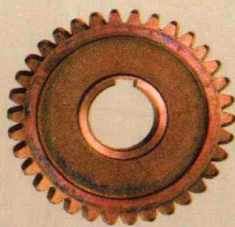




# 精密和 超精密机床 设计理论与方法

THE DESIGN THEORY AND METHOD FOR PRECISION  
AND ULTRA-PRECISION MACHINE TOOL

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 设计理论与方法

李圣怡 戴一帆 王建敏 吴宇列  
解旭辉 彭小强 尹自强 陈善勇 编著  
郑子文 王贵林

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设计理论与方法。全书分为七章,主要介绍了精密和超精密机床的整体结构设计方法与特点;以有限元分析为工具对精密和超精密机床的强度、刚度、阻尼、振动模式及热状态等进行分析设计;精密和超精密机床的重要部件:气体静压轴系和液体静压轴系,驱动系统的滚珠丝杠、摩擦传动、导轨、联轴节、减速器的设计以及电机选型等;超精密加工的环境控制设计,包括空气的洁净度、湿度、温度、加工热控制和隔振消振技术等。

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

精密和超精密机床设计理论与方法/李圣怡等编著. —长沙:国防科技大学出版社,2009.10

ISBN 978-7-81099-705-8

I. 精… II. 李… III. 高精度机床-设计 IV. TG502.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 161447 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)84572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:黄煌 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:15.75 字数:409千

2009年10月第1版第1次印刷 印数:1-530册

ISBN 978-7-81099-705-8

定价:40.00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中的重要作用,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、形状精度为  $0.1 \sim 1\mu\text{m}$ ,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、形状精度为  $0.1 \sim 100\text{nm}$ ,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,例如直径为数米的大型光学零件的加工,精度要求虽然为零点几微米的,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  $10^{-6}$  量级即称为超精密加工。

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,它已不仅是一个专门的工艺技术,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28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,开展了诸如超精密加工机床,超精密磨削和光学研、抛技术,大型和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整理、提炼,出版一套“超精密加工”系列专著丛书,以和同行探讨。本书即为丛书之一,共分为七章,主要内容如下:

第一章主要介绍精密和超精密机床的整体结构特点、特殊模块及模块化设计,并以近年来国内外精密和超精密机床的典型实例为背景,分析精密和超精密机床的整体结构设计和性能指标等。

第二章主要介绍精密和超精密机床设计的强度、刚度、阻尼、振动模态等方面的问题以及以有限元分析为工具对上述问题进行分析的实例。

第三章介绍了精密和超精密机床的关键部件——气体静压轴承的原理和设计理论,以及气体静压轴承轴系设计方法和实例。

第四章介绍了精密和超精密机床的关键部件——液体静压轴承的原理和设计理论,以及液体静压轴承轴系设计的方法和实例。

第五章介绍精密和超精密机床驱动链部件设计选型的方法,包括电机选型原则,滚珠丝杠及联轴节,滚动导轨,轴承和精密减速系统等的设计方法和实例。

第六章主要介绍精密和超精密机床摩擦驱动的原理和方法,以我们研制的大行程纳米分辨率扭轮摩擦传动实验系统为对象对摩擦驱动的设计进行了详细的分析和介绍。

第七章介绍超精密加工的环境控制设计,包括空气的洁净度、湿度、温度、加工热控制等,还着重介绍超精密加工的隔振消振技术的国内外动态和被动、主动隔振消振方法等。

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;书中作者水平有限,而超精密加工技术发展很快,很多新技术我们尚未涉及,我们未作研究的一些新技术和新研究进展不便录入也特表遗憾。最后,要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;同时还要特别感谢学校科研部和出版社,他们的大力支持才使得本书顺利出版。

作者

2009年7月

# 目 录

## 第一章 超精密机床结构设计

- 1.1 超精密加工技术与超精密加工机床概述 ..... ( 1 )
  - 1.1.1 超精密加工技术的概念 ..... ( 1 )
  - 1.1.2 超精密加工机床的加工精度等级和划分精度  
..... ( 6 )
  - 1.1.3 超精密加工机床的分类 ..... ( 9 )
  - 1.1.4 超精密加工机床设计技术的特色 ..... (23)
- 1.2 超精密加工机床的模块化设计 ..... (24)
  - 1.2.1 模块化的概念 ..... (25)
  - 1.2.2 模块化设计的原则 ..... (26)
  - 1.2.3 模块化设计的方法 ..... (28)
- 1.3 超精密加工机床结构设计技术 ..... (29)
  - 1.3.1 特殊的超精密机床的结构设计 ..... (31)
  - 1.3.2 高运动精度的轴系选择设计 ..... (53)
  - 1.3.3 超精密机床计量框及检测设计 ..... (54)
  - 1.3.4 超精密机床热控制设计 ..... (58)
- 1.4 超精密机床结构设计及典型实例 ..... (61)
  - 1.4.1 典型超精密机床结构分析——LODTM 超精密金  
刚石车床 ..... (61)



1.4.2	典型超精密机床结构分析——Nanoform、Nanotech 系列超精密机床 .....	(68)
1.4.3	典型超精密机床结构分析——OAGM2500 CNC 超精密磨床 .....	(77)
1.4.4	典型超精密机床结构分析——Big Optix(BOX)超 精密磨床 .....	(85)
1.4.5	典型超精密机床结构分析——CVD - SiC 离轴非 球镜的五轴超精密磨床 .....	(94)
1.4.6	典型超精密机床结构分析——CPPS 超光滑抛光 机床 .....	(98)
1.4.7	典型超精密机床结构分析——FANUC 公司超精 密铣床 .....	(102)
1.4.8	典型超精密测量机计量框结构 .....	(103)
	参考文献 .....	(111)

## 第二章 精密和超精密机床设计理论与方法

2.1	精密和超精密机床设计的一般原则 .....	(116)
2.1.1	精密和超精密机床设计的方法学 .....	(116)
2.1.2	精密和超精密机床功能和技术要求设计的主要 内容 .....	(117)
2.1.3	精密和超精密机床现代设计方法 .....	(118)
2.2	超精密加工机床强度与变形设计的基本方法 .....	(120)
2.2.1	材料的强度属性 .....	(120)
2.2.2	结构之间的关联属性 .....	(126)
2.3	超精密加工机床阻尼设计的基本方法 .....	(131)
2.3.1	材料阻尼 .....	(131)

2.3.2	结构阻尼 .....	(133)
2.4	有限元结构静力和模态设计与分析 .....	(145)
2.4.1	超精密加工机床基于非刚度效应的设计 .....	(145)
2.4.2	溜板结构与横梁结构设计的例子 .....	(152)
2.4.3	床身结构模态分析 .....	(156)
2.5	有限元热状态设计与分析 .....	(163)
2.5.1	电机发热功率计算 .....	(164)
2.5.2	直线电机发热对拖板的影响 .....	(166)
	参考文献 .....	(171)

### 第三章 超精密气体静压轴系的设计与运用

3.1	超精密气体静压轴系概述 .....	(173)
3.1.1	超精密气体静压类型与节流方式 .....	(173)
3.1.2	超精密气体静压旋转轴系 .....	(183)
3.1.3	超精密气体静压平动轴系 .....	(189)
3.2	气体静压轴承的设计方法 .....	(193)
3.2.1	设计方法概述 .....	(193)
3.2.2	气体润滑方程的建立 .....	(195)
3.2.3	气体润滑方程的求解 .....	(205)
3.2.4	改进型比例分割法 .....	(208)
3.3	气体静压轴承静态特性 .....	(213)
3.3.1	特性描述公式 .....	(213)
3.3.2	矩形止推轴承静态特性与设计原则 .....	(215)
3.3.3	圆环止推轴承静态特性与设计原则 .....	(218)
3.3.4	径向止推轴承静态特性与设计原则 .....	(222)
3.4	节流形式设计 .....	(227)

3.4.1	小孔节流形式 .....	(227)
3.4.2	表面复合节流形式 .....	(228)
3.5	气体静压轴承的稳定性分析 .....	(230)
3.5.1	止推轴承 .....	(231)
3.5.2	径向轴承 .....	(231)
3.6	局部多孔质气体静压轴承的设计 .....	(232)
3.6.1	局部多孔质气体静压轴承的基本条件 .....	(234)
3.6.2	局部多孔质气体静压矩形止推轴承数学模型 .....	(235)
3.6.3	局部多孔质气体静压圆环(或圆盘)止推轴承数 学模型 .....	(239)
3.6.4	局部多孔质气体静压径向轴承数学模型 .....	(242)
3.6.5	局部多孔质气体静压矩形止推方程的有限元方 法求解 .....	(245)
3.6.6	局部多孔质气体静压轴承静态特性 .....	(247)
3.6.7	局部多孔质气体静压轴承设计准则 .....	(250)
3.6.8	多孔质内气体流动模型 .....	(252)
3.6.9	小孔类气体静压轴承与多孔质气体静压轴承的 对比研究 .....	(254)
	参考文献 .....	(257)

## 第四章 精密液体静压轴系的设计与运用

4.1	精密液体静压轴系概述 .....	(261)
4.1.1	流体静压润滑的历史及研究现状 .....	(262)
4.1.2	液体静压轴承的优缺点 .....	(263)

4.1.3	超精密机床液体静压轴承与轴系的典型应用案例 .....	(264)
4.2	液体静压轴承分类 .....	(270)
4.2.1	止推轴承 .....	(271)
4.2.2	径向轴承 .....	(274)
4.2.3	多向支撑轴承 .....	(274)
4.3	液体静压轴承供压系统及油路系统 .....	(275)
4.3.1	定流量式供油静压系统 .....	(277)
4.3.2	定压式供油静压系统 .....	(277)
4.3.3	油路系统 .....	(280)
4.4	节流器及节流比 .....	(282)
4.4.1	节流器 .....	(282)
4.4.2	节流比参数 .....	(284)
4.5	建立流体润滑方程 .....	(285)
4.5.1	基本方程 .....	(286)
4.5.2	雷诺方程 .....	(287)
4.5.3	轴承特性描述 .....	(289)
4.6	流体润滑方程的数值解法 .....	(291)
4.6.1	常用数值解法 .....	(291)
4.6.2	有限差分法 .....	(293)
4.7	液体静压轴承的设计 .....	(297)
4.7.1	单矩形油垫的设计与分析 .....	(298)
4.7.2	单油垫支撑的设计步骤 .....	(303)
	参考文献 .....	(304)

## 第五章 精密和超精密驱动链设计

5.1 精密和超精密驱动链概述 .....	(307)
5.1.1 旋转运动驱动链 .....	(307)
5.1.2 直线运动驱动链 .....	(308)
5.2 驱动电机的选型设计 .....	(309)
5.2.1 精密和超精密机床对伺服电机的一般要求 .....	(309)
5.2.2 驱动电机的类型及评述 .....	(310)
5.2.3 精密和超精密机床驱动电机的选型设计理论与 方法 .....	(315)
5.3 丝杠 .....	(328)
5.3.1 丝杠传动的类型 .....	(328)
5.3.2 丝杠驱动的特点分析 .....	(330)
5.3.3 液体静压丝杠 .....	(339)
5.3.4 滚珠丝杠的设计 .....	(342)
5.3.5 丝杠驱动链的设计 .....	(355)
5.4 减速器 .....	(362)
5.4.1 行星式减速器 .....	(363)
5.4.2 谐波减速器 .....	(365)
附录1 直流伺服电机的实例 .....	(367)
附录2 力矩电机的实例 .....	(373)
附录3 交流伺服电机的实例 .....	(374)
参考文献 .....	(377)

## 第六章 摩擦驱动定位技术

6.1	摩擦传动及其在超精密机床中的运用概述	(380)
6.2	摩擦传动机构的力学原理	(383)
6.3	传统正交式摩擦传动方式	(390)
6.3.1	摩擦传动的组成	(390)
6.3.2	摩擦传动的几种型式	(393)
6.4	扭轮摩擦传动方式	(398)
6.4.1	扭轮摩擦传动的基本原理	(398)
6.4.2	扭轮摩擦传动的实例	(400)
6.5	扭轮摩擦传动运动学、动力学分析	(403)
6.5.1	扭轮摩擦传动的动力学分析	(403)
6.5.2	扭轮摩擦传动的运动学分析	(406)
6.5.3	纯滚动状态下的动力学方程	(407)
6.5.4	负载与夹角 $\beta$ 问题分析	(410)
6.6	扭轮摩擦传动系统运动参数计算	(413)
6.6.1	工作台的 $\text{最大加速度}$	(413)
6.6.2	电机的 $\text{扭矩参数选择}$	(414)
6.6.3	扭轮摩擦传动系统 $\text{运动参数计算}$	(415)
6.7	扭轮摩擦传动的一维工作台设计	(417)
6.7.1	系统组成与结构设计	(417)
6.7.2	气浮平台和浮动单元设计	(419)
6.7.3	实验研究	(419)
6.8	扭轮摩擦传动的二维工作台运用实例	(423)
	参考文献	(425)

## 第七章 超精密环境设计与控制

7.1 超精密加工的空气环境与热环境 .....	(429)
7.1.1 超精密加工的空气洁净度 .....	(429)
7.1.2 超精密加工局部恒温间 .....	(431)
7.1.3 超精密加工机床的热源局部温度控制 ...	(436)
7.1.4 超精密车床主轴热变形控制 .....	(437)
7.2 超精密环境高精度温度测量与控制基准 .....	(448)
7.2.1 高精度温度传感器 .....	(448)
7.2.2 石英温度传感器的误差 .....	(451)
7.3 隔振与减振技术 .....	(453)
7.3.1 隔振与减振原理 .....	(453)
7.3.2 被动隔振 .....	(457)
7.3.3 主动隔振 .....	(471)
7.3.4 正负刚度并联的隔振系统 .....	(477)
7.3.5 动态减振器 .....	(481)
参考文献 .....	(485)

# 第一章 超精密机床结构设计

## 1.1 超精密加工技术与超精密加工机床概述

### 1.1.1 超精密加工技术的概念

超精密加工技术是 20 世纪 50 年代末、60 年代初发展起来的一项新技术,由于电子技术、计算机技术、宇航和激光等技术发展的需要,美国组织有关公司和研究机构对微米级加工技术进行研究,在美国诞生的金刚石刀具镜面车削技术催生了超精密加工技术。1962 年美国首先研制出超精密车床(Union Carbide 公司,超精密半球面车床),在该机床上使用单刃金刚石车刀加工直径  $\phi 101.6\text{mm}$  的铝合金半球面,成功地实现了镜面车削,尺寸精度达  $\pm 0.6\mu\text{m}$ ,表面粗糙度为  $R_a 0.025\mu\text{m}$ ,迈出了微米级超精密加工的第一步。

目前,超精密加工还没有确切的统一定义。就其加工而言,超精密加工有两种含义,一是指向传统加工方法不易突破的精度界限挑战的加工;二是指向实现微细尺度界限挑战的加工,即以微电子电路生产为代表的微细加工。一般认为,加工精度高于  $0.1\mu\text{m}$ 、粗糙度优于百分之几  $\mu\text{m}$  的为超精密加工,更严格地说,尺寸精度为 IT-1(在  $\phi 100\text{mm}$  左右时为  $0.25\mu\text{m}$ ,粗糙度为  $R_a 0.025\mu\text{m}$ )或



更高的为超精加工。所谓微细加工是指在加工微小尺寸零件或微小尺寸结构时,能达到极微细的位移精度和极高的重复精度的加工。

超精密加工技术是尖端技术产品发展中不可缺少的关键加工手段,不管是军事工业还是民用工业都需要这种先进的加工技术。例如,关系到现代飞机、潜艇、导弹性能和命中率的惯性导航仪表用精密陀螺,如陀螺仪用的空气轴承、陀螺仪框架和动压马达等;激光核聚变用的光学镜、大型天体望远镜的反射镜、激光打印机用多面棱镜、高速摄影机和自动检测装备的扫描镜、激光加工机的多曲面反射镜和聚光镜等各种光学元件;大规模集成电路的硅片、复印机的感光鼓、录像机的磁头、计算机的硒鼓、磁盘等信息高技术产品;导弹舵机、精密泵、伺服阀等高精度控制执行器零件都需要超精密加工。从某种意义上说,超精密加工担负着支持最新科学技术进步的重要使命,也是衡量一个国家科学技术水平的重要标志之一<sup>[1]</sup>。

超精密机床是超精密加工最重要、最基本的加工设备,是实现超精密加工的物质基础。超精密机床技术是一项综合技术,包括机床的结构、关键基础部件、测控技术和环境技术等。其关键部件是主轴及其驱动系统、导轨及其驱动系统、检测装置、微进给机构等。

如果我们把超精密机床划分为实验室机床和商品化机床,可以清楚地看到,实验室机床是由大学和研究所研发的原理型机床,它往往由军事需求驱动,为某一特定产品而研制。这类机床尽可能集成最先进的技术和追求精度的极限,因此在一定程度上是以科学实验为目的的探索性和先导性的研究成果。但是,实验室机床并不追求功能的多样性、生产率和经济效益,也不能直接为市场提供规格化、实用化的产品。但是,大学和研究所保持着对超精密机床研究的持续热情和对高技术进行的超前研究,对超精密机床