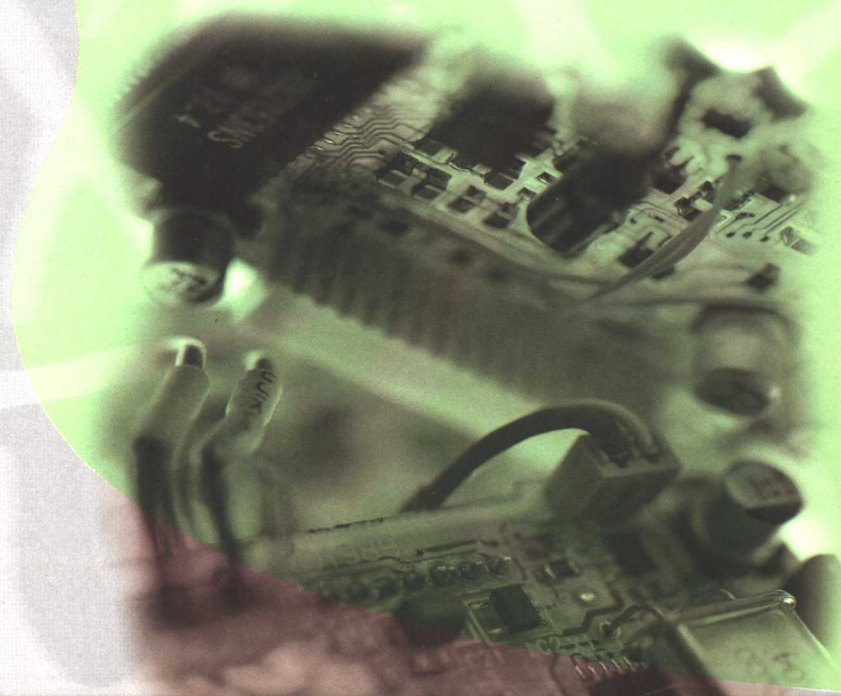



培 训
师 教
技 程
系 列

BIANPINQI KEBIANCHENGXI
KONGZHIQI JI CHUMOPING
ZONGHE YINGYONG JISHU

变频器、可编程序控制器 及触摸屏综合应用技术

主 编 岳庆来
参 编 周 锋 吴启红 胡 洪



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



技师培训教程系列

变频器、可编程序控制器及 触摸屏综合应用技术

主编 岳庆来

参编 周 锋 吴启红 胡 洪

主审 彭旭昀



机械工业出版社

本书从推广综合应用角度出发,在阐述变频器、可编程序控制器以及触摸屏基本知识的同时,又介绍变频器、可编程序控制器与触摸屏的综合应用知识。同时结合深圳市电工、电梯、制冷技师公共模块《可编程序控制器、变频器与触摸屏的综合应用》的实操考核内容,对技能操作进行了详细叙述。

本书为机电类技师培训教材,也可作为大专院校工业自动化、机电一体化、机械设计制造及自动化、电气技术及其他相关专业的参考教材,还可作为广大工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

变频器、可编程序控制器及触摸屏综合应用技术 / 岳庆来主编. —北京:机械工业出版社, 2006.4

(技师培训教程系列)

ISBN 7-111-18581-1

I. 变... II. 岳... III. ①变频器—基本知识②可编程序控制器—基本知识③触摸屏—基本知识 IV. ①TN773②TM571.6③TP334.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第013930号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:牛新国 罗莉

责任印制:洪汉军

三河市宏达印刷有限公司印刷

2006年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·41印张·1020千字

0001—4000册

定价:65.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线:(010)88379768

Http://www.machineinfo.gov.cn/book/

封面无防伪标均为盗版

技师培训教程系列

编委会名单

主任：黄景容

副主任：王 德 张红岩 彭旭昀

顾问：乐嘉祥 侯勇志 王晓沛

委员：涂爱云 岳庆来 张大明 乔建伟 吴启红 刘振鹏

胡 洪 唐先军 王跃军 胡冬兵 谭 斌 黄太平

鄂永雄 廖俊龙 陈 芸 蔡 勇 官风华 赵宪龙

王继桦 李 明 梁昌龙 丘 洪

序

随着知识经济时代的到来，科学技术突飞猛进，特别是随着经济的全球化发展和我国加入 WTO，我国将逐步成为世界的“制造中心”。同时，我国经济的不断发展和产业结构的转型升级，也使得我国符合企业需求的一线工程技术人员严重匮乏，特别是技能人才的市场供给严重不足，而且正在成为影响经济进一步发展的瓶颈。

随着国家劳动和社会保障部国家高技能人才培养工程和《三年五十万新技师培养计划》的实施，高技能人才的培养有了较大的发展并面临新的契机。本系列教材就是在这种形势下组织编写的，以适应经济、社会发展对技能人才教育的新要求，满足高素质、复合型人才培养的需要。

深圳技师学院实行模块化和分段培养教学模式，已经成为深圳市高技能人才培养的主要基地和主要力量，年培养技能人才 10000 人次。在培训教学实践中，我们感到真正实用、好用的培训教材为数不多，尤其是有特色的、贴近生产实际的教材更显匮乏，教材的匮乏及教学内容的滞后已经成为培训教学的瓶颈问题。在技能人才培养的教学过程中，教材处于基础地位，是课程体系设计的核心，因此我们尝试组织专业技术人员自编部分教材，在教材编写中，结合市场需求，我们把相关知识点的学习与专业技能的训练有机地结合起来，摒弃以往“就知识讲知识”的传统做法，在培训教学中“边使用，边调整”，取得了较好的教学效果。

本系列教材的编写思想从以下四个方面出发：

一是根据国家劳动和社会保障部相关技能鉴定规范，并参考了深圳市电工等工种相关职业标准，包括深圳市电工、电梯、制冷专业技师（模块化）职业标准，力求教学内容能覆盖相应技能鉴定的要求。

二是结合当前企业的生产实际，力求教学内容能反映本工种新技术、新工艺的应用，具有一定的广度和深度，因此部分参编人员来自企业一线，能够了解企业生产需要。

三是培养目标明确，强化应用。教学中注重培养学员的职业能力，坚持技能人才的培养方向，内容安排上符合认知规律，由浅及深，由易到难。

四是内容编排上，努力做到理论与实践紧密结合，侧重实践操作，理论知识以够用为度，技能实操以培养掌握复杂操作和新技术操作的技能，并以增强分析、判断、排除各种实际故障为重点。

本系列教材的编者来自深圳技师学院从事培训教学的一线教师和企业的部分专家，书中内容基本反映出深圳市技能培训教学和社会化考核的方向，相信本书会受到中、高职类院校广大师生和广大青年读者的欢迎。

由于时间的限制，也囿于我们的知识和水平，书中疏漏之处在所难免，恳请广大读者和业内人士批评指正！

编委会主任 黄景容

前 言

可编程序控制器是微电子技术、自动控制技术和通信技术相结合的一种新型的、通用的自动控制装置。由于它具有功能强、可靠性高、使用灵活方便、易编程以及适合工业环境下应用等一系列优点，可以方便地直接用于机械制造、冶金化工、电力、交通、采矿、建材、轻工、环保、食品等各行各业，既可用于老设备的技术改造，也可用于新产品的开发。尤其是近年来可编程技术在工业自动化、机电一体化、传统产业技术改造等方面应用越来越广泛，成为现代工业三大支柱之一。

变频器不仅可以用于笼型异步电动机调速，而且也可以用于其他交流电动机调速，从工厂设备到家用空调都可以采用，在节能、减少维修、提高产量、保证质量等方面都取得了明显的经济效益，如果按行业分类，到目前为止，变频器已经在钢铁、有色冶金、石化、矿山、纺织印染、医药、造纸、卷烟、高层建筑供水、建材及机械行业得到广泛应用，而且应用领域正在不断扩大。

触摸屏是一种智能化操作部件，是极富吸引力的全新多媒体操作装置，用户只要用手指轻轻地触摸显示屏上的图符或文字就能实现对设备操作，可显示设备运行状况和运行参数，还可以随时修改设备运行模式、设定运行参数。触摸屏的出现至今只有短短的几年时间就已证明，触摸屏可以取代过去设备的操作面板和指示仪表。

近年来，变频器、可编程序控制器、触摸屏等设备在工业控制上的综合应用，使工业控制如虎添翼。但是，实用的教材很难找到，许多生产一线的技术工作人员得不到这方面的实用知识。正是从这一点出发，我们编写了这本《变频器、可编程序控制器及触摸屏综合应用技术》一书。

本书从推广综合应用角度出发，在阐述变频器、可编程序控制器以及触摸屏基本知识的同时，又介绍变频器、可编程序控制器及触摸屏的综合应用知识。同时结合深圳市电工、电梯、制冷技师公共模块《可编程控制器、变频器与触摸屏的综合应用》的实操考核内容，对技能操作进行了详细叙述。

本书共分4篇13章，第1~3篇分别讲述了变频器、可编程序控制器、触摸屏的基本知识，第4篇讲述了变频器、可编程序控制器与触摸屏的综合应用。其中第1~3、5、6、12章由岳庆来编写，第4、9、13章由吴启红编写，第7、8章由周锋编写，第10、11章由胡洪编写，绘图、植字、排版由王向红完成。全书插图由吴启红完成，全书由彭旭昀主审。

本书为机电类技师培训教材，也可作为大专院校工业自动化、机电一体化、机械设计制造及自动化、电气技术及其他相关专业的参考教材，还可作为广大工程技术人员的参考资料。

由于时间仓促，加之编者水平有限。书中的缺点和不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者
2005年8月

目 录

序 前言

第 1 篇 变频器

第 1 章 调速传动	1
1.1 调速传动的概况	1
1.1.1 调速传动的意义	1
1.1.2 调速传动的发展	1
1.1.3 调速传动的运动方程式	1
1.1.4 调速传动的主要指标	2
1.1.5 调速传动中的生产机械负载转矩特性	2
1.2 直流电动机调速传动	3
1.2.1 直流电动机的工作原理	3
1.2.2 直流电动机的电枢反应及对策	3
1.2.3 直流电动机的电磁转矩	3
1.2.4 直流电动机的调速方法	4
1.2.5 直流电动机的调速特性	5
1.2.6 直流电动机的启动、调速与制动	6
1.3 异步电动机的调速传动	7
1.3.1 三相异步电动机的工作原理	7
1.3.2 异步电动机的电磁转矩及自然机械特性	8
1.3.3 异步电动机的调速方法	13
1.3.4 异步电动机的调速特性	13
1.4 三相笼型异步电动机变频调速传动	18
1.4.1 三相笼型异步电动机变频调速的工作原理	18
1.4.2 三相笼型异步电动机变频调速时的转矩特性	21
1.5 三相笼型异步电动机高动态性能矢量控制变频调速	24
1.5.1 矢量控制的概念	24
1.5.2 等效的异步电动机物理模型	25

1.5.3 三相异步电动机矢量变换控制的构想	25
1.5.4 坐标转换及空间矢量	26
第 2 章 电力电子器件	29
2.1 概述	29
2.1.1 电力电子器件的发展	29
2.1.2 电力电子器件的分类	29
2.2 双极型晶体管 (BJT)	30
2.2.1 BJT 的发展	30
2.2.2 BJT 的特点	31
2.2.3 BJT 的工作特性	32
2.2.4 BJT 的驱动	34
2.2.5 BJT 的主要参数	34
2.2.6 BJT 的二次击穿现象与安全工作区	35
2.2.7 BJT 的保护	36
2.2.8 BJT 的选择	39
2.3 MOS 场效应晶体管 (MOSFET)	40
2.3.1 MOSFET 的特点	40
2.3.2 MOSFET 的结构与工作原理	40
2.3.3 MOSFET 工作特性	41
2.3.4 主要参数与安全工作区	42
2.4 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	43
2.4.1 IGBT 的特点	43
2.4.2 IGBT 的结构与工作原理	43
2.4.3 IGBT 的工作特性	44
2.4.4 IGBT 的主要参数	45
2.4.5 使用 IGBT 时的注意事项	45
2.4.6 IGBT 的驱动	46
2.4.7 IGBT 产品介绍	49
2.5 门极关断 (GTO) 晶闸管	49
2.5.1 GTO 的关断机理	49

2.5.2 GTO 的电特性	50	调节	101
2.5.3 GTO 的主要参数	52	3.9.2 有速度传感器的转速或转矩闭环 矢量控制	102
2.5.4 GTO 的发展方向	53	3.9.3 电动汽车矢量控制	102
2.5.5 GTO 的驱动	54	3.10 智能型变频器	104
2.6 MOS 门场控晶闸管 (MCT)	56	3.11 单相电容分相式电动机的变频调速	106
2.7 智能电力集成电路 (SPIC)	58	3.11.1 单相电容电动机的工作原理	107
第 3 章 变频器	61	3.11.2 单相电容电动机变频调速器控制 系统	108
3.1 变频器的的发展	61	3.11.3 单相电容电动机变频调速系统的 实现	109
3.1.1 异步电动机调速概况	61	3.11.4 输出电流波形	109
3.1.2 变频器技术发展动向	61	3.12 采用数字控制芯片的变频器	109
3.2 交流变频系统的基本形式	64	3.12.1 概述	109
3.2.1 交-交变频系统	64	3.12.2 控制电动机专用芯片	111
3.2.2 交-直-交变频系统	66	3.12.3 多 CPU 控制	115
3.3 变频器的构成	67	3.13 直接转矩控制的变频器	117
3.3.1 主电路	67	3.13.1 PWM 逆变器输出电压的矢量表 示	117
3.3.2 控制电路	68	3.13.2 磁通轨迹控制	119
3.4 通用变频器的分类	70	3.13.3 直接转矩控制实际结构	121
3.4.1 按直流电源的性质分类	70	3.14 变频器控制方式综述	121
3.4.2 按输出电压调节方式分类	71	3.14.1 非智能控制方式	121
3.4.3 按控制方式分类	72	3.14.2 智能控制方式	122
3.4.4 按主开关器件分类	74	3.14.3 变频器控制的展望	123
3.5 通用变频器中的整流器	75	第 4 章 FR-A540 变频器的操作	124
3.5.1 二极管整流器	75	4.1 变频器的接线	124
3.5.2 PWM 整流器	78	4.1.1 主回路接线及注意事项	124
3.6 变频器中的逆变器	80	4.1.2 控制回路接线及注意事项	126
3.6.1 逆变器的类型	80	4.2 操作面板	130
3.6.2 PWM 逆变电路	82	4.2.1 操作面板 (FR-DU04) 的名称和功 能	130
3.6.3 由 SPWM 逆变器组成的变频器	86	4.2.2 操作面板的使用	132
3.7 变频器中的制动	87	4.3 运行操作方式	137
3.7.1 动力制动	87	4.3.1 运行操作方式的选择	137
3.7.2 回馈制动	88	4.3.2 PU 运行操作方式 (Pr.79=0、1)	137
3.7.3 直流制动	90	4.3.3 外部运行操作方式 (Pr.79=2)	138
3.7.4 采用共用直流母线的多逆变器传 动	91	4.3.4 组合运行操作方式 1 (Pr.79=3)	139
3.8 通用变频器的 U/f 控制	93	4.3.5 组合运行操作方式 2 (Pr.79=4)	139
3.8.1 普通功能型 U/f 控制通用变频器	93		
3.8.2 高功能型 U/f 控制通用变频器	94		
3.9 通用变频器矢量控制	100		
3.9.1 无速度传感器矢量控制的速度			

VIII

4.4 参数及参数功能	140	7.2.3 PLC 的工作原理	236
4.4.1 参数表	140	7.3 FX 系列 PLC 的简介、基本指令与 步进指令	240
4.4.2 常用参数分类	142	7.3.1 FX 系列 PLC 简介	240
4.4.3 常用参数功能简述	144	7.3.2 FX2N 系列 PLC 的软元件及地址 分配	244
4.5 应用实例	148	7.3.3 FX2N 系列 PLC 的基本指令	255
4.5.1 输出频率跳变	148	7.3.4 FX2N 系列 PLC 的步进控制指令	262
4.5.2 多段速度	149	7.4 FX2N 系列 PLC 的功能指令	265
4.5.3 程序运行	151	7.4.1 功能指令通则	266
4.5.4 PID 控制	155	7.4.2 程序流控指令 (FNC00~ FNC09)	267
4.5.5 工频电源切换	160	7.4.3 传送和比较 (FNC10~FNC19)	272
4.5.6 PLG 闭环运行	164	7.4.4 四则运算及逻辑运算 (FNC20~ FNC29)	275
4.6 故障处理	165	7.4.5 循环移位与移位 (FNC30~ FNC39)	277
4.6.1 常见故障代码	165	7.4.6 数据处理 (FNC40~FNC49)	278
4.6.2 故障处理对策	169	7.4.7 方便指令 (FNC60~FNC69)	280
第 5 章 变频器的应用	171	7.4.8 外部 I/O 设备 (FNC70~ FNC79)	282
5.1 前言	171	7.4.9 FX2N 系列 PLC 外部设备 (FNC80~FNC89)	285
5.2 节能方面	172	7.4.10 实时时钟处理 (FNC160~ FNC169)	292
5.3 省力化、自动化及提高生产率方面	184	7.4.11 触点式比较指令 (FNC220~ FNC249)	295
5.4 提高质量方面	188	7.4.12 关于基本指令的分类名称助记符 功能及图形与可用软元件	298
5.5 其他方面	192	第 8 章 可编程控制系统设计	299
第 6 章 变频器的选择、安装、调试与维护	194	8.1 PLC 系统的设计	299
6.1 变频器的选择	194	8.2 PLC 的选型	300
6.2 变频器的安装	197	8.3 程序 (软件) 设计的步骤	301
6.3 变频器的调试	204	8.4 程序设计方法	303
6.4 变频器的维护	205	8.5 常用基本环节的编程	304
第 2 篇 可编程序控制器 (PLC)		8.5.1 延时电路	304
第 7 章 可编程序控制器的工作原理与 指令系统	211	8.5.2 闪光电路	306
7.1 概述	211	8.5.3 单按钮起停控制电路	308
7.1.1 引言	211	8.5.4 开机累计时间控制电路	309
7.1.2 PLC 的定义及特点	212		
7.1.3 PLC 的分类	214		
7.1.4 PLC 的性能	215		
7.1.5 PLC 的应用领域	215		
7.1.6 PLC 的发展趋势	216		
7.2 PLC 的组成与工作原理	221		
7.2.1 PLC 的硬件组成	221		
7.2.2 PLC 的软件组成	233		

8.5.5 电梯轿厢位置显示控制电路	309	10.1.7 相互转变梯形图程序和 SFC 程序	386
8.5.6 比较电路	318	10.1.8 读取其他格式的文件	387
8.5.7 采样电路	320	10.2 梯形图制作	388
8.5.8 选择性电路	321	10.2.1 梯形图制作时的限制事项	388
8.5.9 特殊功能模块的读与写	322	10.2.2 梯形图的制作步骤	392
8.5.10 串行通信编程	323	10.3 创建软元件注释	396
8.6 编程实例	328	10.4 在线	398
8.6.1 中央空调三台冷却水泵节能控制 (顺序控制单流程应用举例)	328	10.4.1 PLC 与计算机连接	398
8.6.2 带式输送机控制(顺序控制选择性 控制举例)	331	10.4.2 监视	398
8.6.3 多段速度恒压供水控制(顺序控制 并行分支控制举例)	333	10.4.3 程序调试	405
8.6.4 带编码器的 3 层电梯控制	335	10.4.4 登录关键字/密码	407
8.6.5 16 层电梯控制	338	10.4.5 在监视状态下修改梯形图程序	409
第 9 章 三菱 FX 系列 PLC 的特殊功能模块	343	10.4.6 诊断 PLC 的 CPU	413
9.1 模拟量输入/输出模块	343	10.5 FX 系列 PLC 的 SFC 编程简介	414
9.1.1 概述	343	10.5.1 SFC 程序的说明	414
9.1.2 普通 A/D 输入模块	344	10.5.2 SFC 图符号的列表	415
9.1.3 FX2N-4AD-PT 温度输入模块	350	10.5.3 SFC 的步	416
9.1.4 FX2N-2DA 输出模块	355	10.5.4 SFC 的转移条件	418
9.2 定位控制接口模块	361	10.6 GX Simulator Ver.6 软件简介	433
9.2.1 FX 定位模块的种类	361	10.6.1 启动 GX Simulator Ver.6	433
9.2.2 FX2N-20GM 模块简介	362	10.6.2 初期画面的表示内容	435
9.3 通信接口模块	369	10.6.3 监视软元件内存	436
9.3.1 概述	369	10.6.4 GX Simulator Ver.6 的结束方法	440
9.3.2 FX2N-232BD 通信接口模块简介	369	第 3 篇 触摸屏	
9.3.3 FX2N-485BD 通信接口模块简介	373	第 11 章 MELSEC-GOT 触摸屏	441
9.3.4 FX2N-422BD 通信接口模块简介	377	11.1 触摸屏概述	441
9.3.5 FX2N-232IF 通信接口模块简介	377	11.1.1 触摸屏的工作原理	441
第 10 章 三菱全系列 PLC 的 GX Developer Ver. 7 编程软件使用	378	11.1.2 触摸屏的主要类型	442
10.1 工程	378	11.2 F940GOT 触摸屏的操作	446
10.1.1 创建一个新工程	378	11.2.1 画面构成	446
10.1.2 打开工程	380	11.2.2 状态功能	447
10.1.3 关闭工程	381	11.2.3 GOT 操作键的基本操作	449
10.1.4 保存工程	382	11.2.4 系统连接	449
10.1.5 删除工程	383	11.2.5 起动	449
10.1.6 校验工程	384	11.2.6 状态模式操作	455
		11.3 三菱 GT Designer Ver.5 图形终端显示 屏幕制作软件使用介绍	472

11.3.1	软件概述	472
11.3.2	软件屏幕配置和各种工具	472
11.3.3	软件对话框的基本操作	475
11.3.4	模板的操作	476
11.3.5	规格说明	478
11.3.6	创建显示屏幕	480
11.3.7	数据的下载和上传传输	490

第4篇 综合实际应用

第12章 PLC、变频器及触摸屏间的网络

	数据通信	493
12.1	数据通信基础	493
12.1.1	数据通信方式	493
12.1.2	数据传送方向	497
12.1.3	传送介质	498
12.1.4	串行通信接口标准	498
12.2	工业局域网基础	505
12.2.1	概述	505
12.2.2	局域网的四大要素	505
12.2.3	局域网的选型考虑	507
12.3	三菱PLC的网络通信	508
12.3.1	网络概要	508
12.3.2	以太网(Ethernet)	509
12.3.3	ELSECNET/10 局域令牌网	510
12.3.4	ELSECNET/H 局域令牌网	510
12.3.5	CC-Link 开放式现场总线	511
12.4	FX系列PLC的链接及通信	515
12.4.1	简易PLC间的链接	515
12.4.2	并联链接	520
12.4.3	计算机链接通信	522
12.5	三菱系列变频器的RS-485通信	527
12.5.1	三菱系列变频器RS-485串行通信协议	527
12.5.2	变频器的通信相关参数(通过变频器PU口和PLC通信)	532
12.5.3	FX2N-485-BD与三菱FR-A540	

	变频器的通信接线	533
--	----------	-----

12.5.4	PLC与变频器通信的编程及调试例解	534
12.6	触摸屏与变频器的通信	537
12.6.1	F940GOT的通信端口	537
12.6.2	FREQROL变频器的设置	537
12.6.3	变频器接头规格及电缆图	539
12.6.4	画面创建时的站号指定	540
12.6.5	使用FREQROL系列变频器时的注意事项	540
12.6.6	GOT连接设备的参数设置	546
第13章	变频器、PLC及触摸屏的综合应用	548
13.1	电工、电梯、制冷基本综合应用实例	548
13.1.1	4层货梯控制	548
13.1.2	刨床控制	552
13.1.3	小推车自动控制	557
13.1.4	冷却水泵节能循环运行控制	560
13.1.5	PLC与变频器的RS-485通信控制	566
13.1.6	带编码器的3层电梯控制	570
13.1.7	工业洗衣机程序控制系统	574
13.1.8	恒压供水(多段速度训练)控制	577
13.1.9	中央空调冷冻泵节能运行控制	580
13.1.10	触摸屏与变频器的通信控制	583
13.2	电工、制冷、电梯专业综合应用实例	585
13.2.1	PLC电镀生产线定位控制系统	585
13.2.2	PLC零件数控加工控制系统	587
13.2.3	Q系列PLC工业现场网络总线控制	589
13.2.4	恒压供水系统	592
13.2.5	负压气动机械手控制	609
13.2.6	负压恒值控制	615
13.2.7	中央空调智能化控制系统	620
13.2.8	电梯的群控	634
	参考文献	646

第 1 篇 变频器

第 1 章 调速传动

变频调速是现代高新技术的综合应用，它是调速传动历史的一次飞跃。

1.1 调速传动的概况

1.1.1 调速传动的意义

众所周知，所有的生产机械、运输机械在传动时都需要调速。首先，机械在起动时，根据不同的要求需有不同的起动时间，这就要求有不同的起动速度相配合；其次，机械在停止时，由于转动惯量的不等，所以自由停车时间也各不相同，为了达到人们所需求的停车时间，就必须在停车时采取一些调速措施，以满足对停车时间的要求；第三，机械在运行当中，根据不同的情况也要求进行调速，例如，风机、泵类机械为了节能，要根据负载轻重进行调速；机床加工，根据工件精度的不同要求进行调速；运输机械要提高生产率需要进行调速；电梯为提高舒适度也需要进行调速；生产过程为了提高控制要求，必须进行闭环速度控制等。总之，所有机械传动都需要进行调速。

1.1.2 调速传动的发展

调速传动在以蒸气源为主时，只能采用蒸气式机械调速传动。但因其效率低、单位输出功率的重量大。所以在很多场合自内燃机（柴油机或汽油机）出现后，其调速传动功能便被代替，然而其效率仍然较低，不过由于单位输出功率的重量小，机械体积小，所以在不便使用电源的地方（如汽车上、船舶上），仍采用内燃机调速传动。

自从电出现以后，因其输送容易、使用方便、维修简单、效率高，所以电动调速传动得到迅速发展。一开始是直流电动机调速传动，但由于直流电动机维修较难，且容量受限，所以交流电动机调速传动又得到了很快的发展。然而在很长时间内交流电动机调速性能远不如直流电动机调速性能好，故直流电动机调速传动在调速性能要求很高的地方仍被采用。

最近十多年来，由于电力电子器件与微电子、单片机及 PWM 控制技术的迅猛发展，出现了交流电动机变频调速传动，其效率较高、操作方便，而且调速性能可以与直流电动机调速传动相媲美，所以交流变频调速传动是目前最好的调速传动方式。

1.1.3 调速传动的运动方程式

调速传动系统中旋转运动时，其旋转运动的方程式为

$$T - T_Z = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-1)$$

式中 T ——驱动转矩 ($N \cdot m$)；

T_Z ——负载转矩，即阻转矩 ($N \cdot m$)；

$J d\omega/dt$ ——惯性转矩 ($N \cdot m$)；

ω ——电动机的角速度 (rad/s);

J ——折算到电动机轴上的总转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$), 由式 (1-2) 表示

$$J = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-2)$$

式中 G ——旋转部分的重量 (N);

D ——惯性体直径 (m);

g ——重力加速度, $g = 9.81\text{m/s}^2$ 。

将式 (1-1) 中的角速度 ω (rad/s) 变为用转速 n (r/min) 表示, 即

$$\omega = 2\pi n/60 \quad (1-3)$$

将式 (1-2) 和式 (1-3) 代入式 (1-1) 中, 则有

$$T - T_z = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-4)$$

调速传动系统中旋转运动时, 工作状态可由运动方程式 (1-4) 表示。

① 当 $T = T_z$, $dn/dt = 0$, 拖动系统处于静止或等速运动状态, 电气传动系统处于稳定运转状态即稳定状态。

② 当 $T > T_z$, $dn/dt > 0$, 传动系统处于加速状态, 即处于过渡过程 (也叫动态过程)。

③ 当 $T_1 < T_z$, $dn/dt < 0$, 传动系统处于减速状态, 也处于过渡过程。

由运动方程式可知, 传动系统可能处于两种运转状态, 即稳态和动态。当传动系统由一个稳定运转状态变化到另一个稳定运转状态时, 需要一个变化过程, 这个过程称为过渡过程。在过渡过程中, 调速传动系统中的转速、转矩和电流都按一定的规律变化。

1.1.4 调速传动的主要指标

1) 调速范围: 最高转速与最低转速之比;

2) 调速的平滑性: 在调速范围内, 以相邻两挡转速的差值为标志, 差值越小越平滑;

3) 调速的工作特性: 工作特性又有两个方面, 静态特性和动态特性。静态特性主要是调速后机械特性的硬度。对于绝大多数负载来说, 机械特性越硬, 则负载变化时, 速度变化越小, 工作越稳定。所以希望机械特性越硬越好。动态特性即暂态过程中的特性, 主要指标有两个方面: 升速 (包括起动) 和降速 (包括制动) 过程是否快捷而平稳; 当负载突然增、减与电压突然变化时, 系统的转速能否迅速地恢复。

4) 调速的经济性: 主要从设备投资、调速后的运行效率和调速系统的故障率 3 个方面进行考虑。

1.1.5 调速传动中的生产机械负载转矩特性

生产机械的负载转矩特性为 $T = f(n)$ 。根据统计, 大多数生产机械的负载转矩特性可以归纳为以下 4 种类型。

1) 恒转矩负载特性: 指负载转矩 T_z 与转速 n 无关的特性, 当转速变化时, 负载转矩 T_z 保持恒值。例如, 起重机提升一定重物或带式输送机输送一定货物时的阻转矩, 都可以看成负载转矩与转速无关, 这种生产机械的负载为恒转矩负载, 属于这类机械的还有电梯、印刷机等。

2) 与转速成线性关系的负载特性: 指负载转矩 T_z 的大小与转速 n 成正比, 且成线性关系, 即 $T_z = Kn$ 。例如, 一台异步电动机拖动一台他励直流发电机对加热炉供电, 作为电动机

负载的他励直流发电机即具有此负载特性。

3) 通风机负载特性: 该类负载转矩 T_Z 基本上与转速 n 的二次方成正比, 即 $T_Z = Kn^2$ 。属于通风机负载的生产机械有通风机、水泵、油泵等, 一般来说空气、水、油等介质对机器阻力基本上都是和转速的二次方成正比。

4) 恒功率负载特性: 它是指机床在粗加工时切削量大、切削阻力大, 此时需低速; 而在精加工时, 切削量小、切削阻力小, 往往需高速。因此, 在不同转速下, 负载转矩基本上与转速成反比, 即 $T_Z = K/n$, 因为转矩与转速的乘积是功率, 所以功率是基本恒定的, 即恒功率负载。

1.2 直流电动机调速传动

1.2.1 直流电动机的工作原理

为方便起见, 现以他励直流电动机为例进行分析。

图 1-1 表示一台直流电动机模型。

在定子的主磁极 1 上装有励磁绕组 2, 当绕组 2 通一直流电流 I_f 时, 就在空间产生一个固定方向的主磁通 Φ_M 。转子是一个用导磁材料做成的圆柱体 (也称电枢铁心), 在电枢铁心 3 上放置了一组电枢绕组, 当电枢绕组通过换向器 4 与外部直流电源相连接时, 通电的导体在固定的磁通作用下就产生旋转力。又由于电枢绕组的电流 I_a 是经过集电环电刷组成的换向器通入的, 所以绕组的电流方向也是固定不变的。因此, 产生的转矩方向也不变, 转子就始终沿一个方向旋转。

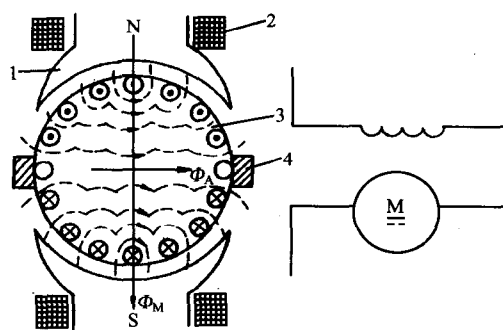


图 1-1 直流电动机模型

1—磁极 2—励磁绕组 3—铁心 4—换向器

1.2.2 直流电动机的电枢反应及对策

由于电枢电流 I_a 也要在空间产生一个磁通 Φ_A (称为副磁通)。因电枢电流 I_a 方向不变, 所以该磁通方向也不变, 而副磁通 Φ_A 方向与主磁通 Φ_M 方向互差 90° , 副磁通 Φ_A 和主磁通 Φ_M 在空间的合成磁通就发生了很大变化, 也就是说电枢电流对主磁通影响很大, 我们称这种现象为电枢反应。电枢反应一方面使气隙磁通发生畸变, 另一方面对主磁通有去磁作用, 致使电动机无法正常工作。为了消除电枢反应的不良影响可增加补偿绕组。补偿绕组嵌放在主极靴上专门冲出的槽内, 其产生的磁通 Φ_c 与电枢绕组产生的副磁通 Φ_A 刚好抵消。

1.2.3 直流电动机的电磁转矩

当直流电动机通电后, 电枢绕组就有电流通过, 电枢绕组在磁场中就受到磁力的作用, 这个力对转轴所产生的转矩就叫电磁转矩。

根据电磁力的定律, 已知磁场密度 B 、导体长度 l 、导体电流 i , 则导体产生的电磁力为

$$f = Bli \quad (1-5)$$

设电枢直径为 D , 则一根导体的电磁转矩 T_x 为

$$T_x = Bli \frac{D}{2} \quad (1-6)$$

式中 i ——一条支路的电流，它与电枢总电流 I_a 的关系为

$$i = \frac{I_a}{2a} \quad (1-7)$$

式中 a ——电枢的支路数目。

又因电枢绕组全部导体数 N 等于每一个磁极内的导体数 N_τ 乘以总磁极数 $\pi D / (2p\tau)$ ，所以，一个磁极内的导体数

$$N_\tau = \frac{2p_n N \tau}{\pi D} \quad (1-8)$$

式中 τ ——电动机极距；

p_n ——电动机磁极对数。

则一个极距内的电磁转矩 T 为

$$T = T_X N_\tau = \frac{p_n N}{2a\pi} Bl\tau I_a \quad (1-9)$$

对某一电动机来讲， $p_n N / (2a\pi)$ 为一常数，用转矩常数 C_T 来表示。

对某一电动机来讲， $Bl\tau$ 为每一磁极下的总磁通，用 Φ 表示，所以式 (1-9) 可以写为

$$T = C_T \Phi I_a \quad (1-10)$$

式中 T ——电磁转矩 (N·m)；

I_a ——电枢电流 (A)；

Φ ——经补偿后的磁通 (Wb)。

1.2.4 直流电动机的调速方法

在分析直流电动机的调速方法之前，首先应对直流电动机的电压、电动势、转矩、磁通、转速之间的关系进行分析。

直流电动机的电压、电动势、转矩、磁通、转速之间的关系如图 1-2 所示。

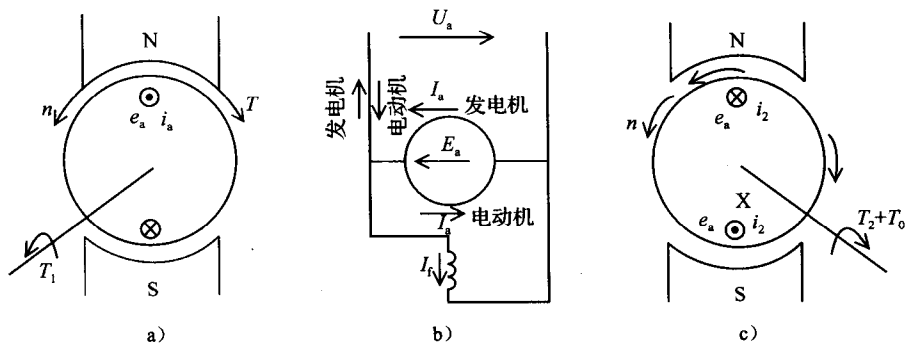


图 1-2 直流电动机电动势与转矩

a) 发电机 b) 电动势和电流的方向 c) 电动机

当外力拖动电枢转动时，发电机 $E_a > U_a$ ；当外加直流电压加于电枢绕组后，根据 $T = C_T \Phi I_a$ ；理论上就会产生转矩，电枢就要旋转，称为电动机，同时电枢导体切割气隙磁力线就会产生感应电动势 E_a ，很明显 $E_a < U_a$ 。其大小可用式 (1-11) 表示

$$E_a = C_e n \Phi \quad (1-11)$$

式中 E_a ——电枢电动势 (V)；

C_e ——电动势常数;

n ——转速 (r/min);

Φ ——磁通 (Wb)。

从式 (1-11) 说明, 电动势与转速和每极磁通的乘积成正比。

从图 1-2 中, 可以分析出直流电动机的电压平衡方程式为

$$U = E_a + I_a R_a \quad (1-12)$$

将式 (1-11) 代入式 (1-12) 即可得出转速公式

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} \quad (1-13)$$

从式 (1-13) 中可以分析得出, 直流电动机调速的方法有 3 种:

调电枢电压 U 、调电枢电阻 R_a 、调磁通 Φ 。

1.2.5 直流电动机的调速特性

所谓直流电动机的调速特性是指电动机在电枢电压、励磁电流, 电枢总电阻为一定的条件下, 电动机转速和电磁转矩的关系曲线 $n=f(T)$ 。又由于 $T=C_T \Phi I_a$, 当 Φ 恒定时, 就可以认为 $n=f(T)$ 的关系也就是 $n=f(I_a)$ 的关系。

对式 (1-13) 进行分解也可以证明这一点。

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I_a R_a}{C_e \Phi} \quad (1-14)$$

其中, 令 $\frac{U}{C_e \Phi} = n_0$

称 n_0 为电动机理想空载转速, 即 $I_a=0$ 的转速公式;

$$\text{令 } \frac{I_a R_a}{C_e \Phi} = \Delta n$$

称 Δn 为电动机带负载后的转速降。所以式 (1-14) 可以改写为

$$n = n_0 + \Delta n \quad (1-15)$$

1. 自然机械特性

所谓自然机械特性是当电动机的工作电压和磁通均为额定值, 电枢电路中没有串入附加电阻时的机械特性, 根据式 (1-14) 画出图 1-3 所示的自然机械特性。从图中可看出, 随着负载电流 I_a 的增加, 转数略有下降, 固有的自然机械特性比较硬。

2. 电枢串电阻的人为机械特性

用调速公式表示就是

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{I_a (R_a + R_i)}{C_e \Phi_N} \quad (i=1, 2, \dots) \quad (1-16)$$

即电压与励磁电流都是额定值, 只改变 R_i , R_i 为电枢外加电阻。

机械特性如图 1-3 所示。它是一组通过 n_0 点且具有不同斜率的直线, 与自然机械特性相比, 同样的负载电流随着附加电阻 R_i 增加, 转速降就增大。当 R_i 不变, 随着负载电流 I_a 的增加, 转速降也增大, 这种特性很软。该调速方法有两个缺点:

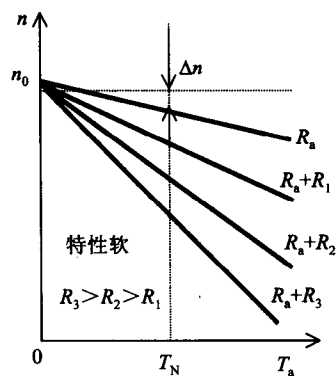


图 1-3 改变电枢电阻特性

第一, 浪费电能, 其值为 $I_a^2 R_f$; 第二, 随着负载增加转速下降较快。但是在小容量电动机不易调压情况下常采用此方法调速。

3. 改变电枢电压的人为机械特性

当 $\Phi = \Phi_N$ 、 R_a 为电动机固有内阻时, 特性方程的关系式为 $n = f(U)$, 如图 1-4 所示。

由于电动机的工作电压以额定电压为上限, 因此电压在改变时, 只能在低于额定电压的范围内变化, 与自然机械特性曲线相比, 特性曲线斜率不变。理想空载转速 n_0 随电压减小成正比地减小, 从图 1-4 看出, 改变电压时的人为机械特性曲线是一组低于自然机械特性而与之平行的直线。此种调速方法的特点是特性硬、转速降不随负载变化而变化。当电压可以随意平滑调节时, 转速就可以实现无级调速。显然这是一种在额定转速以下调速的最好方法。

4. 减磁通时的人为机械特性

减磁通可以通过在励磁回路中串接电阻或降低励磁电压来实现。此时 $U = U_N$, R_a 为电动机固有内阻, 如 $I_a = I_K$, I_K 为堵转电流。即 $n = (U - I_a R_a) / (C_e \Phi) = 0$, 此时 $I_a = I_K = U_N / R_a$ 为定值, $n = f(\Phi)$ 的关系如图 1-5 所示。

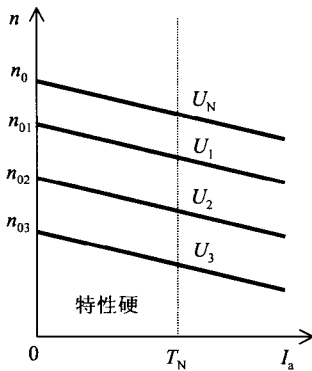


图 1-4 改变电枢电压特性

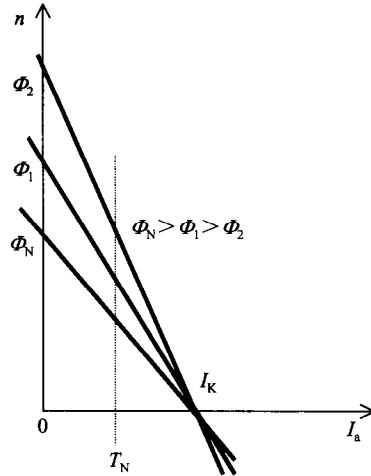


图 1-5 改变磁通特性

根据 $n_0 = U_N / (C_e \Phi)$ 公式可知, Φ 的减少使同步转速成反比增大, 因此 $n = f(\Phi)$ 人为机械特性是一组通过横坐标 $I = I_K$ 点的直线, 磁通越小, 特性的硬度越小。这是因为当 Φ 特别小时, 随着负载电流 I_a 的增加其转速降 $\Delta n = I_a R_a / (C_e \Phi)$ 也增大很多, 因此这种方法较少采用。只有在额定转速以上调速时才采用此调速方法。

1.2.6 直流电动机的起动、调速与制动

由于直流电动机的励磁电流 I_f 与负载电流 I_a 是两个互相无干扰的独立量, 所以起动、调速与制动都非常方便。起动时首先 I_f 足够大使 $\Phi = \Phi_N$, 然后慢慢调节直流电压, 使转速平稳地上升并稳定在所需的转速上运行。要制动时, 只需逐步降低电压到低速时, 断开直流电源进入动力制动, 也可根据需要采取发电反馈制动。特别要强调指出的是, 当转速等于零时, 才能停止励磁电流 I_f , 以防飞车。

直流电动机的调速性能好, 但由于直流电动机构造复杂、故障多, 又由于换向器所限, 电动机容量不能太大, 适应不了生产的需要和环境的需求, 所以直流电动机调速传动的发展