

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.02.005

# 基于 Simotion 的金属复合 3D 打印机 控制系统的设计与实现\*

夏 伟, 张李超\*, 熊海洋

(华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**针对选择性激光熔化逐层加工金属粉末固有的球化效应及台阶效应导致其 3D 打印制件在表面精度和表面粗糙度等指标上距离高端应用存在较大差距的问题,设计与实现了金属复合 3D 打印机控制系统,使选择性激光熔化成形与传统机加工工艺复合,即在激光扫描逐层叠加成形的过程中逐层引入了铣削或磨削加工;控制系统以西门子 Simotion 为控制核心,通过以太网总线采用了 UDP 协议和上位工控机软件通信,通过 PCI 总线以控制激光扫描振镜,通过 DRIVE-CLiQ 总线连接了双轴伺服电机驱动和外部编码器模块,通过 Profibus-DP 总线远程扩展了 IO 模块以控制变频器以及其他 I/O 端口。研究表明,该系统开发自由度高,可扩展性强,多轴异步运行不发生位置干涉,主轴插补精度高。

**关键词:**选择性激光熔化;金属复合 3D 打印;西门子 Simotion

中图分类号:TH166;TP23

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)02-0151-04

## Design and implementation of metal hybrid 3D printer control system based on Simotion

XIA Wei, ZHANG Li-chao, XIONG Hai-yang

(State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that inherent balling behavior and stepped effect of selective laser melting and the 3D printed parts had large gaps from the high-end applications on the surface accuracy and roughness, a creative metal hybrid 3D Printer control system was designed and developed. The process of merging selective laser melting and conventional machining was implemented as a result, namely adding new manufacturing processes of milling or grinding into superimposed forming process laser scanning layer by layer. In the control system based on Siemens Simotion as the control center, UDP and IPC was used in software communication via Ethernet bus, the function of laser galvanometer was controlled via PCI bus, biaxial servo motor drive and external encoder module were connected via DRIVE-CLiQ bus, I/O modules were expanded remotely to control the inverter and other I/O ports via Profibus-DP bus. The results indicate that the system has high degree of freedom and scalability while developing and testing, all the axes don't interference mutually while running asynchronously, and the main axis has high precision of interpolation.

**Key words:** selective laser melting(SLM); metal hybrid 3D printer; Siemens simotion

## 0 引 言

选择性激光熔化 3D 打印技术使用高能激光束,根据三维数据模型,逐层熔化金属粉末材料,可以快速

堆积制造出任意复杂的金属零部件<sup>[1]</sup>。由于激光逐层熔化金属粉末材料固有的球化效应<sup>[2-3]</sup>及台阶效应<sup>[4]</sup>,其 3D 打印制件在表面精度、表面粗糙度等指标上距离高端应用还存在较大差距,必须采用精密铣削

收稿日期:2015-08-19

基金项目:江苏省科技支撑计划资助项目(BE2014077)

作者简介:夏 伟(1990-),男,湖北省荆州人,主要从事 3D 打印控制系统方面的研究. E-mail:xiaweigood@qq.com

通信联系人:张李超,男,副教授,硕士生导师. E-mail:elegantteac@263.net

或磨削等机加工技术对成形件表面进行后处理才能满足应用要求<sup>[5-6]</sup>。但是,机加工技术一般只能对成形件表面轮廓进行处理,受制于刀具干涉效应,难以加工复杂金属零部件的内部(冷却流道及夹缝),因此金属 3D 打印应用领域受到极大限制<sup>[7]</sup>。

本研究提出将金属激光 3D 打印技术与传统金属铣削或磨削工艺在加工过程中结合起来,在激光扫描熔化金属粉末逐层叠加成形的过程中交替进行逐层的铣削或磨削加工,这样可以避免刀具干涉,成形工件加工完成后无需后处理即可直接投入使用<sup>[8]</sup>。

本研究针对这种制造工艺设计并实现金属复合 3D 打印机控制系统。

## 1 核心机械结构及工艺分析

### 1.1 核心机械结构

本研究提出的金属复合 3D 打印机采用一体化铸造机身,激光扫描系统采用传统的机顶式安装方法。金属复合 3D 打印机核心机械结构图如图 1 所示。

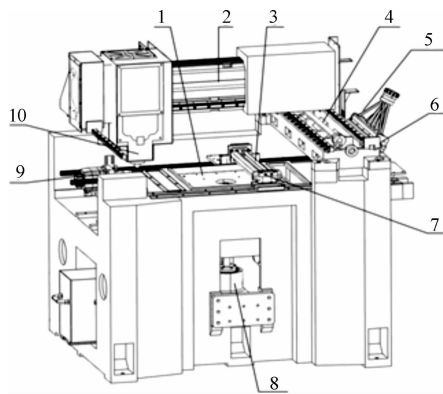


图 1 金属复合 3D 打印机核心机械结构图

1—加工平台;2—X 轴;3—粉槽;4—Y 轴;5—送粉器;  
6—送粉轴;7—滚粉轴;8—Z 轴;9—铺粉轴;10—加工主轴

X 轴(2)和 Y 轴(4)采用“伺服电机 + 滚珠丝杆”的形式带动机加工旋转主轴(10)在 XY 平面运动,主轴刀头始终处于加工平台上表面,可以避免与加工工件发生干涉;加工工件跟随 Z 轴运动而上下升降。

### 1.2 工艺分析

如图 1 所示,铺粉轴(9)沿 X 轴(2)方向往复运动,到达铺粉区间时,滚粉轴(7)自转,粉槽(3)中的金属粉末均匀铺撒在加工平台(1)上,并由滚粉轴(7)铺匀压平。当粉槽(3)中粉末不足时,铺粉轴(9)运动至坐标零点,送粉器(5)中的送粉轴(6)转动,金属粉末掉入并装满粉槽(3),准备下一次铺粉动作。

在加工过程中,激光扫描加工与旋转主轴机加工

两种工序分层循环交替进行,直到工件制造完成。具体工艺流程如图 2 所示。

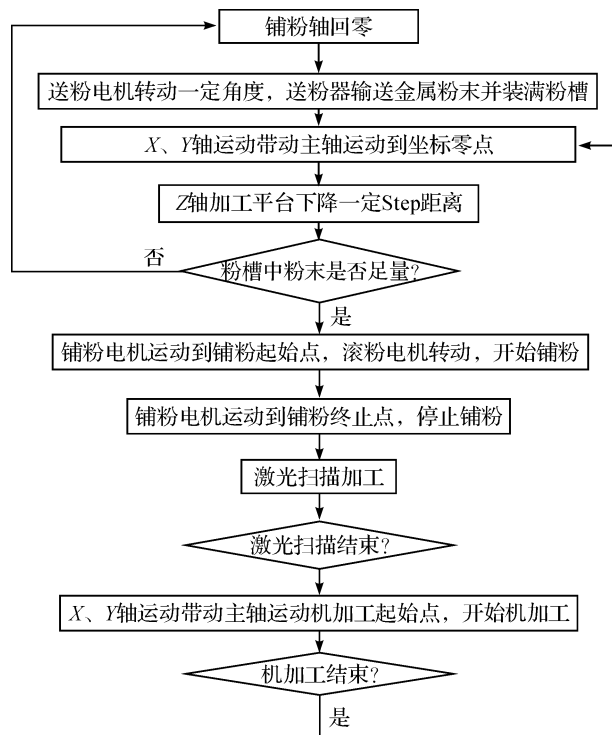


图 2 金属复合 3D 打印工艺流程图

## 2 控制系统硬件结构

根据设备运行需求及控制成本的需要,运动轴电机类型及控制方式如表 1 所示。

表 1 运动轴电机类型及控制方式

| 轴   | 电机类型   | 控制方式              |
|-----|--------|-------------------|
| X 轴 | 伺服电机   | Simotion + 双轴电机模块 |
| Y 轴 | 伺服电机   | Simotion + 双轴电机模块 |
| Z 轴 | 伺服电机   | Simotion + 双轴电机模块 |
| 铺粉轴 | 伺服电机   | Simotion + 双轴电机模块 |
| 主轴  | 三相异步电机 | AO + 变频器          |
| 滚粉轴 | 三相异步电机 | AO + 变频器          |
| 送粉轴 | 三相异步电机 | AO + 变频器          |

该设备控制系统中的 X、Y、Z 轴采用西门子伺服电机,主轴、滚粉轴、送粉轴等使用三相异步电机并采用变频器驱动控制。

该金属复合 3D 打印控制系统拓扑图如图 3 所示:伺服电机驱动器采用西门子 Sinamics S120 系列驱动产品,系统以西门子 Simotion D425 为控制核心,通过 Drive-CLiQ 总线连接 1 个智能型电源模块 SLM (Smart Line Module)、2 个双轴电机模块 DMM (Double Motor Module) 以及 1 个外部增量式编码器模块 SMC30。SMC30 经过软件编程设置,与 X、Y、Z、铺粉轴构成齿轮同步,通过接收手轮编码器的脉冲可以控制

各个伺服进给轴的正、反方向运动。Simotion 通过 Profibus-DP 总线连接远程 I/O 扩展模块 ET200M 并通过背板总线连接系统的所有 I/O 端口。主轴电机、滚粉电机、送粉电机均由台达变频器驱动,并由模拟量输出 AO 控制。由于送粉器对送粉量精度要求低,本研究采取“送粉电机速度  $V \times$  转动时间”的形式来控制送粉量。Fanuc 数控面板通过数字量 I/O 端口与系统相连,通过 DI 和 DO 端口来模拟通讯的地址总线和数据总线,其对应的寄存器由 Simotion 软件编程实现。

由于上位工控机软件与 Simotion 数据传输量大,且 Simotion 必须对上位机发送的急停等控制指令做出最快的响应,传统的 OPC 通讯技术是由 SimaticNet 在工控机建立 OPC 服务器同时在 Simotion 端建立 OPC 客户端<sup>[9]</sup>,这种间接通讯方式不能满足对数据传输及响应的要求<sup>[10]</sup>。本研究采取 UDP 直联的通讯方式,这样可以省去 OPC 服务器中转站,从而缩短通讯时间<sup>[11]</sup>。上位工控机控制软件通过以太网总线采用自主拟定的 UDP 扩展协议与 Simotion 通讯,主要实现机加工轮廓数据和其他基本控制(如点动、寸动)类指令的发送以及对设备各伺服电机运行状态和 I/O 端口状态的监控。另外,上位工控机软件同时通过 PCI 总线和德国 SCANLAB 公司扫描振镜配套的 RTC4 控制卡通讯,驱动旋转扫描振镜以控制激光束的扫描轮廓。

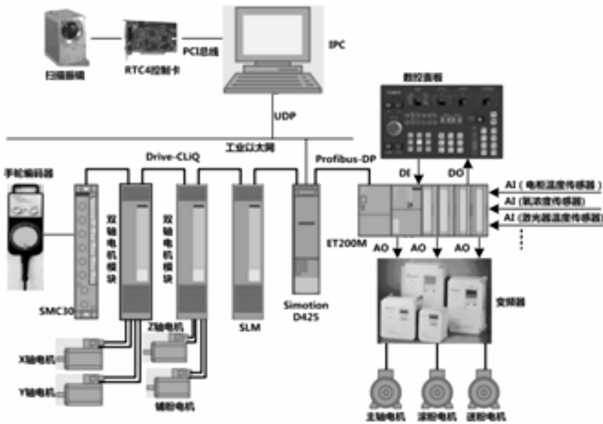


图 3 控制系统硬件结构拓扑图

### 3 控制系统软件结构

#### 3.1 执行系统框架

Simotion 执行系统(EXECUTION SYSTEM)用于管理系统任务以及用户任务的有序执行,类似于各类计算机操作系统中的进程管理系统。执行系统分为不同的等级,每个等级可以包含一个或多个任务(TASK),每个任务中又可以分配一个或多个程序(PROGRAM)。用户可以通过将程序分配到不同的任务中,

来指定程序的优先级或执行顺序<sup>[12]</sup>。

**StartupTask:**当 Simotion 运行模式从 STOP 或 STOPU 到 RUN 时触发 StartupTask,该任务主要用于变量的初始化和对象的复位;**MotionTask:**通常通过用户任务的任务控制命令(\_startTaskID、\_stopTaskID)来启动或停止任务,MotionTask 只执行一次,没有时间看门狗监控;**BackgroundTask:**用于非固定周期循环程序的执行,在 StartupTask 结束后开始执行,在程序结束时自动重新执行,受时间看门狗监控,执行超时即发生 ExecutionFault,适合于执行后台程序或逻辑处理程序等;**TimerInterruptTask:**在固定的周期(设置为插补周期倍数)被循环触发;**UserInterruptTask:**当一个用户自定义事件发生时,启动此项任务,该任务执行一次后停止;**ShutdownTask:**在 CPU 从 RUN 模式到 STOP 或 STOPU 模式时执行一次,可以执行例如设置输出点的状态或轴的停止命令<sup>[13]</sup>。

本研究设计的金属复合 3D 打印机控制系统软件执行框架如表 2 所示。

表 2 控制系统软件执行框架

| 任务                         | 分配程序                                                                                                                                                       |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| StartupTask:               | Program1:程序变量初始化(Unit_SystemInitial)<br>Program2:伺服使能标志位延时置位(Unit_ServoEnable)                                                                             |
| MotionTask1:               | Program1: X 轴寸动(Pos)、点动(Move)、回零(Homing)、停止(Stop)                                                                                                          |
| MotionTask2:               | Program1: Y 轴寸动(Pos)、点动(Move)、回零(Homing)、停止(Stop)                                                                                                          |
| MotionTask3:               | Program1: Z 轴寸动(Pos)、点动(Move)、回零(Homing)、停止(Stop)                                                                                                          |
| MotionTask4:               | Program1: 铺粉轴寸动(Pos)、点动(Move)、回零(Homing)、停止(Stop)                                                                                                          |
| MotionTask5:               | Program1: X、Y、Z、铺粉轴复位 Resetaxis()<br>Program1: UDP 协议解析(UDP_DataParsing)                                                                                   |
| BackgroundTask:            | Program2:数控面板按键解析(Control-Pannel_Decoding)<br>Program3:状态判断(Status_Judgement)<br>Program4:命令执行(Commissioning)<br>Program5:UDP 数据发送结构体数据填充(UDP_SendDataSet) |
| TimerInterruptTask1 (4ms): | Program1:UDP 数据发送(UDP_SendData)                                                                                                                            |
| TimerInterruptTask2 (8ms): | Program1:UDP 数据接收(UDP_ReceiveData)                                                                                                                         |
| UserInterruptTask:         | Program1:急停(Stopemergency)<br>Program1:伺服轴去使能(DisableAxis)                                                                                                 |
| ShutdownTask:              | Program2:I/O 端口置为安全状态(SafeStatus)                                                                                                                          |

### 3.2 UDP 数据接收和解析

在 IPC 上位机软件与 Simotion 进行 UDP 通讯过程中,上位机发送数据帧信息包括:XY 轴插补轮廓数据、各伺服轴运动控制指令、DO 和 AO 端口控制指令; Simotion 发送数据帧信息包括:各个伺服轴位置坐标和速度、DI 和 AI 端口状态值。上位机软件预先定义 UDP 数据结构体均为 1 B 对齐。Simotion 程序开发采用结构化文本(ST)语言,UDP 数据接收和发送分别调用函数\_udpReceive()和\_udpSend()执行<sup>[13]</sup>,接收到的数组调用函数 BIGBYTEARRAY\_TO\_ANYTYPE()转化为预先定义的 UDP 协议解析结构体,发送数据结构体填充完毕之后调用函数 ANYTYPE\_TOBIGBYTEARRAYIPC()将结构体转化为发送数组进行定时发送。上位机软件发送连续数据帧和接收数据帧时间间隔均设置为 20 ms,所以在 Simotion 执行系统中加入 8 ms 定时中断和 4 ms 定时中断,即 Simotion 每隔 8 ms 接收 1 次 UDP 数据帧,每隔 4 ms 向上位机发送 1 次数据帧。接收数据帧解析和发送数据帧的数据填充程序均放在 BackgroundTask 中,这样可以减少定时中断单独占用总线时间,也能确保上位机发送的 UDP 帧能够被及时接收并解析,该程序框架大大优化了 Simotion 执行系统的执行性能。

### 3.3 轴异步运行和急停

为了保证 X、Y、Z、铺粉轴等 4 个伺服轴之间能够独立异步运动以及停止和回零,笔者将各个轴的运动控制函数分别放在单独的 MotionTask 中, MotionTask 由 BackgroundTask 中的 Commissioning 程序采用\_startTaskID(\_getTaskID())函数异步调用,各个轴之间的运动没有同步耦合关系。

为了保证急停指令\_stopemergency()被迅速执行,本研究在 Simotion 执行系统中加入了用户自定义中断 UserInterruptTask,将接收 UDP 数据帧中的变量“AxisEmergency”设置为该中断的触发条件。

## 4 PATH 插补测试

Simotion D425 内部集成了路径插补(path interpolation)功能,三维以下包括三维的位置控制都可以通过插补的方式来确定路径。3 种路径插补方式如图 4

所示。路径可以有直线,圆弧及多项式曲线 3 种方式。

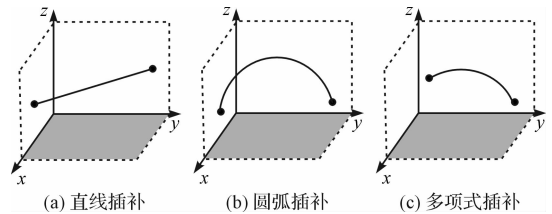


图 4 3 种路径插补方式

本研究主要是通过 X、Y 轴带动机加工旋转主轴对金属 3D 打印过程中每一层切片进行磨削或铣削,故控制系统采用了 Simotion PATH 工具包中 XY 平面的二维插补功能。为了验证 PATH 插补精度,本研究以整圆轮廓(圆心  $O(100, 100)$ ,  $R = 100$  mm)为例,对 XY 平面圆弧插补功能进行了测试,测试数据通过 Simotion 开发软件平台 Scout 中的 Trace 功能在线采集,采集周期为 4 ms。

误差计算:

$$\varphi = \left| \sqrt{(X_{\text{actualPosition}} - O_X)^2 + (Y_{\text{actualPosition}} - O_Y)^2} - R \right| \quad (1)$$

测试结果如表 3 所示。

表 3 PATH 插补测试结果

| 运动速度<br>/(mm · s <sup>-1</sup> ) | 最小误差差<br>/μm | 最大误差<br>/μm | 平均误差<br>/μm |
|----------------------------------|--------------|-------------|-------------|
| 50                               | 0.000 2      | 6.067       | 0.715       |
| 100                              | 0.000 4      | 6.822       | 0.655       |
| 200                              | 0.000 2      | 6.241       | 0.726       |

从表 3 中测试数据分析可得,在轨迹轮廓固定的情况下,XY 轴插补运动速度越大,插补最大误差和平均误差均没有明显大幅变化,误差值均在允许范围( $< 10 \mu\text{m}$ )之内。

## 5 结束语

本研究提出了一种将选择性激光熔化(SLM)和传统磨削或铣削机加工有序结合的金属复合 3D 打印制造工艺,并以西门子 Simotion D425 为控制核心设计与实现了该复合 3D 打印装备的控制系统。Simotion 插补功能开发包 PATH 插补精度高,能够满足设备对主轴运动轨迹轮廓的尺寸精度要求。控制系统支持多轴  
(下转第 159 页)

本文引用格式:

夏 伟,张李超,熊海洋. 基于 Simotion 的金属复合 3D 打印机控制系统的设计与实现[J]. 机电工程,2016,33(2):151-154,159.

XIA Wei, ZHANG Li-chao, XIONG Hai-yang. Design and implementation of metal hybrid 3D printer control system based on Simotion[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(2):151-154,159.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>