普通高等学校仪器科学与技术专业系列教材

计量学基础

卜雄洙　朱　丽　吴　键　编著

Foundation of Metrology

清华大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

普通高等学校仪器科学与技术专业系列教材

计量学基础

Foundation of Metrology

卜雄洙　朱　丽　吴　键　编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书的主要任务是使学生较全面地掌握计量所必需的基本知识和规则制度，同时了解计量学发展现状和趋势。全书共9章，具体包括计量的基础知识、计量单位、测量误差与测量不确定度、计量器具、量值传递与溯源、计量科技主要领域、计量管理；各章均附有思考题可供选用。

本书不仅可作为理工科大学测控技术与仪器专业本专科教材，也可供从事计量测控、质检、标准行业的科技人员使用。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989　13701121933

图书在版编目(CIP)数据

计量学基础/卜雄洙，朱丽，吴键编著. —北京：清华大学出版社，2018
(普通高等学校仪器科学与技术专业系列教材)
ISBN 978-7-302-51451-0

Ⅰ. ①计… Ⅱ. ①卜… ②朱… ③吴… Ⅲ. ①计量学－高等学校－教材 Ⅳ. ①TB9

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第243446号

责任编辑：许　龙
封面设计：常雪影
责任校对：刘玉霞
责任印制：董　瑾

出版发行：清华大学出版社
网　　址：http://www.tup.com.cn，http://www.wqbook.com
地　　址：北京清华大学学研大厦A座　　邮　　编：100084
社 总 机：010-62770175　　邮　　购：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质量反馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
印 装 者：三河市少明印务有限公司
经　　销：全国新华书店
开　　本：185mm×260mm　　**印　　张**：16.25　　**字　　数**：393千字
版　　次：2018年10月第1版　　**印　　次**：2018年10月第1次印刷
定　　价：45.00元

产品编号：077456-01

前言

FOREWORD

随着科技和经济的发展、社会的进步，计量对社会发展和国计民生的积极作用和重要意义日益明显。现在，我们已迈入以“智能制造、智能生产”为核心，以互联为手段，以计量测试为重要的核心技术的大数据物联网时代，现在，及时、准确、可靠的计量测试无处不在、无时不在、无所不在。可以毫不夸张地说，任何一个科技领域，任何一种生产过程，以至任何一项社会活动都离不开计量。

本书是根据21世纪理工科院校的人才培养目标，结合当前计量学发展现状和趋势，以及多年来的教学实践经验，在参阅国内外有关资料和优秀教材基础上整理编写而成的。

本书共9章，其中第1、3章由卜雄洙执笔，第5章由朱丽执笔，第6～9章由吴键执笔，第2、4章由何博侠和王新征博士共同执笔。卜雄洙对全书进行了统稿。

在编写过程中参考了许多国内外同行撰写的教材和文献资料，在此向这些作者深表谢意。东南大学仪器科学与工程学院陈熙源教授在百忙之中对本书做了认真细致的审阅，并提出了许多宝贵的意见，在此一并致谢。

江苏省仪器仪表学会教育专委会、清华大学出版社和南京理工大学对本书的出版给予了大力支持，在此深表谢忱。由于水平有限，书中难免有不当之处，恳请读者批评指正。

作者

2018年4月

目录

CONTENTS

第1章 计量学概论 …… 1
1.1 计量的内容、分类和特点 …… 1
1.1.1 计量的内容 …… 1
1.1.2 计量的分类 …… 2
1.1.3 计量的特点 …… 3
1.2 计量学的发展 …… 3
1.2.1 古典计量阶段 …… 3
1.2.2 经典计量阶段 …… 6
1.2.3 现代计量阶段 …… 6
1.3 计量的作用与意义 …… 7
思考题 …… 13
参考文献 …… 13

第2章 计量单位制 …… 14
2.1 计量单位与单位制 …… 14
2.1.1 量、量制、量纲 …… 14
2.1.2 计量单位与单位制 …… 15
2.2 国际单位制 …… 16
2.2.1 米制的起源与发展 …… 16
2.2.2 国际单位制 …… 18
2.2.3 国际单位制外的单位 …… 27
2.3 我国的法定计量单位 …… 30
2.3.1 法定计量单位的构成 …… 31
2.3.2 法定计量单位的定义 …… 31
2.3.3 法定计量单位的使用方法 …… 35
2.3.4 量、数值及下角标 …… 40
2.3.5 法定计量单位制度 …… 42
思考题 …… 42
参考文献 …… 43

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第3章 测量误差与测量不确定度评定 …… 44
3.1 常用计量术语 …… 44
3.2 测量误差 …… 46
3.2.1 误差的定义 …… 46
3.2.2 误差的来源 …… 48
3.2.3 误差的分类 …… 49
3.2.4 有效数字和数字修约 …… 63
3.2.5 测量结果的表示 …… 65
3.3 间接测量误差传递理论 …… 65
3.4 测量误差的合成 …… 67
3.5 测量不确定度 …… 68
3.5.1 测量不确定度的含义 …… 68
3.5.2 测量不确定度的分类 …… 68
3.5.3 直接测量的不确定度 …… 70
3.5.4 间接测量结果的合成不确定度 …… 71
3.5.5 扩展(范围、展伸)不确定度 …… 73
3.5.6 不确定度的报告 …… 73
3.6 数据处理方法和微小误差准则 …… 74
3.6.1 算术平均值与最小二乘法原理 …… 74
3.6.2 微小误差准则 …… 76
思考题 …… 77
参考文献 …… 77

第4章 计量器具 …… 78
4.1 计量器具及分类 …… 78
4.1.1 计量基准器具 …… 79
4.1.2 计量标准器具 …… 79
4.1.3 普通计量器具 …… 80
4.1.4 计量器具的特征 …… 80
4.2 计量器具的辅助设备 …… 81
4.3 计量器具的制造、使用与维修 …… 82
4.3.1 计量器具的制造与销售 …… 82
4.3.2 计量器具的使用 …… 82
4.3.3 计量器具的维修 …… 83
思考题 …… 84
参考文献 …… 84

第5章 量值传递与溯源 …… 85
5.1 概述 …… 85

5.1.1 量值传递与量值溯源的基本概念 …… 85
5.1.2 量值传递与量值溯源的必要性 …… 87
5.1.3 量值传递与量值溯源体系 …… 88
5.2 量值传递与溯源的实施 …… 90
5.2.1 量值传递与溯源的传统方式 …… 90
5.2.2 新型量值传递与溯源方式——计量保证方案 …… 95
5.2.3 测量过程统计控制 …… 98
5.3 计量检定 …… 105
5.3.1 计量检定和校准的基本概念 …… 105
5.3.2 计量检定和校准的关系 …… 106
5.3.3 计量检定的基本要求 …… 107
5.3.4 计量检定的分类 …… 110
5.3.5 检定方法 …… 112
5.3.6 计量检定中器具合格的判断 …… 113
5.4 计量比对 …… 115
5.4.1 计量比对的概念和作用 …… 115
5.4.2 比对的类型 …… 116
5.4.3 比对的组织和实施 …… 117
5.4.4 比对方式 …… 118
5.4.5 比对的应用 …… 121
习题 …… 124
参考文献 …… 124

第 6 章 几何量、光学及电离辐射计量 …… 125
6.1 几何量计量 …… 125
6.1.1 长度单位米 …… 125
6.1.2 几何量计量器具 …… 127
6.1.3 阿贝原则 …… 128
6.1.4 端度计量 …… 128
6.1.5 线纹计量 …… 130
6.1.6 角度计量 …… 132
6.1.7 平直度计量 …… 135
6.1.8 粗糙度计量 …… 136
6.1.9 基于光电振荡器的长度测量方法 …… 139
6.2 光学计量 …… 140
6.2.1 光度计量 …… 141
6.2.2 光辐射计量 …… 144
6.2.3 激光计量 …… 145
6.2.4 成像光学计量 …… 145

6.2.5 色度计量 …… 146
6.3 电离辐射计量 …… 147
6.3.1 电离辐射的基本概念 …… 148
6.3.2 电离辐射计量的主要内容 …… 149
6.3.3 辐射剂量计 …… 150
6.3.4 电离辐射计量动态 …… 151
6.3.5 感光材料的光度计量简介 …… 151
思考题 …… 152
参考文献 …… 152

第7章 力学、声学及热工计量 …… 153
7.1 力学计量 …… 153
7.1.1 质量计量 …… 153
7.1.2 容量计量 …… 155
7.1.3 密度计量 …… 156
7.1.4 力值计量 …… 158
7.1.5 重力计量 …… 160
7.1.6 硬度计量 …… 162
7.1.7 振动与冲击计量 …… 165
7.2 声学计量 …… 167
7.2.1 声学计量的基本内容 …… 168
7.2.2 声学计量的主要方法 …… 169
7.2.3 声学计量的主要标准器 …… 174
7.3 热工计量 …… 175
7.3.1 温度计量 …… 175
7.3.2 压力计量 …… 181
7.3.3 真空计量 …… 183
7.3.4 流量计量 …… 185
7.3.5 热物性计量 …… 190
思考题 …… 190
参考文献 …… 191

第8章 电磁、无线电及时间频率计量 …… 192
8.1 电磁计量 …… 192
8.1.1 电学计量 …… 192
8.1.2 磁学计量 …… 205
8.2 无线电计量 …… 208
8.2.1 无线电计量的特点 …… 208
8.2.2 无线电计量的主要内容 …… 209

8.3 时间频率计量 …… 218
8.3.1 时间单位秒 …… 219
8.3.2 时间频率基准、标准 …… 220
8.3.3 时间频率的计量方法 …… 223
思考题 …… 225
参考文献 …… 226

第9章 计量管理 …… 227
9.1 管理的一般概念 …… 227
9.1.1 管理的对象、过程和目的 …… 227
9.1.2 管理的基本原则 …… 227
9.2 计量管理的基本任务及分类 …… 229
9.2.1 计量管理的基本任务 …… 229
9.2.2 计量管理的分类 …… 231
9.3 计量管理的主要特征 …… 232
9.4 计量管理的发展规律 …… 233
9.4.1 我国计量管理发展概况 …… 233
9.4.2 计量管理的发展规律 …… 234
9.5 计量管理相关术语 …… 235
9.5.1 与计量器具管理有关的术语 …… 235
9.5.2 测量标准 …… 236
思考题 …… 239
参考文献 …… 240

附录 中华人民共和国计量法(部分节选) …… 241

第1章

计量学概论

1.1 计量的内容、分类和特点

1.1.1 计量的内容

自然界的一切现象或物质，都是通过一定的“量”来描述和体现的。也就是说，“量是现象、物体或物质可定性区别与定量确定的一种属性”。因此，要认识五光十色的大千世界和造福人类，就必须对各种“量”进行分析和确认，既要区分量的性质，又要确定其量值。计量正是达到这种目的的重要手段之一。从广义上说，计量是对“量”的定性分析和定量确认的过程。

计量是实现单位统一、保障量值准确可靠的活动。计量学是关于测量的科学，它涵盖测量理论和实践的各个方面，而不论测量的不确定度如何，也不论测量是在哪个领域中进行的。为了经济而有效地满足社会对测量的需要，应从法制、技术和管理等方面开展计量管理工作。在相当长的历史时期内，计量的对象主要是物理量。在历史上，计量被称为度量衡，即指长度、容积、质量的测量，所用的器具主要是尺、斗、秤。随着科技、经济和社会的发展，计量的对象逐渐扩展到工程量、化学量、生理量，甚至心理量。与此同时，计量的内容也在不断地扩展和充实，通常可概括为六个方面：

(1) 计量单位与单位制；

(2) 计量器具(或测量仪器)，包括实现或复现计量单位的计量基准、计量标准与工作计量器具；

(3) 量值传递与溯源，包括检定、校准、测试、检验与检测；

(4) 物理常量、材料与物质特性的测定；

(5) 测量不确定度、数据处理与测量理论及其方法；

(6) 计量管理，包括计量保证与计量监督等。

1.1.2 计量的分类

计量涉及社会的各个领域。根据其作用与地位，计量可分为科学计量、工程计量和法制计量三类，分别代表计量的基础性、应用性和公益性三个方面。

(1) 科学计量是指基础性、探索性、先行性的计量科学研究，它通常采用最新的科技成果来准确定义和实现计量单位，并为最新的科技发展提供可靠的测量基础。

(2) 工程计量，又称工业计量，是指各种工程、工业、企业中的实用计量。随着产品技术含量的提高和复杂性的增强，为保证经济贸易全球化所必需的一致性和互换性，工程计量已成为生产过程控制不可缺少的环节。

(3) 法制计量是指由政府或授权机构根据法制、技术和行政的需要进行强制管理的一种社会公用事业，法制计量的主要目的是保证与贸易结算、安全防护、医疗卫生、环境监测、资源控制、社会管理等有关的测量工作的公正性和可靠性。它包括计量单位、计量器具(特别是计量基准、标准)、计量方法以及计量人员的专业技能等的明确规定和具体要求。

计量属于国家的基础事业，它不仅为科学技术、国民经济和国防建设的发展提供技术基础，而且有利于最大限度地减少商贸、医疗、安全等诸多领域的纠纷，维护消费者权益。

从学科发展来看，计量原本是物理学的一部分，或者说是物理学的一个分支。随着科技、经济和社会的发展，计量的概念和内容也在不断扩展和充实，以致逐渐形成了一门研究测量理论与实践的综合性学科——计量学，它是现代科学的一个重要的组成部分。计量学又可分为以下几种：

(1) 通用计量学——涉及计量的一切共性问题而不针对具体的被测量的计量学部分，例如，关于计量单位的一般知识(单位制的结构、计量单位的换算等)、测量误差与数据处理、计量器具的基本特性等。

(2) 应用计量学——涉及特定计量的计量学部分。通用计量学是泛指的，不针对具体的被测量；而应用计量学则是关于特定的具体量的计量，如长度计量、频率计量等。

(3) 技术计量学——涉及计量技术，包括工艺上计量问题的计量学部分，例如，自动测量、在线测量等。

(4) 理论计量学——涉及计量理论的计量学部分，例如，关于量和计量单位的理论、测量误差理论等。

(5) 品质计量学——涉及品质管理的计量学部分，例如，关于原料、材料、设备以及生产中用来检查和保证有关品质要求的计量器具、计量方法、计量结果等。

(6) 法制计量学——涉及法制管理的计量学部分，例如，为了保证公众安全、国民经济和社会的发展，根据法律、技术和行政管理的需要而对计量单位、计量器具、计量方法和计量准确度(或不确定度)以及专业人员的技能等所进行的强制管理。

(7) 经济计量学——涉及计量的经济效益的计量学部分。这是近年来人们非常关注的一门边缘学科，涉及面甚广。例如，计量在社会生产体系中的经济作用和地位，计量对科技发展、生产率的增长、产品品质的提高、物质资源的节约、国民经济的管理、医疗保健以及环境保护方面的作用等。

当然，计量学的上述划分不是绝对的，而是突出了某一方面的计量问题。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

1.1.3　计量的特点

计量的特点可以归纳为准确性、一致性、溯源性及法制性四个方面。

(1) 准确性是指测量结果与被测量真值的一致程度。由于实际上不存在完全准确无误的测量，因此在给出量值的同时，必须给出适应于应用目的或实际需要的不确定度或可能误差范围。所谓量值的准确性，是在一定的测量不确定度或误差极限或允许误差范围内，测量结果的准确性。

(2) 一致性是指在统一计量单位的基础上，无论在何时何地采用何种方法，使用何种计量器具，以及由何人测量，只要符合有关的要求，测量结果应在给定的区间内一致。也就是说，测量结果应是可重复、可再现(复现)、可比较的。

(3) 溯源性是指任何一个测量结果或测量标准的值，都能通过一条具有规定不确定度的不间断的比较链，与测量基准联系起来的特性。这种特性使所有的同种量值，都可以按这条比较链通过校准向测量的源头追溯，也就是溯源到同一个测量基准(国家基准或国际基准)，从而使其准确性和一致性得到技术保证。

(4) 法制性是指计量必需的法制保障方面的特性。由于计量涉及社会的各个领域，量值的准确可靠不仅依赖于科学技术手段，还要有相应的法律、法规和行政管理的保障。特别是在对国计民生有明显影响，涉及公众利益和可持续发展或需要特殊信任的领域，必须由政府起主导作用，来建立计量的法制保障。

由此可见，计量不同于一般的测量。测量是以确定量值为目的的一组操作，一般不具备、也不必完全具备上述特点。计量既属于测量而又严于一般的测量，在这个意义上可以狭义地认为，计量是与测量结果置信度有关的、与测量不确定度联系在一起的一种规范化的测量。

1.2　计量学的发展

计量的发展大体上分为以下三个阶段。

1.2.1　古典计量阶段

古典计量阶段是以权力和经验为主的初级阶段，没有或者没有充分的科学依据。

早在原始社会后期，由于生产力的逐渐提高，开始出现社会分工。先是农业和畜牧业分开，即所谓的第一次社会大分工；继之则是手工业和农业分开，即第二次大分工。社会分工带来了经常性的产品交换和以交换为目的的商品生产。我国古书《易·系·辞》中所记载的“日中为市”，便反映了当时的产品交换情景。从我国陕西半坡村发掘的一个原始社会村落的遗址来看，屋基排列整齐，方圆有致，若没有一定的计量保证，显然是不可能的。1958 年，甘肃省文物部门进行文物普查时首次发现，一个可与陕西半坡遗址相媲美的新石器时代文化遗址，经过几年的发掘，已在甘肃省秦安县大地湾初显于世。出土各类文物八千余件，其

中有我国已收录的年代最早的绘画、记事符号和彩陶珍品。遗址中的一些房址保存相当完整，其中有的房屋设有主室、侧室、后室及门前附属建筑等，是我国已发现的年代最早的殿堂式建筑。室内地坪光洁平整，使用了以人造轻骨料作集料的混凝土。经抗压试验，这种人工混凝土至今每平方厘米仍能抗压一百千克。这些珍贵的文化遗产，都是原始计量的佐证。

奴隶社会时期，生产力进一步提高，商品生产不断扩大，原始计量已逐渐形成。中国古代第一位建立度量衡标准的人是大禹。从大禹治水“陆行乘车”证明，中国是世界上最早发明和使用车的国家之一。相传奚仲是夏代著名的造车能手。据《左传》记载：“薛之皇祖奚仲，居薛，以为夏车正。”《管子》说：“奚仲之为车器也，方圆曲直，皆中规矩钩绳，故机旋相得，用之牢利，成器坚固。”铸鼎、造车都需要比较复杂的手工业技术和经验。至今尚未发现夏代车辆的实物，难以有过细的了解。河南安阳大司空村和孝民屯先后发掘出商代随葬车马坑。车的主要部件有辖(辕)、衡、轭、舆、轴和轮。轮又由毂、辐、牙等部件组成。有关专家对其中的18辆车进行了综合分析，认为商代的车都是独辕，辐条多为18根，车厢为长方形，一般为0.8m×1.3m，通常可乘两三人。从出土马车的数量之多、结构之一致、地域之广等几个方面考察，可以推知这种马车的制作技术已相当成熟。例如，车厢放在轴与车辕交接处的上方，与两侧车轮的距离一致，车辕位于车厢下的中间位置，这有助于马车在行驶过程中保持平衡，对驾驭马匹、掌握方向也极为有利。由于马车的形制比较复杂，除了离不开规矩、准绳这些计量工具以外，其各个部件之间的装配组合，制作工艺的规范化、标准化等都对计量有着极高的要求。

随着农业、手工业的进步，西周的商业比殷商时有所发展，同时也促进了度量衡的发展。西周的青铜器上常见有赐贝三十朋、五十朋以至百朋等。西周还可能已有用“铜”作交易的等价物了，在铜器铭文上还多次出现了“锾”“钧”等计重单位。《周礼·地官司徒》中说：司市掌握市上各种政令。根据不同的事务、处所来安排市井的经界，把货物分门别类地陈列出来，分其优劣使物价合理，有时还要用度量衡器具计量后再评定价格。每当开肆之始，“质人”手里还拿着鞭度(指一种无刃之殳，古代兵器)在市上巡视监察。如果发生银钱纠纷或因度量不准而产生争斗，则执鞭惩戒；有争长短者，则执度以校正。《周礼》一书虽是后人对西周王室的官制管理以及东周时期各国制度的汇编，但在一定程度上也反映了西周至春秋期间商品经济和度量衡的状况。现今收集到的春秋晚期的权衡器和量器有齐国的右伯君铜权、楚国的铜环权和邹国的廪陶量，说明春秋时期中国的度量衡已具备相当的科学性，而告别它的原始性了。

封建社会时期，铁器和耕牛已普遍使用，生产力更加提高，计量亦随之有了较快的发展。在我国，秦商鞅于公元前344年运用国家机器的力量，推行统一的度量衡制度，颁布了统一度量衡的命令，将标准量器(如标准铜方升)发放到全国，“一度量、平衡权、正钧石”，推行统一的度量衡制。该时期监造的铜方升(现存上海博物馆)，不仅做工精细，而且在其壁上刻有“爰积十六尊五分尊壹为升”的铭文，对升的容积作了明确的规定，说明当时统治者已经明白统一度量衡制度的重要性。公元前221年，秦始皇统一中国后，即颁布诏书，以最高法律的形式统一了全国的度量衡制度，使我国古代计量进入一个新的历史时期，对封建社会的发展起了重要的作用，至今仍被广为传颂，是世人有口皆碑的历史功绩。据《汉书·律历志》记载，秦代的度量衡制度如下。

度制：1引=10丈=100尺=1000寸=10 000分；

量制：1 斛＝10 斗＝100 升＝1000 合＝2000 龠；

衡制：1 石＝4 钧，1 钧＝30 斤，1 斤＝16 两，1 两＝24 铢。

可见，该制度在当时是比较先进的，其中的度制和量制的大部分皆采用了十进制，尤为突出。秦代不仅颁布了度量衡制度，而且还实行了定期检定等严格的法制管理，以保证度量衡的精确统一。比如，规定各地使用的度量衡器具至少每年要校正一次，并将校正的时间定为每年的春分和秋分时节，因为届时的气温适宜，不冷不热，所谓“昼夜均而寒暑平”，对器具的影响较小，便于保证校正的精度。这种利用天然条件保持温度相对稳定的做法，是相当聪明而简易的，可以说是原始的“恒温”措施。另外，还明文规定了各种度量衡器具的允许误差。如果所使用器具的误差超过了所规定的允许范围，便要受到处治，罚以铠甲或盾牌等。这样，计量已从原始的度量衡发展为比较完善的古典度量衡。直到 19 世纪中叶，清朝末期，米制正式传入我国为止，两千多年的历代封建王朝的度量衡制度，基本上都是沿用了秦制。

在计量的古典阶段，作为计量水平主要体现的计量基准皆是相当简陋的，大体上可归纳为表 1-1。

表 1-1　古典阶段的计量基准

基　　准	典型事例
以人体的某一部分作为基准	(1) 我国古代所谓的“布手知尺”“掬手为升”，就是以部分人体作为基准的。河南安阳出土的两支商代象牙尺，一支长为 15.78cm，另一支长为 15.80cm，每支上都刻有 10 寸，每寸又都刻有 10 分，相当精密，是我国最早的尺实物。 (2) 埃及古代的尺度是以人的胳膊肘到指尖的距离为依据，称为“腕尺”，其长约 46cm。 (3) 英国的“码”，是英国国王亨利一世将其手臂向前平伸，从其鼻尖到指尖的距离；“英尺”是英王查理曼大帝的脚长；“英寸”是英王埃德加的手拇指关节的长度。 (4) 德国在 16 世纪曾将“英尺”定义为：“星期日立于教堂门首，礼拜完毕后，令走出教堂之男子 16 名，高矮不拘，随遇而定，各出左足前后相接，取其长度的十六分之一”
以动物的丝毛或某些能力为基准	(1) 我国史书中关于“蚕所吐丝为忽”“十忽为秒，十秒为豪，十豪为厘，十厘为分”“豪，兔豪也，十豪为秏”，以及“十马尾为一分”的记载等，皆说明当时确曾以动物的丝毛等物作为计量基准。 (2) “英亩”为二牛同轭一日翻耕土地之面积，便是以牛的翻地能力(数量)为基准的
以植物果实为基准	(1) 我国古代曾以一黍为一分，十分为一寸等来定长度；又曾将一千二百颗黍子所占的体积定为容量单位“龠”，将一百颗黍子的质量定为质量单位“铢”，等等。 (2) 在英国，曾以“自穗之中间部分取大麦 36 粒，头尾相接排列之长度”为“英尺”的定义。 (3) 衡量宝石的质量单位“克拉”即是以生长在地中海沿岸的一种名叫角豆树的籽的质量为依据的，等等
以乐器、物品为基准	(1) 最突出的例子，可以说是我国的黄钟律管。黄钟音是我国古乐的标准音。那时把音律分为五音十二律，黄钟音便是五音之首的“宫音”，又是十二律中的首律。为取得一致的音律，当时曾规定，黄钟律管的管长为九十颗黍子排列起来的长度，而管的容积则必须是一龠，即正好容下一千二百颗黍子，从而定出了管径。另外，当时还曾规定，一龠黍子的质量为十二铢。这样，实际上通过音律管就可获得长度、容量和质量三个单位基准。所以古人云“黄钟者信，则度量权衡者得矣”。 (2) 在古代还曾将金属货币或玉器等制成一定的质量，作为质量基准

1.2.2 经典计量阶段

从世界范围来看，1875 年由 17 个国家代表在法国米制外交会议上签署《米制公约》，意味着经典计量阶段的开始。19 世纪的自然科学经历了突飞猛进的发展，并相继建立起热力学、电磁学、化学等学科并得到了技术应用；数学长足进步，不断推出新概念和新方法；天文学、地学有很大发展；光学、生物学、有机化学也随之兴起。科学的进步为计量学发展奠定了理论基础，计量基准已开始摆脱人体、自然物体等的范畴，进入了以科学为基础的发展阶段。

由于科技水平的限制，这个阶段的计量基准都属于宏观器具。

例如，根据地球子午线的长度的四分之一的一千万分之一，用铂铱合金制造的米原器；根据 $1dm^3$ 的水在密度最大时所对应温度下的质量，用铂铱合金制造的千克原器；根据地球围绕太阳的转动周期而确定的秒；根据两通电导线之间产生的力来定义的安培；根据水三相点热力学温度确定的开尔文等，都是以宏观实物为基准。

这类基准，随着时间的推移，由于物理的、化学的以及使用中的磨损等原因，难免发生微小的变化。另外，由于原理和技术的限制，该类基准的精度亦难以大幅度提高，以致不能满足日益发展的现代计量的需要。因此，便不可避免地出现了关于建立更加稳定、更加精确的新的计量基准的要求，从而使计量进入一个新的发展阶段。

1.2.3 现代计量阶段

1960 年第十一届国际计量大会(Conférence Générale des Poids et Mesures，法文缩写 CGPM)通过正式“国际单位制”。它包括米(m)、千克(kg)、秒(s)、安培(A)、开尔文(K)、坎德拉(cd)等 6 个基本单位、2 个辅助单位和 19 个导出单位，还有组成倍数和分数单位用的词头。1971 年第十四届国际计量大会又决定在基本单位中增加物质的量的单位摩尔(mol)，从而形成了一套完整的国际单位制。现代计量的标志是国际单位制由以经典理论为基础的宏观实物基准，转为以量子物理和基本物理常数为基础的微观自然基准。2011 年 10 月，第二十四届国际计量大会正式批准用普朗克常数重新定义质量单位千克(kg)，用基本电荷 e 重新定义电流单位安培(A)，用玻尔兹曼常数 k 重新定义温度单位开尔文(K)，用阿伏伽德罗常数 N_A 重新定义物质的量的单位摩尔(mol)。2014 年 11 月，第二十五届国际计量大会充分肯定了重新定义千克、安培、开尔文和摩尔所取得的显著成果，鼓励计量委员会和相关学术机构继续致力于提供重新定义单位不确定度、一致性等满足修订要求的必要实验数据，并对相关时间路线进行了规划，以期在 2018 年第二十六届国际计量大会通过关于 SI 重新定义的决议。

建立在量子理论基础上的微观量子基准(亦称自然基准)，比宏观实物基准优越得多，更准确、更稳定可靠。因为，根据量子理论，微观世界的量只能跳跃式的改变，而不能发生任意的微小变化；同时，同一类物质原子和分子都是严格一致的，不随时间和地点而改变。这就是微观世界的所谓稳定性和齐一性。量子基准就是利用了微观世界所固有的这种稳定性和齐一性而建立的。

当然，已经建立的量子计量基准，随着科技的进步，亦在不断地完善和发展。

上述的计量发展阶段是根据计量所依据的基本理论、物质技术基础和发展趋势而划分的，难以截然分开。在日常的实际计量工作中，当前乃至将来，普遍应用的仍是宏观实物计量器具，但其计量性能由于溯源到基本量和主要导出量的量子计量基准而得到明显的改进，从而使整体计量水平显著提高。计量的发展趋势主要沿着两个方面：一是利用最新科技成果不断完善国际单位制及其实验基础，使单位的定义及基准、标准建立在物理常量的稳固基础上；二是推动全球计量体系的形成，逐步实现国际间测量与校准结果的相互承认，以适应贸易和经济全球化进展的需要。

1.3　计量的作用与意义

随着科技和经济的发展、社会的进步，计量的作用和意义已日益明显，下面略举几例。

1. 计量与科学技术

众所周知，科学技术是人类生存和发展的一个重要基础。没有科学技术，便不可能有人类的今天。其实，计量本身就是科学技术的一个重要的组成部分。任何科学技术，都是为了探讨、分析、研究、掌握和利用事物的客观规律；而所有的事物都是由一定的“量”组成，并通过“量”来体现的。为了认识量并确切地获得其量值，只有通过计量。比如，哥白尼关于天体运行的学说，是在反复观察的基础上提出的，并在伽利略用天文望远镜进行了进一步观测之后而确立的；著名的万有引力定律，被牛顿的敏锐观察所揭示，并在百余年后经卡文迪许的精密测试而得到了确认；爱因斯坦的相对论，也是在频率精密测量的基础上才得到了一定的验证；李政道、杨振宁关于弱相互作用下宇称不守恒的理论，也是吴健雄等人在美国标准局（金标准技术研究院）进行了专门的测试后才验证的。总之，从经典的牛顿力学到现代的量子力学，各种定律、定理都是经过观察、分析、研究、推理和实际验证才被揭示、承认和确立的。计量正是上述过程的重要技术基础。

历史上三次大的技术革命都充分地依靠了计量，同时也促进了计量的发展。

以蒸汽机的广泛应用为主要标志的第一次技术革命，导致以机器为主的工厂取代了以手工为基础的作坊，使生产力得以迅速提高，进而确立了资本主义的生产方式。当时，经典力学和热力学是社会科技发展的重要理论基础。在蒸汽机的研制和应用的过程中，都需要对蒸汽压力、热膨胀系数、燃料的燃烧效率、能量的转换等进行大量的计量测试。力学计量和热工计量就是在这种情况下发展起来的。另外，机械工业的兴起，使几何量的计量得到了进一步的发展。

以电的产生和应用为基本标志的第二次技术革命，更加推动了社会的发展。欧姆定律、法拉第电磁感应定律以及麦克斯韦电磁波理论等为电磁现象的深入研究和广泛应用、电磁计量和无线电计量的开展提供了重要的理论基础。例如，1821 年西贝克发现的热电效应，为热电偶的诞生奠定了理论基础；而各种热电偶的研制成功，则对温度计量、电工计量，以及无线电计量等提供了一种重要手段，促进了相应技术的发展。为了实际测量地球运动的相对速率，迈克尔逊等人利用物理学的成就，研制出了迈克尔逊干涉仪，从而为长度计量提供了一个重要方法。1892 年，迈克尔逊用镉光（单色红光）作为干涉仪的光源，测量了保存

于巴黎的铂铱合金基准米尺的长度，获得了相当准确的结果（等于 1 553 163.5 个红光波长）。直至百余年后的今天，利用各种干涉仪精密测量长度仍然是几何量计量的一种重要方法。普朗克关于能量状态的量子化假说指出，物体在辐射和吸收能量时，其带电的线性谐振子可以和周围的电磁场交换能量，以致能从一个能级跃迁到另一个能级状态，并且能量子的能量为 $\Delta E=h\nu$（式中，h 为普朗克常数，ν 为频率）。爱因斯坦在普朗克假说的基础上，提出了光不仅具有波动性，而且还具有粒子性，即光是以速度 c 运动的粒子（光子）流，其单元（光子）的能量为 $\Delta E=h\nu$，从而说明不同频率的光子具有不同的能量。上述理论成功地解释了光电效应，成了热辐射计量的理论基础，同时也使计量开始从宏观进入微观领域。随着量子力学、核物理学的创立与发展，电离辐射计量逐渐形成。

核能及化工等的开发与应用，导致了第三次技术革命。在这个时期，科学技术和社会经济的发展更加迅速。原子能、化工、半导体、电子计算机、超导、激光、遥感、宇航等新技术的广泛应用，使计量日趋现代化，计量的宏观实物基准逐步向量子（自然）基准过渡。原子频标的建立和米的新定义的形成有着相当重要的意义。频率和长度的精密测量，促进了现代科技的发展。比如，光速的测定，原子光谱的超精细结构的探测，以及航海、航天、遥感、激光、微电子学等许多科技领域，都是以频率和长度的精密测量为重要基础的。

至于人们广泛谈论和关注的所谓第四次技术革命，将引起科技、经济和社会的重大变革，人类将进入“超工业社会”或“信息社会”。那时，不可再生的石化燃料能源将替换成可再生的太阳能、海潮发电等新能源，钢铁、机械、橡胶等传统产业将被电子工业、宇航工程、海洋工程、遗传工程等新兴产业所征服，等等。这场技术革命的先导是微电子学和计算机，而集成电路又可以说是先导的核心。集成电路的研制，没有相应的计量保证是不可想象的。比如，硅单晶的几何参数、物理特性，超纯水、超纯气的纯度，化学试剂、光刻胶的性能，膜层厚度、层错位错，离子注入深度、浓度、均匀度，以及工艺监控测试图形等的测定与控制都是精密测量。当前，我国集成电路研制尚比较落后，计量工作跟不上是其中的原因之一。

2. 计量与生产

计量是工业生产和产品制造的基础，是贯穿于全部生产和制造过程的一项活动。通过加强计量基础建设，能有效降低生产成本、提高生产效率、合理利用资源、提高产品质量和效益。例如，一辆普通的载重汽车有 9000 多个零件，由上百个工厂生产，若没有一定的计量保证，就无法装配成功。

节能是我国经济和社会发展的一项长远战略指针。计量不仅可以节能降耗，而且能够杜绝浪费，从而提高企业的经济效益。例如某地方中型钢铁厂轧钢板的耗油量，原来是每吨 300kg 左右，后来由于对废气、空气量、燃烧供热量以及温度等进行了计量监控，结果使能耗下降到每吨 40kg。原先，某钢厂的冶金炉所用的重油燃料靠人工经验控制，根本不计量。为了火旺，总是多投料，结果燃烧不彻底，黑烟滚滚，既多耗油又污染环境，以致连年亏损。后来，安装了计量仪表，对燃料进行了监控，使加油量保持在最佳值，既节约了油料又减少了污染，同时还提高了炼钢效率，结果很快就出现了扭亏为盈的新局面。某玛钢厂是我国生产玛钢制品的第一大厂，过去，能耗一直居高不下，是当地耗能的重点户。为摸清原因，该厂对十余种主要设备进行了热平衡测试，并取得了大量数据，从而计算出设备热平衡和能耗的基本关系，初步掌握了能源利用的规律，找出了能耗严重的主要原因并相应地安装了监测仪表。例如，退火窑的热效率原约为 8%，监测控制后则提高到 12%以上，退火时间由 60h 降

需要全本请访问 www.ertongbook.com