

绪 论

1.1 电机及电力拖动的历史与发展现状

1802 年奥斯特发现了电流在磁场受力的物理现象,随后由安培对这种现象进行了科学的总结,发现了磁路定律及全电流定律。在此基础上人们在实验室制成了直流电动机的模型。1834 年亚哥比制成了第一台直流电动机,人们用它来拖动轮船,轮船运载了 11 人,以 4km/h 的速度在涅瓦河上顺流和逆流而行,获得了成功。这是人类制成的第一台直流电动机。当时还没有可以实用的直流电源,为电动机供电的是昂贵的化学电池。

1831 年法拉第发现了电磁感应定律,为生产制造各种发电机提供了依据。随后制成了直流发电机,替换了原来的化学电池,为直流电动机的广泛应用提供了电源。可见,在电机与电力拖动发展史上首先得到应用的是直流电动机。直到 19 世纪 70 年代直流电一直占据统治地位。随着电动机应用范围的扩大,用电量不断增加,由于当时直流电压无法提高,所以在远距离输电方面遇到了困难,人们开始认识到交流电的优点。

1832 年,人们就知道了交流发电机。1878 年亚布洛契可夫用交流发电机和变压器为他发明的照明装置供电。1888 年多里沃·多勃罗沃尔斯制成了三相感应电动机,奠定了三相电路和三相电机的基础。此后,三相交流迅速地发展起来。到 20 世纪初,设计、制造成功了各种三相交流电动机。

进入 20 世纪以后,人们在降低电机成本、减小电机尺寸、提高电机性能、选用新型电磁材料、改进电机生产工艺等方面进行了大量的研究,所以现代电机与 20 世纪初的电机已有很大的区别。

我国的电机制造业是在新中国成立后才发展起来的。20 世纪 50 年代末生产出 5 万千瓦汽轮发电机、7.25 万千瓦水轮发电机和 12 万 kV·A 的变压器;1958 年浙江大学与上海电机厂等合作研发了世界上第一台 1.2 万千瓦双水内冷汽轮发电机。到现在,我国已能制造出单机容量为 60 万千瓦的发电机,变压器的单机容量也达到了 55 万 kV·A,电压等级为 330~500kV。目前国际上已经制造出了 123 万千瓦的汽轮发电机、70 万千瓦的水轮发电机。我国的电机制造业与国际先进水平相比,尚有一定的差距。

纵观电力拖动的发展过程,交、直流两种拖动方式并存于各个生产领域。随着工业技术的不断发展,两种拖动方式在相互竞争、相互促进中发生着深刻的变革。在交流电机出现以前,直流电力拖动是唯一的拖动方式。19 世纪末,由于研制出了经济实用的交流电机,使交流电力拖动在工业中得到了广泛的应用。但是随着生产技术的发展,特别是精密机械加工与冶金工业生产过程的进步,对电力拖动在启动、制动、正反转以及调速精度与范围等静态特性和动态特性响应方面提出了更新、更高的要求。由于交流电力拖动比直流电力拖动在技术上难以实现这些要求,所以 20 世纪以来,在可逆、可调速与高精度的拖动领域中,在相当长的一段时期内几乎都是采用直流电力拖动,而交流电力拖动则主要用于恒转速系统。

虽然直流电力拖动具有调速性能优异这一突出优点,但是由于它具有电刷和换向器,使得它的故障率较高,电动机的使用环境受到限制,其电压等级、额定转速、单机容量的发展也受到限制。所以在 20 世纪 60 年代以后,随着电力电子技术的发展,交流调速不断进步和完善,在调速性能方面由落后状态直到可以与直流调速相媲美。今天,交流调速在很多场合已经取代了直流调速。在不久的将来,交流调速将完全取代直流调速,这也是一种必然的发展趋势。

电力拖动的发展大致可以分为这样几个阶段:第一阶段是单一电机的拖动控制阶段,很多工作机械都是由一台主电机来作为动力,通过天轴和机械传动的方式进行,往往在一个车间就只有一台电动机,对电机的控制采用继电-接触器,这种工作方式噪声大、效率低、指针精度差;第二阶段,电力拖动走向了单机拖动的时代,一台电机拖动一台机械设备,采用模拟电路与晶闸管等电力电子器件进行控制,与前一阶段相比,电机的利用率、加工精度都有了很大的提高;第三阶段,电机的拖动控制向单独的器件发展,即一个旋转部件由一台电机拖动,采用数字电子计算机等数字控制设备进行控制,先进的控制方法也逐渐在电力拖动领域得到广泛的应用。

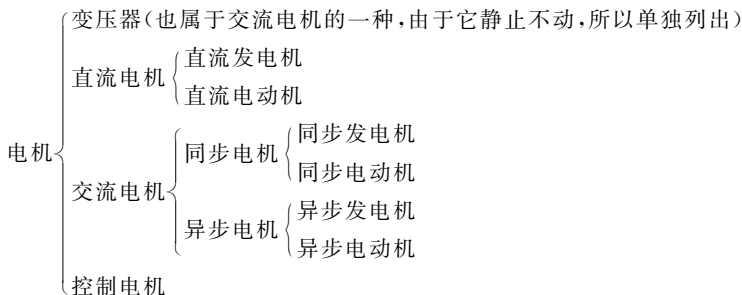
在法拉第刚刚发明第一台发电机的时候,这台小小的装置只能使电流表的指针轻微偏转。有人问他,耗费那么多心血发明这玩意有什么用。法拉第反问道,新生的婴儿又有啥用呢?正是这个新生的婴儿推进了以电气化革新为代表的第二次技术革命,使人类的生产力水平提高了一大步,同时也造就了一大批电机理论学者和发明家。

目前随着计算机技术、控制理论和技术以及电力电子技术的不断发展和完善,电机与电力拖动技术正如虎添翼向着更高的层次不断发展。相信在不远的将来,电机与电力拖动技术将会向数字化、高智能化的方向迈进,其发展前景是非常可观的。

1.2 电机及电力拖动系统分类

电机应用广泛,种类繁多,性能各异,分类方法也很多。主要有两种常用的分类方法:一种是按功能用途分,可分为发电机、电动机、变压器和控制电机四大类;另一种是按照电机的结构或转速来分,可分为变压器和旋转电机。根据电源的不同,旋转电机又分为直流电机和交流电机两大类;而交流电机又分为同步电机和异步电机两类。

综合以上两种分类方法,可归纳如下。



1.3 本课程涉及的基本电磁学理论

从能量转换的角度来看,电机是一种能量转换装置。其能量转换的基本原理主要来自于电磁感应的基本理论。要研究电机及拖动的理论和技术,必须掌握这些电磁学的基本理论,下面将本课程中所用到的一些电磁理论简单介绍一下。

1.3.1 电磁感应的基本概念

当一定大小的电流流过导体时,就会产生一定的磁场。磁场的强弱以及磁场的方向一般使用磁感应强度来表示。在实际的分析过程中,也常常使用磁力线来形象地表示磁场的强弱和方向:磁力线越密,磁场就越强;磁力线越疏,磁场越弱。磁场的方向与产生这种磁场的电流的方向符合右手螺旋定则:当人们紧握右手拳头,竖起大拇指时,大拇指的方向就是电流的方向,弯曲的四指的方向就是磁场的方向,如图 1-1 所示。

磁感应强度用来描述磁场的大小和方向,用 B 来表示,在国际单位制中,其单位是特斯拉(Tesla),在实际使用的过程中通常用 T 表示。磁感应强度又叫做磁通密度,简称为“磁密”。

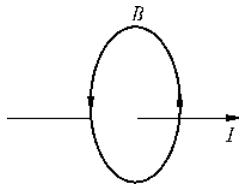


图 1-1 电流与其所产生磁场之间的方向关系(右手螺旋定则)

1.3.2 磁通

磁通是另一个在电磁理论中非常重要的物理量,它表示在某个特定的截面内穿过这个截面的磁感应强度的通量,用 Φ 表示。它和磁感应强度之间的关系用数学语言描述如下。

$$\Phi = \int_s B \cdot dS \quad (1-1)$$

式中, Φ 为磁通,单位为韦伯(Wb); B 为磁感应强度,单位为特斯拉(T); S 为磁力线所穿过区域的面积,单位为平方米(m^2)。

假如通过一定截面积的磁场是均匀的,而且所有磁力线的走向均与此截面正交,则式(1-1)的积分形式就可以写作代数形式,即

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-2)$$

从式(1-2)可以看出,磁感应强度是单位面积上的磁通,是磁通的面密度,因此磁感

应强度又叫做磁通密度。

1.3.3 磁场强度

在处理近似线性磁场的时候,还有一个很重要的物理量经常用到,这就是磁场强度 H 。一般而言,在线性磁性材料的一定范围内,磁场强度和磁感应强度之间呈线性关系,即

$$B = \mu H \quad (1-3)$$

磁场强度是用来衡量在单位长度上的电流大小的,在国际单位制中,其单位是安培/米(A/m)。式(1-3)中, μ 是衡量各种物质对于磁的传导能力大小的物理量,叫做磁导率,单位是亨利/米(H/m)。真空的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。将真空磁导率作为基准,其余物质的磁导率与之相比得到的系数叫相对磁导率,用 μ_r 来表示。一般而言,铁磁物质的相对磁导率比较大,例如电机转子铁心的硅钢片的相对磁导率为 6000~7000,导磁性能优越,而非磁物质的相对磁导率则比较小,导磁性差。

1.3.4 磁路的基本定律

1. 安培环路定律

在物理学中,磁场强度沿闭合曲线 l 的线积分等于此回路所包围的导体电流的代数和,即

$$\oint_l H \cdot dl = \sum I \quad (1-4)$$

式(1-4)中,对电流方向的定义按右手定则来判断其正负符号。大拇指指向电流方向,弯曲的四指绕行方向和环路积分方向一致的,电流取正号,反之取负号。

图 1-2 中,其环路积分可以写为

$$\oint_l H \cdot dl = \sum I = -i_1 + i_2 - i_3 + i_4$$

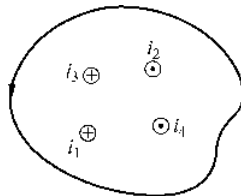


图 1-2 安培环路定律示意图

如果沿闭合回路 l ,磁场强度的方向总与 l 的切线方向处处相同,换句话说也就是闭合回路所形成的曲面与其所包围的电流处处正交,式(1-4)就可以简化为

$$\sum Hl = \sum I = Ni \quad (1-5)$$

式中,第二个等号为螺线管的情况, N 为线圈的匝数。

2. 磁路中的欧姆定律

在电路中有一个非常基本和重要的电路,就是欧姆定律,它反映了电流、电阻和电压之间的约束关系。在磁路中对应的也有非常相似的关系,叫做磁路中的欧姆定律。与电源中电动势类似,在磁路中将式(1-5)中的物理量称为磁动势,用 F 来表示,即

$$F = \sum Hl = \sum I = Ni \quad (1-6)$$

将式(1-2)和式(1-3)的关系代入式(1-6),就可以得到

$$F = Ni = Hl = \frac{B}{\mu} l = \Phi \frac{l}{\mu S} \quad (1-7)$$

式中, Φ 为磁路的磁通; l 为磁力线所经过的长度; μ 为磁路中所经过的磁介质的磁导率; S 为磁力线所穿过的截面积。

将 $\Phi \frac{l}{\mu S}$ 用磁路的磁阻 R_m 表示, 即

$$R_m = \Phi \frac{l}{\mu S} \quad (1-8)$$

这样式(1-7)就可以写成

$$F = \Phi R_m \quad (1-9)$$

它表示在磁路中, 磁路的磁动势等于磁路的磁通与磁路总磁阻的乘积。而由式(1-8)可知, 磁阻在一个确定的磁路中只与磁介质材料本身的性质有关, 与其他参数均无关系, 因此可以说磁路的磁动势与磁路的磁通之间是一个线性关系。

3. 磁路中的基尔霍夫定律

在电路分析中还有一个很重要的定律就是基尔霍夫定律。在磁路的基本理论中也有相应的磁路基尔霍夫定律。在电路分析中, 基尔霍夫定律有两种形式, 第一种是基尔霍夫电流定律(KCL), 它说明了在一个电路的节点上其电流的代数和等于零, 即

$$\sum I = 0$$

与之相应, 在磁路中, 如果磁力线所经过的路径是一个多分支回路, 例如三相变压器的铁心, 如图 1-3 所示。

取如图 1-3 所示的闭合曲面, 且流出闭合面的磁通取正号, 流入闭合面的磁通取负号, 对于曲面 $\sum$ 有

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

即

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-10)$$

这个公式说明, 对于一个闭合面而言, 流入(流出)这个面的磁通代数和等于零。形式与电路中的电流定律非常相似, 因此也将这个表达式称为磁路中的基尔霍夫第一定律, 也叫磁通连续性定律。

在电路分析中, 基尔霍夫定律还有另一种形式, 就是基尔霍夫电压定律(KVL)。对任意回路而言, 电路的总电动势等于回路中各个元件的电压降, 或者表述为回路中所有元件的电压代数和等于零, 即

$$\sum U = 0$$

在电机和变压器中, 其磁路是连续闭合的, 但是磁力线经过的磁介质却并不是处处相同的, 这时计算整个磁路的磁动势时, 需要分段计算, 然后将各段的磁压相加, 如图 1-4 所示的磁路中就有

$$\sum_1^n H_k l_k = \sum I = NI = F$$

式中, H_k 为各段磁介质的磁场强度; l_k 为各段磁介质的长度; I 为产生磁场的电流强度; N 为线圈的匝数。

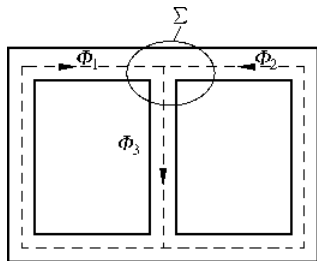


图 1-3 磁路中的基尔霍夫第一定律

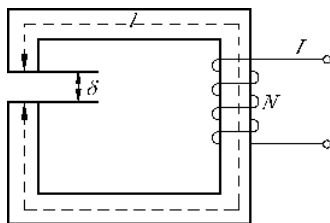


图 1-4 磁路中的基尔霍夫第二定律

根据磁路欧姆定律,式(1-9)可以写为

$$F = Hl + H_0\delta = \Phi_1 R_m + \Phi_2 R_{m\delta} \quad (1-11)$$

式中, δ 为气隙长度; l 为磁力线经过的磁钢的总长度; R_m 为均匀磁钢的磁阻; $R_{m\delta}$ 为气隙的磁阻。

这说明了在闭合磁路中,总的磁动势等于在磁路上的各段磁路磁压的代数和。对照电路中的基尔霍夫电压定律,一个闭合磁路就相当于电路中的闭合回路,而磁通就相当于电流,磁阻相当于电阻,两个定律在形式上非常相似,因此将此表达式称为磁路中的基尔霍夫第二定律。

需要说明的是,将磁路与电路这样对照,只是为了使已经具有一些电路基本知识的读者们更容易记住和了解磁路中的常用定律和参数。实际上,电路与磁路的物理意义是不同的。

1.3.5 电磁力定律

载流导体置于磁场中时,会受到磁场力(安培力)的作用,如果磁力线的方向与导体相互垂直,则导体所受到的安培力的大小为

$$f = BIl \quad (1-12)$$

式中, f 为安培力,单位为牛顿(N); l 为载流导体的长度,单位为米(m); B 为磁场的磁感应强度,单位为特斯拉(T); I 为导体中的电流强度,单位为安培(A)。

安培力的方向可以使用左手定则来判断:伸开左手,磁力线垂直穿过手掌心,伸直的四指指向电流方向,大拇指所指的方向就是导体所受的安培力的方向,如图 1-5 所示。

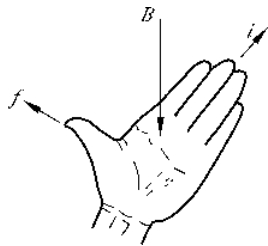


图 1-5 电磁力定律(左手定则)

1.3.6 电磁感应定律

变化着的磁场在导体中会产生感应电动势,如果导体闭合的话,还会产生感应电流,这种现象就是电磁感应现象。电磁感应现象表现在两个方面:一是导体在磁场中做切割磁力线的运动会产生感应电动势;二是在螺线管中,如果磁通发生变化,就会在螺线管中产生感应电动势。

1. 导体切割磁力线所产生的感应电动势

设有一根导体在磁场中做切割磁力线的运动,其长度为 l ,切割磁力线的速度为 v ,而且磁场的磁力线、导体的运动方向以及导体的走向,三者相互垂直时,所产生的感应电动势可以用下列公式来计算,即

$$E = Blv \quad (1-13)$$

式中, E 为感应电动势,单位为伏特(V); l 为导体的长度,单位为米(m); B 为磁场的磁感应强度,单位为特斯拉(T); v 为导体切割磁力线的速度,单位为米/秒(m/s)。

感应电动势的方向可以由右手定则来判断:伸开右手,磁力线垂直穿过手掌心,大拇指所指的方向就是导体切割磁力线的运动方向,伸直的四指的指向就是感应电动势(电流)的方向,如图1-6所示。

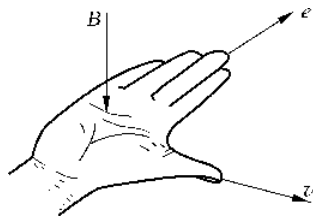


图 1-6 导体切割磁力线所产生的电动势(右手定则)

2. 螺线管中磁通变化所产生的感应电动势

设有一个匝数为 N 的螺线管位于磁场中,当螺线管线圈所交链的磁通发生变化时,在线圈中就会产生感应电动势,电动势的大小为

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-14)$$

式中, E 为感应电动势,单位为伏特(V); Φ 为螺线管线圈所交链的磁通,单位为韦伯(Wb); N 为螺线管线圈的匝数。

这种情况下,感应电动势的方向由楞次定律决定:感应电动势的方向始终与原磁通的变化相反,如式(1-14)中的负号。

1.3.7 铁磁材料的特性及其相关损耗

在电机和变压器中,为了能够使磁场比较强,一般使用铁磁材料作为磁路的导磁材料,下面讨论一下这些材料的基本特性。

铁磁材料一般包括铁、钴、镍以及这些材料的合金,它们都具有良好的导电性。在磁的方面,铁磁材料主要有两个非线性特性:一是饱和特性,二是磁滞特性。

1. 饱和特性

铁磁材料之所以具有较强的导磁性能,从微观角度讲,是因为在这些材料的内部有很多自发的磁化单元,叫做磁畴。一般情况下,磁畴的排列是杂乱无章的,铁磁材料呈中性。在外界磁场的作用下,磁畴的排列渐趋规律,形成一个磁场,使铁磁材料呈现磁性。在不同励磁电流的作用下,铁磁材料的磁场感应强度会随着励磁电流不断变化,对其进行测量就会得到磁感应强度和磁场强度之间的关系曲线,即 $B-H$ 曲线,也叫铁磁材料的磁化特性曲线,如图1-7所示。图中曲线1为铁磁材料的磁化曲线,曲线2为铁磁材料的磁导率随磁场强度变化的曲线。

从铁磁材料的磁化特性曲线上可以看出,在一定的范围内(a, b),尽管磁场强度不断

增大,但是磁感应强度的变化却并不大,这就是铁磁材料的饱和特性。这种特性说明,在铁磁材料的磁感应强度达到一定值后,再靠加强励磁电流的方法是不能使铁磁材料的磁感应强度继续增大的。另外,铁磁材料的磁导率也会随励磁的变化而不同。

2. 磁滞回线和磁滞损耗

在测量铁磁材料的磁化曲线时,如果改变励磁的大小和方向,就会发现,在励磁增大或减小的不同路径上,铁磁材料的磁化曲线会出现不重合的现象,导致磁感应强度滞后于磁场强度的变化,如图 1-8 所示。这种现象就叫做铁磁材料的滞回现象,这种曲线就叫做铁磁材料的磁滞回线。

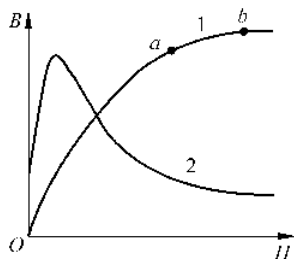


图 1-7 铁磁材料的磁化特性曲线

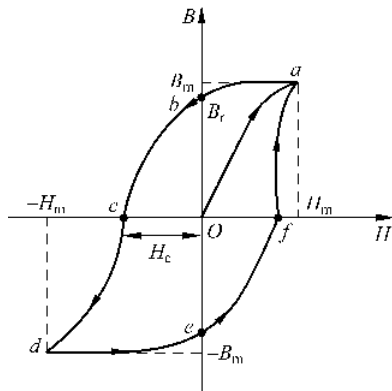


图 1-8 铁磁材料的磁滞回线

从图 1-8 中可以看到,磁场强度从 0 开始增大到 H_m 时,其磁化特性曲线沿 Oa 段上升,达到最大值 B_m ;此后如果减小磁场强度,磁感应强度不会沿着原来的 Oa 曲线下降,而是沿着 ab 段曲线下降,当磁场强度减到 0 时,磁感应强度并不为 0,而是等于 B_r ,称为剩磁;同样当磁感应强度为 0 时,磁场强度也不为 0,而是等于 $-H_c$,这个反向的磁场强度称为矫顽力;当磁场强度和磁感应强度降到最小,又开始增大时,将沿 $defa$ 的方向增大。

不同材料的磁滞回线是各不相同的。磁滞回线较窄的材料为软磁材料,如铸铁、硅钢片等,磁导率比较高,可以用来制作各种电机的定转子铁心;磁滞回线较宽的材料为硬磁材料,可以制作成永久磁铁,用来制造永磁电机。

在对铁磁材料进行反复的磁化时,铁磁材料内部的磁畴不断被改变方向,相互之间产生摩擦,从而引起一定程度的能量损耗,这种能量损耗叫做磁滞损耗。实验证明,铁磁材料磁滞损耗的大小与磁化磁场的磁感应强度和交变磁场的频率成正比。

3. 涡流损耗

除了铁磁材料的磁滞损耗外,在电机或变压器铁心中的磁通发生变化时,铁心会产生感应电动势,进而产生电流,这种电流形状呈旋涡状,故称其为涡流。涡流在铁心中会产生热量,造成一定的能量损耗,这种能量损耗称为涡流损耗。实验证明,涡流损耗的大小与铁心的厚度平方成正比。因此,为了减小涡流损耗,一般采用薄的硅钢片来制作电机或

变压器的铁心。

铁心中的磁滞损耗与涡流损耗合称为铁心损耗。

小结

本章介绍了电机及电力拖动的历史、现状及发展趋势,电机的分类;介绍了电机工作原理的基本电磁定律,主要掌握以下内容。

磁通和磁场强度是电磁感应的两个基本概念。

安培环路定理和磁路欧姆定律是约束某一段磁路参数的基本定理。

$$\oint_l H dl = \sum I$$

$$F = \Phi R_m$$

对整个磁路而言,各参数之间的约束依赖于磁路的基尔霍夫第一定律和第二定律。

$$\sum \Phi = 0$$

$$\sum U = 0$$

也就是说,对某一节点而言,所有流入和流出节点的磁通代数和等于零,这个磁通连续性原理类似于电路中的基尔霍夫电流定律;对某个闭合的磁路而言,所有磁路段的磁压代数和等于零,类似于电路中的基尔霍夫电压定律。

电磁力定律:载流导体在磁场中会受到安培力的作用, $f = BIl$,这就是直流电动机的基本理论。

电磁感应定律:导体在磁场中运动,切割磁力线,会在导体中产生感应的电动势, $E = Blv$,这就是直流发电机的基本理论;螺旋管的磁通发生变化时,会在线圈中产生感应的电动势和电流,这就是变压器的基本原理。

通过掌握这些定理和定律,要学会判断安培力和感应电动势的方向。

在电机和变压器中,为了能够使磁场比较强,一般使用铁磁材料作为磁路的导磁材料。在磁的方面主要有两个非线性特性:一是饱和特性,二是磁滞特性。

思考题与习题

- 1.1 简述电机与电力拖动的历史发展进程。
- 1.2 磁路的磁阻如何计算? 磁阻的单位是什么?
- 1.3 磁感应强度为何又叫做磁通密度? 它与磁通的关系如何?
- 1.4 电机或变压器铁心中的损耗包括哪些损耗? 它们都是如何产生的?
- 1.5 设有两个线圈的匝数相同,一个缠绕在软磁材料上,而另一个缠绕在非磁物质上。若两个线圈通以相同频率的交流电流,此时自感电动势如果相等,那么哪个线圈上的电流大?
- 1.6 为何电动机或变压器的铁心要用薄的硅钢片叠压而成?

第 2 章

直流电机基本理论

直流电机是指能输出直流电流的发电机或通入直流电流而产生机械运动的电动机。

直流电动机具有良好的启动性能和宽广平滑的调速特性,因而被广泛应用于电力机车、无轨电车、轧钢机、机床和启动设备等需要经常启动并调速的电气传动装置中。直流发电机主要作为直流电源。此外,小容量直流电机大多在这种控制系统中以伺服电动机、测速发电机等形式作为测量、执行元件使用。

目前,虽然由晶闸管整流元件组成的静止固态直流电源设备基本上已经取代了直流发电机,但直流电动机以其良好的调速性能优势在许多传动性能要求较高的场合占据一定的地位。

2.1 直流电机的基本原理与结构

2.1.1 电机的分类

应用电磁原理实现电能与机械能互换的旋转机械,统称为电机。把机械能转换为电能的电机,称为发电机;把电能转换为机械能的电机,称为电动机。

直流电机是直流发电机和直流电动机的总称,它们的能量转换过程是可逆的。

直流电动机是人类最早发明和应用的一种电机,虽然目前不如交流电动机应用普遍,但是,直流电动机具有比交流电动机较为优越的调速和启动性能。它的调速范围广,平滑性、经济性较好,采用晶闸管调速系统更为方便;它的启动转矩较大。这种性能对有些机械的拖动是十分重要的,例如大型机床、电力机车、大型轧钢机、大型起重设备等。

直流电动机也有它显著的缺点:一是制造工艺复杂,生产成本低;二是运行时由于电刷与换向器之间容易产生火花,可靠性较差,维护量大且较麻烦。人们虽做过很多研究工作来改善交流电动机的性能,但还不能全部用交流拖动来代替直流拖动。因而,在某些机械的拖动中,仍需用直流电动机。

直流发电机过去是直流电的主要电源之一,广泛地用在电解、电镀、充电等设备中,也用作同步电动机的励磁和直流电动机的电源。由于电力电子技术日益发展,在某些场合已经取代直流发电机。

电动机除了较多地用作动力外,随着生产自动化的需要,在自动控制系统和计算装置