

刘宏伟 向 华 杨 锐 / 著

数控机床误差补偿技术研究

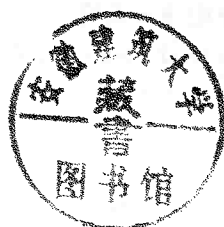


华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

数控机床误差补偿技术研究

The Research of Error Compensation
Technology for CNC Machine Tool

刘宏伟 向 华 杨 锐 著



华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 简 介

本书不仅讲解了数控机床误差补偿的基本理论知识,还提供了应用实例来帮助读者理解和掌握知识点。全书共分7章,内容包括绪论、误差补偿的基本理论、数控机床的误差测量、数控机床误差的建模、机床误差补偿模块的技术研究、机床误差的补偿控制,并在误差理论的基础上,给出了机床误差补偿应用实例。

本书可作为高等院校机械工程、数控技术、机电一体化专业的技术资料或者教学参考书,也可供从事精密加工、精密测量,以及数控机床的专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数控机床误差补偿技术研究/刘宏伟,向华,杨锐著. —武汉:华中科技大学出版社,2018.8
ISBN 978-7-5680-4413-4

I. ①数… II. ①刘… ②向… ③杨… 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(2018)第 184556 号

数控机床误差补偿技术研究

刘宏伟 向 华 杨 锐 著

Shukong Jichuang Wucha Buchang Jishu Yanjiu

策划编辑:范 莹

责任编辑:李 露

封面设计:原色设计

责任校对:张会军

责任监印:徐 露

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:北京虎彩文化传播有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:8

字 数:162千字

版 次:2018年8月第1版第1次印刷

定 价:28.00元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

序 言

数控机床是制造业的“工作母机”，其技术水平代表着一个国家的综合竞争力。数控系统是给机床装备的“大脑”，是决定数控机床功能、性能、可靠性、成本价格的关键因素，也是制约我国数控机床行业发展的瓶颈。特别是国防工业急需的高速、高精、多轴联动的高档数控机床和高档数控系统，一直是重要的国际战略物资。基础薄弱、“缺心少脑”一直是“中国制造”的短板。数控系统、伺服电动机、伺服驱动系统等是制造装备最重要的关键基础部件，广泛应用于高档数控机床、机器人、电动汽车等，但是这些关键部件的高端技术基本上由国外垄断了。要实现“中国制造 2025”的目标，形成“中国智造”的核心竞争力，离不开数控系统，包括伺服驱动系统、伺服电动机等关键技术的自主创新和自主可控。

我国数控系统产业经历了“六五”期间技术引进，“七五”期间技术消化吸收，“八五”期间技术自主开发，“九五”到“十二五”期间中、低档数控技术产业化并和高档数控系统缩小差距的艰难发展过程。

国内企业曾经试图引进国外数控企业的技术，走引进—消化—再创新的道路。但深入交流后发现，凡是我们没有的技术，凡是我们需要的技术，对方都不卖，而且在合作过程中，对方在不断地提高要价。

“六五”期间，中国数控系统技术可谓“一穷二白”，发展国产数控系统只能寄希望于引进国外先进技术。但国外公司只愿意将其落后淘汰的技术转让给我国，还将核心硬件芯片控制在自己手中。“七五”期间，中国开始在引进技术的基础上，消化吸收，并开始推动产业化。可是，国外公司马上将性能质量更好、集成度更高的数控系统产品推向中国市场，这阻滞了我国数控系统产业的发展。然后，国外公司以向中国出口散件，在中国国内组装，以及合资办厂的方式，使我国在引进技术过程中培养出来的大部分骨干人员流失。

又如，我国某数控系统企业采取日本产品贴牌，国内组装生产的方式，一度在市场上取得较大成就。但随着日本公司的数控系统业务被德国公司收购和国内数控系统技术逐步提升，该公司发展受到严重影响。国内某著名机床企业，曾引进意大利数控系统技术，对方只允许我国引进二轴、三轴联动的数控技术，而对于五轴联动高档数控系统关键技术的引进事宜，完全免谈。最后，该企业不得不回过头来，投入巨资，走自主研发的道路。

但是国内数控系统企业受到自身规模、技术水平、人才队伍和财力投入的限制，国产数控系统产品的 90% 以上主要还是定位在中、低档市场。高档型、标准型数控

系统,无论是在技术上还是在产业化水平上,都与国外存在较大差距。

目前,提高机床加工精度的方法主要有两种:误差防止法和误差补偿法。误差防止法主要针对系统内误差和系统外误差进行改善,通过控制机床所在工作环境温度和气流扰动,隔离机床运动与加工过程的振动等措施减小系统内误差,采用提高机床零部件的制造精度和机床安装精度的方法来减小系统外误差。误差防止法只能提高数控机床使用之前的精度,无法改善机床在使用过程中的精度,而且该方法成本较高,在一定条件下难以实现。误差补偿法又分为硬件法和软件法两种。硬件法是通过使用螺距校正装置或丝杠机床校正尺等装置来测量机床螺距误差,然后再进行补偿的方法。软件法提高机床精度的方式为修正加工代码,不改变机床本身结构。与硬件补偿法相比,软件补偿法更加灵活,成本较低,而且适用范围更广,是目前改善机床加工精度的主要方法。误差补偿法是建立在成熟、完善、准确的误差检测技术基础上的。

“十二五”以来,国产数控系统技术取得了较大的进步,与国外的差距逐步缩小。但技术差距的缩小,不等于市场的突破。国产数控系统的市场美誉度与国外仍存在巨大差距,产业化之路仍然任重道远。

以日本发那科、德国西门子等为代表的国外企业在数控系统领域发展了近六十年,积累了大量的先进技术,已在全球范围内建立起了技术壁垒和市场优势。国外企业在中国市场上也已经耕耘了四十多年,由于它们的产品在技术上、性能上的优势,形成了很好的市场品牌与客户美誉度,大量的客户已经习惯使用它们的产品,这形成了一个“市场生态圈”。某些单位的政府采购招标通常指定国外数控系统产品,导致国内数控系统产品根本就没有同台公平竞争的机会。这些实际情况让国产数控系统难以打破国外产品的市场生态圈。

此外,中国数控产业还面临国外企业降价抢占市场的巨大竞争压力。当我国的数控企业研制不出水平相当的数控产品时,它们的高端产品要么封锁,要么以天价出售;当我们的企业生产出性能接近的数控产品时,它们就把其成熟的产品做适当裁剪后,以低价在国内倾销,压榨国内数控产品的利润空间和市场空间。因此,国产数控系统存在的价值,还在于为中国机床行业和中国制造业“堵枪眼”。

当前我国中、高档数控系统企业发展的最大的瓶颈,还是市场的认同度不够。政府支持自主创新核心产业发展,我们的国产数控系统行业当然需要奋发拼搏,缩小与国外的差距,做好自己的产品 and 市场。政府也应该理直气壮地营造以选用国产产品、支持国产品牌为荣的体制和市场环境。要给国产数控系统参与竞争的平等机会,在同等性能价格比下,应该优先选用国产数控系统。

政府、专家和媒体对国产数控系统的支持还应体现在从舆论导向和政策上引导用户选用国产数控系统。部分媒体拿着国产数控系统十多年前的不足进行片面点评,最终导致用户选用国产数控系统时心有余悸。在国产数控系统成长和发展历程

中,我们既需要专家、用户和媒体对我们的批评和鞭策,促使我们加快进步,更需要各方对我们所取得的最新成绩和进步,给予充分的肯定和正面宣传,这是对国产数控系统的最大支持。

在2016年5月30日举行的全国科技创新大会期间,多位院士联名向中央高层递交了关于支持中国高档数控机床和系统的建议。希望国家从多个层面,全力支持产业化关键期的中国中高档数控机床。院士们在报告中希望国家出台系列扶持政策,包括在航空航天军工领域启动“换脑升级工程”;推动政府在采购时优先选用国产产品;取消部分在国产化上已经有所突破的产品的出口免税政策等。

习近平总书记指出,“只有把核心技术掌握在自己手中,才能真正掌握竞争和发展的主动权,才能从根本上保障国家经济安全、国防安全和其他安全。”中国数控系统产业发展历程证明,高档数控系统的关键核心是买不回来的,必须立足自主创新。国产高档数控系统产业已经“曙光就在前头”。我们坚信:再经过5~10年的努力,中国家电、手机、高铁等行业的今天,就是中国数控系统产业的美好明天。

本书作者刘宏伟,华中科技大学博士生,在湖北文理学院从事教学和科研工作,在数控机床的误差分析、误差补偿等方面取得了较多的研究成果,主持国家重大专项子项目1项,参与国家级课题1项、省部级课题1项,发表学术论文多篇。

在本书的撰写过程中,华中科技大学的向华教授作为主审做了大量的审核工作,对本书的各个章节做了修正,襄阳职业技术学院杨锐女士对本书进行了校对,在此表示感谢!

本书的出版得到了“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项课题(2017ZX04011010)、“湖北省重大科技创新计划(2014AAA007)”、“高档数控系统关键技术创新能力平台(二期)(2015ZX04005007)”、“机电汽车湖北省重点学科群专项”、“湖北省教育厅自然科学基金(D20162601)”等项目的大力支持。

感谢恩师陈吉红教授,华中科技大学杨建中副教授,湖北文理学院李波副教授、陈国华副教授,襄阳华中科技大学先进制造工程研究院童光庆工程师、周浩工程师,武汉华中数控股份有限公司杨祥工程师在误差补偿研究中给予的指导、帮助和支持。

感谢湖北文理学院、襄阳华中科技大学先进制造工程研究院、华中科技大学、武汉华中数控股份有限公司、苏州胜利精密制造科技股份有限公司、湖北万盟数控机床有限公司、宝鸡机床厂、四川宁江机床厂对相关研究工作的支持和帮助。

书中难免有各种错误和不足之处,著者在此表示歉意,敬请读者批评指正。

刘宏伟

2018年3月20日

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 数控机床误差补偿的必要性	(1)
1.2 数控机床误差补偿能解决的重大问题	(2)
1.3 数控机床误差补偿的概念	(3)
1.4 数控机床误差补偿的几种形式	(3)
1.4.1 仪器设计中的误差补偿	(3)
1.4.2 机械加工中误差补偿的类型	(4)
1.4.3 机械加工中误差补偿系统的组成	(4)
1.5 数控机床误差补偿技术的研究现状	(6)
1.5.1 国外数控机床误差补偿技术的研究现状	(6)
1.5.2 国内数控机床误差补偿技术的研究现状	(7)
1.6 数控机床误差补偿技术存在的不足和发展趋势	(8)
1.6.1 数控机床误差补偿技术存在的不足	(8)
1.6.2 数控机床误差补偿技术发展趋势	(8)
第 2 章 误差补偿的基本理论	(10)
2.1 数控机床的几何误差	(10)
2.1.1 移动误差	(11)
2.1.2 工艺系统的受力变形引起的误差	(12)
2.2 数控机床的热误差	(13)
2.2.1 机床温升变形的原因及解决方法	(14)
2.2.2 机床主要部件的热误差	(14)
第 3 章 数控机床的误差测量	(18)
3.1 激光干涉仪测量	(19)
3.1.1 激光干涉仪的组成	(19)
3.1.2 激光干涉仪的工作原理	(19)
3.1.3 激光干涉仪的连接及安装	(20)
3.2 机床误差的体对角线测量	(22)
3.3 机床热误差的测量	(24)
3.3.1 机床热误差补偿原理	(24)

3.3.2	机床热误差测量点的选取	(26)
3.4	机床切削力的测量	(28)
3.5	机床其他误差的测量	(30)
3.5.1	主轴的回转误差	(30)
3.5.2	刀具磨损造成的误差	(30)
第4章	数控机床误差的建模	(34)
4.1	误差分析	(34)
4.1.1	平动误差变换矩阵	(35)
4.1.2	旋转轴误差变换矩阵	(35)
4.2	综合误差模型	(37)
4.3	热误差模型	(37)
4.3.1	多元线性回归	(38)
4.3.2	最小二乘线性回归	(39)
第5章	机床误差补偿模块的技术研究	(40)
5.1	误差补偿模块的原理	(40)
5.2	几何误差补偿	(41)
5.2.1	误差补偿	(41)
5.2.2	误差补偿表的逻辑结构	(42)
5.2.3	误差补偿模块处理流程	(45)
5.2.4	模块结构	(45)
5.2.5	接口的设计	(46)
5.3	热误差补偿	(52)
5.3.1	热误差补偿模块的组成	(52)
5.3.2	接口设计	(53)
第6章	机床误差的补偿控制	(58)
6.1	误差补偿的控制形式	(58)
6.1.1	开环前馈补偿控制方式	(58)
6.1.2	闭环反馈控制方式	(58)
6.1.3	半闭环前馈补偿控制方式	(59)
6.2	误差补偿控制的硬件设计	(59)
6.2.1	HNC-8型数控系统误差补偿说明	(60)
6.2.2	数控系统误差补偿硬件结构图	(60)
6.3	误差补偿控制的软件设计	(61)
6.3.1	软件操作功能模块	(61)

6.3.2 补偿说明	(66)
第7章 机床误差补偿应用实例	(96)
7.1 机床存在现象	(96)
7.2 机床误差实验方案	(97)
7.3 机床几何误差补偿	(98)
7.4 机床热误差补偿	(103)
参考文献	(108)

第 1 章 绪 论

1.1 数控机床误差补偿的必要性

数控机床已成为当代机械制造业的主流装备,被称为制造业的“工作母机”,是制造装备的装备。由于现阶段我国技术水平和工业基础还相对落后,数控机床的性能、水平和可靠性与日本、德国、美国等工业发达的国家相比,还有着比较大的差距,尤其是数控系统的控制可靠性还比较差。数控系统关系到经济安全、产业安全、国防安全,且高档数控系统及尖端制造装备是西方对我国封锁与限制的重点。因此,发展自主高精度数控机床和高档数控系统成为我国经济发展道路上急需解决的重大课题。

数控机床、加工中心空间误差的快速检测是 20 多年来此领域的重要研究课题,也是未能很好解决的测量问题。误差检测是提高机床加工精度过程中必不可少且极其重要的环节,每台要进行误差补偿的机床都必须进行误差检测,检测的效率直接关系到整个补偿过程的效率,检测数据的准确性直接影响了误差补偿的效果。现有方法存在安装调整困难、测量时间长、测量辨识结果不唯一、难以溯因等种种问题,难以实现现场在线、高效、高精度的快速测量需求,这限制了数控机床误差精密检测和补偿的实际大规模应用。特别是,在数控系统误差检测与补偿的集成方面,机床误差检测和补偿技术与数控系统的集成不够,无法满足和提升高档数控机床的水平。国家科技重大专项支持了一批机床误差补偿技术课题,这些课题也取得了一定成效,但由于缺乏完善的数控系统二次开发环境,这些技术还主要停留在课题支持的一些机床和国外数控系统上。只有利用国产数控系统的二次开发优势,实现机床误差检测和补偿技术在国产数控系统上的集成,并将成果融入机床的实际生产中,才能充分发挥机床误差补偿技术成果对提高国产数控机床的作用。

我国机床行业中的误差补偿技术在实际的应用中,目前存在的主要问题表现在误差检测技术方面和补偿实现两方面。误差检测技术方面表现在检测方法和手段不全、技术不规范、效果不显著等问题上;补偿实现方面突出表现为基于数控系统内部功能的嵌入式误差补偿软硬件的开发、成功应用和产业化不够,机床误差补偿技术作

为提高数控机床精度的重要方法还远未发挥其重要作用。

误差补偿技术与数控系统的集成度不高,不能满足国产高档数控机床的需求,更不能提升国产高档数控机床的水平。国家支持的一些误差补偿技术课题在各自的机床厂取得了一定的成效,但由于缺乏完善的数控系统二次开发环境,这些技术还主要停留在课题支持的一些机床和国外数控系统上,从应用的角度看,并没有上升到市场应用的层面,没有形成大面积推广。

数控机床是装备制造业的基石,它大大促进了制造业的发展,在我国第二产业发展中有着举足轻重的作用,由此诞生和发展了国产数控制造业。误差补偿技术尤其是几何误差方面的研究已经相对成熟,比如,螺距误差补偿等技术在很多种机床上得到了普及,显著提高了数控机床的精度。但是,由于数控机床的种类多、制造具有一致性,且误差测量技术等方面还存在问题,特别是随着数控机床向着高速高精的方向发展,机床运行过程中的热、力等因素造成的动态误差对机床精度的影响越来越大,所以,应用误差补偿技术来提升机床精度的需求越来越急迫。

1.2 数控机床误差补偿能解决的重大问题

数控机床的误差主要来源于机床制造与装配中的零部件位置偏移、重力变形产生的几何误差和因运行过程中的热、力引起的机床构件变形产生的动态误差。根据数控机床的误差来源,机床误差可分为几何误差、热误差、刚度误差、控制误差、检测误差、随机误差等。

HNC-8 型数控系统的开放式体系结构及完善的二次开发平台,支持多种伺服电动机及各种传感器,借助先进的检测设备或仪器,通过设计相关的工装附件,可实现 21 项空间误差的快速测量,并可运用坐标变换算法,建立 21 项空间数据库模型,从而实现误差补偿。XD 激光测量系统与 HNC-8 型数控系统深度集成,就是将基本的几何误差测量实现功能、测量数据的处理和分析功能及误差快速补偿功能集成到 HNC-8 型数控系统中,这一深度集成,减少了测量设置,以及减少了数据处理和传输的时间。

XD 激光干涉仪可进行线性定位误差测量、直线度误差测量、角度误差测量、热误差的测量。

补偿模块针对反向间隙、角度误差和直线度误差三项参数进行补偿,数据分析时已经把所需的误差补偿值全部计算完,选择相应的补偿按钮,对应的误差补偿数据便自动载入数控系统误差补偿参数和数据表参数中。根据 HNC-8 型数控系统误差补偿参数的要求,对补偿方式进行分类设置,当采用双向螺距误差补偿时无需进行反向间隙补偿,直线度误差补偿类型可以采用单向或双向的补偿。

1.3 数控机床误差补偿的概念

数控机床的误差主要来源于机床制造与装配中的零部件位置偏移、重力变形产生的几何误差和因运行过程中的热、力引起的机床构件变形产生的动态误差。几何误差不随机床运行工况变化而变化,称为静态误差;动态误差则随机床运行工况的变化而变化。为提高数控机床精度,可以采用两种方法,即误差防止法和误差补偿法。误差防止法是通过机床结构的热力平衡设计以及提高机床本体的基础构件、进给机构、主轴等关键零部件的结构刚度、制造和装配精度等设计与制造手段,来提高机床的动静特性、消除各种机床动静误差的来源的方法。误差防止法采用的是“硬技术”,它虽能减小原始误差,但靠提高机床制造精度和安装精度来满足高速发展的需求有着很大的局限性,即使可能实现,经济上的代价往往也是很大的。误差补偿法是在数控系统中嵌入附加的控制与加工指令,抑制与抵消各种运动轨迹误差,从而提高机床运动精度,误差补偿法所投入的费用与提高机床本身精度或新购买高精度机床相比较,价格要低得多,误差补偿法采用的是“软技术”,它用很小的代价便可获得“硬技术”难以达到的精度水平。

误差补偿就是人为地造出一种新的原始误差去抵消当前成为问题的原有的原始误差,并应尽量使二者大小相等,方向相反,从而达到减小加工误差、提高加工精度的目的。误差补偿是仪器设计的重要内容,通过误差补偿措施,可以降低对仪器各部分的工艺技术要求或提高仪器的总精度水平。同时,误差补偿也是机械加工的重要内容,若能在数控机床中应用,则能改善机床加工精度。

1.4 数控机床误差补偿的几种形式

1.4.1 仪器设计中的误差补偿

误差补偿技术是贯穿于每一设计细节的关键技术之一。对仪器仪表进行误差补偿主要从两方面来考虑。

(1) 待测对象随环境因素变化而变化,在不同测量条件下,待测量会有较大变化,因而影响测量结果。

(2) 仪器自身的结构或者元件也会随环境条件变化而略有变形或表现出不同品质。

一般而言,对于第一种情况,可采用相对测量方法或建立恒定测量条件的方法予以解决,而对于第二种情况,应在设计阶段就仔细考虑仪器各组成零件随温度变化而

变化的情况,进行反复选材,斟酌每一个细小结构。

精密测量中的误差补偿技术主要有三种形式:误差分离技术、误差修正技术和误差抑制技术。

(1) 误差分离技术的核心是将有用信号与误差信号进行分离,它有两种方式:基于信号源变换和基于模型参数估计的误差分离。基于信号源变换的误差分离技术要建立误差信号与有用信号的确定函数关系,然后再经相应信号处理,进而达到将有用信号与误差信号分离的目的。基于模型参数估计的误差分离技术在确切掌握了误差作用规律并建立了相应数学模型后,对模型进行求解或估计。

(2) 误差修正技术可分为基于修正量预先获取型和基于实时测量型误差修正技术两种,其核心是通过某种方式获取误差修正量,再从测量数据中消除误差分量。

(3) 误差抑制技术是在掌握误差作用规律的情况下,在测量系统中预先加入随误差源变量变化而变化的因子,从而自动调控输入、输出,达到使误差抵消或消除的目的技术。一般可分为直接抑制型和反馈抑制型两种。

1.4.2 机械加工中误差补偿的类型

1. 实时误差补偿与非实时误差补偿

实时误差补偿(在线检测误差补偿或动态误差补偿):加工过程中,实时进行误差检测,并紧接着进行误差补偿,不仅可以补偿系统误差,而且可以补偿随机误差。

非实时误差补偿:只能补偿系统误差。

2. 软件误差补偿与硬件误差补偿

软件误差补偿:通过计算机对所建立的数学模型进行运算后,发出运动指令,由数控伺服系统完成误差补偿动作。软件误差补偿与硬件误差补偿的区分是看补偿信息是由软件还是硬件产生的。软件误差补偿动态性能好、机械结构简单、经济、工作方便可靠。

3. 单项误差补偿与综合误差补偿

综合误差补偿是同时补偿几项误差的方法,比单项误差补偿要复杂,但效率高、效果好。

4. 单维误差补偿与多维误差补偿

多维误差补偿是在多坐标上进行误差补偿的技术,难度和工作量都比较大,是近几年来发展起来的误差补偿技术。

1.4.3 机械加工中误差补偿系统的组成

机械加工中误差补偿系统一般由如下四部分组成。

(1) 误差信号的检测。

(2) 误差信号的建模。建模是找出工件加工误差与其在作用点上补偿的控制量之间的关系。

(3) 补偿控制。根据所建立的误差模型和实际加工过程,用计算机计算欲补偿的误差值,输出补偿控制量。

(4) 补偿执行机构。补偿执行机构多由微进给机构组成。

1. 误差信号的检测

数控机床误差补偿的效果在很大程度上取决于误差综合数学模型建立的准确性。而误差元素模型是误差综合数学模型的基础,它又直接关系到最后的综合数学模型的准确性。所以,误差补偿的首要任务是对数控机床误差元素进行准确检测。能否精确地检测和辨识数控机床的误差元素直接关系到下一步所建立的误差模型能否准确反映数控要求。

机床的误差情况会影响所建误差综合模型的准确性,最终影响到数控机床误差补偿的效果。直接测量误差分量是在机床不同的位置和温度分布条件下,使用激光干涉仪等设备或其他光学方法来测量误差分量的技术。间接估计误差分量是用可伸缩式球棒等测量仪器来测量机床上工件表面形状误差或最终误差,而后基于运动学模型估计各误差分量的方法。直接测量误差分量更精确、更简单明了。间接估计误差分量提供了一种快速和有效估计机床误差分量的方法。还有另一种方法是,将工件尺寸和形状误差的测量值用于估计机床误差。通常,机床几何误差的测量不是很困难,但由于机床热误差在很大程度上取决于加工周期、冷却液的使用,以及周围环境等多种因素,所以要精确测得热误差是相当困难的。

2. 误差的建模技术

在机械加工中,机床加工精度最终是由机床上刀具与工件之间的相对位移决定的。机床上刀具与工件之间的相对位移误差可用运动学建模技术来计算。误差的建模和预报是实施误差补偿的基础,同时又是各种间接测量方法的理论基础,因此,进行误差综合建模技术的研究非常必要。现在,误差综合建模主要采用标准的齐次坐标变换方法,在建模时基于多刚体运动理论建立刀具和工件的运动关系模型,然后基于小误差假设进行模型简化得出误差综合模型。误差综合建模的一般步骤为:

- (1) 机床误差元素分析;
- (2) 建立参考坐标系和局部坐标系;
- (3) 建立机床各个运动副在理想状态下的变换矩阵;
- (4) 建立机床各个运动副在存在误差条件下的变换矩阵;
- (5) 根据小误差假设得出误差综合模型。

3. 误差补偿的控制

数控系统中的误差补偿软件是根据所建立的误差模型和实际加工过程,用计算机计算将要补偿的误差值,然后将其转变为数控代码的。所加载的误差测量数据和数控代码一同上传到补偿模块中,此时补偿模块的各个误差补偿参数被定义,然后生成补偿后的数控代码,从而输出补偿控制量。

4. 补偿执行机构

误差补偿方法的实施主要可以分为两种:一种是基于加工程序修改的补偿方法;另一种是基于控制器的补偿方法。1971年,Koliskor 和 Thompson 通过对加工零件的轮廓尺寸进行测量,对数控程序进行了修改,但是这种方法无法补偿热误差,并且只有对于大规模的生产才能取得好的效果。为了使用方便,很多人开发了一些能修改数控程序的软件,将编制好的代码导入这个程序后便可获得新的程序,从而达到几何误差的补偿。不过,因加工过程非常复杂,有很多信息都需要进行考虑,因此,这时候可以在后置处理中将测量得到的误差一并输入来进行误差的补偿。在国内,张虎等提出了数控加工中心误差 G 代码补偿技术,这是在后置处理中使用的一种方法。基于数控系统的补偿方式有两种,其中一种是对机床的控制参数的设置进行补偿,即数控系统本身可以进行误差的补偿。比如,Siemens 840D 控制器可以对温度进行补偿。插补运算中的补偿功能可以对由丝杠误差产生的螺距误差,机床测量系统的误差等进行补偿,同时,可以将测量得到的误差以表格的形式输入控制器,在执行数控程序的时候调用这些误差数据。Heidenhain I TNC 控制器也具有同样的功能,可以对机床的几何误差和温度影响进行补偿。这种基于数控系统的补偿的主要问题在于热误差的补偿是通过热膨胀系数的设定和测量机床的关键热源来预测运动轴的直线定位误差随温度的变化而变化的。

1.5 数控机床误差补偿技术的研究现状

1.5.1 国外数控机床误差补偿技术的研究现状

早期机床误差补偿方法主要集中在基于误差测量结果调整机床结构或加工程序上。20 世纪 50 年代,出现了采用螺距校正尺刚度补偿丝杠机床母丝杠螺距误差的方法。而 Kolistor 则先测出被加工件的误差,然后通过改变后续件的加工程序来纠正测出的误差。在 20 世纪 70—80 年代,误差补偿技术成功地应用于坐标测量机(CMM)上。如今,几乎所有的 CMM 都开始使用基于误差模型的软件补偿方法来纠正与 CMM 结构有关的定位误差,这使得 CMM 的制造费用大大降低。相比之下,对数控机床误差补偿技术的研究进展缓慢,还处于探索阶段。机床发展到当今的超精

密发展水平,主要依赖于机床系统的不断精化和改进,如对机床主轴导轨、伺服、驱动装置等的设计、结构和材料等方面的改进。荷兰著名精密工程专家 Schellekens 认为,“机床误差补偿并不普遍,据我所知只是有限的应用”。造成这种局面的原因在于,与三坐标测量机相比:① 机床的结构复杂,工作环境恶劣;② 机床误差补偿向量较多;③ 机床误差补偿有实时性要求;④ 出于安全考虑,对机床误差补偿的鲁棒性和可靠性要求高。机床的误差补偿技术包括机床误差的测量及对误差作用的纠正,不仅涉及机床误差参数的直接测量,而且涉及机床误差的间接运动学建模。机床的误差补偿是通过机床实际误差的修正来提高机床精度的。而实现数控机床软件误差补偿技术的关键在于迅速准确地计算出机床误差。数控机床上刀具与工件之间的误差计算可用运动建模技术实现。世界各国学者在数控机床误差建模技术领域开展了多方面的探索和研究工作。早期的研究有 D. L. Leete 和 French 等人用三角关系推导的几何误差模型。1984 年,日本的小岛辉在一台高精度数控机床上实现了热变形的微机构补偿。它通过主轴箱上的自动检测装置对主轴的热位移进行检测,并通过数控装置进行反馈补偿。1986 年, Ferreira 和 Liu 提出了基于刚体运动学和小角度误差假设的三轴机床几何误差的解析二次型模型。在相关的研究中, Donmez 等人推导出了机床的广义误差合成模型。该模型既考虑了机床的几何误差,又考虑了热误差。1987 年, Sam 等人在运动点的坐标与运动误差存在二次关系的假设基础上,通过实验建立了机床空间误差模型。Dufour 和 Groppetti 等人在不同载荷与温度条件下,向机床工作空间内不同位置的误差向量存入存储器单元,并通过存储器查表方式,对给定点的误差进行补偿。1988 年, Anjanappa 开发了一种模型,可以合成立式车削加工中心的所有几何误差。1990 年, Kurtoglu 用运动学模型补偿了铣床的空间误差,该模型包括 18 项误差,不包括垂直度误差。1991 年, K. Kim 和 M. K. Kim 运用刚体运动学方法建立了三坐标数控机床空间误差模型。1992 年, Soon 等人提出了一种方法,可以得到包含旋转轴在内的多轴机床的误差模型。Chen 则去掉了建模中的刚体运动假设,其成果可以对非刚体误差进行补偿,并通过标准齐次坐标变换方法建立了几何误差和热误差模型,包含旋转轴在内的多轴机床的误差模型考虑了 32 项误差成分,而不是传统的 21 项。1993 年, Lin 和 Ehmann 提出了一种直接空间误差分析方法,可以评价多轴机床工件的位置和方向误差。

1.5.2 国内数控机床误差补偿技术的研究现状

1995 年,章青等人提出了基于多体系统理论建立多轴数控机床定位误差模型,提出了基于多体系统理论的数控机床运动误差模型、几何误差参数综合辨识模型及相应测量技术,使用 9 线位移误差及直线度误差测量,可准确辨识数控机床整个工作区间内的全部 21 项几何误差参数,在三坐标立式数控机床上进行软件误差补偿实

验,并经过坐标测量机检验。结果表明,建模方法具有较强的使用性,为实现通用的建模技术建立了基础。天津大学精仪系在分析影响机床温度场因素的基础上提出了一种机床热变形误差的混合建模方案,即同时采用温度场和机床的主轴转速为模型的输入的方案,这样既可在保证模型预报精度的前提下减少温度测点数量,以方便应用,又可提高模型的可靠性。另外,大连理工大学、哈尔滨工业大学、同济大学、华侨大学、广西大学、沈阳工学院、沈阳机床厂、济南机床厂、昆明机床厂等都对机床误差补偿技术进行了研究,并取得了一定的成绩。目前,基于模型的软件误差补偿方法以其通用性强、成本低、易操作等明显优点越来越受到人们的重视,特别是现代计算机技术和现代测量技术的发展和普及,为软件误差补偿技术的研究和应用提供了更为广阔的前景。因此,复杂工程系统的误差建模成为软件误差补偿的关键问题。

1.6 数控机床误差补偿技术存在的不足和发展趋势

1.6.1 数控机床误差补偿技术存在的不足

目前,国内外关于误差补偿技术的研究较多,特别在几何误差等静态方面已经有了比较成熟的理论,一些补偿技术,如丝杠螺距误差补偿技术等,在不同类型机床上获得了广泛应用,显著提高了数控机床的精度。

在数控系统误差补偿集成方面,机床误差补偿技术与数控系统的集成不够,无法满足和提升高档数控机床的水平。国家科技重大专项支持了一批机床误差补偿技术课题,这些课题在各自机床厂取得了一定的成效,但由于缺乏完善的数控系统二次开发环境,这些技术还主要停留在课题支持的一些机床和国外数控系统上,从应用的角度看并没有上升到市场应用的层面,没有形成大面积推广。另外,从用户的角度看,机床误差补偿技术缺少与国产高档数控系统的深度集成和融合,大部分缺乏实际应用。因此,有组织、有计划地利用国产数控系统的二次开发优势,开展机床误差补偿技术在国产数控系统上的集成工作并将误差补偿技术融入机床用户的实际生产中,才能充分发挥机床误差补偿技术成果对提高国产数控机床的作用。

1.6.2 数控机床误差补偿技术发展趋势

误差对于数控领域而言,是客观上必然存在的。任何数控机床设备在操作过程中,受到客观存在的各种因素的影响,不可能有百分之百的精确度。在科学技术不断进步的今天,人们不断致力于提高数控机床加工生产的精确度。

在对数控机床产生误差的问题有了一定的了解之后,就要针对这些问题,完善误差补偿方面的技术,从而达到提高数控机床生产加工的精密度这一目的。误差预防