

绪 论

一、概述

物质、能量和信息是人类赖以生存的三大基本要素。电能作为一种能量形式，由于其易于传输、变换、分配和控制，已成为使用最为广泛的现代能源，也是人们生产和生活中使用动力的主要来源。在电能的生产、传输、变换、分配、控制和管理中，电机是主要的机电能量转换装置。

自 1831 年法拉第发现电磁感应定律的 100 多年来，各种类型的电机不断发明并广泛应用于人们生产和生活的方方面面。目前，按电机供电电源的不同，大致可以分为直流电机和交流电机两大类，其中：交流电机又可根据其工作方式分为同步电机和异步电机。如果按电机中能量转换的方式，又可将其分为发电机和电动机两大类：发电机是将输入的机械能转换成电能输出；电动机是将输入的电能转换成机械能输出。一般来说，在电机中这两种工作方式是可逆的，也就是说同一台电机既可以作为电动机也可以作为发电机来使用。

电力拖动就是使用各种电动机作为原动机拖动生产机械运动，以完成一定的生产任务。由于电动机具有性能优良、高效可靠、控制方便等优点，因此现代化生产中，大多数生产机械都采用电力拖动。例如：在工农业生产和交通运输中，机床、轧钢机、起重机、卷扬机、鼓风机、抽水机、纺织机、印染机、印刷机、电动工具和电动车辆等都采用电力拖动；在人们的日常生活中，各种家用电器大都使用微特电机作为驱动装置。在自动控制系统、计算机系统和机器人等高新技术中，大量使用控制电机作为检测、放大和执行元件。

因此，可以说电机与电力拖动系统已广泛应用到现代社会生产和生活的方方面面。如果没有发电机也就没有大量的电能产生，如果没有电动机也就没有用电力拖动的运动装置和设备。

二、电力拖动的历史、现状与发展趋势

早在远古时代，人类已经应用流水为动力带动水车。据史料记载：公元前 3000 年，中国有了水车。后来又出现了风车，这些都是最简单的拖动系统。17 世纪末，人类开始利用蒸汽为动力。1782 年，瓦特发明了第一台连续运转的蒸汽机，开创了机器时代。那时原动机与生产机械之间的连接是靠绳索或皮带，而各车间甚至全厂所有的工作就靠这种传动方式与一台原动机相连。

1831 年法拉第发现了电磁感应现象。1888 年，特斯拉发明感应电动机，从此开始了电机与电力拖动的时代。最初的电力拖动是采用传导拖动（又称联动电力拖动）的方式，它是由一台电动机，并由数个传动装置将运动传输到数个工作机构。代替传导拖动的是单机电力拖动方式，即一台机床或一个工作机械由一台电动机拖动。后来，由于生产的需要，工作机械也越来越复杂，出现了多电机电力拖动，如自动化机床、加工中心等。



1956年,晶闸管在 Bell 实验室诞生,开始了第二次电子革命,从此“电子”进入到强电领域,电力电子器件成为弱电控制强电的纽带。其重要意义在于:电力电子学把机器时代、电气时代和电子时代开创的技术融合在一起。20世纪60年代,电力电子器件进入电力拖动领域,可以方便地通过电能变换装置来控制电机的运行方式。其后,自动化技术和计算机技术也不断应用于电机控制,使电力拖动系统发生了根本性改变。

目前,电力拖动系统的工业应用范围不断扩大,已遍及冶金、铁道、机械、纺织等领域,特别在大功率、高电压交流调速系统的应用上取得了重大的突破。交流拖动系统由于结构简单、价格便宜、维护方便等优势,正逐步取代直流拖动系统。电力拖动的现状可概括为两点:

1) 电力拖动现已取代了其他拖动形式,成为最主要的拖动形式。这是因为电动机与其他原动机相比有许多优点,比如:电能的获得和转换比较经济;传输和分配比较便利;操作和控制容易,特别是易于实现自动与远程控制。因此,目前绝大多数的生产机械都采用电力拖动。而且,目前电力拖动的方式也几乎全部是单机或多机拖动。

2) 当代科学和技术的新成果广泛应用于电力拖动系统之中,比如:电力电子学的发展,使半导体变流装置广泛地用作电力拖动的电源;微电子学的发展,使电子控制器件和微处理机成为电力拖动的主要控制手段;自动控制理论广泛应用于电力拖动自动控制系统中,大大提高了系统的性能。

新材料和新元件的结合,正在全面改变传统电机的面貌。由于稀土永磁材料的迅速发展和电力电子器件性能的不断改善,涌现了大量的新型实用电动机,如无刷直流电动机、开关磁阻电动机、无刷双馈电动机等。这些电动机调速性能优良,为电力拖动技术的发展开辟了新的领域。高性能的微处理器如 DSP 的出现,为采用新的控制理论和控制策略提供了良好的物质基础,使电力拖动系统的自动化程度大为提高。神经网络控制和模糊控制等智能控制技术以及现代控制理论在电力拖动系统中的应用已成为新的研究热点。

由此可见,随着现代电力电子技术、自动化技术和计算机技术的发展,电力拖动的发展趋势可概括为:

- 1) 用交流电力拖动完全取代直流电力拖动。
- 2) 从节能的角度改造电力拖动系统,提高系统效率。
- 3) 继续采用新技术不断提高电力拖动系统的性能和完善系统功能。
- 4) 通过系统集成和技术融合,组成综合自动化系统,进一步提高生产效率。

三、本课程的性质、任务和要求

本课程是自动化、电气工程及其自动化等相关专业的一门专业基础课,其任务是使学生掌握电机的基本结构、工作原理和性能参数,电力拖动系统的各种运行方式、动静态性能分析以及电机选择和实验方法,为进一步学习“电力电子技术”“电力拖动控制系统”“PLC 控制系统”等课程准备必要的基础知识。学习本课程必须具备“电路原理”或“电工基础”课程的基本知识。

本课程主要研究和分析电机与电力拖动系统的基本理论问题,为突出实用性也涉及一些简单的电机控制线路,具有原“电机学”和“电力拖动基础”的主要内容。通过本课程的学习,学生应达到如下要求:



1) 掌握一般交直流电机和变压器的基本理论, 包括电磁关系和能量关系等, 并能运用等效电路和相量图等方法推演电机的基本电路方程并进行参数计算。

2) 掌握电力拖动系统静态特性及其分析方法, 包括电动机机械特性与各种运行状态, 比如: 起动、制动和调速等特性。

3) 熟悉电力拖动系统的动态特性及其分析方法, 了解系统参数对过渡过程的影响。

4) 熟悉电机的铭牌参数, 掌握选择电机的方法。

5) 掌握电机与电力拖动系统的基本实验方法和技能。

6) 了解电机与电力拖动系统的应用领域和发展趋势。

试读版本仅供防疫期间线上教学使用

第一章

电机的基本原理

电机虽然种类繁多、大小不一、形式各异，但具有共同的基本原理和特征。本章试图从电磁感应和机电能量转换两个角度来探究电机的基本原理；以一个简单的两极电机为原型电机，建立电机的物理模型，进而导出电机的感应电动势和电磁转矩的一般表达式；并初步讨论电机的能量损耗与发热问题。

第一节 电磁感应原理

众所周知，电和磁是自然界的两种现象，近代通过物理学家的深入研究，发现了电和磁的一些基本规律以及它们之间的联系。本节将概要地介绍电磁感应的基本概念和定律，作为学习本课程的物理基础。

一、磁场

除了天然磁体会产生磁场外，人们发现在导体中通过电流时会在其周围产生磁场，还进一步发现了由电产生磁场的一些规律。

1. 磁场强度和方向

由载流导体产生的磁场大小可用磁场强度 H 来表示，**磁力线的方向与电流的方向满足右手螺旋关系**。如图 1-1 所示，假定在一根导体中通以电流 i ，则在导体周围空间的某一平面上产生的磁场强度 H 的大小为

$$H = \frac{i}{l} \quad (1-1)$$

式中 H ——磁场强度 (A/m)；

i ——电流 (A)；

l ——磁力线的周长 (m)。

如果载流导体是匝数为 N 的线圈 (如图 1-2 所示)，则式(1-1) 可表示为

$$H = \frac{Ni}{l} \quad (1-2)$$

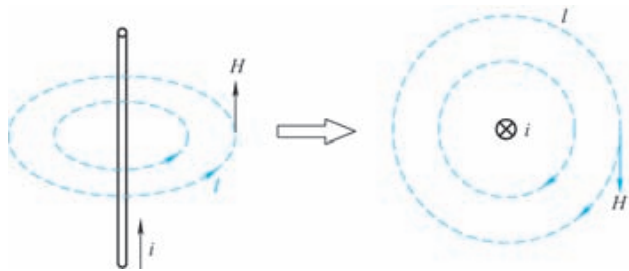


图 1-1 载流导体产生的磁场

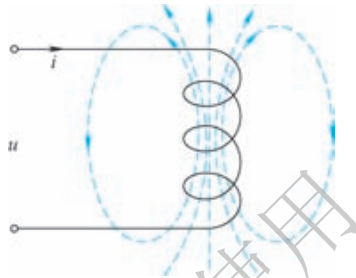


图 1-2 通电线圈产生的磁场

2. 磁通密度

通常把穿过某一截面 S 的磁力线根数称为磁通量，用 Φ 来表示。在均匀磁场中，把单位面积内的磁通量称为磁通密度或称磁感应强度，用字母 B 表示，且有

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-3)$$

式中 B ——磁通密度 (T)；

Φ ——磁通 (Wb)；

S ——截面积 (m^2)。

3. $B-H$ 曲线

磁场强度 H 与磁通密度 B 存在一定的关系，在真空中，它们成正比关系，即

$$B = \mu_0 H \quad (1-4)$$

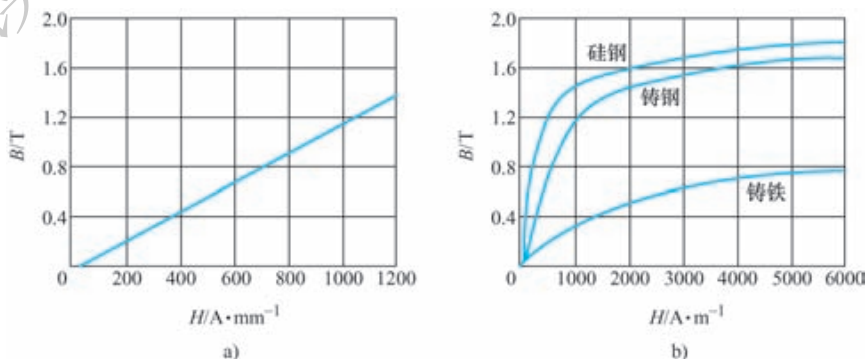
其中， μ_0 为真空导磁率，且有 $\mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ，并可近似为 $\mu_0 \approx 1/800000 \text{H/m}$ ，这样式(1-4)可近似表示成

$$\{H\}_{\text{A/m}} \approx 800000 \{B\}_{\text{T}}$$

非导磁材料，比如：铜、橡胶和空气等，具有与真空相近的导磁率，因此在这些材料中，磁场强度 H 与磁通密度 B 的关系可用图 1-3a 中的 $B-H$ 曲线来表示。在导磁材料中，他们的关系可表示为

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (1-5)$$

其中， μ_r 为导磁材料的相对导磁率。由于 μ_r 的值不是常数，因而 B 与 H 之间的关系不是线

图 1-3 几种典型材料的 $B-H$ 曲线

a) 真空 b) 铁磁材料



性关系。这样,式(1-5)实际上没有实用价值,通常用 $B-H$ 曲线来表达他们之间的关系。图 1-3b 给出了几种典型导磁材料的 $B-H$ 曲线^[1]。

二、磁路

为简单起见,工程上常用磁路方法来描述和分析磁场及电磁关系。磁路的主要部分由高导磁材料构成,使得磁通被限制在磁路内部,这就像电流被限制在电路中一样,可以用类似于电路分析方法建立磁路分析方法。由于变压器和电机的铁心多是由高导磁材料构成的,因此磁路方法可用作分析变压器和电机的重要工具。

1. 简单磁路

如图 1-4a 所示,一个简单的磁路由采用高导磁材料的铁心和通电线圈组成,现假定铁心具有相同的截面积 S_c 和平均长度 l_c ,线圈的匝数为 N ,通以电流 i ,若忽略线圈漏磁通,由通电线圈产生的磁场将主要分布在铁心内部。根据式(1-2),可计算出磁场强度为

$$H_c = \frac{Ni}{l_c}$$

现定义一个新的变量磁动势 (Magnet Motive Force—MMF) F_m 来描述由通电线圈产生的磁场,则上式可写成

$$F_m = Ni = H_c l_c \quad (1-6)$$

再由式(1-3)、式(1-5)和式(1-6)可得

$$F_m = \frac{l_c}{\mu S_c} \Phi \quad (1-7)$$

其中, $\mu = \mu_0 \mu_r$ 称为磁导率。令 $R_m = \frac{l_c}{\mu S_c}$ 为磁阻,可将上式表示为

$$F_m = R_m \Phi \quad (1-8)$$

由式(1-8)可见,磁路中磁动势 F_m 、磁通 Φ 和磁阻 R_m 的关系与电路中的电动势 E 、电流 i 和电阻 R 的关系相似 (如图 1-4b)。这样,可以用等效的磁路来分析和研究电磁关系。

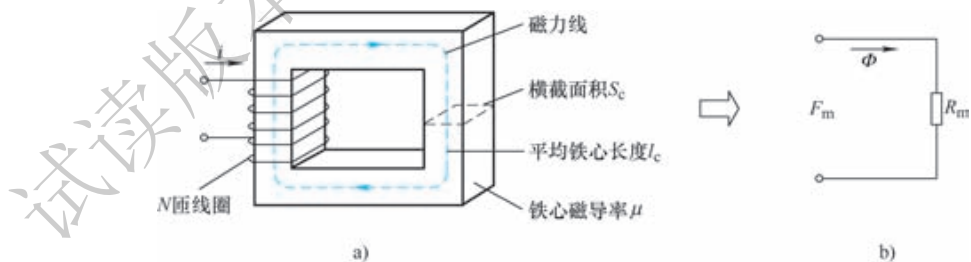


图 1-4 简单磁路示意图

a) 磁路结构 b) 磁路表示

2. 气隙磁场

假如在磁路中有一段气隙,如图 1-5 所示,只要气隙的长度 l_g 与相邻的铁心表面尺寸相比足够小,那么由通电线圈产生的磁通 Φ 仍主要分布在铁心和气隙中,这时磁路的磁动势 F_m 为

$$F_m = Ni = H_c l_c + H_g l_g \quad (1-9)$$

或写成
$$F_m = \frac{B_c l_c}{\mu} + \frac{B_g l_g}{\mu_0}$$

由于 $B_c = \Phi/S_c$, $B_g = \Phi/S_g$, 如果忽略气隙磁场的边缘效应, 即 $S_c = S_g$, 上式变为

$$F_m = \Phi \frac{l_c}{\mu S_c} + \Phi \frac{l_g}{\mu_0 S_c} = \Phi (R_{mc} + R_{mg})$$

(1-10)

式(1-10)说明, 磁路的磁动势 F_m 等于磁通 Φ 与铁心磁阻 R_{mc} 和气隙磁阻 R_{mg} 串联值的乘积。这就与串联电路分析相似。由于铁心的磁导率远远大于气隙的磁导率, 即 $\mu \gg \mu_0$, $R_{mc} \gg R_{mg}$, 因此, 由磁动势 F_m 产生的磁通 Φ 或磁感应强度 B 主要就取决于气隙的性质, 即

$$\Phi \approx \frac{F_m}{R_{mg}} = Ni \frac{\mu_0 S_c}{l_g} \quad (1-11)$$

由此可知, 在电机学中气隙磁场将扮演重要的角色。今后分析研究的重点也主要放在气隙磁场上。

3. 磁动势的合成

如图1-6所示, 磁路有两组线圈 N_1 和 N_2 , 分别通以电流 i_1 和 i_2 , 在磁路中所产生的总磁动势为

$$F_m = Ni = N_1 i_1 + N_2 i_2 \quad (1-12)$$

根据式(1-11), 磁路的磁通也主要存在于气隙之中, 即

$$\Phi = (N_1 i_1 + N_2 i_2) \frac{\mu_0 S_c}{l_g} \quad (1-13)$$

上述结果可以推广到有多组线圈的磁路中, 其总的磁动势 F_m 是每组线圈 $N_1, N_2, \dots, N_n$ 产生的磁动势 $F_{m1}, F_{m2}, \dots, F_{mn}$ 的合成。但必须注意: 磁动势除了大小以外, 还应考虑其方向, 因此一般来说, 磁动势的合成是一种矢量计算。

这样, 类似于电路的分析方法, 可以把工程应用中几何形状复杂的磁路分段处理, 简化成若干个几何形状规则的简单磁路的组合。

例1-1 有一磁路如图1-7a所示, 由铁磁材料构成, 带有两个长度和面积分别为 g_1, g_2 和 S_1, S_2 的气隙, 其线圈匝数为 N , 通以电流 i , 试求出磁路总的磁通量 Φ 和气隙1的磁通量 Φ_1 。

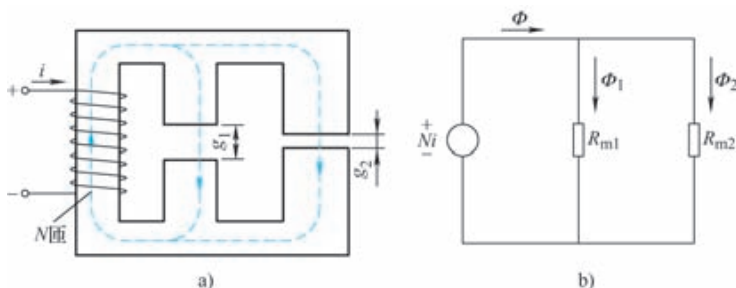


图1-7 例1-1的磁路

a) 磁路 b) 等效磁路图

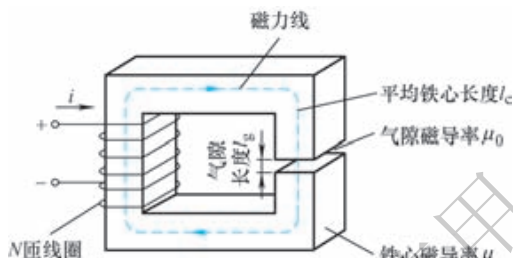


图1-5 带有气隙的磁路

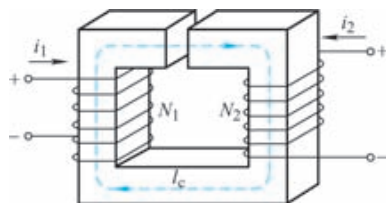


图1-6 有多组线圈的磁路



解 由磁路结构图画出其等效磁路图, 根据磁路分析方法可列出磁路关系

$$\Phi = \frac{Ni}{\frac{R_{m1}R_{m2}}{R_{m1} + R_{m2}}}$$

其中, $R_{m1} = \frac{g_1}{\mu_0 S_1}$, $R_{m2} = \frac{g_2}{\mu_0 S_2}$, 且有 $\Phi_1 = \frac{Ni}{R_{m1}} = \frac{\mu_0 S_1 Ni}{g_1}$ 。

三、电磁感应定律

1. 电磁感应定律

1831年, 法拉第通过实验发现了电磁学中最重要规律——电磁感应定律, 揭示了磁通与电动势之间存在如下关系:

- 1) 如果在闭合磁路中磁通随时间而变化, 那么将在线圈中感应出电动势。
- 2) 感应电动势的大小与磁通的变化率成正比, 即

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

式中 e ——线圈的感应电动势 (V)。

法拉第电磁感应定律奠定了电机学的理论基础。

2. 导体在磁场中的感应电动势

电磁感应定律告诉我们, 磁场的变化会产生感应电动势。如果磁场固定不变, 而让导体在磁场中运动, 这时相对于导体来说, 磁场仍是变化的, 因此根据法拉第定律, 同样会在导体中产生感应电动势。这种导体在磁场中运动产生的感应电动势的大小由下式给出

$$e = Blv \quad (1-15)$$

式中 e ——导体的感应电动势 (V);

l ——在磁场中运动导体的长度 (m);

v ——导体运动的相对速度 (m/s)。

而感应电动势的方向由右手定则确定, 图 1-8 表示了 e 、 B 与 v 三者之间的方向关系。

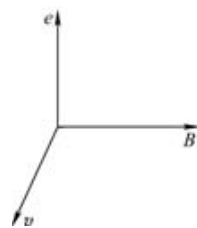


图 1-8 e 、 B 、 v 三者之间的方向关系

3. 载流导体在磁场中的电磁力

如果在固定磁场中放置一个通有电流的导体, 则会在载流导体上产生一个电磁力, 又称洛伦兹力或安培力。

如图 1-9 所示, 载流导体受力的大小与导体在磁场中的位置有关。当导体与磁力线方向垂直时, 所受的力最大, 这时电磁力 F 与磁感应强度 B 、导体长度 l 以及通电电流 i 成正比, 即

$$F = Bli \quad (1-16)$$

当导体与磁力线平行时, $F = 0$, 在其他位置, 导体所受的力介于两者之间。电磁力的方向可由左手定则确定, 图 1-10 给出了 F 、 B 与 i 三者之间的方向关系。

载流导体在磁场中产生电磁力的原理是电动机最重要的理论基础。

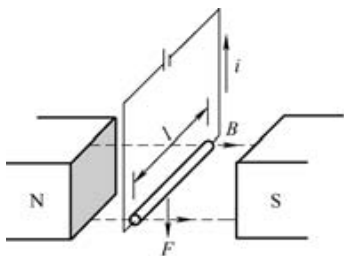
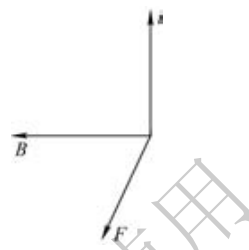
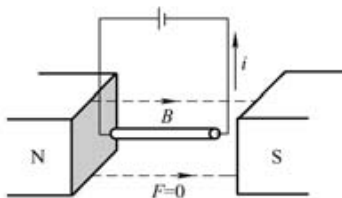


图 1-9 载流导体在磁场中受到的电磁力

图 1-10 F 、 B 、 i 三者之间的方向关系

第二节 机电能量转换原理

从能量转换的观点,可以把依靠电磁感应原理运行的机电设备看作是一类机电转换装置,比如:变压器是一种静止的电能量转换装置,而旋转电机是一种将机械能转换成电能(发电机)或将电能转换成机械能(电动机)的运动装置。因此,机电能量转换原理也是学习和研究电机理论的一个重要工具。

一、磁链、电感和磁能

在图 1-5 所示的磁路中,现引入一个新的参数磁链来表示线圈中感应的总磁通,即有

$$\Psi = N\Phi \quad (1-17)$$

式中 Ψ ——磁链 (Wb)。

这样,由式(1-14)表示的电磁感应定律可写成

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (1-18)$$

再由式(1-11)和式(1-17),可得

$$\Psi = \frac{\mu_0 S_c N^2}{l_g} i \quad (1-19)$$

上式说明,当磁路的线圈匝数 N 、气隙距离 l_g 和截面积 S_c 确定之后,磁路中产生的磁链 Ψ 与线圈电流 i 成正比。由此,可以定义线圈的电感 L 为磁链 Ψ 与电流 i 之比,即

$$L = \frac{\Psi}{i} \quad (1-20)$$

其中, L 为电感 (H)。在忽略铁心磁阻的条件下,式(1-19)成立,再由式(1-20)可得

$$L = \frac{\mu_0 S_c N^2}{l_g} \quad (1-21)$$

这样,式(1-18)可写成

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d}{dt}(Li) = -L \frac{di}{dt} \quad (1-22)$$

由此可见,图 1-5 所示的磁路也可表示成电路形式(如图 1-11 所示)。按照电路理论,该电路的回路方程为



$$u = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (1-23)$$

图 1-5 所示的磁路中所获得的能量是由线圈输入的电能提供的, 由电功率的概念可知

$$P = -ie = i \frac{d\Psi}{dt} \quad (1-24)$$

其中, P 为电功率 (W), 其负号是由于电路中 i 与 e 的正方向规定所致, 也表示功率或能量的传递是有方向的。由此可得磁路中储存的电能 W_e 为

$$W_e = \int_0^t P dt = \int_0^\Psi i d\Psi = \int_0^\Psi \frac{\Psi}{L} d\Psi = \frac{\Psi^2}{2L} = \frac{1}{2} Li^2$$

上式说明了磁路中磁场储存的电能与电感和电流的大小关系, 即

$$W_e = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1-25)$$

式中 W_e ——磁路中储存的能量 (J)。

由式(1-21)可知, 电感主要由气隙决定, 也就是说磁场的储能主要是存放在气隙之中。我们往往把气隙磁场称为耦合磁场, 它是机电能量转换的主要媒介。

二、机电能量转换

如前所述, 电机作为一种机电能量转换装置能够将电能转换为机械能, 也能将机械能转换为电能。由于机械系统和电气系统是两种不同的系统, 其能量转换必须有一个中间媒介, 这个任务就是由气隙构成的耦合磁场来完成的, 图 1-12a 所示是机电系统通过耦合磁场相联系的示意图。根据能量守恒原理, 机电系统 (以电动机为例) 应满足下列能量关系:

电源输入的电能 = 磁场储能的增加 + 机械能输出 + 热能损耗



图 1-12 机电能量转换关系

a) 机电系统及联系 b) 理想的磁能储存系统

为简便起见, 可将能量转换过程中的损耗分别归并到输入的电能和输出的机械能中, 即认为耦合磁场将全部输入的电能转换为机械能, 耦合磁场可看作是一个理想的无损耗的磁能储存系统 (Lossless Magnetic Energy Storage System), 并且耦合磁场的能量全部储存在气隙中, 如图 1-12b 所示。

这样, 机电能量转换关系可用微分方程表示为

$$dW_f = dW_e + dW_m \quad (1-26)$$

式中 dW_f ——在时间 dt 内耦合磁场吸收能量的增量;

dW_e ——在时间 dt 内输入耦合磁场的净电能增量;

dW_m ——在时间 dt 内转换为机械能的能量增量。

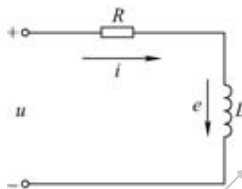


图 1-11 磁路的电路表示形式

在机电能量转换过程中, 电气系统的变化可能是由于机械运动而产生的感应电动势, 机械系统的变化可能是由于电磁作用而产生的力(直线运动时)或转矩(旋转运动时)。按能量传递方向的约定, 在式(1-26)中, 对电动机来说, 输入电能取正号, 输出机械能取负号; 而对发电机来说, 输入机械能取正号, 输出电能取负号。

1. 感应电动势的一般表达式

感应电动势的一般表达式就是由式(1-18)表示的电磁感应定律的表达式, 现重新写出

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}$$

2. 电磁转矩的一般表达式

由式(1-18)和式(1-24)可得

$$dW_e = Pdt = -eidt = id\Psi \quad (1-27)$$

对于旋转运动来说, 如果由于电磁转矩 T_e 的作用, 产生了相应的机械角位移 $d\theta$, 则表示其做了机械功 dW_m , 即

$$dW_m = T_e d\theta \quad (1-28)$$

此时, 耦合磁场的能量转换关系为输入电能和输出机械能, 式(1-26)可写成

$$dW_f = id\Psi - T_e d\theta \quad (1-29)$$

由于磁场储能是磁链 Ψ 和角位移 θ 的函数 $W_f(\Psi, \theta)$, 对其求全微分可得

$$dW_f(\Psi, \theta) = \frac{\partial W_f}{\partial \Psi} d\Psi + \frac{\partial W_f}{\partial \theta} d\theta \quad (1-30)$$

对比式(1-29)和式(1-30), 可以看出

$$-T_e d\theta = \frac{\partial W_f}{\partial \theta} d\theta$$

即

$$T_e = -\frac{\partial W_f}{\partial \theta} \quad (1-31)$$

式(1-31)给出了由磁能 $W_f(\Psi, \theta)$ 计算旋转电机电磁转矩的通用公式。该式说明, 当转子的微小角位移引起电机磁能变化时, 转子上将受到电磁转矩的作用, 电磁转矩的大小等于单位角位移时磁能的变化率(磁链约束为常值), 电磁转矩的方向为恒磁链下趋使磁能减小的方向。

由于磁场储能 W_f 是 Ψ 和 θ 的函数, 有时在电机中难以求取 Ψ , 为此定义磁余能 (W'_f), 也称为磁共能^[8]。 W'_f 为电流 i 和机械角位移 θ 的函数 $W'_f(i, \theta)$, 且有

$$W'_f = i\Psi - W_f \quad (1-32)$$

在等式两边进行微分, 得

$$dW'_f = d(i\Psi) - dW_f$$

因

$$d(i\Psi) = id\Psi + \Psi di$$

再由式(1-29), 可得

$$dW'_f = \Psi di + T_e d\theta \quad (1-33)$$

将 $W'_f(i, \theta)$ 按全微分形式展开, 得

$$dW'_f(i, \theta) = \frac{\partial W'_f}{\partial i} di + \frac{\partial W'_f}{\partial \theta} d\theta$$



比较两式可得

$$T_e = \frac{\partial W'_f}{\partial \theta} \quad (1-34)$$

式(1-34)给出了由磁共能 $W'_f(i, \theta)$ 计算旋转电机电磁转矩的通用公式。该式说明, 当转子的微小角位移引起电机磁共能变化时, 转子上将受到电磁转矩的作用, 电磁转矩的大小等于单位角位移时磁共能的变化率(电流约束为常值), 电磁转矩的方向为恒电流下趋使磁共能增加的方向。

这样, 只要知道旋转电机气隙磁场的磁能 W_f 或磁共能 W'_f 中的一个, 就可利用式(1-31)或式(1-34)求出旋转电机的电磁转矩, 两者的结果是一致的。

第三节 电机的基本结构与工作原理

各种电机虽然结构不一、样式繁多, 但其遵循的基本原理是相同的, 即法拉第的电磁感应定律。本节将忽略具体的电机结构, 把它简化为一个最基本的模型电机, 来分析和讨论电机共同的原理和特征, 为学习后续各章奠定理论基础。

一、模型电机的结构

目前, 无论哪种电机都是由定子、转子和气隙三个部分组成, 定子是固定不动的, 转子是运动的, 它们之间隔着一层薄薄的气隙。在定子和转子上分别按需要安装若干线圈绕组, 其目的是在气隙中产生磁场。往往要求气隙磁场按一定的形式分布, 例如正弦分布磁场。

为简单起见, 先分析一个最简单的两极电机, 如图 1-13a 所示。该电机在定子上有一个励磁绕组, 线圈匝数为 N , 如果通以电流 i , 将产生一个两极磁场, 其磁力线的方向由电流方向决定(见图中的虚线部分)。在忽略定子和转子铁心磁阻的条件下, 由定子线圈电流产生的磁场全部在气隙中, 且在每个磁极下的磁场强度不变, 由式(1-6)并只考虑气隙磁路, 可计算出磁场强度 H 和磁动势 F_m 大小, 其分布如图 1-13b 所示, 为一个随转角 θ 变化的矩形波。

为了能够得到其他形式的分布磁场和磁动势, 可以增加线圈个数并按一定的规律放置。例如: 在上述线圈周围放置若干线圈, 由此产生的磁动势如图 1-14 所示, 其波形接近一个正弦波。在实际电机中就是通过这种办法来得到需要的磁场分布。

同理, 可以在转子上设置一个线圈绕组以产生转子磁动势 F_{mr} 。如果在定子和转子上按

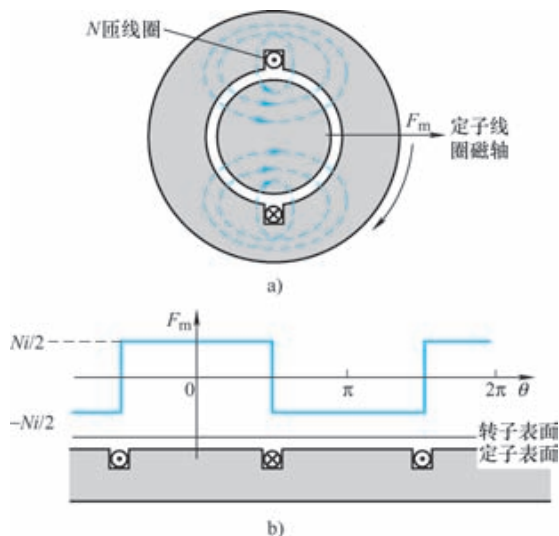


图 1-13 简单电机的气隙磁场分布

a) 两极电机 b) 气隙磁场分布

上述方法增设若干绕组，将使两极电机变为多极电机。此外，还可以将均匀气隙做成不均匀气隙，例如同步电机和直流电机。

由此可见，我们可以用一个简单的两极电机作为电机的物理模型，通过对电机模型的分析，学习和掌握电机的基本原理。为不失一般性，设原型电机如图 1-15a 所示，在定子和转子上各设置一组绕组，构成一个两极电机，各绕组线圈的分布使其产生的磁场按正弦分布。

为分析方便，特作如下假定：

- 1) 忽略各绕组的漏磁和齿槽等影响。
- 2) 忽略凸极影响，认为气隙均匀。
- 3) 忽略高次谐波影响，认为气隙磁场沿电枢表面正弦分布。
- 4) 忽略磁饱和以及其他非线性效应。

这样，可将图 1-15a 的原型电机用图 1-15b 所示的电机物理模型来表示。图中，定子绕组 s 产生的磁动势沿 s 轴方向，转子绕组 r 产生的磁动势沿 r 轴方向， r 轴与 s 轴相差 θ 角，转子以恒定的角速度 ω 旋转。因此，角位移 $\theta = \omega t$ 。

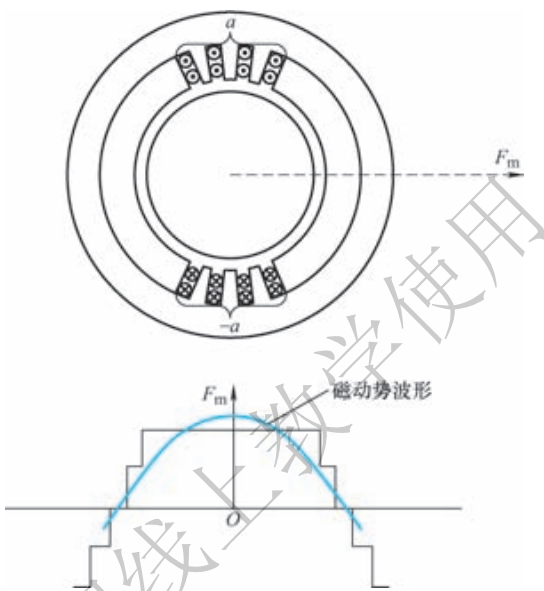


图 1-14 电机的正弦分布磁场

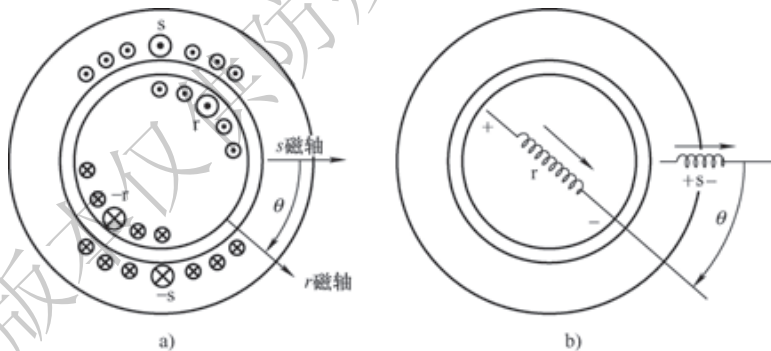


图 1-15 两极电机的物理模型

a) 原型电机 b) 电机模型

二、感应电动势的产生

在图 1-15 的原型电机中，现假定在转子绕组中通以电流产生一个正弦分布磁场，同时转子在外力拖动下以恒定的角速度 ω 旋转，由于受转子磁场变化的影响，将在定子绕组中产生感应电动势。如图 1-16 所示，转子磁通 Φ 在定子磁轴上感应的磁链为

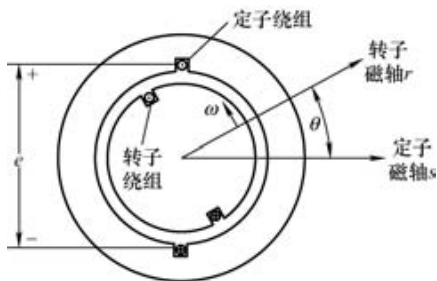


图 1-16 感应电动势的产生



$$\Psi = N\Phi \cos\theta$$

根据电磁感应定律

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \cos\theta + N\Phi \sin\theta \frac{d\theta}{dt}$$

再由 $\theta = \omega t$, 上式可写成

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \cos\omega t + N\Phi \omega \sin\omega t \quad (1-35a)$$

如果保持励磁磁通恒定, 则 $d\Phi/dt = 0$, 这样, 电机产生的感应电动势为

$$e = N\Phi \omega \sin\omega t \quad (1-35b)$$

式(1-35b)可以用来计算恒定励磁电机的感应电动势, 比如他励直流电动机。

三、电磁转矩的产生

如前所述, 当向电机供电时, 电机将产生电磁转矩 T_e 。有两种方法可以计算电磁转矩, 一种方法是从电路的角度, 通过计算定子和转子的电感储能来求出 T_e ; 另一种方法是从磁场的角度, 先由定子与转子的合成磁动势求出磁场储能, 再计算出 T_e 。现采用第二种方法, 在图 1-15 所示的电机模型中, 设定子绕组产生定子磁动势 F_s , 转子绕组产生转子磁动势 F_r , 假定两个矢量 F_s 与 F_r 之间的夹角为 φ_{sr} , 则它们的合成磁动势为 F_{sr} , 其矢量关系如图 1-17 所示。

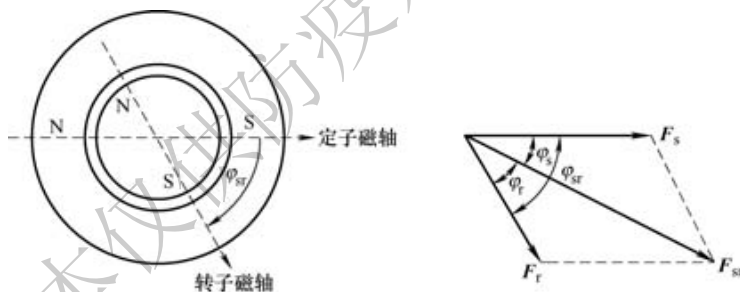


图 1-17 磁动势矢量关系

由余弦定理可知合成矢量 F_{sr} 的大小为

$$F_{sr}^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos\varphi_{sr}$$

现设定子与转子间的气隙均匀, 宽度为 g , 由式(1-6) 可得, 电机的气隙磁场强度的峰值 H_{pk} 为

$$H_{pk} = \frac{F_{sr}}{g}$$

因假定气隙磁场按正弦分布, 由于正弦波均值的二次方是其峰值二次方的一半, 则平均气隙磁场强度为

$$H_{av}^2 = \frac{H_{pk}^2}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{F_{sr}}{g} \right)^2$$

根据磁余能与气隙磁场的关系^[2], 有

$$W'_f = \int_v \frac{\mu}{2} H^2 dV \quad (1-36)$$

其中, $\mu = \mu_0$, $H = H_{av}$, 气隙的体积 $V = \pi Dlg$, 由此可计算出电机的磁余能为

$$W'_f = \frac{\mu_0 \pi D l}{4g} F_{sr}^2 \quad (1-37)$$

式中 D ——气隙的平均直径 (m);

l ——气隙中电机转轴的长度 (m);

g ——气隙宽度 (m)。

再根据机电能量转换原理, 可得两极电机的电磁转矩公式

$$T_e = \frac{\partial W'_f}{\partial \varphi_{sr}} = -\frac{\mu_0 \pi D l}{2g} F_s F_r \sin \varphi_{sr} \quad (1-38)$$

可把式(1-38) 建立的两极电机转矩计算公式推广到多极电机, 设电机有 n_p 个磁极, 则其产生的电磁转矩为

$$T_e = -n_p \frac{\mu_0 \pi D l}{2g} F_s F_r \sin \varphi_{sr} \quad (1-39)$$

再由图 1-17 的磁动势矢量关系, 进行矢量分解, 得到下面的磁动势关系

$$F_s \sin \varphi_{sr} = F_{sr} \sin \varphi_r$$

$$F_r \sin \varphi_{sr} = F_{sr} \sin \varphi_s$$

将上面两式分别代入式(1-39), 可得到分别由定子或转子计算电磁转矩的公式

$$T_e = -n_p \frac{\mu_0 \pi D l}{2g} F_s F_{sr} \sin \varphi_s \quad (1-40)$$

$$T_e = -n_p \frac{\mu_0 \pi D l}{2g} F_r F_{sr} \sin \varphi_r \quad (1-41)$$

式(1-40) 及式(1-41) 是在电机具有均匀气隙磁场的条件下推导出来的, 现将这个结果推广到一般电机。对于凸机电机, 其气隙磁场仅存在于电机磁极部分, 设每个磁极的表面积为 S_p , 如果电机有 $2n_p$ 个磁极, 则在每个磁极下的气隙面积为 $S_p = \pi D l / 2n_p$, 如果忽略电机的磁饱和, 并假定气隙磁场按正弦分布, 则每极下的平均磁通密度 B_{av} 为

$$B_{av} = \frac{2}{\pi} B = \frac{2}{\pi} \mu_0 H = \frac{2\mu_0}{\pi g} F_{sr} \quad (1-42)$$

由此, 每极的合成磁通为 $\Phi_{sr} = B_{av} S_p$, 即

$$\Phi_{sr} = B_{av} \frac{\pi D l}{2n_p} = \frac{\mu_0 D l}{n_p g} F_{sr} \quad (1-43)$$

将式(1-43) 代入式(1-41) 就可得到一般电机的电磁转矩计算公式

$$T_e = -\frac{\pi}{2} n_p^2 \Phi_{sr} F_r \sin \varphi_r \quad (1-44)$$

式中的负号表示电磁转矩的作用方向是使电机定子与转子磁场趋于一致, 在实际电磁转矩计算时可以去除负号, 即

$$T_e = \frac{\pi}{2} n_p^2 \Phi_{sr} F_r \sin \varphi_r \quad (1-45)$$



式(1-45)是利用转子参数计算电磁转矩的公式。同理,可以推导出利用定子参数计算电磁转矩的公式

$$T_e = \frac{\pi}{2} n_p^2 \Phi_{sr} F_s \sin \varphi_s \quad (1-46)$$

这样,本节以一个两极电机为模型,讨论了电机的基本原理、电动势和电磁转矩的产生机理及计算方法。这种原理与方法可以应用和推广到各种类型的多极电机。

此外,如果在图 1-15 所示的电机模型中引入一个 d 、 q 坐标系,就可以很方便地建立起电机的“统一模型”。这样就可以用统一模型来表示和描述一般电机,而各种电机,比如直流电机、交流同步电机和异步电机只是其中的一种工作方式。由于这部分内容已超出本文讨论的范围,读者可参阅有关的著作和文献^[3]。

第四节 电机的能量损耗与发热

一、电机的损耗与效率

电机进行能量转换时总是要有能量损耗,能量损耗将引起电机发热和效率降低。一般来说,电机的能量损耗可分为两大类:

1. 机械损耗

由电机的运动部件的机械磨擦和空气阻力产生的损耗,这类损耗与电机的机械构造和转速有关。

2. 电气损耗

主要包括导体损耗、电刷损耗和铁耗等。

(1) 导体损耗 是由于电机的线圈电阻产生的损耗,有时又称为铜耗,通常在电机的定子和转子上都会产生铜耗。

(2) 电刷损耗 是由于电刷的接触电压降引起的能量损耗,因只有在直流电机中安装电刷,所以电刷损耗仅仅出现在直流电机中。

(3) 铁耗 是由于电机铁磁材料的磁滞效应和涡流产生的一种损耗,主要取决于磁通密度、转速和铁磁材料的特性。

对于变压器等静止的设备来说,其能量损耗只有电器损耗部分。对于电动机和发电机等运动设备,则既有机械损耗又有电气损耗。图 1-18 表示这类电机的能量传递和损耗过程。

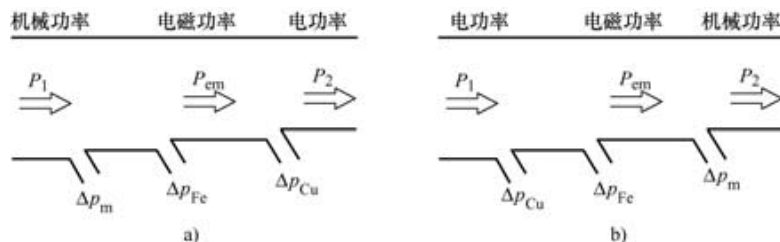


图 1-18 电机能量传递与损耗过程

a) 发电机 b) 电动机

图中, P_1 为电机的输入功率, P_2 为电机的输出功率。对于发电机, 输入功率是由原动机产生的机械功率 P_m , 机械功率是通过发电机的转轴传递的, $P_1 = P_m$; 输出功率为电功率, 因电功率往往是由定子输出, 又可表示为 $P_2 = ei$ 。对于电动机, 输入功率为电网输入的电功率, 即 $P_1 = ei$; 输出功率为机械功率, 即 $P_2 = P_m$ 。

根据上述分析, 电机的效率可表示为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \Delta p} \times 100\% \quad (1-47)$$

式中 η ——电机效率 (%) ;

P_2 ——电机输出功率 (W) ;

P_1 ——电机输入功率 (W) ;

Δp ——电机功率损耗 (W)。

且有

$$\Delta p = \Delta p_{Cu} + \Delta p_{Fe} + \Delta p_m \quad (1-48)$$

式中 Δp_{Cu} ——电机的铜耗;

Δp_{Fe} ——电机的铁耗;

Δp_m ——电机的机械损耗。

二、电机的发热与温升

电机的能量损耗最终都要转换成热能散发掉, 这会引起电机的温度上升。电机温度升高的过程是一个热过渡过程, 称为发热, 通常把电机温度高出环境温度的值称为温升。

一个典型的电机发热过程如图 1-19a 所示。图中: 电机的温升 τ 按指数曲线上升, 最终达到热平衡的稳定状态 $\tau_{ss} = Q/A$ (Q 为电机单位时间产生的热量, A 为散热系数), 并取决于初始温升 τ_{is} 和发热时间常数 $T_0 = C/A$ (C 为电机的热容量, A 为散热系数) 等参数^[7]。电机的容量越大, 一般其 T_0 也越大, 达到热平衡稳定状态的时间就越长。如果电机起动时温度与环境温度相同, 则初始温升 $\tau_{is} = 0$, 这种情况下的温升过程见曲线 1; 如果是在电机运行一段时间之后温度还没有完全降下来就重新启动, 或者是在运行当中的电机增加了负载, 这时 $\tau_{is} \neq 0$, 初始温升取决于电机当时的具体温度, 其温升过程见曲线 2。

同样道理, 电机停止运行或减少负载时温度会下降。电机冷却过程是一个按指数规律下降的曲线 (见图 1-19b)。

由此可见, 电机的发热和冷却过程是一个典型的一阶过渡过程, 其温升曲线依赖于电机的热力学参数和运行时间等因数。通过上述分析, 我们对电机的热过程有了一个定性的了解, 有关定量分析的内容将在第二章的电力拖动系统动态分析中予以介绍。了解电机的发热是为了进一步学习如何正确选择电机容量做准备。

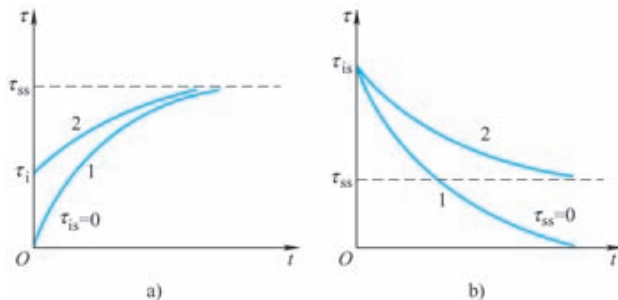


图 1-19 电机的热过程

a) 电机发热过程 b) 电机冷却过程



小 结

本章的目的是为学习后面各章节打下一个良好的理论基础, 因此将电磁感应的基本规律和电机中一些具有共性的基本原理集中予以介绍。希望通过本章的学习了解和掌握:

- 1) 电磁感应定律的物理意义。
- 2) 磁路的基本概念和分析方法。
- 3) 气隙磁场的形成和作用。
- 4) 电机的基本原理和分析思路。
- 5) 电机的能量转换、损耗和发热的基本知识。

思考题与习题

- 1-1 请说明电与磁存在哪些基本关系, 并列出其基本物理规律与数学公式。
- 1-2 通过电路与磁路的比较, 总结两者之间哪些物理量具有相似的对应关系 (如电阻与磁阻), 请列表说明。
- 1-3 如何理解机电能量转换原理? 根据这个原理可以解决什么问题?
- 1-4 旋转电机模型的基本结构由哪些部分组成, 其各自有什么作用? 气隙又有何作用?
- 1-5 以两极原型电机作为旋转电机的物理模型, 有何应用意义?
- 1-6 通过模型电机, 是如何建立电机的感应电动势和电磁转矩方程的? 又怎样将两极电机的方程推广到多极电机?
- 1-7 电机中存在哪些能量损耗? 有哪些因素会影响电机发热? 电动机与发电机的功率传递有何不同?

1-8 用硅钢作为导磁材料, 现已知 $B = 1.6\text{T}$, 试根据图 1-3 所示的 $B-H$ 曲线求在此磁场条件下硅钢的磁导率 μ_r 。

1-9 有一导体, 长度 $l = 3\text{m}$, 通以电流 $i = 200\text{A}$, 放在 $B = 0.5\text{T}$ 的磁场中, 试求:

- 1) 导体与磁场方向垂直时的电磁力。
- 2) 导体与磁场方向平行时的电磁力。
- 3) 导体与磁场方向为 30° 时的电磁力。

1-10 有一磁路的铁心形状如图 1-20 所示, 铁心各边的尺寸为: A、B 两边相等, 长度为 17cm , 截面积为 7cm^2 ; C 边长 5.5cm , 截面积为 14cm^2 ; 气隙长度 $g = 0.4\text{cm}$ 。两边各有一个线圈, 其匝数为 $N_1 = N_2 = 100$, 分别通以电流 i_1 和 i_2 , 所产生的磁动势由 A、B 两边汇入中间的 C 边, 且方向一致。试求: 在气隙中产生 $B = 1.2\text{T}$ 时所需的电流值, 及此时气隙中储存的能量 W_f , 并计算电感 L 。

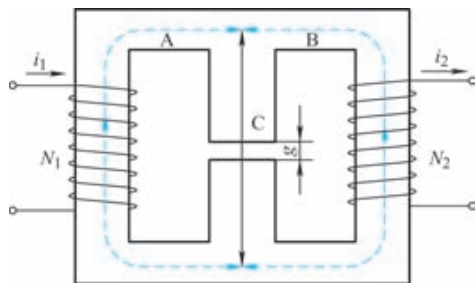


图 1-20 习题 1-10 图

第二章

电力拖动系统的动力学基础

电力拖动系统最主要的部分是电动机和生产机械，系统能否正常工作，不仅与电动机的运行特性密切相关，还涉及生产机械的负载转矩特性，以及电动机与负载转矩特性的配合问题。本章是电力拖动的基础，主要分析电力拖动系统中电动机带动生产机械在运动过程中的力学问题。

第一节 电力拖动系统的运动方程

拖动就是由原动机带动生产机械产生运动。以电动机作为原动机拖动生产机械运动的方式，称为电力拖动。如图 2-1 所示，电力拖动系统一般由电动机、生产机械的传动机构、工作机构、控制设备和电源组成，通常又把传动机构和工作机构称为电动机的机械负载。



图 2-1 电力拖动系统的组成

1. 运动方程式

电力拖动系统经过化简，都可视为如图 2-2a 所示的电动机转轴与生产机械的工作机构直接相连的单轴电力拖动系统，各物理量的方向标示如图 2-2b 所示。根据牛顿力学定律，该系统的运动方程为

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2-1)$$

式中 T_e ——电动机的电磁转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$)；

T_L ——生产机械的阻转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$)；

J ——电动机轴上的总转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)；

ω ——电动机的角速度 (rad/s)。

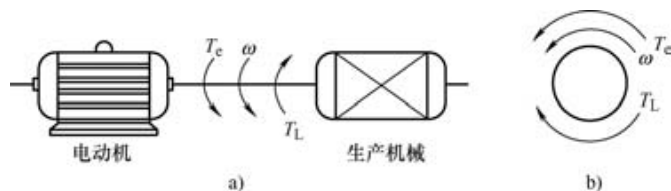


图 2-2 单轴电力拖动系统

a) 单轴电力拖动系统 b) 系统物理量的方向标示

在工程计算中,通常用转速 n (单位为转/分 (r/min)) 代替角速度 ω ,用飞轮惯量 (或称飞轮力矩) GD^2 代替转动惯量 J 。由于 n 与 ω 的关系为

$$\omega = \frac{2\pi}{60}n \quad (2-2)$$

J 与 GD^2 的关系为

$$J = mr^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (2-3)$$

式中 m ——系统转动部分的质量 (kg);

G ——系统转动部分的重力 (N);

r ——系统转动部分的回转半径 (m);

D ——系统转动部分的回转直径 (m);

g ——重力加速度,可取 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

把式(2-2)和式(2-3)代入式(2-1),可得电力拖动运动方程的实用形式

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (2-4)$$

式中 GD^2 ——系统转动部分的总飞轮惯量 ($\text{N} \cdot \text{m}^2$);

375——具有加速度量纲的系数,其值为 $4g \times 60/2\pi$ 。

2. 运动方程中方向的约定

式(2-4)中的 T_e 、 T_L 和 n 都是有方向的,它们的实际方向可以根据图 2-2b 给出的参考正方向,用正、负号来表示。这里规定 n 及 T_e 的参考方向对观察者而言逆时针为正,反之为负; T_L 的参考方向顺时针为正,反之为负。这样规定参考正方向恰好符合式(2-4)中负载转矩 T_L 前有一个负号的表达关系。

3. 运动方程的物理意义

式(2-4)表明电力拖动系统的转速变化 $\frac{dn}{dt}$ (即加速度)由电动机的电磁转矩 T_e 与生产机械的负载转矩 T_L 的关系决定。

1) 当 $T_e = T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} = 0$, 表示电动机以恒定转速旋转或静止不动,电力拖动系统的这种运动状态被称为静态或稳态。

2) 若 $T_e > T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} > 0$, 系统处于加速状态。



3) 若 $T_e < T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} < 0$, 系统处于减速状态。

也就是一旦 $T_e \neq T_L$, 则转速将发生变化, 我们把这种运动状态称为动态或过渡状态。

由于任何一个复杂的电力拖动系统都可以通过等效或折算的方法, 简化为由图 2-2 表示的单轴电力拖动系统, 因此可以用式(2-1) 或式(2-4) 来描述系统运动。这样, 就建立了电力拖动系统的运动方程, 并可以在今后用运动方程研究和分析系统的动力学特性。

第二节 生产机械的负载转矩特性

在运动方程式中, 负载转矩 T_L 与转速 n 的关系 $T_L = f(n)$ 即为生产机械的负载转矩特性。负载转矩 T_L 的大小与多种因素有关。以车床主轴为例, 当车床切削工件时, 主轴转矩和切削速度、切削量大小、工件直径、工件材料及刀具类型等都有密切关系。大多数生产机械的负载转矩特性可归纳为下列三种类型。

一、恒转矩负载特性

所谓恒转矩负载特性, 就是指负载转矩 T_L 与转速 n 无关的特性, 即当转速变化时, 负载转矩 T_L 保持常值。恒转矩负载特性又可分为反抗性负载特性和位能性负载特性两种。

1. 反抗性恒转矩负载特性

反抗性恒转矩负载特性的特点是, 恒值转矩 T_L 总是起阻碍运动的作用。根据前述正负符号的规定, 当正转时, n 为正, 转矩 T_L 为反向, 应取正号, 即为 $+T_L$; 而反转时, n 为负, 转矩 T_L 为正向, 应变为 $-T_L$, 如图 2-3 所示。显然, 反抗性恒转矩负载特性应画在第一与第三象限内, 属于这类特性的负载有金属的压延、机床的平移机构等。

2. 位能性恒转矩负载特性

位能性恒值负载转矩则与反抗性的特性不同, 它由拖动系统中某些具有位能的部件(如起重类型负载中的重物)决定, 其特点是转矩 T_L 具有固定的方向, 不随转速方向改变而改变。如图 2-4 所示、不论重物提升(n 为正)或下放(n 为负), 负载转矩始终为反方向, 即 T_L 始终为正, 特性画在第一与第四象限内, 表示恒值特性的直线是连续的。

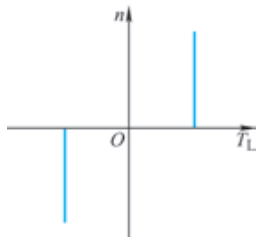


图 2-3 反抗性恒转矩负载特性

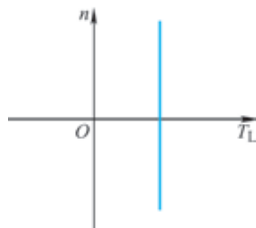


图 2-4 位能性恒转矩负载特性

由图 2-4 可见, 提升时, 转矩 T_L 反对提升; 下放时, T_L 却帮助下放, 这是位能性负载的特点。



二、通风机负载特性

通风机的负载的转矩与转速大小有关,基本上与转速的二次方成正比,即

$$T_L = kn^2 \quad (2-5)$$

式中 k ——比例系数。

通风机负载特性如图 2-5 所示,图中只在第一象限画了转速正向时的特性,鉴于通风机负载是反抗性的,当转速反向(n 为负)时, T_L 是负值,第三象限中应有与第一象限特性对称的曲线。

属于通风机负载的生产机械有通风机、水泵、油泵等,其中空气、水、油等介质对机器叶片的阻力基本上和转速的二次方成正比。

图 2-5 通风机负载特性

三、恒功率负载特性

有些生产机械,比如车床,在粗加工时,切削量大,切削阻力大,此时开低速;在精加工时,切削量小,切削阻力小,往往开高速。因此,在不同转速下,负载转矩基本上与转速成反比,即

$$T_L = \frac{k}{n} \quad (2-6)$$

由于负载功率 $P_L = T_L \omega$, $\omega = 2\pi n/60$, 即 $P_L = T_L 2\pi n/60 = T_L n/9.55$, 再代入式(2-6), 可得 $P_L = k/9.55$ 为常数, 表示在不同转速下, 电力拖动系统的功率保持不变, 负载转矩 T_L 与 n 的特性曲线呈现恒功率的性质, 如图 2-6 所示。

图 2-6 恒功率负载特性

四、实际生产机械的负载特性

实际生产机械的负载转矩特性可能是以上几种典型特性的综合。例如, 实际通风机除了主要是通风机负载特性外, 由于其轴承上还有一定的摩擦转矩 T_f , 因而实际通风机负载特性应为

$$T_L = T_f + kn^2 \quad (2-7)$$

其特性曲线如图 2-7 所示。而实际的起重机的负载特性如图 2-8 所示, 除了位能负载特性外, 还应考虑起重机传动机构等部件的摩擦转矩。

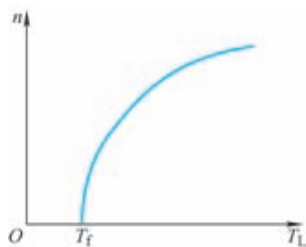


图 2-7 实际的通风机负载特性

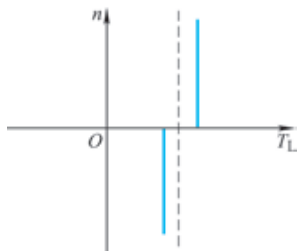


图 2-8 实际的起重机负载特性



第三节 电力拖动系统的稳态分析——稳定运行的条件

通过前两节的分析,可知电力拖动系统是由电动机与负载两部分组成的,通常把电动机的电磁转矩与转速之间的关系称为机械特性,不同的电动机具有不同性质的机械特性,可以用数学形式表示成 $n=f(T_e)$,也可以用图解方法画成机械特性曲线。各种电动机具体的机械特性将在后面各章中阐述,本节将先从电动机一般机械特性与生产机械的负载特性的相互关系着手分析电力拖动系统稳定运行问题。为了便于理解,现分两步来分析和求解问题:①先通过图解法分析问题,建立电力拖动系统稳定运行的直观概念。②然后从电力拖动系统的运动方程出发,给出这一问题的解析解。

一、电力拖动系统稳定运行的概念

所谓电力拖动系统稳定运行是指系统在扰动作用下,离开原来的平衡状态,但仍然能够在新的运行条件达到平衡状态,或者在扰动消失之后,能够回到原有的平衡状态。

例如:图 2-9a 给出了一个电力拖动系统的静态特性,其中,曲线 1 是电动机的机械特性,曲线 2 是生产机械的恒转矩负载特性,这两条曲线的交点 A 为系统的一个稳态工作点,即此时电动机的电磁转矩与生产机械的负载转矩相等 ($T_{eA} = T_{LA}$),系统处于平衡状态 (T_{LA}, n_A)。如图 2-9b 所示,现假定系统负载有一个扰动,使 T_{LA} 变为 T_{LB} ,此时 $T_{eA} < T_{LB}$,电动机的转速下降,达到新的平衡点 B (T_{LB}, n_B)。当系统负载扰动消失,使 T_{LB} 变回到 T_{LA} ,这时 $T_{eB} > T_{LA}$,电动机的转速上升,系统恢复到原来的平衡点 A (见图 2-9c)。上述分析表明,该电力拖动系统能够稳定运行。

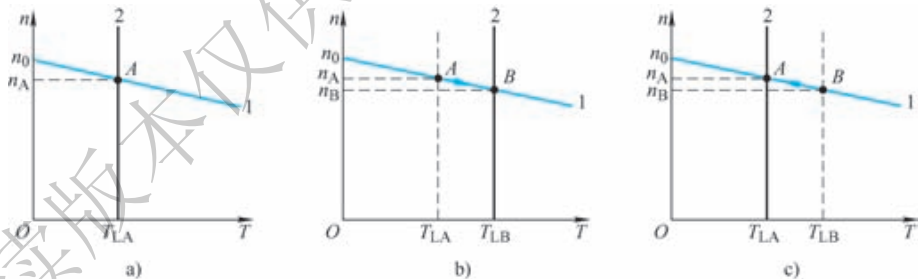


图 2-9 系统稳定运行状态

a) 稳定工作点 A b) 新稳定工作点 B c) 系统恢复到平衡点 A

是否所有在电动机机械特性与负载转矩特性交点上运行的情况都是稳定的呢?请看下面的例子。

图 2-10 所示曲线 1 为电动机在特定情况下的机械特性,当电磁转矩较大时,转速不但没有下降反而随 T 增加而增大,机械特性上翘;曲线 2 为恒转矩负载转矩特性。当电动机拖动恒转矩负载运行时,若运行在电动机机械特性 1 与负载转矩特性 2 的交点 A 上,转速则为 n_A 。现仍假定系统负载有一个扰动,使 T_{LA} 变为 T_{LB} ,同上分析,由于 $T_{eA} < T_{LB}$,电动机的转速下降,但此时却达不到新的平衡点 B (T_{LB}, n_B)。同理,可分析负载下降的情况,这时由于电动机的电磁转矩大于负载转矩,因而引起电动机的转速上升,系统同样无法稳定在一个新



的平衡点正常工作。因此,图 2-10 中所示的工作点 A 不是电力拖动系统的稳定运行状态,或者说电力拖动系统不能在 A 点稳定运行。

比较这两个例子,我们可以直观地发现电力拖动系统能否稳定运行与电动机及其负载特性曲线的形状有关。由上述分析,对于恒转矩负载,如果电动机的机械特性呈下垂曲线,系统是稳定的;反之,则不稳定。进一步分析可知,对于非恒转矩负载,如果电动机机械特性的硬度小于负载特性的硬度,该系统就能稳定运行^[5]。

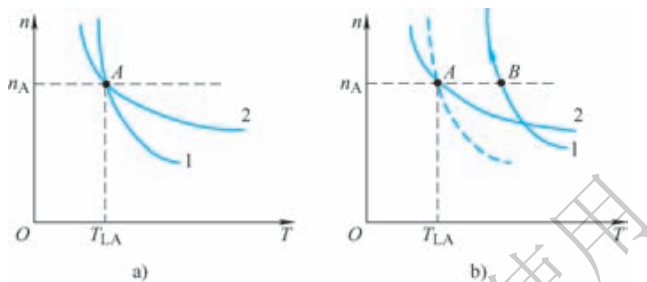


图 2-10 电力拖动系统不稳定运行

a) 工作点 A b) 有扰动的情况

二、电力拖动系统稳定运行的条件

从以上分析可以看出,电力拖动系统在电动机机械特性与负载转矩特性的交点上,并不一定都能够稳定运行,也就是说, $T_e = T_L$ 仅仅是系统稳定运行的一个必要条件,而不是充分条件。因此需要进一步分析电动机与负载特性的关系,寻求电力拖动系统稳定运行的条件。

根据式(2-4) 电力拖动运动方程

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

系统在平衡点稳定运行时应有

$$T_e - T_L = 0 \quad (2-8)$$

即

$$\frac{dn}{dt} = 0 \quad (2-9)$$

如前所述,这种平衡状态仅仅是系统稳定的必要条件,是否稳定还需进一步分析和判断。我们仍用前述图解法的思想方法,当电力拖动系统在平衡点工作时,给系统加一个扰动使转速有一个改变量 Δn , 如果当扰动消失后系统又回到原平衡点工作,即有 $\Delta n \rightarrow 0$, 则系统是稳定的。

现假定拖动系统在扰动作用下离开了平衡状态 A 点, 此时

$$n = n_A + \Delta n, \quad T_e = T_{eA} + \Delta T_e, \quad T_L = T_{LA} + \Delta T_L$$

式(2-4) 变成

$$(T_{eA} + \Delta T_e) - (T_{LA} + \Delta T_L) = \frac{GD^2}{375} \frac{d}{dt}(n_A + \Delta n)$$

由平衡点条件式(2-8) 和式(2-9), 上式变为

$$\Delta T_e - \Delta T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{d\Delta n}{dt} \quad (2-10)$$

如果电动机转矩和负载转矩都是转速的函数, 且各量的增量很小, 即有 $T_e = f(n)$, $T_L = g(n)$, 且对于 Δn 、 ΔT_e 和 ΔT_L 都很小, 那么根据微分原理, 式(2-10) 可近似表示为



$$\frac{dT_e}{dn}\Delta n - \frac{dT_L}{dn}\Delta n = \frac{GD^2}{375} \frac{d\Delta n}{dt} \quad (2-11)$$

令 $\frac{dT_e}{dn} = \alpha_e$, $\frac{dT_L}{dn} = \alpha_L$ 为电动机机械特性和负载特性曲线在平衡点的硬度, 式(2-11) 又可写成

$$\frac{\alpha_e - \alpha_L}{\frac{GD^2}{375}} dt = \frac{d\Delta n}{\Delta n}$$

再令常数 $K = \frac{375}{GD^2}$, 对上式两边取积分, 经整理可得

$$\Delta n = C e^{K(\alpha_e - \alpha_L)t}$$

考虑初始条件 $t=0$ 时, $\Delta n = \Delta n_{st}$, 则有

$$\Delta n = n_{st} e^{K(\alpha_e - \alpha_L)t} \quad (2-12)$$

从式(2-12) 可知:

1) 若 $\alpha_e - \alpha_L < 0$, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\Delta n \rightarrow 0$ 。

2) 若 $\alpha_e - \alpha_L > 0$, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\Delta n \rightarrow \infty$ 。

上述分析物理意义在于: 在第1) 种条件下, 当扰动消失后, 转速增量 Δn 将随时间而减小, 系统能够逐渐恢复到原平衡点, 因而系统是稳定的。在第2) 种条件下, 当扰动消失后, 转速增量 Δn 将随时间而增大, 系统不能回到原平衡点, 这时系统是不稳定的。综上所述: 电力拖动系统稳定运行的充分条件为

$$\frac{dT_e}{dn} - \frac{dT_L}{dn} < 0 \quad (2-13)$$

对于恒转矩负载的电力拖动系统, 由于 $\frac{dT_L}{dn} = 0$, 其稳定运行的条件为

$$\frac{dT_e}{dn} < 0 \quad (2-14)$$

可以看出, 由解析方法推导的结果与我们直观分析时得到的结果是一致的, 也就是直观分析时找到的规律是具有普遍意义的。由此, 可得到结论: 对于一个电力拖动系统, 稳定运行的充分必要条件是

$$\begin{cases} T_e - T_L = 0 \\ \frac{dT_e}{dn} - \frac{dT_L}{dn} < 0 \end{cases} \quad (2-15)$$

根据平衡稳定的条件, 在电力拖动系统中只要电动机机械特性的硬度小于负载特性的硬度, 该系统就能平衡而且稳定。对于带恒转矩负载拖动系统, 只要电动机机械特性的硬度是负值, 系统就能稳定运行, 而各类电动机机械特性的硬度, 大都是负值或具有负的区段, 因此, 在一定范围内电力拖动系统带恒转矩负载都能稳定运行。

* 第四节 电力拖动系统的动态分析——过渡过程分析

在上一节电力拖动系统稳态分析的基础上, 本节将分析和讨论系统的动态过程。所谓动态过程是指系统从一个稳定工作点向另一个稳定工作点过渡的中间过程, 这个过程被称为过



过渡过程, 系统在过渡过程的变化规律和性能被称为系统的动态特性。研究这些问题, 对经常处于起动、制动运行的生产机械如何缩短过渡过程时间, 减少过渡过程中能量损耗, 提高劳动生产率等, 都有实际意义。

一、电力拖动系统动态分析的假设条件

为便于分析, 设电力拖动系统满足以下假定条件:

- 1) 忽略电磁过渡过程, 只考虑机械过渡过程。
- 2) 电源电压在过渡过程中恒定不变。
- 3) 磁通保持恒定。
- 4) 负载转矩为常数不变。

如果已知电动机的机械特性、负载转矩特性、起始点、稳态点以及系统的飞轮惯量, 可根据电力拖动系统的运动方程, 建立关于转速 n 的微分方程式, 以求解转速方程 $n = f(t)$ 。

考虑到大部分电动机的机械特性都具有或可近似为一线性区段, 如图 2-11 所示。为不失一般性, 现假设电动机的机械特性可表示成

$$n = n_0 - \beta T_e \quad (2-16)$$

式中 n_0 ——电动机的理想空载转速 (r/min);

β ——电动机机械特性曲线的斜率, $\beta = \Delta n / \Delta T_e$ 。

下面将根据这些假设来研究和讨论电力拖动系统在过渡过程中转速和转矩等参数的变化规律及其定量计算等动态特性分析问题。

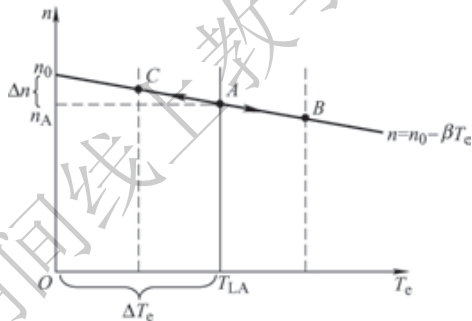


图 2-11 电动机机械特性的线性段部分曲线

二、电力拖动系统转速的动态方程

将式(2-4)代入式(2-16), 可得

$$n = n_0 - \beta \left(T_L + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \right) = n_0 - \beta T_L - \beta \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

令 $n_{ss} = n_0 - \beta T_L$ 为过渡过程的稳态值, $T_M = \beta \frac{GD^2}{375}$ 为过渡过程时间常数, 单位为 s, 其大小除了与 GD^2 成正比之外, 还与机械特性的斜率 β 成正比, 通常又称 T_M 为电力拖动系统的机电时间常数。这样上式可写成

$$n = n_{ss} - T_M \frac{dn}{dt} \quad (2-17)$$

式(2-17)在数学上是一个非奇次一阶微分方程, 可用分离变量法求解, 得到的通解为

$$n - n_{ss} = K e^{-t/T_M} \quad (2-18)$$

其中, K 为常数, 由初始条件决定。设初始条件为 $t=0$, $n = n_{is}$, 代入上式可得 $K = n_{is} - n_{ss}$, 由此得到电力拖动系统转速的动态变化规律为

$$n = n_{ss} + (n_{is} - n_{ss}) e^{-t/T_M} \quad (2-19)$$

式(2-19)表明,转速方程 $n=f(t)$ 中包含有两个分量,一个是强制分量 n_{ss} ,也就是过渡过程结束时的稳态值;另一个是自由分量 $(n_{is} - n_{ss})e^{-t/T_M}$,它按指数规律衰减至零。因此,在过渡过程中,转速 n 是从起始值 n_{is} 开始,按指数曲线规律逐渐变化至过渡过程终止的稳态值 n_{ss} ,其过渡过程曲线如图 2-12 所示。

从图 2-12 中可以看出, $n=f(t)$ 曲线与一般的一阶过渡过程曲线一样,主要应掌握三个要素:起始值、稳态值与时间常数。这三个要素确定了,过渡过程也就确定了。

三、电力拖动系统转矩的动态方程

同理,将式(2-16)给出的电磁转矩 T_e 与转速 n 的关系代入式(2-4)中,可得到如下描述系统转矩动态过程的微分方程

$$T_e - T_L = -T_M \frac{dT_e}{dt} \quad (2-20)$$

再按前述步骤求解该微分方程,便可得到电力拖动系统的转矩动态方程 $T_e=f(t)$,即

$$T_e = T_L + (T_{is} - T_L)e^{-t/T_M} \quad (2-21)$$

显然,转矩动态方程 $T_e=f(t)$ 也包括了一个稳态值与一个按指数规律衰减的自由分量,时间常数亦为 T_M 。转矩 T_e 的变化也是从初始状态 T_{is} 按指数规律逐渐变到稳定状态 T_L ,这里,系统电磁转矩的稳态值 T_{ss} 恰好等于负载转矩 T_L ,从数学上证明了系统在稳态时达到转矩平衡 $T_e = T_L$ 的事实,这一结果与前一节图解法得到的结论完全相同。电力拖动系统转矩的过渡过程曲线如图 2-13 所示。

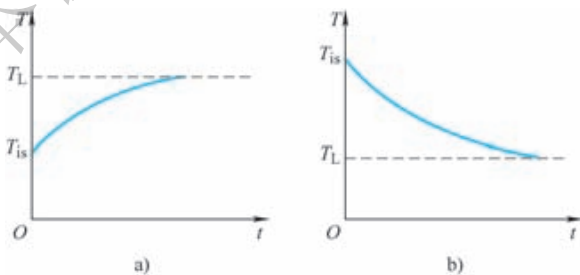


图 2-13 电力拖动系统转矩的过渡过程曲线

a) 电动机转矩的增加过程 b) 电动机转矩的减少过程

四、电力拖动系统热过程的动态方程

在第一章中,我们已定性分析了电机的发热和冷却过程,如图 1-18 所示,电机的热过程也是一个典型的一阶过渡过程。这里,为建立电机热过程的动态方程,特作如下假设:

1) 电动机长期运行,负载不变,总损耗不变。



2) 电机各个部分的温度均匀, 周围环境温度保持不变。

设在单位时间内, 电机产生的热量为 Q , 则在 Δt 时间内产生的热量为 $Q\Delta t$ 。若在单位时间内电机散发出的热量为 $A\tau$, 其中 A 为散热系数, 表示温升 1°C 时每秒钟的散热量; τ 为温升, 则在 Δt 时间内散发的热量为 $A\tau\Delta t$ 。与此同时, 电机本身也要吸收一部分热量, 设电机的热容量为 C , Δt 时间内的温升为 $\Delta\tau$, 则电机吸收的热量为 $C\Delta\tau$ 。根据热量平衡原理, 在 Δt 时间内, 电机的发热应等于其吸收和散发的热量, 即

$$Q\Delta t = C\Delta\tau + A\tau\Delta t$$

将上式写成微分方程形式, 有

$$Qdt = Cd\tau + A\tau dt \quad (2-22)$$

整理后写成微分方程的标准形式

$$\frac{C}{A} \frac{d\tau}{dt} + \tau = \frac{Q}{A}$$

令 $T_Q = C/A$ 为电机发热时间常数 (s); $\tau_{ss} = Q/A$ 为稳态温升, 上式变为

$$T_Q \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_{ss} \quad (2-23)$$

同上方法解此微分方程, 可得电动机的热过程动态方程

$$\tau = \tau_{ss} + (\tau_{is} - \tau_{ss})e^{-t/T_Q} \quad (2-24)$$

式中, τ_{is} 为初始温升。由式(2-24) 描述的电机发热和冷却过程的动态曲线可参见图 1-18, 这里不再赘述。

从上面过渡过程中 $n=f(t)$ 、 $T_e=f(t)$ 和 $\tau=f(t)$ 的分析可看出, 他们都是按照指数规律从起始值变到稳态值。可以按照分析一般一阶微分方程过渡过程三要素的方法, 找出三个要素: 起始值、稳态值与时间常数, 便可确定各量的数学表达式并画出变化曲线。

五、过渡过程时间的计算

从起始值到稳态值, 理论上需要时间为无穷大, 即 $t=t_0 \rightarrow \infty$ 。但实际上当 $t=(3 \sim 4)T_M$ 时各量便达到了稳态值的 95% 以上, 一般就可认为过渡过程结束了。这样, 无论对于电力拖动系统的转速还是转矩而言, 其从初始值到稳态值的时间仅与系统的机电时间常数 T_M 有关, 即有

$$t = (3 \sim 4)T_M \quad (2-25)$$

在工程实际中, 往往是需要知道过渡过程进行到某一阶段所需的时间。对于电力拖动系统的转速动态过程, 可利用式(2-19) 来计算过渡过程的时间。如果已知系统的机电时间常数 T_M 、转速的初始值 n_{is} 、稳态值 n_{ss} 以及到达值 n_x , 有下式可计算出到达时间 t_n 为

$$t_n = T_M \ln \frac{n_{is} - n_{ss}}{n_x - n_{ss}} \quad (2-26)$$

同理, 对于电力拖动系统的转矩过渡过程时间 t_T , 可通过下式进行计算

$$t_T = T_M \ln \frac{T_{is} - T_L}{T_x - T_L} \quad (2-27)$$

式中, 各变量的下标的含义与上面转速变量相同。



通过本节的讨论，为电力拖动系统的动态分析奠定了理论基础。后续章节将结合系统具体的动态过程，比如电机起动过程、制动过程等进行动态分析。

* 第五节 多轴电力拖动系统的化简

前面我们讨论了单轴电力拖动系统问题，但是，实际的电力拖动系统往往是复杂的，有的生产机械需要通过传动机构进行转速匹配，因此增加了很多齿轮和传动轴；有的生产机械需要通过传动机构把旋转运动变成直线运动，比如刨床、起重机等。对这样一些复杂的电力拖动系统，如何来研究其力学问题呢？一般来说，有两种解决办法：

1) 对拖动系统的每根轴分别列出其运动方程，用联立方程组来消除中间变量。这种解法会因方程较多，计算量大而比较繁杂。

2) 用折算的方法把复杂的多轴拖动系统等效为一个简单的单轴拖动系统，然后通过对方等效系统建立运动方程，以实现问题求解。这种方法相对而言较为简单。

由于我们研究电力拖动系统动力学的主要目的是为了解决电动机与生产机械之间的力学问题，而不是生产机械内部的力学问题，因此，一般都采用等效和折算的方法来处理电力拖动系统的动力学问题。

一、系统等效的原则和方法

在电力拖动系统的分析中，对于一个复杂的多轴电力拖动系统，比较简单而且实用的方法是用折算的方法把它等效成一个简单的单轴拖动系统来处理，并使两者的动力学性能保持不变。一个典型的等效过程如图 2-14 所示，其基本思想是通过传动机构的力学折算把实际的多轴系统表示成等效的单轴系统。

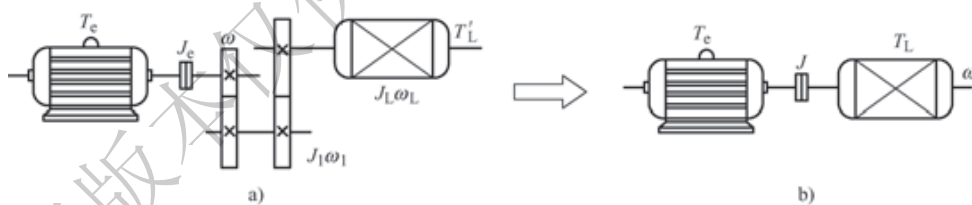


图 2-14 电力拖动系统的等效原理

a) 实际的多轴系统 b) 等效的单轴系统

在电力拖动系统中折算一般是把负载轴上的转矩、转动惯量或者力和质量折算到电动机轴上，而中间传动机构的传送比在折算中就相当于变压器的匝数比。**系统等效的原则是：保持两个系统传递的功率及储存的动能相同。**下面将根据这个原则来介绍具体的折算方法。

二、多轴旋转系统等效为单轴旋转系统的方法

1. 静态转矩的折算

为了便于分析，先考虑一个简单的两轴系统。如图 2-15 所示，设 T_L' 为折算前的负载转矩， T_L 为折算后的负载转矩，假如要把工作机构的转矩 T_L' 折算到电动机轴上，其静态转矩的等效原则是：系统的传送功率不变。

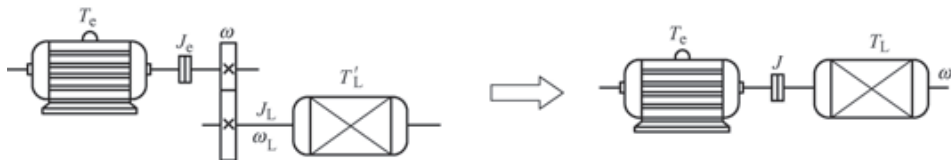


图 2-15 两轴电力拖动系统的等效

如果不考虑传动机构的损耗, 工作机构折算前的机械功率为 $T'_L \omega_L$, 折算后电动机轴上的机械功率为 $T_L \omega$, 根据功率不变原则, 应有折算前后工作机构的传递功率相等, 即

$$T'_L \omega_L = T_L \omega \quad (2-28)$$

式中 ω_L ——生产机械的负载转速 (rad/s);

ω ——电动机转速 (rad/s)。

由式(2-28) 可得

$$T_L = \frac{T'_L}{\omega/\omega_L} = \frac{T'_L}{j_L} \quad (2-29)$$

式中 j_L ——电动机轴与工作机械轴间的转速比, $j_L = \omega/\omega_L = n/n_L$ 。

如果要考虑传动机构的损耗, 可在折算公式中引入传动效率 η_c 。由于功率传送是有方向的, 因此引入效率 η_c 时必须注意: 要因功率传送方向的不同而不同。现分两种情况讨论:

1) 电动机工作在电动状态, 此时由电动机带动工作机构, 功率由电动机各工作机构传送, 传动损耗由运动机构承担, 即电动机发出的功率比生产机械消耗的功率大。根据功率不变原则, 应有

$$T'_L \omega_L = \frac{T_L \omega}{\eta_c} \quad (2-30)$$

则

$$T_L = \frac{T'_L}{\eta_c \omega/\omega_L} = \frac{T'_L}{j_L \eta_c} \quad (2-31)$$

2) 电动机工作在发电制动状态, 此时由工作机构带动电动机, 功率传送方向由工作机构向电动机传送。因而传动损耗由工作机构承担, 根据功率不变原则, 应有

$$T'_L \omega_L = T_L \omega \eta_c \quad (2-32)$$

则

$$T_L = \frac{T'_L}{j_L} \eta_c \quad (2-33)$$

对于系统有多级齿轮或带轮变速的情况, 设已知各级速比为 $j_1, j_2, \dots, j_n$, 则总的速比为各级速比之积, 即

$$j = j_1 j_2 \cdots j_n = \prod_{i=1}^n j_i \quad (2-34)$$

在多级传动时, 如果已知各级的传递效率为 $\eta_{c1}, \eta_{c2}, \dots, \eta_{cn}$, 则总效率 η_c 应为各级效率之积, 即

$$\eta_c = \prod_{i=1}^n \eta_{ci} \quad (2-35)$$

不同种类的传动机构, 其效率是不同的。其数值可以从机械工程手册上查到。



2. 转动惯量和飞轮惯量的折算

将图 2-15 中两轴系统中的电动机转动惯量 J_e 和生产机械的负载转动惯量 J_L , 折算到电动机轴的等效系统的转动惯量 J , 其等效原则是: 折算前后系统的动能不变, 即有

$$\frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{2}J_e\omega^2 + \frac{1}{2}J_L\omega_L^2 \quad (2-36)$$

经整理后得

$$J = J_e + J_L \left(\frac{\omega_L}{\omega} \right)^2$$

即

$$J = J_e + J_L \left(\frac{1}{j_L} \right)^2 \quad (2-37)$$

从式(2-37)可知, 折算到单轴拖动系统的等效转动惯量 J 等于折算前拖动系统每一根轴的转动惯量除以该轴对电动机轴传动比 j_L 的二次方之和。当传动比 j_L 较大时, 该轴的转动惯量折算到电动机轴上后, 其数值占整个系统的转动惯量的比重就很小。

根据式(2-3)表示的 $GD^2 = 4gJ$ 的关系, 可以相应地得到折算到电动机轴上的等效飞轮惯量

$$GD^2 = GD_e^2 + GD_L^2 \frac{1}{j_L^2} \quad (2-38)$$

同理, 式(2-37)和式(2-38)的结果可以推广到多轴电力拖动系统中。设多轴电力拖动系统有 n 根中间传动轴, 则折算到电动机轴上的等效转动惯量 J 和飞轮惯量 GD^2 为

$$J = J_e + J_1 \frac{1}{j_1^2} + J_2 \frac{1}{j_2^2} + \cdots + J_n \frac{1}{j_n^2} + J_L \frac{1}{j_L^2} \quad (2-39)$$

$$GD^2 = GD_e^2 + GD_1^2 \frac{1}{j_1^2} + GD_2^2 \frac{1}{j_2^2} + \cdots + GD_n^2 \frac{1}{j_n^2} + GD_L^2 \frac{1}{j_L^2} \quad (2-40)$$

式中 $j_1, j_2, \dots, j_n$ ——电动机轴对中间传动轴的传动比;

$J_1, J_2, \dots, J_n$ ——各传动轴的转动惯量;

$GD_1^2, GD_2^2, \dots, GD_n^2$ ——各传动轴的飞轮惯量。

在一般情况下, 传动机构的转动惯量 $J_i (i=1, \dots, n)$, 在折算后占整个系统的比重不大, 所以实际工作中往往用下面的近似公式

$$J = \delta J_e + J_L \frac{1}{j_L^2} \quad (2-41)$$

或者

$$GD^2 = \delta GD_e^2 + GD_L^2 \frac{1}{j_L^2} \quad (2-42)$$

其中, δ 为放大系数, 一般取 $\delta = 1.1 \sim 1.25$ 。

例 2-1 在图 2-16 所示的三轴拖动系统中, 电动机轴上转动惯量 $J_e = 2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 转速 $n = 900 \text{ r/min}$; 中间传动轴的转动惯量 $J_1 = 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 转速 $n_1 = 300 \text{ r/min}$; 生产机械轴的转动惯量 $J_L = 16 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 转速 $n_L = 60 \text{ r/min}$ 。试求折算到电动机轴上的等效转动惯量以及折算到生产机械轴上的等效转动惯量。

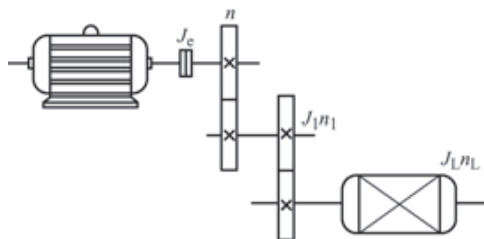


图 2-16 三轴拖动系统



解：依式(2-39)，折算到电动机轴上的转动惯量为

$$\begin{aligned} J &= J_e + \left(\frac{n_1}{n_e}\right)^2 J_1 + \left(\frac{n_L}{n_e}\right)^2 J_L \\ &= \left[2.5 + \left(\frac{300}{900}\right)^2 \times 2 + \left(\frac{60}{900}\right)^2 \times 16\right] \text{kg} \cdot \text{m}^2 \\ &= (2.5 + 0.222 + 0.071) \text{kg} \cdot \text{m}^2 = 2.793 \text{kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

同理折算到生产机械轴上的等效转动惯量为

$$\begin{aligned} J &= J_L + \left(\frac{n_1}{n_L}\right)^2 J_1 + \left(\frac{n_e}{n_L}\right)^2 J_e \\ &= \left[16 + \left(\frac{300}{60}\right)^2 \times 2 + \left(\frac{900}{60}\right)^2 \times 2.5\right] \text{kg} \cdot \text{m}^2 \\ &= (16 + 50 + 562.5) \text{kg} \cdot \text{m}^2 = 628.5 \text{kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

从结果可见，保持折算前后动能不变，往低速轴折算时，其转动惯量要大得多。

三、直线运动系统等效为旋转运动系统

有些生产机械不仅有旋转运动部件，还兼有直线运动部件，分析时要将这样的拖动系统等效为简单的单轴拖动系统，如图 2-17 所示。做这样的等效需要分别对旋转运动和直线运动两种物理量进行折算，前面我们已讨论过旋转运动系统的折算，这里仅讨论直线运动系统的折算。

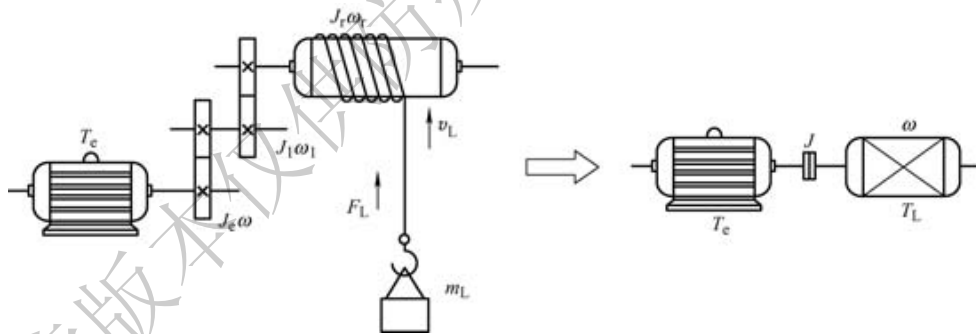


图 2-17 混合拖动系统的等效

1. 静态力 F_L (或称负载重力) 的折算

把直线运动的静态力 F_L 折算到电动机轴上的等效静转矩 T_L 的原则仍是保持折算前后的静态功率不变。如果考虑功率的传递方向，同样分两种情况讨论。

1) 电动机工作在电动状态，此时由电动机带动工作机构，使重物提升。由图 2-17 可知，折算前直线运动部件的静态功率 P_L 为

$$P_L = F_L v_L \quad (2-43)$$

式中 F_L ——作用在直线运动部件上的静态力 (N)；

v_L ——重物提升速度 (m/s)。

折算后等效拖动系统的静态功率 P'_L 为

$$P'_L = T_L \omega \quad (2-44)$$



现在功率是由电动机传向负载，按功率平衡原则 $P'_L = P_L / \eta_c$ ，即

$$T_L \omega = \frac{F_L v_L}{\eta_c}$$

代入关系式 $\omega = 2\pi n / 60$ ，经整理，得到如下折算公式

$$T_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n \eta_c} \quad (2-45)$$

2) 电动机工作在发电制动状态，此时工作机构带动电动机，使重物下放。根据功率平衡关系，有

$$T_L \omega = F_L v_L \eta'_c$$

由此得

$$T_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n} \eta'_c \quad (2-46)$$

式中 η'_c ——物体下放时的传动效率。

可以证明，在提升与下放时传动损耗相等的条件下，下放传动效率与提升传动效率之间有下列关系

$$\eta'_c = 2 - \frac{1}{\eta_c} \quad (2-47)$$

2. 直线运动系统质量的折算

如图 2-17 所示，将直线运动系统的质量 m_L 折算到电动机轴上，用等效的转动惯量 J 来表示。折算的原则是两者储存的动能相等，即

$$\frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} J_e \omega^2 + \frac{1}{2} J_1 \omega_1^2 + \frac{1}{2} J_r \omega_r^2 + \frac{1}{2} m_L v_L^2$$

这样

$$J = J_e + J_1 \frac{1}{j_1^2} + J_r \frac{1}{j_r^2} + m_L \left(\frac{v_L}{\omega} \right)^2 \quad (2-48)$$

$$GD^2 = GD_e^2 + \frac{GD_1^2}{j_1^2} + \frac{GD_r^2}{j_r^2} + 4gm_L \left(\frac{v_L}{\omega} \right)^2 \quad (2-49)$$

由于 $\omega = 2\pi n / 60$ ， $m_L = G_L / g$ ，则

$$4gm_L \left(\frac{v_L}{\omega} \right)^2 = 4gm_L \left(\frac{60v_L}{2\pi n} \right)^2 = 365 G_L \left(\frac{v_L}{n} \right)^2 \quad (2-50)$$

例 2-2 设一提升机构，其传动系统示于图 2-18 上。电动机转速为 950r/min，齿轮减速箱的传动比 $j_1 = j_2 = 4$ ；卷筒直径 $D = 0.24\text{m}$ ；滑轮的减速比 $j_3 = 2$ ；空钩重量 $G_0 = 200\text{N}$ ；起重负荷 $G = 1000\text{N}$ ；电动机的飞轮惯量 $GD_e^2 = 1.05\text{N} \cdot \text{m}^2$ 。试求提升速度 v_L 和折算到电动机轴上的静转矩 T_L 以及折算到电动机轴上整个拖动系统的飞轮惯量 GD^2 。

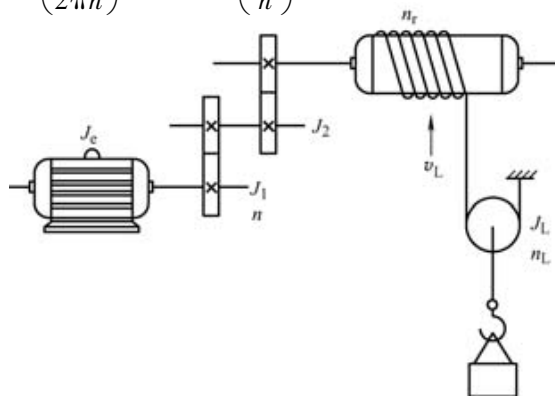


图 2-18 提升机构



解:

(1) 计算提升速度 v_L 依照电动转速 n 经过三级减速后, 再转换成直线速度的关系, 得

$$\frac{n}{n_L} = j, \quad j = j_1 j_2 j_3, \quad n_L = \frac{n}{j} = \frac{n}{j_1 j_2 j_3}$$

$$v_L = \pi D n_L = \frac{\pi D}{j_1 j_2 j_3} n = \frac{3.14 \times 0.24 \times 950}{4 \times 4 \times 2} \text{ m/min} = 22.37 \text{ m/min}$$

(2) 计算折算到电动机轴上的静转矩 T_L 考虑到传动机构的损耗, 假设每对齿轮的效率为 0.95, 并取滑轮和卷筒的效率为 0.92。依功率平衡原则得出折算到电动机轴上静转矩为

$$T_L = \frac{F_L v_L}{\omega \eta_c}$$

这里, $F_L = G_L = G + G_0$, $v_L = \frac{\pi D}{j} \frac{n}{60}$, $\omega = \frac{2\pi n}{60}$

$$T_L = \frac{(G + G_0) \frac{D}{2}}{j \eta_c} = \frac{(G + G_0) \frac{D}{2}}{j_1 j_2 j_3 \eta_c} = \frac{(1000 + 200) \times 0.12}{4 \times 4 \times 2 \times 0.83} \text{ N} \cdot \text{m} = 5.42 \text{ N} \cdot \text{m}$$

式中, 传动效率为 $\eta_c = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 0.95 \times 0.95 \times 0.92 = 0.83$ 。

(3) 折算到电动机轴上的系统总飞轮惯量 GD^2 系统中间传动轴和卷筒的飞轮惯量题中未给出, 用系数 δ 近似估计。今取 $\delta = 1.2$, 则由式 (2-49) 可求出折算后系统等效飞轮惯量

$$GD^2 = \delta GD_e^2 + 365 (G + G_0) \left(\frac{v_L}{n} \right)^2$$

$$= \left[1.2 \times 1.05 + 365 \times (1000 + 200) \times \left(\frac{22.37}{60 \times 950} \right)^2 \right] \text{ N} \cdot \text{m}^2 = (1.26 + 0.07) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

$$= 1.33 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

小 结

通过本章的学习, 可以了解电力拖动系统的一般运动规律, 为进一步分析电力拖动系统在各种运行工况条件下的稳态和动态性能奠定理论基础。本章的学习要点在于:

- 1) 掌握电力拖动系统的运动方程, 并能熟练运用于电力拖动系统的分析和研究。
- 2) 了解生产机械的负载特性, 掌握各种负载的特点, 以便与电动机特性相匹配。
- 3) 掌握电力拖动系统的稳态分析方法, 并能用于分析电力拖动系统的稳定问题。
- 4) 了解电力拖动系统的动态分析方法, 熟悉系统主要参数的动态变化规律。
- 5) 了解复杂电力拖动系统的等效概念, 能应用折算方法进行系统简化。

思考题与习题

2-1 什么是电力拖动系统? 它包括哪些部分?

2-2 电力拖动系统旋转运动方程式中各量的物理意义是什么? 它们的正负号如何确定?



2-3 转矩的动态平衡关系与静态平衡关系有什么不同？

2-4 拖动系统的飞轮惯量 GD^2 与转动惯量 J 是什么关系？

2-5 把多轴电力拖动系统简化为单轴电力拖动系统时，负载转矩的折算原则是什么？各轴飞轮惯量的折算原则是什么？

2-6 起重机提升和下放重物时，传动机构的损耗是由电动机还是重物负担？提升和下放同一重物时，传动机构损耗的大小是否相同？传动机构的效率是否相等？

2-7 生产机械的负载转矩特性归纳起来，可以分为哪几种基本类型？

2-8 电力拖动系统稳定运行的条件是什么？请举例说明。

2-9 在图 2-16 所示的电力拖动系统中，已知飞轮惯量 $GD_e^2 = 15\text{N} \cdot \text{m}^2$ ， $GD_1^2 = 16\text{N} \cdot \text{m}^2$ ， $GD_L^2 = 100\text{N} \cdot \text{m}^2$ ，传动效率 $\eta_{e1} = 0.9$ ， $\eta_{e2} = 0.8$ ，负载转矩 $T'_L = 72\text{N} \cdot \text{m}$ ，转速 $n = 1500\text{r/min}$ ， $n_1 = 750\text{r/min}$ ， $n_L = 150\text{r/min}$ 。试求：折算到电动机轴上的系统总飞轮惯量 GD^2 和负载转矩 T_L 。

2-10 有一起重机的电力拖动系统如图 2-18 所示，电动机转速 1000r/min ，齿轮减速箱的传动比 $j_1 = j_2 = 2$ ；卷筒直径 $D = 0.2\text{m}$ ；滑轮的减速比 $j_3 = 5$ ；空钩重量 $G_0 = 100\text{N}$ ；起重负荷 $G = 1500\text{N}$ ；电动机的飞轮惯量 $GD_e^2 = 10\text{N} \cdot \text{m}^2$ ，传动系统的总传动效率 $\eta_e = 0.8$ ，放大系数 $\delta = 1.2$ 。试求：提升速度 v_L 和折算到电动机轴上的静转矩 T_L ，以及折算到电动机轴上整个拖动系统的飞轮惯量 GD^2 。

第三章

直流电机原理

直流电机是利用电磁感应原理实现直流电能和机械能相互转换的电磁装置，将直流电能转换成机械能的电机称为直流电动机，反之则称为直流发电机。直流电动机具有调速范围广且平滑，起、制动转矩大，过载能力强，易于控制的优点，常用于对调速要求较高的场合。本章主要介绍直流电机的基本结构和工作原理、电枢绕组的结构和磁场，以及直流电动机的基本方程和工作特性。

第一节 直流电机的基本原理和结构

一、直流电机的基本原理

根据第一章的原型电机模型，可以画出两极直流电机的简化模型，如图 3-1 所示。

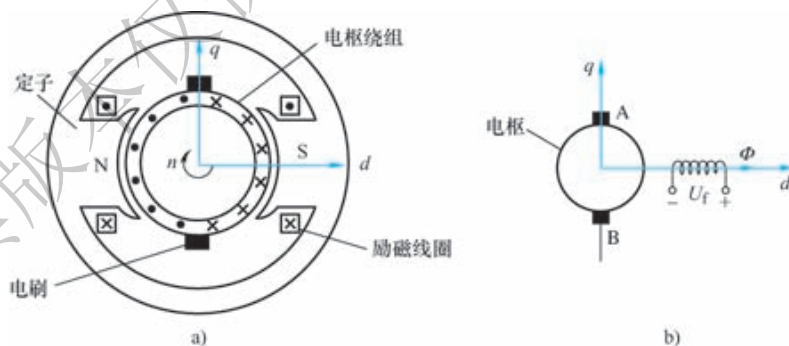


图 3-1 直流电机的简化模型

a) 直流电机结构 b) 直流电机模型

1. 直流电动机的工作原理

在直流电动机定子励磁线圈通入直流电流，产生直轴（ d 轴）方向的主极磁通 Φ ，称为主磁场。交轴（ q 轴）方向上的一对电刷将电枢线圈分为左右两部分，电枢线圈按照一定的连接方式组成电枢绕组。当直流电源通过电刷向电枢绕组供电时，电枢表面的左半部分导体（即 N 极下）可以流过相同方向的电流，根据左手定则，导体将受到逆时针方向的转矩作



用；电枢表面的右半部分导体（即 S 极下）也流过相同方向的电流，同样根据左手定则，导体也将受到逆时针方向的转矩作用。这样，整个电枢绕组即转子将按逆时针旋转（图 3-1a 所示），输入的直流电能就转换成转子轴上输出的机械能。

2. 直流发电机的工作原理

根据电机的可逆原理，定子励磁线圈仍通入直流电流，产生主极磁通 Φ 。电枢上不外加直流电压，而是用原动机拖动转子电枢恒速旋转，使电枢线圈切割磁力线而产生感应电动势，电动势的方向由右手定则确定。由于电枢连续旋转，电枢绕组的每个线圈边交替地切割 N 极和 S 极下的磁力线，产生交变的感应电动势。再通过换向器的作用，使得在上下两个电刷端输出的电动势为一个方向不变的脉动电动势，比如，从电刷 A 总是输出切割 N 极磁力线的线圈边所产生的正向电动势，从电刷 B 总是输出切割 S 极磁力线的线圈边所产生的负向电动势，这样，电刷 A 始终为正极性，而电刷 B 始终为负极性（图 3-1b 所示）。因此，虽然线圈切割不同极性磁极所产生的感应电动势是交变的，但通过换向器的作用，在电刷两端却输出直流电压。这就是直流发电机的工作原理。

二、直流电机的基本结构

直流电动机和直流发电机在主要结构上基本相同，两者具有可逆性。常用的中小型直流电动机结构如图 3-2 所示。直流电动机主要由定子、转子，电刷装置、端盖、轴承、通风冷却系统等部件组成。

1. 定子

定子由机座、主磁极、换向极、电刷装置等组成，其剖面结构示意图如图 3-3 所示。它的主要作用是产生主磁场和作电机的机械支架。

机座除用来作电机的外壳、固定主磁极、换向极以外，也是电机磁路的一部分，又称磁轭。机座一般用铸钢或厚钢板制成，以保证良好的导磁性能和机械支撑作用。主磁极由磁极铁心、励磁线圈组成，又称主极，它的主要作用是产生一定形状分布的气隙磁密。主磁极铁心由 1 ~ 1.5mm 厚的硅钢片冲压叠制而成，用铆钉与电动机壳体相连，铁心外套上预先绕制的线圈，以产生工作主磁场。主极掌面呈弧型，以保证主极掌面与电枢表面之间气隙均匀，磁场分布合理。换向极结构与主磁极相似，也由铁心和线圈构成，又称附加极。其主要作用是产生附加磁场，以改善电机的换向。电刷装置的作用是通过固定的电刷与转动的换向片之间的滑动接触，使旋转的转子电路与静止的外电路相连接，把电流引入或引出。它由电刷、刷握、刷杆和刷杆座等零件构成。石墨制成的电刷放在刷握内，用压紧弹簧以一定的压力压在转子的换向器表面。刷握固定在刷杆上，通过电刷的刷辫，将电流从电刷引入或引出。

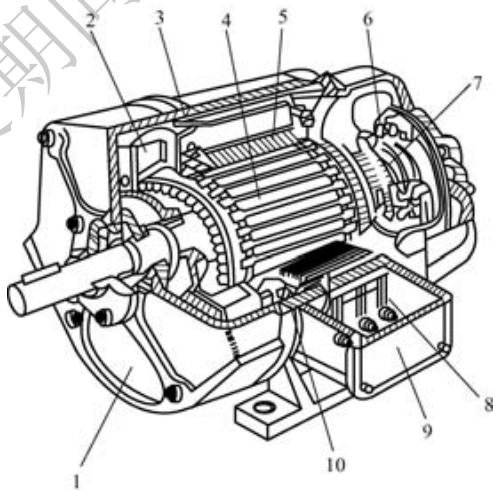


图 3-2 直流电机基本结构

1—端盖 2—风扇 3—机座 4—电枢 5—主磁极 6—刷架
7—换向器 8—接线板 9—出线盒 10—换向磁极

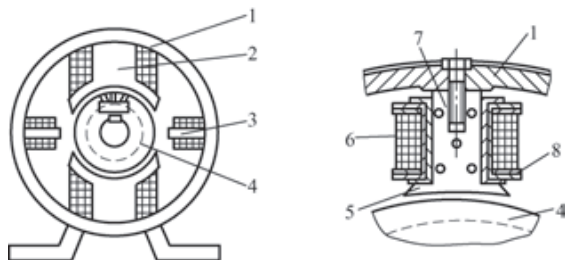


图 3-3 直流电机定子剖面结构

1—机座 2—主磁极 3—换向极 4—电枢 5—极靴 6—励磁线圈 7—极身 8—框架

2. 转子

转子（又称电枢）由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等组成，如图 3-4 所示。它的作用是产生电磁转矩或感应电动势，实现机电能量的转换。

电枢铁心是直流电机主磁路的一部分。为了减少涡流和磁滞损耗，铁心采用 0.5mm 厚两面涂上绝缘漆的硅钢片叠压而成，安装在转轴上。电枢铁心沿圆周上有均匀分布的槽用以嵌放电枢绕组。电枢线圈用包有绝缘的导线（漆包线）制成一定的形状，按要求嵌入电枢铁心，线圈的出线端都与换向器的换向片相连，连接时符合一定规律，构成电枢绕组。换向器安装在转轴上，有许多梯形截面的换向片围叠组成一个圆柱体，相邻的换向片用云母片彼此绝缘。转轴上还有轴承和风扇等。

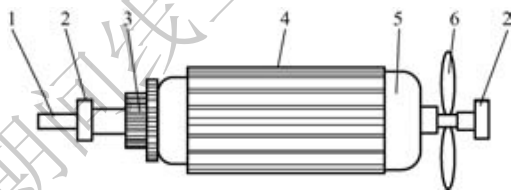


图 3-4 直流电机的电枢

1—转轴 2—轴承 3—换向器
4—电枢铁心 5—电枢绕组 6—风扇

第二节 直流电机的电枢绕组和磁场

一、直流电机的电枢绕组

直流电机的电枢绕组是产生感应电动势和电磁转矩，实现机电能转换的核心部件。在叙述直流电机工作原理时，为简化分析仅在电枢上设置了少量的线圈。而在实际的直流电机中，为增加电机的感应电动势和电磁转矩，其电枢表面均匀分布的槽内嵌放了许多线圈，这些线圈按一定规律与换向器连接起来，组成电枢绕组。

线圈边是产生感应电动势和电磁转矩的有效元件，简称元件，元件数用 S 表示。每个元件的首尾分别与换向片连接，为尽可能增加电动机的电磁转矩且保持方向一致，应使各元件同时有电流通过；为使发电机输出的感应电动势增加且方向相同，应使各元件的感应电动势同时输出，这样每个元件应按一定方式与换向片连接，使电枢绕组形成一个闭合绕组，才能满足上述要求。电枢绕组每个元件的匝数 N 可以是单匝，也可以是多匝，如图 3-5 所示。元件依次嵌放在电枢槽内，一条元件边放在槽的上层，另一条边放在另一槽的下层，构成双层绕组，如图 3-6 所示。



按照元件首尾端与换向片连接规律的不同,电枢绕组可分为叠绕组和波绕组,叠绕组又有单叠和复叠之分,波绕组也有单波和复波之分。单叠绕组是直流电机电枢绕组的基本形式,下面简要介绍单叠绕组。

如图 3-7a 所示,单叠绕组的连接特点是元件的首尾两端分别接到相邻的两个换向片上,并且前一元件的尾端与后一元件的首端接在同一换向片上,在图 3-7a 中上层元件边用实线表示、下层元件边用虚线表示,所有相邻元件依次串联,形成一个闭合回路。将元件的两条边在电枢表面所跨的距离称为第一节距,用 y_1 表示(一般用两条边所跨的槽数计算),一个元件的首尾两端所接的两个换向片之间所跨的距离称为换向节距,用 y_k 表示(一般用换向片数计算)。单叠绕组的换向节距为 1。单叠绕组的支路由电刷引出,支路数等于电刷数,电刷数等于被短路的元件数,也等于磁极数。

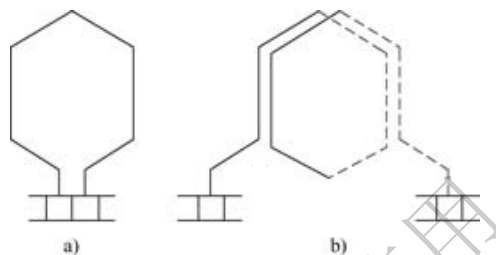


图 3-5 单匝和多匝线圈

a) 单匝线圈 b) 多匝线圈

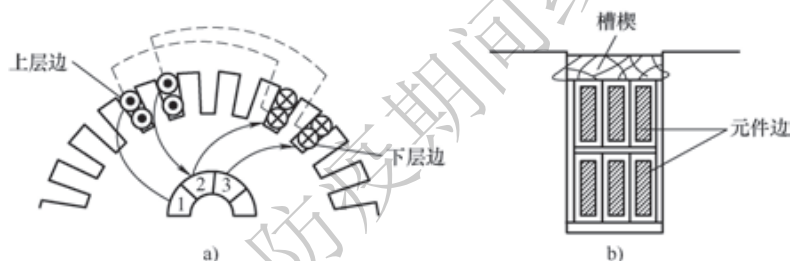


图 3-6 元件边在槽内的放置情况

a) 线圈元件嵌放次序 b) 线圈槽的断面图

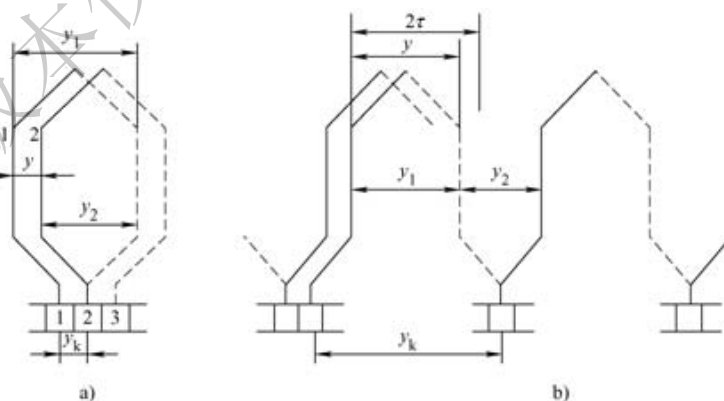


图 3-7 绕组的连接形式

a) 单叠绕组 b) 单波绕组

在实际的电机中,往往采用绕组元件串联和并联的方法使电机能产生更大电磁转矩或提高其输出功率。例如:将若干元件串联起来组成支路,可以提高电机的感应电势;如果将若



干支路并联,则会增大电机的电流,即可增加电磁转矩。有关电机绕组的连接方法可参阅其他电机学的书籍,本教材不再涉及。

二、直流电机的磁场

1. 空载磁场

直流电机空载是指电枢绕组电流为零或很小,电机几乎无功率输出。**空载磁场是由励磁绕组的励磁磁动势单独建立的磁场。**励磁绕组电流的方向与磁场极性符合右手螺旋定则。

图 3-8a 是两极直流电机空载时的磁场分布图。当磁极上励磁绕组按图示方向通入直流电流后,分别呈现 N、S 极性。磁通由 N 极进入气隙和电枢齿,经电枢轭、S 极下的电枢齿、气隙进入 S 极,再由定子轭回到 N 极,构成闭合磁路。该磁通称为**主磁通**,用 Φ_0 表示。另外,在 N、S 极之间有一小部分磁通不经过电枢,不与电枢绕组交链,通过气隙形成闭合,这部分磁通称为**漏磁通**。在直流电机中,主磁通在电枢绕组中产生感应电动势和电磁转矩,而漏磁通却没有这种作用,它只是增加主磁极磁路的饱和程度。但由于两个磁极之间的气隙较大,因此漏磁通的数量相对于主磁通要小得多,大约是主磁通的 20% 左右。

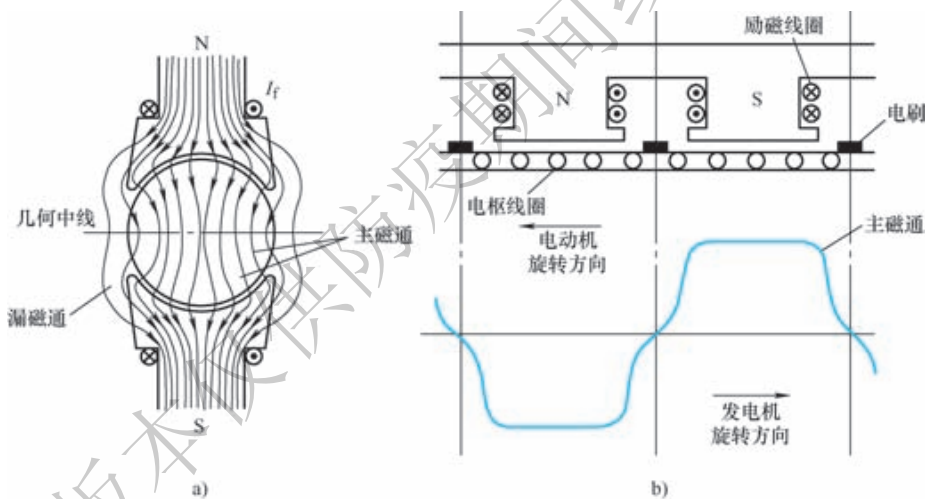


图 3-8 空载时的磁场分布

a) 空载时的磁力线 b) 主磁场磁密分布曲线

主磁通 Φ_0 的大小决定于励磁磁动势 F_f 、磁路各段几何尺寸和选用的材料性质。在磁路尺寸和材料已定的情况下, Φ_0 与 F_f 满足图 3-9 所示的 $\Phi_0 = f(F_f)$ 关系曲线。若励磁绕组匝数一定,磁动势 F_f 便与励磁电流 I_f 成正比,使 $\Phi_0 = f(F_f) = f(I_f)$,称为**磁化曲线**。由磁化曲线表明,电机中磁通增大时,磁通与磁动势成线性正比,但当磁通达到一定数值时,磁通增长缓慢,呈饱和趋势,随着磁动势继续增加,磁通趋于平直。**一般电机空载时,电机的磁场处于磁化曲线的浅饱和区 a 点。**

主磁通通过主极极靴,形成气隙磁场。在极靴下气

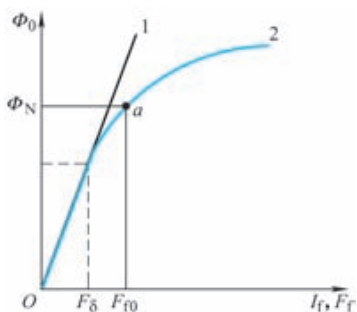


图 3-9 磁化曲线

隙很小,磁通密度均匀且较强,极靴两边气隙明显增大,磁通密度迅速下降,直至两极分界处磁通密度降为零。其分布情况如图 3-8b 所示。 $B=0$ 处的轴线为电气中心线,两极之间的轴线为几何中心线。当电机仅存在主极磁场时,电气中心线与几何中心线重合。

2. 电枢反应

直流电机依靠主磁极建立主磁场,当电枢绕组中通过电流时,产生电枢磁动势,也在气隙中建立起电枢磁场。这时电机的气隙中形成由主磁极磁场和电枢磁场共同作用的合成磁场。这种由电枢磁场引起主磁场变化的现象称为电枢反应。

首先分析电枢磁场的单独分布。由于电枢绕组中各支路电流是经电刷与外电路连接的,电枢表面的磁场分布与电刷分布有关。电刷是电枢表面电流分布的分界线,如图 3-10a 所示,根据右手螺旋定则,其磁通分布和磁密分布曲线展开如图 3-10b 所示。如电枢元件在电枢表面的分布是均匀的,则电枢磁动势在主磁极中央为零,在两磁极的中间为最大。两磁极中间的气隙磁阻大,使磁通最大点出现在主磁极的两端,而在极间处磁通减少呈马鞍形。

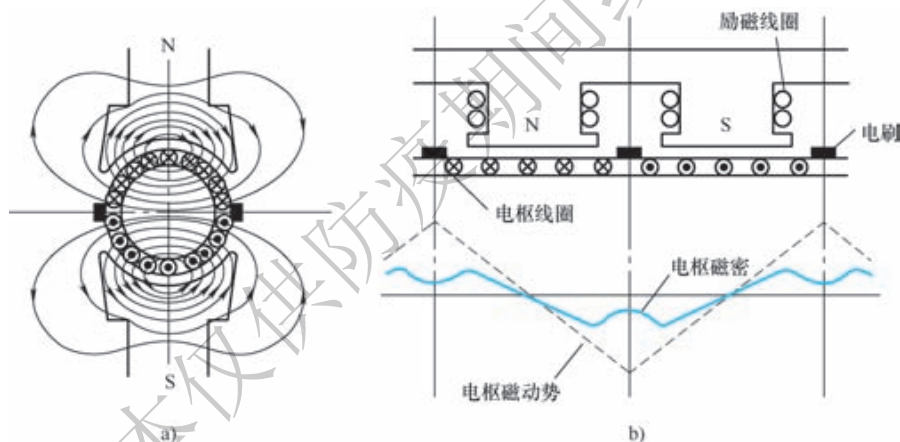


图 3-10 电枢磁场分布

a) 电枢磁场磁力线 b) 电枢磁场磁密分布曲线

直流电机运行时,把主磁场与电枢磁场合成一个工作磁场,其间将产生电枢反应。以直流电动机为例说明这个过程。电动机的主磁场方向、电枢磁场方向均与上述单独作用时情况一致,图 3-11 表示主磁场与电枢磁场合成后的磁通分布与磁密分布曲线展开图。由图可知:电动机负载运行时主磁极的一端磁通增加,另一端磁通减少,使气隙磁场的分布发生扭斜,气隙磁密过零的地方偏离了几何中心线,呈现不均匀分布,出现了电枢反应。

电枢反应使电动机的电气中心轴移动,对原本处于 $B=0$ 的电刷换流产生不利的影响。电枢反应造成每极磁密强弱分布不均,磁极前半部分磁场减弱,后半部分增加,考虑材料磁饱和特性,每极磁通将减少,形成去磁效应,影响了电动机的负载特性。为改善电枢反应对换向的影响,在磁极中间设置换向极,利用换向磁动势抵消主磁极几何中心线的电枢反应磁场,减小换向时电刷与换向片间的火花,提高电机的使用寿命。

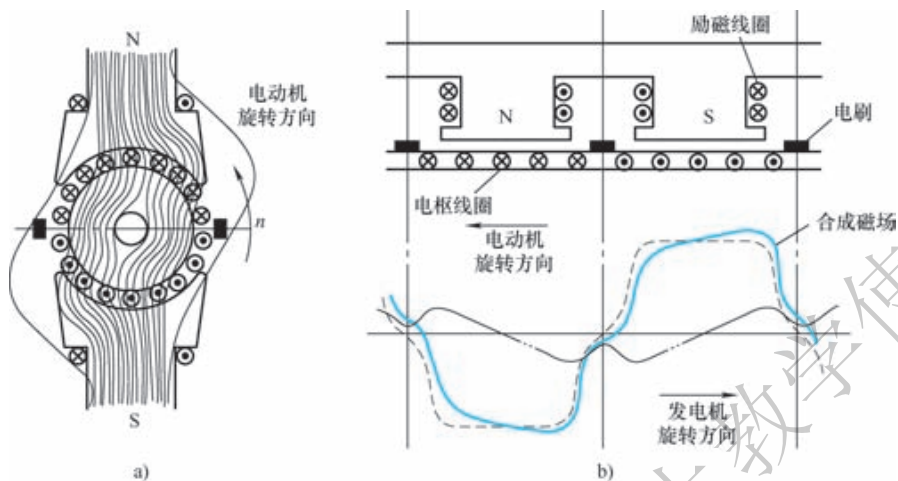


图 3-11 合成磁场分布

a) 合成磁场磁力线 b) 合成磁场磁密分布曲线

三、直流电机的励磁方式

在直流电机中,由定子励磁线圈通电所产生的主磁场也称为励磁磁场。不同的励磁方式,直流电机的运行特性有很大差异。按励磁绕组的供电方式不同,可把直流电机分成下列四种:

(1) **他励直流电机** 他励直流电机是一种励磁绕组与电枢绕组无连接关系,有专用直流电源对励磁绕组供电的直流电机,如图 3-12a 所示。直流电动机接成他励式需要两个不同电压、功率的直流电源。

(2) **并励直流电机** 并励直流电机的励磁绕组与电枢绕组并联,励磁绕组的供电电压与电枢电路端电压相同,如图 3-12b 所示。

(3) **串励直流电机** 串励直流电机的励磁绕组与电枢绕组串联,励磁绕组的电流与电枢电路电流一致,如图 3-12c 所示。

(4) **复励直流电机** 复励直流电机的主磁极上装有两个励磁绕组,一个绕组与电枢电路并联,称为并励绕组,再与另一个励磁绕组串联,该绕组称为串联绕组,如图 3-12d 所示。也可以将电枢电路先与串励绕组串联连接,再与并励绕组并联连接。若串励和并励绕组产生的磁动势方向相同称为积复励;若两个磁动势方向相反则称为差复励。

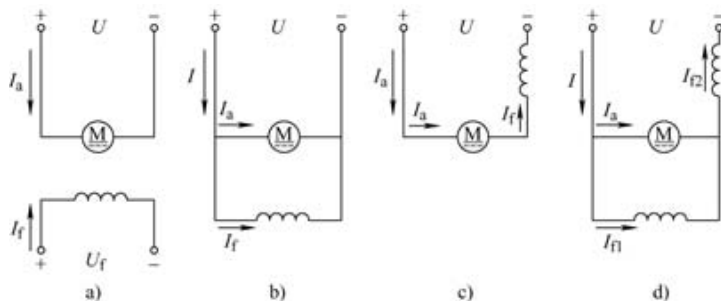


图 3-12 直流电机的励磁方式

a) 他励式 b) 并励式 c) 串励式 d) 复励式

第三节 电枢绕组的感应电动势和电磁转矩

在直流电机运行时,电枢绕组在磁场中切割磁力线,产生感应电动势,同时电枢绕组中有电流便会受电磁力的作用,产生电磁转矩。下面讨论感应电动势和电磁转矩的计算公式。

一、电枢绕组感应电动势

电枢绕组感应电动势是指直流电机电枢上正、负电刷间产生的感应电动势,如图 3-13 所示,电刷间感应电动势波形如同一个交流正弦电压经过整流以后的波形,这说明直流电机电枢上产生的是交流电,经过电刷换向后才输出直流电。

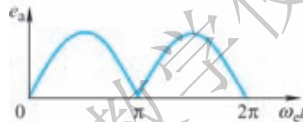


图 3-13 直流电机电刷间的感应电动势

由式(1-35)电机产生的感应电动势为

$$e = N\Phi\omega_e \sin\omega_e t$$

上式是在均匀气隙磁场条件下建立的。现因直流电机仅在磁极下有磁场分布,需考虑每极磁通 Φ 的情况,因此直流电机运转时在电刷间产生的平均感应电动势为

$$E_a = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi N\Phi\omega_e \sin\omega_e t d(\omega_e t) = \frac{2}{\pi} \omega_e N\Phi \quad (3-1)$$

电枢转动的机械角速度 ω 与感应电动势角频率 ω_e 的关系是

$$\omega_e = n_p \omega \quad (3-2)$$

式中 n_p ——极对数。

$$\text{其中,} \quad \omega = \frac{2\pi}{60} n \quad (3-3)$$

式(3-1)表示的直流电机感应电动势可写成

$$E_a = \frac{2n_p N}{\pi} \Phi \omega = 4n_p N\Phi \frac{n}{60} \quad (3-4)$$

由于电枢绕组的匝数 N (每匝有两条有效边) 与电枢总有效边数 Z 以及支路对数 a 的关系为 $N = Z/4a$, 则上式为

$$E_a = 4n_p \frac{Z}{4a} \Phi \frac{n}{60} = \frac{n_p Z}{60a} \Phi n$$

令 $C_e = \frac{n_p Z}{60a}$ 为电动势常数,那么就得到直流电机的电枢电动势计算公式

$$E_a = C_e \Phi n \quad (3-5)$$

另外,还有一种计算直流电机感应电动势的方法。该方法先计算电枢绕组中的每个元件在切割气隙磁场所产生的平均感应电动势,再计算一个支路总元件数,从而算出电枢感应电动势。这两种方法推导出的直流电机感应电动势的公式是相同的,推导过程可以参阅有关书籍。

二、电磁转矩

这里,我们利用第一章推导的一般电机电磁转矩方程式(1-44)来计算直流电机的电磁



转矩。从直流电机的基本结构可以看出,它是一种定子绕组为凸极的电机,现假定其满足以下条件:

- 1) 忽略各种饱和与非线性。
- 2) 电刷的位置在几何中心线上,即 $\varphi_r = 90^\circ$, 并忽略电刷宽度。
- 3) 忽略磁动势的空间谐波。
- 4) 电枢绕组均匀分布,节距相等,忽略槽宽。

如图 3-1 所示的直流电机,在定子绕组中通以直流励磁电流 I_f ,产生恒定的磁通 Φ ,这时 $\Phi_{sr} = \Phi$,由电枢绕组产生的磁动势 F_a 波形是如图 3-14 所示的三角波,其幅值为

$$F_a = \frac{NI_a}{2n_p} = \frac{Z}{8n_p a} i_a$$

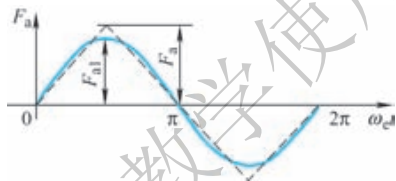


图 3-14 电枢绕组产生的磁动势波形

对三角波电枢磁动势 F_a 进行傅里叶变换,其正弦基波分量的幅值 F_{a1} 为

$$F_{a1} = \frac{8}{\pi^2} \frac{Z}{8n_p a} I_a = \frac{ZI_a}{\pi^2 n_p a} = F_r$$

将上述各变量的关系代入式(1-44),得

$$T_e = \frac{\pi}{2} n_p^2 \Phi F_r \sin 90^\circ = \frac{\pi}{2} n_p^2 \Phi \frac{ZI_a}{\pi^2 n_p a} = \frac{n_p Z}{2\pi a} \Phi I_a$$

令 $C_T = \frac{n_p Z}{2\pi a}$ 为直流电机的**转矩常数**,则可得直流电机电磁转矩计算公式

$$T_e = C_T \Phi I_a \quad (3-6)$$

另外,根据毕萨电磁力定律,计算直流电机电枢绕组元件边在磁场中的受力,也可推导出与式(3-6) 同样的电磁转矩方程。由式(1-6) 可求出一根导体在磁场中所受的平均电磁力为

$$F_{av} = B_{av} l i_{cl}$$

式中 i_{cl} ——导体电流,且有 $i_{cl} = I_a / 2a$,表示每根导体的电流 i_{cl} 等于电机总电流 I_a 除以支路数 $2a$ 。

由电磁力与电磁转矩的关系,可得一根导体的电磁转矩为

$$T_{e1} = F_{av} D / 2$$

式中 D ——电枢的直径 (m)。

现假定电机的总有效导体数为 Z ,则直流电机总的电磁转矩为

$$T_e = Z T_{e1} = Z F_{av} \frac{D}{2} = \frac{Z D l}{4a} B_{av} I_a$$

又因

$$B_{av} = \frac{2n_p}{\pi D l} \Phi$$

因此

$$T_e = \frac{Z D l}{4a} \frac{2n_p}{\pi D l} \Phi I_a = \frac{n_p Z}{2\pi a} \Phi I_a$$



同样, 令 $C_T = \frac{n_p Z}{2\pi a}$ 为直流电机的转矩常数, 则可得直流电机电磁转矩计算公式

$$T_e = C_T \Phi I_a$$

可见, 利用毕萨电磁力定律得到了完全相同的直流电机电磁转矩计算公式。

第四节 直流电机的基本方程和工作特性

直流电机的运行情况可以用基本方程来研究。直流电机可作为发电机运行也可作为电动机运行。当直流电机由外动力拖动, 在电枢转轴上输入机械能, 电枢感应出电动势, 并经电刷转换输出直流电能向负载供电, 感应电动势大于电枢端电压, 电机作发电机运行。当直流电机电枢输入直流电源电压, 此电压经电刷转换流入电枢绕组, 电枢受电磁转矩作用, 在转轴输出机械能, 同时电枢也产生感应电动势, 但数值小于电枢电压, 则电机作电动机运行。本节给出直流电机稳态运行时的基本方程和工作特性。

一、直流电动机

在列写直流电动机的基本方程之前, 先规定相关物理量的参考正方向, 若各物理量的瞬时实际方向与参考正方向一致, 其值为正, 反之为负。直流电动机各物理量的参考正方向选定如图 3-15a 所示。图中 U_a 是直流电动机电枢两端的端电压, I_a 是电枢电流, T_e 是电动机的电磁转矩, T_0 是电动机空载转矩, T_L 是电动机的轴上负载转矩, n 是电动机的电枢转速, U_f 是励磁电压, I_f 是励磁电流, Φ 是主磁通。

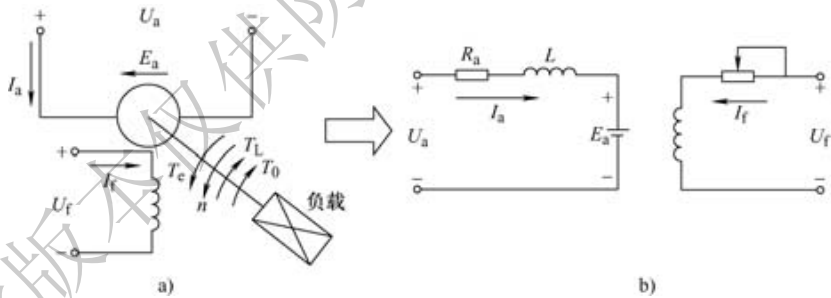


图 3-15 直流电动机物理量的正方向与等效电路

a) 物理量的参考正方向 b) 等效电路

1. 电压方程

(1) 他励直流电动机 如图 3-12a 所示, 他励式直流电动机的励磁线圈采用单独电源供电, 励磁绕组电源电压 U_f , 励磁回路的电阻 R_f , 励磁回路励磁电流 I_f 三者之间关系式为

$$I_f = \frac{U_f}{R_f} \quad (3-7)$$

直流电动机的电枢回路电源电压 U_a , 电枢绕组的电阻 R_a , 正、负电刷的接触电压降为 $2\Delta U_b$, 由基尔霍夫电压定律可列出电枢回路方程

$$U_a = E_a + R_a I_a + 2\Delta U_b = E_a + R_a I_a \quad (3-8)$$

式中 R_a ——包括电枢绕组和电刷压降的等效电阻;



E_a ——直流电机感应电动势,其方向与电源电压 U_a 相反,大小与转速成正比,且 $U_a > E_a$ 。即有

$$E_a = C_e \Phi n \quad (3-9)$$

(2) 并励直流电动机 如图 3-12b 所示,电动机采用并励方式时,励磁绕组与电枢回路并联,共用一个电源,电枢回路的电压方程与他励时相同,并有

$$U = U_a = U_f \quad (3-10)$$

$$I = I_a + I_f \quad (3-11)$$

(3) 串励直流电动机 如图 3-12c 所示,电动机采用串励方式时,励磁绕组与电枢回路串联,再与电源连接,此时

$$I = I_a = I_f \quad (3-12)$$

$$U = U_a + U_f \quad (3-13)$$

2. 转矩方程

直流电动机电枢外加电压后,工作在电动运行状态,此时,电枢产生电磁转矩 T_e ,其方向如图 3-15 所示,为逆时针转动,与电动机空载转矩 T_0 和电动机的轴上负载转矩 T_L 相反。当电机稳态运行时,应有 T_e 与 T_0 、 T_L 相等。这样,按图 3-15 中正方向的约定,可写出电动机的转矩方程

$$T_e = T_L + T_0 \quad (3-14)$$

3. 功率方程

励磁回路输入的电功率为

$$P_f = U_f I_f = R_f I_f^2 \quad (3-15)$$

电枢回路输入电功率为

$$P_a = U_a I_a = (E_a + R_a I_a) I_a = E_a I_a + R_a I_a^2 = P_{em} + \Delta p_{Cua} \quad (3-16)$$

式中 Δp_{Cua} ——电枢回路的铜耗, $\Delta p_{Cua} = R_a I_a^2$;

P_{em} ——为电动机的电磁功率, $P_{em} = E_a I_a$, 且有

$$E_a I_a = \frac{n_p Z}{60a} \Phi n I_a = \frac{n_p Z}{60a} \frac{60\omega}{2\pi} \Phi I_a = \frac{n_p Z}{2\pi a} \Phi I_a \omega = T_e \omega \quad (3-17)$$

式中 ω ——电动机的机械角速度 (rad/s), $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ 。

由上式可得电动机电磁转矩的另一种计算公式

$$T_e = \frac{P_{em}}{\omega} = \frac{P_{em}}{2\pi n/60} = 9.55 \frac{P_{em}}{n} \quad (3-18)$$

由此可见,电枢的电磁功率用于克服电枢轴上的机械负载转矩,实现机电能量的转换。在式(3-14)两边同乘以机械角速度 ω ,可得

$$T_e \omega = T_L \omega + T_0 \omega$$

即

$$P_{em} = P_L + \Delta p_0 \quad (3-19)$$

式中 P_L ——电动机的机械负载功率;

Δp_0 ——电动机的空载损耗,包括机械摩擦损耗 Δp_m 和铁心损耗 Δp_{Fe} 。

上式说明,电磁功率转换成空载损耗和机械能输出。直流电动机电动运行时的功率关系



如图 3-16 所示, 可见电动机的输入电功率为

$$P_1 = P_f + P_a = \Delta p_{\text{Cuf}} + \Delta p_{\text{Cua}} + P_{\text{em}} = \Delta p_{\text{Cu}} + \Delta p_{\text{Fe}} + \Delta p_{\text{m}} + \Delta p_{\text{add}} + P_2 = P_2 + \Sigma \Delta p$$

式中 P_2 ——电动机的输出功率, 并有 $P_2 = P_{\text{L}}$;

Δp_{add} ——电动机的附加损耗, 是未被包括在铜耗、铁耗和机械损耗之内的其他损耗;

$\Sigma \Delta p$ ——电动机的总损耗, 并有

$$\Sigma \Delta p = \Delta p_{\text{Cuf}} + \Delta p_{\text{Cua}} + \Delta p_{\text{Fe}} + \Delta p_{\text{m}} + \Delta p_{\text{add}} = R_f I_f^2 + R_a I_a^2 + \Delta p_0 + \Delta p_{\text{add}} \quad (3-20)$$

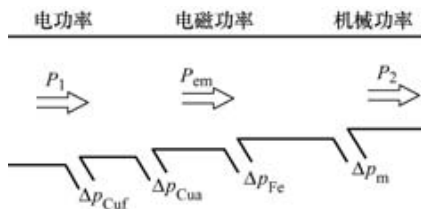


图 3-16 直流电动机的功率流程图

由此, 电动机的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma \Delta p}{P_2 + \Sigma \Delta p} \quad (3-21)$$

例 3-1 已知一台他励直流电动机额定电压 220V, 额定电流 100A, 额定转速 1150r/min, 电枢电阻 0.095Ω , 空载损耗 1500W。求: (1) 额定电动势; (2) 额定电磁转矩; (3) 额定效率。

解:

$$(1) \text{ 额定电动势 } E_{\text{aN}} = U_{\text{N}} - I_{\text{N}} R_{\text{a}} = (220 - 100 \times 0.095) \text{ V} = 210.5 \text{ V}$$

$$(2) \text{ 额定电磁转矩 } T_{\text{eN}} = \frac{E_{\text{a}} I_{\text{a}}}{2\pi n / 60} = \frac{210.5 \times 100}{2\pi \times 1150} \times 60 \text{ N} \cdot \text{m} = 174.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$(3) \text{ 电枢输入功率 } P_1 = U_{\text{N}} I_{\text{N}} = 220 \times 100 \text{ W} = 22000 \text{ W}$$

轴上输出功率

$$P_2 = P_1 - I_{\text{a}}^2 R_{\text{a}} - \Delta p_0 = (22000 - 100^2 \times 0.095 - 1500) \text{ W} = 19550 \text{ W}$$

$$\text{额定效率 } \eta_{\text{N}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{19550}{22000} \times 100\% = 88.86\%$$

4. 工作特性

他励直流电动机的工作状态和性能可用下列几个特性曲线来描述:

(1) **转速特性** 转速特性是指当 $U_{\text{a}} = U_{\text{N}}$, $I_{\text{f}} = I_{\text{fN}}$ 时, $n = f(I_{\text{a}})$ 的关系曲线, 由感应电动势公式和电压方程可得

$$n = \frac{E_{\text{a}}}{C_{\text{e}} \Phi} = \frac{U_{\text{a}} - I_{\text{a}} R_{\text{a}}}{C_{\text{e}} \Phi} = \frac{U_{\text{a}}}{C_{\text{e}} \Phi} - \frac{R_{\text{a}}}{C_{\text{e}} \Phi} I_{\text{a}} \quad (3-22)$$

若忽略电枢反应, 当 I_{a} 增加时, 转速 n 下降, 形成转速降 Δn , 如图 3-17 中曲线 1 所示。若考虑电枢反应的去磁效应, 磁通下降可能引起转速的上升, 与 I_{a} 增大引起的转速降相抵消, 使电动机的转速变化很小。实际运行中为保证电动机稳定运行, 一般使电动机的转速随电流 I_{a} 的增加而下降。转速降一般为额定转速的 3% ~ 8%, 呈基本恒速状态。

(2) **转矩特性** 转矩特性是指当 $U_{\text{a}} = U_{\text{N}}$, $I_{\text{f}} = I_{\text{fN}}$ 时, $T_{\text{e}} = f(I_{\text{a}})$ 的关系曲线。由转矩



特性公式 $T_e = C_T \Phi I_a$ 可知, 在磁通为额定值时, 电磁转矩与电枢电流成正比。若考虑电枢反应的去磁效应, 转矩随电枢电流的增加而略微下降, 如图 3-17 中曲线 2 所示。

(3) **效率特性** 效率特性是指 $U_a = U_N$, $I_f = I_{fN}$ 时, $\eta = f(I_a)$ 的关系曲线。由式 (3-20) 可见, 电动机的损耗中仅电枢回路的铜耗与电流 I_a 的二次方成正比关系, 其他部分与电枢电流无关。电动机的效率随 I_a 增大而上升, 当 I_a 大到一定值后, 效率又逐渐下降, 如图 3-17 中曲线 3 所示。一般直流电动机的效率在 0.75 ~ 0.94 之间。

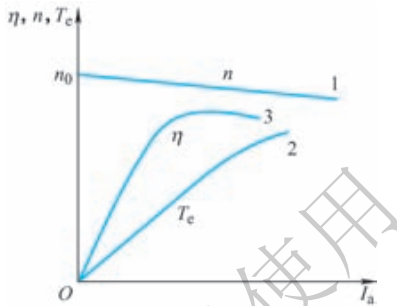


图 3-17 直流电动机的工作特性

直流电动机在使用时一定要保证励磁回路连接可靠, 绝不能断开。一旦励磁电流 $I_f = 0$, 则电机主磁通将迅速下降至剩磁磁通, 若此时电动机负载较轻, 电动机的转速将迅速上升, 造成“飞车”; 若电动机的负载为重载, 则电动机的电磁转矩将小于负载转矩, 使电机转速减小, 但电枢电流将飞速增大, 超过电动机允许的最大电流值, 引起电枢绕组因大电流过热而烧毁。因此在闭合电动机电枢电路前应先闭合励磁电路, 保证电动机可靠运行。

例 3-2 一台并励电动机额定电压 $U_N = 220\text{V}$, 额定电流 $I_N = 40\text{A}$, 额定励磁电流 $I_{fN} = 1.2\text{A}$, 额定转速 $n_N = 1000\text{r/min}$, 电枢电阻 $R_a = 0.5\Omega$, 略去电枢反应的去磁作用。额定转速时空载特性如下:

I_{f0}/A	0.4	0.6	0.8	1.0	1.1	1.2	1.3
E_0/V	83.5	120	158	182	191	198.6	204

求: 在负载转矩和励磁电阻不变, 电源电压为 180V 时, (1) 输入总电流; (2) 电机转速和理想空载转速。

解: 根据 $E_0 = C_e \Phi n_N$, $C_e \Phi = f(I_{f0})$ 可得下列表格:

I_{f0}/A	0.4	0.6	0.8	1.0	1.1	1.2	1.3
$C_e \Phi$	0.0835	0.12	0.158	0.182	0.191	0.1986	0.204

额定电枢电流

$$I_{aN} = I_N - I_{fN} = (40 - 1.2)\text{A} = 38.8\text{A}$$

(1) 当电源电压由 220V 降低至 180V, 励磁电阻不变, 并励绕组的励磁电流为

$$I_f = \frac{U}{U_N} I_{fN} = \frac{180}{220} \times 1.2\text{A} = 0.982\text{A}$$

对照上述表格, 当 $I_{fN} = 1.2\text{A}$ 时, $C_e \Phi_N = 0.1986$;

当 $I_f = 0.982\text{A}$, 采用插入法求 $C_e \Phi$,

$$C_e \Phi = 0.182 - \frac{0.182 - 0.158}{1.0 - 0.8} (1.0 - 0.982) = 0.18$$

降压后电机负载不变, 得



$$T_e = C_T \Phi_N I_{aN} = C_T \Phi I_a$$

$$I_a = \frac{\Phi_N I_{aN}}{\Phi} = \frac{0.1986}{0.18} \times 38.8 \text{ A} = 42.6 \text{ A}$$

输入电流 $I = I_f + I_a = (42.6 + 0.982) \text{ A} = 43.582 \text{ A}$

(2) 降压后电动机的负载转速

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{180 - 42.6 \times 0.5}{0.18} \text{ r/min} = \left(\frac{180}{0.18} - \frac{42.6 \times 0.5}{0.18} \right) \text{ r/min}$$

$$= (1000 - 118.3) \text{ r/min} = 881.7 \text{ r/min}$$

电机的理想空载转速

$$n_0 = 1000 \text{ r/min}$$

二、直流发电机

直流发电机各物理量的参考正方向选定如图 3-18a 所示。图中 U_a 是直流发电机负载两端的端电压, I_a 是电枢电流, T_m 是原动机的拖动转矩, T_e 、 T_0 是发电机的电磁转矩和空载转矩, n 是电机的电枢转速, U_f 是励磁电压, I_f 是励磁电流, Φ 是主磁通。

1. 电压方程

当他励式直流发电机由外力拖动按图 3-18a 所示逆时针旋转, 产生感应电动势 $E_a > U_a$ 并输出, 使电枢电流实际方向与图示方向相反为 $-I_a$, 则电机发电运行状态电枢回路方程为

$$U_a = E_a + R_a (-I_a) = E_a - R_a I_a$$

即

$$E_a = U_a + R_a I_a \quad (3-23)$$

其中, $E_a = C_e \Phi n$ 。

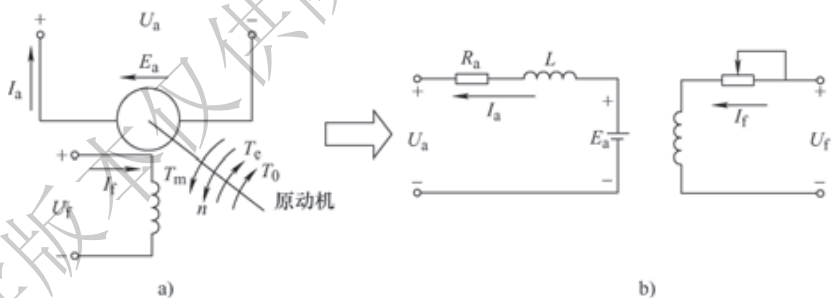


图 3-18 直流发电机物理量的正方向与等效电路

a) 物理量的参考正方向 b) 等效电路

他励直流发电机的励磁线圈采用单独电源供电, 其回路方程见式(3-7), 即

$$I_f = \frac{U_f}{R_f}$$

如果发电机采用并励方式, 励磁绕组与电枢回路并联, 由图 3-19 所示的电流方向, 电枢回路的电压方程与他励时相同, 但电流变为式(3-25), 即

$$U = U_a = U_f \quad (3-24)$$

$$I = I_a - I_f \quad (3-25)$$



2. 转矩方程

直流发电机的电枢在外动力转矩 T_m 的拖动下逆时针旋转, 工作在发电状态时, 与反方向的空载转矩 T_0 和电磁转矩 T_e 平衡。这样, 按图 3-18 中正方向的约定, 可写出发电机状态的转矩平衡方程

$$T_m = T_e + T_0 \quad (3-26)$$

3. 功率方程

对于直流发电机, 输入的机械功率为

$$P_1 = P_m = T_m \omega = (T_e + T_0) \omega = P_{em} + \Delta p_0 \quad (3-27)$$

因

$$P_{em} = E_a I_a = U_a I_a + R_a I_a^2 = P_2 + \Delta p_{Cua} \quad (3-28)$$

式中 P_2 ——直流发电机输出给负载的电功率。因此

$$P_1 = P_{em} + \Delta p_0 = P_2 + \Delta p_{Cua} + \Delta p_m + \Delta p_{Fe} \quad (3-29)$$

式(3-29)说明, 他励直流发电机将输入的原动机的机械功率转换成电能输出和内部的热能损耗。其功率关系如图 3-20 所示, 表示了直流发电机把机械能转换成电能的变换过程。

由此可得, 发电机的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma \Delta p}{P_2 + \Sigma \Delta p} \quad (3-30)$$

式中 $\Sigma \Delta p$ ——直流发电机的总损耗, 对于他励直流发电机

$$\Sigma \Delta p = \Delta p_m + \Delta p_{Fe} + \Delta p_{Cua} + \Delta p_{add} \quad (3-31)$$

对于并励直流发电机, 则在上式中还应加上励磁损耗 Δp_{Cuf} 。

4. 工作特性

根据直流发电机的基本方程, 其工作状态和性能主要取决于电枢电压 U_a 、励磁电流 I_f 、负载电流 I_a 和转速 n 这 4 个物理量, 它们之间的关系由下列几个特性曲线来描述:

(1) **空载特性** 空载特性是指当发电机不带负载, 即 $I_a = 0$, $U = E_a$ 时, $E_0 = E_a = f(I_f)$ 的关系曲线, 表达了直流发电机的空载运行特性。这里分两种情况讨论:

1) 对于他励直流发电机, 由感应电动势公式 $E_a = C_e \Phi n$, 且 n 恒定不变, 因此 $E_a \propto \Phi$, 再由图 3-9 给出的 $\Phi_0 = f(I_f)$ 磁化曲线可得到 $E_a = f(I_f)$ 的关系, 即他励直流发电机的空载特性与其空载磁化曲线是相似的。如图 3-21 所示, 其中: 曲线 1 表示 $E_a = f(I_f)$ 的关系; 曲线 2 称为励磁回路的伏安特性, 即表示 $U = f(I_f)$ 的关系。

2) 对于并励和复励直流发电机, 其励磁电流要靠发电机自身提供的电压产生, 而发电机电压的产生则需要有励磁电流才行。由此可见, **并励和复励直流发电机在起始阶段需要有一个自我励磁并建立电压的过**

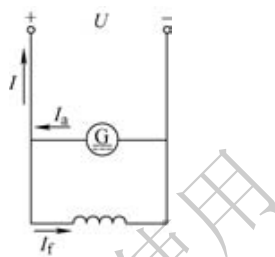


图 3-19 直流发电机的并励方式

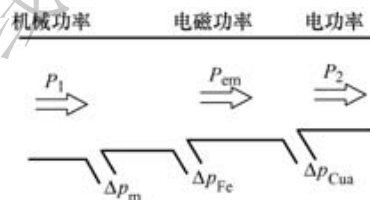


图 3-20 直流发电机的功率流程图

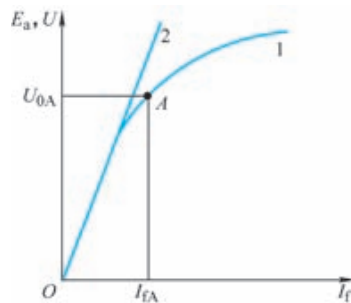


图 3-21 他励直流发电机的空载特性



程,称为自励过程。图 3-22 给出了并励和复励直流发电机空载电压建立的过程:当原动机拖动发电机以恒定转速 n 旋转时,由于主磁极存在剩磁,电枢绕组切割剩磁磁通会产生一个较小的感应电动势 E_{0d} ,由 E_{0d} 在励磁回路中产生励磁电流 I_{f1} ;如果极性正确,将在磁路中产生与剩磁方向相同的磁通,使主磁路中磁通增加,使感应电动势增大为 E_1 , E_1 又使励磁电流增大为 I_{f2} ;如此循环,使得感应电动势和励磁电流不断增加,最终建立起发电机的空载电动势。例如,在图 3-22 中的 A 点 (E_{0A} , I_{fA}) 稳定工作。

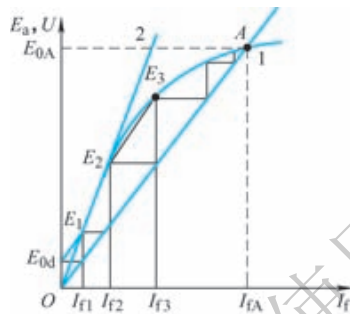


图 3-22 并励和复励直流发电机的空载特性

必须指出,自励发电方式能否建立空载电压是有条件的,要能满足下面三个条件:一是电机必须有剩磁,如果没有,须事先进行充磁;二是励磁绕组的极性必须正确,也就是励磁绕组与电枢并联时接线要正确;三是励磁回路的电阻不能太大,即其伏安特性的斜率 U/I_f 不能太陡(如斜线 1),如果伏安特性的斜率太陡,与发电机空载特性交点很低或无交点(见斜线 2),就无法建立空载电压。总之,自励发电机的运行首先要在空载阶段建立电压,然后才能带负载运行。

(2) 外特性 发电机的外特性是指当励磁电流保持不变 $I_f = I_{fN}$, 改变外部负载时,其输出电压与负载电流的关系,用 $U = f(I_a)$ 特性曲线表示。他励直流发电机的外特性如图 3-23 中曲线 1 所示,随着电流增大,其输出电压下降。这是因为:①随着发电机的负载增加,其电枢反应的去磁效应增强,使每极磁通量减小,导致电枢电动势下降。②电枢回路电阻上的电压将随着电流上升而增大,使发电机的输出电压下降。实际上,他励直流发电机的负载电流从零变化到额定值时,其输出电压下降不大,接近于一个恒压源。对于并励直流发电机,因还要向励磁回路供电,其外特性要更软一些。

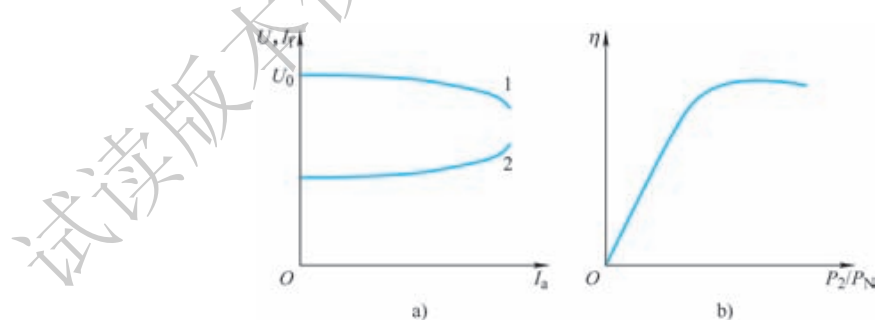


图 3-23 他励直流发电机的工作特性

a) 外特性和调节特性 b) 效率特性

(3) 调节特性 当外接负载变化时,为了保持直流发电机的输出电压不变,可调节励磁电流。例如:对于负载电流增大引起的电压下降,可通过增加励磁电流,加大磁通量,从而使电枢电动势增大,以抵消负载电流在电枢回路的电压降,达到维持发电机电压恒定的目的。他励直流发电机调节特性 $I_f = f(I_a)$ 如图 3-23 中曲线 2 所示。



(4) **效率特性** 他励直流发电机带负载运行时, 其损耗中仅电枢回路的铜耗与电流 I_a 的平方成正比, 称为可变损耗; 其他部分损耗与电枢电流无关, 称为不变损耗。当负载较小时, I_a 也较小, 此时发电机的损耗是以不变损耗为主, 但因输出功率小而效率低; 随着负载增加, P_2 增大而效率上升, **当可变损耗与不变损耗相等时效率达到最大值**; 此后, 若继续增加负载, 可变损耗将随着 I_a 增大而成为损耗的主要部分, 效率又逐渐下降。他励直流发电机的效率特性曲线 $\eta = f(P_2/P_N)$ 如图 3-23b 所示。

例 3-3 一台并励直流发电机, 额定功率 $P_N = 20\text{kW}$, 额定电压 $U_N = 230\text{V}$, 额定转速 $n_N = 1500\text{r/min}$, 电枢电阻 $R_a = 0.156\Omega$, 励磁电阻 $R_f = 73.3\Omega$ 。已知机械损耗和铁耗为 1kW , 附加损耗为 $0.01P_N$, 求额定负载下输入功率、电磁功率、各绕组的铜耗、总损耗及效率。

解: 先计算额定电流 $I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{20 \times 10^3}{230}\text{A} = 86.96\text{A}$

$$\text{励磁电流 } I_f = \frac{U_N}{R_f} = \frac{230}{73.3}\text{A} = 3.14\text{A}$$

$$\text{电枢电流 } I_a = I_N + I_f = (86.96 + 3.14)\text{A} = 90.1\text{A}$$

$$\text{电枢铜耗 } \Delta p_{\text{Cua}} = R_a I_a^2 = 0.156 \times 90.1^2\text{W} = 1266\text{W}$$

$$\text{励磁铜耗 } \Delta p_{\text{Cuf}} = R_f I_f^2 = 73.3 \times 3.14^2\text{W} = 723\text{W}$$

$$\text{电磁功率 } P_{\text{em}} = P_2 + \Delta p_{\text{Cuf}} + \Delta p_{\text{Cua}} = (20000 + 723 + 1266)\text{W} = 21989\text{W}$$

$$\begin{aligned} \text{总损耗 } \Sigma \Delta p &= \Delta p_{\text{Cuf}} + \Delta p_{\text{m}} + \Delta p_{\text{Fe}} + \Delta p_{\text{Cua}} + \Delta p_{\text{add}} \\ &= (723 + 1000 + 1266 + 0.01 \times 20000)\text{W} = 3189\text{W} \end{aligned}$$

$$\text{输入功率 } P_1 = P_2 + \Sigma \Delta p = (20000 + 3189)\text{W} = 23189\text{W}$$

$$\text{电动机效率 } \eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{20000}{23189} \times 100\% = 86.25\%$$

小 结

作为直流电能与机械能互相转换的运动装置, 直流电机在结构上保证了直流电动机和直流发电机工作状态的可逆性。在由定子绕组产生的工作磁场中, 若将转子(电枢)电路接通直流电源, 则转子受电磁力作用, 输出机械转矩; 若用外力拖动转子旋转, 则在转子电路将输出一个直流电动势。直流电动机定子绕组的励磁方式有: 他励、并励、串励和复励。

直流电机的电枢绕组是实现能量转换的主要部件。电枢绕组的嵌放和连接方式主要有叠绕组和波绕组之分。单叠绕组的支路由电刷引出, 支路数等于电刷数, 也等于磁极数。

直流电机的空载磁场由定子绕组接通直流电源建立, 在电枢绕组通电或被旋转后电枢电流也产生磁场, 并且与定子绕组的磁场合成后产生电机的电枢反应现象, 该现象会影响电机的工作状态, 引起换向器的换向火花等。改善电枢的换向性能一般采用在定子上安装换向磁极。

直流电机在运行时电枢产生的感应电动势和电磁转矩计算公式分别为 $E_a = C_e \Phi n$, $T_e = C_T \Phi I_a$ 。直流电动机的基本方程包括电压平衡方程、转矩平衡方程和功率平衡方程。利用这些方程可分析电机的运行特性和电机内部的机电和电磁过程, 进而可以获得不同励磁方式直流电动机的工作特性。



思考题与习题

- 3-1 直流电机电枢绕组导体中的电流是直流的，还是交流的？为什么？
- 3-2 换向器和电刷在直流电机中起什么作用？
- 3-3 直流电机的主磁通既链着电枢绕组又链着励磁绕组，为什么却只在电枢绕组里感应电动势？
- 3-4 他励直流电动机的电磁功率指的是什么？
- 3-5 直流电机的铁心损耗是存在于定子中，还是存在于转子中？为什么？
- 3-6 说明下列情况下空载电动势的变化：（1）每极磁通减少 10%，其他不变；（2）励磁电流增大 10%，其他不变；（3）电机转速增加 20%，其他不变。
- 3-7 他励直流电动机运行在额定状态，负载为恒转矩负载，如果减小磁通，电枢电流是增大、减小还是不变？
- 3-8 一台他励直流电动机的额定数据为： $P_N = 17\text{kW}$ ， $U_N = 220\text{V}$ ， $n_N = 1500\text{r/min}$ ， $\eta_N = 83\%$ 。计算额定电枢电流 I_N 、额定转矩 T_N 和额定负载时的输入电功率 P_1 。
- 3-9 一台他励直流电动机的额定数据为： $P_N = 5\text{kW}$ ， $U_N = 220\text{V}$ ， $n_N = 1000\text{r/min}$ ， $\Delta p_{\text{Cua}} = 500\text{W}$ ， $\Delta p_0 = 395\text{W}$ 。计算额定运行时电动机的 T_e ， T_L ， T_0 ， P_1 ， η_N ， R_a 。
- 3-10 一台他励直流发电机的额定数据为： $P_N = 46\text{kW}$ ， $U_N = 230\text{V}$ ， $n_N = 1000\text{r/min}$ ， $R_a = 0.1\Omega$ ，已知 $\Delta p_0 = 1\text{kW}$ ， $\Delta p_{\text{add}} = 0.01P_N$ 。求额定负载下的 P_1 、 P_{em} 及 η_N 。