

三相异步电动机 制造与使用

上海南洋电机厂



三相异步电动机制造与使用

前 言

自从1889年AEG公司的总工程师迈克尔·冯·多利奥—多布罗沃尔斯克发明了第一台有实用价值的三相异步电动机以来，几乎没有哪一家企业象AEG—德勒风根公司那样，与三相异步电动机的发展息息相关。本书是由公司电机部的专家们集体编写而成的。

本书首先回顾了电动机的发展历史，对电工单位和基本定律作了简要的介绍，然后分别阐述了三相异步电机的性能，工作原理，结构和工作特性，在特种电机和电机运转设计章节之后，对电机运转的实际问题，电机的使用和维修也作了详细的说明。最后还介绍了有关的DIN和VDE等标准。

本节主要供电机设计制造人员，使用和安装人员，电机下线工，和其他有关电工技术人员使用。

目 录

1. 回顾历史
2. 电工单位和基本定律
 - 2.1 电工单位
 - 2.2 基本定律
 - 2.2.1 交流电
 - 2.2.2 三相交流电
 - 2.2.3 星形和三角形接法
 - 2.2.3.1 星形接法
 - 2.2.3.2 三角形接法
 3. 工作原理和性能
 - 3.1 电动机的旋转磁场和转矩
 - 3.2 频率
 - 3.3 运行电压
 - 3.4 功率因数
 - 3.5 转速和转差率
 - 3.6 损耗和效率
 - 3.7 电动转矩和反转矩
 - 3.8 起动和加速
 - 3.9 加速时间
 - 3.10 起动电流和起动转矩
 - 3.11 鼠笼转子电动机的起动
 - 3.11.1 直接起动
 - 3.11.2 星形—三角形起动
 - 3.11.3 起动调压器
 - 3.11.4 单相定子串联电阻起动
 - 3.12 滑环转子电动机的起动
 - 3.13 起动温升
 - 3.13.1 空载起动
 - 3.13.2 负载起动
 - 3.13.3 接通频率
 - 3.14 制动
 - 3.14.1 反接制动
 - 3.14.2 直接制动
 - 3.14.3 机械制动
 - 3.15 调速
 - 3.15.1 转子回路串接电阻调速
 - 3.15.2 变极调速
 - 3.15.3 变频调速
 - 3.15.4 带变速齿轮的电动机
4. 三相异步电动机的构法
 - 4.1 定子及其绕组
 - 4.1.1 散下绕组
 - 4.1.2 穿入式绕组
 - 4.1.3 用于高压的双层成型线圈
 - 4.1.4 半成型线圈
 - 4.1.5 杆形绕组
 - 4.1.6 磁性槽楔
 - 4.1.7 绕组端部的支承
 - 4.1.8 AEG—EPITHERM 绝缘系统
 - 4.2 转子及其绕组
 - 4.2.1 散下绕组
 - 4.2.2 穿入式绕组
 - 4.2.3 杆形绕组
 - 4.2.4 单鼠笼转子
 - 4.2.5 多鼠笼转子
 - 4.3 允许温升
 - 4.4 冷却
 - 4.5 结构型式
 - 4.5.1 防护型式
 - 4.6 绝缘
 - 4.7 耐腐蚀性
 - 4.8 接线柱的标记和连接
5. 特种电机
 - 5.1 磁阻式电动机
 - 5.2 发电机工作状态的三相异步电动机
 - 5.3 防爆型和隔爆型电动机
 - 5.3.1 增安防爆型电动机

- 5.3.2 耐压封闭防护型电动机
- 5.4 用于特殊工作条件下的电动机
- 6. 传动电机的设计
 - 6.1 举例说明在全转速的情况下测定电动机功率
 - 6.2 工作方式对电动机功率的影响
 - 6.3 工作方式
 - 6.3.1 连续工作方式 S_1
 - 6.3.2 短时工作方式 S_2
 - 6.3.3 起动过程不影响温度的断续工作方式 S_3
 - 6.3.4 起动过程影响温度的断续工作方式 S_4
 - 6.3.5 起动和制动过程影响温度的断续工作方式 S_5
 - 6.3.6 具有断续负载的连续工作方式 S_6
 - 6.3.7 起动和制动的连续工作方式 S_7
 - 6.3.8 负载和转速联合变化的连续工作方式 S_8
 - 6.3.9 推荐值
 - 6.4 电压降对转矩的影响
 - 6.5 功率因数的改善
 - 6.5.1 带三相交流励磁机的异步电动机
 - 6.5.2 同步化异步电动机
 - 6.5.3 电容器
- 7. 三相异步电动机的运行
 - 7.1 铭牌
 - 7.2 电动机的底座
 - 7.2.1 固定电机的底座
 - 7.2.2 弹性底座
 - 7.3 安装
 - 7.4 试运行
 - 7.4.1 绝缘电阻
 - 7.4.2 干燥
 - 7.4.3 起动
 - 7.4.4 停车
 - 7.4.5 旋转方向
 - 7.5 维修
 - 7.6 轴承
 - 7.6.1 滑动轴承
 - 7.6.2 滚动轴承
 - 7.6.3 滚动轴承的清洗
 - 7.6.4 滚动轴承的更换
 - 7.6.5 滚动轴承的故障
 - 7.7 联轴器
 - 7.8 噪声
 - 7.9 振动
 - 7.10 功率降低的影响
 - 7.10.1 在高海拔下运转
 - 7.10.2 室温增高
 - 7.11 标准
 - 7.11.1 参考标准(概念、名称、基本标准)
 - 7.11.2 规格标准(电机的规格、安装尺寸和功率)
 - 7.11.3 设计标准(设计和制造的原理)
 - 7.11.4 结构标准(电机零件结构的资料)
 - 7.11.5 尺寸标准(螺纹、半成品和标准部件的尺寸)
 - 7.11.6 材料标准(材料性能、使用规范)
 - 7.11.7 工艺标准(制造或加工部件的工艺标准)
 - 7.11.8 检验标准(材料和产品的检验方法)
 - 7.11.9 供货标准(供货条件和技术要求的协议)
 - 7.11.10 VDE标准
 - 7.11.11 IEC—推荐标准
- 8. 附录
 - 8.1 公差
 - 8.2 绝缘导线的载流量

1、历史回顾

1888年，费拉里斯发表了具有重要意义的多相电流能产生交流磁场的研究成果，从而奠定了制造异步电机的基础。他曾采用铜管做转子，试图制造一台小型两极电动机，但没有成功。当时他还没有认识到，他的发明具有重大的现实意义。相反，在发表的文献中却说这项发明并不具有经济价值，这种电机的效益不会高于50%。

与此同时，AEG的迈克尔·冯·多利奥—多布罗沃利斯克（图1/1）在柏林亦正为研究一台有实用价值的异步电动机而努力。此外，还有布雷德利、哈兹尔旺德勒和特斯拉等三位发明家也同时在研究多相交流电的实用

价值进行实验探索。

费拉里斯关于异步电机经济效益不大的观点，当时造成了一些有经验的专家们的普遍看法。然而，冯·多利奥—多布罗沃利斯克却在不断的进行探索，并且特别对磁路和交、直流磁路间的关系进行了研究，提出采用三相系统，在经济上可以取得最佳的效益。

1889年，冯·多利奥—多布罗沃利斯克终于第一次成功地造出了一台异步电动机（ORP51083“交流电机实验”于1889年3月8日制成）。这台功率大约为1/8马力的试验电动机，运转良好，而且噪音很低（图1/2）



图1/1 迈克尔·冯·多利奥—多布罗沃利斯克



图1/2 冯·多利奥—多布罗沃尔斯克试制的三相交流电动机

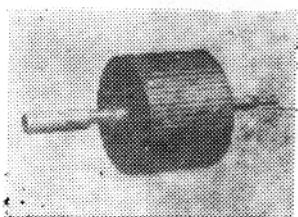


图1/3 三相交流电动机的转子

这是AEG的第一台异步电动机，当然它与现代电动机相比，无论是材料，还是部件的结构都有很大差别。但鼠笼转子与现今的转子差不多（图1/3）。在以后的发展中又遇到了许多困难，特别是在起动和噪音方面问题较多。至1891年，AEG终于制出了一台100马力，600转/分的三相异步电动机，用于从纳甲河边劳芬到莱茵河旁的法兰克福的长达175公理的距离上作运输传动。这一

创举曾轰动一时，为异步电动机的应用开辟了广阔的前景。为了满足三相交流电气传动的需要，1891年AEG公司又制造了第一个从1/2到10马力（图1/4）三相交流电动机系列。这个系列的电机与最初的试验电机相比，已经有了明显的改进，特别是定子绕组从原来的穿线方式改进成为嵌线工艺。AEG公司在发展这种电机的头几年中就已经认识到，鼠笼型三相异步电动机具有结构简单等优点，有广阔的发展前途，并为改善其起动性能而不断努力。1892年，冯·多利奥—多布罗沃尔斯克又提出了采用双鼠笼转子以改善起动性能。其后，AEG公司即生产了这种电动机。冯·多利奥—多布罗沃尔斯克在三相异步电动机的发展上作出了卓越的贡献。1893年他在柏林召开的电工技术会议上提出，较大型的电动机也同样可采用简单的结构，并指出这个问题业已得到解决。不久前通用电器公司在芝加哥展览会展出的第一批无整流子和无滑环的电机，其中有一台就是标准的50马力电动机。

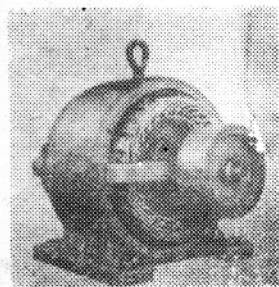


图1/4 第一台实际应用的三相交流电动机，制造于1891年

在三相异步电动机研制上所取得的成果，标志了电机制造发展上的一次飞跃。

2、电 工 单 位 和 基 本 定 律

2.1 电工单位

电工单位是以国际单位制为基础的。电压的单位为伏，电流的单位为安(A)，二者相除得出的单位是欧姆($V/A = \Omega$)，相乘则为电功率的单位瓦($VA = W$)。

计及时间单位秒(S)后，又可以推导出其它一些单位。常用的电工单位如表2/1所示。

2.2 基本定律

2.2.1 交流电

将一根导体或线圈的一边以恒速在一个正弦形的磁场中，并沿垂直于磁场的方向，在导体或线圈中运动，就会产生出正弦形的交流电压(图2/1)。正负半波一起构成一个周期，每秒钟的周期数称为频率(f)。频率的单位为赫芝(Hz)。在欧洲通用的交流电频率为50赫芝，在其他国家，有的采用50赫芝，有的则采用60赫芝。电气化铁道网路中常采用162/3赫芝的单相交流电。

对于交流负载来说，有电阻，电感和电容之分。纯电阻负载的电流与电压同相位，其瞬时值与电压的瞬时值成正比。电感负载的电流相位滞后于电压，纯电感时滞后 90° ；电容负载的电流相位则超前于电压，纯电容时超前 90° 。

表格2/1 电工单位

名 称	符 号	单 位	单位代号	定 义
电压	U	伏	V	
电流	I	安	A	
电阻	R	欧姆	Ω	$1\Omega = 1 \frac{V}{A}$
电容	C	法拉	F	$1F = 1 \frac{As}{V}$
电感	L	亨利	H	$1H = 1 \frac{Vs}{A}$
功率	P	瓦	W	$1W = 1VA$
功	A	瓦秒	Ws	$1Ws = 1VA \cdot s$
频率	f	赫芝	Hz	$1Hz = \frac{1\text{周期}}{S}$
角频率	ω		$\frac{1}{S}$	$\omega = 2\pi f$

图2/1 交流电压的曲线

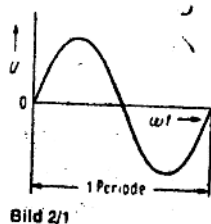


图2/2 感性负载时的相位：电流I滞后于电压U

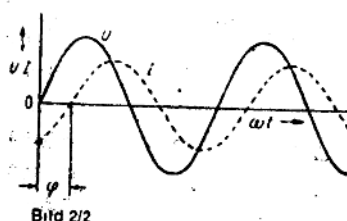


图2/3 有效值

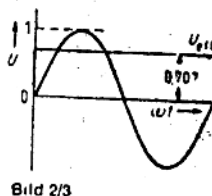
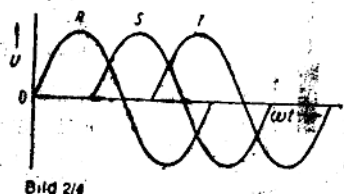


图2/4 三相交流电压的变化曲线



实际中的负载一般都是综合性的，因而电流和电压之间的相位角 φ 处于 0 和 $\pm 90^\circ$ 之间（图2/2）。由于存在相位差，电流和电压的最大值不是同时出现的，故有功功率将减少，其平均值可借助于相位角 φ 余弦来计算。相位角的余弦称为功率因数，符号为 $\cos\varphi$ 。对于交流电来说，普通的测量仪所显示的不是电流和电压的最大值（峰值），是它的 $0.707 (1/\sqrt{2})$ 倍的数值。这一数值被称为有效值，並以 I 和 V 来表示（图2/3）。由 V 、 I 和 $\cos\varphi$ 的乘积即可求出有功功率 P ，其单位为瓦。电压和电流的乘积称为视在功率，单位为 VA 或 kVA 。无功功率 Q 等于电流，电压和 $\sin\varphi$ 的乘积，单位为乏或千乏。

2.2.2 三相交流电

通常三相交流电源的电压大小相等，相互间相移三分之一周期（图2/4）。当三相负载对称时，由电网提供的总功率等于三相功率之和，即 $P = 3V_{\text{相}} I_{\text{相}} \cos\varphi = \sqrt{3} V_{\text{线}} I_{\text{线}} \cos\varphi$ 。

2.2.3 星形和三角形接法

2.2.3.1 星形接法

将三相绕组的终端接在一起，而将各相的首端接上电源，即为星形接法，其标志为“Y”。此时每相电压是线电压（电源线间电压）的 $1/\sqrt{3}$ 倍，而相电流与线电流相等（图2/5）。当电源电压为 $380V$ 时，相电压为 $380/\sqrt{3} \approx 220V$ 。

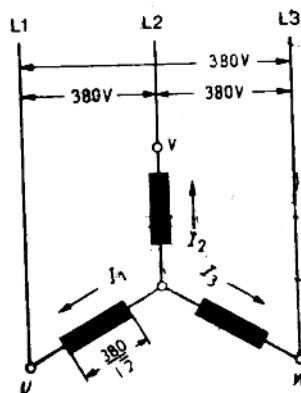


图2/5 星形接法，电源电压为380伏

2.2.3.2 三角形接法

如将三相绕组串连接线，即为星形接法，其标志为“ Δ ”。如将每个串连点接上电源（图2/6）。则每相电压等于线电压，而相电流则为线电流 $1/\sqrt{3}$ 倍。

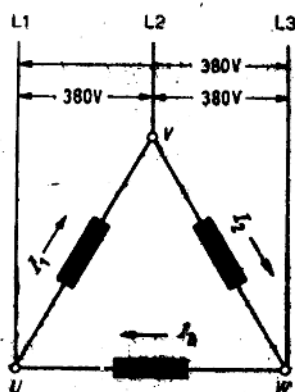


图2/6 三角形接法，电源电压为380伏

表1/1

名称	符号	单位(缩写)	算式
相电压和相电流之间的相位角	φ		
功率因数	$\cos\varphi$		
无功功率因数	$\sin\varphi$		$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi}$
有效电压	U	V	
有效电流	I	A	
有功电流	I_w	A	$I_w = I \cos\varphi$
无功电流	I_b	A	$I_b = I \sin\varphi$
视在功率	S	VA, kVA	$S = UI$
有功功率	P	W, kW	$P = UI \cos\varphi$
无功功率	Q	$var, kvar$	$Q = UI \sin\varphi$
三相交流有功功率	P	W, kW	$P = \sqrt{3} V_{\text{线}} I_{\text{线}} \cos\varphi$
频率	f	Hz	
角频率	ω	S^{-1}	$\omega = 2\pi f$
阻抗	Z	$\frac{V}{A}$	$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$
电阻和电感串联时	Z	$\frac{V}{A}$	$Z = \frac{1}{\omega C}$
纯电电容	Z	$\frac{V}{A}$	$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$
电阻、电感和电容串联时	Z	$\frac{V}{A}$	

3、工作原理和性能

异步电动机主要由定子和转子二部分所组成。它的电磁效应部分来自于分层的冲片铁芯。中等和大功率异步电机的定转子铁心由硅钢片迭成，每一冲片的表面都涂有一层漆或者经过化学处理（如磷化处理）以相互绝缘。小型电机的铁芯冲片多采用软铁片冲制，并进行退火处理。

线圈嵌在定子和转子铁芯的槽内，电动机工作时，就是经由线圈和铁心，把输入的电能转变为机械能的。除主要部件外，还有机壳、端盖、轴承、转轴和风扇等其它另部件。

3.1 电动机的旋转磁场和旋转力矩

电动机从电源得到的有功功率 P ，除去定子中损耗后，经旋转磁场传递给转子，再除去转子中的损耗后，即为机械功 P_2 。从定子传递到转子上的功率叫电磁功率 P_L 。

当将一个在空间互差 $N/3$ 极距（ 120° 电角）的三相绕组，接到一个在时间上互差 120° 电气角度的三相电源时，即能产生旋转磁场。转子的转速与旋转磁场的同步转速间存在差异时，在转子回路中即将感生一个次级电流 I_2 。定子绕组的电流 I 和转子电流 I_2 都是矢量。异步电动机转子的转速 n 恒低于旋转磁场的同步转速 n_s ，其差值通常以转差率 s 来表示：

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} 100, \%$$

同步转速与极数 $2P$ 有关 $n_s = \frac{120f}{2P}$ (转/分)

旋转磁场的磁通 Φ 与转子电流 I_2 作用产生转矩 $M \approx k\Phi I_2$ 牛·米，式中 K 为常数。

电磁功率为： $P_L = \frac{Mn_s}{9.55}$ 瓦，输出的功率（包

括磨擦损耗在内的机械功率） $P_2 = \frac{Mn}{9.55}$ 瓦。

$P_1 = P_L - P_2$ 的差为转子回路中的电气损耗由于 $P_2 = P_L(1-s)$ ， $P_1 = P_L s$ 。故有效机械功率 P_2 和转子损耗 P_1 均与转差率 s 有关。

电动机的转矩可从有效机械功率（瓦）和转速（转/分）得出：

$$M = \frac{P_2}{n} 9.55, \text{ 牛·米}$$

或者近似为：

$$M \approx \frac{P_2}{n_s} 10 \text{ 牛·米}$$

如一台六极三相异步电动机， $P_2 = 90 \text{ kW}$ ， $N_s = 1000$ 转/分， $n = 970$ 转/分，转矩的准确计算值为 $M = 886$ 牛·米，近似值为 $M \approx 900$ 牛·米。

当电动机运行时，工作机械将产生相应的反转矩，电动机的转矩随负载大小的不同自动变化。电动机均具有一定的过转矩能力，按VDE0530旋转电机的标准规定，电动机的最大转矩至少应为额定转矩的1.6倍。实际电机所达到的最大力矩大部分都超过这个数值。如前所述，电动机的转矩与磁通量和转子电流的乘积成比例。当电源频率和电压不变时，磁通量几乎也是恒定的，故转子电流与转矩成比例。在整个工作转速范围内转子电流根据转矩大小相应变化。如电源电压上升或下降，当负载转矩不变时，转子电流变化与电压变化相反。例如，电源电压下降20%时，转子电流将提高25%，因此，在负载不变的情况下，电压降低将使转子绕组的损耗增加，发热加剧。提高电源电压，由于电机磁路的饱和度增加，定子无功电流将明显增大。故电源电压只允许提高5%，即为额定电压的105%（图3/1）

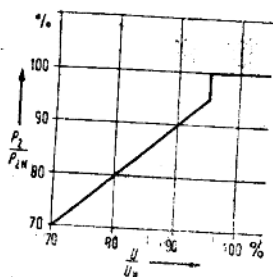


图3/1 电源电压波动对功率的影响

3.2 频率

电源电压 V ，磁通量 ϕ ，定子绕组每相串联匝数 w 和电源频率 f 之间的关系如下：

$$V = kwf\phi$$

式中 k 为常数。

从上式中可见，当电压和绕组匝数不变时，如频率增加，磁通量即减少。反之，如频率降低，则磁通量增加。电动机的运行速度是与相频率成比例的。在频率变化的情况下，只有通过改变线圈的匝数才能使磁通量不变。如电源电压能随频率同时变化，则磁通量亦将不变。

如一台绕组设计为380伏，50赫芝的三相异步电动机用于380伏，60赫芝时，磁通量将下降到原值的5/6，如维持电流不变，则转矩将以相同的比例下降。但因转速按6/5的比例提高了，功率仍不变。如频率提高，相

应改变绕组匝数使乘积 wf 保持不变，当电动机转矩不变时，由于转速增加，将可获得比原功率大6/5倍以上的功率，此时输入电流约增加20%。但由于铁耗增加，电动机的实际应用功率应较上述提高比例（ $\frac{6}{5}$ 倍）稍低。

3.3 运行电压

按VDE 0530“旋转电机标准”的规定中小型三相异步电动机多采用220或380伏电压，大电机采用6000伏，特大型电动机亦可考虑采用10000伏电压。某些电动机也有采用500、3000、5000或15000伏作为运行电压的。对大功率电动机来说，只宜于制成高压的，当电压为10kV时电动机的功率极限以至600kW（1500转/分）较为经济。低压（380伏）电动机的极限功率则以不超过600kW（1500转/分）为宜，此时电动机的电流已约1100安，供电也要采取特别措施。电压波动只允许5%。变压波动较大对额定功率的影响见图3/1。

如变压和标准值的偏差不得超过 $\pm 5\%$ ，则电动机可按额定电压制造。故若运行电压为400伏，一般可采用380伏绕组的电机。如电源电压超过了允许的极限值，则铁耗将大大增加，在这种情况下，通常电动机是不允许连续运转的。另外，空载电流也会上升，功率因数亦将下降。

通过转换或改接，可以使绕组用于一个以上的电压运行。最简单的是三角形接法转换为星形接法，或将星形接法改为三角形接法，这时电压比是 $1:\sqrt{3}$ 。如三角形接法时的电压为220伏，则星接法时为380伏。绕组的绝缘应按最高

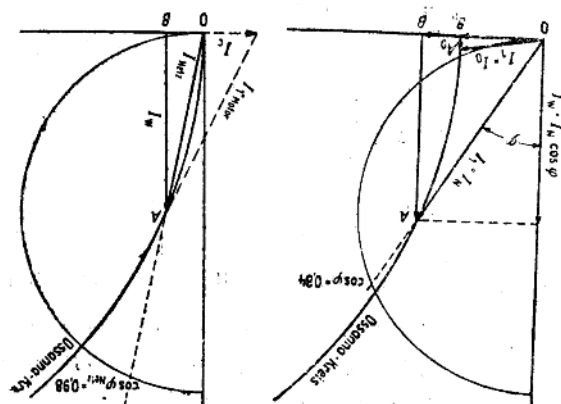


图3/2 一台250kW, 6000V, 740转/分三相交流电动机的园图。

空转点A, 功率因数

工作点A $\cos\phi=0.84$ $I_1=31.4$

左边:无补偿的园图

右边:经电容(电流 I_c)补偿后的空载电流

功率因数

$\cos\phi$ 电源=0.98

I电流=27A

电压来考虑。此外，也可以通过绕组回路的串并联来改变运行电压，例如，对四极电机来说，运行电压可有4:2:1三种。

小型三相异步电动机的空载电流 I_0 。约为额定电流的40~50%，大中型电机则约20~30%。一般来说，在功率和电压相同时，低速三相异步电机比高速运转的空载电流要大一些。

空载电流系由两部分所组成：对应于空载损耗的有功部分（图3/2中 A_0B_0 ）和用来激磁的无功部分（图3/2中 OB_0 ）。后者称为磁化电流 I_m ，它是空载电流的主要组成部分，并滞后于电压 90° 。由无功电流所产生的损耗称它为空载无功功率，可按 $\theta_0 = \sqrt{3}V_L I_0$ 来计算，单位为乏（无功伏安），

电机负载后，将从电源输入相应的负载电流 I ，其有功部分 I_w （ AB ）基本上与负载成正比，但对磁化电流来说，为弥补谐波磁场造成的数值 $B_0 - B$ （图3/2）必须增大无功部分 I_m 。

3.4 功率因数

在负载相等的情况下，无功电流越大，

视在功率和电源电流亦越大。有功功率与视在功率，以及有功电流与电源电流之比即为功率因数 $\cos\varphi$ （表2/2）：

$$\cos\varphi = \frac{\text{有功功率}}{\text{视在功率}} = \frac{\text{有功电流}}{\text{电源电流}}$$

4千瓦以上的，2至8极电动机的额定功率因数约在0.8—0.9之间。在功率因数已知的情况下，可从总电流 I 中求出有功电流和无功电流：

$$\text{有功电流 } I_w = I \cos\varphi$$

$$\text{无功电流 } I_m = I \sin\varphi$$

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi}$$

功率因数与负载的大小有关，且通常随负载降低而减小。

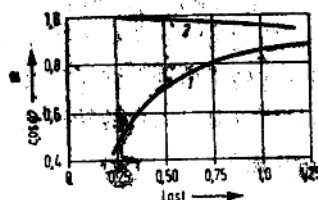


图3/3 功率因数 $\cos\varphi$
1—无补偿运行时
2—有补偿运行时

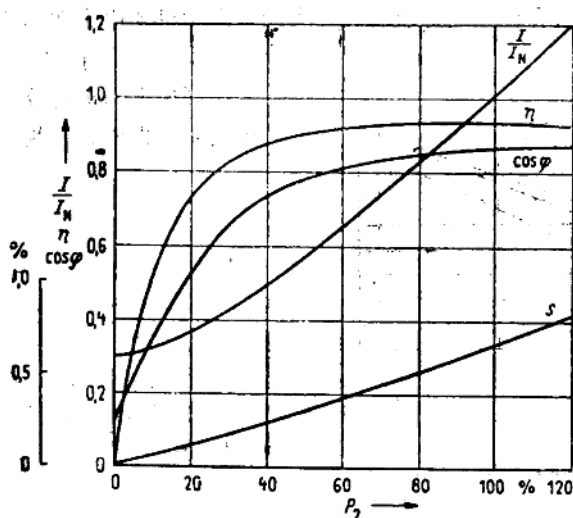


图3/4 110千瓦4极，380伏，1490转/分，IP44三相异步电动机的负载特性曲线

在某一负载下，功率因数达最大值。图3/4为一台110千瓦电动机的功率因数与负载的关系曲线。高速大功率电动机的功率因数比低速小功率电动机要高。如何对无功电流进行补偿以改善功率因数，将于6.5章中加以说明。

3.5 转速和转差率

三相异步电动机的同步转速 n_s 与极数 $2P$ 和电源频率 f 之间的关系是 $n_s = \frac{120f}{2P}$ 转/分。常用极数和频率时的同步转速如表3/1。

表3/1 常用同步转速

极数 (2P)	同 步 转 数 (转/分)		
	60H _z	50H _z	16 2/3 H _z
2	3600	3000	1900
4	1800	1500	900
6	1200	1000	600
8	900	750	450
10	720	600	360
12	600	500	300
16	450	375	225
24	300	250	150
32	225	188	112.5
48	150	125	75

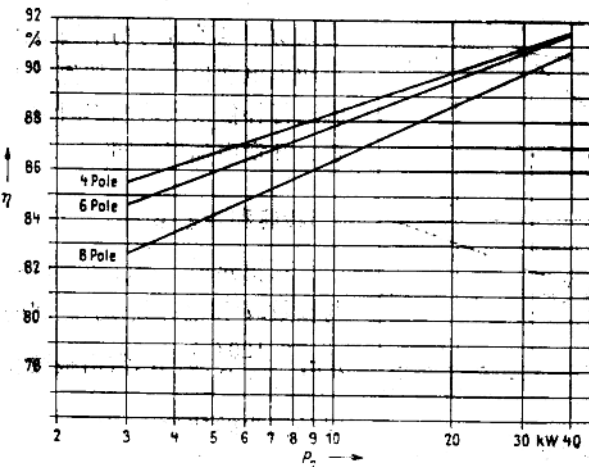
通常，三相异步电动机的负载转差率约为0.3—4%，电机额定功率小于1千瓦时还要大一些。额定转速通常应在电机的铭牌上标明。绕组式转子电动机或采用3.15章中所述措施，可以对电动机的转速进行调节。

3.6 损耗和效率

电动机的功率 η 是输出的有效机械功率与输入功率之比，即计算公式如下：

$$\text{效率}\eta = \frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}} \cdot 100\%$$

图3/4是一台110千瓦，1500转/分的三相异步电动机的效率与输出功率的关系曲



线，在较大的负载范围内效率的变化很小，由于实际中电动机常常不是满载，因而效率曲线比较平坦是有利的。

上述鼠笼式三相异步电动机的损耗情况如下：

铁耗	1.60千瓦
风磨耗、磨擦损耗	3.00千瓦
定子电流损耗	1.50千瓦
转子中电流损耗	1.10千瓦
附加损耗	0.55千瓦
总损耗	7.75千瓦
输出功率	110.00千瓦
输入功率	117.75千瓦

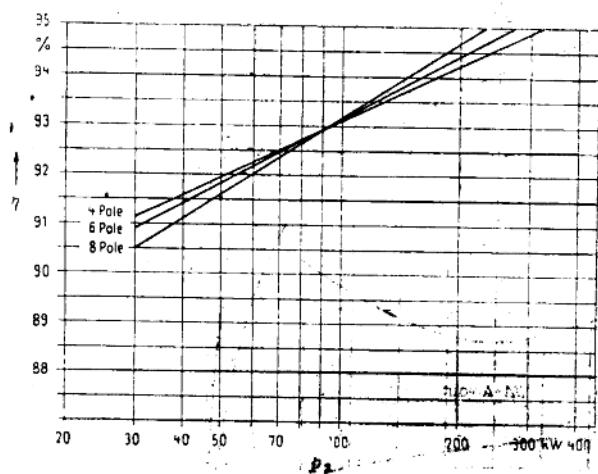
$$\text{效率} = \frac{110}{117.75} \times 100 = 93.4\%$$

电动机的损耗可分为两种类型：与负载大小有关的可变损耗，即绕组中的电流损耗和与负载无关的固定损耗，即铁耗和风磨耗。

当负载达到额定值的四分之三时，可变损耗占优势的电动机，其效率达最高值，而对固定损耗比重较大的电动机来说，负载要高于额定值时效率才是最佳值，低负载时，效率下降很多，空载时效率则为零。

效率与电动机的功率，额定转速和防护等级有关。大功率电动机要比小功率的效率要高一些，同样的防护结构，高速电动机的效率一般比低速的也要高一些。

图3/5 功率3至40千瓦，IP44低压鼠笼式三相异步电动机的效率



3/6 防护等级IP44, 功率30至250kW, IP44低压
鼠笼型三相异步电动机的大致效率

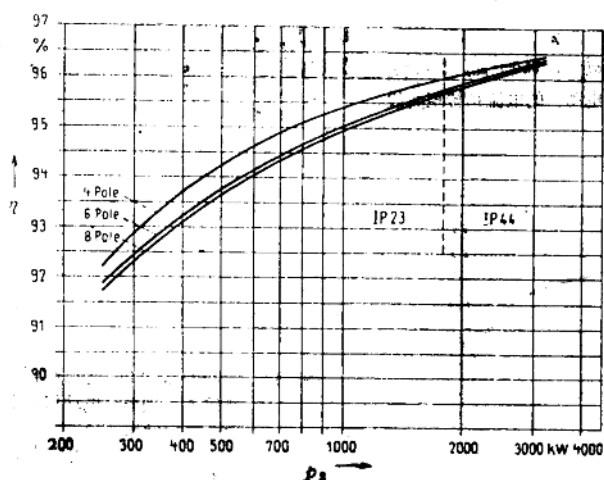


图3/7 功率250至3500千瓦, IP23或IP24, 水冷式
高压鼠笼型三相异步电动机的大致效率

3.7 电动机的转矩和反转矩

鼠笼型电动机的转矩在很大程度上受转子导条的材质及其横断面形状的影响。人们成功地制出了具有集肤效应的转子, 如深槽楔形槽和双鼠笼转子(图4/9)。从电动机的转矩 M 和转速之间的特性曲线图3/8可以得出以下几种转矩:

- 额定转矩 M_N (在额定转速 n_N 时)
- 最大转矩 M_K (在运转时最大力矩)
- 起动转矩 M_A (在静止状态时的力矩)
- 最小转矩 M_S (在静止状态和最大力矩转速中间的最小力矩)

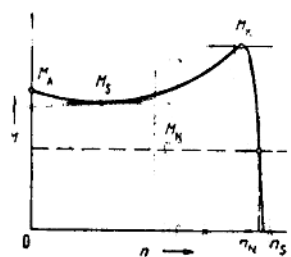


图3/8 电动机转矩
 n_N 额定转速
 n_s 同步转速

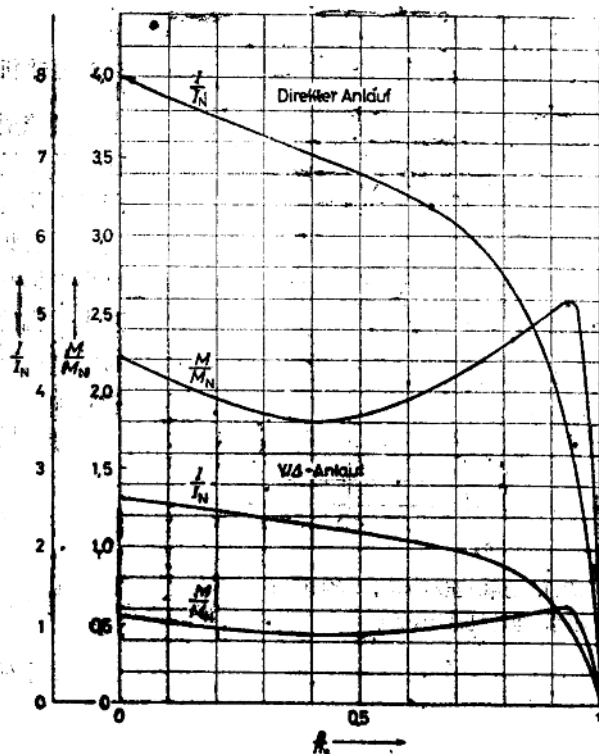


图3/9 双鼠笼转子, 250千瓦, 1485转/分双鼠笼三相异步电动机的电流和转矩曲线

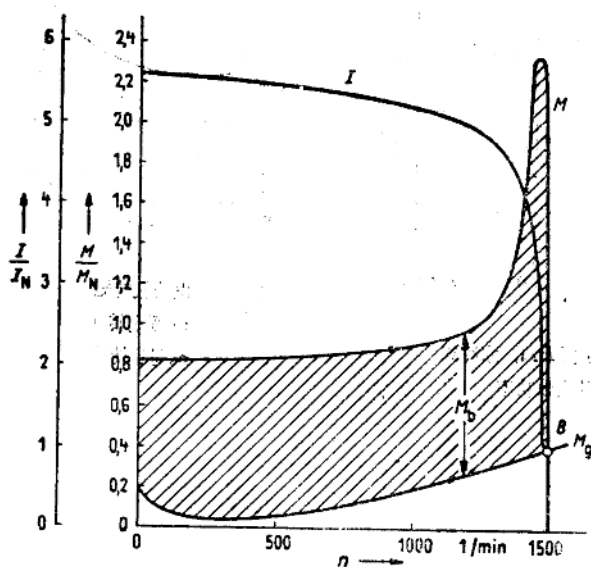


图3/11 8000kW, 1490 转/分楔形槽转子三相异步电动机的电流曲线和转矩曲线

M_s 无负载时离心压缩机的反转矩
 M_a 加速转矩
 B 工作点

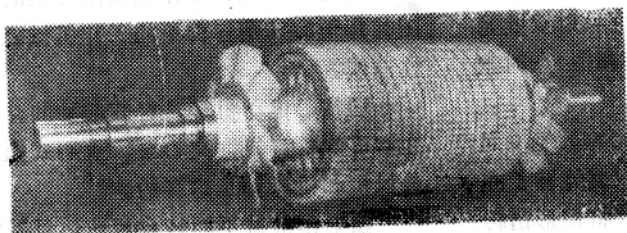


图3/10 8000千瓦, 1490转/分
三相异步电动机的楔形
槽转子

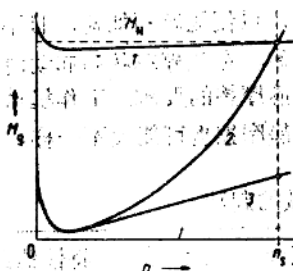


Bild 3/13.

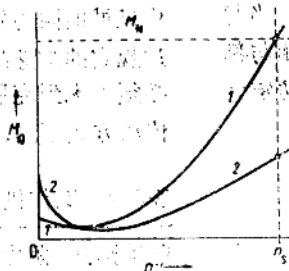


Bild 3/14.

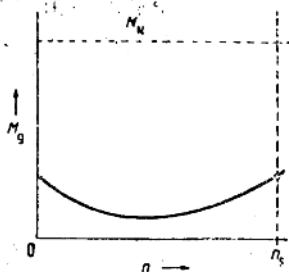
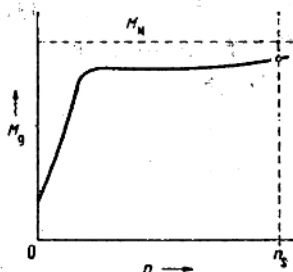


图3/13 工作机器在启动时的反转矩特性曲线
1、满负载启动
2、按方形上升转矩的负载启动
3、无负载启动

图3/14 离心泵和离心压缩机的反转矩特性曲线
1、常开阀门时
2、常闭阀门时
3、工作机械的惯矩小于电动机的惯矩

图3/15 球磨机的反转矩特性曲线
球磨机 $J=30$ 公斤米²
 $n=1000$ 转/分
电动机 $J=12.5$ 公斤米²
 $n=1000$ 转/分
功率=100千瓦

图3/16 无负载的冲击破碎机的反转矩特性曲线
冲击破碎机 $J=87$ 公斤米²
 $n=1500$ 转/分
电动机 $J=22.5$ 公斤米²
 $n=1500$ 转/分
功率=400千瓦

电动机所产生的转矩 M 与工作机械所要求的转矩（反转矩） M_r 之差即为加速力矩 M_a （图3/11）。

使用中常给单独传动选配启动转矩很高的电动机，甚至以此来作为判定传动质量的主要依据。但实践表明，启动转矩过高对大部分工作机械来说是没有必要的，某种情况下甚至反而有害。所以尽量要使电动机的转矩曲线与实际所需的启动条件相符，以便得到一个可靠的，而且尽可能平稳而无冲击的启动加速过程。图3/13至3/16是一些典型的反转矩曲线。

楔形槽转子是一种改进后的深槽转子，

当直接启动时它几乎能适应所有工作机械的要求，当电动机功率较大时，采用楔形槽转子的效果较好。空载启动时，常采用星—三角启动器，图3/11就是这种电机的一种典型的电流和转矩曲线。图3/10是一台8000千瓦，1490转/分楔形槽转子的三相异步电机，该电机用来传动一台离心式压缩机，当启动电流为额定电流的5.6倍时，启动转矩约为80%额定转矩（图3/11）双鼠笼转子电动机的启动转矩常比楔形槽转子电机的高一些。

当因尺寸限制而不能采用双鼠笼铸铝转子时，则可考虑采用楔形槽转子，大多数情况下它均可满足使用要求，而且由于它结构

简单，制造方便，故常为人们所采用。但如采用星—三角起动机，且负载反转矩较大，而电机的起动转矩不够时，则可采用双鼠笼转子。其结构和槽形将于4.2.5和图4/9时叙述。

在重载起动时，由于双鼠笼的上笼（起动笼）的热容量较低，所以用双鼠笼转子亦不够理想。对于用同一只定子，将楔形槽转子或双鼠笼转子比较，在相同效率和起动电流的情况下，提高起动转矩将同时引起最大转矩和功率因数的下降。图3/12是一台楔形槽转子大型三相异步电机的转矩曲线，当起动电流为额定电流的4.8倍时，起动转矩与额定转矩之比为1.2倍，最大转矩与额定转矩之

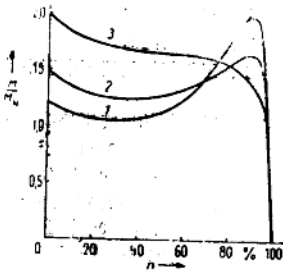


图3/12 转矩曲线

比为2倍（图3/12）中的曲线1）。如采用双鼠笼转子，将起动转矩提高到额定转矩的1.5倍时，最大转矩下降为额定转矩的1.65倍（曲线2）同时功率因数下降0.02。如将起动转矩提高到额定转矩的两倍时，转矩和转速曲线亦将相应变化，电动机的起动转矩就是它的最大转矩（曲线3），此时功率因数将再下降0.02，比如，从0.88下降到0.86。对鼓风机或水泵之类的工作机械来说，其反力矩随转速而增加，象曲线3那样的特性就不太合适了，因为它恰恰相反，随着转速上升而转矩下降。

3.8 起动和加速

运动物体的加速需要一个加速转矩 M_a ，故电动机的转矩 M 必须大于阻力矩 M_r ，以得

所需的加速转矩 $M_a = M - M_r$ ，表3/2是各种不同起动方式和工作机械阻力矩的例子，图3/13至3/16是各种不同工作机械阻力矩特性曲线。

通常，电动机多是轻载起动的。例如，拖动煤炭粉碎机，离心泵，离心式压缩机，鼓风机和机床都是这样的。

如工作机械不能轻载起动，且阻力矩接近或超出额定转矩，或需加速很大的飞轮体时，即为重载起动。当满载和重载起动时在起动至运行点间电动机的转矩都必须大于工作机械的阻力矩，以便能顺利加速，且不超过规定的加速时间。在从停车状态起动时，必须考虑到克服静摩擦的要求。工作机械和传动方式不同，静摩擦也可能大不一样。

表3/2 工作机械的起动

起动形式	阻力矩量	示 例	特性曲线
空载或轻载起动	由于加速后才接入负载故阻力矩较小	车床 轻载起动的 活塞式、压缩机、压力机、冲压机床	图3/3曲线
带负载起动	阻力矩随转速而上升到最大值。额定力矩峰值的恒定反力矩。	非空载的风机，旋转泵和旋转式压缩机。 起重机械带负载起动的活塞泵皮带运输机	图3/13曲线2，图3/14曲线1，图3/13曲线1。
重载起动	阻力矩或所需加速转矩高于额定转矩。	轧钢厂，球磨机，压延机，离心机。	

3.9 加速时间

加速时间 t_a 可从与电动机转轴相联的总

惯性力矩 J 和加速转矩 $M_a = M - M_r$ 的瞬时平均值求得:

$$t_a = \frac{J}{9.55 M_a} \text{ 秒}$$

式中 J —总惯性力矩, 公斤米²;

n —转数, 转/分;

M_a —电动机加速转矩的瞬时平均值, 牛顿米。

由于电动机的转矩 M 与转速 n 的特性曲线变化很大, 因此简单地采用一种固定的加速转矩来进行计算是不恰当的, 而必须分段来计算加速时间。取0到 n_1 , n_1 到 n_2 和 n_2 — n_3 三个相等的宽度, n_3 应取为 $0.95n_s$ 。然后将电动机转速转矩曲线和阻力矩特性(图3/17)间的每一部分用一其面积相等的矩形来代替, 分别得出 M_{a1} , M_{a2} 和 M_{a3} 。根据前式即可求得每部分的时间 t_1 , t_2 和 t_3 。

$$t_1 = \frac{J}{9.55} \cdot \frac{n_1 - 0}{M_{a1}} \text{ 秒}$$

$$t_2 = \frac{J}{9.55} \cdot \frac{n_2 - n_1}{M_{a2}} \text{ 秒}$$

$$t_3 = \frac{J}{9.55} \cdot \frac{n_3 - n_2}{M_{a3}} \text{ 秒}$$

$t_1 + t_2 + t_3$ 的和即为 $n = 0$ 到 $n = 0.95 n_s$ 的总的加速时间。

3.10 起动电流和起动转矩

考虑到的电源和起动设备, 电动机的起动电流应尽可能小一些, 并且直接进行起动, 通常起动电流是额定电流的几倍, 起动电流过小会对电机的技术性能, 特别是起动转矩和最大转矩产生不良影响, 但相比之下对电机的效率影响不大, 从图3/18的简化园图, 可看出起动电流对一台无集肤效应转子的电动机最大转矩的影响。空载电流 I_0 和短路电流 I_A 分别为 OA 和 OF , 额定转矩和最大转矩则分别为 AB 和 CD , 则最大转矩倍数为:

$$\frac{M_K}{M_N} = \frac{I_A - I_0}{2I_1 \cos \varphi} = \frac{I_A - I_0}{2I_W}$$

$$\text{例: } I_A = 105A, I_0 = 10A$$

$$I_W = I_1, \cos \varphi = 27\%$$

$$\text{则 } \frac{M_K}{M_N} = \frac{105 - 10}{2.27} = 1.76$$

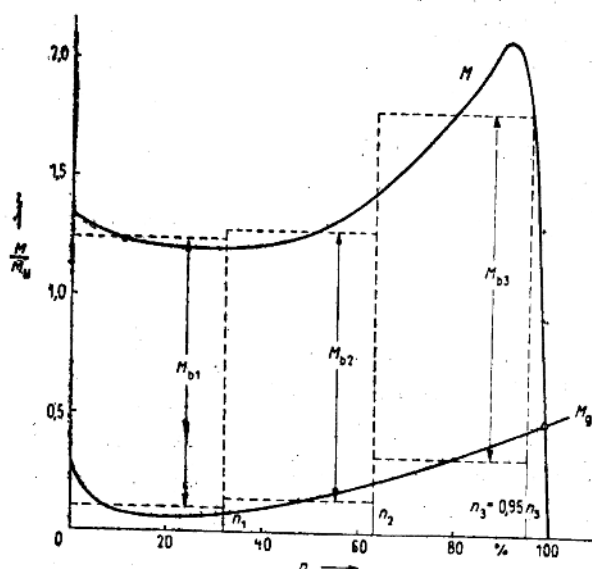


图3/17 加速时间的测定