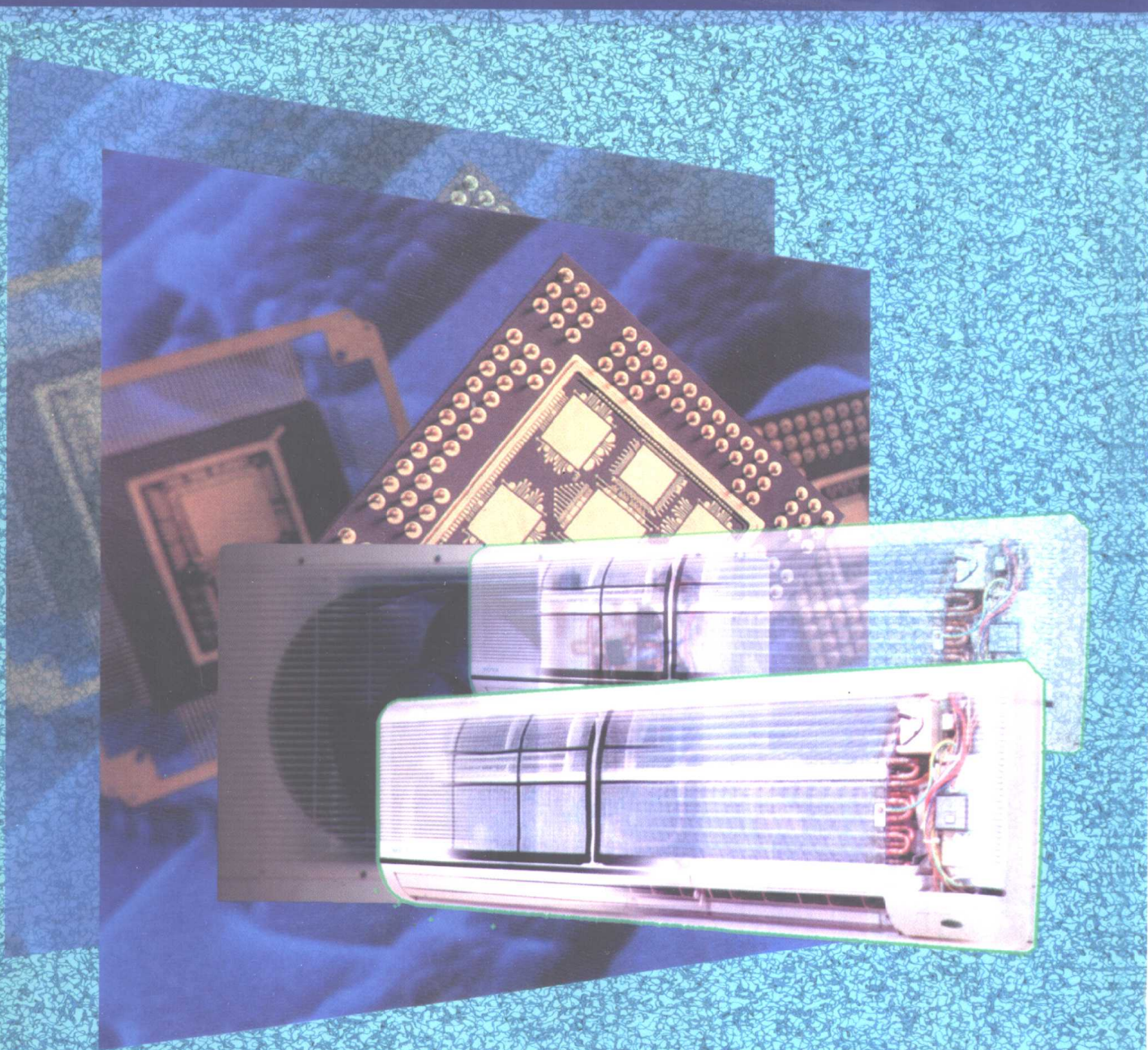


制冷空调设备电气与控制

ZHI LENG KONG TIAO SHE BEI DIAN QI YU KONG ZHI

卫宏毅 编



广东科技出版社

制冷空调设备电气与控制

卫宏毅 编

广东科技出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

制冷空调设备电气与控制/卫宏毅
编.—广州: 广东科技出版社, 1998.4
ISBN 7-5359-1741-0

I.制…
II.卫…
III.制冷技术
IV.TB657

11/138/18

出版发行: 广东科技出版社
(广州市环市东路水荫路 11 号 邮码: 510075)
E-mail: gdkjabb@21cn.com
出版人: 黄达全
经 销: 广东新华发行集团股份有限公司
印 刷: 广东省新会市棠下中学印刷厂
(广东省新会市棠下镇 邮码: 529100)
规 格: 787mm × 1 092mm 1/16 10.25 印张 字数 210 000
版 次: 1998 年 4 月第 1 版
2001 年 7 月第 3 次印刷
印 数: 12 201 ~ 15 200 册
定 价: 15.00 元

如发现因印装质量问题影响阅读, 请与承印厂联系调换。

内 容 简 介

这是为工科专业学校、技校和技术培训班编写的制冷空调设备维修课教材。

电气控制系统与电动机，是制冷空调设备中最常出现故障的部位。本书从最基本的电路知识着手，介绍电冰箱、冷藏柜、窗式空调器、汽车空调器、小型冷库及中央空调系统的控制电路，使读者由浅入深地掌握这些设备的电路原理及维修技术。并对制冷空调设备中常用的电动机，也作了介绍。

前 言

本书主要阐明制冷与空调设备所用电机与电器及其控制方法。

全书内容包括：电冰箱、冷藏柜、窗式空调器、汽车空调器、小型冷库及中央空调系统的控制电路分析。考虑到读者不同的要求，本书中还介绍了单相和三相感应电动机的基本原理及电气系统线路图。

鉴于目前专门对各种具体的制冷与空调装置进行控制线路分析的读物还不算很多，希望读者通过本书的学习能对制冷装置的使用与维修、控制线路设计有所得益。

由于编者水平所限，错误、缺点和不当之处在所难免，恳切希望同行专家和读者批评指正。

编者 1997年8月

目 录

第一章 制冷空调设备用电动机	(1)
一、耐氟电机的要求及其特点	(1)
二、电冰箱耐氟电机主要参数的选择	(2)
三、耐氟电机的绝缘性能测试	(3)
四、制冷空调用三相感应电动机及起动	(3)
五、制冷空调用单相感应电动机及起动	(13)
六、制冷空调用辅助电动机	(25)
第二章 制冷空调设备的自动控制	(34)
一、概述	(34)
二、控制与保护器件	(34)
三、自动控制的作用及其控制方式	(50)
四、蒸发压缩式制冷装置自动化系统举例	(50)
五、电气控制系统线路图	(57)
第三章 电冰箱控制系统	(73)
一、起动控制	(73)
二、温度控制	(76)
三、除霜控制	(87)
四、电冰箱的过载保护	(95)
五、冰箱电路及典型电路分析	(95)
第四章 冷藏柜控制系统	(100)
一、冷藏柜的结构及其控制系统	(100)
二、冷藏箱的控制元件	(103)
三、电路分析	(105)
第五章 冷藏库控制系统	(106)
一、制冷系统的温度控制	(106)
二、简单冷藏库控制系统——某肉类冷藏库的电气控制系统	(111)
三、SC-4A 速冻设备的电气控制线路	(114)
第六章 空调器控制系统	(119)
一、概述	(119)

二、窗式空调器的电路	(119)
三、柜式空调器电路	(132)
四、汽车空调器电路及气路	(133)
第七章 中央空调控制系统	(136)
一、概述	(136)
二、螺杆式冷水机组控制电路	(137)
三、离心式冷水机组控制电路	(147)
四、制冷压缩机控制台	(156)

第一章 制冷空调设备用电动机

一、耐氟电机的要求及其特点

目前，在制冷空调设备中，全封闭或半封闭式各种类型的压缩机一般都使用耐氟电动机。它的型号有如下几种。

- (1) YSR 封闭式制冷机用耐氟三相异步电动机。
- (2) YUR 封闭式制冷机用耐氟单相电阻起动异步电动机。
- (3) YYR 封闭式制冷机用耐氟单相电容运转异步电动机。
- (4) YCR 封闭式制冷机用耐氟单相电容起动异步电动机。
- (5) YLR 封闭式制冷机用耐氟双值电容异步电动机。
- (6) YUYR 封闭式制冷机用耐氟单相电阻起动电容运转异步电动机。

因为电冰箱用全封闭式压缩机的耐氟电机的特点比较典型，因此，就以这种电机为重点说明其特殊要求。

(1) 耐热性 压缩机工作环境温度一般都在 70℃ 以上，所用电机应能在长时间的高温下正常运转，而且绝缘材料要耐热老化。一般采用 E 级绝缘材料，其极限温度为 115℃。若为旋转式压缩机，由于它是在壳体内排气的，所以温度要求更高，一般要用 F 级绝缘材料（允许温度为 140℃）。

(2) 耐制冷剂和耐油性 由于电冰箱用压缩机电机，是长期浸泡在制冷剂和润滑油的特殊环境下工作的，因此，电机的所有绝缘材料，都要有较高的化学稳定性，它不会因接触制冷剂和润滑油或者因压缩机运转受到温度和压力的影响，而使绝缘性能下降。如电机绕组的电磁线应采用 QF 型耐氟里昂漆包线（如聚酯尼龙漆包线）或 QZ 型高强度聚酯漆包线。电机线圈端部多用尼龙丝绳交叉绑扎，扎头结紧后要用火燎过以防松脱，线圈不需绝缘浸漆处理，因制冷剂对浸清漆有腐蚀作用，影响制冷剂和润滑油的稳定性，引起脏堵等各种故障。一般槽绝缘及相间绝缘采用聚酰亚胺薄膜或聚酯复合薄膜。目前一般不用槽楔，只要在嵌线后将绝缘层包上，并和最外层薄膜一起包扎好便可，如果要使用槽楔，一般也应用聚酯材料。

(3) 耐振动和耐冲击 由于电动机是与压缩机在封闭壳体中同轴直接连接，因此，它应能承受作压缩功时所产生的振动和起动或停机时的机械振动，并能经得起起动电流引起的电磁力和制冷剂急剧蒸发时的热冲击。

(4) 起动转矩大、起动性能好 电机应能适应压缩机在排、吸气室两侧的高、低压力不平衡时的最大负载起动和频繁的起动，并能在电网电压大幅度变化（如从 180V 到 240V）时，可靠地起动与运行。要求最大转矩与额定转矩之比一般为 2.5 倍以上，起动转矩与额定转矩之比一般在 2 倍以上。

(5) 有较大的过载能力 当周围的环境温度升高或电机的负载起伏变化大，而过载不

大的情况下，电机仍能正常工作。

二、电冰箱耐氟电机主要参数的选择

(一) 定转子气隙

为减少空载电流，提高功率因数和效率，气隙数值通常希望取小些好。但生产实践证明，气隙不宜过小，一般单边间隙取 0.3mm 较好，因为气隙值选大些可以消除高次谐波磁势的影响，可以改善起动力性能；而且使气隙不均匀度占基本气隙之比相对下降，从而减少“单边磁拉力”，提高压缩机运转的稳定性。

(二) 气隙磁密

电机的电磁噪音是产生噪音的主要原因之一。设计时，除考虑槽配合的合理性外，气隙磁密应基本选择在不饱和状态。另外，冰箱电机多数为二极高速运行，受齿部和轭部饱和程度的限制，气隙磁密要比标准系列电机低，一般取 0.55T（特斯拉）上下为宜。

(三) 线负荷和电流密度

冰箱电机散热条件差，又在高温条件下运行，必需重点考虑绕组温升，而绕组温升与热负荷有关。根据热负荷公式 $W = P/100 \cdot \Delta \cdot A$ （式中 P 为电阻系数， Δ 为电流密度， A 为线负荷）的关系，可以看出，取值大小直接影响绕组温升和绝缘材料等级。但冰箱电机极距小，导线数较多，磁通少，槽内排列又不均匀，线负荷又不能取得较高。为了提高效率，增加过载能力，缩小冷热状态下转距的变化，导线直径取大些则电流密度小，可以降低绕组的温升。

冰箱电机的线负荷、电流密度均取标准系列电机的下限值。对单相一般的异步电动机，其主相电流密度选取的范围值为 $4 \sim 7\text{A}/\text{mm}^2$ ，线负荷选取的范围值为 $A = 105 \sim 170\text{A}/\text{cm}$ （二极电机）或 $A = 120 \sim 230\text{A}/\text{cm}$ （四极电机），以广州压缩机厂所用 FN43φ88G 型压缩机所用的单相电阻起动的二极异步电动机为例：其电机输入功率为 101W，主相电流密度为 $3.36\text{A}/\text{mm}^2$ ，线负荷 A 按主相绕组总安匝与主相所占定子内圆弧长之比计算其值为 $112\text{A}/\text{cm}$ 。冰箱电机的线负荷和电流密度之所以取得较低，主要是考虑到电机在高温低电压下运行容易使电机损坏，因此冰箱电机留有较大的余量是合理的。

(四) 效率与功率因数

对 92W 输出额定功率的冰箱电机，其功率因数为 0.62 ~ 0.68，效率为 56% ~ 58%，在冰箱电机中由于定转子气隙取得较大，而气隙磁势在总磁势中所占的比例最大，因而磁化电流随之增加，功率因数降低，并且相应的铜耗也增加，效率则要看由于气隙增加使附加损耗的下降量，与由于磁化电流增加而引起铜耗增加量哪个大，若前者大则效率增加。但功率因数和效率不会降低太多，因为我们选取较低的气隙磁密，对效率和功率因数的提高是有好处的，同时对运行相设计选取的电流密度较低，导线直径较粗，导线电阻在阻抗中占的比例值小，在一定程度上也降低了功率因数，相对地减少了定子铜耗而提高了效率。随着气隙的增加，使电机的总漏抗值下降，提高了最大转矩值，使机械特性中的谷点有所提高。

三、耐氟电机的绝缘性能测试

(一) 出厂试验

1. 电机绕组对铁芯的绝缘电阻（用 500 伏兆欧表测）

冷态绝缘电阻不应小于 $20M\Omega$ 。

热态绝缘电阻用烘箱或短路电流加热法，将电机绕组加热到绝缘耐热等级对应的额定温变值进行测量（E 级为 115°C ，B 级为 120°C ，F 级为 140°C ），对 7.5kW 以下者不应小于 $5M\Omega$ 。 7.5kW 以上到 75kW 者不应小于 $2M\Omega$ 。

2. 电机绕组对铁芯及相间介电强度试验

试验电压为交流正弦波， 50Hz 试验电压有效值为 1000V 加 2 倍额定电压（ V_N ），但最低试验电压为 1500V ，耐压 1min （分钟）应不发生击穿现象。在生产线上可提高电压到 120% ，以时间为 1S （秒）的耐压试验方法代替。

(二) 绝缘耐氟性能检查试验

此项试验在室温下进行，环境温度不大于 40°C ，相对湿度不大于 85% 。由压缩机厂组装成电动压缩机后进行。

单机电机耐氟性能检查试验，规定频繁起动试验次数至 1.8 万次时停机，在高压釜中进行电机绕组对铁芯的耐压试验，施加 50Hz 交流电压 $(1000 + 2V_N) \times 0.5\text{V}$ ，历时 1min （分钟），应无击穿。

三相电机耐氟性能检查试验，规定为正反转试验次数至 6.5 万次时停机，在高压釜中进行电机绕组对铁芯的绝缘耐压试验，施加 50Hz 交流电压 $(1000 + 2V_N) \times 0.5\text{V}$ ，历时 1min （分钟），应无击穿。

(三) 绝缘结构耐氟寿命试验

本试验的条件与（二）相同。

对单相电机频繁起动试验次数至 4 万次时停机，在高压釜中进行电机绕组对铁芯的耐压试验，施加 50Hz 交流电压 $(1000 + 2V_N) \times 0.5\text{V}$ ，历时 1min （分钟），应无击穿。

三相电机正反转试验次数至 14 万次时停机，在高压釜中进行电机绕组对铁芯的耐压试验，施加 50Hz 交流电压 $(1000 + 2V_N) \times 0.5\text{V}$ ，历时 1min （分钟），应无击穿。

四、制冷空调用三相感应电动机及起动

三相感应电动机有一个固定部分（称作定子）和一个旋转部分（称作转子）其结构如图 1-1 所示。定子和转子之间，有一空气隙，定子和转子之间没有任何导线或机械连接，其间功率的传递是由空气隙中间的磁通的感应作用来完成。因此，这种电机称之为感应电动机。

(一) 三相感应电动机的旋转磁场

1. 旋转磁场的原理

三相感应电动机接入三相电源，定子绕组分为相同的三相，每相绕组相隔 120° 空间电角度并分别嵌放在定子铁心的内圆周 6 个槽内，其原理如图 1-2 所示。为简便起见，每

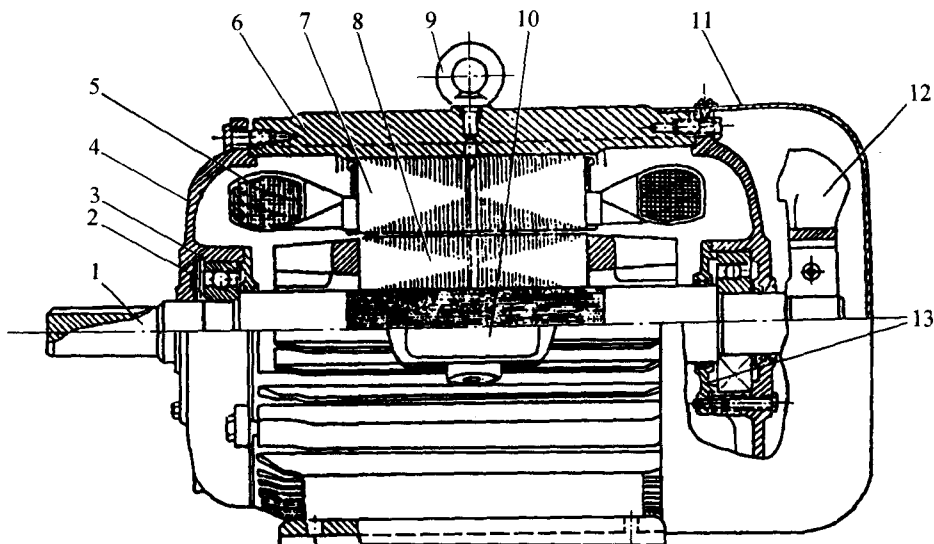


图 1-1 三相感应电动机的结构图

1-轴；2-弹簧片；3-轴承；4-端盖；5-定子绕组；6-机座；7-定子绕组；
8-转子铁心；9-吊环；10-出线盒；11-风罩；12-风扇；13-轴承内盖；

相绕组都画成一匝，其中 A 、 B 、 C 和 X 、 Y 、 Z 分别为各相绕组的起端和末端，这三个绕组可以接成星形，也可以接成三角形。不论绕组接成星形（ \ast ）或者三角形（ \triangle ），如果已把 A 、 B 、 C 三端接到电源上，那末绕组之中必有对称的电流流入，这些电流是：

$$i_A = I_m \sin \omega t$$

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

$$i_C = I_m \sin (\omega t - 240^\circ)$$

根据这些电流的变化可画出三相电流的瞬间变化图形，如图 1-3 所示。

电流流过绕组就会产生磁场，而且它随着电流的变化而变化。

若规定电流的负方向为从绕组的首端 A 、 B 、 C 流向绕组的末端 X 、 Y 、 Z ，规定电流的正方向分别从绕组的末端流向首端。从图 1-4 结合图 1-3 可以看出，当 $\omega t = 90^\circ$ 时， i_A 为正（电流从 X 流向 A ）， i_B 及 i_C 为负（电流从 $B \rightarrow Y$ 及 $C \rightarrow Z$ ），把各个电流产生的磁场相加则得到合成磁势 \bar{F} ，其方向恰为 A 相绕组的轴线方向，见图 1-4 (a)。当 $\omega t = 150^\circ$ 时， i_A 及 i_B 为正（电流的流向是从 $X \rightarrow A$ 及 $Y \rightarrow B$ ）， i_C 为负（电流流向是从 $C \rightarrow Z$ ）其合成磁势 \bar{F} 则顺时针转过 60° 。如图 1-4 (b) 所示。如果我们对取不同瞬间 i 继续观察，如取 $\omega t = 210^\circ$ 、 270° 、 330° 、 390° ，如图 1-4 (c) 至 (f) 所示，可看到电流经过半个周期，磁场也转过半转，电流经过一个周期磁场就旋转一转，这样，电流不断流过，在空间就构成了二极旋转磁场（图中 N 、 S 极）。

2. 旋转磁场的方向及其旋转速度。

(1) 旋转磁场的转向，取决于绕组的相序。从图 1-4 可看出，当任一相绕组电流达

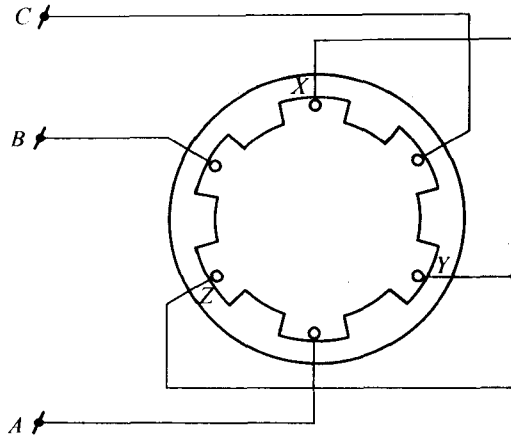


图 1-2 二极感应电动机三相定子绕组嵌放原理图

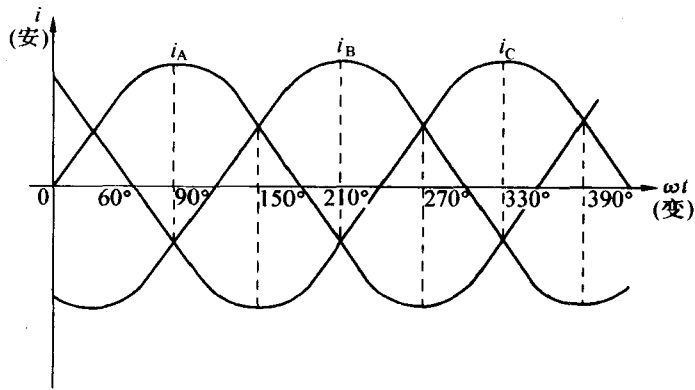


图 1-3 三相对称电流的瞬时变化图

到正最大值时，合成旋转磁场的方向便和该相绕组轴线相重合。因此，旋转磁场的旋转方向可以依照各个绕组中电流相序来决定，如图 1-3 流入各绕组电流的相序是 A—B—C，因此，旋转磁场的旋转方向是 AX 绕组的轴线（A 绕组平面的中垂线），然后顺时针移向 BY 轴线；再移向 CZ 轴线。即旋转磁场是顺时针方向旋转的，如图 1-4 (a)、(c)、(e) 所示。

由此可知，要使旋转磁场反向旋转，只要把三相电源中的任意两根导线接线位置对调即可。

(2) 旋转磁场的旋转速度 n_1 与频率 f_1 的关系。从图 1-4 可知电流变化一周，旋转磁场便转一转，若电流每秒变化 f 周，那末旋转磁场每分钟便旋转 $60f$ 转（当定子为 2 极

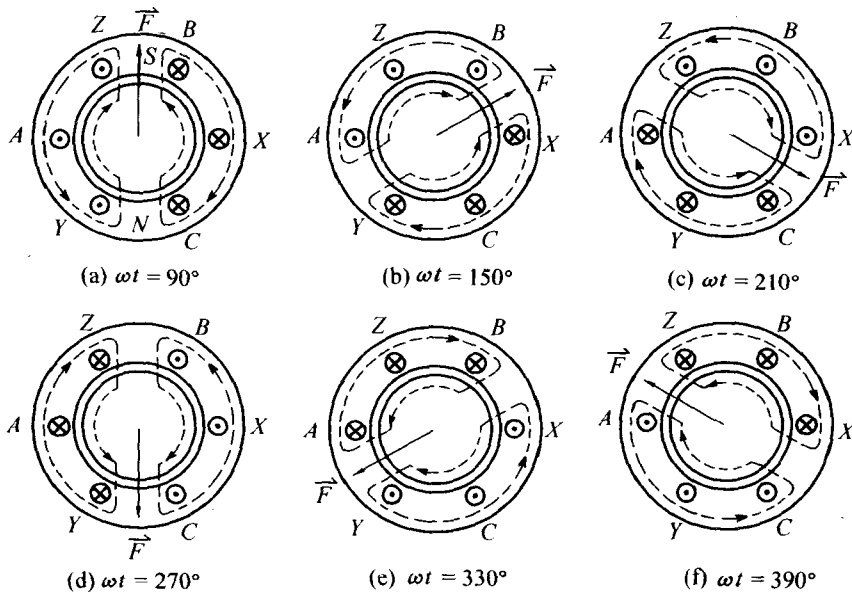


图 1-4 旋转磁场的产生 (二极电机)

(a) $\omega t = 90^\circ$ (b) $\omega t = 150^\circ$ (c) $\omega t = 210^\circ$ (d) $\omega t = 270^\circ$ (e) $\omega t = 330^\circ$ (f) $\omega t = 390^\circ$
 \otimes 表示电流从外部流入 \odot 表示电流从内部流出

时)。如图 1-5 所示当定子绕组嵌放 4 极时，每相嵌放 2 个线圈组，分别为 $A'-X'$ 及 $A-X$ ； $B'-Y'$ 及 $B-Y$ ； $C'-Z'$ 及 $C-Z$ ，按全距绕组布置，设整个圆周有 12 个槽，同相线圈组的首、末端（图中 A 相； $A-X$ 及 $A'-X'$ ，B 相； $B-Y$ 及 $B'-Y'$ ，C 相； $C-Z$ 及 $C'-Z'$ 首、末端）在空间布置为 90° 机械角度。A 相与 B 相首端、B 相与 C 相首端（或 A' 与 B' ； B' 与 C' 相）两相间空间布置相差 60° 机械角度。图 1-5 (a) 为 4 极定子绕组的嵌放原理图，(b) 图为同相线圈组的联接简图，取图 1-3 观察 $\omega t = 90^\circ$ 、 150° 、 270° 三相电流时间角的瞬间，用分析两极电机旋转磁场的方法，不同瞬间通入对称的三相电流在三相定子绕组中，从图 1-6 (a) 到 (c) 可以看出，当电流变化半周期（对应为 180° 电角度），旋转磁场则只转过 90° 机械角度，定子上出现了 N、S、N、S 4 个磁极。如果我们把 1 对磁极的距离以定子内圆占有弧度角计算，N、S 2 个磁极就相当磁通变化一个周期，我们把它看成 360° 空间电角度（或称 2π 电弧度），用 P 代表磁极对数，则整个圆周就是 P 对极 $\times 360^\circ$ 空间电角度，这样，空间电角度与机械角度之间的关系为：

$$\text{空间电角度} = P \times \text{机械角度}$$

当产生 4 个即 2 对极，($2P=4$) 时，A、B、C 三相空间布置 60° 机械角度就相当 $2 \times 60^\circ$ 机械角度 = 120° 空间电角度。每相首、末端空间相差 $2 \times 90^\circ$ 机械角度 = 180° 空间电角度，由以上分析可见，当旋转磁场的极数增加一倍，它的旋转速度就减少一半，这样电流频率 f_1 ，极对数 P 及旋转磁场的同步转速 n_1 的关系式为：

$$n_1 = \frac{60f_1}{P} \text{ (r/min)}$$

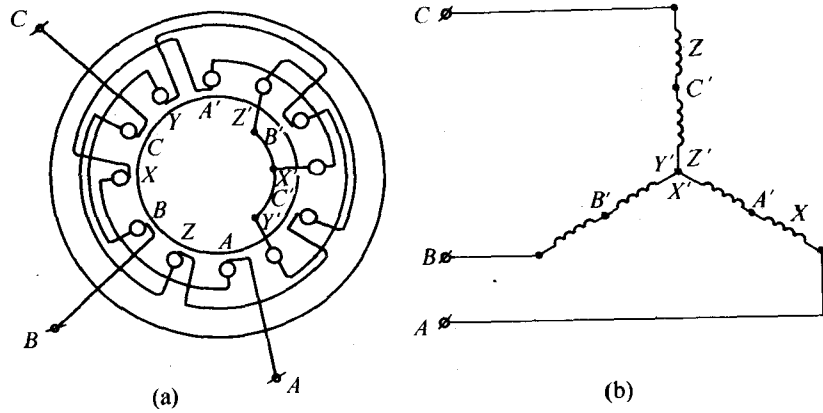


图 1-5 四极感应电动机三相绕组

(a) 四极定子绕组嵌放情况原理图

(b) 接线简图

(c) 图虚线表示线圈端部，实线表示线圈组连线

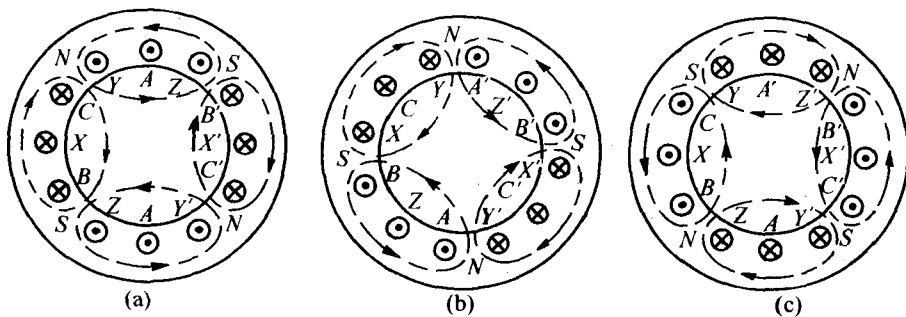


图 1-6 四极旋转磁场

(a) $\omega t = 90^\circ$; (b) $\omega t = 150^\circ$; (c) $\omega t = 270^\circ$

从上式可知，旋转磁场的旋转速度与极对数成反比，而与电流频率成正比。

(二) 三相感应电动机转子转动的工作过程

从上述旋转磁场的原理可以看出，当感应电机定子三相绕组安放在由硅钢片叠成的铁心中，且 A、B、C 三相相差 120° 空间电角度，而三相绕组接入对称的三相电源时，则在定子空间上将产生一个旋转磁场。对于三相感应电机转子，也是由硅钢片叠成的铁心，铁心中有槽，槽中铸入铝，形成导条，导条两端浇铸铝形成端环，用以短接导条的两端，便

制成鼠笼式转子。

三相感应电机转子转动的工作过程如图 1-7 所示。图中 N 、 S 极是代表三相定子绕组产生的旋转磁场 (2 极)，设该磁场逆时针方向旋转，当它切割转子导条时，便在导条中感应电势 e ，可以用右手定则确定导条电势的方向，这样，转子上部为 \otimes (向里)，下部为 \odot (向外) 方向。由于端环短接了导条的两端，因此，导条中便有电流 i 流过，如果不考虑它们之间的相位差，则 e 、 i 方向是一致的，根据左手定则，导条便受到逆时针方向力矩 M 的作用，于是转子便开始转动。其转动的方向与旋转磁场转动的方向是一致的。但是转子的转速始终是低于旋转磁场的转速，如果它们的转速相同，那么，定子旋转磁场与转子之间就没有相对运动，旋转磁场也就不会切割转子导条，也不会感生电势和电流。

因此，旋转磁场的转速 n_1 与转子的转速 n 两者存在一个差额 ($n_1 - n$)，人们把它叫做转差，而转差与同步转速 n_1 的比值叫做转差率，用 S 表示，它与 n_1 和 n 的关系为：

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

对电动机而言， S 值范围在 0 到 1 之间，当 $S=0$ 则 $n \rightarrow n_1$ ； n 为理想空载转速。若 $S=1$ 则 $n=0$ ，为电机启动状态。

转差率是决定异步电动机运转情况的基本数据。

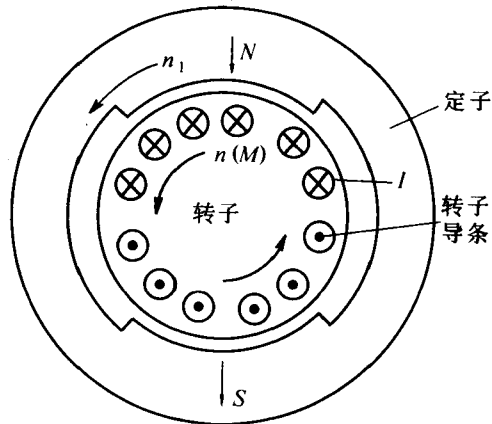


图 1-7 转子转动时的工作状态

(三) 感应电动机的名词解释

1. 极距

当定子绕组采用不同的连接方式时，便可产生 2 极以上的磁极，并形成一定数目磁极的旋转磁场。每个磁极在定子铁心内圆所占有的圆周方向的距离叫极距，它既可以用空间距离来表示，也可以用每极占有的定子槽数来表示。如果定子铁心内径为 D_{i1} ，定子槽数为 Z_1 ，磁极个数为 $2p$ ，极距 (τ) 与它们之间的关系为：

$$\tau = \frac{\pi D_{i1}}{2p} \text{ (cm)} \text{ 或 } \tau = \frac{Z_1}{2p} \text{ (槽)}$$

2. 线圈节距

是指线圈两边在定子圆周上跨过的距离，一般以两边之间跨过的槽数 Y_1 来表示。它经常等于或小于极距，节距等于极距的线圈，即 $Y_1 = \tau$ 叫做整距线圈；节距小于极距的线圈， $Y_1 < \tau$ 叫做短距线圈。

3. 单层绕组与双层绕组

每一相电机绕组是由多个线圈串联 (或并联) 而成的。

单层绕组是指一个定子槽只放一个线圈边的绕组，如果定子槽数为 Z_1 ，则定子线圈数 = $\frac{Z_1}{2}$ 。一般单层绕组均采用整距线圈，因而对消除感应电机的磁势谐波是不利的，但槽的利用率高。

双层绕组是指一个定子槽可以放置两个线圈边的绕组，定子线圈数 = Z_1 ，线圈可采用短距以消除磁势谐波，由于上、下层线圈边要放入层间绝缘，故槽的利用率稍低。

4. 集中绕组与分布绕组

用端接线把二根导体联在一起，构成一个线匝，而多个线匝串联起来则组成一个线圈。线圈中各个线匝是互相绝缘的，一个线圈有二个线圈边。如果把所有绕组都集中一起，放在铁心的两个凹槽中，就称为集中绕组。如果将多个线圈分别放置在相邻的定子槽中，并把它们按顺序联接起来则构成所谓分布绕组，通常电机均采用这种绕组，如图 1-8 所示。

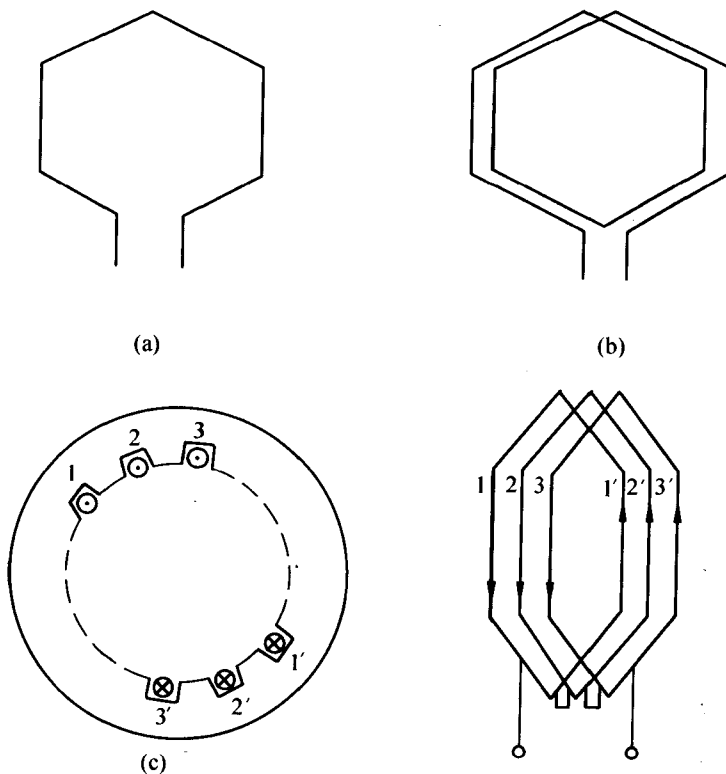


图 1-8 (a) 线匝 (b) 线圈 (c) 分布绕组

(四) 三相笼型感应电动机的起动

1. 全压直接起动

用这种方法起动笼型三相感应电机时，起动电流比额定电流大 5~7 倍，这是由于定子旋转磁场以同步转速切割转子，并在转子上感应较大的电势而使转子电流增大，定子电流也随之增加，这样大的电流将会引起电网电压的显著降低，因此这种方法仅在电动机的功率为整个电气装置容量的一小部分时才用。例如一般三相感应电动机，凡功率小于 5kW 的，均可采用直接起动法。

电动机能否用直接起动法，各地供电部门均有不同的规定。一般可采用以下经验公式予以确定。

$$\frac{\text{直接起动电流}}{\text{电机额定电流}} \leq \frac{3}{4} + \frac{\text{全部装置容量}}{4 \text{ (电动机的容量)}}$$

用直接起动机，设备简单，操作方便。

2. 降压起动

(1) Y—△起动 这种起动方式适用于正常运行为△接法的感应电动机。电机起动时，接成星形（Y）；投入运行时则接成三角形（△），如图 1-9 所示，起动时闸刀 K 向下合（Y 接法），待电动机转速接近额定值时，再把闸刀 K 向上合（△接法），这时电动机处于正常运行状态。

当电机定子绕组作星形联接时，它的各相电压为绕组作三角形联接时的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ，因此各起动电流也减少为绕组作三角形联接时的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 。此外，因绕组作星形联接时， I_{ϕ} （相电流）= I_L （线电流），而绕组作三角形联接时 $I_L = \sqrt{3} I_{\phi}$ ，所以接成星形起动时的线电流减少为绕组作三角形运行时的 $(\frac{1}{\sqrt{3}}) \times (\frac{1}{\sqrt{3}}) = \frac{1}{3}$ 。由于转矩和电压平方成正比，所以起动转矩也减少到直接起动时的 $(\frac{1}{\sqrt{3}})^2 = \frac{1}{3}$ 。因此，这种起动方法只在空载或负载很小时应用。实际应用时，是使用接触器去完成 Y—△起动的。

(2) 利用自耦变压器起动

如图 1-10 所示，它是使用自耦变压器来起动感应电动机的联接法之一。

起动时，先把开关 P 合在 2 上，然后接通电源电压，这时通过自耦变压器把低电压接到电动机定子绕组上。当电动机转速接近额定值时，把开关 P 倒向 1，这时电动机已换接到电网电压上，且自耦变压器已切除。这种起动方式其起动电流与起动力矩都减少同样的倍数。一般设计以电源电压 40%、60%、80% 的抽头供选择使用起动电流及起动力矩减少的倍数近似为 $(0.4)^2$ 、 $(0.6)^2$ 、 $(0.8)^2$ 。这种起动方式的换接在实用中也是使用接触器去完成的。

(3) 延边三角形的起动

这种起动方式要求电机定子绕组每相在嵌线时多抽三个接线头（即电动机定子要抽出 9 个接线头），才能完成延边三角形（以△表示）起动，而运行时仍接成三角形联接接入电网。图 1-11 (a) 为延边三角形三相定子绕组的接法；(b) 图△为简化后的等效电路图。

从图中可以看出，△—△起动与人—△起动不同之处在于：△接法可以看成一部分是△形接法，另一部分是 Y 形接法，这样，接成 Y 部分的线圈数目越多，电动机的相电压就

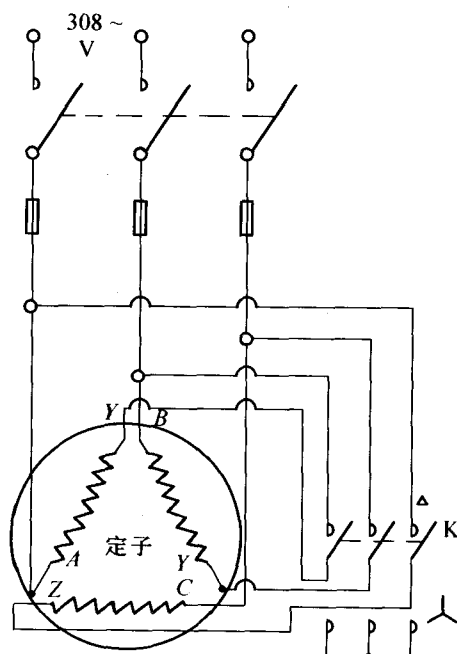


图 1-9 感应电动机 Y—△ 起动线路图