

中华人民共和国国家标准

GB/T 21446—2008

用标准孔板流量计测量天然气流量

Measurement of natural gas flow by means of standard orifice meter

2008-02-13 发布

2008-08-01 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 量、术语和定义 1

3.1 量 1

3.2 术语和定义 2

4 测量的一般要求 4

4.1 节流装置 4

4.2 气流条件 4

4.3 标准参比条件 5

5 安装要求 5

5.1 总则 5

5.2 直管段条件 5

5.3 直管段长度及布置要求 6

5.4 流动调整器 9

5.5 孔板夹持器的安装 13

5.6 装配和垫片 13

5.7 参数测量和信号引线 13

6 孔板的结构形式和技术要求 14

6.1 孔板 14

6.2 孔板夹持器 16

7 检验要求 18

7.1 节流装置的几何检验 18

7.2 系数检定和在线校准 19

8 天然气流量测量原理和计算方法 19

8.1 测量原理 19

8.2 测量使用范围 19

8.3 天然气流量计算方法 20

8.4 天然气流量计算和系数参数确定 22

8.5 取值方法和数据修约 23

8.6 孔板流量计计量系统 24

9 天然气流量测量的不确定度估算 24

9.1 不确定度定义 24

9.2 不确定度的实际估算 25

附录 A（规范性附录） 天然气主要物理参数确定和流量计算常用表 28

A.1 主要物理参数确定 28

A.2 天然气流量计算常用表 33

附录 B（资料性附录） 流动调整器性能测试 68

B.1	说明	68
B.2	标准装置的评定测试要求	68
B.3	流动调整器性能测试和评价	68
附录 C	(资料性附录) 参数测量及信号引线	71
C.1	测量仪表选用规定	71
C.2	温度测量安装规定	71
C.3	压力及差压测量规定	71
C.4	取压孔设置规定	71
C.5	导压管规定	72
C.6	差压信号管路的安装	72
附录 D	(资料性附录) 节流装置在使用中出现部分偏离标准规定的处理	75
D.1	说明	75
D.2	孔板开孔直角入口边缘尖锐度受磨蚀的处理	75
D.3	测量管内壁粗糙度受磨蚀的处理	75
D.4	管道内壁粗糙度的流体实验确定	76
附录 E	(资料性附录) 天然气孔板流量计计量系统的在线校准	78
E.1	在线校准	78
E.2	在线校准用标准流量计装置	78
E.3	在线校准系数 M_1	78
E.4	在线校准的不确定度估算	79
附录 F	(资料性附录) 天然气流量计算和设计计算实例	80
F.1	天然气流量计算实例	80
F.2	孔板开孔直径设计计算实例	83
F.3	差压量程设计计算实例	85
F.4	不确定度估算	87
附录 G	(资料性附录) 天然气流量计算和设计计算程序框图	89
G.1	说明	89
G.2	迭代计算格式	89
G.3	计算机计算程序框图	90
附录 H	(资料性附录) 天然气流量计算机系统基本技术要求	94
H.1	流量计算机系统运用的一般原则	94
H.2	流量计算机系统构成	94
H.3	流量计算机系统基本技术要求	94
H.4	流量计算机系统的不确定度	96
图 1	节流装置的组成和安装示意图	5
图 2	$\beta' = 0.6$ 直通径阀门全开安装平面图	8
图 3	安装示例	9
图 4	19 管束流动调整器	10
图 5	单独弯头下游安装 19 管束流动调整器实例	12
图 6	Zanker 整流板	12
图 7	标准孔板	14
图 8	孔板平直度测量	14

图 9	法兰取压孔板夹持器	16
图 10	角接取压孔板夹持器	17
图 B.1	雪夫隆旋流器	69
图 C.1	取压孔位置图	72
图 C.2	差压仪表装在节流装置上方(无腐蚀介质)	73
图 C.3	差压仪表装在节流装置下方(无腐蚀介质)	73
图 C.4	差压仪表装在节流装置上方(含腐蚀介质)	74
图 C.5	差压仪表装在节流装置下方(含腐蚀介质)	74
图 G.1	流量计算程序框图	91
图 G.2	孔板开孔直径计算程序框图	92
图 G.3	差压量程计算程序框图	93
表 1	量和单位的名称及符号	1
表 2	孔板与阻流件之间所允许的直管段长度(无流动调整器,数值以管内径 D 的倍数表示)	8
表 3	孔板与 19 管束流动调整器之间所允许的直管段长度(阻流件与孔板的距离为 L_z ,数值以管内径 D 的倍数表示)	11
表 4	孔径、管内径、直径比和雷诺数限值表	19
表 5	$10^4 Ra/D$ 的最大值	20
表 6	$10^4 Ra/D$ 的最小值	20
表 7	系数参数最少有效数字位数取值表	24
表 A.1	流出系数 C 值表	33
表 A.2.1	用 GB/T 17747.2 计算的超压缩系数 F_z 值表(以附录 F 天然气组分为例)	43
表 A.2.2	用 AGA NX-19 计算的超压缩系数 F_z 值表(以 $G_r=0.600$; $X_c=0\%$; $X_n=0\%$ 为例)	53
表 A.3	天然气常用组分的摩尔质量、摩尔发热量、求和因子和压缩因子表	64
表 A.4	金属材料($20^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$)的线膨胀系数值表	65
表 A.5	不同压力和温度下甲烷动力黏度 μ 值表	65
表 A.6	不同压力和温度下甲烷 c_p 及 c_v 值表	65
表 A.7	钢管内壁等效绝对粗糙度 K 值表	66
表 A.8	常用隔离液种类及其性质表	66
表 C.1	导压管长度和内径表	72
表 D.1	b_K 与 r_K/d 的关系	75
表 D.2	标准孔板 γ_0 值表	76
表 F.1	天然气的组分	80
表 F.2	天然气流量计算顺序和有效数字位数取值表	82
表 G.1	流量迭代计算和能量计算格式	89
表 G.2	孔板开孔直径迭代计算格式	90
表 G.3	差压量程迭代计算格式	90

前 言

本标准参考 ISO 5167《用安装在充满流体的圆形截面管道中的差压装置测量流量》(第 1、2 部分 2003 年英文版),同时参考 ANSI/API 2530/AGA Report No. 3(第 1、3、4 部分为 1990~1992 年第 3 版,第 2 部分为 2000 年 4 月第 4 版)《天然气流体计量 同心直角边孔板流量计》(英文版)。

本标准的适用范围、测量的一般要求、孔板的结构形式与技术要求、安装要求以及流出系数和不确定度估算内容符合 ISO 5167 第 1、2 部分的规定。本标准与 ISO 5167 的主要差异如下:

- 本标准名称改为《用标准孔板流量计测量天然气流量》;
- 本标准节流件只采用标准孔板,取压方式只采用法兰取压和角接取压;
- 涉及到天然气流量计量特点则参考 AGA No. 3 报告有关资料,并结合国内的实践经验和有关国家标准进行编写,增加了天然气流量测量原理和方法;
- 根据天然气流量计量特点,增加了流量和能量的计算实用公式及其计算范例、孔板流量计计量系统的在线校准、检验要求、流量计算机系统基本技术要求、参数测量及信号引线、节流装置在使用中出现部分偏离标准规定的处理等内容;
- 根据 ANSI/API 2530/AGA Report No. 3 第 2 部分的技术要求在本标准的表 2 中增加了其他任何阻流件(所有种类)的直管段长度规定,在 5.2.2.4、5.4.3.6、5.6.4、6.1.2.2、6.1.7.2 的规定中分别采纳了第 2 部分 2.5.1.3、2.6.5、2.5.1.4、2.4.1、2.4.3 部分较严的技术指标。

本标准的附录 A 是规范性附录,本标准的附录 B、附录 C、附录 D、附录 E、附录 F、附录 G 和附录 H 都是资料性附录。

本标准由中国石油天然气集团公司提出。

本标准由石油工业油气计量及分析方法专业标准化技术委员会归口。

本标准负责起草单位:中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司(四川石油勘察设计研究院)。

本标准参加起草单位:中国石油西南油气田分公司、石油工业天然气流量计量站、北京博思达仪器仪表有限公司、成都金陵阀门有限责任公司。

本标准主要起草人:黄和、宋德琦、游明定、张福元、文代龙、张维臣、魏廉敦、段继芹、李万俊、王京安、李正东、罗明强、赖忠泽。

用标准孔板流量计测量天然气流量

1 范围

本标准规定了标准孔板的结构形式、技术要求；节流装置的取压方式、使用方法、安装和操作条件、检验要求；天然气在标准参比条件下体积流量和能量流量、质量流量以及测量不确定度的计算方法。同时还给出了计算流量及其有关不确定度等方面的必需资料。

本标准适用于取压方式为法兰取压和角接取压的节流装置，用标准孔板对气田或油田采出的以甲烷为主要成分的混合气体的流量测量。

本标准不适用于孔板开孔直径小于 12.5 mm，测量管内径小于 50 mm 和大于 1 000 mm，直径比小于 0.1 和大于 0.75，管径雷诺数小于 5 000 的场合。

对改建或新建的计量系统应满足本标准要求。本标准不强调更新已建计量系统。如果计量系统不满足本标准要求，由于流动条件和上游直管段不相适应，就可能存在计量系统附加误差。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过在标准中的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

- GB 3836.1 爆炸性气体环境用电气设备 第 1 部分：通用要求（GB 3836.1—2000，eqv IEC 60079-0:1998）
- GB/T 8170—1987 数值修约规则
- GB/T 11062—1998 天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算方法（neq ISO 6976:1995）
- GB/T 15464—1995 仪器仪表包装通用技术条件
- GB/T 17747（所有部分） 天然气压缩因子的计算[eqv ISO 12213（所有部分）]
- GB/T 18603—2001 天然气计量系统技术要求
- JJG 640—1994 差压式流量计
- JJF 1059—1999 测量不确定度评定与表示

3 量、术语和定义

3.1 量

本标准所用量和单位的名称及符号见表 1。

表 1 量和单位的名称及符号

量的符号	量的名称	量 纲	单位符号
C	流出系数	1	
d	操作条件孔板开孔直径	L	m
D	操作条件上游测量管内径	L	m
E	渐近速度系数	1	
F _G	相对密度系数	1	
F _T	流动温度系数	1	

表 1 (续)

量的符号	量的名称	量纲	单位符号
F_z	超压缩系数	1	
R_a	粗糙度算术平均偏差	L	m
P	静压	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
q_m	质量流量	MT^{-1}	kg/s
q_V	体积流量	L^3T^{-1}	m^3/s
q_E	能量流量	ML^2T^{-3}	J/s
\hat{H}_s	标准参比条件质量发热量	L^2T^{-2}	J/kg
\tilde{H}_s	标准参比条件体积发热量	$ML^{-1}T^{-2}$	J/m ³
$Re_{D(或d)}$	管径(或孔径)雷诺数	1	
T	气流热力学温度	Θ	K
t	气流摄氏温度	Θ	℃
Z	压缩因子	1	
Δp	差压	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
Δp_c	流动调整器的压力损失	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
β	直径比, $\beta=d/D$	1	
ϵ	可膨胀性系数	1	
μ	气体动力黏度	$ML^{-1}T^{-1}$	Pa·s
κ	等熵指数	1	
ρ	气体密度	ML^{-3}	kg/m ³
注 1: 在“量纲”栏中,长度、质量、时间和热力学温度的量纲,分别用 L、M、T 和 Θ 表示。			
注 2: 下标 f 代表在操作条件下的参数,下标 n 代表在标准参比条件下的参数,下标 1 代表有关上游取压孔平面上的参数,下标 2 代表有关下游取压孔平面上的参数。			

3.2 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.2.1

标准孔板 standard orifice plate

标准孔板(简称孔板)是由机械加工获得的一块圆形穿孔的薄板。它的节流孔圆筒形柱面与孔板上游端面垂直,其边缘是尖锐的,孔板厚与孔板直径相比是比较小的。它应在本标准规定范围所提供的数据和要求进行设计、制造、安装和使用。

3.2.2

孔板夹持器 orifice plate holder

孔板夹持器是用来输出孔板产生的静压力差并安置和定位孔板的带压管路组件。

3.2.3

测量管 meter tube

测量管是指孔板上下游所规定直管段长度的一部分,各横截面面积相等、形状相同、轴线重合且临近孔板,按技术指标进行特殊加工的一段直管。

3.2.4

节流装置 **throttling device**

使管道中流动的流体产生静压力差的一套装置。整套节流装置由标准孔板、取压装置和上下游直管段所组成。

3.2.5

标准孔板流量计 **standard orifice plate meter**

标准孔板流量计由节流装置、信号引线和二次仪表系统所组成。

3.2.6

直径比 **diameter ratio**

β

孔板开孔直径与上游测量管内径之比。

3.2.7

取压孔 **pressure tap**

取压孔是指在孔板夹持器上沿径向加工出的一个圆孔，其内边缘是光滑的并且无毛刺。

3.2.8

差压 **differential pressure**

Δp

“差压”这个术语仅适用于本标准中所规定的在上下游取压孔位置上所取得的静压力之差。

3.2.9

静压 **static pressure**

P

静压是指在上、下游其中一个取压孔上所测量的流动气体的绝对压力。绝对压力可以通过直接测量，也可以由测量的表压加上当地的大气压得到。

3.2.10

流出系数 **discharge coefficient**

C

流出系数为通过节流装置的实际流量值与理论流量值之比并将它应用到理论流量方程中以获得实际的流量。对不可压缩流体由式(1)确定：

$$C = \frac{4q_m \sqrt{1 - \beta^4}}{\pi d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1}}$$

.....(1)

在一定的安装条件下，对于给定的节流装置，该值仅与雷诺数有关。只要节流装置几何相似，并且在相同雷诺数的条件下，则 C 的数值是相同的。

本标准以实验所确定的数值为依据，给出了求流出系数 C 的方程式。

3.2.11

渐近速度系数 **approch velocity coefficient**

E

渐近速度系数 E 是一个数学表达式，它描述了在节流装置渐近段（上游测量管）的流速到孔板开孔处的流速之间的关系，并由式(2)确定。

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

.....(2)

在流量方程推导中定义：

$$\alpha = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} = CE$$

α 称为流量系数,它是直径比 β 和管径雷诺数 Re_D 的函数。流出系数与流量系数的关系见式(3):

$$C = \frac{\alpha}{E}$$

.....(3)

3.2.12

可膨胀性系数 expensibility factor

ϵ

可膨胀性系数是一个经验表达式,用以修正天然气通过孔板时因密度的变化而引起的流量变化。
对给定的节流装置利用可压缩流体(气体)进行标定时由式(4)求得 ϵC 值,该值取决于雷诺数、差压和气体等熵指数。式中流出系数 C 为相同雷诺数在液体中直接标定而确定的数值。

$$\epsilon C = \frac{4q_m \sqrt{1-\beta^4}}{\pi d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1}}$$

.....(4)

因此,可膨胀性系数是由式(5)所确定的一个系数:

$$\epsilon = \frac{4q_m \sqrt{1-\beta^4}}{C \pi d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1}}$$

.....(5)

当流体是不可压缩流体时, ϵ 等于 1;当流体是可压缩流体时, ϵ 小于 1。
实验表明, ϵ 与雷诺数无关,对于给定的节流装置在已知直径比时, ϵ 只取决于差压、静压和等熵指数。本标准给出了计算孔板 ϵ 值的经验方程式。

3.2.13

管径(或孔径)雷诺数 pipe or orifice Reynolds number

Re_D (或 Re_d)

表征流体惯性力与黏性力之比的无量纲参数。本标准所用的雷诺数是以气体上游条件参数和上游管道内径 D (或孔板孔径 d) 所表示的雷诺数,如式(6)所示:

$$Re_D = \frac{4q_m}{\pi \mu_1 D}, \quad Re_d = \frac{Re_D}{\beta}$$

.....(6)

3.2.14

等熵指数 isentropic exponent

κ

在可逆绝热(等熵)转换条件下,压力的相对变化与密度的相对变化之比。它随气体的组成以及随其温度和压力的变化而变化。
为了计算天然气流量,在本标准中可以将比热容比代替等熵指数。

4 测量的一般要求

4.1 节流装置

- 4.1.1 节流装置应按照本标准的规定制造、安装和使用。
- 4.1.2 应对节流装置进行定期检查,使其与本标准保持一致。应注意即使是净化后的天然气,由于含有微量粉尘和液体微粒,也可能在孔板表面上形成沉淀和积垢,经过一段时间会产生流出系数的波动或改变,因而可能导致其值超出本标准所给出的不确定度范围。
- 4.1.3 节流装置应采用已知膨胀系数的材料制造,除非使用者确认由于温度变化而引起的尺寸变化可以忽略不计的情况例外。

4.2 气流条件

- 4.2.1 气流通过节流装置的流动应是保持亚音速的,稳定的或仅随时间缓慢变化的。本标准不适用于脉动流的流量测量。
- 4.2.2 气流应是均匀单相的牛顿流体。若气体含有质量分数不超过 2% 的固体或液体微粒,且成均匀

分散状态,也可以认为是均匀单相的牛顿流体。

4.2.3 气流流经孔板以前,其流束应与管道轴线平行,气流流动应为充分发展紊流且无旋涡,管道横截面所有点上的旋涡角小于 2° ,即认为无旋涡。

4.2.4 为进行流量测量,应保持孔板下游侧静压力与上游侧静压力之比等于或大于0.75。

4.2.5 可接受的速度剖面条件为:横截面上同一径向位置上的轴向局部流速与轴向最大流速的比值与很长直管段(超过 $100D$)后管道横截面上之流速比值在5%之内一致。

4.3 标准参比条件

本标准规定天然气体积流量计量的标准参比条件和发热量测量的燃烧标准参比条件均为绝对压力 P_n 等于101.325 kPa和热力学温度 T_n 等于293.15 K。也可采用合同压力和合同温度作为参比条件。

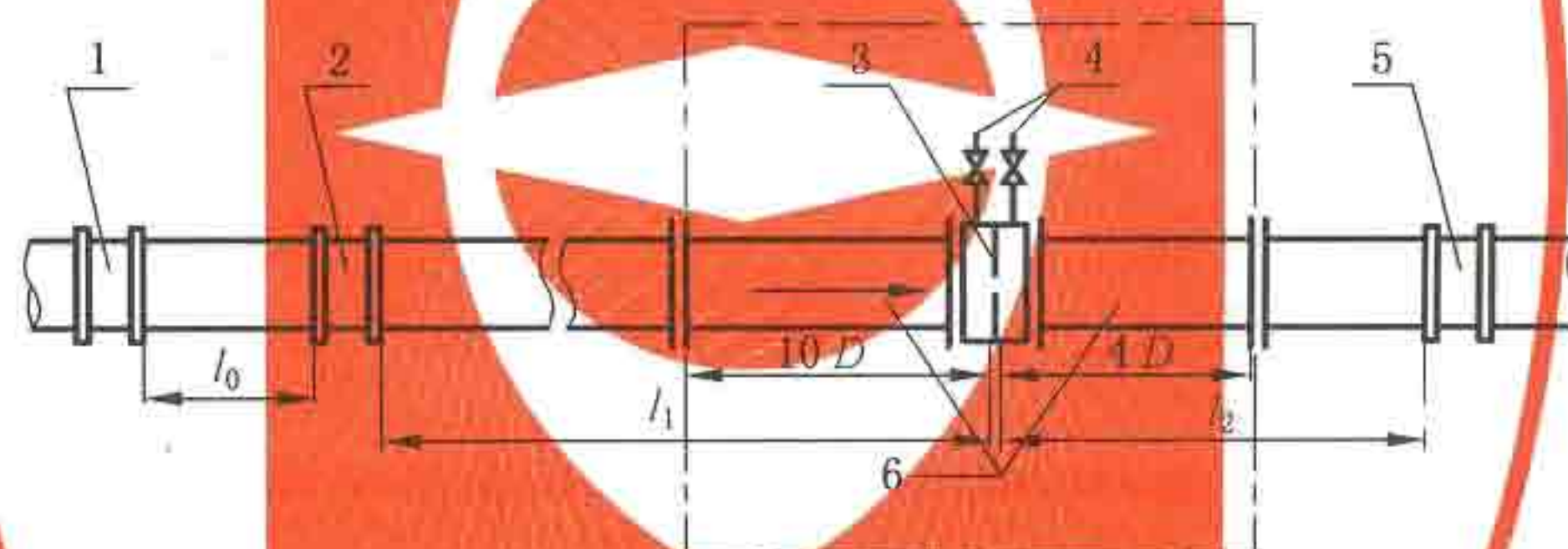
5 安装要求

5.1 总则

5.1.1 本标准规定的节流装置见图1。

5.1.2 节流装置应安装在两段具有等直径的圆形横截面的直管段之间,在此中间,除了取压孔、测温孔外,无本标准规定之外的障碍和连接支管。直管段毗邻孔板的上游 $10D$ (D 为上游测量管内径,下同)或流动调整器后和下游 $4D$ 的直管部分需机加工,并符合本标准规定。

5.1.3 符合上述所要求的最短直管段长度随阻流件的形式和直径比而异,并随是否安装流动调整器而不同,见5.3。



- 1——上游侧第二阻流件;
- 2——上游侧第一阻流件;
- 3——孔板和孔板夹持器;
- 4——差压信号管路;
- 5——下游侧第一阻流件;
- 6——孔板前后测量管;
- l_0 ——第一阻流件与第二阻流件之间的直管段;
- l_1 ——孔板上游的直管段;
- l_2 ——孔板下游的直管段。

图1 节流装置的组成和安装示意图

5.2 直管段条件

5.2.1 直管段直度

节流装置用的直管段应该是直的。当与管道直线的偏移不超过其长度的0.4%时,则认为管道是直的,通常情况下只需目测检验。上下游直管段上管段对接引起管道直线的偏差也应不超过其长度的0.4%。

5.2.2 直管段圆度和直径

5.2.2.1 直管段圆度在孔板上下游侧距取压孔沿测量管轴向长度上各为 $0.5D$ 的范围内,应实测。实

测结果,其测量管内圆柱表面圆度公差应满足 5.2.2.2、5.2.2.3 和 5.2.2.4 要求。

5.2.2.2 在离取压孔(装有夹紧环时,应在夹紧环前缘)0 D、0.5 D 及 0 D 至 0.5 D 之间的上游直管段上取三个与管道轴线垂直的横截面,如果有焊缝第三横截面应位于焊缝上。在每个截面上,以大致相等的角距取 4 个内径的单测值,共得 12 个单测值,求算术平均值为其实际直径值。任一单测值与平均值比较,其偏差的绝对值不得超过 0.3%。

5.2.2.3 在离孔板上游端面的上游直管段上,在 2 D 至 10 D 长度范围内,管道内径与按 5.2.2.2 测得的内径平均值之差的绝对值不得超过内径平均值的 0.3%。

5.2.2.4 在离孔板上游端面 2 D 长度的下游直管段上,管道内径与上游直管段的内径平均值之差的绝对值应不超过内径平均值的 0.5%,可通过检测下游直管段一个直径的方法判断。

5.2.2.5 在所要求的最短直管段长度范围内,管道横截面应该是圆的。邻近孔板 2 D 范围内按 5.2.2.2 作特殊检验,2 D 至 10 D 在现场用量具作常规检验,10 D 外作一般检验,一般检验只要目测检验表明管子外部是圆的,就可认为横截面是圆的。

5.2.2.6 安装在孔板与其上游第一个阻流件之间的上游直管段,可由一种或多种截面的管段组成,用配对法兰口径配对连接。只要任一横截面的直径与 D 之差 ΔD 的绝对值或台阶 h 满足在 10 D 之内不超过 0.3%,在 10 D 之外不超过 2%的圆度要求,则流出系数无附加不确定度。

5.2.2.7 如果任一横截面的直径与 D 之差 ΔD 的绝对值或台阶 h 超过 5.2.2.6 规定的极限值,但符合式(7)并小于 0.05 要求时,则流出系数的不确定度应算术相加 0.2%附加不确定度。

$$\frac{\Delta D(\text{或 } h)}{D} < 0.002 \left[\frac{(S/D) + 0.4}{0.1 + 2.3\beta^4} \right] \dots\dots\dots (7)$$

式中:
S——上游取压孔或夹紧环到直管段横截面变化处或台阶的距离;
β——实测孔板开孔直径与上游测量管内径之比,即 β=d/D。

5.2.2.8 如果任一横截面的直径与 D 之差的绝对值或台阶不符合式(7)和等于大于 0.05 的极限值,则认为不符合本标准。

5.2.3 直管段内壁粗糙度

直管段内部应保持清洁,除掉污垢,管道内壁上的腐蚀硬皮也应除掉。

直管段内表面粗糙度算术平均偏差 Ra 应在与用于确定和检验测量管内径相同的轴向位置上进行至少 4 次的测量确定。在测 Ra 时,应采用测量上限值不小于 0.75 mm 的电子平均表面粗糙度测试仪或其他类型的表面粗糙度测试仪。粗糙度随每次测量和检验节流装置之后所经过的时间而变化,在制定测量和清洗测量管周期以及检验 Ra 值时应考虑这种变化。

当 K 为莫氏(Moody)图上给出的等效绝对粗糙度时,可通过假定 Ra 等于 K/π 来获得 Ra 的大约值。不同材料的 K 值也可从参考文献所列各种表中获得,附录 A 表 A.7 给出了常用钢管内壁的 K 值。K 值还可用流体实验确定。

在孔板上游侧至少 10 D 和下游侧至少 4 D 的长度范围内的直管段部分(测量管)的内表面,其粗糙度限值应符合 8.2.2 的规定。

5.3 直管段长度及布置要求

5.3.1 表 2 列出了各种阻流件要求的最短直管段长度,但在孔板上游安装流动调整器时可以缩短(见 5.4)。对于其他任何阻流件(特别是汇管),推荐在阻流件的下游设置流动调整器,以缩短直管段长度。

5.3.2 当所用直管段等于或比表 2 的规定值长时,则符合本标准。

5.3.3 当上游或下游直管段短于表 2 的规定值时,需采用加装流动调整器或在线校准措施。

5.3.4 在进行流量测量时,表 2 所示阀门应为全开。孔板上游的截断阀应设为全开直通径球阀或闸

阀,该阀门应配备限位器以便指示开启位置,其公称直径与上游管道相同,与相连管道内径可以不同。

5.3.5 在节流装置中,测量管内径与相邻管道系统内径相匹配的上游阀门,设计成全开状态,直径差和台阶不大于 5.2.2.6 及 5.2.2.7 所允许的规定值,可被认为是直管段长度的一部分,但在测量流量时,阀门应完全打开,其他阀门不应直接安装在孔板的上游(如调节阀),需要时用孔板下游阀实现流量控制和调节。

5.3.6 表 2 所列值是在该阻流件上游有一段相当长的直管段进行实验确定的,因此阻流件上游的速度分布被认为是充分发展的,并且无漩涡。实际上,这些条件很难达到,以下布置可作为标准安装方法的指南。

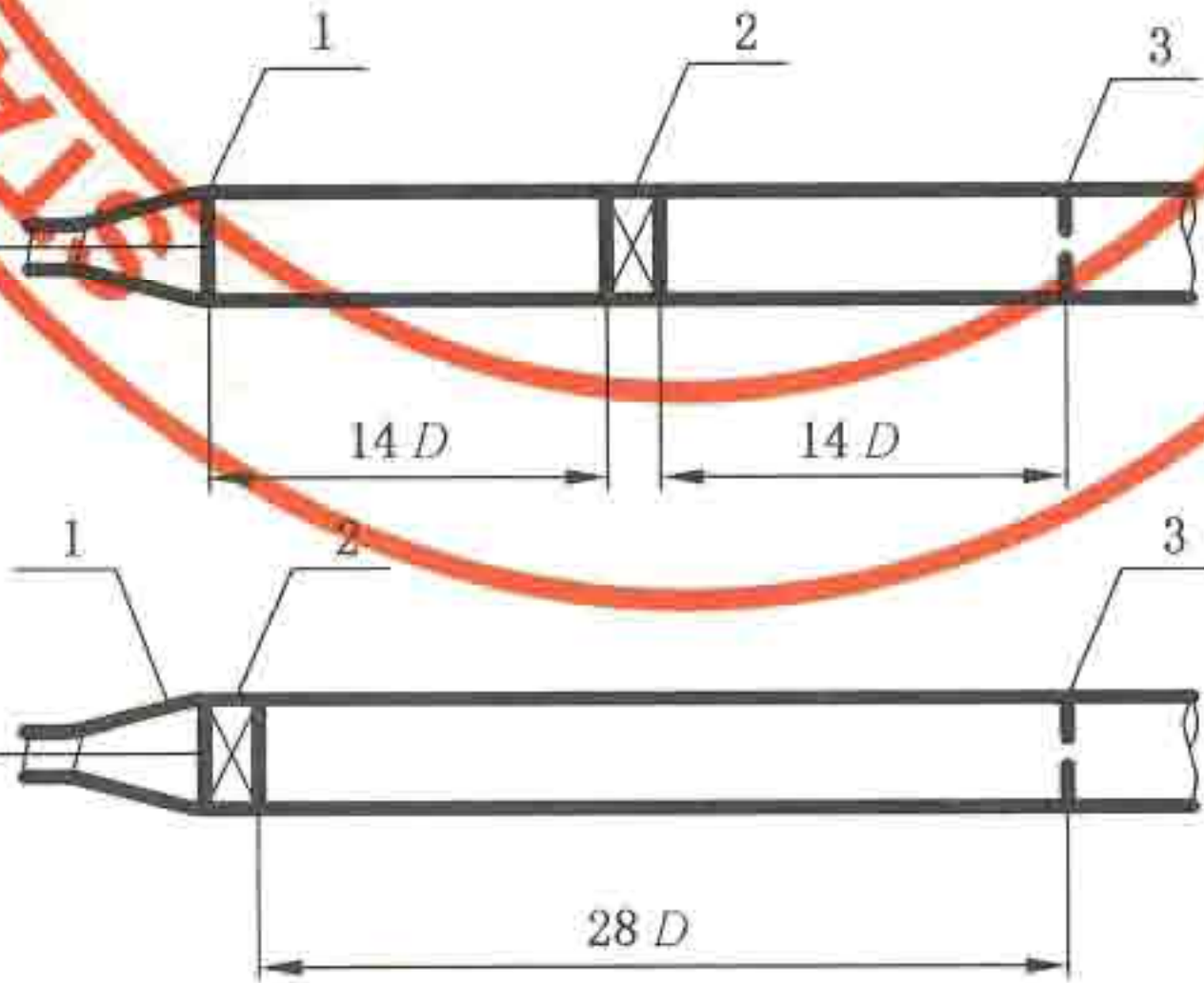
- a) 如果表 2 所列的几种类型阻流件包括由弯头组合被看作一个单独的阻流件,串联排列在孔板上游时,应采用下列布置:
 - 1) 孔板上游阻流件 1 与孔板之间应有一段直管段 l_1 ,至少要等于表 2 中给出的最短长度,以便确定适合连接阻流件 1 的直径比。
 - 2) 阻流件 1 与离孔板稍远的另一阻流件(阻流件 2)之间应设置直管段 l_0 。 l_0 可按阻流件 2 管径及类型和直径比 β 为 0.67(不论实际 β 为多少),取表 2 中所列数值的一半。
 - 3) 如果上游直管段有一直通径阀门位于阻流件(如渐扩管)之后,则阀门可以安装在阻流件的出口上。阀门与孔板之间的长度为第二阻流件要求的长度 l_0 和第一阻流件要求的长度 l_1 之和,参见图 2。应注意:应满足 5.3.6 b) 的要求。
- b) 除满足 a) 中规定外,任何阻流件或将两个连续的弯头作为单独阻流件安装在孔板上游,应距孔板有一定距离,此距离至少应满足孔板处管径和该阻流件与表 2 中相同直径比的孔板和阻流件所要求的距离一样,不管该阻流件与孔板之间的阻流件类型,均应满足孔板与任何阻流件或弯头组合体所要求的距离。孔板与阻流件之间的距离是沿着管道中心轴测得的。
- c) 推荐将流动调整器安装在孔板上游与汇气管的下游之间,因为当汇气管的横截面积大约等于 1.5 倍操作流量计量管道的横截面积时,一直存在速度剖面变形和出现涡流的高度可能性。当距孔板第二远(或更远)的阻流件是弯头组合体时,则按表 2 布置,弯头之间的距离按弯头自身直径倍数来计算,且应满足与孔板之间的距离要求。

5.3.7 以 5.3.6 a) 和 b) 应用的三种情况作为例子,在每种情况下,第二阻流件是两个在垂直平面上的弯头(两弯头之间的距离是弯头直径的 10 倍,孔板的直径比为 0.4)。

- a) 如果第一阻流件是一全开直通径球阀[见图 3 a)],则该阀门与孔板之间的距离至少应为 $12 D$ (见表 2),垂直平面上两弯头与阀门之间的距离至少应为 $22 D$ [见 5.3.6 a)];垂直平面上两个弯头与孔板之间的距离至少应为 $44 D$ [见 5.3.6 b)]。如果阀门的长度为 $1 D$,则需要增加 $9 D$ 的长度,增加的长度可以在阀门的上游或下游,或阀门的部分上游和部分下游。还可按 5.3.6 a) 3) 的要求将阀门移至垂直平面上两弯头的附近,但应满足垂直平面上两弯头到孔板的距离至少有 $44 D$ [见图 3 b)]。
- b) 如果第一阻流件是长度为 $2 D$,管内径从 $2 D$ 渐进变化为 D 的渐缩管[见图 3 c)],则渐缩管与孔板之间的距离至少为 $5 D$ (见表 2),垂直平面两弯头与渐缩管之间的距离至少为 $22 \times 2 D$ [见 5.3.6 a)];垂直平面上两弯头与孔板之间的距离至少为 $44 D$ [见 5.3.6 b)],因此不要求增加长度。
- c) 如果第一阻流件是长度为 $2 D$,管内径从 $0.5 D$ 渐进变化为 D 的渐扩管[见图 3 d)],则渐扩管与孔板之间的距离至少为 $12 D$ (见表 2),垂直平面两弯头和渐扩管之间的距离应至少为 $22 \times 0.5 D$ [见 5.3.6 a)];垂直平面上两弯头与孔板之间的距离至少为 $44 D$ [见 5.3.6 b)]。所以要求增加 $19 D$ 的长度,增加的长度可以在渐扩管的上游或下游,或者渐扩管的部分上游和部分下游。

表 2 孔板与阻流件之间所允许的直管段长度(无流动调整器,数值以管内径 D 的倍数表示)

直径比 β	上游直管段													下游直管段
	在任一平面上单个 90°弯头 两个 90°弯头 ($l > 30 D$) ^a	在同一平面上的两个 90°弯头 S 形状 ($30 D \geq l > 10 D$) ^a	在同一平面上的两个 90°弯头 S 形状 ($10 D \geq l > 5 D$) ^a	在垂直平面上的两个 90°弯头 ($30 D \geq l > 5 D$) ^a	在垂直平面上的两个 90°弯头 ($5 D > l$) ^a	单个 90°三通有或无延伸部分 90°管	在同一平面上的单个 45°弯头两个 45°弯头 S 形状 ($l \geq 2 D$) ^a	同轴的渐缩管在 1.5 D 到 3 D 的长度由 2 D 变为 D	同轴的渐扩管在 D 到 2 D 的长度由 0.5 D 变为 D	全孔球阀或闸阀全开	对称骤缩异径管	温度计套管 ^b 或插孔直径 $\leq 0.03 D$ ^c	其他任何阻流件(所有种类) ^d	
0.20	6	10	10	19	34	3	7	5	6	12	30	5	70	4
0.40	16	10	10	44	50	9	30	5	12	12	30	5	145	6
0.50	22	18	22	44	75	19	30	8	20	12	30	5	145	6
0.60	42	30	42	44	65 ^e	29	30	9	26	14	30	5	145	7
0.67	44	44	44	44	60	36	44	12	28	18	30	5	145	7
0.75	44	44	44	44	75	44	44	13	36	24	30	5	145	8
<p>注 1: 表列数值为位于孔板上游和下游的各种阻流件与孔板上下游端面之间所需的最短直管段长度。应在最近(或仅有)弯头的弯曲部分或三通的下游端或者渐缩管或渐扩管锥形部分的下游端测量直管段。</p> <p>注 2: 弯头曲率半径 $R = 1.5 D$。</p> <p>注 3: 对于 $\beta < 0.20$ 的值按 $\beta = 0.20$ 的值。</p> <p>注 4: 对于其他任何阻流件,特别是汇管和复杂管路,推荐安装流动调整器。</p>														
<p>a l 为两弯头之间的距离,是从上游弯头的弯曲面下游端到下游弯头弯曲面的上游端测得的。</p> <p>b 温度计套管或插孔直径的安装不会改变其他阻流件所需最短上游直管段。</p> <p>c 如果安装直径为 0.03 D 到 0.13 D 的温度计套管或插孔直径,数值增加到 20,但是不推荐这种安装。</p> <p>d 这些安装因为存在涡流和速度剖面变形,对流出系数变化有很大影响。对于高雷诺数和光滑的管子,本标准推荐的直管段长度以对付最不利的情况。</p> <p>e 如 l 小于 2 D 且 Re_{Dn} 大于 2×10^8 时为 95 D。</p>														



1——阻流件(渐扩管);
2——阻流件(球阀);
3——孔板。

图 2 $\beta = 0.6$ 直通径阀门全开安装平面图

5.3.8 温度计安装

- a) 气流温度最好在孔板下游侧直管段外测得,它与孔板之间的距离可等于或大于 $5D$,但不得超过 $15D$ 。
- b) 如应在孔板上游侧安装温度计时,则温度计与孔板之间的距离由温度计套管或插孔直径按表 2 相应栏决定。
- c) 当环境温度与流体温度相差过大,需对节流装置进行热绝缘。

5.3.9 对试验研究工作,孔板上游侧的最短直管段长度至少比表 2 中所列数值增加一倍。

5.4 流动调整器

5.4.1 流动调整器的作用可减少上游直管段的长度,可通过满足附录 B 给出的合格性试验或专用测试要求,用在任何上游阻流件的下游。在任一条件下,测试流动调整器均应采用孔板进行。

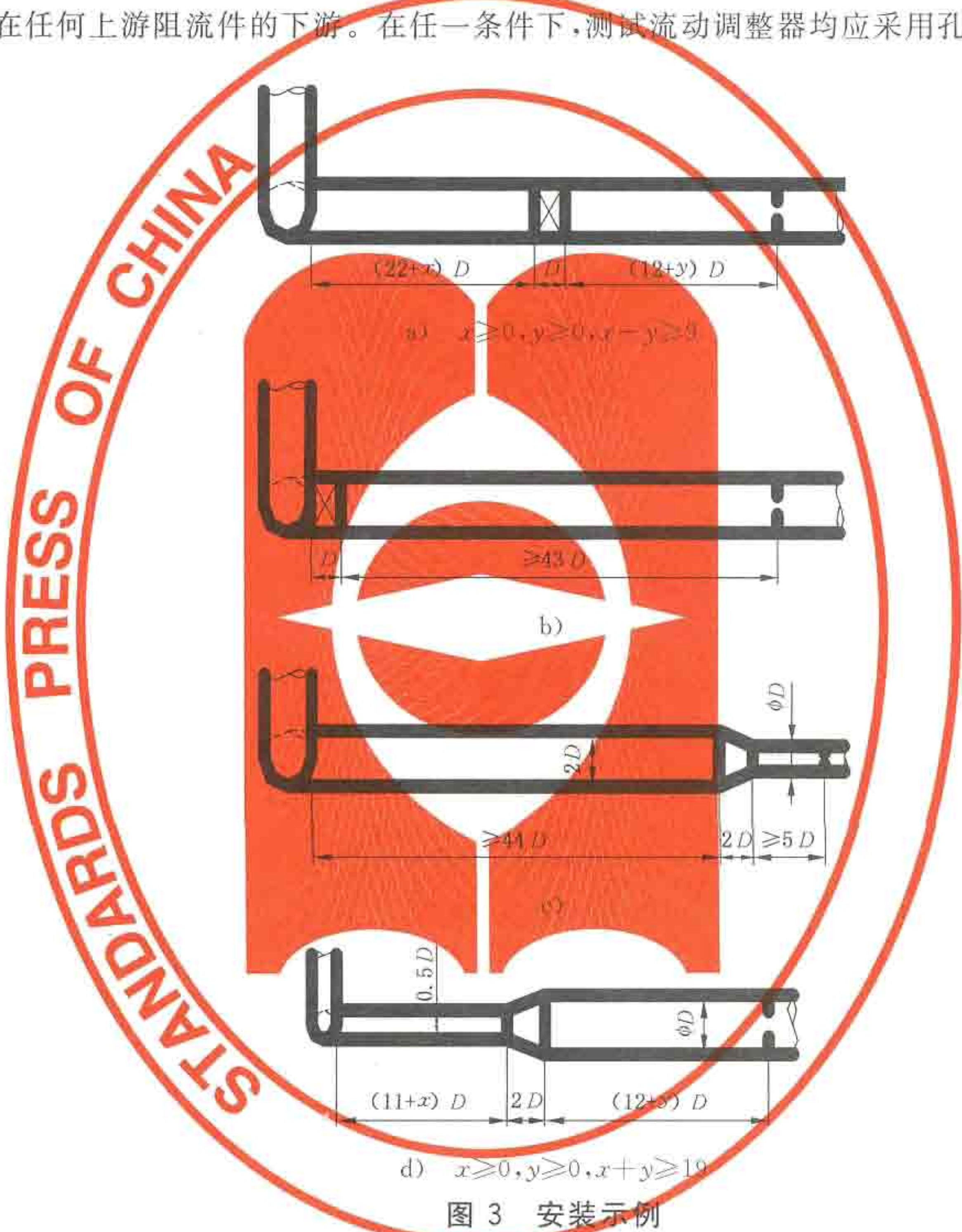


图 3 安装示例

5.4.2 5.4.3 提供了 19 管束流动调整器(1998)的设计、制造、组装和安装规定,5.4.4 提供了 Zanker 整流板的设计和安装规定。附录 B 提供了对用在孔板上游的流动调整器进行性能测试的资料。本标准不限制对其他型式流动调整器的设计、试制和使用,可参见 B.2、B.3 进行性能测试,并已被证明能提供流出系数的微小变化和安装方式。

5.4.3 19 管束流动调整器(1998)

5.4.3.1 设计

19 管束流动调整器应布置成一圆筒形式,如图 4 所示的 19 根管子组成。确定 19 管束流动调整器安装方式的试验研究工作,是通过采用图 4 方式的 19 管束流动调整器进行的。

为了减少可能产生于管束流动调整器外管与管壁之间的涡流,流动调整器的最大外径 D_z ,应满足:

$$0.95 D \leq D_z \leq D$$

管束长度 L 应在 $2 D$ 与 $3 D$ 之间,尽可能接近 $2 D$ 。

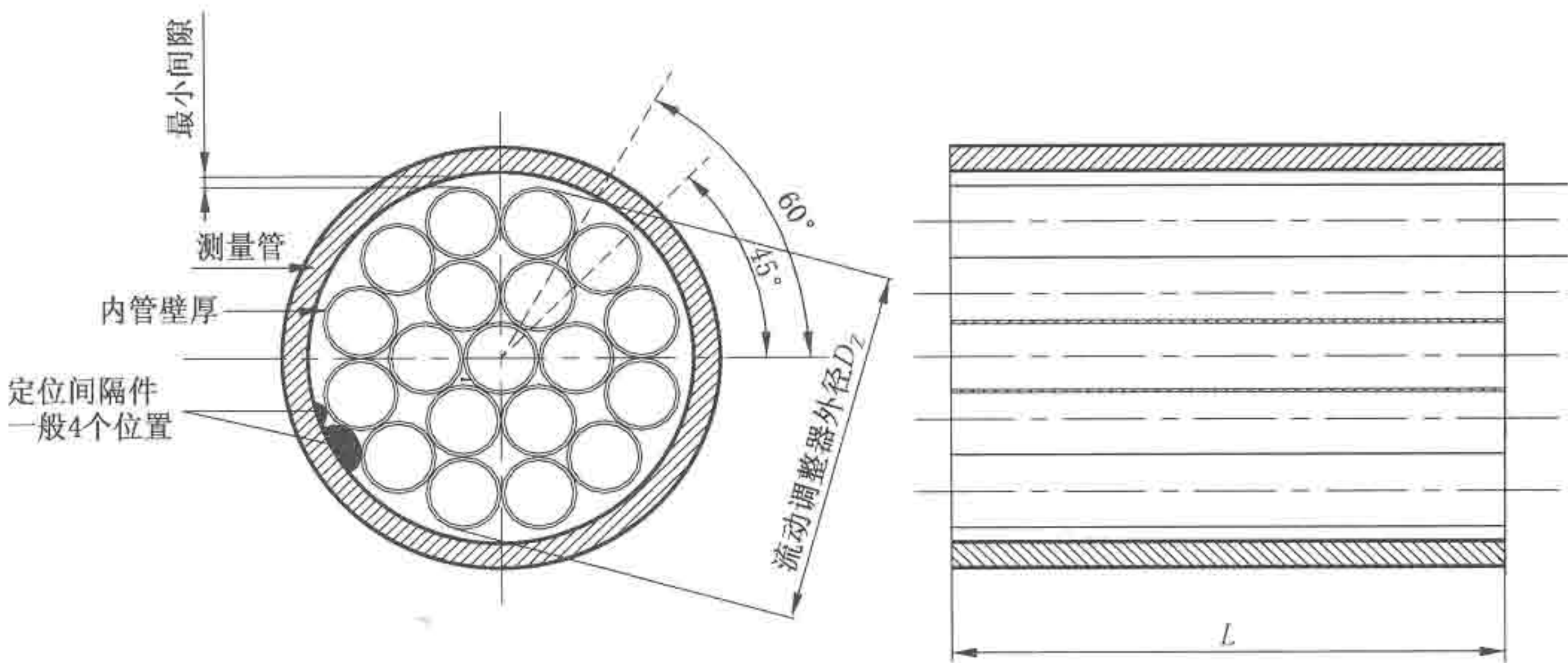


图 4 19 管束流动调整器

5.4.3.2 制造要求

对于管束中的所有管子,粗糙度、外径和壁厚应相同一致。每单根管子应很细,所有管子两端都应内倒角,壁厚应不大于 $0.025 D$ 。

5.4.3.3 组装要求

19 管束流动调整器应组装牢固。每单根管子应在接触点处焊牢,至少在管束两端应是如此。整流管要相互平行,并与管道轴线平行。如果不符合要求,则流动调整器自身可能会将涡流引入流体中。在管束组外面提供中心定位的隔离物,以便管内安装中心定位。隔离物可采取与管道轴线平行的小突缘或标尺的形式。装入管道中后,管束应牢固地安装固定,但牢固地固定不应扭曲与管子内对称性有关的管束组。

5.4.3.4 压力损失

19 管束流动调整器的压力损失系数 K 大约等于 0.75 , K 由式(8)获得:

$$K = \frac{\Delta p_c}{\frac{1}{2} \rho v^2} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

- Δp_c ——19 管束流动调整器的压力损失,单位为帕(Pa);
- v ——管中流体轴向速率的平均值,单位为米每秒(m/s);
- ρ ——管中流体密度,单位为千克每立方米(kg/m³)。

5.4.3.5 在任何阻流件下游的安装

- a) 图 4 所示的 19 管束流动调整器可用在任何阻流件下游和孔板的上游,孔板直径比可为 0.67 或小些,但应满足 5.4.3 设计制造组装要求。
- b) 安装 19 管束流动调整器,孔板与任何上游阻流件之间的距离至少是 $30 D$ 。19 管束流动调整器的下游端与孔板之间的距离等于 $13 D \pm 0.25 D$,见图 5 a)。

5.4.3.6 在常用阻流件下游的安装

- a) 19 管束流动调整器也可以用来减少表 3 所列的常用阻流件所需上游直管段长度。
19 管束流动调整器可允许的位置取决于从孔板至最近阻流件的距离 L_z , L_z 从孔板上游端面量至最近(或者仅一个)弯头或 T 形管弯曲部分下游端或渐缩管或渐扩管的锥形部分的下游端。

表 3 提供了安装 19 管束流动调整器的两个推荐位置范围为： L_z 大于或等于 $18 D$ 至小于 $30 D$ 和 L_z 大于或等于 $30 D$ 。根据阻流件下游端与孔板之间的直管段长度选择 19 管束流动调整器的安装方式，表 3 给出了其安装位置。

表 3 孔板与 19 管束流动调整器之间所允许的直管段长度
(阻流件与孔板的距离为 L_z ，数值以管内径 D 的倍数表示)

β 值	单个 90°弯头 ^b $R/D=1.5$		在不同平面上的两个 90°弯头 ^b ($l \leq 2 D$) ^a , $R/D=1.5$		单个 90°三通		其他任何形式的管 件及管路分布	
	$30 > L_z \geq 18$	$L_z \geq 30$	$30 > L_z \geq 18$	$L_z \geq 30$	$30 > L_z \geq 18$	$L_z \geq 30$	$30 > L_z \geq 18$	$L_z \geq 30$
≤ 0.20	5~14.5	5~25	5~14.5	5~25	5~14.5	1~25	5~11	5~13
0.40	5~14.5	5~25	5~14.5	5~25	5~14.5	1~25	5~11	5~13
0.50	11.5~14.5	11.5~25	9.5~14.5	9~25	11~13	9~23	c,d	11.5~14.5
0.60	12~13	12~25	13.5~14.5	9~25	c,e	11~16	c	12~16
0.67	13	13~16.5	13~14.5	10~16	c	11~13	c	13
0.75	14	14~16.5	c	12~12.5	c	12~14	c	c
推荐管束位置	13 $\beta \leq 0.67$	14~16.5 $\beta \leq 0.75$	13.5~14.5 $\beta \leq 0.67$	12~12.5 $\beta \leq 0.75$	13 $\beta \leq 0.54$	12~13 $\beta \leq 0.75$	9.5 $\beta \leq 0.46$	13 $\beta \leq 0.67$
<p>注 1：表中给出的直管段长度是 19 管束流动调整器下游端与孔板上游端面之间的允许长度。L_z 是给定阻流件下游端与孔板上游端面之间的允许长度。距离 L_z 的测量是从孔板上游端面至最近(或唯一)的 T 形管曲面下游端或渐缩管或渐扩管锥面下游端。表中推荐的管束位置距离值只是适用于给定的 β 值范围。</p> <p>注 2：对于 β 小于 0.20 的值按 β 等于 0.20 的值。</p>								
<p>^a l 是两个弯头之间的距离，是从上游弯头的弯曲面下游端到下游弯头弯曲面的上游端测得的。</p> <p>^b 弯头的曲率半径等于 $1.5 D$。</p> <p>^c 不可能找到一个对特定阻力件下游的 19 管束流动调整器的合格位置，此栏适用所有的 L_z 值。</p> <p>^d β 等于 0.46 为 9.5。</p> <p>^e β 等于 0.54 为 13。</p>								

表 3 未给出孔板下游所需直管段长度，下游所需直管段长度同表 2 所列值。5.4.3.6 d) 给出了表 3 的使用实例。

- b) 当孔板与 19 管束流动调整器之间的直管段长度与表 3 规定的值一致，且下游直管段长度与表 2 规定一致，流出系数无附加不确定度。
- c) 表 3 给出的阻流件是在一段安装在阻流件上游有很长的直管段上进行实验确定下来的。因此，阻流件上游速度分布被认为是充分发展的，并且无漩涡。实际上，这些条件很难达到，如果采用表 3 中 L_z 大于或等于 $18 D$ 至小于 $30 D$ 栏安装方式，第一阻流件与距它最近的阻流件之间应有 $15 D$ 的直管段。
- d) 如果有必要将一单独弯头安装在直径比为 0.6 的孔板上游，则采用 19 管束流动调整器主要有两种选择。使用流动调整器所需的长度与不使用流动调整器所需的 $42 D$ (见表 2) 相比可减少上游直管段。

可按 5.4.3.5 安装 [见图 5 a)]。其优点是：任何阻流件都可放置在单独弯头的上游任何距离处；也可按表 3 [见图 5 b)] 的安装，并给出一个弯头下游所需较短些的直管段长度，但弯头上游段应安

装一段直管段。

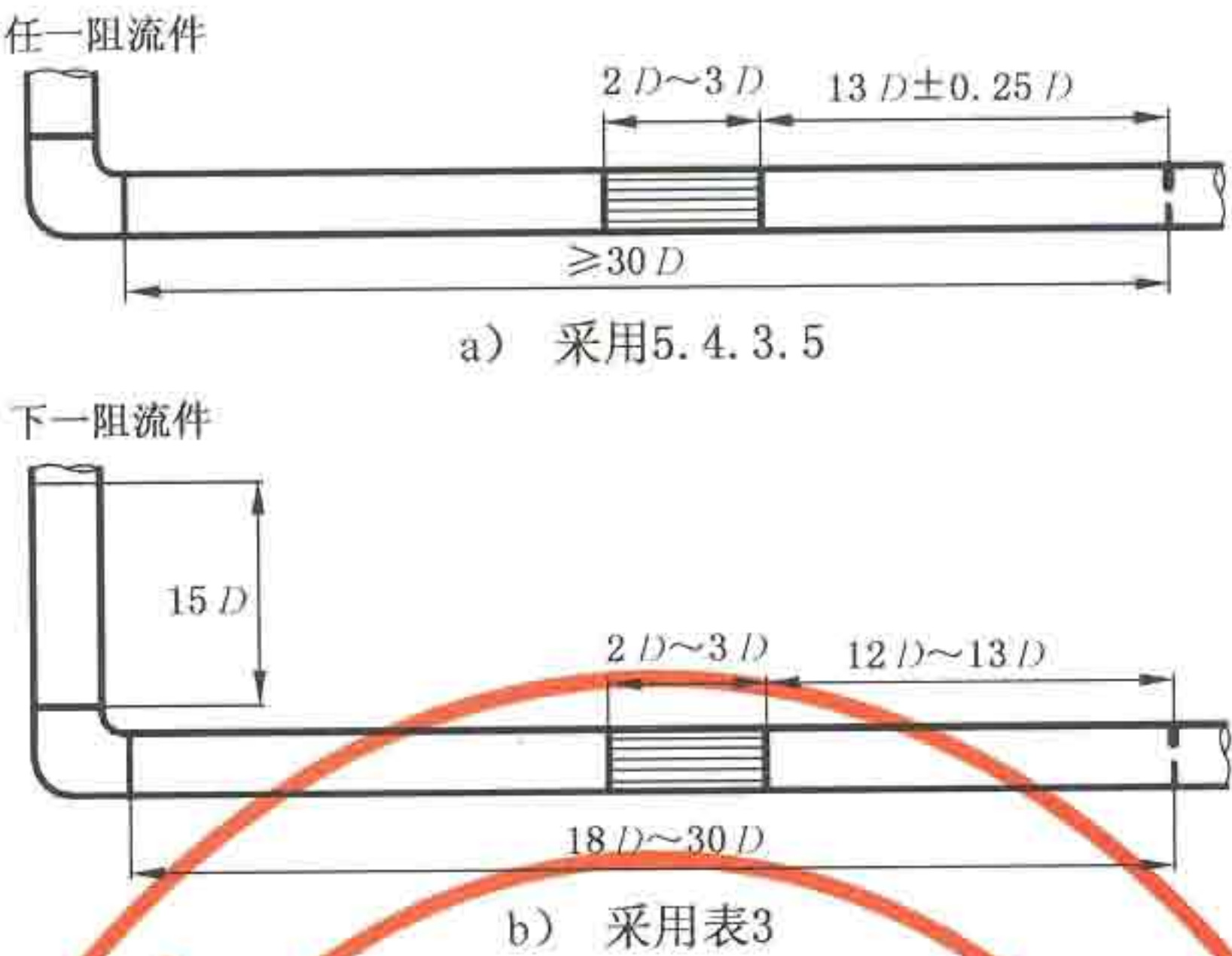


图 5 单独弯头下游安装 19 管束流动调整器实例

5.4.4 Zanker 整流板

5.4.4.1 说明

Zanker 整流板的设计制造应符合 5.4.4.2 要求(见图 6),并且应通过附录 B 中所列的合格性试验要求,其安装符合 5.4.4.3 要求。

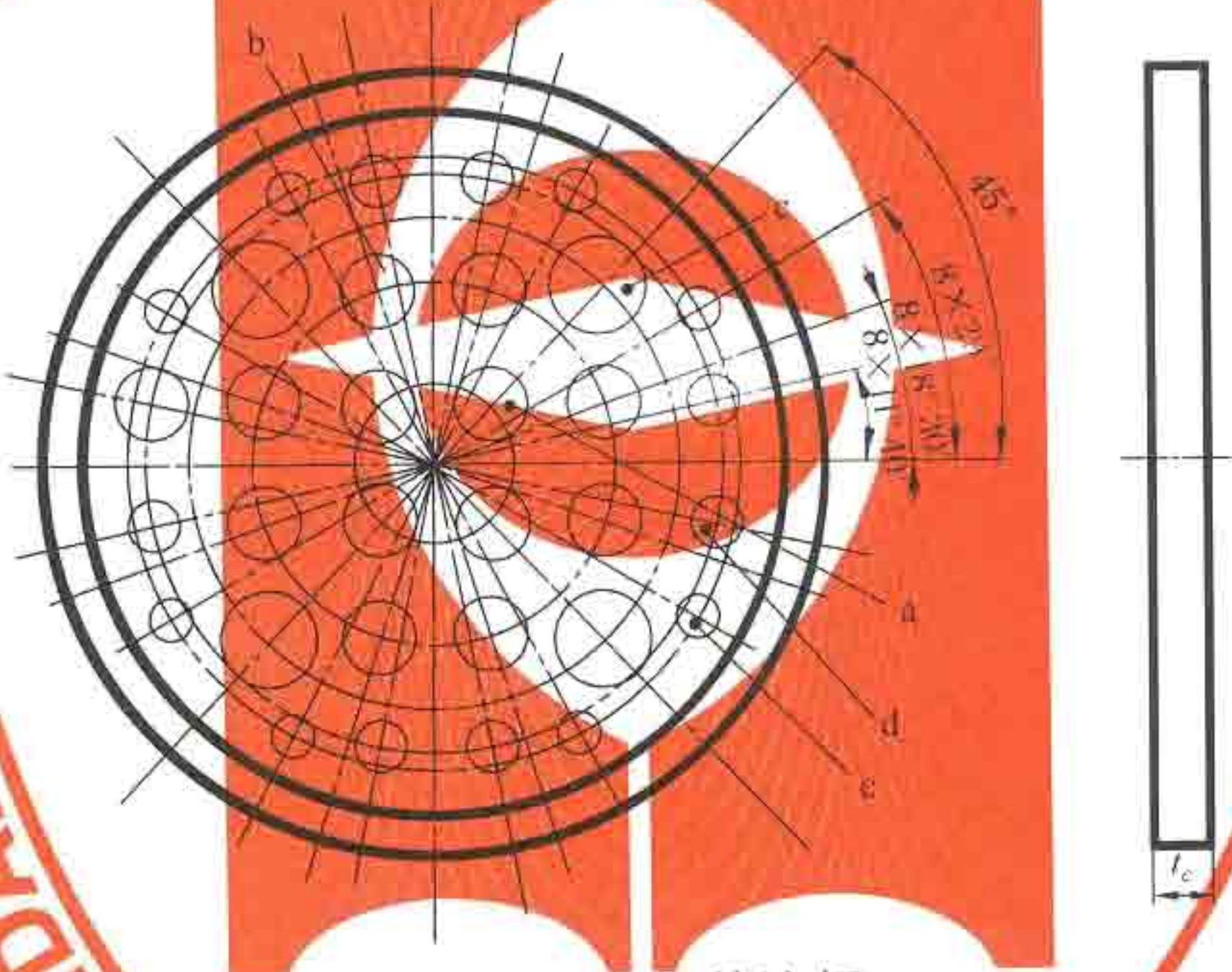


图 6 Zanker 整流板

5.4.4.2 设计

图 6 所示的 Zanker 整流板,板的厚度一般为 $D/8$,它由 32 个对称圆形排列的穿孔组成,这些穿孔的直径是管子内径 D 的函数,应按以下要求制造:

- a) 在直径为 $0.25 D \pm 0.002 5 D$ 的中心圆上,呈环形布置 4 个直径为 $0.141 D \pm 0.001 D$ 的孔;
- b) 在直径为 $0.56 D \pm 0.005 6 D$ 的中心圆上,呈环形布置 8 个直径为 $0.139 D \pm 0.001 D$ 的孔;
- c) 在直径为 $0.75 D \pm 0.007 5 D$ 的中心圆上,呈环形布置 4 个直径为 $0.136 5 D \pm 0.001 D$ 的孔;
- d) 在直径为 $0.85 D \pm 0.008 5 D$ 的中心圆上,呈环形布置 8 个直径为 $0.110 D \pm 0.001 D$ 的孔;
- e) 在直径为 $0.90 D \pm 0.009 D$ 的中心圆上,呈环形布置 8 个直径为 $0.077 D \pm 0.001 D$ 的孔。

当 D 小于 100 mm,各孔直径的误差为 ± 0.1 mm。

Zanker 整流板厚度 t_c 的允许范围为:大于或等于 $0.12 D$ 至小于或等于 $0.15 D$ 。法兰厚度根据用途而定;外径及法兰面根据法兰类型及用途而定。

Zanker 整流板的压力损失系数 K 大约等于 3, K 值由式(8)确定,式中 Δp_c 为整个 Zanker 整流板上的压力损失。

5.4.4.3 安装

孔板与上游最近阻流件之间的距离 L_z 至少应等于 $17 D$ 。在安装 Zanker 整流板时,整流板下游面与孔板上游端面之间的距离 L_s 应为:

$$7.5 D \leq L_s \leq L_z - 8.5 D$$

当 β 小于或等于 0.67 时,可以使用 Zanker 整流板。

至弯头(或弯头组合件)或三通的距离,按至最近(或唯一)弯头弯曲部分的下游端或三通的下游端计算。至渐缩管或渐扩管的距离按至渐缩管或渐扩管的锥形部分的下游端计算。

在任何阻流件的下游,本条中的位置都是合格的。如果上游阻流件的范围受到限制,或上游阻流件与孔板间的总长度增加,或孔板的直径比减少,Zanker 整流板更宽范围的位置是允许的。

5.4.5 当采用流动调整器时,温度计安装按 5.3.8 a)、c) 执行。如要在孔板上游侧安装时温度计套管或插孔直径距流动调整器上游入口的距离应大于 900 mm,同时应遵守 5.3.8 c)。

5.5 孔板夹持器的安装

应注意孔板在孔板夹持器中的安装方向,使气体从孔板的上游端面流向孔板的下游端面。

5.5.1 孔板应垂直于测量管轴线,可有 1° 的偏差。

孔板开孔应与测量管和夹紧环(当采用时)同轴。对于每个取压孔,在测量管中位于与取压孔平行和垂直的轴线方向上,分别对孔板开孔轴线和测量管轴线之间的距离按式(9)和式(10)进行确定。 e_d 是与取压孔平行方向的距离,按式(9)计算:

$$e_d \leq \frac{0.0025 D}{0.1 + 2.3\beta^4} \quad \dots\dots\dots (9)$$

e_m 是与取压孔垂直方向的距离,按式(10)计算:

$$e_m \leq \frac{0.005 D}{0.1 + 2.3\beta^4} \quad \dots\dots\dots (10)$$

满足式(9)和式(10),流出系数无附加不确定度。

如果是一个或多个取压孔在平行方向的距离满足式(11):

$$\frac{0.0025 D}{0.1 + 2.3\beta^4} < e_d \leq \frac{0.005 D}{0.1 + 2.3\beta^4} \quad \dots\dots\dots (11)$$

则流出系数 C 的不确定度算术相加 0.3% 的附加不确定。

对于任何取压孔,见式(12):

$$e_d \text{ 或 } e_m > \frac{0.005 D}{0.1 + 2.3\beta^4} \quad \dots\dots\dots (12)$$

本标准没有给出资料来估计由于超出上式同轴度的规定而产生的任何附加不确定度。

5.5.2 当采用夹紧环时,应该注意对中,夹紧环的任何部位不得突入测量管内。

5.6 装配和垫片

5.6.1 装配和夹紧的方法均应该保证孔板安装在正确的位置上,且保持不变。当孔板装在法兰之间时,要允许它自由热膨胀以避免孔板翘曲和弯扭。

5.6.2 密封垫片应尽量薄,设计采用的垫片厚度应考虑取压孔位置。垫片安装后不得突入孔板夹持器腔内,也不得挡住取压孔及引起取压位置的改变。

5.6.3 夹紧环应按下述原则选择配合:若夹紧环材质的热膨胀系数大于法兰材质的热膨胀系数,夹紧环的法兰为凸面并与夹紧环的凹槽配合时,则应采用过盈配合;反之则应采用间隙配合。

5.6.4 为了满足安装要求,应将孔板、夹紧环和上游侧 $10 D$ (包括配对法兰)及下游侧 $4 D$ (包括配对法兰)的测量管部分先行配套组装,检验合格后再装入管道与直管段长度不足的部分连接,所产生的沟槽应受到限制。应沿着直管段轴线平行方向测量沟槽长度,当轴向长度小于或等于 6.35 mm 时,不受深度限制;当轴向长度大于 6.35 mm 沟槽深度应小于或等于 $0.02 D$ 。

5.6.5 新装测量管路系统应在管道吹扫后再进行孔板的安装。

5.7 参数测量和信号引线

本条参见附录 C。

6 孔板的结构形式和技术要求

6.1 孔板

孔板的轴向截面如图 7 所示。图中所注字母仅供本章以下各条参照使用。

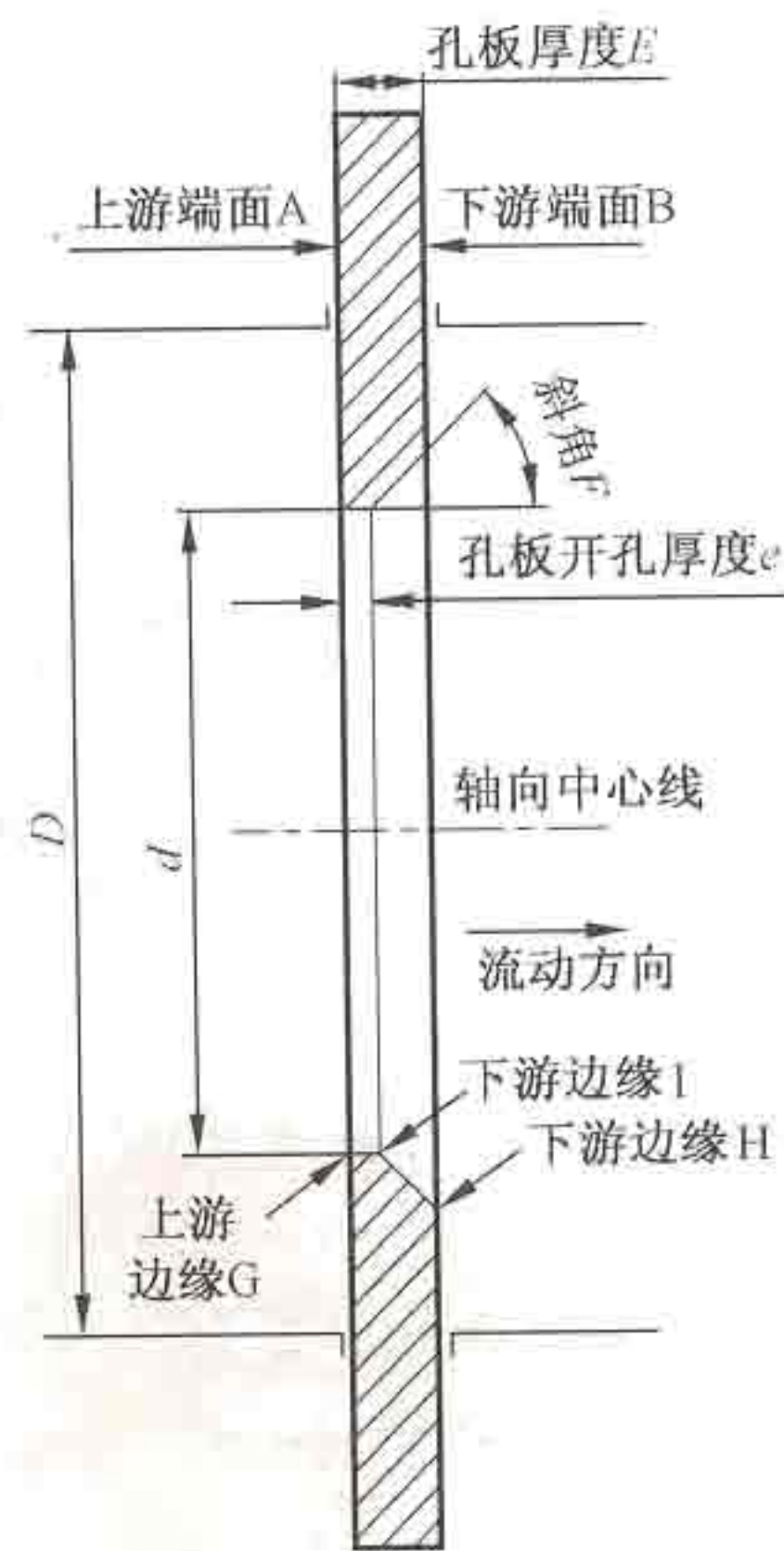


图 7 标准孔板

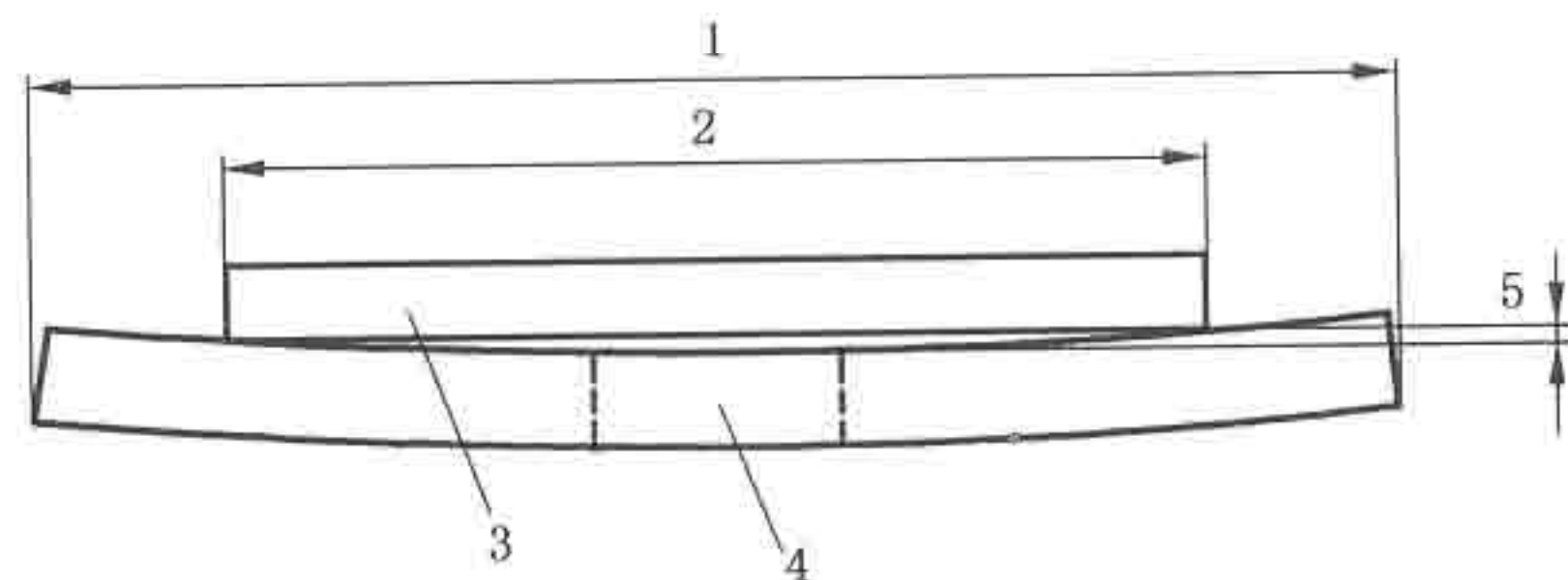
6.1.1 总体形状

6.1.1.1 孔板在测量管内的部分应该是圆的,开孔与测量管轴线同轴,孔板的两端面应始终是平整的和平行的。

6.1.1.2 一般情况下,安装在测量管内的部分应满足下述要求:在设计及安装孔板时,应保证在操作条件下,由于差压或任何其他应力所引起的孔板塑性扭曲和弹性变形所造成的 6.1.2.1 规定的直线斜度不得超过 1%。

6.1.2 上游端面 A

6.1.2.1 当孔板安装在测量管中,孔板两边无差压时,孔板上游端面 A 应是平的。只要安装方法保证不会使孔板变形,则可将孔板从测量管上拆下来测量其平面度。检查时,当孔板 A 面与连接测量管直径 D 的直边(见图 8)间的不平度小于 $0.005(D-d)/2$,则上游端面与垂直于轴线的平面之间的斜度小于 0.5%,可认为孔板是平的。该判别标准不计孔板表面上目测看不见的不可避免的局部缺陷。



- 1——孔板外径;
- 2——测量管内径;
- 3——直边;
- 4——节流孔;
- 5——在孔边缘测量。

图 8 孔板平直度测量

6.1.2.2 孔板 A 面应无可见损伤。在直径不小于 D , 且与节流孔同心的圆内, 孔板上游端面 A 的粗糙度算术平均偏差 Ra 应小于或等于 $1.27\ \mu\text{m}$ 。如果孔板没有满足上述规定的条件, 应重新抛光或清洁。

6.1.2.3 应在孔板明显部位标明流向标志, 最好在安装之后也能看到该标志, 以表明孔板相对于流动方向的安装是正确的。

6.1.3 下游端面 B

6.1.3.1 下游端面 B 应该是平的, 且与上游端面 A 平行。此外应满足 6.1.4.4 要求。

6.1.3.2 孔板的下游端面 B 的表面粗糙度可较 A 面低一级。

6.1.3.3 下游端面 B 的技术要求可通过目测检验加以判断。

6.1.4 孔板厚度 E 和孔板开孔厚度 e

6.1.4.1 孔板开孔厚度 e 应在 $0.005 D$ 与 $0.02 D$ 之间。

6.1.4.2 在孔板开孔的任意点上测得的各个 e 值之间的差不得大于 $0.001 D$ 。

6.1.4.3 孔板厚度 E 应在 e 与 $0.05 D$ 之间, 还应满足 6.1.1.2 要求。然而当 D 在大于或等于 $50\ \text{mm}$ 至小于或等于 $64\ \text{mm}$ 的范围内时, 孔板厚度 E 只要不大于 $3.2\ \text{mm}$ 即可。

6.1.4.4 如果 D 大于或等于 $200\ \text{mm}$, 在孔板任意点上所测 E 值之间相差不得大于 $0.001 D$ 。如果 D 小于 $200\ \text{mm}$, 在孔板任意点上所测 E 值之间相差不得大于 $0.2\ \text{mm}$ 。

6.1.5 斜角 F

6.1.5.1 如孔板厚度 E 超过孔板开孔厚度 e , 孔板的下游侧应有一个扩散的圆锥表面。该表面应经过良好精加工, 并满足 6.1.2.2 要求。

6.1.5.2 斜角 F 为 $45^\circ \pm 15^\circ$ 。

6.1.6 边缘 G、H 和 I

6.1.6.1 上游边缘 G 应无卷口、无毛边、亦无目测可见的异常现象。

6.1.6.2 上游边缘 G 应是尖锐的。如果边缘半径不大于 $0.000\ 4 d$, 无反射光束时, 可认为是尖锐的。

如 D 大于或等于 $25\ \text{mm}$ 时, 一般采用目测检验, 将孔板上游端面 A 倾斜 45° 角, 用日光或人工光源射向直角入口边缘, 边缘应无反射光束。

如 D 小于 $25\ \text{mm}$ 时, 目测检验是不够的, 应采取测量边缘半径的方法进行检查。

使用中的孔板经检验, 其边缘半径 r_k 大于 $0.000\ 4 d$ 时, 参见附录 D 处理。

6.1.6.3 孔板下游边缘 H 和 I, 应无毛刺、划痕和可见损伤。

6.1.6.4 孔板下游边缘 H 和 I 处在分离流动区域内, 因而有它的品质要求, 但低于对孔板上游边缘 G 处的要求, 因此有些细小的缺陷是允许的。

6.1.7 孔板开孔直径 d

6.1.7.1 在任何情况下, 孔板开孔直径 d 均应大于或等于 $12.5\ \text{mm}$ 。直径比 β 应在大于或等于 0.10 至小于或等于 0.75 的范围内。

在上述极限值之内, β 值由用户选择。

6.1.7.2 孔板开孔直径 d 值应取相互之间大致有相等角度的四个直径测量结果的平均值。任意一个单测直径值与直径平均值之差的绝对值为: 当 d 小于或等于 $25.4\ \text{mm}$ 时, 不应超过直径平均值的 0.05% ; 当 d 大于 $25.4\ \text{mm}$ 时不应超过 $0.012\ 7\ \text{mm}$ 。如果任意一个直径值相对于被测直径的直径平均值之差均符合上述要求, 则认为满足本要求。

6.1.7.3 孔板开孔应为圆筒形并垂直于上游端面 A。在任何情况下, 孔板开孔圆筒形部分的粗糙度不得影响边缘尖锐度的测量。

6.1.8 材料和制造

孔板应按所测介质的性质和参数采用相应的耐腐蚀、耐磨的材料和任何方式进行制造。在进行测量时, 孔板应是清洁的, 孔板材料的线膨胀系数应是已知的。

孔板 B 面的外边缘部位应刻有表示孔板安装的符号、出厂编号、安装位号、测量管内径 D 和孔板开

孔直径 d 的实测尺寸值。

6.2 孔板夹持器

每个孔板夹持器,至少应有一个上游取压孔和一个下游取压孔,不同取压方式的上下游取压孔位置应符合本标准规定。

一块孔板可采用本标准中所规定的不同取压方式,如果在同一个孔板夹持器上有不同取压方式的取压孔时,为了避免相互干扰,在孔板同一侧的几个取压孔应至少偏移 30° 。取压孔的位置表征了孔板的取压方式。

孔板夹持器和测量管连接处不应出现台阶。夹持器与孔板的接触面应平齐。

孔板夹持器的外圆柱表面上应刻有表示安装方向的符号、出厂编号和测量管内径 D 的实测尺寸值。

6.2.1 法兰取压孔板夹持器

6.2.1.1 法兰取压孔板夹持器是测量管法兰上带有符合下述要求的取压孔器件。取压孔的间距 l 是取压孔轴线与孔板的某一规定端面的距离。设计取压孔位置时,应预先考虑垫圈和(或)密封材料的厚度。

6.2.1.2 法兰取压孔板夹持器取压孔(见图9)应为:

上游取压孔的间距 l_1 名义上等于 25.4 mm ,且是从孔板的上游端面量起。

下游取压孔的间距 l_2 名义上等于 25.4 mm ,且是从孔板的下游端面量起。

当 D 小于 150 mm 时, l_1 和 l_2 之值均应在 $25.4\text{ mm} \pm 0.5\text{ mm}$ 之间。

当 D 在大于或等于 150 mm 至小于或等于 $1\,000\text{ mm}$ 的范围内时, l_1 和 l_2 之值均应在 $25.4\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ 之间。

6.2.1.3 取压孔的轴线应与测量管轴线相交,并与其成直角。

6.2.1.4 在取压孔的穿透处应为圆形,其边缘应与管壁内表面平齐,并尽可能锐利。为确保消除内边缘上的毛边和卷口,允许有倒圆,但倒圆应尽可能小,倒圆能测量之处其半径应小于取压孔直径的十分之一。在连接孔的内部及管壁上钻出的孔的边缘或靠近取压孔的管壁处不应显现有不规则性。

6.2.1.5 用目测检验来判断取压孔是否符合上述两条要求。

6.2.1.6 取压孔直径应小于 $0.13 D$,同时小于 13 mm 。

对取压孔最小直径不加限制,在实际应用中,考虑偶然阻塞的可能性及良好的动态特性决定最小直径值。上游和下游取压孔应具有相同的直径。

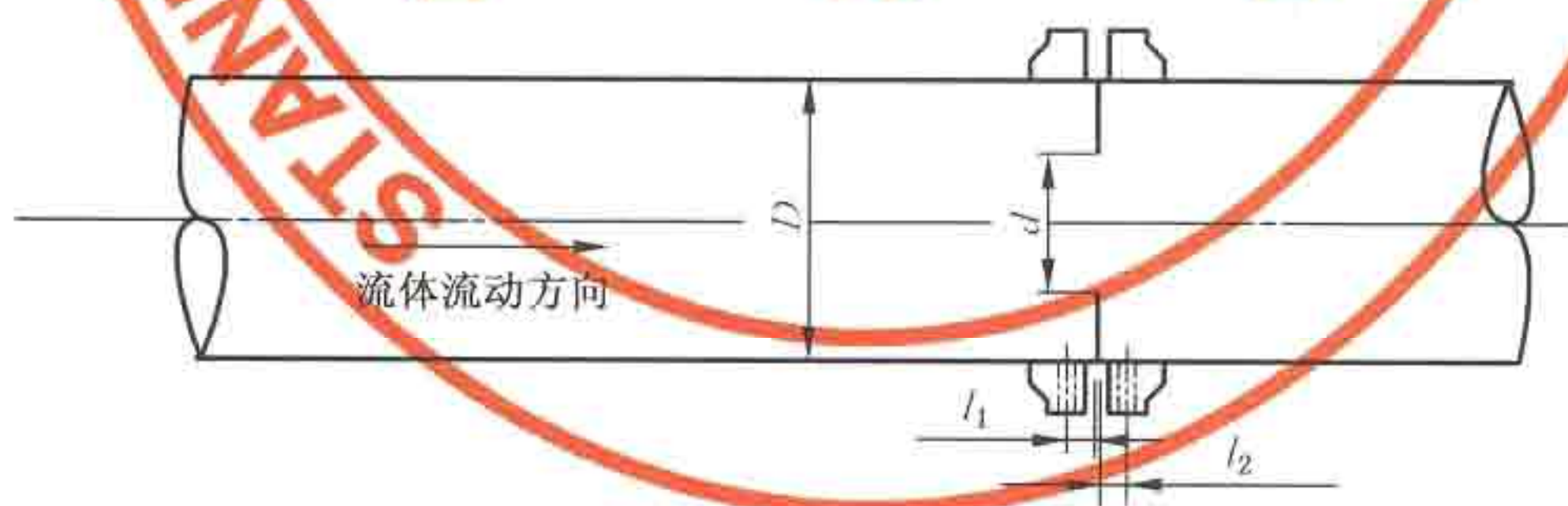


图9 法兰取压孔板夹持器

6.2.1.7 从测量管内壁量起,在至少 2.5 倍取压孔直径的长度范围内,取压孔应为圆筒形。

6.2.2 角接取压孔板夹持器

角接取压孔板夹持器可以是环隙取压[见图10中的a)]器件或者单独钻孔取压[见图10中的b)]器件。

6.2.2.1 环室取压孔板夹持器取压环隙

孔板上游侧静压力由前环室取出,下游侧静压力由后环室取出。前后环室是夹紧孔板的夹紧环。

a) 夹紧环的环隙厚度 f 应大于或等于环隙宽度 a 的两倍。环腔的横截面积 $g \times h$ 应大于或等于此环隙与管道内部连通的开孔总面积之半。

- b) 前后夹紧环与孔板上下游侧端面形成的前后环腔,通过沿夹紧环开孔的全圆周上的连续环隙或按等角距配置不小于4个的断续环隙与测量管相通。但每个断续环隙面积不得小于 12 mm^2 。环隙宽度 a 应符合下述规定:

当 β 小于或等于0.65时, a 应在 $0.005 D$ 至 $0.03 D$ 之间;

当 β 大于0.65时, a 应在 $0.01 D$ 至 $0.02 D$ 之间。

若 D 小于100 mm,对任意 β , a 可取2 mm。

对任意 β 值,其实际尺寸 a 应在1 mm至10 mm之间。

对可能析出凝析液的场合,其实际尺寸 a 应在4 mm至10 mm之间。

- c) 环腔与导压管之间的取压孔应呈圆筒形,其长度不得小于 $2.5j$ 。 j 为取压孔直径,其值 j 在4 mm至10 mm之间,并应满足6.2.1.4的要求。



- 1——孔板;
2——夹持器;
 a ——环隙宽度;
 f ——环隙厚度;
 c ——夹紧环长度(上游);
 c' ——夹紧环长度(下游);
 b ——夹紧环内径;
 s ——上游台阶到夹紧环的距离。

图 10 角接取压孔板夹持器

- d) 夹紧环的内径 b 应大于或等于测量管内径 D , 以保证它不突入测量管内。并应满足式(13)要求:

$$\frac{b-D}{D} \times \frac{c(\text{或 } c')}{D} \times 100 < \frac{0.1}{0.1 + 2.3\beta^4} \dots\dots\dots(13)$$

c 和 c' 为前夹紧环和后夹紧环长度(见图 10), 其值不得大于 $0.5 D$ 。

- e) 所有可能与被测气流接触的夹紧环的表面应是清洁的, 并有良好的表面粗糙度。
f) 前夹紧环和后夹紧环不必彼此对称, 但两者均应符合上述要求。
g) 用以计算直径比以及计算流量的测量管直径是按照 5.2.2.2 的规定测量的, 夹紧环可看作是节流件的一部分, 也应符合 5.2.2.6、5.2.2.7 所给出的要求, 长度 s 是从夹紧环所形成的凹槽的上游边缘量起。

6.2.2.2 单独钻孔取压孔板夹持器取压孔

单独钻孔取压孔板夹持器规定上游侧静压力由前夹紧环(或上游测量管法兰)取出, 下游侧静压力由后夹紧环(或下游测量管法兰)取出。

- a) 取压孔轴线应尽可能以 90° 角度与测量管轴线相交。
如在同一上游或下游取压孔平面上, 有几个单独钻孔取压时, 它们的轴线应彼此互成相等角度。单独钻孔取压孔的直径应满足 c) 的要求。
b) 取压孔轴线与孔板各相应端面之间的间距等于取压孔直径之半。取压孔出口边缘与孔板端面平齐, 并满足 a) 的要求。
c) 上下游侧取压孔直径 a 的尺寸应相同, 其值应符合 6.2.2.1 b) 中对 a 值的规定。
d) 从测量管内壁量起在至少 2.5 倍取压孔直径的长度范围内, 取压孔应呈圆筒形。夹紧环与二次仪表连接的取压孔, 在穿透管壁处应为圆形, 其直径 j 在 4 mm 至 10 mm 之间并满足 6.2.1.4 要求。
e) 夹紧环还应符合 6.2.2.1 的 d) 至 g) 的要求。

7 检验要求

7.1 节流装置的几何检验

7.1.1 标志及随机文件的检验

按 JJG 640—1994 的 5.1 和 5.2 规定进行检验。

7.1.2 包装的检验

包装应符合 GB/T 15464—1995 的要求。

7.1.3 贮存

节流装置应存放在温度为 $-10^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$, 相对湿度不超过 85% 的通风及其无腐蚀性气体的室内。

7.1.4 结构尺寸和几何尺寸的检验

7.1.4.1 结构尺寸和几何尺寸可用满足要求的量具及设备进行检验。

7.1.4.2 在保证节流装置符合第 1~5 章规定的前提下, 按 6.1、6.2 的要求检验结构尺寸和几何尺寸。成套供应的节流装置, 应对所带测量管进行检验。

7.1.4.3 检验结果应符合 7.1.4.2 及以下 a)~f) 的规定。

- a) 孔板开孔圆筒形部分的检验, 应按本标准中相应条款规定的方法进行。其测量工具不确定度应不大于 $5 \mu\text{m}$ 。
b) 孔板边缘尖锐度的检验, 一般按 6.1.6.2 规定进行。当需要采用测量孔板开孔直角入口边缘圆弧半径 r_k 的方法来确定尖锐度时, 应采用模铸法或铅箔模压法实测, 或用具有同等准确度

要求的设备进行检验。

- c) 孔板平面度的检验,是将孔板支承在平板上,用带指示器的可调测量架进行检验。或用具有满足准确度要求的设备进行检验。检验结果应符合 6.1.2 中的有关规定。
- d) 孔板两端面平行度的检验,是将孔板放在平板上,用带指示器的可调测量架进行检验。或用具有满足准确度要求的设备进行检验。检验结果应符合 6.1.2 和 6.1.3 中的有关规定。
- e) 孔板粗糙度的检验,采用上限值不小于 0.75 mm 的电子表面粗糙度测试仪或采用与孔板同材料的样品比板进行检验。
- f) 直管段的检验:应按 5.2、5.3 和 5.4 的有关规定进行检验。

7.2 系数检定和在线校准

7.2.1 当节流装置的制造和使用条件超出本标准规定的极限时,节流装置应进行系数检定。系数检定按 JJG 640—1994 的有关规定执行。

7.2.2 根据需要可对孔板流量计计量系统进行在线校准,参见附录 E。

当无条件进行在线校准时,允许对孔板流量计计量系统进行离线检定,离线检定按 7.2.1 执行。

8 天然气流量测量原理和计算方法

8.1 测量原理

天然气流经节流装置时,流束在孔板处形成局部收缩,从而使流速增加,静压力降低,在孔板前后产生静压力差(差压),气流的流速越大,孔板前后产生的差压也越大,从而可通过测量差压来衡量天然气流过节流装置的流量大小。这种测量流量的方法是以能量守恒定律和流动连续性方程为基础的。

假设未经校准的节流装置与已经过充分实验校准的节流装置几何相似和动力学相似(即符合本标准要求的),则流量计算值在本标准所规定的不确定度范围内。质量流量与差压的关系由式(14)确定;在操作条件下的体积流量与差压的关系由式(15)确定;在标准参比条件下的体积流量与差压的关系由式(16)确定。

8.2 测量使用范围

采用本标准测量天然气流量时,节流装置和计算方法均应满足本标准全部技术要求,其使用限制条件规定如下:

8.2.1 孔板开孔直径 d 、测量管内径 D 、直径比 β 和管径雷诺数 Re_D 的极限值应符合表 4 规定。

表 4 孔径、管内径、直径比和雷诺数限值表

法 兰 取 压	角 接 取 压
$d \geq 12.5 \text{ mm}$	
$50 \text{ mm} \leq D \leq 1\,000 \text{ mm}$	
$0.10 \leq \beta \leq 0.75$	
$Re_D \geq 5\,000$ 及 $Re_D \geq 170\beta^2 D$	$Re_D \geq 5\,000$ 用于 $0.1 \leq \beta \leq 0.56$
	$Re_D \geq 16\,000\beta^2$ 用于 $\beta > 0.56$

8.2.2 孔板上游测量管内壁粗糙度限值要求。

欲达到标准中的不确定度值,直管段内壁粗糙度应满足 $10^4 Ra/D$ 计算值小于或等于表 5 给出的最大值并大于或等于表 6 给出的最小值。流出系数公式(8.4.2.1)的确定是根据利用已知粗糙度的直管段(即已确定 Ra/D 的范围)收集的数据库,在此范围流出系数的偏差不会很大,其不确定度不会超过 9.2.2 给出的不确定度值。5.2.3 给出了直管段粗糙度的相关资料。

表 5 10⁴Ra/D 的最大值

β	Re_D								
	$\leq 10^4$	3×10^4	10^5	3×10^5	10^6	3×10^6	10^7	3×10^7	10^8
≤ 0.20	15	15	15	15	15	15	15	15	15
0.30	15	15	15	15	15	15	15	14	13
0.40	15	15	10	7.2	5.2	4.1	3.5	3.1	2.7
0.50	11	7.7	4.9	3.3	2.2	1.6	1.3	1.1	0.9
0.60	5.6	4.0	2.5	1.6	1.0	0.7	0.6	0.5	0.4
≥ 0.65	4.2	3.0	1.9	1.2	0.8	0.6	0.4	0.3	0.3

表 6 10⁴Ra/D 的最小值

β	Re_D			
	$\leq 3 \times 10^6$	10^7	3×10^7	10^8
≤ 0.50	0.0	0.0	0.0	0.0
0.60	0.0	0.0	0.003	0.004
≥ 0.65	0.0	0.013	0.016	0.012

至少在孔板上游 10 D 的直管段部分(即测量管)应满足表 5 和表 6 的规定。此粗糙度是对孔板连接件及上游直管段的,下游直管段的粗糙度不作这样严格的要求。

下面的两种情况均满足要求:

- a) $1\text{ }\mu\text{m} \leq Ra \leq 6\text{ }\mu\text{m}, D \geq 150\text{ mm}, \beta \leq 0.6, Re_D \leq 5 \times 10^5$;
- b) $1.5\text{ }\mu\text{m} \leq Ra \leq 6\text{ }\mu\text{m}, D \geq 150\text{ mm}, \beta > 0.6, Re_D \leq 1.5 \times 10^7$ 。

当 D 小于 150 mm 时,应使用表 5 和表 6 计算 10⁴Ra/D 的最大值和最小值。

在使用中如对上流 10 D 的直管段范围内壁进行检验,其内壁粗糙度不符合表 5 和表 6 规定,参见附录 D 处理。

8.3 天然气流量计算方法

8.3.1 天然气流量计算基本公式

8.3.1.1 天然气质量流量计算基本公式见式(14):

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1} \dots\dots\dots (14)$$

式中:

ρ_1 ——天然气在操作条件下上游取压孔处的密度,可通过计算或实测得出,单位为千克每立方米(kg/m³)。

8.3.1.2 天然气在操作条件下的体积流量计算基本公式见式(15):

$$q_{V1} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1} / \rho_1 \dots\dots\dots (15)$$

8.3.1.3 天然气在标准参比条件下的体积流量计算基本公式见式(16):

$$q_{Vn} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1} / \rho_n \dots\dots\dots (16)$$

式中:

ρ_n ——天然气在标准参比条件下的密度,可通过计算或实测得出,单位为千克每立方米(kg/m³)。

8.3.2 天然气流量计算实用公式

按天然气在操作条件下和在标准参比条件下密度与其温度、压力的关系,并引入与干空气的相对性推导流量计算实用公式。

8.3.2.1 天然气在标准参比条件下的体积流量计算实用公式

根据式(17):

$$\rho_1 = \frac{MP_1}{RZ_1T_1} = \frac{M_nZ_nG_rP_1}{RZ_nZ_1T_1} \dots\dots\dots(17)$$

式中:

- M_n ——干空气的摩尔质量,其值为 28.962 6,单位为千克每千摩(kg/kmol);
- M ——天然气的摩尔质量,单位为千克每千摩(kg/kmol);
- R ——通用气体常数,其值为 0.008 314 51,单位为兆帕立方米每千摩开[MPa·m³/(kmol·K)];
- Z_n ——干空气在标准参比条件下的压缩因子,其值为 0.999 63;
- Z_n ——天然气在标准参比条件下的压缩因子;
- P_1 ——天然气在操作条件下上游侧取压孔的绝对压力,单位为兆帕(MPa);
- T_1 ——天然气在操作条件下的气流热力学温度,单位为开(K);
- Z_1 ——天然气在操作条件下的压缩因子;
- G_r ——天然气的真实相对密度。

$$\rho_n = \frac{MP_n}{RZ_nT_n} = \frac{M_nG_rP_n}{RZ_nT_n} \dots\dots\dots(18)$$

联解式(16)、式(17)和式(18),整理后得到天然气在标准参比条件下的体积流量计算实用公式,见式(19)。

$$q_{vn} = A_{vn}CEd^2F_G\epsilon F_ZF_T\sqrt{P_1\Delta p} \dots\dots\dots(19)$$

式中:

- q_{vn} ——天然气在标准参比条件下的体积流量。
- A_{vn} ——体积流量计量系数视采用计量单位而定。秒体积流量(m³/s)计量系数 $A_{vns} = 3.179\ 5 \times 10^{-6}$;小时体积流量(m³/h)计量系数 $A_{vnh} = 0.011\ 446$;日体积流量(m³/d)计量系数 $A_{vnd} = 0.274\ 71$ 。
- C ——流出系数,按 8.4.2.1 确定。
- E ——渐近速度系数,按 8.4.2.2 确定。
- d ——孔板开孔直径,单位为毫米(mm),按 8.4.2.3 确定。
- F_G ——相对密度系数,按 8.4.2.4 确定。
- ϵ ——可膨胀性系数,按 8.4.2.5 确定。
- F_Z ——超压缩系数,按 8.4.2.6 确定。
- F_T ——流动温度系数,按 8.4.2.7 确定。
- P_1 ——孔板上游侧取压孔气流绝对静压,单位为兆帕(MPa),按 8.4.2.8 确定。
- Δp ——气流流经孔板时产生的差压,单位为帕(Pa),按 8.4.2.9 确定。

8.3.2.2 天然气质量流量计算实用公式

联解式(14)、式(17),整理后得到天然气质量流量计算实用公式,见式(20):

$$q_m = A_mCEd^2\frac{1}{F_G}\epsilon F_ZF_T\sqrt{P_1\Delta p} \dots\dots\dots(20)$$

或 $q_m = q_{vn}\rho_n$

式中:

- q_m ——天然气质量流量。
- A_m ——质量流量计量系数视采用计量单位而定。秒质量流量(kg/s)计量系数 $A_{ms} = 3.829\ 5 \times 10^{-6}$;小时质量流量(kg/h)计量系数 $A_{mh} = 0.013\ 786$;日质量流量(kg/d)计量系数 $A_{md} = 0.330\ 87$ 。

其他参数系数含义同式(19)。

8.3.2.3 天然气在标准参比条件下的能量流量计算实用公式

a) 当天然气流量用在标准参比条件下的体积流量计量时,能量流量计算实用公式为式(21):

$$q_{EVn} = q_{Vn} \tilde{H}_s \dots\dots\dots (21)$$

b) 当天然气流量用质量流量计量时,能量流量计算实用公式为式(22):

$$q_{Em} = q_m \hat{H}_s \dots\dots\dots (22)$$

式(21)、式(22)中的在标准参比条件下天然气体积发热量 \tilde{H}_s 和质量发热量 \hat{H}_s 可以按天然气摩尔组成进行计算,也可以直接测量,见 A.1.5。

8.4 天然气流量计算和系数参数确定

8.4.1 天然气流量计算

按式(19)和附录 A 的有关规定计算天然气在标准参比条件下的体积流量值 q_{Vn} 。按式(20)和附录 A 的有关规定计算天然气质量流量值 q_m 。

8.4.2 系数参数确定

8.4.2.1 流出系数 C 按式(23)计算:

$$C = 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8 + 0.000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0.7} + (0.0188 + 0.0063A)\beta^{3.5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.3} + (0.043 + 0.080e^{-10L_1} - 0.123e^{-7L_1})(1 - 0.11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0.031(M_2 - 0.8M_2^{1.1})\beta^{1.3} \dots\dots (23)$$

当 $D < 71.12$ 时,式(23)中的 C 值还应增加 $0.011(0.75 - \beta) \left(2.8 - \frac{D}{25.4} \right)$ 项的值(D 的单位为 mm)。式(23)中:

$$M_2 = \frac{2L_2}{1 - \beta}$$
$$A = \left(\frac{19\,000\beta}{Re_D} \right)^{0.8}$$

式中:

β ——直径比, $\beta = d/D$ 。d 按式(25)计算,D 按式(A.4)计算。

Re_D ——管径雷诺数按 A.1.1 确定。

L_1 ——孔板上游端面到上游取压孔轴线的距离除以测量管内径得出的商, $L_1 = l_1/D$ 。

L_2 ——孔板下游端面到下游取压孔轴线的距离除以测量管内径得出的商, $L_2 = l_2/D$ 。

当间距符合 6.2.1 的法兰取压方式: $L_1 = L_2 = 25.4/D$ 。

当间距符合 6.2.2 的角接取压方式: $L_1 = L_2 = 0$ 。

经检验全部符合 8.2 规定,式(23)和式(27)才是有效的。

8.4.2.2 渐近速度系数 E 按式(24)计算:

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \dots\dots\dots (24)$$

8.4.2.3 孔板开孔直径 d 值按式(25)计算:

$$d = d_{20} [1 + \Lambda_d (t_1 - t_{20})] \dots\dots\dots (25)$$

式中:

d_{20} ——孔板开孔在 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 条件下的检测直径,单位为毫米(mm);

Λ_d ——孔板材料的线膨胀系数,单位为毫米每毫米摄氏度[$\text{mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})$],由表 A.4 查取;

t_1 ——天然气流过节流装置时实测的气流温度,单位为摄氏度($^\circ\text{C}$) (温度计安装位置按 5.3.8 或 5.4.5 执行);

t_{20} ——检测时恒温室温度(20℃±2℃)。

8.4.2.4 相对密度系数 F_G 是在推导天然气流量计算实用公式时定义的一个系数,其值按式(26)计算:

$$F_G = \sqrt{\frac{1}{G_r}} \dots\dots\dots(26)$$

天然气真实相对密度 G_r 按 A.1.2 确定。

8.4.2.5 可膨胀性系数 ϵ 按式(27)计算:

$$\epsilon = 1 - (0.351 + 0.256\beta^4 + 0.93\beta^8) \left[1 - \left(\frac{p_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right] \dots\dots\dots(27)$$

按式(27)计算 ϵ 值时应满足下述原则:

- a) 孔板下游气流的绝对静压 P_2 与孔板上游气流的绝对静压 P_1 之比应大于或等于 0.75;
- b) 等熵指数 κ 按 A.1.3 确定;
- c) 孔板上游侧气流绝对静压 P_1 按 8.4.2.8 确定。

8.4.2.6 超压缩系数 F_Z 是因天然气特性偏离理想气体定律而导出的修正系数,其定义式见式(28):

$$F_Z = \sqrt{\frac{Z_n}{Z_1}} \dots\dots\dots(28)$$

式中:

- Z_n ——天然气在标准参比条件下的压缩因子;
 - Z_1 ——天然气在操作条件下的压缩因子。
- F_Z 值按 A.1.4 确定。

8.4.2.7 流动温度系数 F_T 是因天然气流经节流装置时,气流的平均热力学温度 T_1 偏离标准参比条件热力学温度(293.15 K)而导出的修正系数,其值按式(29)计算:

$$F_T = \sqrt{\frac{293.15}{T_1}} \dots\dots\dots(29)$$

式中:

- $T_1 = t_1 + 273.15$;
- t_1 含义同式(25)。

8.4.2.8 气流绝对压力 P_1 为天然气流经节流装置时在孔板上游侧取压孔实测的绝对压力,其值可用绝对压力仪表实测,也可按式(30)计算:

$$P_1 = p_1 + P_a \dots\dots\dots(30)$$

式中:

- p_1 ——孔板上游侧取压孔实测表压值,单位为兆帕(MPa);
- P_a ——当地大气压值,单位为兆帕(MPa)。

8.4.2.9 差压 Δp 应考虑孔板两侧取压孔之间的任何高度差,使用差压仪表直接测量,单位为帕(Pa)。当节流装置水平安装时,其值按式(31)计算:

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_1 - p_2 \\ \text{或 } \Delta p &= P_1 - P_2 \end{aligned} \dots\dots\dots(31)$$

8.4.2.10 天然气流量计算和设计计算实例参见附录 F。

8.5 取值方法和数据修约

8.5.1 取值方法

按本标准计算流量时,运算的最后结果保留不少于四位有效数字,取值方法应符合下列规定。

- 8.5.1.1 仪表上记录或指示的测量值,应保留一位可疑数。
- 8.5.1.2 流量计算参数最少有效数字位数应按表 7 取值。孔板开孔直径 d 大于 100 mm 时增加一位

有效数字。

8.5.2 数据修约

当有效数字位数确定后,计算数据按 GB/T 8170—1987 规定进行修约。

8.6 孔板流量计计量系统

使用孔板流量计的天然气计量系统其设计、建设、校准、投产、运行和维护按 GB/T 18603—2001 执行。计量系统组成包括一次装置、二次仪表和计算计量设备等。运用流量计算机系统进行流量计算和设计计算的框图参见附录 G。流量计算机系统基本技术要求参见附录 H。

表 7 系数参数最少有效数字位数取值表

序 号	参 数	有 效 位 数
1	孔板开孔直径 d	4($d \geq 100$ mm 取 5)
2	孔径比 β	4
3	流动温度 t	按 8.5.1.1 规定
4	天然气真实相对密度	4 或按 8.5.1.1 规定
5	差压 Δp	按 8.5.1.1 规定
6	静压 P_1	按 8.5.1.1 规定
7	流出系数 C	4
8	渐近速度系数 E	5
9	孔板材料线膨胀系数 Δ_d	4
10	相对密度系数 F_G	5
11	可膨胀性系数 ϵ	4
12	超压缩系数 F_Z	5
13	流动温度系数 F_T	4($t_1 \leq 20^\circ\text{C}$ 时取 5)
14	$\sqrt{P_1}$	4
15	$\sqrt{\Delta p}$	4

9 天然气流量测量的不确定度估算

9.1 不确定度定义

9.1.1 本标准不确定度定义为这样一个数值范围,即测量值预计落在这一范围内的置信度为 95%。

9.1.2 当认可符合本标准时,应该以不确定度的名义估算和给出流量测量的不确定度。

9.1.3 流量测量不确定度可用绝对值或相对值表示。流量测量结果可用下列任一形式表示:

- a) 流量等于 $q_m \pm \delta q_m$ 或 $q_{Vn} \pm \delta q_{Vn}$;
- b) 流量等于 $q_m (1 \pm e)$ 或 $q_{Vn} (1 \pm e)$;
- c) 流量等于 q_m 或 q_{Vn} , 不确定度在 $e \times 100\%$ 之内。

其中,不确定度 δq_m 和流量 q_m 或不确定度 δq_{Vn} 和流量 q_{Vn} 具有相同的单位,而相对不确定度 e (等于 $\delta q_m/q_m$ 或 $\delta q_{Vn}/q_{Vn}$) 的量纲为 1。

9.1.4 为方便起见,要区分由使用者进行测量的不确定度与本标准所规定的各个量的不确定度之间的差别。后者的不确定度是关于流出系数和可膨胀性系数的不确定度,以及由于使用者无法控制它们的大小而不得不取允许变化的最大值。这些不确定度的产生是由于允许几何尺寸的微小变化和由于研究这些数值时不可能在“理想”条件下进行而造成的。

9.2 不确定度的实际估算

9.2.1 不确定度的相关性

从式(14)知:公式右边的各个量并不是彼此无关的,因此直接从这些量的不确定度来估算 q_m 的不确定度是不正确的。

例如: C 是 d 、 D 、 Re_D 、 μ_1 的函数; ϵ 是 d 、 D 、 Δp 、 P_1 、 κ 的函数。

9.2.1.1 对大多数实际场合作下述假定是可以满足的,仍假设 C 、 ϵ 、 d 、 Δp 和 ρ_1 的不确定度是彼此无关的。

9.2.1.2 按 9.2.1.1 假设可以推导出 δq_m 的实用估算公式。该公式考虑了 C 、 d 和 C 对 β 值的依赖关系的结果而引入估算中的 D 这三者的相互关系。应该注意到,流出系数 C 也与测量管内径 D 及雷诺数 Re_D 有关。但是,由于这些影响造成流出系数 C 的偏差是二阶微小量,而且已包括在流出系数 C 的不确定度之中。

同样,由于直径比 β 、静压比 P_2/P_1 和等熵指数 κ 的不确定度造成可膨胀性系数 ϵ 的偏差也属二阶小量,并包括在可膨胀性系数 ϵ 的不确定度之中。

9.2.1.3 因此包括在 δq_m 的实用估算公式中的不确定度应是 C 、 ϵ 、 d 、 D 、 Δp 和 ρ_1 这些量的不确定度。

9.2.2 天然气质量流量不确定度估算公式

天然气质量流量测量不确定度按式(32)估算:

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \left[\left(\frac{\delta C}{C} \right)^2 + \left(\frac{\delta \epsilon}{\epsilon} \right)^2 + \left(\frac{2\beta^5}{1-\beta^4} \right)^2 \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 \left(\frac{\delta d}{d} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \rho_1}{\rho_1} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} \right)^2 \right]^{0.5}$$

.....(32)

式中:

- $\delta C/C$ ——流出系数不确定度,其值为:
 - 当 β 大于或等于 0.1 至小于 0.2 时为 $(0.7-\beta)\%$;
 - 当 β 大于或等于 0.2 至小于 0.6 时为 0.5% ;
 - 当 β 大于 0.6 至小于或等于 0.75 时为 $(1.667\beta-0.5)\%$;
 - 当 D 小于 71.12,应附加 $0.9(0.75-\beta)(2.8-D/25.4)\%$ 的不确定度(D 的单位为 mm);
 - 当 β 大于 0.5 且 Re_D 小于 10 000 时,应附加 0.5% 的不确定度。

$\delta \epsilon/\epsilon$ ——可膨胀性系数不确定度,其值为 $3.5(\Delta p/\kappa P_1)\%$ (Δp 、 P_1 应为相同单位)。

$\delta D/D$ ——测量管内径的不确定度,其值为 0.4% 。

$\delta d/d$ ——孔板开孔直径的不确定度,其值为 0.07% 。

$\delta \Delta p/\Delta p$ ——差压测量的不确定度,按 9.2.2.1 确定。

$\delta \rho_1/\rho_1$ ——天然气密度测量的不确定度,按 9.2.2.2 确定。

9.2.2.1 差压测量的不确定度

差压仪表产品应提供性能指标,用户根据其性能指标和实际要求的准确度进行选择和使用。

对于差压测量的不确定度 $\delta \Delta p/\Delta p$ 应全面考虑环境温度、湿度、静压力、信号引线和反应时间对所选用仪表产生的影响。根据 JJG 640—1994 和 JJG 1059—1999 规定,当置信概率为 95% 时,差压测量的不确定度按式(33)估算:

$$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} = \frac{2}{3} \xi_{\Delta p} \frac{\Delta p_K}{\Delta p_i}$$

.....(33)

式中:

$\xi_{\Delta p}$ ——差压仪表的准确度等级;

Δp_K ——差压仪表上限值;

Δp_i ——预计差压测量值。

对组合测量仪表应按组合测量不确定度求解。

9.2.2.2 天然气密度测量的不确定度

天然气密度可以用天然气密度计安装于计量点上在线实测,也可以根据相应平面处的静压、温度等特性资料进行计算。目前国内普遍采用后一种方法,按式(34)计算:

$$\rho_1 = \frac{M_a Z_n}{R Z_a} \frac{G_r P_1}{Z_1 T_1} \dots\dots\dots(34)$$

式中:

- M_a ——含义同式(17);
- R ——含义同式(17);
- Z_a ——含义同式(17);
- Z_n ——含义同式(17),其值视天然气组分定,按 GB/T 17747.2(或 GB/T 17747.3)或式(A.9)计算;
- P_1 ——含义同式(17),其值按 8.4.2.8 确定;
- T_1 ——含义同式(17),其值按式(29)相应项确定;
- Z_1 ——含义同式(17),其值按 GB/T 17747.2(或 GB/T 17747.3)或 AGA NX-19 计算;
- G_r ——含义同式(17),其值按 A.1.2 确定。

假设($M_a Z_n / R Z_a$)为定值,误差可忽略不计,则天然气密度测量的不确定度 $\delta\rho_1 / \rho_1$ 按式(35)估算:

$$\frac{\delta\rho_1}{\rho_1} = \left[\left(\frac{\delta G_r}{G_r} \right)^2 + \left(\frac{\delta Z_1}{Z_1} \right)^2 + \left(\frac{\delta T_1}{T_1} \right)^2 + \left(\frac{\delta p_1}{p_1} \right)^2 \right]^{0.5} \dots\dots\dots(35)$$

式中:

- $\delta G_r / G_r$ ——天然气相对密度测量的不确定度,取值 0.3%;
- $\delta Z_1 / Z_1$ ——天然气压缩因子测量的不确定度,取值 0.5%(按 AGA NX-19 计算)或 0.1%(按 GB/T 17747 计算);
- $\delta T_1 / T_1$ ——天然气在操作条件下的气流热力学温度测量的不确定度,其值视采用温度仪表指标而定,按 9.2.2.1 方式估算,见式(36):

$$\frac{\delta T_1}{T_1} = \frac{2}{3} \xi_T \frac{T_K}{T_i} \dots\dots\dots(36)$$

式中:

- ξ_T ——温度仪表准确度等级($\xi_T = \xi_{it_K} / T_K$);
- T_K ——温度仪表上限值($T_K = t_K + 273.15$);
- T_i ——预计温度测量值($T_i = t_i + 273.15$)。

对组合测量仪表应按组合测量不确定度求解。

$\delta P_1 / P_1$ ——天然气在操作条件下上游侧取压孔绝对压力测量的不确定度,其值视采用压力仪表指标而定,一般按 9.2.2.1 方式估算。见式(37):

$$\frac{\delta P_1}{P_1} = \frac{2}{3} \xi_P \frac{P_K}{P_i} \dots\dots\dots(37)$$

式中:

- ξ_P ——压力仪表准确度等级($\xi_P = \xi_{ip_K} / P_K$);
- P_K ——压力仪表上限值($P_K = p_K + P_a$);
- P_i ——预计压力测量值($P_i = p_i + P_a$)。

对组合测量仪表应按组合测量不确定度求解。

9.2.3 天然气在标准参比条件下体积流量测量不确定度估算公式

天然气在标准参比条件下体积流量测量不确定度按测量方式不同其估算公式亦不相同,用密度法(直接测量密度)测量流量时,按式(38)估算:

$$\frac{\delta q_{Vn}}{q_{Vn}} = \left[\left(\frac{\delta q_m}{q_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta \rho_n}{\rho_n} \right)^2 \right]^{0.5} \dots\dots\dots (38)$$

用压力、温度补偿测量流量时,按式(39)估算:

$$\begin{aligned} \frac{\delta q_{Vn}}{q_{Vn}} = & \left[\left(\frac{\delta C}{C} \right)^2 + \left(\frac{\delta \epsilon}{\epsilon} \right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 \left(\frac{\delta d}{d} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta G_r}{G_r} \right)^2 \right. \\ & \left. + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta Z_1}{Z_1} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta T_1}{T_1} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta P_1}{P_1} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} \right)^2 \right]^{0.5} \dots\dots\dots (39) \end{aligned}$$

9.2.4 天然气在标准参比条件下能量计量不确定度估算

天然气在标准参比条件下能量计量不确定度应根据发热量测量方式估算。

当以质量发热量方式测量时,其能量计量不确定度按式(40)估算:

$$\frac{\delta q_E}{q_E} = \left[\left(\frac{\delta q_m}{q_m} \right)^2 + \left(\frac{\delta \hat{H}_s}{\hat{H}_s} \right)^2 \right]^{0.5} \dots\dots\dots (40)$$

式中:

$\delta q_m/q_m$ ——天然气质量流量测量的不确定度,按 9.2.2 估算;

$\delta \hat{H}_s/\hat{H}_s$ ——天然气在燃烧标准参比条件下质量发热量测量的不确定度,估算视发热量测量方式而定。

当以在标准参比条件下体积发热量方式测量时,其能量计量不确定度按式(41)估算:

$$\frac{\delta q_E}{q_E} = \left[\left(\frac{\delta q_{Vn}}{q_{Vn}} \right)^2 + \left(\frac{\delta \tilde{H}_s}{\tilde{H}_s} \right)^2 \right]^{0.5} \dots\dots\dots (41)$$

式中:

$\delta q_{Vn}/q_{Vn}$ ——天然气在标准参比条件下体积流量测量的不确定度,按 9.2.3 估算;

$\delta \tilde{H}_s/\tilde{H}_s$ ——天然气在燃烧标准参比条件下体积发热量测量的不确定度,估算视发热量测量方式而定。

附录 A
(规范性附录)

天然气主要物理参数确定和流量计算常用表

A.1 主要物理参数确定

A.1.1 管径雷诺数 Re_D 的确定

A.1.1.1 管径雷诺数计算的基本公式

天然气流过圆管时的管径雷诺数 Re_D 计算的基本公式为式(6)。

A.1.1.2 管径雷诺数与流出系数的关系

流出系数随雷诺数变化而变化。但是,当管径雷诺数增大到某一数值时,这个变化就很小了,流出系数趋于稳定。对于法兰取压此值为 10^6 ,对于角接取压此值为 2×10^5 。

A.1.1.3 管径雷诺数计算的实用公式

由式(6)知,由质量流量计算管径雷诺数的实用公式为式(A.1):

$$Re_D = 1.27 \times 10^8 \frac{q_m}{\mu_1 D} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

q_m ——天然气质量流量,单位为千克每秒(kg/s),按式(20)计算;

因为:

$$q_m = q_{Vns} \rho_n \dots\dots\dots (A.2)$$

将式(A.2)代入式(6),经单位换算,演算得出由在标准参比条件下的体积流量计算管径雷诺数的实用公式为式(A.3):

$$Re_D = 1.53 \times 10^8 \frac{q_{Vns} G_r}{\mu_1 D} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

q_{Vns} ——天然气在标准参比条件下的体积流量,单位为立方米每秒(m^3/s),按式(19)计算;

G_r ——天然气的真实相对密度,按 A.1.2 确定;

μ_1 ——天然气在操作条件下的动力黏度,单位为毫帕秒($mPa \cdot s$);

D ——在操作条件下的测量管内径,单位为毫米(mm),按式(A.4)计算。

天然气黏度是表征天然气介质分子之间作相对运动时产生阻力的性质,也是衡量这种性质的指标。在天然气流量测量中,在常用的操作压力和操作温度范围内黏度变化很小,并且仅用于雷诺数计算,因而对流出系数影响很小,其计算准确度不必像直接代入流量计算实用公式中的参数一样要求。由于天然气中以含甲烷为主,甲烷的黏度基本表征了天然气的黏度,用它来计算雷诺数可以满足准确度要求,因此本标准推荐采用。不同压力 and 不同温度下甲烷的动力黏度值示于表 A.5。一般情况下允许采用 μ_1 等于 $0.011 mPa \cdot s$ 。必要时也可以运用有关资料实算相应操作条件下的动力黏度值。

测量管内径只能在常温条件下检测,即 D_{20} 。操作条件下的测量管内径 D_{20} 按式(A.4)计算:

$$D = D_{20} [1 + \Delta_D (t_1 - t_{20})] \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

D_{20} ——在 $20^\circ C \pm 2^\circ C$ 条件下检测的测量管内径,单位为毫米(mm);

Δ_D ——测量管材料的线膨胀系数,单位为毫米每毫米摄氏度 [$mm/(mm \cdot ^\circ C)$],由表 A.4 查取;

t_1 ——含义同式(25);

t_{20} ——含义同式(25)。

式(A.3)中的体积流量 q_{Vns} 要由式(19)求得,要求出 q_{Vns} 首先应求出流出系数 C ,要求出 C 又应想法求出管径雷诺数 Re_D ,这是一个套循环函数的计算过程,需采用牛顿迭代逼近算法。先假设管径雷诺数 Re_D 为无穷大(手工计算)或 10^6 (计算机计算),计算出初始流出系数 C' ,按式(19)求出初始流量 q'_{Vns} 用以代替实求流量 q_{Vns} ,因此:

$$q'_{Vns} = 3.179\,5 \times 10^{-6} C' E d^2 F_G \epsilon F_Z F_T \sqrt{P_1 \Delta p} \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

用初始流量 q'_{Vns} 可以求出天然气实际操作条件下的管径雷诺数 Re'_D 近似值,因此 Re'_D 计算的实用公式为式(A.6):

$$Re'_D = 1.53 \times 10^6 \frac{q'_{Vns} G_r}{\rho_1 D} \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

再采用管径雷诺数近似值计算流出系数 C ,进而计算出逼近流量值用以作为实测流量值。

质量流量求解的逼近迭代计算过程与在标准参比条件下的体积流量的逼近迭代计算过程相同,仅使用公式不同。

A.1.2 天然气真实相对密度 G_r 的确定

天然气真实相对密度定义为在相同参比条件下天然气密度与干空气密度之比。 G_r 为在标准参比条件下的真实相对密度,其值按式(A.7)计算:

$$G_r = \frac{Z_n}{Z_a} G_i \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

式中:

G_i ——天然气的理想相对密度,其值按式(A.8)计算;

Z_a ——干空气在标准参比条件下的压缩因子,其值见式(17);

Z_n ——天然气在标准参比条件下的压缩因子,其值按 GB/T 17747(所有部分)或式(A.9)计算。

$$G_i = \frac{M}{M_a} \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

式中:

M_a ——干空气的摩尔质量,其值见式(17);

M ——天然气的摩尔质量,其值按式(A.17)计算。

$$Z_n = 1 - \left(\sum_{j=1}^n X_j \sqrt{b_j} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

式中:

$\sqrt{b_j}$ ——天然气 j 成分的求和因子,由表 A.3 查取;

X_j ——天然气 j 组分的摩尔分数,由气分析给出;

n ——天然气组分总数,由气分析给出。

也可以用气体相对密度计直接实测得到或用气体密度计实测在标准参比条件下的天然气密度 ρ_n ,通过 $G_r = \rho_n / 1.204\,449$ 计算得到。

A.1.3 天然气等熵指数 κ 的确定

在天然气流量的孔板计量中,天然气以含甲烷为主,甲烷的比热容基本表征了天然气的比热容,用甲烷的比热容比来代替天然气的等熵指数可以满足准确度要求。因此本标准推荐采用式(A.10)计算在操作条件下天然气的等熵指数 κ 值。

$$\kappa = c_p / c_v \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

式中:

c_p ——甲烷的定压比热容,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)];

c_v ——甲烷的定容比热容,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]。

表 A.6 列出了不同压力 and 不同温度下甲烷的比热容值,根据在节流装置处天然气的操作条件查出相应条件的甲烷比热容值,使用式(A.10)即可算出甲烷在该条件下的比热容比,用以作为天然气在该操作条件下的等熵指数。允许采用 $\kappa=1.30$,必要时也可以运用有关资料实算天然气在操作条件下的等熵指数。

A.1.4 天然气超压缩系数 F_z 的确定

本标准推荐按 GB/T 17747(所有部分)计算天然气的超压缩系数 F_z ,非贸易计量系统和贸易计量系统属于 GB/T 18603—2001 表 A.1 准确度为 C 级要求时,允许按 AGA NX-19 计算。

A.1.4.1 当天然气计量系统符合 GB/T 18603—2001 表 A.1 准确度为 A、B 级要求时,应按 GB/T 17747(所有部分)计算 F_z 值。

GB/T 17747(所有部分)提供了以摩尔组成数据(见 GB/T 17747.2)和物性值数据(见 GB/T 17747.3)为基础进行计算的两个方程。式(A.11)是用于摩尔组成数据的方程,属于外延式二维维里方程;式(A.12)是用于物性值数据的方程,属于三维维里方程。首先计算天然气在不同状态下(不同操作条件和参比条件)的压缩因子,再按式(28)计算 F_z 值。编程用数学模型参见 GB/T 17747。

$$Z = 1 + \frac{\rho_r B}{K^3} - \rho_r \sum_{n=13}^{18} C_n^* + \sum_{n=13}^{58} C_n^* (b_n - c_n k_n \rho_r^{k_n}) \rho_r^{b_n} e^{-c_n \rho_r^{k_n}} \dots\dots\dots (A.11)$$

$$Z = 1 + B_{\text{mix}} \rho_m + C_{\text{mix}} \rho_m^2 \dots\dots\dots (A.12)$$

式中:
 Z ——压缩因子;
 ρ_r ——对比密度;
 ρ_m ——摩尔密度,单位为千摩每立方米(kmol/m³);
 K ——混合物体积参数;

B, B_{mix} ——二维维里系数;
 C_n^* ——与温度和组成数据有关的系数;
 C_{mix} ——三维维里系数;

b_n, c_n, k_n ——标准给定的常数。

A.1.4.2 当天然气计量系统为非贸易计量系统和属于符合 GB/T 18603—2001 表 A.1 准确度为 C 级要求时,可按 AGA NX-19 计算 F_z 值。

AGA NX-19 适用于以甲烷为主加上乙烷和少量重烃的天然气介质,其超压缩系数 F_z 按式(A.13)进行计算:

$$F_z = \frac{\sqrt{\frac{B}{D} - D + \frac{n}{3H}}}{1 + \frac{0.001\,32}{\tau^{3.25}}} \dots\dots\dots (A.13)$$

式中:
 $B = \frac{3 - mn^2}{9mH^2};$
 $m = 0.033\,037\,8\tau^{-2} - 0.022\,132\,3\tau^{-3} + 0.016\,135\,3\tau^{-5};$
 $n = \frac{-0.133\,185\tau^{-1} + 0.265\,827\tau^{-2} + 0.045\,769\,7\tau^{-4}}{m};$
 $H = \frac{p_i + 14.7}{1\,000};$

$$\tau = \frac{t_j + 460}{500};$$

$$p_j = 145.04 p_1 F_p;$$

$$t_j = (1.8 t_1 + 492) F_t - 460;$$

$$D = (b + \sqrt{b^2 + B^3})^{1/3};$$

$$b = \frac{9n - 2mn^3}{54mH^3} - \frac{E}{2mH^2}。$$

当 $1.4 > \tau \geq 1.09$ 且 $P_1(\text{绝}) \leq 13.79 \text{ MPa}$ 时:

$$E = 1 - 0.000\,75 H^{2.3} e^{-20(\tau - 1.09)} - 0.001\,1(\tau - 1.09)^{0.5} H^2 [2.17 + 1.4(\tau - 1.09)^{0.5} - H]^2;$$

当 $0.88 \leq \tau < 1.09$ 且 $13.79 \text{ MPa} \geq P_1(\text{绝}) > 8.963 \text{ MPa}$ 时:

$$E = 1 - 0.000\,75 H^{2.3} (2 - e^{-20(1.09 - \tau)}) + 0.455 [200(1.09 - \tau)^6 - 0.032\,49(1.09 - \tau) + 2.016\,7(1.09 - \tau)^2 - 18.028(1.09 - \tau)^3 + 42.844(1.09 - \tau)^4] (H - 1.3)(4.019\,52 - H^2);$$

当 $0.84 \leq \tau < 1.09$ 且 $P_1(\text{绝}) \leq 8.963 \text{ MPa}$:

$$E = 1 - 0.000\,75 H^{2.3} (2 - e^{-20(1.09 - \tau)}) - 1.317(1.09 - \tau)^4 H(1.69 - H^2)。$$

$$F_p = \frac{156.47}{160.8 - 7.22 G_r + K_p}$$

$$F_t = \frac{226.29}{99.15 + 211.9 G_r - K_t}$$

$$K_p = (X_c - 0.392 X_n) \times 100$$

$$K_t = (X_c + 1.681 X_n) \times 100$$

式中:

p_1 ——孔板上游侧取压口实测表压值,单位为兆帕(MPa);

t_1 ——含义同式(25);

G_r ——天然气真实相对密度(应小于 0.75),按 A.1.2 确定;

X_c ——天然气中二氧化碳的摩尔分数(应小于 0.15),由气分析给出;

X_n ——天然气中氮气的摩尔分数(应小于 0.15),由气分析给出。

当天然气真实相对密度 G_r 和组分超出此规定,或组分变化较大,或进行精确计算时应按 GB/T 17747 进行计算。

A.1.5 天然气发热量测量

根据 GB/T 18603—2001 第 6 章规定,天然气发热量可采用直接或间接测量方法获得,当采用直接测量不经济时,可以用计算方法获得。本标准推荐按天然气的摩尔组分遵照 GB/T 11062—1998 计算发热量。

A.1.5.1 天然气在标准参比条件下体积发热量计算

首先按式(A.14) 计算天然气摩尔发热量 \overline{H}_s (或 \overline{H}_s^0)。对于摩尔发热量真实的与理想的在数值上是相等的,即 $\overline{H}_s = \overline{H}_s^0$ 。

$$\overline{H}_s(\text{或 } \overline{H}_s^0) = \sum_{j=1}^n X_j \overline{H}_{sj}^0 \dots\dots\dots (A.14)$$

式中:

\overline{H}_{sj}^0 ——天然气 j 组分(理想)摩尔发热量,单位为兆焦每千摩(MJ/kmol),由表 A.3 查取。

其他参数含义同式(A.9)。

再按式(A.15) 计算天然气在标准参比条件下理想体积发热量 \tilde{H}_s^0 :

$$\tilde{H}_s^0 = \overline{H}_s \times \frac{P_n}{RT_n} \dots\dots\dots (A.15)$$

式中：
 \overline{H}_s ——按式(A.14) 计算，单位为兆焦每千摩(MJ/kmol)；
 P_n 、 T_n ——含义同式(18)，标准参比条件参数，见 4.3；
 R ——含义同式(17)。

最后按式(A.16)计算天然气在标准参比条件下真实体积发热量 \tilde{H}_s ：

$$\tilde{H}_s = \tilde{H}_s^0 / Z_n \dots\dots\dots (A.16)$$

式中：
 \tilde{H}_s^0 ——按式(A.15)计算；
 Z_n ——按 GB/T 17747 或式(A.9)计算。

A.1.5.2 天然气质量发热量计算

首先按式(A.17) 计算天然气的摩尔质量 M ：

$$M = \sum_{j=1}^n X_j M_j \dots\dots\dots (A.17)$$

式中：
 M_j ——天然气 j 组分的摩尔质量，由表 A.3 查取。
其他参数含义同式(A.9)。

再按式(A.18) 计算天然气质量发热量 \hat{H}_s (或 \hat{H}_s^0)。对于质量发热量，真实的与理想的在数值上是相等的，即 $\hat{H}_s = \hat{H}_s^0$ 。

$$\hat{H}_s \text{ (或 } \hat{H}_s^0 \text{)} = \overline{H}_s \text{ (或 } \overline{H}_s^0 \text{)} / M \dots\dots\dots (A.18)$$

式中：
 \overline{H}_s ——天然气摩尔发热量，按式(A.14) 计算，单位为兆焦每千摩(MJ/kmol)；
 M ——天然气摩尔质量，按式(A.17) 计算，单位为千克每千摩(kg/kmol)。

A.2 天然气流量计算常用表

A.2.1 流出系数 C 值表(表 A.1)

该表是按 8.4.2.1 的计算公式和计算步骤运用电子计算机编程计算制表得出的数据表格。由于步长数据间隔取得较大,表内数据不供精确内插,更不得外推,只供检验计算程序用。

表 A.1 流出系数 C 值表
D=50 mm(法兰取压)

Re_D	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8	∞
β	C											
0.25	0.610 2	0.606 9	0.604 8	0.604 0	0.603 2	0.602 9	0.602 5	0.601 9	0.601 6	0.601 4	0.601 3	0.601 2
0.26	0.610 6	0.607 1	0.605 0	0.604 1	0.603 3	0.602 9	0.602 6	0.602 0	0.601 6	0.601 4	0.601 3	0.601 2
0.28	0.611 4	0.607 6	0.605 3	0.604 4	0.603 5	0.603 1	0.602 8	0.602 1	0.601 7	0.601 4	0.601 3	0.601 2
0.30	0.612 3	0.608 2	0.605 7	0.604 8	0.603 8	0.603 4	0.603 0	0.602 2	0.601 8	0.601 5	0.601 4	0.601 3
0.32	0.613 2	0.608 9	0.606 2	0.605 2	0.604 2	0.603 7	0.603 2	0.602 4	0.601 9	0.601 6	0.601 4	0.601 3
0.34	0.614 3	0.609 7	0.606 8	0.605 6	0.604 5	0.604 0	0.603 5	0.602 6	0.602 1	0.601 7	0.601 6	0.601 4
0.36	0.615 5	0.610 5	0.607 4	0.606 2	0.605 0	0.604 4	0.603 9	0.602 9	0.602 3	0.601 9	0.601 7	0.601 6
0.38	0.616 9	0.611 5	0.608 1	0.606 8	0.605 5	0.604 9	0.604 3	0.603 2	0.602 6	0.602 1	0.601 9	0.601 7
0.40	0.618 4	0.612 5	0.608 9	0.607 5	0.606 1	0.605 4	0.604 8	0.603 6	0.602 9	0.602 3	0.602 1	0.601 9
0.42	0.620 0	0.613 7	0.609 8	0.608 2	0.606 8	0.606 0	0.605 4	0.604 1	0.603 3	0.602 6	0.602 3	0.602 1
0.44	0.621 9	0.615 0	0.610 8	0.609 1	0.607 5	0.606 7	0.606 0	0.604 5	0.603 7	0.602 9	0.602 6	0.602 3
0.46	0.623 9	0.616 4	0.611 9	0.610 0	0.608 3	0.607 4	0.606 7	0.605 1	0.604 1	0.603 3	0.602 9	0.602 6
0.48	0.626 0	0.618 0	0.613 0	0.611 0	0.609 2	0.608 2	0.607 4	0.605 7	0.604 6	0.603 6	0.603 2	0.602 8
0.50	0.628 4	0.619 6	0.614 3	0.612 4	0.610 1	0.609 1	0.608 2	0.606 3	0.605 1	0.604 0	0.603 6	0.603 1
0.51	0.629 7	0.620 5	0.614 9	0.612 7	0.610 6	0.609 5	0.608 6	0.606 6	0.605 4	0.604 2	0.603 7	0.603 3
0.52	0.631 0	0.621 4	0.615 6	0.613 3	0.611 1	0.610 0	0.609 0	0.606 9	0.605 6	0.604 4	0.603 9	0.603 4
0.53	0.632 4	0.622 4	0.616 3	0.613 9	0.611 6	0.610 5	0.609 4	0.607 3	0.605 9	0.604 6	0.604 1	0.603 5
0.54	0.633 8	0.623 4	0.617 1	0.614 5	0.612 2	0.610 9	0.609 9	0.607 6	0.606 2	0.604 8	0.604 2	0.603 7
0.55	0.635 2	0.624 4	0.617 8	0.615 2	0.612 7	0.611 4	0.610 3	0.608 0	0.606 5	0.605 0	0.604 4	0.603 8
0.56	0.636 7	0.625 4	0.618 6	0.615 9	0.613 3	0.611 9	0.610 8	0.608 3	0.606 7	0.605 2	0.604 5	0.603 9
0.57	0.638 3	0.626 5	0.619 4	0.616 5	0.613 8	0.612 4	0.611 2	0.608 7	0.607 0	0.605 4	0.604 7	0.604 0
0.58	0.639 9	0.627 6	0.620 2	0.617 2	0.614 4	0.613 0	0.611 7	0.609 0	0.607 3	0.605 6	0.604 8	0.604 1
0.59	0.641 6	0.628 7	0.621 0	0.617 9	0.615 0	0.613 5	0.612 2	0.609 3	0.607 5	0.605 8	0.605 0	0.604 2
0.60	0.643 3	0.629 9	0.621 8	0.618 6	0.615 5	0.614 0	0.612 6	0.609 7	0.607 8	0.605 9	0.605 1	0.604 3
0.61	0.645 0	0.631 0	0.622 7	0.619 3	0.616 1	0.614 5	0.613 1	0.610 0	0.608 0	0.606 0	0.605 1	0.604 3
0.62	0.646 8	0.632 2	0.623 5	0.620 0	0.616 7	0.615 0	0.613 5	0.610 3	0.608 2	0.606 2	0.605 2	0.604 3
0.63	0.648 6	0.633 4	0.624 3	0.620 7	0.617 3	0.615 5	0.613 9	0.610 6	0.608 4	0.606 3	0.605 3	0.604 3
0.64	0.650 5	0.634 7	0.625 2	0.621 4	0.617 8	0.616 0	0.614 4	0.610 9	0.608 6	0.606 3	0.605 3	0.604 3
0.65	0.652 4	0.635 9	0.626 0	0.622 1	0.618 4	0.616 4	0.614 8	0.611 1	0.608 8	0.606 4	0.605 3	0.604 2
0.66	0.654 4	0.637 1	0.626 9	0.622 8	0.618 9	0.616 9	0.615 2	0.611 4	0.608 9	0.606 4	0.605 2	0.604 1
0.67	0.656 4	0.638 4	0.627 7	0.623 4	0.619 4	0.617 3	0.615 5	0.611 6	0.609 0	0.606 3	0.605 1	0.603 9
0.68	0.658 4	0.639 6	0.628 5	0.624 1	0.619 9	0.617 7	0.615 8	0.611 7	0.609 0	0.606 2	0.605 0	0.603 7
0.69	0.660 4	0.640 9	0.629 3	0.624 7	0.620 4	0.618 1	0.616 1	0.611 9	0.609 0	0.606 1	0.604 8	0.603 5
0.70	0.662 5	0.642 1	0.630 1	0.625 3	0.620 8	0.618 5	0.616 4	0.612 0	0.609 0	0.606 0	0.604 5	0.603 2
0.71	0.664 6	0.643 4	0.630 9	0.625 9	0.621 2	0.618 8	0.616 6	0.612 0	0.608 9	0.605 7	0.604 3	0.602 8
0.72	0.666 7	0.644 6	0.631 6	0.626 5	0.621 6	0.619 0	0.616 8	0.612 0	0.608 8	0.605 5	0.603 9	0.602 4
0.73	0.668 9	0.645 9	0.632 3	0.627 0	0.621 9	0.619 3	0.617 0	0.612 0	0.608 6	0.605 1	0.603 5	0.601 9
0.74	0.671 0	0.647 1	0.633 0	0.627 5	0.622 2	0.619 5	0.617 1	0.611 9	0.608 4	0.604 7	0.603 0	0.601 4
0.75	0.673 2	0.648 3	0.633 7	0.627 9	0.622 4	0.619 6	0.617 1	0.611 7	0.608 1	0.604 3	0.602 5	0.600 8

表 A. 1 (续)
D=75 mm(法兰取压)

Re_D	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8	∞
β	C											
0.17	0.602 7	0.600 3	0.598 8	0.598 2	0.597 7	0.597 4	0.597 2	0.596 7	0.596 5	0.596 4	0.596 4	0.596 3
0.18	0.603 1	0.600 5	0.599 0	0.598 4	0.597 8	0.597 5	0.597 3	0.596 8	0.596 6	0.596 4	0.596 4	0.596 4
0.20	0.603 8	0.601 1	0.599 4	0.598 7	0.598 1	0.597 7	0.597 5	0.597 0	0.596 7	0.596 6	0.596 5	0.596 5
0.22	0.604 6	0.601 6	0.599 8	0.599 0	0.598 4	0.598 0	0.597 7	0.597 2	0.596 9	0.596 7	0.596 7	0.596 6
0.24	0.605 4	0.602 2	0.600 2	0.599 4	0.598 7	0.598 3	0.598 0	0.597 4	0.597 1	0.596 9	0.596 9	0.596 8
0.26	0.606 4	0.602 9	0.600 7	0.599 9	0.599 1	0.598 7	0.598 4	0.597 7	0.597 4	0.597 1	0.597 0	0.597 0
0.28	0.607 4	0.603 6	0.601 3	0.600 4	0.599 5	0.599 1	0.598 7	0.598 0	0.597 6	0.597 4	0.597 3	0.597 2
0.30	0.608 4	0.604 4	0.601 9	0.600 9	0.600 0	0.599 5	0.599 1	0.598 4	0.597 9	0.597 6	0.597 5	0.597 4
0.32	0.609 6	0.605 3	0.602 6	0.601 5	0.600 5	0.600 0	0.599 6	0.598 8	0.598 3	0.597 9	0.597 8	0.597 7
0.34	0.610 9	0.606 2	0.603 3	0.602 2	0.601 1	0.600 6	0.600 1	0.599 2	0.598 7	0.598 3	0.598 1	0.598 0
0.36	0.612 3	0.607 3	0.604 2	0.602 9	0.601 7	0.601 2	0.600 7	0.599 7	0.599 1	0.598 6	0.598 4	0.598 3
0.38	0.613 9	0.608 4	0.605 1	0.603 7	0.602 5	0.601 8	0.601 3	0.600 2	0.599 5	0.599 0	0.598 8	0.598 6
0.40	0.615 5	0.609 7	0.606 0	0.604 6	0.603 2	0.602 5	0.602 0	0.600 8	0.600 0	0.599 4	0.599 2	0.599 0
0.42	0.617 4	0.611 0	0.607 1	0.605 5	0.604 1	0.603 3	0.602 7	0.601 4	0.600 6	0.599 9	0.599 6	0.599 4
0.44	0.619 4	0.612 5	0.608 3	0.606 6	0.605 0	0.604 2	0.603 5	0.602 0	0.601 2	0.600 4	0.600 1	0.599 8
0.46	0.621 6	0.614 1	0.609 5	0.607 7	0.605 9	0.605 1	0.604 3	0.602 7	0.601 8	0.600 9	0.600 5	0.600 2
0.48	0.623 9	0.615 8	0.610 8	0.608 9	0.607 0	0.606 0	0.605 2	0.603 5	0.602 4	0.601 4	0.601 0	0.600 6
0.50	0.626 4	0.617 6	0.612 3	0.610 1	0.608 1	0.607 0	0.606 1	0.604 2	0.603 1	0.602 0	0.601 5	0.601 1
0.51	0.627 8	0.618 6	0.613 0	0.610 7	0.608 6	0.607 5	0.606 6	0.604 6	0.603 4	0.602 2	0.601 7	0.601 3
0.52	0.629 2	0.619 6	0.613 8	0.611 4	0.609 2	0.608 1	0.607 1	0.605 0	0.603 7	0.602 5	0.602 0	0.601 5
0.53	0.630 6	0.620 6	0.614 5	0.612 1	0.609 8	0.608 6	0.607 6	0.605 4	0.604 1	0.602 8	0.602 2	0.601 7
0.54	0.632 1	0.621 6	0.615 3	0.612 8	0.610 4	0.609 2	0.608 1	0.605 8	0.604 4	0.603 0	0.602 4	0.601 9
0.55	0.633 6	0.622 7	0.616 1	0.613 5	0.611 0	0.609 7	0.608 6	0.606 2	0.604 7	0.603 3	0.602 7	0.602 1
0.56	0.635 2	0.623 8	0.617 0	0.614 2	0.611 6	0.610 3	0.609 1	0.606 6	0.605 1	0.603 5	0.602 9	0.602 2
0.57	0.636 8	0.624 9	0.617 8	0.614 9	0.612 2	0.610 8	0.609 6	0.607 0	0.605 4	0.603 8	0.603 1	0.602 4
0.58	0.638 5	0.626 1	0.618 6	0.615 6	0.612 8	0.611 4	0.610 1	0.607 4	0.605 7	0.604 0	0.603 2	0.602 5
0.59	0.640 2	0.627 3	0.619 5	0.616 4	0.613 4	0.611 9	0.610 6	0.607 8	0.606 0	0.604 2	0.603 4	0.602 6
0.60	0.641 9	0.628 4	0.620 3	0.617 1	0.614 0	0.612 5	0.611 1	0.608 2	0.606 3	0.604 4	0.603 5	0.602 7
0.61	0.643 7	0.629 6	0.621 2	0.617 8	0.614 6	0.613 0	0.611 6	0.608 5	0.606 5	0.604 5	0.603 6	0.602 8
0.62	0.645 5	0.630 9	0.622 1	0.618 6	0.615 2	0.613 5	0.612 0	0.608 8	0.606 7	0.604 7	0.603 7	0.602 8
0.63	—	0.632 1	0.622 9	0.619 3	0.615 8	0.614 0	0.612 5	0.609 1	0.606 9	0.604 8	0.603 8	0.602 8
0.64	—	0.633 3	0.623 8	0.620 0	0.616 4	0.614 5	0.612 9	0.609 4	0.607 1	0.604 8	0.603 8	0.602 8
0.65	—	0.634 6	0.624 6	0.620 7	0.616 9	0.615 0	0.613 3	0.609 7	0.607 3	0.604 9	0.603 8	0.602 7
0.66	—	0.635 8	0.625 5	0.621 3	0.617 4	0.615 4	0.613 7	0.609 9	0.607 4	0.604 8	0.603 7	0.602 6
0.67	—	0.637 0	0.626 3	0.622 0	0.617 9	0.615 8	0.614 0	0.610 0	0.607 4	0.604 8	0.603 6	0.602 4
0.68	—	0.638 2	0.627 0	0.622 6	0.618 4	0.616 2	0.614 3	0.610 2	0.607 4	0.604 6	0.603 4	0.602 1
0.69	—	0.639 5	0.627 8	0.623 2	0.618 8	0.616 5	0.614 5	0.610 2	0.607 4	0.604 5	0.603 1	0.601 8
0.70	—	0.640 7	0.628 5	0.623 7	0.619 1	0.616 8	0.614 7	0.610 2	0.607 3	0.604 2	0.602 8	0.601 4
0.71	—	0.641 8	0.629 2	0.624 2	0.619 4	0.617 0	0.614 8	0.610 2	0.607 1	0.603 9	0.602 4	0.601 0
0.72	—	0.643 0	0.629 8	0.624 6	0.619 7	0.617 1	0.614 9	0.610 1	0.606 8	0.603 5	0.601 9	0.600 4
0.73	—	0.644 1	0.630 4	0.625 0	0.619 9	0.617 2	0.614 9	0.609 9	0.606 5	0.603 0	0.601 4	0.599 8
0.74	—	0.645 1	0.631 0	0.625 3	0.620 0	0.617 3	0.614 9	0.609 6	0.606 1	0.602 5	0.600 8	0.599 1
0.75	—	0.646 2	0.631 4	0.625 6	0.620 1	0.617 2	0.614 7	0.609 3	0.605 6	0.601 8	0.600 0	0.598 3

表 A.1 (续)
D=100 mm(法兰取压)

Re_D	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8	∞
β	C											
0.13	0.601 4	0.599 4	0.598 2	0.597 7	0.597 3	0.597 1	0.596 9	0.596 6	0.596 4	0.596 3	0.596 2	0.596 2
0.14	0.601 8	0.599 7	0.598 4	0.597 9	0.597 4	0.597 2	0.597 0	0.596 6	0.596 4	0.596 3	0.596 3	0.596 3
0.16	0.602 5	0.600 1	0.598 7	0.598 1	0.597 6	0.597 4	0.597 2	0.596 8	0.596 5	0.596 4	0.596 4	0.596 4
0.18	0.603 2	0.600 6	0.599 1	0.598 5	0.597 9	0.597 6	0.597 4	0.596 9	0.596 7	0.596 5	0.596 5	0.596 5
0.20	0.603 9	0.601 2	0.599 5	0.598 8	0.598 2	0.597 9	0.597 6	0.597 1	0.596 9	0.596 7	0.596 6	0.596 6
0.22	0.604 7	0.601 7	0.599 9	0.599 2	0.598 5	0.598 1	0.597 9	0.597 3	0.597 0	0.596 9	0.596 8	0.596 8
0.24	0.605 6	0.602 4	0.600 4	0.599 6	0.598 8	0.598 5	0.598 2	0.597 6	0.597 3	0.597 0	0.597 0	0.596 9
0.26	0.606 5	0.603 0	0.600 9	0.600 0	0.599 2	0.598 8	0.598 5	0.597 9	0.597 5	0.597 3	0.597 2	0.597 1
0.28	0.607 5	0.603 8	0.601 5	0.600 5	0.599 7	0.599 2	0.598 9	0.598 2	0.597 8	0.597 5	0.597 4	0.597 4
0.30	0.608 6	0.604 6	0.602 1	0.601 1	0.600 2	0.599 7	0.599 3	0.598 5	0.598 1	0.597 8	0.597 7	0.597 6
0.32	0.609 8	0.605 4	0.602 8	0.601 7	0.600 7	0.600 2	0.599 8	0.598 9	0.598 5	0.598 1	0.598 0	0.597 9
0.34	0.611 1	0.606 4	0.603 5	0.602 4	0.601 3	0.600 7	0.600 3	0.599 4	0.598 8	0.598 4	0.598 3	0.598 2
0.36	0.612 5	0.607 5	0.604 3	0.603 1	0.601 9	0.601 3	0.600 8	0.599 8	0.599 3	0.598 8	0.598 6	0.598 5
0.38	0.614 1	0.608 6	0.605 2	0.603 9	0.602 6	0.602 0	0.601 5	0.600 4	0.599 7	0.599 2	0.599 0	0.598 8
0.40	0.615 7	0.609 9	0.606 2	0.604 8	0.603 4	0.602 7	0.602 1	0.600 9	0.600 2	0.599 6	0.599 4	0.599 2
0.42	0.617 6	0.611 2	0.607 3	0.605 7	0.604 2	0.603 5	0.602 9	0.601 5	0.600 8	0.600 1	0.599 8	0.599 6
0.44	0.619 6	0.612 7	0.608 4	0.606 7	0.605 1	0.604 3	0.603 6	0.602 2	0.601 3	0.600 5	0.600 2	0.600 0
0.46	0.621 7	0.614 2	0.609 7	0.607 8	0.606 1	0.605 2	0.604 4	0.602 9	0.601 9	0.601 0	0.600 7	0.600 3
0.48	0.624 1	0.615 9	0.611 0	0.609 0	0.607 1	0.606 1	0.605 3	0.603 6	0.602 5	0.601 5	0.601 1	0.600 7
0.50	0.626 6	0.617 7	0.612 4	0.610 2	0.608 1	0.607 1	0.606 2	0.604 3	0.603 1	0.602 0	0.601 6	0.601 1
0.51	0.627 9	0.618 7	0.613 1	0.610 8	0.608 7	0.607 6	0.606 7	0.604 7	0.603 4	0.602 3	0.601 8	0.601 3
0.52	0.629 3	0.619 7	0.613 8	0.611 5	0.609 2	0.608 1	0.607 1	0.605 1	0.603 8	0.602 5	0.602 0	0.601 5
0.53	0.630 7	0.620 7	0.614 6	0.612 1	0.609 8	0.608 6	0.607 6	0.605 4	0.604 1	0.602 8	0.602 2	0.601 7
0.54	0.632 2	0.621 7	0.615 3	0.612 8	0.610 4	0.609 1	0.608 1	0.605 8	0.604 4	0.603 0	0.602 4	0.601 8
0.55	—	0.622 7	0.616 1	0.613 5	0.610 9	0.609 7	0.608 5	0.606 2	0.604 7	0.603 2	0.602 6	0.602 0
0.56	—	0.623 8	0.616 9	0.614 1	0.611 5	0.610 2	0.609 0	0.606 5	0.605 0	0.603 4	0.602 8	0.602 1
0.57	—	0.624 9	0.617 7	0.614 8	0.612 1	0.610 7	0.609 5	0.606 9	0.605 2	0.603 6	0.602 9	0.602 2
0.58	—	0.626 0	0.618 5	0.615 5	0.612 7	0.611 2	0.610 0	0.607 2	0.605 5	0.603 8	0.603 1	0.602 3
0.59	—	0.627 1	0.619 3	0.616 2	0.613 2	0.611 7	0.610 4	0.607 6	0.605 8	0.604 0	0.603 2	0.602 4
0.60	—	0.628 3	0.620 1	0.616 9	0.613 8	0.612 2	0.610 8	0.607 9	0.606 0	0.604 1	0.603 3	0.602 5
0.61	—	0.629 4	0.620 9	0.617 6	0.614 3	0.612 7	0.611 3	0.608 2	0.606 2	0.604 2	0.603 3	0.602 5
0.62	—	0.630 6	0.621 8	0.618 2	0.614 9	0.613 2	0.611 7	0.608 5	0.606 4	0.604 3	0.603 3	0.602 4
0.63	—	0.631 8	0.622 6	0.618 9	0.615 4	0.613 6	0.612 0	0.608 7	0.606 5	0.604 3	0.603 3	0.602 4
0.64	—	0.632 9	0.623 3	0.619 5	0.615 9	0.614 0	0.612 4	0.608 9	0.606 6	0.604 3	0.603 3	0.602 3
0.65	—	0.634 1	0.624 1	0.620 1	0.616 3	0.614 4	0.612 7	0.609 1	0.606 7	0.604 2	0.603 1	0.602 1
0.66	—	0.635 3	0.624 9	0.620 7	0.616 8	0.614 8	0.613 0	0.609 2	0.606 7	0.604 1	0.603 0	0.601 9
0.67	—	0.636 4	0.625 6	0.621 2	0.617 2	0.615 1	0.613 2	0.609 2	0.606 6	0.604 0	0.602 8	0.601 6
0.68	—	0.637 5	0.626 3	0.621 8	0.617 5	0.615 3	0.613 4	0.609 3	0.606 5	0.603 7	0.602 5	0.601 2
0.69	—	0.638 7	0.626 9	0.622 2	0.617 8	0.615 5	0.613 5	0.609 2	0.606 3	0.603 4	0.602 1	0.600 8
0.70	—	0.639 7	0.627 5	0.622 6	0.618 0	0.615 7	0.613 6	0.609 1	0.606 1	0.603 1	0.601 6	0.600 3
0.71	—	0.640 8	0.628 0	0.623 0	0.618 2	0.615 7	0.613 6	0.608 9	0.605 8	0.602 6	0.601 1	0.599 7
0.72	—	0.641 8	0.628 5	0.623 3	0.618 3	0.615 7	0.613 5	0.608 6	0.605 4	0.602 0	0.600 5	0.599 0
0.73	—	0.642 8	0.629 0	0.623 5	0.618 3	0.615 7	0.613 3	0.608 3	0.604 9	0.601 4	0.599 8	0.598 2
0.74	—	0.643 7	0.629 3	0.623 6	0.618 3	0.615 5	0.613 1	0.607 8	0.604 3	0.600 6	0.598 9	0.597 3
0.75	—	0.644 5	0.629 6	0.623 7	0.618 1	0.615 3	0.612 7	0.607 2	0.603 6	0.599 8	0.598 0	0.596 2

表 A.1 (续)
D=150 mm(法兰取压)

Re_D	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8	∞
β	C											
0.10	0.600 5	0.598 8	0.597 8	0.597 4	0.597 1	0.596 9	0.596 7	0.596 5	0.596 3	0.596 2	0.596 2	0.596 2
0.12	0.601 2	0.599 3	0.598 1	0.597 7	0.597 3	0.597 1	0.596 9	0.596 6	0.596 4	0.596 3	0.596 3	0.596 3
0.14	0.601 8	0.599 8	0.598 5	0.598 0	0.597 5	0.597 3	0.597 1	0.596 7	0.596 5	0.596 4	0.596 4	0.596 4
0.16	0.602 5	0.600 2	0.598 8	0.598 2	0.597 7	0.597 5	0.597 3	0.596 9	0.596 6	0.596 5	0.596 5	0.596 5
0.18	0.603 3	0.600 7	0.599 2	0.598 6	0.598 0	0.597 7	0.597 5	0.597 0	0.596 8	0.596 7	0.596 6	0.596 6
0.20	0.604 1	0.601 3	0.599 6	0.598 9	0.598 3	0.598 0	0.597 7	0.597 2	0.597 0	0.596 8	0.596 8	0.596 7
0.22	0.604 9	0.601 9	0.600 0	0.599 3	0.598 6	0.598 3	0.598 0	0.597 5	0.597 2	0.597 0	0.596 9	0.596 9
0.24	0.605 7	0.602 5	0.600 5	0.599 7	0.599 0	0.598 6	0.598 3	0.597 7	0.597 4	0.597 2	0.597 1	0.597 1
0.26	0.606 7	0.603 2	0.601 1	0.600 2	0.599 4	0.599 0	0.598 7	0.598 0	0.597 7	0.597 4	0.597 4	0.597 3
0.28	0.607 7	0.603 9	0.601 6	0.600 7	0.599 8	0.599 4	0.599 1	0.598 4	0.598 0	0.597 7	0.597 6	0.597 5
0.30	0.608 8	0.604 8	0.602 3	0.601 3	0.600 3	0.599 9	0.599 5	0.598 7	0.598 3	0.598 0	0.597 9	0.597 8
0.32	0.610 0	0.605 6	0.603 0	0.601 9	0.600 9	0.600 4	0.600 0	0.599 1	0.598 7	0.598 3	0.598 2	0.598 1
0.34	0.611 3	0.606 6	0.603 7	0.602 6	0.601 5	0.600 9	0.600 5	0.599 6	0.599 0	0.598 6	0.598 5	0.598 4
0.36	0.612 7	0.607 7	0.604 5	0.603 3	0.602 1	0.601 5	0.601 0	0.600 0	0.599 5	0.599 0	0.598 8	0.598 7
0.38	0.614 3	0.608 8	0.605 4	0.604 1	0.602 8	0.602 2	0.601 7	0.600 6	0.599 9	0.599 4	0.599 2	0.599 0
0.40	0.616 0	0.610 1	0.606 4	0.605 0	0.603 6	0.602 9	0.602 3	0.601 1	0.600 4	0.599 8	0.599 6	0.599 4
0.42	0.617 8	0.611 4	0.607 5	0.605 9	0.604 4	0.603 7	0.603 0	0.601 7	0.600 9	0.600 2	0.600 0	0.599 7
0.44	0.619 8	0.612 8	0.608 6	0.606 9	0.605 3	0.604 5	0.603 8	0.602 3	0.601 5	0.600 7	0.600 4	0.600 1
0.46	—	0.614 4	0.609 8	0.607 9	0.606 2	0.605 3	0.604 6	0.603 0	0.602 0	0.601 1	0.600 8	0.600 5
0.48	—	0.616 0	0.611 1	0.609 1	0.607 2	0.606 2	0.605 4	0.603 6	0.602 6	0.601 6	0.601 2	0.600 8
0.50	—	0.617 8	0.612 4	0.610 2	0.608 2	0.607 1	0.606 2	0.604 3	0.603 1	0.602 1	0.601 6	0.601 2
0.51	—	0.618 7	0.613 1	0.610 8	0.608 7	0.607 6	0.606 7	0.604 7	0.603 4	0.602 3	0.601 8	0.601 3
0.52	—	0.619 7	0.613 8	0.611 4	0.609 2	0.608 1	0.607 1	0.605 0	0.603 7	0.602 5	0.602 0	0.601 5
0.53	—	0.620 6	0.614 5	0.612 1	0.609 7	0.608 6	0.607 5	0.605 4	0.604 0	0.602 7	0.602 1	0.601 6
0.54	—	0.621 6	0.615 3	0.612 7	0.610 3	0.609 0	0.608 0	0.605 7	0.604 2	0.602 9	0.602 3	0.601 7
0.55	—	0.622 6	0.616 0	0.613 3	0.610 8	0.609 5	0.608 4	0.606 0	0.604 5	0.603 1	0.602 4	0.601 8
0.56	—	0.623 7	0.616 7	0.614 0	0.611 3	0.610 0	0.608 8	0.606 3	0.604 7	0.603 2	0.602 5	0.601 9
0.57	—	0.624 7	0.617 3	0.614 6	0.611 9	0.610 5	0.609 2	0.606 6	0.605 0	0.603 4	0.602 6	0.602 0
0.58	—	0.625 8	0.618 2	0.615 2	0.612 4	0.610 9	0.609 6	0.606 9	0.605 2	0.603 5	0.602 7	0.602 0
0.59	—	0.626 9	0.619 0	0.615 9	0.612 9	0.611 4	0.610 0	0.607 2	0.605 4	0.603 6	0.602 8	0.602 0
0.60	—	0.628 0	0.619 8	0.616 5	0.613 4	0.611 8	0.610 4	0.607 4	0.605 5	0.603 6	0.602 8	0.602 0
0.61	—	0.629 0	0.620 5	0.617 1	0.613 8	0.612 2	0.610 7	0.607 6	0.605 6	0.603 7	0.602 8	0.601 9
0.62	—	0.630 1	0.621 2	0.617 7	0.614 3	0.612 6	0.611 1	0.607 8	0.605 7	0.603 6	0.602 7	0.601 8
0.63	—	—	0.621 9	0.618 2	0.614 7	0.612 9	0.611 4	0.608 0	0.605 8	0.603 6	0.602 6	0.601 6
0.64	—	—	0.622 6	0.618 8	0.615 1	0.613 2	0.611 6	0.608 1	0.605 8	0.603 5	0.602 4	0.601 4
0.65	—	—	0.623 3	0.619 3	0.615 5	0.613 5	0.611 8	0.608 1	0.605 7	0.603 3	0.602 2	0.601 1
0.66	—	—	0.623 9	0.619 7	0.615 8	0.613 8	0.612 0	0.608 1	0.605 6	0.603 1	0.601 9	0.600 8
0.67	—	—	0.624 5	0.620 2	0.616 0	0.613 9	0.612 1	0.608 1	0.605 4	0.602 8	0.601 6	0.600 4
0.68	—	—	0.625 1	0.620 5	0.616 2	0.614 0	0.612 1	0.607 9	0.605 2	0.602 4	0.601 1	0.599 9
0.69	—	—	0.625 6	0.620 9	0.616 4	0.614 1	0.612 1	0.607 7	0.604 9	0.601 9	0.600 6	0.599 3
0.70	—	—	0.626 0	0.621 1	0.616 5	0.614 1	0.612 0	0.607 4	0.604 4	0.601 4	0.600 0	0.598 6
0.71	—	—	0.626 4	0.621 3	0.616 5	0.614 0	0.611 8	0.607 1	0.603 9	0.600 7	0.599 3	0.597 8
0.72	—	—	0.626 7	0.621 4	0.616 4	0.613 8	0.611 5	0.606 6	0.603 3	0.600 0	0.598 4	0.596 9
0.73	—	—	0.626 9	0.621 4	0.616 2	0.613 5	0.611 1	0.606 0	0.602 6	0.599 1	0.597 5	0.595 9
0.74	—	—	0.627 1	0.621 3	0.615 9	0.613 1	0.610 6	0.605 3	0.601 7	0.598 1	0.596 4	0.594 7
0.75	—	—	0.627 1	0.621 1	0.615 4	0.612 5	0.610 0	0.604 4	0.600 7	0.596 9	0.595 1	0.593 4

表 A.1 (续)
D=200 mm(法兰取压)

Re_D	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8	∞
β	C											
0.10	0.600 5	0.598 9	0.597 9	0.597 5	0.597 1	0.596 9	0.596 8	0.596 5	0.596 3	0.596 3	0.596 2	0.596 2
0.12	0.601 2	0.599 3	0.598 2	0.597 7	0.597 3	0.597 1	0.596 9	0.596 6	0.596 4	0.596 3	0.596 3	0.596 3
0.14	0.601 9	0.599 8	0.598 5	0.598 0	0.597 5	0.597 3	0.597 1	0.596 7	0.596 6	0.596 4	0.596 4	0.596 4
0.16	0.602 6	0.600 3	0.598 9	0.598 3	0.597 8	0.597 5	0.597 3	0.596 9	0.596 7	0.596 6	0.596 5	0.596 5
0.18	0.603 3	0.600 8	0.599 3	0.598 6	0.598 1	0.597 8	0.597 5	0.597 1	0.596 9	0.596 7	0.596 7	0.596 7
0.20	0.604 1	0.601 4	0.599 7	0.599 0	0.598 4	0.598 1	0.597 8	0.597 3	0.597 1	0.596 9	0.596 8	0.596 8
0.22	0.605 0	0.602 0	0.600 1	0.599 4	0.598 7	0.598 4	0.598 1	0.597 6	0.597 3	0.597 1	0.597 0	0.597 0
0.24	0.605 8	0.602 6	0.600 6	0.599 8	0.599 1	0.598 7	0.598 4	0.597 8	0.597 5	0.597 3	0.597 2	0.597 2
0.26	0.606 8	0.603 3	0.601 1	0.600 3	0.599 5	0.599 1	0.598 8	0.598 1	0.597 8	0.597 5	0.597 5	0.597 4
0.28	0.607 8	0.604 1	0.601 7	0.600 8	0.600 0	0.599 5	0.599 2	0.598 5	0.598 1	0.597 8	0.597 7	0.597 6
0.30	0.608 9	0.604 9	0.602 4	0.601 4	0.600 5	0.600 0	0.599 6	0.598 8	0.598 4	0.598 1	0.598 0	0.597 9
0.32	0.610 1	0.605 8	0.603 1	0.602 0	0.601 0	0.600 5	0.600 1	0.599 2	0.598 8	0.598 4	0.598 3	0.598 2
0.34	0.611 4	0.606 7	0.603 8	0.602 7	0.601 6	0.601 1	0.600 6	0.599 7	0.599 2	0.598 7	0.598 6	0.598 5
0.36	0.612 8	0.607 8	0.604 7	0.603 4	0.602 2	0.601 7	0.601 2	0.600 2	0.599 6	0.599 1	0.598 9	0.598 8
0.38	0.614 4	0.608 9	0.605 6	0.604 2	0.602 9	0.602 3	0.601 8	0.600 7	0.600 0	0.599 5	0.599 3	0.599 1
0.40	—	0.610 2	0.606 5	0.605 1	0.603 7	0.603 0	0.602 4	0.601 2	0.600 5	0.599 9	0.599 7	0.599 5
0.42	—	0.611 5	0.607 6	0.606 0	0.604 5	0.603 8	0.603 1	0.601 8	0.601 0	0.600 3	0.600 1	0.599 8
0.44	—	0.612 9	0.608 7	0.607 0	0.605 4	0.604 5	0.603 8	0.602 4	0.601 5	0.600 8	0.600 4	0.600 2
0.46	—	0.614 5	0.609 9	0.608 0	0.606 3	0.605 4	0.604 6	0.603 0	0.602 1	0.601 2	0.600 8	0.600 5
0.48	—	0.616 1	0.611 1	0.609 1	0.607 2	0.606 2	0.605 4	0.603 7	0.602 6	0.601 6	0.601 2	0.600 9
0.50	—	0.617 9	0.612 4	0.610 2	0.608 2	0.607 1	0.606 2	0.604 3	0.603 2	0.602 1	0.601 6	0.601 2
0.51	—	0.618 8	0.613 1	0.610 8	0.608 7	0.607 6	0.606 7	0.604 7	0.603 4	0.602 3	0.601 8	0.601 3
0.52	—	0.619 7	0.613 8	0.611 4	0.609 2	0.608 1	0.607 1	0.605 0	0.603 7	0.602 5	0.601 9	0.601 4
0.53	—	0.620 6	0.614 5	0.612 0	0.609 7	0.608 5	0.607 5	0.605 3	0.603 9	0.602 6	0.602 1	0.601 5
0.54	—	0.621 6	0.615 2	0.612 6	0.610 2	0.609 0	0.607 9	0.605 6	0.604 2	0.602 8	0.602 2	0.601 6
0.55	—	—	0.615 9	0.613 2	0.610 7	0.609 4	0.608 3	0.605 9	0.604 4	0.603 0	0.602 3	0.601 7
0.56	—	—	0.616 6	0.613 8	0.611 2	0.609 9	0.608 7	0.606 2	0.604 6	0.603 1	0.602 4	0.601 8
0.57	—	—	0.617 4	0.614 5	0.611 7	0.610 3	0.609 1	0.606 5	0.604 8	0.603 2	0.602 5	0.601 8
0.58	—	—	0.618 1	0.615 1	0.612 2	0.610 7	0.609 4	0.606 7	0.605 0	0.603 3	0.602 5	0.601 8
0.59	—	—	0.618 8	0.615 6	0.612 7	0.611 1	0.609 8	0.607 0	0.605 1	0.603 3	0.602 5	0.601 8
0.60	—	—	0.619 5	0.616 2	0.613 1	0.611 5	0.610 1	0.607 2	0.605 2	0.603 4	0.602 5	0.601 7
0.61	—	—	0.620 2	0.616 8	0.613 5	0.611 9	0.610 4	0.607 3	0.605 3	0.603 3	0.602 4	0.601 6
0.62	—	—	0.620 9	0.617 3	0.613 9	0.612 2	0.610 7	0.607 5	0.605 3	0.603 3	0.602 3	0.601 4
0.63	—	—	0.621 6	0.617 8	0.614 3	0.612 5	0.610 9	0.607 6	0.605 3	0.603 2	0.602 2	0.601 2
0.64	—	—	0.622 2	0.618 3	0.614 7	0.612 8	0.611 1	0.607 6	0.605 3	0.603 0	0.601 9	0.600 9
0.65	—	—	0.622 8	0.618 8	0.615 0	0.613 0	0.611 3	0.607 6	0.605 2	0.602 8	0.601 6	0.600 6
0.66	—	—	0.623 4	0.619 2	0.615 2	0.613 2	0.611 4	0.607 5	0.605 0	0.602 5	0.601 3	0.600 2
0.67	—	—	0.623 9	0.619 5	0.615 4	0.613 3	0.611 4	0.607 4	0.604 7	0.602 1	0.600 9	0.599 7
0.68	—	—	0.624 4	0.619 8	0.615 5	0.613 3	0.611 4	0.607 2	0.604 4	0.601 6	0.600 3	0.599 1
0.69	—	—	0.624 8	0.620 1	0.615 6	0.613 3	0.611 2	0.606 9	0.604 0	0.601 1	0.599 7	0.598 4
0.70	—	—	0.625 2	0.620 2	0.615 5	0.613 1	0.611 0	0.606 5	0.603 5	0.600 4	0.599 0	0.597 6
0.71	—	—	0.625 5	0.620 3	0.615 4	0.612 9	0.610 7	0.606 0	0.602 8	0.599 7	0.598 2	0.596 7
0.72	—	—	0.625 7	0.620 3	0.615 2	0.612 6	0.610 3	0.605 4	0.602 1	0.598 8	0.597 2	0.595 7
0.73	—	—	0.625 8	0.620 2	0.614 9	0.612 2	0.609 8	0.604 7	0.601 2	0.597 7	0.596 1	0.594 5
0.74	—	—	0.625 8	0.619 9	0.614 5	0.611 6	0.609 2	0.603 8	0.600 2	0.596 6	0.594 9	0.593 2
0.75	—	—	0.625 6	0.619 6	0.613 9	0.611 0	0.608 4	0.602 8	0.599 1	0.595 3	0.593 5	0.591 7

表 A.1 (续)
D=250 mm(法兰取压)

Re_D	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8	∞
β	C											
0.10	0.600 5	0.598 9	0.597 9	0.597 5	0.597 1	0.596 9	0.596 8	0.596 5	0.596 4	0.596 3	0.596 3	0.596 3
0.12	0.601 2	0.599 4	0.598 2	0.597 7	0.597 3	0.597 1	0.597 0	0.596 6	0.596 5	0.596 4	0.596 3	0.596 3
0.14	0.601 9	0.599 8	0.598 5	0.598 0	0.597 6	0.597 3	0.597 1	0.596 8	0.596 6	0.596 5	0.596 5	0.596 4
0.16	0.602 6	0.600 3	0.598 9	0.598 3	0.597 8	0.597 6	0.597 4	0.596 9	0.596 7	0.596 6	0.596 6	0.596 6
0.18	0.603 4	0.600 9	0.599 3	0.598 7	0.598 1	0.597 8	0.597 6	0.597 1	0.596 9	0.596 8	0.596 7	0.596 7
0.20	0.604 2	0.601 4	0.599 7	0.599 0	0.598 4	0.598 1	0.597 9	0.597 4	0.597 1	0.596 9	0.596 9	0.596 9
0.22	0.605 0	0.602 0	0.600 2	0.599 4	0.598 8	0.598 4	0.598 1	0.597 6	0.597 3	0.597 1	0.597 1	0.597 1
0.24	0.605 9	0.602 7	0.600 7	0.599 9	0.599 1	0.598 8	0.598 5	0.597 9	0.597 6	0.597 4	0.597 3	0.597 3
0.26	0.606 8	0.603 4	0.601 2	0.600 4	0.599 6	0.599 2	0.598 8	0.598 2	0.597 8	0.597 6	0.597 5	0.597 5
0.28	0.607 9	0.604 1	0.601 8	0.600 9	0.600 0	0.599 6	0.599 2	0.598 5	0.598 1	0.597 9	0.597 8	0.597 7
0.30	0.609 0	0.604 9	0.602 5	0.601 5	0.600 5	0.600 1	0.599 7	0.598 9	0.598 5	0.598 2	0.598 1	0.598 0
0.32	0.610 2	0.605 8	0.603 2	0.602 1	0.601 1	0.600 6	0.600 2	0.599 3	0.598 8	0.598 5	0.598 4	0.598 3
0.34	0.611 5	0.606 8	0.603 9	0.602 8	0.601 7	0.601 1	0.600 7	0.599 8	0.599 2	0.598 8	0.598 7	0.598 6
0.36	—	0.607 9	0.604 7	0.603 5	0.602 3	0.601 7	0.601 2	0.600 2	0.599 7	0.599 2	0.599 0	0.598 9
0.38	—	0.609 0	0.605 6	0.604 3	0.603 0	0.602 4	0.601 8	0.600 7	0.600 1	0.599 6	0.599 4	0.599 2
0.40	—	0.610 2	0.606 6	0.605 1	0.603 8	0.603 1	0.602 5	0.601 3	0.600 6	0.600 0	0.599 7	0.599 5
0.42	—	0.611 6	0.607 6	0.606 1	0.604 6	0.603 8	0.603 2	0.601 9	0.601 1	0.600 4	0.600 1	0.599 9
0.44	—	0.613 0	0.608 7	0.607 0	0.605 4	0.604 6	0.603 9	0.602 5	0.601 6	0.600 8	0.600 5	0.600 2
0.46	—	0.614 5	0.609 9	0.608 1	0.606 3	0.605 4	0.604 7	0.603 1	0.602 1	0.601 2	0.600 9	0.600 6
0.48	—	0.616 2	0.611 2	0.609 1	0.607 2	0.606 3	0.605 5	0.603 7	0.602 6	0.601 7	0.601 3	0.600 9
0.50	—	—	0.612 5	0.610 3	0.608 2	0.607 2	0.606 3	0.604 4	0.603 2	0.602 1	0.601 6	0.601 2
0.51	—	—	0.613 1	0.610 8	0.608 7	0.607 6	0.606 7	0.604 7	0.603 4	0.602 3	0.601 8	0.601 3
0.52	—	—	0.613 8	0.611 4	0.609 2	0.608 1	0.607 1	0.605 0	0.603 7	0.602 4	0.601 9	0.601 4
0.53	—	—	0.614 5	0.612 0	0.609 7	0.608 5	0.607 5	0.605 3	0.603 9	0.602 6	0.602 1	0.601 5
0.54	—	—	0.615 2	0.612 6	0.610 2	0.608 9	0.607 9	0.605 6	0.604 1	0.602 8	0.602 2	0.601 6
0.55	—	—	0.615 9	0.613 2	0.610 7	0.609 4	0.608 3	0.605 9	0.604 4	0.602 9	0.602 3	0.601 7
0.56	—	—	0.616 6	0.613 8	0.611 2	0.609 8	0.608 6	0.606 1	0.604 5	0.603 0	0.602 3	0.601 7
0.57	—	—	0.617 3	0.614 4	0.611 6	0.610 2	0.609 0	0.606 4	0.604 7	0.603 1	0.602 4	0.601 7
0.58	—	—	0.618 0	0.615 0	0.612 1	0.610 6	0.609 3	0.606 6	0.604 9	0.603 2	0.602 4	0.601 7
0.59	—	—	0.618 7	0.615 5	0.612 5	0.611 0	0.609 7	0.606 8	0.605 0	0.603 2	0.602 4	0.601 6
0.60	—	—	0.619 4	0.616 1	0.613 0	0.611 4	0.610 0	0.607 0	0.605 1	0.603 2	0.602 3	0.601 5
0.61	—	—	0.620 1	0.616 6	0.613 4	0.611 7	0.610 3	0.607 1	0.605 1	0.603 1	0.602 3	0.601 4
0.62	—	—	0.620 7	0.617 1	0.613 8	0.612 0	0.610 5	0.607 2	0.605 1	0.603 1	0.602 1	0.601 2
0.63	—	—	0.621 4	0.617 6	0.614 1	0.612 3	0.610 7	0.607 3	0.605 1	0.602 9	0.601 9	0.601 0
0.64	—	—	0.622 0	0.618 1	0.614 4	0.612 5	0.610 9	0.607 3	0.605 0	0.602 7	0.601 7	0.600 6
0.65	—	—	0.622 6	0.618 5	0.614 7	0.612 7	0.611 0	0.607 3	0.604 8	0.602 4	0.601 3	0.600 3
0.66	—	—	0.623 1	0.618 9	0.614 9	0.612 8	0.611 0	0.607 2	0.604 6	0.602 1	0.600 9	0.599 8
0.67	—	—	0.623 6	0.619 2	0.615 0	0.612 9	0.611 0	0.607 0	0.604 3	0.601 7	0.600 4	0.599 3
0.68	—	—	0.624 0	0.619 4	0.615 1	0.612 9	0.610 9	0.606 7	0.603 9	0.601 2	0.599 9	0.598 6
0.69	—	—	—	0.619 6	0.615 1	0.612 8	0.610 7	0.606 4	0.603 5	0.600 5	0.599 2	0.597 9
0.70	—	—	—	0.619 7	0.615 0	0.612 6	0.610 5	0.605 9	0.602 9	0.599 8	0.598 4	0.597 0
0.71	—	—	—	0.619 7	0.614 8	0.612 3	0.610 1	0.605 4	0.602 2	0.599 0	0.597 5	0.596 1
0.72	—	—	—	0.619 6	0.614 5	0.611 9	0.609 6	0.604 7	0.601 4	0.598 0	0.596 5	0.595 0
0.73	—	—	—	0.619 4	0.614 1	0.611 4	0.609 0	0.603 9	0.600 4	0.596 9	0.595 3	0.593 7
0.74	—	—	—	0.619 1	0.613 6	0.610 8	0.608 3	0.602 9	0.599 4	0.595 7	0.594 0	0.592 3
0.75	—	—	—	0.618 7	0.613 0	0.610 0	0.607 4	0.601 8	0.598 1	0.594 3	0.592 5	0.590 8

表 A.1 (续)
D=375 mm(法兰取压)

Re_D	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8	∞
β	C											
0.10	0.600 6	0.598 9	0.597 9	0.597 5	0.597 1	0.597 0	0.596 8	0.596 5	0.596 4	0.596 3	0.596 3	0.596 3
0.12	0.601 3	0.599 4	0.598 2	0.597 8	0.597 4	0.597 2	0.597 0	0.596 7	0.596 5	0.596 4	0.596 4	0.596 4
0.14	0.602 0	0.599 9	0.598 6	0.598 1	0.597 6	0.597 4	0.597 2	0.596 8	0.596 6	0.596 5	0.596 5	0.596 5
0.16	0.602 7	0.600 4	0.599 0	0.598 4	0.597 9	0.597 6	0.597 4	0.597 0	0.596 8	0.596 7	0.596 6	0.596 6
0.18	0.603 5	0.600 9	0.599 4	0.598 7	0.598 2	0.597 9	0.597 7	0.597 2	0.597 0	0.596 8	0.596 8	0.596 8
0.20	0.604 2	0.601 5	0.599 8	0.599 1	0.598 5	0.598 2	0.597 9	0.597 4	0.597 2	0.597 0	0.597 0	0.596 9
0.22	0.605 1	0.602 1	0.600 3	0.599 5	0.598 8	0.598 5	0.598 2	0.597 7	0.597 4	0.597 2	0.597 2	0.597 1
0.24	0.606 0	0.602 8	0.600 8	0.600 0	0.599 2	0.598 9	0.598 6	0.598 0	0.597 7	0.597 4	0.597 4	0.597 3
0.26	0.606 9	0.603 5	0.601 3	0.600 5	0.599 7	0.599 3	0.598 9	0.598 3	0.597 9	0.597 7	0.597 6	0.597 6
0.28	0.608 0	0.604 2	0.601 9	0.601 0	0.600 1	0.599 7	0.599 3	0.598 6	0.598 3	0.598 0	0.597 9	0.597 8
0.30	—	0.605 1	0.602 6	0.601 6	0.600 6	0.600 2	0.599 8	0.599 0	0.598 6	0.598 3	0.598 2	0.598 1
0.32	—	0.606 0	0.603 3	0.602 2	0.601 2	0.600 7	0.600 3	0.599 4	0.599 0	0.598 6	0.598 5	0.598 4
0.34	—	0.606 9	0.604 0	0.602 9	0.601 8	0.601 3	0.600 8	0.599 9	0.599 4	0.598 9	0.598 8	0.598 7
0.36	—	0.608 0	0.604 9	0.603 6	0.602 4	0.601 9	0.601 4	0.600 4	0.599 8	0.599 3	0.599 1	0.599 0
0.38	—	0.609 1	0.605 8	0.604 4	0.603 1	0.602 5	0.602 0	0.600 9	0.600 2	0.599 7	0.599 5	0.599 3
0.40	—	—	0.606 7	0.605 3	0.603 9	0.603 2	0.602 6	0.601 4	0.600 7	0.600 1	0.599 9	0.599 7
0.42	—	—	0.607 8	0.606 2	0.604 7	0.603 9	0.603 3	0.602 0	0.601 2	0.600 5	0.600 2	0.600 0
0.44	—	—	0.608 9	0.607 1	0.605 5	0.604 7	0.604 0	0.602 6	0.601 7	0.600 9	0.600 6	0.600 3
0.46	—	—	0.610 0	0.608 2	0.606 4	0.605 5	0.604 8	0.603 2	0.602 2	0.601 3	0.601 0	0.600 7
0.48	—	—	0.611 3	0.609 2	0.607 3	0.606 4	0.605 5	0.603 8	0.602 7	0.601 8	0.601 3	0.601 0
0.50	—	—	0.612 5	0.610 3	0.608 3	0.607 2	0.606 3	0.604 4	0.603 2	0.602 1	0.601 7	0.601 2
0.51	—	—	0.613 2	0.610 9	0.608 8	0.607 7	0.606 7	0.604 7	0.603 5	0.602 3	0.601 8	0.601 4
0.52	—	—	0.613 9	0.611 5	0.609 2	0.608 1	0.607 1	0.605 0	0.603 7	0.602 5	0.601 9	0.601 5
0.53	—	—	0.614 5	0.612 1	0.609 7	0.608 5	0.607 5	0.605 3	0.603 9	0.602 6	0.602 1	0.601 5
0.54	—	—	0.615 2	0.612 6	0.610 2	0.609 0	0.607 9	0.605 6	0.604 1	0.602 8	0.602 2	0.601 6
0.55	—	—	0.615 9	0.613 2	0.610 7	0.609 4	0.608 2	0.605 8	0.604 3	0.602 9	0.602 2	0.601 7
0.56	—	—	0.616 6	0.613 8	0.611 1	0.609 8	0.608 6	0.606 1	0.604 5	0.603 0	0.602 3	0.601 7
0.57	—	—	—	0.614 4	0.611 6	0.610 2	0.608 9	0.606 3	0.604 7	0.603 0	0.602 3	0.601 7
0.58	—	—	—	0.614 9	0.612 0	0.610 6	0.609 3	0.606 5	0.604 8	0.603 1	0.602 3	0.601 6
0.59	—	—	—	0.615 5	0.612 4	0.610 9	0.609 6	0.606 7	0.604 9	0.603 1	0.602 3	0.601 5
0.60	—	—	—	0.616 0	0.612 8	0.611 2	0.609 8	0.606 9	0.604 9	0.603 0	0.602 2	0.601 4
0.61	—	—	—	0.616 5	0.613 2	0.611 6	0.610 1	0.607 0	0.605 0	0.603 0	0.602 1	0.601 2
0.62	—	—	—	0.617 0	0.613 6	0.611 8	0.610 3	0.607 0	0.604 9	0.602 8	0.601 9	0.601 0
0.63	—	—	—	0.617 4	0.613 9	0.612 1	0.610 5	0.607 1	0.604 8	0.602 6	0.601 7	0.600 7
0.64	—	—	—	0.617 8	0.614 1	0.612 2	0.610 6	0.607 0	0.604 7	0.602 4	0.601 4	0.600 3
0.65	—	—	—	0.618 2	0.614 3	0.612 4	0.610 6	0.606 9	0.604 5	0.602 1	0.601 0	0.599 9
0.66	—	—	—	0.618 5	0.614 5	0.612 4	0.610 6	0.606 8	0.604 2	0.601 7	0.600 5	0.599 4
0.67	—	—	—	0.618 8	0.614 6	0.612 4	0.610 6	0.606 5	0.603 9	0.601 2	0.600 0	0.598 8
0.68	—	—	—	0.619 0	0.614 6	0.612 4	0.610 4	0.606 2	0.603 4	0.600 6	0.599 3	0.598 1
0.69	—	—	—	—	0.614 5	0.612 2	0.610 2	0.605 8	0.602 9	0.600 0	0.598 6	0.597 3
0.70	—	—	—	—	0.614 4	0.612 0	0.609 8	0.605 3	0.602 2	0.599 2	0.597 7	0.596 4
0.71	—	—	—	—	0.614 1	0.611 6	0.609 4	0.604 6	0.601 5	0.598 2	0.596 8	0.595 3
0.72	—	—	—	—	0.613 8	0.611 1	0.608 8	0.603 9	0.600 6	0.597 2	0.595 6	0.594 1
0.73	—	—	—	—	0.613 3	0.610 5	0.608 1	0.602 9	0.599 5	0.596 0	0.594 4	0.592 8
0.74	—	—	—	—	0.612 6	0.609 8	0.607 3	0.601 9	0.598 3	0.594 6	0.592 9	0.591 3
0.75	—	—	—	—	0.611 9	0.608 9	0.606 3	0.600 7	0.596 9	0.593 1	0.591 3	0.589 6

表 A.1 (续)
D=760 mm(法兰取压)

Re_D	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8	∞
β	C											
0.10	0.600 6	0.599 0	0.597 9	0.597 5	0.597 2	0.597 0	0.596 9	0.596 6	0.596 4	0.596 3	0.596 3	0.596 3
0.12	0.601 3	0.599 4	0.598 3	0.597 8	0.597 4	0.597 2	0.597 0	0.596 7	0.596 5	0.596 4	0.596 4	0.596 4
0.14	0.602 0	0.599 9	0.598 6	0.598 1	0.597 7	0.597 4	0.597 2	0.596 9	0.596 7	0.596 6	0.596 6	0.596 5
0.16	0.602 8	0.600 5	0.599 0	0.598 5	0.597 9	0.597 7	0.597 5	0.597 1	0.596 9	0.596 7	0.596 7	0.596 7
0.18	0.603 5	0.601 0	0.599 4	0.598 8	0.598 2	0.598 0	0.597 7	0.597 3	0.597 0	0.596 9	0.596 9	0.596 8
0.20	—	0.601 6	0.599 9	0.599 2	0.598 6	0.598 3	0.598 0	0.597 5	0.597 3	0.597 1	0.597 1	0.597 0
0.22	—	0.602 2	0.600 4	0.599 6	0.598 9	0.598 6	0.598 3	0.597 8	0.597 5	0.597 3	0.597 3	0.597 2
0.24	—	0.602 9	0.600 9	0.600 1	0.599 3	0.599 0	0.598 7	0.598 1	0.597 8	0.597 6	0.597 5	0.597 5
0.26	—	0.603 6	0.601 4	0.600 6	0.599 8	0.599 4	0.599 1	0.598 4	0.598 1	0.597 8	0.597 7	0.597 7
0.28	—	—	0.602 0	0.601 1	0.600 3	0.599 8	0.599 5	0.598 8	0.598 4	0.598 1	0.598 0	0.598 0
0.30	—	—	0.602 7	0.601 7	0.600 8	0.600 3	0.599 9	0.599 2	0.598 7	0.598 4	0.598 3	0.598 2
0.32	—	—	0.603 4	0.602 3	0.601 3	0.600 8	0.600 4	0.599 6	0.599 1	0.598 7	0.598 6	0.598 5
0.34	—	—	0.604 2	0.603 0	0.602 0	0.601 4	0.601 0	0.600 0	0.599 5	0.599 1	0.599 0	0.598 8
0.36	—	—	0.605 0	0.603 8	0.602 6	0.602 0	0.601 5	0.600 5	0.599 9	0.599 5	0.599 3	0.599 2
0.38	—	—	0.605 9	0.604 6	0.603 3	0.602 7	0.602 1	0.601 0	0.600 4	0.599 9	0.599 7	0.599 5
0.40	—	—	—	0.605 4	0.604 1	0.603 4	0.602 8	0.601 6	0.600 9	0.600 3	0.600 0	0.599 8
0.42	—	—	—	0.606 4	0.604 9	0.604 1	0.603 5	0.602 2	0.601 4	0.600 7	0.600 4	0.600 2
0.44	—	—	—	0.607 3	0.605 7	0.604 9	0.604 2	0.602 7	0.601 9	0.601 1	0.600 8	0.600 5
0.46	—	—	—	0.608 4	0.606 6	0.605 7	0.604 9	0.603 4	0.602 4	0.601 5	0.601 2	0.600 8
0.48	—	—	—	0.609 4	0.607 5	0.606 5	0.605 7	0.604 0	0.602 9	0.601 9	0.601 5	0.601 1
0.50	—	—	—	—	0.608 4	0.607 4	0.606 5	0.604 5	0.603 4	0.602 3	0.601 8	0.601 4
0.51	—	—	—	—	0.608 9	0.607 8	0.606 9	0.604 9	0.603 6	0.602 5	0.602 0	0.601 5
0.52	—	—	—	—	0.609 4	0.608 2	0.607 3	0.605 2	0.603 9	0.602 6	0.602 1	0.601 6
0.53	—	—	—	—	0.609 9	0.608 7	0.607 6	0.605 4	0.604 1	0.602 8	0.602 2	0.601 7
0.54	—	—	—	—	0.610 3	0.609 1	0.608 0	0.605 7	0.604 3	0.602 9	0.602 3	0.601 7
0.55	—	—	—	—	0.610 8	0.609 5	0.608 4	0.606 0	0.604 4	0.603 0	0.602 4	0.601 8
0.56	—	—	—	—	0.611 2	0.609 9	0.608 7	0.606 2	0.604 6	0.603 1	0.602 4	0.601 8
0.57	—	—	—	—	0.611 7	0.610 3	0.609 0	0.606 4	0.604 7	0.603 1	0.602 4	0.601 7
0.58	—	—	—	—	0.612 1	0.610 6	0.609 3	0.606 6	0.604 8	0.603 1	0.602 4	0.601 7
0.59	—	—	—	—	0.612 5	0.611 0	0.609 6	0.606 8	0.604 9	0.603 1	0.602 3	0.601 6
0.60	—	—	—	—	0.612 9	0.611 3	0.609 9	0.606 9	0.605 0	0.603 1	0.602 2	0.601 4
0.61	—	—	—	—	0.613 2	0.611 6	0.610 1	0.607 0	0.605 0	0.603 0	0.602 1	0.601 2
0.62	—	—	—	—	0.613 6	0.611 8	0.610 3	0.607 0	0.604 9	0.602 8	0.601 9	0.601 0
0.63	—	—	—	—	—	0.612 0	0.610 4	0.607 0	0.604 8	0.602 6	0.601 6	0.600 6
0.64	—	—	—	—	—	0.612 2	0.610 5	0.606 9	0.604 6	0.602 3	0.601 3	0.600 3
0.65	—	—	—	—	—	0.612 3	0.610 5	0.606 8	0.604 4	0.602 0	0.600 9	0.599 8
0.66	—	—	—	—	—	0.612 3	0.610 5	0.606 6	0.604 1	0.601 5	0.600 4	0.599 2
0.67	—	—	—	—	—	0.612 3	0.610 4	0.606 3	0.603 7	0.601 0	0.599 8	0.598 6
0.68	—	—	—	—	—	0.612 2	0.610 2	0.606 0	0.603 2	0.600 4	0.599 1	0.597 9
0.69	—	—	—	—	—	0.611 9	0.609 9	0.605 5	0.602 6	0.599 6	0.598 3	0.597 0
0.70	—	—	—	—	—	0.611 6	0.609 5	0.604 9	0.601 9	0.598 8	0.597 4	0.596 0
0.71	—	—	—	—	—	0.611 2	0.609 0	0.604 2	0.601 0	0.597 8	0.596 3	0.594 9
0.72	—	—	—	—	—	0.610 7	0.608 4	0.603 4	0.600 1	0.596 7	0.595 1	0.593 6
0.73	—	—	—	—	—	0.610 0	0.607 6	0.602 4	0.598 9	0.595 4	0.593 8	0.592 2
0.74	—	—	—	—	—	—	0.606 7	0.601 2	0.597 6	0.594 0	0.592 3	0.590 6
0.75	—	—	—	—	—	—	0.605 6	0.599 9	0.596 2	0.592 3	0.590 6	0.588 8

表 A.1 (续)
D=1 000 mm(法兰取压)

Re_D	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8	∞
β	C											
0.10	0.600 6	0.599 0	0.598 0	0.597 6	0.597 2	0.597 0	0.596 9	0.596 6	0.596 4	0.596 3	0.596 3	0.596 3
0.12	0.601 3	0.599 4	0.598 3	0.597 8	0.597 4	0.597 2	0.597 0	0.596 7	0.596 6	0.596 5	0.596 4	0.596 4
0.14	0.602 0	0.599 9	0.598 7	0.598 1	0.597 7	0.597 4	0.597 3	0.596 9	0.596 7	0.596 6	0.596 6	0.596 6
0.16	0.602 8	0.600 5	0.599 0	0.598 5	0.598 0	0.597 7	0.597 5	0.597 1	0.596 9	0.596 7	0.596 7	0.596 7
0.18	—	0.601 0	0.599 5	0.598 8	0.598 3	0.598 0	0.597 7	0.597 3	0.597 1	0.596 9	0.596 9	0.596 9
0.20	—	0.601 6	0.599 9	0.599 2	0.598 6	0.598 3	0.598 0	0.597 5	0.597 3	0.597 1	0.597 1	0.597 1
0.22	—	0.602 2	0.600 4	0.599 6	0.599 0	0.598 6	0.598 4	0.597 8	0.597 5	0.597 3	0.597 3	0.597 3
0.24	—	0.602 9	0.600 9	0.600 1	0.599 4	0.599 0	0.598 7	0.598 1	0.597 8	0.597 6	0.597 5	0.597 5
0.26	—	—	0.601 5	0.600 6	0.599 8	0.599 4	0.599 1	0.598 4	0.598 1	0.597 9	0.597 8	0.597 7
0.28	—	—	0.602 1	0.601 2	0.600 3	0.599 9	0.599 5	0.598 8	0.598 4	0.598 1	0.598 1	0.598 0
0.30	—	—	0.602 7	0.601 7	0.600 8	0.600 4	0.600 0	0.599 2	0.598 8	0.598 5	0.598 3	0.598 3
0.32	—	—	0.603 5	0.602 4	0.601 4	0.600 9	0.600 5	0.599 6	0.599 2	0.598 8	0.598 7	0.598 6
0.34	—	—	0.604 3	0.603 1	0.602 0	0.601 5	0.601 0	0.600 1	0.599 6	0.599 1	0.599 0	0.598 9
0.36	—	—	—	0.603 8	0.602 7	0.602 1	0.601 6	0.600 6	0.600 0	0.599 5	0.599 4	0.599 2
0.38	—	—	—	0.604 6	0.603 4	0.602 7	0.602 2	0.601 1	0.600 5	0.599 9	0.599 7	0.599 5
0.40	—	—	—	0.605 5	0.604 1	0.603 4	0.602 8	0.601 6	0.600 9	0.600 3	0.600 1	0.599 9
0.42	—	—	—	0.606 4	0.604 9	0.604 2	0.603 5	0.602 2	0.601 4	0.600 7	0.600 5	0.600 2
0.44	—	—	—	—	0.605 8	0.605 0	0.604 3	0.602 8	0.601 9	0.601 2	0.600 9	0.600 6
0.46	—	—	—	—	0.606 7	0.605 8	0.605 0	0.603 4	0.602 4	0.601 6	0.601 2	0.600 9
0.48	—	—	—	—	0.607 6	0.606 6	0.605 8	0.604 0	0.603 0	0.602 0	0.601 6	0.601 2
0.50	—	—	—	—	0.608 5	0.607 5	0.606 5	0.604 6	0.603 5	0.602 4	0.601 9	0.601 5
0.51	—	—	—	—	0.609 0	0.607 9	0.606 9	0.604 9	0.603 7	0.602 5	0.602 0	0.601 6
0.52	—	—	—	—	0.609 5	0.608 3	0.607 3	0.605 2	0.603 9	0.602 7	0.602 2	0.601 7
0.53	—	—	—	—	0.609 9	0.608 7	0.607 7	0.605 5	0.604 1	0.602 8	0.602 3	0.601 7
0.54	—	—	—	—	0.610 4	0.609 1	0.608 1	0.605 8	0.604 3	0.603 0	0.602 4	0.601 8
0.55	—	—	—	—	—	0.609 6	0.608 4	0.606 0	0.604 5	0.603 1	0.602 4	0.601 8
0.56	—	—	—	—	—	0.609 9	0.608 8	0.606 3	0.604 7	0.603 1	0.602 5	0.601 8
0.57	—	—	—	—	—	0.610 3	0.609 1	0.606 5	0.604 8	0.603 2	0.602 5	0.601 8
0.58	—	—	—	—	—	0.610 7	0.609 4	0.606 7	0.604 9	0.603 2	0.602 4	0.601 7
0.59	—	—	—	—	—	0.611 0	0.609 7	0.606 8	0.605 0	0.603 2	0.602 4	0.601 6
0.60	—	—	—	—	—	0.611 3	0.609 9	0.606 9	0.605 0	0.603 1	0.602 3	0.601 5
0.61	—	—	—	—	—	0.611 6	0.610 2	0.607 0	0.605 0	0.603 0	0.602 1	0.601 3
0.62	—	—	—	—	—	0.611 9	0.610 3	0.607 1	0.604 9	0.602 9	0.601 9	0.601 0
0.63	—	—	—	—	—	0.612 1	0.610 5	0.607 3	0.604 8	0.602 6	0.601 6	0.600 7
0.64	—	—	—	—	—	0.612 2	0.610 6	0.607 0	0.604 7	0.602 3	0.601 3	0.600 3
0.65	—	—	—	—	—	0.612 3	0.610 6	0.606 8	0.604 4	0.602 0	0.600 9	0.599 8
0.66	—	—	—	—	—	—	0.610 5	0.606 6	0.604 1	0.601 6	0.600 4	0.599 3
0.67	—	—	—	—	—	—	0.610 4	0.606 3	0.603 7	0.601 0	0.599 8	0.598 6
0.68	—	—	—	—	—	—	0.610 2	0.606 0	0.603 2	0.600 4	0.599 1	0.597 9
0.69	—	—	—	—	—	—	0.609 9	0.605 5	0.602 6	0.599 7	0.598 3	0.597 0
0.70	—	—	—	—	—	—	0.609 5	0.604 9	0.601 9	0.598 8	0.597 4	0.596 0
0.71	—	—	—	—	—	—	0.609 0	0.604 2	0.601 0	0.597 8	0.596 3	0.594 9
0.72	—	—	—	—	—	—	0.608 4	0.603 3	0.600 0	0.596 7	0.595 1	0.593 6
0.73	—	—	—	—	—	—	0.607 6	0.602 4	0.598 9	0.595 4	0.593 8	0.592 2
0.74	—	—	—	—	—	—	0.606 6	0.601 2	0.597 6	0.593 9	0.592 2	0.590 6
0.75	—	—	—	—	—	—	0.605 5	0.599 9	0.596 1	0.592 3	0.590 5	0.588 7

表 A.1 (续)
 $D \geq 71.12$ mm(角接取压)

Re_D	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8	∞
β	C											
0.10	0.600 6	0.599 0	0.598 0	0.597 6	0.597 2	0.597 0	0.596 9	0.596 6	0.596 5	0.596 4	0.596 4	0.596 4
0.12	0.601 4	0.599 5	0.598 3	0.597 9	0.597 5	0.597 3	0.597 1	0.596 8	0.596 6	0.596 5	0.596 5	0.596 5
0.14	0.602 1	0.600 0	0.598 7	0.598 2	0.597 7	0.597 5	0.597 3	0.596 9	0.596 8	0.596 6	0.596 6	0.596 6
0.16	0.602 8	0.600 5	0.599 1	0.598 5	0.598 0	0.597 8	0.597 6	0.597 1	0.596 9	0.596 8	0.596 8	0.596 8
0.18	0.603 6	0.601 1	0.599 5	0.598 9	0.598 3	0.598 1	0.597 8	0.597 4	0.597 1	0.597 0	0.597 0	0.596 9
0.20	0.604 5	0.601 7	0.600 0	0.599 3	0.598 7	0.598 4	0.598 1	0.597 6	0.597 4	0.597 2	0.597 2	0.597 1
0.22	0.605 3	0.602 3	0.600 5	0.599 8	0.599 1	0.598 7	0.598 5	0.597 9	0.597 6	0.597 4	0.597 4	0.597 4
0.24	0.606 2	0.603 0	0.601 0	0.600 2	0.599 5	0.599 1	0.598 8	0.598 2	0.597 9	0.597 7	0.597 6	0.597 6
0.26	0.607 2	0.603 8	0.601 6	0.600 7	0.599 9	0.599 6	0.599 2	0.598 6	0.598 2	0.598 0	0.597 9	0.597 9
0.28	0.608 3	0.604 6	0.602 2	0.601 3	0.600 4	0.600 0	0.599 7	0.599 0	0.598 6	0.598 3	0.598 2	0.598 1
0.30	0.609 5	0.605 4	0.602 9	0.601 9	0.601 0	0.600 5	0.600 1	0.599 4	0.598 9	0.598 6	0.598 5	0.598 4
0.32	0.610 7	0.606 3	0.603 6	0.602 6	0.601 6	0.601 1	0.600 6	0.599 8	0.599 3	0.599 0	0.598 8	0.598 7
0.34	0.612 0	0.607 3	0.604 4	0.603 3	0.602 2	0.601 7	0.601 2	0.600 3	0.599 8	0.599 3	0.599 2	0.599 1
0.36	0.613 5	0.608 4	0.605 3	0.604 0	0.602 9	0.602 3	0.601 8	0.600 8	0.600 2	0.599 7	0.599 6	0.599 4
0.38	0.615 1	0.609 6	0.606 2	0.604 9	0.603 6	0.603 0	0.602 4	0.601 3	0.600 7	0.600 1	0.599 9	0.599 8
0.40	0.616 8	0.610 9	0.607 2	0.605 8	0.604 4	0.603 7	0.603 1	0.601 9	0.601 2	0.600 6	0.600 3	0.600 1
0.42	0.618 7	0.612 2	0.608 3	0.606 7	0.605 2	0.604 4	0.603 8	0.602 5	0.601 7	0.601 0	0.600 7	0.600 5
0.44	0.620 7	0.613 7	0.609 4	0.607 7	0.606 1	0.605 2	0.604 5	0.603 1	0.602 2	0.601 4	0.601 1	0.600 8
0.46	0.622 8	0.615 2	0.610 6	0.608 7	0.607 0	0.606 1	0.605 3	0.603 7	0.602 7	0.601 9	0.601 5	0.601 2
0.48	0.625 1	0.616 9	0.611 8	0.609 8	0.607 9	0.606 9	0.606 1	0.604 3	0.603 3	0.602 3	0.601 9	0.601 5
0.50	0.627 6	0.618 6	0.613 1	0.610 9	0.608 8	0.607 8	0.606 9	0.605 0	0.603 8	0.602 7	0.602 2	0.601 8
0.51	0.628 9	0.619 5	0.613 8	0.611 5	0.609 3	0.608 2	0.607 3	0.605 3	0.604 0	0.602 9	0.602 4	0.601 9
0.52	0.630 2	0.620 4	0.614 4	0.612 1	0.609 8	0.608 7	0.607 7	0.605 6	0.604 3	0.603 0	0.602 5	0.602 0
0.53	0.631 6	0.621 3	0.615 1	0.612 6	0.610 3	0.609 1	0.608 0	0.605 9	0.604 5	0.603 2	0.602 6	0.602 1
0.54	0.633 0	0.622 3	0.615 8	0.613 2	0.610 8	0.609 5	0.608 4	0.606 1	0.604 7	0.603 3	0.602 7	0.602 1
0.55	0.634 4	0.623 2	0.616 5	0.613 8	0.611 2	0.609 9	0.608 8	0.606 4	0.604 9	0.603 4	0.602 8	0.602 2
0.56	—	0.624 2	0.617 2	0.614 3	0.611 7	0.610 3	0.609 1	0.606 6	0.605 0	0.603 5	0.602 8	0.602 2
0.57	—	0.625 2	0.617 9	0.614 9	0.612 1	0.610 7	0.609 5	0.606 9	0.605 2	0.603 6	0.602 8	0.602 2
0.58	—	0.626 2	0.618 5	0.615 5	0.612 6	0.611 1	0.609 8	0.607 0	0.605 3	0.603 6	0.602 8	0.602 1
0.59	—	0.627 2	0.619 2	0.616 0	0.613 0	0.611 4	0.610 1	0.607 2	0.605 4	0.603 6	0.602 8	0.602 0
0.60	—	0.628 2	0.619 8	0.616 5	0.613 4	0.611 7	0.610 3	0.607 3	0.605 4	0.603 5	0.602 7	0.601 9
0.61	—	0.629 2	0.620 5	0.617 0	0.613 7	0.612 0	0.610 6	0.607 4	0.605 4	0.603 4	0.602 5	0.601 7
0.62	—	0.630 2	0.621 1	0.617 5	0.614 0	0.612 3	0.610 8	0.607 5	0.605 4	0.603 3	0.602 3	0.601 4
0.63	—	0.631 2	0.621 7	0.617 9	0.614 3	0.612 5	0.610 9	0.607 5	0.605 2	0.603 0	0.602 1	0.601 1
0.64	—	0.632 1	0.622 2	0.618 3	0.614 5	0.612 6	0.611 0	0.607 4	0.605 1	0.602 8	0.601 7	0.600 7
0.65	—	0.633 1	0.622 7	0.618 6	0.614 7	0.612 7	0.611 0	0.607 3	0.604 8	0.602 4	0.601 3	0.600 2
0.66	—	0.634 0	0.623 2	0.618 9	0.614 8	0.612 8	0.611 0	0.607 1	0.604 5	0.602 0	0.600 8	0.599 7
0.67	—	0.634 8	0.623 6	0.619 1	0.614 9	0.612 7	0.610 8	0.606 8	0.604 1	0.601 4	0.600 2	0.599 0
0.68	—	0.635 7	0.623 9	0.619 3	0.614 9	0.612 6	0.610 6	0.606 4	0.603 6	0.600 8	0.599 5	0.598 3
0.69	—	0.636 4	0.624 2	0.619 3	0.614 7	0.612 4	0.610 4	0.605 9	0.603 0	0.600 1	0.598 7	0.597 4
0.70	—	0.637 2	0.624 4	0.619 3	0.614 5	0.612 1	0.610 0	0.605 3	0.602 3	0.599 2	0.597 8	0.596 4
0.71	—	0.637 8	0.624 5	0.619 2	0.614 2	0.611 7	0.609 4	0.604 6	0.601 4	0.598 2	0.596 7	0.595 3
0.72	—	0.638 3	0.624 4	0.618 9	0.613 8	0.611 1	0.608 8	0.603 8	0.600 5	0.597 1	0.595 5	0.594 0
0.73	—	0.638 8	0.624 3	0.618 6	0.613 2	0.610 4	0.608 0	0.602 8	0.599 3	0.595 8	0.594 2	0.592 6
0.74	—	0.639 1	0.624 0	0.618 1	0.612 5	0.609 6	0.607 1	0.601 6	0.598 0	0.594 3	0.592 6	0.591 0
0.75	—	0.639 4	0.623 6	0.617 4	0.611 6	0.608 6	0.606 0	0.600 3	0.596 5	0.592 7	0.590 9	0.589 2

A.2.2 超压缩系数 F_z 值表(表 A.2.1 和表 A.2.2)

A.2.2.1 表 A.2.1

该表是用附录 F 中的天然气组分数据,按 A.1.4.1 规定的 GB/T 17747.2 的计算公式[式(A.11)]和计算步骤计算 Z_1 ,按 GB/T 11062—1998 的计算公式[式(A.9)]和计算步骤计算 Z_n ,再用式(28)计算 F_z 值,运用电子计算机编程计算制表得出的数据表格。由于步长数据间隔取得较大,表内数据不供精确内插,更不得外推,只供检验计算程序用。

表 A.2.1 用 GB/T 17747.2 计算的超压缩系数 F_z 值表(以附录 F 天然气组分为例)

$t/$ ℃	-20	-15	-10	-5	0	5	10
p (表压)/ MPa	F_z						
0.00	1.000 7	1.000 6	1.000 5	1.000 4	1.000 3	1.000 2	1.000 1
0.10	1.002 7	1.002 5	1.002 2	1.002 0	1.001 8	1.001 7	1.001 5
0.20	1.004 7	1.004 3	1.004 0	1.003 7	1.003 4	1.003 1	1.002 8
0.30	1.006 7	1.006 2	1.005 8	1.005 3	1.004 9	1.004 6	1.004 2
0.40	1.008 7	1.008 1	1.007 5	1.007 0	1.006 5	1.006 0	1.005 6
0.50	1.010 8	1.010 0	1.009 3	1.008 7	1.008 1	1.007 5	1.007 0
0.60	1.012 8	1.011 9	1.011 1	1.010 3	1.009 6	1.009 0	1.008 4
0.70	1.014 9	1.013 9	1.012 9	1.012 0	1.011 2	1.010 5	1.009 8
0.80	1.017 0	1.015 8	1.014 8	1.013 8	1.012 8	1.012 0	1.011 2
0.90	1.019 1	1.017 8	1.016 6	1.015 5	1.014 4	1.013 5	1.012 6
1.00	1.021 3	1.019 8	1.018 5	1.017 2	1.016 0	1.015 0	1.014 0
1.10	1.023 5	1.021 8	1.020 3	1.019 0	1.017 7	1.016 5	1.015 4
1.20	1.025 6	1.023 9	1.022 2	1.020 7	1.019 3	1.018 0	1.016 8
1.30	1.027 8	1.025 9	1.024 1	1.022 5	1.021 0	1.019 6	1.018 3
1.40	1.030 1	1.028 0	1.026 0	1.024 3	1.022 6	1.021 1	1.019 7
1.50	1.032 3	1.030 0	1.028 0	1.026 1	1.024 3	1.022 7	1.021 2
1.60	1.034 6	1.032 1	1.029 9	1.027 9	1.026 0	1.024 2	1.022 6
1.70	1.036 9	1.034 3	1.031 9	1.029 7	1.027 7	1.025 8	1.024 1
1.80	1.039 2	1.036 4	1.033 8	1.031 5	1.029 4	1.027 4	1.025 6
1.90	1.041 5	1.038 6	1.035 8	1.033 4	1.031 1	1.029 0	1.027 0
2.00	1.043 9	1.040 7	1.037 8	1.035 2	1.032 8	1.030 6	1.028 5
2.10	1.046 3	1.042 9	1.039 9	1.037 1	1.034 5	1.032 2	1.030 0
2.20	1.048 7	1.045 1	1.041 9	1.039 0	1.036 3	1.033 8	1.031 5
2.30	1.051 1	1.047 4	1.044 0	1.040 9	1.038 0	1.035 4	1.033 0
2.40	1.053 6	1.049 6	1.046 0	1.042 8	1.039 8	1.037 0	1.034 5
2.50	1.056 1	1.051 9	1.048 1	1.044 7	1.041 5	1.038 7	1.036 0
2.60	1.058 6	1.054 2	1.050 2	1.046 6	1.043 3	1.040 3	1.037 6
2.70	1.061 1	1.056 5	1.052 4	1.048 6	1.045 1	1.042 0	1.039 1
2.80	1.063 7	1.058 9	1.054 5	1.050 5	1.046 9	1.043 6	1.040 6
2.90	1.066 3	1.061 2	1.056 6	1.052 5	1.048 7	1.045 3	1.042 2
3.00	1.068 9	1.063 6	1.058 8	1.054 5	1.050 6	1.047 0	1.043 7

表 A.2.1 (续)

$t/$ $^{\circ}\text{C}$	-20	-15	-10	-5	0	5	10
$p(\text{表压})/$ MPa	F_z						
3.10	1.071 6	1.066 0	1.061 0	1.056 5	1.052 4	1.048 7	1.045 3
3.20	1.074 2	1.068 4	1.063 2	1.058 5	1.054 2	1.050 4	1.046 8
3.30	1.076 9	1.070 9	1.065 4	1.060 5	1.056 1	1.052 1	1.048 4
3.40	1.079 7	1.073 3	1.067 7	1.062 6	1.058 0	1.053 8	1.050 0
3.50	1.082 4	1.075 8	1.069 9	1.064 6	1.059 8	1.055 5	1.051 6
3.60	1.085 2	1.078 3	1.072 2	1.066 7	1.061 7	1.057 2	1.053 1
3.70	1.088 0	1.080 9	1.074 5	1.068 8	1.063 6	1.059 0	1.054 7
3.80	1.090 9	1.083 4	1.076 8	1.070 9	1.065 5	1.060 7	1.056 3
3.90	1.093 8	1.086 0	1.079 1	1.073 0	1.067 4	1.062 5	1.057 9
4.00	1.096 7	1.088 6	1.081 5	1.075 1	1.069 4	1.064 2	1.059 5
4.10	1.099 6	1.091 2	1.083 8	1.077 2	1.071 3	1.066 0	1.061 2
4.20	1.102 6	1.093 9	1.086 2	1.079 4	1.073 3	1.067 8	1.062 8
4.30	1.105 6	1.096 6	1.088 6	1.081 5	1.075 2	1.069 5	1.064 4
4.40	1.108 6	1.099 3	1.091 0	1.083 7	1.077 2	1.071 3	1.066 0
4.50	1.111 7	1.102 0	1.093 4	1.085 9	1.079 2	1.073 1	1.067 7
4.60	1.114 8	1.104 7	1.095 9	1.088 1	1.081 1	1.074 9	1.069 3
4.70	1.117 9	1.107 5	1.098 4	1.090 8	1.083 1	1.076 7	1.070 9
4.80	1.121 1	1.110 3	1.100 8	1.092 5	1.085 1	1.078 5	1.072 6
4.90	1.124 3	1.113 1	1.103 3	1.094 8	1.087 1	1.080 3	1.074 2
5.00	1.127 5	1.115 9	1.105 9	1.097 0	1.089 2	1.082 2	1.075 9
5.10	1.130 7	1.118 8	1.108 4	1.099 3	1.091 2	1.084 0	1.077 6
5.20	1.134 0	1.121 7	1.110 9	1.101 5	1.093 2	1.085 8	1.079 2
5.30	1.137 2	1.124 6	1.113 5	1.103 8	1.095 3	1.087 7	1.080 9
5.40	1.140 7	1.127 5	1.116 1	1.106 1	1.097 3	1.089 5	1.082 6
5.50	1.144 1	1.130 4	1.118 7	1.108 4	1.099 4	1.091 4	1.084 2
5.60	1.147 5	1.133 4	1.121 3	1.110 7	1.101 4	1.093 2	1.085 9
5.70	1.151 0	1.136 4	1.123 9	1.113 0	1.103 5	1.095 1	1.087 6
5.80	1.154 4	1.139 4	1.126 5	1.115 4	1.105 6	1.097 0	1.089 3
5.90	1.157 9	1.142 4	1.129 2	1.117 7	1.107 7	1.098 8	1.090 9
6.00	1.161 5	1.145 5	1.131 9	1.120 1	1.109 8	1.100 7	1.092 6
6.10	1.165 0	1.148 6	1.134 5	1.122 4	1.111 9	1.102 6	1.094 3
6.20	1.168 6	1.151 6	1.137 2	1.124 8	1.114 0	1.104 4	1.096 0
6.30	1.172 2	1.154 7	1.139 9	1.127 2	1.116 1	1.106 3	1.097 7
6.40	1.175 9	1.157 9	1.142 6	1.129 5	1.118 2	1.108 2	1.099 4
6.50	1.179 5	1.161 0	1.145 3	1.131 9	1.120 3	1.110 1	1.101 0
6.60	1.183 2	1.164 1	1.148 1	1.134 3	1.122 4	1.112 0	1.102 7
6.70	1.186 9	1.167 3	1.150 8	1.136 7	1.124 5	1.113 8	1.104 4

表 A.2.1 (续)

$t/$ ℃	-20	-15	-10	-5	0	5	10
p (表压)/ MPa	F_z						
6.80	1.190 6	1.170 5	1.153 6	1.139 1	1.126 6	1.115 7	1.106 1
6.90	1.194 3	1.173 7	1.156 3	1.141 5	1.128 8	1.117 6	1.107 8
7.00	1.198 1	1.176 8	1.159 1	1.143 9	1.130 9	1.119 5	1.109 5
7.10	1.201 9	1.180 0	1.161 8	1.146 3	1.133 0	1.121 4	1.111 1
7.20	1.205 6	1.183 2	1.164 6	1.148 7	1.135 1	1.123 2	1.112 8
7.30	1.209 4	1.186 4	1.167 3	1.151 1	1.137 2	1.125 1	1.114 5
7.40	1.213 2	1.189 7	1.170 1	1.153 5	1.139 3	1.127 0	1.116 2
7.50	1.216 9	1.192 9	1.172 9	1.155 9	1.141 4	1.128 9	1.117 8
7.60	1.220 7	1.196 1	1.175 6	1.158 3	1.143 5	1.130 7	1.119 5
7.70	1.224 5	1.199 3	1.178 4	1.160 7	1.145 6	1.132 6	1.121 1
7.80	1.228 2	1.202 5	1.181 1	1.163 1	1.147 7	1.134 4	1.122 8
7.90	1.232 0	1.205 6	1.183 9	1.165 5	1.149 8	1.136 3	1.124 4
8.00	1.235 7	1.208 8	1.186 6	1.167 9	1.151 9	1.138 1	1.126 1
8.10	1.239 4	1.212 0	1.189 3	1.170 2	1.154 0	1.140 0	1.127 7
8.20	1.243 1	1.215 1	1.192 0	1.172 6	1.156 1	1.141 8	1.129 3
8.30	1.246 7	1.218 2	1.194 7	1.174 9	1.158 1	1.143 6	1.130 9
8.40	1.250 3	1.221 3	1.197 4	1.177 3	1.160 2	1.145 4	1.132 5
8.50	1.253 9	1.224 4	1.200 0	1.179 6	1.162 2	1.147 2	1.134 1
8.60	1.257 4	1.227 4	1.202 7	1.181 9	1.164 2	1.149 0	1.135 7
8.70	1.260 9	1.230 5	1.205 3	1.184 2	1.166 2	1.150 8	1.137 3
8.80	1.264 4	1.233 4	1.207 9	1.186 4	1.168 2	1.152 5	1.138 9
8.90	1.267 7	1.236 4	1.210 4	1.188 7	1.170 2	1.154 3	1.140 4
9.00	1.271 0	1.239 3	1.213 0	1.190 9	1.172 1	1.156 0	1.142 0
9.10	1.274 3	1.242 1	1.215 5	1.193 1	1.174 1	1.157 7	1.143 5
9.20	1.277 5	1.244 9	1.218 0	1.195 3	1.176 0	1.159 4	1.145 0
9.30	1.280 6	1.247 7	1.220 4	1.197 4	1.177 9	1.161 1	1.146 5
9.40	1.283 6	1.250 4	1.222 8	1.199 6	1.179 8	1.162 8	1.148 0
9.50	1.286 5	1.253 1	1.225 2	1.201 8	1.181 6	1.164 4	1.149 5
9.60	1.289 4	1.255 7	1.227 5	1.203 7	1.183 5	1.166 1	1.150 9
9.70	1.292 2	1.258 2	1.229 8	1.205 7	1.185 3	1.167 7	1.152 4
9.80	1.294 8	1.260 7	1.232 0	1.207 7	1.187 1	1.169 3	1.153 8
9.90	1.297 4	1.263 1	1.234 2	1.209 7	1.188 8	1.170 8	1.155 2
10.00	1.299 9	1.265 4	1.236 3	1.211 6	1.190 5	1.172 4	1.156 6
10.10	1.302 3	1.267 7	1.238 4	1.213 5	1.192 2	1.173 9	1.158 0
10.20	1.304 6	1.269 9	1.240 5	1.215 4	1.193 9	1.175 4	1.159 3
10.30	1.306 8	1.272 1	1.242 4	1.217 2	1.195 6	1.176 9	1.160 6
10.40	1.308 9	1.274 1	1.244 4	1.219 0	1.197 2	1.178 3	1.161 9
10.50	1.310 9	1.276 1	1.246 2	1.220 7	1.198 7	1.179 8	1.163 2

表 A.2.1 (续)

$t/$ ℃	—20	—15	—10	—5	0	5	10
p (表压)/ MPa	F_z						
10.60	1.312 8	1.278 0	1.248 1	1.222 4	1.200 3	1.181 2	1.164 5
10.70	1.314 6	1.279 8	1.249 8	1.224 0	1.201 8	1.182 5	1.165 7
10.80	1.316 3	1.281 6	1.251 5	1.225 6	1.203 3	1.183 9	1.167 0
10.90	1.317 9	1.283 3	1.253 2	1.227 2	1.204 7	1.185 2	1.168 2
11.00	1.319 4	1.284 8	1.254 7	1.228 7	1.206 1	1.186 5	1.169 3
11.10	1.320 8	1.286 4	1.256 3	1.230 1	1.207 5	1.187 7	1.170 5
11.20	1.322 1	1.287 8	1.257 7	1.231 5	1.208 8	1.189 0	1.171 6
11.30	1.323 3	1.289 1	1.259 1	1.232 9	1.210 1	1.190 2	1.172 7
11.40	1.324 4	1.290 4	1.260 4	1.234 2	1.211 3	1.191 3	1.173 8
11.50	1.325 4	1.291 6	1.261 7	1.235 5	1.212 5	1.192 5	1.174 8
11.60	1.326 2	1.292 7	1.262 9	1.236 7	1.213 7	1.193 6	1.175 9
11.70	1.327 0	1.293 8	1.264 1	1.237 8	1.214 8	1.194 6	1.176 9
11.80	1.327 8	1.294 7	1.265 1	1.239 0	1.215 9	1.195 7	1.177 8
11.90	1.328 4	1.295 6	1.266 2	1.240 0	1.217 0	1.196 7	1.178 8
12.00	1.328 9	1.296 4	1.267 1	1.241 0	1.218 0	1.197 6	1.179 7
$t/$ ℃	15	20	25	30	35	40	45
p (表压)/ MPa	F_z						
0.00	1.000 1	1.000 0	0.999 9	0.999 8	0.999 8	0.999 7	0.999 7
0.10	1.001 3	1.001 2	1.001 0	1.000 9	1.000 8	1.000 7	1.000 6
0.20	1.002 6	1.002 4	1.002 2	1.002 0	1.001 8	1.001 6	1.001 5
0.30	1.003 9	1.003 6	1.003 3	1.003 1	1.002 8	1.002 6	1.002 4
0.40	1.005 2	1.004 8	1.004 5	1.004 1	1.003 8	1.003 5	1.003 3
0.50	1.006 5	1.006 0	1.005 6	1.005 2	1.004 8	1.004 5	1.004 2
0.60	1.007 8	1.007 3	1.006 8	1.006 3	1.005 9	1.005 4	1.005 1
0.70	1.009 1	1.008 5	1.007 9	1.007 4	1.006 9	1.006 4	1.006 0
0.80	1.010 4	1.009 7	1.009 1	1.008 5	1.007 9	1.007 4	1.006 9
0.90	1.011 7	1.011 0	1.010 2	1.009 6	1.008 9	1.008 3	1.007 8
1.00	1.013 1	1.012 2	1.011 4	1.010 6	1.009 9	1.009 3	1.008 7
1.10	1.014 4	1.013 4	1.012 6	1.011 7	1.011 0	1.010 3	1.009 6
1.20	1.015 7	1.014 7	1.013 7	1.012 8	1.012 0	1.011 2	1.010 5
1.30	1.017 1	1.016 0	1.014 9	1.013 9	1.013 0	1.012 2	1.011 4
1.40	1.018 4	1.017 2	1.016 1	1.015 0	1.014 1	1.013 2	1.012 3

表 A.2.1 (续)

$t/$ ℃	15	20	25	30	35	40	45
p (表压)/ MPa	F_z						
1.50	1.019 8	1.018 5	1.017 3	1.016 2	1.015 1	1.014 1	1.013 2
1.60	1.021 1	1.019 7	1.018 5	1.017 3	1.016 2	1.015 1	1.014 1
1.70	1.022 5	1.021 0	1.019 7	1.018 4	1.017 2	1.016 1	1.015 1
1.80	1.023 9	1.022 3	1.020 8	1.019 5	1.018 2	1.017 1	1.016 0
1.90	1.025 2	1.023 6	1.022 0	1.020 6	1.019 3	1.018 0	1.016 9
2.00	1.026 6	1.024 9	1.023 2	1.021 7	1.020 3	1.019 0	1.017 8
2.10	1.028 0	1.026 2	1.024 4	1.022 9	1.021 4	1.020 0	1.018 7
2.20	1.029 4	1.027 5	1.025 7	1.024 0	1.022 4	1.021 0	1.019 6
2.30	1.030 8	1.028 8	1.026 9	1.025 1	1.023 5	1.022 0	1.020 6
2.40	1.032 2	1.030 1	1.028 1	1.026 2	1.024 5	1.022 9	1.021 5
2.50	1.033 6	1.031 4	1.029 3	1.027 4	1.025 6	1.023 9	1.022 4
2.60	1.035 0	1.032 7	1.030 5	1.028 5	1.026 6	1.024 9	1.023 3
2.70	1.036 4	1.034 0	1.031 7	1.029 6	1.027 7	1.025 9	1.024 2
2.80	1.037 9	1.035 3	1.033 0	1.030 8	1.028 8	1.026 9	1.025 1
2.90	1.039 3	1.036 6	1.034 2	1.031 9	1.029 8	1.027 9	1.026 1
3.00	1.040 7	1.038 0	1.035 4	1.033 1	1.030 9	1.028 9	1.027 0
3.10	1.042 1	1.039 3	1.036 6	1.034 2	1.031 9	1.029 9	1.027 9
3.20	1.043 6	1.040 6	1.037 9	1.035 4	1.033 0	1.030 8	1.028 8
3.30	1.045 0	1.042 0	1.039 1	1.036 5	1.034 1	1.031 8	1.029 8
3.40	1.046 5	1.043 3	1.040 4	1.037 6	1.035 1	1.032 8	1.030 7
3.50	1.047 9	1.044 6	1.041 6	1.038 8	1.036 2	1.033 8	1.031 6
3.60	1.049 4	1.046 0	1.042 8	1.039 9	1.037 3	1.034 8	1.032 5
3.70	1.050 9	1.047 3	1.044 1	1.041 1	1.038 3	1.035 8	1.033 4
3.80	1.052 3	1.048 7	1.045 3	1.042 3	1.039 4	1.036 8	1.034 4
3.90	1.053 8	1.050 0	1.046 6	1.043 4	1.040 5	1.037 8	1.035 3
4.00	1.055 3	1.051 4	1.047 8	1.044 6	1.041 5	1.038 8	1.036 2
4.10	1.056 8	1.052 8	1.049 1	1.045 7	1.042 6	1.039 8	1.037 1
4.20	1.058 2	1.054 1	1.050 3	1.046 9	1.043 7	1.040 7	1.038 0
4.30	1.059 7	1.055 5	1.051 6	1.048 0	1.044 8	1.041 7	1.038 9
4.40	1.061 2	1.056 8	1.052 9	1.049 2	1.045 8	1.042 7	1.039 9
4.50	1.062 7	1.058 2	1.054 1	1.050 4	1.046 9	1.043 7	1.040 8
4.60	1.064 2	1.059 6	1.055 4	1.051 5	1.048 0	1.044 7	1.041 7
4.70	1.065 7	1.061 0	1.056 6	1.052 7	1.049 0	1.045 7	1.042 6
4.80	1.067 2	1.062 3	1.057 9	1.053 8	1.050 1	1.046 7	1.043 5
4.90	1.068 7	1.063 7	1.059 2	1.055 0	1.051 2	1.047 7	1.044 4
5.00	1.070 2	1.065 1	1.060 4	1.056 1	1.052 2	1.048 6	1.045 3

表 A.2.1 (续)

$t/$ $^{\circ}\text{C}$	15	20	25	30	35	40	45
$p(\text{表压})/$ MPa	F_z						
5.10	1.071 7	1.066 5	1.061 7	1.057 3	1.053 3	1.049 6	1.046 2
5.20	1.073 2	1.067 8	1.062 9	1.058 5	1.054 4	1.050 6	1.047 1
5.30	1.074 8	1.069 2	1.064 2	1.059 6	1.055 4	1.051 6	1.048 0
5.40	1.076 3	1.070 6	1.065 5	1.060 8	1.056 5	1.052 6	1.048 9
5.50	1.077 8	1.072 0	1.066 7	1.061 9	1.057 5	1.053 5	1.049 8
5.60	1.079 3	1.073 4	1.068 0	1.063 1	1.058 6	1.054 5	1.050 7
5.70	1.080 8	1.074 8	1.069 2	1.064 2	1.059 7	1.055 5	1.051 6
5.80	1.082 4	1.076 1	1.070 5	1.065 4	1.060 7	1.056 4	1.052 5
5.90	1.083 9	1.077 5	1.071 8	1.066 5	1.061 8	1.057 4	1.053 4
6.00	1.085 4	1.078 9	1.073 0	1.067 7	1.062 8	1.058 4	1.054 3
6.10	1.086 9	1.080 3	1.074 3	1.068 8	1.063 9	1.059 3	1.055 2
6.20	1.088 4	1.081 7	1.075 5	1.070 0	1.064 9	1.060 3	1.056 1
6.30	1.090 0	1.083 0	1.076 8	1.071 1	1.066 0	1.061 3	1.056 9
6.40	1.091 5	1.084 4	1.078 0	1.072 3	1.067 0	1.062 2	1.057 8
6.50	1.093 0	1.085 8	1.079 3	1.073 4	1.068 0	1.063 2	1.058 7
6.60	1.094 5	1.087 2	1.080 5	1.074 5	1.069 1	1.064 1	1.059 6
6.70	1.096 0	1.088 5	1.081 8	1.075 7	1.070 1	1.065 1	1.060 4
6.80	1.097 6	1.089 9	1.083 0	1.076 8	1.071 1	1.066 0	1.061 3
6.90	1.099 1	1.091 3	1.084 3	1.077 9	1.072 2	1.066 9	1.062 1
7.00	1.100 6	1.092 6	1.085 5	1.079 0	1.073 2	1.067 9	1.063 0
7.10	1.102 1	1.094 0	1.086 7	1.080 2	1.074 2	1.068 8	1.063 8
7.20	1.103 6	1.095 3	1.088 0	1.081 3	1.075 2	1.069 7	1.064 7
7.30	1.105 1	1.096 7	1.089 2	1.082 4	1.076 2	1.070 6	1.065 5
7.40	1.106 6	1.098 0	1.090 4	1.083 5	1.077 2	1.071 6	1.066 4
7.50	1.108 1	1.099 4	1.091 6	1.084 6	1.078 3	1.072 5	1.067 2
7.60	1.109 6	1.100 7	1.092 8	1.085 7	1.079 2	1.073 4	1.068 0
7.70	1.111 0	1.102 1	1.094 0	1.086 8	1.080 2	1.074 3	1.068 9
7.80	1.112 5	1.103 4	1.095 2	1.087 9	1.081 2	1.075 2	1.069 7
7.90	1.114 0	1.104 7	1.096 4	1.089 0	1.082 2	1.076 1	1.070 5
8.00	1.115 5	1.106 0	1.097 6	1.090 0	1.083 2	1.077 0	1.071 3
8.10	1.116 9	1.107 3	1.098 8	1.091 1	1.084 2	1.077 9	1.072 1
8.20	1.118 4	1.108 6	1.100 0	1.092 2	1.085 1	1.078 7	1.072 9

表 A.2.1 (续)

$t/$ ℃	15	20	25	30	35	40	45
p (表压)/ MPa	F_z						
8.30	1.119 8	1.109 9	1.101 1	1.093 2	1.086 1	1.079 6	1.073 7
8.40	1.121 2	1.111 2	1.102 3	1.094 3	1.087 0	1.080 5	1.074 5
8.50	1.122 7	1.112 5	1.103 4	1.095 3	1.088 0	1.081 3	1.075 3
8.60	1.124 1	1.113 8	1.104 6	1.096 4	1.088 9	1.082 2	1.076 1
8.70	1.125 5	1.115 0	1.105 7	1.097 4	1.089 9	1.083 0	1.076 9
8.80	1.126 9	1.116 3	1.106 9	1.098 4	1.090 8	1.083 9	1.077 6
8.90	1.128 3	1.117 5	1.108 0	1.099 4	1.091 7	1.084 7	1.078 4
9.00	1.129 7	1.118 8	1.109 1	1.100 4	1.092 6	1.085 6	1.079 1
9.10	1.131 0	1.120 0	1.110 2	1.101 4	1.093 5	1.086 4	1.079 9
9.20	1.132 4	1.121 2	1.111 3	1.102 4	1.094 4	1.087 2	1.080 6
9.30	1.133 7	1.122 4	1.112 4	1.103 4	1.095 3	1.088 0	1.081 4
9.40	1.135 1	1.123 6	1.113 5	1.104 4	1.096 2	1.088 8	1.082 1
9.50	1.136 4	1.124 8	1.114 5	1.105 3	1.097 1	1.089 6	1.082 8
9.60	1.137 7	1.126 0	1.115 6	1.106 3	1.097 9	1.090 4	1.083 5
9.70	1.139 0	1.127 1	1.116 6	1.107 2	1.098 8	1.091 2	1.084 2
9.80	1.140 2	1.128 3	1.117 7	1.108 2	1.099 6	1.091 9	1.084 9
9.90	1.141 5	1.129 4	1.118 7	1.109 1	1.100 5	1.092 7	1.085 6
10.00	1.142 8	1.130 5	1.119 7	1.110 0	1.101 3	1.093 4	1.086 3
10.10	1.144 0	1.131 7	1.120 7	1.110 9	1.102 1	1.094 2	1.087 0
10.20	1.145 2	1.132 7	1.121 7	1.111 8	1.102 9	1.094 9	1.087 7
10.30	1.146 4	1.133 8	1.122 7	1.112 7	1.103 7	1.095 6	1.088 3
10.40	1.147 6	1.134 9	1.123 6	1.113 6	1.104 5	1.096 4	1.089 0
10.50	1.148 7	1.135 9	1.124 6	1.114 4	1.105 3	1.097 1	1.089 6
10.60	1.149 9	1.137 0	1.125 5	1.115 3	1.106 1	1.097 8	1.090 2
10.70	1.151 0	1.138 0	1.126 4	1.116 1	1.106 8	1.098 5	1.090 9
10.80	1.152 1	1.139 0	1.127 3	1.116 9	1.107 6	1.099 1	1.091 5
10.90	1.153 2	1.140 0	1.128 2	1.117 7	1.108 3	1.099 8	1.092 1
11.00	1.154 3	1.141 0	1.129 1	1.118 5	1.109 0	1.100 5	1.092 7
11.10	1.155 3	1.141 9	1.130 0	1.119 3	1.109 8	1.101 1	1.093 3
11.20	1.156 3	1.142 8	1.130 8	1.120 1	1.110 5	1.101 8	1.093 9
11.30	1.157 4	1.143 8	1.131 7	1.120 9	1.111 2	1.102 4	1.094 5
11.40	1.158 3	1.144 7	1.132 5	1.121 6	1.111 8	1.103 0	1.095 0
11.50	1.159 3	1.145 5	1.133 3	1.122 4	1.112 5	1.103 6	1.095 6
11.60	1.160 2	1.146 4	1.134 1	1.123 1	1.113 2	1.104 2	1.096 1
11.70	1.161 2	1.147 3	1.134 9	1.123 8	1.113 8	1.104 8	1.096 7
11.80	1.162 1	1.148 1	1.135 6	1.124 5	1.114 4	1.105 4	1.097 2
11.90	1.162 9	1.148 9	1.136 4	1.125 1	1.115 1	1.106 0	1.097 7
12.00	1.163 8	1.149 7	1.137 1	1.125 8	1.115 7	1.106 5	1.098 2

表 A.2.1 (续)

$t/$ ℃	50	55	60	65	70	75	80
p (表压)/ MPa	F_z						
0.00	0.999 6	0.999 6	0.999 5	0.999 5	0.999 4	0.999 4	0.999 4
0.10	1.000 5	1.000 4	1.000 3	1.000 2	1.000 1	1.000 0	1.000 0
0.20	1.001 3	1.001 2	1.001 0	1.000 9	1.000 8	1.000 7	1.000 6
0.30	1.002 2	1.002 0	1.001 8	1.001 6	1.001 4	1.001 3	1.001 2
0.40	1.003 0	1.002 8	1.002 5	1.002 3	1.002 1	1.001 9	1.001 7
0.50	1.003 8	1.003 6	1.003 3	1.003 0	1.002 8	1.002 6	1.002 3
0.60	1.004 7	1.004 4	1.004 0	1.003 7	1.003 5	1.003 2	1.002 9
0.70	1.005 5	1.005 2	1.004 8	1.004 4	1.004 1	1.003 8	1.003 5
0.80	1.006 4	1.006 0	1.005 5	1.005 2	1.004 8	1.004 4	1.004 1
0.90	1.007 2	1.006 8	1.006 3	1.005 9	1.005 5	1.005 1	1.004 7
1.00	1.008 1	1.007 6	1.007 1	1.006 6	1.006 1	1.005 7	1.005 3
1.10	1.009 0	1.008 4	1.007 8	1.007 3	1.006 8	1.006 3	1.005 9
1.20	1.009 8	1.009 2	1.008 6	1.008 0	1.007 5	1.007 0	1.006 5
1.30	1.010 7	1.010 0	1.009 3	1.008 7	1.008 1	1.007 6	1.007 1
1.40	1.011 5	1.010 8	1.010 1	1.009 4	1.008 8	1.008 2	1.007 7
1.50	1.012 4	1.011 6	1.010 8	1.010 1	1.009 5	1.008 8	1.008 2
1.60	1.013 2	1.012 4	1.011 6	1.010 8	1.010 1	1.009 5	1.008 8
1.70	1.014 1	1.013 2	1.012 3	1.011 5	1.010 8	1.010 1	1.009 4
1.80	1.014 9	1.014 0	1.013 1	1.012 2	1.011 4	1.010 7	1.010 0
1.90	1.015 8	1.014 8	1.013 8	1.012 9	1.012 1	1.011 3	1.010 6
2.00	1.016 7	1.015 6	1.014 6	1.013 7	1.012 8	1.011 9	1.011 2
2.10	1.017 5	1.016 4	1.015 3	1.014 4	1.013 4	1.012 6	1.011 7
2.20	1.018 4	1.017 2	1.016 1	1.015 1	1.014 1	1.013 2	1.012 3
2.30	1.019 2	1.018 0	1.016 8	1.015 8	1.014 7	1.013 8	1.012 9
2.40	1.020 1	1.018 8	1.017 6	1.016 5	1.015 4	1.014 4	1.013 5
2.50	1.021 0	1.019 6	1.018 3	1.017 2	1.016 1	1.015 0	1.014 0
2.60	1.021 8	1.020 4	1.019 1	1.017 9	1.016 7	1.015 6	1.014 6
2.70	1.022 7	1.021 2	1.019 8	1.018 6	1.017 4	1.016 3	1.015 2
2.80	1.023 5	1.022 0	1.020 6	1.019 3	1.018 0	1.016 9	1.015 8
2.90	1.024 4	1.022 8	1.021 3	1.020 0	1.018 7	1.017 5	1.016 3
3.00	1.025 2	1.023 6	1.022 1	1.020 7	1.019 3	1.018 1	1.016 9
3.10	1.026 1	1.024 4	1.022 8	1.021 4	1.020 0	1.018 7	1.017 5
3.20	1.027 0	1.025 2	1.023 6	1.022 1	1.020 6	1.019 3	1.018 0
3.30	1.027 8	1.026 0	1.024 3	1.022 8	1.021 3	1.019 9	1.018 6
3.40	1.028 7	1.026 8	1.025 1	1.023 4	1.021 9	1.020 5	1.019 2
3.50	1.029 5	1.027 6	1.025 8	1.024 1	1.022 6	1.021 1	1.019 7

表 A.2.1 (续)

$t/$ ℃	50	55	60	65	70	75	80
p (表压)/ MPa	F_z						
3.60	1.030 4	1.028 4	1.026 6	1.024 8	1.023 2	1.021 7	1.020 3
3.70	1.031 2	1.029 2	1.027 3	1.025 5	1.023 9	1.022 3	1.020 8
3.80	1.032 1	1.030 0	1.028 0	1.026 2	1.024 5	1.022 9	1.021 4
3.90	1.032 9	1.030 8	1.028 8	1.026 9	1.025 1	1.023 5	1.022 0
4.00	1.033 8	1.031 6	1.029 5	1.027 6	1.025 8	1.024 1	1.022 5
4.10	1.034 6	1.032 4	1.030 2	1.028 3	1.026 4	1.024 7	1.023 1
4.20	1.035 5	1.033 2	1.031 0	1.028 9	1.027 0	1.025 3	1.023 6
4.30	1.036 3	1.033 9	1.031 7	1.029 6	1.027 7	1.025 9	1.024 2
4.40	1.037 2	1.034 7	1.032 4	1.030 3	1.028 3	1.026 4	1.024 7
4.50	1.038 0	1.035 5	1.033 2	1.031 0	1.028 9	1.027 0	1.025 2
4.60	1.038 9	1.036 3	1.033 9	1.031 7	1.029 6	1.027 6	1.025 8
4.70	1.039 7	1.037 1	1.034 6	1.032 3	1.030 2	1.028 2	1.026 3
4.80	1.040 6	1.037 9	1.035 3	1.033 0	1.030 8	1.028 8	1.026 9
4.90	1.041 4	1.038 6	1.036 1	1.033 7	1.031 4	1.029 3	1.027 4
5.00	1.042 3	1.039 4	1.036 8	1.034 3	1.032 0	1.029 9	1.027 9
5.10	1.043 1	1.040 2	1.037 5	1.035 0	1.032 7	1.030 5	1.028 5
5.20	1.043 9	1.041 0	1.038 2	1.035 7	1.033 3	1.031 1	1.029 0
5.30	1.044 8	1.041 7	1.038 9	1.036 3	1.033 9	1.031 6	1.029 5
5.40	1.045 6	1.042 5	1.039 6	1.037 0	1.034 5	1.032 2	1.030 0
5.50	1.046 4	1.043 3	1.040 3	1.037 6	1.035 1	1.032 8	1.030 6
5.60	1.047 2	1.044 0	1.041 0	1.038 3	1.035 7	1.033 3	1.031 1
5.70	1.048 1	1.044 8	1.041 7	1.038 9	1.036 3	1.033 9	1.031 6
5.80	1.048 9	1.045 5	1.042 4	1.039 6	1.036 9	1.034 4	1.032 1
5.90	1.049 7	1.046 3	1.043 1	1.040 2	1.037 5	1.035 0	1.032 6
6.00	1.050 5	1.047 1	1.043 8	1.040 9	1.038 1	1.035 5	1.033 1
6.10	1.051 3	1.047 8	1.044 5	1.041 5	1.038 7	1.036 1	1.033 6
6.20	1.052 2	1.048 6	1.045 2	1.042 1	1.039 3	1.036 6	1.034 1
6.30	1.053 0	1.049 3	1.045 9	1.042 8	1.039 9	1.037 1	1.034 6
6.40	1.053 8	1.050 0	1.046 6	1.043 4	1.040 4	1.037 7	1.035 1
6.50	1.054 6	1.050 8	1.047 3	1.044 0	1.041 0	1.038 2	1.035 6
6.60	1.055 4	1.051 5	1.047 9	1.044 6	1.041 6	1.038 7	1.036 1
6.70	1.056 2	1.052 2	1.048 6	1.045 3	1.042 2	1.039 3	1.036 6
6.80	1.057 0	1.053 0	1.049 3	1.045 9	1.042 7	1.039 8	1.037 1
6.90	1.057 7	1.053 7	1.050 0	1.046 5	1.043 3	1.040 3	1.037 5
7.00	1.058 5	1.054 4	1.050 6	1.047 1	1.043 9	1.040 8	1.038 0
7.10	1.059 3	1.055 1	1.051 3	1.047 7	1.044 4	1.041 3	1.038 5
7.20	1.060 1	1.055 8	1.051 9	1.048 3	1.045 0	1.041 9	1.039 0
7.30	1.060 9	1.056 6	1.052 6	1.048 9	1.045 5	1.042 4	1.039 4

表 A.2.1 (续)

$t/$ ℃	50	55	60	65	70	75	80
p (表压)/ MPa	F_z						
7.40	1.061 6	1.057 3	1.053 2	1.049 5	1.046 1	1.042 9	1.039 9
7.50	1.062 4	1.058 0	1.053 9	1.050 1	1.046 6	1.043 4	1.040 4
7.60	1.063 2	1.058 7	1.054 5	1.050 7	1.047 2	1.043 9	1.040 8
7.70	1.063 9	1.059 3	1.055 2	1.051 3	1.047 7	1.044 4	1.041 3
7.80	1.064 7	1.060 0	1.055 8	1.051 9	1.048 2	1.044 8	1.041 7
7.90	1.065 4	1.060 7	1.056 4	1.052 4	1.048 7	1.045 3	1.042 2
8.00	1.066 1	1.061 4	1.057 0	1.053 0	1.049 3	1.045 8	1.042 6
8.10	1.066 9	1.062 1	1.057 7	1.053 6	1.049 8	1.046 3	1.043 0
8.20	1.067 6	1.062 7	1.058 3	1.054 1	1.050 3	1.046 8	1.043 5
8.30	1.068 3	1.063 4	1.058 9	1.054 7	1.050 8	1.047 2	1.043 9
8.40	1.069 1	1.064 1	1.059 5	1.055 2	1.051 3	1.047 7	1.044 3
8.50	1.069 8	1.064 7	1.060 1	1.055 8	1.051 8	1.048 2	1.044 8
8.60	1.070 5	1.065 4	1.060 7	1.056 3	1.052 3	1.048 6	1.045 2
8.70	1.071 2	1.066 0	1.061 3	1.056 9	1.052 8	1.049 1	1.045 6
8.80	1.071 9	1.066 7	1.061 8	1.057 4	1.053 3	1.049 5	1.046 0
8.90	1.072 6	1.067 3	1.062 4	1.057 9	1.053 8	1.050 0	1.046 4
9.00	1.073 3	1.067 9	1.063 0	1.058 5	1.054 3	1.050 4	1.046 8
9.10	1.074 0	1.068 5	1.063 6	1.059 0	1.054 8	1.050 8	1.047 2
9.20	1.074 6	1.069 2	1.064 1	1.059 5	1.055 2	1.051 3	1.047 6
9.30	1.075 3	1.069 8	1.064 7	1.060 0	1.055 7	1.051 7	1.048 0
9.40	1.076 0	1.070 4	1.065 2	1.060 5	1.056 2	1.052 1	1.048 4
9.50	1.076 6	1.071 0	1.065 8	1.061 0	1.056 6	1.052 5	1.048 8
9.60	1.077 3	1.071 6	1.066 3	1.061 5	1.057 1	1.053 0	1.049 1
9.70	1.077 9	1.072 2	1.066 9	1.062 0	1.057 5	1.053 4	1.049 5
9.80	1.078 6	1.072 7	1.067 4	1.062 5	1.058 0	1.053 8	1.049 9
9.90	1.079 2	1.073 3	1.067 9	1.063 0	1.058 4	1.054 2	1.050 2
10.00	1.079 8	1.073 9	1.068 4	1.063 4	1.058 8	1.054 6	1.050 6
10.10	1.080 4	1.074 4	1.069 0	1.063 9	1.059 2	1.054 9	1.051 0
10.20	1.081 0	1.075 0	1.069 5	1.064 4	1.059 7	1.055 3	1.051 3
10.30	1.081 6	1.075 5	1.070 0	1.064 8	1.060 1	1.055 7	1.051 7
10.40	1.082 2	1.076 1	1.070 4	1.065 3	1.060 5	1.056 1	1.052 0
10.50	1.082 8	1.076 6	1.070 9	1.065 7	1.060 9	1.056 4	1.052 3
10.60	1.083 4	1.077 1	1.071 4	1.066 1	1.061 3	1.056 8	1.052 7
10.70	1.084 0	1.077 7	1.071 9	1.066 6	1.061 7	1.057 2	1.053 0
10.80	1.084 5	1.078 2	1.072 4	1.067 0	1.062 1	1.057 5	1.053 3
10.90	1.085 1	1.078 7	1.072 8	1.067 4	1.062 5	1.057 9	1.053 6
11.00	1.085 6	1.079 2	1.073 3	1.067 8	1.062 8	1.058 2	1.053 9

表 A.2.1 (续)

$t/$ $^{\circ}\text{C}$	50	55	60	65	70	75	80
$p(\text{表压})/$ MPa	F_z						
11.10	1.086 2	1.079 7	1.073 7	1.068 2	1.063 2	1.058 5	1.054 2
11.20	1.086 7	1.080 2	1.074 2	1.068 6	1.063 6	1.058 9	1.054 5
11.30	1.087 2	1.080 6	1.074 6	1.069 0	1.063 9	1.059 2	1.054 8
11.40	1.087 7	1.081 1	1.075 0	1.069 4	1.064 3	1.059 5	1.055 1
11.50	1.088 2	1.081 6	1.075 4	1.069 8	1.064 6	1.059 8	1.055 4
11.60	1.088 7	1.082 0	1.075 8	1.070 2	1.065 0	1.060 1	1.055 7
11.70	1.089 2	1.082 5	1.076 3	1.070 5	1.065 3	1.060 5	1.056 0
11.80	1.089 7	1.082 9	1.076 6	1.070 9	1.065 6	1.060 7	1.056 2
11.90	1.090 2	1.083 3	1.077 0	1.071 3	1.065 9	1.061 0	1.056 5
12.00	1.090 6	1.083 7	1.077 4	1.071 6	1.066 3	1.061 3	1.056 8

A.2.2.2 表 A.2.2

该表是按 A.1.4.2 给出的 AGA NX-19 计算公式和计算步骤运用电子计算机编程计算制表得出的数据表格。该表假设 $G_r=0.600$, $X_c=0\%$, $X_n=0\%$; 由于步长数据间隔取得较大, 表内数据不供精确内插, 更不得外推, 只供检验计算程序用。

表 A.2.2 用 AGA NX-19 计算的超压缩系数 F_z 值表(以 $G_r=0.600$; $X_c=0\%$; $X_n=0\%$ 为例)

$t/$ $^{\circ}\text{C}$	-20	-15	-10	-5	0	5	10
$p(\text{表压})/$ MPa	F_z						
0.00	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
0.10	1.001 7	1.001 6	1.001 6	1.001 5	1.001 3	1.001 3	1.001 2
0.20	1.003 5	1.003 3	1.003 1	1.002 9	1.002 7	1.002 6	1.002 4
0.30	1.005 2	1.004 9	1.004 7	1.004 4	1.004 1	1.003 9	1.003 7
0.40	1.007 0	1.006 6	1.006 2	1.005 8	1.005 5	1.005 2	1.004 9
0.50	1.008 8	1.008 3	1.007 8	1.007 3	1.006 9	1.006 5	1.006 1
0.60	1.010 6	1.010 0	1.009 4	1.008 8	1.008 3	1.007 8	1.007 4
0.70	1.012 4	1.011 7	1.011 0	1.010 3	1.009 7	1.009 2	1.008 6
0.80	1.014 3	1.013 4	1.012 6	1.011 9	1.011 1	1.010 5	1.009 9
0.90	1.016 1	1.015 1	1.014 2	1.013 4	1.012 6	1.011 8	1.011 1
1.00	1.018 0	1.016 9	1.015 9	1.014 9	1.014 0	1.013 2	1.012 4
1.10	1.019 9	1.018 7	1.017 5	1.016 4	1.015 4	1.014 5	1.013 6
1.20	1.021 8	1.020 4	1.019 2	1.018 0	1.016 9	1.015 9	1.014 9
1.30	1.023 7	1.022 2	1.020 8	1.019 5	1.018 3	1.017 2	1.016 2
1.40	1.025 6	1.024 0	1.022 5	1.021 1	1.019 8	1.018 6	1.017 5
1.50	1.027 6	1.025 8	1.024 2	1.022 7	1.021 3	1.020 0	1.018 8

表 A.2.2 (续)

$t/$ °C	—20	—15	—10	—5	0	5	10
p (表压)/ MPa	F_z						
1.60	1.029 5	1.027 6	1.025 9	1.024 3	1.022 7	1.021 3	1.020 0
1.70	1.031 5	1.029 5	1.027 6	1.025 8	1.024 2	1.022 7	1.021 3
1.80	1.033 5	1.031 3	1.029 3	1.027 4	1.025 7	1.024 1	1.022 6
1.90	1.035 5	1.033 2	1.031 0	1.029 1	1.027 2	1.025 5	1.023 9
2.00	1.037 5	1.035 1	1.032 8	1.030 7	1.028 7	1.026 9	1.025 2
2.10	1.039 6	1.036 9	1.034 5	1.032 3	1.030 2	1.028 3	1.026 5
2.20	1.041 6	1.038 9	1.036 3	1.033 9	1.031 7	1.029 7	1.027 9
2.30	1.043 7	1.040 8	1.038 1	1.035 6	1.033 3	1.031 1	1.029 2
2.40	1.045 8	1.042 7	1.039 8	1.037 2	1.034 8	1.032 6	1.030 5
2.50	1.047 9	1.044 6	1.041 6	1.038 9	1.036 3	1.034 0	1.031 8
2.60	1.050 0	1.046 6	1.043 4	1.040 6	1.037 9	1.035 4	1.033 2
2.70	1.052 2	1.048 6	1.045 3	1.042 2	1.039 4	1.036 9	1.034 5
2.80	1.054 4	1.050 6	1.047 1	1.043 9	1.041 0	1.038 3	1.035 8
2.90	1.056 5	1.052 6	1.048 9	1.045 6	1.042 6	1.039 7	1.037 2
3.00	1.058 7	1.054 6	1.050 8	1.047 3	1.044 1	1.041 2	1.038 5
3.10	1.061 0	1.056 6	1.052 7	1.049 0	1.045 7	1.042 7	1.039 9
3.20	1.063 2	1.058 7	1.054 5	1.050 7	1.047 3	1.044 1	1.041 2
3.30	1.065 5	1.060 7	1.056 4	1.052 5	1.048 9	1.045 6	1.042 6
3.40	1.067 7	1.062 8	1.058 3	1.054 2	1.050 5	1.047 1	1.043 9
3.50	1.070 0	1.064 9	1.060 2	1.056 0	1.052 1	1.048 5	1.045 3
3.60	1.072 4	1.067 0	1.062 1	1.057 7	1.053 7	1.050 0	1.046 6
3.70	1.074 7	1.069 1	1.064 1	1.059 5	1.055 3	1.051 5	1.048 0
3.80	1.077 1	1.071 2	1.066 0	1.061 3	1.056 9	1.053 0	1.049 4
3.90	1.079 4	1.073 4	1.068 0	1.063 0	1.058 6	1.054 5	1.050 8
4.00	1.081 8	1.075 6	1.069 9	1.064 8	1.060 2	1.056 0	1.052 1
4.10	1.084 2	1.077 7	1.071 9	1.066 6	1.061 8	1.057 5	1.053 5
4.20	1.086 7	1.079 9	1.073 9	1.068 4	1.063 5	1.059 0	1.054 9
4.30	1.089 1	1.082 1	1.075 9	1.070 2	1.065 1	1.060 5	1.056 3
4.40	1.091 6	1.084 4	1.077 9	1.072 1	1.066 8	1.062 0	1.057 7
4.50	1.094 1	1.086 6	1.079 9	1.073 9	1.068 5	1.063 5	1.059 1
4.60	1.096 6	1.088 9	1.081 9	1.075 7	1.070 1	1.065 1	1.060 4
4.70	1.099 1	1.091 1	1.084 0	1.077 6	1.071 8	1.066 6	1.061 8
4.80	1.101 7	1.093 4	1.086 0	1.079 4	1.073 5	1.068 1	1.063 2

表 A.2.2 (续)

$t/$ ℃	—20	—15	—10	—5	0	5	10
p (表压)/ MPa	F_z						
4.90	1.104 3	1.095 7	1.088 1	1.081 3	1.075 2	1.069 6	1.064 6
5.00	1.106 9	1.098 0	1.090 2	1.083 1	1.076 8	1.071 2	1.066 0
5.10	1.109 5	1.100 3	1.092 2	1.085 0	1.078 5	1.072 7	1.067 4
5.20	1.112 1	1.102 7	1.094 3	1.086 9	1.080 2	1.074 2	1.068 8
5.30	1.114 8	1.105 0	1.096 4	1.088 8	1.081 9	1.075 8	1.070 2
5.40	1.117 4	1.107 4	1.098 5	1.090 7	1.083 6	1.077 3	1.071 6
5.50	1.120 1	1.109 8	1.100 6	1.092 6	1.085 3	1.078 9	1.073 0
5.60	1.122 8	1.112 2	1.102 8	1.094 5	1.087 0	1.080 4	1.074 4
5.70	1.125 6	1.114 6	1.104 9	1.096 4	1.088 8	1.082 0	1.075 8
5.80	1.128 3	1.117 0	1.107 0	1.098 3	1.090 5	1.083 5	1.077 2
5.90	1.131 1	1.119 4	1.109 2	1.100 2	1.092 2	1.085 0	1.078 6
6.00	1.133 9	1.121 8	1.111 3	1.102 1	1.093 9	1.086 6	1.080 0
6.10	1.136 7	1.124 3	1.113 5	1.104 0	1.095 6	1.088 1	1.081 4
6.20	1.139 5	1.126 7	1.115 7	1.106 0	1.097 4	1.089 7	1.082 8
6.30	1.142 3	1.129 2	1.117 8	1.107 9	1.099 1	1.091 2	1.084 2
6.40	1.145 1	1.131 7	1.120 0	1.109 8	1.100 8	1.092 8	1.085 6
6.50	1.148 0	1.134 2	1.122 2	1.111 7	1.102 5	1.094 3	1.087 0
6.60	1.150 9	1.136 7	1.124 4	1.113 7	1.104 2	1.095 9	1.088 4
6.70	1.153 7	1.139 2	1.126 6	1.115 6	1.106 0	1.097 4	1.089 8
6.80	1.156 6	1.141 7	1.128 8	1.117 6	1.107 7	1.099 0	1.091 2
6.90	1.159 5	1.144 2	1.131 0	1.119 5	1.109 4	1.100 5	1.092 6
7.00	1.162 4	1.146 7	1.133 2	1.121 4	1.111 1	1.102 0	1.094 0
7.10	1.165 3	1.149 2	1.135 4	1.123 4	1.112 9	1.103 6	1.095 3
7.20	1.168 3	1.151 7	1.137 6	1.125 3	1.114 6	1.105 1	1.096 7
7.30	1.171 2	1.154 2	1.139 8	1.127 2	1.116 3	1.106 6	1.098 1
7.40	1.174 1	1.156 8	1.142 0	1.129 2	1.118 0	1.108 2	1.099 5
7.50	1.177 0	1.159 3	1.144 2	1.131 1	1.119 7	1.109 7	1.100 8
7.60	1.180 0	1.161 8	1.146 4	1.133 0	1.121 4	1.111 2	1.102 2
7.70	1.182 9	1.164 3	1.148 5	1.134 9	1.123 1	1.112 7	1.103 5
7.80	1.185 8	1.166 8	1.150 7	1.136 9	1.124 8	1.114 2	1.104 9
7.90	1.188 8	1.169 4	1.152 9	1.138 8	1.126 5	1.115 7	1.106 2
8.00	1.191 7	1.171 9	1.155 1	1.140 7	1.128 2	1.117 2	1.107 5
8.10	1.194 6	1.174 4	1.157 2	1.142 6	1.129 8	1.118 7	1.108 9
8.20	1.197 5	1.176 8	1.159 4	1.144 4	1.131 5	1.120 2	1.110 2
8.30	1.200 3	1.179 3	1.161 5	1.146 3	1.133 1	1.121 6	1.111 5
8.40	1.203 2	1.181 8	1.163 7	1.148 2	1.134 8	1.123 1	1.112 8

表 A.2.2 (续)

$t/$ °C	-20	-15	-10	-5	0	5	10
p (表压)/ MPa	F_z						
8.50	1.206 0	1.184 2	1.165 8	1.150 1	1.136 4	1.124 5	1.114 1
8.60	1.208 9	1.186 7	1.167 9	1.151 9	1.138 1	1.126 0	1.115 4
8.70	1.211 7	1.189 1	1.170 0	1.153 7	1.139 7	1.127 4	1.116 7
8.80	1.214 4	1.191 5	1.172 1	1.155 6	1.141 3	1.128 8	1.117 9
8.90	1.217 2	1.193 8	1.174 2	1.157 4	1.142 9	1.130 3	1.119 2
9.00	1.219 9	1.196 2	1.176 2	1.159 2	1.144 5	1.131 7	1.120 5
9.10	1.222 6	1.198 6	1.178 3	1.161 0	1.146 1	1.133 1	1.121 7
9.20	1.225 3	1.200 9	1.180 3	1.162 8	1.147 7	1.134 5	1.123 0
9.30	1.227 9	1.203 1	1.182 3	1.164 6	1.149 2	1.135 9	1.124 2
9.40	1.230 5	1.205 4	1.184 3	1.166 3	1.150 8	1.137 3	1.125 5
9.50	1.233 0	1.207 6	1.186 2	1.168 0	1.152 3	1.138 7	1.126 7
9.60	1.235 4	1.209 8	1.188 2	1.169 7	1.153 8	1.140 0	1.127 9
9.70	1.237 9	1.211 9	1.190 1	1.171 4	1.155 3	1.141 3	1.129 1
9.80	1.240 2	1.214 0	1.191 9	1.173 1	1.156 8	1.142 7	1.130 2
9.90	1.242 5	1.216 1	1.193 8	1.174 7	1.158 3	1.144 0	1.131 4
10.00	1.244 8	1.218 1	1.195 6	1.176 3	1.159 7	1.145 2	1.132 5
10.10	1.247 0	1.220 1	1.197 4	1.177 9	1.161 1	1.146 5	1.133 7
10.20	1.249 1	1.222 0	1.199 1	1.179 5	1.162 5	1.147 7	1.134 8
10.30	1.251 2	1.223 9	1.200 8	1.181 0	1.163 9	1.149 0	1.135 9
10.40	1.253 2	1.225 8	1.202 5	1.182 5	1.165 2	1.150 2	1.136 9
10.50	1.255 1	1.227 6	1.204 1	1.184 0	1.166 6	1.151 4	1.138 8
10.60	1.257 0	1.229 3	1.205 7	1.185 4	1.167 9	1.152 5	1.139 1
10.70	1.158 8	1.231 0	1.207 3	1.186 8	1.169 1	1.153 7	1.140 1
10.80	1.260 5	1.232 7	1.208 8	1.188 2	1.170 4	1.154 8	1.141 1
10.90	1.262 2	1.234 2	1.210 3	1.189 6	1.171 6	1.155 9	1.142 1
11.00	1.263 8	1.235 8	1.211 7	1.190 9	1.172 8	1.157 0	1.143 1
11.10	1.265 3	1.237 3	1.213 1	1.192 2	1.174 0	1.158 1	1.144 0
11.20	1.266 7	1.238 7	1.214 4	1.193 4	1.175 1	1.159 1	1.145 0
11.30	1.268 1	1.240 1	1.215 8	1.194 7	1.176 3	1.160 1	1.145 9
11.40	1.269 4	1.241 4	1.217 0	1.195 8	1.177 3	1.161 1	1.146 8
11.50	1.270 7	1.242 7	1.218 3	1.197 0	1.178 4	1.162 1	1.147 7
11.60	1.271 8	1.243 9	1.219 4	1.198 1	1.179 4	1.163 0	1.148 5
11.70	1.272 9	1.245 0	1.220 6	1.199 2	1.180 4	1.163 9	1.149 4
11.80	1.273 9	1.246 1	1.221 7	1.200 2	1.181 4	1.164 8	1.150 2
11.90	1.274 9	1.247 2	1.222 7	1.201 2	1.182 4	1.165 7	1.151 0
12.00	1.275 8	1.248 2	1.223 7	1.202 2	1.183 3	1.166 6	1.151 8

表 A.2.2 (续)

$t/$ ℃	15	20	25	30	35	40	45
p (表压)/ MPa	F_z						
0.00	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
0.10	1.001 1	1.001 0	1.001 0	1.001 0	1.000 9	1.000 9	1.000 8
0.20	1.002 3	1.002 2	1.002 0	1.001 9	1.001 8	1.001 7	1.001 6
0.30	1.003 4	1.003 3	1.003 1	1.002 9	1.002 8	1.002 6	1.002 4
0.40	1.004 6	1.004 4	1.004 1	1.003 9	1.003 7	1.003 4	1.003 3
0.50	1.005 8	1.005 4	1.005 1	1.004 8	1.004 6	1.004 3	1.004 1
0.60	1.006 9	1.006 5	1.006 2	1.005 8	1.005 5	1.005 2	1.004 9
0.70	1.008 1	1.007 6	1.007 2	1.006 8	1.006 4	1.006 0	1.005 7
0.80	1.009 3	1.008 8	1.008 3	1.007 8	1.007 3	1.006 9	1.006 5
0.90	1.010 5	1.009 9	1.009 4	1.008 8	1.008 3	1.007 8	1.007 3
1.00	1.011 7	1.011 0	1.010 3	1.009 7	1.009 2	1.008 7	1.008 2
1.10	1.012 8	1.012 1	1.011 4	1.010 7	1.010 1	1.009 5	1.009 0
1.20	1.014 0	1.013 2	1.012 4	1.011 7	1.011 0	1.010 4	1.009 8
1.30	1.015 2	1.014 3	1.013 5	1.012 7	1.012 0	1.011 3	1.010 6
1.40	1.016 4	1.015 4	1.014 5	1.013 7	1.012 9	1.012 1	1.011 4
1.50	1.017 6	1.016 6	1.015 6	1.014 7	1.013 8	1.013 0	1.012 3
1.60	1.018 8	1.017 7	1.016 7	1.015 7	1.014 7	1.013 9	1.013 1
1.70	1.020 0	1.018 8	1.017 7	1.016 7	1.015 7	1.014 8	1.013 9
1.80	1.021 3	1.020 0	1.018 8	1.017 7	1.016 6	1.015 6	1.014 7
1.90	1.022 5	1.021 1	1.019 8	1.018 7	1.017 5	1.016 5	1.015 5
2.00	1.023 7	1.022 2	1.020 9	1.019 7	1.018 5	1.017 4	1.016 4
2.10	1.024 9	1.023 4	1.022 0	1.020 7	1.019 4	1.018 3	1.017 2
2.20	1.026 1	1.024 5	1.023 0	1.021 6	1.020 3	1.019 1	1.018 0
2.30	1.027 4	1.025 7	1.024 1	1.022 7	1.021 3	1.020 0	1.018 8
2.40	1.028 6	1.026 8	1.025 2	1.023 7	1.022 2	1.020 9	1.019 6
2.50	1.029 8	1.028 0	1.026 3	1.024 7	1.023 1	1.021 7	1.020 4
2.60	1.031 1	1.029 1	1.027 3	1.025 7	1.024 1	1.022 6	1.021 3
2.70	1.032 3	1.030 3	1.028 4	1.026 7	1.025 0	1.023 5	1.022 1
2.80	1.033 5	1.031 4	1.029 5	1.027 7	1.026 0	1.024 4	1.022 9
2.90	1.034 8	1.032 6	1.030 6	1.028 7	1.026 9	1.025 2	1.023 7
3.00	1.036 0	1.033 7	1.031 6	1.029 7	1.027 8	1.026 1	1.024 5
3.10	1.037 3	1.034 9	1.032 7	1.030 7	1.028 8	1.027 0	1.025 3
3.20	1.038 5	1.036 1	1.033 8	1.031 7	1.029 7	1.027 9	1.026 1
3.30	1.039 8	1.037 2	1.034 9	1.032 7	1.030 6	1.028 7	1.027 0
3.40	1.041 0	1.038 4	1.036 0	1.033 7	1.031 6	1.029 6	1.027 8
3.50	1.042 3	1.039 6	1.037 0	1.034 7	1.032 5	1.030 5	1.028 6

表 A.2.2 (续)

$t/$ ℃	15	20	25	30	35	40	45
p (表压)/ MPa	F_z						
3.60	1.043 6	1.040 7	1.038 1	1.035 7	1.033 4	1.031 3	1.029 4
3.70	1.044 8	1.041 9	1.039 2	1.036 7	1.034 4	1.032 2	1.030 2
3.80	1.046 1	1.043 1	1.040 3	1.037 7	1.035 3	1.033 1	1.031 0
3.90	1.047 4	1.044 2	1.041 4	1.038 7	1.036 2	1.033 9	1.031 8
4.00	1.048 6	1.045 4	1.042 5	1.039 7	1.037 2	1.034 8	1.032 6
4.10	1.049 9	1.046 6	1.043 5	1.040 7	1.038 1	1.035 7	1.033 4
4.20	1.051 2	1.047 7	1.044 6	1.041 7	1.039 0	1.036 5	1.034 2
4.30	1.052 4	1.048 9	1.045 7	1.042 7	1.039 9	1.037 4	1.035 0
4.40	1.053 7	1.050 1	1.046 8	1.043 7	1.040 9	1.038 2	1.035 8
4.50	1.055 0	1.051 3	1.047 9	1.044 7	1.041 8	1.039 1	1.036 6
4.60	1.056 3	1.052 4	1.049 0	1.045 7	1.042 7	1.040 0	1.037 4
4.70	1.057 5	1.053 6	1.050 0	1.046 7	1.043 6	1.040 8	1.038 2
4.80	1.058 8	1.054 8	1.051 1	1.047 7	1.044 6	1.041 7	1.039 0
4.90	1.060 1	1.056 0	1.052 2	1.048 7	1.045 5	1.042 5	1.039 7
5.00	1.061 4	1.057 1	1.053 3	1.049 7	1.046 4	1.0434	1.040 5
5.10	1.062 6	1.058 3	1.054 4	1.050 7	1.047 3	1.044 2	1.041 3
5.20	1.063 9	1.059 5	1.055 4	1.051 7	1.048 2	1.045 1	1.042 1
5.30	1.065 2	1.060 7	1.056 5	1.052 7	1.049 2	1.045 9	1.042 9
5.40	1.066 5	1.061 8	1.057 6	1.053 7	1.050 1	1.046 7	1.043 7
5.50	1.067 8	1.063 0	1.058 7	1.054 7	1.051 0	1.047 6	1.044 4
5.60	1.069 0	1.064 2	1.059 7	1.055 7	1.051 9	1.048 4	1.045 2
5.70	1.070 3	1.065 3	1.060 8	1.056 7	1.052 8	1.049 2	1.046 0
5.80	1.071 6	1.066 5	1.061 9	1.057 6	1.053 7	1.050 1	1.046 7
5.90	1.072 9	1.067 7	1.062 9	1.058 6	1.054 6	1.050 9	1.047 5
6.00	1.074 1	1.068 8	1.064 0	1.059 6	1.055 5	1.051 7	1.048 3
6.10	1.075 4	1.070 0	1.065 1	1.060 6	1.056 4	1.052 6	1.019 0
6.20	1.076 7	1.071 1	1.066 1	1.061 5	1.057 3	1.053 4	1.049 8
6.30	1.077 9	1.072 3	1.067 2	1.062 5	1.058 2	1.054 2	1.050 5
6.40	1.079 2	1.073 4	1.068 2	1.063 5	1.059 1	1.055 0	1.051 3
6.50	1.080 5	1.074 6	1.069 3	1.064 4	1.059 9	1.055 8	1.052 0
6.60	1.081 7	1.075 7	1.070 3	1.065 4	1.060 8	1.056 6	1.052 8
6.70	1.083 0	1.076 9	1.071 4	1.066 4	1.061 7	1.057 4	1.053 5
6.80	1.084 2	1.078 0	1.072 4	1.067 3	1.062 6	1.058 2	1.054 2
6.90	1.085 5	1.079 1	1.073 4	1.068 2	1.063 4	1.059 0	1.055 0
7.00	1.086 7	1.080 3	1.074 5	1.069 2	1.064 3	1.059 8	1.055 7
7.10	1.088 0	1.081 4	1.075 5	1.070 1	1.065 2	1.060 6	1.056 4

表 A.2.2 (续)

$t/$ ℃	15	20	25	30	35	40	45
p (表压)/ MPa	F_z						
7.20	1.089 2	1.082 5	1.076 5	1.071 1	1.066 0	1.061 4	1.057 1
7.30	1.090 5	1.083 6	1.077 5	1.072 0	1.066 9	1.062 2	1.057 8
7.40	1.091 7	1.084 8	1.078 5	1.072 9	1.067 7	1.062 9	1.058 6
7.50	1.092 9	1.085 9	1.079 6	1.073 8	1.068 6	1.063 7	1.059 3
7.60	1.094 1	1.087 0	1.080 6	1.074 8	1.069 4	1.064 5	1.060 0
7.70	1.095 4	1.088 1	1.081 6	1.075 7	1.070 2	1.065 3	1.060 7
7.80	1.096 6	1.089 2	1.082 5	1.076 6	1.071 1	1.066 0	1.061 4
7.90	1.097 8	1.090 3	1.083 5	1.077 5	1.071 9	1.066 8	1.062 1
8.00	1.099 0	1.091 3	1.084 5	1.078 4	1.072 7	1.067 5	1.062 7
8.10	1.100 2	1.092 4	1.085 5	1.079 3	1.073 5	1.068 3	1.063 4
8.20	1.101 3	1.093 5	1.086 5	1.080 1	1.074 3	1.069 0	1.064 1
8.30	1.102 5	1.094 5	1.087 4	1.081 0	1.075 1	1.069 7	1.064 8
8.40	1.103 7	1.095 6	1.088 4	1.081 9	1.075 9	1.070 5	1.065 4
8.50	1.104 9	1.096 6	1.089 3	1.082 8	1.076 7	1.071 2	1.066 1
8.60	1.106 0	1.097 7	1.090 3	1.083 6	1.077 5	1.071 9	1.066 8
8.70	1.107 2	1.098 7	1.091 2	1.084 5	1.078 3	1.072 6	1.067 4
8.80	1.108 3	1.099 7	1.092 1	1.085 3	1.079 1	1.073 3	1.068 0
8.90	1.109 4	1.100 8	1.093 1	1.086 2	1.079 8	1.074 0	1.068 7
9.00	1.110 6	1.101 8	1.094 0	1.087 0	1.080 6	1.074 7	1.069 3
9.10	1.111 7	1.102 8	1.094 9	1.087 8	1.081 3	1.075 4	1.069 9
9.20	1.112 8	1.103 8	1.095 8	1.088 6	1.082 1	1.076 1	1.070 6
9.30	1.113 9	1.104 8	1.096 7	1.089 4	1.082 8	1.076 8	1.071 2
9.40	1.115 0	1.105 7	1.097 5	1.090 2	1.083 6	1.077 4	1.071 8
9.50	1.116 1	1.106 7	1.098 4	1.091 0	1.084 3	1.078 1	1.072 4
9.60	1.117 1	1.107 7	1.099 3	1.091 8	1.085 0	1.078 7	1.073 0
9.70	1.118 2	1.108 6	1.100 1	1.092 6	1.085 7	1.079 4	1.073 6
9.80	1.119 3	1.109 5	1.101 0	1.093 4	1.086 4	1.080 0	1.074 2
9.90	1.120 3	1.110 5	1.101 8	1.094 1	1.087 1	1.080 7	1.074 8
10.00	1.121 3	1.111 4	1.102 6	1.094 9	1.087 8	1.081 3	1.075 3
10.10	1.122 3	1.112 3	1.103 4	1.095 6	1.088 5	1.081 9	1.075 9
10.20	1.123 3	1.113 2	1.104 2	1.096 4	1.089 1	1.082 5	1.076 5
10.30	1.124 3	1.114 1	1.105 0	1.097 1	1.089 8	1.083 1	1.077 0
10.40	1.125 3	1.114 9	1.105 8	1.097 8	1.090 5	1.083 7	1.077 6
10.50	1.126 2	1.115 8	1.106 6	1.098 5	1.091 1	1.084 3	1.078 1
10.60	1.127 2	1.116 6	1.107 4	1.099 2	1.091 8	1.084 9	1.078 6
10.70	1.128 1	1.117 5	1.108 1	1.099 9	1.092 4	1.085 5	1.079 2

表 A.2.2 (续)

$t/$ ℃	15	20	25	30	35	40	45
p (表压)/ MPa	F_z						
10.80	1.129 0	1.118 3	1.108 9	1.100 6	1.093 0	1.086 1	1.079 7
10.90	1.129 9	1.119 1	1.109 6	1.101 2	1.093 6	1.086 6	1.080 2
11.00	1.130 8	1.119 9	1.110 3	1.101 9	1.094 2	1.087 2	1.080 7
11.10	1.131 6	1.120 7	1.111 0	1.102 6	1.094 8	1.087 7	1.081 2
11.20	1.132 5	1.121 4	1.111 7	1.103 2	1.095 4	1.088 3	1.081 7
11.30	1.133 3	1.122 2	1.112 4	1.103 8	1.096 0	1.088 8	1.082 2
11.40	1.134 1	1.122 9	1.113 1	1.104 4	1.096 5	1.089 3	1.082 6
11.50	1.134 9	1.123 7	1.113 7	1.105 0	1.097 1	1.089 8	1.083 1
11.60	1.125 7	1.124 4	1.114 4	1.105 6	1.097 7	1.090 3	1.083 6
11.70	1.136 5	1.125 1	1.115 0	1.106 2	1.098 2	1.090 8	1.084 0
11.80	1.137 2	1.125 8	1.115 6	1.106 8	1.098 7	1.091 3	1.084 5
11.90	1.138 0	1.126 4	1.116 3	1.107 4	1.099 2	1.091 8	1.084 9
12.00	1.138 7	1.127 1	1.116 9	1.107 9	1.099 8	1.092 2	1.085 3
$t/$ ℃	50	55	60	65	70	75	90
p (表压)/ MPa	F_z						
0.00	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
0.10	1.000 7	1.000 7	1.000 6	1.000 7	1.000 5	1.000 5	1.000 6
0.20	1.001 5	1.001 4	1.001 3	1.001 3	1.001 2	1.001 1	1.001 0
0.30	1.002 3	1.002 2	1.002 0	1.001 9	1.001 8	1.001 7	1.001 6
0.40	1.003 1	1.002 9	1.002 7	1.002 6	1.002 5	1.002 3	1.002 2
0.50	1.003 9	1.003 6	1.003 4	1.003 2	1.003 1	1.002 9	1.002 7
0.60	1.004 6	1.004 4	1.004 1	1.003 9	1.003 7	1.003 5	1.003 3
0.70	1.005 4	1.005 1	1.004 8	1.004 5	1.004 3	1.004 1	1.003 8
0.80	1.006 2	1.005 8	1.005 5	1.005 2	1.004 9	1.004 6	1.004 4
0.90	1.006 9	1.006 6	1.006 2	1.005 8	1.005 5	1.005 2	1.004 9
1.00	1.007 7	1.007 3	1.006 9	1.006 5	1.006 1	1.005 8	1.005 4
1.10	1.008 5	1.008 0	1.007 5	1.007 1	1.006 7	1.006 3	1.006 0
1.20	1.009 2	1.008 7	1.008 2	1.007 8	1.007 3	1.006 9	1.006 5
1.30	1.010 0	1.009 4	1.008 9	1.008 4	1.007 9	1.007 5	1.007 1
1.40	1.010 8	1.010 2	1.009 6	1.009 1	1.008 5	1.008 1	1.007 6
1.50	1.011 6	1.010 9	1.010 3	1.009 7	1.009 1	1.008 6	1.008 1
1.60	1.012 3	1.011 6	1.010 9	1.010 3	1.009 7	1.009 2	1.008 7
1.70	1.013 1	1.012 3	1.011 6	1.011 0	1.010 3	1.009 7	1.009 2
1.80	1.023 9	1.013 1	1.012 3	1.011 6	1.010 9	1.010 3	1.009 7

表 A.2.2 (续)

$t/$ ℃	50	55	60	65	70	75	90
p (表压)/ MPa	F_2						
1.90	1.014 6	1.013 8	1.013 0	1.012 2	1.011 5	1.010 9	1.010 2
2.00	1.015 4	1.014 5	1.013 7	1.012 9	1.012 1	1.011 4	1.010 8
2.10	1.016 2	1.015 2	1.014 3	1.013 5	1.012 7	1.012 0	1.011 3
2.20	1.016 9	1.015 9	1.015 0	1.014 1	1.013 3	1.012 5	1.011 8
2.30	1.017 7	1.016 7	1.015 7	1.014 8	1.013 9	1.013 1	1.012 3
2.40	1.018 5	1.017 4	1.016 3	1.015 4	1.014 5	1.013 6	1.012 8
2.50	1.019 2	1.018 1	1.017 0	1.016 0	1.015 1	1.014 2	1.013 3
2.60	1.020 0	1.018 8	1.017 7	1.016 6	1.015 7	1.014 7	1.013 9
2.70	1.020 8	1.019 5	1.018 3	1.017 3	1.016 2	1.015 3	1.014 4
2.80	1.021 5	1.020 2	1.019 0	1.017 9	1.016 8	1.015 8	1.014 9
2.90	1.022 3	1.020 9	1.019 7	1.018 5	1.017 4	1.016 4	1.015 4
3.00	1.023 0	1.021 6	1.020 3	1.019 1	1.018 0	1.016 9	1.015 9
3.10	1.023 8	1.022 3	1.021 0	1.019 7	1.018 5	1.017 4	1.016 4
3.20	1.024 5	1.023 1	1.021 7	1.020 3	1.019 1	1.018 0	1.016 9
3.30	1.025 3	1.023 8	1.022 3	1.021 0	1.019 7	1.018 5	1.017 4
3.40	1.026 1	1.024 5	1.023 0	1.021 6	1.020 3	1.019 0	1.017 9
3.50	1.026 8	1.025 2	1.023 6	1.022 2	1.020 8	1.019 6	1.018 4
3.60	1.027 6	1.025 9	1.024 3	1.022 8	1.021 4	1.020 1	1.018 9
3.70	1.028 3	1.026 6	1.024 9	1.023 4	1.022 0	1.020 6	1.019 3
3.80	1.029 1	1.027 3	1.025 6	1.024 0	1.022 5	1.021 1	1.019 8
3.90	1.029 8	1.028 0	1.026 2	1.024 6	1.023 1	1.021 7	1.020 3
4.00	1.030 5	1.028 6	1.026 9	1.025 2	1.023 6	1.022 2	1.020 8
4.10	1.031 3	1.029 3	1.027 5	1.025 8	1.024 2	1.022 7	1.021 3
4.20	1.032 0	1.030 0	1.028 1	1.026 4	1.024 7	1.023 2	1.021 8
4.30	1.032 8	1.030 7	1.028 8	1.027 0	1.025 3	1.023 7	1.022 2
4.40	1.033 5	1.031 4	1.029 4	1.027 6	1.025 8	1.024 2	1.022 7
4.50	1.034 3	1.032 1	1.030 1	1.028 2	1.026 4	1.024 7	1.023 2
4.60	1.035 0	1.032 8	1.030 7	1.028 7	1.026 9	1.025 2	1.023 6
4.70	1.035 7	1.033 4	1.031 3	1.029 3	1.027 5	1.025 7	1.024 1
4.80	1.036 5	1.034 1	1.031 9	1.029 9	1.028 0	1.026 2	1.024 6
4.90	1.037 2	1.034 8	1.032 6	1.030 5	1.028 5	1.026 7	1.025 0
5.00	1.037 9	1.035 5	1.033 2	1.031 1	1.029 1	1.027 2	1.025 5

表 A.2.2 (续)

$t/$ $^{\circ}\text{C}$	50	55	60	65	70	75	90
$p(\text{表压})/$ MPa	F_2						
5.10	1.038 6	1.036 1	1.033 8	1.031 6	1.029 6	1.027 7	1.025 9
5.20	1.039 4	1.036 8	1.034 4	1.032 2	1.030 1	1.028 2	1.026 4
5.30	1.040 1	1.037 5	1.035 0	1.032 8	1.030 7	1.028 7	1.026 8
5.40	1.040 8	1.038 1	1.035 7	1.033 3	1.031 2	1.029 2	1.027 3
5.50	1.041 5	1.038 8	1.036 3	1.033 9	1.031 7	1.029 7	1.027 7
5.60	1.042 2	1.039 4	1.036 9	1.034 5	1.032 2	1.030 1	1.028 2
5.70	1.042 9	1.040 1	1.037 5	1.035 0	1.032 7	1.030 6	1.028 6
5.80	1.043 6	1.040 8	1.038 1	1.035 6	1.033 3	1.031 1	1.029 0
5.90	1.044 3	1.041 4	1.038 7	1.036 1	1.033 8	1.031 6	1.029 5
6.00	1.045 0	1.042 0	1.039 3	1.036 7	1.034 3	1.032 0	1.029 9
6.10	1.045 7	1.042 7	1.039 9	1.037 2	1.034 8	1.032 5	1.030 3
6.20	1.046 4	1.043 3	1.040 5	1.037 8	1.035 3	1.032 9	1.030 8
6.30	1.047 1	1.044 0	1.041 0	1.038 3	1.035 8	1.033 4	1.031 2
6.40	1.047 8	1.044 6	1.041 6	1.038 9	1.036 3	1.033 9	1.031 6
6.50	1.048 5	1.045 2	1.042 2	1.039 4	1.036 8	1.034 3	1.032 0
6.60	1.049 2	1.045 9	1.042 8	1.039 9	1.037 3	1.034 8	1.032 4
6.70	1.049 9	1.046 5	1.043 4	1.040 4	1.037 7	1.035 2	1.032 8
6.80	1.050 5	1.047 1	1.043 9	1.041 0	1.038 2	1.035 7	1.033 3
6.90	1.051 2	1.047 7	1.044 5	1.041 5	1.038 7	1.036 1	1.033 7
7.00	1.051 9	1.048 3	1.045 1	1.042 0	1.039 2	1.036 5	1.034 1
7.10	1.052 5	1.048 9	1.045 6	1.042 5	1.039 6	1.037 0	1.034 5
7.20	1.053 2	1.049 6	1.046 2	1.043 0	1.040 1	1.037 4	1.034 9
7.30	1.053 9	1.050 2	1.046 7	1.043 5	1.040 6	1.037 8	1.035 2
7.40	1.054 5	1.050 8	1.047 3	1.044 1	1.041 0	1.038 2	1.035 6
7.50	1.055 2	1.051 4	1.047 8	1.044 6	1.041 5	1.038 7	1.036 0
7.60	1.055 8	1.051 9	1.048 4	1.045 1	1.042 0	1.039 1	1.036 4
7.70	1.056 4	1.052 5	1.048 9	1.045 5	1.042 4	1.039 5	1.036 8
7.80	1.057 1	1.053 1	1.049 4	1.046 0	1.042 9	1.039 9	1.037 2
7.90	1.057 7	1.053 7	1.050 0	1.046 5	1.043 3	1.040 3	1.037 5
8.00	1.058 3	1.054 3	1.050 5	1.047 0	1.043 8	1.040 7	1.037 9
8.10	1.059 0	1.054 8	1.051 0	1.047 5	1.044 2	1.041 1	1.038 3
8.20	1.059 6	1.055 4	1.051 5	1.048 0	1.044 6	1.041 5	1.038 6
8.30	1.060 2	1.056 0	1.052 1	1.048 4	1.045 1	1.041 9	1.039 0

表 A.2.2 (续)

$t/$ ℃	50	55	60	65	70	75	90
p (表压)/ MPa	F_z						
8.40	1.060 8	1.056 5	1.052 6	1.048 9	1.045 5	1.042 3	1.039 3
8.50	1.061 4	1.057 1	1.053 1	1.049 4	1.045 9	1.042 7	1.039 7
8.60	1.062 0	1.057 6	1.053 6	1.049 8	1.046 3	1.043 1	1.040 0
8.70	1.062 6	1.058 2	1.054 1	1.050 3	1.046 7	1.043 5	1.040 4
8.80	1.063 2	1.058 7	1.054 6	1.050 7	1.047 1	1.043 8	1.040 7
8.90	1.063 8	1.059 2	1.055 0	1.051 2	1.047 6	1.044 2	1.041 1
9.00	1.064 4	1.059 8	1.055 5	1.051 6	1.048 0	1.044 6	1.041 4
9.10	1.064 9	1.060 3	1.056 0	1.052 0	1.048 4	1.044 9	1.041 7
9.20	1.065 5	1.060 8	1.056 5	1.052 5	1.048 7	1.045 3	1.042 1
9.30	1.066 1	1.061 3	1.057 0	1.052 9	1.049 1	1.045 6	1.042 4
9.40	1.066 6	1.061 8	1.057 4	1.053 3	1.049 5	1.046 0	1.042 7
9.50	1.067 2	1.062 3	1.057 9	1.053 7	1.049 9	1.046 3	1.043 0
9.60	1.067 7	1.062 8	1.058 3	1.054 2	1.050 3	1.046 7	1.043 3
9.70	1.068 3	1.063 3	1.058 8	1.054 6	1.050 7	1.047 0	1.043 6
9.80	1.068 8	1.063 8	1.059 2	1.055 0	1.051 0	1.047 4	1.043 9
9.90	1.069 3	1.064 3	1.059 7	1.055 4	1.051 4	1.047 7	1.044 2
10.00	1.069 8	1.064 8	1.060 1	1.055 8	1.051 7	1.048 0	1.044 5
10.10	1.070 4	1.065 2	1.060 5	1.056 2	1.052 1	1.048 3	1.044 8
10.20	1.070 9	1.065 7	1.060 9	1.056 5	1.052 5	1.048 7	1.045 1
10.30	1.071 4	1.066 2	1.061 4	1.056 9	1.052 8	1.049 0	1.045 4
10.40	1.071 9	1.066 6	1.061 8	1.057 3	1.053 1	1.049 3	1.045 7
10.50	1.072 4	1.067 1	1.062 2	1.057 7	1.053 5	1.049 6	1.046 0
10.60	1.072 9	1.067 5	1.062 6	1.058 0	1.053 8	1.049 9	1.046 2
10.70	1.073 3	1.068 0	1.063 0	1.058 4	1.054 1	1.050 2	1.046 5
10.80	1.073 8	1.068 4	1.063 4	1.058 8	1.054 5	1.050 5	1.046 8
10.90	1.074 3	1.068 8	1.063 8	1.059 1	1.054 8	1.050 8	1.047 0
11.00	1.074 7	1.069 2	1.064 1	1.059 4	1.055 1	1.051 1	1.047 3
11.10	1.075 2	1.069 6	1.064 5	1.059 8	1.055 4	1.051 3	1.047 5
11.20	1.075 6	1.070 0	1.064 9	1.060 1	1.055 7	1.051 6	1.047 8
11.30	1.076 1	1.070 4	1.065 3	1.060 5	1.056 0	1.051 9	1.048 0
11.40	1.076 5	1.070 8	1.065 6	1.060 8	1.056 3	1.052 1	1.048 3
11.50	1.076 9	1.071 2	1.066 0	1.061 1	1.056 6	1.052 4	1.048 5
11.60	1.077 3	1.071 6	1.066 3	1.061 4	1.056 9	1.052 7	1.048 7
11.70	1.077 8	1.072 0	1.066 7	1.061 7	1.057 2	1.052 9	1.049 0
11.80	1.078 2	1.072 4	1.067 0	1.062 0	1.057 4	1.053 2	1.049 2
11.90	1.078 6	1.072 7	1.067 3	1.062 3	1.057 7	1.053 4	1.049 4
12.00	1.078 9	1.073 1	1.067 6	1.062 6	1.058 0	1.053 6	1.049 6

A.2.3 天然气常用组分的摩尔质量、摩尔发热量、求和因子和压缩因子表(表 A.3)

该表用于计算天然气的真实相对密度和发热量等物性参数。

表 A.3 天然气常用组分的摩尔质量、摩尔发热量、求和因子和压缩因子表

组 分	摩尔质量 M_j / kg/kmol)	摩尔发热量 $\overline{H}_{s_j}^0$ / (MJ/kmol) 101.325 kPa 293.15 K	求和因子 $\sqrt{b_{ij}}$ 101.325 kPa 293.15 K	压缩因子 Z_{nj} / 101.325 kPa 293.15 K
甲烷	16.043	891.09	0.0436	0.998 1
乙烷	30.070	1 561.41	0.089 4	0.992 0
丙烷	44.097	2 220.13	0.128 8	0.983 4
丁烷	58.123	2 878.57	0.178 3	0.968 2
2-甲基丙烷	58.123	2 869.38	0.170 3	0.971
戊烷	72.150	3 537.17	0.234 5	0.945
2-甲基丁烷	72.150	3 530.24	0.216 8	0.953
2,2-二甲基丙烷	72.150	3 516.01	0.202 5	0.959
己烷	86.177	4 196.58	0.284 6	0.919
2-甲基戊烷	86.177	4 188.95	0.272 0	0.926
3-甲基戊烷	86.177	4 191.54	0.268 3	0.928
2,2-二甲基丁烷	86.177	4 179.15	0.255 0	0.935
2,3-二甲基丁烷	86.177	4 186.93	0.256 9	0.934
庚烷	100.204	4 855.29	0.352 1	0.876
辛烷	114.231	5 513.88	0.427 8	0.817
环己烷	84.161	3 954.47	0.275 7	0.924
甲基环己烷	98.188	4 602.35	0.325 6	0.894
苯	78.114	3 302.15	0.253 0	0.936
甲苯	92.141	3 948.84	0.328 6	0.892
氢气	2.015 9	285.99	−0.005 1	1.000 6
一氧化碳	28.010	282.95	0.020 0	0.999 6
硫化氢	34.082	562.19	0.100 0	0.990
氦气	4.002 6	—	0.000 0	1.000 5
氩气	39.948	—	0.026 5	0.999 3
氮气	28.013 5	—	0.017 3	0.999 7
氧气	31.998 8	—	0.026 5	0.999 3
二氧化碳	44.010	—	0.072 8	0.994 4
水	18.015 3	44.224	0.219 1	0.952
空气	28.962 6	—	—	0.999 63

注：空气的标准组成按 GB/T 11062—1998 规定，基本数据来源于该标准。若含其他组分可查该标准和相关资料。

A.2.4 金属材料的线膨胀系数 Δ 值表(表 A.4)

该表用于计算在操作条件下的孔板开孔直径 d 和测量管内径 D 。

表 A.4 金属材料(20℃~100℃)的线膨胀系数值表

材 质	$\Delta/[10^6 \text{ mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})]$	材 质	$\Delta/[10^6 \text{ mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})]$
A3 号钢、15 号钢	11.75	Cr6SiMo	11.50
10 号钢	11.60	2Cr12Ni1MoWV	10.80
20 号钢	11.16	1Cr18Ni9Ti	16.60
45 号钢	11.59	普通碳钢	10.60~12.20
1Cr13、2Cr13	10.50	工业用铜	16.00~17.10
1Cr17	10.00	黄铜	17.80
12Cr1MoV	9.8~10.63	红铜	17.20

A.2.5 不同压力和温度下甲烷动力黏度 μ 值表(表 A.5)

该表用于计算在操作条件下的天然气动力黏度 μ_1 。

表 A.5 不同压力和温度下甲烷动力黏度 μ 值表

$t/^\circ\text{C}$	-15	0	15	30	45	60	75	90
$P(\text{绝})/\text{MPa}$	$\mu/(10^5 \text{ mPa} \cdot \text{s})$							
0.10	976	1 027	1 071	1 123	1 167	1 213	1 260	1 303
1.00	991	1 040	1 082	1 135	1 178	1 224	1 270	1 312
2.00	1 014	1 063	1 106	1 153	1 196	1 239	1 281	1 323
3.00	1 044	1 091	1 127	1 174	1 216	1 257	1 297	1 338
4.00	1 073	1 118	1 149	1 195	1 236	1 275	1 313	1 352
5.00	1 114	1 151	1 180	1 224	1 261	1 297	1 333	1 372
6.00	1 156	1 185	1 211	1 253	1 287	1 320	1 352	1 391
7.00	1 207	1 230	1 250	1 289	1 318	1 346	1 374	1 412
8.00	1 261	1 276	1 289	1 324	1 350	1 373	1 396	1 432
9.00	1 331	1 331	1 335	1 366	1 385	1 403	1 424	1 456
10.00	1 405	1 389	1 38 3	1 409	1 421	1 435	1 451	1 482

A.2.6 不同压力和温度下甲烷 c_p 及 c_v 值表(表 A.6)

该表用于计算在操作条件下的天然气比热容比。

表 A.6 不同压力和温度下甲烷 c_p 及 c_v 值表

$t/^\circ\text{C}$		-20	-10	0	10	20	30	40	50
$P(\text{绝})/\text{MPa}$		$C/[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$							
0.10	c_p	2.064	2.110	2.152	2.194	2.231	2.273	2.315	2.357
	c_v	1.537	1.583	1.624	1.666	1.704	1.746	1.788	1.825
1.00	c_p	2.147	2.184	2.222	2.260	2.298	2.335	2.369	2.403
	c_v	1.549	1.595	1.641	1.683	1.725	1.771	1.804	1.842
2.00	c_p	2.242	2.267	2.305	2.338	2.376	2.406	2.435	2.460
	c_v	1.549	1.595	1.649	1.695	1.745	1.787	1.825	1.859

表 A.6 (续)

$t/^\circ\text{C}$		-20	-10	0	10	20	30	40	50
$P(\text{绝})/\text{MPa}$		$C/[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})]$							
3.00	c_p	2.357	2.366	2.391	2.421	2.455	2.480	2.501	2.518
	c_v	1.549	1.599	1.662	1.712	1.766	1.808	1.842	1.871
4.00	c_p	2.492	2.481	2.486	2.507	2.533	2.550	2.563	2.576
	c_v	1.581	1.623	1.662	1.716	1.775	1.817	1.854	1.887
5.00	c_p	2.664	2.604	2.593	2.606	2.615	2.624	2.629	2.638
	c_v	1.614	1.632	1.678	1.732	1.783	1.821	1.859	1.892
6.00	c_p	2.868	2.728	2.696	2.696	2.696	2.695	2.694	2.692
	c_v	1.666	1.644	1.687	1.753	1.803	1.841	1.871	1.900
7.00	c_p	3.311	3.001	2.906	2.872	2.849	2.834	2.814	2.803
	c_v	1.769	1.645	1.672	1.735	1.785	1.831	1.864	1.901
8.00	c_p	3.485	3.128	3.005	2.956	2.924	2.900	2.875	2.859
	c_v	1.746	1.619	1.648	1.722	1.784	1.833	1.871	1.905
9.00	c_p	3.633	3.236	3.092	3.034	2.994	2.954	2.932	2.904
	c_v	1.708	1.594	1.627	1.710	1.780	1.834	1.875	1.912
10.00	c_p	3.778	3.347	3.179	3.109	3.060	3.018	2.986	2.953
	c_v	1.671	1.566	1.603	1.697	1.779	1.837	1.883	1.917

A.2.7 钢管内壁等效绝对粗糙度 K 值表(表 A.7)

该表用于估算测量管内壁粗糙度之用。

表 A.7 钢管内壁等效绝对粗糙度 K 值表

管子状况	K/mm	Ra/mm	管子状况	K/mm	Ra/mm
新冷拔无缝管	<0.03	<0.01	有结皮钢管	$0.5\sim2$	$0.15\sim0.6$
新热拉无缝管	$0.05\sim0.10$	$0.015\sim0.03$	严重结皮钢管	>2	>0.6
新轧制无缝管	$0.05\sim0.10$	$0.015\sim0.03$	涂沥青新钢管	$0.03\sim0.05$	$0.01\sim0.015$
新纵缝焊接管	$0.05\sim0.10$	$0.015\sim0.03$	涂沥青一般钢管	$0.10\sim0.20$	$0.03\sim0.06$
新螺旋焊接管	0.10	0.03	镀锌钢管	0.13	0.04
轻微锈蚀钢管	$0.10\sim0.20$	$0.03\sim0.06$	锈蚀钢管	$0.2\sim0.30$	$0.06\sim0.10$

注： Ra 等于 K/π 。

A.2.8 常用隔离液种类及其性质表(表 A.8)

当测量含有腐蚀性气体的天然气采用隔离器时,可参照该表选用隔离液。

表 A.8 常用隔离液种类及其性质表

种 类	20℃时密度/ (kg/m^3)	冰点/ $^\circ\text{C}$	沸点/ $^\circ\text{C}$
甲基硅油	$0.93\sim0.94^a$	-65	≥ 200
	$0.95\sim0.96^a$	-60	≥ 200

表 A.8 (续)

种 类	20℃时密度/ (kg/m³)	冰点/ ℃	沸点/℃
甘油酒石酸酯	1 262	—17	290
甘油酒石酸酯和水混合物 (体积比 1∶1)	1 130	—22.5	106
邻苯二甲酸二丁酯	1 047	—35	340
乙二醇	1 113	—12	197
乙二醇和水混合物 (质量比 1∶1)	1 070	—35.6	110
变压器油		—10～—25	135
液态石蜡	0.87～0.895 ^a	—15～—18	330～396
乙醇	789	—112	78
^a 为 25℃时密度/25℃时纯水的相对密度。			



附录 B
(资料性附录)
流动调整器性能测试

B.1 说明

本标准 5.4.3、5.4.4 对 19 管束流动调整器和 Zanker 整流板的设计、制造和安装方式作了规定，这些规定是 ISO 5167 和 AGA No. 3 根据大量试验研究资料作出的。从设计、制造及安装方式到上游阻流件型式和分布取得了统一认识并基本达到了标准化。19 管束流动调整器和 Zanker 整流板，除试制定型、改型定型、周期抽检、停产恢复和仲裁检验时需进行型式批准的性能测试外，一般情况只需几何尺寸检验。

其他型式流动调整器的设计、试制和使用，应按 B.2、B.3 进行性能测试，并提供流出系数的微小变化和安装方式。

流动调整器性能测试的目的是为了证明在孔板上游安装有各式各样复杂的阻流件，其直管段要求很长；而在直管段的规定位置安装流动调整器后减少了所需直管段长度，在规定的雷诺数范围和规定的 β 值范围满足流量测量的性能指标。

B.2 标准装置的评定测试要求

标准装置的评定测试应采用流动调整器性能测试相同的孔板和 β 值来进行。标准装置上游直管段应超过 $70 D$ ，各项技术规定不低于本标准 5.1、5.2 和 5.3，最好高一个等级。流体在孔板入口处速度分布是充分发展的并且无涡流（涡流角应小于 2° ）。为了评定测试设备性能和测试所用一次装置的合格性，每个一次装置的基准流出系数按测试设备所需的长直管段的流出系数计算，并应在未标定的一次装置流出系数计算公式的不确定度范围（8.4.2.1 和 9.2.2）之内。为了使测量系统的不确定度降到最低，标准装置的评定测试和流动调整器的性能测试应使用相同的测量仪表和设备。

B.3 流动调整器性能测试和评价

B.3.1 合格性试验

B.3.1.1 如果流动调整器通过节流装置 B.3.1.2 至 B.3.1.6 的合格试验后，该流动调整器可用于节流装置（ β 小于 0.67）的任何上游阻流件的安装条件。按照 B.3.1.6 测试设置的流动调整器与孔板和流动调整器与上游阻流件之间的直管段长度安装，而下游直管段也满足表 2 中下游直管段所列值，这时节流装置的流出系数的不确定度不增加。

B.3.1.2 测试项目

节流装置的直径比为 0.67 时，测试项目为 a) 至 c) 项；直径比为 0.4 时，测试项目为 c) 项。这些项目的测试，都应达到其流出系数与在很长直管段下得到的偏差应小于 0.23%。

- a) 在良好的流动条件下；
- b) 在 50% 闸阀开度的（或 D 形孔板）下游；
- c) 在旋涡发生器的下游（旋涡发生器在其下游 $18 D$ 处产生的旋涡角 $\geq 24^\circ$ ，在其下游 $30 D$ 处 $\geq 20^\circ$ ）。

旋涡由旋流发生器或其他装置产生，旋流发生器如图 B.1 所示的雪夫隆旋流发生器。

在流动调整器下游仍然有旋涡的情况下应包括 B.3.1.2c) 项的试验，因为旋涡在 $\beta=0.4$ 时对流出系数的影响大于 $\beta=0.67$ 时对流出系数的影响。

这些测试并不表示可在半关闭的闸阀下游进行流量测量，流量控制应在节流装置的下游进行。

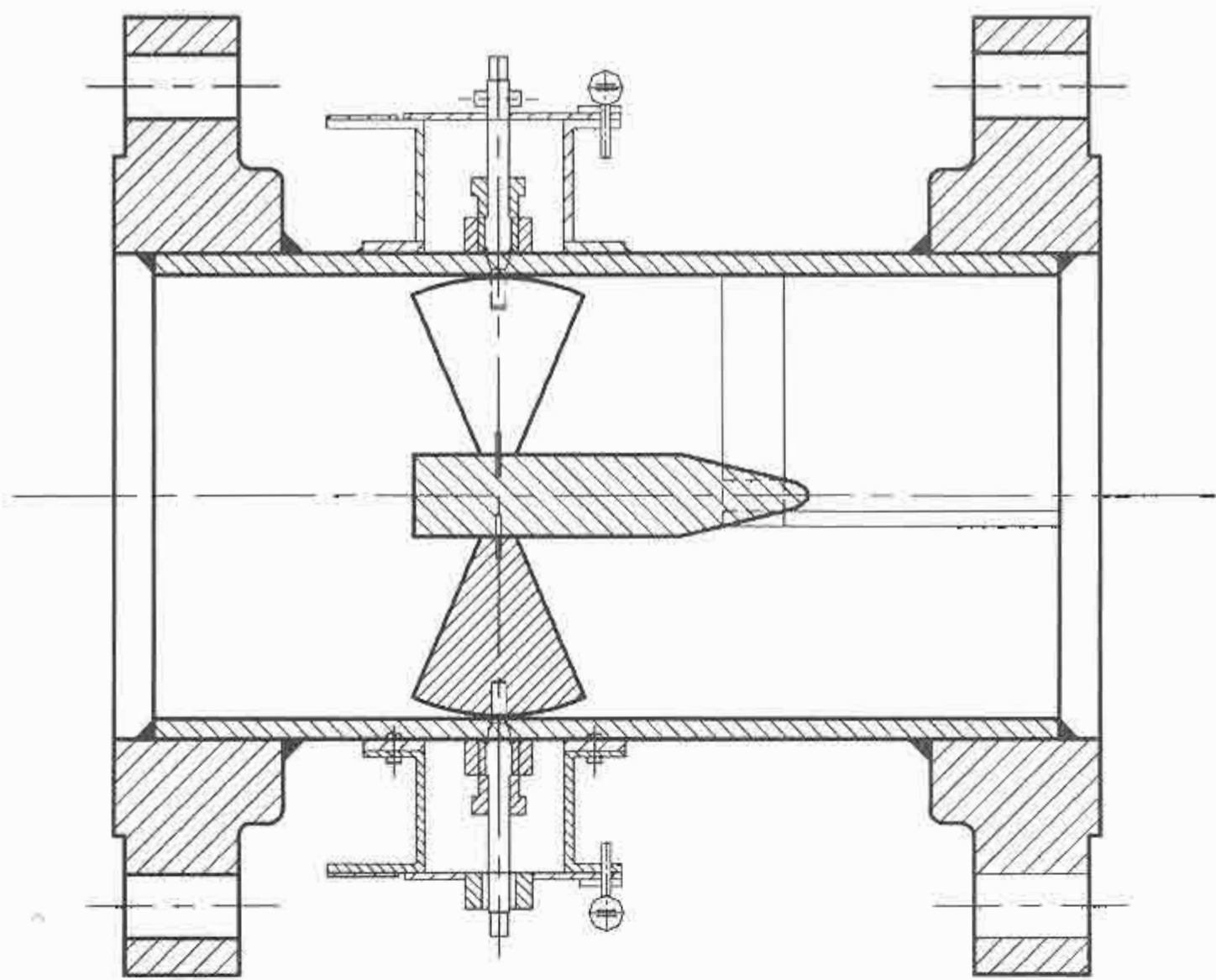


图 B.1 雪夫隆旋流器

B.3.1.3 测试结果

- a) 不会对良好的流动条件产生负面影响；
- b) 对消除高度非对称流动是有效的；
- c) 对消除旋涡流是有效的(如在汇气管的下游处)。

B.3.1.4 测试的流量范围(雷诺数范围)

- a) 如果要求流动调整器在所有雷诺数下都合格,就应确定它不但在一个雷诺数下满足 B.3.1.2, 而且在第二个雷诺数下也应满足 B.3.1.2。如果管子的两个雷诺数为 Re_{low} 和 Re_{high} , 它们应满足以下要求:

$$10^4 \leq Re_{low} \leq 10^6 \text{ 和 } Re_{high} \geq 10^6$$

$$\text{且 } \lambda(Re_{low}) - \lambda(Re_{high}) \geq 0.003\,6,$$

λ 为直管摩擦阻力系数,它可从莫氏(Moody)图中得到;也可用流体实验确定;还可从 Colebrook-White 公式[见式(D.5)]计算得到,式中 K 由表 A.7 查取。

- b) 当测试的雷诺数 Re_D 大于 3×10^6 时,并进行了 B.3.1.2 中的试验,则可用于 Re_D 大于 3×10^6 。
- c) 如果要求流动调整器在所有管径下使用,就应确定:流动调整器不但在某一规格下满足 B.3.1.2,而且在第二规格下也应满足 B.3.1.2。如果管子的两个直径为 D_{min} 和 D_{max} ,则应满足以下要求:

$$D_{min} \leq 110\text{ mm 和 } D_{max} \geq 190\text{ mm}$$

对于孔板确定直管摩擦阻力系数,要求流速剖面足够地变化,因安装引起的流出系数的变化,至少为最大允许变化量的两倍。

B.3.1.5 流动调整器与孔板之间以及上游阻流件与试验中使用的流动调整器之间的距离范围应确定下来,以便在应用孔板流量计时确定一个允许的距离范围。该距离用测量管内径倍数来表示。

B.3.1.6 如果通过合格性测试的流动调整器要应用于 β 大于 0.67, 首先应证明它满足 B.3.1.2 至 B.3.1.5, 其次应在 β_{max} 下进行 B.3.1.2、B.3.1.4 和 B.3.1.5 中所述的试验。测试项目的试验允许的流出系数的偏差增加到 $(0.63\beta_{max} \sim 0.192)\%$ 。在 B.3.1.5 的情况下,应符合:

$$\lambda(Re_{low}) - \lambda(Re_{high}) \geq \frac{0.002\,41\beta_{max} - 0.000\,735}{\beta_{max}^{3.5}}$$

只要流动调整器满足上述所有试验中的要求,并通过了 $\beta \leq \beta_{max}$ 的合格性试验。流动调整器与孔板之间的合格距离范围以及上游阻流件与试验中所用的流动调整器之间的合格距离范围按 B.3.1.5

确定。

B.3.2 专用测试

如果流动调整器不能进行上述合格性测试以用于任何上游阻流件的下游,可对其应用的阻流件进行专用测试。这时,其流出系数与很长直管段下得到的偏差应小于 0.23%。对于 β 在大于 0.67 至小于或等于 0.75 时偏差可增加到 $(0.63\beta \sim 0.192)\%$,此时无需增加流出系数的不确定度。

附 录 C
(资料性附录)
参数测量及信号引线

C.1 测量仪表选用规定

C.1.1 流量变化范围规定

C.1.1.1 采用特定量程测量仪表的单台孔板流量计的范围度一般为 1:3,不得超过 1:4。

C.1.1.2 范围度超过上述规定时,可采用多台不同量程的测量仪表、多路并联孔板进行分段计量,或采用其他形式的流量计。

C.1.2 仪表量程选用规定

C.1.2.1 差压仪表量程:差压值宜在满量程的 10%~90%范围内。

C.1.2.2 压力仪表量程:被测压力较稳定时,工作压力宜在等分刻度满量程的 30%~75%范围内;被测压力波动较大时,工作压力宜在等分刻度满量程的 30%~65%范围内。

C.1.2.3 温度测量仪表量程:天然气温度变化应在等分刻度温度仪表满量程的 30%~70%内。

C.1.2.4 当仪表量程超过上述规定时,除更换仪表外可采用下列方法进行调整:

- a) 更换孔板以调整直径比。本标准推荐使用阀式孔板夹持器,以便实现快速更换和检查清洗孔板;
- b) 更换直管段(包括测量管)及相应的孔板;
- c) 改变操作压力。

C.2 温度测量安装规定

C.2.1 温度计安装位置应符合 5.3.8 和 5.4.5 规定。

C.2.2 温度计套管或插孔管应伸入管道至公称内径的大约三分之一处,对于大口径管道(大于 300 mm,温度计套管或插孔管会产生共振)温度计的设计插入深度应不小于 75 mm。

C.2.3 温度计插入方式可直插或斜插。斜插应逆气流,并与直管段管道轴线成 45°角。

C.2.4 温度计插入处开孔内壁边缘应修圆,无毛刺、无焊瘤突入直管段管道内表面。

C.3 压力及差压测量规定

C.3.1 在操作条件下的上游静压 p_1 (或下游静压 p_2) 取自孔板上游侧取压孔(或下游侧取压孔)。

C.3.2 在操作条件下的差压 Δp 取自孔板上下游取压孔。

C.3.3 差压测量仪表宜与压力测量仪表的取压孔和导压管分开设置,在保证双重联接不导致差压测量误差时,允许将上游静压(或下游静压)取压口与差压测量仪表的上游(或下游)取压口共用。阀(或阀组)应有封记,以防未经许可的操作影响整个测量准确度。

为避免差压、静压测量的错误,导压管与气分析的取样导管不能共用。

C.4 取压孔设置规定

C.4.1 法兰取压孔开孔应符合 6.2.1 有关规定,角接取压孔应符合 6.2.2 有关规定。安装取压短管时,密封材料不得挤入取压孔内。取压短管不得突入法兰、夹紧环的取压孔内表面。

C.4.2 节流装置水平安装时,取压孔位置应按图 C.1 设置。

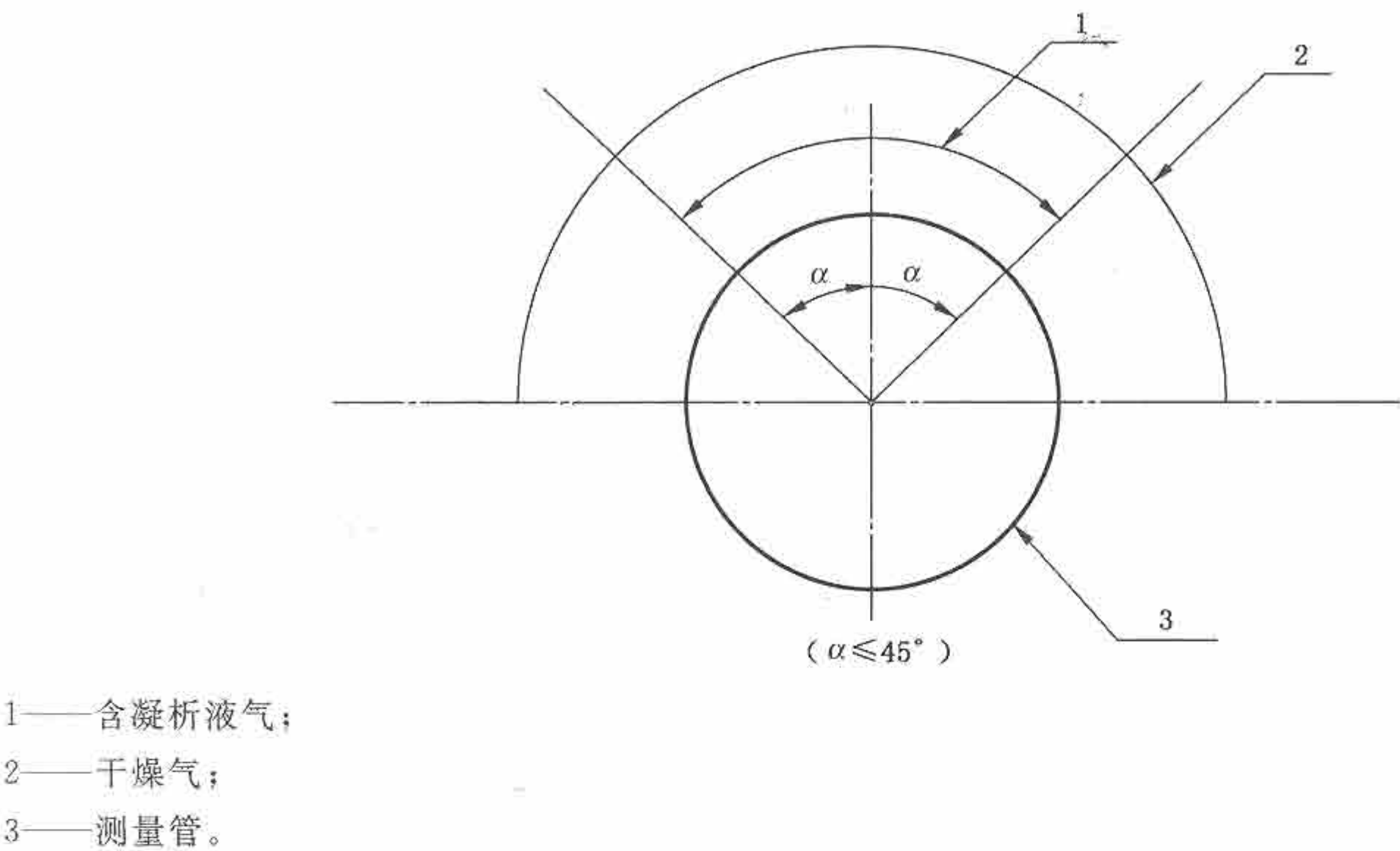


图 C.1 取压孔位置图

- C.4.3 节流装置垂直安装时,取压孔可设在沿周的任何方位上。
- C.4.4 取压回路采用直通式阀门及管件,其流通面积不应小于取压孔处所采用的取压短管的流通面积。

C.5 导压管规定

- C.5.1 导压管及管路附件应按介质及使用条件确定。导压管应按最短距离敷设。导压管长度和管径应按表 C.1 规定选用。
- C.5.2 可能出现凝析液时,导压管内径不得小于 13 mm。
- C.5.3 导压管应垂直或倾斜。可能出现凝液时,倾斜度不得小于 1 : 12。当引压管传送距离大于 30 m 时,应分段倾斜,并在最低点设置沉降器和排污阀。对不出现凝液时可酌情降低倾斜度。

表 C.1 导压管长度和内径表 单位为毫米

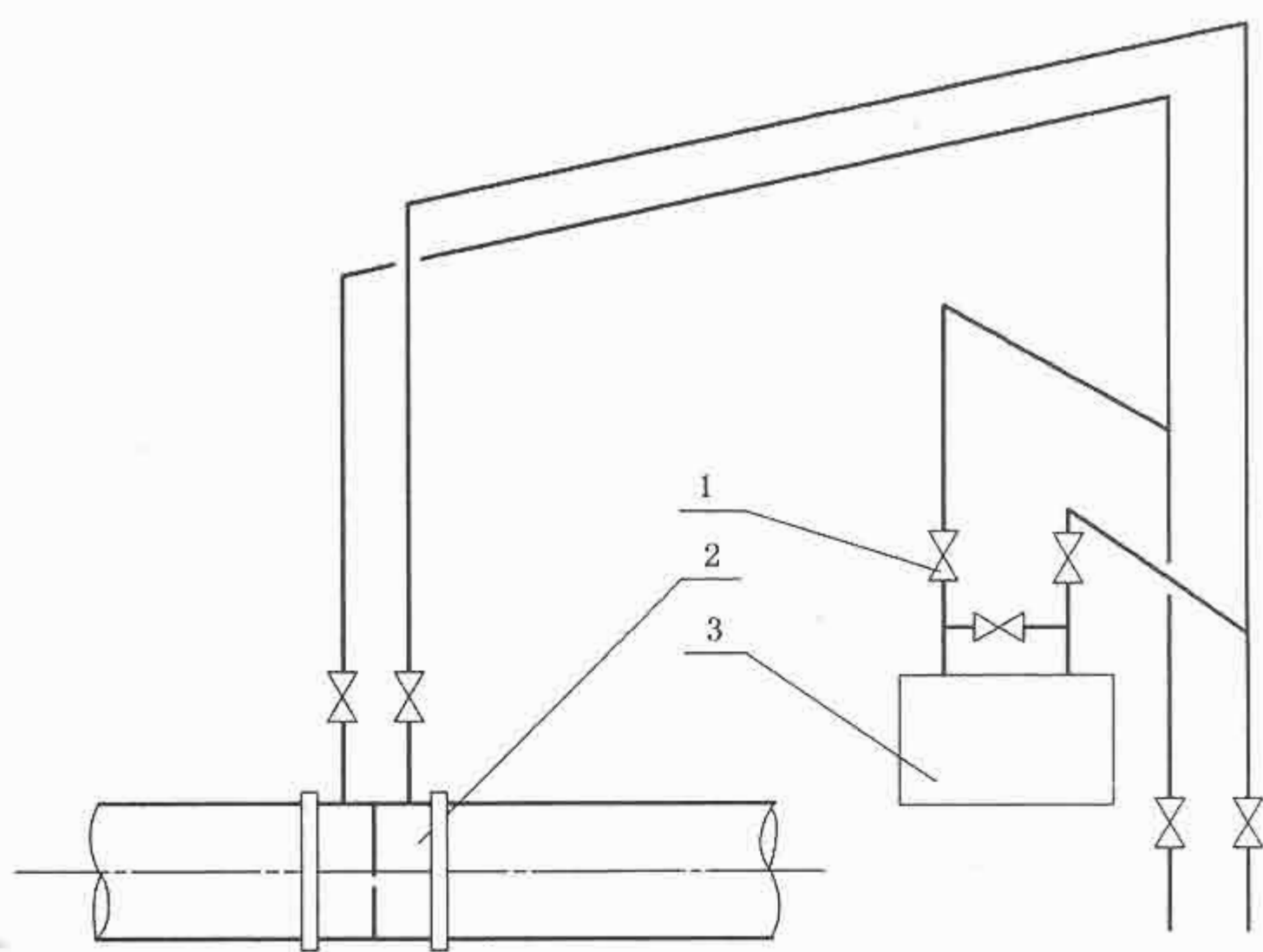
导压管长度	<16 000	16 000~45 000	45 000~90 000
导压管内径	7~9	10	13

- C.5.4 导压管弯曲处应圆滑,弯曲半径应不小于导压管外径的 5 倍。导压管对接时,不应有焊瘤突入和内径错位。
- C.5.5 导压管连接前和焊接后均应吹扫。导压管系统应进行强度和密封性试验。强度试验压力为工作压力的 1.5 倍,稳定 5 min,压力降不得超过 3%;密封性试验压力为工作压力,检查各联接部位无渗漏为合格。
- C.5.6 正负导压管应平行并列敷设,并远离发热源,在寒冷地区要采取防冻措施。
- C.5.7 测量含腐蚀性气体的天然气应在取压孔与测量仪表之间安装隔离器,隔离器应垂直安装在导压管上。差压测量的正负压隔离器安装标高应一致,隔离器液面应一样高,隔离液可按表 A.8 选用。

C.6 差压信号管路的安装

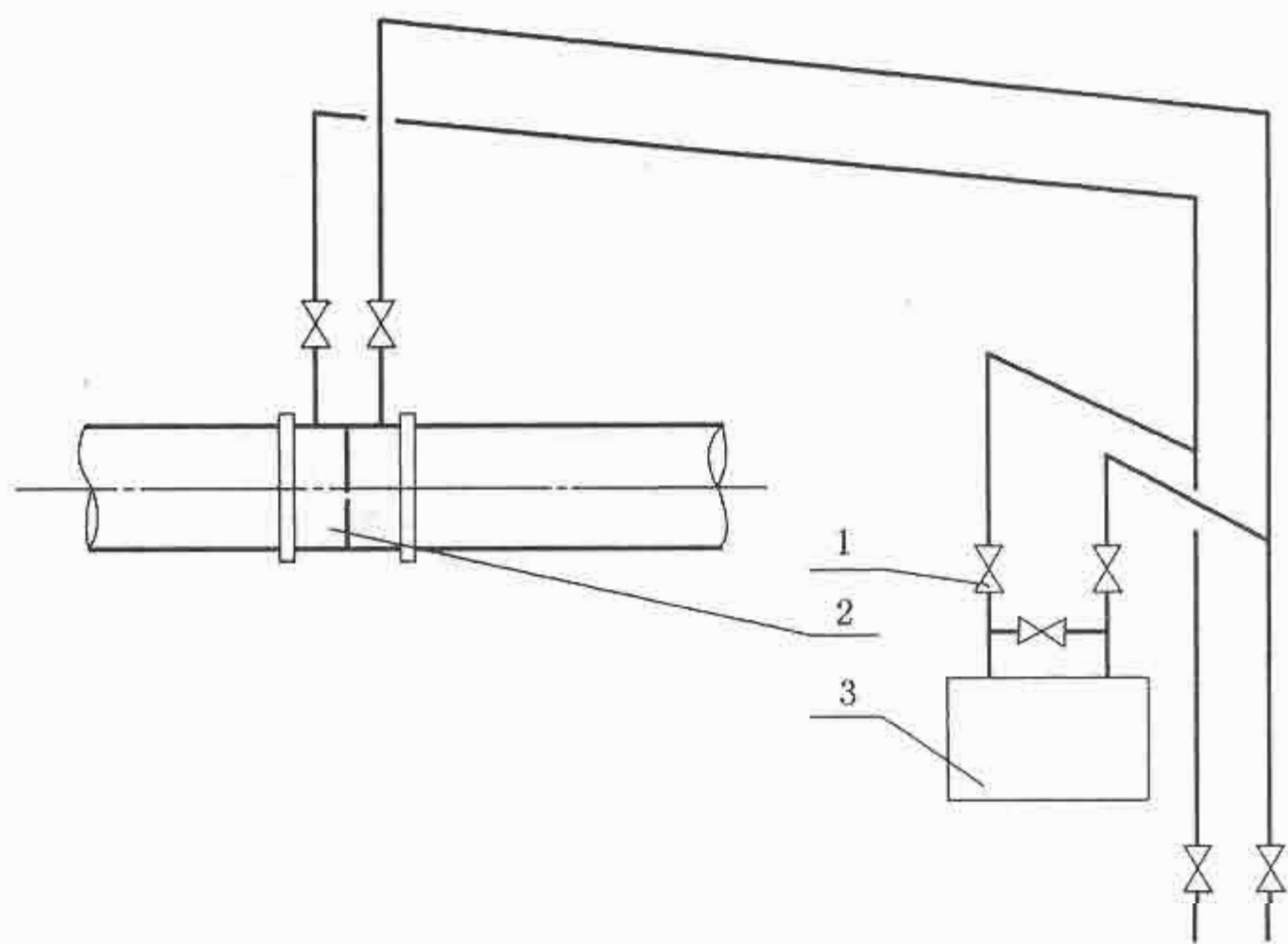
按天然气性质、节流装置与测量仪表相对位置关系,差静压信号管路有以下几种安装方式:

- C.6.1 无腐蚀性天然气,测量信号管路安装方式见图 C.2 和图 C.3。
- C.6.2 被测天然气有腐蚀性时,信号管路的安装方式见图 C.4 和图 C.5。



- 1——截断阀门；
- 2——节流装置；
- 3——差压计。

图 C.2 差压仪表装在节流装置上方(无腐蚀介质)



- 1——截断阀门；
- 2——节流装置；
- 3——差压计。

图 C.3 差压仪表装在节流装置下方(无腐蚀介质)

- 1——截断阀门；
- 2——节流装置；
- 3——差压计；
- 4——隔离器。

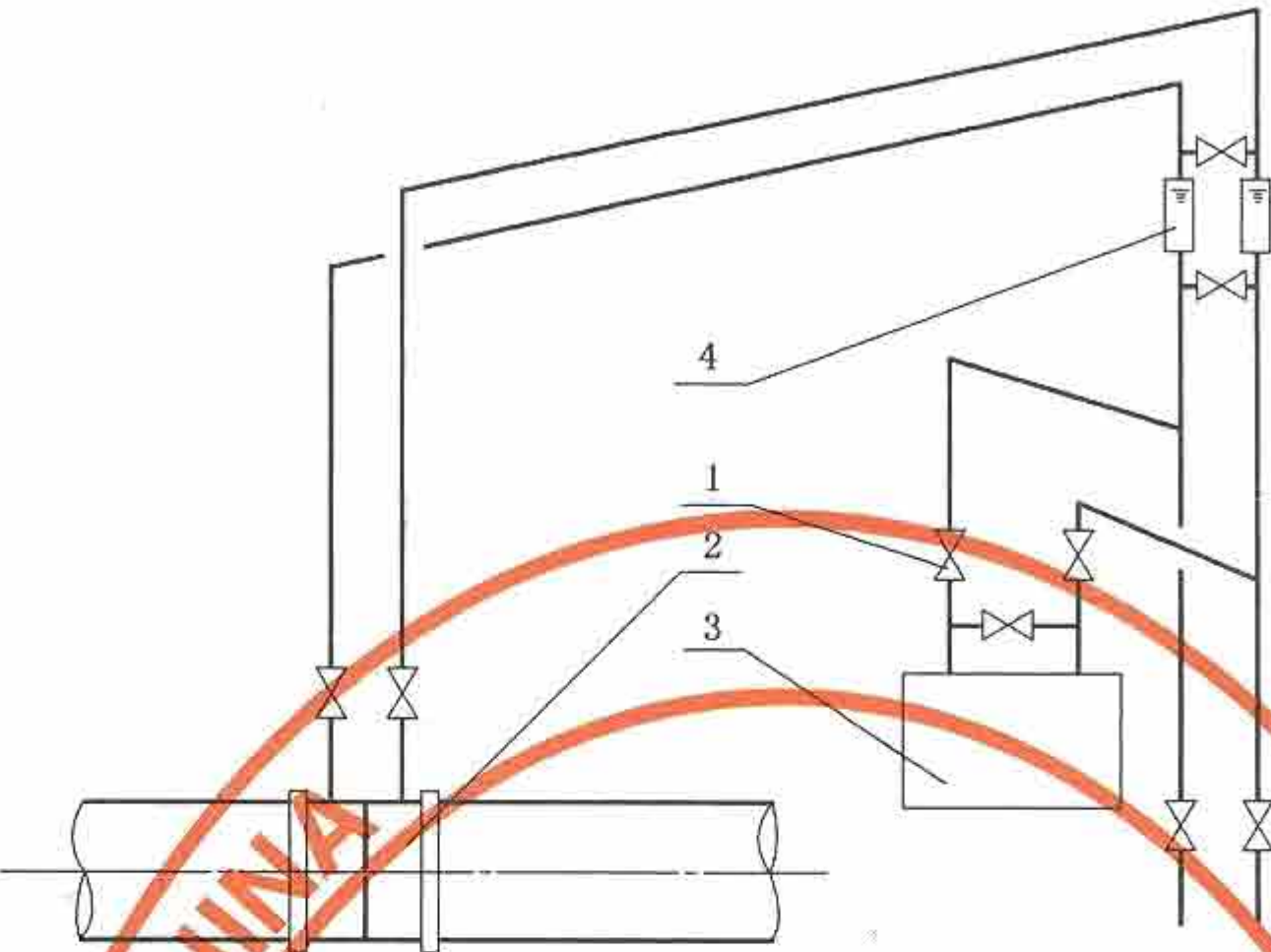


图 C.4 差压仪表装在节流装置上方(含腐蚀介质)

- 1——截断阀门；
- 2——节流装置；
- 3——差压计；
- 4——隔离器。

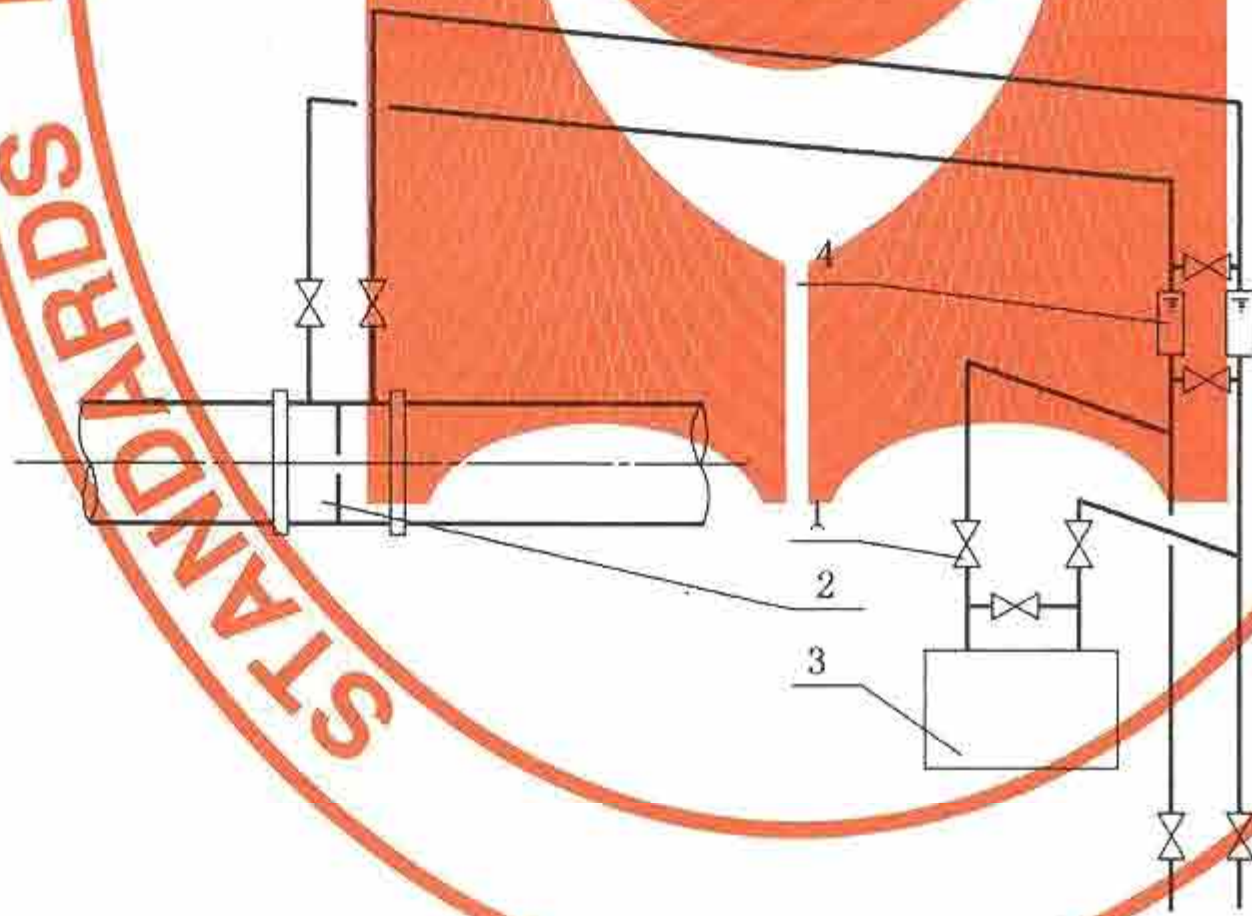


图 C.5 差压仪表装在节流装置下方(含腐蚀介质)

附录 D
(资料性附录)

节流装置在使用中出现部分偏离标准规定的处理

D.1 说明

节流装置的制造和安装应符合本标准规定才能投入使用。但由于天然气从地层中采出来,虽经分离、除尘或过滤,因其所含成分十分复杂,从单井采气计量、集气计量到配气计量,气质组成都各不相同,因而节流装置在使用过程中其冲刷、腐蚀情况也不相同。经调查研究表明,特别是对孔板直角入口边缘和测量管内壁的冲刷腐蚀尤为严重,这将影响到孔板直角入口边缘圆弧半径 r_K 和测量管内表面粗糙度算术平均偏差 Ra 的标准规定,流出系数 C 将发生变化,流量测量不确定度超过估算值。为了避免这种超差,推荐更换新孔板和新测量管,若要继续使用可求出 r_K 和粗糙度算术平均偏差 Ra ,对流出系数 C 修正后再使用。修正方法为:将原流出系数 C 乘上孔板尖锐度系数 b_K 或粗糙度系数 γ_{Re} 或者同时乘这两个系数(若两项均出现偏离),见式(D.1):

$$C' = C \times \gamma_{Re} \times b_K \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

- C' ——修正后的流出系数;
- C ——标准流出系数;
- γ_{Re} ——管道粗糙度修正系数;
- b_K ——孔板开孔入口边缘尖锐度修正系数。

D.2 孔板开孔直角入口边缘尖锐度受磨蚀的处理

孔板使用一段时间后,应对孔板进行全面检查,特别是开孔直角入口边缘的尖锐度。若发现肉眼可见的划痕、冲蚀和撞擦伤等缺陷,建议更换新孔板。假如暂时无新孔板更换,应对原孔板开孔直角入口边缘采用铸模法或铅箔压印法或测量仪进行实测,符合 6.1.6.1 和 6.1.6.2 规定时,不必修正。当 $r_K/d > 0.0004$ 时,应对原流出系数 C 进行修正,修正系数 b_K 按表 D.1 查取。

当 b_K 不等于 1 时,应对流出系数不确定度几何相加一个如下的附加不确定度:

- a) 当 r_K 的单测值与平均值比较,最大偏差在 $\pm 20\%$ 以内时,则附加不确定度见式(D.2):

$$\frac{\delta b_K}{b_K} = 0.5\% \dots\dots\dots (D.2)$$

- b) 当 b_K 的单测值与平均值比较,最大偏差超过上述范围时,则附加不确定度按式(D.3)计算,但不得小于 0.5%:

$$\frac{\delta b_K}{b_K} = 0.5(b_K - 1) \times 100\% \dots\dots\dots (D.3)$$

表 D.1 b_K 与 r_K/d 的关系

r_K/d	≤ 0.0004	0.001	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.015
b_K	1	1.005	1.012	1.022	1.032	1.040	1.048	1.055	1.062	1.065

注:对现场使用中的孔板除实测 r_K 外,也可以按 $r_K = 0.165(1 - e^{-\frac{t}{3}}) + 0.03$ 近似计算,其中 t 为使用年限。

D.3 测量管内壁粗糙度受磨蚀的处理

测量管使用一段时间后,应对其内壁表面粗糙度进行检验,当发现内表面有明显冲刷和腐蚀时,推

荐更换新的内表面符合标准要求的测量管。暂时无新测量管更换,应对原测量管内表面按 5.2.3 进行清洗和检测粗糙度算术平均偏差 Ra ,由表 A.7 查取等效绝对粗糙度 K 值。在有条件的情况下,用流体实验方法测出相对粗糙度 K/D ,实验方法按 D.4 进行。若内表面粗糙度符合 8.2.2 的规定,不必修正。当超出规定时,对原流出系数 C 进行修正,其修正系数 γ_{Re} 随测量管内壁相对粗糙度 K/D 和管径雷诺数 Re_D 而变化,其值按式(D.4)计算:

$$\gamma_{Re} = (\gamma_0 - 1) \left(\frac{\lg Re_D}{6} \right)^2 + 1 \dots\dots\dots (D.4)$$

当 $Re_D \geq 10^6$ 时, $\gamma_{Re} = \gamma_0$ 。

γ_0 是与直径比 β^2 和相对粗糙度的倒数 D/K 有关,其值由表 D.2 查取。

表 D.2 标准孔板 γ_0 值表

D/K	400	800	1 200	1 600	2 000	2 400	2 800	$\geq 3\,200$
β^2	γ_0							
0.1	1.002	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.2	1.003	1.002	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.3	1.006	1.004	1.002	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000
0.4	1.009	1.006	1.004	1.002	1.001	1.000	1.000	1.000
0.5	1.014	1.009	1.006	1.004	1.002	1.001	1.000	1.000
0.6	1.020	1.013	1.009	1.006	1.003	1.002	1.001	1.000

D.4 管道内壁粗糙度的流体实验确定

D.4.1 应用流体实验方法确定管道内壁相对粗糙度 K/D 时,要首先用实验测出直管阻力系数 λ 后,再用 Colebrook-White 公式确定,见式(D.5):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.74 - 2 \log_{10} \left(\frac{2K}{D} + \frac{18.7}{Re_D \sqrt{\lambda}} \right) \dots\dots\dots (D.5)$$

式中:

λ ——为直管摩擦阻力系数。

D.4.2 确定直管摩擦阻力系数 λ 值的实验方法:

D.4.2.1 取内径为 D 的直管,使流体密度为 ρ 恒定平均流速为:

$$v = 1.273 \sqrt[2]{\frac{q_v}{D^2}} \dots\dots\dots (D.6)$$

在流体流经的同时测出在长度为 L 的两点间的流体压力损失 ΔP ,按下式计算 λ 值:

$$\lambda = \frac{2 \Delta p D}{L \rho v^2} \dots\dots\dots (D.7)$$

式中:

Δp ——距离为 L (m)的两取压点之间的直管内壁压力损失,单位为帕(Pa);

ρ ——流过直管的流体密度,单位为千克每立方米(kg/m³);

D ——直管内径,单位为米(m);

v ——管内平均流速,单位为米每秒(m/s)。

D.4.2.2 测量时的要求如下:

- a) 用来测量差压 Δp 的差压仪表准确度不低于 0.5 级,其他有关参数的测量准确度不低于 0.25 级;

b) 两取压点之间的距离 L 应尽量大,最好为 $30\,D \sim 50\,D$,且在长度 L 上流体的流动已达到充分

发展的紊流速度分布；

- c) 取压孔直径 j_b 应在 1 mm 左右,取压孔在管道内壁的出口应与管道内壁平齐,无毛刺,最好有半径为 $0.1j_b$ 的倒角。取压孔在从管内壁算起的不小于 $2.5j_b$ 的长度上应呈等直径圆柱形,并与管道轴线垂直；
- d) 雷诺数最好大于 10^5 。

附录 E
(资料性附录)

天然气孔板流量计计量系统的在线校准

E.1 在线校准

在线校准是孔板流量计计量系统在正常操作的条件下,用标准流量计装置串联安装在实际直管段的管路上,使用实际流体、实际孔板和实际记录仪表进行的校准。

在线校准孔板流量计,要求使用不确定度不大于被检孔板流量计 1/2 的标准流量计装置(标准流量计)。

当有如下情况时,可进行在线校准:

- a) 当计量系统符合 GB/T 18603—2001 表 A.1 中准确度等级为 A 级(1.0 级)时,应进行在线校准;
- b) 当计量系统在使用中出现不符合本标准规定,并且不能按附录 D 进行修正处理时,宜进行在线校准;
- c) 为提高孔板流量计计量系统流量测量的准确度,可进行在线校准;
- d) 当供需双方有合同约定时,可进行在线校准。

E.2 在线校准用标准流量计装置

E.2.1 在线校准用标准流量计装置的要求

在线校准用标准流量计装置应是在符合量值溯源规定的上一级标准装置上校准后,总不确定度不大于被校孔板流量计计量系统总不确定度的 1/2 的传递标准流量计装置。校准用标准流量计装置可以是移动的或固定的。

E.2.2 在线校准时的安装要求

在线校准时校准用计量系统与被校孔板流量计计量系统的流量管道应是串联安装在同一管路中,校准用流量计管道应安装在孔板流量计直管段外的上游或下游,两套管路之间不能有泄漏,且在测试前应严格进行检漏,安装被校孔板流量计的地方应留有校准用标准流量计装置的安装空间。

E.2.3 在线校准时的测试要求

在线校准应在流量计操作的正常流量、温度和压力下进行。为了在实际工况范围内保证较高的置信水平,在线校准应在流量计操作流量、温度和压力范围内进行。

校准时系统最好运行在稳定的压力和温度条件下。如果压力和温度有波动,其影响应在计量准确度范围内。

E.3 在线校准系数 M_f

在线校准所确定的在线校准系数 M_f ,经有关各方同意,可用来修正按本标准计算的质量流量和在标准参比条件下的体积流量。

在线校准系数 M_f 是指校准用标准流量计装置在标准参比条件下测量的体积流量值与被校孔板流量计计量系统在校准期间指示的体积流量值之比;或校准用标准流量计装置测量的质量流量值与被校孔板流量计计量系统在校准期间指示的质量流量值之比。在线校准系数 M_f 为式(E.1)所示:

$$M_f = \frac{q_{Vnp}}{q_{Vni}} = \frac{q_{mp}}{q_{mni} \rho_n} \dots\dots\dots (E.1)$$

式中：

- q_{Vnp} ——校准用标准流量计装置在标准参比条件下的体积流量输出值；
- q_{Vni} ——被校孔板流量计在标准参比条件下的体积流量输出值；
- q_{mp} ——校准用标准流量计装置质量流量输出值；
- ρ_n ——流经计量管路的天然气在标准参比条件下的密度。

被校流量计计量系统经在线校准得到的实际不确定度超过 GB/T 18603—2001 表 A.1 准确度要求时，应首先检查计量系统，找出偏差的原因。若无法找出原因消除偏差，建议更换流量计或进行修正。

被校流量计计量系统实际不确定度满足 GB/T 18603—2001 表 A.1 准确度要求时，可不对被校流量计计量系统进行修正。

用在线校准系数计量流量时，可用式(E.2)和式(E.3)：

$$q'_{Vn} = M_i q_{Vni}$$

.....(E. 2)

式中：

- q'_{Vn} ——孔板流量计在标准参比条件下的实际体积流量。

$$q'_m = M_i q_{Vni} \rho_n$$

.....(E. 3)

式中：

- q'_m ——孔板流量计的实际质量流量。

如果采用 M_i 并保证测量准确度，应周期地进行在线校准。当测量系统发生了物理性质变化或者测量工况发生了显著改变，应重新进行在线校准。

E.4 在线校准的不确定度估算

经过在线校准的孔板流量计计量系统，其质量流量测量的不确定度 $\delta q_m/q_m$ 按式(E.4)估算：

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \left[\left(\frac{\delta M_i}{M_i} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \rho_1}{\rho_1} \right)^2 \right]^{0.5}$$

.....(E. 4)

式中：

- $\delta M_i/M_i$ ——在线校准系数的不确定度，由校准单位给出；
- $\delta \Delta p/\Delta p$ ——差压测量的不确定度，按 9.2.2.1 确定；
- $\delta \rho_1/\rho_1$ ——天然气密度测量的不确定度，按 9.2.2.2 确定。

天然气在标准参比条件下体积流量测量不确定度，视校准系统测量方法不同估算公式和方法亦不同，按 9.2.3 进行估算。

附录 F
(资料性附录)
天然气流量计算和设计计算实例

F.1 天然气流量计算实例

F.1.1 已知条件

- a) 测量管内径： $D=259.38\text{ mm}$ (20 号钢的新无缝钢管)；
- b) 孔板开孔直径： $D=150.25\text{ mm}$ (1Cr18Ni9Ti)；
- c) 气流常用温度： $t=15^{\circ}\text{C}$ ；
- d) 气流常用差压： $\Delta p=12\,500\text{ Pa}$ ；
- e) 气流常用表静压： $p_1=1.48\text{ MPa}$ ；
- f) 当地常用大气压： $P_a=0.098\,1\text{ MPa}$ ；
- g) 节流装置经检验符合本标准第 1~6 章有关技术规定；
- h) 温度测量系统不确定度小于或等于 0.5%，测量范围为 0~50℃；压力测量系统不确定度小于或等于 0.4%，测量范围为 0~2.5 MPa；差压测量系统不确定度小于或等于 0.4%，测量范围为 0~25 000 Pa；
- i) 天然气组分见表 F.1。

表 F.1 天然气的组分

组分	甲烷	乙烷	丙烷	丁烷	2-甲基丙烷 (异丁烷)	戊烷	2-甲基丁烷 (异戊烷)	己烷	氢气	氦气	氮气	二氧化碳
摩尔 分数	0.883 6	0.062 5	0.024 0	0.003 5	0.001 5	0.001 0	0.000 5	0.000 1	0.000 4	0.000 4	0.006 8	0.015 7

F.1.2 辅助计算

F.1.2.1 求直径比 β ：

因为 $\beta=d/D$ ，按式(25)和式(A.4)，求出 d 、 D ：

$$d=150.25\times[1+1.660\times10^{-5}\times(15-20)]\text{ mm}=150.24\text{ mm}$$

$$D=259.38\times[1+1.116\times10^{-5}\times(15-20)]\text{ mm}=259.37\text{ mm}$$

所以： $\beta=150.24/259.37=0.579\,2$

F.1.2.2 求天然气的真实相对密度、密度、压缩因子和超压缩系数：

标准参比条件下天然气压缩因子按式(A.9)计算：

$$Z_n=1-\left(\sum_{j=1}^nX_j\sqrt{b_j}\right)^2$$

式中：

$$\begin{aligned}\sum_{j=1}^nX_j\sqrt{b_j}&=0.038\,5+0.005\,6+0.003\,1+0.000\,6+0.000\,3+0.000\,2+0.000\,1+0.000\,0\\&\quad +0.000\,0+0.000\,0+0.000\,1+0.001\,1\\&=0.049\,6\end{aligned}$$

则： $Z_n=1-0.049\,6^2=0.997\,5$

天然气摩尔质量按式(A.17)计算:

$$M=(14.161+1.879+1.058+0.203+0.087+0.072+0.036+0.086+0.001+0.000+0.190+0.691)\text{kg/kmol}=18.404\text{ kg/kmol}$$

在标准参比条件下天然气真实相对密度按式(A.7)、式(A.8)和式(A.9)计算得:

$$G_r=\frac{Z_a M}{Z_n M_a}=\frac{0.999\,63\times 18.404}{0.997\,5\times 28.962\,6}=0.636\,8$$

在标准参比条件下天然气密度按式(18)计算:

$$\rho_n=\frac{MP_n}{RZ_nT_n}=\frac{18.404\times 0.101\,325}{0.008\,314\,51\times 0.997\,5\times 293.15}\text{kg/m}^3=0.767\,0\text{ kg/m}^3$$

按式(A.11)GB/T 17747.2 标准的方法计算 F.1 中已知天然气组分及相应温度和压力下的压缩因子 $Z_1=0.959\,8$,按式(28)计算超压缩系数:

$$F_z=\sqrt{\frac{Z_n}{Z_1}}=\sqrt{\frac{0.997\,5}{0.959\,8}}=1.019\,5$$

F.1.2.3 求天然气的等熵指数:

从表 A.6 查得在相应操作条件下的定压比热容 $c_p=2.324$,定容比热容 $c_v=1.713$,按 A.1.3 式(A.10)计算等熵指数:

$$\kappa=c_p/c_v=2.324/1.713=1.357$$

F.1.2.4 求天然气的动力黏度:

按 A.1.1.3 有关规定,天然气的动力黏度 μ_1 由表 A.5 查得在相应操作条件下的黏度值:

$$\mu_1=0.010\,96$$

F.1.2.5 天然气发热量计算:

F.1.2.5.1 天然气在标准参比条件下体积发热量计算:

按 A.1.5 规定由式(A.14)计算天然气摩尔发热量:

$$\begin{aligned}\bar{H}_s &= \sum_{j=1}^n X_j \bar{H}_{sj}^0 \\ &= (787.367+97.588+53.283+10.075+4.304+3.537+1.765+0.420+0.114)\text{MJ/kmol} \\ &= 958.453\text{ MJ/kmol}\end{aligned}$$

天然气在标准参比条件下理想体积发热量按式(A.15)计算:

$$\begin{aligned}H_s^0 &= \bar{H}_s \times \frac{P_n}{RT_n} = 958.453 \times \frac{0.101\,325}{0.008\,314\,51 \times 293.15} \text{MJ/m}^3 \\ &= 39.844\text{ MJ/m}^3\end{aligned}$$

天然气在标准参比条件下真实体积发热量按式(A.16)计算:

$$\hat{H}_s = 39.844/0.997\,5\text{ MJ/m}^3 = 39.944\text{ MJ/m}^3$$

F.1.2.5.2 天然气质量发热量计算:

天然气质量发热量按式(A.18)计算:

$$\hat{\bar{H}}_s = \frac{958.453}{18.404}\text{MJ/kg} = 52.079\text{ MJ/kg}$$

F.1.3 流量计算

天然气流量计算顺序按式(19)至式(31)从左至右依次进行,见表 F.2。

表 F.2 天然气流量计算顺序和有效数字位数取值表

法 兰 取 压	角 接 取 压
求初始流出系数 C' ： 假设 $Re_D=\infty$ ，按式(23)计算得： $C'=0.601\ 7$	求初始流出系数 C' ： 假设 $Re_D=\infty$ ，按式(23)计算得： $C'=0.602\ 1$
求渐近速度系数 E ： 按式(24)计算得： $E=1.061\ 5$	求渐近速度系数 E ： 按式(24)计算得： $E=1.061\ 5$
求孔板开孔直径 d ： F.1.2.1 中已求出： $d=150.24\ \text{mm}$	求孔板开孔直径 d ： F.1.2.1 中已求出： $d=150.24\ \text{mm}$
求相对密度系数 F_G ： 按式(26)计算得： $F_G=1.253\ 1$	求相对密度系数 F_G ： 按式(26)计算得： $F_G=1.253\ 1$
求可膨胀性系数 ϵ ： 按式(27)计算得： $\epsilon=0.997\ 7$	求可膨胀性系数 ϵ ： 按式(27)计算得： $\epsilon=0.997\ 7$
求超压缩系数 F_Z ： F.1.2.2 已求出： $F_Z=1.019\ 5$	求超压缩系数 F_Z ： F.1.2.2 已求出： $F_Z=1.019\ 5$
求流动温度系数 F_T ： 按式(29)计算得： $F_T=1.008\ 6$	求流动温度系数 F_T ： 按式(29)计算得： $F_T=1.008\ 6$
求在标准参比条件下的体积流量近似值 q'_{Vns} ： 按式(19)计算得： $q'_{Vns}=3.179\ 5\times10^{-6}\times0.601\ 7\times1.061\ 5\times150.24^2\times1.253\ 1\times$ $0.997\ 7\times1.019\ 5\times1.008\ 6\times\sqrt{1.578\ 1\times12\ 500}\text{m}^3/\text{s}$ $=8.276\ 5\ \text{m}^3/\text{s}$	求在标准参比条件下的体积流量近似值 q'_{Vns} ： 按式(19)计算得： $q'_{Vns}=3.179\ 5\times10^{-6}\times0.602\ 1\times1.061\ 5\times150.24^2\times1.253\ 1\times$ $0.997\ 7\times1.019\ 5\times1.008\ 6\times\sqrt{1.578\ 1\times12\ 500}\text{m}^3/\text{s}$ $=8.282\ 0\ \text{m}^3/\text{s}$
迭代运算求实测体积流量 q_{Vns} ： 按式(A.3)计算出 Re_D ： $Re_D=1.53\times10^6\times8.276\ 5\times0.636\ 8/(0.010\ 96\times259.37)$ $=2.84\times10^6$ 按式(23)计算出实际 C 值： $C=0.603\ 9$ 实测体积流量 q_{Vns} 为： $q_{Vns}=(8.276\ 5/0.601\ 7)\times0.603\ 9\ \text{m}^3/\text{s}=8.306\ 8\ \text{m}^3/\text{s}$	迭代运算求实测体积流量 q_{Vns} ： 按式(A.3)计算出 Re_D ： $Re_D=1.53\times10^6\times8.282\ 0\times0.636\ 8/(0.010\ 96\times259.37)$ $=2.84\times10^6$ 按式(23)计算出实际 C 值： $C=0.604\ 3$ 实测体积流量 q_{Vns} 为： $q_{Vns}=(8.282\ 0/0.602\ 1)\times0.604\ 3\ \text{m}^3/\text{s}=8.312\ 3\ \text{m}^3/\text{s}$
求天然气质量流量值 q_{ms} ： 按式(20)计算得： $q_{ms}=8.306\ 8\times0.767\ 0\ \text{kg/s}=6.371\ 3\ \text{kg/s}$	求天然气质量流量值 q_{ms} ： 按式(20)计算得： $q_{ms}=8.312\ 3\times0.767\ 0\ \text{kg/s}=6.375\ 5\ \text{kg/s}$
求天然气能量流量 q_{Es} ： 由 F.1.2.5.1 计算的在标准参比条件下的体积发热量代入式(21)计算得： $q_{EVns}=8.306\ 8\times39.944\ \text{MJ/s}=331.69\ \text{MJ/s}$ 由 F.1.2.5.2 计算的质量发热量代入式(22)计算得在标准参比条件下的能量流量： $q_{Emns}=6.371\ 3\times52.079\ \text{MJ/s}=331.69\ \text{MJ/s}$	求天然气能量流量 q_{Es} ： 由 F.1.2.5.1 计算的在标准参比条件下的体积发热量代入式(21)计算得： $q_{EVns}=8.312\ 3\times39.944\ \text{MJ/s}=332.03\ \text{MJ/s}$ 由 F.1.2.5.2 计算的质量发热量代入式(22)计算得在标准参比条件下的能量流量： $q_{Emns}=6.375\ 5\times52.079\ \text{MJ/s}=332.03\ \text{MJ/s}$

F.2 孔板开孔直径设计计算实例

孔板开孔直径设计计算不必像流量计算那样精确要求,以满足给定操作条件为准则,因此本实例按角接取压方式计算,法兰取压方式与之类似。

F.2.1 已知条件

- 测量管内径: $D=259.38\text{ mm}$ (20号钢的新无缝钢管)。
- 气流常用流量: $q_{V\text{nscom}}=8.15\text{ m}^3/\text{s}$,最大流量: $q_{V\text{nsmax}}=11.25\text{ m}^3/\text{s}$ 。最小流量: $q_{V\text{nsmin}}=4.00\text{ m}^3/\text{s}$ 。
- 气流常用温度: $t=15^\circ\text{C}$ 。
- 气流常用差压: $\Delta P=12\,500\text{ Pa}$ 。
- 气流常用表静压: $p_1=1.48\text{ MPa}$ 。
- 当地常用大气压: $P_a=0.098\,1\text{ MPa}$ 。
- 天然气组分见表 F.1。
- 按 GB/T 18603—2001 规定: $q_{V\text{nbmax}}=11.25\times 3\,600=40\,500\text{ m}^3/\text{h}<50\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 属于 B 级计量准确度等级要求,并要求温度测量准确度 $\leq 0.5^\circ\text{C}$,压力测量准确度 $\leq 0.5\%$,操作条件下体积流量测量准确度 $\leq 1.0\%$,每一时间周期应有流量记录,为满足其要求采用电动变送器配流量计算机进行测量和计算。就给定的操作条件,可选择不确定度小于或等于 0.5% 的温度测量系统,测量范围为 $0\sim 50^\circ\text{C}$;不确定度小于或等于 0.4% 的压力测量系统,测量范围为 $0\sim 2.5\text{ MPa}$;不确定度小于或等于 0.4% 的差压测量系统,测量范围为 $0\sim 25\,000\text{ Pa}$ 。

F.2.2 辅助计算

F.2.2.1 求测量管直径 D :

按式(A.4)求出 D 值:

$$\begin{aligned} D &= 259.38 \times [1 + 1.116 \times 10^{-5} \times (15 - 20)] \text{ mm} \\ &= 259.37 \text{ mm} \end{aligned}$$

F.2.2.2 求天然气的真实相对密度、密度、压缩因子和超压缩系数:

计算方法和结果请参照 F.1.2.2。

F.2.2.3 求天然气的等熵指数 κ :

计算方法和结果请参照 F.1.2.3。

F.2.2.4 求天然气的动力黏度 μ_1 :

计算方法和结果请参照 F.1.2.4。

F.2.2.5 求管径雷诺数 Re_D :

- 常用流量时的管径雷诺数 $Re_D = (1.53 \times 10^6 \times 8.15 \times 0.636\,8) / (0.010\,96 \times 259.37) = 2.79 \times 10^6$;
- 最大流量时的管径雷诺数 $Re_D = (1.53 \times 10^6 \times 11.25 \times 0.636\,8) / (0.010\,96 \times 259.37) = 3.86 \times 10^6$;
- 最小流量时的管径雷诺数 $Re_D = (1.53 \times 10^6 \times 4.00 \times 0.636\,8) / (0.010\,96 \times 259.37) = 1.37 \times 10^6$ 。

F.2.3 计算顺序

F.2.3.1 求 β' 近似值:

由式(19)得:

$$CE\beta^2 = q_{V\text{ns}} / (A_{V\text{ns}} D^2 F_G \epsilon F_Z F_T \sqrt{P_1 \Delta p})$$

式中:

$F_G=1.253\,1$ [按式(26)计算];

$F_Z=1.019\,5$ [按 F.1.2.2 已算出];

$F_T=1.008\ 6$ [按式(29)计算]。

假设 $\beta_0=0.6$, 则:

$\epsilon=0.997\ 7$ [按式(27)计算];

$E=1.071\ 9$ [按式(24)计算];

$C=0.604\ 3$ [按式(23)计算]。

因此:

$$\beta' = \left(\frac{8.15}{3.179\ 5 \times 10^{-6} \times 0.604\ 3 \times 1.071\ 9 \times 259.37^2 \times 1.253\ 1 \times 0.997\ 7 \times 1.019\ 5 \times 1.008\ 6 \times \sqrt{1.578\ 1 \times 12\ 500}} \right)^{0.5}$$

= 0.570 8

F.2.3.2 迭代计算:

用 β' 近似值代入式(27)、式(24)、式(23)求 ϵ 、 E 、 C 等值, 再求 β 值进而求出 d 值。

此时:

$\epsilon = 0.997\ 7$

$E = 1.059\ 2$

$C = 0.604\ 3$

$\beta = 0.574\ 2$

$d = 0.574\ 2 \times 259.37\ \text{mm} = 148.93\ \text{mm}$

F.2.3.3 差压刻度核算:

由式(19)得:

$$\Delta p = \frac{\left(\frac{q_{Vns}}{A_{Vns} \times C \times E \times d^2 \times F_G \times \epsilon \times F_Z \times F_T} \right)^2}{P_1}$$

a) 最大流量时差压刻度核算:

假设最大流量时差压刻度为刻度上限的 90%(等分刻度);94.9%(开方刻度), 则:

$$\Delta p'_K = 25\ 000\ \text{Pa} \times 90\% = 22\ 500\ \text{Pa}$$

此时:

$\epsilon=0.995\ 9$ [按式(27)计算];

$E=1.059\ 2$ [按式(24)计算];

$C=0.604\ 1$ [按式(23)计算]。

$$\Delta p_{\max} = \frac{\left(\frac{11.25}{3.179\ 5 \times 10^{-6} \times 0.604\ 1 \times 1.059\ 2 \times 148.93^2 \times 1.253\ 1 \times 0.995\ 9 \times 1.019\ 5 \times 1.008\ 6} \right)^2}{1.578\ 1}\ \text{Pa}$$

= 23 919 Pa

当流量达到最大时差压刻度为刻度上限的百分数是:

$$e_{\max} = 23\ 919\ \text{Pa} / 25\ 000\ \text{Pa} \approx 95.7\% \text{ (等分刻度) 或 } 97.8\% \text{ (开方刻度)}$$

该值未超过差压刻度上限, 符合设计要求, 无需再迭代。

b) 最小流量时差压刻度核算:

假设最小流量时差压刻度为刻度上限的 10%(等分刻度)或 31.6%(开方刻度), 则:

$$\Delta p'_{\min} = 25\ 000\ \text{Pa} \times 10\% = 2\ 500\ \text{Pa}$$

$\epsilon=0.999\ 5$ [按式(27)计算];

$C=0.604\ 9$ [按式(23)计算]。

$$\Delta p_{\min} = \frac{\left(\frac{4.00}{3.179\ 5 \times 10^{-6} \times 0.604\ 9 \times 1.059\ 2 \times 148.93^2 \times 1.253\ 1 \times 0.999\ 5 \times 1.019\ 5 \times 1.008\ 6} \right)^2}{1.578\ 1}\ \text{Pa}$$

= 2 994 Pa

当流量降至最小时差压刻度为刻度上限的百分数是:

$$e_{\min}=2\,994\text{ Pa}/25\,000\text{ Pa}=12.0\%(\text{等分刻度})\text{或}34.6\%(\text{开方刻度})$$

该值未降至差压刻度上限的 10%(等分刻度)或 31.6%(开方刻度)以下,无需再迭代。

经最大和最小流量时差压刻度核算结果证明孔板开孔直径 $d=148.93\text{ mm}$ 的设计计算合理可行。
 $d_{20}=148.94\text{ mm}$ [按式(25)计算]。

F.3 差压量程设计计算实例

差压量程设计计算不必像流量计算那样精确要求,以满足给定操作条件为准则,因此本实例按角接取压方式计算,法兰取压方式与之类似。

F.3.1 已知条件

- a) 测量管内径: $D=259.38\text{ mm}$ (20 号钢的新无缝管);
- b) 孔板开孔直径: $D=150.25\text{ mm}$ (1Cr18Ni9Ti);
- c) 气流常用温度: $t=15^{\circ}\text{C}$;
- d) 气流常用流量: $q_{Vn\text{com}}=8.15\text{ m}^3/\text{s}$,最大流量: $q_{Vn\text{max}}=11.25\text{ m}^3/\text{s}$;最小流量: $q_{Vn\text{min}}=4.00\text{ m}^3/\text{s}$;
- e) 气流常用表静压: $p_1=1.48\text{ MPa}$;
- f) 当地常用大气压: $P_a=0.098\,1\text{ MPa}$;
- g) 天然气组分见表 F.1;
- h) 按 GB/T 18603—2001 规定: $q_{Vn\text{max}}=11.25\times3\,600=40\,500\text{ m}^3/\text{h}<50\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 属于 B 级计量准确度等级要求,并要求温度测量准确度 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$,压力测量准确度 $\leq 0.5\%$,操作条件下体积流量测量准确度 $\leq 1.0\%$,每一时间周期应有流量记录,为满足其要求采用电动变送器配流量计算机进行测量和计算。就给定的操作条件,可选择不确定度小于或等于 0.5% 的温度测量系统,测量范围为 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$;不确定度小于或等于 0.4% 的压力测量系统,测量范围为 $0\sim 2.5\text{ MPa}$ 。

F.3.2 辅助计算

F.3.2.1 求直径比 β :

因为 $\beta=d/D$,按式(25)和式(A.4),求出 d 、 D :
 $d=150.25\times[1+1.660\times 10^{-3}\times(15-20)]\text{ mm}=150.24\text{ mm}$
 $D=259.38\times[1+1.116\times 10^{-3}\times(15-20)]\text{ mm}=259.37\text{ mm}$
所以: $\beta=150.24/259.37=0.579\,2$

F.3.2.2 求天然气的相对密度、密度、压缩因子和超压缩系数:

计算方法和结果请参照 F.1.2.2。

F.3.2.3 求天然气的等熵指数 κ :

计算方法和结果请参照 F.1.2.3。

F.3.2.4 求天然气的动力黏度 μ_1 :

计算方法和结果请参照 F.1.2.4。

F.3.2.5 求管径雷诺数 Re_D :

- a) 常用流量时的管径雷诺数 $Re_D=(1.53\times 10^6\times 8.15\times 0.636\,8)/(0.0109\,6\times 259.37)=2.79\times 10^6$;
- b) 最大流量时的管径雷诺数 $Re_D=(1.53\times 10^6\times 11.25\times 0.636\,8)/(0.010\,96\times 259.37)=3.86\times 10^6$;
- c) 最小流量时的管径雷诺数 $Re_D=(1.53\times 10^6\times 4.00\times 0.636\,8)/(0.010\,96\times 259.37)=1.37\times 10^6$ 。

F.3.3 计算顺序

F.3.3.1 求常用流量时差压对应刻度近似值,确定差压量程:

由式(19)得:

$$\Delta p = \frac{\left(\frac{q_{Vns}}{A_{Vns} \times C \times E \times d^2 \times F_G \times \epsilon \times F_Z \times F_T} \right)^2}{P_1}$$

假设: $\epsilon_0 = 1$

而: $C = 0.604\ 3$ [按式(23)计算];

$F_G = 1.253\ 1$ [按式(26)计算];

$F_Z = 1.019\ 5$ [按 F.1.2.2 已算出];

$F_T = 1.008\ 6$ [按式(29)计算]。

则:

$$\begin{aligned} \Delta p' &= \frac{\left(\frac{8.15}{3.179\ 5 \times 10^{-6} \times 0.604\ 3 \times 1.061\ 5 \times 150.24^2 \times 1.253\ 1 \times 1.000\ 0 \times 1.019\ 5 \times 1.008\ 6} \right)^2}{1.578\ 1} \text{ Pa} \\ &= 11\ 962\ \text{Pa} \end{aligned}$$

假设常用流量时对应差压刻度为刻度上限的 50%(等分刻度)或 70.7%(开方刻度)左右。因此差压量程 Δp_k 刻度上限选为 25 000 Pa, 差压测量系统不确定度选为 0.4% 较为合理。

F.3.3.2 最大流量时对应刻度和最小流量时对应刻度核算, 常用流量时对应刻度验算:

a) 最大流量时对应刻度核算

假设最大流量时差压刻度为刻度上限的 90%(等分刻度)或 94.9%(开方刻度)。则:

$$\Delta P'_{\max} = 25\ 000\ \text{Pa} \times 90\% = 22\ 500\ \text{Pa}$$

此时:

$\epsilon = 0.995\ 9$ [按式(27)计算];

$C = 0.604\ 1$ [按式(23)计算]。

$$\begin{aligned} \Delta p_{\max} &= \frac{\left(\frac{11.25}{3.179\ 5 \times 10^{-6} \times 0.604\ 1 \times 1.061\ 5 \times 150.24^2 \times 1.253\ 1 \times 0.995\ 9 \times 1.019\ 5 \times 1.008\ 6} \right)^2}{1.578\ 1} \text{ Pa} \\ &= 22\ 995\ \text{Pa} \end{aligned}$$

当流量达到最大时差压刻度为刻度上限的百分数是:

$$e_{\max} = 22\ 995\ \text{Pa} / 25\ 000\ \text{Pa} = 92.0\% \text{ (等分刻度) 或 } 95.9\% \text{ (开方刻度)}$$

该值未超过差压刻度上限, 上限值合适。

b) 最小流量时对应刻度核算

假设最小流量时差压刻度为刻度上限的 10%(等分刻度)或 31.6%(开方刻度)。则:

$$\Delta p'_{\min} = 25\ 000\ \text{Pa} \times 10\% = 2\ 500\ \text{Pa}$$

$\epsilon = 0.999\ 5$ [按式(27)计算];

$C = 0.604\ 9$ [按式(23)计算]。

$$\begin{aligned} \Delta p_{\min} &= \frac{\left(\frac{4.00}{3.179\ 5 \times 10^{-6} \times 0.604\ 9 \times 1.061\ 5 \times 150.24^2 \times 1.253\ 1 \times 0.999\ 5 \times 1.019\ 5 \times 1.008\ 6} \right)^2}{1.578\ 1} \text{ Pa} \\ &= 2\ 879\ \text{Pa} \end{aligned}$$

当流量降至最小时差压刻度为刻度上限的百分数约为:

$$e_{\min} = 2\ 879\ \text{Pa} / 25\ 000\ \text{Pa} \approx 11.5\% \text{ (等分刻度) 或 } 33.9\% \text{ (开方刻度)}$$

该值未降至差压刻度上限的 10%(等分刻度)或 31.6%(开方刻度)以下, 下限值合适。

c) 常用流量时对应刻度验算

假设常用流量时差压刻度为刻度上限的 50%(等分刻度)或 70.7%(开方刻度), 则:

$$\Delta P' = 25\ 000\ \text{Pa} \times 50\% = 12\ 500\ \text{Pa}$$

此时：

$\epsilon=0.997\ 7$ [按式(27)计算]；

$C=0.604\ 3$ [按式(23)计算]。

$$\Delta p = \frac{\left(\frac{8.15}{3.179\ 5 \times 10^{-6} \times 0.604\ 3 \times 1.061\ 5 \times 150.24^2 \times 1.253\ 1 \times 0.997\ 7 \times 1.019\ 5 \times 1.008\ 6} \right)^2}{1.578\ 1} \text{ Pa}$$

= 12 017 Pa

当流量为常用流量时差压刻度为刻度上限的百分数约为：

$e_{\max}=12\ 017\ \text{Pa}/25\ 000\ \text{Pa}=48.1\%$ (等分刻度)或 69.4% (开方刻度)

经最大、最小和常用流量对应差压刻度的核算和验算证明差压额定量程选择合理可行。

F.4 不确定度估算

不确定度估算应根据节流装置和二次仪表配备的检验结果进行估算。现假设节流装置检验结果各项指标达到本标准第1~6章的全部要求，直管段长度、测量管圆度、同轴度等均满足无附加不确定度指标，二次仪表配备满足GB/T 18603—2001表A.2要求。

F.4.1 质量流量测量不确定度估算

质量流量测量不确定度 $\delta q_m/q_m$ 按式(32)估算。

由于 $\beta<0.6$ ，则：

$$\begin{aligned} \frac{\delta C}{C} &= 0.5\% \\ \frac{\delta \epsilon}{\epsilon} &= 3.5 \times \frac{12\ 500}{10^6 \times 1.578\ 1 \times 1.36} \% = 0.02\% \\ \frac{\delta D}{D} &= 0.4\% \\ \frac{\delta d}{d} &= 0.07\% \\ \frac{\delta G_r}{G_r} &= 0.3\% \text{ (按 GB/T 11062—1998 规定估算)} \\ \frac{\delta Z_1}{Z_1} &= 0.1\% \text{ (按 GB/T 17747 规定估算)} \\ \frac{\delta T_1}{T_1} &= 0.5\% \text{ (按已知条件)} \\ \frac{\delta p_1}{p_1} &= 0.4\% \text{ (按已知条件)} \end{aligned}$$

按式(35)估算 $\delta \rho_1/\rho_1$ 得：

$$\delta \rho_1/\rho_1 = (0.3^2 + 0.1^2 + 0.4^2 + 0.5^2)^{0.5} = 0.71\%, \text{ 而}$$
$$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} = 0.4 \text{ (按已知条件)}$$

因此：

$$\begin{aligned} \frac{\delta q_m}{q_m} &= \left[0.50^2 + 0.02^2 + \left(\frac{2 \times 0.579\ 2^4}{1 - 0.579\ 2^4} \right)^2 (0.4)^2 + \left(\frac{2}{1 - 0.579\ 2^4} \right)^2 (0.07)^2 + \frac{1}{4} (0.4)^2 + \frac{1}{4} (0.71)^2 \right]^{0.5} \\ &= [0.25 + 0.000\ 4 + 0.010\ 3 + 0.024\ 9 + 0.040\ 0 + 0.126\ 0]^{0.5} = 0.67\% \end{aligned}$$

F.4.2 在标准参比条件下的体积流量测量不确定度估算

在标准参比条件下的体积流量测量不确定度 $\delta q_{vn}/q_{vn}$ 按式(39)估算。由于：

$$\frac{\delta C}{C} = 0.5\%$$

$$\frac{\delta \epsilon}{\epsilon} = 3.5 \times \frac{12\,500}{10^6 \times 1.578\,1 \times 1.36} \% = 0.02 \%$$

$$\frac{\delta D}{D} = 0.4 \%$$

$$\frac{\delta d}{d} = 0.07 \%$$

$$\frac{\delta G_r}{G_r} = 0.3 \% \text{ (按 GB/T 11602—1998 规定估算)}$$

$$\frac{\delta Z_1}{Z_1} = 0.1 \% \text{ (按 GB/T 17747 规定估算)}$$

$$\frac{\delta T_1}{T_1} = 0.5 \% \text{ (按已知条件)}$$

$$\frac{\delta p_1}{p_1} = 0.1 \% \text{ (按已知条件)}$$

$$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} = 0.4 \% \text{ (按已知条件)}$$

因此：

$$\begin{aligned} \frac{\delta q_{Vn}}{q_{Vn}} &= \left[0.50^2 + 0.02^2 + \left(\frac{2 \times 0.579\,2^4}{1 - 0.579\,2^4} \right)^2 (0.4)^2 + \left(\frac{2}{1 - 0.579\,2^4} \right)^2 (0.07)^2 + \frac{1}{4} (0.3^2 + 0.1^2 + 2 \times 0.4^2 + 0.5^2) \right]^{0.5} \\ &= [0.25 + 0.000\,4 + 0.010\,3 + 0.024\,9 + 0.167\,5]^{0.5} = 0.67 \% \end{aligned}$$

因为本实例采用温度、压力补偿方法测量，故质量流量测量不确定度与标准参比条件的体积流量测量不确定度是相等的。

附录 G
(资料性附录)
天然气流量计算和设计计算程序框图

G.1 说明

流量计算和设计计算一般来说不能直接代入求解,常需采用迭代计算方法。本标准流量计算和设计计算的计算命题为:

- a) 计算在标准参比条件下的体积流量 q_{Vn} 、质量流量 q_m 和在标准参比条件下的能量流量 q_E ;
- b) 孔板开孔直径 d 的设计计算;
- c) 选择差压量程 ΔP_K 的设计计算。

按流量计算实用公式,把已知量组合在方程的一边,把未知量放在方程的另一边。计算过程中,把已知一边的各量视为不变量。首先把第一个假定值 Y_1 代入未知量一边,经计算得出方程两边的差值 δ_1 ,然后进行迭代计算。迭代计算方程是将假定值 Y_2 代入,同样可得 δ_2 。再把 Y_1 、 Y_2 、 δ_1 、 δ_2 代入线性算法中,计算出 Y_3 、 δ_3 、…… Y_n 、 δ_n ,直到 $|\delta_n|$ 小于某一规定值。或者 Y 、 δ 的逐次之值等于某一规定准确度时迭代完毕。

具有快速收敛的弦截法计算式见式(G.1):

$$Y_n = Y_{(n-1)} - \delta_{(n-1)} \frac{Y_{(n-1)} - Y_{(n-2)}}{\delta_{(n-1)} - \delta_{(n-2)}} \dots\dots\dots (G.1)$$

本标准流量计算和设计计算程序框图中的流量 q_{Vn} 、 q_m 和 q_E 为正常输送时在标准参比条件下的体积流量、质量流量和在标准参比条件下的能量流量,推荐该流量值对应差压满刻度的 50%(等分刻度)或 70.7%(开方刻度)左右。

G.2 迭代计算格式

表 G.1 为在标准参比条件下的体积流量迭代计算和能量计算格式。质量流量迭代计算和能量计算格式与在标准参比条件下的体积流量迭代计算和能量计算格式相似,仅流量计算实用公式、管径雷诺数计算实用公式和能量计算实用公式略有不同,用(或……)以示区别。表 G.2 为孔板开孔直径迭代计算格式。表 G.3 为差压量程迭代计算格式。

表 G.1 流量迭代计算和能量计算格式

问题名称	q_{Vns} (或 q_{ms})、 q_{EVns} (或 q_{Ems})
已知量	D_{20} 、 d_{20} 、 A_d 、 A_1 、 P_1 、 Δp 、 t_1 、 G_r 、 X_n 、 X_C 、 κ 、 μ_1 、 \tilde{H}_s (或 \hat{H}_s)
找出量	q_{Vn} (或 q_{ms})、 q_{EVns} (或 q_{Ems})
不变量	$A_1 = \frac{1.53 \times 10^6 \times G_r}{\mu_1 \times D} \left(\text{或} \frac{1.27 \times 10^6}{\mu_1 \times D} \right) \times \left[A_{Vns} \text{ (或 } A_{ms}) \times E \times d^2 \times F_G \left(\text{或} \frac{1}{F_G} \right) \times \epsilon \times F_z \times F_T \times \sqrt{P_1 \times \Delta p} \right]$
迭代方程	$A_1 = Re_D / C$
线性算法中变量	$Y = Re_D = C \times A_1$
精确度判据	$\left \frac{A_1 - Y/C}{A_1} \right < 5 \times 10^{-10}$
第一个假定值	$Re_D = 10^6$
流量迭代计算结果	q_{Vns} (或 q_{ms}) = $A_1 \times \frac{\mu_1 \times D}{1.53 \times 10^6 \times G_r} \left(\text{或} \frac{\mu_1 \times D}{1.27 \times 10^6} \right) \times C_n$
能量计算结果	q_{EVns} (或 q_{ms}) = q_{Vns} (或 q_{ms}) $\times \tilde{H}_s$ (或 \hat{H}_s)

表 G.2 孔板开孔直径迭代计算格式

问题名称	d_{20}
已知量	$D_{20}、\Lambda_d、\Lambda_D、P_1、q_{Vns}(\text{或 } q_{ms})、\Delta p、t_1、G_r、X_n、X_C、\kappa、\mu_1$
找出量	d_{20}
不变量	$A_2 = \frac{q_{Vns}(\text{或 } q_{ms})}{\left[A_{Vns}(\text{或 } A_{ms}) \times D^2 \times F_G \left(\text{或 } \frac{1}{F_G} \right) \times F_Z \times F_T \times \sqrt{P_1 \times \Delta p} \right]}$
迭代方程	$A_2 = \frac{C \times \epsilon \times \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}}$
线性算法中变量	$Y = \frac{\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} = \frac{A_2}{C \times \epsilon}$
精确度判据	$\left \frac{A_2 - Y \times C \times \epsilon}{A_2} \right < 5 \times 10^{-10}$
第一个假定值	$\beta = 0.5, \epsilon = 1$
结果	$d_{20} = \frac{D \times \left(\frac{Y^2}{1 + Y^2} \right)^{0.25}}{1 + \Lambda_d(t_1 - 20)}$

表 G.3 差压量程迭代计算格式

问题名称	Δp
已知量	$D_{20}、d_{20}、\Lambda_d、\Lambda_D、P_1、q_{Vns}(\text{或 } q_{ms})、t_1、G_r、X_n、X_C、\kappa、\mu_1$
找出量	Δp_K
不变量	$A_3 = \left[\frac{q_{Vns}(\text{或 } q_{ms})}{A_{Vns}(\text{或 } A_{ms}) \times C \times E \times d^2 \times F_G \left(\text{或 } \frac{1}{F_G} \right) \times F_Z \times F_T \times \sqrt{P_1}} \right]^2$
迭代方程	$A_3 = \Delta P \times \epsilon^2$
线性算法中变量	$Y = \Delta p = \frac{A_3}{\epsilon^2}$
精确度判据	$\left \frac{A_3 - Y \times \epsilon^2}{A_3} \right < 5 \times 10^{-10}$
第一个假定值	$\epsilon = 1$
结果	$\Delta P = Y \quad \Delta P_K \approx 2 \times \Delta P$

G.3 计算机计算程序框图

流量计算程序框图见图 G. 1,孔板开孔直径计算程序框图见图 G. 2,差压量程计算程序框图见图 G. 3。

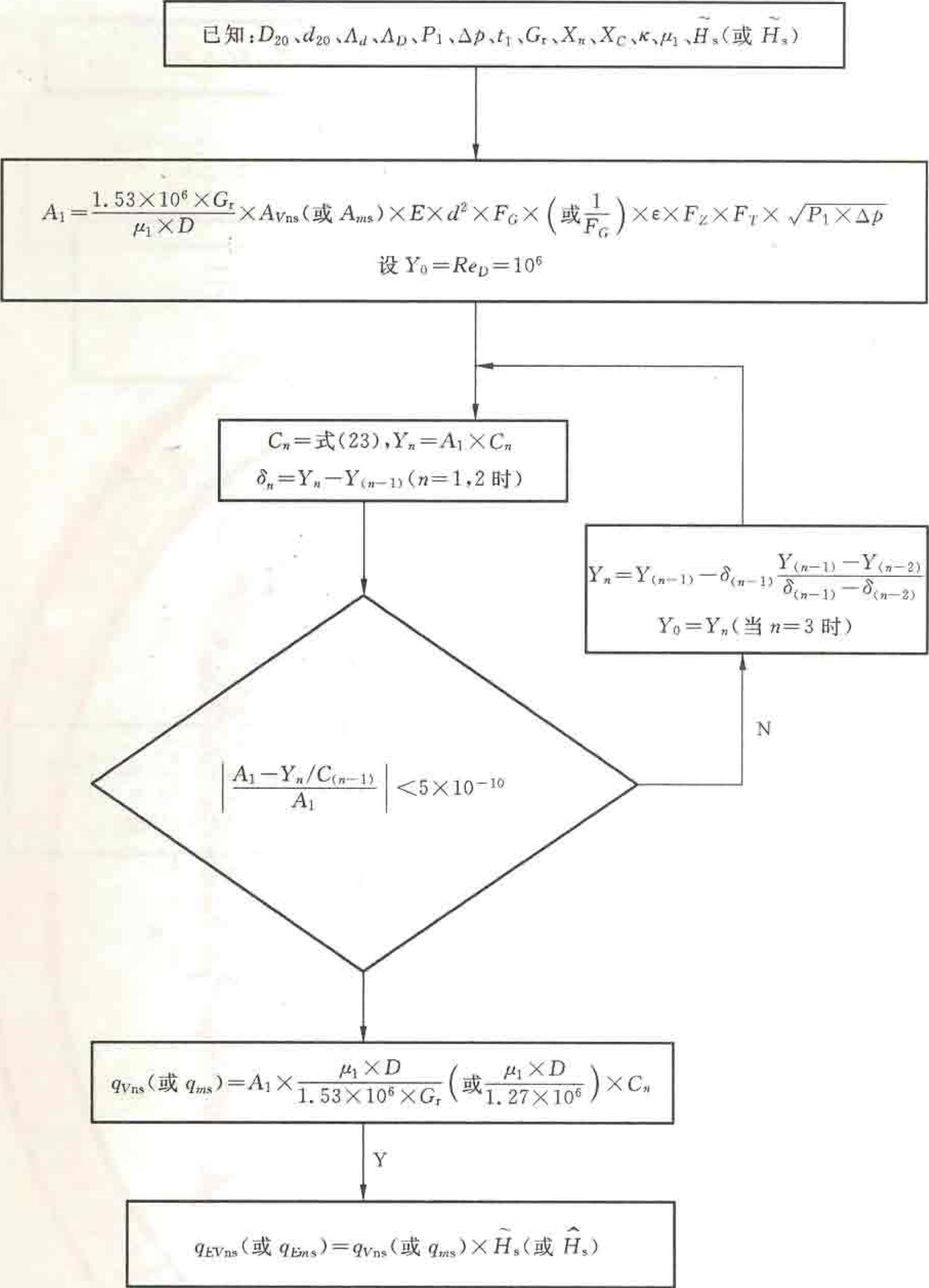


图 G.1 流量计算程序框图

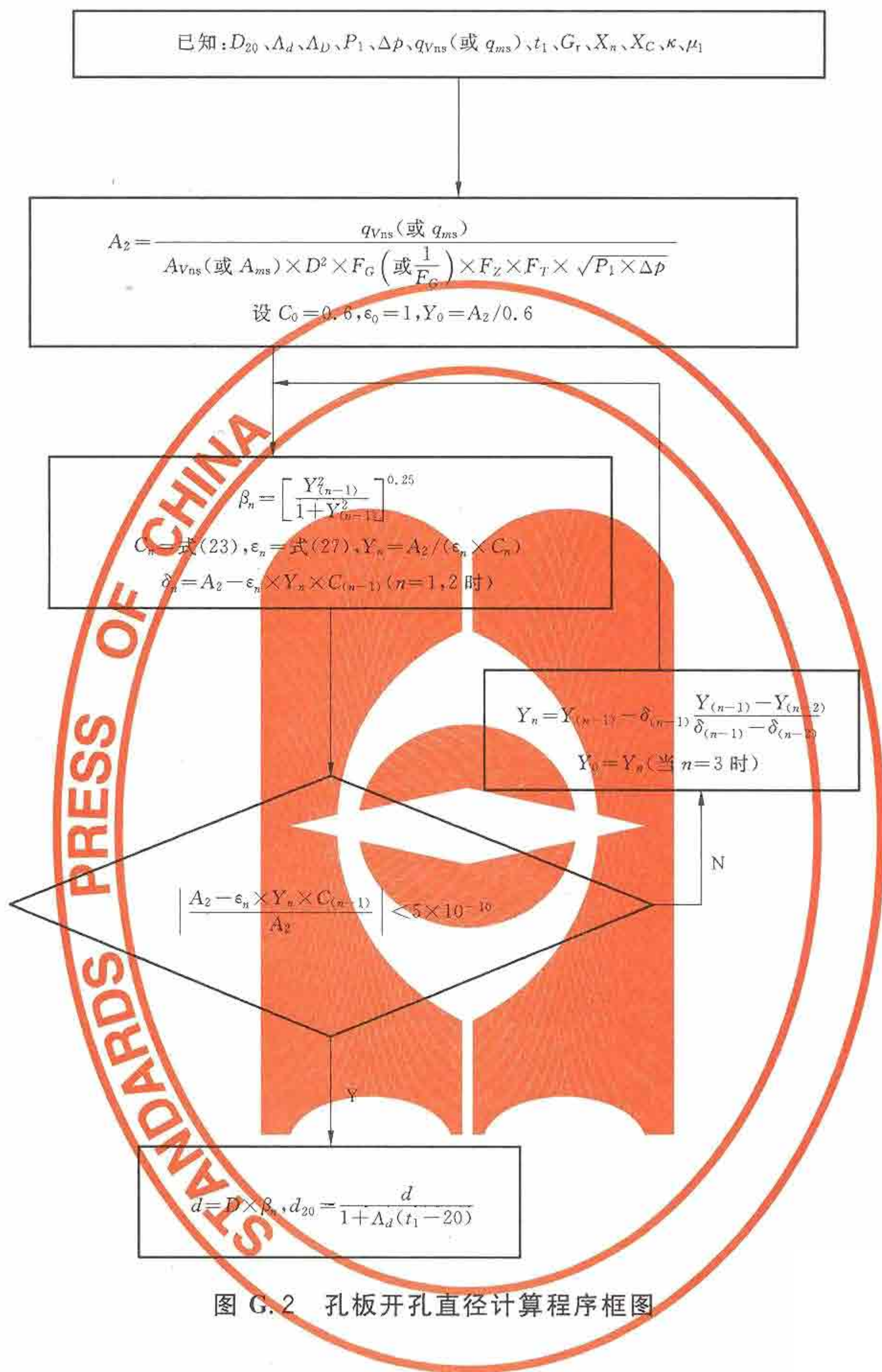




图 G.3 差压量程计算程序框图

附录 H
(资料性附录)

天然气流量计算机系统基本技术要求

H.1 流量计算机系统运用的一般原则

当采用计算机计算天然气流量时,其数学模型应符合第 8 章规定计算瞬时流量和累积流量,数据有效位数由计算机本身确定,但不低于表 7 的规定。流量计算机系统应能可靠、连续地运行。

在正常供气情况下清洗、检修节流装置或调校仪表时,流量计算机系统应具有流量自动累积功能。

流量计算机系统应具有所有计量参数和历史事件的记录功能。

流量计算机系统应具有参数设置、数据记录的安全保护功能。

流量计算机系统应具备通信功能。

H.2 流量计算机系统构成

流量计算机系统由信号转换和采集单元、流量计算和处理单元以及输出单元构成。

流量计算机系统应能自动实时采集检测数据、自动实时处理数据、按本标准规定自动实时计算天然气流量并对流量数据自动进行累计归档。同时对装置设置的基本参数、检测数据、事件进行历史储存和管理。

H.3 流量计算机系统基本技术要求

H.3.1 处理器/存储器

- a) 微处理器不低于 16 bit,建议选用 32 bit;
- b) 程序存储器容量应满足程序需求;
- c) 存储器容量满足数据保存需求;
- d) 支持浮点数或双浮点数运算;
- e) 内置电池至少满足 1 个月的数据保存需求。

H.3.2 时钟

- a) 内置可调整石英时钟;
- b) 可显示出年/月/日/时/分/秒;
- c) 时钟精度不低于 0.1 s/24 h;
- d) 允许用户设定日流量时间界限。

H.3.3 自诊断

- a) 提供硬件自诊断,包括对处理器、存储器、电源、输入/输出接口、通信接口的诊断测试;
- b) 提供软件自诊断,包括对流量计算程序、设定参数、输入/输出参数的诊断测试。

H.3.4 供电

支持 24 VDC 或 220 VAC 通过 UPS 供电。

H.3.5 系统安全性

- a) 流量计算程序应采用工厂固化或加密保护,不允许用户修改;
- b) 所有输入/输出通道接口、通信接口与外部设备间及各通道间和通道与内部总线间均需采用有效的隔离防护措施;
- c) 流量计算机需设有操作权限限制,可通过密匙、分级密码进行保护,必要时需采用封印进行保护。

- d) 当流量计算机安装在危险场所,应符合 GB 3836.1 标准要求。

H.3.6 操作、显示

- a) 流量计算机面板应设有操作键盘,但使用该键盘不能修改程序;
- b) 流量计算机面板设有 LCD 或 LED 显示窗口,可以显示流量计算机系统基础参数设置、测量过程参数、系统诊断报警信息及有关提示信息等。

H.3.7 输入/输出信号

- a) 支持 4 mA~20 mA、1 V~5 V 模拟信号输入,RTD 信号输入;A/D 转换分辨率不低于 16 bit。
- b) 支持数字信号输入和输出。
- c) 支持 4 mA~20 mA 模拟信号输出,D/A 转换分辨率不低于 12 bit。
- d) 支持开关量输出。
- e) 自动或手动输入天然气气质和物性数据、标准参比条件、压缩因子计算方法选择、取压方式选择、测量管内径、孔板开孔直径、仪表量程、报警限设置、时钟数据及通信参数等。
- f) 显示和输出实时和历史测量数据、流量计算和累计数据、当前和历史基础参数、事件记录、报警信息以及必要的中间计算数据等。

H.3.8 通信接口

至少提供 4 个通信接口,分别用于组态、数据传输、打印以及与在线色谱仪通信。

H.3.9 平均无故障时间

平均无故障时间(MTBF)应不小于 30 000 h。

H.3.10 电磁干扰

电磁性能应符合 GB/T 18603—2001 标准 7.2.8 要求。

H.3.11 环境条件

温度:0℃~40℃(贮存温度-20℃~50℃),湿度:5%~85%。

H.3.12 数据采集、处理周期

- a) 数据采集周期应不超过 1 s;
- b) 数据处理、流量计算周期不超过 5 s。

H.3.13 流量计算功能

- a) 体积流量:支持在操作条件下的瞬时体积流量计算和在标准参比条件下的瞬时体积流量计算及各自体积流量的累计计算;
- b) 质量流量:支持瞬时质量流量计算及质量流量累计计算;
- c) 能量流量:支持在标准参比条件下的瞬时能量流量计算及能量流量累计计算;
- d) 支持小信号切除功能。必要时,通过设定最小差压值,达到切除干扰的目的。

H.3.14 流量数据存储

- a) 支持体积流量、质量流量、能量流量和各自累计量的数据存储;
- b) 至少分别提供上述 3 种流量的小时、日流量累计值存储;
- c) 至少存储前 1 小时每分钟、前 1 天每小时、前 35 天每天的测量数据;
- d) 若有必要可要求提供存储 7 d~35 d 的小时、日归档测量参数值;
- e) 当使用工控机作为流量计量主机时,至少存储前 2 年的每个计算周期的测量数据、计算结果、历史事件、参数变化数据等。

H.3.15 报警

- a) 至少提供流量计算机系统故障报警、输入信号故障报警、测量及内部参数超限报警;
- b) 流量计算机报警时,需提供声音和光警示信号;
- c) 流量计算机内部需对产生的报警按照时间顺序自动进行记录存储,记录应包括报警状态、产生的时间、确认的时间、报警描述等信息。

GB/T 21446—2008

H.3.16 事件

- a) 按照时间顺序自动记录各种报警和任何一次参数篡改等事件;
- b) 记录应包括事件产生的时间、事件描述等信息;
- c) 所有记录均不可修改、删除,存储器满时自动溢出。

H.3.17 通道校准

- a) 所有模拟输入通道均支持校准功能;
- b) 校准及相关设置应有权限限制。

H.4 流量计算机系统的不确定度

H.4.1 天然气瞬时流量计算的不确定度(仅对计算方法而言),应不大于 $\pm 1\%$ 。

H.4.2 当输入标准信号值时,计算机流量时不确定度应不大于各信号通道不确定度的方和根,并应符合 GB/T 18803—2001 标准表 A.3 的规定。



GB/T 21446—2008

版权专有 侵权必究

书号: 155065 · 1-01190

定价: 54.00 元