

异步电动机运行 与维修

何报杏 编著

机械工业出版社



本书较全面系统地介绍了异步电动机运行与维修的技术知识。主要内容有异步电动机的结构与特性,运行方式与方法,起动、制动与调速,超载与温升,使用与维护,故障分析与处理,以及节电技术等。书中举有例题,每章有复习思考题。

本书可供从事电动机运行与维修的电工及使用电动机的工矿企业工人阅读,也可用作职工培训教材;对其他电气工人也有参考价值。

异步电动机运行与维修

何报杏 编著

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $5 \frac{1}{4}$ ·字数 113 千字

1985年9月北京第一版·1985年9月北京第一次印刷

印数 00,001—22,530·定价 1.15元

统一书号: 15033·5914

前 言

异步电动机是工业企业中的主要动力设备，正确使用和精心维修是保证电动机安全经济运行的重要措施。为了帮助广大电机工人及使用电动机的工矿企业工人了解它的运行方式及方法，正确使用及维修好电动机，在总结实践经验的基础上特将积累的有关资料加工整理，编写成这本小册子。在编写中，注意到了理论联系实际，定性分析与定量分析相结合，力求概念清楚，简明实用，避免繁杂的数学推导，深入浅出，通俗易懂，使广大电工学得懂，用得上。

全书共分七章。第一章是异步电动机的结构和主要特性，扼要地叙述了异步电动机的结构特点，等效电路，机械特性，能量转换及效率；第二至第五章讨论各种运行方式，包括电压、频率、负载变化及断相时的运行分析、起动、制动、调速原理和方法以及超载附加温升的计算；第六章为使用与维修，也谈到了选型、安装及调校的要点；最后一章介绍了电动机的节电技术及方法。

本书初稿经方日杰同志审阅，提出不少宝贵的意见。彭玲根同志为本书绘制了插图。在编写过程中，得到有关领导、技术人员和工人同志的指导和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，书中难免有错漏或不妥之处，希望读者批评指正。

编 者

一九八三年九月

目 录

前言

第一章	异步电动机的结构和主要特性	1
第一节	结构特点	
第二节	工作原理和等效电路	
第三节	能量转换和效率	
第四节	电磁转矩和机械特性	12
	复习思考题	16
第二章	异步电动机的运行方式	18
第一节	在额定值下的运行	18
第二节	不同工作制时的输出功率	19
第三节	额定值改变时的运行	23
第四节	三角形改星形接法运行	31
第五节	不对称运行	38
第六节	异步电动机作发电机运行	46
第七节	单相异步电动机	51
第八节	三相异步电动机接单相电源运行	54
	复习思考题	55
第三章	异步电动机的起动和制动	56
第一节	异步电动机的起动	56
第二节	笼型电动机的起动	57
第三节	绕线型电动机的起动	62
第四节	异步电动机的制动	68
	复习思考题	76
第四章	异步电动机的转速调节	77
第一节	调速方法	77
第二节	变频调速	77
第三节	变极调速	80

第四节	交流调压调速	87
第五节	绕线型电动机的调速	89
第六节	晶闸管串级调速	93
第七节	涡流离合器调速	96
第八节	各种调速方法的比较	99
	复习思考题	101
第五章	异步电动机的超载和附加温升	102
第一节	超载温升	102
第二节	过热原因	103
第三节	发热曲线	104
第四节	附加温升的计算	106
第五节	短时超载对绝缘寿命的影响	109
	复习思考题	110
第六章	异步电动机的使用与维修	111
第一节	电动机的选择	111
第二节	电动机的安装	113
第三节	起动及试运行	113
第四节	正常运行中的监视与维护	115
第五节	常见故障及处理方法	117
第六节	电动机的检修	120
第七节	电动机的干燥	137
第八节	电动机的校正	141
	复习思考题	144
第七章	异步电动机的节电技术	146
第一节	异步电动机的节电方法	146
第二节	高效率电动机	147
第三节	节电运行方式	148
第四节	提高功率因数	154
第五节	节电方案及其经济效益	160
	复习思考题	161

参考文献

第一章 异步电动机的 结构和主要特性

异步电动机（也称感应电动机）是在电源电压、频率一定时，其转速有异于同步转速且随负载而变化的交流电机。异步电动机的主要类型分无换向器（整流子）式及有换向器式两大类。无换向器式广泛作为电动机使用，而有换向器式只是用在有限范围内的特殊型式。本书着重讨论无换向器式三相异步电动机。

第一节 结构特点

一、结构

异步电动机主要由定子和转子两大部分构成，转子有笼型及绕线型两种。定子与转子之间有一个很小的气隙，中小型电动机的气隙一般为0.2~2毫米。图1-1和图1-2分别为封闭式及防护式笼型异步电动机的结构。

1. 定子 定子主要由铁心、绕组及机座三部分组成。

（1）铁心 定子铁

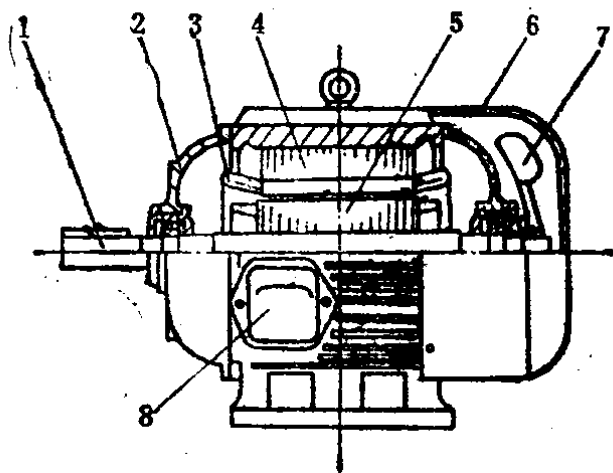


图1-1 封闭式异步电动机剖面图

1—转轴 2—端盖 3—定子绕组 4—定子
5—转子 6—风罩 7—风扇 8—出
线盒

心由两面涂以绝缘漆的薄硅钢片（片厚一般为0.5毫米）叠压而成。铁心上冲有一圈槽，用来嵌放定子绕组。定子铁心的槽形通常分半闭口槽、半开口槽及开口槽三种。中小型低压电动机一般采用半闭口槽。

（2）绕组 定子绕组是对称的三相绕组，由许多线圈按一定规律联接而成。中小型低压电动机的线圈由高强度漆包圆铜线或圆铝线绕制，线圈与槽壁之间垫以“槽绝缘”。

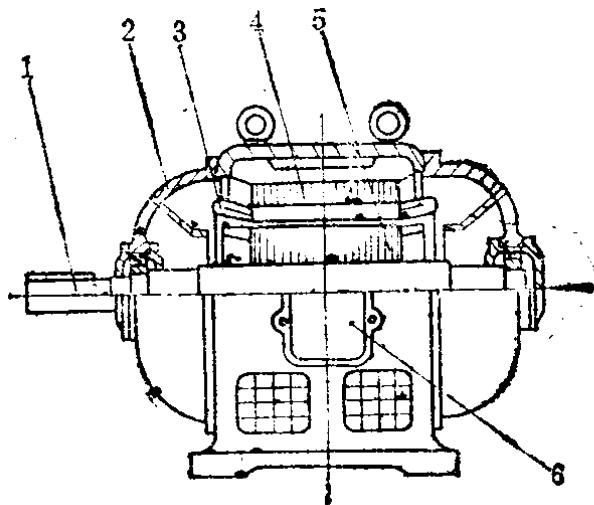


图1-2 防护式异步电动机剖面图

1—转轴 2—端盖 3—定子绕组
4—定子 5—转子 6—出线盒

定子绕组在槽内的布置分单层绕组及双层绕组两种基本型式。绕组嵌好后用槽楔锁口压紧，槽楔常用竹、胶布板或环氧玻璃布板等非磁性材料制成。

（3）机座 机座的作用主要是固定和支撑定子铁心。中小型电动机一般采用铸铁机座。对于封闭式电动机，由于其热量主要通过机座散出，故在机座外表面铸有均匀分布的散热筋，以增大散热面积。

2. 转子 转子主要由铁心、绕组及转轴等部分组成。

（1）铁心 转子铁心一般也用0.5毫米厚的冲槽的硅钢片叠成，固定在转轴或转子支架上。

（2）绕组 转子绕组分为笼型及绕线型两种结构。现分述于下。

① 笼型绕组 笼型绕组由插入转子铁心槽中的导电条及两端的端环构成。如果去掉铁心，整个绕组的外形就象一

个松鼠笼子，所以习惯上称为鼠笼形即笼形转子，如图1-3。为了节约用铜和提高生产率，中小容量的笼型电动机一般都采用铸铝转子，如图1-4。这种转子的导条、端环及风扇叶一次铸出。

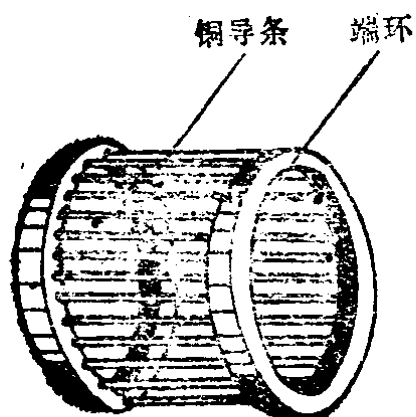


图1-3 铜条笼型转子

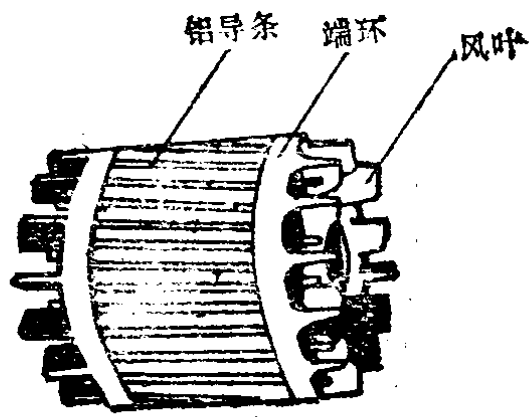


图1-4 铸铝笼型转子

此外，笼型绕组还有双笼式及深槽式，这种转子能改善异步电动机的起动性能，主要用于100千瓦以上的大中型电动机。

② 绕线型绕组（图1-5）它与定子绕组一样，也是一

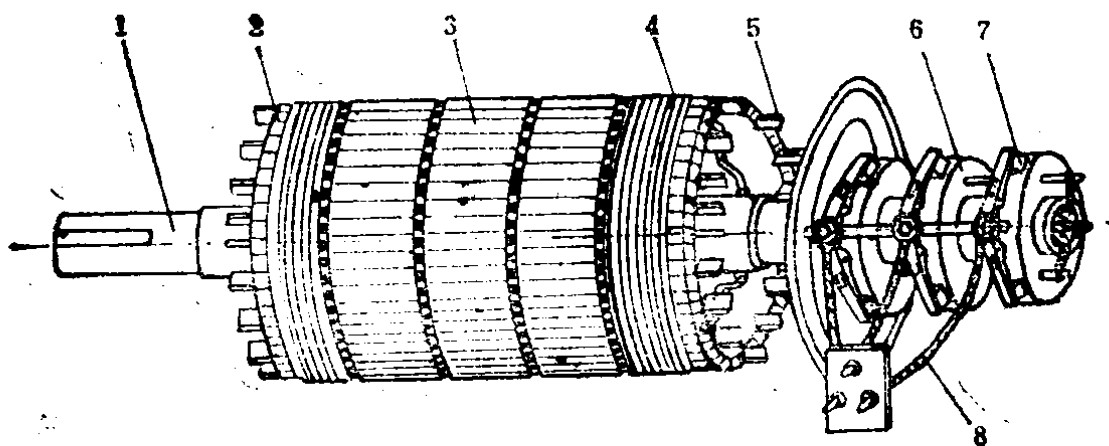


图1-5 绕线型转子

1—转轴 2—绕组 3—铁心 4—绑线 5—风叶 6—集电环
7—电刷 8—引出线

个对称三相绕组，星形接法，三相出线接到转轴上的三个集电环，再通过电刷与外电路联接。这样就可以在转子电路中接入附加电阻或其它控制装置，以改善电动机的起动性能和调速性能。为了减小电刷与集电环的磨损，中等容量以上的绕线型电动机装有举刷装置。当电动机起动以后，可将电刷提起，同时将三个集电环短接。

二、特点

三相异步电动机具有结构简单，运行可靠，维修方便，价格便宜等极为宝贵的优点，因此它得到了最广泛的应用。异步电动机的主要缺点是：功率因数较低，起动电流较大，调速比较困难。异步电动机这些缺点并不影响它的广泛应用。晶体闸流管（简称晶闸管，又称可控硅）的问世与应用，为异步电动机的调速开辟了新的前景。异步电动机的晶闸管变频调速，交流调压调速及电气串级调速已经在一些领域中获得成功的应用。

第二节 工作原理和等效电路

异步电动机的定子上嵌有三相绕组AX、BY、CZ，它们在空间呈对称分布。当通入三相交流电时，就会在定转子气隙中产生“合成磁场”。每相电流和磁场（基波）的方向如图1-6所示。由图可见，合成磁通 ϕ 的方向总是与电流为最大值那一相绕组的轴线方向一致。因此，随着电流最大值依次由A→B→C→A的变化，合成磁通的方向也依次按上述相序而变化，即形成了“旋转磁场”的效应。旋转磁场的速度 n_s 称为同步转速，其数值为

$$n_s = \frac{60f_1}{p} \quad (\text{转/分}) \quad (1-1)$$

式中 f_1 ——电流频率 (赫);

p ——磁极对数。

当转子尚未起动时, 磁通 ϕ 与定转子相交链, 在定转子绕组中感应出电势 E_1 及 E_{20} , 在电势 E_{20} 的作用下, 转子产生电流 I_2 , 电流 I_2 与磁通 ϕ 相互作用而产生转矩, 驱动转子旋转。

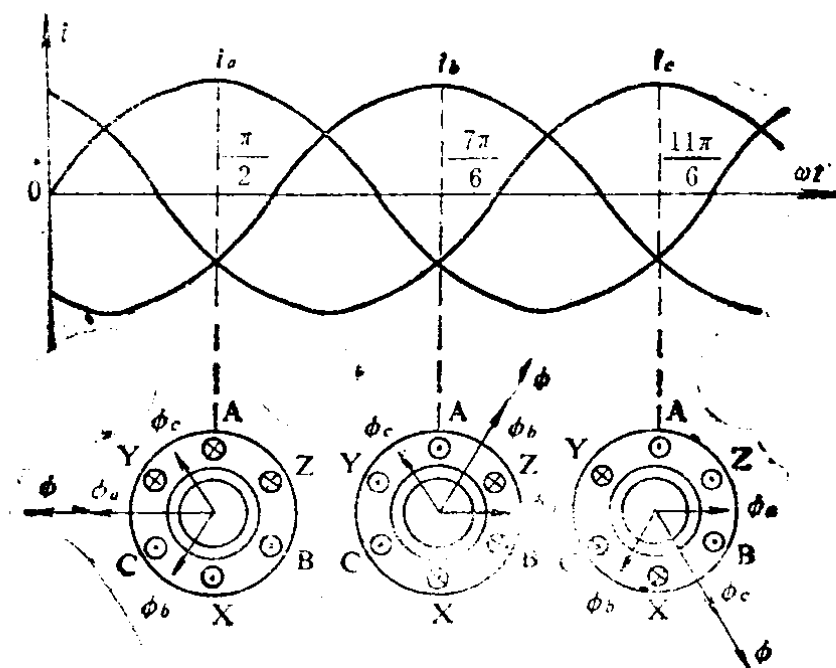


图1-6 异步电动机的旋转磁场

当转子沿旋转磁场方向以转速 n 旋转起来后, 转子与定子旋转磁场的相对速度便减小, 变为 $n_s - n$, 因而转子感应电势 E_2 及其频率 f_2 也要减小, 其值为

$$E_2 = sE_{20} \quad (1-2)$$

$$f_2 = sf_1 \quad (1-3)$$

式中 E_{20} 、 E_2 ——分别为转子未转动时及转动时的相电势;

s ——转差率, 表示转子实际转速 n 落后于旋

转磁场转速 n_s 的相对值, 即

$$s = \frac{f_2}{f_1} = \frac{(n_s - n)}{n_s}$$

在某一转差率下运行时，转子电流为

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \\ &= \frac{E_{20}}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_{20}^2}} \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中 I_2 ——转子相电流；

X_2 ——转子转动时的漏抗，即 $X_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2 = sX_{20}$ ；

X_{20} ——转子不动时的漏抗，即 $X_{20} = 2\pi f_1 L_2$ ，其中 L_2 为转子漏电感。

相应的等效电路（一相）如图1-7a所示。

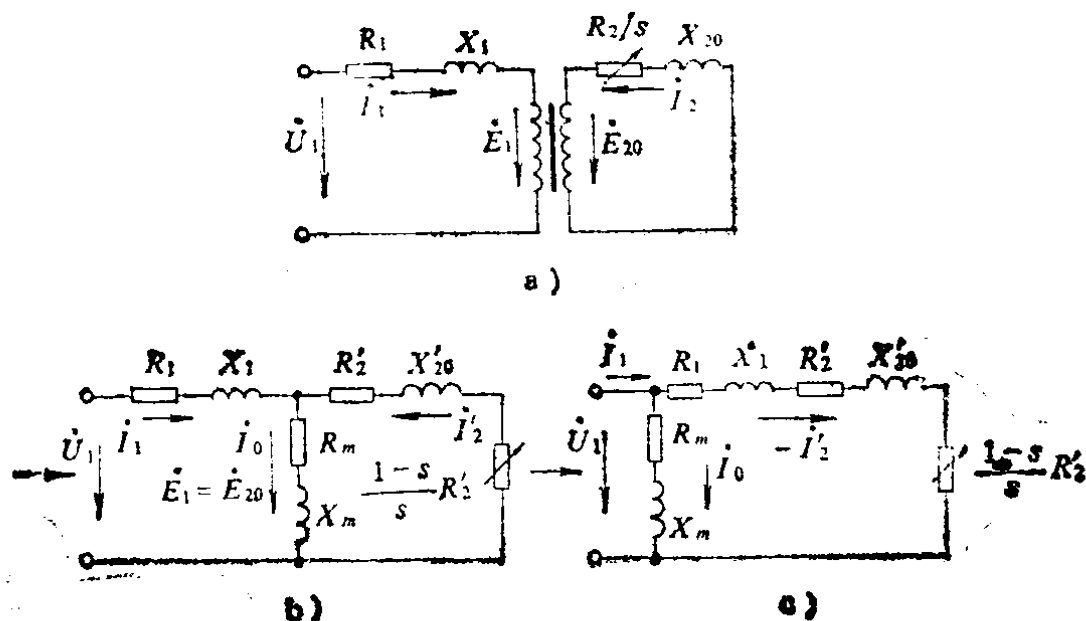


图1-7 异步电动机的等效电路图

a) 等值变压器 b) 等效电路 c) 简化电路

在定子相数相同时，转子各参数量可按下列公式折算到定子侧，即

$$I_2' = I_2 \frac{E_{20}}{E_1} \approx I_2 \frac{U_{20}}{U_1} \quad (1-5)$$

$$R_2' = R_2 \left(\frac{E_1}{E_{20}} \right)^2 \approx R_2 \left(\frac{U_1}{U_{20}} \right)^2 \quad (1-6)$$

$$X_2' = X_2 \left(\frac{E_1}{E_{20}} \right)^2 \approx X_2 \left(\frac{U_1}{U_{20}} \right)^2 \quad (1-7)$$

式中 U_1 ——定子相电压；

U_{20} ——转子相电压。

这样就得到等效电路如图1-7b所示。该电路使我们可以将旋转的异步电动机化为副边电阻为 R_2'/s ($=R_2' + \frac{1-s}{s}R_2'$) 的静止变压器来研究，图中 R_2' 、 X_{20}' 分别相当于副边的电阻及漏抗， $\frac{1-s}{s}R_2'$ 是与转速有关的机械负载的等效电负载。

通常由于定子电阻及漏抗 R_1 、 X_1 很小，其电压降可以忽略，将励磁回路移出，就可以简化成图1-7c的形式，这对于工程实用上已足够准确。由此可得转子换算相电流为

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_{20}')^2}} \quad (1-8)$$

与图1-7b相对应的向量图如图1-8所示。

根据异步电动机的等效电路图，可以归纳出下面几点：

1. 当定转子绕组的电阻及漏抗不变时，异步电动机的阻抗只与转差率 s 有关。当转子未动时 ($s=1$)， $\frac{1-s}{s}R_2' = 0$ ，电动机的阻抗完全由定转子的电阻及漏抗所决定；当转子接近同步转速时 ($s \approx 0$)， $\frac{1-s}{s}R_2' \approx \infty$ ，相当于转子开路，电动机的阻抗决定于磁化分路的阻抗；当转子以与定子旋转

磁场的速度反向旋转时 ($s=2$), $\frac{1-s}{s}R_2' = -R_2'/2$, 电动机的阻抗将小于转子未动时的数值。

2. 电动机从静止到额定转速的范围内, 转子电流频率 f_2 从 f_1 变到近于零的很小值, 频率的变化引起转子回路阻抗的变化。当转子未动时, 转子换算阻抗有最小值; 在接近同步转速时, 则有最大值。

3. 电动机的起动电流仅决定于电源电压及电动机的阻抗, 而与负载无关。对于同一台电动机, 空载起动与带负载起动的起动电流是相同的, 但带负载时其起动时间将增加。

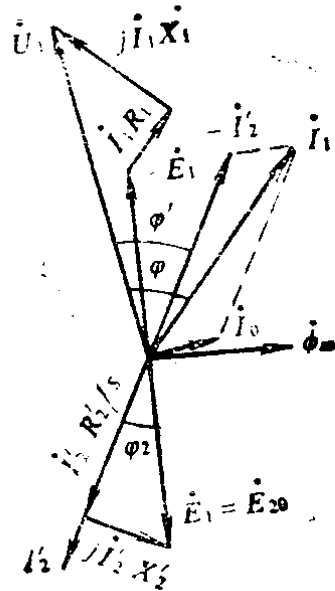


图 1-8 异步电动机向量图

第三节 能量转换和效率

异步电动机是一种把电能转换为机械能的机器。在能量转换过程中, 不可避免地要产生功率损失。通常用能流图表示输入、输出功率及损失功率之间的关系, 如图1-9所示。

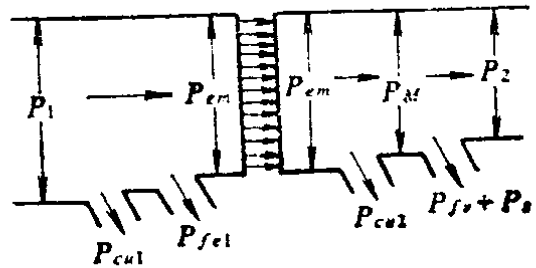


图1-9 异步电动机能流图

电源供给电动机的总功率为

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi \times 10^{-3} \text{ (千瓦)}$$

式中 P_1 ——输入功率 (千瓦);

U_1 ——相电压 (伏);

I_1 ——相电流 (安);

$\cos\varphi$ ——功率因数。

从输入功率中减去定子铜耗 P_{Cu1} 及铁耗 P_{Fe1} , 就得到通过电磁感应关系传递到转子的电磁功率为

$$P_{em} = P_1 - (P_{Cu1} + P_{Fe1}) = P_1 - \Delta P_1 \quad (1-9)$$

式中 P_{em} ——电磁功率;

$\Delta P_1 = P_{Cu1} + P_{Fe1}$ ——定子总损耗。

从转子方面看, 电磁功率等于输出功率 P_2 与风摩耗 P_{fv} 、杂散耗 P_s 及转子铜耗 P_{Cu2} 之和, 即

$$P_{em} = P_2 + P_{fv} + P_s + P_{Cu2} = 3I_2'^2 R_2' / s \quad (1-10)$$

转子铜耗为

$$P_{Cu2} = 3I_2'^2 R_2' \quad (1-11)$$

由式 (1-10) 及式 (1-11) 得

$$\begin{aligned} P_2 + P_{fv} + P_s &= P_{em} - P_{Cu2} = 3I_2'^2 R_2' \left(\frac{1-s}{s} \right) \\ &= P_{em} (1-s) \end{aligned} \quad (1-12)$$

故输出功率为

$$P_2 = P_{em} (1-s) - (P_{fv} + P_s) \quad (1-13)$$

转子铜耗为

$$\begin{aligned} P_{Cu2} &= P_{em} - (P_2 + P_{fv} + P_s) \\ &= P_{em} - P_{em} (1-s) \\ &= P_{em} s = \frac{P_2 + (P_{fv} + P_s)}{1-s} s \end{aligned} \quad (1-14)$$

电动机的效率为

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_{em} (1-s) - (P_{fv} + P_s)}{P_{em} + \Delta P_1} \\ &\quad \times 100\% \end{aligned} \quad (1-15)$$

异步电动机的杂散耗可取输出功率的 0.5%。为了求得风摩耗，可以测绘出空载特性曲线，如图1-10所示。图中 P_0 为空载损耗， I_0 为空载电流， U_0 、 U_N 分别为空载及额定电压， P_0' 为铁耗与风摩耗之和，而 $P_0' = P_0 - P_{0Cu1}$ ，式中 P_{0Cu1} 为空载时定子绕组损耗。在低电压时， P_0' 与 $(U_0/U_N)^2$ 的关系为直线，与纵轴交于 P 点， OP 就是电动机的风摩耗 P_{fv} ， $(P_0' - P_{fv})$ 即为铁耗 P_{Fe1} 。

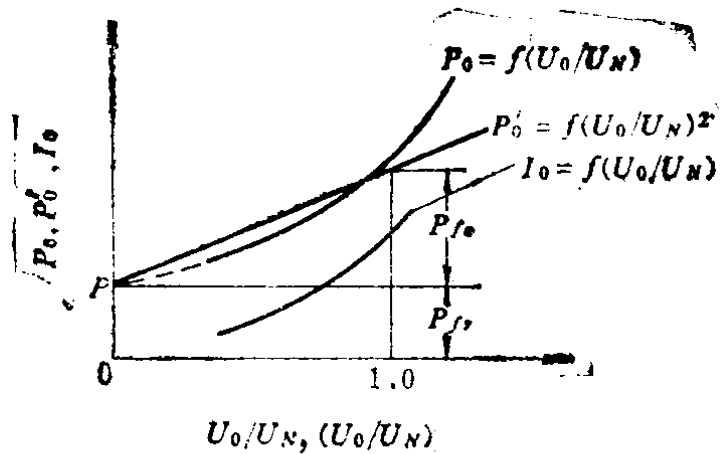


图1-10 空载特性曲线

工厂现场如果限于条件不能测取空载特性曲线，则可取风摩杂散耗为轴功率的 1~2%，已能满足工程计算的要求。

异步电动机的效率随负载而变化，其效率曲线见图1-11。为了求得电动机在某一负载下的效率，可以测定负载下的输入功率及转差率，结合空载试验的数据，即可算出电动

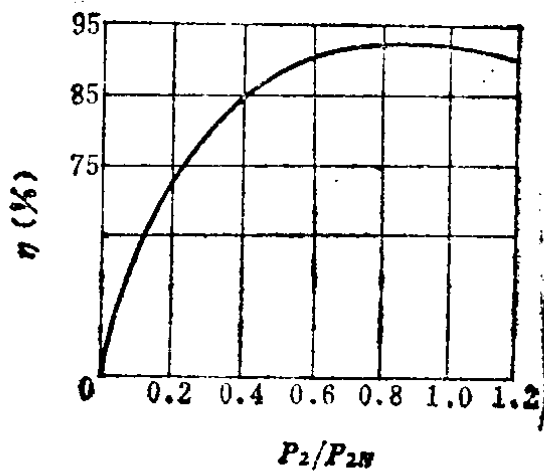


图1-11 异步电动机的效率曲线

机的效率。

例1-1 电动机为JO271-4 22千瓦, 380伏, 42.5安, 1460转/分, $\cos\varphi=0.88$, $\triangle$ 接法。求75%及额定负载下的效率。

解 空载试验数据: $U_0=380$ 伏, $I_0=10$ 安, $P_0=1.1$ 千瓦。定子相电阻 (75°C 时) $R_1=0.425$ 欧。

1. 额定负载时的效率

额定输入功率

$$P_{1N} = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N \times 10^{-3} = \sqrt{3} \times 380 \times 42.5 \times 0.88 \times 10^{-3} = 24.6 \text{ 千瓦}$$

$$\text{额定转差率 } s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} = \frac{1500 - 1460}{1500} = 0.027$$

定子铜耗

$$P_{Cu1} = 3 I_{1N}^2 R_1 \times 10^{-3} = 3 (42.5 / \sqrt{3})^2 \times 0.425 \times 10^{-3} = 0.765 \text{ 千瓦}$$

$$\text{风摩杂散耗 } P_{fv} + P_s = 0.02 P_2 = 0.02 \times 22 = 0.44 \text{ 千瓦}$$

定子铁耗

$$\begin{aligned} P_{Fe1} &= P_0 - P_{Cu1} \left(\frac{I_0}{I_N} \right)^2 - (P_{fv} + P_s) \\ &= 1.1 - 0.765 \left(\frac{10}{42.5} \right)^2 - 0.44 = 0.62 \text{ 千瓦} \end{aligned}$$

$$\text{电磁功率 } P_{em} = \frac{1.02 P_2}{1 - s_N} = \frac{1.02 \times 22}{1 - 0.027} = 23 \text{ 千瓦}$$

$$\text{转子铜耗 } P_{Cu2} = P_{em} s_N = 23 \times 0.027 = 0.62 \text{ 千瓦}$$

$$\begin{aligned} \text{额定效率 } \eta_N &= \frac{P_{em} (1 - s_N) - (P_{fv} + P_s)}{P_{1N}} \times 100\% \\ &= \frac{23 (1 - 0.027) - 0.44}{24.6} \times 100\% \\ &= 89.2\% \end{aligned}$$

计算结果与产品样本的数据基本相同。

2. 75%负载即定子电流 $I_1=32$ 安时的效率

$I_1=32$ 安时, 测得 $P_1=17.1$ 千瓦, $s=0.023$ 。

$$\text{定子铜耗 } P_{Cu1} = 0.765 \left(\frac{32}{42.5} \right)^2 = 0.436 \text{ 千瓦}$$

$$\begin{aligned} \text{电磁功率 } P_{em} &= P_1 - P_{Cu1} - P_{fe1} = 17.1 - 0.436 - 0.62 \\ &= 16 \text{ 千瓦} \end{aligned}$$

$$\text{转子铜耗 } P_{Cu2} = P_{em}s = 16 \times 0.023 = 0.37 \text{ 千瓦}$$

$$\begin{aligned} \text{输出功率 } P_2 &= P_{em} (1-s) - (P_{fv} + P_s) \\ &= 16 (1-0.023) - 0.44 = 15.2 \text{ 千瓦} \end{aligned}$$

$$\text{效率 } \eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{15.2}{17.1} \times 100\% = 89\%$$

上述结果表明, 在75%至额定负载范围内, 有时为了避免繁杂的计算, 取额定负载下的效率已足够准确。

第四节 电磁转矩和机械特性

电磁转矩是异步电动机的重要参量, 是驱动机械旋转的原动力。根据转矩平衡条件

$$M = M_0 + M_2 \quad (1-16)$$

式中 M ——电动机转矩;

M_0 ——空载转矩;

M_2 ——负载转矩。

由能流图可见, 转矩 M_2 与输出功率 P_2 相对应, 转矩 M_0 与风摩杂散耗相对应, 而机械功率 $P_M = P_2 + (P_{fv} + P_s)$, 故

$$P_M = P_2 + P_{fv} + P_s = M_2 \Omega + M_0 \Omega = M \Omega \text{ (瓦)} \quad (1-17)$$

式中 $\Omega = \frac{2\pi}{60} n$ 是转子角速度 (弧度/秒)。