

电磁测量

唐统一 赵伟 编著



清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书是作者在清华大学电机工程与应用电子技术系多年讲授电磁测量课程以及 1986 年、1993 年编的两部讲义的基础上,为将电磁测量技术的新发展引入教学并适应拓宽学生知识面的教学改革的要求而编著的。

全书共分六篇十五章。第一篇电学量的直读测量与仪表,包含:模拟式电机机械指示测量机构及有关问题、电压和电流及电量的直读测量、功率与电能的直读测量、电参数的直读测量;第二篇比较测量法及其仪表,包含:比较测量法与标准元件、补偿测量法与电位差计、直流电桥法、经典电桥、带磁感应耦合作用的变换器及装置、有源电桥;第三篇电子式仪器仪表及测量,介绍电子式仪器仪表及应用;第四篇数字测量技术基础,包含:数字式电测仪表及测量、微机化仪器及其自动测试系统;第五篇磁测量基础,简介磁测量技术;第六篇误差与数据处理,介绍误差分析在电磁测量中的应用。每章附习题与思考题,书的最后还附有总习题,以便读者自学。

本书可作为高等工科院校电工技术各专业的电磁测量、电气测量技术或电工量测等课程的教材,也可供有关教师和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁测量/唐统一 赵伟编著. —北京:清华大学出版社,1997
ISBN 7-302-02476-6

I. 电… II. ①唐… ②赵… III. 电磁测量 IV. TM936

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 08531 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

印刷者:北京丰华印刷厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:14.25 字数:332 千字

版 次:1997 年 7 月 第 1 版 1997 年 7 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-02476-6/TM·26

印 数:0001~3000

定 价:13.50 元

前 言

本教材是为电工技术学科各专业大学生学习电磁测量课程而编写的。

近年来,随着科学技术的进步与发展,电磁测量领域不断出现新的测量原理、方法,测量手段也在更新并日趋完善;电磁测量技术在科学研究和现代化大生产中的应用日益广泛,发挥着越来越重要的作用。为将电磁测量新的发展与革新性变化引入教学和适应拓宽学生知识面的教学改革的要求,我们以清华大学基本电工教研组原《电磁测量》讲义为基础,经调整、补充,并借鉴国内外新近出版的有关教材与科研成果,新编写这部以介绍电磁测量技术基本知识为主的教材。

本书的编写特点是:经典电磁测量技术原理部分既凝练又较全面;适当增加了电子测量及仪器方面的一般性知识;数字式和微机化仪器及其应用等内容比重较大,其叙述侧重基本原理又有较宽的知识面;注重介绍常用的和旨在削弱干扰以提高准确度的多种测量方法及其选用原则,这一原则贯穿全书,并反复提醒读者应对误差有更为全面的理解与认识。而且,部分内容与习题体现了对相关课程的知识应熟练掌握和应动手实践、研究探索、联系实际的要求。

此教材包含有电工技术学科各专业要求的电磁测量课程的基本内容。使用时可视具体专业的需求决定对某些章节的取舍。

本书共分15章。编写者为唐统一(绪论、第一~四、九、十四、十五章)、赵伟(第五~八、十~十三章)。每章附有习题与思考题,并提供带总结性质的总习题。

在本教材编写过程中,采纳了徐云、赵学东、吕鸿莉的建议;丁青青、朱红参加了部分辅助工作。

限于编者的水平,书中仍可能有一些不足之处甚至错误,恳请批评指正。

编 者

1996年3月于清华大学

绪 论

测量的经典定义是以实验的方法将被测(未知)量与已知标准量进行比较来实现定量认知的过程。而电磁测量则是研究电学量、磁学量以及可转化为电学量的非电量的测量原理、方法、所用仪器、电表的技术科学。

在自然界众多的现象与规律中,电和磁自身的规律、它们相互间的规律,以及它们与其他物理、化学等现象间的广泛联系(例如电和磁本身的力学效应、电与磁结合产生作用力的效应、电通过磁的作用改变量值的效应、电热效应、光电效应、光磁效应、电化学效应等)为电学量、磁学量和几乎所有非电量的测量提供了多种多样的方法和手段。

对于被测对象的测量,要选择合适的方式与仪表,并以一定的准确度来进行,从而得到所要求的“测量结果”。常用的测量方式有直接测量、间接测量和组合测量三种。

直接测量是使待测的量与作为标准的量进行直接或间接比较,而得到测量结果的方法。例如用电位差计测电压、以电桥测元件参数等(直接比较);或者用经过校验的电表测电压、电流、功率等(间接比较,这时标准量已隐含在电表的游丝或张丝中)。

间接测量是利用未知量与一些便于直接测量的电学量或其他物理量之间的简单函数关系,经直接测量这些量,再通过简单计算而获得被测对象量值的测量方法。例如由直接测得的电阻电压和流过电阻的电流按欧姆定律算出电阻;又如电阻率 $\rho = SR/l$ 一般不能直接测得,通常先直接测出 S, l, R (分别是被测材料的截面积、长度和电阻值),再按上式算出 ρ 。间接测量方式用得最为普遍。

组合测量的对象是那些与便于测量的量间有复杂函数关系的量。为获得测量结果,要经过复杂计算(在计算机已十分普及的今天,解复杂方程并非难事)。

事实上,对一个量的测量可采用不同方式。即使仅以一种方式测量,也有多种方法和多种不同类型的仪表可供选择。

电磁测量具有很强的技艺性,表现在为完成同一测量任务即使采用同样的测量方法和相同的仪表,熟练且有经验的科技工作者与生手相比,所获测量结果仍可能有很大差别。因此,要做一名合格的测量工作者必须掌握测量原理、测量的基本方法,熟悉测量仪器的性能,并能分析各种干扰因素的来源和产生误差的可能原因(以防患于未然)。经缜密思考和细致操作,才能得到符合准确度要求的可靠的测量结果。

电磁测量始于实验室研究,后逐渐进入工业应用。20 世纪初期,重要的经典类型的电磁测量仪器、电表已商品化。其中电表多采用指针或光标的偏转实现连续指示。这类电表又称模拟式电表,以区别于 20 世纪 50 年代发展起来的以数字方式显示测量结果的数字式电表。与经典仪器、电表相比,近年来新开发研制出的数字化、微机化测量仪器、电表在显示方式和工作原理等方面都有很大变化,甚至大相径庭,但就测量理论和方法而言,数字测量仍以经典测量为基础。经典式和数字式仪表都在继续发展,而后者已呈现出取代前者的趋势。

利用仪器仪表实施测量的过程,可按图 1 所示分解为一些环节。在电磁测量领域,图 1 中的被测对象主要包括:电学量,如电参量——电压、电流、电功率、电能等,以及电参数——

电阻、电容、电感、互感、电阻率和介质损耗角等；磁学量，如磁通、磁通密度、磁通势、磁场强度、磁导率、铁损等。

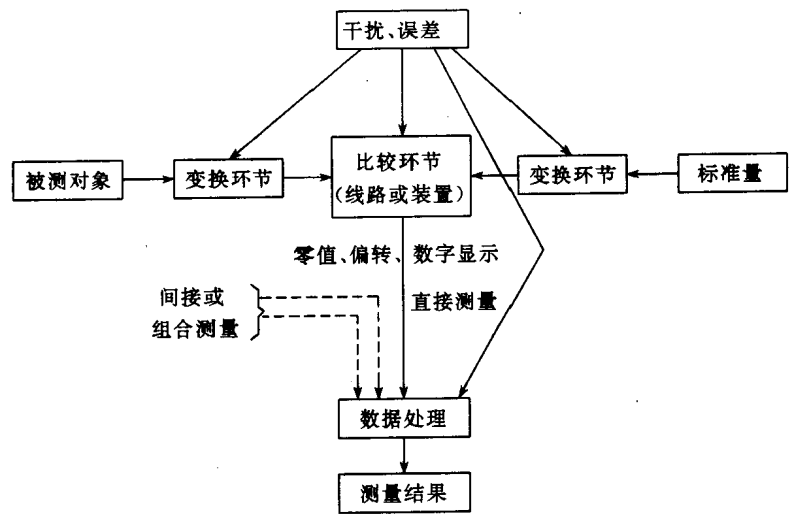


图 1 测量过程剖析

由图 1 可见，有关的被测对象与同性质或不同性质的标准量分别经过各自的变换环节转换为同性质且在数值上便于比较的量值。比较后，或以零值方式、指针（或光标）偏转方式，或以数字显示方式反映测量情况或直读数据。如果进行的是间接测量或组合测量，还需将所得数据作进一步处理，方能得到最终的测量结果。

测量仪表与测量系统各环节本身可能具有的不完善和受外界因素的干扰等，会使实施测量时产生误差。且误差还可能因所选间接或组合测量的具体方法的不理想而增大，即又造成所谓方法误差。此外，若被测对象是工作电路中的某个量，例如支路电压或支路电流，当接入仪表进行测量，必将改变该电路的工作状态，即测得数据已非原电路的情况，显然又引入新的误差项。可以说，只要进行测量，误差就不可避免。

从允许误差范围看，电磁测量大致分为监测、工业与实验室测试、精密测量和计量四类。由表 1 可见，监测的允许误差范围可以很大，有时甚至只要求判断有、无或正、负极性就可以了。工业与实验室测试包括在线、离线工业测试和一般科研实验。精密测量要求很小的误差亦即很高的准确度，用于高科技领域。计量是实现单位统一和量值准确一致的测量，具有

表 1 测量分类与相应的允许误差范围

测量分类 \ 误差										
	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰
监测										
工业与实验室测试										
精密测量										
计 量										

法制、强制和技术监督的含义,可看作是“物化的法官”,亦即具有判决的权力。因此,计量属于精密测量的低误差即高准确度段。表 1 列出了与这四类测量相应的允许误差范围。

有关误差的进一步介绍,可参见本书第十五章。

测量方法可分为两大类:

(1) 直读(或偏转)法 借助弹簧秤实施机械称重是认识此法最好的例子。在电磁测量中,利用模拟式指示电表的指针、光标在刻度盘上所处位置或数字显示装置的读数来显示被测对象量值大小的方法均属于直读(或偏转)法。直读法的优点是观测直观。利用模拟式仪表实施直读测量,可以观察被测对象的连续缓慢变化;测量准确度决定于所用电表的准确度级。如改用数字式电表,可使读数无视差,且更为准确、快速。

(2) 比较测量法(简称较量法) 是将被测的量与标准量直接比较的方法。相当于用天平及砝码称重。其特点是标准量直接参与测量过程。经典的较量仪器如电桥、电位差计等都比直读电表的准确度级高,但操作复杂、费时,且要求操作人员具备熟练的技巧。采用随后开发出的具有自动平衡功能的较量仪器,不仅降低了对操作人员素质的要求,还可大大缩短测量过程,减轻劳动强度。

至此可见,一项测量任务完成的整个过程应包括:

① 根据测量目的和允许误差要求选取适当的测量方式与方法。显然,要考虑现存条件并注意节约。

② 合理选用仪表、标准量具,制定测量步骤,考虑实施各种预防干扰、消除或减小误差的措施。

③ 精心测量,以获取可靠的数据。

④ 进行数据处理,包括运用误差理论分析测量结果的误差范围。

严格地讲,一个测量结果没标明误差,将降低它的实用价值。

本教材的编写和取材主要针对科技工作者在工作中可能经常遇到的电磁测量问题,即属于工业和实验室中的任务范畴。欲完成这类测量任务,就应对仪器仪表的基本原理和性能以及测量方法有一定深度和广度的了解,以做到正确选用并灵活使用。由表 1 可见,这类测量的允许误差范围大致由百分之几到千分之一。对于这类情况,一般来讲,只考虑有关系统误差的起因与处理就可以了。

当今世界已进入信息时代。电磁测量也应纳入信息科学领域,因为它是提取信息的重要方式。

本教材主要介绍电磁测量的基本原理和方法,目的在于为进一步深入研究与应用电磁测量技术打下基础。

目 录

绪论	VIII
----------	------

第一篇 电学量的直读测量与仪表

第一章 模拟式电机机械指示测量机构及有关问题	2
第一节 概述	2
第二节 各系测量机构转动动力矩的产生原理	3
第三节 流比计式测量机构	8
习题与思考题	10
第二章 电流、电压和电量的直读测量	11
第一节 电流的直读测量	11
第二节 电压的直读测量	14
第三节 电量的直读测量	16
习题与思考题	18
第三章 功率与电能的直读测量	20
第一节 功率表的形成	20
第二节 电功率的直读测量	20
第三节 正弦交流电路无功功率的直读测量	22
第四节 功率因数的直读测量	24
第五节 正弦工频有功与无功电能的直读测量	25
习题与思考题	28
第四章 电参数的直读法测量	29
第一节 直流电阻的直读法测量	29
第二节 交流电参数(R, C, L, M, Z)的直读法测量	32
习题与思考题	35

第二篇 比较测量法及其仪表

第五章 比较测量法与标准元件	38
第一节 比较测量法简介	38
第二节 标准电压元件	38
第三节 标准电阻(器)	40
第四节 标准电容(器)	44

第五节 标准电感(器)	46
习题与思考题	47
第六章 补偿测量法与电位差计	49
第一节 补偿测量法	49
第二节 直流电位差计	49
第三节 交流电位差计	53
第四节 电位差计的应用	55
习题与思考题	57
第七章 直流电桥法	58
第一节 单比电桥	58
第二节 双比电桥——低值电阻的测量	60
习题与思考题	62
第八章 经典电桥	64
第一节 经典电桥的工作原理与分类	64
第二节 交流电桥的电压灵敏度与收敛性	67
第三节 实用经典电桥举例	68
第四节 电桥的防护	72
习题与思考题	75
第九章 带磁感应耦合作用的变换器及装置	77
第一节 仪用互感器	77
第二节 双级电流互感器	79
第三节 磁平衡式电流互感器	81
第四节 感应分压器	81
第五节 电流比较仪	83
第六节 变压器电桥	84
第七节 比较仪式电桥及其应用	86
习题与思考题	88
第十章 有源电桥	89
第一节 预备知识	89
第二节 有源电桥的形成——伪桥	92
第三节 有源电桥的分析方法	95
第四节 有源电桥分析举例	98
第五节 半桥	100
第六节 带感应分压器的有源电桥	102

习题与思考题	104
--------	-----

第三篇 电子式仪器仪表及测量

第十一章 电子式仪器仪表及应用	108
第一节 电子示波器及其使用	108
第二节 模拟式电子电压表及其使用	116
第三节 模拟电子式频谱分析仪	127
习题与思考题	128

第四篇 数字测量技术基础

第十二章 数字式电测仪表及测量	133
第一节 概述	133
第二节 数字式仪表和数字测量的特点	134
第三节 模拟/数字(A/D)转换器和电子计数器	134
第四节 直流数字电压表的工作原理	136
第五节 一些电学量的数字测量	144
第六节 数字多用表	154
第七节 数字式频谱分析仪及其应用	159
习题与思考题	160

第十三章 微机化仪器及其自动测试系统	162
第一节 智能仪器的特点与基本结构	162
第二节 智能仪器举例	164
第三节 自动测试系统	171
第四节 IEEE-488 仪器系统——智能仪器组成的自动测试系统	172
第五节 PC 仪器系统	174
第六节 VXI 总线仪器系统——虚拟仪器系统	175
习题与思考题	179

第五篇 磁测量基础

第十四章 磁测量	181
第一节 概述	181
第二节 有关磁性材料的基础知识	181
第三节 磁通和磁通密度的测量	184
第四节 磁通势和磁场强度的测量	188
第五节 软磁材料静态与动态特性的测量	189
第六节 软磁材料损耗的测量	191
习题与思考题	194

第六篇 误差与数据处理

第十五章 误差分析在电磁测量中的应用.....	196
第一节 概述.....	196
第二节 误差的分类与表示方法.....	196
第三节 系统误差.....	198
第四节 随机误差.....	201
第五节 间接测量误差的传递与综合.....	202
第六节 误差分析的逆任务——实验设计.....	205
第七节 提高测量准确度应用举例.....	206
第八节 一些国产仪表和标准元件的准确度级别或误差公式.....	209
习题与思考题.....	209
总习题.....	211
参考文献.....	214

第一篇

电学量的直读测量与仪表

第一章 模拟式电机机械指示测量机构及有关问题

第一节 概 述

利用电磁力使其机械部分动作并以指针或光标在刻度盘上指示被测对象量值的电表称作模拟式电机机械指示电表,也称直读式电表。由于其问世已百余年,所以又称经典式电表。

可见模拟式电机机械指示电表必须具备能接受某种电参量能量并将它转变成机械力或力矩的机构——测量机构。机械力根据电与磁的相互作用或电荷间存在吸力或斥力等原理产生。如此,不同种(系)测量机构中产生机械力的电参量不同,称该电参量为测量机构的基本量测量。基本量测量可以是电压、电流、两电流的乘积或比值等。如果被测对象的量值超过了测量机构所能直接承担的能力,特别是要求其他测量对象也能使测量机构动作,则必须附加一个称作测量电路的组成部分,见图 1-1。测量电路的繁简取决于测量需要,通常由无源元件(R, C, L, M)和晶体管组成。一般地,模拟式电机机械指示电表是由测量机构配以相应的测量电路构成。

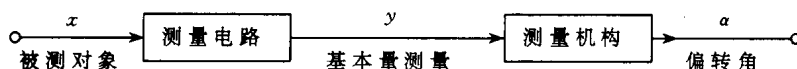


图 1-1 电机机械直读式指示电表组成框图

测量机构由可动和静止两个基本部分组成。可动部分的支撑可以是轴承和轴尖的组合或张丝。工作时,可动部分受力产生偏转,从而带动指针或光标在刻度盘上显示偏转角的大小。

对于直读电表,可动部分所受的旋转力矩又称转动动力矩,用 M_a 表示。为确定 M_a 与有关电参量 x 的关系,可借助电磁学有关场能与力矩间关系的理论公式。设测量机构系统中电场或磁场能量为 A ,则有

$$M_a = \frac{dA}{d\alpha} \quad (1-1)$$

其中, α 为偏转角, A 取决于测量机构的结构参数和被测电参量 x 。由此,上式可写作

$$M_a = \frac{dA}{d\alpha} = f(x) \quad (1-2)$$

显然,不同测量机构的 $f(x)$ 也不同。一般来讲, x 加大将使 M_a 增强。

为分辨转动动力矩的大小,电表中一般都有随偏转角增大而加强的反动力矩 M_r 。反动力矩可用游丝提供,新型电表则多由张丝兼而供给。 M_r 可表示为

$$M_r = W\alpha \quad (1-3)$$

这里, W 或为常数,或是偏转角 α 的函数。

可动部分的静止偏转角 α 对应于转动力矩与反抗力矩相等的位置,即

$$M_a = M_r \quad (1-4)$$

由式(1-2), (1-3)可见, α 与 x 之间满足关系

$$\alpha = F(x) \quad (1-5)$$

它确定表盘的刻度形式,即电表的刻度特性。

此外,还存在次要的摩擦力矩和只在运动过程中出现的阻尼力矩,见第二章第三节。

第二节 各系测量机构转动力矩的产生原理

按产生转动力矩 M_a 所利用电磁现象与方式的不同,测量机构分为磁电系、电磁系、电动系、感应系和静电系等系别。

一、磁电系测量机构

磁电系测量机构是利用通电导线在磁场中受力的原理制成的。磁场由永久磁铁提供,在气隙中作辐射均匀分布,可转动线圈通恒定电流 I , 则两者相互作用使在磁力线辐射均匀分布的范围内的线圈受到恒定转动力矩的作用(见表 1-1),即

$$M_a = KI \quad (1-6)$$

上式中 K 是与气隙中磁通密度、线圈尺寸及匝数有关的常数。反抗力矩 $M_r = W\alpha$ 由游丝或张丝提供。如此,平衡(稳定偏转)时

$$\alpha = \frac{K}{W}I = S_I I \quad (1-7)$$

这里, S_I 称作电流灵敏度,即单位电流所能引起的稳定偏转角。由式(1-7)可见,在这种测量机构中,产生转动力矩的电参量是直流电流 I , 因此 I 为它的基本量测量。

磁电系测量机构具有灵敏度高(微安级电流即可使其偏转)、抗外磁场能力强、功率消耗低、形成的仪表的刻度分布均匀等特点;但因电流 I 是通过游丝或张丝引入线圈的,所以过载(即过电流)能力差。此外也不能直接测交流电流。

二、电磁系测量机构

电磁系测量机构的固定部分是一个线圈,当通以电流时产生磁场,使处在该磁场中的静铁片和动铁片同时磁化,于是在两铁片间产生的切线方向排斥力,形成转动力矩,使动铁片带动指针偏转。见表 1-1。转动力矩与磁场强度即电流 I 的平方成比例,亦即

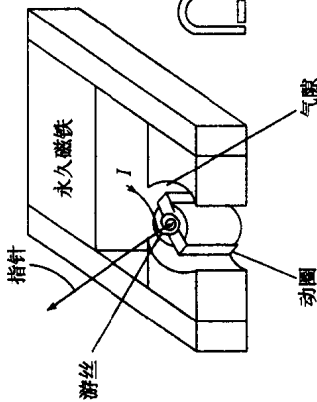
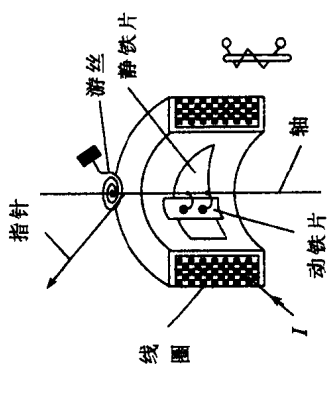
$$M_a = KI^2 \quad (1-8)$$

这里, K 是取决于两铁片形状及其相对位置的系数,可利用 K 控制刻度分布。如静铁片被设计得一端宽、一端窄,目的是获得较大范围的线性刻度特性。反抗力矩 $M_r = W\alpha$ 仍由游丝或张丝提供,如此,稳定偏转角

$$\alpha = \frac{K}{W}I^2 \quad (1-9)$$

此系测量机构的基本量测量是直流电流或交流电流。因随电流亦即工作磁场的交变变化,静、动铁片的磁化极性同时变化,故两铁片间的斥力方向保持不变。

表 1-1 各系电机式指示电表的测量机构及工作原理

电表 系列	结构示意图及符号	工作原理	转动转矩 M_a	反抗转矩 M_r	基本量 测量	电表读数 (偏转角) α	主要用途	特 点
磁 电 系		通过直流电流 I 的动圈处于由永久磁铁提供的均匀分布的气隙中，动圈受力带动指针偏转	$M_a = KI$ I 为通过线圈的直流电流; K 为与动圈的匝数、尺寸及气隙磁通密度有关的常数	由游丝或张丝提供; $M_r = W\alpha$; α 为指针偏转角; W 为游丝常数	直流电流 I	$\alpha = \frac{KI}{W}$	形成不同量程的直流电流表和电压表	高灵敏度、刻度线性
电 磁 系		电流 I 通过线圈产生磁场，使处于磁场中的静铁片和动铁片同时磁化，两者间产生排斥力；固定在转轴上的动铁片带动指针偏转	$M_a = KI^2$ I 为通过线圈的直流电流或交流电流的有效值; K 为与静、动铁片形状及相互位置有关的常数	同上	直流电流或交流电流的有效值 I	$\alpha = \frac{KI^2}{W}$	主要形成交流电流表和电压表	高过载能力(电流表); 改变变动的静铁片形状可控制刻度分布

续表

电表系列	结构示意图及符号	工作原理	转动力矩 M_a	反抗力矩 M_r	基本量测量	电表读数 (偏转角) α	主要用途	特点
电 动 系		通以电流 i_1 的动圈在有电流 i_2 的静圈磁场中受力, 从而带动指针偏转。与磁电系相比, 在这里, 由电流产生的磁场代替了永久磁场	$M_a = K I_1 I_2 \cos \varphi$ I_1, I_2 为通过动圈、静圈的电流的有效值, K 为与线圈匝数、尺寸及相对位置有关的常数, φ 为 i_1, i_2 的相位差	同上	两直流电 流或两交 流电流及 它们间夹 角余弦的 乘积	$\alpha = \frac{K}{I_1 I_2} \cos \varphi$	形成直流、交流电表、电压表和功率表; 可作直、交流转换表	功率表刻度均匀; 对于电压表和电压静圈, 可利用静圈的布置控制刻度分布
感 应 系		交变磁通 Φ_u 和 Φ_i 在圆盘上分别感生出涡流 $i'u$ 和 $i'i$。 $i'u$ 与 Φ_i 作用, 及 $i'i$ 与 Φ_u 作用, 产生使圆盘旋转的力矩	$M_a = K \Phi_{um} \Phi_{im} \times \sin \phi$ Φ_{um}, Φ_{im} 为 Φ_u, Φ_i 的最大值; ϕ 为 Φ_u 与 Φ_i 的相位差; K 为比例常数; f 为频率	利用永久磁铁提供制动力矩 M_M 。参见图 3-11	两交流电通及它们间夹角的正弦的乘积	圆盘转数反映被测有功或无功电能	主要用于形成有功电能和无功电能表	圆铝盘的转数由记度器记录。见图 3-9

续表

电表 系列	结构示意图及符号	工作原理	转动力矩 M_e	反动力矩 $M_e \alpha$	基本量 测量	电表读数 (偏转角) α	主要用途	特 点
静 电 系		电压使两电极上出现异性电荷,产生吸力,结果使一个电极的可动部分发生偏转,从而带动小镜转动	$M_e = KU^2$ U 为加在两电极间的直流电压或交流电压的有效值, K 为与电极形状、结构有关的系数	由游丝或张丝提供; $M_e = W\alpha$; α 为指针偏转角; W 为游丝常数	直流电压 或交流电压	$\alpha = \frac{K}{W} U^2$	形成直流、交流高压电压表	可测量的最低电压约为 10V

由于电磁系测量机构所能建立的磁场较弱,因此灵敏度较低,也易受外磁场干扰;但因电流无需通过游丝或张丝,所以有较强的过载能力。这种测量机构主要用于交流测量。

三、电动系测量机构

用通以电流的固定线圈(又称静圈)代替磁电系测量机构的永久磁铁提供磁场,就形成了电动系测量机构,见表 1-1。电动系机构既可测直流,也可测交流。以交流为例,设 $i_1 = \sqrt{2} I_1 \sin \omega t$, $i_2 = \sqrt{2} I_2 \sin(\omega t - \varphi)$, 则瞬时转动力矩

$$M_{12} \propto i_1 i_2$$

平均转动力矩

$$M_a = \frac{1}{T} \int_0^T M_{12} dt = K I_1 I_2 \cos \varphi \quad (1-10)$$

其中 K 为常数。于是稳定偏转角

$$\alpha = \frac{M_a}{W} = \frac{K}{W} I_1 I_2 \cos \varphi \quad (1-11)$$

即此系测量机构的基本量测量为 $I_1 I_2 \cos \varphi$, 对于直流为 $I_1 I_2$ 。

这种机构的磁场也较弱,因此灵敏度低,且易受外磁场干扰。可加设铁心及磁屏蔽来改善性能。

四、感应系测量机构

感应系测量机构的主要组成部分为一个可旋转的铝圆盘和三个固定的磁极,三磁极的磁通分别是 Φ_u 、 Φ_m 、 $-\Phi_i$ (即反向的 Φ_i)。当这些角频率为 $\omega = 2\pi f$ 的正弦交变磁通穿过铝圆盘时,将会在其中分别产生瞬时感应电动势 e'_i (相量形式

为 $\dot{E}'_i$)和 e'_u (相应相量 $\dot{E}'_u$)。对这些电动势来讲,铝圆盘相当于一个纯阻性导体,因此其中的瞬时电流 i'_i (相量 $\dot{I}'_i$)和 i'_u (相量 $\dot{I}'_u$)与相关电动势同相。 i'_i 与 i'_u 在铝圆盘中的流动路径示于表 1-1 内的结构图中。图 1-2 是这种测量机构的原理性相量图。其中, $\dot{E}'_i$ 与 $\dot{E}'_u$ 分别滞后于 $\dot{\Phi}_{im}$ 和 $\dot{\Phi}_{um}$ 90° , 且 $\dot{I}'_i$ 与 $\dot{E}'_i$ 同相, $\dot{I}'_u$ 与 $\dot{E}'_u$ 同相。

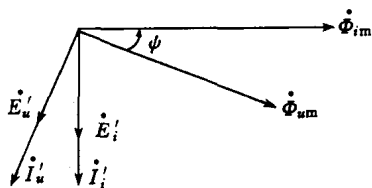


图 1-2 感应系测量机构相量图

流经 Φ_u 磁极面下的电流 i'_i 与 Φ_u 相互作用;流经 Φ_i 和 $-\Phi_i$ 磁极面下的电流 i'_u 与 Φ_i 、 $-\Phi_i$ 相互作用,分别产生瞬时力矩。按照设定的力矩正方向(见表 1-1 中的结构图)总瞬时力矩 M 可表示为

$$M \propto (\Phi_u i'_i - \Phi_i i'_u) \quad (1-12)$$

平均力矩

$$M_a = \frac{1}{T} \int_0^T M dt \propto (\Phi_{um} I'_i \sin \psi + \Phi_{im} I'_u \sin \psi) \quad (1-13)$$

由于 $I'_i \propto \omega \Phi_{im}$, $I'_u \propto \omega \Phi_{um}$, 所以

$$M_a \propto f \Phi_{um} \Phi_{im} \sin \psi \quad (1-14)$$

即感应系测量机构的转动转矩与所加电压(亦即电流)的频率、电压磁通、电流磁通及两磁通