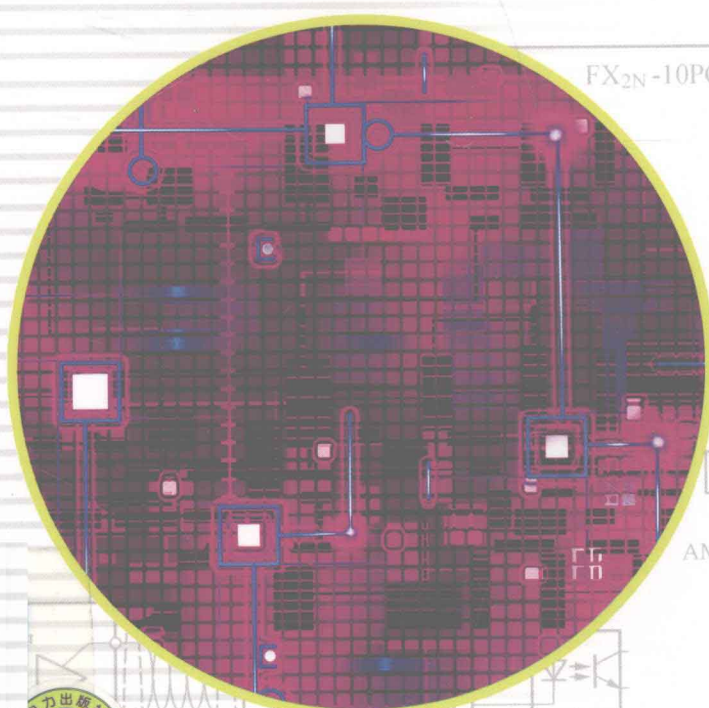


三菱FX系列PLC

控制系统设计与应用实例

张 还 主编 李胜多 副主编



FX2N-10PG



AM26LS 或同等替代件
差分线驱动器
25mA 或更小

屏蔽电缆

CLR+

CLR-



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

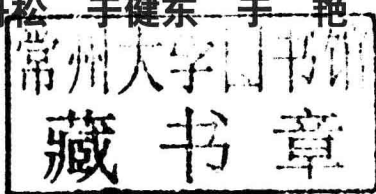
三菱FX系列PLC

控制系统设计与应用实例

张 还 主 编

李胜多 副主编

岳丹松 于健东 于 艳 刘晓红 高春凤 参 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书主要以三菱 FX 系列小型 PLC 及其脉冲发生单元、定位模块为对象,讲述它们在运动控制领域中的应用。通过结合典型的实验实训项目、工程实例,详细介绍基于 PLC 的新型运动控制技术,内容涵盖运动控制技术的最新趋势、三菱 FX 系列 PLC 运动控制应用指令及其功能模块、变频器和伺服放大器基本原理及应用,以及典型的工程实例等。

本书力求向读者介绍可编程序控制器运动控制应用中的普遍性知识,使读者在学习后能够收到举一反三的效果,能够自如地运用可编程序控制器的相关理论和技术方法设计出符合控制要求的基于 PLC 的运动控制系统。本书内容工程性和实践性较强,可供工程技术人员培训和自学使用,也可作为高等院校电气工程、自动化、计算机、电子通信、机械设计、机电一体化等相关专业的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

三菱 FX 系列 PLC 控制系统设计与应用实例/张还主编. —北京:中国电力出版社,2011.3

ISBN 978-7-5123-1505-1

I. ①三… II. ①张… III. ①可编程序控制器-控制系统
IV. ①TM571.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 044476 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 6 月第 1 版 2011 年 6 月北京第一次印刷

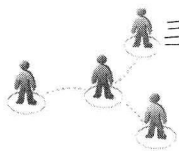
787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.25 印张 287 千字

印数 0001—3000 册 定价 22.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前 言

可编程序控制器 (Programmable Logic Controller, PLC) 是以微处理器为核心的工业自动化控制装置, 被誉为现代工业生产自动化的三大支柱之一。PLC 具有控制功能强、可靠性高、使用灵活方便、易于扩展、兼容性强等一系列优点。它不仅应用于开关量的逻辑控制领域, 而且越来越多地应用于运动控制领域, 实现一些较复杂的数控功能。

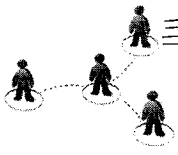
全书共分七章, 主要内容包括运动控制系统概述, 基于 PLC 的运动控制系统的组成, PLC 运动控制功能、应用指令及其功能模块, 变频器和伺服放大器基本原理及应用, 基于 PLC 的空压站变频调速控制系统, 基于 PLC 的机械手模型控制系统, 基于 PLC 和定位模块的数控平台控制系统。书中主要以三菱 FX 系列小型 PLC 及其脉冲发生单元、定位模块为对象, 讲述它们在运动控制中的应用。

本书编写力求深入浅出、注重应用, 具有内容简明、结构严谨、选材合理、应用实例丰富、工程性和实践性较强的特点。本书可作为自动控制、电气、机械等行业技术人员的培训教材和自学用书, 也可作为高等学校自动化、电气工程、计算机、电子信息、机电一体化、机械设计等相关专业的教学参考用书。

在本书编写过程中得到了青岛农业大学机电工程学院领导和许多教师的指导和帮助, 其中刘立山教授提出了许多指导性的意见。本书由张还任主编, 李胜多任副主编, 岳丹松、于健东、于艳、刘晓红、高春风参加编写, 全书由张还统稿。另外, 张后国、唐菊兰、亢军、胡秀英、陈俊东和马新也参与了本书的资料收集和部分插图的绘制工作。同时, 本书的编写参考了较多已出版的论著、教材和相关厂家的技术资料, 在此一并表示感谢! 限于编者水平, 书中难免有疏漏和不足之处, 恳请读者批评指正。

编 者

2011年3月于青岛



目 录

前言

第一章 运动控制系统概述	1
第一节 运动控制的发展概况和组成结构	1
一、运动控制的历史发展概况	1
二、运动控制系统的组成结构	3
三、现代电动机运动控制系统的主要类型	3
第二节 运动控制器的主要构成方案	4
一、PLC的运动控制功能简介	4
二、运动控制器的主要构成方案	5
第三节 运动控制技术的发展趋势	8
第二章 基于 PLC 的运动控制系统的组成	11
第一节 PLC 运动控制系统概述	11
一、脉冲量在 PLC 伺服位置控制系统中的使用	11
二、基于现场总线和网络的 PLC 运动控制系统	13
三、PLC 运动控制系统常见硬件配置结构	14
第二节 运动控制系统中的检测元件	15
一、位置检测元件	15
二、速度和加速度检测元件	22
三、转矩检测元件	25
四、其他常见的检测元件	28
第三节 运动控制系统中的控制器	31
一、FX 系列 PLC 及其运动控制功能简介	31
二、Q 系列 PLC 及其运动控制功能简介	32
第四节 运动控制系统中常见的执行元件和装置	33
一、变频器	33
二、步进电动机	33
三、直流伺服电动机	38
四、交流伺服电动机	39

第三章 PLC 运动控制功能、应用指令及其功能模块	43
第一节 PLC 基本单元的运动控制功能和应用指令	43
一、FX 系列 PLC 基本单元的脉冲输出和高速计数功能	43
二、FX 系列 PLC 运动控制相关应用指令简介	44
第二节 脉冲发生单元	53
一、脉冲发生单元 FX _{2N} -1PG	54
二、脉冲发生单元 FX _{2N} -10PG	68
第三节 定位控制模块	75
一、三菱 FX 系列定位控制模块简介	75
二、定位控制模块 FX _{2N} -10GM	76
三、定位控制模块 FX _{2N} -20GM	85
四、定位控制模块的使用和编程	86
五、定位控制模块编程示例	94
六、可视化定位控制模块编程软件 VPS 简介	99
七、凸轮控制模块 FX _{2N} -1RM-E-SET 简介	105
第四章 变频器和伺服放大器基本原理及应用	107
第一节 变频器基本原理和应用技术	107
一、变频调速原理概述	107
二、三菱 FR-A700 系列变频器使用简介	112
第二节 伺服放大器基本原理和应用技术	122
一、伺服控制系统概述	122
二、三菱 MR-J2S-A 系列伺服放大器使用简介	128
第五章 基于 PLC 的空压站变频调速控制系统	154
第一节 控制系统的改造和控制要求	154
一、空压站控制系统改造要求	154
二、控制系统的控制要求和原理	155
第二节 控制系统的硬件设计	156
一、控制系统的硬件选型	156
二、控制系统的硬件设计	157
第三节 控制系统的软件设计	160
一、PLC 的程序设计	160
二、控制系统人机界面的设计	163
第六章 基于 PLC 的机械手模型控制系统	165
第一节 机械手模型控制系统概述	165
一、机械手模型动作流程	165
二、工作原理简介	166
第二节 控制系统的硬件选型	167

一、系统外围器件的选型	167
二、系统的主控制器 PLC	169
第三节 控制系统的软件设计	169
一、PLC 的程序设计	169
二、系统的人机界面及调试主要事项	177
第七章 基于 PLC 和定位模块的数控平台控制系统	178
第一节 两轴数控平台系统的硬件设计	178
一、基于 PLC 的数控系统的可实现性	178
二、控制系统的硬件选型	179
三、控制系统的硬件设计	181
第二节 控制系统的软件设计及调试	183
一、伺服参数设置	183
二、定位程序的设计	183
三、人机界面的设计及调试	183
参考文献	188



第一章

运动控制系统概述

运动控制技术是一门综合性、多学科交叉的技术,是自动化技术的重要分支之一。运动控制技术的发展被称为制造业自动化前进的旋律。目前,运动控制系统和产品得到了越来越广泛的应用。本章简要介绍运动控制系统的发展概况、组成结构、运动控制器主要构成方案和运动控制技术的发展趋势等。

第一节 运动控制的发展概况和组成结构

一、运动控制的历史发展概况

1. 运动控制系统的定义、应用及分类

本书所指的运动(Motion)和运动控制系统(Motion Control System)是近一二十年来国际上流行的一个技术术语,它源于一种狭义的、约定俗成的共识,即它的主要研究内容是机械运动过程中涉及的力学、机械学、动力驱动、运动参数检测和控制等方面的理论和技术问题。随着电力电子技术的进步、微机技术的应用和新型控制策略出现,运动控制技术正发生着深刻的变革。

运动控制通常是指在复杂条件下,将预定的控制方案、规划指令转变成期望的机械运动。运动控制系统是使被控机械运动实现精确的位置控制、速度控制、加速度控制、转矩或力的控制,以及这些被控机械量的综合控制。典型的运动控制系统有扫描仪、数控机床、机器人等,这些系统是力学、机械、材料、电工、电子、计算机、信息和自动化等科学和技术领域的综合。

按照使用动力源的不同,运动控制可分气动、液压和电动三大类。电气运动控制由于具有更容易实现与微型计算机接口等明显的优点,因而在中小功率的运动控制系统中得到了最广泛的应用。基于电气的运动控制综合了现代电机技术、传感器技术、电力电子技术、微电子技术、自动控制技术和微机应用技术的最新发展成就。本书主要介绍采用电力传动装置的运动控制系统中的一些相关理论和技术问题。因此可以说,电力传动的运动控制技术是以电力半导体变流器件的应用为基础,以电动机为控制对象,以自动控制理论为指导,以电子技术和微处理器控制及计算机辅助设计为手段,并且与检测技术和数据通信技术相结合,构成

的一门具有相对独立性的科学技术。运动控制系统广泛用于机械、钢铁、矿山、冶金、化工、石油、纺织、军工等各个行业，这些行业中绝大部分生产机械都采用电动机作为原动机。有效地控制电动机，提高其运行性能，具有十分重要的现实意义，运动控制技术在生产设备和过程自动化中发挥着日益重要的作用。

运动控制系统主要包括电机调速系统和伺服控制系统，电机调速系统按照拖动电动机的类型又可分为直流调速系统和交流调速系统两大类。运动控制作为一门多学科交叉的技术，每种技术的新进展都会使其向前迈进一步，其技术进步可以说是日新月异。

2. 运动控制系统历史发展概况

人类在19世纪中叶就已经发明了电动机，但真正意义上的电动机运动控制系统是在20世纪30年代出现的，当时的闸流管、引燃管，而后是磁放大器、磁饱和电抗器作为静止变流器，形成了第一代电动机传动控制系统。在第二次世界大战中，自动控制理论得到了发展，有力地促进了电动机传动控制系统理论体系的建立。但是，在很长的一段时间里，在较高控制性能的传动系统中直流电动机一直占据主导地位，主要原因在于其控制简单、调速平滑、性能良好。然而，直流电动机结构上存在的机械换向器和电刷，使它具有一些难以克服的固有缺点，即维护困难、寿命短，单机容量和最高电压都受到一定限制等。而交流电动机（主要是异步电动机）与直流电动机相比，它没有电刷，结构简单，维护容易，但是在当时的技术条件下，很难实现高性能的调速控制。在当时，交流电动机虽然在数量上占绝大多数，但一般采用电源直接供电、直接拖动负载的方式，没有任何调节和控制。

20世纪70年代，席卷全球的石油危机促进了交流调速技术的发展。当时人们发现，占电动机用电量一半以上的风机、泵类负载的拖动电动机工作在恒速状态，是靠阀门和挡板来调节流量或压力，因而造成了大量的电能浪费。通过改变电动机转速的方法调节风量或流量，一般可节电20%~30%，于是在工业化国家出现了变频器。可以说，交流传动控制真正的发展和应用是从使用变频调速技术改造风机、泵类负载开始的。1957年，美国通用电气公司的A. R. 约克制成了世界上第一只晶闸管（SCR），这标志着电力电子时代的开始。从技术角度来说，正是晶闸管的应用才使得交流电动机变频调速成为可能。继晶闸管出现以后，又陆续推出了其他种类的器件，如门极可关断晶闸管（GTO）、电力功率晶体管（GTR）、电力场效应晶体管（P-MOSFET）、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）、静态感应晶体管（SIT）、静态感应晶闸管（SITH）和MOS控制的晶闸管（MCT）等。在这个不断的发展过程中，器件的电压、电流定额以及其他电气特性都得到了很大的改善。因此，现代运动控制技术的发展是以电力电子器件的发展和应用为基础的。

运动控制系统主要包括电机调速系统和伺服控制系统，而伺服控制技术是运动控制中的关键、核心技术。伺服控制系统能够使输出的机械位移准确地实现输入的位移指令，达到位置的精确控制和连续轨迹的准确跟踪。伺服控制具有三种典型的方式，即点位控制、连续轨迹控制和同步控制。点位控制主要应用于那些仅对终点位置有要求而与运动轨迹无关的系统，这种运动控制器具有快速的定位要求；连续轨迹控制则要求系统在高速运动的情况下保证系统加工的轮廓精度，还要保证刀具沿轮廓运动时切向速度的恒定，以及对小线段加工时有多段程序预处理功能；同步控制主要应用于需要有电子齿轮箱和电子凸轮功能的系统控制中，如印染、印刷、造纸、轧钢及同步剪切等行业，主要解决多轴间的同步控制问题。同步

控制的控制算法常采用自适应前馈控制，通过自动调节控制量的幅值和相位来保证在输入端加一个与干扰幅值相等但相位相反的控制作用，以抑制周期干扰保证系统的同步控制。

二、运动控制系统的组成结构

运动控制系统处理机械系统中一般称为轴（Axis）的一个或多个坐标上的运动以及这些运动之间的协调（Coordination）时，需要涉及各轴上运动速度的调节，以一定的加减速曲线来进行运动，以及形成准确的定位或遵循特定的轨迹等诸如此类的问题。这些精确的位置、速度、加减速乃至力矩的控制主要通过电动机、驱动器、反馈装置、运动控制器、主控制器（如计算机和可编程序控制器）等实现。一个完整的以电能为动力的比较典型的运动控制系统的组成结构如图 1-1 所示。

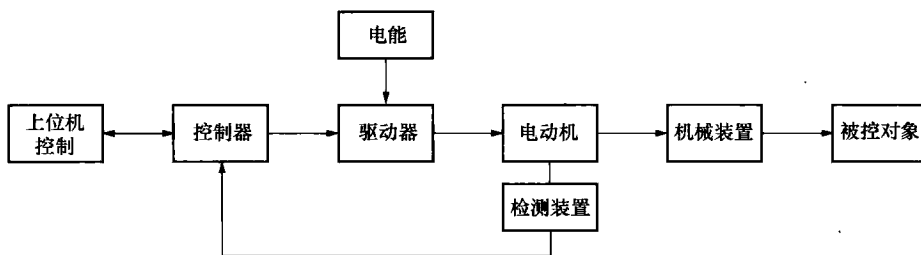


图 1-1 以电能为动力运动控制系统的组成结构

三、现代电动机运动控制系统的主要类型

到 21 世纪，运动控制系统的技术水平已经提高到一个新的高度，无论是应用的广泛程度，还是研究工作的深入程度，都是过去人们想象不到的。现代电动机运动控制技术主要包括下面五方面的内容：

1. 直流电动机控制系统

直流电动机及其控制系统目前在市场上所占份额已经越来越少，但是也应该看到，交流电动机的控制理论和方法是在直流电动机的控制理论和方法的基础上发展起来的。例如，异步电动机矢量控制理论，其实质就是把异步电动机模拟成为直流电动机，用直流电动机的控制思路去控制异步电动机。从理论上说，速度闭环反馈控制理论、无静差调速理论、转速电流双闭环控制理论和控制方法是所有电动机传动控制技术重要的理论基础，从认识事物的角度来看，这是不可或缺的。

2. 三相异步电动机控制系统

三相异步电动机是使用最广泛的一类电动机，其控制技术也是整个电动机运动控制技术中一个最活跃的分支，内容十分广泛。传统的内容包括开环 VVVF 控制、基于电动机静态数学模型的转差频率闭环控制、基于矢量控制理论的转子磁场定向控制、转差频率矢量控制等。近年来，人们在直接转矩控制（DTC）理论和控制方法上取得了进展，已经成功地应用于三相异步电动机的控制。

实现变频控制的基础是脉宽调制（PWM）技术。人们提出的并且已经得到应用的 PWM 方案有很多种，主要有正弦波 PWM、三次谐波注入 PWM、空间矢量 PWM、最优 PWM、预测 PWM、随机 PWM 等。其中应用最广泛的是正弦波 PWM（SPWM）和空间矢量 PWM（SVPWM）。

3. 无刷直流电动机控制系统

当前,无刷直流电动机最主要的应用领域包括各种电动车辆的驱动、自动门窗的驱动、小型一体化水泵的驱动、自动武器的驱动等。

4. 永磁正弦波同步电动机控制系统

全数字交流伺服系统正在广泛应用于运动控制中,包括数控机床、机器人等各类精密机械的驱动等。从技术角度来看,当今主要的全数字交流伺服系统产品基本上都属于永磁正弦波同步电动机控制系统,从本质上说也属于自控式变频系统。

5. 开关磁阻电动机控制系统

开关磁阻电动机又称为电流调节步进电动机,其结构与感应式步进电动机类似,只是定子磁极对数和转子磁极对数不相等,定子绕组可以是三相也可以是四相。由于电磁转矩仅由定转子磁阻产生,因此每相绕组只需一个功率器件,即可产生所需转矩。由于结构简单、转矩传动惯量比高,开关磁阻电动机可实现高速驱动,并非常适合于运动控制系统。这种控制系统的主要缺点是有转矩脉动和噪声,目前已提出多种方法来解决这些问题。

第二节 运动控制器的主要构成方案

一、PLC的运动控制功能简介

1968年,美国通用汽车公司(GM)为使其汽车装配线能适应多种产品的需求,对装配线控制系统提出十条招标意见,这就是历史上的“GM十条”。1969年,美国数据设备公司(DEC)研制出基本满足“GM十条”的控制器,并在GM的装配线上成功使用,这种控制器就是可编程序控制器(PLC)。PLC作为通用控制装置,以其高可靠性、功能强、体积小、可在线修改程序、易于与计算机接口、能对模拟量进行控制等诸多优异性能,广泛应用于钢铁、石油、化工、电力、建材、机械制造、汽车、轻纺、交通运输、环保及文化娱乐等各个行业。现代PLC已经不仅仅具有逻辑判断和顺序控制功能,还同时具有数据处理、PID调节、运动控制和通信联网等功能。

世界上各主要PLC厂家的产品几乎都有运动控制功能,如实现圆周运动或直线运动的轨迹控制和定位控制等。从20世纪50年代起,制造业为适应市场多样化的要求,在零件加工中大量使用数控机床。其可在一条流水线上生产多种产品,形成所谓“柔性制造系统(FMS)”。数控机床适合于加工多品种小批量、几何形状复杂、精度要求高的零件,是目前制造业加工各种零件的主要设备。数控机床的控制系统一般由数字控制器(也称运动控制器)和内装式PLC组成。内装式PLC负责主轴和刀具的控制,为专用PLC;运动控制器负责运动轨迹控制(零件形状),也是专用控制装置。专用数控机床控制系统的价格高、维护较困难,特别是对于不太复杂的系统而言,采用通用PLC实现数控机床控制功能可带来价格较低、维护较方便等诸多好处。除了在数控机床上的应用,现在基于PLC的运动控制系统已经广泛应用于各种定长输送机械、机械手、工业机器人等场合。

从控制部件配置上,在运动控制领域PLC从早期直接使用开关量I/O模块连接位置传感器和执行机构,到现在一般使用PLC基本单元扩展专用的运动控制模块(如可驱动步进电动机或伺服电动机的单轴或多轴位置控制模块),或者使用运动控制型PLC。

二、运动控制器的主要构成方案

微处理器技术的飞速发展使电动机运动控制系统再次发生巨大变革，使用微处理器实现数字化控制不仅可以简化控制硬件，而且可以加入人工智能对系统运行状态进行诊断，这对电机运动控制系统的发展产生了深远的影响。如今应用于电机运动控制的微处理器主要有单片机、数字信号处理器（DSP）和专用控制芯片（ASIC）等。在产品形式上，运动控制器通常表现为运动控制卡、具有运动控制功能的 PLC 控制单元、数控系统（CNC）或专用运动控制系统等。

在电气传动中，要求伺服的性能越高，则系统中其他单元的性能也会随之提高。在一个运动控制系统中，控制器和执行机构是运动系统中至关重要的两个组成部分。以伺服控制系统为例，执行机构部分一般是步进电动机、交流伺服电动机和直流电动机等。它们作为执行机构，带动刀具或工作台动作，就像是人类的“手脚”。如今运动控制器的类型已经发展得越来越多样，但控制器单元的构成方案则主要有四种，即单片机步进伺服系统、专用具有运动控制功能的 PLC 或 PLC 扩展运动控制单元、PC 机加运动控制卡、专用伺服控制系统（如 CNC，即计算机数字控制系统，简称数控系统）。运动控制器是指挥各执行机构动作的，可以看成是整个系统的“大脑”。作为运动控制系统的核心部分，控制器的形式决定了整套系统的运动控制功能的优劣。下面简要介绍上述伺服控制系统中运动控制器各构成方案的基本思想。

1. 采用单片机作为步进伺服控制器

这种控制系统由单片机芯片、外围扩展芯片和外围电路等组成。在位置控制方式下，通过单片机的 I/O 口输出数字脉冲信号来控制执行机构运动；在速度控制方式下，需要加 D/A 转换模块输出模拟量信号来实现。这种方案的优点是成本较低，但由于一般单片机 I/O 口产生脉冲频率较低，对于分辨率高的执行机构尤其是对于控制伺服电动机来说，存在速度跟不上、控制精度有限等缺点。对于运动控制复杂的场合，如升降速的处理，多轴联动，直线插补、圆弧插补等功能，实现起来都需要用户自己编写相应算法，这将增加开发的难度，使开发周期较长，调试过程麻烦。而且系统一旦定型，不太容易扩展功能，带来升级、柔性不强等诸多问题。因此，这种方案一般适用于运动控制系统的功能较简单、产品批量较大，且单片机系统开发经验较丰富的用户。

2. 采用 PC 机加运动控制卡

随着 PC（Personal Computer）机的发展和普及，采用 PC 机加运动控制卡作为控制器已成为伺服控制系统的一个重要控制方案。这种方案能充分利用计算机资源，可用于运动过程、运动轨迹都比较复杂且柔性比较强的机器和设备。从用户使用的角度来看，基于 PC 机的运动控制卡主要是功能上的差别，如硬件接口（输入/输出信号的种类、性能）和软件接口（运动控制函数库的功能函数）。从运动控制卡的主控芯片类型来看，一般有三种形式，即单片机、专用运动控制芯片、DSP（Digital Signal Processor）。以单片机为主控芯片的运动控制卡，成本较低，外围电路较为复杂。这种方案仍采用在程序中通过延时来控制发脉冲，脉冲波形的质量和频率都受到限制，一般用于控制步进电动机。以专用运动控制芯片作为主控芯片的运动控制卡成本较高，但其运动控制功能由硬件电路实现，而且集成度高，所以可靠性、实时性都比较好。其输出脉冲频率可以达到几兆赫，能够满足对步进电动机和数

字式伺服电动机的控制要求。以 DSP 为主控芯片的运动控制卡利用了 DSP 对数字信号的高速处理功能，能够实时完成非常复杂的运动轨迹，常用于像工业机器人等运动控制复杂的自动化设备中。控制卡按信号类型可分为数字卡和模拟卡。模拟卡用于控制模拟式的伺服电动机；数字卡一般用于控制步进电动机和伺服电动机，相应又可分为步进卡和伺服卡。步进卡的脉冲输出频率一般较低（几百千赫），适用于控制步进电动机；伺服卡的脉冲输出频率较高（可达几兆赫），能够满足对伺服电动机的控制。随着数字式伺服电动机的发展和普及，数字卡已成为运动控制卡的主流。

运动控制卡是基于 PC 机各种总线的步进电动机或数字式伺服电动机的控制单元，总线形式也是多种多样，通常使用的是基于 ISA 总线和 PCI 总线的。由于计算机主板的更新换代，ISA 插槽已经越来越少，因此 PCI 总线的运动控制卡是目前的主流。卡上专用 CPU 与 PC 机 CPU 构成主从式双 CPU 控制模式。PC 机的 CPU 可以专注于人机界面、实时监控和发送指令等系统管理工作；控制卡上专用的 CPU 用于处理所有运动控制的细节，像升降速计算、行程控制、多轴插补等，无需占用 PC 机资源。同时随卡提供功能强大的运动控制软件库，如 C 语言运动库、Windows DLL 动态链接库等，方便用户更快、更有效地解决复杂的运动控制问题。控制卡可以接受主 CPU 的指令，进行运动轨迹规划，包括脉冲和方向信号的输出、自动升降速处理、原点和限位开关等信号的检测等。控制卡的运动控制功能主要取决于运动函数库。运动函数库为单轴及多轴的步进或伺服控制提供多种运动函数，如单轴运动、多轴独立运动、多轴插补运动等。另外，为了配合运动控制系统的开发，还提供了一些辅助函数，如中断处理、编码器反馈、间隙补偿、变速定位等。每块运动控制卡可以控制多轴步进电动机或数字式伺服电动机，并支持多卡共用，以实现更多运动轴的控制。每个轴都可以输出脉冲和方向信号，并可输入原点、减速、限位等开关信号，以实现回原点、限位保护等功能。开关信号由控制卡自动检测并作出反应。正是由于运动控制卡具有开放式结构、强大而丰富的软件功能，对于使用者来说，进行二次开发的设计周期缩短了，开发手段增多了，针对不同的数控设备，其柔性化、模块化、高性能的优势都得到了充分的利用。在目前工业生产中，运动控制卡的应用范围较广泛。在使用步进电动机和数字式伺服电动机的 PC 机运动控制系统中，都可以使用运动控制卡作为核心控制单元，如数控机床、加工中心、机器人、送料装置、云台、三坐标控制台、绘图机、雕刻机、印刷机械、打标机、绕线机、医疗设备、包装机械、纺织机械等。

从工业设备来看，使用专业运动控制卡作为运动控制系统的上位控制越来越多，附带产生的各种数控系统软件也越来越多。随着像激光雕刻机、三坐标测量仪等新兴数控设备的兴起，运动控制卡在各个方面都表现出巨大的开发潜力以及良好的应用前景。DSP 运动控制卡的不断深入应用，使 PC 机加运动控制卡的方案在运动控制器中占有日益重要的地位。

3. 采用专用运动控制功能的 PLC 或 PLC 扩展运动控制单元

目前，许多品牌的 PLC 都可选配定位控制模块，有些小型 PLC 的基本单元本身就具有运动控制功能（如三菱的 FX_{1S}、FX_{1N}和 FX_{3U}系列，松下的 FP0、FP Σ 系列），可以进行脉冲串输出、模拟量输出等。使用这种类型的 PLC 做运动控制系统的控制器时，可以同时利用 PLC 的 I/O 接口功能，能够同时完成运动控制、顺序控制、逻辑量的开关控制等。PLC 通常使用梯形图编程，对开发人员来说简单易学、省时省力。另外值得一提的是，PLC 可

以与人机界面 (HMI) 进行通信, 在线修改运动参数, 如轴号、速度、加速度、位移等。这样使整个控制系统从输入到控制再到显示非常的方便, 既可以使界面友好, 又可以从整体上节省控制系统的成本。具有脉冲输出功能的 PLC 大多是晶体管输出类型的, 这种输出类型的输出接口驱动电流不大, 一般只有 $0.1 \sim 0.2\text{A}$ 。在工业生产中, 作为 PLC 驱动的负载来说, 很多继电器开关的容量都要大很多, 因此需要添加中间放大电路或转换模块。与此同时, 由于 PLC 的工作方式 (循环扫描) 决定了它作为控制器时的实时性能不是很高, 要受 PLC 每步扫描时间的限制。而且控制执行机构进行复杂轨迹的动作不太容易实现, 虽然有的 PLC 已经有直线插补、圆弧插补功能, 但由于其本身的脉冲输出频率也是有限的 (一般为 $10 \sim 100\text{kHz}$), 对于像伺服电动机高速高精度多轴联动、高速插补等动作, 它实现起来具有一定的难度。这种方案主要适用于运动过程不是特别复杂、运动轨迹相对固定的设备, 如送料设备、自动焊机等。

特别值得注意的是, 近年来数控 (CNC) 机床已成为制造业的主要零件加工单元, CNC 实际是一种专用计算机控制系统, 它在逻辑上分为轨迹控制和顺序控制两个部分。轨迹控制通过插补计算、位置控制、速度控制等步骤, 对机床的各坐标轴进行运动控制, 使刀具走出零件轨迹。轨迹控制一般由专用控制器实现, 采用 G 代码编程。顺序控制负责对主轴的启/停、JOG (手动或寸动)、刀具的更换、工件的夹紧/松开、冷却、润滑等动作进行控制。许多厂家的 CNC 由运动控制器和内装式 PLC 组成, 分别完成轨迹控制和顺序控制功能, 是一种专用的控制系统。这种专用控制系统的缺点是互换性差, 各 CNC 生产厂家的控制系统在硬件上不能互换, 在软件上多数厂家采用国际标准化组织 (ISO) 的 ISO 代码进行编程。

目前, 许多高性能的 PLC 都可以实现复杂的运动控制功能。根据控制技术趋同性的规律, 不少 PLC 厂家推出了运动控制单元和位置控制单元, 大型专用运动控制型 PLC 也不断出现。许多品牌的 PLC 都有位置控制单元和运动控制单元可供选配, 即以 PLC 为主控制器扩展相应运动控制单元或位置控制单元, 由运动控制单元或位置控制单元完成轨迹控制或定位控制。运动控制单元能使用 G 代码编程, 可与 PLC 灵活地交换数据。此类控制系统的出现和推广应用, 大大降低了 CNC 的成本。这种 PLC 运动控制方案已经在流水线、包装线、机械手等设备上得到了广泛的应用, 这些应用都属于典型的运动控制范畴。

4. 采用专用数控系统

专用的数控系统一般都是针对专用设备或专门行业而设计开发生产的, 像专用车床数控系统、铣床数控系统、电火花线切割机数控系统等。它集成了计算机的核心部件、输入/输出外围设备以及为专门用途而开发的软件。由于是专用的, 用户的使用开发过程非常简便, 不需要进行二次开发, 对使用者来说只需通过熟悉过程达到能操作的目的就可以。在这方面, 国外知名品牌的在我国制造行业中早已出现, 如西门子、法那克、法格、三菱等。当然, 用户大规模广泛地采用这种专用数控系统, 是因为其功能丰富、性能稳定可靠。但数控系统的成本较高, 因此, 适用于控制要求较高且产品档次较高的专用数控设备生产厂家和用户。

综上所述, PC 机加运动控制卡是运动控制领域的一种主流方案, 而在自动化一般行业中主要是应用 PLC 产品, 因而 PLC 加运动控制模块则是另一种主要的方案。本书在后面将

主要介绍三菱 FX 系列小型 PLC 及其运动控制模块在运动控制中的相关应用技术。

第三节 运动控制技术的发展趋势

随着运动控制技术研究工作的深入和生产加工工艺的进步,运动控制系统的各个组成部分都有了较大的改进和发展,各种类型的控制电动机层出不穷,各种驱动器也不断出现。尽管人们在电动机运动控制技术上已经取得了巨大的成就,但技术是永无止境的,为了提高电动机运动控制系统的性能,目前有关研究工作正围绕以下六方面展开:

1. 采用新型电力电子器件和新型电路拓扑结构

电力电子器件的不断进步为交流电动机控制系统的完善提供了物质保证,新的电力电子器件正朝着高电压、大功率、高频化、组合化和智能化的方向发展。智能功率模块(IPM)的广泛应用,使得新型电动机运动控制系统的体积更小、可靠性更高。

传统电力电子变频装置有交一直一交间接式(包括电流源型、电压源型)和交—交直接式两种。PWM电压型变频器在中小功率电动机控制系统中占有主导地位。目前国外研制出了很多新型变频器,像矩阵式变频器、串联并联谐振式变频器等,新一代电动机运动控制系统正在孕育之中。

2. 新型微处理器和运动控制器

运动控制器在运动控制系统处于核心位置,是运动控制系统的“大脑”。运动控制器是运动控制系统中发展更新最快的一类部件,已经从以单片机、微处理器、专用芯片(ASIC)为核心处理器的运动控制器,发展到基于PC总线、以DSP和FPGA(或CPLD)为核心处理器的开放式运动控制器。

在运动控制器中,微处理器所需的周围器件较多,这往往会影响到整个系统的稳定性和可靠性,并且在某些控制场合,CPU的处理速度也成为制约提高系统实时控制性的一个瓶颈。从20世纪90年代开始,数字信号处理器DSP(Digital Signal Processor)芯片技术得到了高速发展,出现了一批高性能低成本的DSP,运算速度最快可达1GHz。这些DSP的优良特性使它们的兼容性好且浮点运算速度快,使多轴的运动控制系统能够浓缩在一块控制卡上,每个轴的控制速率都很高,并且能实现复杂的控制算法。可编程逻辑阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)芯片技术则使通过软件来更新硬件成为可能,从而使运动控制器使用的外围器件减少,可靠性提高。采用DSP作为系统控制器,并结合FPGA(CPLD)器件来设计运动控制器,使整个系统选用器件少,有利于复杂控制过程的实现,而且可以运用DSP的高速数据处理能力来进行闭环控制,进一步提高系统的控制精度。

DSP和FPGA技术的应用,使运动控制系统的硬件成本和体积下降,速度、精度提高。PC加运动控制卡、PLC运动控制单元和专用数控系统一般都采用此种技术。

3. 伺服驱动器的改进

随着微电子技术的进步,交流伺服电动机的驱动技术已从模拟式过渡到全数字式,使得驱动装置硬件结构简单,参数调整方便,产品输出的一致性、可靠性增加。驱动装置的发展突出表现在智能化和网络化两个方面。

(1) 智能化。伺服驱动装置利用计算机技术,可以集成复杂的电动机控制算法和智能化

控制功能,如增益自动调整、PID运算、前馈控制、速度实时监控、共振抑制控制、可变增益控制、模型规范适应控制、反复控制、预测控制、模型跟踪控制、在线自动修正控制、模糊控制、神经网络控制等。目前可以通过面板进行参数设置,并能通过编程软件对伺服驱动装置进行组态。

(2) 基于现场总线和网络化。现代电动机运动控制系统在硬件结构上已朝着总线化发展,总线化使得各种电动机的控制系统有可能采用相同的硬件结构。基于各类现场总线和工业以太网的伺服驱动装置也逐步进入市场。例如,德国伦茨(Lenze)公司生产的伺服驱动器就具有CAN总线接口,使它很容易挂接到CAN总线网络上。伺服驱动器作为CAN总线的从站单元,可连接至网络长度超过1km的开放式CAN网络中。通过CAN总线进行数据传输与控制,拓展了伺服驱动器、伺服电动机的功能与应用范围,使伺服控制系统能更好、更灵活地应用于现代工业控制系统中。使用这种总线网络配置模式,控制器就可以直接使用数字通信的方式来操作和使用伺服驱动器,这样在配线、编程和安装上都有较大好处。

当今已是网络时代,信息化的电动机运动控制系统正在出现。内含嵌入式操作系统的控制器已经进入电动机控制领域。这种控制系统采用嵌入式控制器,在嵌入式操作系统的软件平台上工作,控制系统自身就具有局域网甚至互联网的上网功能,这样就为远程监控和远程故障诊断及维护提供了方便。基于网络的开放式、嵌入式结构的通用运动控制器已逐步成为运动控制领域里的主导产品之一。

4. 直线电动机驱动技术

直线电动机驱动(Linear Motor Driving)是运动控制中具有代表性的新技术,最初主要用于磁悬浮列车(时速可达500km/h)。使用直线电动机可使数控机床向高速、超高速方向发展,因为采用直线电动机直接驱动相对于原来的旋转电动机传动而言,最大区别是取消了从电动机到工作台之间的一切机械中间传动环节,把机床进给传动链的长度缩短为零。这种“零传动”方式具有原来的旋转电动机驱动方式不可比拟的一系列优点,主要有:

(1) 高速响应。由于系统中直接取消了一些响应时间常数较大的机械传动件,如丝杠,使整个闭环控制系统动态响应性能大大提高,反应更灵敏快捷。

(2) 精度高。直线驱动系统取消了由于丝杠等机械机构引起的传动误差,减少了插补时因传动系统滞后带来的跟踪误差。通过直线位置检测反馈控制,即可大大提高机床的定位精度。

(3) 传动刚度高。由于采用“直接驱动”,所以避免了启动、变速和换向时因中间传动环节的弹性变形、摩擦损耗和反向间隙造成的运动滞后现象,同时提高了其传动刚度。

(4) 速度快、加、减速过程短。直线电动机可满足数控机床超高速切削的最大进给速度(可达60~100m/min或更高),由于“零传动”的高速响应性,使其加、减速过程大大缩短,从而可实现启动时瞬间达到高速,高速运行时又能瞬间准停。系统可获得较高的加速度,一般可达2~10g($g=9.8\text{m/s}^2$),而滚珠丝杠传动的最大加速度只有0.1~0.5g。

(5) 行程长度不受限制。在导轨上通过串联直线电动机,就可以无限延长其行程长度。

(6) 运动安静,噪声低。由于取消了传动丝杠等部件的机械摩擦,且导轨又可采用滚动导轨或磁垫悬浮导轨(无机械接触),其运动时噪声将大大降低。

(7) 效率高。由于无中间传动环节,消除了机械摩擦时的能量损耗。

但是，直线电动机的推广使用尚需解决成本高和发热等问题。

5. 伺服控制系统可采用全闭环结构

通常带有位置环的伺服系统，位置环的反馈采样取自伺服电动机的编码器，对于传动链上的间隙及误差还不能补偿克服，只能形成半闭环的位置控制系统。现在一些定位精度或动态响应要求比较高的机电一体化产品中，已经使用全闭环数字式交流伺服系统，其控制原理如图 1-2 所示。

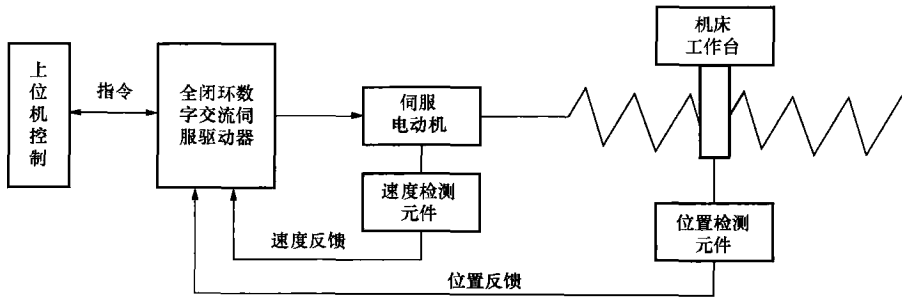


图 1-2 全闭环数字式交流伺服控制原理图

这种系统克服了半闭环控制系统的缺陷，位置环的采样可以直接取自装在最后一级机械上的位置反馈元件（如旋转编码器、光栅尺、磁栅尺等），而电动机上的编码器此时仅作为速度环的反馈，这样就可以消除机械上存在的一切间隙。并且该伺服系统还可以对机械传动上出现的误差进行补偿，达到真正全闭环的功能，实现高精度的位置控制。另外，这种全闭环控制均由驱动器来完成，无需增加上位控制器。由于采用全闭环交流伺服系统能获得极高的定位精度，而不需增加上位控制系统，所以它广泛应用于数控机床、台钻机等高精度数控设备中。

6. 应用现代控制理论、技术和智能控制方法

近年来，现代控制理论在电动机控制系统的应用研究方面出现了蓬勃发展的兴旺景象。这要归功于两方面的原因：第一是高性能处理器的应用，使得复杂的运算得以实时完成；第二是在过程辨识、参数估值以及控制算法鲁棒性方面的理论和方法的成熟，使得应用现代控制理论能够取得更好的控制效果。

当运动控制系统工作时，由于传动部分机械阻力的变化或加工材料硬度的变化使被控对象的参数发生变化，使系统不是处于最佳状态，从而导致生产率下降、成本升高、质量下降。近年来，人工神经网络等智能控制方法开始引入到电动机运动控制系统中，并成为一个新的研究发展方向。目前研究的自适应控制算法，采用的对策是实时检测反映运动控制系统状态的参数（如各电动机电流、转速、振动等），根据约束条件自动调整各轴的运动速度，保证最优运动轨迹。