



普通高校“十三五”规划教材

交流变频调速技术

(第3版)

何超 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高校“十三五”规划教材

交流变频调速技术

(第3版)

何 超 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

交流电动机变频调速技术是在近几十年来才迅猛发展起来的电力拖动先进技术,得到越来越广泛的应用,并已成为高等院校电类、自动化类、机电类专业本科,尤其是应用型本科和高职高专相关专业的必修或选修课程。

修订后仍分八章,依次是:变频调速技术概述,常用电力电子器件介绍及选择,变频调速原理,变频器的选择、变频调速系统的构建,变频器技术应用概述,变频器的安装、维护与调试,变频器的操作实验;并着重在实践性和应用性上加大了笔墨。此外,还精选了思考题和习题,考虑到题目难度较大和读者学习的困难,给出了适度的解答。

本书可用作高等院校电类、自动化类、机电类专业,尤其是应用型本科教学和高职高专相关专业的教学教材;也可供从事变频技术相关工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

交流变频调速技术 / 何超编著. -- 3 版. -- 北京 :
北京航空航天大学出版社, 2017. 4

ISBN 978 - 7 - 5124 - 2394 - 7

I. ①交… II. ①何… III. ①交流电机—变频调速
IV. ①TM921.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 079256 号

版权所有,侵权必究。

交流变频调速技术(第 3 版)

何 超 编 著

责任编辑 张艳学

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京泽宇印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:18 字数:405 千字

2017 年 4 月第 3 版 2017 年 4 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978 - 7 - 5124 - 2394 - 7 定价:38.00 元

第3版前言

交流电动机变频调速技术是在近几十年来才迅猛发展起来的电力拖动先进技术。越来越得到广泛的应用,因而成为高等院校电类、自动化类、机电类专业本科,尤其是应用型本科和高职高专相关专业的必修或选修课程。

本书第1版于2006年出版。出版后得到了广大读者的厚爱,受到社会的好评。鉴于变频调速技术的快速发展,其应用愈加广泛,原书中的部分内容已不适用于当前技术和教学实际,为此,我们在2012年第2版的基础上再次修订,推出第3版。

本书继承原书全书结构合理、简明扼要、重点突出、通俗易懂、文笔流畅、图文并茂、理论联系实际的特点。着重在实践性和应用性上加大了分量。书中还精选了思考题和习题,考虑到题目难度较大和读者学习的困难,给出了适度的解答。全书严格贯彻国家相关标准。

本书第3版由何超教授编著。本书在编写过程中,得到了北京航空航天大学、华中科技大学、广东白云学院、广东技术师范学院天河学院等单位的关心、帮助和支持,在此表示衷心的感谢。

变频技术飞跃发展,应用日益广泛,尽管编者努力跟进,但限于学术水平和实践能力,书中错误和不足之处在所难免。诚望各位专家学者和广大读者不吝赐教。

编 者
2017年4月

目 录

第 1 章 变频调速技术概述	1
1.1 直流电动机及其拖动系统的基础知识回顾	1
1.1.1 直流电动机的工作原理	1
1.1.2 直流电动机的励磁方式	2
1.1.3 直流电动机的机械特性	3
1.1.4 直流电动机的调速	4
1.2 三相交流异步电动机及其拖动系统的基础知识回顾	5
1.2.1 三相异步电动机的基本结构	5
1.2.2 三相异步电动机的工作原理	7
1.2.3 旋转磁场的极数	9
1.2.4 三相异步电动机的运行特点	10
1.2.5 三相异步电动机的调速	10
1.2.6 三相异步电动机的机械特性	11
1.2.7 异步电动机负载的机械特性	12
1.2.8 异步电动机拖动系统运行状况的分析	14
1.2.9 异步电动机拖动反抗性恒转矩负载系统的制动	15
1.2.10 异步电动机拖动位能性恒转矩负载系统的制动	17
1.3 交流电动机的变频调速技术概述	19
1.3.1 什么是交流电动机的变频调速技术	19
1.3.2 交流电动机变频调速技术的主要发展过程	19
1.3.3 交流电动机的变频器种类	19
1.3.4 变频电机	23
习题 1	25
第 2 章 常用电力电子器件原理及选择	27
2.1 晶闸管的结构原理及测试	27
2.1.1 普通晶闸管的结构	27
2.1.2 晶闸管的工作原理	27
2.1.3 晶闸管的伏安特性	29
2.1.4 晶闸管管脚极性的判断和测试	30
2.1.5 门极可关断晶闸管	31
2.2 功率晶体管	31
2.2.1 功率晶体管的结构及工作特点	31

2.2.2	功率晶体管的主要参数	32
2.2.3	功率晶体管的选择方法	33
2.2.4	常用功率晶体管的驱动电路模块	34
2.3	功率场效应晶体管的结构、工作特点及测试	34
2.3.1	功率场效应晶体管的结构	34
2.3.2	功率场效应晶体管的工作特点	34
2.3.3	功率场效应晶体管的测试	35
2.4	绝缘栅双极型晶体管的结构与工作特点	36
2.4.1	绝缘栅双极型晶体管的结构	36
2.4.2	绝缘栅双极型晶体管的工作特点	36
2.5	集成门极换流晶闸管的结构与工作特点	37
2.5.1	集成门极换流晶闸管的结构	37
2.5.2	集成门极换流晶闸管的工作特点	37
2.6	MOS控制晶闸管的结构与工作特点	37
2.6.1	MOS控制晶闸管的结构	37
2.6.2	MOS控制晶闸管的工作特点	38
2.7	电力半导体器件的应用特点	38
2.8	智能电力模块的结构与工作特点	39
	习题2	40
第3章	变频调速原理	42
3.1	变频调速的基本原理	42
3.1.1	变频调速系统的控制方式	42
3.1.2	PWM控制技术	44
3.2	通用变频器简介	49
3.2.1	通用变频器基本结构	49
3.2.2	变频器的主电路	50
3.2.3	变频器的其他单元电路	53
3.2.4	其他相关电路	59
3.3	U/f控制型通用变频器	60
3.3.1	普通控制型U/f通用变频器	60
3.3.2	具有恒定磁通功能的U/f通用变频器	64
3.3.3	转速闭环控制的转差频率控制系统	65
3.4	矢量控制系统通用变频器	66
3.4.1	矢量控制的基本思路	66
3.4.2	矢量控制通用变频器举例	68
3.5	直接转矩控制	68

3.5.1 PWM 逆变器输出电压的矢量表示	68
3.5.2 磁通轨迹控制	69
3.5.3 直接转矩控制系统的实际结构	71
3.6 高压变频器主电路结构及其控制特点	71
3.7 我国变频调速技术的发展状况	73
3.7.1 变频调速技术的发展过程	73
3.7.2 目前国内主要的产品状况	74
3.8 变频技术的发展方向	75
习题 3	76
第 4 章 变频器的选择	78
4.1 变频器的额定值和性能指标	78
4.2 变频器的选择	80
4.2.1 变频器品牌的选择	81
4.2.2 变频器控制方式的选择	81
4.2.3 变频器滤波方式的选择	82
4.2.4 变频器容量的选择	83
4.3 电网与变频器的切换	89
4.4 瞬时停电再启动	89
4.5 变频器的外围设备及其选择	90
4.5.1 常规配件的选择	90
4.5.2 专用配件的选择	92
习题 4	95
第 5 章 变频调速拖动系统的构建	97
5.1 变频调速拖动系统的组成	97
5.2 构建变频调速拖动系统的基本要求	97
5.2.1 在机械特性方面的要求	97
5.2.2 在运行可靠性方面的要求	98
5.3 变频调速时电动机的有效转矩线	99
5.3.1 有效转矩线的概念	99
5.3.2 $f_x \leq f_N$ 时的有效转矩线	99
5.3.3 $f_x > f_N$ 时的有效转矩线	100
5.4 恒转矩负载变频调速系统的构建	101
5.4.1 工作频率范围的选择	101
5.4.2 调速范围与传动比	102
5.4.3 电动机和变频器的选择	104

5.5 恒功率负载变频系统的构建	105
5.5.1 恒功率负载系统构建的主要问题	105
5.5.2 电动机和变频器的选择	108
5.6 平方律负载变频调速系统的构建	108
5.6.1 平方律负载系统构建的主要问题	109
5.6.2 平方律负载系统电动机与变频器的选择	110
5.7 直线律负载变频系统的构建	110
5.7.1 直线律负载及其特性	110
5.7.2 直线律负载系统变频器的选择	111
5.8 对混合特殊性负载变频器的选择	111
5.8.1 混合特殊性负载及其特性	111
5.8.2 对混合特殊性负载变频器的选择	112
习题 5	112
第 6 章 变频技术应用概述	113
6.1 变频技术的应用	113
6.2 起升机构的变频调速	115
6.2.1 起升机构的特点	115
6.2.2 起升机构对拖动系统的要求	117
6.2.3 起升机构的变频调速改造	118
6.3 箱式电梯设备的变频调速	120
6.3.1 箱式电梯与起升机构的异同	120
6.3.2 箱式电梯的变频调速	121
6.4 水泵、风机的变频调速	126
6.4.1 水泵变频调速节能原理	126
6.4.2 恒压供水变频调速系统的构成与工作过程	128
6.4.3 恒压供水系统的应用实例	130
6.5 中央空调的变频调速	131
6.5.1 中央空调的构成	131
6.5.2 对中央空调变频调速系统的基本考虑	132
6.5.3 对中央空调变频调速系统的另一考虑	134
6.6 机床的变频调速改造	136
6.6.1 变频器的选择	137
6.6.2 变频器的频率给定	137
6.6.3 变频调速系统的控制电路	139
习题 6	140

第 7 章 变频器的安装、维护与调试	142
7.1 三菱 FR-A-500 系列变频器	142
7.1.1 变频器的外形与结构	144
7.1.2 变频器的硬件和软件功能编码	148
7.1.3 功能预置的几个问题	150
7.2 变频器的安装与调试常识	161
7.2.1 变频器的安装	161
7.2.2 变频器的调试	163
7.3 变频器的保养和维护	167
7.3.1 变频器保养维护的重要性及注意事项	167
7.3.2 变频器的保养维护	169
7.4 变频器常见故障诊断	175
7.4.1 关于维修变频器要注意的一些问题	175
7.4.2 故障报警显示和运行异常处理对策	179
7.4.3 变频器主板故障	184
7.5 电磁干扰和射频干扰	193
习题 7	194
第 8 章 变频器操作实验	197
实验一 变频器结构认识与接线	197
实验二 变频器的基本操作	206
实验三 变频器的 PU 模式操作	212
实验四 变频器的外部操作	217
实验五 变频器的组合操作	220
实验六 变频器的频率跳变	225
实验七 变频器的多段速运行	227
实验八 变频器的程序运行	231
实验九 变频器与 PLC 的综合应用	238
附录一 三菱 FR-A-500 变频调速器常用参数表	242
附录二 三菱变频器故障报警代码表	245
习题解答	248
参考文献	277

第 1 章 变频调速技术概述

变频调速技术是一种以改变交流电动机的供电频率来达到交流电动机调速目的的技术。大家知道,从电源性能来分,电动机有直流电动机和交流电动机。由于直流电动机调速容易实现,性能好,因此,过去生产机械的调速多用直流电动机。但直流电动机固有的缺点是,由于采用直流电源,它的滑环和碳刷要经常拆换,费时费工,成本高,给使用带来不少的麻烦。因此人们希望,让简单可靠价廉的笼式交流电动机也能像直流电动机那样调速。于是就出现了定子调速、变极调速、滑差调速、转子串电阻调速和串极调速等交流调速方式,产生了滑差电机、绕线式电机、同步式交流电机等。但其调速性能都无法和直流电动机相比。直到 20 世纪 80 年代,由于电力电子技术、微电子技术和信息技术的发展,出现了变频调速技术。它一出现就以其优异的性能逐步取代其他交流电动机的调速方式,乃至直流电动机调速系统,而成为电气传动的中枢。

要学习交流电动机的变频调速技术,必须有电力拖动系统的知识。因此,本章先学习电力拖动系统的基础知识。电力拖动系统由电动机、负载和传动装置三部分组成。描写电力拖动系统的物理量主要是转速 n 和转矩 T (有时也用电流,因转矩和电动机的电枢电流成正比),两者之间的关系式 $n=f(T)$ 称为机械特性。

1.1 直流电动机及其拖动系统的基础知识回顾

1.1.1 直流电动机的工作原理

直流电动机由转子和定子两大部分组成。定子是用励磁绕组绕在定子磁极上而成的(这里不讨论“永磁式直流电动机”);转子是用电枢绕组嵌入转子铁芯(用来构成磁路)而成的。定子绕组和转子绕组都通入直流电流。两个电流产生的磁场相互作用,使转子旋转。

图 1-1 为直流电动机的工作原理图。图中 N 和 S 是定子励磁绕组产生的磁极。电刷 A 接直流电源的正极,电刷 B 接直流电源的负极。因此电流总是从电刷 A 流入,经转子(也称电枢)绕组有效边 ab 后再由有效边 cd 最后经电刷 B 流出。

由图 1-1 可见,电枢绕组有效边 ab 与 cd 处于定子励磁绕组产生的磁场中,根据左手定则,它们都受到如图 1-2 所示方向的电磁力的作用,且在电磁力所产生的转矩推动下,电枢将沿顺时针方向旋转。电枢转过 180° 时,电枢绕组 ab 边和 cd 边互换了位置,因与之相连的换向片也随着转动,所以各边的电流方向也改变,这就是换向片的换向原理。利用这种换向原理,使电枢绕组各边到达同一磁极下时具有相同的电流方向,

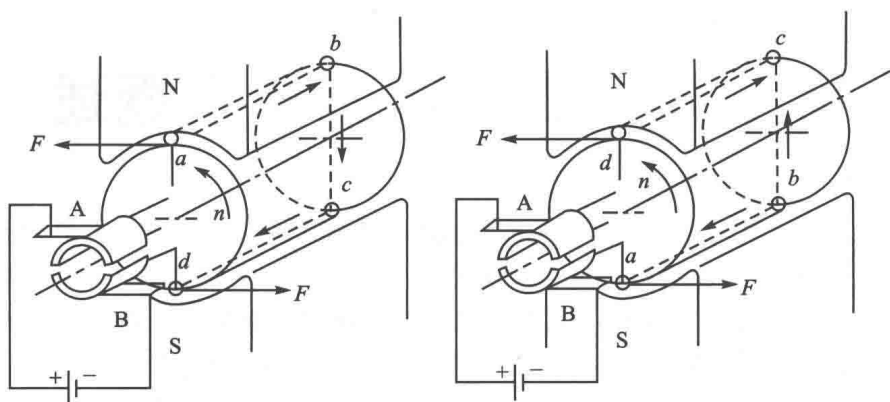


图 1-1 直流电动机的工作原理

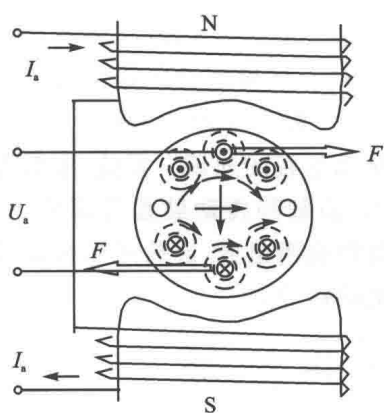


图 1-2 直流电动机的两个磁场

从而使电动机产生固定方向的电磁转矩,驱动电枢沿顺时针方向继续旋转,如此循环往复。这就是直流电动机的工作原理。实际的电动机有许多电枢绕组,每组电枢绕组都有一对换向片,这些换向片就组成了一个换向器。

综上所述,直流电动机的结构有以下两个特点:

① 定子励磁电路和电枢供电电路基本上是相互独立的,可以分别进行调节。

② 两个磁场(由定子励磁电路产生的主磁场和电枢供电电路产生的电枢磁场)互相垂直,如图 1-2 所示。

这是直流电动机具有优良的调速性能的原因。

1.1.2 直流电动机的励磁方式

前面已经提到,直流电动机定子主磁极上装有励磁绕组,在励磁绕组中通入直流电后产生的磁场称为励磁磁场。励磁绕组的供电方式称为励磁方式。按励磁方式的不同,可将直流电动机分为他励、并励、串励和复励四种。

① 他励直流电动机:励磁绕组由其他直流电源供电,与电枢绕组无任何电的联系,如图 1-3(a)所示。

② 并励直流电动机:励磁绕组与电枢绕组并联起来,接在同一个直流电源上,如图 1-3(b)所示。

③ 串励直流电动机:励磁绕组与电枢绕组串联后接直流电源,如图 1-3(c)所示。

④ 复励直流电动机:接线方式如图 1-3(d)所示,绕在主磁极上靠近电枢的绕组是与电枢绕组串联的。靠近定子外壳的绕组是与电枢绕组并联的,称这种励磁方式为复励直流电动机。

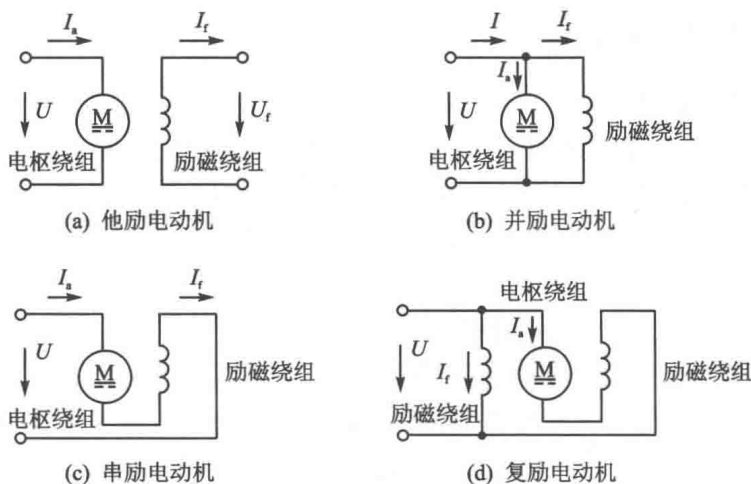


图 1-3 直流电动机的励磁方式

1.1.3 直流电动机的机械特性

在直流电动机中,由图 1-2 可知,电枢电压 U_a 除去电枢绕组 R 上的直流电压降 $I_a R$ 以外,主要用于克服反电势 E ,即有

$$E = U_a - I_a R \quad (1-1)$$

而 E 与定子磁场的磁通 Φ 成正比,与转子转速 n 成正比,即

$$E = K_e \Phi n \quad (1-2)$$

式中: K_e 为比例系数。由式(1-1)和式(1-2)可得

$$n = \frac{U_a - I_a R}{K_e \Phi} \quad (1-3)$$

而转矩 T 和电流 I_a 与磁通 Φ 的关系为

$$T = K_T \Phi I_a \quad (1-4)$$

将式(1-4)代入式(1-3),消去 I_a 则有

$$n = \frac{U_a}{K_e \Phi} - \frac{R_a}{K_e K_T \Phi^2} T \quad (1-5)$$

式(1-5)表示了他励直流电动机的转速 n 和转矩 T 之间的关系。在电枢电压 U_a 和磁通 Φ 保持不变的条件下,转速 n 和转矩 T 之间的关系称为直流电动机的机械特性。在通常情况下,式(1-5)后项很小,故直流电动机的机械特性接近于一条水平直线,随着转矩 T 的增大,转速 n 仅略有下降,这样的机械特性称为硬特性,表明了转速的相对稳定性,如图 1-4 所示。

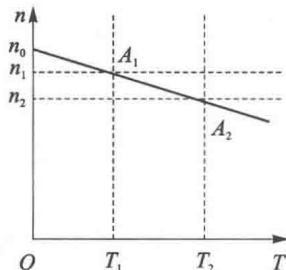


图 1-4 直流电动机的机械特性

1.1.4 直流电动机的调速

1. 调压调速

由式(1-5)可知,在负载转矩 T 和磁通 Φ 不变时,降低电枢电压 U_a 可以降低转速 n ,从而得到一系列平行的机械特性,如图 1-5 所示。但只能在额定电压以下进行调速。其优点是:可平滑调速,控制方便;机械特性硬,稳定性好;调速范围大,可达 6~10 倍。

2. 在额定转速以上弱磁升速

由式(1-5)还可知,在负载转矩 T 和电枢电压 U_a 不变时,减弱磁通 Φ (通过在励磁绕组上串联一个可变电阻 R_f 进行调节,若电阻 R_f 增大,励磁电流 I_f 减少,磁通 Φ 也随之减弱)可以在额定转速以上升高转速 n ,由此得到一系列变陡了的不平行的机械特性,但仍属硬特性,如图 1-6 所示。其优点是:可平滑调速,控制方便;机械特性虽然没有调压调速的机械特性硬,但也是斜率不大的直线,仍属较硬特性,稳定性也较好;有一定的调速范围,专门生产的弱磁升速的电动机,其调速范围可达 3~4 倍。

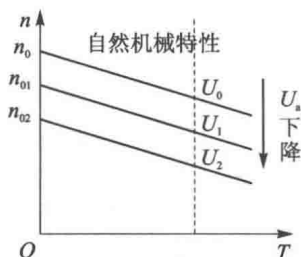


图 1-5 直流电动机的调压调速

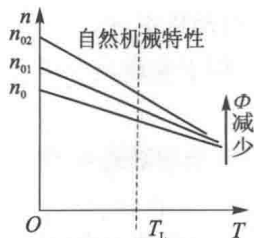


图 1-6 直流电动机的弱磁升速

3. 电枢电路串电阻 R_T 调速

由式(1-5)可知,在负载转矩 T 、电枢电压 U_a 和磁通 Φ 不变时,通过在电枢绕组上串联一个可变电阻 R_T ,式(1-5)后项中的 R_a 变为 $R_a + R_T$,若电阻 R_T 增大,转速 n 降低,从而得到一系列斜率较大(较陡的)的机械特性。电阻 R_T 越大,机械特性越陡,则可由硬特性变为软特性,如图 1-7 所示。其中 $R_T = 0$ 时的机械特性,称为“自然机械特性”,其余的称为“人工机械特性”。

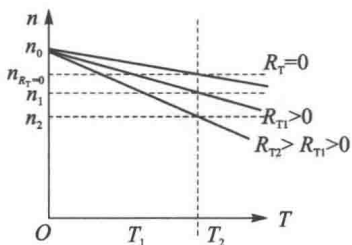


图 1-7 电枢绕组中串电阻调速的机械特性

其优点是方法简便;缺点是机械特性软,调速电阻 R_T 上的能量损耗增大。在电枢电路中串联 R_T 调速电阻,这种调整方法适用于小功率电动机,在对机械特性要求不高的情况下可以采用。

1.2 三相交流异步电动机及其拖动系统的基础知识回顾

交流电动机可分为异步电动机和同步电动机两大类。其中异步电动机由于结构简单、运行可靠、维护方便、价格便宜,是所有电动机中应用最广泛的一种。近年来,随着交流变频调速技术的不断发展,使三相异步电动机的调速性能有了很大提高,完全可以和直流电动机相媲美。据统计,目前在电力拖动中 90% 以上采用的是异步电动机,在电力系统总负荷中,三相异步电动机占 50% 以上。因此,三相异步电动机的变频调速具有重要的意义。

1.2.1 三相异步电动机的基本结构

三相异步电动机主要由定子和转子两部分组成。其拆开后的总体结构如图 1-8 所示。定子由机座、定子铁芯、定子绕组和端盖等部件组成。定子铁芯一般用相互绝缘、厚 0.5 mm 的环形硅钢片叠成圆筒形,固定在机座里面。在定子铁芯硅钢片的内圆侧表面冲有间隔均匀的槽,如图 1-9 所示。定子三相绕组对称地嵌放在这些槽中,在空间上彼此相隔 120° 。三个绕组共有 6 个出线端,首端接头分别用 U_1 、 V_1 、 W_1 表示,其对应的末端接头用 U_2 、 V_2 、 W_2 表示,分别引出接到机座的接线盒上,如图 1-10(a) 所示。根据电动机额定电压和供电电源电压的不同,定子绕组或连接成三角形,或连接成星形,分别如图 1-10(b)、(c) 所示。如果电网线电压等于电动机每相绕组的额定电压,那么三相定子绕组应为三角形连接;如果电网线电压等于电动机每相绕组额定电压的 $\sqrt{3}$ 倍,那么三相定子绕组应为星形连接。

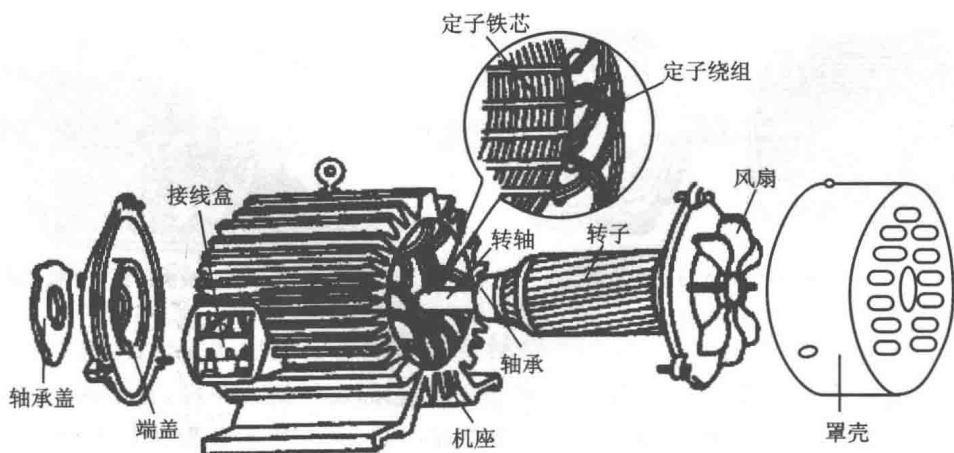


图 1-8 三相异步电动机的总体结构

端盖固定在机座上,端盖中央孔上装有轴承,支撑转子。转子拖动机械负载。转子

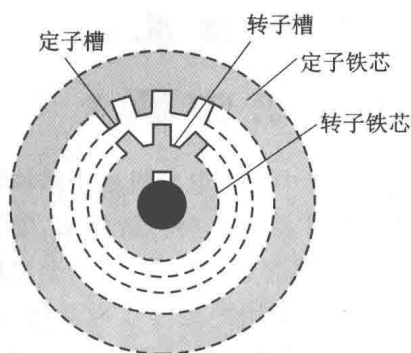


图 1-9 定子铁芯与转子铁芯截面图

由转子铁芯、转子绕组、转轴和风扇等组成。转子铁芯用硅钢片叠成,固定在转轴上,呈圆柱形,外圆侧表面冲有均匀分布的槽(见图 1-9 和图 1-11),槽内嵌放转子绕组。在定子铁芯与转子铁芯之间有一定的空气隙,它们共同组成电动机的磁路。转子绕组有鼠笼型和绕线型两种。

鼠笼型转子绕组的制作方法有两种:一种是将铜条嵌入转子铁芯槽中,两端用铜环将铜条一一短接构成闭合回路,如图 1-11(a)所示。另一种方法是将熔化的铝液浇铸到转子铁芯槽内,并同时铸出两端短路环和散热风扇叶片,如图 1-11(b)所示。

后一种制造方法成本较低,中小型鼠笼型异步电动机转子一般都采用铸铝法制造。

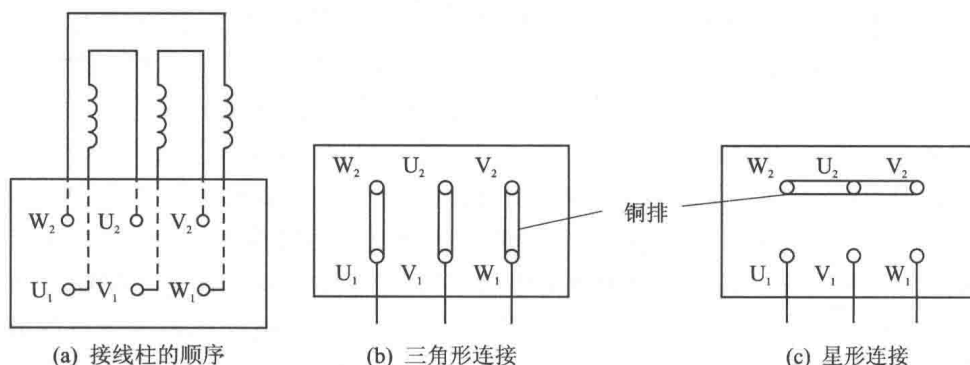


图 1-10 三相异步电动机定子绕组的接法

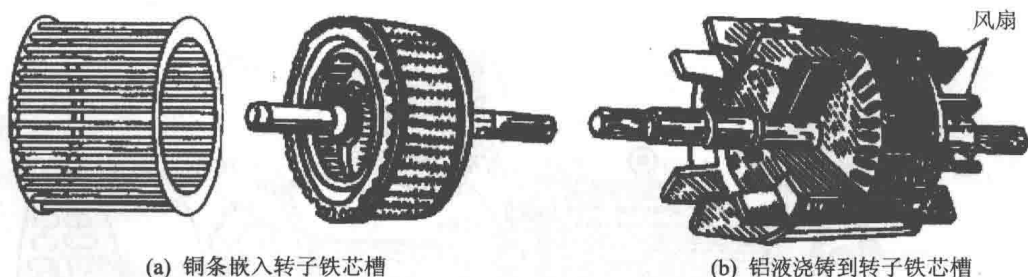


图 1-11 鼠笼型转子

绕线型转子绕组的结构如图 1-12 所示。它同定子绕组一样,也是三相对称绕组。转子绕组连接成星形,即三相线组的末端接在一起,三个始端分别接到彼此相互绝缘的三个铜制滑环上。滑环固定在转轴,并与转轴绝缘。滑环随轴旋转,与固定的电刷滑动接触。电刷安装在电刷架上,电刷的引出线通常与外接三相变阻器连接。通过滑环、电刷将转子绕组与外接变阻器构成闭合回路,用以改善电动机的启动和调速性能。

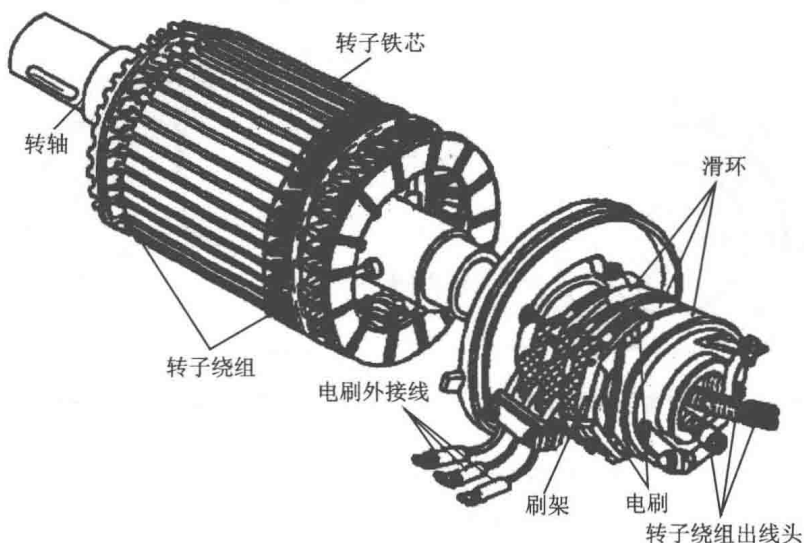


图 1-12 绕线型转子

1.2.2 三相异步电动机的工作原理

为了便于理解三相异步电动机的转动原理,先假设用一对旋转着的永久磁铁作为旋转磁场,旋转磁场中间为仅有一匝绕组的转子,如图 1-13 所示。设这个两极磁场顺时针方向旋转,于是旋转磁场与转子导体相互切割,在转子绕组中会产生感应电动势;由于转子绕组是闭合回路,所以,在感应电动势的作用下出现感应电流,感应电流的方向如图 1-13 所示。图中 $\odot$ 表示电流从该端流出, $\otimes$ 表示电流从该端流入。感应电流又同旋转磁场相互作用产生电磁力 F ,电磁力的方向根据左手定则判定,在电磁力的作用下转子和旋转磁场同方向旋转。

上面的讨论有两点启示:第一,要有一个旋转磁场;第二,转子随旋转磁场转动。三相异步电动机的转动原理与上面的讨论是相似的。那么,三相电动机中的旋转磁场是怎么产生的呢?首先来研究这个问题。

为简单起见,假定三相异步电动机的每相定子绕组只有一个线圈,这三个线圈的结构相同,对称地嵌放在定子铁芯线槽中,绕组的首端与首端、末端与末端都互相间隔 120° ,如图 1-14 所示。设三相绕组接成星形,如图 1-15 所示。当三相绕组的首端接通三相交流电源时,绕组中的三相对称电流分别为

$$i_U = I_m \sin \omega t$$

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

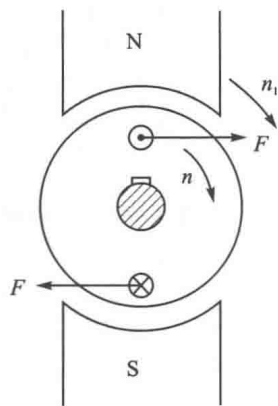


图 1-13 三相异步电动机的工作原理

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

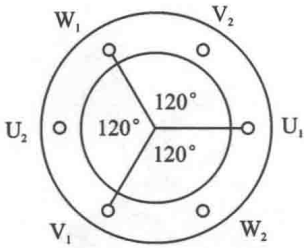


图 1-14 一对极的定子绕组

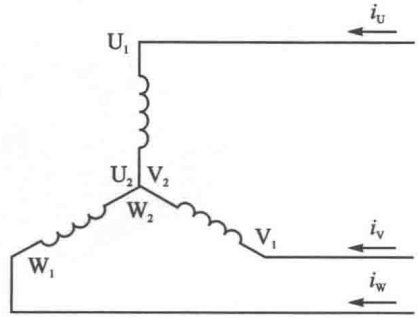


图 1-15 定子绕组联结成星形

各相电流的波形如图 1-16 所示。其中 T 为电流的周期。设从线圈首端流入的电流为正,从末端流入的为负,则在各瞬间三相绕组中的电流产生的合成磁场,该磁场如图 1-17 所示。

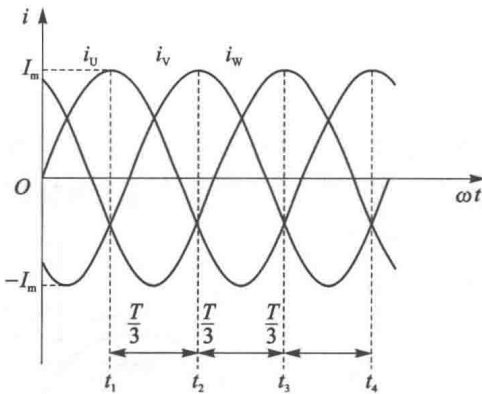


图 1-16 绕组中的电流波形

不失一般性,可在图 1-16 中选 $t_1 \sim t_4$ 四个时刻来研究电流的合成磁场:

在 t_1 时刻, $\omega t = 90^\circ$, $i_U = I_m$, $i_V = i_W = -\frac{1}{2}I_m$ 。因此, i_U 的实际方向与参考方向一致,即电流从 U_1 端流到 U_2 ; 而 i_V 、 i_W 的实际方向与参考方向相反,即电流分别从 V_2 、 W_2 流到 V_1 、 W_1 。根据右手螺旋法则可知三相电流的合成磁场如图 1-17(a)所示,为一对磁极的磁场,方向自下而上。

经过 $\frac{T}{3}$ 时间,即在 t_2 时刻, $\omega t = 210^\circ$, $i_V = I_m$, $i_U = i_W = -\frac{1}{2}I_m$ 。三相电流的合成磁场如图 1-17(b)所示。此时两极磁场在空间的位置较 t_1 时刻沿顺时针方向旋转了 120° 。

又经过 $\frac{T}{3}$ 时间,即在 t_3 时刻, $\omega t = 330^\circ$, $i_W = I_m$, $i_U = i_V = -\frac{1}{2}I_m$ 。三相电流的合成磁场如图 1-17(c)所示。此时两极磁场在空间的位置较 t_2 时刻沿顺时针方向又旋转了 120° 。

再经过 $\frac{T}{3}$ 时间,即在 t_4 时刻,两极磁场又沿顺时针方向旋转 120° 而回到了图 1-17(a)所示的位置。

当三相电流不断变化时,合成磁场在空间将不断旋转,这样就产生了旋转磁场。一