



高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材

电 器 学

孙 鹏 马少华 主编



科学出版社

高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材

电 器 学

孙 鹏 马少华 主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了各类低压电器和高压电器所涉及的基本理论和工程分析计算方法。内容包括:电器发热的分析与计算、电器电动力分析与计算、气体击穿及电弧理论、电器绝缘技术、开关电器的电弧及其熄灭原理、电接触理论、电磁系统理论与计算等。

本书重点阐述电器领域所涉及的基本问题及其解决方法,突出理论与工程实际应用的结合,是从事各类电器设备及其元器件开发与应用的工程技术人员不可或缺的理论指导用书。

本书可作为高等院校电气工程类专业的教材,也可供从事各类电器研究、设计、生产、运行与维护等的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电器学/孙鹏,马少华主编. —北京:科学出版社, 2012. 6
(高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材)
ISBN 978-7-03-034965-1

I. ①电… II. ①孙…②马… III. ①电器学-高等教育-教材 IV. ①TM501
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 132585 号

责任编辑:余 江 张丽花/责任校对:林青梅
责任印制:闫 磊/封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2012 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2012 年 6 月第一次印刷 印张: 16 1/4

字数: 402 000

定价: 36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电器元件及设备作为电力系统、配电系统及其他用电系统不可或缺的重要组成,广泛应用于工业、农业、国防、交通及民用生产生活等众多领域。随着我国国民经济的发展,各种应用领域对电器产品的需求量不断增高,对其技术及经济指标的要求也在不断提高。为了适应对电器产品这种不断增长的需求,满足广大从事电器研究、设计及应用的工程技术人员的需求,特别是为了满足高等院校电器专业及其他相关专业培养适应面向 21 世纪应用型电器专业人才的需求,由沈阳工业大学的孙鹏教授和马少华教授,在总结多年从事电器研究及教学工作的基础上,共同执笔完成了本书。

本书系统地介绍了各类低压电器与高压电器所涉及的基本理论和工程分析计算方法,主要内容包括:电器发热的分析与计算、电器电动力分析与计算、气体击穿及电弧理论、电器绝缘技术、开关电器的电弧及其熄灭原理、电接触理论、电磁系统理论与计算等。

本书贯彻理论联系实际的原则,突出知识的专业性、实用性和先进性,在系统介绍电器相关理论的基础上,重点突出电器设计及应用领域中所涉及问题的分析与解决方法和手段。为使学生及读者能够更加清晰地了解并掌握电器学所涉及的基本理论及相关问题的解决方法,本书始终遵循以下宗旨:

(1) 专业知识传授的系统性。全书汇总电器专业领域所涉及的基本理论及相关技术,概括了电器元件及电器设备所必须遵循的基本规律,其中包括电器正常工作状态下所具备的基本特性,以及非正常状态下电器可能出现的问题。例如,电器通电工作时,导体及其他部件的发热、电器零部件所遭受到的电动力、电器的绝缘、气体击穿的机理、开关电器的电弧及其熄灭原理、相互导电的导体间所形成的接触电阻及发热、开关电器触头材料的磨损、电磁系统中的基本特性等。

(2) 基本理论叙述的层次性。书中所涉及理论的阐述均以典型电器为研究对象,首先介绍该电器工作过程中可能出现的物理现象,并详细分析其对电器本身及相关设备或电路可能造成的(正面和负面)影响,从而使学生及读者能够初步了解电器设计及应用过程中所应注意的关键知识点。其次,根据典型电器的特点,建立能够描述所研究物理过程的物理模型,进而推导出相关的数学模型。最后,采用合适的数学方法求解上述数学模型,实现对所研究物理过程的理论解释。

(3) 专业知识的实用性。本书在阐述电器相关基本理论的同时,注重理论在工程中的实际应用,特别是在所研究问题的解决方法方面,重点介绍适合电器领域实际应用的数学方法,从而为电器专业技术人员分析问题和解决问题提供有效的帮助。

(4) 专业知识的先进性。书中所介绍的专业知识充分考虑到电器及其他相关技术的发展动态,对于复杂问题的研究主要以计算机作为解决问题的辅助工具,摒弃了部分烦琐的传统手工计算方法,从而使得电器相关参数或特性的计算更加便捷,计算结果的精度更高。

本书的第 1 章、第 2 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章、第 8 章由孙鹏教授编写,第 3 章、第 7 章、第 9 章、第 10 章由马少华教授编写。

大连理工大学邹积岩教授对本书进行了仔细审阅,并提出许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不妥和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 电器概论	1
1.1 电器的定义和分类	1
1.2 电器的组成及典型结构原理	4
1.3 电器学涉及的主要理论	7
1.4 电器技术的发展及其展望	8
思考题与习题.....	8
第 2 章 电器导体的发热及其计算	10
2.1 电器的发热及其极限允许温升.....	10
2.2 电器发热的热源.....	13
2.3 电器中的热传递形式.....	17
2.4 牛顿冷却定律.....	22
2.5 电器表面稳定温升计算.....	22
2.6 不同工作制下电器的热计算.....	24
2.7 电器典型发热部件的稳定温升分布.....	29
2.8 短路电流下的热计算和电器的热稳定性.....	36
思考题与习题	38
第 3 章 电器中的电动力计算	40
3.1 电器中的电动力现象.....	40
3.2 计算电动力的基本方法.....	42
3.3 电器中典型导体系统的电动力计算.....	43
3.4 单相正弦交流下的电动力.....	48
3.5 三相正弦交流下的电动力.....	51
3.6 电器的电动稳定性.....	55
思考题与习题	56
第 4 章 气体放电理论	57
4.1 气体放电的主要形式.....	57
4.2 气体的电离与消电离.....	59
4.3 气体间隙的击穿理论.....	68
思考题与习题	77
第 5 章 电器绝缘技术	79
5.1 电器绝缘的基本要求.....	79

5.2	绝缘材料及其基本要求	81
5.3	气体击穿电压及其极性效应	83
5.4	持续作用电压下空气间隙的击穿电压	87
5.5	操作冲击电压下空气间隙的击穿电压	89
5.6	雷电冲击电压下空气间隙的击穿电压	91
5.7	提高电器气体绝缘的措施	93
5.8	液体、固体绝缘材料	95
	思考题与习题	100
第6章	开关电器中的电弧及其熄灭原理	101
6.1	开关电器开断电路时电弧的产生过程	101
6.2	电弧的基本物理特性	102
6.3	直流电弧的基本特性	109
6.4	直流电弧的熄灭原理	115
6.5	交流电弧的基本特性	118
6.6	交流电弧的熄灭原理	124
6.7	弧隙的电压恢复过程	133
	思考题与习题	145
第7章	电接触理论	147
7.1	概述	147
7.2	接触电阻理论及其计算	149
7.3	φ - θ 理论和接触电压	156
7.4	触头闭合过程的振动分析	159
7.5	触头间的电动斥力	163
7.6	触头的熔焊与焊接力	164
7.7	触头的质量转移及电磨损	167
	思考题和习题	170
第8章	电磁系统磁路计算	171
8.1	概述	171
8.2	磁路的基本概念及基本定理	177
8.3	气隙磁导计算	184
8.4	直流磁路计算	190
8.5	永磁磁路计算	206
8.6	交流磁路计算	212
	思考题与习题	220
第9章	电磁系统的吸力计算与静态特性	223
9.1	电磁系统的磁场能量	223

9.2	能量转换与电磁力的普遍公式	225
9.3	麦克斯韦电磁吸力公式	227
9.4	交流电磁系统吸力的特性与分磁环原理	228
9.5	电磁系统静态吸力特性与反力特性的配合	231
	思考题与习题	233
第 10 章	电磁系统的动态特性	234
10.1	概述	234
10.2	电磁系统的动态特性方程	235
10.3	直流电磁系统的吸合过程	236
	思考题与习题	250
	参考文献	251

第 1 章 电器概论

电能是一种使用方便且易于远距离输送的能源,在国民经济中起着十分重要的作用。电能的生产(发电)、输送和使用必须借助于大量电器才能得以实现。例如,发电厂中,发电机将其他形式的一次能源(势能、燃烧热能、核能、太阳能、风能等)转换为电能,而安全可靠的发电过程需要众多电器的参与才能得以实现,其中包括发电机运行控制电器和保护电器。

通常,汽轮发电机的额定电压为 10.5kV,水轮发电机的额定电压 13.8kV,为了能够将发电厂所生产的电能高效地远距离输送,必须将电压升高至 110kV 以上,而且电能输送的距离越远,输送电能的电网的电压等级就越高。为了保证高压输电系统安全可靠的运行,电力系统必须装备完善的调度控制和继电保护装置,其中包括各种类型的开关电器,开关电器是电力系统实现输送电能不可缺少的重要装备。由远方发电厂输送的高压电能通常必须经过具有降压功能的配电系统转化为较低电压的电能才能最终被终端用户所使用,这一电能的分配过程同样需要大量的控制电器和保护电器。电能用户利用电能完成种类繁多的任务,必须借助于特定功能的电器才能得以实现。

概括而言,电器可以应用于工业、农业、国防、交通以及民用生产生活等众多领域。电器产品的种类非常繁多,电器设计与制造涉及许多相关的理论和技术。作为揭示和研究电器机理的一门学科,电器学重点研究电器所共有的特性和机理。本章在给出电器定义和分类的基础上,通过典型电器的结构和工作原理,简要介绍电器所涉及的基础理论。

1.1 电器的定义和分类

1.1.1 电器的定义及其应用领域

1. 电器的定义

作为系统中的元件或设备,电器可以执行指定的操作或实现特定的功能,通常情况下完成上述操作或实现上述功能时,电器必须使用电能或对电信号进行处理。概括而言,凡是利用电能或电信号完成特定操作或实现特定功能的用电元件或设备均可归类于电器范畴,由此可见,电器产品的应用范畴非常广泛,它可以包括所有的用电元件或设备。

电器是一种电气元件或设备,它可以根据外界给定的指令(信号),自动或手动地接通和断开电路,断续或连续地改变电路参数,从而实现对电气量或非电气量的切换、控制、保护、检测、变换和调节等功能。

2. 应用领域

根据电器的定义可知,电器产品的应用领域非常广泛,例如:

(1) 应用于电力系统或配电系统的开关电器,可以实现电力系统或配电系统的合闸、分断以及转换操作。

(2) 应用于电力系统或配电系统的保护电器,可以为电力系统或配电系统的元件、设备提

供各种故障或不正常运行状态的保护功能。

(3) 应用于电力拖动系统中的控制电器,可以完成用电设备的操作控制任务,或完成对电动机的启动、停止、正转、反转的控制任务。

(4) 在电气系统或设备中,完成电量信号或非电量信号的传递、变换、放大功能,以达到相关信号量的自动检测或调节与控制的电工器械等。

1.1.2 电器的分类

由于电器的种类繁多,有必要将常用电器按一定的准则分类。根据不同的分类准则,电器可以有多种分类方式。

1. 按对电路的作用分类

(1) 开关电器:实现对电路的接通与分断任务,例如断路器、接触器、继电器、刀开关、按钮等。

(2) 非开关电器:主要完成对电气量或非电气量的测量、变换或放大等任务,例如电压互感器、电流互感器、传感器以及各种不同于开关电器的各类电器。

2. 按电器动作的动力源分类

(1) 手动操作电器:电器的动作是由外界作用力,特别是依靠人工完成的,例如刀开关、按钮、主令电器以及手动变阻器等。

(2) 自动操作电器:电器的动作是由该电器自身通过给定的指令、并在特定的驱动能(电能或其他机械能等)的作用下完成的,自动操作电器可以实现远程或自动控制操作。例如断路器、(自动)隔离开关、接触器、继电器等。

3. 按电压等级分类

(1) 低压电器:额定交流电压在 1200V、额定直流电压在 1500V 及以下的电器,例如低压断路器、低压熔断器、接触器、控制器、启动器、继电器、低压电压互感器、高压电流互感器、变阻器、主令电器、电阻器和变阻器等。

(2) 高压电器:额定电压在 3kV 及以上的电器,例如高压断路器、隔离开关、避雷器、高压电抗器、高压电压互感器、高压电流互感器等。

4. 按工作职能分类

(1) 保护电器:完成被保护线路或设备安全运行的保护作用,例如保护继电器、熔断器、避雷器,以及各种继电保护电器或装置等。

(2) 自动控制电器:完成不同设备或器械的自动或异地控制,例如,各种接触器、各种控制继电器等。

(3) 启动调速电器:实现各种电动机的启动控制,例如电磁启动器、星-三角启动器、自耦补偿启动器、变阻器以及某些调速装置等。

(4) 稳压与调压电器:例如自动调压器、自动稳压器及其装置。

(5) 测量、放大与变换电器元件:例如,各种传感器、磁放大器、高低压电流互感器、电压互感器等。

(6) 牵引与传动电器元件：主要完成动力的传递任务，例如，各种操作和牵引电磁铁以及机械负载传动用电磁离合器等。

5. 按电器用途分类

(1) 电力系统用电器：电力系统中使用的各种电器，其中包括高压断路器、高压熔断器、电压互感器、电流互感器、电抗器、避雷器、低压断路器、低压熔断器以及其他继电保护电器等。对实现电力系统接通与分断任务的高压开关电器而言，其主要技术要求是通断能力强、动热稳定性高、操作过电压低。对保护电器则要求其具备完善的保护性能。

(2) 电力拖动及自动控制系统用电器：例如接触器、启动器、控制器、控制继电器等。对此类电器的主要技术要求是转换能力强，动作时间快，操作效率高，电气和机械寿命长。

(3) 自动化通信及其他弱电系统用电器：该应用领域的最大特点是电器的工作电压低、工作电流非常小，例如微型继电器、舌簧管、磁性或晶体管逻辑元件等。对此类电器的主要技术要求是动作时间快，灵敏度高，抗干扰能力强，特性误差小，寿命长和工作绝对可靠。

6. 按使用场合和工作条件分类

(1) 一般工业企业用电器：适用于大部分工业企业生产环境。

(2) 特殊工矿企业用电器：用于矿山、冶金、化工等特殊环境的电器，例如矿用防爆电器和化工用电器，此类电器应具备良好的防火和防爆功能，以及其他适合特殊使用环境的性能指标。

(3) 农用电器：适合农村环境而专门生产的电器。

(4) 热带用电器和高原用电器：适合热带、亚热带地区以及高原山区而派生的电器，此类电器应具备在高温、高湿和高海拔环境下可靠工作的能力。

(5) 牵引、船舶、航空等电器：电气化铁路用的牵引电器、船用电器、航空电器以及汽车、拖拉机等专用电器等，此类电器必须具备在特殊使用环境下 ze 常工作的能力，例如，船用控制电器除了具备控制功能外，对其抗潮湿和高钠侵蚀有较高的要求；航空电器则必须保证在低气压环境下能够完成规定的任务。

7. 按开关电器的转换深度分类

对于开关电器而言，在执行电路通断任务的转换过程中，引入转换深度的概念

$$h = \frac{R_{DK}}{R_{JT}}$$

式中， R_{DK} 为断开或截止时，开关电器执行电路的电阻值； R_{JT} 为接通或导通时，开关电器执行电路的电阻值。

(1) 有触点电器：开关电器通断的执行功能是由触点(头)结构来实现的。有触点开关电器在接通电路时，其执行电路的电阻值通常很小；而当断开电路时，其执行电路的电阻值却非常大，因此有触点开关电器的转换深度较高， $h = 10^{10} \sim 10^{14}$ 。常见的各种接触器、继电器等大多属于有触点开关电器，其典型结构特点在于电路的接通与分断是由具备触点(头)结构的执行机构来最终实现的。正是由于有触点开关电器具备的高转换深度，从而保证在接通电路时，开关电器的执行电路电能损耗小，对被控电路的影响也较小；断开电路后，其执行电路的电阻非常高，从而可以保证电器的耐压水平得以提高。因此，高压开关电器基本上属于有触点开关电器。然而，当有触点开关电器开断具有一定能量的电路(负荷)时，触点(头)间将会产生电

弧,这种具有极高温度的电弧对触点(头)具有一定的烧损,从而影响开关电器的使用寿命。此外,电弧的产生还会影响被控电路的工作。

(2) 无触点开关电器:开关电器通断的执行功能不是由触点(头)结构来实现的,而是根据开关电器输出信号的高低电平来实现的,例如,各种无触点继电器等。无触点开关电器接通电路时,其执行电路仍具有一定的电阻值;而当电路断开时,其执行电路的电阻相对有触点开关电器而言较小。因此,无触点开关电器的转换深度较低, $h=10^4\sim 10^7$ 。无触点开关电器的特点是开断电路(负荷)时,不产生电弧。但是,接通电路时,由于其执行电路电阻要比有触点开关电器的高,所产生的损耗也较大,其发热问题较突出。特别是电路开断后,其执行电路的电阻值相对较小,不利于其耐压水平的提高。因此,无触点开关电器通常应用于低压领域。

(3) 混合式开关电器:有触点和无触点相结合的开关电器,其转换深度介于两者之间。

1.2 电器的组成及典型结构原理

1.2.1 电器的基本组成

如上述所述,电器产品的种类繁多,应用领域非常广泛,其构成及工作原理也多种多样。但是,它们也存在一定的相同或相似之处。从系统的观点看,无论是结构简单的电器元件,还是结构复杂的成套电器均是系统中的一个元件,它具有接受外界指令信号或信息的输入部分,并含有完成特定工作的输出部分。结构上,电器的基本组成包括感测器官、逻辑判断器官、执行器官、传动或操动机构等。

电器的感测器官主要是接受外界指令或信号,或提取相关信息,为完成电器特定任务提供必要的输入信息。

电器的逻辑判断器官主要完成对电器感测器官所接受的输入信息进行必要的逻辑判断,以便确定电器的工作状态。

电器所要完成的任务则是由电器的执行器官来实现的,例如,有触点开关电器对电路的接通或分断是由有触点开关电器的触点(头)来完成的。所以,触点(头)就是有触点开关电器的执行器官。

有些电器工作时需要一定的动力,以便驱动电器的执行器官做功,从而完成电器特定的工作任务,这就需要能够完成执行器官做功的传动或操动机构。例如,电磁式开关电器的电磁操动机构,可以实现开关电器触点(头)的闭合、分断操作。

需要指出的是,并不是所有的电器都具备上述组成,根据电器所需完成的工作任务,有的电器具备上述全部组成,而有的仅具备部分组成。例如,电磁式电压互感器仅具备感测器官,它是由电压互感器的一次线圈、铁心和二次线圈构成。作为输入部分,电压互感器的一次线圈侧取被测电压,并通过其输出部分(二次线圈)输出与被测电压成正比的测量电压。其他传感器类大多也具备类似电压互感器的基本组成。

作为故障保护电器的熔断器则具备了感测器官、逻辑判断器官和执行器官,而且这些器官的功能均是由熔断器中的熔体来实现。当故障电流流过熔体时,熔体由于其电阻损耗而发热,此时,熔体相当于感测器官。当故障电流足够大或故障时间足够长时,熔体的温度将会达到熔体材料的熔点温度,从而导致熔体的熔化并产生电弧,在熔断器中灭弧介质的作用下,电弧最终被熄灭,故障线路或设备最终被从系统中切除,从而实现了短路故障或过流的保护。此时,熔体实现了逻辑判断和任务执行功能。通常,熔断器没有机械运动部件,因此,不含有传动

或操动机构。

电磁式继电器则具备了感测器官、逻辑判断器官、执行器官和操动机构等基本组成,是具有代表性的电器产品之一,其他电磁式开关电器大多具有与电磁式继电器相类似的组成,例如具有电磁或永磁操动机构的断路器、接触器等。因此,通过对电磁式继电器基本结构的研究,可以实现对电器产品共性的了解,进而掌握电器的基本理论及相关技术。

1.2.2 电磁式继电器的基本结构及其工作原理

1. 基本结构

图 1-1 所示为电磁式继电器的基本结构示意图。

电磁式继电器主要是由以下几部分所构成:电磁系统、触头系统、灭弧系统。

电磁系统由激磁线圈 1、铁心柱 2、轭铁 3、衔铁 4 和系统反力弹簧 5 等组成,而止挡 6 的作用是限制衔铁 4 的旋转角度,从而限定衔铁 4 与铁心柱 2 之间气隙 δ 的大小。

触头系统由常闭触点 c_0 和 c_1 以及常开触点 c_2 构成,其中触点 c_0 在衔铁 4 的作用下可以运动,因此被称为动触点;触点 c_1 和 c_2 则被固定于绝缘支架 7 上而相对静止,故被称为静触点。

灭弧系统则是由动静触点间的空气气隙所构成。

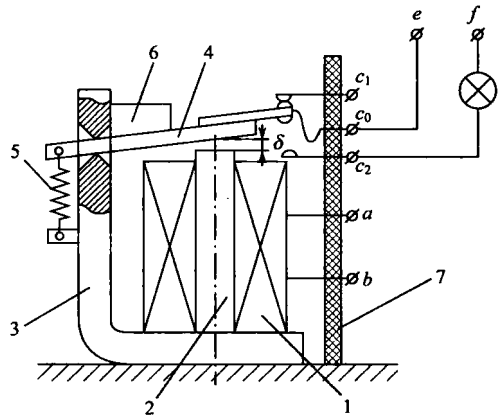


图 1-1 电磁式继电器的基本结构

传统意义上讲,电磁式继电器不具备特殊设计的灭弧系统,触点开断电路时所产生的电弧仅通过对电弧的拉长来熄灭,因为继电器触头系统所控制的线路或设备的功率较小,切断电路或设备时触点间所产生电弧的能量也很小,这种简单的灭弧措施即可满足需要。对于需要控制更高功率的接触器和断路器则必须装配完善的灭弧系统,触头系统的尺寸也相对增大,因此,工程上通常将构成接触器和断路器触头系统的接触元件称为动触头和静触头,而在继电器触头系统中则被称为动触点和静触点。

电磁式继电器的感测部分是由电磁系统组成的,其逻辑判断器官由电磁系统和反力弹簧等部件组成,其执行器官由触头系统所构成,而其操动机构则由电磁系统、反力弹簧等部件组成。

2. 工作原理

(1) 激磁线圈通电后,作为感测器官的电磁系统中的激磁线圈电流将逐渐增加,该激磁电流在电磁系统中产生磁通,其中衔铁与铁心之间气隙中的磁通(称为工作气隙磁通)将作用于衔铁,随着工作磁通逐渐增加,作用于衔铁上的电磁吸力(转矩)也越来越大。作为逻辑判断器官的电磁系统将比较电磁系统所产生的电磁吸力和系统反力的大小,以确定电器下一步的工作。当电磁吸力大于系统反力时,衔铁将绕其转动轴转动,即向铁心方向转动(此过程被称为衔铁的吸合),衔铁的转动又会带动其执行器官(触头系统)中动触头 c_0 的运动,从而实现常闭触头的分开和常开触头的闭合。其中,电磁系统即充当了电器的感测器

官,同时也担负起其执行器官动作的动力提供的任务,因此,电磁系统与反力弹簧共同作用构成电器的操动机构。

(2) 激磁线圈断电后,激磁线圈电流逐渐减小,电磁系统中由此所产生的磁通也逐渐降低,工作气隙磁通也随之降低,作用于衔铁上的电磁吸力越来越小。当电磁吸力小于衔铁反力时,衔铁在系统反力的作用下开始向其初始位置转动(此过程被称为衔铁的释放过程)。动触点必然随之向其初始位置运动,直至常开触点、常闭触头的复位。

3. 继电器的主要参数

电磁式继电器是应用最广泛的电器之一,特别是在自动控制、通信系统以及继电保护系统中被大量使用,其相关特性及参数将影响到应用领域的工作。

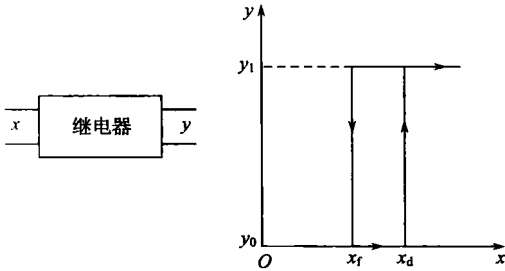


图 1-2 继电器的输入-输出特性

如果将继电器的激磁线圈输入端看成是元件的输入,而将触头系统中的触点看成是元件的输出,则继电器作为应用系统中的元件,其输入-输出特性如图 1-2 所示。其中输入量 x 可以是电压(并联式激磁线圈)或电流(串联式激磁线圈),其输出量 y 则代表触点的状态。例如, y_0 可以表示常开触点的初始状态(打开状态), y_1 则表示常开触点动作后的状态(闭合状态);或者 y_0 可以表示常闭触点的初始状态(闭合状态), y_1 则表示常闭触点动作后的状态(打开状态)。因此,继电器的输出可以根据系统需要加以定义。

假设图 1-2 所示的继电器具有并激式激磁线圈,且 y_0 为常开触点的初始状态, y_1 为常开触点动作后的状态,当输入量 x (电压)从零逐渐增大时,只要 $x < x_d$,继电器的输出状态就不会改变,即继电器的常开触点仍处于其初始打开位置。当 $x = x_d$ 时,继电器的输出状态将从 y_0 跃变至 y_1 ,即继电器的常开触点从其打开位置转变到其闭合位置,这里 x_d 被称为继电器的动作值。当 $x > x_d$ 时,继电器常开触点的状态将不再发生改变,即常开触点保持闭合状态。

此后,逐渐降低 x ,直至 $x = x_f$ 。在该 $x = x_f$ 时刻之前,继电器常开触点始终处于闭合位置,尽管输入量 x 可能已经低于 x_d 。只有当 $x = x_f$ 时,继电器的常开触点才从闭合状态跃变回其打开状态(初始位置),而且随着 x 进一步减小,这一状态将始终保持不变,这里 x_f 被称为继电器的返回值。因此可以看出,电磁式继电器的动作值大于其返回值,二者之差 Δx 被定义为回差。这种输出状态改变时其动作值大于其返回值的特性,被称为继电器(开关电器)的继电特性。

(1) 返回系数(或称恢复系数)

$$K_f = \frac{x_f}{x_d} \quad (1-1)$$

式中, x_d 为继电器的动作值; x_f 为继电器的返回值。

返回系数的大小反映了继电器继电特性的明显程度,通常电磁式继电器的返回系数小于 1。

(2) 控制系数: 继电器触点上输出的控制功率 P_c (即继电器触点的工作电压乘以允许的触点最大通断电流)和线圈吸取的最小动作功率 P_0 之比

$$K_c = \frac{P_c}{P_0} \quad (1-2)$$

控制系数反映继电器的功率控制能力。

- (3) 灵敏度：继电器在规定负载条件下的最小动作功率 P_0 。
- (4) 吸合动作时间：继电器从获得输入信号起到触头完成动作止的时间。
- (5) 释放时间：继电器从断开输入信号起到触头完成动作止的时间。

1.3 电器学涉及的主要理论

如前所述,电器产品种类繁多,其结构及工作原理也不尽相同,然而,各种电器正常工作时,必须遵循一定的规律,如果违反这些规律,则电器将不能正常工作,严重时还会造成事故。电器学所研究的就是电器所应遵循的规律,由此总结出的相关理论是电器研究、设计和生产的基础。

根据电器的基本定义,电器是一种电气元件或设备,因此,电器学理论也必然基于电学和磁学理论。例如,通电导体将会发热,这就涉及电器的发热理论;载流导体在磁场中将会受到电动力的影响,这涉及电器的电动力理论;电流产生磁场,特别是在良好导磁材料中,这一现象更加明显,而磁场中磁力线的收缩特性,将会在导体与空气交界面产生电磁力,这就涉及电器的电磁机构理论;两导体相接触时,在其接触面处会产生附加的接触电阻,这将涉及电器的电接触理论;在有触点开关电器中,当其触头分断具有一定能量的电路(负荷)时,会在触头间产生电弧,这些将会在电器学的电弧理论中加以研究。

1.3.1 电器发热和电动力理论

电器的发热理论将研究电器在长期、短时和反复短时工作制下的发热、冷却过程及其过载能力。同时,将会研究导电部件在大电流但通电时间极短(例如导线上存在短路电流)作用下电器的发热,并校验导体在短时温升下的可靠程度。

电器电动力理论将研究各种几何形状载流体在不同形式电流作用下、在不同空间或平面分布时所受到电动力,以及如何计算该电动力,并考核电器在短路电流作用下的电动稳定性。

1.3.2 电弧理论

电弧是有触点开关电器在分断电路过程中所产生的物理现象。开关电器触头上电弧的存在不仅延缓了电路开断的时间,而且还灼伤触头表面,使之工作不可靠和缩短使用寿命。当然,触头上的电弧也是线路中电磁能泄放的场所,在一定程度上可以减轻线路开断时的过电压。对开关电器而言,电弧则是弊多利少。因此,揭示气体放电以及电弧的形成机理,并尽快将电弧熄灭正是电器学中的电弧理论所要研究的。

1.3.3 电接触理论

电接触理论的主要研究内容包括电接触的物理与化学过程,电接触的热、电、磁以及金属变形等各种效应,接触电阻的物理化学本质及其计算,电接触元件当接触和分开过程中电接触元件的腐蚀磨损和金属迁移,触头在闭合操作过程中的振动、磨损和熔焊等。

1.3.4 电磁机构理论

电磁机构是自动化电磁式电器的重要组成部分,在电器中占有十分重要的位置。电器中电磁机构或电磁装置的结构型式很多,它既不同于变压器的静止铁心,又不同于旋转电机不变的均匀气隙,而是一种具有可动铁心和可变气隙的电磁装置。因此,电磁机构理论是涉及电磁—力—运动的综合理论。

1.4 电器技术的发展及其展望

电器行业的产生和发展是和电能的使用分不开的。无论是在强电领域还是在弱电领域都需要使用电器。在强电领域中,根据电器所控制的对象有电力系统与配电系统和电力拖动两大应用领域。

在电气拖动领域,电器的发展历程如下:

- (1) 从手动操作到自动操作的过程。
- (2) 从开关、调节和保护的作用发展到更多功能(例如控制、检测和变换等)的过程。
- (3) 从有触点电器发展到无触点电器的过程。
- (4) 从单个元件发展到组合电器和成套装置的过程。

在电力系统与配电系统领域中,电器的发生和发展的演变过程亦相类似。

电器应用初期,低压电力网广泛使用刀开关和熔断器。利用刀开关可以完成正常情况下切换电路和隔离电路的作用;而熔断器则在故障情况下起到对电路或用电设备过载和短路的保护作用。熔断器结构简单,只能一次性操作,一旦熔断器动作后,即其熔体熔断后,必须更换熔体或整个熔断器;刀开关一般只能手动投入,不适宜远程操作,而且执行机能也弱,不能满足电力系统传输功率越来越高的需要。于是开发出了具有更强的执行机能和感测机能的自动空气断路器。

20世纪50年代,随着电力系统容量的不断扩大,发生短路故障时,短路电流也越来越大,从 10^4 A数量级增大到接近 10^5 A数量级。巨大的短路电流不仅使开关本身通断困难,而且还使系统内的电工设备因热稳定和动稳定不足而受损。为了保证供电的可靠性,提高断流容量,配电系统对配电电器提出了限流的要求,并随之研制成了具有一定的限流性能的限流熔断器和限流断路器。

电力系统中的核心设备——高压断路器的结构演变是随着灭弧原理与灭弧装置不断创新而发展的,它经历了从多油灭弧到少油灭弧;从压缩空气吹弧到真空灭弧;从一般的空气、油气到 SF_6 负电性气体灭弧。不仅如此,高压电器从户外式、户内式单独结构上发展到 SF_6 全封闭组合式结构。

总而言之,电器产品和电器技术由于电力系统及配电系统和自动化拖动系统的推动,它的发展是十分迅速的。电器技术理论和电器产品结构正处于不断更新和全面提高的阶段。传统的有触点电器在结构原理、最佳结构设计和应用新材料、新工艺方面不断创新和完善;真空电器、半导体电器以及其他新型电器,如微电子技术和电器结合的机电一体化电器或智能化电器亦在开拓发展;单件电器向着组合化、成套化发展。

思考题与习题

1-1 电器可以完成或实现哪些功能或任务?

- 1-2 何谓开关电器的转换深度?
- 1-3 有触点开关电器和无触点开关电器各有哪些优缺点?
- 1-4 电器有哪些基本组成? 各基本组成可以实现哪些功能? 在某一具体电器中是否全部具备这些基本组成? 举例说明。
- 1-5 试阐述电磁式继电器的工作原理。
- 1-6 何谓电磁式继电器的继电特性?

第 2 章 电器导体的发热及其计算

2.1 电器的发热及其极限允许温升

众所周知,电器工作时必须施加一定的电源,使其能够在规定的电压及电流条件下完成特定的工作或任务。电器在电压及电流驱动下除了能够完成特定工作外,还会产生其他附带结果,例如,当电流流过电器导体时会产生电阻损耗。宏观意义上讲,电器工作时必然处于一定的电磁工作环境中,根据构成电器零部件所采用的材料及其结构的不同,会造成电器零部件产生能量损耗。通常情况下,这些损耗几乎全部转变为热能,其中的一部分热能散失到周围介质中,而另一部分则加热电器,使其温度升高。

1. 电器工作时发热的原因

导致电器发热的根本原因是电器工作时产生的损耗,根据电器零部件材料的不同可能产生的损耗如下。

- (1) 电阻损耗: 电流通过电器中导体并在导体中产生能量损耗。
- (2) 铁磁损耗: 在交变磁场的作用下,电器中的铁磁材料所产生涡流和磁滞损耗。
- (3) 介质损耗: 在交变电磁场作用下,电器中的绝缘材料中所产生的损耗。

2. 电器发热的危害

如果电器工作时所产生的损耗过高或电器散热措施不利,可能导致电器零部件温度的升高,当温度超过一定范围以后会造成电器零部件性能指标及使用寿命的降低,严重时甚至会造成电器的损坏。

1) 金属材料

电器中许多零部件是采用铜、铝、铁或其他金属材料及其合金材料制成的,当某些零部件的温度 T 达到一定数值以后,其机械强度 σ 会显著降低。

图 2-1 所示为典型金属材料机械强度 σ 与温度 T 的关系。

由此可见,当温度达到金属材料的软化点温度 T_s 时,其机械强度 σ 开始显著降低,而且金属材料的软化点温度 T_s 与材料种类有关,同时还与电器加热时间的长短有关,电器加热的时间越长,材料达到软化点的温度就越低。对铜而言,当对其短时加热时,其软化点温度可达约 300°C ;而当长期加热时,其软化点温度仅为 $100\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。

为了保证电器具有必要的机械强度,电器中裸导体的极限允许温度应小于材料的软化点温度。在实际工程应用中,导体作为电器及其部件的重要组成,通常是根据实际应用场合确定其最高允许温度,考虑到导体导电性能与温度的影响以及电器长期工作时通电或承受短时作用的短路电流等因素,通常导体的实际允许最高温度远低于材料的软化点,如表 2-1 所示。

2) 绝缘材料

为了提供必要的电气绝缘,通常电器中需要采用一定的绝缘材料,而绝缘材料的电气绝缘