

# 第 1 章

---

## 绪 论

本章主要介绍电机的简单分类、电力拖动系统的组成和主要内容、课程的性质与特点,回顾与总结本课程必需的基本电磁量、定理、定律、铁磁材料的特性。一方面便于学生对课程有一个初步了解,另一方面为后续内容的学习打下基础。

### 1.1 电机的概念

在现代,电能是一种广泛应用的能源。与其他能源相比,电能有突出的优点。首先,电能的生产与转换比较经济,目前我国的公共电网就是由众多的火力发电厂与水力发电站并网运行组成的;其次,电能的传输与分配比较容易,尤为突出的是,它可以远距离输送,可把某地生产的电能输送到几千千米之外的地区去;再者,电能的使用与控制比较方便,且易于实现自动化。因此,在现代社会中,电能的应用已遍及各行各业。

在电能的生产、转换、传输、分配、使用与控制等方面,都必须通过能够进行能量(或信号)传递与变换的电磁机械装置,这些电磁机械装置被广义地称为电机。

通常所说的电机是指那些利用电磁感应原理设计制造而成的、用于实现能量(或信号)传递与变换的电磁机械的统称。按其功能来分类,电机可分为以下几种:

(1)发电机。发电机把机械能转变成电能。

(2)电动机。电动机把电能转变成机械能。

(3)变压器、变频器、变流机、移相器等是分别用于改变电压、频率、电流及相位的,即把一种类型的电能转变成另一种类型的电能。

(4)控制电机。控制电机是应用于各类自动控制系统中的控制元件。

值得指出的是,从基本工作原理来看,发电机与电动机只是电机的两种不同的运行方式,从能量转换的观点来看,二者是可逆的。

在上述各种电机中,有些是静止的,如变压器;有些是旋转的,如各种类型的发电机与电动机。按电流的类型及工作原理的某些差异,旋转电机又可分为直流电机、交流异步电机、交流同步电机及各种具有专门用途的控制电机等。

### 1.2 电机及电力拖动的发展概况

始于 19 世纪 60~70 年代的第二次工业技术革命,是以电力的广泛应用为显著特点

## ■ 电机与拖动基础

的,从此人类社会由蒸汽机时代步入了电气化时代。在法拉第电磁感应定律基础上,一系列电气发明相继出现。1866年,德国工程师西门子发明了发电机。1870年,比利时人格拉姆发明了电动机,电力开始成为取代蒸汽来拖动机器的新能源。随后,各种用电设备相继出现。1882年,法国学者德普勒发明了远距离送电的方法。同年,美国著名发明家爱迪生创建了美国第一个火力发电站,把输电线结成网络,从此电力作为一种新能源而被广泛应用。那时,电机刚刚在工业上初步应用,各种电机初步定型,电机设计理论和电机设计计算初步建立。

随着社会生产的发展和科技的进步,对电机也提出了更高的要求,如性能良好、运行可靠、单位容量的重量轻体积小等,而且随着自动控制系统的发展,在旋转电机的理论基础,又派生出多种精度高、响应快的控制电机,成为电机学科的一个独立分支。电机制造也向着大型化、巨型化方向发展。中小型电机正向多用途、多品种、高效节能方向发展。各种响应快速、起停快速的特种电机在各种复杂的计算机控制系统和无人工厂中实现了比人的手脚更复杂而精巧的运动。古老的电机学已经和电力电子学、计算机、控制论结合起来,发展成了一门新的学科。

在我国,电机制造业也发生了巨大的变化。我国的电机生产从1917年至今已有将近100年的历史,经过改革开放几十年的发展,特别是近10年的发展,有了长足的进步,令世人瞩目。目前已经形成比较完整的产业体系,电机产品的品种、规格、性能和产量满足了我国国民经济发展的需要,而且一些产品已经达到或接近世界先进水平。电机行业专家纷纷预测,中国将成为世界电机的生产制造基地。

近年来,我国已生产了不少大型直流电动机、异步电动机和同步电动机;在中小型电机和控制电机方面,亦自行设计和生产了不少新系列电机;对电机的新理论、新结构、新工艺、新材料、新运行方式和调试方法进行了许多研究和试验工作,取得不少成果。

与电机发展过程一样,电力拖动技术也有一个不断发展的过程。

电力拖动代替蒸汽或水力拖动之初,其方式是成组拖动,就是由一台电动机拖动一组生产机械,从电动机到各个生产机械的能量传递及各个生产机械之间的能量分配完全用机械的方法,靠天轴及机械传动系统来实现,车间里有大量的天轴、长皮带和皮带轮等。这种传动方式效率低下,灰尘多,劳动条件和卫生条件差,容易发生事故。另外,若电动机发生故障,则成组拖动的所有生产机械都将停车,生产将可能停滞。显然这是一种落后的电力拖动方式。

20世纪20年代以来,生产机械上广泛采用一种单电机拖动系统,即一台生产机械用一台单独的电动机拖动,简化了机械结构,且易于实现生产设备运转的全部自动化。但是,由于是一台电动机拖动具有多个工作机构的生产机械,需要负责能量传递的机械传动机构,因而从20世纪30年代起,广泛采用了多电动机拖动系统,即每个工作机构由单独的电动机拖动,这样可以大大简化生产机械的机械结构,提高了机械机构的可靠性。

随着生产的发展和科技水平的提高,对电力拖动系统提出了更高的要求,如要求提高加工精度与工作速度,要求快速启动、制动及反转,实现在大范围内调速及整个生产过

程自动化等。这些,都必须要有自动控制设备,以组成自动化的电力拖动系统。

最早的电力拖动控制系统是继电器-接触器自动控制系统,属于有触点断续控制系统。接着,出现了发电机-电动机组,使得直流电动机得到了广泛的应用,并在这个基础上发展成为采用电力电子器件组成的自动化直流电力拖动系统,且正向大容量方向发展。自动化元件已有成套标准控制单元,控制装置集成化、小型化、微型化,设备可靠性高,维护简便,许多设备都可做到自动运行,不需要监视和维护。

随着电力电子技术、计算机控制技术、微电子技术、信号检测与处理技术及控制理论的发展,电力拖动系统正朝着网络化、信息化、智能化的方向飞速发展。

### 1.3 电机与电力拖动在国民经济中的重要作用

电机与拖动基础是把电机学和电力拖动基础两门课程有机结合而成的一门课程。在国民经济和人们的日常生活中,电能是最重要的能源之一。与其他能源相比,电能除了具有转换经济、传输和分配容易、使用和控制方便等优点外,尤为可贵之处是使用电能不会产生有毒有害的物质,不会污染环境。在人们的环保意识越来越强的今天,作为一种干净、清洁的能源,电能可在工农业生产、交通运输等各行各业和人们的生活中得到越来越广泛的应用就不足为奇了。

发电厂发出的电能通过电网可以实现远距离传输,为了减少传输损耗,常用变压器将发电机发出的电压升高,实现高压传输。由于能高压远距离输电,我国的一些火力发电厂就建在煤矿附近,俗称“坑口电站”,就地将煤燃烧产生的热能转换为电能输往大城市;也正是采用了高压远距离输电技术,我国西部水力发电厂发出的电能才能传输到东南沿海一带,形成“西电东送”的格局。电能被输送到用电地区,要经过变压器降压,才能供用户使用。通过电力网和变压器的升压及降压作用,能够很方便地实现电能的传输和分配,可以看出,变压器是在国民经济中起着重要作用的变电设备。用户用电就是将电能转换为其他形式的能量。用户用电的一个重要方面就是利用电动机将电能转换为机械能,拖动生产机械工作。由于电动机的效率高,种类和规格多,具有各种良好的特性,电力拖动易于操作和控制,可以实现自动控制和远距离控制,因而电力拖动广泛应用于国民经济各领域。例如,各种机床、轧制生产线、电力机车、风机、水泵、电动工具乃至家用电器等。

为了能建立一个感性认识,对电机进行如下简单的分类:电机的分类从能量转换的角度、从旋转与否的角度、从电能的性质。在电力拖动自动控制系统中,大量应用控制电机。控制电机是一种在自动控制、自动调节、随动系统、远距离测量及计算装置中作为执行元件、检测元件的小型电机。在自动化专业与电气工程及自动化专业中,电机与拖动是一门十分重要的专业基础课或技术基础课,它在整个专业教学计划中起着承前启后的作用,是后续“自动控制原理”“电力拖动自动控制系统”“电力电子技术”等课程的重要基础,主要研究电机拖动系统的基本理论问题,分析研究直流电机、变压器、异步电动机和同步电动机的简单结构、原理、基本电磁关系和运行特性;初步联系生产实际,从生产机

## 电机与拖动基础

械工作的要求出发,重点介绍交直流拖动系统的动静态运行特性,为学习自动控制系统等后续专业课打下坚实基础。因此,电机与拖动课程既具有较强的基础性,又带有专业性。

### 1.4 电力拖动系统的组成

简单的电力拖动系统由电源、电动机、传动机构、负载和自动控制装置等部分组成。电源提供电动机和控制系统所需的电能;电动机完成电能向机械能的转换;传动机构用于传递动力,并实现运转方式和运转速度的转换,以满足不同负载的要求;自动控制装置则控制电动机拖动负载按照设定的工作方式运行,完成规定的生产任务。

- (1)从能量转换的角度分为电动机、发电机、变压器和控制电机。
- (2)从旋转与否的角度分为旋转电机和静止电机。
- (3)从电能的性质分为直流电机和异步电机。

电动机拖动生产机械的运转称为电力拖动(电气传动)。电力拖动系统一般由控制设备、电动机、传动机构、生产设备和电源五部分构成,如图 1-1 所示。

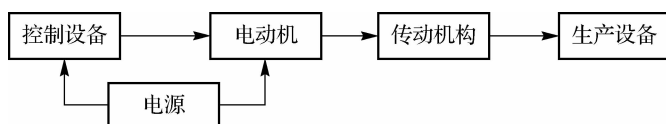


图 1-1 电力拖动系统的构成

### 1.5 电机理论常用基本电磁量和所遵循的基本电磁定律

由于电机是利用电磁感应和电磁力原理来进行能量传递和转换的,因而有必要先复习在先修课中讲过的几个基本电磁量和电磁定律。

#### 1.5.1 磁感应强度

描述磁场强弱及方向的物理量是磁感应强度  $B$ 。往往采用磁力线来形象地描绘磁场,磁力线可以看成是无头无尾的闭合曲线。磁感应强度  $B$  与产生它的电流之间的关系用毕奥-萨伐尔定律描述,磁力线方向与产生该磁场的电流的方向满足右手螺旋定则。

#### 1.5.2 右手螺旋定则

全电流与它产生的磁场两者的方向关系用右手螺旋定则来判定。判定通电直导线所产生磁场的方向时,用大拇指代表电流方向,其余四指所指的环绕方向则为磁力线方向,如图 1-2(a)所示。判定通电线圈产生磁场的方向时,用四指环绕方向代表线圈中的电流方向,则大拇指所指方向为线圈内部的磁场方向。图 1-2(c)是图 1-2(b)的一种示意图。

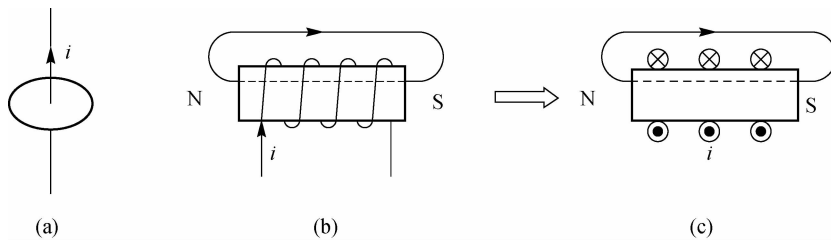


图 1-2 右手螺旋定则

### 1.5.3 全电流定律

全电流定律的内容为：在磁场中，磁场强度的切向量沿一个磁通回路的线积分等于该回路所包围的电流代数之和。磁场强度沿闭合回路的线积分，其结果与积分路径无关。因此，

$$\oint H dl = \sum i \quad (1-1)$$

式中， $H$  为该回路上各点切线方向的磁场强度分量； $i$  为导体中的电流，电流的正负号这样确定：凡导体电流方向与积分路径方向符合右手螺旋关系的，电流为正，反之为负。全电流定律是电机和变压器磁路计算的基础。

若磁路是由不同的材料或不同长度和截面积的数段组成的，如图 1-3 所示，则全电流定律可表示为

$$\sum Hl = H_\delta \delta + H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 + H_5 l_5 = NI = F \quad (1-2)$$

式中， $N$  为有效导体数； $H_i l_i$  为磁路各段的磁压降 ( $i=1, 2, 3, 4, 5$ )， $l_i$  为磁路工程计算的平均长度 ( $i=1, 2, 3, 4, 5$ )； $\delta$  为空气隙长度。

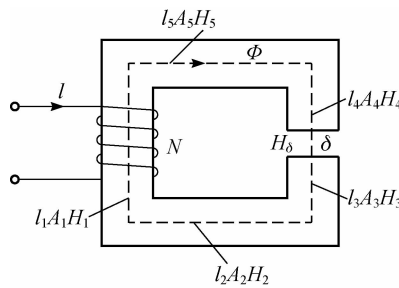


图 1-3 磁路

由物理学可知，磁场强度  $H$  与磁感应强度  $B$  分别为

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

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-4)$$

磁阻为

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (1-5)$$

一般情况下,铁心的磁导率比空气的磁导率要大得多,所以其磁阻很小。因此,电机中的气隙虽然很小,但磁阻很大,通常占磁路总磁阻的 70%~80%。

## 1.6 电机的制造材料

### 1.6.1 铁磁材料的磁化特性及磁导率

#### 1. 初始磁化曲线和磁滞回线

研究铁磁材料的磁化规律,一般是通过测量磁化场的磁场强度  $H$  与磁感应强度  $B$  之间的关系来进行的。铁磁材料的磁化过程非常复杂,一簇磁滞回线如图 1-4 所示。当铁磁材料从未磁化状态( $H=0$  且  $B=0$ )开始磁化时, $B$  随  $H$  的增加而非线性增加。当  $H$  增大到一定值  $H_m$  后, $B$  增加得十分缓慢或基本不再增加,这时磁化达到饱和状态,称为磁饱和。达到磁饱和时的  $H_m$  和  $B_m$  分别称为饱和磁场强度和饱和磁感应强度(对应图 1-4 中的  $Q$  点)。 $B-H$  曲线  $OabQ$  称为初始磁化曲线。当使  $H$  从  $Q$  点减小时, $B$  也随之减小,但不沿原曲线返回,而是沿另一曲线  $QRD$  下降。当  $H$  逐步减小至 0 时, $B$  不为 0,而是  $B_r$ ,说明铁磁材料中仍然保留一定的磁性,这种现象称为磁滞效应; $B_r$  称为剩余磁感应强度,简称剩磁。要消除剩磁,必须加一个反向的磁场,直到反向磁场强度  $H=-H_c$ , $B$  才恢复为 0, $H_c$  称为矫顽力。继续反向增加  $H$ ,曲线达到反向饱和( $Q'$  点),对应的饱和磁场强度为  $-H_m$ ,饱和磁感应强度为  $-B_m$ 。再正向增大  $H$ ,曲线回到起点  $Q$ 。从铁磁材料的磁化过程可知,当磁化场  $H$  按  $H_m-0--H_c--H_m-0-H_c-H_m$  依次变化时, $B$  所经历的相应变化依次为  $B_m-B_r-0--B_m--B_r-0-B_m$ ,这一过程形成的  $B-H$  闭合曲线称为磁滞回线。采用直流励磁电流产生磁化场对材料样品反复磁化测出的磁滞回线称为静态(直流)磁滞回线;采用交变励磁电流产生磁化场对材料样品反复磁化测出的磁滞回线称为动态(交流)磁滞回线。

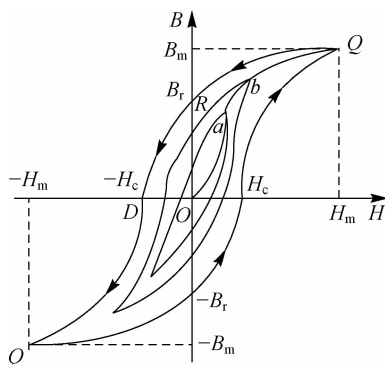


图 1-4 一簇磁滞回线

## 2. 磁滞损耗

当铁磁材料沿着磁滞回线经历磁化—去磁—反向磁化—反向去磁的循环过程时,由于磁滞效应,要消耗额外的能量,并以热量的形式耗散掉。这部分因磁滞效应而消耗的能量称为磁滞损耗,用  $BH$  表示。一个循环过程中单位体积磁性材料的磁滞损耗正比于磁滞回线所围的面积。在交流电路中磁滞损耗是十分有害的,必须尽量减小。要减小磁滞损耗就应选择磁滞回线狭长、包围面积小的铁磁材料。如图 1-5 所示,工程上把磁滞回线细而窄、矫顽力很小 [ $H_c$  为  $1 \text{ A/m}$  ]的铁磁材料称为软磁材料;把磁滞回线宽、矫顽力大 [ $H_c$  为  $10^4 \sim 10^6 \text{ A/m}$  ]的铁磁材料称为硬磁材料。软磁材料适合做继电器、变压器、镇流器、电动机和发电机的铁心;硬磁材料则适合制造许多电器设备(如电表、扬声器、电话机和录音机)中的永磁体。

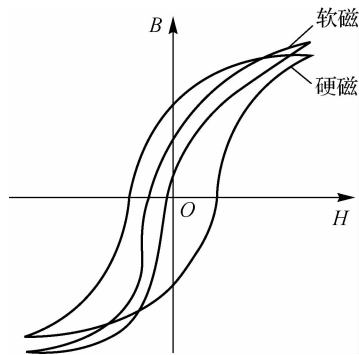


图 1-5 不同铁磁材料的磁滞回线

## 3. 基本磁化曲线和磁导率

未磁化的铁磁材料,在交变磁场作用下由弱到强依次进行磁化的过程中,可以测出面积由小到大的簇磁滞回线。这些磁滞回线顶点的连线称为铁磁材料的基本磁化曲线。

根据基本磁化曲线可以近似确定铁磁材料的磁导率  $\mu$ 。从基本磁化曲线上一点到原点  $O$  连线的斜率定义为该磁化状态下的磁导率( $\mu$ ),  $\mu = \frac{B}{H}$ 。由于磁化曲线不是线性的,当  $H$  由 0 开始增加时, $\mu$  也逐步增加,然后达到一个最大值。当  $H$  再增加时,由于磁感应强度达到饱和,

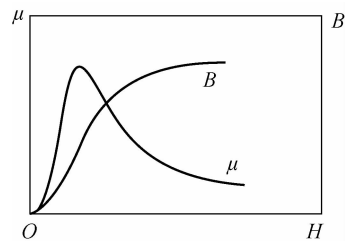


图 1-6 基本磁化曲线与  $\mu$ - $H$  曲线

$\mu$  开始急剧减小。 $\mu$  随  $H$  的变化曲线如图 1-6 所示。磁导率  $\mu$  非常高是铁磁材料的主要特性,也是铁磁材料用途广泛的主要原因之一。

### 1.6.2 磁路计算仿真

磁路计算是电机、变压器设计和分析中的基本计算内容,通过使用 MATLAB 软件

## 电机与拖动基础

编制 M 文件的方法可以进行磁路分析。

**仿真实例 1-1** 图 1-7 所示为电工钢片叠压而成的磁路,叠片净长与包含绝缘的总长度即铁心的叠压系数  $k_{Fe}=0.94$ 。各段铁心的截面积相同,均为  $A=0.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 。各段铁心的平均长度分别为  $l_1=0.08 \text{ m}$ ,  $l_2=0.1 \text{ m}$ ,  $l_3=0.034 \text{ m}$ ,  $l_4=0.04 \text{ m}$ ,  $l_5=0.1 \text{ m}$ ,气隙长度  $\delta=0.006 \text{ m}$ ,已知铁心的相对磁导率为 1 900,励磁绕组匝数  $N=2\ 000$ ,若要在铁心中产生  $1 \times 10^{-3} \text{ Wb}$  的磁通,问需要多大的励磁电流? 试用 M 语言编写计算程序。

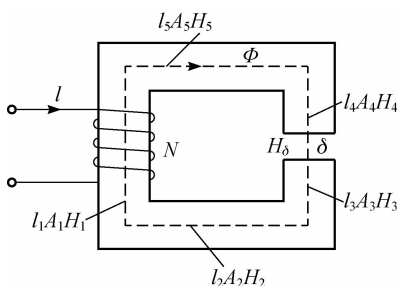


图 1-7 电工钢片叠压而成的磁路

**【解】** 用 M 语言编写计算励磁电流的程序如下:

```
% 磁路计算求解励磁电流问题
clc                                % 消除主程序窗口
clear                              % 清除变量空间的变量
A = 1 * 1e - 3;                    % 已知铁心截面积
kFe = 0.94;                        % 已知铁心叠片系数
Ph = 1 * 1e - 3;                  % 需产生的磁通量
u0 = 4 * pi * 1e - 7;             % 已知空气磁导率
l1 = 0.08; l2 = 0.1; l3 = 0.034; l4 = 0.04; l5 = 0.1; % 已知气隙长度
N = 2000;                          % 已知励磁绕组系数
d = 0.006;                         % 已知气隙长度
Ak = kFe * A;                      % 计算磁通密度
B = Ph * A;                        % 计算铁心磁通密度
uFe = 1900 * u0;                  % 计算铁心磁导率
He = B/uFe;                       % 计算铁心磁导强度
Fe = He * (l1 + l2 + l3 + l4 + l5); % 计算铁心的磁压降
Ha = Ph/u0/A;                     % 计算气隙磁场强度
Fa = Ha * d;                      % 计算气隙的磁压降
F = Fe + Fa;                      % 计算总磁压降
i = F/N;                          % 计算励磁电流
```



```

s = num2str(i);           % 将数字转换为字符串
s1 = '励磁电流为: ';    % 定义字符串
s = strcat(s1,s,A);      % 合并字符串
disp(s);                 % 显示计算结果

```

显示,励磁电流为 2.387 3 A。

**仿真实例 1-2** 已知某电感线圈匝数  $N=400$ ,铁心长度  $l=0.3$  m,截面积  $A=8 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>,真空磁导率  $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$  H/m,气隙长度  $\delta=0.005$  m,气隙截面积  $A_0=8 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>,相对磁导率  $\mu_r=100 \sim 8\,000$ ,试绘制电感系数  $L$  与相对磁导率之间的关系曲线。

**【解】** 计算电感系数的公式为  $L=\mu_0\mu_rAN^2/l$ ,用 M 语言编写计算电感系数和绘制电感系数和相对磁导率之间的关系曲线的程序如下:

```

% 磁路计算求解励磁电流问题
clc
clear
u0=pi * 4e-7;
N=400;l=0.3;
d=0.005;
A=8e-4;
A0=8e-4;
R0=d/(u0 * A0);
for n=1 : 80;
ur(n)=100+(10000-100) * (n-1)/100;
Rm(n)=l/(ur(n) * u0 * A);
R=R0+Rm(n);
L(n)=N^2/R;
end
plot(ur,L);
title('电感系数 L 与相对磁导率 \mu_r');
xlabel('铁心相对磁导率 \mu_r');
ylabel('电感系数 L/h');

```

运行上述程序,得到电感系数与相对磁导率之间的关系曲线如图 1-8 所示。

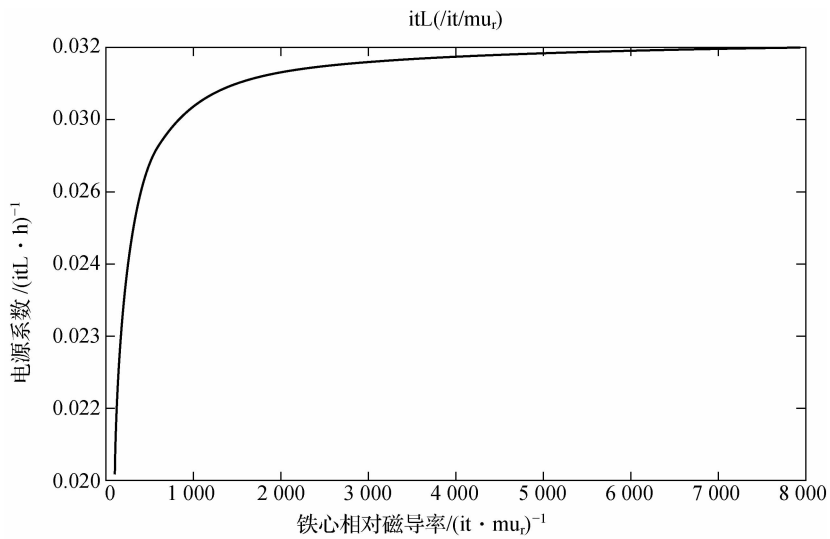


图 1-8 电感系数与相对磁导率之间的关系曲线

仿真实例 1-3 已知某铁磁材料的磁化数据见表 1-1, 试用 MATLAB 软件进行磁化曲线的拟合并绘制拟合的磁化曲线。

表 1-1 某铁磁材料的磁化数据

$B/T$	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.4	1.38	1.40	1.42	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56
0.5	1.58	1.60	1.62	1.64	1.66	1.69	1.71	1.74	1.76	1.78
0.6	1.81	1.84	1.86	1.89	1.91	1.94	1.97	2.00	2.03	2.06
0.7	2.10	2.13	2.16	2.20	2.24	2.28	2.32	2.36	2.40	2.45
0.8	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.76	2.81	2.87	2.93	2.99
0.9	3.06	3.13	4.01	3.26	3.33	3.41	3.49	3.57	3.65	3.74
1.0	3.83	3.92	3.92	4.11	4.22	4.33	4.44	4.56	4.67	4.80
1.1	4.93	5.07	5.21	5.36	5.52	5.68	5.84	6.00	6.16	6.33
1.2	6.56	6.73	6.94	7.16	7.38	7.62	7.86	8.10	8.36	8.62
1.3	8.90	9.20	9.50	9.80	10.10	10.50	10.90	11.30	11.70	12.10
1.4	12.60	13.10	13.60	14.20	14.80	15.50	16.30	17.10	18.10	19.10
1.5	20.10	21.20	22.40	23.70	25	26.70	28.50	30.40	32.60	35.60
1.6	37.80	40.70	43.70	46.80	50	53.40	56.80	60.40	64.40	67.80
1.7	72	76.40	80.80	85.40	90.20	95	100	105	110	116
1.8	122	128	134	140	146	152	158	165	172	180

**【解】** 用 M 语言编制磁化曲线的程序如下：

```

clc
clear
Hdata = [1.38,1.40,1.42,1.44,1.46,1.48,1.50,1.52,1.54,1.56,...
1.58,1.60,1.62,1.64,1.66,1.69,1.71,1.74,1.76,1.78,...
1.81,1.84,1.86,1.89,1.91,1.94,1.97,2.00,2.03,2.06,...
2.10,2.13,2.16,2.20,2.24,2.28,2.30,2.36,2.40,2.45,...
2.50,2.55,2.60,2.65,2.70,2.76,2.81,2.87,2.93,2.99,...
3.06,3.13,3.19,3.26,3.33,3.41,3.49,3.57,3.65,3.74,...
3.93,3.92,4.01,4.11,4.22,4.33,4.44,4.56,4.67,4.80,...
4.93,5.07,5.21,5.36,5.52,5.68,5.84,6.00,6.16,6.33,...
6.52,6.72,6.94,7.16,7.38,7.62,7.86,8.10,8.36,8.62,...
8.90,9.20,9.50,9.80,10.1,10.5,10.9,11.3,11.7,12.1,...
12.6,13.1,13.6,14.2,14.8,15.5,16.3,17.1,18.1,19.1,...
20.1,21.2,22.4,23.7,25.0,26.7,28.5,30.4,32.6,35.1,...
37.8,40.7,43.7,46.8,50.0,53.4,56.8,60.4,64.0,67.8,...
72.0,76.4,80.8,85.4,90.2,95.0,100,105,110,116,...
122,128,134,140,146,152,158,165,172,180];
Bdata = 0.40;0.01;1.89;
len = length(Hdata);
Hmax = Hdata(len);
a = polyfit(Hdata,Bdata,13);
for n = 1 : 151
Hfit(n) = Hmax * (n - 1)/150;
Bfit(n) = a(1) * Hfit(n)^13 + a(2) * Hfit(n)^12 + a(3) * Hfit(n)^11 + a(4) *
Hfit(n)^10 + a(5) * Hfit(n)^9 + a(6) * Hfit(n)^8 + a(7) * Hfit(n)^7 + a(8) * Hfit(n)^6 +
a(9) * Hfit(n)^5 + a(10) * Hfit(n)^4 + a(11) * Hfit(n)^3 + a(12) * Hfit(n)^2 + a(13) *
Hfit(n) + a(14);
end
plot(Hdata,Bdata,'*');
hold on
title('磁化曲线')
xlabel('{/it}/A/cm');
ylabel('{/it}B/T');

```

运行上述程序,得到图 1-9 所示的拟合曲线。

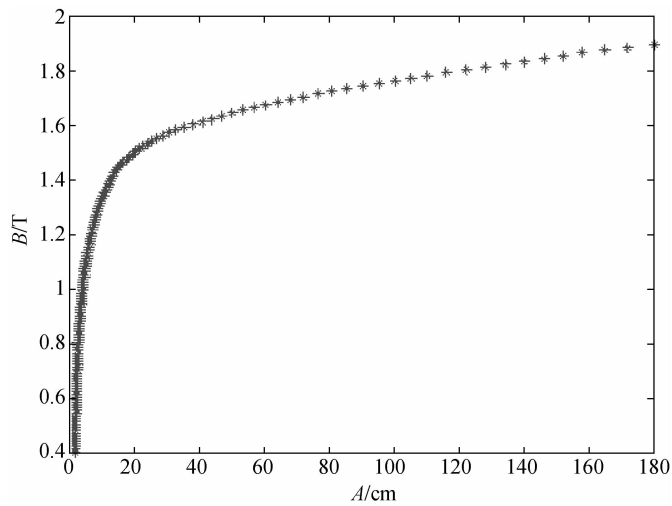


图 1-9 拟合的磁化曲线

**仿真实例 1-4** 已知对某种铁磁材料反复磁化,得到表 1-2(表中含有正、负两组数据),试用 MATLAB 软件进行磁化曲线的拟合并绘制拟合的磁化曲线。

表 1-2 某种铁磁材料反复磁化的数据

<b>B</b>	0	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9	1	0.95	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4	0.2
<b>H</b>	48	52	58	73	85	103	135	193	80	42	2	-18	-29	-40	-45
<b>B</b>	0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1.0	-0.95	-0.8	-0.7	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2
<b>H</b>	-48	-52	-58	-73	-85	-103	-135	-193	-42	-2	18	29	40	42	45

**【解】** 用 M 语言编写绘制磁滞回线的程序如下:

```
Bdata = [0,0.2,0.4,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0,0.95,0.9,0.8...
0.7,0.6,0.4,0.2,0,-0.2,-0.4,-0.6,-0.7,-0.8...
-0.9,-1.0,-0.95,-0.8,-0.7,-0.6,-0.4,-0.3,-0.2];
Hdata = [48,52,58,73,85,103,135,193,80,42,2,-18,-29,-40,-45,-48,
-52,-58,-73,-85,-103,-135,-193,-80,-42,-2,18,29,40,42,45];
plot(Hdata,Bdata,'y')
xlabel('H(A/m)')
ylabel('B(T)')
title('磁滞回线')
hold on
plot([-250 250],[0 0],'b-')
hold on
plot([0 0],[-1.5 1.5],'r')
```

运行上述程序,可得到图 1-10 所示的磁滞回线。

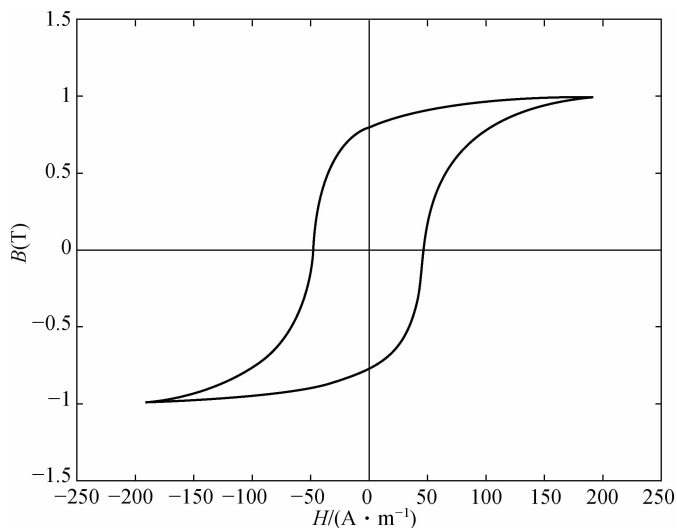


图 1-10 仿真的磁滞回线

## 1.7 电机及电力拖动系统的发展前景

在电气化、信息化时代,人们对电机的性能、可靠性及容量等提出了更高的要求。交流变频调速系统及变频电机、大功率无刷直流电机和永磁同步无刷电机等得到了很大发展。

同时,随着新兴行业的发展,微电机也成为电机行业发展的亮点,是我国机电、电机行业发展的重点产品。稀土永磁电机、无轴承电机是电机技术发展的新动向。

与此相适应,电机拖动也有了新的发展,对拖动系统又提出更高的要求。例如,要求提高加工的精度和工作的速度,要求快速起动、制动和逆转,实现很宽范围内的调速及整个生产过程的自动化等,这就需要有一整套自动控制设备组成自动化的电力拖动系统。而这些高要求的拖动系统随着自动控制理论不断发展,半导体器件和电力电子技术的采用,以及数控技术和计算机技术的发展与采用,正在不断地完善和提高。

综上所述,电力拖动技术发展至今,它具有许多其他拖动方式无法比拟的优点。它起动、制动、反转和调速的控制简单、方便、快速且效率高;电动机的类型多,且具有各种不同的运行特性来满足各种类型生产机械的要求;整个系统各参数的检测和信号的变换与传送方便,易于实现最优控制。因此,电力拖动已成为国民经济电气自动化的基础。

## 1.8 本课程的性质、任务、内容与特点

电机与拖动基础是机械电子工程、电气工程及其自动化专业的一门专业基础课。它的主要任务是使学生掌握常用的交直流电机、变压器、控制电机等的基本结构和工作原

## 电机与拖动基础

理,电力拖动系统的运行性能、分析计算,电机容量选择及试验方法等,本课程是电机学与电力拖动基础课程的有机结合。

电机与拖动基础是分析和解决电机与电力拖动系统的基本问题,主要包括直流电机及拖动、变压器、异步电机及拖动、同步电动机、控制电机和电动机容量的选择等内容。

本课程具有承前启后的作用,学好本课程需要掌握如数学、电路、电磁学和力学等基础知识,为学习工厂电气控制设备、自动控制原理、信号与系统和运动控制系统等课程准备必要的基础知识。课程学完后学生应达到下列要求:掌握常用的交直流电机及变压器的基本原理(电磁关系、能量关系);掌握电动机机械特性及各种运行状态的基本原理;掌握电力拖动系统中电动机的调速方法、调速原理和技术经济指标;掌握电机与电力拖动系统的基本实验方法与技能,并具有熟练的运算能力;掌握电力拖动系统中电动机容量的选择;掌握控制电机的工作原理、特性及用途。

### 1.9 本课程的学习方法

本课程是一门专业基础课,但同时又是一门实践性很强的独立课程。本课程的内容主要包括直流电机及电力拖动、变压器、交流电机及拖动、同步电机等相关内容,考虑到电机是实现电能和机械能转换的装置,而电能与机械能的转换是通过电磁场完成的,因此要了解和熟悉电机的各种特性,就需要分析电机内部的电磁过程。由于电磁场的抽象性,因而增加了本课程的难度。

因此,要学好本课程必须有一个好的学习方法,建议学生在学完一小节或相对完整的知识点要搞清楚三个“是什么”。

#### 1. 要解决的问题

明确目标,抓住要解决问题的重点。

#### 2. 解决问题的思路和方法

本课程中有些问题的解决是很繁杂的,如直流电机、异步电机、同步电机的磁场问题等。因此,在解决问题的过程中思路必须清晰,方法必须正确。解决问题的方法是多种多样的,本课程涉及对系统的基本指标要求与实现的方法等,要运用系统的观点看问题,既要以物理概念和常规计算为主进行严密的理论推导,又要用工程方法进行分析 and 计算。实际问题往往是复杂的,几种问题有可能纠合在一起,如果按照常规方法进行严密的推导,往往在中途难以进行下去,最终得不到能用的结果,这时需要运用工程的观点和方法将问题简化,找出主要矛盾,忽略一些次要因素;然后用基本理论和计算方法加以解决,这样所得到的结果,往往能够比较正确地反映实际情况。

#### 3. 解决问题后的结论

解决问题的结论是最主要的,本课程中很多问题的推导过程难且繁杂,可以要求对推导过程做一般了解,但结论应重点掌握,这样做的目的是抓住重点,不要纠缠繁杂且不是很重要的细节。

电机与拖动基础是一门原理性和实践性都很强的课程,学习本课程要做到理论联系实际。学生既要有扎实的基础理论知识,又要有从工程观点分析和解决问题的能力,这样才能进一步学习和研究下一步的课程。

## 习 题

- 1.1 电机和变压器的磁路常采用什么材料制成? 这种材料有哪些主要特性?
- 1.2 磁滞损耗和涡流损耗是由什么原因引起的? 它们的大小与哪些因素有关?
- 1.3 什么是软磁材料? 什么是硬磁材料?
- 1.4 磁路的磁阻如何计算? 磁阻的单位是什么?
- 1.5 说明磁路和电路的不同点。
- 1.6 说明直流磁路和交流磁路的不同点。
- 1.7 基本磁化曲线与起始磁化曲线有何区别? 磁路计算时使用的是哪一种磁化曲线?
- 1.8 磁路的基本定律有哪几条? 当铁心磁路上有几个磁动势同时作用时,磁路计算能否运用叠加原理? 为什么?

# 直流电机的基本原理

直流电机是电能和机械能相互转换的旋转电机之一。将机械能转换为直流电能的电机称为直流发电机,将直流电能转换为机械能的电机称为直流电动机。直流发电机可作为各种直流电源;直流电动机具有宽广的调速范围,较强的过载能力和较大的起动转矩,广泛应用于对起动和调速要求较高的生产机械,如电力机车、内燃机车、工矿机车、城市电车、电梯、轧钢机等拖动电机。

本章介绍直流电机的工作原理和基本结构,分析直流电机的磁路系统、电路系统和电磁过程,导出感应电势和电磁转矩的一般计算方法,得出直流电机在不同运行状态的各种平衡方程式和运行特性。

### 2.1 直流电机的模型结构和工作原理

直流电机是直流发电机和直流电动机的总称。直流电机具有可逆性,既可作为直流发电机使用,也可作为直流电动机使用。作为直流发电机使用时,将机械能转换成直流电能输出;作为直流电动机使用时,则将直流电能转换成机械能输出。

#### 2.1.1 直流电机的模型结构

图 2-1 所示为直流发电机的工作原理。N、S 为定子上固定不动的两个主磁极,主磁极可以采用永久磁铁,也可以采用电磁铁,在电磁铁的励磁线圈上通以方向不变的直流电流,便形成一定极性的磁极。

在两个主磁极 N、S 之间装有一个可以转动的、由铁磁材料制成的圆柱体,圆柱体表面嵌有一线圈(称为电枢绕组),线圈首末两端分别连接到两个弧形钢片(称为换向片)上。换向片之间用绝缘材料构成一个整体,称为换向器,它固定在转轴上(但与转轴绝缘),随转轴一起转动,整个转动部分称为电枢。为了接通电枢内电路和外电路,在定子上装有两个固定不动的电刷 A 和 B,并压在换向器上与其滑动接触。



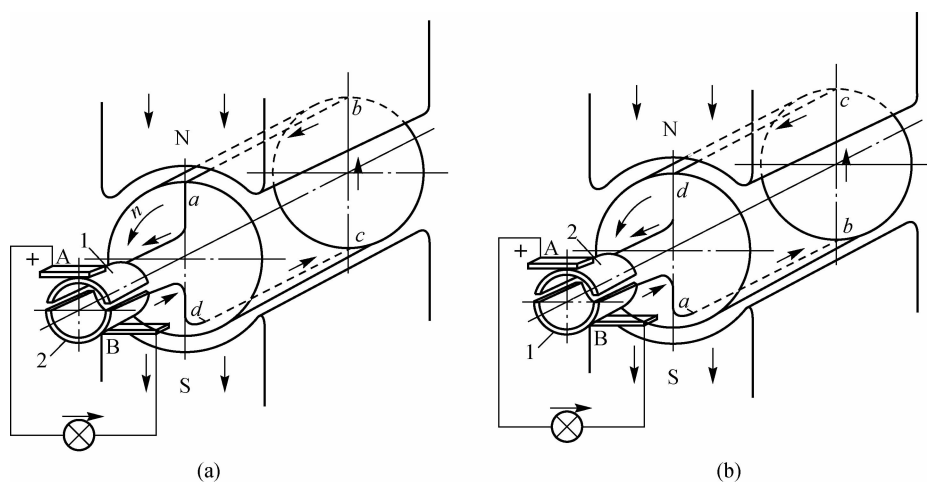


图 2-1 直流发电机的工作原理

## 2.1.2 直流发电机的工作原理

### 1. 感应电势的产生

当直流发电机的电枢被原动机拖动,并以恒速  $v$  逆时针方向旋转时,如图 2-1(a)所示,线圈两个有效边  $ab$  和  $cd$  将切割磁力线,而感应产生电势  $e$ ,其方向用右手定则确定,导体  $ab$  位于 N 极下,导体  $cd$  位于 S 极下,产生电势方向分别为  $b \rightarrow a, d \rightarrow c$ 。若接通外电路,电流从换向片 1  $\rightarrow$  A  $\rightarrow$  负载  $\rightarrow$  B  $\rightarrow$  换向片 2。电流从电刷 A 流出,具有正极性,用“+”表示;从电刷 B 流入,具有负极性,用“-”表示。

当电枢转到  $90^\circ$  时,线圈有效边  $ab$  和  $cd$  转到 N、S 极之间的几何中心线上,此处磁通密度为零,故这一瞬时感应电势为零。

当电枢转到  $180^\circ$  时,导体  $ab$  和  $cd$  及换向片 2、1 位置互换,如图 2-1(b)所示。导体  $ab$  位于 S 极下,导体  $cd$  位于 N 极下,线圈两个有效边产生的感应电势方向分别为  $a \rightarrow b, c \rightarrow d$ ,电势方向恰与开始瞬时相反。外电路中流过的电流从换向片 2  $\rightarrow$  A  $\rightarrow$  负载  $\rightarrow$  B  $\rightarrow$  换向片 1。由此可见,电刷 A(B)始终与转到 N(S)极下的有效边所连接的换向片接触,故电刷极性始终不变,A 为“+”,B 为“-”。

由以上分析可知,线圈内部为一交变电势,但电刷引出的电势方向始终不变,为一单方向的直流电势。

### 2. 电势的波形

根据电磁感应定律,每根导体产生的感应电势  $e$  为

$$e = B_x L v \quad (2-1)$$

式中,  $B_x$  为导体所在位置的磁通密度, T;  $L$  为导体切割磁力线的有效长度, m;  $v$  为导体切割磁力线的线速度, m/s。

要想知道电势的波形,先要找出磁通密度的波形,前已设电枢以恒速  $v$  旋转,  $L$  在电机中不变,则  $e \propto B_x$ ,即导体电势随时间的变化规律与气隙磁通密度的分布规律相同。设想将电枢从外圆某一点沿轴切开,把圆周拉成一直线作为横坐标,纵坐标表示磁通密度,线圈内的电势波形如图 2-2 所示,为一梯形波。由于  $e \propto B_x$ ,电势波形与磁通密度波形可用同一曲线表示,因而只需换一个坐标即可得到线圈内部的交变电势波形。

通过电刷和换向器的作用,及时将线圈内的交变电势转换成电刷两端单方向的直流电势,如图 2-3 所示,但它是一个大小在零和最大值之间变化的脉振电势。

对于图 2-2 所示的线圈内电势波形,由于电枢上只嵌了一个线圈,所以感应电势数值小,波动大。为了减小电势的脉动,在实际电机中,电枢上放置许多线圈组成电枢绕组,这些线圈均匀分布在电枢表面,并按一定规律连接起来。图 2-4 所示为两个线圈换向后的电势波形,即电枢上嵌有在空间互差  $90^\circ$  的两个线圈产生的电势波形,由图可见,其脉动程度大大减小了。实践证明,若每极下的线圈边数大于 8,电势脉动的幅值将小于 2%,基本是一直流电势,如图 2-5 所示。

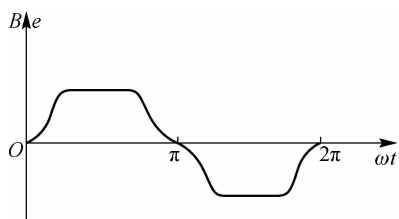


图 2-2 线圈内的电势波形

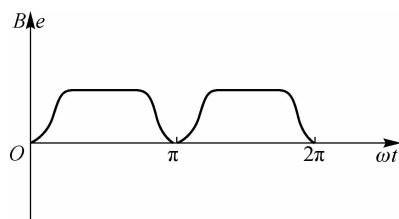


图 2-3 电刷两端的电势波形

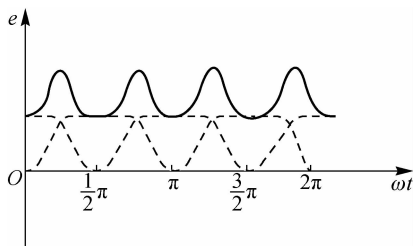


图 2-4 两个线圈换向后的电势波形

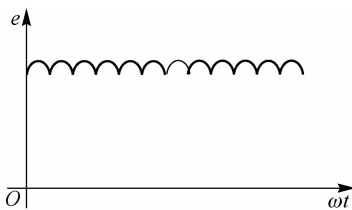


图 2-5 多个线圈电刷两端的电势波形

### 3. 直流发电机产生的电磁转矩

当直流发电机电刷两端获得直流电势后,若接上负载,便有一电流流过线圈,电流  $i$  与电势  $e$  的方向相同。同时,载导体在磁场中必然产生一电磁力  $f$ ,其方向用左手定则确定。电磁力对转轴形成一电磁转矩  $T$ ,  $T$  与电枢旋转的方向相反,起到了阻碍作用,故称为阻转矩。直流电机要维持发电状态,原动机就必须输入机械能克服电磁转矩  $T$ ,正是这种不断的克服作用,实现了将机械能转换为电能。

### 2.1.3 直流电动机的工作原理

图 2-6 所示为直流电动机工作原理图。直流电动机的结构与直流发电机相同,不同的是电刷 A、B 外接一直流电源。图示瞬时电流的流向为  $+$ →A→换向片 1→ $a$ → $b$ → $c$ → $d$ →换向片 2→B→ $-$ 。根据电磁力定律,载导体  $ab$ 、 $cd$  都将受到电磁力  $f$  的作用,其大小为

$$f = B_x Li \quad (2-2)$$

式中, $i$  为导体中流过的电流,A。

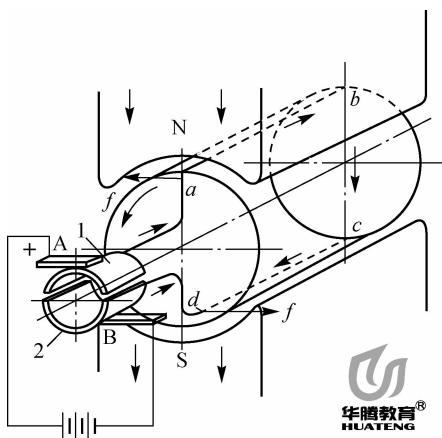


图 2-6 直流电动机工作原理图

导体所受电磁力的方向用左手定则确定,在此瞬时, $ab$  位于 N 极下,受力方向从右向左, $cd$  位于 S 极下,受力方向从左向右,电磁力对转轴便形成一个电磁转矩  $T$ 。在  $T$  的作用下,电枢逆时针旋转起来。

当电枢转到  $90^\circ$ ,电刷不与换向片接触,而与换向片间的绝缘片相接触,此时线圈中没有电流流过, $i=0$ ,故电磁转矩  $T=0$ 。由于机械惯性的作用,电枢仍能转过一个角度,电刷 A、B 又将分别与换向片 2、1 接触。线圈中又有电流  $i$  流过,此时,导体  $ab$ 、 $cd$  中的电流改变了方向,即为  $b \rightarrow a$ 、 $d \rightarrow c$ ,且导体  $ab$  转到 S 极下, $ab$  所受的电磁力  $f$  方向从左向右, $cd$  转到 N 极下, $cd$  所受的电磁力方向从右向左。因此,线圈仍然受到逆时针方向电磁转矩的作用,电枢始终保持同一方向旋转。

在直流电动机中,虽然电刷两端加的是直流电源,但是在电刷和换向器的作用下,线圈内部却变成了交流电,从而产生了单方向的电磁转矩,驱动电机持续旋转。同时,旋转的线圈中也将感应产生电势  $e$ ,其方向与线圈中的电流方向相反,称为反电势。若直流电动机要维持继续旋转,则外加电压就必须高于反电势,才能不断地克服反电势而流入电流,正是这种不断克服作用,实现了将电能转换为机械能。

由此可见,直流电机具有可逆性,即一台直流电机既可作为发电机运行,也可作为电

## 电机与拖动基础

动机运行。当输入机械转矩将机械能转换成电能时,电机作为发电机运行;当输入直流电流产生电磁转矩,将电能转换成机械能时,电机作为电动机运行。例如,电力机车在牵引工况时,牵引电机作为电动机运行,产生牵引力;在制动工况时,牵引电机作为发电机运行,将机车和列车的动能转换成电能,产生制动力对机车进行电气制动。

## 2.2 直流电机的基本结构和额定值

### 2.2.1 直流电机的基本结构

直流电机由静止的定子和旋转的转子两大部分组成,在定子和转子之间有一定大小的间隙(气隙),如图 2-7 所示。

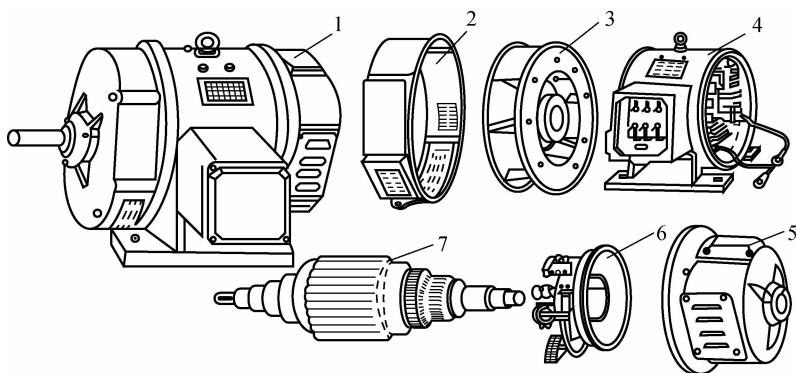


图 2-7 直流电机结构图

1—直流电机总成; 2—后端盖; 3—通风机; 4—定子总成;  
5—前端盖; 6—电刷装置; 7—转子(电枢)总成

#### 1. 定子

直流电机定子的作用是产生磁场和作为电机的机械支撑,主要由机座、主磁极、换向极和电刷装置等组成。

##### 1) 机座

机座起机械支撑和导磁磁路两个作用。它既用来作为安装电机所有零件的外壳,又是联系各磁极的导磁铁轭。机座通常为铸钢件,也有采用钢板焊接而成的。

##### 2) 主磁极

如图 2-8 所示,主磁极是一个电磁铁,由主极铁心和主极绕组等组成。主极铁心一般用 2~2.5 mm 厚的薄钢板冲片叠压后再用铆钉铆紧成一个整体。小型电机的主极绕组用绝缘铜线(或铝线)绕制而成,大中型电机的主极绕组用扁铜线绕制,并进行绝缘处理,然后套在主极铁心外面。整个主磁极用螺钉固定在机座内壁上。

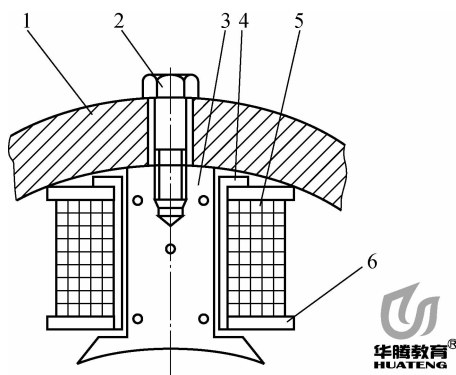


图 2-8 主磁极

1—机座；2—主极螺钉；3—主极铁心；4—框架；5—主极绕组；6—绝缘衬垫

### 3) 换向极

换向极又称为附加极，它装在两个主极之间，用来改善直流电机的换向性能。换向极由换向极铁心和换向极线圈构成。换向极铁心大多用整块钢加工而成。在整流电源供电的功率较大的电机中，为了更好地改善电机换向性能，换向极铁心也采用叠片结构。换向极线圈与主极线圈一样，也是用圆铜线或扁铜线绕制而成的，经绝缘处理后套在换向极铁心上，最后用螺钉将换向极固定在机座内壁上。

### 4) 电刷装置

电刷装置的作用是通过电刷与换向器表面的滑动接触，把转动的电枢绕组与外电路相连。电刷装置一般由电刷、刷握、刷杆和刷杆座等部分组成，如图 2-9 所示。电刷一般用石墨粉压制而成。电刷放在刷握内，用弹簧压紧在换向器上，刷握固定在刷杆上，刷杆装在刷杆座上，成为一个整体部件。

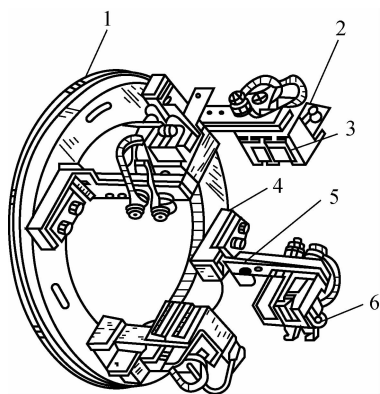


图 2-9 电刷装置

1—刷杆座；2—刷握；3—电刷；4—绝缘杆；5—刷杆；6—弹簧

## 2. 转子

转子又称电枢，主要由转轴、电枢铁心、电枢绕组和换向器等组成。

## 电机与拖动基础

### 1) 转轴

转轴的作用是传递转矩,一般用合金钢锻压而成。

### 2) 电枢铁心

电枢铁心是电机磁路的一部分,也是承受电磁力作用的部件。当电枢在磁场中旋转时,在电枢铁心中将产生涡流和磁滞损耗。为了减小这些损耗的影响,电枢铁心通常用厚 0.5 mm 的电工钢片叠压而成,电枢铁心固定在转子支架或转轴上。电枢铁心冲片和铁心如图 2-10 所示,沿铁心外圈均匀地分布着槽,在槽内嵌放电枢绕组。

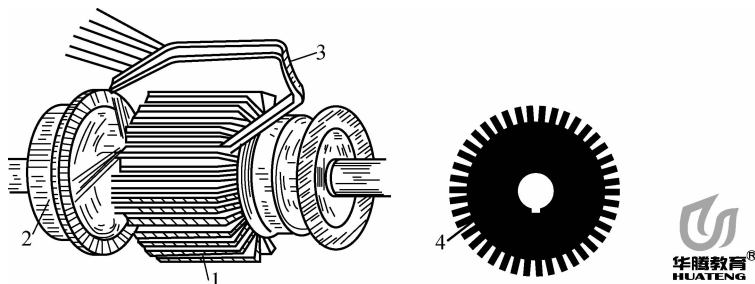


图 2-10 电枢铁心冲片和铁心

1—电枢铁心; 2—换向器; 3—绕组元件; 4—铁心冲片

### 3) 电枢绕组

电枢绕组的作用是产生感应电势和通过电流产生电磁转矩,实现机电能量转换。它是直流电机的主要电路部分。电枢绕组通常都用圆形或矩形截面的导线绕制而成,再按一定规律嵌放在电枢槽内,上下层之间及电枢绕组与铁心之间都要妥善地绝缘。为了防止离心力将绕组甩出槽外,槽口处需用槽楔将绕组压紧,伸出槽外的绕组端接部分用无纬玻璃丝带绑紧。绕组端头则按一定规律嵌放在换向器钢片的升高片槽内,并用锡焊或氩弧焊焊牢。

### 4) 换向器

换向器的作用是机械整流,即在直流电动机中,将外加的直流电流逆变成绕组内的交流电流;在直流发电机中,将绕组内的交流电势整流成电刷两端的直流电势。换向器的结构如图 2-11 所示。换向器由许多换向片组成,换向片间用云母片绝缘。换向片凸起的一端称为升高片,用于与电枢绕组端头相连,换向片下部做成燕尾形,利用换向器套筒、V 形压圈及螺旋压圈将换向片、云母片紧固成一个整体。在换向片与换向器套筒、压圈之间用 V 形云母环绝缘,最后将换向器压装在转轴上。

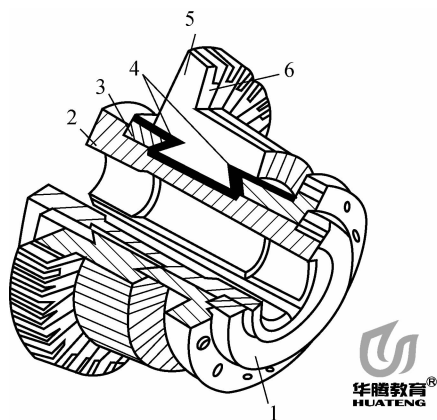


图 2-11 换向器的结构

1—螺旋压圈; 2—换向器套筒; 3—V 形压圈;  
4—V 形云母环; 5—换向铜片; 6—云母片

### 2.2.2 直流电机的额定值

每一台直流电机都有一块铭牌,上面标注各种额定数据,简要介绍一台直流电机的型号、规格和性能,是用户合理选择和正确使用电机的依据。

根据国家标准要求设计和试验所得的一组反映电机性能的主要数据称为直流电机的额定值。

#### 1. 额定功率 $P_N$

额定功率指直流电机按规定的工作方式运行时所能提供的输出功率。发电机额定功率是指接线端子处的输出功率,电动机额定功率是指电动机转轴的有效机械功率,单位为千瓦(kW)。额定功率、额定电压和额定电流的关系为

$$\text{直流发电机} \quad P_N = U_N I_N \quad (2-3)$$

$$\text{直流电动机} \quad P_N = U_N I_N \eta_N \quad (2-4)$$

式中, $\eta_N$  为额定效率。

#### 2. 额定电压 $U_N$

额定电压指在额定输出时直流电机接线端子间的电压,单位为伏(V)。

#### 3. 额定电流 $I_N$

额定电流指直流电机按照规定的工作方式运行时,电机绕组允许流过的最大安全电流,单位为安(A)。

#### 4. 额定转速 $n_N$

额定转速指直流电机在额定电压、额定电流和额定输出功率时直流电机的旋转速度,单位为转/分(r/min)。

此外,直流电机的额定值还有工作方式、励磁方式、额定励磁电压、额定温升和额定效率等。

额定值是选用或使用直流电机的主要依据,一般希望直流电机按额定值运行。但实际上,直流电机运行时的各种数据可能与额定值不同,它们由负载的大小来确定。若直流电机的电流正好等于额定值,称为满载运行;若直流电机的电流超过额定值,称为过载运行;若直流电机的电流比额定值小得多,称为轻载运行。长期过载运行将使直流电机过热,降低直流电机的寿命甚至损坏直流电机;长期轻载运行将使直流电机的容量不能充分利用。两种情况都将降低直流电机的效率,都是不经济的。因此,在选择直流电机时,应根据负载的要求,尽可能使直流电机运行在额定值附近。

## 2.3 直流电机的电枢绕组(\* )

电枢绕组是实现电能和机械能相互转换的枢纽,为直流电机的重要部件之一,绕组的形式与电机的性能、寿命和效率有很大的关系。研究直流电机电枢绕组,主要是找出

绕组元件相互之间和元件与换向器角度的连接规律。不同类型的电枢绕组,具有不同的连接规律。直流电机的电枢绕组分为单叠绕组、复叠绕组、单波绕组和复波绕组等几种类型。本节仅讨论应用较广泛又具有代表性的单叠绕组和单波绕组。

### 2.3.1 电枢绕组概述

#### 1. 对电枢绕组的要求

电枢绕组是由许多形状相同的线圈,按一定规律连接起来的总称。对于电枢绕组,要求一定的导体数,应能产生较大的电势;通过一定大小的电流能产生足够大的电磁转矩。同时,应尽量节省有色金属和绝缘材料,并要求结构简单,运行安全可靠。

#### 2. 绕组元件

绕组元件是用绝缘铜导线绕制成的线圈,这些线圈是组成电枢绕组的基本单元,故称为绕组元件。一个元件有两个有效边,其中一个有效边嵌放在某个槽的上层(上元件边),另一个有效边嵌放在另一个槽的下层(下元件边),元件的首末端分别接于两个换向片上,如图 2-12 所示。元件在铁心槽内的部分称为有效部分,槽外两端仅起连接作用,称为端接部分。

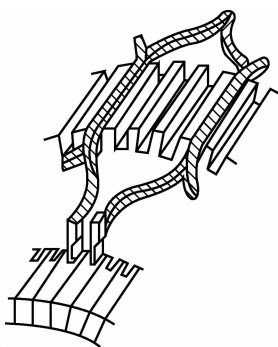


图 2-12 线圈与换向片

#### 3. 元件数 $S$ 、换向片数 $K$ 、虚槽数 $Z_u$ 之间的关系

每个元件均有首末两端,而每个换向片总是焊接着一个元件的末端和另一个元件的首端。因此,元件数与换向片数相等,即

$$S = K \quad (2-5)$$

若每一个实槽内嵌放上、下两个有效边,则称为一个单元槽或一个虚槽。但有些直流电机一个实槽内上、下层常并列嵌放多个元件边,如图 2-13 所示。这时,电枢总的虚槽数为

$$Z_u = uZ \quad (2-6)$$

式中, $Z$  为电枢铁心实槽数; $u$  为一个实槽内所包含的虚槽数。

于是,可得  $S$ 、 $K$ 、 $Z_u$  的关系为

$$S = K = Z_u = uZ \quad (2-7)$$



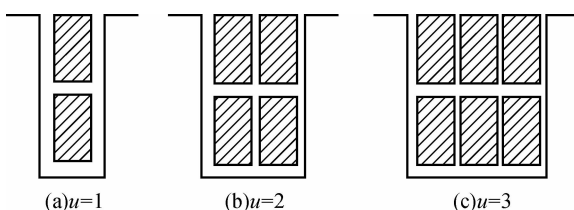


图 2-13 实槽与虚槽

#### 4. 极距

极距( $\tau$ )是电枢表面圆周上相邻两个主磁极之间的距离,用长度表示为

$$\tau = \pi D_a / 2p \quad (2-8)$$

式中, $D_a$  为电枢外径; $p$  为主磁极对数。

用虚槽表示为

$$\tau = Z_u / 2p \quad (2-9)$$

#### 5. 绕组的基本形式和节距

##### 1) 绕组的基本形式

直流电机的电枢绕组最基本的有单叠绕组和单波绕组两大类,图 2-14 所示为单叠绕组的连接规律示意图。由图可见,单叠绕组的相邻绕组元件在电枢表面仅差一个槽,单个绕组元件的首端和末端之间相邻一个换向片。例如,图 2-14 中第一绕组元件从 N 极出发,绕到相邻的 S 极,通过换向器与 N 极下的第二绕组元件串联,直到所有的绕组元件都串联起来为止。

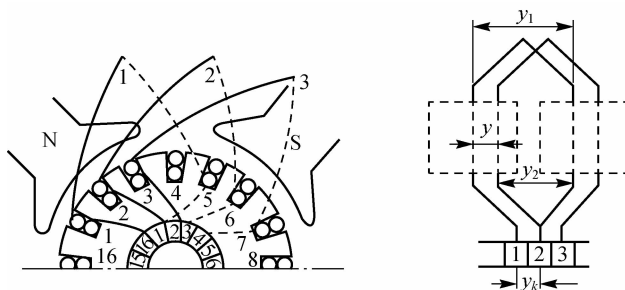


图 2-14 单叠绕组的连接规律示意图

图 2-15 所示为单波绕组的连接规律示意图。由图可见,单波绕组的相邻绕组元件相隔约为两个极距,第二绕组元件与第一绕组元件处在相同极性的两个磁极下,单个绕组元件的首端与末端相隔约为两个极距。若直流电机有  $p$  对磁极,则连接  $p$  个元件后才回到出发元件的邻近,并相隔一个槽,以便第二周继续绕下去,直到所有的绕组元件都串联起来为止。

##### 2) 绕组的节距

各种绕组在电枢和换向器上的连接规律由绕组的节距来确定。直流电机的节距有

线圈节距(第一节距) $y_1$ 、合成节距  $y$ 、换向器节距  $y_k$  和后节距(第二节距) $y_2$ 。

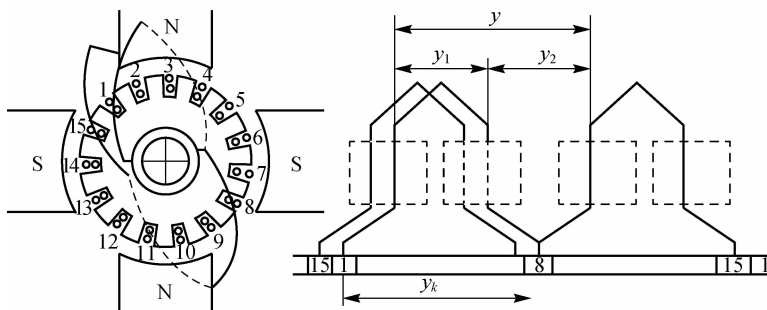


图 2-15 单波绕组的连接规律示意图

(1)线圈节距  $y_1$ 。线圈节距  $y_1$  是指同元件两个有效边在电枢表面所跨过的距离,如图 2-15 所示,一般以虚槽数表示,即

$$y_1 = Z_u/2p + \epsilon = \text{整数} \quad (2-10)$$

式中, $\epsilon$  是用来把  $y_2$  凑成整数的一个小数。当  $\epsilon=0$  时, $y_1 = \tau$ ,为整距绕组;当  $\epsilon$  取“ $-$ ”时, $y_1 < \tau$ ,为短距绕组;当  $\epsilon$  取“ $+$ ”时, $y_1 > \tau$ ,为长距绕组。整距绕组可获得最大感应电势,短距和长距绕组感应电势略小。由于短距绕组比长距绕组能节省端部材料,同时短距绕组对换向有利,因而一般采用短距绕组。

(2)合成节距  $y$ 。合成节距  $y$  是指相连接的两个绕组元件的对应边在电枢表面所跨过的距离(见图 2-15)。

(3)换向器节距  $y_k$ 。换向器节距  $y_k$  是指同一个绕组元件首末端所连接两换向片之间在换向器表面所跨过的距离(见图 2-15)。以换向片数表示为

$$y_k = y \quad (2-11)$$

(4)后节距  $y_2$ 。后节距  $y_2$  是指在相串联的两元件中,第一元件的下层有效边与所连接的第二元件的上层有效边之间在电枢表面所跨过的距离(见图 2-15),其值取决于  $y_1$  和  $y$ ,并与绕组的类型有关。

①单叠绕组。

$$y_2 = y_1 - y \quad (2-12)$$

②单波绕组。

$$y_2 = y - y_1 \quad (2-13)$$

### 2.3.2 单叠绕组

单叠绕组的同一元件首末两端分别与相邻两个换向片相接,第一只元件的末端与第二只元件的首端接在同一换向片上。两只相互串联的元件总是后一只紧叠在前一只上面,故称为单叠绕组,其特征为

$$y = y_k \pm 1 \quad (2-14)$$

式中,取“ $+$ ”为右行绕组,取“ $-$ ”为左行绕组,左行绕组端部交叉,一般不予采用。

为进一步分析单叠绕组的连接方法和特点,现以  $Z=S=K=16, 2p=4$  为例绕制一个单叠右行绕组。

### 1. 计算节距

$$(1) y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \epsilon = \frac{16}{4} \pm 0 = 4, \text{为整距绕组。}$$

$$(2) y = y_k = 1, \text{为单叠右行绕组。}$$

$$(3) y_k = y_1 - y = 4 - 1 = 3。$$

### 2. 绕组展开图

根据求得的各种节距,可画出绕组展开图。先将电枢表面展开成平面,并将电枢槽、电枢元件及换向片编号。其中,元件及换向片号与其上层边所在槽号相同,电枢槽号和换向片号之间的相对位置用如下方法确定:为了使元件的端接对称,应使每一元件所接的两个换向片的分界线与其轴线重合。

图 2-16 所示为单叠右行绕组展开图,元件上层边画成实线,下层边画成虚线。第一元件的首端接在换向片 2 上,它的一边放在 2 号槽的上层,另一边放在 5 号槽的下层( $y_2=4$ ),末端接在换向片 2 上( $y_k=2$ );第二元件的首端接到换向片 2 上,它的一边放在 2 号槽的上层,另一边放在 6 号槽的下层,末端接到换向片 3 上;依次连接第 3,4,……,16 元件。第 16 元件的末端又接到换向片 2 上,组成一个闭合回路。

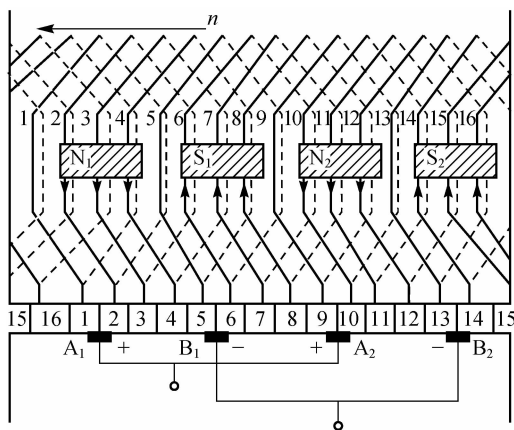


图 2-16 单叠右行绕组展开图

### 3. 主极位置

为了确定电枢绕组中感应电势的方向,须假定电枢的转向,同时画出主极的位置和极性。电机主极在圆周上是对称均匀分布的,极靴宽度一般为  $0.6\tau \sim 0.7\tau$ 。在展开图上对称均匀划分极距,在每极距内画上磁极,并假设极性 N 极表示磁力线方向进入纸面, S 极表示磁力线方向离开纸面。根据右手定则,可以确定各导体中感应电势的方向,用元件边上的箭头表示(在 N 极下的元件边中电势方向均向下,在 S 极下的元件边中的电势方向均向上)。由于几何中心线处的磁通密度为零,因而此处元件边中的电势为零,即 2、

5、9、23 号元件中的电势为零。因此,电枢电势的分界线是磁场的分界线。

#### 4. 电刷的位置和极性

电刷在换向器上的位置是根据空载时在正负电刷之间能获得最大电势这一原则来确定的。为了获得最大电势,电刷应与电势为零的电枢元件所连接的换向片相接触。

电势为零的元件所处的位置用下述方法判断:如图 2-17(a)所示,若是整距绕组( $y_2 = \tau$ ),当两元件边位于几何中心线时,元件电势为零,此时,元件轴线与主极轴线重合;如图 2-17(b)所示,若是短距绕组( $y_2 < \tau$ ),当元件轴线与主极轴线重合时,两元件边不在几何中心线上,而处在同一极性下左右对称,此时,两元件边的电势大小和方向都相同,互相抵消,元件电势也为零。由此可见,只要元件的轴线与主极轴线重合,感应电势即为零。此时,元件所接的两个换向片的分界线与主极轴线重合,所以电刷必须放在主极轴线下的换向片上。对应一个主极,便可放置一组电刷。本例中  $2p=4$ ,则应有四组电刷。电刷的宽度通常为换向片宽度的 2.5~3 倍。在分析电机电枢绕组时,为简便,电刷只画成一个换向片宽。

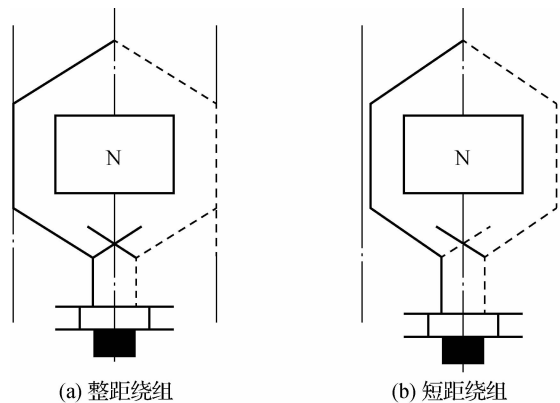


图 2-17 电刷放置法

电刷的极性由线圈内电势的方向来确定,当电枢转向和主极极性一定时,通过换向片跨接在任何两个相邻电刷间的元件中的电势方向是一定的,因此,电刷的极性固定不变。如图 2-18 所示,A 电刷为正,B 电刷为负。电机中将同极性电刷相连后引出正负两接线端。

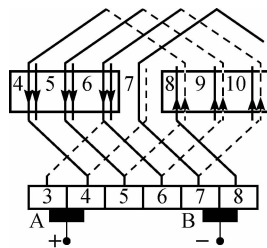


图 2-18 电刷极性

### 5. 并联支路数

将图 2-16 中的元件依次连接, 可得单叠绕组的瞬间电路图, 如图 2-19 所示。由图可见, 有 4 条支路并联于正负电刷之间。每一支路都是由上层边处在同一主极下的元件串联而成的, 一个主极对应一条支路, 则单叠绕组的并联支路数恒等于电机的主极数。所以, 支路对数  $a$  等于主极对数  $p$ , 即

$$a = p \quad (2-15)$$

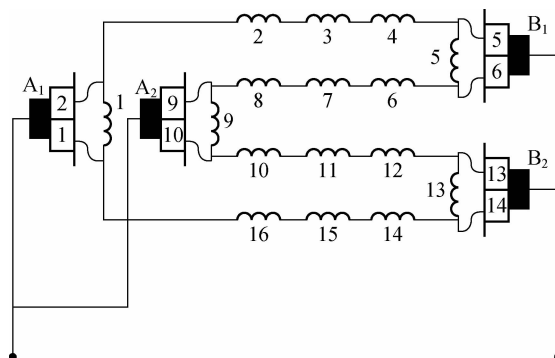


图 2-19 单叠绕组的瞬间电路图

电枢旋转时, 随着位置的移动, 构成各支路的元件在交替更换, 由于电刷位置是固定的, 因而组成一条支路的元件数不变, 感应电势大小不变, 从电刷外面看绕组时, 永远是一个具有  $2a$  条并联支路的电路。

电刷两端接通负载或电源时, 产生电枢电流, 由于电刷两侧的感应电势方向相反, 则电刷两侧的电流方向相反, 所以电枢电流的分界线是电刷。

单叠绕组的电枢电势  $E_a$  等于一条支路的电势, 电枢电流  $I_a$  等于各支路电流  $i_a$  之和, 即

$$I_a = 2a \cdot i_a \quad (2-16)$$

### 6. 单叠绕组的均压线

在多极 ( $2p > 2$ ) 电机的单叠绕组中, 各支路的元件边处在不同的磁极下。如果各极下的气隙、磁通量都相等, 电机运行正常, 这是理想的情况。但实际上由于磁性材料不均匀, 磁路的磁阻可能有所不同, 制造上的偏差 (如铸件中的气孔, 安装时的误差) 或运行造成的原因 (如轴承磨损使气隙不均匀) 等都会导致各极磁通量不相等。因此, 即使绕组排列完全对称 (绕组每对支路中的对应元件在磁场中所处的位置相同), 也会使各支路中的感应电势有所不同, 从而在绕组中引起环流。该环流的数值仅受支路电阻和接触电阻的限制, 而这些电阻值都很小, 所以较小的电势不平衡就会产生相当大的环流。当电枢带负载后, 各并联支路的电流也将严重不对称。环流的存在使电机损耗加大, 更重要的是, 环流加重了某些电刷的负载, 恶化了换向条件, 很容易在电刷下产生危害电机运行的火花。

## 电机与拖动基础

为了在一定程度上消除环流的不良影响,可将电枢绕组中理论上电位相等的点用均压线连接起来,如图 2-20 所示。实际电机的均压线( $a-b$ )是连接在对应的换向片上的,均压线节距  $y_p$  可用一对极内的换向片数表示,并且由于在单叠绕组中  $p=a$ ,所以

$$y_p = \frac{K}{p} = \frac{K}{a}$$

式中,  $2p=4$ ,  $Z=K=S=16$ ,  $y_p = \frac{K}{p} = \frac{16}{2} = 8$ , 即换向片 1-9, 2-10, 3-11, ……间都可连接均压线。若每个换向片上都连接均压线,则共有  $\frac{K}{p} = \frac{16}{2} = 8$  根,称为全额均压线。直流电机一般采用  $2/2$  或  $2/3$  的全额均压线。

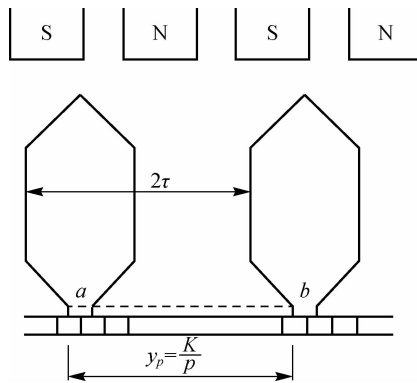


图 2-20 单叠绕组的均压线

均压线可制成与电枢绕组端部同样的形状,包上与电枢绕组同等级的绝缘,然后按照均压线节距接到换向片上。均压线放置位置如图 2-21 所示,将均压线接在换向片上后绑扎固定,然后嵌放进电枢绕组。

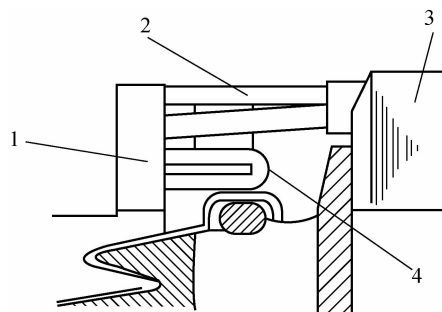


图 2-21 均压线放置位置

1—换向片; 2—电枢绕组; 3—电枢铁心; 4—均压线

### 2.3.3 单波绕组

单波绕组每一元件两条边之间的距离( $y_1$ )与单叠绕组相同,即

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \epsilon = \text{整数}$$

单波绕组每一元件的首末端要接到相距约为两个极距的换向片上,每嵌放一个元件,其相应元件边在电枢表面上移动约为两个极距的槽,即  $y_1 = y_k \approx 2\tau$ 。第二只元件与第一只元件处在相同极性的两个磁极下,感应电势方向相同。当依次串联  $p$  个元件,在电枢表面环绕一周后,第  $p$  只元件的末端要接到第一只元件的首端所接的换向片 2 的相邻换向片上,以便第二周继续绕下去,即

$$p \cdot y_k = K \pm 1 \quad (2-17)$$

因此,单波绕组的换向器节距为

$$y_k = \frac{K \pm 1}{p} = \text{整数} \quad (2-18)$$

当采用  $K+2$  时,  $p$  个元件串联后,接到换向片 2 上,称为右行绕组,此时端接交叉,很少采用。一般采用  $K-2$ ,称为左行绕组。现以  $Z=S=K=15, 2p=4$  为例绕制一个单波左行绕组。

### 1. 计算节距并画绕组展开图

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \epsilon = \frac{15}{4} - \frac{3}{4} = 3$$

$$y = y_k = \frac{K-1}{p} = \frac{15-1}{2} = 7$$

$$y_2 = y - y_1 = 7 - 3 = 4$$

根据求得的各种节距,可画出单波绕组的展开图,如图 2-22 所示。从图中可看出元件连接的顺序为 2—8—25—7—24—6—23—5—22—4—22—3—20—2—9—2,也构成一个闭合绕组。

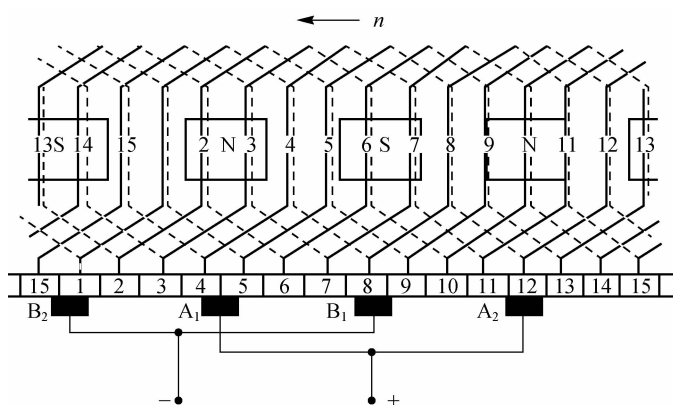


图 2-22 单波绕组的展开图

确定主极位置、电刷位置的原则与单叠绕组相同。

## 2. 单波绕组的支路对数

根据图 2-22 可画出单波绕组的瞬间电路图,如图 2-23 所示。由图可见,单波绕组是将所有上层边在 N 极下的元件串联成一条支路(4—22—3—20—2),将上层边在 S 极下的元件串联成另一条支路(25—7—24—6—23),其余元件被电刷短路。显然,单波绕组的支路数  $2a$  和主极数目无关,即

$$a = 2 \quad (2-19)$$

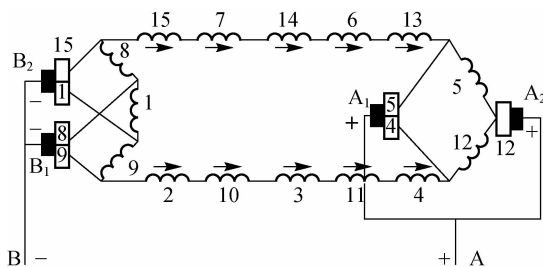


图 2-23 单波绕组的瞬间电路图

由于单波绕组只有两条并联支路,只要一正一负两组电刷即可工作。但在极数较多时,由于电刷的载流量很大,使换向器尺寸加大,因此,一般仍采用与极数相等的电刷组数(全额电刷)。

单波绕组的电枢电势仍为一支路电势,电枢电流为两支路电流之和。

### 2.3.4 单叠绕组与单波绕组的区别

单叠绕组与单波绕组是直流电机基本的绕组形式,其主要区别是并联支路数不同。单叠绕组  $a = p$ ,可以通过增加磁极对数来增加并联支路数,适用于低电压、大电流的直流电机。单波绕组  $a = 2$ ,在元件数相同的情况下,每条支路串联的元件较多,适用于小电流、较高电压的直流电机。

## 2.4 直流电机的磁场

从直流电机的基本工作原理的分析可知,发电机将机械能转换为电能,电动机将电能转换为机械能,其必要条件之一是必须具有气隙磁通。因此,必须在直流电机主磁极的励磁绕组中通以励磁电流来产生磁势,以产生气隙磁通。使电枢绕组切割气隙磁通而感应电势,或由电枢电流与气隙磁通相互作用而产生电磁转矩,从而实现能量的转换。

### 2.4.1 直流电机的励磁方式

直流电机的励磁方式是指直流电机励磁绕组和电枢绕组之间的连接方式。不同励磁方式的直流电机,其特性有很大差异,因此,励磁方式是选择直流电机的重要依据。直



流电机的励磁方式可分为他励、并励、串励和复励 4 类,如图 2-24 所示。

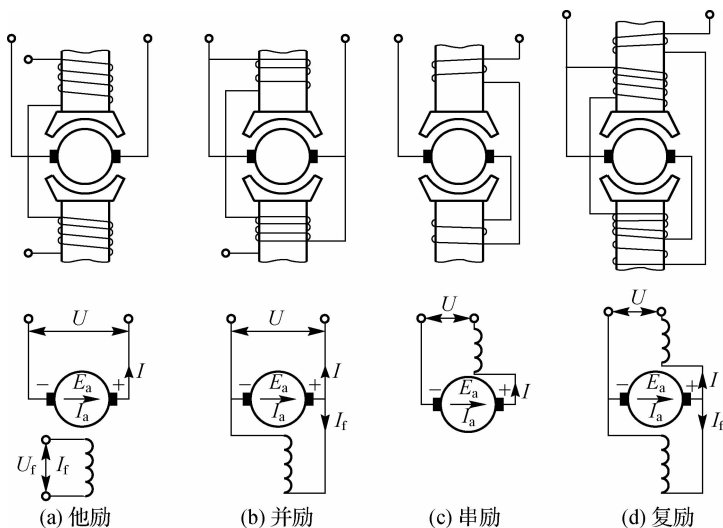


图 2-24 直流电机的励磁方式

### 1. 他励电机

励磁绕组与电枢绕组各自分开,励磁绕组由独立的直流电源供电,如图 2-24(a)所示。励磁电流  $I_f$  的大小只取决于励磁电源的电压和励磁回路的电阻,而与直流电机的电枢电压大小及负载无关。用永久磁铁作为主磁极的电机可当作他励电机。

### 2. 并励电机

励磁绕组与电枢绕组相并联,如图 2-24(b)所示。励磁电流一般为额定电流的 5%,要产生足够大的磁通,需要有较多的匝数。因此,并励绕组匝数多,导线较细。

### 3. 串励电机

励磁绕组与电枢绕组相串联,如图 2-24(c)所示。励磁电流与电枢电流相同,数值较大,因此,串励绕组匝数很少,导线较粗。

### 4. 复励电机

直流电机至少有两个励磁绕组,其中之一是串励绕组,其他为并励(他励)绕组,如图 2-24(d)所示。通常并励绕组起主测作用,串励绕组起辅助作用。若串励绕组和并励绕组所产生的磁势方向相同,则称为积复励;若串励绕组和并励绕组所产生的磁势方向相反,则称为差复励。并励绕组匝数多,导线细;串励绕组匝数少,导线粗,外观上有明显的区别。

直流电机各类绕组接线后,其引出线的端头要加以标记。直流电机各绕组线端符号见表 2-2。

表 2-1 直流电机各绕组线端符号

绕组名称	电枢绕组	换向极绕组	补偿绕组	串励绕组	并励绕组	他励绕组
线端符号	A <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub> B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	D <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	E <sub>1</sub> E <sub>2</sub>	F <sub>1</sub> F <sub>2</sub>

### 2.4.2 直流电机的空载磁场

直流电机空载时,电枢电流为零,只有励磁绕组中存在电流。因此,空载时直流电机的气隙磁场完全由励磁绕组的电流所产生。

#### 1. 空载磁场的分布

励磁绕组中通入励磁电流  $I_f$  后,各主磁极依次为 N 极和 S 极,由于电机磁路对称,不论极数多少,每对极下的磁通分布是相同的,因此,可以讨论一对极下的情况。图 2-25 所示为直流电机的空载磁场,主磁通  $\Phi$  由 N 极出来,经空气隙和电枢齿槽,便分左右两路经过电枢轭、电枢齿槽和空气隙进入相邻的 S 极,然后从定子磁轭回到 N 极而自成闭路。主磁通中同时匝链着励磁绕组和电枢绕组,是实现能量转换的关键。从图中还可看出,在 N 极和 S 极之间,还存在着一小部分磁通,它们不进入电枢铁心,不与电枢绕组匝链,称为主极漏磁通,用  $\Phi_{\sigma}$  表示。主磁通磁路的空气隙较小,磁阻较小;漏磁通磁路的空气隙较大,磁阻较大。因此,在同样的磁势作用下,漏磁通要比主磁通小得多。一般电机的主极漏磁通约为主磁通的 20%~25%。

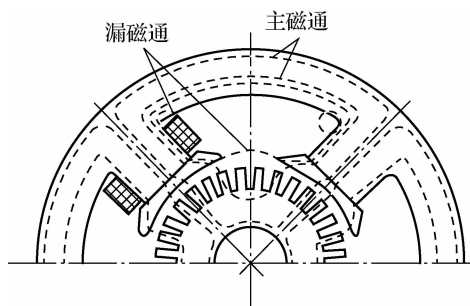


图 2-25 直流电机的空载磁场

#### 2. 直流电机的磁化曲线

直流电机的磁化曲线是指电机主磁通  $\Phi$  与励磁磁势  $F_f$  的关系曲线  $\Phi=f(F_f)$ 。

直流电机运行时,要求每一个磁极下应具有一定的磁通量,这就要求有一定的励磁磁势  $F_f=I_f N_f$ ,而在实际的直流电机中,励磁绕组匝数  $N_f=$ 常数,则  $F_f \propto I_f$ ,即励磁磁势与励磁电流成正比。故磁化曲线又可表示为  $\Phi=f(I_f)$ 。而电机中的主磁通  $\Phi$  所经过的路径绝大部分由铁磁材料构成,当铁磁材料磁化时具有饱和现象,导磁系数不为常数,磁阻是非线性的。因此, $\Phi=f(I_f)$  曲线与铁磁材料的  $B-H$  曲线相似,如图 2-26 所示。

磁化曲线起始一段是直线,因为在  $\Phi$  不大时,铁磁材料的磁路未饱和,磁阻数值很

小,磁通与磁势成正比,即  $\Phi \propto F_f (\Phi \propto I_f)$ 。当  $\Phi$  逐渐增加时,磁路逐渐饱和,磁阻增加,则使  $\Phi$  通过这部分磁阻所需的磁势  $F_f (I_f)$  也随之增加,曲线逐渐弯曲变平。当磁路饱和后,磁阻很大,为了增加很少一点磁通  $\Phi$ ,就必须增加很大的磁势  $F_f$ ,即增加很大的励磁电流。因此,为了最经济地利用材料,设计电机时,一般使额定工作点位于曲线开始弯曲的所谓“膝点”附近。

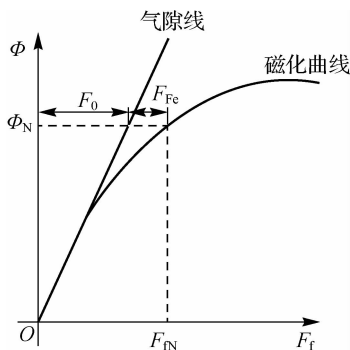


图 2-26 直流电机的磁化曲线

### 3. 气隙磁通密度分布曲线

在直流电机中,电枢导体切割气隙磁通而产生感应电势  $e = B_x L v$ 。当转速恒定时,  $e \propto B_x$ 。因此,在研究直流电机时,不但要知道每极磁通  $\Phi$  的大小,还需要知道主极下气隙中每一点磁通密度的大小,即气隙磁通密度的分布情况。根据磁路欧姆定律,气隙某处磁通或磁通密度的大小,取决于该处的磁势和磁路磁阻的大小。忽略铁心材料的磁阻,可认为磁势全部消耗在气隙中,直流电机的主极气隙是不均匀的,极下部分气隙大小相等且数值很小,因此在极下部分磁通密度的大小相等且数值较大。靠近极尖处的气隙逐渐增加,磁通密度明显减小;在两极之间的几何中心线上,磁通密度等于零。若不考虑电枢表面齿和槽的影响,在一个极距范围内,电枢各点垂直分量的磁通密度分布近似为梯形,如图 2-27 所示。主极磁场在主极轴线两侧对称分布,因此,主极磁场的轴线为主极轴线。

磁通密度  $B_x$  曲线所包围的面积即为主极磁通  $\Phi$ 。由于磁通  $\Phi$  是有方向的,所以  $B_x$  也有正、负,一般规定 S 极下磁通密度为正, N 极下磁通密度为负。

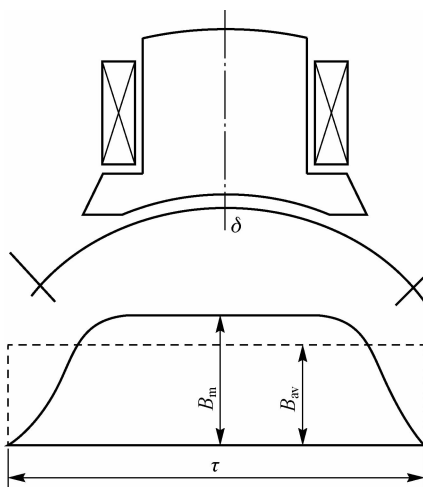


图 2-27 气隙磁通密度的分布

### 2.4.3 电枢磁场

直流电机负载运行时,电枢绕组中通过电流,所产生的磁场称为电枢磁场。

电枢磁场沿电枢表面的分布情况与电枢电流的分布情况有关。在直流电机中,电枢

## 电机与拖动基础

电流方向的分界线是电刷,在电刷轴线两侧对称分布,所以电枢磁场的分布情况与电刷的位置有关。

电刷的正常位置应在主极轴线下的换向片上,这时与电刷相连接的电枢元件位于几何中心线上或附近。在分析电枢磁场示意图时,常省去换向器,把电刷画成与线圈的导体直接相连,所以在正常情况下,电刷直接画在几何中心线上。

下面分析电刷在几何中心线上和偏离几何中心线两种情况下的电枢磁场分布。

### 1. 电刷在几何中心线上

电刷在几何中心线上时,电枢电流的方向以电刷为分界线,相邻两电刷间的电枢圆周上的导体电流方向都相同,而每个电刷两侧的导体电流方向相反。因此,只要电刷不动,不论电枢是静止还是旋转,电枢表面电流分布总是不变的,所以电枢电流产生的电枢磁场在空间总是静止的。图 2-28 所示为两极电机的电枢电流方向和电枢磁场分布情况。

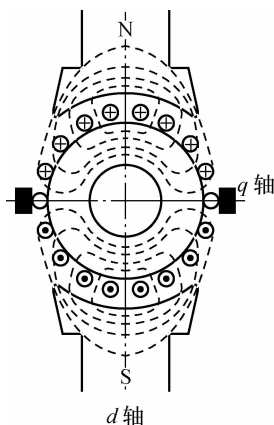


图 2-28 两极电机的电枢电流方向和电枢磁场分布情况

电枢磁通的方向与电枢导体中的电流方向间符合右手螺旋定则,这时电枢可以看成是一个电磁铁,它的 N 极和 S 极位于电刷轴线上,因此,电枢磁场的轴线为电刷轴线。与主极磁场轴线在空间垂直的称为交轴电枢磁场。主极磁场轴线称为  $d$  轴,电枢磁场轴线称为  $q$  轴。

电枢磁势在空间的分布情况可应用全电流定律进行分析。将图 2-28 展开成图 2-29,图 2-29(a) 表示电枢电流和磁通的分布。由图可见,电枢支路的中点对应在主极轴线上,电枢磁通环绕支路中点向两边对称分布。以支路中点为基准,任取一个磁通管,通过磁通管所形成的回路磁势  $F_{\Sigma}$  等于此回路中所包含的全电流。因此,对应主极中心点,回路磁势为零,而通过电刷轴线的回路磁势最大。假定电枢表面导体均匀而又连续分布,则电枢磁势的分布曲线为一个三角形,如图 2-29(b) 所示。

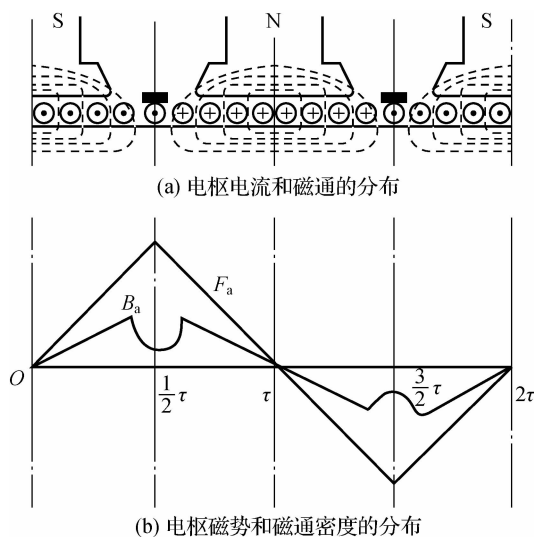


图 2-29 电枢磁势和磁密分布

三角形分布的电枢磁势将产生怎样的磁通密度分布呢？由图 2-29(a)可见，每一电枢磁通都经过电枢铁心、气隙和主极铁心形成闭合回路，由于铁磁物质的磁阻相对空气磁阻数值很小，因而上述闭合磁路中的磁势全部降在两个气隙上。因此，电枢磁势产生磁场的磁通密度  $B_a$  为

$$B_a = \mu_0 \frac{F_a}{\delta} \quad (2-20)$$

式中， $\mu_0$  为空气的磁导率； $\delta$  为有效气隙长度。

在磁极下面，气隙的长度基本不变，可以认为  $B_a$  随  $F_a$  的增加而增加；在极间区域，由于气隙变得很大，虽然  $F_a$  继续增加，但是  $B_a$  反而减少，所以  $B_a$  的分布曲线为马鞍形，如图 2-29(b)所示。

综上所述，当电刷在几何中心线上时，电枢磁场有以下特点：

- (1) 在空间静止不动。
- (2) 电枢磁场轴线与主极磁场轴线垂直，为交轴电枢磁场。
- (3) 电枢磁通密度  $B_a$  在空间分布呈马鞍形。

## 2. 电刷偏离几何中心线

如图 2-30(a)所示，当电刷偏离几何中心线一个角度时，电刷在电枢表面移动一段距离  $b$ 。由于电枢导体中电流的分布仍以电刷为界，因而电枢磁势的轴线也将随之移动，此时电枢磁场轴线和主极磁场中心线不再是垂直关系。为了研究方便，将电枢磁势分为两部分：一部分由  $\tau - 2b$  范围内的电枢导体电流形成，如图 2-30(b)所示，这部分磁势与主极磁势轴线在空间垂直，称为交轴电枢磁势  $F_{aq}$ ；另一部分由  $2b$  范围内的电枢导体电流形成，如图 2-30(c)所示，这部分磁势与主极磁势的轴线重合，称为直轴电枢磁势  $F_{ad}$ 。

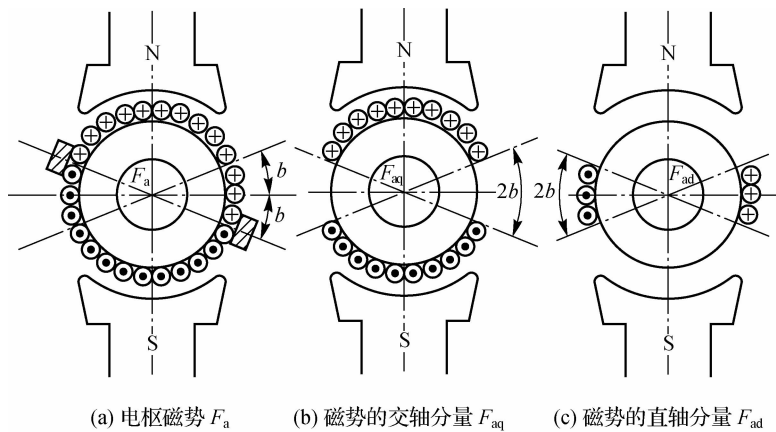


图 2-30 电刷偏离几何中心线时的电枢磁场

由上述分析可知,电枢磁势和电刷位置的关系如下:电刷在几何中心线上时,只有交轴电枢磁势;电刷偏离几何中心线时,除交轴电枢磁势外,还有直轴电枢磁势。

#### 2.4.4 电枢反应

电机负载运行时,电枢磁场对主极磁场的影响称为电枢反应。交轴电枢磁势对主极磁场的影响称为交轴电枢反应,直轴电枢磁势对主极磁场的影响称为直轴电枢反应。

##### 1. 交轴电枢反应

一般情况下,电刷总是位于几何中心线上,电枢磁势全部为交轴电枢磁势,只有交轴电枢反应,此时电机的磁场由主极磁势建立的磁场和电枢磁势建立的磁场叠加而成。

图 2-31(b)中的  $B_0$  表示电机空载时主磁场沿电枢表面的分布曲线(梯形),图 2-31(c)中的  $B_a$  表示电机负载时由交轴电枢磁势单独建立的电枢磁场沿电枢表面的分布曲线(马鞍形)。当电机磁路不饱和时,磁路磁阻为常值,将  $B_0$  和  $B_a$  相加,即可得到负载后合成磁场沿电枢表面的分布曲线  $B_s$ ,如图 2-31(c)中实线所示。实际上电机的磁路往往是饱和的,由于合成磁通在增加的那一半极面中饱和程度的增加,使该部分的磁阻增大,磁通密度减少,如图 2-31(c)中虚线所示。

综上所述,交轴电枢反应的影响如下:

(1)气隙磁场发生畸变。每个主极下的磁场,一半被削弱,另一半被加强,使气隙磁通密度分布曲线由平顶形变成尖顶形。

(2)气隙磁场畸变后,会使电枢绕组一条支路中各串联线圈间的电势分布不均匀。如图 2-32 所示,在极尖处的磁通密度大大增加,线圈处在这个部位时,感应电势很大,使所接两个换向片间的电压很大,可能超过换向片间的安全电压,产生火花或电弧,使电机损坏。

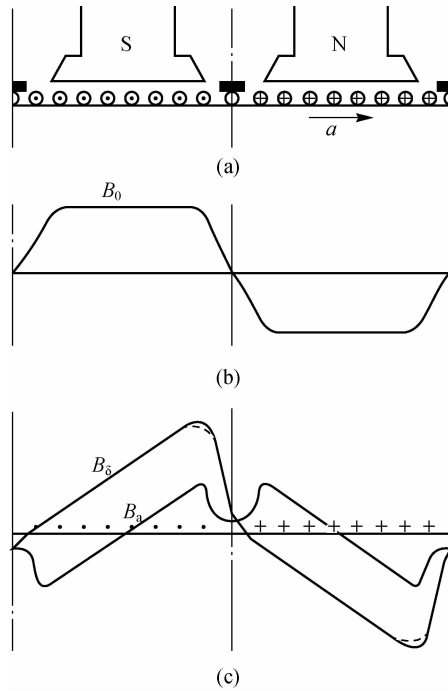


图 2-31 直流电机负载时的合成磁势

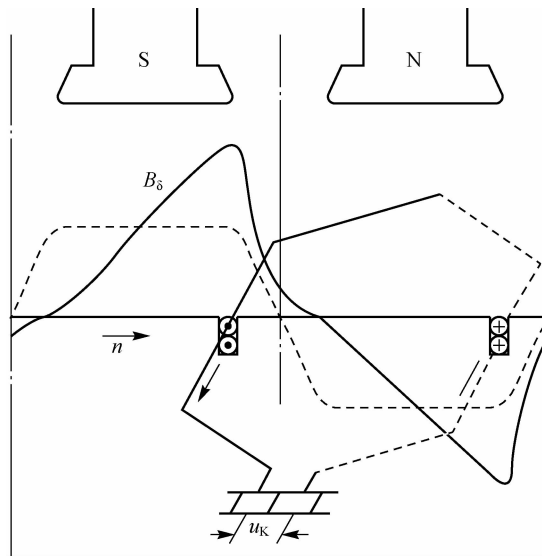


图 2-32 电枢反应使片间电压增大

(3) 每极磁通量减少和气隙平均磁通密度下降。在磁路不饱和时,因主磁场被削弱的数量等于被加强的数量,故气隙磁通量和平均气隙磁通密度没有变化。实际上,由于磁路饱和的影响,一半极面下磁通增加的量小于另一半极面下磁通减少的量,因而负载时的每极磁通量比空载时的每极磁通量有所减少,则平均磁通密度有所下降,即交轴电

枢磁场对主极磁场起去磁作用,这种去磁作用是通过磁路饱和和作用产生的。

## 2. 直轴电枢反应

电刷偏离几何中心线时,电枢磁势中包含有交轴电枢磁势  $F_{aq}$  和直轴电枢磁势  $F_{ad}$  两个分量,将同时出现交轴电枢反应和直轴电枢反应。直轴电枢磁势与主极轴线重合,若  $F_{ad}$  与主极磁势方向相同,则起增磁作用,增磁作用将引起电机换向恶化。若  $F_{ad}$  与主极磁势方向相反,则起去磁作用,去磁作用使电机的每极磁通量下降,导致电枢电势降低。

## 2.5 直流电机的感应电势和电磁转矩

### 2.5.1 直流电机的感应电势

直流电机的感应电势是指电机正负电刷间的电势。当电机的气隙中有磁场存在且电枢旋转使电枢导体切割磁力线时,在电枢绕组中会产生感应电势。感应电势的大小不仅取决于磁通量的大小和转速的高低,还和绕组的导体数和连接方法有关。从电刷看去,电枢绕组由  $2a$  条并联支路组成,电刷间的电势为一条支路电势,而支路电势为支路中各串联导体的感应电势之和,绕组形式不同,其连接方式不同,支路数和串联导体数均不同,则感应电势大小也不同。

设电枢绕组线圈数为  $S$ ,一个线圈的匝数为  $N_s$ ,则电枢导体总数  $N$  为

$$N = 2SN_s \quad (2-21)$$

每一支路中串联的导体数为  $\frac{N}{2a}$ 。

直流电机空载运行时的气隙磁通密度分布如图 2-33 所示。由图可见,电枢表面各点的磁通密度不相等,则各导体中感应电势的数值也不相等,使电枢电势公式的推导变得复杂,为此引入磁通密度和导体感应电势的平均值  $B_{av}$  和  $e_{av}$  进行分析。

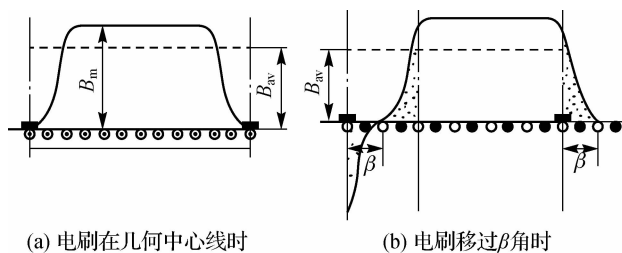


图 2-33 直流电机空载运行时的气隙磁通密度分布

主极极距为  $\tau$ ,导体在磁场中的轴向有效长度为  $L$ ,每极磁通为  $\Phi$ ,则平均气隙磁通密度为

$$B_{av} = \frac{\Phi}{L\tau} \quad (2-22)$$

导体的平均电势为

$$e_{av} = B_{av}Lv \quad (2-23)$$



式中,  $v$  为电枢表面线速度, 若电机转速为  $n$ , 电枢直径为  $D_a$ , 主极数为  $2p$ , 电枢表面周长为  $\pi D_a = 2p\tau$ , 则

$$v = \frac{2p\tau n}{60}$$

因此, 支路电势即电机的感应电势为

$$E_a = \frac{N}{2a} e_{av} = \frac{N}{2a} \cdot \frac{\Phi}{\tau L} \cdot L \cdot \frac{2p\tau n}{60} = \frac{pN}{60a} \cdot \Phi \cdot n = C_e \Phi n \quad (2-24)$$

式中,  $\Phi$  为每极磁通量, Wb;  $n$  为电机转速, r/min;  $C_e$  为电机电势常数,  $C_e = \frac{pN}{60a}$ , 对于给定的电机,  $p$ 、 $N$ 、 $a$  均为定值, 所以  $C_e$  是一个常数。

从以上分析可知:

(1) 直流电机的感应电势是指电枢表面圆周上固定位置(电刷间)的电枢线圈中的感应电势之和, 仅与电刷间磁通的大小、电枢转速及电机的结构有关。对于已给定的电机,  $C_e$  为常数, 感应电势  $E_a$  的大小随着磁通和转速的变化而不同。

(2) 感应电势的大小与磁通的大小有关, 与磁通密度的分布无关。分布形状改变使每个导体的感应电势大小发生变化, 只要保持总磁通量不变, 电刷间的电势就不变。计算空载或负载电势时, 要分别代入空载或负载时的磁通值。当励磁绕组中无电流时, 气隙磁场由主极剩磁产生, 将剩磁磁通量代入公式可求出电机的剩磁电势。

(3) 公式是在整距绕组时导出的, 若为短距绕组, 则在线圈的两边都处在同一磁极下的瞬间, 两线圈边中的感应电势方向相反, 互相抵消, 使感应电势减少。在直流电机中, 不允许节距过短, 可不考虑节距对电势的影响。

(4) 电刷偏离几何中心线时, 电刷间所包含的总磁通量有所减少, 如图 2-33(b) 所示, 使感应电势相应减少。

## 2.5.2 直流电机的电磁转矩

电枢绕组通过电流时, 在磁场中将受到电磁力的作用, 电磁力在电枢轴上产生的转矩称为电磁转矩。电磁转矩的大小, 可根据电磁力定律求得。

电枢绕组的支路电流为  $i_a$  时, 作用在任意一根导体上的平均电磁力  $f_{av}$  为

$$f_{av} = B_{av} \cdot L \cdot i_a \quad (2-25)$$

导体产生的电磁转矩为

$$T_{av} = f_{av} \frac{D_a}{2} \quad (2-26)$$

由于每极下导体的电流方向相同, 因而同一极下各导体产生的电磁转矩方向相同, 相邻极下的磁场和导体电流方向同时相反, 转矩方向保持不变, 如图 2-34 所示。因此, 电磁转矩  $T$  应为电枢表面所有导体产生的  $f_{av}$  之和, 即

$$T = f_{av} \frac{D_a}{2} N = B_{av} L i_a \cdot \frac{D_a}{2} N = \frac{\Phi}{\tau L} \cdot L \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot \frac{p\tau}{\pi} \cdot N = \frac{pN}{2\pi a} \cdot \Phi \cdot I_a = C_T \Phi I_a \quad (2-27)$$

式中,  $I_a$  为电枢电流,  $I_a = 2ai_a$ ;  $C_T = \frac{pN}{2\pi a}$ 。

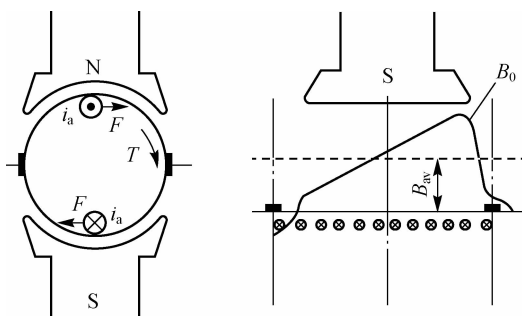


图 2-34 直流电机的电磁转矩

对于已制成的电机,  $p$ 、 $N$ 、 $a$  均为定值, 所以,  $C_T$  也是一个常数。感应电势  $E_a = C_e \Phi n$  和电磁转矩  $T = C_T \Phi I_a$  是直流电机的两个重要公式。对同一台直流电机, 电势常数  $C_e$  和转矩常数  $C_T$  有一定的关系。

因为

$$C_e = \frac{pN}{60} a, C_T = \frac{pN}{2\pi a}$$

所以

$$C_T \approx 9.55 C_e \quad (2-28)$$

## 2.6 直流电机的基本方程

从直流电机可逆原理可知, 无论是发电机还是电动机, 在实现能量转换过程中, 都伴有感应电势、电流、电磁转矩产生。电机稳态运行, 电机的负载、励磁电流及转速达到稳定值时, 各种电压、转矩和功率之间存在的平衡关系称为电机的平衡方程式。这些平衡关系应分别符合电学、力学及能量守恒定律。

### 2.6.1 电势平衡方程

无论是发电机还是电动机, 当电枢旋转时, 电枢绕组切割磁力线都产生感应电势, 其大小为  $E_a = C_e \Phi n$ , 方向可用右手定则判定。在发电机中, 电枢绕组接负载后, 感应电势驱动电流流动, 所以电枢电流与感应电势同方向, 如图 2-35 所示; 在电动机中, 电枢绕组经电刷接外电源, 外加电压为驱动电流流动, 所以电枢电流与电源电压同方向, 此时, 感应电势与电枢电流方向相反, 称为反电势, 如图 2-36 所示。

设  $U$  为直流电机的端电压, 取  $U$ 、 $E_a$ 、 $I_a$  的实际方向作为正方向, 可得电枢回路的电势平衡方程式。

(1) 发电机的电枢回路的电势平衡方程。

$$U = E_a - I_a R_a \quad (2-29)$$

(2) 电动机的电枢回路的电势平衡方程。

$$U = E_a + I_a R_a \quad (2-30)$$

式中,  $R_a$  为电枢回路总电阻, 包括电枢回路中各串联绕组的电阻和电刷与换向器之间的接触电阻。

式(2-29)和式(2-30)适用于各种励磁方式的直流电机, 在计算时, 要注意各种励磁方式中  $R_a$  所包含的内容不完全相同。

以上两式表明, 直流发电机和电动机在运行时都存在电枢电势  $E_a$  和端电压  $U$ 。在发电机中,  $E_a > U$ , 电枢电流  $I_a$  的方向与  $E_a$  的方向一致; 在电动机中,  $U > E_a$ , 电枢电流  $I_a$  的方向与  $U$  的方向一致,  $E_a$  表现为反电势。

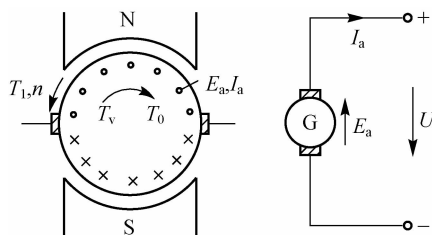


图 2-35 直流发电机的电势、转矩平衡关系

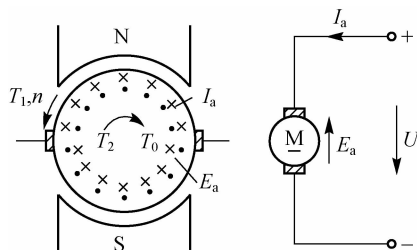


图 2-36 直流电动机的电势、转矩平衡关系

### 2.6.2 转矩平衡方程

无论是发电机还是电动机, 当电枢绕组有电流流过时, 电枢电流和磁场相互作用都产生电磁转矩,  $T = C_T \Phi I_a$ , 方向可用左手定则判定。在发电机(见图 2-35)中, 外加转矩  $T$  为驱动转矩, 使电枢旋转, 电磁转矩  $T$  与  $T_1$  方向相反, 为阻力转矩, 同时还存在电机的空载阻力转矩  $T_0$ 。在电动机(见图 2-36)中, 电磁转矩  $T$  为驱动转矩, 使电枢转动, 与电动机转向相同, 此时轴上的负载转矩  $T_2$  和  $T$  均为阻力转矩。

电机的转速恒定时, 加在电机轴上的驱动转矩应与阻力转矩相等, 得出转矩平衡方程式。

(1) 发电机的转矩平衡方程。

$$T_1 = T + T_0 \quad (2-31)$$

(2) 电动机的转矩平衡方程。

$$T = T_2 + T_0 \quad (2-32)$$

## 电机与拖动基础

以上两式表明,在电机稳定运行时,电磁转矩和外转矩同时存在并达到平衡。在发电机中, $T_1 > T$ ,作为驱动转矩的是外转矩  $T_1$ ,电机的转向取决于  $T_1$  的方向,电磁转矩是阻力转矩,起平衡外转矩的作用;在电动机中, $T > T_2$ ,作为驱动转矩的是电磁转矩  $T$ ,电机的转向取决于  $T$  的方向,电磁转矩带动负载转动而达到平衡。

### 2.6.3 功率平衡方程

电机是实现机电能量转换的装置,因而功率关系是电机运行中最基本的关系。电机运行过程中,存在输入功率、输出功率和各种损耗,它们之间应满足能量守恒定律。若将电机进行能量转换过程中的各种损耗抽出,则可用一个耦合磁场来表述电机,如图 2-37 所示。机械系统为原动机或机械负载,电系统为电源或电负载,耦合磁场产生  $T$  和  $E_a$ ,以实现能量的转换。 $P_{Cu}$  (包括  $P_{Cuf}$  和  $P_{Cua}$ )、 $P_{Fe}$ 、 $P_{\Omega}$ 、 $P_{ad}$  分别表示电机的各种损耗。机械系统的机械功率等于转矩乘以旋转角速度,电系统的电功率等于电压乘以电流,经磁场转换的功率称为电磁功率。

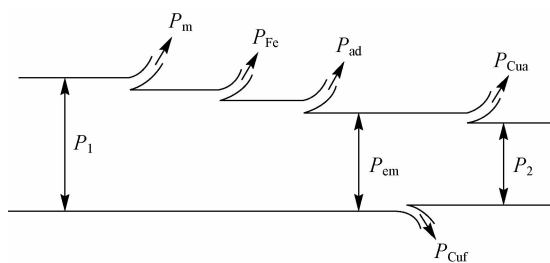


图 2-37 电机中的能量平衡图

#### 1. 电机的损耗

电机的损耗包括铜耗  $P_{Cu}$ 、铁耗  $P_{Fe}$ 、机械损耗  $P_{\Omega}$  和附加损耗  $P_{ad}$ 。

##### 1) 铜损耗 $P_{Cu}$

铜损耗是由于电机的各种绕组中流过电流而产生的电阻损耗,铜损耗随负载而变化,又称为可变损耗。铜损耗分两种:一个是励磁回路的铜损耗  $P_{Cuf}$ ,一个是电枢回路的铜损耗  $P_{Cua}$ 。

##### 2) 铁损耗 $P_{Fe}$

由于铁心中的磁滞、涡流而产生的损耗称为铁损耗。

##### 3) 机械损耗 $P_{\Omega}$

由于各种机械摩擦、通风而产生的损耗称为机械损耗。

铁损耗和机械损耗在电机空载时就存在,其大小与电机负载无关,合称为空载损耗(又称不变损耗),用  $P_0$  表示,即

$$P_0 = P_{Fe} + P_{\Omega} \quad (2-33)$$

4) 附加损耗  $P_{ad}$ 

产生附加损耗的原因很多,如电枢反应使气隙磁场畸变而引起铁耗的增加、电枢表面电流分布不均而引起铜耗的增加、均压电流造成的损耗等。 $P_{ad}$ 中的一部分空载时已存在,另一部分随负载而变化。附加损耗一般不易计算,而估计为电机输出功率的  $0.5\% \sim 2\%$ 。

综上所述,电机的总损耗  $\sum P$  为

$$\sum P = P_{Cu} + P_{Fe} + P_{\Omega} + P_{ad} \quad (2-34)$$

## 2. 电磁功率

在电机中,把通过电磁作用传递的功率称为电磁功率,用  $P_m$  表示。从图 2-37 中可以看出电磁功率的意义和计算方法。对发电机而言,输入机械功率  $P_1 = T\Omega$ ,克服空载损耗后,其余部分转变为电磁功率,即

$$P_m = P_1 - P_0 \quad (2-35)$$

转换而来的电功率不能全部输出,必须克服电机的铜耗  $P_{Cu}$  后才能供给负载,输出给负载的电功率  $P_2 = UI$ , 即

$$P_2 = P_m - P_{Cu} = UI \quad (2-36)$$

对电动机而言,输入的电功率为  $P_2 = UI$ , 此功率不能全部转换为机械功率,必须克服电机本身的铜耗  $P_{Cu}$  后才能进行电磁转换,即

$$P_m = P_1 - P_{Cu} \quad (2-37)$$

转换而来的机械功率不能全部输出,必须克服电机的空载损耗  $P_0$  后才能输出,其轴上的输出机械功率  $P_2 = T_2\Omega$ , 即

$$P_2 = P_m - P_0 = T_2\Omega \quad (2-38)$$

电磁功率既可看成机械功率,又可看成电功率。从机械功率的角度看,  $P_m$  是电磁转矩  $T$  和旋转角速度  $\Omega$  的乘积,即

$$P_m = T\Omega \quad (2-39)$$

从电功率的角度看,  $P_m$  是电枢电势  $E_a$  和电枢电流  $I_a$  的乘积,即

$$P_m = E_a I_a \quad (2-40)$$

根据能量守恒定律,两者相等,即

$$P_m = T\Omega = E_a I_a \quad (2-41)$$

因此,无论是发电机还是电动机,电磁功率均指电机能够利用电磁感应原理进行能量转换的这部分功率,可以表示为机械功率的形式,也可以表示为电功率的形式。由于电磁功率具有这样的物理意义,因而在实际计算中,经常把它作为从机械量计算电量或从电量计算机械量的桥梁。

## 3. 功率平衡方程

电机的输入功率为  $P_1$ , 输出功率为  $P_2$ , 总损耗为  $\sum P$  时,根据能量守恒定律,可得功率平衡方程为

$$P_1 = P_2 + \sum P \quad (2-42)$$

### 2.6.4 电机的效率

电机输出功率  $P_2$  和输入功率  $P_1$  之比的百分数,称为电机的效率  $\eta$ ,即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} \times 100\% \quad (2-43)$$

直流电机的基本方程把电机中电、磁、机械等物理量联系起来,是分析直流电机运行特性的基础。

## 2.7 直流发电机的运行特性

直流发电机的运行特性是指发电机在恒定转速运行时,端电压  $U$ 、负载电流  $I$ 、励磁电流  $I_f$  这 3 个基本物理量之间的关系,依次保持其中一个量不变,其余两个量就构成一种特性,因此有空载特性  $U_0 = f(I_f)$ 、负载特性  $U = f(I_f)$ 、外特性  $U = f(I)$ 、调整特性  $I_f = f(I)$ 。本节主要讨论各种励磁方式下直流发电机的空载特性  $U_0 = f(I_f)$  和外特性  $U = f(I)$ 。

### 2.7.1 他励发电机

他励发电机接线如图 2-38 所示。励磁电流  $I_f$  由其他直流电源供给,其大小和方向取决于励磁电压  $U_f$  和励磁回路总电阻  $R_f$ 。电枢电流  $I_a$  等于负载电流  $I$ ,其大小取决于负载,并与感应电势  $E_a$  同方向。

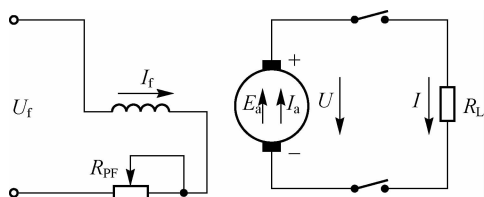


图 2-38 他励发电机接线

#### 1. 空载特性

空载特性  $U_0 = f(I_f)$  是指负载开路、电枢电流为零、转速为额定转速时,发电机的空载电压随励磁电流变化的关系。

他励发电机空载时,  $I = I_a = 0$ , 电枢回路电阻压降  $I_a R_a = 0$ , 发电机空载端电压  $U_0$  等于感应电势  $E_a$ , 即

$$U_0 = E_a = C_e \Phi n$$

由于  $n$  为常数,所以  $U_0 \propto \Phi$ 。同时,  $F_f = I_f N_f$ ,  $I_f \propto F_f$ , 则空载特性曲线  $U_0 = f(I_f)$  与电机的磁化曲线  $\Phi = f(F_f)$  形状完全相同,两曲线实际上只差一个比例常数,如图 2-39 所示。

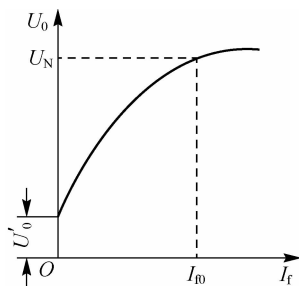


图 2-39 他励发电机的空载特性

发电机的空载特性表示给予一定  $I_f$  时,在电枢两端建立相应空载电压  $U_0$  的数值。 $I_f$  较小时,  $U_0$  接近于一条直线,当  $I_f$  逐渐增加时,磁路逐渐饱和,呈现非线性,曲线开始弯曲变平,因此,空载特性也表征了电机的饱和程度。一般电机都存在一些剩磁,所以当  $I_f=0$  时,电枢两端仍有不大的电压,称为剩磁电压  $U'_0$ ,通常  $U'_0=(2-4)/U_N$ 。

额定电压位于空载特性开始弯曲的部位,若额定电压的工作点选在直线部分(电机的磁路不饱和),磁通密度太低,铁心没有充分利用,不经济。同时,励磁电流稍有变化,就会引起电压的较大变动。若工作点选在平坦部分,磁路较饱和,要得到额定电压就需要有较多的励磁安匝,用钢量和铜损耗相应增加,亦不经济。

## 2. 外特性

外特性  $U=f(I)$  是指转速为额定转速、励磁电流为额定励磁电流时发电机的负载端电压随负载电流变化的关系。

在图 2-38 中,若将负载接入,则电枢回路有电流流过。当转速恒定、励磁电流不变时,负载  $R_L$  的变化使  $I_a$  变化,引起端电压变化。随着负载的增加,发电机的端电压逐渐下降,如图 2-40 所示。

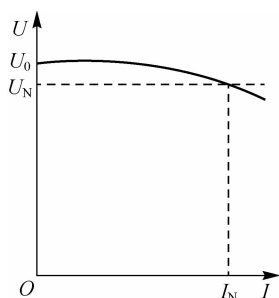


图 2-40 他励发电机的外特性

$U=f(I)$  曲线可根据发电机电势平衡方程  $U=E_a-I_aR_a$  进行分析。空载时,  $I=0$ , 端电压为  $U_0=E_a=C_e\Phi n$ 。当负载电流增加时,电压下降有以下两个原因:

## 电机与拖动基础

(1) 由于  $I_a$  增大, 电枢电阻压降  $I_a R_a$  随之增大, 使端电压下降。

(2)  $I_a$  增大时, 引起电枢反应的去磁作用, 使每极磁通  $\Phi$  减小,  $E_a = C_e \Phi n$ , 所以  $E_a$  减小, 使端电压进一步下降。

发电机的端电压随负载变化的程度, 可用电压调整率表示。电压调整率是指  $n_N = n I_{fN}$  时, 发电机从额定负载 ( $U = U_N, I = I_N$ ) 到空载 ( $U = U_0, I = I_0$ ) 时, 端电压升高的数值与额定电压比值的百分数, 即

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (2-44)$$

一般他励发电机的  $\Delta U$  为  $5\% \sim 20\%$ , 基本可看成是恒压电源。

从外特性可见, 若他励发电机在额定励磁下发生短路, 由于  $R = 0, U = 0, I_a = \frac{E_a}{R_a}$ , 而电机的内阻  $R_a$  很小, 因而将产生高达额定电流十几到几十倍的短路电流。为保护电机不受短路电流的危害, 必须在外电路加装短路保护装置, 如熔断器等, 当电流超过允许电流值时, 保护装置立即切断外电路。

### 2.7.2 并励发电机

并励发电机接线如图 2-41 所示。励磁绕组并联在电枢的两端, 励磁电流  $I_f$  由发电机本身供给, 称为自励电机。 $I_f$  的大小和方向由端电压  $U$  及励磁回路总电阻  $R_f$  决定。电枢电流  $I_a$  等于负载电流  $I$  和励磁电流  $I_f$  之和, 即  $I_a = I + I_f$ 。

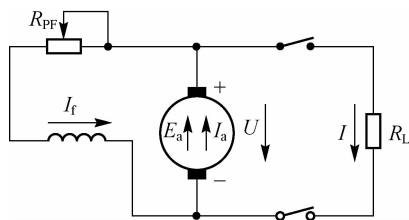


图 2-41 并励发电机接线

#### 1. 空载特性 $U_0 = f(I_f)$

并励发电机空载时,  $I = 0$ , 电枢电流  $I_a = I_f$ , 通常  $I_f$  只有额定电流的  $2\% \sim 3\%$ , 这样微小电流所产生的电阻压降和电枢反应可以忽略不计, 故空载时端电压也等于感应电势, 因此, 并励发电机的空载特性和他励发电机相同(见图 2-39)。

#### 2. 自励过程和电压建立的条件

由图 2-41 可见, 并励发电机建立主磁场的励磁电流由电枢电势供给, 而电枢电势又是由电枢绕组切割主磁场产生的。当并励发电机刚开始运行时, 外界电源并没有提供励磁电流, 那么电枢电势和励磁电流是怎样产生的呢?

由电工基础知识已知, 任何磁性物质一经受到励磁, 即使励磁电流下降为零, 仍然会留有少量剩余磁性, 称为剩磁。在直流电机的铁心中, 当励磁电流为零时, 总有些剩磁存



在。并励发电机就是利用本身的剩磁建立稳定电压的,这个过程称为电压建立过程,也称为电机的自励过程。

电枢旋转时,电枢绕组切割剩磁磁通,感应剩磁电势(约为额定电压的 $2\% \sim 4\%$ ),这个电势加到励磁绕组上使励磁电流从零开始增加,产生一个微小的励磁磁场。若新产生的磁场与剩磁方向相同,则使电势继续上升;若方向相反,则剩磁被削弱,发电机电压将不能建立。励磁电流所产生的磁场是增强还是削弱剩磁,和电枢绕组与励磁绕组的相对连接及电枢的旋转方向有关。

满足以上两个条件后,感应电势和励磁电流可以相互促进,不断上升。但电势是否会无止境地上升?发电机的稳定工作电压又取决于哪些因素?要解决这两个问题,必须对自励过程做进一步分析。

并励发电机在建立电压的过程中,负载开关应打开,发电机应为空载状态。电压建立过程为过渡过程,设 $U_0$ 为空载电压, $I_f$ 为励磁电流, $R_f = r_f + R_{PF}$ 为励磁回路总电阻。从电枢回路看, $U_0$ 为 $I_f$ 的函数, $U_0 = f(I_f)$ 为发电机的空载特性或磁化曲线,如图2-42中的曲线1所示。从励磁回路看,当电阻 $R_f$ 不变时,励磁回路电阻压降 $I_f R_f$ 随 $I_f$ 正比变化,即 $I_f R_f = f(I_f)$ 的关系为一条通过原点的直线,称为场电阻,如图2-42中的曲线2所示。场电阻的斜率为

$$\tan \alpha = \frac{I_f R_f}{I_f} = R_f \quad (2-45)$$

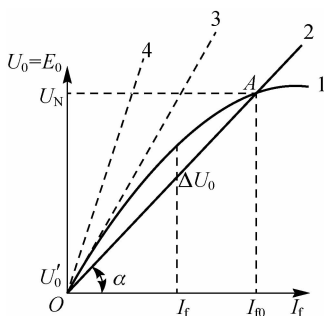


图 2-42 电压建立过程分析

在图2-42中,曲线1和曲线2交于A点。在A点的左侧,对应某 $I_f$ (自励过程中的任意瞬间), $U_0 > I_f R_f$ ,即感应电势产生的端电压大于磁场电阻上所需要的压降,产生的剩余电压( $\Delta U_0 = U_0 - I_f R_f$ )作用在励磁回路上,使 $I_f$ 上升, $U_0$ 随之上升。由于空载特性具有饱和特性, $U_0$ 上升速度逐渐缓慢,到达A点时, $U_0 = I_f R_f$ ,即励磁电流产生的空载电压等于励磁回路的电阻压降。励磁电流和感应电势不再增大,电机进入空载稳定状态,端电压便稳定在某一数值上,自励过程结束,电压不会无止境上升。

交点A的位置并不是固定的,它随着励磁回路的电阻值变化,若磁场电阻增大,则场阻线的斜率增大,直线变陡,此时交点将沿着曲线1向原点移动,稳定电压的数值降低,所以改变 $R_f$ 可调节发电机的空载电压。当场阻线(见图2-42中的曲线3)与空载特性的

## 电机与拖动基础

直线部分相切时,曲线 1 和曲线 3 没有固定的交点,发电机的电压不稳定,此种状态称为临界状态,对应的励磁回路电阻称为建压临界电阻。当励磁回路电阻大于建压临界电阻时,场阻线(见图 2-42 中的曲线 4)与空载特性的交点很低,此时空载电压约等于剩磁电压,发电机不能自励。

综上所述,要使一台并励发电机建立稳定的电压,必须满足以下条件:

(1)电机有剩磁并具有饱和特性。有剩磁,自励过程才能开始,具有饱和特性才能建立稳定电压。若电机失去剩磁,可用其他直流电源向励磁绕组通电以获得剩磁。

(2)励磁绕组与电枢绕组的连接正确,使励磁电流产生的磁通与剩磁同方向。

(3)励磁回路的总电阻要小于建压临界电阻。

### 3. 外特性 $U=f(I)$

并励发电机的外特性是指  $n=\text{常数}$ ,  $R_f=R_{fN}$  时,  $U=f(I)$  的关系曲线。其中,  $R_{fN}$  为电机达到额定状态 ( $U=U_N, I=I_N$ ) 时的励磁电阻。

图 2-43 中的曲线 2 为并励发电机的外特性,曲线 2 所示为该电机接成他励时,保持同一空载电压时的外特性。由图可见,与他励相比,并励发电机的外特性有以下 3 个特点:

(1)在同一负载电流下端电压较低。在他励发电机中,励磁电流不变,随着负载电流的增加,端电压下降有两个原因,即电枢的电阻压降和电枢反应的去磁作用。并励发电机除上述两个原因外,还有第三个原因。并励时,  $I_f = \frac{U}{R_f}$ , 当端电压下降时,励磁电流  $I_f$  随之减小,主磁通和感应电势下降,使得端电压进一步降低。因此,并励发电机的外特性比他励发电机下降得快,即图 2-43 中曲线 2 的实线部分。并励发电机的电压调整率一般在 20% 左右。

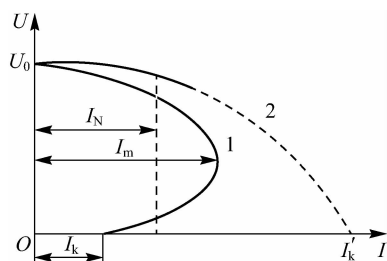


图 2-43 并励发电机的外特性

(2)外特性有“拐弯”现象,与拐点相对应的电流称为临界电流  $I_m$ ,一般  $I_m=(2\sim 3)I_N$ 。根据电路定律,负载电流  $I = \frac{U}{R_L}$  受到两方面影响:一方面,由于负载电阻  $R_L$  减小,使  $I$  增加;另一方面,由于端电压  $U$  下降,使  $I$  减小。因此,负载电流的变化情况取决于  $R_L$  与  $U$  这两个量相对变化的程度。当  $U$  较高,磁路较饱和时,电枢反应的去磁作用和电枢电阻压降使  $U$  下降较小,励磁电流减小引起磁通和电势的下降不大,因此,  $R_L$  的变化幅度大

于  $U$  变化的幅度。当  $R_L$  减小时,负载电流增大,一直到拐点。若  $R_L$  进一步减小,由于此时  $U$  较低,磁路已处于不饱和状态,励磁电流稍有减小,将引起感应电势下降很多,致使  $U$  下降的幅度大于  $R_L$  减小的幅度。于是,  $R_L$  减小时,负载电流反而减小,即图 2-43 中曲线 2 的虚线部分(到达临界电流  $I_m$  以后的部分)。

(3)稳定短路电流  $I_k$  不大。当负载电阻  $R_L=0$ ,即电枢绕组被短路时,端电压  $U=0$ ,励磁绕组的电压为剩磁电压,短路电流仅由剩磁电压产生,故数值很小。但是当并励发电机在运行中电枢绕组出线端发生突然短路时,由于励磁绕组是一个具有铁心的电感线圈,具有较大的电感,励磁电流在短路瞬间不能突然减小,因而磁通和感应电势不能突然降低,短路电流可达到很大的数值,使电机损坏。因此,并励发电机也必须加装短路保护装置,以保证电机安全运行。

并励发电机的励磁电流由发电机本身供给,不需要其他励磁电源,在规定负载范围内,能提供较稳定的电压。并励发电机是最常用的直流发电机。

### 2.7.3 串励发电机和复励发电机

#### 1. 串励发电机

串励发电机接线如图 2-44 所示。由于励磁绕组、电枢绕组及负载相串联,因而励磁电流、电枢电流和负载电流三者相等,即  $I_f = I_a = I$ 。当负载变化时,励磁电流及磁场随之变化,这是串励发电机的基本特点。

串励发电机的空载特性只有在它的励磁绕组由其他电源供电时才能求出。

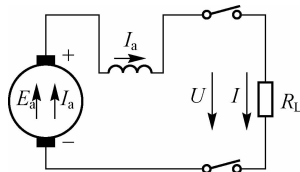


图 2-44 串励发电机接线

串励发电机的外特性如图 2-45 中的曲线 2 所示。当负载较小时,励磁电流随负载电流增大,感应电势及电压随之升高;当负载较大时,磁路逐渐饱和,励磁电流增大时,感应电势上升缓慢;同时,电枢电流产生的电枢反应去磁作用及电阻压降却大大增加,反而使端电压有所下降。

一般来说,供电系统要求有比较稳定的电压,即当负载变化时,电压的变化不能太大,应将电压调整率限制在一定的范围内,而串励发电机端电压随负载变化很大,因此其实用价值很小,除一些特殊场合外,很少采用。

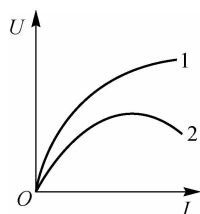


图 2-45 串励发电机的特性

## 2. 复励发电机

复励发电机接线如图 2-46 所示。电机的主磁极装有并励和串励两套励磁绕组，若两绕组产生的磁势方向相同，则该复励称为积复励；若两绕组产生的磁势方向相反，则该复励称为差复励。在两绕组中，并励绕组的磁势起主要作用，以保证发电机能建立电压；串励绕组用来自动调节发电机的电压，以适应不同负载的要求。

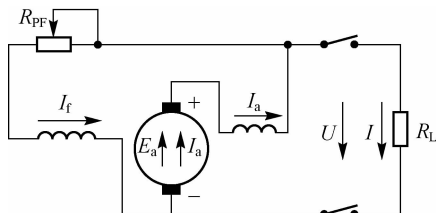


图 2-46 复励发电机

### 1) 空载特性 $U_0 = f(I_f)$

复励发电机空载时， $I = 0$ ，串励绕组不起作用，只有并励绕组产生磁势。因此，复励发电机的空载特性与并励发电机的空载特性一样。

### 2) 外特性 $U_0 = f(I_f)$

当负载电流流过串励绕组时，将产生串励磁势，串励磁势的强弱对外特性的形状有很大影响。

随着负载电流的增加，电枢电阻压降和电枢反应的去磁作用使端电压有下降的趋势，但对于积复励发电机来说，随着负载电流的增加，串励磁势也增加，因而也有使端电压升高的趋势。根据串励绕组的补偿程度，积复励发电机可分为过复励、平复励和欠复励。不同的补偿程度使积复励发电机有不同的特性，适用于不同的场合。若串励绕组的影响较大，则随着负载电流的增加，端电压上升，称为过复励，其外特性如图 2-47 中的曲线 1 所示。若串励绕组的影响较小，则随着负载电流的增加，端电压仍然下降，称为欠复励，其外特性如图 2-47 中的曲线 3 所示。若在额定负载时，串励绕组的增磁作用在抵消电枢反应的去磁作用后，增加的感应电势恰好补偿电枢电阻压降，则满载电压与空载电压相等，称为平复励，其外特性如图 2-47 中的曲线 2 所示。平复励发电机的外特性并不是一条水平直线，这是因为当电流较小时，磁路尚未饱和，随着负载电流的增加，磁通及感应电势增加较多，串励绕组影响较大，使端电压上升。当电流较大时，磁路趋向饱和，

随着负载电流的增加,磁通及感应电势增加减少,而电阻压降仍正比例增加,因此,端电压反而下降。

积复励发电机的端电压在负载变化时变化较小,多应用于要求电压基本不变的系统中。

在差复励发电机中,串励绕组产生去磁电势,故随着负载电流的增加,电机中的合成磁通减小,使感应电势和端电压迅速下降,具有陡降的外特性,如图 2-47 中的曲线 4 所示。差复励发电机只应用于特殊场合,如直流电焊机等。

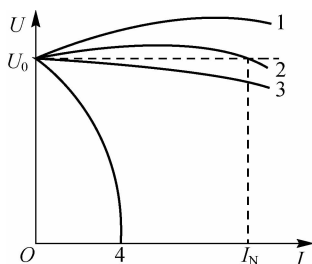


图 2-47 复励发电机的外特性

## 本章小结

直流电机的基本原理建立在电和磁相互作用的基础上,可应用电磁基本定律结合换向器和电刷的作用来理解。直流发电机将机械能转换成直流电能,直流电动机将直流电能转换成机械能。一台直流电机既可作为发电机运行,也可作为电动机运行,这就是电机运行的可逆性。

直流电机由定子和转子两大部分组成。

电枢绕组的基本形式是单叠绕组和单波绕组,其连接规律不同,支路对数也不同。单叠绕组  $a = p$ ,单波绕组  $a = 2$ 。

直流电机的励磁方式可分为他励、并励、串励和复励 4 种,励磁功率仅占电机额定功率的 2%~3%,但对电机性能的影响很大。

直流电机的主磁场一般都是在励磁绕组中通以直流电流建立的。空载时的主磁场仅由励磁电流产生,其磁通密度分布为梯形。负载时,电枢电流产生电枢磁场,对主磁场的分布和大小产生影响,称为电枢反应。电枢反应的性质与电刷的位置及电机的运行方式有关,分为交轴电枢反应和直轴电枢反应。

感应电势、电磁转矩公式和电势、转矩及功率平衡方程是直流电机最基本的公式。应用这些公式可定性和定量分析直流电机运行中的各种问题。

直流发电机可以他励,也可以自励,自励电机存在建压问题。自励发电机的建压条件为:电机中要有剩磁,励磁绕组与电枢绕组连接正确,磁场电阻小于建压临界电阻。

## 电机与拖动基础

发电机的中心问题是电压问题,主要的特性是外特性  $U_0 = f(I_f)$ ,即当负载变化时,端电压的变化情况。外特性的形状及特点因励磁方式不同有较大差异。不同励磁方式的发电机具有不同的特性,可根据需要结合具体情况选用。

### 习 题

- 2.1 说明直流发电机的工作原理。
- 2.2 说明直流电动机的工作原理。
- 2.3 直流电机的额定值有哪些?
- 2.4 直流电机的励磁方式有哪些?
- 2.5 直流电机有哪些主要部件?各部件的作用是什么?
- 2.6 直流电机的换向装置由哪些部件构成?它在电机中起什么作用?
- 2.7 直流电枢绕组由哪些部件构成?
- 2.8 什么是电枢反应?它对电机有什么影响?
- 2.9 电机产生的电势  $E_a = C_e \Phi n$  对于直流发电机和直流电动机来说所起的作用有什么不同?
- 2.10 电机产生的电磁转矩  $T = C_t \Phi I_a$  对于直流发电机和直流电动机来说,所起的作用有什么不同?
- 2.11 换向过程中的火花是如何产生的?如何改善换向?
- 2.12 一台直流发电机,当分别把它接成他励和并励时,在相同的负载情况下,电压变化率是否相同?如果不同,哪种接法电压变化率大?为什么?
- 2.13 一台四极直流发电机,额定功率  $P_N$  为 55 kW,额定电压  $U_N$  为 220 V,额定转速  $n_N$  为 2 500 r/min,额定效率  $\eta_N$  为 0.9。求额定状态下电机的输入功率  $P_1$  和额定电流  $I_N$ 。
- 2.14 一台直流电动机的额定数据如下:额定功率  $P_N = 17$  kW,额定电压  $U_N = 220$  V,额定转速  $n_N = 1 500$  r/min,额定效率  $\eta_N = 0.83$ 。求它的额定电流  $I_N$  及额定负载时的输入功率。
- 2.15 一台直流发电机,其额定功率  $P_N = 17$  kW,额定电压  $U_N = 230$  V,额定转速  $n_N = 1 500$  r/min,极对数  $p = 2$ ,电枢总导体数  $N = 468$ ,单波绕组,气隙每极磁通  $\Phi = 1.03 \times 10^{-2}$  Wb,求额定电流  $I_N$  和电枢电动势。
- 2.16 一台单叠绕组的直流发电机,  $2p = 4$ ,  $N = 420$ ,  $I_N = 30$  A,气隙每极磁通  $\Phi = 0.028$  Wb,额定转速  $n_N = 1 245$  r/min,求额定运行时的电枢电动势和电磁转矩及电磁功率。
- 2.17 设有一台 27 kW,4 极,220 V,2 500 r/min 的直流电动机,额定效率为 83%,电枢有 39 槽,每槽 22 根导体,2 条并联支路,求:电机的额定电流  $I_N$ ;如果额定运行时电枢内部压降为 20 V,那么此时电机的每极磁通为多少?

2.18 一台并励直流发电机的额定电压  $U_N = 230 \text{ V}$ , 励磁回路总电阻  $R_f = 44 \text{ } \Omega$ , 电枢回路总电阻  $R_a = 0.25 \text{ } \Omega$ , 负载电阻  $R_L = 4 \text{ } \Omega$ , 求:(1)励磁电流  $I_f$  和电枢电流  $I_a$ ; (2)电枢电势  $E_a$ ; (3)输出功率  $P_2$  及电磁功率。

# 直流电动机的电力拖动和仿真

## 3.1 电力拖动系统的运动方程式

用各种原动机带动生产机械的工作机构运转,以完成一定的生产任务称为拖动。用电动机作为原动机的拖动称为电力拖动。电力拖动系统通常由电动机、传动机构、工作机构、控制设备和电源 5 部分组成。

### 3.1.1 运动方程式

#### 1. 直线运动方程式

直线运动方程式为

$$F - F_L = m \frac{dv}{dt} \quad (3-1)$$

式中,  $F$  为拖动力, N;  $F_L$  为阻力, N;  $m$  为运动物体的质量, kg;  $m \frac{dv}{dt}$  为惯性力, N。

#### 2. 旋转运动方程式

旋转运动方程式为

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (3-2)$$

式中,  $T$  为拖动转矩;  $T_L$  为阻转矩(或称负载转矩);  $J \frac{d\Omega}{dt}$  为惯性转矩(或称加速转矩)。

通常将转动惯量  $J$  用飞轮矩  $GD^2$  来表示,它们之间的关系为

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

式中,  $m$  与  $G$  为转动部分的质量(kg)与重量(N);  $\rho$  与  $D$  为惯性半径与直径, m;  $g$  为重力加速度,取值为  $9.81 \text{ m/s}^2$ 。

再将机械角速度  $\Omega$  用转速  $n$  表示,则可得运动方程式的实用形式为

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (3-4)$$

式中,  $GD^2$  为飞轮矩,  $\text{N} \cdot \text{m}^2$ 。

电动机的工作状态可由运动方程式判断。



(1) 当  $T = T_L$  时,  $\frac{dn}{dt} = 0$ , 则  $n = 0$  或  $n = \text{常值}$ , 电动机静止或等速旋转, 即电力拖动系统稳定运行。

(2) 当  $T > T_L$  时,  $\frac{dn}{dt} > 0$ , 电力拖动系统加速运行。

(3) 当  $T < T_L$  时,  $\frac{dn}{dt} < 0$ , 电力拖动系统减速运行。

### 3.1.2 运动方程式中转矩的正负号分析

根据电动机和生产机械负载类型及运转状态的不同, 运动方程式中的  $T$  和  $T_L$  都有方向变化带来的正负号问题。一般做如下规定: 先规定某一方向为  $n$  的正方向, 则转矩  $T$  的方向与此方向相同为正, 反之为负; 转矩  $T_L$  的方向与此方向相反为正, 相同为负。

$\frac{dn}{dt}$  的大小及正负符号由  $T$  及  $T_L$  的代数和来决定。

上述运动方程式是对一根轴而言的, 适用于单轴系统, 对于多轴系统, 就应列出多个方程联立求解, 比较麻烦。为此, 通常只要把电动机轴作为研究对象即可。这就需把实际的拖动系统折算为等效的单轴系统。

## 3.2 生产机械的负载机械特性

负载转矩  $T_L$  与转速  $n$  的关系曲线  $T_L = f(n)$  称为生产机械的负载机械特性。

生产机械品种繁杂, 特性各不相同, 但大多数生产机械的机械特性可以归纳为以下 3 种类型:

### 3.2.1 恒转矩负载机械特性

#### 1. 反抗性恒转矩负载机械特性

$T_L$  的大小恒定不变, 方向总是与运动方向相反, 其机械特性在第一和第三象限, 如图 3-1 所示, 如金属的压延、机床的平移机构等。

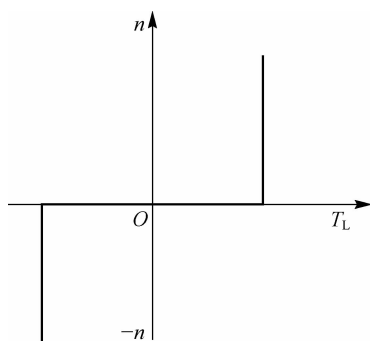


图 3-1 反抗性恒转矩负载机械特性

#### 2. 位能性恒转矩负载机械特性

$T_L$  的大小和方向均与转速无关, 不随  $n$  变化, 其机械特性在第一和第四象限, 如

## 电机与拖动基础

图 3-2 所示,如重物的提升与下放等。

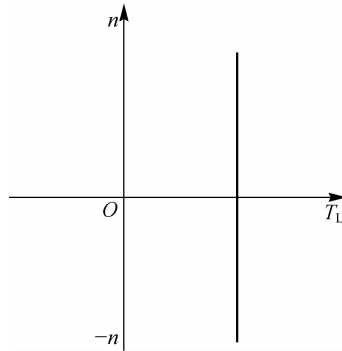


图 3-2 位能性恒转矩负载机械特性

### 3.2.2 泵类负载机械特性

$T_L$  的大小基本上与转速  $n$  的平方成正比,即

$$T_L = kn^2$$

式中,  $k$  为比例常数。

通风机负载机械特性如图 3-3 所示,在第一、第三象限(图中只画了第一象限),如风机、水泵和油泵等。

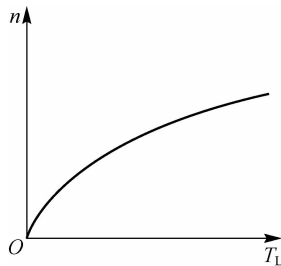


图 3-3 通风机负载机械特性

### 3.2.3 恒功率负载机械特性

$T_L$  的大小基本上与转速  $n$  成反比,即

$$T_L = \frac{k}{n}$$

这时,

$$P_L = T_L \Omega = T_L \frac{2\pi n}{60} = \frac{T_L n}{9.55} = \frac{k}{9.55} = \text{常数}$$

故称恒功率负载机械特性,如图 3-4 所示。切削机床等属于此类。

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。

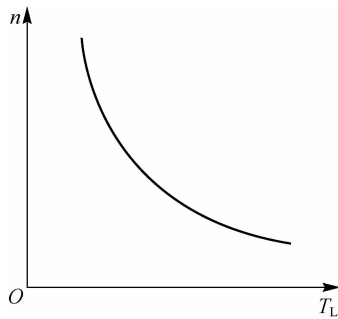


图 3-4 恒功率负载机械特性

### 3.3 他励电动机的机械特性

电动机的电磁转矩  $T$  与转速  $n$  的关系曲线  $n = f(T)$  称为电动机的机械特性。

#### 3.3.1 机械特性方程式

由基本公式

$$\begin{aligned} T &= C_T \Phi I_a \\ E_a &= C_e \Phi n \\ U &= E_a + I_a R \end{aligned}$$

得

$$n = \frac{E_a}{C_e \Phi} = \frac{U - I_a R}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e \Phi} I_a = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T = n_0 - \beta T = n_0 - \Delta n$$

式中,  $R = R_a + R_{sa}$ ,  $R_{sa}$  为电枢回路串接的附加电阻;  $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ , 称为理想空载转速;  $\beta =$

$\frac{R}{C_e C_T \Phi^2}$ , 称为机械特性的斜率;  $\Delta n = \beta T = \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T$ , 称为负载时的转速降。

当  $U$ 、 $R$ 、 $\Phi$  为常数时,  $n = f(T)$  为一条向下倾斜的直线, 如图 3-5 所示。

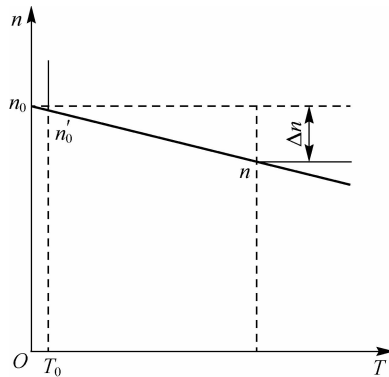


图 3-5 他励直流电动机的机械特性

### 3.3.2 固有机械特性

固有机械特性指  $U=U_N, \Phi=\Phi_N$ , 电枢回路不串电阻时的机械特性。其方程式为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T = n_0 - \beta_N T \quad (3-5)$$

由于  $R_a$  较小, 特性的斜率  $\beta_N$  较小, 因而他励直流电动机的固有机械特性是一条稍稍向下倾斜的直线(见图 3-5), 斜率小的特性称为硬特性, 其额定转速变化率为

$$\Delta n_N \% = \frac{n_0 - n_N}{n_N} \times 100 \% \quad (3-6)$$

$\Delta n_N \%$  一般为 10% 左右。

### 3.3.3 人为机械特性

#### 1. 电枢串接电阻时的人为机械特性

电枢串接电阻时的人为机械特性指  $U=U_N, \Phi=\Phi_N, R=R_a + R_{sa}$  时的  $n=f(T)$  曲线, 其方程式为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_{sa}}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (3-7)$$

可见  $n_0$  不变, 斜率随  $R_{sa}$  的增大而增大, 转速降也随串联电阻的增大而增加, 如图 3-6 所示。

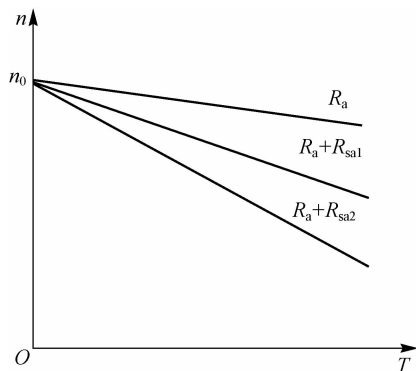


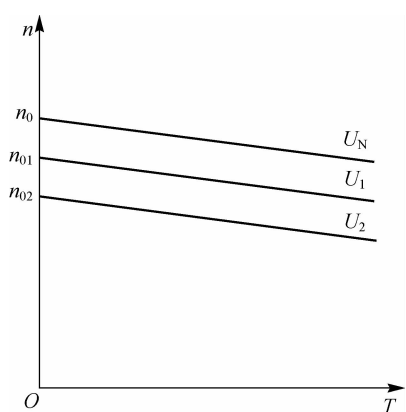
图 3-6 他励直流电动机电枢串接电阻时的人为机械特性 ( $R_{sa1} < R_{sa2}$ )

#### 2. 降低电压时的人为机械特性

当  $\Phi=\Phi_N, R_{sa}=0$  时, 降低电压时的机械特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (3-8)$$

特性的斜率  $\beta$  不变,  $n_0$  与  $U$  成正比变化, 如图 3-7 所示。

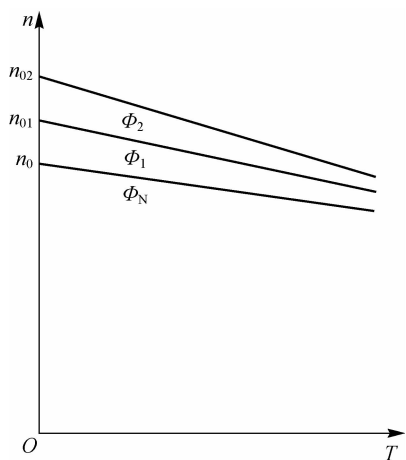

 图 3-7 他励直流电动机降低电压时的人为机械特性 ( $U_2 < U_1 < U_N$ )

### 3. 减弱磁通时的人为机械特性

减弱磁通时的人为机械特性方程式为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (3-9)$$

随着磁通  $\Phi$  减弱,  $n_0$  增大, 斜率  $\beta$  也增大, 如图 3-8 所示。


 图 3-8 减弱磁通时的人为机械特性 ( $\Phi_2 < \Phi_1 < \Phi_N$ )

#### 3.3.4 机械特性的绘制

##### 1. 固有机机械特性的绘制

两点决定一条直线, 只要设法求得特性上的两个点, 一般选择理想空载点 ( $T = 0$ ,  $n_0$ ) 和额定运行点 ( $T_N, n_N$ ) 较为方便,  $n_N$  是已知的, 只要求  $n_0$  和  $T_N$  即可。

(1) 求  $n_0$ 。

$$n_0 = \frac{U}{C_e \Phi} \quad (3-10)$$

$$C_e \Phi_N = \frac{E_N}{n_N} = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} \quad (3-11)$$

故

$$R_a = \left( \frac{1}{2} - \frac{2}{3} \right) \frac{U_N I_N - P_N}{I_N^2} \quad (3-12)$$

(2) 求  $T_N$ 。

$$T_N = C_T \Phi_N I_N = 9.55 C_e \Phi_N I_N \quad (3-13)$$

## 2. 人为机械特性的绘制

只要将相应的参数值代入人为机械特性方程式,即可计算绘制各种人为机械特性。

### 3.3.5 电力拖动系统稳定运行的条件

负载的机械特性和电动机的机械特性配合恰当,电力拖动系统才能稳定运行。

如图 3-9 所示,曲线 1 为一台他励直流电动机的机械特性  $n = f(T)$ , 曲线 2 为一恒转矩负载的机械特性  $n = f(T_L)$ 。此系统稳定运行的必要条件是  $T = T_L$ , 即必须工作在两条机械特性的交点, 如图 3-9 中的 A 点所示, 但是否满足稳定运行的充分条件, 还要看电力拖动系统在受到某种干扰(如电源电压波动、加负载、减负载、起动、制动和调速等)时能否移到新的工作点稳定运行, 当干扰消失时能否回到原来的工作点稳定运行, 若能, 则此系统是稳定的, 反之则是不稳定的。分析图 3-9 中 A 点的工作情况, 如果负载转矩突然由  $T_{L1}$  增大到  $T_{L2}$ , 由于机械惯性的作用, 转速和电磁转矩不能突变, 因而  $T = T_{L1} < T_{L2}$ ,  $T - T_{L2} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} < 0$ ,  $\frac{dn}{dt} < 0$ , 系统开始减速, 随着转速下降, 电枢电动势  $E_a = C_e \Phi n$  随之下降, 电枢电流  $I_a = \frac{U - E_a}{R_a}$  上升, 电磁转矩  $T = C_T \Phi I_a$  增大, 当增大到  $T = T_{L2}$  时, 系统进入新的工作点 B 以较低转速稳定运行。由此可见, 电动机稳定运行时电磁转矩的大小由负载转矩的大小所决定。如果干扰消失,  $T_L$  又从  $T_{L2}$  恢复到  $T_{L1}$ , 由于转速和电磁转矩不能突变,  $T = T_{L2} > T_{L1}$ , 系统加速,  $E_a$  上升,  $I_a$  下降,  $T$  下降, 到  $T = T_{L1}$  时又回到原来的 A 点运行, 所以在 A 点系统运行是稳定的。

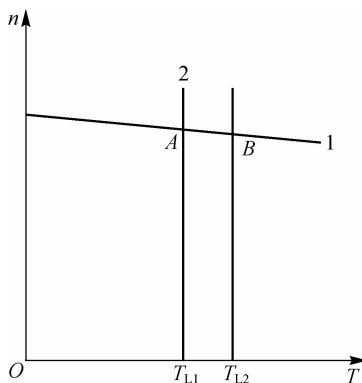


图 3-9 静态稳定运行

如果考虑他励直流电动机电枢反应的影响,当电动机转矩较大,即电枢电流  $I_a$  较大时,电枢反应的去磁作用使每极磁通  $\Phi$  减小,使机械特性出现上翘现象,如图 3-10 中的曲线 1 所示。若与负载的机械特性曲线 2 交于上翘部分 C 点,这时若负载转矩由  $T_L$  突然上升,则  $T < T_L$ , 转速  $n$  下降,电动机的电磁转矩  $T$  将下降,使转速进一步下降;若  $T_L$  稍有下降,则  $T > T_L$ ,  $n$  上升,  $T$  增大,使转速进一步上升。因此在 C 点,虽然  $T = T_L$ , 满足稳定运行的必要条件,但是负载转矩受干扰稍有上升或下降,当干扰消失时,拖动系统都无法恢复到原来的运行点 C,所以在 C 点运行不满足稳定运行的充分条件,运行是不稳定的。为避免他励直流电动机机械特性因电枢反应的去磁作用而上翘,以致引起不稳定,有时在主磁极上加一个匝数很少的串励绕组,使其磁通势补偿电枢反应磁通势,从而克服电枢反应的去磁作用。此时仍属于他励直流电动机,所加串励绕组根据其作用称为稳定绕组。

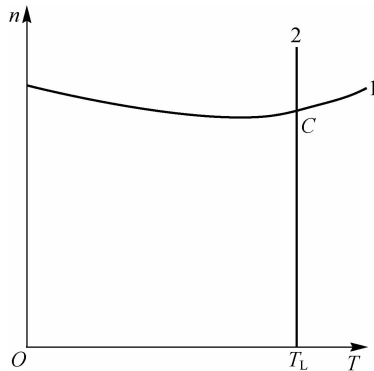


图 3-10 静态不稳定运行

对于不同的负载机械特性与他励直流电动机机械特性的配合,是否满足稳定运行的必要条件和充分条件,可用上面所述的方法分析判断,也可将必要条件和充分条件合为稳定运行的充要条件,即在  $T = T_L$  处,有

$$\frac{dT}{dn} < \frac{dT_L}{dn} \quad (3-14)$$

如果满足此条件,系统是稳定的,否则就是不稳定的。

### 3.4 他励直流电动机的起动

电动机接通电源,由静止状态开始加速到某一稳定转速的过程称为起动过程,简称起动。

他励直流电动机的起动一般要求如下:起动过程中起动转矩  $T_{st}$  足够大,使电动机起得动,起得快;起动电流的起始值  $I_{st}$  不能太大,以免换向恶化和产生转矩冲击;起动设备与控制装置简单、可靠、经济、操作方便。

如果将额定电压直接加至电枢两端进行起动,称为直接起动。由于起动开始时,  $n = 0$ ,  $E_a = 0$ , 起动电流  $I_{st} = \frac{U - E_a}{R_a} = \frac{U}{R_a}$ , 可能达到额定电流的 10~30 倍,换向火花严重,

冲击转矩也易损坏传动机构。因此,一般工业用他励直流电动机不允许直接起动。只有功率很小的直流电动机,相对来说  $R_a$  较大,电机惯性小,起动快,可以采用直接起动。

为限制他励直流电动机的起动电流  $I_{st} \leq 2I_N$ ,可以采用两种起动方法:一种是电枢回路串接电阻,另一种是降低电源电压。

### 3.4.1 电枢回路串电阻分级起动

电枢串电阻三级起动电路如图 3-11 所示,  $K$  为主接触器的主触点,  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别为控制用接触器  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  的主触点,  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  为电枢回路串入的三段起动电阻,通过  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分三次切除,称为三级起动。图 3-12 所示为电枢串电阻三级起动的机械特性,  $I_1$  为限定的起始起动电流,是起动过程中的最大电流,通常取  $I_1 = 3I_N$ ,相应的起动过程中的最大转矩  $T_1 = 3T_N$ ;  $I_2$  为起动过程中电流的切换值,通常取  $I_2 = (1.1 \sim 1.3)I_N$  或  $I_2 = (1.3 \sim 1.5)I_L$ ,式中  $I_L$  为起动时电动机所带负载所对应的电枢电流,  $I_2$  相应的转矩  $T_2$  称为切换转矩,显然  $T_2 = (1.1 \sim 1.3)T_N$  或  $T_2 = (1.3 \sim 1.5)T_L$ ,假定起动过程中负载转矩  $T_L$  大小不变。

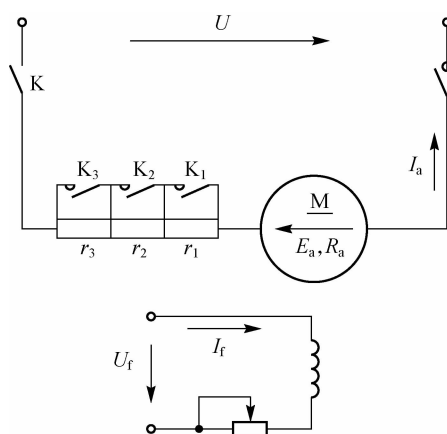


图 3-11 电枢串电阻三级起动电路

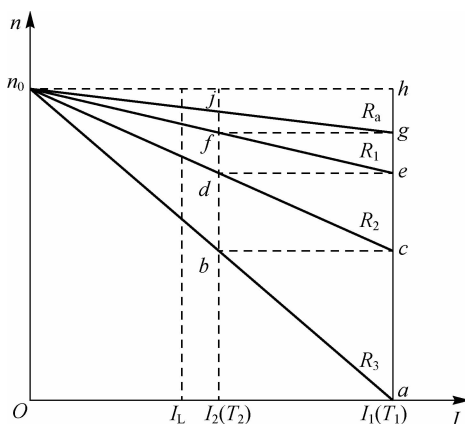


图 3-12 电枢串电阻三级起动的机械特性



起动时,先加励磁,使  $I_f = I_{fN}$ ,  $\Phi = \Phi_N$ , 闭合主触点 K, 接通电枢电源, 起动电流为  $I_1 = \frac{U_N}{R_3}$ , 起动转矩  $T_1 > T_L$ , 电动机沿  $R_3(R_a + r_1 + r_2 + r_3)$  的机械特性  $abn_0$  升速, 随着转速  $n$  上升, 感应电势  $E_a$  增大, 电枢电流  $I_a$  下降, 转矩  $T$  下降, 加速度变小, 当  $I_a$  下降到  $I_2$  时, 转矩降到切换转矩  $T_2$ , 加速度相当小了, 为了加速起动过程, 使控制接触器  $K_3$  的主触点闭合, 将电阻  $r_3$  短接, 电枢回路电阻由  $R_3$  降为  $R_2(R_a + r_1 + r_2)$ , 机械特性变为  $cdn_0$ , 由于转速不能突变, 工作点由  $b$  平移至  $c$ , 若起动电阻配置恰当, 则  $c$  点相应的转矩又上升为最大转矩  $T_1$ , 加速度增至最大, 转速迅速上升,  $I_a$  及  $T$  又下降, 当  $I_a$  降至  $I_2$ ,  $T$  降为  $T_2$  时, 让接触器  $K_2$  的主触点闭合,  $r_2$  切除, 电阻由  $R_2$  降为  $R_1(R_a + r_1)$ , 特性变为工作点由  $d$  平移至  $e$ , 转速沿  $efn_0$  上升,  $I_a$  及  $T$  下降, 到  $f$  点时, 使  $K_1$  闭合, 起动电阻全部切除, 工作点由  $f$  平移至固有机械特性上的  $g$  点, 然后沿固有机械特性  $gjn_0$  继续升速, 直至稳定负载转速  $n_L$ , 工作于固有机械特性与负载机械特性的交点  $j$ , 起动结束。

这种方法可以限制起动电流不超过限值, 起动性能决定于所选的起动级数。级数越多, 起动转矩平均值越大, 起动越快, 平稳性越好, 但是自动切除各级起动电阻的控制设备也就越复杂, 初投资高, 维护工作量亦大。为此, 一般空载起动时取  $m = 1 \sim 3$ , 重载起动时取  $m = 3 \sim 4$ 。电枢回路串电阻起动的优点是方法简单, 操作方便; 缺点是能量损耗较大, 经济性较差。这种起动方法适用于容量不大, 对起动性能要求不太高的场合。

### 3.4.2 他励直流电动机起动电阻的计算

以图 3-11 为例, 取  $I_2 = (1.1 \sim 1.2)I_N$  或  $I_2 \geq (1.2 \sim 1.5)I_L$ ,  $I_1 = (1.5 \sim 2.0)I_N$ , 一般要经过多次调整, 才能绘出图 3-12 所示的特性图, 由此图可以推导得到计算分级电阻的公式。

图中  $n_b = n_c$ , 故有  $E_b = E_c$ 。

在  $b$  点:

$$I_2 = \frac{U - E_b}{R_2} \quad (3-15)$$

在  $c$  点:

$$I_1 = \frac{U - E_c}{R_1} \quad (3-16)$$

两式相除, 考虑  $E_b = E_c$ , 得

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3-17)$$

同样, 由  $d$  点和  $e$  点, 可得

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1}{R_a} \quad (3-18)$$

故三级起动时, 有

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_3}{R_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_1}{R_a} \quad (3-19)$$

推广到  $m$  级为

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_m}{R_{m-1}} = \frac{R_{m-1}}{R_{m-2}} = \dots = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_1}{R_a} = \lambda \quad (3-20)$$

式中,  $\frac{I_1}{I_2} = \lambda$  ( $\frac{T_1}{T_2} = \lambda$ ), 称为起动电流比(起动转矩比), 则得各级电枢电路总电阻的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \lambda R_a \\ R_2 &= \lambda R_1 = \lambda^2 R_a \\ &\vdots \\ R_m &= \lambda R_{m-1} = \lambda^m R_a \end{aligned} \right\} \quad (3-21)$$

可见

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{R_m}{R_a}} \quad (3-22)$$

若给定  $\beta$ , 则

$$m = \frac{\lg \frac{R_m}{R_a}}{\lg \lambda} \quad (3-23)$$

如需求分段电阻值, 由前面公式可得

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= R_1 - R_a = (\lambda - 1) R_a \\ r_2 &= R_2 - R_1 = (\lambda^2 - \lambda) R_a = \lambda R_{Q1} \\ &\vdots \\ r_{m-1} &= R_{m-1} - R_{m-2} = \lambda r_{m-2} = \lambda^{m-2} r_1 \\ r_m &= R_m - R_{m-1} = \lambda r_{m-1} = \lambda^{m-1} R_{Q1} \end{aligned} \right\} \quad (3-24)$$

计算分级起动电阻, 有以下两种情况:

(1) 起动级数  $m$  未定: 初选  $\beta \rightarrow R_m = \lambda^m R_a \rightarrow$  求  $m$ , 取整数  $m \rightarrow$  计算  $\lambda$  值  $\rightarrow$  计算各级电阻或各分段电阻。

(2) 起动级数  $m$  已定: 选定  $I_1 \rightarrow R_m = \frac{U}{I_1} \rightarrow$  计算  $\lambda$  值  $\rightarrow$  计算各级电阻或分段电阻。

### 3.5 他励直流电动机的过渡过程

电力拖动的过渡过程是指从一个稳定工作状态过渡到另一个稳定工作状态的过程。

研究过渡过程的内容如下: 过渡过程前后两个稳定状态电动机的电枢电流  $I_a$ 、电磁转矩  $T$  和转速  $n$  一般是不相同的, 过渡过程就是要研究  $I_a$ 、 $T$  和  $n$  在这个过程中随时间变化的规律。这些变化规律曲线称为负载图。

产生电力拖动系统过渡过程的外因是系统受到外部干扰, 如起动、制动、反转、调速

及负载突变等。内因是系统本身的惯性,即机械惯性和电磁惯性,实际上两种惯性同时存在,但由于电磁惯性的影响远小于机械惯性,为了分析方便,忽略电磁惯性的影响,只考虑机械惯性,这种过渡过程称为机械过渡过程。

### 3.5.1 机械过渡过程方程式

图 3-13 所示为他励直流电动机串固定电阻全压起动的原理图。忽略电枢反应的影响, $\Phi = \Phi_N = \text{常数}$ ,可列电动势平衡方程式为

$$U = E_a + I_a R = C_e \Phi_N n + I_a R \quad (3-25)$$

$$n = \frac{U - I_a R}{C_e \Phi_N} \quad (3-26)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{R}{C_e \Phi_N} \frac{dI_a}{dt} \quad (3-27)$$

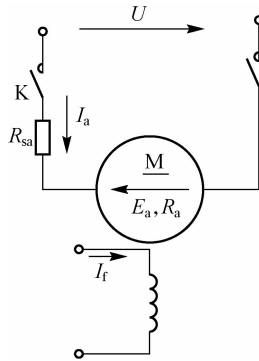


图 3-13 他励直流电动机串固定电阻全压起动的原理图

代入运动方程式,得

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (3-28)$$

$$T = T_L - \frac{GD^2}{375} \frac{R}{C_e \Phi_N} \frac{dI_a}{dt} \quad (3-29)$$

两边同时除以  $C_T \Phi_N$ ,可得

$$I_a = I_L - \frac{GD^2}{375 C_e C_T \Phi_N^2} \frac{dI_a}{dt} = I_L - T_M \frac{dI_a}{dt} \quad (3-30)$$

式中, $I_L = \frac{T_L}{C_T \Phi_N}$ ,为负载转矩对应的负载电流; $T_M = \frac{GD^2 R}{375 C_e C_T \Phi_N^2}$ ,为机电时间常数。

式(3-30)可改写为

$$\frac{dI_a}{dt} + \frac{I_a}{T_M} = \frac{I_L}{T_M} \quad (3-31)$$

其解为

$$I_a = I_L + k e^{-\frac{t}{T_M}} \quad (3-32)$$

式中, $k$ 为由初始条件决定的常数,以起动为例, $t=0, I_a = I_{st}$ ,代入式(3-32)可得

$$k = I_{st} - I_L \quad (3-33)$$

将式(3-33)代入式(3-32),即得过渡过程的电流方程式为

$$I_a = I_L + (I_{st} - I_L)e^{-\frac{t}{T_M}} \quad (3-34)$$

式中,  $I_L$  为电流的稳态分量;  $(I_{st} - I_L)e^{-\frac{t}{T_M}}$  为电流的暂态分量, 又称自由分量。

起动过程中电流  $I_a$  的变化曲线  $I_a = f(t)$  如图 3-14 所示。电流方程式两边同乘以  $C_T \Phi_N$ , 即可得转矩方程式为

$$T_a = T_L + (T_{st} - T_L)e^{-\frac{t}{T_M}} \quad (3-35)$$

可见  $T = f(t)$  与  $I_a = f(t)$  形状相同。

同理可得转速方程式为

$$n_a = n_L + (n_{st} - n_L)e^{-\frac{t}{T_M}} \quad (3-36)$$

当  $n_{st} = 0$  时,  $n$  的变化曲线如图 3-15 所示。

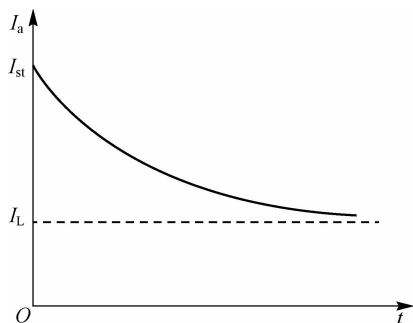


图 3-14 起动过程中电枢电流的变化曲线  $I_a = f(t)$

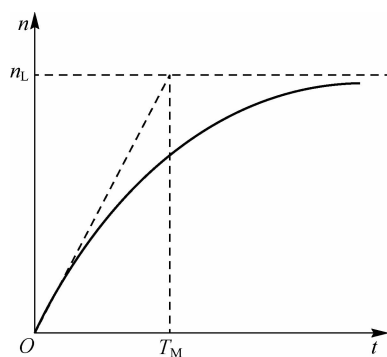


图 3-15 起动过程中转速的上升曲线  $n = f(t)$

以上所得三个方程式虽是以起动为例推导而得的, 实际上就是电力拖动系统过渡过程的通用方程式。把  $I_{st}$ 、 $T_{st}$  和  $n_{st}$  理解为过渡过程的起始值, 把  $I_L$ 、 $T_L$  和  $n_L$  理解为过渡过程的稳态值,  $I_a$ 、 $T$  和  $n$  为对应于时间  $t$  时的瞬时值。

### 3.5.2 机电时间常数

机电时间常数为

$$T_M = \frac{GD^2 R}{375 C_e C_T \Phi_N^2} \quad (3-37)$$

$T_M$  的大小不但与飞轮矩  $GD^2$  成正比,还与电动机的电磁量  $R$  和  $\Phi_N$  有关,故称为机电时间常数。以转速  $n$  为例,其物理意义为:如果保持  $t=0$  时的加速度  $\left. \frac{dn}{dt} \right|_{t=0}$  不变,转速由起始值  $n_{st}$  上升或下降到稳态值  $n_Z$  所需的时间。实际上,由于  $n$  的加速度是逐步变小的,因而只有当  $t$  为  $(3\sim 4)T_M$  时,才可认为过渡过程结束,即达到稳定状态。

### 3.5.3 过渡过程持续时间的计算

设  $t=0$  时,  $I_a = I_{st}$ ;  $t=t_x$  时,  $I_a = I_{ax}$ , 则可得

$$I_{ax} = I_Z + (I_{st} - I_Z) e^{-\frac{t_x}{T_M}} \quad (3-38)$$

对  $t_x$  求解, 可得持续时间为

$$t_x = T_M \ln \frac{I_{st} - I_Z}{I_{ax} - I_Z} \quad (3-39)$$

同理可得

$$t_x = T_M \ln \frac{T_{st} - T_Z}{T_x - T_Z} \quad (3-40)$$

$$t_x = T_M \ln \frac{n_{st} - n_Z}{n_x - n_Z} \quad (3-41)$$

式中,  $I_{st}$ 、 $T_{st}$ 、 $n_{st}$  为起始值,  $I_Z$ 、 $T_Z$ 、 $n_Z$  为稳态值,  $I_{ax}$ 、 $T_x$ 、 $n_x$  为所求过渡过程的终了值。

对于电枢串多级电阻起动的过渡过程, 可以分级用上述方法求取, 总的起动时间为各级起动时间的总和, 最后一级的起动时间为  $(3\sim 4)T_M$ 。

### 3.5.4 缩短过渡过程持续时间的方法

对于需要频繁起动、调速、制动的生产机械, 如轧钢机、龙门刨等, 其电力拖动系统经常处在过渡过程。如何缩短过渡过程的持续时间, 加快过渡过程, 提高生产效率, 具有重要意义。

由运动方程式可得

$$\frac{dn}{dt} = 375 \frac{T - T_L}{GD^2} \quad (3-42)$$

由此可见, 要加快过渡过程, 增大  $\frac{dn}{dt}$  可有以下两种途径:

- (1) 减小系统的飞轮矩  $GD^2$ , 采用细而长的电动机或采用双电动机拖动。
- (2) 改善起动电流的波形。如图 3-16 所示, 一直保持起动电流  $I_{st}$  等于允许最大电流

## 电机与拖动基础

(一般为  $I_L$  左右),直到起动结束电流突然降为负载电流  $I_L$ ,使起动过程中的  $T-T_L$  为一较大定值,加速度大而恒定,起动既快又平稳,起动过程的时间为  $T_M$ ,比一般情况下的  $(3\sim 4)T_M$  缩短很多。

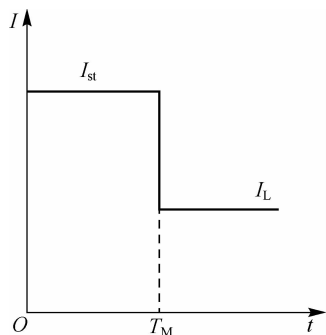


图 3-16 理想的起动电流变化规律

### 3.6 他励直流电动机的调速

大量生产机械(如各种机床、轧钢机、造纸机、纺织机械等)的工作机构要求在不同的情况下以不同的速度工作。

电气调速是指在负载转矩不变的条件下,通过人为的方法改变电动机的有关参数,从而调节电动机和整个拖动系统的转速。

他励直流电动机的机械特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_{sa}}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (3-43)$$

可以看出,调速方法有电枢回路串电阻调速、降压调速和弱磁调速 3 种。

#### 3.6.1 调速指标

##### 1. 调速的技术指标

###### 1) 调速范围

调速范围  $D$  指额定负载转矩下电动机可能调到的最高转速  $n_{\max}$  与最低转速  $n_{\min}$  之比,即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (3-44)$$

式中,  $n_{\max}$  受电动机换向及机械强度的限制,  $n_{\min}$  受生产机械对转速相对稳定性要求的限制。不同的生产机械要求的调速范围不同。例如,车床的  $D$  为  $30\sim 130$ ,龙门刨床的  $D$  为  $10\sim 40$ ,造纸机的  $D$  为  $3\sim 30$ ,轧钢机的  $D$  为  $3\sim 130$  等。

## 2) 静差率

静差率  $\delta$  指电动机由理想空载到额定负载运行的转速降  $\Delta n_N$  与理想空载转速  $n_0$  之比,用百分数表示为

$$\delta\% = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\% = \frac{n_0 - n_N}{n_0} \times 100\% \quad (3-45)$$

一般取静差率  $\delta$  为  $5\% \sim 10\%$ 。

静差率  $\delta$  的大小反映静态转速相对稳定的程度,  $\delta$  越小, 转速降  $\Delta n_N$  越小, 转速相对稳定性越好。不同的生产机械要求有不同的静差率。例如, 普通车床的静差率  $\delta \leq 30\%$ , 龙门刨床的静差率  $\delta \leq 10\%$ , 造纸机的静差率  $\delta \leq 0.1\%$ 。

静差率与机械特性硬度有关。机械特性越硬, 静差率越小, 相对稳定性越好, 但机械特性的硬度相同时, 静差率  $\delta$  并不相等, 而是  $n_0$  较低的其  $\delta$  较大。

生产机械对静差率的要求限制了电动机允许达到的最低转速  $n_{\min}$ , 从而限制了调速范围。下面以调压调速的情况为例推导  $D$  与  $\delta$  的关系, 图 3-17 中所示的曲线 1 和 3 为不同电压下的两条特性, 由此可得

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_{\max}}{n'_0 - \Delta n_N} = \frac{n_{\max}}{n'_0 \left(1 - \frac{\Delta n_N}{n'_0}\right)} = \frac{n_{\max}}{\frac{\Delta n_N}{\delta} (1 - \delta)} = \frac{n_{\max} \delta}{\Delta n_N (1 - \delta)} \quad (3-46)$$

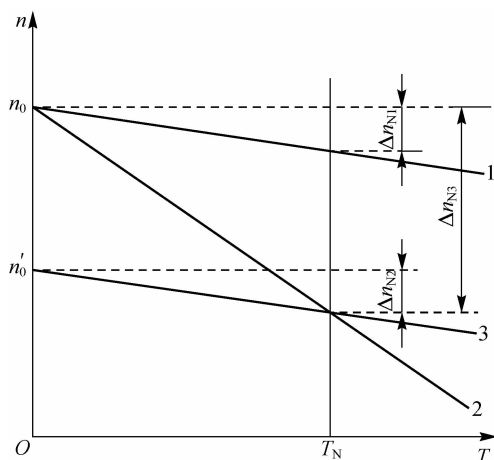


图 3-17 静差率与机械特性硬度的关系

由此可知, 生产机械允许的最低转速时的静差率  $\delta$  越大, 电动机允许的调速范围  $D$  越大。因此, 调速范围  $D$  只有在对  $\delta$  有一定要求的前提下才有意义。

## 3) 平滑性

在一定的调速范围内, 调速的级数越多, 调速越平滑。平滑程度用平滑系数  $\phi$  来衡量。 $\phi$  是相邻两级转速或线速度之比, 即

$$\phi = \frac{n_i}{n_{i-1}} = \frac{v_i}{v_{i-1}} \quad (3-47)$$

## 电机与拖动基础

显然,  $\phi$  越接近于 1, 调速平滑性越好,  $\phi - 1 = \epsilon$  可以小于任意数, 则  $n$  可调至任意数值, 平滑性最好, 称为无级调速。

### 4) 调速时的容许输出

调速时的容许输出是指保持额定电流条件下调速时, 电动机容许输出的最大转矩或最大功率与转速的关系。容许输出的最大转矩与转速无关的调速方法称为恒转矩调速方法, 允许输出的最大功率不变的调速方法称为恒功率调速方法。

## 2. 调速的经济指标

调速的经济指标包含三个方面: 一是调速设备初投资的大小, 二是运行过程中能量损耗的多少, 三是维护费用的高低, 三者总和较小者经济指标较好。

### 3.6.2 电枢回路串电阻调速

电枢回路串电阻调速指保持  $U = U_N$ ,  $\Phi = \Phi_N$ , 电枢回路串入适当大小的电阻  $R_{sa}$ , 从而调节转速, 其原理可从图 3-18 所示的机械特性图上看出来。

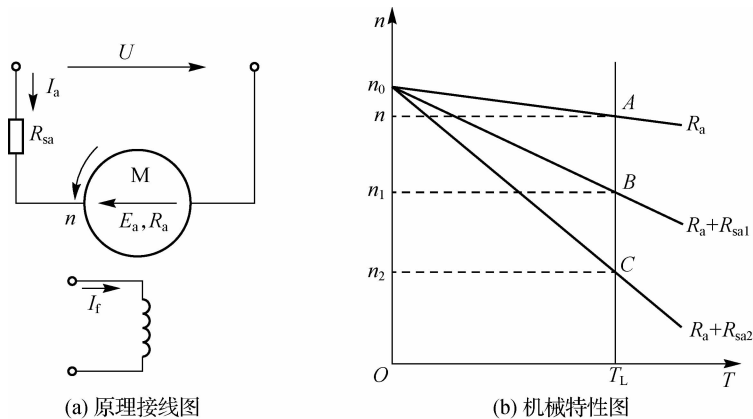


图 3-18 电枢回路串电阻调速

串电阻调速的物理过程如下:  $R_{sa}$  增大,  $E_a$  不能突变, 故  $I_a = \frac{U - E_a}{R_a + R_{sa}}$  减小,  $T$  减小,  $n$  减小,  $E_a$  减小,  $I_a$  增大,  $T$  回升至  $T_L$  时稳定, 速度已由  $n_1$  减小至  $n_2$ 。要注意的是, 调速前后  $T_L$  不变, 因此,  $T$  不变,  $I_a$  也不变。

电枢回路串电阻调速的特点如下: 只能将转速向下调, 且静差率明显增大, 所以调速范围  $D$  较小, 平滑性差, 损耗大, 设备简单, 投资少, 属恒转矩调速。

电枢回路串电阻调速适用于容量不大, 低速运行时间不长, 对调速性能要求不高的场合。

### 3.6.3 降压调速

降压调速指保持  $\Phi = \Phi_N$ ,  $R_{sa} = 0$ , 降低电源电压  $U$ , 从而调节转速, 其原理可以从



图 3-19 所示的机械特性图上看。

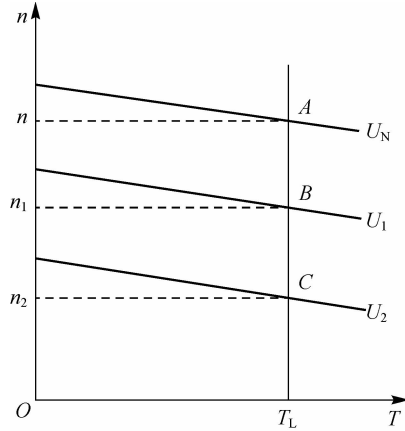


图 3-19 降压调速的机械特性

降压调速的物理过程如下： $U$  减小， $I_a$  减小， $T$  减小， $n$  减小， $E_a$  减小， $T$  回升至  $T_L$  时恢复稳定运行，但  $n$  已降低。

降压调速的特点如下：特性平行下移， $\delta$  变化不明显，调速范围  $D$  较大，平滑性好，损耗小，但需可调直流电源，初投资大。

降压调速适用于对调速性能要求较高的中大容量拖动系统，如重型机床（龙门刨）、精密机床和轧钢机等。

### 3.6.4 弱磁调速

弱磁调速指保持  $U=U_N$ ， $R_{sa}=0$ ，调节励磁电流使之减小，亦即减弱磁通，从而调节转速，原理可从图 3-20 所示的机械特性图上看。

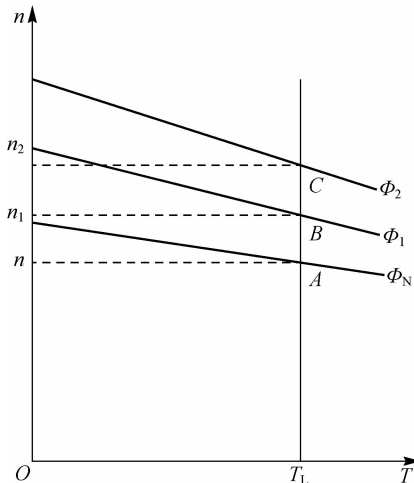


图 3-20 弱磁调速的机械特性

## 电机与拖动基础

弱磁调速的物理过程如下： $I_f$  减小， $\Phi$  减小， $n$  暂时来不及变化，故有  $E_a = C_e \Phi n$  减小， $I_a$  增大超过  $\Phi$  减小的程度， $T = C_T \Phi I_a$  增大， $n$  增大，使  $E_a$  由一开始的下降经过某一最小值后逐渐回升。 $I_a$  相应地由一开始的上升经最大值后下降， $n_1$  随之下降至等于  $n_1$ ，恢复稳定运行，转速由  $n_1$  上升为  $n_2$ 。

弱磁调速的特点如下：只能向上调，受换向和机械强度限制，调速范围不大，但静差率小，平滑性好，设备简单，损耗小，属恒功率调速。常与调压调速联合使用，以扩大调速范围。

必须注意的是：恒转矩性质的调速方法应用于恒转矩负载；恒功率的负载应采用恒功率调速方法，即调速方法的性质必须与负载性质相匹配。如果不匹配，就会造成投资或运行费用的浪费。

### 3.6.5 调速的计算

应用机械特性的公式，代入已知数，就可计算出要求的未知数。

## 3.7 直流电动机的制动

电动机制动运行的主要特征是电磁转矩  $T$  的方向与转速  $n$  的方向相反。

电动机制动运行的作用是使系统快速减速或停车和匀速下放重物。

根据实现制动的的方法和制动时电动机内部能量转换关系的不同，制动运行分为能耗制动、反接制动和回馈制动三种。

### 3.7.1 能耗制动

#### 1. 实现能耗制动的方法

能耗制动原理接线图如图 3-21 所示，将电枢从电源上断开，通过制动电阻  $R_{sa}$  闭合。电枢由于惯性继续朝原来的方向旋转，切割磁场，感应电势为  $E_a$ ，方向与电动状态时相同。不同的是，电枢电流  $I_a$  变为由  $E_a$  产生，与原来的方向相反，电磁转矩  $T = C_e \Phi I_a$  随之反向， $T$  与  $n$  反向，进入制动状态。在制动过程中，电动机靠系统的动能发电，消耗在电枢回路的电阻上，故称为能耗制动。

#### 2. 能耗制动时的机械特性

能耗制动时， $U=0$ ， $R=R_a+R_{sa}$ ，机械特性方程式为

$$n = -\frac{R_a + R_{sa}}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (3-48)$$

可见其机械特性为过零点且位于第二、第四象限的直线，如图 3-22 所示，其斜率取决于所串制动电阻的大小。

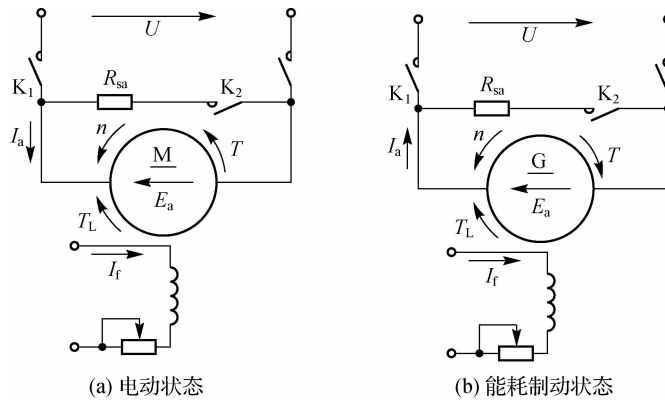


图 3-21 能耗制动原理接线图

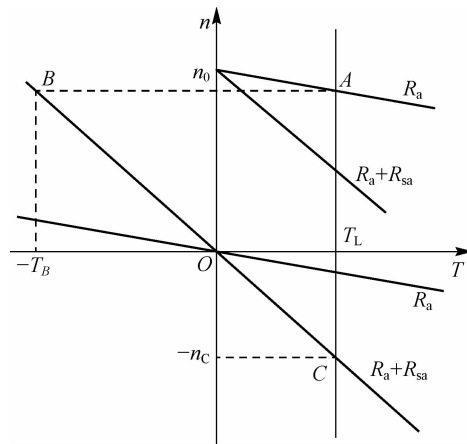


图 3-22 能耗制动的机械特性

### 3. 能耗制动的分析

制动电阻  $R_{sa}$  越小,机械特性斜率越小,制动开始瞬间的转矩( $T_1$ )和电流( $I_1$ )越大。

一般电流的最大值不允许超过  $2I_N$ ,因此,  $R_a + R_z \geq \frac{E_a}{2I_N}$ ,即

$$R_z \geq \frac{E_a}{2I_N} - R_a \quad (3-49)$$

因为

$$E_a \approx U \quad (3-50)$$

所以

$$R_z \geq \frac{U}{2I_N} - R_a \quad (3-51)$$

若电动机带的是位能性负载,则当  $T=0, n=0$  时,由于  $T_L$  仍大于零,将倒拉电动机反向运转,转速沿能耗制动机械特性第四象限部分升高,至  $T=T_L$ ,转速为  $-n_c$  为止,匀速( $n_c$ )下放重物。将转速  $n=-n_c$  代入机械特性方程式,可得应串电阻为

$$R_{sa} = \frac{C_e C_T \Phi^2 n_c}{T} - R_a \quad (3-52)$$

式中,  $n_c$  代入下放转速的绝对值即可。

#### 4. 能耗制动的过渡过程

在制动过程中,  $n$  和  $I_a$  的变化曲线如图 3-23(b)和图 3-23(c)所示,要求能耗制动停车的时间,可将  $n_x=0$  和第四象限的  $n_c$ (负值)代入过渡过程的公式,得

$$t_T = T_M \ln \frac{n_B + n_c}{n_c} \quad (3-53)$$

式中,  $n_c$  代以绝对值。

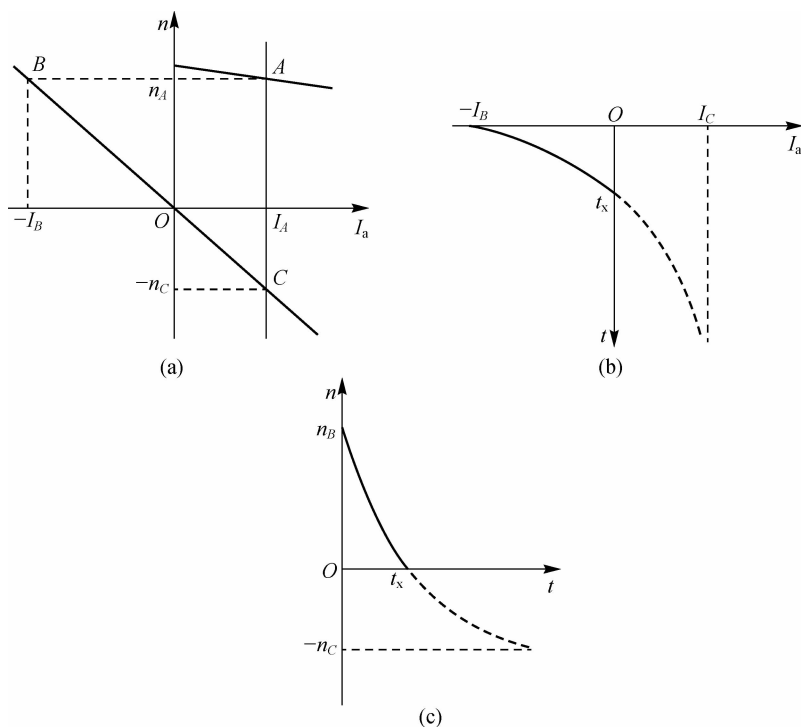


图 3-23 能耗制动的过渡过程

#### 5. 能耗制动的特点与适用场合

能耗制动的特点为:设备简单,操作方便,运行可靠;制动平稳,便于准确停车;低速时制动效果较差。能耗制动适用于一般生产机械和要求准确停车的场合制动停车,提升装置用于低速匀速下放重物。

### 3.7.2 反接制动

#### 1. 电源反接制动

##### 1) 实现方法

电源反接制动原理接线图如图 3-24 所示,使  $K_1$  断开、 $K_3$  闭合,即电枢电源反接的

同时串入一个制动电阻  $R_{sa}$ ，由于  $U$  反向，电流  $I_a = \frac{-U - E_a}{R_a + R_{sa}} = -\frac{U + E_a}{R_a + R_{sa}}$  反向， $T$  反向，从而进入制动状态。

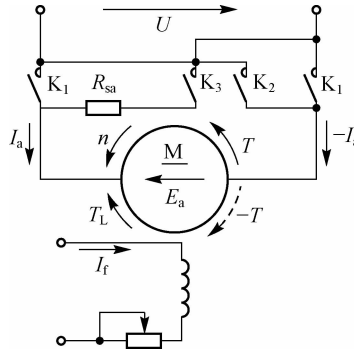


图 3-24 电源反接制动原理接线图

2) 机械特性

电源反制动方程为

$$n = \frac{-U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_{sa}}{C_e C_T \Phi^2} T = -n_0 - \frac{R_a + R_{sa}}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (3-54)$$

机械特性在第二象限，如图 3-25 中的 BC 段所示。设电动机制动前工作在电动状态，在固有特性上的 A 点运行，电枢反接，转矩瞬时变为  $-T_B$ ，沿 BC 迅速减速。

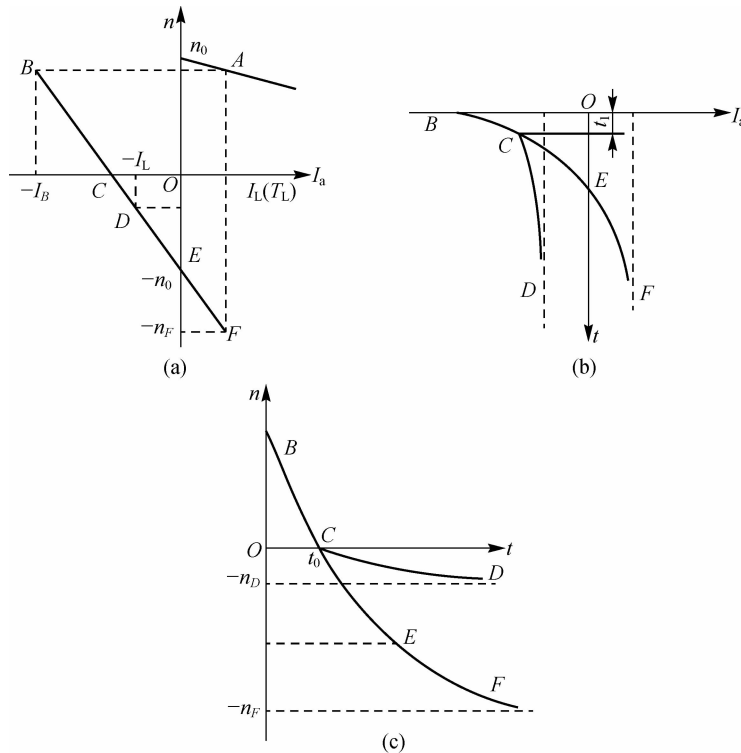


图 3-25 电源反接制动的机械特性和过渡过程

3)分析

电源反接制动时,若不串入附加电阻,则制动起始时的电枢电流  $I_a = -\frac{U+E_a}{R_a}$ ,其值将达额定电流的 30~40 倍,即直接起动电流的两倍左右,这是绝对不允许的,所以必须串入制动电阻。一般限制最大电流为  $2I_N$ ,则制动电阻应为

$$R_{sa} \geq \frac{U+E_a}{2I_N} - R_a \approx \frac{U_N}{I_N} - R_a \quad (3-55)$$

可见,  $R_{sa}$  比能耗制动时差不多大一倍。特性斜率比能耗制动时大得多。

电源反接制动时,从电源吸收的电能和系统的动能全部消耗在电枢回路中,能量损耗大。

4)特点与适用场合

电源反接制动的特点如下:设备简单,操作方便,制动转矩平均值较大,制动强烈,但能量损耗大。电源反接制动适用于要求快速停车的拖动系统,对于要求快速并立即反转的系统更为理想。

2. 转速反向的反接制动

1)实现方法

他励电动机拖动位能性负载,电枢回路串入较大电阻,使  $n=0$  时的电磁转矩(起动转矩)小于负载转矩  $T_L$ 。

2)机械特性

转速反向的反接制动的机械特性表达式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_{sa}}{C_e C_T \Phi^2} T = n_0 - \frac{R_a + R_{sa}}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (3-56)$$

机械特性为电枢回路串入较大电阻时人为特性在第四象限的部分,也就是正向电动运行时机械特性向第四象限的延伸,如图 3-26 所示。

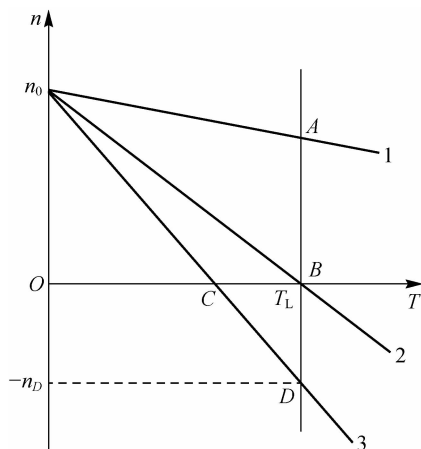


图 3-26 转速反向反接制动的机械特性

### 3) 分析

反接制动时,有

$$I_a(R_a + R_{sa}) = U - (-E_a) = U + E_a \quad (3-57)$$

两边同乘以  $I_a$ , 则得

$$I_a^2(R_a + R_{sa}) = UI_a + E_a I_a \quad (3-58)$$

式中,  $UI_a$  为电网输入电功率;  $E_a I_a$  为由负载的位能自轴上输入转换而来的电磁功率, 均消耗在电枢回路的电阻上, 能量损耗大。

### 4) 特点与适用场合

转速反向的反接制动的特点如下: 设备简单, 操作方便, 电枢回路串接电阻较大, 机械特性较软, 转速稳定性差, 能量损耗大。转速反向的反接制动适用于低速匀速下放重物。

## 3.7.3 回馈制动

### 1. 实现方法

他励直流电动机在电动状态下提升重物时, 将电源反接, 电动机进入电枢反接制动状态, 转速  $n$  沿特性  $BC$  段[见图 3-25(a)]迅速下降, 至  $C$  点转速降到零时, 如不断开电源, 电动机必将反向起动, 转速反向升高, 至  $E$  点,  $T=0$ , 但  $T_L \neq 0$ , 系统在  $T_L$  的作用下沿特性的  $EF$  段继续反向升速, 工作点进入特性的第四象限部分, 这时  $|-n| > |-n_0|$ ,  $E_a > U$ , 电流  $I_a$  及  $T$  均变为正, 而  $n$  为负, 电动机进入制动状态。至  $F$  点,  $T=T_L$ , 匀速下放重物。由于  $E_a > U$ , 电流  $I_a$  与  $E_a$  同方向, 与  $U$  反方向, 因而电动机将位能转换为电能回馈电网, 称为回馈制动, 又称再生制动。

他励直流电动机降压调速时, 使  $n_0$  突然降为小于  $n$ , 会自动进入回馈制动状态, 加快减速过程, 如图 3-27 中的  $BC$  段所示。

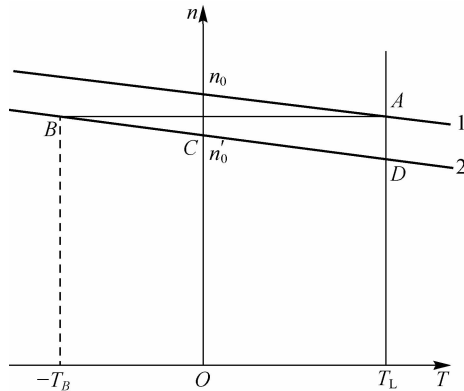


图 3-27 降压调速时出现的回馈制动

### 2. 机械特性

由上所述, 回馈制动的机械特性可能在第四象限, 也可能在第二象限。

### 3. 分析

在回馈制动过程中, 有功率  $UI_a$  回馈电网, 能量损耗最少。

#### 4. 特点与使用场合

回馈制动的实现条件是使  $|n| > |n_0|$ , 故不能用于快速停车, 能量损耗最少, 这种制动方式适用于高速匀速下放重物 and 降压、增加磁通调速过程中自动加快减速过程。

### 3.8 直流电动机起动仿真

#### 3.8.1 他励直流电动机直接起动仿真

直流电动机直接起动瞬间起动电流可达额定电流的 10~20 倍, 对于一般微型电动机, 只有其电枢电阻较大才可直接起动。由于起动是动态过程, 因而相比 M 函数编程, 用 MATLAB/Simulink 建模仿真起动过程更具优势。下面通过使用 Simulink 对直流电动机直接起动进行建模并仿真, 研究起动电流、电磁转矩的变化过程。

**实例:** 一台他励直流电动机的额定数据为: 额定功率  $P_N = 37 \text{ kW}$ , 额定电压  $U_N = 240 \text{ V}$ , 额定转速  $n_N = 1220 \text{ r/min}$ , 额定电流  $I_N = 16.2 \text{ A}$ , 电枢回路电阻  $R_a = 0.6 \Omega$ , 电枢电感  $L_a = 0.012 \text{ H}$ , 励磁绕组电阻  $R_f = 240 \Omega$ , 励磁电感  $L_f = 120 \text{ H}$ , 励磁绕组和电枢的互感  $L_{af} = 1.8 \text{ H}$ , 转动惯量  $J = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。建模仿真他励直流电动机运行在空载状态(转矩常数取 10)直接起动, 示波器显示转速、电枢电流、励磁电流、电磁转矩在起动时间 0~5 s 内的变化曲线。

**建模:** 涉及的模块有直流电源、理想开关、直流电动机、开关、增益、电阻、示波器模块等, 仿真模型中理想开关之后并联的  $10 \text{ k}\Omega$  电阻, 是因为电动机本身属于感性负载, 电流不能突变, 需在其两端并联缓冲电阻。由仿真结果可见, 直接起动最大冲击电流为  $I_{st} = 328.5 \text{ A}$ , 而额定电流为  $I_N = 16.2 \text{ A}$ , 则起动电流倍数为  $k_{ist} = 20.3$ , 数值太大, 因此不能直接起动, 应采取措施, 限制起动冲击电流。

他励直流电动机直接起动仿真模型如图 3-28 所示。

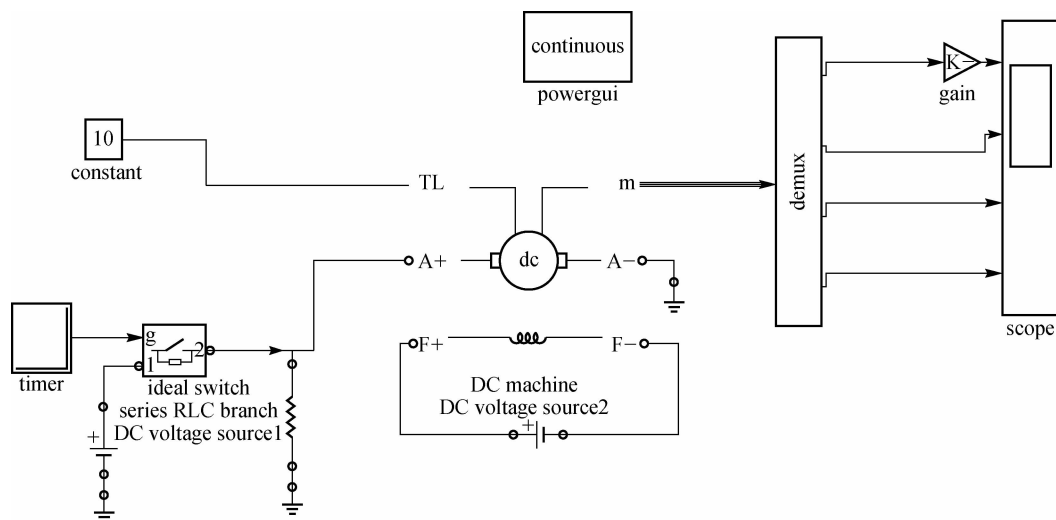


图 3-28 他励直流电动机直接起动仿真模型