

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.03.004

三角网格面自动铺丝定角度路径规划算法

王小平, 周宇, 刘付国

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

摘要: 研究三角网格曲面上的路径规划问题, 以局部测地线为补充, 提出了改进的定角度初始路径规划算法。该算法避免了传统参数化求解过程的无解和多解情况, 尤其适用于曲率变化较大的复杂曲面和拼接曲面。采用等距覆盖算法来获得均匀的满铺路径, 并分别提出基于路径样条线末端延伸和芯模曲面整体延拓的两种边界处理思路, 以解决偏移路径无法到达曲面边界的问题。以某机翼模型为算例对上述算法进行验证, 利用计算机辅助三维交互应用 (Computer aided three-dimensional interactive application, CATIA) 的逆向工程模块实现了完整的算法可视化, 建立了三维建模软件与路径规划算法的系统关系。验证表明本文提出的算法可靠、系统、适应性强, 具有工程应用价值。

关键词: 自动铺丝; 路径规划; 三角网格曲面; 定角度法; 测地线

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2020)03-0378-10

Fixed-Angle Method for Automatic Fiber Placement on Triangular Mesh Surface

WANG Xiaoping, ZHOU Yu, LIU Fuguo

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: With local geodesic line as a supplement, this paper proposes an improved fixed-angle initial path planning algorithm on grid surfaces. This algorithm avoids the no-solution and multi-solution situations of the traditional parametric methods, and is especially suitable for complex curved surfaces and spliced surfaces with large curvature changes. After the uniform coverage is obtained by equidistant offsetting algorithm, two boundary processing ideas are presented to solve the problem that the offsetting paths cannot reach the surface boundary. The algorithm is verified on a wing model and the visualization is realized in CATIA's reverse engineering module. The validation shows that the proposed algorithm is reliable, systematic and adaptable, and has engineering application value.

Key words: automatic fiber placement; path planning; triangular meshes; fixed-angle method; geodesic line

先进的复合材料具有质量轻、强度高、耐疲劳和耐腐蚀等优良特点。良好的加工性和可设计性使其成为理想的航空结构材料^[1]。先进复材在高

端飞行器上的用量正在迅速增加, 其应用范围从副支撑结构 (舱口、整流罩和稳定器等) 扩展到主支撑结构 (机翼、机身等)。作为最先进的复材成型技

基金项目: 国家自然科学基金 (51575266) 资助项目。

收稿日期: 2020-03-30; **修订日期:** 2020-06-04

作者简介: 王小平, 男, 教授, 博士生导师, 在国内外重要刊物发表论文 60 余篇, 其中被 SCI 收录 25 篇, EI 收录 30 余篇。获国防科技进步二等奖 2 项, 省部级奖 1 项, 市级奖 1 项。主持完成国家自然科学基金项目 3 项, 参与完成国家自然科学基金 3 项。

通信作者: 王小平, E-mail: levine@nuaa.edu.cn。

引用格式: 王小平, 周宇, 刘付国. 三角网格面自动铺丝定角度路径规划算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 378-387. WANG Xiaoping, ZHOU Yu, LIU Fuguo. Fixed-Angle method for automatic fiber placement on triangular mesh surface[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 378-387.

术,自动纤维铺放(Automatic fiber placement, AFP)具有较高的成型精度和良好的表面适应性。与传统的成型方法相比,AFP可以将废品率降低90%以上,并将制造成本降低30%以上^[2-3]。AFP是大曲率、自由形和复杂曲面零件的主要成型方法,其关键之一是针对不同曲面进行合理而有效的纤维路径规划。为了降低制造成本,避免缺陷并充分利用纤维的可设计性以提高零件性能,纤维路径规划应同时考虑几何信息和承载信息。AFP路径规划的研究主要集中在两个部分:(1)合理有效的初始路径构建。(2)通过对初始路径的平移或平行等操作获取覆盖零件曲面的路径簇。全世界的学者进行了许多探索。

从曲面的几何特征出发,Lewis等^[4]率先提出“自然路径”的概念,解决了曲率大时纤维铺放过程中的丝束皱缩问题。Shinno等^[5]将测地线迭代算法应用于四边形网格表面,并获得了由离散线段组成的初始路径。文献^[6]以零角度路径为例,平滑连接多段样条曲线以生成参考路径。Parnas等^[7]采用双三次Bezier曲面和曲线分别表示芯模曲面和纤维路径,以样条线控制点的坐标为变量,使用序列二次规划来优化铺放路径。Shirinzadeh等^[8]使用给定平面和芯模表面的相交曲线生成开放式自由曲面上的初始参考路径。Waldhart^[9]提出了一种用丝束覆盖芯模面的方法:对于已知的初始中心参考轨迹线,找到垂直于其切线向量的方向,然后偏移一定距离以使轨迹线族均匀覆盖完整的芯模面。上述算法主要适用于参数化曲面或简单网格曲面,求解过程基于微分几何,样条曲线和其他相关知识,很难处理曲率变化剧烈的复杂曲面。

由于CAD/CAM技术和逆向工程技术的发展,离散网格数据越来越多地直接应用于CNC加工。例如,著名的铺丝软件Fibersim具有专为网格曲面开发的路径规划功能。直接针对网格曲面的路径规划算法,国内外见刊的文献不多。比利时学者Bruyneel等^[10]提出了一种改进的基于离散有限元的快速跟踪算法。他计算了每个网格单元的局部纤维方向,继而在网格曲面上构建等距的平行轨迹。该算法仅适用于简单开边的网格曲面,并且不考虑轨迹的测地曲率。因此,预浸料在铺设过程中可能无法很好地与芯模表面贴合。Xu和Sun等^[11]假设可以将芯模曲面展开为平面网格,并在平面网格上规划平行等距路径,然后将其映射到初始网格表面。该方法原理上简单,但是仅适用于可展开曲面、近似可展开曲面或单曲率曲面。当曲率变化很大时,累积误差很大,从而导致纤维之间产生重叠或间隙。

考虑到网格曲面在复杂曲面表示和有限元分析过程中的优势,本文针对以立体光刻(Stero-Li-

thography interface specification, STL)文件表达的三角网格曲面提出了完整的路径规划算法。本文研究内容如流程图1所示。本文使用一种改进的固定角度法在网格曲面上生成初始路径,避免了传统参数法可能遇到的无解和多解问题。讨论了该方法在曲率较大处的失效原因,采用局部测地线法作为补充。此方法通过分析多个空间向量的角度关系预先判断可能的路径点,无需在每个面片中建立局部坐标系,这将减少大量计算。针对基于初始路径获取满铺路径时的边界处理问题,提出通过预先延拓芯模曲面来主动避免出现这种情况,而不是被动地解决该问题。

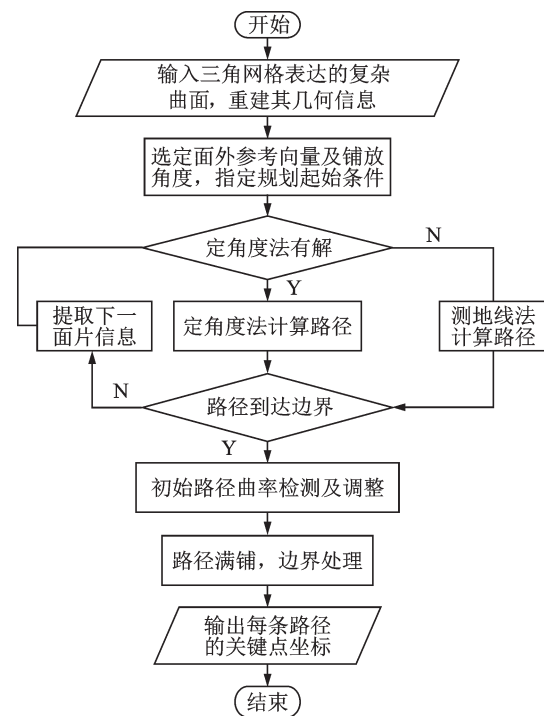


图1 改进的定角度路径规划算法

Fig.1 Modified fixed-angle path planning algorithm

本文的其余部分安排如下:在第1节中,将复杂曲面离散为三角网格曲面并对其进行重建,去除冗余,建立面片间的几何联系。在第2节中,将参数化曲面路径规划中的“定角度”概念引入到三角网格曲面中。分析了算法失效的原因,并引入局部测地线算法作为补充,以生成初始路径。然后根据丝束变形能力检测并调整路径。在第3节中,通过在垂直于初始路径的测地方法上偏移初始路径点来进行均匀覆盖。对于满铺路径不能延伸到曲面外边界的问题。分别提出基于样条线延伸和曲面整体延拓的处理方法。基于上述算法,在第4节中给出了两个模型表面上的算法实例。基于算法获取的路径点数据,在CATIA逆向工程模块中实现了完整的算法可视化验证,从而在三维建模软件与本文提出的路径规划算法之间建立了联系。

1 STL文件重建算法

STL模型是美国3D Systems公司于1987年提出的一种CAD文件格式。STL文件表示的曲面由许多三角形小面片组成。随着面片细分程度的越来越高,网格模型将越来越逼近真实的连续曲面。通过控制每个三角形小面的角度以及小面与曲面之间的最大距离,可以将误差保持在可接受的范围内^[12]。该文件格式简单,易于阅读和显示,并且可以由大多数通用3D建模软件读取和处理。现在,它已广泛用于快速原型制作,图形现实显示,有限元分析和逆向工程。STL文件逐面存储每个三角形面片的3个顶点坐标和法矢向量。它的文件结构简单易懂,但点、线和面之间没有几何联系,因此不能直接用于路径规划中。顶点信息还会被多次存储,从而使文件变得冗余。根据本文路径规划的特点,重建后的STL文件结构应满足以下条件:

(1)无重复地存储顶点坐标并对其编号。

(2)无重复地存储面片并对其编号,包含面内顶点索引值(逆时针)。

(3)无重复地存储边信息并对其编号,包含其从属的面片索引值。

(4)可以识别和区分外部边界和内部孔洞。

基于MATLAB强大的数据处理功能,本文在MATLAB中编程以二进制格式读取STL文件,并消除了重复的点以建立对应关系。由于本文很少使用面片法向量,因此不进行读取和存储,以节省空间并提高计算效率。在后续涉及面片法矢的部分中,可以根据公式 $n = L_{P_1P_2} \times L_{P_2P_3}$ 进行计算,其中 P_1, P_2, P_3 是当前三角形面片逆时针记录的3个顶点的坐标。STL文件重建过程如图2所示。

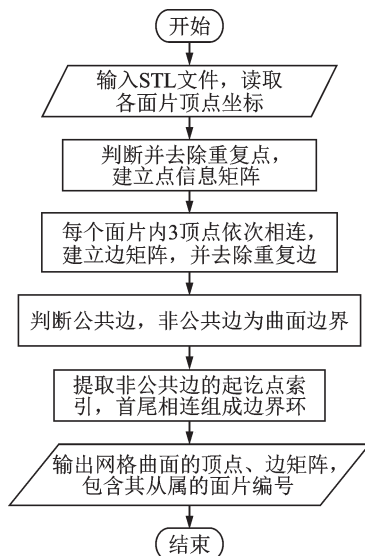


图2 STL文件重建流程

Fig.2 Reconstruction of STL file

2 初始路径生成算法

在实际生产中,定角度法被广泛用于AFP路径规划中。其含义是,在铺放过程中,纤维轨迹与给定的参考方向始终形成一个固定的角度,其中使用较广的角度为 $0^\circ, 90^\circ$ 和 $\pm 45^\circ$ 。参考方向可以是固定矢量或可变曲线,通常选择全局坐标系的坐标轴或较规则芯模的轴线。具有 0° 和 90° 路径的铺层设计为承受拉压载荷,而具有 45° 和 -45° 路径的铺层则用于承受剪切和弯曲载荷。李俊斐等^[13]尝试将传统参数曲面规划中的定角度法引入网格表面,并讨论了参考向量在面内和面外的两种典型情况。但是,他们没有分析该算法的适用范围,也没有提供用于路径满铺的成套算法。另一方面, Lewis等^[4]证明了曲面上测地线和自然路径的等效性, Shinno等^[5]和 Kumar等^[14]分别提出了计算网格曲面上离散测地线的方法。这些方法也可以用于获得网格面上的初始路径或满铺路径。基于以上研究,本节以改进的定角度法为主要算法生成初始路径,分析了该算法在实际操作中的失效原因,辅以局部测地线算法为补充。然后利用算法便于局部调整的优势检测并调整了初始路径,以保证丝束不产生皱缩。

2.1 定角度路径生成算法

网格曲面定角度路径是指在每个面片内,纤维走向与该处的路径参考方向始终保持同一夹角。应力场情况复杂或芯模曲面不规则时,采用可变路径参考方向。通常为简化算法,对一般情况的芯模面选取固定轴线为路径参考方向。其基本原理如图3所示: ABC 与 ACD 为STL格式的曲面上两相邻三角面片, n_1, n_2 分别为两面法矢,向量 V 为整个铺丝过程的参考方向, P_1, P_2 为第一段路径的起讫点, P_2, P_3 为下一段路径的起讫点。两段路径分别与参考方向形成空间角 α, β ,他们均等于算法设定的固定角度 θ 。每段路径的终点为下一段路径的起点,直至最后一段路径到达曲面边界。

通常在参数曲面上,因为曲面是有完整表达式的,所以可用解析法求得定角度路径的解析式。将

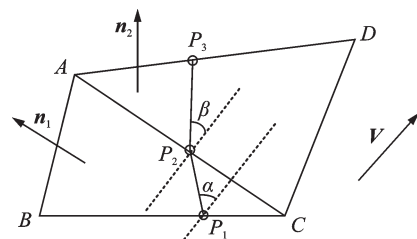


图3 网格曲面定角度法基本原理

Fig.3 Basic principle for fixed-angle method on mesh surface

此概念扩展到三角网格曲面上,问题可概括为:在三角片上,给定某边上的起点 P_s ,求得终点 P_e ,使两点组成的纤维方向与参考方向 V 所成的空间夹角为固定值 θ 。通常的处理方法为:提取该面片的另两条边,分别建立方程,利用异面直线夹角公式(1)计算,其中 V_1 、 V_2 分别指空间两任意矢量。

$$\theta = \arccos \frac{V_1 \cdot V_2}{|V_1| |V_2|} \quad (1)$$

该算法进行纯粹的代数运算,原理及计算过程简单,但无法预先判断可能的路径终点落在三角面片的哪条边上,因而需要遍历该面片除起点所在边外的另外两条边。另外计算结果可能有多解,其可能要处理的情况如图 4 所示,向量 V 为参考方向, P_s 为当前路径起点, θ 为设定的路径与参考方向间的固定角度值, P_e 为式(1)计算的可能解。其中图 4(a)~(c)为两解落在铺放起点下一条边上(逆时针为正,下同),图 4(f)~(h)为两解落在再下一条边上,图 4(d)和(e)为两边各有一解存在。同时因为式(1)无法分辨角度正负值,因而为了保证曲线的连续性,在图 4 的基础上需要结合前一段路径,判断出使线段连接处转角最小的解。

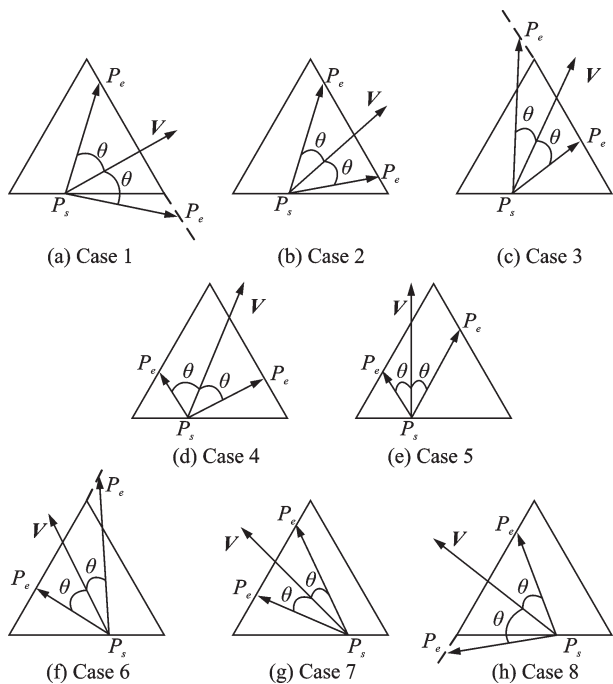


图 4 传统数值解法的多解情况
Fig.4 Multiple situations for analytical calculation

相对于该算法,李俊斐等^[13]等在计算每个面片内的路径时,预先将参考向量向面片投影,在面内计算与参考向量投影线夹角为 θ 的路径,该算法简化了每个面片内的情况,但是一方面投影的过程增加了运算量,且需预先在内存中储存各面片的法向量;另一方面所求路径与原参考向量的夹角并非严

格为 θ ,若参考向量依据受力情况选取,则该算法会影响最终零件的力学性能。本文基于线面空间关系,无需投影参考向量,通过空间位置关系预先判断路径点的位置并求解。其原理如图 5 所示。

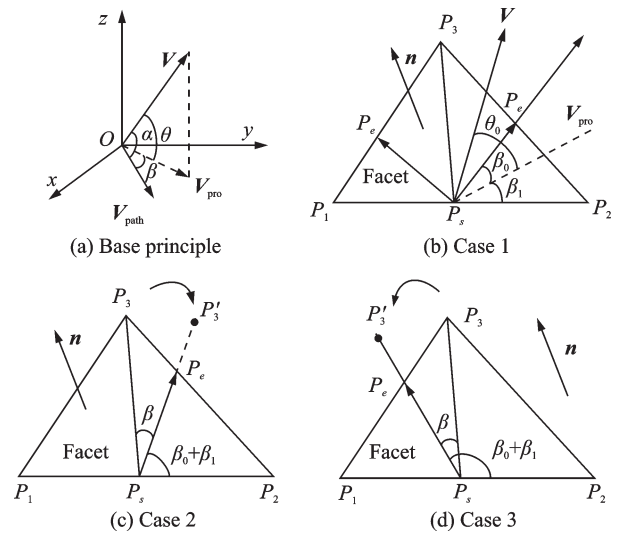


图 5 改进的定角度法求解原理

Fig.5 Process of modified fixed-angle method on triangular patches

如图 5(a)所示的直角坐标系中, V 为任意空间向量, V_{pro} 为其在 xOy 平面的正交投影, V_{path} 是 xOy 平面内的任意向量。 θ 为 V 与 V_{pro} 的夹角, β 为 V_{path} 与 V_{pro} 的夹角, α 为 V 与 V_{path} 的夹角。

$$\text{设 } \begin{cases} V = (a, b, c) \\ V_{pro} = (a, b, 0) \\ V_{path} = (A, B, C) \end{cases} \text{ , 则有}$$

$$\begin{cases} \cos\alpha = \frac{V \cdot V_{path}}{|V| \cdot |V_{path}|} = \frac{aA + bB}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \cdot \sqrt{A^2 + B^2}} \\ \cos\theta = \frac{V \cdot V_{pro}}{|V| \cdot |V_{pro}|} = \frac{a^2 + b^2}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \cdot \sqrt{a^2 + b^2}} \\ \cos\beta = \frac{V_{pro} \cdot V_{path}}{|V_{pro}| \cdot |V_{path}|} = \frac{aA + bB}{\sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sqrt{A^2 + B^2}} \end{cases} \quad (2)$$

从而可得到

$$\cos\alpha = \cos\theta \cdot \cos\beta \quad (3)$$

即某任意空间向量、其在某平面内的投影与该平面内的任意向量间的夹角具有以上关系。将式(3)运用于图 5(b)中, P_s 为铺丝起点, V 是铺丝参考方向,以 $L_{P_1P_2}$ 为分界线,其在面片内的投影可能处于右半部分或左半部分。通过以下几步判断铺丝终点可能的落点。

- (1) 计算 V 与 $L_{P_1P_2}$ 的夹角。
- (2) 计算 V 与其投影的夹角 θ_0 。
- (3) 利用式(3)计算 $L_{P_1P_2}$ 与 V_{pro} 的夹角,记为 β_1 。

(4) 与路径 $L_{P_1P_2}$ 的夹角应为固定角度值 θ , 利用式(3)计算 $L_{P_1P_2}$ 与 V_{pro} 的夹角 β_0 。

(5) 计算 $\beta_0 + \beta_1$ 与 $L_{P_1P_2}$ 、 $L_{P_2P_3}$ 夹角的差值 β , 则能判断出图 5(b) 所示 P_e 两种可能的落点。两种情况分别简化为图 5(c) 和图 5(d) 所示, 路径终点 P_e 的求取通过将线段 $L_{P_2P_3}$ 顺时针或逆时针旋转一定角度后与面片对应边求交得来, 以避免用方程的形式求解未知数带来的多解情况。

(6) 依据步骤 5 的判断分别在 $L_{P_2P_3}$ 或 $L_{P_3P_1}$ 上计算 P_e 坐标值, 并提取当前边所在的下一面片信息, 继续下一轮计算, 直至到达边界。步骤(5)求解路径终点 P_e 的公式为

$$\frac{L_{P_2P_3} \times L_{P_2P_e}}{|L_{P_2P_3} \times L_{P_2P_e}|} = \text{sgn}(\beta) \cdot n \quad (4)$$

$$\frac{L_{P_2P_3} \cdot L_{P_2P_e}}{|L_{P_2P_3} \cdot L_{P_2P_e}|} = \cos(\beta) \quad (5)$$

$$P_e = tP_3 + (1-t) \cdot P_1 \quad (6)$$

其中式(4)用于保证 P_2P_e 落在当前面片平面上且处在步骤(5)判断所在的边上, 式(5)用于保证 $L_{P_2P_e}$ 与 V 的夹角为 θ , 式(6)以图 5(d) 所示情况为例, 若步骤(5)判断情况为图 5(c) 所示, 则式(6)调整为

$$P_e = tP_2 + (1-t) \cdot P_3 \quad (7)$$

值得指出的是当 P_e 落在面片顶点时, 即式(6)或式(7)中的 t 值接近 0 或 1 时, 很难判断下一段路径所在的面片, 故此时规定将 P_e 向该顶点逆时针侧移动至下一条边的 1% 处。

2.2 测地线路径生成算法

表面上的测地线是测地曲率处处为零的空间曲线。对于可展平面, 其上的测地线在展开后为平面上的直线。因为两相邻网格面总是可展的, 对于网格面上的局部测地线可以如图 6 所示定义, 即两段连续路径 $L_{P_1P_2}$ 、 $L_{P_2P_3}$ 与 L_{AC} 形成的夹角 α 、 β 相等。相较于定角度路径算法, 该算法处理的情况较为简单, 预先计算公共边 L_{AC} 与 L_{P_2D} 的夹角, 与 α 比较即可判断 P_3 落在哪条边上。 P_3 落在面片顶点上时处理方法同定角度算法。由图 5(a) 的分析, 在投影平面内的任意向量与参考向量 V 的夹角不小于 V 与

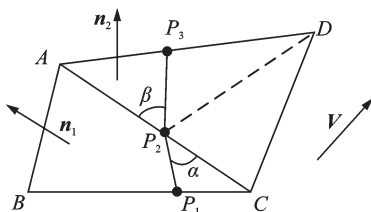


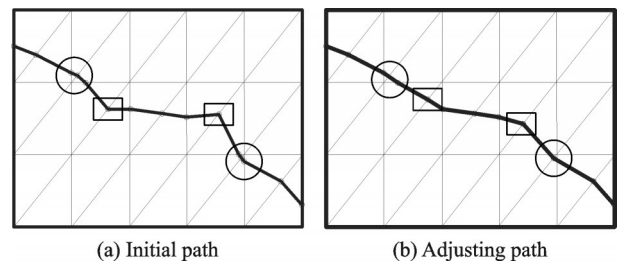
图6 网格曲面局部测地线法

Fig.6 Geodesic method on triangular patches

投影平面的线面夹角。因此采用面外固定参考方向虽然计算效率更高且有利于保证各面片内的受力状况, 但对于曲率波动较大的曲面, 当出现某面片与参考方向间线面角大于设定的铺丝角度 θ , 会导致定角度算法无解。本文针对此情况, 在定角度算法失效的面片处采用测地线算法作为补充, 当面片满足定角度算法条件后, 优先选用定角度法。因而本文的初始路径求取算法主要适用于整体曲率波动较小的曲面, 但是对于局部的曲率波动也有一定的稳定性。

2.3 初始路径曲率检测及调整

使用本节提出的初始路径生成算法, 能够结合定角度与测地线算法, 适于在较复杂的芯模曲面上规划路径。初始路径生成后, 可能会出现多个路径点相互靠近, 如图 7 中圆圈部分所示。此时过于密集的路径点并不能提高路径精度且会导致后续的满铺计算更加复杂, 需要对密集处的路径点进行归并和筛选。另外丝束的可铺性要求路径的曲率不能过大, 如图 7 中矩形框所示, 在路径偏折处纤维一侧会产生拉应变, 另一侧会产生皱缩, 超过材料允许的限度后就会导致失效。



(a) Initial path (b) Adjusting path

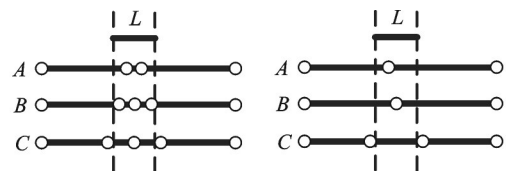
图7 初始路径检测及调整

Fig.7 Detecting and adjusting of initial path

对以上两种情况的处理方法分别如下:

- (1) 将生成的初始路径点读入数组, 记为 $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$
- (2) 计算相邻两路径点的距离数组, 记为 $\{L_1, L_2, \dots, L_{n-1}\}$

(3) 如图 8 所示, L 为参考长度, 间距小于 L 的两路径点视为密集点。 L 可参考铺丝束的总宽度和曲面复杂情况设定。由图 7 所示三角网格曲面的特点, 可能的密集点会如图 8 所示出现 3 种情



(a) Detection of dense path points (b) Improved dense path points

图8 密集路径点求解

Fig.8 Treatment of dense path points

况。情况 A 连续 2 个密集点,保留第 1 个;情况 B 连续 3 个密集点且两段路径总长度依然小于 L ,仅保留中间点;情况 C 连续 3 个密集点且两段路径总长度大于 L ,仅去除中间点。

如图 9 所示的纤维丝束转向问题, P_1 、 P_2 、 P_3 构成两段相连路径,路径间夹角 α 的丝束转向完成于 $A-P_2-B$ 段,其中 A 、 B 分别为两段路径的中点。纤维受拉侧产生弹性形变,可能会对内应力的分布有一定影响,而纤维受压侧会产生屈曲和皱缩,严重影响零件形状并影响后续铺层,因而受压侧的变形量必须严格控制。设丝带总宽度为 d ,路径曲线测地曲率为 k_g ,定义纤维受压变形量 ϵ 为缩短量与原长度的比值,文献[14]给出了连续曲线变形量的计算公式。

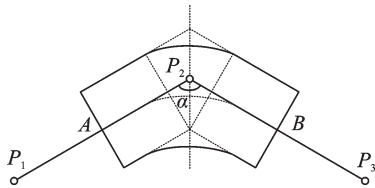


图 9 路径转角对丝束变形的影响

Fig.9 Influence of path deflection on tow deformation

$$\epsilon = \frac{d}{\frac{1}{k_g} + \frac{d}{2}} \quad (8)$$

由式(8)可见,测地曲率 k_g 过大会导致纤维压缩变形过大,而测地曲率为曲率向量的一个分量。针对本文关注的网格曲面路径,其由离散折线段组成。对于离散曲线上的任一点,可以选取有限邻域来估计曲率值^[15]。其中最为经典的是基于切线的估计方法,其关键是对切线方向和长度的度量。Gorman 等^[16]最先提出“k-slope”方法,即选取固定长度的对称邻域,以两邻域的边缘点与当前点构成的直线长度与夹角进行后续估计度量。在此基础上,国内外学者又进一步优化和丰富了离散曲率的近似估量算法。连续折线段的离散曲率估计不是本文关注的内容,但是参考该领域文献,可以据图 9 所示用相邻路径线段间的夹角来度量纤维受压变形量。

$$\epsilon = \frac{d \cdot (\pi - \alpha)}{2L} \quad (9)$$

式中: L 是图 8 中依据网格密度和曲面复杂情况所选定。由此可知,必须控制图 9 所示的角度

$$\alpha > \pi - \frac{2L\epsilon}{d} \quad (10)$$

完成路径点的筛选后,依次计算相邻两段路径的夹角,若夹角小于允许的临界值,读取该路径点所在的面片边信息,将该点在当前边上移动直至满足要求。

3 路径等距满铺算法

3.1 测地线求取满铺路径

获得初始路径后,可以通过平移法或平行法完成路径的完整覆盖。前者操作简单,路径几乎不变形。但是,路径间隔将改变,并且需要不断进行增剪丝操作。后者可确保相邻丝束的间距均匀,但是算法稍微复杂,并且丝束可能会变形。Wang 等^[17]将初始路径在参数表面上的均匀覆盖转化为参数域或 3D 空间中一阶常微分方程的初值问题,并使用弧长参数来简化路径的计算。为了避免重叠和间隙,并减少纤维切割和重送的操作,本文选择与初始路径测地等距的平行法进行路径均匀覆盖。此外,在 2.3 节中给出了路径检测和调整算法,它可以克服通过平行法获得的路径的缺点。

对于三角网格面上的路径满铺问题,Zhang 等^[18]等创新性地提出了求解光程函数的方法来实现满铺。通过将初始路径上的点视为光源,控制其扩散的时间间隔来获得等距路径。其计算结果精确,但计算过程需要在求解器中进行,对生成后的路径也没有提出检测优化。Pei 等^[19]等将初始路径点直接沿初始路径的垂直方向进行偏移,其偏置路径点可能会落在各三角面片内部,求解时需要在各面片内建立局部坐标系。本文基于前述初始路径求取方法,使所有待求点落在各三角面片的边上以简化计算。如图 10 所示, C 为初始路径, P_1 、 P_2 为其中两个路径点(中间还有若干路径点未画出)。在初始路径点处构造垂直于初始路径的测地线,作为求取偏置路径的参考。该测地线的求取采用本文 2.2 算法,图 10 中三角形标记所示为求得的一系列参考路径点。其中 R_1 、 R_2 等是在每个初始路径点处生成的参考折线段,在其上以满丝束宽度为间隔依次取点,如图 10 中黑色圆点所示,获得一系列偏置路径点,将上标相同的路径点连接后可获得各满铺路径。该算法可并行求解各初始路径点处的参考路径,先通过线段相交求出三角形标记的参考路径点,然后转化为折线段上的等距点求取,无须在三角形内部进行计算,过程简单高效。

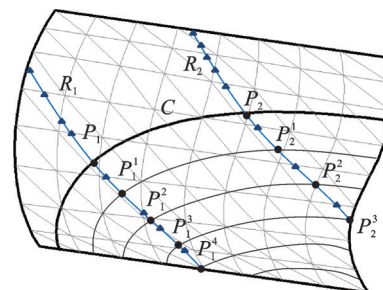
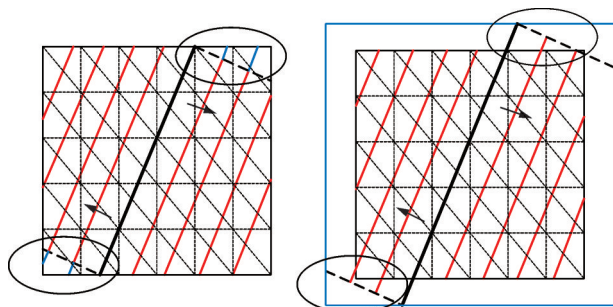


图 10 初始路径的均匀覆盖

Fig.10 Uniform coverage from initial path

3.2 两种路径边界处理算法

无论是参数曲面还是网格曲面,芯模表面上的铺丝路径规划主要包括以下几步:初始路径的规划、基于初始路径平移或平行的满铺路径获取、处理某些满铺路径无法到达曲面边界的问题。如图11所示,黑色实线为初始路径,将初始路径在芯模表面上向两侧偏移的过程中,可能会产生图11中椭圆区域内无法到达边界的路径,传统的处理方法在末达边界的路径末端选取控制点拟合出二次或三次的样条线,然后延长样条线直到与边界相交,最后获得图11(a)所示蓝色线条的补充路径。该方法便于理解 and 操作,但是需要对每条路径单独处理并拟合出多条样条线。本文如图11(b)所示提出满铺处理的一种新思路,蓝色外框为基于原曲面信息的延拓曲面,将初始路径两端延伸至延拓曲面后,按照传统满铺方式进行路径偏置。当初始路径延伸量足够的情况下,各偏置路径会出现“只长不短”的情况,此时只要标识出各路径与原曲面外边界的交点,将处于延拓曲面部分的路径舍去即可。该方法无须对原本未达边界的路径依次插值处理,只需将初始路径在延拓曲面上延伸足够长的一段距离即可,后续操作同传统的满铺路径算法一样。另外,延拓曲面部分的路径可以舍去,因此对延拓部分的精度和网格密度要求并不高。



(a) Traditional boundary processing (b) Improved boundary processing

图11 边界处理的两种思路

Fig.11 Two algorithms for path boundary processing

基于图11(a)所示的传统处理思路,结合本文提出的三角面片上的路径规划及满铺算法,本文给出边界处理方法如下:如图12所示, C 为初始路径,蓝色线条为本文使用测地线算法得到的参考路径,在其上等距取点并连接后获得黑色细实线所示的满铺路径,可见满铺路径并未到达边界。考虑到本文求取的参考路径实际很密集,各满铺路径与曲面边界距离并不远。图12圆圈部分的情况,以 $L_{P_m^n P_{m+1}^n}$ 为例,将该段路径末端折线段即 $L_{P_m^n P_{m+1}^n}$ 作为参考,使用测地线法从 P_m^n 延伸至外边界,具体算法同本文2.2;图12中矩形框部分所示为孤立路径

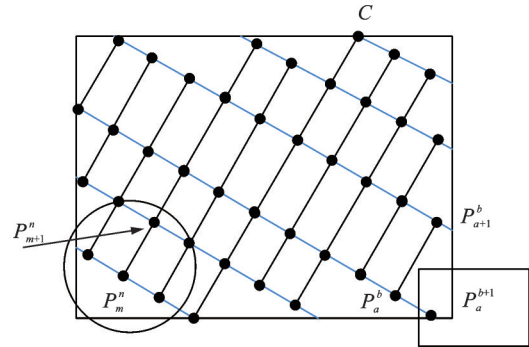


图12 基于样条线末端插值的处理方法

Fig.12 Boundary processing based on interpolation

点,需要提取出其相邻的路径点,以 $L_{P_a^b P_{a+1}^b}$ 为参考方向,采用定角度法规划直至边界的补充路径。

基于曲面延拓的边界处理方法,其本质是通过在向外延展的曲面上规划“足够长”的初始路径,来“避免”出现满铺路径无法到达原芯模曲面边界的问题。曲面延拓问题广泛存在于航空航天复材构件及钣金类曲面零件的制造过程中,通过在零件的基础上自然延伸出模具型面,以布置压边圈及真空密封袋等成形工艺结构^[20]。大型通用CAD/CAM软件如CATIA、UG等均提供了功能丰富的曲面延拓工具,能够实现延拓方向和延拓距离的控制。但是在实际应用中,零件曲面通常是由多种操作得到的拼接面,难以整体地直接延拓,而采取分段延拓的方法常会造成曲面出现自交和缝隙等^[21]。对于此问题,主要研究方向有基于曲面参数化表达、基于CAD软件二次开发的延拓算法。代表性的研究如Shetty和White^[22]通过控制顶点及插入节点的方法对有理B样条曲线曲面进行延拓,该方法适应于基于有理B样条的完整曲面,对于曲率不连续的拼接曲面则效果不佳;刘辉强等^[23]从工程实际出发,基于CATIA二次开发技术获取模具曲面边界信息,并沿边界选取待延拓点,结合曲面边界的切矢和法矢计算延拓点,最后构造出延拓面。该方法效率较高,但是没有对可能出现的自交与重叠进行特殊处理,在拼接曲面的不连续处可能会出现自交与重叠。延拓问题不是本文自动铺丝算法的研究重点,但芯模曲面延拓的思路确实在求取满铺路径的时候很好地规避路径未达边界问题。为更好地衔接本文基于三角网格曲面的铺丝路径规划算法,采用一种基于三角网格化的曲面延拓算法^[24],通过该算法对芯模曲面进行前处理,即在曲面边界处以一定的方式插入三角面片的延拓思路。结合本文算法进行路径规划,可避免出现满铺路径不达曲面边界的问题。

4 算法实例验证

4.1 Bezier 双曲率曲面算法验证

Bezier 曲面广泛应用于工程零件曲面造型和复杂曲面拟合,在飞机零部件的设计中也常采用 Bezier 曲面造型技术。为验证本文算法的合理

性,本文选取 3×4 阶 Bezier 曲面作为验证对象。其控制顶点见表 1,调整不同位置的控制顶点就能调整曲面的局部曲率,以逼近工程应用中的实际零部件曲面。将构造的 Bezier 曲面三角网格化,并对以 STL 格式表达的文件进行重建后进行路径规划。

表 1 3×4 阶 Bezier 曲面控制顶点坐标

Table 1 Control points of 3×4 order Bezier surface

mm

项目	$j=0$	1	2	3	4
$i=0$	(0,0,0)	(100,0,100)	(200,0,100)	(300,0,0)	(400,0,100)
1	(0,100,50)	(100,100,100)	(200,100,150)	(300,100,50)	(400,100,0)
2	(0,200,100)	(100,200,150)	(200,200,200)	(300,200,100)	(400,200,50)
3	(0,300,100)	(100,300,50)	(200,300,100)	(300,300,0)	(400,300,-50)

以全局坐标系下 Z 方向为参考方向,分别进行 $45^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 90^\circ$ 的铺丝路径规划,结果如图 13 所示。其中黑色粗线条为结合定角度法与测地线法生成的初始路径;黑色细线为测地线法生成的参考路径,此处并未画出所有参考路径;红色线条为参考路径上等距选取的路径点依次连接生成的满铺路径。如图 13 所示,针对此类曲率波动不大的双曲率自由曲面,改进的定角度法能获得与曲面贴合良好的初始路径。在获取满铺路径时,由于引入了黑色细线所示的参考路径,使得所有计算发生在面片边界,提升了计算效率。

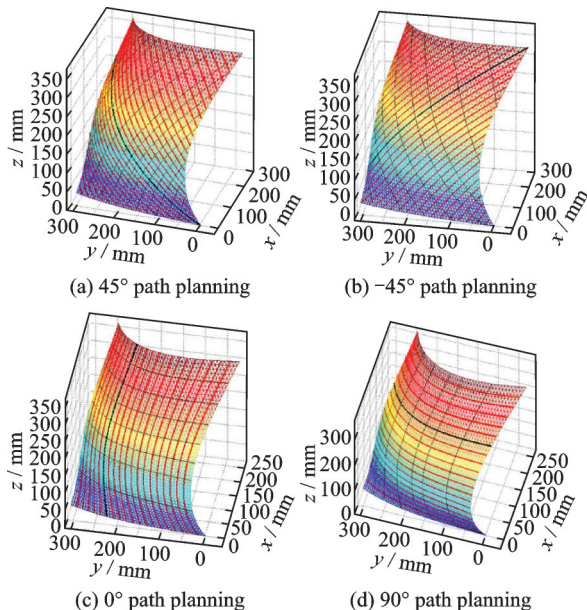


图 13 某 3×4 阶 Bezier 曲面路径规划

Fig.13 Path planning on 3×4 order Bezier surface

4.2 某型号飞机机翼算法验证

自动铺丝技术是主要应用于航空航天复材零部件自动成型的一项高精技术,为了验证本文算法的工程应用价值,基于常用的航空领域曲面造

型软件 CATIA,设计某型号飞机机翼模型。对模型数据进行三角网格离散化,导出 STL 模型并进行重建。在此基础上运用本文算法进行铺丝路径规划,采集路径点数据,利用 CATIA 提供的接口文件 GSD_PointSplineLoftFromExcel.xls 对数据进行批量导入,而后利用 CATIA 的逆向工程模块对本文规划的路径进行可视化,验证铺丝算法的实用性。整体操作思路及各部分操作环境如图 14 所示。

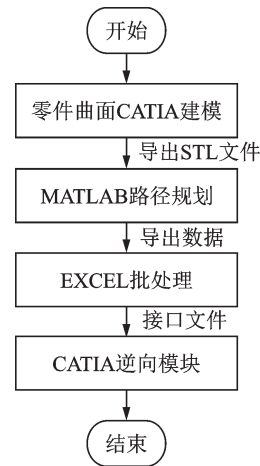


图 14 工程应用流程

Fig.14 Operating process for engineering application

如以下各图所示,为算法验证的各阶段。其中图 15 为机翼 CATIA 三维模型及使用本文算法对机翼 STL 文件重建了几何信息后绘制的三角网格模型;图 16 为基于本文算法进行的 $45^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 90^\circ$ 的铺丝路径规划,其中以全局坐标系下的 Z 轴方向为面外参考向量,各角度路径曲线簇分别在图 16 中以不同颜色标识。采集构成各路径的路径点,基于文件 GSD_PointSplineLoftFromExcel.xls 将数据批量导入 CATIA,在 CATIA 环境中拟合数据点对路径进行可视化,最终效果如图 17 所示。

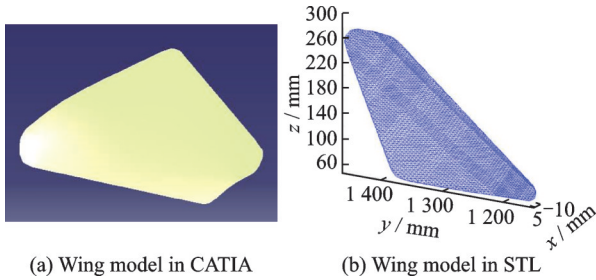


图15 机翼三维模型及网格模型

Fig.15 Three-dimensional model and triangular mesh model of a wing

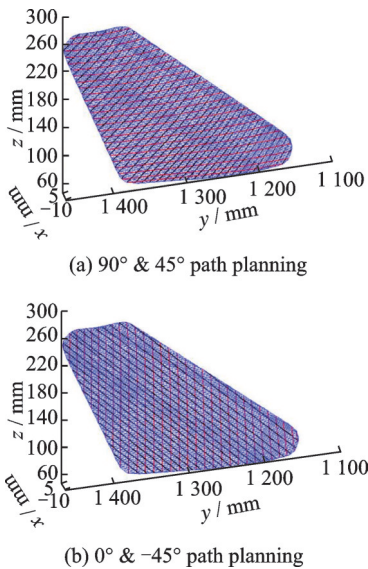


图16 机翼模型定角度路径规划算例

Fig.16 Fixed angel path planning of wing model

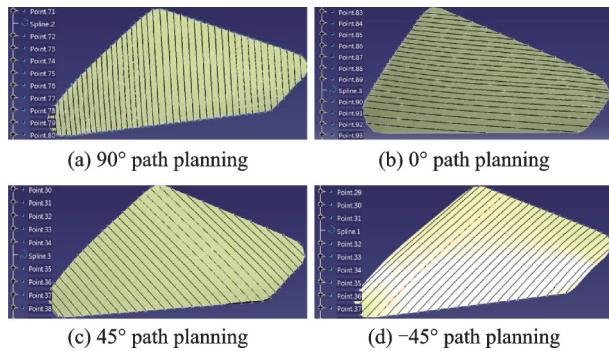


图17 CATIA环境可视验证

Fig.17 Visualization verification of paths in CATIA

5 结 论

本文重点讨论三角网格曲面上自动铺丝的路径规划问题,将解析曲面“定角度法”的概念引入到网格曲面。分析了曲面曲率变化大时该算法的失效原因,以局部测地线法作为补充生成初始路径。本文提出的改进算法相对于传统解析法具有以下优点:

(1)对曲率波动较大的曲面适应性较好,适合

于在复杂曲面和拼接曲面上生成初始路径。

(2)基于空间向量的几何关系预先判断可能的路径点,并通过旋转每个面片中的线段来获得最终的路径点。这将大大减少工作量,因为不需要在每个面片中建立局部坐标系,也不需要像传统方法那样处理可能的多解情况。

(3)基于调整后的初始路径,采用测地等距的方法获得满铺路径。具体计算时,首先采用测地线法求取位于各面片边上的参考路径点,然后依次以满丝束宽度等间隔选取满铺路径点。所有计算均发生在线段上,无须建立面片内的局部坐标系,简化了计算。

(4)提出了一种处理无法到达曲面边界的满铺路径的新思路。通过预先延拓芯模曲面,以获得“足够长的”初始路径,避免出现不理想的满铺路径。由于三角网格曲面易于处理和扩展,因此该方案可以在实践中实现。

参考文献:

- [1] ZHANG Leen, WANG Xiaoping, PEI Jingyu, et al. Review of automated fibre placement and its prospects for advanced composites[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(2): 1-35.
- [2] CROSKY A, GRANT C, KELLY D W, et al. Fiber placement processes for composites manufacture[C]// Proceedings of Advances in Composites Manufacturing & Process Design. Paris France: Elsevier, 2015: 79-92.
- [3] 林胜. 自动铺带机/铺丝机(ATL/AFP)-现代大型飞机制造的关键设备(下)[J]. 世界制造技术与装备市场, 2009(6): 78-83.
LIN Sheng. Automatic tape laying machine automatic fiber laying machine (ATL/AFP)-Key design of modern large aircraft manufacturing[J]. World Manufacturing Technology and Equipment Market, 2009(6): 78-83.
- [4] LEWIS H W, ROMERO J E. Composite tape placement apparatus with natural path generation means: US4696707[P]. 1987-09-29.
- [5] SHINNO N, SHIGEMATSU T. Method for controlling tape affixing direction of automatic tape affixing apparatus: US 5041179 A[P].1991-08-20.
- [6] SCHUELER K, MILLER J, HALE R. Approximate geometric methods in application to the modeling of fiber placed composite[J]. Journal of Computing & Information Science in Engineering, 2004, 4(3): 251-256.
- [7] PARNAS L, ORAL S, CEYHAN Ü. Optimum design of composite structures with curved fiber courses

- [J]. *Compos Sci Technol*, 2003, 63(7): 1071-1082.
- [8] SHIRINZADEH B, CASSIDY G, OETOMO D, et al. Trajectory generation for open-contoured structures in robotic fiber placement[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, 23(4): 380-394.
- [9] WALDHART C. Analysis of tow-placed variable-stiffness laminates[D]. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
- [10] BRUYNEEL M, ZEIN S. A modified fast marching method for defining fiber placement trajectories over meshes[J]. *Computers & Structures*, 2013, 125(125): 45-52.
- [11] XU J, SUN Y, WANG S. Tool path generation by offsetting curves on polyhedral surfaces based on mesh flattening[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 64(9/10/11/12): 1201-1212.
- [12] 卫伟, 周来水, 张丽艳. 海量STL文件的快速读取与显示[J]. *机械科学与技术*, 2006, 25(8): 935-938.
WEI Wei, ZHOU Laishui, ZHANG Liyan. Fast reading and display of massive STL files[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2006, 25(8): 935-938.
- [13] 李俊斐, 王显峰, 肖军, 等. 网格化曲面的固定角度铺丝轨迹规划算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(9): 1410-1415.
LI Junfei, WANG Xianfeng, XIAO Jun, et al. Trajectory planning of automated fiber placement for meshed surface in fixed angle algorithm[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2013, 25(9): 1410-1415.
- [14] KUMAR G V V R, Srinivasan P, Holla V D, et al. Geodesic curve computations on surfaces[J]. *Computer-Aided Geometric Design*, 2003, 20(2): 119-133.
- [15] LEWINER T, JOAO D, GOMES J. Arc-length based curvature estimator[C]//Proc of XVII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing. Curitiba: [s. n.], 2004: 250-257.
- [16] GORMAN L. An analysis of feature detectability from curvature estimation[C]//Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Ann Arbor, Michigan: [s. n.], 1988: 235-240.
- [17] WANG Xiaoping, AN Luling, ZHANG Liyan, et al. Uniform coverage of fibres over open-contoured free-form structure based on arclength parameter[J]. *Chin J Aeronaut*, 2008, 21(6): 571-577.
- [18] ZHANG Leen, WANG Xiaoping, PEI Jingyu, et al. Adaptive path planning of fiber placement based on improved method of mesh dynamic representation[J]. *Applied Composite Materials*, 2019, 26(3): 785-803.
- [19] PEI Jiazhi, WANG Xiaoping, PEI Jingyu, et al. Path planning based on ply orientation information for automatic fiber placement on mesh surface[J]. *Applied Composite Materials*, 2018, 10: 1-14.
- [20] 姜坤, 周雄辉, 黎旻, 等. 检具设计中延伸曲面修补方法[J]. *上海交通大学学报*, 2011, 45(11): 1720-1724.
JIANG Kun, ZHOU Xionghui, LI Min, et al. Extension surface reparation in checking fixture design[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2011, 45(11): 1720-1724.
- [21] CHOI B K. Surface modeling for CAD/CAM[M]. New York: Elsevier Science Publishers, 1991: 173-203.
- [22] SHETTY S, WHITE P R. Curvature-continuous extension for rational b-spline curves and surfaces[J]. *Computer-Aided Design*, 1991, 23(7): 484-491.
- [23] 刘辉强, 安鲁陵. 一种基于边界信息的曲面延拓方法[J]. *机械制造与自动化*, 2018, 257(4): 30-33.
LIU Huiqiang, AN Luling. Surface extension method based on boundary information[J]. *Machine Building & Automation*, 2018, 257(4): 30-33.
- [24] 许澍虹, 柯映林, 刘美萍, 等. 复杂曲面延拓及其应用研究[J]. *工程设计学报*, 1997(4): 23-27.
XU Shuhong, KE Yinglin, LIU Meiping, et al. Complex surface extension and its applications[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 1997(4): 23-27.

(编辑:陈珺)