

WUZHOU SHUKONG JICHUANG WUCHA JIANMO  
YU JINGDU CEPING FANGFA YANJIU

# 五轴数控机床误差建模 与精度测评方法研究

孙惠娟 著



重庆大学出版社

## 内容提要

数控机床的精度是保证零件加工精度的首要条件之一。随着交通、航空、航天等领域的快速发展,汽车零部件、飞机结构件及现代模具的结构变得越来越复杂,因此对数控机床的精度也提出了更高的要求。

本书以“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项课题为背景,针对企业在加工生产中对大型龙门、立式及卧式等五轴数控机床精度检测和评价的实际需求,深入研究了数控机床误差检测办法、误差辨识与分离机理、误差分析模型与精度测评方法,对我国高档数控机床的自主开发及精度的提高有着重要的理论价值和实用价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

五轴数控机床误差建模与精度测评方法研究/孙惠娟著. -- 重庆:重庆大学出版社,2019.10  
ISBN 978-7-5689-1864-0

I. ①五… II. ①孙… III. ①数控机床—加工误差—系统建模—研究 ②数控机床—加工精度—评价—研究  
IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 240986 号

## 五轴数控机床误差建模与精度测评方法研究

孙惠娟 著

策划编辑:杨粮菊

责任编辑:陈力 邓桂华 版式设计:杨粮菊

责任校对:张红梅 责任印制:张策

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:饶帮华

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

重庆俊蒲印务有限公司印刷

\*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:7 字数:182 千

2019 年 10 月第 1 版 2019 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5689-1864-0 定价:49.00 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

数控机床的精度是保证零件加工精度的首要条件之一。随着交通、航空、航天等领域的发展,汽车零部件、飞机结构件及现代模具的结构变得越来越复杂,曲面变得越来越多,因此对数控机床的精度也提出了更高的要求。提高机床精度一直是国内外研究的目标之一,我国数控机床在性能、精度和可靠性等方面与国外机床还存在较大的差距。针对数控机床精度保持性和提高的需求,进行数控机床误差分析与精度测评的研究,对我国高档数控机床的自主开发及精度提高有着重要的理论意义和实用价值。

本书以“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项课题为背景,针对实际企业中所采用的大型龙门、立式及卧式等五轴数控机床精度检测和评价的实际需求,开展了五轴数控机床误差建模与精度评价技术的研究,深入研究了数控机床误差检测方法、误差辨识与分离机理、误差分析模型及精度测评方法。其主要研究工作与成果如下:

①五轴数控机床误差建模原理与分析模型研究。针对3种构型五轴数控机床,在分析数控机床主要误差来源及误差形式的基础上,基于多体系统理论建立了不同构型五轴数控机床的综合误差模型。

②提出五轴数控机床旋转定位误差的非接触式检测方法。根据不同构型五轴数控机床旋转轴的结构特点,利用机器视觉技术采集旋转轴在不同位置的标志图像,采用图像处理技术对获取的图像进行转角定位误差计算,并与传统检测方法进行对比分析,验证所提方法的可行性和有效性。

③提出转台加摆头式五轴数控机床几何误差和伺服误差综合建模评价方法。在不同进给速度下,对转台加摆头式五轴数控机床多轴联动时的几何误差和伺服误差进行了分析与评价,并对其在机床总误差中所占比重进行了评估,结果表明高速时伺服动态误差对机床总误差影响较大。该方法为相似构型机床的几何和伺服误差的综合评价提供了参考。

④建立双转台式五轴数控机床旋转轴误差检测与辨识模型。根据五轴数控机床旋转轴运动形式及其相关误差源的特

点,制订了不同的误差检测模式与分离方法。利用球杆仪在不同检测模式下检测机床旋转轴运动时的误差,通过建立与两个旋转轴相关的误差辨识模型,对误差结果进行分离和辨识,得到与回转工作台相关的误差参数,为旋转轴误差的补偿和调整提供了参考依据。

⑤建立五轴数控机床空间误差分析模型。利用激光干涉仪等仪器检测机床坐标轴的各项误差,基于多体系统理论建立空间误差模型,计算机床工作区域内的空间误差分布,预测机床当前精度状况,为确定机床的特定误差检测项,实现对主要误差项的快速、高效检测和数控机床误差补偿提供基础数据。

⑥提出五轴数控机床圆度误差检测与分离方法。在分析机床圆度误差影响因素基础上,推导了误差传递函数与误差分离算法,通过参数求解得到各误差源对机床圆度误差的影响程度,实现了各误差源的定性分析和定量分析。利用光栅尺位移传感器和球杆仪对数控机床在不同工况下的圆度误差进行检测,通过对比进一步分析数控机床的主要误差源,并利用所提方法对机床圆度误差进行了初步分离。

⑦开发出数控机床精度评价原型系统。针对用户需求,在数控机床误差检测、辨识基础上,设计机床精度测评指标集,构建机床精度评价指标体系,结合层次分析法与模糊综合评判法,建立了数控机床精度评价原型系统。

本书由重庆工业职业技术学院孙惠娟编著,在完成书稿的过程中参考了部分文献,在此编者对该部分文献的作者们和本书的审阅者表示感谢。

同时本书得到了重庆市教委科学技术研究项目(自然科学类 KJ1603001)的资助。

著 者  
2019年5月

# 目 录

1	绪 论	1
1.1	研究目的与意义	1
1.2	五轴数控机床发展概况	1
1.3	数控机床误差检测与评价技术研究概况	2
1.3.1	数控机床精度概念及精度体系	2
1.3.2	数控机床精度检测技术研究现状	3
1.3.3	数控机床误差建模方法研究现状	6
1.3.4	数控机床误差辨识与解耦方法研究现状	7
1.3.5	数控机床精度评价方法研究现状	7
1.3.6	数控机床精度预测研究现状	8
1.4	研究内容与技术路线	9
2	五轴数控机床误差建模原理与分析模型	12
2.1	数控机床误差源	12
2.2	五轴数控机床误差源分析	13
2.2.1	几何误差分析	13
2.2.2	热误差分析	14
2.2.3	其他误差分析	15
2.3	多体系统理论分析与误差建模	15
2.3.1	多体系统几何结构描述方法	16
2.3.2	多体系统运动变换矩阵	17
2.3.3	基于多体系统的误差模型	18
2.4	五轴数控机床结构形式分类	19
2.4.1	五轴数控机床类型	19
2.4.2	实验对象机床	19
2.5	实验对象机床误差模型	20
2.5.1	双转台式五轴数控机床误差模型	20
2.5.2	双摆头式五轴数控机床误差模型	21

2.5.3	转台加摆头式五轴数控机床误差模型 .....	22
2.6	总体研究目标及关键技术 .....	23
2.7	本章小结 .....	24
3	五轴数控机床旋转定位误差的非接触检测方法 .....	25
3.1	机器视觉检测技术 .....	25
3.2	图像处理方法 .....	26
3.2.1	边缘提取算法 .....	26
3.2.2	去噪技术 .....	26
3.2.3	最小二乘法椭圆拟合 .....	26
3.2.4	支持向量机 .....	27
3.3	机器视觉检测流程 .....	28
3.3.1	标志设计 .....	28
3.3.2	不同构型机床检测方法 .....	28
3.3.3	图像获取和图像处理 .....	29
3.3.4	计算偏转角度误差 .....	30
3.4	机床旋转轴转角定位误差检测实例 .....	30
3.4.1	实验设备及仪器 .....	30
3.4.2	图像获取过程 .....	30
3.4.3	图像处理过程 .....	31
3.5	检测结果分析 .....	33
3.6	本章小结 .....	35
4	转台加摆头式五轴数控机床几何和伺服误差综合评价 .....	36
4.1	机床运动误差模型 .....	37
4.1.1	五轴数控机床的结构 .....	37
4.1.2	几何误差定义 .....	37
4.1.3	几何误差模型 .....	37
4.1.4	伺服误差模型 .....	38
4.1.5	机床空间误差模型 .....	39
4.2	实验方法与装置 .....	39
4.3	实验结果分析与验证 .....	40
4.3.1	实验结果分析 .....	40
4.3.2	结果验证 .....	43
4.4	本章小结 .....	44
5	双转台式五轴数控机床旋转轴误差检测与辨识方法 .....	45
5.1	五轴数控机床旋转轴误差定义 .....	45

5.2	五轴数控机床旋转轴误差辨识原理和流程	46
5.3	五轴数控机床旋转轴误差辨识模型	47
5.4	旋转轴误差检测方法	50
5.4.1	沿 A 轴径向检测	50
5.4.2	沿 A 轴轴向检测	50
5.4.3	沿 C 轴径向检测	51
5.4.4	沿 C 轴轴向检测	51
5.5	误差辨识过程	52
5.5.1	$\delta_{yAY}$ 和 $\delta_{zAY}$ 误差辨识	52
5.5.2	$\beta_{AY}$ 和 $\gamma_{AY}$ 误差辨识	52
5.5.3	$\beta_{CA}$ 和 $\alpha_{AY}$ 误差辨识	53
5.5.4	$\delta_{xAY}$ 和 $\delta_{yCA}$ 误差辨识	53
5.5.5	误差辨识结果	54
5.6	本章小结	55
6	双摆头式五轴数控机床空间误差分析模型	56
6.1	基本原理	56
6.1.1	激光干涉仪及特点	56
6.1.2	九线法检测原理	57
6.2	基于多体系统的机床精度预测建模	60
6.2.1	实验对象机床结构模型	60
6.2.2	特征矩阵	61
6.2.3	理想成形函数	62
6.2.4	实际成形运动函数	62
6.2.5	空间误差模型	63
6.2.6	数控机床空间误差预测结果	63
6.3	本章小结	66
7	数控机床圆度误差检测与误差分离方法	67
7.1	误差源的轨迹模式及误差传递函数	67
7.1.1	周期误差及传递函数	67
7.1.2	反向间隙误差及传递函数	68
7.1.3	垂直度误差及传递函数	69
7.1.4	位置环增益不匹配误差及传递函数	69
7.1.5	比例不匹配误差及传递函数	70
7.2	圆度误差检测误差分离	71
7.3	不同圆度误差检测方法比较	72
7.3.1	实验方法	72
7.3.2	检测结果对比分析	73

7.3.3	高速小半径圆度误差检测 .....	75
7.3.4	圆度检测误差分离功能模块开发 .....	75
7.4	本章小结 .....	77
8	基于层次分析法的数控机床精度评价系统 .....	78
8.1	基于层次分析法的模糊综合评判 .....	78
8.1.1	层次分析法评价步骤 .....	78
8.1.2	模糊集理论 .....	79
8.1.3	多级模糊综合评价 .....	79
8.2	精度指标评价体系设计 .....	80
8.3	基于 J2EE 的数控机床精度测评系统 .....	81
8.3.1	开发及运行环境 .....	81
8.3.2	数控机床精度测评系统框架 .....	82
8.3.3	数控机床精度测评系统主要功能 .....	83
8.3.4	数控机床精度测评流程 .....	84
8.3.5	数控机床精度测评典型模块运行实例 .....	84
8.4	本章小结 .....	88
9	结论与展望 .....	89
9.1	主要研究结论 .....	89
9.2	主要创新点 .....	90
9.3	研究展望 .....	91
	参考文献 .....	92

# I

## 绪 论

### 1.1 研究目的与意义

数控机床被称为“工作母机”，其加工零件的质量和精度在很大程度上取决于机床的自身性能，机床的技术水平直接决定了产品的精度水平。随着五轴数控机床在交通、航空、航天领域的广泛应用，飞机结构零件的不断发展，飞机的结构件呈现出“结构尺寸越来越大，零件结构越来越复杂，复杂曲面越来越多，几何精度不断提高”的特点，对加工零件的数控机床要求也越来越高。而机床本身的各种问题都可能导致所加工的零件质量不合格，目前，大多数机床厂家一般都是在零件加工完毕后对零件进行质量检查，发现机床精度出现问题时再想办法对其进行修复，这种方法效率低、误差率高、周期长，可能导致长时间的停机，使得制造成本大大增加。

针对这一问题，比较理想的解决方法是在机床精度尚未超出偏差范围之前，根据需要对机床工作状态进行监控，并对机床进行日常精度检测，根据其精度变化追溯机床的误差来源，并针对各种误差来源对机床进行相应的补偿，来消除或减少误差，使机床的精度始终保持在要求的范围内，以便及时发现和解决问题，提高零件加工精度。对机床精度的测评是保证零件加工精度，提高机床精度保持性的重要过程。本书通过对影响机床精度的因素进行分析得到机床精度测试指标集，根据所设计的精度指标集进行机床精度的检测。对获取的精度数据进行分析，建立精度数据映射模型，进行精度数据解耦处理。根据所建立的机床精度评价体系推导机床精度测评算法与测评流程，通过所建立的数控机床精度测评原形系统实现数控机床的精度测评，机床精度测评结果以报告的形式进行显示，用于指导用户了解所测评机床目前的精度状况。本书所做的工作对我国高档数控机床的自主开发及精度提高有重要的实用价值。

### 1.2 五轴数控机床发展概况

精密加工技术是指加工的尺寸、形状精度为  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ ，表面粗糙度  $Ra \leq 30 \text{ nm}$ ，超精密加工技术是指加工的尺寸、形状精度为  $0.1 \sim 100 \text{ nm}$ ，表面粗糙度  $Ra \leq 10 \text{ nm}$  的所有加工技术

的总称。“精密”“超精密”既与加工尺寸、形状精度及表面质量的具体指标有关,又与一定技术条件下实现这一指标的难易程度相关。精密和超精密数控机床是获得高的形状精度、表面精度和表面粗糙度零件的基本条件。随着交通、航空、航天等领域的发展,汽车零部件、飞机结构件及现代模具的结构变得越来越复杂,曲面变得越来越多,对数控机床的精度也提出了更高的要求。

五轴加工中心是一种专门用于加工机翼、叶轮、叶片、重型发电机转子等具有复杂空间曲面零件的高科技含量、高精密度的现代数控加工中心。其优点主要在于:①能够加工一般三轴联动机床不能加工或者无法一次装夹加工完成的自由曲面,节省装夹次数和时间;②可以提高空间曲面的加工精度、加工效率和加工质量。

当前,欧美国家、日本、韩国等生产的五轴联动数控机床基本上代表了五轴联动数控机床发展的最高水平。著名的五轴联动数控机床厂有德国 DMG 公司、Zimmermann 公司,瑞士威力铭一马科黛尔公司、宝美技术公司,韩国 Doosan 公司等。

一直以来,国内五轴联动数控机床相对于国外的整体水平还比较低,主要原因在于机床的关键功能还未能实现自主研发,与国外同类产品相比,国产机床的稳定性、精度等指标较差。同时,在高精度技术含量精密机床方面,国外对中国实行技术封闭和进口限制,目前国内市场上的五轴联动机床仍以进口机床为主。我国十分重视机床行业的发展,2009 年年初启动了“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项,重点支持高档数控机床、基础制造装备、数控系统、功能部件、工具、关键部件、共性技术等方面的研究和开发,且在各高校及相关企业的共同努力下,我国的五轴数控机床技术也得到了飞速的发展,已逐渐形成了比较成熟的产品。从 CIMT2007 展会上所展机床的情况来看,我国五轴联动数控机床已经形成了品种多样、技术成熟、拥有自主技术知识产权的特点。国内著名的五轴联动数控机床生产厂家主要有沈阳机床厂、上海机床厂、济南机床厂、北京机床研究所、昆明机床厂、普什宁江机床厂等。

目前,我国的机床改造策略正处在高速发展时期,社会各界对此广泛关注。最近,由大连科技局、金州新区等组织,大连光洋科技主办的“中大型机床亚微米级集成控制技术国际研讨会”在金州新区举行。会上,光洋科技在国内首次将激光测量用于中大型机床运动控制,实现了  $0.5\ \mu\text{m}/1\ 000\ \text{mm}$  的定位精度和  $0.1\ \mu\text{m}/1\ 000\ \text{mm}$  的重复定位精度,比传统精密机床精度提高了一个数量级。与会专家认为,此项技术使国内中大型高档数控机床在亚微米超精密集成控制方面取得了重大技术突破,在国际上处于领先水平。

随着我国国民经济的迅速发展和国防建设的需要,用户对设备的需求正向柔性、生产效率、功能多样和高性能等个性化需求方向转移,由此也促进了数控机床向高速高效化、模块化、高精度和复合加工等方向发展,对带动和提升我国机床工业水平具有重要的战略意义。

### 1.3 数控机床误差检测与评价技术研究概况

#### 1.3.1 数控机床精度概念及精度体系

“加工精度”和“加工误差”是评定零件几何参数准确程度的两种不同概念。加工误差的大小表明了加工精度的高低,一般来说,精度越高,误差越小;精度越低,误差越大。零件在加

工过程中,由机床、夹具、工件和刀具所组成的工艺系统会产生各种误差,从而改变刀具和工件在切削运动过程中的相互位置关系,从而影响零件的加工精度。机床的精度是指机床各部件与其理想位置偏离的程度。机床精度分为机床加工精度和机床静态精度。其中,机床加工精度是指被加工零件达到的尺寸精度、形状精度和位置精度;机床静态精度是指机床的几何精度、运动精度、传动精度、定位精度等在空载条件下检测的精度。通常可以通过相关的检测仪器检测机床的几何精度和位置精度从而直接反映机床的精度状况。而加工精度一般通过专用试件的加工精度来间接反映机床的精度状况。随着科技的不断进步,机床的精度也在不断提高,如图 1.1 所示为机床精度的界限随着时间的变化曲线图。

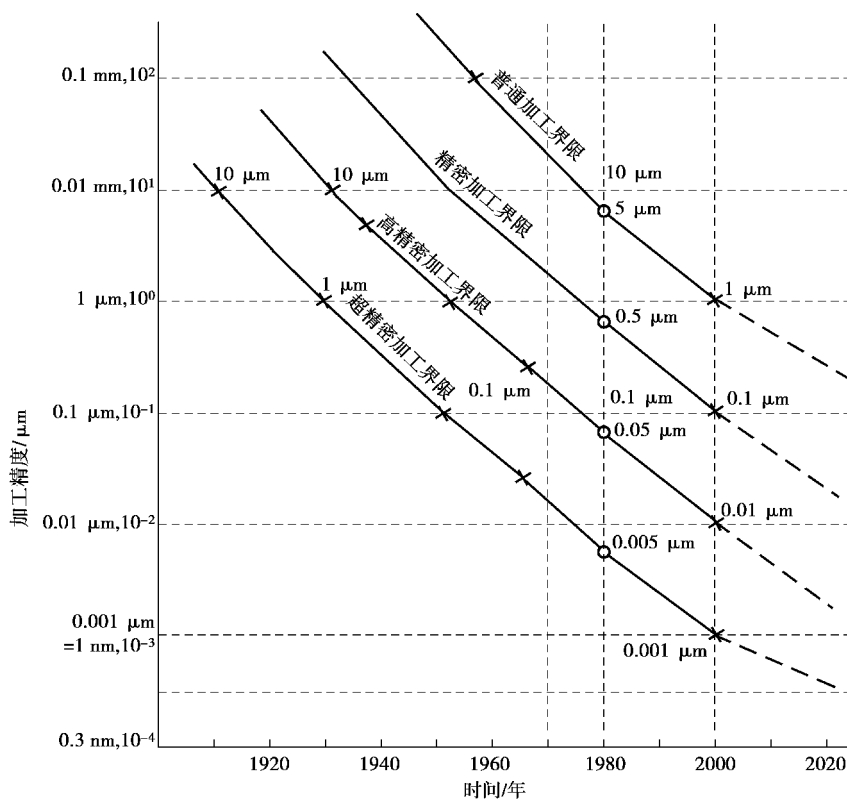


图 1.1 精度概念的发展与变化

目前,提高机床精度的方法主要有误差防止法和误差补偿法,其中误差补偿法无须更换机床的硬件,降低了生产成本,缩短了开发周期,成为提高机床加工精度的主要方法。误差补偿法的关键技术有误差检测技术、误差建模技术、误差补偿技术,其中误差检测技术和误差建模技术是误差补偿技术的前提。

五轴数控机床的误差测评技术归纳起来主要有误差检测技术、误差分离与辨识技术、误差建模与误差预测技术、精度评价技术等关键技术。

### 1.3.2 数控机床精度检测技术研究现状

常用的机床误差测量方法有直接测量法和间接测量法,其中,间接测量法如用典型工件试切或试加工,再对所试切的工件进行精度检测,其测量结果中包括了工艺、刀具和材料等因素在内,虽然可以通过试件的加工精度间接反映机床的精度,但不能精确地用于指导机床的研发

和改进。直接测量法如用微位移传感器测量装夹在主轴上的圆柱形基准棒或基准球,或者对装夹在工件台面上的基准量块或平尺直接进行测量,其可以直接获得某项误差,但该方法测量效率低,测量的范围(如行程)有限。

目前,世界各国对数控机床精度检测指标的定义、测量方法及数据处理方法等都有所不同。国际上有5种精度标准体系,分别为德国VDI标准、日本JIS标准、国际标准ISO标准、国标GB系列和美国机床制造商协会NMTBA。其中,NAS979是美国国家航空航天局在20世纪70年代提出的通用切削试件,“NAS试件”是通过检测加工好的圆锥台试件的“面粗糙度、圆度、角度、尺寸”等精度指标来反映机床的动态加工精度。NAS试件已在三坐标数控机床的加工精度检测方面得到了很好的应用,但用NAS试件来检测五轴数控机床的加工精度还存在一些问题。成都飞机工业(集团)有限责任公司于2011年提出了用于检验五轴数控机床精度的标准试件——“S形试件”,该试件是由一个呈S形的直纹面等厚缘条和一个矩形基座组合而成,通过检测加工试件的“外形轮廓尺寸、厚度、表面粗糙度”等指标,以及试件上的3条线共99个点的坐标位置来检验五轴数控机床的加工精度,“S形试件”是目前五轴数控机床精度检验通用的检测试件,该试件已于2011年申请美国国家专利,“S形试件”模型图及检测点如图1.2所示。

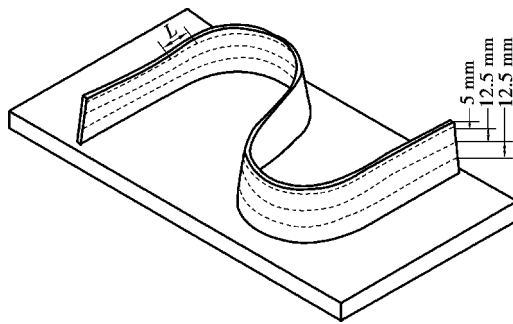


图 1.2 S形试件模型图

测量方法需根据具体的测量仪器来制订,机床精度提高的需求也促进了机床精度检测工具的发展。根据检测轨迹的不同,检测仪器可分为圆轨迹运动检测和直线运动轨迹检测。由于机床的圆轨迹运动包含了较多误差信息,因此,开发一种用于检测机床轨迹运动的仪器成为国内外学者的研究重点。

1982年Bryan发明了双球规法(Double Ball Bar, DBB),该装置由一个安装在可伸缩纤维杆内的高精度直线位移传感器构成。测量时,将中心座固定在工作台上,球杆仪一端小球与中心座相连,另一端小球与主轴端相连,在机床运动过程中,当杆长发生变化时,内置的位移传感器将电感信号转变成位移信号,输送至计算机中。该检测方法已被列入美国机床验收标准ASME B5.54,并被国际机床检验标准ISO 230-2采用。2009年M. Sharif Uddin等用DBB首次实现了双转台五轴加工中心的几何运动误差的检测。

其他的圆轨迹检测仪器如Knapp研制的基准圆盘—双向微位移计测头法(DGBP),Okuyama研制的全周电容—圆球法(CBP),姜明锡提出的四连杆机构法(PFLM),丘华发明的二连杆机构-角编码器法(PTLM)。

Heidenhain公司研制的平面正交光栅(GGET),既可以检测圆轨迹,又可以检测直线轨迹或不规则的异形平面运动。Wei Gao等用光电自准直仪检测主轴偏角的误差,用电容位移测

头测出了主轴的轴向跳动误差,用直尺和电容位移测头结合检测出了导轨的直线度误差。

韩国的 S. W. Hong 等通过“标准检验棒—微位移传感器—编码器法”一系列的检测可溯源到机床的各个单项运动误差。

用于直线运动轨迹检测的仪器,目前比较常用的有双频激光干涉仪和激光跟踪仪。

双频激光干涉仪是一种用途广泛的超精密非接触式测量装置,该类仪器以激光在真空中的波长作为长度基准,可以达到纳米级的测量分辨率。目前主要的激光干涉仪的生产厂家有英国 Renishaw 公司,其生产激光干涉仪线性测量分辨率可达  $0.001\ \mu\text{m}$ ,最高测量速度可达  $60\ \text{m}/\text{min}$ 。另外还有美国 API 公司,该公司生产的高精密型激光干涉仪,其线性测量精度可达  $0.2\ \text{ppm}$ ;偏摆角和俯仰角精度可达  $(0.2 + 0.02)''/\text{m}$ 。

双频激光干涉仪目前已广泛应用于精密、超精密机床的误差检测中。利用双频激光干涉仪对机床进行各项误差检测,目前比较流行的方法有二十二线法、十五线法、十四线法、九线法等多种位移测量法。

激光跟踪测量系统(Laser Tracker System, LTS)是工业测量系统中一种高精度的大尺寸测量仪器,可对空间运动目标进行跟踪并实时测量目标的空间三维坐标。其具有高精度、高效率、实时跟踪测量、安装快捷、操作简便等特点,适合于大尺寸工件配装测量。但激光跟踪仪的测量精度有限,其测量的误差与测量的距离有关,距离越长,误差越大,其应用得到了限制,但根据需要在某些机床上可以考虑作为误差矢量的方向性判断。

上海交通大学杨建国团队与美国光动公司合作,基于激光多普勒位移测量仪提出了一种沿体对角的机床空间几何误差的激光矢量测量方法,通过分步测量机床工作空间的 4 条体角线,并结合空间误差综合模型快速分离机床的 19 项误差。该方法通过添加 3 个面上的 6 条对角线,可以实现分离出机床的 21 项几何误差。

机床的热误差检测通过位置传感器和温度传感器同时检测机床热关键点的热变形和温升,分析机床热变形的分布规律和对机床精度的影响机理,并通过相应的补偿算法对机床进行误差补偿,提高机床精度。目前对机床热误差检测和补偿技术已经比较成熟,如上海交通大学开发的数控机床综合误差实时补偿系统,采用了并行线程的处理模式,通过实时采集机床温度和位移数据,建立热误差,选择数学模型、综合数据处理,上位机通过数控补偿系统对机床误差进行实时补偿,该方法已在工厂企业里得到了应用。

近年来,我国的测量技术和相关仪器的研究取得了一系列的重要进展,新型的检测原理、检测技术、测量系统和仪器设备不断出现:新型传感原理及传感器、先进制造的现场、非接触式、数字化测量、微纳米级超精密测量、超大尺寸精密测量及相关测量理论研究等方面都有了长足的发展。

根据国际生产工程协会(CIRP)的预测,至 2012 年,30% ~ 50% 的新机床将配备定位误差、直线度和各种转向误差的补偿功能。随着数控机床使用数量的增加,在使用过程中如何对数控机床精度进行再标定及误差溯源,调整机床以排除故障或对其进行误差补偿,并定期对数控机床误差进行检测和补偿的需求也会增加。提高机床精度的关键步骤是误差检测,快速高效的误差检测方法成为研究的重点,同时随着多轴数控机床的广泛应用,研究的对象也逐渐向多轴机床转移。

### 1.3.3 数控机床误差建模方法研究现状

机床误差建模技术是实现机床误差补偿提高机床精度的重要步骤。机床误差建模已经发展了多种不同的建模方法,如对机床的几何误差、空间误差以及包括多种误差的综合误差建模方法。

#### (1) 几何误差建模方法

1961年 Leete、French 和 Humphries 等用三角关系建立机床的几何误差模型。

1986年 Ferreira 和 Liu, 1989年 Elshchnawy 和 Ham 等基于刚体运动和小角度误差假说建立了三轴机床和坐标测量机的几何误差解析二次型模型。同年, Han 和 Zhou 等用 FFT 法建立了旋转工作台的位置误差模型。

1992年 Soons 等基本刚体假说基础建立了一种包括转动轴的多轴机床误差模型。

1994年 Ziegert 等建立了包括机床运动误差的神经网络模型。

#### (2) 空间误差建模方法

1993—1977年 Love 和 Scarr、Schultschik、Lin 和 Ehmann 等通过分析机床各误差因素的影响关系,建立了机床的空间误差模型。Kiridena 等用机构学方法建立了“RRTTT、RTTTR、TTTRR”形式的五轴数控机床空间几何误差模型,为此后多轴机床空间误差模型的建立打下了基础。

#### (3) 综合误差建模方法

Donmez 等针对车床推导出了包括几何误差和热误差在内的广义的误差模型。

1988年 Rexhtov 基于小角度误差假设,用变分法推导出了任意构造机床广义精度模型,利用该模型可以将机床的各种误差直接用参数的形式来表达。

1992年 Chen 等通过齐次变换方法建立了包括几何误差与热误差在内的 32 项误差元素的误差模型,该模型适用于非刚体条件下的运动。

1996年 Yang 和 Yuan 等用小波控制神经网络对机床热误差进行了建模。

1997年朱建忠、李圣怡、黄凯等在考虑零件加工工艺的基础上,使 Rexhtov 的变分模型更符合实际应用。

1998年杨建国等用齐次坐标变换的原理建立起车削加工中心的几何与热误差模型。

2000年 Rahman 等基于齐次坐标矩阵建立起包含多种误差在内的多轴数控机床准静态误差综合空间误差模型。

2009年林伟青等利用动态自适应算法,优化热误差建模中的参数,首先对数据进行最小二乘支持向量机建模,根据误差变量确定权重系数,建立了数控铣床热误差模型。试验结果表明,该建模方法精度高,泛化能力强,优于未加权的最小二乘支持向量机和传统最小二乘法。

2012年阳红等利用灰色模型和最小二乘支持向量机模型,通过加权系数将两种模型进行组合。试验结果表明,数控机床热误差最优权系数组合建模方法精度高、泛化能力强,优于灰色预测、最小二乘支持向量机和多元线性回归 3 种建模方法。

机床误差建模方法的发展从内容上来说,包括的误差项越来越多,从单一的几何误差到多种误差的综合,从直线、平面误差到空间误差。从建模的理论上来说,从传统的统计分析到使用自学习的神经网络再到多种建模方法的综合运用。随着人们对机床各种误差源的逐步认识和研究,误差的建模方法也越来越向通用性强、综合性强、准确性高的方向发展。

#### 1.3.4 数控机床误差辨识与解耦方法研究现状

机床误差检测结果中包含了多种误差成分,需借助一定的误差分离算法对误差进行解耦处理。误差辨识和解耦的原理非常复杂,通常与所采用的检测方法密切相关。国内外学者针对误差辨识开展了多方面的研究,开发出不少误差辨识方法,归结起来主要有综合误差测量辨识和间接误差测量辨识。

目前,导轨误差辨识的方法有利用 Renishaw 检查规、雷射追踪球杆、一维球列及 TBB 等测量仪器,建立误差与测量轨迹运动关系的辨识方法。2006 年曲智勇等提出了一种十线法的误差辨识方法,该方法通过测量仿真区域内 10 条直线的位移误差,快速、精确地确定 3 个导轨的全部 21 项几何误差,缩短了误差辨识时间。这些方法辨识的原理是利用激光干涉仪测量机床工作空间内不同位置直线上的坐标点,利用位移的误差建立误差辨识方程来辨识三轴数控机床的 21 项基本误差。

2004 年任永强等提出五轴数控机床各运动副的误差补偿运动量与刀具和工件间的误差值(位置及方向误差)之间存在一定的耦合关系,并基于小误差补偿运动假设,分析了误差运动和补偿运动间的相互关系,对五轴数控机床各运动副的位置及方向误差补偿运动进行了解耦。

2005 年加拿大的 S. H. H. Zargarbashi 等也专门对转动轴的误差进行了研究,用 DBB 通过 5 次测量实现了该转动轴轴向误差、径向误差、偏摆误差等 5 项误差的辨识,每次测量都是一次安装,减少了人工干预,检测精度得到提高。

2011 年张宏韬提出了一种适合五轴数控机床特点的分步解耦补偿实施策略,首先进行姿态误差补偿,通过旋转轴的旋转运动将工件的实际姿态调整到与理想姿态相同,然后通过移动轴的平移运动进行位置误差补偿。

2010 年胡建忠利用双球杆仪针对五轴数控机床的两个直线轴和任意一个旋转轴三轴联动运动进行圆度检测,制订了 6 种运动轨迹来检测机床的空间由此来对与五轴数控机床旋转相关的误差进行分离。

目前针对数控机床的误差辨识方法主要是运用激光干涉仪和球杆仪这两种检测工具进行不同检测路径的规划,并根据所建立的误差辨识模型进行误差辨识和分离。首先利用检测仪器将一些可以直接获得的误差项检测出来,减小误差的耦合项数,对一些不能直接测得的误差,通过制订特殊检测路径测量综合误差,其次利用误差辨识模型对各项误差进行辨识,最后得到各项相关的误差。

#### 1.3.5 数控机床精度评价方法研究现状

目前常用的综合评价方法主要包括基于人工神经网络的综合评价法、基于粗糙集的综合评价法、基于模糊数学的综合评价法、层次分析评价法、灰色模糊综合评价法、多元综合评价分析法、风险评价决策分析法和数据包络分析法等。

人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)是一种能够自组织、自学习、自适应、非线性映射的神经网络,通过初始样本集的训练能够对多指标综合评价问题作客观的评价。人工神经网络的缺点是不能合理地选择初始训练样本集,通常需要与其他评价方法相结合,如模糊评价、粗糙集、熵权 TOPSIS 法、层次分析及遗传算法等。

层次分析法(The Analytic Hierarchy Process, AHP)是美国著名运筹学家 T. L. Satty 等人在 20 世纪 70 年代提出的一种将定性与定量相结合的多准则决策方法,该方法能够客观地对人们的主观判断进行描述,原理简单易于理解,目前已广泛应用于城市规划、招标评价、科研成果评价、系统资源分析、社会科学等领域。

粗糙集理论(Rough Set Theory, RST)是波兰学者 Paw lak 于 1982 年提出的一种可以处理模糊性和不确定性的数学工具,该方法可将确定权重的问题转化为粗糙集属性重要性评价的问题。

模糊集合理论(Fuzzy Sets, FS)是由美国自动控制专家查德(L. A. Zadeh)教授于 1965 年提出的用于表达事物不确定性的一种理论。模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评价方法,该方法根据模糊数学的隶属度理论可把定性评价的问题转化为定量评价的问题,即用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象作一个总体的评价,该方法能较好地解决模糊的、难以量化的问题,适应于解决各种非确定性的问题。

2010 年刘世豪等建立了数控机床综合性能的评价指标体系,采用层次分析法中的 1~9 标度法确定了数控机床各项性能指标的权重系数,提出运用模糊综合评判法对数控机床综合性能的评价指标进行评价研究。

在运用这些评价方法时,应该根据所选择的评价指标的性质选择合适的评价方法。

### 1.3.6 数控机床精度预测研究现状

1991 年 Kim 等用刚体运动学模型建立起三轴数控机床空间误差预报模型。

1998 年 Minyang Yang 提出利用两个圆球和一个接触式探测器检测机床的几何误差和热误差,建立了机床的热误差神经网络预测模型,并利用测量结果对预测模型进行修改,提高误差预测的可靠性。

2000 年杨庆东等利用神经网络建立机床热误差补偿模型,通过实验验证,预测模型可预报补偿 70% 以上的机床热变形误差。

2002 年卢碧红等通过简化工艺系统尺寸链的“三瞬心”法建立了工件加工精度的预测模型,实验结果表明预测模型的相对误差在 10% 以内。

2003 年粟时平利用多体系统理论,基于虚拟加工技术开发出了数控机床加工精度预测系统。

2004 年孙春华采用 BP 神经网络的方法建立了电解加工精度与加工参数之间的预测模型,该模型的预测误差可控制在 10% 以内。

2007 年 M. Sharif Uddin 等利用球杆仪辨识所建机床误差模型参数预测机床的精度,并用标准的 NAS979 试件进行实验验证预测机床的加工精度。

2008 年张松青等利用数理统计法建立了零件加工精度变化的预测模型,并通过典型轴类零件验证了所建模型的精确性和适应性。

2009 年杨小萍运用多元回归分析方法建立了铣削参数与刀具几何参数集成的表面粗糙度的预测模型,并利用最小二乘法建立了直线度、平面度和线轮廓度的预测算法。

2010 年胡建忠利用多体系统理论建立了双转台五轴数控机床运动误差模型,对标准圆锥台试件进行加工精度的仿真,并对圆锥台试件的加工圆度误差进行了预测。

2011年王永等提出了一种综合考虑尺寸、形位公差的精度预测方法,将零部件的实际配合面想象为理想的配合面,分析系统末端功能面的空间位置分布范围和分布规律,实现了对机械系统的精度预测。

2012年刘志峰等利用多体系统理论建立了精密立式加工中心的精度预测模型,通过对典型试件的模拟加工,实现了机床加工精度的预测,该预测方法可为机床设计方案的改进和精度分配提供参考依据。

2012年C. Ahilan等提出了一种利用神经网络建立数控车削过程加工参数(切削速度、进给率、切削深度和刀尖点半径)与表面粗糙度和功率消耗之间关系的预测模型。

Kuang-Chao Fan等于2012年提出在给定切削力和导轨参数的条件下,可用于计算由导轨磨损接触变形引起滑板几何误差的数学模型,并通过该数学模型预测导轨在长时间使用之后的定位误差。

目前数控机床的精度预测技术主要是基于多体系统理论和神经网络所建立的预测模型,精度预测的结果可为机床最终的加工精度提供参考。另外,通过所预测的机床的精度结果可以进一步找出误差的主要来源,为下一步提高机床的精度奠定基础。

## 1.4 研究内容与技术路线

本书研究的主要目的是根据实际需要,结合实际企业所采用的国产高档数控机床的特点,归纳分析数控机床几何精度、定位精度指标,以此为基础确定精度的检测项目、检测方法,搭建数控机床精度数字化检测平台。开展的主要研究内容如下:

①数控机床精度影响因素分析。通过对数控机床结构关联形式、误差类型及误差源的分析,明确数控机床精度检测的主要误差源及误差形式。

②数控机床精度测评指标集设计与检测方法研究。在数控机床误差检测方法与影响因素分析的基础上,设计数控机床精度测评指标集。分析国际和国内检测标准,研究以三坐标测量机、激光干涉仪、球杆仪及数控机床用工件测头等为核心检测设备的数控机床精度检测方法,提出可行的数控机床精度检测方法,以国产五轴数控机床为研究对象,进行机床精度检测实验验证。

③数控机床误差模型研究。基于多体系统理论,建立不同构型五轴数控机床的误差模型。利用解耦技术确定数控机床精度优化评价指标集,提出定量分析与定性分析相结合的指标数据映射模型。

④数控机床精度测评算法与测评流程研究。提出数控机床精度评价体系及评价算法,建立数控机床精度测评流程与规范结构形式。

⑤数控机床精度测评软件模块开发。在数控机床精度检测及评价技术研究基础上,开发数控机床精度测评软件模块,实现对机床精度的测评,并基于机床现场运行状态,完成对机床当前精度的测评。

本书以国产高档五轴数控机床为研究对象,重点研究五轴数控机床误差检测、误差建模与精度评价等关键技术,在此基础上开发一套数控机床精度测评系统。针对不同机床的结构特点及误差分布,选用相应的误差检测方法,利用误差辨识与分离算法对检测结果进行误差辨