

高等学校教材

工业用电设备

上海电力学院 罗廷璇 编

水利电力出版社

高等学校教材

工业用电设备

上海电力学院 罗廷璇 编

水利电力出版社

解 释 学 习 指 南

内 容 提 要

本书针对几种在工业中被广泛应用的用电设备,如三相异步电动机、泵、风机、工业电炉、电焊机、照明、制冷、空气调节、电解和电镀等典型直流用电设备的工作原理、运行特性及其节电途径等作了定性的阐述。在本书的最后一章,还介绍了用电各具特点的八类工业的生产流程和用电概况。这八类工业的共同点是电力负荷大、用电量

大。

本书是为大专“用电管理与监察专业”编写的教材,亦可作为电业职大有关专业的教学用书和供有关专业的教师、工程技术人员作参考和自学之用。

高等学校教材

工业用电设备

上海电力学院 罗廷策编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 17.25印张 390千字

1989年11月第一版 1989年11月北京第一次印刷

印数 0001—5920 册

ISBN 7-120-00757-2/TM·222

定价3.50元

前 言

对从事用电管理与用电监察的工程技术人员来说，了解与掌握用户主要用电设备的结构、工作原理、特性、用途，以及工厂的生产流程、所用用电设备及其运行方式、负荷特点、对供电的要求等等是必须的。否则就很难设想能做好本职工作，当然更谈不上指导与协助用户开展安全用电、计划用电和节约用电。因此，我院从“用电管理与监察专业”成立伊始，就把“工业用电设备”作为本专业的一门主课来安排。本教材——《工业用电设备》就是为这门课程专门编写的。

在本教材中，我们介绍了几种量多面广、用电量大的设备：三相异步电动机、泵、风机、工业电炉、电焊机、电解和电镀（作为直流典型负载），照明、制冷与空气调节，和负荷大、用电量大的用电各具特点的八类工厂：造纸、棉纺织、烧碱、电石、合成氨、水泥、钢铁、机械制造等（当然比较有代表性的工厂远不止上述八类）的生产流程与用电概况。

由于本专业人员所从事的工作既不是设备的设计制造，也不是进行具体的运行操作，所以本教材所介绍的上述各项内容都以定性为主。

本教材是在自编《工业用电设备》讲义的基础上，根据多次教学实践的心得作出修改的。在修编过程中，得到原水利电力部电力生产司高级工程师汪又雄的关心和支持，后又蒙其仔细审阅了全稿，并提出了许多宝贵意见和建议，编者在此表示衷心的感谢。

由于此次修编时间较紧，调研工作做得很不够，对新的信息收集得也极少，有些内容势必未能跟上生产的发展；其次是内容处理上也定有许多不妥之处。为此祈请读者指正。

编 者

1988年9月

目 录

前 言

第一章 电力机械 设备	1
1-1 三相异步电 动机	1
1-2 泵	28
1-3 风 机	44
1-4 泵与风机的节电 途径和措施	52
第二章 工业电炉	58
2-1 电 阻 炉	58
2-2 电 弧 炉	78
2-3 感应炉和感 应加热设备	94
2-4 其它几种电炉的简介	102
第三章 电焊机	108
3-1 电弧焊机	108
3-2 电阻焊机	148
3-3 其它电焊机的简介	154
第四章 直流用电设备及直流电源	156
4-1 电 解	156
4-2 电 镀	161
4-3 直流电源	165
第五章 电气照明	178
5-1 光学基本知识	178
5-2 电光源	182
5-3 照明器	194
5-4 工厂照明	193
5-5 电气照明的节约用电	206
第六章 制冷与空气调节	210
6-1 制冷的基本原理	210
6-2 几种制冷系统	211
6-3 制冷剂与冷媒	212
6-4 制冷系统中各主要部件的简介	212
6-5 空气调节	216
6-6 空调系统的节电途径	222
第七章 几类工业的生产流程与用电 概况	224
7-1 造纸工业的生产流程与用电	224

7-2 棉纺织厂的生产流程与用电·····	232
7-3 隔膜法烧碱的生产流程与用电·····	237
7-4 电石的生产流程与用电·····	243
7-5 合成氨的生产流程与用电·····	247
7-6 水泥厂的生产流程与用电·····	252
7-7 钢铁冶炼的生产流程与用电·····	256
7-8 机械制造工业的生产流程与用电·····	263
参考文献及资料·····	269

第一章 电力机械设备

在现代生产体系中，各种生产机械的原动机几乎都由电动机来担任。这种用电动机作原动机的机械设备，我们在这里统称之为电力机械。至于生产机械之所以要用电动机作原动机，是因为电动机与其它形式的原动机相比较，具有一系列的优点，例如：

(1) 各种不同类型的电动机具有各种不同的机械特性，可以满足各类生产机械的需要；

(2) 各类电动机都能自动快速适应负载的变化，而毋须人为的调节；

(3) 电动机的操作简单、控制（起动、反转、制动、调速）方便，有利于自动化；

(4) 电动机结构简单（特别是鼠笼式异步电动机）、价格低廉、效率高，易于维修保养；

(5) 电动机的规格齐全，它的容量小到几瓦，大到几万千瓦。并且有不同的电压等级可供选用。

此外，由电动机传动的生产机械可以采用集中传动、单独传动、多电动机传动等多种传动方式，这是其它类型的原动机无法与之比拟的。

各类电动机中应用最广泛的是三相异步电动机，而生产体系中以电动机作原动机的机械，无论从数量或用电量，以及从单机功率来看，泵和风机都占有较多和较大的比例。为此，本章就仅仅介绍三相异步电动机、泵和风机。

1-1 三相异步电动机

三相异步电动机的基本部件是定子和转子。

定子由定子铁芯（用硅钢片叠成）、定子三相绕组和机座组成，如图1-1所示。

转子由装在转轴上的转子铁芯（用硅钢片叠成）、转子绕组组成。转子绕组有鼠笼式和绕线式两种结构，而鼠笼式绕组又分为单鼠笼、双鼠笼和深槽式。小容量鼠笼式转子一

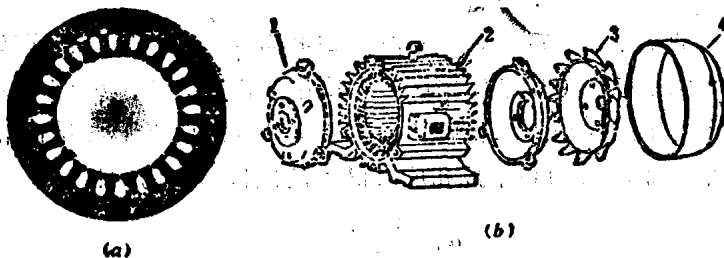


图 1-1 三相异步电动机定子

(a) 定子铁芯；(b) 定子

1—端盖；2—定子；3—风叶；4—风罩

般用铸铝绕组，而100kW以上的电动机常用铜条嵌入转子槽内构成转子绕组。转子结构如图1-2所示。

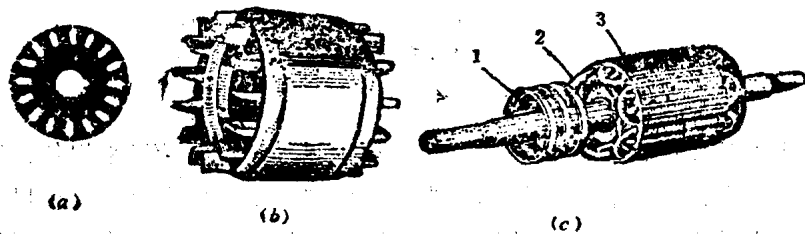


图 1-2 转子结构
(a)转子钢片；(b)铸铝转子；(c)绕线式转子
1—滑环；2—转子绕组；3—转子铁芯

电动机的定子是固定不动的部分，主要用来产生磁场，向电源吸取电能；而转子是旋转部分，它将定子传递过来的电能转换成从轴上输出的机械能。为保证转子的正常运转，电动机的定子和转子之间留有空隙，称空气隙。为考虑到电动机的性能，空隙又不能过大，中小型电动机的空气隙一般为0.2~2mm。绕线式异步电动机的剖面图如图1-3所示。

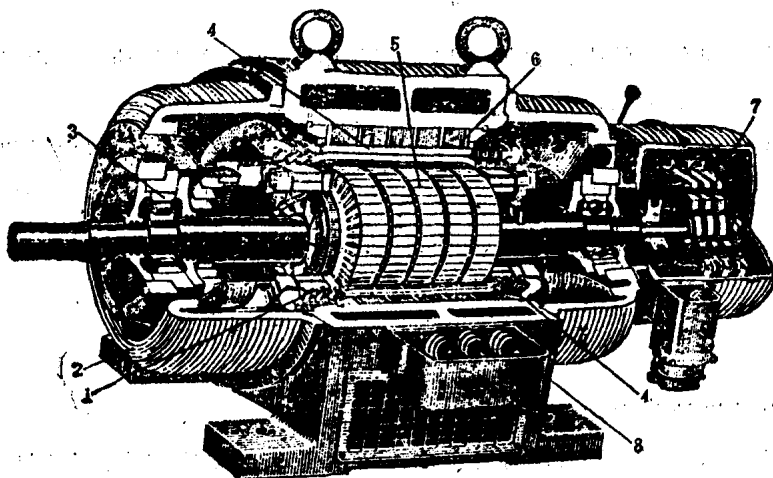


图 1-3 绕线转子异步电动机剖面图
1—转子绕组；2—端盖；3—轴承；4—定子绕组；5—转子；6—定子；7—集电环；8—出线盒

一、三相异步电动机的基本原理和电路方程

三相异步电动机的定子三相绕组通以对称三相电流以后，产生三相旋转磁场。三相旋转磁场的大小取决于绕组结构（包括绕组匝数、绕组结构系数）、旋转磁场的磁极数、铁芯的导磁系数和外加电压的大小。三相旋转磁场的旋转方向取决于电源的相序。而三相旋转磁场的转速 n_s ，则取决于电源的频率 f_1 和旋转磁场的磁极对数 p ，即

$$n_s = \frac{60f_1}{p} \quad (1-1)$$

式中 n_s ——旋转磁场的同步转速。

旋转磁场在空间以 n_s 的转速旋转时，切割定子绕组和转子绕组，并在绕组中感应出

电势。定子绕组每相的感应电势为

$$E_1 = 4.44 f_1 w_1 K_1 \Phi \quad (1-2)$$

式中 w_1 —— 定子绕组每相匝数;

K_1 —— 定子绕组系数;

Φ —— 旋转磁场磁通的最大值。

转子静止时, 转子绕组每相的感应电势为

$$E_{20} = 4.44 f_1 w_2 K_2 \Phi \quad (1-3)$$

式中 w_2 —— 转子绕组每相匝数;

K_2 —— 转子绕组系数。

利用式 (1-2) 和式 (1-3), 可以得到 E_{20} 与 E_1 之间的关系为

$$E_{20} = \frac{K_2 w_2}{K_1 w_1} E_1 \quad (1-4)$$

如略去定子电路的阻抗压降, 定子电势与电源电压间有以下的关系

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 w_1 K_1 \Phi \quad (1-5)$$

将上式代入式 (1-4) 后可得

$$E_{20} \approx \frac{K_2 w_2}{K_1 w_1} U_1 = k_e U_1 \quad (1-6)$$

式中 k_e —— 异步电动机的电势比, $k_e = \frac{K_2 w_2}{K_1 w_1}$ 。

异步电动机运行时, 转子绕组处于通路状态, 因此在电势的作用下, 就有电流通过。转子静止时, 通过转子的电流 I_{20} 可用下式表示

$$\left. \begin{aligned} I_{20} &= \frac{E_{20}}{\sqrt{r_2^2 + x_{20}^2}} \\ x_{20} &= 2\pi f_1 L_{2\sigma} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

式中 r_2 —— 转子绕组每相电阻;

x_{20} —— 转子静止时, 由转子绕组每相漏感 $L_{2\sigma}$ 引起的漏电抗。

实际上, 转子有电流通过时, 它与旋转磁场的相互作用会产生转矩, 使转子以低于 n_s 的转速 n 旋转。两者之差 $\Delta n = n_s - n$, 称为转差。实用中, 是以转差与同步转速之比的大小来反映旋转磁场和转子间相对运动的大小, 我们称这个比值为转差率, 用 s 表示

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1-8)$$

转差率是分析异步电动机运行情况的一个重要参数。在满载时, 小型电动机的转差率约为 4%, 大型电动机的转差率约在 (1.5~2)% 左右。

转子旋转以后, 转子绕组切割旋转磁场的速度由 n_s 变为 $n_s - n$, 因此转子绕组中感应电势的频率不再是 f_1 , 而是与 Δn 成正比的 f_2 。转子电势频率 f_2 与 f_1 之间具有以下关系

$$f_2 = \frac{p \Delta n}{60} = \frac{p(n_s - n)}{60} = \frac{p(n_s - n)n_1}{60n_1} = s f_1 \quad (1-9)$$

此时转子电势 E_2 (转子旋转以后的转子电势)为

$$E_2 = 4.44 f_2 w_2 \Phi = 4.44 s f_1 w_2 \Phi = s E_{20} \quad (1-10)$$

而转子电流则为

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}} = \frac{s E_{20}}{\sqrt{r_2^2 + (s x_{20})^2}} = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_{20}^2}} \quad (1-11)$$

$$x_2 = 2\pi f_2 L_{2\sigma} = 2\pi s f_1 L_{2\sigma} = s x_{20}$$

式中 x_2 —— 转子旋转后的转子漏电抗。

转子电路的功率因数 $\cos\varphi_2$ 为

$$\cos\varphi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (s x_{20})^2}} = \frac{r_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_{20}^2}} \quad (1-12)$$

从以上各式可以看出, 转子电路的各个物理量, 如电动势 E_2 、电流 I_2 、频率 f_2 、漏抗 x_2 和功率因数 $\cos\varphi_2$, 都与转差率 s 有关, 亦即与转速 n 有关, 与电动机的运行状况有关。 I_2 和 $\cos\varphi_2$ 与转差率的关系曲线如图1-4所示。

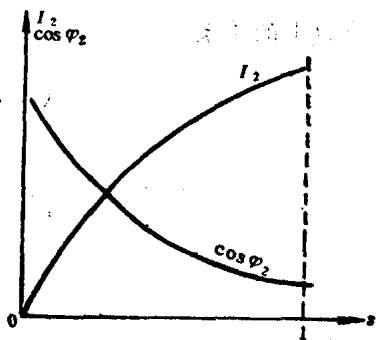


图 1-4 I_2 、 $\cos\varphi_2$ 与 s 的关系曲线

图 1-4 中的两条曲线说明: 在电动机起动的瞬间, $n = 0$, 即 $s = 1$, 转子与旋转磁场间的相对转速最大, 转子感应电势为 E_{20} , $f_2 = f_1$, 转子电抗为 x_{20} , 所以 $\cos\varphi_2$ 为最小, 而 I_2 却最大; 随着转速的增加, s 减小, sE_{20} 、 f_2 和 sx_{20} 均随之减小。于是 $\cos\varphi_2$ 增大, I_2 减小。

电动机负载时, 定子电流 I_1 为

$$I_1 = I_0 + (-I_2') \quad (1-13)$$

$$\left. \begin{aligned} I_2' &= \frac{m_2 K_2 w_2}{m_1 K_1 w_1} I_2 = \frac{1}{k_i} I_2 \\ k_i &= \frac{m_1 K_1 w_1}{m_2 K_2 w_2} \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

上二式中 I_0 —— 空载电流, 主要用来产生定子旋转磁场, 电动机负载变动时, I_0 基本不变;

I_2' —— 归算到定子侧后的转子电流有效值;

m_1 、 m_2 —— 分别为定子绕组和转子绕组的相数;

k_i —— 变流比。

负载增加时, I_2 或 I_2' 增加。由于 I_0 基本不变, 所以随着负载增加, I_1 也随之增加。

根据式(1-6)和式(1-11)还可以得到如下的关系式, 即

$$I_2 = \frac{s k_i U_1}{\sqrt{r_2^2 + (s x_{20})^2}} \quad (1-15)$$

上式说明 I_2 不仅与转差率 s 有关, 还与定子绕组的外加电压成正比。当然, I_1 几乎也有同样的关系。

二、三相异步电动机的功率、转矩和机械特性

异步电动机是一种换能装置，它将输入到定子的电能通过电磁作用传递给转子，转换成从转子轴上输出的机械能。

(一) 功率及其变换过程

由电源输入到定子绕组的功率 P_1 中，有一小部分消耗在定子绕组的电阻 r_1 上，称定子铜耗 p_{Cu1} ；另有一小部分消耗于定子铁芯的磁滞损耗和涡流损耗，总称定子铁耗 p_{Fe} 。余下的绝大部分借助于旋转磁场，由定子传送到转子。这部分功率称异步电动机的电磁功率 P_M 。以上各量之间的关系是

$$P_1 - p_{Cu1} - p_{Fe} = P_M \quad (1-16)$$

对三相异步电动机而言

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1 \quad (1-17a)$$

$$p_{Cu1} = 3I_1^2 r_1 \quad (1-17b)$$

$$p_{Fe} = 3I_1^2 r_m \quad (1-17c)$$

$$P_M = 3E'_2 I'_2 \cos\varphi'_2 = 3I_1^2 \frac{r'_2}{s} \quad (1-17d)$$

式中 U_1 、 I_1 、 I_0 ——分别为定子相电压、定子相电流、定子空载相电流；

$\cos\varphi_1$ ——定子功率因数；

E'_2 、 I'_2 、 r'_2 和 $\cos\varphi'_2$ ——归算到定子侧的转子电势、电流、电阻和功率因数；

r_m ——代表与定子铁耗相对应的等值电阻。

电磁功率传递到转子后，伴随着产生转子电流，并在转子电阻 r_2 上引起转子铜耗 p_{Cu2} 。由于转子铁芯中磁通变化的频率很低，所以转子铁耗可以略去不计。这样，电磁功率扣除转子铜耗以后，就是驱使转子转动的全部机械功率 P_d 。

$$P_d = P_M - p_{Cu2} \quad (1-18)$$

$$p_{Cu2} = 3I_2^2 r_2 = m_s I_1^2 \frac{r'_2}{s} \quad (1-19)$$

以式(1-17d)代入上式后，得

$$P_d = (1-s)P_M = P_M - sP_M \quad (1-20)$$

与式(1-18)相比较，可知 $sP_M = p_{Cu2}$ 。由于转子铜耗取决于转差率，所以又称转子铜耗为转差功率，用 P_s 表示

$$P_s = sP_M = p_{Cu2} \quad (1-21)$$

总机械功率 P_d 在补偿了机械损耗 p_d 和附加损耗 p_f 以后，余下的就是轴上输出的净机械功率 P_2 ，即

$$P_2 = P_d - p_d - p_f \quad (1-22)$$

上述异步电动机的能量传递过程可用图1-5所示的能流图来表示。

异步电动机的效率 η 可表示为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + p_{Cu1} + p_{Fe} + p_{Cu2} + p_d + p_f} \quad (1-23)$$

异步电动机的损耗可分为两类：一类称不变损耗，包括 p_{Fe} 、 p_d ；一类称可变损耗，

包括 p_{cu1} 、 p_{cu2} 、 p_f 。可变损耗随输出功率 P_2 的增加而增加。通过数学证明,当可变损耗等于不变损耗时,异步电动机的效率达到最大。随着负载的继续增加,可变损耗增加得很快,效率就降低。中小型异步电动机的最高效率出现在3/4的额定负载时。电动机的容量越大,效率就越高。异步电动机的效率特性

$\eta = f(P_2)$ 的曲线如图1-6所示。

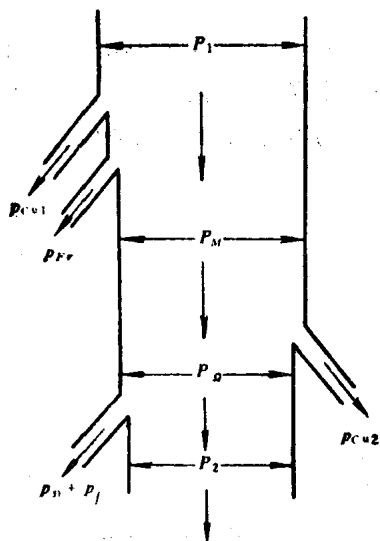


图 1-5 异步电动机的能流图

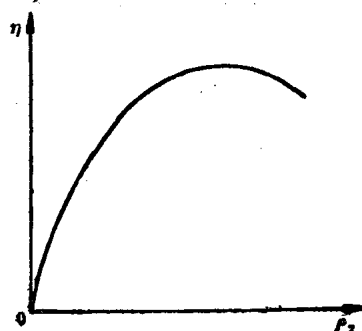


图 1-6 异步电动机的效率特性

(二) 转矩和机械特性

电动机的机械功率等于相应的转矩与机械角速度的乘积。所谓相应的机械角速度,就是指正比于旋转磁场转速 n_s 的同步角速度 Ω_s ($\Omega_s = 2\pi n_s/60$)和正比于转子转速 n 的机械角速度 Ω ($\Omega = \frac{2\pi n}{60}$)。

根据式(1-20) $P_d = (1-s)P_M = \frac{n}{n_s} P_M = \frac{\Omega}{\Omega_s} P_M$ 得到

$$\frac{P_d}{\Omega} = \frac{P_M}{\Omega_s} \quad (1-24)$$

上式中 $\frac{P_M}{\Omega_s}$ 即为与电磁功率相应的电磁转矩 M ,即

$$M = \frac{P_M}{\Omega_s} \quad (1-25)$$

同样,负载转矩 M_2 、空载转矩 M_0 分别为

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega} \quad (1-26a)$$

$$M_0 = \frac{p_0 + p_f}{\Omega} \quad (1-26b)$$

以上各式中:功率的单位为W;角速度的单位为rad/s;转矩的单位为N·m。

在以上众多的转矩中,我们关心的是电磁转矩。通过数学运算,可推导出电磁转矩的多种数学表达式,如

$$M = C_M \Phi I_1 \cos \varphi_1 \quad (1-27a)$$

或

$$M = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_{20})^2 \right]} \quad (1-27b)$$

或

$$M = \frac{2M_m}{\frac{s}{s_L} + \frac{s_L}{s}} \quad (1-27c)$$

上三式中 C_M ——电动机的转矩系数，与电机的结构有关；

p ——旋转磁场的磁极对数；

m_1 ——定子绕组相数；

x'_{20} ——归算到定子侧的转子漏抗；

M_m ——电动机的最大转矩（见图1-7）；

s_L ——电动机的临界转差率（见图1-7）。

上三式中，式（1-27c）为实用表达式，利用产品目录的额定功率 P_n 、额定转速 n_n 和过载系数 λ_m 可以很方便地求得 M 值。因为

$$M_m = \lambda_m M_n = \lambda_m \times 9550 \frac{P_n}{n_n} \quad (1-28)$$

$$s_L = s_n (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) \quad (1-29)$$

$$s_n = \frac{n_n - n_s}{n_s} \quad (1-30)$$

而利用式（1-27a）、（1-27b）可以对转矩特性 $M=f(s)$ 和机械特性 $n=f(M)$ 进行定性分析。转矩特性和机械特性分别如图1-7、图1-8所示。

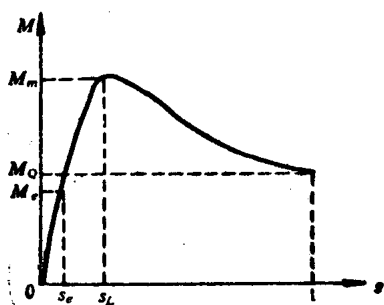


图 1-7 转矩特性 $M=f(s)$

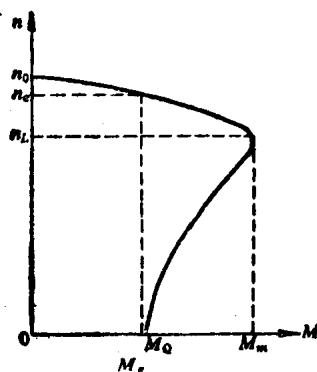


图 1-8 机械特性 $n=f(M)$

图中 M_n 、 s_n 、 n_n 分别为电动机的额定转矩、额定转差率和额定转速； M_m 为最大转矩；对应于最大转矩时的转差率称临界转差率 s_L ，当电动机的转差率大于临界转差率时，电动机就不能稳定运行； n_s 为理想空载转速，即同步转速； M_0 为起动转矩。

在 $M > 1.5M_n$ 时，转差率通常不超过 $0.01 \sim 0.1$ [或 $n = (0.99 \sim 0.9)n_s$]，这段特性曲线几乎是一条直线。由于转差率或转速在负载变化时变化不大，所以说异步电动机具有硬特性。

特性曲线在 n_0 到 n_L 或 $s=0$ 到 $s=s_L$ 的这一区间是电动机的稳定工作区, 曲线的其余区间是不稳定区。电动机只有在稳定区才能正常运行。

以上两条特性曲线称为自然特性。如人为地改变加在定子绕组上的电压 U_1 或改变转子回路的电阻 r_2 (只有绕线式电动机才有此可能), 就可获得人工机械特性, 它们分别如图1-9(a)、(b)所示。

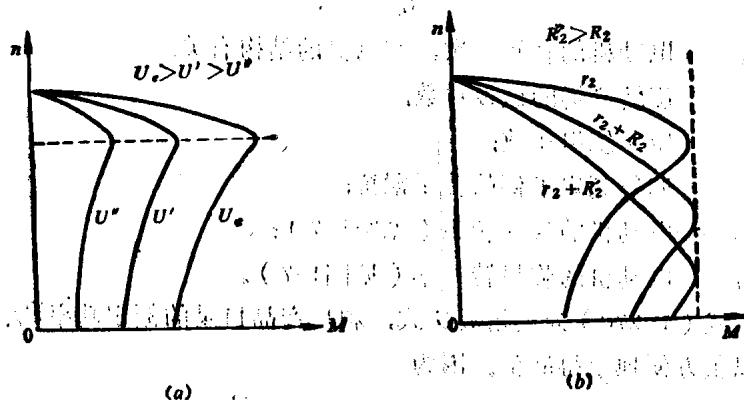


图 1-9 异步电动机的人工机械特性
(a)不同 U_1 时; (b)不同转子电阻时

由于最大转矩[利用 s_L 代入式(1-26b)求得]

$$M_m = \frac{m_1 P}{4\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2}{r_1 \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (1-31)$$

即最大转矩 M_m 与 U_1^2 成正比, 当电压降低20%时, 最大转矩约下降35%。因最大转矩与转差率无关, 所以临界转差率不受电压的影响。

当转子回路中加入 R_2 以后, 由于最大转矩与转子回路的电阻无关, 所以 M_m 不变。而临界转差率(令 $\frac{dM}{ds} = 0$ 求得)

$$s_L = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (1-32)$$

与 r_2' 有关, 所以随着转子回路电阻的增加, s_L 也随之增大, 即出现最大转矩时的转差率增大, 转速降低。从图中亦可看出, 随着转子电阻的增大, 电动机的机械特性变软。

三、三相异步电动机的起动

从电动机接通电源到进入正常运行的过程称为起动。不同类型的电动机, 起动时存在的问题不同, 其起动方法也各异。对三相异步电动机而言, 有以下一些起动方法。

(一) 直接起动

直接起动是在定子绕组上直接加上额定电压的一种起动方法。

电动机在刚接通电源起动时, 由于转子尚未转动, $n=0$, $s=1$, 所以转子的启动电流

$$I_{1,0} = \frac{sE_{20}}{\sqrt{r_1^2 + (sx_{20})^2}} = \frac{E_{20}}{\sqrt{r_1^2 + x_2'^2}},$$

比正常运行时(s 很小)的 I_1 要大得多。反映到定子侧, 此时定子的启动电流 $I_{1,0}$ 一般约为额定电流的4~7倍, 某些鼠笼式电动机甚至大到8~

12倍。这样大的电流对经常起动的电动机是特别不利的；另一方面，由于这样大的电流流经变压器与供电线路时产生相当大的电压损耗，使电压降显著增加，从而影响了接在同一电源上的其它负载的正常工作。所以除对小功率（小于7.5kW）的电动机允许直接起动以外，对功率大于7.5kW的电动机，只有在满足下列条件时，才可以直接起动。条件是

$$\frac{I_{1q}}{I_n} \leq \frac{3}{4} + \frac{\text{电源变压器容量(KVA)}}{4 \times \text{起动电动机的容量(KVA)}} \quad (1-33)$$

式中 I_{1q} ——定子起动电流（线值）；

I_n ——电动机的额定电流。

（二）降压起动

降压起动是降低直接加在定子绕组上的电压的一类起动方法。

1. 星-三角(Y-Δ)起动

凡正常运行时定子绕组作三角形（Δ）连接的电动机，均可采用星-三角起动，其接线如图1-10所示。起动时，将定子绕组接成星形，待电动机的转速接近正常运行转速时，再把定子绕组改接成三角形。

星形起动时，加在定子绕组上的电压与通过绕组的电流只有三角形起动（直接起动）时的 $1/\sqrt{3}$ ；星形起动时的线电流与相电流是相等的，而三角形起动时，线电流是相电流的 $\sqrt{3}$ 倍。因此，星形起动时的线电流只有三角形起动时的线电流的1/3。由于转矩与定子电压的平方成正比，所以起动转矩 M_q 也只有三角形起动时的1/3。因此星-三角形起动只适用于空载或轻载起动的场合。

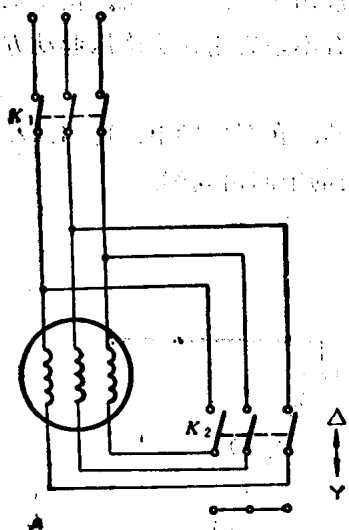


图 1-10 星-三角形起动的原理接线图

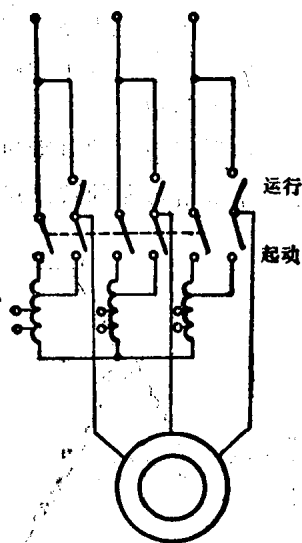


图 1-11 自耦（变压器）补偿起动的原理接线图

2. 自耦补偿起动

自耦补偿起动是利用自耦变压器降低加到定子绕组的电压，以减小起动电流。待起动结束，把自耦变压器切除，让电动机在全压下运行。其接线如图1-11所示。

起动时，把开关投向“起动”位置，电源电压经自耦变压器接到电动机的定子绕组，

电动机在降压下起动。当电动机转速接近正常运行转速时，再将开关转换到“运行”位置，把自耦变压器切除，电动机在全压下投入正常运行。

设电动机在额定电压下起动时的起动电流为 I_0 ，经变压比为 K_A 的自耦变压器次级的起动电流 $I_{02} = K_A I_0$ ，而变压器初级的电流为 $I_{01} = K_A I_{02}$ ，于是得 $I_{01} = K_A^2 I_0$ ，亦即经自耦变压器起动时，电源提供的起动电流仅为直接起动时的 K_A^2 倍（ $K_A < 1$ ）。由于转矩与

电压平方成正比，所以起动转矩也为直接起动时 K_A^2 倍。

即起动电流和起动转矩按同样的比例减小。

为了满足不同负载的要求，自耦变压器的次级绕组一般有三档抽头，分别为电源电压的40%、60%和80%（或55%、64%和73%），以供选用。

3. 电阻或电抗降压起动

这是利用电阻或电抗降低加在电动机定子绕组上的电压来进行起动的一种方法。电阻降压起动的原理接线如图1-12所示。如把图1-12中的电阻换成电抗器，就成为电抗降压起动的原理接线。

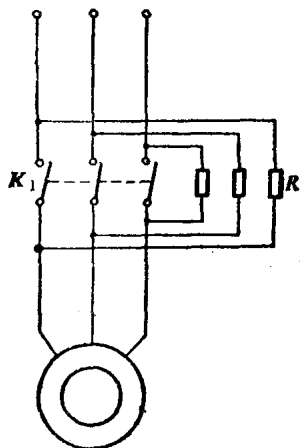


图 1-12 电阻降压起动的原理接线图

起动时，将开关 K_1 断开，把电阻串入定子电路，起动电流在电阻上产生的压降，使作用在定子绕组上的电压 $U' = KU$ （ K 为电阻降压比， $K < 1$ ），因此起动电流 I'_0 仅为直接起动时的起动电流 I_0 的 K 倍。但起动转矩 M'_0 却降为直接起动时 M_0 的 K^2 倍。

电抗降压起动通常用于高压电动机；电阻降压起动一般用于低压电动机。由于电阻要消耗能量，所以实际上用得不多。总之，起动较频繁的场合不适宜用这类降压起动方法。

4. 延边三角形起动

作延边三角形起动用的电动机，每相绕组有三个出线端，在图1-13中，1、4、2、5、3、6分别为三相绕组每相的首末端；7、8、9则为每相绕组的中间出线端。

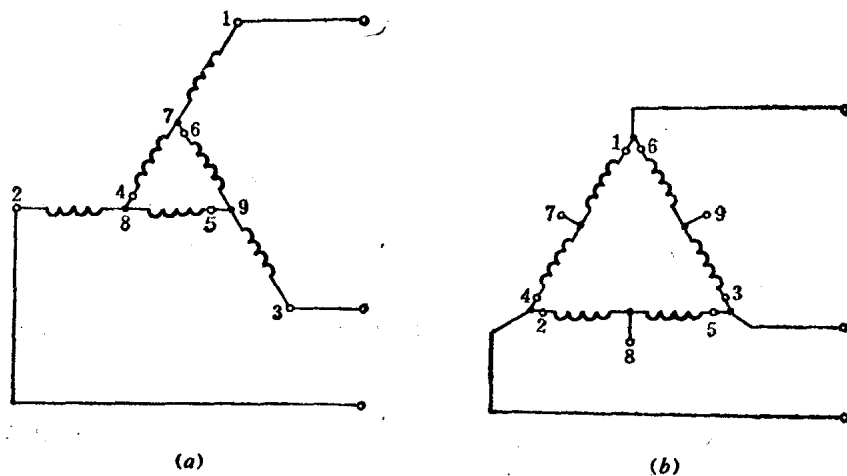


图 1-13 延边三相绕组的原理接线图

(a) 起动时三相绕组的连接；(b) 正常运行时三相绕组的连接

起动时, 定子三相绕组接成如图1-13(a)所示。从图中可以看出, 三个绕组中的一部分组成 Δ 连接, 另一部分作为 Δ 三条边的延长线, 所以这种接法称延边三角形连接。延边 Δ 的三条延长线的终端与三相电源相连。三相绕组接成延边 Δ 后, 绕组的相电压降低, 起动电流减小。它的起动电流介乎 Δ 形直接起动与 Y 形降压起动之间。起动结束后, 将7、8、9三端空着, 1、2、3三端分别与6、4、5三端相连后接到电源, 如图1-13(b)所示。

延边三角形起动具有体积小, 重量轻, 允许经常起动和节省有色金属和黑色金属等优点。

(三) 绕线式异步电动机的起动

绕线式异步电动机也可以利用上述的降压起动方法, 但实用上都是在转子绕组中串入起动变阻器来起动的。根据所用变阻器的不同, 有以下两种方法:

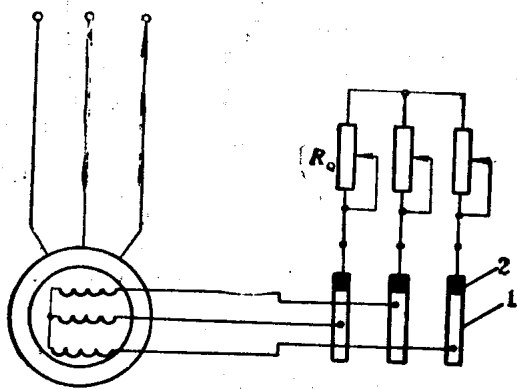


图 1-14 绕线式异步电动机转子串接变阻器起动的原理接线图
1—滑环; 2—电刷

1. 转子串接变阻器起动

转子串接变阻器起动的原理接线如图1-14所示。

这里所用的变阻器是指用金属电阻丝材料制成的可变电阻 R_0 。它通过电刷、滑环与转子三相绕组相连。刚起动时, 变阻器调在电阻为最大的位置, 随着电动机转速的增加, 逐步减小电阻, 直到将电阻全部切除 ($R_0 = 0$), 起动过程结束, 电动机进入正常运行。

转子串接变阻器起动, 既可减小起动电流, 还能增大起动转矩, 常用于功率较大的重载电动机起动。

2. 转子串接频敏变阻器起动

用上述转子串接变阻器起动时, 由于电阻的改变不能做到很均匀, 因此在逐段切除电阻时, 转矩变化较大。特别在起动大功率电动机时, 转矩的变化会引起较大的机械冲击。如果采用频敏变阻器, 则上述缺点可以得到克服。

频敏变阻器实际上是一个特殊的三相变压器, 其结构原理如图1-15(a)所示。它的铁芯用6~12mm甚至更厚的钢板组成, 钢板间互不绝缘, 绕组接成星形。铁芯的上轭可以上下移动, 用以调节上轭与固定铁芯间的空隙大小。

频敏变阻器的等效电路如图1-15(b)所示。图中 r_1 为频敏变阻器绕组的电阻, X_m 为绕组的电抗, r_m 是反映钢芯损耗的等效电阻。由于频敏变阻器的钢芯铁片较厚, 所以 r_m 较一般电抗器大。

串接频敏变阻器起动与串接变阻器起动的原理接线相似, 只要将图1-14中的 R_0 拆去, 代之以频敏变阻器即成。

在电动机刚起动时, 转子电路的频率与定子电源频率相同, 随着转子转速的不断增加, 转子电路的频率不断减小。当电动机进入正常运行时, 转子电路的频率 $f_2 = sf_1 \leq 1 \sim$