

变频调速系统设计与应用

BIANPIN TIAOSU XITONG SHEJI YU YINGYONG

王廷才 屈保中 黄长春 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

变频调速系统设计与应用

主 编 王廷才 屈保中 黄长春
参 编 连 晗 杨 旭
主 审 王崇文



机械工业出版社

前 言

变频器是综合应用电子技术、电力电子技术及计算机控制技术的新型电气设备。变频调速系统具有节能、高效、自动化程度高、操作使用方便、可提高产品加工质量等优点，已经广泛应用于各种电气设备中。作者根据多年从事变频调速技术设计与应用的经验，编写了本书。本书内容通俗易懂，抛弃繁杂的理论分析和数学推导，紧密联系工程实际，结合典型案例，从实用角度进行深入浅出的阐述。变频器内部结构复杂，但对用户来说，变频器是一个整体设备，重点在于应用。本书只对变频器的结构和组成原理进行概述，而以大量篇幅叙述外部控制电路的线路设计、安装、调试和维修等。

本书内容主要包括：交流电动机变频调速原理，交-直-交变频技术，交-交变频技术，高（中）压变频器，变频器的组成与功能，变频器的控制方式，变频调速系统主电路和控制电路的设计，变频器的电磁兼容，变频调速系统的安装、运行、调试、维护，变频调速系统在恒压供水、风机、中央空调、空气压缩机和物料传送等方面的应用等。本书内容结构合理，图文并茂，实用性强。

本书配套有教学讲稿和思考题详细解答等电子课件，凡一次性购书 30 本以上者免费赠送。请与出版社联系（联系电话 010-88379766）。

本书由王廷才、屈保中、黄长春主编。其中第 1 章、第 3 章、第 4 章和第 13 章由王廷才编写，第 9~12 章由屈保中编写，第 7 章和第 8 章由黄长春编写，第 5 章和第 6 章由连晗编写，第 2 章由杨旭编写，全书由王廷才统稿，北京理工大学王崇文教授主审。在编写过程中，河南工业职业技术学院、深圳信息职业技术学院和希望森兰科技股份有限公司给予了积极支持，作者参考了多家变频器制造企业提供的产品资料 and 许多同行专家编著的文献，在此一并表示诚挚谢意。

由于编者水平有限，书中难免有不足之处，欢迎读者提出宝贵意见。

编 者

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 变频调速技术的发展	1
1.2 变频器的分类	2
1.3 变频调速的应用	6
思考题	7
第2章 交流电动机变频调速原理	8
2.1 异步电动机变频调速原理	8
2.2 异步电动机的调速方式	11
2.3 同步电动机的变频调速	13
2.4 直线电动机的变频调速	16
思考题	18
第3章 交-直-交变频技术	19
3.1 整流电路	19
3.2 中间电路	22
3.3 逆变电路的工作原理及基本形式	24
3.4 SPWM 控制技术	26
思考题	29
第4章 交-交变频技术	31
4.1 单相输出交-交变频电路	31
4.2 三相输出交-交变频电路	34
4.3 矩形波交-交变频	35
思考题	37
第5章 高(中)压变频器	38
5.1 高(中)压变频器概述	38
5.2 高(中)压变频器的主电路结构	41
5.3 高(中)压变频器对电动机的影响 及防治措施	48
思考题	50
第6章 变频器的组成与功能	51
6.1 变频器的组成及接线端子	51
6.2 变频器的外形结构及操作面板	59
6.3 变频器的主要功能参数及预置	64
6.4 变频器的频率参数及预置	72
思考题	77

第7章 变频器的控制方式	78
7.1 U/f 控制	78
7.2 转差频率控制	82
7.3 矢量控制	83
7.4 直接转矩控制	90
思考题	90
第8章 变频调速系统设计	92
8.1 变频调速开环系统和闭环系统	92
8.2 变频器的选用	93
8.3 变频调速系统的成套技术	106
8.4 变频调速系统的主电路	120
8.5 低压断路器	121
8.6 漏电保护断路器	127
8.7 接触器	130
8.8 传感器和变送器	132
8.9 电抗器	138
8.10 电源滤波器	147
8.11 制动电阻与制动单元	151
8.12 控制变压器与快速熔断器	153
8.13 变频调速系统的电缆	155
思考题	160
第9章 变频调速系统的控制电路	161
9.1 常用基本控制电路	161
9.2 变频与工频切换控制	165
9.3 多挡转速程序控制	166
9.4 给定信号方式	168
9.5 变频器与 PLC 的连接	170
9.6 变频器“1 控 X”切换技术	176
9.7 图形显示操作终端	178
9.8 变频器与 PC 的通信	181
9.9 网络结构的变频器控制系统	184
思考题	187
第10章 变频器的电磁兼容	188
10.1 变频器的电磁兼容标准	188
10.2 供电电源对变频器的干扰及防护	195

10.3 变频器对电网及其他设备的干扰	200	12.5 变频器的维修步骤	232
10.4 变频器数字电路受干扰的原因 及防护	203	思考题	234
思考题	204	第 13 章 变频调速系统应用实例	235
第 11 章 变频器的安装与调试	205	13.1 变频器在供水系统节能中的应用	235
11.1 变频器的储存与装设环境	205	13.2 变频调速技术在风机上的应用	243
11.2 变频器的安装	208	13.3 空气压缩机的变频调速及应用	248
11.3 变频器的接地与防雷	215	13.4 中央空调系统中的变频技术及 应用	254
11.4 变频调速系统的调试	216	13.5 变频器在液态物料传输中的应用	258
思考题	219	13.6 中压变频器在潜油电泵中的应用	261
第 12 章 变频器的维护与故障处理	220	13.7 矿山提升机变频调速系统	264
12.1 安全及注意事项	220	思考题	266
12.2 变频器的测量与试验	222	附录 森兰 SB70G 系列变频器	267
12.3 变频器的维护与检查	227		
12.4 变频调速系统常见故障与处理	228		

第 1 章

概 述

变频调速系统近年来已广泛应用于工业生产和日常生活的许多领域中。变频调速系统具有调速精度高、动态响应快、运行效率高、节约能源、调速范围广和便于自动控制等诸多优势，被认为是最有发展前途的调速方式。

1.1 变频调速技术的发展

变频调速系统的核心部件是变频器。变频器是将固定电压、固定频率的交流电变换为可调电压、可调频率的交流电的装置。变频器的问世，使电气传动领域发生了一场技术革命，即交流调速取代直流调速。

1.1.1 变频调速技术的发展回顾

100 多年前，人们就发明了直流电动机和交流电动机，但在过去很长一段时间内被广泛应用的是直流电动机的调速系统，这主要是因为直流调速系统具有调速范围广、性能稳定和过载能力强等优点，特别是在低速时仍能得到较大的过载能力，是其他调速方法无法比拟的。但直流调速系统也有着不可回避的弱点，主要表现在直流电动机结构复杂，要消耗大量有色金属，且换向器及电刷维护保养困难、寿命短、效率低等。

交流电动机结构简单，造价低廉，运行控制比较方便，在各种领域都得到广泛的应用。但在过去很长一段时间内，由于没有变频电源，异步电动机只能工作在不要求变速或对调速性能要求不高的场合。变频器的问世为交流电动机的调速提供了契机，不仅要取代结构复杂、价格昂贵的直流电动机调速，而且原来由交流电动机拖动的负载实现变频调速后能节省大量的能源。

变频器问世于 20 世纪 80 年代，初期的变频调速装置由晶闸管等分立电子元件组成，可靠性差、频率低，而且输出的电压和电流的波形是方波。

随着电力晶体管（GTR）和可关断晶闸管（GTO）的出现并成为逆变器的功率器件时，脉宽调制（PWM）技术也进入到应用阶段，这时的逆变电路能够得到相当接近正弦波的输出电压和电流，同时 8 位微处理器成为变频器的控制核心，按压频比（ U/f ）控制原理实现异步电动机的变频调速，在工作性能上有了很大提高。

近年来人们陆续研制出绝缘栅双极晶体管（IGBT）和集成门极换流晶闸管（IGCT），以及性能更为完善的智能功率模块（IPM），使得变频器的容量和电压等级不断扩大和提高。

当然变频器的发展也得益于计算机技术的支持。从 20 世纪 80 年代至今，计算机制造技术一直处于突飞猛进的发展阶段，变频器的中央处理单元从采用 8 位微处理器迅速升级为

16 位乃至 32 位微处理器,有的还使用了 DSP 系统,使变频器的功能从单一的变频调速发展为包含算术、逻辑运算及智能控制的综合功能。

自动控制理论的发展使变频器在改善压频比控制性能的同时,推出了能实现矢量控制、直接转矩控制、模糊控制和自适应控制等多种模式。现代的变频器已经内置有参数辨识系统、PID 调节器、PLC 控制器和通信单元等,根据需要可实现拖动不同负载、宽调速和伺服控制等多种应用。

目前在我国,变频调速系统仍处于推广应用阶段,变频器作为商品在国内的销售额呈逐年增加趋势,销售前景十分看好,据有关资料报道,在过去几年内我国变频器市场保持着 15% 以上的增长率,这一速度远远超过了近几年 GDP 的增长速度,强劲的需求为变频器发展提供了广阔的市场,变频调速全面推广应用的时代已经来临。

1.1.2 变频调速的发展趋势

现在,电力电子的基片已从 Si (硅) 变换为 SiC (碳化硅),使电力电子新器件进入到高电压大容量化、高频化、组件模块化、微小型化、智能化和低成本化,多种适宜变频调速的新型电气设备正在开发研制之中,信息技术的迅猛发展,以及控制理论的创新,这些与变频调速相关的技术将影响其发展的趋势。

1. 智能化

智能化的变频器安装到系统后,不必进行那么多的功能设定,就可以方便地操作使用,有明显的工作状态显示,而且能够实现故障诊断与故障排除,甚至可以进行部件自动转换。利用互联网可以遥控监视,实现多台变频器按工艺程序联动,形成最优化的变频器综合管理系统。

2. 专门化

根据某一类负载的特性,有针对性地制造专门化的变频器,这不但利于对负载的电动机经济有效地控制,而且可以降低制造成本。例如,风机、水泵用变频器、起重机械专用变频器、电梯控制专用变频器、张力控制专用变频器和空调专用变频器等。

3. 一体化

变频器将相关的功能部件,如参数辨识系统、PID 调节器、PLC 控制器和通信单元等有选择地集成到内部组成一体化机,不仅使功能增强,系统可靠性增加,而且可有效缩小系统体积,减少外部电路的连接。据报道,现在已经研制出变频器和电动机的一体化组合机,使整个系统体积更小,控制更方便。

4. 环保化

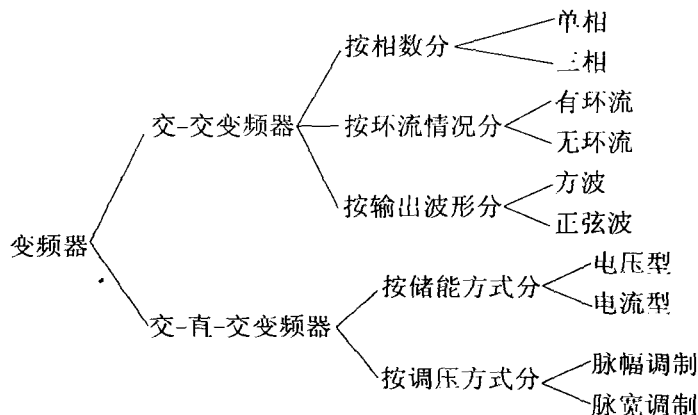
保护环境,制造“绿色”产品是人类的新理念。今后的变频器将更侧重于节能和低公害,即尽量减少使用过程中的噪声和谐波对电网及其他电气设备的污染干扰。

总之,变频调速技术的发展趋势是朝着智能、操作简便、功能健全、安全可靠、环保低噪声、低成本和小型化的方向发展。

1.2 变频器的分类

变频器的种类很多,下面根据不同的分类方法进行简单介绍。

1.2.1 按变频的原理分类



1. 交-交变频器

交-交变频器只有一个变换环节，即把恒压恒频（CVCF）的交流电源转换为变压变频（VVVF）电源，称为直接变频器，或称为交-交变频器。图 1-1 所示为交-交变频器的原理框图。

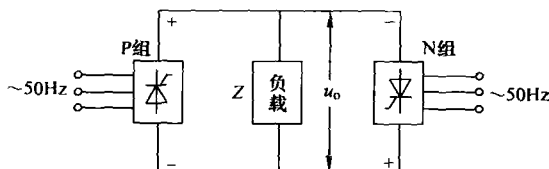


图 1-1 交-交变频器的原理框图

2. 交-直-交变频器

交-直-交变频器又称为间接变频器，它是先将工频交流电通过整流器变成直流电，再经逆变器将直流电变成频率和电压可调的交流电。图 1-2 所示为交-直-交变频器的原理框图。

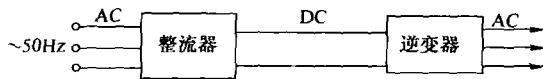


图 1-2 交-直-交变频器的原理框图

(1) 交-直-交变频器根据直流环节的储能方式，又分为电压型和电流型两种（见图 1-3）

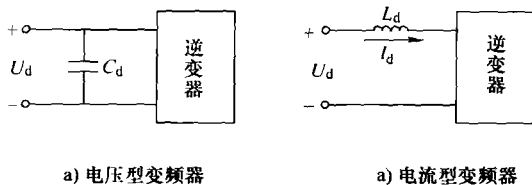


图 1-3 电压型和电流型变频器的主电路结构

1) 电压型变频器。在电压型变频器中，整流电路产生的直流电压，通过电容进行滤波

后供给逆变电路。由于采用大电容滤波,故输出电压波形比较平直,在理想情况下可以看成是一个内阻为零的电压源,逆变电路输出的电压为矩形波或阶梯波。电压型变频器多用于不要求正反转或快速加减速的通用变频器中。电压型变频器的主电路结构如图 1-3a 所示。

2) 电流型变频器。当交-直-交变频器的中间直流环节采用大电感滤波时,直流电流波形比较平直,因而电源内阻很大,对负载来说基本上是一个电流源,逆变电路输出的交流电流是矩形波。电流型变频器适用于频繁可逆运转的变频器和大容量的变频器。电流型变频器的主电路结构如图 1-3b 所示。

(2) 根据调压方式的不同,交-直-交变频器又分为脉幅调制和脉宽调制两种

1) 脉幅调制 (PAM)。脉幅调制 (Pulse Amplitude Modulation, PAM) 方式,是一种改变电压源的电压 E_d 或电流源的电流 I_d 的幅值进行输出控制的方式。因此,在逆变器部分只控制频率,整流器部分只控制输出电压或电流。采用 PAM 调节电压时,变频器的输出电压波形如图 1-4 所示。

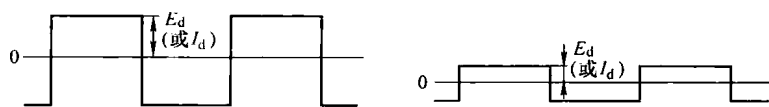


图 1-4 用 PAM 方式调压

2) 脉宽调制 (PWM)。脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 方式,指变频器输出电压的大小是通过改变输出脉冲的占空比来实现的。目前使用最多的是占空比按正弦规律变化的正弦波脉宽调制,即 SPWM 方式。用 PWM 方式调压输出的波形如图 1-5 所示。

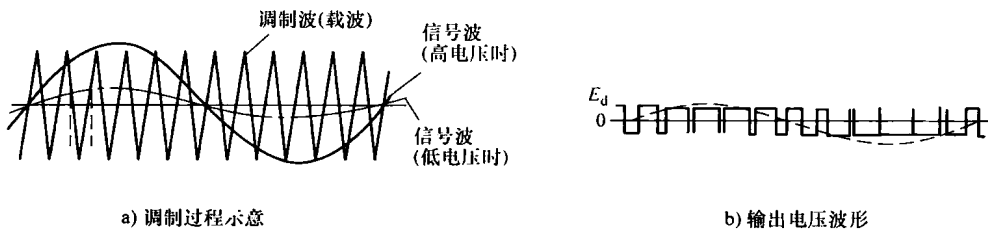


图 1-5 用 PWM 方式调压输出的波形

1.2.2 按变频器的控制方式分类

1. U/f 控制变频器

U/f 控制又称为压频比控制。它的基本特点是对变频器输出的电压和频率同时进行控制。在额定频率以下,通过保持 U/f 恒定使电动机获得所需的转矩特性。这种方式控制电路成本低,多用于精度要求不高的通用变频器。

2. 转差频率控制变频器

转差频率控制也称为 SF 控制,是在 U/f 控制基础上的一种改进方式。采用这种控制方式,变频器通过电动机、速度传感器构成速度反馈闭环调速系统。变频器的输出频率由电动机的实际转速与转差频率之和来自动设定,从而达到在调速控制的同时也使输出转矩得到控制。该方式是闭环控制,故与 U/f 控制相比,调速精度与转矩特性较优。但是由于这种控制方式需要在电动机轴上安装速度传感器,并需依据电动机特性调节转差,故通用性较差。

3. 矢量控制变频器

矢量控制 (Vector Control) 简称 VC, 是 20 世纪 70 年代由德国人 F. Blaschke 首先提出来的对交流电动机一种新的控制思想和控制技术, 也是异步电动机的一种理想调速方法。矢量控制的基本思想是将异步电动机的定子电流分解为产生磁场的电流分量 (励磁电流) 和与其相垂直的产生转矩的电流分量 (转矩电流), 并分别加以控制。由于在这种控制方式中必须同时控制异步电动机定子电流的幅值和相位, 即控制定子电流矢量, 所以这种控制方式被称为矢量控制。

矢量控制方式使异步电动机的高性能成为可能。矢量控制变频器不仅在调速范围上可以与直流电动机相媲美, 而且可以直接控制异步电动机转矩的变化, 所以已经在许多需精密或快速控制的领域得到应用。

4. 直接转矩控制

直接转矩控制 (Direct Torque Control) 简称 DTC, 1985 年德国鲁尔大学 Depenbrock 教授首先提出直接转矩控制理论。它是把转矩直接作为控制量来控制。直接转矩控制的优越性在于: 控制转矩是控制定子磁链, 在本质上并不需要转速信息; 控制上对除定子以外的所有电动机参数变化, 有良好的鲁棒性; 所引入的定子磁链观测器能容易估算出同步速度信息。因而能方便地实现无速度传感器化。

1.2.3 按用途分类

对一般用户来说, 更为关心的是变频器的用途, 根据用途的不同, 对变频器进行分类如下。

1. 通用变频器

顾名思义, 通用变频器的特点是其通用性。随着变频技术的发展和市场需要的不断扩大, 通用变频器也在朝着两个方向发展, 一是低成本的简易型通用变频器; 二是高性能多功能的通用变频器。它们分别具有以下特点:

简易型通用变频器是一种以节能为主要目的而简化了一些系统功能的通用变频器。它主要应用于水泵、风扇、鼓风机等对于系统调速性能要求不高的场合, 并具有体积小、价格低等方面的优势。

高性能通用变频器在设计过程中充分考虑了在变频器应用中可能出现的各种需要, 并为满足这些需要在系统软件和硬件方面都做了相应的准备。在使用时, 用户可以根据负载特性选择算法并对变频器的各种参数进行设定, 也可以根据系统的需要选择厂商所提供的各种备用选件来满足系统的特殊需要。

2. 专用变频器

(1) 高性能专用变频器

随着控制理论、交流调速理论和电力电子技术的发展, 异步电动机的矢量控制得到发展, 矢量控制变频器及其专用电动机构成的交流伺服系统已经达到和超过了直流伺服系统。此外, 由于异步电动机还具有环境适应性强、维护简单等许多直流伺服电动机所不具备的优点, 在要求高速、高精度的控制中, 这种高性能交流伺服变频器正在逐步代替直流伺服系统。

(2) 高频变频器

在超精密机械加工中常要用高速电动机。为了满足其驱动的需要,出现了采用 PAM 控制的高频变频器,其输出主频可达 3kHz,驱动两极异步电动机时的最高转速为 180000r/min。

(3) 高压变频器

高压变频器一般是大容量的变频器,最高功率可达 5000kW,电压等级为 3kV、6kV、10kV。

高压大容量变频器主要有两种结构形式:一种是用低压变频器通过升降压变压器构成,称为“高-低-高”式变压变频器,亦称为间接式高压变频器。另一种采用大容量绝缘栅双极晶闸管(IGBT)或集成门极换流晶闸管(IGCT)串联方式,不经变压器直接将高压电源整流为直流,再逆变输出高压,称为“高-高”式高压变频器,亦称为直接式高压变频器。

1.3 变频调速的应用

变频调速不仅具有卓越的调速性能,还具有显著的节能效果,它广泛应用于电力、石油、化工、建材、冶金、交通车辆、纺织、化纤、造纸及公用工程(供水、水处理、中央空调、电梯)等领域中。

1.3.1 在节能方面的应用

风机、泵类负载采用变频调速后,节电率可以达到 20%~60%,这是因为风机、泵类负载的耗电功率基本与转速的三次方成比例。当用户需要的平均流量较小时,风机、泵类采用变频调速使其转速降低,节能效果非常可观。而传统的风机、泵类采用挡板和阀门进行流量调节,电动机转速基本不变,耗电功率变化不大。在此类负载上使用变频调速装置具有非常重要的意义。以节能为目的变频器的应用,在最近十几年来推广发展非常迅速。由于风机、水泵、压缩机在采用变频调速后,可以节省大量电能,所需的投资在较短的时间内就可以收回,因此,在这一领域中变频调速应用得最多。目前应用较成功的有恒压供水、各类风机、中央空调和液压泵的变频调速。特别值得指出的是恒压供水,由于使用效果很好,现在已形成典型的变频控制模式,广泛应用于城乡生活用水、消防、喷灌等。恒压供水不仅节省大量电能,而且延长了设备的使用寿命,使用操作也更加方便。一些家用电器,如电冰箱、空调采用变频调速,节能也取得了很好的效果。

1.3.2 在提高工艺水平和产品质量方面的应用

变频器还可以广泛应用于传送、起重、挤压和机床等各种机械设备控制领域,它可以提高工艺水平和产品质量,减少设备的冲击和噪声,延长设备的使用寿命。采用变频调速控制后,使机械系统简化,操作和控制更加方便,有的甚至可以改变原有的工艺规范,从而提高了整个设备的功能。例如,纺织和许多行业用的定型机,机内温度是靠改变送入热风的多少来调节的。输送热风通常用的是循环风机,由于风机速度不变,送入热风的多少只有用风门来调节。如果风门调节失灵或调节不当就会造成定型机失控,从而影响成品质量。循环风机高速起动,传送带与轴承之间磨损非常厉害,使传送带变成了一种易耗品。在采用变频调速后,温度调节可以通过变频器自动调节风机的速度来实现,解决了产品质量问题;此外,变频器很方便地实现风机在低速起动,减少了传送带与轴承的磨损,延长了设备的寿命,同时

可以节能 40%。

1.3.3 在自动化系统中的应用

由于变频器内置有 32 位或 16 位的微处理器，具有多种算术逻辑运算和智能控制功能，输出频率精度高达 0.1% ~ 0.01%，还设置有完善的检测、保护环节，因此在自动化系统中获得广泛的应用。例如，化纤工业中的卷绕、拉伸、计量、导丝；玻璃工业中的平板玻璃退火炉、玻璃窑搅拌、拉边机、制瓶机；电弧炉自动加料、配料系统以及电梯的智能控制等。

思 考 题

1. 什么叫变频器？变频调速有哪些应用？
2. 变频调速发展的趋势如何？
3. 按工作原理变频器分为哪些类型？按用途变频器分为哪些类型？
4. 按控制方式变频器分为哪几种类型？

第 2 章

交流电动机变频调速原理

三相交流电动机有异步电动机和同步电动机两大类型。异步电动机的结构简单、价格低廉、控制方便，但在过去很长一段时期内由于没有变频电源，异步电动机只能用于对调速没有过高要求的场合。变频器的问世，为三相交流电动机调速系统的发展提供了契机，短短 30 年，三相交流电动机的变频调速系统就得到了广泛地应用。

2.1 异步电动机变频调速原理

异步电动机按转子的结构不同分为笼型和绕线型两类，按使用的电源相数不同分为单相、两相和三相等几种。变频调速主要用于三相笼型异步电动机，部分应用于三相同步电动机。

2.1.1 异步电动机变频调速工作原理

由电机学可知，三相交流电动机的同步转速（即定子旋转磁场转速） n_0 可表示为

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

式中 f_1 ——定子的供电频率；

p ——电动机的磁极对数。

根据异步电动机的工作原理，异步电动机要产生转矩，同步转速 n_0 与转子转速 n 必须有差别。这个转速差（ $n_0 - n$ ）与同步转速 n_0 的比值 s 称为转差率，以式（2-2）表示为

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (2-2)$$

异步电动机的转速 n 的表达式为

$$n = n_0(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s) \quad (2-3)$$

异步电动机在额定状态运行时，转子转速 n 通常与 n_0 相差不大，因此额定转差率 s_N 一般都比较小，其范围在 0.01 ~ 0.05 之间。

如果将电源频率调节为 f_x ，则同步转速 n_{0x} 也随之调节成

$$n_{0x} = \frac{60f_x}{p} \quad (2-4)$$

异步电动机变频后的转速 n_x 的表达式为

$$n_x = n_{0x}(1 - s) = \frac{60f_x}{p}(1 - s) \quad (2-5)$$

这就是异步电动机变频调速的理论依据。

2.1.2 三相异步电动机的机械特性

当加在电动机上的电压 U_1 为额定电压时, 电动机的电磁转矩 T 与转子转速 n 之间的关系, 称为电动机的机械特性, 即

$$n = f(T)$$

三相异步电动机的机械特性曲线如图 2-1 所示。下面讨论曲线上几个特殊的转矩。

1. 起动转矩 T_{st}

在 $n=0$ ($s=1$), $T=T_{st}$ 点, 这点的转矩称为起动转矩 T_{st} , 也称为堵转转矩。当电动机的负载转矩大于 T_{st} 时, 电动机将不能起动。

2. 额定转矩 T_N

在 $n=n_N$ ($s=s_N$), $T=T_N$ 点, 这点的转矩称为额定转矩 T_N 。当电动机工作在额定转矩 T_N 时, s_N 通常在 0.02 ~ 0.06 之间, 转速在很小的范围内变化时, 转矩即可在很大的范围内变化, 即工作于额定转矩 T_N 时, 电动机具有很硬的机械特性。

3. 最大转矩 T_M

在 $n=n_L$ ($s=s_L$), $T=T_M$ 点, 这点的转矩称为最大转矩 T_M 。 T_M 的大小象征着电动机的过载能力, 用过载倍数 λ 表示, $\lambda = T_M/T_N$ 。在任何情况下, 电动机的负载转矩都不能大于 T_M , 否则电动机转速将急剧下降, 致使电动机堵转停止, 因此, 这一点称为临界转速点。临界转速 n_L 的大小决定了 L 点的上下位置, 从而反映了机械特性的硬度。

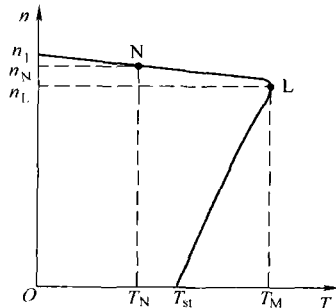


图 2-1 三相异步电动机的机械特性曲线

2.1.3 三相异步电动机的起动

在拖动系统中, 电动机要经常起动和停止 (即制动)。从提高劳动生产率的角度看, 电动机起动时间、制动时间越短越好, 但是由于三相异步电动机的具体特点, 起动时间、制动时间又不能太短。

人们希望电动机起动时, 起动电流不要太大, 而起动转矩要足够大, 但是实际情况恰恰相反。在起动瞬间, 转子还没转动, $s=1$, 由于转子以较大的转速切割旋转磁场, 在转子绕组中产生较大的感应电动势 E_2 和电流 I_2 , 根据磁动势平衡关系, 定子电流随着转子电流改变而改变, 所以起动时定子电流 I_{st} 也很大, 一般会达到额定电流 I_N 的 4 ~ 7 倍, 这样大的起动电流会在电路中产生过大的电压降, 从而影响接在同一电网上的其他用电设备的正常运行。

在生产中, 除了小容量的三相异步电动机能直接起动外, 一般要采取不同的方法起动, 比如自耦变压器减压起动、串电阻或电抗器减压起动、Y- Δ 减压起动等。在变频调速系统中, 变频器用降低频率 f_1 从而也降低了 U_1 的方法来起动电动机。图 2-2 所示为低频起动时电动机的机械特性曲线。电动机以很

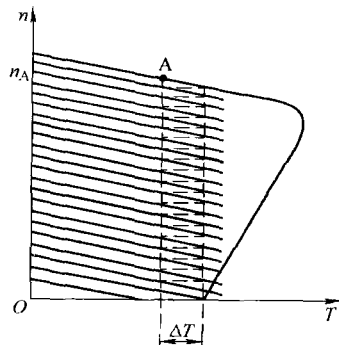


图 2-2 低频起动时电动机的机械特性曲线

低的频率起动,随着频率的上升,转速上升,直至达到电动机的工作频率后,电动机稳速运行。在此过程中,转速差 Δn 被限制在一定的范围,起动电流也将被限制在一定的范围内,而且动态转矩 ΔT 很小,起动过程很平稳。

2.1.4 三相异步电动机的制动

电动机的制动状态是指电磁转矩 T 与转速 n 方向相反的状态。三相异步电动机的制动方式有直流制动、回馈制动和反接制动等。由于反接制动在变频调速系统中禁止使用,所以下面只介绍前两种制动方式。

1. 直流制动

电动机制动时,切断电动机的三相电源,在定子绕组中通入直流电,产生一恒定磁场,如图 2-3a 所示。由于转子在机械惯性作用下仍按原方向旋转,它切割恒定磁场产生感应电流,用左手定则可判断感应电流在磁场中的受力方向,从而可判断电磁转矩方向与转子转速方向相反,为制动转矩。如图 2-3b 所示,曲线①为原电动运行状态机械特性曲线,曲线②为直流制动运行状态机械特性曲线。直流制动过程是由电动运行状态的 A 点平跳至曲线②的 B 点,在制动转矩和负载转矩共同作用下沿着曲线②减速,直到 $n=0$,直流制动结束。直流制动的实质是将转子中储存的机械能转换成电能,并消耗在转子电阻上。

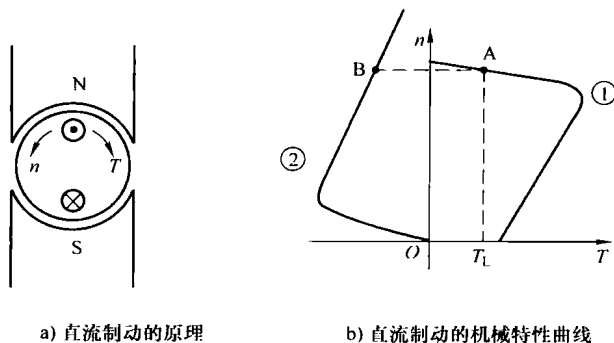


图 2-3 直流制动的原理与机械特性

2. 回馈制动

由于某些原因,当 $n > n_1$ (即转子转速大于旋转磁场转速) 时,转子切割旋转磁场的方向与电动运行状态 $n < n_1$ 正好相反,转子中感应电动势和电流的方向也相反,电磁转矩 T 也就与 n 反向,为制动转矩。回馈制动的实质是将轴上的机械能转换成电能,回馈给电源。

如图 2-4 所示,曲线①第一象限为电动机电动运行状态的机械特性曲线。下面分析两种不同的回馈制动情况:

1) 起重机下放重物时,电动机处于回馈制动状态,曲线①第二象限为其机械特性曲线,制动的过程如下:由于重力作用,电动机转速 n 沿曲线①增加,当 $n > n_1$ 时,电磁转矩 T 为制动转矩,直到 $T = T_B = T_L$,工作点由 A 点移至 B 点,重物以 n_B 匀速下放。

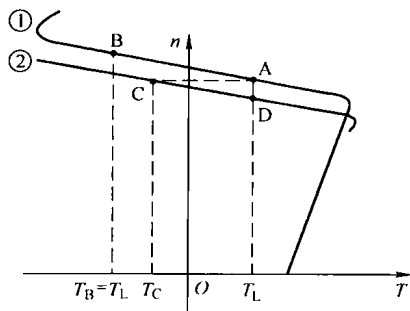


图 2-4 回馈制动的机械特性曲线

2) 变频调速时, 由于 f_1 降低使电动机处于回馈制动状态, 曲线②第二象限为其机械特性曲线, 制动的过程如下: f_1 降低瞬间, 由于机械惯性, 电动机转速 n 来不及变化, 工作点由A点平跳至C点, 于是得到制动转矩 T_C , 使电动机沿着曲线②减速。

2.2 异步电动机的调速方式

2.2.1 异步电动机的调速

1. 调速与速度改变

(1) 调速

调速是在负载没有改变的情况下, 根据生产过程需要人为地、强制性地改变拖动系统的转速。

例如, 将电源频率从50Hz调至40Hz, 电动机的工作点从 Q_1 移至 Q_2 。其转速也从1460r/min调至1168r/min, 如图2-5所示。可见, 调速时转速的改变是从不同的机械特性上得到的。我们将调速时得到的机械特性簇称为调速特性。

(2) 速度改变

速度改变是由于负载的变化而引起拖动系统的转速改变。例如, 若原系统工作在 Q_1 点, 此时负载转矩由 T_1 减小到 T_2 引起系统加速, 最后稳定运行在 Q'_1 点上。可见速度改变时转速的变化是从同一根机械特性曲线上得到的。

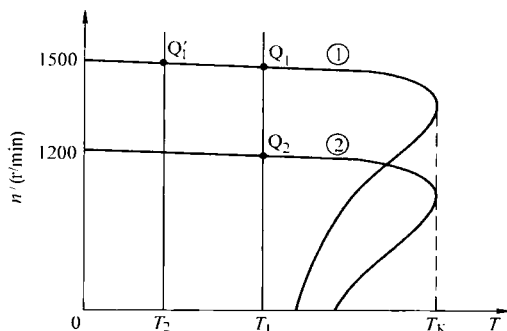


图2-5 异步电动机的调速

2. 调速指标

电动机的调速性能常用下列指标衡量:

(1) 调速范围

调速范围是指电动机在额定负载时所能达到的最高转速 $n_{1,max}$ 与最低转速 $n_{1,min}$ 之比, 即

$$\alpha_1 = \frac{n_{1,max}}{n_{1,min}} \quad (2-6)$$

不同的生产机械对调速范围的要求不同, 如车床的调速范围 α_1 为20~120, 钻床为2~12, 铣床为20~30等。一般变频器的最低工作频率可达到0.5Hz, 即在额定频率($f_N = 50\text{Hz}$)以下, 调速范围为 $\alpha_1 = 50/0.5 = 100$ 。

(2) 调速的平滑性

调速的平滑性是指相邻两级转速的接近程度。两档转速差越小, 调速的平滑性越好。在变频调速时, 若给定为模拟信号, 多数变频器输出频率的分辨率(相邻两级频率)为0.05Hz, 以4极电动机为例, 则相邻两档的转速差为

$$\varepsilon_n = \frac{60 \times 0.05}{2} \text{r/min} = 1.5 \text{r/min}$$

可见, 其平滑性是很高的。

(3) 调速特性

一种调速方案是否优良, 调速后的工作特性能否满足负载的要求, 也是一个很重要的方面。常通过下面两点来衡量:

1) 静态特性, 主要是指调速后机械特性的硬度。工程上常用静差度 δ 来表示

$$\delta = \frac{n_0 - n_N}{n_0} \times 100\% \quad (2-7)$$

2) 动态特性, 指过渡过程中的性能。例如, 加减速过程是否快捷、平稳, 遇到冲击性负载时, 系统的转速能否迅速恢复等。

对大多数的生产机械来说, 希望调速后的机械特性硬一些, 负载变动时, 速度变化较小, 工作比较稳定。但也有的负载希望调速后的机械特性较软, 如起重机械, 负载较重时, 为安全起见, 速度要明显变慢。

2.2.2 常用的异步电动机调速方式

三相异步电动机的调速方式主要有 3 种, 即变极调速、变转差率调速和变频率调速。

1. 变极调速

三相异步电动机的变极调速属于有级调速, 通过改变磁极对数 p , 可以得到 2 : 1 调速、3 : 2 调速、4 : 3 调速及三速电动机等, 调速的级数很少。由于磁极对数 p 取决于定子绕组的结构, 而且笼型转子的极数能自动地保持与定子极数相等, 所以此调速只适用于特制的笼型异步电动机, 这种电动机结构复杂, 成本高。

2. 变转差率调速

变转差率调速一般适用于绕线型异步电动机或转差电动机。具体的实现方法很多, 比如, 转子串电阻的串级调速、调压调速、电磁转差离合器调速等。随着 s 的增大, 电动机的机械特性变软, 效率降低。

3. 变频率调速

(1) 异步电动机的等效电路

异步电动机的转子能量是通过电磁感应而得到的。定子和转子之间在电路上没有任何联系, 其电路可用图 2-6 来表示。

在图 2-6 中, U_1 为定子的相电压; I_1 为定子的相电流; r_1 为定子每相绕组的电阻; x_1 为定子每相绕组的漏抗; E_{2s} 、 I_{2s} 、 x_{2s} 分别为转子电路中产生的电动势、电流、漏电抗; E_1 为每相定子绕组的反电动势, 它是定子绕组切割旋转磁场而产生的, 其有效值计算如下:

$$E_1 = 4.44 f_1 k_{N1} N_1 \Phi_M \quad (2-8)$$

式中 E_1 ——每相定子绕组的反电动势有效值 (V);

f_1 ——电源频率 (Hz);

k_{N1} ——与绕组结构有关的常数;

N_1 ——每相定子绕组的匝数;

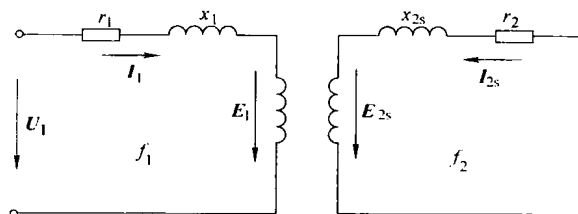


图 2-6 异步电动机定子转子等效电路