

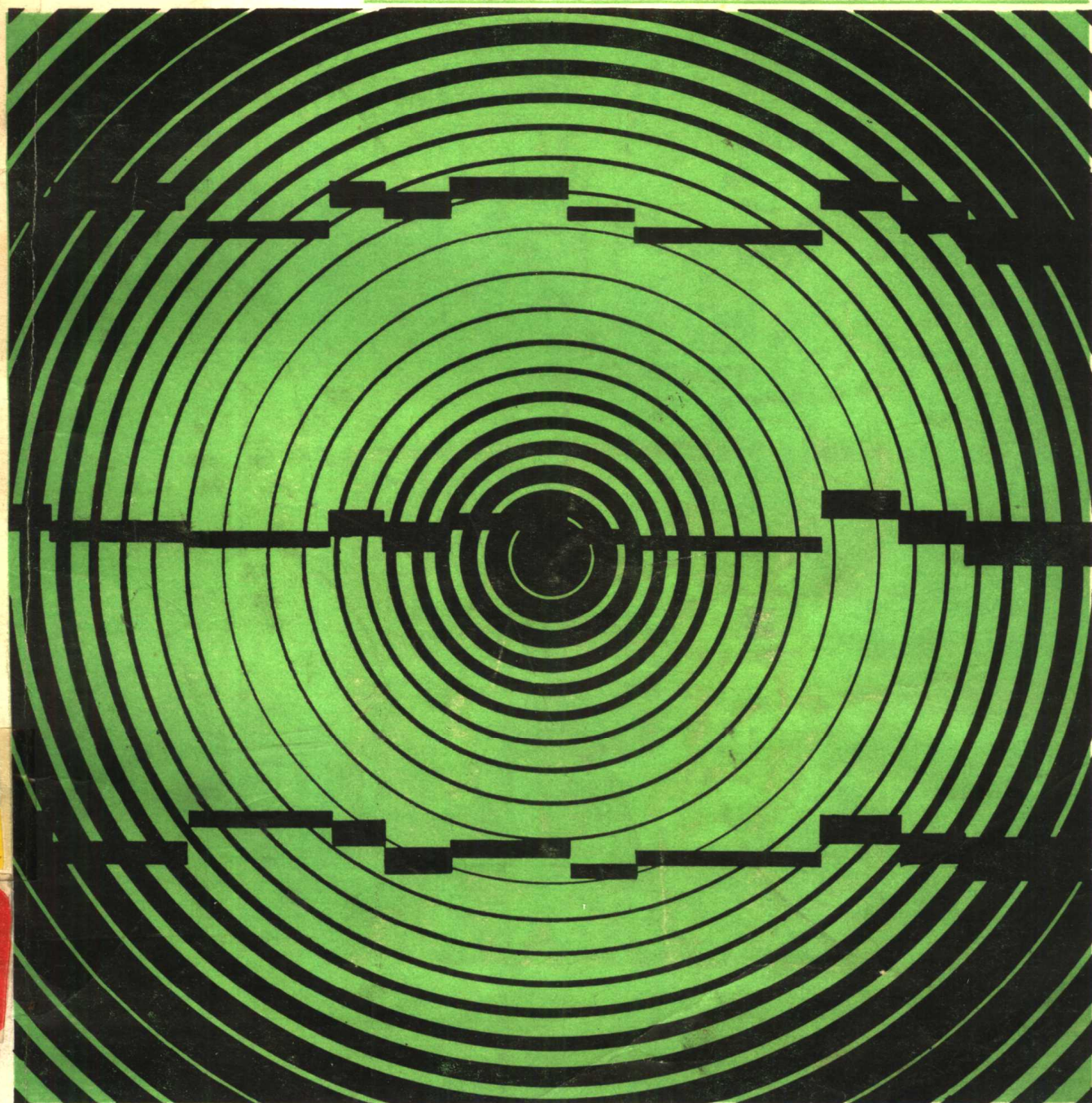
计量技术初级教材



无线电计量测试

江苏省计量局 编

计 量 出 版 社



计量技术初级教材

无线电计量测试

江苏省计量局 编

计量出版社

1986·北京

内 容 提 要

本书适合于具有中等文化程度，从事无线电计量测试技术工作的人员进行自学和专业培训使用。全书共十章，可分两部分。第一部分（一至五章）介绍无线电测量基本知识（单位制、误差理论、无线电测量基本原理、无线电计量概述等）。第二部分（六至十章）介绍无线电计量方面典型仪器设备的检定和各参量的计量原理。主要有：信号发生器、示波器、Q表的检定、失真度、高频电压计量。全书着重物理概念、测试原理及检定方法的阐述。本书可供在职人员和中等专业学校学生学习参考。

计量技术初级教材

无 线 电 计 量 测 试

江苏省计量局 编

责任编辑 倪伟清

计量出版社出版
(北京和平里11区2号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—

开本787×1092 1/16 印张 18

字数 446 千字 印数 1—8 000

1986年6月第一版 1986年6月第一次印刷

统一书号 15210·538

定价3.80元

前 言

为了使计量队伍适应四化建设的需要，必须加强在职人员的教育培训工作，以提高他们的技术水平和管理水平，而初级计量技术人员的系统培训工作又是当务之急。为此，我们从1981年开始组编了一套“计量技术初级教材”，它包括长度计量、温度计量、力学计量、电学计量、无线电计量测试五种。

这套教材主要是供具有初中以上文化程度的、有一定实际工作经验的地、县和相应的厂矿企业计量人员短期训练班使用。其目的是使初级计量人员具有进行业务工作所必备的基础知识，并为他们进一步提高业务能力打下基础。这套教材也可作为具有相应程度的计量人员的自学用书。

我们希望这套教材的出版，对计量系统的职工培训工作，能起到推动作用。

国家计量局 教育处

1984年3月

本书编者

主 编： 范懋本

编 者： 范懋本 吕春风 赵国荣
 汤秀英 韦凤姣 刘聚清

编 者 的 话

无线电计量是一门新的学科，随着电子技术的发展，无线电计量测试技术也发展很快，因此培养无线电计量测试技术人材十分迫切。本书是应国家计量局为对在职人员进行技术培训而编写的“计量技术初级教材”。

本书内容分两大部分：第一部分包括第一、二、三、四、五章，介绍了无线电计量的基本知识，如：各种单位制、误差的基本知识、无线电测量基本原理、无线电计量概述等。第二部分包括第六、七、八、九、十章，主要介绍无线电计量方面典型仪器设备的检定和各参量的计量方法和原理，其中有：信号发生器、示波器、Q表的检定及失真度、高频电压的计量方法和原理。无线电计量内容甚多，本书无法一一包罗，其它有关项目，仅在第四章中作一般介绍。

本书适用于具有中等文化程度，从事无线电计量技术工作的人员进行专业培训使用。因此，着重于物理概念、测试原理及方法的阐述，尽力避免较深的数学推导；又紧密联系计量检定实例，使理论与实际应用相结合。

本书在编写工作中，江苏省计量局杨子康局长、张恒烈副局长、电学室樊孝礼主任给予了热情关怀和支持，使编写工作得以顺利完成。在编写过程中曾得到有关单位的大力支持，李世雄、孙续、陈成仁、吴达慎、王惠琴、袁耀奎等同志对本书原稿提出许多宝贵意见，在此一并表示感谢！

由于我们的业务水平和工作经验有限，编写中的缺点和错误在所难免，希望读者给予批评指正。

编 者

1984年11月

目 录

第一章 计量基础	(1)
第一节 测量与计量	(1)
一、测量的定义	(1)
二、计量的定义	(1)
第二节 物理量的单位和国际单位制	(2)
一、物理量的单位	(2)
二、计量组织	(3)
三、国际单位制 (SI)	(5)
第三节 基准和标准以及量值的传递	(7)
第四节 计量的方法分类	(9)
一、直接计量或测量	(9)
二、间接计量或测量	(10)
三、组合计量或测量	(10)
第二章 测量误差基本理论	(11)
第一节 测量误差的定义和分类	(11)
一、测量误差的定义	(11)
二、误差的分类	(12)
第二节 系统误差、随机误差及差错	(13)
一、系统误差	(13)
二、随机误差	(15)
三、差错或粗大误差	(25)
四、直接测量计算实例	(26)
第三节 间接测量误差及误差合成	(28)
一、定义	(28)
二、间接测量误差的一般计算方法	(29)
第四节 最小二乘法与组合测量	(29)
一、最小二乘法的基本定理	(29)
二、组合测量	(31)
三、实例	(32)
第五节 测量结果的处理	(34)
一、有效数字的概念	(34)
二、有效数字的化整规则	(35)
三、有效数字的运算规则	(36)
四、图解处理测量数据	(38)
第三章 基本测量技术	(41)
第一节 电流、电压及功率的测量	(41)
一、测量高频电流与电压的特点	(41)

二、热偶式电流表	(42)
三、电压测量仪——电子电压表	(43)
四、功率的测量	(60)
第二节 电子示波器	(63)
一、概述	(63)
二、电子示波器的主要组成部分	(64)
三、示波器的主要应用	(75)
第三节 测量用信号源	(76)
一、概述	(76)
二、超低频信号发生器	(77)
三、低频信号发生器	(78)
四、高频信号发生器	(80)
五、调频信号发生器与扫频信号发生器	(81)
六、脉冲信号发生器	(82)
七、合成信号发生器	(82)
第四节 电路与元件参数的测量	(83)
一、概述	(83)
二、电桥法测量阻抗	(86)
三、谐振法测量阻抗	(89)
第五节 时间与频率的测量	(91)
一、概述	(91)
二、频率测量	(93)
第六节 衰减与增益的测量	(100)
一、概述	(100)
二、四端网络衰减的测量	(104)
三、常用的衰减器	(105)
四、四端网络增益的测量	(107)
第七节 电信号波形分析与测量	(108)
一、概述	(108)
二、谐波分析与谐波分析仪	(108)
三、非线性失真的测量	(110)
第八节 噪声的测量	(116)
一、概述	(116)
二、信噪比和噪声系数	(117)
三、噪声系数的测量	(118)
第九节 脉冲波形参数的测量	(120)
一、概述	(120)
二、脉冲波形的特性	(120)
三、脉冲信号发生器	(122)
四、脉冲的测量方法	(122)
第十节 相位差的测量	(126)
一、概述	(126)

二、相位差的测量方法	128
第四章 无线电计量概述	132
第一节 无线电计量的意义	132
第二节 无线电计量的基本内容与特点	132
第三节 无线电计量主要项目	133
一、时间和频率	133
二、高频电流	134
三、高频电压	134
四、功率	136
五、衰减	137
六、集总参数和分布参数阻抗	139
七、失真系数或失真度	140
八、相移	140
第四节 无线电计量的发展动向	141
一、超导技术在无线电计量中的应用	141
二、多功能测试系统	141
三、电子计算机和自动测试	142
第五章 关于检定工作	143
第一节 概述	143
第二节 电子仪器的误差表示法	143
一、电子测量仪器的一般规定	143
二、其他国家电子仪器误差表示	144
第三节 一阶检定	145
一、标准仪器误差可忽略	145
二、标准仪器误差不可忽略	146
第四节 多阶检定	150
一、全部为确定性系统误差	151
二、全部误差为随机误差	152
第五节 检定方法	153
一、整体检定法	153
二、分部检定法	156
三、组合检定法	157
四、对比法	159
第六章 信号发生器的检定	162
第一节 概述	162
第二节 信号发生器的主要技术特性	163
第三节 标准信号发生器主要特性的计量检定原理	165
一、载波频率的测定	165
二、输出电压的测定	167
三、调幅特性的测定	168
第四节 信号发生器的量值传递及检定	171
一、信号发生器的传递系统	171

二、XFG-7型高频信号发生器	(172)
第七章 失真度的计量	(184)
第一节 概述	(184)
第二节 失真度仪的误差分析	(185)
一、失真度的定义值 K 与实测值 K_0 间的误差	(185)
二、基波滤波特性和谐波损耗误差	(185)
三、机内失真对测量引入的误差	(186)
四、失真度仪的附加波形误差	(187)
五、失真度仪的频率特性误差	(187)
第三节 SZ-3 型失真度测量仪	(187)
一、概述	(187)
二、主要技术规格	(187)
三、电路工作原理	(188)
四、使用方法	(191)
第四节 失真度仪的检定方案及标准失真源	(192)
一、失真度仪的检定方案	(192)
二、BO-6 型失真度仪检定装置	(193)
三、BO-13 型失真度仪检定装置简介	(196)
第五节 失真度仪的检定	(198)
第八章 高频电压的计量	(205)
第一节 概述	(205)
第二节 高频电压标准	(206)
一、测辐射热电桥组成的高频电压标准	(207)
二、真空热偶法	(214)
三、补偿式电子管电压表法	(216)
第三节 高频电压的量值传递系统与电子电压表检定仪	(227)
一、量值的传递系统	(227)
二、电子电压表的检定	(227)
三、电子电压表的检定简介	(229)
四、DYB-2型电子管电压表检定仪	(230)
五、DYB-2检定仪的主要检定内容	(232)
第九章 示波器的检定	(238)
第一节 SBM-14 示波器简介	(238)
一、主机部分	(238)
二、Y轴放大器(宽带插入元件)	(240)
三、时基插入单元	(241)
第二节 示波器校准仪(SO3)	(242)
一、SO3示波器校准仪的结构和工作原理	(242)
二、时间校准电路	(242)
三、电压校准电路	(244)
四、上升时间校准电路	(244)
五、触发(同步)输出电路	(245)

第四节 示波器的检定	(245)
一、检定条件和要求	(245)
二、检定项目和方法	(246)
第十章 Q 表的检定	(258)
第一节 概述	(258)
第二节 Q表的组成与残余参量的分析.....	(258)
一、基本组成原理	(258)
二、Q表的残余参量与其影响	(259)
三、残余参量造成的测量误差.....	(264)
第三节 Q表的测量方法及QBG-1A型表介绍.....	(266)
一、串联比较法	(266)
二、并联比较法	(266)
三、变频法与变容法测定回路 Q 值	(267)
四、QBG-1A型Q表简介	(270)

第一章 计 量 基 础

第一节 测 量 与 计 量

一、测量的定义

广义的来讲，测量是人们认识客观自然界的一种手段，并且取得数量观念的过程。通过测量，可以对周围的客观世界得到定性和定量的描述。同时，测量本身实际上是一种“比较”的过程，也就是将被测量的量和测量单位的已知量进行比较的过程。例如，我们用尺来量一段布匹，得到10尺的结果，说明这段布有“一尺”这样长度的十倍。由此使我们对这段布匹有了定量的认识。

测量对于科学实验是十分重要的。因为任何科学实验都必须进行大量的测量工作，从测量所得的结果进行统计、分析、归纳，由此得到正确的结论。一些科学家，如，门捷列夫（苏）曾说过：“科学从测量开始”；汤姆逊（英）说过：“每一件事只有当可以测量才能认识”。由此可以看到：“测量”对于自然科学的发展起了多么重要的作用。

二、计量的定义

从前面对一段布匹的测量实例中可看到：测量过程中，使用一种实物（尺子）作为标准来进行比较而得到布匹长度的数值。如果人们各取不同的实物作为标准，那么测得的数值就不会一样。使用不同的尺子来比较就将得到不同的结果，因此造成很大的混乱。为了统一人们对客观实际情况的认识，大家必须使用统一测量用的标准，这就是必然的结果。

许多国家很早就由政府通过法令来规定统一的标准。对于一些日常用的器具的统一标准，和人民生活、安全、健康等有关的计量工作，就是大家常说的度、量、衡或叫做“权度”。所谓“度”即指“长度”；“量”即指“数量”；“衡”即指“重量”。近代称为“民生计量”或“法制计量”。随着科学技术的发展，计量工作的范围大大超出度、量、衡而渗透到各个工业部门。这些计量常称为“工业计量”或“科学计量”。根据被测物理量或对象的不同，计量可分为：长度、热力学（温度）、力学、电磁、无线电（高频电磁）、时间频率、光学、声学、放射性（电离辐射）、理化计量等十大类。表 1—1 示其主要包含项目。

此外，从计量二字的来源来看：计量包括“计器”和“测量”两名词的简称。因此“计量”就是用计量器具，如：仪器、量具等对物体的“物理量”进行测量或比较的过程。简要说来，计量属于精度要求较高，而且其测量结果具有一定可靠性的测量。当然计量工作还应包含二个重要内容，即：（一）建立最高标准或基准；（二）保证量值正确无误地传递。因此为了搞好计量工作，必须一方面建立必要的标准和基准设备；另一方面，应努力掌握基本的测量技术和测量理论的基础知识。

表1-1 计量分类表

序	类 别	主 要 项 目 与 内 容
1	长 度 计 量	端面、角度、线纹、平直度、光洁度
2	热力学(温度)计量	高温、中温、低温
3	力 学 计 量	质量、容量、密度、压力、真空、测力、转速、流量、粘度、硬度、振动、冲击加速度
4	电 磁 学 计 量	电流、电动势、电阻、电容、电感、磁场强度、磁通、磁矩、磁性材料性能
5	无 线 电 计 量 (高频电磁计量)	高频电压、高频功率、高频电容、高频电感品质因数、衰减、失真系数、相位差、脉冲参数、干扰及噪声
6	时 间 频 率 计 量	时间、频率
7	光 学 计 量	光强度、光通量、亮度、照度、辐射能量、感光度、色度
8	声 学 计 量	声压、声功率
9	放 射 性 计 量 (电离辐射计量)	放射性强度、放射性计量
10	理 化 计 量	物质的成分与物理特性

第二节 物理量的单位和国际单位制

一、物理量的单位

物理量是物理对象或各种物质或物理系统的固有性质。这种性质应该包括它们的大小数值的含义。可是，仅仅有了大小数值的认识，还不能说对它们的认识完整；必须说明它们对某些标准量值的比值，也就是单位(Unit)值。如重量为多少公斤？长度为多少米？因此，物质物理量的单位就是某值等于一个单位的物理量。或者说，在定量测定某一物理对象时，用同一性质的物理量的数值与它比较，得出既有大小，又有单位时，才能说达到彻底认识它的地步。得到的数值有大于“1”，或小于“1”的情况；前者言，得到了倍数；后者言，得到了分数。

早先，物理量的选用是任意的，彼此并无任何联系。同样一个“量”有许多单位，例如：长度的单位有：米、尺(市尺)、呎(英尺)等，容易造成计算过程中的困难。因此，对于物理量的单位很有必要建立一种制度，称为“单位制”。

在自然科学中，有多少应该能够测定的物理量，就应有多少个单位。但是只能选取最主要的几个标准单位。这种单位称为基本单位。基本单位的建立必须使各种物理量之间有规律的联系。对于量与量之间有规律的联系，由此产生新的单位，常称为“导出单位”。例如，长度的基本单位在MKS单位制中是“米”，则速度的单位为“米每秒”，称为导出单位。

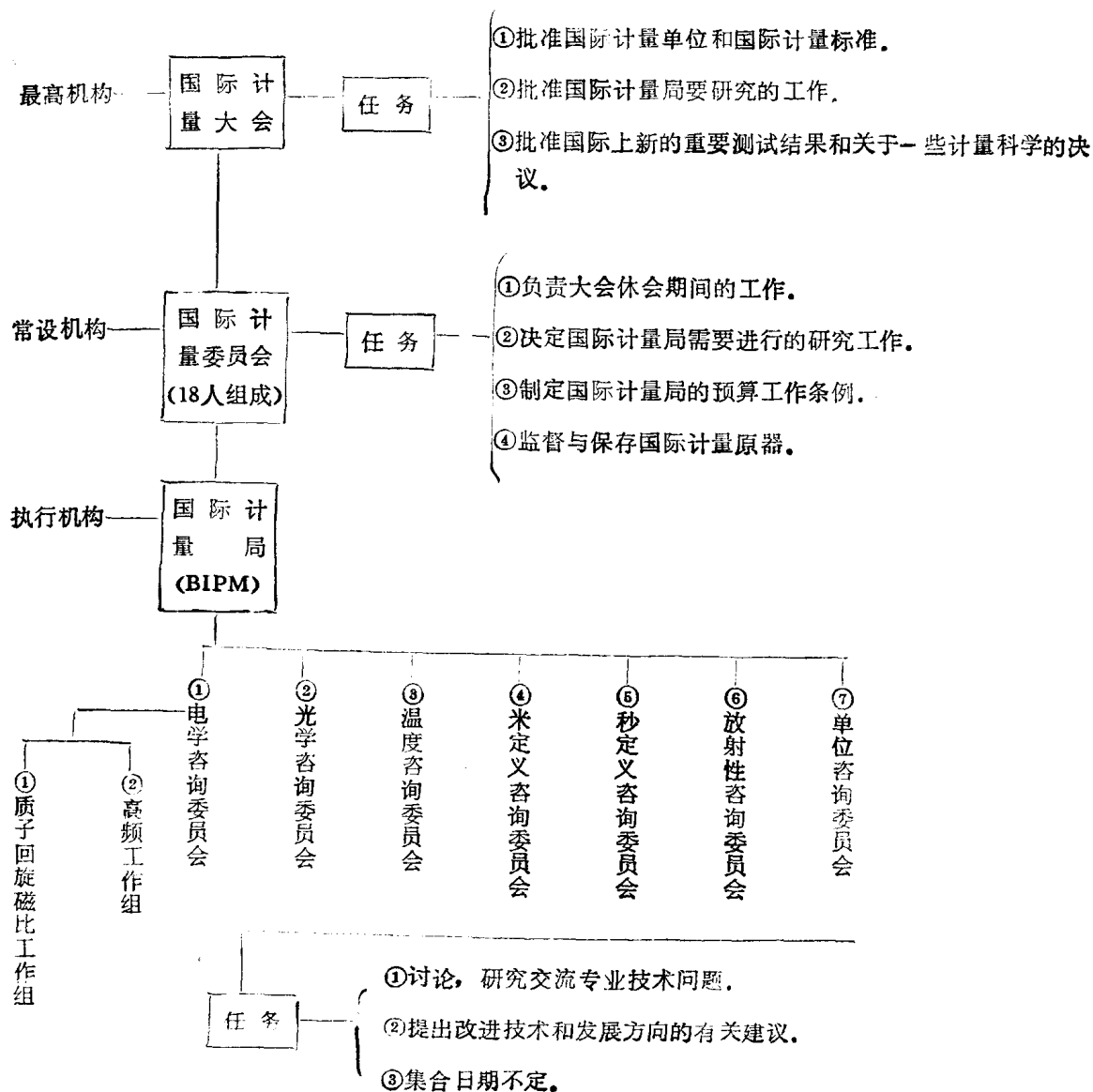
体现这些基本单位的物体有：人造的物体、自然物体以及自然物质，随着科学技术的发展，表征各种单位的物体不断改进，但是关键的问题是：如何将大量的物理量的基本单位和导出单位克服换算上的不便，从而有必要建立一种能尽量包括所有学科领域，并且在国际上共同采用的统一单位制——国际单位制。

二、计 量 组 织

由于国际间科学技术的交流、贸易的日益扩大，各国都有要求：希望有统一的计量标准。在1875年有17个国家在巴黎签署了国际米制公约，正式成立了国际计量组织。

国际计量组织的最高机构为：（一）国际计量大会（亦称为国际权度大会），每四年举行一次会议；（二）国际计量委员会——国际计量大会的常设机构，每二年开一次会；（三）国

表1—2 国际计量组织



际计量局 (BIPM) ——国际计量大会的执行机构。此外, 为建立 计量法制, 也成立了国际法制计量组织。表 1—2 为国际计量组织的组织机构和它们的主要任务。

国际计量大会于1889年举行第一届大会, 到1983年举行第17届大会, 历届大会的基本工作情况, 大体如表1—3所示。

表1—3 历届计量大会工作简况

届	年	确 定 计 量 单 位 等 工 作
1	1889年	定义“米”(m)、千克(kg)的国际计量单位, 建立基准器。
2	1895年	听取“迈克尔逊”和“贝诺瓦”的关于用光波波长来定义“米”的报告。
3	1901年	确定“力”与“重量”为同一性质的量, 并确定重力标准加速度 $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ 。
4	1907年	决议规定宝石质量单位为克拉, 1克拉 = 200mg。
5	1913年	审议力的单位为“牛顿”(N)。
6	1921年	修订1875年米制公约; 电学单立并入研究范围。
7	1927年	确定“米”与氩-86谱线波长间的关系; 通过临时国际实用温标单位。
8	1933年	核准电学单位“绝对制”代替国际电学单位的原则; 通过由国际计量委员会确定的各单位间的关系。
9	1948年	通过光强度单位——坎德拉(cd); 热量单位——焦耳的新定义; 建议, 米(m)、千克(kg)、秒(s)。
10	1954年	确定水的三相点热力学温标的决议, 增设开尔文(K)、坎德拉(cd)为单位。
11	1960年	核准国际单位制(SI)与秒的新定义, 通过米的新基准器。
12	1964年	通过1 L(升) = 1 dm ³ 决议, 通过分数单位: 10^{-15} (飞母托) 10^{-18} (阿托)等。
13	1967年	通过“秒”的新定义, 成为自然原子频率的函数。
14	1971年	通过SI单位制的第七个基本单位——摩尔。
15	1975年	根据NBS的建议, 通过米的新定义, 即以光速 c 来定义: $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$
16	1976年	决定以约瑟夫逊效应来定义电学单位。
17	1983年	定义米的新定义, 即 $1 \text{ m} = 1/299\,792\,458 \text{ s}$ 的持续时间内, 平面电磁波在真空中传播的距离。

从表1—3中可看出, 在几届大会中, 如第4届~第6届大会(1913年~1921年); 第8届~第9届(1933年~1948年)间的间隔时间较长。主要原因即为第一次和第二次世界大战所造

成。

1955年10月,有24个国家在巴黎“国际法制”公约上签字,国际法制组织由此产生,其组织形式亦有:(一)国际法制计量大会,(二)国际计量委员会,(三)国际法制计量局。它们的主要任务有:

- (1) 建立各国有关的计量法、条例;计量器具和检定测量工具;
- (2) 编译、出版各国现有有关计量器具的法律条文;
- (3) 制定法制计量单位的一般原则;
- (4) 统一计量器具的规格;
- (5) 促进计量机构间的相互合作等工作。

关于国际法制组织的历届工作等情况,这里不多谈了。可参阅有关“计量管理”的书籍。

三、国际单位制 (SI)

1948年第9届国际计量大会 (CGPM) 通过决议,规定国际间采用实用单位制。建议长度单位为“米”,质量单位为“千克”,时间单位为“秒”。1954年第10届国际计量大会决定采用:米、千克、安培、秒、开尔文、坎德拉。1960年第11届国际计量大会正式通过将实用单位制定名为国际单位制;外文译为“单位的国际体系”。简称为“SI”。成为目前世界上较先进、较科学的计量单位制。它的基本构成如表1—4所示。

表1—4 国际单位制的基本构成

国际单位制	单位	基本单位 (7个)
		导出单位 (19个)
		辅助单位 (2个)
	词头 (16个)	
单位的十进倍数与分数单位		

国际单位制 (SI) 的基本单位共七个,它们是:

(1) 长 度

单位是“米”,代号为“m”。1960年第11届国际计量大会定义是:一米等于氪-86原子二个能级 ($2P_{1/2}$ 和 $2d_{5/2}$) 之间跃迁的辐射在真空中的 $1\,650\,763.73$ 倍波长的长度。1981年第17届国际计量大会对单位“米”又作了新的定义(见表1—3)。

(2) 质 量

单位为“千克”,代号为“kg”。根据1889年第一届国际计量大会定义是:以铂铱合金的实物基准(圆锥体)为一千克的单位。

(3) 时间和频率

单位为“秒”,代号为“s”。1967年第13届国际计量大会定义为:一秒为铯-133原子基态两个超精细能级跃迁的辐射周期的 $9\,192\,631\,770$ 倍的时间。频率单位为赫兹 (Hz),是秒的导出单位,代号为 s^{-1} 。

(4) 电 流

单位为“安培”，代号为“A”。1948年第9届国际计量大会上通过定义为：真空中电流通过两条相距一米的两无限长的平行导线，在每米导线之间产生的力为 2×10^{-7} N。则此电流强度为1 A。

(5) 温 度

单位为“开”（开尔文）。1967年第13届国际计量大会通过定义为：开尔文等于水三相点热力学温度的1/273.16。代号为K。

(6) 光 度

单位为“坎德拉”，代号为cd。1967年第13届国际计量大会通过定义为：光源在给定方向上的发光强度，该光源发出频率为 540×10^{12} Hz的单色辐射，且在此方向上辐射强度为：1/683 瓦特每球面度。

(7) 物质的量

单位为“摩尔”，代号为“mol”。1971年第14届国际计量大会定义是①摩尔是一系统物质的量，该系统中所包含的基本单元数与0.012 kg 碳-12的原子数目相等；②在使用摩尔时，基本单元应指明：可以是原子、分子、离子、电子以及其他粒子，或者这些粒子的特

表1—5 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量	SI 单 位			
	名 称	符 号	用其他SI单位表示的表达式	用 SI 基本单位表示的表示式
频 率	赫 (兹)	Hz		s^{-1}
力	牛 (顿)	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
压强 (压力)、应力	帕 (斯卡)	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
能、功、热量	焦 (耳)	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
功率、辐 (射) 通量	瓦 (特)	W	J/s	$kg \cdot s^{-2}$
电量、电 荷	库 (仑)	C	—	$s \cdot A$
电位、电压、电动势、电势	伏 (特)	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
电 容	法 (拉)	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg \cdot s^4 \cdot A^2$
电 阻	欧 (姆)	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
电 导	西 (门子)	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁 通 (量)	韦 (伯)	Wb	$V \cdot s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁感应 (强度) 磁通密度	特 (斯拉)	T	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
电 感	亨 (利)	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
摄 氏 温 度	摄氏度	$^{\circ}C$	—	K
光 通 (量)	流 (明)	lm	—	$cd \cdot sr$
(光) 照 度	勒 (克斯)	lx	lm/m^2	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$
(放射性) 活度 (放射性强度)	贝可 (勒尔)	Bq	—	s^{-1}
吸 收 剂 量	戈 (瑞)	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
剂 量 当 量	希 (沃特)	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$