

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2164—2024

在线振动管液体密度计校准规范

Calibration Specification for On-line 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

在线振动管液体密度计

校准规范

Calibration Specification for On-line

Oscillation-type Liquid Density Meters

JJF 2164—2024

代替 JJG 370—2019

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

上海市质量监督检验技术研究院

参加起草单位：国家石油天然气大流量计量站

艾默生过程控制有限公司

中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司

新疆维吾尔自治区计量测试研究院

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：

张竞月（中国计量科学研究院）

李占宏（中国计量科学研究院）

侯学青（上海市质量监督检验技术研究院）

参加起草人：

陈 亮（国家石油天然气大流量计量站）

孟荟滨（艾默生过程控制有限公司）

钟新荣（中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司）

许德福（新疆维吾尔自治区计量测试研究院）



目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 计量单位	(1)
4 概述	(1)
4.1 工作原理	(1)
4.2 组成	(1)
5 计量特性	(2)
5.1 示值误差	(2)
5.2 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	(3)
7.1 校准项目	(3)
7.2 校准方法	(4)
8 校准结果表达	(6)
9 复校时间间隔	(6)
附录 A 压力密度瓶法	(7)
附录 B 标准在线液体密度计法	(9)
附录 C 仪表系数测量及计算	(10)
附录 D (18~26)℃钨酸钠水溶液密度温度系数表	(12)
附录 E (0~40)℃纯水密度表 (不含空气)	(13)
附录 F 油品压缩系数 F 表	(15)
附录 G 钨酸钠水溶液毛细常数表	(17)
附录 H 水压缩系数 F_w 表	(18)
附录 J 空气密度计算公式	(19)
附录 K 校准记录	(21)
附录 L 校准证书内页格式	(22)
附录 M 在线振动管液体密度计校准结果不确定度评定示例	(23)

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》共同构成支撑本规范修订工作的基础性系列规范。

本规范的历次发布情况为：

JJG 370—2019；

JJG 370—2007；

JJG 370—1984。



在线振动管液体密度计校准规范

1 范围

本规范适用于在线振动管液体密度计（以下简称在线密度计）的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 42 工作玻璃浮计

JJG 86 标准玻璃浮计

JJF 1229 质量密度计量名词术语及定义

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）

ISO 15212-2 振动型密度仪 第2部分：均质液体使用的过程测量仪器（Oscillation-type density meters—Part 2: Process instruments for homogeneous liquids）

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 计量单位

采用的计量单位有：千克每立方米（ kg/m^3 ）、克每立方厘米（ g/cm^3 ）、摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）、兆帕（ MPa ）、微秒（ μs ）。

4 概述

4.1 工作原理

在线液体密度计是一种用于连续在线测量液体密度的设备。利用振动管谐振周期随流经其内部液体密度变化而发生改变的原理，通过测量谐振周期信号及其他相关物理量来实时获得液体密度。在常压状态下，在线密度计的密度值可表述为：

$$\begin{aligned}\rho &= f(k_i, T, t) \\ &= k_0 + k_1 T + k_2 T^2\end{aligned}\quad (1)$$

式中：

ρ ——在线密度计的密度值， kg/m^3 ；

k_i ——在线密度计的系数， $i=0, 1, 2$ ；

T ——密度计输出振动谐振周期， μs ；

t ——液体温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

4.2 组成

在线密度计一般由振动管、激振模块、拾振模块、温度测量模块和显示模块组成。

5 计量特性

5.1 示值误差

在线密度计准确度等级分为 0.1 级、0.2 级、0.5 级、1.0 级和 2.0 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	0.1 级	0.2 级	0.5 级	1.0 级	2.0 级
最大允许误差(kg/m ³)	±0.1	±0.2	±0.5	±1.0	±2.0

5.2 重复性

在线密度计重复性建议不超过最大允许误差绝对值的 1/3。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 温度：20℃±5℃。

6.1.2 相对湿度：20%~80%。

6.1.3 实验室无明显机械振动和磁场影响。

6.1.4 校准液体若为可燃性液体，校准装置及辅助设备和场地应满足安全防爆要求。

6.1.5 校准时应避免与在线密度计工作频率接近的其他干扰。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 测量标准

校准时所用的测量标准可以为液体密度有证标准物质与台式振动管密度仪或一等标准密度计组。测量标准应进行有效溯源，主要技术指标见表 2。

表 2 校准用测量标准

测量标准	技术要求
液体密度有证标准物质与台式振动管密度仪	液体密度有证标准物质： 密度范围(650~1 000) kg/m ³ ，扩展不确定度≤0.020 kg/m ³ (k=2)； 密度范围>(1 000~2 000) kg/m ³ ，扩展不确定度≤0.033 kg/m ³ (k=2)
	台式振动管密度仪： 扩展不确定度≤0.050 kg/m ³ (k=2)，适用于 0.1~2.0 级； 扩展不确定度≤0.10 kg/m ³ (k=2)，适用于 0.5~2.0 级
一等标准密度计组	一等标准密度计组： 密度范围(650~1 500) kg/m ³ ，适用于 0.2~2.0 级； 扩展不确定度≤0.08 kg/m ³ (k=2)

6.2.2 校准介质

校准介质物理化学性质应均匀稳定，无颗粒和纤维等物质，校准介质黏度一般小于 5 mPa·s。

表3列出推荐的校准用介质。空气、纯水、油品和钨酸钠溶液的相关参数见附录D~附录J。

表3 校准用介质（按20℃密度排序）

序号	密度 kg/m ³	介质	序号	密度 kg/m ³	介质
1	1.2	空气	5	830~950	乙醇水溶液
2	650~750	石油产品混合液	6	998	纯水
3	757	十三烷	7	1 410	钨酸盐溶液
4	830	航空煤油	8	其他均质液体	

6.2.3 主要配套设备

主要配套设备列于表4。

表4 主要配套设备

设备名称	技术要求
温度计	测量范围(0~50)℃,扩展不确定度 ≤ 0.02 ℃($k=2$)
频率计 (电子计数器)	测量范围100 Hz~1 MHz,灵敏度不低于20 mV,扩展不确定度 $\leq 2 \times 10^{-7}$ Hz($k=2$)
温湿度表	温度:测量范围(5~50)℃,最大允许误差 ± 2.0 ℃; 相对湿度:测量范围0~85%,最大允许误差 $\pm 5\%$ (20℃)
压力校验仪 (数字压力计)	加压范围(0~3) MPa,准确度等级不低于0.05级

6.2.4 辅助设备

- 1) 恒温槽,控温范围(10~50)℃,温度波动性 ≤ 0.03 ℃/10 min;
- 2) 空气压缩机。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目列于表5。

表5 校准项目一览表

序号	校准项目
1	示值误差
2	重复性

7.2 校准方法

7.2.1 校准前的准备

7.2.1.1 外观检查

在线密度计应外观良好，密封面平整无损伤，表面涂镀层均匀，不得有裂纹、锈蚀和剥落等现象；

在线密度计的焊接处应光滑平整，不得有损伤；

在线密度计的接插件等电气连接应牢固可靠，不得松动或脱落；

在线密度计显示的字母、数字及符号应清晰整齐。

7.2.1.2 清洗

在线密度计振动管内壁不得附着任何异物。若振动管内壁有油污残留，应先用合适的溶剂清洗，再用酒精、纯水清洗，最后使用空气压缩机进行吹干。

7.2.1.3 安装

在线密度计应按照使用说明书进行安装。

7.2.2 校准装置

校准方法优先采用密度计法，也可选用压力密度瓶法及标准在线液体密度计法。压力密度瓶法及标准在线液体密度计法参见附录 A、附录 B。

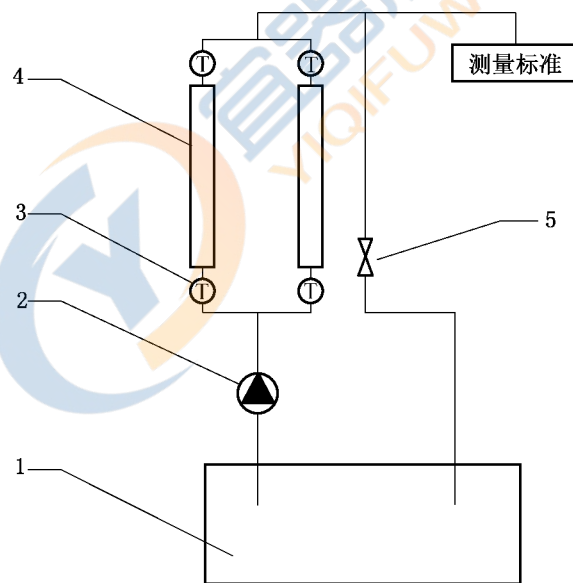


图1 校准装置示意图

1—恒温槽；2—泵；3—温度传感器；4—被测密度计；5—阀门

7.2.3 校准程序

校准程序如下：

a) 在线密度计通电稳定后，开启循环系统使校准介质进入在线密度计循环，排出校准装置中积存的气体，对循环系统和校准介质进行恒温。

b) 在标准温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和常压条件下，将不同的校准介质依次在校准装置中循环，推荐流速范围 $(1\sim 1.5)\text{ m/s}$ 。

c) 当在线密度计内介质温度稳定在 $(20\pm 0.02)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，记录在线密度计输出谐振

周期 T 或密度相关的其他信号（如密度 ρ 或频率 f ），同时记录在线密度计进口端与出口端温度计示值 t_i 、 t_o 。

d) 用台式振动管密度仪或一等标准密度计组测量相同温度条件下校准介质的标准密度 ρ_{ref} ，用一等标准密度计组测量液体密度时需记录液体温度 t_{hr} 。

e) 若需在 $(10 \sim 50)^\circ\text{C}$ 的工况温度条件下校准，按上述步骤进行。当在线密度计内介质温度稳定在 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 以内时，记录数据。

7.2.4 计算方法

a) 使用台式振动管密度仪测量结果的平均值作为标准密度 ρ_{ref} ，测量次数不低于 3 次。

b) 使用一等标准密度计组（玻璃浮计）校准的数据计算如下。

密度计示值应考虑以下几项修正：

1) 玻璃浮计的标准温度为 20°C ，当测量液体温度值 t_{hr} （单位为 $^\circ\text{C}$ ）不等于 20°C 时应对示值进行温度修正，温度修正值 $\Delta\rho_{t1}$ 的计算见式（2）。

$$\Delta\rho_{t1} = \rho_a \cdot \beta \cdot (20 - t_{\text{hr}}) \quad (2)$$

式中：

$\Delta\rho_{t1}$ ——玻璃浮计的温度修正值；

ρ_a ——浮计测量液体的密度值；

β ——玻璃的体膨胀系数 $2.5 \times 10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$ 。

2) 当 t_i 、 t_o 的平均值 $\bar{t}_1 \neq t_{\text{hr}}$ 时，对 ρ_a 进行修正，温度修正值 $\Delta\rho_{t2}$ 的计算见式（3）。

$$\Delta\rho_{t2} = r \cdot (t_{\text{hr}} - \bar{t}_1) \quad (3)$$

式中：

$\Delta\rho_{t2}$ ——玻璃浮计的温度修正值；

r ——液体的密度温度系数， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

3) 如果所用液体与玻璃浮计的工作用液不同时，需要对 ρ_a 对进行毛细常数修正，即

$$\Delta\rho_a = \frac{(a_2 - a_1) \cdot \pi \cdot D \cdot \rho^2}{M} \times 1\,000 \quad (4)$$

式中：

$\Delta\rho_a$ ——玻璃浮计毛细常数修正值， kg/m^3 ；

a_1 ——证书上给出工作用液的毛细常数， mm^2 ；

a_2 ——被测液体的毛细常数， mm^2 ；

π ——圆周率，取 3.14；

D ——被修正密度计所测点的干管平均直径， mm ；

ρ ——液体密度， g/cm^3 ；

M ——密度计质量， mg 。

4) 玻璃浮计按上缘读取示值时，则应考虑上下缘读数之差的修正量 $\Delta\rho_s$ 。

5) 玻璃浮计的修正值 $\Delta\rho$ 。

6) 玻璃浮计测得液体的标准密度为：

$$\rho_{\text{ref}} = \rho_a + \Delta\rho_{t1} + \Delta\rho_{t2} + \Delta\rho_a + \Delta\rho_s + \Delta\rho \quad (5)$$

c) 示值误差的计算

在线密度计各校准点的示值误差按式 (6) 计算。

$$\bar{\rho} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i \quad (6)$$

$$\bar{\rho}_{\text{ref}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \rho_{\text{ref}j} \quad (7)$$

$$E = \bar{\rho} - \bar{\rho}_{\text{ref}} \quad (8)$$

式中：

E ——示值误差， kg/m^3 ；

$\bar{\rho}$ ——被测在线密度计示值的平均值， kg/m^3 ；

ρ_i ——第 i 次被测在线密度计示值， kg/m^3 ；

$\bar{\rho}_{\text{ref}}$ ——液体密度测量标准值的平均值， kg/m^3 ；

$\rho_{\text{ref}j}$ ——第 j 次液体密度测量标准值， kg/m^3 ；

m, n ——测量次数， $m \geq 3, n \geq 6$ 。

d) 重复性

在线密度计各校准点的重复性 s 按式 (9) 计算。

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\rho_i - \bar{\rho})^2}{n-1}} \quad (9)$$

8 校准结果表达

经校准后的在线密度计应出具校准证书，校准结果应包括在线密度计的示值误差、重复性及扩展不确定度。若在线密度计仪表系数需要重新测量，参照附录 C。

9 复校时间间隔

复校时间间隔建议为 1 年。复校时间间隔的长短取决于其使用情况，如环境条件、使用频率及测量对象等。因此，使用单位可根据实际使用情况自主决定复校的时间间隔。

附录 A

压力密度瓶法

A.1 压力密度瓶法标准装置配套设备要求

A.1.1 不锈钢压力密度瓶

A.1.2 准确度等级为①级的电子天平，准确度等级为 E_2 的砝码组，天平最大称量满足密度瓶装满液体时的最大质量称量要求。

A.1.3 在线密度计入口端及出口端分别安装温度计。温度计的测量范围 $(0\sim 50)^\circ\text{C}$ ，扩展不确定度 $\leq 0.02^\circ\text{C}$ ($k=2$)。

A.1.4 0.05 级压力校验仪，其压力测量范围为 $(0\sim 3)\text{MPa}$ 。

A.1.5 恒温槽，控温范围为 $(10\sim 50)^\circ\text{C}$ ，温度波动性 $\leq 0.03^\circ\text{C}/10\text{min}$ 。

A.1.6 频率计的测量范围为 $100\text{Hz}\sim 1\text{MHz}$ ，灵敏度不低于 20mV 。

A.1.7 压力密度瓶法测量装置的不确定度不大于被校在线密度计最大允许误差的 $1/3$ 。

A.2 校准程序

1) 在 20°C 和常压下，将不同校准介质依次在装置中循环。

2) 当校准介质温度稳定在 $(20\pm 0.02)^\circ\text{C}$ ，且压力密度瓶出入口温度计的平均值与在线密度计出口、入口端温度计平均值相差小于 0.02°C 时，记录在线密度计输出谐振周期值 T_{p1} 或密度相关的其他信号（如密度 ρ_i 或频率 f ）。

3) 记录下在线密度计进口端与出口端温度计示值 t_i 、 t_o 。

4) 液体充满压力密度瓶并排出气体后关闭密度瓶阀门，将密度瓶放置天平上称量质量值，记录为 m_1 。

A.3 计算方法

A.3.1 密度标准值计算

a) 实验温度 t 、压力 p 下的密度瓶体积 V_{tp}

$$V_{tp} = [V_0 + E_p(p - p_0)] \times [1 + E_t(t - t_0)] \quad (\text{A.1})$$

式中：

V_0 ——标准条件下的密度瓶容积， mL ；

E_p ——密度瓶容积的压力修正系数， $\text{mL} \cdot \text{MPa}^{-1}$ ；

E_t ——密度瓶的体膨胀系数， $^\circ\text{C}^{-1}$ ；

p ——工作压力（绝对压力）， MPa ；

p_0 ——标准大气压力， $0.101\,325\text{MPa}$ ；

t ——工作温度， $^\circ\text{C}$ ；

t_0 ——标准温度， 20°C 。

b) 密度瓶内液体的质量 m

$$m = m_H \times \frac{1 - \rho_a/\rho_w}{1 - \rho_a/\rho_e} - M \times \frac{1 - \rho_a/\rho_B}{1 - \rho_a/\rho_e} \quad (\text{A.2})$$

式中：

m_H ——在空气中密度瓶充满液体的质量，g；

ρ_a ——空气密度， kg/m^3 ；

ρ_w ——砝码材料密度， kg/m^3 ；

M ——密度瓶的真空质量，g；

ρ_e ——液体密度，准确到 $10 \text{ kg}/\text{m}^3$ ；

ρ_B ——密度瓶材料密度， kg/m^3 。

当密度瓶与砝码所用材料密度相同时，公式为

$$m = (m_H - M) \cdot C \quad (\text{A. 3})$$

C 为空气浮力修正系数：

$$C = \frac{1 - \rho_a / \rho_w}{1 - \rho_a / \rho_e} \quad (\text{A. 4})$$

c) 实验条件下的校准介质密度 ρ_{li}

$$\rho_{li} = \frac{m}{V_{tp}} \quad (\text{A. 5})$$

附录 B

标准在线液体密度计法

B.1 标准在线液体密度计法标准装置配套设备

B.1.1 校准 0.5 级、1.0 级和 2.0 级在线密度计需配备 2 台 0.1 级在线密度计。

B.1.2 在线密度计入口端及出口端分别安装温度计，温度计的测量范围为 $(0\sim 50)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，扩展不确定度 $\leq 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($k=2$)。

B.1.3 0.05 级校验仪，压力测量范围为 $(0\sim 3)\text{ MPa}$ 。

B.1.4 恒温槽，控温范围为 $(10\sim 50)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温度波动度 $\leq 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ min}$ 。

B.1.5 频率计的频率测量范围为 $100\text{ Hz}\sim 1\text{ MHz}$ ，灵敏度不低于 20 mV 。

B.2 校准程序

1) 在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和常压下，将不同校准介质依次在装置中循环。

2) 当液体温度稳定在 $(20\pm 0.02)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，且两台标准在线密度计显示的密度值之差不超过 0.1 kg/m^3 时，记录被测在线密度计输出谐振周期 T_{p1} 或密度相关的其他信号（如密度 ρ_i 或频率 f ）。

3) 记录下在线密度计进口端与出口端温度计示值 t_i 、 t_o 。

4) 记录两台标准在线密度计示值为 ρ_{r1} 和 ρ_{r2} 。

B.3 计算方法

密度标准值计算按照式 (B.1) 计算：

$$\rho_2 = \frac{\rho_{r1} + \rho_{r2}}{2} \quad (\text{B.1})$$

附录 C

仪表系数测量及计算

C.1 测量步骤

C.1.1 温度修正系数测量步骤

选择至少 3 种校准介质，在（10~50）℃范围内分别进行恒温控制，当液体温度稳定性达到 ± 0.02 ℃时，记录在线密度计振动周期 T_t ，同时记录在线密度计进口端与出口端温度计示值 t_i 、 t_o 。同时用台式振动管液体密度计或一等标准密度计组测量相同温度条件下液体密度值 ρ_r ，用一等标准密度计组测量液体密度时应记录液体温度 t_{hr} 。

C.1.2 压力修正系数测量步骤

选择至少 2 种校准介质，充满被校在线密度计，排除管路内的空气。在选取的压力范围内均匀选取至少 5 个压力点，使用压力校验仪加压。待输出信号稳定时记录振动周期 T_p ，同时记录液体温度值 t_p 。压力系数测量过程中温度波动 ≤ 0.1 ℃。

C.2 计算方法

C.2.1 密度计系数计算

将 20℃下不同校准介质密度 ρ_{ri} 及相应的在线密度计输出周期信号 T_i 构成一组方程：

$$\rho = k_0 + k_1 T + k_2 T^2 \quad (C.1)$$

$$\rho_{r1} = F(T_1, k_i) \quad (C.2)$$

$$\rho_{r2} = F(T_2, k_i) \quad (C.3)$$

$$\vdots$$

$$\rho_{ri} = F(T_i, k_i) \quad (C.4)$$

通过最小二乘法计算出密度计系数 k_i ， $i=0, 1, 2$ 。

C.2.2 温度修正系数计算

将不同温度下测量的校准介质密度 ρ_{rj} ，液体温度 t 及相应的在线密度计输出周期信号 T_{tj} ，构成一组方程：

$$\rho_{r1} = S(T_{t1}, t_1, k_i, K_t) \quad (C.5)$$

$$\rho_{r2} = S(T_{t2}, t_2, k_i, K_t) \quad (C.6)$$

$$\vdots$$

$$\rho_{rj} = S(T_{tj}, t_j, k_i, K_t) \quad (C.7)$$

利用最小二乘法计算得出温度修正系数 K_t 。

C.2.3 压力修正系数计算

将不同压力、温度下测量的校准介质密度 ρ_{pjk} ，液体温度 t_{pk} 、压力 p_k 及相应的在

线密度计输出周期信号 T_{pk} ，构成一组方程：

$$\rho_{pr1} = D(T_{p1}, t_{p1}, p_1, k_i, K_t, K_{tp}) \quad (\text{C. 8})$$

$$\rho_{pr2} = D(T_{p2}, t_{p2}, p_2, k_i, K_t, K_{tp}) \quad (\text{C. 9})$$

$$\vdots$$

$$\rho_{prk} = D(T_{pk}, t_{pk}, p_k, k_i, K_t, K_{tp}) \quad (\text{C. 10})$$

利用最小二乘法计算得出温度修正系数 K_{tp} 。

C. 2. 4 也可根据不同规格型号在线密度计提供的密度计算公式，利用最小二乘法得到各项系数。



附录 D

(18~26) °C 钨酸钠水溶液密度温度系数表

$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1 050	1 100	1 150	1 200	1 250	1 300	1 350	1 400	1 450
$\gamma/[\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}^{-1})]$	0.245	0.277	0.293	0.329	0.356	0.371	0.396	0.415	0.432



附录 E

(0~40) °C 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。										

附录 F

油品压缩系数 F 表

单位： 10^{-3}MPa^{-1}

$t/^{\circ}\text{C}$	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$										
	800	802	804	806	808	810	812	814	816	818	820
15.00	0.854	0.848	0.842	0.836	0.830	0.824	0.818	0.812	0.807	0.801	0.796
15.25	0.855	0.849	0.843	0.837	0.831	0.825	0.819	0.814	0.808	0.803	0.797
15.50	0.857	0.851	0.844	0.838	0.832	0.827	0.821	0.815	0.809	0.804	0.798
15.75	0.858	0.852	0.846	0.840	0.834	0.828	0.822	0.816	0.811	0.805	0.800
16.00	0.860	0.853	0.847	0.841	0.835	0.829	0.823	0.818	0.812	0.806	0.801
16.25	0.861	0.855	0.849	0.843	0.837	0.831	0.825	0.819	0.813	0.808	0.802
16.50	0.863	0.856	0.850	0.844	0.838	0.832	0.826	0.820	0.815	0.809	0.804
16.75	0.864	0.858	0.852	0.845	0.839	0.833	0.828	0.822	0.816	0.810	0.805
17.00	0.866	0.859	0.853	0.847	0.841	0.835	0.829	0.823	0.817	0.812	0.806
17.25	0.867	0.861	0.854	0.848	0.842	0.836	0.830	0.824	0.819	0.813	0.808
17.50	0.868	0.862	0.856	0.850	0.844	0.838	0.832	0.826	0.820	0.814	0.809
17.75	0.870	0.864	0.857	0.851	0.845	0.839	0.833	0.827	0.821	0.816	0.810
18.00	0.871	0.865	0.859	0.852	0.846	0.840	0.834	0.829	0.823	0.817	0.811
18.25	0.873	0.866	0.860	0.854	0.848	0.842	0.836	0.830	0.824	0.818	0.813
18.50	0.874	0.868	0.862	0.855	0.849	0.843	0.837	0.831	0.825	0.820	0.814
18.75	0.876	0.869	0.863	0.857	0.851	0.845	0.839	0.833	0.827	0.821	0.815
19.00	0.877	0.871	0.864	0.858	0.852	0.846	0.840	0.834	0.828	0.822	0.817
19.25	0.879	0.872	0.866	0.860	0.853	0.847	0.841	0.835	0.830	0.824	0.818
19.50	0.880	0.874	0.867	0.861	0.855	0.849	0.843	0.837	0.831	0.825	0.819
19.75	0.882	0.875	0.869	0.863	0.856	0.850	0.844	0.838	0.832	0.826	0.821
20.00	0.883	0.877	0.870	0.864	0.858	0.852	0.845	0.839	0.834	0.828	0.822
20.25	0.885	0.878	0.872	0.865	0.859	0.853	0.847	0.841	0.835	0.829	0.823
20.50	0.886	0.880	0.873	0.867	0.861	0.854	0.848	0.842	0.836	0.830	0.825
20.75	0.888	0.881	0.875	0.868	0.862	0.856	0.850	0.844	0.838	0.832	0.826
21.00	0.889	0.883	0.876	0.870	0.863	0.857	0.851	0.845	0.839	0.833	0.827
21.25	0.891	0.884	0.878	0.871	0.865	0.859	0.852	0.846	0.840	0.835	0.829

表 (续)

单位: 10^{-3}MPa^{-1}

$t/^\circ\text{C}$	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$										
	800	802	804	806	808	810	812	814	816	818	820
21.50	0.892	0.886	0.879	0.873	0.866	0.860	0.854	0.848	0.842	0.836	0.830
21.75	0.894	0.887	0.881	0.874	0.868	0.861	0.855	0.849	0.843	0.837	0.831
22.00	0.895	0.889	0.882	0.876	0.869	0.863	0.857	0.851	0.845	0.839	0.833
22.25	0.896	0.889	0.882	0.876	0.869	0.863	0.857	0.851	0.845	0.839	0.833
22.50	0.898	0.892	0.885	0.879	0.872	0.866	0.860	0.853	0.847	0.841	0.835
22.75	0.900	0.893	0.887	0.880	0.874	0.867	0.861	0.855	0.849	0.843	0.837
23.00	0.902	0.895	0.888	0.882	0.875	0.869	0.862	0.856	0.850	0.844	0.838
23.25	0.903	0.896	0.890	0.883	0.876	0.870	0.864	0.858	0.851	0.845	0.840
23.50	0.905	0.898	0.891	0.884	0.878	0.872	0.865	0.859	0.853	0.847	0.841
23.75	0.906	0.899	0.893	0.886	0.879	0.873	0.867	0.860	0.854	0.848	0.842
24.00	0.908	0.901	0.894	0.887	0.881	0.874	0.868	0.862	0.856	0.850	0.844
24.25	0.909	0.902	0.896	0.889	0.882	0.876	0.870	0.863	0.857	0.851	0.845
24.50	0.911	0.904	0.897	0.890	0.884	0.877	0.871	0.865	0.858	0.852	0.846
24.75	0.912	0.905	0.899	0.892	0.885	0.879	0.872	0.866	0.860	0.854	0.848

注：参照 GB/T 21450 原油和石油产品密度在 $638 \text{ kg}/\text{m}^3$ 到 $1\,074 \text{ kg}/\text{m}^3$ 范围内的烃压缩系数。

F 为根据液体在 15°C 时的密度和液体的温度查得的压缩系数（单位为 MPa^{-1} ）； ρ 为 15°C 时的密度（单位为 kg/m^3 ）； t 为温度（单位为 $^\circ\text{C}$ ）。

在标准大气压下的密度 ρ_0 和各压力点 p_i 的实际密度值 ρ_i 为

$$\rho_i = \rho_0 (1 + F \cdot p_i) \quad (\text{F.1})$$

式中：

p_i ——压力表的压力读数，MPa。

附录 G

钨酸钠水溶液毛细常数表

$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1 050	1 100	1 150	1 200	1 250	1 300	1 350	1 400
α/mm^2	6.94	6.69	6.45	6.21	5.95	5.73	5.45	5.25



附录 H

水压缩系数 F_w 表

$t/^\circ\text{C}$	15	16	17	18	19	20	21	22
$F_w/10^{-3}\text{MPa}^{-1}$	0.467 3	0.465 5	0.463 7	0.462 0	0.460 4	0.458 9	0.457 5	0.456 1
$t/^\circ\text{C}$	23	24	25	26	27	28	29	30
$F_w/10^{-3}\text{MPa}^{-1}$	0.454 8	0.453 6	0.452 5	0.451 4	0.450 4	0.449 4	0.448 5	0.447 7



附录 J

空气密度计算公式

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

式中：

- ρ ——湿空气密度， 10^{-3} kg/m^3 ；
 p ——大气压力，Pa；
 Z ——压缩系数；
 T ——热力学温度， $T = 273.15 + t$ ，K；
 x_{CO_2} ——空气中 CO_2 的摩尔分数， mol mol^{-1} ；
 x_v ——水蒸气摩尔系数。

其中：

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

$$x_v = h f(p, t) \frac{p_{\text{sv}}(t)}{p} \quad (\text{J. } 3)$$

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

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

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， $^{\circ}\text{C}$ 。

以上式 (J. 2) 至式 (J. 4) 中的常数项数值如下：

- $a_0 = 1.581\,23 \times 10^{-6} \text{ kPa}^{-1}$ ；
 $a_1 = -2.933\,1 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ ；
 $a_2 = 1.104\,3 \times 10^{-10} \text{ K}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ ；
 $b_0 = 5.707 \times 10^{-6} \text{ kPa}^{-1}$ ；
 $b_1 = -2.051 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ ；
 $c_0 = 1.989\,8 \times 10^{-4} \text{ KPa}^{-1}$ ；
 $c_1 = -2.376 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$ ；
 $d = 1.83 \times 10^{-11} \text{ K}^2 \cdot \text{Pa}^{-2}$ ；
 $e = -0.765 \times 10^{-8} \text{ K}^2 \cdot \text{Pa}^{-2}$ ；
 $\alpha = 1.000\,62$ ；
 $\beta = 3.14 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ ；

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

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

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

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

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

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



附录 K

校准记录

客户名称：_____
器具名称：_____
型号/规格：_____
出厂编号：_____
生产厂商：_____
校准范围：_____
分辨力：_____
校准方法：_____
校准依据：_____
使用的标准器：_____

序号	标准密度 kg/m ³	液体温度 ℃	振动周期 μs	示值 kg/m ³	示值误差 kg/m ³	不确定度 kg/m ³	重复性 kg/m ³
1							
平均值							
2							
平均值							
3							
平均值							

环境条件：温度：_____℃ 相对湿度：_____％ 校准日期：____年__月__日
校准员：_____核验员：_____

附录 L

校准证书内页格式

校准结果

标准温度： °C

密度范围：(××~××) kg/m³

序号	标准密度值 kg/m ³	温度 °C	振动周期 μs	示值误差 kg/m ³	不确定度 kg/m ³	重复性 kg/m ³
1						
2						
3						
4						
5						

备注：

(以下空白)

附录 M

在线振动管液体密度计校准结果不确定度评定示例

M.1 测量模型

$$E = \bar{\rho} - \bar{\rho}_{\text{ref}} \quad (\text{M.1})$$

式中：

E ——示值误差， kg/m^3 ；

$\bar{\rho}$ ——被测在线密度计示值的平均值， kg/m^3 ；

$\bar{\rho}_{\text{ref}}$ ——液体密度测量标准值的平均值， kg/m^3 。

示值误差的合成标准不确定度的计算公式为：

$$u_c(E) = \sqrt{\left[\frac{\partial E}{\partial \bar{\rho}} u(\bar{\rho}) \right]^2 + \left[\frac{\partial E}{\partial \bar{\rho}_{\text{ref}}} u(\bar{\rho}_{\text{ref}}) \right]^2} \quad (\text{M.2})$$

M.2 不确定度的来源

不确定度来源主要包括液体密度标准值测量引入的标准不确定度 $u(\bar{\rho}_{\text{ref}})$ ，液体温度测量引入的标准不确定度 $u(\rho_t)$ ，在线密度计分辨力引入的标准不确定度 $u(\rho_{\text{res}})$ ，测量过程重复性引入的标准不确定度 $u(\rho_s)$ 。各不确定度分量互不相关。

M.3 标准不确定度的评定

M.3.1 由液体密度标准值测量引入的标准不确定度 $u(\bar{\rho}_{\text{ref}})$

采用液体密度有证标准物质校准台式振动管密度仪，使用扩展不确定度 $0.050 \text{ kg}/\text{m}^3$ ($k=2$) 的台式振动管密度仪测量液体密度，校准过程中液体密度标准值测量的标准不确定度 $u(\bar{\rho}_{\text{ref}})$ 为

$$u(\bar{\rho}_{\text{ref}}) = 0.050 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} / 2 = 0.025 \text{ kg}/\text{m}^3 \quad (\text{M.3})$$

M.3.2 由液体温度测量引入的标准不确定度 $u(\rho_t)$

温度传感器的扩展不确定度为 $0.02 \text{ }^\circ\text{C}$ ($k=2$)。以纯水密度为参考，温度在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 附近每变化 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 导致液体密度变化约为 $0.21 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，由液体温度测量引入的标准不确定度 $u(\rho_t)$ 为

$$u(\rho_t) = 0.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \times 0.02 \text{ }^\circ\text{C} / 2 = 0.0021 \text{ kg}/\text{m}^3 \quad (\text{M.4})$$

M.3.3 由在线密度计分辨力引入的标准不确定度 $u(\rho_{\text{res}})$

被校在线密度计分辨力 $d = 0.01 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，引入的标准不确定度为：

$$u(\rho_{\text{res}}) = \frac{d}{2\sqrt{3}} = \frac{0.01 \text{ kg}/\text{m}^3}{2\sqrt{3}} \approx 0.0029 \text{ kg}/\text{m}^3 \quad (\text{M.5})$$

M.3.4 测量重复性引入的标准不确定度 $u(\rho_s)$

以校准点为 $843 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的测试数据为例，测量数据见表 M.1。

表 M.1 在线密度计测量数据

序号	周期 μs	温度 $^{\circ}\text{C}$	密度 kg/m^3
1	3 682.302 490	20.00	843.16
2	3 682.301 514	20.00	843.16
3	3 682.302 490	20.00	843.16
4	3 682.303 223	20.00	843.17
5	3 682.303 223	20.00	843.17
6	3 682.302 002	20.00	843.16
7	3 682.302 490	20.00	843.16
8	3 682.302 490	20.00	843.16
9	3 682.302 490	20.00	843.16
10	3 682.302 979	20.00	843.17

测量重复性引入的标准不确定度 $u(\rho_s)$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.004\ 8\ \text{kg}/\text{m}^3 \quad (\text{M. 6})$$

$$u(\rho_s) = \frac{s}{\sqrt{10}} = 0.001\ 5\ \text{kg}/\text{m}^3 \quad (\text{M. 7})$$

M.4 合成标准不确定度的计算

$$u_c(E) = \sqrt{\left[\frac{\partial E}{\partial \rho_{\text{res}}} u(\rho_{\text{res}})\right]^2 + \left[\frac{\partial E}{\partial \rho_s} u(\rho_s)\right]^2 + \left[\frac{\partial E}{\partial \rho_t} u(\rho_t)\right]^2 + \left[\frac{\partial E}{\partial \bar{\rho}_{\text{ref}}} u(\bar{\rho}_{\text{ref}})\right]^2} \quad (\text{M. 8})$$

以密度为 $843\ \text{kg}/\text{m}^3$ 的液体测量为例，分析具体数据见表 M.2。

表 M.2 合成标准不确定度

校准点	$843\ \text{kg}/\text{cm}^3$
标准不确定度 $u(\bar{\rho}_{\text{ref}})$	$0.025\ \text{kg}/\text{m}^3$
标准不确定度 $u(\rho_t)$	$0.002\ 1\ \text{kg}/\text{m}^3$
标准不确定度 $u(\rho_{\text{res}})$	$0.002\ 9\ \text{kg}/\text{m}^3$
标准不确定度 $u(\rho_s)$	$0.001\ 5\ \text{kg}/\text{m}^3$
合成标准不确定度 $u_c(E)$	$0.025\ 3\ \text{kg}/\text{m}^3$

M.5 扩展不确定度的计算

扩展不确定度 U 为

$$U = k \times u_c(E) \quad (\text{M. 9})$$

取包含因子 $k=2$ ，校准结果的测量扩展不确定度为

$$U = 0.025 \, 3 \, \text{kg/m}^3 \times 2 \approx 0.05 \, \text{kg/m}^3 \quad (\text{M. 10})$$

在线密度计校准点为 $843 \, \text{kg/m}^3$ 的扩展不确定度为 $0.05 \, \text{kg/m}^3$ ($k=2$)。

