

天津市地方计量技术规范

JJF(津)78-2022

计量泵流量参数校准规范

Calibration Specification for Flow of Metering Pumps

2022-10-30 发布

2023-01-30 实施

天津市市场监督管理委员会 发布

计量泵流量参数校准规范

Calibration Specification for

Flow of Metering Pumps

JJF(津) 78-2022

归口单位：天津市市场监督管理委员会

主要起草单位：天津市计量监督检测科学研究院

本规范委托天津市计量监督检测科学研究院负责解释

本规范主要起草人：

安海骄（天津市计量监督检测科学研究院）

张 璋（天津市计量监督检测科学研究院）

郑维君（天津市南开区计量检定所）

赵 轶（天津市计量监督检测科学研究院）

目 录

引 言	(II)
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 计量单位	(1)
4 概述	(2)
4.1 工作原理	(2)
4.2 分类和组成	(2)
4.3 用途	(3)
5 计量特性	(3)
6 校准条件	(3)
6.1 环境条件	(3)
6.2 主标准器及配套设备	(4)
7 校准项目和校准方法	(4)
7.1 校准项目	(4)
7.2 校准方法	(4)
8 校准结果的表达	(8)
9 复校时间间隔	(8)
附录 A 校准记录参考格式	(9)
附录 B 校准证书(内页)参考格式	(11)
附录 C 测量不确定度评定示例	(13)

引言

本规范根据我国计量泵的使用和流量量值溯源现状进行制定。

本规范所用术语，除在本规范中专门定义的外，均采用 JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》和 JJF 1004—2004《流量计量名词术语及定义》。

根据 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》第 3.1、3.2 条，本规范将隔膜式计量泵输出流量及其扩展不确定度、柱塞（活塞）式计量泵输出流量示值误差及其扩展不确定度列为计量性能并作为计量校准的主要工作。

本规范是首次制定。



计量泵流量参数校准规范

1 范围

本校准规范适用于计量泵流量参数的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 7782—2020 计量泵

GB/T 7784—2018 机动往复泵试验方法

GB/T 7785—2013 往复泵分类和名词术语

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

3 术语和计量单位

3.1 术语

JJF 1004—2004《流量计量名词术语及定义》界定的及以下术语和定义适用于本规范。

3.1.1 计量泵 metering pump

能够通过流量（或行程长度）调节机构（或设备），按流量（或相对行程长度）显示机构（或设备）上的示值精确地调节和输送流体的泵。[GB/T 7785，按主要用途分 3.6.1]

3.1.2 计量腔 metering room

计量泵内已知容积的腔室。

3.1.3 最大行程长度 maximum length of stroke

具有行程长度调节机构的计量泵的行程长度允许调节的最大值。

3.1.4 相对行程长度 relative length of stroke

具有行程长度调节机构的计量泵的任一行程长度与最大行程长度的比值。一般隔膜式计量泵行程长度调节机构的刻度值用相对行程长度表征。

3.2 计量单位

3.2.1 体积单位：立方米，符号 m^3 ；或升，符号 L；或毫升，符号 mL。

- 3.2.2 质量单位：千克，符号 kg；或克，符号 g。
- 3.2.3 时间单位：秒，符号 s；或分钟，符号 min；或小时，符号 h。
- 3.2.4 瞬时流量单位：立方米每小时，符号 m^3/h ；或毫升每分钟，符号 mL/min 。
- 3.2.5 密度单位：千克每立方米，符号 kg/m^3 。
- 3.2.6 压力单位：帕[斯卡]，符号 Pa；或千帕，符号 kPa。
- 3.2.7 温度单位：摄氏度，符号 $^{\circ}\text{C}$ 。

4 概述

4.1 工作原理

计量泵是一种定量输送流体的设备，通过计量腔充满和排放流体的次数或位移来测量排出流体的流量，实现调节、计量液体流量的功能。

4.2 分类和组成

计量泵主要由动力源、传动机构、计量腔、调节机构和显示机构等部分组成。计量泵按照计量腔结构可分为隔膜式和柱塞（活塞）式，结构见图 1 和图 2 所示。

计量腔内做直线往复位移的元件是柱塞（活塞）的计量泵。[GB/T 7785，按主要用途分 3.6.1.1]。柱塞（活塞）式计量泵一般具有直观的流量调节、显示机构，通过改变柱塞（活塞）的移动速度控制输出流量。计量腔内做周期性挠曲变形的元件是薄膜状弹性元件的计量泵。[GB/T 7785，按主要用途分 3.6.1.2]。

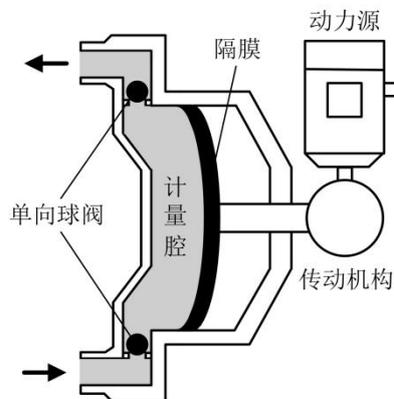


图 1 隔膜式计量泵结构示意图

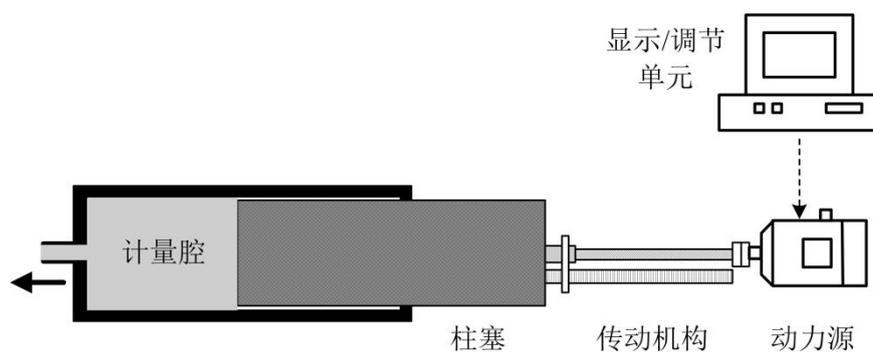


图2 柱塞式计量泵结构示意图

4.3 用途

计量泵广泛应用于石油化工、水处理、精细化工、航空航天、制药领域，实现液体定量加注等作用。

5 计量特性

计量泵在规定范围内的输出流量准确度等级和最大允许误差见表1。

表1 准确度等级及最大允许误差对应表

准确度等级	0.5级	1.0级	2.0级	3.0级
最大允许误差	±0.5%	±1.0%	±2.0%	±3.0%

注：

- 1 以上指标不用于合格性判别，仅供参考。
- 2 示值误差指标仅适用于柱塞（活塞）式计量泵。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 校准环境条件一般应满足：

环境温度：(10~35)℃；

相对湿度：40%~95%；

大气压力：(86~106)kPa。

6.1.2 校准介质一般为水。在一次校准过程中，介质温度变化应不超过±0.5℃。

6.1.3 机械振动、噪声、磁场等对标准装置和计量泵的影响应小到可以忽略不计。

6.2 主标准器及配套设备

6.2.1 主标准器及配套设备均应有有效的检定/校准证书。

6.2.2 主标准器及配套设备应满足表 2 要求。

表 2 主标准器及主要配套设备一览表

名称	测量范围	技术要求
电子天平	(0.01~3100) g	Ⅲ级或优于Ⅲ级
标准金属量器	1L、5L、20L、100L 等	二等或优于二等
温度计	(0~50) °C	MPE: ±0.2°C
二等标准密度计	(640~1500) kg/m ³	二等或优于二等
秒表(计时器)	(0~1) h	MPE: ±0.01s

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

7.1.1 隔膜式计量泵输出流量的校准。

7.1.2 柱塞(活塞)式计量泵输出流量示值误差的校准。

7.2 校准方法

7.2.1 校准前准备

7.2.1.1 被校仪器应具有仪器名称、生产厂家、型号、出厂编号等标识。

7.2.1.2 被校仪器应结构完整, 无影响正常工作和妨碍读数的缺陷及机械损伤。

7.2.1.3 被校仪器运行时, 传动与调节机构工作平稳, 动力端应无异常声响并可靠工作, 各部件无泄漏现象。

7.2.1.4 校准前使计量泵通电预热, 在校准流量下运行 10min, 排出管路内的气体, 等待流体温度、压力和流量稳定后进行校准。

7.2.2 隔膜式计量泵输出流量的校准

7.2.2.1 校准点与校准次数

校准点应根据被校仪器的实际适用范围按用户需要确定。当用户无要求时, 在相对行程长度为 100%、75%、50%、30%、10%处校准计量泵的输出流量。每个点至少校准 3 次。

7.2.2.2 校准操作

校准操作应在工况条件下进行。将计量泵的行程调节机构置于校准点位置，待流体温度、压力和流量稳定后，从加注口处将介质开始注入标准金属量器或称重容器，同时启动秒表开始计时。运行一段时间后停止加注，同时停止计时。注入时间不小于 1min。

使用容量比较法校准时，应按规定提前润湿标准器内壁，并记录试验过程中标准金属量器内的介质温度。使用衡量法校准时，应在每次试验后记录介质密度。

7.2.2.3 数据处理

a) 衡量法的数据处理。

在第 i 个校准点，第 j 次试验中，计量泵排出液体流量的实际值 $(q_s)_{ij}$ 按式 (1) 计算。

$$(q_s)_{ij} = \frac{m_{ij} C_f}{\rho_{ij} t_{ij}} \quad (1)$$

式中：

m_{ij} ——第 i 个校准点，第 j 次试验，电子天平测得液体的质量，kg；

ρ_{ij} ——第 i 个校准点，第 j 次试验，称量容器内液体的密度， kg/m^3 ；

t_{ij} ——第 i 个校准点，第 j 次试验的试验时间，s；

C_f ——浮力修正因子，按式 (2) 计算。

$$C_f = \frac{\rho_{ij} (\rho_b - \rho_a)}{\rho_b (\rho_{ij} - \rho_a)} \quad (2)$$

式中：

ρ_b ——电子天平检定时所用标准砝码的密度， kg/m^3 ；

ρ_a ——空气密度， kg/m^3 。

b) 容量比较法的数据处理。

在第 i 个校准点，第 j 次试验中，计量泵排出液体流量的实际值 $(q_s)_{ij}$ 按式 (3) 计算。

$$(q_s)_{ij} = \frac{V_{ij} [1 + \beta_s (T_{ij} - 20)]}{t_{ij}} \quad (3)$$

式中：

V_{ij} ——第 i 个校准点，第 j 次试验，标准金属量器读出的容积，L；

T_{ij} ——第 i 个校准点，第 j 次试验，标准金属量器内的液体温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

β_s ——标准金属量器的体膨胀系数， $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

c) 重复性计算和相对行程长度—流量关系曲线。

各校准点（相对行程长度）处计量泵输出流量的实际值 $(q_s)_i$ 按式（4）计算。

$$(q_s)_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (q_s)_{ij} \quad (4)$$

式中：

n ——校准次数。

第 i 个校准点，计量泵输出流量的重复性 E_i 按式（5）计算。

$$E_i = \frac{[(q_s)_{ij}]_{\max} - [(q_s)_{ij}]_{\min}}{d_n} \quad (5)$$

式中：

$[(q_s)_{ij}]_{\max}$ ——第 i 个流量点，计量泵输出流量实际值的最大值；

$[(q_s)_{ij}]_{\min}$ ——第 i 个流量点，计量泵输出流量实际值的最小值；

d_n ——极差系数，其值见表3。

表3 极差系数 d_n 数值表

校准次数 n	3	4	5	6	7	8	9	10
极差系数 d_n	1.69	2.06	2.33	2.53	2.70	2.85	2.97	3.08

采用数理统计回归运算方法（最小二乘法拟合），给出计量泵在工况条件下相对行程长度与输出流量的关系曲线和数学表达式，从而在实际运行中用来进行流量调节。

7.2.3 柱塞（活塞）式计量泵输出流量示值误差的校准

7.2.3.1 校准前的准备

校准前使计量泵通电预热，在校准流量下运行10min，排出管路内的气体，等待液体温度、压力和流量稳定后再进行校准。

7.2.3.2 校准流量点与校准次数

校准流量点应根据被校仪器的实际适用范围按用户需要确定，当用户无要求时，按 q_{\max} 、 $0.75q_{\max}$ 、 $0.5q_{\max}$ 、 $0.25q_{\max}$ 和 q_{\min} 五个流量点校准。每个流量点至少校准3次。

7.2.3.3 校准操作

将计量泵输出流量调至待校准流量点，待流体温度、压力和流量稳定后，将介质开始

注入标准金属量器或称重容器，同时启动秒表开始计时。运行一段时间后停止加注，同时停止计时。注入时间不小于 1min。

使用容量比较法校准时，应按规定润湿标准器内壁，并记录试验过程中标准金属量器内的介质温度。使用衡量法校准时，应在每次试验后记录介质密度。

7.2.3.4 数据处理

- a) 使用衡量法或容量比较法时分别按 7.2.2.4 a) 或 7.2.2.4 b) 进行基本数据处理。
- b) 相对示值误差计算。

在第 i 个校准点，第 j 次校准中，计量泵排出液体流量的实际值 $(q_v)_{ij}$ 按式 (1) 或 (3) 计算。单次测量的计量泵输出流量相对示值误差按式 (6) 计算。

$$E_{ij} = \frac{q_{vj} - (q_s)_{ij}}{(q_s)_{ij}} \times 100\% \quad (6)$$

式中：

E_{ij} ——第 i 个校准点，第 j 次校准，计量泵输出流量相对示值误差，%；

q_{vj} ——第 i 个校准点，第 j 次校准，计量泵设定的输出流量值， m^3/h 。

第 i 个校准点，计量泵输出流量的平均相对示值误差 E_i 按式 (7) 计算。

$$E_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_{ij} \quad (7)$$

式中：

n ——校准次数。

- c) 重复性计算

第 i 个校准点，计量泵输出流量的重复性 $(E_r)_i$ 按式 (8) 计算。

$$(E_r)_i = \frac{(E_{ij})_{\max} - (E_{ij})_{\min}}{d_n} \quad (8)$$

式中：

$(E_{ij})_{\max}$ ——第 i 个校准点，计量泵输出流量相对示值误差中的最大值；

$(E_{ij})_{\min}$ ——第 i 个校准点，计量泵输出流量相对示值误差中的最小值；

d_n ——极差系数，其值见表 3。

8 校准结果的表达

原始记录和校准证书格式见附录 A 和附录 B，测量不确定度评定示例见附录 C。

9 复校时间间隔

计量泵的复校时间间隔建议一般为 1 年。复校时间间隔由计量泵的使用情况、使用者、计量泵本身质量等诸因素确定。申请校准单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

校准记录参考格式

送校单位和地址_____器具名称_____

制造单位_____型号规格_____器具编号_____

环境温度_____℃ 相对湿度_____% 大气压力_____kPa

校准日期_____证书编号_____

校准员_____核验员_____

校准地点_____压力_____

校准依据_____

表 A.1 校准所用的主要标准器

名称	测量范围	编号	准确度等级/ 测量不确定度	证书号	有效期至

表 A.2 隔膜式计量泵输出流量校准记录

序号	相对行程长度 (%)	主标准器示值 m_{ij} (kg) / V_{ij} (L)	介质密度 ρ_{ij} (kg/m ³)	标准器内液体温度 T_{ij} (°C)	试验时间 t_{ij} (s)	实际流量 $(q_s)_{ij}$ (m ³ /h)	平均流量 $(q_s)_i$ (m ³ /h)	合成标准不 确定度 (%)	扩展不确 定度 (%)($k=2$)
1									
2									
3									
4									
5									

校准介质:

外观及功能性检查:



图 A.1 隔膜式计量泵相对行程长度—流量关系曲线

表 A.3 柱塞（活塞）式计量泵输出流量示值误差校准记录

序号	显示流量 (m ³ /h)	主标准器示值 m_{ij} (kg) / V_{ij} (L)	介质密度 ρ_{ij} (kg/m ³)	标准器内 液体温度 T_{ij} (°C)	试验 时间 t_{ij} (s)	相示值 误差 E_{ij} (%)	平均误 差 E_i (%)	重复性 (%)	合成标准不 确定度 (%)	扩展不确 定度 (%) ($k=2$)
1										
2										
3										
4										
5										

校准介质:

外观及功能性检查:

附录 B

校准证书（内页）参考格式

1 校准依据：

2 校准所用的主要标准器

名称：

不确定度或准确度：

有效期至：

3 环境条件

环境温度：

大气压力：

相对湿度：

4 校准结果

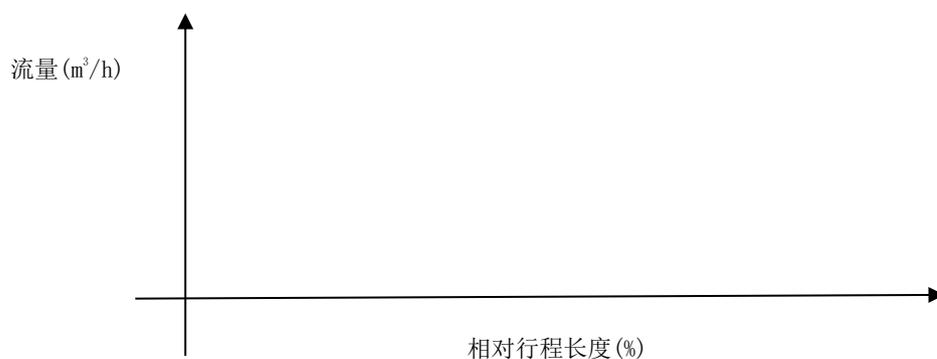
隔膜式计量泵输出流量校准结果：

校准介质：

压力：

序号	相对行程长度 (%)	输出流量校准流量 (q_s) _{ij} (m ³ /h)	扩展不确定度 U ($k=2$) (m ³ /h)
1			
2			
3			
4			
5			

隔膜式计量泵相对行程长度—流量关系曲线：



柱塞（活塞）式计量泵输出流量相对示值误差校准结果：

校准介质：

压力：

序号	流量点 (mL/min)	相对示值误差 (%)	扩展不确定度 $U(k=2)$
1			
2			
3			
4			
5			

5 外观及功能性检查

6 复校时间间隔建议： 年

注：

- 1 校准结果仅对被校对象有效。
- 2 未经实验室书面批准，不得部分复制证书。

附录 C

测量不确定度评定示例

C.1 隔膜式计量泵输出流量的校准

C.1.1 概述

C.1.1.1 被校计量泵

计量泵种类：机械式隔膜计量泵。

准确度等级：1.0 级。

C.1.1.2 主标准器及配套设备

主标准器：二等金属量器，50L、20L、10L。

温度计最大允许误差： $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。

秒表最大允许误差： $\pm 0.01\text{s}$ 。

C.1.2 测量数据

表 C.1 隔膜式计量泵输出流量校准记录

序号	相对行程长度(%)	主标准器示值 V_{ij} (L)	标准器内液体温度 T_{ij} ($^{\circ}\text{C}$)	试验时间 t_{ij} (s)	实际流量(q_s) _{ij} (m^3/h)	平均流量(q_s) _i (m^3/h)
1	100	50.161292	18.5	75.11	2.404	2.390
		50.174132	18.6	75.93	2.379	
		50.298371	18.6	75.83	2.388	
2	75	49.644015	18.7	100.71	1.774	1.803
		50.018903	18.6	99.46	1.810	
		50.296090	18.6	99.22	1.825	
3	50	50.404835	18.7	147.76	1.228	1.225
		50.074441	18.6	148.80	1.211	
		50.481497	18.4	146.90	1.237	
4	30	19.880473	18.5	97.09	0.737	0.743
		20.084958	18.4	96.33	0.751	
		20.067221	18.5	97.28	0.743	
5	10	10.075204	18.6	135.08	0.269	0.259
		10.017974	18.5	141.22	0.255	
		10.011465	18.7	141.70	0.254	

校准介质：水

C.1.3 数学模型

计量泵排出液体流量的实际值 q_s 按式 (C.1) 计算:

$$q_s = \frac{V[1 + \beta_s(T - 20)]}{t} \quad (\text{C.1})$$

其中, $\beta_s \approx 5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 可视为常数, 实际流量的不确定度传播律:

$$u_c^2(q_s) = u_A^2(q_s) + c^2(V)u^2(V) + c^2(T)u^2(T) + c^2(t)u^2(t) \quad (\text{C.2})$$

其中, 灵敏系数:

$$c(V) = \frac{\partial q_s}{\partial V} = \frac{1 + \beta_s(T - 20)}{t}$$

$$c(T) = \frac{\partial q_s}{\partial T} = \frac{V\beta_s}{t}$$

$$c(t) = \frac{\partial q_s}{\partial t} = -\frac{V[1 + \beta_s(T - 20)]}{t^2}$$

C.1.4 标准不确定度分量

试验中通过联锁控制实现开启和计时同步操作, 且试验时间不小于 60s, 因此忽略启停效应。由式 (C.2) 可知, 隔膜式计量泵输出实际流量的不确定度来源主要有:

- 重复性引入的不确定度分量 $u(q_s)$;
- 标准金属量器引入的不确定度分量 $u(V)$;
- 温度计引入的不确定度分量 $u(T)$;
- 秒表引入的不确定度分量 $u(t)$ 。

C.1.5 标准不确定度的评定

以相对行程长度为 100% 处的校准数据为例评定标准不确定度。

- 重复性引入的不确定度分量 $u(q_s)$ 。

按照极差法计算:

$$u(q_s) = \frac{(2.404 - 2.379) / 1.69}{\sqrt{3}} \text{ m}^3 / \text{h} = 0.00854 \text{ m}^3 / \text{h} \quad (\text{C.3})$$

灵敏系数 c 为 1。

- 标准金属量器引入的不确定度分量 $u(V)$ 。

标准金属量器的准确度等级为二等，其最大允许误差为 $\pm 0.025\%$ ，按照均匀分布考虑，则：

$$u(V) = \frac{0.025\%}{\sqrt{3}} \times 50.211265\text{L} = 7.2 \times 10^{-6} \text{m}^3 \quad (\text{C.4})$$

灵敏系数 $c(V) = 47.6 \text{h}^{-1}$ 。

c) 温度计引入的不确定度分量 $u(T)$ 。

温度计的最大允许误差为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ，按照均匀分布考虑，则：

$$u(T) = \frac{0.2}{\sqrt{3}} \text{ }^\circ\text{C} = 0.12 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{C.5})$$

灵敏系数 $c(T) = 1.2 \times 10^{-4} \text{m}^3 / (\text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

d) 秒表引入的不确定度分量 $u(t)$ 。

秒表的最大允许误差为 ± 0.01 ，按照均匀分布考虑，则：

$$u(t) = \frac{0.01}{\sqrt{3}} \text{s} = 1.6 \times 10^{-6} \text{h} \quad (\text{C.6})$$

灵敏系数 $c(t) = -113.78 \text{m}^3 / \text{h}^2$ 。

C.1.6 标准不确定度分量见表 C.2。

表 C.2 标准不确定度分量一览表

序号	符号	来源	标准不确定度	灵敏系数
1	$u(q_s)$	重复性引入的不确定度分量	$0.00854 \text{m}^3 / \text{h}$	1
2	$u(V)$	标准金属量器引入的不确定度分量	$7.2 \times 10^{-6} \text{m}^3$	47.6h^{-1}
3	$u(T)$	温度计引入的不确定度分量	0.12°C	$0.00012 \text{m}^3 / (\text{h} \cdot ^\circ\text{C})$
4	$u(t)$	秒表引入的不确定度分量	$1.6 \times 10^{-6} \text{h}$	$-113.78 \text{m}^3 / \text{h}^2$

C.1.7 合成标准不确定度计算

将各标准不确定度分量代入式 (C.2)，得到 q_s 的合成标准不确定度

$$u_c(q_s) = 0.0085 \text{m}^3 / \text{h}$$

C.1.8 扩展不确定度计算

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = 2 \times 0.0086 \text{ m}^3 / \text{h} = 0.017 \text{ m}^3 / \text{h}$$

C.1.9 校准结果

用同样的方法得到其它校准点扩展不确定度，校准结果见表 C.3。

表 C.3 隔膜式计量泵输出流量校准结果

序号	相对行程长度 (%)	实际输出流量 (q_s) _{<i>i</i>} (m ³ /h)	扩展不确定度 U ($k=2$) (m ³ /h)
1	100	2.390	$U=0.017$
2	75	1.803	$U=0.034$
3	50	1.225	$U=0.018$
4	30	0.743	$U=0.009$
5	10	0.259	$U=0.010$

C.1.10 隔膜式计量泵相对行程长度—流量关系曲线

根据 C.1.9 中的校准结果，采用最小二乘法拟合直线方法，给出计量泵在工况条件下相对行程长度与输出流量的关系直线，其关系式为：

$$q = a + bs_r \quad (\text{C.7})$$

根据最小二乘法按式 (C.8) 和 (C.9) 计算 a 和 b 的数值。

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n q_i s_{ri} - \sum_{i=1}^n q_i \sum_{i=1}^n s_{ri}}{n \sum_{i=1}^n s_{ri}^2 - \left(\sum_{i=1}^n s_{ri} \right)^2} \quad (\text{C.8})$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n} - b \frac{\sum_{i=1}^n s_{ri}}{n} \quad (\text{C.9})$$

得到相对行程长度与输出流量的关系式为：

$$q = 2.36 \text{ m}^3 / \text{h} s_r + 0.0315 \text{ m}^3 / \text{h} \quad (\text{C.10})$$

其中：

s_r ——隔膜式计量泵相对行程长度，%；

q ——为输出流量，m³/h。

行程长度—流量关系曲线图见图 C.1。

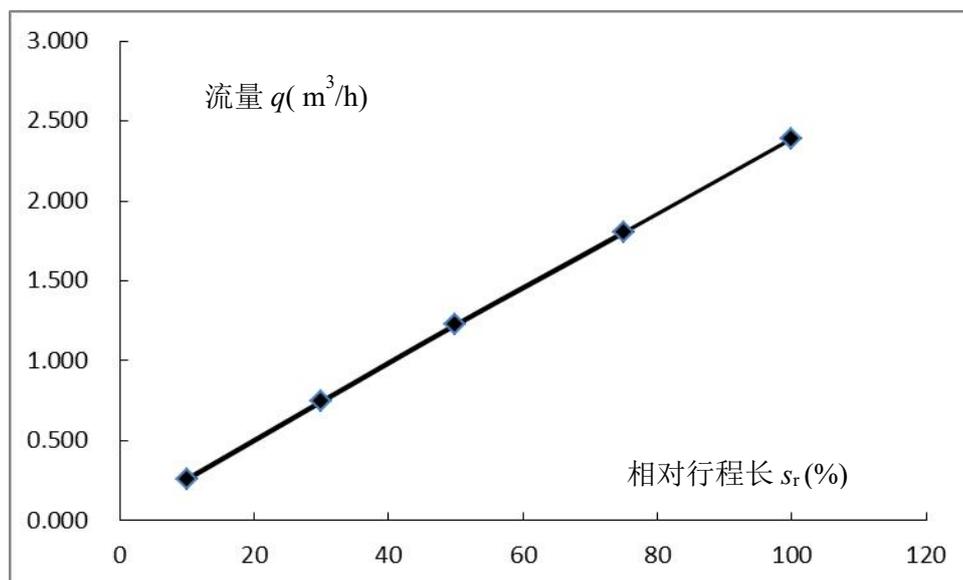


图 C.1 隔膜式计量泵相对行程长度—流量关系曲线图

按式 (C.11) 计算最小二乘拟合的不确定度为:

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [q - q(s_r)]^2}{n-2}} = 0.010 \text{m}^3/\text{h} \quad (\text{C.11})$$

因此, 最小二乘法拟合的扩展不确定度 $U=0.010 \text{ m}^3/\text{h} \times 2=0.020 \text{ m}^3/\text{h}$ ($k=2$)。在使用中可直接参考已校准相对行程的不确定度, 也可按照不确定度传播律, 分别计算其他具体流量点的不确定度。详细的最小二乘法拟合不确定度分析过程可参见 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》的 A.3.2.2。

C.2 柱塞(活塞)式计量泵输出流量相对示值误差的校准

C.2.1 概述

C.2.1.1 被校计量泵

计量泵种类: 柱塞式计量泵。

准确度等级: 0.5 级。

C.2.1.2 标准器及配套设备

主标准器: 电子天平, 最大允许误差: $\pm 1.5e$, 其中 e 为检定分度值 1mg 。

温度计最大允许误差: $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。

标准密度计: 二等。

秒表最大允许误差： $\pm 0.01s$ 。

C.2.2 测量数据

表 C.3 柱塞式计量泵输出流量示值误差校准记录

序号	显示流量 (mL/min)	主标准 器示值 m_{ij} (g)	介质密度 ρ_{ij} (kg/m ³)	试验 时间 t_{ij} (s)	实际流量 (q_s) _{ij} (mL/min)	示值误差 E_{ij} (%)	平均示 值误差 E_i (%)	重复性 (%)
1	100	113.428	998.5	68.02	100.310	-0.31	-0.30	0.02
		113.448	998.5	68.05	100.283	-0.28		
		113.418	998.5	68.01	100.316	-0.31		
2	75	116.254	998.5	92.83	75.332	-0.44	-0.42	0.04
		116.272	998.5	92.91	75.279	-0.37		
		116.253	998.5	92.83	75.331	-0.44		
3	50	83.514	998.5	100.06	50.206	-0.41	-0.41	0.04
		83.579	998.5	100.11	50.220	-0.44		
		83.586	998.5	100.19	50.184	-0.37		
4	25	62.544	998.5	150.06	25.072	-0.29	-0.23	0.06
		62.509	998.5	150.08	25.054	-0.22		
		62.516	998.5	150.13	25.049	-0.19		
5	10	25.080	998.5	150.01	10.057	-0.57	-0.56	0.12
		25.104	998.5	150.01	10.067	-0.66		
		25.053	998.5	150.01	10.046	-0.46		

校准介质：水

C.2.3 数学模型

计量泵排出液体流量的相对示值误差 E 按式 (C.12) 计算：

$$E = \frac{q\rho t}{mC_f} - 1 \quad (\text{C.12})$$

式中：

$$C_f = \frac{\rho(\rho_b - \rho_a)}{\rho_b(\rho - \rho_a)} \quad (\text{C.13})$$

其中 ρ_b 取 8000kg/m^3 ， ρ_a 取 1.2kg/m^3 ，测量水密度为 998.5kg/m^3 ，从而 C_f 为 1.001053 。实际中可按需要视 ρ_b 、 ρ_a 为常数，并忽略 ρ 的变化，将 C_f 近似为 1。相对示值误差的不确定度传播律：

$$u^2(E) = c^2(q)u^2(q) + c^2(m)u^2(m) + c^2(\rho)u^2(\rho) + c^2(t)u^2(t) \quad (\text{C.14})$$

其中，灵敏系数：

$$c(q) = \frac{\partial E}{\partial q} = \frac{\rho t}{m C_f}$$

$$c(m) = \frac{\partial E}{\partial m} = -\frac{q \rho t}{m^2 C_f}$$

$$c(\rho) = \frac{\partial E}{\partial \rho} = \frac{q t}{m C_f}$$

$$c(t) = \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{q \rho}{m C_f}$$

C.2.4 标准不确定度分量

试验中通过联锁控制实现开启和计时同步操作，且试验时间不小于 60s，因此忽略启停效应。由式 (C.14) 可知，柱塞式计量泵输出流量相对示值误差的不确定度来源主要有：

- a) 被校计量泵引入重复性引入的不确定度分量 $u(q)$ ；
- b) 电子天平引入的不确定度分量 $u(m)$ ；
- c) 密度计引入的不确定度分量 $u(\rho)$ ；
- d) 秒表引入的不确定度分量 $u(t)$ 。

C.2.5 标准不确定度的评定

以 100mL/min 校准点的数据为例评定标准不确定度。

- a) 被校计量泵引入的不确定度 $u(q)$ 考虑主要为重复测量引入的不确定度，按照式 (C.15) 计算。

$$u(q) = \frac{E_r}{\sqrt{n}} \cdot q = \frac{[-0.31\% - (-0.28\%)] / 1.69}{\sqrt{3}} \times 100 \text{ mL} / \text{min} = 0.010 \text{ mL} / \text{min} \quad (\text{C.15})$$

灵敏系数 $c(q)$ 为 1 min / mL。

- b) 电子天平引入的不确定度分量 $u(m)$ 。

电子天平的最大允许误差为 $\pm 1.5e$ ，测量上限为 120g， e 为 1mg，因此最大允许误差为 $\pm 1.5\text{mg}$ ，按照均匀分布考虑，则：

$$u(m) = \frac{0.0015}{\sqrt{3}} \text{ g} = 0.00087 \text{ g} \quad (\text{C.16})$$

灵敏系数 $c(m) = -0.00881 \text{ g}^{-1}$ 。

c) 密度计引入的不确定度分量 $u(\rho)$ 。

密度计的最大允许误差为 $\pm 0.5 \text{ kg/m}^3$ ，按照均匀分布考虑，则：

$$u(\rho) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} \text{ kg/m}^3 = 2.89 \times 10^{-4} \text{ g/mL} \quad (\text{C. 17})$$

灵敏系数 $c(\rho) = 0.999 \text{ mL/g}$ 。

d) 秒表引入的不确定度分量 $u(t)$ 。

秒表的最大允许误差为 $\pm 0.01 \text{ s}$ ，按照均匀分布考虑，则：

$$u(t) = \frac{0.01}{\sqrt{3}} \text{ s} = 9.6 \times 10^{-5} \text{ min} \quad (\text{C. 18})$$

灵敏系数 $c(t) = 0.88 \text{ min}^{-1}$ 。

C. 2. 6 标准不确定度分量见表 C. 4。

表 C. 4 标准不确定度分量一览表

序号	符号	来源	标准不确定度	灵敏系数
1	$u(q)$	重复测量引入的不确定度	0.010 mL/min	1 min/mL
2	$u(m)$	电子天平引入的不确定度分量	0.00087 g	-0.00881 g^{-1}
3	$u(\rho)$	密度计引入的不确定度分量	$2.89 \times 10^{-4} \text{ g/mL}$	0.999 mL/g
4	$u(t)$	秒表引入的不确定度分量	$9.6 \times 10^{-5} \text{ min}$	0.88 min^{-1}

C. 2. 7 合成标准不确定度计算

将各标准不确定度分量代入式 (C. 14)，得到 E 的合成标准不确定度：

$$u_r(E) = 3.2 \times 10^{-4}$$

C. 2. 8 扩展不确定度计算

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = 2 \times 3.2 \times 10^{-4} = 0.06\%$$

C. 2. 9 校准结果

用同样的方法得到其它校准点扩展不确定度，校准结果见表 C. 5。

表 C.5 柱塞式计量泵输出流量相对示值误差校准结果

序号	流量点 (mL/min)	相对示值误差	扩展不确定度 $U(k=2)$
1	100	-0.30%	0.06%
2	75	-0.42%	0.08%
3	50	-0.41%	0.08%
4	25	-0.23%	0.09%
5	10	-0.56%	0.15%

