

学 术 著 作 丛 书

*Accuracy Modeling Technology of
Precision and Ultra-precision Machine Tool*

精密和超精密机床精度建模技术

李圣怡 戴一帆 等编著

国防科技大学出版社

国防科技大学学术著作
专项经费资助出版

精密和超精密机床精度 建模技术

李圣怡 戴一帆 尹自强 编著
郑子文 王贵林 彭小强

国防科技大学出版社
湖南·长沙

内 容 简 介

本书重点介绍精密和超精密机床精度建模技术,全书分为五章,主要介绍了用多体系建模方法建立的适合于各类机床的统一精度数学模型及其在超精密加工机床中的运用;基于精度模型的激光干涉仪的精密、超精密机床误差十二线辨识法;单点金刚石端面车削和飞切条件下的三维表面形貌建模方法;表面形貌模型在虚拟加工中实现切削参数的优化、表面形貌和粗糙度预测以及相对振动辨识的运用等。

本书可供从事精密和超精密机床设计、超精密加工工艺、精密仪器和测量等精密工程领域研究的科技人员参考,也适合大专院校相关专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

精密和超精密机床精度建模技术/李圣怡,戴一帆,尹自强等编著. —长沙:国防科技大学出版社,2007.3

ISBN 978 - 7 - 81099 - 397 - 5

I . 精… II . ①李… ②戴… ③尹… III . 高精度机床—几何量—精度—数学模型 IV . TC502.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 154253 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

<http://www.gkdebs.com>

责任编辑:张静 肖滨 责任校对:耿筠

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:850×1168 1/32 印张:12.5 字数:325千
2007年3月第1版第1次印刷 印数:1-3000册

ISBN 978 - 7 - 81099 - 397 - 5

定价:32.00元

前 言

超精密加工技术是因宇航技术和军事技术的发展需要,于20世纪60年代初在美国形成和发展起来的。最具有里程碑和代表性的技术是金刚石镜面切削技术,它推动了超精密机床技术的发展并奠定了机械制造中超精密加工技术这一新分支的学科地位。由于超精密加工在军事技术和高技术领域的重要作用,如精确打击武器中的制导仪表、伺服控制元件,信息战设备中操瞄与光学探测设备等,各军事强国均将它列为国家关键技术予以重点资助和发展。日本在20世纪80年代因重视超精密加工技术的基础研究,并将其应用于民用高技术产业,如磁盘、光盘、集成电路芯片、磁头和光电晶体器件等制造中,使得日本在微电子产业竞争中取得了世界领先的优势。目前,超精密加工技术不仅成为各国重点发展的技术,而且成为衡量一个国家制造水平高低的标志。

精密和超精密加工技术是指加工精度达到某一量级的所有制造技术的总称。根据我国当今科学技术发展的水平,通常把尺寸、形状精度在 $0.1 \sim 1\mu\text{m}$,表面粗糙度 $R_a \leq 20\text{nm}$ 的加工技术称为精密加工技术,把尺寸、形状精度在 $0.1 \sim 100\text{nm}$,表面粗糙度 $R_a \leq 10\text{nm}$ 的所有加工技术称为超精密加工技术。

当然,上述定义并非十分严格,例如数米直径大型光学零件的加工,精度虽在零点几微米的要求,但在目前一般条件下却难以达到,其制造不但要有特殊的加工设备和环境条件,同时还要有高精

度的在线(或在位)检测及补偿技术的支持,故也将其称为“超精密”加工技术。因此,“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。通常认为精度与加工尺寸之比(精度比)达到 10^{-6} 量级也称为超精密加工。

精密和超精密加工技术是以高精度为目标的制造技术,不同的历史时期或技术发展的阶段有不同的定义和标准,人们不断地用当代科技最新成果来完善和提高加工精度,故“精密”、“超精密”概念也是与时俱进的。当前,精密和超精密加工技术利用愈来愈多的最新科技成果,所涉及学科领域也愈来愈广,它已不仅是一门工艺技术,而且成为包含当代最新科技成果的复杂系统工程。其工程理论的研究范围包括:

(1) 单项制造技术的精度极限及机理研究,重点在于挑战极限和揭示基本原理与规律;

(2) 高精度制造工艺与装备条件的研究,重点在于挑战工程应用的难点,探讨工程可行性、适应性及工程应用的创新;

(3) 以当代新技术的综合与集成为特色的高精度制造原理与方法研究。

国防科技大学精密工程研究室成立于1981年,至今已走过了26年的历程,经历了三代学人的不懈努力。从20世纪80年代开始,我们在航天工业部和国家自然科学基金的支持下,以惯性陀螺零件的超精密加工技术为背景,重点开展金刚石超精密镜面车削的在线检测与误差补偿控制技术的研究。在此基础上不断扩展我们的研究领域与理论和实验研究的深度,开展了诸如超精加工机床,超精密磨削和光学研、抛技术,大型、微型光学零件制造技术等

的研究工作。随着研究的深入,我们迫切感到需要将多年的研究成果整理、提炼,出版一套“超精密加工”丛书,以和同行探讨。本书即为丛书之一,共分为五章,主要内容如下:

第一章主要介绍建立在传统的坐标变换理论和多序体特征表述方法基础上的变分法和多体系统误差分析建模方法。介绍了用多体系统建模方法建立的一种适合各类机床的统一数学模型。这一数学模型实际上是表述了各种部件的误差量如何通过机床的结构和运动,定量地变换为刀具和工件成形面的位置和姿态误差。用这一模型可以分析和预测各类误差沿不同途径对机床精度的影响,可对机床精度的仿真、检验和设计改进等工作提供理论依据。

第二章以单点金刚石超精密车床和大型五轴超精密加工机床为应用实例介绍了超精密加工机床建模的分析方法。并针对我们研制的实验型超精密机床,着重介绍了回转轴系的误差建模方法和对溜板驱动系统的滚珠丝杠传动机构进行的特性与精度分析。

第三章主要对刀具三维运动轨迹以及工件加工后的三维表面形貌进行建模。介绍了刀具路线、刀具轨迹与刀具模型的关系;用机床运动学和切削理论的分析方法建立了单点金刚石切削的工件三维表面形貌模型;通过对超精密端面车削和飞切两种切削方式进行仿真建模来模拟刀具切削运动的轨迹、预测工件表面三维微观形貌及二维截面轮廓形状等表面特征。

第四章介绍了双频激光干涉测量仪在超精密机床中应用的一些基本问题;分析了三轴数控精密机床尤其是超精密机床的 21 项基本几何误差辨识的九线辨识法以及我们提出十二线辨识法,后者充分利用双频激光干涉测量仪在位移测量上的高精度特性,避免对平动轴的直线度误差和角度误差同时进行直接测量,有一定

的实用价值。

第五章以香港理工大学对虚拟超精密加工系统和光学零件虚拟超精密加工的研究为实例,介绍了超精密虚拟加工技术研究的概念与现状;运用第一、二章建立的误差模型进行误差仿真和虚拟加工;运用第三章建立的端面车削表面形貌的模型,在虚拟加工中实现切削参数的优化,表面形貌和粗糙度预测以及从工件表面形貌数据来辨识刀具与工件间的相对振动。

本书主要由研究室老师和学生的研究成果整理而成,运用了大量前人的研究论文和经验,我们力求在参考文献中详细给出,但可能不甚全面,在这里对有关作者表示歉意。作者水平有限,加之超精密加工技术发展很快,很多新技术我们尚未涉及,也未作深入的研究,因此,一些新技术和新研究进展尚未录入也特表遗憾。最后,特别要感谢研究室的所有在职和离开的老师以及所有毕业离去和在读的研究生,正是他们辛勤的劳动才有本书成功出版的可能。还特别要感谢学校科研部和出版社,他们的大力支持才使本书顺利出版。

作者

2007年1月

目 录

第一章 精密和超精密机床几何精度建模理论与方法

1.1	误差的基本知识	(1)
1.1.1	准确度、重复度(精密度)和分辨率	(1)
1.1.2	阿贝误差	(2)
1.1.3	误差的特性和分类	(4)
1.1.4	不确定度的概念	(9)
1.1.5	表面粗糙度及其评价	(11)
1.2	精密和超精密机床及加工误差描述	(19)
1.2.1	精密和超精密标准随科技的发展	(19)
1.2.2	精密和超精密机床误差源分析	(21)
1.2.3	单元误差	(23)
1.2.4	机床几何误差及其表示	(25)
1.2.5	精密和超精密机床加工精度的要求	(27)
1.3	精密和超精密机床几何精度建模理论的发展 ..	(32)
1.4	多体系统误差分析与建模的运动学理论概述 ..	(35)
1.4.1	多体系统几何结构描述方法	(36)
1.4.2	理想运动的变换矩阵	(40)
1.4.3	实际运动的变换矩阵	(45)
1.5	多体系统运动学方程	(58)
1.5.1	理想条件下的零级运动方程	(59)
1.5.2	实际条件下的零级运动方程	(60)
1.6	多体系统的约束	(61)

1.6.1	结构约束	(62)
1.6.2	相对运动约束	(63)
1.7	多轴数控机床成形运动及误差分析与建模	(64)
1.7.1	机床成形运动及成形函数基本概念	(64)
1.7.2	理想运动的成形函数与运动约束 一般形式	(68)
1.7.3	实际运动的成形函数与运动约束 一般形式	(70)
1.7.4	基于多体系统数控机床误差模型的 应用意义	(73)
	参考文献	(75)

第二章 精密和超精密机床精度模型与应用

2.1	超精密车床成形运动及空间误差建模	(81)
2.1.1	单点金刚石超精密车床简介	(81)
2.1.2	超精密车床的拓扑结构、低序体阵列和 特征矩阵	(83)
2.1.3	超精密金刚石车床误差分析	(85)
2.1.4	理想成形函数与运动约束方程	(88)
2.1.5	实际成形函数与运动约束方程	(89)
2.1.6	空间误差模型	(90)
2.2	大型五轴超精密加工机床成形运动及空间误差 建模实例	(92)
2.2.1	大型五轴超精密加工机床简介	(92)
2.2.2	五轴超精密加工机床空间误差建模	(96)
2.2.3	理想成形函数与运动约束方程	(103)
2.2.4	实际成形函数与运动约束方程	(104)
2.2.5	空间误差模型	(108)

2.2.6	基于误差模型的光学镜面磨削精度控制	(112)
2.3	精密和超精密机床回转轴系的误差建模 ^[7-11] …	(123)
2.3.1	精密和超精密机床回转轴系的 误差建模方法 ……	(124)
2.3.2	精密和超精密机床主轴回转误差的 测量方法 ……	(128)
2.3.3	精密和超精密机床主轴偏角误差的 测量方法 ……	(130)
2.4	超精密机床滚珠丝杠传动机构的特性与精度分析	(138)
2.4.1	丝杠的微观动态特性 ……	(139)
2.4.2	传动机构中的摩擦 ……	(147)
2.4.3	滚珠丝杠副运动特性的理论模型 ……	(152)
2.4.4	滚珠丝杠微观动态特性对超精密 进给运动的影响 ……	(156)
2.4.5	进给机构中的反向间隙 ……	(158)
2.4.6	滚珠丝杠对进给机构运动直线度的影响	(164)
	参考文献 ……	(177)

第三章 精密和超精密加工刀具及加工表面形貌建模技术

3.1	超精密加工表面三维微观形貌建模综述 ……	(179)
3.1.1	建模的意义 ……	(179)
3.1.2	建模的基本方法 ……	(180)
3.2	刀具模型与轮廓加工误差 ……	(185)
3.2.1	轮廓加工误差指标体系 ……	(185)
3.2.2	直线轮廓加工误差 ……	(188)
3.2.3	曲线轮廓加工误差 ……	(190)

3.2.4	自由曲面轮廓加工误差	(192)
3.3	精密车削加工中心车削表面形貌的建模与分析	(197)
3.3.1	车削加工中心多体动力学的精度建模 ..	(197)
3.3.2	车刀模型	(201)
3.3.3	车刀轨迹参数方程	(202)
3.3.4	车削加工中心典型零件加工表面 形貌仿真	(205)
3.3.5	车削加工中心的精度建模	(210)
3.4	非球面形精密铣磨的建模与误差分析 ^[46]	(212)
3.4.1	轴对称非球面的常用磨削方式	(212)
3.4.2	非球面磨削成型的几何模型	(214)
3.4.3	杯形砂轮铣磨二次曲面的数学模型	(222)
3.4.4	误差分析	(227)
3.5	单点金刚石超精密车削表面微观形貌建模 ^[47]	(230)
3.5.1	工件表面形貌建模方法	(231)
3.5.2	刀具干涉对工件径向截面轮廓形成的 影响	(238)
3.5.3	表面粗糙度的预测	(240)
3.6	超精密飞切加工三维形貌仿真	(241)
3.6.1	飞切加工表面形貌建模的算法	(241)
3.6.2	飞切加工表面形貌的仿真	(245)
3.7	超精密车削表面特征分析与相对振动的辨识 ..	(248)
3.7.1	超精密端面车削工件二维截面轮廓的 特征分析	(248)
3.7.2	工件表面径向轮廓分析	(249)
3.7.3	工件表面周向轮廓分析	(256)
3.7.4	工件表面沿刀具螺旋切削轨迹截面的 轮廓分析	(261)

3.7.5 相对振动的辨识方法	(263)
参考文献	(269)

第四章 基于激光干涉仪的精密和超精密机床误差 检验与评价

4.1 概述	(276)
4.1.1 机床综合误差检验与评定	(276)
4.1.2 误差溯源	(280)
4.2 激光干涉仪的基本原理	(282)
4.2.1 双频激光干涉测量仪 ^[26]	(282)
4.2.2 新型单频激光干涉测量仪 ^[27]	(284)
4.3 双频激光干涉仪在超精密机床中的应用	(286)
4.3.1 双频激光干涉仪在空气中工作的 不确定度 ^[28]	(287)
4.3.2 双频激光干涉仪在超精密机床中 角度的测量 ^[26]	(289)
4.3.3 双频激光干涉仪在超精密机床中 直线度的测量	(290)
4.4 多轴机床平动系统几何误差的九线法辨识	(292)
4.4.1 X轴单元误差辨识	(292)
4.4.2 Y轴单元误差辨识	(295)
4.4.3 Z轴单元误差辨识	(297)
4.4.4 平动轴垂直度误差辨识	(299)
4.4.5 九线法应用问题分析	(300)
4.5 多轴机床平动系统几何误差的十二线法辨识	(301)
4.5.1 运动轴定位误差辨识	(303)
4.5.2 颠摆和偏摆误差辨识	(303)
4.5.3 直线度误差辨识 ^[3]	(304)

4.5.4	滚摆误差和垂直度误差的建模与分离	···	(305)
4.5.5	十二线法应用问题分析	·····	(309)
4.5.6	平动轴误差的位移法辨识技术比较	·····	(310)
4.6	平动单元几何误差检测与辨识实验	·····	(310)
4.6.1	实验系统	·····	(313)
4.6.2	实验结果	·····	(315)
4.6.3	辨识得到的 21 项误差结果	·····	(323)
4.6.4	九线法与十二线法的辨识结果比较分析	·····	(333)
	参考文献	·····	(334)

第五章 基于模型的精密和超精密虚拟加工技术

5.1	超精密机床虚拟加工概述	·····	(338)
5.1.1	虚拟加工系统的基本构成	·····	(338)
5.1.2	虚拟加工系统的典型实例	·····	(341)
5.2	基于几何运动精度模型的超精密虚拟加工	·····	(347)
5.2.1	基于几何运动精度模型的超精密 虚拟加工过程	·····	(347)
5.2.2	超精密虚拟加工中的成形运动 误差补偿策略	·····	(350)
5.2.3	虚拟加工中软件误差补偿的数控指令 修正算法	·····	(353)
5.2.4	虚拟加工中软件误差补偿实例	·····	(363)
5.3	端面车削表面形貌建模在虚拟加工中的应用	···	(366)
5.3.1	表面形貌模型验证及切削参数优化	·····	(366)
5.3.2	车削微振对工件三维形貌的影响与消除	·····	(371)
	参考文献	·····	(385)

第一章 精密和超精密机床几何精度建模理论与方法

1.1 误差的基本知识

1.1.1 准确度、重复度(精密度)和分辨率

关于机床运动精度有三个很重要的概念,即准确度、重复度和分辨率。准确度和重复度又共同形成精确度的概念,它们之间的关系可用图 1.1 表示。

1) 准确度

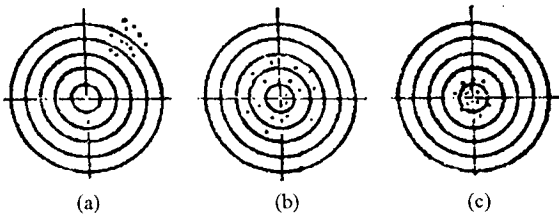


图 1.1 准确度、重复度和精确度

准确度是辨别真相的能力,反映了测量数据偏离“真值”的程度。如图 1.1(a)所示一组数据,虽然示值较集中,但和靶心(真

值)偏差大,系统的准确度较差,具有较大的系统误差。准确度可以表示为在目标靶上所有数据点和靶心(真值)距离的均方根值。图 1.1(b)则反映出该组数据准确度较好,系统误差小,但数据分散度大,即随机误差大。

2)重复度

重复度(精密度)是可以多次重现的能力,例如机床要求具有高的重复定位精度就是要求机床坐标轴多次重复移至同一位置时的偏差很小。如图 1.1(a)所示,数据分散度小,即系统的重复度较好,随机误差小。图 1.1(b)的数据表明,数据分散度大,系统的重复度差。图 1.1(c)则显示系统的准确度和重复度都好,即精确度高。重复度可以用包含 N 个数据分布的圆形区域的直径来表示, N 由随机发生事件决定。双向重复度是指当从两个方向逼近目标点时的重复度,例如机床丝杆螺旋传动的正、反旋方向,导轨溜板直线运动的正、反方向等,空间重复度则是指当从多个方向逼近目标点时的重复度。

3)分辨率

分辨率是能明确描述测量值的最小尺度,测量仪器本身的分辨率通常是指仪器的最小示值,在一定环境下的测量分辨率是仪表能稳定读出的最小数值。对数控机床运动而言,运动控制分辨率就是最小的可控机械运动增量,它与伺服系统的特性和软件的最小编程值等有关。

1.1.2 阿贝误差

在 19 世纪末,为了消除在测量过程中由于计量尺的基准轴线与被测尺寸的测量轴线不平行而产生的误差,Ernst Abbe 博士提出了关于长度计量仪器的设计原则,即“测量轴线只有在基准轴线的延长线上才能获得准确的测量结果”,这一设计原则称为阿贝原

则。虽然阿贝原则在长度测量中是一个基本测量原则,但其并非在任何长度测量中都能实现。例如用千分尺测量工件直径时,被测工件直径的测量轴线是在千分尺的测量尺(基准轴线)延长线上(如图 1.2 所示),虽然遵守阿贝原则,但千分尺的整体长度就必须大于两倍被测工件的长度。

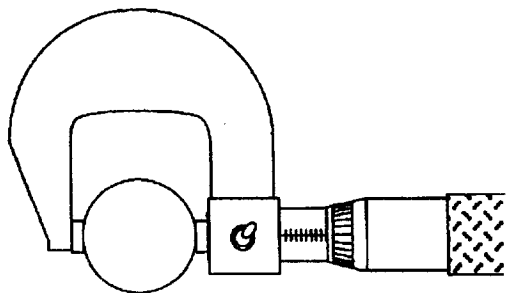


图 1.2 千分尺测长符合阿贝原则

假设千分尺螺杆长度为 L ,由螺杆运动的直线度误差产生转角 θ ,因为没有阿贝误差,此时产生的误差为:

$$\Delta L = L(1 - \cos\theta) \approx L\theta^2/2 \quad (1.1)$$

当 θ 很小时,误差为二次无穷小。

计量器具在结构、制造和使用上的限制,往往使得测量轴线与基准轴线不重合或不在其延长线上,也就是不一定遵守阿贝原则。凡是不符合阿贝原则而引起的误差,通常称之为阿贝误差,可采取一定的措施来减少阿贝误差。以游标卡尺的测量为例,从测量原理来看,被测长度的测量轴线与游标卡尺的基准轴线是不重合的,由于存在滑轨刚度、精度等问题,会产生测量阿贝误差。

如图 1.3 所示,当工件在卡口端测量时,卡口会因为滑轨上轴承的弹性及间隙而轻微晃动,由活动游标卡口运动的直线度误差产生的转角为 θ ,当 θ 角很小时,产生的测量阿贝误差为:

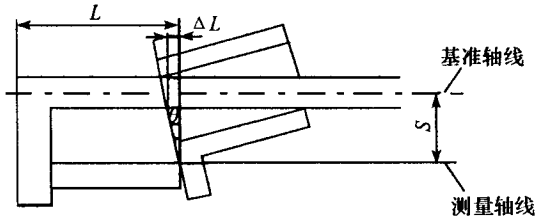


图 1.3 游标卡尺测量中的阿贝误差

$$\Delta L = S \cdot \tan \theta \approx S \cdot \theta \quad (1.2)$$

机床运动导轨测量的光栅尺往往贴在床身上,光栅读数头固定在溜板上,这是光栅的基准轴线。但是我们的测量轴线是与刀具加工点运动平行的直线,它与光栅尺的基准轴线不重合,也会产生阿贝误差。

1.1.3 误差的特性和分类

根据误差特性,可将它们分成确定性误差、时变误差、随机性误差和过失误差。

1) 系统误差(或称确定性误差)

误差数值的大小和符号不随测量的重复次数和测量时间而变化,或在条件改变时其值按一定规律变化,这种误差分量取决于系统固有的条件,故称为系统误差。在测量过程中,系统误差是以确定的规律影响着测量的结果,所以也称之为确定性误差。

误差数值的大小和符号均不变的系统误差又称为定值误差,定值误差是不能从一系列测量值的数据处理中揭示的,只能通过更高精度实验对比方法来发现,如用更高精度的仪器或更高精度标准件的测量比对。

变值系统误差,其误差数值的大小和符号按一定规律变化,其