



天津市地方计量技术规范

JJF (津) XXX-2025

蠕动泵校准规范

Calibration Specification for Peristaltic Pumps

(报批稿)

2025-XX-XX 发布

2025-XX-XX 实施

天津市市场监督管理委员会 发布

蠕动泵校准规范

JJF(津) XXX-2025

Calibration Specification for Peristaltic Pumps

归口单位：天津市流量容量计量技术委员会

主要起草单位：天津市计量监督检测科学研究院

本规范委托天津市流量容量计量技术委员会负责解释

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）

郑中民（天津市计量监督检测科学研究院）

李彩萍（天津市计量监督检测科学研究院）

参加起草人：

张艺欣（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	(2)
4 概述	(2)
4.1 工作原理	(2)
4.2 分类和组成	(2)
4.3 用途	(2)
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	(3)
7 校准项目和校准方法	(3)
7.1 校准项目	(3)
7.2 校准方法	(4)
8 校准结果的表达	(8)
9 复校时间间隔	(9)
附录 A 校准记录参考格式	(10)
附录 B 校准证书(内页)参考格式	(13)
附录 C 测量不确定度评定示例	(15)

引 言

JJF1071《国家计量校准规范编写规则》、JJF1001《通用计量术语及定义》、JJF1004《流量计量名词术语及定义》和 JJF1059.1《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定的基础性系列规范。本规范参照相关行业标准，结合我市蠕动泵应用现状和技术水平编制。

本规范是首次制定。

蠕动泵校准规范

1 范围

本校准规范适用于输出流量小于 100L/min，转速范围在（20~600）r/min 的蠕动泵的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1001 通用计量术语及定义

JJF 1004 流量计量名词术语及定义

JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示

QB/T 5000—2016 食品工业用蠕动泵

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

本规程除引用 JJF1001《通用计量术语及定义》、JJF1004《流量计量名词术语及定义》规定的术语和定义之外，还使用下列术语及定义。

3.1.1 蠕动泵 peristaltic pump

通过对泵管进行交替挤压和释放来泵送流体的泵。

3.1.2 转速型蠕动泵 rotate speed type peristaltic pump

仅能显示和调节转速的蠕动泵。

3.1.3 流量型蠕动泵 flowrate type peristaltic pump

能够显示和调节流量的蠕动泵。

3.1.4 驱动器 peristaltic pump driver

用于实现控制主轴转动、设置和显示参数、通讯等功能的部件。

3.1.5 泵管 peristaltic pump tube

用于输送流体的软管。

3.1.6 泵头 peristaltic pump head

与驱动器主轴连接，通过若干组滚轮交替挤压泵管实现泵送流体的部件。泵头为可更换部件，同一驱动器可装配多个型号的泵头。

3.1.7 泵室 metering room

泵管受到挤压时，相邻两组滚轮间形成的已知容积的腔室。

3.2 计量单位

3.2.1 体积单位：升，符号 L；毫升，符号 mL。

3.2.2 质量单位：千克，符号 kg；克，符号 g。

3.2.3 时间单位：分钟，符号 min；秒，符号 s。

3.2.4 瞬时流量单位：升每分钟，符号 L/min；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/m³。

3.2.6 压力单位：帕[斯卡]，符号 Pa；千帕，符号 kPa。

3.2.7 温度单位：摄氏度，符号℃。

4 概述

4.1 工作原理

蠕动泵是一种兼具动力源和计量功能的精密泵类设备。在使用过程中，将充满介质的泵管装卡在蠕动泵转子和定子之间，转子的转动对泵管进行交替挤压和释放，转子两个滚轮之间的一段泵管形成泵室，根据泵室容积、转子转动一圈形成的泵室数量和转速三者的乘积计算输出流量。

4.2 分类和组成

蠕动泵按照显示参数可分为转速型和流量型；按照通道数可分为单通道型和多通道型。蠕动泵主要由驱动器、泵头、泵管等部分组成，结构见图 1 所示。

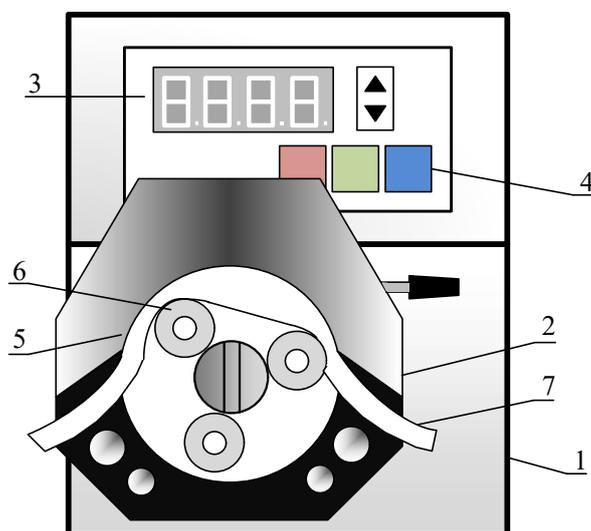


图 1 蠕动泵结构示意图

1—驱动器；2—泵头；3—显示屏；4—控制面板；

5—定子；6—转子；7—泵管

4.3 用途

蠕动泵广泛应用于生化分析、医疗救护、水质检测、生物制药、食品、化工、

冶金、造纸、采矿、石油等行业领域，实现液体流量输送和计量等作用。

5 计量特性

5.1 流量最大允许误差不超过 $\pm 5\%$ 。

5.2 转速最大允许误差不超过 $\pm 5\%$ 。

注：以上指标不用于合格性判别，仅供参考。

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： $(15\sim 30)$ °C；

相对湿度：20%~95%；

大气压力： $(86\sim 106)$ kPa。

6.1.2 在一次校准过程中，液体温度变化一般不超过 0.5 °C；机械振动、噪声、磁场等对标准装置和蠕动泵的影响应小到可以忽略不计。校准介质一般为水，当工况介质性状与水区别较大时，可采用工况介质进行校准。

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 1 要求。

表 1 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	$(0.01\sim 3100)$ g	⑩级
标准金属量器	1L、5L、20L、100L 等	二等
转速表	$(20\sim 8000)$ r/min	0.5 级
温度计	$(0\sim 50)$ °C	MPE: ± 0.2 °C
二等标准密度计	$(640\sim 1500)$ kg/m ³	二等
秒表（计时器）	/	MPE: ± 0.1 s/h

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

7.1.1 外观及功能性检查。

7.1.2 流量型蠕动泵输出流量示值误差的校准。

7.1.3 转速型蠕动泵转速示值误差的校准。

7.1.4 转速型蠕动泵输出流量的校准。

7.2 校准方法

7.2.1 外观及功能性检查

- 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，运动零部件动作灵敏、协调准确，无异响和卡阻。输送流体的管路、润滑系统等畅通、控制灵活、无泄漏渗漏。

7.2.2 流量型蠕动泵输出流量示值误差的校准

7.2.2.1 校准前的准备

安装并记录泵头和泵管型号，使蠕动泵通电预热，在校准流量下运行 10min，排出管路内的气体，等待介质温度、压力和流量稳定后进行校准。

7.2.2.2 校准点与校准次数

校准点应根据被校仪器的实际使用范围按用户需要确定。当用户无要求时，在 q_{\max} 、 $0.5q_{\max}$ 、 $0.2q_{\max}$ 三个流量点校准蠕动泵的输出流量。每个点至少校准 3 次。

7.2.2.3 校准操作

将蠕动泵设置到校准流量点，待介质温度、压力和流量稳定后，将金属量器调节到待校状态或天平示值清零，从出液口处将介质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，记录标准金属量器示值或天平示值，试验时间不少于 1min。校准开始前和校准结束后测量介质温度，确保两次温度之差不超过 0.5°C 。针对有转向可逆的蠕动泵应分别进行正转、反转两个方向的校准，并专门标注。

使用容积法校准时，应按规定试验前润湿标准器内壁，放空后滴流 2min，并记录试验过程中标准金属量器内的介质温度。使用质量法校准时，应在每次试验后记录介质密度。

7.2.2.4 数据处理

a) 质量法的数据处理

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

$$(q_s)_{ij} = \frac{6000m_j C_f}{\rho_{ij} t_{ij}} \quad (1)$$

式中：

$(q_s)_{ij}$ ——蠕动泵排出液体流量的实际值，L/min；

m_j ——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；

60000——kg、kg/m³、s 与 L/min 之间的量级转变系数；

C_f ——浮力修正因子，按式（2）计算：

$$C_f = \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_b}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{ij}}} \approx 0.99985 \times \frac{\rho_{ij}}{\rho_{ij} - \rho_a} \quad (2)$$

式中：

ρ_b ——电子天平检定时所用砝码约定质量的约定密度，8000kg/m³；

ρ_a ——空气密度，1.2kg/m³。

b) 容积法的数据处理

在第 i 个校准点，第 j 次试验中，蠕动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，°C；

β_s ——标准金属量器的体膨胀系数，°C⁻¹；

t_{ij} ——测量时间，min。

c) 相对示值误差计算

在第 i 个流量点，第 j 次校准中，蠕动泵输出流量相对示值误差按式（4）计算。

$$E_{ij} = \frac{q_{ij} - (q_s)_{ij}}{(q_s)_{ij}} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

E_{ij} ——第 i 个流量点，第 j 次校准，蠕动泵输出流量相对示值误差，%；

q_{ij} ——第 i 个流量点，第 j 次校准，蠕动泵设定的流量值，L/min。

第 i 个流量点，蠕动泵输出流量的平均相对示值误差 E_i 按式（5）计算。

$$E_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_{ij} \quad (5)$$

式中：

n ——校准次数。

d) 重复性计算

第 i 个流量点，蠕动泵输出流量的重复性 $(E_r)_i$ 按式（6）计算。

$$(E_r)_i = \frac{(E_{ij})_{\max} - (E_{ij})_{\min}}{d_n} \quad (6)$$

式中：

$(E_{ij})_{\max}$ ——第 i 个流量点，蠕动泵输出流量相对示值误差中的最大值；

$(E_{ij})_{\min}$ ——第 i 个流量点，蠕动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 2。

表 2 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

7.2.3 转速型蠕动泵转速示值误差的校准

7.2.3.1 校准前的准备

安装并记录泵头和泵管的型号，在泵头上做好标记，并安装好转速表。使蠕动泵通电预热。

7.2.3.2 校准点与校准次数

校准点应根据被校仪器的实际使用范围按用户需要确定。当用户无要求时，在最大转速的 100%、50%、20% 三个点校准蠕动泵的转速。每个点至少校准 3 次。

7.2.3.3 校准操作

调节转速旋钮，将蠕动泵的转速设置到校准点，对于转向可逆的蠕动泵应分别进行正转、反转两个方向的校准。

等待转速稳定后，记录蠕动泵转速设定值，并使用转速表测量蠕动泵转速得到标准值。每个点重复测量三次，分别计算转速相对示值误差，将三次测量平均误差作为该点的转速误差。

7.2.3.4 数据处理

a) 在第 i 个转速点，第 j 次校准中，蠕动泵转速相对示值误差按式 (7) 计算。

$$E_{ij} = \frac{\omega_i - \omega_{sj}}{\omega_{sj}} \times 100\% \quad (7)$$

式中：

E_{ij} ——第 i 个转速点，第 j 次校准，蠕动泵转速相对示值误差，%；

ω_i ——第 i 个转速点，蠕动泵设定的转速值，r/min；

ω_{sj} ——第 i 个转速点，第 j 次校准，蠕动泵转速实测值，r/min。

b) 第 i 个转速点，蠕动泵转速的平均相对示值误差 E_i 按式 (8) 计算。

$$E_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_{ij} \quad (8)$$

c) 重复性计算

第 i 个转速点, 蠕动泵转速的重复性 $(E_r)_i$ 按式 (9) 计算。

$$(E_r)_i = \frac{(E_{ij})_{\max} - (E_{ij})_{\min}}{d_n} \quad (9)$$

$(E_{ij})_{\max}$ ——第 i 个转速点, 蠕动泵转速相对示值误差中的最大值;

$(E_{ij})_{\min}$ ——第 i 个转速点, 蠕动泵转速相对示值误差中的最小值;

d_n ——极差系数, 其值见表 2。

7.2.4 转速型蠕动泵输出流量的校准

7.2.4.1 校准前的准备

安装并记录泵头和泵管型号, 使蠕动泵通电预热, 在校准流量下运行 10min, 排出管路内的气体, 等待介质温度、压力和流量稳定后进行校准。

7.2.4.2 校准点与校准次数

校准点应根据蠕动泵的实际使用范围按用户需要确定。当用户无要求时, 在最大转速的 100%、75%、50%、25%、10%处校准流量。每个点至少校准 3 次。

7.2.4.3 校准操作

校准操作应在工况条件下进行。将蠕动泵的速度设置到校准转速点位置, 待介质温度、压力和流量稳定后, 按照 7.2.2.3 中描述的质量法或容积法进行试验测量流量, 并对应记录蠕动泵设定的转速。

7.2.4.4 数据处理

根据 7.2.2.4 中的数据处理方法, 计算出在第 i 个转速点, 第 j 次试验中, 蠕动泵排出液体流量的实际值 $(q_s)_{ij}$, 并根据式 (10) 计算第 i 个转速点蠕动泵输出液体流量的实际值 $(q_s)_i$ 。

$$(q_s)_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (q_s)_{ij} \quad (10)$$

第 i 转速点的输出流量重复性按式 (11) 计算,

$$E_i = \frac{[(q_s)_{ij}]_{\max} - [(q_s)_{ij}]_{\min}}{d_n} \quad (11)$$

式中:

$[(q_s)_{ij}]_{\max}$ ——第 i 个转速点, 蠕动泵输出流量实际值的最大值;

$[(q_s)_{ij}]_{\min}$ ——第 i 个转速点, 蠕动泵输出流量实际值的最小值;

d_n ——极差系数, 其值见表 2。

采用数理统计回归运算方法 (最小二乘法拟合) 按式 (12) 计算, 给出转速

型蠕动泵转速与输出流量的关系曲线和数学表达式,从而在实际使用中根据转速来进行流量调节。

$$q_s = a + b\omega \quad (12)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n} - b \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n}$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n q_i \omega_i - \sum_{i=1}^n q_i \sum_{i=1}^n \omega_i}{n \sum_{i=1}^n \omega_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \omega_i \right)^2}$$

式中:

a 、 b ——表达式系数;

n ——测量点个数;

ω_i ——第 i 个校准点的设定转速, r/min。

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, 不确定度评定示例见附录 C。校准证书可包含以下信息:

- a) 标题“校准证书”;
- b) 实验室名称和地址;
- c) 进行校准的地点(如果与实验室地址不同);
- d) 证书的唯一性标识(如编号), 每页及总页数的标识;
- e) 客户的名称和地址;
- f) 被校对象的描述和明确标识;
- g) 进行校准的日期, 如果与校准结果的有效性和应用有关时, 应说明被校对象的可接收日期;
- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时, 应对被校样品的抽样程序进行说明;
- i) 校准所依据的技术规范的标识, 包括名称及代号;
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;
- k) 校准环境的描述;
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- m) 对校准规范的偏离的说明;
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识;
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明;

p) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

蠕动泵的复校时间间隔建议一般为 1 年。复校时间间隔由蠕动泵的使用情况、使用者、蠕动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_____

泵头泵管型号_____

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_____

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	不确定度/准确度等级/最大允许误差	证书编号	有效期至

表 A.2 流量型蠕动泵输出流量示值误差的校准结果

序号	流量点	主标准器示值	介质密度	标准器内液体温度	试验时间	实际流量	相对示值误差 E_i	重复性	扩展不确定度
		$m_{ij}(\text{kg}) / V_{ij}(\text{L})$	$\rho_{ij}(\text{kg}/\text{m}^3)$	$T_{ij}(\text{°C})$	$t_{ij}(\text{s})$	$(q_s)_{ij}(\text{L}/\text{min})$	(%)		
1									
2									
3									
4									
5									

校准介质:

表 A.3 转速型蠕动泵转速示值误差的校准结果

序号	转速点 ω_i (r/min)	转速标准值 ω_{sij} (r/min)	相示值误差 E_{ij} (%)	平均误差 E_i (%)	重复性 (%)	扩展不确定度 (%) ($k=2$)
1						
2						
3						
4						
5						

校准介质:

表 A.4 转速型蠕动泵输出流量的校准结果

序号	转速点 ω_i (r/min)	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 $(q_s)_{ij}$ (L/min)	平均流量 $(q_s)_i$ (L/min)	扩展不确定度 (%) ($k=2$)
1								
2								
3								
4								
5								

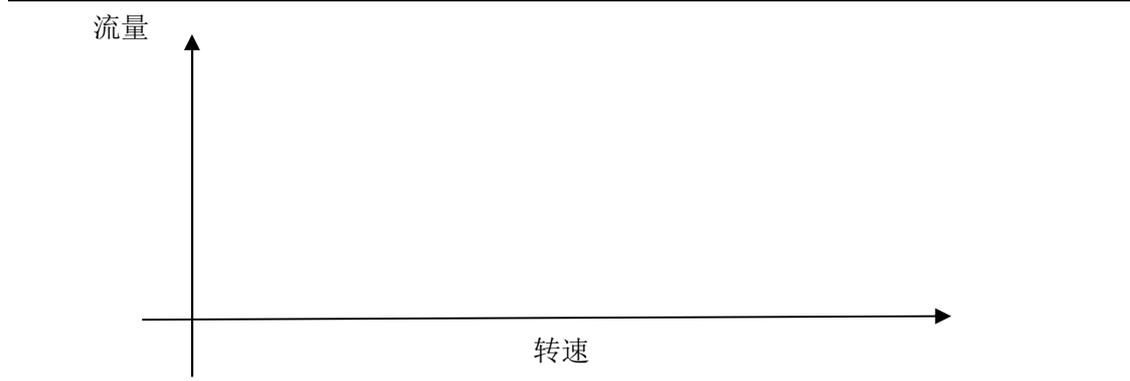


图 A.1 蠕动泵转速—输出流量关系曲线

蠕动泵转速—输出流量关系式：

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 外观及功能性检查
- 5 校准结果

流量型蠕动泵输出流量示值误差校准：

校准介质：

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

转速型蠕动泵转速示值误差校准：

校准介质：

序号	转速点 (r/min)	相对示值误差 (%)	扩展不确定度 U_r ($k=2$) (%)
1			
2			
3			
4			
5			

转速型蠕动泵输出流量的校准：

校准介质：

序号	转速点 (r/min)	输出流量 q (L/min)	扩展不确定度 U ($k=2$) (L/min)
1			
2			
3			
4			
5			

蠕动泵转速—输出流量关系曲线：

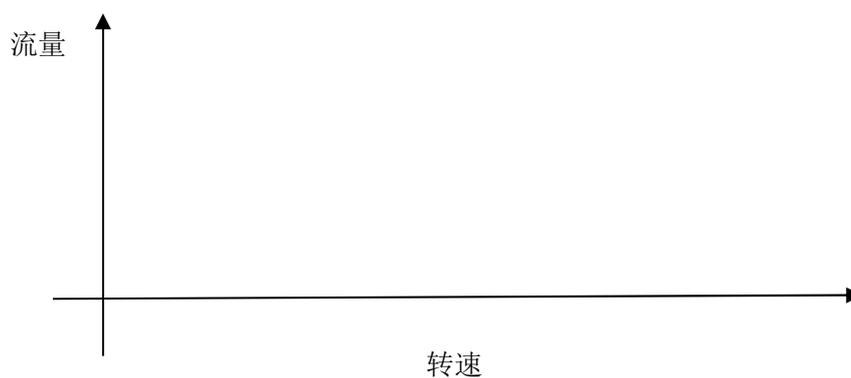


图 B.1 蠕动泵转速—输出流量关系曲线

蠕动泵转速—输出流量关系式：

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 流量型蠕动泵输出流量示值误差的校准

C.1.1 概述

C.1.1.1 被校蠕动泵

蠕动泵流量范围：(1~20) L/min

C.1.1.2 主标准器及配套设备

主标准器：二等金属量器 50L、10L

温度计最大允许误差：±0.2℃

秒表最大允许误差：MPE：±0.1s/h

C.1.2 测量数据

表 C.1 流量型蠕动泵输出流量示值误差测量数据

序号	流量点 (L/min)	主标准器示值 V_{ij} (L)	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} (L/min)	相对示值误差 E_{ij} (%)	重复性 (%)
1	20	50.0473	18.1	151.63	19.80183823	1.0007	0.2086
		50.0284	18.2	151.37	19.82845905	0.8651	
		50.0748	18.2	152.04	19.75938961	1.2177	
2	10	10.0152	18.2	60.67	9.903707235	0.9723	0.1283
		10.0136	18.2	60.53	9.925027698	0.7554	
		10.0149	18.1	60.621	9.911365947	0.8943	
3	4	10.0041	18.2	151.23	3.968736215	0.7878	0.0633
		10.0096	18.2	151.21	3.971443345	0.7190	
		10.0122	18.2	151.41	3.967227621	0.8261	

校准介质：水

C.1.3 数学模型

蠕动泵输出流量的误差 E 按式 (C.1) 计算，

$$E = \frac{q - q_s}{q_s} \times 100\% = \frac{q - \frac{V[1 + \beta_s(T - 20)]}{t}}{q_s} \times 100\% \quad (\text{C.1})$$

式中：

q ——校准点的设定流量，L/min；

q_s ——校准点的实际流量，L/min；

V ——主标准器示值，L；

T ——标准器内液体温度，°C；

β_s ——标准器的体胀系数， $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

t ——试验时间，s。

误差的不确定度传播率：

$$u_c(E) = \sqrt{c_A^2(E_r)u_A^2(E_r) + c^2(V)u^2(V) + c^2(t)u^2(t) + c^2(T)u^2(T) + c^2(\beta_s)u^2(\beta_s)} \quad (\text{C.2})$$

其中，灵敏系数：

$$c_A(E_r) = 1$$

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

$$c(t) = \frac{q}{V[1 + \beta_s(T - 20)]}$$

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

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

C.1.4 标准不确定度分量

由式 (C.2) 可知，流量型蠕动泵输出流量误差的不确定度来源主要有：

- 重复测量引入的不确定度 A 类评定 $u_A(E_r)$ ；
- 标准金属量器引入的不确定度分量 $u(V)$ ；
- 温度测量引入的不确定度分量 $u(T)$ ；
- 时间测量引入的不确定度分量 $u(t)$ ；
- 标准金属量器体胀系数引入不确定度分量 $u(\beta_s)$ 。

C.1.5 标准不确定度的评定

以 20L/min 流量点的校准数据为例评定标准不确定度。

- 重复测量引入的 A 类不确定度 $u_A(E_r)$

重复测量引入的 A 类不确定度按照极差法计算。

$$u_A(E_r) = \frac{(0.012177 - 0.008651)/1.69}{\sqrt{3}} = 0.0012046 \quad (\text{C.3})$$

灵敏度系数 $c_A(E_r) = 1$ 。

- 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：

$$u(V) = \frac{0.025\% \times 50.050167\text{L}}{\sqrt{3}} = 0.007224\text{L} \quad (\text{C.4})$$

灵敏系数 $c(V)=-0.001009\text{L}^{-1}$ 。

c) 温度测量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：

$$u(T) = \frac{0.2}{\sqrt{3}}^\circ\text{C} = 0.11547^\circ\text{C} \quad (\text{C.5})$$

灵敏系数 $c(T)=-5.05 \times 10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$ 。

d) 时间测量引入的不确定度分量 $u(t)$

秒表的最大允许误差为 $\pm 0.1\text{s/h}$ ，按照均匀分布考虑，则：

$$u(t) = \frac{0.1\text{s}}{\sqrt{3}} = 9.6 \times 10^{-4} \text{min} \quad (\text{C.6})$$

灵敏系数 $c(t)=0.39963\text{min}^{-1}$

e) 标准金属量器体胀系数引入不确定度分量 $u(\beta_s)$

体胀系数为 $50 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ ，最大允许误差为 $50 \times 10^{-7}^\circ\text{C}^{-1}$ ，按照均匀分布考虑，则：

$$u(\beta_s) = \frac{50 \times 10^{-7}}{\sqrt{3}}^\circ\text{C}^{-1} = 2.89 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1} \quad (\text{C.7})$$

灵敏系数 $c(\beta_s)=1.8523^\circ\text{C}$

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	$u_A(E_r)$	重复测量引入的不确定度 A类评定	0.0012046	1
2	$u(V)$	标准金属量器引入的不确定度分量	0.007224L	-0.001009L^{-1}
3	$u(T)$	温度测量引入的不确定度分量	0.11547°C	$-5.05 \times 10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$
4	$u(t)$	时间测量引入的不确定度分量	$9.6 \times 10^{-4}\text{min}$	0.39963min^{-1}
5	$u(\beta_s)$	标准金属量器体胀系数分量	$2.89 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$	1.8523°C

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 E 的合成标准不确定度

$$u_c(E) = 0.13\%$$

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

$$U_r(E) = 0.26\%$$

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 流量型蠕动泵输出流量示值误差

序号	流量点 (L/min)	相对示值误差 E_i (%)	相对扩展不确定度 U ($k=2$) (%)
1	20	1.03	0.26
2	10	0.87	0.18
3	4	0.78	0.12

C.2 转速型蠕动泵转速示值误差

C.2.1 概述

C.2.1.1 被校蠕动泵

蠕动泵转速范围：(20~300) r/min

C.2.1.2 主标准器及配套设备

主标准器：转速表 0.5 级，上限 1000r/min

C.2.2 测量数据

表 C.4 转速型蠕动泵转速示值误差测量数据

序号	转速点 ω_i (r/min)	转速标准值 ω_{sij} (r/min)	相示值误差 E_{ij} (%)	平均误差 E_i (%)	重复性 (%)
1	300	300.8	-0.2660	-0.4093	0.1565
		301.3	-0.4315		
		301.6	-0.5305		

C.2.3 数学模型

蠕动泵输出流量的误差 E 按式 (C.8) 计算，

$$E = \frac{\omega - \omega_s}{\omega_s} \times 100\% \quad (\text{C.8})$$

式中：

ω ——蠕动泵设定的转速值，r/min；

ω_s ——蠕动泵转速实测值，r/min。

误差的不确定度传播率：

$$u_c(E) = \sqrt{c_A^2(E_r)u_A^2(E_r) + c^2(\omega_s)u^2(\omega_s)} \quad (\text{C.9})$$

其中，灵敏系数：

$$c_A(E_r) = 1$$

$$c^2(\omega_s) = -\frac{\omega}{\omega_s^2}$$

C.2.4 标准不确定度分量

由式 (C.9) 可知, 转速型蠕动泵转速示值误差的不确定度来源主要有:

- a) 重复测量引入的不确定度 A 类评定 $u_A(E_r)$;
- b) 转速表引入的不确定度分量 $u(\omega_s)$;

C.2.5 标准不确定度的评定

- a) 重复测量引入的 A 类不确定度 $u_A(E_r)$

重复测量引入的 A 类不确定度按照极差法计算。

$$u_A(E_r) = \frac{(-0.2660\% + 0.5305\%) / 1.69}{\sqrt{3}} = 0.000904 \quad (\text{C.10})$$

灵敏系数 $c_A(E_r) = 1$ 。

- b) 转速表引入的不确定度分量 $u(\omega_s)$

转速表准确度等级为 0.5 级, 其最大允许误差为 $\pm 0.5\%$, 按照均匀分布考虑, 则:

$$u(V) = \frac{0.5\% \times 1000 \text{ r/min}}{\sqrt{3}} = 2.9 \text{ r/min} \quad (\text{C.11})$$

灵敏系数 $c(\omega_s) = -0.00331 \text{ min/r}$ 。

C.2.6 标准不确定度分量见表 C.5

表 C.5 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	$u_A(E_r)$	重复测量引入的不确定度 A 类评定	0.000904	1
2	$u(\omega_s)$	转速表引入的不确定度分 量	2.9r/min	-0.00331min/r

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.9), 得到 E 的合成标准不确定度

$$u_c(E) = 0.96\%$$

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

$$U_r(E) = 2.0\%$$

C.3 转速型蠕动泵输出流量的校准

C.3.1 概述

C.3.1.1 被校蠕动泵

蠕动泵转速范围: (20~300) r/min

C.3.1.2 主标准器及配套设备

主标准器: 二等金属量器 50L、10L

温度计最大允许误差：±0.2℃

秒表最大允许误差：MPE：±0.1s/h

C.3.2 测量数据

表 C.6 转速型蠕动泵输出流量测量数据

序号	转速点 (r/min)	主标准器示值	标准器内液体温度	试验时间	单次流量(q_s) _{ij}	平均流量 q_i
		V_{ij} (L)	T_{ij} (°C)	t_{ij} (s)	(L/min)	(L/min)
1	300	50.2034	18.0	111.48	27.01742	27.02639
		50.2416	18.1	111.36	27.06725	
		50.2103	18.0	111.59	26.99450	
2	225	50.1058	18.1	149.85	20.06047	20.13337
		50.0936	18.1	149.37	20.12004	
		50.1328	18.0	148.75	20.21961	
3	150	50.2147	18.1	222.85	13.51849	13.54549
		50.1269	18.1	221.26	13.59182	
		50.1846	18.1	222.59	13.52616	
4	75	20.0529	18.0	177.16	6.79077	6.76561
		20.0156	18.1	178.41	6.73068	
		20.0322	18.1	177.38	6.77538	
5	30	20.0431	18.1	446.23	2.69473	2.69490
		20.0329	18.1	447.12	2.68800	
		20.0348	18.1	444.85	2.70197	

校准介质：水

C.3.3 数学模型

转速型蠕动泵输出流量 q 按式 (C.12) 计算,

$$q = \frac{V[1 + \beta_s(T - 20)]}{t} \quad (\text{C.12})$$

式中:

q ——输出流量, L/min;

V ——主标准器示值, L;

T ——标准器内液体温度, °C;

β_s ——标准器的体胀系数, °C⁻¹;

t ——试验时间, s。

误差的不确定度传播率:

$$u_c(q) = \sqrt{c_A^2(q)u_A^2(q) + c^2(V)u^2(V) + c^2(t)u^2(t) + c^2(T)u^2(T) + c^2(\beta_s)u^2(\beta_s)} \quad (\text{C.13})$$

其中, 灵敏系数:

$$c_A(q) = 1$$

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

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

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

$$c(\beta_s) = \frac{V(T - 20)}{t}$$

C.3.4 标准不确定度分量

由式 (C.13) 可知, 转速型蠕动泵输出流量的不确定度来源主要有:

- 重复测量引入的不确定度 A 类评定 $u_A(q)$;
- 标准金属量器引入的不确定度分量 $u(V)$;
- 温度测量引入的不确定度分量 $u(T)$;
- 时间测量引入的不确定度分量 $u(t)$;
- 标准金属量器体胀系数引入的不确定度分量 $u(\beta_s)$ 。

C.3.5 标准不确定度的评定

以转速点 300r/min 的校准数据为例评定标准不确定度。

- 重复测量引入的 A 类不确定度 $u_A(q)$

重复测量引入的 A 类不确定度按照极差法计算。

$$u_A(q) = \frac{(27.0672 - 26.9945) / 1.69}{\sqrt{3}} \text{ L / min} = 0.0248 \text{ L / min} \quad (\text{C.14})$$

灵敏系数 $c_A(q) = 1$ 。

- 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:

$$u(V) = \frac{0.025\% \times 50.21843 \text{ L}}{\sqrt{3}} = 0.007248 \text{ L} \quad (\text{C.15})$$

灵敏系数 $c(V) = 0.5382 \text{ min}^{-1}$ 。

- 温度测量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:

$$u(T) = \frac{0.2}{\sqrt{3}} ^\circ\text{C} = 0.11547 ^\circ\text{C} \quad (\text{C.16})$$

灵敏系数 $c(T) = 0.001351 ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{L / min}$ 。

- 时间测量引入的不确定度分量 $u(t)$

秒表的最大允许误差为 $\pm 0.1 \text{ s/h}$, 按照均匀分布考虑, 则:

$$u(t) = \frac{0.1s}{\sqrt{3}} = 9.6 \times 10^{-4} \text{ min} \quad (\text{C.17})$$

灵敏系数 $c(t) = -14.5464 \text{ min}^{-1} \cdot \text{L/min}$

e) 标准金属量器体胀系数引入不确定度分量 $u(\beta_s)$

体胀系数为 $50 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 最大允许误差为 $50 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 按照均匀分布考虑, 则:

$$u(\beta_s) = \frac{50 \times 10^{-7}}{\sqrt{3}} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} = 2.89 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \quad (\text{C.18})$$

灵敏系数 $c(\beta_s) = -53.1571 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{L/min}$

C.3.6 标准不确定度分量见表 C.7

表 C.7 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	$u_A(q)$	重复测量引入的不确定度 A类评定	0.0248L/min	1
2	$u(V)$	标准金属量器引入的不确定度分量	0.007248L	0.5382 min^{-1}
3	$u(T)$	温度测量引入的不确定度分量	$0.11547 \text{ }^\circ\text{C}$	$0.001351 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{L/min}$
4	$u(t)$	时间测量引入的不确定度分量	$9.6 \times 10^{-4} \text{ min}$	$-14.5464 \text{ min}^{-1} \cdot \text{L/min}$
5	$u(\beta_s)$	标准金属量器体胀系数引入不确定度分量	$2.89 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$-53.1571 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{L/min}$

C.3.7 合成标准不确定度计算

将各标准不确定度分量代入式 (C.13), 得到 q 的合成标准不确定度

$$u_c(q) = 0.029 \text{ L/min}$$

C.3.8 扩展不确定度计算

取包含因子 $k=2$, 扩展不确定度为

$$U(q) = 0.058 \text{ L/min}$$

C.3.9 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.8。

表 C.8 转速型蠕动泵输出流量校准

序号	转速点 (r/min)	输出流量 q (L/min)	扩展不确定度 U ($k=2$) (L/min)
1	300	27.026	0.058
2	225	20.133	0.113

3	150	13.545	0.058
4	75	6.766	0.051
5	30	2.695	0.031

C.3.10 转速——流量关系曲线

根据表 C.8 按照式 (13) 可得

$$q(\omega) = 0.00988 + 0.08989\omega$$

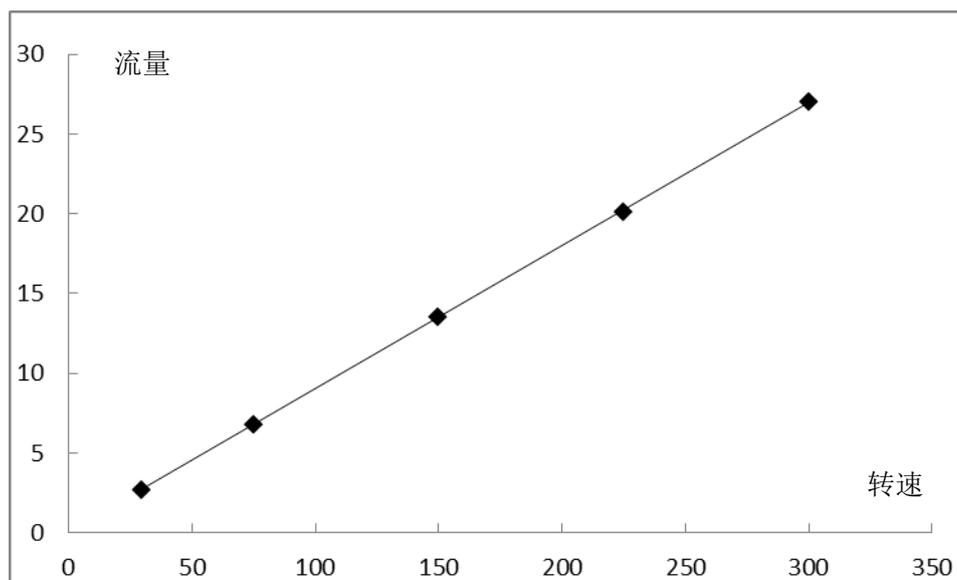


图 C.1 转速——流量关系曲线关系曲线图

按式 (C.19) 计算最小二乘拟合的不确定度为

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [q - q(\omega)]^2}{n-2}} = 0.0727 \text{ L/min} \quad (\text{C.19})$$

因此, 扩展不确定度 $U=0.0727\text{L/min} \times 2=0.15\text{L/min}$ ($k=2$), 在使用中也可按照不确定度传播率, 分别计算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 A.3.2.2。

