



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定
普通高等教育“十一五”国家级规划教材修订版
机械工业出版社精品教材

(电气工程及自动化类专业)

电机与电气 控制技术

第3版

许 蓼 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

赠 电 子 课 件
习 题 详 解 等

目录

第3版前言	
第2版前言	
第1版前言	
绪论	1
第一章 变压器	4
第一节 变压器基本工作原理和结构	4
第二节 单相变压器的空载运行	8
第三节 单相变压器的负载运行	10
第四节 三相变压器	15
第五节 其他用途的变压器	23
习题	27
第二章 三相异步电动机	30
第一节 三相异步电动机的结构与工作原理	30
第二节 三相异步电动机的空载运行	39
第三节 三相异步电动机的负载运行	39
第四节 三相异步电动机的工作特性	43
第五节 三相异步电动机的电磁转矩特性	44
第六节 三相异步电动机的机械特性	46
第七节 电力拖动基本知识	50
第八节 三相异步电动机的起动	53
第九节 三相异步电动机的制动	59
第十节 三相异步电动机的调速	63
第十一节 单相异步电动机	71
阅读与应用 三相异步电动机的运行维护与故障分析	77
习题	80
第三章 直流电机	82
第一节 直流电机的基本原理与结构	82
第二节 直流电动机的电磁转矩和电枢电动势	87
第三节 他励直流电动机的运行原理与机械特性	88
第四节 他励直流电动机的起动和反转	92
第五节 他励直流电动机的制动	94
第六节 他励直流电动机的调速	97
习题	100
第四章 常用控制电机	101
第一节 伺服电动机	101
第二节 测速发电机	105
第三节 步进电动机	108
习题	112
第五章 常用低压电器	113
第一节 常用低压电器基本知识	113
第二节 电磁式接触器	123
第三节 电磁式继电器	128
第四节 时间继电器	135
第五节 热继电器	144
第六节 速度继电器	148
第七节 熔断器	149
第八节 低压断路器	153
第九节 主令电器	157
第十节 常用低压电器技能训练	166
习题	169
第六章 电气控制电路基本环节	170
第一节 电气控制系统图	170
第二节 电气控制电路基本控制规律	174
第三节 三相异步电动机的起动控制	180
第四节 三相异步电动机的制动控制	184
第五节 三相异步电动机的调速控制	189
第六节 直流电动机的电气控制	192
第七节 电气控制系统常用的保护环节	196
第八节 电气控制电路故障诊断与维修技能训练	198
习题	201
第七章 典型设备的电气控制	203
第一节 电气控制电路分析基础	203
第二节 Z3040 型摇臂钻床的电气控制	209
第三节 XA6132 型卧式万能铣床的电气控制	216
第四节 交流桥式起重机的电气控制	230
阅读与应用一 M7120 型平面磨床的电气控制	245
阅读与应用二 T68 型卧式镗床电气控制电路分析	251
习题	257
第八章 电气控制系统设计	259
第一节 电气控制设计的原则和内容	259
第二节 电力拖动方案的确定和电动机的选择	260

第二章 三相异步电动机

旋转电机有直流电机与交流电机两大类，交流电机又有同步电机与异步电机之分，异步电机又可分为异步发电机与异步电动机。异步电动机按相数不同，分为三相异步电动机和单相异步电动机；按其转子结构不同，可分为笼型和绕线转子型，其中笼型三相异步电动机因其结构简单、制造方便、价格便宜、运行可靠，在各种电动机中应用最广、需求量最大。

本章首先讲述三相异步电动机的结构与工作原理，分析其在空载与负载下的运行状态，重点分析三相异步电动机的机械特性及电力拖动的相关知识，另外对单相异步电动机也作一介绍。

第一节 三相异步电动机的结构与工作原理

一、三相异步电动机的结构

三相异步电动机由两个基本部分组成：一是固定不动的部分，称为定子；一是旋转部分，称为转子。图 2-1 为三相异步电动机的外形和结构图。

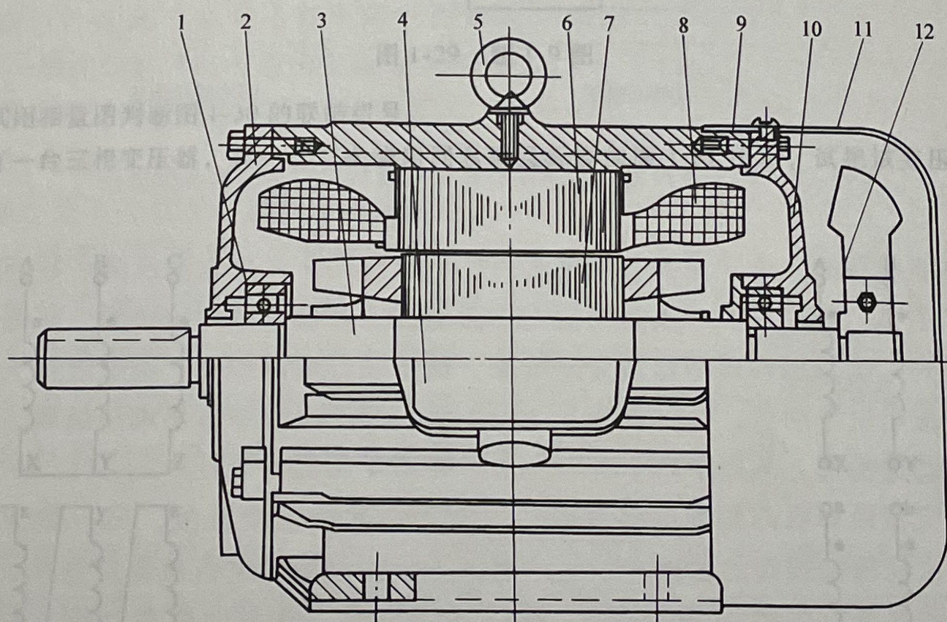


图 2-1 三相异步电动机的外形和结构

1—轴承 2—前端盖 3—转轴 4—接线盒 5—吊攀 6—定子铁心 7—转子铁心
8—定子绕组 9—机座 10—后端盖 11—风罩 12—风扇

(一) 定子

定子由机座、定子铁心、定子绕组和端盖等组成。机座和端盖通常用铸铁制成，机座内装有由 0.5mm 厚的硅钢片叠制而成的定子铁心，铁心内圆周上分布着定子槽，槽内嵌放三

相定子绕组, 定子绕组与铁心间有良好的绝缘。

定子绕组是定子的电路部分, 对于中小型电动机一般由漆包线绕制而成, 共分三相, 分布在定子铁心槽内, 构成对称的三相绕组。三相绕组共有六个出线端, 将其引出接在置于电动机外壳上的接线盒中, 三个绕组的首端分别用 U_1 、 V_1 、 W_1 表示, 其对应的尾端分别用 U_2 、 V_2 、 W_2 表示。通过接线盒上六个端头的不同联结, 可将三相定子绕组接成星形或三角形, 如图 2-2 所示。

(二) 转子

转子由转子铁心、转子绕组、转轴、风扇等组成。转子铁心为圆柱形, 通常是利用定子铁心冲片冲下的内圆硅钢片, 将其外圆周冲成均匀分布的槽后叠成, 并压装在转轴上。转子铁心与定子铁心之间有很小的空气隙, 它们共同组成电动机的磁路。转子铁心外圆周上均匀分布的槽是用来安放转子绕组的。

转子绕组有笼型和绕线转子两种结构。笼型转子绕组是由嵌在转子铁心槽内的铜条或铝条组成, 两端分别与两个短接的端环相联。如果去掉铁心, 转子绕组外形像一个鼠笼, 故也称笼型转子。目前中小型异步电动机大都在转子铁心槽中采用浇注铝液, 铸成笼型绕组, 同时在端环上注出许多叶片, 作为冷却用的风扇。

绕线转子绕组与定子绕组相似, 在转子铁心槽中嵌放对称的三相绕组, 作星形联结。将三个绕组的尾端联结在一起, 三个首端分别接到装在转轴上的三个铜制圆环上, 通过电刷与外电路的可变电阻相联结, 供起动和调速用。

绕线转子电动机结构复杂, 价格较高, 一般只用于对起动和调速要求较高的场合, 如起重机等设备上。

(三) 三相异步电动机分类及用途

三相异步电动机按防护形式分为开启式、防护式、封闭式及特殊防护式等。

开启式电动机除必要的支撑结构外, 转动部分及绕组没有专门的防护, 与外界空气直接接触。因此, 散热性好, 结构简单, 适用于干燥、无尘埃、无有害气体的场合。

防护式电动机的机壳或端盖设有通风罩, 防止水滴、尘土、铁屑和其他物体从上方或斜上方落入电机内部。适用于比较清洁、干燥的场合, 但不能用于有腐蚀性和有爆炸性气体的场合。

封闭式电动机的外壳完全封闭, 可防止水滴、尘土、铁屑或其他的物体从任何方向侵入电动机内部。适用于灰尘、水滴飞溅的场合。此种电动机内外空气不能对流, 只靠本身风扇冷却, 但由于运行中安全性好, 获得广泛应用。

特殊防护式电动机有隔爆型、防腐型、防水型等, 适用于在相应环境下工作。

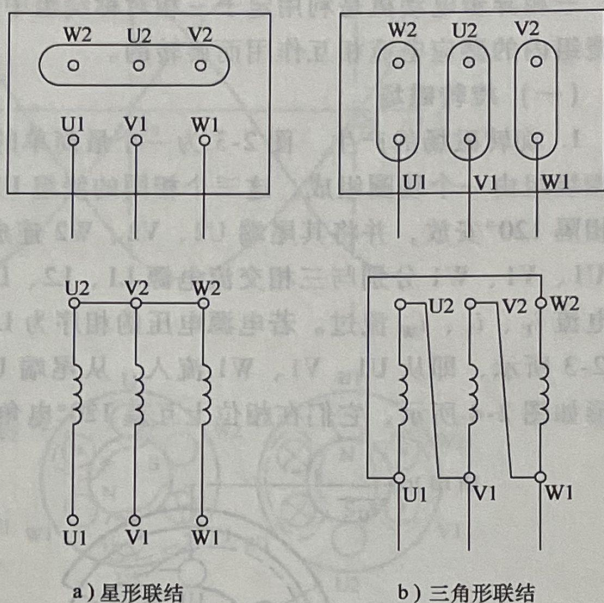


图 2-2 三相定子绕组的接法

二、三相异步电动机工作原理

三相异步电动机是利用定子三相对称绕组中通以三相对称交流电所产生的旋转磁场与转子绕组内的感应电流相互作用而旋转的。

(一) 旋转磁场

1. 旋转磁场的产生 图 2-3 为一个最简单的两极三相异步电动机三相定子绕组布置图。每相绕组由一个线圈组成, 这三个相同的绕组 U_1U_2 、 V_1V_2 、 W_1W_2 在定子铁心的槽内按空间相隔 120° 安放, 并将其尾端 U_2 、 V_2 、 W_2 连成一点, 作星形联结。当定子绕组的三个首端 U_1 、 V_1 、 W_1 分别与三相交流电源 L_1 、 L_2 、 L_3 接通时, 在定子绕组中便有对称的三相交流电流 i_U 、 i_V 、 i_W 流过。若电源电压的相序为 $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3$, 电流参考方向或规定正方向如图 2-3 所示, 即从 U_1 、 V_1 、 W_1 流入, 从尾端 U_2 、 V_2 、 W_2 流出, 则三相电流 i_U 、 i_V 、 i_W 波形如图 2-4 所示, 它们在相位上互差 120° 电角度。

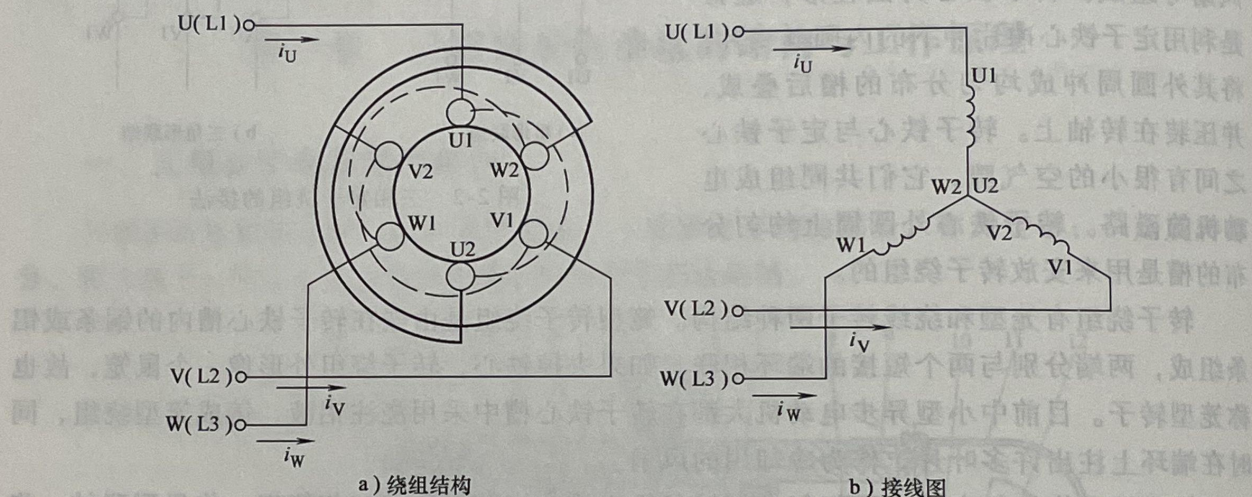


图 2-3 两极三相异步电动机三相定子绕组的布置

下面分析三相交流电流在铁心内部空间产生的合成磁场。在 $\omega t = 0$ 瞬时, i_U 为零, U_1U_2 绕组无电流; i_V 为负, 电流的真实方向与参考方向相反, 即从尾端 V_2 流入, 从首端 V_1 流出; i_W 为正, 电流真实方向与参考方向一致, 即从首端 W_1 流入, 从尾端 W_2 流出, 如图 2-4a 所示。将每相电流生产的磁通势相加, 便得出三相电流共同产生的合成磁场, 这个合成磁场此刻在的方向是自上而下, 相当于一个 N 极在上、S 极在下的两极磁场。

用同样的方法可画出 $\frac{2}{3}\pi$ 、 $\frac{4}{3}\pi$ 、 2π 时各相电流的流向及合成磁场的磁通势方向, 如图 2-4b、c、d 所示, 而 $\omega t = 2\pi$ 时的电流流向与 $\omega t = 0$ 时完全一样。若进一步分析其他瞬时的合成磁场可以发现, 各瞬间的合成磁场的磁通势大小相同, 仅方向不同而已, 但都向电流相序方向旋转。当正弦交流电变化一周时, 合成磁场在空间正好旋转了一周。

由上分析可知, 在定子铁心中空间互差 120° 的三个线圈中分别通入相位互差 120° 的三相对称交流电时, 所产生的合成磁场是一个旋转磁场。而旋转磁场的旋转速度, 由三相对称电流的频率及定子绕组在定子铁心中的布置方式决定。

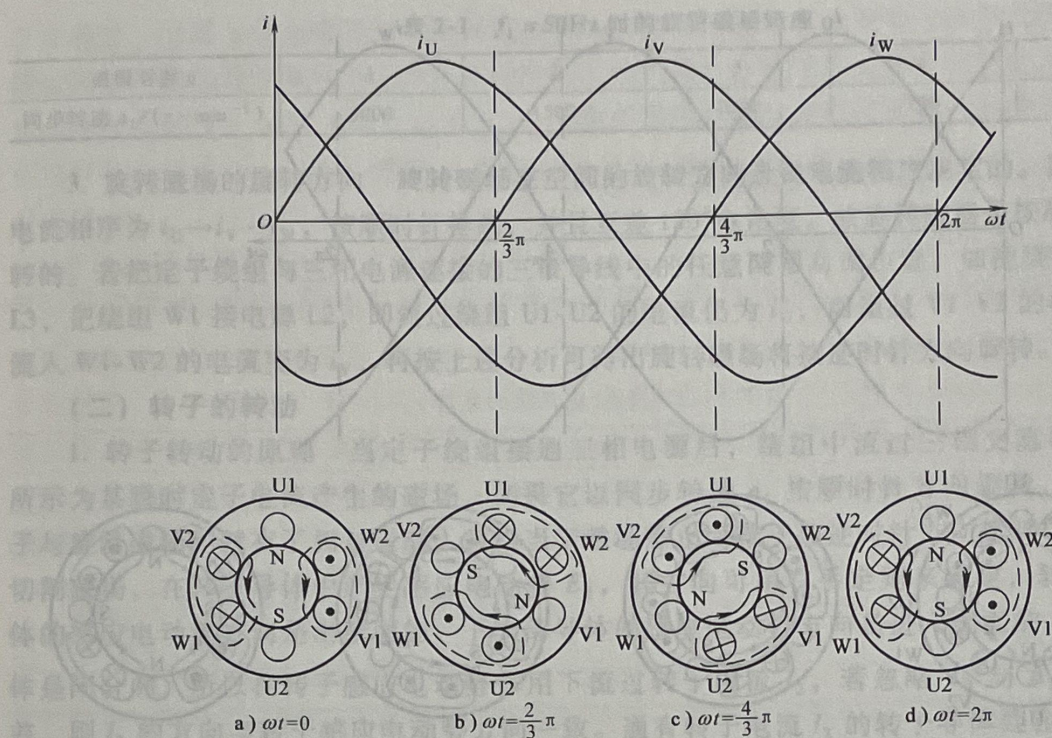


图 2-4 两极三相电动机旋转磁场的产生

上述电动机定子绕组每相只有一个线圈，三相定子绕组共有三个线圈，在空间互差 120° ，分别置于定子铁心的 6 个槽中。当通入三相对称电流时，产生的旋转磁场相当于一对 N、S 磁极在旋转。若每个绕组由两个线圈串联组成，则定子铁心槽数应为 12 个槽，每个线圈在空间相隔 60° ，如图 2-5 所示。U 相由 U1U2 与 U1'U2' 串联，V 相由 V1V2 与 V1'V2' 串联，W 相由 W1W2 与 W1'W2' 串联组成，且同一相中两个线圈的首端（如 U1 与 U1' 端）在空间上相隔 180° ，而各相绕组的首端（如 U1 与 V1、W1 端）在空间只相隔 60° ，因此，当通入三相对称交流电时，可产生具有两对磁极的旋转磁场，如图 2-6 所示。

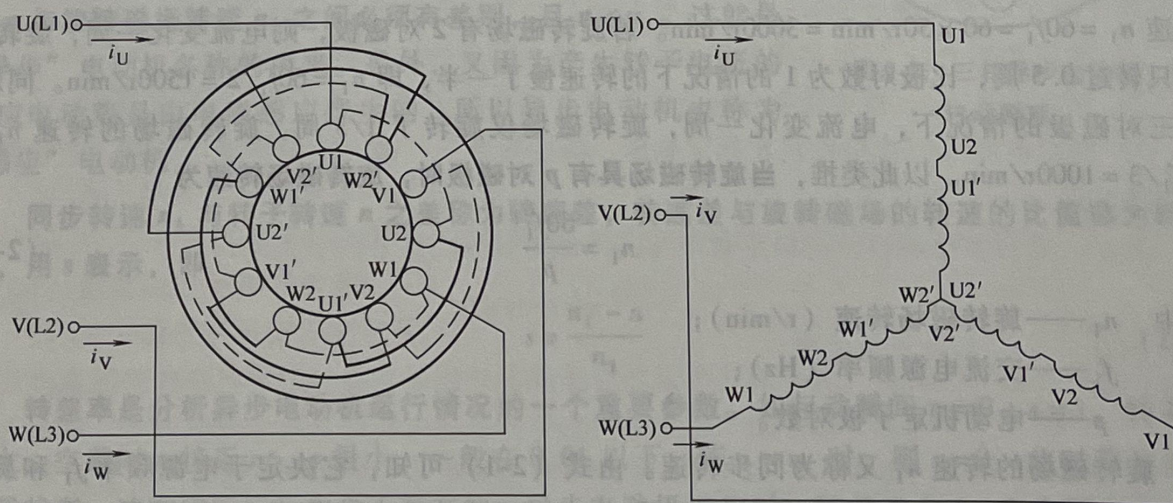


图 2-5 四极电动机定子绕组结构和接线图

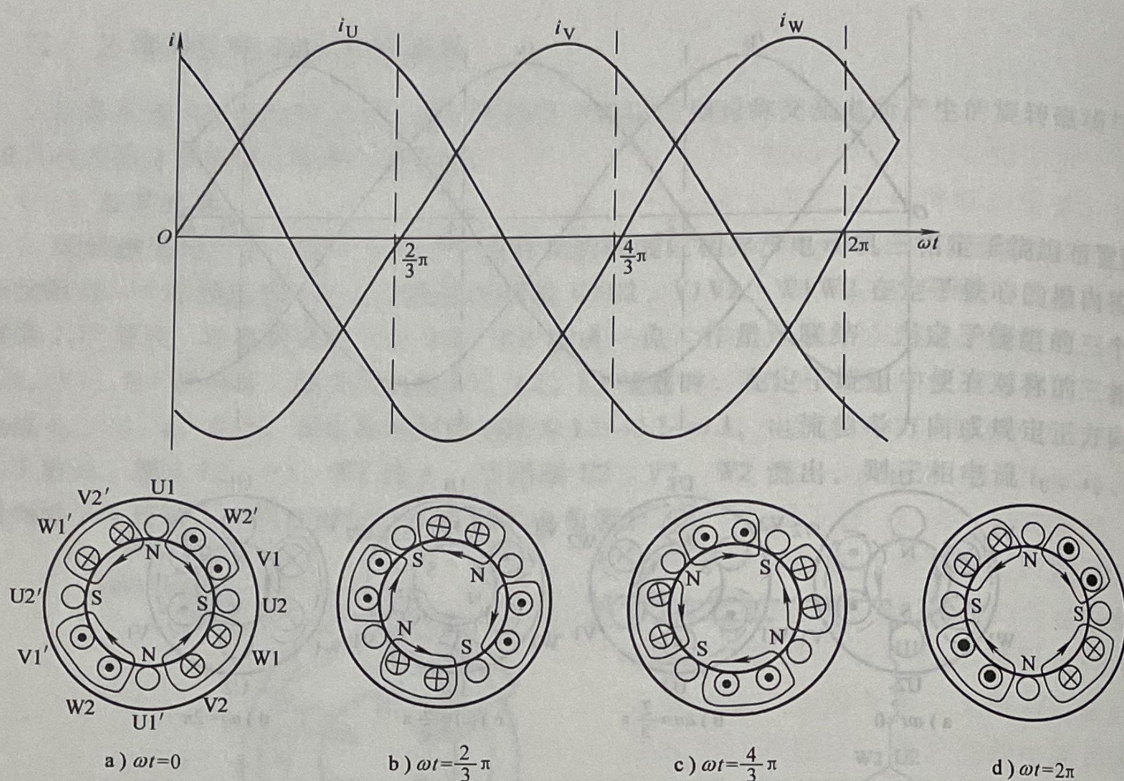


图 2-6 四极电动机旋转磁场

当 $\omega t = 0$ 瞬时, i_U 为零, U 相绕组无电流; i_V 为负值, i_W 为正值, V 相与 W 相电流流向及合成磁场如图 2-6a 所示。依次分析 $\omega t = \frac{2}{3}\pi$ 、 $\frac{4}{3}\pi$ 及 2π 瞬时, i_U 、 i_V 、 i_W 的流向及合成磁场情况分别如图 2-6b、c、d 所示。当正弦交流电变化一周时, 合成磁场在空间只旋转了 180° 。由此可见, 旋转磁场的极对数越多, 其旋转磁场转速越低。

2. 旋转磁场的转速 如上所述, 有一对磁极的旋转磁场中, 当电流变化一周时, 旋转磁场在空间正好转过一周。对 50Hz 的工频交流电来说, 旋转磁场每秒钟将在空间旋转 50 周, 其转速 $n_1 = 60f_1 = 60 \times 50 \text{ r/min} = 3000 \text{ r/min}$ 。若旋转磁场有 2 对磁极, 则电流变化一周, 旋转磁场只转过 0.5 周, 比极对数为 1 的情况下的转速慢了一半, 即 $n_1 = 60f_1/2 = 1500 \text{ r/min}$ 。同理, 在三对磁极的情况下, 电流变化一周, 旋转磁场仅旋转了 $1/3$ 周, 旋转磁场的转速 $n_1 = 60f_1/3 = 1000 \text{ r/min}$ 。以此类推, 当旋转磁场具有 p 对磁极时, 旋转磁场转速为

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (2-1)$$

式中 n_1 ——旋转磁场转速 (r/min);

f_1 ——交流电源频率 (Hz);

p ——电动机定子极对数。

旋转磁场的转速 n_1 又称为同步转速。由式 (2-1) 可知, 它决定于电源频率 f_1 和旋转磁场的极对数 p 。当电源频率 $f_1 = 50 \text{ Hz}$ 时, 三相异步电动机同步转速 n_1 与磁极对数 p 的关系如表 2-1 所示。

表 2-1 $f_1 = 50\text{Hz}$ 时的旋转磁场转速

磁极对数 p	1	2	3	4	5
同步转速 $n_1 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	3000	1500	1000	750	600

3. 旋转磁场的旋转方向 旋转磁场在空间的旋转方向是由电流相序决定的。图 2-3 所示的电流相序为 $i_U \rightarrow i_V \rightarrow i_W$ ，按顺时针排列，并且互差 120° 电角度，故旋转磁场是按顺时针方向旋转的。若把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，如把绕组 V_1 接电源 L_3 ，把绕组 W_1 接电源 L_2 ，即流过绕组 U_1 - U_2 的电流仍为 i_U ，而流过 V_1 - V_2 的电流变为 i_W ，流入 W_1 - W_2 的电流变为 i_V ，再按上述分析可得出旋转磁场将按逆时针方向旋转。

(二) 转子的转动

1. 转子转动的原理 当定子绕组接通三相电源后，绕组中流过三相交流电流，图 2-7 所示为某瞬时定子电流产生的磁场，如果它以同步转速 n_1 按顺时针方向旋转，则静止的转子与旋转磁场间就有了相对运动，这相当于磁场静止而转子按逆时针方向旋转，则转子导体切割磁场，在转子导体中产生感应电动势 E_2 ，其方向可用右手定则来确定，转子上半部导体的感应电动势方向是出纸面的，下半部导体的感应电动势方向是进入纸面的。由于转子导体是闭合的，所以在转子感应电动势作用下流过转子电流 I_2 ，若忽略 I_2 与 E_2 之间的相位差，则 I_2 的方向与转子感应电动势方向一致。通有转子电流 I_2 的转子导体处在定子磁场中，根据左手定则，便可确定转子导体受到的电磁力 F 的作用方向，如图 2-7 所示。由于转子导体是圆周均匀分布，所以电磁力 F 对转轴形成电磁转矩 T 的方向与旋转磁场的旋转方向相同，于是转子就顺着定子旋转磁场旋转方向转动起来了。

2. 转子的转速 n 、转差率 s 与转动方向 由上分析可知，异步电动机转子旋转方向与旋转磁场的旋转方向一致，但转速 n 不可能达到与旋转磁场的转速 n_1 相等。因为产生电磁转矩需要转子中存在感应电动势和感应电流，如果转子转速与旋转磁场转速相等，两者之间就没有相对运动，转子导体将不切割磁力线，则转子感应电动势、转子电流及电磁转矩都不存在，转子就减速且不可能继续以 n 转动。所以，转子转速 n 与旋转磁场转速 n_1 之间必须有差别，且 $n < n_1$ 。这就是“异步”电动机名称的由来。另外，又因为产生转子电流的感应电动势是由电磁感应产生的，所以异步电动机也称为“感应”电动机。

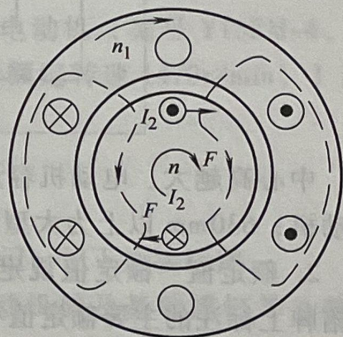


图 2-7 三相异步电动机
转动原理

同步转速 n_1 与转子转速 n 之差称为转速差，转速差与旋转磁场的转速的比值称为转差率，用 s 表示，即

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

转差率是分析异步电动机运行情况的一个重要参数。如起动瞬间 $n = 0$ ， $s = 1$ ，转差率最大；空载时 n 接近 n_1 ， s 很小，一般在 0.01 以下；若 $n = n_1$ 时，则 $s = 0$ ，此时称为理想空载状态，这在实际运行中是不存在的。异步电动机工作时，转差率在 1~0 之间变化，当电动机在额定负载下工作时，其额定转差率 $s_N = 0.01 \sim 0.07$ 。

由上分析还可知,异步电动机的转动方向总是与旋转磁场的转向一致。因此,要改变三相异步电动机的旋转方向,只需把定子绕组与三相电源连接的三根导线中任意两根对调,改变旋转磁场的转向,也便实现电动机转向的改变了。

三、三相异步电动机的铭牌及主要系列

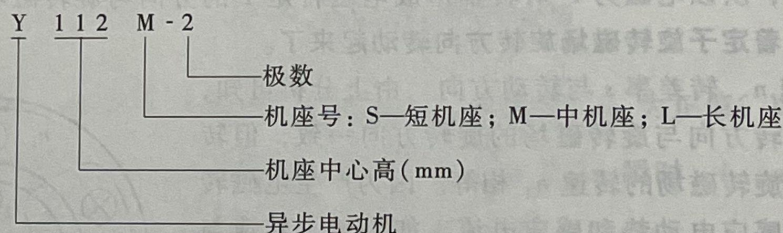
(一) 三相异步电动机的铭牌

每一台三相异步电动机,在其机座上都有一块铭牌,其上标有型号、额定值等,如表 2-2 所示。

表 2-2 三相异步电动机的铭牌

三相异步电动机			
型号 Y112M-2		编号 × × × ×	
4kW		8.2A	
380V	2890r/min	LW79dB(A)	
接法 Δ	防护等级 IP44	50Hz	× × kg
JB/T 9616—1999	工作制	B 级绝缘	× × 年 × × 月
× × 电机厂			

1. 型号 异步电动机型号的表示方法是用汉语拼音的大写字母和阿拉伯数字表示电动机的种类、规格和用途等,其型号意义:



中心高越大,电动机容量越大,中心高 80 ~ 315mm 为小型电动机; 315 ~ 630mm 为中型电动机; 630mm 以上为大型电动机。在同一中心高下,机座长则铁心长,容量大。

2. 额定值 额定值规定了电动机正常运行状态和条件,是选用、维修电动机的依据。在铭牌上标注的主要额定值有:

- 1) 额定功率 P_N : 指电动机额定运行时,轴上输出的机械功率(kW)。
- 2) 额定电压 U_N : 指电动机在额定运行时,加在定子绕组出线端的线电压(V)。
- 3) 额定电流 I_N : 指电动机在额定电压、额定频率下,轴上输出额定功率时,定子绕组中的线电流(A)。

对于三相异步电动机,其额定功率与其他额定数据之间有如下关系式:

$$P_N = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N \eta_N \quad (2-3)$$

式中 $\cos \varphi_N$ ——额定功率因数;

η_N ——额定效率。

- 4) 额定频率 f_N : 电动机所接交流电源的频率,我国电力系统频率规定为 50Hz。
- 5) 额定转速 n_N : 指电动机在额定电压、额定频率下,电动机轴上输出额定机械功率时的转子转速(r/min)。

此外,铭牌上还标明绕组接法、绝缘等级及工作制等。对于绕线转子异步电动机还标有转子绕组的额定电压(指当定子绕组上加额定频率的额定电压,而转子绕组开路时,集电环间的电压)和转子额定电流。表 2-2 中的防护等级 IP44 是指电动机的防护结构达到国际电工委员会(IEC)规定的外壳防护等级 IP44 的要求,适用于灰尘飞扬、水滴喷射的场所。

(二) 三相异步电动机主要系列

Y 系列三相异步电动机是 20 世纪 70 年代末设计、80 年代开始替代 J₂、JO₂ 系列的更新换代产品。常用的 Y 系列异步电动机有:Y(IP44)封闭式、Y(IP23)防护式小型三相异步电动机,YR(IP44)封闭式、YR(IP23)防护式绕线转子三相异步电动机,YD 变极多速三相异步电动机,YX 高效率三相异步电动机,YH 高转差率三相异步电动机,YB 隔爆型三相异步电动机,YCT 电磁调速三相异步电动机,YEJ 制动三相异步电动机,YTD 电梯用三相异步电动机,YQ 高起动转矩三相异步电动机等几十种产品。

电气工程及其自动化类专业系列教材参考书目

书 名	主 编	书 号
1. 自动控制原理与系统 第3版 ★ (附光盘, 包括教学指导、电子教案、学习指导等)	孔凡才	05080
2. 供配电技术 ★ (附光盘, 包括电子教案、电子课件)	江 文 许慧中	15639
3. 单片机应用技术 (赠电子课件等)	谢 敏	24235
4. 模拟电子技术 第2版 (赠电子课件) ★	刘吉来	30126
5. 数字电子技术 (赠电子课件)	卢庆林	16591
6. 电工基础 (赠电子课件)	李 梅	16604
7. 电力电子技术 (赠电子课件) ★	龙志文	16899
8. Protel 99 SE EDA技术及应用 ★ (赠电子课件)	徐琤颖	15625
9. 电机与电气控制技术 第3版 (赠电子课件) ★	许 廖	48171
10. SIMATIC可编程序控制器及应用 第2版 ★ (赠电子课件)	孙海维	40238
11. 微型计算机控制技术 (赠电子课件)	王洪庆	16336
12. 自动检测技术及应用 第2版 (赠电子课件) ★	武昌俊	30416
13. C语言程序设计实用教程 (赠电子课件)	陈 方	16742
14. 电类专业英语 (赠参考译文)	汪建宇	16784
15. 电子技术实验与实训 ★	王海群	16495
16. 机电类专业毕业设计指南	张桂香	15607
17. 工业控制组态软件及应用 (赠电子课件)	许志军	16743
18. 工程制图及CAD	马义荣	16253
19. 工程制图及CAD习题集	马义荣	16240
20. 电路分析实训教程 (赠电子课件等) ★	张恩沛	23474
21. 可编程控制器综合应用技术 (赠电子课件等)	邓 松	29933
22. 电子与电气工程制图项目式教程 许涌清	武昌俊	38904
23. 电气控制与PLC应用技术项目式教程 (三菱机型)	晏华成	38501
24. 单片机系统设计与制作	倪志莲	39247
25. 电机与电气控制技术项目式教程 唐惠龙	牟宏钧	38749
26. 电气控制技术与应用项目式教程	赵红顺	38484
27. 电气控制与PLC应用技术 (西门子PLC) 周 忠 (理实一体化项目教程)	彭小平	42375
28. 集散控制系统组态应用技术	蒋兴加	45302

以上书目凡选用作为教材的学校, 均可索取免费电子课件

注: 加★的为普通高等教育“十一五”国家级规划教材、“十二五”职业教育国家规划教材



机工教育微信服务号

策划编辑◎于宁 / 装帧设计◎鞠杨



ISBN 978-7-111-48171-3



9 787111 481713

定价: 45.00元