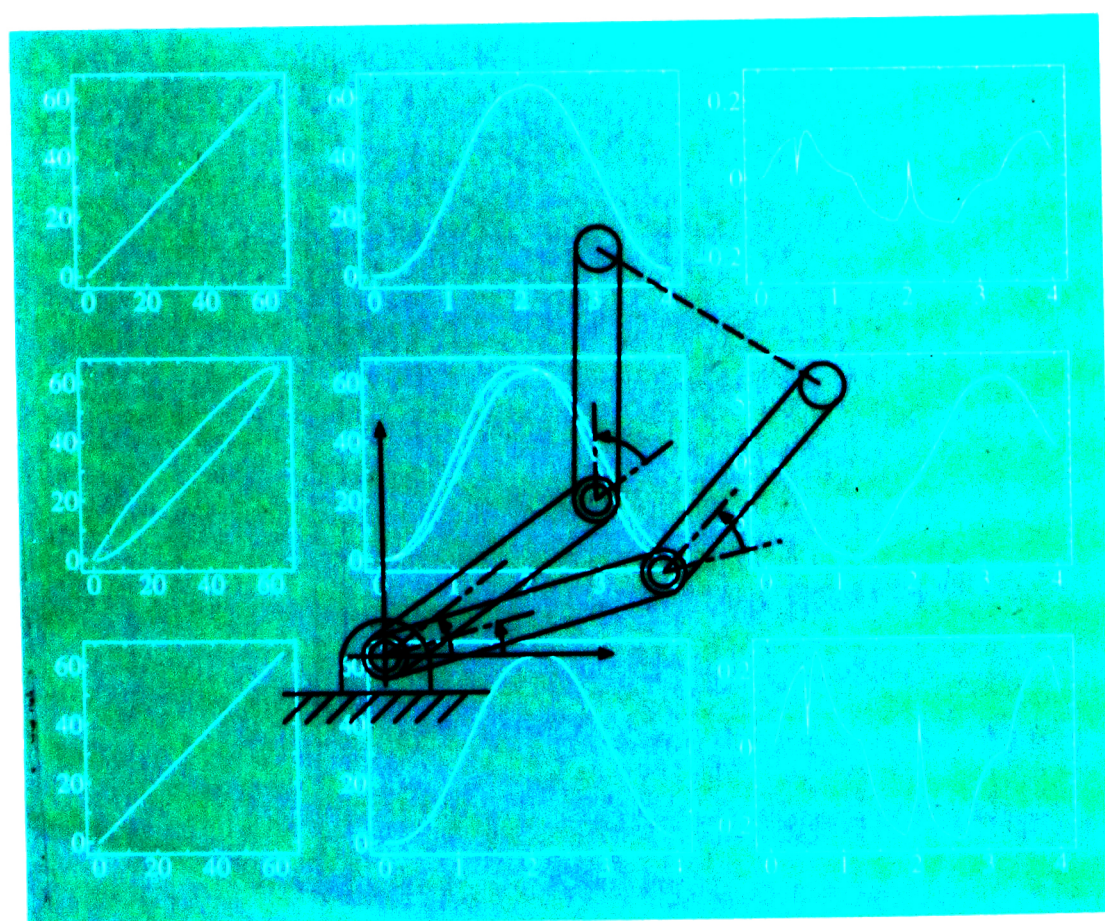


机电一体化伺服系统控制

—— 工业应用中的问题及其理论解答

中村政俊 后藤聪 久良修郭 著
张 涛 译



清华大学出版社

TH-39/169

2012

机电一体化伺服系统控制

—— 工业应用中的问题及其理论解答

中村政俊 后藤聪 久良修郭 著

张 涛 译



北方工业大学图书馆



C00302881

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书详细讲述了机电一体化伺服系统在控制方面存在的问题,给出了这些问题的理论分析及解决方法。主要包括机电一体化伺服系统概述、机电一体化伺服系统数学模型的建立、机电一体化伺服系统的离散时间间隔、机电一体化伺服系统的量化误差、机电一体化伺服系统的转矩饱和、修正教示信号法、基于主从同步定位控制方法的轮廓控制等内容。不仅使读者了解机电一体化伺服系统在工业中存在的主要问题,同时从理论和实际两个方面获得解决这些问题的方法。本书给出的详细的理论分析过程和具体实例,能帮助读者对这一领域有更加实际和深入的了解,通过掌握该领域的必要知识,可独立运用这些方法和技术来解决实际问题。因此,本书具有较高的学术价值和实践指导作用。

本书可作为普通高等院校机械类或电类本科生和研究生专业基础课的教材,也可供其他大专院校及从事机电一体化伺服系统研制、开发及应用的技术人员学习参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

机电一体化伺服系统控制:工业应用中的问题及其理论解答/(日)中村政俊,(日)后藤聪,(日)久良修郭著;张涛译.--北京:清华大学出版社,2012.7

ISBN 978-7-302-28118-4

I. ①机… II. ①中… ②后… ③久… ④张… III. ①机电一体化—伺服系统—控制 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 033658 号

责任编辑:张占奎 李 嫚

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×230mm 印 张:11.25 字 数:194 千字

版 次:2012 年 7 月第 1 版 印 次:2012 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:39.80 元

产品编号:025949-01

译者序

“Mechatronics (机电一体化)”一词源于 1969 年由日本安川电机公司的一位工程师提出。国际机械与机械装置理论联合会(The International Federation for the Theory of Machines and Mechanism, IFTMM)的技术委员会给出了该名词的严格定义,即“机电一体化是精密机械加工、电子控制及其产品设计和加工过程的协作式组合”。机电一体化技术的发展带动了全球电子技术在机械领域中的应用。与此同时,作为机电一体化技术中的一项关键技术,伺服控制系统在各种类型机械系统中被设计出来。目前,机电一体化技术已经成为现代机械加工技术的基础。而且,伺服控制系统设计方法的学习是从事机械加工领域工作的工程师必不可少的内容。

作为一名机电一体化技术的研究人员,当我第一次阅读该著作的日本版时,就被它所阐述的内容深深吸引。该著作仔细研究了机电一体化伺服控制系统中存在的各种问题,书中提出的这些问题的解决方案在实际应用中具有重要的意义。因此,我产生了强烈的愿望,希望将这些研究成果介绍给所有从事机电一体化技术研究的研究人员和工程师。由于该著作在研究中所取得的成就,日本仪器与控制协会(The Society of Instrument and Control Engineers, SICE)授予它 2001 年“著作奖(Works Reward)”。原著作者也希望将该著作翻译成其他文字,介绍给世界各国的研究者。因此,我从 2002 年开始将其翻译成英文。2004 年终于完成了英文版的翻译工作,并由世界知名的 Springer 出版社出版。2006 年年初,我结束了在日本的多年学习和工作后回国,开始在清华大学继续开展研究工作。几年后,我又开始将其翻译成中文,最近终于完成了中文翻译工作。

全书内容共分为 7 章(第 7 章未译),首先是引言,介绍机电一体化伺服系统概述。然后,从第 1 章到第 6 章分别介绍机电一体化伺服系统方面的问题及解

决方法,包括:机电一体化伺服系统数学模型的建立、机电一体化伺服系统的离散时间间隔、机电一体化伺服系统的量化误差、机电一体化伺服系统的转矩饱和、修正教示信号法、基于主从同步定位控制方法的轮廓控制等。另外,该书还给出了详细的理论分析过程和具体实例,帮助读者对这一领域有更加实际和深入的了解。通过学习,读者可以掌握这一领域的必要知识,独立运用这些方法和技术解决实际问题。因此,该书具有较高的学术价值和指导作用。

该著作的翻译过程中得到了华东理工大学信息科学与工程学院邹俊忠教授以及清华大学自动化系多名研究生的大力支持和帮助,同时参考了大量的技术资料,汲取了许多同人的宝贵经验,在此表示衷心的感谢。

由于机电一体化伺服控制系统技术发展很快,本人水平有限,对原著理解不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

张 涛

2011年12月于清华园

前言

作为本书的主编,中村教授在大学致力于系统控制及其应用的研究。伺服控制器的设计及其应用作为中村教授的研究领域之一,在过去的 10 多年中,与久良教授长期合作,在研究上取得了重大进展。中村教授与久良教授每年都会举行几次讨论会,所有这些讨论会上取得的成果都会汇编成报告,每一份报告都长达 50~100 页,其中包括了很多久良教授对这些成果的重要建议,而且可以找到许多新的研究方向。

在本书中合著者的主要工作包括:

久良教授描述了在工业中所使用的工业机器人的伺服部分、数控机器、三维测量机以及被称为贴片机的机电一体化机器等的控制问题。

中村教授从系统控制理论的角度解答了这些问题,并且用公式表述了对这些问题的解答中的关键点。

后藤教授对于这些问题的解答进行了计算机仿真,并在实验室中用机电一体化相关实验装置清楚地验证了这些理论成果的合理性。另外,对机电一体化伺服系统控制感兴趣的研究室的本科生、研究生和博士生在指导下对一些项目的研究也取得了相应的成果,至今在机电一体化控制方面已发表了将近 60 篇会议报告和 20 篇经评审的学术论文。

以上的研究经历是写作此书的由来。在学术会议上针对演讲内容回答问题中、在与文章审阅者的交流中以及在与研究机器人操作方面的大学和研究院所的访问交流中,我们强烈地感觉到很多研究者和工程师对工业上已解决的一些问题存在很大的误解。

事实上,诚如合著者久良教授所说,对于工业上所遇到的伺服控制器设计问题所采取的策略,主要取决于设计人员和工程师对实际误差的处理经验,它反映

了实际的需求。这些技术还没有真正成为所谓的知识,因为它们并非逻辑上的策略,即使成功地执行了,还是有很多情况不能得到清楚的解释。在工业上,即使不清楚的地方得以指明,其内容也并没有公开。目前的状况仍然是不清楚为什么好的途径难以实现。

通过合作,我们对工业上所遇到的问题的本质进行了分析并从逻辑上和数学上进行了公式化。根据对这些导出的公式求解以及对结果合理地证明,取得了很多重要的结论。目前已经系统地归纳了这些观点。而基于这些知识的技术得以被明确地解释,从而使很多研究者和工程师可以更普遍地了解它们并有效地使用它们。这些就是写作本书的动机。

在本书中所讨论的问题是 based 于工业上的共同需求,而不仅是某个工程师待研究的问题。针对那些根据经验所获得的结果,都给出了逻辑上的阐述。因此,这些结果适用于一个实际的机器,并且,那些以前由专家经验确定的控制器设计的各种性能和控制方法,现在都可以采用这些方法来确定,至今只适用于特殊情况的知识,现在也转变为更为复杂、准确和一般性的技术。本书在解决这些问题上具有独特性。

本书的结构如下。机电一体化伺服系统伺服控制器的设计主要涉及建模、分析以及控制器设计,这一部分从引言一直到第 6 章。

引言部分主要是机电一体化伺服系统的概要,以及工业中针对一些问题的主要观点。

在第 1 章,这些问题都被合理解决,成为合著者合作研究的成果。在以后每一章,都会提到相关的要点。

针对目前工业界的状况和问题,每一项应用中的主要观点和成果的重要性也都会在每一章的开始部分叙述。

我们建议读者从头阅读。如果读者想真正读懂本书并很好地理解本书各章中的各段内容,最好通过解决作者本人处理过的问题和前言中描述的问题。对每一章中的每一节,主要观点都会在开始部分阐述以指导阅读。而各节的主要内容都基于作者的一篇文章,这些文章都在参考文献中列出。另外,本书还包括关键词表、符号说明以及在实验中所用到的实验装置的描述说明。

在准备阶段,本书的不同内容分别请佐贺大学现代系统控制工程系的 7 位硕士研究生(青木重人、片浏达郎、擲田大辅、白砂健太、山上升二郎、田村雅之、西泽实)试读过。根据他们的看法,我们改进了本书的易读性。本书中所提到的问题的要点以及成果都被适当地用公式表述出来。对于这些公式的求解一般采用了经典控制(拉氏变换)和现代控制(微分方程)方法,这些在取得学士学位以

前是应当学习过的。而其他控制理论中的基础知识在附录里也给予了介绍。因此,不管是从事系统控制的研究者或研究生,还是将理论应用于实践的本科生都应能读懂本书。我们希望通过对本本书的学习,使这些知识能够在机电一体化工业中有所应用,同时也希望从事相关研究的工作人员有所收获。

由于本书用到的资料均取自合作研究,故对合作体会略作以下介绍:

- (1) 在各个领域都应该有大量的合作研究。
- (2) 在合作研究人员之间应该开展讨论。
- (3) 应互相尊重对方的观点。
- (4) 彼此保持良好的关系。

在本书写作过程中,森北出版株式会社生产部的小林巧次郎先生以及编辑部的石田升司先生都给予很大帮助,在此一并表示感谢。

(原著)作者

1998年10月

目 录

引言 机电一体化伺服系统概述	1
0.1 机电一体化伺服系统的产生	1
0.1.1 伺服系统的控制模式	1
0.1.2 伺服系统应用的特征	4
0.2 伺服系统中的问题	7
0.2.1 关于机电一体化伺服系统建模的讨论	7
0.2.2 关于机电一体化伺服系统单轴性能的讨论	8
0.2.3 关于多轴机电一体化伺服系统性能的讨论	11
0.2.4 关于机电一体化伺服系统指令的讨论	12
第1章 机电一体化伺服系统数学模型的建立	14
1.1 机电一体化伺服系统单轴的四阶模型	14
1.1.1 机电一体化伺服系统	15
1.1.2 机电一体化伺服系统数学模型的推导	16
1.1.3 利用数学模型确定伺服参数的方法	20
1.1.4 数学模型的实验验证	23
1.2 机电一体化伺服系统单轴的降阶模型	25
1.2.1 降阶模型的必要条件	26
1.2.2 模型的结构标准	27
1.2.3 低速一阶模型的推导	27
1.2.4 中速二阶模型的推导	28

1.2.5	低速一阶模型和中速二阶模型的评价	31
1.3	多关节机械臂的笛卡儿坐标线性模型	32
1.3.1	多关节机械臂的笛卡儿线性模型	33
1.3.2	工作线性模型自适应区域的推导	37
1.3.3	工作线性化模型的自适应区域及其实验验证	44
第2章	机电一体化伺服系统的离散时间间隔	46
2.1	采样时间间隔	46
2.1.1	机电一体化伺服系统的条件要求	47
2.1.2	控制特性与采样频率的关系	48
2.1.3	采用控制中要求的采样频率	49
2.1.4	采样频率确定法的实验验证	50
2.2	参考输入时间间隔与速度波动的关系	51
2.2.1	考虑参考输入时间间隔的机电一体化伺服系统的 数学模型	51
2.2.2	参考输入时间间隔内速度波动的工业领域策略	53
2.2.3	稳态速度波动和机电一体化伺服系统之间的参数关系	54
2.2.4	稳态速度波动的实验验证	56
2.2.5	参考输入时间间隔和瞬时速度波动的关系	57
2.2.6	瞬时速度波动的实验验证	59
2.3	参考输入时间间隔与轨迹不规则性的关系	59
2.3.1	在参考时间间隔内的轨迹不规则性	60
2.3.2	参考输入时间间隔中产生的轨迹不规则性的实验 验证	65
2.3.3	理论分析结果的应用值	66
第3章	机电一体化伺服系统的量化误差	69
3.1	编码器分辨率	69
3.1.1	软件伺服系统的编码器分辨率	70
3.1.2	编码器分辨率的数学模型及其分辨率判定	71
3.1.3	编码器分辨率确定的实验验证	73
3.2	转矩分辨率	75
3.2.1	用于转矩分辨率的机电一体化伺服系统的数学模型	76

3.2.2	由于力矩量化误差引起的定位精度的退化	77
3.2.3	由于力矩量化误差引起的阶跃响应的退化	78
3.2.4	转矩分辨率确定方法的推导	81
第4章	机电一体化伺服系统的转矩饱和	84
4.1	转矩饱和特性的测量方法	84
4.1.1	机电一体化伺服系统的转矩饱和	84
4.1.2	转矩饱和曲线的测量及实验验证	89
4.2	避免转矩饱和的轮廓控制方法	93
4.2.1	具有转矩饱和的轮廓控制性能与高精度轮廓控制 方法	93
4.2.2	考虑转矩饱和的轮廓控制的实验验证	98
第5章	修正教示信号法	104
5.1	基于数学模型的修正教示信号法	104
5.1.1	修正教示信号法的推导	105
5.1.2	修正教示信号法的特性分析	111
5.1.3	修正教示信号法的实验验证	115
5.2	基于高斯网络的修正教示信号法	117
5.2.1	基于高斯网络的修正教示信号法的推导	117
5.2.2	基于高斯网络的修正教示信号法的实验验证	121
5.3	一种柔性机制的修正教示信号法	123
5.3.1	使用修正教示信号法进行有振荡限制的轮廓控制 的推导	123
5.3.2	利用修正教示信号法进行振荡约束控制的实验验证	125
第6章	基于主从同步定位控制方法的轮廓控制	127
6.1	主从同步定位控制方法	127
6.1.1	主从同步定位控制的必要性	127
6.1.2	主从同步定位控制方法的推导及特性分析	129
6.1.3	主从同步定位控制方法的实验测试	130
6.2	基于主轴同步定位控制方法的高精度轮廓控制	137
6.2.1	主从同步定位轮廓控制的推导	137

6.2.2	主从同步定位轮廓控制方法的特性分析和评价·····	139
6.2.3	主从同步定位轮廓控制方法的实验测试·····	141
关键词	·····	144
附录	·····	149
符号说明	·····	153
实验装置	·····	160
参考文献	·····	165

机电一体化伺服系统概述

机电一体化伺服系统是本书的研究主题。本章将重点阐述电气伺服电动机中所采用的机电一体化伺服系统,介绍其发展阶段到目前的应用情况及其性能。所谓的机械装置(下文称作机电一体化伺服系统),即在数字控制机床或工业机器人中采用的伺服系统,通常区别于自动控制教材中所介绍的伺服系统。这一点在讨论机电一体化伺服系统时是非常重要的。

首先,举例说明机电一体化伺服系统所具有的控制模式,并介绍满足这些控制模式的电流伺服系统的特性及其应用。然后,作为讨论内容,将对机电一体化伺服系统及其应用进行分析和说明。

0.1 机电一体化伺服系统的产生

0.1.1 伺服系统的控制模式

作为满足数控机床传动轴运动条件的控制系统,机电一体化伺服系统最初是在改进直流伺服电动机时(约 1967 年)产生的。然后,在 1975 年,安川电动机用速度控制装置(伺服驱动单元)将控制系统的补偿器和功率放大器结合为整体,并开始销售这种速度控制装置。起初它主要应用于工作机器的传动轴控制。从 1980 年开始被各种各样机械装置的位置和速度控制所采用,如工业机器人等。当机电一体化伺服系统产生的时候,作为伺服系统建立的起点,控制模式一般定义如下:

1. 由于步进成形转矩扰动,速度偏移量低于 $n\text{rpm}$ (一般低于 1r/min)。
2. 速度控制比是从 1 到几千 r/min (最小值是 1r/min , 最大值是 $3000 \sim 5000\text{r/min}$)。

3. 有效利用功率放大器的能力(对于有限值,调节时间根据额定电流的加速/减速被缩短)。

以上三点将分别介绍它们在实际应用中的必要性和重要性。第一点,在工作机器的传动轴中,控制模式由被安装的切削或旋转切削工具的运动所决定。在加工产品时,这些产品与工具的刀刃之间存在接触,且作为输入设备,传动轴的负载是持续不断增加的运动摩擦转矩。当开始加工时,安装在工具上的传动轴中存在与加工相反的反作用力。当然,这个反作用力的程度与加工状态不同。可以将这个反作用力看作是步进成形加工的转矩负载。这个转矩负载在控制系统中作为转矩扰动加到电动机上。所以此时出现速度偏差,并且传动轴还会引起实际生产形状与设计形状之间的误差。所以由于转矩扰动的出现,会出现未知速度偏差。

当一个圆形轨迹不能用多边形来近似时,第二点是必要的。为了实现圆形轨迹,想要精确产生出类似正弦或余弦的轨迹指令是非常困难的。所以在产生圆形轨迹时,要已知用多边形近似圆形轨迹的直线命令,并且应当考虑用双轴伺服系统构成一个平面时的速度。为了能沿着多边形的一个边以恒速移动,两条轴必须根据对应于传动轴斜率的速率来移动。在 x 轴和 y 轴相交的直角处,它们的速度是无穷大。为了更容易理解这一点,从理论上讲,引起单轴运动的驱动系统的速度指令必须限制在从 0 到 1 有限值的范围内。事实上,近似多边形的边数由驱动系统的速度控制率决定,这个驱动系统的速度控制率可以在实际操作中实现。

根据操作效率和功率放大器经济方面的要求,提出了第三点。操作效率由一个元件的机械结构的实际操作时间来评价,例如机械运动从启动到停止的时间。因此,我们期望没有刀削的时间是最小值,而且为了达到恒定速度,还需要尝试时间上的下降(速度调节时间)。但是,为了达到这一目的而付出比较大的代价是不允许的。通常,功率放大器的耗费主要受它的输出电压和允许最大电流的影响。因此,在速度控制中,要求采用功率放大器的最大性能(容许电流),并且需要缩短加速或减速时间。

图 0.1 所示为满足这些性能指标而设计的单轴机电一体化伺服系统的位置控制系统的结构,电动机为直流电动机。为了帮助理解这个图,一般来说,位置控制通常设计为比例控制,并且设计速度和伺服系统内部的电流磁滞回线。在功率放大器的结构中,还经常采用 PWM 放大器。当使用 PWM 时,基波的载波频率范围是从几到几十 kHz。

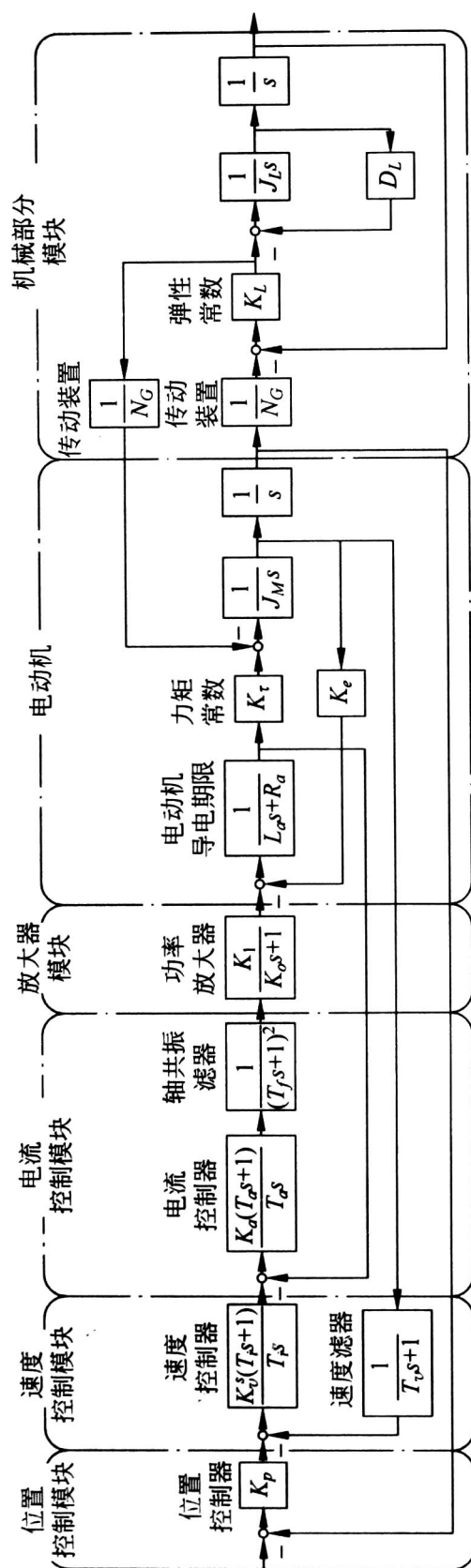


图 0.1 单轴机电一体化伺服系统的位置控制系统的结构

这个机电一体化伺服系统的结构成分从起初的直流伺服电动机转变为交流伺服电动机。而且与最初的硬件计算放大器不同的是,采用位置、速度、电流环的控制器转变为软件伺服系统,这一系统具备使用微处理器的算法软件。

0.1.2 伺服系统应用的特征

以上简要地介绍了机电一体化系统的来源和结构。为了理解机电一体化伺服系统和普通伺服系统在用途上的区别,列出了以下要点。

(1) 在机电一体化伺服系统中有两种类型控制。一种是位置控制(PTP: 点到点),这种控制强调到达时间和从任何位置开始的停止位置,而不考虑相应的路径。另一种是轮廓控制(CP: 连续路径),这种控制强调从当前位置到下一位置的运动轨迹(在每一时刻的位置和运动速度)。这些控制形式如图 0.2 所示。前一种控制类型是用于控制组装零件、点焊等工作的机械臂,或者还可以用来控制钻孔机械的运动轴;后一种是控制焊接机器、油漆机器和激光切割机器等的机械臂,或是可以用来控制任何执行三维形状加工的机器的传动轴(加工中心)。

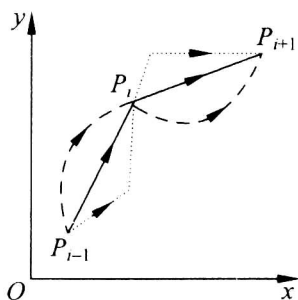


图 0.2 PTP 控制和 CP 控制

(2) 在轮廓控制中,作为一个位置控制系统,伺服系统需要严格的速度控制以做出多种反应。以焊接机器人为例,能够很容易理解速度控制的重要性。在使用自动焊接机器的电焊中,当设置好电压和电流之后,喷枪(调整好电压后能够连续喷出细细的溶剂的工具)的运动速度取决于沿着焊接曲线给定的热耗率。因此,当给定的热耗率变化时喷枪的运动速度也相应改变。如果热耗率超过给定值,则喷口张开过大,投入热量不足,不能实现充分的焊接。另外,对于一个油漆机器人,如果油漆罐的运动速度改变,喷漆就会很容易出现油漆不均匀的斑点。除此之外,在各种材料的切割操作中,保持恒定的切削速度能够保证切割质量。

(3) 在轮廓控制中,不应该出现位置控制系统的超调。在很多事例中为了避免超调,需要调节速度控制系统。在各种各样的实际加工操作中,超调的产生将会导致形状加工致命的缺陷。例如,在转轴加工中如果出现超调,这部分的半径将会变小,从而削弱这部分的强度。而且,如果振动轨迹存在形状上的不足,在之后的运动中也无法消除这种缺陷。

(4) 在很多事例中,在实施控制之前需要得到正确的伺服系统的目标指令。

可以这样说,在开始期望的操作之前,要求能够完全知道机器人的操作对象或机床的加工对象的元件尺寸、设定方法等。另外,也明确决定了这个时刻的运动速度。因此,在开始控制之前需要知道运动所必要的轨迹信息。此外,可以假设外部扰动混入控制系统中。当混入的扰动超过假设值时,考虑到装置的安全性,应该停止控制系统的运动,并且尽可能地隔离驱动电源。这就是说,电机的选择必须通过对其执行操作所需的必要的最大转矩进行精确分析。另外,连续混入扰动的大小也必须低于电机的连续额定转矩。

(5) 在很多伺服系统中,反馈系统只能够建立在伺服传动器的信息基础上,但是不必考虑每一个移动端或运动端的信息。这就意味着要在电动机的反负载面(无负载侧)安装位置和速度检测器,然后通过得到的信息来组装这一传动控制的反馈系统,这种控制系统称作半闭环控制系统。一般来讲,要通过机械装置中运动端的信息来构建反馈系统是非常困难的。在有些模块中采用运动端信息反馈的全闭环结构,如图 0.3 所示。另外,几乎所有的六自由度工业机器人的机械模块是半闭环的。考虑伺服驱动器的各种关系如图 0.4 所示。同普通的反馈系统一样,机电一体化伺服系统并不能构成这种半闭环结构。为了能够采取一般反馈系统的分析方式来考虑这个系统,该系统要满足的条件是,当机械装置根据期望的运动指令在控制区域内时,需要通过执行器将这个系统严格统一起来。

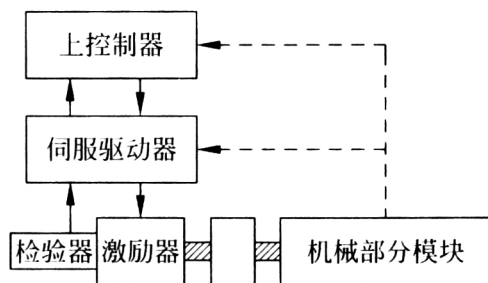


图 0.3 工业伺服系统的结构

(6) 为了构造多轴可移动机械装置,在机械装置中通常安装执行器,这个执行器与一个执行器的前进运动及一个轴(自由度)的转动相对应。在伺服系统中给定三维空间中一条随机曲线,这个三维空间是多轴同步控制的执行空间,而这条曲线则是作为每条独立轴期望运动位置的时间函数的指令给出的。控制系统中的前提条件是将每条轴看作相对独立。事实上,不能避免相互干扰的产生。例如,多轴机械臂的一条轴运动的反作用总会影响其他轴。在试图最小化机械装置设计中的轴干扰时,这个轴间干扰非常重要。而且,在机电一体化伺服系统中,当仅仅考虑一条轴时,由于该轴的作用所产生的来自其他轴的影响被看作是扰动。为了在控制中将影响降为最低值,应该将轴的运动变为相互独立的状态。

(7) 用于实现由多轴机械构成的机器运动的目标参考输入是通过伺服系统生成的。在这个伺服系统中能够实现所介绍的机械装置的每条轴的独立运动。为了保持每个轴的一致性,需要调节参考输入的特性。在几乎所有的情况中,位