

封面：

分类号_____

密级_____

U D C_____

编号_____

厦 门 大 学

博 士 后 研 究 工 作 报 告

高端精密激光加工设备控制软件研究

刘杰

工作完成日期 2016年8月

报告提交日期 2016年9月

厦门大学

2016年9月

封面：

分类号_____

密级_____

U D C_____

编号_____

厦 门 大 学

博 士 后 研 究 工 作 报 告

高端精密激光加工设备控制软件研究

刘杰

工作完成日期 2016年8月

报告提交日期 2016年9月

厦门大学

2016年9月

题名页

高端精密激光加工设备控制软件研究

Research on the Control Software for High-end Precision Laser
Processing Machines

博 士 后 姓 名 刘杰

流动站（一级学科）名称 仪器科学与技术

专 业（二级学科）名称 精密仪器及机械

研究工作起始时间 2013 年 11 月

研究工作期满时间 2016 年 10 月

厦 门 大 学

2016 年 9 月

厦门大学博士后研究工作报告

著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用博士后研究工作报告的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交该报告的纸质版和电子版，有权将该报告用于非赢利目的的少量复制并允许该报告进入学校图书馆被查阅，有权将该报告的内容编入有关数据库进行检索，有权将博士后研究工作报告的标题和摘要汇编出版。保密的博士后研究工作报告在解密后适用本规定。

本研究报告属于： 1、保密（）， 2、不保密（）

纸本在 30 年解密后适用本授权书； 电子版在 30 年解密后适用本授权书。

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：刘杰

日期：2016年12月6日

导师签名：孙道恒

日期：2016年12月6日

摘要

内容摘要

瞄准企业重大研发需求，本文首先对激光加工设备的控制软件设计方法进行了研究。提出了面向激光加工设备的可重构控制软件体系结构，利用组件技术建立了可重构机制，并依据激光加工设备控制软件相似功能的抽象描述进行了可重构模块的划分。定义了设备控制软件中的关键数据对象，利用 COM 组件设计了可重构模块。然后，针对 3 种高端精密激光加工设备开发出了合格的产品。具体如下：

(1) 针对精密金属激光 3D 打印机的研发，分析了双缸型设备的运行原理，根据企业已定型的设备 SLM-100、SLM-150 和 SLM-280，设计了控制电路并开发出 LRPSystem 设备控制软件。LRPSystem 能够手动控制激光 3D 打印机的电机、激光器、扫描振镜和各种辅助装置；能够根据导入的激光扫描路径数据，自动完成三维零件的打印，并且能够自动监控打印状态，根据实时检测数据控制打印室中的氧含量；能够在停电后记录打印现场并安全关闭计算机；具备拍照和视频录制功能。

(2) 针对精密微管激光切割机的研发，分析了设备的运行原理，根据企业已定型的设备 BCT-100D 和 BCT-10FT，设计了控制电路并开发出 PipeCutting 设备控制软件。PipeCutting 能够导入 DXF 文件，并以 2 维和 3 维方式显示数据模型；能够手动控制激光切割机的电机、激光器和各种辅助装置；能够根据导入的 DXF 数据，结合参数设置生成加工代码；能够自动执行加工代码。

(3) 针对精密微管激光焊接机的研发，分析了设备的运行原理，根据企业已定型的设备 BWT-150F，设计了控制电路并开发出 PipeWelding 设备控制软件。PipeWelding 能够编辑、打开和保存 G 代码；能够手动控制激光焊接机的电机、激光器和各种辅助装置；能够通过示教自动生成焊接轨迹代码；能够自动执行 G 代码。

关键词：激光加工，可重构控制软件，金属 3D 打印，微管激光切割，微管激光焊接

英文摘要

Abstract

Aiming at the significant R & D needs of enterprises, this paper studies the control software design methods of laser processing equipments. A reconfigurable architecture of control software for laser processing equipments is introduced. Reconfigurable mechanism is established based on component technology. Reconfigurable modules are divided according to the similar functions of control softwares. The key data objects of control software are defined. The reconfigurable modules are designed as COM(Component Object Model) component. Then, qualified software products are developed for three kinds of high-end precision laser processing equipments. Details as follows:

(1) After analyzing the working principle of 3D printer with two platform. The control circuit is designed and the control software called LRPSystem are developed for SLM-100, SLM-150 and SLM-280. LRPSystem can manually control the laser 3D printer's motor, laser, scanning galvanometer and a variety of auxiliary devices; can automatically complete the printing of three-dimensional parts according to the imported laser scanning path data, and can automatically monitor the print status, based on real-time detection data control of oxygen; can record the scene after power failure and turn off the computer safely; has camera and video recording capabilities.

(2) According to the equipment of BCT-100D and BCT-10FT, the control circuit is designed and the control software of PipeCutting equipment is developed. PipeCutting can import DXF files and display data models in 2D and 3D; can manually control the laser cutting machine's motors, lasers and various auxiliary equipment; can generate DXF data, combined with parameter settings to generate processing code; can automatically execute Processing code.

(3) Aiming at the research and development of precision micro-tube laser welding machine, the operation principle of the equipment is analyzed. According to the equipment BWT-150F, the control circuit is designed and the control software of PipeWelding is developed. PipeWelding can edit, open and save G codes. It can control the laser welding machine's motors, lasers and various auxiliary devices manually. It can automatically generate weld track codes by teaching. It can

automatically execute G codes.

Keywords: laser processing, reconfigurable control software, metal 3D printing, micro-tube laser cutting, micro-tube laser welding

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目录

目 次

1 绪论.....	1
1.1 课题的背景及意义.....	1
1.2 研究现状.....	1
1.2.1 精密金属激光 3D 打印设备研究现状.....	1
1.2.2 精密激光切割设备研究现状.....	4
1.2.3 精密激光焊接设备研究现状.....	5
1.3 课题来源及本文研究内容.....	6
2 面向激光加工设备的可重构控制软件设计方法研究.....	7
2.1 面向激光加工设备的可重构控制软件体系结构设计.....	7
2.1.1 可重构控制软件的定义.....	8
2.1.2 基于组件技术的重构机制.....	8
2.1.3 设备控制软件可重构模块的划分.....	11
2.2 关键数据对象定义.....	11
2.2.1 任务数据.....	12
2.2.2 参数数据.....	13
2.2.3 加工轨迹数据.....	14
2.2.4 状态数据.....	15
2.3 可重构模块的组件设计.....	16
2.3.1 加工功能组件.....	16
2.3.2 辅助功能组件.....	18
2.3.3 加工代码解释组件.....	19
2.3.4 参数设置组件.....	20
2.3.5 自动调度组件.....	21
2.3.6 任务管理组件.....	22
2.3.7 手动功能组件.....	23
2.3.8 加工状态监测组件.....	24
3 精密金属激光 3D 打印机控制软件研究.....	25
3.1 精密金属激光 3D 打印机工作原理.....	25
3.2 精密金属激光 3D 打印机产品型号.....	25
3.3 精密金属激光 3D 打印机控制电路.....	27
3.4 精密金属激光 3D 打印机控制软件设计.....	31
3.4.1 主界面设计.....	31
3.4.2 菜单及工具栏设计.....	32
3.4.3 主视图设计.....	34
3.4.4 加工任务及参数设置区设计.....	34
3.4.5 系统状态区设计.....	36
3.4.6 摄像显示区设计.....	36
3.4.7 3D 显示区设计.....	37
3.4.8 扫描装置调试对话框设计.....	38

3.4.9 铺粉装置调试对话框设计.....	39
3.4.10 压力参数设置对话框设计.....	39
3.4.11 IO 调试对话框设计.....	40
3.4.12 管理员功能设计.....	40
3.4.13 停电保护功能设计.....	41
3.5 功能验证.....	41
4 精密微管激光切割机控制软件研究.....	42
4.1 精密微管激光切割机工作原理.....	42
4.2 精密微管激光切割机产品设计.....	43
4.3 精密微管激光切割机控制电路.....	45
4.4 精密微管激光切割机控制软件设计.....	47
4.4.1 主界面设计.....	47
4.4.2 菜单及工具栏设计.....	48
4.4.3 主视图设计.....	49
4.4.4 加工任务及参数设置区设计.....	50
4.4.5 新建加工任务对话框设计.....	52
4.4.6 系统状态及执行代码区设计.....	53
4.4.7 轨迹添加和编辑功能设计.....	53
4.4.8 手动控制及参数设置功能设计.....	54
4.4.9 其他功能设计.....	55
4.5 功能验证.....	56
5 精密微管激光焊接机控制软件研究.....	57
5.1 精密微管激光焊接机的工作原理.....	57
5.2 精密微管激光焊接机产品设计.....	57
5.3 精密微管激光焊接机控制电路设计.....	58
5.4 精密微管激光焊接机控制软件设计.....	60
5.4.1 主界面设计.....	60
5.4.2 菜单和工具栏设计.....	61
5.4.3 主视图设计.....	62
5.4.4 系统状态和代码帮助区设计.....	63
5.4.5 手动控制及参数设置功能设计.....	64
5.4.6 轨迹编程功能设计.....	64
5.4.7 其他功能设计.....	64
5.5 功能验证.....	65
参考文献.....	67
致谢.....	70
博士生期间发表的学术论文、专著.....	71
博士后期间发表的学术论文、专著.....	72
个人简历.....	73
联系地址.....	74

1 绪论

1.1 课题的背景及意义

激光是人类在 20 世纪自然科学上的重大发明之一。自 1960 年第一台激光器问世以来，激光以高相干性、高单色性、高方向性和高亮度的特点，在高精度测量、物质结构分析、通信、光化学领域、加工制造等众多领域的研究和应用中得到了迅速的发展。激光加工技术具有无污染、无机械畸变、标记永久、成本低、灵活性高、可靠、维修间隔时间长等普通加工技术所不能比拟的优势，使其在机械、电子、冶金、汽车、石油和国防等领域得到了广泛应用，产生了巨大的经济效益和社会效益。随着新型激光器件的诞生、激光技术的发展以及新材料、新工艺的不断涌现，激光加工技术正逐渐进入更多行业并发挥重要的作用。

本课题瞄准激光加工技术的研究热点，面向企业研发重大需求，以 3 款精密激光加工设备为研究目标，进行控制软件设计，对我国激光加工技术的发展和运用有着重要的促进作用。

1.2 研究现状

1.2.1 精密金属激光 3D 打印设备研究现状

精密金属激光 3D 打印又称选区激光熔化（Selective Laser Melting, SLM），是由德国 Fraunhofer 激光技术研究所在二十世纪九十年代首次提出的一种能够直接制造金属零件的 3D 打印工艺^[3]。在原理上，选区激光熔化与选区激光烧结（Selective Laser Sintering, SLS）相似，但因为采用了较高的激光能量密度和更细小的光斑直径，打印件的力学性能、尺寸精度等均较好，只需简单后处理即可投入使用，并且打印所用原材料无需特别配制^[4]。

选区激光熔化工艺具有以下特点^[1]：

- （1）直接制造金属功能件，无需中间工序。
- （2）良好的光束质量，可获得细微聚焦光斑，从而可以直接制造出较高尺寸精度和较好表面粗糙度的功能件。
- （3）金属粉末完全熔化，所直接制造的金属功能件具有冶金结合组织，致密度较高，具有较好的力学性能，无需后处理。
- （4）粉末材料可为单一材料也可为多组元材料，原材料无需特别配制。

(5) 可直接制造出复杂几何形状的功能件。

(6) 特别适合于单件或小批量的功能件制造。

国外对选区激光熔化设备的研究比较深入，已形成相对成熟的技术，并商品化。主要的设备生产和销售商有：MCP 公司、EOS 公司、Concept Laser 公司、Phenix systems 公司、TRUMPF 公司和 MATSUURA 公司等，各公司均开发出系列产品，各具特色^[2, 5-9]。表 1-1 列出了几家主要公司具有代表性的设备。国内在选区激光熔化设备开发方面起步落后于国外，但也逐渐出现了商品化的设备。华南理工大学^[10, 11]是国内较早进行选区激光熔化成型设备开发的科研单位。



(a) Realizer 250



(b) SLM50 设备

图 1-1 MCP 公司的 SLM 设备^[5]

表 1-1 EOS、MCP、Concept Laser 公司的主要设备^[2, 5, 7]

公司	设备	成型范围 (mm)	光斑直径 (μm)
EOS	EOSING	250×250×215	100-500
	M270		
MCP	Realizer 100	$\Phi 100 \times 100$	30-50
	Realizer 150	$\Phi 150 \times 100$	50-100
	Realizer 250	$\Phi 250 \times 250 \times 240$	70-200
Concept Laser	M1 Cusing	120×120×120	30-50
	M2 Cusing	250×250×280	50-200
	M3 Cusing	300×350×300	70-300



图 1-2 EOS 公司的 SLM 成型设备^[2]

SLM 的应用研究一直是行业内的关注重点。针对 SLM 成型件属于小批量甚至是个性化单个零件的特点，主要的应用研究集中在医学、模具、航空航天、汽车等领域。图 1-3 和图 1-4 分别是 MCP 公司和 EOS 公司公布的一部份应用图片。在国内，华南理工大学也报道了采用 SLM 成型个性化手术模板并成功应用于临床手术（图 1-5）。



(a) 关节植入体



(b) 模具镶嵌件



(c) 个性化牙桥牙冠

图 1-3 SLM 成型的零件^[5]



图 1-4 SLM 成型的齿轮^[2]



图 1-5 用于临床的手术模板^[12]

1.2.2 精密激光切割设备研究现状



图 1-6 LPKF Fusion 3D 激光系统

精密激光切割机结合了激光加工与高精度数控技术的优点，随着这两项技术的发展，激光精密切割系统经历了 2D-2.5D-3D 的发展历程。研究的总体方向为高精度、高稳定性、低成本和美观紧凑。在同一设备上逐渐实现了多种加工工艺的复合，加工过程中实现了激光聚焦焦点自动识别^[13]，在控制策略上也越来越多的采用了人工智能的成果^[14]。德国 LPKF 公司在精密激光切割领域处于领先地位，生产的 SMT 模板切割机、PCB 和 FPC 外形切割机、太阳能电池成型机具有体积小、切割速度快、运行成本低、操作简单的特点。飞行光路技术（加工过程中，工件保持不动，激光束在控制作用下进行大范围的扫描^[15]）逐渐兴起，如 LPKF 公司开发的 protolaser 100 激光雕刻机配合振镜扫描系统，采用的激光器波长为 1064nm，频率约为 10 ~ 100KHZ, 振镜扫描范围为

100mmx100mm，定位和切割速度快；Rofin-Sinar 公司生产的振镜扫描切割设备能够广泛应用于 PCB 板，手机薄膜的加工。在国内，深圳木森科技有限公司是国内知名的激光精密加工设备制造商之一，于 2006 年开发出国内第一台高精度激光切割机，经鉴定，达到了行业领先水平，填补了国内空白。随后又开发出 PCB、玻璃、FPC、陶瓷和晶圆等多种材料的激光精密切割机，始终引领国内精密切割的潮流。武汉华源拓银激光科技，苏州天弘激光，深圳精诚达威机械，武汉金运激光经过多年的科研，也相继开发出高精度的激光精密切割系统，并应用于多种材料的切割加工。华中科技大学依托武汉光谷和国家重点实验室，在激光精密加工系统的研究方面取得了一定的进展。

国际上正在努力开发和推广三维激光精密切割系统。如 LPKF 公司的 Fusion 3D 激光系统可以批量生产模塑互联器件，即塑料经激光活化后，再进行金属化和组装，可以实现三维方向上的布线，从而省去了接线步骤。其四个激光头可以布置在七个位置，并可配置高性能随机软件，可用于手机天线、汽车方向盘、助听器等领域^[34]。Rofin 公司使用三维振镜为三维方向的切割提供了重要途径，开发的精密设备具有扫描速度快、切割范围大、稳定性高的特点^[16]。

1.2.3 精密激光焊接设备研究现状

以美国、欧盟、日本为首的工业发达国家非常重视激光技术的发展与应用，都将激光技术列入国家发展计划中，投以巨资。仅就激光焊接这一加工技术，先后将其与航空工业、航天工业、核能设备、国防武器工业、造船工业、汽车工业、铁路车辆工业、机械零部件、电子工业、建材业及家电业等分别组合，利用集成和系统的工程方法进行经费资助，研究开发。目前激光焊接技术已达到与传统产业相融合，将其制订为行业技术标准或工艺，成为一项成熟的技术^[17]。激光焊接技术的进展主要是美国在 bender 造船有限公司成功完成了激光焊接系统焊接船体平面分段的试验。该项目是在美国国家造船先进连接工艺计划、综合激光光学控制焊接项目计划和海军研究局小企业创新研究项目计划的共同支持下完成的^[18]。美国海军已采用激光技术用于军船制造，德国已大量采用大功率激光用于潜艇结构件或零部件连接，因此大力推广大功率激光造船技术是一项亟待解决的问题^[19]目前，国内一些激光设备与生产单位主要生产 kW 级的 CO₂ 激光设备和 1 kW 以下的固体 YAG 激光设备。对激光焊接研究主要集中在激光焊接等离

子体形成机理、特性分析、检测、控制、深熔激光焊接模拟、激光-电弧复合热源的应用、激光堆焊、超级钢焊接、水下激光焊接、宽板激光拼焊、填丝激光焊、铝合金激光焊、激光切割质量控制等。

1.3 课题来源及本文研究内容

本课题来源于广东汉邦激光科技有限公司的研发需求。广东汉邦激光科技有限公司成立于广东省中山市。专注于高端激光加工设备的研发、生产、销售及服务领域。现与西安交通大学（快速制造国家工程研究中心）、厦门大学、南京航空航天大学、华南师范大学、广东省工研院（广州有色金属研究院）等多所科研院所开展多方面的合作，并建立起长期战略合作关系。

本文的研究工作是针对该公司的 3 种高端精密激光加工设备进行控制软件的研发。为了防止技术秘密泄露引起不必要的经济损失，因此公司申请将该本文内容进行保密。



图 1-7 保密申请

2 面向激光加工设备的可重构控制软件设计方法研究

2.1 面向激光加工设备的可重构控制软件体系结构设计

激光加工设备的自动化加工过程是由设备控制软件通过与组成设备的各个硬件协同工作来共同完成的。激光加工的工艺多种多样，如：激光打标、激光切割、激光焊接和激光 3D 打印等。相应的激光加工设备也是种类繁多。但无论是哪种工艺或是设备都是以激光束扫描为基础。这就使得激光加工设备的控制软件在某种程度上具有一定的相似性。

但是，不同的激光加工工艺，由于机理不同，其相应的加工设备的构建方式也各不相同。即便是同一种工艺，不同厂商的设备或是不同型号的设备也会有不同之处。这就使得不同激光加工设备的控制软件会存在一些差异，主要体现在：

(1) 加工代码格式不同。

加工代码是驱动激光加工设备进行加工运动的指令数据，以一定的格式保存在文件中以供控制软件进行调用。不同的设备研发机构所开发的设备往往采用不同格式的加工代码。例如：北京隆源自动成型有限公司的 AFI 格式代码、广东汉邦激光科技有限公司的 HBD 格式代码、数控 G 代码等。

(2) 被控对象不同。

被控对象是指与软件协同工作的硬件装置。例如：激光 3D 打印机中的振镜控制卡、运动控制卡和激光器等。不同的激光加工工艺，往往需要不同的硬件装置。即使是同种工艺，不同的设备研发机构可能会选用来自不同硬件生产商的产品。不同的硬件装置或是不同厂商的同类硬件装置，其控制接口（API、通讯指令等）往往是不同的。

(3) 工艺参数不同。

不同的激光加工工艺，对应的工艺参数也存在不同。例如：SLM 工艺中，加工层厚是非常重要的工艺参数。但是激光切割工艺，就没有这个工艺参数。

这些不同之处导致激光加工设备的控制软件之间虽然存在着相似性，但彼此之间却无法兼容，与硬件装置无关的相似模块也很难得到复用。这使得当工艺发生变化时，或仅仅是使用了不同厂商的硬件装置，整个设备控制软件就需要重新进行编程，大大增加了人工参与度。为改善这一状况，减少由于工艺或硬件发生

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.