



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2165—2024

实验室振动式液体密度仪校准规范

Calibration Specification for Laboratory Oscillation-type Liquid
Density Meters

2024-10-19 发布

2025-04-19 实施

国家市场监督管理总局 发布

实验室振动式液体密度仪

校准规范

Calibration Specification for Laboratory

Oscillation-type Liquid Density Meters

JJF 2165—2024

代替 JJG 1058—2010

归口单位：全国质量密度计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

参加起草单位：东营港有限责任公司

河北省计量监督检测研究院

山东省日照市计量科学研究院

国家石油天然气管网集团有限公司

中石化石油化工科学研究院有限公司

本规范委托全国质量密度计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

刘 翔（中国计量科学研究院）

李占宏（中国计量科学研究院）

参加起草人：

杨金鑫（东营港有限责任公司）

白月霞（河北省计量监督检测研究院）

裴志强（山东省日照市计量科学研究院）

王德宁（国家石油天然气管网集团有限公司）

杨 鹤（中石化石油化工科学研究院有限公司）

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	(1)
5 计量特性	(2)
6 校准条件	(2)
6.1 环境条件	(2)
6.2 校准用标准物质和校准设备	(2)
7 校准项目和校准方法	(3)
7.1 校准前准备工作	(3)
7.2 校准方法	(3)
8 数据处理及校准结果表达	(4)
8.1 示值误差	(4)
8.2 重复性	(4)
8.3 校准结果表达	(4)
9 复校时间间隔	(5)
附录 A (0~40)℃纯水密度表 (不含空气)	(6)
附录 B CIPM-2007 空气密度计算公式	(8)
附录 C 密度仪测量结果不确定度评定示例	(10)
附录 D 实验室振动式液体密度仪校准原始记录	(14)
附录 E 实验室振动式液体密度仪校准证书内页 (示例)	(15)

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》构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。本规范的计量特性、校准项目和校准方法主要参照 JJF 1005《标准物质通用术语和定义》、JJG 1058《实验室振动式液体密度仪》、ISO 15212-1《振动型密度仪 第1部分：实验室仪器》（Oscillation-type density meters—Part1: Laboratory instruments）和 ISO 12185《原油和石油产品 密度测定 U形振动管法》（Crude petroleum and petroleum products—Determination of density—Oscillating U-tube method）的相关内容。

本规范列出了实验室振动式液体密度仪的校准条件、校准项目、校准方法及不确定度评定。

本规范代替 JJG 1058—2010《实验室振动式液体密度仪》。

本规范的历次版本发布情况为：

JJG 1058—2010。

实验室振动式液体密度仪 校准规范

1 范围

本规范适用于常压下实验室振动式液体密度仪（含台式振动式密度仪和便携式振动式密度仪）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 1005 标准物质通用术语和定义

JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示

JJF 1071 国家计量校准规范编写规则

ISO 12185 原油和石油产品 密度测定 U形振动管法（Crude petroleum and petroleum products—Determination of density—Oscillating U-tube method）

ISO 15212-1 振动型密度仪 第1部分：实验室仪器（Oscillation-type density meters—Part 1: Laboratory instruments）

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

3.1.1 液体密度有证标准物质 density certified reference material

附有标准物质证书的液体密度标准物质，其密度值用建立了溯源性的程序确定，可溯源至固体密度基准或副基准，其密度值附有给定包含概率的不确定度。

注：通常用于密度量值传递。

3.2 计量单位

密度的计量单位： kg/m^3 或 g/cm^3 。

4 概述

实验室振动式液体密度仪（以下简称密度仪）主要由振动传感器、温度传感器、数据处理单元、显示单元等组成。当传感器内液体密度发生变化时，其振动周期也相应变化，利用仪器系数按照方程计算得到被测液体在相应测量条件下的密度。传感器内液体密度与其振动周期、液体温度之间的关系可简化表示为公式（1）：

$$\rho = f(k, t, T) \quad (1)$$

式中：

ρ ——传感器内液体密度；

k ——密度仪系数；

t ——液体温度；

T ——振动周期。

5 计量特性

本校准规范重点关注密度仪示值误差和重复性。

密度仪的分辨力和示值误差的最大允许误差的关系见表 1。

表 1 分辨力和示值误差的最大允许误差

密度仪标称参数		密度仪示值误差的 最大允许误差 kg/m^3
分辨力 kg/m^3	校准系数	
1	2	± 2
0.1	10	± 1.0
0.1	5	± 0.5
0.01	20	± 0.20
0.01	10	± 0.10
0.01	5	± 0.05
0.001	100	± 0.100
0.001	50	± 0.050
注：以上所有指标不适用于合格性判别，仅提供参考。		

表中最大允许误差可作为选择校准密度仪所用液体密度标准物质的依据。

6 校准条件

6.1 环境条件

实验室环境应满足密度仪安装要求，不得存在强烈的机械振动和电磁干扰。实验室温度应控制在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $20\% \sim 70\%$ 。环境应通风良好，须配备消防设施及水源。

6.2 校准用标准物质和校准设备

6.2.1 标准物质

校准密度仪时使用的液体密度标准物质应为有证标准物质。通常选择标准物质的测量不确定度 $U(\rho_{\text{ref}})$ 应不大于被校准密度仪最大允许误差绝对值的 $1/3$ ，即： $U(\rho_{\text{ref}}) \leq \frac{1}{3} |MPE|$ 。对于最大允许误差为 $\pm 0.05 \text{ kg/m}^3$ 的密度仪，液体密度标准物质密度最大

允许不确定度为最大允许误差绝对值的 1/2。

校准用液体密度标准物质应清澈、透明、无可见颗粒等物质，具备较好的均匀性。液体密度标准物质的黏度低于 50 mPa·s。

6.2.2 主要配套设备

主要配套设备及技术要求见表 2。

表 2 主要配套设备

设备名称	技术要求
温湿度表	温度测量范围 (5~50)℃，最大允许误差±0.5℃； 相对湿度测量范围 10%~85%，最大允许误差±3%
压力计	压力测量范围 (800~1 060) hPa，最大允许误差为±5.0 hPa
注射器及附件	注射器容积为 (10~20) mL
注：选用的注射器和附件不能与密度标准液体发生反应。	

6.2.3 辅助设备及材料

6.2.3.1 清洗液：蒸馏水、无水乙醇、石油醚、洗涤剂，可以有效去除液体密度标准物质在传感器内的残留，同时对传感器及附件无腐蚀、粘结作用。

6.2.3.2 空气泵：对于没有配备内置空气泵的密度仪，需要配有空气气源，通常气源提供的空气压力不大于 0.1 MPa。

6.2.3.3 恒温水浴槽：显示分辨力不低于±0.1℃，稳定性等于或优于±0.2℃。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准前准备工作

7.1.1 被校准密度仪应具有铭牌或产品标识；应有型号、编号、分辨力和制造厂商等信息；密度仪显示屏应读数清晰、完整；传感器内部应清洁干燥；按键应接触良好，能正常工作，各连接紧固件无松动。

7.1.2 密度仪在校准前需通电预热，预热时间可依据仪器使用说明书规定的时间或用户设定的时间。若无以上规定，则预热时间应不少于 30 min。

7.1.3 具有自校功能的密度仪，校准前按照密度仪说明书的规定进行自校。

7.2 校准方法

a) 对于具备温度控制功能的密度仪，要先将温度设置为校准温度。选取要校准的某一密度点所用的液体密度标准物质后，使用密度仪自带的进液装置或手工使用注射器将液体密度标准物质缓慢注入仪器传感器并完全排出气泡，待仪器温度稳定后得到密度仪测量结果 ρ_i 。

对于不具备温度控制功能的密度仪，需要使用恒温水槽将液体密度标准物质控制到校准温度，条件稳定后获得密度仪测量结果 ρ_i 。

b) 按照密度仪使用说明书规定使用易于溶解液体密度标准物质的洗剂进行密度仪

传感器的冲洗，用洁净干燥空气吹干，确保传感器内无液体残留。

c) 重复液体密度的测量，完成校准温度下至少 5 次测量。

注：重复测量需要注入新的液体。

d) 重复上述步骤 a) ~ c)，完成所有需校准密度点的测量。

8 数据处理及校准结果表达

8.1 示值误差

对于每一校准点示值误差 E 计算方式如下：

$$E = \bar{\rho} - \rho_{\text{ref}} \quad (2)$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i \quad (3)$$

式中：

E ——密度示值误差， kg/m^3 ；

$\bar{\rho}$ ——密度仪示值平均值， kg/m^3 ；

ρ_{ref} ——液体密度标准物质质量值， kg/m^3 ；

n ——测量次数， $n \geq 5$ ；

ρ_i ——单次测量密度仪示值， kg/m^3 。

8.2 重复性

密度仪校准点的重复性用实验标准偏差 s 表示：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2}{n - 1}} \quad (4)$$

式中：

ρ_i ——单次测量密度仪示值， kg/m^3 ；

$\bar{\rho}$ ——密度仪示值平均值， kg/m^3 ；

n ——测量次数， $n \geq 5$ 。

8.3 校准结果表达

校准证书应至少包含以下信息：

- 标题“校准证书”；
- 实验室名称和地址；
- 进行校准的地点（如果与实验室地址不同）；
- 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- 客户的名称和地址；
- 被校准仪器的描述和明确标识；
- 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- 本次校准所使用的液体密度标准物质的标识；
- 校准环境的描述；

- j) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- k) 复校时间间隔的建议；
- l) 校准证书签发人的签名或等效标识；
- m) 校准结果仅对被校对象有效的声明。

9 复校时间间隔

密度仪复校时间间隔建议不超过 1 年。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况（如使用频率、环境条件）、仪器质量等诸因素所决定的，因此使用单位可根据实际情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

(0~40)℃ 纯水密度表 (不含空气)

单位: kg/m³

$t_{90}/^{\circ}\text{C}$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	999.843	999.850	999.856	999.862	999.869	999.874	999.880	999.886	999.891	999.897
1	999.902	999.907	999.911	999.916	999.920	999.924	999.928	999.932	999.936	999.940
2	999.943	999.946	999.949	999.952	999.955	999.957	999.959	999.962	999.964	999.965
3	999.967	999.969	999.970	999.971	999.972	999.973	999.974	999.974	999.975	999.975
4	999.975	999.975	999.975	999.974	999.974	999.973	999.972	999.971	999.970	999.968
5	999.967	999.965	999.963	999.961	999.959	999.957	999.954	999.952	999.949	999.946
6	999.943	999.940	999.937	999.933	999.929	999.926	999.922	999.918	999.913	999.909
7	999.904	999.900	999.895	999.890	999.885	999.880	999.874	999.869	999.863	999.857
8	999.851	999.845	999.839	999.833	999.826	999.819	999.813	999.806	999.798	999.791
9	999.784	999.776	999.769	999.761	999.753	999.745	999.737	999.728	999.720	999.711
10	999.703	999.694	999.685	999.676	999.666	999.657	999.648	999.638	999.628	999.618
11	999.608	999.598	999.588	999.577	999.567	999.556	999.545	999.534	999.523	999.512
12	999.500	999.489	999.477	999.466	999.454	999.442	999.430	999.418	999.405	999.393
13	999.380	999.367	999.355	999.342	999.329	999.315	999.302	999.289	999.275	999.261
14	999.247	999.233	999.219	999.205	999.191	999.176	999.162	999.147	999.132	999.118
15	999.103	999.087	999.072	999.057	999.041	999.026	999.010	998.994	998.978	998.962
16	998.946	998.930	998.913	998.897	998.880	998.863	998.846	998.829	998.812	998.795
17	998.778	998.760	998.743	998.725	998.707	998.689	998.671	998.653	998.635	998.617
18	998.598	998.580	998.561	998.542	998.523	998.505	998.485	998.466	998.447	998.427
19	998.408	998.388	998.369	998.349	998.329	998.309	998.288	998.268	998.248	998.227
20	998.207	998.186	998.165	998.144	998.123	998.102	998.081	998.060	998.038	998.017
21	997.995	997.973	997.951	997.929	997.907	997.885	997.863	997.841	997.818	997.796
22	997.773	997.750	997.727	997.704	997.681	997.658	997.635	997.612	997.588	997.564
23	997.541	997.517	997.493	997.469	997.445	997.421	997.397	997.372	997.348	997.323
24	997.299	997.274	997.249	997.224	997.199	997.174	997.149	997.124	997.098	997.073
25	997.047	997.021	996.996	996.970	996.944	996.918	996.891	996.865	996.839	996.812
26	996.786	996.759	996.732	996.706	996.679	996.652	996.624	996.597	996.570	996.543

表 (续)

$t_{90}/^{\circ}\text{C}$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
27	996.515	996.488	996.460	996.432	996.404	996.376	996.348	996.320	996.292	996.264
28	996.235	996.207	996.178	996.150	996.121	996.092	996.063	996.034	996.005	995.976
29	995.946	995.917	995.888	995.858	995.828	995.799	995.769	995.739	995.709	995.679
30	995.649	995.619	995.588	995.558	995.527	995.497	995.466	995.435	995.404	995.373
31	995.342	995.311	995.280	995.249	995.217	995.186	995.154	995.123	995.091	995.059
32	995.027	994.996	994.963	994.931	994.899	994.867	994.834	994.802	994.769	994.737
33	994.704	994.671	994.638	994.605	994.572	994.539	994.506	994.473	994.439	994.406
34	994.372	994.339	994.305	994.271	994.237	994.204	994.170	994.135	994.101	994.067
35	994.033	993.998	993.964	993.929	993.894	993.860	993.825	993.790	993.755	993.720
36	993.685	993.650	993.614	993.579	993.543	993.508	993.472	993.437	993.401	993.365
37	993.329	993.293	993.257	993.221	993.184	993.148	993.112	993.075	993.039	993.002
38	992.965	992.929	992.892	992.855	992.818	992.781	992.744	992.706	992.669	992.632
39	992.594	992.557	992.519	992.481	992.443	992.406	992.368	992.330	992.292	992.253
40	992.215	——	——	——	——	——	——	——	——	——
注： 1 t_{90} 为 1990 年国际温标 (ITS-90)； 2 水密度值采用 CIPM-2001 推荐计算公式计算得到。										

附录 B

CIPM-2007 空气密度计算公式

$$\rho = [3.483\,740 + 1.444\,6 \cdot (x_{\text{CO}_2} - 0.000\,4)] \cdot \frac{p}{ZT} (1 - 0.378\,0\,x_v) \quad (\text{B.1})$$

式中：

ρ ——湿空气密度， 10^{-3} kg/m^3 ；

x_{CO_2} ——空气中的 CO_2 含量， mol mol^{-1} ；

p ——大气压力，Pa；

Z ——压缩系数；

T ——热力学温度， $T = 273.15 + t$ ，K；

x_v ——水蒸气摩尔系数。

其中：

$$Z = 1 - \frac{p}{T} [a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (b_0 + b_1 t)x_v + (c_0 + c_1 t)x_v^2] + \frac{p^2}{T^2} (d + ex_v^2) \quad (\text{B.2})$$

$$x_v = hf(p, t) \frac{p_{\text{sv}}(t)}{p} \quad (\text{B.3})$$

$$f(p, t) = \alpha + \beta p + \gamma t^2 \quad (\text{B.4})$$

$$p_{\text{sv}}(t) = 1 \text{ Pa} \times \exp\left(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T}\right) \quad (\text{B.5})$$

式中：

$p_{\text{sv}}(t)$ ——饱和蒸汽压，Pa；

h ——空气的相对湿度， $0 \leq h \leq 1$ ；

t ——空气温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

以上公式 (B.2) 至 (B.4) 中的常数项数值如下：

$$a_0 = 1.581\,23 \times 10^{-6} \text{ KPa}^{-1}；$$

$$a_1 = -2.933\,1 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}；$$

$$a_2 = 1.104\,3 \times 10^{-10} \text{ K}^{-1} \text{ Pa}^{-1}；$$

$$b_0 = 5.707 \times 10^{-6} \text{ KPa}^{-1}；$$

$$b_1 = -2.051 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}；$$

$$c_0 = 1.989\,8 \times 10^{-4} \text{ KPa}^{-1}；$$

$$c_1 = -2.376 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}；$$

$$d = 1.83 \times 10^{-11} \text{ K}^2 \cdot \text{Pa}^{-2}；$$

$$e = -0.765 \times 10^{-8} \text{ K}^2 \cdot \text{Pa}^{-2}；$$

$$\alpha = 1.000\,62；$$

$$\beta = 3.14 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}；$$

$$\gamma = 5.6 \times 10^{-7} \text{ K}^{-2};$$

$$A = 1.237\ 884\ 7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-2};$$

$$B = -1.912\ 131\ 6 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1};$$

$$C = 33.937\ 110\ 47;$$

$$D = -6.343\ 164\ 5 \times 10^3 \text{ K}。$$

公式出处：CIPM-2007 推荐公式，Metrologia 45（2008）149～155。

附录 C

密度仪测量结果不确定度评定示例

C.1 被校准仪器信息

被校准仪器信息列于表 C.1。

表 C.1 被校准仪器信息

被校准仪器	实验室振动式液体密度仪
分辨力	0.001 kg/m ³
测量范围	(0~3 000) kg/m ³
黏度修正功能	开启
校准员进行的调整	进行校准前,按照说明书进行空气和纯水调整
温度分辨力	0.001 °C
最大允许误差 MPE	0.05 kg/m ³
液体密度标准物质不确定度 ($k=2$)	小于 0.025 kg/m ³

C.2 校准所用标准物质

校准用标准物质信息列于表 C.2。

表 C.2 标准物质信息

名称	标准密度值 kg/m ³	扩展不 确定度 ($k=2$) kg/m ³	标准 温度 °C	密度温度关系 [(15~25)°C]
CRM1	691.869	0.020	20	$\rho(t) = 691.869 - 0.821\,6 \times (t - 20) - 0.000\,4 \times (t - 20)^2$
CRM2	998.204	0.020	20	$\rho(t) = 998.204 - 0.208\,7 \times (t - 20) - 0.005\,7 \times (t - 20)^2$

C.3 校准用配套仪器 (测温仪)

校准用配套仪器 (测温仪) 信息列于表 C.3。

表 C.3 配套仪器 (测温仪) 信息

测温范围/°C	-260 ~ +962
分辨力/°C	0.000 1
测量范围为 (15~50)°C 时的测量不确定度 ($k=2$)	0.006 °C

C.4 温度测量结果

使用测温仪对密度仪的振动管内部温度进行测量。表 C.4 列出了校准温度为 20 °C

的测量结果。

表 C.4 温度测量结果

序号	被测密度仪温度 示值/℃	标准测温仪 示值/℃	标准测温仪 修正值/℃	温度示值误差/℃
1	20.001	20.005 9	−0.007	0.002 1
2	20.000	20.005 8	−0.007	0.001 2
3	20.001	20.005 8	−0.007	0.002 2
4	20.000	20.005 6	−0.007	0.001 4
5	20.000	20.005 4	−0.007	0.001 6
6	20.000	20.005 5	−0.007	0.001 5
平均值	20.000	20.005 7	−0.007	0.002
标准测温仪在校准温度 20 ℃ 下的测量不确定度为 0.006 ℃ ($k=2$)。				

C.5 标准液体校准结果

使用液体密度标准物质 CRM1 进行示值误差测量的数据列于表 C.5。

表 C.5 标准液体校准结果

序号	密度示值/ (kg/m ³)	校准温度/℃
1	691.866	20.000
2	691.865	20.000
3	691.865	20.000
4	691.866	20.000
5	691.865	20.000
6	691.867	20.000
平均值	691.866	20.000

C.6 示值误差的标准不确定度

被校密度仪测量模型为：

$$E = \rho - \rho_{\text{ref}} \quad (\text{C.1})$$

示值误差的合成标准不确定度的计算公式为：

$$\begin{aligned}
 u_c(E) &= \sqrt{\left[\frac{\partial E}{\partial \rho} u(\rho) \right]^2 + \left[\frac{\partial E}{\partial \rho_{\text{ref}}} u(\rho_{\text{ref}}) \right]^2} \\
 &= \sqrt{\left[\frac{\partial E}{\partial \rho_{\text{res}}} u(\rho_{\text{res}}) \right]^2 + \left[\frac{\partial E}{\partial \rho_s} u(\rho_s) \right]^2 + \left[\frac{\partial E}{\partial \rho_t} u(\rho_t) \right]^2 + \left[\frac{\partial E}{\partial \rho_{\text{ref}}} u(\rho_{\text{ref}}) \right]^2}
 \end{aligned} \quad (\text{C.2})$$

C.6.1 标准不确定度评定

C.6.1.1 液体密度标准物质引入的不确定度 $u(\rho_{\text{ref}})$

液体密度标准物质 CRM1 的标准不确定度 $u(\rho_{\text{ref}})$ 可以由标准物质的证书获得，其标准不确定度为：

$$u(\rho_{\text{ref}}) = \frac{U(\rho_{\text{ref}})}{k} = \frac{0.020 \text{ kg/m}^3}{2} = 0.010 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{C.3})$$

C.6.1.2 被校密度仪分辨力引入的不确定度 $u(\rho_{\text{res}})$

被校准密度仪分辨力为 0.001 kg/m^3 ，引入的不确定度为：

$$u(\rho_{\text{res}}) = \frac{d}{2\sqrt{3}} = \frac{0.001 \text{ kg/m}^3}{2\sqrt{3}} = 0.00029 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{C.4})$$

C.6.1.3 测量过程的密度仪示值重复性引入的标准不确定度 $u(\rho_s)$

$$u(\rho_s) = \frac{s(\rho)}{\sqrt{n}} = \frac{0.00082 \text{ kg/m}^3}{\sqrt{6}} = 0.00033 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{C.5})$$

C.6.1.4 密度仪测温引入的标准不确定度 $u(\rho_t)$

温度测量的标准不确定度 $u(t)$ 可由校准证书获得，其标准不确定度为 $0.003 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

密度仪内部传感器温度测量引起的密度测量标准不确定度可以表示为：

$$u(\rho_t) = \frac{\partial \rho}{\partial t} u(t) = 0.8216 u(t) = 2.465 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3 \approx 2.5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3 \quad (\text{C.6})$$

C.7 密度仪测量结果不确定度

密度仪示值误差各不确定度分量及其灵敏系数如表 C.6 所示。

表 C.6 密度仪示值误差扩展不确定度计算汇总表

序号	输入量	数值	分布	标准不确定度	自由度	灵敏系数	示值误差 不确定度分量/ (kg/m^3)
1	液体密度 标准物质	691.869	正态分布, $k=2$	0.010 kg/m^3	50	1	0.010
2	分辨力	0.001	矩形分布	$2.9 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$	200	1	2.9×10^{-4}
3	测量 重复性	—	正态分布	$3.3 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$	5	1	3.3×10^{-4}
4	温度测量	—	正态分布	$3.0 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$	50	$0.8216 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$	2.5×10^{-3}
示值误差合成 标准不确定度		0.011 kg/m^3					
示值误差扩展 不确定度 ($k=2$)		0.022 kg/m^3					

上述几项不确定度分量进行合成得到密度仪示值误差合成标准不确定度：

$$u_c(E) = \sqrt{\left[\frac{\partial E}{\partial \rho_{\text{res}}}u(\rho_{\text{res}})\right]^2 + \left[\frac{\partial E}{\partial \rho_s}u(\rho_s)\right]^2 + \left[\frac{\partial E}{\partial \rho_t}u(\rho_t)\right]^2 + \left[\frac{\partial E}{\partial \rho_{\text{ref}}}u(\rho_{\text{ref}})\right]^2} = 0.011 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{C.7})$$

密度仪示值误差扩展不确定度：

取包含因子 $k=2$ ，

$$U(E) = k \times u_c(E) = 0.022 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{C.8})$$

附录 D

实验室振动式液体密度仪校准原始记录

送校单位			校准证书编号			
仪器名称			制造厂			
校准依据						
仪器型号/规格			仪器编号			
仪器分辨力			测量范围			
校准日期						
标准器及 主要配套设备	名称	编号	准确度等级	有效期		
环境温度			环境湿度			
校准地点						
校准员			核验			

被校密度仪		液体密度标准物质量值 kg/m³	示值误差 kg/m³	重复性 kg/m³	扩展不确定度 (k=2) kg/m³	校准温度 ℃
示值 kg/m³	平均值 kg/m³					

附录 E

实验室振动式液体密度仪校准证书内页（示例）

证书编号：××××××—××××××

本次校准所依据的技术规范（代号、名称） JJF 2165—2024 《实验室振动式液体密度仪校准规范》				
校准环境条件及地点：				
温度：	℃	地点：		
相对湿度：	%	其他：		
校准使用的计量标准装置				
名称/编号	测量值	准确度等级/ 不确定度	证书编号/ 校准机构	有效期至

证书编号：××××××—×××××

校准范围		分辨力			
测量点 kg/m³	标准密度值 kg/m³	仪器示值 kg/m³	示值误差 kg/m³	重复性 kg/m³	不确定度 kg/m³

校准结果内容结束

- 申明：
- 1. 本实验室仅对加盖“××××校准专用章”的完整证书负责。
 - 2. 本证书提供的结果仅对本次所校仪器有效。
 - 3. 未经本实验室许可，部分采用本证书内容无效。