绪　　论

§0－1　控制元件在自动控制系统中的作用

一、自动控制元件的定义和分类

随着科学技术的迅猛发展，自动控制系统在工业、农业、交通、航海、航空、航天及国防等各种领域中的应用日趋广泛。尽管它们的功能和结构不同，但基本组成均包括指令机构、控制器、放大器、执行机构、检测装置和被控对象等部分(图 0－1)。

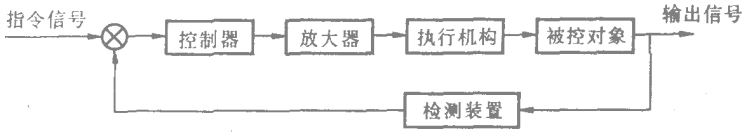


图 0－1　典型控制系统基本组成方框图

自动控制系统各部分功能是：指令机构发出的指令信号与检测装置检测的被控量（输出信号)之差，经过控制器的处理(校正)以满足一定的控制品质，由放大器将该信号放大后驱动执行机构，使被控对象的被控量跟随指令信号变化。

从以上各部分在系统中的功能和作用可知，任何一个自动控制系统都包括大量的检测、放大、执行和校正几个部分，实现这些部分功能的元件统称为自动控制元件。与上述功能相对应的元件称为测量元件、放大元件、执行元件和校正元件。

自动控制元件有很多类型，通常它们可以从能量转换的形式进行分类。自然界有多种形式的能量(如机械量、电能、磁能、化学能，核能等)，其中一部分元件是在磁场参与下进行机械能与电能之间或电能与电能之间转换。它们是利用电和磁的原理进行工作的元件，这类元件统称为电磁元件。电磁元件在自动控制系统中应用最多，是自动控制元件中最重要的部分。本书将对典型的电磁元件进行介绍。

为了学习方便，可以按各种分类原则对电磁元件进行分类。

1.按作用分类

(1) 功率元件 进行电 - 机能量转换的元件，如力矩电机、三相异步电动机等。

(2) 信号元件 进行机 - 电能量转换的元件。如测速发电机、自整角机、旋转变压器等。

2.按电流分类

(1) 直流元件：如直流电动机、直流无刷电机等。

(2) 交流元件：如自整角机、两相伺服电动机等。

(3) 脉冲元件：如步进电机等。

二、控制元件在自动控制系统中的作用

自动控制系统特别是计算机自动控制系统已成为现代科学技术、军事工程和现代工业等领域不可缺少的部分。因而自动控制元件在大型飞机、船舶、导弹、人造卫星、汽车、机床、机器人、家用电器等各种控制系统中得到广泛的应用。下面结合具体实例说明控制元件在自动控制

需要全本请访问 www.ertongbook.com

系统中的重要作用。

1. 防空天线 – 火炮控制(指挥)系统

现代武器正朝着威力大、速度快、准确度高等方向发展,只靠人的脑力和体力是不行的,必须借助于自动控制技术来实现。防空天线 – 火炮控制系统就是由雷达、指挥仪和火炮随动系统组成的现代武器系统，它可以有效地击中目标。该系统包括：

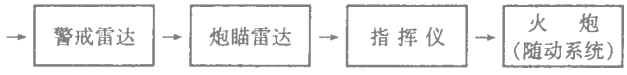


图 0 – 2 防空天线 – 火炮控制系统方框图

警戒雷达 —远距离发现目标,将其粗略的方位、高度、距离等参数发送给炮瞄雷达；

炮瞄雷达 —近距离精确地测得目标位置的雷达，它能发现并测得目标的方位角、高度角和斜距离，并将这些参数发送给指挥仪；

指挥仪 — 现代的指挥仪是一台计算机系统。它接收炮瞄雷达传来的信号，迅速而准确地计算出目标的未来点位置(方位角、高低角和斜距离),并把参数发送给火炮随动系统。

火炮随动系统 — 根据指挥仪传输来的目标位置信号，火炮随动系统将炮身转向目标的未来点方向,发射炮弹,击毁目标。

上述四部分组成的防空指挥系统的每一部分都是一个精密的控制系统，本书仅将火炮方位随动系统略述如下(图 0 – 3)。

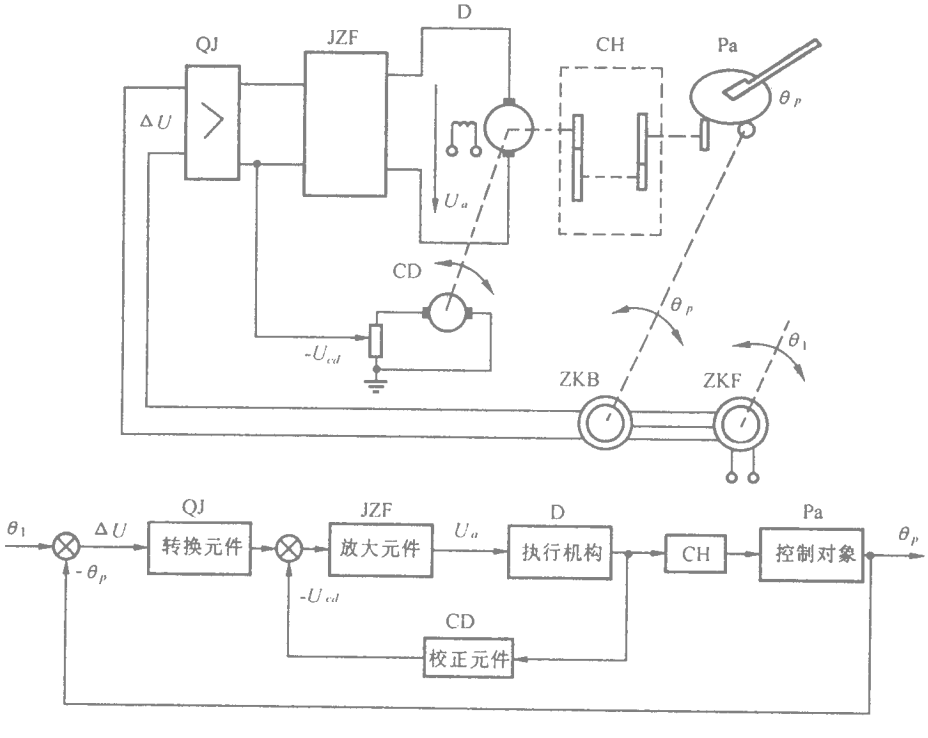


图 0 – 3 火炮随动系统（方位角）原理及其方块图

QJ—前放和解调 ;JZF— 晶闸管功放 ;D— 伺服电动机 ;CH— 减速机械 ;Pa— 火炮；

ZKF— 自整角发送机 ;ZKB— 自整角变压器 ;CD— 测速发电机

若系统各元件处于相对稳定的初始状态,即“火炮炮身”方位为 $\theta_p = 0°$,“自整角机对”也处于协调位置,$\theta_1 = 0°$。显然“误差电压”也为零。若此刻目标在方位 $\theta'_1 = 15°$ 处出现,自整角机发送机接到由指挥仪发出的控制信号,使其位置处于 $\theta'_1 = 15°$。于是“自整角机对”将产生相应的“偏差电压”(ΔU),经过解调和功率放大,作为控制电压将 U_a 加到直流电动机电枢绕组两端,电动机将向消除误差电压的方向旋转,经过减速装置拖动炮身,使 $\theta'_p = \theta'_1 = 15°$,从而使偏差电压为零,系统进入新的稳定状态。这时,炮身的方位已对准目标。如果结构类似的高低角随动系统也将炮身高低角置于适应位置,火炮便可以进入射击状态。

在系统中,还有一台直流测速发电机与直流伺服电动机同轴连接,它将把电动机的速度信号变换成电压信号,再负反馈到相应放大器的输入端。这个负反馈的作用将使控制系统的品质得到改善。

2. 导弹制导系统

导弹的制导系统是以导弹为控制对象的闭环系统,它主要由导引系统、控制系统和弹体组成(图 0 - 4)。

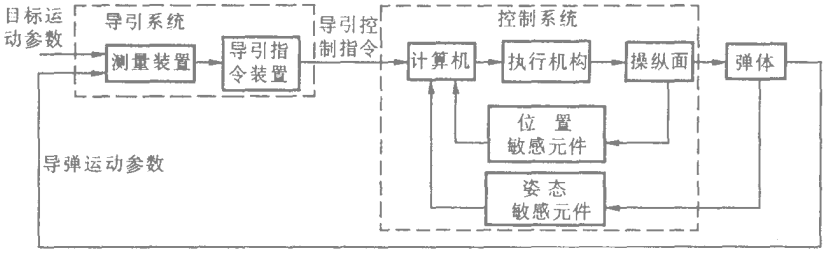


图 0 - 4　导弹制导系统基本组成方框图

导引系统一般由测量装置、导引指令装置组成,其功能是测量导弹相对理想弹道或目标的运动偏差,以形成预定的导引控制指令。

导弹控制系统一般由敏感元件(测量元件)、计算机和执行机构等组成。其主要功能是保证导弹在导引控制指令作用下沿着要求的弹道飞行,保证导弹的姿态稳定及不受各种干扰的影响.

3. 数控机床

数控机床一般由数控系统、包含伺服电动机和检测反馈装置的伺服系统,机床本体(包括主传动系统、强电控制柜)和各类辅助装置组成。(图 0 - 5)。

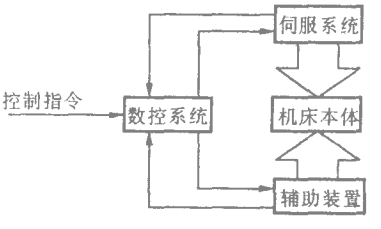


图 0 - 5　数控机床的组成示意图

数控系统是机床实现自动加工的核心。主要有操作系统、主控制系统、可编程控制器、各类输入输出接口等组成。其控制方式又可分为数据运算处理控制和时序逻辑控制两大类,其中主控制器内的插补运算模块就是根据所读入的零件程序,通过译码、编译等信息处理后,进行相应的刀具轨迹插补运算,并通过与各坐标伺服系统的位置、速度反馈信号比较,从而控制机床各个坐标轴的位移。而时序逻辑控制通常由可编程控制器(PLC)来完成,它根据机床加工过程中的各个动作要求进行协调,按各检测信号进行逻辑判别,从而控制机床各个部件有条不

紊地按序工作。

伺服系统是数控系统与机床本体之间的电传动联系环节。它主要由伺服电动机，驱动控制系统及位置检测反馈装置组成。伺服电动机是系统的执行元件，驱动控制系统则是伺服电动机的动力源。数控系统发出的指令信号与位置检测反馈信号比较后作位移指令，再经驱动控制系统功率放大后，驱动电动机运转，从而通过机械传动装置拖动工作台或刀架运动。

辅助装置主要由各类电气控制的刀具自动交换机、回转工作台、液压控制系统等组成，以完成不同的加工工艺。

从以上实例不难看出，无论哪种自动控制系统，控制元件均是系统重要的组成部分，它们在系统中起到了不可缺少的重要作用。随着科学技术的飞速发展，它们在各种自动控制系统中的作用会越来越重要。

§0－2　本书主要内容

本书作为自动化专业、检测技术专业本科生使用的技术基础课的教材，主要对各类典型控制元件(直流伺服电动机、直流测速发电机、步进电机、旋转变压器、自整角机、交流伺服电动机）的基本原理、简单结构、工作特性以及典型应用等予以介绍，并对传感器和新型控制元件（低惯量直流伺服电动机、无刷直流电动机等）作了简单介绍，以使学生尽量接触更多的控制元件，增加科技新水平的信息量。

本书对各类控制元件的论述有很强的工程实践性，因此在学习中不但要较好地掌握其基本原理，而且对其结构、应用等方面也要给予充分的重视，并要掌握实验环节，加强动手能力。

§0－3　预 备 知 识

电磁控制元件尽管种类繁多，但是它们在运行原理上，可以说是达到了惊人的统一。几乎所有的电磁控制元件在结构上都由两大部分构成 静止部分(定子)和运动部分(转子)。正如爱因斯坦所说：“一个理论体系的一切概念和一切关系，都归为尽可能小的逻辑上独立的基本概念和公理”;只要读者纯熟电路和电磁基本定理,并对电机运行原理基本掌握,学习本门课程将是不难的。为了承上启下,达到温故而知新的目的,本节将对铁磁物质的基本特性、磁路的基本物理量和基本定律进行简单介绍。

一、基本物理量

1. 磁感应强度 B

磁场是由电流或永磁体产生的。就其本质来说，一切磁现象都来源于电荷的运动。磁感应强度 B 是表征磁场强度强弱及方向的一个物理量,或称磁通密度(磁密),其国际单位是 T。

磁场中，不同地点的磁感应强度是不同的，为了形象地描绘出磁场中各处磁感应强度及方向的分布情况，可用该处磁力线的多少来表示。

图 0－6 为几种形状不同的导体，通人电流后产生磁力线的情况。

磁力线的方向与电流方向满足右手螺旋定则。磁力线上任意点的切线方向就是该点磁感应强度 B 的方向。

2. 磁通量 Φ

通过某一截面 S 的磁力线的总数称为磁通量 Φ,简称磁通。其定义为

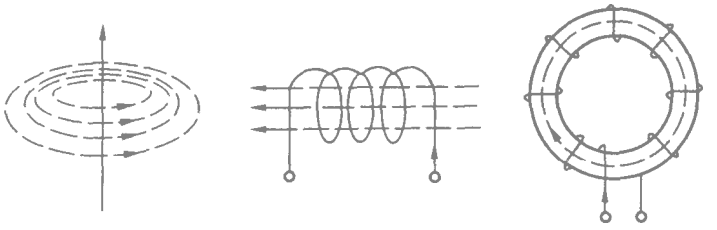


图 0－6　磁力线图
(a) 直导线;(b)螺线管;(c)环形线圈

$$\Phi = \int_S \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} \tag{0-1}$$

磁通的单位为 Wb。

3. 磁场强度 $\boldsymbol{H}$

磁场强度是用来表示磁场中各点磁力大小和方向的一个物理量,与磁感应强度不同,它的大小与磁场中磁介质的性质无关，仅与产生磁场的电流大小和载流导体的形状有关。

磁场强度与磁感应强度之间关系为

$$\boldsymbol{H} = \frac{\boldsymbol{B}}{\mu} \tag{0-2}$$

磁场强度 H 的单位是 A/m,μ 为磁导率。

4. 磁导率 μ

磁导率 μ 是用于衡量物质导磁能力的物理量。物质按导磁性能的不同分为铁磁物质（铁、钴、镍及其合金)和非铁磁物质(铁磁物质以外的其它物质,如铜、铝、橡胶等各种绝缘材料及空气等)两类。非铁磁物质的磁导率 μ 与真空的磁导率 μ_0 相差很小，工程上通常认为二者相同。

铁磁物质的磁导率 μ 要比真空的 μ_0 大很多倍(几百 ～几万倍不等),因此工程上用铁磁物质做成各种形状的磁路，以便使磁通能集中在选定的空间，以增强磁场。

磁导率的单位是 H/m。

真空的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$(H/m)

二、磁性材料的主要特性

1. 高导磁性

磁性材料(铁、钴、镍及其合金)的磁导率 μ 是非磁性材料磁导率($\approx \mu_0$)的几百 ～ 几万倍,这就使它们具有被强烈磁化(呈现磁性)的特性。

下面用磁分子学说解释磁性物质为什么具有被磁化的特性。大家知道在物质的分子中由于电子环绕原子核运动和本身自转运动而形成分子电流，分子电流也要产生磁场，每个分子相当于一个基本小磁铁。同时,在物质内部还分成许多小区域,这些小区域称为磁畴。由于磁性物质不同于其他物质,其分子间有一种特殊的作用力。在没有励磁电流(或外磁场)作用时,各个磁畴排列混乱，磁场互相抵消，对外就显示不出磁性来。当有励磁电流（或外磁场）的作用时，磁性物质每个磁畴内的分子磁铁都会顺外磁场方向转向，显示一定的磁性。

随着励磁电流的增大（或外磁场的增强），磁畴就逐渐转到与外磁场相同的方向上并整齐

需要全本请访问 www.ertongbook.com

地排列起来。这样，便产生了一个很强的与外磁场同方向的磁化磁场，而使磁性物质内的磁感应强度大大增加，这就是说磁性物质被强烈地磁化了。

2. 磁饱和性

铁磁材料的另一个磁特性可由磁化曲线或 $B-H$ 曲线来表示。例如，若一个没有磁化的铁磁物质制成的闭合环状铁心，将线圈均匀地缠绕在这一铁心上（图 0-7(a)），那么当改变通入绕圈内的电流 I 时，可以得到一条磁化曲线（图 0-7(b)）。

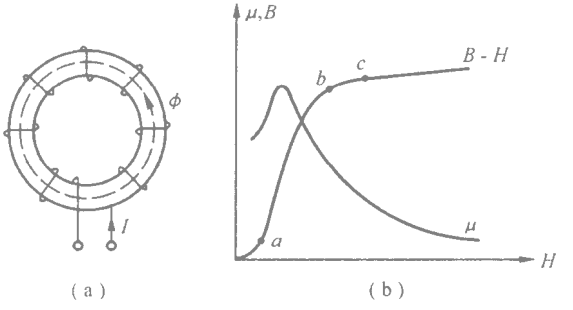


图 0-7 磁化曲线

(a) 闭合环状铁心及线圈；(b) 铁心的磁化曲线

随着通入线圈内电流 I 的增加，磁路内磁通增大，磁感应强度就增加。在开始阶段，B 随 H 的增加较慢，超过 a 点后再增大线圈电流则 B 迅速增长，超过 b 点之后增长减慢，并逐渐趋于饱和 $B-H$ 曲线上的 b 点称为膝点，c 点称为饱和点。当磁路内的磁感应强度 B 的数值超过 c 点所对应的数值后，励磁电流 $I(H)$ 继续增大，B 值增加不多，这种情况称铁磁物质达到饱和。这是因为磁性物质由于磁化所产生的磁化磁场不会随着外磁场的增强而无限地增强。当外磁场（或励磁电流）增大到一定值时，全部磁畴的磁场方向与外磁场的方向一致。这时磁化磁场的磁感应强度即达到饱和值。在实际应用中，我们应当避免磁路内的 B 值在饱和点以上，同时也应当注意磁路内的 B 值不应过低。通常将磁路内的磁密选择在 $B-H$ 曲线膝部或稍高一些。

铁磁材料的 $B-H$ 曲线不是直线，即 B 和 H 的比值 μ（磁导率）不是常数，μ 随 H 改变的情况如图 0-7(b) 所示。在磁化的起始阶段 μ 数值较小，随着 H 的增加，μ 值迅速增加达到最大值，H 再继续增加后，B 值接近饱和，而 μ 值反而下降，所以铁磁物质的 μ 值不是常数，其值的大小与磁场强度及铁磁物质的磁状态的情况有关。

3. 磁滞性

当图 0-7(a) 所示铁心线圈内的电流大小及方向改变时，磁场强度将循环地在 $+H_m$ 和 $-H_m$ 之间变化，这时就得到一个对称原点的闭合磁化曲线（图 0-8），该曲线称为铁磁物质的磁滞回线。

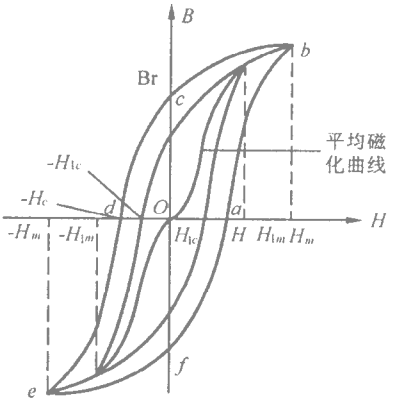


图 0-8 磁滞回线

铁磁物质反复磁化时，磁化过程的上升段 $a\rightarrow b$ 或 $(d\rightarrow e)$ 与下降段 $b\rightarrow c$ 或 $(e\rightarrow f)$ 不重合，即 H 减为零时，B 减小到 B_r。B_r 称剩磁，只有反向去磁的磁场强度达到 $-H_c$ 时剩磁才会消失。在反复的磁化过程中，B 的变化落后于 H，这种现象称为磁滞现象，由此测试出的闭合磁化曲线称为磁滞曲线。

若增大 H_m 或减小 H_m 可以得到不同的磁滞回线。为了便于磁路计算，实际工程中应用‘平均磁化曲线’进行磁路计算。平均磁化曲线是由不同 H_m 值的磁滞回线顶点相连的一条曲线。每种磁性材料的平均磁化曲线是确定的。

三、磁路及其基本定律

在电工技术中，利用磁性物质的高导磁性，制成一定形状的导磁的路径，可以认为磁通将主要集中在这个路径内闭合，这个路径是磁通的主要路径。而周围空间磁通很少，它们在铁心外通过空气隙闭合，这是磁通的次要路径。这两种路径即凡是磁通经过的路径统称为磁路。通过主要路径的磁通称为主磁通，用 Φ_δ 或 Φ 表示。通过次要路径的磁通称为漏磁通，用 Φ_σ 表示。图 0－9 给出了三种典型电磁元件的磁系统。图(a)为拍合式电磁铁，图(b)为直流电机，图(c)为变压器。它们的磁路一般都包括一定形状的铁磁材料和气隙两部分。我们把这种主要由铁磁材料和线圈以及气隙等组成的整体称为磁系统。

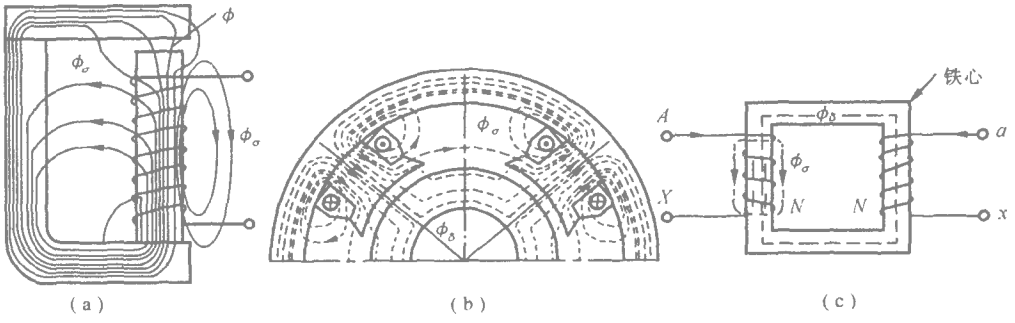


图 0－9　典型电磁元件的磁系统

(a) 拍合式电磁铁；(b) 直流电机；(c) 变压器

磁路的基本定律与磁场的基本定律相对应，磁路的基本定律都可直接从磁场的基本定律转化而得到。

1. 基尔霍夫第一定律

基尔霍夫第一定律与磁场的磁通连续定律（高斯定律）相对应。

磁通连续定律是磁场的一个基本性质，即在磁场中任何闭合面上的磁通代数和恒等于零，或者说进入闭合面的磁通等于离开闭合面的磁通，其表达式为

$$\oint_s \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = 0 \quad 或 \quad \sum \Phi = 0$$

上式规定，进入闭合面的磁通取负号，离开闭合面的磁通取正号，如图 0－10(a) 所示。

将这个原理应用到图 0－10(b) 中的封闭曲面 A 处，则有

$$-\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

而这里的封闭曲面 A 就是一段有分支磁路，如果把分支处看成磁路的一个节点，则汇聚在该节点上磁通的代数和必恒等于零。推广一般，即磁场的磁通连续定律可相应为磁路基尔霍夫第一定律，则汇聚在任一节点上磁通的代数和恒等于零，即

$$\sum \Phi_i = 0$$

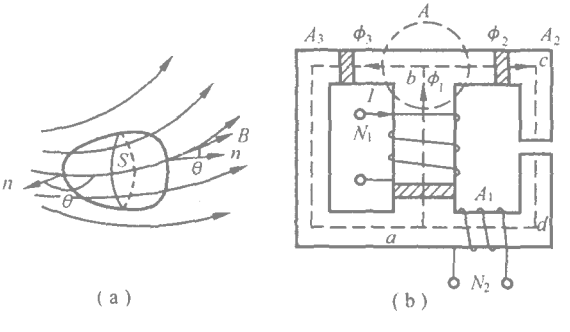


图 0－10　磁通连续定律应用举例

式中 i 为支路数

2. 欧姆定律和基尔霍夫第二定律

欧姆定律和基尔霍夫第二定律是与磁场的安培环路定理相对应。安培环路定理表明磁场强度 H 与励磁电流 I 之间的关系,其表示式为

$$\oint_l \boldsymbol{H} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \sum I \tag{0-3}$$

当线圈有 N 匝时,则式(0-3)变为

$$\oint_l \boldsymbol{H} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \sum IN \tag{0-4}$$

就是说磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 沿某一闭合路径 l 的线积分,等于路径 l 所包围的电流 I 的代数和。当电流的参考方向与闭合路径规定的方向符合右手螺旋定则时,电流 I 取正号,反之取负号。

当磁路各点的磁场度 $\boldsymbol{H}$ 方向与路径 l 的方向一致时,则磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 沿指定路径 l_{ab} 的线积分,即由 a 至 b 线积分定义为磁场中 a 与 b 间的磁压降 U_{ab} 为

$$U_{ab} = \int_a^b \boldsymbol{H} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

在均匀磁场中,则有

$$U_{ab} = Hl_{ab}$$

如果磁路是由不同截面的几段组成,则上式可写成磁路的形式。

$$\sum_{i=1}^{n} H_i l_i = \sum_{i=1}^{n} \Phi_i R_i = \sum_{i=1}^{n} \Phi_i / \Lambda_i = \sum_{i=}^{n} U_i = \sum IN$$

式中 $R_i = l_i/\mu_i S_i$——第 i 段磁路的磁阻(1/H);

$\Lambda_i = 1/R_i$——第 i 段磁路的磁导(H)或(Wb/A);

U_i——第 i 段磁路的磁压降(V);

$\sum IN$——磁路的磁动势(安匝)。

而表达式

$$\Phi_i R_i = \Phi_i / \Lambda_i = U_i \tag{0-5}$$

是安培环路定律在无分支磁路中以 Φ, U 等表示的形式,也称为磁路的欧姆定律。而表达式

$$\sum U_i = \sum IN \tag{0-6}$$

即为磁路基尔霍夫第二定律。它表示在闭合磁路中,沿某一环线方向磁压降的代数和等于磁动势的代数和。

必须指出,每段磁路磁压降 U_i 有 Hl 或 $\Phi R = \Phi/\Lambda$ 两种表达形式。在磁路计算中,对于导磁体的磁压降均采用 Hl 的形式,即要利用铁磁材料的磁化曲线由 B 值查到对应的 H 值,再乘以导磁体中的磁路长度 l,这是非线性的计算方法。对于气隙的磁压降则采用 ΦR 的形式,因为气隙的磁导率 μ_0 是常数,故当气隙长度不变时,其磁阻值是不变的,具有线性性质。

因此,对于有气隙的磁路,式(0-6)可以表示为

$$\sum IN = \sum_{i=1}^{n} H_{mi} l_{mi} + \sum_{i=1}^{m} \Phi_{\delta j} / \Lambda_{\delta j} = U_m + U_\delta \tag{0-7}$$

式中 H_{mi}——第 i 段导磁体中的磁场强度(A/m);

l_{mi}——第 i 段导磁体的长度(m);

$\Phi_{\delta j}$——第 j 段气隙中的磁通(Wb)；

$\Lambda_{\delta j} = 1/R_{\delta j}$——第 j 段气隙的磁导(Wb/A)；

U_m—— 导磁体的总磁压降(V)；

U_δ——气隙的总磁压降(V)。

式中各项正负号规定如下：先规定各回路环线的方向，如果回路中各段磁通 Φ(或 H)的正方向与规定环线方向一致，则该段的磁压降为正；当线圈磁动势的正方向与环线方向一致时，则该线圈的磁动势为正，而磁动势正方向和线圈电流正方向应符合右手螺旋关系。

由上可知，磁路计算中所用到的概念和定律在形式上与电路非常相似，表 0－1 列出电路与磁路的对应关系。

表 0－1　电路与磁路对应表

电　　路	磁　　路
电动势 E(V)	磁动势 $F(F = IN)$(A)
电流 I(A)	磁通 Φ(Wb)
电阻 $R(R = \rho l/S)(\Omega)$	磁阻 $R_i(R_i = \frac{l_i}{\mu_i S_i})$(1/H)
电导 $G(G = 1/R)(1/\Omega)$	磁导 $\Lambda_i(\Lambda_i = 1/R_i)$(H)
欧姆定律 $U = IR$	磁路欧姆定律 $U_i = \Phi_i R_i$
基尔霍夫第一定律 $\sum I = 0$	磁路基尔霍夫第一定律 $\sum \Phi = 0$
基尔霍夫第二定律 $\sum E = \sum U$	磁路基尔霍夫第二定律 $\sum IN = \sum U$

考虑到目前电磁学中还有电磁单位制的使用，表 0－2 列出国际单位制与电磁单位制的换算关系,以便考查,本书一律采用国际单位制。

表 0－2　磁量的基本单位及换算关系

名　　称	国际单位制	电磁单位制	换算关系
磁通 Φ	Wb = V·S	Ma	$1Wb/m^2 = 10^8 Ma$
磁感强度 B	$T = Wb/m^2$	$Gs = Ma/cm^2$	$1Wb/m^2 = 10^4 Gs$
磁场强度 H	A/m	1.25Oe = A/cm	$1A/m = 10^{-2} A/cm = 1.25 \times 10^{-3} Oe$
磁导率 μ	Wb/A·m = H/m	Ma/A·cm	$1Wb/A \cdot m = 10^6 Ma/A \cdot cm$
空气磁导率 μ_0	$1.25 \times 10^{-6} H/m$	1.25Ma/A·cm	–
磁压降 U	A	A	–
磁导 Λ	H = Wb/A	Ma/A	$1Wb/A = 10^8 Ma/A$

3. 电磁感应定律

通过一个线圈的磁通量 Φ 与线圈匝数 W 的乘积一般称为磁链,记为 ψ,即 $\psi = W\Phi$。若磁

通(或磁链)通过了线圈所包围的面,就说磁通(或磁链)和线圈交链(或称匝链、相链、环链)。

如果一个线圈位于磁场中，就会有许多磁力线穿过该线圈而与它交链。如果有许多部分磁通各自交链该线圈的不同匝数，则该线圈的总磁链数为

$$\psi = \sum W_i \Phi_i \tag{0-8}$$

式中 Φ_i——某一部分磁通；

W_i——Φ_i 所交链的匝数。

如果电势、电流取相同的正方向，并且它们与磁通的正方向之间符合右手螺旋定则，则电磁感应定律可写成

$$e = -\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t} \tag{0-9}$$

若所有磁通 Φ 都交链线圈的全部匝数 W,式(0-9)便成为

$$e = -W\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \tag{0-10}$$

线圈中的磁通变化可能有两种不同的方式：(1)磁通本身就是由交流电流产生的，也就是说空间中任一点的磁通本身随时间变化；(2)空间中各点的磁通本身虽不变化，但线圈处于不同位置时,通过它的磁通可能不同,由于线圈和磁场间有相对运动,线圈中的磁通在变化。一般说来,磁链可以看成是时间和位移的函数,即 $\psi = \psi(t, x)$,所以有

$$\mathrm{d}\psi = \frac{\partial\psi}{\partial t}\mathrm{d}t + \frac{\partial\psi}{\partial x}\mathrm{d}x \tag{0-11}$$

故有

$$e = -\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\partial\psi}{\partial t} - \frac{\partial\psi}{\partial x}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = -\frac{\partial\psi}{\partial t} - v\frac{\partial\psi}{\partial x} = e_T + e_R \tag{0-12}$$

式中 $v = \mathrm{d}x/\mathrm{d}t$ 为导体(线圈)与磁场间的相对速度。由此可见感应电势 e 可分为两部分,$e_T = -\frac{\partial\psi}{\partial t}$ 称为变压器电势;$e_R = -v\frac{\partial\psi}{\partial x}$ 称为旋转电势或速度电势。

变压器为一特殊例子，它的线圈静止不动，速度电势为零，线圈中的感应电势仅有变压器电势 e_T。直流电机为另一特例，在直流电机中间任一点的磁通对时间为恒定不变，变压器电势为零，线圈中的电势仅有速度电势。

一根长为 l 的导线在磁场中以速度 v 切割磁力线,当 B、L、v 互相垂直时有感应电势

$$e = Blv \tag{0-13}$$

若一个线圈本身的电流 i 所产生的磁链为 ψ,则定义该线圈由磁链 ψ 所引起的电感 L 为

$$L = \frac{\psi}{i} \tag{0-14}$$

若线圈是空心线圈,周围没有铁磁材料,则 L 是常数,与电流无关,这时称这个线圈的电感是线性电感。这时感应电势为

$$e = -\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t} = -L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{0-15}$$

若线圈周围有铁磁材料,则 L 就不是常数，它的大小随电流而变化,称为非线性电感。但是，若磁通的回路上有空气隙，空气隙的磁阻（或磁压 Hl）远大于其他磁路段的磁阻（或磁压),这时由磁链 ψ 所引起的电感仍可看成是线性电感，式(0-15)仍然适用。

4、电磁力与电磁转矩

磁场中的载流导体所受的电磁力 F_e 为

$$F_e = BlI \tag{0-16}$$

式中 l 为导线长度，I 为导线中的电流，B、l、I 三者互相垂直。若这导线在电机的转子上，导体至旋转轴的距离为 r，则电磁转矩 T_e 为

$$T_e = BlIr \tag{0-17}$$

转矩也可由功率关系算得

$$T_e = \frac{P}{\omega} \tag{0-18}$$

式中 P—— 电机转轴上的机械功率；

ω—— 转轴的角速度。

5. 圆柱面磁场间的力矩

图 0-11 表示两个同心圆柱面，圆柱孔的内表面和圆柱体的外表面都是两极磁场。取两个异性磁极正好对齐的位置为磁场夹角 θ 的零值，内圆柱体所受力矩为 T。根据磁极间同性相斥、异性相吸的现象可以看出，只要两个表面的磁极不是正好对齐，两表面间就存在相互作用力矩 T。T 是 θ 的周期函数，周期是 360°。根据傅里叶级数理论，可将 T 写成 θ 的一系列正弦函数之和，其中基波为

$$T_1 = K\sin\theta \tag{0-19}$$

谐波的振幅比基波振幅小。如果谐波可以忽略，则 T 与 θ 的关系就是式(0-19)。

图 0-12 表示的圆柱面具有四极磁场，同样可以看出，T 仍是 θ 的周期函数，但周期是

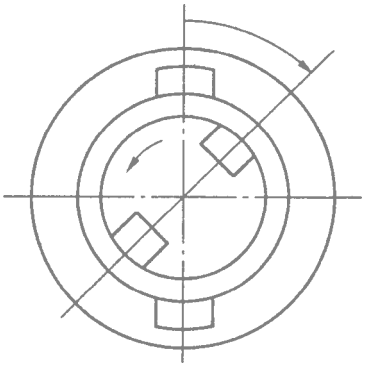


图 0-11 两极磁场

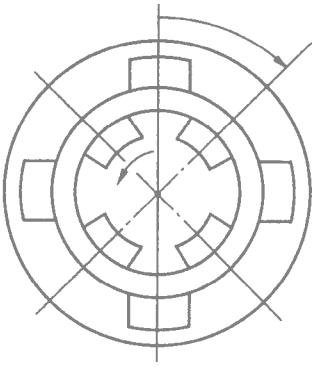


图 0-12 四极磁场

$\frac{360°}{2}$，其傅里叶级数中的基波表达式为

$$T_2 = K\sin 2\theta \tag{0-20}$$

同样，若两圆柱表面的磁场是 p 对极，其力矩的基波表达式为

$$T_P = K\sin p\theta \tag{0-21}$$

绝大部分电机中的力矩的产生都可以用上述圆柱面磁场来进行解释，电机中的力矩 T 与磁场间的夹角 θ 的关系近似符合式(0-21)。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第一章　直流伺服电动机

电机是使机械能与电能相互转换的机械。从原理上讲，一台电机，不论是直流电机，还是交流电机，都可以在一种条件下作为发电机运行，把机械能转变为电能，而在另一种条件下作为电动机运行，把电能转变为机械能，这个原理叫做电机的可逆原理。

直流电动机把直流电能变为机械能，直流发电机把机械能变为直流电能。直流电动机和直流发电机在结构上没有差别。

历史上，最早的电源是电池，只能供应直流电能，所以直流电机的发展比交流电机早。后来交流电机发展比较快，这是因为交流电机与直流电机相比有很多优点，如易生产、成本低、能做到较大容量等。目前电站的发电机全部是交流发电机；用在各行各业的电机，大部分也都是交流电机。

由于直流电动机具有良好的调速特性、较大的起动转矩、相对功率大及快速响应等优点，尽管有结构复杂、成本较高的缺点，但是它在国民经济中仍占有重要地位，在自动控制系统中也获得了广泛的应用。特别是近年来，随着大功率晶闸管元件及其整流放大电路的成功运用，高性能磁性材料的不断问世，以及新型结构的设计，使得直流电动机控制性能更加改善。因此，在控制系统中的应用有了更新的发展。

直流电动机在自动控制系统中作为执行系统控制信号命令的元件，被称作执行元件（图 1－1）。又因为它执行命令的动作是使负载（或者说控制系统的‘对象’）进入新的运行状态（随动系统）或保持原来的运行状态（恒值控制系统），因而，可以视其为控制对象‘服务’的。这样，又把在控制系统中作为执行元件使用的直流电动机叫做直流伺服电动机。

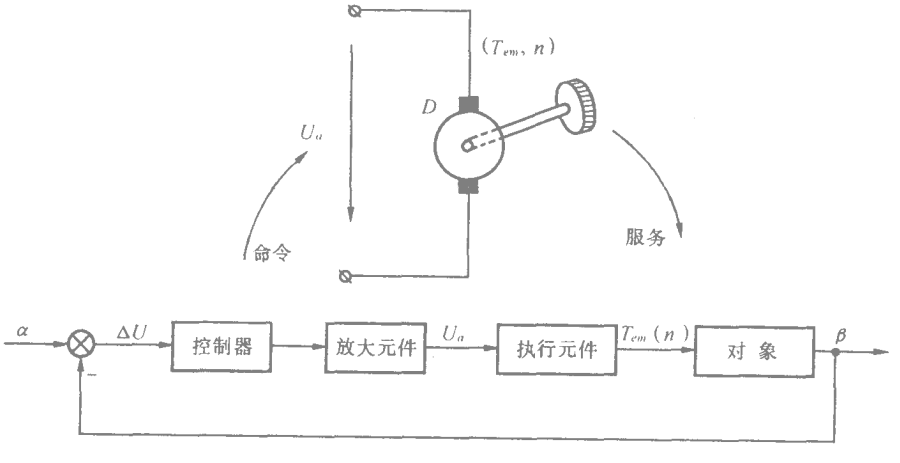


图 1－1　直流伺服电动机在控制系统中的位置

直流电动机有以下几方面的优点：1）调速范围广，且易于平滑调节；2）过载、起动、制动转矩大；3）易于控制，控制装置的可靠性高；4）调速时的能量损耗较小。

直流电动机的主要缺点是有换向器。由于有换向器，使直流电机比交流电机费工费料，造价贵，运行时换向器需要经常维修，寿命也较短，换向条件又使直流电机的容量受到限制。

§1－1　直流电机基本原理

一、直流电机基本原理

图 $1-2$ 所示是直流电机的原理模型。在空间有两个静止并产生恒定磁通的磁极 N、S，即为一对极（$p=1$）。线匝 $ab-cd$ 敷设在电枢铁心表面上，它的两端分别与两片换向片相连接并一起转动。换向片与电刷 A 和 B 接触。

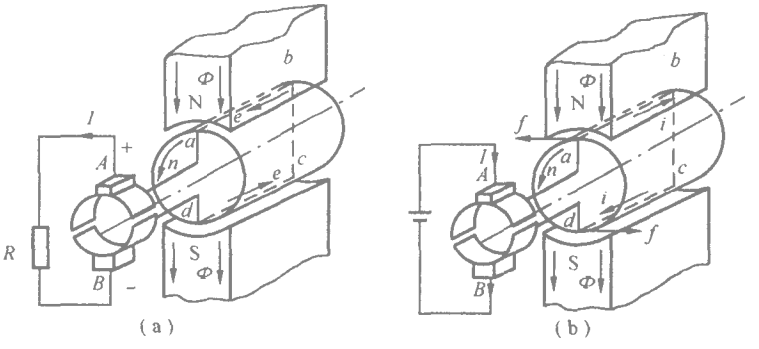


图 $1-2$　直流电机的工作原理模型

(a) 直流发电机；(b) 直流电动机

若电枢由外力拖动旋转，根据电磁感应定律，导体 ab 和 cd 必然产生感应电动势 e 电动势方向用右手定则决定，如图 $1-2(a)$ 中箭头所示。当 $B_{\delta x}$（导体所在处的磁感应强度）、l（导体有效长度）、v（导体沿圆周运动的线速度）三者垂直时，电动势 e 大小为

$$e = B_{\delta x} l v \tag{1-1}$$

电枢转速 n 恒定时，线速度 v 亦恒定，有效长度 l 也为一常数，于是 e 与 $B_{\delta x}$ 成正比。e 随时间的变化规律将与 $B_{\delta x}$ 在气隙空间的分布规律相同。

当导体旋转一周（机械角 $\alpha_m = 2\pi$）时，由于每根导体交替切割 N 极和 S 极下的磁场，因此导体（线匝）电动势也是交变一个周期（相位角即电角 $\alpha = 2\pi$）。很显然，当 $p=1$ 时，电角等于机械角，即 $\alpha = \alpha_m$，如图 $1-3(a)$ 所示。当电机有 p 对极时，导体旋转一周，所转过的机械角 α_m 仍为 2π，而导体中的电动势却交变了 p 周，即电角等于机械角的 p 倍，这时 $\alpha = p\alpha_m$，如图 $1-4$ 所示。

由于电刷 A 通过换向片总是与处在 N 极下的导体相接触，电刷 B 总是与处在 S 极下的导体相接触，而 N 极下和 S 极下的导体电动势方向是恒定不变的，因此，在图 $1-2(a)$ 所示情况下，电刷 A 的电位总是比电刷 B 的电位高，即在两电刷之间的电动势 e_{AB} 是一单方向的，如图 $1-3(b)$ 所示。在这里，电刷和换向器的作用相当于一个机械式单相全波整流器。

如果将电刷 A，B 与外电路负载电阻 R_L 接通，电动势 e_{AB} 产生电流 I，该电流 I 与电动势 e_{AB} 同方向，从正电刷 A 流出，输出直流电能。这就是直流发电机的基本工作原理，它把机械能转换成直流电能输出。

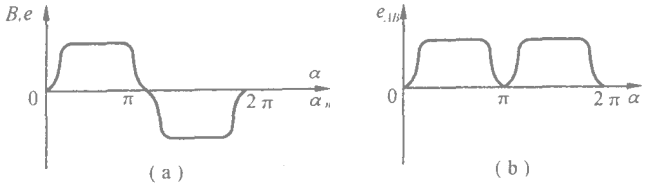


图 1－3　一对极磁感应强度和电动势

若把图 1－2(a) 所示的模型作为直流电动机，此时需将正、负电刷 AB 分别连接在一外部直流电源的正、负极上，电流 I 从电刷 A 流入，经过线圈从电刷 B 流出，见图 1－2(b)。这样处于磁场中的载流导体 ab 和 cd 将形成电磁力 f，则 f 为

$$f = B_{\delta x} l I \qquad (1-2)$$

式中 f 的方向用左手定则确定。此电磁力形成电磁转矩 T_{em} 驱动电枢沿图中所示 n 的方向旋转。旋转时，由于电刷和换向器的作用，处于 N 极下的导体电流方向总是流进的，S 极下总是流出的，因此电磁转矩方向恒定不变。在电磁转矩的作用下，转轴可以拖动机械负载做功，实现直流电能向机械能的转换，这就是直流电动机的基本工作原理。

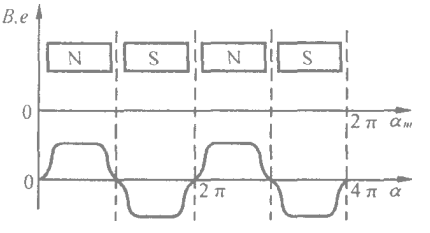


图 1－4　两对极电机的机械角与电角的关系

不难看出，如图 1－2 所示的模型既可以做直流发电机，也可以做直流电动机。工作在发电机状态时，导体电流 I 在磁场中也会产生如式 (1－2) 描述的电磁力 f；工作在电动机状态时，导体在磁场中运动也会产生如式(1－1) 描述的电动势 e。显然，对于一根导体，电功率 $ei = B_{\delta x} l v i$，机械功率 $fv = B_{\delta x} l i v$；对于一匝线圈，电功率 $e_{AB} i = 2B_{\delta x} l v i$，机械功率 $T_{em}\Omega = 2fv = 2B_{\delta x} l i v$。这一事实表明：电动势所形成的电功率等于电磁力所产生的机械功率。在旋转的电机中，不论它是发电机还是电动机，这两种功率是等量存在的。

图 1－2 所示的直流电机，只有一匝线圈和两个换向片，产生的电动势及电磁转矩的脉动都大，同时电枢铁心也没有得到充分利用。在实际电机中，则有许多导线均匀地分布在电枢上，按一定规律连接成所谓“电枢绕组”，换向器的换向片数也相应地增加。

二、直流电机的结构

直流电机总体结构可以分成两大部分：定子(静止部分)和转子(旋转部分)。定子和转子之间存在间隙(称为气隙)，以便定、转子能够进行相对机械运动。小容量电机的气隙约为 1～3mm。气隙虽小，但在磁路计算及能量变换中却有着重要作用。定子由定子铁心、励磁绕组或永磁体、机壳、端盖和电刷装置等组成。转子由电枢铁心、电枢绕组、转向器、轴、风扇等组成。风扇是用来改善冷却条件的。一般小型电机的轴是通过滚动轴承支承在两端的端盖上。直流电机的基本结构示意图如图 1－5 所示。

下面介绍直流电机的主要部件的结构和作用。

1. 定子铁心和磁极

定子铁心包括主磁极和磁轭两部分，主磁极用来建立磁场。磁轭是磁极间磁通通路，因此所用材料要求具有较好的导磁性能。

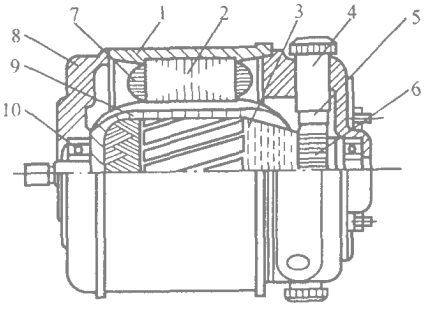


图 1－5　直流电机结构简图

1— 机壳；2— 定子铁心；3— 电枢；4— 电刷座；5— 电刷；6— 转向器；7— 励磁绕组；8— 端盖；9— 气隙；10— 轴承

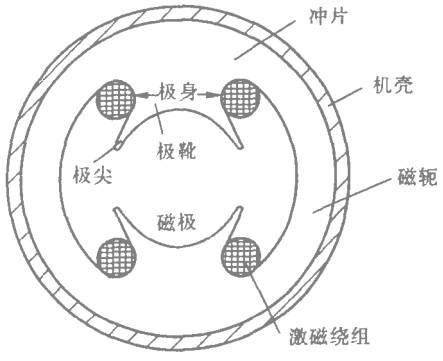


图 1－6　定子结构简图

按励磁方式，直流电机可分为电磁式和永磁式两种。对于电磁式小容量直流电机，定子铁心的磁极和磁轭做成一体，用厚为 0.35 或 0.5mm 的硅钢片冲片或 0.5 ～ 3mm 厚的钢板冲片叠压而成，铁心外边的机壳由铝合金浇铸而成，如图 1－6 所示。一般直流电动机的磁轭也可以用整体材料（如铸钢和钢筒）做成。

主磁极的作用是使电枢表面的气隙磁通密度按一定形状在空间分布。主磁极通常用厚度为 0.35 或 0.5mm 的硅钢片冲片或 0.5 ～ 3mm 厚的低碳钢冲片叠压而成。为了使主磁通在气隙中的分布更为合理，主磁极一般分为极身和极靴（极掌）两部分。极身较窄，外装励磁绕组（电磁式），极靴较宽。极靴两边伸出极身之外的部分称为极尖。极靴面向电枢的曲面称为极弧。极弧的形状对电机运行性能的好坏有一定的影响，通常使两极尖下的气隙较大。

电磁式直流电机的磁场是由励磁绕组产生的，励磁绕组又称为励磁绕组，它是由铜线绕制而成，包上绝缘材料以后套在磁极上。直流电机运行时励磁绕组通过直流电，产生磁通，形成 N、S 极。

永磁式电机的磁极由永久磁体做成，镶嵌在磁轭上。由于永磁体比电磁铁体积小，重量轻，无励磁损失，因此永磁电机具有体积小，重量轻、效率高和结构紧凑等优点。永磁电机的缺点是，永磁体励磁在电机中产生的磁场比由电流励磁产生的磁场要弱，励磁还不能调节；永磁材料硬脆，机械加工较困难。由于低价的铁氧体磁性能的提高，特别是由于性能优良和价格适宜的新型永磁稀土材料的广泛应用，永磁电机越来越显示出它的优越性。永磁电机的容量范围随着新的永磁材料的出现不断扩大。在直流微型电动机中，永磁式占绝大部分。据国外 1978 年统计，10W 以下的直流电动机中，永磁式占 99%；500W 以下的，永磁式占 92%。

2. 电枢铁心和电枢绕组

直流电机的电枢一般都在转子上，以便实现电枢电流的换向。电枢铁心一般又称为转子铁心。电枢铁心的作用是给主磁通提供低阻磁路和嵌放电枢绕组。电机运行时电枢铁心要转动。当电枢在磁场中旋转时，铁心中的磁通方向不断变化，因而会产生涡流及磁滞损失。为减少损耗，电枢铁心用厚 0.35 或 0.5mm 的硅钢片的冲片叠压而成，冲片之间有片间绝缘，冲片形状见图 1－7。电枢铁心上的槽是安放电枢绕组用的。电枢铁心和电机转轴之间是固定连接的。

电枢绕组是电机实现机电能量变换的主要部件。电机运行时负载电流的流通、感应电动势和电磁转矩的产生都要依靠电枢绕组，故称其为电机的中枢或枢纽。电枢绕组的制造方法一般是把带绝缘的铜导线先预制成形，在铁心槽内放好绝缘层后将绕组嵌入。绕组嵌入槽中后要用槽楔压紧，绕组两端用绑线扎紧。每个绕组元件的两个端头（引出线）按着一定的规律接到换向器上。直流电枢绕组本身自成闭合回路。

电枢铁心和绕组如图 1－8 所示。

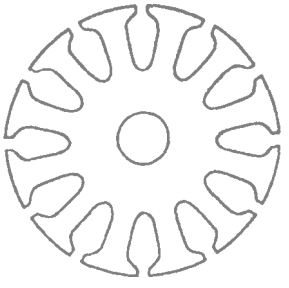


图 1－7　电枢铁心冲片

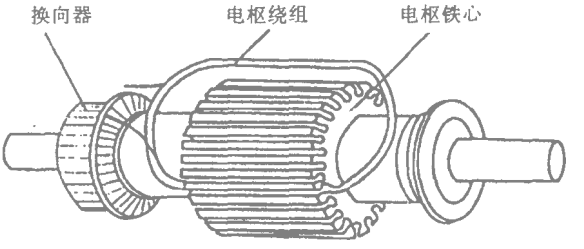


图 1－8　电枢铁心和绕组

3.换向器和电刷装置

换向器也是直流电机的关键部件，它起整流和换向作用。在直流发电机中，换向器将电枢绕组内部的交流变为电刷上的直流。在直流电动机中，它将电刷上的直流变为绕组内部的交流。换向器由许多换向片(铜片)装配而成,换向片之间用云母绝缘，各换向片与绕组元件连接。常用的换向器有金属套筒式换向器与塑料换向器。图 1－9 是换向器的示意图。

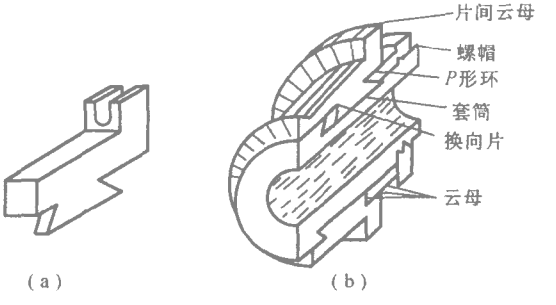


图 1－9　换向器
(a) 换向片;(b)换向器

电刷装置是电流引入或引出装置，它使转动的换向器与静止的外电路相通,它包括电刷、刷握(又称刷盒)、刷架、调压弹簧。电刷装在刷握内，用弹簧将它压在换向器上，使其与换向器有良好的接触。

对于直流电动机，直流电源通过电刷与换向器加到电枢绕组的导体中，并使每个磁极下线圈导体的电流总是一个方向，从而使电磁力和电磁转矩也保持一个方向，使电动机能保持连续旋转。

三、直流电机的励磁方式

根据励磁方式的不同，直流电机有下列几种类型。

1. 他励直流电机

励磁电流由其它直流电源单独供给的称为他励直流电机，他励直流电动机接线如图 1－10(a) 所示。一般用符号 M 表示电动机,符号 G 表示发电机。

2. 自励直流电机

电机的励磁电流由电机自身供给。根据励磁绕组与电枢电路联接方式的不同，又分为如下几种型式。

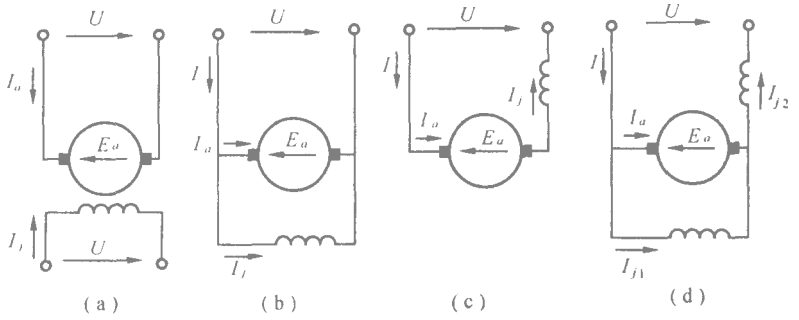


图 1－10　直流电机的励磁方式

(1) 并励直流电机 励磁绕组与电枢电路的两端并联。作为并励发电机来说，是由电机本身发出来的端电压供给励磁电流；作为并励电动机来说，励磁绕组与电枢电路共用同一电源，与他励直流电动机没有本质区别，接线如图 1－10(b) 所示。

(2) 串励直流电机：励磁绕组与电枢电路串联，电枢电流也是励磁电流。串励直流电动机接线如图 1－10(c)所示。

(3) 复励直流电机：励磁绕组分为两部分，一部分与电枢电路串联，一部分与电枢电路并联。复励直流电动机接线如图 1－10(d) 所示。并励绕组可先与电枢电路并联后再共同与串励绕组串联(先并后串)，也可以接成串励励磁绕组先与电枢串联后再与并励励磁绕组并联(先串后并)。不同励磁方式的直流电机有不同的特性。

四、电机的铭牌数据

根据国家标准，直流电机的额定数据表示如下：

(1)额定容量(功率)P_e(kW)；

(2)额定电压 U_e(V)；

(3) 额定电流 I_e(A)；

(4)额定转速 n_e(r/min)；

(5) 励磁方式和额定励磁电流 I_e(A)。

关于额定容量，对直流发电机来说，功率是指电刷端的输出电功率 P_e，应为 $P_e = U_eI_e$。

对直流电动机来说，功率是指它的转轴上输出的机械功率，应为 $P_e = U_eI_e\eta_e$。

式中，η_e 是直流电机的额定效率。它是直流电动机额定运行时输出机械功率与电源输入电功率之比。

电动机轴上输出的额定转矩用 T_{2e} 表示，其大小应该是输出的机械功率额定值除以转子角速度的额定值，即

$$T_{2e} = \frac{P_e}{\Omega_e} = \frac{P_e}{\frac{2\pi n_e}{60}} = 9.55\frac{P_e}{n_e}$$

式中，P_e 的单位为 W，n_e 的单位为 r/min，T_{2e} 的单位是 N·m。

直流电机运行时，若各个物理量都与它的额定值一样，就称为额定运行状态。在额定运行状态下工作，电机能可靠地运行，并具有良好的性能。

实际运行中，电机不能总是运行在额定状态。如果流过电机的电流小于额定电流，称为欠

需要全本请访问 www.ertongbook.com