

力学计量测试丛书

密度计量

MIDU JILIANG

徐秀华 编著



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

力学计量测试丛书

密度计量

徐秀华 编著

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

密度计量/徐秀华编著. —北京: 中国计量出版社, 2010. 5
(力学计量测试丛书)

ISBN 978-7-5026-3278-6

I. ①密… II. ①徐… III. ①密度测定 IV. ①TB933

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 065267 号

内 容 提 要

本书主要介绍密度计量的基本概念、密度测量方法及常见密度测量仪器、密度标准参考物质及重要物质的密度—浓度测量、我国的密度量值传递系统、密度、浓度测量在食品检验中的应用等内容。

本书适合于从事密度计量检测与检定的人员阅读参考, 也可作为密度计量人员培训教材。

中国计量出版社出版
北京和平里西街甲 2 号
邮政编码 100013
电话 (010) 64275360
<http://www.zgjl.com.cn>
三河市灵山红旗印刷厂
新华书店北京发行所发行
版权所有 不得翻印

*

850 mm × 1168 mm 32 开本 印张 9.5 字数 225 千字

2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷

*

印数 1—2 000 定价: 22.00 元

丛 书 编 委 会

主	编	张 跃	刘国普	
编	委	张 跃	刘国普	王 虹
		李宗英	王均国	刘子勇
		张 琬	何 力	柳建明
		李占宏	徐 殷	沈效宏
		于旭光	周 彪	徐秀华
选 题 策 划		王 虹		
版 式 设 计		李宗英		

总

序

计量是实现单位统一、量值准确可靠的活动。计量在经济建设和科技发展中起到举足轻重的作用。计量已渗透到各行各业，成为经济社会有序活动和可持续发展的必要条件。

20 世纪 80 年代，中国计量出版社曾出版了一套《力学计量测试丛书》，该丛书因其实用性强而受到广大读者一致好评。随着新技术的发展，原书很多内容已陈旧。为了满足广大从事力学计量工作技术人员的需求，由中国计量出版社和中国计量科学研究院力学所组织力学计量领域的专家重新编写了《力学计量测试丛书》，并将陆续出版。

本套丛书内容包括衡器、密度计量、硬度计量、天平砝码、流量计量、容量计量、振动计量、力值计量等。

本套丛书专业理论体系完整，且可操作性强，介绍有关力学计量基本原理、定义、公式，对测量方法和典型仪器做了重点介绍。除此以外，还对技术的发展趋势、国内外的现状做了简要介绍。希望它能对提高广大力学计量工作人员的理论和技术水平有所帮助。

丛书编委会

2009.6

前

言

密度是物质的一个重要参数，密度测量在国民经济中有着广泛的应用，然而相关的参考书在国内却极少。应《力学计量测试丛书》编委会的邀约，本人编写了这本《密度计量》。本书共分为五章，第一章论述了密度测量的基本概念以及密度计量专业最新常用名词术语及定义；论述了密度与温度、压力的关系以及密度测量方法、仪器分类等。第二章较为详细地论述了密度测量的基本理论知识、测量方法和仪器，其中包括固体、液体和气体的密度测量以及实验室测量仪器和在线测量仪器；对目前国际上先进的密度测量技术进行了详细的论述，并指出了国际上密度计量发展的最新动态。第三章对密度标准参考物质纯水（海水）、纯汞、空气密度测量进行了较为详尽的论述；同时阐述了工业上重要的工质——水蒸气的密度测量方法；对石油、天然气的各种密度测量方法进行了概括性总结；给出了工业中常用的重要物质——酒精水溶液、蔗糖水溶液、葡萄糖水溶液、果糖水溶液、转化糖水溶液的密度-浓度换算关系式和换算关系表。第四章对我国刚刚建立的固体密度基准以及正在建立中的固体基准密度测量装置进行了全面的论述与分析，并给出了不同测量模式下的不确定度数学模型；对我国即将实施的密度量传系统表进行了详细的介绍。第五章论述了密度、浓度测量在食品行业中的应用。

本书可供从事密度计量测试人员阅读参考，亦可作为密度计

量人员的培训教材。

本书的编写得到了中国计量科学研究院罗志勇研究员的大力支持与帮助，在此表示深深的感谢。

由于时间仓促、水平有限，书中难免有疏漏或错误之处。敬请读者批评指正。

编 者

2010 年 3 月

目

录

CONTENTS

第一章 基本概念 /1

第一节 概述 /1

第二节 密度计量专业常用名词术语及定义 /2

一、一般术语 /2

二、密度测量仪器 /4

三、特性术语定义 /10

第三节 密度与温度、压力的关系 /11

一、密度与温度的关系 /12

二、密度与压力的关系 /14

第四节 密度单位换算 /17

第五节 密度测量法及其仪器分类 /17

第二章 密度测量方法及常见密度测量仪器 /19

第一节 流体静力称量法 /19

一、液体静力天平法 /19

二、磁悬浮密度测量法 /25

三、双浮子称量法 /33

四、称量式数显液体密度法 /36

五、液体相对密度天平法 /44

六、橡塑密度测量仪 /48

第二节 浮计法 /50

- 一、浮计的种类及参数 /51
- 二、有关浮计参数的计算公式 /53
- 三、测量仪器与方法 /55
- 四、浮计示值读数与计算 /58
- 五、测量影响因素及修正 /59
- 六、浮计检定 /68

第三节 密度瓶法 /75

- 一、密度瓶 /75
- 二、泥浆密度计 /82

第四节 振动管密度测量法 /85

- 一、实验室振动式液体密度计 /85
- 二、在线振动管液体密度计 /87

第五节 超声波与电离辐射密度测量法 /92

- 一、声学法 /92
- 二、电离辐射法 /98

第六节 浮沉法 /102

- 一、浮压法 /102
- 二、沉浮比较密度法 /104
- 三、密度梯度法 /106
- 四、差压式密度测量法 /110

第七节 电学法 /114

- 一、电导法 /114
- 二、电磁法 /116

第三章 密度标准参考物质及重要物质的密度 - 浓度测量 /119

第一节 水密度测量 /119

- 一、纯水 /119

二、标准平均海水密度	/121
三、现代水密度测量技术	/131
四、国际实用盐标 (PSS-78)	/141
五、国际海水状态方程 (IESS-80)	/143
第二节 纯汞密度及其测量	/148
第三节 空气密度测量	/154
一、国际上用以确定湿空气密度的通用公式	/154
二、双浮子测量法	/158
第四节 水蒸气密度测量	/161
第五节 石油及天然气的密度测量	/168
一、石油密度计量	/168
二、天然气密度测量	/180
第六节 酒精溶液密度、浓度与温度的关系	/185
第七节 糖溶液密度、浓度与温度的关系	/210

第四章 我国的密度量值传递系统 /217

第一节 固体密度基准	/217
一、我国密度测量的发展历史及现状	/217
二、固体密度基准——单晶硅球的密度测量	/218
三、误差源	/223
第二节 固体密度基准传递装置	/225
一、固体密度基准传递装置	/225
二、固体密度基准传递的不同模式	/229
三、误差源	/232
第三节 我国的密度量值传递系统	/237
第四节 单晶硅密度测量的意义及发展趋势	/243

第五章 密度、浓度测量在食品检验中的应用 /249

第一节 旋光法	/249
---------	------

第二节 折光法 /250

第三节 紫外、可见分光光度法 /252

第四节 红外吸收光谱法 /253

第五节 原子吸收分光光度法 /257

第六节 气相色谱法 /260

第七节 高效液相色谱法 /263

附录一 国内密度标准和检定规程 /265

附录二 密度国际标准 (ISO) 和国际建议 (OIML) /274

附录三 其他国家密度标准 /277

附录四 API 度与相对密度 $d_{15.56}^{15.56}$ 和 ρ_{20} 换算表 /285

参考文献 /286

第一章 基本概念

第一节 概述

自然界是由各种物质组成的，从宏观上看，大量存在的是物质的三态，即气体、液体和固体，从微观上看，它们是物质分子聚集的状态，是实物存在的形式。一般来讲，当一个客观实体分布在一维线、二维平面或三维空间上时，其质量对之长度、面积或体积之比，统称为密度。需要区别时可分别称为线密度、面密度和体密度。体密度常简称为密度。本书所述的物质三态的密度系指物质的体密度。

密度是表征物质内在特性的一个物理量。为描述各种物质的密度特性，以单位体积的物质的质量来度量，其质量的大小说明了物质分子排列的疏密程度。若某种物质在单位体积内的质量大，即分子排列紧密，则密度就大，反之密度就小。它与物质组成的物系形状、光泽等外部特性无关。各种物质密度特性是不同的，而且与它们所处的状态或条件有关，为了正确表示密度量值，必须指明物质所处的有关状态或条件。一般来说，均匀物质的密度在一定的状态（如温度、压力等）下都有确定的值，但对于非均匀物质，例如多相物体、空气柱、烧结物和粉粒体等，其密度在物质各处不同。对于非均匀物体来说，选用充分大的体积进行计算，可以给出平均密度。

密度计量测试涉及到石油、化工、冶金、建材、轻工、煤炭、医疗、贸易、国防以及科学研究领域，应用十分广泛。它不仅关系到生产过程中产品质量控制、检测及管理，而且关系到科

学技术,国际贸易的促进与发展。因此不论从经济或技术观点来看,准确地计量测试是必不可少的。为测量密度,除在实验室里使用着各种类型的密度计或装置外,在工业生产过程中,常用各种测量原理的在线密度测量仪。有些场合,由于测量浓度比测量密度更为直接,故还使用着各种浓度计。它们已经成为工业生产过程中,用以控制与检测流体密度、浓度、组分和质量流量等必不可少的一种工业过程用仪器仪表。

第二节 密度计量专业常用名词 术语及定义

一、一般术语

1. 密度 density

表示单位体积“ V ”中所含物质的质量“ m ”。即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

单位为 kg/m^3 。

2. 表观密度 apparent density

多孔固体(粉末或颗粒状)材料质量与其表观体积(包括“空隙”的体积)之比。

注:空隙包括材料间的空隙和本身的开口孔、裂口或裂纹(浸渍时能被液体填充)以及封闭孔或空洞(浸渍时不能被液体填充)。

3. 实际密度 actual density

多孔固体材料质量与其体积(不包括“空隙”的体积)之比。

4. 堆积(容积)密度 bulk density

在特定条件下,既定容积的容器内,疏松状(小块、颗粒、纤维)材料质量与其体积之比。

5. 相对密度 relative density

在规定条件，物质密度 ρ_1 与参考物质密度 ρ_2 之比。即

$$d = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (1-2)$$

无单位，即无量纲的量。

注：在密度测量领域中，参考物质对于液体与固体通常采用纯水，对于气体通常采用与其气体的压力和温度相同的干燥空气。

6. 标准密度 standard density

在规范规定的标准条件下的物质密度（例如，温度 273.15K 即 0℃ 和压力 101 325Pa 下的气体密度；20℃ 下的液体密度）。

7. 临界密度 critical density

物质在临界点的密度。

8. 比容（比体积） specific volume

物质体积“ V ”与其质量“ m ”之比。它是密度的倒数。即

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-3)$$

单位为 m^3/kg 。

9. 质量分数 mass fraction

溶液中所含溶质质量“ m' ”与溶液质量“ m ”之比。即

$$p = \frac{m'}{m} \times 100\% \quad (1-4)$$

p 为无量纲的量，用小数或% 表示。

10. 体积分数 volume fraction

在一定温度下，溶液中所含溶质体积“ V' ”与溶液体积“ V ”之比。即

$$q = \frac{V'}{V} \times 100\% \quad (1-5)$$

q 为无量纲的量, 用小数或% 表示。

11. 静压称量 hydrostatic weighing

通过称量浸入液体中密度标准 (如标准浮子或硅球等) 在稳定状态下所受到的浮力, 从而求得液体的密度或进行密度量值传递的方法。

二、密度测量仪器

1. 固体密度基准 solid density primary standard

一种物理化学性能十分稳定 (用单晶硅、石英或玻璃等材料制作) 的固体球或立方体, 是密度量值传递的最高标准, 可以直接溯源到基本物理量质量和长度。

2. 密度标准液 density standard liquids

用于密度量值传递的标准液体。

3. 标准硅球 standard silicon sphere

用单晶硅材料制作的密度标准球, 用于密度量值传递。

4. 浮计 hydrometer

一种在液体中能垂直自由漂浮, 由它浸没于液体中的深度来直接测量液体密度或溶液浓度的仪器。本术语仅指质量固定式玻璃浮计, 简称为“浮计”。

5. 玻璃浮计的组成部分

(1) 躯体 body

为浮计主体部分, 是底部呈圆锥形或半球形 (以避免附着气泡) 的圆柱体。

(2) 压载物 loading material

为调节浮计质量及使其垂直稳定漂浮而装在躯体最底部的材料。

(3) 干管 stem

熔接于躯体的上部, 顶端密封的细长圆管。

(4) 刻度 scale

固定在干管内一组有序的、指示不同量值的刻线标记。

(5) 示值范围 indication range

浮计所指示的“最低值”到“最高值”的范围。

(6) 分度值 value of a scale division

浮计相邻两刻度线所对应的量值之差。

6. 副基准密度计 secondary standard hydrometer

副基准密度计是由固体密度基准来定度的，它担负着一等标准密度计、一等标准海水计、一等标准糖量计的量值传递。测量范围为 $(650 \sim 3\,000) \text{ kg/m}^3$ 。

7. 副基准酒精计 secondary standard alcoholometer

副基准酒精计是由固体密度基准来传递的，它负责一等标准酒精计的量值传递。

8. 标准浮计 standard hydrometer

标准浮计分一等标准浮计和二等标准浮计。一等标准浮计负责二等标准浮计的量值传递工作，二等标准浮计负责工作浮计的量值传递。

9. 通用密度计 hydrometer for general use

用于测量液体密度的通用浮计（例如：密度计）。

10. 专用密度计 hydrometer for special purpose

用于测量某一种液体密度或相对密度的专用浮计。仪器以所测液体而命名（例如：石油密度计、乳汁密度计和海水密度计等）。

11. 海水密度计 seawatermeter

用于测量海水密度的浮计。海水密度计的标准温度是 17.5°C ，其密度值是 17.5°C 时的海水密度与 17.5°C 时的纯水密度的比值，是一相对的密度，为无量纲量。测量范围为 $(1.000 \sim 1.040)$ 。

12. 酒精密度计 alcohol hydrometer

用于测定酒精溶液密度的浮计。测量范围为 $(789.24 \sim$

998.20) kg/m^3 。

13. 酒精计 alcoholmeter

用于测定酒精溶液体积或质量分数的浮计。

14. 质量酒精计 mass alcoholmeter

用于测定酒精溶液质量分数的浮计。测量范围为 p : (0 ~ 100)%。

15. 体积酒精计 volume alcoholmeter

用于测定酒精溶液体积分数的浮计。测量范围为 q : (0 ~ 100)%。

16. 糖量计 saccharometer

用于测定糖溶液质量分数的浮计。测量范围为 p : (0 ~ 80)%。

17. 石油密度计 densimeter for petroleum

用于测量石油产品密度的浮计。测量范围为 (650 ~ 1 100) kg/m^3 。

18. 乳汁计 densimeter for latex

用于测量乳品密度或乳汁度的浮计。乳汁度用 m° 表示。测量范围为 (1 015 ~ 1 040) kg/m^3 或 (15 ~ 40) m° 。

19. 土壤计 densimeter for soil

用于测量土壤（泥水混合液）的相对密度或土壤度的浮计。土壤计分甲种土壤计和乙种土壤计。

20. 甲种土壤计 A - type densimeter for soil

用于测量土壤（泥水混合液）的土壤度的浮计。甲种土壤计的单位用符号 s° 表示。测量范围为 (-5 ~ 50) s° ，相当于密度 (995 ~ 1 030) kg/m^3 。

$$s^\circ = \frac{\rho_{20} - 998.203}{0.623} \quad (1-6)$$

21. 乙种土壤计 B - type densimeter for soil

用于测量土壤（泥水混合液）相对密度的浮计。测量范围