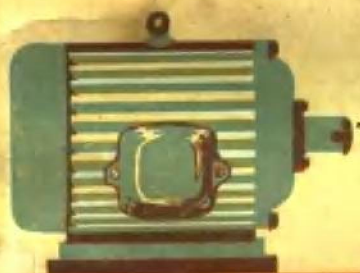


异步电机

西安交通大学电机专业



人民教育出版社

内 容 简 介

本书是西安交通大学电机专业革命师生，为了满足有实践经验的电机修理工人和中学教师从理论上提高的需要，在开门办学过程中由工人、学员、教师三结合编写的。书中主要讲述异步电机绕组、电势、磁势、磁路等基础知识，从理论上对异步电机的结构、运行、起动、调速做了分析，还讲到了异步电动机的使用、维护以及修理中的简单计算。全书以三相异步电动机为重点，对异步发电机的运行和单相异步电动机的结构、原理也做了简单介绍。

本书适于需要从理论上加深对异步电机了解的中学物理教师和电机教师，电机修理工人和技术人员阅读，也可供高等学校电机专业教学参考。

异 步 电 机

西安交通大学电机专业

*

人 民 教 育 出 版 社 出 版

新 华 书 店 北 京 发 行 所 发 行

人 民 教 育 出 版 社 印 刷 厂 印 装

*

1976年8月第1版 1977年3月第1次印刷

书号 13012·036 定价 0.70 元

编者的话

在无产阶级文化大革命的推动下，遵照伟大领袖毛主席“教育要革命”的教导，我校七·二一电机试点班在工人、解放军宣传队的直接领导下，坚持“教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合”的方针，于1970年在开门办学过程中，结合电机修理边实践边教学，由工人、学员、教师三结合编写了《电机修理》一书，并于1972年由陕西人民出版社出版。《电机修理》在全国发行后，得到广大工农兵的热情支持，提出了很多宝贵意见和进一步从理论方面提高的要求。同时，中学物理课和电机专业课的广大教师，在讲授异步电动机的教学实践中，也迫切要求从理论上对异步电动机的构造和工作原理有比较深入的了解。为了满足这些要求，我们结合电机专业73届工农兵学员的教学实践，由工人、学员、教师三结合编写了“异步电机”这本书。为了力争本书能切合读者需要，在编写过程中曾去一些中学做了调查研究，还分别举办了农村中学教师短训班和农村电工短训班，试用了本书部分初稿，听取了进一步修改的意见。

由于我们对马列主义和毛泽东思想学习还很不够，调查研究工作也做得不够充分，本书一定存在不少缺点和错误，欢迎广大读者批评指正。

在本书编写过程中得到陕西省中小学教材编辑组、陕西师范大学和西安地区有关中学的支持，西安电机厂和西安市建筑第二公司维修队的工人师傅对本书的编写提出了许多宝贵意见，在此表示感谢。

西安交通大学电机专业

1975年11月

目 录

第一章 异步电机的结构及基本工作原理.....	1
§ 1-1 异步电机的用途和特点.....	1
§ 1-2 三相异步电动机为什么会旋转.....	2
§ 1-3 异步电动机的结构.....	8
§ 1-4 异步电动机的铭牌和系列.....	14
§ 1-5 我国异步电机的生产概况.....	18
小结.....	20
第二章 异步电动机的绕组和电势.....	22
§ 2-1 与绕组有关的几个基本概念.....	22
§ 2-2 三相单层绕组.....	24
§ 2-3 三相双层迭绕组.....	37
§ 2-4 绕组的感应电势.....	43
§ 2-5 利用电势星形图分析绕组的安排及连接规律.....	57
§ 2-6 鼠笼式转子绕组.....	61
小结.....	64
第三章 异步电动机的磁势、磁路与修理中的简易 计算.....	66
§ 3-1 单相绕组的磁势.....	66
§ 3-2 三相基波旋转磁势.....	77
§ 3-3 异步电机中的主磁通、漏磁通及漏电抗.....	83
§ 3-4 异步电动机的磁路及激磁电流的简略计算.....	87
§ 3-5 异步电动机修理中的简易计算.....	95
小结.....	109
第四章 异步电动机的运行分析.....	111
§ 4-1 异步电动机的电势平衡方程式.....	112
§ 4-2 异步电动机的磁势平衡规律.....	116

§ 4-3	异步电动机的等效电路及其简化	119
§ 4-4	异步电动机的功率及转矩平衡关系	127
§ 4-5	异步电动机的电磁转矩和机械特性	135
§ 4-6	异步电动机工作特性的分析	145
小结		152
第五章	三相异步电动机的起动	154
§ 5-1	概述	154
§ 5-2	鼠笼式异步电动机的起动方法	155
§ 5-3	绕线式异步电动机的起动	165
§ 5-4	深槽及双鼠笼电动机	168
小结		172
第六章	异步电动机的调速	173
§ 6-1	变极调速	174
§ 6-2	变频调速	189
§ 6-3	改变转子电阻调节电动机的转速	191
§ 6-4	在转子回路接入附加电势调速(串级调速)	192
小结		194
第七章	异步电机的其它运行方式	196
§ 7-1	异步电机的制动运行状态	196
§ 7-2	异步发电机	202
§ 7-3	感应调压器	207
小结		209
第八章	单相异步电动机	211
§ 8-1	单相异步电动机的工作原理	211
§ 8-2	单相异步电动机的结构、类型和起动方法	215
§ 8-3	单相异步电动机的绕组和匝数计算	223
小结		231
第九章	异步电动机的使用和维护	233
§ 9-1	异步电动机使用前的检查	233
§ 9-2	异步电动机运行中的温升	234

§ 9-3	异步电动机运行中的故障原因	239
§ 9-4	异步电动机运行中的控制和保护	245
§ 9-5	异步电动机的定期检查维护	259
	小结	261
附录 I	复数、矢量与相量	263
附录 II	磁场及磁路	280
附录 III	谐波磁势及其绕组系数	297
附录 IV	异步电机的附加转矩	307
附录 V	主要电工量和它们的单位	319

第一章 异步电机的结构及 基本工作原理

§ 1-1 异步电机的用途和特点

异步电机也叫感应电机，它主要作为电动机用。异步电动机是现代化生产中应用最广泛的一种动力机械。例如，在工业方面，它被广泛地用于拖动各种机床，桥式起重机、水泵等设备也大多用异步电动机带动；在农业方面，它被用于拖动排灌机械、脱粒机和各种农副产品加工机械；在人民日常生活和医疗机械中异步电动机的应用也日益增多。

异步电动机所以能得到这样广泛的应用，是由于它比其他各种电动机有很多显著的优点。例如，鼠笼式异步电动机，结构简单，制造容易，运行可靠，维护方便，而且效率高、重量轻、价格低；与同容量、同转速的直流电动机相比，重量约为直流电动机的一半，价格仅为直流电动机的三分之一。但是，“事物都是一分为二的。”异步电动机也存在某些缺点，比较突出的缺点是调速性能差和功率因数低。因此，在调速性能要求比较高的场合，特别是在要求较宽的范围内实现平滑调速的场合，就不得不采用直流电动机；在单机容量较大，并且需要恒速运行时，则常常采用同步电动机，以改善电网的功率因数。

异步电机除作为电动机使用外，还可以作为发电机使用，

但工作性能较差。因此，异步发电机仅用于要求不高的山区农村小型电站中。

§ 1-2 三相异步电动机为什么会旋转

如果把一台三相异步电动机的定子绕组接到三相交流电源上，我们看到，电动机的转子就很快地转动起来，并且还能带动生产机械做功，例如带动机床加工机器的零件或带动水泵抽水。

电动机为什么会转动呢？为了说明这个问题，首先分析下面的实验。

一、载流导体在旋转磁场的作用下会受到电磁力

图 1-1 是一个简单的实验装置，其中有一个可用手柄转动的两极永久磁铁。在永久磁铁中间的是转子。沿转子的圆周均匀地分布着很多根细的导条，导条的两端分别用两个铜环把它们联接起来成为一个整体。

现在我们转动手柄使永久磁铁旋转，就会发现磁铁中间的转子也会跟着磁铁旋转。为了说明这个道理我们要用到物理和电工基础中学过的基本知识。

1. 当磁场相对导体运动时，就会在导体中感应出电势^① $e = Blv$ ，其中 l ——导体处在磁场中的长度， B ——导体切割到的磁通密度， v ——导体与磁场的相对速度。导体中感应电

^① 电机学中所说的“电势”，即物理学中的“电动势”。后面所说的“感应电势”，即物理学中的“感生电动势”（也叫“应电动势”）。

势的方向应根据发电机的右手定则确定。在图 1-1 中，先假设转子不动，当永久磁铁顺时针方向旋转时，则转子导体相对磁场是反时针方向运动。根据右手定则，转子上半部导体中的电势方向都是垂直纸面出来，用 \odot 表示，下半部导体中的电势方向都是垂直进入纸面，用 \otimes 表示。由于转子导条都是互相接通的，所以导体中一有电势就会有电流流通。假如我们不考虑导体中电势与电流的相位差，那么电流的方向就与电势的方向相同。

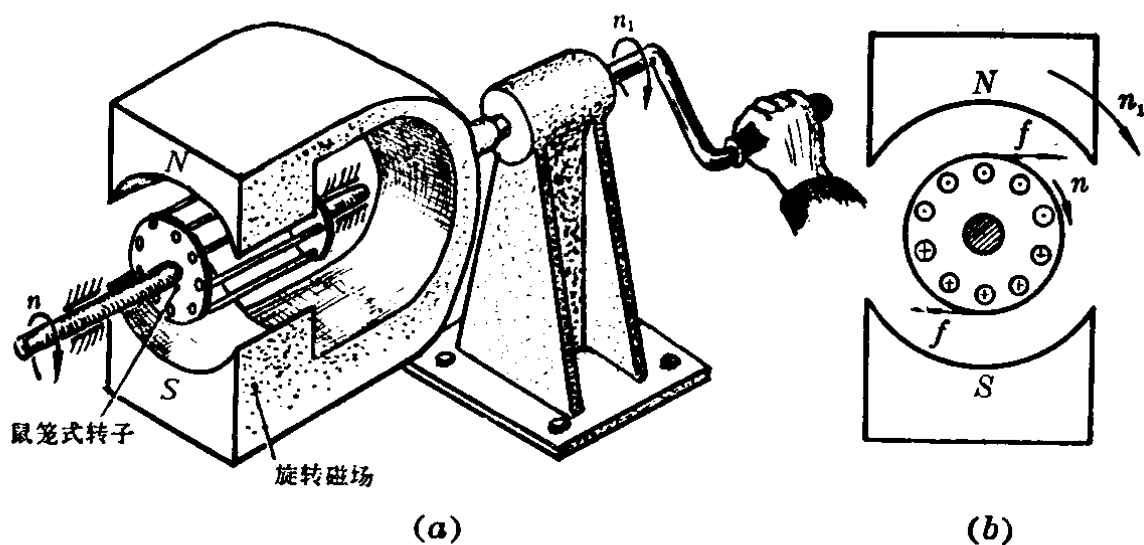


图 1-1

2. 我们从物理和电工基础中还不知道，载流导体在磁场中会受到电磁力的作用。这个力的大小可用公式 $f = Bli$ 来计算，式中 i 是导体中的电流。而导体所受电磁力的方向则由左手定则来确定。从图 1-1 可以看出，转子上半部各导条都受到了向右的力，转子下半部各导条都受到了向左的力，因此转子就会跟着磁铁顺时针方向转动。

从上面的分析中可以清楚地看到：当一个磁场在空间旋转时，处在磁场中的转子就会跟着它同方向地旋转。

三相异步电动机在接通三相电源后能够旋转也是这个道理。但是，在三相异步电动机中旋转磁场不是由旋转的永久磁铁产生，而是在对称的三相绕组中通入对称的三相电流所产生的。下面我们来分析它是怎样产生旋转磁场的。

二、在三相对称绕组中流过对称的三相电流会产生旋转磁场

我们以图 1-3 所示的两极异步电动机为例，说明三相绕组产生旋转磁场的情况。三相定子绕组由 $A-X$, $B-Y$, $C-Z$ 三个线圈组成，它们在空间彼此相隔 120° 。当定子三相线圈接至三相电源后，定子绕组中就有了一个对称的三相电流流过：

$$i_a = I_m \cos \omega t$$

$$i_b = I_m \cos (\omega t - 120^\circ)$$

$$i_c = I_m \cos (\omega t - 240^\circ)$$

各相电流随时间而变化的曲线如图 1-2 所示。当 $\omega t = 0$ 时，

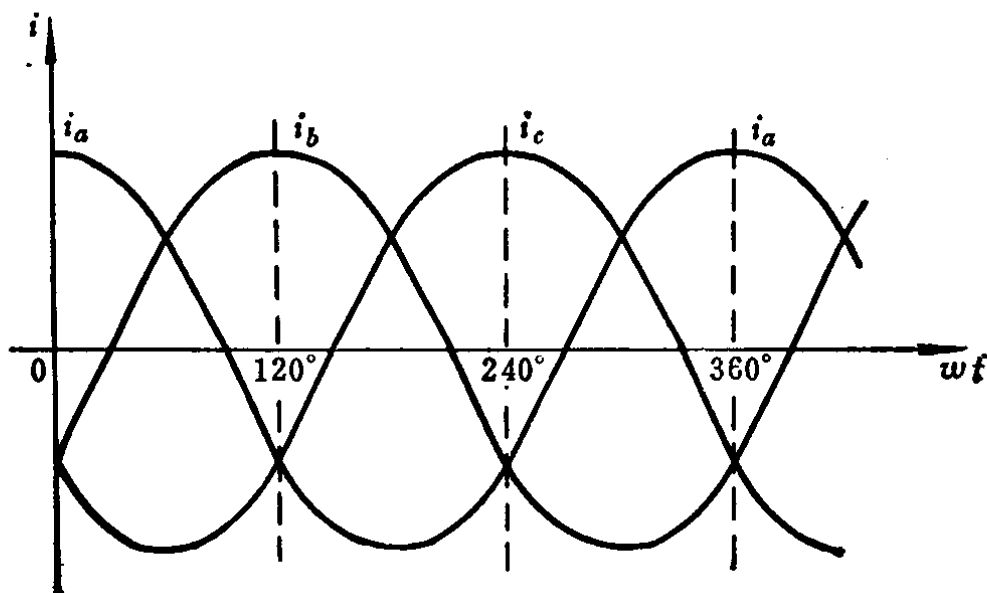
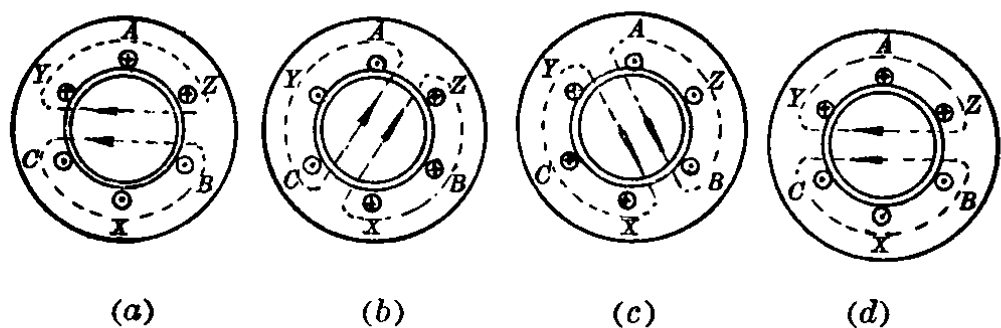


图 1-2

$i_a = I_m$, $i_b = i_c = -\frac{1}{2}I_m$ 。假如我们规定, 电流为正时, 电流从每相线圈的始端(即 A, B, C)流入, 而从每相线圈的尾端 (X, Y, Z)流出; 电流为负时则方向相反, 从线圈的始端流出而从线圈的尾端流入。以 $\omega t = 0$ 这一瞬间为例, 此时 $i_a = I_m$, 电流从 A 流入, 以 \oplus 表示, 而从 X 流出, 以 \ominus 表示; $i_b = i_c = -\frac{1}{2}I_m$, 都是负的, 所以电流分别从 B 及 C 流出(以 \ominus 表示), 而从 Y 及 Z 流入(以 \oplus 表示), 如图 1-3(a) 所示。由图可见上半部导体中的电流都是流入纸面, 下半部导体中的电流都是流出纸面。根据右手螺旋定则可知, 三相线圈中电流产生的磁场方向是从右向左。用同样的方法可以画出 $\omega t = 120^\circ$ 、 240° 、 360° 时的电流及磁通的方向, 分别如图 1-3(b)、(c) 及 (d) 所示。



(a) $\omega t = 0$ (b) $\omega t = 120^\circ$ (c) $\omega t = 240^\circ$ (d) $\omega t = 360^\circ$

$i_a = I_m$	$i_b = I_m$	$i_c = I_m$	$i_a = I_m$
$i_b = i_c$	$i_a = i_c$	$i_a = i_b$	$i_b = i_c$
$= -\frac{1}{2}I_m$	$= -\frac{1}{2}I_m$	$= -\frac{1}{2}I_m$	$= -\frac{1}{2}I_m$

图 1-3

比较图 1-3 中的 (a)、(b)、(c)、(d), 可以看出, 每当 ωt 变化了 120° , 磁场的方向就顺时针方向转过 120° ; 当 ωt 变化 360° , 即变化了一个周期, 磁场方向也就重新转回到从右向左。这说明在两极电机中, 电流变化一个周期, 旋转磁场在空间也正好转一周, 即 360° ; 电流每秒钟变化 f 周, 则旋转磁场每秒钟在空间旋转 f 转。现在我国交流电的频率 $f=50$ 周/秒, 所以两极异步电机产生的旋转磁场的转速

$$n_1 = f = 50 \text{ (转/秒)}$$

或

$$n_1 = 60f = 3000 \text{ (转/分)}$$

如果我们把三相绕组安排成图 1-4 所示, 从图 1-4(a) 中画出的 $\omega t=0, i_a=I_m, i_b=i_c=-\frac{1}{2}I_m$ 时的电流和磁通的分布情况, 可以看出它是一个 4 极磁通。当 ωt 每经过 120° , 从图 1-4 中可以看到磁场相应地在空间顺时针方向转过 60° 。电流变化了一个周期 (即 ωt 经过 360°), 磁场便在空间旋转了半周。对于频率 $f=50$ 周/秒 的电源, 4 极电机旋转磁场的转速 $n_1 = \frac{f}{2} = 25$ 转/秒, 或 $n_1 = \frac{60f}{2} = 1500$ 转/分, 它是两极

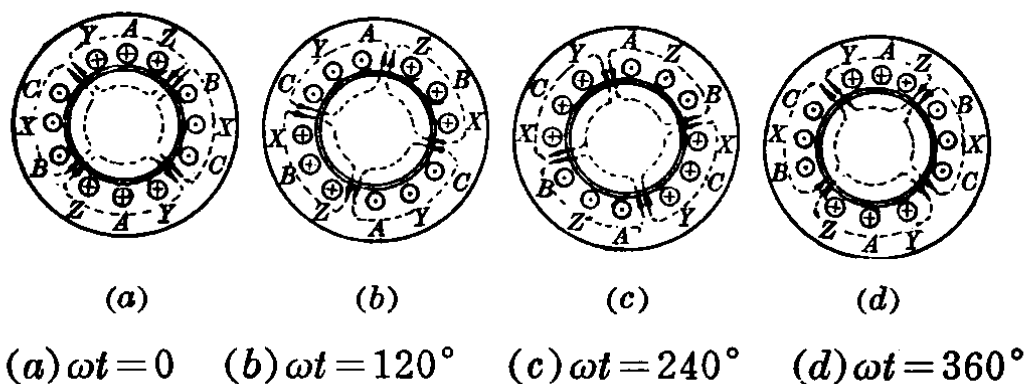


图 1-4

旋转磁场转速的一半。

只要适当地安排绕组,可以得到 3 对极, 4 对极或 p 对极的旋转磁场。按照前面作图的方法, 同样可以求得它们的转速, 3 对极时 $n_1 = \frac{60f}{3} = 1000$ 转/分; 4 对极时 $n_1 = \frac{60f}{4} = 750$ 转/分……当电机为 p 对极时, 旋转磁场的转速

$$n_1 = \frac{60f}{p} \text{ (转/分)} \quad (1-1)$$

从上面的分析我们知道了异步电动机的基本作用原理: 在异步电动机的三相绕组中通入三相对称电流会产生旋转磁场, 旋转磁场切割转子导条, 便在导条中感应出电势和电流, 磁场和电流相互作用就产生电磁力使电机转动起来。根据工农业生产的需要, 可以把绕组联成 2 极、4 极或其它的极数, 使旋转磁场有各种不同的转速, 以获得不同转速的电动机。

三、异步电动机转子的转速

异步电动机转子的转速是多少, 是不是与旋转磁场的转速相同呢?

从前面的分析知道, 异步电动机的转子所以能够转动, 是由于旋转磁场对转子有相对运动, 在转子导条中感应出电势和电流才能产生电磁力。假如电动机转子的转速 n 等于旋转磁场的转速 n_1 , 那么磁场与导条之间便没有相对运动, 因而不可能在导条中感应出电势和电流, 也不会产生电磁力来拖动机械负载而转动, 所以异步电动机转子的转速总是略小于旋转磁场的转速 n_1 。例如 4 极、4 千瓦异步电动机的 $n_1 = 1500$

转/分,在额定负载时它的转子转速约在 1440 转/分左右。一般,我们称旋转磁场的转速 n_1 为同步转速。异步电动机的转速 n 总是略小于同步转速 n_1 。正因为 n 总不同于 n_1 ,这种电动机才称为异步电动机。 n_1 和 n 之差称为转差,转差与 n_1 之比叫做转差率 s ,即 $s = \frac{n_1 - n}{n_1}$ 。

当电动机的负载变化时,转差率 s 也将随着变化,使电动机转子导体中的电势、电流和电磁转矩都发生变化,以适应负载的需要。由公式 1-1 可知,异步电动机的旋转磁场的转速 n_1 是由电网频率 f 和电动机的极的对数 p 决定的,对一台电动机来说,当电网频率 f 和极对数 p 一定时, n_1 是不变的,但是,电动机的转子转速 n 是随负载的变动而变化的。通常异步电动机的空载转差率约在 0.5% 以下,额定负载时转差率约在 2~5%。

§ 1-3 异步电动机的结构

异步电动机的结构主要分为以下两个部分:静止部分——定子;转动部分——转子。定子与转子之间有一个很小的间隙,称为气隙。图 1-5 为常见的一种异步电动机——封闭式鼠笼型三相感应电动机的主要部件图。下面简要地介绍异步电动机各主要部件的结构及作用。

一、定子

从上一节已知,在异步电动机的三相定子绕组中通过电

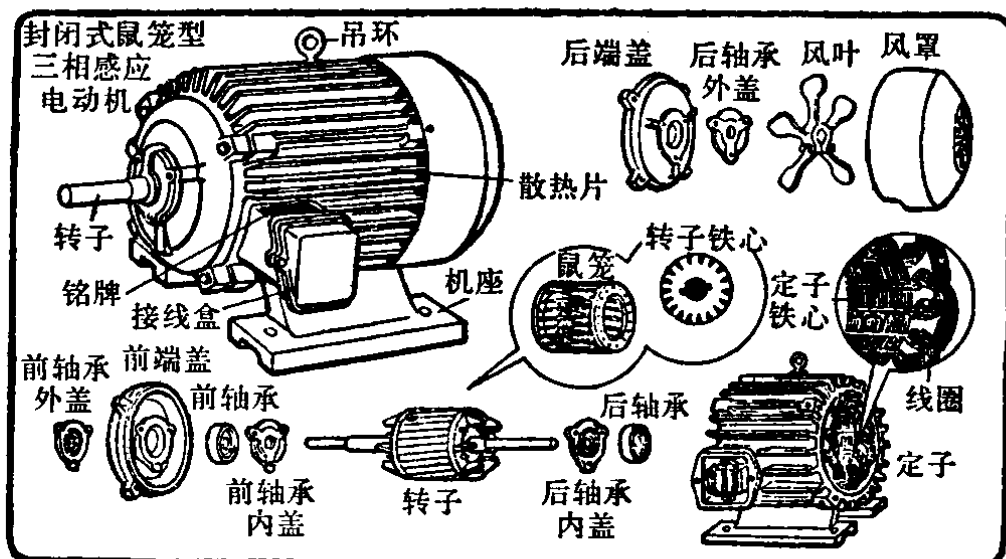


图 1-5

流时会产生旋转磁场，旋转磁场在转子绕组中感应出电势及电流，磁场与转子电流相互作用而产生电磁转矩。所以在异步电动机定子中必须包含有：通过电流的电路部分——绕组，使磁通能顺畅地通过的磁路部分——铁心，以及固定和支撑定子铁心的机座三个部分。

定子铁心是电动机磁路的一部分，由于异步电动机中产生的是旋转磁场，它相对定子以同步转速旋转，因此定子铁心中磁通的大小及方向都是变化的。为了减少磁场在定子铁心中引起的涡流损耗和磁滞损耗，定子铁心由 0.5 毫米厚的硅钢片迭成。对于容量较大的电动机(10 千瓦以上)，在硅钢片两面涂以绝缘漆，作为片间绝缘之用。定子硅钢片迭装压紧之后，成为一个整体的铁心，固定于机座内。对于中型或大型的异步电动机，为了使铁心中的热量能更有效地散发出去，在铁心中设有径向通风沟——风道，这时铁心沿长度方向被分成数段，每段铁心长约 40—60 毫米。两段铁心之间的径向通风

沟宽约 10 毫米，如图 1-6 所示。对于小型异步电动机，由于铁心长度较短，散热较容易，因此不需要径向通风沟。

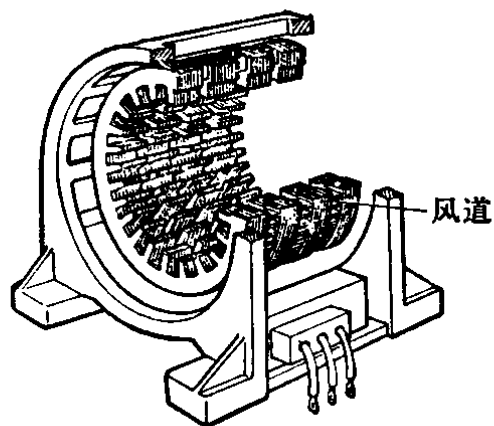


图 1-6

在定子铁心内圆均匀地分布着许多形状相同的槽，用以嵌放定子绕组。槽的形状由电机的容量，电压及绕组的型式决定。异步电动机常用的定子槽形如图 1-7 所示。容量在 100 千瓦以下的小型异步电动机都采用图 1-7(a) 所示的半闭口槽，槽口的宽度小于槽宽的一半，定子绕组由高强度漆包圆铝线或圆铜线绕成，经过槽口分散嵌入槽内。在线圈与铁心间衬以聚脂薄膜青壳纸作为槽绝缘。半闭口槽的优点是槽口较小，可以减小主磁路的磁阻，使产生旋转磁场的激磁电流减小。其缺点是嵌线很不方便。

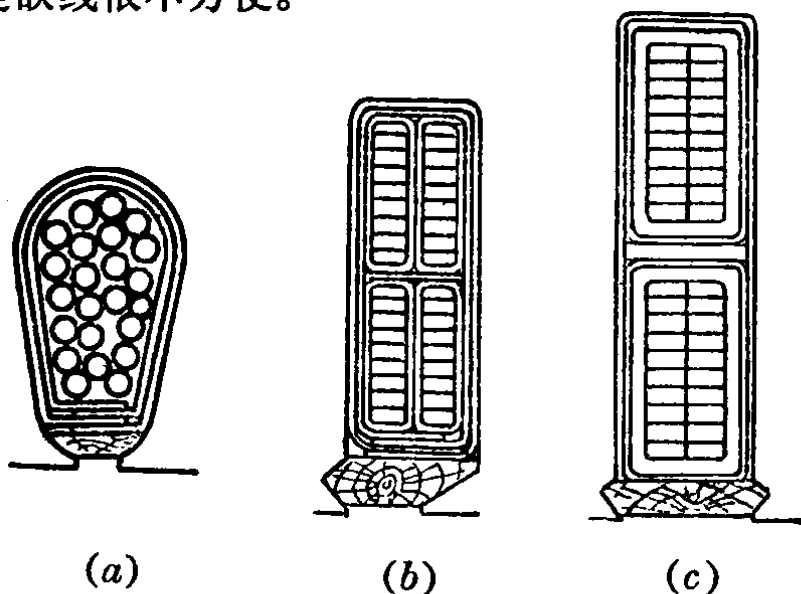


图 1-7

电压在 500 伏以下的中型异步电动机，通常都用图 1-7

(b) 所示的半开口槽。半开口槽的槽口宽度稍大于槽宽的一半。这时绕组用高强度漆包扁铝线或扁铜线，或用玻璃丝包扁铜线绕成。线圈沿槽内宽度方向布置成双排。

对于高电压的中型或大型异步电动机都用开口槽，如图 1-7(c)，槽口的宽度等于槽宽，下线方便。

近年来为了实现自动化嵌线，中小型异步电动机有的也采用开口槽，并采用磁性槽楔（由合成树脂与铁粉或铁丝等材料制成），以补偿槽口增大后对磁阻的影响，使其仍达到半闭口槽的效果。

定子绕组是由线圈按一定的规律嵌入定子槽中，并按一定的方式联接起来的。根据定子绕组在槽中的布置情况，可分为单层及双层绕组。容量较大的异步电动机都采用双层绕组。双层绕组在每槽内的导线分为上下两层，如图 1-7(b) 及 (c) 所示，上层及下层线圈之间需要用层间绝缘隔开。双层绕组的端部连接形状如图 1-8。对于小容量异步电动机（10 千瓦以下）常采用单层绕组，这时每槽中只有一层导线，如图 1-7(a) 所示。至于绕组的连接方法将在第二章详细介绍。

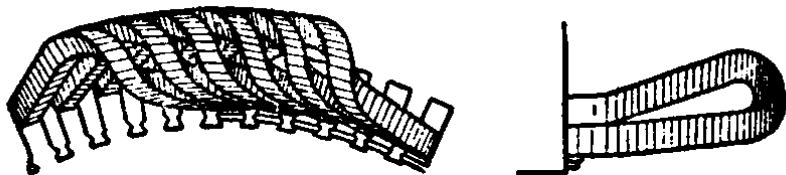


图 1-8

机座的作用主要是固定和支撑定子铁心。中小型异步电动机一般都采用铸铁机座，并根据不同的冷却方式而采用不同的机座型式。例如小型封闭式电动机，电机中损耗变成的热量全都要通过机座散出，为了加强散热能力，在机座的外表