

数控机床热误差及其 抑制与补偿

SHUKONGJICHUANG REWUCHA JIQI YIZHI YU BUCHANG

◇方辉 许斌 阳红 主编



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

数控机床热误差及其 抑制与补偿

方 辉 许 斌 尹德强 著

重庆大学出版社

内容提要

该书以作者在该领域的研究成果为基础,汇集国内外相关领域研究、开发以及设计制造人员的相关研究成果,围绕保持和提高数控机床精度稳定性的实际工程需求,针对数控机床热误差的抑制和补偿,系统介绍了数控机床热误差影响因素、热传递类型与传递方程、温度-热误差关联关系等热误差形成机理,对数控机床热误差软件补偿、硬件抑制的概念、原理、关键技术及其应用等进行了全面的阐述。

该书可作为机械工程类专业高年级本科生、硕博研究生的专业技术参考书,也可供相关领域科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数控机床热误差及其抑制与补偿/方辉,许斌,阳红主编. —重庆:重庆大学出版社,2016.6
ISBN 978-7-5624-9821-6

I. ①数… II. ①方… ②许… ③阳… III. ①数控机
床—误差补偿—研究 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 115379 号

数控机床热误差及其抑制与补偿

方辉 许斌 阳红 主编

策划编辑:杨粮菊

责任编辑:文鹏 版式设计:杨粮菊

责任校对:邹忌 责任印制:赵晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:易树平

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023)88617190 88617185(中小学)

传真:(023)88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆华林天美印务有限公司印刷

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:14.75 字数:368 千

2016 年 7 月第 1 版 2016 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5624-9821-6 定价:48.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

数控机床是现代机械制造业的基础,国防工业、航空航天、汽车、模具和船舶等其他众多国民经济重要行业、高新技术产业,都需要高档数控机床作为关键生产工具。美国、德国、日本等工业发达国家一直将高档数控技术及装备列为重要的战略性行业和关系国家安全的高技术产品。可以说,高档数控机床的生产和研发能力已经成为衡量一个国家现代制造技术和制造行业发展水平的重要标志。在“工业4.0”的环境下,数控机床向着集成、互联、模块化、智能化的方向发展,数控机床稳定性、加工效率和精度、自适应、自诊断、自修复等能力的提高,又反过来促进了“工业4.0”的发展和实现。随着我国国民经济的迅速发展和国防建设的需要,国民经济众多行业对高档数控机床提出了急迫的需求。高档数控机床的研究与开发,不仅能够满足行业用户对数控加工设备高柔性、高生产率、多功能和高性能的迫切需求,同时也将有效促进数控机床向高速高效、模块化、高精度和复合加工方向发展,对提高我国机床工业设计制造水平,进而牵引和提升相关行业的技术和设备配套能力,具有重要的战略意义。

随着数控机床主轴转速、各坐标方向进给速度及加速度日益高速化,以及加工精度的逐步提高,数控机床热误差对加工精度的影响已经越来越明显。已有研究表明,在数控机床整机及零部件设计、制造、装配技术和材料等相关技术不断取得进步的条件下,几何误差、刀具磨损、伺服等误差在数控机床整体误差中的比例逐渐减小。在高速、高精度加工条件下,热变形日益成为影响机床加工精度的重要因素。在高速精密数控机床中,热误差占到了机床总误差的40%~70%。因此,从机床硬件体系和软件体系两个方面综合考虑,在改善机床的热态特性、抑制热误差产生的结构性因素的同时,建立热误差模型,通过软件补偿,减小机床的热误差,已成为提高数控机床加工精度及其稳定性的重要途径。

针对机床热误差的抑制与补偿,国内外的研究人员开展了广泛而深入的研究,从热误差机理、热关键点辨识、补偿模型构建等方面,进行了大量的机理性研究、数值模拟和仿真分析和实验研究,取得了很多研究成果,并在部分数控系统和机床上获得了较好的应用。目前数控机床热误差研究与开发不断向着热误差快速测量与辨识、热误差快速数值仿真分析、高自适应能力和鲁棒性补偿模型构建、热误差在线补偿软硬件体系构

建等方向发展。

本书共分为“绪论”“数控机床误差及其检测技术、标准与设备”“数控机床热误差及其形成机理”“数控机床热误差仿真分析技术”“数控机床热误差硬件抑制原理与技术”和“龙门加工中心进给系统热误差抑制与补偿”6章内容。其中,“绪论”主要通过介绍数控机床及其在制造业中的作用,阐述了数控机床热误差补偿技术的概念、发展历史、现状和发展趋势,以及数控机床热误差补偿技术研究与应用的重要意义;“数控机床误差及其检测技术、标准与设备”通过介绍数控机床误差分类及误差源,详细介绍了数控机床的几何误差及其检测标准、检测方法、检测技术及设备等;“数控机床热误差及其形成机理”分析了热误差影响因素,介绍了数控机床热量传递类型及传递方程,提出热态信息链概念,并阐述了基于热态信息链的机床热误差机理研究工作,分析了数控机床热误差补偿体系结构及其关键技术;“数控机床热误差仿真分析技术”介绍了数控机床重点热刚度辨识原理与技术、对流换热系数的迭代修正等,并以龙门加工中心 X 向、 Y 向进给系统和主轴系统、滚珠丝杠为实例,进行了子系统和关键部件的热态特性分析;“数控机床热误差硬件抑制原理与技术”通过龙门加工中心 X 向、 Y 向和 Z 向传动系统热态特性实验与数据分析,对数控机床热误差的硬件抑制原理与技术进行了详细介绍和说明;“龙门加工中心进给系统热误差抑制与补偿”以龙门加工中心进给系统为例,介绍了基于热误差抑制的龙门加工中心 X 向进给系统热优化设计和龙门加工中心进给系统热误差的软件补偿等研究工作,并介绍了龙门加工中心进给系统热误差在线补偿效果验证情况。

本人于2009年进入四川大学制造科学与工程学院工作,在殷国富教授的带领和指导下,作为主研人员承担了“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项子课题“高速龙门五轴加工中心(AC摆角)精度稳定性研究”,并作为项目负责人主持了与数控机床热误差抑制与补偿相关的国家自然科学基金、教育部博士点基金、四川省科技支撑计划等研究项目。本书介绍了本人在相关课题研究中关于数控机床热误差及其抑制与补偿的相关研究成果,对数控机床几何误差检测与补偿方法等其他相关内容也作了相应的介绍。

感谢殷国富教授对我的悉心指导与帮助,也要感谢在相关课题研究中付出辛勤努力研究生们,包括阳红、孙惠娟、杨才久、程渤、刘兴业等研究生同学,以及参与本书撰写工作的许斌博士、尹德强博士。

方 辉

2016-04-27

目录

第1章 绪论	1
1.1 数控机床及其在制造业中的作用	1
1.1.1 数控机床发展的历史与趋势	1
1.1.2 数控机床在现代制造业中的基础支撑作用	4
1.1.3 工业4.0与数控机床	5
1.2 数控机床热误差补偿技术概述	9
1.2.1 数控机床热误差补偿的基本概念	9
1.2.2 数控机床热误差补偿技术研究与应用的历史	9
1.2.3 数控机床热误差补偿技术研究与应用现状	10
1.2.4 数控机床热误差补偿技术研究与应用的发展趋势	15
1.3 数控机床热误差补偿技术研究与应用的意义	17
第2章 数控机床误差及其检测技术、标准与设备	18
2.1 数控机床误差分析	18
2.1.1 数控机床误差分类	18
2.1.2 数控机床误差源分析	19
2.2 数控机床的几何误差	21
2.3 数控机床几何误差的检测标准	27
2.3.1 一条线在一个平面或空间内的直线度	27
2.3.2 部件的直线度	31
2.3.3 运动的直线度	32
2.4 数控机床几何误差的检测方法	33
2.4.1 基于单项误差分量检测的直接测量方法	33
2.4.2 基于试件加工误差反求的间接测量方法	34
2.4.3 基于标准参考物的综合测量方法	34
2.5 数控机床几何误差检测的检测技术及设备	34
2.5.1 基于激光干涉仪的检测技术及设备	34

2.5.2	基于球杆仪的检测技术及设备	37
2.6	五轴数控机床误差建模原理与分析	40
2.6.1	多体系统理论分析与误差建模	40
2.6.2	五轴数控机床结构形式分类	43
2.6.3	实验对象机床误差模型	44
2.6.4	五轴数控机床的精度测评的关键技术	48
2.7	五轴数控机床旋转定位误差的非接触检测方法 ...	49
2.7.1	机器视觉检测技术	49
2.7.2	图像处理方法	50
2.7.3	机器视觉检测流程	52
2.7.4	机床旋转轴转角定位误差检测实例	53
2.7.5	检测结果分析	56
2.8	转台加摆头式五轴数控机床几何和伺服误差综合评价	58
2.8.1	机床运动误差模型	58
2.8.2	实验方法与装置	60
2.8.3	实验结果分析与验证	61
2.9	双转台式五轴数控机床旋转轴误差检测与辨识方法	65
2.9.1	五轴数控机床旋转轴误差定义	65
2.9.2	五轴数控机床旋转轴误差辨识原理和流程	66
2.9.3	五轴数控机床旋转轴误差辨识模型	67
2.9.4	旋转轴误差检测方法	70
2.9.5	误差辨识过程	72
2.10	双摆头式五轴数控机床空间误差分析模型	75
2.10.1	九线法检测原理	75
2.10.2	基于多体系统的机床精度预测建模	81
2.11	数控机床圆度误差检测与误差分离方法	86
2.11.1	误差源的轨迹模式及误差传递函数	87
2.11.2	圆度误差检测误差分离	90
2.11.3	不同圆度误差检测方法比较	91
2.12	基于层次分析法的数控机床精度评价系统	96
2.12.1	基于层次分析法的模糊综合评判	96
2.12.2	五轴数控机床精度评价过程	98
2.12.3	基于 J2EE 的数控机床精度测评系统	101
第3章	数控机床热误差及其形成机理	109
3.1	数控机床热误差影响因素分析	109
3.2	数控机床热量传递类型与传递方程	110

3.2.1	数控机床热量传递类型·····	110
3.2.2	数控机床热量传递方程·····	112
3.2.3	机床导热微分方程和热弹性运动方程·····	113
3.2.4	机床热误差多体系统理论方程·····	114
3.3	基于热态信息链的机床热误差机理研究·····	117
3.3.1	机床热态信息链概念及理论模型·····	117
3.3.2	机床热态信息链在热误差机理研究中的作用·····	119
3.4	数控机床热误差补偿体系结构及其关键支撑技术 ·····	120
3.4.1	数控机床热误差补偿体系结构·····	120
3.4.2	热误差硬件抑制技术·····	120
3.4.3	热误差软件补偿技术·····	121
第4章	数控机床热误差仿真分析技术·····	123
4.1	数控机床重点热刚度辨识原理与技术·····	123
4.1.1	机床热刚度·····	123
4.1.2	机床重点热刚度定义·····	123
4.1.3	机床重点热刚度辨识·····	124
4.2	对流换热系数的迭代修正·····	130
4.2.1	对流换热系数初始值计算·····	131
4.2.2	对流换热系数迭代修正模型·····	132
4.2.3	对流换热系数迭代修正计算步骤·····	134
4.3	龙门加工中心 X 向进给系统热特性有限元分析 ·····	135
4.3.1	基于 ANSYS 的热分析原理与基本模型·····	135
4.3.2	龙门加工中心 X 向进给系统热载荷和热边界 条件分析·····	136
4.3.3	龙门加工中心 X 向进给系统热稳态分析·····	140
4.3.4	龙门加工中心 X 向进给系统热结构耦合分析 ·····	141
4.4	龙门加工中心 Y 向进给系统热特性有限元分析 ·····	148
4.4.1	龙门加工中心 Y 向进给系统热源分析·····	148
4.4.2	龙门加工中心 Y 向进给系统热变形分析·····	150
4.5	龙门加工中心主轴系统热特性分析·····	157
4.5.1	主轴系统发热量·····	157
4.5.2	主轴系统热量传递方式及其性能参数·····	159
4.5.3	主轴系统热稳态分析·····	160
4.5.4	主轴系统热变形分析·····	161

4.5.5	不同转速条件下主轴系统热态性能分析·····	165
4.6	滚珠丝杠热性能分析·····	166
4.6.1	热量的计算·····	167
4.6.2	滚珠丝杠热传递性能参数·····	169
4.6.3	滚珠丝杠的热稳态性能分析·····	169
4.6.4	滚珠丝杠稳态热变形·····	171
第5章	数控机床热误差硬件抑制原理与技术·····	176
5.1	龙门加工中心X向传动系统热态特性实验与数据分析 ·····	176
5.1.1	实验设计·····	176
5.1.2	实验数据分析·····	179
5.2	龙门加工中心Y向传动系统热态特性实验与数据分析 ·····	182
5.2.1	实验设计·····	182
5.2.2	实验数据分析·····	185
5.3	龙门加工中心Z向传动系统热态特性实验与数据分析 ·····	187
5.3.1	实验设计·····	187
5.3.2	实验数据分析·····	190
第6章	龙门加工中心进给系统热误差抑制与补偿·····	193
6.1	基于热误差抑制的龙门加工中心X向进给系统热 优化设计·····	193
6.1.1	龙门加工中心X向丝杠优化设计与载荷计算 ·····	193
6.1.2	优化效果验证·····	199
6.2	龙门加工中心进给系统热误差的软件补偿·····	202
6.2.1	龙门加工中心Y向进给系统热补偿数学模型 ·····	204
6.2.2	基于西门子840D系统的热误差补偿·····	212
6.2.3	热误差补偿软件系统开发·····	214
6.3	龙门加工中心进给系统热误差在线补偿效果验证 ·····	216
6.3.1	龙门加工中心进给系统热误差补偿实验及其分析 ·····	216
6.3.2	龙门加工中心S试件切削实验及其分析·····	218
参考文献	·····	220

第 1 章 绪论

1.1 数控机床及其在制造业中的作用

1.1.1 数控机床发展的历史与趋势

1946 年 2 月 14 日,世界上诞生了第一台电子计算机 ENIAC,自此开始,计算机被用于各个领域,人类社会逐渐进入数字化、信息化时代。在制造业的发展过程中,帕森斯(J. Parsons)第一个将计算机技术融入生产加工,他带领的 Parsons 公司与美国麻省理工学院(MIT)共同合作,于 1952 年成功研制出世界上第一台三坐标数控立式铣床“Hydrotel”,这也标志着第一代数控机床——电子管数控机床的诞生。这台机床的诞生极大地改变了传统制造业的发展,将机床带入数控时代。到现在为止,数控机床经历了两个阶段的发展,完成了六代的更迭。

1952—1970 年是数控机床发展的第一个阶段,称为数控(NC)阶段。早期的计算机运算速度慢,远达不到数控机床实时控制的功能要求,于是人们便研发了一种机床专用的计算机。这种计算机采用数字逻辑电路制成,被称为硬件连接数控(HARD-WIRED NC),简称为数控(NC)。随着电子技术的发展,电子元件不断更换,随之形成了三代数控机床,分别为电子管数控机床、晶体管数控机床、集成电路数控机床。

1952 年诞生的第一台机床只是一台样机,到了 1954 年 11 月,在帕森斯专利的基础上,第一台工业用的数控机床由美国本迪克斯公司正式生产出来。在 20 世纪 50 年代末到 60 年代初,以罗斯(D. Ross)教授为主研发并改进了数控系统的编程语言,诞生了后来广泛应用的 APT(automatically programmed tool)语言,在他们的努力下,数控原理的应用从铣床逐步扩展到镗铣床、钻床和车床。1958 年,美国卡尼-特雷克(Kearney & Trecker)公司研制成功世界上第一台加工中心 Milwaukee-Matic II,在数控卧式镗铣床的基础上增加了刀库和自动换刀装置,可实现在一次装夹中完成铣、钻、镗、铰和攻丝等多种工序的加工,极大地提高了生产效率。数控机床中最初获得使用的是数控铣床,因为数控机床能够解决普通机床难于胜任的、需要进行轮廓加工的曲线或曲面零件。然而,由于系统采用电子管,体积庞大、功耗高,因此除了在军事部门使用外,在其他行业并没有得到推广使用。

1959年,随着电子技术和计算机技术的发展,数控机床的控制系统广泛采用晶体管和印刷电路板,这时的机床称为第二代数控机床。到了1960年以后,点位控制的数控机床得到了迅速发展。因为点位控制的数控系统比起轮廓控制的数控系统要简单得多。因此,数控铣床、冲床、坐标镗床大量发展,据统计资料表明,到1966年实际使用的约6 000台数控机床中,85%是点位控制的机床。而这一时期,其他一些工业国家,如德国、日本也都陆续开发、生产以及使用了数控机床。

1965年,数控机床发展到了新一代。集成电路以其体积小、功耗低的优点广泛用于数控系统,数控机床的性能和可靠性因此有了很大提高。1966年诞生了群控系统,它是一种由一台计算机控制多台数控机床的系统。美国麦道飞机公司(McDonnell-Douglas)从1975年起发展群控系统,到1981年时,整个群控系统一共可带动109台机床。

1970年,数控机床的发展步入了第二个阶段——计算机数控(CNC)阶段。这一阶段诞生了三代数控机床,分别为小型计算机数控机床、微型计算机数控机床和基于PC(个人计算机)的数控机床。20世纪70年代初期的通用小型计算机已经诞生并批量生产,通用性好,成本较低且运行可靠,基本上替代了专用的逻辑电路数控系统,成为数控系统的核心部件,这一代数控机床被称为小型计算机数控机床。

1971年,美国Intel公司成功将计算机的运算器和控制器集成在一片芯片上,称为微处理器(Micro-processor),这一发明又成功地应用到了数控机床上。1974年,使用微处理器和半导体存储器的微型计算机数控装置(简称MNC)被研制成功,因而诞生了第五代数控机床——微型计算机数控机床。这代机床与第三代相比,数控装置的功能扩大了一倍,而体积却缩小为原来的1/20,价格降低了3/4,可靠性也得到极大的提高。20世纪80年代,出现了能进行人机对话式自动编制程序的数控装置,数控装置日益小型化,可以直接安装在机床上;数控机床的自动化程度进一步提高,具有自动监控刀具破损和自动检测工件等功能。

随着计算机的进一步发展,到1990年,个人计算机可以满足数控机床加工需要,且其生产批量大、价格便宜、可靠性高,于是成为了数控机床的核心部件。从此,数控机床发展出了第六代,称为基于PC(个人计算机)的数控机床。

数控机床经过两个阶段六代产品的发展,已经成为融合自动控制技术、伺服驱动技术、机械制造技术、信息技术、软件技术和传感器技术的机电一体化产品,包括车床、铣床、冲床、电火花机床、齿轮加工机床和加工中心等。数控机床具备自动机床、精密机床和万能机床等的优点,在制造业发展十分迅速。其优点是:

(1) 高速、高精度和高可靠性

高速是指主轴速度、进给率、运算速度、换刀速度越来越高。目前,机床采用电主轴时最高转速可达到20万r/min,分辨率0.01 μm时最大进给率达到240 m/min,运算速度在拥有几百兆赫、上千兆赫运算频率的CPU的支持下极易满足机床的加工要求,而换刀速度已经达到1 s以内。

高精度是指对机床的几何精度、运动精度、热变形乃至机床振动提出了更高的要求。可采用高速插补技术、高分辨率位置检测装置、更优良的伺服控制方法等提高CNC系统的控制精度,采用网格解码器来检查和提高加工中心的运动轨迹精度,采用反向间隙补偿、刀具误差补偿等误差补偿技术对机床的热变形误差等进行补偿。

高可靠性要求数控机床有精心设计的系统、严格的制造过程和明确的可靠性目标,能通过

整机分析找出薄弱环节加以改进,使数控机床在拥有复杂的数控系统和各种检测设备、机电装置的同时保证较低的失效率。数控机床加工的零件型面较为复杂,加工周期长,要求平均无故障时间在2万h以上。国外数控系统平均无故障时间在7万~10万h,而国产数控系统仅为1万h左右;国外整机平均无故障工作时间达800h以上,而国内最高只有300h。

(2) 驱动并联化、控制智能化和功能复合化

传统机床串联机构有着移动部件笨重、刀具进给方向单一、作业自由度偏低、系统整体稳定性不够、设备加工不够灵活等固有缺陷,驱动并联则能够有效解决这些问题。并联运动机床采用多杆并联连接机构将主轴与机座相连接,通过变化各杆的长度和角度来使平台获得不同自由度的运动,可实现多坐标联动数控加工、装配和测量多种功能,特别是在加工复杂特种零件上有着突出的优势,而且具有模块化程度高、质量轻和速度快等优点。驱动并联化作为一种新兴技术,已成为当前数控机床技术的一个重要研究方向,受到了国际机床行业的高度重视,被认为是“自发明数控技术以来在机床行业中最有意义的进步”。

为了满足生产加工柔性化和自动化的需求,要求数控机床越来越向智能化的方向发展,这就促使数控机床的控制技术越来越智能化,具体有以下表现:

①加工过程自适应控制技术:通过监测加工过程中的各个切削要素和系统的功率、电流、电压等信息,识别出刀具的当前状态及机床运行的稳定性状态,并根据这些状态实时调整加工参数和命令,使设备能自适应加工需要,以提高加工精度、降低加工表面粗糙度并提高设备运行的安全性。

②加工参数的智能优化与选择:构造加工参数优化选择器,将工艺师的经验、零件加工的相关流程与规律集合为一个数据库,利用它获得优化的加工参数,从而达到优化加工工艺、提高加工水平和缩短生产准备时间的目的。

③智能故障自诊断与自修复技术:根据已有的故障信息,快速排查故障出现的位置。

④智能化交流伺服驱动装置:智能化伺服系统能自动识别负载,并自动调整参数,包括智能主轴交流驱动装置和智能化进给伺服装置。这种驱动装置能通过识别电机和负载的转动惯量,自动对控制系统参数进行优化和调整,保证驱动系统始终处于良好的运行状态之中。

功能复合化是指一台机床拥有多种加工功能,能尽可能地完成工件从毛坯到成品的多种加工。这种机床可分为工艺复合型和工序复合型两类。工艺复合型机床如镗铣钻复合加工中心、铣镗钻车复合加工中心等;工序复合型机床如双主轴车削中心等。采用复合机床进行加工,可有效减少生产前的辅助时间以及工件反复装夹产生的误差,提高了零件加工精度和生产效率,相对于传统分步生产方法具有明显的优势。功能复合化也使机床向着模块化的方向发展。德国已出现模块化的加工中心,该加工中心能够完成车削、铣削、钻削、磨削、滚齿和激光热处理等多种工序,一次装夹即可完成全部加工。随着制造业的发展和加工要求的不断提高,功能复合的数控机床越来越受到各大企业的欢迎。

(3) 信息交互网络化和体系开放化

为确保企业各个车间的协调一致和方便全面调控管理,保证信息流在各个车间畅通无阻十分必要。这就需要数控机床拥有便捷的人机互动功能和联网通信功能,这样既能满足机床与操作者之间的交互,又能满足机床与机床、车间与车间之间的沟通协调,并可以实现网络资源共享、远程监视、远程控制、在线培训、教学和管理,还可实现数控装备的数字化服务(如故障诊断和维护等)。

体系开放化意味着建立统一的国际标准和数控装备软硬件要面向未来技术发展。国际上正在制定一种不依赖数控系统的、新的 CNC 系统标准 ISO-14649,能够描述产品整个生命周期内的统一数据模型,从而实现整个制造过程乃至各个工业领域产品信息的标准化。形成统一标准既有利于产品的设计制造,也提供了标准化的产品管理依据,降低了和操作效率有关的劳动消耗。在统一标准的条件下,数控设备的软硬件接口都实现了统一化,只需少量调整设计即可兼容未来产生的新的技术或设备,大大减少了数控设备的开发周期,而且不会降低系统的稳定性和可靠性,使系统长期处于生命周期内。

数控机床及数控技术研发在世界上处于领先地位的国家主要是德国、美国和日本三个国家,它们的共同特点是重视机床工业的发展,不断进行技术创新和精益求精。

德国特别重视科学实验,通过实验和实际生产相结合不断提高技术标准和要求,不断提高数控机床的质量;德国的各大企业和高校强强联合,共同对机床的共性和特性问题深入研究,德国生产的机床质量可靠、性能优秀,其机、电、液、气、光、刀具、测量、数控系统、各种功能部件在质量和性能上居于世界顶尖地位,出口遍及世界各地。

美国机床行业的兴盛主要由于美国国防部门因军事需求不断提出的机床发展方向和要求。由于其国防部门经费充足,人才众多,美国的机床技术始终处于不断创新之中。从世界上第一台数控机床到加工中心的研制成功,再到 20 世纪 70 年代柔性制造系统(FMS)的诞生,美国的数控机床及技术的发展始终引领着制造业的变革。由于美国的电子、计算机技术在世界上领先,且重视创新和效率,数控机床的自主研发基础扎实,固其高性能数控机床技术在世界上一直领先。

日本特别注重机床行业的发展,不仅制定了各项法规加以引导,还善于学习其他国家的先进机床技术,先仿后创,逐渐形成了自身的竞争优势。至今,日本的数控机床无论是产量还是出口量都稳居世界首位。自 20 世纪 80 年代,日本进一步加强科研,向高性能数控机床发展,现已在世界领先的机床行业中占有一席之地。

我国的数控技术实际起步较晚,约从 20 世纪 50 年代末开始。大致经历了三个阶段:第一阶段是 20 世纪 50 年代至 70 年代,这个时期我国的经济比较落后,技术条件较差,数控技术发展比较缓慢;第二阶段是“六五”至“八五”阶段,改革开放促使经济开始起飞,加之国家的重视和先进技术的引进,使我国的数控技术及相关产业得到稳步发展;第三阶段是“八五”之后,技术的不断进步和研发力度的加强,加之国内市场需求增大,使得这一阶段我国在数控领域取得了实质性进步。然而我国的机床行业与先进国家相比仍然存在严重的不足,精确度、稳定性、可靠性差距较大,机床的复合性能较差,数控系统也无法与德国、日本等相比,而关键配套件也由于国家整体工业水平达不到标准而无法达到世界最先进的水平。总体而言,我国的机床研发力度不够,制造水平依然落后,数控系统还不够完善,导致我国的数控机床特别是中高档数控机床仍然缺乏市场竞争力。我们应充分认识自身的缺点和不足,加大对先进机床技术的研究力度,增强创新意识,理论用于实际,以不断缩短与发达国家的差距^[1,2]。

1.1.2 数控机床在现代制造业中的基础支撑作用

高档数控机床是现代机械制造业的基础,国防工业、航空航天、汽车模具和船舶等其他高新技术产业都需要高档数控机床作为重要的生产工具^[3]。工业发达国家一直将研制高档数控机床作为重要的发展目标,可以说高档数控机床的生产和研发能力已经成为衡量一个国家

现代制造业发展水平的重要标志^[4]。

我国目前己是一个“制造大国”,近年来在高档数控机床的研发和生产方面也取得了不小进展。但我国还不是一个“制造强国”,与发达国家相比仍有较大差距^[5]。在高档数控机床方面,由于共性和关键技术的缺失,使国内机床行业仍未能从根本上扭转“低端混战,高端缺失”的局面^[6]。以大型数控龙门镗铣床为例,国内生产该类型机床的企业已超过 50 余家,但大部分机床厂家只能在中低端或低端市场打拼。在“四大”飞机制造企业中,五轴联动数控龙门镗铣床几乎全部是进口设备,国产机床一般只作为粗加工设备使用。同样,在国内船舶(船用柴油机、船用螺旋推进器)、汽轮机、水轮机、高速铁路、城市轨道交通、汽车模具等行业中所采用的高速五轴联动龙门镗铣床,基本上也被欧洲或日本的产品所占领。目前,进口产品占有国内高档数控机床市场份额高达 85%,我国自主研发的同类型机床由于性能较低,精度不能满足加工要求以及可靠性差等因素,一直被拒之门外^[7,8]。

长期以来,西方国家将高性能数控机床作为战略物资,列入对中国的禁运清单,已经成为严重制约中国制造业发展的瓶颈。2000 年,美国以中国进口了 16 台二手四轴、五轴联动数控机床为借口,指责中国“偷窃”美国尖端技术,其后又进一步将高档数控机床等 20 个大类产品列为对华科技出口管制的对象^[9]。我国大飞机项目正面临上述问题,所需的高档数控机床正属于禁运产品。由于现代飞机的零部件制造越来越向尺寸大型化、型面复杂化、结构轻量化、材料多元化和制造精密化发展,加工难度大、精度要求高,因而对机床加工设备的技术性能要求也越来越高^[10]。目前我国航空行业所需的关键件机床加工设备——高性能五轴联动数控机床几乎全部依赖进口^[11-13]。

为了扭转高档数控机床依赖进口的局面,使我国的国防和科技发展不受制于人,必须投入必要的人力物力,自主发展高档数控机床。为此,在我国中长期规划中,将发展高档数控机床和基础制造装备列入 16 个重大专项之一,与大飞机、登月工程等一起视为国家发展的基础^[14]。于 2009 年开始实施的“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项共立项 344 项,涉及企业 170 余家,科研院所 36 家,高等院校 36 家。在高档数控机床、基础制造装备、数控系统、功能部件、工具、关键部件、共性技术等方面已取得了阶段性的成果^[15]。2011 年发布的《机床工具行业“十二五”发展规划》提出“为军工、航空航天、能源、汽车、轨道交通等国家重点发展领域和战略新兴产业提供高档数控机床”的发展目标,并重点支持“高速、精密、智能、复合数控金属切削机床”的研制^[16]。

随着我国国民经济迅速发展和国防建设的需要,对高档的数控机床提出了急迫的需求。研发高档数控机床不仅能满足用户对设备柔性、高生产率、多功能和高性能的迫切需求,同时也促进了数控机床朝向高速高效化、模块化、高精度和复合加工方向发展,对牵引和提升我国机床工业水平具有重要的战略意义。

1.1.3 工业 4.0 与数控机床

(1) 工业 4.0 简介

“工业 4.0”是德国提出的一个高科技战略计划,它的提出基于前三次工业革命。德国的学术界和产业界对前三次工业革命的定義与国际上的定义不尽相同,他们将 18 世纪机械制造设备的产生和应用定义为“工业 1.0”,20 世纪初的电气化定义为“工业 2.0”,将 20 世纪 70 年代开始诞生的生产工艺自动化定义为“工业 3.0”。而在制造业服务化的要求下,以物联网为

基础、以智能制造为主导的第四次工业革命,定义为“工业4.0”。“工业4.0”概念包含了由集中式控制向分散式增强型控制的基本模式转变,目标是建立一个高度灵活的个性化和数字化的产品与服务的生产模式,旨在通过充分利用信息通讯技术和信息物理系统(CPS)相结合的手段,推动制造业向智能化转型。“工业4.0”可以描述为互联、集成、数据、创新和转型。

1) 互联

互联是“工业4.0”的核心,它利用信息物理系统(CPS)将各种传感器、智能控制系统、嵌入式终端系统、通信设施整合为一个智能网络,使得产品与生产设备之间、不同的生产设备之间以及虚拟与现实世界之间能够互联,使得数字信息可以通过网络在机器、工作部件、系统以及人类之间通畅地传递。

产品与生产设备的互联意味着产品能够协助生产过程,它可以告诉生产设备使用什么工序进行加工、怎样加工、加工完成的后续处理等问题,即产品能够理解自身的制造细节和用途;同时,生产设备也能根据不同产品的特性进行个性化生产,即实现个性化的批量生产。

生产设备之间的互联是将不同种类和功能的独立生产设备互联,组成智能生产线,多个智能生产线间互联组成智能车间,智能车间的互联组成智能工厂,不同企业、不同地域乃至不同国家的智能工厂互联组成一个覆盖全球的智能制造系统。这些设备、生产线、车间及工厂之间的互联是动态变化的,以满足不同的生产需要,这是工业4.0区别于工业3.0的重要特征。

虚拟与现实世界之间的互联利用了信息物理系统(CPS),它将各种物理设备连接至互联网,共同组合并形成了一个巨大的虚拟世界,允许设备间进行远程协调、控制、通信等行为,从而实现了虚拟与现实世界的互联。信息物理系统(CPS)是工业4.0的核心,它实现了信息与物质之间的联系与转换,形成一个智能的制造环境,在这个环境中,生产过程能够自感知、自适应、自诊断和自修复。

2) 集成

“工业4.0”将产品、设备、服务、工厂和人互联,实现了横向、纵向和端对端的高度集成,“集成”成为了德国“工业4.0”的关键词。

横向集成预示着过去企业内部在生产过程中的信息流、资金流、物流间的连接和协调必须从企业内部调出来,转换为企业间的关系。其目标是实现从企业内部协同研发体系到企业间的研发网络,从企业内部的信息集成向产业链信息集成,从企业内部的供应链管理与企业间的协同供应链管理,从企业内部的价值链重构向企业间的价值链重构。

纵向集成的程度代表着企业信息化的发展阶段,表示信息流、资金流和物流的集成层次、作用环节和发展水平,如研发设计内部信息集成是生产环节上的集成,研发设计与制造环节的集成是跨环节的集成,产品开发、设计、生产计划、生产工艺到投产、服务的全生命周期的信息集成是产品全生命周期的集成。“工业4.0”的目标就是在企业内部实现所有环节信息无缝链接,这也是智能化的基础。

端到端集成是德国提出的一个新概念,其含义就是创造围绕产品全生命周期的价值链,在整合价值链上不同企业资源的基础上,对产品的全生命周期进行管理和服务。它集成了各级供应商、制造商、分销商以及客户信息流、资金流和物流,在重构产业链各环节价值体系的同时,为客户提供更优质的产品和服务。

3) 数据

德国机械设备制造业协会及 SAP 的专家共同认为,数据是“工业 4.0”成功开展的基石。SAP 高级副总裁柯曼用汽车后视镜和前窗玻璃来形容数据的重要性:“企业数据分析就像汽车的后视镜,开车没有后视镜就没有安全感,但更重要的是车的前挡风玻璃——对实时数据的精准分析。”“数据量大、内容繁杂、信息交叉”是“工业 4.0”与传统工业体系的最大区别。在“工业 4.0”时代,所有的生产和感知设备、各种物理终端,包括产品和生产者本身都无时无刻不产生大量数据,如设计及建模、工艺设计及加工、设备维护及保养、零部件配置关系、变更记录等的产品数据,企业结构和管理、加工设备的配置、验收和质量控制、材料的采购和存储、生产时间和流程的安排等的运营数据,各级供应商、合作伙伴、客户资料等的价值链数据,以及包括市场分析、经济运行、行业和竞争等的外部数据。这些数据将会渗透进企业管理运营模式、生产模式、价值链体系乃至产品的整个生命周期,对产品的生产、改进和创新,企业的有效管理、资源优化和市场应变有重要的意义。

4) 创新

“工业 4.0”的推进过程实际上就是科学技术的不断创新,在制造业领域具体表现为产品创新、加工制造技术创新、生产和商业模式创新等。

由于互联网、通信和电子技术的发展,工业产品越来越向智能化和数字化的方向发展。一方面,制造装备的纵向和横向集成促进了智能生产线、智能车间、智能工厂等系列化、整体化的创新设备的诞生。另一方面,家居智能化、车辆和船舶智能化的步伐也在创新的路上不断迈步向前。这两方面成为了产品创新的重要方向。

未来“工业 4.0”的技术创新三路并行,一是新型传感器、人工智能、云计算、移动互联、大数据、精密电路等技术不断产生新的创新和突破,为新技术的诞生和跨领域的技术应用、融合打下坚实的基础;二是随着通信与互联技术的深入,传统工业对自身的创新方向、手段和模式作出相应调整,使之在原有的技术路线上不断创新;三是传统工业与信息技术的交叉融合,不应体现在各种横向、纵向集成技术上,还应重视单个关键技术,如工业软硬件上的创新。

在“工业 4.0”的信息化推进过程中将会产生全新的生产和商业模式。在生产模式中,机器制造加人脑判断分析这种传统的生产模式将逐渐被淘汰,取而代之的将是产品的全部分析和生产环节由机器负责,这种转变依赖于物理信息系统(CPS)的发展和成熟。同时在商业模式中,由于信息流、资金流和物流的高度集成,“网络化制造”和“个性化制造”也成为制造业的偏重点,它带动商业模式向率先满足动态的商业网络的方向发展,由此产生了异地协同设计、个性化批量生产、精准供应链管理等新型智能商业模式。

5) 转型

“工业 4.0”带来的信息化和数字化使得生产与服务变得更加灵活和智能,在这种条件下,制造业必然向着批量定制和服务型制造的方向发展。

传统生产模式下,用户只出现在生产流程的两端,只参与下单和验收等环节。而在“工业 4.0”环境下,通信极度便利和灵活,生产流程的全部信息可以展现在用户的面前,从设计、供应链到制造、服务等的全部流程都可以放开,让用户参与。用户可以根据自身需求对每个商品提出设计要求,指定零部件采购、参与安排生产计划等,这种实时的参与过程不仅真正满足用户的需求,而且也极大地丰富了企业的产品种类。

服务型制造是“工业 4.0”的又一重要理念,未来,制造不再是生产型的,而是把服务融入

产品全生命周期的各个环节,从而将制造业提供产品转变为提供融入大量服务要素的产品与服务的组合。实现的手段可以从提供个性化的设计服务、在线检测和维护服务、更便捷的交易和物流方式等入手。

(2) 工业 4.0 环境下数控机床的发展方向

数控机床在制造业领域的重要性不言而喻。为适应“工业 4.0”环境下制造业智能化、自动化的发展要求,数控机床有必要向着以下几大方向发展:

1) 运行更可靠

数控机床的可靠性直接关系到智能生产线、智能车间乃至智能工厂是否能稳定运转,它是数控机床的重要指标。为使数控机床的可靠性最大化,数控系统将采用大规模和超大规模集成电路以减少电子元件的数量。使用模块化、标准化的零部件不仅可以简化机床制造流程,还便于检测和保证机床质量;将硬件功能以相应的软件功能替代,在简化机床的复杂程度基础上满足了控制要求。同时,利用多种监测监控方式、诊断方式、报警提示和故障保护技术能够对各种故障进行及时处理,也是提高机床可靠性的有效手段。

2) 速度更快、精度更高

速度和精度是数控机床的两个重要指标,它直接关系到加工效率和产品质量,可从机床的控制运算和驱动伺服两个方面进行改进。控制运算方面可采用频率和位数更高的处理器来提高基本运算速度;同时,采用大规模和超大规模集成电路和并联处理器结构可以提高系统插补运算的速度和精度。驱动伺服方面可采用直线电动机直接驱动机床工作台的直线伺服进给方式以提高速度和动态响应特性;而前馈控制技术的采用则使追踪滞后误差大大减小,从而改善拐角切削的加工精度。

3) 更灵活的通信

“工业 4.0”要求设备与产品、设备与设备之间能够互联,生产环节之间能够高度集成,所以就要求数控机床有更加灵活的通信功能,且要更加智能。通过各种传感器和射频识别技术,产品和机床之间实现通信,机床能够识别产品的特征和加工参数等信息;通过物理信息系统(CPS),机床与机床可以互联,经过通信和控制实现任务分配和生产计划安排;通过纵向集成,将产品的研发设计与生产制造集成到一起,实现设计部门与数控设备的实时信息交流和监控。

4) 更加智能

自诊断、自修复和自适应控制技术的发展使数控机床智能化的目标越来越近。自诊断和自修复技术意味着数控机床能够对自身进行监控和诊断,若产生故障将发出警报信号,这时,机床将停止工作并对故障进行修复。在加工过程中,自适应技术保证机床可以根据产品加工过程中切削参数的变化相应地调整加工参数,使整个加工过程都处于最佳的状态,这样不仅提高了产品的加工精度,且延长了设备和刀具的使用寿命。

5) 功能更复合

功能更复合化的数控机床或者加工中心是“工业 4.0”对数控机床的发展要求。它们将拥有更加丰富的刀库,能在一台机床上同时实现车削、铣削、磨削、镗孔、钻孔、攻丝、滚齿等多种工序加工;多主轴、多面体切削也是数控机床的一个发展方向,即同时对一个零部件的不同位置进行不同的切削加工。数控系统的分级中断控制方式和并联微处理器技术,使得零件加工和程序编制可以在一台机床上同时进行,实现所谓的“前台加工,后台编辑”。

总之,在“工业 4.0”的环境下,数控机床必然要向着集成、互联、模块化、智能化的方向发