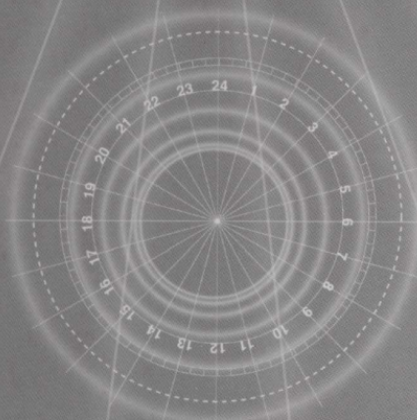




# 精密和 超精密机床 控制技术

CONTROL TECHNOLOGY FOR PRECISION  
AND ULTRA-PRECISION MACHINE TOOL

李圣怡 戴一帆 / 等编著

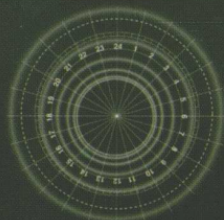


国防科技大学出版社



# 精密和 超精密机床 控制技术

CONTROL TECHNOLOGY FOR PRECISION  
AND ULTRA-PRECISION MACHINE TOOL



责任编辑/ 石少平  
封面设计/ 殷 健

ISBN 978-7-81099-560-3



9 787810 995603 >

定价: 35.00元

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 控制技术

李圣怡 戴一帆 解旭辉 郑子文 编著  
吴宇列 彭小强 陈善勇 陈志华

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控制技术,全书分为七章,主要介绍了超精密机床进给系统建模方法,包括经典PID控制策略,多轴系统的轮廓误差交叉耦合控制,定量反馈控制(QFT)和基于模糊滑模控制器的摩擦控制等。本书还介绍了压电陶瓷驱动刀具伺服机构,高频响、大刚度音圈电机及伺服刀架,直线电机驱动的超精密机床的进给系统的建模和控制策略。本书还针对超精密机床数控的关键硬件、软件技术,介绍了运动控制器硬件设计和数控系统软件设计以及适合超精数控的双圆弧精密插补算法等。

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

精密和超精密机床控制技术/李圣怡,戴一帆,解旭辉等编著. —长沙:国防科技大学出版社,2008.9

ISBN 978-7-81099-560-3

I. 精… II. ①李… ②戴… ③解… III. 数控机床—控制系统  
IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第134594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:石少平 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:14 字数:364千  
2008年9月第1版第1次印刷 印数:1-1000册

ISBN 978-7-81099-560-3

定价:35.00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27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”系列专业丛书,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:

第一章主要介绍用经典控制理论对超精密机床的进给系统进行建模和控制的方法与实践。本章以国防科技大学精密工程研究室研制的 KD250 型试验超精密金刚石车床为例,对精密滚珠丝杠、直流(交流)伺服电机和空气静压导轨组成的单轴、多轴数控进给系统的静、动态特性进行了分析和建模。本章介绍了所采用的经典 PID 控制策略,包括基于模型或基于过程特征参数的 PID 调节器参数整定;速度和加速度前馈控制器、伪微分反馈控制器和变增益 PID+速度前馈控制器的设计;参数优化等。

第二章以我们开发的基于 DSP 的 KDMC 系列运动控制器为实例,介绍运动控制器的硬件和软件设计的方法,以及在 PMAC 运动控制器和 COM 总线结合的开放式数控系统平台的设计。还介绍了我们研制的 KD250 型超精密金刚石车床的数控软件的结构,着重介绍两维空间曲线在线圆弧插补算法原理以及我们针对超精密加工的特点开发的超精密数控系统在线双圆弧插补算法。

第三章介绍了多轴超精密数控机床进给系统的加工轮廓跟踪误差分析,建立实时的轮廓误差模型,和设计最优的轮廓误差补偿律。本章通过设计轮廓误差交叉耦合控制器,将轮廓误差补偿修正量送给各坐标轴,达到减小和消除轮廓误差的目的。

第四章定量反馈控制理论(Quantitative Feedback Theory—QFT)

是一个具有工程应用价值的鲁棒控制器设计方法。本章首先介绍基于 QFT 原理的控制器设计过程,然后针对超精密机床进给机构的轨迹跟踪控制问题,着重介绍 QFT 控制器的基本设计方法。

第五章通过分析精密机床伺服进给系统的结构和建立机床伺服进给系统的摩擦非线性特性的动态数学模型,着重分析伺服进给系统摩擦非线性特性对机床跟踪精度的影响;然后通过神经网络等技术建立超精密机床伺服进给系统的非线性模型;再通过计算机仿真和设计模糊滑模控制器来研究相对应的摩擦控制对策。

第六章以我们研制的电陶瓷微动刀具伺服机构为对象,着重介绍压电刀具系统的建模技术,包括 Preisach—Krasnoselkii 磁滞非线性的数学模型,非线性频域建模法、非线性动态数据系统(NLDDS)和神经网络等建模方法。本章还介绍了压电陶瓷电源及微进给伺服控制系统,并介绍了实现超精密车削加工压电陶瓷执行器的跟踪性能的改善和提高加工精度的实例。

第七章着重介绍我们研制的非圆截面零件车削的音圈式直线电机和高频响、大刚度伺服刀架。针对中凸变椭圆外形轮廓的活塞高速伺服车削加工,本章介绍了音圈电机伺服刀架结构及动力学模型,半闭环和闭环精密控制器和  $H_{\infty}$  鲁棒控制器的设计与运用。本章还介绍了直线电机用于机床导轨超精密溜板进给控制的建模与高精度伺服控制的理论与实验等。

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。由于书中作者水平有限,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进展不便录入,也特表遗憾。最后,特别感谢研究室的所有在职和离任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

2008年6月

# 目 录

## 第一章 超精密车床进给系统建模及经典控制

- 1.1 超精密车床控制技术研究的概述 ..... ( 1 )
- 1.2 KD250 型试验超精密车床简介 ..... ( 3 )
  - 1.2.1 机床的结构特点 ..... ( 3 )
  - 1.2.2 机床的伺服控制位置检测 ..... ( 4 )
  - 1.2.3 试验超精密机床的控制特性实验 ..... ( 7 )
- 1.3 超精密车床进给系统建模与辨识 ..... (16)
  - 1.3.1 电气传动部分的建模 ..... (18)
  - 1.3.2 机械传动部分的建模 ..... (20)
  - 1.3.3 系统的传递函数 ..... (21)
- 1.4 超精密车床进给系统频域特性测试 ..... (22)
  - 1.4.1 系统频率响应测试的实施 ..... (23)
  - 1.4.2 超精密车床进给系统模型参数频域辨识  
..... (27)
- 1.5 超精密车床进给系统模型参数时域辨识 ..... (29)
  - 1.5.1 时域模型表示 ..... (29)
  - 1.5.2 测试信号的产生 ..... (29)
  - 1.5.3 系统模型参数的 MLS 辨识 ..... (30)
- 1.6 超精密车床进给系统模型的频域分析 ..... (32)
- 1.7 系统模型的转换和处理 ..... (36)

1.7.1	连续和离散传递函数的相互转换 .....	(36)
1.7.2	高阶传递函数的简化处理 .....	(38)
1.8	超精密车床进给经典控制策略 .....	(41)
1.8.1	基于模型的 PID 调节器参数整定 .....	(42)
1.8.2	基于过程特征参数的 PID 调节器参数整定 .....	(46)
1.8.3	速度/加速度前馈控制器设计 .....	(50)
1.8.4	伪微分反馈控制器设计 .....	(53)
1.8.5	变增益 PID“+”速度前馈控制器设计 ..	(55)
1.9	控制参数的优化 .....	(63)
1.9.1	综合性能指标 .....	(63)
1.9.2	优化算法和波形 .....	(64)
1.9.3	控制参数的优化 .....	(68)
	参考文献 .....	(71)

## 第二章 超精密机床的数控系统的设计与研究

2.1	数控系统硬件和运动控制器技术的综述 .....	(73)
2.1.1	运动控制器技术 .....	(73)
2.1.2	运动控制器在超精密机床 CNC 系统中的应用 .....	(80)
2.2	超精密车床数控内核和特殊插补软件的研究 ..	(84)
2.3	KDMC 系列运动控制器设计 .....	(88)
2.3.1	运动控制器的基本功能原理与结构 .....	(90)
2.3.2	运动控制器的软件设计 .....	(96)
2.3.3	上位机软件的设计 .....	(105)
2.4	PMAC 多轴运动控制器及应用 .....	(107)
2.4.1	PMAC 的功能与特点 .....	(108)

2.4.2	基于 COM 标准系统管理软件的开发	… (112)
2.4.3	PMAC 实时软件	… (118)
2.5	超精密数控系统在线圆弧插补算法	… (126)
2.5.1	两维空间曲线在线圆弧插补算法与误差分析	… (126)
2.5.2	轮廓加工的刀具半径补偿	… (131)
2.5.3	超精密数控系统中双圆弧伸缩步长插补算法	… (132)
2.5.4	列表曲线的三次 B 样条拟合处理	… (136)
2.6	复杂曲线或曲面的双圆弧逼近	… (141)
2.6.1	双圆弧逼近复杂曲线的基本理论	… (141)
2.6.2	双圆弧逼近任意函数曲线的程序段数目计算	… (145)
2.6.3	双圆弧逼近复杂曲线示例	… (146)
2.6.4	Spiral 曲线的双圆弧逼近	… (147)
2.6.5	Spiral 曲线的单边圆弧逼近及误差计算	… (151)
2.6.6	Spiral 曲线的近似最优双圆弧逼近	… (153)
2.6.7	Spiral 曲线近似最优双圆弧逼近示例	… (155)
	参考文献	… (157)

### 第三章 超精密加工的多轴耦合与解耦控制策略

3.1	轮廓误差及其来源	… (163)
3.2	伺服系统动态特性对轮廓加工精度的影响分析	… (165)
3.3	轮廓误差交叉耦合控制 (Cross - Coupling Control - CCC)	… (168)

3.3.1	轮廓误差模型 .....	(170)
3.3.2	CCC 控制器的实现 .....	(171)
3.3.3	机床耦合轮廓控制器性能分析 .....	(173)
3.4	同步控制 .....	(178)
3.5	细插补运动控制 .....	(180)
3.6	轮廓误差控制仿真结果 .....	(184)
	参考文献 .....	(185)

## 第四章 基于 QFT 的超精密轨迹跟踪控制器的设计

4.1	超精密机床进给机构控制要求及 QFT 控制方法特点 .....	(187)
4.2	QFT 控制方法设计原理 .....	(189)
4.2.1	线性系统跟踪问题的 QFT 控制器设计原理 .....	(189)
4.2.2	QFT 方法在采样控制系统中的应用 .....	(196)
4.2.3	基于 QFT 的非线性时不变系统的控制器设计 .....	(198)
4.3	超精密机床进给系统 QFT 控制器的设计 .....	(200)
4.3.1	控制系统结构 .....	(200)
4.3.2	确定系统不确定性 .....	(202)
4.3.3	确定控制系统设计指标 .....	(202)
4.3.4	控制器 G 的设计 .....	(204)
4.3.5	前置滤波器 F 的设计 .....	(207)
4.3.6	稳定性分析 .....	(207)
4.3.7	控制系统分析 .....	(208)
4.4	基于 QFT 的复合控制策略 .....	(211)
4.4.1	前馈控制器 .....	(211)

4.4.2	带复位功能的积分控制器 .....	(213)
4.4.3	QFT 控制试验 .....	(216)
4.5	关于 QFT 控制器设计的讨论 .....	(218)
	参考文献 .....	(219)

## 第五章 超精密机床伺服进给系统的摩擦控制

5.1	超精密机床伺服进给系统 stick/slip 摩擦的仿真模型 .....	(222)
5.1.1	超精密机床伺服进给系统 stick/slip 摩擦产生的机理 .....	(222)
5.1.2	超精密机床伺服进给系统 stick/slip 摩擦运动仿真模型 .....	(227)
5.2	超精密机床伺服进给系统 stick/slip 摩擦运动特性分析 .....	(231)
5.2.1	模型的有效性分析 .....	(231)
5.2.2	模型动力学分析 .....	(232)
5.3	超精密机床伺服进给系统摩擦非线性对机床性能的影响 .....	(236)
5.3.1	超精密机床伺服进给系统的结构 .....	(237)
5.3.2	Stick/Slip 摩擦非线性对机床位置精度的影响 .....	(237)
5.3.3	Stick/Slip 摩擦非线性对机床跟踪特性的影响 .....	(239)
5.3.4	超精密 CNC 机床轮廓精度测试 .....	(240)
5.4	基于神经网络的超精密机床伺服进给系统非线性模型 .....	(243)
5.4.1	神经网络学习算法 .....	(243)

5.4.2	超精密机床伺服进给系统前馈神经网络训练 .....	(245)
5.5	超精密机床伺服进给系统摩擦控制技术研究 .....	(250)
5.5.1	摩擦控制与补偿的基本思想和方法 .....	(250)
5.5.2	模糊滑模智能控制 .....	(253)
	参考文献 .....	(266)

## 第六章 压电陶瓷驱动微进给伺服控制系统

6.1	微进给伺服刀架实现方法概述 .....	(270)
6.2	压电陶瓷驱动微进给伺服刀具控制系统设计 .....	(273)
6.2.1	压电陶瓷微位移器的工作原理 .....	(273)
6.2.2	柔性铰链结构 .....	(275)
6.2.3	直流高压驱动电源设计 .....	(278)
6.2.4	其他直流高压驱动电源简介 .....	(281)
6.3	微动伺服系统的实验研究 .....	(284)
6.3.1	微进给系统性能测试 .....	(284)
6.3.3	微动装置闭环特性测试研究 .....	(287)
6.4	两坐标双重伺服轮廓误差补偿实验研究 .....	(290)
6.4.1	超精密车削加工机床的双重伺服控制系统 .....	(290)
6.4.2	双重伺服控制理论的数学论证 .....	(295)
6.4.3	两坐标双重伺服轮廓误差补偿实验研究 .....	(298)
6.5	压电陶瓷磁滞非线性分析及建模 .....	(303)
6.5.1	概述 .....	(303)
6.5.2	Preisach—Krasnoselkii 模型 .....	(304)
6.5.3	压电陶瓷建模的实验研究 .....	(311)

6.6	压电陶瓷微进给执行器典型控制方法 .....	(319)
6.6.1	线性化动态模型与控制 .....	(319)
6.6.2	非线性动态数据系统(NLDDS)建模与控制 .....	(325)
6.6.3	超精密加工中压电陶瓷刀具位置的自学习 控制 .....	(332)
	参考文献.....	(341)

## 第七章 直线电机伺服刀架及机床溜板伺服系统

7.1	直线电机驱动概述 .....	(346)
7.1.1	直线电机直接驱动的特点 .....	(346)
7.1.2	直线电机的类型 .....	(348)
7.2	高频响、大刚度音圈电机及伺服刀架.....	(354)
7.2.1	音圈电机伺服刀架结构及动力学模型 ...	(355)
7.2.2	伺服刀架的半闭环控制 .....	(359)
7.2.3	伺服刀架闭环控制的传统设计 .....	(364)
7.3	高频响、大刚度伺服刀架的 $H_{\infty}$ 控制研究 .....	(369)
7.3.1	$H_{\infty}$ 控制概述 .....	(369)
7.3.2	非圆车削系统模型特点 .....	(375)
7.3.3	高频响伺服刀架的 $H_{\infty}$ 控制器研究 .....	(381)
7.3.4	基于内模原理的 $H_{\infty}$ 重复控制器 .....	(392)
7.4	直线电机机床溜板伺服系统 .....	(397)
7.4.1	超精密加工中的慢速刀具伺服系统 .....	(397)
7.4.2	永磁直线同步电机实验平台简介 .....	(402)
7.4.3	永磁直线同步电机建模 .....	(404)
7.4.4	永磁直线同步电机控制实验 .....	(409)
	参考文献.....	(422)



# 第一章 超精密车床进给系统 建模及经典控制

## 1.1 超精密车床控制技术研究概述

国防科技大学精密工程研究室着重在以下几个方面对超精密机床的控制技术进行研究：

### 1. 超精密车床进给系统建模和控制

我们以自研的 KD250 型超精密金刚石试验车床为对象,对超精密车床进给系统建模和控制方法进行研究。包括经典控制和一些先进的控制方法,如解耦控制、摩擦控制、定量反馈控制、滑模控制和对直线电机快速伺服刀架的鲁棒控制,等等。并且,在 KD250 平台上还先后开发了一系列的运动控制器和完整的超精密车床数控软件和数控系统。

KD250 超精密金刚石试验车床是精密滚珠丝杠和气浮导轨组成的两维 T 型布置的机床,我们分别使用直流伺服电机和交流伺服电机驱动、双频激光干涉仪和精密光栅尺反馈检测等不同方案进行实验研究。图 1.1 为 KD250 超精密金刚石试验车床外形图。在摩擦传动在超精密机床中的应用方面,我们还对扭轮摩擦传动装置代替滚珠丝杠,驱动气浮平台实现纳米级分辨率和精度的机构设计和控制技术等进行了研究。

2006 年以后,我们在 KD250 基础上,研制 KD250B 和 KD250C