JJG

中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 620－202×

临界流喷嘴

Critical Flow Nozzle

（征求意见稿）

XXXX-XX-XX 发布　　XXXX-XX-XX 实施

国 家 市 场 监 督 管 理 总 局　发布

临界流喷嘴检定规程

Verification Regulation for

Critical Flow Nozzle

JJG 620－202X

代替 JJG 620－2008

归　口　单　位：全国流量计量技术委员会

主要起草单位：

参加起草单位：

本规程委托全国流量计量技术委员会解释

本规程主要起草人：

参加起草人：

目　录

1 范围.....1
2 引用文件.....1
3 术语和计量单位.....1
3.1 术语.....1
3.2 量的符号，量纲和单位.....4
4 概述.....5
4.1 原理.....5
4.2 构造.....6
4.3 用途.....7
5 计量性能要求.....7
5.1 准确度等级.....7
5.2 重复性.....8
6 通用技术要求.....8
6.1 外观要求.....8
6.2 统一要求.....8
6.3 特殊要求.....9
7 计量器具控制.....11
7.1 检定条件.....11
7.2 检定项目.....12
7.3 检定方法.....12
7.4 仲裁.....15
7.5 检定结果的处理.....15
7.6 检定周期.....15
附　录　A　（资料性）　喷嘴的流出系数.....16
附　录　B　（资料性）　临界流函数.....17
B.1 总则.....17
B.2 理想气体的临界流函数.....17
B.3 实际气体的临界流函数.....17
B.4 临界流喷嘴（喷嘴）进行流量校准时所使用的临界流函数.....17
B.5 具有显著振动弛豫效应的气体.....18
附　录　C　（资料性）　常用气体临界流函数C_*的数值表.....19
C.1 总则.....19
C.2 氮气.....19
C.3 氩气.....20
C.4 含二氧化碳的干空气（CIPM 2007 组分+CO_2/0.04%）.....21
C.5 不含二氧化碳的干空气(CIPM 2007 组分/无 CO_2).....22
C.6 甲烷.....23
C.7 二氧化碳.....26
C.8 氧气.....28
C.9 蒸汽（单相气体）.....29

附　录　D　（资料性） 大气空气的质量流量修正因子.....32
D.1 总则.....32
D.2 临界流函数的湿度修正系数.....32
D.3 分子量的湿度修正系数（CIPM-2007）.....32
附　录　E　喷嘴安装要求.....34
E.1 两种标准安装的通用要求.....34
E.2 管道配置.....35
E.3 腔室配置.....37
附　录　F　（资料性）β>0.25 的临界流喷嘴临界质量通量的计算.....38
F.1 总则.....38
F.2 修正因子.....38
附　录　H　（资料性） 临界背压比.....41
H.1 理论临界背压比.....41
H.2 临界背压比的估算.....41
附　录　I　（资料性） 粘度值 – 纯气体和空气.....44
I.1 氮气.....44
I.2 氩气.....44
I.3 干空气.....45
附　录　J　检定证书及检定结果通知书内页信息.....46
J.1 流量检定法证书内页信息.....46
J.2 几何检定法检定证书内页信息.....46
J.3 检定结果通知书内页信息.....46
J.4 下次送检时，请带此证书或证书复印件.....46

引　言

JJF 1002《国家计量检定规程编写规则》、JJF 1001《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑规程制修订工作的基础性系列规范。

本规程参照国际标准 ISO 9300: 2022（E） Measurement of gas flow by means of critical flow nozzles，结合我国临界流喷嘴的现状，对 JJG 620—2008《临界流文丘里喷嘴检定规程》进行修订。

本规程对 JJG 620—2008 进行修订，与 JJG 620—2008 相比，除编辑性修改外主要技术变化如下：

——基于国际标准 ISO 9300: 2022 名称的调整，本规程的名称调整为“临界流喷嘴检定规程”；

——增加了引言；

——修改了术语，删除了精确加工喷嘴及普通加工喷嘴；

——修改了流出系数的计算公式；

——修改了临界流函数的计算公式；

——修改了湿度影响的计算公式；

——基于技术发展，增加了 0.15 级，删除了 0.5 级喷嘴；提升了压力计，温度计的技术指标；

——增加了附录 B（资料性） 临界流函数；

——增加了附录 I（资料性） 粘度-纯气体和空气；

——删除了原规程附录 C 天然气混合物临界质量通量的计算。

所替代规程的历次版本发布情况为：

——JJG 620—2008《临界流文丘里喷嘴检定规程》

——JJG 620—1994《临界流流量计检定规程》

临界流喷嘴检定规程

1 范围

本规程适用于测量气体流量的临界流喷嘴的首次检定、后续检定和使用中检查。

2 引用文件

本规程引用下列文件：

ISO 5167-3: 2022 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量 第3部分：喷嘴和文丘里喷嘴

ISO 9300: 2022 用临界流喷嘴测量气体流量（Measurement of gas flow by means of critical flow nozzles）

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规程；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规程。

3 术语和计量单位

3.1 术语

3.1.1 压力

3.1.1.1 静态压力 static pressure

通过管壁取压口测量得到的流动气体的压力。

注：本规程中所使用的静态压力均为绝对压力。

3.1.1.2 滞止压力 stagnation pressure

流动气体以等熵过程达到静止状态时的气体压力。

注：本规程中所使用的滞止压力均为绝对压力。

3.1.2 温度

3.1.2.1 静态温度 static temperature

流动气体的实际温度。

注：本规程中所使用的静态温度均为开尔文温度值。

3.1.2.2 滞止温度 stagnation temperature

流动气体以等熵过程达到静止状态时的气体温度。

注：本规程中所使用的滞止温度均为开尔文温度值。

3.1.3 喷嘴

3.1.3.1 收缩段 contraction

喷嘴（3.1.3.4）在喉部（3.1.3.2）上游的部分，旨在加速流动并在临界点（3.1.4.1）达

到假定的流场。

3.1.3.2 喉部 throat

喷嘴中流动面积最小的横截面。

注：本规程适用于圆环形和圆筒形喉部的喷嘴。

3.1.3.3 扩散段 diffuser

位于喉部（3.1.3.2）后的喷嘴（3.1.3.5）扩散段，其目的是恢复压力。

3.1.3.4 喷嘴 nozzle

插入系统中用于测量系统流量速率的测量管，该测量管由收缩段（3.1.3.1）和喉部（3.1.3.2）组成，或者由收缩段（3.1.3.1）、喉部（3.1.3.2）和扩散段（3.1.3.3）组成。

3.1.3.5 临界流喷嘴 critical flow nozzle

在给定的入口条件下，气体在喉部达到音速，流量达到临界流的喷嘴，又称音速喷嘴。

3.1.3.6 圆环形喉部喷嘴 toroidal-throat nozzle

圆环形喉部喷嘴的收缩段（入口）是一段圆环面，它从入口平面向后延伸，通过最小横截面（喉部）与扩散段相切。（见图1）

3.1.3.7 圆筒形喉部喷嘴 cylindrical-throat nozzle

圆筒形喉部喷嘴的收缩段（入口）是一个 1/4 圆环面，其一端与入口平面相切，另一端与圆筒形喉部相切。（见图 2）

3.1.4 流动

3.1.4.1 临界流 critical flow

达到临界压力比时，流过喷嘴的气体质量流量达到最大，气体在喉部达到当地音速，此时的流动称为临界流。进一步降低背压比，通过喷嘴的流量将保持不变。

3.1.5 流量

3.1.5.1 质量流量 mass flow-rate

单位时间内流过喷嘴的气体质量。

注：本规程中“流量”始终指的是“质量流量”。

3.1.5.2 喉部雷诺数 throat Reynolds number

以喉部直径作为特性尺寸，使用喷嘴入口滞止条件下的气体动力粘度计算得到的无量纲参数。

注：它由下式确定：

$$Re_{\mathrm{nt}} = \frac{4q_m}{\pi d \mu_0}$$

式中，q_m——通过喷嘴的实际质量流量；

d——喷嘴喉径；

μ_0——滞止条件下的气体动力粘度。

3.1.5.3 流出系数 discharge coefficient

实际流量与相同滞止条件下，气体一维、等熵地流过喷嘴的理想流量的比值。

注 1：流出系数由下式确定：

$$C_d = \frac{q_m}{q_{m\mathrm{i}}}$$

式中，q_m——通过喷嘴的实际质量流量；

$q_{m\mathrm{i}}$——相同滞止条件下，气体一维、等熵地流过喷嘴的理想质量流量。

注 2：该系数是对粘性和流场曲率影响的修正；

注 3：对于满足本规程中规定的喷嘴结构和安装条件，它仅是喉部雷诺数的函数。

3.1.5.4 临界压力比 critical pressure ratio

通过喷嘴的气体流量达到最大值时，喷嘴喉部处静态压力与上游滞止压力之比。

3.1.5.5 背压比 back-pressure ratio

喷嘴出口静态压力与喷嘴上游滞止压力之比。

3.1.6 气体

3.1.6.1 压缩因子 compressibility factor

相同温度和压力下，实际气体与理想气体的比容之比，是实际气体对理想气体体积特性的修正量。

注：压缩因子由下式确定：

$$Z = \frac{v}{v_{\mathrm{i}}}$$

式中，v——实际气体比容；

v_{i}——理想气体比容。

3.1.6.2 临界流函数 critical flow function

表征气体一维、等熵地从入口流到喉部处热动力特性的无量纲参数。

注：它是气体物性和滞止条件的函数（见 4.1.2）。

3.1.6.3 实际气体临界流系数 real gas critical flow coefficient

临界流函数的另一种形式，一般适用于气体混合物。

注：它与临界流函数的关系为：

$$C_{\mathrm{R}} = C_* \sqrt{Z}$$

3.1.6.4 等熵指数 isentropic exponent

可逆绝热（等熵）过程中，压力的相对变化与密度的相对变化之比。

注 1：等熵指数由下式给出：

$$\kappa = \frac{\rho}{p}\left(\frac{dp}{d\rho}\right)_s = \frac{\rho c^2}{p}$$

式中，p——气体的静态压力；

ρ——气体的密度；

c ——当地音速；

s——表示“等熵”。

注 2：对于真实气体，分子之间的作用力以及分子所占据的体积对气体的特性具有不可忽略的影响；对于理想气体，分子之间的作用力和分子所占据的体积可略去不计。

注 3：对于理想气体，κ 等于比热容比 γ，单原子气体等于 5/3；双原子气体等于 7/5；三原子气体等于 9/7。

3.2 量的符号，量纲和单位

量的符号，量纲和单位见表1。

表1 量的符号，量纲和单位

符号	量	量纲	单位
A_2	喷嘴出口的横截面积	L^2	m^2
A_{nt}	喷嘴喉部的横截面积	L^2	m^2
C_d	流出系数	无量纲	
C_R	实际气体临界流系数，$C_R = C_*\sqrt{Z}$	无量纲	
C_*	实际气体临界流函数	无量纲	
C_{*i}	理想气体一维等熵流的临界流函数	无量纲	
D	上游管道的直径	L	m
d	喷嘴喉部的直径	L	m
M	摩尔质量	M	kg mol^{-1}
Ma_1	上游取压口处的马赫数	无量纲	
p_1	喷嘴入口处气体的绝对静态压力	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
p_2	喷嘴出口处气体的绝对静态压力	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
p_0	喷嘴入口处气体的绝对滞止压力	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
p_{nt}	喷嘴喉部处气体的绝对静态压力	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
p_{*i}	理想气体一维等熵流喷嘴喉部处气体的绝对静态压力	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
$(p_2/p_0)_i$	理想气体一维等熵流喷嘴出口静压对喷嘴入口滞止压力之比	无量纲	
q_m	实际质量流量	MT^{-1}	$kg·s^{-1}$
q_{mi}	理想气体一维等熵流的质量流量	MT^{-1}	$kg·s^{-1}$
R	通用气体常数	$ML^2T^{-2}\Theta^{-1}$	$J·mol^{-1}K^{-1}$
Re_{nt}	喷嘴喉部雷诺数	无量纲	
r_c	喷嘴入口的曲率半径	L	m
r_*	临界压力比 p_{nt}/p_0	无量纲	
T_1	喷嘴入口处气体的静态温度	Θ	K
T_0	喷嘴入口处气体的滞止温度	Θ	K
U_r	相对扩展不确定度	无量纲	
Z	压缩因子	无量纲	
β	直径比 d/D	无量纲	
γ	比热容比	无量纲	
κ	等熵指数	无量纲	

μ_0	滞止条件下气体的动力粘度	$ML^{-1}T^{-1}$	Pa·s
ρ_0	滞止条件下气体的密度	ML^{-3}	$kg·m^{-3}$
M = 质量 L = 长度 T = 时间 Θ = 温度			

4 概述

4.1 原理

当上游滞止压力 p_0 保持不变，逐渐减小喷嘴出口压力 p_2，即减小背压力比(p_2/p_0)，通过喷嘴的气体流量先是不断增加。当达到临界压力比时，气体在喉部达到临界速度即等于当地音速，流过喷嘴的气体质量流量达到最大。进一步降低背压比，流量将保持不变。计算模型如下。

4.1.1 状态方程

实际气体的特性可用下式（1）表示：

$$\frac{p}{\rho}=\left(\frac{R}{M}\right)TZ \tag{1}$$

4.1.2 理想条件下的临界流量

$$q_{m\mathrm{i}}=\frac{A_{\mathrm{nt}}C_{*\mathrm{i}}p_0}{\sqrt{(R/M)T_0}} \tag{2}$$

或

$$q_{m\mathrm{i}}=A_{\mathrm{nt}}C_{*\mathrm{i}}\sqrt{p_0\rho_0} \tag{3}$$

式中

$$C_{*\mathrm{i}}=\sqrt{\gamma\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \tag{4}$$

4.1.3. 实际条件下的临界流量

$$q_m=\frac{A_{\mathrm{nt}}C_{\mathrm{d}}C_{*}p_0}{\sqrt{(R/M)T_0}} \tag{5}$$

或

$$q_m=A_{\mathrm{nt}}C_{\mathrm{d}}C_{\mathrm{R}}\sqrt{p_0\rho_0} \tag{6}$$

其中

$$C_R=C_{*}\sqrt{Z_0} \tag{7}$$

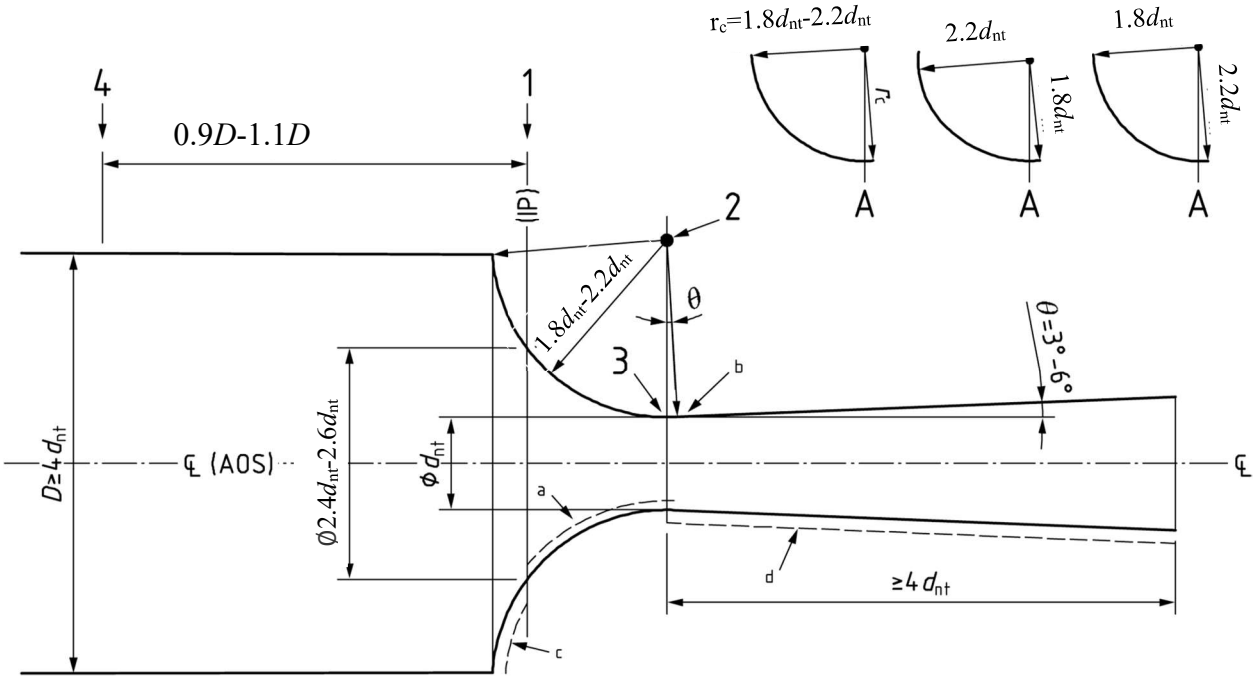
式中，Z_0—上游滞止条件下的压缩因子：

$$Z_0 = \frac{p_0 M}{\rho_0 R T_0} \tag{8}$$

对于实际气体，C_*和 C_R 不等于$C_{*\mathrm{i}}$，C_*值可用任何已证明其准确度的方法计算得到，常见气体的C_*值见附录 C。由于流动并非一维及边界层的存在，C_d总小于 1。

4.2 构造

临界流喷嘴的结构包含圆环形喉部喷嘴和圆筒形喉部喷嘴，分别见图 1、图 2。



标引序号说明：

1 ——进口平面（Inlet Plane，IP，此为定义不必是物理平面，见 6.3.2.2）；

2 ——入口圆环面的中心；

3 ——喉部；

4——取压口位置；

A——入口环形面示例（恒定半径和可变半径）；

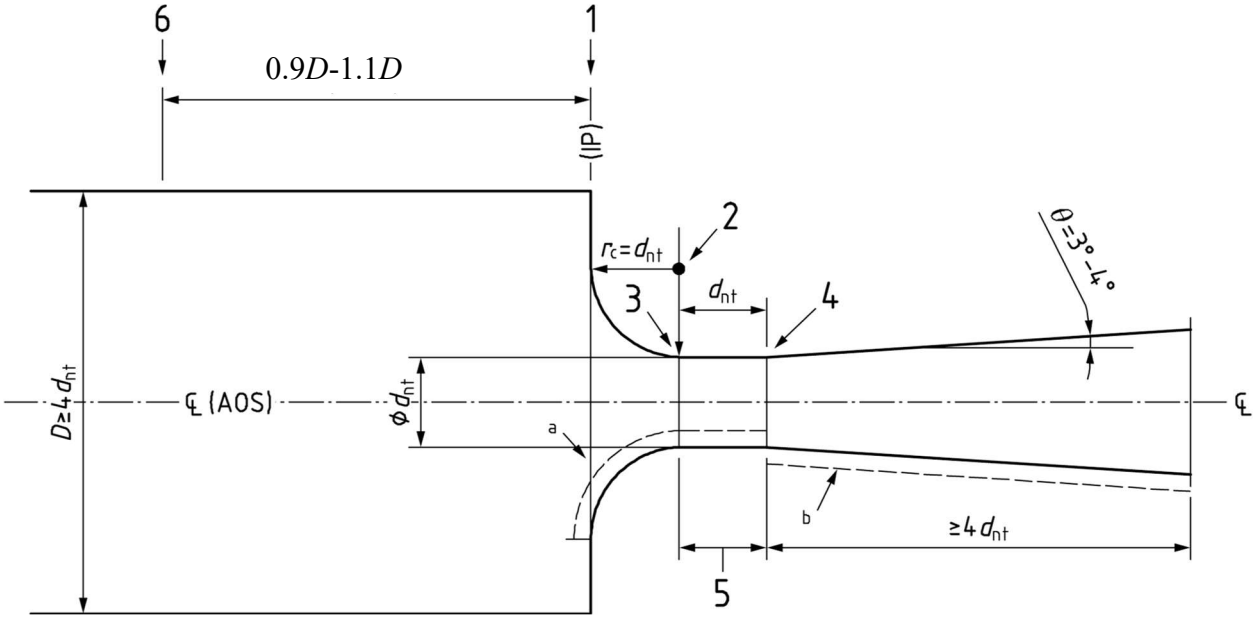
[a] ——见 6.3.2.3 和 6.3.2.6；

[b] ——入口圆环面和传统扩散段的衔接面（典型形式）；

[c] ——见6.3.2.5（典型形式）；

[d]——见6.3.2.6和6.2.3（典型形式）。

图1　圆环形喉部喷嘴



标引序号说明：

1 ——IP（物理平面）；

2 ——入口圆环面的中心；

3 ——喉部入口；

4——喉部出口；

5——喉部；

6——取压口位置。

[a] 圆筒形喉部。其算术平均粗糙度Ra不应超过$15\times10^{-6}d_{nt}$，且其廓形偏离圆环和圆筒形状的偏差不应超过$\pm0.001d_{nt}$。

[b] 长度宜大于d_{nt}，最好大于$4d_{nt}$。

图2　圆筒形喉部喷嘴

4.3 用途

临界流喷嘴通常用作测量气体流量的次级标准、作为工作标准或参考标准用以检定或校准其他流量计、作为传递装置及作为核查标准等。

5 计量性能要求

5.1 准确度等级

临界流喷嘴的准确度等级用流出系数的相对扩展不确定度表示，其相对扩展不确定度如表 2 所示。

表 2 准确度等级

准确度等级	相对扩展不确定度$U_r(k=2)$
0.15	≤0.15%

0.2	≤0.2%
0.3	≤0.3%

5.2 重复性

临界流喷嘴流出系数的重复性应不超过表 2 中规定的相对扩展不确定度的 1/3。

6 通用技术要求

6.1 外观要求

6.1.1 喷嘴外表面明显部位应清晰标明喷嘴的编号；如有可能，还应标明型号、喉部直径、设计流量、制造单位等。

6.1.2 喷嘴内表面应无污垢、锈蚀等任何污染物。

6.2 统一要求

本条规定了圆环形喷嘴和圆筒形喷嘴的通用要求。

6.2.1 材料

所选用的材料应有较高的硬度并有较好的耐腐蚀性。不得有凹痕、气孔和夹有杂质。还应有稳定的可复现的热膨胀特性，如果使用时的温度与测量喉部直径时的温度不同，可对喉部直径进行适当的修正。

应根据预定用途采用合适的材料制造喷嘴。

部分考虑因素包括：

a） 宜能将表面加工或处理至满足 6.2.2 和 6.3 中规定的条件。

注：存在气孔、凹痕或质地不均的材料不适用。

b） 材料及其表面处理，在预期使用条件下应不受腐蚀。

c） 材料的尺寸宜稳定，并具有确定且可复现的热膨胀特性，以便能按公式（9）对喉部直径作修正。

$$A_{\mathrm{nt}} = \frac{\pi d_{\mathrm{nt}}^2}{4} = \frac{\pi d_{\mathrm{nt0}}^2}{4}[1 + 2\alpha(T_1 - T_{\mathrm{nt}})]^2 \qquad (9)$$

注：需注意，该公式不适用于修正由较大温差引起的非等熵流的影响。

6.2.2 收缩段和喉部

喷嘴的收缩段和喉部应满足以下规定：

a） 相对于喷嘴的对称轴（Axis Of Symmetry，AOS）呈轴对称；

b) 应进行精加工，使其表面粗糙度 R_a 满足：

对于 d_{nt}>13 mm：$R_a \leq 15\times10^{-6}d_{nt}$；

对于 $d_{nt}\leq$13 mm：$R_a \leq$200 nm；

c) 无污垢或其他任何污染物。

由于收缩段和喉部难以按规定形状精确加工，而流出系数直接取决于此，且喉部直径（尤其是小喷嘴）也很难精确测量，因此，加工过程宜特别注意。

在对收缩段和喉部进行抛光时也应格外注意，以免导致表面严重变形。

6.2.3 扩散段

对扩散段的唯一要求是不应干扰喉部处的流动，因此无需规定其尺寸。

除传统扩散段外，也可采用无扩散段、可拆卸扩散段、在喉部和/或扩散段中有台阶结构等设计的喷嘴。

传统扩散段宜和喷嘴整体加工为一体结构。任何台阶、不连续性、不规则性和不同心度都应控制在局部直径的 1%以内。长度宜不小于 d_{nt}。如果扩散段直径为非连续，则直径应沿下游方向增大（而非减小）。平截头扩散段的算术平均粗糙度不应超过 $10^{-4}d_{nt}$。在给定的雷诺数范围内，传统扩散段的临界背压比可以根据附录 H 进行估算。

在低雷诺数的情况下，某些现象（如提前非壅塞，Premature Unchoking Phenomena，PUP）会以不可预测的方式影响扩散段的性能。若低雷诺数下（例如低于 2×10^5）临界背压比对系统的运行非常关键时，则宜使用实际应用的喷嘴及其配套管路，通过实验来测量真实的临界背压比。

建议扩散段尽可能长，至少为 $4d_{nt}$，以降低发生 PUP 的风险。若采用可拆卸的扩散段，可根据需要更换更长的扩散段。可在整体式扩散段后加装附加的可拆卸扩散段，且不会影响流出系数。

扩散段入口（无论整体式或可拆卸式）应精密加工，避免损伤或堵塞喉部。该要求同样适用于可拆卸扩散段的安装。

6.3 特殊要求

6.3.1 总则

除了 6.2 中的要求外，圆环形和圆筒形喉部喷嘴还应分别符合 6.3.2 和 6.3.3 的要求。

6.3.2 圆环形喉部喷嘴

6.3.2.1 除 6.2 中的要求外，圆环形喉部喷嘴还应符合 6.3.2.2~6.3.2.7 的规定，见图 1。

6.3.2.2 IP 定义为垂直于喷嘴 AOS 的物理或虚拟平面、该平面在直径等于 $2.5d_{nt}\pm0.1d_{nt}$ 处与收缩段相交，且 IP 上游的形状不限。

6.3.2.3 IP 下游的收缩段（图 1 中 IP 的右侧）应是一段圆环面。在喉部，曲面的切线（Tangential Line of Surface，TLS）应平行于喷嘴 AOS。应避免使用短圆环面（即喉部 TLS 与喷嘴 AOS 不平行），因为即使偏差很小也会导致严重的误差。为了减少应用中损坏喉部的风险，圆环面最好延伸到过喉部的扩散段一定距离，例如，延伸至喉部后约 $0.1d_{nt}$ 处，其中圆环面末端的 TLS 与喷嘴 AOS 之间的夹角约为 3º。

6.3.2.4 如果扩散段和喷嘴是一个整体，在加工喉部处的扩散段时应非常谨慎，因为即使是机床的轻微反冲也可能在喉部形成非预期形面，从而显著影响流出系数。加工后宜仔细检查喉部形面，如发现任何不规则缺陷，宜对喷嘴进行实流校准。

6.3.2.5 只要不影响收缩段的流动状态，IP 上游入口的形状不作规定，但该形状宜保持轴对称，且任一轴向位置的表面直径宜不小于 IP 后的圆环面的延伸直径。

6.3.2.6 IP 和喉部之间圆环面的半径可以是恒定的，或者只要半径变化不影响喉部处的流动，也可在 $1.8d_{nt}$ 和 $2.2d_{nt}$ 之间平滑变化。图 1 为恒定半径和可变半径圆环面的示例。

6.3.2.7 传统扩散段的半角宜为 3.0º~6.0º，并与圆环面末端以相同表面切线方向平滑衔接，如图 1 所示。

6.3.3 圆筒形喉部喷嘴

6.3.3.1 除 6.2 中的要求外，圆筒形喉部喷嘴还应符合 6.3.3.2~6.3.3.10 的规定，见图 2。

6.3.3.2 IP 定义为喷嘴前端面的物理平面。

6.3.3.3 喷嘴的收缩段（入口）应为 1/4 圆环面，一端与 IP 相切，另一端与喉部相切。

6.3.3.4 收缩段的曲率半径应为 d_{nt} 且偏差不应超过$\pm0.001d_{nt}$。

6.3.3.5 喉部应为直径 d_{nt}、长度 d_{nt} 的圆筒。

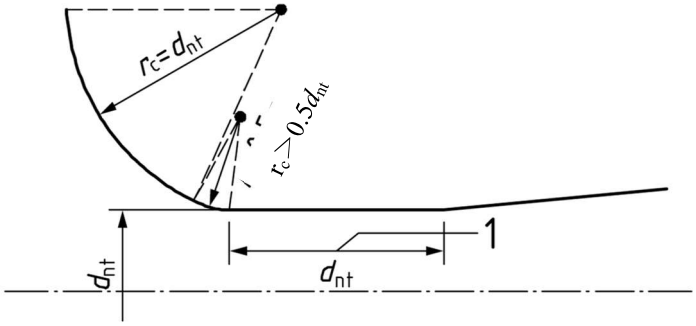
6.3.3.6 喉部直径 d_{nt} 应定义为圆筒形喉部出口截面的平均直径。确定平均直径时，应测量圆筒形喉部出口截面至少四个等角分布的直径。喉部长度内任一直径与平均直径的偏差不应超过$\pm0.001d_{nt}$。

6.3.3.7 宜检查收缩段与喉部之间的过渡区域，以确保喷嘴轴线所在平面上的表面局部曲率半径 r_c，在收缩段和喉部的衔接平面的整个圆周上不小于 $0.5d_{nt}$，见图 3。

6.3.3.8 喉部长度与喉部直径的偏差不应超过 0.05d_{nt}。还应目视检查圆筒形喉部和扩散段的衔接处，确保无缺陷。

6.3.3.9 收缩段和喉部表面应进行适当抛光，使其算术平均粗糙度不超过 $15\times10^{-6}d_{nt}$（可测量时）。

6.3.3.10 传统扩散段的半角宜为 3º~4º。



标引序号说明：

1——喉部

图1 1/4圆环面与圆筒形喉部衔接部分（过渡区）详细要求

7 计量器具控制

计量器具控制包括首次检定、后续检定和使用中检查。

7.1 检定条件

7.1.1 环境条件

一般试验大气条件

温　　度：（5～35）℃；

相对湿度：45%～75%；

大气压力：（86～106）kPa。

7.1.2 检定用仪器设备

检定用仪器设备应符合或优于表 3 的规定。

表 3 **检定用的仪器设备**

检定方法	检定用仪器设备名称	流出系数准确度等级		
		0.15%	0.2%	0.3%
流量检定法	标准装置的准确度要求	0.05%	0.07%	0.10%
	压力计（绝压）的准确度（FS）要求	0.01%	0.02%	0.04%
	温度计的准确度要求	0.1 ℃	0.1 ℃	0.2 ℃

几何检定法	卡 尺	/	0.02 mm
	三坐标测量机 万能工具显微镜		U=5 μm（k=2）
	表面粗糙度仪		U=5%（k=2）

注：温度计、压力计是用来测量喷嘴滞止状态下的温度、压力。

如果分别测量表压力和大气压力，其压力计的准确要求应满足表 3 的要求。

7.2 检定项目

喷嘴的检定项目见表 4，包括首次检定，后续检定和使用中检查。

表 4 检定项目

序号	检定项目	流量检定法			几何检定法		
		首次检定	后续检定	使用中检查	首次检定	后续检定	使用中检查
1	外观检查	+	+	+	+	+	+
2	收缩段	—	—	—	+	+	—
3	喉部直径	+	—	—	+	+	—
4	扩散段	—	—	—	+	+	—
5	粗糙度	—	—	—	+	+	—
6	流出系数	+	+	—	+	+	—
7	重复性	+	+	—	—	—	—

注 1：“+”表示需检项目，“—”表示可不检项目。

注 2：如果是不带扩散段的喷嘴不检扩散段。

7.3 检定方法

喷嘴的检定可分为流量检定法、几何检定法：

a) 流量检定法是采用 pVTt 法、mt 法、活塞式等气体流量标准装置对喷嘴的流出系数进行检定；

b) 几何检定法是采用尺寸测量的方法对喷嘴进行检定，对无法进行流量检定法检定的喷嘴可实施几何检定法检定。

7.3.1 流量检定法

7.3.1.1 用目测的方法检查喷嘴的外观和随机文件，其结果应符合 6.1.1、6.1.2 的要求。

7.3.1.2 流量检定法一般是在 pVTt 法、mt 法、活塞式等气体流量标准装置（以下简称标

准装置）上进行，其原理是通过标准装置测量得到通过喷嘴的实际质量流量，结合滞止压力、滞止温度及相关参数得到理想质量流量，进而计算出流出系数。

7.3.1.3 使用流量检定法装置检定喷嘴时，一般应在喷嘴使用条件下进行检定，或者检定条件下的结果能足够准确地换算到使用条件下。

7.3.1.4 使用流量检定法，一般应对喷嘴的喉部直径进行检定。

7.3.1.5 喷嘴的流出系数的重复性优于其要求的 1/2 时，可以检定 3 次。否则应检定 6 次。流出系数的计算公式为：

$$C_{\mathrm{d}} = \frac{q_m}{A_* C_* p_0}\sqrt{\frac{R}{M}}T_0 \tag{10}$$

或

$$C_{\mathrm{d}} = \frac{q_m}{A_* C_R \sqrt{p_0 \rho_0}} \tag{11}$$

式中，q_m—通过喷嘴的实际质量流量，由装置测得；

p_0和T_0或ρ_0—滞止压力和滞止温度或滞止密度，由喷嘴前的测量仪器测得；

A_*—喉部面积，通过喉部检验中测得的喉径计算得到；

C_*—按气体条件查表或计算求得（见附录 B、C）；

C_R—按气体条件查表或计算求得（见附录 B、C）。

7.3.1.6 喷嘴流出系数的平均值为：

$$\bar{C}_{\mathrm{d}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} C_{\mathrm{d}i} \tag{12}$$

式中，$C_{\mathrm{d}i}$—相同条件下第 i 次检定测得的喷嘴流出系数。

7.3.1.7 喷嘴流出系数的重复性

$$u_{\mathrm{r}} = \frac{1}{\bar{C}_{\mathrm{d}}}\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(C_{\mathrm{d}i}-\bar{C}_{\mathrm{d}}\right)^2}{n-1}\right)^{\frac{1}{2}} \times 100\% \tag{13}$$

式中，n—检定次数，按 7.3.1.5 的规定取 3 或 6。

7.3.2 几何检定法

7.3.2.1 用目测的方法检查喷嘴外观和随机文件，其结果应符合 6.1.1、6.1.2 的要求。

7.3.2.2 入口收缩段

（1）对喷嘴的圆环形入口平面处直径用卡尺进行测量，其结果应符合第6.3.2.2的要求。

（2）喷嘴的入口收缩段的曲率半径r_{c}及曲面偏差一般用三座标测量机测量，采用连续扫描的方法，一次得出曲率半径为r_{c}的曲面轮廓偏差。采点数不少于20点。采用最小二乘曲

线拟合方法进行数据处理，其结果：对圆环形喉部喷嘴应符合 6.3.2.3 和 6.3.2.6 的要求；对圆筒形喉部喷嘴应符合 6.3.3.3 和 6.3.3.4 的要求；收缩段与喉部过渡区的检查应符合 6.3.3.7 的要求。

7.3.2.3 喉部直径

（1）对圆环形喉部喷嘴，用三座标测量机或万能工具显微镜测量喷嘴喉部直径，至少测量大致等角分布的四个直径，取其平均值作为喉部直径。

（2）对圆筒形喉部喷嘴，其喉部直径在出口平面上测量，至少测量大致等角分布的四个直径，取其平均值作为喉部直径。另外在喉部三个不同截面上测量直径并计算与喉部直径之差，最后测量喉部长度。其结果应符合第 6.3.3.5、6.3.3.6、6.3.3.8 的要求。

7.3.2.4 扩散段

用三座标测量机检验喷嘴扩散段的长度、扩散角、直线度等，其结果：扩散段通用要求应符合 6.2.3；圆环形喉部喷嘴扩散段半角应符合 6.3.2.7；圆筒形喉部喷嘴扩散段半角应符合 6.3.3.10。

7.3.2.5 粗糙度

喷嘴喉部和圆环形入口表面粗糙度的Ra一般用表面粗糙度仪测量，其结果应符合第6.2.2和6.3.3.9的要求。

7.3.2.6 喷嘴流出系数及其相对扩展不确定度

几何检定法检定合格的喷嘴，并满足附录 E 安装和使用要求的条件下，喷嘴流出系数按下式计算：

$$C_{\mathrm{d}} = (a - bRe_{\mathrm{nt}}{}^{-n}) - \frac{(c - dRe_{\mathrm{nt}}{}^{-n})}{1+\exp\left(e-\frac{Re_{\mathrm{nt}}}{f}\right)} \qquad (14)$$

表 5 给出各种类型喷嘴在规定喉部雷诺数范围内的系数 a、b、c、d、e、f 和 n。不同雷诺数下流出系数的计算结果见附录 A。

表 5 a、b、c、d、e、f **和** n **系数表**

圆环形喉部临界流喷嘴	
$2.1 \times 10^4 < Re_{\mathrm{nt}} < 3.2 \times 10^7$	a = 0.9990 b = 3.415 c = 0.0031 d = 0.690 e = 10 f = 120 000 n = +0.5
圆筒形喉部临界流喷嘴	
$1.5 \times 10^5 < Re_{\mathrm{nt}} < 1.2 \times 10^7$	a = 1.0000 b = 6.341 c = 0.009（对于空气） c = 0.008（对于天然气） d = 3.000

	e = 6 f = 170000 n = +0.5

当气体具有明显的振动弛豫效应时，如CO_2、SF_6，若小喉径喷嘴使用了稳态临界流函数（见附录B.5），则流出系数可能大于1%。

在 95%置信水平下根据公式（14）及表 5，流出系数的相对扩展不确定度为 0.3%。

7.4 仲裁

当喷嘴出现计量纠纷需要进行仲裁时，优先推荐使用流量检定法。

7.5 检定结果的处理

经检定符合本规程要求的喷嘴发给检定证书，检定证书内容见附录J。检定不合格的发给检定结果通知书，并注明不合格项目。

7.6 检定周期

喷嘴检定周期一般不超过五年。

周期检定的喷嘴应附带前次的检定证书。

附 录 A
（资料性）
喷嘴的流出系数

为了进行计算验证，表A.1和A.2给出了给定雷诺数下，根据式（14）并采用表5中的系数计算出的流出系数值。

表 A.1 圆环形喉部喷嘴的流出系数

圆环形喉部喷嘴	
雷诺数 Re_{nt}	流出系数 C_d
2.1×10^4	0.9754
3×10^4	0.9793
5×10^4	0.9837
1×10^5	0.9882
3×10^5	0.9928
5×10^5	0.9942
1×10^6	0.9952
1.5×10^6	0.9939
3×10^6	0.9943
5×10^6	0.9947
1×10^7	0.9950
3.2×10^7	0.9954

表 A.2 圆筒形喉部喷嘴的流出系数

圆筒形喉部喷嘴		
雷诺数 Re_{nt}	流出系数（天然气） C_d	流出系数（空气） C_d
1.5×10^5	0.9836	0.9836
2×10^5	0.9858	0.9858
3×10^5	0.9884	0.9884
5×10^5	0.9909	0.9908
7×10^5	0.9918	0.9917
1×10^6	0.9913	0.9908
1.3×10^6	0.9899	0.9891
2×10^6	0.9897	0.9897
3×10^6	0.9901	0.9891
5×10^6	0.9905	0.9895
1.2×10^7	0.9910	0.9900

附 录 B
（资料性）
临界流函数

B.1 总则

喷嘴的质量流量首先通过理论质量流量进行近似估算，然后利用流出系数来修正其与真实值之间的偏差。由于理论质量流量是由临界处的面积、局部声速以及密度的乘积所确定的，因此对质量流量有直接影响的压力和温度就是临界处的压力和温度。

然而，当使用喷嘴来测量流量时，压力和温度是在流速非常低的上游管道中进行测量的，并且会将这些测量值转换为滞止状态下的压力和温度值。这意味着理论流量方程中包含一个将滞止状态下的压力和温度转换为临界状态下的压力和温度的因子，这个因子就是临界流函数。

注：临界流函数是在假定从滞止点到临界点为一维等熵流的情况下计算得出的，它是滞止状态以及气体性质，即压缩因子和等熵指数的函数。

B.2 理想气体的临界流函数

理想气体的压缩因子无论在何种气体状态下始终为1。其等熵指数在任何气体状态下也都是恒定的，且等于比热容比。在这些条件下，流动方程可以通过解析方法求解，并且可以推导出4.1中列出的基本方程，如式（4）所示，临界流函数可由公式（B.1）给出。

$$C_{*\mathrm{i}} = \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \qquad \text{（B.1）}$$

如果上游压力不高，例如低于1 MPa，公式（B.1）可以近似表示临界流函数。在这种情况下，建议通过参考数据库确定滞止状态下的比热容比（γ）值。

B.3 实际气体的临界流函数

实际气体的临界流函数考虑了从滞止点流到临界点过程中必然会出现的压缩因子和等熵因子的变化情况。在这种情况下，无法通过解析方法求解流动方程，因此需要进行数值计算。

对于指定的滞止压力（p_0）和滞止温度（T_0）条件，临界点处的密度（ρ_*）和局部声速（v_*）是利用考虑了实际气体效应的热力学性质数据库来计算的。由于流动是等熵且绝热的，临界点处的熵值和焓值与滞止状态下的熵值和焓值相等。喉部的熵和总焓是相互独立的热力学变量，因此它们决定了临界点处的热力学状态。实际气体的临界流函数（C_*）可通过找出与临界点处热力学状态相对应的唯一的临界密度和临界速度来确定。通常需要采用迭代程序，从已知的熵和总焓来确定ρ_*和v_*。临界流函数通过公式（B.2）来计算：

$$C_* = \frac{\rho_* v_*}{p_0}\sqrt{\frac{R}{M}T_0} \qquad \text{（B.2）}$$

这些计算可以通过使用由美国国家标准与技术研究院（NIST）维护并不断更新REFPROP的热力学数据库完成。该数据库在指定的气体成分、滞止压力和滞止温度条件下，内部求解一维等熵流模型以得出临界流函数（C_*）的值。它还提供了可以嵌入到C++、Excel、Fortran、LabVIEW、MATLAB、Python、VB等软件中的子程序，并且记录了实验测量属性的不确定度，涵盖了众多气体（例如氧气、二氧化碳、氮气、氢气、氩气、乙烯、氦气），同时还提供了创建用户自定义气体混合物（例如天然气、干空气和湿空气）的灵活性。

注：用户也可使用其他经国家权威机构验证的，具有同等或更高准确度的数据库和计算软件。

B.4 临界流喷嘴（喷嘴）进行流量校准时所使用的临界流函数

B.4.1 概述

始终建议通过参考合适的数据库来使用临界流函数（C_*）的精确值；然而，如果要根据参考标准对临界流喷嘴（喷嘴）进行流量校准，那么像B.4.2和B.4.3中那样，采用一种简化的方法来设定临界流函数（C_*）的值也是可以接受的。

B.4.2 在相同滞止条件下使用相同气体的情况

如果临界流喷嘴（喷嘴）在与校准过程中相同的滞止压力和温度下，使用相同的气体，那么临界流函数的值不必非常精确，例如，采用一个常数可能也是可以接受的，并且在校准和实际应用中应使用相同的值。在这种情况下，在实际应用中计算质量流量时，测量得到的流出系数中所包含的临界流函数（C_*）的误差会像喉部直径的误差一样被抵消掉。

B.4.3 在相同滞止条件范围内使用相同气体的情况

如果在通过匹配雷诺数进行校准的过程中，临界流喷嘴（喷嘴）是在相同气体且相同滞止条件范围内使用，那么临界流函数（C_*）的计算公式在所需的不确定度范围内不必非常精确，但应能以合理的精度反映真实临界流函数（C_*）的变化趋势，并且在校准和实际应用中应使用相同的计算公式。

如果实际应用中的压力和温度组合与校准过程中的几乎相同，那么基于与B.4.2中所讨论的相同理由，在整个范围内使用一个恒定的临界流函数可能是可以接受的，并且在实际应用中应使用相同的常数值。

B.4.4 需要精确值的情况

如果临界流喷嘴（喷嘴）所使用的气体与校准时的不同，通过匹配雷诺数来使用时，这两种情况下，每个临界流函数（C_*）的值都应该是准确的。例如，如果该喷嘴是使用空气进行校准，而在实际应用中用于氧气，那么在校准时应使用空气的临界流函数（C_*）值，而在实际应用中则应使用氧气的临界流函数（C_*）值。即使使用相同的气体，如果在实际应用中雷诺数范围是在校准范围的基础上进行外推得到的，并且假设在实际应用中不存在边界层转换的情况，那么也可能需要同样（精确取值）的操作。

B.5 具有显著振动弛豫效应的气体

一些气体，如六氟化硫（SF_6）和二氧化碳（CO_2），在其振动模式下具有相当大的能量。当它们通过收缩段时，由于该段温度和压力的快速变化，可能无法保持热平衡；气体分子振动模式中储存的内能没有足够的时间重新分配到分子的平动和转动模式中，因此临界流函数无法达到热力学性质数据库所给出的稳态值。临界流函数的实际值会部分“冻结”在上游的值，导致其值比稳态值更大。

因此，对于尺寸较小的临界流喷嘴（喷嘴），这种效应更为显著，因为从入口平面到喉部的流动时间更短。如果临界流喷嘴（喷嘴）足够大，那么由REFPROP，也即附录C给出的临界流函数可能不会产生显著的误差；然而，例如，如果在二氧化碳中使用喉部直径为几毫米的圆环形喉部临界流喷嘴（喷嘴）（通常在雷诺数低于10^5的情况下），使用稳态临界流函数计算出的质量流量误差可能会大于1%。

附 录 C
（资料性）
常用气体临界流函数C_*的数值表

C.1 总则

本附录提供了在特定压力和温度范围内计算几种纯气体和干燥空气临界流函数所需的资料。这里给出的所有信息都被使用REFPROP 10.0计算出的值所证实。

临界流函数可以通过公式（C.1）计算得到，

$$C_*(p,T)=\sum_j\left[\left(\sum_i C_{i,j}\,p^i\right)(T-T_{c^*})^{jc_{c^*}}\right] \quad \text{（C.1）}$$

每种气体的回归方程中的所有系数在每个表格中给出。公式中的p和T的单位分别为MPa和K。

这些方程只在规定的范围内有效。

C.2 氮气

REFPROP的临界流函数值如表C.1所示。公式（C.1）的系数、有效范围以及与REFPROP值的偏差如表C.2所示。

表 C.1 C_*值（氮气）

T(K)	p(MPa)										
	0.1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
200	0.68561	0.70367	0.72497	0.74845	0.77343	0.79856	0.82204	0.84230	0.85842	0.87023	0.87809
220	0.68538	0.69867	0.71360	0.72928	0.74530	0.76109	0.77599	0.78938	0.80081	0.81006	0.81710
240	0.68522	0.69521	0.70608	0.71714	0.72816	0.73884	0.74889	0.75803	0.76604	0.77280	0.77825
260	0.68510	0.69272	0.70083	0.70890	0.71679	0.72434	0.73140	0.73782	0.74352	0.74840	0.75244
280	0.68500	0.69088	0.69702	0.70303	0.70882	0.71430	0.71938	0.72399	0.72808	0.73160	0.73455
300	0.68492	0.68948	0.69417	0.69870	0.70300	0.70703	0.71074	0.71408	0.71703	0.71956	0.72168
320	0.68485	0.68839	0.69198	0.69540	0.69862	0.70160	0.70431	0.70673	0.70885	0.71065	0.71213
340	0.68478	0.68752	0.69026	0.69285	0.69524	0.69744	0.69941	0.70114	0.70263	0.70387	0.70486
360	0.68470	0.68681	0.68889	0.69082	0.69258	0.69417	0.69558	0.69679	0.69780	0.69861	0.69922
380	0.68462	0.68621	0.68776	0.68918	0.69045	0.69157	0.69253	0.69333	0.69397	0.69444	0.69475
400	0.68452	0.68570	0.68682	0.68783	0.68871	0.68945	0.69007	0.69054	0.69088	0.69109	0.69116
420	0.68441	0.68525	0.68603	0.68670	0.68726	0.68771	0.68804	0.68826	0.68836	0.68835	0.68824
440	0.68428	0.68484	0.68533	0.68573	0.68604	0.68624	0.68635	0.68636	0.68627	0.68609	0.68582
460	0.68413	0.68445	0.68471	0.68489	0.68498	0.68499	0.68491	0.68475	0.68451	0.68419	0.68379
480	0.68395	0.68409	0.68415	0.68415	0.68407	0.68391	0.68368	0.68338	0.68301	0.68258	0.68207
500	0.68376	0.68373	0.68364	0.68348	0.68325	0.68296	0.68261	0.68220	0.68172	0.68119	0.68060
520	0.68355	0.68338	0.68315	0.68286	0.68252	0.68212	0.68166	0.68115	0.68059	0.67998	0.67932
540	0.68331	0.68303	0.68269	0.68229	0.68185	0.68135	0.68081	0.68022	0.67959	0.67892	0.67820
560	0.68305	0.68268	0.68224	0.68175	0.68122	0.68065	0.68004	0.67939	0.67870	0.67797	0.67721
580	0.68278	0.68232	0.68180	0.68124	0.68064	0.68001	0.67934	0.67863	0.67789	0.67712	0.67632
600	0.68249	0.68196	0.68138	0.68075	0.68010	0.67941	0.67868	0.67793	0.67715	0.67635	0.67551

表 C.2 系数$C_{i,j}$，范围及其偏差（氮气）

j	i							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	6.433695661 1E-01	4.729607541 7E-04	-3.125517934 2E-04	1.339652030 9E-04	-3.794790755 1E-05	3.945716805 3E-06	-1.681556058 0E-07	2.553129502 1E-09

j	i							
	0	1	2	3	4	5	6	7
1	5.572279564 3E+01	-1.642512880 9E+00	5.749430594 7E-01	-2.472244987 8E-01	7.105105406 6E-02	-7.409989201 1E-03	3.157833885 8E-04	-4.790483851 4E-06
2	-3.010375779 8E+04	8.615455482 1E+02	-4.123960910 7E+02	1.782979229 4E+02	-5.199340169 8E+01	5.437137489 8E+00	-2.316241134 6E-01	3.509840351 0E-03
3	8.112190581 2E+06	-1.204021740 8E+05	1.437248741 4E+05	-6.265088770 6E+04	1.857465214 1E+04	-1.948138232 7E+03	8.294480849 0E+01	-1.255149493 4E+00
4	-1.087092166 9E+09	2.368537656 1E+07	-2.548913585 8E+07	1.071782926 8E+07	-3.239976819 0E+06	3.411095263 1E+05	-1.451449689 9E+04	2.192823174 9E+02
5	5.784190846 3E+10	-1.496684306 7E+09	1.930069178 2E+09	-7.162704275 9E+08	2.208279754 9E+08	-2.337908455 9E+07	9.944643008 7E+05	-1.499699120 8E+04
系数：T_{c^*}=0　C_{c^*}=-1 范围：　0.1 MPa≤p≤20 MPa　200 K≤T≤600 K								

C.3　氩气

REFPROP的临界流函数值如表C.3所示。公式（C.1）的系数、有效范围以及与REFPROP值的偏差如表C.4所示。

表 C.3 C^*值（氩气）

T(K)	p(MPa)										
	0.1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
220	0.72719	0.74757	0.77178	0.79909	0.82951	0.86253	0.89682	0.93035	0.96092	0.98687	1.00746
240	0.72698	0.74275	0.76074	0.78016	0.80086	0.82248	0.84448	0.86612	0.88659	0.90515	0.92129
260	0.72682	0.73926	0.75308	0.76756	0.78256	0.79787	0.81320	0.82821	0.84253	0.85583	0.86783
280	0.72670	0.73667	0.74752	0.75866	0.76998	0.78135	0.79261	0.80355	0.81401	0.82382	0.83281
300	0.72660	0.73469	0.74335	0.75211	0.76090	0.76961	0.77816	0.78643	0.79432	0.80174	0.80860
320	0.72653	0.73314	0.74015	0.74715	0.75409	0.76092	0.76757	0.77397	0.78006	0.78579	0.79111
340	0.72647	0.73192	0.73764	0.74330	0.74886	0.75430	0.75955	0.76459	0.76937	0.77387	0.77804
360	0.72642	0.73094	0.73563	0.74025	0.74476	0.74913	0.75333	0.75734	0.76114	0.76470	0.76801
380	0.72638	0.73014	0.73402	0.73780	0.74148	0.74502	0.74841	0.75163	0.75467	0.75751	0.76014
400	0.72635	0.72948	0.73269	0.73581	0.73882	0.74170	0.74445	0.74704	0.74948	0.75176	0.75385
420	0.72632	0.72893	0.73160	0.73417	0.73664	0.73899	0.74122	0.74331	0.74527	0.74709	0.74876
440	0.72630	0.72848	0.73069	0.73281	0.73483	0.73674	0.73855	0.74024	0.74181	0.74326	0.74459
460	0.72628	0.72809	0.72992	0.73166	0.73332	0.73488	0.73633	0.73769	0.73894	0.74009	0.74112
480	0.72627	0.72777	0.72927	0.73070	0.73204	0.73330	0.73447	0.73555	0.73654	0.73743	0.73823
500	0.72625	0.72749	0.72872	0.72988	0.73097	0.73197	0.73290	0.73374	0.73451	0.73519	0.73579
520	0.72624	0.72725	0.72825	0.72918	0.73004	0.73084	0.73156	0.73221	0.73279	0.73329	0.73372
540	0.72623	0.72704	0.72784	0.72858	0.72925	0.72987	0.73041	0.73089	0.73131	0.73167	0.73196
560	0.72622	0.72687	0.72749	0.72806	0.72857	0.72903	0.72943	0.72977	0.73005	0.73027	0.73044
580	0.72621	0.72671	0.72719	0.72761	0.72799	0.72831	0.72857	0.72879	0.72896	0.72907	0.72913
600	0.72621	0.72658	0.72692	0.72722	0.72747	0.72768	0.72784	0.72795	0.72801	0.72803	0.72800

表 C.4 系数$C_{i,j}$，范围及其偏差（氩气）

j	i							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	7.261081671 1E-01	2.042474432 2E-04	-3.709231249 9E-04	1.368723865 3E-04	-2.397324295 1E-05	2.065954816 4E-06	-8.393193083 4E-08	1.282665977 3E-09

j	i							
	0	1	2	3	4	5	6	7
1	9.567215480 2E-02	-1.023026172 5E+00	4.563491931 3E-01	-1.639150157 5E-01	2.840991278 3E-02	-2.429891070 5E-03	9.811811472 3E-05	-1.491886151 1E-06
2	-4.459311758 9E+01	6.630621000 2E+02	-2.116906566 8E+02	7.346252591 4E+01	-1.258135189 1E+01	1.066701111 0E+00	-4.275745148 3E-02	6.460403526 0E-04
3	9.721259944 4E+03	-9.446421676 1E+04	4.506032155 8E+04	-1.546589355 0E+04	2.614356224 8E+03	-2.193525104 7E+02	8.712487773 0E+00	-1.305885444 8E-01
4	-1.000120072 5E+06	7.207680598 6E+06	-4.411115375 6E+06	1.537498230 8E+06	-2.570636491 9E+05	2.130360062 4E+04	-8.363603082 1E+02	1.240535958 7E+01
5	3.931065245 5E+07	-2.350267362 1E+08	1.663274171 3E+08	-5.824148148 4E+07	9.670364213 1E+06	-7.908152312 7E+05	3.058299920 5E+04	-4.472335683 7E+02
系数：T_{c^*}=0　C_{c^*}=-1 范围：0.1 MPa≤p≤20 MPa　200 K≤T≤600 K								

C.4　含二氧化碳的干空气（CIPM 2007 组分+CO_2/0.04%）

REFPROP产生的临界流函数值如表C.5所示。公式（C.1）的系数、有效范围以及与REFPROP值的偏差如表C.6所示。

CIPM 2007组合物中的每个摩尔分数乘以一个常数，以包括0.04%摩尔分数的CO_2，得出总和。

表 C.5 C^*值（含 0.04%CO_2 的干空气)

T(K)	p(MPa)										
	0.1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
200	0.68589	0.70501	0.72798	0.75397	0.78250	0.81214	0.84068	0.86583	0.88612	0.90118	0.91137
220	0.68566	0.69977	0.71588	0.73313	0.75116	0.76937	0.78699	0.80321	0.81737	0.82909	0.83826
240	0.68548	0.69614	0.70791	0.72008	0.73243	0.74465	0.75640	0.76733	0.77714	0.78563	0.79269
260	0.68533	0.69353	0.70235	0.71127	0.72013	0.72876	0.73700	0.74467	0.75162	0.75775	0.76299
280	0.68520	0.69157	0.69830	0.70499	0.71153	0.71783	0.72380	0.72933	0.73435	0.73882	0.74268
300	0.68508	0.69007	0.69526	0.70035	0.70526	0.70995	0.71435	0.71841	0.72209	0.72536	0.72820
320	0.68496	0.68888	0.69291	0.69680	0.70053	0.70405	0.70733	0.71034	0.71305	0.71544	0.71751
340	0.68483	0.68791	0.69104	0.69403	0.69687	0.69952	0.70197	0.70419	0.70618	0.70792	0.70940
360	0.68469	0.68710	0.68952	0.69182	0.69396	0.69595	0.69776	0.69939	0.70083	0.70206	0.70310
380	0.68454	0.68640	0.68826	0.69000	0.69161	0.69308	0.69440	0.69557	0.69658	0.69742	0.69810
400	0.68436	0.68579	0.68720	0.68850	0.68968	0.69074	0.69167	0.69247	0.69314	0.69367	0.69407
420	0.68417	0.68524	0.68628	0.68721	0.68805	0.68878	0.68940	0.68991	0.69031	0.69060	0.69077
440	0.68396	0.68473	0.68546	0.68611	0.68666	0.68713	0.68749	0.68777	0.68795	0.68803	0.68803
460	0.68372	0.68425	0.68473	0.68514	0.68546	0.68570	0.68587	0.68595	0.68595	0.68587	0.68571
480	0.68347	0.68379	0.68406	0.68427	0.68440	0.68447	0.68446	0.68438	0.68424	0.68403	0.68375
500	0.68320	0.68335	0.68345	0.68348	0.68346	0.68337	0.68323	0.68302	0.68275	0.68243	0.68205
520	0.68291	0.68291	0.68286	0.68276	0.68260	0.68239	0.68213	0.68182	0.68145	0.68103	0.68057
540	0.68261	0.68249	0.68231	0.68209	0.68182	0.68151	0.68115	0.68074	0.68029	0.67980	0.67927
560	0.68229	0.68206	0.68179	0.68147	0.68110	0.68070	0.68026	0.67978	0.67926	0.67870	0.67811
580	0.68196	0.68164	0.68128	0.68087	0.68043	0.67996	0.67945	0.67890	0.67833	0.67772	0.67707
600	0.68162	0.68123	0.68079	0.68031	0.67981	0.67927	0.67870	0.67810	0.67748	0.67682	0.67614
组分摩尔分数（CIPM 2007 组分）： 氮气　0.7808480　甲烷　0.0000015 氧　0.2093900　氪　0.0000011 氩气　0.0093320　氢气(正常)　0.0000005											

二氧化碳	0.0004000	一氧化二氮	0.0000003
氖	0.0000182	一氧化碳	0.0000002
氦	0.0000052	氙	0.0000001

表 C.6 系数$C_{i,j}$，范围及其偏差—干空气（含 0.04%CO_2）

j	i							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	6.5632959106E-01	2.6412313138E-04	-2.0698776491E-04	9.0274334003E-05	-1.8093636314E-05	1.6364307636E-06	-6.6494872085E-08	9.9725217371E-10
1	2.7525164563E+01	-1.1933915224E+00	3.0609997409E-01	-1.3298030312E-01	2.6778028389E-02	-2.4243613933E-03	9.8422802476E-05	-1.4736760151E-06
2	-1.0718118248E+04	6.1754865432E+02	-1.7356691089E+02	7.5688405699E+01	-1.5291915232E+01	1.3842282087E+00	-5.6090321765E-02	8.3780294257E-04
3	2.0858587509E+06	-6.9146485402E+04	4.5713923707E+04	-2.0772718534E+04	4.2156251996E+03	-3.8126563497E+02	1.5405556474E+01	-2.2934742216E-01
4	-2.0134517649E+08	5.9872989742E+06	-5.7872392671E+06	2.7436998428E+06	-5.6191976234E+05	5.0796966264E+04	-2.0451918569E+03	3.0317748646E+01
5	7.6812256271E+09	-2.6959891807E+08	3.0334573927E+08	-1.4001328970E+08	2.9044117150E+07	-2.6302863662E+06	1.0550203735E+05	-1.5558115043E+03
系数：T_{c^*}=65　C_{c^*}=-1 范围：0.1 MPa≤p≤20 MPa　200 K≤T≤600 K								

C.5 不含二氧化碳的干空气(CIPM 2007 组分/无 CO_2)

REFPROP产生的临界流函数值如表C.7所示。公式（C.1）的系数、有效范围以及与REFPROP值的偏差如表C.8所示。

CIPM 2007组合中的每个摩尔分数乘以一个常数，使总和为1。

注：在CIPM 2007组成中，所有摩尔分数的总和不是1。

表 C.7 C^*值（不含 CO_2 的干空气）

T(K)	p(MPa)										
	0.1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
200	0.68590	0.70499	0.72793	0.75388	0.78234	0.81192	0.84040	0.86549	0.88575	0.90078	0.91097
220	0.68566	0.69976	0.71584	0.73307	0.75107	0.76925	0.78683	0.80302	0.81715	0.82885	0.83800
240	0.68548	0.69613	0.70789	0.72004	0.73237	0.74457	0.75630	0.76720	0.77700	0.78547	0.79252
260	0.68534	0.69352	0.70234	0.71124	0.72009	0.72871	0.73693	0.74458	0.75152	0.75764	0.76287
280	0.68521	0.69157	0.69830	0.70497	0.71150	0.71779	0.72375	0.72927	0.73428	0.73874	0.74260
300	0.68509	0.69007	0.69526	0.70033	0.70524	0.70992	0.71431	0.71837	0.72204	0.72530	0.72814
320	0.68497	0.68888	0.69290	0.69680	0.70052	0.70403	0.70731	0.71031	0.71301	0.71540	0.71746
340	0.68484	0.68791	0.69104	0.69403	0.69686	0.69951	0.70195	0.70417	0.70615	0.70788	0.70937
360	0.68470	0.68711	0.68953	0.69182	0.69396	0.69594	0.69775	0.69938	0.70081	0.70204	0.70307
380	0.68455	0.68641	0.68827	0.69001	0.69161	0.69308	0.69440	0.69556	0.69656	0.69740	0.69808
400	0.68438	0.68580	0.68721	0.68850	0.68968	0.69073	0.69166	0.69246	0.69313	0.69366	0.69406
420	0.68419	0.68525	0.68629	0.68722	0.68805	0.68878	0.68940	0.68991	0.69030	0.69059	0.69076
440	0.68397	0.68474	0.68547	0.68612	0.68667	0.68713	0.68750	0.68777	0.68795	0.68803	0.68802
460	0.68374	0.68427	0.68474	0.68515	0.68547	0.68571	0.68587	0.68595	0.68595	0.68587	0.68571
480	0.68349	0.68381	0.68408	0.68428	0.68441	0.68447	0.68447	0.68439	0.68424	0.68403	0.68375
500	0.68322	0.68336	0.68346	0.68349	0.68347	0.68338	0.68323	0.68303	0.68276	0.68243	0.68205

T(K)	p(MPa)										
	0.1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
520	0.68293	0.68293	0.68288	0.68277	0.68262	0.68240	0.68214	0.68182	0.68146	0.68104	0.68057
540	0.68262	0.68250	0.68233	0.68211	0.68184	0.68152	0.68116	0.68075	0.68030	0.67981	0.67927
560	0.68231	0.68208	0.68180	0.68148	0.68112	0.68072	0.68027	0.67979	0.67927	0.67871	0.67812
580	0.68198	0.68166	0.68129	0.68089	0.68045	0.67997	0.67946	0.67892	0.67834	0.67773	0.67708
600	0.68163	0.68125	0.68080	0.68033	0.67982	0.67928	0.67871	0.67812	0.67749	0.67683	0.67615
组分摩尔分数（CIPM 组分-CO_2）											
氮气	0.781 162 7		甲烷	0.000 001 5							
氧气	0.209 474 4		氪气	0.000 001 1							
氩气	0.009 335 8		氢气（正常）	0.000 000 5							
二氧化碳	0		一氧化二氮	0.000 000 3							
氖气	0.000 018 2		一氧化碳	0.000 000 2							
氦气	0.000 005 2		氙气	0.000 000 1							

表 C.8 系数$C_{i,j}$，范围及其偏差（不含 CO_2 的干空气）

j	i							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	6.592430038 6E-01	3.423406696 9E-04	-2.095405182 9E-04	7.115068452 9E-05	-1.246189286 8E-05	1.067978443 9E-06	-4.265975357 8E-08	6.386187163 5E-10
1	2.301447525 2E+01	-1.281213505 8E+00	2.937154547 2E-01	-9.933997504 3E-02	1.747556215 4E-02	-1.499371252 7E-03	5.985318082 4E-05	-8.948411310 0E-07
2	-8.305063871 3E+03	6.618289088 5E+02	-1.548860222 5E+02	5.269567688 6E+01	-9.323937911 4E+00	8.010737104 9E-01	-3.194577597 7E-02	4.767008667 1E-04
3	1.490416422 9E+06	-8.592651787 8E+04	3.720309408 3E+04	-1.329463791 8E+04	2.373657088 5E+03	-2.042471849 7E+02	8.131261347 6E+00	-1.209904399 3E-01
4	-1.320270749 7E+08	7.093030154 2E+06	-4.191975279 8E+06	1.598232028 8E+06	-2.900228193 5E+05	2.502096299 1E+04	-9.937084445 1E+02	1.472666358 8E+01
5	4.601957255 4E+09	-2.715169388 2E+08	1.908466864 6E+08	-7.378597997 0E+07	1.368880427 1E+07	-1.187946706 8E+06	4.705934781 3E+04	-6.937345860 1E+02
系数：T_{c^*}=80　C_{c^*}=-1 范围：0.1 MPa≤p≤20 MPa　200 K≤T≤600 K								

C.6 甲烷

REFPROP的临界流函数值如表C.9所示。表C.10到C.12中给出了公式（C.1）的系数、有效范围以及与REFPROP值的偏差。

表 C.9 C^*值（甲烷）

T(K)	p(MPa)										
	0.1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
200	0.67480	0.72109	0.81178	—	—	—	—	—	—	—	—
220	0.67404	0.70710	0.75733	0.84096	0.99220	1.16340	1.26520	1.30970	1.32280	1.31890	1.30590
240	0.67323	0.69796	0.73118	0.77554	0.83585	0.91211	0.98936	1.04930	1.08800	1.10970	1.11950
260	0.67229	0.69135	0.71515	0.74381	0.77822	0.81818	0.86109	0.90206	0.93653	0.96260	0.98060
280	0.67119	0.68619	0.70403	0.72426	0.74702	0.77203	0.79839	0.82459	0.84887	0.86983	0.88678
300	0.66992	0.68189	0.69566	0.71068	0.72691	0.74413	0.76192	0.77964	0.79656	0.81200	0.82546
320	0.66850	0.67815	0.68898	0.70049	0.71259	0.72513	0.73788	0.75051	0.76268	0.77403	0.78430
340	0.66696	0.67480	0.68344	0.69243	0.70172	0.71118	0.72067	0.73002	0.73904	0.74754	0.75535

360	0.66532	0.67173	0.67869	0.68582	0.69308	0.70039	0.70764	0.71475	0.72159	0.72806	0.73406
380	0.66363	0.66889	0.67454	0.68025	0.68600	0.69173	0.69737	0.70287	0.70814	0.71314	0.71779
400	0.66193	0.66626	0.67085	0.67546	0.68005	0.68459	0.68903	0.69333	0.69745	0.70134	0.70497
420	0.66025	0.66381	0.66756	0.67129	0.67497	0.67859	0.68211	0.68550	0.68873	0.69178	0.69463
440	0.65860	0.66153	0.66459	0.66761	0.67058	0.67347	0.67627	0.67895	0.68149	0.68389	0.68611
460	0.65700	0.65940	0.66190	0.66435	0.66673	0.66905	0.67127	0.67339	0.67539	0.67727	0.67900
480	0.65547	0.65743	0.65946	0.66144	0.66335	0.66519	0.66695	0.66862	0.67018	0.67164	0.67298
500	0.65401	0.65561	0.65724	0.65882	0.66035	0.66180	0.66318	0.66449	0.66570	0.66682	0.66784
520	0.65262	0.65391	0.65521	0.65647	0.65767	0.65881	0.65988	0.66088	0.66180	0.66264	0.66339
540	0.65131	0.65233	0.65336	0.65434	0.65527	0.65614	0.65696	0.65770	0.65839	0.65900	0.65953
560	0.65007	0.65087	0.65166	0.65241	0.65311	0.65376	0.65436	0.65490	0.65538	0.65580	0.65615
580	0.64891	0.64951	0.65010	0.65065	0.65116	0.65163	0.65204	0.65240	0.65271	0.65297	0.65318
600	0.64780	0.64824	0.64866	0.64905	0.64939	0.64970	0.64996	0.65017	0.65034	0.65046	0.65054

表 C.10 系数$C_{i,j}$，范围及其偏差（高温条件下的甲烷）

j	i							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	6.2636407496E-01	-6.1420869681E-04	9.8191834635E-06	-9.7951744801E-07	4.0277492346E-08	1.2188515398E-09	-7.3263408076E-11	6.2636407496E-01
1	1.0904263264E+03	1.4963493356E+01	-9.2371980050E-01	9.2261745221E-02	-2.9041240990E-03	-1.8041148933E-04	8.2455913438E-06	1.0904263264E+03
2	-1.2940757656E+07	8.1231618982E+05	1.4438343805E+04	-2.6217075930E+03	3.2190974914E+01	9.9852006708E+00	-3.5461860024E-01	-1.2940757656E+07
3	8.9177930855E+10	-7.4620344853E+09	-1.5834608691E+07	2.1994288202E+07	1.0980033054E+06	-2.3713574345E+05	7.0354178442E+03	8.9177930855E+10
4	-3.3601598602E+14	3.2272690302E+13	4.6723153456E+10	1.2729885327E+10	-2.6285638060E+10	2.5830301274E+09	-6.6125316153E+07	-3.3601598602E+14
5	5.3216561906E+17	-5.6049765734E+16	5.8370095180E+14	-5.2240732880E+14	1.4414784983E+14	-1.1066829575E+13	2.5347305348E+11	5.3216561906E+17
系数：T_{c^*}=110　C_{c^*}=-1.7 范围：0.1 MPa≤p≤20 MPa　280 K≤T≤600 K								

表 C.11 系数$C_{i,j}$，范围及其偏差（低压条件下的甲烷）

j	i							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	6.2560559279E-01	-5.9563923715E-04	-1.2421934333E-04	7.6661120597E-05	-2.3561783246E-05	3.9696841356E-06	-3.0254583130E-07	6.8406710265E-09
1	1.2242840792E+03	1.1886788066E+01	8.3948609545E+00	-5.1742429214E+00	1.5846485713E+00	-2.6511512757E-01	1.8932258934E-02	-3.1589033487E-04
2	-1.4881817391E+07	1.1648019833E+06	-2.2420413153E+05	1.3216416802E+05	-4.2726822259E+04	7.5166386517E+03	-5.4419789695E+02	8.5268605728E+00
3	1.0262808655E+11	-1.0437820460E+10	3.1362870088E+09	-1.8771670067E+09	6.7253535805E+08	-1.2840987847E+08	1.0149831088E+07	-2.1376947028E+05
4	-4.0770051666E+14	5.0660679453E+13	-2.2121623742E+13	1.5469532772E+13	-5.9870300804E+12	1.1897184616E+12	-9.8057859793E+10	2.3672559216E+09

j	i							
	0	1	2	3	4	5	6	7
5	8.6559880822E+17	-1.3098816552E+17	8.1387599466E+16	-6.2682912761E+16	2.5074553379E+16	-4.9340459609E+15	3.9194859608E+14	-8.7632800549E+12
6	-7.5837902117E+20	1.4010860401E+20	-1.1533379784E+20	9.2375211523E+19	-3.6548357944E+19	6.8065939618E+18	-4.6167250835E+17	5.5395960767E+15

系数：T_{c^*}=80　C_{c^*}=-1.7

范围：0.1 MPa≤p≤6.5 MPa

温度范围如下：

p MPa	Min. T K	Max. T K
0.1 ~ 4	200	600
4.5	205	
5	210	
5.5	215	
6	220	
6.5	225	

表 C.12 系数$C_{i,j}$，范围及其偏差（高压条件下的甲烷）

j	i							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	-1.6977265267E+00	1.1520857607E+00	-2.2317344529E-01	2.1216498632E-02	-9.9288906846E-04	1.6637984796E-05	2.4287484144E-07	-8.6813467095E-09
1	3.2985861490E+05	-1.5887990600E+05	2.9652200076E+04	-2.6279096259E+03	1.0275643239E+02	-2.7970429918E-01	-9.3456038550E-02	1.9121485358E-03
2	-1.6183107265E+10	7.5426346611E+09	-1.3166400187E+09	1.0066094765E+08	-2.1188434775E+06	-1.4924599241E+05	9.2691664744E+03	-1.4835172498E+02
3	3.5320585319E+14	-1.5448948659E+14	2.3583962837E+13	-1.1614655460E+12	-5.9811951851E+10	9.1362126965E+09	-3.7057948813E+08	5.1913057520E+06
4	-3.5651104301E+18	1.3725230094E+18	-1.4403801291E+17	-7.0660249664E+15	2.5215891286E+15	-1.9827543190E+14	6.7711636937E+12	-8.7539202546E+10
5	1.5008849666E+22	-4.0728780238E+21	-2.4834113541E+20	2.0013422731E+20	-2.7972815289E+19	1.7932769328E+18	-5.5875103729E+16	6.8573444030E+14
6	-1.6677925014E+25	-2.0459718488E+24	3.5632321221E+24	-8.7676104345E+23	9.7693248836E+22	-5.6704087941E+21	1.6710692529E+20	-1.9794592670E+18

j	i							
	0	1	2	3	4	5	6	7

系数：T_{c^*}=80　C_{c^*}=-1.8

范围：6.5 MPa≤p≤20 MPa

温度范围如下：

p MPa	Min. T K	Max. T K
6.5~7	215	600
7.5~8.5	220	
9~19	215	
19.5~20	220	

C.7　二氧化碳

REFPROP的临界流函数值如表C.13所示。表C.14和C.15中给出了公式（C.1）的系数、有效范围以及与REFPROP值的偏差。

注：二氧化碳可能具有显著的振动弛豫效应，并且在小喷嘴中效果会变得更强。见B.5。

表C.13 C^*值（二氧化碳）

T(K)	p(MPa)										
	0.1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
260	—	0.73659	—	—	—	—	—	—	—	—	—
280	—	0.71519	0.80820	—	—	—	—	—	—	—	—
300	0.66843	0.70188	0.75514	0.86604	—	—	—	—	—	—	—
320	0.66646	0.69245	0.72920	0.78419	0.88486	—	—	—	—	—	—
340	0.66470	0.68539	0.71256	0.74821	0.79797	0.87274	0.98659	1.12050	1.22830	1.29850	1.34000
360	0.66313	0.67989	0.70083	0.72633	0.75813	0.79864	0.85046	0.91390	0.98271	1.04585	1.09634
380	0.66171	0.67550	0.69209	0.71134	0.73388	0.76041	0.79155	0.82736	0.86673	0.90711	0.94522
400	0.66042	0.67189	0.68532	0.70038	0.71729	0.73631	0.75756	0.78099	0.80620	0.83239	0.85844
420	0.65926	0.66889	0.67993	0.69199	0.70518	0.71954	0.73511	0.75179	0.76939	0.78755	0.80580
440	0.65819	0.66634	0.67553	0.68538	0.69592	0.70716	0.71908	0.73160	0.74461	0.75791	0.77128
460	0.65721	0.66416	0.67188	0.68003	0.68862	0.69763	0.70703	0.71677	0.72677	0.73692	0.74708
480	0.65631	0.66226	0.66880	0.67562	0.68272	0.69007	0.69765	0.70542	0.71332	0.72128	0.72922
500	0.65548	0.66060	0.66618	0.67193	0.67786	0.68394	0.69015	0.69645	0.70282	0.70920	0.71554
520	0.65471	0.65913	0.66391	0.66880	0.67379	0.67887	0.68402	0.68921	0.69442	0.69961	0.70475
540	0.65399	0.65782	0.66193	0.66611	0.67034	0.67462	0.67892	0.68324	0.68755	0.69183	0.69605
560	0.65332	0.65665	0.66019	0.66377	0.66738	0.67100	0.67463	0.67825	0.68185	0.68540	0.68890
580	0.65269	0.65558	0.65865	0.66173	0.66482	0.66790	0.67097	0.67402	0.67704	0.68001	0.68293
600	0.65210	0.65462	0.65728	0.65993	0.66258	0.66521	0.66782	0.67040	0.67295	0.67545	0.67789

表 C.14 系数$C_{i,j}$，范围及其偏差（低温低压条件下的二氧化碳）

j	i						
	0	1	2	3	4	5	6
0	-7.2651017647E+02	7.4282410458E+03	-1.8178414177E+04	1.8366764887E+04	-8.8398754707E+03	2.0093181655E+03	-1.7393995859E+02
1	9.9523245358E+03	-1.0144544029E+05	2.4786025589E+05	-2.5017382440E+05	1.2033270592E+05	-2.7342096481E+04	2.3665929299E+03
2	-5.4476152343E+04	5.5403801369E+05	-1.3514635095E+06	1.3626602981E+06	-6.5501414597E+05	1.4877822819E+05	-1.2875660370E+04

j	i						
	0	1	2	3	4	5	6
3	1.4906557209 E+05	-1.5125824719 E+06	3.6834931977 E+06	-3.7100625626 E+06	1.7822079229 E+06	-4.0465276783 E+05	3.5014523641 E+04
4	-2.0390474043 E+05	2.0642995508 E+06	-5.0185149477 E+06	5.0492187611 E+06	-2.4238629669 E+06	5.5012626003 E+05	-4.7594939416 E+04
5	1.1154329978 E+05	-1.1266558320 E+06	2.7342748454 E+06	-2.7479445070 E+06	1.3182298545 E+06	-2.9906817856 E+05	2.5870114020 E+04

系数：T_{c^*}=175　C_{c^*}=-0.2

范围：0.1 MPa≤p≤4 MPa

温度范围如下：

p MPa	Min. T K	Max. T K
0.1	305	370
0.5		
1	265	
1.5		
2	275	
2.5	285	
3	270	
3.5	280	
4		

表 C.15 系数$C_{i,j}$，范围及其偏差—（高温低压条件下的二氧化碳/）

j	i							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	6.3756979939E-01	-2.4217708415E-03	9.8410306161E-04	-5.8587646855E-04	1.8322253959E-04	-2.9324909923E-05	2.3047120413E-06	-7.0549492534E-08
1	3.7490985095E+00	7.0401913996E-01	-3.8948964916E-01	2.2774066279E-01	-7.0985389037E-02	1.1363890052E-02	-8.9412564403E-04	2.7422992364E-05
2	-2.5678560824E+02	-5.7657032269E+00	5.4974561165E+01	-3.2196393976E+01	9.9819419639E+00	-1.5976466194E+00	1.2589605698E-01	-3.8726679959E-03
3	9.9066959359E+03	-9.8559860722E+01	-3.3810802810E+03	2.0636877064E+03	-6.3629258934E+02	1.0180187427E+02	-8.0437301511E+00	2.4873313965E-01
4	-1.9812288906E+05	-3.6495262700E+03	9.5877518641E+04	-5.9743079392E+04	1.8383905606E+04	-2.9399454501E+03	2.3339014859E+02	-7.2875128834E+00
5	1.5899467523E+06	1.0946742216E+05	-9.8963428027E+05	6.2187263035E+05	-1.9114903462E+05	3.0596066969E+04	-2.4474064599E+03	7.7815554758E+01
6	6.3756979939E-01	-2.4217708415E-03	9.8410306161E-04	-5.8587646855E-04	1.8322253959E-04	-2.9324909923E-05	2.3047120413E-06	-7.0549492534E-08

j	i							
	0	1	2	3	4	5	6	7

系数：T_{c^*}=280　C_{c^*}=-0.9

范围：0.1 MPa≤p≤10 MPa

温度范围如下：

p MPa	Min. T K	Max. T K
0.1~9	275	600
9.5	325	
10	330	

C.8　氧气

REFPROP产生的临界流函数值在表C.16中给出。表C.17和C.18给出了公式（C.1）的系数、有效范围以及与REFPROP值的偏差。

表 C.16 C^*值（氧气）

T(K)	p(MPa)										
	0.1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
200	0.68575	0.70823	0.73 08	0.77 15	0.81 54	0.87 94	0.93 16	0.99 78	1.03 80	1.07 20	1.09 90
220	0.685 47	0.702 20	0.722 30	0.745 33	0.771 55	0.800 77	0.832 08	0.863 71	0.893 42	0.919 31	0.940 38
240	0.685 23	0.698 04	0.712 79	0.728 88	0.746 27	0.764 76	0.783 95	0.803 25	0.821 94	0.839 32	0.854 81
260	0.685 01	0.695 01	0.706 19	0.718 02	0.730 40	0.743 20	0.756 21	0.769 15	0.781 73	0.793 65	0.804 63
280	0.684 77	0.692 69	0.701 36	0.710 34	0.719 54	0.728 88	0.738 22	0.747 43	0.756 37	0.764 87	0.772 81
300	0.684 51	0.690 85	0.697 68	0.704 64	0.711 67	0.718 70	0.725 67	0.732 49	0.739 07	0.745 34	0.751 22
320	0.684 22	0.689 32	0.694 77	0.700 24	0.705 71	0.711 13	0.716 45	0.721 62	0.726 60	0.731 33	0.735 77
340	0.683 88	0.688 02	0.692 39	0.696 74	0.701 05	0.705 28	0.709 41	0.713 40	0.717 22	0.720 85	0.724 25
360	0.683 51	0.686 87	0.690 39	0.693 87	0.697 29	0.700 63	0.703 86	0.706 98	0.709 94	0.712 75	0.715 38
380	0.683 09	0.685 83	0.688 67	0.691 46	0.694 19	0.696 84	0.699 38	0.701 82	0.704 14	0.706 32	0.708 36
400	0.682 64	0.684 87	0.687 16	0.689 40	0.691 58	0.693 67	0.695 68	0.697 60	0.699 41	0.701 10	0.702

表 C.17 系数$C_{i,j}$，范围及其偏差—（全部条件下的氧气）

j	i							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	6.96657241 46E-01	-4.61060044 45E-02	4.75673581 41E-02	-1.59120092 66E-02	2.49445918 28E-03	-1.90544879 65E-04	6.88816958 09E-06	-9.47117711 71E-08
1	-1.18234684 98E-02	6.05924185 80E-02	-4.79071815 08E-02	1.65463382 04E-02	-2.59483926 50E-03	2.00613771 86E-04	-7.38548710 21E-06	1.03518282 35E-07
2	4.62036399 56E-03	-2.48148022 56E-02	1.93758919 73E-02	-6.81142467 32E-03	1.06977934 99E-03	-8.36223947 51E-05	3.12611401 31E-06	-4.45063748 42E-08
3	-9.00803214 51E-04	4.75931835 98E-03	-3.90944139 07E-03	1.38744778 53E-03	-2.18390913 13E-04	1.72408598 12E-05	-6.52936630 56E-07	9.41581987 20E-09
4	8.94205955 71E-05	-4.48834757 66E-04	3.92125180 72E-04	-1.39859897 71E-04	2.20723016 41E-05	-1.75791955 12E-06	6.73114025 45E-08	-9.81064518 96E-10
5	-3.85609327 35E-06	1.68958145 58E-05	-1.56130683 40E-05	5.58296913 26E-06	-8.83552019 17E-07	7.09212305 60E-08	-2.74120325 75E-09	4.03108668 91E-11

系数：T_{c^*}=190　C_{c^*}=0.35

范围：0.1 MPa≤p≤20 MPa　200 K≤T≤400 K

表 C.18 系数$C_{i,j}$，范围及其偏差—（低压下高准确度条件下的氧气/）

j	i						
	0	1	2	3	4	5	6
0	3.2625615758 E+00	2.6411737361 E+01	-2.6559289469 E+01	1.0232345111 E+01	-2.5629438653 E+00	3.2547928464 E-01	-1.3404136153 E-02
1	-1.3152444836 E+01	-9.5505818766 E+01	9.1604337015 E+01	-3.5191511384 E+01	8.8106593730 E+00	-1.1131181383 E+00	4.5719814041 E-02
2	2.4602540776 E+01	1.3778565194 E+02	-1.2617984292 E+02	4.8392763470 E+01	-1.2108120896 E+01	1.5220462857 E+00	-6.2355399023 E-02
3	-2.1860112941 E+01	-9.8978831449 E+01	8.6781773466 E+01	-3.3258876728 E+01	8.3149169582 E+00	-1.0401463574 E+00	4.2506703474 E-02
4	9.3897436213 E+00	3.5377731086 E+01	-2.9805713869 E+01	1.1423914120 E+01	-2.8533539229 E+00	3.5525673308 E-01	-1.4482861353 E-02
5	-1.5754181469 E+00	-5.0323240705 E+00	4.0902565392 E+00	-1.5688761261 E+00	3.9143853918 E-01	-4.8513512511 E-02	1.9731258821 E-03
系数：T_{c^*}=159　C_{c^*}=0.08 范围：0.1 MPa≤p≤12 MPa　200 K≤T≤400 K							

C.9 蒸汽（单相气体）

REFPROP的临界流函数值如表C.19所示。表C.20到C.21中给出了公式（C.1）的系数、有效范围以及与REFPROP值的偏差。

表 C.19 C^*值（蒸汽）

T(K)	p(MPa)										
	0.1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
420	0.67337	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
440	0.67272	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
460	0.67208	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
480	0.67148	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
500	0.67090	0.69657	—	—	—	—	—	—	—	—	—
520	0.67035	0.69359	—	—	—	—	—	—	—	—	—
540	0.66981	0.68976	0.71539	—	—	—	—	—	—	—	—
560	0.66929	0.68640	0.70886	0.73598	—	—	—	—	—	—	—
580	0.66878	0.68358	0.70246	0.72579	0.75468	—	—	—	—	—	—
600	0.66829	0.68118	0.69714	0.71638	0.74004	0.76986	0.81134	—	—	—	—
620	0.66781	0.67912	0.69278	0.70874	0.72777	0.75101	0.78030	0.81982	—	—	—
640	0.66733	0.67732	0.68913	0.70260	0.71816	0.73648	0.75852	0.78585	0.82142	0.87252	—
660	0.66687	0.67572	0.68604	0.69756	0.71056	0.72540	0.74259	0.76287	0.78737	0.81797	0.85817
680	0.66641	0.67430	0.68337	0.69335	0.70440	0.71672	0.73061	0.74641	0.76466	0.78608	0.81177
700	0.66596	0.67302	0.68104	0.68976	0.69928	0.70971	0.72123	0.73402	0.74834	0.76452	0.78302
720	0.66552	0.67185	0.67899	0.68667	0.69495	0.70391	0.71365	0.72427	0.73592	0.74876	0.76300
740	0.66508	0.67078	0.67716	0.68397	0.69123	0.69902	0.70737	0.71637	0.72608	0.73660	0.74804
760	0.66464	0.66980	0.67552	0.68158	0.68801	0.69483	0.70208	0.70981	0.71806	0.72688	0.73633
780	0.66422	0.66888	0.67404	0.67947	0.68518	0.69120	0.69755	0.70427	0.71137	0.71888	0.72685
800	0.66379	0.66803	0.67269	0.67757	0.68267	0.68802	0.69363	0.69952	0.70570	0.71219	0.71901
820	0.66337	0.66723	0.67146	0.67585	0.68044	0.68521	0.69020	0.69539	0.70082	0.70649	0.71240
840	0.66296	0.66648	0.67032	0.67430	0.67843	0.68271	0.68716	0.69178	0.69658	0.70157	0.70674
860	0.66255	0.66576	0.66926	0.67287	0.67661	0.68047	0.68446	0.68859	0.69286	0.69728	0.70185

880	0.66214	0.66509	0.66828	0.67157	0.67495	0.67845	0.68204	0.68575	0.68957	0.69351	0.69756
900	0.66174	0.66444	0.66736	0.67036	0.67344	0.67661	0.67986	0.68320	0.68664	0.69016	0.69378
920	0.66134	0.66382	0.66650	0.66924	0.67205	0.67493	0.67788	0.68091	0.68400	0.68717	0.69042
940	0.66095	0.66323	0.66569	0.66820	0.67077	0.67339	0.67608	0.67882	0.68163	0.68449	0.68742
960	0.66056	0.66267	0.66492	0.66723	0.66958	0.67198	0.67442	0.67692	0.67947	0.68206	0.68471
980	0.66018	0.66212	0.66420	0.66631	0.66847	0.67067	0.67290	0.67518	0.67750	0.67986	0.68226
1000	0.65981	0.66159	0.66351	0.66546	0.66744	0.66945	0.67150	0.67358	0.67570	0.67785	0.68003

表 C.20 系数 $C_{i,j}$，范围及其偏差（低温条件下的蒸汽）

j	i					
	0	1	2	3	4	5
0	7.6383628636E-01	-1.3948809459E+00	-9.4682604528E-03	-1.6324349951E-02	-4.8136125911E-04	2.7472738708E-04
1	-2.5022686945E+02	3.0698113874E+03	2.5438748520E+02	-1.9835926887E+01	1.0308868889E+01	-1.2180337513E+00
2	2.2309865728E+05	-2.5007340159E+06	-4.3319430117E+05	6.8529295310E+04	-1.7185358070E+04	1.5839639878E+03
3	-8.3375219628E+07	8.9290286975E+08	2.5143120800E+08	-4.6235981182E+07	9.8380474046E+06	-8.1916664054E+05
4	1.1296847136E+10	-1.1698415314E+11	-4.8602570794E+10	9.4769242935E+09	-1.8812765934E+09	1.4882150791E+08

系数：T_{c^*}=0　C_{c^*}=-1

范围：0.1 MPa≤p≤6 MPa

温度范围如下：

p MPa	Min. T K	Max. T K
0.1	405	700
0.5	430	
1	455	
1.5	475	
2	490	
2.5	500	
3	510	
3.5	520	
4	525	
4.5	535	
5	540	
5.5	545	
6	550	

表 C.21 系数$C_{i,j}$，范围及其偏差（高温条件下的蒸汽）

j	i					
	0	1	2	3	4	5
0	6.0538184067E-01	4.4451919734E-03	-1.0552950714E-03	2.6192602318E-04	-3.0734451594E-05	1.6713260277E-06

j	i					
	0	1	2	3	4	5
1	2.5168685232E+00	-3.5787620199E-01	7.0538988170E-02	-1.7254081463E-02	2.0412362614E-03	-1.1177534079E-04
2	-4.5170447476E+01	1.0172762225E+01	-1.8680420538E+00	4.4732366508E-01	-5.3361463859E-02	2.9464670782E-03
3	4.2758519902E+02	-1.1602332503E+02	2.4357667835E+01	-5.7162905587E+00	6.8716465501E-01	-3.8321292332E-02
4	-2.0807195140E+03	6.3131772787E+02	-1.5405400890E+02	3.6119701698E+01	-4.3706355366E+00	2.4653199971E-01
5	4.1081046567E+03	-1.3597740602E+03	3.8149828437E+02	-9.0450567417E+01	1.1028054833E+01	-6.2965180441E-01
系数：T_{c^*}=583　C_{c^*}=-0.5 范围：0.1 MPa≤p≤6 MPa　645 K≤T≤1000 K						

附 录 D
（资料性）
大气空气的质量流量修正因子

D.1 总则

当工作介质是（大气）空气时，忽略湿度对压缩因子的影响，湿度对质量流量的影响可表示为两部分，

$$q_{mi,H} = q_{mi} \cdot k_{C_*} \cdot \sqrt{k_M} \tag{D.1}$$

式中：k_{C_*}——临界流函数的湿度修正系数；
k_M——分子量的湿度修正系数。

D.2 临界流函数的湿度修正系数

湿度修正可以用下式准确估算：

$$C^*_{HA} = C^*_{DA}\left[1 + \left\{\left(7.894 - \frac{12.571}{p}\right)\frac{T^2}{100000} - \left(4.473 - \frac{7.0563}{p}\right)\frac{T}{100} + \left(6.3665 - \frac{9.9266}{p}\right)\right\}\frac{H_R}{100000}\right] \tag{D.2}$$

注：用几种典型组分的空气进行验证，校正值与REFPROP值的偏差均小于0.005%。

此方程在以下范围内有效：
0.1 MPa≤p≤0.5 MPa
280 K≤T≤310 K
0%≤H_R≤90%
在高压下，湿度修正可忽略不计

临界流函数的湿度修正系数，如下：

$$k_{C_*} = \frac{C^*_{HA}}{C^*_{DA}} \tag{D.3}$$

D.3 分子量的湿度修正系数（CIPM-2007）

对于工作介质为湿空气，压力（60~110）kPa，温度（15~27）℃内时，被校准流量计处的湿空气密度，$\rho_{MUT,H}$，可采用 CIPM-2007 计算，即，

$$\rho_{MUT,H} = [3.483740 + 1.4446 \cdot (X_{CO_2} - 0.0004)] \cdot \frac{p_{MUT}}{Z_{MUT}T_{MUT}} \cdot (1 - 0.3780x_v) \tag{D.4}$$

式中：X_{CO_2}——空气中 CO_2 所占的摩尔分数（如果未知，可用 0.0004）；
x_v——水蒸气的摩尔百分比。

基于式（D.4），分子量的湿度修正系数为，

$$k_M = 1 - 0.3780x_v \tag{D.5}$$

其中，水蒸气的摩尔百分比，x_v，为，

$$x_v = \mathrm{RH}f(p,t) \cdot \frac{p_{SV}(t)}{p} \tag{D.6}$$

式中，p_{SV}——饱和蒸汽压；
f——增益因子。

饱和蒸汽压，p_{SV}，为，

$$p_{SV} = 1\ \text{Pa} \times \exp(AT^2 + BT + C + D/T) \quad \text{（D.7）}$$

其中：A=1.237 884 7×10^{-5} K^{-2}；

B=−1.912 131 6×10^{-2} K^{-1}；

C=33.937 110 47；

D=−6.343 164 5×10^{3} K。

增强因子，f，为

$$f = \alpha + \beta p + \gamma t^2 \quad \text{（D.8）}$$

式中，t 的单位是℃。

其中：α=1.000 62；

β=3.14×10^{-8} Pa^{-1}；

γ=5.6×10^{-7} ℃$^{-2}$。

压缩因子，Z_{MUT}，可表示为，

$$Z_{MUT} = 1 - \frac{p_{MUT}}{T_{MUT}}[a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (b_0 + b_1 t)x_v + (c_0 + c_1 t)x_v{}^2] + \frac{p_{MUT}{}^2}{T_{MUT}{}^2}(d + e x_v{}^2) \quad \text{（D.9）}$$

式中，a_0=1.581 23×10^{-6} K · Pa^{-1}；

a_1=−2.9331×10^{-8} Pa^{-1}；

a_2=1.1043×10^{-10} K^{-1} Pa^{-1}；

b_0=5.707×10^{-6} KPa^{-1}；

b_1=−2.051×10^{-8} Pa^{-1}；

c_0=1.9898×10^{-4} KPa^{-1}；

c_1=−2.376×10^{-6} Pa^{-1}；

d=1.83×10^{-11} K^2 Pa^{-2}；

e=−0.765×10^{-8} K^2 Pa^{-2}。

附 录 E （资料性）
喷嘴安装要求

E.1 两种标准安装的通用要求

E.1.1 标准安装

喷嘴应安装于以下任一配置中：

a) 管道配置：喷嘴喉部与上游管道直径之比 $\beta \leq 0.25$ 的圆形横截面管道；或

b) 腔室配置：喷嘴上游为大空间（腔室或稳压室），使 β 实际为零。

管道安装应只安装一个喷嘴，并应满足 E.1.2～E.1.7 以及 E.2 的要求。

腔室安装可安装一组多个喷嘴，并应满足 E.1.2～E.1.7 以及 E.3 的要求。

E.1.2 上游取压口

喷嘴上游的静态压力应通过在喷嘴上游管道或腔室上钻孔而成的一个或多个管壁取压口来测量。

如已证实管壁取压口测得的压力能可靠用于确定上游滞止压力，则其可位于E.2.3和E.3.3中规定的位置的上游或下游 (见附录J)。

如取压口处的流量无法近似为静止状态，例如β>0.15，则取压口应符合下列要求（汇总于图E.1）：

a） 中心线应垂直于喷嘴轴线；

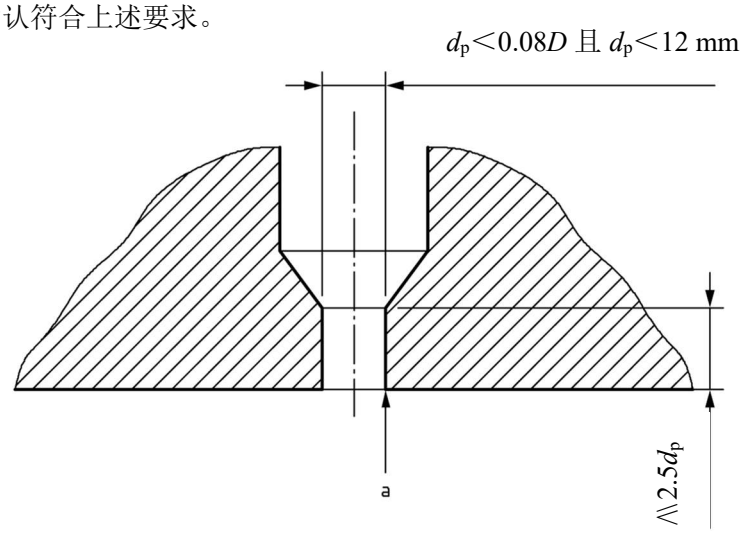
b） 贯通管道的横截面应为圆形；

c） 在管壁中的形状应为圆筒形，自穿透处起的最小长度为 $2.5d_p$，其中 d_p 为贯通孔直径；

d） 贯通孔边缘应为直角或倒圆，倒圆半径不超过 $0.1d_p$；

e） 贯通孔的边缘应无毛刺。

应通过目视检查确认符合上述要求。



标引序号说明：

[a]孔的边缘与管道内表面齐平，无毛刺，呈直角或倒圆半径不超过$0.1d_p$

图 E.1 管壁取压口详细要求

E.1.3 下游取压口

下游压力应通过一个或多个管壁取压口进行测量，以确保喷嘴或所有喷嘴都处于壅塞状态。从喷嘴出口流出的流体不宜直接影响任何取压口。

在某些应用场合，无需采用管壁取压口就可以确定出口压力，例如，喷嘴直接排入已知压力的大空间时（如大气或大容器），喷嘴下游压力可用大空间的压力来表示。

E.1.4 温度测量

上游温度应通过设置在喷嘴上游的一个或多个传感器进行测量，无需测量下游温度。

温度传感器不应干扰上游压力测量；为此，传感器不应与上游取压口沿流向对齐。

如果流动气体的滞止温度与环境温度存在显著差异（例如相差 5 K 以上），需特别注意温度传感器的选型和管道隔热措施。此类情况下，传感器应具备抗热辐射影响能力，且管道应充分加装隔热层，以最大限度减少流动气体与环境之间的热传递。如果流动气体与管壁的温度差非常大，将很难准确测量气体温度，应最大限度减少管道与传感器护套之间的热传递。

E.1.5 密度测量

对于某些应用场合，例如当气体摩尔质量无法精确获知时，可能需要直接测量喷嘴上游的气体密度。密度计应安装在入口取压口和温度测量点的上游。

为了准确测量流量，应特别注意以下几点：

a） 密度计不应干扰上游静态压力和静态温度测量；

b） 当密度计安装在喷嘴上游管道或腔室的旁通管路中，应进行检查以确保流经密度计的气体与管道或腔室中的气体状态相同；

c） 密度计处的压力和温度宜尽可能接近喷嘴上游的压力和温度，以尽量减少修正量。喷嘴的滞止密度应按公式（E.1）计算：

$$\rho_0 = \rho_{\mathrm{den}} \frac{p_0}{p_{\mathrm{den}}} \frac{T_{\mathrm{den}}}{T_0} \frac{Z_{\mathrm{den}}}{Z_0} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (\mathrm{E.1})$$

E.1.6 排泄孔

管道或腔室可设置排泄孔，以排出某些应用场合中可能积聚的冷凝液或其他杂质。在测量过程中，应无流体通过这些排泄孔。

排泄孔应设置在喷嘴上游管壁取压口的上游，且位于与管壁取压口不同的轴向平面内，以避免干扰上游静态压力测量。

排泄孔宜适配图E.1中的取压口规格。排泄孔到上游管壁取压口平面的轴向距离应大于1D。

E.1.7 下游条件

除了应不妨碍喷嘴达到临界流外，对出口管道无其他要求。

E.2 管道配置

E.2.1 总则

除E.1外，管道配置还应符合E.2.2～E.2.4的要求。这些要求如图E.2所示。

E.2.2 上游管道

上游管道应符合以下要求：

a） 为直管段；

b） 为圆形截面；

c） 与喷嘴 AOS 的同轴度在±0.02D 之内；

d） 直径大于 4d_{nt}（β≤0.25）；

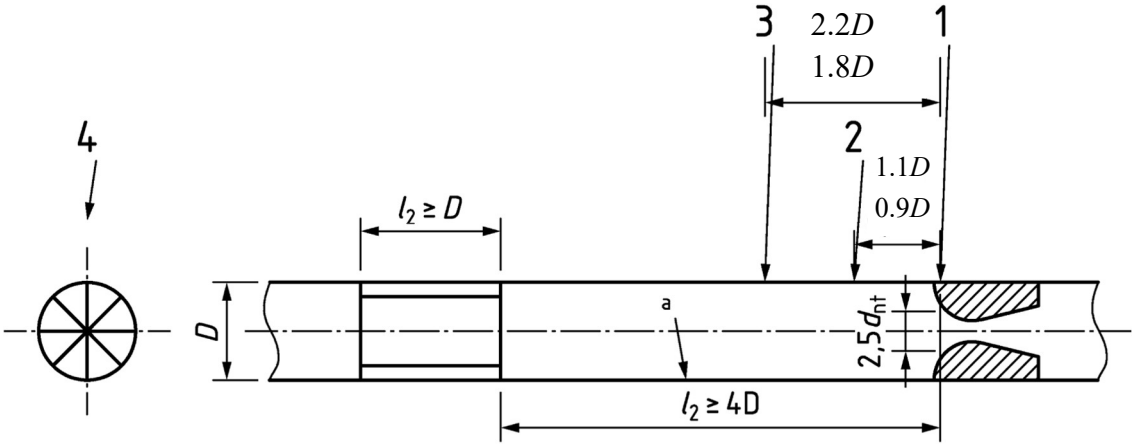
e） IP 上游 3D 以内的圆度偏差不超过 0.01D；

f） IP 上游 3D 以内的算术平均粗糙度 R_a 不超过 $10^{-4}D$。

如无法满足上述要求，建议开展专项测试以了解安装条件对流量测量不确定度的影响，或使用同一管道进行实流校准以确定 C_d。

当β>0.25时，质量流量可通过附录F的方法进行修正。但应特别注意，高速流体的静态压力测量极易因位置、形式和/或取压口的加工质量而产生严重误差。此外，恢复系数的不确定性可能对测量产生较大影响，且上游取压口和IP之间的压降也可能变得不可忽略。

上游管道中不应存在涡流，如果上游管道中存在涡流，则可在 IP 上游 l_1>5D 距离处安装图 E.2 所示结构的流动整直器（Etoile 整直器），以确保无涡流条件。也可根据 GB/T 2624.1 在上游安装其他流动调整器。



标引序号说明：

1——IP

2——取压口的位置

3——温度传感器的位置

4——叶片厚度足以防止屈曲的 Etoile 整直器（当管道中的流体流速不可忽略时）

[a] 此区间的表面粗糙度不应超过 $10^{-4}D$

图 E.2 管道中的安装要求

E.2.3 压力测量

上游取压口宜位于喷嘴IP上游0.9D～1.1D处。

如有多个取压口，则所有取压口都应位于垂直于喷嘴轴线的同一平面中。

下游压力可通过位于扩散段出口下游0.5D范围内的取压口进行测量。如果没有明显的压力变化，也可以位于下游更远的位置。

E.2.4 温度测量

上游温度可在 IP 上游 1.8D～2.2D 处测量。传感器直径不应大于 0.04D。

如无法使用直径不大于 0.04D 的传感器，则传感元件的位置应确保其不影响上游压力测量。若能证明所测温度能可靠用于确定喷嘴入口滞止温度，则传感器可以设置在上游更远的位置。

E.3 腔室配置

E.3.1 总则

腔室配置应符合E.1，以及E.3.2～E.3.5。

E.3.2 上游腔室

如果喷嘴的喷嘴轴线至腔室所有内壁的距离均不小于5d_{nt}，则可认为喷嘴安装在大空间（腔室）内。

当多个喷嘴并联安装在同一腔室内，任意喷嘴喷嘴轴线之间的最小距离都应大于最大喉部直径的6倍，以避免喷嘴间相互干扰。建议进行试验，以确保喷嘴之间以及喷嘴和腔壁之间的干扰不会导致性能下降。

E.3.3 压力测量

上游腔室中的壁面取压口宜位于垂直于IP的腔壁上，并与IP的距离在(10±1)d_{nt}范围内。

E.3.4 温度测量

上游腔室的温度传感器不应位于流动滞止的区域，以确保所测温度能代表流入各喷嘴的气体温度。由于流动滞止和/或温度分层现象，建议大腔室内安装多个传感器。

E.3.5 背压比

如腔室中安装了多个喷嘴，则腔室的背压比应小于所有喷嘴临界背压比中的最小值。

附 录 F
（资料性）
β>0.25 的临界流喷嘴临界质量通量的计算

F.1 总则

取压口测量静态压力，即流动气体的压力。然而，由于气体的黏度，固定在管道上的温度传感器测量气体处于静止状态时的温度，记录的温度 T_m，既不是滞止温度 T_0，又不是静态温度 T，这些温度之间的关系由恢复因子给出。恢复系数取决于气体和探头形式、流量，其公式见（F.1）：

$$R_f = \frac{T_m - T}{T_0 - T} \quad \text{（F.1）}$$

如果 R_f 的值为零，则意味着温度检测元件所测量的是静态温度 T，而如果 R_f 的值为 1，则意味着被测温度是滞止温度 T_0。R_f=0 和 1 分别对应于厚度无穷大的温度边界层和等于速度边界层厚度的温度边界层。实际上，R_f 的值一般是在 0.5 到 0.9 范围内，这意味着与静态温度相比，被测温度更接近于滞止温度。

F.2 修正因子

特别提示——在本规程出版之时，天然气混合物的修正因子尚未确定。如果需要天然气混合物的修正因子，宜采用甲烷的修正因子。

注：如果上游管道流速高，不建议使用喷嘴测量流量，因为在高速流动中，静态压力测量容易产生较大的误差，此外，修正因子的不确定性（见附录J）也会造成较大的误差。本附录宜仅适用于在上游管道的直径不可避免地较小的情况下流量的估算。

下列修正因子所适用的气体与式（B.1）相同，即氮、氩、不含 CO_2 的干燥空气和甲烷。有效的温度及压力范围也相同，即：温度范围 200 K～600 K（甲烷是 200 K～600 K），最高压力 20 MPa。β 值在 0.25～0.5 时修正有效。

对于给定入口被测温度 T_m（K）和被测压力 p_m（MPa），具有高 β 值（β 值在 0.25～0.5 之间）喷嘴的质量流量可按下式计算：

$$q_{m,\beta} = q_{m,\mathrm{stag}}[(1 - R_f)F_0 + R_f F_1] \quad \text{（F.2）}$$

式中：$q_{m.\mathrm{stag}}$ ——按式（5）计算的质量流量；

R_f ——温度检测元件的恢复系数；

修正因子 F_0 和 F_1 的计算公式如下：

$$F_i = 1 + B \cdot C_i \quad \text{（F.3）}$$

$$B = 25.879\beta^6 - 32.693\beta^5 + 34.276\beta^4 - 6.0199\beta^3 + 1.1156\beta^2 - 0.1122\beta + 0.0047 \quad \text{（F.4）}$$

$$C_i = \sum_k n_{i,k}\pi^{p_{i,k}}\tau^{t_{i,k}} \quad \text{（F.5）}$$

公式（F.5）的各系数由表 F.1 至 F.4 给出。取得对比压力 π（$\pi = \frac{p}{p_c}$，p_c为气体临界压力）和对比温度 τ（$\tau = \frac{T}{T_c}$，T_c为气体临界温度）所需的临界参数。

表 F.1 氮气的方程（F.5）系数

i	k	$n_{i.k}$	$p_{i.k}$	$t_{i.k}$
0	1	1.304619×10^{-2}	0	0

	2	-3.666323×10^{-5}	0	1
	3	-3.668820×10^{-3}	0.5	–5
	4	5.024075×10^{-4}	1	–1
	5	2.846962×10^{-3}	2	–6
	6	-7.569285×10^{-4}	3	–8
1	1	1.516890×10^{-2}	0	0
	2	-2.433804×10^{-5}	0	1
	3	-3.755322×10^{-3}	1	–3
	4	4.068331×10^{-3}	1	–2
	5	9.540179×10^{-3}	1.5	–6
	6	-4.828687×10^{-6}	5	–6

表 F.2 氩气的方程（F.5）系数

i	k	$n_{i.k}$	$p_{i.k}$	$t_{i.k}$
0	1	1.359113×10^{-2}	0	0
	2	5.072601×10^{-4}	1	–1
	3	5.776326×10^{-4}	2	–4
	4	4.625040×10^{-4}	3	–10
	5	-3.001709×10^{-7}	6	–4
1	1	1.702515×10^{-2}	0	0
	2	3.255007×10^{-3}	1	–2
	3	2.029543×10^{-4}	1	–1
	4	6.931127×10^{-3}	2	–6
	5	-1.846055×10^{-4}	4	–6

表 F.3 无 CO_2 干空气的方程（F.5）系数

i	k	$n_{i.k}$	$p_{i.k}$	$t_{i.k}$
0	1	1.307864×10^{-2}	0	0
	2	-4.752544×10^{-5}	0	1
	3	1.760268×10^{-2}	0.5	–6
	4	-1.340098×10^{-2}	0.5	–5
	5	4.672622×10^{-4}	1	–1
	6	1.294203×10^{-3}	1.5	–4
1	1	1.522775×10^{-2}	0	0
	2	-4.726879×10^{-5}	0	1
	3	-5.958875×10^{-3}	1	–4
	4	3.445387×10^{-3}	1	–2
	5	1.256916×10^{-2}	1.5	–6
	6	-4.775091×10^{-5}	4	–6

表 F.4 甲烷的方程（F.5）系数

i	k	$ni.k$	$pi.k$	$ti.k$
0	1	1.068826×10^{-3}	0	–1
	2	1.199593×10^{-2}	0	0
	3	-1.482920×10^{-3}	0.5	–6
	4	2.764799×10^{-4}	1	–1
	5	7.920711×10^{-5}	2	–2
	6	1.111278×10^{-3}	3	–8
	7	-6.815626×10^{-5}	5	–10
	8	3.862490×10^{-8}	10	–18
1	1	-3.463148×10^{-3}	0	–3
	2	5.286029×10^{-3}	0	–1
	3	1.195016×10^{-2}	0	0
	4	1.664232×10^{-3}	1	–2

	5	1.159371×10^{-3}	1.5	–4
	6	7.260461×10^{-3}	3	–10
	7	-7.541933×10^{-4}	5	–12
	8	2.613967×10^{-7}	10	–15

附 录 H （资料性）
临界背压比

H.1 理论临界背压比

理论临界背压比（Critical Back Pressure Ratio，CBPR）假设扩散段中为理想气体完全附着的一维等熵流，由p_{2i}/p_0给出。对于特定气体，它仅取决于扩散段出口与喉部的面积比。

在高雷诺数下，大多数带有扩散段喷嘴的运行大致与经验预测甚至与简单理论基本一致。

在低雷诺数下，喷嘴将面临提前非壅塞现象（PUP），即在BPR大于临界压力比时（例如，双原子气体约为0.53），理论上受扩散段影响喷嘴应达到临界流，但流量可能会显著降低。

造成PUP的机制尚不清楚，因此，还不能预测出现PUP的条件。尽管通过实验来检测PUP并不困难，特定喷嘴中PUP的影响可能主要取决于其安装条件；因此，为了通过实验预测某一特定喷嘴中PUP的发生情况，测量应在实际应用中使用的那台喷嘴进行测量，且测量时该喷嘴应安装在其自身的上游和下游管道中。振动冲击波的共振是PUP的原因之一，这可能导致其对安装条件的依赖性。

一般来说，对于符合本规程的喷嘴，PUP开始影响流量的典型雷诺数约为10^5，例如，这相当于在大气压下运行时，d_{nt}≈10 mm（约50 m^3/h）的喷嘴。通过加长扩散段可以减少由PUP引起的流出系数的降低，因此，本规程建议让扩散段长度尽可能长，至少$4d_{nt}$。在小于PUP开始影响流量的雷诺数下，用户应该假设没有扩散段影响，即：高于临界压力比的BPR可能会导致严重的误差。

当 PUP 较弱时（即在怀疑可能发生 PUP 的范围内，处于相对较高的雷诺数下），大多数喷嘴可能会在略小于临界压力比的 BPR 处壅塞。然而，在雷诺数非常低、接近本规程适用范围下限时，由于激波共振导致的流量降低可能发生在 BPR 远小于临界压力比的情况下。因此，在 PUP 较强时，建议保持压力比远小于临界压力比，例如 0.25 或更低。

对于没有扩散段和扩散段非常短的喷嘴，例如 L=0.1d_{nt}，如果需要高准确度，无论其雷诺数如何建议背压比始终小于 0.35。BPR 为 0.35 时流量开始出现轻微的降低，在 0.5 时达到 0.1%，BPR 超过 0.5 时流量迅速下降，因为流速完全是亚音速的；但是，如果在应用中可以容忍 0.1%的偏差，则 BPR 为 0.5 是可以接受的。

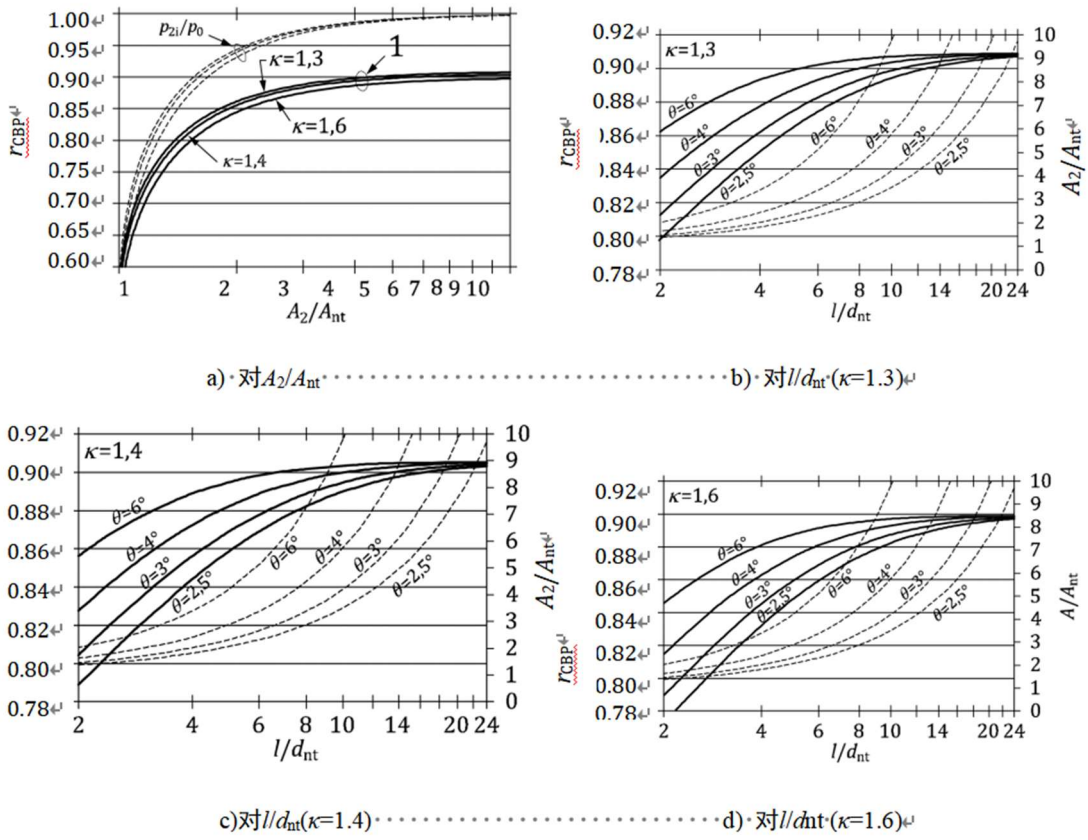
H.2 临界背压比的估算

H.2.1 对于雷诺数在2×10^5以上的传统扩散段

当雷诺数大于2×10^5时，传统扩散段的临界背压比r_{CBP}可通过公式（H.1）估算：

$$r_{CBP} = 0.8\frac{p_{2i}}{p_0} + 0.2\left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad \text{（H.1）}$$

式中，p_{2i}为喷嘴达到临界流速而扩散段内为完全亚音速流动且完全附着时，扩散段出口处的理论静态压力（假设为一维等熵流动）。公式（H.1）的图示见图H.1，可通过A_2/A_{nt}或截头锥体扩散段长度l（对应每个壁面半角θ）来估算r_{CBP}的值。如图所示，延长扩散段使A_2/A_{nt}>4，例如当θ=4°、l/d_{nt}>7时，不会显著提高压力比r_{CBP}。



标引说明：

1——公式（H.1）

————r_{CBP}

.....A/A_{nt}

图 H.1 按式(H.1)计算的最大允许背压比 r_{CBP}

κ值无需非常准确，如图H.1所示κ的灵敏度并不高，且公式（H.1）给出的仅为估计值。

也可采用更高的背压比，只要能验证喷嘴在这些背压比下仍处于壅塞状态。如扩散段足够长且具有适当的形状和质量，在高雷诺数下可以实现0.9的背压比。

H.2.2 对于低雷诺数的扩散段

对于带扩散段的喷嘴，实际应用中很难预测其在低雷诺数下（例如小于2×10^5）的r_{CBP}，因为可能出现PUP，导致流出系数出现难以量化的显著降低。随着雷诺数降低，由PUP引起的流出系数降低，会从可忽略的程度（此时每个喷嘴及安装条件有其对应的雷诺数），在理论上因扩散段效应实现壅塞的背压比下（背压比大于临界压力比），下降百分之几十（下降幅度取决于雷诺数）。在特定雷诺数和特定背压比下，流出系数的减少量实际上不可预测。

若雷诺数处于可能出现PUP的范围内，但并非特别低，则大多数喷嘴宜在略低于临界压力比的背压比下（例如0.5，见图H.1）壅塞。但是，若雷诺数接近本规程规定的最低限值，建议将背压比保持在0.25以下。

若确切的临界背压比对于系统运行非常重要，建议使用给定的喷嘴及其配套的上下游管道来测量r_{CBP}。PUP可能对喷嘴的形状及其安装条件非常敏感。

H.2.3 对于无扩散段或极短扩散段

对于没有扩散段或扩散段非常短的喷嘴，例如 l=0.1d_{nt}，建议无论雷诺数多少，始终保持背压比小于 0.35。如果在应用中可忽略 0.1%的流量偏差，则可采用 0.5 的临界背压比（或略小于临界压力比）。

附 录 I
（资料性）
粘度值 – 纯气体和空气

I.1 通则

建议使用REFPROP或任何其他可靠的数据库计算黏度。然而，对于几种纯气体和空气，黏度可以通过遵循本附件在规定的压力和温度范围内计算。此处给出的所有信息均使用REFPROP 10.0生成的值进行确认。

黏度值可以通过式（I.1）得出：

$$\mu = \sum_j \left[\left(\sum_i V_{i,j}\, p^i \right) (T - T_\mu)^{j C_\mu} \right] \quad \text{（I.1）}$$

式中的所有系数都在每个表中给出。方程中的p和T分别以MPa和K为单位。

这些方程仅在指定范围内严格有效。

在符合本规程的测量中，2%的黏度误差几乎可以忽略不计。

I.1 氮气

系数、有效范围和与 REFPROP 值的偏差如表I.1所示。

表 I.1 系数 $V_{i,j}$、范围和偏差（氮）

$V_{i,j}$	j			
i	0	1	2	3
0	-2.37372924E+03	-2.15205006E+02	3.80697293E+01	-7.19569669E-01
1	6.17528263E+03	4.96563894E+02	-8.52196892E+01	1.61553774E+00
2	-5.35004624E+03	-3.80864753E+02	6.36511321E+01	-1.20998758E+00
3	1.55080318E+03	9.71508454E+01	-1.58613477E+01	3.02299893E-01
系数：T_u=150　C_u=0.05 范围：0.1 MPa≤p≤20 MPa　200 K≤T≤600 K				

I.2 氩气

系数、有效范围和与 REFPROP 值的偏差如表 I.2 所示。

表 I.2 系数 $V_{i,j}$、范围和偏差（氩气）

$V_{i,j}$	j						
i	0	1	2	3	4	5	6
0	9.45120578 E+03	3.25597090 E+02	-1.63030985 E+02	3.87470871 E+01	-4.13638599 E+00	1.80930325 E-01	-2.71567168 E-03
1	-3.36790505 E+04	-1.26544548 E+03	6.31719943 E+02	-1.49715525 E+02	1.59988850 E+01	-6.99801783 E-01	1.04967036 E-02
2	4.01645241 E+04	1.63641921 E+03	-8.15651169 E+02	1.92681903 E+02	-2.06126026 E+01	9.01619877 E-01	-1.35147928 E-02
3	-1.60032862 E+04	-7.03779844 E+02	3.50937278 E+02	-8.25947681 E+01	8.84593129 E+00	-3.86946668 E-01	5.79617377 E-03
系数：T_u=165　C_u=-0.05							

$V_{i,j}$ i	j						
	0	1	2	3	4	5	6
范围：0.1 MPa≤p≤20 MPa　200 K≤T≤600 K							

I.3　干空气

系数、有效范围和与REFPROP值的偏差如表 I.3 所示。空气应具有表C.7中指定的CIPM 2007组分（无CO_2）。

表 I.3 系数 $V_{i,j}$、范围和偏差 (干空气/CIPM 2007 组分)

$V_{i,j}$ i	j				
	0	1	2	3	4
0	2.195671E+01	-1.072776E+00	2.099647E-01	5.337098E-02	-1.934377E-03
1	-1.028073E+01	1.583527E+00	-1.646644E-01	-5.353841E-02	1.932906E-03
2	1.548471E+00	-6.213702E-01	4.405660E-02	1.782954E-02	-6.427325E-04
3	6.732455E-01	7.465762E-02	-4.008054E-03	-1.972206E-03	7.109563E-05
系数：T_u=160　C_u=0.2 范围：0.1 MPa≤p≤20 MPa　200 K≤T≤600 K					

附 录 J
检定证书及检定结果通知书内页信息

J.1 流量检定法证书内页信息

1. 外观检查；
2. 检定介质；
3. 喷嘴喉部直径 d；
4. 重复性；
5. 流出系数C_{d}；
6. 流出系数相对扩展不确定度；
7. 检定状态下的雷诺数；
8. 检定时背压比。

J.2 几何检定法检定证书内页信息

1. 外观检查；
2. 入口收缩段；
3. 喷嘴喉部直径 d；
4. 扩散段；
5. 粗糙度；
6. 流出系数C_{d}；
7. 流出系数相对扩展不确定度；
8. 设计背压比。

J.3 检定结果通知书内页信息

检定结果通知书内页信息要求同上，需指明不合格项目。

J.4 下次送检时，请带此证书或证书复印件