

高等学校试用教材

自动控制与调节原理

河北工学院 沈安俊 主编

机械工业出版社

高等学校试用教材

自动控制与调节原理

河北工学院 沈安俊 主编



机械工业出版社

自动控制与调节原理

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街一号)

(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 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 26 · 字数 641 千字

1980 年 7 月北京第一版·1981 年 5 月北京第二次印刷

印数 13,401—23,400 · 定价 2.65 元

*

统一书号: 15033 · 4882

自动控制与调节原理

机械工业出版社

1-25

前言

本书是根据 1978 年 4 月第一机械工业部在天津召开的“高等学校对口专业座谈会”制订的教学计划及 1978 年 5 月在黄山召开的“高等学校一机部对口工业电气自动化专业教材编写会议”制订的《自动控制与调节原理》课程的教材编写大纲编写的。

本书共分三篇：第一篇为断续控制系统，包括有电器控制线路、顺序控制器、机床数控系统；第二篇为连续控制系统，包括有可控硅整流电路、自动调速系统；第三篇为自动调节原理，包括有控制系统的数学模型与瞬态响应、控制系统分析、控制系统的校正与综合。

本书可作为高等工业学校电机制造专业、电器制造专业以及相类似专业的试用教材，也可供工业电气自动化专业师生及厂矿、研究所工程技术人员参考。

本书由河北工学院工业电气自动化教研室沈安俊副教授主编，参加编写的人员为吕德忠同志（第一、二、三章）、孟昭忠同志（第六、七、八章）、卢谦亮同志（提供第六章及 § 8-3 节的初稿）。书中 § 5-5 节及 § 5-6 节中有环流系统部分，系由主编人委托陕西机械学院荣国浚同志编写。

本书由天津大学工业电气自动化教研室吕家元副教授主审，参加审阅的还有李柏林、田树苞、袁修乔等同志。另外，清华大学、华中工学院、合肥工业大学、湖南大学、山东工学院、天津大学和河北工学院的有关同志对本书也提出很多宝贵意见，编者在此谨表谢意。

本书的部分内容参考了清华大学及其他兄弟院校自动化系所编的讲义，在编写过程中得到清华大学陈伯时副教授及高龙等同志的关心与帮助，得到天津电气传动研究所叶王、马小亮、周德泽同志，天津第三开关厂郑光复同志的帮助，编者在此致以谢意。

由于编写时间仓促，我们的水平又有限，书中一定还有不少错误与不妥之处，殷切希望各院校师生及广大读者提出宝贵意见。

编 者

1979 年 10 月

目 次

绪 论	1
-----------	---

第一篇 断续控制系统

第一章 电器控制线路	4
§ 1-1 控制电器的基本概念	5
§ 1-2 电器控制系统中元件的符号和线路图	12
§ 1-3 电动机的基本控制环节	20
§ 1-4 电动机的基本控制方法	23
§ 1-5 电动机的保护	30
§ 1-6 生产机械控制线路举例	39
* § 1-7 电器控制线路设计	43
第二章 顺序控制器	51
§ 2-1 概述	51
§ 2-2 基本逻辑型顺序控制器	52
§ 2-3 步进式顺序控制器	55
* § 2-4 顺序控制器应用举例	69
第三章 机床数控系统	78
§ 3-1 概述	78
§ 3-2 输入装置	80
§ 3-3 数控机床的插补原理	85
* § 3-4 串行运算器	91
§ 3-5 输出装置	99
§ 3-6 DK6732 数控线切割机简介	108

第二篇 连续控制系统

第四章 可控硅整流电路	113
§ 4-1 概述	113
§ 4-2 单相可控整流电路	121
§ 4-3 三相半波整流电路	131
§ 4-4 三相桥式整流电路	143
§ 4-5 整流电路的逆变工作状态	151
§ 4-6 可控硅-电动机系统	157
* § 4-7 可控硅整流电路方案的选用与容量计算	162
§ 4-8 可控硅的触发电路	170
§ 4-9 可控硅电路的保护	186
* § 4-10 可控硅电路工作对电动机及供电电网的影响	198

IV

第五章 自动调速系统	204
§ 5-1 概述	204
§ 5-2 转速负反馈(有静差)调速系统	208
§ 5-3 电压负反馈及电流反馈自动调速系统	223
§ 5-4 无静差调速系统	229
§ 5-5 转速与电流双闭环调速系统	234
§ 5-6 可逆自动调速系统	241
* § 5-7 控制对象的信号检测	260

第三篇 自动调节原理

第六章 控制系统的数学模型和瞬态响应	268
§ 6-1 概述	269
§ 6-2 典型环节的传递函数	270
§ 6-3 非线性数学模型的线性化	283
§ 6-4 控制系统的方块图及其变换	284
§ 6-5 控制系统的数学模型	291
§ 6-6 控制系统的瞬态响应	297
第七章 控制系统分析	308
§ 7-1 控制系统的稳态误差分析	308
§ 7-2 劳斯稳定判据	314
§ 7-3 频率特性的概念	319
§ 7-4 极坐标图	322
§ 7-5 奈奎斯特稳定判据	328
§ 7-6 对数坐标图	336
§ 7-7 频率特性和品质的关系	347
* § 7-8 根轨迹法的概念	350
第八章 控制系统的校正与综合	363
§ 8-1 校正装置	363
§ 8-2 用对数坐标图计算校正装置	373
* § 8-3 调速系统动态参数工程计算法	380
* § 8-4 用根轨迹法校正系统的概念	396
附 录	404
一 本书符号说明	404
二 几种常用调节器	407
三 部分习题解答	410
四 主要参考文献	411

绪 论

一、“自动控制与调节原理”研究的对象及在四个现代化中的地位

现代化的机械设备、生产线、生产车间、甚至整个工厂都是采用电气化和自动化的。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 直接参与的情况下，利用控制系统，使被控制的对象或生产过程，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，人造卫星能按照预定轨道运行并返回地面指定的地点，宇宙飞船能准确地在月球上着陆并安全返回，都是自动控制技术高度发展的结果。在工业生产中，机器按照规定的程序自动地起动与停车。在数控机床上，按照穿孔纸带发出的信号自动按规定的轨迹进行加工，加工完自动退刀、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，并通过可控硅控制系统来实现这些指令。在无人仓库中，由可编程序顺序控制器自动进行存放与取出货物。所有这些 都是自动控制的应用。

自动控制所用技术手段是多种多样的，可用电气方法实现自动控制，也可以用机械方法，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”。根据自动控制理论发展的不同阶段与内容，又可分为“经典控制理论”、“现代控制理论”和“大系统理论”。而由实现自动控制所必需的各部分组成的系统则称为“自动控制系统”。本书第三篇自动调节原理便是以阐述经典控制理论为其主要内容。

自动控制是一门年轻的学科，从 1945 年起开始形成，至今只有 30 多年的历史。但在它形成学科之前，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，所以直流电动机被广泛地用于自动控制要求较高的各种生产部门。在频繁起动、制动及调速要求较高的场合，直流拖动与交流拖动相比，前者仍然占居主要地位。

电力拖动自动控制方式可分为断续控制和连续控制两大类。断续控制是有级控制，连续控制是无级控制。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，它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，出现了电机放大机-发电机-电动机控制，使控制系统从断续控制发展到连续控制，这同时也促进了闭环控制理论（即自动调节原理）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，一当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-可控硅控制，以及发展到今天70年代的集成电路放大器-可控硅控制，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 10^5 ，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年出现了第一支可控硅元件以后，半导体技术，电子技术有了飞速的发展。可控硅元件的效率、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。目前晶体管及可控硅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（每秒几千万次到每秒几亿次），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的同时控制，电子计算机有复杂的逻辑功能及计算功能，所有这些为生产过程的自动化，开辟了新的途径。

经典的自动控制理论（自动调节原理）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、我国自动化事业的发展

解放前，我国的电力拖动自动控制事业十分落后。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，电机放大机-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。

我国的可控硅元件是1963年试制成功的，1965年便应用于轧钢机的励磁设备中，并取得良好效果。目前我国可控硅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、发电设备等，技术性能也已大大提高。

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。数控技术、顺控技术以及专用的计算装置已在我国的自动控制领域得到应用，收到很好的效果，取得了不少宝贵经验。至于电子计算机在自动控制领域中的应用，目前我国仅有少数工厂开始使用，与国际先进水平相比还有较大差距，有待我们大家进行努力。我们相信，有伟大的中国共产党的英明领导，有我国广大的工人、农民及知识分子的共同努力，经过伟大的新长征，在本世纪内，我们一定能赶上世界先进水平。

四、本门课程的性质、任务与要求

“自动控制与调节原理”是高等工业学校电机专业、电器专业以及其它相近专业的一门专业课，任务是讲授自动控制学科的基本原理与典型线路。

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，因此自动控制系统与自动调节原理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，了解本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理论基础，能适应“基础好些、知识面宽些、适应性强些”的要求。

自动控制学科的内容十分丰富，范围包括很广，由于学时的限制，本书仅能涉及最普遍、最基础的知识，至于自动控制领域中的现代控制理论、电子计算机控制技术以及大系统理论等，本书都没有涉及。

自动化学科在 70 年代有着迅猛的发展，为了反映近代科学发展的新技术，本书编进了较多的内容。在编写过程中，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（教学计划安排为 100 学时），这些内容还是可能不会在课堂上全部讲授的。因此，在本书中有些内容的前后，注以 * 号标记，是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。

第一篇 断续控制系统

断续控制系统在生产实际中被广泛应用。所谓断续控制系统，就是由开关元件组成的断续作用的控制系统。由于开关元件只具有“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，因此它所能实现的控制必然是断续的。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、顺序控制器以及机床数控系统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型式之一。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，是六十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。

机床数控系统用于数控机床。数控机床又叫数字程序控制机床，是目前机械制造业中重要的一环。数控机床一般是根据纸带的命令进行切削加工的，机床加工的辅助时间短，效率高，重复精度高，适合于小批量生产。当加工的零件改变时，只要换一条纸带就可以进行加工。特别是数控机床能够加工工人所不能加工的，形状十分复杂的零件。其缺点是编程序麻烦，价格高。

断续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:

(一) 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。

(二) 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。

(三) 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。

(四) 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。

(五) 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。

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: N (牛顿);

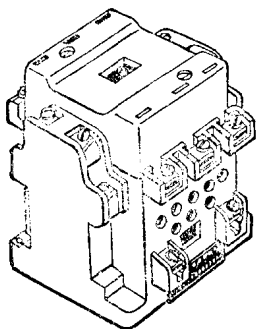


图1-1 电磁式交流接触器外形图

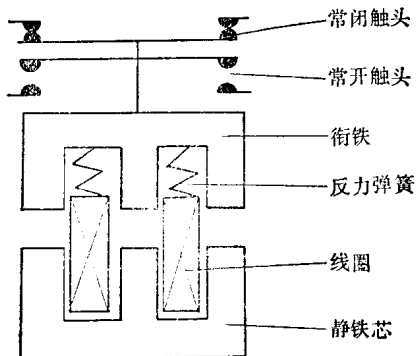


图1-2 电磁式交流接触器原理图

ϕ ——磁极极面的磁通。单位：Wb(韦伯)；

S ——磁极表面面积。单位： m^2 (米²)；

μ_0 ——空气导磁系数。

$$\mu_0 = 1.25 \times 10^{-6} \text{H/m (亨/米)}$$

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：

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

所以：

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

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：

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

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_i 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_i 是随时间变化的，即 F_i 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_i 大于反作用力 F_j （包括反力弹簧和触点等的反作用力），衔铁被吸合，但当 F_i 小于 F_j 时，衔铁要释放，由于作用力 F_i 的变化很快（当电源电压频率为 50 周/秒时， F_i 的变化频率为 100 周/秒），故衔铁不会完全释放，而处于抖动状态，

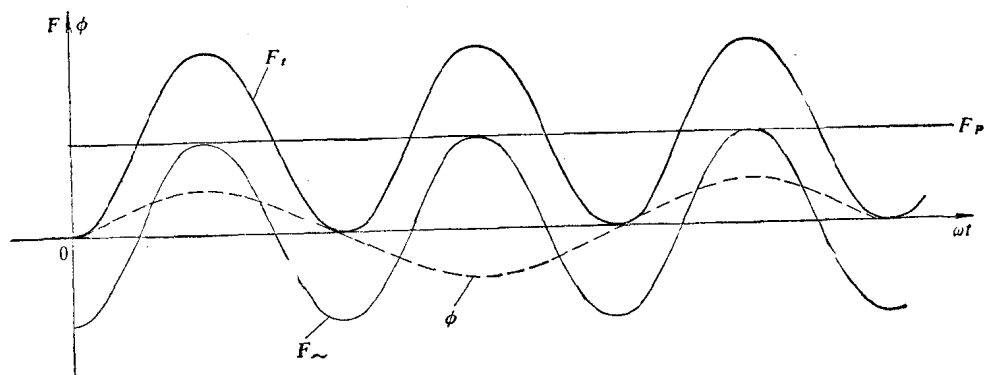


图1-3 吸力、磁通随时间变化的曲线

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 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。

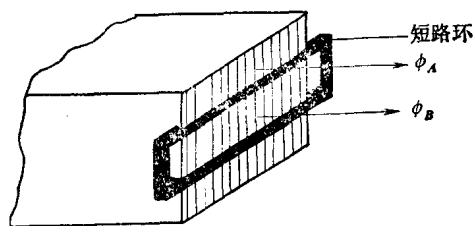


图1-4 短路环

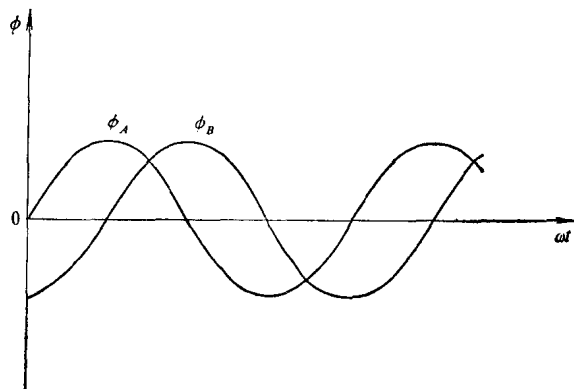


图1-5 磁通曲线

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：

（一）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。

（二）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。

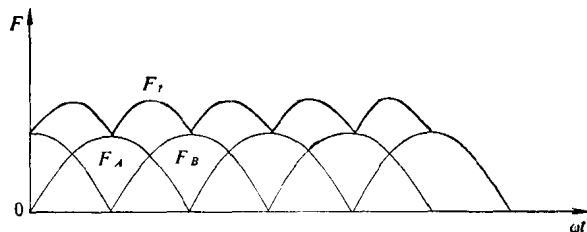


图1-6 电磁吸力曲线

（三）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。

（四）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 $10\sim 20\text{ V}$ 以上，电流在 $80\sim 100\text{ mA}$ 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 （伏/米），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 10~20 V。如果这些串联短弧压降的总和大于电源电压，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的多，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。

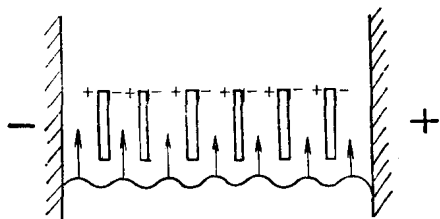


图1-7 灭弧栅灭弧原理

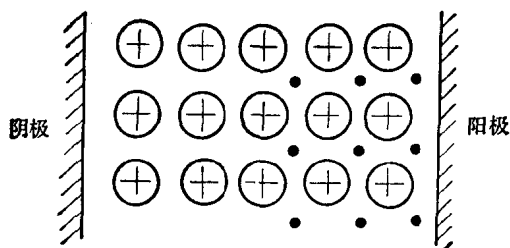


图1-8 阴极效应

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。

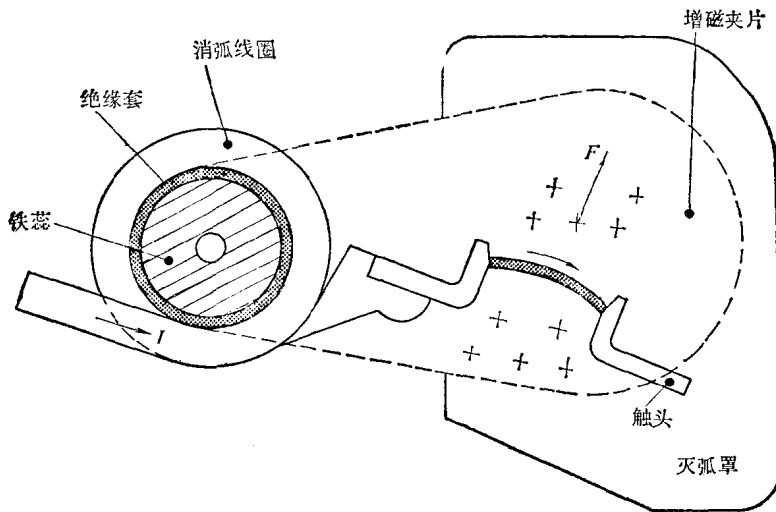


图1-9 磁吹装置

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)的电路时,由于电流由某一稳定值突然降为零,电流的变化率 $\frac{di}{dt}$ 很大,就会在触点间隙产生较高的电压,此电压超过270~300 V时,就会在触头间隙产生火花放电现象。火花放电与电弧不同之处是:火花放电的电压高,电流小,而且是在局部地区产生不稳定的火花亮线。火花放电将使触点产生电磨损以至缩短它的寿命。另外火花放电造成的高频干扰信号将影响无线电通讯和干扰弱电控制系统的正常工作,为此需要消除由于过电压引起的火花放电现象。下面介绍两种常用的熄火花电路。

(一) 用半导体二极管与电感负载并联,如图 1-10 所示,在触点K闭合时,电感负荷L中流有稳定的电流,当触点突然打开时,由于二极管D的存在,使电流不是从某一稳定值突然降为零,而是由电感L和二极管D组成放电回路使电流逐渐降为零,即减小了电流的变化率 $\frac{di}{dt}$,从而减小了电感L产生的过电压 $(e = -L \frac{di}{dt})$,这样使

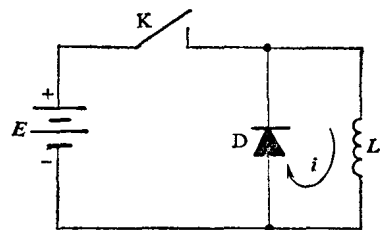


图1-10 与电感负载并联二极管

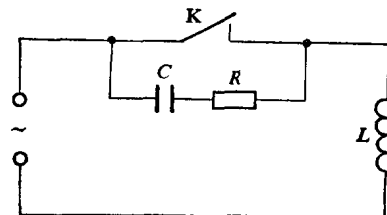


图1-11 与触点并联阻容环节

触点K的间隙不会产生火花放电,另外也使电感 L 的绝缘不会因过电压而击穿。

(二)用串联的电容电阻环节与触点并联,如图1-11所示,在触点突然打开时,电感的磁场能量就要转为电容的电场能量,此时表现为对电容器的充电,因此触点突然打开时,电感 L 中的电流也不是立刻降为零,而是随着电容器逐渐充满电而降为零,电感 L 就不会产生过电压。

电容电阻的选择:一般电容 C 是根据负载电流的大小来选择其容量的。每一安培的负载电流至少选一微法电容。电阻 R 是用来减小在触点闭合时,电容 C 通过触点的放电电流的。因此它的选择原则是:使电容 C 放电电流的最大值 I_s 小于触点材料的最小熔焊电流 I_w ,即:

$$I_s = \frac{E_c}{R} < I_w$$

$$R > \frac{E_c}{I_w} \quad (1-6)$$

这里 E_c 为电容器 C 在触点打开后被充电的电压值,一般就取电感负载的电源电压。

下面给出几种触点材料的最小熔焊电流值。

表1-1 几种触点材料的最小熔焊电流

触 点 材 料	银	金	金 59% 银 25% 铂 6%	钽	铂	钨
I_w (安)	19	11	11	16	15	20~22

常用的控制继电器,如JZ7、JJDZ3、DZ-100等,它们的触点皆为银材料制成。

值得指出的是:当电感负荷是继电器或接触器的线圈时,由于采取了熄火花电路,在触点打开时使继电器或接触器线圈中的电流逐渐减小,即它们磁路中的磁通逐渐减小,电磁力也逐渐减小,只有当电磁力小于反力弹簧的反作用力时,继电器或接触器才释放,因此延长了它们的释放时间,这是值得注意的。

小结

在电器控制系统中常用的控制电器是电磁式接触器、继电器等,本节着重介绍电磁式电器的共性问题。掌握了电器的共性问题就可以帮助我们认识和进一步分析各类具体的电器。

“开”和“关”是控制电器的最基本的功能。电磁式控制电器是利用电磁吸力来使触点系统动作的,触点的动作就可以实现“开”和“关”的功能。触点在通断过程中要产生电弧,电弧要烧损触点和造成其他故障,为此需要采取灭弧措施,对于通断大电流电路的电器如接触器等,这个问题更为突出,因此要有较完善的灭弧装置。对于继电器、主令电器等,由于它们的触点是通断小电流电路的(如控制电路等),因此不要求完善的灭弧装置。

思考题和习题

- 1-1 控制电器的基本功能是什么?
- 1-2 短路环有何作用?三相电磁铁要不要装短路环?
- 1-3 二个交流110V的接触器线圈能否串联运行于220V的电源?
- 1-4 电弧是怎样产生的?怎样灭弧?