

精密电气测量

哈尔滨工业大学 李继凡 罗远瑜 编
陶时澍 顾洪涛
袁禄明 审

中国计量出版社

内 容 提 要

全书有三部分内容：第一部分为测量的基本概念和基本知识，包括计量单位、基准器、量值传递以及误差分析和实验数据处理；第二部分为精密电气测量中常用的仪器、测量方法和线路分析，主要介绍了直流电位差计、直流电桥、交直流变换、直流电流比较仪、交流电桥、电能测量；第三部分为保证精密测量的技术措施和设备，包括电测线路的屏蔽保护及辅助设备的选择。全书以阐述精密测量的基本理论与方法为主，同时对电学计量中有关的检定方法也给予一定的注意。

本书为工科大学电测与仪表专业教材，对于电学计量人员和有关电测工程技术人员也很有参考价值。

精 密 电 气 测 量

哈尔滨工业大学 李继凡 罗远瑜 编
陶时澍 顾洪涛

袁禄明 审

责任编辑 王朋植

*

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

河北省三河县潮河印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 787×1092/16 印张26.5 字数 662千字

1984年6月第1版 1990年5月第3次印刷

印数：18001—22000

ISBN 7-5026-0327-1/TB·289

定价 9.60 元

前 言

《精密电气测量》是电气测量技术与仪表专业的专业课教材。全部讲授约需60—80学时。它的基础课程是《电工基础》、《概率论》和《电磁测量》，也涉及一定的电子学和自动调节原理方面的知识。

这本教材是在我校《精密电气测量》讲义的基础上编写的。开始编写时，尤德斐副教授曾参加了章节安排的讨论；在编写过程中得到教研室赵新民副教授和全体同志的大力支持。

在搜集资料的过程中，曾得到中国计量科学研究院电学处、哈尔滨电工仪表研究所、上海仪器仪表研究所、上海电表厂、上海电工仪器厂、辽宁计量测试研究所、黑龙江计量测试研究所等单位及有关同志的帮助。

哈尔滨电工学院袁禄明副教授对全书进行了细致的审阅，并提出了许多宝贵的修改意见。

对以上单位和个人一并致以深切的谢意。

全书由四人合编：李继凡同志负责绪论、一、二、四章；罗远瑜同志负责三、七、八章；陶时澍同志负责五、九章；顾洪涛同志负责六、十章。最后由李继凡同志对书中专用名词、符号、文字等方面作了统一。

由于时间仓促，水平有限，缺点错误在所难免，敬希读者及有关专家批评指正。

编 者

1983年5月

目 录

绪论

第一章 计量单位和基准器	(1)
§ 1-1 计量单位与国际单位制	(1)
一、计量单位与单位制	(1)
二、物理量的量纲式	(2)
三、国际单位制	(2)
四、电磁学单位制	(3)
§ 1-2 电学基准器	(5)
一、基本单位安培的复制	(5)
二、导出单位的复现	(6)
三、实物标准	(8)
四、自然基准的建立	(9)
§ 1-3 量值传递的概念	(13)
§ 1-4 过渡量具	(15)
主要参考文献	(19)
第二章 误差分析及实验数据处理	(20)
§ 2-1 误差的概念及分类	(20)
一、系统误差	(20)
二、随机误差	(20)
三、粗差	(21)
四、准确度	(21)
§ 2-2 随机误差的统计特性	(21)
一、统计直方图	(21)
二、随机误差的统计特性	(23)
§ 2-3 概率分布	(24)
一、正态分布律	(24)
二、置信限与置信概率	(25)
三、均匀分布	(27)
§ 2-4 算术平均值和最小二乘法原理	(29)
一、算术平均值	(29)
二、最小二乘法原理	(29)
§ 2-5 标准误差、随机不确定度及其计算	(31)
一、标准误差及其计算	(31)
二、随机不确定度及其计算	(34)
§ 2-6 坏值及其剔除	(36)
一、拉依达准则	(36)
二、 t 检验准则	(37)
§ 2-7 有效数字和测量结果的表示	(38)
一、数据舍入规则	(38)
二、有效数字定义及运算规则	(39)
三、测量结果的表示	(40)
§ 2-8 系统误差的发现	(40)

§ 2-9 测量线路中常见误差分析	(42)
一、量具的误差	(42)
二、线路中其它元件的误差	(43)
三、连接导线、接线柱、转换开关的电阻及其变差引进的误差	(44)
四、测量线路中元件的稳定性	(47)
五、在交流电路中,由于元件未考虑残余分量而引起的误差	(47)
六、读数误差	(49)
七、线路和平衡指示器灵敏度不够引起的误差	(49)
八、调节细度不够引起的误差	(51)
九、磁场的影响	(51)
十、电场的影响	(52)
十一、温度的影响	(52)
十二、不完全平衡线路输出端测量仪表的误差对结果的影响	(54)
十三、其它因素的影响	(54)
十四、实验者的影响	(55)
十五、计算(或估计)各种因素对测量对象的作用	(55)
§ 2-10 消除或减弱系统误差的典型测量技术	(56)
一、差值法	(56)
二、零值法	(57)
三、替代法	(57)
四、对照法	(58)
五、正、负误差补偿法	(59)
六、对称观测法	(59)
七、半周期偶数观测法	(60)
§ 2-11 消除系统误差的准则	(60)
§ 2-12 函数误差的基本问题及基本关系	(61)
一、正问题	(61)
二、反问题	(61)
三、第三问题	(61)
§ 2-13 几种常见函数的综合误差	(62)
一、和差函数的综合误差	(62)
二、积商函数的综合误差	(63)
三、和差积商函数的综合误差	(63)
§ 2-14 随机误差的综合	(64)
§ 2-15 系统误差的综合	(67)
一、已定系统误差的综合	(67)
二、系统不确定度的综合	(67)
§ 2-16 微小误差准则	(70)
一、已定系统误差综合时的微小误差准则	(70)
二、标准差综合时的微小误差准则	(70)
§ 2-17 误差的分配	(71)
一、按算术综合时的误差分配	(71)
二、按几何综合时的误差分配	(73)
§ 2-18 测量中最有利条件的确定	(73)
一、按算术综合情况	(74)
二、按几何综合情况	(74)
§ 2-19 组合测量的数据处理	(75)
主要参考文献	(79)

第三章 直流电位差计.....	(80)
§ 3-1 概述	(80)
§ 3-2 误差分析.....	(82)
一、元件调整误差	(82)
二、寄生热电势引起的误差	(83)
三、工作电源输出端电压变化的影响	(85)
四、灵敏度不够的影响	(87)
五、其它	(87)
§ 3-3 直流电位差计的灵敏度和检流计选择	(88)
一、电位差计的灵敏度.....	(88)
二、检流计的选择.....	(91)
§ 3-4 电位差计的各种线路原理及特点	(93)
一、定流变阻式.....	(94)
二、定阻变流式.....	(97)
§ 3-5 实际电位差计的核算练习	(107)
一、基本关系	(109)
二、各盘补偿电压	(110)
三、参数计算	(112)
四、误差	(115)
§ 3-6 电位差计的检定.....	(117)
一、补偿法	(117)
二、电桥法	(121)
三、电位差计自检的概念	(121)
主要参考文献	(123)
第四章 直流电桥	(124)
§ 4-1 电桥的T型等值线路	(124)
§ 4-2 平衡电桥的性质.....	(125)
一、电桥的平衡条件	(125)
二、电桥的输入电阻 R_i	(126)
三、电桥的输出电阻 R_o	(126)
§ 4-3 电桥灵敏度的计算	(127)
§ 4-4 误差分析.....	(132)
一、元件制造公差的影响	(132)
二、热电势的影响	(132)
三、接触电阻引起的误差	(133)
四、替代法误差分析	(133)
五、插入法的误差	(134)
§ 4-5 双电桥.....	(136)
一、双电桥电路.....	(136)
二、误差分析.....	(137)
§ 4-6 三步平衡双电桥	(137)
§ 4-7 跨线电阻的补偿	(140)
§ 4-8 双电桥的灵敏度	(141)
§ 4-9 电桥线路举例	(142)
一、电桥的结构	(142)
二、QJ-36型单、双两用电桥.....	(142)
§ 4-10 万能比例臂	(143)
一、基本原理	(143)

二、线路结构	(144)
三、误差分析	(144)
四、应用	(145)
主要参考文献	(146)
第五章 交、直流变换及交流电流、电压标准	(147)
§ 5-1 概述	(147)
一、交、直流变换的概念	(147)
二、电动系和静电系交、直流比较仪	(147)
三、电子式交、直流变换器	(148)
四、热电式交、直流变换器	(148)
§ 5-2 热电变换器的结构及其误差	(149)
一、热电变换器的结构	(149)
二、热电变换器的交、直流变换误差	(150)
§ 5-3 交流标准器	(153)
一、交流标准	(153)
二、我国交流标准简介	(153)
§ 5-4 热电式交、直流比较仪	(154)
一、“隆普”型交、直流比较仪的工作原理	(154)
二、“隆普”型交、直流比较仪测量电压、电流时的实际电路	(155)
三、YY-10 型交、直流比较仪的原理电路	(158)
四、YY-10 型交、直流比较仪测量电流时的工作原理	(158)
五、YY-10 型交、直流比较仪测量电压时的工作原理	(160)
六、YY-10 型交、直流比较仪校验 $\cos\varphi \geq 0.5$ 的功率表	(161)
七、YY-10 型交、直流比较仪的电流平衡及电压平衡	(164)
八、YY-10 型交、直流比较仪校验 $\cos\varphi \geq 0.1$ 的功率表	(164)
§ 5-5 YY-10 型交、直流比较仪的误差分析	(167)
一、YY-10 型交、直流比较仪产生误差的原因及其等效电路	(167)
二、校验功率表电流失衡引起的误差	(169)
三、校验功率表电压失衡引起的误差	(170)
四、测量电流时，线路的电阻时间常数引起的误差	(171)
五、测量电压时，线路的电阻时间常数引起的误差	(172)
六、校验功率表时，线路的电阻时间常数引起的误差	(173)
七、交流电源漏电产生的误差	(174)
主要参考文献	(175)
第六章 直流电流比较仪式仪器	(176)
§ 6-1 概述	(176)
一、发展简史	(176)
二、本类仪器共同特点	(176)
§ 6-2 交、直流电流比较仪基本原理	(177)
一、交流电流比较仪基本原理	(177)
二、直流电流比较仪基本原理	(178)
§ 6-3 倍频磁调制器原理	(178)
一、恒流源激磁下的磁调制器	(179)
二、恒压源激磁下的双铁芯两绕组磁调制器	(182)
§ 6-4 倍频磁调制器的性能分析	(185)
一、倍频磁调制器的灵敏度	(185)
二、交流激磁源波形对灵敏度 S_i 和稳定性的影响	(188)
三、磁调制器的噪声	(189)
四、磁调制器的零误差	(190)

§ 6-5 自平衡直流电流比较仪	(191)
一、全跟踪自平衡直流电流比较仪	(191)
二、高、低跟踪自平衡直流电流比较仪	(192)
§ 6-6 直流比较仪式电位差计	(195)
一、直流比较仪式电位差计工作原理	(196)
二、直流比较仪式电位差计线路结构	(199)
三、电流比较仪式电位差计特点	(201)
§ 6-7 UJ-42 型电位差计误差分析	(202)
一、UJ-42 型电位差计误差分析应遵守的原则	(202)
二、UJ-42 型电位差计主要技术指标	(202)
三、误差分析	(202)
§ 6-8 UJ-42 型电位差计的自检	(205)
一、比较仪式电位差计自检原理	(205)
二、UJ-42 型电位差计测量盘线性度自检基本方法	(207)
三、误差公式的推导及表达式	(207)
§ 6-9 直流比较仪式电桥	(214)
一、比较仪式电桥的工作原理	(214)
二、原理线路结构说明	(215)
三、测量方式	(217)
四、直流比较仪式电桥特点	(220)
§ 6-10 其它直流比较仪式仪器简介	(221)
一、QJ-59 直流比较仪式测温电桥	(221)
二、应用电流比较仪原理的数字电压表	(223)
主要参考文献	(225)
第七章 交流电桥	(227)
§ 7-1 前言	(227)
§ 7-2 交流电桥的收敛性	(228)
一、交流电桥的平衡过程和收敛角	(228)
二、收敛角的求法	(230)
§ 7-3 交流电桥的灵敏度	(231)
§ 7-4 调节参数的选择	(235)
§ 7-5 交流电桥的误差因素	(236)
一、直角误差	(236)
二、检测器不灵敏区(死区)的影响	(240)
三、引线阻抗	(241)
四、对地寄生导纳	(242)
五、电源频率的影响	(243)
§ 7-6 交流电桥线路举例	(243)
一、爱迪生六臂电桥	(244)
二、测量残余参数的电容电桥	(245)
§ 7-7 感应分压器(感应式电压比例器)	(247)
一、自耦式感应分压器	(249)
二、隔离式感应分压器	(255)
三、组合铁芯式感应分压器	(258)
§ 7-8 变压器电桥	(261)
一、电桥对比例器的要求和感应分压器的相应性能	(261)
二、测量两端和三端阻抗的变压器电桥类型	(262)
三、电桥实例——QS-16型电容电桥	(268)
四、测量多端阻抗用变压器电桥简介	(271)

§ 7-9 电流比较仪电桥	(275)
一、电流比较仪	(275)
二、电流比较仪电桥	(276)
§ 7-10 交流电桥的组成	(280)
主要参考文献	(282)
第八章 电能测量	(283)
§ 8-1 概述	(283)
一、电能测量简史和本章内容	(283)
二、电能管理简介	(284)
§ 8-2 电度表的校验方法	(285)
一、功率表-秒表法	(286)
二、比较法	(291)
§ 8-3 电能计量标准中的功率测量	(293)
一、电动势比较仪式功率表	(293)
二、热电法的应用	(296)
三、数字功率电能表	(299)
四、应用微处理机测量功率	(301)
§ 8-4 电能标准比较装置	(302)
一、电能传递系统	(302)
二、电能标准比较装置	(303)
主要参考文献	(310)
第九章 电测线路的屏蔽保护	(311)
§ 9-1 概述	(311)
一、屏蔽保护的目地、任务和对象	(311)
二、干扰源的分类	(313)
三、干扰信号进入被干扰对象的通路	(314)
四、减小干扰引起测量误差的方法	(314)
§ 9-2 干扰信号的基本形式	(315)
一、串联电路干扰信号的基本形式	(315)
二、并联电路干扰信号的基本形式	(317)
三、分析干扰信号的方法举例	(318)
§ 9-3 干扰信号和端钮数的关系	(320)
一、被测量和仪器端钮数的关系	(320)
二、屏蔽隔离和绝缘隔离的本质	(323)
§ 9-4 电位屏蔽和等电位屏蔽	(324)
一、电位屏蔽	(324)
二、等电位屏蔽	(326)
§ 9-5 磁场、电场和电磁场的屏蔽	(327)
一、磁场、电场和电磁场干扰源	(327)
二、静电场的屏蔽方法	(328)
三、恒流磁场的屏蔽方法	(329)
四、低频电场和磁场的屏蔽方法	(330)
五、电磁波的屏蔽方法	(331)
六、高频似稳场的屏蔽方法	(333)
§ 9-6 无定向结构	(334)
一、无定向结构的定义及无定向结构的实例	(334)
二、短路扼流圈所形成的无定向结构	(336)
§ 9-7 导线的屏蔽	(337)
一、导线之间的容性漏电及其屏蔽方法	(337)

二、导线之间的感应耦合及其屏蔽方法	(338)
三、高电压、大电流导线的屏蔽方法	(340)
§ 9-8 阻抗元件的屏蔽、等效电路及分布参数对阻抗元件的影响	(341)
一、阻抗元件的屏蔽方法及其等效电路	(341)
二、屏蔽对电阻元件时间常数的影响	(344)
三、屏蔽对电感、电容元件的影响	(346)
§ 9-9 直流电位差计及直流分压器的屏蔽保护	(346)
一、对补偿线路的绝缘要求	(346)
二、直流电位差计的屏蔽结构	(347)
三、对直流分压器的绝缘要求及其屏蔽结构	(348)
四、用电位差计和分压器测量电压时的屏蔽方法	(348)
§ 9-10 电桥线路的屏蔽保护	(350)
一、桥臂顶点对地漏电不产生误差的条件	(350)
二、用辅助支路消除电桥顶点对地漏电产生的误差	(351)
三、用屏蔽方法减小桥臂耦合引起的测量误差	(351)
四、指零仪支路的屏蔽方法	(353)
§ 9-11 电测仪表的屏蔽保护	(355)
一、电测仪表所受干扰的特点	(355)
二、串模干扰的屏蔽方法	(357)
三、共模干扰的屏蔽方法	(358)
§ 9-12 静电感应的屏蔽	(361)
一、静电感应产生的原因	(361)
二、静电感应的屏蔽方法	(362)
§ 9-13 交流电网供电仪器的屏蔽保护	(362)
一、交流电网电压引起的误差	(362)
二、交流电网供电仪器的屏蔽方法	(364)
主要参考文献	(365)
第十章 电测装置辅助设备	(366)
§ 10-1 辅助设备的任务及分类	(366)
一、电源类	(366)
二、标准电压发生器类	(366)
三、指零仪类	(366)
四、恒温设备	(367)
§ 10-2 电测装置辅助设备的技术指标及要求	(367)
一、电源装置	(367)
二、直流(或交流)标准电压、电流发生器	(368)
三、指零仪	(369)
四、恒温设备	(369)
§ 10-3 YJ-42型精密稳压电源	(370)
一、性能和用途	(370)
二、主要技术指标	(370)
三、工作原理	(371)
§ 10-4 CWL-1型磁调制直流放大器式稳流源	(374)
一、主要性能	(374)
二、基本工作原理	(375)
三、原理电路各环节说明	(375)
四、CWL-1型恒流源单独使用时举例	(377)
五、大容量可变恒流源	(378)
§ 10-5 2552型直流标准电压源	(379)

一、2552-01 型技术指标	(379)
二、工作原理	(380)
三、特点	(381)
§ 10-6 交流标准电压发生器	(383)
一、主要技术性能	(383)
二、工作原理	(384)
三、5200A 型交流标准电压发生器	(385)
四、国内外交、直流标准电压发生器比较	(389)
§ 10-7 交流稳压电源与交流标准信号源	(390)
一、614-B 型电子交流稳压器	(390)
二、脉冲移相三相工频信号源	(391)
三、XO-10A 型精密信号源	(392)
§ 10-8 JZ-1 型晶体管交流指零仪	(394)
一、主要技术指标	(394)
二、电路工作原理	(394)
三、结构概述	(397)
§ 10-9 光电放大式检流计	(397)
一、原理	(397)
二、串、并联反馈接入形式的特性	(398)
三、结构简介	(398)
§ 10-10 其它辅助设备简介	(401)
一、空气恒温箱	(401)
二、HW-1 型恒温油槽	(403)
三、FY-57 型热电势补偿器	(404)
四、优质开关	(405)
主要参考文献	(406)

第一章 计量单位和基准器

测量是一个比较的过程。为了确定测量结果，必须有计量单位；比较的实现是一个实验的过程，因此需要有代表单位大小的实物(即量具)。这一章里，将主要介绍电磁学单位及电学基准器。

§ 1—1 计量单位与国际单位制

一、计量单位与单位制

测量的任务，是根据所选计量单位，确定被测量的大小(数值)。因此每一个物理量都可以被表示为一个纯数与一个单位的乘积。即要把一个物理量完整地表示出来，必须要有它的数值和单位。单位是一个选定的参考量，所有同类物理量都可以用它来表示。但所选单位不同，测量结果的数值也不相同。例如分别取米和尺做长度的单位，同一长度有不同的数值。

计量单位与相应的物理量一样，具有一种抽象的数学性质。因此它与体现单位的实物(量具)是不同的。

因为各个物理量之间并不是互相独立的，而是由许多物理定义和物理规律把它们联系起来的。这样，只要人们规定了少数几个物理量的单位，其他物理量的单位就可以根据定义或物理规律推导出来。独立定义的单位叫做基本单位，所对应的物理量叫基本量。由基本单位导出的单位叫做导出单位，对应的物理量叫导出量。用来确定导出单位对应的物理量与其它已确定单位的物理量之间关系的方程式称为定义方程式。选定基本单位以后，从基本单位确定导出单位的过程如下：

1. 选取定义方程式，该方程式中除需要确定导出单位的物理量外，其它物理量的单位均已确定。

2. 取定义方程式的比例系数等于1。

3. 列出定义方程式右边诸量的单位，经过整理即可得出导出单位。

例如，选长度单位米(m)和时间单位秒(s)作为基本单位，便可以根据定义得到速度的单位。首先选取直线匀速运动的速度公式

$$V = k \frac{S}{t}$$

作为定义方程式。其中 V 是速度， S 为在时间 t 内通过的路程， k 是比例系数。其次，公式中的系数 k 本来是可以任选的，为使问题简化，令 $k=1$ ，由此即可得出速度的单位是米/秒(m/s)。再如长度、质量、时间的单位已选定为米、千克、秒，确定力的单位的过程也是首先选取牛顿第二运动定律做为定义方程式： $F = kma$ ，其次取比例系数 $k=1$ ，则 $F = ma$ ，最后列出定义方程式右边各个量的单位，经过整理，即得到力的单位：1千克·米/秒²，即1牛顿(N)。由

此可以类推，以某几个任意选定的基本单位为基础，能够推导出一系列导出单位，它们的总体称做单位制。

二、物理量的量纲式

物理量的量纲式是用来表征导出量与基本量之间的关系的。如果已经选定基本量，则导出量必然通过各种物理公式与基本量发生联系。因此一个物理量的量纲式是用基本量来表示它的表达式的。如选定长度 (L)、质量 (M) 和时间 (T) 做为基本量，其它导出量可以按下式确定：

$$[Q] = L^\alpha M^\beta T^\gamma \quad (1-1-1)$$

(1-1-1) 式称为物理量 Q 的量纲式，指数 α 、 β 、 γ 称为量纲。

例如，长度、速度、力的量纲式分别为

$$[L] = L$$

$$[V] = LT^{-1}$$

$$[F] = LMT^{-2}$$

类似于物理量的量纲，也可引进单位量纲的概念。单位量纲式是导出单位与基本单位之间的关系式。如在选定米、千克、秒为基本单位时，长度、速度和力的单位的量纲式分别为

$$[L] = m$$

$$[V] = m \cdot s^{-1}$$

$$[F] = m \cdot kg \cdot s^{-2}$$

物理量的量纲式与物理量单位的量纲式等号左侧方括弧里的都是物理量，等号右侧的则不同。方程式等号右侧如果是基本量符号，则表示物理量量纲；方程式等号右侧如果是单位符号，则表示是单位量纲。

在CGSE单位制中， $F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon_0 r^2}$ 做为电量 q 的定义方程式，从中得出电量 q 与另两个物

理量 F 及 r 的关系为 $q = r\sqrt{F}$ ，而力 F 的量纲式为：

$$[F] = LMT^{-2}$$

于是电量 q 的量纲式为

$$[q] = L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}$$

三、国际单位制

由于历史的原因，世界各国都建立了自己的计量制度，致使世界计量制度十分混乱，计量单位也十分繁杂。这给国际间的贸易往来及科学技术交流造成一定困难，对学习和工作也带来许多不便。例如，现在常遇到的单位制有：MTS制（米吨秒制），MKS制（米千克秒制），MkgfS制（米千克力秒重力制），CGS制（厘米克秒制）；在英、美两国，以英尺、磅和秒为基础的类似单位制已使用了几个世纪。

在十七世纪和十八世纪期间，一些国家政府和科学家们开始寻找一种适用的、国际通用的单位，以便以它为基础得到一个在所有国家都相同的计量制度。

1875年国际上签署的“米制公约”成为现在大部分国家使用的计量单位和标准基本上一致的基础。按照米制公约，参加的国家承认了米制。1960年国际计量大会正式通过了一种通

用的适合一切计量领域的单位制，叫做国际单位制，用符号“SI”表示。

SI构成原则如下：

1. 和其它单位制一样，首先选取基本单位，然后确定导出单位。在SI中基本单位有七个，由此确定其它物理量的单位（导出单位），此外还有两个辅助单位。

2. 一贯性原则，即前面提到的系数 $k=1$ ，或者说换算系数总是1的单位制叫一贯性单位制。采用一贯性单位制是很方便的。因为只要把物理公式中的各个物理量换成它的数字（不包括单位）就可以正确计算。而采用非一贯性单位制时就需要引入各种各样的换算系数才能求得正确的结果。

3. 一种物理量只有一个SI单位。这一原则使人们一看物理量的单位就知道它是什么性质的物理量，同时也避免了不同物理量使用同一名称的单位所造成的混乱。

4. 倍数单位（包括分数单位）一律按十进或千进关系构成，并使用统一规定的SI词头，把SI词头加在SI单位前就构成了SI倍数单位（包括分数单位）。

1971年第十四届国际计量大会规定了国际单位制含有七个基本单位，并对导出单位的名称、符号等作了一系列规定。SI的七个基本单位及其定义如下：

1. 长度单位——米(m)。米等于氪 86 原子的 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁所对应的辐射，在真空中的 1 650 763.73 个波长的长度。

2. 质量单位——千克（公斤）(kg)。千克是质量的单位，它等于国际千克原器的质量。

3. 时间单位——秒(s)。秒是铯 133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间。

4. 电流单位——安培 (A)。安培是一恒定电流，若保持在处于真空中相距 1 米的两根无限长的、圆截面小到可忽略的平行直导线内，则此两导线之间产生的力在每米长度上等于 2×10^{-7} 牛顿。

5. 热力学温度单位——开尔文 (K)。热力学温度单位开尔文是水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

6. 物质的量单位——摩尔 (mol)

(1) 摩尔是一系统的物质的量，该系统所包含的基本单元数与 0.012 千克碳-12 的原子数目相等。

(2) 在使用摩尔时，应指明结构的粒子可以是原子、分子、离子、电子以及其它粒子；或者这些粒子的组合体。

7. 发光强度单位——坎德拉 (cd)。坎德拉是一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，且在此方向上的辐射强度为 $1/683$ 瓦特每球面度。

根据以上七个基本单位和弧度，球面度两个辅助单位建立起来的国际单位制，是当前最完善的单位制，是各学科都适用的统一的单位制。在统一世界计量制度，促进国际交流方面起了巨大作用。

四、电磁学单位制

在电磁学领域同样存在多种单位制并用的现象。例如，CGSE制（绝对静电单位制），CGSM制（绝对电磁单位制）、高斯单位制、MKSA制（绝对实用安培制）及有理化绝对实

用安培制等。

SI 的电磁学量的单位就是按有理化绝对实用安培制定义的。SI 的电磁学单位是以 SI 的前四个基本单位米、千克、秒和安培为基本单位建立起来的。而伏特、欧姆等这些单位都是导出单位，根据基本单位可以把它们定义出来。

力的单位牛顿 (N)，是使 1 千克质量产生 1 米每秒每秒加速度的力。

能量单位焦耳 (J)，是 1 牛顿的力在 1 米距离上所做的功。

功率单位瓦特 (W)，是以 1 焦耳每秒的速率做功所需的功率。

电位差和电动势的单位伏特 (V)，是当流过 1 安培恒定电流的导线上两点之间所消耗的功率为 1 瓦特时，这两点之间的电位差即为 1 伏特。

表 1-1-1 电磁学量的 SI 导出单位

物 理 量	定义方程式	单 位 名 称	单 位 代 号		物理量量纲	单 位 量 纲
			中 文	国 际		
电 量	$Q=It$	库 仑	库	C	TI	sA
电 荷 面 密 度	$\sigma = \frac{Q}{S}$	库仑每米平方	库/米 ²	C/m ²	L ⁻² TI	m ⁻² sA
电 荷 体 密 度	$\rho = \frac{Q}{V}$	库仑每立方米	库/米 ³	C/m ³	L ⁻³ TI	m ⁻³ sA
电 势	$U = \frac{W}{Q}$	伏 特	伏	V	L ² MT ⁻³ I ⁻¹	m ² kg ⁻³ A ⁻¹
电 容	$C = \frac{Q}{U}$	法 拉	法	F	L ⁻² M ⁻¹ T ⁴ I ²	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
电 阻	$R = \frac{U}{I}$	欧 姆	欧	Ω	L ² MT ⁻³ I ⁻²	m ² kg ⁻³ A ⁻²
电 阻 率	$\rho = \frac{S}{L}R$	欧 姆 米	欧·米	Ω·m	L ³ MT ⁻³ I ⁻²	m ³ kg ⁻³ A ⁻²
电 导	$g = \frac{1}{R}$	西 门 子	西	S	L ⁻² M ⁻¹ T ³ I ²	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
电 导 率	$\gamma = \frac{1}{\rho}$	西门子每米	西/米	S/m	L ⁻³ M ⁻¹ T ³ I ²	m ⁻³ kg ⁻¹ s ³ A ²
电 场 强 度	$E = \frac{U}{d}$	伏 特 每 米	伏/米	V/m	LMT ⁻³ I ⁻¹	mkg ⁻³ A ⁻¹
电 容 率	$\epsilon = \frac{dC}{s}$	法拉每米	法/米	F/m	L ⁻³ M ⁻¹ T ⁴ I ²	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
电 位 移	$D = \epsilon E$	库仑每平方米	库/米 ²	C/m ²	L ⁻² TI	m ⁻² sA
磁 通	$d\Phi = Edt$	韦 伯	韦	Wb	L ² MT ⁻² I ⁻¹	m ² kg ⁻² A ⁻¹
磁 通 密 度	$B = \frac{\Phi}{S}$	特 斯 拉	特	T	MT ⁻² I ⁻¹	kg ⁻² A ⁻¹
磁 场 强 度	$H = \frac{I}{2\pi r}$	安 培 每 米	安/米	A/m	L ⁻¹ I	m ⁻¹ A
电 感	$L = \frac{\Psi}{I}$	亨 利	亨	H	L ² MT ⁻² I ⁻²	m ² kg ⁻² A ⁻²
磁 导 率	$\mu = \frac{B}{H}$	亨利每米	亨/米	H/m	LMT ⁻² I ⁻²	mkg ⁻² A ⁻²

电阻单位欧姆 (Ω)，是当一导体的两点之间加 1 伏特的恒定电位差时，在导体中产生 1 安培电流，而且导体中不存在任何电动势，则导体这两点之间的电阻为 1 欧姆。

电量单位库仑 (C)，是 1 安培电流在 1 秒之内所运送的电量。

电容单位法拉 (F)，是当一电容器充 1 库仑电量，它的两极板之间出现 1 伏特电位差时，该电容器的电容量即为 1 法拉。

电感单位亨利 (H)，是一无源回路的电感，当流过该电路的电流以每秒 1 安培的速率均匀变化时，在电路中产生 1 伏特的电动势。

磁通单位韦伯 (Wb)，是一匝环路交链的磁通量，如果使它在 1 秒内均匀地减小到零，则在环路中产生 1 伏特的电动势。

为了更清楚地看出导出单位与基本单位之间的关系，现将常见电磁学量的 SI 导出单位列于表 1—1—1 中。

选择安培作为第四个基本单位是因为安培可以利用安培天平准确地用力学方法测定出来。也就是说，它根据力学单位复制出来的实物具有高的准确度，为统一单位量值奠定了基础。

测量单位是理论定义，而代表它的实物则参预测量过程。

§ 1—2 电学基准器

在进行电气测量时，实际上是将被测电学量直接或间接与作为计量单位的同类量进行比较，从而确定被测量的大小。而所谓量具（也叫作度量器），就是计量单位或计量单位的分数、整数倍的复制实体。

在电学计量中，根据量具在单位量值传递上的作用和不同的准确度，分为基准量具（基准器）、标准量具（标准器）和工作量具三大类。本书着重介绍基准器。

一、基本单位安培的复制

安培的定义已在前节中明确给出，并具有法制的意义，但并不能直接根据它复制安培。因为直导线的无限长度和可以忽略的横截面，以及那样异常小的力的测量都要引起无法克服的困难。为此，根据电磁理论设计出一个更切合实际的系统来复制这个单位。这就是安培天平。

安培天平（亦称电流天平）是以通过两个螺管线圈电流的相互作用以及利用天平来测定这个相互作用力的大小为原理的装置，其原理性结构图如图 1—2—1 所示。当两个线圈中分别通过电流 I_1 和 I_2 时，两个线圈之间的相互作用力 F 等于

$$F = I_1 I_2 \frac{\partial M}{\partial x}$$

在图 1—2—1 给出的结构中，外面的线圈的位置是固定的，称为定圈，里面的线圈相对定圈可以上下移动，称为动圈。使定圈与动圈流过同一个电流，即

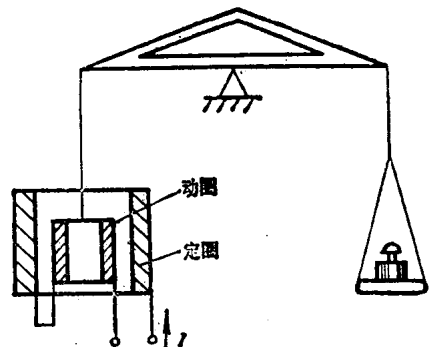


图 1—2—1 安培天平

$I_1 = I_2 = I$, 则当天平衡时, 两线圈的相互作用力 F 与砝码的重力 mg 相平衡, 于是

$$I^2 \frac{\partial M}{\partial x} = mg$$

$$I = \sqrt{\frac{mg}{\partial M / \partial x}} \quad (1-2-1)$$

式中 m ——砝码质量;
 g ——重力加速度;
 x ——动圈相对于定圈的位移;
 M ——定圈与动圈之间的互感。

因为互感 M 仅与两个螺管的几何形状、尺寸及相互位置有关, 所以电流单位值可根据基本单位米、千克、秒并借助安培天平确定下来, 误差不超过 4×10^{-6} 。

二、导出单位的复现

在电磁计量中, 伏特和欧姆是常用的单位, 它们的量具——标准电池和标准电阻器也是最重要的实物标准。

前面已给出了伏特和欧姆的定义。对于伏特来说可以简单写为 $1V = 1W/A$ 。若根据此定义复现它将牵涉到电流和功率的测量, 而功率的测量是不能做到很准确的。所以实际上是由欧姆和安培测定伏特。这是纯粹的电学测量, 可获得高的准确度。

对于欧姆来说可以简单写为 $1\Omega = 1V/A$ 。它又依赖于伏特。这样复现伏特与欧姆就遇到了困难。但从亨利和法拉的定义与量纲式可知: 1 亨利 = 1 欧姆·秒, 1 法拉 = 1 秒/欧。即它们的量纲中都含有电阻的量纲。又因电感 L 、互感 M 、电容 C 可以根据它们的几何尺寸计算出来 (即它们可以直接从长度单位确定其单位量值), 这样可把电阻与电感或互感、电容在交流电桥上进行比较, 从而复现欧姆。早期根据计算电感或互感, 近年则根据计算电容来复现欧姆。

所谓计算电容, 又称汤普逊-兰帕德电容。1956年汤普逊与兰帕德提出了静电学的一个新原理, 并用来计算一种新的标准容量。实验证明, 若一个任意截面的无限长导电柱面, 沿纵向 (平行于轴线) 分割为四部分, 相邻部分之间的间隙足够小, 则相对面所形成的单位长度上电容量 C_1 和 C_2 之间 (见图1-2-2) 存在下列关系

$$\exp\left[-\pi \frac{C_1}{\epsilon_0}\right] + \exp\left[-\pi \frac{C_2}{\epsilon_0}\right] = 1 \quad (1-2-2)$$

若电极是对称的 (见图1-2-3), 则 $C_1 = C_2$, 并且用 C 表示, 于是单位长度上的电容量为

$$C = \frac{\epsilon_0}{\pi} \ln 2 \text{ F/m} \quad (1-2-3)$$

而

$$\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c_0} \text{ F/m} \quad (1-2-4)$$

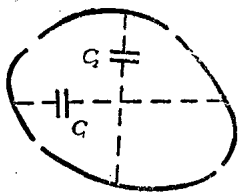


图 1-2-2 任意截面的计算电容

在 (1-2-4) 式中 c_0 是光速的数值, 即 $c_0 = 2,997\,924\,580 \times 10^8$, 其单位是米/秒, 但在 (1-2-4) 式中只是其数量关系。将 ϵ_0 的数值代入 (1-2-3) 式得