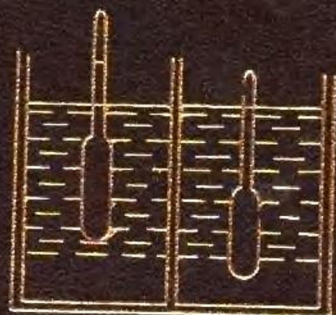


容量与密度计量

廉育英 柯瑞刚 编著



内 容 简 介

本书作者将在容量与密度计量两学科中多年来的科研成果和工作实践经验加以总结,从概念入手,全面系统地论述了该领域内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。

本书可供容量与密度计量领域内的科研、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。

容量与密度计量

廉育英 柯瑞刚 编著

*

责任编辑:高金生 版式设计:冉晓华

封面设计:方 芬 责任校对:熊天荣

责任印制:王国光

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 $17 \frac{3}{4}$ ·插页 2·字数 467 千字

1990 年 5 月北京第一版·1990 年 5 月北京第一次印刷

印数 0,001—6,000·定价:15.00 元

*

科技新书目:219—001

ISBN 7-111-02158-4/TH·359

前 言

容量系指容器中所容纳物质（液体、气体和固体微粒）的数量（体积或质量）而言。它是一门研究物质（大多为液体或气体）的体积或质量的计量专业学科，在社会实践中，它不仅具有重要的科学意义，而且容量的计量是一项基础性的法制计量工作，它关系到石油、化工、外贸、交通、商业、轻工、民航等系统中许多企业的经营管理、成本核算以及经济与社会效益问题。

密度是指单位体积中物质的质量，是表征物质特性的一个基本物理量。它的计量不仅在物理学、化学、海洋学等学科中对物质性质的研究具有重要意义，而且在石油、化工、轻工、冶金、材料等部门中应用十分广泛，对产品的质量检验、数量计算等也同样具有重要作用。

容量与密度虽然是两个不同的物理量，但它们却息息相关。在容量计量中，经常涉及到密度测量问题。要将容器中物质的体积量化为质量时，需测该物质的密度；同样，在密度计量中，要求某物质的密度时，则需制作某一容积已知的容器，那么装满容器的物质质量与容积之比即为所求的物质密度。可见，本书将容量与密度放在一起论述，十分有利于从事容量计量与密度计量工作的有关人员学习和参考。

本书是根据作者多年来从事容量与密度研究的科研成果和工作实践，并参阅了国内外有关资料编著而成的。

本书初稿完成后，武汉大学物理学系胡修愚副教授、陕西省计量局局长杨玉瓚教授及张鸿珍高级工程师、中国计量科学研究院容量与密度室刘子勇工程师等进行了全面的审校，提出了宝贵的修改意见，在此谨表示衷心感谢！

本书在编写过程中，虽经多次修改，但由于作者水平有限，书中难免有不当甚至错误之处，敬请广大读者批评指正。

目 录

前言

容 量 计 量 篇

第一章 容量基本概念和定义	1
一、容量的定义和量器的分类	1
二、容积单位及其换算	2
三、温度对容积的影响	3
四、量器的容积误差	4
五、量入式与量出式量器	5
六、国家容量计量器具检定系统	6
(一) 检定系统制定依据的基本原则	6
(二) 国家容量基准	7
(三) 标准器具	10
(四) 检定系统框图	11
第二章 玻璃量器	12
一、玻璃量器的特点	12
二、量器的等级分类	12
三、液面观察方法	13
(一) 弯月面的形成	13
(二) 液面的观察方法	16
四、基本玻璃量器	17
(一) 量杯	17
(二) 量筒	18
(三) 量瓶	20
(四) 滴定管	22
(五) 吸管	28
五、标准玻璃量器	36
(一) 用途、分类和结构	36

(二) 标准量器读数误差与管径的关系·····	40
(三) 流出时间与等待时间·····	41
六、标准分度容量瓶·····	43
(一) 量瓶的结构、形状与尺寸·····	43
(二) 标称容量与它的最大允差·····	45
七、衡量法容积计量原理·····	46
八、衡量法在玻璃量器容积计量中的应用·····	47
(一) 检定环境条件和设备·····	47
(二) 容积检定一般步骤和方法·····	48
(三) A级滴定管和微量滴定管的容积检定·····	50
(四) A级吸管(包括0.5mL以下的B级吸管)的容积检定·····	57
(五) 标准分度容量瓶的容积检定·····	58
(六) 标准玻璃量器(标准球)的容积检定·····	60
九、衡量法容积计量的误差分析·····	61
十、容量比较法与应用·····	65
(一) B级量瓶、量筒和量杯的容积检定·····	65
(二) B级滴定管的容积检定·····	66
(三) B级吸管的容积检定·····	67
第三章 标准金属量器·····	69
一、金属量器的特点与分类·····	69
二、量器的结构与设计原理·····	69
三、一等标准量器的容积检定(衡量法)·····	73
(一) 检定条件与准备工作·····	73
(二) 检定项目与检定方法·····	74
(三) 检定结果的误差分析·····	101
四、二等标准量器的容积检定(比较法)·····	103
(一) 比较法容量计量原理·····	103
(二) 检定设备·····	104
(三) 检定条件与准备工作·····	104
(四) 检定项目与检定方法·····	104
(五) 检定结果的误差分析·····	106
五、标准金属量器应用——计量加油机容积检定·····	108
(一) 计量加油机的工作原理与结构·····	108

(二) 加油机示值检定	108
(三) 加油机示值误差的确定	111
六、标准金属量器应用——饮料罐车容积检定	112
(一) 检定设备	112
(二) 检定条件与准备工作	113
(三) 检定项目与检定方法	115
七、标准金属量器应用——汽车油罐车容积检定	122
(一) 容积检定方法	122
(二) 容积检定结果的数据处理	123
(三) 容积检定的误差分析	127
八、标准金属量器应用——流量计检定	130
第四章 油罐容量计量	133
一、立式金属罐容量计量	133
(一) 立式罐的种类	133
(二) 立式罐计量特性要求	136
(三) 立式油罐容量计量的国内外动向和水平	137
(四) 容量计量原理	139
(五) 最小计量体积	140
(六) 各圈板的内径测量(外测法)	141
(七) 各圈板的内径测量(内测法)	159
(八) 各圈板内高的测量	162
(九) 液体静压力效应修正值的计算	165
(十) 罐底量与罐底不平度修正值测量	175
(十一) 罐内附件修正值的测量	183
(十二) 罐体倾斜修正值的计算	183
(十三) 容量表的编制	185
(十四) 误差分析与测量结果的总不确定度	185
(十五) 浮顶罐的容量测量	190
(十六) 实际使用时罐内液体体积的计算	192
二、卧式金属罐容量计量	192
(一) 概述	192
(二) 测量原理及其测量方法	194
(三) 容积计算	212

(四) 倾斜卧式罐的容积计算	235
(五) 误差分析	243
三、球形罐容量计量	252
(一) 围测法	253
(二) 经纬仪法	262
(三) 经纬仪的基本结构	267
(四) 经纬仪的操作常识	268
(五) 经纬仪的角度测量法	273
第五章 容器内液体温度测量	290
一、温度测量的基本概念	290
(一) 温度	290
(二) 温标	290
二、玻璃液体温度计的结构与工作原理	295
(一) 温度计的分类	295
(二) 温度计的工作原理	295
(三) 测温范围	297
(四) 棒式与内标式温度计的结构	299
三、玻璃液体温度计的使用	301
四、玻璃温度计的检定	303
(一) 主要检定设备和仪器	303
(二) 检定	306
五、玻璃温度计的故障与维修	309
(一) 玻璃水银温度计	309
(二) 玻璃有机液体温度计	309
六、罐内油温的测量	310
第六章 液位与质量计量	312
一、液位测量	312
(一) 检尺	312
(二) 玻璃式液位计	314
二、罐内液体质量的确定	315
三、油罐液体称重仪	318
(一) 称重仪的理论依据	318
(二) 设计原理	321

四、油罐储液质量自动化计量新方法.....	323
-----------------------	-----

密度计量篇

第七章 基本概念和定义	326
一、密度.....	326
二、相对密度.....	328
三、测量单位间的密度换算.....	329
四、密度与温度的关系及密度温度修正系数.....	330
五、密度与压力的关系.....	335
六、溶液的浓度.....	336
(一) 质量百分浓度.....	336
(二) 体积百分浓度.....	337
(三) 波美度.....	338
第八章 基础物质密度	351
一、水的密度.....	351
(一) 水密度测量简史.....	351
(二) 溶解空气和压力补正.....	354
(三) 水的同位素组成及其对水密度的影响.....	358
二、空气密度.....	361
(一) 温·湿·压测量法.....	361
(二) 浮力测量法.....	370
(三) 干空气密度.....	378
三、水银密度.....	381
第九章 液体密度的测量	386
一、浮计.....	386
(一) 浮计的分类.....	386
(二) 浮计的构造及其作用原理.....	388
(三) 弯月面.....	389
(四) 毛细现象与毛细作用常数.....	389
(五) 浮计在液体中的平衡方程式.....	399
(六) 浮计的设计原理.....	400
(七) 毛细作用的修正.....	403

(八) 温度对浮计示值的影响·····	405
(九) 玻璃浮计的使用·····	409
(十) 玻璃浮计的检定·····	412
二、比重瓶的测量·····	420
(一) 比重瓶的结构·····	421
(二) 灌注和抽空比重瓶装置·····	423
(三) 测量液体密度的原理·····	424
(四) 比重瓶的使用·····	427
(五) 应用举例——汞密度测量·····	430
三、液体静力衡量法·····	431
(一) 测量原理与方法·····	432
(二) 液体静力天平的测定·····	435
(三) 液体密度天平的测定·····	444
四、绝对测量法·····	446
(一) 测量原理·····	447
(二) 熔融氧化硅空心立方体结构·····	447
(三) 毛细管的容积·····	449
(四) 灌注液体的真空装置·····	450
(五) 温度的控制和液体的体积确定·····	451
(六) 实验结果计算和误差源·····	452
五、自动密度计·····	453
(一) 浮子式工业密度计·····	454
(二) 天平式工业密度计·····	468
(三) 静压式工业密度计·····	476
(四) 放射性同位素密度计·····	485
(五) 超声波密度计·····	497
(六) 振动式密度计·····	510
第十章 固体密度测量·····	521
一、液体静力衡量法·····	521
(一) 测量原理·····	521
(二) 实验及其装置·····	523
(三) 误差分析·····	524
(四) 用液体静力天平测定·····	528

(五) 用液体密度天平测定.....	528
二、比重瓶法.....	531
三、绝对测量法.....	533
(一) 球体密度测量.....	533
(二) 固体的体积传递.....	540
(三) 液体和固体密度的统一基准.....	544
四、放射线测量法和超声波测量法.....	545
第十一章 气体密度测量	546
一、比重瓶法.....	546
二、气体密度天平.....	547
三、勒克斯式气体天平.....	547
四、本生法.....	548
五、杜马法.....	551
六、气柱秤.....	551
七、高压比重瓶法.....	552
参考文献	554

容量计量篇

第一章 容量基本概念和定义

一、容量的定义和量器的分类

容量系指容器内可容纳物质（液体、气体或固体微粒）体积或质量的量。对于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；对于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，更重要的是具有计量特性，作为计量器具使用，它的不同高度对应于不同的容积，如量筒、量杯、量瓶和各类型的计量罐等，这种作为计量器具用的容器称为量器。

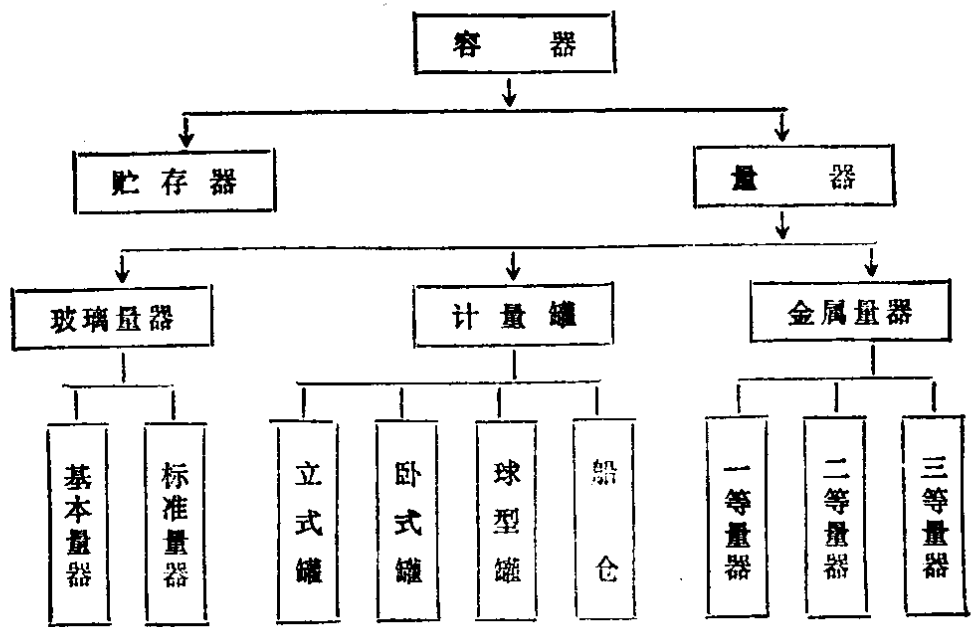


图1-1 容器与量器的分类

量器按它的制作材料和用途分类，分为玻璃量器、金属量器和计量罐，详见图1-1。

二、容积单位及其换算

国际单位制(SI) 中，容积的单位是立方米，符号为 m^3 。习惯上也常用单位升 (L，它等于 $10^{-3}m^3$)，或者更小一些的如毫升 (mL，它等于 $10^{-6}m^3$)、微升(μL ，它等于 $10^{-9}m^3$)等单位来表示。

表1-1 容积不同

$N_2 \backslash N_1$	米 ³ (m ³)	厘米 ³ (cm ³)	升(1901) ^① (L)	市尺 ³
1 米 ³ (m ³)	1	1×10^{-6}	999.972	27
1 厘米 ³ (cm ³)	1×10^{-6}	1	9.99972×10^{-4}	2.7×10^{-5}
1 升(1901) ^① (L)	1.000028×10^{-3}	1.000028×10^3	1	2.70008×10^{-2}
1 市尺 ³	3.7037×10^{-2}	3.7037×10^4	37.0359	1
1 码(yd ³)	0.764555	7.64555×10^5	764.534	20.643
1 英尺(ft ³)	2.83168×10^{-2}	2.83168×10^4	28.3161	0.764554
1 英寸(in ³)	1.63871×10^{-5}	16.3871	1.63866×10^{-2}	4.42452×10^{-4}
1 英加仑(1 kgal)	4.54609×10^{-3}	4546.09	4.54596	0.122744
1 美加仑(USgal)	3.78541×10^{-3}	3785.41	3.78541	0.102206
1 升(L ³)	0.001	1000	0.999972	0.027

① 用升 (1901) 表示旧定义的升

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”，那时它等于 $1,000028 dm^3$ 。1964年第十二届国际计量大会声明，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密度的测量结果。

容积单位之间的换算见表1-1。单位 N_2 沿纵行排列，它可以通过横行所表示的别的单位 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，为了将厘米³换算为升，在纵行 1 厘米³和横行升的交叉方格中得到换算系数0.001，所以 1 厘米³ = 0.001升。

单位间的换算系数

码 ³ (yd ³)	英尺 ³ (ft ³)	英寸 ³ (in ³)	英加仑 (UKgal)	美加仑 (USgal)	升 (L)
1.30795	35.3147	6.10237×10^4	219.969	264.172	1000
1.30795×10^{-6}	3.53147×10^{-5}	6.10237×10^{-2}	2.19969×10^{-4}	2.64172×10^{-4}	0.001
1.30799×10^{-3}	3.53157×10^{-2}	61.0255	0.219975	0.264179	1.000028
4.84425×10^{-2}	1.30795	2260.13	8.14699	9.78414	37.037
1	27	46656.0	168.178	201.973	764.555
3.7037×10^{-5}	1	1728.00	6.22883	7.48051	28.3168
2.14335×10^{-5}	5.78704×10^{-4}	1	3.60465×10^{-3}	4.32901×10^{-3}	1.63871×10^{-2}
5.94608×10^{-3}	0.160544	277.419	1	1.20095	4.54609
4.95113×10^{-3}	0.133681	231	0.832674	1	3.78541
1.30795×10^{-3}	35.3147×10^{-3}	61.0237	0.219969	0.264172	1

三、温度对容积的影响

所有量器的容积都会受到温度变化引起的热胀冷缩的影响。

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

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

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

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

当忽略 β 的高次项微量时便得

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

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°C)下的容积 V_{20} 值进行换算。

四、量器的容积误差

量器上所标注的对应于特定刻线在 20°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($V_{\text{标}}$)与其实际容量($V_{\text{实}}$)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其误差，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为 $V_{\text{实}}$ ，如何判断该结果符合确定的精度等级要求呢

设两次测定值为 V_1 和 V_2 ，若按极差法处理，则单次测量精度为

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

式中 d_2 ——测量次数为 2 的极差系数，其值等于 1.13。

于是，平均值的均方根误差为

$$\sigma_2 = \frac{\hat{\sigma}_2}{\sqrt{2}} \approx \frac{2}{3} |V_1 - V_2|$$

即可取两次测定差值的 $2/3$ 作为平均值的均方根误差。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，平均值的均方根误差为

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

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，即可保证平均值的误差不超过该极限误差。

五、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它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，那么根据量器的用途，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5mm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，它的检定是对其全容积而言的，所以它的等待时间是指液体从量器内全部流出后，为使器壁所吸附的液体充分流下而需等待的一定时间。

器壁上的残留量与液体的流出时间有关。实验表明，流出时间越短（流速越大），附着在器壁上的液体残留量越大；反之，则越小。通过资料〔9〕中油对铅直壁面进行实验的结果表明，当设液体的密度和粘度分别为 ρ (g/cm³)和 η (P $\ominus$)时，令排出液体时液面的下降速度为 v_s (cm/s)，残留在容器内壁表面积 F (cm²)的液体量 ε_d (cm³)可用下式表示：

$$\varepsilon_d = 0.015 F \left(v_s \frac{\eta \times 10^{-1}}{\rho} \right)^{0.6} \quad (\text{cm}^3) \quad (1-6)$$

六、国家容量计量器具检定系统

（一）检定系统制定依据的基本原则

我国计量法规定，计量检定必然按照国家计量检定系统表进行。它决定了国家计量基准通过计量标准向工作计量器具进行量

$\ominus \quad 1\text{P} = 10^{-1}\text{Pa} \cdot \text{s}。$

值传递的程序，并指明误差及基本检定方法等。

我国容量计量基准于1986年经国家计量局审批并颁布使用，因此必须建立一种与其对应的检定系统，使之将国家容量基准所复现的容量单位量值(基准衡量法复现的容量单位量值为0.01 mL~2000 L；基准几何测量法复现的容量单位量值为20~100000 m³)通过检定传递给下一等级的计量标准，并依次逐级传递到工作计量器具，以保证被检量器的量值准确一致。另外，大家知道，量值准确一致的前提是，计量结果必须具有“溯源性”，即被计量的量值必须具有能与国家容量计量基准相联系的特性。为此，就要求用以计量的计量器具必须经过具有适当准确度的计量标准的检定，逐级往上追溯，直至国家容量计量基准。

基准、各等级标准与工作量器之间的误差传递是三倍到五倍的关系，即上一级标准的误差应为直接传递标准(或工作量器)误差的 $1/3 \sim 1/5$ 。

以上所述，即是计量器具检定系统制定所依据的基本原则。

(二) 国家容量基准

1. 用途 国家容量基准是统一全国容量量值最高依据的容量标准，具有复现、保存、传递单位量值的三种功能。建立在中国计量科学研究院内。

2. 基准的全套主要计量器具名称

(1) 200 g 一级精密天平(分度值:0.02mg, 准确度: $\pm 1 \times 10^{-7}$);

(2) 1 kg 精密天平(分度值:0.5mg, 准确度: $\pm 5 \times 10^{-7}$);

(3) 5kg 精密天平(分度值:5mg, 准确度: $\pm 1 \times 10^{-6}$);

(4) 20kg 精密天平(分度值:10mg, 准确度: $\pm 5 \times 10^{-7}$);

(5) 50kg 精密天平(分度值:50mg, 准确度: $\pm 1 \times 10^{-6}$);

(6) 200 kg 精密天平(分度值:200mg, 准确度: $\pm 1 \times 10^{-6}$);

(7) 2 t 精密天平(分度值:1 g, 准确度: $\pm 5 \times 10^{-7}$);

(8) 专用基准密度计(分度值: $5 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$, 准确度: