

# 典型薄壁结构件增材制造焊接路径规划优化算法

李天旭, 王天琪, 李亮玉, 杨壮

(天津工业大学, 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津, 300387)

**摘要:** 针对复杂曲面薄壁件的电弧增材制造引入有理 B 样条曲线求取成形轨迹. 首先根据预制件三维模型提取轮廓数据建立轨迹曲线方程, 自动生成成形路径; 然后通过边缘曲线方程计算预制件在  $z$  轴方向上偏移量, 进行高度补偿预测, 提高分层精度, 实现基于高度预测的分层算法优化. 另一方面针对具有相交特征的薄壁件交叉点处焊高过高等问题, 基于相反、相切成形路径思想设计最佳路径, 同时可以尽量减小由于应力集中和热累计产生的误差. 最后通过试验得到不同焊接参数下对应焊缝尺寸, 确定合适的焊接参数范围, 并通过典型复杂薄壁件的成形试验验证优化算法可行性. 结果表明, 电弧增材制造成形路径规划优化算法提高了分层精度, 实现了基于高度预测的分层算法优化, 并且制备的实体件表面成形良好, 成形尺寸误差在可接受范围内, 此算法可以应用在制备薄壁结构件过程中.

**创新点:** (1) 利用有理 B 样条曲线设计优化了基于高度预测的增材制造模型分层算法.

(2) 提高了典型特征薄壁件的成形尺寸精度.

**关键词:** 薄壁结构件; 电弧增材制造; 路径规划; 有理 B 样条曲线; 分层算法

**中图分类号:** TG 455      **文献标识码:** A      **doi:** 10.12073/j.hjxb.20200823002

## 0 序言

增材制造也称快速成形 (rapid prototyping, RP) 技术, 具有生产效率高、加工柔性化良好、成形制件性能较好等优点, 越来越多的被应用在航空航天、船舶、军工等重要零件的生产中<sup>[1-4]</sup>. 增材制造技术与工业机器人技术相结合, 在个性化、预制件规格限制小、具有复杂曲面的零件制造中可以很好的体现该技术的优势<sup>[5-7]</sup>. Ribeiro 等人<sup>[8]</sup> 创建了一种预测焊接参数的数学模型, 利用回归方程分析创建预测算法, 并实现自动确定焊接参数, 简化了增材制造过程中确定焊接参数的大量试验, 但此过程存在误差且具有局限性. Ding 等人<sup>[9]</sup> 创建焊缝预测模型并利用神经网络预测焊缝几何尺寸, 通过自动化路径设计实现整个过程闭环控制, 避免了人为干涉产生误差, 但未对每层复杂曲线轨迹进行研究.

针对具有复杂空间曲线的薄壁件增材制造, 引

入有理 B 样条曲线, 给定型值点进行局部逼近, 并非插值, 包括相邻的曲线段的连续性, 具有更好的收敛性, 可以得到平滑、光顺的空间曲线<sup>[10]</sup>. 首先通过轮廓曲线自动提取生成 IGES 格式文件, 计算复杂曲线的数学模型, 得到建立在  $x$ - $y$  平面上轨迹曲线方程; 并且在基于高度预测分层算法的基础上, 通过计算曲线方程得到的  $z$  轴方向上边缘轮廓曲线, 对高度预测值进行补偿, 提高分层精度, 实现算法优化. 然后针对具有相交特征的薄壁件在成形过程中由于重复焊接导致的交叉点处过高等问题, 基于相切、相反的成形路径思想设计最佳成形路径, 减小误差. 再通过离线编程生成机器人 Rapid 语言程序并进行试验, 通过试验得到不同焊缝形状对应的焊接参数, 得到适合增材制造的参数范围. 最后焊制部分具有说明性的零件对优化算法进行验证.

## 1 算法优化

### 1.1 有理 B 样条曲线拟合

设空间由  $n$  个点数列, 被一组曲线逼近, 有理 B 样条曲线的曲线公式为

收稿日期: 2020-08-23

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (U1733125); 天津市自然科学基金项目 (17JCZDJC38700); 天津市“项目+团队”重点培养专项 (XC202053).

$$p^{i,j}(u) = \frac{\sum_{i=0}^n q_i \cdot d_i \cdot N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n q_i \cdot N_{i,k}(u)} \quad (1)$$

式中:  $p^{i,j}(u)$  表示第  $i$  层中的第  $j$  个轮廓曲线, 参变量为  $u$  的空间点坐标向量, 由于应用在薄壁件中, 因此  $j$  一般取 1;  $d_i$  为控制点, 控制点个数为  $n-1$ ;  $q_i$  为与控制点相关的权值因子, 一般取正实数;  $N_{i,k}(u)$  为调和函数, 又称基函数;  $k$  为拟合次数, 一般为 3, 即为 3 次多项式非周期空间曲线;  $t_i$  为节点值, 递归定义如下<sup>[11]</sup>

$$N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1, & \text{若 } t_i \leq u < t_{i+1} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{(u - t_i)N_{i,k-1}(u)}{t_{i+k-1} - t_i} + \frac{(t_{i+k} - u)N_{i+1,k-1}(u)}{t_{i+k} - t_{i+1}} \quad (3)$$

式中:  $u$  的取值范围为  $0 \leq u \leq n-k+2$ ;  $i$  的范围为  $0 \leq i \leq n-k$ .  $t_i$  的选择规则为

$$t_i = \begin{cases} 0, & \text{当 } i < k \\ i - k + 1, & \text{当 } k \leq i \leq n \\ n - k + 2, & \text{当 } i > n \end{cases} \quad (4)$$

为了求得曲线方程, 根据式 (1) 的定义可知, 要求得节点序列  $t$  即  $u_i$  的集合, 权值因子  $q_i$ , 控制点  $d_i$ . 参变量为  $u$  的基函数  $N_{i,k}(u)$ .

权值因子  $q_i$  一般取 1, 在构建出曲线后, 再通过形状与曲率变化微调. 基函数  $N_{i,k}(u)$  的求解并不需要计算整条 B 样条曲线, 通过递归公式计算某一参变量  $u_i$  处的基函数值即可, 因此需要得知当参变量  $u \in [u_i, u_i + 1)$  时, 对应曲线的插值点. 关于控制点  $d_i$ 、参变量  $u$ 、节点序列  $t$  可以通过离线编程操作进行提取.

## 1.2 补偿预测高度的分层优化算法

对于分层算法来说, 确定每层的层间距离是非常关键的一步, 通过建立焊接成形的截面预测图, 推导出每层的焊缝高度  $h_n$  预测公式, 即

$$h_n = \frac{4h_1^2 + B_1^2}{4h_1} \cos \theta_n \quad (5)$$

式中:  $h_1$  为第一层成形高度;  $B_1$  为第一层成形宽度;  $\theta_n$  为焊枪方向与上一次截面之间形成的焊接角度, 即焊枪方向与上一层轨迹中心到下一层熔敷边缘连线之间的夹角, 可以通过以下公式求得, 即

$$\pi - 2\theta_n + 2\sin \theta_n \cos \theta_n = \theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1 \quad (6)$$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left( \frac{4h_1 B_1}{4h_1^2 + B_1^2} \right) \quad (7)$$

联立式 (6)、式 (7) 并带入式 (5) 便可求得焊缝高度预估值. 由于空间曲面的边缘轮廓曲线曲率是变化的, 计算出的焊缝高度预估值  $h_n$  并不是沿  $z$  轴方向上的实际高度变化值, 而是层高的最大值. 这就导致如果按照此预估值进行分层, 分层的精度不够, 需要对此预估值进行在  $z$  轴方向上的分量补偿. 设在机器人基坐标系下第  $n$  层的某一路径点方向矢量为  $(n_x, n_y, n_z)$ , 与  $z$  轴正方向的夹角为  $\alpha_n$ , 因此真正的层高  $h_n'$  为

$$h_n' = h_n \sin \alpha_n \quad (8)$$

为了降低插补误差, 提高分层精度, 同样使用有理 B 样条曲线进行计算. 设任意曲线上  $p(u)$  的表达式为

$$p^{i,j}(u) = f_1(u)p_i + f_2(u)p_{i+1} + f_3(u)p_{i+2} \quad (9)$$

一阶导数公式为

$$p^{i,j}(u) = f_1'(u)p_i + f_2'(u)p_{i+1} + f_3'(u)p_{i+2} \quad (10)$$

通过对路径点所在的两控制点间的曲线段方程进行求导, 得到曲线段在向量  $(n_x, n_y, n_z)$  方向上的导数方程, 然后将离线编程中提取出的插值点  $u$  带入式 (10), 求出相邻两层的对应路径点间线段的方向矢量, 由此可以得到与  $z$  轴正方向的夹角  $\alpha_n$ , 将  $\alpha_n$  带入式 (8) 中, 便可求得每层层高  $h_n'$ .

## 2 离线编程与轨迹规划

### 2.1 离线编程

离线编程具体流程图如图 1 所示. 以飞机发动机叶片为例, 验证上文中优化算法, 通过离线编程提取曲线数据, 生成焊接成形路径.

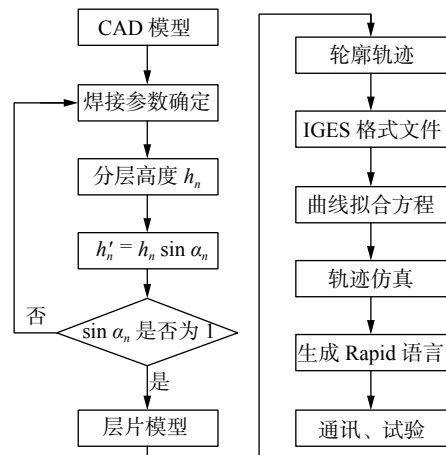


图 1 离线编程流程图

Fig. 1 Offline programming flow chart

图 2 为离线编程流程. 其中图 2a 为叶片分层后的 CAD 模型. 由于叶片模型特殊的几何特征, 每

层的轨迹宽度 (壁厚) 尺寸不同, 因此提取叶片两侧的轨迹, 然后取其中线作为焊接成形轨迹线.

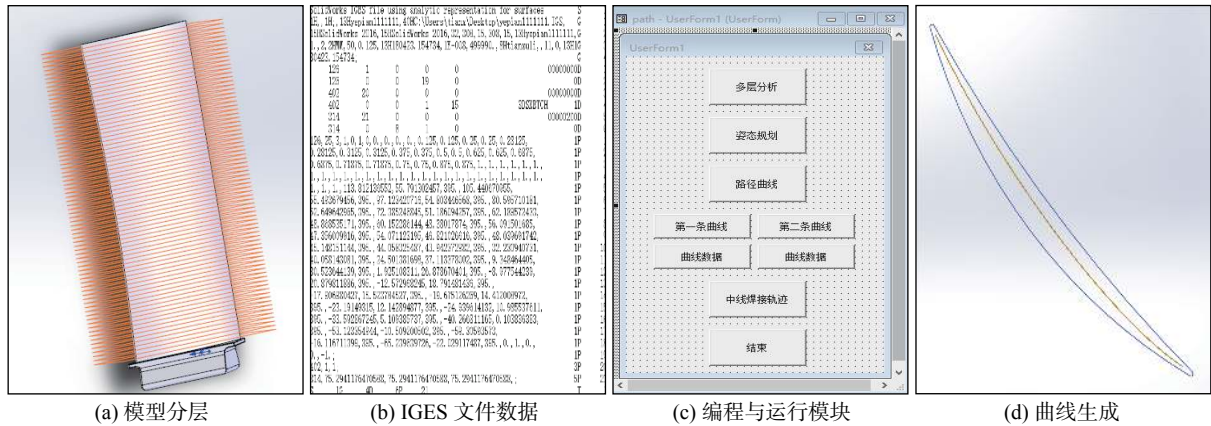


图 2 离线编程

Fig. 2 Offline programming. (a) model layering; (b) IGES file data; (c) programming and running module; (d) curve generation

利用三维绘图软件 SolidWorks 中绘制 3D 曲线的转换实体功能, 提取出薄壁件的轨迹, 另存为 IGES 格式文件. 图 2b 为 IGES 格式文件中的数据内容, 其中从第 12 行开始为数据信息, 第一位数据“126”表示有理 B 样条曲线的实体类型号, 其它数据表示如表 1 所示. 然后利用软件的宏指令, 进行 VBA 编程得到曲线数据, 图 2c 为编程页面与程序运行模块. 在此程序中, 通过读取 IGES 格式文件中的数据信息, 可以将所需数据提取到生成的文件中, 如曲线数据“message”文件、曲线基函数  $N_{i,k}(u)$  数据“Nnm”文件、控制点空间坐标数据

“point”文件. 将数据带入式 (1) 计算出拟合曲线方程与叶片成形轨迹曲线方程, 再利用插入曲线功能读取数据信息, 得到焊接轨迹, 如图 2d 所示. 最后通过 VB 编程生成 ABB 机器人 Rapid 语言, 在离线编程软件 RobotStudio 仿真验证, 与机器人控制柜通讯并下载到机器人示教器, 完成离线编程.

令表中: 段的数目  $N = K - k + 1$ , 参数  $A = N + 2k$ ; PROP 为平面的标志, 表示为如果曲线全部位于一个唯一的平面内则置 1, 否则置 0.

## 2.2 轨迹规划

一些带相交特征的复杂薄壁件的轮廓轨迹并不是单道曲线, 而是存在路径交叉点与转弯点. 如果在成形过程中对交叉点进行重复焊接, 会导致在该点出现重叠的“峰”, 在交叉点处还会出现应力集中现象, 而且由于起弧点高、收弧点低的原因也会造成预制件的尺寸误差. 在转弯处由于转弯速度突变而引起的焊高偏高问题, 影响层间成形质量.

以特征件“田”字框为例进行路径优化. 如图 3 所示, 针对最初的焊接路径 (图 3a), 设计了两种不同的焊接成形路径 (图 3b, 3c), 并进行对比试验分析. 图中点  $S_1$ 、点  $S_2$ 、点  $S_3$  为每层中两条焊接路径的起弧点, 点  $E_1$ 、点  $E_2$ 、点  $E_3$  为收弧点, 点 P 为交叉点. 每相邻的两层路径需要以上层的收弧点作为下一层的起弧点进行误差补偿. 与最初的路径规划相比, 优化后的路径减少一次焊接过程, 这便减少了由于起弧点、收弧点处焊接缺陷造成的误差. 为了避免重复焊接, 采用相切、相反的路径规划方式

表 1 曲线参数数据

Table 1 Curve parameter data

索引(数据顺序)	名称	类型	备注
1			126型曲线实体
2	$K$	整型	总和的上限标志
3	$k$	整型	基函数的阶数
4 ~ 7	PROP	整型	0表示非平面, 1表示平面
8 ~ (8 + A)	$t$	实型	节点序列
(9 + A) ~ (9 + A + K)	$q_i$	实型	权值因子
(10 + A + K) ~ (12 + A + 4K)	$d_i$	实型	控制点
(13 + A + 4K) ~ (14 + A + 4K)	$u$	实型	起始和终止 参变量 $u$
(15 + A + 4K) ~ (17 + A + 4K)	X/Y/Z <sub>NORM</sub>	实型	单位法向



进行优化,可以很好地解决交叉点处焊高过高的问题.并且设计从路径中点切入起弧而不是在端点处起弧,利用特定的转弯半径,可以避免起弧点处过高与转弯处偏高的叠加误差.由于每层的直线路径

方向以及相邻层间的路径方向都是相反的,不但可以减小多次焊接过程中造成的热累计引起的误差,而且可以在单次焊接成形过程中抵消一部分应力,减小应力集中引起的误差.

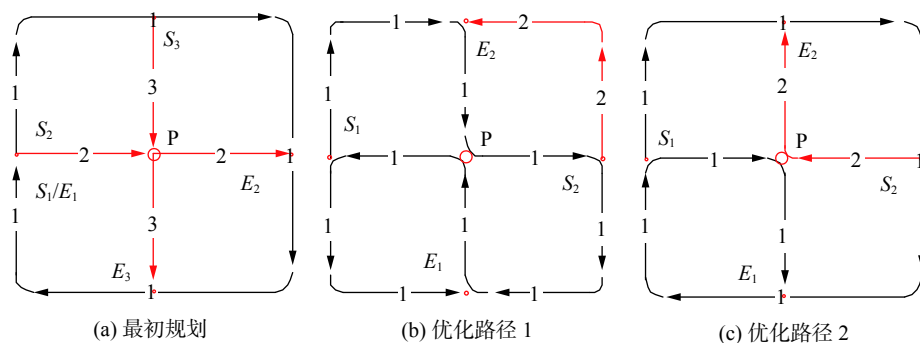


图 3 路径优化图

Fig. 3 Path optimization diagram. (a) initially plan; (b) optimization path 1; (c) optimization path 2

### 3 试验验证

试验系统中硬件设备包括: ABB 公司的 IRB 1410 型工业机器人、Fronius\_TPS4000 CMT 自动化焊机、CO<sub>2</sub> (18%) + Ar (82%) 混合气装置、工作台、夹具等. 焊机采用协同算法自动匹配焊接参数,即仅需调节焊接电流便可在匹配好的专家数据库里调用焊接电压、送丝速度;另外通过工业机器人的离线编程创建数据类型为 welddata 调节焊接速度, seamdata 调节保护气体的预充气时间、吹气时间、收弧时的回烧量等焊接参数. 控制不同的焊接速度与焊接电流进行焊缝尺寸探索试验. 为了更好说明焊缝形状,引入宽高比系数  $\lambda$ , 得到数据如图 4 所示.

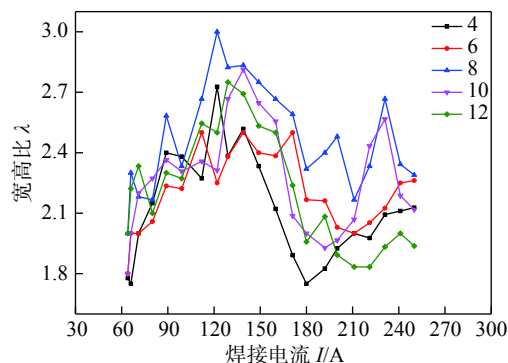


图 4 焊接参数与焊缝尺寸对应图

Fig. 4 Corresponding drawing of welding parameters and weld size

通过图 4 可以看出 5 条不同颜色的曲线代表不同的焊接速度,分别为 4 ~ 12 mm/s. 在电流由

60 ~ 250 A 不断变化的过程中,宽高比系数  $\lambda$  先呈上升趋势,在 150 A 左右开始下降,到 210 A 以后又开始上升. 通过上述的尺寸预测,得到较好焊缝的宽高比为 2.5 ~ 3,虽然电流大于 200 A 同样可以满足要求,但是由于电流过大,导致热输入过高,造成的热累计也会变高,会对成形产生较大影响,因此选择焊接电流为 100 ~ 150 A、焊接速度为 6 ~ 10 mm/s,适合 CMT 焊接增材制造的焊接参数. 通过预制件尺寸,选取合适的焊接参数进行算法优化的验证试验,如图 5、图 6 所示. 其中成形实体未经任何打磨处理.

图 5 为验证路径优化对比试验图,成形“田”字格 18 层的预测高度为 26 mm,壁厚 4.5 mm,宽高比较大,选择焊接参数  $I = 129$  A,焊接速度  $v = 8$  mm/s. 图 5a 为路径优化前成形 8 层后的成形图. 可以看出只成形 8 层便出现较大缺陷:图中圈出位置的焊高过高,造成零件尺寸的不精确,且影响下一层成形. 图 5b 为优化路径 1 成形图,由于路径转弯点过多,转弯点处焊高过高导致成形表面凹凸不平,成形最高处 24 mm,最低处 22 mm. 图 5c 为优化路径 2 成形图,高度 25.6 mm,可以看出成形表面良好,转弯处与交叉点处焊高正常,尺寸误差在允许范围内. 通过对比试验可以得出:路径 2 的误差在允许的范围,且成形良好,因此在存在交叉点的路径规划时,可以采用相切相反路径,且转弯点尽量少,保证一定的转弯半径,避免在转弯过程中由于速度的突变而导致转弯处焊高过高问题.

图 6 为实体成形图. 其中图 6a 为叶片实体成

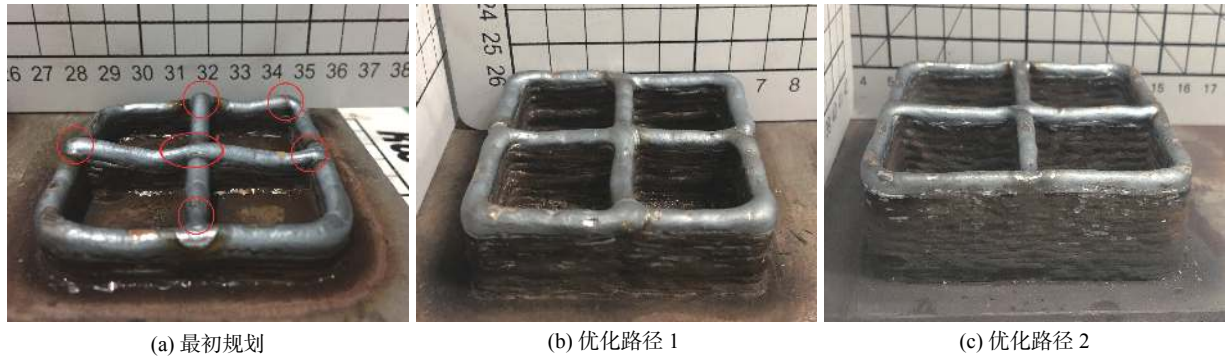


图 5 路径优化的成形效果

Fig. 5 Forming effect of path optimization. (a) initially plan; (b) optimization path 1; (c) optimization path 2

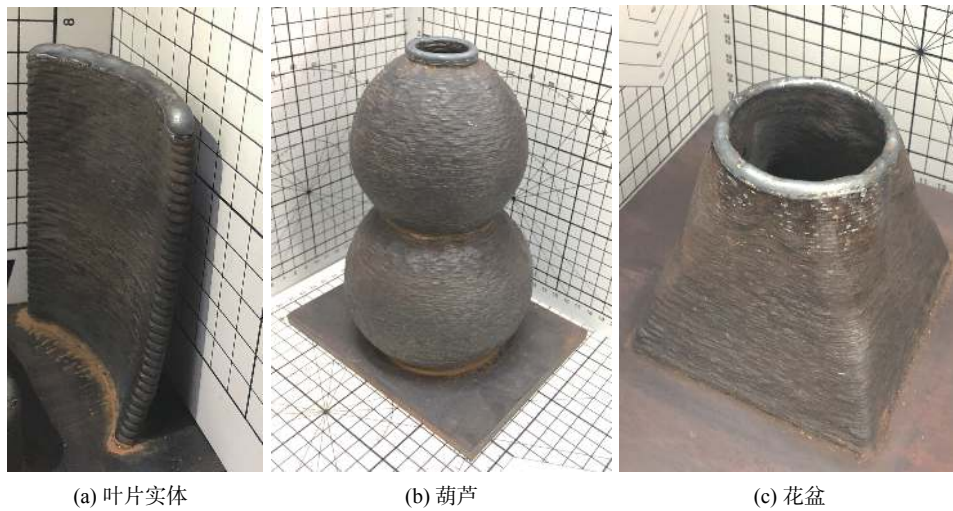


图 6 实体成形图

Fig. 6 Solid forming diagram. (a) leaf; (b) gourd; (c) flowerpot

形图, 通过离线编程计算得到共分 74 层, 预测高度 100 mm, 壁厚 3.5 mm; 利用轨迹提取与路径规划, 最后通过机器人离线编程进行试验验证, 焊接参数选择焊接电流  $I = 119$  A, 焊接速度  $v = 8$  mm/s. 成形实体的实际尺寸 100.4 mm, 试验结果显示: 误差小于 1 mm 且成形轨迹准确, 表面质量良好, 验证上述优化算法的正确性及准确性. 最后焊制了两个典型的变截面工件: “葫芦”、“花盆”, 如图 6b, 6c 所示. 葫芦共规划成形 168 层, 预测高度 200 mm, 壁厚 4 mm, 最大半径 60 mm, 最小半径 15 mm; 试验焊接电流  $I = 119$  A, 焊接速度  $v = 10$  mm/s, 共耗时 7 h, 高度 199 mm, 最大半径 60.5 mm, 最小半径 15.5 mm. 花盆预测尺寸: 共成形 66 层, 高度 80 mm, 壁厚 4 mm, 第一层为边长为 100 mm 的长方形, 第 66 层为半径为 30 mm 的圆形; 试验焊接电流  $I = 119$  A, 焊接速度  $v = 10$  mm/s, 共耗时 3 h, 高度 80.5 mm, 第一层长方形边长为 100.5 mm, 第 66 层圆形半径为 29 mm. 结果显示: 实体件表面成形良

好, 尺寸误差在允许范围内, 由此证明了优化算法的可行性.

## 4 结论

(1) 针对复杂曲面薄壁件引入了有理 B 样条曲线, 以叶片为例设计了一套复杂轨迹自动提取的优化算法, 根据预制件三维模型提取轮廓数据求得了叶片中心线轨迹曲线方程; 通过边缘曲线方程计算出预制件在  $z$  轴方向上偏移量, 提高了分层精度, 实现了基于高度预测的分层算法优化.

(2) 基于相反、相切的成形路径思想设计了最佳焊接成形路径, 解决了带相交特征的薄壁件在成形过程中重复焊接所导致的交叉点过高等问题, 减小了由于应力集中和热累计的影响而产生的成形尺寸误差. 最后通过试验得到了焊接参数与焊缝尺寸对应关系, 便于参数匹配; 验证了上述优化算法正确性及准确性, 并焊制了典型复杂薄壁件加以说明.

## 参考文献

- [1] 柏久阳, 王计辉, 林三宝, 等. 铝合金电弧增材制造焊道宽度尺寸预测 [J]. 焊接学报, 2015, 36(9): 87 – 90.  
Bai Jiuyang, Wang Jihui, Lin Sanbao, *et al.* Width prediction of aluminium alloy weld additively manufactured by TIG arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(9): 87 – 90.
- [2] Panchagnula J S, Simhambhatla S. Manufacture of complex thin-walled metallic objects using weld-deposition based additive manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 49: 194 – 203.
- [3] Sun Qingjie, Sang Haibo, Liu Yibo, *et al.* Cross section scan trace planning based on arc additive manufacturing[J]. China Welding, 2019, 28(4): 16 – 21.
- [4] Geng H, Li J, Xiong J, *et al.* Optimization of wire feed for GTAW based additive manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243: 40 – 47.
- [5] 杨建华, 张定华, 吴宝海. 考虑加工过程的复杂薄壁件加工综合误差补偿方法 [J]. 航空学报, 2014, 35(11): 3174 – 3181.  
Yang Jianhua, Zhang Dinghua, Wu Baohai. A comprehensive error compensation approach considering machining process for complex thin-wall parts machining[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(11): 3174 – 3181.
- [6] 王美茜. 义齿 3D 打印技术中分层算法与刀具路径生成策略的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.  
Wang Meiqian. Study of hierarchical algorithm and path generation strategy in 3D printing technology of denture model[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [7] 王天琪, 李天旭, 李亮玉, 等. 复杂结构薄壁件电弧增材制造离线编程技术 [J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 42 – 47.  
Wang Tianqi, Li Tianxu, Li Liangyu, *et al.* Welding path planning optimization algorithm for additive manufacturing of typical thin-walled structural parts[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(5): 42 – 47.
- [8] Ribeiro F, Ogunbiyi B, Norrish J. Mathematical model of welding parameters for rapid prototyping using robot welding[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2014, 2(5): 185 – 190.
- [9] Ding D, Shen C, Pan Z, *et al.* Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part[J]. Computer-Aided Design, 2016, 73: 66 – 75.
- [10] 刘晓健, 张树有, 魏栋, 等. 复杂曲面加工中等距双 NURBS 刀具路径高效插补方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(6): 1286 – 1295.  
Liu Xiaojian, Zhang Shuyou, Wei Dong, *et al.* Isometric dual-nurbs high quality interpolation algorithm for complex surface processing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(6): 1286 – 1295.
- [11] 孙海洋. NURBS 曲线刀具路径实时插补技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.  
Sun Haiyang. Research on real-time algorithms of NURBS tool-paths interpolation[D]. Changsha: National University of Defense Science and technology, 2008.

第一作者: 李天旭, 硕士; 主要从事电弧增材制造方面研究;  
Email: tianxuli01@163.com.

通信作者: 王天琪, 博士, 讲师; Email: wtq0622@163.com.

(编辑: 郑红)