

容量计量技术

RONGLIANG JILIANG JISHU

廉育英 著



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE



容量计量技术

廉育英 著

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

容量计量技术/廉育英著. —北京: 中国计量出版社, 2006. 7
ISBN 7-5026-2439-2

I. 容… II. 廉… III. 容量—计量 IV. TB938.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 063433 号

内 容 提 要

本书根据作者从事容量计量工作数十年来的科研成果和检测技术实践经验并加以总结整理编写而成。书中全面系统地论述了容量计量领域现代的计量方法及其原理、实验装置及仪器、测量技术、误差分析和具体应用等。

本书可供容量、流量计量领域内的科研、设计、检定人员和管理干部以及有关大专院校师生学习与参考。

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](http://www.zgjl.com.cn)
北京市迪鑫印刷厂印刷
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 14.5 字数 453 千字
2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月第 1 次印刷

*

印数 1—2 000 定价: 36.00 元

前 言

容量是指容器中所容纳物质(液体、气体和固体微粒)的体积或质量。容量计量是研究物质体积或质量计量的专门学科。在社会实践中,它不仅在化学、分析化学、医药卫生等研究领域具有重要的科学意义,而且是一项基础性的法制计量工作,涉及石油、化工、外贸、商业、民航、军队等系统油料商贸中的经营管理、成本核算与经济效益,并发挥着举足轻重的作用。

容量是导出量。对于中小容量,其量值是通过质量与密度计量求得;对于储罐之类的大容量,量值则是通过容器几何尺寸量的计量求得。因此,容量计量技术的研究涉及到与容量有关的质量、密度、长度、温度等计量技术的研究。因此,容量计量是一门综合性的计量研究专业学科。

本书是作者基于自己多年来的研究成果并参考有关资料撰写而成,不妥之处,诚请读者批评指正。

作 者

2006 年 5 月于北京

目 录

第1章 概述	(1)
1 容量的定义与量器的分类	(1)
2 容积单位及其换算系数	(2)
3 容积与温度的关系	(4)
4 量器的容积误差	(4)
5 量入式与量出式量器	(6)
第2章 玻璃量器	(8)
1 玻璃量器的特点	(8)
2 量器的等级分类	(8)
3 液面观察方法	(9)
3.1 弯月面的形成	(9)
3.2 观察方法	(12)
4 工作玻璃量器	(13)
4.1 量杯	(13)
4.2 量筒	(14)
4.3 量瓶	(16)
4.4 滴定管	(19)
4.5 吸管	(25)
5 标准玻璃量器	(33)
5.1 用途、分类和结构	(33)
5.2 标准量器读数误差与管径的关系	(39)
5.3 流出时间与等待时间	(40)
6 标准分度容量瓶	(43)
6.1 量瓶的结构、形状与尺寸	(43)

6.2	标称容量与最大允差	(45)
7	衡量法容量计量原理	(46)
8	衡量法在玻璃量器容量计量中的应用	(48)
8.1	检定环境条件和设备	(48)
8.2	检定一般步骤和方法	(49)
8.3	A级滴定管和微量滴定管的容量检定	(51)
8.4	A级吸管 (包括0.5 mL以下的B级吸管) 的容量检定	(60)
8.5	标准分度容量瓶的容量检定	(61)
8.6	标准玻璃量器的容量检定	(63)
9	衡量法容量计量的误差分析	(64)
10	容量比较法与应用	(69)
10.1	B级量瓶、量筒和量杯的容量检定	(69)
10.2	B级滴定管的容量检定	(70)
10.3	B级吸管的容量检定	(71)
11	新型标准玻璃量器组的建立	(71)
第3章	标准金属量器	(92)
1	金属量器的特点与分类	(92)
2	量器的结构与设计原理	(92)
3	一等标准量器的容量检定 (衡量法)	(96)
3.1	检定条件与准备工作	(97)
3.2	检定项目与检定方法	(97)
3.3	检定结果的误差分析	(100)
3.4	水密度测量	(102)
3.5	纯水密度	(123)
3.6	空气密度测量	(154)
4	二等标准量器的容量检定 (比较法)	(175)
4.1	比较法容量计量原理	(175)
4.2	检定设备	(176)

4.3	检定条件与准备工作	(176)
4.4	检定项目与检定方法	(177)
4.5	检定结果的误差分析	(178)
5	标准金属量器应用——燃油加油机付油量的检定	(180)
5.1	燃油加油机的结构	(180)
5.2	工作原理	(182)
5.3	加油机的型式与类型	(182)
5.4	加油机计量准确度要求	(183)
5.5	付油体积量的计量检定	(184)
5.6	标准体积燃油加油机	(187)
6	标准金属量器应用——饮料罐车容量检定	(191)
6.1	检定设备	(191)
6.2	检定条件与准备工作	(192)
6.3	检定项目与检定方法	(194)
7	标准金属量器应用——汽车油罐车容积检定	(201)
7.1	检定方法	(201)
7.2	检定结果的数据处理	(202)
7.3	容量检定的误差分析	(207)
8	标准金属量器应用——流量计检定	(209)
9	标准金属量器应用——液化石油气 (LPG) 加气机计量 检定	(212)
9.1	概述	(212)
9.2	术语	(213)
9.3	加气机的主要结构与工作原理	(215)
9.4	加气机计量性能要求	(215)
9.5	活塞式液化石油气计量检定装置	(216)
第4章	立式金属罐	(226)
1	概述	(226)
1.1	立式金属罐容量计量的意义	(226)

1.2	立式罐的种类	(226)
1.3	立式罐计量特性要求	(230)
1.4	最小计量体积	(230)
2	专门术语	(232)
3	容量计量原理	(233)
4	液体静压力效应修正值的计算	(234)
4.1	静压力效应修正值公式的导出	(234)
4.2	修正值的不确定度分析	(238)
4.3	修正值公式与原苏联国标的计算式比较	(242)
4.4	静压力容量修正表的应用与装液罐换算为 空罐状态内径的计算	(243)
5	罐底量与罐底不平度修正值的测量	(244)
5.1	容量比较法	(244)
5.2	测量算法	(245)
6	罐体椭圆度与倾斜度修正值的测量	(256)
6.1	倾斜修正值的计算	(257)
6.2	倾斜角 α 的测量	(258)
6.3	罐的椭圆度测量	(260)
7	罐内附件体积及其起迄点高度的测量	(260)
8	各圈板内高与参照高度的测量	(261)
8.1	裸体罐圈板内高的测量	(261)
8.2	保温罐和无扶梯裸体罐圈板高度的测量	(263)
8.3	参照高度的测量	(264)
9	各圈板直径的测量	(264)
9.1	围尺法	(265)
9.2	铅直仪(垂准仪)测量法	(265)
9.3	具导轨光学径向测量仪测量法	(279)
9.4	全站仪测量法	(298)
9.5	容量表的编制	(317)

9.6	浮顶罐容量测量	(320)
9.7	立式罐容量检测结果不确定度分析	(323)
9.8	实际使用时罐内液体体积的计算	(329)
第5章	卧式金属罐	(332)
1	概述	(332)
2	容量测量原理	(333)
3	直圆筒内直径的测量	(334)
3.1	测量位置的确定	(334)
3.2	外测法	(335)
3.3	内测法	(339)
4	直圆筒内筒长和圈板内宽的测量	(341)
4.1	外测法	(341)
4.2	内测法	(345)
5	顶板的测量	(346)
5.1	顶板底圆筒内直径的测量	(346)
5.2	顶板外高的测量	(347)
5.3	总内长的测量	(348)
5.4	内、外伸长的测量	(349)
5.5	其他几何尺寸的测量 (以弧形顶为例)	(351)
6	下尺点内竖直径的测量	(354)
7	倾斜测量	(354)
8	钢板厚度及罐内附件的测量	(355)
9	容积计算	(355)
9.1	直圆筒容积计算	(356)
9.2	附件及液高修正值	(359)
9.3	顶板容积计算	(360)
10	倾斜卧式罐的容积计算	(378)
10.1	倾斜比的计算	(378)
10.2	直圆筒的部分容积计算	(379)

10.3	顶板的部分容积计算	(385)
11	容积压力修正	(387)
12	卧式罐容量自动测量仪	(391)
12.1	仪器的结构	(391)
12.2	测量原理	(392)
第6章	球形罐	(394)
1	概述	(394)
2	围测法	(395)
2.1	赤道周长(水平周长)测量	(395)
2.2	竖向外圆周长测量	(396)
2.3	罐内垂直总高测量	(396)
2.4	罐壁厚度测量	(397)
2.5	总容积计算	(397)
2.6	部分容积计算	(397)
2.7	测量精度分析	(400)
2.8	容积温度换算	(401)
3	压力对金属球罐容积的影响	(402)
3.1	理论分析	(402)
3.2	应用举例	(404)
4	全站仪测量法	(406)
4.1	相关量的测量	(406)
4.2	球心天顶距与球心至仪器中心平距的计算	(407)
4.3	赤道内半径与竖向内半径的计算	(408)
4.4	赤道半径与竖向半径换算为标准温度 20℃ 值	(409)
4.5	球罐总容积与部分容积计算	(409)
第7章	容器内液体温度测量	(411)
1	温度测量的基本概念	(411)
1.1	温度	(411)
1.2	温标	(412)

2	玻璃液体温度计的结构与工作原理	(418)
2.1	温度计的分类	(418)
2.2	温度计的工作原理	(418)
2.3	测温范围	(421)
2.4	棒式与内标式温度计的结构	(422)
3	玻璃液体温度计的使用	(424)
4	玻璃温度计的故障与维修	(428)
4.1	玻璃水银温度计	(428)
4.2	玻璃有机液体温度计	(428)
5	罐内油温测量	(429)
第8章	液位与质量计量	(431)
1	液位测量	(431)
1.1	检尺	(431)
1.2	玻璃式液位计	(433)
1.3	雷达液位计	(435)
1.4	静压式液位计	(435)
1.5	伺服式液位计	(437)
1.6	可动液槽式液位计检定标准装置	(439)
2	罐内液体质量的确定	(441)
3	油罐液体称重仪	(444)
3.1	称重仪的理论依据	(444)
3.2	设计原理	(447)
	参考文献	(450)

第1章 概述

1 容量的定义与量器的分类

容量是指容器内可容纳物质的（液体、气体或固体微粒）体积或质量的量。可容纳物质体积的量称为容器的体积容量，简称容器的容积；可容纳物质质量的量称为容器的质量容量。

容器按用途可分为两大类：一类仅作贮存物质用，这类容器称为贮存容器；另一类容器不仅具有前者的作用，而且还具有一定的计量特性，由于它的不同高度对应于不同的容量。因此，这种作为计量器具的容器称为量器。

按制作材料和用途分类，量器可分为玻璃量器、金属量器和计量罐，如图1-1所示。

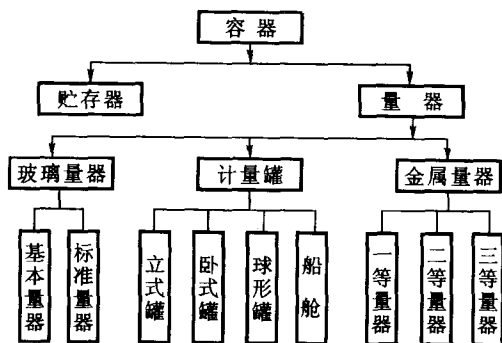


图1-1 容器的分类

2 容积单位及其换算系数

国际单位制 (SI) 中, 容积的单位是立方米, 符号为 m^3 。其分数单位为立方分米 (dm^3) 和立方厘米 (cm^3)。

习惯上容积也常用升 (L, 等于 10^{-3}m^3), 或毫升 (mL, 等于 10^{-6}m^3)、微升 (μL , 等于 10^{-9}m^3) 等单位来表示。

升是非 SI 单位, 即制外单位。由于它应用十分广泛而且也非常重要, 所以将它保留下来可以与 SI 并用, 属法定计量单位。

1901 年第三届国际计量大会曾定义升是 “1 kg 纯水在其最大密度和标准大气压下所占有的体积”, 由此, $1 \text{ L} = 1.000\,028 \text{ dm}^3$, 这是旧升的定义。1964 年第十二届国际计量大会对升的定义作了修订, 声明升是 1 dm^3 , 即 10^{-3}m^3 的专用名称, 并建议不用升表示高精度的测量结果。

在多种单位制并存的情况下, 同一个量的两种计量单位之比 k 称为单位换算系数。

容积单位之间的换算系数见表 1-1。单位 N_2 沿纵行排列, 它可通过横行所表示的单位 N_1 来换算, 所求的单位换算系数位于相应的横行和纵行的交叉方格中。

例如:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{1[\text{cm}^3]}{1[\text{L}]} = \frac{1[\text{cm}^3]}{1 \times 1\,000[\text{cm}^3]} = 0.001$$

$$\therefore 1[\text{cm}^3] = 0.001[\text{L}]$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{1[\text{m}^3]}{1[\text{L}]} = \frac{1\,000[\text{L}]}{1[\text{L}]} = 1\,000$$

$$\therefore 1[\text{m}^3] = 1\,000[\text{L}]$$

表 1-1 容积不同单位间的换算系数

$\begin{matrix} N_1 \\ \backslash \\ N_2 \end{matrix}$	米 ³ (m ³)	米 ³ (m ³)	升(1901) ^① (L)	市尺 ³	码 ³ (yd ³)
1 米 ³ (m ³)	1	1 × 10 ⁻⁶	999.972	27	1.307 95
1 厘米 ³ (cm ³)	1 × 10 ⁻⁶	1	9.999 72 × 10 ⁻⁴	2.7 × 10 ⁻⁵	1.307 95 × 10 ⁻⁶
1 升 (1901) ^① (L)	1.000 028 × 10 ⁻³	1.000 028 × 10 ³	1	2.700 08 × 10 ⁻²	1.307 99 × 10 ⁻³
1 市尺 ³	3.703 7 × 10 ⁻²	3.703 7 × 10 ⁴	37.035 9	1	4.844 25 × 10 ²
1 码(yd ³)	0.764 555	7.645 55 × 10 ⁵	764.534	20.643	1
1 英尺 ³ (ft ³)	2.831 68 × 10 ⁻²	2.831 68 × 10 ⁴	28.316 1	0.764 554	3.703 7 × 10 ⁻⁵
1 英寸 ³ (in ³)	1.638 71 × 10 ⁻⁵	16.387 1	1.638 66 × 10 ⁻²	4.424 52 × 10 ⁻⁴	2.143 35 × 10 ⁻⁵
1 英加仑 (UKgal)	4.546 09 × 10 ⁻³	4 546.09	4.545 96	0.122 744	5.946 08 × 10 ⁻³
1 美加仑 (USgal)	3.785 41 × 10 ⁻³	3 785.41	3.785 41	0.102 206	4.951 13 × 10 ⁻³
1 升(L ³)	0.001	1 000	0.999 972	0.027	1.307 95 × 10 ⁻³
$\begin{matrix} N_1 \\ \backslash \\ N_2 \end{matrix}$	英尺 ³ (ft ³)	英寸 ³ (in ³)	英加仑(UKgal)	美加仑(USgal)	升(L)
1 米 ³ (m ³)	35.314 7	6.102 37 × 10 ⁴	219.969	264.172	1 000
1 厘米 ³ (cm ³)	3.531 47 × 10 ⁻⁵	6.102 37 × 10 ⁻²	2.199 69 × 10 ⁻⁴	2.641 72 × 10 ⁻⁴	0.001
1 升 (1901) ^① (L)	3.531 57 × 10 ⁻²	61.025 5	0.219 975	0.264 179	1.000 028
1 市尺 ³	1.307 95	2 260.13	8.416 99	9.784 14	37.037
1 码(yd ³)	27	466 56.0	168.178	201.973	764.555
1 英尺 ³ (ft ³)	1	1 728.00	6.228 83	7.480 51	28.316 8
1 英寸 ³ (in ³)	5.787 04 × 10 ⁻⁴	1	3.604 65 × 10 ⁻³	4.329 01 × 10 ⁻³	1.638 71 × 10 ⁻²
1 英加仑 (UKgal)	0.160 544	277.419	1	1.200 95	4.546 09
1 美加仑 (USgal)	0.133 681	231	0.832 674	1	3.785 41
1 升(L ³)	35.314 7 × 10 ⁻³	61.023 7	0.219 969	0.264 172	1

① 用升(1901)表示旧定义的升。

3 容积与温度的关系

所有量器的容积都会受到因温度变化而引起的热胀冷缩的影响。

假定某量器 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的容积为 V_0 ，某材料的体膨胀系数为 β ，则 $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的容积为：

$$V_t = V_0(1 + \beta t) \quad (1-1)$$

若温度由 $t_1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化到 $t_2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，则其容积将由 V_{t_1} 变化到 V_{t_2} ，由上式可推得：

$$V_{t_2} = V_{t_1} \frac{1 + \beta t_2}{1 + \beta t_1} = V_{t_1} (1 + \beta t_2) (1 - \beta t_1 + \beta^2 t_1^2 + \cdots)$$

当忽略 β 的高次项微量时，可得：

$$V_{t_2} = V_{t_1} [1 + \beta(t_2 - t_1)] \quad (1-2)$$

在实际工作中，常依据式 (1-2) 进行不同温度下量器容积的换算，特别是相对于标准温度 ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下的容积 V_{20} 值进行换算。

4 量器的容积误差

量器上所标注的对应于特定刻线在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的容积值称为量器的标称容量。由于制造和使用上的原因，标称容量 ($V_{\text{标}}$) 与其实容量 ($V_{\text{实}}$) 之间总存在一定的差值，此差值称为量器的偏差，即

$$\Delta = V_{\text{实}} - V_{\text{标}} \quad (1-3)$$

对有的量器 (如玻璃量器和小口标准金属量器等)，它的使用容积就是标称容量，检定时须判定其标称值的误差是否超出允

差。标称值的误差等于量器的偏差与它的实际值测量误差的合成，若实际值测量误差很小可忽略不计，则此时量器的误差等于它的偏差。允差是为了保证量器具有一定的精度等级而规定的最大绝对误差，若标称值的误差大于该量器的允差，则量器为不合格，不具有确定的精度等级；若标称值的误差未超过量器的允差，表明量器具有确定的精度等级，是合格的。

对有的量器（如大口标准金属量器和各种计量罐等），它的使用容积是实际测量值，检定时需要给出量器的实际值及误差，此时它的容积不确定度由检定时的各误差分量所决定。

在日常检定中，测量次数往往取两次，两次测定值的平均值记为 $V_{\text{实}}$ ，那么，通过以下简单分析，即可判断该测量结果是否符合确定的精度等级要求：

设两次测定值为 V_1 和 V_2 ，若按极差法处理，则单次测量的标准偏差为：

$$\hat{\sigma}_2 = \frac{|V_1 - V_2|}{d_2} = \frac{|V_1 - V_2|}{1.13} \quad (1-4)$$

式中： d_2 ——测量次数为 2 的极差系数，其值等于 1.13。

于是，平均值的标准偏差为：

$$\sigma_2 = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{2}} \approx \frac{2}{3} |V_1 - V_2|$$

即可取两次测定差值的 2/3 作为平均值的标准偏差。若规定平均值极限误差为 $3\sigma_2$ ，则当两次测定值之差的绝对值不超过该极限误差的一半时，即可保证平均值的误差不超过该极限误差。

若两次测定值之差的绝对值超过极限误差的一半时，则需进行第三次测量，按极差法有：

$$\hat{\sigma}_3 = \frac{|V_{\max} - V_{\min}|}{d_3} \quad (1-5)$$

式中： d_3 ——三次测量的极差系数（ $d_3 = 1.69$ ）；

$V_{\max}$ ——三次测量中的最大值；

$V_{\min}$ ——三次测量中的最小值。

于是，平均值的标准误差为：

$$\sigma_3 = \frac{\hat{\sigma}_3}{\sqrt{3}} \approx \frac{1}{3} |V_{\max} - V_{\min}|$$

若规定平均值的极限误差为 $3\sigma_3$ ，则当最大值与最小值之差不超过该极限误差时，即表明平均值的误差不超过该极限误差。

5 量入式与量出式量器

由于量器壁对试验液体的吸附作用，当液体从量器内流出时，总有一层薄液附着在器壁上，所以注入量器内液体的体积不等于液体经量器后所排出的体积，其差量即是器壁上所吸附的那一层薄液的体积，简称为器壁的残留量。

由于上述现象的存在，根据量器的用途，量器就分为量入式量器和量出式量器两种。量入式量器用来测定注入其内的被测液体的体积（注入量器中液体的体积等于它的刻度表上相应的读数）；量出式量器则用来测定从它内部排出的液体体积（排出的液体体积等于它的刻度表上相应的读数）。为了区别量入式与量出式，通常在量器的外部标注某一符号，我国目前统一用“ I_n ”表示量入，用“ E_x ”表示量出，若量器上无“ I_n ”或“ E_x ”的标注字样时，则均为量出式量器。

由于器壁对液体的吸附作用，故对于量出式量器规定有流出时间和等待时间。所谓流出时间是指液体从量器最高标线处经流液嘴或排出阀，全部自然流至最低标线所需要的时间；而等待时间是指液体流至被检量器所要读数标线以上约 5 mm 处时，为使器壁上所吸附的液体充分流下而需要等待的一定时间。在此之后，再调整液面到被测标线位置，一般是对具有分度的不完全流出的量出式量器而言。对于无分度的完全流出的量出式量器，它