

# 第1章 三相异步电动机及拖动系统的基础知识

## 章节概述

与直流电动机相比，异步电动机具有结构简单、运行可靠、价格便宜、维护方便等优点，因此异步电动机被广泛应用于电力拖动系统中。随着电力电子技术和计算机微处理器技术的发展，通用变频器逐步应用于三相异步电动机的调速。变频调速在调速性能方面完全可与直流调速相媲美。本章主要介绍三相异步电动机的基本结构、工作原理、机械特性、调速方法和电力拖动系统的运动方程及典型负载的机械特性。

## 1.1 三相异步电动机的基本结构和工作原理

### 学习目标

1. 掌握三相异步电动机的基本结构和工作原理
2. 掌握三相异步电动机的铭牌数据

### 导入

在变频调速日益普及的今天，三相异步电动机已取代直流电动机广泛应用于要求高精度、高速度控制的各个领域。三相异步电动机的基本结构和工作原理等是本节要讲解的重点。

### 任务知识点

#### 1.1.1 三相异步电动机的基本结构和工作原理

##### 1. 结构

三相异步电动机是由定子和转子两大部分组成，定转子之间有气隙，为了减少励磁电流、提高功率因数，气隙应做得尽可能地小。按转子结构不同，异步电动机分为鼠笼型异步电动机和绕线转子异步电动机两种。这两种电动机定子结构完全一样，只是转子结构不同。

##### 1) 定子

三相异步电动机定子由定子铁心、定子绕组和机座三个主要部分组成。

定子铁心的作用是作为电机磁路的一部分和嵌放定子绕组。为了减少交变磁场在铁心中引起的损耗，由涂有绝缘漆的 0.5mm 厚的导磁性能较好的硅钢片叠压而成，如图 1-1 所示。为了嵌放定子绕组，在定子冲片中均匀地冲制若干个形状相同的槽。槽形有三种：半闭口槽、半开口槽和开口槽，如图 1-2 所示。半闭口槽适用于小型异步电机，其绕组是用圆导线绕成的。半开口槽适用于低压中型异步电机，其绕组是成型线圈。开口槽适用于高压大中型异步电机，其绕组是用绝缘带包扎并浸漆处理过的成型线圈。

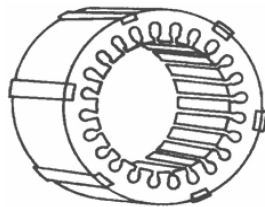


图 1-1 定子铁心

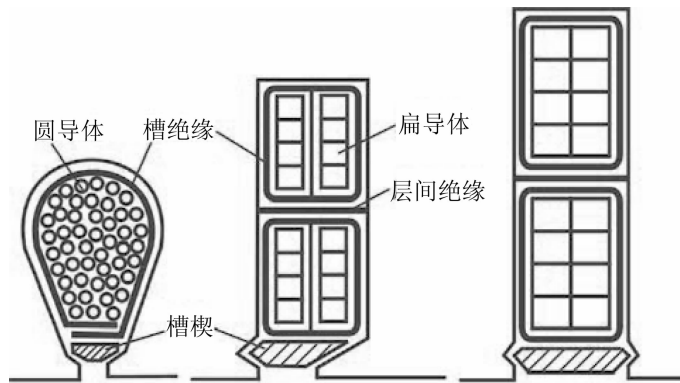


图 1-2 异步电动机的定子槽形

定子绕组是电机的电路部分，它嵌放在定子铁心的内圆槽内。定子绕组分单层和双层两种，一般小型异步电动机采用单层绕组，大、中型异步电动机采用双层绕组。定子绕组在槽内部分与铁心间必须可靠绝缘，槽绝缘的材料、厚度由电机耐热等级和工作电压来决定。

机座的作用是固定和支撑定子铁心及端盖，因此，机座应有较好的机械强度和刚度。中、小型异步电动机一般用铸铁机座，大型异步电动机的机座则用钢板焊接而成。

## 2) 转子

三相异步电动机转子由转子铁心、转子绕组和转轴组成。转子铁心也是磁路的一部分，由 0.5mm 厚的硅钢片叠成，铁心与转轴必须固定，以便传递机械功率。转子铁心的外圆周上也冲满槽，槽内安放转子绕组。转子绕组分绕线型和笼型两种，绕线型转子为三相对称绕组，常联结成星形，三条出线通过轴上的三个滑环及压在其上的三个电刷把电路引出。这种电动机在起动和调速时，可以在转子电路中串入外接电阻，或进行串级调速，绕线转子异步电动机中的转子绕组接线如图 1-3 所示。

笼型转子绕组由槽内的导条和端环构成的多相对称闭合绕组，有铸铝和插铜条两种结构。铸铝转子把导条、端环和风扇一起铸出，结构简单、制造方便，常用于中、小型电动机。插铜条式转子把所有的铜条和端环焊接在一起，形成短路绕组。笼型转子如果把铁心去掉单看绕组部分形似鼠笼，因此称为鼠笼型转子，如图 1-4 所示。

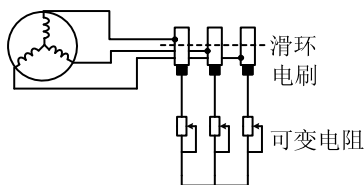
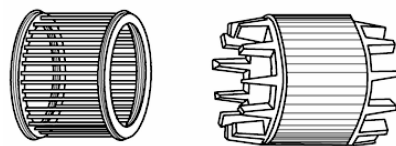


图 1-3 绕线转子绕组接线



(a) (b)

图 1-4 笼型转子

(a) 铜导条 (b) 铸铝

笼型异步电动机的结构如图 1-5 所示。与直流电动机相比，具有结构简单、制造容易、价格便宜、坚固耐用、转动惯量小、运行可靠、使用环境及结构发展不受限制等优点。在变频调速日益普及的今天，笼型异步电动机已逐步取代直流电动机，广泛应用于要求高精度、高速度控制的各个领域。

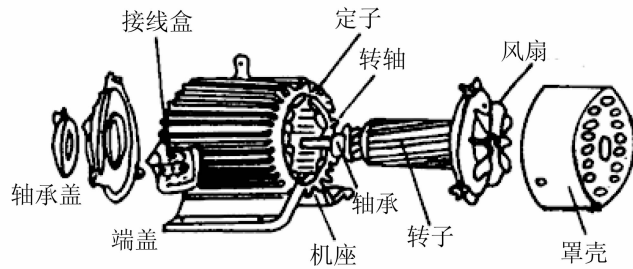


图 1-5 三相鼠笼异步电动机的结构

3) 气隙

三相异步电动机的气隙是均匀的。气隙大小会对三相异步电动机的运行性能和参数产生较大影响，由于励磁电流由电网供给，且气隙越大，励磁电流也就越大，而励磁电流又属于无功性质，它会影响电网的功率因数，因此三相异步电动机的气隙大小往往为机械条件所能允许达到的最小数值，中、小型电机一般为 0.2 ~ 1.5mm。

2. 工作原理

在三相异步电动机的定子铁心里，嵌放着对称的三相绕组 U1-U2、V1-V2、W1-W2，即三相在空间位置上互差 120°电角度的绕组，可以根据需要联结成星形或三角形。转子是一个闭合的多相绕组。图 1-6 为异步电动机的工作原理图，图中定、转子上的小圆圈表示定子绕组和转子导体。

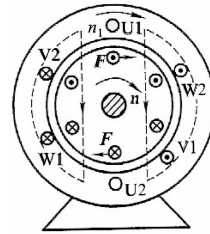


图 1-6 三相异步电动机的工作原理

为了分析方便，设三相对称电流按余弦规律变化，并设 U 相电流达到正最大值时为计时起点，其电流波形如图 1-7 所示。假定电流从绕组首端流入为正，末端流入为负。电流的流入端用符号 ⊗ 表示，流出端用 ⊙ 表示。对称三相交流电流通过对称三相绕组时，电机内便形成一个以同步转速  $n_1$  旋转的圆形旋转磁场（见图 1-8）。同步转速  $n_1$  为

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \tag{1-1}$$

式中  $n_1$  为同步转速 (r/min)；

$f_1$  为定子频率 (Hz)；

$p$  为磁极对数。

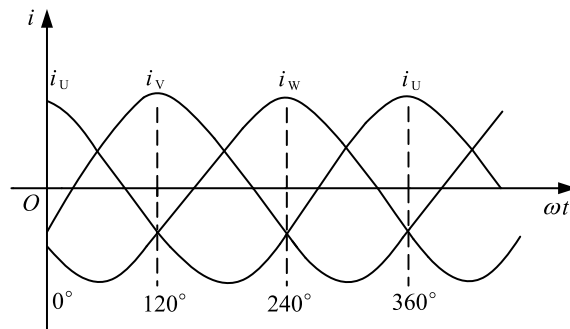


图 1-7 三相对称交流电流的波形

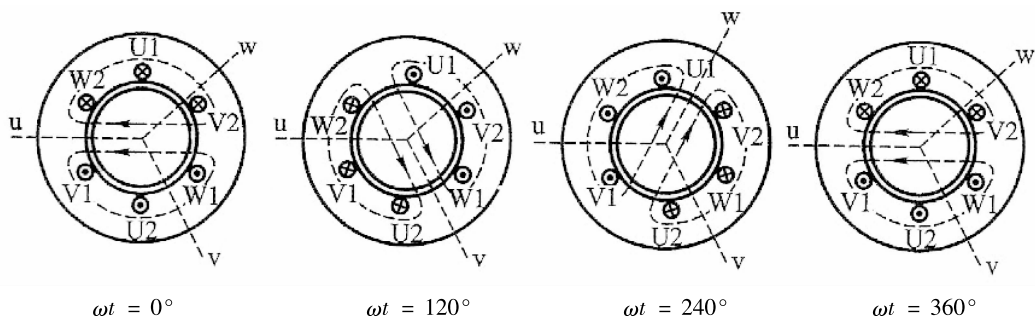


图 1-8 三相异步电动机的旋转磁场

当磁场旋转时，位于该旋转磁场中的转子导体切割旋转磁场，产生感应电动势和电流，方向由右手定则判定；转子载流导体在磁场中受到电磁力的作用，产生电磁转矩，使电动机转子转动，方向由左手定则判定。

转子绕组中的感应电流也产生旋转磁场，但如果定子绕组中没有电流，转子绕组也就产生不了感应电流。所以转子磁场是不可能独立存在的，也无法进行外部控制，并且转子磁场和定子磁场在空间上也不互相垂直。

异步电动机的转速恒小于旋转磁场转速，即  $n < n_1$ ，这是异步电动机工作的必要条件，也是称为“异步”的原因。 $\Delta n = n_1 - n$  称为转速差，而  $\Delta n$  与  $n_1$  之比称为转差率，用  $s$  表示。

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (1-2)$$

一般异步电动机的额定转差率在 0.02 ~ 0.05，它能反映异步电动机的各种运行情况。对异步电动机而言，当转子尚未转动（如起动瞬间）时， $n = 0$ ，此时转差率  $s = 1$ ；当转子转速接近同步转速（空载运行）时， $n \approx n_1$ ，此时转差率  $s \approx 0$ 。由此可见，异步电动机的转速在  $0 \sim n_1$  变化，其转差率  $s$  在  $0 \sim 1$  变化。

### 1.1.2 三相异步电动机的铭牌数据

在每台电动机的铭牌上都标注了电动机的型号、额定值和额定运行情况下的有关技术数据。铭牌上的额定值及有关技术数据是选用、安装和维修电动机的依据，同时用以规定电动机正常运行状态和条件。图 1-9 是三相异步电动机铭牌的一个例子。

Y80L-4	标准编号 × × × × × ×	
0.55kW	1.5A	
380V	1390r/min	重量 16kg
接法 Y	防护等级 IP44	50Hz
工作制 S1	B 级绝缘	出厂年月 ×年×月
× × × × 电机厂		

图 1-9 三相异步电动机的铭牌

## 1. 型号

异步电动机的型号主要包括产品代号、设计序号、规格代号和特殊环境代号等。产品代号表示电机的类型，用大写印刷体的汉语拼音字母表示。如 Y 表示异步电动机，YR 表示绕线转子异步电动机等。设计序号指电动机产品设计的顺序，用阿拉伯数字表示。规格代号是用中心高、铁心外径、机座号、机座长度、铁心长度、功率、转速或极数表示。主要系列产品的规格代号如表 1-1 所示。此外，还有特殊环境代号等，详见有关电机手册。

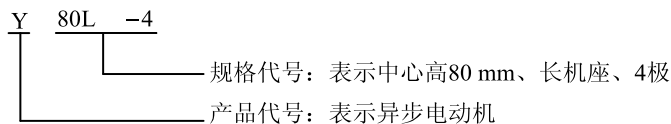
表 1-1 系列产品的规格代号

序号	系列产品	规格代号
1	中小型异步电动机	中心高 (mm)、机座长度 (字母代号)、铁心长度 (数字代号) - 极数
2	大型异步电动机	功率 (kW) - 极数/定子铁心外径 (mm)

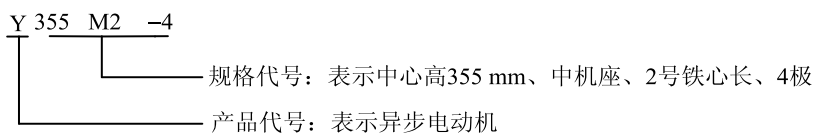
注：1. 机座长度的字母代号采用国际通用符号表示：S 表示短机座、M 表示中机座、L 表示长机座。  
2. 铁心长度的数字代号用数字 1、2、3……依次表示。

现以 Y 系列异步电动机为例，说明型号中各字母及数字所代表的含义。

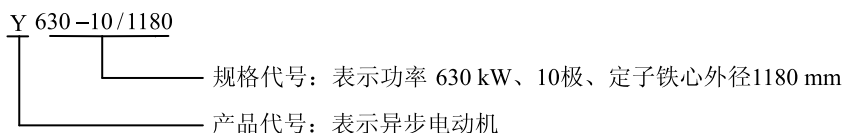
### 小型异步电动机



### 中型异步电动机



### 大型异步电动机



## 2. 额定值

### 1) 额定电压 $U_N$

指电动机额定运行时定子加的线电压，单位为 V 或 kV。

### 2) 额定电流 $I_N$

指定子加额定电压，轴端输出额定功率时定子线电流，单位为 A。

### 3) 额定功率 $P_N$

指电动机额定运行时轴端输出的机械功率，单位为 W 或 kW。

对于三相异步电动机，其额定功率为

$$P_N = \sqrt{3} U_N I_N \eta_N \cos \varphi_N \times 10^{-3} \quad (1-3)$$

式中  $\eta_N$  为电动机的额定效率；

$\cos \varphi_N$  为电动机的额定功率因数；

$U_N$  的单位为 V；

$I_N$  的单位为 A；

$P_N$  的单位为 kW。

#### 4) 额定频率 $f_N$

在额定状态下运行时，电动机定子侧电压的频率称为额定频率。我国电网的额定频率为 50Hz。

#### 5) 额定转速 $n_N$

指额定电压、额定电流，电动机运行于额定功率时所对应的转子的转速，单位为 r/min。

#### 6) 额定功率因数 $\cos\varphi_N$

指电动机在额定功率状态下工作时定子侧的功率因数。

有些物理量虽然不标在铭牌上，但也是额定值，例如电动机轴上输出的额定转矩用  $T_N$  表示，其大小应该是输出的机械功率额定值除以转子机械角速度的额定值，即

$$T_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = 9.55 \frac{P_N}{n_N} \quad (1-4)$$

式中  $P_N$  的单位为 W；

$n_N$  的单位为 r/min；

$T_N$  的单位为 N·m。

### 3. 接线

接线是指在额定电压下运行时，三相异步电动机定子绕组有星形和三角形联接两种，如图 1-10 所示。具体采用哪种接线方式取决于相绕组能承受的电压设计值。例如：380/220V，Y/Δ 是指：线电压为 380V 时采用 Y 接法；当线电压为 220V 时，采用 Δ 接法。在这两种情况下，每相绕组实际上都只能承受 220V。

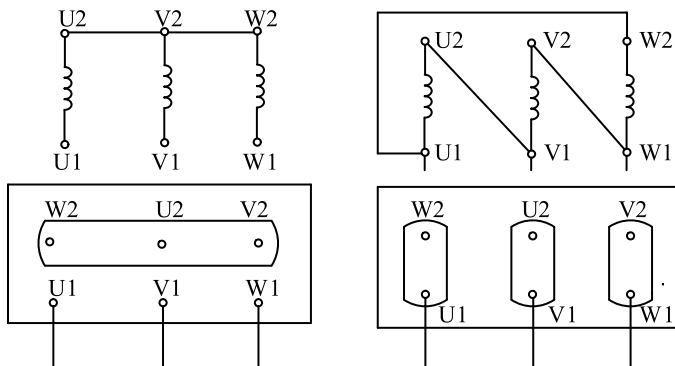


图 1-10 三相异步电动机的接线

### 4. 防护等级

电动机外壳防护等级的标志，是以字母“IP”和其后面的两位数表示的。“IP”为国际防护的缩写。IP 后面第一位数字代表第一种防护形式（防尘）的等级，共分 0~6 七个等级。第二位数字代表第二种防护形式（防水）的等级，共分 0~8 九个等级，等级数字越大，表示防护的能力越强。

### 5. 工作方式

电动机工作时，其温升的高低不仅与负载的大小有关，而且还与负载的持续时间有

关。同一台电动机，如果工作时间的长短不同，则它的温升也不同，或者说，它能够承担负载功率的大小也不同。为了适应不同负载的需要，按负载持续时间的不同，国家标准把电动机分成了三种工作方式或三种工作制，即连续工作制（S1），短时工作制（S2），断续周期工作制（S3 ~ S8）。

## 6. 绝缘等级

电动机运行时，由于损耗产生热量，使电动机的温度升高。电动机允许达到的最高温度是由电动机所使用绝缘材料的耐热程度决定的，绝缘材料的耐热程度称为绝缘等级。不同的绝缘材料，其允许的最高温度是不同的，电动机中常用的绝缘材料分为五个等级，如表 1-2 所示。其中的最高允许温升值是按环境温度为 40℃ 计算出来的。目前我国生产的电机多采用 E 级和 B 级绝缘，发展趋势是采用 F 级和 H 级绝缘，这样可以在一定的输出功率下，减轻电机的重量、缩小电机的体积。

表 1-2 绝缘材料的等级

等 级	A	E	B	F	H
最高允许的温度（℃）	105	120	130	155	180
最高允许的温升（℃）	65	80	90	115	140

## 1.2 三相异步电动机的 T 型等效电路和机械特性

### 学习目标

1. 掌握三相异步电动机的 T 型等效电路
2. 掌握三相异步电动机的机械特性
3. 掌握三相异步电动机的各种调速方法

### 导入

由前一节, 我们知道三相异步电动机的定子和转子之间只有磁的关系, 而没有电的联系, 这给定量分析定、转子间的关系带来了困难。为了分析方便, 本书用一种等效电路来代替实际的电路, 使定、转子各物理量间的关系能够在统一的电路里进行定量分析。

三相异步电动机有什么样的机械特性, 如果相关的参数发生了变化, 转子的转速会有怎样的变化? 这一节将详细介绍这些内容。

### 任务知识点

### 1.2.1 三相异步电动机的 T 型等效电路

#### 1. 三相异步电动机的定子电路

##### 1) 主、漏磁通的分布

根据磁通经过的路径和性质的不同, 异步电动机的磁通可分为主磁通和漏磁通两大类。

(1) 主磁通  $\dot{\Phi}$  当三相异步电动机定子绕组通入三相对称交流电时, 将产生旋转磁动势, 该磁动势产生的磁通绝大部分穿过气隙, 并同时交链于定、转子绕组, 这部分磁通称为主磁通, 用  $\dot{\Phi}$  表示, 如图 1-11 (a) 所示。由于主磁通同时交链定、转子绕组而在其中分别产生感应电动势。又由于异步电动机的转子绕组为三相或多相短路绕组, 在电动势的作用下, 转子绕组中有电流通过。转子电流与定子磁场相互作用产生电磁转矩, 实现异步电动机的电磁能量转换, 因此, 主磁通起了转换能量的媒介作用。

(2) 漏磁通  $\dot{\Phi}_s$  除主磁通外的磁通称作漏磁通, 它包括定子绕组的槽部漏磁

通和端部漏磁通，如图 1-11 (b) 所示。以及由高次谐波磁动势所产生的高次谐波磁通，前两项漏磁通只交链于定子绕组，而不交链于转子绕组。而高次谐波磁通实际上穿过气隙，同时交链定、转子绕组。由于高次谐波磁通对转子不产生有效转矩，另外它在定子绕组中感应电动势又很小，且其频率和定子前两项漏磁通在定子绕组中感应电动势频率又相同，它也具有漏磁通的性质，所以就把它当作漏磁通来处理，故又称作谐波漏磁通。

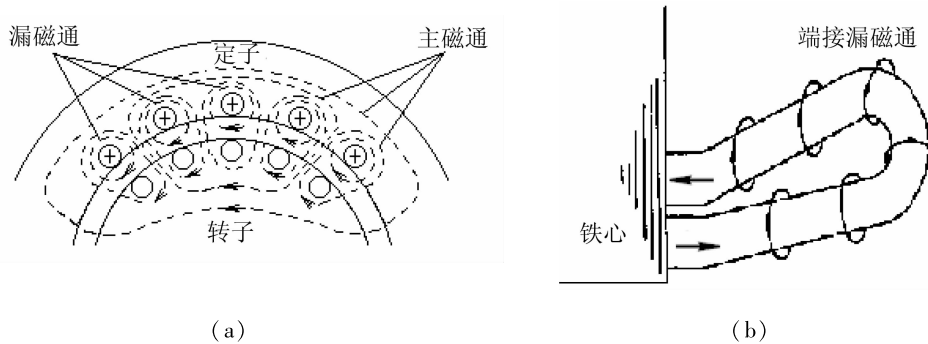


图 1-11 主磁通与漏磁通  
(a) 主磁通和槽漏磁通 (b) 端部漏磁通

由于漏磁通沿着磁阻很大的空气形成闭合回路，因此它比主磁通小很多。漏磁通仅在定子绕组上产生漏电动势，因此不能起能量转换的媒介作用，只起电抗压降的作用。

## 2) 空载运行时定子绕组的电动势

(1) 主磁通感应的电动势 主磁通在定子绕组中感应的电动势  $e_1$  为

$$e_1 = -N_1 k_{w1} \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 k_{w1} \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = -N_1 k_{w1} \omega \Phi_m \cos \omega t \quad (1-5)$$

$$= N_1 k_{w1} \omega \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

由上式可知， $e_1$  的有效值为

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} e_{1m} = \frac{1}{\sqrt{2}} N_1 k_{w1} \omega \Phi_m = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_1 k_{w1} f_1 \Phi_m = 4.44 N_1 k_{w1} f_1 \Phi_m \quad (1-6)$$

式中  $E_1$  为定子绕组电动势的有效值；

$f_1$  为定子电压的频率；

$N_1$  为每相定子绕组的匝数；

$k_{w1}$  为定子绕组的基波绕组系数；

$\Phi_m$  为每极下的磁通（最大值）。

所以， $E_1$  的相量表达式为

$$\dot{E}_1 = -j4.44 N_1 k_{w1} f_1 \dot{\Phi}_m \quad (1-7)$$

(2) 漏磁通感应的电动势 定子漏磁通在定子绕组中感应的漏磁电动势可用漏抗压降的形式表示，即

$$\dot{E}_{1\sigma} = -jx_1 \dot{I}_0 \quad (1-8)$$

式中  $\dot{E}_{1\sigma}$  为定子绕组的漏磁电动势；

$x_1$  为定子漏电抗，它是对应于定子漏磁通的电抗；

$\dot{I}_0$  为空载电流。

3) 空载时定子电压平衡方程与等效电路

设定子绕组上外加电压为  $\dot{U}_1$ ，相电流为  $\dot{I}_0$ ，主磁通  $\dot{\Phi}$  在定子绕组中感应的电动势为  $\dot{E}_1$ ，定子漏磁通在定子每相绕组中感应的电动势为  $\dot{E}_{1\delta}$ ，定子每相电阻为  $r_1$ ，根据基尔霍夫第二定律，可列出电动机空载时每相的定子电压方程式。

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\delta} + r_1 \dot{I}_0 = -\dot{E}_1 + jx_1 \dot{I}_0 + r_1 \dot{I}_0 \\ &= -\dot{E}_1 + (r_1 + jx_1) \dot{I}_0 = -\dot{E}_1 + z_1 \dot{I}_0 \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中  $z_1$  为定子绕组的漏阻抗,  $z_1 = r_1 + jx_1$ 。

空载电流  $\dot{I}_0$  产生主磁通  $\dot{\Phi}$  在一次绕组感应出主电动势  $\dot{E}_1$ ，它也可引入某一参数的压降来表示，但考虑到交变主磁通在铁心中还产生铁损耗，它就不能单纯地引入一个电抗参数，而还需引入一个电阻  $r_m$  参数，用  $I_0^2 r_m$  来反映铁损耗，因此可引入一个阻抗参数  $z_m$ ，把  $\dot{E}_1$  与  $\dot{I}_0$  联系起来，此时， $-\dot{E}_1$  可看作空载电流  $\dot{I}_0$  在  $z_m$  上的阻抗压降，即

$$-\dot{E}_1 = z_m \dot{I}_0 = (r_m + jx_m) \dot{I}_0 \quad (1-10)$$

式中  $z_m$  为励磁阻抗,  $z_m = r_m + jx_m$ ，其中  $r_m$  为励磁电阻，是反映铁损耗的等效电阻,  $x_m$  为励磁电抗，与主磁通相对应。

由式 (1-9) 和式 (1-10)，即可画出异步电动机定子的等效电路，如图 1-12 所示。

2. 三相异步电动机的转子电路

1) 静止状态下的转子绕组

(1) 转子绕组感应电动势 在静止状态下，其产生过程和定子绕组完全相同，所以感应电动势  $E_2$  为

$$E_2 = 4.44f_1 N_2 k_{w2} \Phi_m \quad (1-11)$$

式中  $E_2$  为静止时的转子绕组电动势的有效值；

$N_2$  为每相转子绕组的匝数；

$k_{w2}$  为转子绕组的基波绕组系数。

当转子不转时，转差率  $s = 1$ ，其感应电动势频率  $f_2 = f_1$ ，主磁通切割转子的相对速度最快，此时转子电动势最大。

(2) 转子绕组的漏电抗 漏电抗的大小和频率有关，在静止状态下，有

$$x_2 = 2\pi f_1 L_2 \quad (1-12)$$

式中  $x_2$  为转子不转时的漏电抗；

$L_2$  为转子绕组的漏电感。

2) 旋转状态下的转子绕组

(1) 转子电动势的频率 感应电动势的频率和导体与磁场的相对切割速度成正比，故转子电动势的频率为

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n)}{60} = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot \frac{pn_1}{60} = sf_1 \quad (1-13)$$

式中  $f_1$  为电网频率，为一定值，故转子绕组感应电动势的频率  $f_2$  与转差率  $s$  成正比。

当转子不转（如起动瞬间）时， $n = 0$ ， $s = 1$ ，则  $f_2 = f_1$ ；当转子接近同步转速（如空载运行）时， $n \approx n_1$ ， $s \approx 0$ ，则  $f_2 \approx 0$ 。异步电动机在额定情况运行时，转差率

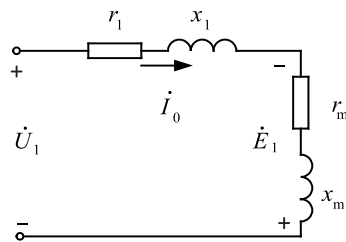


图 1-12 异步电动机定子的等效电路

很小，通常在 0.01 ~ 0.06，若电网频率为 50 Hz，则转子感应电动势频率仅在 0.5 ~ 3 Hz，所以异步电动机在正常运行时，转子绕组感应电动势的频率很低。

(2) 转子电动势的有效值 转子旋转时的转子绕组感应电动势  $E_{2s}$  为

$$E_{2s} = 4.44f_2 N_2 k_w \Phi_m = sE_2 \quad (1-14)$$

式中  $E_{2s}$  为旋转时的转子绕组电动势的有效值。

当电源电压  $U_1$  一定时， $\Phi_m$  就一定，故  $E_2$  为常数，则  $E_{2s} \propto s$ ，即转子绕组感应电动势也与转差率成正比。

当转子转速增加时，转差率将随之减小。因正常运行时转差率很小，故转子绕组感应电动势也就很小。

(3) 转子绕组的漏电抗  $x_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2 = s x_2$  (1-15)

式中  $x_{2s}$  是转子旋转时的转子绕组漏电抗 ( $x_2$  是个常数，故转子旋转时的转子绕组漏电抗也正比于转差率  $s$ )。

同样，在转子不转 (如起动瞬间) 时， $s = 1$ ， $x_{2s}$  最大。当转子转动时， $x_{2s}$  随转子转速的升高而减小。

(4) 转子绕组的电流 异步电动机的转子绕组正常运行时处于短接状态，其端电压  $U_2 = 0$ ，所以，转子绕组电动势平衡方程为

$$\dot{E}_{2s} - z_{2s} \dot{I}_2 = 0 \text{ 或 } \dot{E}_{2s} = (r_2 + jx_{2s}) \dot{I}_2 \quad (1-16)$$

其电路如图 1-13 所示，转子每相电流  $\dot{I}_2$  为

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2s}}{z_{2s}} = \frac{\dot{E}_{2s}}{r_2 + jx_{2s}} = \frac{s \dot{E}_2}{r_2 + jsx_2} \quad (1-17)$$

其有效值为

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} \quad (1-18)$$

上式说明转子绕组电流  $I_2$  也与转差率  $s$  有关，当  $s = 0$  时， $I_2 = 0$ ；当转子转速降低时，转差率  $s$  增大，转子电流也随之增大。

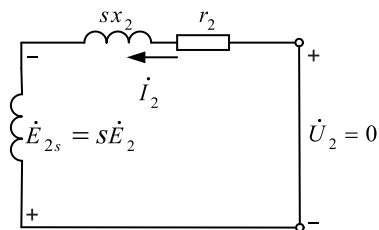


图 1-13 转子绕组一相电路

(5) 转子绕组功率因数

$$\cos\varphi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} \quad (1-19)$$

式 (1-19) 说明，转子回路功率因数也与转差率  $s$  有关。当  $s = 0$  时， $\cos\varphi_2 = 1$ ；当  $s$  增加时， $\cos\varphi_2$  则减小。

### 3. 磁动势平衡方程

异步电动机负载运行时，定子电流产生定子磁动势  $F_1$ ，转子电流产生转子磁动势  $F_2$ 。这两个磁动势在空间同速、同向旋转，相对静止。 $F_1$  与  $F_2$  的合成磁动势即为励磁磁动势  $F_0$ ，则

$$F_1 + F_2 = F_0 \quad (1-20)$$

式 (1-20) 即为磁动势平衡方程式，可改写成

$$F_1 = F_0 + (-F_2) = F_0 + F_{1L} \quad (1-21)$$

式中  $F_{1L} = -F_2$  为定子负载分量磁动势。

可见，定子旋转磁动势包含有两个分量：一个是励磁磁动势  $F_0$ ，它用来产生气隙磁通  $\Phi$ ；另一个是负载分量磁动势  $F_{1L}$ ，它是用来平衡转子旋转磁动势  $F_2$ ，即用来抵消转子旋转磁动势对主磁通的影响。

#### 4. 电流平衡方程

根据旋转磁动势幅值公式，可以写出定子磁动势、转子磁动势和励磁磁动势的幅值公式为

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{m_1}{2} 0.9 \frac{N_1 k_{w1}}{p} I_1 \\ F_2 &= \frac{m_2}{2} 0.9 \frac{N_2 k_{w2}}{p} I_2 \\ F_0 &= \frac{m_1}{2} 0.9 \frac{N_1 k_{w1}}{p} I_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-22)$$

式中  $I_0$  为励磁电流；

$m_1$ 、 $m_2$  分别为定、转子绕组相数；

$I_1$  为定子电流， $I_2$  为转子电流。

将式 (1-22) 代入式 (1-20)，经整理得电流方程的相量式为

$$\dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_2}{k_i} = \dot{I}_0 \quad (1-23)$$

式中  $k_i = \frac{m_1 N_1 k_{w1}}{m_2 N_2 k_{w2}}$  为异步电动机的电流变比。

所以磁动势之间的平衡关系也可以简单地通过电流平衡方程来表示，即

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_0 \quad (1-24)$$

式中  $\dot{I}_2' = \frac{\dot{I}_2}{k_i}$  为转子电流的折算值。

转子电流  $\dot{I}_2'$  的有效值总是和负载转矩成比例，所以常称为转矩分量， $\dot{I}_0$  则是励磁分量，或称为励磁电流。

#### 5. 负载时定、转子电动势平衡方程

定子电动势  $\dot{E}_1$ 、漏磁电动势  $\dot{E}_{1\sigma}$ 、定子绕组电阻压降  $r_1 \dot{I}_1$  与外加电源电压  $\dot{U}_1$  相平衡，此时定子电流为  $\dot{I}_1$ 。在转子电路中，由于转子为短路绕组，故转子电动势  $\dot{E}_{2s}$ 、转子漏磁电动势  $\dot{E}_{2\sigma}$  和转子绕组压降  $r_2 \dot{I}_2$  相平衡。因此，可写出负载时定、转子的电动势平衡方程式为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + r_1 \dot{I}_1 + jx_1 \dot{I}_1 \\ 0 &= \dot{E}_{2s} - r_2 \dot{I}_2 - jx_{2s} \dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-25)$$

式 (1-25) 中， $E_1 = 4.44f_1 N_1 k_{w1} \Phi_m$ ，转子不动时的转子绕组感应电动势  $E_2 = 4.44f_1 N_2 k_{w2} \Phi_m$ ，两者之比用  $k_e$  来表示，称为电动势变比，即

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} = k_e \quad (1-26)$$

## 6. 三相异步电动机的等效电路

欲定量分析异步电动机的性能，须将其基本方程式的各个复数方程式联立求解，算出电流  $\dot{I}_1$  及  $\dot{I}_2$ ，以及功率和转矩等物理量，计算十分繁杂。尤其是定子电势频率为  $f_1$ ，转子电势频率为  $f_2 = sf_1$  时，而直接将频率不同的相量方程式联立求解是没有物理意义。解决的办法，就是找出一个便于计算的异步电机等效电路。即要设法把只有磁的耦合，而没有电的联系的定子电路和转子电路连成一个电路，而又不改变定子绕组的各物理量（定子电流、电势、功率因数等）和电机的电磁性能，要找出这个等效电路，必须先进行“折算”。

上面提到定子绕组内电势和电流的频率为  $f_1$ ，而转子绕组的频率为  $f_2$ ，加上定、转子绕组的相数、有效匝数又互不相同，所以需要进行频率和绕组折算。

### 1) 折算

(1) 频率折算 频率折算就是要寻求一个等效的转子电路来代替实际旋转的转子系统，而该等效的转子电路应与定子电路有相同的频率。只有当转子静止时，转子电路才与定子电路有相同的频率。所以频率折算的实质就是把旋转的转子等效成静止的转子。

在等效过程中，要保持电机的电磁效应不变，折算的原则有两条：一是保持转子电路对定子电路的影响不变，而这一影响是通过转子磁动势  $F_2$  来实现的，所以进行频率折算时，应保持转子磁动势  $F_2$  不变，要达到这一点，只要使被等效静止的转子电流大小和相位与原转子旋转时的电流大小和相位一样即可；二是被等效的转子电路功率和损耗与原转子旋转时电路一样。

由式 (1-17) 可知，转子旋转时的转子电流为

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2s}}{r_2 + jx_{2s}} = \frac{s \dot{E}_2}{r_2 + jsx_2} \quad (\text{频率为 } f_2) \quad (1-27)$$

将上式分子、分母同除以  $s$ ，得

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{\frac{r_2}{s} + jx_2} \quad (\text{频率为 } f_1) \quad (1-28)$$

比较式 (1-27) 和式 (1-28) 可见，频率折算方法只要把原转子电路中的  $r_2$  变换为  $\frac{r_2}{s}$ ，即在原转子旋转的电路中串入一个  $\frac{r_2}{s} - r_2 = \frac{1-s}{s}r_2$  的附加电阻即可，如图 1-14 所示。由此可知，变换后的转子电路中多了一个附加电阻  $\frac{1-s}{s}r_2$ 。实际旋转的转子在转轴上有机功率输出并且转子还会产生机械损耗。而经频率折算后，因转子等效为静止状态，转子就不再有机械功率输出及机械损耗了，但却在电路中多了一个附加电阻  $\frac{1-s}{s}r_2$ 。根据能量守恒及总功率不变原则，该电阻所消耗的功率  $m_2 I_2^2 \frac{1-s}{s}r_2$  应等于转轴上的机械功率和转子的机械损耗之和，这部分功率称为总机械功率，附加电阻  $\frac{1-s}{s}r_2$

称为模拟机械功率的等效电阻。

由图 1-14 可知,从等效电路角度,可把  $\frac{1-s}{s}r_2$  看作是异步电动机的“负载电阻”,把转子电流  $\dot{I}_2$  在该电阻上的电压降看成是转子回路的端电压,即  $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \frac{1-s}{s}r_2$ ,这样转子回路电动势平衡方程就可写成

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - (r_2 + jx_2) \dot{I}_2 \quad (1-29)$$

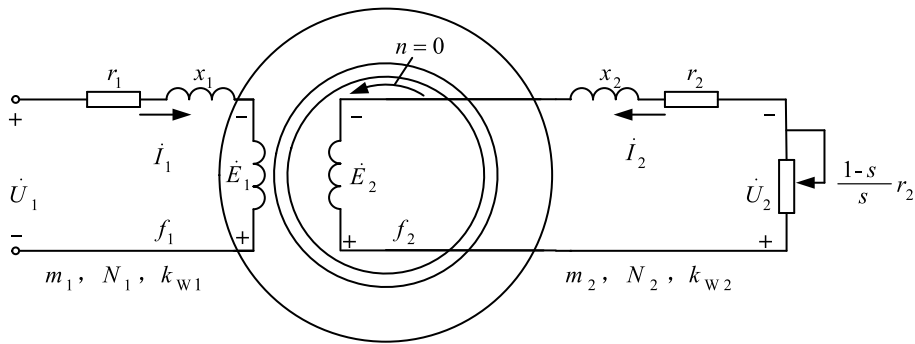


图 1-14 频率折算后异步电动机的定、转子等效电路

(2) 转子绕组折算 转子绕组的折算就是用一个和定子绕组具有相同相数  $m_1$ 、匝数  $N_1$  及绕组系数  $k_{w1}$  的等效转子绕组来等效代替原来的相数  $m_2$ 、匝数  $N_2$  及绕组系数  $k_{w2}$  的实际转子绕组。包括电流的折算、电动势的折算和阻抗的折算。本书中因为不进行具体计算,故折算公式从略。

## 2) 等效电路

(1) 折算后的基本方程组 经过频率和绕组折算后,异步电动机的基本方程组为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + (r_1 + jx_1) \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - (r_2' + jx_2') \dot{I}_2' \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2' &= \dot{I}_0 \\ \dot{E}_1 &= -(r_m + jx_m) \dot{I}_0 \\ \dot{E}_2' &= \dot{E}_1 \\ \dot{U}_2' &= \frac{1-s}{s} r_2' \dot{I}_2' \end{aligned} \right\} \quad (1-30)$$

注:加“'”的物理量为折算后的转子的量。

(2) T 型等效电路 异步电动机是通过磁场从定子向转子传输能量,根据基本方程式,可画出异步电动机的 T 型等效电路,如图 1-15 所示。

由等效电路分析可知:

① 当转子不转(如堵转)时,  $n = 0, s = 1$ , 则附加电阻  $\frac{1-s}{s}r_2' = 0$ , 总机械功率为零,此时异步电动机处于短路运行状态,定、转子电流均很大。

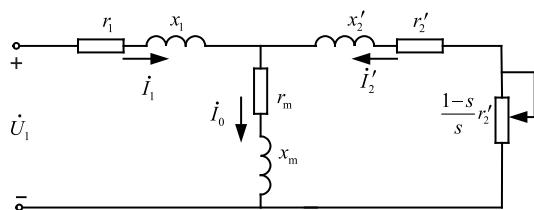


图 1-15 异步电动机的 T 型等效电路

② 当转子趋于同步转速旋转时,  $n \rightarrow n_1, s \rightarrow 0$ , 则  $\frac{1-s}{s}r_2' \rightarrow \infty$ , 等效电路近乎开路, 转子电流很小, 总机械功率也很小, 相当于异步电动机空载运行。

### 7. 三相异步电动机的功率平衡

#### 1) 定子功率平衡

异步电动机运行时, 定子从电网吸收电功率, 转子向拖动的机械负载输出机械功率。电动机在实现机电能量转换的过程中, 必然会产生各种损耗。根据能量守恒定律, 输出功率应等于输入功率减去总功率损耗。

(1) 输入功率 由电网供给电动机的功率称为输入功率, 其计算公式为

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi_1 \quad (1-31)$$

(2) 损失功率 定子电流流过定子绕组时, 电流  $I_1$  在定子绕组电阻  $r_1$  上的功率损耗称为定子铜损耗, 其计算公式为

$$P_{\text{cu1}} = m_1 r_1 I_1^2 \quad (1-32)$$

旋转磁场在定子铁心中还将产生铁损耗 (因转子频率很低, 一般为 1 ~ 3 Hz, 故转子铁损耗很小, 可忽略不计), 其值可看作励磁电流  $I_0$  在励磁电阻上所消耗的功率

$$P_{\text{Fe}} = m_1 r_m I_0^2 \quad (1-33)$$

(3) 电磁功率 从输入功率  $P_1$  中扣除定子铜损耗  $P_{\text{cu1}}$  和定子铁损耗  $P_{\text{Fe}}$ , 剩余的功率便是由气隙磁场通过电磁感应关系由定子传递到转子侧的电磁功率  $P_{\text{em}}$ , 即

$$P_{\text{em}} = P_1 - (P_{\text{cu1}} + P_{\text{Fe}}) \quad (1-34)$$

#### 2) 转子功率平衡

(1) 电磁功率 由等效电路可得

$$P_{\text{em}} = m_1 E_2' I_2' \cos\varphi_2 = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} \quad (1-35)$$

(2) 损失功率 转子电流流过转子绕组时, 电流  $I_2$  在转子绕组电阻  $r_2$  上的功率损耗称为转子铜损耗, 其计算公式为

$$P_{\text{cu2}} = m_1 r_2 I_2'^2 \quad (1-36)$$

(3) 总机械功率 传递到转子的电磁功率扣除转子铜损耗为电动机的总机械功率  $P_{\text{MEC}}$ , 即

$$P_{\text{MEC}} = P_{\text{em}} - P_{\text{cu2}} \quad (1-37)$$

由等效电路可知, 它就是转子电流消耗在附加电阻  $\frac{1-s}{s}r_2'$  上的电功率, 即

$$P_{\text{MEC}} = m_1 \frac{1-s}{s} r_2' I_2'^2 \quad (1-38)$$

由式 (1-35) 和式 (1-36) 可得

$$\frac{P_{\text{cu}2}}{P_{\text{em}}} = s \text{ 或 } P_{\text{cu}2} = sP_{\text{em}} \quad (1-39)$$

由式 (1-35) 和式 (1-38) 可得

$$\frac{P_{\text{MEC}}}{P_{\text{em}}} = 1 - s \text{ 或 } P_{\text{MEC}} = (1 - s)P_{\text{em}} \quad (1-40)$$

(4) 输出的机械功率 电动机运行时, 还会产生由轴承及风阻等摩擦所引起的机械损耗  $P_{\text{mec}}$ , 另外还有由于定、转子开槽和谐波磁场引起的附加损耗  $P_{\text{ad}}$ 。电动机的附加损耗很小, 一般在大型异步电动机中,  $P_{\text{ad}}$  约为  $0.5\% P_{\text{N}}$ ; 而在小型异步电动机中, 满载时,  $P_{\text{ad}}$  可达  $(1 \sim 3)\%$  或更大些。

总机械功率  $P_{\text{MEC}}$  扣去机械损耗  $P_{\text{mec}}$  和附加损耗  $P_{\text{ad}}$ , 才是电动机转轴上输出的机械功率, 即

$$P_2 = P_{\text{MEC}} - (P_{\text{mec}} + P_{\text{ad}}) \quad (1-41)$$

可见异步电动机运行时, 从电源输入电功率  $P_1$  到转轴上输出功率  $P_2$  的全过程为

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 - P_{\text{cu}1} - P_{\text{Fe}} - P_{\text{cu}2} - P_{\text{mec}} - P_{\text{ad}} \\ &= P_1 - \sum P \end{aligned} \quad (1-42)$$

式中  $\sum P$  为电动机的总损耗。

异步电动机的功率流程如图 1-16 所示。

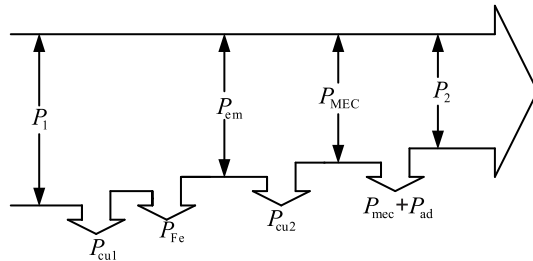


图 1-16 异步电动机功率流程

### 8. 三相异步电动机的转矩平衡

由动力学可知, 旋转体的机械功率等于作用在旋转体上的转矩与其机械角速度  $\Omega$  的乘积,  $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$  (rad/s)。将式 (1-41) 的两边同除以转子机械角速度  $\Omega$  便得到稳态时异步电动机的转矩平衡方程式

$$\begin{aligned} \frac{P_2}{\Omega} &= \frac{P_{\text{MEC}}}{\Omega} - \frac{P_{\text{mec}} + P_{\text{ad}}}{\Omega} \\ \text{即 } T_2 &= T_{\text{em}} - T_0 \text{ 或 } T_{\text{em}} = T_2 + T_0 \end{aligned} \quad (1-43)$$

式中  $T_{\text{em}} = \frac{P_{\text{MEC}}}{\Omega}$  为电动机电磁转矩, 为驱动性质转矩;

$T_2 = \frac{P_2}{\Omega}$  为电动机轴上输出的机械负载转矩, 为制动性质转矩;

$T_0 = \frac{P_{\text{mec}} + P_{\text{ad}}}{\Omega}$  为对应于机械损耗和附加损耗的转矩, 称为空载转矩, 它也为

制动性质转矩。

式(1-43)说明电磁转矩  $T_{em}$  与输出机械转矩  $T_2$  和空载转矩  $T_0$  相平衡。

从式(1-40)可推得

$$T_{em} = \frac{P_{MEC}}{\Omega} = \frac{(1-s)P_{em}}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{P_{em}}{\frac{2\pi n_1}{60}} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} \quad (1-44)$$

式中  $\Omega_1$  为同步机械角速度,  $\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}$  (rad/s)。

由此可知,电磁转矩从转子方面看,它等于总机械功率除以转子机械角速度;从定子方面看,它又等于电磁功率除以同步机械角速度。

在计算中,若功率单位为 W,机械角速度单位为 rad/s,则转矩单位为 N·m。

## 1.2.2 三相异步电动机的机械特性

三相异步电动机拖动生产机械运行时,电磁转矩和转速是最重要的输出量。三相异步电动机的机械特性就是指电动机的转速与电磁转矩之间的函数关系  $n = f(T_{em})$ 。由于转差率与转速之间存在着一定的关系,因此也可以用  $s = f(T_{em})$  表示三相异步电动机的机械特性。但是在用曲线表示三相异步电动机的机械特性时,却常以  $T_{em}$  为横坐标,以  $s$  和  $n$  为纵坐标。

### 1. 机械特性的物理表达式

$$T_{em} = C_T \Phi_m I_2' \cos\varphi_2 \quad (1-45)$$

式中  $C_T$  为异步电动机的转矩常数。对于已制成的电动机,  $C_T$  为常数。

式(1-45)表明,异步电动机的电磁转矩是由主磁通  $\Phi_m$  与转子电流的有功分量  $I_2' \cos\varphi_2$  相互作用产生的,它是电磁力定律在异步电动机中的具体表现。

物理表达式虽然反映了异步电动机电磁转矩产生的物理本质,但并没有直接反映出电磁转矩与电动机参数之间的关系,更没有明显地表示电磁转矩与转速之间的关系,因此,分析和计算异步电动机的机械特性时,一般不采用物理表达式,而是采用下面介绍的参数表达式。

### 2. 机械特性的参数表达式

$$T_{em} = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 [(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad (1-46)$$

式(1-46)即为用电动机的电压、频率及结构参数表示的三相异步电动机机械特性公式,称为机械特性的参数表达式。按该式绘制的机械特性曲线如图 1-17 所示。

从图 1-17 可以看出:

(1) 在 I 象限,旋转磁场的转向与转子转向一致,电磁转矩即为驱动转矩,此时电机从电网取得电功率转变成机械功率,由转轴传输给负载。电动机的转速范围为  $n_1 > n > 0$ ,其转差率范围为  $0 < s \leq 1$ 。电磁转矩  $T_{em}$  及转子转速  $n$  均为正,电动机处于电动运行状态。

(2) 在 II 象限, 旋转磁场的转向与转子转向一致, 电磁转矩为制动转矩。为克服电磁转矩的制动作用而使转子继续旋转, 并保持  $n > n_1$ , 电机必须不断从原动机吸收机械功率, 把机械功率变为输出的电功率, 成为发电机运行状态。此时, 若  $n > n_1$ , 则转差率  $s < 0$ 。  $n$  为正值,  $T_{em}$  为负值。

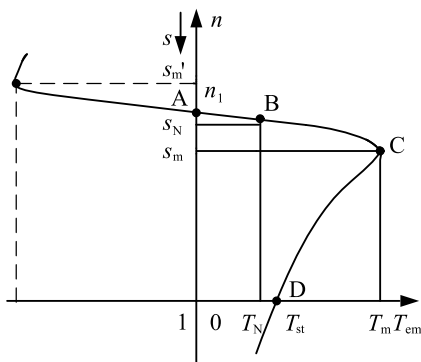


图 1-17 三相异步电动机的机械特性曲线

(3) 在 IV 象限内, 旋转磁场的转向与转子转向相反, 电磁转矩与电机旋转方向相反, 起制动作用。电机定子仍从电网吸收电功率, 同时转子从外力吸收机械功率, 这两部分功率都在电机内部以损耗的方式转化成热能消耗掉。这种运行状态称为电磁制动运行状态。此种情况下, 若  $n$  为负值, 即  $n < 0$ , 则转差率  $s > 1$ 。此时  $T_{em}$  为正值。

### 3. 固有机械特性

三相异步电动机的固有机械特性是指在额定电压和额定频率下, 按规定的接线方式接线, 定子和转子电路不外接电阻或电抗时的机械特性。当电机处于电动机运行状态时, 其固有机械特性如图 1-17 所示。在曲线上有四个特殊点, 即图中的 A、B、C、D 四点。这四个点确定了, 机械特性的形状也就基本确定了。

(1) 同步运行点 A 该点  $T_{em} = 0$ ,  $n = n_1 = 60f_1/p$ ,  $s = 0$ 。此时电动机不进行机电能量转换。

(2) 额定工作点 B 额定工作点的转速、转矩、电流及功率等都是额定值。与额定转速对应的转差率  $s_N$  称为额定转差率, 其值在 0.012 ~ 0.05。机械特性曲线上的额定转矩是指额定电磁转矩, 在工程计算中通常忽略  $T_0$ , 则额定电磁转矩等于额定负载转矩, 即  $T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N}$ 。

(3) 最大转矩点 C 该点电磁转矩为最大值  $T_m$ , 相应的转差率为  $s_m$ , 称为临界转差率。最大转矩  $T_m$  是三相异步电动机的性能指标之一, 最大转矩越大, 电动机短时过载能力越强。因此把最大转矩与额定转矩之比称为异步电动机的过载能力, 用  $\lambda_m$  表示, 即  $\lambda_m = \frac{T_m}{T_N}$ 。通常, 过载能力应大于 2。

最大转矩  $T_m$  和对应的转差率  $s_m$  可以通过对式 (1-46) 求导, 并令  $\frac{dT_{em}}{ds} = 0$ , 求得临界转差率

$$s_m = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (1-47)$$

最大转矩

$$T_m = \pm \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 [\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]} \quad (1-48)$$

以上二式中“+”为电动状态，“-”号对应发电状态。通常  $r_1 \ll (x_1 + x_2')$ ，忽略  $r_1$ ，则

$$s_m \approx \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2'} \quad (1-49)$$

$$T_m = \pm \frac{m_1 p}{4\pi f_1} \frac{U_1^2}{(x_1 + x_2')} \quad (1-50)$$

(4) 起动机 D 该点  $s = 1, n = 0$ ，电磁转矩为初始起动转矩  $T_{st}$ 。即

$$T_{st} = \frac{m_1 p U_1^2 r_2'}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad (1-51)$$

则相应的电流为起动电流。通常起动电流为额定电流的 5~6 倍。

#### 4. 人为机械特性

人为机械特性就是改变机械特性的某一参数后所得到的机械特性。下面简要介绍三相异步电动机中几种常用的人为机械特性。

##### 1) 降低定子电压的人为机械特性

降低定子电压的人为机械特性是指仅降低定子电压，其它参数都与固有机机械特性相同。如图 1-18 所示。图中曲线 1 为固有机机械特性曲线，定子电压为  $U_N$ ；曲线 2 为定子电压降至  $0.8U_N$  时的人为机械特性曲线。不难看出，降低定子电压的人为特性具有如下特点：

- (1) 同步转速  $n_1$  不变。
- (2) 临界转差率  $s_m$  与定子电压无关。
- (3) 最大转矩  $T_m$ ，初始起动转矩  $T_{st}$  均

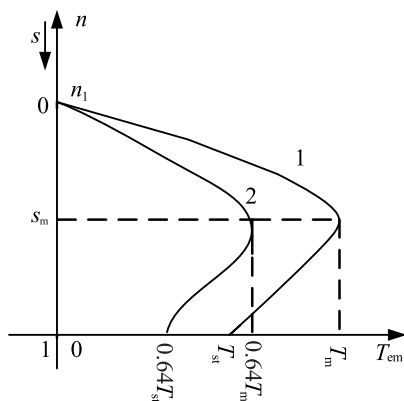


图 1-18 降低定子电压时的人为机械特性

与定子电压的平方成正比的降低。

##### 2) 转子回路串三相对称电阻时的人为机械特性

绕线转子异步电动机转子回路中串入三相对称电阻时，相当于增加了转子绕组每相电阻值。图 1-19 (a) 是绕线转子异步电动机回路中串接三相对称电阻  $R_s$  时的线路图。其人为机械特性，如图 1-19 (b)。

由图 1-19 (b) 可见，在一定范围内增加转子电阻，可以增大电动机的起动转矩。当所串接的电阻使其  $s_m = 1$  时，对应的起动转矩将达到最大转矩，如果再增大转子电阻，起动转矩反而减小。另外，转子串接对称电阻后，其机械特性曲线线性段斜率增大，特性软。

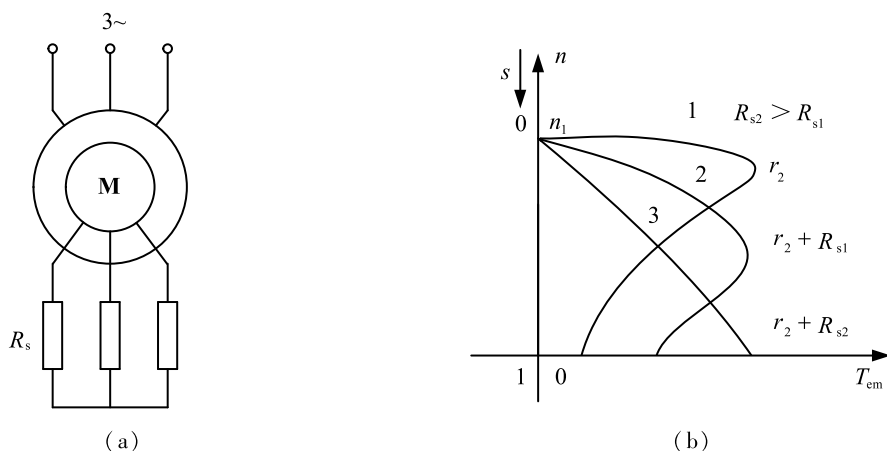


图 1-19 绕线转子异步电动机转子电路串接对称电阻  
(a) 接线图 (b) 机械特性

### 1.2.3 三相异步电动机调速的方法

三相异步电动机运行时其转速为

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s) \quad (1-52)$$

由上式可见，三相异步电动机的调速方法有：改变极对数  $p$ ，改变转差率  $s$  和改变电源频率  $f_1$ 。

#### 1. 变磁极对数调速

改变定子磁极对数调速，即改变异步电动机的旋转磁场转速，例如磁极增加一倍，旋转磁场转速（同步转速）就下降一半。因为异步电动机磁极对数只能成倍跳跃式改变，因此这种调速是有级调速而不是平滑无级调速。而且转速等级有限，只适用于要求有级调速、不要求平滑调速的场合。

改变磁极对数有两种方法，一是在定子上装两套具有不同极数的独立绕组，每次选用其中一套，即所谓双绕组变极。显然，这是一种不经济的办法，仅在特殊情况下才采用。为了提高材料利用率，一般采用单绕组变极，即在一个绕组上用改变绕组的连接来改变磁极对数。至于转子，一般采用笼型绕组，它不具有固定的极对数，它的极对数自动与定子绕组一致。下面以最简单的倍极比为例加以说明。

##### 1) 变极原理

图 1-20 (a) 是一个四极电机的 A 相绕组示意图，在如图所示的电流方向  $U1 \rightarrow U1' \rightarrow U2 \rightarrow U2'$  下，它产生 4 极磁场，即极数  $2p = 4$ 。

如果按图 1-20 (b) 改接，即  $U1$  与  $U2'$  联接作为首端  $U1$ ， $U1'$  与  $U2$  相联接，作为尾端  $U2$ ，则它产生 2 极磁场，即极数  $2p = 2$ ，这样就实现了单绕组变极。

##### 2) 变极绕组的联接方法

下面介绍两种典型的变极绕组联接方法， $\Delta/YY$  和  $Y/YY$ 。

(1)  $\Delta/YY$   $\Delta$  联接方法时，端子  $1U$ 、 $1V$ 、 $1W$  接电源， $2U$ 、 $2V$ 、 $2W$  空着，每相的两个半相绕组正向串联，电流方向一致，极对数为  $p$ ，同步转速为  $n_1$ ，如图 1-21

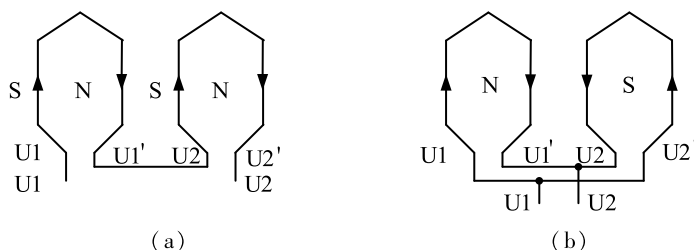


图 1-20 变极原理  
(a)  $2p=4$  (b)  $2p=2$

(a) 所示。YY 联结方法时可将 1U、1V、1W 短接，2U、2V、2W 接电源，此时半相绕组反向并联，其中一个半相绕组电流反向，极对数为  $p/2$ ，同步转速为  $2n_1$ ，如图 1-21 (b) 所示，机械特性如图 1-21 (c) 所示。

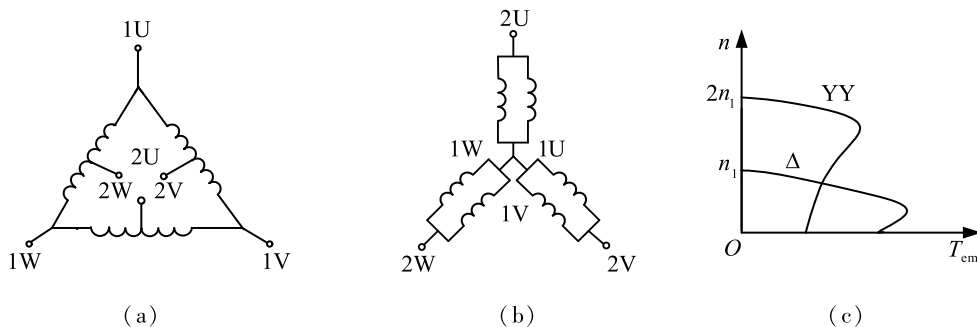


图 1-21  $\Delta/YY$  变极接法  
(a)  $\Delta$  接， $2p$  对极 (b) YY 接， $p$  对极 (c) 机械特性

(2) Y/YY 电动机定子绕组有六个出线端。低速运行时端子 1U、1V、1W 接电源；2U、2V、2W 空着。此时，定子绕组为单 Y 联结方法，每相的两个半相绕组正向串联，电流方向一致，极对数为  $p$ ，同步转速为  $n_1$ ，如图 1-22 (a) 所示。YY 联结方法时，1U、1V、1W 短接，2U、2V、2W 接电源。此时，每个半相绕组变成反向并联，每相中都有一个半相绕组改变电流方向，此时，极对数变为  $p/2$ ，同步转速变为  $2n_1$ ，如图 1-22 (b) 所示。机械特性如图 1-22 (c) 所示。

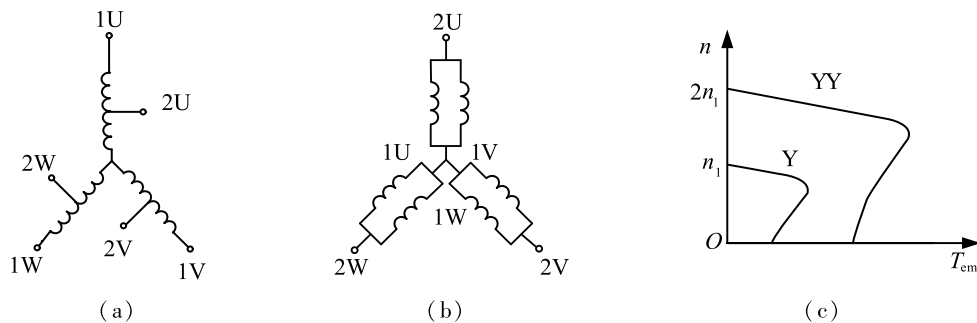


图 1-22 Y/YY 变极接法  
(a) Y 接， $2p$  对极 (b) YY 接， $p$  对极 (c) 机械特性

为了保证电动机在调速前后转速不变，必须在改变定子绕组连接方式的同时，将定子三相绕组中任意两相的出线端对调，再接到三相电源上。

## 2. 变转差率调速

### 1) 调压调速

在异步电动机调速方法中调压调速是一种较为简单的方法，由电机拖动原理可知，当异步电动机等效电路参数不变及转速恒定的条件下，电磁转矩与定子电压的二次方成正比，即  $T_{em} \propto U_1^2$ 。改变异步电动机定子外加电压，就可改变电动机在一定负载转矩下的转速。可用自耦变压器或电抗器来改变交流电压，从而改变电动机转速。但更好的方法是由晶闸管构成的交流调压器，装置的体积减小，调速性能也提高。如图 1-23 所示，用三对晶闸管反向并联或三个双向晶闸管分别串联在每相绕组上。

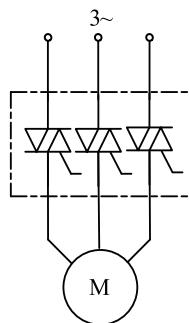


图 1-23 调压调速

电动机正、反转运行时的主电路如图 1-24 所示。正转时 1 ~ 6 晶闸管工作，反转时 1、4 和 7 ~ 10 晶闸管工作，同时也可用于反接制动和能耗制动。

对于调速范围要求较宽的恒转矩负载，可采用带转速负反馈的闭环控制系统，如图 1-25 所示。当负载增大引起转速下降时，通过转速负反馈控制作用提高定子电压，使转速提高。当负载减小引起转速升高时，通过负反馈控制作用降低定子电压，使转速下降。如果采用 PI 调节器，转速负反馈闭环控制的交流变压调速系统可成为一个无静差的调速系统。

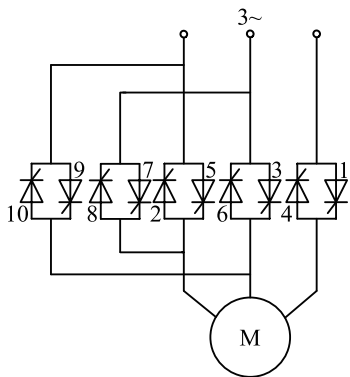


图 1-24 晶闸管交流调压调速系统  
正、反转和制动电路

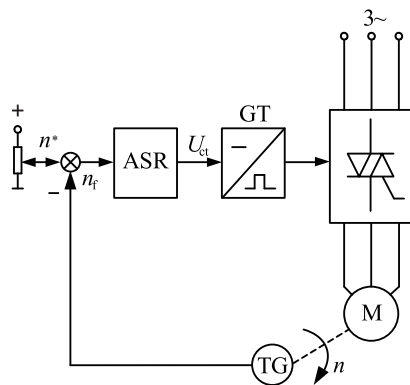


图 1-25 转速闭环的交流调压调速系统

### 2) 绕线转子电动机转子串电阻调速

这种调速方法的调速范围比较小，属于有级调速，平滑性差，转速越低、特性越软，转差率越大，造成转子铜损耗越大，输出的机械功率越少，效率越低。当负载转矩波动时，将引起较大的转速变化，所以低速运行时稳定性差。

由于转子串电阻调速线路简单，所用设备少，所以这种调速方法多应用在对调速性能要求不高的恒转矩负载上，如起重机电机一类。

### 3) 绕线转子电动机串级调速

所谓串级调速，即在异步电动机转子回路中串入一个与转子电动势  $sE_2$  频率相同、相位相同或相反的附加电动势  $\dot{E}_{ad}$ ，利用改变  $\dot{E}_{ad}$  的大小来调节转速的一种调速方法，如图 1-26 所示。电动机在低速运行时，转子中的转差功率只有小部分被转子

绕组本身电阻所消耗，而其余大部分被附加电动势  $\dot{E}_{ad}$  所吸收，利用产生  $\dot{E}_{ad}$  的装置可以把这部分转差功率回馈到电网，使电动机在低速运行时仍具有较高的效率。这种在绕线转子异步电动机转子回路串接附加电动势的调速方法称为串级调速。

串级调速的基本原理如下：

未串  $\dot{E}_{ad}$  时，转子电流为

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} \quad (1-53)$$

当转子串入的  $\dot{E}_{ad}$  与  $\dot{E}_{2s} = s\dot{E}_2$  反相

位时，电动机的转速将下降。因为反相位的  $\dot{E}_{ad}$  串入后，立即引起转子电流  $I_2$  的减小，即

$$I_2 = \frac{sE_2 - E_{ad}}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} = \frac{E_2 - \frac{E_{ad}}{s}}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}} \quad (1-54)$$

而电动机产生的电磁转矩  $T_{em} = C_T \Phi_m I_2' \cos\varphi_2$  也随  $I_2$  而减少，于是电动机开始减速，转差率  $s$  增大，由式 (1-54) 可知，随着  $s$  增大，转子电流  $I_2$  开始回升， $T_{em}$  也相应回升，直到转速降至某个值， $I_2$  回升到使得  $T_{em}$  复原到与负载转矩平衡时，减速过程结束，电动机便在此低速下稳定运行，这就是向低于同步转速方向调速的原理。

串入反相位  $\dot{E}_{ad}$  的幅值越大，电动机的稳定转速就越低。

当转子串入的  $\dot{E}_{ad}$  与  $\dot{E}_{2s}$  同相位时，电动机的转速将向高调节，因为同相位的  $\dot{E}_{ad}$  串入后，即使  $I_2$  增大，即

$$I_2 = \frac{sE_2 + E_{ad}}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} \quad (1-55)$$

于是，电动机的  $T_{em}$  相应增大、转速将上升、 $s$  减小，随着  $s$  的减小， $I_2$  开始减小， $T_{em}$  也相应减小，直到转速上升到某个值， $I_2$  减小到使得  $T_{em}$  复原到负载转矩平衡时，升速过程结束，电动机便在高速下稳定运行。

由上面分析可知，当  $\dot{E}_{ad}$  与  $\dot{E}_{2s}$  反相位，可使电动机在同步转速以下调速，称为低同步串级调速，这时提供  $\dot{E}_{ad}$  的装置从转子电路中吸收电能并回馈到电网；当  $\dot{E}_{ad}$  与  $\dot{E}_{2s}$  同相位时，可使电动机朝着同步转速方向加速， $\dot{E}_{ad}$  幅值越大，电动机的稳定转速越高，当  $\dot{E}_{ad}$  幅值足够大时，电动机的转速将达到甚至超过同步转速，这称为超同步串级调速，这时提供  $\dot{E}_{ad}$  的装置向转子电路输入电能，同时电源还要向定子电路输入电能，因此又称为电动机的双馈运行。

串级调速时的机械特性如图 1-27 所示。由图可见，当  $\dot{E}_{ad}$  与  $\dot{E}_{2s}$  同相位时，机械特

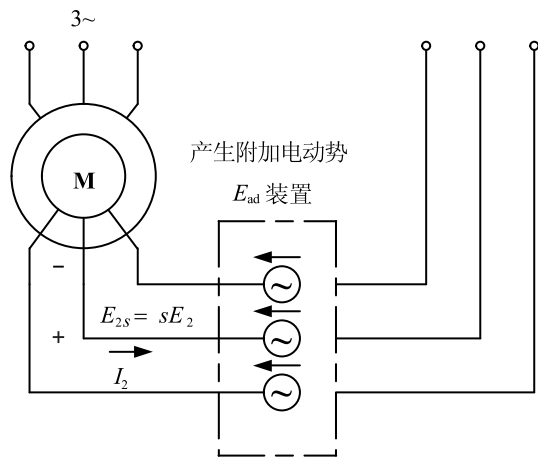


图 1-26 转子串  $E_{ad}$  的串级调速原理

性基本上是向右上方移动；当 $\dot{E}_{ad}$ 与 $\dot{E}_{2s}$ 反相位时，机械特性基本上是向左下方移动。因此机械特性硬度基本不变，但低速时的最大转矩和过载能力降低，起动转矩也减小。

异步电动机串级调速的特点如下：

(1) 在调速过程中，机械特性硬度基本不变，调速稳定性较好。

(2) 可以做到均匀平滑的无级调速。

(3) 转差功率一小部分消耗掉，大部分则通过变流装置回馈给电网，所以比较经济。转速越低，回馈的功率越多。

(4) 获得附加电动势 $\dot{E}_{ad}$ 的装置比较复杂，成本较高，且在低速时电动机的过载能力较低，因此串级调速最适合于调速范围不太大（一般为2~4）的场合，如通风机和提升机等。

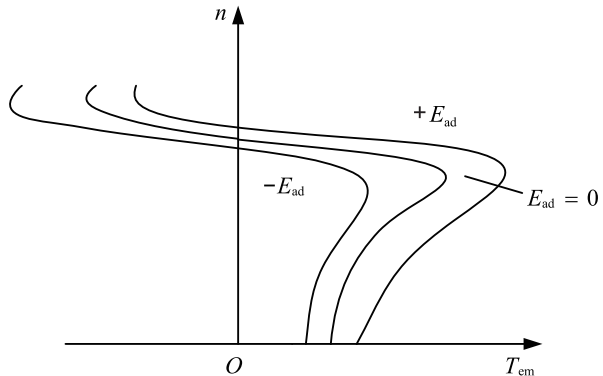


图 1-27 串级调速时的机械特性

### 3. 变频调速

由 $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ 可知，当极对数 $p$ 不变时，同步转速 $n_1$ 和电源频率 $f_1$ 成正比。连续地改变供电电源频率，就可以平滑地调节电动机的转速，即变频调速。变频调速具有很好的调速性能，可以从高速到低速都保持很小的转差率，效率高、调速范围大、精度高。目前，在交流调速系统中，变频调速是应用最多、最广泛，可以构成高动态性能的交流调速系统，取代直流调速。变频调速技术已成为实现工业自动化的主要手段之一，在各种生产机械中，如风机、水泵、生产装配线、机床、纺织机械、造纸机械、食品、化工、矿山、冶金、轧钢等工程设备及家用电器中得到广泛的应用。

## 1.3 电力拖动系统的运动方程式和负载的机械特性

### 学习目标

1. 掌握电力拖动系统的运动方程式
2. 掌握典型负载的机械特性

### 导入

电力拖动系统就是电动机带动生产机械运动（大多数为旋转运动）的系统。进一步说，是电动机的电磁转矩克服了生产机械的阻转矩，把生产机械带动到一定转速的运行系统。

任何机械在运行过程中，都有阻碍运动的力或转矩，称为阻力或阻转矩。负载转矩在大多数情况下，都呈阻转矩性质。因此负载的机械特性，也就是负载的阻转矩与转速的关系。在分析负载的机械特性时，首先应弄清楚其阻转矩是怎么形成的，然后再分析当转速变化时，阻转矩的变化规律。

### 任务知识点

### 1.3.1 电力拖动系统的运动方程式

电力拖动系统通常由电动机、生产机械和传动机构三大部分组成。电动机是把电能转换成机械能的装置。在拖动系统里，电动机起原动机的作用。生产机械是拖动系统的工作对象，如鼓风机、水泵、起重机械、机床等。生产机械也是电动机的负载。传动机构是把电动机输出的机械能传递给生产机械的装置，如皮带、齿轮、联轴器等。在大多数情况下，是一种减速装置。有时，也能在一定范围内进行调速。

根据牛顿第二定律可知，电力拖动系统的运动方程式为

$$T_{em} - T_z = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-56)$$

式中  $J$  为运动系统的转动惯量，单位为  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；

$\Omega$  为系统旋转的角速度，单位为  $\text{rad/s}$ ；

$J \frac{d\Omega}{dt}$  为系统的惯性转矩，单位为  $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

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

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (1-57)$$

$$J = m\rho^2 = \frac{G}{g} \frac{D^2}{4} = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-58)$$

式中  $n$  为电动机轴转速,单位为 r/min;

$m$  与  $G$  为旋转体的质量与重量,单位分别为 kg 与 N;

$\rho$  与  $D$  为惯性半径与直径,单位为 m;

$g$  为重力加速度,  $g = 9.8\text{m/s}^2$

把式 (1-57)、(1-58) 代入式 (1-56), 可得运动方程的实用型式

$$T_{\text{em}} - T_z = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-59)$$

式中  $T_{\text{em}}$  为电动机产生的拖动转矩,单位为 N·m;

$T_z$  为阻转矩 (或称负载转矩),单位为 N·m;

$GD^2$  为旋转体的飞轮矩,反映物体旋转惯性的一个整体物理量,单位为 N·m<sup>2</sup>;

$t$  为时间,单位为 s。

应注意,式 (1-59) 中的 375 为具有加速度量纲的常数。电动机和生产机械的  $GD^2$  可从产品样本和有关设计资料中查到。

式 (1-59) 描述了电动机轴上的电磁转矩、负载转矩与系统转速变化三者之间的关系。系统的旋转运动可分为三种状态:

- (1) 当  $T_{\text{em}} = T_z$ ,  $dn/dt = 0$  时,系统处于静止或恒转速运行状态,即处于稳定状态。
- (2) 当  $T_{\text{em}} > T_z$ ,  $dn/dt > 0$  时,系统处于加速运行状态,即处于瞬态过程。
- (3) 当  $T_{\text{em}} < T_z$ ,  $dn/dt < 0$  时,系统处于减速运行状态,即处于瞬态过程。

### 1.3.2 负载的机械特性

在电力拖动系统中,为了使电动机的机械特性与负载转矩特性相配合,研究电动机的各种运行状态所涉及到的负载的机械特性,是指负载转矩  $T_z$  与转速  $n$  的关系即  $T_z = f(n)$ 。在此定义下,典型负载的机械特性有如下几种。

#### 1. 恒转矩负载特性

所谓恒转矩负载特性,就是指负载转矩  $T_z$  的大小与转速  $n$  无关的特性,即无论转速  $n$  如何变化,负载转矩  $T_z$  的大小都保持常值。根据负载转矩的方向是否与转向有关,恒转矩负载又可分为反抗性恒转矩负载和位能性转矩负载两种。

##### 1) 反抗性恒转矩负载

这类负载的特点是:负载转矩  $T_z$  的大小恒定不变,而负载转矩的方向总是与转速  $n$  的方向相反,即负载转矩的性质是起反抗运动作用的阻转矩性质。当正转时  $n$  为正,转矩  $T_z$  为反向,即为  $-T_z$ ; 而反转时  $n$  为负,转矩  $T_z$  为正向,应变为  $+T_z$ 。显然,反抗性恒转矩负载特性应画在第 I 与第 III 象限内,如图 1-28 所示。例如生产上的传送带,负载转矩随运送的产品重量变化,但不随传送速度变化,当反向输送时,转矩也跟着反

向。轧钢机也相同，主轴上的转矩跟着轧下力变化，反轧时转矩方向也反向，与转速无关，轧制停止转矩为零。凡因阻力产生转矩的负载都属此类，称为反抗性恒转矩负载，也称为摩擦性恒转矩负载。

2) 位能性恒转矩负载

位能性恒转矩负载则与反抗性恒转矩负载的特性不同，它是由拖动系统中某些具有位能的部件（如起重类型负载中的重物）造成，其特点是：不仅负载转矩  $T_z$  的大小恒定不变，而且负载转矩的方向也不随转速  $n$  的方向改变而改变。例如起重机，无论提升重物还是下降重物，由物体所产生的负载转矩的方向是不变的。因此，位能性恒转矩负载特性贯穿第 I、IV 象限，如图 1-29 所示。表示恒值特性的直线是连续的。属于这类特性的负载有起重机、电梯等。它们的卷轴上的转矩只随起重重量或载人重量而变化，即使在静止时，负载转矩仍存在，在运行中产生位能的变化，故称为位能性恒转矩负载。

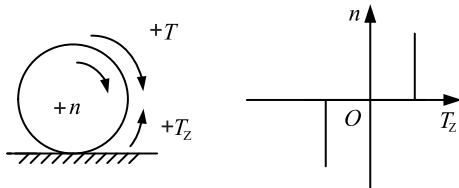


图 1-28 反抗性负载转矩

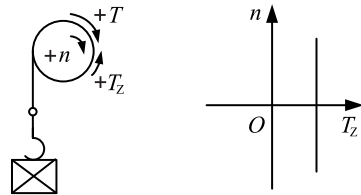


图 1-29 位能性负载转矩

2. 恒功率负载特性

机床主轴和轧钢、造纸机、塑料薄膜生产线中的卷取机、开卷机等所要求的转矩，大体与转速成反比，这就是恒功率负载，即

$$T_z = \frac{K}{n} \tag{1-60}$$

$$P_z = T_z \Omega = T_z \frac{2\pi n}{60} = \frac{T_z n}{9.55} = \frac{K}{9.55} = K_1 \tag{1-61}$$

式中  $K_1 = \frac{K}{9.55}$  为常数；

$P_z$  为负载功率，单位为 W。

可见，当负载功率基本不变时，负载转矩  $T_z$  与转速  $n$  成反比，恒功率负载特性是一条双曲线，如图 1-30 所示。例如车床的切削，在粗加工时，切削量大，切削阻力大，切削速度低；精加工时，切削量小，切削力小，切削速度高。

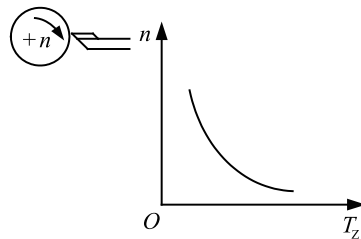


图 1-30 恒功率负载特性

3. 泵与风机类负载特性

水泵、油泵、通风机和螺旋桨等机械的负载转矩与转速大小有关，基本上与转速的平方成正比，即

$$T_z \propto Kn^2 \tag{1-62}$$

式中  $K$  为比例常数。

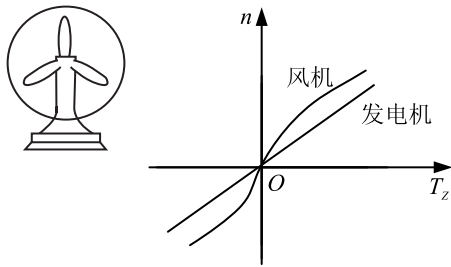
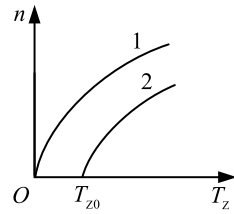


图 1-31 风机类负载特性



1. 理想通风机负载
2. 实际通风机负载

图 1-32 通风机负载特性

这类机械的负载特性是一条抛物线。如图 1-31 和图 1-32 中的曲线 1 所示，图中只在第 I 象限画了转速正向时的特性，由于通风机负载是反抗性的，当转速反向（ $n$  为负）时， $T_z$  是负值，第 III 象限中应有与第 I 象限特性对称的曲线。

以上介绍的恒转矩负载特性、恒功率负载特性及泵与风机负载特性都是从各种实际负载中概括出来的典型的负载特性。实际生产机械的负载转矩可能是以某种典型为主，或是以上几种典型特性的综合。例如：实际通风机除了主要是通风机负载特性外，由于其轴承上还有一定的摩擦转矩  $T_{z0}$ ，因而实际通风机的负载特性如图 1-32 中曲线 2 所示，应为

$$T_z = T_{z0} + Kn^2 \quad (1-63)$$

## 知识拓展

## 高压电动机的软起动

### 1. 软起动和一般降压起动的区别

在电动机起动时，降低加到电动机定子绕组的电压可以减小电动机的起动电流。一般降压起动是指电动机在起动过程中加在电动机定子绕组的电压变化是瞬间突变的，主要有“Y— $\Delta$ ”降压起动和自耦变压器降压起动等。软起动是使用调压装置在规定的起动时间内，自动地将起动电压连续、平滑地上升，直到达到额定电压，同时将起动电流限制在一定范围内。

### 2. 软起动的作用

(1) 减小电动机直接起动引起的电网电压降，使不影响共网其它电气设备的正常运行；

(2) 减小电动机的冲击电流，冲击电流会造成电动机局部温升过大，降低电动机寿命；

(3) 减小直接起动带来的机械冲击力，减少传动机械（轴、啮合齿轮等）的磨损；

(4) 减少电磁干扰，冲击电流会以电磁波的形式干扰电气仪表的正常运行；

(5) 使电动机可以起停自如，减少空转，提高作业率，因而有节能作用；

(6) 在油田安装软起动设备可少建电站，节省基建投资。

### 3. 软起动的分类

(1) 有级：调节是分档的，分为星三角、电抗器、自耦变压器软起动。

(2) 无级：调节是连续的，分为以电解液限流的液阻软起动，以晶闸管为限流器件的晶闸管软起动，开关变压器软起动，以磁饱和电抗器为限流器件的磁控软起动。另外变频调速装置也是一种软起动装置。

### 4. 各种无级软起动装置介绍

#### 1) 液阻软起动装置

(1) 原理 液阻是一种由电解液形成的电阻，它导电的本质是离子导电。它的阻值正比于相对的两块电极板间的距离，反比于电解液的电导率，电导率可以通过电解液浓度改变，极板距离可以实时控制。该软起动器连接三相滑环电动机转子回路，根据机械负载的特征，改变起动电阻，调节起动转矩，使电动机处于最佳起动状态。该起动器采用无级调节，电动机转子回路串联附加电阻的方法起动电机，具有起动电流小，起动转矩大，功率因数高。而且起动过程平稳。

(2) 组成 由进线开关，主回路开关，旁路开关，液阻起动器和控制部分构成，如图 1-33 所示。其中液阻起动器由电极系统，电机驱动系统，电控系统及箱体组成。控制部分采用西门子生产的可编程控制器 S7-224，具有数字化的特点，用西门子生产的 TD-200 文本显示器组成人机界面，用来显示和设定参数，查看所发生的事件记录，具

有中文界面。

### 2) 晶闸管软起动装置

(1) 原理 晶闸管软起动装置通过调整可控硅导通角的大小来调整电机的定子电压，实现电机的软起动。

(2) 组成 如图 1-34 所示，主回路是可控硅组成反并联调压电路，调节器由西门子生产的可编程控制器 S7-224 及脉冲放大板组成，显示器用西门子生产的 TD-200。

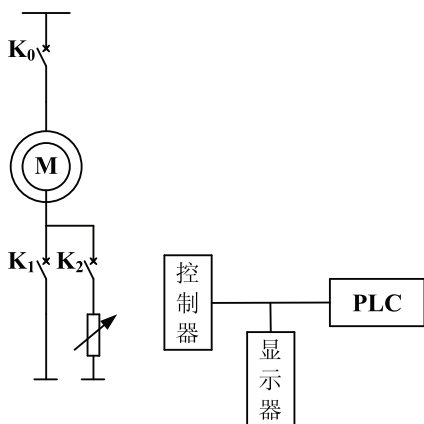


图 1-33 液阻软起动示意图

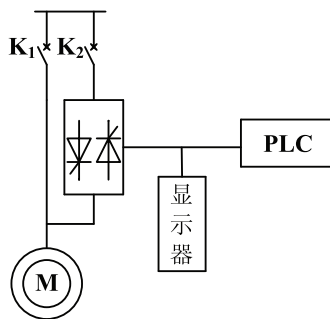


图 1-34 晶闸管软起动示意图

### 3) 开关变压器软起动装置

(1) 原理 开关变压器软起动装置是在定子回路中串入开关变压器，用开关变压器来隔离高压和低压。开关变压器的高压原边绕组串入主回路，低压绕组与晶闸管和控制系統相连，通过调节晶闸管导通角，改变其低压绕组上的电压来改变高压绕组上的电压，从而达到改变电动机端电压的目的，以实现电动机的软起动。在起动过程中 PLC 控制晶闸管的导通与截止，使开关变压器的两端电压由大到小变化，电动机的端电压则由小到大变化，开关变压器始终处于开和关的两种工作状态。电动机转速逐步升高，接近额定转速时，接通主回路开关，断开旁路开关，软起动结束。

(2) 组成 如图 1-35 所示，由主回路开关，旁路开关，开关变压器，晶闸管 and 可编程序控制 PLC 组成。可以闭环控制，起动电流小，能耗小，可靠性高，同时可以两台不同容量的电动机分别起动，目前体积稍大。

### 4) 磁控软起动装置

(1) 原理 将饱和电抗器的工作绕组串联在电动机的定子回路，通过反馈调整电抗器控制绕组的直流电流的大小，从而改变饱和电抗器的饱和程度，实现电机的软起动。其调节特性和用晶闸管组成的软起动装置相同。

(2) 组成 如图 1-36 所示，由饱和电抗器和磁控部分组成。其中饱和电抗器由铁心和绕组组成，绕组分为交流绕组（工作绕组）和直流绕组（控制绕组）。磁控部分：主回路由三相全控桥式整流电路组成，调节器由西门子可编程控制器 S7-224 及脉冲放大板组成。具有全数字的特点，用西门子 TD200 文本显示器组成人机界面，用来显示和设定参数，查看所发生的事件记录，具有中文界面，调试方便，运行可靠，控制功率稍大。

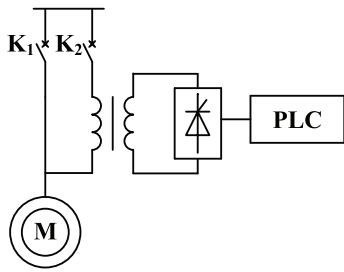


图 1-35 开关变压器软起动示意图

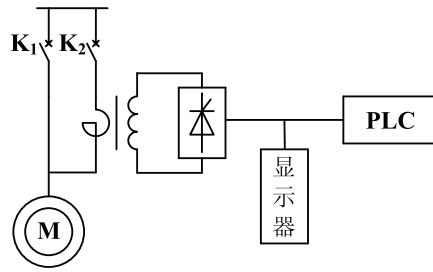


图 1-36 磁控软起动示意图

5. 液阻软起动、晶闸管软起动、开关变压器软起动和磁控软起动的比较，见表 1-3 所示

表 1-3 各种软起动的比较

	液阻	晶闸管	开关变压器	磁控
软起动的基本性能	离子导电，靠极板移动实现软起动，调节快速性差，有一定的维护工作量	用微电子通过晶闸管实现软起动，调节快速性好，闭环控制，起动方式的菜单化	用微电子通过晶闸管控制变压器次级实现软起动，调节快速性好，闭环控制，起动方式的菜单化	用微电子通过磁饱和电抗器实现软起动，调节快速性好，闭环控制，起动方式的菜单化
实现软停止	难	易	较易	较易
电动机综合保护功能	具有初级保护功能	完善	完善	完善
产生高次谐波	无	大	较大	较大
价格比	1	5~10	1~3	1~2
体积比	1	~0.2	0.3~0.5	0.3~0.5
噪音	小	较小	一般	较大
维护工作量	较大	小	小	小
对环境温度的要求	较高	较高	较低	较低
对恶劣环境的耐受力	较弱	较弱	较强	较强

## 章节小结

三相异步电动机是靠电磁感应来工作的，所以也称异步电动机为感应电动机。转差率是异步电动机的重要物理量。异步电动机按转子结构不同分为鼠笼型和绕线转子异步电动机两种，它们的定子结构相同。为求出异步电动机的等效电路，除对转子绕组进行折算外，还须对转子频率进行折算。频率折算的实质就是用转子静止的异步电动机代替转子旋转的异步电动机。等效电路中， $\frac{1-s}{s}r_2'$  是模拟总机械功率的等值电阻。

三相异步电动机的机械特性就是当定子电压、频率以及绕组参数都固定时，电动机的转速与电磁转矩之间的函数关系  $n = f(T_{em})$ 。由于转差率与转速之间存在线性关系 ( $s = \frac{n_1 - n}{n_1}$ )，因此也可以用  $s = f(T_{em})$  表示三相异步电动机的机械特性。最大转矩和起动转矩是反映电动机的过载能力和起动性能的两个重要指标，最大转矩和起动转矩越大，则电动机的过载能力越强，起动性能越好。三相异步电动机的机械特性是一条非线性曲线，一般情况下，以最大转矩为分界点，其线性段为稳定运行区，而非线性段为不稳定运行区。固有机械特性的线性段属于硬特性，额定工作点的转速略低于同步转速。人为机械特性曲线的分析关键在于抓住最大转矩、临界转差率及起动转矩这三个量随参数的变化规律。

三相异步电动机的调速方法有：改变极对数  $p$ ，改变转差率  $s$  和改变电源频率  $f_1$ 。变转差率调速包括调压调速、绕线转子电动机转子串电阻调速和串级调速。由于变频调速具有很好的调速性能，所以它在交流调速方式中具有重要意义，应用相当广泛。

电力拖动系统就是电动机带动生产机械工作的运动（大多数为旋转运动）系统。电力拖动系统主要研究电动机与所拖动的生产机械之间的关系。典型的负载转矩特性有如下几种：反抗性恒转矩负载、位能性转矩负载、恒功率负载、泵与风机类负载。实际生产机械的负载转矩可能是以某种典型为主，或是以上几种典型特性的综合。

## 测试题

1. 简述三相异步电动机的工作原理。
2. 简述三相异步电动机的铭牌数据的含义。
3. 什么是三相异步电动机的转差率？
4. 一台  $P_N = 5.5 \text{ kW}$ 、Y/ $\Delta$  联结、380/220 V、 $\cos\varphi_N = 0.8$ 、 $\eta_N = 0.8$ 、 $n_N = 1450 \text{ r/min}$  的三相异步电动机，试求：① 接成 Y 联结及  $\Delta$  联结时的额定电流；② 同步转速  $n_1$  及定子磁极对数  $p$ ；③ 带额定负载时的转差率  $s_N$ 。
5. 什么是三相异步电动机的等效电路，画图并简要说明。
6. 什么是三相异步电动机的固有机械特性和人为机械特性，画图并简要说明。
7. 三相异步电动机的调速方法及其特点？
8. 采用变频调速与采用调压调速相比，有何优点？
9. 写出电力拖动系统的运动方程式。怎样判断拖动系统是处于动态还是处于稳态？
10. 典型的负载有几种？各有何特点？