

高等学校教材

自动电磁元件

(修订本)

河北工学院 颜威利 邹道元 主编

GAODENG XUE
XIAO JIAO DIAI

机械工业出版社

高等学校教材

自动电磁元件

(修订本)

河北工学院 颜威利 邹道元 主编



机械工业出版社

B 571814



前 言

本书是根据1983年5月在杭州召开的原机械委电工技术类专业教材编审委员会电器编审小组制订的《自动电磁元件》大纲进行编写的。

本书为高等院校电器专业选修课教材，也可作有关专业教学参考书，还可供从事电器及自动化元件制造和应用方面的工程技术人员参考。

以电磁原理工作的自动化电器元件，种类甚多，应用非常广泛。电磁铁、电磁继电器、电磁离合器、电磁传感器、频敏变阻器和磁放大器是自动控制系统必不可少的元件。对电器专业的学生和电器工作者来说，掌握各种自动电磁元件的基本理论、特性分析和设计计算是十分必要和有益的。

本书由河北工学院颜威利教授和邹道元副教授主编，沈阳工业大学任耀先教授主审。参加本书编写的有河北工学院颜威利（第一章）；陆俭国（第二、三章）；杨乐玉（第四章）；张乃宽（第五章）和邹道元（第六章）。

在编写过程中，天津机床电器厂罗绍宇同志、上海无线电八厂王力人同志、上海第三机床电器厂叶祥发同志、天津第三电器开关厂王永茂同志和天津第二机床电器厂童骥同志都提供了不少宝贵资料，编者在此表示衷心的感谢。

本书是在福州大学张冠生教授和河北工学院陆俭国教授1982年主编的《电磁铁与自动电磁元件》的基础上修订的，在编写过程中得到张冠生教授和陆俭国教授的许多帮助，在此表示衷心感谢。

最后，主审任耀先教授为本书付出了巨大的劳动并提出宝贵的意见，编者对此表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中不当之处在所难免，恳请读者批评指出。

编 者

目 录

绪论	1	§ 3-3 磁粉式离合器	140
第一章 电磁铁	4	第四章 电磁传感器	144
§ 1-1 概述	4	§ 4-1 概述	144
§ 1-2 电磁铁的工程设计方法	11	§ 4-2 电感式传感器	145
§ 1-3 电磁铁的优化设计方法	24	§ 4-3 电涡流式传感器	165
§ 1-4 电磁铁的数值计算方法	48	§ 4-4 感应同步器	172
§ 1-5 牵引电磁铁	62	第五章 频敏变阻器	182
§ 1-6 起重电磁铁	68	§ 5-1 概述	182
第二章 电磁继电器	72	§ 5-2 频敏变阻器的工作原理和性能	186
§ 2-1 概述	72	§ 5-3 频敏变阻器的设计	193
§ 2-2 继电器的一般问题	75	第六章 磁放大器	200
§ 2-3 自动控制用小型电磁继电器	92	§ 6-1 概述	200
§ 2-4 舌簧继电器	107	§ 6-2 扼流磁放大器	206
§ 2-5 极化继电器	116	§ 6-3 自饱和磁放大器	222
§ 2-6 磁保持继电器	120	§ 6-4 快速作用磁放大器	228
§ 2-7 时间继电器	122	§ 6-5 特殊用途的磁放大器	232
第三章 电磁离合器	129	§ 6-6 磁放大器设计	243
§ 3-1 概述	129	参考书目	271
§ 3-2 摩擦片式电磁离合器	133		

绪 论

自动控制在国防、尖端技术及国民经济各部门中起着十分重要的作用。所谓自动控制就是指应用控制装置自动地、有目的地控制或操纵机器设备或过程，使之具有一定的状态和性能。被控制的机器设备或物体称为控制对象，而所用的控制装置常称为控制器。控制装置(控制器)和控制对象两者就组成了一个自动控制系统。

在自动控制系统中需要用很多自动化元件，它们在自动控制系统中起着检测、放大、控制、保护、执行、调节等作用。例如：用传感器对有关参数进行监视和检测；用电磁铁操纵机械装置或开闭阀门；用离合器对从动轴的输出转矩、转速、转向进行调节；用继电器实现控制、保护等作用；用频敏变阻器控制绕线式电动机启动；用磁放大器、磁继电器、磁性逻辑元件对信号进行放大、控制及逻辑运算等等。

一个自动控制系统是否能正常而可靠地工作，在很大程度上取决于该系统所用自动化元件的工作是否可靠。随着系统的大型化，一个系统中所用的元件数越来越多，只要其中一个元件工作不正常，就会使整个系统工作发生故障。例如一个容量为一万门的自动电话交换机约装有五万至七万个继电器，约有五十万对以上的触点参加工作。如这台交换机中的每对触点在十年内有一次失误的话就会使交换机每天平均发生一百多次故障。由此可见，自动化元件在自动控制系统中起着十分重要的作用。

自动化元件有电子元件、气动元件、液动元件及自动电磁元件等。本课程主要阐述自动电磁元件，即利用电磁原理进行工作的自动化元件，它主要包括各种电磁铁、电磁离合器、电磁继电器、电磁传感器、频敏变阻器和磁放大器等。它们的分类如下：

(一) 电磁铁

它的种类很多，主要分为以下几类：

1. 牵引电磁铁 主要用来牵引机械装置，开启或关闭各种阀门，以执行自动控制任务。
2. 制动电磁铁 主要用来对电动机进行制动以达到准确停车的目的。
3. 起重电磁铁 可用它作为起重装置来吊运钢锭、钢材、铸铁等铁磁性材料。
4. 自动电器的电磁系统 如电磁继电器和接触器的电磁系统、自动开关的电磁脱扣器及操作电磁铁等。
5. 其它用途的电磁铁 如磨床的电磁吸盘及电磁振动器等。

(二) 电磁离合器

按作用原理可分为以下几类：

1. 摩擦片式离合器；
2. 牙嵌离合器；
3. 转差式离合器；
4. 磁粉离合器。

(三) 电磁继电器

按各种特征进行分类如下：

1. 按控制电流（线圈电流）的种类可分为直流继电器和交流继电器。

2. 按线圈电流方向与吸动关系可分为非极化继电器（继电器吸动与否和线圈电流方向无关）和极化继电器（继电器吸动与否和线圈电流方向有关）。

（四）电磁传感器

按电磁原理工作的传感器主要有以下几类：

1. 电感式传感器；
2. 电涡流式传感器；
3. 感应同步器。

（五）频敏变阻器

按结构型式分为叠片式、管式、方柱式和混合式等。

（六）磁放大器

按其工作原理可分为以下几类：

1. 扼流磁放大器；
2. 自饱和磁放大器；
3. 快速磁放大器；
4. 特殊用途的磁放大器，如磁继电器、磁性逻辑元件、直流互感器等。

科学技术的不断发展和自动控制系统自动化程度的不断提高，对自动化元件提出了越来越高的要求，同时在自动化元件的设计和制造中新技术的引进促进了自动化元件的发展，使其品种不断增多，性能更趋完善。例如在电磁继电器方面，由于电子技术的迅速发展，特别是70年代以来大规模集成电路的普遍应用，要求继电器大大提高灵敏度以适于用集成电路直接驱动，同时还要求继电器缩小外形尺寸（特别是降低高度）以适应在印刷线路板上安装，这样就促进了高灵敏继电器及扁式继电器的发展。此外，电子技术引用到电磁继电器中大大推动了继电器的变革，出现和发展了固体继电器和混合式继电器。混合式继电器的基本形式大多是将固体放大器（或激励器）置于电磁继电器的前级而构成。混合式继电器不仅大大提高了继电器的灵敏度（从毫瓦级提高到微瓦级），使继电器可直接由标准的TTL电路控制，而且还保持了电磁继电器的某些固有特点，即高的输入输出间绝缘、低的接触电阻、触点电流大、过载能力高以及方便地实现多组转换等。因此混合式继电器在与集成电路配套使用以及在电源不充裕的场合获得了大量的应用。

下面扼要提一下当前自动电磁元件的发展方向及概况：

电磁铁在向缩小体积、节约材料、减轻重量、降低耗电量、提高寿命及提高可靠性等方面发展，并在研究用电子计算机计算电磁铁的磁场、吸力、温升、动特性以及根据给定的要求进行最佳化设计。在60年代出现了湿式阀用电磁铁，它与干式电磁铁不同，可以让油进入其内部，使电磁阀的所有运动部件都在液压油中工作。由于它具有不易漏油、换向可靠、寿命长、动作快等优点，所以它在液压系统中得到了日益广泛的应用。近年来出现的比例电磁铁，其吸力和电流间具有比例控制关系，在液压自动控制系统中获得良好应用。此外，还出现了感应斥力式快速机构，它已被应用在直流快速开关以及选相合闸开关等要求快速动作的操作机构中。

电磁离合器在向体积小、寿命高、动作快等方面发展。目前快速动作的电磁离合器已被用在仿形机床的进给系统中以及在数控机床中被用来代替液压马达作为执行元件。近十几年来

磁粉离合器得到很大发展,已广泛应用于很多部门的自动控制系统中。现在国外已制成了转矩从 $0.01\sim 150000\text{Nm}$ 的磁粉离合器系列。

电磁继电器在向小型化(缩小外形尺寸,特别是缩小高度尺寸以适应印刷线路板间隔的日益减小)、提高灵敏度以直接驱动集成电路、完善和加强可靠性保证措施以提高继电器可靠性、发展固体继电器及混合式继电器等方面发展。目前继电器在品种及性能上都有很大的发展,出现了很多体积小、灵敏度高、寿命高、动作快以及耐振耐冲击性能好的新品种。

电磁传感器在向灵敏度高、精度高、线性度好、工作可靠等方面发展。随着自动控制系统的不断发展,需要检测的参数日渐增多,因而传感器不但性能在不断提高,而且品种也不断增加。

频敏变阻器也在不断地改进频敏特性,以满足绕线式电动机重载和满载起动的需要。

磁放大器在向体积小、重量轻、提高软磁材料性能(导磁率高、矫顽磁力小、饱和磁感应强度高)、提高工作电源频率(采用 $400\sim 500\text{Hz}$ 中频以及 1000Hz 以上的高频电源)、降低灵敏限度以放大低电平微小直流信号等方面发展。近十几年来出现了半导体磁放大器,它是一种把半导体元件和磁放大器结合起来互相取长补短的组合装置。磁放大器的理论研究近些年来也在不断深入。模拟计算机及数字计算机已被应用到磁放大器的理论研究及设计计算等领域,促使磁放大器进一步向前发展。

总的看来,随着科学技术的发展,以及自动控制系统对元件要求的不断提高,自动电磁元件一定會在理论研究,新品种研制及性能指标进一步完善等各方面不断向前发展。

第一章 电 磁 铁

§1-1 概 述

一、工作原理

电磁铁是一种通电以后对铁磁物质产生吸力而把电能转换为机械能的自动电磁电器。它的应用范围极广，如起重各种钢铁、废铁和分散的铁砂等磁性物的起重电磁铁，用于起重吊车上对电动机进行制动的制动电磁铁，以及用来牵引机械装置、开启或关闭各种阀门的牵引电磁铁和阀用电磁铁等。许多自动化电器（如接触器、继电器和自动开关等）的驱动机构、操作机构和脱扣机构也以电磁铁作为主体。在原子能工业中，巨大的回旋加速器需要一个很大的电磁铁。在家用电器中，小小的电铃也需要应用电磁铁。总之，电磁铁的应用是十分广泛的。

电磁铁的类型很多，但它们的基本组成部分和工作原理却是相同的。电磁铁的结构并不十分复杂，一般由线圈、铁心和衔铁三个主要部分组成。但也可以是没有衔铁的，而以工作物作为可动被吸体，相当于衔铁的作用。现以直流拍合式电磁铁为例来说明电磁铁的基本工作原理。

图1-1是直流拍合式电磁铁的结构简图。线圈3套在铁心4上，两者固定不动，衔铁1是可动部分。当线圈通过一定数值的电流后，在由铁心、衔铁和气隙组成的磁路中就产生一定数量的磁通。在磁通的作用下，在工作气隙中铁心与衔铁之间产生一定大小的电磁吸力，将衔铁吸向铁心。当线圈中电流停止后，电磁吸力消失，衔铁在反力弹簧6的作用下返回。可见，线圈是电磁铁获得电磁能量的源泉，通过电磁吸力吸引衔铁运动而将电能转换为机械能。

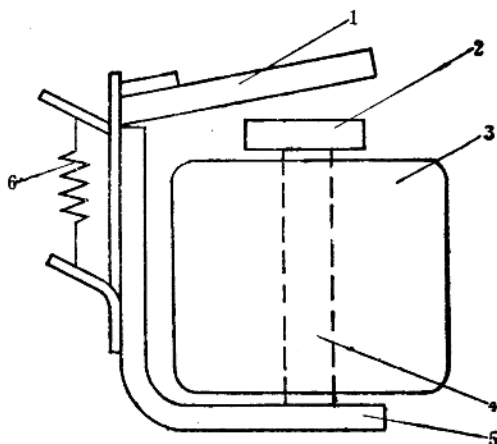


图1-1 直流拍合式电磁铁结构简图

1—衔铁 2—极靴 3—励磁线圈 4—铁心 5—轭铁 6—反力弹簧

二、电磁铁的结构类型

（一）直流电磁铁

直流电磁铁采用直流励磁，通过其磁路的磁通是不随时间作周期性变化的恒定磁通，因此，直流电磁铁的磁导体中就不会产生磁滞损耗和涡流损耗。这一特点决定了直流电磁铁的导磁体和励磁线圈具有图1-1所示结构型式，导磁体由整块的软钢或工程纯铁加工制成，线圈采用无骨架结构，并且直接套在铁心柱上，以增大散热面积，使线圈中产生的热量能更好地散发到周围的介质中去。铁心柱通常被加工制成圆柱形，而且呈细长状，轭铁和衔铁则用

扁钢类的型材冲制。

按结构类型来区分,直流电磁铁有转动式和直动式两类,前者又称为拍合式,后者通常为螺管式。

拍合式电磁铁的结构特征如下:

1. 衔铁绕棱角转动

拍合式结构型式的特点是衔铁与轭铁之间仅有棱角一线接触,因此摩擦面小而灵活。为了防止衔铁运动时产生相对位移,可采用压棱装置。棱角相互摩擦处经过淬硬处理后,磨损非常小,故这种结构型式的电磁铁具有极高的机械寿命,可达千万次。

2. 铁心端面装有极靴

直流拍合式电磁铁通常吸力特性非常陡峭,为了便于同反力特性良好配合,获得较平坦的吸力特性,可在铁心端部加上一个极靴,以改善特性配合。此外,从结构上来看,有了极靴对线圈的固定和非磁性垫片的固定都更为方便。

3. 铁心端面处设置非磁性垫片

非磁性垫片通常由薄铜片或薄铝片冲制而成,其作用在于减弱剩磁,以防止衔铁在线圈断电以后仍被粘住在铁心上,保证衔铁能够可靠地释放。

拍合式电磁铁有几种结构型式如图1-2所示,图a为U型拍合式结构;图b为U型铁心柱拍合式结构,其特点是在铁心与轭铁之间没有非工作气隙,因为它们是由整根的型材弯制的,适用于要求缓慢动作的场合;图c为电话继电器所采用的一种拍合式电磁铁,其特点是除了通过工作气隙的主磁通外,衔铁与铁心之间的漏磁通也能产生吸力做功,所以灵敏度很高;图d为E型拍合式结构,其外侧一极处的磁通也能够产生电磁吸力,此吸力在额定行程处甚小,在闭合位置处较大,所以这种结构型式电磁铁的吸力特性较之U型的更陡,它适用于触头数量较多的中间继电器。

螺管式电磁铁是直动的,其结构特征是衔铁的行程较长,并且衔铁是在线圈的内腔中作直线运动的。由于其电磁吸力中包含有由漏磁通产生的螺管力,所以螺管式电磁铁常用于需要作功较大及行程较长处,例如,用于长行程的牵引装置和制动装置中。

图1-3表示螺管式电磁铁的几种结构型式,图a为无壳螺管式电磁铁。这里,作用于衔铁的电磁吸力主要是螺管力,它是由集中在衔铁附近的漏磁通产生的,其数值较小,但吸力特性的平坦部分却特别长;图b是甲壳开口螺管式,由于有了铁质外壳和法兰,使螺管力增大;图c是衔铁端面为平面状的有止座螺管式电磁铁,这种电磁铁的磁导体给主气隙磁通提供了封闭的铁心回路,在闭合位置附近电磁吸力得到加强,因而吸力特性较为陡峭;图d是衔铁端面为圆锥状的螺管式电磁铁。锥形衔铁头的存在,使大行程下的电磁吸力提高了很多,所以吸力特性比端面为平面状的衔铁要平坦一些。因此,这种电磁铁对长行程的工作条件很为适宜。图e是具有阶梯状衔铁的螺管式电磁铁,由于阶梯状衔铁,使得吸力特性变得更为平坦并增大额定气隙下的电磁吸力。

(二) 交流电磁铁

交流电磁铁采用交流激磁,所以通过其磁路的磁通是随时间作周期性变化的交变磁通。这样,在交流电磁铁的导体中就必然地会产生磁滞损耗和涡流损耗。同时,交流电磁铁所产生的电磁吸力也是周期性变化的,出现电磁吸力等于零的情况。这些特点就决定了交流电磁铁具有如下的结构特征:

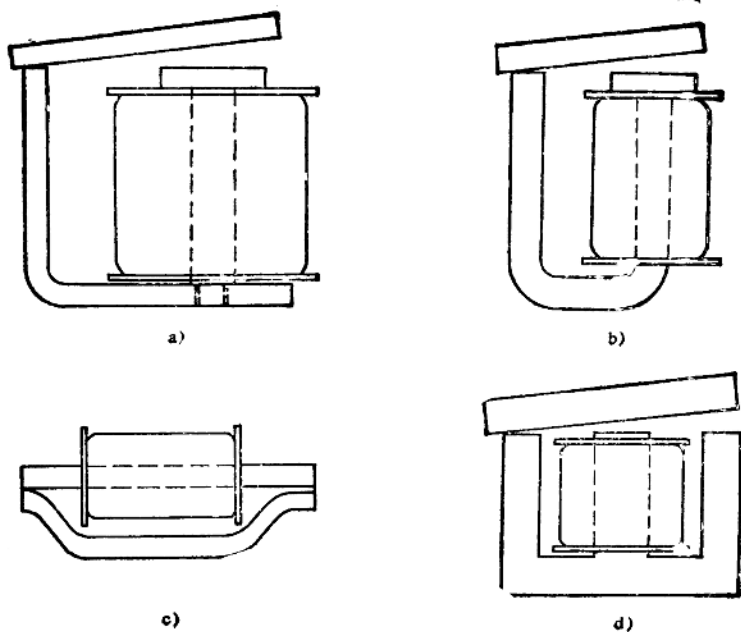


图1-2 直流拍合式电磁铁结构类型

a) U型 b) U型铁心柱式 c) 电话继电器用拍合式 d) E型

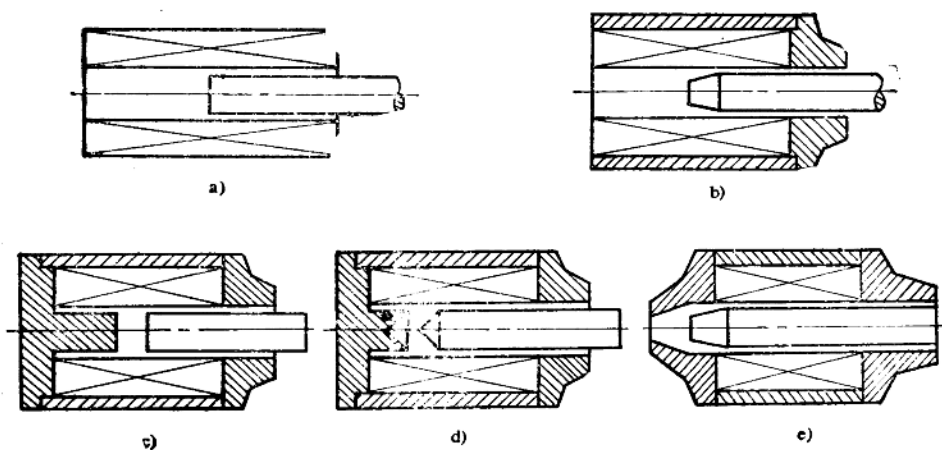


图1-3 直流螺管式电磁铁的结构型式

a) 无壳螺管式 b) 甲壳开口螺管式 c) 有止座螺管式 d) 锥形衔铁头螺管式 e) 阶梯状衔铁螺管式

1. 导磁体

由于导磁体产生磁滞损耗和涡流损耗而严重发热，为了尽可能地减少损耗、降低发热，交流电磁铁的导磁体必须采用高电阻率的硅钢片制造。先是将硅钢片冲制成所需的形状，然后再叠合到所需的厚度，最后再用铆钉把这些冲片铆装在一起。这样，交流电磁铁的铁心柱

就只能是矩形的或正方形的。

2. 分磁环

为了克服因电磁吸力过零而产生的振动和噪声，单相交流电磁铁的铁心端面上要装设分磁短路环，以减弱电磁吸力的脉动。

3. 线圈

由于导磁体中有磁滞损耗和涡流损耗，所以线圈温升一般比较高。这样，导磁体不仅不能吸收线圈发出的热量，反而可能传些热量给线圈。因此，为了防止或者减少来自导磁体的热量，交流电磁铁的线圈通常要作成有骨架的形式，并且在几何形状方面一般是矮而粗的。

根据上述特点，交流电磁铁的典型结构型式如图1-4所示。

和直流电磁铁一样，从结构类型来看，交流电磁铁也分为直动式和转动式两类。

直动式交流电磁铁在结构方面大体可以分为六类：单E型、双E型、单U型、双U型、T型和螺管型，如图1-5所示。一般的说，单E型和单U型电磁铁的吸力特性较陡，而双E型和双U型较为平坦。T型电磁铁通常用于交流牵引电磁铁，甲壳螺管式则适用于长行程的电磁铁。

转动式交流电磁铁大都是双U型或双E型的，通常用于大、中容量的电磁铁。

为了减少线圈断电后铁心中的剩磁，防止衔铁被剩磁粘住而不能释放，在交流电磁铁的闭合磁路中要引入去磁间隙。对于E型电磁铁，可在其中间磁极处设一去磁间隙 Δ ，即通过磨削中间磁极的端面，使其高度略低于两边磁极的高度，如图1-6a所示。对于U型电磁铁，则可在铁心中间加入一个去磁间隙 Δ ，如图1-6b所示。

三、特性配合

电磁铁是一种将电磁能转换为机械能的自动电器，它的任务是带动负载作机械功。因此电磁铁的吸力特性应该与负载反力特性良好地配合。

反力特性是指作用于电磁铁衔铁上的反作用力 F_r 与气隙长度 δ 间的关系。常见的反力特性有以下几种：（1）恒负载特性，如牵引电磁铁的恒力负载等；（2）弹簧负载特性，其反力随行程成直线增加；（3）接触器负载特性，其反力在触头闭合瞬间突增，反力特性呈跃增状。典型的反力特性如图1-7所示，图中 δ 为气隙长度。

电磁铁的静态吸力特性应与反力特性良好配合。吸力特性系指电磁吸力 F 与气隙长度 δ 的关系。为了保证电磁铁可靠吸合，在规定的动作电压（或电流）下，电磁铁的吸力特性应大于反力特性。但是，如果吸力特性比反力特性大得很多，则由于电磁铁吸合时撞击能量增加而导致使用寿命降低，例如对于E形电磁铁，如果撞击能量过大，会使铁心边柱较快磨损，中柱去磁间隙减少，到一定程度电磁铁就不能继续使用了。对于接触器等开关电器的磁系统，如果吸力特性比反力特性高得太多，则触头闭合速度过大，触头振动时间增加，会导致触头电磨损增加，电气寿命降低。因此，过大的吸力是不必要的，会降低电器的机械和电气寿命。当然，对于小容量快速动作继电器，则又是另一种情况了。图1-8中曲线1表示吸力特性与

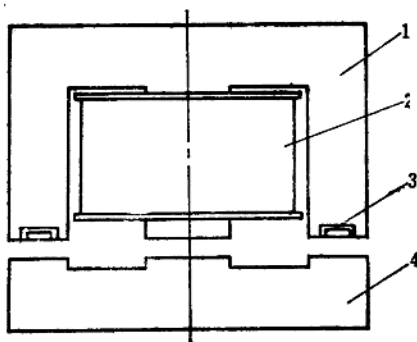


图1-4 交流电磁铁结构示意图
1—铁心 2—线圈 3—分磁环 4—衔铁

反力特性良好配合的情况，曲线2吸力特性则过大，曲线3吸力特性与反力特性相交点过多，会产生启动后不能完全吸合的现象，曲线4代表反力特性。应当指出，仅仅讨论静态吸力特性与反力特性的配合是不全面的，实际上电磁铁的吸合过程是一动态过程，应该进一步分析各动态特性间的配合问题，这里所作的静态特性分析仅仅是初步的。

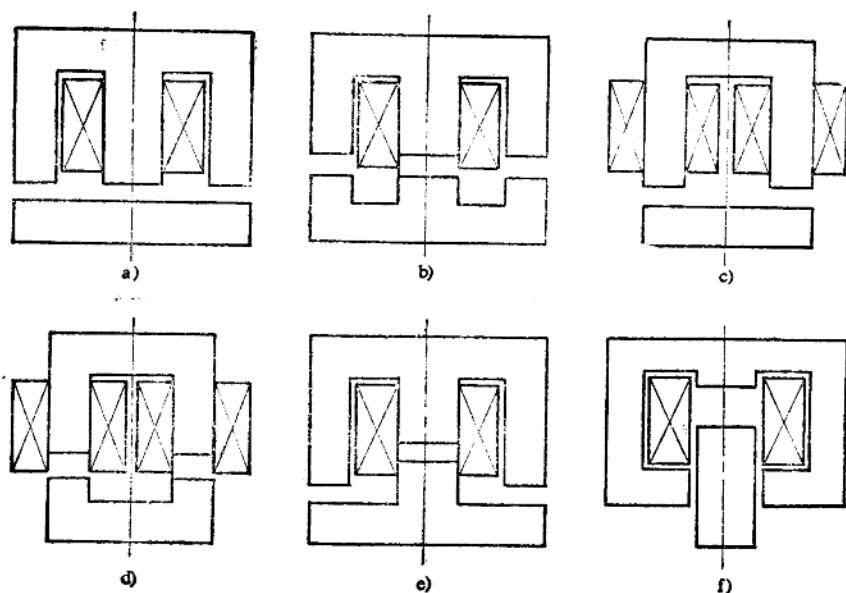


图1-5 直动式交流电磁铁结构示意图

a) 单E型 b) 双E型 c) 单U型 d) 双U型 e) T型 f) 甲壳螺管型

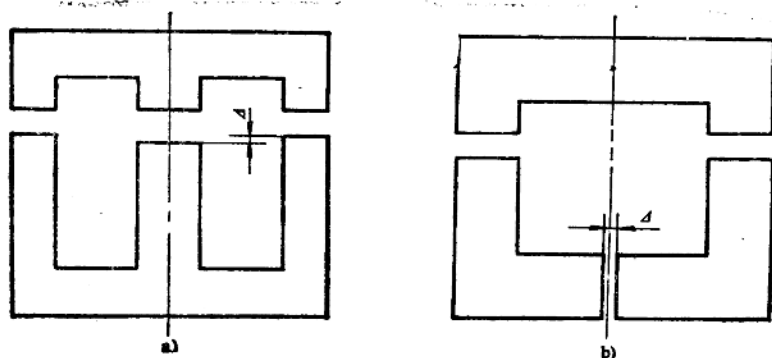


图1-6 去磁间隙 Δ

a) E型电磁铁 b) U型电磁铁

对于不同类型的负载反力特性，应该选择不同型式的电磁铁，使其吸力特性能够与反力特性良好配合。

一般地说，直流电磁铁的吸力特性比较陡峭，而交流电磁铁的吸力特性比较平坦。由图1-9拍合式电磁铁吸力特性可以看出，吸力特性随着恒磁势或恒磁链的不同而有所不同。

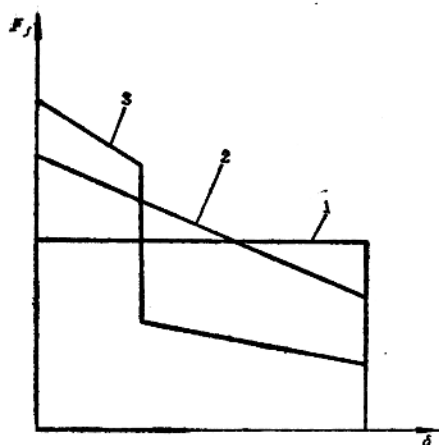


图1-7 典型的反力特性

1—恒负载 2—弹簧负载 3—接触器负载

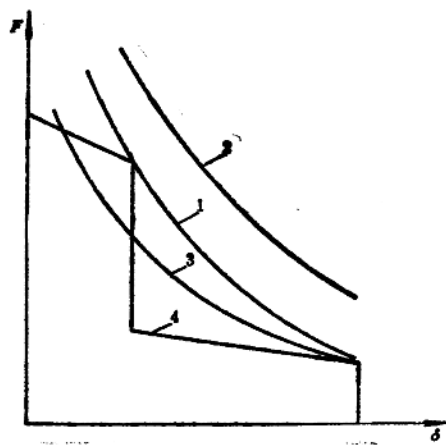


图1-8 吸力特性与反力特性的配合

当线圈是直流励磁时，磁系统属恒磁势，即磁势不随气隙而变， $IN = \text{常数}$ 。吸力 F 与工作气隙 δ 的关系可由下式表示：

$$F = \frac{\Phi_{\delta}^2}{2\mu_0 A} = \frac{(IN)_{\delta}^2 \mu_0 A}{2\delta^2} \quad (1-1)$$

式中 $(IN)_{\delta}$ ——工作气隙磁压降；

Φ_{δ} ——工作气隙中工作磁通；

A ——磁极面积。

由上式可以看出恒磁势磁系统吸力 F 与气隙 δ 的平方成反比。当气隙增大时，吸力迅速减小，而随着气隙 δ 的减小，吸力就急剧增加，因此吸力特性很陡峭，如图 1-9 中曲线 1 所示。

当线圈是交流电压励磁时，这种磁系统叫作恒磁链系统，即磁链不随气隙而变， $\psi \approx$

$\frac{u}{4.44f} = \text{常数}$ ，吸力 F 与工作气隙 δ 的关系如下式所示：

$$F = \frac{\Phi_{\delta}^2}{4\mu_0 A} = \frac{1}{4\mu_0 A} \left(\frac{\phi}{\sigma} \right)^2 = \frac{1}{4\mu_0 A} \left(\frac{\psi}{\sigma N} \right)^2 \quad (1-2)$$

式中 Φ_{δ} ——气隙工作磁通，以幅值表示；

F ——电磁吸力，以平均值表示；

Φ ——按磁链等效的磁系统的等效磁通；

σ ——漏磁系数；

ψ ——磁链。

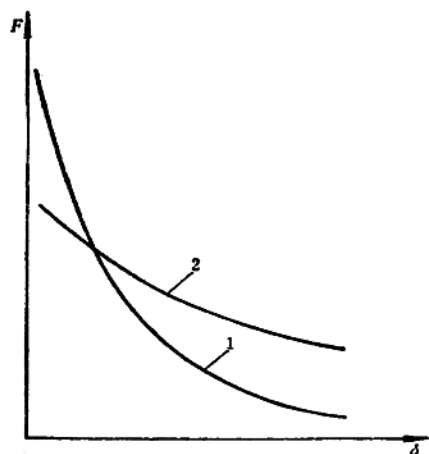


图1-9 拍合式电磁铁吸力特性

1— $IN = \text{常数}$ 2— $\psi = \text{常数}$

由上式可以看出, 恒磁链系统吸力 F 与气隙 δ 并无直接关系, 只有漏磁系数 σ 随气隙增加而增大, 其它参数均为常数, 因此气隙增大时吸力不象恒磁势系统那样减少得快, 如图1-9中曲线2所示。

因此, 对于负载反力特性很陡的电磁铁, 如真空接触器的磁系统, 宜采用直流励磁。对于某些大容量交流接触器和电磁铁, 为改善特性配合并节约长期工作时能耗, 也常常采用直流励磁。

同一类型的直流电磁铁, 采取不同的磁极形状也可获得不同的吸力特性, 图1-10为不同磁极形状的直流螺管电磁铁吸力特性, 图中曲线1为磁极端面为平面的吸力特性, 曲线2为磁极端面为圆锥形的吸力特性。由式(1-1)可知, 在大气隙时, 由于圆锥形磁极面积 A 比平面磁极面积要大, 而气隙磁压降 $(IN)_{\delta} \approx IN$ 近似为一常数, 因此圆锥形磁极的吸力比平面磁极的吸力要大。在小气隙时, 由于铁心接近饱和, 大部分磁压降消耗在铁心上, 气隙磁压降低, 这时磁极面积 A 增加引起气隙磁压降 $(IN)_{\delta}$ 减少, 从而使吸力减小, 因此小气隙时圆锥形磁极的吸力比平面磁极要小。由此可知, 圆锥形磁极的直流电磁铁吸力特性比平面磁极的吸力特性要平坦。改变锥面角度可以改变吸力特性的陡度。对于拍合式直流电磁铁, 改变极靴的面积也可以改变它的吸力特性。

交流电磁铁常采用不同的衔铁形状来获得不同的吸力特性。图1-11表示不同衔铁形状的交流U型电磁铁的吸力特性, 图中曲线1为单U型电磁铁, 曲线2为双U型电磁铁。由式(1-2)可知, 对于单U型磁系统, 由于漏磁系数 σ 较大, 其吸力较低, 而对于对称的双U型磁系统, 在磁极面积和线圈尺寸、参数均相同的情况下, 按磁链等效归算的等值漏磁导只有单U型的1/4, 漏磁系数 σ 较小, 因而其吸力也较高, 同时衔铁伸入到线圈内部也可获得附加的螺管力。在吸合位置时, 由于单U型和双U型二者的漏磁系数都接近于1, 因此二者吸力基本接近。由此可知, 单U型电磁铁的吸力特性较陡, 而双U型电磁铁的吸力特性较平坦, 实用上常采用不对称的双U型磁系统来获得需要的吸力特性。单E型和双E型电磁铁的吸力特性与单U型和双U型相近似。

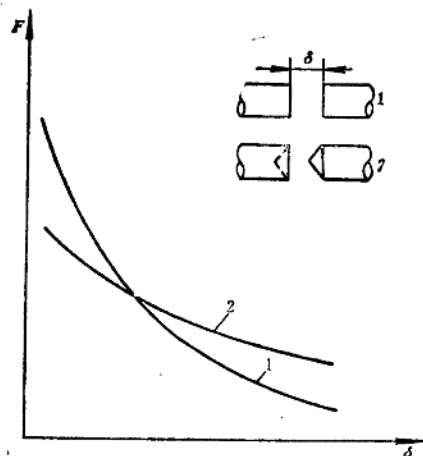


图1-10 不同磁极形状的直流电磁铁吸力特性
1—平面磁极的吸力特性 2—圆锥形磁极的吸力特性

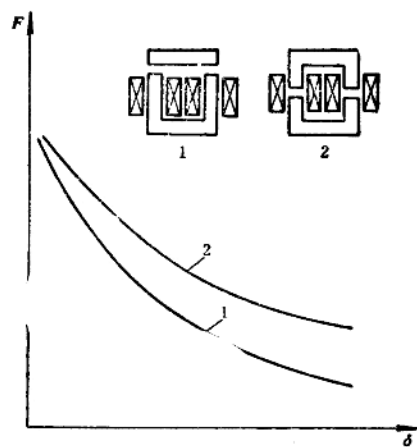


图1-11 不同形状的交流电磁铁吸力特性
1—单U型电磁铁吸力特性 2—双U型电磁铁吸力特性

§1-2 电磁铁的工程设计方法

一、设计要求和步骤

电磁铁设计的任务是根据给定的要求与原始数据设计出既经济又有良好性能的电磁铁，包括确定电磁系统的结构形式，铁心尺寸，线圈尺寸和参数等，并进行吸力特性计算和温升计算，检验其是否满足给定的要求。此外，还应充分考虑设计的经济性、工艺性及标准化。

对于电磁铁设计，主要要求如下：

(1) 电磁铁的吸力特性应与给定的反力特性良好配合。在电磁铁实际工作中，应考虑动态特性的配合，但由于动态特性的计算很复杂，因此为简化设计工作起见，在工程设计时，一般按静态吸力特性满足特性配合要求来考虑。

(2) 电磁铁的动作值应符合规定的要求，即在规定的动作电压（通常动作电压 $U_c = 0.85U_N$ ， U_N 为线圈额定电压）下，电磁铁应能可靠地吸合，启动电压应等于吸合电压。在电磁铁线圈断电后，应能保证可靠地释放，释放电压应等于返回电压。

(3) 在规定的工作制下，线圈温升不得超过允许值。对于长期工作制来说，线圈加以额定电压 U_N 长期连续工作时温升不应超过允许值。

(4) 经济性方面包括功率损耗小、成本低、结构简单等。

(5) 其它有动作时间、工作频率、工作环境等。

对电磁铁设计的要求是多方面的，许多参数之间又存在着错综复杂的关系，使电磁铁的设计和计算很复杂和困难。电磁铁的工程设计方法是从一些简化的基本公式出发，引入一系列的经验系数，从而得出电磁铁的基本结构尺寸和线圈参数。由于所用的公式是近似的，所选用的参数也是经验的，因此在初步确定结构尺寸后，还要通过验算，反复修正，最后通过模型试验来检验。一个满意的电磁铁设计往往要经过多次反复才能取得。

电磁铁的设计步骤如下：

(1) 确定结构型式。电磁铁结构型式的选择应从电磁铁工作的整体要求来考虑，如吸力特性和反力特性的配合以及经济性和工艺性等问题。电磁铁的结构型式可以按结构因数 K_s 来选择，而在相当大的程度上是按经验选择的，将国内、外现有先进产品进行分析、试验、比较和总结，以确定合理的结构型式。

(2) 初步设计。即初算，其主要任务是确定电磁铁的主要结构尺寸。在初算时，需要按照经验数据事先选择一些合理的参数，如工作气隙中的磁密 B_g 、铁心中磁密 B_i 和漏磁系数 σ 等，然后根据一些简化的基本计算公式求出电磁铁的主要结构尺寸和线圈参数。

(3) 验算。主要任务是验算在初步设计中确定的电磁铁尺寸和参数是否满足要求，如吸力特性、线圈温升以及设计的经济性等。因为初步设计中许多系数是假定的，因此必须进行验算，才能确定所选参数是否合理。

(4) 模型试验。设计的电磁铁需经过模型制作，进行型式试验，测定全部技术指标是否符合技术条件要求，并根据试验结果修改和完善设计。

因此，电磁铁的工程设计是一个不断计算，实践和试验的过程，往往需要经过多次反复才能得到满意的结果。

二、直流电磁铁的初步设计

(一) 设计的原始数据

1. 反力特性 $F_r=f(\delta)$ 和设计点的吸力与气隙

根据负载反力特性的情况,在电磁铁设计时首先要选择一个最重负载点作为设计点。对于一般电磁铁和电磁继电器,通常选择衔铁打开位置作为设计点,因为这类负载反力 F_r 随气隙 δ 的变化不大,只要保证在打开位置时吸力能大于反力,那么随着气隙减少,吸力急剧增加,便可保证电磁铁可靠吸合。对于某些接触器,由于在主触头刚接触时反力有一跃增,这时工作较为繁重,可选这一位置为设计点。

设计点上的吸力 F_a 由已知反力特性确定。为使电磁铁能可靠工作,吸力 F_a 应为相应气隙的反力 F_r 乘上一安全系数 k_a ,安全系数 k_a 可按如下值选取:对快速继电器 $k_a=3\sim4$;对小功率继电器 $k_a=2\sim3$;对控制继电器 $k_a=1.5\sim2$;对接触器 $k_a=1.2\sim1.5$;对牵引电磁铁和制动电磁铁 $k_a=1.1\sim1.2$ 。

因此在电磁铁设计时,以设计点的气隙 δ_0 和吸力 F_a 作为原始数据。

2. 线圈额定电压 U_N 和动作电压 U_0

线圈的额定电压 U_N 是指在长期工作状态下其温升不超过允许值而规定的线圈所能承受的电压。动作电压 U_0 是指考虑电源电压波动而能保证电磁铁可靠吸合的电压,通常取 $U_0=0.85U_N$,对于某些重要场合如矿用电磁电器,则取 $U_0=0.75U_N$ 。

3. 线圈的允许发热温升 τ

在规定的工作制下,线圈的允许温升决定于所选用的绝缘等级。按标准规定最高介质温度为 40°C ,各种绝缘等级的线圈允许温度应符合标准规定。

4. 其它

动作时间,操作频率和返回系数等。

(二) 电磁铁结构型式的选择

直流电磁铁的结构型式可以按电磁铁的结构因数 K_s 来选择。结构因数的定义如下:

$$K_s = \frac{\sqrt{F_a/10}}{\delta_0} \quad (1-3)$$

式中 δ_0 ——设计点的气隙,单位为cm;

F_a ——设计点的吸力,单位为N。

结构因数 K_s 实际上代表了磁系统尺寸的比例。对于直流电磁铁来说,在气隙磁密为一定的条件下,电磁吸力 F_a 与磁极面积 A 成正比,因此 $\sqrt{F_a}$ 与磁极直径 d 成正比,也可认为与铁心直径 d_c 成正比。同时线圈的励磁安匝 IN 与气隙长度 δ_0 成正比,而 IN 又决定了线圈长度,也即大体上决定了铁心长度 l_c ,因此可以认为 δ_0 与 l_c 成正比。这样,结构因数 K_s 就代表了电磁铁的几何形状,即铁心直径 d_c 与铁心长度 l_c 之比,通过结构因数 K_s 把给定初始条件 F_a 、 δ_0 和主要结构尺寸联系起来了,它可以作选择电磁铁最佳结构型式的根据。

合理地选择电磁铁的结构型式除了满足特性上的要求外,主要考虑经济性的要求,即以最小的材料消耗获得尽可能大的功能。电磁铁作功的能力可以用拟定功来表示,所谓拟定功是指电磁吸力 F 与工作气隙 δ 的乘积。对于一定型式的电磁铁,可由吸力特性上各点吸力 F 与气隙 δ 的乘积得到拟定功 W 与气隙 δ 的关系曲线,此特性在某一气隙处达最大值。若电磁铁在该气隙下工作,可获得最大的有效功。不同型式的电磁铁吸力特性的陡度不同,因此获

得最大拟定功的气隙也不同。图1-12表示两种不同结构型式电磁铁的吸力特性和拟定功特性，例如曲线1代表平面磁极螺管电磁铁的吸力特性，曲线2代表圆锥磁极螺管电磁铁的吸力特性，前者特性较陡，而后者特性平坦；曲线1'和2'分别代表两者的拟定功特性。由图1-12显见，对于吸力特性较陡的电磁铁，在小气隙时可获得较大的拟定功，而对于吸力特性平坦的电磁铁，在大气隙时可获得较大的拟定功。

因此，对于结构因数 K_s 较大，即行程较小而吸力较大的电磁铁来说，采用吸力特性较陡的结构型式较为经济，而对于 K_s 较小，即行程较大而吸力较小的电磁铁，则适于采用吸力特性平坦的结构型式。

计算结果和实验结果表明，各种不同结构类型的电磁铁，其结构因数 K_s 值都有一定的范围。在此范围内，电磁铁将具有较高的经济重量指标。表1-1列出了不同类型的电磁铁结构因数 K_s 值的合理范围。

显然，衔铁为平板型的圆盘式电磁铁的吸力特性最陡， K_s 值亦最大，这种电磁铁适宜用于行程小、吸力大的场合。无止座的螺管电磁铁则与此相反，其吸力很少随行程而改变，吸力特性最平坦， K_s 值也最小，这种电磁铁宜用于要求行程大而吸力小的场合。

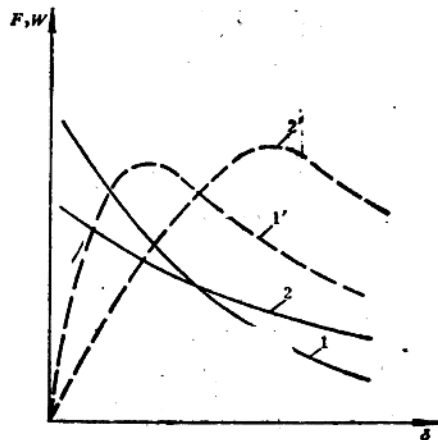


图1-12 电磁铁的吸力特性和拟定功

表1-1 各种型式直流电磁铁结构因数 K_s 的合理范围

电磁铁的结构类型	K_s 的合理范围， 单位为 $N \cdot s/cm$	电磁铁的结构类型	K_s 的合理范围， 单位为 $N \cdot s/cm$
衔铁为平板型的圆盘式电磁铁	>93	圆锥磁极有止座螺管电磁铁 $\alpha=45^\circ$	$5 \sim 16.5$
拍合式电磁铁	$2.6 \sim 26$	圆锥磁极有止座螺管电磁铁 $\alpha=80^\circ$	$1.2 \sim 5$
平面磁极有止座螺管电磁铁	$16.5 \sim 93$	无止座螺管电磁铁	<0.2

(三) 设计的基本公式

1. 吸力方程式

电磁吸力方程式是决定电磁铁尺寸参数的最关键的方程式。在初算中近似地只考虑气隙工作磁通产生的吸力，忽略边缘磁通产生的吸力。吸力计算采用麦克斯韦公式

$$F = \frac{B_g^2 A_p}{2\mu_0} \quad (1-4)$$

式中 B_g ——工作气隙中的磁感应强度，单位为T；

A_p ——磁极面积，单位为 m^2 。

2. 磁势方程式

建立磁势方程式的目的，是为了求出电磁铁正常工作时所需要的励磁磁势值（也即求出其励磁线圈所需要产生的安匝数）。

总磁势

$$IN = (IN)_s + (IN)_r + (IN)_t \quad (1-5)$$