

# 第 4 章 交流异步电动机

电动机是利用电磁感应原理,把电能转换为机械能,输出机械转矩的动力机械。根据电动机所使用的电流性质可分为交流电动机和直流电动机两大类。交流电动机按所使用的电源相数可分为单相电动机和三相电动机两种,三相和单相电动机又分同步和异步两种。

三相交流异步电动机按转子结构形式可分为鼠笼式和绕线式异步电动机;按外壳的保护形式可分为开启式、防护式、封闭式异步电动机,其外形如图 4-1 所示。

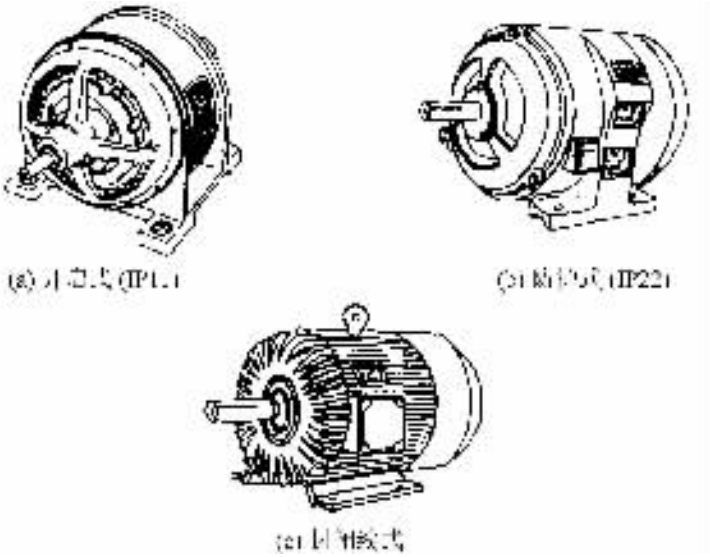


图 4-1 三相异步电动机外形图

异步电动机具有结构简单、工作可靠、使用和维修方便等优点,因此,在工农业生产和生活各方面都得到广泛的应用。

## 4.1 三相异步电动机的构造和转动原理

### 4.1.1 三相异步电动机的构造

三相异步电动机是由定子和转子两个基本部分组成的,定子与转子间存在很小的间隙,称为气隙,一般为  $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 。三相鼠笼式异步电动机的组成如图 4-2 所示。

#### 1) 定子

异步电动机的静止部分称为定子,主要由定子铁芯、定子绕组和机座等部件组成,用来产生旋转磁场。

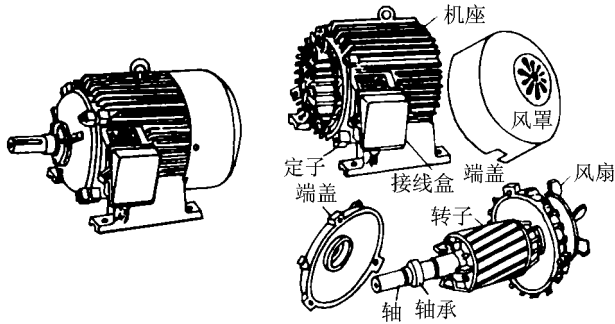


图 4-2 三相笼型异步电动机的构造

(1) 定子铁芯。定子铁芯是电机磁路的一部分, 由于异步电动机中的磁场是旋转的, 定子铁芯中的磁通为交变磁通。为了减小磁场在铁芯中引起的涡流及磁滞损耗, 定子铁芯由导磁性能较好的  $0.35 \sim 0.5 \text{ mm}$  厚、表面具有绝缘层(涂绝缘漆或硅钢片表面具有氧化膜绝缘层)的硅钢片叠压而成。定子铁芯叠片内圆冲有均匀分布的一定形状的槽, 用以嵌放定子绕组, 如图 4-3 所示。

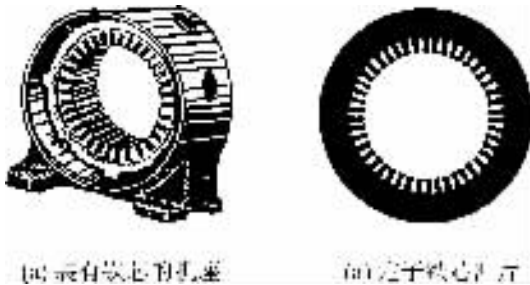


图 4-3 异步电动机的机座和定子铁芯

(2) 定子绕组。定子绕组是电机的电路部分, 由许多线圈按一定的规律连接而成。小型异步电动机的定子绕组由高强度漆包圆铜线或铝线绕制而成; 大、中型异步电机的定子绕组用截面较大的扁铜线绕制而成, 再包上绝缘。三相绕组按照一定的空间角度依次嵌放在定子槽内, 并与铁芯绝缘。三相绕组共有六个出线端引出机壳外, 接在机座的接线盒中。每相绕组的首末端用符号  $U_1-U_2$ 、 $V_1-V_2$ 、 $W_1-W_2$  标记, 在接线形式上要按电动机铭牌上的说明, 接成星形或三角形。图 4-4(a) 是定子绕组内部连线的示意图, 图 4-4(b) 是定子绕组连成星形的连接图, 图 4-4(c) 是定子绕组连成三角形的连接图。

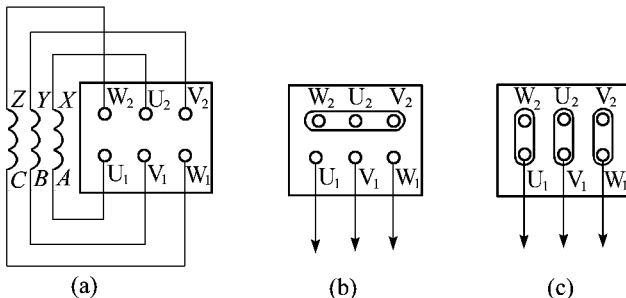


图 4-4 异步电动机定子绕组的接法

(3)机座。机座是电动机的外壳,用以固定和支撑定子铁芯及端盖,机座应具有足够的强度和刚度,同时还应满足通风散热的需要。小型异步电动机的机座一般用铸铁铸成,也可用铝铸造。大型异步电动机机座常用钢板焊接而成。为了增加散热面积,加强散热,封闭式异步电动机机座外壳上面有散热筋,防护式电动机机座两端端盖开有通风孔,或机座与定子铁芯间留有通风道。

2)转子

转子由转子铁芯、转子绕组和转轴等部件构成。转子是用来产生电磁转矩的。

(1)转子铁芯: 转子铁芯也是电机磁路的一部分。通常用定子冲片内圆冲下来的原料做转子叠片,即一般仍用 0.5 mm 厚的硅钢片叠压而成,套装在转轴上,转子铁芯叠片外圆冲有嵌放转子绕组的槽。为了改善电动机的启动及运行性能,鼠笼式异步电动机转子铁芯一般采用斜槽结构。

(2)转子绕组: 转子绕组的作用是产生感应电势和电流并在旋转磁场的作用下产生电磁力矩而使转子转动。转子绕组根据结构不同分为笼型和绕线型两种。

笼型转子绕组:用铸铝的方法,把转子导条和端环、风扇叶片用铝液一次浇铸而成,称为铸铝转子绕组,如图 4-5 所示。

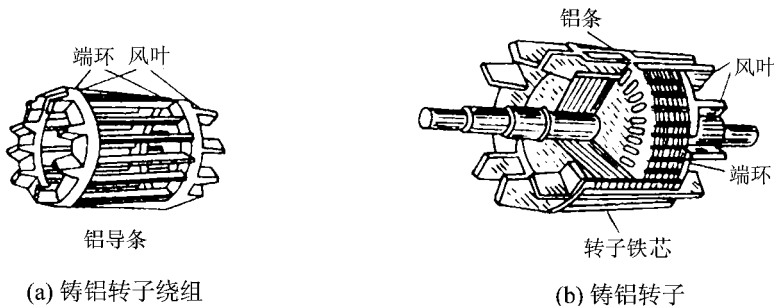


图 4-5 笼型铸铝转子结构

中、小型异步电动机的鼠笼转子绕组一般采用铸铝转子绕组。在每个转子槽中插入一铜条,在铜条两端各用一铜质端环焊接起来形成一个鼠笼的样子,称为铜条转子绕组,如图 4-6 所示。鼠笼式转子结构简单,制造方便,运行可靠,得到广泛应用。

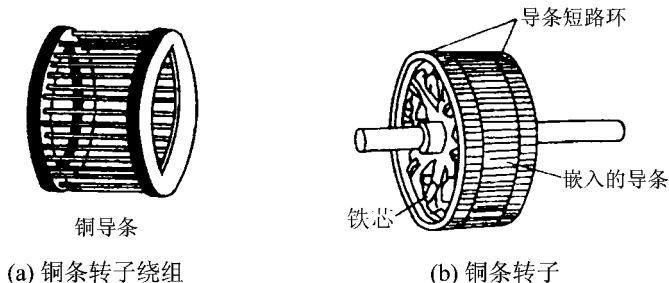


图 4-6 笼型铜条转子结构

绕线转子绕组:绕线转子异步电动机的定子绕组结构与笼型异步电动机完全一样,两者的转子绕组却不同。绕线转子异步电动机的转子绕组是一个与定子绕组具有相同极数的三相对称绕组。转子绕组一般都接成星形,绕组的末端接在一起,绕组的首端分别接到转轴上

的三个与转轴绝缘的滑环上,再通过安装在定子端盖上的电刷装置与外电路相连,如图4-7所示是绕线式转子的结构和接线图。绕线式转子的特点是可以通过滑环和电刷在转子电路中接入附加电阻,以改善异步电动机的启动性能或调节电动机的转速。在正常工作情况下,转子绕组是短接的,不接入附加电阻。

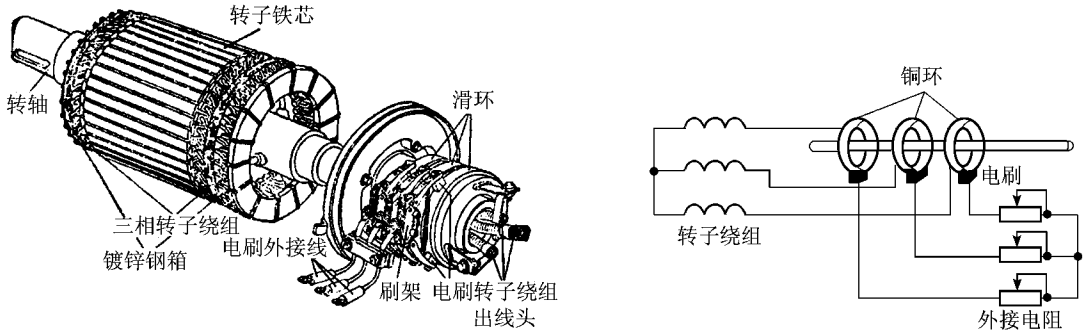


图4-7 绕线式异步电动机转子结构及转子接线图

(3) 转轴: 转轴一般由中碳钢或合金钢制成,其作用是支撑转子和传递转矩,因而要求有一定的机械强度。

## 4.1.2 旋转磁场的产生

### 1. 定子的旋转磁场

对称三相电流通入在空间上彼此相差  $120^\circ$  的三个相同的线圈时,就能产生旋转磁场。三相异步电动机就是根据这一原理而工作的。为此,先介绍旋转磁场是怎样产生的,设对称三相电流为

$$i_1 = I_m \sin \omega t$$

$$i_2 = I_m \sin (\omega t - 120^\circ)$$

$$i_3 = I_m \sin (\omega t + 120^\circ)$$

如图4-8所示为这组电流的波形曲线。现将这组电流  $i_1$ 、 $i_2$  和  $i_3$  分别通入在空间位置上彼此相差  $120^\circ$ ,而结构和形状完全相同的三个线圈  $U_1U_2$ 、 $V_1V_2$  和  $W_1W_2$  中,如图4-9所示。为便于说明问题,在图4-8所示的电流波形曲线的横坐标上取  $\omega t = 0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  和  $360^\circ$  五个瞬间,依次来研究  $U_1U_2$ 、 $V_1V_2$  和  $W_1W_2$  三个线圈的合成磁场(注意合成磁场方向的变化)。这里,规定各相电流分别从线圈的始端(即  $U_1$ 、 $V_1$  和  $W_1$ )流入,从线圈的末端(即  $U_2$ 、 $V_2$  和  $W_2$ )流出的方向为各相电流的标定方向。

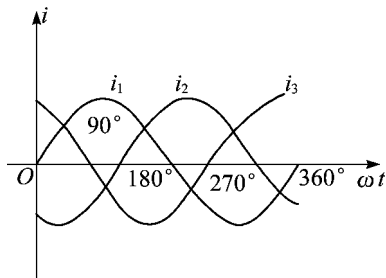


图4-8 三相定子电流的波形

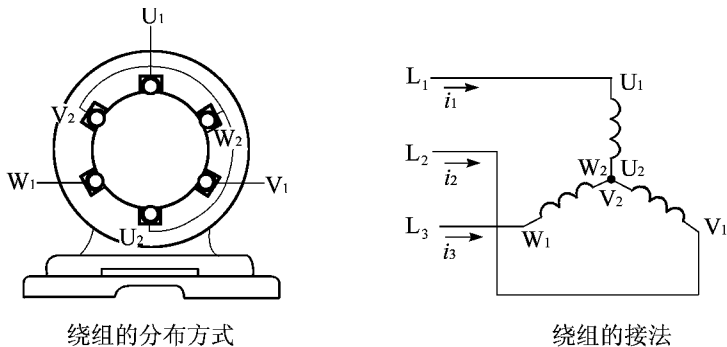


图 4-9 简化的三相定子绕组

从图 4-8 所示的电流波形曲线上可以看出,在  $\omega t = 0^\circ$  的瞬间,电流  $i_1 = 0$ , 而  $i_3$  具有正值,  $i_2$  具有负值, 并且它们在数值上大小相等。因而线圈  $U_1U_2$  中无电流, 而  $i_2$  从  $V_1V_2$  的  $V_2$  端流入,  $V_1$  端流出,  $i_3$  从  $W_1W_2$  的  $W_1$  端流入,  $W_2$  端流出。根据右手螺旋法则可以确定三个线圈的合成磁场方向, 它与  $U_1U_2$  的轴线重合指向左, 如图 4-10(a) 所示。

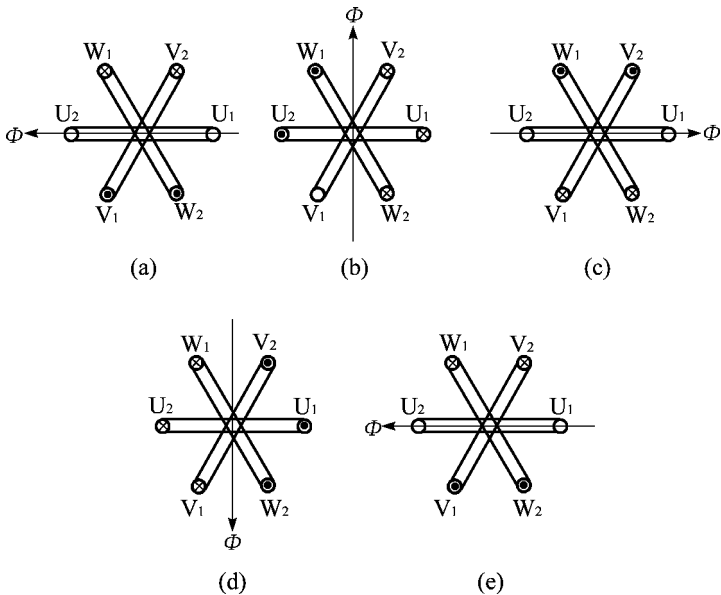


图 4-10 异步电动机旋转磁场示意图

到  $\omega t = 90^\circ$  的瞬间,  $i_1$  到达了正的最大值, 而  $i_2$  和  $i_3$  都变到了负值, 且大小相等。因而  $i_1$  从  $U_1U_2$  的  $U_1$  端流入,  $U_2$  端流出;  $i_2$  从  $V_1V_2$  的  $V_2$  端流入,  $V_1$  端流出;  $i_3$  从  $W_1W_2$  的  $W_2$  端流入,  $W_1$  端流出。根据右手螺旋法则确定, 其合成磁场的方向垂直向上, 如图 4-10(b) 所示。同样可得, 当  $\omega t = 180^\circ$ 、 $270^\circ$  和  $360^\circ$  三个瞬间的合成磁场方向, 分别如图 4-10(c)、(d) 和 (e) 所示。

综上所述, 可以得出结论: 当空间彼此相差  $120^\circ$  的三个相同的线圈通入对称三相交流电时, 就能够产生与电流变化有相同角速度的旋转磁场(即在一个周期内电流的相位角变化了  $360^\circ$ , 其合成磁场的方向在空间也旋转了  $360^\circ$ )。

## 2. 旋转磁场的转速

由以上分析可以看出,异步电动机定子绕组中的三相电流所产生的合成磁场是随着电流的变化在空间不断旋转,形成一个具有一对磁极(磁极对数  $p=1$ )的旋转磁场。三相电流变化一个周期  $T$ (即变化  $360^\circ$ 电角度),合成磁场在空间旋转一周。三相电流的频率为  $f$ ,表明三相电流每秒钟交变的周期数为  $f$ ,故旋转磁场每分钟的转速为

$$n_0 = 60f \quad (\text{r/min})$$

通过定子绕组的缠绕制作,可以使定子磁场为四极(磁极对数  $p=2$ ),可以证明,电流变化一个周期,合成磁场在空间旋转  $180^\circ$ ,其转速为  $n_0 = 60f/2$  (r/min)。由此可以推广到  $p$ 对磁极的异步电动机的旋转磁场的转速为

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (\text{r/min}) \quad (4-1)$$

由此可得,旋转磁场的转速  $n_0$  取决于电源频率和电动机的磁极对数  $p$ 。

旋转磁场的转速亦称作同步转速。

## 3. 旋转磁场的方向

旋转磁场的旋转方向与三相绕组中的电流相序有关。如图 4-8 和图 4-9 所示,  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  三相绕组顺序通入三相电流  $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$ ,其旋转方向与电流相序( $L_1$ - $L_2$ - $L_3$ )一致,为顺时针方向。如果要改变旋转磁场的方向,可将定子绕组与三相电源连接的三根导线中的任意两根对调位置,如将  $L_2$ 、 $L_3$  两相接线互换,即  $i_1$  仍送入  $L_1$  相绕组,但  $i_3$  送入  $L_2$  相绕组,  $i_2$  送入  $L_3$  相绕组,如图 4-11(a)所示。用上面所说的同样方法可以确定,这时旋转磁场是按逆时针方向旋转的。如图 4-11(b)、(c)画出了  $\omega t=0^\circ$  和  $\omega t=60^\circ$  两个时刻的情况,其他时刻可依此类推。

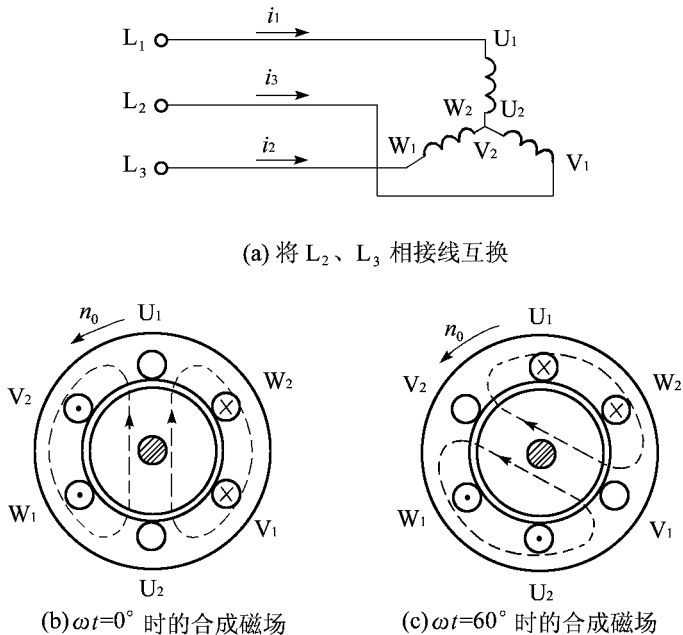


图 4-11 旋转磁场的反向旋转

旋转磁场的旋转方向与三相电源的相序一致。要使旋转磁场反转,只要改变电源的相序,即只要把接到三相绕组始端上的任意两根电源线对调,就可以实现旋转磁场的反转。改变异步电动机的转向,就是根据这一原理来实现的。

### 4.1.3 三相异步电动机的转动原理

如果三相异步电动机的定子绕组中通入对称三相正弦交流电,就会产生旋转磁场,由于旋转磁场与静止的转子绕组之间有相对运动,转子导体就切割旋转磁场的磁感线,其中将产生感应电动势。因为转子绕组是闭合的,所以转子绕组中会有电流流过。转子绕组中的电流产生后,立即又受到旋转磁场的电磁力的作用,于是,转子在电磁转矩的作用下沿着旋转磁场的方向旋转起来,这就是三相异步电动机的工作原理。

如图 4-12 所示是两极三相异步电动机转动原理示意图。设磁场以同步转速  $n_0$  逆时针方向旋转,转子与磁场之间有相对运动。即相当于磁场不动、转子导体以顺时针方向切割磁力线,于是在导体中产生感应电动势,其方向由右手定则确定,如图 4-12 所示。由于转子导体的两端由端环连通,形成闭合的转子电路,在转子电路中便产生了感应电流。载流的转子导体在磁场中受电磁力  $F$  的作用(电磁力的方向可用左手定则确定)形成一电磁转矩,在此转矩的作用下,转子沿旋转磁场的方向转动起来,其转速用  $n$  表示。转速  $n$  总是要小于旋转磁场的同步转速  $n_0$ ,否则,两者之间没有相对运动,就不会产生感应电动势及感应电流,电磁转矩也无法形成,电动机不可能旋转,这就是异步电动机名称的由来。又因转子中的电流是感应产生的,故异步电动机又称作感应电动机。

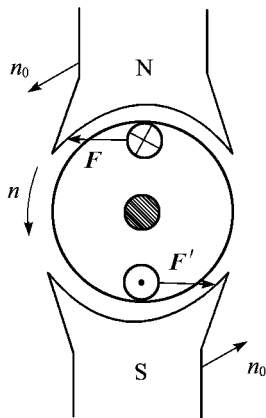


图 4-12 两极三相异步电动机转动原理示意图

通常,把同步转速  $n_0$  与转子转速  $n$  的差值称为转差,转差与  $n_0$  的比值称为异步电动机的转差率,用  $s$  表示。即

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad \text{或} \quad s = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\% \quad (4-2)$$

转差率  $s$  是描绘异步电动机运行情况的一个重要物理量。在电动机启动瞬间,  $n=0$ ,  $s=1$ ,转差率最大。空载运行时,转子转速最高,转差率最小,  $s < 0.5\%$ 。

额定负载运行时,转子额定转速较空载转速要低,  $s_N$  大约为  $1\% \sim 6\%$ 。

## 4.2 三相异步电动机的机械特性

### 4.2.1 三相异步电动机的机械特性概述

#### 1. 异步电动机的转矩特性

当电源电压、频率和转子参数一定时,转矩  $T$  随着转差率  $s$  变化的情况可用  $T=f(s)$  曲线来表示,该曲线称为异步电动机的转矩特性曲线,如图 4-13 所示。

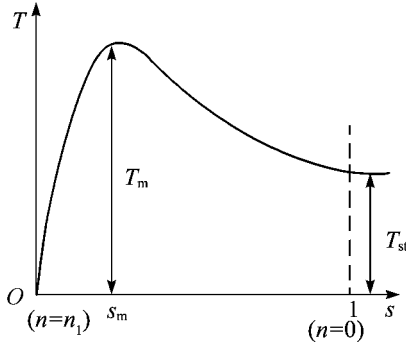


图 4-13 异步电动机的转矩特性曲线

在  $0 < s < s_m$  区段,转矩  $T$  随  $s$  的增大而增大。在  $s_m < s < 1$  区段,转矩  $T$  随  $s$  的增大而减小。当  $s = s_m$  时, $T$  出现最大值  $T_m$ ,称为最大转矩。出现最大转矩时的转差率  $s_m$  称为临界转差率。

#### 2. 异步电动机的机械特性

为了更直接地表示电磁转矩  $T$  和转速  $n$  之间的关系,可根据转速  $n$  与转差率  $s$  的关系,将曲线  $T=f(s)$  变换为  $n=f(s)$  曲线,这种曲线称为异步电动机的机械特性,如图 4-14 所示。

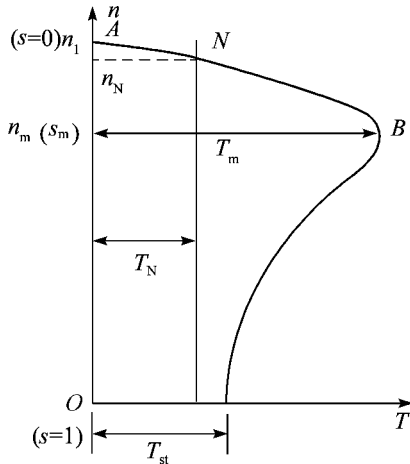


图 4-14 异步电动机机械特性曲线



图 4-14 中,转子静止时,  $n=0$  ( $s=1$ ), 对应的启动转矩为  $T_{st}$ 。只要  $T_{st}$  大于负载转矩, 转子就开始旋转, 并逐渐加速。从机械特性可以看出,  $0 < n < n_m$  区间 ( $n_m$  为临界转速), 转速升高, 电磁转矩加大, 电磁转矩大于负载转矩, 所以电动机一直处于加速状态。过  $n_m$  点后, 转速再升高,  $T$  将随之减小, 直到电磁转矩等于负载转矩, 电动机便进入稳速运行。若负载转矩为额定值, 则稳定转速为额定转速  $n_N$ 。机械特性上,  $T=0, s=0, n=n_1$  为同步运转点。

电动机在 AB 区段稳定运行时, 如果负载增大, 转速下降, 则电磁转矩自动增大, 当电磁转矩与负载转矩达到新的平衡时, 转速又恢复稳定。机械特性的 AB 段称为稳定运行区段。当负载转矩的增加超过了最大转矩  $T_m$ , 则电动机的电磁转矩总小于负载转矩, 转子减速, 直至停转。

#### 4.2.2 额定转矩和过载能力

(1) 当异步电动机在额定状态下运行时, 从其转轴上以转矩的形式输出动力, 此时的转矩为额定转矩, 即

$$T_N \approx 9550 \frac{P_N}{n_N} \quad (4-3)$$

式中,  $P_N$  的单位为 kW;  $n_N$  的单位为 r/min;  $T_N$  的单位为 N·m。

从上式可以看出, 输出功率相同的电动机, 转速低的转矩大, 转速高的转矩小。

**例 4.2.1** 有两台功率相同的三相异步电动机, 一台  $P_N=7.5$  kW,  $U_N=380$  V,  $n_N=962$  r/min; 另一台  $P_N=7.5$  kW,  $U_N=380$  V,  $n_N=1450$  r/min, 试求它们的额定转矩。

**解** 对于第一台电动机:  $T_N=9550 \frac{P_N}{n_N}=9550 \times \frac{7.5}{962}=74.5$  N·m

对于第二台电动机:  $T_N=9550 \frac{P_N}{n_N}=9550 \times \frac{7.5}{1450}=49.4$  N·m

由上述计算结果可知, 当输出功率  $P_N$  一定时, 额定转矩与转速成反比, 也近似与磁极对数成反比, 因此, 相同功率的异步电动机, 磁极对数越多或转速越低, 其额定转矩越大。

(2) 当电动机负载转矩大于最大转矩时, 电动机就因带不动负载而停转, 此时电动机电流能很快升至  $(5 \sim 7)I_N$ , 致使电动机定子绕组过热而烧毁。

最大转矩对电动机的稳定运行有着重要的意义。当电动机负载突然增加, 短时过载时, 负载转矩短时接近最大转矩, 要求电动机仍能稳定运行, 由于负载过载时间短, 电机绕组还不至于过热。这就需要电动机不能因为短时过载而停转, 即电动机要有一定的过载能力。

将最大转矩与额定转矩的比值用  $\lambda_m$  表示, 称为异步电动机的过载能力, 也叫过载系数。其值一般在 1.6~2.5 之间。

$$\lambda_m = \frac{T_m}{T_N} \quad (4-4)$$

(3) 电动机刚启动的瞬间, 即  $n=0, s=1$  时的转矩称为启动转矩  $T_{st}$ 。只有当启动转矩大于负载转矩时, 电动机才能启动; 启动转矩越大, 电动机启动就越迅速、越容易。反映电动机启动能力的参数为启动转矩倍数  $K_{st}$ 。

$$K_{st} = \frac{T_{st}}{T_N} \quad (4-5)$$

Y 系列三相异步电动机的  $K_{st}$  一般为 1.7~2.2。

### 4.3 三相异步电动机的铭牌数据

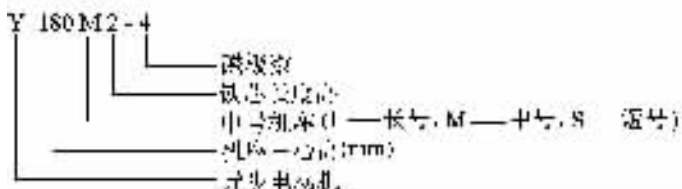
电动机外壳上都有一块铭牌,它标明了电动机的类型、主要性能、技术指标和使用条件,为用户使用和维修提供了重要的依据,如图4-15所示。

三 相 异 步 电 动 机			
型号 Y 112M-4		编号	
4.0	千瓦	8.8	安
380 伏	1440 转/分	LW 82 分贝	
接法 $\Delta$	防护等级 IP44	50 赫兹	45 千克
标准编号	工作制 S1	B级绝缘	08年8月
× × × ×		电机厂	

图 4-15 异步电动机铭牌

#### 1. 型号

Y 系列电动机型号由三部分组成,即产品代号、规格代号和特殊环境代号。



例如 Y180M2-4,表示异步电动机中常用的特点代号以及新老产品型号对照表如表4-1所示。

表 4-1 异步电动机中常用代号及新老型号对照表

特点代号	汉字意义	产品名称	新产品名称	老产品名称
—	—	笼型异步电动机	Y	J, J2, J3, JO, JO2, JO3, JS
R	绕	绕线型异步电动机	YR	JR, JRZ
K	快	高速异步电动机	YK	JK
RK	绕快	绕线型高速异步电动机	YRK	JRK
Q	起	高启动转矩异步电动机	YQ	JQ
H	滑	高滑差率异步电动机	YH	JH, JHO
D	多	多速异步电动机	YD	D, JDO

#### 2. 额定功率

额定功率是指电动机在额定工作状态下运行时,转轴上所能输出的机械功率,单位为瓦(W)或千瓦(kW)。

#### 3. 额定电压

额定电压是指电动机在额定工作状态下运行时定子绕组规定使用的线电压,单位为伏

(V)或千伏(kV)。按我国国家标准规定,电动机的电压等级分为 220 V、380 V、3 kV、6k V 和 10 kV 五级。

#### 4. 接法

接法是指电动机三相定子绕组的联结方式,一般有  $\Delta$  形和 Y 形两种。

若铭牌上所标电压为 380 V,接法为  $\Delta$  形,则表示电动机的额定电压为 380 V,三相定子绕组应接成  $\Delta$  形。若铭牌上所标电压为 380/220 V,接法为 Y/ $\Delta$ ,则表示当电源线电压为 380 V 时,三相定子绕组接成 Y 形,电源线电压为 220 V 时,三相定子绕组接成  $\Delta$  形。

电动机三相定子绕组出线端在接线盒内的排列形式以及 Y 形和  $\Delta$  形接线法如图 4-4 所示。

#### 5. 额定电流

额定电流是指电动机在额定工作状态下运行时,电源输入电动机绕组的线电流,单位为安(A)。若铭牌上标有两个电流值,则表示定子绕组在两种不同接法时的输入线电流。

#### 6. 频率

频率指输入电动机的交流电频率,单位是 Hz。国际上有 50 Hz 和 60 Hz 两种标准频率,我国采用 50 Hz 频率的交流电。

#### 7. 功率因数

功率因数是指电动机在额定状态下运行时,电源输入电动机的有功功率与视在功率的比值。电动机空载运行时功率因数很低,约为 0.2。满载运行时,功率因数较高,一般在 0.75~0.92 之间。

#### 8. 效率

效率是指电动机在额定状态下运行时,电动机轴上输出的机械功率与电源输入的电功率的比值。

#### 9. 转速

转速是指电动机在额定状态下运行时的转速,以每分钟的转数表示(r/min)。

#### 10. 温升与绝缘等级

温升与绝缘等级都是用来表示电动机的允许发热限度的值——极限工作温度的数值。一般铭牌上只要标出一种即可。

在稳定状态下,电动机温度与环境温度之差为电动机温升。环境温度规定为 40 °C。例如温升为 60 °C,则表明电动机温度不能超过 100 °C。

绝缘等级是根据电动机所用的绝缘材料的耐热性能而分成的等级,不同绝缘等级的绝缘材料,其最高工作温度也是不同的。例如:A 级,105 °C;E 级,120 °C;F 级,155 °C 等。

#### 11. 定额

电动机的定额可分为连续定额、短时定额和断续定额三种。

(1)连续定额( $S_1$ )。这类电动机可按其铭牌规定的的数据长期连续运行而不会超过容许的温升限度。

(2)短时定额( $S_2$ )。这类电动机只能在规定的时间内短期运行(由冷却开始运行),才能保证不超过温度限度。我国规定的短时运行时间有 15 min、30 min、60 min 及 90 min 四种。

(3) 断续定额( $S_3$ )。这类电动机运行一段时间后需停止一段时间,因而周而复始地按一定的周期重复运行。负载运行时间与整个周期之比称为负载持续率(或暂载率)。我国规定的负载持续率分为 15%、25%、40% 及 60% 四种,而每一周期为 10 min。

## 12. 防护等级

防护等级指电动机外壳防护形式的分级,具体情况可查阅有关电工手册。

# 4.4 三相异步电动机的启动

## 4.4.1 三相异步电动机的启动性能

电动机从接通电源开始,转速由零增加到稳定转速的过程称为启动过程。电动机的启动过程很短暂,一般在几秒钟之内。大型电动机时间略长些。

一台电动机刚接通电源时, $n=0$ ( $s=1$ ),此时,转子上的电流达到最大。根据交流电动机磁动势平衡的特性可知,此时的定子电流也相应地达到最大。通常,启动时定子绕组的启动电流与额定电流的比值  $I_{st}/I_N$  为 4~7。

例如:一台 90 kW 的电动机,其额定电流为 164 A,若  $I_{st}/I_N=6$ ,则启动电流可达 984 A。这样大的启动电流产生的不良影响是:

(1) 使线路电压降增大,致使负载端的电压降低。使电动机本身的启动转矩随端电压的降低而减小,甚至不能启动,而且还会影响同一线路上其他负载的正常运行。

(2) 使电动机绕组铜损增大,发热增加。启动过程越长,次数越频繁,发热就越严重。这将加速电动机中绝缘材料的老化,缩短使用寿命。

启动时,尽管电流很大,但启动时的转矩一般并不很大。这是由于启动时,转子电路内的功率因数  $\cos \varphi_2$  很小,致使转子电路内电流的有功分量不大的缘故。启动转矩不大,就会延长启动所需的时间,有时甚至不能启动。因此,一般衡量电动机启动性能好坏主要有三点:第一,启动电流尽可能小;第二,启动转矩尽量大些;第三,启动所需用的设备简单、经济,操作方便。

## 4.4.2 三相异步电动机的直接启动

三相笼型异步电动机的启动方法有两种,即在额定电压下的全压启动(又称直接启动)和经过启动设备降压后的降压启动。

全压启动:是指启动时直接将额定电压加到电动机上,是最简单的启动方法。

一台电动机能否全压启动要看电动机容量与其供电变压器容量的关系。如有独立变压器供电,一般来说,不经常启动的电动机容量不应超过变压器容量的 30%;频繁启动的电动机容量不应超过变压器容量的 20%;如没有独立变压器供电(与照明共用),电动机全压启动时所产生的电压降不应超过 5%。在其他情况下,则可根据电源变压器容量及电动机功率,参考以下经验公式来确定是否允许全压启动:

$$\frac{I_{st}}{I_N} \leq \frac{3}{4} + \frac{S_T}{4P_N} \quad (4-6)$$

式中, $S_T$  为公用变压器容量(kVA); $P_N$  为电动机的额定功率(kW); $I_{st}/I_N$  为电动机启动电流与额定电流之比。此式成立,允许全压启动,若不成立,则不允许全压启动。

电动机直接启动的优点是启动设备简单,运行可靠,成本低廉,启动时间短,这也是小型异步电动机常用的启动方式;缺点是对电动机和电网有一定的电流冲击。

### 4.4.3 三相异步电动机的降压启动

降压启动是利用启动设备降低加到电动机定子绕组上的电压,让电动机在低电压下启动,等到电动机达到稳定转速后,再使电动机定子绕组上的电压恢复到额定电压,使之正常运行。这种方法可以降低电动机的启动电流,从而减小启动电流引起的不良影响。

根据经验,一般把启动电流限制在 $(2\sim 2.5)I_N$ 的范围内。这种方法的主要作用也只是减少启动电流。但由于电动机的启动转矩 $T_{st}$ 与电源电压的平方 $U_1^2$ 成正比,所以在用降压来减小启动电流的同时,也大大地降低了电动机的启动转矩,因此,降压启动的方法仅适用于空载或轻载启动。

降压启动一般有下列四种具体方法:

#### 1) 串联电阻(或电抗器)降压启动

这种方法是,当电动机启动时,将适当阻值的三相电阻器串接在输入电路上,以降低加到电动机定子绕组上的电压。当启动结束时,再将电阻切除,使电动机正常运行,其控制原理如图 4-16 所示。

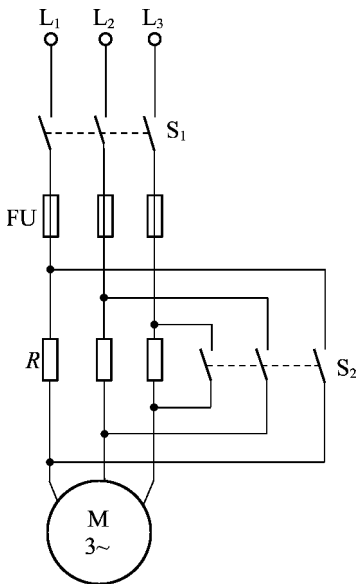


图 4-16 串联电阻降压启动

先闭合 $S_1$ ,此时额定电压经电阻 $R$ 后加到电动机的定子绕组上。当电动机转速上升,逐渐达到稳定转速时,闭合 $S_2$ ,电阻 $R$ 被 $S_2$ 短接,电动机定子绕组加上额定电压正常运转。

采用这种降压启动方法,设备较简单,虽能达到降压启动的目的,但启动转矩随电压平方成正比例下降,并且启动时,电阻上要消耗较多的电能。

#### 2) 星形-三角形(Y- $\Delta$ )减压启动

只要正常运行时定子绕组是三角形( $\Delta$ )联结的电动机,均可采用Y减压启动方法。它是依靠电动机定子绕组接法的变化来降低启动时加在各相定子绕组上的电压,以达到减小启动电流的目的。Y- $\Delta$ 启动控制原理如图 4-17 所示。

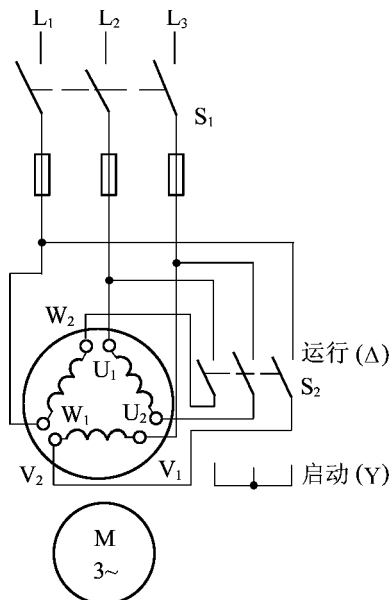


图 4-17 Y-Δ 启动原理图

启动时先把绕组接成星形,即开关  $S_2$  投向“启动”位。待电动机转速上升到一定值后再把绕组接成三角形,即开关  $S_2$  投向“运行”位。

采用 Y-Δ 启动的电动机,正常运行时应是三角形接法,定子每相绕组实际可承担的额定电压是电源的线电压。采用 Y-Δ 启动时,由于采用星形接法时定子绕组上的电压只有  $1/\sqrt{3}$  倍线电压,因此启动电流为直接采用三角形启动电流的  $1/3$ ,启动转矩也只有直接用三角形启动时的  $1/3$ ,故此方法不适宜重载启动。

Y-Δ 启动方法的优点是设备简单、价格低廉。一般做成自动切换式,应用极为广泛。

**例 4.4.1** 有一台 Y160M-4 型异步电动机,额定功率 11 kW,额定转速 1 450 r/min,额定电压 380 V,采用三角形接法,功率因数为 0.84,额定效率为 89%, $T_{st}/T_N=2.2$ , $I_{st}/I_N=7$ ,试求:

- (1) 电动机的额定电流;
- (2) Y-Δ 启动时的启动电流和启动转矩;
- (3) 若负载转矩  $T_{fz}=0.5T_N$  时,是否可以采用 Y-Δ 降压启动?

**解** (1)  $I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N\eta_N\cos\varphi} = \frac{11 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.89 \times 0.84} = 22.3 \text{ A}$

(2) Y-Δ 启动时的启动电流为

$$I_{stY} = \frac{1}{3} I_{st} = \frac{7}{3} I_N = \frac{7}{3} \times 22.3 \approx 52 \text{ A}$$

Y-Δ 启动时的启动转矩为

$$T_{stY} = \frac{1}{3} T_{st} = \frac{2.2}{3} T_N = \frac{1}{3} \times 2.2 \times 9550 \times \frac{11}{1450} = 53.1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(3) 因为  $T_{stY} = \frac{1}{3} T_{st} = \frac{2.2}{3} T_N = 0.73 T_N$

而  $T_{fz}=0.5T_N$ ,所以  $T_{stY} > T_{fz}$ ,该电动机可以采用 Y-Δ 启动。

### 3) 自耦变压器(补偿器)降压启动。

降压启动原理如图 4-18 所示,启动时先合上开关  $S_1$ ,再把  $S_2$  投向“启动”位,这时自耦变压器将电源电压降低后加到电动机上,待电动机转速升高后,再把  $S_2$  投向“运行”位,电动机就正常运行。自耦变压器在启动阶段使用,启动结束切除。

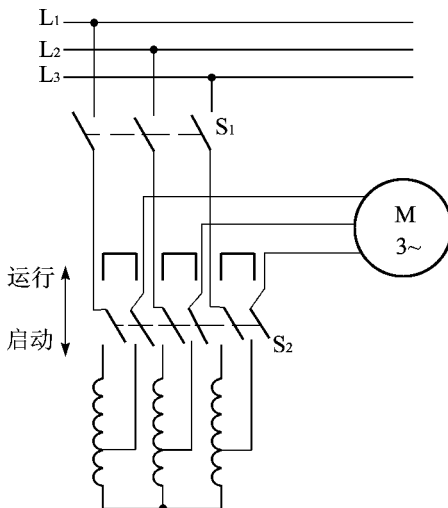


图 4-18 自耦变压器降压启动

由于电压的下降已使电动机的启动电流下降  $K$  倍,而自耦变压器又使原边电流比副边电流下降  $K$  倍,所以启动电流下降到  $1/K^2$  倍。自耦变压器的电压降低到  $1/K$  倍,而电动机的转矩与电压的平方成正比,所以电动机的启动转矩降为全压启动转矩的  $1/K^2$  倍。用自耦变压器(补偿器)降压启动限流作用很好,但启动转矩也下降了。

为了满足不同的负载要求,自耦变压器副边有 2~3 组抽头,其电压分别为原边电压的 80%、65% 或 80%、60%、40%。实际使用中把自耦变压器、开关触头、操作手柄等组合在一起构成自耦减压启动器(又称为启动补偿器),有手动或自动切换两种控制线路。

自耦补偿启动的优点是:自耦变压器的不同抽头可供不同负载启动时选择,适用 Y 形或  $\Delta$  形接法的电动机;缺点是体积大,价格高,质量重。

### 4) 延边三角形启动。

延边三角形启动法与星形-三角形启动法类似,如图 4-19 所示,启动时定子绕组一部分接成星形,另一部分接成三角形,看上去像三角形的三个边延长,故称为“延边三角形”。

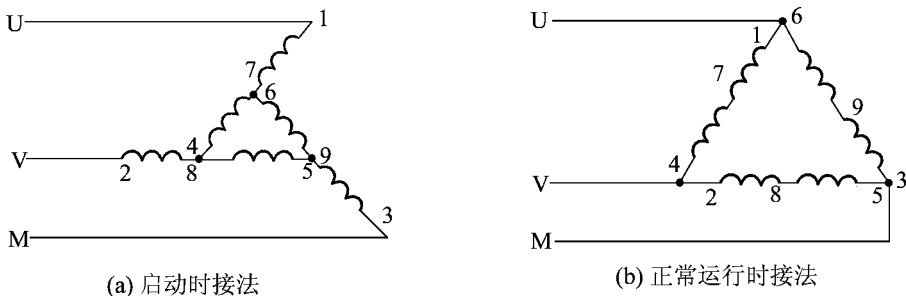


图 4-19 延边三角形启动

这种启动方法的启动电流比星形-三角形启动法的电流要大,当然启动转矩也随之增

大。如果改变每相两段绕组(如1到7与7到4之间)的匝数比,可以得到不同的启动电流和启动转矩,但用延边三角形启动的笼型异步电动机定子绕组的抽头多,限制了它的使用。

#### 4.4.4 三相绕线转子异步电动机的启动

三相绕线转子异步电动机有转子串联电阻及转子串接频敏变阻器两种启动方法。绕线式异步电动机转子回路串入可调电阻或频敏变阻器之后,可以减小启动电流,同时增大启动转矩,因而启动性能比鼠笼式异步电动机好。

##### 1. 转子串接电阻启动

启动时,为了增大电动机在整个启动过程中的转矩,缩短启动时间,随着电动机转速的升高,应把转子回路串入的电阻逐级切除。小型绕线转子异步电动机可采用如图4-20所示的启动电路。容量较大的电动机应采用图4-21所示的启动电路。

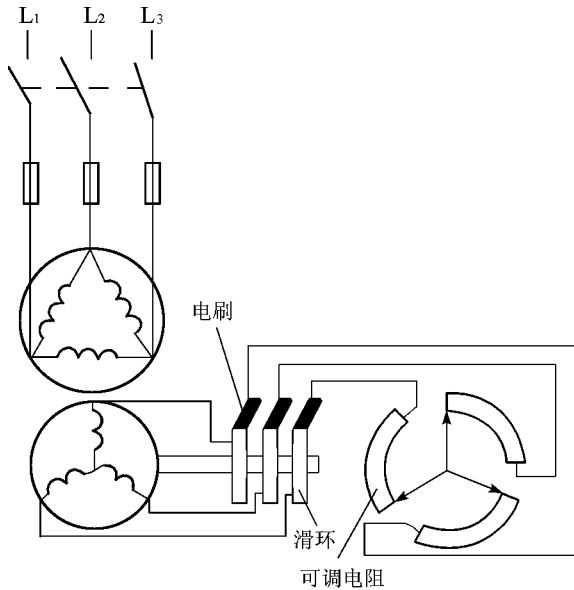


图 4-20 绕线转子与外加电阻接线图

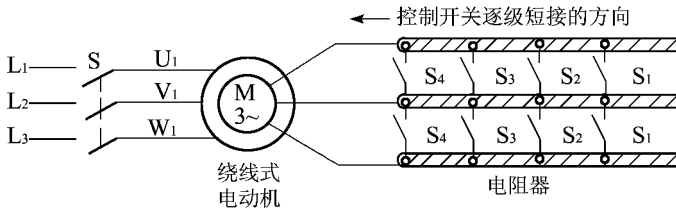


图 4-21 绕线转子异步电动机转子串联电阻启动线路(有级)

电动机刚开始启动时,变阻器的电阻全部串入转子回路,启动后,转速逐渐上升,切除一部分电阻,使电动机转子加速;随着转速的升高,又切除一部分电阻;随着转速的再升高,电阻全部切除;电动机转速继续上升,最后在额定转速状态下稳定运行,启动过程结束。

这种启动方法,既减少了启动电流,又有较大的启动转矩,适合电动机重载启动。所以广泛用在起重机、卷扬机、龙门吊等机械上,缺点是控制设备复杂,投资大,启动时有一部分能量消耗在电阻上,且启动过程中存在着电流的冲击以及机械上的冲击,不是平滑启动。



## 2. 转子串接频敏变阻器启动

频敏变阻器的三个绕组分别绕在三个铁芯柱上,铁芯用厚 6~12 mm 的钢板制成。设计时有意使铁芯在饱和情况下工作,工作时会产生较大的涡流和磁滞损耗,由于铁芯较饱和,线圈匝数不多,所以绕组的感抗和直流电阻都较小。三个绕组接成星形,通过集电环和电刷与转子电路相接。如图 4-22 所示是频敏变阻器一相的等效电路图,如图 4-23 所示是频敏变阻器启动线路图。

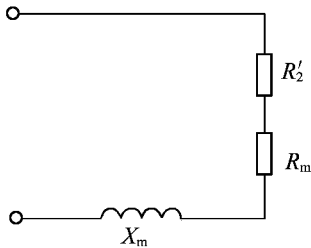


图 4-22 一相的等效电路

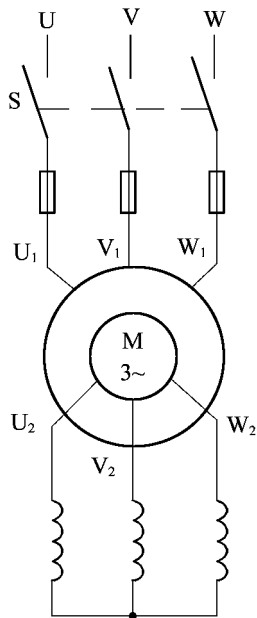


图 4-23 频敏变阻器启动线路

启动开始时,电动机转速很低,转子电流频率很高,频敏变阻器的损耗较大,即损耗电阻值较大,限制了启动电流,增大了启动转矩。随着转速的上升,转子电流频率不断下降,频敏变阻器的损耗等效电阻值随之平滑下降,使电动机平滑启动。启动结束,应将滑环短接切除频敏变阻器。

频敏变阻器实际上是利用转速上升转子电流频率的平滑变化来达到使转子回路电阻平滑减小的目的,所以是一种无触点的变阻器,能实现无级平滑启动,可获得恒转矩的启动特性,没有机械冲击。而且,频敏变阻器结构比较简单,成本低,使用寿命长,维护方便。其缺点是体积较大,设备笨重。由于其电抗的存在,功率因数较低,启动转矩并不很大,因此当绕线式异步电动机在轻载启动时,可采用频敏变阻器启动,重载时一般采用串接变阻器启动。

## 4.5 三相异步电动机的调速与制动

### 4.5.1 三相异步电动机的调速

为了适应生产的需要,满足生产机械的要求,在工业生产过程中需要人为地改变电动机的转速,称为调速。选择异步电动机调速方法的基本原则是:调速范围广,调速平滑性好,调速设备简单,调速中的损耗小。

根据异步电动机的转速关系式:

$$n = (1-s) \frac{60f}{p}$$

可以看出,异步电动机调速有三种方法:

- (1) 改变定子绕组磁极对数  $p$ ——变极调速。
- (2) 改变电动机的转差率  $s$ ——变转差率调速。
- (3) 改变供给电动机电源的频率  $f$ ——变频调速。

#### 1. 变极调速

通过对定子绕组引出线的不同连接,得到相应的极对数。变极调速只用于笼型异步电动机,因为定子变极时,笼型转子也能作相应的变极;绕线转子电动机的转子绕组极数是固定不变的,所以不能进行变极调速。

变极调速的优点是所需设备简单;缺点是电动机绕组引出头多,调速只能有级调节,级数少。变极调速通常不单独使用,往往与机械调速配套使用,以达到相互补充、扩大调速范围的目的。在金属切削机床、通风机、升降机等机械中,多速电动机有比较广泛的应用。

#### 2. 变转差率调速

改变转差率  $s$  调速的方法有转子回路串接电阻调速、变压调速、转子回路串电势调速和电磁调速等。本书简单介绍前两种方法。

##### 1) 变阻调速

变阻调速是通过改变电动机转子电路的外接电阻实现的,因此只适用于绕线转子电动机的调速。机械特性曲线如图 4-24 所示。对应一定的负载转矩就有不同的转速  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ 。这种调速方法简单方便,但机械特性曲线较软,而且外接电阻越大,曲线越软,致使如果负载有较小的变化,便会引起很大的转速波动。另外,在转子电路上的串接电阻要消耗功率,使电动机效率较低。变阻调速主要应用于起重、运输机械的调速。

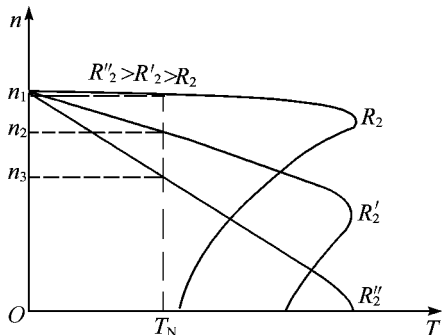


图 4-24 转子串联电阻调速

变阻调速原理与转子串联电阻启动是一样的,但应该注意到启动用的转子外接串联电阻功率往往较小,不能用于调速;而调速用的外接串联电阻功率较大,可以用作启动。

2) 变压调速

变压调速是改变电动机定子绕组上的电压。由于转矩与电压的平方成正比,对于不同的定子电压,可以得到一组不同的机械特性曲线,如图 4-25 所示。对于恒转矩负载,可得到不同的稳定转速  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ ,可见,恒转矩负载的调速变化很小,实用价值不大。

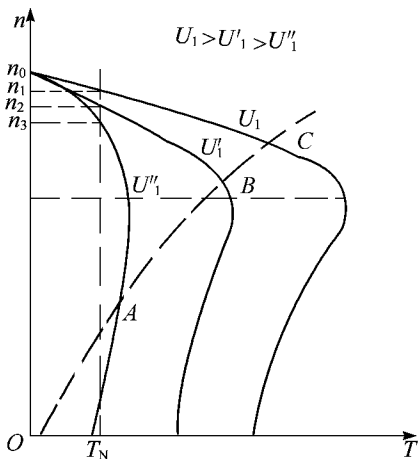


图 4-25 改变定子电压调速

目前,随着晶闸管技术的发展,晶闸管交流调压调速已得到广泛应用。其优点是可以获得较大的调速范围,调速平滑性较好。其缺点是:当电动机运行在低转速时,转差率较大,转子铜损较大,使电动机效率低,发热严重,故这种调速一般不宜于在低速下长时间运转。

3. 变频调速

变频调速是改变电动机电源的频率,应用最广的是恒磁通调速,或称为恒转矩调速,异步电动机的变频调速有三种方式:

- (1) 恒磁通控制。
- (2) 恒电流控制(过载能力不变)。机械特性曲线与恒磁通控制的机械特性曲线相类似,只是过载能力小,用于负载容量小且变化不大的场合。
- (3) 恒功率控制。如果电动机的调速要高于额定转速,而电源电压又不能提高,此时电动机应为恒功率调速。

变频调速具有质量轻、体积小、惯性小、效率高等优点,变频调速设备价格也在逐步下降。随着计算机技术的发展,采用矢量控制技术,异步电动机调速的机械特性曲线可以做得像直流电动机调速一样硬,这是目前交流调速的发展方向。

4.5.2 三相异步电动机的制动

电动机与电源断开之后,由于转子有惯性,要经过一段时间后会才会停止转动。为了使电动机迅速准确地停转,必须对电动机实行制动,通常采用的制动方法有机械制动和电气制动,电气制动又分反接制动、能耗制动和再生制动。

1. 机械制动

机械制动是利用机械装置使电动机在电源切断以后迅速停转的方法。常用的机械制动

有电磁离合器制动和电磁抱闸制动。

## 2. 电气制动

电气制动是使异步电动机产生一个与其旋转方向相反的电磁转矩,作为制动转矩,从而使电动机减速或停转。电气制动的主要方法有反接制动、能耗制动及再生制动。

### 1) 反接制动

反接制动是改变正在转动的电动机定子绕组中任意两相与电源接线的相序,使旋转磁场的转向与原来相反,从而使转子受到反力矩作用,转速很快下降到零。当电动机转速接近零时,立即切断电源,以免电动机反转,如图 4-26 所示。

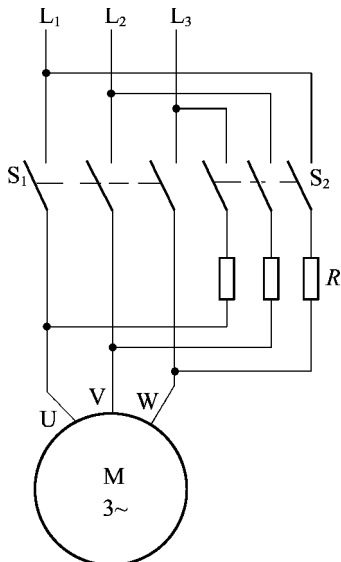


图 4-26 反接制动线路

反接制动时,转子与旋转磁场的相对速度非常大,转子感应电流将比启动瞬间的电流还大,因此经常进行反接制动,电流冲击大,电动机会过热,甚至损坏;电磁转矩从驱动立刻变为制动,对电动机转轴及传动部分有很大的机械冲击。故反接制动时通常接入限流电阻,以缓和电流和机械冲击。为了准确停转,常采用速度继电器来控制,及时切断电源。

反接制动的优点是停转迅速、设备简易;缺点是对电动机及负载冲击大。一般只用于小型电动机,且不经常停转制动的场合。

### 2) 能耗制动

能耗制动控制线路如图 4-27 所示,假定电动机是顺时针旋转,断开开关  $S_1$ ,电动机脱离三相电源,但由于惯性的作用,转子仍沿着顺时针方向继续转动。立即闭合开关  $S_2$ ,直流电源通过电阻  $R$  加在定子  $W$  相、 $V$  相绕组上,通入的直流电流大小应为  $(1.5 \sim 2) I_N$ ,直流电流在定子绕组  $W$  相、 $V$  相流过,会产生一个固定的磁场,如图 4-28 所示。惯性运动的转子导体切割固定磁场的磁通,产生感应电动势及电流(用右手定则判别),这个电流又与固定磁场作用产生电磁力矩,其方向与转子转动的方向相反(用左手定则判别),使转子较快地停止转动。实质是将电动机转为发电机状态,产生与转速反向的转动力矩。

这种制动方法是利用转子惯性转动切割磁通而产生制动转矩,把转子的动能消耗在转子回路的电阻上,所以称为能耗制动。它的优点是制动力较强,能耗少,制动较平稳,对电网及机械设备冲击小;但在低速时制动力矩也随之减小,不易制停,需要另加直流电源。

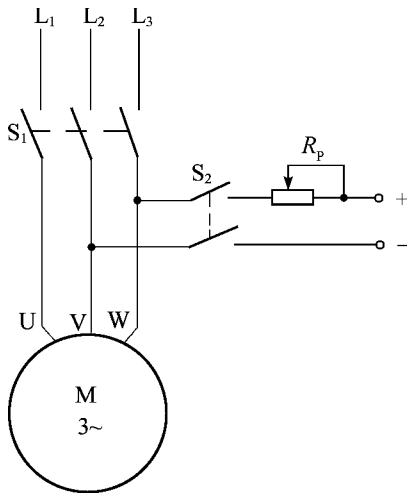


图 4-27 能耗制动控制线路

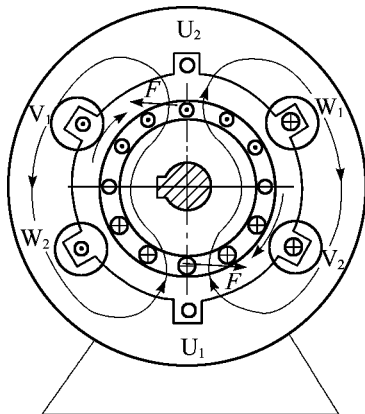


图 4-28 能耗制动原理示意图

### 3)再生制动

在电动机工作过程中,由于外来因素的影响,使电动机转速  $n$  超过旋转磁场的同步转速  $n_0$  (一般指势能负荷,如起重机在下放重物时),电动机进入发电机状态,此时电磁转矩的方向与转子的旋转方向相反,变为制动转矩,电动机将机械能转变成电能向电网反馈,故又称为再生制动或回馈制动。

再生制动的优点是经济性能好,可将负载的机械能转换成电能反馈回电网。其缺点是应用范围窄,仅当电动机转速  $n > n_0$  时才能实现制动。常用于起重机、电力机车和多速电动机中。

## 4.6 单相异步电动机

### 4.6.1 单相异步电动机的分类

单相异步电动机只需单相交流电源,特别是可以直接用 220 V 交流电源供电,所以它不仅在工业、医疗等方面广泛应用,而且在家用电器上大量应用,最常见的如电风扇、洗衣机、

电冰箱、吸尘器等,都用单相异步电动机作动力。

单相异步电动机除了供电方便外,还有结构简单、成本低廉、运行可靠及维修方便等优点,但它也有不足之处,如运行性能较差、效率较低。它与同容量的三相异步电动机相比,体积较大,因此,一般只做成小容量(0.6 kW 以下)的电动机。

从转子的结构上分析,各种单相异步电动机没有什么大的差异,一般均为笼型转子。但从定子的结构上看,就不一样了。由于要使单相异步电动机产生有固定方向的启动转矩可以有多种方法,于是也就形成了单相异步电动机的多种类型。一般常见的有分相启动和罩极启动两种类型的单相异步电动机。

#### 4.6.2 电容式单相电动机的工作原理

单相异步电动机的电源是单相正弦交流电,当定子绕组通入单相交流电时,其铁芯内产生了一个交变的脉动磁场。这个磁场的磁感应强度的大小随着绕组上的电流瞬时值的变化而变化,方向也随着电流方向的改变而改变,但磁场的方向始终与绕组轴线平行。如图 4-29 所示的即是一单相单绕组异步电动机磁场的示意图。

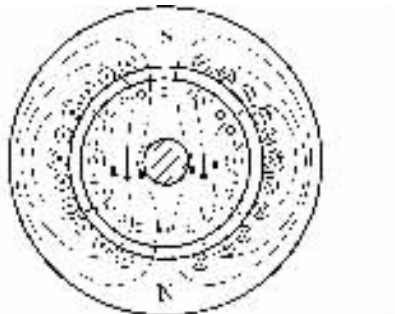


图 4-29 单相异步电动机磁场

这样的一个脉动磁场,根据磁场理论,可以分解为由两个大小相等、角速度相同的相反方向旋转的磁场,这两个旋转磁场磁感应强度的最大值应等于脉动磁场磁感应强度最大值  $B_m$  的一半。这两个旋转磁场在任一时刻的磁感应强度,在垂直方向上的分量之和等于脉动磁场在该时刻的瞬时值。这两个旋向相反的磁场中任的任何一个,都与三相电动机产生的旋转磁场一样,能使转子产生转矩。设顺时针旋转的磁场对转子产生的转矩为  $M_1$ ,逆时针旋转的磁场对转子产生的转矩为  $M_2$ ,转子未动时,转子对顺、逆旋转磁场的转差率是相同的,均为 1。由于顺、逆两旋转磁场除了转向不同之外,其他均相同,所以此时它们对转子产生的转矩  $M_1$  和  $M_2$  应是大小相等而方向相反,两转矩抵消,合成转矩为零,故此时转子不能转起来。

为了说明方便,把顺、逆旋转产生转矩的两个特性曲线画在同一坐标,如图 4-30 所示,右边表示顺时针旋转磁场的转矩特性,左边表示逆时针旋转磁场的转矩特性。从中可见, $S=1$  时, $M_1 = -M_2$ , $M_1 + M_2 = 0$ ,即合成转矩  $M$  为零。若利用一个外力,使转子顺时针转一下,这时转子对顺、逆两旋转磁场的转差率就不相等了,此时  $S_1 < 1$ ,而  $S_2 > 1$ , $M_1 > -M_2$ ,合成转矩  $M \neq 0$ ,所以,转子受到顺时针方向的转矩而沿顺时针方向转动起来。如果外力使转子逆时针转动一下,那么转子将沿逆时针方向转动起来。

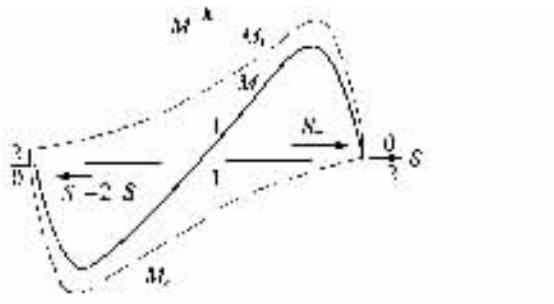


图 4-30 单相单绕组电动机转矩特性

### 1. 分相启动式单相异步电动机的工作原理

所谓分相启动是指利用调整两相绕组阻抗的办法,从单相交流电流中得到具有一定相位差的两相电流,从而在两相绕组上形成旋转磁场,产生启动转矩的启动方法。

分相启动电动机是一种隐极式电动机,定子铁芯上只有嵌线槽,但看不出磁极。在定子铁芯的线槽内安放有两套绕组,一套叫工作绕组,以  $L_1$  表示,另一套叫启动绕组,以  $L_2$  表示。这两套绕组在空间位置上互差  $90^\circ$ 。如果能使通入两套绕组  $L_1$  和  $L_2$  的电流  $i_1$  和  $i_2$  产生  $90^\circ$  的相位差,那么,它们将形成一个旋转磁场。分相启动电动机实现两相绕组电流相位差  $90^\circ$  的方法大致上有两种,一种是电阻分相启动,另一种是电容分相启动,以下分别介绍:

#### 1) 电阻分相启动

电阻分相启动的原理图如图 4-31 所示。它的启动绕组  $L_2$  与电阻  $R$  串联后,经离心式开关  $S$  与工作绕组  $L_1$  并联。

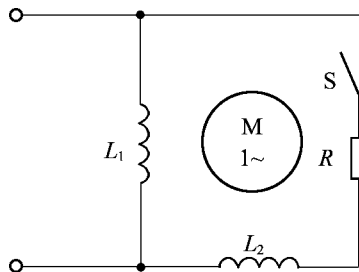


图 4-31 电阻分相启动电路

启动时,支路与  $L_2$  和  $R$  串联支路均接在电源上。由于工作绕组  $L_1$  匝数较多,启动时的感抗较大,近似一个纯电感,电流滞后电压近  $90^\circ$ ;启动绕组  $L_2$  匝数较少,导线又较细,再串接电阻  $R$ ,支路近似一个纯电阻,支路电流与电压接近同相。由于工作绕组支路与启动绕组支路并联,承受的电压相同,这样工作绕组  $L_1$  上的电流与启动绕组  $L_2$  上的电流就会有近  $90^\circ$  的相位差,于是可以在定子中产生旋转磁场,使转子产生启动转矩而启动。

当电动机转速达到额定转速的  $75\% \sim 80\%$  时,依靠离心式开关将启动绕组电路切断。在运行时只有工作绕组  $L_1$  与电源接通,因为转子转动之后,单绕组就能产生一定的转矩,使电动机正常运转。

#### 2) 电容分相启动

电容分相启动是让启动绕组  $L_2$  串联电容  $C$  后再与工作绕组  $L_1$  并联,它是利用串接电容使启动绕组支路呈电容性,使它的电流超前电压一定的电角,而工作绕组由于呈电感性,

故电流滞后电压一定的电角,这样,假如绕组设计和电容选择合适,就可以使  $L_1$  上的电流与  $L_2$  上的电流互差  $90^\circ$  电角,从而获得一个旋转磁场,使电动机启动。电容分相启动的电动机一般可有两种具体类型。

(1) 电容启动电动机。这种电动机的定子绕组接线原理如图 4-32 所示。

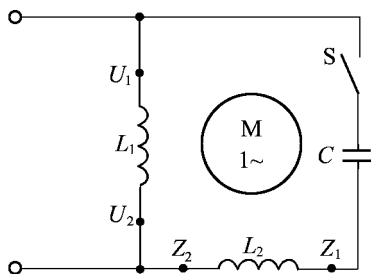


图 4-32 电容启动电动机启动线路

启动时,启动绕组  $L_2$  与电容  $C$  相串联,并经离心式开关  $S$  后再与  $L_1$  并联后接至电源,使电动机产生旋转磁场及启动转矩。当转速达到  $75\% \sim 80\%$  额定转速时,依靠离心式开关  $S$  切断启动绕组支路,然后由工作绕组单独运行。

(2) 电容运转电动机。这种电动机的定子绕组接线原理如图 4-33 所示。

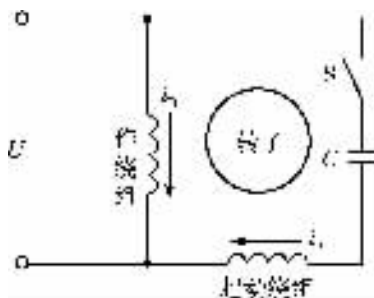


图 4-33 电容运转电动机

电容运转电动机的启动绕组由原来较细的导线改为较粗的导线,使启动绕组不仅产生启动转矩,而且参加运行,即在正常运行时,启动绕组以及串联的电容仍与电源接通,始终保持两相交流电形成的旋转磁场特性,这样不仅可以得到较大的转矩,而且电动机的功率因数、效率、过载能力均可提高,因此,这种电动机的应用范围相当广泛,如家用电器中的电风扇、电冰箱、洗衣机等均采用这种电动机。

## 2. 罩极启动式单相电动机的工作原理

罩极启动式单相电动机结构简单,制造方便,维修容易,运行时噪声小,但它的启动及运行性能较差,效率及功率因数均低,因而使用较少。该种电动机的工作原理就不再介绍,有兴趣的读者可查阅相关的技术资料。

## 本章小结

1. 三相异步电动机由定子和转子两部分组成,这两部分之间由气隙隔开。转子按结构型式不同,分为笼型异步电动机和绕线型异步电动机两种。前者结构简单,价格便宜,运



行、维护方便,使用广泛。后者启动、调速性能好,但结构复杂,价格高。

2. 异步电动机又称为感应电动机,它的转动原理是:(1)电生磁:在三相定子绕组通入三相交流电流产生旋转磁场;(2)磁生电:旋转磁场切割转子绕组,转子绕组产生感应电动势(电流);(3)产生电磁力矩:转子感应电流(有功分量)在旋转磁场作用下产生电磁力并形成转矩,驱动电动机旋转。

3. 转子转速  $n$  恒小于旋转磁场转速  $n_0$ ,即转差的存在是异步电动机旋转的必要条件。

4. 转子转向与旋转磁场方向(即三相电流相序)一致,这是异步电动机改变转向的原理。

5. 转差率的定义

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad \text{或} \quad s = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\%$$

空载时,  $n \approx n_0$ ,  $s \approx 0$ ; 不转时(启动瞬间),  $n = 0$ ,  $s = 1$ 。故异步电动机的转差率的变化范围在  $0 \sim 1$  之间。转差率是异步电动机的一个重要参数。

6. 当电源频率一定时,异步电动机电磁转矩对电源电压的波动十分敏感。异步电动机负载变化时,其转速变化不大,故它具有较硬的机械特性。

7. 三个重要转矩:额定转矩、最大转矩和启动转矩。

$$\text{额定转矩: } T_N \approx 9550 \times \frac{P_N}{n_N}$$

当  $P_N$  一定时,即具有相同功率的异步电动机,其电磁转矩近似于和磁极对数  $p$  成正比,即磁极对数越多,其输出转矩就越大。

最大转矩的大小决定了异步电动机的过载能力,  $\lambda_m = \frac{T_m}{T_N}$ 。

启动转矩的大小反映了异步电动机的启动性能,  $K_{st} = \frac{T_{st}}{T_N}$ 。

这三个转矩是使用和选择异步电动机的依据。

8. 异步电动机启动电流大而启动转矩小。对稍大容量异步电动机,为减少启动电流,常用降压(Y- $\Delta$ 启动器、自耦补偿器)启动。在降压限制启动电流同时,也减少了本来就不大的启动转矩,故它只适用于空载或轻载启动。绕线型异步电动机用转子回路串联电阻或接频敏变阻器等方式启动,它既能减小启动电流,又能增大启动转矩。

9. 笼型异步电动机的调速有:变极调速——属有级调速,变频调速——属无级调速;绕线型异步电动机采用变转差率调速,即在转子回路串联可变电阻。

10. 异步电动机的能耗制动是将三相绕组脱离交流电源,把直流电接入其中两相绕组,形成恒定磁场而产生制动转矩;反接制动是改变电流相序形成反向旋转磁场而产生制动转矩;回馈制动是借助于外界因素,使电动机转速  $n$  大于旋转磁场转速  $n_0$ ,致使由电动状态变为发电状态而产生制动转矩。

11. 铭牌是电动机的运行依据,其中额定功率是指在额定运行时,电动机转子轴上输出的机械功率,这不是电功率的含义,它并非指电动机从电网取得的电功率。额定电压、额定电流均指线电压和线电流。

12. 异步电动机的单相绕组通入单相正弦交流电流产生脉动磁场,脉动磁场本身没有启动转矩,故单相异步电动机的关键是解决启动转矩,常用的启动方法有分相启动和罩极启动。

## 习 题 4

**4.1** 异步电动机的额定电压是 220/380 V,当三相电源的线电压分别是 220 V 和 380 V 时,问电动机的定子绕组各应作何种接法?当轴上负载相同,在这两种接法下,问:

(1)加在电动机每相绕组上的电压是否相同?

(2)流过电动机每相绕组的电流是否相同?

(3)电动机的线电流是否相同?

**4.2** 异步电动机的转子因有故障已取出修理,如果误在定子绕组上加以额定电压,问将产生什么后果?为什么?

**4.3** 三相异步电动机在运行中,如果转子突然被卡住而不能转动,试问这时电动机的电流有何改变?对电动机有何危害?首先应采取什么措施?

**4.4** 异步电动机在一定负载转矩下运行,如果电源电压下降,电动机的电磁转矩、转速将如何变化?为什么?

**4.5** 异步电动机轴上机械负载增加时,电动机转速将如何变化?为什么?

**4.6** 如何使三相异步电动机反转?

**4.7** 一台 50 Hz 的异步电动机运行于 60 Hz 的电源上,设负载转矩不变,试分析同步转速、额定电流时的电机转速、最大转矩、产生最大转矩时的转差率、启动转矩等该如何变化?

**4.8** 试说明三相异步电动机在  $s=0$ 、 $0<s<1$ 、 $s=1$  时各处于什么运行状态?

**4.9** 异步电动机在满载和空载启动时,其启动电流和启动转矩是否一样大小,为什么?

**4.10** 绕线型异步电动机在转子回路串联电阻启动时,所串联电阻越大,其启动转矩是否也越大,为什么?

**4.11** 额定电压为 380 V 的异步电动机,当采用能耗制动时,若将定子绕组直接接到 380 V 的直流电源上是否可以?为什么?

**4.12** 一台三相鼠笼式异步电动机的铭牌数据如下:型号 Y180L-6,50 Hz,15 kW,380 V,采用三角形接法  $\Delta$ ,电流为 31.4 A,转速为 970 r/min,又知其满载功率因数为 0.88。当电源线电压为 380 V 时,求:

(1)电动机定子绕组应采取何种接法?

(2)电动机满载运行时的输入电功率、效率和转差率;

(3)电动机的额定转矩;

(4)若电源线电压为 220 V,此电动机能否正常运行?

**4.13** 测得两台鼠笼式三相异步电动机的转速分别为 2 940 r/min 和 970 r/min,电源频率为 50 Hz。试问两台电动机的磁极数、同步转速及转差率各为多少?

# 第 9 章 直流稳压电源

## 9.1 直流稳压电源的组成

### 1. 稳压电源的组成

直流稳压电源是电子设备的重要组成部分,其功能是把交流电力网供给的交流电压转换成电子设备所需要的稳定的直流电压,它主要由四部分组成:电源变压器、整流电路、滤波电路和稳压电路,其框图如图 9-1 所示。

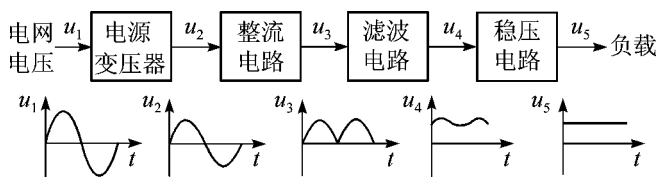


图 9-1 直流稳压电源组成方框图

其各部分作用介绍如下:

#### 1) 电源变压器

将电网交流电压变为整流电路所需的交流电压,一般次级电压  $u_2$  较小。

#### 2) 整流电路

将变压器次级交流电压  $u_2$  变成单向的直流电压  $u_3$ ,它包含直流成分和许多谐波分量。

#### 3) 滤波电路

滤除脉动电压  $u_3$  中的谐波分量,输出比较平滑的直流电压  $u_4$ 。该电压往往随电网电压和负载电流的变化而变化。

#### 4) 稳压电路

它能在电网电压和负载电流变化时,保持输出直流电压的稳定。它是直流稳压电源的重要组成部分,决定着直流电源的重要性能指标。

### 2. 稳压电源的主要技术指标

#### 1) 特性指标

特性指标是表明稳压电源工作特征的参数,例如,输入、输出电压及输出电流,电压可调范围等。

#### 2) 质量指标

质量指标指衡量稳压电源稳定性能状况的参数,如稳压系数、输出电阻、纹波电压及温度系数等。具体含义简述如下:

(1) 稳压系数:指通过负载的电流和环境温度保持不变时,稳压电路输出电压的相对变化量与输入电压的相对变化量之比,即

$$\gamma = \frac{\Delta U_o / U_o}{\Delta U_i / U_i} \Big|_{\Delta I_L=0, \Delta T=0} \quad (9-1)$$

式中,  $U_i$  为稳压电源输入直流电压;  $U_o$  为稳压电源输出直流电压。  $\gamma$  数值越小, 输出电压的稳定性越好。

(2) 输出电阻  $r_o$ :指当输入电压和环境温度保持不变时, 输出电压的变化量与输出电流变化量之比。即

$$r_o = \frac{\Delta U_o}{\Delta I_o} \Big|_{\Delta U_i=0, \Delta T=0} \quad (9-2)$$

式中,  $r_o$  的值越小, 带负载能力越强, 对其他电路影响越小。

(3) 纹波电压  $S$ :指稳压电路输出端中含有的交流分量, 通常用有效值或峰值表示。  $S$  值越小越好, 否则影响正常工作, 如在电视接收机中表现交流“嗡嗡”声和光栅在垂直方向呈现扭曲。

(4) 温度系数  $S_T$ :指在  $U_i$  和  $I_o$  都不变的情况下, 环境温度  $T$  变化所引起的输出电压的变化, 即

$$S_T = \frac{\Delta U_o}{\Delta T} \Big|_{\Delta U_i=0, \Delta I_o=0} \quad (9-3)$$

式中,  $\Delta U_o$  为漂移电压。  $S_T$  越小, 漂移越小, 该稳压电路受温度影响越小。

另外, 还有其他质量指标, 如负载调整率、噪声电压等。

## 9.2 单相整流电路

把交流电转换成直流电的电路称为整流电路。单相整流电路分为半波整流、全波整流、桥式整流及倍压整流电路等。

### 9.2.1 单相半波整流电路

#### 1. 电路的组成及工作原理

如图 9-2(a) 所示为单相半波整流电路。它由变压器 T 和整流二极管 D 组成。如果变压器的初级输入正弦电压  $u_1$ , 则在次级可得同频的交流电压  $u_2$ , 设  $u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$ 。

当  $u_2$  为正半周时, A 端电位高于 B 端电位, 二极管 D 因正向偏置而导通, 电流由 A 端  $\rightarrow$  D  $\rightarrow R_L \rightarrow$  B 端, 自上而下流过  $R_L$ , 在  $R_L$  上得到上正下负的电压  $u_o$ , 若忽略二极管正向压降  $u_o = u_2$ , 负载上的电压波形如图 9-2(b) 所示。

当  $u_2$  是负半周时, A 端电位低于 B 端电位, 二极管 D 因反向偏置而截止, 电路中无电流流过, 负载电压  $u_o$  为零。

可见, 在交流电压  $u_2$  的整个周期内, 负载上将得到一个单方向的脉动直流电压(大小变化, 方向不变), 由于流过负载的电流和加在负载两端的电压只有半个周期的正弦波, 故称为半波整流。

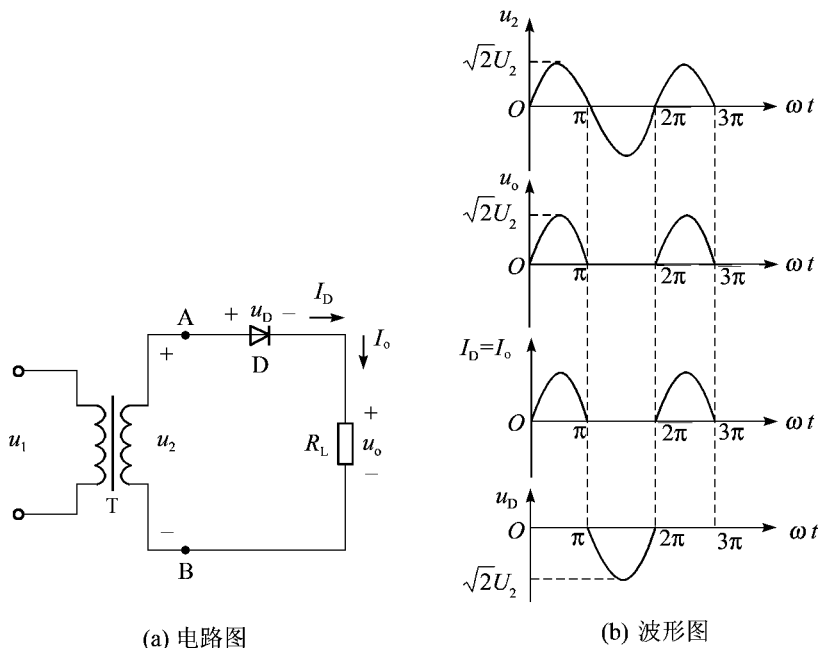


图 9-2 单相半波整流电路

## 2. 负载上的直流电压

直流电压是指一个周期内脉动电压的平均值,即

$$U_O = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_o d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2}{2\pi} \sqrt{2}U_2 \approx 0.45U_2 \quad (9-4)$$

## 3. 整流二极管参数

由图 9-2(a) 可知,流过整流二极管的平均电流  $I_D$  与流过负载的电流  $I_O$  相等,即

$$I_D = I_O = \frac{0.45U_2}{R_L} \quad (9-5)$$

当二极管截止时,它承受的反向峰值电压  $U_{DRM}$  是变压器次级电压的最大值,即

$$U_{DRM} = \sqrt{2}U_2 \quad (9-6)$$

根据式(9-5)和式(9-6)可以选择整流二极管的类型,但考虑到电网电压的波动和其他因素,在具体选择二极管时要留有一定的余量。

## 9.2.2 单相桥式整流电路

### 1. 电路的组成及工作原理

桥式整流电路由变压器 T 和四个二极管组成,如图 9-3(a) 所示。由图可见,四个二极管接成桥式,在四个顶点中相同极性接在一起的一对顶点接向直流负载  $R_L$ ,不同极性接在一起的一对顶点接向交流电源。如图 9-3(b) 是桥式整流电路的简化画法。

当  $u_2$  为正半周时, A 端电位高于 B 端电位,整流二极管  $D_1$ 、 $D_3$  导通,  $D_2$ 、 $D_4$  截止,电流从 A 端  $\rightarrow D_1 \rightarrow R_L \rightarrow D_3 \rightarrow B$  端,自上而下流过  $R_L$ ,在  $R_L$  上得到上正下负的电压。当  $u_2$  为负半周时, A 端电位低于 B 端电位,整流二极管  $D_2$ 、 $D_4$  导通,  $D_1$ 、 $D_3$  截止,电流从 B 端  $\rightarrow D_2 \rightarrow$

$R_L \rightarrow D_4 \rightarrow A$  端,自上而下流过  $R_L$ ,在  $R_L$  上得到上正下负的电压。这样在  $u_2$  的整个周期内,都有单向脉动的电压输出,输出波形如图 9-4 所示。

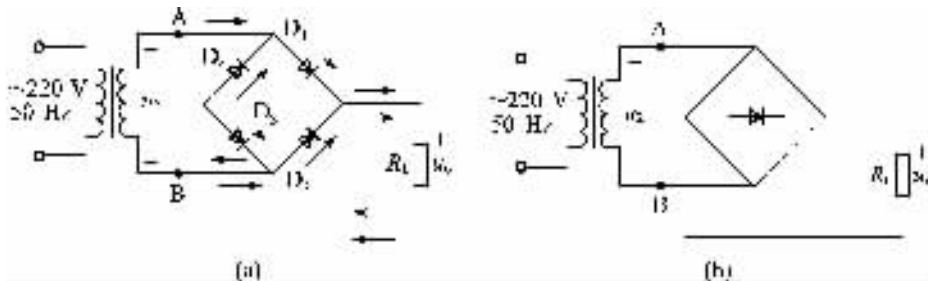


图 9-3 单相桥式整流电路

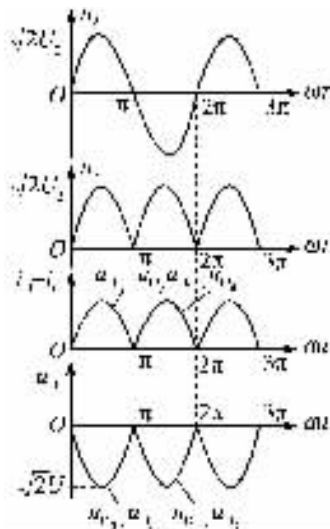


图 9-4 桥式整流电路波形图

### 2. 负载上的直流电压和直流电流

由上述分析可知,桥式整流负载电压和电流是半波整流的两倍,即

$$U_o = 0.9U_2 \tag{9-7}$$

$$I_o = 0.9 \frac{U_2}{R_L} \tag{9-8}$$

### 3. 整流二极管参数

在桥式整流电路中,因为二极管  $D_1$ 、 $D_3$  和  $D_2$ 、 $D_4$  在电源电压变化的一个周期内轮流导通,所以流过每个二极管的电流都等于负载电流的一半,即

$$I_D = \frac{1}{2} I_o = 0.45 \frac{U_2}{R_L} \tag{9-9}$$

整流二极管在截止时管子两端承受的最大反向电压就是  $U_2$  的最大值,即

$$U_{DRM} = \sqrt{2}U_2 \tag{9-10}$$

桥式整流电路的优点是输出电压高、纹波电压小、管子承受的最大反向电压较低,同时电源变压器的利用率较高,但是电路中需用四个整流二极管。桥式整流电路目前已做成模块

(叫整流桥),其输出电流、耐反压等指标有系列标称值可选用。

**例 9.2.1** 一单相桥式整流电路,接到 220 V 正弦工频交流电源上,负载电阻  $R_L = 50 \Omega$ ,负载电压  $U_o = 100 \text{ V}$ 。根据电路要求选择整流二极管。

**解** 整流电流的平均值为

$$I_o = \frac{U_o}{R_L} = \frac{100}{50} \text{ A} = 2 \text{ A}$$

流过每个二极管的平均电流为

$$I_D = \frac{I_o}{2} = \frac{2}{2} \text{ A} = 1 \text{ A}$$

变压器二次侧电压有效值为

$$U_2 = \frac{U_o}{0.9} = \frac{100}{0.9} \approx 111 \text{ V}$$

考虑到变压器二次侧绕组及二极管上的压降,变压器二次侧电压一般应高出(5% ~ 10%) $U_2$ ,即

$$U_2' = 111 \times 1.1 \approx 122 \text{ V}$$

每只二极管截止时承受的最高反向电压为

$$U_{\text{DRM}} = \sqrt{2}U_2' = 122 \sqrt{2} \approx 172 \text{ V}$$

为使整流电路工作安全,在选择二极管时,二极管的最大整流电流  $I_{\text{OM}}$  应大于二极管中流过的电流平均值  $I_o$ ,二极管的反向工作电压峰值  $U_{\text{RM}}$  应比二极管在电路中承受的最高反向电压  $U_{\text{DRM}}$  大一倍左右。可选用 2CZ12D 二极管,其最大整流电流为 3 A,反向工作峰值电压为 300 V。

## 9.3 滤波电路

整流电路的输出电压,虽然极性不变,但是其幅度仍有大幅度波动,其中含有很大的交流分量。滤波器的功能是利用电抗元件(电容与电感)的频率特性,把整流输出电压中的交流分量滤除掉。不同的电子设备,对电源的要求也不一样,因此不同电子设备的电源所采用的滤波电路也不相同。常用的滤波电路有电容滤波、电感滤波和复式滤波。

为了更清楚地说明滤波电路的工作原理,在以下论述中,把各个元件都视作理想器件。

### 9.3.1 电容滤波电路

电容滤波电路如图 9-5 所示,图中电容  $C$  叫滤波电容。为使该电路具有较好的滤波效果,滤波电容的容量要足够大,即  $1/(2\pi f_0 C)$  应足够小(式中,  $f_0$  是整流电路输出电压的脉动频率,它是  $u_2$  频率的两倍)。理想情况下,若能使  $1/(2\pi f_0 C) \approx 0$ ,则滤波电容即对交流分量视为短路,使输出电压的交流分量等于零。对于直流分量,滤波电容相当于开路,不影响直流电压的输出,从而使该电路对负载提供平稳的直流电压。实际应用中,虽然做不到  $1/(2\pi f_0 C) \approx 0$ ,但是,只要  $C$  足够大,使  $1/(2\pi f_0 C) \ll R_L$ ,即可获得具有实用价值的滤波效果。

由图 9-5 电路可知,负载  $R_L$  未接入时的情况:设电容  $C$  两端初始电压为零,接入交流电源后,当  $u_2$  为正半周时,  $u_2$  通过  $D_1$ 、 $D_3$  向电容器  $C$  充电;  $u_2$  为负半周时,经  $D_2$ 、 $D_4$  向电容器  $C$  充电,充电时间常数为

$$\tau = R_{\text{int}} \cdot C \quad (9-11)$$

式中,  $R_{\text{int}}$  包括变压器副绕组的直流电阻和二极管的正向电阻。由于  $R_{\text{int}}$  一般很小,电容器很

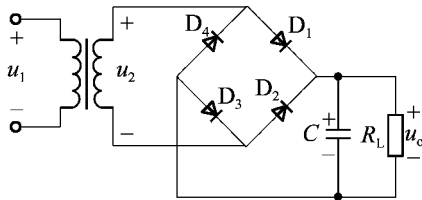


图 9-5 桥式整流电容滤波电路图

很快就充电到交流电压  $u_2$  的最大值  $\sqrt{2}U_2$ ，极性如图 9-5 中所示。因电容器无放电回路，故输出电压（即电容器  $C$  两端的电压  $u_C$ ）保持在  $\sqrt{2}U_2$  上，如图 9-6 中  $\omega < 0$  部分所示。

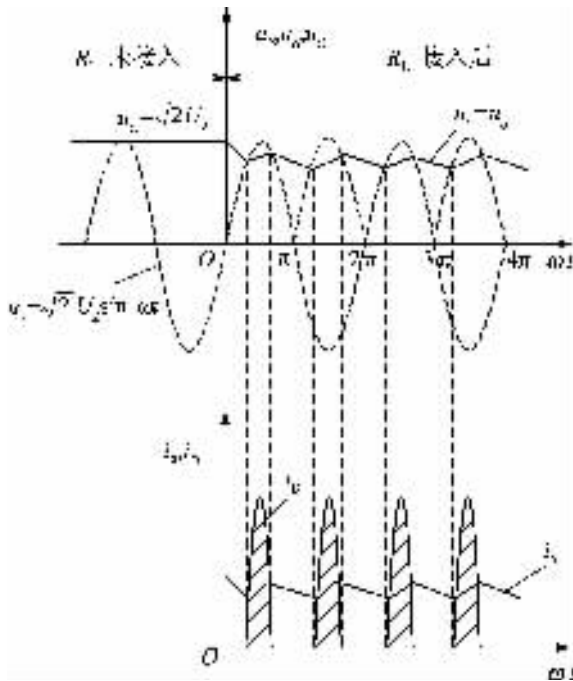


图 9-6 桥式整流电容滤波电路波形图

接入负载  $R_L$  的情况：设变压器副边电压  $u_2$  从 0 开始上升（即正半周开始）时接入负载  $R_L$ ，由于电容器在负载未接入前充了电，故刚接入负载时  $u_2 < u_C$ ，二极管受反向电压作用截止，电容器  $C$  经  $R_L$  放电，放电的时间常数为

$$\tau' = R_L \cdot C \tag{9-12}$$

因  $\tau'$  一般较大，故电容  $C$  两端的电压  $u_C$  按指数规律慢慢下降。其输出电压  $u_o = u_C$ ，如图 9-6 所示。与此同时，交流电压  $u_2$  按正弦规律上升。当  $u_2 > u_C$  时，二极管  $D_1$ 、 $D_3$  受正向电压作用而导通，此时  $u_2$  经二极管  $D_1$ 、 $D_3$  向负载  $R_L$  提供电流，并向电容器  $C$  充电（接入负载时的充电时间常数  $\tau = (R_L // R_{int}) \cdot C \approx R_{int} \cdot C$  很小）。 $u_C$  随着交流电压  $u_2$  升高到接近最大值  $\sqrt{2}U_2$ 。然后， $u_2$  又按正弦规律下降。当  $u_2 < u_C$  时，二极管受反向电压作用而截止，电容器  $C$  又经  $R_L$  放电。电容器  $C$  如此周而复始地进行充放电，负载上便可得到图 9-6 所示的一个近似锯齿状波动的电压  $u_o = u_C$ ，使负载电压的波动大为减小。

电容滤波电路的主要特点如下：



(1) 电流的有效值和平均值的关系与波形有关,在平均值相同的情况下, $i_D$  波形越尖,有效值越大。当有电容滤波时,变压器副边电流的有效值为

$$I_2 \approx (1.5 \sim 2.0) \cdot I_o \quad (9-13)$$

(2) 负载平均电压升高,纹波(交流成分)减小,且放电的时间常数越大,电容放电速率越慢,则负载电压中的纹波成分越小,负载平均电压越高。为了得到平滑的负载电压,一般取

$$\tau' = R_L \cdot C \geq (3 \sim 5) \cdot \frac{T}{2} \quad (9-14)$$

式中, $T$  为电源交流电压的周期。

(3) 负载平均直流电压  $U_o$ 。随负载平均电流  $I_o$  增加而减小。若  $C$  值一定,当  $R_L = \infty$  (即空载) 时,负载直流电压  $U_o = \sqrt{2}U_2 \approx 1.4U_2$ 。当  $C = 0$  (即无电容) 时,负载直流电压约为

$$U_o = 0.9U_2 \quad (9-15)$$

在整流电路的内阻不太大(几欧)和放电时间常数满足式(9-12)的关系时,电容滤波电路的负载直流电压约为

$$U_o = (1.1 \sim 1.2) \cdot U_2 \quad (9-16)$$

电容滤波电路结构简单、输出电压高、脉动小。但在接通电源的瞬间,将产生强大的充电电流,这种电流称为“浪涌电流”;同时,因负载电流太大,电容器放电的速度加快,会使负载电压变得不够平稳,所以电容滤波电路只适用于负载电流较小的场合。

### 9.3.2 电感滤波电路

电感滤波电路如图 9-7 所示。为了得到较好的滤波效果,应当满足如下条件:

$$2\pi f_o L \gg R_L$$

式中, $f_o$  是整流输出电压的脉动频率,是电感  $L$  呈现的感抗; $R_L$  是滤波电路的负载电阻。

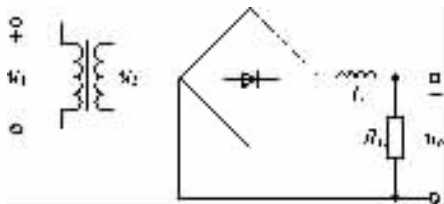


图 9-7 电感滤波电路

因为理想电感对直流电不产生压降,所以整流输出电压中的直流分量,全部传输到负载  $R_L$  两端;整流输出电压中的交流分量,则由电感线圈的感抗  $2\pi f_o L$  和负载  $R_L$  分压。由于  $2\pi f_o L \gg R_L$ , 因此交流分量几乎全部降落在电感线圈两端,使负载  $R_L$  上的交流压降很小。从而在负载  $R_L$  两端得到比较平滑的输出电压  $u_o$ , 其直流输出电压  $U_o$  为

$$U_o = 0.9U_2$$

为了减小输出电压的脉动系数,应当充分满足  $2\pi f_o L \gg R_L$  的条件。受设备体积的限制,电感  $L$  不可能做得很大,因此,为充分满足  $2\pi f_o L \gg R_L$  的条件, $R_L$  的阻值必须足够小。可见,电感滤波电路适用于负载电阻较小的场合。低频电感的体积大、重量重、价格高,因此只有在十分必要的情况下,才采用电感滤波电路。

### 9.3.3 复式滤波电路

在上述电容滤波电路和电感滤波电路中,只有一个电抗元件,故称为单节滤波电路,多用于对滤波效果要求不高的场合。若需要进一步减小脉动系数,应当采用复式滤波电路,所谓复式滤波电路就是由多个电抗元件构成的滤波电路,也叫多节滤波电路。

#### 1. LC 滤波电路

LC 滤波电路如图 9-8 所示。为获得较好的滤波效果,应当满足如下条件:

$$2\pi f_0 L \gg \frac{1}{2\pi f_0 C}$$

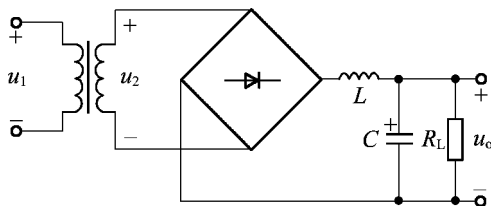


图 9-8 LC 滤波电路

对于整流输出电压中的直流分量而言,电感  $L$  可视为短路,电容  $C$  可视为开路,所以直流分量全部传输到负载  $R_L$  两端。对于交流分量而言,则由  $2\pi f_0 L$  和  $\frac{1}{j2\pi f_0 C} // R_L$  分压。

由于  $2\pi f_0 L \gg \frac{1}{2\pi f_0 C}$ ,所以  $R_L$  两端(即  $\frac{1}{j2\pi f_0 C} // R_L$  两端)的交流压降很小。这样便可以使负载获得波动程度很小的输出电压,其直流成分  $U_o$  为

$$U_o = 0.9U_2$$

为满足  $2\pi f_0 L \gg \frac{1}{2\pi f_0 C}$  的条件,要使电感  $L$  和电容  $C$  足够大。这种滤波电路,当其负载大幅度变化时,其输出电压的脉动系数变化很小,所以 LC 滤波电路有较强的适应性。而且由于它由两节滤波电路组成,所以其脉动系数远小于单节滤波电路。

#### 2. LC- $\pi$ 型滤波电路

LC- $\pi$  型滤波电路如图 9-9 所示。这种滤波电路是在电容滤波电路的输出端加上一个 LC 滤波电路构成的,它具有三节滤波电路,所以只要元件参数选择合理,就会获得很好的滤波效果。由于第一节滤波电容  $C_1$  的储能效应,会使直流输出电压有一定程度的升高,实际工作中,通常用如下公式估算该电路的直流输出电压  $U_o$  为

$$U_o \approx 1.2U_2$$

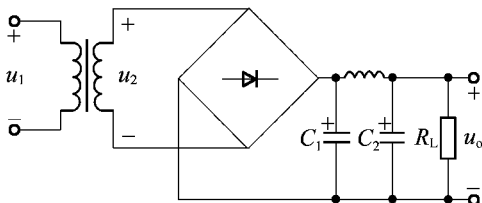


图 9-9 LC- $\pi$  型滤波电路

### 3. RC- $\pi$ 型滤波电路

RC- $\pi$  型滤波电路如图 9-10 所示。它由两节电容滤波电路构成,因此其滤波效果要比单节电容滤波电路好,但是要比 LC- $\pi$  型滤波电路差。由于滤波电阻  $R$  会产生直流压降,并且会形成有功功率损耗。工作电流越大,这种功率损耗越大,所以这种滤波电路只能用于工作电流较小的场合。

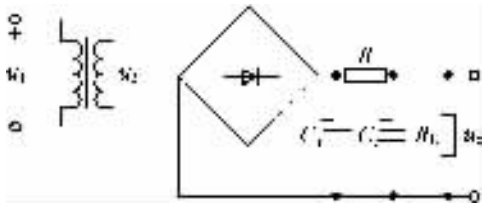


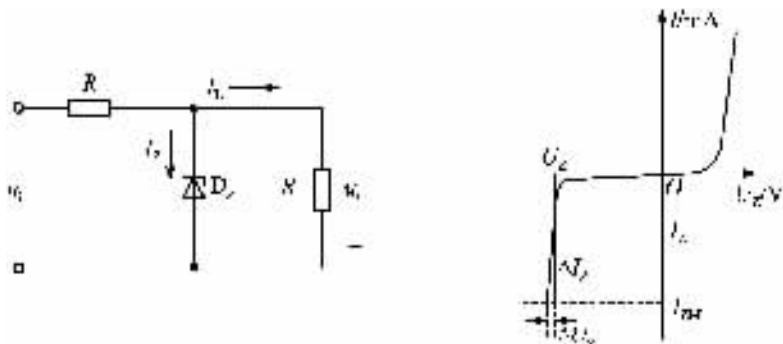
图 9-10 RC- $\pi$  型滤波电路

## 9.4 稳压电路

在电网电压有效值、负载和环境温度都不变的情况下,经整流和滤波后的电源电压,其波动程度很小。但是,在实际电路中,电网电压有效值、负载和环境温度常常会发生大幅度的变化,由于其变化频率很低,所以滤波电容、电感对它们的滤波效果很差,这会使整流滤波电路的输出电压也发生大幅变化。因此,必须在整流滤波电路的后面接上某种类型的稳压电路。稳压电路的功能是在电网电压有效值、负载或环境温度发生变化时,能通过自动调节,使输出的直流电压稳定在一个设定的范围内。

### 9.4.1 并联型稳压电路

并联型稳压电路由稳压二极管和负载并联组成,故又称为稳压二极管稳压电路。其稳压电路如图 9-11(a) 所示。



(a) 电路图

(b) 稳压二极管的伏安特性曲线

图 9-11 并联型稳压电路

稳压二极管的稳压作用是利用 PN 结的击穿特性实现的。由图 9-11(b) 所示的稳压二极管的伏安特性曲线可以看出:在击穿区,流过稳压二极管的电流  $I_Z$  在一个较大的范围内变化时,稳压二极管的端电压  $U_Z$  只发生微小的变化;反之,只要  $U_Z$  发生微小的变化,就会引起  $I_Z$

产生大幅度变化。图 9-11(a) 所示的稳压电路,就是利用稳压二极管的这一特性设计的。图中  $R$  叫限流电阻,其作用是把流过稳压二极管的电流  $I_Z$  限制在  $I_{Z\min} \sim I_{Z\max}$  的范围内,使稳压二极管工作在击穿状态。

由于稳压二极管与负载并联,所以稳压电路的输出电压  $U_o$  就等于稳压二极管的端电压  $U_Z$ 。当某一因素使输出电压增大时,稳压二极管的端电压也随之增大,由稳压二极管的击穿特性可知,此时流过稳压二极管的电流  $I_Z$  会急剧增大,使得流过限流电阻  $R$  的电流  $I_R = I_Z + I_L$  也急剧增大,从而使限流电阻  $R$  上的压降  $U_R$  也随之增大。因为  $U_o = U_Z - U_R$ ,所以  $U_R$  增大就会有效地抑制  $U_o$  的增大趋势。反之,当某一因素使输出电压下降时,限流电阻  $R$  上的压降  $U_R$  也随之下降,从而使输出电压的下降趋势受到抑制。

通过上述分析可知,只要使稳压二极管工作在击穿区,就可以从稳压二极管的两端得到较稳定的直流电压。

为使稳压二极管起到良好的稳压作用,必须把稳压二极管的实际工作电流  $I_{ZW}$  限制在  $I_{Z\min} \sim I_{Z\max}$  的范围内,即最大工作电流  $I_{ZW\max} \leq I_{Z\max}$ ;最小工作电流  $I_{ZW\min} \geq I_{Z\min}$ 。因为  $I_Z = I_R - I_L$ ,所以最大工作电流  $I_{ZW\max}$  等于  $I_R$  的最大值  $I_{R\max}$  减去负载电流  $I_L$  的最小值  $I_{L\min}$ ,即

$$I_{ZW\max} = I_{R\max} - I_{L\min} = \frac{U_{I\max} - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_{L\max}} \quad (9-17)$$

要使得

$$\frac{U_{I\max} - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_{L\max}} \leq I_{Z\max}$$

应让

$$R \geq \frac{U_{I\max} - U_Z}{I_{Z\max} + U_Z/R_{L\max}}$$

最小工作电流  $I_{ZW\min}$  为

$$I_{ZW\min} = I_{R\min} - I_{L\max} = \frac{U_{I\min} - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_{L\min}} \quad (9-18)$$

要使得

$$\frac{U_{I\min} - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_{L\min}} \geq I_{Z\min}$$

应让

$$R \leq \frac{U_{I\min} - U_Z}{I_{Z\min} + U_Z/R_{L\min}}$$

综上所述,为使稳压二极管的实际工作电流在  $I_{Z\min} \sim I_{Z\max}$  的范围内,限流电阻的阻值必须满足如下不等式:

$$\frac{U_{I\max} - U_Z}{I_{Z\max} + U_Z/R_{L\max}} \leq R \leq \frac{U_{I\min} - U_Z}{I_{Z\min} + U_Z/R_{L\min}} \quad (9-19)$$

若把电路的各个参数值代入上式后, $R$  无解,则说明选定的稳压二极管不能胜任设计要求,应选用稳压电流范围  $I_{Z\min} \sim I_{Z\max}$  更大的稳压二极管,或降低设计要求,即减小  $\Delta U_1 = U_{I\max} - U_{I\min}$ ,或减小  $\Delta R_L = R_{L\max} - R_{L\min}$ 。

并联型稳压电路结构简单,在电源电压不需要调节并且负载电流比较小的电子设备中被广泛采用。

## 9.4.2 串联型稳压电路

串联型稳压电路由调整元件、比较放大器、基准电路和取样电路等环节组成,其结构框图如图 9-12(a) 所示。相对于输入电压而言,调整元件和负载是串联关系,故称为串联型稳压电路。

如图9-12(b)是串联型稳压电路的电路图,图中 $R_3$ 、 $R_4$ 和 $R_5$ 组成取样电路,当输出电压变化时,取样电阻将其变化量的一部分送到比较放大管的基极,基极电压能反映输出电压的变化,称为取样电压,取样电阻不宜太大,也不宜太小,若太大,控制的灵敏度下降,若太小,带负载能力减弱。 $R_2$ 和稳压二极管 $D_Z$ 构成一个基准电路,给 $T_2$ 发射极提供一个基准电压, $R_2$ 为限流电阻,保证 $D_Z$ 有一个合适的工作电流。 $T_2$ 是比较放大管, $R_1$ 既是 $T_2$ 的集电极负载电阻,又是 $T_1$ 的基极偏置电阻,比较放大管的作用是将输出电压的变化量先放大,然后加到调整管的基极,控制调整管工作,提高了控制的灵敏度和输出电压的稳定性。 $T_1$ 是调整管,它与负载串联,故称此电路为串联型稳压电路,调整管 $T_1$ 受比较放大管的控制,集射间相当于一个可变电阻,用来抵消输出电压的波动。

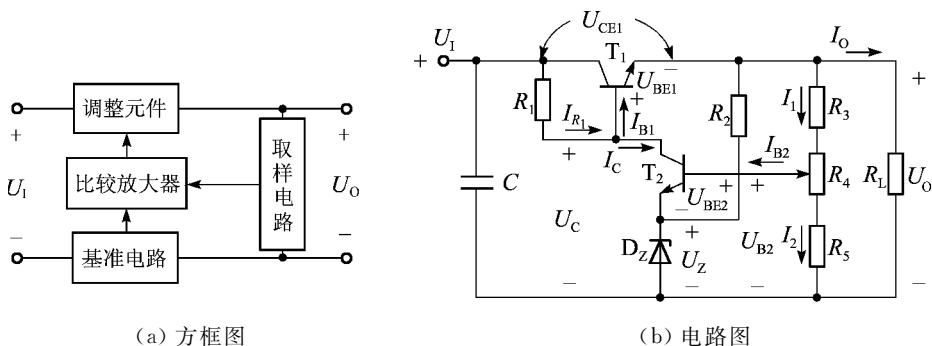


图9-12 串联型稳压电路

其工作原理分析如下:

(1) 当负载 $R_L$ 不变,输入电压 $U_1$ 减小时,输出电压 $U_0$ 有下降趋势,通过取样电阻的分压使比较放大管的基极电位 $U_{B2}$ 下降,而比较放大管的发射极电压不变 $U_{BE2} = U_Z$ ,因此 $U_{BE2}$ 也下降,于是比较放大管导通能力减弱, $U_C$ 升高,调整管 $T_1$ 导通能力增强,调整管 $T_1$ 集电极与射极之间的电阻 $r_{ce1}$ 减小,管压降 $U_{CE1}$ 下降,使输出电压 $U_0$ 上升,保证了 $U_0$ 基本不变。当输入电压 $U_1$ 增大时,稳压过程与上述过程相反。

(2) 当输入电压 $U_1$ 不变,负载 $R_L$ 增大时,引起输出电压 $U_0$ 有增长趋势,通过取样电阻的分压使 $U_{BE2}$ 升高,于是比较放大管导通能力增强, $U_C$ 下降,调整管导通能力减弱,调整管 $T_1$ 集电极与射极之间的电阻 $r_{ce1}$ 增大,管压降 $U_{CE1}$ 升高,使输出电压 $U_0$ 下降,保证了 $U_0$ 基本不变。当负载 $R_L$ 减小时,稳压过程相反。

由此看出,稳压的过程实质上是通过负反馈使输出电压维持稳定的过程。

图9-12(b)所示稳压电路中有一个电位器 $R_4$ 。串接在 $R_3$ 和 $R_5$ 之间,可以通过调节 $R_4$ 来改变输出电压 $U_0$ 。设计这种电路时要满足 $I_2 \gg I_{B2}$ ,因此,可以忽略 $I_{B2}$ , $I_1 \approx I_2$ ,则

$$U_{B2} = U_0 \cdot \frac{R_4' + R_5}{R_3 + R_4 + R_5}$$

$$U_0 = U_{B2} \cdot \frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_4' + R_5} = (U_Z + U_{BE2}) \cdot \frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_4' + R_5} \quad (9-20)$$

式中, $U_Z$ 为稳压管的稳压值; $U_{BE2}$ 为比较放大管 $T_2$ 发射结电压; $R_4'$ 为图9-12(b)中电位器滑动触点下半部分的电阻值。

当 $R_4$ 调到最上端时,输出电压 $U_0$ 为最小值,即

$$U_{Omin} = (U_Z + U_{BE2}) \cdot \frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_4 + R_5} \quad (9-21)$$

当  $R_4$  调到最下端时,输出电压  $U_O$  为最大值,即

$$U_{O\max} = (U_Z + U_{BE2}) \cdot \frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_5} \quad (9-22)$$

**例 9.4.1** 如图 9-12(b) 所示,已知  $R_3 = 560 \Omega$ ,  $R_4 = 680 \Omega$ ,  $R_5 = 1\,000 \Omega$ ,  $U_Z = 6 \text{ V}$ ,  $U_{BE2} = 0.7 \text{ V}$ ,求输出电压调整范围。

**解** 由式(9-21)可得

$$U_{O\min} = (6 + 0.7) \cdot \frac{560 + 680 + 1\,000}{680 + 1\,000} \approx 8.9 \text{ V}$$

由式(9-22)可得

$$U_{O\max} = (6 + 0.7) \cdot \frac{560 + 680 + 1\,000}{1\,000} \approx 15 \text{ V}$$

输出电压调整范围为  $8.9 \sim 15 \text{ V}$ 。

## 本章小结

1. 单相半波整流电路输出电压平均值与变压器二次绕组电压有效值之间的关系是  $U_O = 0.45U_2$ , 二极管截止时承受的最高反向电压是  $U_{\text{DRM}} = \sqrt{2}U_2$ , 通过二极管的电流等于负载电流  $I_D = I_L$ 。仅利用了交流电的半个周期, 变压器存在单向磁化的现象。

2. 单相桥式整流电路输出电压平均值与变压器二次绕组电压有效值之间的关系是  $U_O = 0.9U_2$ , 二极管截止时承受的最高反向电压是  $U_{\text{DRM}} = \sqrt{2}U_2$ , 通过二极管的电流等于负载电流的一半  $I_D = I_L/2$ 。利用了交流电的整个周期, 变压器无单向磁化的现象。

3. 常用滤波电路有电容滤波、电感滤波、 $LC$  滤波、 $RC-\pi$  型滤波和  $LC-\pi$  型滤波。一般来说, 电容滤波适用于工作电流较小的场合; 电感滤波适应于工作电流较大的场合;  $LC$  滤波则处于两者之间。

4. 采用电容器滤波的整流电路二极管中通过的是冲击电流, 对于半波整流电容滤波的电路, 二极管在截止时承受的最高反向电压是  $2\sqrt{2}U_2$ 。半波整流电容滤波电路输出电压的平均值  $U_O = U_2$ , 桥式整流电容滤波电路输出电压的平均值  $U_O = 1.2U_2$ 。

5. 串联型稳压电路主要由调整元件、比较放大器、基准电路和取样电路等组成。其稳压原理与直流射极跟随器基本相同, 只是在调整管的基极和发射极之间引入了取样电路和比较放大器构成的有源反馈网络。采用串联型稳压电路时要特别注意必须与稳压二极管串联限流电阻。可根据稳压二极管的稳定电压应等于负载电压, 最大稳定电流等于 2 倍负载最大电流的条件来选择稳压二极管。稳压电路的输入电压至少大于 2 倍负载电压。

## 习 题 9

**9.1** 桥式整流和单相半波整流电路相比, 在变压器副边电压相同的条件下, \_\_\_\_\_ 电路的输出电压平均值高了一倍; 若输出电流相同, 就每一整流二极管而言, 则 \_\_\_\_\_ 电路的整流平均电流大了一倍, 采用 \_\_\_\_\_ 电路, 脉动系数可以下降很多, 若变压器副边电压有效值为  $U_{\text{DRM}}$ , 每个整流管的反向峰值电压为  $U_{\text{DRM}}$ , 则桥式整流电路的  $U_{\text{DRM}} =$  \_\_\_\_\_, 半波整流电路的  $U_{\text{DRM}} =$  \_\_\_\_\_。