

变频器与

步进/伺服驱动技术

完全精通教程



向晓汉 宋 昕 主编
钱晓忠 审



化学工业出版社

变频器与 步进/伺服驱动技术 完全精通教程



向晓汉 宋 昕 主编
钱晓忠 审



化学工业出版社

· 北京 ·

《变频器与步进/伺服驱动技术完全精通教程》从基础和实用出发,详细讲解了变频器与步进驱动、伺服驱动技术。涵盖的内容主要包括异步电动机、步进电动机和伺服电动机的结构和工作原理;变频器的工作原理;变频器的外围电路;三菱和西门子变频器的速度给定;步进驱动系统及其应用;三菱和西门子伺服驱动系统及其应用。

本书内容丰富,重点突出,强调知识的实用性,几乎每章中都配有实用的例题,便于读者模仿学习,另外每章配有习题供读者训练之用。大部分实例都有详细的软件、硬件配置清单,并配有接线图和程序,这些实例程序的下载网址: download.cip.com.cn,在“配书资源”一栏中,欢迎读者下载学习使用。

本书可供学习变频器、步进驱动和伺服驱动技术的工程技术人员使用,也可作为大中专院校的机电类、信息类专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

变频器与步进/伺服驱动技术完全精通教程 / 向晓汉, 宋昕主编. —北京: 化学工业出版社, 2015.3

ISBN 978-7-122-22480-4

I. ①变… II. ①向… ②宋… III. ①变频器-步进电动机-教材②变频器-伺服电动机-教材 IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 287534 号

责任编辑: 李军亮

文字编辑: 陈 喆

责任校对: 宋 玮

装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16¼ 字数 400 千字 2015 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

随着计算机技术的发展,以可编程控制器、变频器调速和计算机通信等技术为主体的新型电气控制系统已经逐渐取代传统的继电器电气控制系统,并广泛应用于各行业。变频器、伺服驱动和步进驱动是 20 世纪 70 年代随着电力电子技术、PWM 控制技术的发展而产生的驱动装置,此应用技术在有的文献上也称为“运动控制”。由于其通用性强、可靠性好、使用方便,目前已在工业自动化控制的很多领域得到了广泛的应用。随着科技的进一步发展,变频器、伺服驱动和步进驱动产品性能日益提高,价格不断下降,变频器、伺服驱动和步进驱动产品应用将更加广泛。

由于三菱的变频器和伺服系统是日系代表产品,性价比较高,在中国有一定的市场份额,西门子的变频器和伺服系统是欧系的杰出代表,其功能强大,虽然价格高,但市场占有率很高,因此本书将以三菱和西门子变频器和伺服系统为例介绍。本书将力求讲解简洁和详细,用较多的小例子引领读者入门,让读者读完入门部分后,能完成简单的工程。应用部分精选工程的实际案例,供读者模仿学习,提高读者解决实际问题的能力。为了使读者能更好地掌握相关知识,我们在总结长期的教学经验和工程实践的基础上,联合相关企业人员,共同编写了本书,力争使读者通过“看书”就能学会变频器、伺服驱动和步进驱动技术。

我们在编写过程中,将一些生动的操作实例融入教程中,以提高读者的学习兴趣。本书具有以下特点。

① 用实例引导读者学习。该书的大部分章节用精选的例子讲解。例如,用例子说明通信的实现的全过程。

② 重点的例子都包含软硬件的配置方案图、接线图和程序,而且为确保程序的正确性,程序已经在 PLC 上运行通过。

③ 该书实用,实例容易被读者进行工程移植。

④ 实例程序可供下载,网址: download.cip.com.cn,在“配书资源”一栏中,欢迎读者下载学习使用。

本书由向晓汉、宋昕主编,由无锡职业技术学院的钱晓忠审稿。其中第 1 章由唐克彬编写;第 2、3 章由桂林电子科技大学的向定汉教授编写;第 4 章由无锡雪浪环保科技有限公司的宋昕编写;第 5、6、11 章由无锡职业技术学院的向晓汉编写;第 7 章由无锡雷华科技有限公司的陆彬编写;第 8 章由无锡雪浪环保科技有限公司的刘摇摇编写;第 9 章由无锡雪浪环保科技有限公司的王飞飞编写;第 10 章无锡雷华科技有限公司的阳思惠编写。

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

第1章 电气传动和变频器基础 1

1.1 电气传动概述	1
1.1.1 电气传动技术的概念	1
1.1.2 直流电气传动	1
1.1.3 交流电气传动	2
1.2 交流调速基础	3
1.2.1 三相交流电动机的结构和原理	3
1.2.2 三相异步电动机的机械特性和调速原理	6
1.3 变频器概述	10
1.3.1 变频器的发展	10
1.3.2 变频器的分类	13
1.3.3 变频器关键技术指标	14
1.3.4 变频器的应用	15
1.3.5 主流变频器介绍	16
小结	16
习题	17

第2章 变频器的工作原理 18

2.1 电力电子器件	18
2.2 变频器的变频原理	22
2.2.1 交-直-交变换简介	22
2.2.2 变频变压的原理	22
2.2.3 正弦脉宽调制波的实现方法	24
2.3 变频器的主电路	26
2.4 变频器的控制电路	28
小结	30
习题	30

第3章 通用变频器的常用功能 31

3.1 频率控制功能	31
3.1.1 变频器的输出频率设定	31
3.1.2 极限频率和回避频率	31
3.1.3 频率增益和频率偏置	32
3.2 U/f 控制功能	33
3.2.1 U/f 控制方式	33

3.2.2 转矩补偿功能	33
3.2.3 节能运行控制功能	35
3.3 矢量控制功能	35
3.3.1 他励直流电动机的调速原理	35
3.3.2 三相异步电动机的矢量控制原理	36
3.3.3 变频器的矢量控制功能	36
3.4 运行控制与保护功能	36
3.4.1 加速曲线和减速曲线	36
3.4.2 点动控制	37
3.4.3 制动控制	37
3.4.4 过载保护功能	37
3.5 变频器的 PID 闭环控制功能	38
3.5.1 PID 控制原理简介	38
3.5.2 变频器的转速闭环控制	41
3.5.3 变频器的 PID 控制应用实例	42
小结	44
习题	44

第4章 西门子变频器的技术应用

4.1 西门子变频器的接线与参数设置	45
4.1.1 西门子 MM440 变频器的接线	45
4.1.2 西门子 MM440 变频器的参数设置	47
4.2 西门子变频器的速度给定	48
4.2.1 手动键盘速度给定	48
4.2.2 变频器多段速度给定	49
4.2.3 变频器模拟量速度给定	55
4.2.4 变频器的通信速度给定	57
4.3 西门子变频器的正反转和制动控制	71
4.3.1 西门子变频器的正反转控制	71
4.3.2 西门子变频器的制动控制	72
4.4 西门子变频器应用实例	73
4.4.1 刨床控制系统的设计	73
4.4.2 物料搅拌机的控制系统设计	76
4.4.3 跳动度测试仪	82
小结	87
习题	87

第5章 三菱变频器的技术应用

5.1 三菱变频器的接线与参数设置	88
5.1.1 三菱 FR-A740 变频器的接线	88
5.1.2 三菱 FR-A740 变频器的参数设定	92

5.2 三菱变频器的速度给定	93
5.2.1 运输站变频器的控制面板速度给定	94
5.2.2 运输站变频器的模拟量速度给定	95
5.2.3 运输站变频器的多段速度给定	97
5.2.4 运输站变频器的通信速度给定	99
5.3 三菱变频器的正反转和制动控制	107
5.3.1 三菱变频器的正反转控制	107
5.3.2 三菱变频器的制动控制	108
5.4 三菱变频器的其他应用	108
5.4.1 三菱变频器的过流保护	108
5.4.2 三菱变频器的失速防止	109
5.4.3 使用变频器时的常见疑问	109
小结	110
习题	110

第6章 变频器的常用电路 111

6.1 变频器启动与正反转控制	111
6.1.1 变频器的启动控制	111
6.1.2 变频器的正反转控制	111
6.2 变频器并联控制电路	113
6.2.1 由模拟电压输入端子控制的并联运行	113
6.2.2 由升降速端子控制的同速运行	115
6.3 变频器制动及保护控制电路	117
6.3.1 制动控制电路	117
6.3.2 报警及保护控制电路	120
6.4 工频-变频切换控制电路	121
6.4.1 继电器控制的变频/工频切换电路	121
6.4.2 PLC控制的变频/工频自动切换电路	122
小结	123
习题	123

第7章 变频器外围器件与变频器的选型 124

7.1 变频器的配线和外围开关器件	124
7.1.1 主电路的配线	124
7.1.2 接触器的选用	125
7.1.3 断路器的选用	126
7.1.4 快速熔断器的选用	127
7.2 电抗器	127
7.2.1 交流电抗器的选用	127
7.2.2 直流电抗器的选用	130
7.3 变频器电气制动	130

7.3.1 直流制动	131
7.3.2 回馈制动	131
7.3.3 能耗制动	131
7.4 变频器的选型	133
7.4.1 根据负载的机械特性选择变频器	133
7.4.2 根据负载的工艺特性选择变频器	133
7.4.3 变频器的容量选择	134
7.4.4 变频器的箱体结构选择	135
7.4.5 选用变频器的其他事项	136
小结	137
习题	137

第8章 变频器常见故障分析与维护

8.1 变频器故障判断及处理	138
8.1.1 逆变功率模块的损坏	138
8.1.2 整流桥的损坏	139
8.1.3 滤波电解电容器损坏	140
8.1.4 散热风扇的损坏	141
8.1.5 开关电源的损坏	141
8.1.6 接触器的损坏	142
8.1.7 印制电路板的损坏	142
8.1.8 变频器内部打火或燃烧	143
8.1.9 常见运行中的故障	145
8.2 变频器故障维修实例	146
8.2.1 西门子变频器常见故障及处理方法	146
8.2.2 三菱变频器常见故障及处理方法	157
8.2.3 安川变频器常见故障及处理方法	160
8.2.4 富士变频器常见故障及处理方法	162
小结	165
习题	165

第9章 步进驱动系统原理及应用

9.1 步进驱动系统的结构和工作原理	167
9.1.1 步进电动机简介	167
9.1.2 步进电动机的结构和工作原理	170
9.1.3 步进驱动器工作原理	172
9.2 步进电动机的选型	174
9.2.1 步进电动机最大速度选择	174
9.2.2 步进电动机定位精度的选择	174
9.2.3 步进电动机力矩选择	175
9.3 步进驱动系统的应用	178

9.3.1 直接使用 PLC 的高速输出点控制步进电动机	178
9.3.2 用西门子 S7-200 控制步进电动机的调速	187
9.3.3 步进电动机的正反转	189
小结	191
习题	191

第10章 伺服系统及原理 193

10.1 伺服系统概述	193
10.1.1 伺服系统的概念	193
10.1.2 主流伺服系统介绍	193
10.2 伺服系统行业应用	194
10.3 伺服技术的发展趋势	195
10.4 伺服电动机及其控制技术	196
10.4.1 伺服电动机的特点	196
10.4.2 直流伺服电动机	197
10.4.3 交流伺服电动机	199
10.4.4 直接驱动电动机	200
10.4.5 伺服电动机的选型	201
10.5 伺服系统的检测元件	202
小结	204
习题	204

第11章 伺服系统工程应用 205

11.1 三菱伺服系统工程应用	205
11.1.1 三菱伺服系统简介	205
11.1.2 三菱伺服系统基本使用	205
11.1.3 三菱伺服系统工程应用	214
11.2 西门子主流伺服系统工程应用	222
11.2.1 西门子主流伺服系统简介	222
11.2.2 西门子伺服系统工程应用	223
11.3 西门子 SINAMICS V80 伺服系统工程应用	233
11.3.1 SINAMICS V80 伺服系统简介	233
11.3.2 PCB 板下载检测线控制系统安装与调试	237
小结	249
习题	249

参考文献 250

第1章

电气传动和变频器基础

电气传动是现代传动的核心组成部分，而变频器又是电气传动的重要节点。变频器是将固定频率的交流电转换成频率、电压连续可调的交流电，供给电动机运转的电源装置。本章介绍电气传动概念；交流电动机的结构和原理、交流调速的原理；变频器的历史发展、应用范围、发展趋势、在我国的使用情况等知识，使读者初步了解变频器，这是学习本书后续内容的必要准备。

1.1 电气传动概述

现代传动技术是机电工业的关键基础技术。它主要包括机械传动技术、流体传动技术和电气传动技术。现代传动技术主要承担能量传递、改变运动形态、实现对能量的分配和控制、保证传动精度和效率等功能，它是机电产品向高速化、自动化、高效率、高精度、高可靠性、轻量化、多样化方向发展的不可缺少的关键技术之一。

1.1.1 电气传动技术的概念

在人类所利用的能源当中，电能是最清洁最方便的能源，电气传动无疑有着很大的意义。随着电力电子技术、计算机技术以及自动控制技术的迅速发展，电气传动技术正面临着一场历史革命。

(1) 电气传动技术的定义

电气传动技术是指用电动机把电能转换成机械能，带动各种类型的生产机械、交通车辆以及生活中需要运动物品的技术；是通过合理使用电动机实现生产过程机械设备电气化及其自动控制的电气设备及系统的技术总称。

一个完整的电气传动系统包括三部分：电源部分、控制部分、电动机。

(2) 电气传动与运动控制

电气传动技术是电力电子与电动机及与其控制相结合的产物，内容涉及电动机、电力电子、控制理论、计算机、微电子、现代检测技术、仿真技术、电力系统、机械、材料和信息技术等多种学科，是这些学科交叉融合而形成的一门新型的综合性学科。对于位置控制（伺服）系统，也称为运动控制。

1.1.2 直流电气传动

电气传动技术诞生于 20 世纪初的第二次工业革命时期，电气传动技术大大推动了人类社会的现代化进步。它是研究如何通过电动机控制物体和生产机械按要求运动的学科。随着传感器技术和自动控制理论的发展，电气传动技术由简单的继电、接触、开环控制，发展为较复杂的闭环控制系统。20 世纪 60 年代，特别是 80 年代以来，随着电力电子技术、现代控

制理论、计算机技术和微电子技术的发展,逐步形成了集多种高新技术于一身的全新学科技术——现代电气传动技术。

电气传动主要有直流电气传动和交流电气传动,下面先介绍直流电气传动。

(1) 直流电动机的调速

直流电动机的转速 n 的表达式为:

$$n = \frac{U_a - RI_a}{K_e \Phi} \quad (1-1)$$

式中 U_a ——电动机电枢两端的电压;

I_a ——电动机电枢回路电流;

R ——电动机回路电阻;

K_e ——电动机电势常数;

Φ ——电动机励磁磁通。

从以上的公式可看出,直流电动机的调速方式有三种。

① 调压调速,即保持 R 和 Φ 不变,通过调节 U_a 来调节 n ,是一种大范围无级调速方式。

② 弱磁升速,即保持 R 和 U_a 不变,通过减少 Φ 来升高 n ,是一种小范围无级调速方式。

③ 变电阻调速,即保持 U_a 和 Φ 不变,通过调节 R 来调节 n ,是一种大范围有级调速方式。

对于要求大范围平滑调速的直流电气传动系统来说,调压调速方式最常用。

(2) 直流电气传动控制技术的发展

直流电气传动控制技术的发展经历了以下演变过程:开环控制→单闭环控制→多闭环控制;分立元件电路控制→小规模集成电路控制→大规模集成电路控制;模拟电路控制→数模电路混合控制→数字电路控制;硬件控制→软件控制。

(3) 直流传动的缺点

直流电动机调速方便,控制灵活。但直流电动机由于本身结构上存在有机械换向器和电刷,所以给直流调速系统带来了以下主要缺点。

① 维修困难。

② 使用环境受限制,不适用于易燃、易爆及环境恶劣的地方。

③ 制造大容量、高转速及高电压的直流电动机比较困难。

④ 系统的价格较高。

1.1.3 交流电气传动

20 世纪 70 年代以前,直流传动占统治地位,交流调速只在大功率电动机调速上使用。但由于直流传动系统固有的局限性以及随着交流传动系统关键技术的成熟,交流传动系统大量取代直流传动系统成为现实。交流电动机分异步电动机和同步电动机两大类。

(1) 同步交流电动机的调速

同步交流电动机的转速满足如下公式:

$$n = \frac{60f}{p} \quad (1-2)$$

式中 n ——转速;

f ——频率;

p ——磁极对数。

同步电动机只能采用变频调速，在变频器产生之前，同步电动机是不能调速的，因此只能在定速传动领域使用。

(2) 三相异步交流电动机的调速

三相异步交流电动机的转速满足如下公式：

$$n = \frac{60f(1-s)}{p} \quad (1-3)$$

式中 n ——转速；

f ——频率；

s ——转差率；

p ——磁极对数。

可见，三相异步电动机的调速有三种方式，即变极调速、变转差率（如调压调速、转子串电阻调速）和变频调速。三相交流笼型电动机尽管调速性能不佳，但其结构坚固、经久耐用且价格低廉，因此在一些性能较低的传动现场得到广泛的使用。

(3) 交流电气传动控制技术的发展

交流电气传动控制模式的发展经历了以下演变过程：转速开环的恒压频比控制→转速闭环转差频率控制→矢量控制→解耦控制→模糊控制；分立元件电路控制→小规模集成电路控制→大规模集成电路控制；模拟电路控制→数字电路控制；硬件控制→软件控制。

(4) 直、交流电气传动系统的对比

直流电气传动系统和交流电气传动系统的特点对比见表 1-1。

表 1-1 直、交流电气传动系统特点的对比

直流电气传动系统的特点	交流电气传动系统的特点
控制对象：直流电动机	控制对象：交流电动机
控制原理简单，一种调速方式	控制原理复杂，有多种调速方式
性能优良，对硬件要求不高	性能较差，对硬件要求较高
电动机有换向电刷（换向火花）	电动机无电刷，无换向火花问题
电动机设计功率受限	电动机设计功率不受限
电动机易损坏，不适应恶劣现场	电动机不易损坏，适应恶劣现场
需定期维护	基本免维护

可见，直流电气传动系统和交流电气传动系统各有优缺点，两者将长期共存。但不可否认的是，后者的应用比前者更加广泛。

1.2 交流调速基础

交流电动机是将交流电的电能为机械能的一种机器。交流电动机的工作效率较高，又没有烟尘、气味，不污染环境，噪声也较小。由于它的一系列优点，所以在工农业生产、交通运输、国防、商业及家用电器、医疗电气设备等各方面应用广泛。

1.2.1 三相交流电动机的结构和原理

交流电动机主要由一个用以产生磁场的电磁铁绕组或定子绕组和一个旋转电枢或转子

组成,此外要电动机正常运行,电动机还需要有机座、风扇、端盖、罩壳、轴承和接线盒等部件,其结构如图 1-1 所示。

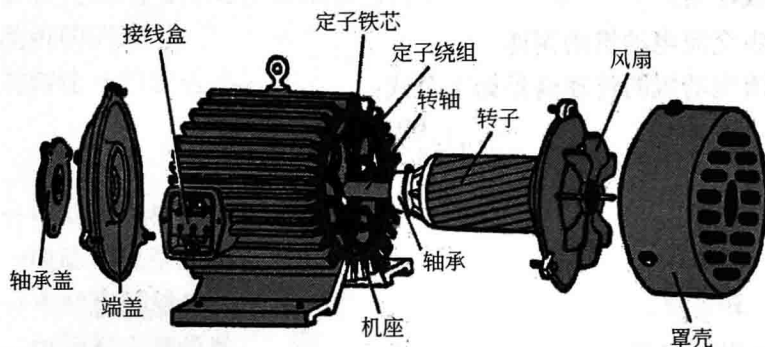


图 1-1 三相交流电动机的结构

(1) 定子

三相异步电动机的定子由机座和装在机座内的圆筒形铁芯以及其中的三相定子绕组组成。机座是用铸铁或铸钢制成的,铁芯是由互相绝缘的硅钢片叠成的。铁芯的内圆周表面冲有槽,用以放置对称三相绕组 A、B、C,定子的示意图如图 1-2 所示。定子的绕组连接方式有两种:一是星形连接,即三相绕组有一个公共点相连,如图 1-3 所示;二是三角形连接,即三相绕组首尾相连,如图 1-4 所示。

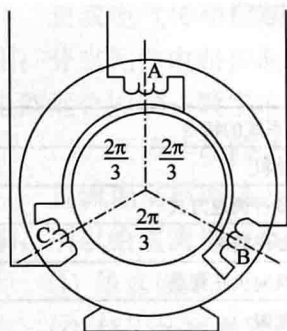


图 1-2 定子的示意图

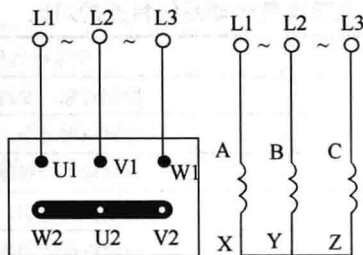


图 1-3 定子绕组星形连接

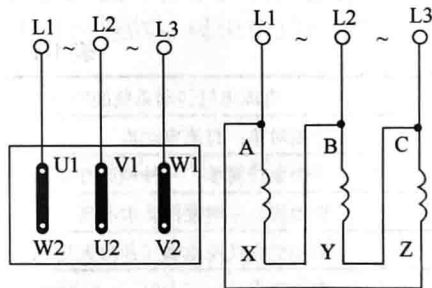


图 1-4 定子绕组三角形连接

(2) 转子

三相异步电动机的转子根据构造上的不同分为两种形式:笼式和绕线式。转子铁芯是圆柱状,用硅钢片叠成,表面冲有槽,铁芯装在转轴上,轴上加机械负载。

笼式电动机的转子绕组做成笼状,就是在转子铁芯的槽中放铜条,其两端用端环连接。或者在槽中浇铸铝液,铸成一笼,这样便可以用比较便宜的铝来代替铜,同时制造也方便。因此,目前中小型笼式电动机的转子很多都是铸铝的。笼式异步电动机的“笼”是它的构造特点,易于识别。笼形转子如图 1-5 所示。

绕线式异步电动机的转子绕组同定子绕组一样,也是三相的,它连成星形。每相的始端连接在三个铜制的滑环上,滑环固定在转轴上。环与环、环与转轴都互相绝缘。在环上弹簧压着炭质电刷,启动电阻和调速电阻是借助于电刷同滑环和转子绕组连接的。通常就是根据绕线式异步电动机具有三个滑环的构造特点来辨认它的。

(3) 电动机的旋转原理

交流电动机的原理：交流电动机由定子和转子组成，定子就是电磁铁，转子就是线圈。定子和转子采用同一电源，因此，定子和转子中电流的方向变化总是同步的，即线圈中的电流方向变了，同时电磁铁中的电流方向也发生改变。旋转过程的具体描述如下。

① 三相正弦交流电通入电动机定子的三相绕组，产生旋转磁场，旋转磁场的转速称之为同步转速。

② 旋转磁场切割转子导体，产生感应电势。

③ 转子绕组中感生电流。

④ 转子电流在旋转磁场中产生力，形成电磁转矩，电动机就转动起来了。

电动机的转速达不到旋转磁场的转速，否则，就不能切割磁力线，就没有感应电势，电动机就停下来了。转子转速与同步转速不一样，称之为异步。

设同步转速为 n_0 ，电动机的转速为 n ，则转速差为 $n_0 - n$ 。

电动机的转速差与同步转速之比定义为异步电动机的转差率 s ， s 是分析异步电动机运行情况的主要参数，用如下公式表示：

$$s = \frac{n_0 - n}{n} \quad (1-4)$$

(4) 旋转磁场的产生

① 旋转磁场的产生。假设电动机为 2 极电动机，每相绕组只有一个线圈，定子采用星形连接。三相交流电的波形图如图 1-6 所示，定子的通电示意图如图 1-7 所示。以下详细介绍其在 $0 \sim T/2$ (T 表示一个周期) 这个区间旋转磁场的产生过程。

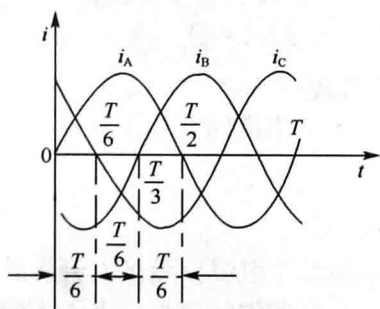


图 1-6 三相交流电的波形图

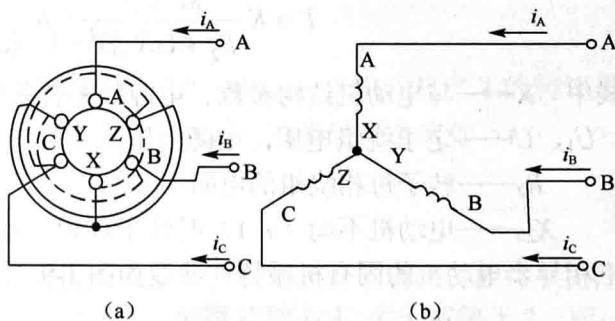


图 1-7 定子的通电示意图

a. $t=0$ (起始阶段) 时， $i_A=0$ ； i_B 为负，电流实际方向与正方向相反，即电流从 Y 端流到 B 端； i_C 为正，电流实际方向与正方向一致，即电流从 C 端流到 Z 端。按右手螺旋法则确定三相电流产生的合成磁场，如图 1-8 (a) 中箭头所示。

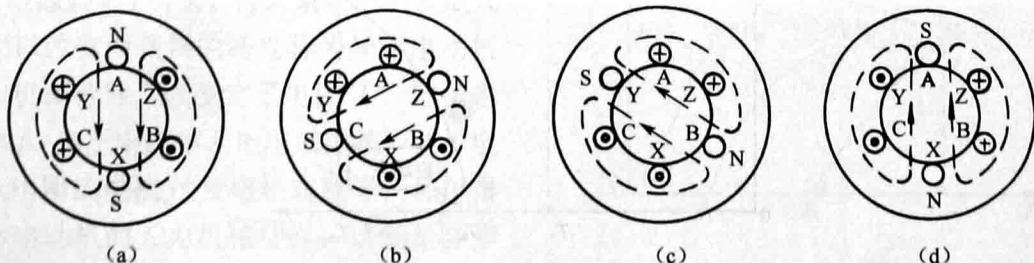


图 1-8 旋转磁场的产生过程

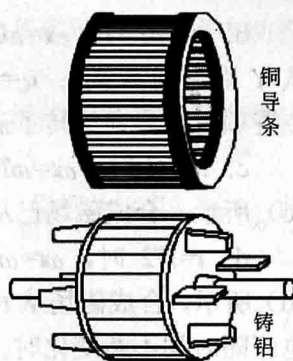


图 1-5 笼形转子外形

b. $t=T/6$ 时, $\omega t=\omega T/6=\pi/3$ (相位角), i_A 为正 (电流从 A 端流到 X 端); i_B 为负 (电流从 Y 端流到 B 端); $i_C=0$ 。此时的合成磁场如图 1-8 (b) 所示, 合成磁场已从 $t=0$ 瞬间所在位置顺时针方向旋转了 $\pi/3$ 。

c. $t=T/3$ 时, $\omega t=\omega T/3=2\pi/3$ (相位角), i_A 为正; $i_B=0$; i_C 为负。此时的合成磁场如图 1-8 (c) 所示, 合成磁场已从 $t=0$ 瞬间所在位置顺时针方向旋转了 $2\pi/3$ 。

d. $t=T/2$ 时, $\omega t=\omega T/2=\pi$ (相位角), $i_A=0$; i_B 为正; i_C 为负。此时的合成磁场如图 1-8 (d) 所示。合成磁场从 $t=0$ 瞬间所在位置顺时针方向旋转了 π 。按以上分析可以证明: 当三相电流随时间不断变化时, 合成磁场的方向在空间也不断旋转, 这样就产生了旋转磁场。

② 旋转磁场的旋转方向。旋转磁场的旋转方向与三相交流电的相序一致。改变三相交流电的相序, 即 A-B-C 变为 C-B-A, 旋转磁场反向。要改变电动机的转向, 只要任意对调三相电源的两根接线即可。

1.2.2 三相异步电动机的机械特性和调速原理

(1) 三相异步电动机的机械特性

在异步电动机中, 转速 $n=(1-s)n_0$, 为了符合习惯画法, 可将曲线换成转速与转矩之间的关系曲线, 即称为异步电动机的机械特性, 理解异步电动机的机械特性至关重要, 后续章节都会用到。公式如下:

$$T = \frac{Km_1 p U_1^2 R_2 s}{2\pi f_1 [R_2^2 + (sX_{20})^2]} = Km_1 \Phi I_2 \cos \varphi_2 \quad (1-5)$$

以上公式简化如下:

$$T = K \frac{sR_2 U_1^2}{R_2^2 + (sX_{20})^2} = K \frac{sR_2 U^2}{R_2^2 + (sX_{20})^2} \quad (1-6)$$

式中 K ——与电动机结构参数、电源频率有关的一个常数;

U_1, U ——定子绕组电压, 电源电压;

R_2 ——转子每相绕组的电阻;

X_{20} ——电动机不动 ($s=1$) 时转子每相绕组的感抗。

三相异步电动机的固有机械特性曲线如图 1-9 所示。

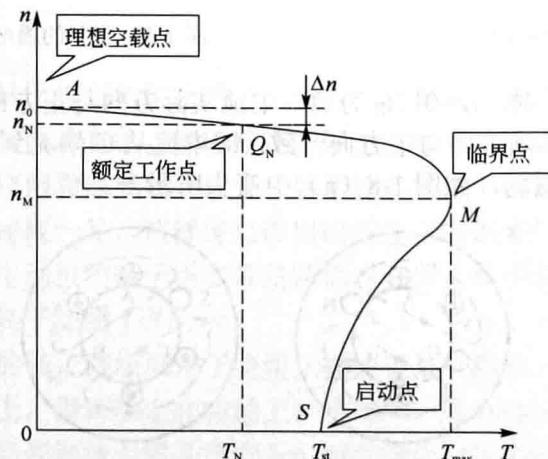


图 1-9 三相异步电动机的固有机械特性曲线

从特性曲线上可以看出,其上有四个特殊点可以决定特性曲线的基本形状和异步电动机的运行性能,这四个特殊点描述如下。

① $T=0$, $n=n_0$, $s=0$ 。电动机处于理想空载工作点,此时电动机的转速为理想空载转速,电动机的转速可以达到同步转速,即图中的 A 点,坐标为 $(0, n_0)$ 。

② $T=T_N$, $n=n_N$, $s=s_N$ 。电动机额定工作点,即图中的 Q_N 点,坐标为 (T_N, n_N) 。此时额定转矩和额定转差率为:

$$T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N}, \quad s_N = \frac{n_0 - n_N}{n_0} \quad (1-7)$$

式中 P_N ——电动机的额定功率;

n_N ——电动机的额定转速,一般 $n_N = (0.94 \sim 0.985)n_0$;

s_N ——电动机的额定转差率,一般 $s_N = 0.06 \sim 0.015$;

T_N ——电动机的额定转矩。

③ $T=T_{st}$, $n=0$, $s=1$ 。电动机的启动工作点,电动机刚接通电源,但转速为 0 时,称为启动工作点,这时的转矩 T_{st} 称为启动转矩,也称堵转转矩,即图中的 S 点,坐标为 $(T_{st}, 0)$ 。启动转矩满足如下公式:

$$T_{st} = K \frac{R_2 U^2}{R_2^2 + X_{20}^2} \quad (1-8)$$

可见:异步电动机的启动转矩 T_{st} 与 U 、 R_2 及 X_{20} 有关。

a. 当施加在定子每相绕组上的电压降低时,启动转矩会明显减小;

b. 当转子电阻适当增大时,启动转矩会增大;

c. 若增大转子电抗则会使启动转矩大为减小。

一般情况下: $T_{st} \geq 1.5T_N$, 这个数据是比较重要的。

④ $T=T_{max}$, $n=n_m$, $s=s_m$ 。电动机的临界工作点,在这一点电动机产生的转矩最大,称为临界转矩 T_{max} , 即图中的 M 点,坐标为 (T_{max}, n_m) 。临界转矩公式如下:

$$T_{max} = K \frac{U^2}{2X_{20}} \quad (1-9)$$

临界转矩与额定转矩之比就是异步电动机的过载能力,它表征了电动机能够承受冲击负载的能力大小,是电动机的又一个重要运行参数,一般过载能力 λ_m 大于或等于 2, 即:

$$T_{max} = \lambda_m T_N \geq 2T_N \quad (1-10)$$

(2) 三相异步电动机的调速原理

分析式 (1-5) 可知:异步电动机的机械特性与电动机的参数有关,也与外加电源电压 U 、电源频率 f 有关,将关系式中的参数人为地加以改变而获得的特性称为异步电动机的人为机械特性。改变定子电压 U 、定子电源频率 f 、定子电路串入电阻或电抗、转子电路串入电阻或电抗,改变磁极对数等,都可得到异步电动机的人为机械特性。这就是异步电动机调速的原理。

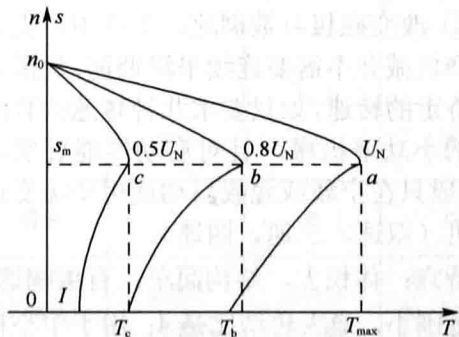


图 1-10 三相异步电动机电压调速时的机械特性曲线

① 改变定子绕组电压调速。这种调速方式实际就是改变转差率调速，即降低电动机电源电压 U 时的人为特性，如当定子绕组外加电压为 U_N 、 $0.8U_N$ 、 $0.5U_N$ 时，转子输出最大转矩分别为 $T_a=T_{\max}$ 、 $T_b=0.64T_{\max}$ 和 $T_c=0.25T_{\max}$ 。可见，电压愈低，人为特性曲线愈往左移，如图 1-10 所示。

由于 $T_{\max} \propto U^2$ 和 $T_{st} \propto U^2$ ，所以当异步电动机的定子绕组电压降低时，启动转矩和临界转矩都会大幅度降低，而且机械特性会明显变软（所谓机械特性变软，就是指负载转矩增加时，电动机的转速降低显著；如果电动机机械特性硬，那么负载转矩增加时，电动机的转速不降低或降低很少）。运行时，如电压降低太多，会大大降低它的过载能力与启动转矩，甚至使电动机发生带不动负载或者根本不能启动的现象。

此外，电网电压下降，在负载不变的条件下，将使电动机转速下降，转差率 s 增大，电流增加，引起电动机发热甚至烧坏。可见，降压调速，会降低启动转矩和临界转矩，并会使电动机的机械特性变软，其调速范围小，所以它并不是一种理想的调速方法。

【例 1-1】 电动机运行在额定负载 T_N 下，使 $\lambda_m=2$ ，若电网电压下降到 $70\%U_N$ ，求 $T_{\max}$ 。
解：

$$T_{\max} = \lambda_m T_N \left(\frac{U}{U_N} \right)^2 = 2 \times 0.7^2 T_N = 0.98 T_N$$

② 定子电路接入电阻 R_2 或电抗 X_2 时的人为特性。在电动机定子电路中外串电阻或电抗后，电动机端电压为电源电压减去定子外串电阻上或电抗上的压降，致使定子绕组相电压降低，这种情况下的人为特性与降低电源电压时的相似，在此不再赘述。其机械特性曲线如图 1-11 所示。

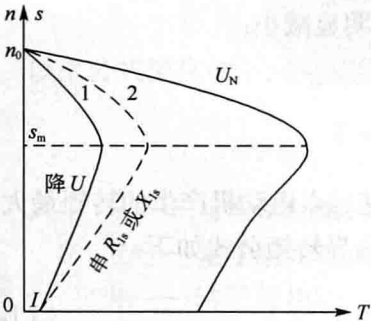


图 1-11 三相异步电动机的定子串电阻调速时机械特性曲线

③ 转子电路串电阻调速。转子电路串电阻调速，也是变转差率调速。在三相线绕式异步电动机的转子电路中串入电阻后的接线图机械特性曲线如图 1-12 (a) 所示，转子电路中的电阻为 $R_2 + R_{2r}$ 。

串电阻调速的特点：如图 1-12 (b) 所示，串电阻后，临界转矩不变，但启动转矩增加，机械特性变软；低速时，调速范围小，是一种有级调速；转子电路串电阻调速的机械性能比定子串电阻要好，但这种调速方式仅用于绕线式电动机的调速，如起重机的电动机；低速时，能耗高。

④ 改变磁极对数调速。生产中，大量的生产机械并不需要连续平滑调速，只需要几种特定的转速，如只要求几种转速的有级变速的小功率机械，且对启动性能要求不高，一般只在空载或轻载启动选用变级变速电动机（双速、三速、四速）。

特点：体积大，结构简单；有级调速，调速范围小，最大传动比是 4；用于中小机床，替代齿轮箱，如早期的镗床。这种调速方式的使用目前在逐渐减少。

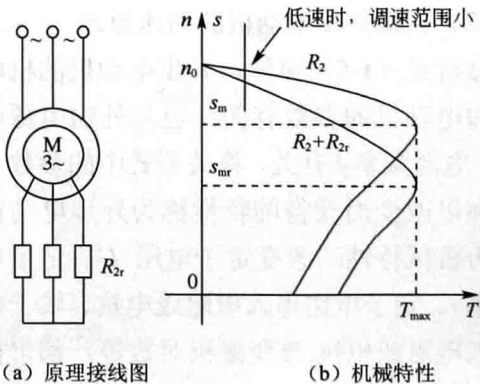


图 1-12 三相异步电动机串电阻调速时的机械特性曲线