

应用型本科机电类专业规划教材

运动控制技术 与应用

(第二版)

主 编◎熊田忠
副主编◎孙承志

YUNDONG
KONGZHI
JISHU YU
YINGYONG



中国轻工业出版社 | 全国百佳图书出版单位

应用型 材

运动控制技术与应用

(第二版)

熊田忠 主 编
孙承志 副主编
孙书芳 黄 捷 参 编
王锁萍 李建民 主 审

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

运动控制技术与应用/熊田忠等主编. —2 版. —北京: 中国轻工业出版社,

2016. 9

应用型本科机电类专业规划教材

ISBN 978-7-5184-1084-2

I. ①运… II. ①熊… III. ①运动控制—高等学校—教材 IV. ①TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 205289 号

内 容 提 要

本书主要包括运动控制系统中的传感器、执行器、开环步进电机伺服系统、直流伺服系统、交流伺服系统、位置伺服系统与多轴运动协调控制、基于现场总线的运动控制系统、运动控制系统设计及运动控制系统实例。内容由浅入深, 删繁就简, 注重实用性。

本书可作为高校电气、自动化、机电一体化等专业本、专科生, 高职高专自动化专业学生的教材, 也可供工业自动化行业工程技术人员参考。本教材有课件, 可供教师参考, 需要者可与 qq1095907737, beartz@163.com 联系

责任编辑: 杨晓洁 策划编辑: 王 淳 责任终审: 孟寿萱
封面设计: 锋尚设计 版式设计: 宋振全 责任监印: 马金路

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 北京君升印刷有限公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2016 年 8 月第 2 版第 1 次印刷

开 本: 787×1092 1/16 印张: 17.25

字 数: 410 千字

书 号: ISBN 978-7-5184-1084-2 定价: 35.00 元

邮购电话: 010-65241695 传真: 65128352

发行电话: 010-85119835 85119793 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

160732J1X201ZBW

前 言

运动控制与过程控制一样，是自动化的一个分支。运动控制是综合运用力学、机械、电子、计算机、通信和自动化等有关技术，采用适当的控制原理、方法，在硬件或软件平台上实现满足精度、响应速度和其他要求的执行装置的位置/角位移、速度/角速度、加速度/角加速度、力矩/力的控制。

运动控制系统包含单轴速度伺服系统、单轴位置伺服系统和多轴运动协调等，伺服系统通常认为是位移、速度、加速度的闭环控制，速度伺服系统又是位置伺服系统的基础。所以，单轴速度伺服系统是分析运动控制系统的基础，本书以单轴速度伺服系统为基础展开，逐步扩展到位置伺服系统和多轴运动协调控制。

本书在理论知识讲解上，尽可能压缩数学推导，保证理论知识够用、到位，重点讲解运动控制系统的原理、工程应用、注意事项，配以实例，可以让读者循序渐进，逐步掌握和应用运动控制技术解决工程实际问题。

除了运动控制系统中的传感器、执行器的讲解外，步进开环伺服系统部分结合了运动控制总体设计和实例讲解；直流伺服部分结合电机数学模型重点讲解速度、电流双闭环系统及其数字化实现；交流伺服系统部分以简洁的方式介绍变频调速理论，特别是矢量控制的讲解上，重点谈坐标变换的目的、由来及结论；位置伺服系统及多轴协调控制附带介绍了插补原理、数控技术基础；介绍了现场总线技术、基于现场总线的运动控制系统架构及运动控制系统监控技术；运动控制系统设计部分介绍了方案设计、部件选择及调节器的工程设计方法；实例部分包括丰富的嵌入式、系统集成的运动控制系统开发实例。

本书由熊田忠担任主编，孙承志担任副主编。三江学院电气与自动化工程学院院长王锁萍教授、机械工程学院副院长李建民教授担任主审，三江学院张家海教授、河海大学梅志千教授参加了部分章节的审稿。熊田忠编写了第1、4、6、7、9章；孙承志编写了第5、8章；孙书芳编写了第2章，并负责全书的绘图校对；黄捷编写了第3章；第10章由熊田忠、孙承志共同编写。全书由熊田忠统稿。南京航空航天大学叶文华教授，三江学院电气与自动化工程学院吉顺平副教授等对本书的成稿给予了很大帮助，三江学院2008级刘兆杰、陈凯等同学参与了部分校稿工作，同时本书的编写工作得到了三江学院现代运动控制实验室的硬件支持，在此一并表示感谢！

由于编者水平所限，加之时间仓促，书中错误和疏漏之处在所难免，恳请广大读者不吝指正（编者 E-mail: beartz@163.com），衷心感谢！

编 者

2016年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 运动控制的定义	1
1.2 运动控制系统结构	1
1.3 运动控制系统分类	2
1.4 运动控制器	3
1.5 运动控制技术的发展趋势	4
思考与习题	5
第 2 章 运动控制系统中的传感器与检测技术	6
2.1 旋转变压器	7
2.1.1 旋转变压器的结构与工作原理	7
2.1.2 旋转变压器的信号处理	8
2.1.3 旋转变压器的选用	10
2.2 光电编码器	10
2.2.1 增量式光电编码器	10
2.2.2 绝对式光电编码器	12
2.2.3 光电编码器的选用	15
2.3 直线光栅尺	15
2.3.1 光栅的概念、结构与分类	15
2.3.2 直线光栅尺的测量原理	16
2.3.3 直线光栅尺的选用	18
2.4 其他运动控制系统中的传感器	19
2.4.1 感应同步器	19
2.4.2 磁栅尺	20
2.4.3 激光干涉仪	20
2.4.4 电容式传感器	21
2.4.5 电感式传感器	21
2.4.6 霍尔式传感器	22
2.4.7 电荷耦合图像传感器	22
2.4.8 测速发电机	23
2.4.9 力/力矩传感器	24
2.5 运动控制系统中的速度检测与滤波	24
2.5.1 速度检测方法	24
2.5.2 速度检测测量噪声	26
2.5.3 速度环节低通滤波器设计	26
思考与习题	27
第 3 章 运动控制系统的执行器	28

3.1 步进电机	28
3.1.1 步进电机的分类、工作原理和特点	29
3.1.2 步进电机的运行特性	32
3.1.3 步进电机驱动器	34
3.1.4 步进电机的控制	36
3.1.5 步进电机的选用	37
3.2 直流伺服电机	38
3.2.1 直流伺服电机的基本结构与原理	38
3.2.2 直流伺服电机的机械特性	39
3.2.3 直流伺服电机的驱动技术	40
3.2.4 几种直流伺服电机的特点与应用	45
3.3 无刷直流电动机	46
3.4 交流伺服电机概述	48
3.5 两相交流伺服电机	49
3.6 永磁同步电动机	50
3.6.1 永磁同步电动机的结构、原理	50
3.6.2 永磁同步电动机的特点及应用	51
3.7 其他特殊电机	52
3.8 液压与气动	55
思考与习题	58
第4章 步进电机伺服系统	59
4.1 开环步进伺服系统方案设计	59
4.1.1 环形分配器、驱动功率放大器	61
4.1.2 步进电机驱动器的脉冲方向控制	63
4.1.3 速度规划	64
4.2 开环步进伺服系统设计	64
4.2.1 运动控制系统中的常用机械结构	64
4.2.2 运动控制系统中的机电匹配设计	66
4.2.3 控制系统设计简介	73
思考与习题	73
第5章 直流伺服系统	75
5.1 直流调速系统概述	75
5.1.1 直流调速方法	75
5.1.2 转速控制的要求和调速指标	75
5.2 直流调速系统的数学模型	78
5.3 单闭环直流调速系统	81
5.3.1 转速负反馈有静差调速系统	81
5.3.2 电流截止负反馈调速系统	83
5.3.3 转速负反馈无静差调速系统	85
5.4 双闭环直流调速系统	86
5.4.1 双闭环直流调速系统的基本构成	87

5.4.2 双闭环直流调速系统的性能分析	89
5.5 直流调速系统的数字控制	93
5.5.1 数字量化	93
5.5.2 采样频率的选择	95
5.5.3 计算机数字控制系统的输入与输出变量	95
5.5.4 数字 PI 调节器	96
5.5.5 模拟传递函数的数字化实现	97
5.5.6 计算机数字控制双闭环直流调速系统的硬件和软件	98
思考与习题	99
第 6 章 交流伺服系统	100
6.1 交流调速概述	100
6.2 异步电动机变频调速原理	103
6.3 矢量控制原理	104
6.3.1 三相异步电动机的数学模型	104
6.3.2 三相-两相静止坐标变换 (3s/2s 变换)	105
6.3.3 两相静止-两相旋转坐标变换 (2s/2r 变换)	107
6.3.4 三相异步电动机按转子磁场定向的矢量控制	107
思考与习题	109
第 7 章 位置伺服系统与多轴运动协调	110
7.1 单轴位置伺服系统	110
7.1.1 位置伺服系统及其组成	110
7.1.2 位置伺服系统的结构	111
7.1.3 位置伺服系统的特性	112
7.1.4 位置伺服系统的模型辨识	114
7.1.5 位置伺服系统的性能改善	115
7.2 多轴运动协调控制技术	120
7.2.1 多轴运动控制器及其控制方案	120
7.2.2 多轴运动控制应用领域	121
7.2.3 多轴运动协调控制模式	123
7.3 插补原理	124
7.3.1 插补概述	124
7.3.2 逐点比较法插补原理	126
7.4 数控技术基础	129
7.4.1 数控技术概述	129
7.4.2 数控编程介绍	129
7.4.3 数控铣床基本编程指令	130
7.4.4 零件数控加工编程实例	136
思考与习题	143
第 8 章 基于现场总线的运动控制系统	144
8.1 现场总线概述	144
8.1.1 现场总线的产生	144

8.1.2 现场总线的发展	145
8.2 基于现场总线的运动控制系统架构	148
8.2.1 通信网络的选择	149
8.2.2 基于现场总线的运动控制系统架构举例	151
8.3 运动控制系统监控技术	153
8.3.1 数据采集与监控技术的发展	153
8.3.2 主流的 HMI/SCADA 监控软件	154
8.3.3 监控软件与运动控制器的通信	157
8.4 基于现场总线的运动控制系统应用	158
思考与习题	159
第 9 章 运动控制系统设计	160
9.1 运动控制系统的总体性能要求和设计任务	160
9.2 运动控制系统的方案设计	161
9.3 运动控制系统部件的选择	162
9.3.1 执行电机	165
9.3.2 电机驱动器	171
9.3.3 位置和速度传感器的选择	174
9.3.4 运动控制器的选择原则	177
9.3.5 运动控制系统部件的选择实例	181
9.4 调节器的工程设计方法	187
9.4.1 工程设计方法的基本思路	188
9.4.2 典型系统	188
9.4.3 PID 控制器的参数整定	188
思考与习题	191
第 10 章 运动控制系统应用实例	193
10.1 基于 DSP/ARM 的无刷直流电动机控制系统	193
10.1.1 基于 ARM 的无刷直流电动机控制系统设计	193
10.1.2 数字控制无刷直流电动机驱动器硬件设计	196
10.2 基于 S7-200 PLC 的二维运动控制系统的示教与再现	201
10.2.1 概述	201
10.2.2 系统组成	201
10.2.3 控制软件设计	202
10.2.4 实验验证	207
10.2.5 二维示教平台具体实现扩展	207
10.3 基于单片机的步进电机速度/位置控制系统设计	213
10.3.1 硬件设计	213
10.3.2 软件设计	213
10.4 基于 S7-200 PLC 与变频器的 USS 通信同步控制系统	228
10.4.1 USS 协议概述	228
10.4.2 S7-200 PLC 的通信接口	230
10.4.3 S7-200 PLC 与 MM420 变频器的通信连接	231

10.4.4 S7-200 PLC 的 USS 编程	233
10.5 基于 S7-300 PLC 与变频器的 PROFIBUS 通信水位控制系统	236
10.5.1 系统组成、功能要求及控制方案	236
10.5.2 编程实现	237
10.6 步进电机控制的镜片阵列日光聚焦系统设计	245
10.6.1 系统概述	245
10.6.2 方案设计	246
10.6.3 实施要点	247
10.7 基于运动控制板卡的雕刻机控制系统设计	250
10.7.1 方案设计	250
10.7.2 硬件组成	252
10.7.3 软件开发	256
参考文献	264

第 1 章 绪 论

1.1 运动控制的定义

运动控制 (Motion Control-MC) 是 20 世纪 90 年代在国际上兴起的一个多学科交叉的研究领域, 是自动化技术的一个重要分支, 运动控制起源于早期的伺服控制 (Servo Control), 早期的运动控制技术主要是伴随着数控技术 (Computer numerical control-CNC)、机器人技术 (Robotics) 和工厂自动化技术 (Factory Automation-FA) 的发展而发展的。

简单地说, 运动控制就是对机械运动部件的位置、速度等进行实时的控制管理, 使其按照预期的轨迹和规定的运动参数 (如速度、加速度参数等) 完成相应的动作。运动控制至今没有统一的定义, 我们赞成这样的定义: 所谓运动控制, 是综合运用力学、机械、电子、计算机、通信和自动化等有关技术, 采用适当的控制原理、方法, 在硬件或软件平台上实现满足精度、响应速度和其他要求的执行装置的位置/角位移、速度/角速度、加速度/角加速度、力矩/力的控制。运动控制技术的发展是制造自动化前进的旋律, 是推动新的产业革命的关键技术。

我们认为, 运动控制系统 (Motion Control System-MCS) 包含单轴速度伺服系统、单轴位置伺服系统和多轴运动协调等。伺服系统通常认为是位移、速度、加速度的闭环控制, 速度伺服系统又是位置伺服系统的基础, 而工程技术人员习惯上将“位置伺服系统”称之为“伺服系统”。电力拖动自动控制系统中常常提到的调速系统则包含了开环与闭环速度控制系统。所以, 单轴速度伺服系统是分析运动控制的基础, 本书以单轴速度伺服系统为基础展开, 逐步扩展到位置伺服系统和多轴运动协调控制。运动控制系统中的部分概念、原理和电力拖动自动控制系统、伺服系统等相关学科有很多一致的地方, 但研究的侧重点有所不同。

1.2 运动控制系统结构

典型的运动控制系统结构可以用图 1-1 所示方框图表示。



图 1-1 典型的运动控制系统结构

机械系统 (Mechanical System) 通常是控制的最终对象, 可以是一维或多维机械平台、机械手臂、机床等。

传动机构 (Transmission Mechanism) 通常是进行增减速、输出力矩的放大或减小、

旋转运动与直线运动的转换等而采用的齿轮箱、丝杠、皮带轮等。

执行元件 (Execute Component) 是各种由电能转化为机械能的元件, 多为各种功率电机或控制电机 (Control Motor), 比如直流伺服电动机、三相异步电动机、无刷直流电动机、永磁同步电动机、步进电动机、超声波电动机、直线电动机等, 也可以是液压油缸、液压马达、气缸等。

驱动/放大器 (Driver) 为弱电信号与强电驱动信号的转换装置, 通常为以电力电子器件及其控制电路、保护电路组成的伺服驱动器/放大器。它接收控制系统指令信号, 经过转换变成能直接驱动各种执行元件的大电压/大电流信号。驱动/放大器与执行元件可以合称为运动控制系统的执行器 (Actuator)。

反馈传感器 (Sensor) 可以将机械末端的运动情况反馈给控制器从而实现闭环控制; 也可以将执行元件输出反馈给控制器, 实现半闭环控制; 没有反馈环节的系统即为开环系统。

运动控制器 (Motion Controller) 是运动控制系统的核心, 它向驱动/放大器发出能使系统产生期望输出的信号, 进行各种插补运算、轨迹路径规划、复杂控制策略等任务, 并根据检测运动情况, 实时调整信号输出。可由基于 PC 的运动控制板卡、PLC 或定位模块、以 DSP 或 ARM 等为为核心的控制器等承担。

主控制器通常负责调度、运动状况显示、数据存储、通信协调等工作。可由 PC 机、PLC 等承担。

以上驱动/放大器、运动控制器、主控制器有时未必能严格区分, 某些系统中可以仅有驱动/放大器, 或运动控制器与主控制器功能合为一体, 需要具体情况具体分析。

1.3 运动控制系统分类

运动控制系统可以分为单轴运动控制系统与多轴运动控制系统。

对于单轴运动控制, 可以分为单轴速度控制、位置控制、力矩控制等。单轴运动控制是多轴运动控制的基础。

单轴位置控制可分为开环、闭环和半闭环伺服系统。其特点和应用如下:

1) 开环 (Open Loop) 伺服系统: 运动部件的位移没有检测反馈装置, 数控装置发出的信号是单向的, 通常采用功率步进电机作位移的伺服机构。开环伺服系统结构简单, 调试、维修方便, 成本低廉, 但精度差, 用于经济型数控机床。

2) 闭环 (Closed Loop) 伺服系统: 运动部件上安装有直线位移测量装置, 将测出的实际位移值反馈到数控装置中与输入的指令位移值相比较, 用差值进行控制, 直到差值至零。闭环系统应用于高精度运动控制场合。

3) 半闭环 (Semi Closed Loop) 伺服系统: 位置反馈采用转角检测装置, 如光电编码器及旋转感应同步器等, 直接安装在伺服电机或丝杠端部, 通过检测丝杠转角, 间接测量工作台位移量, 再反馈给数控装置。半闭环应用广泛。

对于多轴控制, 根据运动控制的特点和应用领域的不同, 可以将运动控制分成以下几种形式:

1) 点位控制 (Point to Point Control-PTP Control): 这种运动控制的特点是仅对终

点位置有要求，与运动的中间过程即运动轨迹无关。

2) 连续轨迹控制 (Continual Trajectory Control): 又称为轮廓控制，主要应用在传统的数控系统、切割系统的运动轮廓控制。伺服系统控制工作台行进的轨迹，就是工件要求加工的轮廓，是对预定轨迹的跟踪控制。

3) 同步控制 (Synchronous Control): 是指多个轴之间的运动协调控制，可以是多个轴在运动全程中进行同步，也可以是在运动过程中的局部有速度同步，主要应用在需要有电子齿轮箱和电子凸轮功能的系统控制中。

1.4 运动控制器

一个典型的运动控制系统主要由运动部件、传动机构、执行机构、驱动器和运动控制器等构成，整个系统的运动指令由运动控制器给出，因此运动控制器是整个运动控制系统的灵魂。

目前，国内的运动控制器生产厂商提供的产品大致可以分为三类：

1) 以单片机或微处理器作为核心的运动控制器，这类运动控制器速度较慢，精度不高，成本相对较低。在一些只需要低速点位运动控制和对轨迹要求不高的轮廓运动控制场合应用。

2) 以专用芯片 (ASIC) 作为核心处理器的运动控制器，这类运动控制器结构比较简单，大多数只能输出脉冲信号，工作于开环控制方式。这类控制器对单轴的点位控制场合是基本满足要求的，但对于要求多轴协调运动和高速轨迹插补控制的设备，这类运动控制器不能满足要求。由于这类控制器不能提供连续插补功能，也没有前瞻功能 (Look ahead)，特别是对于大量的小线段连续运动的场合，如模具雕刻，不能使用这类控制器。另外，由于硬件资源的限制，这类控制器的圆弧插补算法通常都采用逐点比较法，这样以来圆弧插补的精度也不高。

3) 基于 PC 总线的以 DSP 和 FPGA 作为核心处理器的开放式运动控制器。这类开放式运动控制器以 DSP 芯片作为运动控制器的核心处理器，以 PC 机作为信息处理平台，运动控制器以插卡形式嵌入 PC 机，即“PC+运动控制器”的模式。这样将 PC 机的信息处理能力和开放式的特点与运动控制器的运动轨迹控制能力有机地结合在一起，具有信息处理能力强、开放程度高、运动轨迹控制准确、通用性好的特点。这类运动控制器充分利用了 DSP 的高速数据处理功能和 FPGA 的超强逻辑处理能力，便于设计出功能完善、性能优越的运动控制器。这类运动控制器通常都能提供多轴协调运动控制与复杂的运动轨迹规划、实时的插补运算、误差补偿、伺服滤波算法，能够实现闭环控制。由于采用 FPGA 技术来进行硬件设计，方便运动控制器供应商根据客户的特殊工艺要求和技术要求进行个性化的定制，形成独特的产品。

以上第一类运动控制器由于其性能的限制，在市场上所占份额较少，主要应用于一些单轴简单运动的场合，往往还面临同 PLC 厂商提供的定位控制模块的激烈竞争。第二类运动控制器因其结构简单、成本较低，占有一定的市场份额，但由于其专用芯片 (ASIC) 能提供运动控制的基本功能，用户可以利用该芯片设计专用的控制器而分薄了这类运动控制器的市场份额。第三类运动控制器是目前国内外运动控制器产品的主流，目前国外开放

式运动控制器产品已经开始大量进入中国；固高科技（深圳）有限公司相继开发出 GO、GE、GT、GH 和 GU 系列基于 DSP 的开放式运动控制器产品，有近 150 个品种可供用户选择；应用也从传统的机床数控扩展到了如激光加工、服装、纺织、印染、电子加工等多个领域，市场规模也有较大的增长。

通用运动控制器的主要功能如下：

1) 运动规划功能 实际上是形成运动的速度和位置的基准量。合适的基准量不但可以改善轨迹的精度，而且其影响作用还可以降低对传动系统以及机械传递元件的要求。通用运动控制器通常都提供基于对冲击（Jerk）、加速度和速度等这些可影响动态轨迹精度的量值加以限制的运动规划方法，用户可以直接调用相应的函数。对于加速度进行限制的运动规划产生梯形速度曲线；对于冲击进行限制的运动规划产生 S 形速度曲线。一般说来，对于数控机床而言，采用加速度和速度基准量限制的运动规划方法，就足以获得一种优良的动态特性。对于高加速度、小行程运动的快速定位系统如 PCB 钻床、SMT 机，其定位时间和超调量都有严格的要求，往往需要高阶导数连续的运动规划方法。

2) 多轴插补、连续插补功能 通用运动控制器提供的多轴插补功能在数控机械行业获得了广泛的应用。近年来，由于雕刻机市场，特别是模具雕刻机市场的快速发展，推动了运动控制器的连续插补功能的发展。在模具雕刻中存在大量的短小线段加工，要求段间加工速度波动尽可能小，速度的变化的拐点要平滑过渡，这就要求运动控制器有速度前瞻（Look ahead）和连续插补的功能。

3) 电子齿轮与电子凸轮功能 不但可以大大地简化机械设计，而且可以实现许多机械齿轮与凸轮难以实现的功能。电子齿轮可以实现多个运动轴按设定的齿轮比同步运动，电子齿轮功能还可以实现一个运动轴以设定的齿轮比跟随一个函数，而这个函数由其他的几个运动轴的运动决定；一个轴也可以以设定的比例跟随其他两个轴的合成速度。电子凸轮功能可以通过编程改变凸轮形状，无需修磨机械凸轮，极大地简化了加工工艺。

4) 比较输出功能 是指在运动过程中，位置到达设定的坐标点时，运动控制器输出一个或多个开关量，而运动过程不受影响。

5) 探针信号锁存功能 可以锁存探针信号产生的时刻，各运动轴的位置，其精度只与硬件电路相关，不受软件和系统运动惯性的影响，在 CMM 测量行业有良好的应用。

1.5 运动控制技术的发展趋势

运动控制系统和其他自动化系统一样，追求系统稳定、快速响应和控制精度高，因此，高速、高精度是其发展方向。

今后基于计算机标准总线的运动控制器仍然是市场的主流，但是，基于网络的嵌入式运动控制器会有较大的发展。基于计算机标准总线的通用运动控制器主要是板卡结构，采用的总线大多数为 ISA、PCI。由于它们的应用依附于通用 PC 计算机平台，从工业控制的角度分析，这种运动控制器的优缺点如下。

优点：

- 1) 硬件组成简单，把运动控制器插入 PC 总线，连接信号线就可组成系统；
- 2) 可以使用 PC 机已经具有的丰富软件进行开发；

- 3) 运动控制软件的代码通用性和可移植性较好;
- 4) 可以进行开发工作的工程人员较多, 不需要太多培训工作就可以进行开发。

缺点:

- 1) 采用板卡结构的运动控制器采用“金手指”连接, 单边固定, 在多数环境较差的工业现场(振动、粉尘、油污严重), 不适宜长期工作。
- 2) PC资源浪费, 由于PC的捆绑方式销售, 用户实际上仅使用少部分PC资源, 未使用的PC资源不但造成闲置和浪费, 还带来维护上的麻烦。
- 3) 整体可靠性难以保证, 由于PC的选择可以是工控机, 也可以是商用机。系统集成后, 可靠性差异很大, 并不是运动控制器能保证的。
- 4) 难以突出行业特点, 不同行业、不同设备其控制面板均有不同的特色和个性。

嵌入式PC的运动控制器能够克服以上缺点。这种产品会有较好的市场前景。由于SOM(System on Module)和SOC(System on Chip)技术的快速发展, 嵌入式PC运动控制器获得了良好的发展。嵌入式运动控制器产品可以很方便地将在PC上开发的应用系统, 不加任何改动就移植过来。对于用户来讲, 他们的开发工作仅跟具体项目有关, 所以使用相对独立的人机界面就可以了。由于嵌入式PC的运动控制平台具有标准PC的接口功能, 用户不需要再购买工业PC就能很方便地组成自己的系统。这种嵌入式运动控制器不仅提高了整个系统的可靠性, 有时甚至可以使系统更加简洁和高度集成化。

随着工业现场网络总线技术的发展, 基于网络的运动控制器得到了很好的发展, 并已经开始应用于多轴同步控制中。将传统的以机械轴同步的系统改用网络运动控制器控制的电机轴控制, 可以减少系统的维护和增加系统的柔性。

由于我国的特殊市场需求, 一些其他的专用运动控制系统也会越来越多。例如图像伺服控制的专用运动控制器, 力伺服的专用运动控制器等。根据用户的应用要求进行个性化的定制, 设计出个性化的运动控制器将成为市场应用的一大方向。

思考与习题

- 1-1 以框图描述通常的运动控制系统结构, 说明各组成部分的主要功能, 并举例说明可以构成这些部分的典型代表器件或装置。
- 1-2 简述开环、闭环、半闭环运动控制系统及其各自应用场合。
- 1-3 多轴运动控制系统可分为哪几种形式?

第2章 运动控制系统中的传感器与检测技术

传感器 (Sensor) 与检测系统是控制系统的重要组成部分, 测量准确是控制的前提。传感器是能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置。

被测量通常是模拟量信号, 如连续变化的温度、压力、流量、物位、浓度、位移、速度、加速度、力等; 部分被测量可以是开关量信号, 如物体的有无、位移限位等。

随着电子技术的进步, 电量具有便于传输、转换、处理、显示的特点, 因此, 常用的传感器是将非电量转换成电量输出。传感器按输出信号的类型可以分为模拟式和数字式。模拟式检测是直接对被测量进行检测, 无须量化处理, 在小量程内可以实现高精度检测, 送入计算机处理前需要进行 AD 转换; 数字式检测的特点是, 被检测测量量化后, 直接转化成脉冲个数或二进制编码, 可以直接送计算机处理, 检测精度取决于检测单位, 与量程基本无关, 检测装置较简单, 数字信号抗干扰能力强。

通常, 传感器由敏感元件和转换元件组成。其中, 敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分; 转换元件是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号部分。由于传感器输出信号一般都很微弱, 需要有信号调理与转换电路, 进行放大、运算调制等。

传感器指标通常有精度、灵敏度、迟滞、线性度、重复性、漂移、延时和频率响应特性等。

运动控制的目的是实现对运动部件运动参数 (位置、速度、加速度、力/力矩等, 位置检测最为常见, 且位置能方便转化成速度、加速度) 的精确控制, 且多数采用闭环控制, 为此必须配有能对运动参数进行精确测量的传感器, 才能构成完整的闭环系统。传感器或检测元件是运动控制系统的重要组成部分, 其精度对系统的控制精度有很大影响。运动控制系统中的被测量通常有位移、速度、加速度、力/力矩等; 而经传感器可输出电压、电流、脉冲、二进制编码等。位置和速度传感器也可以分为模拟式和数字式两大类; 按运动形式可分为旋转型和直线型; 按信号产生及转换原理可分为光电效应、压电效应、霍尔效应、电磁感应原理、压阻效应等类型。常用运动控制系统中的传感器有旋转光电编码器、直线光栅尺、磁栅尺、旋转变压器等; 在精密和超精密运动控制中, 常采用激光干涉测量装置; 而在微位移测量方面, 则常用电容式传感器或电感式传感器。位置和速度传感器的分类见表 2-1。

表 2-1

位置和速度传感器的分类

分类	增 量 式		绝 对 式
位移传感器	旋转型	脉冲编码器、自整角机、旋转变压器、圆感应同步器、光栅角度传感器、圆光栅、圆磁栅	多极旋转变压器、绝对脉冲编码器、绝对值式光栅、三速圆感应同步器、磁阻式多极旋转变压器
	直线型	直线感应同步器、光栅尺、磁栅尺、激光干涉仪、霍尔位置传感器	三速感应同步器、绝对值磁尺、光电编码尺、磁性编码器

续表

分类	增 量 式	绝 对 式
速度传 感器	交、直流测速发电机,数字脉冲编码式速度传感器,霍尔速度传感器	速度-角度传感器,磁敏式速度传感器

本章将介绍几种传感器的基本原理和应用以及运动控制系统中检测技术相关问题。

2.1 旋转变压器

旋转变压器 (Resolver) 又称回转变压器、同步分解器,是一种将转子转角变换成与之呈某函数关系的电信号的元件,是一种精度很高、结构和工艺要求十分严格和精细的控制微发电机。旋转变压器本身输出的位置信息是连续变化的模拟量,经过高频数字化处理后可对运动控制系统的位置、速度进行精确测量。由于旋转变压器结构坚固耐用,能承受工业环境,尤其是在振动和高温环境下比增量式编码器要好,在运动控制系统中得到越来越广泛的应用。

2.1.1 旋转变压器的结构与工作原理

旋转变压器均有定子、转子两部分,有的还含转子输出变压器(或附加变压器)。定子和转子均由高导磁的铁镍软磁合金或硅钢薄片冲压成的槽状片叠成,并分别嵌有绕组。定子绕组为旋转变压器的原边,转子绕组为旋转变压器的副边。结构示意图如图 2-1 所示。定子铁心上的结构相同的二相绕组在空间上正交,并且以相位差为 90° 的正弦和余弦电流进行励磁,通常励磁电流的频率远高于工频。转子铁心上有一个转子绕组(有的旋转变压器在转子上有二相正交绕组,使用时可将其中一个绕组短接)。

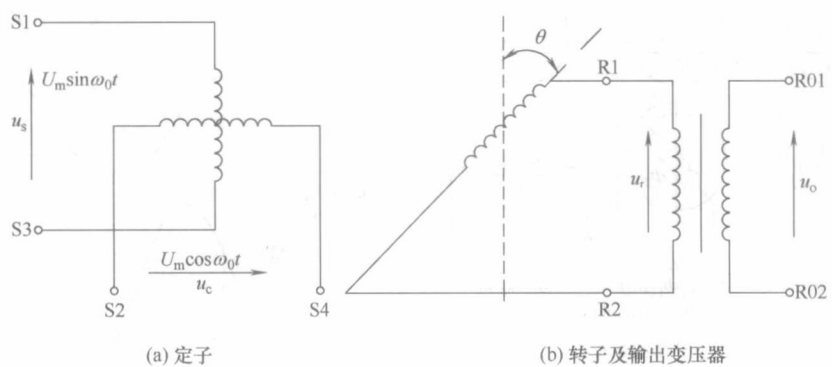


图 2-1 旋转变压器结构示意图

旋转变压器在结构上保证了定子与转子之间空气间隙的磁通按正弦规律分布,定子绕组加上交流励磁电压时,通过电磁耦合,转子绕组会产生感应电动势,其输出电压的大小取决于定子与转子两个绕组的轴线在空间的相对偏角位置。先从定子一相绕组对转子感应电动势的影响分析旋转变压器的工作原理,如图 2-2 所示,定子某绕组通以 $u_c = U_m \cos \omega_0 t$ 的信号,当两者垂直时,转子绕组中的感应电动势为零,如图 2-2 (a) 所示。当两者平行

时，转子绕组中的感应电动势最大，如图 2-2（c）所示。当两者成一定角度时，转子绕组中的感应电动势为

$$u_r = k_1 U_m \cos \omega_0 t \sin \theta \tag{2-1}$$

式中， k_1 为该两绕组的变压比； U_m 为励磁电压幅值； ω_0 为交流励磁电压角频率； θ 为两绕组的轴向夹角，即转子相对定子某基准位置的转角。式（2-1）表明，转子绕组感应电动势为转角 θ 的函数，其余变量均为已知量，因此，可以采用测出转子绕组感应电动势幅值或相位的方法，来测量转子转角 θ 的变化。

如图 2-1 所示，实际使用中，当定子绕组分别加上两个相位相差 90° 且同频率的励磁电压：正弦绕组电压 $u_s = U_m \sin \omega_0 t$ 和余弦绕组电压 $u_c = U_m \cos \omega_0 t$ ，应用叠加原理，转子绕组中的感应电动势为

$$u_r = k_1 U_m \cos \omega_0 t \sin \theta + k_1 U_m \sin \omega_0 t \cos \theta = k_1 U_m \sin(\omega_0 t + \theta) \tag{2-2}$$

则转子的输出信号电压（转子绕组或转子输出变压器的输出电压）可用下式表示

$$u_o = k U_m \sin(\omega_0 t + \theta) \tag{2-3}$$

式中， k 为旋转变压器的变压比。

由式（2-3）所表示的旋转变压器的输出信号为与给定励磁信号同频不同相和不同幅值的正弦信号，如图 2-3 所示。可以看出，对于定子的正弦励磁信号 $u_s = U_m \sin \omega_0 t$ 来说，旋转变压器的转子从基准位置所转过的 θ 角，变成了输出信号中的相位移角 θ 。也就是说，输出信号在时间上的相位移角 θ 正好是旋转变压器转子偏离基准位置的空间位移角 θ 。如果设法将这个相位移信号加以处理并提取出来，那么就可以得到旋转变压器的转子位置信息，若将转子与旋转运动部件同轴安装，定子安装于固定部件上，则可以得到旋转运动的角位移。

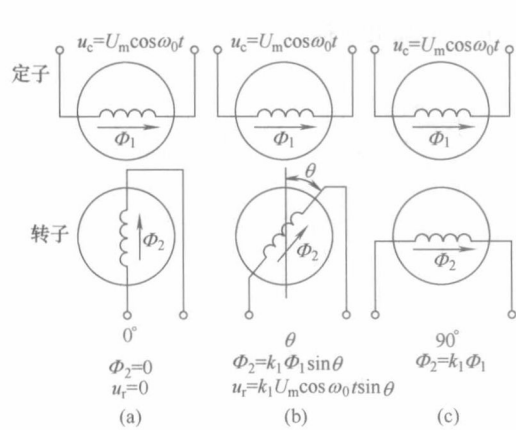


图 2-2 旋转变压器的工作原理

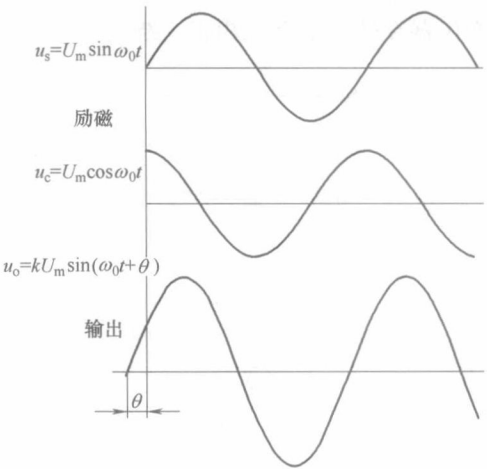


图 2-3 旋转变压器的励磁信号与输出信号关系

2.1.2 旋转变压器的信号处理

旋转变压器的信号处理有鉴相型和鉴幅型两种工作方式。

鉴相工作方式下，由式（2-3）可通过测量旋转变压器输出信号的相位来测量转子相