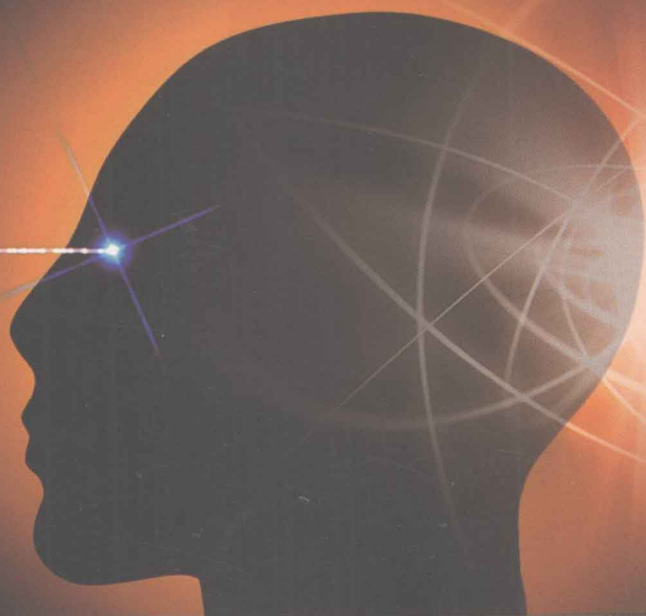


人才教育培训丛书

电/气/智/能/化/技/术/系/列/教/材

主编 梁庆保

变频器、可编程序控制器、 触摸屏及组态软件 综合应用技术



岳庆来 吴启红 唐山 杨远升 赵修汉 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高技能人才教育培训丛书 电气智能化技术系列教材 主编 梁庆保

变频器、可编程序控制器、 触摸屏及组态软件综合 应用技术

岳庆来 吴启红 唐山 杨远升 赵修汉 编著

周 锋 审

机械工业出版社

本书从推广综合应用技术的角度出发,在阐述变频器、可编程序控制器、触摸屏及组态软件基本知识的基础上,重点介绍变频器、可编程序控制器、触摸屏与组态软件在实践中综合技术应用。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》的实操考核要求,对技能操作进行了详细叙述。

本书为机电类技师和电气智能化工程师教育培训教材,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、电气技术及其相关专业的参考教材,还可作为广大工程技术人员和技能操作人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

变频器、可编程序控制器、触摸屏及组态软件综合应用技术/岳庆来,吴启红等编著. —北京:机械工业出版社,2012.7

高等技能人才教育培训丛书 电气智能化技术系列教材

ISBN 978-7-111-38697-1

I. ①变… II. ①岳…②吴 III. ①变频器—技术培训—教材②可编程序控制器—技术培训—教材③触摸屏—技术培训—教材④过程控制软件—技术培训—教材 IV. ①TN773②TM571.6③TP334.1④TP317

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第120888号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:罗莉 责任编辑:罗莉

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:赵颖喆 责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·31.25印张·871千字

0 001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-38697-1

定价:69.90元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

高技能人才教育培训丛书系列教材 编委会名单

主任：梁庆保

副主任：李长虹 黄煜奎 俞益飞 张彦礼 郑 锋 罗成波
王晟磊 于东方 曹修兵

顾问：马 阳 岳庆来

编委：张自忠 彭海虹 高南岗 周 锋 肖明耀 吴启红
阮友德 朱金根 李文群 乔建伟 杨远升 邹少明
唐 山 鲍海龙 李 磊 李小平 魏 勇 贾俊林
孟小威 刘振鹏 刘俊龙 王跃军 范良平 王金平
王 阳 王齐炯 江新河 余 富 赵修汉 杨 波
刘保亮 高含林 葛红霞 周治湘 黄伟雄 王木林
赖忠旺 唐 佳 邓 松 杨水昌 宋志刚 陈铁俭
肖 辉 代建军 林启德 贺鹏麟

序

胡锦涛总书记指出：没有一流的技工，就没有一流的产品。

高技能人才是我国人才队伍的重要组成部分，是各行各业产业大军的优秀代表，是技术队伍的核心骨干，在加快产业优化升级、提高企业竞争力、推动技术创新和科技成果转化等方面具有不可替代的重要作用。

我国现阶段走的是新型工业化道路，它突出的特点是以智能化、信息化、网络化来带动工业化，振兴装备制造业。显而易见，这就需要一大批新型高技能人才，这些人才不仅具有传统的“手艺”和“绝活”，更重要的是经过系统技能教育和培训，掌握现代化理论知识，并具有高超动手操作能力、突出创造革新能力的技能与智能兼备的复合型高技能人才。当前一部分大学毕业生由于动手能力还不能满足企业需求而处于就业难的状态，不少在职的老技术工人也由于年龄、经济条件、工作环境等原因而失去技能更新的机会也陷入半失业甚至失业的状态。新型高技能人才严重短缺，已成为制约经济社会发展和阻碍产业升级的“瓶颈”。因此，加强高技能人才的培养是摆在我们面前迫在眉睫的任务。

高技能人才教育培养要适应现代产业发展的需要，不能照搬旧有的培养模式，而必须创新，这就要坚持以就业为导向、以全面素质培养为基础、以能力为本位，把提高受教育者的职业能力放在首要位置。

本系列教材借鉴国际国内的先进教育理念进行教材的编写，力求将先进的“任务引领型一体化训练模式”加以引入并运用，即以实际工程项目和工作任务为引领，并将其分解成若干个子任务进行系统培训，力求将同一任务的理论课与实训课在同一实训室或企业真实环境由同一位教师带领学员共同完成。训练则要求是：理论知识够用即可，突出职业能力的训练和养成，要求每个技能任务必须是个人可独立完成的实际工程项目。

为开发与“任务引领型一体化训练模式”相适应的培训教材，我们精心组织了企业实战专家、院校经验丰富的教师和相关工程技术人员编写了楼宇智能管理师、可编程序控制系统设计师、嵌入式系统设计师、物联网系统设计师和电气智能化技术五大系列高技能人才教育培训教材，力求为高等院校、行业企业和社会培训机构提供更加实用的高技能人才培养的参考用书。但由于现代科学技术高速发展，也囿于编写人员的业务水平有限以及时间仓促等因素的制约，本系列教材难免有错漏之处，恳求广大读者及专业人士指正，一并表示衷心感谢！

编委会主任 梁庆保
2012年元月9日

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，可编程序控制器技术在工业自动化、机电一体化、传统产业技术改造等方面应用非常广泛，成为现代工业四大支柱之一。

随着电力电子技术的飞速发展，变频器从功能到容量也得到更大的发展。从工厂设备到家用电器中都得到大量使用，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。目前，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、建材及机械行业大量地应用，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。触摸屏已广泛地应用于工业、民用、国防等各项领域。

组态软件是完成系统硬件与软件沟通、建立现场与监控层沟通的人机界面的软件平台，成功地应用在工业自动化各个领域。由组态软件构建工业控制系统，既提高了系统的成套速度，又保证了系统软件的成熟性和可靠性，使用起来方便灵活，而且便于修改和维护。

近年来，变频器、可编程序控制器、触摸屏等设备以及组态软件技术在工业控制中的综合应用，使工业控制如虎添翼。但是，实际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和技术参考。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、触摸屏及组态软件综合应用技术》一书。

本书从推广综合应用技术角度出发，在阐述变频器、可编程序控制器、触摸屏以及组态软件基本知识的同时，又介绍变频器、可编程序控制器及触摸屏的综合技术运用。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》的实操考核内容和要求，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、触摸屏和组态软件的基本知识，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、7、8、9、11、13.1~13.2.5由吴启红编写，唐山和赵修汉共同编写了第13章中的13.2.6~13.2.7部分，第10章由吴启红和杨远升共同编写，全书由吴启红完成统稿、插图。系列教材主编梁庆保对本书的内容安排及章节结构进行了统筹指导。

本书为机电类技师和电气智能化工程师培训教材，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和技能操作人员的参考资料。

囿于时间仓促和编者水平有限，书中的缺点和不足之处在所难免，敬请读者批评指正。请将意见和建议发至 qhongw@126.com，不胜感谢！

编 者
2012 年 1 月于深圳

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 直流电动机的起动、调速与制动	6
1.3 异步电动机的调速传动	6
1.3.1 三相异步电动机的工作原理	6
1.3.2 异步电动机的电磁转矩及自然机械特性	7
1.3.3 异步电动机的调速方法	11
1.3.4 异步电动机的调速特性	12
1.4 三相笼型异步电动机的变频调速传动	16
1.4.1 三相笼型异步电动机变频调速的工作原理	16
1.4.2 三相笼型异步电动机变频调速时的转矩特性	18
1.5 三相笼型异步电动机高动态性能矢量控制变频调速	21
1.5.1 矢量控制的概念	21
1.5.2 等效的异步电动机物理模型	22
1.5.3 三相异步电动机矢量变换控制的构想	22

1.5.4 坐标转换及空间矢量	23
1.6 三相永磁同步电动机的变频调速传动	25
1.6.1 三相永磁同步电动机的发展过程	25
1.6.2 永磁同步电动机的结构和变频调速传动基本原理	25
1.6.3 永磁同步电动机变频调速直接驱动伺服系统	26
第 2 章 电力电子器件	31
2.1 概述	31
2.1.1 电力电子器件的发展	31
2.1.2 电力电子器件的分类	31
2.2 双极型晶体管 (BJT)	32
2.2.1 BJT 的发展	32
2.2.2 BJT 的特点	33
2.2.3 BJT 的工作特性	34
2.2.4 BJT 的驱动	35
2.2.5 BJT 的主要参数	35
2.2.6 BJT 的二次击穿现象与安全工作区	36
2.2.7 BJT 的保护	37
2.2.8 BJT 的选择	39
2.3 MOS 场效应晶体管 (MOSFET)	41
2.3.1 MOSFET 的特点	41
2.3.2 MOSFET 的结构与工作原理	41
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	48
2.5 门极关断 (GTO) 晶闸管	49

2.5.1	GTO 的关断机理	49	3.9.2	有速度传感器的转速或转矩闭环 矢量控制	91
2.5.2	GTO 的电特性	50	3.9.3	电动汽车矢量控制	92
2.5.3	GTO 的主要参数	51	3.10	智能型变频器	94
2.5.4	GTO 的发展方向	52	3.11	单相电容分相式电动机的变频 调速	96
2.5.5	GTO 的驱动	53	3.11.1	单相电容电动机的工作原理	96
2.6	MOS 门场控晶闸管 (MCT)	55	3.11.2	单相电容电动机变频调速器控制 系统	97
2.7	智能电力集成电路 (SPIC)	57	3.11.3	单相电容电动机变频调速系统的 实现	98
第 3 章	变频器	60	3.11.4	输出电流波形	98
3.1	变频器的发展	60	3.12	采用数字控制芯片的变频器	99
3.1.1	异步电动机调速过程	60	3.12.1	概述	99
3.1.2	变频器技术发展动向	60	3.12.2	控制电动机专用芯片	100
3.2	交流变频系统的基本形式	63	3.12.3	多 CPU 控制	104
3.2.1	交-交变频系统	63	3.13	直接转矩控制的变频器	106
3.2.2	交-直-交变频系统形式	65	3.13.1	PWM 逆变器输出电压的矢量 表示	106
3.3	变频器的构成	65	3.13.2	磁通轨迹控制	108
3.3.1	主电路	65	3.13.3	直接转矩控制实际结构	109
3.3.2	控制电路	66	3.14	变频器控制方式综述	110
3.4	通用变频器的分类	66	3.14.1	非智能控制方式	110
3.4.1	按直流电源的性质分类	66	3.14.2	智能控制方式	111
3.4.2	按输出电压调节方式分类	67	3.14.3	变频器控制的展望	111
3.4.3	按控制方式分类	69	第 4 章	FR - A540 变频器的操作	113
3.4.4	按主开关器件分类	70	4.1	变频器的接线	113
3.5	通用变频器中的整流器	71	4.1.1	主回路接线及注意事项	114
3.5.1	二极管整流器	71	4.1.2	控制回路接线及注意事项	115
3.5.2	PWM 整流器	74	4.2	操作面板	119
3.6	变频器中的逆变器	75	4.2.1	操作面板 (FR - DU04) 的名称和 功能	119
3.6.1	逆变器的类型	75	4.2.2	操作面板的使用	120
3.6.2	PWM 逆变电路	77	4.3	运行操作方式	125
3.6.3	由 SPWM 逆变器组成的变频器	80	4.3.1	运行操作方式的选择	125
3.7	变频器中的制动	80	4.3.2	PU 运行操作方式 (Pr. 79 = 0、1)	126
3.7.1	动力制动	81	4.3.3	外部运行操作方式 (Pr. 79 = 2)	126
3.7.2	回馈制动	81	4.3.4	组合运行操作方式 1 (Pr. 79 = 3)	127
3.7.3	直流制动	82	4.3.5	组合运行操作方式 2 (Pr. 79 = 4)	128
3.7.4	采用共用直流母线的多逆变器 传动	83			
3.8	通用变频器的 U/f 控制	84			
3.8.1	普通功能型 U/f 控制通用 变频器	84			
3.8.2	高功能型 U/f 控制通用变频器	85			
3.9	通用变频器矢量控制	90			
3.9.1	无速度传感器矢量控制的速度 调节	91			

4.4 参数及参数功能·····	128	7.1.6 PLC的发展趋势·····	191
4.4.1 参数表·····	128	7.2 PLC的组成与工作原理·····	192
4.4.2 常用参数分类·····	130	7.2.1 PLC的硬件组成·····	192
4.4.3 常用参数功能简述·····	131	7.2.2 PLC的软件组成·····	201
4.5 应用实例·····	135	7.2.3 PLC的工作原理·····	203
4.5.1 输出频率跳变·····	135	7.3 FX系列PLC的简介、基本指令与 步进指令·····	206
4.5.2 多段速度·····	136	7.3.1 FX系列PLC简介·····	206
4.5.3 程序运行·····	138	7.3.2 FX2N系列PLC的软元件及地址 分配·····	210
4.5.4 PID控制·····	141	7.3.3 FX2N系列PLC的基本指令·····	219
4.5.5 工频电源切换·····	146	7.3.4 FX2N系列PLC的步进控制指令·····	226
4.6 故障处理·····	150	7.4 FX2N系列PLC的功能指令·····	229
4.6.1 常见故障代码·····	150	7.4.1 功能指令通则·····	229
4.6.2 故障处理对策·····	153	7.4.2 程序流控指令(FNC00 ~ FNC09)·····	231
第5章 变频器的应用技术 ·····	156	7.4.3 传送和比较(FNC10 ~ FNC19)·····	234
5.1 前言·····	156	7.4.4 四则运算及逻辑运算(FNC20 ~ FNC29)·····	237
5.2 变频器在恒压供水节能方面的应用 技术·····	157	7.4.5 循环移位与移位(FNC30 ~ FNC39)·····	239
5.3 交流永磁同步电动机变频调速应用 技术·····	162	7.4.6 数据处理(FNC40 ~ FNC49)·····	240
5.3.1 电梯运行状态·····	162	7.4.7 方便指令(FNC60 ~ FNC69)·····	242
5.3.2 电梯双PWM变频节能运行·····	162	7.4.8 外部I/O设备(FNC70 ~ FNC79)·····	243
5.3.3 交流永磁同步电动机变频调速 优点·····	165	7.4.9 FX2N系列PLC外部设备(FNC80 ~ FNC89)·····	246
5.4 省力化、自动化及提高生产率方面 的应用技术·····	166	7.4.10 实时时钟处理(FNC160 ~ FNC169)·····	253
5.5 提高质量方面·····	168	7.4.11 触点式比较指令(FNC220 ~ FNC249)·····	256
5.6 其他方面·····	171	第8章 可编程序控制系统设计 ·····	259
第6章 变频器的选择、安装、调试与 维护 ·····	173	8.1 PLC系统的设计·····	259
6.1 变频器的选择·····	173	8.2 PLC的选型·····	260
6.2 变频器的安装·····	175	8.3 程序(软件)设计的步骤·····	261
6.3 变频器的调试·····	181	8.4 程序设计方法·····	261
6.4 变频器的维护·····	182	8.5 常用基本环节的编程·····	263
第2篇 可编程序控制器(PLC)		8.5.1 延时电路·····	263
第7章 PLC的工作原理与指令系统 ·····	188	8.5.2 闪光电路·····	264
7.1 概述·····	188	8.5.3 单按钮起停控制电路·····	266
7.1.1 引言·····	188	8.5.4 开机累计时间控制电路·····	267
7.1.2 PLC的定义及特点·····	189	8.5.5 电梯轿厢位置显示控制电路·····	267
7.1.3 PLC的分类·····	190		
7.1.4 PLC的性能·····	190		
7.1.5 PLC的应用领域·····	191		

8.5.6 比较电路	273	10.7 曲线	330
8.5.7 采样电路	275	10.7.1 实时趋势曲线	330
8.5.8 选择性电路	276	10.7.2 历史趋势曲线	333
第9章 三菱FX系列PLC的特殊功能		10.7.3 在画面上放置温控曲线	341
模块	277	10.8 报警和事件系统	343
9.1 模拟量输入/输出模块	277	10.8.1 报警系统	343
9.1.1 概述	277	10.8.2 事件类型及使用方法	346
9.1.2 普通A/D输入模块	278	10.9 配方管理	347
9.1.3 FX2N-4AD-PT温度输入		10.9.1 概述	347
模块	283	10.9.2 组态王中的配方管理	347
9.1.4 FX2N-2DA输出模块	286	10.9.3 使用配方	350
9.2 通信接口模块	291	10.10 组态网络功能	353
9.2.1 概述	291	10.10.1 概述	353
9.2.2 FX2N-232BD通信接口模块		10.10.2 网络配置	355
简介	291	10.10.3 远程变量的引用	360
9.2.3 FX2N-485BD通信接口模块			
简介	295	第3篇 触摸屏	
9.2.4 FX2N-422BD通信接口模块		第11章 MELSEC-GOT触摸屏	363
简介	298	11.1 触摸屏概述	363
9.2.5 FX2N-232IF通信接口模块		11.1.1 触摸屏的工作原理	363
简介	298	11.1.2 触摸屏的主要类型	363
第10章 组态软件控制技术	299	11.2 触摸屏工程创作软件GT Designer2	
10.1 工业组态软件的概述	299	(中文版)的使用	367
10.2 组态王软件的入门	300	11.2.1 软件概述	367
10.2.1 组态王软件的安装	300	11.2.2 GT Designer2软件安装	368
10.2.2 组态王软件结构	300	11.2.3 触摸屏工程创建	368
10.2.3 组态工程制作一般的过程	301	11.2.4 工程设计软件的使用	370
10.3 组态王软件系统软件一般设计	303	11.2.5 菜单工具的使用	371
10.3.1 工程建立	304	11.2.6 数据的传输	375
10.3.2 配置硬件设备	304		
10.3.3 添加工程变量	307	第4篇 综合实际应用	
10.3.4 制作图形画面	309	第12章 变频器、PLC及触摸屏间的网络	
10.4 动画连接	311	数据通信	378
10.4.1 概述	311	12.1 数据通信基础	378
10.4.2 动画动作连接	312	12.1.1 数据通信方式	378
10.4.3 实例连接	321	12.1.2 数据传输方向	382
10.5 组态王的命令语言	323	12.1.3 传输介质	382
10.5.1 命令语言类型	323	12.1.4 串行通信接口标准	383
10.5.2 用户自定义函数	325	12.2 工业局域网基础	388
10.5.3 命令语言语法	328	12.2.1 概述	388
10.5.4 命令语言及控制程序编写	328	12.2.2 局域网的四大要素	388
10.6 组态王的运行	329	12.2.3 局域网的选型考虑	390

12.3 三菱 PLC 的网络通信	391	13.1 电工、电梯、制冷基本综合应用	
12.3.1 网络概要	391	实例	424
12.3.2 以太网	392	13.1.1 4 层货梯控制	424
12.3.3 ELSECNET/10 局域令牌网	393	13.1.2 刨床控制	428
12.3.4 ELSECNET/H 局域令牌网	393	13.1.3 小推车自动控制	433
12.3.5 CC-Link 开放式现场总线	394	13.1.4 冷却水泵节能循环运行控制	436
12.4 FX 系列 PLC 的链接及通信	398	13.1.5 PLC 与变频器的 RS-485 通信	
12.4.1 简易 PLC 间的链接	398	控制	441
12.4.2 并联链接	402	13.1.6 带编码器的 3 层电梯控制	445
12.4.3 计算机链接通信	403	13.1.7 工业洗衣机程序控制系统	449
12.5 三菱系列变频器的 RS-485		13.1.8 恒压供水(多段速度训练)	
通信	409	控制	451
12.5.1 三菱系列变频器 RS-485 串行通		13.1.9 中央空调冷冻泵节能运行	
信协议	409	控制	452
12.5.2 变频器的通信相关参数(通过变		13.1.10 触摸屏与变频器的通信控制	456
频器 PU 接口和 PLC 通信)	413	13.2 电工、制冷、电梯专业综合应用	
12.5.3 FX2N-485-BD 与三菱 FR-A540		实例	458
变频器的通信接线	414	13.2.1 PLC 电镀生产线定位控制	
12.5.4 PLC 与变频器通信的编程及调试		系统	458
例解	415	13.2.2 PLC 零件数控加工控制系统	459
12.6 触摸屏与变频器的通信	418	13.2.3 Q 系列 PLC 工业现场网络总线	
12.6.1 F940GOT 的通信接口	418	控制	460
12.6.2 FREQROL 变频器的设置	418	13.2.4 负压气动机械手控制	465
12.6.3 变频器接头规格及电缆图	419	13.2.5 负压恒值控制	469
12.6.4 画面创建时的站号指定	420	13.2.6 Q 系列 PLC 自动化生产线定位控制	
12.6.5 使用 FREQROL 系列变频器时的		实训	471
注意事项	421	13.2.7 三菱 Q 系列 PLC 通过 CC-LINK	
第 13 章 变频器、PLC 及触摸屏的综合		网络控制伺服电动机实训	478
应用	424	参考文献	484

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，是调速传动历史性的一次飞跃。

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，这样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，几乎绝大多数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，蒸气式机械调速传动便被内燃机机械调速传动代替，然而它的效率仍然较低，不过由于单位输出功率的重量小，机械体积小，所以目前在不便于使用电源的地方（如汽车、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。可是在很长一段时期内，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、单片机及脉宽调制（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性能相媲美，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·m）；

T_z ——负载转矩，即阻转矩 ($N \cdot m$)；

$Jd\omega/dt$ ——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 ($kg \cdot m^2$)，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， $g = 9.81 m/s^2$ 。

将式 (1-1) 中的角速度 $\omega(rad/s)$ 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，三种工作状态可由运动方程式 (1-4) 表示。

① 当 $T = T_z$ ， $dn/dt = 0$ ，传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。

也可以说传动系统处于两种运转状态，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、减或电压突然变化时，系统的转速能否迅速地恢复到原值。

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，作为异步电动机负

载的他励直流发电机就具有此类负载特性。

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 (也称为电枢铁心), 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。

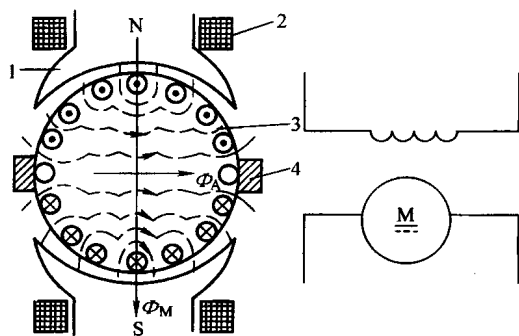


图 1-1 直流电动机模型

1—主磁极 2—励磁绕组 3—电枢铁心 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, 已知磁通密度 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_i 为

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

式中 i ——一条支路的电流, 它与电枢总电流 I_a 的关系为

$$i = \frac{I_a}{2a} \tag{1-7}$$

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_r 乘以总磁极数 $\pi D / (2p_n \tau)$ ，所以，一个磁极内的导体数

$$N_r = \frac{2p_n N}{\pi D} \tag{1-8}$$

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

$$T = T_x N_r = \frac{p_n N}{2a\pi} Blr I_a \tag{1-9}$$

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， Blr 为每一磁极下的总磁通，用 Φ 表示，所以式 (1-9) 可以写为

$$T = C_T \Phi I_a \tag{1-10}$$

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。

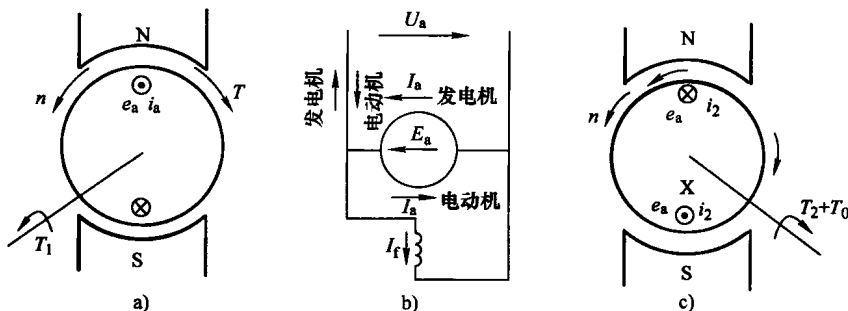


图 1-2 直流电动机电动势与转矩

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，如图 1-2a 所示为发电状态；发电机 $E_a > U_a$ ，如图 1-2b 所示；当外加直流电压加于电枢绕组后为电动机状态，如图 1-2c 所示，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。

$$E_a = C_e n \Phi \tag{1-11}$$

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), 即可得出直流电动机转速公式为

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

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 $U/(C_e \Phi) = n_0$, 称 n_0 为电动机理想空载转速, 即 $I_a = 0$ 的转速公式;

令 $I_a R_a / (C_e \Phi) = \Delta n$, 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电枢电阻为 R_0 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, 转速就会下降, 但固有的自然机械特性还是比较硬的。

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: 第一, 浪费电能, 其值为 $I_a^2 R_i$; 第二, 随着负载增加转速下降较快。但是小功率电动机在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 可看出, 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

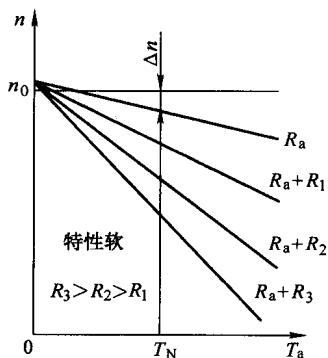


图 1-3 改变电枢电阻特性