

直流电动机及电力拖动基础知识

学习目标

本章内容包括直流电动机及拖动的全部基础知识,要求掌握直流电动机的工作原理、结构、按励磁分类方式、电枢电动势、电磁转矩和基本方程式;熟悉直流电动机的机械特性和启动、制动、调速及正反转;了解直流电动机磁场、电枢反应、电枢绕组、换向及工作特性。

1.1 直流电动机的基本工作原理、结构及励磁分类

常见的旋转电动机可以分为交流电动机和直流电动机两大类。直流电动机与交流电动机相比,它的主要优点是具有良好的启动性能和调速性能,例如钢铁企业的主轧机、电力机车、造纸设备或印刷机械等,大多用直流电动机来拖动。直流电动机的缺点是制造工艺复杂,生产成本较高,且运行可靠性差,维护比较困难,运行时容易出现换向火花,因而在很多使用场合受到限制,如易燃易爆等场合。

1.1.1 直流电动机的基本工作原理

载流导体在磁场中会受到作用力,其工作原理可通过直流电动机的简化模型进行说明。

图 1.1 所示是一台两极直流电动机,固定部分由两个主磁极 N 和 S 组成。转动部分由固定在硅钢片叠成的圆柱体铁芯上的一匝线圈 abcd 组成。若把电刷 A、B 接到一直流电源上,电刷 A 接电源的正极,电刷 B 接电源的负极,此时在电枢线圈中将有电流流过。如图 1.1(a)所示,设线圈的 ab 边位于 N 极下,线圈的 cd 边位于 S 极下,则载流导体 abcd 在磁场中受到电磁力的作用,电磁力的方向由左手定则判定如图 1.1(a)所示。整个线圈受到一个逆时针方向的转动力矩作用,电动机会沿逆时针方向旋转。从图 1.1(b)中可知,不管转子处于何种位置,同一磁极下的线圈电流方向不变,电动机转子的转动力矩方向不变。电动机便可以通过转轴带动负载进行工作,这就是直流电动机的工作原理。

直流电动机是可逆式电机,当有原动机拖动转子以一定的转速逆时针旋转时,在电刷两端可获得直流电动势输出,成为直流发电机分析方法同直流电动机工作原理。

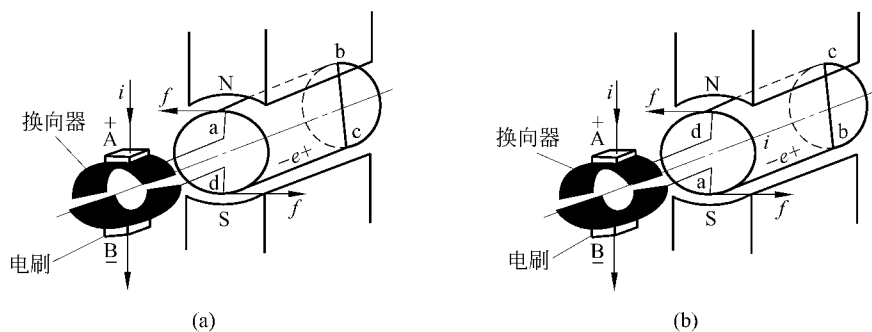


图 1.1 直流电动机模型

1.1.2 直流电动机的基本结构

直流电动机由定子(固定不动)与转子(旋转)(因直流电动机转子部分产生感应电动势及电磁转矩,因而转子又称电枢)两大部分组成,定子与转子之间有空隙,称为气隙。定子部分包括机座、主磁极、换向极、端盖、电刷等装置,如图 1.2 所示;转子部分包括电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴、风扇等部件,如图 1.3 所示。

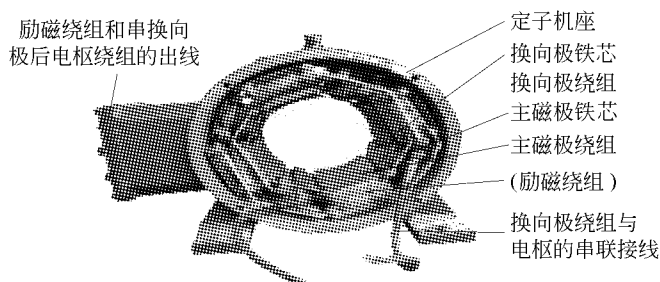


图 1.2 直流电动机定子

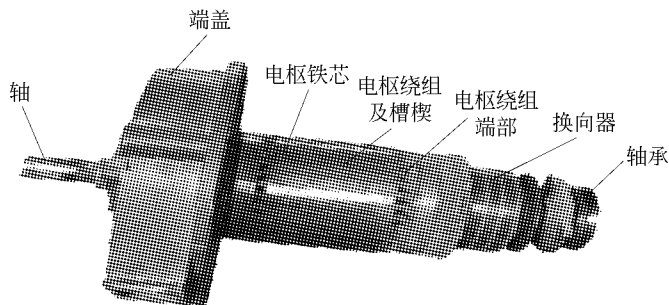


图 1.3 直流电动机转子

1. 定子部分

(1) 机座

机座可以固定主磁极、换向极、端盖等,是电动机磁路的一部分(称为磁轭)。机座一般用铸钢或厚钢板焊接而成,具有良好的导磁性能和机械强度。

(2) 主磁极

主磁极由主磁极铁芯和主磁极绕组(励磁绕组)构成,如图 1.4 所示。主磁极铁芯一般由 0.5~1.0mm 厚的低碳钢板冲片叠压而成,包括极身和极靴两部分。极靴做成圆弧形,使磁极下气隙磁通较均匀。极身上面套有励磁绕组,整个磁极用螺钉固定在机座上。当励磁绕组中通入直流电流时主磁极产生气隙磁场。一般用“p”来表示主磁极的磁极对数。

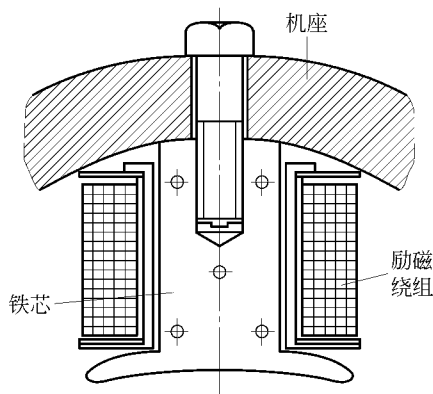


图 1.4 直流电动机的电枢绕组

(3) 换向极

换向极由铁芯和套在铁芯上的绕组构成,如图 1.5 所示。换向极铁芯一般用整块钢制成,如换向要求较高,则用 0.5~1.0mm 厚的钢板叠压而成,其绕组中流过的是电枢电流。换向极装在相邻两主极之间,用螺钉固定在机座上。换向极的作用是改善直流电动机的换向。一般电机容量超过 1kW 时均应安装换向极。

(4) 电刷装置

电刷装置由电刷、刷握、刷杆、刷杆架、弹簧、铜辫等构成,如图 1.6 所示。电刷组的个数,一般等于主磁极的个数。电刷装置把直流电动机外部电源与电枢相连,同时配合换向器可以把转动的电枢绕组电路和外电路连接并把电枢绕组中的交流量转变成电刷端的直流量。

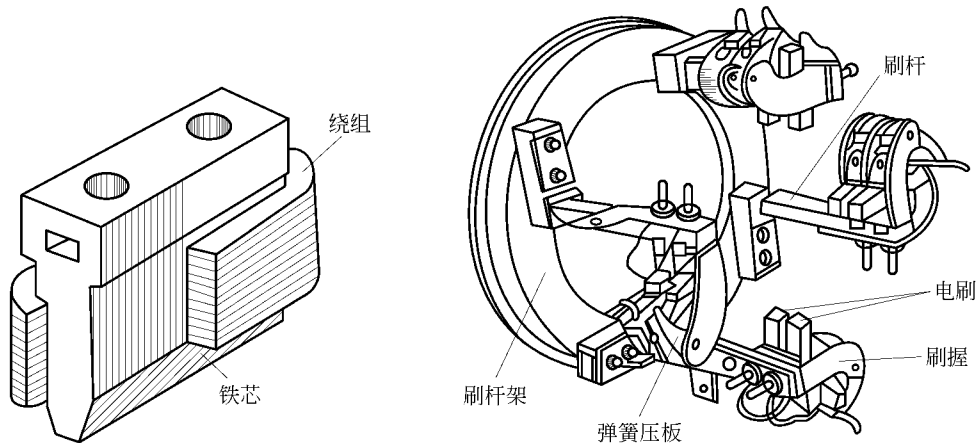


图 1.5 直流电动机的换向绕组

图 1.6 直流电动机的电刷装置

2. 转子部分

(1) 电枢铁芯

电枢铁芯是电机磁路的一部分,其外圆周开槽,用来嵌放电枢绕组。电枢铁芯一般用 0.5mm 厚、两边涂有绝缘漆的硅钢片冲片叠压而成,如图 1.7(a)所示。电枢铁芯固定在转轴或转子支架上。铁芯较长时,为加强冷却,可把电枢铁芯沿轴向分成数段,段与段之

间留有通风孔。

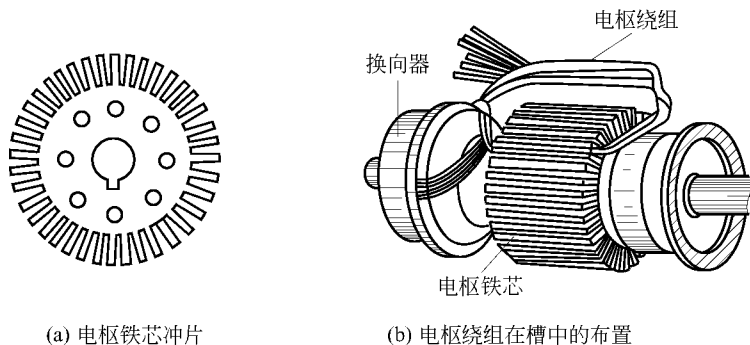


图 1.7 直流电动机的转子

(2) 电枢绕组

电枢绕组是直流电动机的主要组成部分,通常用绝缘导线绕成的线圈(或称元件)按一定规律连接而成,如图 1.7(b)所示。线圈用带有绝缘的圆形或矩形截面的导线绕成,嵌放在电枢铁芯周围的槽内。其作用是产生感应电动势、通过电枢电流,它是电机实现机电能量转换的关键。

(3) 换向器

换向器又称整流子,是由多个紧压在一起的梯形铜片构成的一个圆筒,片与片之间用一层薄云母绝缘,电枢绕组各元件的始端和末端与换向片按一定规律连接,如图 1.8 所示。换向器与转轴固定在一起。换向器作用是把外界供给的直流电流转变为绕组中的交变电流以使电动机旋转。换向器是直流电动机的关键部件,也是最薄弱部分。

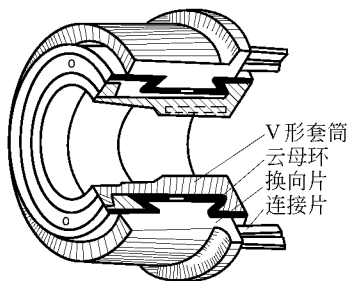


图 1.8 直流电动机的换向器

3. 气隙

气隙是电机磁路的重要部分。它的路径虽然很短,但由于气隙磁阻远大于铁芯磁阻(一般小型电机的气隙为 $0.7 \sim 5\text{mm}$,大型电机为 $5 \sim 10\text{mm}$),对电机性能有很大的影响。尤其在拆装时应予以重视。

1.1.3 直流电动机按励磁方式分类

本章介绍的直流电动机结构属于电磁式直流电动机,因为电枢绕组是通过电刷与换向器之间的滑动接触与外部电源连接的,所以又被称为“有刷直流电机”。

根据不同的使用要求,电磁式直流电动机的主磁极绕组与电枢绕组连接方式的不同,又可分为他励、并励、串励、复励直流电动机,分别简介如下。

(1) 他励直流电动机

电枢绕组和励磁绕组分别由两个独立的直流电源供电,互相独立,如图 1.9(a)所示。

(2) 并励直流电动机

电枢绕组和励磁绕组并联,由同一电源供电,励磁电压等于电枢电压,电源电流等于

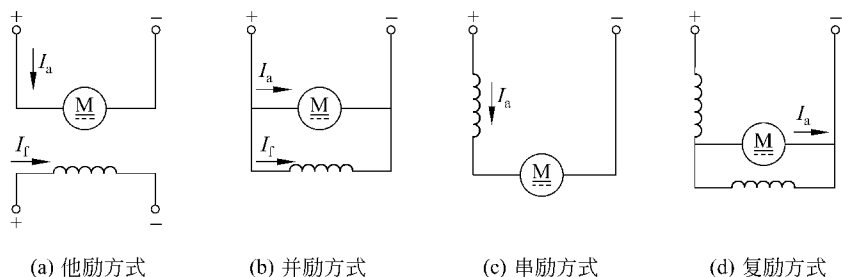


图 1.9 直流电动机的励磁方式

电枢电流和励磁电流之和,如图 1.9(b)所示。

(3) 串励直流电动机

电枢绕组和励磁绕组进行串联,电枢电流等于励磁电流,如图 1.9(c)所示。

(4) 复励直流电动机

电机的励磁绕组分为两部分:并励绕组匝数多而线径细,与电枢绕组并联;串励绕组匝数少,而线径粗,与电枢绕组串联,如图 1.9(d)所示。

1.2 直流电动机的磁场及电枢反应

直流电动机的磁场是由主磁极产生的励磁磁场和电枢绕组电流产生的电枢磁场合成的一个合成磁场,它对直流电动机产生的电动势和电磁转矩都有直接的影响,这种因电枢电流而产生的磁通势对主磁动势分布的影响称为电枢反应。而且直流电动机的运行特性在很大程度上也取决于磁场特性。因此,研究直流电动机的磁场是十分必要的。

1. 直流电动机的空载磁场

直流电动机空载(发电机与外电路断开,没有电流输出;电动机轴上不带机械负载)运行时,其电枢电流等于零或近似等于零。因而空载磁场可以认为仅仅是励磁电流通过励磁绕组产生的励磁磁动势所建立的。图 1.10 是一台四极直流电动机空载时的磁场示意图。当励磁绕组通过 I_f 时,每极的励磁磁动势为

$$F_f = I_f N_f \quad (1-1)$$

式中, N_f 是一个磁极上励磁绕组的串联匝数,励磁磁动势的单位名称为安[培](单位符号为 A),习称“安匝”。

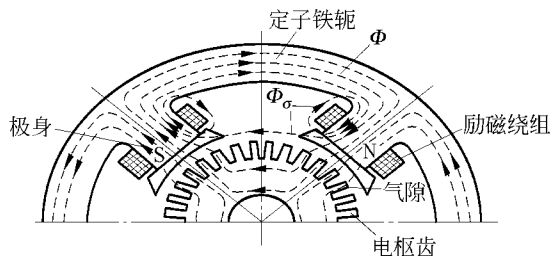


图 1.10 直流电动机空载时磁场分布

图 1.10 所示为四极电机空载时磁场分布,当励磁绕组通入直流电流后,主磁极产生磁场,以 N,S 极间隔均匀地分布在定子内圆周上,此时只有励磁磁动势单独建立的空载磁场。由于每对磁极下的磁通所经过的路径不同,根据它们的作用可以分为两类,其中占绝大部分的磁通是从主磁极的 N 极出来经过气隙进入电枢的齿槽、电枢的磁轭,然后到达电枢铁芯另一边的齿槽,再穿过气隙,进入主磁极的 S 极,通过定子磁轭回到 N 极,形成闭合磁回路。这部分磁通同时交链励磁绕组和电枢绕组,是直流电动机进行电磁感应和能量转换所必需的,称为主磁通 Φ 。此外,还有一小部分磁通从 N 极出来后并不进入电枢,而是经过气隙直接进入相邻的磁极或磁轭,它对电机的能量转换工作不起作用;相反,使电机的损耗加大,效率降低,增大了磁路的饱和程度,这部分磁通称为漏磁通 Φ_σ ,一般 $\Phi_\sigma = (15\% \sim 20\%) \Phi$ 。

图 1.11(a)所示为主磁场在电机中的分布情况。按照图中所示的励磁电流方向,应用右手螺旋定则,便可确定主极磁场的方向。在电枢表面上磁感应强度为零的地方是物理中性线 $m-m$,它与磁极的几何中性线 $n-n$ 重合。

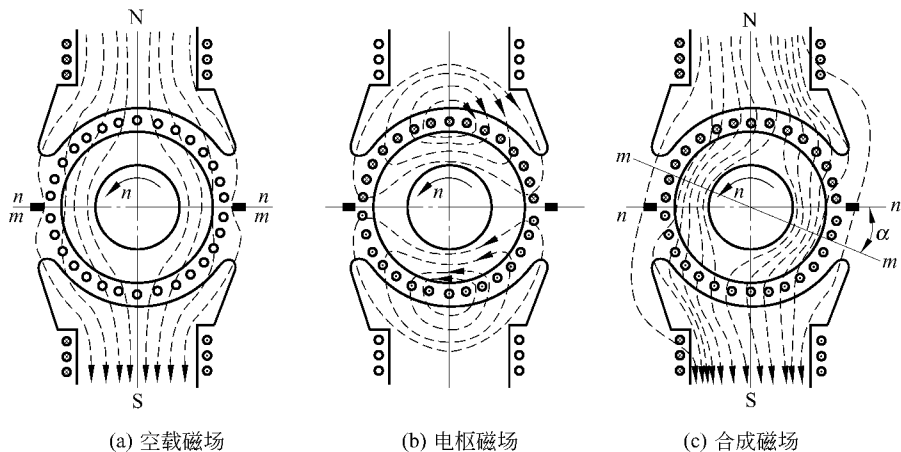


图 1.11 直流电动机气隙磁场分布示意图

2. 直流电动机的电枢磁场

直流电动机在带负载运行时,电枢绕组中有电流通过产生电枢磁动势。电枢磁场与主磁极磁场共同在气隙里建立合成磁场。

图 1.11(b)所示是直流电动机的电枢磁场,它的方向由电枢电流确定。由图可以看出,不论电枢如何转动,电枢电流的方向总是以电刷为界限来划分的。在电刷两边,N 极面下的导体和 S 极面下的导体电流方向始终相反,只要电刷固定不动,电枢两边的电流方向就不变,电枢磁场的方向不变,即电枢磁场是静止不动的。根据图上的电流方向用左手定则可判定该台电动机旋转方向为逆时针。

3. 电枢反应

所谓电枢反应是指电枢磁场对主磁场的影响,电枢反应对电机的运行性能有很大的

影响。如图 1.11(c)所示为主极磁场和电枢磁场合在一起而产生的合成磁场。与图 1.11(a)比较可见由于带负载后出现的电枢磁场,对主磁极磁场的分布有明显的影响。在磁场饱和和电枢反应对磁场的影响如下。

① 电枢反应使磁极下的磁力线扭斜,磁通密度分布不均匀,合成磁场发生畸变。磁场畸变的结果,使原来的几何中性线 $n-n$ 处的磁场不等于零,磁场为零的位置,即物理中性线 $m-m$ 逆旋转方向移动 α 角度,物理中性线与几何中性线不再重合。

② 电枢反应使主磁场削弱,电枢磁场使每一个磁极下的磁动势发生变化,如 N 极下的左半部分主极磁动势被削弱,右半部分的主极磁动势被增强。每极下的合成磁通量仍应与空载时的主磁通 Φ 相同。但在实际工作时,电机的磁路总是处在比较饱和的非线性区域,因此增强的磁通量小于减少的磁通量,故负载时每极合成磁通比空载时每极主磁通 Φ 小,称此为电枢反应的去磁作用。因此,负载运行时的感应电动势略小于空载时的感应电动势。

1.3 直流电动机的电枢绕组简介

1.3.1 直流电动机的电枢绕组简介

电枢绕组是直流电动机的一个重要部件。其切割主磁场从而产生感应电动势、感应电流,最终产生电磁力,电机中能量的变换就是通过电枢绕组而实现的。电枢绕组的结构对电机基本参数和性能都有影响,因此对电枢绕组提出了一定的要求,这就是在允许通过规定的电流和产生足够的电动势的前提下,线圈要充分利用,尽可能地节省有色金属材料和绝缘材料,并且要结构简单、运行安全可靠。

电枢绕组由结构、形状相同的线圈组成,线圈有单匝、多匝之分,分别如图 1.12(a)和图 1.12(b)所示。由于直流电动机的容量和电压等级的不同,电枢绕组的形式有多种,常用的有叠绕组、波绕组、叠绕组和波绕组混合组成的蛙形绕组等。本节只介绍叠绕组的结构形式。

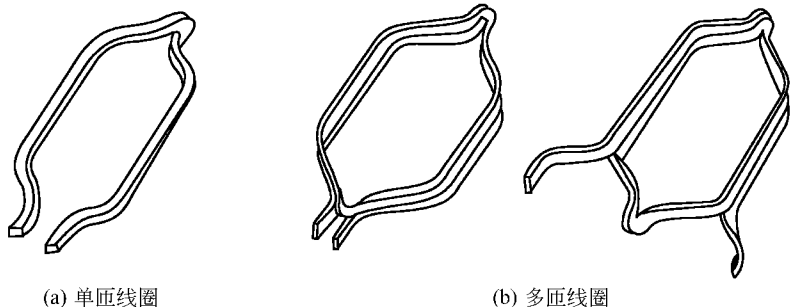


图 1.12 电枢绕组元件

组成电枢绕组的基本单元称为“元件”,一个元件由两条元件边和端接线组成,元件可以是一匝或多匝。元件边置于转子铁芯槽内,它与定子绕组产生的磁场形成相对的切割

而产生感应电动势,故称为“有效边”。为了使元件的端接部分平整排列,每个槽中的元件分为上、下两层叠放;某元件的一边在槽的上层,则另一边在槽的下层,所以直流电动机电枢绕组均是双层绕组,如图 1.13 所示。

每一个元件的上层边(首端)和另一元件的下层边(末端)按一定的规律排列连接到一片换向片上,所有元件依次串联,最后使整个电枢绕组通过换向片连成一个闭合回路,这是直流电动机电枢绕组的构成原则。因为每一个元件有两个元件边,而每一个换向片连接的是一个元件的上层边和另一元件的下层边,每一个槽内包含元件的上层边和下层边,故绕组元件数 S ,换向片数 K 应相等,即

$$S = K$$

1.3.2 单叠绕组并联支路图

单叠绕组的特点是每个元件的两个出线端连接在相邻的两个换向片上,如图 1.14 所示。元件两边分别接在换向片 1、2 上。为了正确地把各元件安放入电枢槽内,并且和相应的换向片按一定规律连接起来,就必须先了解绕组和换向器的基本术语。

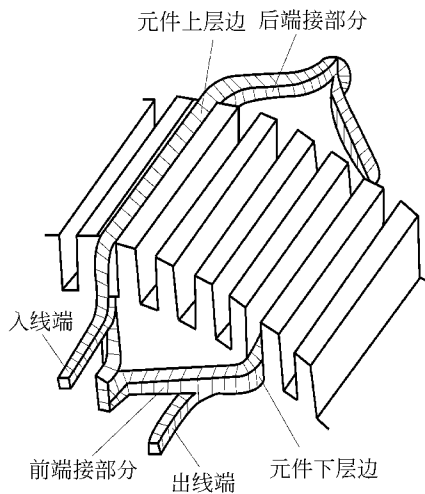


图 1.13 绕组元件在槽中的位置

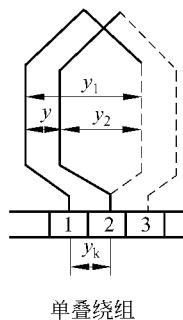


图 1.14 单叠绕组的展开图

1. 绕组节距

(1) 极距 τ

极距是一个磁极在电枢表面的空间距离,用 D 表示电枢直径, p 表示磁极对数,则

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad (1-2)$$

通常又用一个磁极在电枢表面占多少个槽来计算极距,即

$$\tau = \frac{Z_i}{2p} \quad (1-3)$$

式中, Z_i 为电枢槽数。

(2) 第一节距 y_1

第一节距 y_1 是指一个线圈两有效边之间在电枢表面上的跨距,以槽数表示,如图 1.14 所示。由于线圈边要放入槽内,所以 y_1 应是整数。而为了让绕组能感应出最大的电动势,应使 y_1 接近或等于极距 τ ,即

$$y_1 = \frac{Z_i}{2p} \mp \epsilon \quad (1-4)$$

式中, ϵ 为正分数,是将 y_1 补成整数的一个正分数。若 $\epsilon=0$,则 $y_1=\tau$,称为整距绕组。若取正号,则 $y_1>\tau$,称为长距绕组;若取负号,则 $y_1<\tau$,称为短距绕组。为了节省铜线及方便工艺,一般多采用短距或整距绕组。

(3) 第二节距 y_2

第二节距 y_2 是指相串联的两个相邻线圈中,第一个线圈的下层边与相邻的第二个线圈的上层边之间的距离, y_2 用槽数表示,如图 1.14 所示。

(4) 换向节距 y_k

换向节距 y_k 是线圈两端所连接的换向片之间的距离,用该线圈跨过的换向片数来表示,如图 1.14 所示。

(5) 合成节距 y

合成节距 y 是指相串联的两个相邻线圈对应的有效边之间的距离,用槽数来表示,如图 1.14 所示。表示每串联一个元件后,绕组在电枢表面前进或后退多少个虚槽。它是表示不同绕组形式的一个重要标志。对单叠绕组, $y=\pm 1$,表示每连接一个元件,在电枢表面就要移过一个槽, $y=+1$,表示向右移过一个槽,称右行绕组。 $y=-1$,表示向左移过一个槽,称左行绕组。左行绕组由于元件出线端交叉,用导线较多,一般不用。

以槽数表示的合成节距和以换向片数表示的换向节距在数值上是相等的,即 $y=y_k$,对于单叠绕组 $y=y_k=1$ 。

2. 单叠绕组的展开图

绕组的连接常用展开图来表示。绕组展开图是假设将电枢从某齿中间沿轴剖开后展成一个平面的绕组连接图。展开图是绕组嵌放的一个重要依据。下面以一个单叠绕组为例说明绕组的嵌放、连接方法。

设 $2p=4$, $S=K=Z=16$,单叠右行绕组。

(1) 计算极距和节距

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{16}{2 \times 2} = 4 \quad (1-5)$$

采用整距绕组,因为是单叠右行,故 $y=y_k=1$,所以

$$y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3 \quad (1-6)$$

(2) 绘制单叠绕组的展开图

单叠绕组展开图如图 1.15 所示。作图步骤如下:

先画 16 个槽和 16 个换向片,为了作图方便,令换向片宽度等于槽与槽之间的距离并将元件、槽和换向片按顺序编号。编号时要把元件号码、元件上层边所在槽的号码以及与元件上层边相连接的换向片号码编号一致,即 1 号元件的上层边放在 1 号槽内并与 1 号

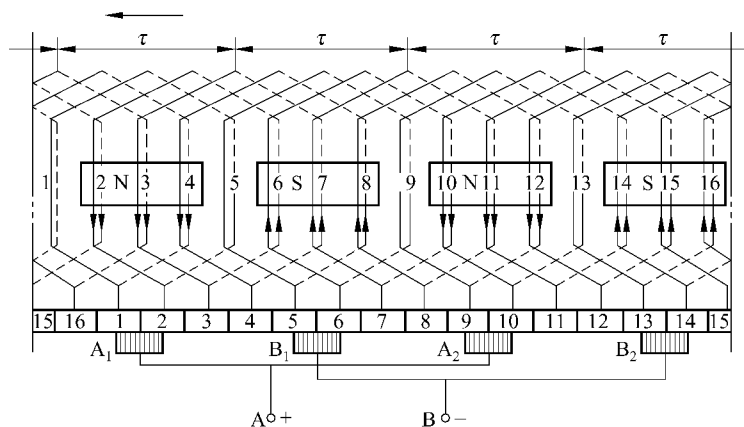


图 1.15 单叠绕组展开图

换向片相连接。这样当1号元件的上层边放在1号槽内(上层边用实线表示)并与1号换向片相连后,因为 $y_1=4$,则1号元件的下层边应放在第5号槽($1+y_1=5$)的下层,下层边用虚线表示,编号为5';因 $y=y_k=1$,所以1号元件的末端应连接在2号换向片上($1+y_k=2$)。一般应使元件左右对称,这样1号换向片与2号换向片的分界线正好与元件的中心线相重合。然后将2号元件的上层边放入2号槽的上层($1+y=2$),下层边放在6号槽的下层($2+y_1=6$),2号元件的上层边连在2号换向片上,下层边连在3号换向片上。以此类推,最后第16号元件的下层边与1号换向片相连,整个绕组形成一个闭合回路,绕组连接完毕。绕组元件的连接次序如图1.16所示。

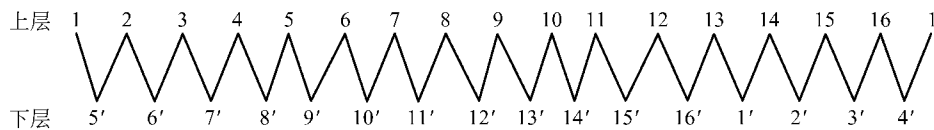


图 1.16 单叠绕组元件的连接次序

单叠绕组的特点是每个元件的两个出线端连接在相邻的两个换向片上,按一定规则把各元件安放入电枢槽内,并且和相应的换向片按一定规律连接起来。

从图1.17可知,把同一磁极下相邻元件依次串联起来,在每一磁极下电动势方向相同的元件组成一条支路,即每对应一个磁极就有一条支路。直流电动机的磁极总是成对出现的,若用 a 表示并联支路对数,则对于叠绕组直流电动机 $a=p$ 。

单叠绕组有以下特点:

- ① 同一主磁极下的元件串联在一起组成一个支路,即有几个主磁极就有几条支路。
- ② 电刷数等于主磁极数,电刷位置应使支路感应电动势最大,电刷间电动势等于并联支路电动势。

③ 电枢电流等于各并联支路电流之和。

因此单叠绕组适合用于低电压、大电流的直流电动机。

而对于单波绕组(本书不具体介绍,可参看参考文献)直流电动机 $a=1$,每个支路里

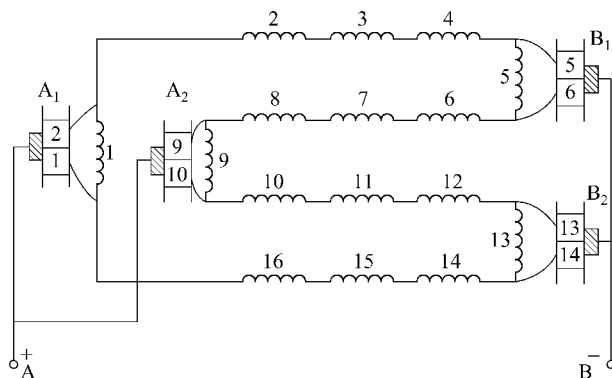


图 1.17 单叠绕组的并联支路图

含的元件数较多,支路合成感应电动势较高;并联支路数少,在支路电流与单叠绕组支路电流相同的情况下,单波绕组能允许通过的总电枢电流较小,所以单波绕组适用于较高电压、较小电枢电流的直流电动机。

1.4 直流电动机换向及改善换向条件的方法

由电机绕组连接分析可知,直流电动机的电枢绕组是一闭合绕组,电刷把这一闭合电路分成几个支路,每个支路的元件数相等。一个电刷两边所连接的两条支路中电流方向相反,电枢旋转时,绕组元件从一个支路经电刷,进入另一个支路时,电流方向改变。绕组元件中电流改变方向的过程称为换向。换向是直流电动机中十分重要的问题,换向会使电刷和换向器之间产生火花,严重时烧坏换向器与电刷,使电机不能正常工作和寿命缩短。我国对电机换向时产生的火花等级与允许的运行状态有相应的规定。

1. 直流电动机的换向过程

直流电动机旋转时,电枢绕组元件的有效边越过磁极中性线,从一个磁极下进入另一个极性相反的磁极下,电枢绕组元件从一条支路经过电刷进入另一条支路,该元件中的电流方向发生改变称为换向。元件中的电流从 i 变为 $-i$ 的过程称为换向过程,如图 1.18

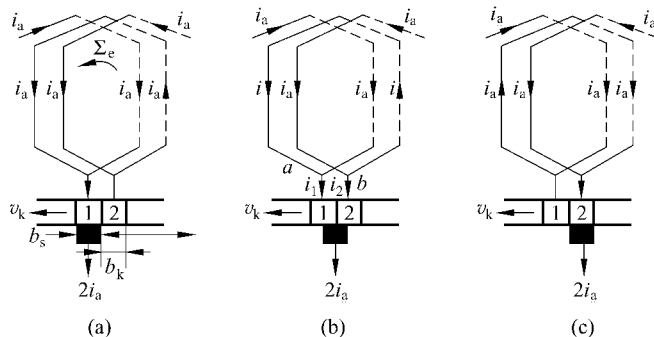


图 1.18 电流换向过程

所示,该过程所经历的时间称为换向周期 T ,通常 T 只有 $\frac{5}{10^4} \sim \frac{2}{10^3} \text{s}$ 。

在一般情况下,如果电刷和换向器之间保持接触良好,电刷的压力适当,同时,换向元件中也没有很大的附加电动势,那么电刷下基本上不会发生火花,这种情况称为换向良好。

2. 换向火花的影响和等级

直流电动机在运行时,在电刷与换向器表面会出现火花,火花通常是出现在后刷边(换向器离开电刷的一边)。若火花很小,亮度很弱,呈蓝色,对电机正常运转没有什么影响;若火花范围较大,比较明亮,呈白色或红色,对电机便有危害,大范围的强烈的红色火花,危害更大。火花会烧伤电刷,使其接触表面粗糙而造成凹坑,从而使接触表面积减少,增大电刷电流密度,加大火花;火花还会烧伤换向器,使其表面变黑而产生伤痕;此外,火花会产生电磁波,对附近电信接收及通信电路产生干扰。

对于一般的电机,在额定负载下运行时,火花不应大于 $1 \frac{1}{2}$ 级;2 级火花仅允许电机在过载、启动或反转瞬间出现,不允许常存在;3 级火花一般不允许出现。

为了说明火花大小的程度,我国电机技术标准 GB 755—1981 中规定了火花的等级,如表 1-1 所示。

表 1-1 火花等级(GB 755—1981)

火花等级	电刷下火花的程度	换向器及电刷的状态
1	无火花(黑暗换向)	换向器上没有黑痕及电刷上没有灼痕
$1 \frac{1}{4}$	电刷边缘仅有小部分($1/5 \sim 1/4$ 刷边长)有断续的几点状火花	
$1 \frac{1}{2}$	电刷边缘大部分(大于 $1/2$ 刷边长)有连续的较稀的颗粒状火花	换向器上有黑痕,但不发展,用汽油即能擦去,同时在电刷上有轻微灼痕
2	电刷边缘大部分或全部有连续的较密的颗粒状火花,开始有连续的舌状火花	换向器上有黑痕,用汽油不能擦除,同时电刷上有灼痕。如短时出现这一级火花,换向器上不出现灼痕,电刷不烧焦或损坏
3	电刷整个边缘有强烈的舌状火花,伴有爆裂声音	换向器上黑痕较严重,用汽油不能擦除,同时电刷上有灼痕。如在这一级火花等级下短时运行,则换向器上将有灼痕,同时电刷将被烧焦或损坏

3. 换向火花产生的原因

引起换向不良,在电刷下产生较大火花的原因很多,主要有电磁、机械和化学等方面的原因。

(1) 电磁方面

在换向过程中,换向元件中的电流从 i 变到 $-i$,将产生一个自感电动势来阻碍电流的变化;如果几个元件同时换向,还会产生互感电动势来阻碍电流的变化。其次,由于电枢反应,使处于几何中性线上的换向元件处磁场不再为零,便产生一个旋转电动势,也是阻碍电流变化的。以上电动势相叠加,就在换向元件中产生附加电流,从而产生现换向

火花。

(2) 机械方面

有换向器偏心,换向器表面换向片或云母片凸出,换向器表面污染,电刷压力不合适使电刷在刷握中太松而发生跳动或太紧被卡住,电刷位置安装不正确、电刷接触面研磨不光滑,换向极气隙不均匀,电机装配不良或动平衡不好运动时引起振动等。

(3) 化学方面

在换向器表面,通常会产生一层褐色光泽的氧化亚铜薄膜,这层薄膜增大了电刷和换向器之间的接触电阻,可以改善换向,并具有良好的润滑作用,减少电刷的磨损,在电机运行时,这层薄膜不断地被破坏和形成,但当电刷压力过大,或在高空使用缺氧或有水蒸气时,氧化亚铜薄膜被破坏得较快而形成得较慢,这就要发生火花,电刷将很快磨损。因此,必须控制电刷压力,一般应为 $15 \sim 25 \text{ kPa}$,对高空使用的电机要采用高空用电刷。

电动机在振动较大或工作在尘埃、烟雾、化学气体较多的地方,和电机运行时过载或负载剧变等情况,也会造成换向不良,发生火花。

4. 改善换向的方法

(1) 装置换向极

直流电动机一般装置换向极,利用换向极在换向元件中产生的换向极电动势来抵消换向元件中的电抗电动势和电枢反应电动势。换向极装置在相邻的两个主磁极之间,对发电机而言,沿电机转向为 $N' - N - S' - S$;对电动机而言,沿电机转向为 $N - N' - S - S'$ 。其中 N' 、 S' 为换向极, N 、 S 为主磁极。同时,换向极绕组应与电枢绕组串联,使换向极磁场的强度能随负载(电枢电流)正比变化,且换向极磁路应不饱和。

(2) 选择适当电刷

要求电刷与换向器表面的接触电阻应尽量大些,同时电刷的耐磨性要好。一般采用电化石墨电刷(碳—石墨电刷);低铜大电流电机采用黄铜石墨电刷或青铜石墨电刷;对换向特别困难的电机可采用分裂式电刷。

顺着磁场偏转的方向移动电刷位置来改善换向火花,这种方法很简单,但由于电抗电动势随负载变化,所以实际上达不到目的,现在已很少使用。

(3) 装配补偿绕组

除了上述电磁性换向火花外,直流电动机有时还会因为某些换向片间电压过高而产生电位差火花,在不利的情况下,电磁性火花和电位差火花连成一片,在换向器表面形成环形火花,将正、负电刷连通,这种现象称为“环火”。环火会造成换向器和电枢绕组的损坏。

要消除环火,必须消除电位差火花,通常采用补偿绕组的方法来消除。补偿绕组嵌放在主磁极极靴上专门冲出的槽内或励磁绕组外面,该绕组与电枢绕组串联,产生的磁场方向与电枢反应的磁通方向相反,保证在任何负载电流下都可以抵消电枢反应引起的磁通畸变,降低了产生“环火”的可能。装配补偿绕组使电机结构复杂,成本增加。因此,只有在负载变化很大的大、中型直流电动机中使用。

另外,环火除了以上电气原因外,也可能由于如换向器外圆不圆、表面不干净等原因引起环火。

1.5 直流电动机的电枢电动势、电磁转矩和基本方程式

直流电动机运行时,其电枢中产生电磁转矩和感应电动势。电磁转矩为拖动转矩,通过电机轴带动负载,电枢感应电动势为反向电动势与电枢所外加电压相平衡。

1. 直流电动机的电枢电动势

电枢绕组中的感应电动势简称电枢电动势。电枢电动势是指直流电动机正负电刷之间的感应电动势,也就是每个支路里的感应电动势。

每条支路所含的元件数是相等的,而且每个支路里的元件都是分布在同极性磁场下的不同位置上。先求出一根导体在一个磁极下切割气隙磁通密度的平均感应电动势,然后乘上一个支路里总的导体数,就是电枢电动势。

一根导体中的感应电动势可通过电磁感应定律求得,其表达式为 $e = B_{av}lv$,如果电枢总导体数为 N ,并联支路数为 $2a$,则每条支路中的串联导体数为 $N/2a$,一条支路的总电动势(即电枢电动势)为

$$E_a = \frac{N}{2a} e_{av} = \frac{N}{2a} B_{av} lv = \frac{pN}{60a} \Phi n = C_e \Phi n \quad (1-7)$$

式中, B_{av} 是一个主磁极下的平均气隙磁通密度, B_{av} 与每极磁通 Φ 的关系为 $B_{av} = \frac{\Phi}{l\tau}$, v 是

线速度,可以表示为 $v = 2p\tau \frac{n}{60}$, $C_e = \frac{pN}{60a}$ 为电动势常数,仅与电机结构有关。

因此电枢电动势仅与气隙磁通和转速有关,改变转速和磁通均可以改变电枢电动势的大小。

2. 直流电动机的电磁转矩

直流电动机的电枢绕组中有电流通过,通电导体与气隙磁场相互作用就产生电磁力,从而产生电磁转矩。电磁转矩越大,驱动电动机电枢转动的能力就越大。因此,电磁转矩是一个重要的物理量。

设电枢电流为 I_a ,绕组每一支路流过的电流为 i_a ,则绕组中每一导体在磁场中受到的电磁力为 $f_{av} = B_{av} l i_a = B_{av} l \frac{I_a}{2a}$ 。

设电枢铁芯直径为 $D = \frac{2p\tau}{\pi}$,每根导体的电磁转矩为 $T_c = f_{av} \frac{D}{2}$,总的电磁转矩为

$$T_{em} = B_{av} l \frac{I_a}{2a} N \frac{D}{2} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = C_T \Phi I_a \quad (1-8)$$

式中, $C_T = \frac{pN}{2\pi a}$ 为转矩常数,仅与电机结构有关。从 C_T 与 C_e 的表达式可以看出 $C_T = 9.55 C_e$ 。

因此电磁转矩仅与电枢电流和气隙磁通成正比。

3. 直流电动机的电磁功率

直流电动机在不计损耗的情况下,从电源吸取的电功率为

$$P_{\text{em}} = E_a I_a = C_e \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi \frac{60}{2\pi} \Omega I_a = \frac{pN}{2\pi a} I_a \Omega = T_{\text{em}} \Omega \quad (1-9)$$

式中, Ω 是电动机的角速度。因此在不计损耗的条件下,直流电动机从电源吸收的电功率 $P_{\text{em}} = E_a I_a$ 完全转换成对负载作功的机械功率 $P_{\text{em}} = T_{\text{em}} \Omega$, 实现了直流电动机的能量转换, 所以 $P_{\text{em}} = E_a I_a = T_{\text{em}} \Omega$ 称为电磁功率。

4. 电动势平衡方程式

他励直流电动机在稳定运行时,加在电枢两端电压为 U , 电枢电流为 I_a , 电枢电动势为 E_a , 由电动机工作原理可知 E_a 是反电动势, 若以 U, E_a, I_a 的实际方向为正方向, 则可列出直流电动机的电动势平衡方程式

$$U = E_a + RI_a + 2\Delta U_b \quad (1-10)$$

式中, R 为电枢回路总电阻, $2\Delta U_b$ 为一对电刷的接触压降, 一般为 $0.6 \sim 1.2 \text{ V}$ 。

该平衡方程式表示了电源电压除一小部分被电枢电阻损耗外, 其余被电动机吸收转换为反电动势去带动电动机转动。

在一般的定性分析中, 常常把电刷接触压降归并到电枢回路压降中去, 也就是把电刷回路的压降折算到电枢回路的等效电阻上, 则电动势平衡方程可以简写为

$$U = E_a + I_a R \quad (1-11)$$

5. 转矩平衡方程式

他励电动机的电磁转矩 T_{em} 为拖动性质的转矩。当电动机以恒定的转速稳定运行时, 电磁转矩 T_{em} 与负载转矩 T_L 及空载转矩 T_0 相平衡, 即

$$T_{\text{em}} = T_L + T_0 \quad (1-12)$$

由此可见, 电动机轴上的电磁转矩一部分与负载转矩相平衡, 另一部分是空载损耗。

6. 功率平衡方程式

直流电动机工作时, 从电网吸取电功率 P_1 , 除去电枢回路的铜损耗 P_{Cu2} , 电刷接触损耗 P_{Cub} , 励磁回路铜耗 P_{Cu1} , 其余部分转变为电枢上的电磁功率 P_{em} 。电磁功率并不能全部用来输出, 它的一部分是运行时的机械损耗 P_{mec} 、铁损 P_{Fe} 和附加损耗 P_{ad} , 剩下的部分才是轴上对外输出的机械功率 P_2 , 即

$$P_1 = P_{\text{em}} + P_{\text{Cu2}} + P_{\text{Cub}} + P_{\text{Cu1}} \quad (1-13)$$

$$P_{\text{em}} = P_2 + P_{\text{mec}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{ad}} \quad (1-14)$$

综上所述, 直流电动机的功率平衡方程为

$$P_1 = P_{\text{Cu1}} + P_{\text{Cu2}} + P_{\text{Cub}} + P_2 + P_{\text{mec}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{ad}} = P_2 + \sum P \quad (1-15)$$

直流电动机的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p} \quad (1-16)$$

其功率流程如图 1.19 所示。

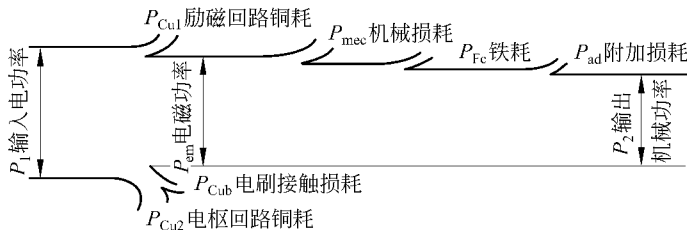


图 1.19 直流电动机的功率流程图

7. 电力拖动系统的运动方程

电力拖动系统的运动方程式描述了系统的运动状态,系统的运动状态取决于作用在原动机转轴上的各种转矩。根据刚体转动定律,单轴旋转系统的运动方程式为

$$T_{\text{em}} - T_{\text{L}} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-17)$$

电动机的电磁转矩 T_{em} 通常与转速 n 同方向,是驱动性质的转矩。生产机械的负载转矩 T_{L} 是制动性质的转矩。 J 是运动系统的转动惯量, Ω 是系统旋转的角速度, $\frac{d\Omega}{dt}$ 是系统的惯性转矩。

在实际工程计算中,经常用转速 n 代替角速度 Ω 来表示系统的转动速度,用飞轮惯量 GD^2 代替转动惯量 J 来表示系统的机械惯性。 Ω 与 n 、 J 与 GD^2 的关系为

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60}, \quad J = m\rho^2 = \frac{G}{g} \cdot \frac{D^2}{4g} \quad (1-18)$$

这样可以得到运动方程的实用形式

$$T_{\text{em}} - T_{\text{L}} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1-19)$$

飞轮惯量 GD^2 是反映物体旋转惯性的一个整体物理量。电动机的 GD^2 可以从产品的技术参数资料中查到。

通过系统的运动方程可知,系统的旋转运动分为三种状态:

- (1) 当 $T_{\text{em}} = T_{\text{L}}$, $\frac{dn}{dt} = 0$ 时,系统处于静止或恒转速运行状态,即处于稳态。
- (2) 当 $T_{\text{em}} > T_{\text{L}}$, $\frac{dn}{dt} > 0$ 时,系统处于加速运行状态,即处于动态过程。
- (3) 当 $T_{\text{em}} < T_{\text{L}}$, $\frac{dn}{dt} < 0$ 时,系统处于减速运行状态,也是处于动态过程。

可见,当 $\frac{dn}{dt} \neq 0$ 时,系统处于加速或减速的动态过程,所以常把 $T_{\text{em}} - T_{\text{L}}$ 或 $\frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$ 动负载转矩,而把 T_{L} 称为静负载转矩,运动方程式实质上就是动态的转矩平衡方程式。

1.6 直流电动机的工作特性和机械特性

1.6.1 直流电动机的工作特性

电动机的作用是将电能转换为机械能,因此人们最关心的是它的机械量,即转速和转矩。直流电动机的工作特性就是分析电枢电压为额定值 U_N ,励磁电流为 I_f ,电枢回路不串电阻时,电动机的转速 n 、电磁转矩 T_{em} 和效率 η 分别与输出功率 P_2 之间的关系。

由于直流电动机的工作特性与励磁方式有关,本节将分析他励直流电动机的工作特性。

1. 他励(并励)电动机的转速特性

转速特性指电枢电压为额定值 U_N ,励磁电流 I_f ,电枢回路不串电阻时,电动机的转速 n 与输出功率 P_2 之间的关系,即 $n=f(P_2)$ 。

由式 $E_a=C_e\Phi n$ 和式 $U_N=E_a+I_aR$ 可得到转速 n 的表达式

$$n = \frac{U_N - I_a R}{C_e \Phi} = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e \Phi} I_a = n_0 - \beta I_a \quad (1-20)$$

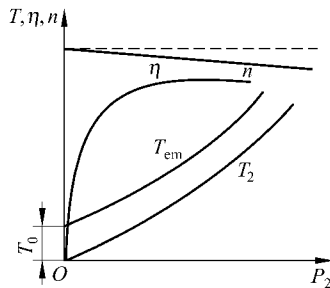
当输出功率增加时,电枢电流增加,电枢压降 $I_a R$ 增加,使转速下降,同时由于电枢反应的去磁作用,使转速上升。上述两者相互作用的结果,使转速的变化呈略微下降,如图 1.20 所示。

电动机转速随负载变化的稳定程度用电动机的额定转速调整率 $\Delta n\%$ 表示,即

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_N}{n_N} \quad (1-21)$$

式中, n_0 为电动机的理想空载转速, n_N 为额定负载转速。

他励直流电动机的转速调整率很小, $\Delta n\%$ 为 $3\% \sim 8\%$ 。



1.20 他励(并励)电动机的工作特性

2. 转矩特性

转矩特性是指电枢电压为额定值 U_N ,励磁电流 I_f ,电枢回路不串电阻时,电动机的电磁转矩与输出功率之间的关系,即 $T_2=f(P_2)$,即

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_2}{2\pi n/60} = 9.55 \frac{P_2}{n} \quad (1-22)$$

式中, P_2 的单位为 kW, n 的单位为 r/min。

由此可见当转速不变时, $T_2=f(P_2)$ 为一通过原点的直线。实际上,当输出功率 P_2 增加时转速 n 有所下降,因此 $T_2=f(P_2)$ 的关系曲线将稍微向上弯曲。因此只要在 $T_2=f(P_2)$ 的关系曲线上加上空载转矩 T_0 ,便可得到 $T_{em}=f(P_2)$ 的关系曲线,如图 1.20 所示。

3. 效率特性

由功率平衡方程可知,电动机的损耗主要是可变的铜损和固定的铁损。当负载较小

时,铁损不变,效率低;随着负载的增加,铁损不变,铜损增加,但总损耗的增加小于负载的增加,效率上升;负载继续增大,铜损是按负载电流的平方增大,使得效率开始下降,如图 1.20 所示。

1.6.2 直流电动机的机械特性

直流电动机的机械特性是指电动机的转速与转矩之间的关系,即 $n=f(T_{\text{em}})$ 。当直流电动机的负载转矩产生变化时,其输出的转矩也同时随之变化,仍能够稳定在另一转速下稳定工作。因此直流电动机转速和转矩之间的关系,体现了电动机与被拖动的负载之间能否配合得当,工作是否稳定。

根据公式 $U=E_a+I_aR$ 、 $E_a=C_e\Phi n$ 及 $T_{\text{em}}=C_T\Phi I_a$ 可以得出

$$\begin{aligned} n &= \frac{U-I_aR}{C_e\Phi} = \frac{U}{C_e\Phi} - \frac{R}{C_e\Phi} I_a = \frac{U}{C_e\Phi} - \frac{R_a}{C_eC_T\Phi^2} \cdot T_{\text{em}} \\ &= n_0 - \beta T_{\text{em}} = n_0 - \Delta n \end{aligned} \quad (1-23)$$

式中, $\beta = \frac{R_a}{C_eC_T\Phi^2}$ 为机械特性的斜率。

1. 固有机械特性

直流电动机的固有机械特性是指当直流电动机的工作电压和励磁磁通均为定值时,电枢回路没有附加电阻的机械特性。由于直流电动机的电枢电阻 R_a 较小,固有机械特性是一条微向下垂的直线,特性较硬。

2. 人为机械特性

人为机械特性是指人为地调节 U 、 R 、 Φ 等参数得到的机械特性。

(1) 串电阻时的人为机械特性

电枢串接电阻后的机械特性如图 1.21 所示。可以看出曲线下垂,串入的电阻越大,下垂越厉害,且体现出较软的机械特性。

(2) 降低电枢电压时的人为机械特性

如果改变直流电动机电枢电压时,得到如图 1.22 所示的人为机械特性,由式(1-21)可知,电枢电压减少时,直流电动机的理想空载转速下降,当机械特性的斜率基本不变,还体现出较硬的机械特性。

(3) 减弱励磁磁通时的人为机械特性

可以在励磁回路内串接电阻或降低励磁电压来减弱磁通,由于磁通 Φ 的减少,使得理想空载转速 n_0 和斜率 β 都增大,其特性曲线如图 1.23 所示。

由于电动机额定运行时,磁路已经开始饱和,即使再成倍增加励磁电流,磁通也不会有明显增加,何况由于励磁绕组发热条件的限制,励磁电流也不允许再大幅度地增加,因此,只能在额定值以下调节励磁电流,即只能减弱励磁磁通。

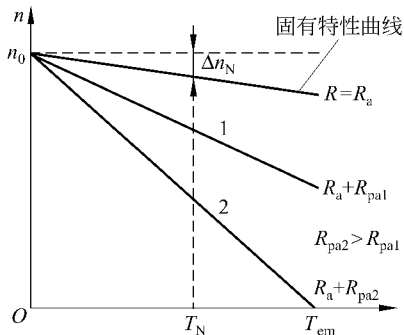


图 1.21 电枢回路串电阻时机械特性

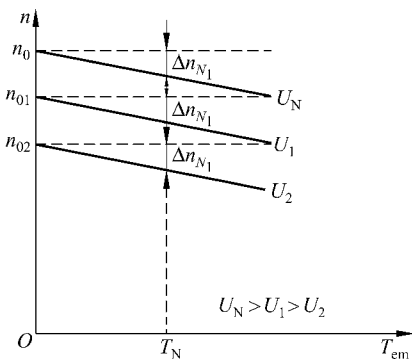


图 1.22 调压调速时的机械特性

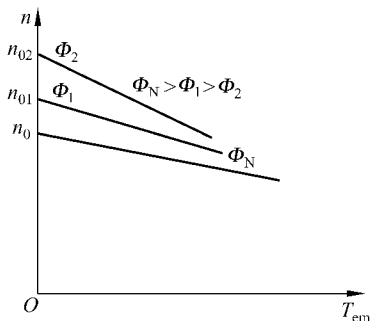


图 1.23 减少磁通时的机械特性

1.7 直流电动机的启动、调速、制动及正反转

1.7.1 直流电动机启动

直流电动机直接启动时,启动瞬间,由于 $n=0$, $E_a=0$,启动电流 $I_{st}=\frac{U}{R_a}$,电动机的电枢绕组 R_a 很小,电动机直接加额定电压启动, I_{st} 很大,可达 $(10\sim 20)I_N$ 。启动电流过大将引起强烈的换向火花,烧毁换向器;将产生过大的冲击转矩,损坏传动机构;将引起电网电压波动,影响供电的稳定性。因此,除了容量特别小的电动机以外,直流电动机不允许直接启动,必须设法限制启动电流。一般把启动电流限制在 $(1.5\sim 2.5)I_N$ 范围内。常用的启动方法有两种,一是电枢回路串电阻启动;二是降压启动。

电枢回路串电阻启动时,电枢回路内串入启动电阻以限制启动电流,在启动过程中将启动电阻逐步切除。这种启动方法设备简单、价格便宜,广泛用于各种中、小型直流电动机,但在启动电阻上能量损耗较大,适用于不经常启动的小型直流电动机。

降压启动一般采用晶闸管可控整流电源,用降低电源电压的方法来限制启动电流。降压启动时,启动电流将随电枢电压的降低程度成正比减少,但应注意,并励电动机在降压启动时不能降低励磁电压。电动机启动后,随着转速的上升,可相应提高电压,以获得所需的加速转矩。用这种启动方法时,启动过程能量消耗少,启动平滑,但需专用电源设备。多用于要求经常启动的直流电动机和中、大型直流电动机。

图 1.24(a)是表示他励电动机分二级启动时的电路图。当电动机已有磁场时,接通 KM1,此时 KM2 和 KM3 断开,电阻 R_1+R_2 串入电枢回路。设电压为 U ,则启动电流

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_a} \quad (1-24)$$

由电流 I_1 所产生的启动转矩 T_1 如图 1.24(b)所示。由于 $T_1 > T_L$,电动机开始启动,转速上升,转矩下降(见图 1.24(b)中 $a \rightarrow b$ 段),加速度逐步变小。为了得到较大的加速,到 b 点时,断电延时型时间继电器 KT1 先延时闭合,KM2 得电,把电阻 R_1 切除, b 点的电流 I_2 称为切换电流。电阻 R_1 切除后,电枢回路只有总电阻 R_2+R_a ,机械特性变成了直线

n_0dc 。由于转速不能突变,电势也保持不变,因而电流突增,转矩也按比例增加。选择恰当的电阻,使 c 点电流与 I_1 相等。电机由 c 点加速到 d 点,KT2 延时闭合,KM3 得电,把 R_2 切除,运行点由 d 过渡到固有特性上的 e 点,电动机电流又一次由 I_2 回升到 I_1 ,拖动系统继续加速到 g 点稳定运行,此时,转矩 $T=T_L$,启动过程到此结束。

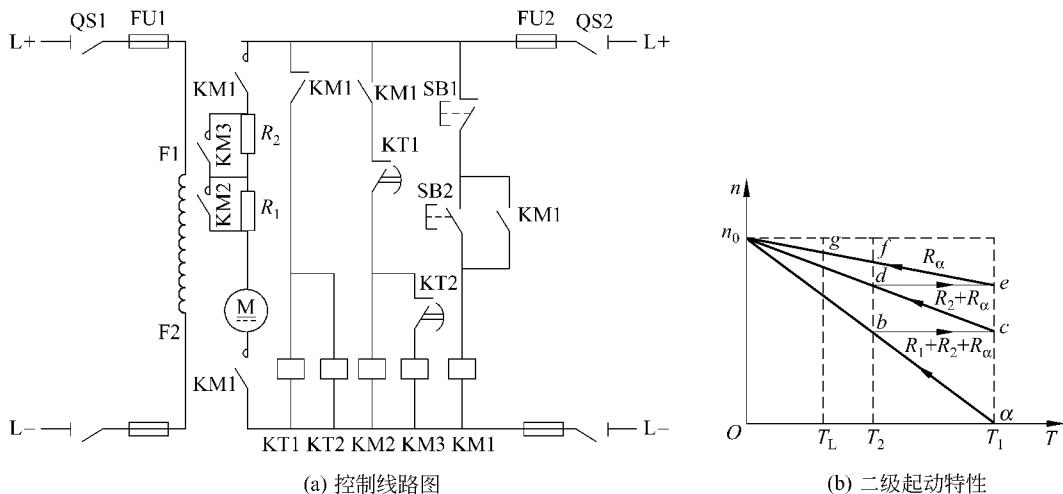


图 1.24 他励直流电动机二级启动

必须指出,分级启动时使每一级的 I_1 与 I_2 取得大小一致,可以使电机较均匀地加速,并能改善电动机的换向情况,缓和转矩对传动机构与工作机械的有害冲击。

1.7.2 直流电动机的调速

在电动机的负载不变的条件下,改变电动机的转速称为调速。调速可用机械方法、电气方法或机械电气配合的方法。这里只分析直流电动机的电气调速方法。

1. 调速指标

为了评价各种调速方法的优缺点,对调速方法提出了一定的技术经济指标,称为调速指标,一般有以下四个方面。

(1) 调速范围

调速范围是指电动机在额定负载下可能运行的最高转速 $n_{\max}$ 与最低转速 $n_{\min}$ 之比,通常用 D 表示,即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}$$

不同的生产机械对电动机的调速范围有不同的要求。要扩大调速范围,必须尽可能地提高电动机的最高转速和降低电动机的最低转速。电动机的最高转速受到电动机的机械强度、换向条件、电压等级等方面的限制,而最低转速则受到低速运行时转速的相对稳定性的限制。

(2) 静差率

静差率是指负载变化时,转速变化的程度,用 $\delta\%$ 来表示。即当电动机在某一机械特性上运行时,由理想空载增加到额定负载,电动机的转速降落 $\Delta n_N = n_0 - n_N$ 与理想空载