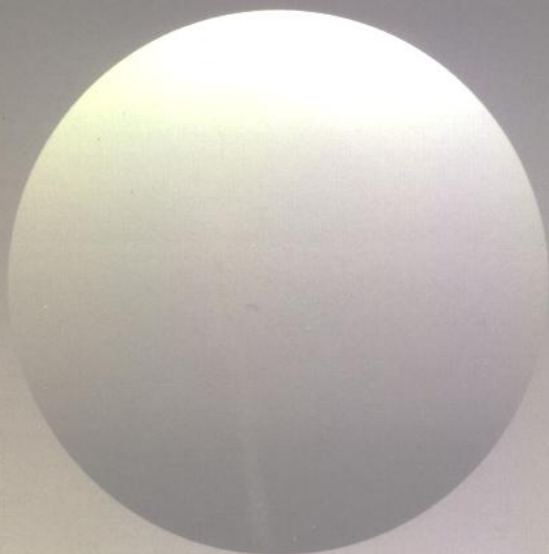


● 研 究 生 用 书 ●

DIGITAL CONTROL OF
MACHINING PROCESSES

华中理工大学出版社



宾 鸿 赞



加工过程数控

加工过程数控

宾 鸿 赞

华中理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

加工过程数控/宾鸿赞

武汉:华中理工大学出版社, 1999年4月

ISBN 7-5609-1914-6

I. 加…

II. 宾…

III. 机械制造-自动控制-高等学校教材

IV. TH164

9.85/05

• 研究生用书 •

加工过程数控

宾鸿赞

责任编辑 周芬娜

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编:430074)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社照排室排版

荆州市今印集团有限责任公司印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:13.375 插页:2 字数:312 000

1999年4月第1版 1999年4月第1次印刷

印数:1—1 500

ISBN 7-5609-1914-6/TH·97

定价:18.00 元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行科调换)

内 容 简 介

本书阐述了利用计算机控制理论与技术对加工过程运行状态(误差、力、热、振动等)的实时控制。针对高控制性能要求和高控制实时性之间的矛盾,作者力求采用简洁实用的理论工具、实例示范的方法和拟人化的策略来探讨解决矛盾的思路与措施。同时,总结了作者指导研究生近年所取得的部分研究成果,体现了多学科综合解决工程实际问题的特色。全书共分7章,前4章结合加工过程介绍了计算机控制的基本理论,可作硕士生教学内容,后3章着重介绍了基于信息的控制策略及相应的成果,可供博士生参考。

本书可作为机械工程学科研究生的学位课程教材,也适用于机械工程技术人员参考。

Abstract

"Digital Control of Machining Processes" focuses attention on the real time control for operating states (such as, errors, forces, heat, vibrations etc.) occurred in machining processes based on computer control theories and techniques. In order to deal with the contradictions between high control performance requirements and rapid real time control scheme the author tried his best to explore strategies and measures for solving the mentioned problems by adopting straightforward theoretical tools, giving typical examples and making human-like strategy. Several research results show the engineering application characteristics by means of multi-discipline integration. In the first 4 chapters of the book, computer control theory is introduced by combining machining process performance, and in the last 3 chapters information-based control scheme and related research results are described.

The book may be become as academic degree course textbook for graduate students in the field of mechanical engineering. It is also suitable to be as a reference for mechanical engineering technicians when they study computer control on their own.

“研究生用书”总序

研究生教材建设是提高研究生教学质量的重要环节,是具有战略性的基本建设。各门课程必须有高质量的教材,才能使学生通过学习掌握各门学科的坚实的基础理论和系统的专门知识,为从事科学研究工作或独立担负专门技术工作打下良好的基础。

我校各专业自1978年招收研究生以来,组织了一批学术水平较高,教学经验丰富的教师,先后编写了公共课、学位课所需的多种教材和教学用书。有的教材和教学用书已正式出版发行,更多则采用讲义的形式逐年印发。这些讲义经过任课教师多年教学实践,不断修改、补充、完善,已达到出书的要求。因此,我校决定出版“研究生用书”,以满足本校各专业研究生教学需要,并与校外单位交流,征求有关专家学者和读者的意见,以促进我校研究生教材建设工作,提高教学质量。

“研究生用书”以公共课和若干门学位课教材为主,还有教学参考书和学术专著,涉及的面较广,数量较多,准备在今后数年内分批出版。编写“研究生用书”总的要求是从研究生的教学需要出发,根据各门课程在教学过程中的地位和作用,在内容上求新、求深、求精,每本教材均应包括本门课程的基本内容,使学生能掌握必需的基础理论和专门知识;学位课教材还应接触该学科的发展前沿,反映国内外的最新研究成果,以适应目前科学技

术知识更新很快的形势；学术专著则应充分反映作者的科研硕果和学术水平，阐述自己的学术见解。在结构和阐述方法上，应条理清楚，论证严谨，文字简炼，符合人们的认识规律。总之，要力求使“研究生用书”具有科学性、系统性和先进性。

我们的主观愿望虽然希望“研究生用书”的质量尽可能高一些，但由于研究生的培养工作为时尚短，水平和经验都不够，其中缺点、错误在所难免，尚望校内外专家学者及读者不吝指教，我们将非常感谢。

华中理工大学研究生院院长

陈 珽 黄树槐

1989. 11.

目 录

绪 论	(1)
第一章 加工过程数控概述	(9)
§ 1-1 加工过程数控的发展简介	(9)
§ 1-2 加工过程数控系统的性能及其指标	(12)
§ 1-3 加工过程的数据及其特点	(14)
§ 1-4 加工过程数控的类型	(17)
§ 1-5 加工过程数控系统的构成与设计	(26)
§ 1-6 加工过程数控的实例简介	(33)
第二章 加工过程的数控模型	(42)
§ 2-1 加工过程的数控模型分类	(42)
§ 2-2 加工过程离散建模	(45)
§ 2-3 计算机控制算法的离散形式	(57)
§ 2-4 加工过程数控系统框图	(71)
§ 2-5 系统辨识	(78)
§ 2-6 被控对象的时序建模	(87)
§ 2-7 传感器融合信息模型	(99)
第三章 加工过程数控系统分析	(107)
§ 3-1 引言	(107)
§ 3-2 系统输入的典型形式及其发生函数	(108)
§ 3-3 系统输入的发生函数求解	(111)
§ 3-4 系统响应求解	(118)
§ 3-5 系统稳定性分析	(123)
§ 3-6 系统响应分析实例	(128)
§ 3-7 加工过程响应图解法	(136)

§ 3-8	PAM 和 PWM 方案比较	(144)
§ 3-9	NC 机床理论成形误差的控制	(151)
第四章	加工过程的数字控制器设计	(163)
§ 4-1	引言	(163)
§ 4-2	满足响应性能要求的设计	(164)
§ 4-3	数字控制器的可行性与稳定性	(178)
§ 4-4	最少拍设计及无纹波系统	(181)
§ 4-5	前馈+反馈控制	(188)
§ 4-6	串级控制	(191)
§ 4-7	自适应控制	(200)
第五章	基于信息的加工过程数控	(220)
§ 5-1	引言	(220)
§ 5-2	预测控制	(221)
§ 5-3	多功能数字比相计	(243)
§ 5-4	模糊控制	(250)
§ 5-5	神经网络控制	(264)
§ 5-6	自学习控制	(278)
§ 5-7	“加工过程卡”控制	(283)
第六章	加工过程数控的实时性策略	(290)
§ 6-1	引言	(290)
§ 6-2	离散勒让德(Legendre)多项式拟合控制算法	(291)
§ 6-3	加工误差的几种简单外推算法	(302)
§ 6-4	任意空间圆弧的高速插补方法——三点递归插补 (TPRI)算法	(307)
§ 6-5	线性外推拟合算法	(312)
§ 6-6	空间圆弧 CNC 加工的实时插补	(316)
§ 6-7	复杂形状刀具 CNC 磨削	(329)
§ 6-8	丝杠的简化圆柱杠的精确求解	(352)
§ 6-9	鞋模 CAD/CAM 一体化	(358)

绪 论

人类社会技术发展史,经历了石器时代、青铜器时代和铁器时代,每一个时代都是以该时代的主导资源和主导工具命名的.当今社会已进入了信息时代,信息成为起主导作用的资源,而以电子计算机为主的电子交换器件则成为起主导作用的工具.由于信息具有可共享性、可识别性、可转换性、可传递性、可处理性、可再生性等特点及其特殊功能,因此,可用灵活性或柔性或软性来概括信息的特点.所以,人们借助计算机系统的辅助,将有关的信息转换到产品与服务中,使之成为更好的产品和更优良的服务.可见,计算机系统、智能机器等信息载体对当今时代所产生的影响,无论在广度、深度和重要程度上远大于石器工具、青铜器工具和铁器工具对相应时代的影响.因此,研究计算机、信息技术在各行各业中的应用,是当代社会所赋予的一种责任.

信息是人们运算和处理问题时所需要的条件、内容和结果,表现为数字、数据、图表和曲线等形式.信息也可以作为通信的消息来理解,它告诉对方某些预先不知道的东西.

在一个计算机控制系统中,系统是一些机构的组合,这些机构由信息联系在一起,完成一定的任务,机构包括计算机(完成比较器、控制器等功能)、被控对象或过程、测量机构或传感器等.控制是指通过信息给对象以命令.为完成一定任务的被控制机构称之为对象.被控制的连续运行状态称之为过程,如化学反应过程、经济调节过程、生物进化过程、机械加工过程(磨削过程、铣削过程、激光切削过程、电火花加工过程、……)等.

传统上,机械制造工艺系统定义为由机床、夹具、工件和刀具组成的一个封闭系统.由于工艺系统内各构成元素的相互作用,便产生各种各样的产品.工艺系统内部的协调控制是刚性的,不太容

易根据加工过程的实时状态进行调节,柔性差.在现代制造技术中,传统制造技术不断吸收机械、电子、信息、材料、能源及现代管理等科技成果,将其综合应用于制造全过程,实现优质、高效、低耗、清洁、灵活生产,以取得理想的技术经济效益.因此,作者认为,现代制造工艺系统是由机床、夹具、工件、刀具和计算机组成的一个封闭系统,而计算机是一种高度信息化的工具,那么,现代制造工艺系统也是一种信息化的系统.鉴于信息诸多特点,也使现代制造工艺系统具有柔性化、软性化的特点,这大大地提高了制造工艺系统的能力,并且更好地反映了对客观规律的认识.

在机器的生产过程中,零件的机械加工是在机械加工车间进行的.在机械加工车间,直接改变生产对象的形状、尺寸、相互位置与性质等,使之成为成品或半成品的过程称为机械加工工艺过程.随着加工工艺过程的进行,伴有一系列的连续运行状态,如尺寸及其误差、力、振动、温度与热变形、噪声等连续变化状态需要进行控制.研究利用计算机控制技术对加工工艺过程连续运行状态进行控制的理论与策略,被称之为“加工工艺过程数控”,或简称“加工过程数控”(Digital Control of Machining Processes).其实质可理解为利用计算机对工艺系统与工艺过程状态的控制.工艺过程受到诸多因素的影响,其动态性能表现出一定的随机性,当人们利用计算机对工艺过程进行控制时,要实时地适应动态性能的变化要求.

“机床数控”(Machine Tool Numerical Control)主要是研究计算机对机床或其他加工设备的运动规律的控制,这种控制根据对被加工零件的形状、尺寸与精度的要求,计算机按人工编制的程序控制机床各相应轴运动,即按预先规定的时间函数实现控制.这种控制,一般不考虑被控对象的动态特性的变化.

为了进一步比较机床数控与加工过程数控的区别,现特列表0-1.

由表0-1可见,加工过程数控所涵盖的内容比机床数控所涵

表 0-1 机床数控与加工过程数控的比较

项 目	机床数控	加工过程数控
被控对象模型	确定,时间函数	难确定,信息模型
运动状态	$x, \dot{x}$	$x, \dot{x}, \ddot{x}$
控制方式	程序控制	随动控制
控制规律	插补算法	实时控制算法
控制信号输出	主动、系统地输出	被动、随机地实时输出
理论基础	计算几何	过程控制理论
复杂性	多轴联动数控	多传感器信息融合
控制系统	已有商品化系统	大多需自行开发

盖的内容更广,是对加工过程状态全面的监视与控制,是更复杂的控制问题,基于数学模型的传统控制理论已难以处理这类控制问题,需要研究基于信息的控制理论。

机械制造业是基础工业,它是提高一个国家的国力和人民生活水平的重要产业. 在当今信息时代,计算机技术帮助人们管理制造企业. 美国制造工程师学会(SME; Society of Manufacturing Engineers)所属的计算机和自动化系统协会(CASA; The Computer and Automated System Association)于1993年提出了一个新的制造企业轮图,如图 0-1 所示. 它较好地体现了信息、计算机在制造企业的地位与作用. 在以往的 CIM (Computer Integrated Manufacturing)企业轮图中(CASA/SME, 1985),主要强调了企业内部的自动化与集成化,以数据库为轮心,而在新型轮图中,增加了对当今制造企业的新认识. 主要体现在:

① 顾客的中心作用,是新轮图的轮心. 企业的成功关键是瞄准顾客的需求.

② 企业组织中的工作协调与工作群体的作用,强调人员之间

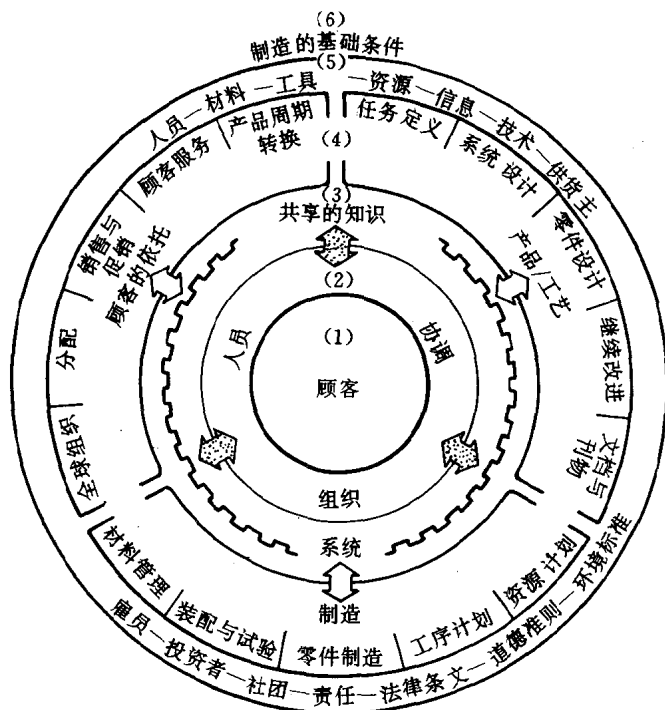


图 0-1 新型制造企业轮图

的合作共事,采用一切措施和通信联系,保证工作人员协调合作,充分发挥工作群体的知识与技能,激励他们的工作热情.

③ 共享知识和共享系统对人们和工艺过程革命性的影响, 强调计算机的重要性并用以辅助研究、分析、创新、决策、建立文档等工作。

④ 提出了从产品/工艺定义、制造到顾客的依托等主要范畴的 15 个关键过程。

⑤ 明确界定了企业的资源(输入)和责任(输出), 认识到将官僚主义机构向更精简、更灵活的组织过渡的趋势。

⑥ 对企业外部环境的认识. 企业的成功也取决于顾客、竞争对手、供货主以及其他周围环境因素,如能源、交通、通信、原材料、教育、……诸多方面.

制造企业综合人力与工具资源,通过工艺过程使购进的材料及零件增加附加值,所以,工艺过程是制造企业的生命.所有的公司正以从未有过的注意力对工艺过程进行研究与探讨,包括:工艺过程图示、工艺过程简化、工艺过程研究等.目前,新的工艺方法如为制造设计、为装配设计、为试验设计、为服务设计等同步工程方法都证明是有效的.

从轮图的构成分析可知,支撑机械制造业的四大支柱是机械设计、机械加工工艺、应用力学和控制系统技术.要使机械制造业迅速发展,达到高效、优质、低成本地制造产品的要求,这4个方面都必须充分发展.在当今信息化时代,更应该使他们在信息化方向上加速进展.

但问题随之而来,传统的机械制造中,技术职工的“绝活”是一种技能(Skill),表现为技术职工的经验与操作,有许多是不好用数学公式、曲线、图表来描述的,即难以用信息的形式来表述.那么,要利用信息技术及信息化工具来改造传统机械制造业,就必须研究技能信息化的问题.其途径之一,就是拟人化方法,亦即采用信息化的工具(如计算机)来模仿人类的经验与操作.

在机械设计方面,利用计算机辅助设计功能来取代传统的经验设计,取代手工绘图,让年长的有设计经验的工程技术人员掌握计算机等信息化工具,将设计提高到一个新的水平.近年来,计算机辅助设计(CAD)的成果,为实现这一目的提供了技术手段.“开目CAD”软件的研制成功,推动了设计绘图拟人化的进程.

在机械加工工艺方面,CNC机床的出现,是对传统机械制造的突破.数控(NC)技术是柔性制造的核心技术.国内外的大量实践证明,谁在NC技术上处于领先地位,谁就在制造企业中占主导地位,日本、德国以他们各自的NC技术优势而居制造技术的国际

领先地位. 数控技术的核心是数控系统, 近年来, 广泛应用 32 位微机, 使数据处理速度提高了两倍, 使数控技术由硬件数控进入软件数控时代. 因而, 数控机床的成本构成, 90 年代的比例为: NC 系统 (含硬、软件) 占 70%, 而机械部分只占 30%. 数控系统的可靠性大为提高, 数控装置平均无故障时间已达 1 万小时. 数控技术从应用于铣削、车削过程开始, 目前已推广应用到各类机床上, 近 10 年来, 已推广应用到多轴联动的工具磨床上, 甚至超精密加工机床上. 数控加工技术与工艺的应用, 使人们有必要对传统加工技术与工艺进行观念更新.

计算机辅助工艺编程 (CAPP), 也是一个工艺规程编制的信息化问题. 传统的方法是, 工艺人员经过多年的实践, 积累了大量的工艺信息和经验, 根据产品的技术要求, 结合企业的现有条件, 拟定出加工工艺规程. 这是一项费时的、枯燥乏味的重复劳动, 但也是一项复杂的、高技能化的劳动, 非有长期的经验积累不可. 为了改变这种状况, 人们试图研制各种版本的 CAPP 系统, 尽管取得若干实用成果, 但在技能信息化方面, 还有许多问题需要探索与研究.

在加工过程控制系统技术方面, 计算机控制技术已广为应用, 多传感器融合、神经网络、模糊控制等理论与方法, 可用来监控加工过程的状态. 华中理工大学研制成功的运动误差计算机辅助实时检测与控制系统, 在精密丝杠磨削误差补偿、滚刀铲磨导程误差的补偿、滚齿机运动误差补偿、数控机床轮廓误差的补偿控制等方面均取得了实用化成果, 证明用计算机来模仿人类的经验与操作, 可以部分地解决熟练技工短缺的问题. 有学者认为, 下一代的制造系统, 应具备以下 4 项条件, 即

- ① 系统能在世界任何地方制造与供应产品;
- ② 系统应具备熟练工人具备的工作“诀窍” (Know-how) 或技能;
- ③ 系统应具有高生产率, 以解决劳动力短缺问题;

④ 系统不仅能适应多品种小批量生产,也能满足个别用户的特定要求.

作为下一代制造系统中的构成单元,从日本 FANUC 公司已开发的几个产品看,说明这些产品基本上能将人类的经验与操作过程实现计算机化.

在应用力学方面,无论是结构力学、材料力学、流体力学,还是热力学、塑性力学等领域的研究,均已广泛采用计算机辅助工程.有限元法、边界元法以及其他数值分析计算方法的研究成果,为机械制造提供了更符合工程实际的定量分析工具.作为一个独立的学科门类,应用力学正朝自身的方向发展、深入、完善.

面对机械制造信息化的要求与发展趋势,作者确定撰写本书,其基本出发点是:

① 计算机硬件目前已相当完备,满足加工过程数控所需功能与处理信息能力的计算机硬件,可以在市场上购买到,不必像模拟电子电路那样需要该专业的深入知识.因此,机械制造专业的技术人员只要有选择硬件、应用硬件的能力,就不会遇到专业能力所不及的重大障碍.似乎可以这样说,为解决加工过程数控问题,在计算机硬件的选配上,各个专业领域的人员处于同等的地位.这一点,机械制造专业的人员要破除对计算机硬件的神秘感.

② 根据应用软件的开发,力求事务管理通用化、过程控制专业化的精神,加工过程数控软件应以机械制造专业人员为主来开发,因为他们懂得加工过程的物理本质,能获得软件、硬件的最佳匹配.可见,加工过程数控技术的研究,是当今机械制造专业技术人员的一项不可忽视的任务.

③ 过程控制工程.计算机控制理论与技术等学科领域的成果,为加工过程数控提供了应用理论基础.因此,本书的任务是试图将计算机控制理论与技术和加工过程控制有机地结合起来,只是针对加工过程数控中的一些特殊要求(如实时性要求高等),完善、补充某些理论,而不作大量的控制理论研究.加强本书的针对

性、实用性、可操作性是作者努力的方向。

④ 加工过程数控涉及多学科的综合知识,如机械制造、计算机技术、传感技术、数据处理等方面的知识,在撰写本书时,也力求突出多学科集成的特点。

⑤ 作为教材,作者希望通过诸多的应用实例,不仅介绍成果本身,而且也注意阐述解决问题的思路,分析多种解决问题的方案,给读者以举一反三的启发。

加工过程数控,如同加工工艺一样是一个非常活跃的领域,技术日新月异,但一些规律性的认识应该是具有长期指导意义的。如果通过本书能给读者提供某些有指导意义的内容,则达到了作者撰写本书的意图。