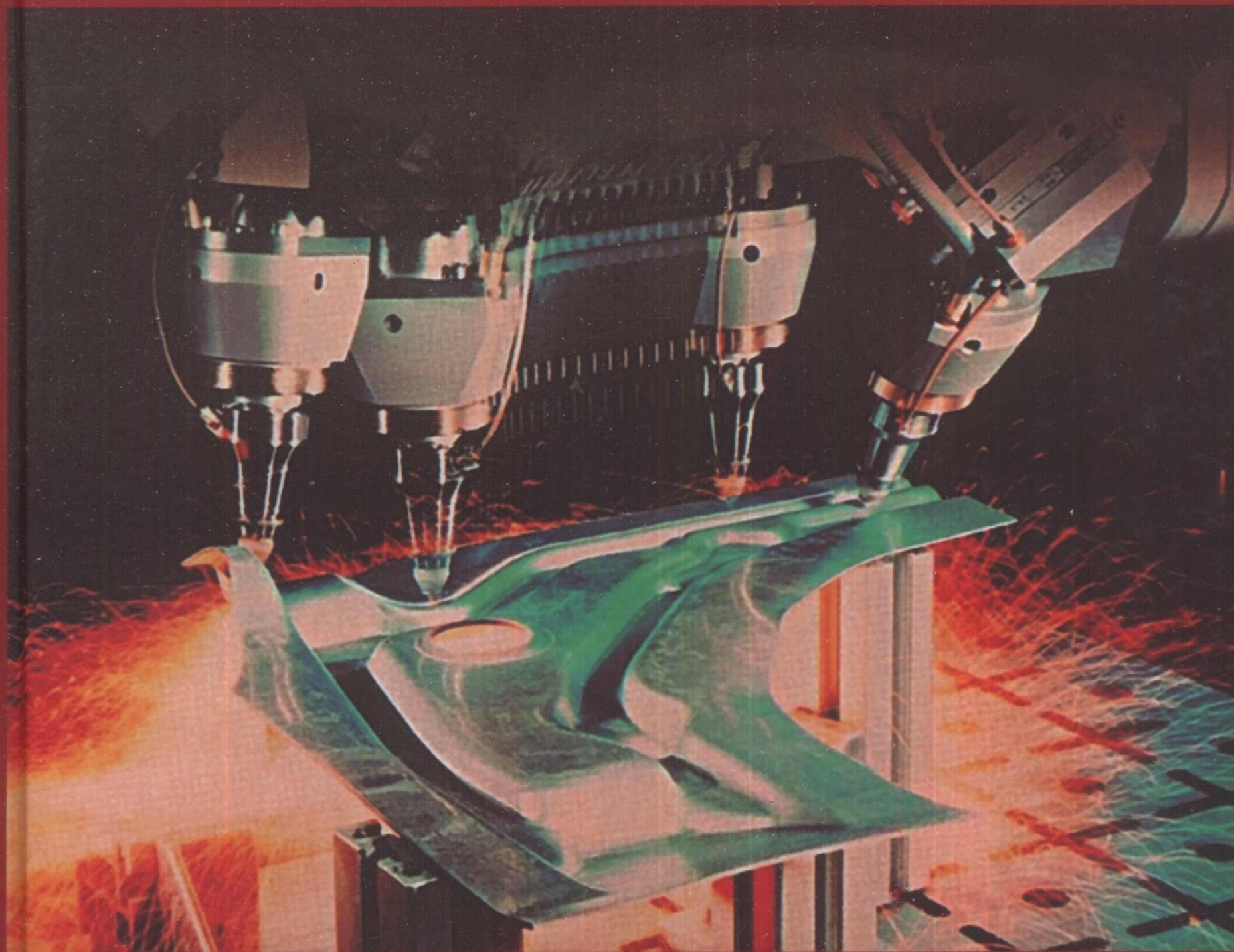




Integrated Laser Intelligent Manufacturing



集成化 激光智能加工工程

● 虞 钢 虞和济 著

● 冶金工业出版社

集成化激光智能加工工程

虞 钢 虞和济 著

北 京

冶金工业出版社

2002

内 容 简 介

激光技术、计算机技术、先进制造技术和材料工艺力学相互融合形成了 21 世纪的知识创新工程领域。本书以集成化激光智能加工系统为基础对智能激光加工领域作了开拓性的介绍。

全书共分 7 章。分别介绍了集成化激光智能加工系统的内涵、特点和发展趋势,激光加工工程的理论基础,柔性激光加工技术及其生产系统,激光加工机器人系统,智能测量技术,集成化智能控制,激光智能加工系统的实时在线监控。

本书主要供高等院校相关专业的本科生、硕士、博士研究生、博士后、教师和科研院所以及相关部门的科研人员使用,也可供工业界、企业界的科技管理和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

集成化激光智能加工工程/虞钢,虞和济著. —北京:
冶金工业出版社, 2002. 1

ISBN 7-5024-2860-7

I. 集… II. ①虞… ②虞… III. 激光加工
IV. TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 063302 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 葛志祺 肖 放 美术编辑 熊晓梅 责任校对 朱 翔 李文彦 责任印制 李玉山
北京市兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2002 年 1 月第 1 版, 2002 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 30.75 印张; 739 千字; 470 页; 1-2000 册

69.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

序

进入 21 世纪,人类正迈向知识经济时代。知识创新已成为发展经济,包括发展现代科学技术的主要源泉和动力。高新技术不但形成新兴工业体系,而且重要的是用以武装和改造基础工业,使我国的工业经济适应现代化的迫切要求。作为一个国家支柱工业的制造工程技术,其建设的现代化问题和有关科技发展,已列入新的 863 计划。概括起来,其发展趋势是:1)科学创新的高新技术的有效利用,产生新的更为有效的生产方法和工程手段;2)多元技术的综合利用和集成,特别是将现代信息技术融入生产过程(产业的信息化,包括自控、智能化等);3)极度功能的开发与利用,如特大、微型、快速、精化、轻量化、长寿命及适应特殊环境等;4)生产过程的柔性化,形成系列组合,适应多元需求,并具有可持续发展的前景;5)工程技术与市场经济的一体化(经济性和市场需求),使得优化系统工程产生知识产权并具有竞争能力。

本书的主要内容是关于激光智能制造和柔性加工新技术的基础、应用和现代化研究。作者及其领导的研究小组,本着知识创新的基本精神,针对一定的加工对象,通过大量的理论和实践,进行具有实际应用意义的国家级立项研究,取得了丰富的科研成果。本书是作者及所领导的群体,在多年科学研究并结合自己工程实践的基础上,综合大量的国内外最新资料撰写成的。该书的内容对当代从事新技术开发研究工作具有示范意义。本书是一本具有创新意义,代表当今先进水平的科技专著。

在此祝贺《集成化激光智能加工工程》一书的正式出版。



2001 年 4 月 10 日

Preface

Stepping into the 21st century, the human society begins to enter the era of knowledge economy. Knowledge invention and innovation have already become the prime resource and power to develop national economy as well as modern science and technology. As a result of developments of high technology, many new industries have come into practice, and it is also leading reconstruction and modernization of traditional industries nation-wide. Among these technology developments, one important topic is advanced manufacturing, which has been arranged into the "New National 863 High-Technology Development Projects". This tendency may be marked as follows: (1) the fully utilization of high-technology developments resulting the efficient manufacturing means and engineering design; (2) the comprehensive integration of various techniques into manufacturing processing, in particular, the high technology of systemic measurement, automation, control and artificial intelligent; (3) the capability of achievement of extreme characteristics, such as ultra big scale, ultra minute, ultra fast, super position, light weight, long life and fitness to peculiar environment; (4) the production flexibility, forming serial combinations; (5) the concluded consideration on cost production and market demands, so that the manufacturing technology becomes the essential part in optimization and modern complex systems engineering.

The present book deals mainly on the basic principle and application of laser flexible machining and intelligent manufacturing. The author and his colleagues, based on the ground of knowledge invention and innovation, have being engaged in number of important research problems aiming on certain laser materials processing. Many technical achievements have been made according to their fundamental and applied research work both theoretically and experimentally in related fields as outcomes of some research projects supported by the government. This book is a monographic description being useful as a reference for people engaged in the research and development of similar discipline.

I hereby congratulate the publication of this book.

Wang Daheng in Beijing
April 10, 2001

前言

知识创新是新世纪科学与技术发展的必然趋势。先进的和环境友好的集成化智能制造与柔性加工对提高国家基础工业和支柱产业的综合竞争力起着至关重要的作用,世界各工业发达国家纷纷提出了面向新世纪的先进制造计划。21 世纪要求制造业必须是:可以持续发展的;先进加工技术的集成;具有高经济效益;柔性加工系统;智能型控制。

由作者领导的科研集体在完成了所承担的国家自然科学基金项目(编号:69678007)、中国科学院院长基金项目(留学人员归国特别支持)、中国科学院重大仪器装备研制项目(编号:中科院计字[1997]第 167 号,中科院成鉴字[1999]第 017 号)和中国科学院“九五”重大课题(编号:KY951-A₁-602)的基础上,研制成功的集成化激光智能加工系统,对环境十分友好和没有污染;体现了激光加工技术自身的先进性和可集成性;具有较高的性能价格比;具有柔性加工的模块化特点;以及基于 PC 的智能控制等完全满足了上述 5 项要求,从而形成了具有 21 世纪特色的集成化激光智能加工工程,并且进一步拓展出 2000 年中国科学院知识创新工程的重大项目“集成化激光智能加工及柔性制造系统”(编号:KGCX1-11)。为进一步推动这个多学科交叉领域知识创新工程研究工作的发展,作者撰写了本书。参加本项课题研究的有博士后张 省,博士生高春林、安永强、张凤林、刘荷辉、赵俊峰,硕士生乔 锐、胡幼娟、涂孟夫、谷 雨,参加课题研究的还有曲道奎研究员、王泰耀研究员、徐 方副研究员、张金城高级工程师、张桂秋高级工程师、甘翠华工程师等。

本书以作者的研究成果为主要基础,结合国内外各有关学科的最新成就,系统地阐述了集成化激光智能加工工程的理论、方法、技术和实践。全书共分 7 章。第 1 章“导论”以 21 世纪先进制造技术的发展趋势为导向介绍了激光加工技术的先进性,及其作为一个“绿色加工技术”的可持续发展性,它的集成化、柔性化和智能化形成了激光智能加工机器系统。第 2 章“激光加工原理”以量子理论为基础全面阐述了激光产生的原理,激光与材料的相互作用机理和由此形成的激光材料工艺力学,展开讨论了材料的激光表面工程、激光材料去除、激光材料连接、激光原型制造及其他各种激光加工形式。第 3 章“激光柔性加工工程”以集成化概念为基础系统地讲述了各种工业激光器,高强度光束的时空变换及大功率柔性传输装置,工业激光系统的全数值化控制,相关辅助气、粉、丝输送装置,激光加工的安全与防护,由这些子系统构成的激光柔性加工技术及智能加工系统。第 4 章“激光加工机器人系统”以系统智能化思想为基础详细介绍了激光加工智能机器系统中最典型的激光加工机器人的原理、功能和结构。第 5 章“智能测量工程”以测控加工一体化概念研究了作为激光加工前置工作的自适应智能测量工程的原理、方法和技术,包括测量数据的采集、处理及误差控制。第 6 章“智能控制系统的集成”深入分析了激光加工智能控制的各个子系统的主要功能以及通过硬件和软件两方面的集成,基于神经网络与测控加工一体化的智能控制,和智能加工专家系统。第 7 章“实时在线监控”介绍了集成化激光智能加工系统中实时在线监控的重要性,监控的原理和方法,监控系统的组成和信息运行。本书各章之间的连接和结构如下面逻辑框图所示:

集成化激光智能加工工程

1 导论						
1.1 绪言	1.2 激光加工概论	1.3 激光加工集成化、智能化、柔性化			1.4 激光加工智能机器系统	
2 激光加工原理						
2.1 激光原理	2.2 激光与材料的相互作用	2.3 激光材料表面工程	2.4 激光材料去除过程	2.5 激光材料连接过程	2.6 激光原型制造	2.7 其他激光加工
3 激光柔性加工工程						
3.1 几种常用的工业激光器	3.2 高强光束的空间变换及柔性传输	3.3 工业激光系统及其数控	3.4 气、粉、丝输送系统	3.5 激光安全与防护	3.6 激光柔性加工技术及智能加工系统	
4 激光加工机器人系统						
4.1 五维框架式工业机器人工作原理	4.2 五维框架式激光加工机器人系统	4.3 电动双向运载系统				
5 智能测量工程						
5.1 智能测量	5.2 测头系统	5.3 测量系统的上下位机	5.4 测量过程的自动控制	5.5 数据的智能处理	5.6 误差控制	
6 智能控制系统的集成						
6.1 智能控制的集成	6.2 测控与激光加工一体化	6.3 基于神经网络的智能控制	6.4 激光柔性加工系统数控软件		6.5 智能加工专家系统	
7 实时在线监控						
7.1 实时在线监控的重要性		7.2 在线监控系统			7.3 在线监控的信息运行	

书中所论述的是多学科交叉形成的一个知识创新工程。鉴于本书作者水平有限,书中难免有欠缺之处,希望读者不吝指教,帮助我们进一步提高和完善。

作者
于中国科学院力学研究所
2001.1

目 录

1 导 论

1.1 绪言	1
1.1.1 21 世纪制造技术	1
1.1.2 先进加工技术集成	1
1.1.3 激光材料工艺力学	1
1.1.4 柔性加工系统	2
1.1.5 智能控制	2
1.1.6 自主知识产权	2
1.1.7 高经济效益	3
1.2 激光加工概论	4
1.2.1 激光概念和理论	4
1.2.2 激光器的发明和工业激光器的发展	5
1.2.3 激光加工的发展与动向	6
1.3 激光加工集成化、智能化、柔性化	9
1.3.1 激光加工先进生产系统	9
1.3.2 激光加工智能化	12
1.3.3 激光加工柔性化	12
1.3.4 激光加工的集成化	17
1.4 激光加工智能机器系统	17
1.4.1 激光加工智能机器系统	17
1.4.2 激光加工机器人的特点	19
1.4.3 激光加工机器人的分类	24
1.4.4 柔性激光加工机器人	24

2 激光加工原理

2.1 激光原理	37
2.1.1 激光产生的原理	37
2.1.2 能级结构	50
2.1.3 激光系统特性	57
2.2 激光与材料的相互作用	60
2.2.1 理论模型	61
2.2.2 计算方法	62

2.2.3 数值算例	63
2.2.4 激光材料工艺力学原理	66
2.3 激光材料表面工程	69
2.3.1 激光改性	69
2.3.2 激光强化	69
2.3.3 激光熔覆	83
2.3.4 激光合金化	88
2.3.5 激光标记	89
2.3.6 激光清除	89
2.4 激光材料去除过程	89
2.4.1 激光打孔	89
2.4.2 激光切割	96
2.4.3 激光雕刻	103
2.4.4 激光烧蚀	103
2.5 激光材料连接过程	104
2.5.1 激光焊接	104
2.5.2 激光烧结	113
2.6 激光原型制造	113
2.6.1 快速原型制造	113
2.6.2 激光原型制造原理及应用	114
2.6.3 离散堆积法	117
2.6.4 光敏树脂法	121
2.6.5 叠层法	124
2.6.6 烧结法	137
2.6.7 复合成型法	139
2.7 其他激光加工	139
2.7.1 激光超精细加工	139
2.7.2 激光微型机械加工	140
2.7.3 激光非晶化	149
2.7.4 激光化学气相沉积(LCVD)技术	150

3 激光柔性加工工程

3.1 几种常用的工业激光器	153
3.1.1 工业激光器的分类	153
3.1.2 气体激光器	154
3.1.3 固体激光器	159
3.1.4 半导体激光器	161
3.1.5 其他激光器	166
3.2 高强光束的空间变换及柔性传输	171

3.2.1 光束变换及柔性传输	171
3.2.2 激光束的空间强度变换	179
3.2.3 二元光学元件的设计与制造	183
3.2.4 大功率激光束的光纤传输	201
3.3 工业激光系统及其数控	207
3.3.1 工业激光系统	208
3.3.2 虚拟驱动程序(VxD)	208
3.3.3 基于虚拟驱动程序(VxD)的串口稳定通讯	210
3.3.4 激光参数的数值化控制	221
3.4 气、粉、丝输送系统	229
3.4.1 气、粉、丝输送系统的功能与组成	229
3.4.2 气、粉、丝输送设备	232
3.4.3 气、粉、丝输送设备的控制	234
3.5 激光安全与防护	235
3.5.1 激光辐射危害及其分类	236
3.5.2 激光加工安全防护标准	245
3.5.3 激光危害的工程控制 and 安全管理	248
3.6 激光柔性加工技术及智能加工系统	264
3.6.1 激光柔性加工技术	264
3.6.2 智能化激光表面强化处理系统	265
3.6.3 测量系统和加工系统的结合	266

4 激光加工机器人系统

4.1 五维框架式工业机器人工作原理	268
4.1.1 机器人的构成	268
4.1.2 机器人运动学	270
4.1.3 机器人数控系统	293
4.2 五维框架式激光加工机器人系统	302
4.2.1 五维框架式机器人动作原理	303
4.2.2 五维框架式机器人加工范围	304
4.2.3 五维框架式机器人加工过程	305
4.3 电动双向运载系统	307
4.3.1 运载系统的构成	307
4.3.2 运载系统的运动及控制	308

5 智能测量工程

5.1 智能测量	310
5.1.1 几种常用的测量方式	311
5.1.2 测量过程	318

5.1.3 智能测量系统	319
5.2 测头系统	320
5.2.1 测头的种类及选择	320
5.2.2 接触式测头结构及性能参数	320
5.2.3 测量信号与时序	323
5.2.4 测量信号的处理	328
5.3 测量系统的上下位机	331
5.3.1 上下位机的功能	331
5.3.2 测量指令分析	332
5.3.3 测量过程中的几个问题	333
5.4 测量过程的自动控制	335
5.4.1 测量过程自动化	335
5.4.2 测量过程控制	339
5.4.3 测量过程自适应控制	340
5.5 数据的智能处理	351
5.5.1 测量数据处理方法分析	351
5.5.2 算术平均法方程拟合	359
5.5.3 加权平均法方程拟合	360
5.5.4 人工神经网络法数据处理	361
5.6 误差控制	365
5.6.1 误差种类与来源	366
5.6.2 本体误差分析与控制	367
5.6.3 腕部结构误差分析与控制	371
5.6.4 测头系统的误差分析与控制	378
5.6.5 误差综合与控制	381
5.6.6 加工误差分析	382
5.6.7 注意事项和实例分析	383

6 智能控制系统的集成

6.1 智能控制的集成	389
6.1.1 智能控制的概念、定义和分类	389
6.1.2 系统集成	393
6.2 测控与激光加工一体化	394
6.2.1 测量系统和加工系统的集成	394
6.2.2 系统的上下位机接口与通讯	395
6.3 基于神经网络的智能控制	397
6.3.1 从测量到加工的转换过程	397
6.3.2 加工数据生成的 CAx 方法	399
6.3.3 加工数据生成的神经网络方法	402

6.4 激光柔性加工系统数控软件	415
6.4.1 系统硬件	415
6.4.2 控制软件	416
6.4.3 各模块的功能	418
6.4.4 基于 PC 的人机界面	421
6.5 智能加工专家系统	422
6.5.1 加工过程仿真	423
6.5.2 加工数据库	424
6.5.3 加工专家系统	424
 7 实时在线监控	
7.1 实时在线监控的重要性	426
7.2 在线监控系统	426
7.2.1 信号采集	427
7.2.2 信号处理	430
7.2.3 诊断和控制	443
7.2.4 实时在线监测控制系统的组成	461
7.3 在线监控的信息运行	463
7.3.1 信息运行系统	463
7.3.2 激光智能加工系统的信息运行	463
参考文献	466

Contents

1 Introduction

1.1 Foreword	1
1.1.1 Manufacturing Technology in 21 Century	1
1.1.2 Integration of Advanced Processing Technologies	1
1.1.3 Laser Materials Processing(LMP) Mechanics	1
1.1.4 Flexible Machine System	2
1.1.5 Intelligent Control	2
1.1.6 Self-determination Intellectual Asset	2
1.1.7 High Economic Benefit	3
1.2 Conspectus of Laser Machining	4
1.2.1 Laser Concept and Theory	4
1.2.2 Invention of Laser and Development of Industrial Lasers	5
1.2.3 Development of Laser Machining	6
1.3 Integration, Intelligence and Flexibility of Laser Machining	9
1.3.1 Advanced Production System of Laser Machining	9
1.3.2 Intelligence of Laser Machining	12
1.3.3 Flexibility of Laser Machining	12
1.3.4 Integration of Laser Machining	17
1.4 Intelligent Laser Machine System	17
1.4.1 Intelligent Laser Machine System	17
1.4.2 Characteristic of Laser Machine Robot	19
1.4.3 Classification of Laser Machine Robot	24
1.4.4 Flexible Laser Machine Robot	24

2 Principle of Laser Machining

2.1 Laser Principle	37
2.1.1 Principle of Laser	37
2.1.2 Energy Configuration	50
2.1.3 Characteristic of Laser System	57
2.2 Laser Material Interaction	60
2.2.1 Theoretical Model	61
2.2.2 Calculation Method	62
2.2.3 Numerical Example	63
2.2.4 Laser Material Technological Mechanics	66

2.3 Laser Surface Engineering	69
2.3.1 Laser Modification	69
2.3.2 Laser Hardening	69
2.3.3 Laser Cladding	83
2.3.4 Laser Alloying	88
2.3.5 Laser Marking	89
2.3.6 Laser Cleaning	89
2.4 Laser Material Removal Process	89
2.4.1 Laser Drilling	89
2.4.2 Laser Cutting	96
2.4.3 Laser Engraving	103
2.4.4 Laser Ablation	103
2.5 Laser Material Joining Process	104
2.5.1 Laser Welding	104
2.5.2 Laser Sintering	113
2.6 Laser Prototype Manufacturing(LPM)	113
2.6.1 prototyping Manufacture	113
2.6.2 Principle and Application of LPM	114
2.6.3 Scatter-Heap Method	117
2.6.4 Photosensitive Resin Method	121
2.6.5 Piling up Method	124
2.6.6 Sintering Method	137
2.6.7 Hybrid Molding Method	139
2.7 Other Laser Machining	139
2.7.1 Laser Superfine Machining	139
2.7.2 Laser Micro-Machining	140
2.7.3 Laser Non-Crystallization	149
2.7.4 Laser Chemical Vapor Deposition(LCVD)	150

3 Laser Flexible Machining Engineering

3.1 Industrial Lasers in Common Use	153
3.1.1 Classification of Industrial Lasers	153
3.1.2 Gas Lasers	154
3.1.3 Solid Lasers	159
3.1.4 Semiconductor Lasers	161
3.1.5 Other Lasers	166
3.2 Intensity Transformation and Flexible Propagation of High Power Laser Beam	171
3.2.1 Beam Conversion and Flexible Propagation	171

3.2.2	Intensity Transformation of Laser Beam	179
3.2.3	Design and Fabrication of Binary Optics	183
3.2.4	Optical Fiber Delivery of High Power Beam	201
3.3	Numerical Control of Industrial Lasers	207
3.3.1	Industrial Laser System	208
3.3.2	Virtual Driven Programming(VxD)	208
3.3.3	Stability of Serial Communication Based on VxD	210
3.3.4	Numerical Control of Laser Parameters	221
3.4	Feeding System of Related Gas, Powder and Thread	229
3.4.1	Function and Components of Gas, Powder, and Thread Feeding System	229
3.4.2	Feeding Equipment	232
3.4.3	Control of Feeding Equipment	234
3.5	Laser Safety	235
3.5.1	Laser Radiation Hazard and Classification	236
3.5.2	Safety Standard of Laser Machining	245
3.5.3	Engineering Control and Safety Management of Laser Hazard	248
3.6	Laser Flexible Machining and Intelligent System	264
3.6.1	Laser Flexible Machining	264
3.6.2	Intelligent Laser Surface Treatment System	265
3.6.3	Integration of Measure System and Machining System	266

4 Laser Machining Robot

4.1	Principle of 5 Axis Frame Structure Industrial Robot	268
4.1.1	Structure of Robot	268
4.1.2	Kinematics of Root	270
4.1.3	Numerical Control(NC) of Robot	293
4.2	5 Axis Frame Structure Laser Industrial Robot	302
4.2.1	Motion Principle of 5 Axis Frame Structure Robot	303
4.2.2	Operation Range of 5 Axis Frame Structure Robot	304
4.2.3	Machining of 5 Axis Frame Structure Robot	305
4.3	Electrical Twin Motion Carrier System	307
4.3.1	Structure of Carrier System	307
4.3.2	Motion and Control of Carrier System	308

5 Intelligent Measure Engineering

5.1	Intelligent Measurement	310
5.1.1	Few normal Probing Methods	311
5.1.2	Measure Process	318
5.1.3	Intelligent Measure System	319

5.2 Measure Head System	320
5.2.1 Category and selection of Measure Head	320
5.2.2 Structure and Properties of Contact Measure Head	320
5.2.3 Measure Signal and Time Order	323
5.2.4 process of Measure Signal	328
5.3 Up-and Down-Stream PC of Measure System	331
5.3.1 Function of Up-Stream and Down-Stream PC	331
5.3.2 Analysis of Measure Instruction	332
5.3.3 Issues of Measure Process	333
5.4 Automation of Measure Process	335
5.4.1 Automation of Measure Process	335
5.4.2 Control of Measure Process	339
5.4.3 Adaptive Control of Measuring	340
5.5 Intelligent Process of Data	351
5.5.1 Methodology of Measured Data Process	351
5.5.2 Equation Fitting of Arithmetic Average	359
5.5.3 Equation Fitting of Weight Average	360
5.5.4 Data Process on Artificial Neural Network	361
5.6 Error Control	365
5.6.1 Error Category and Source	366
5.6.2 Structure Error Analysis and Control	367
5.6.3 Wrist Structure Error Analysis and Control	371
5.6.4 Measure Head Error Analysis and Control	378
5.6.5 Error Synthesis and Control	381
5.6.6 Machining Error Analysis	382
5.6.7 Noticeable Items and Example Analysis	383

6 Integration of Intelligent Control System

6.1 Integration of Intelligent Control(IC)System	389
6.1.1 Concept, Definition and Classification of IC	389
6.1.2 System Integration	393
6.2 Integration of Measure, Control and Laser Machining	394
6.2.1 Integration of Measure System and Machine System	394
6.2.2 System PC Connection and Communication	395
6.3 Intelligent Control on Neural Network(NN)	397
6.3.1 Conversion of Measure to Machine	397
6.3.2 CAx Method of Machine Code	399
6.3.3 NN Method of Machine Code	402
6.4 NC Software of Laser Flexible Machine	415

6.4.1	System Hardware	415
6.4.2	Control Software	416
6.4.3	Function of Each Module	418
6.4.4	PC Interface	421
6.5	Expert System of Intelligent Machining	422
6.5.1	Emulation of Machining	423
6.5.2	Data-base of Machining	424
6.5.3	Expert System of Machining	424

7 Real Time On-line Monitor and Control

7.1	Importance of Real Time On-line Monitor and Control	426
7.2	On-line Monitor and Control System	426
7.2.1	Signal Acquisition	427
7.2.2	Signal Processing	430
7.2.3	Diagnosis and Control	443
7.2.4	Composition of Real Time On-line Monitor and Control	461
7.3	Information Circulation of On-line Monitor and Control	463
7.3.1	Information Circulation System	463
7.3.2	Information Circulation of Laser Intelligent Machining	463
Reference		466