

普通高等工科教育机电类规划教材

工厂电气控制设备

第2版

赵明 许蓼 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等工科教育机电类规划教材

工厂电气控制设备

第 2 版

赵 明 许 寥 编



机械工业出版社

本书以继电—接触器控制、电机扩大机自动调速系统的基本环节为主线,全面分析了常用机床电气控制、桥式起重机和电梯电气控制、A系列龙门刨床电气控制;对应用日益广泛的可编程序控制器的结构、基本原理及编程方法作了较全面的介绍;对继电接触器控制系统的设计和可编程序控制器的程序设计与应用设计作了介绍,以提高其设计能力。

该书为高等工科院校电气工程及自动化专业教材,也适用于高等专科学校、职工大学、业余大学,并可供有关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

工厂电气控制设备/赵明编. —2版. —北京:机械工业出版社, 1996.1 (2011.6重印)
普通高等工科教育机电类规划教材
ISBN 978-7-111-04696-7

I. 工… II. 赵… III. 工厂—电气控制装置—高等学校—教材 IV. TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第03839号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:贡克勤 版式设计:张世琴

责任印制:乔宇 责任校对:申春香

三河市宏达印刷有限公司印刷

2011年6月第2版第32次印刷

184mm×260mm·19.25印张·470千字

标准书号:ISBN 978-7-111-04696-7

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务 网络服务

社服务中心:(010) 88361066

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

门户网: <http://www.cmpbook.com>

教材网: <http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是全国普通高等工科教育机电类规划教材，是根据机械工业部制定的高等工科院校电气工程及自动化专业教学大纲编写的。

本书也适用于高等专科学校、职工大学、业余大学，并可供有关工程技术人员参考。

本书对电梯的电气控制、可编程序控制器的结构、原理及编程方法和可编程控制器的程序设计和应用设计作了较为详尽的介绍，以适应电气控制技术及应用的新发展。

全书共分九章，以继电—接触器控制线路及电机扩大机自动调速系统的基本环节为主线，阐述并分析了机床、桥式起重机、电梯等电气控制设备和 A 系列龙门刨床电气控制设备。用两章内容全面介绍了应用日益广泛的可编程序控制器原理及其应用。本书适当加强了继电—接触器控制系统的设计及可编程序控制器的程序设计和应用设计，以期提高学生的设计能力。

本书列有专业英语词汇，以促进英语学习，提高英语水平。

本书全面贯彻国家各项最新标准。

本书由[赵明]编写第六、七、八章，其余由许蓼编写。

由于编者水平所限，本书难免存在缺点和错误，恳望读者提出批评和指教。

编 者

绪 论

工厂设备各式各样，大多由电力拖动，且采用各种控制装置来实现对它的控制。按控制系统分，有断续控制、连续控制和计算机控制系统。本书以前两种控制系统及其设备为主，对在集成电路、计算机技术的基础上发展起来的新型工业自动控制装置——可编程序控制器，作了较为详尽的介绍。

一、电力拖动自动控制的发展

19 世纪末，在生产机械的拖动系统中，电动机逐渐代替了蒸气机，出现了电力拖动。在其初期，常以一台电动机拖动多台设备，或使一台机床的多个动作由同一台电动机拖动，称为集中拖动。随着生产发展的需要，20 世纪 20 年代电力拖动方式由集中拖动发展为单独拖动。为了进一步简化机械传动机构，更好地满足大型机械和精密机械的各部分对机械特性的不同需求，在 30 年代出现了多电动机拖动方式，机械的各部分分别采用不同的电动机拖动。这种多电动机拖动不仅简化了机械结构，使机械的工作性能日趋完善，而且也为机械的自动化控制创造了良好的条件。此外，在生产过程中，要求对影响产品质量的各种参数能自动调整，这些都促使电气自动控制技术迅速发展。

在电力拖动方式的演变过程中，电力拖动的控制方式由手动控制逐步向自动控制方向发展。最初的自动控制是用数量不多的继电器、接触器及保护元件组成的继电—接触器控制系统。这种控制具有使用的单一性，即一台控制装置只能针对某一种固定程序的设备，一旦程序有所变动，就得重新配线。而且这种控制的输入、输出信号只有通和断两种状态，因而这种控制是断续的，不能连续反映信号的变化，故称为断续控制。

为了使控制系统获得更好的静态和动态特性，完成更复杂的控制任务，常采用反馈控制系统。反馈控制系统是由连续控制元件组成，它不仅能反映信号的通或断，而且能反映信号的大小和变化，这种由连续控制元件组成的反馈控制系统，称为连续控制系统。用作连续控制的元件，以前普遍采用电机扩大机和磁放大器，随着半导体器件和晶闸管的发展，现在越来越多地采用晶闸管作为控制元件的晶闸管控制系统。

60 年代出现了一种能够根据生产需要，方便地改变控制程序的顺序控制器。它是通过组合逻辑元件的插接或编程来实现继电—接触器控制线路的装置，能满足程序经常改变的控制要求，使控制系统具有较大的灵活性和通用性，但仍使用硬件手段且装置体积大，功能也受到一定限制。70 年代出现了用软件手段来实现各种控制功能以微处理器为核心的新型工业控制器——可编程序控制器。它不仅充分利用微处理器的优点来满足各种工业领域的实时控制要求，同时也照顾到现场电气操作维护人员的技能和习惯，摒弃了微机常用的计算机编程语言的表达形式，独具风格地形成一套以继电器梯形图为基础的形象编程语言和模块化的软件结构，使用户程序的编制清晰直观，方便易学，且调试和查错容易。它不仅可取代继电器、接触器为主的顺序控制器，而且广泛应用于大规模的生产过程控制，具有通用性强，程序可变，编程容易，可靠性高，使用维护方便等优点，故目前世界各国已作为一种标准化通用设备普遍应用于工业控制。

由于数控技术的发展和电子计算机的应用，电力拖动自动控制发展到了一个新水平，正向着生产过程自动化的方向发展。

二、课程的性质与任务

本课程是一门实践性强的主要专业课，本课程是在学习《电机原理》、《电力拖动基础》之后，在进行了电工劳动实践的基础上进行讲授的，使学生具有较牢固的基础理论知识和较强的感性认识。

本课程的基本任务是：

- 1) 熟悉常用控制电器的基本结构、工作原理、用途及型号意义，达到能正确使用和选用的目的。
- 2) 熟练掌握电气控制线路的基本环节，具有对一般电气控制线路的分析能力。
- 3) 熟悉典型生产设备电气控制系统，具有从事电气设备安装、调试、运行、维修的能力。
- 4) 具有设计和改进一般生产设备电气控制线路的能力。
- 5) 掌握可编程序控制器的基本原理，能根据工艺过程和控制要求正确选用可编程序控制器并完成程序设计，经调试用于生产过程的控制。

目 录

前言		第四节 起重机的保护	111
绪论	1	第五节 电梯概述	115
第一章 常用低压电器	3	第六节 电梯的机械系统	116
第一节 低压电器基本知识	3	第七节 交流集选控制电梯电气系统	122
第二节 接触器	10	第八节 电梯电力拖动的调整	134
第三节 控制继电器	14	小结	135
第四节 其它常用电器	28	习题	136
小结	37	第五章 继电—接触器控制系统的 设计	138
习题	37	第一节 电气控制系统设计的基本原则 和内容	138
第二章 继电—接触器控制电路基 本环节	38	第二节 电力拖动方案的确定和电动机 的选择	138
第一节 电气图	38	第三节 继电接触器控制系统设计的 一般要求	140
第二节 三相笼型感应电动机全压起动 控制电路	42	第四节 电气控制电路图的设计	143
第三节 三相笼型感应电动机减压起动 控制电路	47	第五节 常用控制电器的选择	147
第四节 三相绕线转子感应电动机起动 控制电路	54	第六节 生产机械电气设备施工设计	156
第五节 三相感应电动机电制动控制电 路	57	小结	160
第六节 三相感应电动机调速控制电路	63	第六章 电机扩大机自动调速系统 的基本环节	161
小结	67	第一节 电机扩大机	161
习题	68	第二节 转速负反馈自动调速系统	168
第三章 常用机床电气控制	70	第三节 电压负反馈和电流正反馈自动 调速系统	178
第一节 车床的电气控制	70	第四节 电动势负反馈自动调速系统	182
第二节 磨床的电气控制	72	第五节 具有电流截止负反馈环节的自 动调速系统	184
第三节 钻床的电气控制	77	第六节 稳定环节	187
第四节 铣床的电气控制	80	第七节 电位器的计算与等效电路	191
第五节 镗床的电气控制	86	小结	195
小结	91	习题	197
习题	92	第七章 A 系列龙门刨床电气控制 设备	199
第四章 桥式起重机和电梯电气控 制	93	第一节 主拖动系统静态分析	200
第一节 桥式起重机概述	93	第二节 交流电动机主电路	205
第二节 起升机构的电气控制	98	第三节 交流控制电路	207
第三节 运行机构的电气控制	109		

第四节 主拖动系统运行分析	217	第七节 F ₁ -40MR 可编程序控制器	260
小结	227	小结	267
习题	227	习题	267
第八章 可编程序控制器的结构、 基本原理及编程方法	229	第九章 可编程序控制器的程序设 计与应用设计	269
第一节 可编程序控制器的发展及特 点	229	第一节 可编程序控制器程序设计的一 般方法	269
第二节 PC 的组成及基本原理	230	第二节 PC 程序设计的功能图法	273
第三节 主机中的各类继电器	235	第三节 移位寄存器在 PC 程序设计中 的应用	282
第四节 PC 的编程语言	239	第四节 可编程序控制器的应用设计	286
第五节 ACMY-S256 可编程序控制 器	241	小结	294
第六节 SYSMAC C-20 可编程序控制 器	253	附录	295
		参考文献	301

绪 论

工厂设备各式各样,大多由电力拖动,且采用各种控制装置来实现对它的控制。按控制系统分,有断续控制、连续控制和计算机控制系统。本书以前两种控制系统及其设备为主,对在集成电路、计算机技术的基础上发展起来的新型工业自动控制装置——可编程序控制器,作了较为详尽的介绍。

一、电力拖动自动控制的发展

19世纪末,在生产机械的拖动系统中,电动机逐渐代替了蒸气机,出现了电力拖动。在其初期,常以一台电动机拖动多台设备,或使一台机床的多个动作由同一台电动机拖动,称为集中拖动。随着生产发展的需要,20世纪20年代电力拖动方式由集中拖动发展为单独拖动。为了进一步简化机械传动机构,更好地满足大型机械和精密机械的各部分对机械特性的不同需求,在30年代出现了多电动机拖动方式,机械的各部分分别采用不同的电动机拖动。这种多电动机拖动不仅简化了机械结构,使机械的工作性能日趋完善,而且也为机械的自动化控制创造了良好的条件。此外,在生产过程中,要求对影响产品质量的各种参数能自动调整,这些都促使电气自动控制技术迅速发展。

在电力拖动方式的演变过程中,电力拖动的控制方式由手动控制逐步向自动控制方向发展。最初的自动控制是用数量不多的继电器、接触器及保护元件组成的继电—接触器控制系统。这种控制具有使用的单一性,即一台控制装置只能针对某一种固定程序的设备,一旦程序有所变动,就得重新配线。而且这种控制的输入、输出信号只有通和断两种状态,因而这种控制是断续的,不能连续反映信号的变化,故称为断续控制。

为了使控制系统获得更好的静态和动态特性,完成更复杂的控制任务,常采用反馈控制系统。反馈控制系统是由连续控制元件组成,它不仅能反映信号的通或断,而且能反映信号的大小和变化,这种由连续控制元件组成的反馈控制系统,称为连续控制系统。用作连续控制的元件,以前普遍采用电机扩大机和磁放大器,随着半导体器件和晶闸管的发展,现在越来越多地采用晶闸管作为控制元件的晶闸管控制系统。

60年代出现了一种能够根据生产需要,方便地改变控制程序的顺序控制器。它是通过组合逻辑元件的插接或编程来实现继电—接触器控制线路的装置,能满足程序经常改变的控制要求,使控制系统具有较大的灵活性和通用性,但仍使用硬件手段且装置体积大,功能也受到一定限制。70年代出现了用软件手段来实现各种控制功能以微处理器为核心的新型工业控制器——可编程序控制器。它不仅充分利用微处理器的优点来满足各种工业领域的实时控制要求,同时也照顾到现场电气操作维护人员的技能和习惯,摒弃了微机常用的计算机编程语言的表达形式,独具风格地形成一套以继电器梯形图为基础的形象编程语言和模块化的软件结构,使用户程序的编制清晰直观,方便易学,且调试和查错容易。它不仅可取代继电器、接触器为主的顺序控制器,而且广泛应用于大规模的生产过程控制,具有通用性强,程序可变,编程容易,可靠性高,使用维护方便等优点,故目前世界各国已作为一种标准化通用设备普遍应用于工业控制。

由于数控技术的发展和电子计算机的应用，电力拖动自动控制发展到了一个新水平，正向着生产过程自动化的方向发展。

二、课程的性质与任务

本课程是一门实践性强的主要专业课，本课程是在学习《电机原理》、《电力拖动基础》之后，在进行了电工劳动实践的基础上进行讲授的，使学生具有较牢固的基础理论知识和较强的感性认识。

本课程的基本任务是：

- 1) 熟悉常用控制电器的基本结构、工作原理、用途及型号意义，达到能正确使用和选用的目的。
- 2) 熟练掌握电气控制线路的基本环节，具有对一般电气控制线路的分析能力。
- 3) 熟悉典型生产设备电气控制系统，具有从事电气设备安装、调试、运行、维修的能力。
- 4) 具有设计和改进一般生产设备电气控制线路的能力。
- 5) 掌握可编程序控制器的基本原理，能根据工艺过程和控制要求正确选用可编程序控制器并完成程序设计，经调试用于生产过程的控制。

第一章 常用低压电器

根据我国电工专业范围的划分与分工, 低压电器(low-voltage apparatus)标准规定, 低压电器通常是指交流 1200V 及以下与直流 1500V 及以下电路中起通断、控制、保护和调节作用的电气设备, 以及利用电能来控制、保护和调节非电过程和非电装置的用电装备。但随着工农业生产的发展, 某些工业部门使用电压等级的提高, 低压电器的电压等级范围也将提高。

第一节 低压电器基本知识

一、低压电器的分类

低压电器的种类繁多, 用途广泛。按所控制的对象分为低压配电电器(distributing apparatus)与低压控制电器(control apparatus)。前者主要用于配电系统中, 对此类电器的要求是工作可靠, 有足够的动稳定性与热稳定性。电器的动稳定性是电器承受短路(冲击)电流的电动力作用而不致损坏的能力; 电器的热稳定性是指电器承受规定时间内短路电流产生的热效应而不致损坏的能力。这类电器有刀开关、熔断器等。后者主要用于电力拖动自动控制系统和用电设备中, 要求这类电器工作准确可靠、操作频率高、寿命长。主要有接触器、控制继电器、主令开关、起动器、电磁铁等。

按动作性质可分为自动切换电器和非自动切换电器。自动切换电器是指它在完成接通、分断、起动、反向和停止等动作是依靠本身参数或外来信号自动进行的, 不是由人力来直接操作; 非自动切换电器又称手控电器, 它主要是用手来直接操作进行切换的。

按电器工作条件可分为一般用途低压电器、牵引低压电器、矿用低压电器、航空低压电器及船用低压电器等。

二、低压电器的基本结构

从结构上看, 电器一般都具有两个基本组成部分, 即感受部分与执行部分。感受部分接受外界输入的信号, 并通过转换、放大与判断作出有规律的反应, 使执行部分动作, 输出相应的指令, 实现控制的目的。对于有触点的电磁式电器, 感受部分大都是电磁机构, 而执行部分则是触头系统。对于低压断路器类的低压断路器, 还具有中间部分, 它将感受和执行部分联系起来, 使它们协同一致, 按一定规律动作。

(一) 电磁机构

1. 电磁机构的结构型式 电磁机构通常采用电磁铁(electro-magnet)的形式, 由吸引线圈、铁心和衔铁三部分组成。其结构型式按铁心型式分有单 E 型、单 U 型、甲壳螺管型、双 E 型等; 按动作方式有直动式、转动式等, 见图 1-1。其工作原理是: 当吸引线圈通入电流后, 产生磁场, 磁通经铁心、衔铁和工作气隙形成闭合回路, 产生电磁吸力, 将衔铁吸向铁心。与此同时, 衔铁还要受到反作用弹簧的拉力, 只有当电磁吸力大于弹簧反力时, 衔铁才可靠地被铁心吸住。

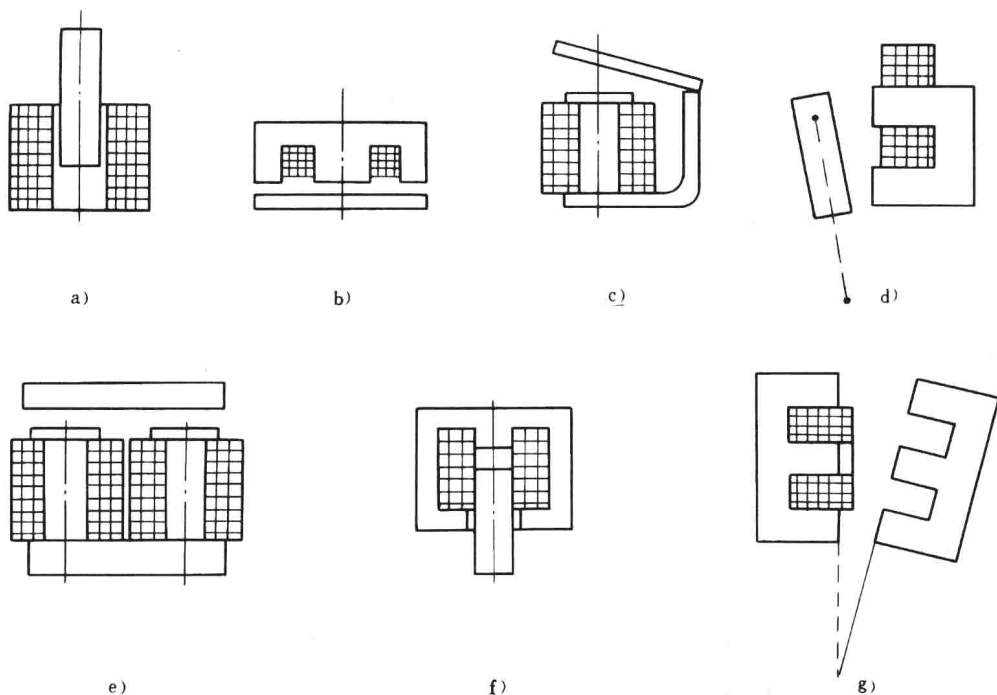


图 1-1 电磁铁的结构型式

a)、f) 螺管式 b)、e) 直动式 c)、d)、g) 转动式

2. 直流电磁铁与交流电磁铁 按吸引线圈通电电流的性质不同, 电磁铁可分为直流电磁铁与交流电磁铁。直流电磁铁电磁吸力根据马克思威尔公式为

$$F = 4B^2 S \times 10^5 \quad (1-1)$$

式中 F 为电磁铁磁极的表面吸力(N); B 为工作气隙磁感应强度(T); S 为铁心截面积(m^2)。

其吸力特性如图 1-2 所示。由此可知, 在电磁铁安匝数不变情况下, 电磁吸力与气隙大小的二次方成反比, 图中特性 1 与 2 为不同励磁安匝下的吸力特性。所以电磁吸引线圈励磁电压的高低, 衔铁行程的大小, 都将影响电磁铁的吸力特性, 从而影响电磁铁的工作性能。

交流电磁铁吸力公式是

$$\begin{aligned} F &= 4B^2 S \times 10^5 \\ &= 4S \times 10^5 B_m^2 \sin^2 \omega t \\ &= 2B_m^2 S (1 - \cos 2\omega t) \times 10^5 \\ &= 2B_m^2 S \times 10^5 - 2B_m^2 S \times 10^5 \cos 2\omega t \end{aligned} \quad (1-2)$$

由上式可知, 虽然交流电磁铁磁感应强度是正、负交变的, 但电磁吸力却是脉动的, 方向不变。上式吸力由两部分组成: 第一项为平均吸力 F_{av} , 其值为最大吸力的一半; 第二项为以电源频率两倍变化的交变分量, 即

$$F_{\sim} = F_{av} \cos 2\omega t \quad (1-3)$$

交流电磁铁的吸力变化情况如图 1-3 所示。

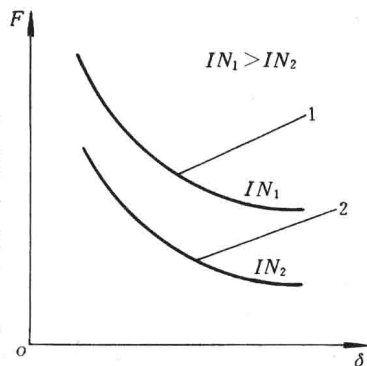


图 1-2 直流电磁铁的吸力特性

交流电磁铁吸力是在最大值为 $2F_m$ 和最小值为零的范围内以两倍于电源频率周期地变化。因此在每一个周期内，必然有某一段时刻吸力小于弹簧产生的反作用力，这时衔铁在反力作用下将开始释放，而当吸力大于反力时，衔铁又被吸合，如此周而复始，衔铁产生振动，这对电器工作十分不利，同时还发出噪声。为此，必须采取措施消除振动。

交流电磁铁 $U \approx 4.44 f N \Phi_m$ ，所以是恒磁链系统，直流电磁铁为恒磁通势情况。由分析可知，恒磁链的吸力特性比恒磁通势的吸力特性更平坦，如图 1-4 所示。

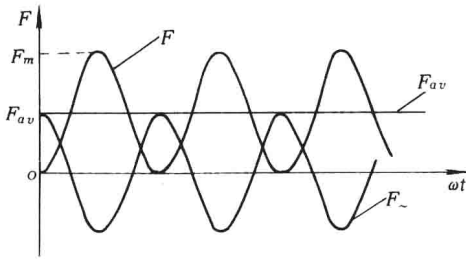


图 1-3 交流电磁铁吸力变化情况

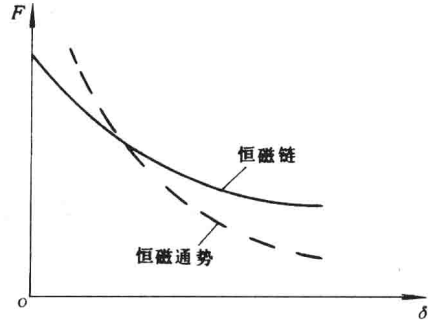


图 1-4 交流电磁铁吸力特性

此外，直流电磁铁与交流电磁铁在结构上也不相同。直流电磁铁在稳定状态下通过恒定磁通，铁心中没有磁滞损失与涡流损失，只有线圈本身的铜损，所以直流电磁铁线圈没有骨架，且成细长形。而交流电磁铁则不然，铁心中有磁滞损失与涡流损失。为此，一方面铁心由硅钢片叠制而成；另一方面线圈做成粗短形并有线圈骨架将线圈与铁心隔开，以免铁心发热传给线圈使其过热而烧毁。

3. 短路环的作用 单相交流电磁铁，为消除振动和噪声，设想若把极面上的磁通分成两部分，并使这两部分交变磁通间有一个相位差，则其所产生的吸力间也有一个相位差。这样，虽然每部分都有到达零值的时刻，但二者合成后的吸力却无到达零值的时刻。如果合成吸力在任一时刻都大于反力，便可消除振动了。

在一部分极面上安装短路环即可达到磁通的分相作用。如图 1-5 所示，短路环相当于在磁路参数中有一个磁抗，因此，被短路环包围的部分是一个有磁抗的分支磁路，而未被包围的部分则是一个只有气隙磁阻的分支磁路，其等效磁路如图 1-6 所示。

$$\begin{aligned} \dot{U}_m &= \dot{\Phi}_{m1} R_{\delta 1} = \dot{\Phi}_{m2} (R_{\delta 2} + jX_{m2}) \\ &= \dot{\Phi}_{m2} \sqrt{R_{\delta 2}^2 + X_{m2}^2} e^{j\varphi} \end{aligned} \quad (1-4)$$

$$\psi = \arctan \frac{X_{m2}}{R_{\delta 2}}$$

$$R_{\delta 2} = \frac{\delta_2}{\mu_0 S_2}$$

$$X_{m2} = \frac{\omega N^2}{r} = \frac{\omega}{r}$$

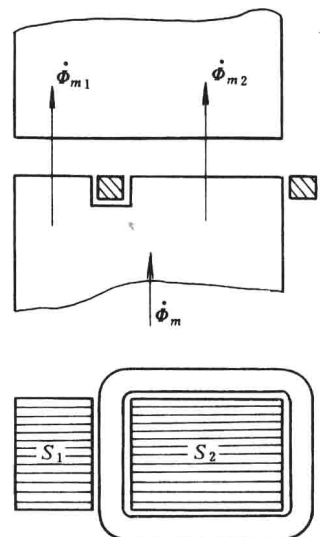


图 1-5 短路环

式中, X_{m2} 为短路环的磁抗(Ω); r 为短路环电阻(Ω); φ 为磁通 $\dot{\Phi}_{m1}$ 与 $\dot{\Phi}_{m2}$ 的相位差; N 为短路环匝数, 通常 $N=1$ 。

则

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \Phi_{m1} \sin \omega t \\ \varphi_2 &= \Phi_{m2} \sin (\omega t - \varphi)\end{aligned}$$

由 φ_1 和 φ_2 在衔铁上产生的电磁吸力分别为

$$\begin{aligned}F_1 &= F_{av1}(1 - \cos 2\omega t) \\ F_2 &= F_{av2}[1 - \cos 2(\omega t - \varphi)]\end{aligned}$$

作用在衔铁上的总吸力为

$$\begin{aligned}F &= F_1 + F_2 \\ &= F_{av1} + F_{av2} - F_{av1} \cos 2\omega t - F_{av2} \cos 2(\omega t - \varphi) \\ &= F_{av1} + F_{av2} - F_{\sim 1} - F_{\sim 2}\end{aligned}\quad (1-5)$$

上式后两项为同频率的交变分量, 其相量图如图 1-7 所示。图中 OA 表示 $F_{\sim 1}$ 交变分量, OB 表示 $F_{\sim 2}$ 交变分量, OC 是两者的合成相量。其值为

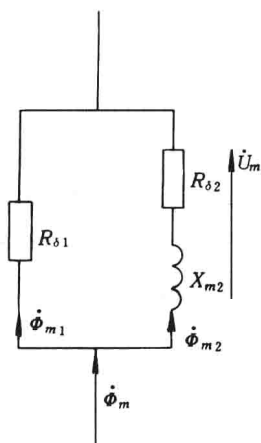


图 1-6 有短路环的局部等值磁路图

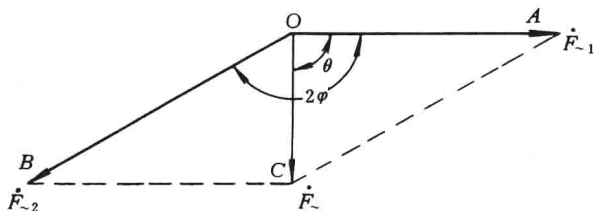


图 1-7 吸力交变分量的相量图

$$\begin{aligned}F_{\sim} &= F_{\sim 1} + F_{\sim 2} \\ &= F_{av1} \cos 2\omega t + F_{av2} \cos 2(\omega t - \varphi) \\ &= \sqrt{F_{av1}^2 + F_{av2}^2 + 2F_{av1}F_{av2} \cos 2\varphi} \cos (2\omega t - \theta)\end{aligned}$$

代入式(1-5)中, 得

$$F = F_{av1} + F_{av2} - \sqrt{F_{av1}^2 + F_{av2}^2 + 2F_{av1}F_{av2} \cos 2\varphi} \cos (2\omega t - \theta) \quad (1-6)$$

由上式可知, 合成吸力的最大值为

$$F_{\max} = F_{av1} + F_{av2} + \sqrt{F_{av1}^2 + F_{av2}^2 + 2F_{av1}F_{av2} \cos 2\varphi}$$

最小值为

$$F_{\min} = F_{av1} + F_{av2} - \sqrt{F_{av1}^2 + F_{av2}^2 + 2F_{av1}F_{av2} \cos 2\varphi}$$

消除衔铁振动的充分条件是合力最小值大于反力, 即

$$F_{\min} > F_r \quad (1-7)$$

$\Phi_1(\omega t)$ 、 $\Phi_2(\omega t)$ 、 $F_1(\omega t)$ 和 $F_2(\omega t)$ 、 $F(\omega t)$ 关系曲线如图 1-8 所示。必须指出, 即使满足式(1-7), 吸力仍是脉动的, 为减小脉动, 应取 $\varphi = 50^\circ \sim 80^\circ$, 而 $S_2/S_1 = 3 \sim 4$, 短路环采用导电性能好, 机械强度高的材料制作。

4. 电磁铁的线圈 线圈是电磁铁的心脏，也是电能与磁场能量转换的场所。大多数电磁铁线圈并接在电源电压两端，称为电压线圈，其匝数多、阻抗大、电流小，常用绝缘性能好的电磁线绕制而成。当需反映电路电流时，则将电磁线圈串接于电路中，成为电流线圈，其匝数少、导线粗，常用扁铜带或粗铜线绕制。

5. 吸力特性与反力特性的配合 电磁铁中的衔铁除受电磁吸力作用外，同时还受到与电磁吸力方向相反的作用力。这些反作用力通常包括反作用弹簧力、触点弹簧所产生的力、运动部分的重力与摩擦力等几部分。反作用力与工作气隙大小的关系称为反力特性，若不计后两种力，则反力特性如图 1-9 所示。其中直线 1 为反作用弹簧力，2 为常开触点弹簧力，3 为常闭触点弹簧力，三力叠加后即为反力特性 *abcdef*。

为了使电磁铁能正常工作，衔铁在吸合时，吸力必须始终大于反力，即吸力特性始终处于反力特性的上方；衔铁释放时，吸力特性必须位于反力特性的下方。图 1-10 为吸力特性与反力特性的配合情况。

由图 1-10 可见，在吸力特性与反力特性曲线之间有一块面积，这块面积代表了衔铁在运动过程中积聚的能量。此块面积越大，衔铁积聚的能量越大，其动作速度也越大，动静触头接触时的冲击力也越大，严重时会导致触头的熔焊或烧损。因此，吸力特性与反力特性应尽可能靠近，以利于改善电器的性能。吸力特性与反力特性配合紧密的程度可用返回系数来表示，这将在继电器一节中讲述。

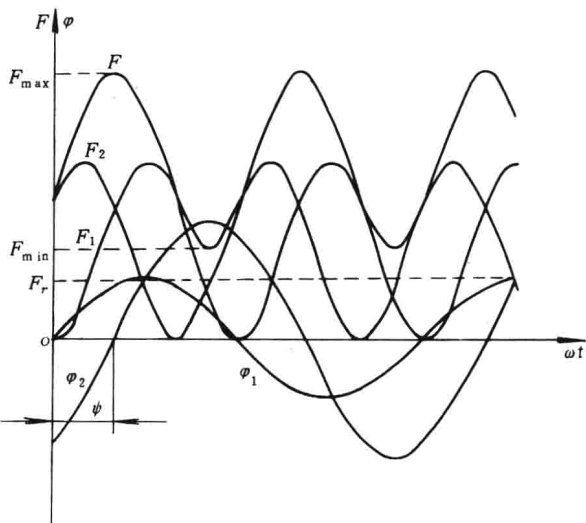


图 1-8 有短路环时的吸力变化曲线

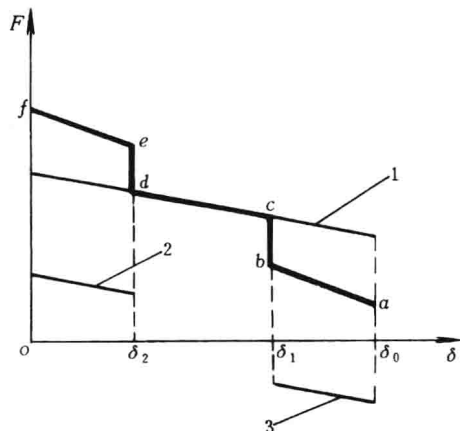


图 1-9 反力特性

1—反作用弹簧力 2—常开触点弹簧力
3—常闭触点弹簧力

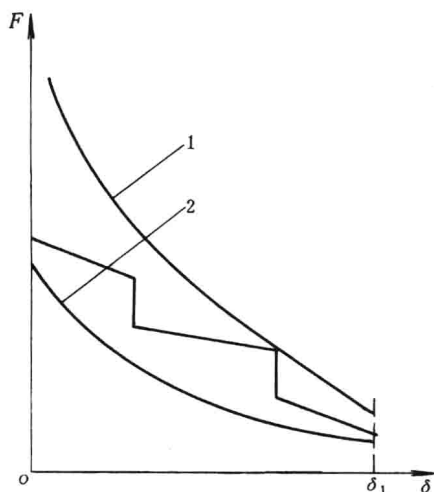


图 1-10 吸力特性与反力特性的配合
1—吸合时最小吸力特性 2—释放时允许最大吸力特性

(二) 触头系统

触头是一切有触点电器的执行部件，这些电器就是通过触头的动作来接通与分断电路的。因此，触头工作的好坏直接影响整个电器的工作性能。触头的工作可分为三种工作状态：闭合状态、闭合过程和分断过程。

1. 闭合运行的触头 触头闭合工作时，由于接触表面凹凸不平、表面层氧化，使接触面上覆盖一层导电性能差的薄膜，使接触电阻加大，致使损耗增大，温度升高，而温度的升高又反过来使触头表面氧化加剧。为此，对触头的容许温升一般都有要求。

2. 载流情况下触头的闭合

在触头闭合的过程中，往往发生运动部分的弹跳，而触头的这一机械振动又使触头表面产生电气磨损，严重时发生触头熔焊。为此，可适当增大触头弹簧的初压力，减小触头质量、降低触头的接通速度，采用指式触头，如图 1-11 所示。在触头闭合瞬间，先由动触头的端部 A 点与静触头接触，经过一段滚动后，再转变为动触头的根部 B 与静触头接触。这种指式触头闭合滚动接触的过程，

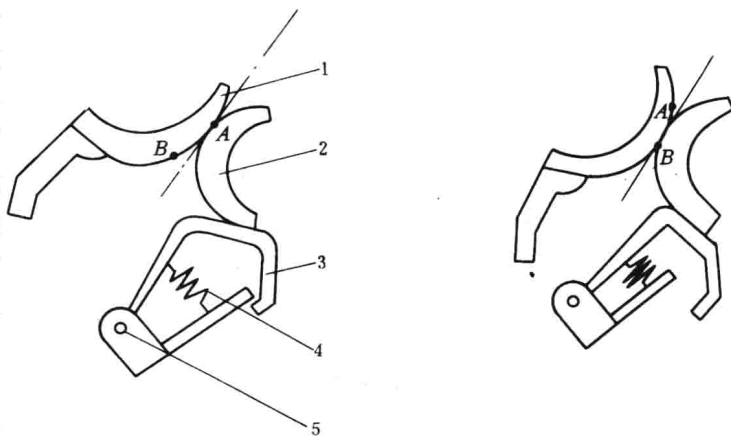


图 1-11 指式触头闭合过程

1—静触头 2—动触头 3—触头支架 4—触头弹簧 5—触头支架销孔

既消耗了撞击能量，同时触头的接通和分断都在触头的端部，有利于电弧转移，减轻触头的电气磨损，并且能擦除触头表面的氧化膜，对触头在闭合状态下的工作十分有利。

3. 载流情况下触头的分断 两触头之间的接触，实质上是许多个点的接触，触头在分断时最终将出现一个点接触的现象。这时，该点处的电流密度可达 $10^7 \sim 10^{12} \text{ A/m}^2$ ，致使金属熔化，并随着触头的分离形成融化了的高温金属液桥，一旦触头完全分开，金属液桥被拉断，在断口处产生电弧。

电弧形成的过程是：当触头间刚出现断口时，两触头间距离极小，电场强度极大，在高温和强电场作用下，金属内部的自由电子从阴极表面逸出，奔向阳极，这些自由电子在电场中运动时撞击中性气体分子，使之激励和游离，产生正离子和电子，这些电子在强电场作用下继续向阳极移动时，还要撞击其它中性分子。因此，在触头间隙中产生了大量的带电粒子，使气体导电形成了炽热的电子流即电弧。

电弧一经产生，便在弧隙中产生大量热能，使气体热游离作用占主要地位，特别是当触头表面的金属蒸气进入弧隙后，气体热游离作用更为显著。由此可见，电压越高，电流越大，即电弧功率越大，弧区温度越高，电弧的游离因素就越强。

与此同时，弧隙中还存在去游离因素。因为已游离的正离子和电子在空间相遇时要进行复合，重新形成中性的气体分子，同时高度密集的高温离子和电子，要向周围密度小、温度低的介质方面扩散，使弧隙内离子和自由电子浓度降低，电弧电阻增加，电弧电流减小，热游离大为削弱。

所以,电弧是游离与去游离的统一体,触头分断是切断电流,应使电弧尽快熄灭。为此,应抑制游离因素而加强去游离因素,若去游离处于主导地位,就能使电弧熄灭。

(三) 灭弧方法和灭弧装置

为使电弧熄灭,可采用将电弧拉长、使弧柱冷却、把电弧分成若干短弧等方法。灭弧装置就是基于这些原理来设计的。

1. 电动力吹弧 图 1-12 是一种桥式双断口触头系统。所谓双断口就是在一个回路中有两个产生和断开电弧的间隙。当触头断开电路时,在断口处产生电弧。静触头 1 和动触头 2 在弧区内产生图中所示的磁场,根据左手定则,电弧电流将受到均指向外侧方向电磁力 F 的作用而使电弧向外侧移动,一方面使电弧被拉长,另一方面使电弧温度降低,有助于电弧熄灭。

这种灭弧方法结构简单,无需专门灭弧装置。一般用于交流电器,当交流电弧电流过零时,触头间隙的介质强度迅速恢复,将电弧熄灭。

2. 磁吹灭弧 为加强弧区的磁场强度,以获得较大的电弧运动速度,可采用图 1-13 所示串联线圈的磁吹(magnetic blow-out)装置。由图可知,由磁吹线圈产生的磁场集中,经铁心和导磁夹板进入电弧空间。于是,电弧在磁场力作用下在灭弧罩内部迅速向上运动,并在引弧角附近被拉到最长。在电弧运动过程中,一方面拉长,另一方面又被冷却,以使电弧迅速熄灭。引弧角除有引导电弧运动的作用外,还能起到保护触头的作用。

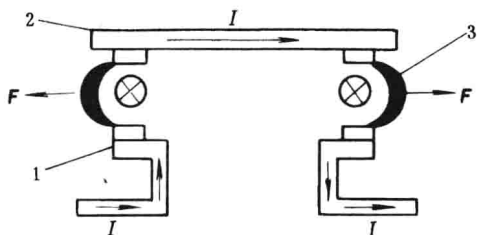


图 1-12 双断口结构的电动力吹弧
1—静触头 2—动触头 3—电弧

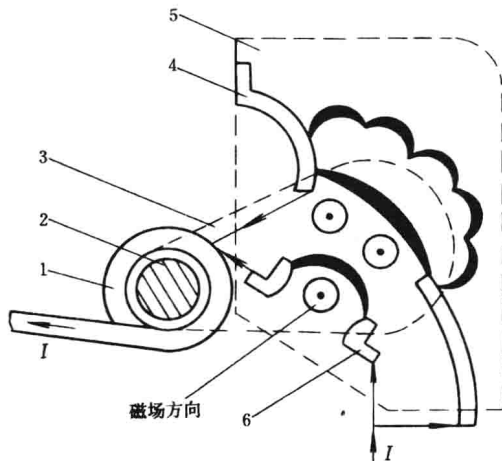


图 1-13 磁吹灭弧工作原理
1—磁吹线圈 2—铁心 3—导磁夹板 4—引弧角
5—灭弧罩 6—动触头

上述灭弧方式为串联磁吹灭弧。由于磁吹线圈与主电路串联,所以作用于电弧的磁场力大小随电弧电流大小改变。但磁吹力方向与电流方向无关。

此外,还有并联磁吹方式,其小电流时的磁吹效果比串联磁吹为好,但当触头电流反向时,必须同时改变磁吹线圈的极性。否则,磁吹力将反向,造成电弧不易熄灭,甚至损坏电器。

由上分析可知,磁吹灭弧装置广泛用于直流电器中。

3. 窄缝灭弧室 它是由耐弧陶土、石棉、水泥或耐弧塑料制成,用来引导电弧纵向吹出并防止相间短路,同时使电弧与灭弧室的绝缘壁接触,使其迅速冷却,增强去游离作用,使电弧熄灭。为此制成窄缝灭弧室,如图 1-14 所示。缝宽小于电弧直径,使电弧紧密与缝壁接触,加强冷却,同时也加大了电弧运动的阻力,使电弧运动速度下

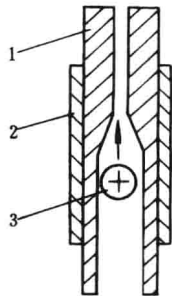


图 1-14 窄缝灭弧室断面图
1—灭弧室壁 2—磁性夹板
3—电弧