

原 魁 刘伟强 编著

变频器

基础及应用

冶金工业出版社

7N 773
Y90

变频器基础及应用

原 魁 刘伟强 编著

冶金工业出版社

EA10/14

内容简介

本书第1章简单介绍了变频器技术的发展历史,变频器主要特点和应用范围,变频器驱动系统的优势以及变频器的技术发展动向;第2章介绍了和变频器有关的各种基础知识,其中包括变频调速的基本原理、变频器的分类、变频器的控制方式和基本原理以及变频器中的半导体器件等方面的内容;第3章介绍了变频器的基本硬件结构,各部分电路的基本功能和变频器本身具有的各种主要功能;第4章介绍了如何设计变频器驱动系统,其中包括常见负载机械特性介绍,电动机类型和容量的选择,变频器类型和容量的选择,如何从厂家提供的变频器样本了解变频器性能,进行变频器驱动系统设计时所需要了解和注意的各种事项等;第5章介绍了变频器的各种周边设备以及在行变频器驱动系统设计时如何根据系统要求对这些外围设备进行选择;第6章介绍了进行变频器安装调试和维修保养时应注意的各种事项;第7章中介绍了使用变频器时可能会遇到的各种异常情况及相应的对策。本书还在附录中给出了几种典型通用变频器的技术数据和一种变频器的几种典型用途的接线图。

本书可供从事和交流调速有关工作的工程技术人员阅读,也可供大、专院校机电、自动控制专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

变频器基础及应用/原魁,刘伟强编著.-北京:冶金工业出版社,1997.6
ISBN 7-5024-1900-4

I. 变… II. ①原…②刘… III. 变频器 IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 09638 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)

中国人民警官大学印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1997年6月第1版,1997年6月第1次印刷

850mm×1168mm 1/32; 8.25印张; 219千字; 251页; 1-1500册

14.00元

前 言

交流变频调速技术是现代电力传动技术的重要发展方向，随着电力电子技术、微电子技术和现代控制理论在交流变频调速系统中的应用，作为交流变频调速系统核心的变频器的性能也得到了飞跃性的提高，并越来越广泛地应用于工业生产和日常生活的许多领域之中。近年来国外变频器市场的增长速度每年都在10%以上，而随着我国改革开放的深入发展，国外的各种变频器大量涌入国内市场，也为国内市场带来了较高的增长速度。

虽然变频器的应用范围很广，但对于许多工程技术人员来说，变频器技术尚属于一门新的技术，因此，需要通过一本较为通俗易懂的参考书去了解变频器本身以及设计变频器驱动系统时所需要的各种基础知识。而本书正是为了这个目的而编写的。

编写本书时参考了大量国外有关书籍和各种最新的技术资料，力求比较通俗并全面地对和变频器有关的各种基础知识、变频器的基本结构和主要功能、变频器驱动系统的设计、周边设备的选择、变频器安装调试和维修保养、变频器驱动系统、系统异常及其对策等方面的内容进行介绍，以达到为尚不太熟悉变频器的技术人员提供一本较有价值的参考书的目的。

在本书的编写过程中得到了孙一康、余达太、李春寿、张明浩教授的大力支持，张明浩教授审阅了部分书稿。此外，葛良松、韩灵生同志在收集资料方面，黄子河同志在书稿的录入和整理方

面都给予了许多帮助，在此一并表示谢意。

由于时间仓促，加之编者的水平所限，书中错误在所难免，敬请读者不吝指正。

编者

1997年2月

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 变频器技术的发展历史	(1)
1.2 变频器调速控制系统的优势	(2)
1.3 变频器技术的发展动向	(9)
第2章 变频器基础知识	(11)
2.1 异步电动机基本工作原理和控制	(11)
2.1.1 异步电动机基本工作原理	(11)
2.1.2 异步电动机的变频调速	(12)
2.1.3 异步电动机的等效电路和速度特性	(13)
2.1.4 异步电动机的机械特性 (转速/转矩-电流特性)	(14)
2.2 变频器的基本构成和工作原理	(16)
2.2.1 变频器的基本构成	(16)
2.2.2 变频器内部电路的基本功能	(16)
2.2.3 逆变电路基本工作原理	(18)
2.3 变频器的种类	(20)
2.4 变频器控制方式和基本原理	(28)
2.4.1 V/f 控制	(28)
2.4.2 转差频率控制	(31)
2.4.3 矢量控制	(32)

2.4.4	提高转矩控制性能的措施	(36)
2.4.5	各种控制方式特点比较	(38)
2.5	变频器中的半导体开关器件	(41)
2.5.1	晶闸管 (Thyristor)	(41)
2.5.2	门极可关断晶闸管 (GTO Thyristor)	(42)
2.5.3	双极型功率晶体管 (Bipolar Power Transistor)	(42)
2.5.4	功率场效应管 (Power MOSFET)	(43)
2.5.5	隔离门极双极型晶体管 (IGBT)	(43)
2.5.6	智能功率模块 IPM (Intelligent Power Module)	(43)
2.5.7	复合模块	(44)
2.6	变频器专用电动机	(45)
第3章	变频器的基本结构和主要功能	(48)
3.1	绪言	(48)
3.2	变频器主电路的构成	(49)
3.2.1	整流电路	(49)
3.2.2	直流中间电路	(52)
3.2.3	逆变电路	(52)
3.2.4	制动电路的作用及工作原理	(59)
3.2.5	主电路的几种常见结构	(60)
3.3	控制电路的基本构成	(65)
3.3.1	主控制电路	(66)
3.3.2	主电路驱动电路	(69)
3.3.3	信号检测电路	(69)
3.3.4	保护电路	(71)
3.3.5	外部接口电路	(73)
3.3.6	数字操作显示盒	(76)
3.4	变频器的主要功能	(78)
3.4.1	系统所具有的功能	(79)

3.4.2	频率设定功能	(84)
3.4.3	与保护有关的功能	(87)
3.4.4	与运动方式有关的功能	(90)
3.4.5	与状态监测有关的功能	(92)
3.4.6	其他功能	(92)
第4章	变频器驱动系统设计	(94)
4.1	机械负载与电动机的转矩特性	(96)
4.1.1	恒转矩负载	(96)
4.1.2	平方降转矩负载	(96)
4.1.3	恒功率负载	(97)
4.1.4	电动机的转矩特性	(98)
4.2	设计变频器驱动系统的要点	(99)
4.2.1	驱动恒转矩负载	(99)
4.2.2	驱动平方降转矩负载	(101)
4.2.3	驱动恒功率负载	(102)
4.2.4	驱动四象限运行的负载	(105)
4.2.5	驱动脉动转矩负载	(106)
4.2.6	驱动冲击负载	(106)
4.2.7	驱动大惯性负载	(106)
4.2.8	驱动高速运转的负载	(106)
4.2.9	驱动大起动转矩负载	(107)
4.3	电动机的选择	(108)
4.3.1	电动机外壳保护的选定	(108)
4.3.2	电动机容量的选定	(110)
4.3.3	选定电机时的注意事项	(126)
4.4	变频器的选择	(133)
4.4.1	变频器种类的选择	(133)
4.4.2	产品样本的规格指标	(135)
4.4.3	变频器容量选定	(146)
4.4.4	应用变频器的注意事项	(151)

第 5 章 变频器周边设备的选择及上位机的连接	(157)
5.1 变频器周边设备的种类	(157)
5.2 主电路、控制电路用电线	(158)
5.2.1 主电路电线	(158)
5.2.2 控制电路电线	(160)
5.3 变压器	(160)
5.4 配线用断路器和漏电断路器	(161)
5.4.1 配线用断路器	(161)
5.4.2 漏电断路器	(163)
5.5 电磁接触器和过载继电器	(164)
5.5.1 电磁接触器	(164)
5.5.2 过载继电器 (THR)	(164)
5.6 电抗器和滤波器	(165)
5.6.1 电抗器	(166)
5.6.2 电波噪声滤波器	(169)
5.7 制动电阻	(170)
5.8 电网电源切换电路	(173)
5.9 变频器与 PLC 及上位机的连接	(175)
5.9.1 变频器的输入输出电路 (接口电路)	(175)
5.9.2 使用时的注意事项	(182)
5.9.3 通过数据传输进行的控制	(183)
5.9.4 接地和电源系统	(184)
第 6 章 变频器的安装调试和维修保养	(186)
6.1 变频器的设置环境和安装	(186)
6.1.1 变频器的设置环境	(186)
6.1.2 变频器的柜内安装和冷却方式	(187)
6.2 配线	(193)
6.2.1 主电路配线	(193)
6.2.2 接地线配线	(193)
6.2.3 控制电路布线	(194)

6.3	通电前检查	(196)
6.3.1	外观及结构检查	(196)
6.3.2	绝缘电阻检查	(196)
6.4	试运行	(197)
6.4.1	电动机单独运行	(197)
6.4.2	负载机械的试运行	(198)
6.5	检查与维修保养	(199)
6.5.1	维修保养时应遵照的准则	(199)
6.5.2	定期检查和维修保养	(200)
第7章	变频器常见异常及其对策	(202)
7.1	变频器自身异常及对策	(202)
7.1.1	设置环境	(202)
7.1.2	外部噪声的影响	(202)
7.1.3	电源异常	(204)
7.2	变频器对周边设备的影响及对策	(207)
7.2.1	高次谐波对电网电源的影响及其对策	(208)
7.2.2	电波噪声的影响及对策	(210)
7.2.3	噪声、振动和发热的对策	(212)
7.3	变频器驱动系统故障分析	(217)
附录1	几种典型通用变频器技术数据	(220)
附录2	变频器典型应用实例	(242)
参考文献		(250)

第 1 章 绪 论

1.1 变频器技术的发展历史

直流电动机拖动和交流电动机拖动先后诞生于 19 世纪,距今已有 100 多年的历史,并已成为动力机械的主要驱动装置。但是,由于技术上的原因,在很长一段时期内,占整个电力拖动系统 80% 左右的不变速拖动系统中采用的是交流电动机(包括异步电动机和同步电动机),而在需要进行调速控制的拖动系统中则基本上采用的是直流电动机。

但是,众所周知,由于结构上的原因,直流电动机存在以下缺点:

- (1) 需要定期更换电刷和换向器,维护保养困难,寿命较短;
- (2) 由于直流电动机存在换向火花,难以应用于存在易燃易爆气体的恶劣环境;
- (3) 结构复杂,难以制造大容量、高转速和高电压的直流电动机。

而与直流电动机相比,交流电动机则具有以下优点:

- (1) 结构坚固,工作可靠,易于维护保养;
- (2) 不存在换向火花,可以应用于存在易燃易爆气体的恶劣环境;
- (3) 容易制造出大容量、高转速和高电压的交流电动机。

因此,很久以来,人们希望在许多场合下能够用可调速的交流电动机来代替直流电动机,并在交流电动机的调速控制方面进行了大量的研究开发工作。但是,直至 20 世纪 70 年代,交流调速系统的研究开发方面一直未能得到真正能够令人满意的成果,也因此限制了交流调速系统的推广应用。也正是因为这个原因,在

工业生产中大量使用的诸如风机、水泵等需要进行调速控制的电力拖动系统中不得不采用挡板和阀门来调节风速和流量。这种做法不但增加了系统的复杂性，也造成了能源的浪费。

经历了 20 世纪 70 年代中期的第 2 次石油危机之后，人们充分认识到了节能工作的重要性，并进一步重视和加强了对交流调速技术的研究开发工作。随着同时期内电力电子技术的发展，作为交流调速系统中心的变频器技术也得到了显著的发展，并逐渐进入了实用阶段。

虽然发展变频驱动技术最初的目的主要是为了节能，但是随着电力电子技术、微电子技术和控制理论的发展，电力半导体器件和微处理器的性能不断提高，变频驱动技术也得到了显著发展。随着各种复杂控制技术在变频器技术中的应用，变频器的性能不断得到提高，而且应用范围也越来越广。目前变频器不但在传统的电力拖动系统中得到了广泛的应用，而且几乎已经扩展到了工业生产的所有领域，并且在空调、洗衣机、电冰箱等家电产品中也得到了广泛应用。

变频器技术是一门综合性的技术，它建立在控制技术、电力电子技术、微电子技术和计算机技术的基础之上，并随着这些基础技术的发展而不断得到发展。表 1-1 给出了近年来变频器技术的基本发展过程。

1.2 变频器调速控制系统的优势

与传统的交流拖动系统相比，利用变频器对交流电动机进行调速控制的交流拖动系统有许多优点，如节能，容易实现对现有电动机的调速控制，可以实现大范围内的高效连续调速控制，容易实现电动机的正反转切换，可以进行高频度的起停运转，可以进行电气制动，可以对电动机进行高速驱动，可以适应各种工作环境，可以用一台变频器对多台电动机进行调速控制，电源功率因数大，所需电源容量小，可以组成高性能的控制系统等等。下面我们将简单介绍一下上面提到的变频器调速控制系统的各种主

表 1-1 变频器技术的基本发展过程

发展过程		• 1965	• 1970	• 1975	• 1980	• 1985	• 1990	• 1995
半导体换流器件	晶闸管	晶闸管实用期	高速晶闸管	电力晶体管开发	GTO 晶闸管开发	GTO 晶闸管实用期	IMP 开发	IMP 进入实用期
	晶体管	电力晶体管实用期	电力晶体管开发	晶体管模块	IGBT 开发	IGBT 实用期		
控制电路元件		模拟电路	IC 运算放大器	8 位 CPU	16 位 CPU	16 位 DSP	复合 ASIC (包括 CPU)	32 位 DSP
模拟控制	晶闸管	电压型变频器	电流型变频器	节能大容量变频器	矢量控制变频器	GTO 晶闸变频器		
	晶体管	PAM 高频变频器	等幅宽 PWM 变频器	正弦波 PWM 变频器	矢量控制变频器 (机床用)	矢量控制变频器		
数字控制	晶闸管			矢量控制变频器	电流型 PWM 变频器	无传感器矢量控制变频器		
	晶体管			全数字化 PWM 变频器	低噪声 PWM 变频器	通用变频器的两极分化	大容量 IM 伺服	无传感器矢量控制变频器

要优点。

在许多情况下，使用变频器的目的是节能，尤其是对于在工业中大量使用的风扇、鼓风机和泵类负载来说，通过变频器进行调速控制可以代替传统上利用挡板和阀门进行的风量、流量和扬程的控制，所以节能效果非常明显。

因为以节能为目的的调速运转对电动机的调速范围和精度要求不高，所以通常采用在价格方面比较经济的通用型变频器。

由于变频器可以看作是一个频率可调的交流电源，对于现有的进行恒速运转的异步电动机来说，只需在电网电源和现有的电动机之间接入变频器和相应设备，就可以利用变频器实现调速控制，而无需对电动机和系统本身进行大的设备改造。

在采用了变频器的交流拖动系统中，异步电动机的调速控制是通过改变变频器的输出频率实现的。因此，在进行调速控制时，可以通过控制变频器的输出频率使电动机工作在转差较小的范围，电动机的调速范围较宽，并可以达到提高运行效率的目的。一般来说，通用型变频器的调速范围可以达到 $1:10$ 以上，而高性能的矢量控制变频器的调速范围可以达到 $1:1000$ 。此外，当采用矢量控制方式的变频器对异步电动机进行调速控制时，还可以直接控制电动机的输出转矩。因此，高性能的矢量控制变频器与变频器专用电动机的组合在控制性能方面可以达到和超过高精度直流伺服电动机的控制性能。

利用普通的电网电源运行的交流拖动系统，为了实现电动机的正反转切换，必须利用开闭器等装置对电源进行换相切换。利用变频器进行调速控制时，只需改变变频器内部逆变电路换流器件的开关顺序即可以达到对输出进行换相的目的，很容易实现电动机的正反转切换而不需要专门设置正反转切换装置。

此外，对在电网电源下运行的电动机进行正反转切换时，如果在电动机尚未停止时就进行相序的切换，电动机内将会由于相序的改变而流过大于起动电流的电流，有烧毁电动机的危险，所以通常必须等电动机完全停下来之后才能够进行换相操作。而在

采用变频器的交流调速系统中，由于可以通过改变变频器的输出频率使电动机按照斜坡函数的规律进行减速，并在电动机减速至低速范围后再进行相序切换，进行相序切换时电动机的电流可以很小。同样，在电动机的加速过程中可以通过改变变频器的输出频率使电动机按照斜坡函数的规律进行加速，从而达到限制加速电流的目的。因此，在利用变频器进行调速控制时更容易和其它设备一起构成自动控制系统。

对于利用普通的电网电源运行的交流拖动系统来说，由于电动机的起动电流较大并存在着与起动时间成正比的功率损耗，所以不能使电动机进行高频度的起停运转。而对于采用了变频器的交流调速系统来说，由于电动机的起停都是在低速区进行而且加减速过程都比较平缓，电动机的功耗和发热较小，可以进行较高频度的起停运转。

变频调速系统的上述特点可以用于采用交流拖动系统的传送带和移动工作台等以达到节能的目的。这是因为，在利用异步电动机进行恒速驱动的传送带以及移动工作台中，电动机通常一直处于工作状态，而采用变频器进行调速控制后，由于可以使电动机进行高频度的起停运转，可以使传送带或移动工作台只是在有货物或工件时运行，而在没有货物或工件时停止运行，从而达到节能的目的。

由于在变频器驱动系统中电动机的调速控制是通过改变变频器的输出频率进行的，当把变频器的输出频率降至电动机的实际转速所对应的频率以下时，负载的机械能将被转换为电能，并被回馈到变频器。而变频器则可以利用自己的制动回路将这部分能量以热能消耗或回馈给供电电网，并形成电气制动。此外，一些变频器还具有直流制动功能，即在需要进行制动时，可以通过变频器给电动机加上一个直流电压，并利用该电压产生的电流进行制动。

同机械制动相比，电气制动有许多优点，例如体积小，维护简单，可靠性好等。但是也应该注意到，由于在静止状态下电气

制动并不能使电动机产生保持转矩，所以在某些场合还必须采取相应的措施，例如和机械制动器同时使用等。

高速驱动是变频器调速控制的最重要的优点之一。这是因为对于直流电动机来说，由于受电刷和换向环等因素的制约，无法进行高速运转。但是，对于异步电动机来说，由于不存在上述制约因素，理论上讲异步电动机的转速可以达到相当高的速度。

由于异步电动机的转速为

$$n = \frac{120f(1-s)}{p}$$

式中 n —— 电动机转速，r/min；

f —— 电源频率，Hz；

p —— 电动机磁极个数；

s —— 转差。

当用工频电源（50Hz）对异步电动机进行驱动时，二极电动机的最高速度只能达到 3000r/min。为了得到更高转速，则必须使用专用的高频电源或使用机械增速装置进行增速。

与此相比，目前高频变频器的输出频率已经可以达到 3000kHz，所以当利用这种高速变频器对二极异步电动机进行驱动时，可以得到高达 180000r/min 的高速。而且随着变频器技术的发展，高频变频器的输出频率也在不断提高，因此进行更高速度的驱动也将成为可能。

此外，与采用机械增速装置的高速驱动系统相比，由于采用高频变频器的高速驱动系统中并不存在异步电动机以外的机械装置，其可靠性更好，而且保养和维修也更加简单。

在变频器调速控制系统中，变频器和电动机是可以分离设置的。因此，通过和各种不同的异步电动机的适当组合，可以得到适用于各种工作环境的交流调速系统，而对变频器本身并没有特殊要求。

例如，对有防爆和防腐蚀要求的环境，只需将电动机换为专用电动机，而使用普通的变频器并将其安装在有防爆和防腐蚀要

求的环境之外的普通环境中即可。

由于变频器本身对外部来说可以看作是一个可以进行调频调压的交流电源，可以用一台变频器同时驱动多台异步电动机或同步电动机，从而达到节约设备投资的目的。而对于直流调速系统来说，则很难做到这一点。

当用一台变频器同时驱动多台电动机时，若驱动对象为同步电动机，所有的电动机将会以同一速度（同步转速）运转，而当驱动对象为容量和负载都不相同的异步电动机时，则由于转差的原因，各电动机之间会存在一定的速度差。

因为变频器是通过交流-直流-交流电源变换后对异步电动机进行驱动的，所以电源的功率因数不受电动机功率因数的影响，几乎为定值。

此外，当用电网电源对异步电动机进行驱动时，电动机的起动电流为额定电流的5~6倍，而在采用变频器对异步电动机进行驱动时，由于可以将变频器的输出频率降至很低时起动，电动机的起动电流很小，因而变频器输入端电源的容量也可以比较小。一般来说，变频器输入端电源的容量只需为电动机输出容量的1.5倍左右即可。这也说明变频器也可以同时起到减压起动器的作用。

随着控制理论、交流调速理论和电子技术的发展，变频器技术也得到了充分地重视和发展，目前，由高性能变频器和专用的异步电动机组成的控制系统在性能上已经达到和超过了直流电动机伺服系统。此外，由于异步电动机还具有对环境适应性强，维护简单等许多直流伺服电动机所不具备的优点，所以在许多需要进行高速高精度控制的应用中这种高性能的交流调速系统正在逐步替代直流伺服系统。而且由于高性能的变频器的外部接口功能也非常丰富，可以将其作为自动控制系统中的一个部件使用，构成所需的自动控制系统。

由于变频器具有上述优点，因而在各种领域中得到了广泛的应用。表1-2给出了变频器在工业生产中的主要应用。