



# 天津市地方计量技术规范

JJF (津) 154-2025

## 蠕动泵校准规范

Calibration Specification for Peristaltic Pumps

2025-10-28 发布

2026-01-28 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) 154-2025

## 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/m<sup>3</sup>。

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。

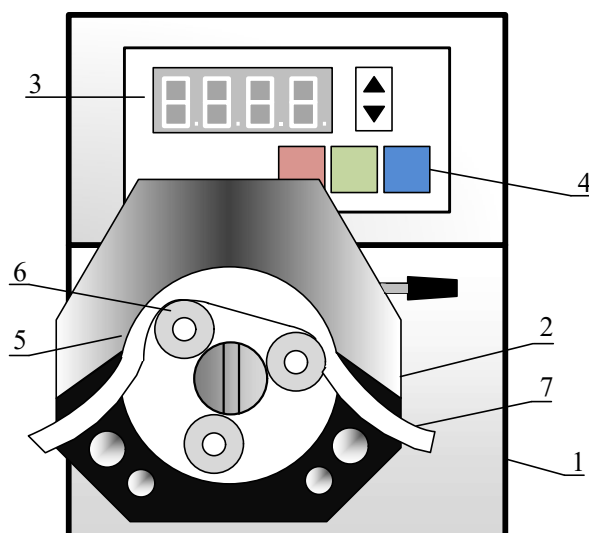


图 1 蠕动泵结构示意图

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 $0.5^{\circ}\text{C}$ ；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: $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$
二等标准密度计	$(640\sim 1500)$ kg/m <sup>3</sup>	二等
秒表（计时器）	/	MPE: $\pm 0.1\text{s/h}$

## 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  $0.5^{\circ}\text{C}$ 。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;

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

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

$t_{ij}$ ——第  $i$  个校准点,第  $j$  次试验的试验时间, s;

60000——kg、kg/m<sup>3</sup>、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：

$\rho_b$ ——电子天平检定时所用砝码约定质量的约定密度，8000kg/m<sup>3</sup>；

$\rho_a$ ——空气密度，1.2kg/m<sup>3</sup>。

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；

$\beta_s$ ——标准金属量器的体膨胀系数，°C<sup>-1</sup>；

$t_{ij}$ ——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。

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

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, %;

$\omega_i$ ——第  $i$  个转速点, 蠕动泵设定的转速值, r/min;

$\omega_{sij}$ ——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;

$\omega_i$ ——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 ( $q_s$ ) <sub>ij</sub>	相对示值 误差 $E_i$	重复性 (%)	扩展不确定度 (%) ( $k=2$ )
		$m_{ij}$ (kg) / $V_{ij}$ (L)	$\rho_{ij}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$T_{ij}$ (°C)	$t_{ij}$ (s)	(L/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 $\omega_i$ (r/min)	转速标准值 $\omega_{sij}$ (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 $\omega_i$ (r/min)	主标准器示值 $m_{ij}$ (kg) / $V_{ij}$ (L)	介质密度 $\rho_{ij}$ (kg/m <sup>3</sup> )	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								

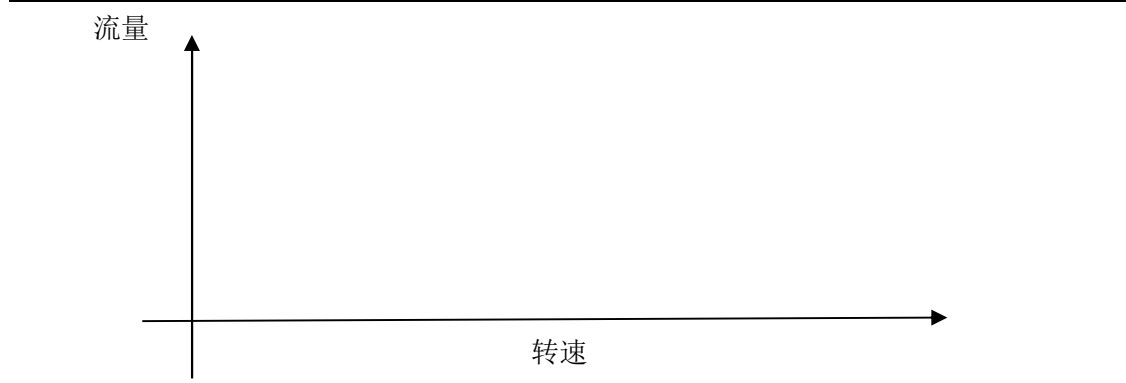


图 A.1 蠕动泵转速—输出流量关系曲线

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：

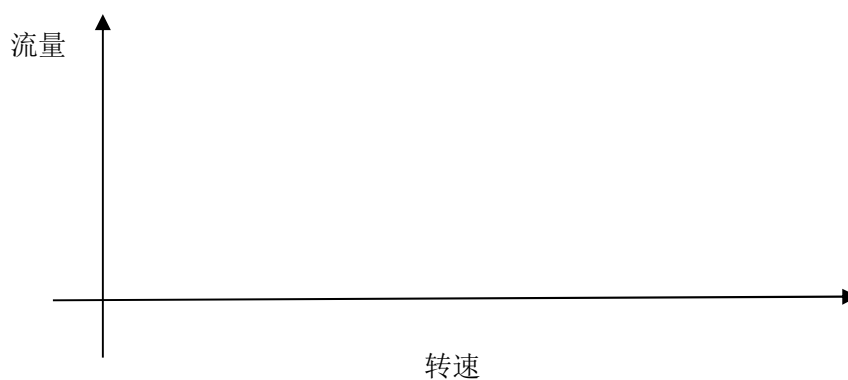


图 B.1 蠕动泵转速—输出流量关系曲线

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( $q_s$ ) <sub>ij</sub> (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；

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

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 $\omega_i$ (r/min)	转速标准值 $\omega_{sij}$ (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：

$\omega$ ——蠕动泵设定的转速值，r/min；

$\omega_s$ ——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( $q_s$ ) <sub>ij</sub>	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;

$\beta_s$ ——标准器的体胀系数, °C<sup>-1</sup>;

$t$ ——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：

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

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	$0.5382 \text{ min}^{-1}$
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

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

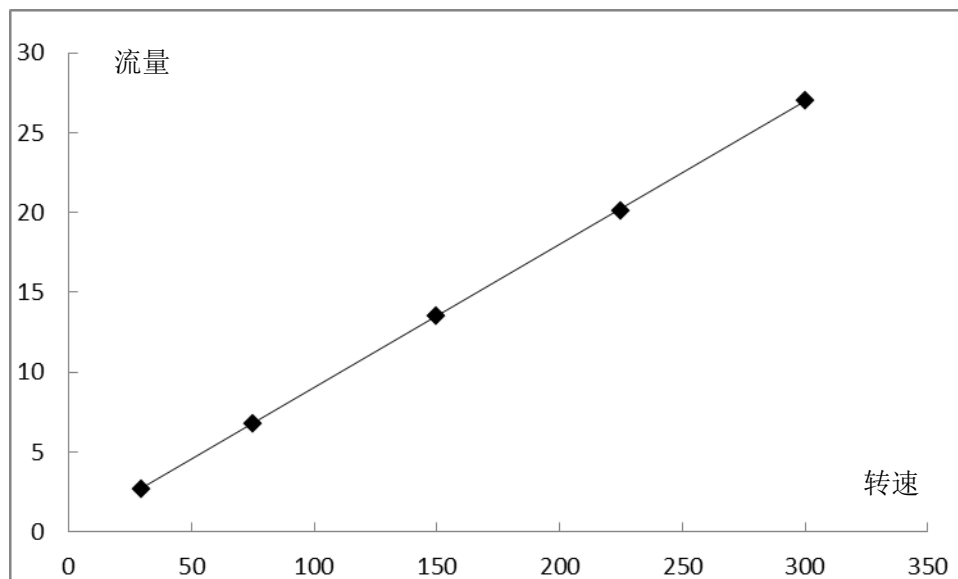


图 C.1 转速——流量关系曲线关系曲线图

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。

