

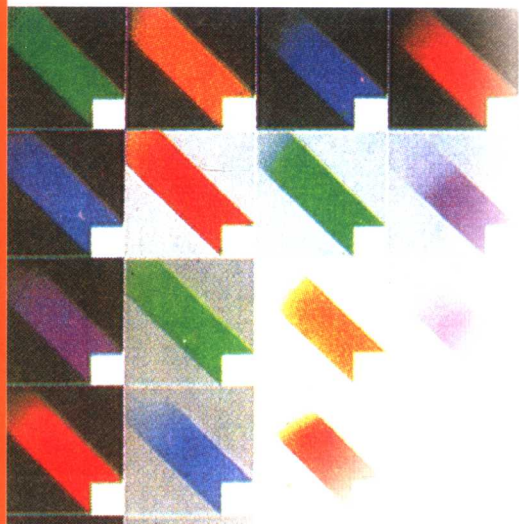
斛兵博士文丛

HUBING BOSHI WENCONG

开放式网络化 齿轮加工数控系统研究

著 韩 江 ● 导师 王治森

合肥工业大学出版社



合肥工业大学研究生科技创新基金资助出版

开放式网络化齿轮加工 数控系统研究

著 韩 江 导师 王治森

合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

开放式网络化齿轮加工数控系统研究/韩江著. —合肥:合肥工业大学出版社,2007.10
(斛兵博士文丛)

ISBN 978-7-81093-678-1

I. 开… II. 韩… III. 齿轮加工—数控系统—研究 IV. TG61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 165942 号

开放式网络化齿轮加工数控系统研究

韩 江 著 策划编辑 马国锋 责任编辑 权 怡 章 建

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2007 年 10 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2007 年 10 月第 1 次印刷
邮 编	230009	开 本	710×1000 1/16
电 话	总编室:0551-2903038	印 张	11.25
	发行部:0551-2903198	字 数	172 千字
网 址	www.hfutpress.com.cn	印 刷	合肥创新印务有限公司
E-mail	press@hfutpress.com.cn	发 行	全国新华书店

ISBN 978-7-81093-678-1

定价:28.50 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换。

《斛兵博士文丛》出版委员会学术委员会

主任委员：徐枏巍

副主任委员：陈心昭 赵 韩

委 员(按姓氏笔画为序)：

史铁钧 刘全坤 陈心昭

张崇巍 杨伯源 费业泰

赵 韩 钟玉海 徐枏巍

出版编辑委员会

主任委员：吴玉程 马国锋

委 员：朱 红 孟宪余 曹 兵

郭志勇 王连超 权 怡

出版说明

为贯彻教育部《关于实施研究生教育创新计划 加强研究生创新能力培养 进一步提高培养质量的若干意见》(教研〔2005〕1号)文件精神,培养研究生创新意识、创新能力,提高研究生培养质量,合肥工业大学设立了研究生科技创新基金,以支持和资助研究生的教育创新活动,为创新人才的成长创造条件。学校领导高度重视研究生教育创新,出版的《斛兵博士文丛》就是创新基金资助的项目之一。

《斛兵博士文丛》入选的博士学位论文是合肥工业大学 2006 届部分优秀的博士学位论文。为提高学位论文的出版质量,《斛兵博士文丛》以注重创新为出版原则,充分展示我校博士研究生在基础与应用研究方面的成绩。

《斛兵博士文丛》的出版,得到了相关兄弟院校和有关专家的大力支持,也得到了研究生导师和研究生的热情支持,我们谨此表示感谢,希望今后能继续得到他们的支持与帮助。

我们力求把这项工作做好,但由于我们经验不足和学识水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者给予批评指正。

合肥工业大学研究生学位论文出版编辑委员会

2007 年 11 月

总 序

当今世界科学技术突飞猛进,知识经济飞速发展,以经济和科技为基础的综合国力的竞争日趋激烈。而科技的竞争、经济的竞争乃至综合国力的竞争,归根结底是人才的竞争。面对新的形势、新的要求,党中央先后作出了实施“科教兴国”、“人才强国”战略和走自主创新道路,建设创新型国家的重大决策。胡锦涛同志在党的十七大报告中又提出,建设人力资源强国和创新型国家是我国全面夺取建设小康社会新胜利的两大新目标。高等学校是国家创新体系的重要组成部分,肩负着培养自主创新型人才的历史使命。研究生教育处于高等教育的最高层次,是国家培养高层次创新型人才的主要渠道。研究生,特别是博士研究生的科研工作,一般处于本学科的前沿,具有一定的创造性。为鼓励广大研究生,特别是博士研究生选择具有重大意义的科技前沿课题进行研究,进一步提高研究生的创新意识、创新精神、创新能力,激励、调动我校博士研究生及其指导教师进一步重视提高博士学位论文质量和争创优秀博士学位论文的主动性和积极性,展示我校博士研究生的学术水平,为他们的尽快成才搭建平台,学校经过精心策划,编辑出版了《斛兵博士文丛》。

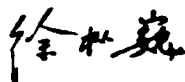
此次入选《斛兵博士文丛》的论著,均为2006年毕业并获得博士学位的博士研究生学位论文,是在广泛动员、严格把关的基础上,根据质量第一、公平公开、规范评审的原则认真遴选出来的。同时这些论著注重坚持基础研究与应用研究并举,是兼顾理论价

值与实践意义的最新研究成果。可以说,这套《斛兵博士文丛》(第一卷)虽然也可能有这样或那样的不足,但基本反映了我校博士研究生所具有的坚实的理论基础、系统的专门知识,以及较高的学术造诣和分析能力;体现了他们崇尚学术、追求真理、勇于创新的科学精神,实事求是、严谨认真的治学态度,不断进取、追求卓越的学术品格;展现了我校“勤奋、严谨、求实、创新”的校风学风。

建校 62 年来,学校充分发挥人才培养、科学研究和服务社会的功能,为国家和社会培养了一大批杰出人才,一代又一代的莘莘学子在这里勤奋耕耘、茁壮成长。出版《斛兵博士文丛》也是我校实施研究生教育创新工程、培养研究生创新精神、提高研究生创新能力的一个重要举措。合肥工业大学经过 62 年的建设和发展,逐步形成自身的办学特色,也取得许多令人瞩目的成就。我们正在不断改善办学条件,逐步完善相关政策,营造有利于高层次创新型人才尽快成长的良好环境,确保学校多出人才、快出人才、出好人才。

我衷心希望广大研究生特别是博士研究生,发扬我校优良的传统、校风、学风,在合肥工业大学自由宽松、开放和谐、充满生机和活力的学术环境中奋发努力、锐意进取、勇于创新,通过自己的辛勤劳动和刻苦钻研写出更好的论文,为进一步提高我校的学术水平、科研创新能力和综合实力作出更大的贡献,努力把学校建设成为国内先进、国际知名的创新型高水平大学。

合肥工业大学校长
教授、博士生导师



二〇〇七年十一月

致 谢

本文是在导师王治森教授的悉心指导和关怀下完成的。从论文选题、方案实施到论文撰写的整个过程,都得益于导师敏锐的洞察力、渊博的学识和丰富的科研经验。值此论文成稿之际,谨向导师表示诚挚的敬意和深深的感谢!同时衷心感谢师母钱素珍女士在工作生活上对我的关怀和帮助!

导师严谨、求实的治学态度,对学术问题的敏锐感和洞察力,对研究工作忘我的投入和海人不倦的工作作风深深地感染了我,也将激励我在科学的道路上奋力拼搏。20多年的师生历程受益匪浅,所得颇深,师恩难忘!

感谢 CIMS 研究所曾经在一起工作和课题研究的张勇老师、张勇跃硕士、孙福清硕士、吴焱明老师、赵福民博士、高锬博士、方兴硕士、姜晓林硕士、褚学宁老师、陈怀莉老师、王纯贤老师、徐万斌老师、马治堂老师等给予的帮助。

感谢 CIMS 研究所的何凯老师、祖珣老师、何高清老师、余道洋老师、李良初老师、齐继阳老师、郑盛新老师等在课题研究过程中给予的关心和帮助。

感谢 CIMS 研究所 2004 级研究生张栋栋、张国权、陆青松、苏志远、胡静、刘向前、李小伟;2005 级研究生戴文明、夏静霆、唐保、次青波、田艺、王堃、李志鹏、谢捷等给予的帮助和协助。

感谢我的父母、岳父岳母和兄弟姐妹多年来对我的理解、关心和支持。

感谢我的妻子夏链和可爱的儿子韩夏阳,他们是我前进的动力和坚实的后盾。

向所有关心和帮助过我的老师、同学和朋友们,向论文中引用过文献的作者们表示感谢!

最后,再一次向我的导师王治森教授表示感谢!

韩 江

2006 年 12 月

摘 要

齿轮是机械行业量大面广的基础件,因此,随着应用范围的不断扩大,对其在加工精度、效率和柔性等方面的要求也越来越高了。开发齿轮数控机床是当今齿轮机床的发展方向,而数控系统是其核心。数控系统正朝着开放式、网络化、智能化和柔性化的方向发展,并不断满足对高速度和高精度数控加工的要求。本论文结合滚齿机数控系统的研制开发,重点开展了开放式网络化齿轮加工数控系统的研究与应用。

论文在分析滚齿机运动原理的基础上,研究了非全功能数控滚齿机和全功能数控滚齿机数控系统体系结构。针对全功能数控滚齿机展成分度链和差动链的数控处理方法不同,分析了基于软件插补和基于硬件控制两种特点,指出齿轮数控机床的展成、差动链控制的发展方向是软硬件结合,这样既易于加工各种非圆齿轮和修形齿轮,又易于实现高速响应和高精度控制。

论文全面系统地设计研究了六轴全功能数控滚齿机 STAR 数控系统的硬件和软件;重点介绍了面向对象的参数化特征自动编程模块;详细研究了基于刀具主轴基准信号的滚齿加工跟随插补算法,并推导了其计算公式;介绍了自行研制开发的全功能数控滚齿机 STAR 数控系统的应用实例。

论文指出,必须将数控系统的软件与底层的硬件、操作系统分离开来,才能实现真正意义上的跨平台开放性。基于上述分析研究,提出了基于量子框架的开放数控系统软件体系结构和采用量子编程的软件编程模式。在此基础上,设计研究了基于量子框架的开放式齿轮数控系统,并定义了主要软件功能活动对象的状态图,给出了部分程序。

论文分析了网络数控系统的功能和特点,给出了网络数控系统结构模型;引入 SERCOS 总线和现场总线技术,提出了一种基于 Windows 和 RTX

实时操作系统的纯软件的开放式网络数控系统及其三层体系结构:采用工业以太网的系统数据网,实现和 CAD/CAM 等系统的集成;采用现场总线控制网作为系统设备层的实时通信总线,实现实时性数据的有效、迅速的传输;选择运动控制总线——SERCOS 总线作为系统强实时性信息的传输网络,完成多轴伺服运动控制。开展了网络数控系统任务调度和网络通信的设计研究。

论文结合国家重点科技攻关项目,设计了齿轮准柔性自动生产线的总体方案及构成和主要功能;提出了设备代理的概念,解决了实现异构系统的互操作问题,并对其实现进行了深入研究;开发出基于设备代理的生产线网络监控服务系统,并应用在自行研制的圆柱齿轮(轴)准柔性自动生产线中,效果良好。

论文推导了非圆齿轮的设计公式;讨论了数控插齿机和数控滚齿机加工非圆齿轮原理;详细介绍了滚齿机加工非圆斜齿轮的方法,推导了滚齿加工非圆斜齿轮的四轴联动控制模型;讨论了传统的等弧长直线拟合非圆齿轮节曲线插补原理以及存在的弊端,并在此基础上,提出了采用三次样条分段连续拟合非圆齿轮节曲线的插补方法,研究了其拟合插补原理、预处理过程以及实时插补算法,并且进行了实证研究和仿真,指出该方法能更好地保证非圆齿轮的数控加工质量、效率和加工过程的稳定性。

最后,论文提出了一种改进的径向布齿非圆齿轮设计方法,分析了其与传统法向布齿非圆齿轮的区别、关系和应用特点,采用当量齿形和逐齿变位思想和方法,设计推导了径向非圆齿轮的数学模型,开展了三维实体设计,进行了加工仿真。

关键词: 齿轮 开放式网络化数控系统 数控滚齿机 量子框架 非圆齿轮 网络监控服务系统

ABSTRACT

Gears serve as the fundamental parts, which are widely employed in mechanical industry. As a result, the high demand for accuracy, efficiency and flexibility in processing is becoming more and more urgent. The development of gear CNC machine tools has been the orientation of gear machine tools recently. As the core, CNC system is sure to have the characteristics of open architecture, network, intelligence and flexibility, and has to meet the demand of high speed and high accuracy. In combination with the development of CNC system for hobbing machine tools, the open architecture gear machining CNC system basing on network is studied and applied in this book.

Based on the analysis of motion principle of hobbing machine, the architecture of CNC hobbing machine with non-global function and global function is studied. In light of the different CNC processing methods of the generated chain and differential chain of global-function hobbing machine, the characteristics of software-interpolated and hardware control are analyzed. Furthermore, it is pointed out that the combination of software and hardware is the orientation of generated chain control and differential chain control of gear CNC machine tools. Therefore it is convenient to process various non-circular gears and shape-repaired gears, and implement high response and high-accuracy control.

The hardware and software of STAR CNC system for the six-axis global-function CNC hobbing machine tools are designed systematically and comprehensively in this paper. The object-oriented, parameterized auto-

matic programming module of STAR CNC system is developed. The chasing interpolation algorithm of hobbing machining based on the reference signals of tool spindle is studied in detail and its calculation formulas are given. Meanwhile, the application examples of STAR CNC system are introduced.

This paper also indicates that only by separating the CNC system software from hardware and operation system can we carry out the practical open system regardless of the platforms. The architecture of open CNC system software basing on quantum framework and the pattern of quantum programming are put forward in this paper. In view of this, the open gear CNC system based on quantum framework is researched and designed. Besides, the state charts of active objects of main software function are defined and parts of the programs are given in this paper.

The functions and characteristics of network NC system are also analyzed in this book, and systematic and structural model of the network CNC system is given. The techniques of SERCOS bus and field bus are introduced; the open and interconnected NC software system based on Windows and RTX is put forward. Besides, three-level structure of the network CNC system is as follows. Firstly, systematic data net of Industrial Ethernet is adopted to realize the integration with other systems, such as CAD and CAM. Secondly, field bus control network is taken as real-time communication bus of system-equipment level to carry out the effective and quick transmission of real-time data. Thirdly, SERCOS bus, the motion control bus, is selected as the transmission network which can strengthen the system's real-time function and accomplish multi-axis servo control. Scheduling and Netcom are also researched and designed in this paper.

The book is dependent on the national key scientific and technological project, and the overall scheme, constitution and main functions of gear quasi-flexible automatic production line are designed. The concept of "equipment agent" is proposed, the mutual operation problems of isometric

systems are solved and its implementation method is studied intensively. Also, the production-line Web-MoniService system based on "equipment agent" is developed, and it is employed in the circular-gears (gear shafts) quasi-flexible automatic production lines, which was developed by CIMS institute itself.

In this paper, the design formulas of non-circular gears are deduced. The principle of processing non-circular gears by CNC gear shaping machines and hobbing machine tools are discussed. The method of machining non-circular skew gears by the hobbing machine tools is introduced in detail, and the model of its four-axis gang control is derived. In this paper, the principle and disadvantages of the traditional interpolation method that the pitch curve of non-circular gears is fitted by the lines with equivalent arc length is discussed. Based on these, the new interpolation method that the pitch curve is fitted by cubic splines is proposed and its interpolation principle, the pre-processing and the algorithm of real-time interpolation are analyzed. Besides, the empirical study and stimulation are implemented with the conclusion that this method could better guarantee the machining quality, efficiency and the processing stability.

Finally, the design method of a new type of radial non-circular gears is proposed, the differences and relations between the radial gears and traditional normal ones, and their application characteristics are analyzed. The mathematical model of radial non-circular gears is derived by the methods of equivalent pitch radius and tooth-by-tooth modification. Besides, the three-dimensional solid model is established and the machining simulation is implemented.

KEY WORDS: Gear; Open and interconnected CNC system; Quantum framework; on-circular gear; Web-MoniService system

目 录

第 1 章 绪 论	(001)
1.1 论文研究的背景和意义	(001)
1.2 开放式数控系统国内外研究现状和发展概况	(005)
1.3 齿轮机床数控系统及其加工技术的研究现状和发展	(010)
1.5 论文的主要研究工作	(014)
第 2 章 数控滚齿机数控系统设计与应用研究	(017)
2.1 滚齿机滚齿原理	(017)
2.2 滚齿机数控系统体系结构研究	(019)
2.3 六轴数控滚齿机 STAR 数控系统设计开发研究	(025)
2.4 六轴数控滚齿机 STAR 数控系统插补算法研究	(036)
2.5 STAR 数控系统应用实例	(044)
2.6 本章小结	(045)
第 3 章 基于量子框架的开放式数控系统	(046)
3.1 数控系统的开放性	(046)
3.2 量子编程和量子框架的基本内容	(051)
3.3 基于量子框架的齿轮数控系统	(065)
3.4 本章小结	(074)

第 4 章 网络数控系统研究	(075)
4.1 网络数控系统基本内涵	(075)
4.2 开放式网络数控系统的设计研究	(079)
4.3 本章小结	(096)
第 5 章 齿轮准柔性自动生产线网络监控服务系统	(097)
5.1 齿轮准柔性自动生产线总体构成	(097)
5.2 齿轮准柔性自动生产线监控服务系统的设计研究与实现 ...	(099)
5.3 监控服务系统的实践效果	(113)
5.4 本章小结	(114)
第 6 章 特殊齿轮数控加工技术的研究及应用	(115)
6.1 非圆齿轮基本概念	(115)
6.2 非圆齿轮数控加工	(121)
6.3 径向布齿非圆齿轮建模及数控加工的研究	(141)
6.4 本章小结	(146)
第 7 章 结 论	(147)
7.1 全文总结	(147)
7.2 研究展望	(150)
参考文献	(151)
附录 缩略语和术语注释	(158)

第1章 绪论

1.1 论文研究的背景和意义

20 世纪末期,随着以电子技术、信息技术、网络技术、自动化技术、新材料技术为核心的新一代技术的迅速发展及其在制造领域的广泛渗透和应用,制造业发生了天翻地覆的变化。面对全球技术、经济、市场变革的挑战和机遇,世界各个经济强国都投入了巨大的财力、人力和物力进行先进制造技术的研究。计算机数控技术(CNC)、柔性制造系统(FMS)等先进制造技术的应用,不仅使企业的国际竞争力得到巩固和加强,而且也促使世界先进制造业迅猛地向前发展^[1~2]。

作为现代先进制造系统中不可缺少的基础技术——数控技术,正向开放式体系结构发展^[3]。CNC 技术的应用代表着一个国家制造技术和自动化技术的研究和应用水平,数控机床在整个现代制造系统中处于基础的、核心的地位。随着计算机技术的迅猛发展,传统的 CNC 系统已逐渐显露出许多弱点,即:专用性强、通用性差,软件为系统制造商所有,不便于功能扩展和更新,软件移植性差,组网通讯能力差,对机床制造商和用户的水平要求较高等。同时现代制造业的发展,对 CNC 系统又提出了更高的要求,一方面 CNC 系统必须适应 DNC、CAD/CAM 及网络制造的发展;另一方面,由于中、小批量生产的趋势日益增强,以及数控系统应用领域的不断扩展,需根据不同的用户需求,迅速、高效、低成本地构筑面向用户的控制系统,这就要

求 CNC 系统具有模块化、开放性和可配置的特点。新一代开放式数控系统体系结构正是在这种情况下提出的。如今,PC 机的运算速度和可靠性大幅度提高,价格却大幅度降低,尤其是各种嵌入式系统、Profibus 等新型实时性工业总线和 DSP(数字信号处理器)的出现,为基于 PC 的开放式数控提供了实时性、可靠性和实用性的保证,也为开放式数控的发展奠定了基础。我国在传统计算机数控方面的研究、开发和制造水平,远远地落后于德国、日本、美国等世界科技强国,而开放式数控体系的出现,则有望打破欧洲、日本、美国等国瓜分世界数控市场的格局,为我国缩短和世界经济强国的差距提供了前所未有的机遇。

21 世纪,数控系统发展的主要趋势将是智能化、开放式、网络化。

智能化的内容包括在数控系统中的各个方面:如加工过程的自适应控制、工艺参数自动生成方面;前馈控制、非线性控制、电机参数的自适应运算、自动识别负载、自动选定模型和自整定等方面;智能化的自动编程、智能化的人机界面等方面;智能诊断、智能监控等方面。

为解决传统的数控系统封闭性和数控应用软件的产业化生产存在的问题,从上世纪 80 年代以来,许多国家对开放式数控系统进行了大力研究^[3~4],如美国的 NGC(The Next Generation Work-Station/Machine Control)计划、欧共体的 OSACA(Open System Architecture for Control within Automation Systems)计划、日本的 OSEC(Open System Environment for Controller)计划,中国的 ONC(Open Numerical Control System)计划等。数控系统的开放化已经成为共识,开放式数控系统也已成为当前的发展趋势。

所谓开放式数控系统^[4]就是数控系统的开发可以在统一的运行平台上,面向机床厂家和最终用户,通过改变、增加或剪裁结构对象(数控功能),形成系列化,并可方便地将用户的特殊应用和技术诀窍集成到控制系统中,快速实现不同品种、不同档次的开放式数控系统,形成具有鲜明个性的名牌产品。目前开放式数控系统的体系结构规范、通信规范、配置规范、运行平台、数控系统功能库以及数控系统功能软件开发工具等是当前研究的核心。

网络化数控机床是近两年国际数控机床发展的一个新亮点^[5]。数控机床的网络化将极大地满足生产线、制造系统、制造企业对信息集成的需求,也是实现新的制造模式如敏捷制造、虚拟企业、全球制造的基础单元。国内