



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 1058—2010

实验室振动式液体密度仪

Laboratory Oscillation-type Liquid Density meters

2010—06—10 发布

2010—09—10 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

实验室振动式液体 密度仪检定规程

JJG 1058—2010

Verification Regulation of Laboratory

Oscillation-type Liquid Density meters

本规程经国家质量监督检验检疫总局于 2010 年 6 月 10 日批准，并自 2010 年 9 月 10 日起施行。

归口单位：全国质量密度计量技术委员会

主要起草单位：河北省计量科学研究所

中国计量科学研究院

中国测试技术研究院

参加起草单位：河北省计量监督检测院

本规程委托全国质量密度计量技术委员会负责解释

本规程主要起草人：

刘承魁（河北省计量科学研究所）

陈朝晖（中国计量科学研究院）

任彦丽（河北省计量科学研究所）

郭 强（河北省计量科学研究所）

邵志新（中国测试技术研究院）

目 录

1 范围	(1)
2 引用文献	(1)
3 概述	(1)
4 计量性能要求	(2)
5 通用技术要求	(2)
6 计量器具控制	(2)
6.1 检定设备	(2)
6.2 检定项目和检定方法	(4)
6.3 检定结果处理	(6)
6.4 检定周期	(6)
附录 A 检定记录格式	(7)
附录 B 检定证书和结果通知书内页格式	(8)
附录 C (15~25)℃纯水密度表	(9)
附录 D 空气密度计算公式	(14)
附录 E 湿空气密度表	(15)
附录 F 几种标准液体的毛细常数 α (20℃)	(17)
附录 G 大气压与海平面高度对照表	(18)

实验室振动式液体密度仪检定规程

1 范围

本规程适用于密度范围 (650~3 000) kg/m³ 的实验室振动式液体密度仪 (包括台式振动管密度仪和手持式振动管密度仪, 以下简称密度仪) 的首次检定、后续检定和使用中检验。

2 引用文献

JJF 1002—1998 国家计量检定规程编写规则

JJF 1001—1998 通用计量术语及定义

JJF 1059—1999 测量不确定度与表示

ISO 15212-1 振动型密度仪 第一部分: 实验室仪器

GB/T 6682—2008 分析实验室用水 规格说明和试验方法

使用本规程时应注意使用上述引用文献的现行有效版本。

3 概述

密度仪主要是由 U 形玻璃振动管、电磁振荡器、温度控制器以及显示单元和数据处理单元组成。其结构见图 1。当一定体积的液体充满 U 形玻璃振动管后, 由于管内物质的质量发生变化, 使得振动管的固有振动频率或特征频率也发生变化。体积一定时, 振动管的频率是管内所充物质质量的函数。当质量增加时密度增加, 频率降低, 振动周期增大。反之, 当质量减小时密度减小, 振动周期减小。二者之间的关系式简单描述如下:

$$\rho = A \times T^2 - B \quad (1)$$

式中: ρ ——密度;

T ——振动周期;

A 、 B ——仪器常数。



图 1 密度仪结构示意图

4 计量性能要求

密度仪的计量性能要求见表1和表2。

表1 标准密度仪(0.01级)的计量性能要求 kg/m^3

量 程	不确定度 U	重复性
650~1 500	0.01 ($k=2$)	0.005
1 500~3 000	0.015 ($k=2$)	0.007 5

表2 精密级和工作级密度仪的计量性能要求 kg/m^3

指标	量程	精密级		工作级			
最大允差	650~1 500	± 0.05	± 0.10	± 0.20	± 0.50	± 1.0	± 2.0
	1 500~3 000	± 0.075	± 0.15	± 0.30	± 0.75	± 1.5	± 3.0
重复性	650~1 500	0.025	0.05	0.10	0.25	0.50	1.0
	1 500~3 000	0.050	0.075	0.15	0.50	0.75	1.5

5 通用技术要求

密度仪外观要求如下:

密度仪应具有下列标志、标识:仪器名称、型号、编号、制造厂名和出厂日期;其标志、标识应清晰。

密度仪外表不应有影响工作性能的机械损伤;显示屏表面平整、洁净、无划痕,读数清晰、完整;各调节器应能正常调节,各开关及按键接触良好,能正常工作,各紧固件无松动。

6 计量器具控制

计量器具控制包括:首次检定、后续检定和使用中检验。

6.1 检定设备

6.1.1 检定用标准器按“密度计量器具检定系统”的规定配置。见表3。

表3 检定用标准器

受检仪器	测量范围	计量标准器名称	测量范围	扩展不确定度
标准级	$(650\sim 3\,000)\text{kg/m}^3$	密度标准液体	$(600\sim 3\,000)\text{kg/m}^3$	$U=3\times 10^{-3}\text{kg/m}^3$ $k=2$
精密级	$(650\sim 3\,000)\text{kg/m}^3$	密度标准液体	$(600\sim 3\,000)\text{kg/m}^3$	$U=3\times 10^{-3}\text{kg/m}^3$ $k=2$
		台式振动管密度标准装置	$(650\sim 3\,000)\text{kg/m}^3$	$U=1\times 10^{-2}\text{kg/m}^3$ $k=2$

表 3 (续)

受检仪器	测量范围	计量标准器名称	测量范围	扩展不确定度
工作级	(650~2 000) kg/m ³	密度标准液体	(600~3 000) kg/m ³	$U=3\times 10^{-3}$ kg/m ³ $k=2$
		台式振动管密度标准装置	(650~3 000) kg/m ³	$U=1\times 10^{-3}$ kg/m ³ $k=2$
		一等密度计标准装置	(650~2 000) kg/m ³	$U=(8\sim 20)\times 10^{-3}$ kg/m ³ $k=2$

6.1.1.1 密度标准液体

选取 3 个或 4 个密度标准液体, 该液体必须是单一物质, 且具有稳定的物理和化学性质。其运动粘度应不大于 100 mm²/s。标准液体的选取, 尽可能在仪器测量范围内考虑密度的均匀分布。

密度仪的测量范围为 (650~2 000) kg/m³ 时, 应选择如下 3 种密度标准液体:

- (1) (600~700) kg/m³: 异辛烷或壬烷;
- (2) (950~1 050) kg/m³: 纯水;
- (3) (1 450~1 650) kg/m³: 溴苯或四氯乙烯;

密度仪的测量范围为 (650~3 000) kg/m³ 时, 可根据用户需要增加一个检定点, 并选取如下密度标准液体:

- (4) (2 200~2 400) kg/m³: 1,2,3-三溴丙烷。

注: 对于仅用仪器一段窄范围进行密度测量的用户, 在用户要求下, 允许仅检定这一窄段范围, 但要覆盖这一窄段范围, 且要检定 3 个点, 包括最低、最高和中间点 (或常用点)。并在证书中表明检定的范围。

6.1.1.2 振动管台式密度标准装置: 测量范围为 (650~3 000) kg/m³, 标准等级为 0.01 级的标准密度仪一台。

6.1.1.3 一等密度计标准装置: 测量范围 (650~2 000) kg/m³ 的连续型一等密度计组及配套设备。

6.1.1.4 温度计: 范围为 (0~50)℃ 的二等标准水银温度计或准确度不低于二等标准水银温度计的其他温度计。

6.1.1.5 空盒气压表 (检定精密级和工作级用): 范围 (80~106) kPa, 最大允许误差 ±0.25 kPa。

水银气压表 (检定标准级用): 范围 (80~106) kPa, 最大允许误差 ±0.03 kPa。

6.1.1.6 相对湿度表: 范围 20%~85%, 最大允许误差 ±5%。

6.1.1.7 清洗液: 无水乙醇、蒸馏水、溶剂汽油、丙酮、石油醚、重铬酸钾洗液、甲苯、洗涤剂。

6.1.1.8 注射器: (5~10) mL。

6.1.1.9 空气干燥装置: 对于没有空气干燥泵的密度仪, 可以外加一个微量空气泵, 空气量以能够吹干 U 形管为宜; 或者使用干燥的洗耳球, 将 U 形管吹干。

6.1.1.10 实验室恒温装置: 实验室内应有恒温装置, 以保证室内温度、湿度能够达到

检定环境要求。

6.1.2 检定环境条件

6.1.2.1 环境温度要求在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 范围内, 相对湿度 20%~80%。

6.1.2.2 室内应防潮、避光、防热, 无强电磁场干扰, 无强的机械振动, 无有害和腐蚀性物质, 远离可燃气体及蒸气, 通风良好。

6.2 检定项目和检定方法

6.2.1 外观检查按第 5 条要求进行检查。

6.2.2 检定前的准备

接通密度仪电源开关, 根据仪器使用说明书的要求, 进行预热。

在每一密度点进行检定之前, 都必须对测量系统进行清洗、净化。

清洗、净化方法: 根据检定液的性质, 选用合适的清洗液。

首先选用具有溶解性质的液体 I 将振动管内的残余物质进行溶解、清洗。不同的密度标准液体通常使用的溶解液见表 4。清洗过后, 用干燥空气将其吹出, 然后再用具有较强挥发性的液体 II 清洗残余物质, 该物质易挥发。这种液体通常使用无水乙醇、石油醚 (30~60 沸程) 等。然后再用干燥空气将其吹出, 并且净化。

清洗、净化工作至少反复循环进行 3 次, 直至管内没有残余物质。

可根据净化后振动管内的空气密度大小来判断其内部是否还有残余物质。如果空气密度与初始值的偏离超出了使用说明书的要求, 则需要重新清洗振动管。

具有自动进样和自动清洗功能的仪器, 按说明书及使用要求设置好程序进行自动清洗即可。

表 4 常用的溶解液

密度标准液体	溶 解 性
异辛烷	不溶于水, 溶于醚, 易溶于醇、丙酮、苯、氯仿等
壬烷	不溶于水, 溶于乙醇、乙醚, 可混溶于苯、丙酮、氯仿等
溴苯	不溶于水, 溶于甲醇、乙醚、丙酮、苯、四氯化碳等众多有机物
四氯乙烯	不溶于水, 可混溶于乙醇、乙醚、丙酮等众多有机物
1,2,3-三溴丙烷	不溶于水, 溶于乙醇、乙醚和氯仿等

6.2.3 仪器的自校

仪器的操作过程包括: 进样、排样、清洗、净化四个部分。

仪器的自校可根据仪器等级的不同采用不同的方式。

6.2.3.1 标准和精密级的密度仪通常使用干燥空气和除气蒸馏水进行自校。

(1) 空气自校

空气密度是与温度、湿度、大气压力有关的。空气密度发生了变化, 可导致密度曲线变化。所以空气密度的自校对于高精度的仪器来讲是十分重要的。

将测量系统的温度设定为 20°C , 并将干燥空气充满 U 形振动管, 待温度稳定后, 记录空气密度值 $\rho_{0\text{测}}$ 和温度值, 同时记录检定环境的相对湿度及大气压力值, 并计算空气密度 ρ_0 。计算公式见附录 D。当 $|\rho_0 - \rho_{0\text{测}}|$ 超出仪器说明书所规定的要求时, 需对空

气密度示值进行修正。

(2) 用除气蒸馏水自校

将测量系统的温度设定为 20℃，用新鲜的除气蒸馏水充满 U 形振动管，并确保振动管内无气泡。待温度稳定后，记录水的密度值 $\rho_{\text{水测}}$ 和温度值。按记录的温度值查附录 C 中对应的纯水密度值 $\rho_{\text{水}}$ 。当 $|\rho_{\text{水}} - \rho_{\text{水测}}|$ 超出仪器说明书所规定的要求时，需对水的密度示值进行修正。

6.2.3.2 工作级的密度仪可以不进行空气自校。

对于具有自动校准功能的仪器，按说明书要求设置好程序进行自动校准。

蒸馏水应符合 GB/T 6682—2003 的 2 级或更高级要求，水质新鲜。先过滤后蒸馏。除去空气的水应谨慎保存，减少晃动，以尽量减少空气再次溶入其中。

6.2.4 密度示值误差和重复性的检定

6.2.4.1 密度标准液体检定法

将选定的密度标准液体注入并充满测量槽，待密度仪温度稳定后，记录密度和温度值。每个密度检定点独立测量 3 次，计算平均值

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

计算密度差值

$$\Delta\rho = \rho_m - \rho_{\text{标}} \quad (3)$$

在测量 (950~1 050) kg/m³ 的密度点时，用蒸馏水重复 6 次，并按下式计算单次测量标准偏差，即重复性：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 \Delta\rho_i^2}{6-1}} \quad (4)$$

注入密度标准液体时，应仔细观察 U 形管内有无气泡，如发现有气泡，应将气泡排出，直至无气泡。

手动进样时，注射器应继续保持在样品入口处，以免空气进入 U 形管内。

对于具有自动进样功能的仪器，按说明书要求设置好程序进行自动测量，记录密度和温度值。

6.2.4.2 台式振动管密度标准装置检定法

将被检密度仪与标准装置放置在工作台上，设定温度均为 20℃，恒温后，根据被检仪器的测量范围选取 6.1.1.1 中的 4 种或前 3 种密度标准液体，分别注入被检密度仪与标准装置中，观察二者有无气泡，如果有气泡，需将气泡排出，待温度稳定后，分别记录标准装置和被检密度仪的密度和温度值。每种液体独立测量 3 次。按式 (2) 计算各自的密度平均值。

按下式计算密度示值误差

$$\Delta\rho = \bar{\rho}_m - \bar{\rho}_{\text{标}} \quad (5)$$

式中： $\bar{\rho}_{\text{标}}$ ——标准装置 3 次示值的平均值。

在测量 (950~1 050) kg/m³ 的密度点时, 被检仪器重复 6 次, 按式 (4) 计算单次测量标准偏差, 即重复性。

6.2.4.3 用一等密度标准装置进行检定

选取 6.1.1.1 中的前 3 种密度标准液体, 分别将一等标准密度计放入温度为 (20±0.1)℃ 的盛有密度标准液体的检定玻璃筒中, 用一等标准密度计对其进行测量。同时, 用被检仪器也对其进行测量。待温度稳定后, 分别记录一等密度计和被检密度计的密度和温度值。每种液体独立测量 3 次。按式 (2) 计算各自的密度平均值并计算密度示值误差:

$$\Delta\rho = \bar{\rho}_m - \bar{\rho}_{\text{标}} \quad (6)$$

式中: $\bar{\rho}_{\text{标}}$ ——标准密度计 3 次示值的平均值修正后的实际密度值 (包括证书修正值或毛细修正值等)。

在测量 (950~1 050) kg/m³ 密度点时, 被检仪器重复 6 次, 按式 (4) 计算单次测量标准偏差, 即重复性。

如果检定液体和一等密度计证书上给出的工作液不同时, 需要进行毛细常数作用修正。修正公式如下:

$$\Delta\rho_c = \frac{(a_2 - a_1) \times \pi \times D \times \rho^2}{M} \times 1\,000 \quad (7)$$

式中: $\Delta\rho_c$ ——毛细常数修正值, kg/m³;

a_1 ——证书上给出工作液的毛细常数, mm²;

a_2 ——所选液体的毛细常数, mm²;

D ——一等密度计的干管平均直径, mm;

ρ ——液体密度, g/cm³;

M ——一等密度计质量, mg;

π ——圆周率, 取 3.14。

密度标准液体检定法作为仲裁的方法。

6.3 检定结果处理

按本规程要求检定合格的密度计发给检定证书。不合格的密度计发给检定结果通知书。并注明不合格项目。当密度计不符合本级计量性能要求, 但符合低一级别的计量性能要求时, 可发给检定证书, 但要注明其合格的等级。

6.4 检定周期

检定周期不超过 1 年。

附录 A

检定记录格式

共 页 第 页

送检单位		证书编号	
制造厂		仪器型号	
仪器编号		检定员	
室 温		核验员	
相对湿度		日 期	

1 通用技术要求:

2 检定用标准:

3 自校情况:

4 密度示值误差:

室内温度:

湿度:

气压:

仪器工作温度:

检定液	标准值				受检器示值				受检器误差
	1	2	3	平均	1	2	3	平均	

5 密度重复性:

检定液	受检器示值						
	1	2	3	4	5	6	平均
重复性							

6 备注:

附录 B

检定证书和结果通知书内页格式

B.1 检定证书内页格式

检定结果	
外观	
检定用标准	
示值误差	
重复性	

B.2 检定结果通知书内页格式

检定结果	
外观	
检定用标准	
示值误差	
重复性	
不合格项目	

附录 C

(15~25)℃纯水密度表

$t/^\circ\text{C}$	0.00	0.01	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
15.00	999.099 064	999.097 557	999.096 045	999.094 534	999.093 022	999.091 508	999.089 994	999.088 478	999.086 961
15.10	999.083 923	999.082 000	999.080 881	999.079 358	999.077 834	999.076 309	999.074 783	999.073 255	999.071 726
15.20	999.068 665	999.066 449	999.065 600	999.064 045	999.062 529	999.061 002	999.059 454	999.057 925	999.056 375
15.30	999.053 290	999.051 746	999.050 201	999.048 655	999.047 107	999.045 559	999.044 009	999.042 458	999.040 906
15.40	999.037 798	999.036 142	999.034 685	999.033 127	999.031 568	999.030 008	999.028 446	999.026 884	999.025 320
15.50	999.022 189	999.020 220	999.019 054	999.017 483	999.015 912	999.014 340	999.012 767	999.011 193	999.009 617
15.60	999.006 463	999.004 100	999.003 394	999.001 722	999.000 146	998.998 566	998.996 974	998.995 380	998.993 798
15.70	998.990 621	998.988 060	998.987 188	998.985 845	998.984 251	998.982 646	998.981 040	998.979 432	998.977 864
15.80	998.974 663	998.973 041	998.971 457	998.969 853	998.968 247	998.966 640	998.965 032	998.963 423	998.961 813
15.90	998.958 589	998.956 975	998.955 360	998.953 744	998.952 127	998.950 509	998.948 889	998.947 269	998.945 647
16.00	998.942 400	998.940 774	998.939 150	998.937 520	998.935 892	998.934 262	998.932 630	998.930 999	998.929 365
16.10	998.926 095	998.924 459	998.922 823	998.921 187	998.919 541	998.917 895	998.916 257	998.914 614	998.912 969
16.20	998.909 676	998.908 028	998.906 378	998.904 728	998.903 076	998.901 423	998.899 769	998.898 114	998.896 458
16.30	998.893 142	998.891 482	998.889 821	998.888 159	998.886 496	998.884 832	998.883 167	998.881 500	998.879 832
16.40	998.876 494	998.874 822	998.873 150	998.871 477	998.869 802	998.868 127	998.866 450	998.864 772	998.863 093
16.50	998.859 731	998.858 049	998.856 365	998.854 680	998.852 994	998.851 307	998.849 619	998.847 930	998.846 239
16.60	998.842 855	998.841 161	998.839 466	998.837 770	998.836 072	998.834 374	998.832 674	998.830 974	998.829 272
									998.827 569

表(续)

$t/^\circ\text{C}$	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
16.70	998.825 865	998.824 160	998.822 453	998.820 746	998.819 037	998.817 327	998.815 616	998.813 904	998.812 191	998.810 477
16.80	998.808 762	998.807 045	998.805 327	998.803 609	998.801 889	998.800 168	998.798 445	998.796 722	998.794 998	998.793 272
16.90	998.791 545	998.789 817	998.788 088	998.786 358	998.784 627	998.782 895	998.781 161	998.779 427	998.777 691	998.775 954
17.00	998.774 216	998.772 477	998.770 737	998.768 995	998.767 253	998.765 509	998.763 765	998.762 019	998.760 272	998.758 524
17.10	998.756 774	998.755 024	998.753 273	998.751 520	998.749 766	998.748 011	998.746 256	998.744 498	998.742 740	998.740 981
17.20	998.739 220	998.737 459	998.735 696	998.733 932	998.732 167	998.730 401	998.728 634	998.726 866	998.725 097	998.723 326
17.30	998.721 554	998.719 782	998.718 008	998.716 233	998.714 457	998.712 680	998.710 901	998.709 122	998.707 341	998.705 559
17.40	998.703 777	998.701 993	998.700 208	998.698 422	998.696 634	998.694 846	998.693 056	998.691 266	998.689 474	998.687 681
17.50	998.685 887	998.684 092	998.682 296	998.680 499	998.678 700	998.676 901	998.675 100	998.673 299	998.671 496	998.669 692
17.60	998.667 887	998.666 081	998.664 273	998.662 465	998.660 655	998.658 845	998.657 033	998.655 220	998.653 406	998.651 591
17.70	998.649 775	998.647 958	998.646 139	998.644 320	998.642 499	998.640 678	998.638 855	998.637 031	998.635 206	998.633 380
17.80	998.631 553	998.629 724	998.627 895	998.626 064	998.624 233	998.622 400	998.620 566	998.618 731	998.616 895	998.615 058
17.90	998.613 220	998.611 380	998.609 540	998.607 698	998.605 856	998.604 012	998.602 167	998.600 321	998.598 474	998.596 626
18.00	998.594 776	998.592 926	998.591 075	998.589 222	998.587 368	998.585 513	998.583 658	998.581 801	998.579 943	998.578 083
18.10	998.576 223	998.574 362	998.572 499	998.570 636	998.568 771	998.566 905	998.565 038	998.563 170	998.561 301	998.559 431
18.20	998.557 560	998.555 688	998.553 814	998.551 940	998.550 064	998.548 187	998.546 310	998.544 431	998.542 551	998.540 670
18.30	998.538 787	998.536 904	998.535 020	998.533 134	998.531 248	998.529 360	998.527 471	998.525 582	998.523 691	998.521 799
18.40	998.519 905	998.518 011	998.516 116	998.514 220	998.512 322	998.510 424	998.508 524	998.506 623	998.504 721	998.502 818
18.50	998.500 914	998.499 009	998.497 103	998.495 196	998.493 288	998.491 378	998.489 468	998.487 556	998.485 643	998.483 730
18.60	998.481 815	998.479 899	998.477 982	998.476 064	998.474 144	998.472 224	998.470 303	998.468 380	998.466 457	998.464 532
18.70	998.462 606	998.460 679	998.458 752	998.456 823	998.454 893	998.452 961	998.451 029	998.449 096	998.447 161	998.445 226
18.80	998.443 289	998.441 352	998.439 413	998.437 473	998.435 532	998.433 591	998.431 648	998.429 703	998.427 758	998.425 812
18.90	998.423 865	998.421 916	998.419 967	998.418 016	998.416 064	998.414 112	998.412 158	998.410 203	998.408 247	998.406 290
19.00	998.404 332	998.402 373	998.400 412	998.398 451	998.396 489	998.394 525	998.392 561	998.390 595	998.388 628	998.386 660

表(续)

$t/^\circ\text{C}$	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
19.10	998.384 691	998.382 722	998.380 751	998.378 778	998.376 805	998.374 831	998.372 856	998.370 879	998.368 902	998.366 923
19.20	998.364 944	998.362 963	998.360 981	998.358 998	998.357 015	998.355 030	998.353 044	998.351 056	998.349 068	998.347 079
19.30	998.345 089	998.343 097	998.341 105	998.339 111	998.337 117	998.335 121	998.333 124	998.331 127	998.329 128	998.327 128
19.40	998.325 127	998.323 125	998.321 122	998.319 117	998.317 112	998.315 106	998.313 099	998.311 090	998.309 081	998.307 070
19.50	998.305 058	998.303 046	998.301 032	998.299 017	998.297 001	998.294 984	998.292 966	998.290 947	998.288 927	998.286 906
19.60	998.284 883	998.282 860	998.280 835	998.278 810	998.276 783	998.274 756	998.272 727	998.270 697	998.268 667	998.266 635
19.70	998.264 602	998.262 568	998.260 533	998.258 497	998.256 460	998.254 421	998.252 382	998.250 342	998.248 301	998.246 258
19.80	998.244 215	998.242 170	998.240 124	998.238 078	998.236 030	998.233 981	998.231 931	998.229 880	998.227 829	998.225 776
19.90	998.223 721	998.221 666	998.219 610	998.217 553	998.215 495	998.213 435	998.211 375	998.209 313	998.207 251	998.205 187
20.00	998.203 123	998.201 057	998.198 990	998.196 923	998.194 854	998.192 784	998.190 713	998.188 641	998.186 568	998.184 494
20.10	998.182 419	998.180 343	998.178 265	998.176 187	998.174 108	998.172 027	998.169 946	998.167 863	998.165 780	998.163 695
20.20	998.161 610	998.159 523	998.157 435	998.155 346	998.153 256	998.151 165	998.149 074	998.146 981	998.144 887	998.142 792
20.30	998.140 695	998.138 598	998.136 500	998.134 401	998.132 301	998.130 199	998.128 097	998.125 993	998.123 889	998.121 783
20.40	998.119 677	998.117 569	998.115 460	998.113 351	998.111 240	998.109 128	998.107 015	998.104 901	998.102 787	998.100 671
20.50	998.098 554	998.096 436	998.094 316	998.092 196	998.090 075	998.087 953	998.085 830	998.083 705	998.081 580	998.079 454
20.60	998.077 326	998.075 198	998.073 068	998.070 938	998.068 806	998.066 673	998.064 540	998.062 405	998.060 269	998.058 133
20.70	998.055 995	998.053 856	998.051 716	998.049 575	998.047 433	998.045 290	998.043 146	998.041 001	998.038 855	998.036 708
20.80	998.034 560	998.032 410	998.030 260	998.028 109	998.025 956	998.023 803	998.021 649	998.019 493	998.017 337	998.015 179
20.90	998.013 021	998.010 861	998.008 701	998.006 539	998.004 376	998.002 213	998.000 048	997.997 882	997.995 715	997.993 547
21.00	997.991 379	997.989 209	997.987 038	997.984 866	997.982 693	997.980 519	997.978 344	997.976 168	997.973 991	997.971 812
21.10	997.969 633	997.967 453	997.965 272	997.963 090	997.960 906	997.958 722	997.956 537	997.954 350	997.952 163	997.949 975
21.20	997.947 785	997.945 595	997.943 403	997.941 211	997.939 017	997.936 822	997.934 627	997.932 430	997.930 233	997.928 034
21.30	997.925 834	997.923 633	997.921 432	997.919 229	997.917 025	997.914 820	997.912 614	997.910 407	997.908 200	997.905 991
21.40	997.903 781	997.901 570	997.899 358	997.897 145	997.894 931	997.892 716	997.890 499	997.888 282	997.886 064	997.883 845

表(续)

$t/^\circ\text{C}$	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
21.50	997.881 625	997.879 404	997.877 182	997.874 958	997.872 734	997.870 509	997.868 282	997.866 055	997.863 827	997.861 597
21.60	997.859 367	997.857 136	997.854 903	997.852 670	997.850 435	997.848 200	997.845 963	997.843 726	997.841 487	997.839 248
21.70	997.837 007	997.834 766	997.832 523	997.830 280	997.828 035	997.825 789	997.823 543	997.821 295	997.819 046	997.816 797
21.80	997.814 546	997.812 294	997.810 042	997.807 789	997.805 535	997.803 280	997.801 020	997.798 763	997.796 504	997.794 244
21.90	997.791 983	997.789 721	997.787 458	997.785 195	997.782 930	997.780 666	997.778 401	997.776 129	997.773 860	997.771 590
22.00	997.769 319	997.767 047	997.764 774	997.762 500	997.760 225	997.757 949	997.755 672	997.753 394	997.751 115	997.748 835
22.10	997.746 554	997.744 272	997.741 989	997.739 705	997.737 420	997.735 134	997.732 847	997.730 558	997.728 269	997.725 979
22.20	997.723 688	997.721 395	997.719 103	997.716 809	997.714 513	997.712 217	997.709 920	997.707 622	997.705 323	997.703 023
22.30	997.700 721	997.698 419	997.696 116	997.693 812	997.691 507	997.689 200	997.686 891	997.684 585	997.682 276	997.679 966
22.40	997.677 654	997.675 342	997.673 029	997.670 715	997.668 400	997.666 085	997.663 766	997.661 446	997.659 129	997.656 808
22.50	997.654 487	997.652 165	997.649 842	997.647 517	997.645 192	997.642 866	997.640 539	997.638 211	997.635 881	997.633 551
22.60	997.631 220	997.628 893	997.626 554	997.624 220	997.621 885	997.619 549	997.617 212	997.614 873	997.612 534	997.610 194
22.70	997.607 853	997.605 521	997.603 187	997.600 823	997.598 478	997.596 132	997.593 785	997.591 437	997.589 087	997.586 737
22.80	997.584 386	997.582 044	997.579 691	997.577 327	997.574 972	997.572 615	997.570 258	997.567 900	997.565 541	997.563 181
22.90	997.560 820	997.558 459	997.556 095	997.553 731	997.551 366	997.549 000	997.546 633	997.544 265	997.541 896	997.539 526
23.00	997.537 155	997.534 783	997.532 410	997.530 036	997.527 661	997.525 285	997.522 908	997.520 530	997.518 151	997.515 771
23.10	997.513 390	997.511 008	997.508 625	997.506 242	997.503 857	997.501 471	997.499 084	997.496 696	997.494 307	997.491 918
23.20	997.489 527	997.487 135	997.484 742	997.482 349	997.479 954	997.477 558	997.475 162	997.472 764	997.470 365	997.467 966
23.30	997.465 565	997.463 163	997.460 761	997.458 357	997.455 953	997.453 547	997.451 141	997.448 733	997.446 325	997.443 915
23.40	997.441 505	997.439 093	997.436 681	997.434 268	997.431 853	997.429 438	997.427 021	997.424 604	997.422 186	997.419 766
23.50	997.417 346	997.414 925	997.412 503	997.410 079	997.407 655	997.405 230	997.402 804	997.400 377	997.397 949	997.395 520
23.60	997.393 090	997.390 659	997.388 226	997.385 793	997.383 360	997.380 925	997.378 489	997.376 052	997.373 614	997.371 175
23.70	997.368 735	997.366 294	997.363 852	997.361 410	997.358 966	997.356 521	997.354 076	997.351 629	997.349 181	997.346 733
23.80	997.344 283	997.341 832	997.339 381	997.336 928	997.334 475	997.332 020	997.329 565	997.327 108	997.324 651	997.322 193

表(续)

$t/^\circ\text{C}$	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
23.90	997.319 733	997.317 273	997.314 812	997.312 349	997.309 886	997.307 422	997.304 957	997.302 491	997.300 024	997.297 555
24.00	997.295 086	997.292 616	997.290 145	997.287 673	997.285 200	997.282 727	997.280 252	997.277 776	997.275 299	997.272 821
24.10	997.270 342	997.267 863	997.265 382	997.262 900	997.260 418	997.257 934	997.255 449	997.252 964	997.250 477	997.247 990
24.20	997.245 501	997.243 012	997.240 522	997.238 030	997.235 538	997.233 045	997.230 550	997.228 055	997.225 559	997.223 062
24.30	997.220 564	997.218 065	997.215 565	997.213 064	997.210 562	997.208 059	997.205 555	997.203 050	997.200 544	997.198 037
24.40	997.195 530	997.193 021	997.190 511	997.188 001	997.185 489	997.182 976	997.180 463	997.177 948	997.175 433	997.172 917
24.50	997.170 399	997.167 881	997.165 361	997.162 841	997.160 320	997.157 798	997.155 275	997.152 751	997.150 225	997.147 699
24.60	997.145 172	997.142 644	997.140 116	997.137 586	997.135 055	997.132 523	997.129 990	997.127 457	997.124 922	997.122 386
24.70	997.119 850	997.117 312	997.114 774	997.112 234	997.109 694	997.107 153	997.104 610	997.102 067	997.099 523	997.096 977
24.80	997.094 431	997.091 884	997.089 336	997.086 787	997.084 237	997.081 686	997.079 134	997.076 582	997.074 028	997.071 473
24.90	997.068 917	997.066 361	997.063 803	997.061 244	997.058 685	997.056 124	997.053 563	997.051 001	997.048 437	997.045 873
25.00	997.043 308	997.040 742	997.038 174	997.035 606	997.033 037	997.030 467	997.027 896	997.025 324	997.022 752	997.020 178
25.10	997.017 603	997.015 027	997.012 451	997.009 873	997.007 294	997.004 715	997.002 135	996.999 553	996.996 971	996.994 387
25.20	996.991 803	996.989 218	996.986 632	996.984 045	996.981 457	996.978 868	996.976 278	996.973 687	996.971 095	996.968 502
25.30	996.965 909	996.963 314	996.960 718	996.958 122	996.955 524	996.952 926	996.950 326	996.947 726	996.945 125	996.942 522
25.40	996.939 919	996.937 315	996.934 710	996.932 104	996.929 497	996.926 889	996.924 280	996.921 670	996.919 060	996.916 448
25.50	996.913 835	996.911 222	996.908 607	996.905 992	996.903 375	996.900 758	996.898 140	996.895 520	996.892 900	996.890 279
25.60	996.887 657	996.885 034	996.882 410	996.879 785	996.877 159	996.874 532	996.871 905	996.869 276	996.866 647	996.864 016
25.70	996.861 384	996.858 752	996.856 119	996.853 484	996.850 849	996.848 213	996.845 576	996.842 938	996.840 299	996.837 659
25.80	996.835 018	996.832 376	996.829 734	996.827 090	996.824 445	996.821 800	996.819 153	996.816 506	996.813 857	996.811 208
25.90	996.808 558	996.805 907	996.803 255	996.800 601	996.797 947	996.795 293	996.792 637	996.789 980	996.787 322	996.784 664

注: t 是基于 1990 年国际温标。

此表出处:

tm-Technisches Messen 59 (1992) 7/8 © R. Olaenbourg Verlag

附录 D

空气密度计算公式

$$\rho = \frac{pM_a}{ZRT} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (\text{D.1})$$

式中: ρ ——湿空气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

p ——大气压力, Pa;

M_a ——干空气摩尔质量 = $0.028\,963\,512\,440 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$;

Z ——压缩系数;

R ——摩尔气体常数 = $8.314\,510 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

T ——热力学温度 = $273.15 + t$, K;

x_v ——水蒸气摩尔系数;

M_v ——水的摩尔质量 = $18.015 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

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

$$x_v = hf(p, t) \frac{p_w(t)}{p} \quad (\text{D.3})$$

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

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

以上公式 (D.2) 至 (D.5) 中的常数项数值如下:

$$a_0 = 1.581\,23 \times 10^{-8} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1}$$

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

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

$$b_0 = 5.707 \times 10^{-8} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1}$$

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

$$c_0 = 1.989\,8 \times 10^{-8} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1}$$

$$c_1 = -2.376 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$$

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

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

$$\alpha = 1.000\,62$$

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

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

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

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

$$C = 33.937\,110\,47$$

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

公式出处: Metrologia 1992, 29, 67-70 R. S. Davis

附录 E

湿空气密度表

表 E.1 相对湿度 50%, CO₂ 含量 0.04% 在 t_m 和压力 p 的空气密度 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

t_m /°C	p/kPa														t_m /°C
	95	96	97	98	99	100	101	101.325	102	103	104	105	106	107	
0	1.211	1.223	1.236	1.249	1.262	1.275	1.287	1.291	1.291	1.300	1.313	1.326	1.338	1.351	0
5	1.188	1.201	1.213	1.226	1.238	1.251	1.263	1.268	1.268	1.276	1.289	1.301	1.314	1.326	5
10	1.166	1.179	1.191	1.203	1.216	1.228	1.240	1.244	1.244	1.253	1.265	1.277	1.290	1.302	10
15	1.145	1.157	1.169	1.181	1.193	1.206	1.218	1.222	1.222	1.230	1.242	1.254	1.266	1.278	15
20	1.124	1.136	1.148	1.160	1.172	1.183	1.195	1.199	1.199	1.207	1.219	1.231	1.243	1.255	20
25	1.103	1.115	1.127	1.138	1.150	1.162	1.173	1.177	1.177	1.185	1.197	1.209	1.220	1.232	25
30	1.083	1.094	1.106	1.117	1.129	1.140	1.152	1.155	1.155	1.163	1.175	1.186	1.198	1.209	30
35	1.062	1.073	1.085	1.096	1.107	1.119	1.130	1.134	1.134	1.141	1.153	1.164	1.175	1.187	35
40	1.041	1.053	1.064	1.075	1.086	1.097	1.108	1.112	1.112	1.119	1.131	1.142	1.153	1.164	40
45	1.021	1.031	1.042	1.053	1.064	1.075	1.086	1.090	1.090	1.097	1.108	1.119	1.130	1.141	45
50	0.999	1.010	1.021	1.031	1.042	1.053	1.064	1.067	1.067	1.075	1.085	1.096	1.107	1.118	50
55	0.977	0.988	0.998	1.009	1.019	1.030	1.041	1.044	1.044	1.051	1.062	1.073	1.083	1.094	55
60	0.954	0.965	0.975	0.985	0.996	1.006	1.017	1.020	1.020	1.027	1.038	1.048	1.059	1.069	60
65	0.930	0.940	0.951	0.961	0.971	0.982	0.992	0.995	0.995	1.002	1.012	1.023	1.033	1.043	65
70	0.905	0.915	0.925	0.935	0.945	0.955	0.965	0.969	0.969	0.976	0.986	0.996	1.006	1.016	70
75	0.878	0.888	0.898	0.908	0.918	0.928	0.938	0.941	0.941	0.948	0.958	0.968	0.978	0.988	75
80	0.848	0.858	0.868	0.878	0.888	0.898	0.908	0.911	0.911	0.917	0.927	0.937	0.947	0.957	80
85	0.817	0.827	0.837	0.846	0.856	0.866	0.875	0.879	0.879	0.885	0.895	0.905	0.914	0.924	85
90	0.783	0.793	0.802	0.812	0.821	0.831	0.840	0.844	0.844	0.850	0.860	0.869	0.879	0.888	90
95	0.746	0.755	0.765	0.774	0.783	0.793	0.802	0.805	0.805	0.812	0.821	0.831	0.840	0.850	95
100	0.705	0.714	0.723	0.733	0.742	0.751	0.761	0.764	0.764	0.770	0.779	0.789	0.798	0.807	100

表 E.2 不同温度和湿度下空气密度的修正值

$t_{\text{测}}$ /℃	空气相对湿度 ϕ /%											$t_{\text{标}}$ /℃
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0
5	0.002	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	5
10	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.003	10
15	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.000	-0.001	-0.002	-0.002	-0.003	-0.004	15
20	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001	0.000	-0.001	-0.002	-0.003	-0.004	-0.005	20
25	0.007	0.006	0.004	0.003	0.001	0.000	-0.001	-0.003	-0.004	-0.006	-0.007	25
30	0.009	0.007	0.006	0.004	0.002	0.000	-0.002	-0.004	-0.006	-0.007	-0.009	30
35	0.012	0.010	0.007	0.005	0.002	0.000	-0.002	-0.005	-0.007	-0.010	-0.012	35
40	0.015	0.012	0.009	0.006	0.003	0.000	-0.003	-0.006	-0.009	-0.012	-0.015	40
45	0.020	0.016	0.012	0.008	0.004	0.000	-0.004	-0.008	-0.012	-0.016	-0.020	45
50	0.025	0.020	0.015	0.010	0.005	0.000	-0.005	-0.010	-0.015	-0.020	-0.025	50
55	0.032	0.025	0.019	0.013	0.006	0.000	-0.006	-0.013	-0.019	-0.025	-0.031	55
60	0.039	0.031	0.024	0.016	0.008	0.000	-0.008	-0.016	-0.023	-0.031	-0.039	60
65	0.049	0.039	0.029	0.019	0.010	0.000	-0.010	-0.019	-0.029	-0.039	-0.048	65
70	0.060	0.048	0.036	0.024	0.012	0.000	-0.012	-0.024	-0.036	-0.048	-0.059	70
75	0.073	0.058	0.044	0.029	0.015	0.000	-0.015	-0.029	-0.044	-0.058	-0.073	75
80	0.089	0.071	0.053	0.035	0.018	0.000	-0.018	-0.035	-0.053	-0.071	-0.088	80
85	0.107	0.086	0.064	0.043	0.021	0.000	-0.021	-0.043	-0.064	-0.086	-0.107	85
90	0.128	0.103	0.077	0.051	0.026	0.000	-0.026	-0.052	-0.077	-0.103	-0.129	90
95	0.153	0.123	0.092	0.062	0.031	0.000	-0.031	-0.062	-0.093	-0.124	-0.155	95
100	0.182	0.146	0.110	0.073	0.037	0.000	-0.037	-0.074	-0.110	-0.147	-0.184	100

附录 F

几种标准液体的毛细常数 α (20 °C)

溶液名称	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	毛细常数 α / mm^2
异辛烷	692.9	2.81
壬烷	718.8	3.26
纯水	998.2	7.43
溴代苯	1 494.6	2.45
四氯乙烯	1 622.5	2.03
1,2,3-三溴丙烷	2 415.4	1.94

附录 G

大气压与海平面高度对照表

海平面高度/m	大气压/kPa
0	101.3
400	96.6
800	92.1
1 200	87.7
1 600	83.5
2 000	79.6
2 400	75.6
2 800	71.9
3 200	68.3
3 600	64.9