



Precise Microminiature Turnmilling Complex
Maching Technology

精密微小型车铣 复合加工技术

■ 张之敬 金鑫 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

精密微小型车铣 复合加工技术

Precise Microminiature Turnmilling
Complex Maching Technology

张之敬 金鑫 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

精密微小型车铣复合加工技术 / 张之敬, 金鑫著.
—北京: 国防工业出版社, 2014. 4
ISBN 978-7-118-09406-0

I. ①精… II. ①张… ②金… III. ①高精度机床 - 数控机床 - 车床 - 复合加工 ②高精度机床 - 数控机床 - 铣床 - 复合加工 IV. ①TG519.3 ②TG54

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 073761 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 18 3/4 字数 337 千字
2014 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777 发行邮购: (010) 88540776
发行传真: (010) 88540755 发行业务: (010) 88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作

需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨 伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆 军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

微机械加工技术经过多年的研究开发,已迅速发展成为具有多学科交叉的前沿研究领域。随着微小型机械的迅速发展,对微小型零件结构的复杂程度、材料的多样性、尺寸与形状精度、表面粗糙度等均提出了越来越高的要求,加工难度越来越大,传统的分散工序加工方法完全不适应这种复杂、精密、微小型结构件的加工。多工序、多工艺复合的精密微小型机械加工技术成了国内外机械制造领域的研究热点。复合加工即在一台机床上进行多种不同工序和工艺的加工。车铣复合加工是一种最近十多年以来,国内外发展起来的先进切削加工方法,将车铣复合加工技术运用于微小型零件的切削加工,是微加工技术发展的一个重要趋势,也是目前和未来相当长时期内精密复杂三维微小型结构件加工的主流技术。

作者及所带领的科研团队经过多年的微小型机械制造技术研究,取得了一些基础和应用技术成果。为了进一步促进我国微小型机械制造技术和微小型武器装备技术的深入发展,我们在已有研究成果的基础上广泛查阅国内外相关研究文献,对精密微小型机械车铣复合加工装备与工艺技术进行总结和归纳后撰写了本书,以期对从事微小型机械制造技术基础研究、工程应用技术研究和微小型系统与装备研发的研究人员、工程技术人员、大专院校师生在研究和技术开发中起到抛砖引玉的作用。

本书共分为6章。第1章对微小型车铣复合加工技术的重要性、现状及发展趋势进行了介绍;第2章论述了微小型车铣复合加工机理;第3章阐述了微小型车铣复合加工机床结构设计方法;第4章阐述了微小型车铣复合加工机床控制系统设计方法;第5章介绍了微小型车铣复合加工机床的动态特性;第6章介绍了微小型零件车铣复合加工工艺技术。

参加本书部分编著工作的还有叶鑫博士、肖木峥博士、李忠新老师等研究团队老师和刘冰冰、孙宏昌、邓勇军、许志尧、苏晓阳、石存磊、于洋、全旭松、秦廷海等博士和硕士研究生。参加精密微小型机械车铣复合加工装备与工艺技术研究团队的还有吕秉德教授、蒙爱平技师、刘克非博士、周敏博士、张建成博士、袁巍博士和刘智斌、马静雅、孙需要、赵增武等硕士,他(她)们卓有成效的科研工作和论文为本书提供了大量详实的第一手材料。著者对团队人员在本方向科学研

究过程中的全力合作和贡献表示衷心地感谢!

本书中介绍的主要创新性的基础和应用成果,是在多项国防基础科研、总装备部预先研究、04 专项等科研项目资助下取得的,在项目立项和研究过程中,长期得到有关领导、专家和各界朋友们的大力支持,在此谨表诚挚的谢意!

由于本著作主要是在作者及团队研究基础上撰写的,有的学术观点可能只是一家之言,加之水平有限,时间仓促,书中难免有不当之处,恳请同行专家和读者不吝指正。

著 者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 发展微小型车铣复合加工技术的重要性	1
1.1.1 微小型零件的概念和加工方法	1
1.1.2 复合加工技术含义和类型	2
1.1.3 车铣复合加工原理	4
1.1.4 微小型车铣复合加工的优势	4
1.1.5 微小型车铣复合加工技术需求	6
1.2 微小型车铣复合加工设备的现状	9
1.2.1 加工设备微小型化的研究	9
1.2.2 微小型车铣复合加工机床现状	13
1.2.3 可重配置车铣复合加工机床背景与意义	17
1.3 微小型车铣关键技术及研究现状	20
1.3.1 微小型车铣加工机理	20
1.3.2 微小型车铣复合加工机床总体技术	20
1.3.3 精密微小型加工刀具系统自动换刀技术	21
1.3.4 微小型复杂三维结构多工艺复合完整加工技术	21
1.3.5 微小型车铣复合加工工艺辅助技术	22
1.3.6 可重配置车铣复合加工机床控制方法	23
参考文献	23
第 2 章 微小型车铣复合加工原理	26
2.1 正交微小型车铣工艺过程	26
2.1.1 车铣工艺与微小型加工	26
2.1.2 无偏心微小型正交车铣	28
2.2 车铣复合加工刀齿运动轨迹模型	30
2.2.1 圆形轨迹	30
2.2.2 次摆线轨迹	31

2.2.3	刀齿运动轨迹仿真	32
2.3	微小型车铣复合加工理论切削力	35
2.3.1	正交车铣啮合区	35
2.3.2	单齿圆周刀切入角、切出角	35
2.3.3	单齿圆周刀切削厚度和切削宽度	37
2.3.4	理论切削力计算	43
2.4	车铣加工切削过程的有限元仿真技术	45
2.4.1	微小型车铣三维有限元建模过程	45
2.4.2	三维车铣复合加工有限元模拟及实验验证	52
2.4.3	车铣加工中温度场二维仿真分析	58
	参考文献	72
第3章	微小型车铣复合加工机床结构设计方法	74
3.1	微小型车铣复合加工机床总体方案设计	75
3.1.1	微小型车铣复合加工机床总体性能要求	75
3.1.2	微小型车铣复合加工机床总体结构配置	76
3.1.3	高转速精密微小型车铣复合加工中心总体结构方案	81
3.2	局部可重配置微小型车铣复合加工机床结构设计方法	85
3.2.1	微小型车铣复合加工机床可重配置特性	85
3.2.2	局部可重配置复合加工机床结构设计特征	88
3.2.3	局部可重配置机床设计基本方法	93
3.3	高转速微小型切削刀具系统及自动换刀技术	102
3.3.1	高转速微小型切削刀具系统及自动换刀系统结构特征	102
3.3.2	高转速微小型切削刀具系统力学特性分析	109
3.3.3	高转速小型自动换刀系统设计	115
3.4	局部可重配置单元及其模块机械接口技术	119
3.4.1	平面多销过定位数学描述	119
3.4.2	定位销数目的确定	121
3.4.3	双态定位机械接口精度保障机理	124
	参考文献	126
第4章	微小型车铣复合加工机床控制系统设计方法	128
4.1	车铣复合机床控制系统常用配置方案	128
4.1.1	车铣复合机床常用控制系统	128
4.1.2	可重配置微小型复合加工机床控制系统功能	132

4.1.3	可重配置数控系统的框架结构	133
4.1.4	现场总线和可重配置数控技术关系	135
4.1.5	可重配置车铣复合加工机床控制系统总体方案	138
4.1.6	系统硬件模块配置方法	140
4.2	车铣复合加工机床控制系统软件结构体系	141
4.2.1	基于软件数控的数控技术	142
4.2.2	车铣复合中心数控系统软件总体结构	145
4.2.3	车铣复合加工机床基于 UML 建模	147
4.2.4	可重配置微小型车铣复合中心软件系统 UML 建模	149
4.2.5	基于人机协同策略的参数化编程技术	154
4.2.6	基于组件的参数化编程模块实现方法	157
4.3	可重配置微小型车铣复合加工机床空间限位技术	159
4.3.1	数控机床常用空间限位方法	159
4.3.2	局部可重配置机床模块空间关系	161
4.3.3	基于遗传算法的三维凸包碰撞检验方法	163
4.3.4	基于面层的碰撞检验简化算法	167
4.4	微小型车铣复合机床精度控制方法	173
4.4.1	机床定位精度补偿的基本原理	173
4.4.2	运动轴定位精度检测及补偿	174
4.4.3	非接触式对刀	179
	参考文献	182

第5章 微小型车铣复合加工机床的动态特性

5.1	工艺系统动态特性分析	184
5.1.1	工艺系统动态特性分析方法	184
5.1.2	微小型车铣复合加工工艺系统特征	185
5.1.3	刀具系统动力学特性	188
5.1.4	工件系统动力学特性试验	192
5.2	试验模态分析	193
5.2.1	模态拟合方法	193
5.2.2	试验模态分析方法	195
5.2.3	锤击激励法模态试验	196
5.2.4	模态验证切削试验	198
5.3	微小型车铣复合切削颤振研究	200
5.3.1	问题的提出	200

5.3.2 颤振过程分析	201
5.4 正交车铣加工稳定性研究	209
5.4.1 正交车铣颤振模型	209
5.4.2 颤振频率分析	211
5.4.3 车铣复合加工颤振试验	214
5.5 高速切削稳定阈分析	218
5.5.1 正交车铣复合加工颤振域曲线	218
5.5.2 稳定性叶瓣图试验验证	222
参考文献	225

第6章 微小型零件车铣复合加工工艺技术

6.1 微小型车铣完整性加工工艺规划与精度分析	227
6.1.1 微小型车铣完整性加工工艺规划	227
6.1.2 微小型车铣复合加工精度分析	233
6.2 刀具磨损机理与磨破损检测技术	243
6.2.1 微小型车铣加工过程中刀具磨损现象	243
6.2.2 车铣过程中小直径立铣刀磨损形态	246
6.2.3 微小型车铣过程中小直径立铣刀磨钝标准	248
6.2.4 微小型车铣复合加工刀具磨破损检测技术	251
6.3 表面粗糙度试验与加工参数优化方法	258
6.3.1 表面粗糙度的优化与预测	258
6.3.2 微小型车铣加工表面粗糙度优化试验	260
6.4 典型微小零件的车铣复合加工工艺案例	269
6.4.1 钟表结构件车铣复合加工工艺	269
6.4.2 阀芯零件的车铣复合加工工艺	271
6.4.3 微小型板类零件的加工工艺案例	273
6.4.4 微小型轴类零件的加工	277
参考文献	279

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	The Importance of Microminiature Turn-milling Complex Machining	1
1.1.1	The Concept and Processing of Microminiature Parts	1
1.1.2	The Connotation and Types of Complex Machining	2
1.1.3	The Principle of Turn-milling Complex Machining	4
1.1.4	Advantages of Microminiature Turn-milling Complex Machining	4
1.1.5	Technical Requirements of Microminiature Turn-milling Complex Machining	6
1.2	Status of Microminiature Turn-milling Complex Equipment	9
1.2.1	Research on the Microminiaturization of Machining Equipment	9
1.2.2	Status of Microminiature Turn-milling Complex Machine Tools	13
1.2.3	The Research Background and Significance of Reconfigurable Turn-milling Complex Machine Tools	17
1.3	Key Technologies of Microminiature Turn-milling Machining	20
1.3.1	The Mechanism of Microminiature Turn-milling Machining	20
1.3.2	General Technology of Microminiature Turn-milling Complex Machine Tools	20
1.3.3	Automatic Tool Changing Technology for Precision Microminiature Turn-milling Tool System	21
1.3.4	Multi-process Complete Machining Technology for 3D Microminiature Complex Structural Parts	21
1.3.5	Assistive Technology of Microminiature Turn-milling Complex Processing	22

1. 3. 6	Control Method of Reconfigurable Turn-milling	
	Machine Tools	23
References		23

Chapter2 The Principle of Microminiature Turn-milling Complex

	Processing	26
2. 1	The Process of Microminiature Orthogonal Turn-milling	
	machining	26
2. 1. 1	Turn-milling Process and Microminiature Machining	
	Technology	26
2. 1. 2	Unbiased Microminiature Orthogonal Turn-milling	
	Machining	28
2. 2	Models of Moving Path of Cutter Tooth in Turn-milling	
	Complex Machining	30
2. 2. 1	Circular Track Model	30
2. 2. 2	Trochoidal Track Model	31
2. 2. 3	Simulation of Moving Path	32
2. 3	Theoretical Cutting Force in Microminiature Turn-milling	
	Complex Machining	35
2. 3. 1	Meshing Region in Orthogonal Turn-milling Complex	
	Machining	35
2. 3. 2	Cutting Angles of a Single Circumference Edge	35
2. 3. 3	Cutting Thickness and Width of a Single Circumference	
	Edge	37
2. 3. 4	Calculation of Theoretical Cutting Force	43
2. 4	Finite Element Simulation of Turn-milling Complex	
	Machining	45
2. 4. 1	3D Finite Element Modeling	45
2. 4. 2	Simulation and Experiment	52
2. 4. 3	Simulation of 2D Temperature Field	58
References		72

Chapter 3 The Method of Structural Design of Microminiature

	Turn-milling Complex Machine Tools	74
3. 1	General Design of Microminiature Turn-milling Complex	
	Machine Tools	75

3.1.1	Performance Requirements of Microminiature Turn-milling Complex Machine Tools	75
3.1.2	General Structure Configuration of Microminiature Turn-milling Complex Machine Tools	76
3.1.3	General Structure Scheme of High-speed Precision Microminiature Turn-Milling Complex Machining Center	81
3.2	The Method of Structural Design of Local-scale Reconfigurable Microminiature Turn-milling Complex Machine Tools	85
3.2.1	Reconfigurable Characteristics of Microminiature Turn-milling Complex Machine Tools	85
3.2.2	Characteristics of Structural Design of Local-scale Reconfigurable Complex Machine Tools	88
3.2.3	Basic Method of Designing Local-scale Reconfigurable Machine Tools	93
3.3	High-speed Microminiature Tool System and Automatic Tool Change Technology	102
3.3.1	Structural Characteristics of High-speed Microminiature Tool System and Automatic Tool Changer	102
3.3.2	Mechanics Characteristics Analysis of High-speed Microminiature Tool System	109
3.3.3	Design of High-speed Microminiature Automatic Tool Changer	115
3.4	Reconfigurable Units and Mechanical Interface Technology	119
3.4.1	Mathematical Modeling of Plane-Pins Over-Positioning	119
3.4.2	Determining the Quantity of Positioning Pins	121
3.4.3	Mechanism of Improving Precision of Dual-state Positioning Mechanical Interface	124
	References	126

Chapter4 Design Method of Control System of Microminiature

	Turn-milling Complex Machine Tools	128
4.1	Common Configurations of Control System for Turn-milling Machine Tools	128
4.1.1	Common Control Systems for Turn-milling Complex	

	Machine Tools	128
4. 1. 2	Functions of Control System for Reconfigurable Microminiature Complex Machine Tools	132
4. 1. 3	Frame Structure of the Reconfigurable CNC System	133
4. 1. 4	Relation Between the Fieldbus and Reconfigurable CNC Technology	135
4. 1. 5	General Scheme of Control System for Reconfigurable Turn-milling Complex Machine Tools	138
4. 1. 6	Configuration Method of Hardware Modules	140
4. 2	Software Architecture of Control System for Turn-milling Complex Machine Tools	141
4. 2. 1	Software-Based CNC Technology	142
4. 2. 2	Software Structure of CNC System for Turn-milling Complex Machining Center	145
4. 2. 3	Modeling of Turn-milling Complex Machine Tools Based on UML	147
4. 2. 4	Modeling of Software System for Reconfigurable Microminiature Turn-milling Machining Center Based on UML	149
4. 2. 5	Parameterized Programming Based on Human-machine Cooperation	154
4. 2. 6	Implementation Method of Parametric Programming Modules Based on Components	157
4. 3	Spacial Limiting Technologies of Reconfigurable Microminiature Turn-milling Complex Machine Tools	159
4. 3. 1	Common Spacial Limiting Methods of CNC Machine Tools	159
4. 3. 2	Spacial Relation Between Modules of Local-scale Reconfigurable Machine Tools	161
4. 3. 3	Collision Detection Method of Convex Hulls Based on Genetic Algorithm	163
4. 3. 4	Simplified Algorithm of Collision Based on Faces	167
4. 4	Precision Control Method of Microminiature Turn-milling Complex Machine Tools	173
4. 4. 1	The Principle of Precision Compensation for Machine	

Tools	173
4. 4. 2 Detection and Compensation of Positioning Precision of Motion Axis	174
4. 4. 3 Non-Contact Tool Setting	179
References	182
Chapter 5 Dynamic Characteristics of Microminiature Turn-milling Machine Tools	
5. 1 Dynamic Characteristics Analysis of Process System	184
5. 1. 1 Methods of Dynamic Characteristics Analysis of Process System	184
5. 1. 2 Characteristics of Microminiature Turn-milling Process System	185
5. 1. 3 Dynamic Characteristics of Tool System	188
5. 1. 4 Dynamic Characteristics Test of Workpiece System	192
5. 2 Experimental Modal Analysis	193
5. 2. 1 Modal Fitting Method	193
5. 2. 2 The Method of Experimental Modal Analysis	195
5. 2. 3 Modal Test by Pulse Hammer Excitation	196
5. 2. 4 Experiment of Modal Verification	198
5. 3 Chatter Research on Microminiature Turn-milling Machining	200
5. 3. 1 Posing Problems	200
5. 3. 2 Chatter Process Analysis	201
5. 4 Research on the Machining Stability of Orthogonal Turn-milling machining	209
5. 4. 1 Chatter Model of Orthogonal Turn-milling Machining	209
5. 4. 2 Chatter Frequency Analysis	211
5. 4. 3 Chatter Experiment of Turn-milling Machining	214
5. 5 Stability Threshold Analysis of the High-speed Cutting	218
5. 5. 1 Chatter Curve of Orthogonal Turn-milling Machining	218
5. 5. 2 Experimental Verification of the Stability Lobes	222
References	225
Chapter 6 The Turn-milling Complex Processing for Microminiature Parts	
6. 1 Process Planning and Precision Analysis of Microminiature	