

DOI: 10.3969/j. issn. 1001-3881. 2024. 03. 003

文献引用: 王朝琴, 石玟, 王小荣. 基于双 NURBS 曲线的叶轮叶片工业机器人 GMAW 增材制造[J]. 机床与液压, 2024, 52(3): 17-21.

Cite as: WANG Zhaoqin, SHI Yu, WANG Xiaorong. GMAW additive manufacturing of industrial robot for impeller blade based on double NURBS curves[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(3): 17-21.

## 基于双 NURBS 曲线的叶轮叶片工业机器人 GMAW 增材制造

王朝琴<sup>1,2</sup>, 石玟<sup>1</sup>, 王小荣<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃兰州 730050;  
2. 兰州交通大学机电工程学院, 甘肃兰州 730070)

**摘要:** 以双 NURBS 曲线获得的直纹面广泛存在于各行业复杂零件中, 如何实现复杂直纹面的增材制造一直是增材制造领域中极为关心的问题。以双 NURBS 曲线描述叶片模型, 进一步获得直纹面, 采用优化工艺参数, 以 GMAW 方法实现了叶轮叶片的增材制造, 增材获得的叶片完整, 成形良好, 表明以 GMAW 工艺实现双 NURBS 曲线叶片增材制造是可行的。为叶片模型构建、复杂形状叶片的电弧增材制造提供了新方法, 对复杂形状零件增材制造过程控制具有借鉴意义。

**关键词:** NURBS 模型; 双 NURBS 曲线; 直纹面; GMAW

**中图分类号:** TH164

### GMAW Additive Manufacturing of Industrial Robot for Impeller Blade Based on Double NURBS Curves

WANG Zhaoqin<sup>1,2</sup>, SHI Yu<sup>1</sup>, WANG Xiaorong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-Ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China; 2. School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China)

**Abstract:** Ruled surfaces obtained from dual NURBS curves are widely used in complex parts in various industries. How to realize additive manufacturing of complex ruled surfaces has always been a problem of great concern in the additive manufacturing field. The blade model was described by dual NURBS curves, and the ruled surface was further obtained. By optimizing the process parameters, the additive manufacturing of impeller blades was realized by GMAW method. The blades obtained by additive manufacturing are complete and well formed, which shows that it is feasible to realize the additive manufacturing of dual NURBS curve blades by GMAW process. This study provides a new method for blade model construction and GMAW additive manufacturing of complex shape blades, and has reference significance for additive manufacturing process control of complex shape parts.

**Keywords:** NURBS model; dual NURBS curves; ruled surface; GMAW

## 0 前言

增材制造是采用材料逐渐累加而实现实体零件制造的技术, 是基于离散-堆积原理, 由零件三维数据驱动直接制造零件的科学技术体系。常见金属增材制造技术包括激光增材<sup>[1-3]</sup>、热/冷喷涂增材<sup>[4-5]</sup>、电子束增材<sup>[6-7]</sup>和搅拌摩擦增材<sup>[8]</sup>等。然而, 电弧增材制造以其成本低、效率高、灵活易实施、原材料利用率

高、成形件化学成分均匀且具有优良的性能, 在核工业、生物医学工程、轨道交通、能源建设、微纳制造等领域应用前景广阔<sup>[9-12]</sup>。

复杂曲面零件的增材制造, 必然涉及到数字建模, 如何表达曲面并实现其加工是 CAGD、CAD 和 CAM 领域中的关键技术, 在航空航天、核工业和高铁等高新技术行业中具有重要意义。非均匀有理 B 样

收稿日期: 2022-11-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52075235); 甘肃省科技计划项目(2022JR5RA314; 22YF7WA151; 22YF7GA138; 21YF5GA048; 23CXGA0151); 甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2022CYZC-31); 甘肃省科协创新驱动助力工程项目(GXH20230817-10)

作者简介: 王朝琴(1980—), 女, 博士研究生, 副教授, 研究方向为表面工程技术和数字智造技术。E-mail: wzqpapers@126.com。

通信作者: 石玟(1973—), 男, 博士, 教授, 研究方向为焊接过程自动控制及高效焊接。E-mail: shiyu@lut.edu.cn。

条 (Non-Uniform Rational B-Spline, NURBS) 模型, 是当今主流 CAD/CAM 软件描述复杂曲线曲面时所普遍采用的模型<sup>[13]</sup>, 已成为 ISO 国际标准。

双 NURBS 曲线是为了解决五轴数控铣削刀轴控制提出的<sup>[14]</sup>, 它可以定义一个直纹面, 而直纹面是工业中大量存在的一种特征类型。目前, 有关双 NURBS 曲线的研究几乎都集中在数控加工领域<sup>[15-16]</sup>, 对其在增材制造领域中的应用鲜有提及。本文作者以双 NURBS 曲线完成叶片建模, 并探索以 GMAW 实现双 NURBS 曲线直纹面增材制造方法, 为电弧增材制造工艺过程控制探索新方法。

## 1 NURBS 曲线和双 NURBS 曲线模型

### 1.1 NURBS 曲线模型

一条  $p$  次 NURBS 曲线<sup>[6]</sup>可以表示为

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i} \quad (a \leq u \leq b) \quad (1)$$

其中:  $P_i$  为控制顶点, 顺序连接成控制多边形;  $w_i$  为权重。

$U$  为节点向量, 且

$$U = \left\{ \underbrace{a, \dots, a}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, \underbrace{b, \dots, b}_{p+1} \right\} \quad (m = n + p + 1) \quad (2)$$

$N_{i,p}(u)$  为  $p$  次规范 B 样条基函数, 且

$$\begin{cases} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{for } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \\ \text{定义: } \frac{0}{0} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$N_{i,p}(u)$  可以变换为有理基函数  $R_{i,p}(u)$ :

$$R_{i,p}(u) = \frac{N_{i,p}(u) w_i}{\sum_{j=0}^n N_{j,p}(u) w_j} \quad (0 \leq u \leq 1) \quad (4)$$

则式 (1) 可表示为

$$C(u) = \sum_{i=0}^n R_{i,p}(u) P_i \quad (0 \leq u \leq 1) \quad (5)$$

### 1.2 NURBS 曲面模型

一张在  $u$  向和  $v$  向分别为  $k$  次和  $l$  次的 NURBS 曲面可以表示为

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) W_{i,j} R_{i,j}}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) W_{i,j}} \quad (0 \leq u, v \leq 1) \quad (6)$$

其中:  $R_{i,j}$  为控制点, 呈拓扑矩阵阵列, 形成一个控制网格;  $W_{i,j}$  是与控制点  $P_{i,j}$  对应的权重;  $N_{i,k}(u)$  ( $i = 0, 1, \dots, m$ ) 和  $N_{j,l}(v)$  ( $j = 0, 1, \dots, n$ ) 分别为  $u$  向  $k$  次和  $v$  向  $l$  次规范 B 样条基函数, 它们分别有  $u$  向与  $v$  向的节点矢量:

$$U = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{k+1}, u_{k+1}, \dots, u_{r-k-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{k+1} \right\} \quad (r = m + k + 1) \quad (7)$$

$$V = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{l+1}, u_{l+1}, \dots, u_{s-l-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{l+1} \right\} \quad (s = n + l + 1) \quad (8)$$

按德布尔递推公式决定。

### 1.3 双 NURBS 曲线模型及其直纹面

顺序直线段连接两条 NURBS 曲线, 可以获得一个直纹面 (如图 1 所示), 可表示为

$$S(u, v) = (1 - v) C_1(u) + v C_2(u)$$

$$v, u \in [0, 1] \quad (9)$$

其中:  $C_1(u)$  和  $C_2(u)$  为基线, 连接双曲线对应点的直线为母线。

为使母线上的两个点彼此保持同步, 两条 NURBS 曲线被赋予相同的参数  $u$ , 两条 NURBS 曲线  $C_1(u)$  和  $C_2(u)$  表示为

$$\begin{cases} C_1(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i} \\ C_2(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i Q_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i} \end{cases} \quad u \in [0, 1] \quad (10)$$

式 (10) 所示的双 NURBS 曲线构成了式 (9) 的直纹面, 将式 (10) 对应参数代入式 (6) 则可以计算出该直纹面。

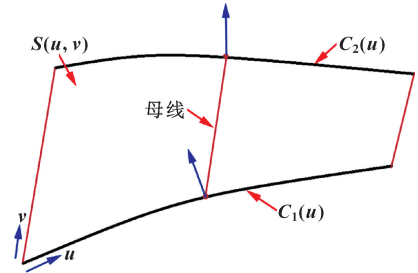


图 1 包含双 NURBS 曲线的直纹面

Fig. 1 Ruled faces with dual NURBS curves

由双 NURBS 曲线创建的 NURBS 直纹面  $S(u, v)$  如图 2 所示, 其中  $v$  向只有 2 个点, 对于叶片类直纹面的增材制造,  $v$  向也是一个决定增材高度的变量。

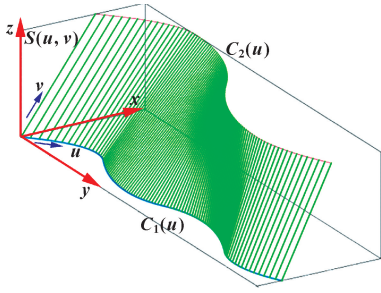


图2 一个包含双NURBS曲线的直纹面

Fig. 2 A ruled surface containing dual NURBS curves

## 2 双NURBS曲线插补

双NURBS曲线的插补，首先以某种插补方法对其中一条NURBS曲线 $C_1(u)$ 进行插补，获得该NURBS曲线插补点，然后以 $C_1(u)$ 插补点对应的 $u$ 值，计算另一条曲线 $C_2(u)$ 插补点，从而完成双NURBS曲线的插补，如图3所示。

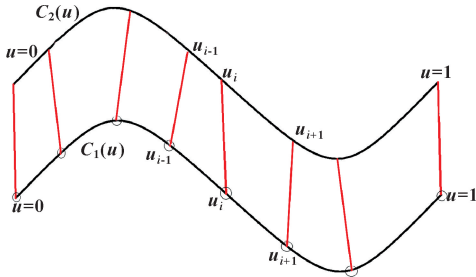


图3 双NURBS曲线插补

Fig. 3 Dual NURBS curves interpolation

常用的NURBS插补方法有4种，包括：等步长插补、等弦长插补、等弧长插补和等弓高插补<sup>[17-18]</sup>。

(1) 等步长插补： $u_{i+1} = u_i + \Delta$  ( $\Delta$ 为固定步长)。等步长插补获得的插补点，无法实现插补点沿NURBS曲线的均匀分布，一般而言在NURBS曲线曲率大的部分分布密集而在曲率小的部分分布稀疏，且这种插补方法无法获得对NURBS曲线逼近精度的控制。

(2) 等弦长插补：NURBS曲线相邻插补点间弦长需满足： $|l_i - l| \leq e$  ( $l$ 为指定弦长， $l_i$ 为当前点弦长， $e$ 为误差)。等弦长插补能使插补点沿着NURBS曲线均匀分布，但同样不能保证逼近直线段对NURBS曲线的逼近精度，且在大曲率段处逼近精度偏差极大。

(3) 等弧长插补：假设 $u_i = a + k\Delta$  ( $\Delta > 0$ ) 是参数轴上的一个等距划分（即固定步长），而 $C_i = C(u_i)$ 是对应于参数轴 $u_i$ 的点列，则其总弦长为： $l = \sum_i l_i = \sum_i |\Delta C_i| = \sum_i \left| \frac{\Delta C_i}{\Delta u} \right| \Delta u$ ，其中 $l_i = |\Delta C_i| = |C(u_i) - C(u_{i-1})|$ ，当 $\Delta \rightarrow 0$ 时，弦长 $l$ 收敛于弧长 $s$ ，而 $\Delta C_i / \Delta u$ 收敛于切向量。等弧长插补是等弦长插补的升级版，在保留了插补点沿NURBS曲线均匀

分布的同时，在大曲率段处直线段逼近精度好于等弦长插补。

(4) 等弓高插补：等弓高插补是控制逼近直线段与NURBS曲线之间偏差实施的插补，其插补点分布具有与等步长相同的疏密特性，但可以保证逼近直线段与NURBS曲线之间的偏差在规定精度范围内，适宜于对精度要求很高的场合。

上述4种插补方法，可以根据情况选择，其计算强度依次沿：等步长插补→等弦长插补→等弧长插补→等弓高插补的顺序升高。本文作者针对双NURBS曲线的插补，考虑到计算强度和应用场合，采用等弧长插补方式完成。指定弧长取 $s=0.5$ ，搜索步长 $\Delta=0.05$ ，误差 $e=0.05$ 。

## 3 双NURBS曲线叶轮叶片GMAW增材制造

### 3.1 单叶片双NURBS曲线模型

以双NURBS曲线构建如图4所示直纹面，并以此直纹面构建一个GMAW增材制造叶轮叶片模型。

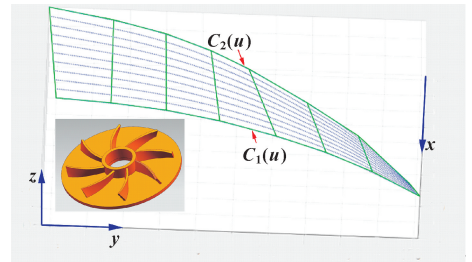


图4 双NURBS曲线及其构建的叶轮叶片模型

Fig. 4 Dual NURBS curve and its impeller blade model

双NURBS曲线中参数如下：

$$P = \begin{Bmatrix} [-0.126 & 50.000 & 0] \\ [0.803 & 65.151 & 0] \\ [2.489 & 80.456 & 0] \\ [5.211 & 95.227 & 0] \\ [9.386 & 110.956 & 0] \\ [13.968 & 124.827 & 0] \\ [19.545 & 137.849 & 0] \\ [26.768 & 151.195 & 0] \end{Bmatrix}$$

$$Q = \begin{Bmatrix} [-11.475 & 47.675 & 30] \\ [-8.209 & 65.515 & 30] \\ [-4.442 & 80.011 & 30] \\ [0.397 & 92.653 & 30] \\ [5.740 & 103.275 & 30] \\ [15.747 & 119.700 & 30] \\ [25.651 & 134.215 & 30] \\ [40.170 & 148.974 & 30] \end{Bmatrix}$$

$$U = [0, 0, 0, 1/6, 2/6, 3/6, 4/6, 5/6, 1, 1, 1]$$

$$w = [11; 11; 11; 11; 11; 11; 11; 11]$$

$$p=2$$

此双曲线对应的直纹面 $S(u, v)$ 几个参数取值： $k=2$ ， $l=1$ ， $\{W_{i,j}\} = 1$ 。

### 3.2 多叶片坐标变换

如图4所示，叶轮包含8片叶片，叶片间夹角为 $45^\circ$ ，当确定好 $0^\circ$ 叶片双NURBS曲线参数后，其余7个叶片控制点按照绕 $z$ 轴的齐次变换计算：

$$R(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

当  $\theta = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$  和  $315^\circ$  时, 可以计算出其余 7 个叶片双 NURBS 曲线对应控制点。

### 3.3 双 NURBS 曲线叶轮叶片 GMAW 增材制造

采用如图 5 所示工业机器人 GMAW 增材制造系统开展双 NURBS 曲线叶轮叶片增材制造研究, 该系统包括一台 Motoman UP6 工业机器人和一台 Pulse MIG500RP 弧焊电源。

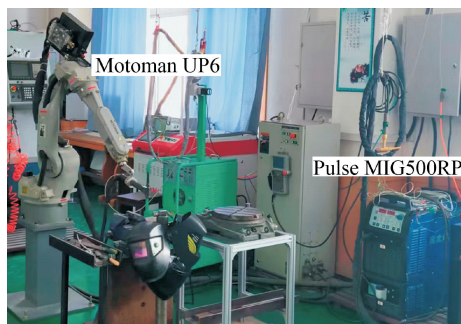


图 5 GMAW 增材制造系统

Fig. 5 GMAW additive manufacturing system

叶轮叶片增材制造是在 45 钢圆盘上实施, 焊丝材料为碳钢焊丝 ER50-6, 保护气体为 1 : 5 的  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2$  混合气体。焊接电流和焊接速度是影响增材成形的两个关键参数, 焊接电流太大或焊接速度太小, 则熔池不能稳定存在发生塌陷导致增材过程中断, 焊接电流太小或焊接速度太大, 则焊缝成形不良出现严重高低起伏现象也会导致增材过程中断。经过参数匹配试验验证后, 文中焊接电流取 90 A, 各层焊接速度根据曲率变化在 4~6 mm/s 之间 (机器人预设)。每增材一层后, 测量增材高度, 最终增材高度-层数变化曲线如图 6 所示, 高度随层数很好地遵循了线性规律, 但图 7 显示, 每层层高差的变化是起伏波动的, 除第一层从基体上获得 2.3 mm 层高外, 后续层高差波动范围在 1.06~1.96 mm 之间。

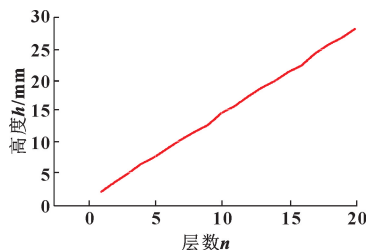


图 6 增材高度-层数对应关系

Fig. 6 The relationship between additive manufacturing height and layer number

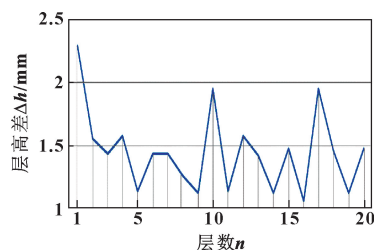


图 7 增材层高差-层数对应关系

Fig. 7 The relationship between height difference of additive manufacturing layer and layer number

图 8 为双 NURBS 曲线叶轮叶片 GMAW 增材制造效果图, 8 片双 NURBS 曲线叶片增材完整, 成型良好。

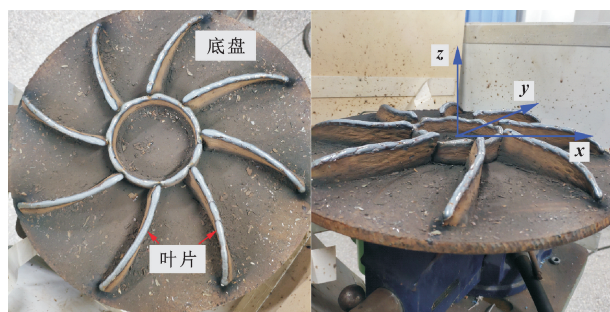


图 8 双 NURBS 曲线叶轮叶片 GMAW 增材制造效果

Fig. 8 GMAW additive manufacturing effect of the dual NURBS curves impeller blade

## 4 结论

本文作者提出以双 NURBS 曲线描述叶片模型, 并以 GMAW 实现叶轮叶片的增材制造。试验结果表明, 在合适工艺参数下, 增材制造的叶片完整, 成型良好, 表明以 GMAW 工艺实现双 NURBS 曲线叶片的增材制造是可行的。此研究为叶片模型构建、复杂形状叶片 GMAW 增材制造提供了新的控制方法, 对促进我国电弧增材制造和叶片增材算法的进步具有积极意义。

## 参考文献

- [1] 倪江涛, 周庆军, 衣凤, 等. 激光增材制造技术发展及在航天领域的应用进展[J]. 稀有金属, 2022, 46(10): 1365-1382.  
NI J T, ZHOU Q J, YI F, et al. Development of laser additive manufacturing technology and its application progress in aerospace field [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46(10): 1365-1382.
- [2] 李时春, 莫彬, 肖罡, 等. 激光增材制造成形质量表征与调控研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(10): 141-149.  
LI S C, MO B, XIAO G, et al. Research progress of forming quality and its characterization and regulation in laser additive manufacturing [J]. Materials Reports, 2022, 36(10): 141-149.
- [3] 杨浩, 李尧, 郝建民. 激光增材制造 Inconel 718 高温合金



- 的研究进展[J].材料导报,2022,36(6):129-138.
- YANG H, LI Y, HAO J M. Research progress of laser additively manufactured Inconel 718 superalloy [J]. Materials Reports, 2022, 36(6): 129-138.
- [4] 王荣城, 王文宇, 殷凤仕, 等. 铜及其合金表面涂层技术与增材制造技术研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(19): 19142-19152.
- WANG R C, WANG W Y, YIN F S, et al. Research progress of copper and its alloys surface coating technology and additive manufacturing technology [J]. Materials Reports, 2021, 35(19): 19142-19152.
- [5] 陈永雄, 罗政刚, 梁秀兵, 等. 热喷涂技术的装备应用现状及发展前景[J]. 中国表面工程, 2021, 34(4): 12-18.
- CHEN Y X, LUO Z G, LIANG X B, et al. Development status and prospect on equipment application of thermal spray technology [J]. China Surface Engineering, 2021, 34(4): 12-18.
- [6] 方星晨, 李忠文, 于治水. 电子束增材制造 TC4 合金制备熔道特征的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(3): 1011-1016.
- FANG X C, LI Z W, YU Z S. Study on characteristics of TC4 alloy single track prepared by electron beam melting [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(3): 1011-1016.
- [7] 杨广宇, 汤慧萍, 王建, 等. 粉床型电子束 3D 打印纯钨及 W-Nb 合金的显微组织及开裂机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(12): 4342-4347.
- YANG G Y, TANG H P, WANG J, et al. Microstructure and cracking mechanism of pure tungsten and W-Nb alloys fabricated by selective electron beam melting [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(12): 4342-4347.
- [8] 温琦, 刘景麟, 孟祥晨, 等. 搅拌摩擦增材制造关键技术与装备发展[J]. 焊接学报, 2022, 43(6): 1-10.
- WEN Q, LIU J L, MENG X C, et al. Development in key technique and equipment of friction stir additive manufacturing [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(6): 1-10.
- [9] 石玕, 朱珍文, 张刚, 等. 金属电弧增材成形控制关键技术及研究现状[J]. 材料导报, 2022, 36(12): 135-142.
- SHI Y, ZHU Z W, ZHANG G, et al. Key technology and status of metal arc additive morphology control [J]. Materials Reports, 2022, 36(12): 135-142.
- [10] 韩启飞, 符瑞, 胡锦涛, 等. 电弧熔丝增材制造铝合金研究进展[J]. 材料工程, 2022, 50(4): 62-73.
- HAN Q F, FU R, HU J L, et al. Research progress in wire arc additive manufacturing of aluminum alloys [J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(4): 62-73.
- [11] 何鹏, 柏兴旺, 周祥曼, 等. MIG 电弧增材制造 6061 铝合金的组织与性能[J]. 焊接学报, 2022, 43(2): 50-54.
- HE P, BAI X W, ZHOU X M, et al. Microstructure and properties of 6061 aluminum alloy by MIG wire and arc additive manufacturing [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(2): 50-54.
- [12] 韩庆麟, 李鑫磊, 张广军. 低碳钢/高强钢组合结构双丝双钨极氩弧增材制造[J]. 焊接学报, 2022, 43(2): 88-93.
- HAN Q L, LI X L, ZHANG G J. Fabrication of mild steel/high-strength steel composite structure by double wire twin electrode gas tungsten arc additive manufacturing [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(2): 88-93.
- [13] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条 [M]. 2 版(修订版). 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [14] QIAO Z F, WANG T Y, WANG Y F, et al. Bézier polygons for the linearization of dual NURBS curve in five-axis sculptured surface machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 53(1): 107-117.
- [15] 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 X J, ZHANG S Y, WEI D, et al. Isometric dual-NURBS high quality interpolation algorithm for complex surface processing [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(6): 1286-1295.
- [16] 陈良骥, 王永章, 富宏亚. 五轴联动双 NURBS 曲线的生成与插补方法研究[J]. 机械制造, 2006, 44(1): 67-70.
- CHEN L J, WANG Y Z, FU H Y. Study on generation and interpolation methodology of five-axis coordinated bi-NURBS curve [J]. Machinery, 2006, 44(1): 67-70.
- [17] WANG X R, WANG Z Q, LIN T S, et al. The high-energy micro-arc spark-computer numerical control deposition of planar NURBS curve coatings [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(9): 3325-3335.
- [18] WANG Y S, WANG X R, WANG Z Q, et al. Preparation and microstructure of AlCoCrFeNi high-entropy alloy complex curve coatings [J]. Materials Science and Technology, 2017, 33(5): 559-566.