

# 电子测量和仪器

[美] B. M. 奥利弗 J. M. 卡奇 编

科学出版社

# 电子测量和仪器

〔美〕 B. M. 奥利弗 J. M. 卡奇 编

張 倫 韓家瑞 譯  
李世英 魯 人  
張世箕 校

科 学 图 书 出 版 社

1978

## 内 容 简 介

本书是一部全面论述现代电子测量仪器的专著。全书共分十八章，详细介绍了频率、时间、电流、电压、阻抗的测量原理和测量方法。着重讨论了几类常用电子测量仪器(信号源、放大器、示波器、记录器、发射机、接收机等)的工作原理及测量方法。书中对一些新近发展起来的测量技术如信号的数字分析技术、微波网络分析技术及自动测量系统也作了扼要说明。本书内容比较丰富新颖，叙述清楚，基本上反映了现代电子测量水平。

本书可供从事生产和研制电子测量仪器的广大工程技术人员以及从事电子测量工作的科研人员和大专院校师生参考。

B. M. Oliver     J. M. Cage  
ELECTRONIC    MEASUREMENTS  
AND    INSTRUMENTATION  
McGraw-Hill, 1971

## 电 子 测 量 和 仪 器

[美] B. M. 奥利弗    J. M. 卡奇 编  
张 伦 韩家瑞 译  
李世英 鲁 人  
张世箕 校

\*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

沈阳新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行    各地新华书店经营

\*

1978年9月第一版    开本: 787×1092 1/16  
1978年9月第一次印刷    印张: 30  
印数: 0001—45,110    字数: 700 000

统一书号: 15031·191  
本社书号: 1133·15—7

定 价: 3.10元

## 译 者 的 话

本书可以认为是近年来已出版的有关电子测量和仪器方面的书籍中内容较全面、题材较新颖、带有启发性的一本。书中内容涉及的范围相当广泛，几乎包括了电子测量的所有环节。作者在扼要论述测量的一般原理的同时，着重强调了各类方法的前景，因而能给人以某些启示。

关于本书的价值、内容及优缺点，已在校后记中作了评述。读者可以从中加深对本书的了解和认识。

在翻译过程中，我们对原书的个别内容作了删节。

我们希望本书的翻译出版能对我国从事电子测量和仪器制造的同志有所帮助，限于我们的学识水平，难免有不当甚至错误的地方，请读者批评指正。

# 目 录

第一章 基本原理	1
1-1 测量的任务	1
1-2 测量的单位	3
1-3 测量单位的标准	6
第二章 线性系统的正弦波测试	10
2-1 数学背景	10
2-2 增益或损耗测量	12
2-3 相位测量	15
2-4 自动网络分析仪	19
2-5 延迟失真测量	19
2-6 环路增益测量	22
2-7 非线性测量	25
2-8 正弦波测试中的注意事项	27
第三章 线性系统的方波和脉冲测试	28
3-1 工具和技术	29
3-2 瞬态响应和正弦响应之间的关系	29
3-3 对一般化输入的响应	35
3-4 低端截止对方波响应的影响	36
3-5 时域反射计技术	39
第四章 噪声测量、利用噪声进行的测量以及存在噪声时进行的测量	42
4-1 数学背景	42
4-2 噪声的测量	51
4-3 用噪声作为测试信号进行的测量	56
4-4 用伪随机测试信号进行的测量	59
4-5 存在噪声时进行的测量	62
第五章 信号的数字分析方法	68
5-1 傅氏变换——基本理论的回顾	69
5-2 统计学——基本理论的回顾	72
5-3 信号分析	73
5-4 小结	99
第六章 频率和时间测量	103
6-1 时间的定义和标准	103
6-2 标准频率和时号广播	104
6-3 时间和频率标准	106
6-4 频率测量仪器	113
6-5 频率合成器	117
第七章 仪器用的直流放大器	122

7-1	直接耦合放大器的考虑	123
7-2	有自动复位的直流放大器	129
7-3	差动放大器	131
7-4	斩波放大器	133
<b>第八章</b>	<b>电压和电流测量</b>	<b>136</b>
8-1	数字电压表简介	136
8-2	非积分式数字电压表	138
8-3	具有计数电路的数字电压表	142
8-4	常模抑制	148
8-5	共模抑制	150
8-6	交流电压测量原理	152
8-7	平均响应检波器	154
8-8	峰值响应检波器	158
8-9	峰-峰值检波	160
8-10	均方根响应检波器	161
8-11	其它检波方法	163
8-12	取样电压表	164
8-13	同步检波	165
8-14	直流探头	167
8-15	交流探头	168
<b>第九章</b>	<b>阻抗测量</b>	<b>170</b>
9-1	定义和公式	170
9-2	元件和标准	173
9-3	测量阻抗的电表法	178
9-4	直流电桥	182
9-5	低频电桥	185
9-6	射频阻抗测量	196
9-7	精密测量	200
<b>第十章</b>	<b>音频信号源</b>	<b>206</b>
10-1	正弦音频信号源	206
10-2	LC振荡器	207
10-3	RC信号发生器	211
10-4	文氏电桥振荡器	214
10-5	实用的文氏电桥振荡器	216
10-6	相移振荡器	218
10-7	环形振荡器	218
10-8	差频振荡器	219
10-9	多相差频振荡器	221
10-10	正弦波的合成	223
<b>第十一章</b>	<b>示波器</b>	<b>226</b>
11-1	示波器的功能	226
11-2	示波管	227

11-3	示波管显示屏幕的特性 .....	232
11-4	示波管存储靶的特性 .....	235
11-5	通用示波器 .....	240
11-6	取样示波器 .....	258
11-7	专用示波器 .....	264
11-8	示波器的附件 .....	271
<b>第十二章</b>	<b>记录器 .....</b>	<b>278</b>
12-1	检流计式记录器 .....	278
12-2	检流计式记录器用的放大器 .....	286
12-3	笔尖驱动机构 .....	290
12-4	伺服记录器 .....	296
12-5	磁记录装置 .....	299
12-6	磁记录技术 .....	301
<b>第十三章</b>	<b>音频及视频放大器的测量 .....</b>	<b>310</b>
13-1	传递增益和传递函数 .....	310
13-2	放大器中的稳态增益及相位测量 .....	312
13-3	精确度极高的增益测量 .....	316
13-4	共模抑制和输入平衡 .....	317
13-5	使用变压器耦合的共模抑制和平衡 .....	320
13-6	共模抑制比和平衡度良好的差分放大器 .....	321
13-7	动态范围和失真 .....	324
13-8	荡动的限幅作用 .....	326
<b>第十四章</b>	<b>发射机和接收机的测量 .....</b>	<b>328</b>
14-1	一般性能特性 .....	328
14-2	基本测量 .....	329
14-3	特殊的系统测量 .....	330
14-4	接收系统的测量 .....	333
14-5	信噪失真灵敏度 .....	335
14-6	调制接纳带宽 .....	336
14-7	灵敏度与噪声系数的关系 .....	336
14-8	自动增益控制特性 .....	338
14-9	发送系统的测量 .....	339
14-10	无线电设备的技术规范 .....	348
<b>第十五章</b>	<b>微波信号源 .....</b>	<b>349</b>
15-1	微波晶体管振荡器 .....	349
15-2	固态微波放大器 .....	353
15-3	其它固态微波信号源 .....	356
15-4	固态微波振荡器 .....	363
15-5	固态信号源的比较 .....	368
15-6	微波信号发生器 .....	371
15-7	信号发生器的调幅器 .....	376
15-8	微波扫频发生器 .....	379
<b>第十六章</b>	<b>微波信号分析 .....</b>	<b>385</b>

16-1	功率测量 .....	385
16-2	100 毫瓦以上功率的测量 .....	390
16-3	脉冲功率测量 .....	390
16-4	失配考虑 .....	392
16-5	使用上的考虑 .....	393
16-6	微波频率计或波长计 .....	395
16-7	频谱分析 .....	398
16-8	扫频超外差式频谱分析仪 .....	400
16-9	波形分析仪 .....	408
16-10	射频调谐式(TRF)频谱分析仪 .....	409
16-11	多滤波器实时频谱分析仪 .....	410
16-12	跟踪发生器计数器 .....	411
16-13	频谱分析仪的技术及应用 .....	411
16-14	观察脉冲调制射频频谱时, 选择带宽和其它控制调置的一些经验法则 .....	421
16-15	电磁干扰测量 .....	423
<b>第十七章</b>	<b>微波网络分析 .....</b>	<b>424</b>
17-1	反射和阻抗测量 .....	424
17-2	衰减测量 .....	427
17-3	铁氧体器件 .....	428
17-4	双口网络理论 .....	434
17-5	$s$ 参量理论 .....	436
17-6	利用散射参量进行的网络计算 .....	440
17-7	$s$ 参量的测量 .....	444
17-8	测量技术 .....	447
<b>第十八章</b>	<b>自动测量系统 .....</b>	<b>458</b>
18-1	低电平多路数据采集系统 .....	458
18-2	共模噪声的抑制 .....	459
18-3	常模噪声的抑制 .....	461
18-4	低噪声前置放大器 .....	462
18-5	交扰 .....	462
18-6	热电压 .....	463
18-7	扫描器 .....	464
18-8	自动分析系统 .....	465
18-9	自动测试系统 .....	466
<b>校后记</b>	<b>.....</b>	<b>469</b>



# 第一章 基本原理

简单物理量的测量虽然从古代就已开始，但是，测量作为一门精密技术，问世不过数百年。在我们今天测量的诸量中，百年前人们对其中许多量甚至一无所知，充其量不过是一知半解。即使象时间这样一个如此基本的量，也一直是用沙钟和滴漏进行极其粗略的测量，直到伽利略对摆的观察才启发人们用计数周期的谐振系统来取代这些耗散机构。自那时以来，钟表的准确度虽然随着愈来愈好的谐振系统的发现而获得巨大的改进，但其基本原理并未改变。目前，我们使用铯原子谐振和氢原子谐振来测量时间，其准确度相当于在三万年内误差小于1秒。现在还没有任何其它的物理量能够这样精确地进行测量。当然，除钟表学可能保持目前准确度的最高纪录，其它领域也由于应用了电子学来解决其测量问题而收益很大。

电子测量分为两类：一类是测电压、电容或场强之类的电子量；一类是运用电子手段来测量压力、温度或流速之类的其它量。在满足电子学本身测量需要方面，电子仪器已迈入成熟阶段，而随着电子仪器的完善，突出地证明它们适用于其它领域。在本书中，我们把电子仪器主要当作本专业的一种工具来看。这样做既大大避免了重复和肤浅化，同时又尽量地保存了普遍性，因为用电子方法测量非电的物理变量，第一步就是将这种变量转换成电量。

## 1-1 测量的任务

科学和工艺技术，同测量是息息相关以至全然不可分离的。诚然，现代测量仪器是科学研究成果之一。但是，离开测量便无科学，也是不言而喻的。物理定律是定量的定律，它们的正确性只能通过精密的测量来确定。正是坚持理论与实验的定量的一致，才使科学有别于哲学。

第谷(Tycho Brahe)所做的周密的天文观察，以及开普勒(Johannes Kepler)对第谷的数据所作的精辟分析，十分令人信服地说明精确的测量对科学发展的贡献。柏拉图以及信奉其学说的希腊哲学家认为，天体是完美无缺的，是由第五原质(照字义讲，除土、火、气以及水之外的第五个原质)组成的，因而它们的运动必然是永恒而完美的。当然，恒星沿圆周运转，而行星的运转则被认为可以用一些均匀的圆周运动的适当组合来说明。在两千多年中，将行星运转分解为圆周分量，被认为是天文学的最重要的问题。阿里斯塔克斯(Aristarchus, 公元前250年希腊天文学家)的地动说，托勒玫(Ptolemy, 公元150年)的地球中心说，甚至哥白尼(公元1543年)的地动说，都离不开圆周运动的概念。即使是哥白尼学说消除了实际是地球本身运转所产生的大的周转圆，从而大大简化了托勒玫的地动说，也没有一种学说能推断出诸行星在各个时期的确切位置。两种学说都有误差，且往往达2度之多。

对于在哥白尼去世不久诞生的第谷来说，2度误差是不能容忍的。他决定在发现任何

正确的理论以前，一定要比以往更加精确地测量出行星多年内的实际位置。在丹麦国王的资助下，第谷建造了一些十分巨大而坚固的象限仪和用来测量角度的其它仪器。他将这些仪器安装在号称“天体之堡”的天文台的稳固的地基上。然后，他校准了自己的仪器，以便将这些仪器的误差从自己的天文观察中扣除掉。他持续二十年记录了行星的位置。后来迁到布拉格，并收开普勒为助手。

分派给开普勒的任务是，根据第谷的天文观测来计算火星的轨道。经过四年的艰苦努力，开普勒得出一个痛苦的结论。不管是哥白尼的均轮和本轮的组合，还是托勒玫的天动说，都与事实不符。火星的运动并不象柏拉图认为的那样能够从规则的圆周运动合成。开普勒得到的最好的解，同天文观测是不一致的，相差仅为 8 弧分。但是，开普勒知道第谷的天文观测误差不可能大于 2 弧分。以一种甚至在科学家中也是罕见的严谨性，开普勒看出了流传长达两千年之久的信念，由于一个超过容许限度仅仅 6 弧分的误差而受到末日的审判。

于是，开普勒继续研究，发现了他的著名的行星运动定律。八十年后牛顿指出，所有这些行星运动定律都是他的运动定律和万有引力理论的结果，因此为万有引力理论提供了令人信服的证据。古希腊天动说被永远打破了。这种学说认为行星按托勒玫轨道在一些水晶般的天球上运转。行星的所有这些复杂运动，长期以来使人们迷惑不解，至此被归纳进了一个简短的公式。

后来用望远镜进行的更加精确的天文观测指出，水星的轨道每个世纪的岁差，比由于其它行星的摄动而引起的多出 43 弧秒。这又为我们提供了对爱因斯坦的广义相对论迄今最有力的证明。牛顿万有引力定律只是作为一个特殊情况而被包括在相对论之内的。

测量在其它科学部门所起的作用与测量在揭示天体力学的秘密方面所起的作用是可以相媲美的。化学计量学对化学反应进行的定量测量，确定了原子的存在。光谱学的精确测量帮助揭示了原子结构的秘密。目前，对核裂变碎片轨道的测量逐渐阐明了原子核的性质。X 射线衍射研究告诉我们晶体的结构，并对脱氧核糖核酸(DNA)和其它有机分子的性质提供了重要线索。这类例子是举不胜举的，因为继第谷、伽利略和牛顿之后，科学已变成实验性的了，而一切实验都离不开测量。人们终于学会不把自己的主观想法强加给自然，而是不断地对自然提出疑问，并对其答案加以寻根究底的探索。

科学上的新发现为研究自然提供了新仪器。这类研究反过来又促成了科学新发现。虽然物理学的大部分秘密现在已被揭晓，但是在原子核之微和宇宙之大这两个极极端上，至今仍然存在着不少奥秘。粒子物理学、宇宙学以及分子生物学诸领域，是现代科学的重要尖端。所有这些科学领域，都与仪器和测量密切相关。

光学的发展对科学仪器(望远镜、显微镜和分光镜)作出了重要的贡献。当伽利略改进了佛来明的小望远镜并把它转过来指向天空时，天文学便出现了一个新时代。后来，分光镜不但发现了地球上的新元素，而且最终无可争辩地证实了恒星本身象太阳一样也都是由这些同样的元素组成的。显微镜显示出了有生命的物体的细胞结构，以及疾病的根源微生物。

试想，倘若阿里斯塔克斯有一台望远镜和分光镜，希波克拉底有一台显微镜，人类历史会是多么不同啊！倘若希腊人能看到月球上的山脉和阳光中的地球元素的光谱线，怎么会相信第五原质呢？！如果当时看到了木星的几个卫星，又有谁会主张所有的天体都是

围绕着地球运转呢?!

近几年来,无论是天文学还是生物学,都因有了新工具而取得了新的巨大的进展,这时期的新进展是由于电子学发展的结果。射电望远镜使天文学家能够研究星际之间,即曾被简单地称之为空间内的物质。用射电望远镜发现了类星体和脉冲星:前者可能是宇宙中最遥远的物体;后者被认为是几乎完全由中子组成的星体。与此同时,电子显微镜揭示了脱氧核糖核酸的单链和有生命细胞的许多奇异的迁移机构。这些机构利用遗传密码构造蛋白质、抗体和酶。现在看来,有生命的东西肯定也是遵守物理学和化学定律的。

尺寸、温度、压力、功率、电压、电流、阻抗、材料的各种特性以及许多其它物理变量的精密测量,对工程技术和科学都是很重要的。

在我们的技术社会中,不只是仪器和测量起的作用越来越大,电子学在仪器中也正在起着越来越重要的作用。这样说的理由在于,大部分物理量可以通过传感器变换为电信号,一旦这些量变成电信号这一共同形式,便可进行放大、滤波、多路传输、取样以及测量。很容易获得数字形式的测量结果,或将测量结果变换成数字形式,以供进行自动分析和自动记录。或者可以把数据送入伺服系统进行自动的过程控制。在检测和放大微弱信号的能力上,以及对持续时间很短的事件进行测量的能力上,电子电路都是无与伦比的。将电子传感器和电子电路应用于仪器,大大提高了我们的测量能力,因而也提高我们对新问题寻求自然答案的能力。

## 1-2 测量的单位

在维也纳圣史蒂芬教堂的石壁上插着两根铁棒,各有一端伸露在外面:一根露出长约一码,另一根露出长约一米。这两根棒的历史比码和米这两个单位古老得多。在中世纪,维也纳是从东方来的贸易商队所到达的西方终点。这两根铁棒是用来丈量商人进口的丝绸和其它产品的。

贸易上重要的量,如长度、质量以及容积等,其测量的历史都象文化本身一样古老,但是古代度量单位保留至今的极少。目前没有一个人知道古希腊尺(stadium)或腕尺(cubit)的准确长度。在公元前三世纪,当太阳直照在锡尼(Syene)城时,伊拉托斯西尼斯(Eratosthenes)测量了太阳光线在亚历山德里亚(Alexandria)城上的角度,从而知道这两个城市之间南北距离之后,计算出地球的周长为250,000古希腊尺。当我们读到这一点时,只能赞美他的才智,而无法确切地验证他的计算结果。

角度的测量是独特的,因为它的测量单位是无量纲的。它不需要标准,只需要一个数字上的习惯约定。也许这可以解释巴比伦角度测量制能够沿用久远的原因,直到目前仍在使用。与巴比伦六十进位制相一致,巴比伦人将等边三角形的角分成六十份,每份取为一度。然后将每度再分为六十个小分度,这些小分度又分为六十个二阶小分度,现在分别简称为分和秒\*。遗憾的是,巴比伦人并未象我们现在把一昼夜分为二十四小时那样,将一圆周分为二十四份作为他们的基本单位;否则时间和角度的这两个传统度量单位虽然其小分度与十进位制不相容,这两个单位彼此之间至少是互相一致的,这样,天文学家就

---

\* 在拉丁文中“分(minute)”的原义是“小”,“秒(second)”的原义是“二次的”。——校注

不必慎重处理两种分和两种秒的问题了<sup>1)</sup>。

随着十八、十九世纪实验科学的发展,开始感到需要公认的度量单位。缺少这种标准化,不同国家的工作者对研究结果互相进行比较就困难得多。1799年法国采用米制以后,米制的长度单位和质量单位以及早已奠定的时间单位——秒逐渐被接受,当时,力学方面的一些科学发现便是用这些单位报道的。尽管许多实验室使用了不同的米制单位,如米·克·秒(mgs)制,或毫米·毫克·秒制,但是这些单位由10的整数次幂相联系,很容易进行换算。然而,在十九世纪末和二十世纪初,厘米·克·秒(cgs)制逐渐变成科学上普遍接受的标准。不但单位实现了标准化,而且各种物理量单位的符号和名称也标准化了。这也有助于使科学的公式成为世界各地科学家的一种易懂的共同语言。

**电学单位** 由于初时对静电学和电磁学之间的关系理解得还不清楚,使电学单位的早期历史也复杂起来。把电学单位归系到早已很好地建立了的功和力的机械单位上,其重要性在静电学和电磁学中都受到重视。所以静电学的工作者选用表示两个点电荷 $q_1$ 和 $q_2$ 之间力的库伦关系式,即:

$$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2} \quad (1-2-1)$$

其中, $\epsilon$ 在真空中取为1,作为定义电荷单位的出发点。在距离为1厘米时产生1达因力的两个相等的电荷,每一个均为一个单位电荷。由于 $\epsilon$ 在真空中被取为1,所以,它一般被认为是无量纲的。这就使得在静电单位制(esu)中电荷具有 $\sqrt{ML^3/T^2} = M^{1/2}L^{3/2}T^{-1}$ 的量纲。后来,电磁学的工作者沿袭了相同的途径。磁极强度 $m_1$ 和 $m_2$ 在单位距离上产生单位的力,如下式所示:

$$F = \frac{m_1 m_2}{\mu r^2} \quad (1-2-2)$$

并取式中 $m_1 = m_2$ ,在真空中 $\mu = 1$ ,这样的磁极强度就是单位磁极强度。但是,由于磁极和电荷不一样,在本质上是不能孤立出来的,所以此式就被含有电流 $I_1$ 和 $I_2$ 的理论等效关系式代替,

$$\frac{F}{l} = \frac{2\mu I_1 I_2}{d} \quad (1-2-3)$$

此式表示相距距离为 $d$ 的两个无限长的平行导体之间的每单位长度 $l$ 的力。同样,由于 $\mu$ 被认为是无量纲的,故由(1-2-3)式定义的电流被指定具有量纲 $\sqrt{ML/T^2} = M^{1/2}L^{1/2}T^{-1}$ 。由于电荷是电流和时间的积,故在电磁单位制(emu)中电荷具有量纲 $M^{1/2}L^{1/2}$ 。

因此,电荷的静电单位的量纲是电荷的电磁单位的量纲的 $L/T$ 倍。这两种单位制中其它单位之间的关系也是如此。由于一个给定量的单位的数目与单位大小成反比,所以,我们可知 $q_{\text{emu}} = v q_{\text{esu}}$ ,式中, $v$ 是某一速度。将实际值代入式中, $v$ 就变为光速,这一事实给麦克斯韦和其他人很大启发——光是一种电磁现象。

当静电单位制和电磁单位制均被理论工作者和科学实验人员使用时,还出现了第三种用于工程技术的所谓实用单位制,其中包括伏特、安培、库仑和瓦特。在1863年,在所

1) 欧洲曾经出现过一种新单位,即新度(neugrad)(或grad),它等于圆周的 $4/100$ 。此单位又按10进位细分为小单位,而这种做法也可以施之于度的细分。将一直角分为100份而不是90份的优点则不明显。实际上,将 $30^\circ$ 之类的常见角度表示为 $33\frac{1}{3}$ 新度更显得别扭。如果要做什么改动的话,最好把新单位选取为 $15^\circ$ 。

有的基本单位实现标准化初期, 这些实用单位中的一些单位被规定为电磁单位的十进倍数, 因此, 这些单位目前仍然是这样。

对同样一些量来说, 静电单位和电磁单位之间的量纲不一致性, 说明(1-2-1)式中的  $\varepsilon$  以及(1-2-2)式和(1-2-3)式中的  $\mu$ , 显然不应看作是无量纲的。如果不是无量纲的, 为什么又规定它们在真空中的值为 1 呢? 这种做法虽然可能促使麦克斯韦把电磁理论统一起来, 但也带来很大混乱, 因为它抹杀了电场强度  $E$  和位移电流密度  $D$  之间的根本差别, 更有甚者, 它掩盖了磁场强度  $H$  和磁感应  $B$  之间的根本差别。一旦人们认识到把  $\varepsilon$  和  $\mu$  取为 1 同在下述的牛顿万有引力定律中把  $\gamma$  取为 1 一样没什么道理时,

$$F = \gamma \frac{M_1 M_2}{r^2} \quad (1-2-4)$$

(由这个公式定义了质量单位), 就为静电单位制、电磁单位制和实用单位制三者协调一致扫清道路。实现这一目的之方法是, 长度单位采用米而不是厘米, 质量单位采用千克而不是克, 这样便产生目前的米·千克·秒制(mks)。

这样做, 部分地弥补了静电单位制和电磁单位制的另一个缺陷。库仑定律涉及到球面几何。每个电荷受到来自另一个电荷的球面电场的作用力。由于根据定义  $F = qE$ , 所以, 运用  $\varepsilon = 1$  的(1-2-1)式可知, 这种电场在单位距离时在单位电荷情况下必然获得单位电场强度。这就使电荷  $q$  具有  $\Phi = 4\pi \cdot q$  的总电通量, 且将  $4\pi$  这个因数引入许多包含直角几何场和平面场的表达式中。在电磁单位制中也存在同样的情况。在 1882 年, 赫维塞德(O. Heaviside)指出, 如果将(1-2-1)式和(1-2-3)式记写如下而相应地考虑到球面和圆柱几何结构, 便可得到一个“更为有理的”单位制:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \varepsilon r^2} \quad (1-2-1r)$$

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu I_1 I_2}{2\pi d} \quad (1-2-3r)$$

公式序号中的  $r$  表示有理的形式。如果一开始就这样做且  $\varepsilon$  和  $\mu$  在真空中的值取为 1, 则电荷的静电单位和电磁单位就会大  $\sqrt{4\pi}$  倍。赫维塞德和洛伦茨(H. A. Lorentz)提出了这种单位制, 且在各自的工作中进行运用。现在的实际做法是, 把公式写成上面的形式, 采用静电单位、电磁单位或实用单位, 且给  $\varepsilon$  和  $\mu$  增加一个补偿因数  $4\pi$ 。这就是自由空间的介电常数和导磁率在米·千克·秒制中的值

$$\varepsilon_0 = \frac{10^{11}}{4\pi c^2} \approx \frac{10^{-9}}{36\pi} \quad (1-2-5)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad (1-2-6)$$

其中有一个  $4\pi$  的由来, 其余 10 和  $c$ (光速)的幂则来自静电单位和电磁单位对实用单位的比值。由于实现了有理化, 从以米·千克·秒单位书写的平面场公式中省去了  $4\pi$ , 但在  $\mu$  和  $\varepsilon$  中包含了这个因数。这个因数在后二者中总是不可少的。

实际上, 赋予  $\varepsilon$  和  $\mu$  的量纲, 定义了一个新的物理量纲。这个新量纲可以认为是安培或库仑。这就消除了老的静电单位制和电磁单位制中给予电荷的又奇怪又不合理(因而也不一致)的量纲。例如, 根据(1-2-1)式或(1-2-1r)式, 在米·千克·秒制中,  $\varepsilon$  的单位为

$$\frac{(\text{库仑})^2}{(\text{牛顿})(\text{米})^2} = \frac{Q^2 T^2}{M L^3} \quad (1-2-7)$$

我们没有理由相信电荷能够由质量、长度和时间构成,而有充分理由相信电荷是一个性质特殊的物理量,它应该有自己的量纲。尽管如此,将此第四个单位引入绝对单位制,引起了长期的而且往往是激烈的争论。质量、长度和时间这三个基本量纲的古典单位制的辩护者,似乎并未因为电荷在静电单位制和电磁单位制中有两个不同的量纲问题而感到烦恼。此外,看来他们没有发觉甚至连三个基本量纲也是不需要的。如将(1-2-4)式中的 $\gamma$ 看作是无量纲的,并且象对待(1-2-1)式和(1-2-3)式中的 $\varepsilon$ 和 $\mu$ 那样把 $\gamma$ 看作1,便获得一个新的质量单位,其量纲为 $L^3T^{-2}$ 。倘若牛顿这样做的话,信奉牛顿学说的古典主义者就会强烈地反对引出第三个“基本”量纲——质量。

事实上,同样通过把普朗克常数和光速定义为无量纲的并且取为1,甚至连长度和时间也可以取消。于是,可以得到这样一种单位制,按这种单位制物理方程式中的所有变量都是纯粹的数字,而单位的大小则取决于一个要求,即对一些规定的物理测量应产生一致性。这种单位制将排除需要包括进许多比例常数这种麻烦,但同时却会大大掩盖一切公式中变量性质的差别,并且妨碍使用量纲分析来检验计算结果。

既然在一个单位制中基本量纲的数目是比较任意的,所以关于数目3并没有什么不可思议的东西,而且没有真正的实际理由把电荷排除在基本量纲之外。

应当了解到,单位的大小能够离开其量纲而独立地加以选择。我们可以称心如意地自由选择任何适宜的单位的大小。也就是说,我们需要表示的量,与我们的单位的比值不要不适宜地(因而几乎是无意义地)过大或过小。按三个量级而取的标准的前置词\*对解决这个问题帮助很大。实际上,采用公制的原因不在于长度单位是米,质量单位是千克,而是在于这些单位的十进制细分和倍进关系。

问题是:是否有一个“自然”单位制?也就是说,我们能否对质量、长度、时间以及电荷这些单位的大小加以选择,使许多或全部物理常数变为整数或有理数,或最低限度变成具有某种用可允许的自由度之类表示的物理意义的数呢?目前,对这些问题的答案看来是否定的。譬如说,我们可以把电子的质量和电荷,光速,以及普朗克常数定义为1。但是,做了这一点之后,下一步就没办法简化了。没有一个其它的物理常数采用整数值的。的确有一个物理常数即精细结构常数 $\alpha$ ;它将光速、普朗克常数、电子电荷以及真空的介电常数结合在如下一个公式内

$$\alpha = \frac{\mu_0 c^2}{4\pi} \frac{e^2}{hc} = \frac{1}{137.03602 \dots}$$

问题在于 $\alpha$ 是无量纲的,所以其数值与我们的单位制无关。如同 $\pi$ 和 $e$ 是自然数学数一样,在同样的意义上,数字137.03602...是一个自然物理数。爱丁顿认为 $\alpha^{-1}$ 具有整数数值137,并且提出几种假说,说明这种看法可能正确的理由。更精确的现代测量证明他这种提法是错误的。一直到未来的研究发现一种自然单位制存在以前,看来没有理由放弃目前米·千克·秒制。

### 1-3 测量单位的标准

为了在不同的地区进行精确而可互比较的测量,需要精确的标准。早期的标准全

\* 即微、毫、千、兆等前置词,每一个前置词表示数值差 $10^{3n}$ 倍。——校注

都是原器标准：用实际物体把单位定义为其物理特性之一。标准千克和标准米尺都是原器标准。地球本身也是原器标准，因为秒被定义为平均太阳日的  $1/86,400$ 。

原器标准有几个缺点。它们会随时间而变化，会损坏，并且象古希腊尺和腕尺一样它们会失传。由于内应力，金属发生磨损和蠕动。由于潮汐摩擦，地球运转速度变慢。看来，最好的标准是原子标准。就我们所知，给定元素的给定同位素的一切原子，是绝对相同的，且其特性是不变的。近几年来，秒和米这两个基本单位已按照原子标准来定义，而不是根据它们原来的原器标准来定义了。

这种向原子标准的过渡之所以可能，是由于仪器技术的发展，特别是干涉仪和铯束原子钟的发展，使原子特性能够同原来的原器标准进行充分精确的比对。比对以后，保存原来的原器，就仅仅是为了历史上和情感上的原因。迄今为止，还没有提出足够精确的技术，以使原子参考标准取代千克原器，但是这一天可能已为期不远了。

下面给出了国际计量委员会(CIPM)在1967年(及较早的)国际计量大会(CGPM)上通过的国际单位制(SI)的基本单位的现行定义\*。只有千克采用原器标准。开尔文(kelvin)和坎德拉(candela)虽然不全是原子标准，但它们仅涉及物质的可重复的特性。这两个单位不如其它单位那么基本，但为了方便，也列在基本单位之内。热力学温标在原则上能够通过规定玻尔兹曼常数来定义，而坎德拉是生理量的一个物理标准，因为光度涉及到人的肉眼的特性。

#### 国际单位制中基本单位的定义

米(m)——长度单位。它等于 $\text{Kr}^{86}$ 原子在 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间的跃迁所对应的辐射在真空内的 $1,650,763.73$ 个波长(1960年第十一届国际计量大会决议6)。

千克(kg)——质量单位。它等于国际千克原器的质量(1889年和1901年第一和第三届国际计量大会)。

秒(s)——时间单位。它等于 $\text{Cs}^{133}$ 原子在基态的两个超精细能级间的跃迁所对应的辐射的 $9,192,631,770$ 个周期的持续时间(1967年第十三届国际计量大会决议1)。

安培(A)——电流单位。它等于这样的恒定电流：即如果在真空内两条相距1米的无限长且其圆截面小得可略而不计的平行导体内维持1安培恒定电流，就会在这两个导体之间产生 $2 \times 10^{-7}$ 牛顿/米的一个作用力(1946年国际计量委员会决议2,此决议为1948年第九届国际计量大会批准)。

开尔文(k)——热力学温度单位。它等于水的三相点的热力学温度的 $1/273.16$ (1967年第十三届国际计量大会决议4)。

坎德拉(cd)——发光强度单位。它等于在 $101,325$ 牛顿/米<sup>2</sup>压力下铂的凝固温度时黑体的 $1/600,000$ 米<sup>2</sup>表面的垂直方向上的发光强度(1967年国际计量大会决议5)。

安培的定义建立了机械标准和电学标准之间的联系。也可以选择其它的建立联系的办法，但是通过具有精确尺寸的线圈的稳态电流所产生的的较大的磁力是能够很精确地测

\* 除1-3-1节所列举的以外，1971年10月第十四届国际计量大会通过确认物质的量的单位为摩尔，并作为国际单位制的一个新的基本单位。摩尔的定义是：1摩尔的任何物质所包含的结构粒子数与 $0.012$ 千克 $^{12}\text{C}$ 的原子数相等。摩尔这个物质质量单位，在国际上早已广泛使用，不过在1971年才被正式确定为七个基本单位之一。——校注

表 1-1 推荐的物理常数数值<sup>[3]</sup>

物 理 量	符 号	数 值	不 确 定 度 <sup>①</sup>	单 位	
				米·千克·秒	厘米·克·秒
光速 <sup>②</sup>	$c$	2.9979250	±10	10 <sup>8</sup> 米/秒	10 <sup>10</sup> 厘米/秒
电子电荷	$e$	1.6021917	70	10 <sup>-19</sup> 库仑	10 <sup>-20</sup> 电磁单位
		4.803250		.....	10 <sup>-10</sup> 静电单位
电子伏特	.....	1.6021917		10 <sup>-19</sup> 焦耳	10 <sup>-12</sup> 尔格
等效于	.....	2.4179659		10 <sup>-14</sup> 赫兹	,
等效于	.....	8.065465		10 <sup>5</sup> 米 <sup>-1</sup>	10 <sup>8</sup> 厘米 <sup>-1</sup>
等效于	.....	1.160485		10 <sup>4</sup> K	
普朗克常数	$h$	6.626196	50	10 <sup>-34</sup> 焦耳·秒	10 <sup>-27</sup> 尔格·秒
$(c)^{-1}(hc/2e)$	$h/e$	4.135708		10 <sup>-15</sup> 焦耳·秒/库仑	10 <sup>-7</sup> 尔格·秒/电磁单位
阿氏数 (阿伏伽德罗常数)	$N$	6.022169	40 <sup>③</sup>	10 <sup>-26</sup> 摩尔 <sup>-1</sup>	10 <sup>23</sup> 摩尔 <sup>-1</sup>
原子质量单位	amu	1.660531	11 <sup>③</sup>	10 <sup>-27</sup> 千克	10 <sup>-24</sup> 克
电子静质量	$m_e$	9.109558	54	10 <sup>-31</sup> 千克	10 <sup>-28</sup> 克
	$m_e^*$	5.485930		10 <sup>-4</sup> amu	10 <sup>-4</sup> amu
质子静质量	$M_p$	1.672614	11 <sup>③</sup>	10 <sup>-27</sup> 千克	10 <sup>-24</sup> 克
	$M_p^*$	1.00727661		amu	amu
质子对电子的质量比	$M_p/m_e$	1,836.109			
电子荷质比	$e/m_e$	1.7588028	54	10 <sup>11</sup> 库仑/千克	10 <sup>7</sup> 电磁单位/克
		5.272759		.....	10 <sup>17</sup> 静电单位/克
磁通量子	$\Phi$	2.067854		10 <sup>-15</sup> 特斯拉·米 <sup>2</sup>	10 <sup>-7</sup> 高斯·厘米 <sup>2</sup>
玻尔兹曼常数	$k$	1.380622	59	10 <sup>-23</sup> 焦耳/K	10 <sup>-16</sup> 尔格/K
	$k/e$	8.617087		10 <sup>-5</sup> 伏/K	
重力常数	$\gamma$	6.6732	31	10 <sup>-11</sup> 牛顿·米 <sup>2</sup> /千克 <sup>2</sup>	10 <sup>-8</sup> 达因·厘米 <sup>2</sup> /克 <sup>2</sup>

① (a) 此处列出的数据是1 $\sigma$ 误差, 是前面一列数值中最末两位数字的误差限;

(b) 根据NBS的《数学函数手册》第9版(1971年);

(c) 参阅 *Hewlett-parkard Journal*, p. 11, May 1971. ——校注

② (a) 光速的最新测得值为  $c = 299792456.2 \pm 1.1$  米/秒;

(b) 参阅 *NBS Tech. News Bull.*, No. 1, 1973. ——校注

③ 这些数值与近来的新数据不一致, 有待重新调整, 为谨慎起见, 可将这些数值乘上3. ——校注

量的。在这种测量中并不使用平行导体, 而是根据定义就能够计算出具有适宜形状和尺寸的线圈之间的力, 虽然连这样做也是不必要的。汤姆生和兰帕德对一类可计算的电容器的发现(第九章), 以及能够以很高的精确度测定频率的能力, 就使得我们能对电感量进行精密的测量。知道了电感  $L$  随着载有电流  $I$  的两个线圈(一个是固定的, 另一个放在天平的一个臂上)之间的位移  $x$  而变化的定律, 便可利用下式“称量”出安培

$$F = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dx}. \quad (1-3-1)$$

确定了安培之后, 对其它的主要电学单位可给出<sup>[2]</sup>下列定义<sup>1)</sup>:

伏特(V)——电位差单位。当载有1安培恒定电流的一根导线的两点间耗散1瓦特功率时, 该两点间的电位差为1伏特。

1) 须注意, 虽然我们使用亨利来确定安培, 但是(a)这是不必要的, (b)这种推理不能自相循环, 因为公式(1-3-1)中的电感并不是用安培来确定的, 而是利用一个计算电容器和在某一 $\omega$ 下  $\omega L = 1/\omega C$  的关系。



欧姆( $\Omega$ )——电阻单位。当把1伏特恒定电位差加在一根导线的两点之间,而在该导体上产生1安培电流时,该导体两点间的电阻为1欧姆,该导体内不存在任何电动势(emf)。

库仑(C)——电量单位。1安培电流在1秒时间内运输的电量为1库仑。

法拉(F)——电容单位。当一个电容器上充以1库仑的电量而在该电容器极片之间出现1伏特的电位差时,该容器极片间的电容为1法拉。

亨利(H)——电感单位。当一个闭合电路中的电流以1安培/秒的速率均匀地变化而在该闭合电路内产生1伏特电动势时,该闭合电路的电感为1亨利。

韦伯(Wb)——磁通量单位。当与一匝电路相交连时,随着磁通量以均匀的速率于1秒时间内降低到零,在该电路内能产生1伏特电动势的磁通量为1韦伯。

特斯拉(T)——磁感应强度单位。它等于1韦伯/米<sup>2</sup>。

虽然原器标准的无常的本性使得凡有可能就废弃不用作原基准,但是它们仍然是大多数测量用的副基准或工作基准的基础。因此,使用各种类型的标准化学电池以及齐纳二极管作为电压标准,但这类标准有时须进行绝对校准。标准实验室为了检验副标准相对于绝对单位的精确度而采用的各级基准、标准体系以及相互校验的连锁系列,由于篇幅过于冗长,本章或本书不予专门讨论。我们的目的只是向读者简略地介绍精确定义的通用测量单位的作用和重要性,以及我们目前的单位制的理论基础。

为了读者方便起见,在表1-1中列出一些通用常数的最近确定的值<sup>[3,4]</sup>,以作为本章的结束。在改进标准方面需要一些极精确的技术。我们特地向致力于认真研究这些技术的读者推荐参考文献[3]。在参考文献[3,4]中给出了一个极好的书目和更多的常数值。

### 参 考 文 献

- [1] Thompson, A. M., and D. G. Lampard: A New Theorem in Electrostatics and Its Application to Calculable Standards of Capacitance, *Nature*, vol. 166, p. 888, 1956.
- [2] *National Bureau of Standards (U. S.), Monograph 56*, p. 22, August, 1963, revision
- [3] Taylor, B. N., W. H. Parker, and D. N. Langenberg: Determination of  $e/h$ . Using Macroscopic Quantum Phase Coherence in Superconductors: Implications for Quantum Electrodynamics and the Fundamental Physical Constants, *Rev. Mod. Phys.*, vol. 41, p. 375, July, 1969.
- [4] Fink, D. G., and J. M. Carroll: "Standard Handbook for Electrical Engineers," 16th ed., McGraw-Hill Book Company, 1968.