

三相与单相 **异步电机**



陕西科学技术出版社

三相与单相
异步电机

汪国樑 沈官秋 编著
何秀伟

陕西科学技术出版社出版

(西安北大街 131 号)

陕西省新华书店发行 国营五二三厂印刷

开本 787×109 1/32 印张 15.125 字数 321,000

1981 年 1 月第 1 版 1981 年 1 月第 1 次印刷

印数 1—15,000

统一书号: 15202·18 定价: 1.32 元

内 容 简 介

本书主要讲述三相和单相异步电机的基本原理、绕组、电势、磁势和磁路等基础知识，从理论上对三相和单相异步电机的运行特性、起动、调速以及电磁噪声和振动等进行了分析。第一篇以三相异步电动机为重点，对其他运行状态也做了简单的介绍，还讲述了三相异步电动机的使用、维护以及修理中的简单计算。第二篇介绍了常用的单相异步电动机，如电容起动和电阻起动电动机、电容运转电动机、罩极电动机等，还讲述了单相异步电动机的正弦绕组和三相异步电动机的单相运行。

本书适于高等院校和中等技术学校电类专业师生的教学参考，并可供工矿企业电工和有关工程技术人员需要从理论上加深对异步电机了解的读者阅读。

编 者 的 话

1972年我校编的“电机修理”一书出版后（由陕西人民出版社出版），读者纷纷来信，希望从理论上加深对电机的了解。1976年我校又编了“异步电机”一书（由人民教育出版社出版）；书中主要介绍了三相异步电动机的原理、运行性能及简单计算等方面的知识。这次出版的“三相及单相异步电动机”是在原“异步电机”一书的基础上修订而成的。修订时根据广大读者的要求，作了下面三点更动：（1）对三相异步电机的内容作了适当的调整和增补；（2）比较系统地介绍了单相异步电动机的原理及性能；（3）增加了异步电机的电磁振动和噪声的内容。在编写方法上，尽可能做到由浅入深、通俗易懂、便于自学。

本书适于高等院校和中等技术学校电类专业师生的教学参考，并可供工矿企业电工和有关工程技术人员需要从理论上加深对异步电机了解的读者阅读。

本书2至4章和附录Ⅰ、Ⅱ由何秀伟同志编写；1章，5至9章和附录Ⅲ由沈官秋同志编写；10至13章和附录Ⅳ由汪国樑同志编写；周建枢同志参加了附录Ⅰ的撰稿；邱元仁同志参加了第2章的撰稿。西安交大电机教研室的许多同志为编写本书给予了多方面的帮助。本书还得到西安电机厂和西安市建二公司设备队等单位的大力支持，谨此表示感谢！

由于我们的水平有限，书中缺点和错误在所难免，请广大读者提出批评和指正。

1979年12月

目 录

第一篇 三相异步电机

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
小 结	21
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	81
§ 3-3 三相绕组的谐波磁势	87
§ 3-4 异步电机中的主磁通、漏磁通及漏电抗	91
§ 3-5 异步电动机的磁路及激磁电流的简略计算	95

§ 3-6 异步电动机修理中的简易计算.....	103
小 结	117
第四章 异步电动机的运行分析	119
§ 4-1 异步电动机的电势平衡方程式.....	120
§ 4-2 异步电动机的磁势平衡规律.....	124
§ 4-3 异步电动机的等效电路及其简化.....	127
§ 4-4 异步电动机的功率及转矩平衡关系.....	135
§ 4-5 异步电动机的电磁转矩和机械特性.....	143
§ 4-6 异步电动机工作特性的分析.....	153
小 结	160
第五章 异步电机的其它运行方式.....	162
§ 5-1 异步电机的制动运行状态.....	162
§ 5-2 异步发电机.....	168
§ 5-3 感应调压器.....	173
小 结	175
第六章 异步电动机的起动	176
§ 6-1 概述.....	176
§ 6-2 鼠笼式异步电动机的起动方法.....	177
§ 6-3 绕线式异步电动机的起动.....	187
§ 6-4 深槽及双鼠笼电动机.....	190
§ 6-5 异步电机的附加转矩.....	194
小 结	204
第七章 异步电动机的调速	206
§ 7-1 变极调速.....	207
§ 7-2 变频调速.....	221
§ 7-3 改变转子电阻调节电动机的转速.....	223
§ 7-4 在转子回路接入附加电势调速 (串级调速)	224
小 结	226

第八章 异步电动机的圆图	228
§ 8-1 R 、 L 串联电路的电流圆图	228
§ 8-2 异步电动机的简化圆图	229
§ 8-3 异步电动机圆图的作法	231
§ 8-4 从圆图上求取异步电动机的工作特性	234
§ 8-5 较准确圆图及其物理解析	243
小 结	248
第九章 异步电动机的使用和维护	250
§ 9-1 异步电动机使用前的检查	250
§ 9-2 异步电动机运行中的温升	251
§ 9-3 异步电动机运行中的故障原因	256
§ 9-4 异步电动机运行中的控制和保护	262
§ 9-5 异步电动机的定期检查维护	277
小 结	278

第二篇 单相异步电动机

第十章 单相异步电动机的工作原理、类型与 结构	280
§ 10-1 单相绕组磁势的性质	280
§ 10-2 单相异步电动机的工作原理与性能	285
§ 10-3 转子绕组对负序磁场的阻尼作用	289
§ 10-4 两相绕组的磁势	291
§ 10-5 单相异步电动机的类型	294
§ 10-6 单相异步电动机的容量等级与结构简介	303
小 结	308
第十一章 单相电容运转异步电动机	310
§ 11-1 绕组折算	311
§ 11-2 对称分量法	313

§ 11-3	单相电容运转异步电动机的等效电路	315
§ 11-4	单相电容运转异步电动机的电流和转矩	321
§ 11-5	单相异步电动机的损耗计算	326
§ 11-6	产生圆形旋转磁场的条件	330
小 结		332
第十二章 单相电容起动及单相电阻起动异步电动机		
§ 12-1	等效电路	334
§ 12-2	工作特性计算	338
§ 12-3	起动电流与起动转矩	341
§ 12-4	单相电容起动异步电动机中起动电容的决定	346
§ 12-5	单相电阻起动异步电动机中副绕组电阻的决定	357
§ 12-6	单相电阻起动、单相电容起动及单相电容运转异步电动机的性能对比	363
§ 12-7	三相异步电动机在单相电源下工作	367
小 结		372
第十三章 附加转矩与正弦绕组		
§ 13-1	单相电机中的谐波磁势	374
§ 13-2	同步附加转矩的产生	379
§ 13-3	产生同步附加转矩谐波次数的确定	382
§ 13-4	正弦绕组	386
§ 13-5	转子斜槽	391
§ 13-6	正弦绕组的绕组系数计算	394
小 结		396
附录 I	复数、矢量和相量	400
附录 II	磁场及磁路	417
附录 III	异步电机的电磁振动和噪声	434
附录 IV	单相异步电动机的技术数据	450

表-1	JX 系列单相电容运转异步电动机技术数据	450
表-2	JX 系列单相电容运转异步电动机绕组排列方法	452
表-3	JY 系列单相电容起动异步电动机技术数据	454
表-4	JZ 系列单相电阻起动异步电动机技术数据	456
表-5	BO 系列单相电阻起动异步电动机技术数据	458
表-6	CO 系列单相电容起动异步电动机技术数据	460
表-7	DO 系列单相电容运转异步电动机技术数据	462
表-8	正弦绕组分布和谐波强度	464

第一篇 三相异步电机

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，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 (a) 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

① 电机学中所说的“电势”，即“电动势”。后面所说的“感应电势”，即“感生电动势”（也叫“应电动势”）。

割到的磁通密度， v ——导体与磁场的相对速度。导体中感应电势的方向应根据发电机的右手定则确定。图 1-1 (b) 所示为图 1-1 (a) 的轴向视图，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。

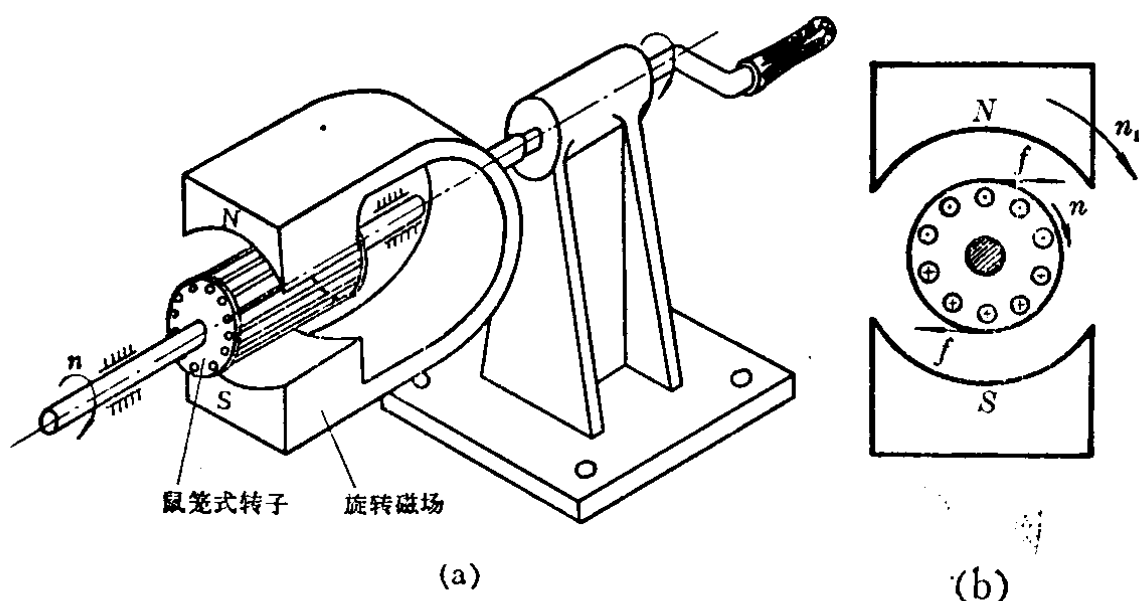


图 1-1

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 (b) 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 $\omega t = 0$

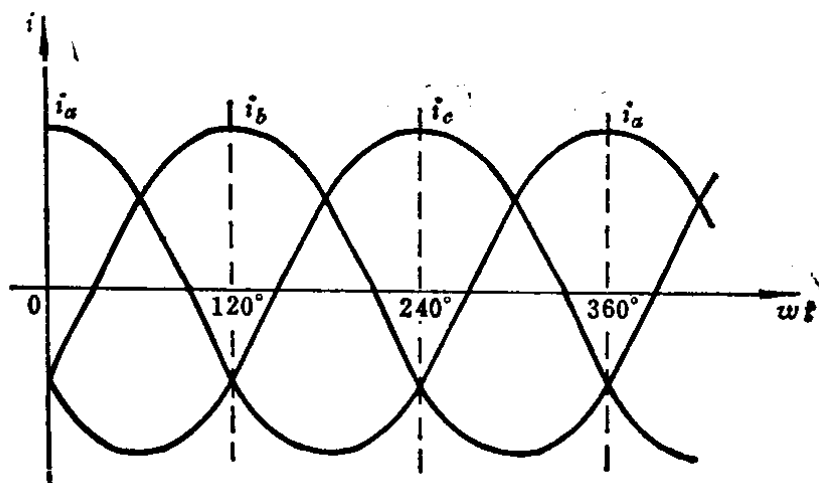


图 1-2

时, $i_a = I_m$, $i_b = i_c = -\frac{1}{2}I_m$. 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。

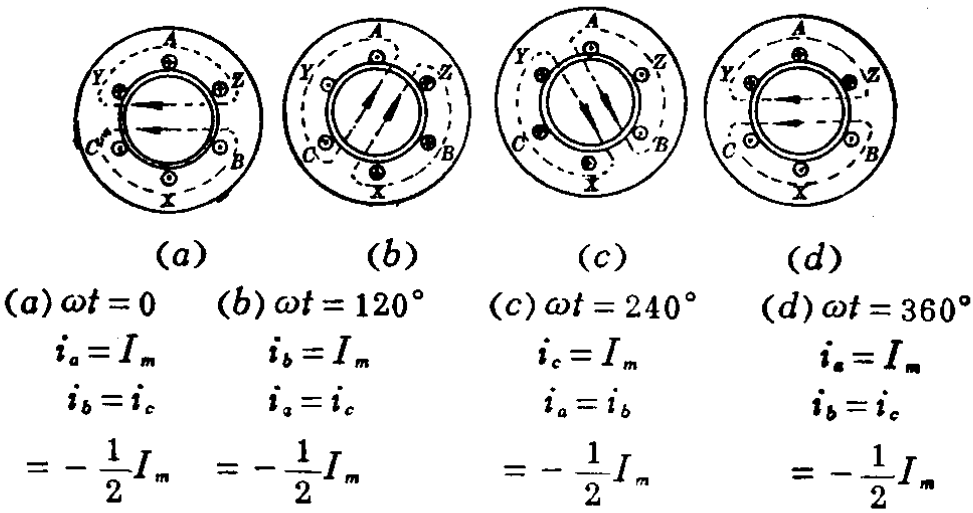


图 1-3

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，它是两极旋转磁场转速的一半。

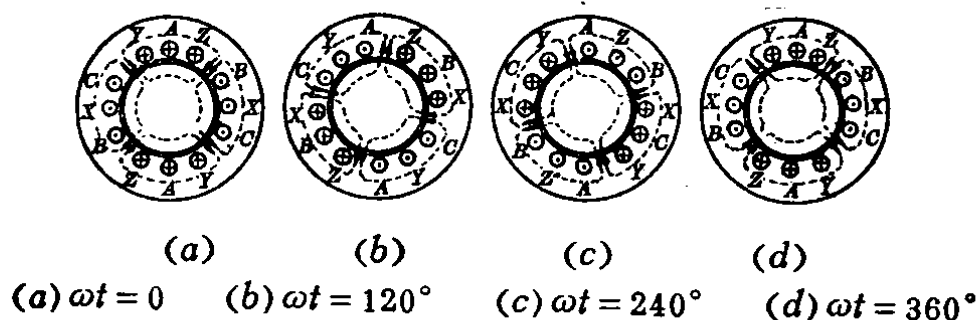


图 1-4

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。

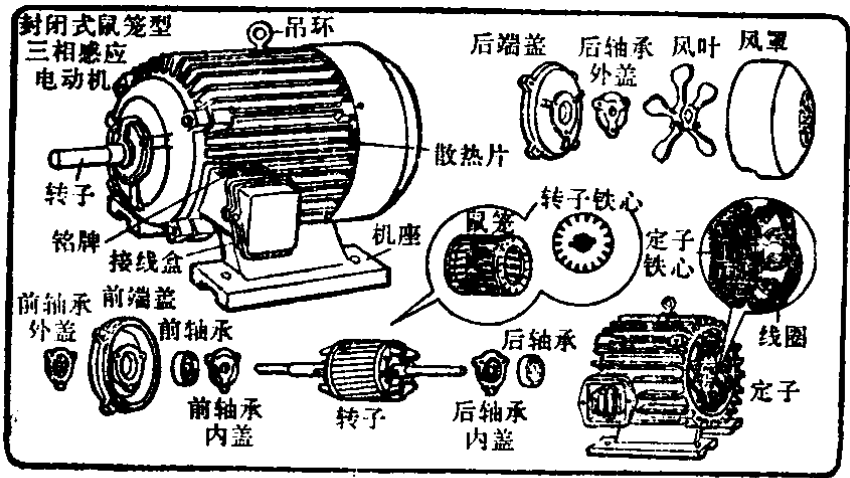


图 1-5