

21 世纪高等院校教材

电工电子应用技术

(电工学Ⅲ)

史仪凯 主编



 科学出版社
www.sciencep.com

21 世纪高等院校教材

电工电子技术

(电工学Ⅲ)

史仪凯 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是根据教育部最新制定的高等工业院校“电工学”课程教学基本要求编写,在教材的内容及编排体例上对传统教材作了大幅度的调整与更新。全书分为3个部分,即电工技术(电工学Ⅰ)、电子技术(电工学Ⅱ)和电工电子应用技术(电工学Ⅲ)。

本书为电工电子应用技术部分,主要包括交流电动机、直流电动机、控制电动机、电气自动控制技术、可编程控制器原理与应用、电力电子技术基础、电气电测技术、信号处理与数据采集系统、现代通信技术等。每章均附有大量的练习与思考题,书后附有试题和部分答案,便于教师教学和学生自学。

本书在覆盖上述教学基本要求的基础上,根据编者多年来从事教学研究和教学改革的实践体会,对教材内容和结构体系作了适当的整合。本书内容丰富,深浅适度,可供不同非电类专业灵活选用。

本书还配有支持教学的多媒体电子教案,可以免费提供给使用该教材的教师。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子应用技术(电工学Ⅲ)/史仪凯主编. —北京:科学出版社,2004
(21世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-014162-8

I. 电… II. 史… III. 电工电子应用技术-高等院校-教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 082651 号

责任编辑:段博原 贾瑞娜 / 责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005年1月第一次印刷 印张:20

印数:1—6 000 字数:383 000

定价:69.00元(全三册)

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

本书是根据教育部最新颁布的高等工业院校“电工学”课程教学基本要求编写的。本教材已被列入西北工业大学 2002 年校规划重点出版教材。参考学时为 40~60 学时。

本书编写的指导思想是,在内容上力求贯彻少而精的原则,既覆盖了教学基本要求所规定的全部内容,又增添了一些拓宽和加深的内容,可以满足非电类各专业根据具体需要进行取舍。在阐述上由浅入深,循序渐进,使之符合人们认识客观事物的规律,便于自学,适当反映了现代科学技术发展的新成就。在体系上注意各部分章节的有机联系,根据编者的教学实践和体会,对传统的体系结构作了适当的整合,加强了各主要部分内容的逻辑性,便于读者应用和科技创新能力的培养。在教学上配有多媒体电子教案,教师可以对电子教案进行修改,有利于教师组织课堂教学和提高教学质量。

本书由西北工业大学史仪凯主编和统稿,卢健康任副主编。其中第 1 章、第 3 章和第 9 章由史仪凯编写;第 2 章由杨坤德编写;第 4 章由向平编写;第 5 章由田梦君编写;第 6 章由卢健康编写;第 7 章由付敏江编写;第 8 章由刘雁编写;附录、电工电子应用技术试题(卷)、部分习题答案由袁小庆编写。

本书由西北工业大学陈麟章教授和张家喜教授审阅,并提出了宝贵的意见和修改建议。在编写过程中,先后得到西北工业大学电工学课程组同志们的关心和支持。同时,作者借鉴了有关参考资料。在此,对主审、参考资料的作者,以及帮助本书出版的科学出版社、西北工业大学教务处和教材科一并致以诚挚的谢意。

由于编者水平所限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请使用本书的教师和同学,以及广大读者提出宝贵意见。

编 者

2004 年 2 月于西北工业大学

目 录

前言

第 1 章 交流电动机	(1)
1.1 三相异步电动机的结构与工作原理	(1)
1.1.1 三相异步电动机的结构	(1)
1.1.2 三相异步电动机的工作原理	(4)
1.2 三相异步电动机的电路分析	(9)
1.2.1 定子电路	(9)
1.2.2 转子电路	(10)
1.3 三相异步电动机转矩与机械特性	(13)
1.3.1 电磁转矩	(13)
1.3.2 机械特性	(14)
1.4 三相异步电动机的使用	(18)
1.4.1 铭牌和技术数据	(18)
1.4.2 启动	(20)
1.4.3 调速	(26)
1.4.4 制动	(27)
1.5 三相异步电动机的选择与经济运行	(29)
1.5.1 电动机的选择	(29)
1.5.2 电动机的经济运行	(31)
1.6 单相异步电动机	(33)
1.6.1 单相异步电动机的工作原理	(33)
1.6.2 单相异步电动机的应用	(37)
1.7 三相同步电动机	(39)
1.7.1 同步电动机的结构	(39)
1.7.2 同步电动机的工作原理	(40)
1.7.3 同步电动机启动	(40)
本章小结	(41)
习题	(42)
第 2 章 直流电动机	(44)
2.1 直流电机的结构	(44)

2.1.1 定子	(44)
2.1.2 转子	(46)
2.2 直流电机的工作原理	(46)
2.2.1 直流发电机工作原理	(46)
2.2.2 直流电动机工作原理	(48)
2.2.3 直流电机的可逆性原理	(49)
2.3 直流电机电动势与电磁转矩	(49)
2.3.1 电枢电动势	(49)
2.3.2 电磁转矩	(49)
2.3.3 直流电动机的分类	(50)
2.4 直流电动机的机械特性	(51)
2.5 直流电动机的使用	(53)
2.5.1 启动	(53)
2.5.2 反转	(54)
2.5.3 调速	(54)
2.6 直流电动机制动	(59)
2.6.1 能耗制动	(59)
2.6.2 反接制动	(59)
本章小结	(60)
习题	(61)
第3章 控制电动机	(62)
3.1 伺服电动机	(62)
3.1.1 交流伺服电动机	(62)
3.1.2 直流伺服电动机	(64)
3.2 步进电动机	(65)
3.2.1 单三拍	(66)
3.2.2 双三拍	(67)
3.2.3 六拍	(68)
3.3 力矩电动机	(69)
3.3.1 交流力矩电动机	(70)
3.3.2 直流力矩电动机	(71)
3.4 超声波电动机	(72)
本章小结	(74)
习题	(75)
第4章 电气自动控制技术	(77)

4.1 低压电器	(77)
4.1.1 刀开关和熔断器	(77)
4.1.2 自动空气断路器	(79)
4.1.3 主令电器	(80)
4.1.4 接触器	(83)
4.1.5 控制继电器	(88)
4.2 三相异步电动机基本控制电路	(88)
4.2.1 三相异步电动机直接启动控制电路	(88)
4.2.2 继电器控制电路的逻辑函数式	(90)
4.2.3 热继电器及电动机过载保护	(93)
4.3 三相异步电动机常用控制系统	(95)
4.3.1 正反转控制	(95)
4.3.2 行程控制	(98)
4.3.3 时间控制	(100)
4.3.4 其他控制环节	(104)
本章小结	(106)
习题	(107)
第5章 可编程序控制器原理与应用	(110)
5.1 PLC组成与工作原理	(110)
5.1.1 PLC的组成	(110)
5.1.2 PLC的工作原理	(112)
5.1.3 PLC的主要技术性能	(113)
5.1.4 PLC的主要功能和特点	(118)
5.2 可编程序控制器的基本指令	(119)
5.2.1 PLC的编程语言	(119)
5.2.2 基本指令	(120)
5.3 可编程序控制器编程原则与方法	(129)
5.3.1 编程原则	(129)
5.3.2 常用编程举例	(132)
5.4 可编程序控制器的应用设计	(136)
5.4.1 确定系统控制任务	(137)
5.4.2 PLC机型的选择	(137)
5.4.3 系统设计	(138)
5.4.4 设计举例	(139)
本章小结	(144)

习题	(144)
第6章 电力电子技术基础	(150)
6.1 电力电子器件	(150)
6.1.1 普通晶闸管	(151)
6.1.2 两种特殊晶闸管	(157)
6.1.3 电力场效应晶体管	(159)
6.1.4 绝缘栅双极型晶体管	(160)
6.1.5 MOS控制晶闸管	(161)
6.2 可控整流电路	(162)
6.2.1 单相半波可控整流电路	(162)
6.2.2 单相半控桥式整流电路	(165)
6.2.3 单结晶体管和触发电路	(168)
6.3 交流调压器与直流斩波器	(173)
6.3.1 交流调压器	(173)
6.3.2 直流斩波器	(175)
6.4 直流电动机 PWM 调速系统	(178)
6.4.1 脉宽调制变换器	(178)
6.4.2 脉宽调速系统的机械特性	(182)
6.5 变频与逆变电路	(183)
6.5.1 概述	(183)
6.5.2 变频装置	(184)
6.6 异步电动机的变频调速	(187)
6.6.1 变频调速的基本控制方法	(187)
6.6.2 正弦波脉宽调制逆变器	(188)
6.6.3 SPWM 波形的生成方法	(192)
本章小结	(194)
习题	(195)
第7章 电气电测技术	(198)
7.1 电测技术方法分类	(198)
7.1.1 电测技术主要优点	(198)
7.1.2 电测方法分类	(199)
7.2 电气测量误差分析	(200)
7.2.1 误差定义	(200)
7.2.2 误差分类和来源	(202)
7.3 常用电工仪表分类	(203)

7.3.1 磁电式仪表	(204)
7.3.2 电磁式仪表	(206)
7.3.3 电动式仪表	(207)
7.4 电压、电流与电功率测量	(208)
7.4.1 电压的测量	(208)
7.4.2 电流的测量	(209)
7.4.3 功率的测量	(209)
7.4.4 万用表	(212)
7.5 温度传感器与应用	(213)
7.5.1 热敏电阻	(214)
7.5.2 热电偶	(216)
7.5.3 集成温度传感器	(218)
7.6 压力传感器与应用	(219)
7.6.1 应变式电阻传感器	(219)
7.6.2 电感式传感器	(221)
7.6.3 电容式传感器	(222)
7.7 其他传感器与应用	(223)
7.7.1 霍尔传感器	(224)
7.7.2 光电传感器	(225)
7.7.3 CCD 图像传感器	(227)
7.8 非电量电测系统	(228)
7.8.1 传感器的作用和选择	(229)
7.8.2 信号处理电路	(229)
7.8.3 信号显示和记录	(230)
本章小结	(230)
习题	(231)
第 8 章 信号处理与数据采集系统	(233)
8.1 测量放大电路	(233)
8.1.1 电桥放大电路	(233)
8.1.2 电荷放大电路	(234)
8.2 调制与解调电路	(235)
8.2.1 调制器工作原理	(235)
8.2.2 解调器工作原理	(236)
8.3 多路模拟开关	(237)
8.3.1 CMOS 模拟开关	(238)

8.3.2 集成模拟多路开关	(238)
8.4 电压/频率转换电路	(241)
8.4.1 U/F 转换电路工作原理	(241)
8.4.2 集成 U/F 转换器	(242)
8.5 采样保持电路	(244)
8.5.1 采样定理	(244)
8.5.2 S/H 电路工作原理	(244)
8.5.3 集成 S/H 电路	(245)
8.6 数据采集系统	(246)
8.6.1 多通道共享 S/H 和 A/D 系统	(247)
8.6.2 多通道共享 A/D 系统	(247)
8.6.3 多通道 A/D 系统	(248)
本章小结	(248)
习题	(249)
第 9 章 现代通信技术	(250)
9.1 通信系统分类	(250)
9.1.1 通信系统按传输介质分类	(250)
9.1.2 通信系统按传输信号分类	(251)
9.2 通信方式	(253)
9.2.1 同频单工方式	(253)
9.2.2 双频双工方式	(253)
9.2.3 半双工方式	(254)
9.3 信道与传输介质	(254)
9.3.1 信道	(254)
9.3.2 传输介质	(255)
9.4 信号调制方式	(257)
9.4.1 模拟信号调制	(257)
9.4.2 数字信号调制	(259)
9.5 光纤通信技术	(259)
9.5.1 光纤传输特性	(259)
9.5.2 光纤通信系统	(260)
9.6 卫星通信技术	(261)
9.6.1 卫星通信特点	(262)
9.6.2 卫星通信分类	(263)
9.6.3 卫星通信系统	(264)

9.7 移动通信技术	(265)
9.7.1 移动通信特点和分类	(266)
9.7.2 移动通信系统	(266)
9.7.3 公用移动电话系统	(268)
9.7.4 无绳电话系统	(269)
9.7.5 无线寻呼系统	(269)
9.7.6 专用移动通信系统	(270)
本章小结	(270)
习题	(271)
电工电子应用技术试题(卷)	(272)
部分习题答案	(280)
电工电子应用技术试题(卷)答案	(283)
中英文名词对照	(287)
参考文献	(291)
附录 A Y 系列三相异步电动机技术数据	(292)
附录 B OMRON 公司 CMP1A 基本指令	(293)
附录 C OMRON 公司 CMP1A 基本梯形图	(294)
附录 D 国产晶闸管主要参数	(295)
附录 E GTR 主要参数	(296)
附录 F MOSFET 主要参数	(297)
附录 G IGBT 主要参数	(299)
附录 H GE 公司 MCT 主要参数	(300)
附录 I 电工测量仪表按被测量分类	(301)
附录 J 典型光电耦合器主要参数	(302)
附录 K 常用热电偶主要参数	(303)
附录 L 部分 NTC 型热敏电阻主要参数	(304)
主编简介	(305)

第 1 章 交流电动机

实现机械能与电能相互转换的旋转机械称为电机。将机械能转换为电能的电机称为发电机,将电能转换为机械能的电机称为电动机。

电机可分为直流电机和交流电机两大类,交流电机又分为异步电机和同步电机两种。

现代各种生产机械都广泛应用电动机来驱动。电动机按使用电源种类的不同,通常可分为交流电动机和直流电动机,交流电动机又分为异步电动机和同步电动机。电动机根据使用场合的不同可分为动力用电动机和控制用电动机。

本章主要讨论三相异步电动机的基本结构、工作原理、技术性能和使用方法,最后简单介绍单相异步电动机和同步电动机等。

1.1 三相异步电动机的结构与工作原理

在异步电动机中,通常将功率(容量)较大的做成三相异步电动机,其有利于三相电源的负载平衡,而功率较小者做成单相异步电动机。三相异步电动机与其他类型的电动机相比较,具有结构简单、运行可靠、价格低廉、维护方便和运行效率高等优点。其缺点是功率因数较低,调速性能差(尤其是大范围内调速)。在要求调速范围较宽、平滑无级的生产机械中,大多使用直流电动机或者其他类型的电动机。近年来,随着电力电子技术的迅猛发展,较好地解决了异步电动机的调速问题,使三相异步电动机在各个生产领域都得到了最广泛的应用。例如各种机床、起重机械、鼓风机、水泵以及各种动力机械等普遍使用三相异步电动机,各种家用电器、医疗器械和许多小型机械则使用单相异步电动机。三相异步电动机的容量从几十瓦到几百千瓦,约占全国电动机总容量的 85% 左右。

1.1.1 三相异步电动机的结构

三相异步电动机由定子和转子两个基本部分组成,中小型异步电动机定子和转子之间一般有约 0.1~0.2mm 厚度的空气隙,如图 1.1.1 所示。

1. 定子部分

三相异步电动机的定子部分是电动机固定不动的部分。由机座(外壳)、定子铁心、定子绕组和端盖等组成。

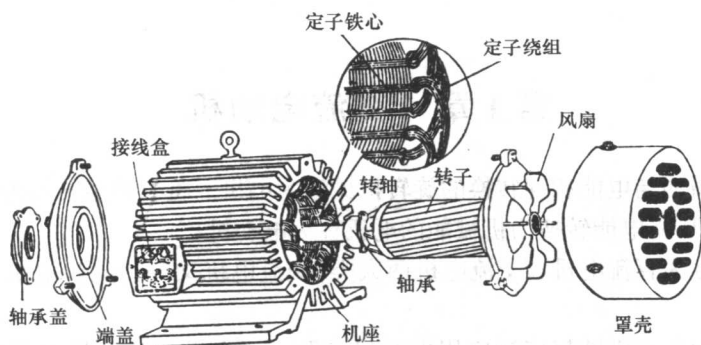


图 1.1.1 三相鼠笼式异步电动机的结构

机座通常由铸铁制成,内装有 $0.35\sim 0.5\text{mm}$ 圆环状硅钢片叠成的筒形(定子)铁心。机座的主要作用是固定和支撑定子铁心,要求有足够的机械强度和刚度,能够承受运输和运行过程中的各种作用力。

定子铁心是电动机磁路的一部分,为了减小涡流和磁滞损耗,由涂有绝缘漆的硅钢片叠成。定子内圆表面有若干个凹槽,以便使三相绕组放置在槽中,如图1.1.2所示。定子铁心是用压力机压入机座内的。

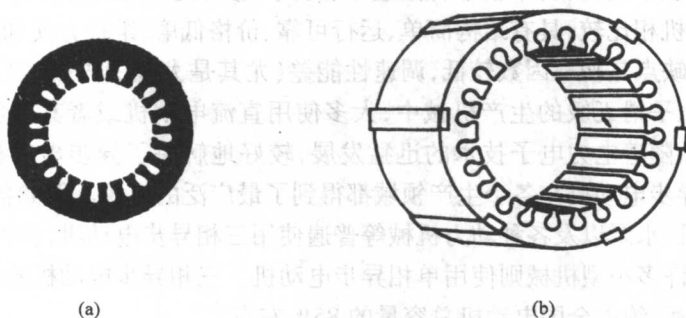


图 1.1.2 定子铁心

(a) 圆环状硅钢片;(b) 筒形定子铁心

定子绕组是定子的电路部分。异步电动机的定子绕组由带绝缘的导线——漆包铜线、铝线或纱包线等制成,安装在线槽内。定子绕组与槽壁之间还嵌有青壳线等绝缘材料。在制造定子绕组时,一般都先用模具把导线绕成线圈,再逐个地嵌入铁心槽中,然后按一定规则将所有线圈联接成三组对称分布于定子铁心中的绕组(称为定子三相对称绕组)。

定子三相绕组共有六个端子,三个首端分别标记为 U_1 、 V_1 、 W_1 ,三个对应的尾端分别标记为 U_2 、 V_2 、 W_2 ,并将它们分别引到电动机的接线盒的接线柱上。根据需要可将三相绕组联接成星(Y)形和三角(Δ)形,如图 1.1.3 所示。两种不同的联接,可使电动机在两种不同电压下工作。

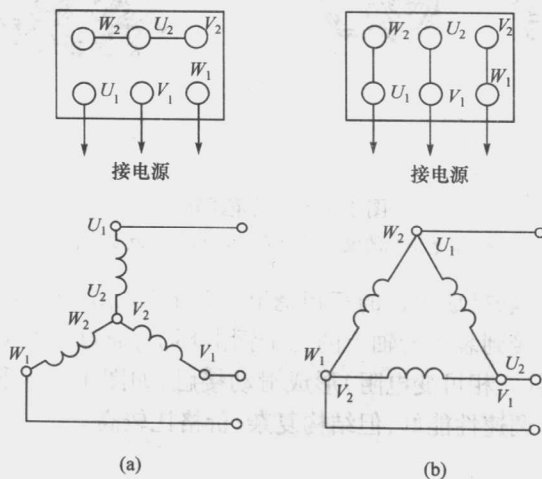


图 1.1.3 定子绕组的两种接法

(a) 星形接法; (b) 三角形接法

2. 转子部分

转子是电动机的转动部分,它由转子铁心、转子绕组、转轴和风扇等组成。

转子铁心是电动机磁路的一部分,也由 $0.35 \sim 0.5\text{mm}$ 硅钢片叠压而成。转子铁心的外圆周上有槽,槽内放置转子绕组,转子固定在转轴上,如图 1.1.4 所示。

转子绕组的作用是感应电动势、流过电流和产生电磁转矩。按转子绕组结构型式不同,异步电动机可分为鼠笼式和绕线式两种。图 1.1.5 所示是鼠笼式转子的结构,它在转子铁心的槽内放置铜条,其两端用端环联接,如果抽掉转子铁心,转子绕组形似鼠笼,所以称为鼠笼式转子绕组,如图 1.1.5(a)所示。

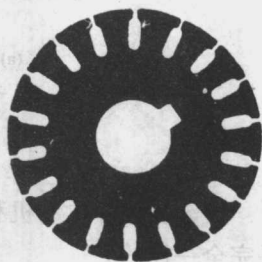


图 1.1.4 转子铁心冲片

此外,也可将铝液浇注在铁心槽内,铸成一个鼠笼,如图 1.1.5(b)所示。这种转子既经济又便于生产,中小型电动机几乎都采用铸铝转子。

绕线式转子的绕组和定子绕组相似,是将由绝缘导线做成的绕组元件放置在

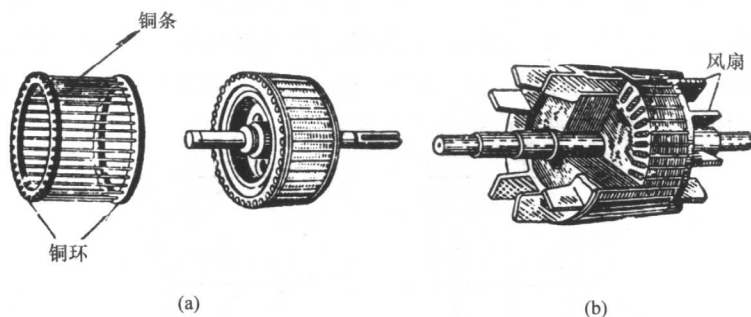


图 1.1.5 鼠笼式转子

(a) 铜条构成的鼠笼式转子; (b) 铸铝的鼠笼式转子

转子铁心槽内,然后联接成对称的三相绕组。转子三相绕组通常联接成星形,星形绕组的三根端线联接到装在转轴上的三个铜滑环上,通过一组电刷(碳刷)与外界静止的启动变阻器(三相可变电阻)形成滑动接触,如图 1.1.6 所示。绕线式三相异步电动机启动和调速性能好,但结构复杂、价格比较高。

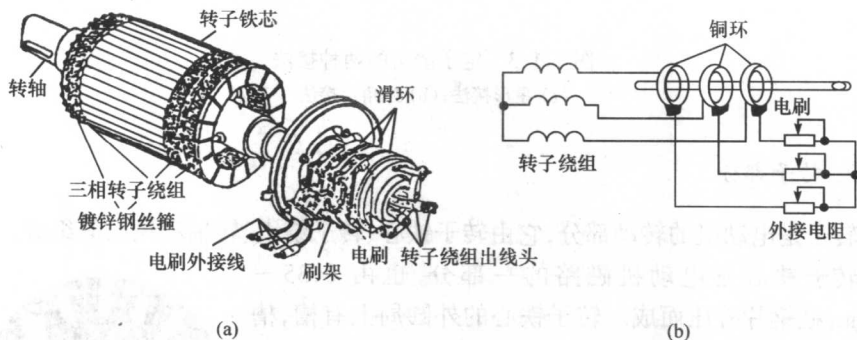


图 1.1.6 绕线式转子

(a) 转子结构图; (b) 转子示意图

鼠笼式异步电动机和绕线式异步电动机只是转子构造不同,它们的工作原理是完全一样的。

1.1.2 三相异步电动机的工作原理

1. 转动原理

图 1.1.7 是异步电动机的转动原理图。设旋转磁极是一对 N、S 磁极的永久磁铁,外壳是圆筒形,可以人工转动。中间是一鼠笼式转子。当旋转磁极以 n_1 转

速旋转时,在转子的铜条中就产生感应电动势。这个感应电动势的实际方向可用右手定则确定^①,图中磁力线用虚线表示。在上方的一组铜条中,感应电动势的方向是离开纸面(用 $\odot$ 表示),而下方的另一组铜条中,感应电动势的方向是进入纸面(用 $\otimes$ 表示)。由于端环使转子的各铜条均联通,于是上下方铜条中的感应电动势相互顺向相加形成电流,并认为电流的方向与电动势的方向相同^②。这个电流使铜条在磁场中受到力 F 的作用(F 的方向用左手定则确定),从而使转子以转速 n 转动,而且 n 与 n_1 是同一方向,但 $n < n_1$ 。

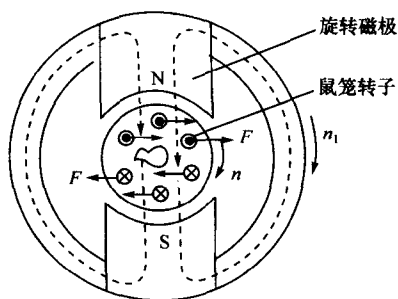


图 1.1.7 异步电动机的转动原理

在实际的三相异步电动机中,上述旋转磁极不是永久磁铁,而是三相电流通入三相绕组中产生的三相旋转磁场。

2. 旋转磁场

三相异步电动机每相定子绕组的结构如图 1.1.8(a)所示。图 1.1.8(b)是三相绕组的安置图。为了简单起见,设定子有六个槽,放有三相绕组 U_1 、 U_2 、 V_1 、 V_2 和 W_1 、 W_2 。每相绕组均为集中绕组(一相绕组的两个有效边各放在一个槽中),并且只有一匝。从三相绕组的分布情况看,每相绕组的首端在空间互差 120° ,因此构成三相对称绕组,如图 1.1.8(b)所示。

设三相绕组接成星形,如图 1.1.9(a)所示。其中通入对称三相电流,如图 1.1.9(b)所示。即

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

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

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

下面分析三相电流在三相绕组中如何形成合成磁场。

当 $\omega t = 0^\circ$ 时,如图 1.1.9(b)所示。A 相电流为零, C 相电流为正值,由 C 相绕组的首端 W_1 流入,尾端 W_2 流出。B 相电流为负值,由 B 相绕组的尾端 V_2 流入,首端 V_1 流出。三相电流的合成磁场如图 1.1.9(c)所示。合成磁场为两极,定子内圆的上边为 N 极,下边为 S 极,故为两极电动机。

① 这时可设想磁极不动,而转子铜条是逆时针旋转而切割磁力线。图中磁力线用虚线表示。

② 实际上每根铜条中的电动势与电流并非完全相同。为叙述简单起见,忽略铜条的感抗部分,仅有电阻。

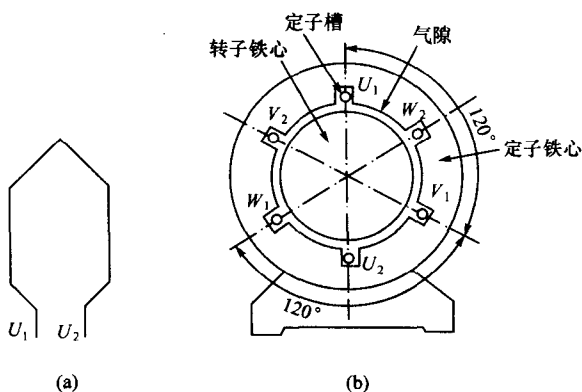


图 1.1.8 三相定子绕组安置图
(a) 一相绕组; (b) 三相绕组安装在定子槽中

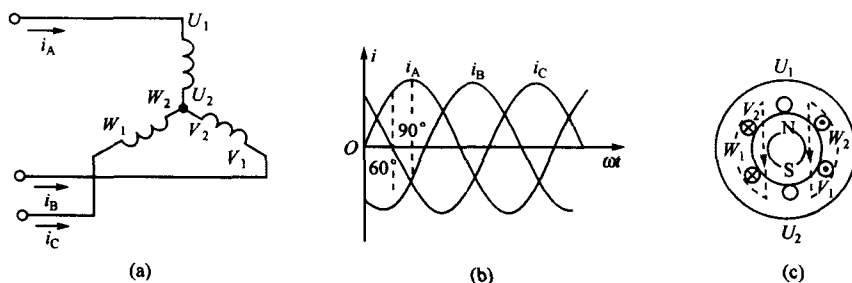


图 1.1.9 三相电流及其合成磁场
(a) 三相绕组的联接; (b) 三相电流的形成; (c) $\omega t = 0^\circ$ 时的合成磁场

以 $\omega t = 90^\circ$ 为计时起点, 依次分析 $\omega t = 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ \dots$ 各相应时刻的三相电流在 三相绕组中形成的合成磁场, 其结果如图 1.1.10 所示 (图中未完成一个周期)。由图可知, 三相对称绕组流过三相对称电流时形成的合成磁场是一个旋转磁场, 其旋转方向与三相电流出现最大值的顺序一致, 即沿着定子三相绕组 A、B、C 的方向旋转。显然, 如果将三相电源线中的任意两根对调, 例如将 B 相电源线接至 C 相绕组上, 而 C 相电源线接至 B 相绕组上, 则三相绕组的电流相序就会改变, 因而旋转磁场的转向相反, 电动机也就反转了。

由此可以得出结论: 旋转磁场的旋转方向与三相电流的相序一致。

3. 旋转磁场转速

由图 1.1.10 可知, 在两极的情况下, 当电流经过一个周期时, 旋转磁场在空间