



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2260—2025

摇摆式生物反应器性能参数校准规范

Calibration Specification for Performance Parameters of Swing Bioreactors

2025-06-11 发布

2025-12-11 实施

国家市场监督管理总局 发布

摇摆式生物反应器性能
参数校准规范

Calibration Specification for Performance

Parameters of Swing Bioreactors

JJF 2260—2025

归口单位：全国生物计量技术委员会

主要起草单位：南京市计量监督检测院

中国计量科学研究院

中国计量测试学会

黑龙江省计量检定测试研究院

参加起草单位：上海市计量测试技术研究院

本规范委托全国生物计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

徐 昇（南京市计量监督检测院）
陈鸿飞（南京市计量监督检测院）
隋志伟（中国计量科学研究院）
马爱文（中国计量测试学会）
周 彤（黑龙江省计量检定测试研究院）

参加起草人：

惠文珊（南京市计量监督检测院）
刘 刚（上海市计量测试技术研究院）

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和定义	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(1)
6 校准条件	(2)
6.1 环境条件	(2)
6.2 测量标准及其他设备	(2)
7 校准项目和校准方法	(2)
7.1 温度示值误差和稳定性	(2)
7.2 气体流量示值误差和稳定性	(3)
7.3 液体流量示值误差和流量稳定性	(3)
7.4 摇摆频率示值误差	(4)
7.5 摇摆角度示值误差	(4)
8 校准结果表达	(5)
9 复校时间间隔	(5)
附录 A 校准记录和校准证书的内容	(6)
附录 B 摇摆式生物反应器校准结果的测量不确定度评定示例	(9)
附录 C 1990 年国际温标纯水密度表	(17)

引 言

JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。本规范校准方法及计量特性等主要参考了 JJG 705—2014《液相色谱仪检定规程》、GB/T 6682—2008《分析实验室用水规格和实验方法》。

本规范为首次发布。

摇摆式生物反应器性能参数校准规范

1 范围

本规范适用于基于振摇培养方式的摇摆式生物反应器性能参数的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 705—2014 液相色谱仪检定规程

GB/T 6682—2008 分析实验室用水规格和实验方法

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 术语和定义

JJF 1001—2011、JJF 1265—2022 中界定的及以下术语和定义适用于本规范。

3.1 生物反应器 bioreactor

利用酶或生物体（如微生物和细胞）所具有的生物功能，在体外进行生化反应，提供反应环境的生产实验设备。

4 概述

摇摆式生物反应器（以下简称反应器）是基于振摇方式培养细胞或其他生物体的仪器。反应器的培养原理是采用非介入的波浪式摇动混合，将细胞和培养液置于无菌封闭的细胞培养袋中，放在摇动平台上，在摇动过程中产生波浪，提供培养物在低剪切力状态下的充分混合和表面高效传氧，形成细胞生长的理想环境，改善细胞状态以提高产量。较传统的生物发酵罐及搅拌式培养，反应器具有混合方式温和高效、传氧效率高、易保持无菌状态等优点，越来越多地应用于生物制药、疫苗生产等领域中。

反应器主要由振摇系统、输液系统、检测系统和数据处理系统组成。

5 计量特性

反应器性能参数的各项计量特性指标见表 1。

表 1 摇摆式生物反应器的计量特性

计量性能	计量性能指标
温度示值误差	$\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$
温度稳定性	$\leq 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
气体流量示值误差	$\pm 5\%$

表 1 摇摆式生物反应器的计量特性（续）

计量性能	计量性能指标
气体流量稳定性	$\leq 2\%$
① 液体流量示值误差	$\pm 5\%$
① 液体流量稳定性	$\leq 2\%$
摇摆频率示值误差	$\pm 1 \text{ r/min}$
摇摆角度示值误差	$\pm 0.5^\circ$
注：表中技术指标不用于合格性判别，仅供参考。 ① 如仪器适用，可进行该项目的校准。	

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度（10~30）℃，相对湿度不大于 80%。

6.1.2 室内应防潮、避光、防热、无腐蚀性物品，通风良好。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 数字温度计：测量范围（-10.0~100.0）℃，最大允许误差 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 。

6.2.2 分析天平：最大称量不小于 200 g，最小分度值不大于 1 mg，①级。

6.2.3 电子秒表：最小分度值不大于 0.1 s，最大允许误差 $\pm 0.5 \text{ s/d}$ 。

6.2.4 气体流量计：测量范围（0.1~20 000）mL/min，最大允许误差 $\pm 1.5\%$ 。

6.2.5 光电转速表：测量范围（0~50）r/min，0.5 级。

6.2.6 电子水平仪：测量范围（-20°~20°），最大允许误差 $\pm 2\%$ 。

6.2.7 纯水：符合 GB/T 6682—2008 要求的二级水。

7 校准项目和校准方法

由于反应器的应用场景一般对于洁净度要求较高，因此在校准过程中需要根据用户要求对测量标准和设备进行严格消毒灭菌，并在校准过程中遵守无菌操作流程。

7.1 温度示值误差和稳定性

将温度计探头固定在振摇盘或细胞培养袋相应的位置，当温度计探头固定在振摇盘上时，应使温度计探头均匀分布，采用 5 个温度计探头同时测量振摇盘中心和四角位置的温度，并保证探头与振摇盘贴合紧密，以 5 个温度计探头读数的平均值作为一次测量结果；当温度计探头固定在细胞培养袋中时，应将温度计探头放置于细胞培养袋中心位置。将反应器通电，设置为常用的培养温度（如 37.0℃）。待温度稳定后，记录下温度计温度读数并开始计时，每隔 2 min 记录一次读数，共计 15 次，计算出平均值。根据公式（1）计算温度示值误差，根据公式（2）计算温度稳定性。

$$\Delta T = T_d - \overline{T} \quad (1)$$

式中：

ΔT ——温度示值误差, $^{\circ}\text{C}$;

T_d ——仪器设置温度, $^{\circ}\text{C}$;

$\overline{T}$ ——15 次温度测量的平均值, $^{\circ}\text{C}$ 。

$$\Delta T_f = T_{0\max} - T_{0\min} \quad (2)$$

式中:

ΔT_f ——温度稳定性, $^{\circ}\text{C}$;

$T_{0\max}$ ——15 次温度测量中的最大值, $^{\circ}\text{C}$;

$T_{0\min}$ ——15 次温度测量中的最小值, $^{\circ}\text{C}$ 。

7.2 气体流量示值误差和稳定性

将标准气体流量计串联接入摇摆式生物反应器的气路系统, 将气体流量控制系统设置为用户常用的流量点, 稳定通气 30 s 后开始测量, 测量 5 次, 计算平均值, 按公式 (3) 计算气体流量示值误差, 按公式 (4) 计算气体流量稳定性。

$$\Delta V = \frac{V_d - \overline{V}}{\overline{V}} \quad (3)$$

式中:

ΔV ——气体流量示值相对误差, %;

V_d ——气体流量值设定值, mL/min ;

$\overline{V}$ ——同一设定流量 5 次测量的平均值, mL/min 。

$$\Delta V_f = \frac{V_{0\max} - V_{0\min}}{\overline{V}} \quad (4)$$

式中:

ΔV_f ——气体流量稳定性, %;

$V_{0\max}$ ——同一设定流量 5 次测量中的最大值, mL/min ;

$V_{0\min}$ ——同一设定流量 5 次测量中的最小值, mL/min ;

$\overline{V}$ ——同一设定流量 5 次测量的平均值, mL/min 。

7.3 液体流量示值误差和流量稳定性

用专用管路连接反应器的入口、出口, 以脱过气的纯水作流动介质, 通过管路冲洗系统, 使系统中充满纯水。将温度计插入纯水内, 测量试验温度。设定适当的流量, 当反应器的流路系统运行稳定后, 在反应器流量的设置范围中均匀取 3 个测量点, 用合适体积的容量瓶 (事先清洗、干燥后称重) 分别接收规定时间流出的流动相, 并称量总重量, 重复测量 3 次, 测量时间如表 2 所示。按公式 (5)、公式 (6) 计算流量的实测值 F_m , 按公式 (7) 计算流量示值相对误差 S_s , 按公式 (8) 计算流量稳定性 S_R 。

表 2 液体流量测定参数表

流量设定值/(mL/min)	1~5	5~50	>50
收集时间/min	5	2	1

$$F_m = \Delta W / (\rho_t \times t) \quad (5)$$

$$\Delta W = W_2 - W_1 \quad (6)$$

式中：

F_m ——流量实测值，mL/min；

ΔW ——收集的流动相的质量，g；

W_2 ——容器加流动相的质量，g；

W_1 ——容器的质量，g；

ρ_t ——实验温度下流动相的密度，g/cm³，（不同温度下流动相的密度参见附录 C）；

t ——收集流动介质的时间，min。

$$S_s = \frac{F_s - \overline{F_m}}{\overline{F_m}} \quad (7)$$

式中：

S_s ——液体流量示值相对误差，%；

$\overline{F_m}$ ——同一设定流量 3 次测量值的算术平均值，mL/min；

F_s ——流量设定值，mL/min。

$$S_R = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{\overline{F_m}} \quad (8)$$

式中：

S_R ——液体流量稳定性，%；

$F_{\max}$ ——同一设定流量 3 次测量值的最大值，mL/min；

$F_{\min}$ ——同一设定流量 3 次测量值的最小值，mL/min；

$\overline{F_m}$ ——同一设定流量 3 次测量值的算术平均值，mL/min。

7.4 摇摆频率示值误差

将反光纸贴在反应器的振动盘上，在反应器振荡频率区间内选取 3 个校准点（通常为 10 r/min、20 r/min、30 r/min），开启振摇并且稳定 1 min 以上，使用光电计数表测量反应器的摇摆频率，重复测量 3 次，将测量的平均摇摆频率作为实测摇摆频率，按式（9）计算反应器的摇摆频率示值误差。

$$\Delta n = n_s - \overline{n} \quad (9)$$

式中：

Δn ——摇摆频率示值误差，r/min；

n_s ——摇摆频率设置值，r/min；

$\overline{n}$ ——摇摆频率 3 次实测值平均值，r/min。

7.5 摇摆角度示值误差

将反应器放置在水平桌面上，并将电子水平仪置于振动盘上，归零。将反应器调至最低摇摆频率，开启振摇。设置反应器停止摆动的角度（通常为可能摇摆最大角度），使反应器停止摆动，读取电子水平仪的读数，作为反应器的最大摇摆角度，重复上述测量过程 3 次，计算平均值，按公式（10）计算摇摆角度示值误差。

$$\Delta\alpha = \alpha_t - \overline{\alpha_s} \quad (10)$$

式中：

$\Delta\alpha$ —— 摇摆角度示值误差，(°)；

α_t —— 摇摆角度设置值，(°)；

$\overline{\alpha_s}$ —— 摇摆角度 3 次测量值的平均值，(°)。

8 校准结果表达

应尽可能详尽地记载测量数据和计算结果，出具的校准证书应符合 JJF 1071—2010 中 5.12 的要求。推荐的校准记录格式及校准证书内容格式见附录 A。测量不确定度按 JJF 1059.1—2012 的要求评定，测量不确定度评定示例见附录 B。

9 复校时间间隔

建议摇摆式生物反应器复校间隔一般不超过 1 年。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。如果在使用过程中对仪器测量结果产生怀疑或更换主要部件，应及时校准。

附录 A

校准记录和校准证书的内容

(推荐性表格)

校 准 记 录										共×页，第×页	
仪器名称					型号						
制造厂商					出厂编号						
委托单位	名称				联系人						
	地址				电话						
温度					相对湿度						
记录编号					证书编号						
校准员					核验员						
本次使用的主要 计量标准器具		规格型号		不确定度/准确度 等级/最大允许误差			器具编号		有效性确认		
一、温度示值误差和稳定性										℃	
温度测量次数		1	2	3	4	5	6	7	8		
测量值											
温度测量次数		9	10	11	12	13	14	15	——		
测量值									——		
设定值					示值误差		稳定性				
二、气体流量示值误差和稳定性										mL/min	
设置值		测量值									
平均值					示值误差						
稳定性											

三、液体流量示值误差及流量稳定性

$F_S/(\text{mL}/\text{min})$	$F_{S1} =$		$t_1 =$	$F_{S2} =$		$t_2 =$	$F_{S3} =$		$t_3 =$
W_1/g									
W_2/g									
W_2-W_1/g									
$(W_2-W_1)/\rho_i/\text{mL}$									
$F_m/(\text{mL}/\text{min})$									
$\overline{F}/(\text{mL}/\text{min})$									
$S_s/\%$									
$S_R/\%$									

四、摇摆频率示值误差

r/min

标准值	测量值			平均值	示值误差
10					
20					
30					

五、摇摆角度示值误差

(°)

仪器标称值	测量值			平均值	示值误差

校 准 证 书

共×页，第×页

序号	校准项目	校准结果
1	温度示值误差	
2	温度稳定性	
3	气体流量示值误差	
4	气体流量稳定性	
5	液体流量示值误差	
6	液体流量稳定性	
7	摇摆频率示值误差	
8	摇摆角度示值误差	

- 1. 温度示值误差测量不确定度：
- 2. 气体流量示值误差测量不确定度：
- 3. 液体流量示值误差测量不确定度：
- 4. 摇摆频率示值误差测量不确定度：
- 5. 摇摆角度示值误差测量不确定度：

校准员：_____ 核验员：_____

附录 B

摇摆式生物反应器校准结果的测量不确定度评定示例

摇摆式生物反应器校准过程中涉及的参数主要有温度、气体流量、液体流量、摇摆频率、摇摆角度，其中，温度、气体流量、摇摆频率、摇摆角度都是使用标准器进行直接测量，液体流量的测量则采用间接测量方法，测量结果受温度、湿度、气压等环境因素的影响可以忽略。因此，主要分析测量过程中对测量结果影响较大的不确定度分量来源，对其进行不确定度评定。

B.1 温度示值误差的不确定度评定示例

B.1.1 测量模型

$$\Delta T = T_d - \bar{T} \quad (\text{B.1})$$

式中：

ΔT ——温度示值误差，℃；

T_d ——仪器设置温度，℃；

$\bar{T}$ ——15次温度测量的平均值，℃。

B.1.2 不确定度来源

温度示值误差测量结果的不确定度来源主要为：

- a) 测量重复性引入的不确定度；
- b) 标准器分辨力引入的不确定度；
- c) 温度测量标准器准确度引入的不确定度。

B.1.3 标准不确定度分量的评定

B.1.3.1 测量重复性引入的标准不确定度 u_1

选定一台摇摆式生物反应器，设置温度 37℃，读取固定在培养袋中心位置的温度测量标准器示值，每隔 2 min 记录一次读数 T_i ，共记 15 次：36.9℃、36.8℃、36.9℃、36.9℃、36.8℃、36.8℃、36.9℃、36.9℃、36.7℃、36.7℃、36.8℃、36.9℃、36.8℃、36.7℃、36.7℃。

根据测量结果计算实验标准偏差：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{15} (T_i - \bar{T})^2}{14}} \approx 0.083 \text{ } ^\circ\text{C}$$

实际测量 15 次，则测量重复性引入的标准不确定度为：

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{15}} \approx 0.021 \text{ } ^\circ\text{C}$$

B.1.3.2 标准器分辨力引入的标准不确定度 u_2

数字温度计的分辨力为 0.1℃，分散区间半宽为 0.05℃，按均匀分布计算，则

$$u_2 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} \text{ } ^\circ\text{C} \approx 0.029 \text{ } ^\circ\text{C}$$

B.1.3.3 温度测量标准器准确度引入的标准不确定度 u_3

温度计的最大允许误差为 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，按均匀分布，则

$$u_3 = \frac{0.3}{\sqrt{3}}\text{ }^{\circ}\text{C} \approx 0.173\text{ }^{\circ}\text{C}$$

B.1.4 标准不确定度一览表

标准不确定度一览表见表 B.1。

表 B.1 标准不确定度一览表

标准不确定度	不确定度来源	标准不确定度值
u_1	测量重复性	0.021 $^{\circ}\text{C}$
u_2	标准器分辨力	0.029 $^{\circ}\text{C}$
u_3	标准器准确度	0.173 $^{\circ}\text{C}$

B.1.5 合成标准不确定度

由于各不确定度分量不相关，故

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \approx 0.177\text{ }^{\circ}\text{C}$$

B.1.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则温度示值误差的扩展不确定度为 $U=2u_c=0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

B.2 气体流量示值误差的不确定度评定

B.2.1 测量模型

$$\Delta V = \frac{V_d - \bar{V}}{\bar{V}} \quad (\text{B.2})$$

式中：

ΔV ——气体流量示值相对误差，%；

V_d ——气体流量值设定值，mL/min；

$\bar{V}$ ——同一设定流量 5 次测量的平均值，mL/min。

灵敏系数：

$$c = \frac{\partial(\Delta V)}{\partial(\bar{V})} = -\frac{V_d}{\bar{V}^2} \quad (\text{B.3})$$

B.2.2 不确定度来源

气体流量示值误差测量结果的不确定度来源主要为：

- a) 测量重复性引入的不确定度；
- b) 标准器分辨力引入的不确定度；
- c) 测量标准器准确度引入的不确定度。

B.2.3 标准不确定度分量的评定

B.2.3.1 测量重复性引入的标准不确定度 u_1

在设定流量校准点，分别读取 10 次测量数据，得到一组测量值 V_i ：964 mL/min、958 mL/min、962 mL/min、961 mL/min、967 mL/min、969 mL/min、962 mL/min、

968 mL/min、963 mL/min、959 mL/min。根据测量结果计算其单次测量的实验标准偏差 s ：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (V_i - \bar{V})^2}{9}} \approx 3.71 \text{ mL/min}$$

气体流量实际测量 5 次，得到一组测量结果：964 mL/min、958 mL/min、962 mL/min、961 mL/min、967 mL/min，则测量重复性引入的标准不确定度为：

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{5}} \approx 1.66 \text{ mL/min}$$

平均值为：

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^5 V_i}{5} \approx 962 \text{ mL/min}$$

B.2.3.2 标准器分辨力引入的标准不确定度 u_2

气体流量计的分辨力为 1 mL/min，分散区间半宽为 0.5 mL/min，按均匀分布计算，则

$$u_2 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} \text{ mL/min} \approx 0.29 \text{ mL/min}$$

B.2.3.3 测量标准器准确度引入的标准不确定度 u_3

气体流量计准确度引入的不确定度可按其最大允许误差计算：

$$u_3 = a/k = \bar{V} \times 1.5\% / \sqrt{3} \approx 8.33 \text{ mL/min}$$

B.2.4 标准不确定度一览表

标准不确定度一览表见表 B.2。

表 B.2 标准不确定度一览表

标准不确定度	不确定度来源	标准不确定度值	灵敏系数
u_1	测量重复性	1.66 mL/min	$-0.0011 \text{ (mL/min)}^{-1}$
u_2	标准器分辨力	0.29 mL/min	
u_3	标准器准确度	8.33 mL/min	

B.2.5 合成标准不确定度

由于各不确定度分量不相关，故

$$u_c = \sqrt{c^2(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2)} \approx 0.0093$$

B.2.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则气体流量示值误差的扩展不确定度为 $U=2u_c=2\%$ 。

B.3 液体流量示值误差的不确定度评定

B.3.1 测量模型

$$F_m = \Delta W / (\rho_t \times t) \quad (\text{B.4})$$

$$\Delta W = W_2 - W_1 \quad (\text{B. 5})$$

$$S_s = \frac{F_s - \overline{F_m}}{\overline{F_m}} \times 100\% \quad (\text{B. 6})$$

式中：

F_m ——流量实测值，mL/min；

ΔW ——收集的流动相的质量，g；

W_2 ——容量瓶加流动相的质量，g；

W_1 ——容量瓶的质量，g；

ρ_t ——实验温度下流动相的密度，g/cm³（不同温度下流动相的密度参见附录 C）；

t ——收集流动相的时间，min；

S_s ——流量示值误差，%；

$\overline{F_m}$ ——同一设定流量 3 次测量值的算术平均值，mL/min；

F_s ——流量设定值，mL/min。

由公式 (B. 4)、公式 (B. 6) 得灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial S_s}{\partial (\Delta W)} = - \frac{F_s \times \rho_t \times t}{(\Delta W)^2} \quad (\text{B. 7})$$

$$c_2 = \frac{\partial S_s}{\partial t} = \frac{F_s \times \rho_t}{\Delta W} \quad (\text{B. 8})$$

B. 3.2 不确定度来源

液体流量示值误差测量结果的不确定度来源主要为：

a) 称量过程引入的不确定度，主要包括测量重复性引入的不确定度和电子天平引入的不确定度（包括分辨力引入的不确定度和由测量准确度引入的不确定度）；

b) 测量时间引入的不确定度，主要包括由使用的电子秒表引入的不确定度和人为误差引入的不确定度。

B. 3.3 标准不确定度的评定

B. 3.3.1 称量过程引入的标准不确定度

B. 3.3.1.1 测量重复性引入的标准不确定度 u_1

选定一台摇摆式生物反应器，在设定值为 10 mL/min 处，测量泵流量设定值误差，收集时间为 5 min，流动相密度取 997.043 kg/m³。在此条件下，进行 10 次连续测量，得到一组数据 ΔW_i ：49.811 g、49.962 g、50.165 g、50.243 g、49.867 g、49.644 g、50.373 g、49.751 g、49.930 g、49.885 g。根据测量结果计算其单次测量的实验标准偏差 s ：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\Delta W_i - \overline{\Delta W})^2}{9}} \approx 0.229 \text{ g}$$

实际重复测量 3 次，得到一组数据 ΔW_i ：49.811 g、49.962 g、50.165 g，以 3 次

测量值的算术平均值作为测量结果，则测量重复性引入的标准不确定度为：

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{3}} \approx 0.132 \text{ g}$$

B.3.3.1.2 电子天平分辨力引入的标准不确定度 u_2

称量使用的电子天平的分辨力为 1 mg，按均匀分布计算。则由电子天平分辨力引入的标准不确定度为：

$$u_2 = \frac{1 \text{ mg}}{2 \times \sqrt{3}} = 0.0003 \text{ g}$$

B.3.3.1.3 电子天平准确度引入的标准不确定度 u_3

称量使用的电子天平的最大允许误差为 $\pm 5 \text{ mg}$ ，按均匀分布计算。则由电子天平准确度引入的标准不确定度为：

$$u_3 = \frac{5 \text{ mg}}{\sqrt{3}} = 0.0029 \text{ g}$$

B.3.3.2 测量时间引入的标准不确定度

B.3.3.2.1 电子秒表引入的标准不确定度 u_4

电子秒表引入的不确定度可按其最大允许误差进行计算，电子秒表最大允许误差为 0.5 s/d，按均匀分布，则

$$u_4 = \frac{0.5}{86400 \times \sqrt{3}} \times 300 \text{ s} = 0.001 \text{ s}$$

B.3.3.2.2 人为误差引入的标准不确定度 u_5

人为误差主要是指由人的反应时间造成的计时误差，一般人的反应时间通常为 0.2 s~0.3 s，则由人为误差引入的不确定度为：

$$u_5 = \frac{0.3 \text{ s}}{2 \times \sqrt{3}} = 0.087 \text{ s}$$

B.3.4 标准不确定度一览表

标准不确定度一览表见表 B.3。

表 B.3 标准不确定度一览表

不确定度来源		标准不确定度值	灵敏系数
称量过程	测量重复性	0.132 g	-0.0200 g^{-1}
	电子天平分辨力	0.0003 g	
	电子天平准确度	0.0029 g	
测量时间	电子秒表	0.001 s	0.1995 min^{-1}
	人为误差	0.087 s	

B.3.5 合成标准不确定度

由于各不确定度分量不相关，故

$$u_c = \sqrt{c_1^2(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) + c_2^2(u_4^2 + u_5^2)} = 0.27\%$$

B.3.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则液体流量示值误差测量结果的相对扩展不确定度为 $U=2u_c \approx 0.6\%$ 。

B.4 摇摆频率示值误差的不确定度评定

B.4.1 测量模型

$$\Delta n = n_s - \bar{n} \quad (\text{B.9})$$

式中：

Δn —— 摇摆频率示值误差，r/min；

n_s —— 摇摆频率设置值，r/min；

$\bar{n}$ —— 摇摆频率实测值，r/min。

B.4.2 不确定度来源

摇摆频率示值误差测量结果的不确定度来源主要为：

- a) 测量重复性引入的不确定度；
- b) 标准器分辨力引入的不确定度；
- c) 测量标准器引入的不确定度。

B.4.3 标准不确定度的评定

B.4.3.1 测量重复性引入的标准不确定度 u_1

在设定摇摆频率校准点，使用光电计数表测量反应器的摇摆频率，分别读取 10 次测量数据，得到一组测量值 n_i ：20.13 r/min、20.25 r/min、20.68 r/min、20.44 r/min、20.51 r/min、20.09 r/min、19.88 r/min、20.37 r/min、20.80 r/min、20.34 r/min。根据测量结果计算其单次测量的实验标准偏差 s ：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (n_i - \bar{n})^2}{9}} \approx 0.28 \text{ r/min}$$

实际在校准点重复测量 3 次，因此测量结果平均值的标准不确定度为：

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{3}} \approx 0.16 \text{ r/min}$$

B.4.3.2 标准器分辨力引入的标准不确定度 u_2

光电计数表的分辨力为 0.01 r/min，分散区间半宽为 0.005 r/min，按均匀分布计算，则

$$u_2 = \frac{0.005}{\sqrt{3}} \text{ r/min} \approx 0.0029 \text{ r/min}$$

B.4.3.3 测量标准器准确度引入的标准不确定度 u_3

摇摆频率测量标准器准确度引入的不确定度可按标准器的最大允许误差计算，则由光电转速表引入不确定度为：

$$u_3 = a/k = 0.5\% \times 20 \text{ r/min} / \sqrt{3} \approx 0.058 \text{ r/min}$$

B.4.4 标准不确定度一览表

标准不确定度一览表见表 B.4。

表 B.4 标准不确定度一览表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值
u_1	测量重复性	0.16 r/min
u_2	标准器分辨力	0.002 9 r/min
u_3	标准器准确度	0.058 r/min

B.4.5 合成标准不确定度

由于各不确定度分量不相关，故

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \approx 0.17 \text{ r/min}$$

B.4.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则摇摆频率示值误差的扩展不确定度为 $U=2u_c=0.4 \text{ r/min}$ 。

B.5 摇摆角度示值误差的不确定度评定

B.5.1 测量模型

$$\Delta\alpha = \alpha_t - \overline{\alpha_s} \quad (\text{B.10})$$

式中：

$\Delta\alpha$ —— 摇摆角度示值误差，(°)；

α_t —— 反应器摇摆角度最大值，(°)；

$\overline{\alpha_s}$ —— 反应器摇摆角度 3 次测量值的算术平均值，(°)。

B.5.2 不确定度来源

摇摆角度示值误差测量结果的不确定度来源主要为：

- a) 测量重复性引入的不确定度；
- b) 测量标准器引入的不确定度。

B.5.3 标准不确定度分量的评定

B.5.3.1 测量重复性引入的标准不确定度 u_1

将反应器停在摇摆最大角度处，使用电子水平仪测量反应器的摇摆角度，分别读取 10 次测量数据，得到一组测量值 α_i ：12°05′、12°07′、12°10′、12°08′、12°02′、12°11′、12°04′、12°15′、12°06′、12°12′。根据测量结果计算其单次测量的实验标准偏差 s ：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\alpha_i - \overline{\alpha})^2}{9}} \approx 4.0'$$

摇摆角度实际重复测量 3 次，则测量结果平均值的标准不确定度为：

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{3}} \approx 2.3'$$

B.5.3.2 测量标准器引入的标准不确定度 u_2

摇摆角度测量标准器引入的不确定度可按标准器的最大允许误差计算，则由电子水平仪引入不确定度为：

$$u_2 = a/k = 0.002^\circ/\sqrt{3} \approx 0.07'$$

B.5.4 标准不确定度一览表

标准不确定度一览表见表 B.5。

表 B.5 标准不确定度一览表

标准不确定度	不确定度来源	标准不确定度值
u_1	测量重复性	$2.3'$
u_2	标准器	$0.07'$

B.5.5 合成标准不确定度

由于各不确定度分量不相关，故

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \approx 2.3'$$

B.5.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则摇摆角度示值误差的扩展不确定度为 $U=2u_c \approx 5'$ 。

附录 C

1990 年国际温标纯水密度表

表 C.1 1990 年国际温标纯水密度表

kg/m³

$t_{90}/^{\circ}\text{C}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
15	999.099	999.084	999.069	999.053	999.038	999.022	999.006	998.991	998.975	998.959
16	998.943	998.926	998.910	998.893	998.876	998.860	998.843	998.826	998.809	998.792
17	998.774	998.757	998.739	998.722	998.704	998.686	998.668	998.650	998.632	998.613
18	998.595	998.576	998.557	998.539	998.520	998.501	998.482	998.463	998.443	998.424
19	998.404	998.385	998.365	998.345	998.325	998.305	998.285	998.265	998.244	998.224
20	998.203	998.182	998.162	998.141	998.120	998.099	998.077	998.056	998.035	998.013
21	997.991	997.970	997.948	997.926	997.904	997.882	997.859	997.837	997.815	997.792
22	997.769	997.747	997.724	997.701	997.678	997.655	997.631	997.608	997.584	997.561
23	997.537	997.513	997.490	997.466	997.442	997.417	997.393	997.396	997.344	997.320
24	997.295	997.270	997.246	997.221	997.195	997.170	997.145	997.120	997.094	997.069
25	997.043	997.018	996.992	996.966	996.940	996.914	996.888	996.861	996.835	996.809
26	996.782	996.755	996.729	996.702	996.675	996.648	996.621	996.594	996.566	996.539
27	996.511	996.484	996.456	996.428	996.401	996.373	996.344	996.316	996.288	996.260
28	996.231	996.203	996.174	996.146	996.117	996.088	996.059	996.030	996.001	996.972
29	995.943	995.913	995.884	995.854	995.825	995.795	995.765	995.753	995.705	995.675
30	995.645	995.615	995.584	995.554	995.523	995.493	995.462	995.431	995.401	995.370
31	995.339	995.307	995.276	995.245	995.214	995.182	995.151	995.119	995.087	995.055
32	995.024	994.992	994.960	994.927	994.895	994.863	994.831	994.798	994.766	994.733
33	994.700	994.667	994.635	994.602	994.569	994.535	994.502	994.469	994.436	994.402
34	994.369	994.335	994.301	994.267	994.234	994.200	994.166	994.132	994.098	994.063
35	994.029	993.994	993.96	993.925	993.891	993.856	993.821	993.786	993.751	993.716