



卓越工程师培养计划

“十二五”高等学校规划教材

<http://www.phei.com.cn>

戚新波 主编

张文豪 齐山成 蒋炜华 副主编



# 电工技术基础

## 与工程应用

### · 电机及电气控制 (第2版)



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

013046992

TM-43  
136-2  
V3



卓越工程师培养计划

“十二五”高等学校规划教材

<http://www.phei.com.cn>

戚新波 主编  
张文豪 齐山成 蒋炜华 副主编



# 电工技术基础 与工程应用 · 电机及电气控制 (第2版)



北航 C1654915

TM-43  
136-2  
V3

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书根据高等院校电子、电气相关专业“十二五”规划教材建设的精神和教学的需要,以职业岗位群的基本知识和核心技能为出发点,按照“工学结合、教学做一体化”的教学理念,本着“理论以必需、够用,注重实践应用”的原则,突出应用性、综合性和先进性,同时引入仿真,通过大量反映生产实际的例子对其进行仿真,培养学生选择、设计和调试电路的能力,增强工程意识。

本书主要内容包括异步电动机、直流电动机、控制电机、电动机的继电控制、可编程控制器及其应用、工业企业供电与安全用电、EDA 技能训练等知识。

本书可作为高等学校电子、电气相关专业的教学用书,也可供电子、电气专业的工程技术人员参考使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

电工技术基础与工程应用·电机及电气控制/戚新波主编.—2版.—北京:电子工业出版社,2013.5

(卓越工程师培养计划)

ISBN 978-7-121-20264-3

I. ①电… II. ①戚… III. ①电工技术-高等学校-教材②电机学-高等学校-教材③电气控制-高等学校-教材 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 085880 号

责任编辑:张 剑(zhang@phei.com.cn)

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:9.25 字数:200 千字

印 次:2013 年 5 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:25.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

# 前 言

本书编者为长期从事高等职业教育的教师和生产一线的工程技术人员，本书以职业岗位群的基本知识和核心技能为出发点，按照“工学结合、教学做一体化”的教学理念，本着“理论以必需、够用，注重实践应用”的原则，突出应用性、综合性和先进性，同时引入仿真，通过大量反映生产实际的例子对其进行仿真，培养学生选择、设计和调试电路的能力，增强工程意识。

本书由戚新波任主编，张文豪、齐山成、蒋炜华任副主编。河南机电高等专科学校张文豪编写第1章、第2章和第3章的第1节和第2节；河南机电高等专科学校齐山成编写第3章的第3节和第4节、第4章和第5章；河南机电高等专科学校蒋炜华编写第6章和第7章，全书由戚新波教授统稿和主审。

本书在编写过程中，曾得到河南省电力公司和河南机电高等专科学校其他院系同行们的支持和帮助，在此一并致谢。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评、指正。

编 者

# 目 录

<b>第 1 章 异步电动机</b> .....	1
1.1 三相异步电动机的结构与工作原理 .....	1
1.1.1 三相异步电动机的基本构造 .....	1
1.1.2 三相异步电动机的工作原理 .....	3
1.2 三相异步电动机的转矩与机械特性 .....	7
1.2.1 定子电路 .....	8
1.2.2 转子电路 .....	8
1.2.3 转矩公式 .....	10
1.2.4 机械特性曲线 .....	11
1.3 三相异步电动机的起动 .....	13
1.4 三相异步电动机的调速 .....	16
1.5 三相异步电动机的制动 .....	17
1.6 三相异步电动机的铭牌数据 .....	19
1.6.1 铭牌数据的意义 .....	19
1.6.2 三相异步电动机的选择 .....	21
1.7 单相感应电动机 .....	23
1.7.1 电容异步电动机 .....	23
1.7.2 罩极电动机 .....	24
小结 .....	24
思考题 .....	26
习题 .....	26
<b>第 2 章 直流电动机</b> .....	28
2.1 直流电动机的结构 .....	28
2.2 直流电动机的基本工作原理 .....	30
2.3 直流电动机的机械特性 .....	32
2.4 直流电动机的起动、调速和制动 .....	34
2.4.1 起动 .....	34
2.4.2 调速 .....	35
2.4.3 制动 .....	36
小结 .....	37
思考题 .....	38
<b>第 3 章 控制电机</b> .....	39
3.1 伺服电动机 .....	39

3.1.1	伺服电动机的特点	39
3.1.2	直流伺服电动机	40
3.1.3	交流伺服电动机	42
3.2	测速发电机	44
3.2.1	直流测速发电机	45
3.2.2	异步测速发电机	46
3.3	自整角机	48
3.3.1	自整角机的结构与工作原理	48
3.3.2	自整角机的误差分析与选用时应注意的问题	52
3.4	步进电动机	52
3.4.1	工作原理	52
3.4.2	驱动电源	59
	小结	61
	思考题与习题	62
<b>第4章</b>	<b>电动机的继电控制</b>	<b>64</b>
4.1	常用低压电器	64
4.1.1	电磁式低压电器	64
4.1.2	接触器	66
4.1.3	低压隔离器和低压断路器	68
4.1.4	控制继电器	69
4.1.5	熔断器	75
4.1.6	主令电器	76
4.2	电气控制线路的绘制及分析	79
4.3	三相异步电动机继电控制的基本电路	81
4.3.1	三相交流异步电动机全压起动	81
4.3.2	三相交流异步电动机降压起动控制电路	84
4.3.3	电动机的制动与调速	85
	小结	86
	思考题与习题	86
<b>第5章</b>	<b>可编程控制器及其应用</b>	<b>87</b>
5.1	PLC 概述	87
5.1.1	PLC 的主要特点	88
5.1.2	PLC 的分类方法	89
5.1.3	PLC 应用与发展	89
5.2	PLC 的结构和工作原理	90
5.2.1	PLC 的基本组成	90
5.2.2	软件系统	92
5.3	PLC 的工作原理	93
5.3.1	工作过程	93

5.3.2	扫描周期及工作方式 .....	93
5.4	PLC 的程序编制 .....	94
5.4.1	PLC 的编程语言 .....	95
5.4.2	S7-200 PLC 基本指令 .....	96
5.5	可编程控制器应用举例 .....	100
5.5.1	自动起-停控制电路 .....	100
5.5.2	三相交流异步电动机正、反转控制电路 .....	100
<b>第6章</b>	<b>工业企业供电与安全用电 .....</b>	<b>102</b>
6.1	发电和输电概述 .....	102
6.1.1	电力系统的基本知识 .....	102
6.1.2	发电厂 .....	102
6.1.3	变电所 .....	104
6.1.4	电网 .....	105
6.1.5	电能用户 .....	105
6.2	工厂供电系统 .....	105
6.2.1	一次变压的工厂供电系统 .....	105
6.2.2	二次变压的工厂供电系统 .....	106
6.2.3	供电质量 .....	107
6.3	安全用电 .....	108
6.3.1	名词解释 .....	109
6.3.2	电流对人体的危害 .....	109
6.3.3	常见的触电情况 .....	110
6.3.4	常用的保护措施 .....	111
小结	.....	115
思考题	.....	116
<b>第7章</b>	<b>EDA 技能训练——Tina Pro 操作入门 .....</b>	<b>117</b>
7.1	Tina Pro 仿真软件应用介绍 .....	117
7.1.1	Tina Pro 概况 .....	117
7.1.2	软件仿真结果与实际电路的异同 .....	118
7.2	Tina Pro 电路仿真实训 .....	119
7.2.1	熟悉 Tina Pro 软件 .....	119
7.2.2	子电路的建立与调用 .....	123
7.2.3	交互式仿真 .....	125
7.2.4	Tina Pro 虚拟仪器的使用 .....	126
7.2.5	熟悉 Tina Pro 的直流分析功能 .....	129
7.2.6	熟悉 Tina Pro 的正弦稳态分析功能 .....	135
7.2.7	熟悉 Tina Pro 的瞬时分析功能 .....	139



# 第 1 章 异步电动机

电动机是利用电磁感应原理，把电能转换为机械能的旋转装置。根据电动机所使用的电源的性质可分为直流电动机和交流电动机两大类。交流电动机又可分为同步电动机和异步电动机两种。异步电动机又有三相和单相之分。

异步电动机是交流电动机的一种。异步电动机是工业、农业、国防，乃至日常生活和医疗器械中应用最广泛的一种电动机，它的主要作用是驱动生产机械和生活用具。其单机容量可从数十瓦到数千千瓦。随着电气化和自动化程度的不断提高，异步电动机将占有越来越重要的地位。据统计，在供电系统的动力负载中，约有 70% 是异步电动机，可见它在工农业生产乃至日常生活中的重要性。异步电动机是一种交流电动机，其电动机的转子转速总落后于电动机的同步转速，故称为异步电动机。异步电动机有许多突出的优点，和其他各种电动机相比，它的结构简单，制造、使用和维护方便，效率较高，价格低廉。因此，从应用的角度来讲，了解异步电动机的工作原理，掌握它的运行性能是十分必要的。本章将着重讨论三相异步电动机，并对单相异步电动机的工作原理作简要的介绍。

## √<sup>+</sup> 1.1 三相异步电动机的结构与工作原理

### 1.1.1 三相异步电动机的基本构造

三相异步电动机主要由两部分组成，固定不动的部分称为电动机定子；旋转并拖动机械负载的部分称为电动机转子。转子和定子之间有一个非常小的空气气隙将转子和定子隔离开来，根据电动机的容量的大小不同，气隙一般在 0.4 ~ 4mm 的范围内。电动机转子和定子之间没有任何电气上的联系，能量的传递全靠电磁感应作用，所以这样的电动机也称为感应式电动机。三相异步电动机的外形和结构如图 1-1 所示。

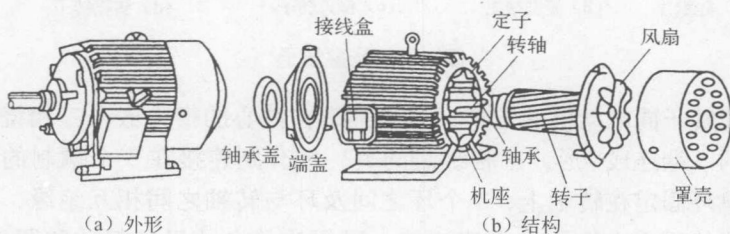


图 1-1 三相异步电动机的外形和结构





## 1. 定子

电动机定子由支撑空心定子铁心的钢制机座、定子铁心和定子绕组线圈组成。定子铁心由0.5mm厚的硅钢片叠装而成。定子铁心上的插槽是用来嵌放对称三相定子绕组线圈的。三相异步电动机的定子构造如图1-2所示。

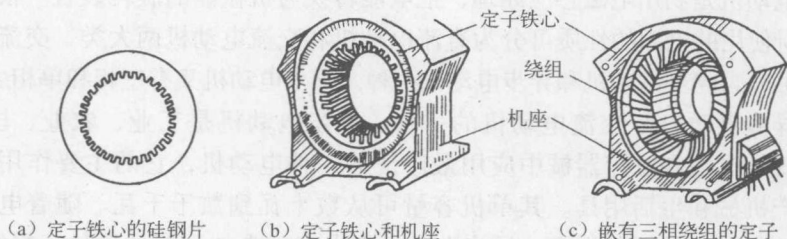


图1-2 三相异步电动机的定子构造

定子绕组是定子的电路部分,中小型电动机一般采用漆包线(或丝包漆包线)绕制,共分3组,分布在定子铁心槽内,它们在定子内圆周空间的排列彼此相隔 $120^\circ$ ,构成对称的三相绕组。

## 2. 转子

电动机转子由转子铁心、转子绕组和转轴组成。转子铁心由表面冲槽的硅钢片叠装成圆柱形。转子铁心装在转轴上,转轴拖动机械负载。转子、气隙和定子铁心构成了一个电动机的完整磁路。

异步电动机的转子有两种形式,即笼型转子和绕线转子。

笼型转子是在转子铁心槽里插入铜条,再将全部铜条两端焊在两个铜端环上,以构成闭合回路。抽去转子铁心,剩下的铜条及其两边的端环,其形状像个鼠笼,故称之为笼型转子,如图1-3所示。为了节省铜材,现在中小容量的笼型转子是在转子铁心的槽中浇注铝液铸成笼型导体,以代替铜制笼体。

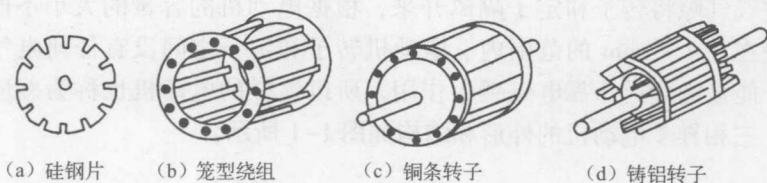


图1-3 笼型转子

绕线转子同电动机的定子一样,都是在铁心的槽中嵌入三相绕组,三相绕组的一端连成Y形,三相绕组的另一端分别连接在3个铜制的集电环上,集电环固定在转轴上,3个环之间及环与转轴之间相互绝缘,在集电环上用弹簧压着电刷与外电路连接,以便改善电动机的起动和调速特性,如图1-4所示。

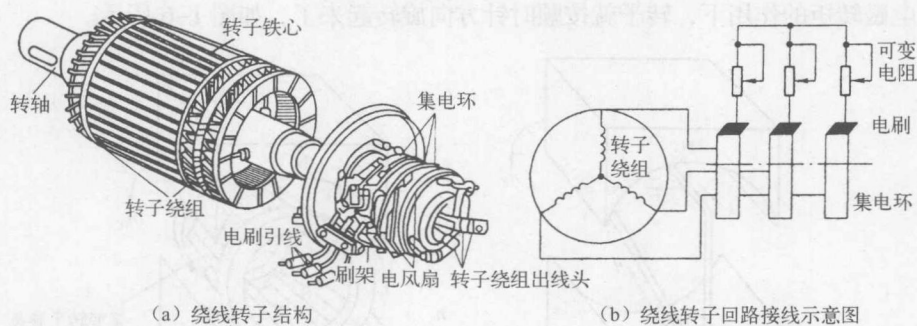


图 1-4 绕线转子

一般把笼型转子的异步电动机称为笼型感应电动机，把绕线转子的异步电动机称为绕线转子感应电动机。虽然笼型感应电动机与绕线转子感应电动机在转子构造上有所不同，但它们的工作原理是一样的。

**【说明】** 笼型感应电动机由于转子结构简单，因而价格低廉、工作可靠。如果对电动机的起动和调速没有特殊的要求，一般在实际应用中，笼型感应电动机应用得最为广泛。所以在本书中以介绍笼型感应电动机为主。

## 1.1.2 三相异步电动机的工作原理

### 1. 电动机的转动原理

三相异步电动机转动的一般原理是基于法拉第电磁感应定律和载流导体在磁场中会受到电磁力的作用这两个基本因素。如图 1-5 所示，N 和 S 是一对永久磁铁的磁极，这对磁极以转速  $n_0$  按顺时针方向进行旋转，从而形成一个转速为  $n_0$  的旋转磁场。当磁场转动时，放置在磁场中的铜制绕组上、下两根导条与旋转磁场就有了相对运动并切割旋转磁场的磁力线，于是在这两根导条上就产生了感应电动势，其方向符合发电机右手定则。

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

式中： $E$ ——感应电动势，单位为 V；

$B$ ——磁感应强度，单位为 T；

$l$ ——导条长度，单位为 m；

$v$ ——导条切割磁力线的相对速度，单位为 m/s。

由于铜制绕组形成一个闭合回路，因此在感应电动势的作用下，绕组的上、下两根导条中就出现了如图 1-5 所示方向的感应电流。磁场中的载流导体将受到电磁力的作用，根据左手定则，上、下两根导条所受电磁力的方向如图 1-5 所示。在图中可以看出，N 极下的导条受力方向是朝向右，而 S 极下的导条受力方向是朝向左。这一对力形成一个顺时针方向的转矩。如果把异步电动机的笼型转子放置在旋转磁场中，用笼型转子代替绕组，不难想象，当磁场旋转时，在磁极经过下的每对导条都会产生这样的电磁转矩，在这些



电磁转矩的作用下,转子就按顺时针方向旋转起来了,如图1-6所示。

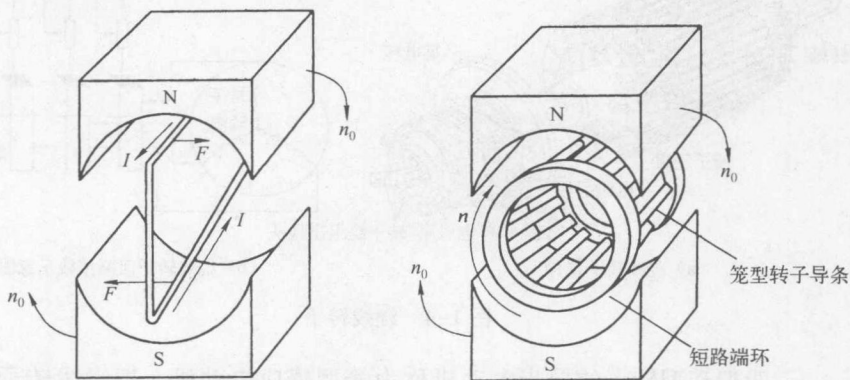


图1-5 单个绕组在磁场中的受力示意图 图1-6 异步电动机转动原理示意图

当然,如果磁场按逆时针方向旋转,转子也将按逆时针方向旋转。由此可见,转子的旋转方向与旋转磁场的旋转方向是相同的。

虽然转子同旋转磁场彼此隔离,但从上面的叙述可知,由于有了一个旋转的磁场,在转子的导条中产生了感应电流,而流过电流的导条又在磁场中受到电磁力的作用,产生电磁转矩,从而使转子转动起来。这就是感应式电动机转动的一般原理。

**【说明】** 转子的旋转速度  $n$  (即电动机的旋转速度) 比旋转磁场的旋转速度  $n_0$  (一般称为同步转速) 要低一些。这是因为如果这两种转速相等,转子和旋转磁场就没有了相对运动,转子导条将不切割磁力线,便不能产生感应电动势,也就不能产生感应电流,这样就没有电磁转矩,转子将不会继续旋转。因此,若要转子旋转,旋转磁场和转子之间就一定存在转速差,即转子的旋转速度总要落后于旋转磁场的旋转速度。由于转子的旋转速度不同于且低于旋转磁场的转速,所以称这种电动机为异步电动机。

## 2. 旋转磁场的产生

从上面分析可知,若要使异步电动机的转子转动,首先应当有一个旋转磁场。在实际应用的异步电动机中是不可能使用一个旋转的永久磁铁来产生旋转磁场的,它的磁场是由三相对称交流电流通入静止的三相对称绕组而产生的空间旋转磁场。

通常在三相异步电动机的定子铁心中放置三相对称绕组 AX、BY 和 CZ,将三相绕组作星形联结,并接在三相正弦交流电源上,通入三相对称电流:

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

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

$$i_C = I_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

其波形如图1-7所示。为了简化起见,设每相绕组只有一个线匝,3个绕



组分别嵌放在定子铁心圆周上在空间位置上互差  $120^\circ$  对称分布的 6 个凹槽中。取绕组始端到末端的方向作为电流的参考方向。在电流的正半周时, 其值为正, 其实际方向与参考方向一致; 在负半周时, 其值为负, 其实际方向与参考方向相反。

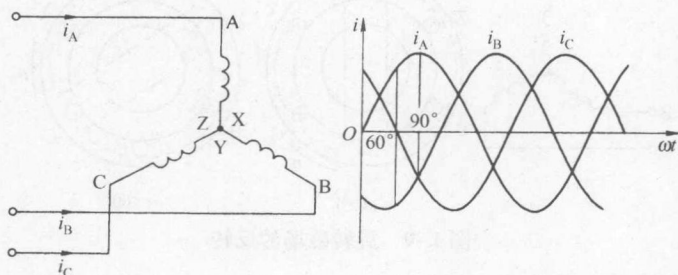


图 1-7 三相对称电流

当  $\omega t = 0^\circ$  时, 定子绕组中的电流方向如图 1-8 (a) 所示。这时  $i_A = 0$ ;  $i_B$  为负值, 其方向与参考方向相反, 即从 Y 端流入, 在 B 端流出;  $i_C$  为正值, 其方向与参考方向一致, 即从 C 端流入, 在 Z 端流出。根据电流的流向, 应用右手螺旋定则, 由  $i_C$  和  $i_B$  产生的合成磁场如图 1-8 (a) 所示, 合成磁场的轴线方向是自上而下。

当  $\omega t = 60^\circ$  时, 定子绕组中电流的方向和三相电流的合成磁场的方向如图 1-8 (b) 所示, 这时的合成磁场已在空间上转过了  $60^\circ$ 。

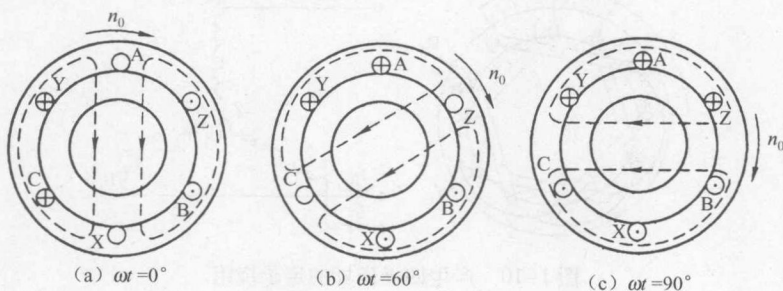


图 1-8 三相电流产生的旋转磁场 ( $p=1$ )

同理, 可得在  $\omega t = 90^\circ$  时的三相电流的合成磁场, 它比  $\omega t = 60^\circ$  时的合成磁场在空间又转过了  $30^\circ$ , 如图 1-8 (c) 所示。

由此可知, 当定子绕组中通入三相电流后, 它们共同产生的合成磁场随电流的交变而在空间不断地旋转着, 这就是旋转磁场。这种旋转磁场同磁极在空间旋转 (图 1-6) 所起的作用是一样的。

### 3. 旋转磁场的转向

图 1-8 (c) 所示的情况是 A 相电流  $i_A = +I_m$ , 这时旋转磁场轴线的方向恰好与 A 相绕组的轴线一致。在三相电流中, 电流出现正幅值的顺序为  $A \rightarrow B \rightarrow C$ , 因此磁场的旋转方向是与这个顺序一致的, 即磁场的转向与通入绕组的三相电流的相序有关。



如果将同三相电源连接的3根导线中的任意两根的一端对调位置(如对调了B与C两相),则电动机三相绕组的B相与C相对调(注意:电源端子的相序未变),旋转磁场因此反转,如图1-9所示。

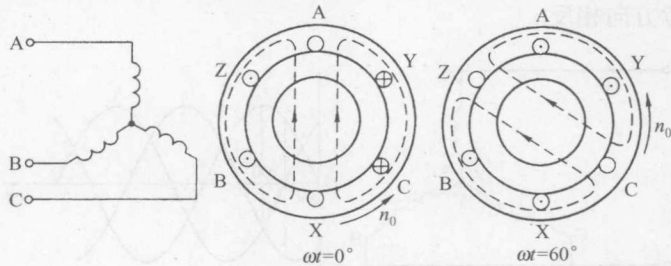


图1-9 旋转磁场的反转

#### 4. 旋转磁场的极数

三相异步电动机的极数就是旋转磁场的极数。旋转磁场的极数和三相绕组的安排有关。在图1-8所示的情况下,每相绕组只有一个线圈,绕组的始端之间相差 $120^\circ$ 空间角,则产生的旋转磁场只有一对极,即 $p=1$ (磁极对数)。如将定子绕组安排成如图1-10那样,即每相绕组有两个线圈串联,绕组的始端之间相差 $60^\circ$ 空间角,则产生的旋转磁场具有两对极,即 $p=2$ ,如图1-11所示。

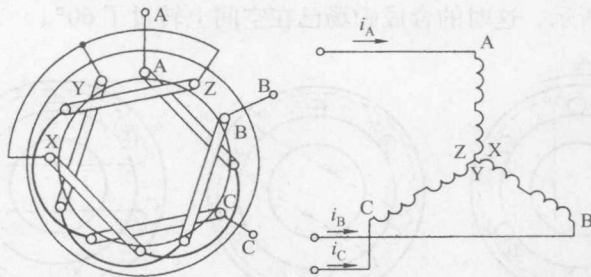


图1-10 产生四极磁场的定子绕组

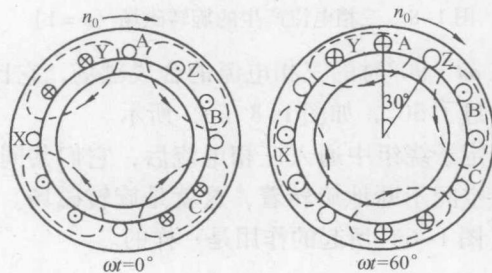


图1-11 三相电流产生的旋转磁场( $p=2$ )

#### 5. 旋转磁场的转速

三相异步电动机的转速与旋转磁场的转速有关,而旋转磁场的转速决定于磁场的极数。在一对极的情况下,由图1-9可知,当电流从 $\omega t=0^\circ$ 到



$\omega t = 60^\circ$  经历了  $60^\circ$  时, 磁场在空间也旋转了  $60^\circ$ 。当电流交变了一次 (一个周期) 时, 磁场恰好在空间旋转了一转。设电流的频率为  $f_1$ , 即电流每秒交变  $f_1$  次或每分交变  $60f_1$  次, 则旋转磁场的转速为  $n_0 = 60f_1$ 。转速的单位为转每分 (r/min)。

由此推知, 当旋转磁场具有  $p$  对极时, 旋转磁场的转速为

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (1-2)$$

旋转磁场的转速称为异步电动机的同步转速  $n_0$ , 它与旋转磁场的磁极对数  $p$  及通入的三相对称电流的频率  $f_1$  有关。通常对于一台具体的异步电动机,  $f_1$  和  $p$  都是确定的, 所以磁场同步转速  $n_0$  为常数。在我国, 工频  $f_1 = 50\text{Hz}$ , 于是由式 (1-2) 可得出对应于不同极对数  $p$  的旋转磁场转速  $n_0$  (r/min)。

## 6. 转差率

从三相异步电动机的工作原理可知, 虽然电动机的转动方向同旋转磁场的转动方向相同, 但旋转磁场的同步转速  $n_0$  与电动机转速  $n$  是不同的。电动机的转速  $n$  低于旋转磁场的同步转速  $n_0$ 。旋转磁场的同步转速  $n_0$  与电动机转速  $n$  之差 ( $n_0 - n$ ), 用符号  $\Delta n$  表示, 称为转速差 (简称转差)。转差与同步转速的比值称为转差率, 用  $s$  表示, 即

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{\Delta n}{n_0} \quad (1-3)$$

转差率  $s$  表示电动机转子转速  $n$  与旋转磁场转速  $n_0$  相差的程度。转差率是异步电动机的一个重要的物理量, 转子转速越接近磁场转速, 则转差率越小。一般情况下, 运行中的三相异步电动机的额定转速与同步转速相近, 所以转差率很小。通常, 不同容量的异步电动机在额定负载时的转差率约为  $1\% \sim 9\%$ 。

**【例 1-1】** 有一台三相异步电动机接在频率  $f_1 = 50\text{Hz}$  的三相电源上, 额定负载时的转速为  $n = 1462\text{r/min}$ 。试求该电动机的极对数和转差率。

**【解】** 由于异步电动机额定转速接近且略小于同步转速,  $f_1 = 50\text{Hz}$ , 由式 (1-2) 可知, 与  $1462\text{r/min}$  最接近的同步转速为  $n_0 = 1500\text{r/min}$ , 相对应的磁极对数  $p = 2$ 。因此, 额定负载时的转差率为

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{1500 - 1462}{1500} \times 100\% \approx 2.5\%$$

## √<sup>+</sup> 1.2 三相异步电动机的转矩与机械特性

图 1-12 所示的是三相异步电动机的每相等效电路图。和变压器相比, 定子绕组相当于变压器的一次绕组, 转子绕组 (一般是短接的) 相当于二



次绕组。三相异步电动机中的电磁关系与变压器中的类似。当定子绕组接上三相电源电压时,则有三相电流通过。定子三相电流产生旋转磁场,其磁通通过定子铁心和转子铁心而闭合。该磁场不仅在转子每相绕组中要感应出电动势  $E_2$ , 而且在定子每相绕组中也要感应出电动势  $E_1$ 。此外,还有漏磁通在定子绕组和转子绕组中产生漏磁电动势  $E_{\sigma 1}$  和  $E_{\sigma 2}$ 。

定子和转子每相绕组的匝数分别为  $N_1$  和  $N_2$ 。

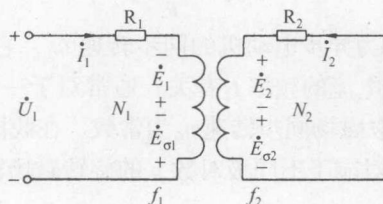


图 1-12 三相异步电动机的每相等效电路图

### 1.2.1 定子电路

如图 1-12 所示,定子每相电路的电压方程和变压器一次绕组电路一样,即

$$\dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 + (-\dot{E}_{\sigma 1}) + (-\dot{E}_1) = R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1 + (-\dot{E}_1) \quad (1-4)$$

式中,  $R_1$  和  $X_1$  分别为定子每相绕组的电阻和漏感抗。

和变压器一样,忽略电阻和漏感抗上的压降,也可得出

$$\dot{U} \approx -\dot{E}_1 \text{ 和 } E_1 = 4.44K_1 f_1 N_1 \Phi_m \approx U_1 \quad (1-5)$$

式中,  $\Phi_m$  是通过每相绕组的磁通最大值,在数值上它等于旋转磁场的每极磁通;  $K_1$  是定子绕组的分布系数;  $f_1$  是定子频率。

### 1.2.2 转子电路

在图 1-12 中,由于转子短路,转子的端电压  $\dot{U}_2 = 0$ ,则转子每相电路的电压方程为

$$\dot{E}_2 = R_2 \dot{I}_2 + (-\dot{E}_{\sigma 2}) = R_2 \dot{I}_2 + jX_2 \dot{I}_2 \quad (1-6)$$

式中,  $R_2$  和  $X_2$  分别为转子电路的电阻和漏感抗。转子电路的各个物理量对电动机的性能都有影响。

#### 1. 转子频率 $f_2$

因为旋转磁场和转子间的相对转速为  $(n_0 - n)$ ,所以转子频率

$$f_2 = \frac{p(n_0 - n)}{60} = \frac{n_0 - n}{n_0} \times \frac{pn_0}{60} = sf_1 \quad (1-7)$$

可见转子频率  $f_2$  与转差率  $s$  有关,也就是与转速  $n$  有关。

在  $n=0$ ,即  $s=1$  时(电动机起动瞬间),转子与旋转磁场间的相对转



速最大, 转子导条被旋转磁通切割得最快。因此, 这时  $f_2$  最大, 即  $f_2 = f_1$ 。异步电动机在额定负载时,  $s = 1\% \sim 9\%$ , 则  $f_2 = 0.5 \sim 4.5\text{Hz}$ 。

## 2. 转子电动势 $E_2$

转子电动势  $E_2$  的有效值为

$$E_2 = 4.44K_2 f_2 N_2 \Phi_m = 4.44K_2 s f_1 N_2 \Phi_m \quad (1-8)$$

式中,  $K_2$  是转子绕组的分布系数。

在  $n = 0$ , 即  $s = 1$  时, 转子电动势为

$$E_{20} = 4.44K_2 f_1 N_2 \Phi_m \quad (1-9)$$

这时  $f_2 = f_1$ , 转子电动势最大。

由式 (1-8) 和式 (1-9) 可得出

$$E_2 = sE_{20} \quad (1-10)$$

可见转子电动势  $E_2$  与转差率  $s$  有关。

## 3. 转子感抗 $X_2$

转子感抗  $X_2$  与转子频率  $f_2$  有关, 即

$$X_2 = 2\pi f_2 L_{\sigma 2} = 2\pi s f_1 L_{\sigma 2} \quad (1-11)$$

式中,  $L_{\sigma 2}$  为转子漏电感。

在  $n = 0$ , 即  $s = 1$  时, 转子感抗为

$$X_{20} = 2\pi f_1 L_{\sigma 2} \quad (1-12)$$

这时  $f_2 = f_1$ , 转子感抗最大。

由式 (1-11) 和式 (1-12) 可得出

$$X_2 = sX_{20} \quad (1-13)$$

可见, 转子感抗  $X_2$  与转差率  $s$  有关。

## 4. 转子电流 $I_2$

转子每相电路的电流可由式 (1-6) 得出, 即

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (1-14)$$

可见转子电流  $I_2$  也与转差率  $s$  有关。当  $s$  增大, 即转速  $n$  降低时, 转子与旋转磁场间的相对转速  $(n_0 - n)$  增加, 转子导体切割磁通的速度提高, 于是  $E_2$  增加,  $I_2$  也增加。 $I_2$  随  $s$  变化的关系可用图 1-13 所示的曲线表示。

当  $s = 0$ , 即  $n_0 - n = 0$  时,  $I_2 = 0$ ; 当  $s$  很小时,  $R_2 \gg sX_{20}$ ,  $I_2 \approx \frac{sE_{20}}{R_2}$ , 即与  $s$

近似地成正比; 当  $s$  接近 1 时,  $sX_{20} \gg R_2$ ,  $I_2 \approx \frac{E_{20}}{X_{20}} = \text{常数}$ 。

## 5. 转子电路的功率因数 $\cos\varphi_2$

由于转子有漏磁通, 相应的感抗为  $X_2$ , 因此  $\dot{I}_2$  比  $\dot{E}_2$  滞后  $\varphi_2$  角。因





而转子电路的功率因数为

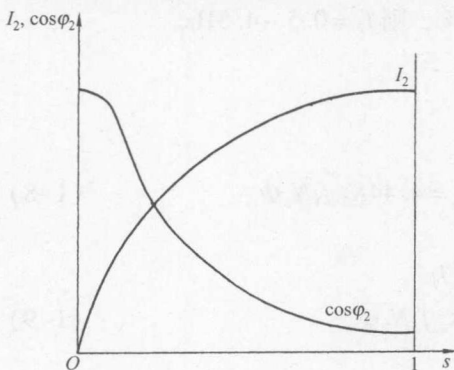


图 1-13  $I_2, \cos\varphi_2$  与转差率  $s$  的关系

$$\cos\varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (1-15)$$

它也与转差率  $s$  有关。当  $s$  增大时,  $X_2$  也增大, 于是  $\varphi_2$  增大, 即  $\cos\varphi_2$  减小。 $\cos\varphi_2$  随  $s$  的变化关系也如图 1-13 所示。当  $s$  很小时,  $R_2 \gg sX_{20}$ ,  $\cos\varphi_2 \approx 1$ ; 当  $s$  接近于 1 时  $\cos\varphi_2 \approx \frac{R_2}{sX_{20}}$ , 即二者之间近似地有双曲线关系。

由此可知, 转子电路的各个物理量, 如电动势、电流、频率、感抗及功率因数等都与转差率有关。

### 1.2.3 转矩公式

电磁转矩  $T$  是三相异步电动机最重要的物理量之一, 异步电动机的转矩是由旋转磁场的每极磁通与转子电流  $I_2$  相互作用而产生的。但因转子电路是电感性的, 转子电流  $i_2$  比转子电动势  $E_2$  滞后  $\varphi_2$  角; 又因

$$T = \frac{P_{em}}{\Omega_0} = \frac{P_{em}}{\frac{2\pi n_0}{60}} \quad (1-16)$$

电磁转矩  $T$  与电磁功率  $P_{em}$  成正比, 和讨论有功功率一样, 也要引入  $\cos\varphi_2$ 。于是得出

$$T = K_T \Phi I_2 \cos\varphi_2 \quad (1-17)$$

式中,  $K_T$  是转矩常数, 它与电动机的结构有关。

由式 (1-17) 可知, 转矩  $T$  除与磁通  $\Phi$  成正比外, 还与  $I_2 \cos\varphi_2$  成正比。

再根据式 (1-5)、式 (1-9)、式 (1-14) 和式 (1-15), 可知

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{E_1}{4.44K_1 f_1 N_1} \approx \frac{U_1}{4.44K_1 f_1 N_1} \propto U_1 \\ I_2 &= \frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} = \frac{s(4.44K_2 f_1 N_2 \Phi)}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \\ \cos\varphi_2 &= \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \end{aligned}$$

由于  $I_2$  和  $\cos\varphi_2$  与转差率  $s$  有关, 所以转矩  $T$  也与  $s$  有关。

如果将上述 3 式代入式 (1-17), 则得出转矩的另一个表达式

$$T = \frac{K_T K_2 N_2}{4.44 f_1 K_1^2 N_1^2} \times \frac{s R_2 U_1^2}{R_2^2 + (sX_{20})^2} = K \frac{s R_2 U_1^2}{R_2^2 + (sX_{20})^2} \quad (1-18)$$