

电磁测定基础

【日】金井 宽·高藤正男 著

陈幼祥 胡永昌 译

上海科学技术文献出版社



电 磁 测 定 基 础

〔日〕金井宽 斎藤正男 著

陈幼祥 胡永昌 译

上海科学技术出版社

电 磁 测 定 基 础

[日] 镜井宽 斋藤正男 著

陈幼祥 胡永昌 译

*

上海科学技术文献出版社出版发行

(上海市武康路2号)

总 经 销

宜兴南漕印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 6.25 字数 151,000

1987年 2月第1版 1987年 2月第1次印刷

印数: 1—3,000

书号: 15192·499 定价: 1.30 元

《科技新书目》129-217

译 序

电磁测量因其实用性强、知识面较广在日本已成为不少大学的必修课,以培养学生进行独立测量工作的能力。

本书译自日本《電気磁気測定の基礎》。由于该书作者集在大学电气、电子工程系的讲课心得和实践经验编写而成,故深受广大读者欢迎。该书自出版以来已再版近十次之多。

本书内容丰富、叙述精炼,包括测量基础、测量值处理、电磁单位和标准、电压和电流测量、集中参数电路元件测量、电功率测量、磁量测量、波形和频率测量、含有分布参数系统测量以及电气测量技术应用等十章。叙述深入浅出,可作为大、中专院校有关专业师生及工程技术人员参考。

本书第1至8章由胡永昌同志翻译、陈幼祥同志校对,第9、10两章由陈幼祥同志翻译、齐彦昭同志校对。

译文中不妥之处,敬请读者指正。

译 者

前 言

本书是笔者在各大学对电气、电子工程系的学生讲课用的讲义基础上,根据若干实践经验修改汇集而成的。

现在,许多大学已把电气测量或电磁测量这门学科作为必修课,实际上已经认为这是一门重要的学问。然而在另一方面,正因为它的实用性强,所以涉及的知识面也较广。本书从考虑实际需要出发,并以“分析方法”为中心,论述了有关知识。

以大学生为对象的电磁测量的讲义,大体上应该包括以下三个方面的内容:

1. 测量的基础:理解关于测量操作本身的基本概念。
2. 电磁测量法:掌握测量各种电磁现象的基本分析方法。
3. 关于实验:在不妨碍3~4年级应完成的学生实验以及与毕业研究有关的实验程度的条件下,使学生掌握电磁测量常识性的知识和技术。

对学生来说,通过电磁测量讲义及学生实验,到毕业时,必须掌握一些关于测量方法的一般常识、实验技术以及测量仪器的要点等知识。当然,没有必要去掌握高难度的实验技巧和材料的详细知识或每个测量装置的细节,这些都是专家的事情。如果能够详细地掌握基本分析方法,那么,在实际碰到具体问题时,也就不会感到困难了。近来,电气测量技术正在不断地发生显著的变化。本书与其说是介绍最新技术,倒不如说是重点介绍基本分析方法。

电气、电子工程系的工科学生,与其他学科的学生不同,要

培养他们成为以研究电磁现象为主的专家。但是，他们在研究电磁现象时，还不具备所谓“一经思考即能领会”的独特本领。作为最低限度要求，作者希望学生能掌握象电气专家那样的熟练的分析方法。

测量必定要有测量对象。如果不了解测量对象的现象及装置的性质，就不会有合适的测量方法。本书一再强调这点。作者还希望，学生在大学毕业时，不要再犯诸如看到电压表指示为10V，就马上认为“电压是10V”的那种基本错误。

本书在出版过程中，曾请上智大学的中山淑先生审阅了草稿，还得到了昭晃堂阿井国昭先生的很大帮助，在此表示谢意。

著 者

目 录

1. 测量的基础

1.1 测量是什么	1
1.2 测量方法的分类	2
1.3 测量误差	6
问题	9

2. 测量值的处理

2.1 测量值的离散程度	11
2.2 有效数字	13
2.3 测量值的统计处理	14
2.4 测量误差的传递	17
2.5 测量值之间的关系	19
问题	22

3. 电磁单位和标准

3.1 电磁单位制	24
3.2 绝对测量	25
3.3 标准的维持	29
3.4 交流用标准器	32
问题	36

4. 电压、电流的测量

4.1 电压、电流的测量方法	37
4.2 指示仪表的一般性质	39
4.3 检流计	44

4.4	动圈式仪表	49
4.5	各种指示仪表	51
4.6	应用电子电路的测量	58
4.7	电位差计	61
4.8	倍率器、分流器等	67
4.9	特殊电压、电流的测量方法	70
	问题	72

5. 集中参数电路元件的测量

5.1	集中参数元件与分布参数元件	73
5.2	电阻的测量	73
5.3	低电阻的测量	77
5.4	高电阻的测量	78
5.5	电阻计	80
5.6	特殊电阻的测量	81
5.7	交流电桥	84
5.8	高频阻抗的测量	91
5.9	阻抗计	96
5.10	特殊阻抗的测量	98
	问题	99

6. 电功率的测量

6.1	电功率的测量方法	101
6.2	电动式功率表	103
6.3	功率的积算	105
6.4	多相电功率的测量	109
6.5	电功率的其他测量方法	112
	问题	115

7. 磁量的测量

7.1	磁量的测量	116
7.2	磁场的测量	116
7.3	磁化特性的测量	122
7.4	铁损的测量	125
	问题	127
8.	波形和频率的测量	
8.1	时间和频率的标准	129
8.2	波形的观察和记录	132
8.3	相位的测量	137
8.4	频率的测量	142
8.5	频率成分的测量	148
	问题	150
9.	含有分布参数系统的测量	
9.1	传输线	151
9.2	线路参数的测量	154
9.3	驻波比的测量	156
9.4	阻抗的测量	160
9.5	空腔谐振器	165
	问题	166
10.	电气测量技术的应用	
10.1	应用测量和测量系统	167
10.2	光的测量	168
10.3	放射线的测量	174
10.4	机械量的测量	176
10.5	测量系统的构成	179
	问题	189

1. 测量的基础

1.1 测量是什么

所谓测量或计量测量,是怎么回事呢?对此要下严密的,并同常识性的概念没有矛盾的定义,是困难的。简单地讲,所谓测量,就是把所需的量用数字表现出来的某种操作*。

在这里,“所需的量”是指各种各样的对象,包括测量客观存在的量,如长度、时间、电压等物理量;也包括测量味道、苦痛、爱好等主观上的量。因此,测量对象不同,作为测量操作本身的分析方法,在本质上是有所区别的。当然,确定了测量的性质,就能用数字来表现了。

例如,在计算某个箱中放入物体的个数时,被测量是离散量(1个、2个……能够计数的量),但在大多数场合,被测量是象长度、时间等的连续量(不能用1个、2个……来计数的量)。为了要把连续的量用数字表现出来,我们就要设定某个适当的作为基准的量,还必须判断被测量是基准量的倍数。我们把实现基准量的器具叫做标准,把基准量和被测量比较判断的装置叫做测量仪器。在实际测量中,既可以用刻度尺来测长度,也可读取仪器指示的数字,用人的感觉来分担测量仪器的一部分工作。

根据以上分析,我们可以知道,测量的结果是建立在下面互相有关的四个要素上的(图 1.1)。

* 关于测量用语有以下两个标准。

JIS Z 8104—1962(一般测量用语)和 JIS Z 8103—1959(关于精度用语)。

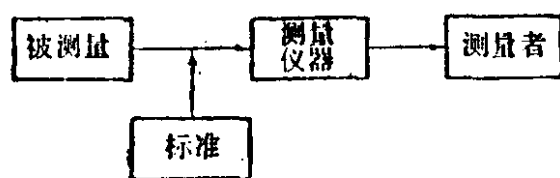


图 1.1 测量的四个要素

1. 被测量;
2. 标准(单位);
3. 测量仪器;
4. 测量者。

这是指一般测量,对于电磁测量,还要考虑下面两个内容。

1. 电量或磁量的测量;
2. 应用电气和电子学的技术来测量非电磁量的量。

对于后者的测量,也叫应用测量。这种测量最重要的是要有把被测量先变换成电量的变换装置(变换器),再对已变换的电量,进行电量的测量操作。关于变换器,其他书里已有详细说明,本书仅举两、三个例子加以说明。

1.2 测量方法的分类

实际测量时,由于对具体的内容有各种分析方法,因此,根据各种观点预先对测量方法进行分类,对整理分析方法是有益的。然而,这些分类方法归根结底是概念上的东西,具体地要把某种测量方法适用于何种分类,还是相当困难的。

(i) 直接测量和间接测量 通过测量仪器,把被测量同标准直接进行比较而得到测量结果的方法,叫做直接测量;将直接测量到的某些量,经过计算,最后得到测量结果的方法,叫做间接测量。

例如,图 1.2 所示的长方形,用刻度尺测得它的长和宽分别为 a 、 b ,这就是直接测量。根据 a 、 b 的测量结果,通过公式

$$S = ab \quad (1.1)$$

可以求得它的面积 S , 这个 S 就是间接测量。

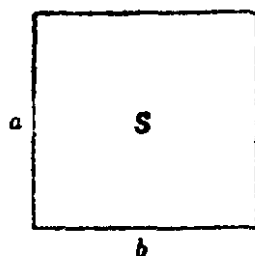


图 1.2

在上例中, 如果 a 和 b 都有一定的测量误差, 通过式(1.1)求得的 S 测量结果, 必定也会产生误差, 象这种把一个直接的测量误差, 作为间接测量结果的误差表现出来的现象, 叫做误差的传递。

(ii) 偏位法和零位法 读出指示仪表的指针偏转角度, 测量者根据测量仪器指出的量的大小来判断的测量方式, 叫做偏位法。与此相反, 根据天平的平衡来测量质量时, 测量仪器上同时有被测量和同种类的基准量 (这里是砝码), 测量者仅根据被测量与基准量是否相等来判断的测量方式, 叫做零位法。这种分类方法, 着眼于测量仪器与测量者之间的关系, 如图 1.3 所示。

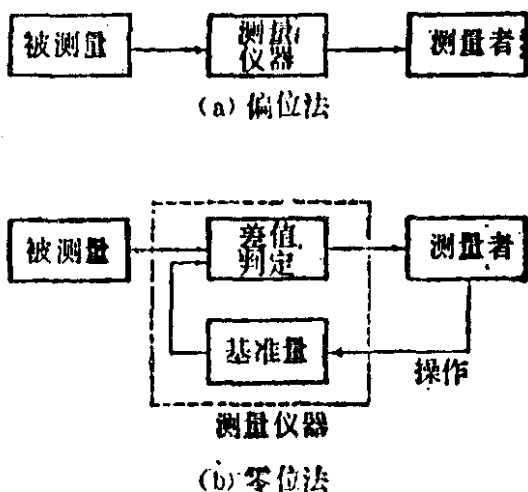


图 1.3 偏位法与零位法

我们来分析一下图 1.3 中的测量操作顺序。图中 (a) 的偏位法, 仅仅顺着—个方向就能到达结果; 而图中 (b) 的零位法, 操作的流程要循环回到原来的起点。我们把操作或信息流程的循环回到起点的现象, 称为反馈。因此, 从本质上来说, 零位法和偏位法的差别, 就是有没有反馈的差别。

根据类似的分析, 也可用置换法、补偿法等名称。这些名称实质上都是零位法, 即用某—种现象作媒介, 来比较被测量与基准量。

例 1.1 图 1.4 (a) 是一个 LC 振荡电路, 其中 C 是可变标准电容器, 其容量可通过刻度值读出。根据 $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{LC}$, 可测出图中 (a) 电路的振荡频率。如图中 (b) 所示, 一加入待测的未知电容量 C_x 后, 振荡频率就会由 f_0 变成 f_1 。

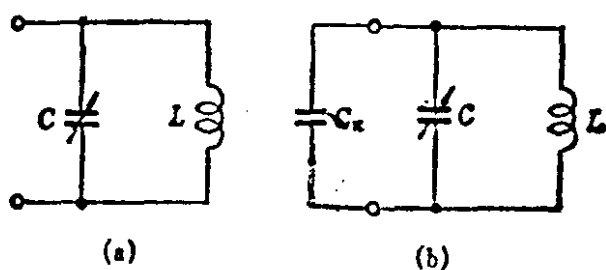


图 1.4 置换法和补偿法

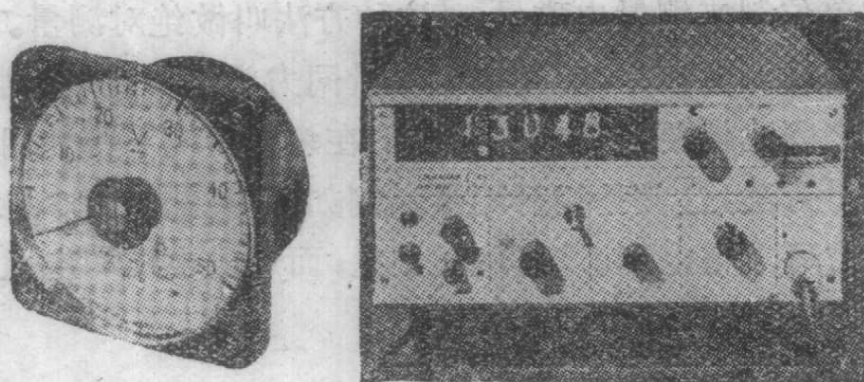
在 (a) 电路里, 如增加 C 使振荡频率变为 f_1 , 这时, 通过读数, 可知 C 的增加量为 ΔC , ΔC 和 C_x 具有相同的作用, 两者相等。这种测量方式叫做置换法。

如在 (b) 的电路里减小 C , 使振荡频率回到原来的 f_0 上。这时, 假设 C 的减少量为 $\Delta C'$, $\Delta C'$ 就能起到抵消 C_x 的作用, 或者说两者也相等。这种测量方式就是补偿法。

(iii) 模拟测量和数字测量 测量结果最终是以数值的形式表现出来的, 因此在测量连续量时, 必须把某段连续量转换成

能用数值来表示的量(离散量)。

在测量仪器内部,把连续量变换成离散量,测量仪器并以数字形式把测量结果告诉测量者,这种测量方式,叫做数字测量。与此相反,如测量仪器对被测量始终采用连续量,并由测量者把连续量变换成数字的测量方式,叫做模拟测量。就是说,当人们自己读出指示仪表的指针偏向时,是模拟测量;测量仪器用数字显示测量结果时,是数字测量(图 1.5)。



(a) 模拟测量仪器

(b) 数字测量仪器

图 1.5 模拟测量仪器和数字测量仪器

对测量仪器的制造者来说,模拟测量仪器和数字测量仪器之间有很大区别;但从原理角度来看,两者没有多大差别,仅有的一点差别在于连续量变换成离散量,是由测量仪器来完成,还是由测量者来完成。

象在工厂里计算产品的个数那样,被测量从一开始就是离散量,而测量仪器中也有始终采用离散量来处理的。一般来说,其中已经含有数字测量的分析方法。

(iv) 被动测量和主动测量 实际测量时,必然存在着能量的取用问题,因此,也可以根据能量的取用方式,对测量方法进行分类。测量所需的能量,全部由测量对象供给测量仪器,这

种形式的测量叫做被动测量。与此相反,由测量仪器提供能量给测量对象的测量,叫做主动测量。例如,要调查地层状态,可利用在偶尔发生地震时得到的观测结果,这就是被动测量;也可用爆破的方法造成人工地震来进行测量,这就是主动测量。

(v) 绝对测量和相对测量 电磁量的单位,可以在基本单位(长度、时间、质量)上,增加一个单位(μ_0)而被推导出来。如把 μ_0 的值作为前提,把电磁量同力学量进行比较,就能按力学量等的单位制来测量电磁量。这种方法叫做绝对测量。然而,作为实际的测量技术,与其把电磁量同力学量作比较,倒不如在电磁量之间比较要容易些。因此,在多数情况下都使用后者形式的测量方法,这就是相对测量。例如,通过测量两个电流之间的作用力可求得电流,这是绝对测量;而通过电压和电阻值来求得电流,就是相对测量。

1.3 测量误差

不管使用哪一种方法,所得的测量结果,不一定能期待和真值一致。设被测量的真值为 T ,测量结果(测量值)为 M ,两者的差值

$$E = M - T \quad (1.2)$$

称为测量误差。^{*}也可用 E 的绝对值或 E 对 M 的百分比来表示误差(E 为绝对误差, E/M 为相对误差)。

测量误差不一定是由测量方法引起的,它还受到其他各种原因的影响。一般来说,在讨论测量误差时,必须明确以下条件:

(1) 被测量,标准器,测量仪器,测量者;

^{*} 由于我们并不知道真值,即使知道了,在测量时,也可能还会变化。因此,式(1.2)中考虑的“真值”是没有意义的。如能求得十分正确的测量值,就能在式(1.2)中代替 T ,这个值可称为“正确值”。真值和正确值仅仅是分析方法上的两种不同单位,一般来说,没有区分的必要。

(2) 周围环境条件,测量时间等。

误差是由各种原因造成的。例如,因测量仪器的调试偏差而引起的误差,就是由一定原因造成的,如重复测量几次,就会呈现某种倾向性。这类误差,叫做系统误差。与此相反,因个别不易确定的细小原因积累而引起的误差,表现为每次测得的值都不同,这种误差叫做偶然误差。

$$(\text{误差}) = (\text{系统误差}) + (\text{偶然误差}) \quad (1.3)$$

首先,对于系统误差,它至少从原理上能找出产生的原因,可分类*如下:

(i) 理论误差 因测量方法在理论上的假设或近似而引起的误差;

(ii) 测量仪器误差 因测量仪器的校正或调试不完善而产生的误差;

(iii) 动误差 因测量仪器的动作速度跟不上,不能如实跟踪变化现象而造成的误差;

(iv) 个人误差 因各人在读取测量仪器刻度时产生的误差。

要减小系统误差,可采用适当方法进行校正。另外,如果是由于测量方法和测量条件变化而引起系统误差的变化,只要在改善条件和方法上下工夫,还是能够尽量减少系统误差的。

其次,再来考虑一下偶然误差。这种误差是由很多互不相关的各种原因积集而造成的,在大多数情况下,可通过经验及理论,知道这种误差具有以下性质。

“对于相同的量,在相同的条件下,重复多次相同的测量,其结果为图 1.6 所示的分布(正态分布)。”

* 当然,如果要对造成误差的每一个原因都作数量分析,即使是对系统误差也是困难的。这是经常会遇到的实际问题。

这种性质，在概率论中叫做中心极限定理。关于这条曲线的数学表达式将在下一章里论述。

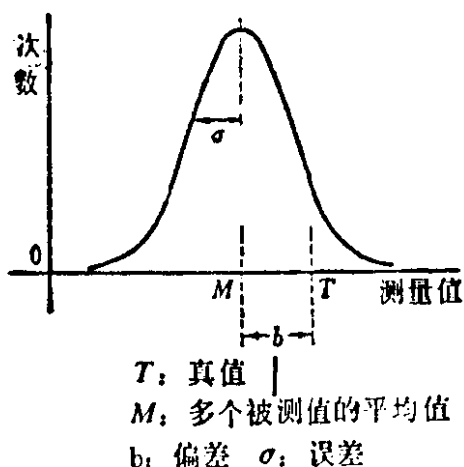


图 1.6

图 1.6 所示的两个量——“集中趋势”和“离散程度”，能正确地确定正态分布曲线的形状。可以这样认为：集中趋势和离散程度分别表示系统误差和偶然误差的影响。

如图 1.6 所示，被测值在 M 点前后有一个概率波动，通过适当的统计处理（如取其平均值），

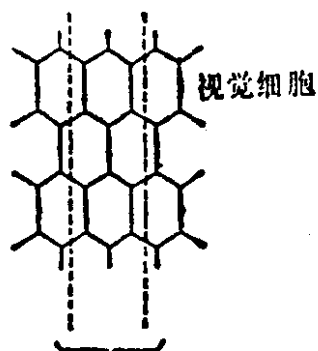
就能够消除偶然误差的影响，从而求得正确的 M 值。但系统误差——集中趋势，则不能用统计处理的方法加以消除。

最后，解释一下和测量误差有关的几个名词。

细度——测量仪器能够检测被测量的微小差别的界限，叫做该测量仪器的细度。细度表示测量仪器能测量到何种程度的细小差别，它不考虑产生多少测量误差的问题。

例 1.2 人类的视觉细胞，在视网膜上是按照蜂巢形式排列的，如图 1.7 所示。现在，假设测量仪器的刻度线投影到视网膜上。为了要区别这两条线，如图 1.7 所示，就有必要分别在两个分离的细胞上各自成一条线的像。

图 1.7 所示的两条线的间隔，换算成视角约为 $1'$ ；换算成在明视距离（25 cm）约为 0.07 mm。这个数字就是指示仪表刻度的细度界限（刻度的间隔一般在 0.6~2.5 mm



要区别两条离开的线，必须这样成像

图 1.7 视觉细胞的排列