

# 基于样式表达的激光立体成形路径优化

马良 林鑫 谭华 黄卫东

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

**摘要** 以 C919 大飞机中央翼上下椽条的激光立体成形为研究对象, 以激光立体成形扫描路径的工艺过程控制为目标, 通过构建激光立体成形工艺参数的样式表达数据库, 为椽条扫描路径设定不同的成形工艺参数。通过扫描路径的轮廓偏置生成矩形包围盒测试区域, 结合“命中因子”自动判断下一层中相似扫描路径, 从而为其指定相同的样式号。根据用户为不同路径设定的不同样式, 自动生成激光立体成形数控作业文件。使用该方法实现了不同路径的不同成形工艺参数的设定, 多层间样式自动继承, 降低了工艺设计人员的操作负担, 杜绝了加工过程中人为因素的影响, 使工艺设计、数控操作职责明晰, 满足了适航认证对激光立体成形过程控制的要求。

**关键词** 激光技术; 激光立体成形; 扫描路径; 样式; 上下椽条

中图分类号 TG142

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.031405

## Scanning Path Optimization of Laser Solid Forming Based on Style

Ma Liang Lin Xin Tan Hua Huang Weidong

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

**Abstract** In order to fabricate an upper or lower chord blank of the C919 plane, different scanning paths are set with different laser solid forming (LSF) process parameters based on style-database of LSF. A test region is calculated using offset algorithm of the scanning path. “Similar scanning path” is automatically found by using parameters of the above test region and “hit probability” and a same style number is set for the next path. A numerical control operation file is automatically generated in terms of the style of every scanning path. What is concerned is how to set different process parameters for different scanning paths and transfer the style of the scanning path. Using this method, the operational complexity of process designer is reduced, and human factors are excluded during the manufacturing process. Processing design and manufacturing operation are separated and airworthiness certification requirements are satisfied.

**Key words** laser technique; laser solid forming; scanning path; style; upper/lower chord

**OCIS codes** 140.3390; 140.6810; 120.4610

## 1 引言

激光立体成形(LSF)技术是在快速成形技术和大功率激光熔覆技术蓬勃发展的基础上迅速发展起来的一项新的先进制造技术。该技术综合了激光技术、材料技术、计算机辅助设计和计算机辅助制造(CAD/CAM)技术和数控技术等先进制造技术,通过逐层熔化、堆积金属粉末,能够直接从CAD数据生成三维实体零件,可以实现高性能复杂结构致密金属零件的快速、无模具、近净成形。这项技术尤其适用于大型复杂结构零件的整体制造,在航空航天等高新技术领域具有广阔的发展前景<sup>[1,2]</sup>。

C919为我国在研的大型干线客机,单机需要标准件109万件,其中钛合金材料零部件需要近20万件。例如,使用钛合金的上下椽条构件为机翼的关键承力件,该构件为空间弯板结构,使用传统锻造的方法材料

收稿日期: 2012-11-12; 收到修改稿日期: 2012-12-24; 网络出版日期: 2013-02-27

基金项目: 国家973计划(2011CB610402)和国家自然科学基金(51105311, 50971102)资助课题。

作者简介: 马良(1978—),男,副教授,高级工程师,主要从事复杂金属零件的激光立体成形方面的研究。

E-mail: maliang@nwpu.edu.cn

利用率低、制造周期长,使用激光立体成形技术制造该构件将会发挥制造周期短、材料利用率高等一系列技术优势。

激光立体成形首先需要对上下椽条三维模型进行剖分,生成二维平面轮廓,并进行计算机自动算法填充,结合激光立体成形工艺参数,将填充的路径转换为数控加工作业文件<sup>[3,4]</sup>。

如果直接使用上述作业文件生产椽条类零件,将会导致成形表面起伏、边缘塌陷等各种问题<sup>[5,6]</sup>,使零件的成形制造失败,其原因是计算机自动生成的路径使用的是相同的工艺参数,即扫描速度、激光功率等可控工艺参数均相同。但实际上由于结构的原因,在轮廓的最外层、路径拐弯处等特殊位置,需要使用不同的工艺参数来保证成形的高度、几何尺寸以及良好的内部质量。由于材料、结构、激光模式、光束质量以及数控设备等因素对成形工艺均有影响,目前还没有统一的模型对其成形过程进行预测,因此,需要工艺设计人员根据工艺试验数据来决定成形路径的加工工艺参数<sup>[7,8]</sup>。

本文以样式表达为基础,以计算机图形处理为工具,为工艺设计人员提供了路径工艺参数控制手段,简化了数控加工的操作强度,提高了成形件质量的稳定性。

## 2 椽条类零件的激光立体成形

上下椽条为 C919 飞机中央翼的关键承力件,因此对该零件的尺寸、质量甚至显微组织的均匀性、稳定性都提出了较高要求,所以,使用激光立体成形技术制造该零件,对制造工艺、制造装备及制造过程控制都有较高的要求。

椽条形状如图 1 所示,在高度方向上有曲率变化,通过有限元分析以及与工程实践经验结合,该类零件沿高度方向竖直成形变形和热应力最小。为此,西北工业大学凝固技术国家重点实验室建设了椽条类零件的专用激光立体成形装备 LSF-V,设备成形尺寸为 1500 mm×1500 mm×3000 mm,采用 Rofin 8000 CO<sub>2</sub> 激光器, Fagor 8070 数控系统。

椽条的激光立体成形首先需要对三维模型进行剖分,得到每一层的剖分轮廓,然后进行路径填充,填充后的图形如图 2 所示。获得填充路径后,还需为路径设定激光功率、扫描速度、送粉量等工艺参数,然后生成数控加工作业文件。简单情况下,所有的扫描路径使用相同的工艺参数,但是,对于空间有曲率变化的复杂零件,使用相同的工艺参数将导致成形边缘塌陷、表面不平整等问题出现。

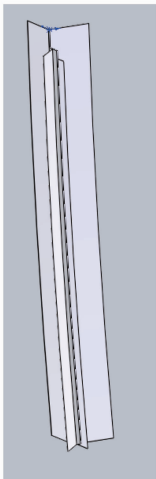


图 1 椽条零件图

Fig. 1 Part of chord

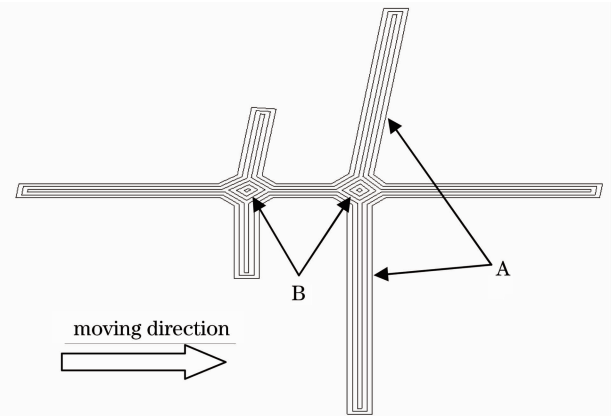


图 2 椽条某一层的扫描路径

Fig. 2 Scanning path in a layer of the chord

成形边缘的塌陷是由于椽条零件在高度方向上有曲率变化,两层之间由于曲率变化,导致填充路径有微小平移,如图 2 中箭头所指方向,从而导致在成形过程中某些扫描线会产生漏光现象,如图 2 中 A 标号所指位置,即激光扫描到边缘,有部分激光没有完全进入熔池,从而使该位置成形高度不足的现象。如图 3(a)所示,成形路径的边沿,特别是边沿并伴有 90°直角拐弯的位置,最容易发生边沿塌陷现象。

成形表面不平整,主要集中在椽条零件的中心位置,如图2中B标号所指位置,该位置由于路径较短,扫描完成后,产生较大的热量残余,在残余热量还没来得及散失掉时,下一道扫描已经开始,相当于上一道扫描对下一道进行了强预热,从而导致熔池温度过高,捕获的金属粉末更多,成形高度变高,产生表面不平整现象。如图3(b)所示,成形路径中心位置沿着成形扫描方向出现凸起,如果凸起高度超过工艺稳定范围,将会导致成形过程出现层间融合不良,从而造成零件内部缺陷,导致成形过程失败。

为了获得平整的成形表面和边缘,需要针对图2中A、B等位置使用不同的激光成形工艺参数。

### 3 基于样式表达的激光立体成形路径优化

如果直接为每个扫描线段设定不同的工艺参数,由于扫描路径繁多,设定工作将极其麻烦,后续的维护和图形化观察不便。为此,提出了基于样式表达的激光立体成形路径优化方案,即首先根据工艺试验,筛选出能够使用的激光工艺参数配比,将这些工艺参数输入到数据库中,并为每个工艺参数指定标号,然后在进行扫描路径的工艺参数修改时,选择某一个工艺参数标号即可。最后,计算机自动根据用户对扫描线的样式设定,生成激光立体成形数控加工作业文件。

#### 3.1 样式数据库

样式数据库(如图4所示)是为工艺参数的配比提供存储而设计的。在激光立体成形过程中的关键工艺参数包括激光功率、扫描速度、送粉量、保护气氛等,但是实时可调的工艺参数目前仅有激光功率和扫描速度。为此,样式数据库的表头字段包括:ID标号、Power激光功率、ScanSpeed扫描速度、FeedSpeed送粉量、Color显示颜色。其中,送粉量也是关键工艺参数,但是目前设备无法做到实时送粉量控制,所以该字段为后续预留字段。

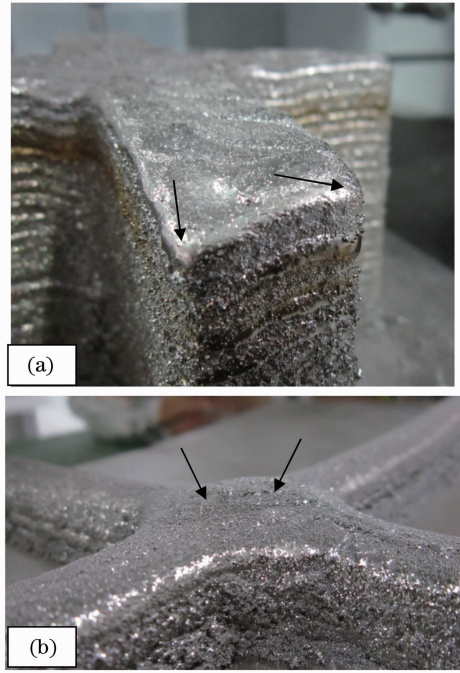


图3 激光立体成形缺陷实例。(a)塌陷;(b)凸起  
Fig. 3 Defects of laser solid forming. (a) Collapse of edge; (b) raise



图4 样式数据库

Fig. 4 Database of style

工艺设计人员首先对橡胶零件的激光立体成形进行工艺验证试验,在正交试验结果的基础上,反复试验,优选出符合该结构的成形工艺参数配比若干,然后将这些工艺参数配比输入到工艺参数样式数据库中,构成激光立体成形工艺样式数据库。

样式数据库构建完成后,就可以对任何一层的成形路径进行样式指定,例如对于图 2 所示的 A、B 位置可以分别指定较高或者较低的激光功率,较快或者较慢的扫描速度样式,从而满足工艺设计人员对于扫描路径的控制。

仅使用上述方案对橡胶零件进行样式指定将是不可能完成的任务。对于剖分厚度 1 mm 来说,橡胶剖分完成后就有近 3000 层数据,每层填充完成后有几十条甚至上百条扫描路径,如果直接为每条路径设定样式,完全由人工进行,将是不可想象的。因此,提出了基于样式规则继承的自动检测算法。

### 3.2 样式规则的自动继承

基于样式规则继承的自动判断算法是该方案能否成功的关键。该算法的建立依托于一个事实:橡胶零件的曲率变化是连续的。也就是说,相邻两层之间,相似位置的扫描路径,其样式是相同的。从而下一层可以通过对上一层用户设定的样式进行继承,即通过上一层扫描线所在位置或相对位置以及扫描线设定的样式,来自动判断并设定下一层相似位置的扫描线的样式。可见,上下两层相似位置的扫描线判断是该算法的关键。下面举例说明该关键算法的工作原理。

假设第  $i$  层轮廓如图 5 所示,其中扫描线 1 被用户设定了不同的样式,样式号为  $S_i$ 。为了对下一层的扫描线进行自动样式判断,首先根据上一层扫描线 1 的数据生成轮廓偏置区域,如图 5 中虚线所示,偏置距离为  $R/2$  (该值可以由用户设定),然后,遍历下一层所有的扫描线,计算是否有扫描线落入该区域。假设在下一层扫描线中找到一根落入该区域(如图 5 中 2 所指的扫描线所示),则为该扫描线自动设定样式号为  $S_i$ 。计算扫描线是否落入某一区域,可以使用扫描线算法,通过计算直线段与区域轮廓的交点来判断直线段与轮廓环的关系。

直线的轮廓偏置算法是将直线作为一个矩形包围盒考虑的,只是矩形包围盒两个短边的长度都为零,该矩形包围盒向外轮廓偏置后,将会得到一个如图 5 虚线所示的区域。但是需要注意,整个填充路径的微量移动方向为水平向右,而矩形包围盒的轮廓偏置方向与直线 1 的方向垂直,所以,在进行下一层相似路径计算时,线段 3 和线段 4 的一部分会进入矩形包围盒,从而产生误判。为了避免该问题的出现,可以使用“命中因子”,即落入该区域中的扫描线的长度与扫描线总长度的比值,例如可以设定为 99%,即当下一层扫描线有 99% 落入矩形包围盒中时,才认为该扫描线是相似扫描线,并设定相同的样式号,否则不予设定。

在上述算法过程中,用户可以通过控制偏置距离  $R/2$  和“命中因子”来对下一层落入矩形包围盒的扫描线的多少进行控制。

## 4 数控作业文件的自动生成

在基于样式表达的系统中,每一条扫描线(直线段)都包含一个样式字段(正整数变量),在用户对所有层进行样式设定和确认后,即可以通过数控代码自动生成操作,生成真正的激光立体成形数控作业文件。

由于数控插补速度  $F$  为模态指令,即用户一旦设定,如果不修改,则后续的运动都使用该速度,所以在自动生成数控代码过程中,需要根据插补速度是否变化来决定下一行代码中是否包含  $F$  速度设定控制字。

例如对于如图 5 中的扫描线 1,正常的数控代码指令为:

G00 P1;快速移动到  $P_1$  点

M20;打开激光

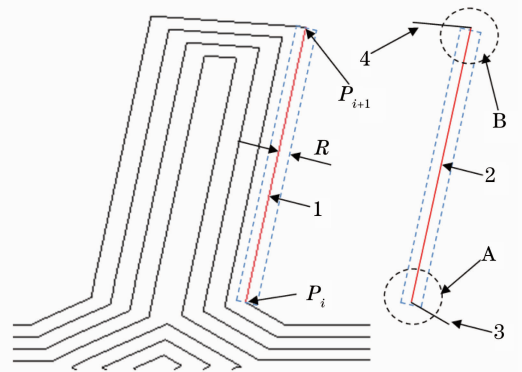


图 5 相似位置扫描线判断  
Fig. 5 Judgment of the scan path in the similar position

G01 P2 F10;扫描到第 2 点

...

G01 P $i$ ;扫描到第  $i$  点

G01 P $i+1$ ;扫描到第  $i+1$  点

...

M21;关闭激光

修改样式后,对扫描线 1 采用不同的扫描速度,假设采用 20 mm/s 的速度,则第  $i+1$  行的数控代码为:

...

G01 P $i+1$  F20;使用 20 mm/s 速度

G01 P $i+2$  F10;恢复 10 mm/s 的扫描速度

...

激光功率设定也为模态指令,采用同样的设定方法,其数控指令为:S1000,其中 S 后面的数字表示激光功率。

因此在系统自动生成激光立体成形作业文件时,相当于模拟一次真实的数控操作过程,在生成代码时,需要系统维护两个变量,一个为当前速度,另一个为当前激光功率。在进行下一条数控指令输出时,判断当前速度和当前激光功率是否发生了改变,如果发生改变,则相应地修改输出数控代码,并更新当前值。依次遍历所有的层,每一层遍历所有的扫描线,并根据样式确定输出数控代码格式,即能自动生成最终的激光立体成形数控作业文件。下载到数控系统中,执行即可。图 6 为使用样式设定方法生成的激光立体成形作业文件制造的椽条零件,零件尺寸 430 mm×250 mm×2900 mm,毛坯重量近 100 kg。

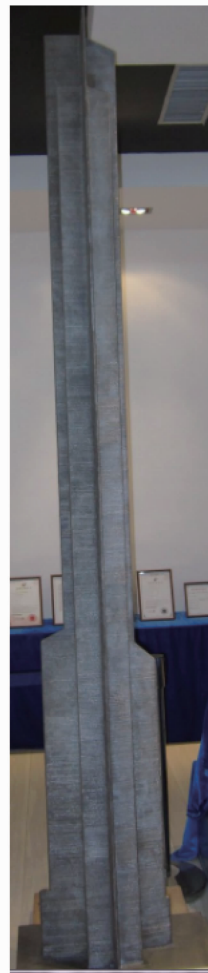


图 6 激光立体成形椽条零件

Fig. 6 Chord part manufactured by laser solid forming

## 5 结 论

以 C919 中央翼上下椽条的激光立体成形扫描路径控制为研究对象,通过构建激光立体成形工艺参数不同配比的样式表达数据库,为椽条扫描路径设定不同的激光立体成形工艺参数样式。通过使用轮廓偏置算法生成矩形包围盒测试区域,结合“命中因子”自动判断下一层中相似路径的扫描线,并为其自动设定样式。根据用户为每个扫描路径设定的样式,自动生成激光立体成形数控作业文件。使用该方法不仅实现了对所有扫描路径的激光立体成形工艺设定,而且多层之间能够自动继承,大大减少了工艺设计人员的操作,并杜绝了加工过程中人为因素对激光立体成形质量的影响,使工艺设计人员、数控操作人员职责明晰,满足适航认证对激光立体成形过程控制的要求。

## 参 考 文 献

- Huang Weidong, Lin Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component [J]. *Materials China*, 2010, **29**(6): 12~27  
黄卫东, 林 鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. *中国材料进展*, 2010, **29**(6): 12~27
- Wang Huaming, Zhang Lingyun, Li An *et al.*. Rapid solidification laser processing and forming of advanced aeronautical metallic materials [J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, **30**(10): 962~967  
王华明, 张凌云, 李 安 等. 金属材料快速凝固激光加工与成形 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2004, **30**(10): 962~967
- Dong Ling, Yang Xichen, Zhang Haiming *et al.*. Path generation for repairing damaged parts of free-form surfaces in laser remanufacturing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(7): 0703007  
董 玲, 杨洗陈, 张海明 等. 自由曲面破损零件激光再制造修复路径生成 [J]. *中国激光*, 2012, **39**(7): 0703007

- 4 Liu Lifeng, Yang Xichen. Path planning of laser remanufacturing robot based on reverse engineering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0703008  
刘立峰, 杨洗陈. 基于逆向工程的激光再制造机器人路径规划 [J]. 中国激光, 2011, **38**(7): 0703008
- 5 Yang Xiaohu, Zhang Anfeng, Li Dichen *et al.*. Influence of process parameters on self-healing ability in laser metal direct forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603023  
杨小虎, 张安峰, 李涤尘 等. 激光金属直接成形工艺参数对形貌自愈合能力的影响 [J]. 中国激光, 2011, **38**(6): 0603023
- 6 Wang Zhijian, Dong Shiyun, Xu Binshi *et al.*. Effect of laser cladding processing parameters on metal forming efficiency and geometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(2): 315~319  
王志坚, 董世运, 徐滨士 等. 激光熔覆工艺参数对金属成形效率和形状的影响 [J]. 红外与激光工程, 2010, **39**(2): 315~319
- 7 Hu Xiaoyun, Shen Yifu, Li Ziquan *et al.*. Process and material considerations in laser rapid manufacturing of metal parts [J]. *Materials Science & Technology*, 2008, **16**(3): 378~383  
胡孝昀, 沈以赴, 李子全 等. 金属粉末激光快速成形的工艺及材料成形性 [J]. 材料科学与工艺, 2008, **16**(3): 378~383
- 8 Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Influence of processing parameter on the microstructure and forming characterizations of Ti-6Al-4V titanium alloy after laser rapid forming processing [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, **36**(10): 1839~1843  
张霜银, 林鑫, 陈静 等. 工艺参数对激光快速成形 TC4 钛合金组织及成形质量的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2007, **36**(10): 1839~1843