

高等学校教材

电气自动控制

河北工学院 沈安俊 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

高等学校教材

电气自动控制

（第二版）

GAO DENG DIAO
XIAO ZI DONG KONG ZHI

机械工业出版社

高等学校教材

电气自动控制

河北工学院 沈安俊 主编



机械工业出版社

本书共分三篇：第一篇为开环控制系统，包括有电器控制线路及顺序控制器；第二篇为反馈控制理论，包括有反馈控制系统及其数学模型、反馈控制系统分析及反馈控制系统的综合；第三篇为自动调速系统，包括有晶闸管整流电路、直流调速系统及交流调速系统简介。本书是在《自动控制与调节原理》一书（机械工业出版社1980年7月第一版）的基础上修订的，有较多的变动与补充，为使书名较科学而确切，故改名为《电气自动控制》。本书可作为高等工业学校电机专业及相近专业的教材，可作为职工大学、夜大学教材，也可供工业电气自动化专业师生及厂矿、研究所的工程技术人员参考。

电 气 自 动 控 制

河北工学院 沈安俊 主编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张 $27^{3/4}$ · 字数 683 千字

1986年6月北京第二版·1986年6月北京第七次印刷

印数 57,401—64,900 · 定价 4.60 元

*

统一书号：15033·4882

前 言

本书是在1980年出版的高等学校试用教材《自动控制与调节原理》基础上,根据1982年11月高等学校电机专业教材编审委员会制订的新教学计划,并根据1983年4月高等学校自动化专业教材编审委员会制订的教学大纲以及审定的修改大纲修订的。为使课程的名称较为科学而确切,在上两个会议上决定改名为《电气自动控制》。

本书共分三篇:第一篇为开环控制系统,包括有电器控制线路及顺序控制器;第二篇为反馈控制理论,包括有反馈控制系统及其数学模型、反馈控制系统分析、反馈控制系统的综合;第三篇为自动调速系统,包括有晶闸管整流电路、直流调速系统、交流调速系统简介。

本书可作为高等工业学校电机专业本科生以及相近专业的教材,可作职工大学、夜大学教材,也可供有关专业师生、工程技术人员参考。

本书由河北工学院沈安俊副教授主编。第一章、第二章由吕德忠同志修订;第三章、第四章、第五章由孟昭忠同志修订;第六章由高鹏程同志编写;其余部分由沈安俊同志编写。另外,机械工业部电气传动研究所何冠英同志为交流调速简介部分提供了初稿。

本书由天津大学吕家元副教授主审,参加审阅的还有李慕兰、张钦智、王以直等同志。他们对本书提出了许多宝贵意见,编者在此谨表谢意。

由于我们的学识有限,错误与不妥之处在所难免,殷切希望各院校师生及广大读者提出宝贵的意见。

编 者
1984年6月

目 次

绪论	1	校正装置	196
第一篇 开环控制系统	5	* § 5-5 局部反馈校正装置的综合	200
第一章 电器控制线路	6	* § 5-6 根轨迹法在系统综合中的应用	203
§ 1-1 控制电器的基本概念	6	第三篇 自动调速系统	209
§ 1-2 电器控制系统中元件的符号和 线路图	13	第六章 晶闸管整流电路	209
§ 1-3 电动机的基本控制环节	20	§ 6-1 晶闸管	209
§ 1-4 电动机的基本控制方法	22	§ 6-2 单相可控整流电路	219
§ 1-5 电动机的保护	30	§ 6-3 三相半波可控整流电路	239
§ 1-6 生产机械控制线路举例	39	§ 6-4 三相全控桥式整流电路	248
§ 1-7 电器控制线路设计	50	§ 6-5 晶闸管—电动机系统的机械特性	270
* 第二章 顺序控制器	62	* § 6-6 晶闸管整流方案的选用与容量 计算	274
§ 2-1 概述	62	§ 6-7 晶闸管电路的保护	284
§ 2-2 基本逻辑型顺序控制器	63	* § 6-8 可控整流电路工作对电动机及 供电电网的影响	299
§ 2-3 步进式顺序控制器	66	第七章 直流调速系统	306
§ 2-4 顺序控制器应用举例	80	§ 7-1 概述	306
第二篇 反馈控制理论	89	§ 7-2 转速负反馈(有静差)调速系统	311
第三章 反馈控制系统及其数学模型	89	§ 7-3 电压负反馈及电流反馈的应用	327
§ 3-1 反馈控制系统	89	* § 7-4 交磁放大机控制调速系统	333
§ 3-2 反馈控制系统分类	92	§ 7-5 无静差调速系统	338
§ 3-3 控制系统的数学模型	93	§ 7-6 转速与电流双闭环调速系统	344
§ 3-4 非线性模型的线性化	99	* § 7-7 转速与电流双闭环调速系统的 工程设计计算	349
§ 3-5 传递函数	101	* § 7-8 控制对象的信号检测	364
§ 3-6 控制系统的方框图及其变换	107	§ 7-9 晶闸管—电动机可逆系统	371
第四章 反馈控制系统分析	119	§ 7-10 晶闸管整流电路的逆变工作状态	377
§ 4-1 系统的稳态误差分析	119	§ 7-11 有环流可逆调速系统	383
§ 4-2 劳斯稳定判据	126	§ 7-12 无环流可逆调速系统	388
§ 4-3 控制系统的瞬态响应	131	第八章 交流调速系统简介	399
§ 4-4 频率特性	139	§ 8-1 概述	399
§ 4-5 极坐标图	141	§ 8-2 交流电动机的调速方案	399
§ 4-6 乃奎斯特稳定判据	147	* § 8-3 变极调速	401
§ 4-7 对数坐标图	153	* § 8-4 能耗转差调速	401
§ 4-8 对数坐标图的应用	161	§ 8-5 串级调速	407
§ 4-9 频率特性和品质的关系	164	§ 8-6 变频调速	412
* § 4-10 系统的根轨迹图及其应用	166	§ 8-7 无换向器电动机调速	424
第五章 反馈控制系统的综合	180	* § 8-8 高性能交流调速的综合技术问题	430
§ 5-1 系统校正的概念	180	* § 8-9 交流调速的现状与发展趋势	431
§ 5-2 校正装置	181	附录	432
§ 5-3 用对数坐标图综合串联校正装置	186		
* § 5-4 用期望对数幅频特性综合串联			

绪 论

一、“电气自动控制”研究的对象

现代化的机械设备、生产线、车间、甚至整个工厂都是电气化和自动化的。它由各种电动机、电器元件、半导体器件、检测器件以及电子计算机等设备，按照一定规律组成控制系统，对生产过程进行“自动控制”。所谓“自动控制”是指在没有人直接参与(或仅有少数人参与)的情况下，利用自动控制系统，使被控制对象(或生产过程)，自动地按照预定的规律去进行工作。导弹能准确地命中目标，人造卫星能按预定轨道运行并返回地面指定的地点，宇宙飞船能准确地月球上着陆并安全返回，都是离不开自动控制技术的。在工业生产中，机器按照规定的程序自动地起动与停车。在微型计算机控制的数控机床上，依照计算机发出的程序指令，自动按预定的轨迹进行加工，自动退刀、自动换工件，再自动加工下一个工件。在轧钢机上，用电子计算机计算出轧制速度与轧辊压下量，并通过晶闸管可控整流电路控制电动机来实现这些指令。在自动化仓库中，由可编程序控制器自动控制货物的存放与取出。所有这些都是电气自动控制的应用。

自动控制所用的技术手段是多种多样的，可以用电气方法实现自动控制，也可用机械方法、液压方法、电气液压方法、射流控制方法以及气动的方法。其中以电气自动控制方法最为普遍，本书就是以它为研究对象。

自动控制是一门理论性很强的工程技术，通常称作“自动控制技术”，把实现这种技术的理论叫作“自动控制理论”。根据它发展的不同阶段与内容，又可分为“经典控制理论”与“现代控制理论”。而由各种部件组成的系统，以实现具体生产对象的自动控制，则称为“自动控制系统”。

自动控制是一门年轻的学科，从本世纪四十年代起开始形成。但是，在它形成独立学科的很早以前，自动控制技术便已有一些应用了。

二、电气自动控制的发展概况

本书阐述的主要是电力拖动的自动控制。电力拖动主要分为直流拖动和交流拖动两大类。直流拖动是以直流电动机为动力的拖动，交流拖动是以交流电动机为动力的拖动。直流电动机虽然不如交流电动机结构简单、制造方便、维护容易、价格便宜等，但是由于直流电动机具有良好的起动、制动性能和调速性能，可以方便地在很宽的范围内平滑调速，所以直流电动机广泛地应用于自动控制要求较高的各种生产部门。近20年来，由于半导体变流技术的发展，使得交流电动机的调速技术有很大的突破。交流调速有许多优点，单机容量可以大大超过直流电动机，转速也可高于直流电动机，能用于带有腐蚀性、易爆性、含尘气体等特殊环境中。与直流电动机相比，交流电动机还具有体积小、重量轻、转动惯量小、制造简单、结构牢固、工作可靠以及易于维修等优点。

电力拖动的自动控制方式可分为开环控制和闭环反馈控制两大类。开环控制一般是断续的有级控制，而闭环反馈控制一般是连续的无级控制。自动控制系统的发展，经历了一个从断续控制到连续控制又到断续控制的过程。最早的自动控制是断续控制，是在本世纪的20~30年代，借助于简单的接触器与继电器等控制电器，实现对控制对象的起动，停车以及有级

调速等控制，它的控制速度慢，控制精度差。到了40~50年代，出现了交磁放大机—电动机控制，使控制系统从断续控制发展到连续控制，这同时也促进了反馈控制理论（即经典控制理论）的发展。连续控制系统能随时随地地检查控制对象的工作状态，一旦输出量与给定量发生偏差，就自动进行调整。连续控制的快速性及控制精度都大大超过了最初的断续控制，并简化了控制系统，减少了电路中的触点，提高了可靠性，使生产率也大大提高了。50~60年代出现磁放大器—水银整流器控制，60年代出现晶体管放大器—晶闸管控制，以及发展到70年代的集成电路放大器—晶闸管控制，这些都属于连续控制系统。自动控制系统所用的功率元件与放大元件的发展使得控制系统的响应时间（动作时间）大大缩短，由秒级到毫秒级，功率放大系数大大提高，由10到 10^4 以上，信号放大倍数大大提高，由10到 10^6 ，拖动装置的效率大大提高，由85%到97%。

自从1948年出现了第一个晶体管，1958年出现了第一支晶闸管元件以后，半导体技术，电子技术有了飞速的发展。晶闸管元件的效率、控制特性好、反应快、寿命长、可靠性高、维护容易、体积小、重量轻等优点，使它获得了强大的生命力，引起世界各国的重视。目前晶体管及晶闸管控制已经成为自动控制领域中的一个极其重要的组成部分，迅速地占领各个工业部门，排挤了其他种控制方式。

60年代由于数控技术的发展，特别是电子计算机的出现及应用，又使控制系统、控制理论发展到一个新阶段——采样控制。采样控制也是一种断续控制，但是和最初的断续控制不同，它的控制间隔——采样周期，比控制对象的变化周期短得多。因此，尽管是断续控制，却能无失真地恢复控制对象的本来面目，在客观上完全等效于连续控制。由于电子计算机有极高的运算速度，采用采样控制方式后，可以实现一台计算机对多个控制对象的控制，电子计算机有复杂的逻辑功能及运算功能，所有这些为生产过程的自动化开辟了新的途径。特别是近些年来微型计算机（微处理机）的出现，它具有价廉及运行可靠的优点，在电气自动控制领域中日益得到广泛的应用，由于篇幅的限制，在本书中不涉及这方面的内容。

经典的自动控制理论（反馈控制理论）在电力拖动自动控制中得到了广泛应用。近代的自动控制理论（现代控制理论）是在经典理论的基础上，在60年代以后发展起来的。从经典控制理论发展到现代控制理论，不只是在理论上及方法上的简单延伸或推广，而是反映人们认识上的一次更新的飞跃。现代控制理论克服了经典理论的缺陷，能处理多变量，有约束的、时变的、非线性的复杂系统，对于改进现有系统的性能，设计新型系统，特别是复杂的电子计算机控制的电力拖动自动化系统，是一个有力的工具。

三、我国电气自动化事业的发展

解放前，我国的电力拖动自动控制十分落后。在工厂中使用的设备大部分是由一台电动机带动多台机器的成组拖动，仅用最简单的闸刀开关来控制。在少数进口设备上是采用单个电机或多台电机拖动的，用接触器、继电器进行控制。

解放后，我国的电力拖动自动控制技术得到迅速的发展。在50年代，我国新建的现代化工业的自动控制采用的是继电器—接触器系统，交磁放大机—发电机—电动机系统以及磁放大器—水银整流器系统。从50年代末期开始，我国研制了自己的水银整流器元件及系统，并在进口设备上进行了取代试验。60年代初研制了自己的磁性逻辑元件及无触点控制系统并用于轧钢生产及其它工业部门中，大大提高了控制性能和工作可靠性。

我国的晶闸管元件是1963年试制成功的，1965年开始应用于轧钢机的励磁设备中，并取

得良好效果。目前我国晶闸管拖动系统的应用已遍及各个领域,如轧钢、冶金、矿山、铁道、纺织、化工、造纸及发电设备等。

我国第一台电子管大型通用计算机是1959年问世的,计算速度为每秒1万次。1967年制成第一台晶体管式大型通用电子计算机,计算速度为每秒7万次。1976年我国研制成功每秒200万次的集成电路通用电子计算机。1983年我国自行设计和研制的每秒向量运算一亿次的“银河”巨型计算机系统研制成功,标志着我国计算机技术发展到了一个新阶段。数控技术、顺控技术以及近年来迅速发展的微型机数控技术已在我国电气自动控制领域中得到日益广泛的应用,收到很好的效果,取得显著的经济效益,但与国际先进水平相比,还有较大的差距,有待我们共同努力,力争在本世纪内赶上世界先进水平。

四、本门课程的性质、要求与讲授顺序

“电气自动控制”是高等工业学校电机专业及其它相近专业的一门专业基础课,其任务是讲授电气自动控制学科的基本原理与典型控制系统。

本课程在学生学过“电子技术基础”及“电机学”等有关课程后讲授。

由于电气自动控制学科在近一、二十年来发展十分迅速,与电机专业、电器专业及其它相近专业的关系日益密切,因此“电气自动控制”课程的有关内容逐渐成为这些专业所不可缺少的基础与专业知识。在学习完本门课程以后,学生应该懂得这个学科的基本原理,有关的基础知识,了解自己专业在这方面应用的概况与要求,能启发学生去改进与设计新型的电机与电器,同时也为解决这方面问题打下初步的理论基础,能适应“基础好些、知识面宽些、适应性强些”的要求。

电气自动控制学科的内容十分丰富,范围包括很广,技术内容的发展与更新十分迅速,由于课程学时的限制,本书仅能涉及最普遍、最基础的理论及典型的控制系统,至于自动控制领域中的现代控制理论以及计算机控制技术等,本书都没有涉及。虽然如此,本书的内容还是较多的,在编写过程中,我们注意了删减次要内容,突出主要内容,力求作到少而精。但由于学时的限制(教学计划安排约为100学时),这些内容在课堂上不可能全部进行讲授。因此,在本书中有些内容的前后,注以*号标记,指出这些内容可以采用自学方式学习,不必进行讲授,只作为参考之用。

本书编排的顺序是由易到难,由简到繁,由开环控制系统(第一篇)到闭环控制系统,而后者又是由理论基础(第二篇)到实际控制系统的应用(第三篇)。因此,可按书中所编排的顺序进行讲授。也可分成自动控制系统(第一、三篇)及反馈控制理论(第二篇)两门课分别进行讲授,在进度上,后者应在讲授第七章之前授课完毕。

第一篇 开环控制系统

控制系统是由一些电气元件联接成控制线路所组成，它可以完成一定的工作顺序，或实现一定的工作状态。

开环控制系统的特点是，可以按照预先规定好的顺序进行工作。如实现绕线式异步电动机起动的控制线路，由按钮发出起动信号，线路可实现随着电机转速的升高自动切除串在转子电路中的电阻。又如直流电动机转速控制线路，由晶闸管组成可控整流电路向电机供电，用一个可变电阻来调节晶闸管的导通时间，改变整流电路输出的直流电压，使电机转速达到一定的数值，这也是开环控制系统。直流电动机的转速是否达到了规定的数值，线路本身不能反映出来，要由操作工人通过转速表观察才能知道。这种根据给定的控制量（如线路中的可变电阻）进行控制，而被控制量（例如转速）在整个过程中对控制量不产生任何影响的系统，叫开环控制系统。这种系统比较简单，控制精度较低，但已能满足一般生产的要求。

与开环控制系统相对应的是闭环控制系统，它具有被控制量反馈到输入端与控制量进行相减运算的比较环节（即形成负反馈），用比较后产生的偏差，再通过控制器去控制被控制量，使偏差有所降低，以提高控制系统的精度。我们把输出与输入间存在反馈的系统叫闭环控制系统，或反馈控制系统，这是第二篇要讲述的内容。

开环控制系统多由开关元件组成。它只具有“接通”和“断开”两种截然不同的状态，不能连续反映控制信号的变化，因此所能实现的控制是断续的，故又称为断续控制系统。具有“接通”和“断开”两种状态的开关元件可以采用继电器、接触器，也可以采用晶体管以及数字集成电路等。本篇介绍的电器控制线路及顺序控制器都属于断续控制系统。

电器控制线路主要由按钮、继电器、接触器等组成。其优点是：结构简单、造价低、抗干扰能力强、调整维护容易。运用它不仅可以实现生产过程自动化，而且还可以实现集中控制和远距离控制，因此电器控制线路是目前工业生产中最基本的控制形式之一。其缺点是：由于采用有触点的开关，故允许的工作频率低，当工作频率超过每分钟数千次时，这种开关就根本不能动作，当然就失去其控制作用。另外，触点在打开时，要产生电弧，故触点容易损坏，从而使开关动作不可靠。

顺序控制器是由继电器—接触器控制系统发展而来的，是60年代末出现的一种新技术。所谓顺序控制器就是能够根据工艺预先安排好的程序，一步一步顺序地进行工作的自动控制装置，其特点是：程序可以灵活改变，通用性强。另外，由于采用晶体管，集成电路等电子元件，使其体积大大缩小，缺点是抗干扰能力差，价格较高。

开环控制系统是电力拖动自动控制领域重要的组成部分，它可以大大提高生产率，减轻劳动强度，提高产品质量等。因此，它在实现我国四个现代化的进程中将起重要的作用。

第一章 电器控制线路

控制系统发展的初期,是由手动电器,例如闸刀开关、转换开关等组成的。随着生产的发展,电动机容量的增大、操作频率的增高、运动部件的增多等,这种由手动电器组成的控制系统已远远不能满足生产的要求,从而出现了继电器,接触器等自动控制电器和电器控制线路,以及由它们组成的电器控制系统。这种系统不仅可以实现生产过程自动化,还可以实现集中控制和远距离控制,它具有结构简单、造价低、抗干扰能力强、调整维护容易等优点,因此它已成为目前工业生产中最基本的控制形式之一。它的缺点是:由于采用有触点的开关,故允许的工作频率仍然较低,而且在打开触点时产生的电弧易使触点损坏,从而使系统的寿命和可靠性大为降低。

§ 1-1 控制电器的基本概念

由于电能具有分配灵活、输送经济和控制方便等优点,故被广泛应用于各种生产部门。要应用电能就必须对它进行分配、控制和调节,电器就是实现这种作用的器具。概括地说:“电器”就是电能的控制器具。其控制作用就是接通或断开电路中的电流。因此“开”和“关”就是电器最基本和最典型的功能。

电器的种类繁多,这里只介绍用于电力拖动自动控制领域中的低压电器(低压指1200 V以下),即所谓“控制电器”。

一、控制电器分类

按控制电器的性能和用途可分为以下几类:

1. 接触器 用于远距离,频繁接通和分断正常工作的大电流电路。它适用于交流与直流电动机的频繁起动和控制。接触器分交流接触器和直流接触器等。

2. 控制继电器 用来控制其它电器的动作与否。控制继电器分中间继电器、电流继电器、电压继电器和热继电器等。

3. 控制器 用来换接电路中的电阻,从而实现电动机的起动、制动、反向和调速。它分鼓型控制器和凸轮控制器等。

4. 主令电器 用来在控制电路中发布命令。它包括按钮、万能转换开关、主令控制器等。

5. 电阻器 用来限制和调节电路中的电流和电压。它分铸铁电阻、瓷管式电阻、框架式电阻等。

控制电器的种类繁多,可以说举不胜举。下面就常用的电磁式交流接触器为例,来叙述有关控制电器的一些基本概念。至于具体的各种控制电器将在本章的其它各节中予以介绍。

二、电磁吸力

电磁式交流接触器主要由以下四部分组成:

- ① 电磁系统:包括线圈、衔铁(又称动铁芯)和静铁芯。
- ② 反力弹簧。

③ 触点系统：包括主触点和辅助触点。

④ 灭弧室。

图1-1为电磁式交流接触器的外形图，而图1-2是它的原理图。

当接触器的线圈加上交流电压时，就在线圈中产生交变电流，于是在衔铁和静铁芯组成的磁路中产生磁通，从而产生电磁吸力，当电磁吸力大于反力弹簧等的反作用力时，衔铁被吸合（见图1-2）使常闭触点打开，常开触点闭合。当外加电压消失时，电磁力就消失，衔铁在反力弹簧的作用下释放而恢复原位，使触点系统恢复原状。

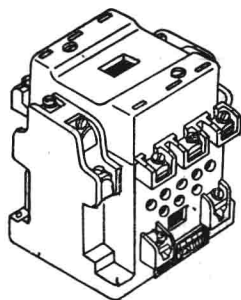


图1-1 电磁式交流接触器外形图

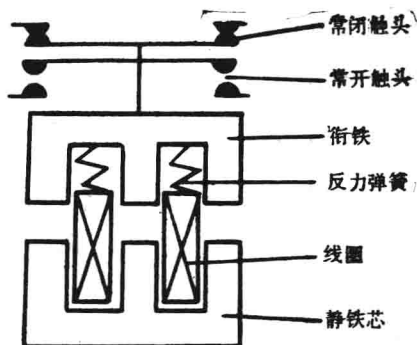


图1-2 电磁式交流接触器原理图

交流电磁力计算：

根据麦克斯威尔公式：

$$F = \frac{0.5\Phi^2}{\mu_0 S} \quad (1-1)$$

式中 F ——每一个气隙的吸力，单位为 N ；

Φ ——磁极极面的磁通，单位为 Wb ；

S ——磁极表面面积，单位为 m^2 ；

μ_0 ——空气导磁系数。

$$\mu_0 = 1.25 \times 10^{-6} H/m$$

磁通是按正弦规律变化的，即：

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (1-2)$$

将式 (1-2) 代入式 (1-1) 得电磁吸力的瞬时值为：

$$F_t = \frac{0.5\Phi_m^2}{\mu_0 S} \sin^2 \omega t = \frac{0.5\Phi_m^2}{2\mu_0 S} (1 - \cos 2\omega t)$$

所以：

$$F_t = \frac{0.5\Phi_m^2}{2\mu_0 S} - \frac{0.5\Phi_m^2}{2\mu_0 S} \cos 2\omega t = F_p + F_{\sim} \quad (1-3)$$

从式 (1-3) 看出，吸力由两部分组成，一个是恒定部分（即平均吸力），其值为：

$$F_p = \frac{0.5\Phi_m^2}{2\mu_0 S} \quad (1-4)$$

平均吸力 F_p 的大小和磁通最大值的平方成正比，与空气导磁系数和磁极表面面积成反比。

另一个是交变部分，其值为：

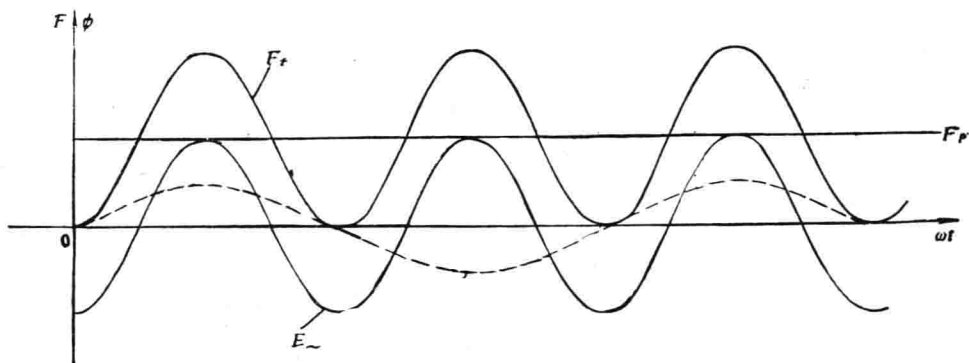


图1-3 吸力、磁通随时间变化的曲线

$$F_{\sim} = \frac{-0.5\Phi_m^2}{2\mu_0 S} \cos 2\omega t \quad (1-5)$$

根据式 (1-3) 和 (1-2) 可得出图1-3的曲线。由图1-3看出, 虽然磁通是交变的 (方向有正有负), 但其所产生的吸力 F_t 的方向是不变的。其数值在零和最大值 F_m 之间变化, 变化的频率为磁通变化频率的两倍。

三、交流电磁衔铁的抖动

从图1-3的曲线看出, 电磁吸力 F_t 是随时间变化的, 即 F_t 的大小是在零和最大值 F_m 之间变化的, 变化的角频率为 2ω 。当吸力 F_t 大于反作用力 F_f (包括反力弹簧和触点等的反作用力), 衔铁被吸合, 但当 F_t 小于 F_f 时, 衔铁要释放, 由于作用力 F_t 的变化很快 (当电源电压频率为 50Hz/s 时, F_t 的变化频率为 100Hz/s), 故衔铁不会完全释放, 而处于抖动状态, 这将使触点抖动, 产生电弧, 容易使触点烧坏。另外, 衔铁的抖动将发出振耳的噪声, 影响工作人员的工作。因此必须消除这种抖动现象。办法是使电磁吸力在任何时间都大于反作用力。具体作法是在静铁芯或衔铁上装置一短路环 (又叫分磁环), 见图1-4。有了短路环后, 磁通分为两部分, 一部分为 ϕ_A 流经不被短路环包围的截面, 另一部分为 ϕ_B 流经被短路环包围的截面。当 ϕ_B 穿过短路环时, 将在短路环中产生感应电势和电流, 根据楞次定律可知, 此感应电流将阻碍磁通 ϕ_B 的变化, 因此使 ϕ_B 落后 ϕ_A 一个角度。见图1-5, 由磁通 ϕ_A

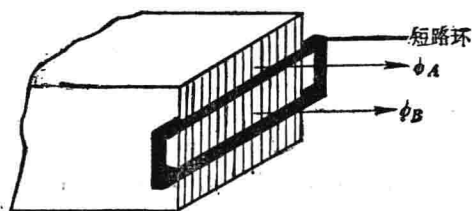


图1-4 短路环

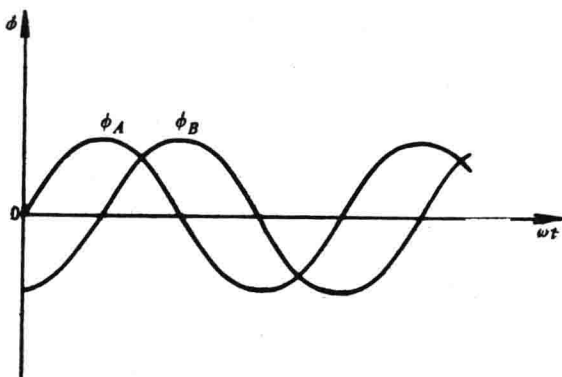


图1-5 磁通曲线

和 ϕ_B 产生的电磁吸力分别为 F_A 和 F_B , 见图1-6, 则总的电磁吸力为 $F_t = F_A + F_B$ 。从图中可以看出, F_t 在任何瞬间都大于反作用力, 所以衔铁就不会抖动。

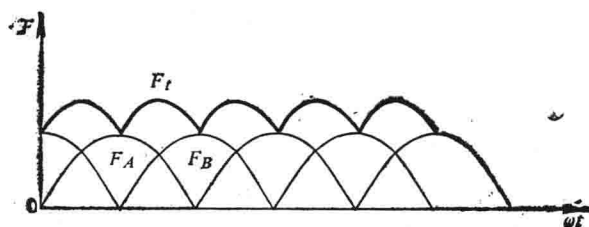


图1-6 电磁吸力曲线

四、触点和灭弧系统

触点是用来接通或断开电路用的。它有四种工作状态：

1. 触点在开断位置 此时它使电路开断，在这种情况下，触点间要承受电压，因此要求触点之间有良好的绝缘强度以保证可靠地断开电路。

2. 触点的接通过程 触点在允许的合闸电流下接通电路时，要避免触点抖动，否则电弧将使触点熔焊（熔化而粘合在一起，使触点不能打开），为此有些电器的触点装设有附加弹簧。

3. 触点在闭合位置 此时它使电路接通，在这种情况下，应尽量减少触点本身的电阻和触点之间的接触电阻。接触电阻包括“膜电阻”和“收缩电阻”。“膜电阻”是由触点接触面上的氧化膜造成的，此氧化膜的电阻要比触点本身的电阻大几十到几千倍。“收缩电阻”是由于触点的接触面不是十分光滑的，在接触时，实际接触的面积总是小于触点原有的接触面，这样有效导电截面减小，从而使电阻增加，这部分增加的电阻即为“收缩电阻”。如果上述的电阻大的话，则在电流流过触点时要造成电压降落，这对弱电控制系统影响较为严重。另外电流流过触点时电阻损耗大，将使触点发热而使其温度升高。触点温度的升高，会导致触点表面的“膜电阻”增加，相邻绝缘材料的老化，严重时可使触点熔焊。因此对各种电器的触点都规定了它的允许温升。

4. 触点的分断过程 当触点分断通电的电路时，如果触点间电压在10~20 V以上，电流在80~100 mA以上，则在触点打开的间隙中就可能产生电弧。

电弧对电器的影响有三方面：

- ① 触点打开时，由于电弧的存在，使要断开的电路实际上并没有断开。
- ② 电弧的温度很高，严重时可使触点熔化。
- ③ 电弧向四周喷射，会引起电器和周围物质的损坏，还会造成相间短路，甚至造成火灾。所以必须采取措施熄灭或减小电弧。为此首先要了解电弧的物理本质。

电弧是一种气体放电现象，就是触点间隙间的气体被游离产生大量的电子和离子，于是绝缘的气体就变成了导体，电流通过这个游离区时所消耗的电能转变为热能和光能，因此发生光和热的效应。那么触点间隙怎么会产生大量的电子和离子呢？这主要有以下四种原因：

1) 热电子发射：在高温下，阴极（与电源负极连接的触点）金属中的电子能量增加，能量增加到一定值时，电子便从金属表面逸出。

2) 强电场放射：触点开始分离时，间隙很小，电路的全部电压都加在此很小的间隙上，因此电场强度很高，可达几亿 V/m，此强电场将阴极表面的电子拉出，即所谓强电场放射。

3) 撞击游离: 触点间隙中的自由电子在电场力作用下, 不断加速, 经一定路程后获得足够的动能, 由它撞击中性分子, 使其外层的电子被游离出来。所以电场强度越强、电子在加速过程中所走的路程越长, 它所获得的能量就越大, 故撞击游离的电子就越多。

4) 高温游离: 当电弧间隙中气体的温度升高时, 气体分子的强烈热运动造成的碰撞, 使中性分子游离为电子和离子。当电弧间隙中有金属蒸汽时, 高温游离大大增加。

在触点分断的过程中, 以上四种原因的作用是不一致的。在触点开始分离时, 首先是强电场放射。此电子以高速向阳极 (与电源正极连接的触点) 移动, 撞击中性分子产生撞击游离, 使间隙中游离的离子和电子增加。正离子向阴极移动, 撞击阴极, 使阴极发生高热, 从而产生热电子发射。与此同时, 电弧间隙的温度升高, 又产生高温游离。当触点完全打开时, 由于触点距离增加, 电场强度减小, 因此起主要作用的是: 热电子发射、撞击游离和高温游离, 而其中又以高温游离作用最大。

电弧间隙中发生游离作用的同时, 还存在消游离作用, 消游离可分为复合和扩散两种方式:

① 复合: 当正离子和电子彼此接近时, 由于异性电荷的吸力结合在一起, 成为中性的气体分子。另外, 电子附着在中性原子上, 成为负离子, 负离子与正离子相遇就复合为中性分子。这种复合只有在离子运动速度较低时才有可能。因此利用液体和气体人工冷却电弧, 或将电弧挤入绝缘壁做成的窄缝里, 迅速导出电弧内部的热量, 减小离子的运动速度, 可以加强复合过程。

② 扩散: 弧柱内的电子、正离子、负离子要从浓度大、温度高的地方扩散到周围的冷介质中去, 扩散出来的电子、离子互相结合又成为中性分子。因此, 降低弧柱周围的温度, 或用人工方法减小电弧的直径, 使电弧内部电子、离子的浓度增加, 就可以增加扩散和复合作用。

电弧的游离和消游离是同时存在的, 当游离和消游离速度相等时, 电弧就稳定燃烧, 当消游离速度大于游离速度时, 电弧就要熄灭。因此熄灭电弧可以从两方面着手, 一方面是尽量减少输入电弧的能量以减弱游离作用, 另一方面是尽量把电弧中的能量尽快地散失掉, 以加强消游离作用。为达到上述目的, 其基本方法有:

- ① 拉长电弧。
- ② 用电磁力使电弧在冷却介质中运动。
- ③ 将电弧分成许多串联的短弧。
- ④ 将电弧挤入绝缘壁组成的窄缝中以冷却电弧。
- ⑤ 将电弧密封于高压的容器中。

下面介绍两种常用的灭弧装置:

1. 灭弧栅 灭弧栅就是钢质栅片。当电弧在触点间隙中形成后, 由于钢质栅片是铁磁体, 故它对电弧电流有吸力, 将电弧很快拉入灭弧栅, 电弧进入灭弧栅后就被分割成许多串联的短弧, 此时栅片就成为短弧的电极 (见图1-7)。每两个小电极间要维持电弧燃烧都必须有一定的电压, 一般为10~20V。如果这些串联短弧压降的

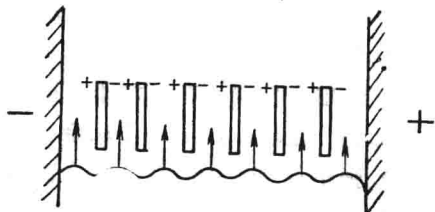


图1-7 灭弧栅灭弧原理

总和大于电源电压，就不能维持这些短弧的继续燃烧。另外由于钢质栅片吸收了电弧的热量，加强了消游离的作用，故使电弧迅速熄灭。

当触点上所加的电压是交流时，交流电所产生的电弧要比直流电所产生的电弧容易熄灭。因为交流电压每个周期有两次过零，显然电压为零时电弧容易熄灭。另外灭弧栅在熄灭交流电弧时还有所谓“阴极效应”有利于电弧的熄灭。阴极效应是：当电弧电流过零后，间隙中的电子和离子的运动方向要随触点电极极性的改变而改变，由于正离子比电子质量大得多，因此在触点电极极性改变后，即阳极变为阴极，阴极变为阳极，原来阳极附近的电子能很快地回头向相反的方向运动（向改变后的阳极），而正离子几乎还停留在原来的地方。这样，由于电子跑向阳极而使阴极附近缺少电子只剩下了正离子，见图1-8，于是阴极附近的电子会造成电流中断，从而使电弧熄灭。

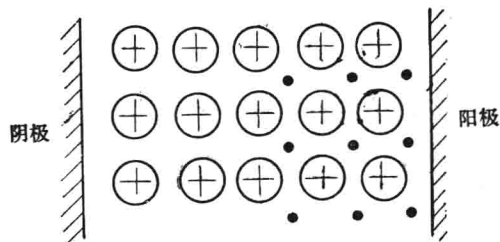


图1-8 阴极效应

2. 磁吹装置 磁吹装置是利用电弧在磁场中受力，将电弧拉长，并使电弧在冷空气中运动，产生强烈的消游离作用，从而将电弧熄灭。图1-9为直流接触器采用的一种磁吹装置，这里消弧线圈与负载电路是串联的。当负载电流通过消弧线圈时要产生磁场，根据右手螺旋定则可知：磁场方向是由铁芯出来，经增磁夹片进入触点空间再回至铁芯。故触点空间磁场的方向是向里的，电弧电流在此磁场中要受力，力的方向根据左手定则决定，其方向是向上的，故电弧被拉长并受到冷却，使电弧很快熄灭。这种方法的优点是：当触点中的电流方向改变时，由于磁场的方向也跟着改变，因此电弧受力的方向并不改变。其缺点是：电弧电流越小，磁场就越弱，电弧所受力就越小，因此灭弧能力就越小。

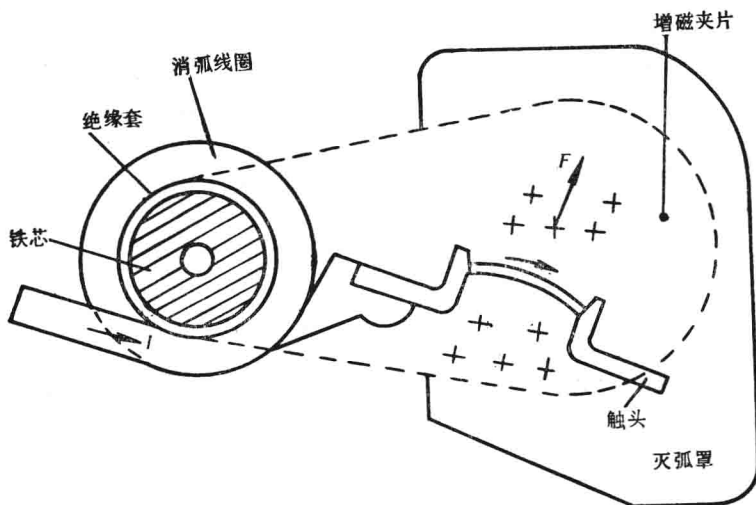


图1-9 磁吹装置

五、熄火花电路

控制电器的触点在切断具有电感负载（如直流电动机的激磁绕组、电磁铁线圈等）的电