

文章编号: 1002 - 0411(2003)03 - 0245 - 06

高性能运动控制在数控系统中的应用综述

王军平¹ 王安² 敬忠良³ 陈全世¹

(1. 清华大学汽车工程系汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084;

2. 西北工业大学自动控制系 西安 710072; 3. 上海交通大学航空航天信息与控制研究所 上海 200030)

摘要:分析了在高速高精度加工中设计高性能运动控制器时存在的问题及面临的挑战,评述了高性能数控系统运动控制器设计方法的发展现状,对存在的主要问题和今后可能的发展方向作了进一步的探讨.*

关键词:数控系统;高速加工;运动控制;开放式体系结构

中图分类号: TP13

文献标识码: A

A SURVEY ON THE HIGH PERFORMANCE MOTION CONTROL AND ITS APPLICATION TO CNC SYSTEMS

WANG Jun-ping¹ WANG An² JING Zhong-liang³ CHEN Quan-shi¹

(1. Department of Automotive Engineering, State Key Laboratory of Automotive Energy and Safety, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;

3. Institute of Aerospace Information and Control, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

Abstract: High speed machining faces many difficult problems and the design of high performance motion controller is a challenge project. In this paper, the design methods for high performance motion controller and its existing problems are analyzed and discussed and the research and development directions are described.

Keywords: CNC, high-speed machining, motion control, open system architecture

1 研究背景 (Research background)

现代科学技术给机械制造业带来了深刻的变化.一方面,它们促使形成国际上的激烈竞争市场,使用户对产品质量、品种和价格的要求越来越严格,在机械制造业中表现为高精度、多品种、小批量、低成本和快周期的生产要求;另一方面,它们与机械制造科学技术的结合,为机械制造产业适应这种发展趋势提供了重要的系统理论和实现的技术基础^[1].

数控机床正是适应这种需求而正在发展着,已发展有加工中心、柔性制造单元等.它们是电子技术、信息技术和机床技术相结合的产物.近十几年来,国外数控机床技术发展很快.我国数控机床技术发展相对工业发达国家来说,无论在产量、产值和拥有量的数控化率方面,还是在品种、性能和可靠性等技术方面,都还有很大差距.因此,根据国内外机械制造自动化发展现状,从我国的实际出发,除必要的跟踪研究以外,集中必要的人力和资金研究机械制

造自动化关键设备和基础理论与技术,例如高性能新型数控系统、高精度伺服控制技术与主轴驱动技术等,对我国机械制造水平,特别是基础技术水平的提高,为更高层次的综合自动化的开发以及对国民经济的发展均具有重要意义.新一代数控装置,实现高速度、高精度、高效率和高可靠性的加工是优先考虑的问题^[1].应该指出,高速度、高精度、高效率和高可靠性 4 个高性能指标是统一的整体.要实现高性能控制,高性能数控系统伺服控制器设计是基础和关键技术之一.本文对其中一个重要研究方面——高性能运动控制在数控系统中的应用进行评述.

2 研究现状 (Present situation)

2.1 面临挑战

高速高精度加工是目前最重要的研究领域之一,其目的在于提高机械加工生产率及改善加工质量.然而,高速高精度加工在实用之前也面临着许多挑战.最主要的问题是在存在扰动、非线性、模型和

* 收稿日期: 2002 - 02 - 01

基金项目: 国家教育部留学回国人员基金资助项目; 跨世纪优秀人才培养计划基金项目; 航天科技创新基金资助项目

参数不确定性的情况下设计高性能的伺服控制器^[2]。当使用有限带宽的伺服控制器时,伺服延迟也成为引起位置误差的主要原因,并会随着高速加工时进给速度的提高而更加严重。现代加工系统由伺服系统所支持,伺服控制器的性能和加工质量、效率密切相关。从机床控制系统的角度看,机床控制是一个动态系统,控制系统中不确定因素的产生主要是由于^[1]:1)系统的输入包含有随机扰动;2)系统的测量传感器具有测量噪声;3)系统数学模型的参数甚至结构具有不确定性。我们把第一、二类不确定因素称为不确定环境因素,把第三类不确定因素称为不确定模型因素。传统的数控系统对机床的控制主要采用经典控制论方法^[3]。大部分是PID控制,PID控制器以其结构简单、使用方便和运行可靠等优点在运动控制中也经常被采用。不过在解决系统中存在着非线性因素不易定量描述的控制问题时,PID控制器显得力不从心。由于PID控制器的结构本身以及算法设计依赖对象的局限性,使得精度的改善导致动态性能的减弱,而动态性能的改善,又使执行机构庞大且能耗增加;再者,在从事具有快速高精度和鲁棒性要求的运动控制系统的设计时,同一控制器不仅用来改善输入输出的动态性能,而且还用来消除负载扰动,要想得到使系统具有满意的动静态性能指标的PID参数整定算法是相当困难的。由于经典控制论方法完全依赖于精确数学模型,只能实现随机控制,所以这类系统对不确定模型因素无能为力。而对不确定环境因素的处理则依赖于控制模型的非线性能力。这类控制系统的不确定因素处理能力是极为有限的。现代控制论中的自适应控制技术的作用是跟踪系统参数、环境条件和输入信号等,然后通过改变内回路的补偿元件的参数而获得满意的性能。由于传统数控系统的专有体系结构,系统的控制策略难以更新,实现自适应控制需要较高的成本和代价,而自适应控制对控制性能的改善也不够显著,所以自适应控制并没有成为机床控制中的主流技术。

另外一个难题是实现高速加工过程和数控加工状态的监控^[2]。加工过程和数控加工状态主要包括下列几方面的因素^[3]:1)控制执行机构状态;2)各运动轴状态;3)刀具状态;4)机床辅助功能工作状态等。状态反馈信号主要来自于各类传感器。由于目前传感技术的限制,要全面地反馈以上加工状态信息还不太现实。特别是对于刀具状态和工件状态的测量,目前还缺乏有效的手段。传统机床控制系统中,

位置测量和反馈是比较成熟的技术。位置测量传感器目前的热点技术是实现数字反馈。用于监视伺服电机等机构的测力、测速传感器也基本可满足控制系统需求。而对刀具、工件状态的实时测量,目前还主要处于研究阶段,虽然不断有新方法、新技术涌现,但总体来说,实现技术比较复杂、实现代价比较昂贵,一时还难以实用化。反馈能力的不足已严重制约了机床控制智能水平的提高,成为进一步改善机床控制性能的瓶颈。所以用于测量刀具状态、工件状态、机床特性等加工要素的新型传感器技术以及利用目前的传感器对上述状态进行融合估计或软测量是机床智能控制的一个重要研究方向。最后,即使新型的传感器、各种伺服控制算法以及过程控制策略是完善的,其应用也受到传统的闭式数控机床的限制。因此,研究开放式、模块化的数控系统体系结构成为另一重要课题^[4]。

2.2 运动控制研究现状

工件的尺寸精度由轮廓精度所决定,这个事实激发了许多研究者将重点放在了改善轮廓精度上。改善轮廓精度的方案主要分为两类:1)基于多轴协调运动的控制方法^[5,6];运动控制系统中的基本问题就是要求多轴联动以实现具体的性能指标。Koren提出了多轴协调运动控制,Kulkarni详细研究了多轴协调运动补偿控制策略并提出了最优方案。Tomizuka等人在多轴协调控制器的基础上增加了自适应前馈策略以改善其暂态性能和抑制干扰的能力。但上述各类方法的局限性在于其多轴协调指标是线性的。Keron提出了一种变增益的多轴协调控制器,但系统的稳定性尚未证明,其难点在于几何轮廓的时变特性难于和传递函数结合在一起进行分析。Chiu在考虑非线性协调指标下对于相对阶为1的系统提出了综合控制算法。Kokotovic利用积分反推的办法去掉了相对阶的限制。肖本贤将智能控制引入协调控制中,利用自适应模糊控制手段向各联动轴提供附加补偿,以提高系统鲁棒性。但以上算法都没有考虑模型不确定性和外部干扰的影响,这也是当前研究的一个方向。2)基于提高单轴运动精度的方法;大部分研究者将重点放在通过提高单轴的跟踪精度来实现小的轮廓误差上。其中,Lee的工作是此类方法的代表。他们提出了综合前馈摩擦力补偿、扰动观测器、位置反馈控制器以及前馈控制器为一体的总体控制结构,即基于扰动观测器(DOB)的高性能伺服系统^[2]。文献[4]对该控制策略作以改进,将工件加工状态以及统计信息也融入控制系统的设

计.图1反映了这一重要而实用的控制策略模型. Ohnishi 提出扰动观测器后由 Umeno 加以改进,其作用在于补偿扰动和模型不确定性,使得系统对模型不确定性更具鲁棒性.扰动观测器不局限于连续扰动,而且抑制扰动的带宽也易于调整.但是由于它是基于线性系统理论设计的,因而不能有效地抑制不连续扰动.比如,摩擦力会引起很大的位置误差.因此,前馈摩擦力补偿器用来改善系统的鲁棒性.对于非线性摩擦力补偿,常用的方法有^[7,8]:基于指数型非线性函数的在线补偿法,基于神经网络的逆控制器补偿法等.前馈控制器可采用最优预测控制、零相位误差跟踪控制、重复控制等^[9].位置反馈控制通常采用 PID 控制.但当系统参数变化较大或运动轨迹存在非连续加速度时,DOB 则并不十分适当,并且对于运动控制中的驱动饱和的影响没有考虑^[10,11].为此,研究者将思路转向自适应控制.但由于缺乏鲁棒性,传统的自适应控制系统在实际应用中遇到了很大困难,而以鲁棒化再设计、鲁棒优化原理和智能

化思想为特征的鲁棒自适应控制受到欢迎,并引起了理论研究者的关注^[12,13].为解决参数不确定性和非线性模型不确定性, Yao 提出了新的运动控制方法,即自适应鲁棒控制^[14].该方法综合了自适应控制和确定性鲁棒控制的设计方法,扬长避短,保留了二者的优点而又克服了确定性鲁棒控制不能保证暂态性能,自适应控制鲁棒性差的缺点.通过适当的控制器结构设置,可以保证鲁棒控制既有良好的暂态性能又有较好的跟踪精度;在自适应控制中通过参数学习可以达到渐进跟踪,而不需要利用非连续控制律或高增益反馈的办法. Al-Majed 提出了基于线性自适应鲁棒控制(ARC)的高性能伺服系统设计方法^[2],通过在数控系统以及高速大容量硬盘控制系统中应用,证明了 ARC 比 DOB 具有更好的跟踪性能^[2,15,16].此外,基于 DOB 或 ARC 的监督控制^[17,18]、多速率采样控制^[19]在运动控制系统中也得以应用.

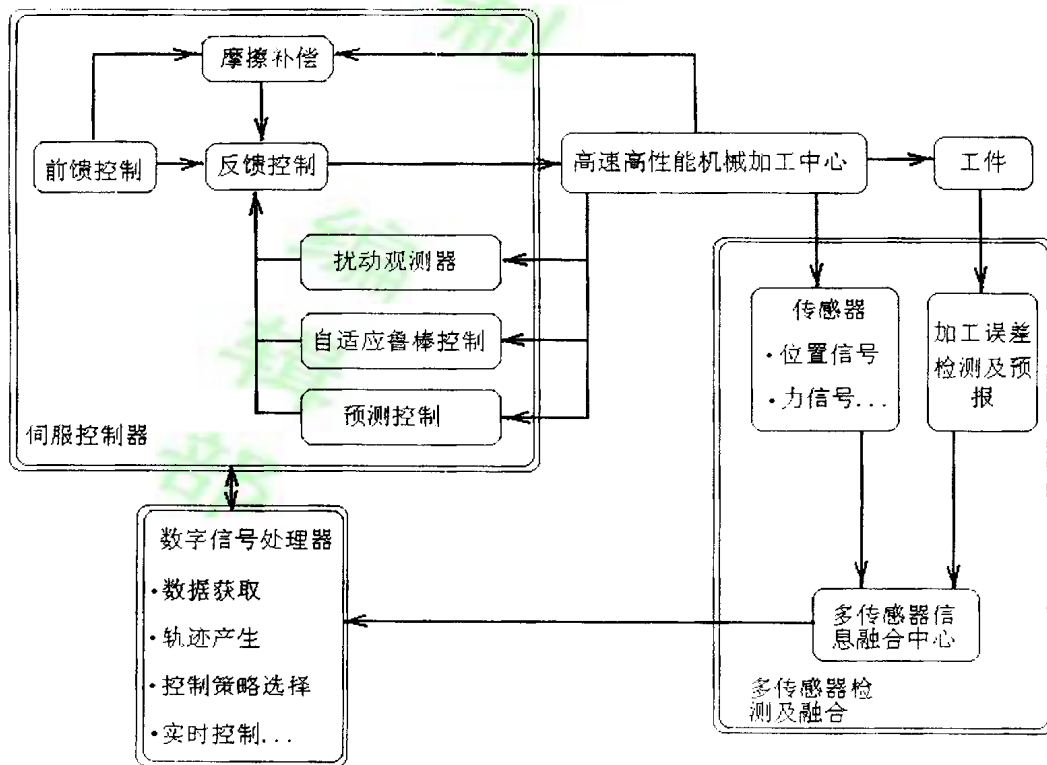


图1 数控系统中的运动控制策略

Fig.1 Control strategy of CNC system

滞后是工业过程中固有的特性,被认为是本来就存在于物理系统中的最难控制的动态环节.时滞

较大时,将导致较大的超调量和较长的调节时间,甚至出现错误的控制,严重影响生产过程的控制品质.对于时延系统,最流行的方法是 Smith(1957)提出的 Smith 预估器.但该方法对模型精度比较敏感,为消除此影响,Al-Majed 提出了基于 DOB 的 Smith 控制方案^[21].自 70 年代以来,人们一方面为了提高数学模型的精确程度及考虑不确定性因素的影响加强了对系统辨识、工业过程建模、自适应控制、鲁棒控制等方面的研究,另一方面开始突破传统控制思想的约束,试图面向实际工业过程的特点研究发展各种对模型要求低、在线计算简单方便、实时性好、控制效果佳的控制新算法.另一方面,计算机技术的飞速发展,也为新的控制策略提供了良好的运行平台和基础.预测控制就是在这种情况下发展起来的一类新型控制算法^[20].预测控制的出现为解决大延迟系统控制的难题开辟了一条新的途径.近 20 年来,国内外预测控制的研究和应用日趋广泛.研究范围^[21]已经涉及到预测模型类型、优化目标种类、约束条件种类、控制算法以及稳定性、鲁棒性等方面,也包括多变量系统、非线性系统.随着预测控制理论研究的不断深入,研究领域的不断扩展,越来越多的学者开始尝试把其他控制理论与预测控制相结合,形成了许多新的预测控制方法^[22,23],如:基于神经网络的预测控制;模糊预测控制;灰色预测控制;基于神经网络的自适应模糊预测控制等.

2.3 多传感器信息融合理论在加工中的应用现状

多传感器信息融合(MSIF)是一个信息处理过程,它将来自不同途径、不同时间、不同空间的传感器信息协调成统一的特征表达,以完成对某一对象和环境特征的描述.现代工业生产以综合、复杂、大型、连续为其特点,采用了大量各式各样的传感器来监测和控制生产过程.在这种多传感器系统中,各传感器所提供信息的空间、时间、表达方式不同,可信度、不确定程度不同,侧重点和用途也不同,这对信息的处理和管理提出了新的要求.实践证明,单一的传感器很难正确反映加工状态,向多传感器信息融合发展是必然之路.多传感器能够提供加工过程多方面的信息,对这些信息进行综合和知识提取(即信息融合),进而对加工过程进行正确的预测和控制.信息融合技术在机械加工中的应用主要在于刀具状态监控、加工精度预测、误差补偿等方面.MSIF 与工业监测控制结合,将给传统的工业监测控制带来新的机理,可望形成一种新型的工业监测控制系统^[24].

提高加工精度常用的方法有:基于提高机床精度的避免误差技术和基于消除误差本身的误差补偿技术^[24].由于随着机床精度的提高,所需的成本也将成倍增长.因此,在现有设备条件下,对于一般工件的加工,误差补偿技术将是一种行之有效的方法.加工误差建模预报技术是提高加工精度、减少加工误差、进行误差补偿的关键技术.国内外很多文献对误差补偿进行了大量研究,提出了多种建立误差补偿模型的方法,如三角关系法、有限元法、齐次坐标变换法和神经网络法等.加工过程状态信息包括切削速度、切削深度、进给量、振动、切削力、主轴电机电流、进给电机电流、声发射、刀具磨损度等,这些信息都与加工精度有关^[3,24].如何从众多的信息源中得到误差或状态补偿信号与信息源的映射关系,其中人工神经网络法有非常强的学习能力和非线性映射能力,并且与其他方法相比具有直接性,经过适当训练能准确地实现从误差源到定位误差的映射,避免了其他方法工作量大或边界条件不充分的缺点,因此基于神经网络的信息融合技术将在误差补偿中得到广泛的应用.工程实际系统中,输入输出信号易受到噪声污染,随机模糊神经网络的出现为解决此类问题提供了思路^[25,26].小波分析理论被认为是傅立叶分析的突破性进展^[27].小波变换通过尺度伸缩和平移对信号进行多尺度分析,能有效提取信号的局部信息.小波神经网络继承了两者的优点,通过训练自适应地调整小波基的形状实现小波变换,同时具有良好的函数逼近能力和模式分类能力.有些文献利用神经网络^[28]或小波神经网络^[27]进行刀具状态监测.但他们的工作大都是针对某一种工件或加工方法,所采用的预报模型也大都是基于大量历史加工数据的单一预报方法,切削条件变化或历史数据少时,预报精度将下降.因此,结合加工过程状态信息和历史加工数据建立具有自学习能力、较强的鲁棒性和自适应性的在线智能预报模型是目前迫切需要解决的问题.

2.4 数控系统开放式体系结构的研究简介

数控系统是一种专用的计算机系统,它用于工业现场控制,因而和通用计算机有许多区别.长期以来,数控系统的发展自成体系,建立自己的软硬件结构,实行技术保密和技术封锁,从而使得机床生产厂家和最终用户很难进行二次开发,限制了机床和数控系统的能力.当数控机床进入分布式控制和柔性制造系统环境,甚至要求与 CAD/CAPP/CAM 等共同信息系统通讯后,原有的以单机服务为对象的 CNC

装置显得不够用了,新的环境要求 CNC 装置进一步向开放式数控系统转化.开放式体系结构普遍采用模块化、层次化的结构,并通过各种形式向外提供统一的应用程序接口,具有可移植性、可扩展性、互操作性和可缩放性等特点,即系统组成的内部开放化和系统组成部件之间的开放化.目前,开放式体系结构方面的研究主要集中在基于 PC 机的控制模块功能划分;控制模块的软硬件实现;接口协议的划分及制订;体系结构的参考模型研究;面向开放式体系结构的机床控制系统的规划、设计与实现以及智能数控体系结构等^[29].实际上,从实用化的角度来看,开放式体系结构的研究还处于初期阶段,还有许多问题需要解决,具体在发展展望中作以阐述.

3 发展展望 (Development prospect)

虽然对于高性能数控系统伺服控制器设计方法的研究如此广泛,但要真正达到高性能、智能化,特别是实用化,还存在不少问题.归结为以下几个方面,作为今后研究工作的参考.

(1) 如何进一步提高控制器的整体性能? 有效地综合运用当前现代控制理论和智能控制理论的研究成果来提高控制器的性能以达到避免误差的目的,运用基于多传感器信息融合等理论的加工误差智能建模预报技术来达到误差补偿的目的,二者的结合是有效的研究思路.

(2) 前面所述及的有关设计方法仍然存在各自的缺点,因此高性能的控制器设计依赖于这些相关技术的进一步完善.比如,预测控制理论中的稳定性和鲁棒性分析亟需突破;针对工业过程大量存在的非线性及不确定等系统的特点,非线性预测控制和鲁棒预测控制将成为今后研究的重点;如何将自适应鲁棒控制用于时延系统和高阶系统中等.因此,进一步完善并改进这些方法是今后发展的一个方向.这些研究方向包括多轴非线性动态系统辨识与建模;相对于干扰和参数变化的鲁棒反馈控制;相对于性能变化的鲁棒前馈控制;相对于时间延迟的预测控制;基于扰动观测器的高性能控制系统设计;基于非线性自适应鲁棒控制的高性能控制系统设计;多轴运动协调控制;智能监督控制;轨迹规划等.

(3) 基于多传感器信息融合等理论的加工误差智能建模预报技术是系统辨识、模式识别、多传感器融合技术、预测理论、神经网络、模糊系统、小波变换、分形理论和基于知识的决策与控制等技术的综合应用,因此充分利用以上各种技术的优势并继续

注重学科的交叉研究是至关重要的.

(4) 控制策略的实现问题实际上就是开放式体系结构的研究,这也是实现高性能、智能化数控的关键技术.从目前的研究成果来看,开放式体系结构还没有统一,明确的概念内涵、系统实现技术还处于百家争鸣时代.目前还有许多问题有待进一步研究:解决 Windows 等操作系统的实时性问题;各系统之间的体系结构缺乏兼容性;缺乏实时性的传输控制协议;各类面向对象的新的数据表达方法必须与开放式数控系统相容;作为完全开放的数控系统,其安全性和可靠性受到很大的威胁,因此可靠性与安全性的研究也是有必要的.

(5) 数控系统体系结构除了开放化以外,网络化、软件化将是一个趋势,也将是研究的重点.软件数控是数控系统的新概念,“包括伺服控制在内的控制决策完全用基于 PC 的软件实现”及“核心控制策略的用户开放性”是软件数控的两个基本特征^[29].这种开放结构不仅支持运动控制策略的定制,完全面向数控系统的智能化实现,使得数控系统具有更大的性能空间和更好的系统交互性,而且可以充分借鉴相关学科的最新成果,从而促进数控技术本身的快速成长.要实现软件数控,系统对 CPU 的计算能力提出了更高的要求.更高性能的处理机、更优化的实时调度能力,是软件数控能达到满意控制性能的基础.

参 考 文 献 (References)

- 1 黄大贵.微机数控系统[M].成都:电子科技大学出版社,1996
- 2 Al-Majed M. High Performance Machine Tool Controllers- A Control Theoretic Study and a PC-Based Realization[D]. USA: University of California at Berkeley, 1997
- 3 雷为民,乔建中,等.智能数控实现技术分析[J].小型微型计算机系统,1999,20(8):593~599
- 4 王军平,敬忠良,等.基于开放式体系结构的数控系统控制策略研究[J].机械科学与技术,2000,19(增刊):169~170
- 5 Srinivasan K, Kulkarni P K. Cross-coupled control of biaxial feed drive servomechanisms[J]. ASME Trans. J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1990, 112: 225~232
- 6 Chiu G T C. Coordinated position control of multi-axis mechanical systems[J]. J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1998, 120: 159~166
- 7 丛爽.运动控制中先进控制策略的研究综述[J].微特电机,1998,(1):2~8
- 8 de Wit C C, et al. A new model for control of systems with friction[J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1995, 40(3): 419~425
- 9 Tomizuka M. Zero phase error tracking algorithm for digital control[J]. ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1987, 109

- (3) :65 ~ 68
- 10 Lee A, Hedrick K. Some new results on closed loop stability in the presence of control saturation[J]. *Int. J. Control* , 1995 ,**62**(3) :619 ~ 631
- 11 王军平,王 安,敬忠良,等. 抗漂移的状态反馈控制器设计及在数控系统中的应用[J]. *西安交通大学学报* ,2002 ,**36**(4) :365 ~ 368
- 12 席裕庚,等. 预测控制的研究现状和多层智能控制理论与应用[J]. *控制理论与应用* ,1989 ,**6**(2) :1 ~ 7
- 13 梁 军,杜 丽. 自适应控制系统鲁棒性研究评述[J]. *信息与控制* ,1998 ,**27**(3) :197 ~ 205
- 14 Yao B. Adaptive Robust Control of Nonlinear Systems with Application to of Mechanical Systems[D]. USA: University of California at Berkeley , 1996
- 15 王军平,王 安,敬忠良,等. 数控系统的自适应鲁棒控制器设计[J]. *西安交通大学学报* ,2002 ,**36**(6) :612 ~ 615
- 16 Li Y. Two Degree of Freedom Control for Disk Drive Servo Systems[D]. USA: University of California at Berkeley , 2000
- 17 Ozaki M. Supervisory Control of Drilling of Composite Materials[D]. USA: University of California at Berkeley , 2000
- 18 Furness R J, Ulsoy A G, Wu C L. Supervisory control of drilling[J]. *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control* , 1996 , (118) :10 ~ 19
- 19 Gu Y. Multi-rate Digital Control and Signal Processing: Theory and Application to Motion Control Systems[D]. USA: University of California at Berkeley , 2000
- 20 褚 健,潘红华,苏宏业. 预测控制技术的现状和展望[J]. *机电工程* ,1999 ,5 :3 ~ 7
- 21 Juan M, Sanchez M, *et al.* Adaptive predictive control: limits of stability[J]. *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing* .1997 ,**11**(3) : 216 ~ 230
- 22 Tomizuka M. Model based prediction, preview and robust controls in motion control systems[A]. *IEEE 4th Advanced Motion Control[C]*. Mie , Japan :1996 .197 ~ 202
- 23 毕效辉,姚琼荟. 灰色预测在过程控制中的应用[J]. *西南工学院学报* ,1997 ,3 :1 ~ 11 \ = 24 陈美华,周道远,李小隼. 加工误差智能建模与预报技术的发展应用[J]. *云南工业大学学报* , 1998 ,**14**(3) :6 ~ 9
- 25 Jing Z L, Luo A C J, *et al.* A stochastic fuzzy neural network for nonlinear dynamic systems[J]. *Int. J. of Intelligent Control and Systems* . 1999 ,**3**(2) :193 ~ 203
- 26 张 骏. 随机模糊神经网络理论及应用[D]. 西北工业大学, 1999
- 27 Pittner S, Kamarthi S V, *et al.* Wavelet networks for sensor signal interpretation in flank wear assessment[A]. *Proc. of Second World Congress on Intelligent Manufacturing Processes & Systems[C]*. Budapest :1997 . 82 ~ 87
- 28 Nadgir A, Ozel T. Neural network modeling of flank wear for tool condition monitoring in orthogonal cutting of hardened steels[A]. *4th Int. Conf. on Engineering Design and Automation[C]*. Orlando, Florida, USA:2000 .1 ~ 6
- 29 雷为民,乔建中,等. 关于软件数控的一些基本构想[J]. *小型微型计算机系统* ,1999 ,**20**(2) :81 ~ 87

作者简介

王军平(1974 -) ,男, 博士生.研究领域为高性能运动控制及应用, 模式识别与智能控制等.

敬忠良(1960 -) ,男, 教授,博士生导师,国家教育部“长江学者奖励计划”特聘教授.研究领域为高性能运动控制及应用, 信息融合理论,模式识别与智能控制等.

王 安(1960 -) ,男, 副教授.研究领域为过程控制及自动化仪表, 数字信号处理.