

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—XXXX

γ 射线密度计校准规范

Calibration Specification for γ -Ray Density Meters

(征求意见稿)

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

γ射线密度计校准规范

Calibration Specification for

JJF XXXX—XXXX

γ-Ray Density Meters

归口单位：全国电离辐射计量技术委员会

主要起草单位：河北省计量监督检测研究院

中国计量科学研究院

参加起草单位：广东省计量科学研究院

中辐兰光技术开发（河北）有限公司

北京锐达仪表有限公司

本规范委托全国电离辐射计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

参加起草人：

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)
5.1 辐射剂量当量率.....	(2)
5.2 密度示值误差.....	(2)
5.3 重复性.....	(2)
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.....	(4)
7.1 校准前的准备.....	(4)
7.2 辐射剂量当量率.....	(4)
7.3 密度示值误差.....	(5)
7.4 重复性.....	(7)
8 校准结果.....	(7)
9 复校时间间隔.....	(8)
附录 A (0~40)℃纯水密度表(不含空气).....	(9)
附录 B γ 射线密度计校准记录推荐格式.....	(11)
附录 C 校准证书内页推荐格式.....	(15)
附录 D 测量结果的不确定度评定示例.....	(16)

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》、JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑校准规范制定工作的基础性系列规范。

本规范中“辐射剂量当量率”计量特性主要参照了GBZ 125《含密封源仪表的放射卫生防护要求》中的内容，“密度示值误差、重复性”计量特性主要参照GB/T 13980《电离辐射密度计》和GB/T 25846《工业用 γ 射线密度计》中的内容。

本规范为首次发布。

γ射线密度计校准规范

1 范围

本规范适用于γ射线密度计的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1035 电离辐射计量术语及定义

JJF 1229 质量密度计量名词术语及定义

GB/T 6682 分析实验室用水规格和试验方法

GB/T 13980 电离辐射密度计

GB/T 25846 工业用γ射线密度计

GBZ 125 含密封源仪表的放射卫生防护要求

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

JJF1001、JJF 1035、JJF 1229、GB/T 13980、GB/T 25846 界定的及以下术语和定义适用于本规范。

3.1 术语

γ射线密度计 γ-Ray Density Meter

一种带有γ射线电离辐射源，并设计成可以利用γ射线电离辐射衰减或反散射的变化，测量均匀物质或多种物质混合物的平均密度的测量仪器。

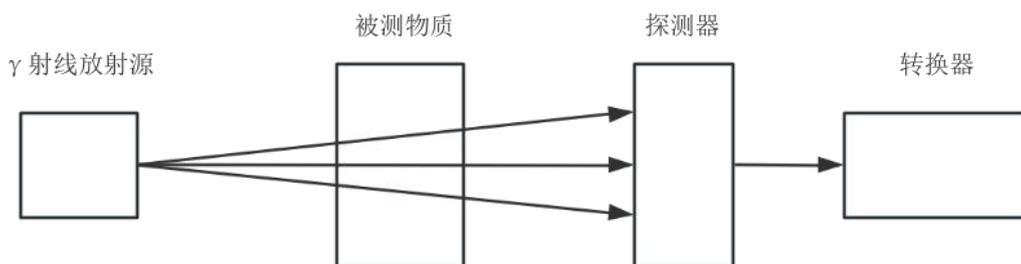
3.2 计量单位

3.2.1 辐射剂量当量率的计量单位名称：希沃特每小时，符号：Sv/h。

3.2.2 密度的计量单位名称：千克每立方米或克每立方厘米，符号：kg/m³或g/cm³。

4 概述

γ射线密度计（以下简称密度计）是一种非接触式放射性密度计，广泛应用于有色金属、非金属矿山、煤炭、冶金、电力、石油化工、生物医药等领域。密度计基于γ射线透射衰减原理工作，通过探测器测量射线穿透介质后的强度变化，计算出物质密度。密度计主要由放射源、探测器和转换器三部分组成。其结构示意图见图1。

图 1 γ 射线密度计结构示意图

5 计量特性

5.1 辐射剂量当量率

源容器的屏蔽性能应使源闸关闭和打开时，距离源容器外表面 5 cm 处的辐射剂量当量率小于 25 $\mu\text{Sv/h}$ 。

5.2 密度示值误差

密度计的准确度等级分 0.5 级和 1.0 级。各等级对应的最大允许误差见表 1。

表 1 各准确度等级对应的最大允许误差

准确度等级	0.5 级	1.0 级
最大允许误差	$\pm 0.5\%FS$	$\pm 1.0\%FS$

5.3 重复性

密度计的重复性不超过最大允许误差的绝对值。

注：以上所有指标不作为合格性判据，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

校准时，环境温度需控制在（10~40） $^{\circ}\text{C}$ ，湿度不大于 80%，无强电磁场干扰，无强烈振动。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 测量标准

校准用测量标准及技术要求见表 2。

表 2 校准用测量标准及技术要求

序号	测量标准名称	技术要求
1	γ 射线剂量当量率仪	符合 γ 辐射防护仪器性能要求，校准因子的扩展不确定度不大于 5.0% ($k=2$)

2	电子天平和玻璃量器	电子天平：实际分度值 1 mg， ① 级 2 kg 标准砝码：E ₂ 等级
		玻璃量器：1000 mL，量入式（In），容量允许误差±5 mL
3	实验室振动式液体密度仪	密度标准物质：不确定度应优于 $U=5 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ ($k=2$)
		实验室振动式液体密度仪：不确定度应优于 $U=1 \text{ kg/m}^3$ ($k=2$)
注：1. 序号“2”和“3”选择其一即可。 2. 使用实验室振动式液体密度仪校准之前用密度标准物质对特定密度范围进行校准。		

6.2.2 校准介质

根据被校密度计测量范围或用户需求选用合适的校准介质。校准介质应清澈、透明、无可见颗粒和纤维等物质。如选用的校准介质具有可燃性及毒性，应注意安全使用及环境污染。不可选用具有腐蚀性（例如强酸碱类）的校准介质。推荐的校准用介质见表 3。

表 3 实验室用校准介质

测量范围/ (kg/m^3)	校准介质名称
(650~800)	石油产品混合液
(810~950)	乙醇水溶液
(950~1050)	纯水
(1450~1650)	四氯乙烯
(1900~2000)	氟油

6.2.3 主要配套设备

主要配套设备及技术要求见表 4。

表 4 主要配套设备及技术要求

设备名称	技术要求
温度计	测量范围 (0~50) °C，分辨力不低于 0.1 °C，最大允许误差不超过±0.2 °C
温湿度表	温度测量范围 (5~50) °C，最大允许误差不超过±2.0 °C 湿度测量范围 (0~90) %RH，最大允许误差不超过±5%RH
钢直尺	测量范围 (0~1000) mm，分度值为 1 mm，全长最大允许误差不超过±0.20 mm

6.2.4 辅助设备及材料

6.2.4.1 清洗液：无水乙醇、石油醚、蒸馏水、洗涤剂等。

6.2.4.2 测量筒、实心玻璃搅拌器数支、玻璃漏斗、烧杯和盛放校准介质的玻璃瓶、量筒等。

6.2.4.3 柔软干净的防静电清洁布、毛巾、绸布、脱脂棉、滤纸等。

6.2.4.4 消防沙桶、灭火器等。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准前的准备

7.1.1 检查密度计外观，密度计应标明规格型号、制造厂、仪器编号、出厂日期。密度计的源容器上应有放射性标记，并符合放射源管理的有关规定。源闸应有锁紧装置，开关位置标记应清晰醒目。密度计紧固件不得松动，各种调节器件应转动灵活，功能正常。

7.1.2 使用柔软干净的防静电清洁布对设备面板、支架等处的污垢、灰尘，进行清洁。

7.1.3 具有校准功能的密度计，按仪器使用说明书进行零点和量程校准。

7.1.4 玻璃量器应清洁干燥，使校准过程中液面能够形成良好的弯月面，并且弯月面在上升或下降过程中不应改变形状，同时内壁上不应残留校准介质。

7.1.5 将电子天平调整到水平位置，接通电源预热达到平衡状态，启动天平的内校或外校功能进行调整。

7.2 辐射剂量当量率

用 γ 射线剂量当量率仪测量距离源容器表面 5 cm 处的剂量当量率，如图 2 所示距装置主体外表面（包括前后及侧面）5 cm 处选择不少于 4 个测量点（位置 1、位置 2、位置 3 和位置 4 为推荐测量点），测量位置均匀分布，每个点位重复测量 10 次，取算术平均值作为该点的测量结果，按公式（1）进行计算。

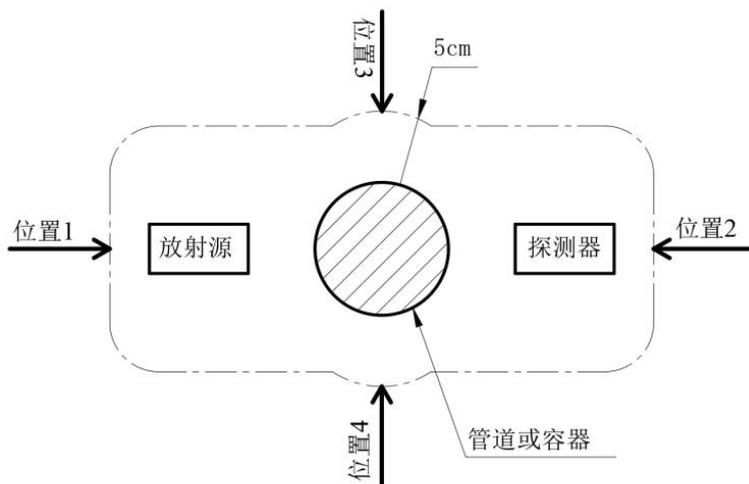


图 2 密度计周围剂量当量率测量示意图

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^{10} \dot{H}_i}{10}$$

式中：

H_i ——被校密度计在 5 cm 处的第 i 次辐射剂量当量率测量值， $\mu\text{Sv/h}$ ；

\bar{H} ——被校密度计在 5 cm 处的辐射剂量当量率平均值， $\mu\text{Sv/h}$ ；

7.3 密度示值误差

7.3.1 电子天平和玻璃量器校准法

1) 接通密度计电源，根据仪器说明书的要求进行预热。

2) 管道内通入介质，待介质混合均匀、运行稳定后开始进行测量。

3) 待电子天平显示稳定，按下操作键使电子天平去皮，将玻璃量器放入电子天平秤盘中心的位置，记录玻璃量器空瓶质量值 m_0 。

4) 待被校密度计示值稳定后，开始记录数据，同时从管道取样口进行取样，并注入玻璃量器中，调整介质弯月面的最低点与 1000 mL 刻线上缘水平面相切，如果有气泡，需将气泡排出，将取好样的玻璃量器放入电子天平秤盘中心的位置，待电子天平显示稳定后，记录质量值 m_i 。将玻璃量器中介质倒掉，洗净并擦干，进行下一组取样，记录质量值 m_i ，共记录 3 组。

测量完成后，按公式(2)～(5)计算密度计示值误差。

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^3 \rho_i}{3} \quad (2)$$

$$\bar{\rho}_s = \frac{\sum_{i=1}^3 (m_i - m_0)}{3 \times V} \times 1000 \quad (3)$$

$$\Delta\rho = \bar{\rho} - \bar{\rho}_s \quad (4)$$

$$E = \frac{\Delta\rho}{\rho_{FS}} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

ρ_i ——第 i 次测量时被校密度计的示值， kg/m^3 ；

$\bar{\rho}$ ——被校密度计 3 次示值的平均值， kg/m^3 ；

m_i ——第 i 次测量时电子天平示值，g；

V ——玻璃量器容量值，取 1000 mL；

$\bar{\rho}_s$ ——密度标准值， kg/m^3 ；

ρ_{FS} ——被校密度计的满量程， kg/m^3 ；

$\Delta\rho$ ——被校密度计绝对示值误差， kg/m^3 ；

E ——被校密度计相对示值误差，%FS；

7.3.2 实验室振动式液体密度仪校准法

校准前使用与校准介质密度值接近的密度标准物质对实验室振动式液体密度仪进行校准。

1) 将校准介质倒入测量筒，校准介质应上下搅拌均匀，搅拌器底部不能露出液面，以免带入气泡。

2) 将密度计的放射源和探测器放置在测量筒两侧，校准介质需完全浸没 γ 射线，放置示意图如图3所示。

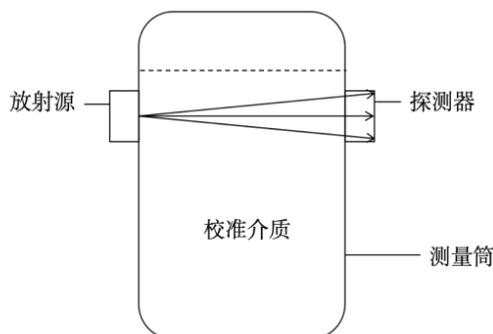


图3 密度计放置示意图

3) 接通密度计电源，并根据仪器使用说明书的要求进行预热。测量过程中保持探测器和放射源稳定，严禁摇晃。等待测量数据稳定，记录被校密度计显示的密度值，共测量3次。同时用温度计标准器测量校准介质的温度。

4) 将实验室振动式液体密度仪的温度设定为校准介质温度，抽取测量筒内液体，如果有气泡，需将气泡排出。待温度稳定后，记录实验室振动式液体密度仪的示值，重复测量3次。

5) 测量完成后，按公式(6)~(9)计算密度计示值误差。

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{j=1}^3 \rho_j}{3} \quad (6)$$

$$\bar{\rho}_s = \frac{\sum_{j=1}^3 \rho_{s,j}}{3} \quad (7)$$

$$\Delta\rho = \bar{\rho} - \bar{\rho}_s \quad (8)$$

$$E = \frac{\Delta\rho}{\rho_{FS}} \times 100\% \quad (9)$$

式中：

ρ_j ——第 j 次测量时被校密度计的示值， kg/m^3 ；

$\bar{\rho}$ ——被校密度计 3 次示值的平均值， kg/m^3 ；

$\rho_{s,j}$ ——第 j 次测量时实验室振动式液体密度计示值， kg/m^3 ；

$\bar{\rho}_s$ ——实验室振动式液体密度计 3 次示值的平均值， kg/m^3 ；

ρ_{FS} ——被校密度计的满量程， kg/m^3 ；

$\Delta\rho$ ——被校密度计绝对示值误差， kg/m^3 ；

E ——被校密度计相对示值误差，%FS；

6) 更换校准介质，重复 1) ~ 5)，直至完成所有密度点的校准。

7.4 重复性

根据所选用的测量方法，对被校密度计每一校准点连续测量至少 10 次，单次测量标准偏差与其量程之比，按公式 (10) 计算重复性。

$$s = \frac{1}{\rho_{FS}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2}{n-1}} \times 100\% \quad (10)$$

s ——被校密度计重复性，%；

ρ_{FS} ——被校密度计的满量程， kg/m^3 ；

ρ_i ——该校准点第 i 次测量时被校密度计的示值， kg/m^3 ；

$\bar{\rho}$ ——该校准点被校密度计测量平均值， kg/m^3 ；

n ——测量次数， $n \geq 10$ ；

8 校准结果

校准结果应在校准证书上反映。校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；

- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- 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，应说明被校对象和接收日期；
- h) 如果与校准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和标识，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说明。

9 复校时间间隔

γ 射线密度计复校时间间隔建议为 12 个月。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。

附录 A

(0~40)°C纯水密度表 (不含空气)

表 A (0~40)°C纯水密度表 (不含空气)

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	9.850	9.856	9.862	9.869	9.874	9.880	9.886	9.891	9.897
1	999.902	9.907	9.911	9.916	9.920	9.924	9.928	9.932	9.936	9.940
2	999.943	9.946	9.949	9.952	9.955	9.957	9.959	9.962	9.964	9.965
3	999.967	9.969	9.970	9.971	9.972	9.973	9.974	9.974	9.975	9.975
4	999.975	9.975	9.975	9.974	9.974	9.973	9.972	9.971	9.970	9.968
5	999.967	9.965	9.963	9.961	9.959	9.957	9.954	9.952	9.949	9.946
6	999.943	9.940	9.937	9.933	9.929	9.926	9.922	9.918	9.913	9.909
7	999.904	9.900	9.895	9.890	9.885	9.880	9.874	9.869	9.863	9.857
8	999.851	9.845	9.839	9.833	9.826	9.819	9.813	9.806	9.798	9.791
9	999.784	9.776	9.769	9.761	9.753	9.745	9.737	9.728	9.720	9.711
10	999.703	9.694	9.685	9.676	9.666	9.657	9.648	9.638	9.628	9.618
11	999.608	9.598	9.588	9.577	9.567	9.556	9.545	9.534	9.523	9.512
12	999.500	9.489	9.477	9.466	9.454	9.442	9.430	9.418	9.405	9.393
13	999.380	9.367	9.355	9.342	9.329	9.315	9.302	9.289	9.275	9.261
14	999.247	9.233	9.219	9.205	9.191	9.176	9.162	9.147	9.132	9.118
15	999.103	9.087	9.072	9.057	9.041	9.026	9.010	8.994	8.978	8.962
16	998.946	8.930	8.913	8.897	8.880	8.863	8.846	8.829	8.812	8.795
17	998.778	8.760	8.743	8.725	8.707	8.689	8.671	8.653	8.635	8.617
18	998.598	8.580	8.561	8.542	8.523	8.505	8.485	8.466	8.447	8.427
19	998.408	8.388	8.369	8.349	8.329	8.309	8.288	8.268	8.248	8.227

表 A (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
20	998.207	8.186	8.165	8.144	8.123	8.102	8.081	8.060	8.038	8.017
21	997.995	7.973	7.951	7.929	7.907	7.885	7.863	7.841	7.818	7.796
22	997.773	7.750	7.727	7.704	7.681	7.658	7.635	7.612	7.588	7.564
23	997.541	7.517	7.493	7.469	7.445	7.421	7.397	7.372	7.348	7.323
24	997.299	7.274	7.249	7.224	7.199	7.174	7.149	7.124	7.098	7.073
25	997.047	7.021	6.996	6.970	6.944	6.918	6.891	6.865	6.839	6.812
26	996.786	6.759	6.732	6.706	6.679	6.652	6.624	6.597	6.570	6.543
27	996.515	6.488	6.460	6.432	6.404	6.376	6.348	6.320	6.292	6.264
28	996.235	6.207	6.178	6.150	6.121	6.092	6.063	6.034	6.005	5.976
29	995.946	5.917	5.888	5.858	5.828	5.799	5.769	5.739	5.709	5.679
30	995.649	5.619	5.588	5.558	5.527	5.497	5.466	5.435	5.404	5.373
31	995.342	5.311	5.280	5.249	5.217	5.186	5.154	5.123	5.091	5.059
32	995.027	4.996	4.963	4.931	4.899	4.867	4.834	4.802	4.769	4.737
33	994.704	4.671	4.638	4.605	4.572	4.539	4.506	4.473	4.439	4.406
34	994.372	4.339	4.305	4.271	4.237	4.204	4.170	4.135	4.101	4.067
35	994.033	3.998	3.964	3.929	3.894	3.860	3.825	3.790	3.755	3.720
36	993.685	3.650	3.614	3.579	3.543	3.508	3.472	3.437	3.401	3.365
37	993.329	3.293	3.257	3.221	3.184	3.148	3.112	3.075	3.039	3.002
38	992.965	2.929	2.892	2.855	2.818	2.781	2.744	2.706	2.669	2.632
39	992.594	2.557	2.519	2.481	2.443	2.406	2.368	2.330	2.292	2.253
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										

附录 B

 γ 射线密度计校准记录推荐格式

共 页 第 页

B.1 电子天平和玻璃量器校准法原始记录格式

客户名称			
客户地址			
仪器名称		证书编号	
仪器型号		环境温度	
仪器编号		环境湿度	
生产厂家		校准员	
测量范围		核验员	
其他		校准日期	
校准依据			
校准地点			

校准使用的计量标准装置

名称	测量范围	不确定度/准确度等级/ 最大允许误差	计量标准证书号	有效期至

校准使用的主要计量标准器

名称	规格 型号	测量 范围	出厂编号 / 设备编号	不确定度/准 确度等级/最 大允许误差	证书编号	有效期至	上级溯源 机构名称

1. 外观检查

密度计放射源种类:

密度计的源容器上有放射性标记符合规定 是 否 源闸有锁紧装置 是 否 密度计紧固件不松动, 各种调节器件转动灵活, 功能正常 是 否

2. 辐射剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

源闸状态	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4
打开				
平均值				
扩展不确定度				
关闭				
平均值				
扩展不确定度				

3. 密度示值误差

被校仪器		标准器示值		示值误差	扩展不定度	校准介质	校准介质温度
示值	平均值	质量	密度				

4. 重复性

被校仪器示值 ()										平均值 ()	重复性 ()

B.2 实验室振动式液体密度仪校准法原始记录格式

客户名称			
客户地址			
仪器名称		证书编号	
仪器型号		环境温度	
仪器编号		环境湿度	
生产厂家		校准员	
测量范围		核验员	
其他		校准日期	
校准依据			
校准地点			

校准使用的计量标准装置

名称	测量范围	不确定度/准确度等级/ 最大允许误差	计量标准证书号	有效期至

校准使用的主要计量标准器

名称	规格 型号	测量 范围	出厂编号 / 设备编号	不确定度/准 确度等级/最 大允许误差	证书编号	有效期至	上级溯源 机构名称

1. 外观检查

密度计放射源种类:

密度计的源容器上有放射性标记符合规定 是 否

源闸有锁紧装置 是 否

密度计紧固件不松动, 各种调节器件转动灵活, 功能正常 是 否

2. 辐射剂量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

源闸状态	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4
打开				
平均值				
扩展不确定度				
关闭				
平均值				
扩展不确定度				

3. 密度示值误差

被校仪器		实验室振动式液体密度仪		示值误差	扩展不确定度	校准介质	校准介质温度
示值	平均值	示值	平均值				

4. 重复性

被校仪器示值 ()										平均值 ()	重复性 ()

附录 C

校准证书内页推荐格式

1. 辐射剂量当量率:

源闸状态	实测值			
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4
打开				
关闭				

2. 密度示值误差:

标准值 ()	被校仪器示值 ()	示值误差 ()	扩展不确定度 $U(k=2)$ ()

3. 重复性:

校准点 ()	重复性 ()

附录 D

测量结果的不确定度评定示例

D.1 辐射剂量当量率测量结果的不确定度评定

以北京锐达仪表有限公司型号为NRD3000Na22的辐射测量为例，对辐射测量结果作不确定度评定。

D.1.1 测量依据：JJF XXXX—XXXX 《γ射线密度计校准规范》

D.1.2 测量标准

γ射线剂量当量率仪：校准因子扩展不确定度 $U_{rel}=4.5\%$ ($k=2$)。

D.1.3 测量对象及方法

γ射线密度计设置在正常工作条件，在源闸打开时距离源容器表面 5cm 处，用 γ 射线剂量当量率仪进行辐射剂量当量率的测量。

D.1.4 数学模型

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^{10} \dot{H}_i}{10} \quad (\text{D.1})$$

式中：

\dot{H}_i ——被校密度计在 5 cm 处的第 i 次辐射剂量当量率测量值， $\mu\text{Sv/h}$ ；

\bar{H} ——被校密度计在 5 cm 处的辐射剂量当量率平均值， $\mu\text{Sv/h}$ ；

D.1.5 输入量 H_i 的标准不确定度

输入量 H_i 的标准不确定度包括仪器测量重复性引入的标准不确定度 u_1 和 γ 射线剂量当量率仪引入的标准不确定度 u_2 。前者可以通过连续测量得到测量列，采用 A 类方法评定，后者可以根据仪器证书给出的扩展不确定度，采用 B 类方法评定。

D.1.5.1 测量重复性引入的标准不确定度 u_1

在相同条件下，使用 γ 射线剂量当量率仪测量源闸打开时距离源容器表面 5 cm 处相同位置的辐射剂量当量率，得到测量结果如表 D.1。

表 D.1

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值(μSv/h)	3.17	3.18	3.15	3.03	3.14	3.12	3.11	3.1	3.04	3.09
平均值(μSv/h)	3.113				标准偏差 s(μSv/h)			0.050		

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{10}} = 0.02\mu\text{Sv/h} \quad (\text{D. 2})$$

D.1.5.2 γ射线剂量当量率仪引入的标准不确定度 u_2

由γ射线剂量当量率仪的证书得到其相对扩展不确定度为 $U_{\text{rel}}=4.5\%$ ($k=2$)，由此得：

$$u_2 = \frac{4.5\% \times \bar{H}}{2} = 0.07\mu\text{Sv/h} \quad (\text{D. 4})$$

D.1.6 合成标准不确定度 $u(H)$

合成标准不确定度为：

$$u(H) = \sqrt{0.02^2 + 0.07^2} = 0.08\mu\text{Sv/h} \quad (\text{D. 5})$$

D.1.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U=0.16 \mu\text{Sv/h}, k=2$$

D.2 密度示值误差测量结果的不确定度评定（电子天平与玻璃量器校准法）

D.2.1 测量依据：JJF XXXX—XXXX 《γ射线密度计校准规范》

D.2.2 测量标准见表 D.2。

表 D.2 校准用测量标准

测量标准	技术性能
电子天平和玻璃量器	玻璃量器：1000 mL，量入式（In），最大允许误差：±5 mL 电子天平：分度值 1 mg，最大允许误差±15 mg 2 kg 标准砝码：E ₂ 等级

D.2.3 测量对象及方法

按照本规范选用纯水作为校准介质测得γ射线密度计的示值误差。

D.2.4 测量模型

$$\Delta\rho = \bar{\rho} - \bar{\rho}_s \quad (\text{D. 6})$$

式中：

$\Delta\rho$ ——被校密度计在该测量点的示值误差， kg/m^3 ；

$\bar{\rho}$ ——被校密度计 3 次示值的平均值， kg/m^3 ；

$\bar{\rho}_s$ ——密度标准值， kg/m^3 ；

D. 2. 5 输入量的标准不确定度评定

D. 2. 5. 1 输入量 $\bar{\rho}$ 的标准不确定度评定

D. 2. 5. 1. 1 被校密度计测量重复性引入的不确定度 u_1

通过连续测量得到测量列，采用 A 类方法进行评定。实际测量时连续三次测量得到测得值，可得到标准不确定度如表 D. 3。

表 D. 3

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 (kg/m^3)	991	996	998	992	995	997	995	997	998	994
平均值 (kg/m^3)	995.3									

使用贝塞尔公式计算标准偏差：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2}{n-1}} = 2.41 \text{kg/m}^3 \quad (\text{D. 7})$$

则该测量结果的标准不确定度为：

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{3}} = 1.40 \text{kg/m}^3 \quad (\text{D. 8})$$

D. 2. 5. 1. 2 被校密度计仪器分辨力引入的不确定度 u_2

被校密度计分辨力 δ_1 为 1 kg/m^3 ，因此由分辨力引入的不确定度分量为：

$$u_2 = \frac{\delta_1}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \text{kg/m}^3 = 0.29 \text{kg/m}^3 \quad (\text{D. 9})$$

D. 2. 5. 2 输入量 $\bar{\rho}_s$ 的标准不确定度评定

输入量 $\bar{\rho}_s$ 的标准不确定度主要取决于重复性，电子天平最大允许误差，标准砝码最大允许误差，玻璃量器容量允许误差，读数误差。

D. 2. 5. 2. 1 重复性引入的标准不确定度 u_3

电子天平测量同一纯水质量值所得 10 次结果如表 D. 4。

表 D.4

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 (g)	997.359	998.478	999.789	998.355	997.932	997.416	998.477	998.517	999.622	998.225
平均值 (g)	998.4170									

实际测量时连续三次测量得到测得值，根据贝塞尔公式计算测量重复性引入的标准不确定度为：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}{n-1}} = 0.7992\text{g} \quad (\text{D. 10})$$

$$u_3 = \frac{s}{\sqrt{3}} = 0.4614\text{g} \quad (\text{D. 11})$$

D. 2. 5. 2. 2 电子天平最大允许误差引入的标准不确定度 u_4

电子天平最大允许误差为 $\pm 15\text{mg}$ ，按均匀分布计算，则：

$$u_4 = \frac{0.015\text{g}}{\sqrt{3}} = 0.0087\text{g} \quad (\text{D. 12})$$

D. 2. 5. 2. 3 标准砝码最大允许误差引入的标准不确定度 u_5

标准砝码最大允许误差为 $\pm 5.0 \text{ mg}$ ，按均匀分布计算，则：

$$u_5 = \frac{0.005\text{g}}{\sqrt{3}} = 0.0029\text{g} \quad (\text{D. 13})$$

D. 2. 5. 2. 4 玻璃量器最大允许误差引入的标准不确定度 u_6

玻璃量器最大允许误差为 $\pm 5 \text{ mL}$ ，按三角分布计算，则：

$$u_6 = \frac{5\text{mL}}{\sqrt{6}} = 2.0412\text{mL} \quad (\text{D. 14})$$

D. 2. 5. 2. 5 读数误差引入的标准不确定度 u_7

根据经验估算，由读数引入的标准不确定度为：

$$u_7 = 1.15\text{mL} \quad (\text{D. 15})$$

根据公式

$$\frac{u(\rho_s)}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(V)}{V}\right)^2} \quad (\text{D. 16})$$

代入数据，得 $u(\rho_s) = 2.39 \text{ kg/m}^3$ 。

D. 2.6 合成标准不确定度

合成标准不确定度如表 D. 5。

表 D. 5

不确定度符号	不确定度来源	标准不确定度值 (kg/m^3)
u_1	被校密度计测量重复性	1.40
u_2	被校密度计分辨力	0.29
$u(\rho_s)$	电子天平重复性	2.39
	标准砝码最大允许误差	
	电子天平最大允许误差	
	玻璃量器最大允许误差	
	读数误差	

取 u_1 、 u_2 中较大者进行合成，输入量引入的合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u(\rho_s)^2} = 3 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{D. 17})$$

D. 2.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，即 $U=2 \times 3 \text{ kg/m}^3 = 6 \text{ kg/m}^3$ 。

D. 3 密度示值误差测量结果的不确定度评定（实验室振动式液体密度仪校准法）

D. 3.1 测量依据：JJF XXXX—XXXX 《 γ 射线密度计校准规范》

D. 3.2 测量标准见表 D. 6。

表 D. 6 校准用测量标准

测量标准	技术性能	
	超纯水	标准值：998.204 kg/m^3
实验室振动式液体密度仪	分辨力：0.1 kg/m^3	

D. 3.3 测量对象及方法

按照本规范选用的标准物质为超纯水，标准值为 998.204 kg/m^3 ，扩展不确定度为 0.020 kg/m^3 。对实验室振动式液体密度仪进行校准后，按照本规范选用纯水作为校准介质测得 γ 射线密度计的示值误差。

D. 3.4 测量模型

$$\Delta\rho = \bar{\rho} - \bar{\rho}_s \quad (\text{D. 18})$$

式中：

$\Delta\rho$ ——被校密度计在该测量点的示值误差， kg/m^3 ；

$\bar{\rho}$ ——被校密度计 3 次示值的平均值， kg/m^3 ；

$\bar{\rho}_s$ ——实验室振动式液体密度仪 3 次示值的平均值， kg/m^3 ；

D. 3. 5 输入量的标准不确定度评定

D. 3. 5. 1 输入量 $\bar{\rho}$ 的标准不确定度评定

D. 3. 5. 1. 1 被校密度计测量重复性引入的不确定度 u_1

通过连续测量得到测量列，采用 A 类方法进行评定。实际测量时连续三次测量得到测得值，可得到标准不确定度如表 D. 7。

表 D. 7

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 (kg/m^3)	991	996	998	992	995	997	995	997	998	994
平均值 (kg/m^3)	995.3									

使用贝塞尔公式计算标准偏差：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2}{n-1}} = 2.41 \text{kg/m}^3 \quad (\text{D. 19})$$

则该测量结果的标准不确定度为：

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{3}} = 1.40 \text{kg/m}^3 \quad (\text{D. 20})$$

D. 3. 5. 1. 2 被校密度计仪器分辨力引入的不确定度 u_2

被校密度计分辨力 δ_1 为 1 kg/m^3 ，因此由分辨力引入的不确定度分量为：

$$u_2 = \frac{\delta_1}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \text{kg/m}^3 = 0.29 \text{kg/m}^3 \quad (\text{D. 21})$$

D. 3. 5. 2 输入量 $\bar{\rho}_s$ 的标准不确定度评定

输入量 $\bar{\rho}_s$ 的标准不确定度主要取决于密度标准物质定值时标准不确定度 u_3 ，实验室振动式液体密度仪测量重复性带来的标准不确定度 u_4 ，实验室振动式液体密度仪

读数分辨率带来的标准不确定度 u_5 ，校准介质温度波动时引入的不确定度分量 u_6 。

D.3.5.2.1 密度标准物质引入的不确定度 u_3

密度标准物质的扩展不确定度 $U=2.0 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ ， $k=2$ ，则：

$$u_3 = 0.01 \text{ kg/m}^3$$

D.3.5.2.2 实验室振动式液体密度仪测量重复性引入的不确定度分量 u_4

选用纯水测得 10 次测量值见表 D.8。

表 D.8

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 (kg/m^3)	998.1	998.2	998.2	998.2	998.3	998.4	998.4	998.5	998.6	998.2
平均值 (kg/m^3)	998.3									

实际测量时连续三次测量得到测得值，根据贝塞尔公式计算测量重复性引入的标准不确定度为：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_{si} - \bar{\rho}_s)^2}{n-1}} = 0.16 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{D.22})$$

$$u_4 = \frac{s}{\sqrt{3}} = 0.09 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{D.23})$$

D.3.5.2.3 实验室振动式液体密度仪分辨力引入的不确定度分量 u_5

实验室振动式液体密度仪分辨力 δ_2 为 0.1 kg/m^3 ，因此由分辨力引入的不确定度分量为：

$$u_5 = \frac{\delta_2}{2\sqrt{3}} = \frac{0.1}{2\sqrt{3}} \text{ kg/m}^3 = 0.03 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{D.24})$$

D.3.5.2.4 校准介质温度波动时引入的不确定度分量 u_6

在校准过程中，温度波动为 $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ，按每变化 $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 导致的密度变化约为 0.21 kg/m^3 ，按均匀分布，将其换算成密度则为：

$$u_6 = \frac{0.21 \times 0.2}{\sqrt{3}} = 0.02 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{D.25})$$

D.3.5.3 标准不确定度一览表见表 D.9

表 D.9

不确定度符号	不确定度来源	标准不确定度值 (kg/m ³)
u_1	被校密度计测量重复性	1.40
u_2	被校密度计分辨力	0.29
u_3	密度标准物质	0.01
u_4	实验室振动式液体密度仪测量重复性	0.09
u_5	实验室振动式液体密度仪分辨力	0.03
u_6	校准介质温度波动	0.02

D.3.6 合成标准不确定度

取 u_1 、 u_2 中较大者进行合成，取 u_4 、 u_5 中较大者进行合成，输入量引入的合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_6^2} = 1.5 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{D. 26})$$

D.3.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，即 $U=2 \times 1.5 \text{ kg/m}^3 \approx 3 \text{ kg/m}^3$ 。