

学 术 著 作 丛 书

*On-site Measurement and Error
Compensation Technology for
Precision and Ultra-precision Machining*
精密和超精密加工在位检测与误差分离技术

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

精密和超精密加工 在位检测与误差分离技术

李圣怡 戴一帆 解旭辉 编著
尹自强 陈善勇 王建敏

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在位检测与误差分离技术,全书分为六章。主要介绍了电容传感器、电感传感器、基于同心圆光栅莫尔条纹图像处理的二自由度误差测量系统和大量程纳米级光栅位移测量系统等四种测量仪器基本原理和改进措施。介绍了超精密加工中无误差重构的直线度测量及运动误差分离方法,圆度、圆柱度和平面度测量及运动误差分离方法与实验。最后还介绍了基于李群李代数的形位公差统一模型与评定方法。

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

精密和超精密加工在位检测与误差分离技术/李圣怡,戴一帆等编著.
—长沙:国防科技大学出版社,2007.10
ISBN 978-7-81099-398-2

I.精… II.①李…②戴… III.精密切削—在位—检测 IV.TG506

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 154255 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.gfkdcbs.com>

责任编辑:张 静 石少平 责任校对:文 慧
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 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1-2000 册
ISBN 978-7-81099-398-2

定价:32.00 元

前 言

超精密加工技术是应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加以整理、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,共分为六章,主要内容如下:

第一章主要介绍了四种由我们自行研究开发的、用于超精密加工在位检测与误差分离的位移测量仪器。我们研制的数字式电容位移传感器适合于超精密测量的需要,具有体积小、精度高和方便集成多传感器布置的特点;电感传感器是一种常用的接触式位移传感器,本章着重介绍我们对电感式传感器精密电路的各种改进;基于同心圆光栅莫尔条纹图像处理的二自由度误差测量是一种新的光学原理的机床多自由度误差测量方式;大量程纳米级光栅位移测量着重介绍了我们开发的一种新的光栅位移测量原理和计数方法。

第二章介绍超精密直线度测量以及直线运动误差分离技术。着重介绍了一种简单的对精确周期延拓方法的证明,介绍所开发的双剪切精确重构频域法(TSERF)和双剪切精确重构时域法(TSERT),解决调零误差的问题,进一步从工件的重构长度等于剪切量整数倍时这种特殊情况推广到工件长度不受限的一般情况。在无理论误差和无假设约束的条件下,可实现精确重构直线度和直线运动误差。

第三章主要介绍三点法超精密圆度误差检测与分离方法的理论与实验以及精密圆度检测中强异步误差运动(多圈不重复误差)评定方法,本章还介绍了高精度的圆度在位检测和误差补偿的实验案例。

第四章着重介绍圆柱度在位测量的数学模型、误差分离理论和模型验证、方程求解和谐波抑制等问题,对实际的超精密加工圆柱度误差在位测量装置、传统的圆柱度误差的评估方法、优化算法等问题进行了详细阐述。还介绍了超精密圆柱度在位检测和误差补偿的实验系统和测量加工实例。

第五章着重介绍冗余四传感器法,增加一个冗余传感器,以便充分利用冗余传感器信息,减少随机误差的影响;还介绍了针对大型平面度测量的数据量大的特点开发的混合逐次测量(HSTP)法;针对小型平面进行测量时受测头间距限制的特点开发的二维最小二乘插值逐次两点(ILSSTP)法等。

第六章着重介绍基于李群李代数的形位公差统一模型与评定方法。第二至五章对直线度、圆度、圆柱度和平面度误差的评价都是沿用传统的方式,误差的定义与表达都有各自的不同。本章介绍了用李群李代数作为数学工具,按照 ASME 数学标准的形式获得对现有公差数学标准、形位公差的统一数学模型;讨论了工件定位与公差评定在数学本质上的相似性和区别;用一维搜索技术和球约束最小二乘方法等对形位公差的最小区域和最小二乘准则下的评定算法进行改进的措施等。

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,很多新技术我们未作深入的研究,因此,本书中未涉及也特表遗憾。最后,特别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。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 6 月

目 录

第一章 精密和超精密在位检测仪器

1.1 电容传感器	(2)
1.1.1 电容传感器简介	(2)
1.1.2 电容式位移传感器的原理	(3)
1.1.3 KD-2 型数字式电容位移传感器	(5)
1.1.3.1 测量电路原理	(5)
1.1.3.2 测量电路的稳定性	(11)
1.1.3.3 标定	(16)
1.1.3.4 噪声的测试	(20)
1.1.3.5 动态性能分析	(21)
1.2 电感传感器	(22)
1.2.1 电感传感器工作原理	(23)
1.2.2 精密测量电路的改进	(28)
1.3 基于同心圆光栅莫尔条纹图像处理的二自由度误差 测量系统	(46)
1.3.1 测量系统基本原理	(46)
1.3.2 测量系统基本构成	(48)
1.3.3 多自由度误差测量系统的应用	(56)
1.3.4 同心圆光栅莫尔条纹形成的理论基础	(58)
1.3.5 莫尔条纹图像处理	(67)

1.3.6	测量系统实验	(68)
1.4	大量程纳米级光栅位移测量理论及方法	(71)
1.4.1	纳米级光栅技术概述	(71)
1.4.1.1	双高线数光栅系统	(73)
1.4.1.2	单根高线数光栅系统	(73)
1.4.1.3	非对称双级闪耀光栅系统	(76)
1.4.2	单根计量光栅实现大量程纳米级光栅位移测量的原理	(78)
1.4.3	波动光学分析法	(81)
1.4.4	实验研究	(82)
1.4.5	光栅位移测试系统设计	(84)
1.4.6	基于 DSP 的宽动态范围莫尔条纹精密计数细分方法	(86)
1.4.6.1	计数细分的用途	(86)
1.4.6.2	常规计数方法及其存在的问题	(86)
1.4.6.3	新计数细分方法的原理与实现	(88)
	参考文献	(92)

第二章 超精密直线度测量以及直线运动误差分离技术

2.1	基本概念	(95)
2.1.1	直线度与直线运动误差	(95)
2.1.2	直线度测量方法	(96)
2.1.3	超精密加工中的误差分离	(97)
2.2	单测头测量法	(98)

2.3	逐次两点法	(101)
2.4	逐次三点法	(104)
2.4.1	逐次三点法的原理	(104)
2.4.2	逐次三点法评价直线度时存在的原理误差 ...	(105)
2.4.3	其他三点法的改进	(108)
2.5	频域法误差分离技术的理论基础	(108)
2.5.1	可无限延拓时和周期性函数的重构理论	(108)
2.5.1.1	无限延拓时的测量重构	(108)
2.5.1.2	周期性轮廓的测量	(110)
2.5.2	直线度测量和误差分离技术的频域法概述 ...	(111)
2.6	频域最优化直线度和直线运动误差分离方法	(112)
2.6.1	假定为周期函数的频域法误差分离	(112)
2.6.2	基于频域最优化误差分离方法的两点法	(115)
2.6.3	基于频域最优化误差分离方法的三点法	(120)
2.7	精确非任意的周期延拓和调零误差的讨论	(121)
2.7.1	工件直线度测量精确重构方法的提出	(121)
2.7.2	直线度频域重构的关键问题之一:精确周期延拓	(123)
2.7.2.1	当 p 是 s 的整数倍时的精确延拓	(123)
2.7.2.2	当 p 不是 s 的整数倍时的周期延拓	(126)
2.7.3	直线度频域重构的关键问题之二:调零误差消除	(128)
2.7.3.1	调零误差对直线度测量的影响	(128)
2.7.3.2	相对调零误差差值的计算	(129)

2.8	工件直线度的双剪切精确重构频域法	(132)
2.8.1	当工件重构长度 $p = s_1 \cdot s_2$ 时的特殊情况	(132)
2.8.2	当工件重构长度 $p \neq s_1 \cdot s_2$ 时的一般情况	(135)
2.8.3	双剪切精确重构频域法进行直线度测量的流程	(136)
2.8.4	双剪切精确重构频域法的仿真实验	(141)
2.8.4.1	调零误差的影响	(142)
2.8.4.2	工件长度的影响	(147)
2.8.4.3	重构算法的稳定性验证	(151)
2.9	超精密直线度测量的双剪切精确重构时域法	(153)
2.9.1	直线度时域重构的关键问题	(154)
2.9.2	工件直线度的双剪切精确重构时域法	(154)
2.9.2.1	当工件重构长度 $p = s_1 \cdot s_2$ 时的特殊情况	(155)
2.9.2.2	当工件重构长度 $p \neq s_1 \cdot s_2$ 时的一般情况	(161)
2.9.3	双剪切精确重构时域法的仿真实验	(170)
2.9.3.1	调零误差对时域法评价直线度的影响	(170)
2.9.3.2	工件长度对时域法评价直线度的影响	(176)
2.9.3.3	噪声对时域法评价直线度的影响	(179)
2.9.3.4	双剪切精确重构频域法和时域法对噪声的抑制能力比较	(180)
	参考文献	(182)

第三章 超精密圆度及主轴回转运动误差在位测量与分离技术

3.1 基本概念 (190)

3.1.1	概述	(190)
3.1.2	圆度与回转运动误差	(192)
3.1.3	圆度与回转运动误差检测与分离技术研究现状	(201)
3.2	三点法圆度测量与误差分离技术	(202)
3.2.1	三点法圆度测量与误差分离技术的原理	(202)
3.2.2	三点法的参数选择与形状失真分析	(207)
3.2.3	三点法的实验系统	(213)
3.3	两点法圆度测量与误差分离技术	(215)
3.3.1	两步法和两点法	(215)
3.3.2	混合法	(221)
3.4	圆度误差的评定	(223)
3.4.1	评定方法的原理和数学基础	(223)
3.4.2	圆度或轴线回转误差的评定方法	(225)
3.4.3	误差评定的算法	(229)
3.4.3.1	最小外切圆和最大内接圆法评定圆度误差算法	(230)
3.4.3.2	最小区域法评定圆度误差算法	(237)
参考文献		(244)

第四章 超精密加工的圆柱度在位测量与误差 补偿技术

4.1	圆柱度的测量及其评估技术综述	(247)
4.1.1	圆柱度的测量技术	(247)

4.1.2 圆柱度的评估技术	(251)
4.2 圆柱度误差的在位分离方法	(252)
4.2.1 圆柱工件的数学模型	(252)
4.2.2 工件与主轴的一次谐波分离的探讨	(254)
4.2.3 圆柱度误差平面测量法的数学模型	(261)
4.2.4 圆柱度误差空间测量法的数学模型	(265)
4.3 圆柱度在位测量系统与实验	(269)
4.3.1 圆柱度在位测量系统	(269)
4.3.2 实验结果及其分析	(272)
4.4 圆柱度误差的评估技术	(275)
4.4.1 基本概念	(275)
4.4.2 最小二乘法	(277)
4.4.3 圆柱度的最小区域法	(279)
4.4.3.1 数学模型——“Minimax”表达式	(279)
4.4.3.2 最优化理论及其在圆柱度最小区域评估中的应用	(280)
4.4.3.3 删点技术	(285)
4.4.3.4 仿真结果及其分析	(286)
参考文献	(288)

第五章 超精密大型平面磨床在位平面度测量

5.1 精密、超精密平面度检测方法概述	(291)
5.1.1 传统的平面度测量方法	(291)
5.1.2 新型精密、超精密直线度和平面度测量方法	(292)

5.2 平面度在位测量的数学模型与误差分离方法	(295)
5.2.1 二维逐次两点法平面度在位测量原理	(296)
5.2.2 递推逐次两点法	(298)
5.2.3 最小二乘逐次两点法	(300)
5.2.4 混合逐次两点法	(302)
5.2.5 二维最小二乘插值逐次两点法	(307)
5.3 平面度评价方法	(312)
5.3.1 最小二乘评估法	(313)
5.3.2 预排序最小区域评估法	(314)
5.4 在位测量与误差分离实验系统	(315)
5.4.1 电容传感器性能指标测试实验	(317)
5.4.2 在位测量与误差分离实验	(319)
5.4.3 测量误差源分析及实用误差分离方法的讨论	(323)
参考文献	(325)

第六章 基于李群李代数的形位公差统一模型与 评定方法

6.1 现代几何公差研究概述	(327)
6.1.1 尺寸公差没有严格和统一数学模型带来的问题	(327)
6.1.2 公差评定算法	(329)
6.1.3 尺寸公差严格和统一数学模型的研究	(331)

6.2	用李群李代数描述的几何特征的位形空间	(333)
6.3	统一的形位公差数学模型	(337)
6.3.1	形状公差	(338)
6.3.2	基准的建立	(344)
6.3.3	位置公差	(346)
6.4	形位公差的评定算法	(350)
6.4.1	基本算法	(351)
6.4.2	算法性能改进	(354)
6.5	算法仿真和应用	(357)
6.5.1	与其他算法性能的比较	(358)
6.5.2	算法对初始条件的鲁棒性	(363)
6.5.3	算法在非球面光学零件加工中的应用	(364)
6.6	结论	(366)
附录 A	公差的测量数据	(367)
附录 B	算法的 Matlab 程序代码	(369)
参考文献		(378)

第一章 精密和超精密在位检测仪器

精密、超精密在位检测系统包括传感器、处理电路、数字化接口和数据预处理软件等。传感器及其仪器要满足精密、超精密在位检测的需求,应具有以下特点:

(1) 精度高

我们使用的精密、超精密在位检测仪器以高精度位移传感器为主,主要有电感式、电容式、光电式(如激光测微仪、光栅测微仪),它们的精度都是微米、亚微米级,甚至更高。有一些场合必须采用非接触式传感器,以免损伤工件表面。精密、超精密在位检测仪器中传感器是关键,开发和研究高精度的传感器及其仪器是该领域的难题和迫切任务。

(2) 体积小

精密、超精密在位检测仪器往往需要安装在加工现场,有时还用于多传感器组合集成的场合,因此传感器体积越小越好,还要便于安装、调整及检查。它所配用的电箱也应有尽可能小的体积,以方便加工现场的使用。

(3) 抗干扰性强

我们将边加工边进行的检测称为在线检测,将加工停止而工件仍在机床上处于待加工状态下的检测称为在位检测。目前,超精密加工基本还做不到真正的“在线”加工检测,主要的原因是高精度的传感器与其他仪器还很难实现在加工过程中一边加工一边检测。例如在超精密车削加工时,加工切削液、切屑、加工热变形都会使高精度传感器无法对工件加工面进行准确的检测。在位检

测与加工状态下的“在线检测”相比,检测环境条件要好得多,但与计量实验室的条件相比要恶劣得多,因此对环境干扰的鲁棒性要求就高很多。

(4)价格低廉

一些价格昂贵的检测仪器通常应放置在条件很好的计量实验室,并要求有严格规范的保养措施。然而精密、超精密在位检测仪器通常在车间使用,现场使用的仪器必须价格低廉,并且不能过于“娇气”。

国防科技大学精密工程实验室的研究人员长期从事超精密加工和精密、超精密在位检测的研究工作。本章着重介绍四种传感器及其仪器的研究和开发,主要集中于后续章节中要使用的位移传感器。

1.1 电容传感器

1.1.1 电容传感器简介

电容传感器作为一种低成本、高精度的微位移传感器有一系列的优点,在超精密测量各方面得到广泛的应用。当前,电容测量电路进一步向集成化、小型化、数字化方向发展,并不断出现一些新颖的测量电路。如瑞士梅特勒仪器公司研制的电容测量电路,使用一种特殊形式的 RC 振荡器,用完全专用的双极型集成电路对电容传感器的电容比值进行测量,可实现 10^{-6} 的分辨率,小于 $1.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的温漂。文献[1]介绍的高精度自动音频电容桥,内置微处理器,采用高稳定度的频率合成器输出 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ 的共桥音频信号,根据电桥输出的差值,用计算机控制音频信号的幅值