



QIZHONG YUNSHU
JIXIE DIANQI SHEBEI

起重运输机械
电气设备

中国铁道出版社

起重运输机械电气设备

刘瑞琦 李元章 戴文一 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 褚书铭 封面设计 刘景山

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：16.25 字数：383 千

1984年5月 第1版 第1次印刷

印数：0001—10,000册 定价：2.05元

内 容 提 要

本书较详细地介绍了起重运输机械电力拖动系统中的电气设备。全书共分三篇。第一篇阐述了异步电动机、直流电动机的工作原理与特性，起动、制动及各种调速方法；第二篇介绍了起重运输机械最常用的控制电器和保护电器的结构、性能及其选择方法，并对电线、电缆和移动供电装置的选用作了介绍；第三篇叙述了电力拖动系统的基本控制电路和保护电路，并针对几种典型起重运输机械的总体电路进行了具体分析。

本书可供从事起重运输机械设计、管理及教学人员参考。

前 言

一台完整的生产机械包括有动力设备、控制设备、传动机构和工作机构四大部分，前三部分统称为拖动系统。以电动机作为动力设备的拖动系统称为电力拖动系统。在电力拖动系统中，电动机把电能转换成机械能，通过传动机构把机械能传递给工作机构，使它运转。控制设备的任务是控制动力设备（在电力拖动系统中就是电动机），使它能够正确地、安全地按照人们的要求进行工作。传动机构的任务是把动力设备与工作机构结合起来，使它们之间的速度配合和运转方向的改变能够满足要求。

由于电力拖动系统较其他形式的拖动系统具有能源获得方便，经济效益高，技术性能好，易于控制等突出优点，所以得到广泛应用。在起重运输机械中，电力拖动占有非常重要的地位。为了满足起重运输机械的设计、管理及教学人员的需要，本书分三篇介绍了起重运输机械电力拖动系统的动力设备（电动机）、控制与保护设备（电器）以及由它们所组成的具有某种功能的电路。为结合装卸作业实际，书中选用了几种常见的、典型的装卸机械，对它们的电路、原理及应用作了介绍。

本书由戴文一提出初稿，刘瑞琦、李元章重新整理、编写。由于编者水平所限，加之编写时间仓促，书中难免有错误及不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第一篇 电动机

第一章 异步电动机	1
第一节 异步电动机的结构概述.....	1
第二节 异步电动机的型号和技术数据.....	3
第三节 异步电动机的工作原理.....	5
第四节 异步电动机的运行分析和等效电路.....	8
第五节 异步电动机的功率.....	16
第六节 异步电动机的电磁转矩与机械特性.....	18
第七节 异步电动机的工作特性.....	25
第八节 异步电动机的各种工作状态.....	27
第九节 异步电动机的起动.....	30
第十节 异步电动机的调速.....	36
第十一节 异步电动机的选择.....	57
第二章 直流电动机	60
第一节 直流电动机的工作原理.....	60
第二节 直流电动机的结构.....	62
第三节 直流电动机的型号及技术数据.....	64
第四节 直流电动机的分类.....	65
第五节 直流电动机的电压、功率与转矩平衡方程式.....	66
第六节 直流电动机的稳定运行条件.....	68
第七节 直流电动机的电枢反应.....	69
第八节 直流电动机的工作特性.....	70
第九节 直流电动机的起动.....	74
第十节 直流电动机的制动.....	78
第十一节 直流电动机的调速.....	83

第二篇 电 器

第三章 常用电器	93
第一节 概 述.....	93
第二节 几种常用的开关.....	95
第三节 接触器.....	101
第四节 起动器.....	107
第五节 控制器.....	111
第六节 电阻器.....	114
第七节 熔断器.....	121
第八节 继电器.....	127
第九节 保护箱.....	133

第十节 电线、电缆和移动供电装置136

第三篇 电 路

第四章 电力拖动电路的基本知识145

第一节 电路原理图的构成145

第二节 电路原理图的绘制原则145

第三节 对控制电路的基本要求148

第四节 关于电器的选择与联接问题148

第五节 关于电路选择与设计的有关问题150

第五章 电动机的起动电路153

第一节 鼠笼型异步电动机的直接起动电路153

第二节 鼠笼型异步电动机的降压起动电路160

第三节 绕线型异步电动机的起动电路164

第四节 异步电动机的制动电路166

第五节 直流电动机的起动与制动电路168

第六节 按行程准则对异步电动机和直流电动机正、反转的控制169

第六章 电动机的调速电路170

第一节 变极调速电路170

第二节 定子调压调速电路172

第三节 涡流制动器与电磁转差离合器-异步电动机调速174

第四节 串级调速电路177

第五节 变频调速电路182

第六节 异步电动机的三相不对称调压调速电路184

第七节 绕线型异步电动机的改变转子电阻调速电路185

第八节 串激直流电动机的调速电路196

第七章 电动机的保护电路199

第一节 短路电流保护199

第二节 过电流保护201

第三节 过热保护202

第四节 零压及欠压保护203

第五节 零磁保护205

第六节 交流起重机保护箱206

第八章 几种起重运输机械的总体电路207

第一节 龙门起重机电路207

第二节 卸煤机电路214

第三节 电瓶叉车电路220

第四节 电动轮胎起重机电路227

第五节 起重电磁铁电路231

附 录234

第一篇 电动机

电动机的种类颇多，按其取用电源性质的不同有：交流电动机和直流电动机。交流电动机又分为同步电动机和异步电动机两种；直流电动机根据激磁方式不同，可分为串激、并激、复激和他激电动机。在起重运输机械中使用最多的是异步电动机，以及直流电动机。本篇将着重介绍这些电动机的各种特性、工作状态和主要参数。

第一章 异步电动机

异步电动机也叫感应电动机，是现代化生产中应用很广的一种动力机械。这是因为它具有结构简单，制造容易，运行可靠，维护方便，效率高，造价低，重量较轻等优点。但是与直流电动机比较也存在缺点：调速性能差，功率因数低。在目前电子技术迅速发展情况下，尤其是可控硅元件问世以后，为改善异步电动机的调速性能开辟了广阔的道路。因此，异步电动机的应用将更加广泛。

第一节 异步电动机的结构概述

异步电动机的结构可分三个部分：静止部分，即定子；转动部分，即转子；在定子与转子之间留有很窄小的空间，这部分称为气隙。

一、定 子

定子是异步电动机磁路的一部分，在这里产生所谓的“旋转磁场”（其工作原理将在后面介绍）。为防止交变磁场在定子铁芯中引起涡流损耗和磁滞损耗，所以定子铁芯是用0.5毫米厚并且互相绝缘的硅钢片叠成。将定子铁芯固定在机座上，铁芯内侧开有径向沟槽——风道，其宽约10毫米，如图1—1—1所示。

在定子铁芯内圆，均匀地分布着许多形状相同的槽，用以嵌放定子绕组。

定子绕组是由线圈按照一定的规律嵌入定子槽中，并以适当的方式联接起来。按定子绕组在定子槽中布置的情况不同，可分为单层绕组和双层绕组。容量较大的异步电动机都采用双层绕组，而小容量的异步电动机（10千瓦以下）多采用单层绕组。定子的三相绕组的首端、末端都引到机座上的接线盒里。

机座的作用主要是固定和支撑定子铁芯。中、小容量的异步电动机一般都采用铸铁机

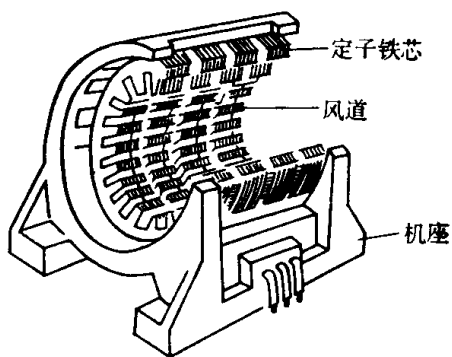


图1—1—1 定子铁芯和机座

座。此外，根据不同的冷却方式可采用不同型式的机座。

二、转 子

转子是电动机的旋转部分，它是由转子铁芯、轴和转子绕组等构成。转子铁芯一般用0.5毫米厚的硅钢片迭成，在转子铁芯的外圆上有许多槽，槽中嵌放着转子绕组。转子的轴是由中碳钢制成，两端的轴颈与轴承相配合，一般是支撑在电动机的端盖上，轴的伸出端有键槽，用以固定皮带轮或联轴器，与被拖动的工作机构相连接。根据转子绕组型式的不同，可分为鼠笼型转子和绕线型转子两大类。

1. 鼠笼型转子

鼠笼型转子的绕组由许多根导条组成，导条是用铜或铝材料制成的，把它们嵌放在转子铁芯外圆的槽中，导条的两端与铜或铝制成的端环焊接在一起，其外形如鼠笼，故得名。中、小容量的鼠笼型电动机多采用铸铝转子。它的导条、端环和风叶可以一起铸出，其外形如图1—1—2。

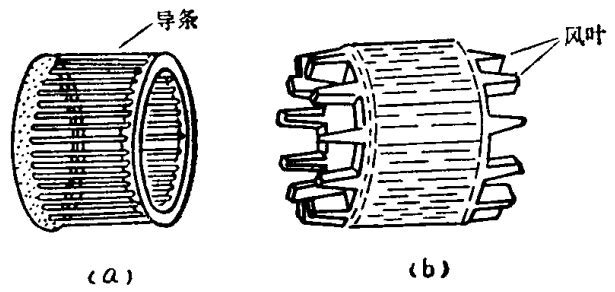


图1—1—2 鼠笼型转子
(a) 鼠笼型转子绕组；
(b) 鼠笼型铝铸转子的外形。

2. 绕线型转子

绕线型转子的绕组与定子绕组相似，它是由绝缘导线连成的三相对称绕组，将每相绕组的一端接在一起，构成Y型连接；另端分别接到固定在轴上的三个铜制的集电环（或称滑环）上。然后通过压在集电环上的三组碳刷，将转子的三相绕组与三组附加电阻接起来，这三组附加电阻也接成Y型。绕线型转子的外形见图1—1—3。

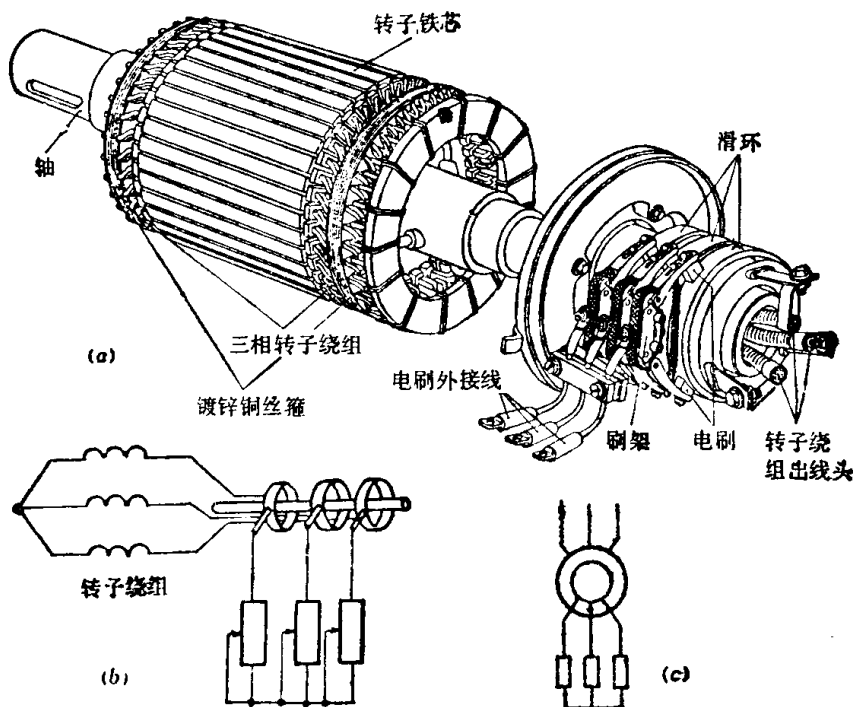


图1—1—3 绕线型转子
(a) 外形图；(b) 接线示意图；(c) 代表符号。

具有鼠笼型转子的异步电动机称为鼠笼型异步电动机；具有绕线型转子的异步电动机则称为绕线型异步电动机。它们的外形见图 1—1—4。

鼠笼型异步电动机较绕线型异步电动机结构简单，制造方便，价格低廉，坚固耐用。但是，起动及调速性能都不如绕线型异步电动机。所以在要求起动电流小、起动转矩大的情况下，多采用绕线型异步电动机。

三、气 隙

定子与转子之间所保留的间隙称为气隙。在异步电动机中，气隙一般为 0.2~1 毫米。气隙不能太大，也不能太小。气隙愈

大，电动机的磁阻则愈大，产生同样强度的旋转磁场所需要的激磁电流也就愈大，这会使电动机的功率因数 ($\cos \varphi$) 降低。但是，气隙也不应太小，否则会给装配工作造成困难，而且运转也不安全（定子与转子可能相擦）。

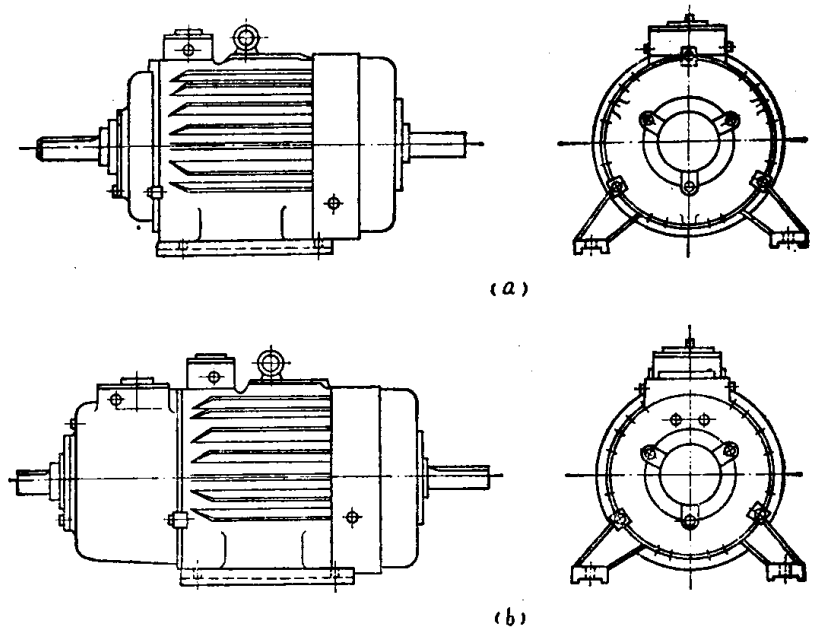


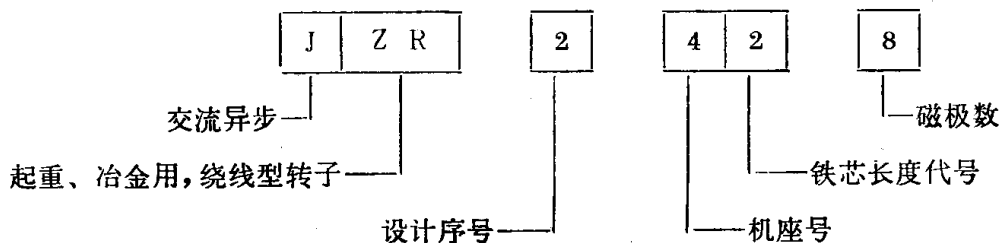
图 1—1—4 异步电动机的外形图
(a) 鼠笼型； (b) 绕线型。

第二节 异步电动机的型号和技术数据

每台电机上都装有铭牌，上面标有型号、运行条件和有关技术数据，以便为选用、安装、维修提供依据。

一、型 号

型号是表示电机的品种、性能、防护型式和转子类型的代号。现以 JZR 2-42-8 型异步电动机为例，说明电动机型号中各部分文字所代表的意义。



第一部分字母表示电动机的类型。J 表示交流异步电动机。第二部分字母表示性能、防护型式及转子类型。异步电动机常见的第二部分字母有：O——封闭式；DO——多速，封闭式；HO——高转差率，封闭式；R——绕线型转子；RO——绕线型转子，封闭式；QO——高起动转矩，封闭式；B——防爆型；Z——起重及冶金用；ZR——起重及冶金用，绕

线型转子。第三部分是数字，表示设计序号。第四部分是数字，表示机座号。还有的电动机有第五部分，是字母，表示铁芯长度的代号：S——短，M——中，L——长；如果是数字，则表示铁芯长度序号。第六部分是数字，表示极数。

二、技术数据

1. 额定电压 U_n ：指电动机在正常运转条件下，给定子绕组所加的电压，单位是“伏”。
2. 额定电流 I_n ：指电动机在正常运转条件下，定子绕组所加的电压又是额定电压时，定子绕组中的电流，单位是“安”。
3. 额定输出功率 P_n ：指电动机的定子绕组加额定电压，并且定子电流为额定电流时，由转子所输出的机械功率，单位是“千瓦”。
4. 额定转速 n_n ：指电动机在额定电压、额定输出功率下，转子的转速，单位是“转/分”。
5. 接法：指电动机在额定电压下，定子三相绕组应该采用的连接方法。一般有三角形 (Δ) 和星形 (Y) 两种接法。使用时应按铭牌指定的接法连接。有的电机铭牌上附有接线图。若铭牌上标有两个额定电压和额定电流，而且标明的接法是 Δ/Y ，则表示前一个电压和电流值是指在 Δ 形接法下的额定值，后一个是指在 Y 形接法下的额定值。
6. 额定功率因数 $\cos \varphi_n$ ：指在额定电压、额定输出功率情况下，定子绕组的功率因数。一般小容量异步电动机的功率因数约为 0.75；大容量异步电动机的功率因数约为 0.9。
7. 额定效率 η_n ：指在额定电压、额定输出功率的情况下，输出的机械功率与输入的电功率（指有功功率）之比值。
8. 绝缘：表示电动机绕组的绝缘等级，它决定了电动机的允许温升（也有的电动机上标明的是允许温升）。绝缘等级与允许温升间的关系如表 1—2—1。

表 1—2—1

绝缘等级	A	E	B	F	H	C
允许最高温度 $^{\circ}\text{C}$	105	120	130	155	180	180以上

9. 工作方式：按电动机运行的持续时间，工作方式可分为“连续”、“短时”和“断续”三种。“连续”表示电动机可以在额定条件下连续运行。“短时”表示只能按铭牌规定的时间范围，输出额定功率短时运行，一般分为 30 分钟、60 分钟等。“断续”表示电动机可以断续工作，每次工作时间不长，中间有一段间歇时间。对于断续工作方式常用暂载率（亦称接电持续率） $JC\%$ 表示电动机在一个工作周期里相对工作时间的长短。它等于电动机在一个工作周期里工作时间与工作周期（工作时间 + 间歇时间）之比，即：

$$JC\% = \frac{\text{工作时间}}{\text{工作时间} + \text{间歇时间}} \times 100\% \quad (1-2-1)$$

起重用的电动机如 JZR、JZR2、JZ、JZ2 系列，铭牌上所标的额定功率是指暂载率为 25% 情况下的额定输出功率。若在实际使用中暂载率高于 25% 时，输出功率应适当降低；反之，若实际使用的暂载率低于 25% 时，输出功率可适当提高。可用公式 1—11—4 和 1—11—5 进行换算。

10. 标准编号：表示设计该电动机所依据的技术文件，“GB”为国家标准，“JB”为机械工业部部颁标准，后面的数字表示技术文件的编号。

绕线型异步电动机的铭牌上还标有转子绕组的开路电压和转子绕组的额定电流，作为配用起动电阻时的依据。

第三节 异步电动机的工作原理

一、转子在旋转磁场中的转动

如果将异步电动机定子的三相绕组接通三相交流电源，则电动机的转子就会旋转起来。为解释这个道理，我们先作一个简单的实验。如图 1—3—1 所示，一个鼠笼型转子，它的轴放在轴承上，使转子能自由转动，在转子的外面放一个永久磁铁，并使磁铁也能在轴承上转动。当操作手柄使磁铁旋转时，处在中间的转子，虽然与磁铁之间没有机械联系，但是它随着磁铁的旋转，朝同一个方向旋转起来。这是因为当磁铁旋转时，处在中间的转子绕组的导条切割磁力线，就会在导条中产生感应电势，它的最大值为：

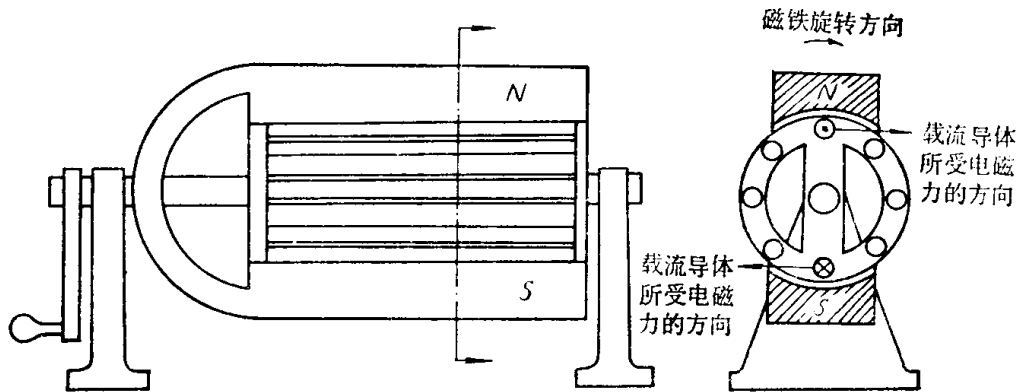


图 1—3—1 转子在可旋转的永久磁铁的磁场中转动

$$E = Blv \quad (1-3-1)$$

式中 E —— 导条中产生的感应电动势；
 B —— 导条所在空间的磁感应强度；
 l —— 导条在磁场中的有效长度；
 v —— 导条与磁场之间相对运动速度。

摇动手柄，使磁铁顺时针方向旋转时，则可认为转子导条相对于磁场是逆时针方向旋转。由于导条两端是相互连通的，所以当导条中产生感应电动势后就会有电流流过。电流的方向用发电机右手定则确定。电流方向与感应电动势的方向是一致的。

另外，在磁场中，垂直于磁力线的载流导体又会受到电磁力的作用，它的大小是：

$$f = BII \quad (1-3-2)$$

式中 f —— 载流导条所受的电磁力；
 B —— 载流导条所在空间的磁感应强度；
 l —— 载流导条在磁场中的有效长度；
 I —— 载流导条中的电流大小。

电磁力的方向由电动机左手定则来确定。从图 1—3—1 中可见，转子上半部导条受到

向右的力，下半部导条受到向左的力，所以转子的旋转方向与磁场的旋转方向是相同的，均按顺时针方向旋转，但是转子的旋转速度总落后于磁场的旋转速度。这是因为，倘若转子的转速与磁场的转速相同，它们之间就出现相对静止状态，导条就不再切割磁力线，因此导条中就没有感应电动势和感应电流了，导条也就受不到电磁力的作用。所以说，转子与磁场之间必须存在一个转速差，这就是异步电动机名称的来由。

二、异步电动机中的旋转磁场

当异步电动机定子三相绕组与三相交流电源接通之后，在定子周围也能产生一个旋转磁场，它与图 1—3—1 中的永久磁铁旋转的作用相同，且能带动中间的转子旋转。

我们首先以具有一对磁极的异步电动机为例，来说明当定子三相绕组通电之后是怎样产生旋转磁场的。

假设定子的三相绕组是由 A-X、B-Y、C-Z 三个线圈构成的，它们的空间位置相差 120°（见图 1—2—3）。当定子三相绕组接入三相电源之后，在定子绕组中就产生了三相电流，它们的瞬时值是：

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_m \sin \omega t \\ i_B &= I_m \sin (\omega t - 120^\circ) \\ i_C &= I_m \sin (\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \right\} (1-3-3)$$

三相电流值随时间的变化关系可用图 1—3—3 表示。

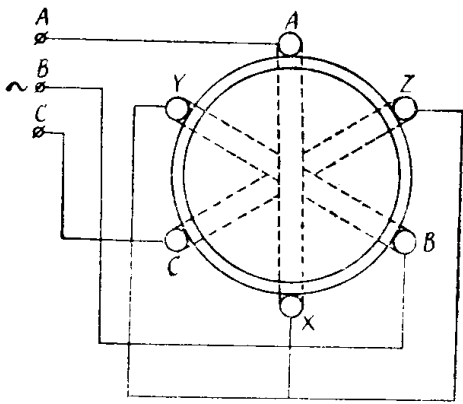


图 1—3—2 定子三相绕组示意图

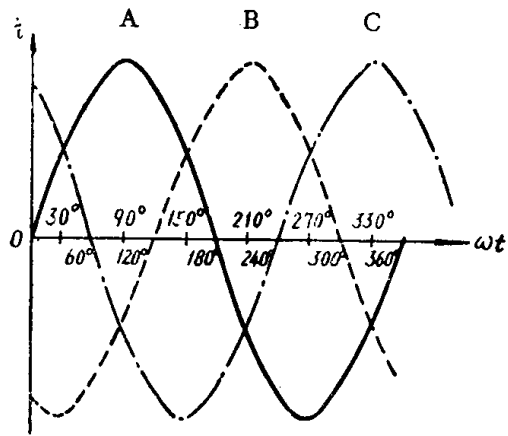


图 1—3—3 定子三相绕组中电流随时间变化的关系

假定电流为正值时，是从各绕组线圈的首端（即 A、B、C）流入，并以⊕表示；从各线圈的末端（即 X、Y、Z）流出，以⊙表示。若电流为负值时，电流方向与上述相反。从图 1—3—4 可以看出，当 $\omega t = 0^\circ$ 时（见图 1—3—4 a），A 相绕组中电流值为 0，B 相电流值为 $-\frac{\sqrt{3}}{2}I_m$ ，C 相电流值为 $+\frac{\sqrt{3}}{2}I_m$ 。在定子的左半部电流是流入的，而在右半部电流是流出的。根据右手螺旋定则，电流在定子三相绕组线圈所包围的空间里形成的磁场，相当于一个永久磁铁所形成的磁场，N 极在上，S 极在下。还可以看出当 ωt 为 60° 、 120° 、 180° 、 240° 、 300° 时，在图 1—3—4 b、c、d、e、f 中的磁场也不断地改变方向，其变化规律是： ωt 每增加 60° ，磁场的空间方位便顺时针方向旋转 60° ，当定子绕组中电流变化一个周期时，磁场也就顺时针在空间旋转一周。我国的交流电统一规定的频率是 50 周/秒，

对于具有一对磁极的异步电动机而言，其旋转磁场的旋转速度为：

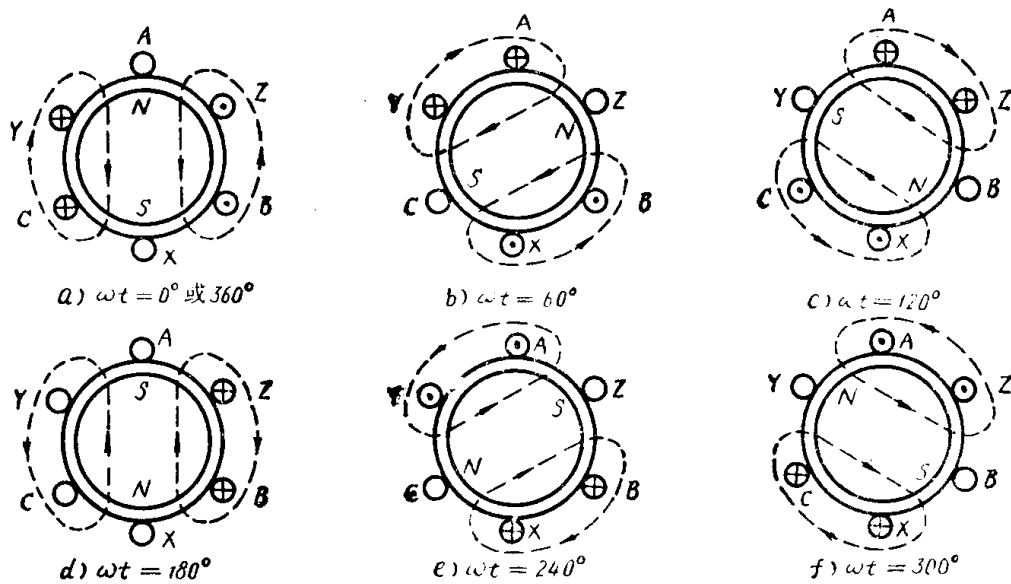


图 1—3—4 具有一对磁极的旋转磁场

$$n_1 = f_1 = 50 \text{ 转/秒 或}$$

$$n_1 = 60 f_1 = 3000 \text{ 转/分}$$

(1—3—4)

式中 n_1 ——旋转磁场的空间旋转速度；

f_1 ——三相交流电源的频率。

如果将图 1—3—4 中定子绕组的任意两相交换一下位置，用上述同样的方法分析，就会发现：这时磁场的旋转方向相反，也就是变成逆时针方向旋转。所以，对一台异步电动机来讲，如欲改变它原来的旋转方向，只要把定子绕组接到三相电源的接头，任意两个调换一下位置（也就是改变相序），就可以达到目的。

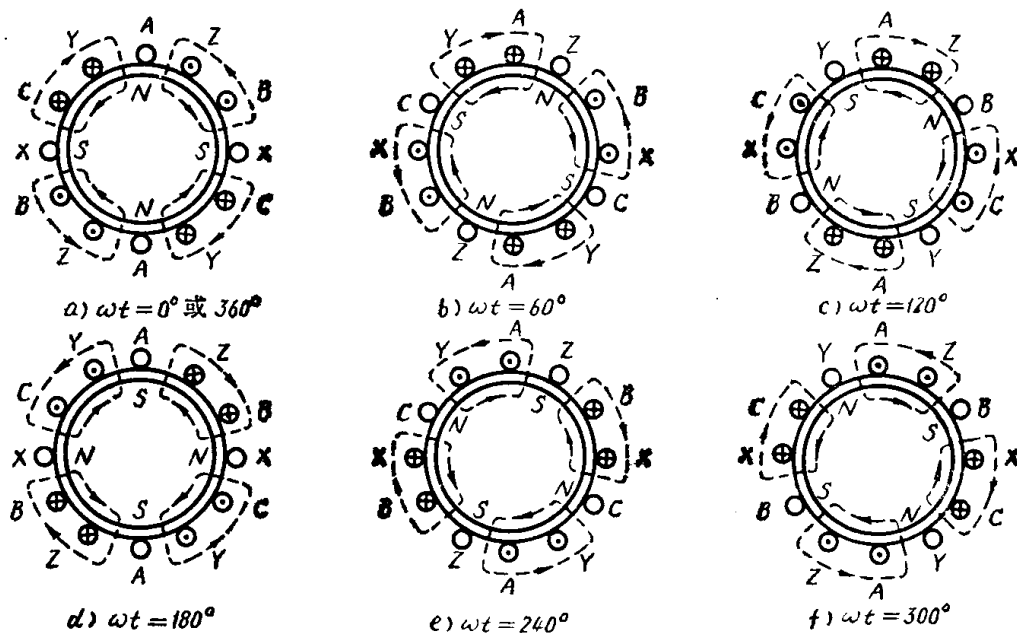


图 1—3—5 具有两对磁极的旋转磁场

其次，再看另外一种情况，即图 1—3—5 所示。从图中可以看出，这是具有两对磁极的旋转磁场。当定子的三相交流电流从 $\omega t = 0^\circ$ 开始，分别为 60° 、 120° 、 180° 、 240° 、 300°

再到 360° （与 $\omega t = 0^\circ$ 相同）时，电流变化了一个周期，而旋转磁场在空间只旋转了半周。对于频率 $f_1 = 50$ 周/秒的三相交流电源而言，具有两对磁极的旋转磁场的转速是 $n_1 = f_1/2 = 25$ 转/秒或 $n_1 = 60f_1/2 = 1500$ 转/分。显然，这个旋转磁场的转速是具有一对磁极的旋转磁场转速的一半。如果适当安排绕组，就能够得到各种不同磁极对数的旋转磁场。以 p 代表旋转磁场的磁极对数，则异步电动机旋转磁场的转速为：

$$n_1 = f_1/p \text{ 转/秒 或}$$

$$n_1 = 60f_1/p \text{ 转/分} \quad (1-3-5)$$

式中 n_1 —— 旋转磁场的转速；
 p —— 定子的磁极对数。

三、转差和转差率

前面已谈到，异步电动机的转子之所以能够转动，就是因为它在旋转磁场中由于切割磁力线，致使转子绕组产生感应电动势和感应电流。转子绕组中通过感应电流之后，则受到电磁力的作用，因而使得转子能够顺着旋转磁场的转动方向而旋转。但是，转子的转速总是要落后于旋转磁场的转速，也就是说，转子与旋转磁场之间存在着转速差。如果以 n 表示转子的转速， n_1 表示旋转磁场的转速，则 $n_1 - n$ 称为转差， $S = \frac{n_1 - n}{n_1}$ 称为转差率。

由（1—3—5）式可知：异步电动机旋转磁场的转速 n_1 是由电源频率 f_1 和电动机的磁极对数 p 所决定的。当电源频率 f_1 和电动机的磁极对数 p 确定不变，旋转磁场的转速 n_1 也就固定不变了，但是转子的转速是随负载的变化而改变的。当转子的转速 n 改变后，转差率 S 也随之改变。通常在异步电动机空载时 $S < 0.5\%$ ，在额定负载时 $S = 2 \sim 5\%$ 。

第四节 异步电动机的运行分析和等效电路

本节中我们分析异步电动机中定子绕组与转子绕组之间的电磁关系，并绘出其等效电路，以便对异步电动机进行分析和计算。因为在异步电动机中每相定子绕组和转子绕组的结构都是相同的，而且它们的电压和电流的大小也都一样。所以，只要研究其中的一相绕组即可。

一、转子不动，转子绕组开路的情况

在转子绕组开路的情况下，定子绕组与三相交流电源接通，转子绕组处在旋转磁场中虽然会产生感应电动势，但没有感应电流，所以转子是不会转动的。这时定子绕组中的电流称激磁电流，以 I_m 来表示。定子绕组所包围的空间里产生旋转磁场，磁力线的分布可分为两个部分：一部分穿过空气隙进入转子铁芯与转子绕组相交链，这部分磁通称为主磁通，以 ϕ_m 表示；另一部分不穿过空气隙，只分布在定子内部，这部分磁通称为定子的漏磁通，以 ϕ_{l1} 表示。主磁通与漏磁通的分布示意图见图1—4—1。

主磁通 ϕ_m 在定子及转子绕组中都会产生感应电动势。在定子每相绕组中产生的感应电动势 E_1 值如下：

$$E_1 = 4.44 f_1 W_1 k_{\omega 1} \phi_m \quad (1-4-1)^*$$

式中 f_1 ——定子电流的频率，它与电源的频率是一致的；

W_1 ——定子每相绕组的匝数，对每台电动机都是固定的值；

$k_{\omega 1}$ ——定子的绕组系数，它决定于定子绕组的排列，对每台电动机也是固定的值；

ϕ_m ——主磁通。

另外，还可以写出定子绕组的感应电动势 E_1 与激磁电流 I_m 间的关系如下：

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= -(r_m + jX_m) \dot{I}_m = -Z_m \dot{I}_m \quad (1-4-2)^* \\ Z_m &= r_m + jX_m \end{aligned}$$

式中 X_m 称为激磁电抗，它与主磁通 ϕ_m 相对应，决定于电动机的结构，当电动机的磁路未饱和时， X_m 值可认为是常数；当电动机的磁路饱和之后， X_m 值略有减小。此外，旋转磁场在铁芯中会产生涡流损耗和磁滞损耗，使铁芯发热，这部分功率损耗叫做铁耗，以 $I_m^2 r_m$ 来表示， r_m 就是与这部分损耗相对应的等效电阻。 Z_m 称激磁阻抗。 I_m 是前面所提到的激磁电流。

定子绕组的漏磁通 ϕ_{l1} 在定子绕组中也产生感应电动势 E_{1l} ，它与激磁电流 I_m 的关系是：

$$\dot{E}_{1l} = -j \dot{I}_m X_1 \quad (1-4-3)^*$$

式中 X_1 称为定子的漏电抗。

激磁电流 I_m 流过定子绕组时，在定子绕组本身的电阻 r_1 上也会产生电压降，考虑到上述各种因素，可以写出定子绕组每相的电势平衡方程式如下：

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + (-\dot{E}_{1l}) + \dot{I}_m r_1 = -\dot{E}_1 + j \dot{I}_m x_1 + \dot{I}_m r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_m Z_1 \quad (1-4-4)$$

式中 U_1 ——定子绕组每相的相电压；

Z_1 ——定子绕组的阻抗， $Z_1 = r_1 + jx_1$ 。

将式 (1-4-2) 和 (1-4-4) 合写在一起得到：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_m Z_1 = \dot{I}_m Z_m + \dot{I}_m Z_1 = \dot{I}_m (Z_m + Z_1) \quad (1-4-5)$$

通常 Z_1 较 Z_m 小得多，可以近似地认为：

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = \dot{I}_m Z_m$$

如果定子绕组上所加的电压 U_1 保持不变，则 E_1 几乎不变。又根据 (1-4-1) 式可知：主磁通 ϕ_m 亦保持不变。

旋转磁场在定子绕组中产生感应电动势 E_1 的同时，在转子绕组中也要产生感应电动势 E_2 。由于转子绕组开路，转子不动，所以转子绕组中感应电动势 E_2 的频率应该与定子绕组中感应电动势 E_1 的频率是相同的，均为 f_1 。转子绕组中感应电动势 E_2 的大小与转子绕组本身的结构有关，可写成下式：

$$E_2 = 4.44 f_1 W_2 k_{\omega 2} \phi_m \quad (1-4-6)^*$$

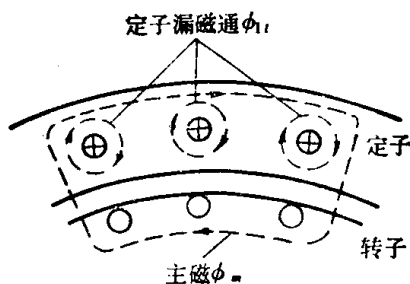


图 1-4-1 转子绕组开路时，主磁通与漏磁通分布示意图

注：凡带 * 的公式，其来源皆与电动机的结构有关，本书不作推导。

式中 E_2 ——转子不动，转子绕组开路时，转子绕组中的感应电动势；
 f_1 ——电源频率，当转子绕组开路时，也是转子绕组感应电动势的频率；
 W_2 ——转子绕组每相的匝数；
 k_{ω_2} ——转子绕组的绕组系数，它决定于转子绕组的排列；
 ϕ_m ——主磁通。

这种情况下的异步电动机相当于一个副端开路的变压器，定子绕组与转子绕组的感应电动势之比是：

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1 k_{\omega_1}}{W_2 k_{\omega_2}} \quad (1-4-7)$$

因为转子绕组开路，所以没有转子电流。在旋转磁场作用下，转子铁芯也存在涡流损耗，这部分功率损耗可认为是 $I_m^2 r_m$ 中的一部分，所以不单独考虑。

二、转子不动，转子绕组短路的情况

我们设法将转子堵住，勿使其转动。当定子绕组与三相交流电源接通后，不仅定子绕组中有电流 I_1 流过，而且转子绕组中也有电流 I_2 流过。此时的异步电动机如同一个副端短路的变压器一样。为使转子绕组中电流保持额定值 I_{2e} ，定子绕组上所加的电压就要低于额定电压 U_{1e} ，此时加到定子绕组上的电压称为短路电压 U_K ，一般 $U_K \approx (15\% \sim 25\%) U_{1e}$ 。

定子绕组中的电流 I_1 里有一部分作为激磁电流 I_m ，用来产生主磁通 ϕ_m ；另一部分电流在定子中产生一个磁势 F_{1f} 与转子电流 I_2 在转子绕组中产生的磁势 F_2 相平衡，以便使主磁通 ϕ_m 不致由于转子电流 I_2 的出现而改变，这部分电流称为定子的负载电流 I_{1f} ，于是有：

$$I_1 = I_m + I_{1f} \quad (1-4-8)$$

$$F_{1f} = -F_2 \quad \text{或} \quad F_{1f} + F_2 = 0 \quad (1-4-9)$$

在异步电动机中磁势与电流的关系是：

$$F = \frac{\sqrt{2} m W k_{\omega} I}{\pi p} \quad (1-4-10)^*$$

式中 m ——绕组的相数；
 W ——绕组的匝数；
 p ——磁极对数；
 k_{ω} ——绕组系数，它是与绕组排列方式有关的常数。

对应 (1-4-10) 式，可以写出 F_1 与 I_1 、 F_{1f} 与 I_{1f} 、 F_2 与 I_2 、 F_m 与 I_m 之间的关系：

$$F_1 = \frac{\sqrt{2} m_1 W_1 k_{\omega_1}}{\pi p} I_1 \quad (1-4-11)$$

$$F_{1f} = \frac{\sqrt{2} m_1 W_1 k_{\omega_1}}{\pi p} I_{1f} \quad (1-4-12)$$

$$F_2 = \frac{\sqrt{2} m_2 W_2 k_{\omega_2}}{\pi p} I_2 \quad (1-4-13)$$

$$F_m = \frac{\sqrt{2} m_1 W_1 k_{\omega_1}}{\pi p} I_m \quad (1-4-14)$$

式中 m_1 ——定子绕组相数； m_2 ——转子绕组相数。

将 (1-4-8) 式各项皆乘以 $\frac{\sqrt{2} m_1 W_1 k_{\omega 1}}{\pi p}$ 就得到:

$$F_1 = F_m + F_{1f} = F_m - F_2 \quad (1-4-15)$$

或写成:

$$F_1 + F_2 = F_m \quad (1-4-16)$$

将 (1-4-12)、(1-4-13) 式代入 (1-4-9) 式得到:

$$\frac{\sqrt{2} m_1 W_1 k_{\omega 1}}{\pi p} I_{1f} + \frac{\sqrt{2} m_2 W_2 k_{\omega 2}}{\pi p} I_2 = 0 \quad (1-4-17)$$

由 (1-4-17) 式可以得到转子电流与定子负载电流之比:

$$k_i = \left| \frac{I_2}{I_{1f}} \right| = \frac{m_1 W_1 k_{\omega 1}}{m_2 W_2 k_{\omega 2}} \quad (1-4-18)$$

所以, 可将 (1-4-17) 式写成:

$$k_i I_{1f} + I_2 = 0 \quad \text{或} \quad k_i I_{1f} = -I_2 \quad (1-4-19)$$

因为主磁通 ϕ_m 主要决定于电源电压 U_1 , 在电源电压 U_1 保持恒定的条件下, 主磁通 ϕ_m 基本上不变。所以磁势 F_{1f} , F_2 所产生的磁通都是以漏磁通的形式出现, 即定子绕组漏磁通 ϕ_{1f} 和转子绕组漏磁通 ϕ_{2f} , 它们的分布情况见图 1-4-2。

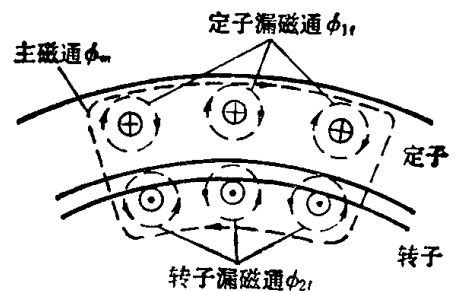


图1-4-2 在转子绕组短路情况下, 主磁通和漏磁通的分布

三、转子与定子间的折合

因为转子与定子之间只有磁的联系, 没有电的联系, 而且它们的绕组匝数, 绕组系数都不相同, 因此不能直接把异步电动机的定子、转子用一个等效电路来表示。但是为了分析和计算方便, 希望把定子与转子之间的联系用一个等效电路来表示, 为此目的而假想一个等效的转子, 这个等效转子绕组的匝数、相数和绕组系数都与定子绕组相同。对于这样一个假想的转子说来, 它的感应电动势就不是原来的 E_2 , 而是一个与定子感应电动势 E_1 相等的感应电动势 E'_2 , 即: $E'_2 = E_1$ 。根据 (1-4-7) 式得出:

$$E'_2 = E_1 = k_e E_2 \quad (1-4-20)$$

转子绕组中的电流也不是 I_2 , 而是 $I'_2 = |I_{1f}|$, 即:

$$I'_2 = |I_{1f}| = I_2 / k_i \quad (1-4-21)$$

在这个假想的转子中绕组的感应电动势、电流都与原来的不同, 但是要求它与原来实际转子绕组中各部分的有功功率和无功功率都相同, 也就是这个假想的转子要与原来的转子, 在功率损耗上是等效的。为此在假想的转子中, 各电阻、电抗、阻抗值也就要作相应地改变。从保持功率损耗不变的角度出发, 必须使得

$$m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2' \quad (1-4-22)$$

$$m_2 I_2^2 x_2 = m_1 I_2'^2 x_2' \quad (1-4-23)$$

式中 r_2 ——实际转子绕组本身的电阻;

r_2' ——假想转子绕组本身的电阻;

x_2 ——实际转子, 当转子不动, 转子绕组短路情况时, 转子绕组的漏电抗;

x_2' ——假想转子绕组的漏电抗。