

<http://www.phei.com.cn>

高等学校电工电子实践系列

电工电子实验 与计算机仿真

邹其洪 黄智伟 高 嵩 等编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

高等学校电工电子实践系列

电工电子实验与计算机仿真

邹其洪 黄智伟 高 嵩 等编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是为高等学校电子、自动化、电气工程等相关专业编著的实验课程教材。本书共分9章。第1, 2, 3章介绍了常用电工测量仪表、电子实验测量仪器和电子电路元器件的基本原理及使用方法。第4章介绍了电子工作台 EWB 的基本操作方法, 虚拟电子器件、虚拟仪器仪表和虚拟电路的组建与运行及电路分析方法。第5章为电路原理实验, 第6章为模拟电路实验, 第7章为数字电路实验, 实验项目内容详细完整, 将实际工程实验和计算机虚拟实验有机地结合在一起。第8章介绍 EDA 原理图输入设计方法, VHDL 文本输入设计方法, 组合逻辑电路、时序逻辑电路的 EDA 综合实验。第9章为三相电机和直流电机的性能与控制方法实验。

本书可以作为本科生电子技术基础课程的实验教材, 也可以作为参加全国大学生电子设计竞赛的培训教材。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工电子实验与计算机仿真/邹其洪等编著. —北京: 电子工业出版社, 2003.9

(高等学校电工电子实践系列)

ISBN 7-5053-9117-8

I. 电... II. 邹... III. ①电工试验—计算机仿真—高等学校—教材②电子技术—实验—计算机仿真—高等学校—教材 IV. ①TM-33②TN-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 077923 号

责任编辑: 韩同平

印 刷: 北京大中印刷厂

出版发行: 电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×980 1/16 印张: 32 字数: 740 千字

版 次: 2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 5000 册 定价: 38.00 元

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换; 若书店售缺, 请与本社发行部联系。
联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 bqq@phei.com.cn。

前 言

本书是为高等学校电子、自动化、电气工程等专业编著的实验教材,是根据教育部《关于加强高等学校本科教育工作提高教学质量的若干意见》文件精神和《高等教育基础实验教学示范中心建设标准》要求,参照《高等工程学校电子技术基础课程教学基本要求》,以及《普通高等教育“十五”国家规划教材》的立项要求,编写的一本适应 21 世纪教学改革要求的实验教材。

电工电子实验是配合电子技术基础课程教学的一个非常重要的环节,通过实验能够巩固电子技术基础理论知识,培养学生的实践技能、动手能力和分析问题及解决问题的能力,启发学生的创新意识及创新思维潜力。

本书共分 9 章。第 1 章为常用电工测量仪表,介绍了电工仪表基本知识,指示式仪表的基本结构,电流表、电压表、功率表的原理和使用方法。第 2 章为常用电子测量仪器,介绍了示波器、函数发生器、数字万用表等电子测量仪器的原理、选择及其应用方法。第 3 章介绍了常用电子电路元件、器件的识别与主要性能参数。第 4 章介绍了电子工作台 EWB 的基本操作方法,EWB 的元件及仪器库栏,虚拟电子器件及操作使用,虚拟电路的组建与运行,虚拟仪器仪表使用方法及电路分析方法。第 5 章为电路原理实验。第 6 章为模拟电路实验。第 7 章为数字电路实验。每一章都提供了不少于 20 个的实验项目,有验证型的实验,也有综合设计型的实验,实验项目按照实验目的、实验原理、实验设备与器件、实验内容要求、计算机仿真实验、实验总结和预习要求进行排列,内容详细完整,将实际工程实验和计算机虚拟实验有机地结合在一起。第 8 章是 EDA-FPGA 实验,介绍了现代数字系统的设计方法和 EDA 技术,FPGA 的基本结构,EDA 原理图输入设计方法,VHDL 文本输入设计方法,组合逻辑电路、时序逻辑电路的 EDA 实验。第 9 章介绍了三相电机和直流电机的电机性能与控制方法实验。第 5, 6, 7, 9 章所用实验设备分别为天煌教仪“DGX-1 型电工技术实验装置”、“DZX-1 型电子学综合实验装置”及“DDSZ-1A 型电机及电气技术实验装置”。

本书具有如下特点:一.紧密配合课程内容与课程体系改革和实验教学改革的要求;二.内容详细、完整,能与大多数高等学校实验中心的实验设备配套;三.引进计算机仿真技术,将计算机虚拟实验与传统的实际工程实验有机地结合,提供给学生先进的实验技术和发挥想像力、创造力的空间。

本书可以作为本科生电子技术基础课程的实验教材,也可以作为参加全国大学生电子设计竞赛的培训教材。

本书由南华大学电气工程学院编写,邹其洪完成了第 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9 章的编写,黄智伟提出了整书的基本结构与思路,并完成了第 4, 8 章的编写,高嵩、王彦、赵艳辉、李传琦、管金云和杨璞琼等老师参加了编写工作,南华大学电气工程学院电子信息工程、自动化、电气工程及其自动化、电工电子基础等教研室的老师也提出了不少宝贵的建议,浙江杭州天科技术实业有限公司、杭州天煌电器设备厂给予了大力的支持,在此一并表示感谢。

作 者

目 录

第 1 章 常用电工测量仪表	(1)
1.1 电工仪表基本知识	(1)
1.2 指示式仪表的基本结构	(2)
1.2.1 磁电系仪表的结构和工作原理	(2)
1.2.2 电磁系仪表的结构和工作原理	(4)
1.2.3 电动系仪表的结构和工作原理	(6)
1.3 电流表、电压表及功率表的原理和使用	(7)
1.3.1 电流表的工作原理	(7)
1.3.2 电压表的工作原理	(7)
1.3.3 功率表的工作原理	(8)
第 2 章 常用电子测量仪器	(10)
2.1 电子示波器	(10)
2.1.1 示波器的工作原理	(10)
2.1.2 示波器在电压、相位、时间和频率测量中的应用	(13)
2.1.3 CS—4125A 示波器操作面板说明	(21)
2.1.4 6502 示波器操作面板说明	(25)
2.2 YB1600P 函数信号发生器	(31)
2.2.1 面板说明	(31)
2.2.2 基本操作方法	(33)
2.3 直流稳压电源	(34)
2.4 数字式万用表	(36)
2.5 交流毫伏表	(37)
第 3 章 常用电子电路元器件的识别与主要性能参数	(39)
3.1 电阻器的简单识别与型号命名法	(39)
3.1.1 电阻器的分类	(39)
3.1.2 电阻器的型号命名	(40)
3.1.3 电阻器的主要性能指标	(41)
3.1.4 电阻器的简单测试	(43)
3.1.5 选用电阻器常识	(43)
3.2 电容器的简单识别与型号命名法	(44)
3.3 电感器的简单识别与型号命名法	(48)
3.4 半导体器件的简单识别与型号命名法	(50)
3.4.1 二极管的识别与简单测试	(51)
3.4.2 三极管的识别与简单测试	(53)
3.5 半导体集成电路型号命名法	(54)
3.5.1 集成电路的型号命名法	(54)
3.5.2 集成电路的分类	(56)
3.5.3 集成电路外引线的识别	(57)

第 4 章	电子工作台 EWB	(58)
4.1	电子工作台 EWB 简介	(58)
4.2	EWB 的基本界面	(59)
4.3	EWB 的基本操作	(65)
4.3.1	文件操作	(65)
4.3.2	电路的基本操作	(66)
4.3.3	联机帮助操作	(69)
4.4	电路的创建	(70)
4.4.1	元器件的操作	(70)
4.4.2	电路图选项的设置	(73)
4.4.3	导线的操作	(74)
4.5	仪器的使用	(75)
4.5.1	仪器的基本操作	(75)
4.5.2	数字多用表	(76)
4.5.3	函数信号发生器	(77)
4.5.4	示波器	(78)
4.5.5	波特图仪	(79)
4.5.6	字信号发生器	(80)
4.5.7	逻辑分析仪	(82)
4.5.8	逻辑转换仪	(84)
4.5.9	电压表和电流表	(86)
4.6	电子电路仿真实验举例	(86)
4.6.1	模拟电路仿真实验举例	(86)
4.6.2	数字逻辑电路仿真实验举例	(90)
4.7	电路分析方法	(92)
4.7.1	EWB 的分析菜单	(92)
4.7.2	分析任选项(Analysis Options)	(93)
4.7.3	直流工作点分析(DC Operating Point Analysis)	(96)
4.7.4	交流频率分析(AC Frequency Analysis)	(97)
4.7.5	瞬态分析(Transient Analysis)	(98)
4.7.6	傅里叶分析(Fourier Analysis)	(99)
4.7.7	噪声分析(Noise Analysis)	(100)
4.7.8	失真分析(Distortion Analysis)	(101)
4.7.9	参数扫描分析(Parameter Sweep Analysis)	(102)
4.7.10	温度扫描分析(Temperature Sweep)	(104)
4.7.11	零—极点分析(Pole - Zero Analysis)	(104)
4.7.12	传递函数分析(Transfer Function Analysis)	(106)
4.7.13	直流和交流灵敏度分析(DC&AC Sensitivity Analysis)	(107)
4.7.14	蒙特卡罗分析(Monte Carlo Analysis)	(108)
4.7.15	最坏情况分析(Worst Case Analysis)	(109)
第 5 章	电路原理实验	(111)
5.1	基本电工仪表的使用与测量误差的计算	(111)
5.2	减小仪表测量误差的方法	(114)

5.3	电路元件伏安特性的测绘	(118)
5.4	电位、电压的测定及电路电位图的绘制	(121)
5.5	基尔霍夫定律的验证	(124)
5.6	叠加原理的验证	(126)
5.7	电压源与电流源的等效变换	(129)
5.8	戴维南定理	(132)
5.9	受控源 VCVS, VCCS, CCVS, CCCS 的实验研究	(136)
5.10	典型电信号的观察与测量	(141)
5.11	RC 一阶电路的响应测试	(145)
5.12	二阶动态电路响应的研究	(149)
5.13	R, L, C 元件阻抗特性的测定	(152)
5.14	用三表法测量电路等效参数	(155)
5.15	正弦稳态交流电路相量的研究	(159)
5.16	RC 选频网络特性测试	(163)
5.17	R, L, C 串联谐振电路的研究	(166)
5.18	双口网络测试	(170)
5.19	互感电路实验	(174)
5.20	单相铁心变压器特性的测试	(177)
5.21	三相交流电路中电压及电流的测量	(180)
5.22	三相电路功率的测量	(183)
5.23	单相电度表的校验	(186)
5.24	功率因数及相序的测量	(189)
5.25	负阻抗变换器	(191)
5.26	回转器	(195)
第 6 章	模拟电路实验	(200)
6.1	常用电子仪器的使用	(200)
6.2	晶体管共发射极单管放大器	(205)
6.3	场效应管放大器	(214)
6.4	负反馈放大器	(219)
6.5	射极跟随器	(223)
6.6	差动放大器	(226)
6.7	集成运算放大器指标测试	(231)
6.8	集成运算放大器的基本应用(I)——模拟运算电路	(237)
6.9	集成运算放大器的基本应用(II)——有源滤波器	(242)
6.10	集成运算放大器的基本应用(III)——电压比较器	(248)
6.11	集成运算放大器的基本应用(IV)——波形发生器	(252)
6.12	RC 正弦波振荡器	(257)
6.13	LC 正弦波振荡器	(261)
6.14	函数信号发生器的组装与调试	(264)
6.15	压控振荡器	(267)
6.16	低频功率放大器(I)——OTL 功率放大器	(270)
6.17	低频功率放大器(II)——集成功率放大器	(274)
6.18	直流稳压电源(I)——串联型晶体管稳压电源	(278)

6.19	直流稳压电源(Ⅱ)——集成稳压器	(283)
6.20	晶闸管可控整流电路	(288)
6.21	应用实验——温度监测及控制电路	(292)
第7章	数字电路实验	(298)
7.1	晶体管开关特性、限幅器与钳位器	(298)
7.2	TTL 集成逻辑门的逻辑功能与参数测试	(302)
7.3	CMOS 集成逻辑门的逻辑功能与参数测试	(308)
7.4	集成逻辑电路的连接和驱动	(313)
7.5	组合逻辑电路的设计与测试	(318)
7.6	译码器及其应用	(321)
7.7	数据选择器及其应用	(327)
7.8	触发器及其应用	(333)
7.9	计数器及其应用	(339)
7.10	移位寄存器及其应用	(345)
7.11	脉冲分配器及其应用	(352)
7.12	使用门电路产生脉冲信号——自激多谐荡器	(357)
7.13	稳态触发器与施密特触发器——脉冲延时与波形整形电路	(360)
7.14	555 时基电路及其应用	(366)
7.15	D/A 和 A/D 转换器	(373)
7.16	智力竞赛抢答装置	(379)
7.17	电子秒表	(382)
7.18	$3\frac{1}{2}$ 位直流数字电压表	(387)
7.19	数字频率计	(394)
7.20	拔河游戏机	(400)
第8章	EDA-FPGA 实验	(405)
8.1	EDA-FPGA 实验基础	(405)
8.1.1	EDA 概述	(405)
8.1.2	现代数字系统的设计方法	(405)
8.1.3	EDA 技术	(406)
8.1.4	FPGA 的基本结构	(409)
8.1.5	Xilinx 公司的 Spartan 系列芯片简介	(410)
8.1.6	EDA 原理图输入设计方法	(411)
8.1.7	VHDL 文本输入设计方法	(426)
8.1.8	Xilinx 的 ISE 4.X 软件	(436)
8.2	组合逻辑电路 EDA 实验	(437)
8.2.1	译码器和编码器设计	(437)
8.2.2	加法器设计	(439)
8.2.3	只读存储器设计	(440)
8.3	时序逻辑电路 EDA 实验	(441)
8.3.1	D 触发器、T 触发器及 RS 触发器设计	(441)
8.3.2	寄存器设计	(444)
8.4	EDA 综合实验	(445)

8.4.1	交通灯控制器	(445)
8.4.2	自动售货机设计	(455)
8.4.3	简单异步通信电路设计	(466)
8.4.4	抢答器设计	(473)
8.4.5	PS/2 键盘接口设计	(479)
8.4.6	VGA 彩显接口设计	(481)
第 9 章	电机实验	(484)
9.1	三相异步电动机点动和自锁控制电路	(484)
9.2	三相异步电动机的正反转控制	(486)
9.3	三相鼠笼异步电动机的工作特性	(488)
9.4	直流他励电动机在各种运转状态下的机械特性	(497)
参考文献		(501)

第1章 常用电工测量仪表

1.1 电工仪表基本知识

用来测量电流、电压、功率等电量的指示仪表，称为电测量指示仪表。它不仅可以用来测量各种电量，利用相应变换器的转换，还可以用来间接测量各种非电量，如温度、压力等。

1. 电工指示仪表的基本组成和工作原理

电工指示仪表的基本工作原理都是将被测电量或非电量变换成指示仪表活动部分的偏转角位移量。被测量往往不能直接加到测量机构上，一般需要将测量转换成测量机构可以测量的过渡量，这个把被测量转换为过渡量的部分叫测量线路。把过渡量按某一关系转换成偏转角的机构叫测量机构。测量机构由活动部分和固定部分组成，它是仪表的核心。如图 1.1.1 所示，电工指示仪表一般由测量线路和测量机构两个部分组成。

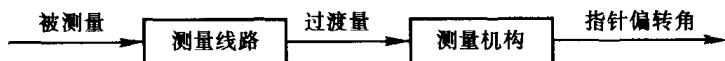


图 1.1.1 电工指示仪表的基本组成

测量机构的主要作用是产生使仪表的指示器偏转的转动力矩，以及使指示器保持平衡和迅速稳定的反作用力矩及阻尼力矩。

测量线路把被测电量或非电量转换为测量机构能直接测量的电量时，测量机构活动部分在偏转力矩的作用下偏转。同时测量机构产生反作用力矩的部件所产生的反作用力矩也作用在活动部件上，当转动力矩与反作用力矩相等时，可动部分便停止下来。由于可动部分具有惯性，以至于可动部分达到平衡时不能迅速停止下来，而是在平衡位置附近来回摆动。测量机构中的阻尼装置产生的阻尼力矩使指针迅速停止在平衡位置上，指出被测量的大小，这就是电工指示仪表的基本工作原理。

2. 常用电工仪表的分类

电气测量指示式仪表种类繁多，分类方法也很多，了解电气测量指示式仪表的分类，有助于认识它们所具有的特性，对了解电气测量指示式仪表的原理有一定的帮助。下面介绍几种常见的电气测量指示仪表的分类方法。

(1) 按仪表的工作原理分类

根据测量仪表的工作原理，指示式仪表有下列几种类型：磁电系仪表，电磁系仪表，电动系仪表，感应系仪表等。

(2) 按测量对象分类

根据测量对象的不同，指示式仪表有电流表、电压表、功率表、欧姆表、电度表以及

多种用途的万用表等。

(3) 按测量电量的种类分类

根据测量电量的类型的不同,指示式仪表分为直流仪表、单相交流表、交直两用表和三相交流表。

(4) 按测量准确度分类

根据测量准确度等级,仪表有 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0 共七个等级。

1.2 指示式仪表的基本结构

指示式仪表是指有指示器直接指出被测量的大小的仪表。本小节主要介绍用于电工电子测量用的磁电系、电磁系和电动系这三类仪表的基本结构和它们的工作原理。

1.2.1 磁电系仪表的结构和工作原理

1. 磁电系仪表的结构

磁电系仪表获得了较为广泛的应用,如直流电流表、直流电压表以及直流检流计等都是属于此类仪表。与其他仪表比较,磁电系仪表具有灵敏度高,功耗小,刻度均匀等优点。

磁电系仪表是一种利用载流可动线圈在固定的永久磁铁磁场力的作用下,使活动线圈发生偏转,从而用指针指出被测量数值大小的一种指示式仪表。它的基本结构如图 1.2.1 所示。它主要由永久磁铁、极掌、铁心、活动线圈、游丝及指针等组成。铁心是圆柱形的,它可使极掌与铁心之间产生一个均匀磁场。活动线圈绕在铝框上,其两端各连接一个半轴,它可以自由转动。指针被固定在半轴上。游丝装在活动线圈上,用来产生反作用力矩,同时还用做活动线圈电流的引线。铝框的作用是产生阻力矩,这个力矩的方向总是与活动线圈转动的方向相反,能够阻止活动线圈来回摆动,使与其相连的指针迅速地静止在某一位置上。但这种阻力矩只有在活动线圈转动时才产生,活动线圈静止时它也随之消失,所以它对测量结果并无影响。

2. 磁电系仪表的工作原理

磁电系测量机构的基本原理是利用活动线圈中的电流与气隙中磁场的相互作用产生电磁力,活动线圈在力矩的作用下产生偏转,因此称这个力矩为转动力矩。活动线圈的转动使游丝产生反作用力矩,当反作用力矩与转动力矩相等时,活动线圈将停留在某一位置上,指针也相应停留在某一位置上。磁电系测量机构产生转动力矩的工作原理如图 1.2.2 所示。

设磁电系仪表均匀磁场的磁感应强度为 B ,活动线圈的匝数为 N ,线圈的有效边长为 L , d 为转轴中心到线圈端的距离,当线圈中通过电流 I 时,则线圈产生的转动力矩为:

$$M = 2NBILd \quad (1.2-1)$$

因为气隙磁场是均匀射状的,不管线圈转到什么位置,磁感应强度 B 均不改变。而对于一个固定的磁电系仪表来说,其线圈的匝数、每一个有效边的长度,以及转轴中心到线圈端的距离都是固定的,所以,转动力矩的大小与被测量电流的大小成正比,其方向取决于电流流进线圈的方向。

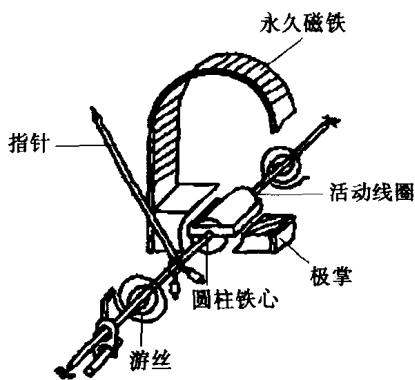


图 1.2.1 磁电系仪表的结构

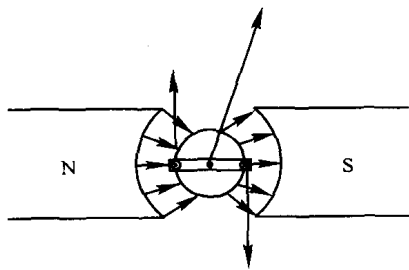


图 1.2.2 磁电系仪表的工作原理图

线圈的偏转将使游丝产生反作用力矩。反作用力矩 M_a 的大小与游丝的偏转角 α 成正比，即：

$$M_a = D\alpha \quad (1.2-2)$$

式中， D 为游丝的反作用力矩系数。

反作用力矩的方向与转动力矩的方向相反，随着偏转角的增大，反作用力矩也将增大；而转动力矩在被测电流不变时是不变的。当反作用力矩增大到与转动力矩相等时，可动部分达到平衡，此时可动部分将停止在某一平衡位置，指针也就停止在某一偏转角。根据物体平衡条件 $M_a = M$ ，得：

$$\alpha = \frac{2NBId}{D} I \quad (1.2-3)$$

由式(1.2-3)可知，指针偏转角 α 正比于被测电流的大小。只需把偏转角均匀地刻度在仪表的标尺上，就可以根据指针在标尺上停止的位置，直接读出被测电流的大小。

3. 磁电系仪表的优缺点

(1) 准确度高。磁电系测量机构磁感应强度很强，可以在很小的电流作用下，产生较大的转动力矩，可以减小由于摩擦、外磁场等原因引起的误差，提高了仪表的准确度。

(2) 灵敏度高。磁电系仪表的磁感应强度很强，在很小的电流作用下，就能产生较大的转动力。

(3) 过载能力差。由于被测电流通过游丝导入可动线圈，游丝和可动线圈的导线都很细，所以电流过大，容易引起游丝发热使弹性系数变化或损坏可动线圈。

(4) 不能直接测量交流。磁电系仪表永久磁铁产生的磁场方向恒定不变，如果在磁电系测量机构中通入交流，则产生的转动力矩就是交变的，可动部分由于惯性作用而来不及转动，指针只能在零位左右摆动，无法获得被测量的测量值。

(5) 表盘刻度均匀。磁电系仪表偏转角与被测电流的大小成正比，因此它的仪表刻度都是均匀的。

1.2.2 电磁系仪表的结构和工作原理

1. 电磁系仪表的结构

电磁系仪表的测量机构常用的有吸引型和排斥型。

(1) 吸引型结构

吸引型电磁系仪表结构如图 1.2.3 所示。它的测量机构由固定线圈和偏心地装在转轴上的可动铁片组成。固定线圈中间有一条窄缝，可动铁片可以转入此窄缝内。固定线圈和可动铁片是产生转动力矩的主要元件。转轴上还装有能产生作用力矩的游丝、指针及阻尼器。

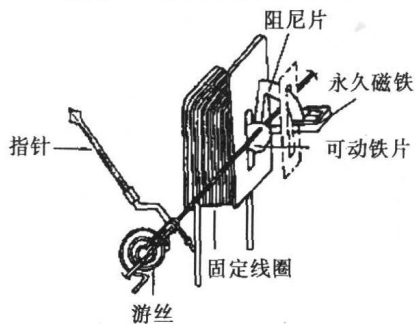


图 1.2.3 吸引型电磁系仪表的结构图

当电流通过线圈时，线圈的附近就产生磁场使可动铁片磁化，且对铁片产生吸引力，从而产生转动力矩，使铁片偏转，引起指针偏转。当线圈中电流方向改变时，线圈磁场的极性改变，被磁化的可动铁片的极性也同时改变，所以不论线圈中电流方向如何，线圈与可动铁片之间的作用始终是吸引力，如图 1.2.4 所示。因此，指针的偏转方向与电流方向无关。这种吸引型机构

可以直接对交流电路进行测量。

(2) 排斥型结构

排斥型电磁系仪表的结构如图 1.2.5 所示。它的固定部分包括圆形的固定线圈和固定于线圈内壁的铁片。可动部分由固定在转轴上的可动铁片、游丝、指针和阻尼片组成。当固定线圈中通过电流后，内部将产生磁场使定铁片和动铁片同时被磁化，而且极性相同，因此它们相互排斥而产生转动力矩。游丝是产生反作用力矩的。阻尼力矩是由阻尼片和永久磁铁组成的磁感应阻尼器产生的。

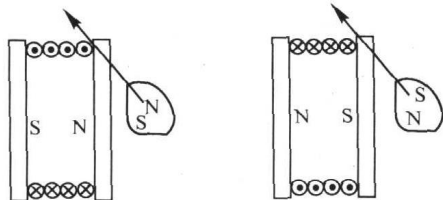


图 1.2.4 固定线圈与可动铁片产生吸引力的示意图

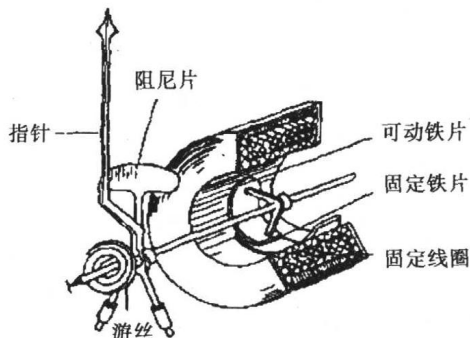


图 1.2.5 排斥型电磁系仪表的结构图

与吸引型测量机构类似，在排斥型测量机构中，不论电流方向如何，在线圈磁场中的定铁片被磁化的极性和动铁片被磁化的极性相同，所以它们之间的相互作用力始终是排斥的。因此，指针的偏转方向与电流方向无关。可见排斥型测量机构同样可以用于交流电路的测量。

2. 电磁系仪表的工作原理

不论哪种形式的电磁系测量机构,都是由通过固定线圈的电流产生磁场的,使处于该磁场中的铁片磁化,从而产生转动力矩。根据电磁系仪表的工作原理,可以得出其转动力矩与固定线圈的匝数的平方成正比,即:

$$M = k(IN)^2 \quad (1.2-4)$$

式中, I 为通过固定线圈的电流, N 为线圈的匝数(IN 为固定线圈的安匝数), k 为与偏转角有关的变量,它与线圈的特性,铁心的形状、尺寸以及线圈的相对位置有关。当可动部分偏转一个角度 α 时,其游丝产生的反作用力矩为:

$$M_\alpha = D\alpha \quad (1.2-5)$$

当可动部分达到平衡时,根据平衡条件有 $M_\alpha = M$, 因此有:

$$\alpha = \frac{M}{D} = \frac{kN^2}{D} I^2 \quad (1.2-6)$$

由此可见,电磁系仪表测量机构指针的偏转角与被测量电流值的平方有关。当被测量电流为交流电流时,其指针的偏转角与被测交流电流有效值的平方有关。

需要注意的是指针的偏转角 α 并不是与 I^2 成正比的。这是因为系数 k 随着偏转角 α 的增大而减小,使仪表的标度尺在有效值的工作部分尽可能均匀一些。总之,电磁系仪表的刻度是不均匀的。

3. 电磁系仪表的优缺点

(1) 过载能力强。因为电磁系测量机构的电流不通过游丝和可动线圈部分,而固定线圈对电流的承受能力较强。

(2) 交直流两用。因为固定线圈的极性与其中被磁化的可动铁片的极性能够随着电流方向的改变而同时变化,使可动铁片与磁场之间的相互作用不发生改变,其转动力矩的方向不发生改变。电动系仪表测量直流时,不存在极性问题。

(3) 准确度低。由于电磁系测量机构中有铁磁物质,而铁磁物质存在着磁滞现象,使得仪表的准确度降低。

(4) 工作频率范围不大。由于固定线圈的匝数较多,对应感抗就较大,且线圈感抗随频率的变化将给测量带来影响。

(5) 易受外界影响。电磁系仪表的磁场较弱,因而外磁场的影响是造成电磁系仪表附加误差的主要原因。为减小外界磁场的影响,一般采用磁屏蔽方法或采用无定位结构。磁屏蔽是把测量机构装在导磁良好的磁屏内,使外磁场的磁力线无法进入测量机构。无定位结构就是将测量机构中的固定线圈分为两部分反向串联,当线圈通电时,两线圈产生的磁场相反,但转动力矩却是相加的。外磁场对测量机构的影响,使一个线圈的磁场被削弱,而另一个线圈的磁场则加强。由于两部分机构是对称的,外磁场的影响就被削弱。

1.2.3 电动系仪表的结构和工作原理

1. 结构

电动系仪表的结构如图 1.2.6 所示。它由固定线圈、可动线圈、指针、游丝和空气阻尼器叶片等组成。固定线圈做成两个，且平行排列，目的是使固定线圈产生的磁场均匀。可动线圈与转轴固定连接，一起放置在固定线圈的两个部分之间。游丝产生反作用力矩，空气阻尼器产生阻尼力矩。

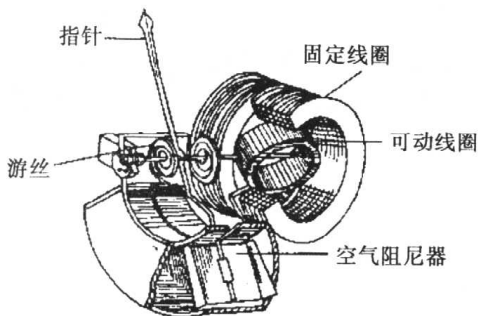


图 1.2.6 电动系仪表的结构图

2. 工作原理

当电动系仪表工作时，固定线圈和可动线圈中都通以电流。设固定线圈中通过的电流为 I_1 ，它的作用是在固定线圈中建立磁场，磁场的强弱除与其电流有关外，还与固定线圈的匝数等参数有关，磁场方向由右手螺旋定则确定。

对于某一个电动系仪表，固定线圈参数是固定不变的，因此，磁场的强弱仅与 I_1 有关，而且正比于 I_1 。当可动线圈中通以电流 I_2 时，磁场将对 I_2 产生一个电磁力，使可动部分获得转动力矩 M 而偏转。其电磁力的大小与磁场的强弱、电流 I_2 的大小，以及可动线圈的尺寸、形状有关，方向由左手定则确定。当 I_1 、 I_2 同时改变方向时，由左手定则可知，电磁力的方向不变，即转动力矩 M 的方向不变。所以电动系仪表既能测直流又能测交流。

当电动系仪表用于直流电路的测量时，由电工学知识可知，转动力矩 M 与电流 I_1 和 I_2 的乘积成正比，即：

$$M \propto I_1 I_2 \quad (1.2-7)$$

当用于交流电路的测量时，有：

$$M \propto I_1 I_2 \cos \varphi \quad (1.2-8)$$

式中， φ 为固定线圈中电流相量与可动线圈中电流相量的相位差。

当可动部分偏转到角度为 α 时达到平衡，其游丝产生的反作用力矩为 $M_\alpha = D\alpha$ ，根据 $M = M_\alpha$ 的平衡条件可知，电动系仪表用于直流电量的测量时，有： $\alpha \propto I_1 I_2$ ；当电动系仪表用于交流电量的测量时，有： $\alpha \propto I_1 I_2 \cos \varphi$ 。

3. 电动系仪表的优缺点

(1) 准确度高。由于电动系仪表中没有铁磁物质，不存在涡流和磁滞的影响，其准确度高。

(2) 可以交直流两用。

(3) 测量参数范围广。电动系仪表能够构成多种线路及多种参数，如电压、电流和功率等。

(4) 易受外磁场影响。电动系仪表的固定线圈较弱。

(5) 过载能力小。由于可动线圈中电流由游丝导入。

(6) 标尺多样化。电动系电流表、电压表的标度尺刻度不均匀, 但功率表的标度尺刻度均匀。

1.3 电流表、电压表及功率表的原理和使用

1.3.1 电流表的工作原理

电流表测量电流时应串联在电路中使用。为确保电路工作不因接入电流表而受影响, 电流表的内阻必须很小。因此, 如果不慎将电流表并联在电路的两端, 则电流表将被烧毁。在使用时必须特别小心。测量直流电流通常采用磁电系电流表, 测量交流电流常采用电磁系电流表。

磁电系测量机构用来测量电流时, 因可动线圈的导线很细, 电流又需经过游丝, 所以允许通过的电流是很小的, 通常只能用做检流计、微安表和毫安表。

如图 1.3.1 所示, 为了扩大磁电系电流表测量的量程, 以测量较大的电流, 在可动线圈上并联电阻 R_d , 使大部分电流从并联电阻 R_d 中流过, 而可动线圈只流过其允许通过的电流。这个并联电阻 R_d 就叫分流电阻或分流器。

这样, 当磁电系电流表电流为 I_s 时, 而分流电阻为 R_d , 则实际上测量的电流大小为:

$$I = \frac{R_s + R_d}{R_d} I_s \quad (1.3-1)$$

根据式(1.3-1)可知, 当需要测量的电流越大时, 则分流电阻 R_d 必须越小。多量程的电流表的表面有几个不同量程的接头, 这些接头与仪表内部相应的分流器相连, 分流器由不同电阻值的电阻构成。使用时根据被测电流量的大小, 选择不同的量程接头。设:

$$n = \frac{I}{I_s} = \frac{R_s + R_d}{R_d} \quad (1.3-2)$$

$$\text{则} \quad R_d = \frac{R_s}{n-1} \quad (1.3-3)$$

式(1.3-3)表明, 将磁电系电流表测量机构量程扩大 n 倍时, 分流电阻 R_d 的值应为磁电系测量电流表机构的内阻 R_s 的 $\frac{1}{n-1}$ 。

用电磁系仪表来测量交流电流时, 根据电磁系仪表的工作原理, 可以把固定线圈直接串联在被测量电路中。由于被测量电流不通过可动部分和游丝, 因而可以制成直接测量大电流的电流表, 而不需要采用分流器来扩大量程。电磁系仪表有时采用固定线圈分段串联的方法来改变量程。

1.3.2 电压表的工作原理

测量直流电压常用磁电系电压表, 测量交流电压通常采用电磁系电压表。电压表是用来测量电源、负载或某元件两端电压的, 因此必须与它们并联。

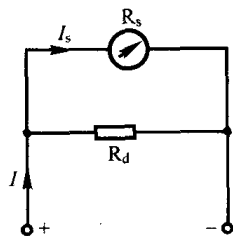


图 1.3.1 电流表的分流

磁电系测量机构的角位移与电流成正比, 而测量机构的电阻一定时, 角位移与其两端的电压呈正比, 将测量机构和被测电路并联, 就能测量其电压。但由于磁电系测量机构的内阻不大, 允许通过的电流又小, 因此测量电压的范围也就很小。为了测量高电压, 可用一只较大的电阻与测量机构串联, 如图 1.3.2 所示, 其中 R_d 为分压电阻。

串联电阻以后, 被测量电压 U 与测量机构本身的两端电压 U_s 之比为:

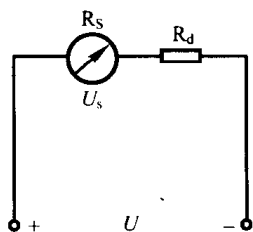


图 1.3.2 电压表的分压

所以

$$m = \frac{U}{U_s} = \frac{R_s + R_d}{R_s} \quad (1.3-4)$$

$$R_d = (m - 1) R_s \quad (1.3-5)$$

式(1.3-5)表明, 将磁电系电压表测量机构量程扩大 m 倍时, 分压电阻 R_d 应为磁电系测量电压表机构内阻 R_s 的 $(m - 1)$ 倍。即需要扩大的量程越大, 分压器的电阻应越高。多量程电压表的表面上具有几个标有不同量程的接线端, 这些接线端分别与表内相应电阻值的分压器串联。使用时根据被测量电压的大小, 选择不同的量程。

电磁系仪表做成电压表时, 电压表量程的扩大方法也同样是采用串联附加电阻的方法。

1.3.3 功率表的工作原理

测量功率与所测量段的电流与电压有关, 因此功率表有固定的电流线圈和可动的电压线圈, 电流线圈与负载串联, 电压线圈与负载并联。常采用电动式仪表作为功率的测量仪表, 功率表的工作原理如图 1.3.3 所示。

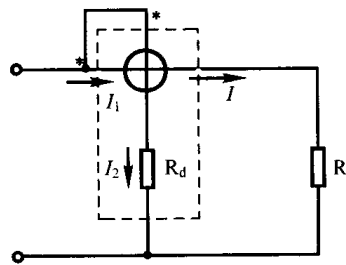


图 1.3.3 功率表的工作原理图

1. 测量直流电路的功率

功率表用于测量直流电路的功率时, 负载电流 I 等于电流线圈中流过的电流 I_1 , 负载电压 U 正比于流过电压线圈的电流 I_2 , 功率表的偏转角 α 正比于负载电压和电流的乘积, 即

$$\alpha \propto UI = P \quad (1.3-6)$$

这样, 电动系仪表的偏转角 α 与被测量段的负载功率 P 成正比。

2. 测量交流电路的功率

由于电压支路中的附加电阻 R_d 比较大, 在一定条件下, 可动线圈的感抗相比之下可以忽略不计。这样可以近似地认为可动线圈的电流 I_2 与负载电压 U 同向。与直流电路相似, 负载电流 I 等于电流线圈中流过的电流 I_1 , 负载电压 U 正比于流过电压线圈的电流 I_2 。在交流电路中, 电动式功率表指针的偏转角 α 与所测量的电压、电流, 以及所测量的电压和电流之间的相位差的余弦成正比, 即:

$$\alpha \propto UI \cos \varphi \quad (1.3-7)$$

由式(1.3-7)可知, 所测量的交流电路的功率为所测量电路部分的有功功率。如不慎将电