

# 纤维丝束可铺放性分析技术\*

周 鹏,孟月梅,梁岱春,闫利强

(中国航空制造技术研究院数字化制造技术航空科技重点实验室,北京 100024)

**[摘要]** 通过对复合材料及其先进制造技术进行分析,结合铺放工艺性,提出基于三角网格的复合材料丝束可铺放性分析技术。在现有丝束基准路径和等距路径规划方法中融入分析机制,并系统分析丝束中心线转弯半径和角度偏差等指标。通过分析结果建立分区机制,将原铺层面进行区域划分,并独立进行丝束几何规划,提高制品质量。结合 CATIA 二次开发工具 CAA 在 Microsoft Visual Studio 2005 平台上实现丝束几何生成与分析功能,并对分析结果与分区结果的正确性进行验证。此研究为复合材料先进制造技术的发展提供了重要思路。

**关键词:** 自动铺丝;三角网格;丝束几何;丝束分析;可铺放性

## Analysis Technology of Composite Material Fiber Placement

ZHOU Peng, MENG Yuemei, LIANG Daichun, YAN Liqiang

(Aeronautical Key Laboratory for Digital Manufacturing Technology, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

**[ABSTRACT]** Based on the analysis of the composite material and its advanced manufacturing technology, with the process of fiber placement, an analysis technology of composite material fiber placement based on triangular mesh was proposed. The paper summarizes the current approach and the equidistant path planning method integrating the analysis mechanism, and we analyzed the targets of turning radius and angular deviation on the center lines. Through the result of analysis, we established the partition mechanism. With the mechanism, the original surface area of the ply was divided into some sectors independent to fiber geometry generation to improve the quality of the composite product. The CATIA secondary development tool CAA was used to realize the function of generation and analysis of the fiber geometry on the Microsoft Visual Studio 2005 platform, and the correctness of the analysis result and the partition result was validated. This research provides an important idea for the development of advanced manufacturing technology of composite materials.

**Keywords:** Automatic fiber placement; Triangular mesh; Fiber geometry; Fiber analysis; Paving property

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.11.088

复合材料<sup>[1]</sup>以其制备的灵活性、卓越的比强度、独特的耐烧蚀、材料性能的可设计性和易加工性等受到各国军事工业青睐。飞机的机身、机翼、雷达罩等重要构件均可部分使用或全部使用复合材料,部分机型复合材料利用率达到甚至超过 50%,航空工业的复合材料时代已经来临。自动铺丝技术是 20 世纪 70 年代由美国 Alliant Techsystems 公司综合纤维缠绕技术<sup>[2]</sup>和自动铺带技术两种复合材料成型技术的优点而发展起来的一种全自动复合材料加工技术。自动铺丝技术对制品的

适应性更强、线型规划自由度大,突破“自然路径”<sup>[3]</sup>限制,可实现变角度铺放。

21 世纪初,随着自动铺丝技术的不断发展和广泛应用,各大复合材料制造厂商在高端 CAD/CAM 环境下进一步提出了多种线型规划算法,并开发设计了多款用于先进复合材料制造和分析的自动铺放 CAD/CAM 软件。Shirinzadeh 等<sup>[4]</sup>对铺丝的工作原理、流程规划和仿真控制等作了分析,根据铺丝工艺将丝束路径分成初始路径和等距路径。林福建<sup>[5]</sup>提出了一种基于 STL 文件格式的用于自由曲面零件铺丝束成型轨迹规划的方法,该方法使用三角面片逼近自由曲面。卢敏<sup>[6]</sup>研究分析

\* 基金项目: 国防基础科研项目(A0520131001); 工信部民用飞机专项科研项目(MJZ-2016-G-59)。

了铺丝工艺、曲面外形以及路径规划之间的制约关系,提出并改进了截平面法、投影法、插值映射法等多种基准路径的生成算法。

铺丝过程就是压辊按预定的路径轨迹将纤维丝束碾压在模具面上的过程。铺放工艺性一般指轨迹的可铺放性,即纤维丝束在铺放过程中不发生褶皱、撕裂的能力。为降低铺放成本、提高铺放质量,需对纤维丝束的可铺放性进行分析。纤维丝束由增强材料和基体材料组成,各向异性严重,沿纤维方向的力学性能较好<sup>[1]</sup>。通过不同算法规划所得丝束几何一般不同,所得制品的质量及制造成本的消耗也存在一定差异。考虑到整个铺丝工艺流程,对纤维丝束可铺放性的分析需从网格模型数据、丝束路径生成阶段、丝束铺放阶段3个方面进行。

### 1 三角网格数据分析与处理

将曲面网格离散化是将有限元的思想运用于轨迹

规划,将整个铺层看成是由许多相互关联的三角片组成,给每个三角片假定一个合适的近似解,从而得到整个铺层面的解,该方法在网格划分精度得到保证的前提下不但能适应各种复杂形状,而且计算精度较高,更适合于大规模数据计算。基于上述分析,本文所涉及的丝束几何生成方法与分析方法均基于三角网格进行算法设计。

常见的网格数据存储类型包括 STL<sup>[5,7-8]</sup> 文件和有限元网格 DAT 文件。两种格式文件均存储了模型名称、模型地址、网格节点坐标等信息。为减少数据冗余、提高算法计算效率,需对网格数据进行拓扑重构。在空间关系描述中,点集拓扑学、组合拓扑学和图论是使用较为普遍的数学工具。在计算机处理中常采用链表的数据结构来记录三角网格的几何信息和拓扑信息,即建立顶点表、边表和三角片表,其拓扑关系如图 1 所示。

在丝束几何规划与铺放数据计算过程中需使用法向量进行计算,因此需对三角网格上任意位置处的法向

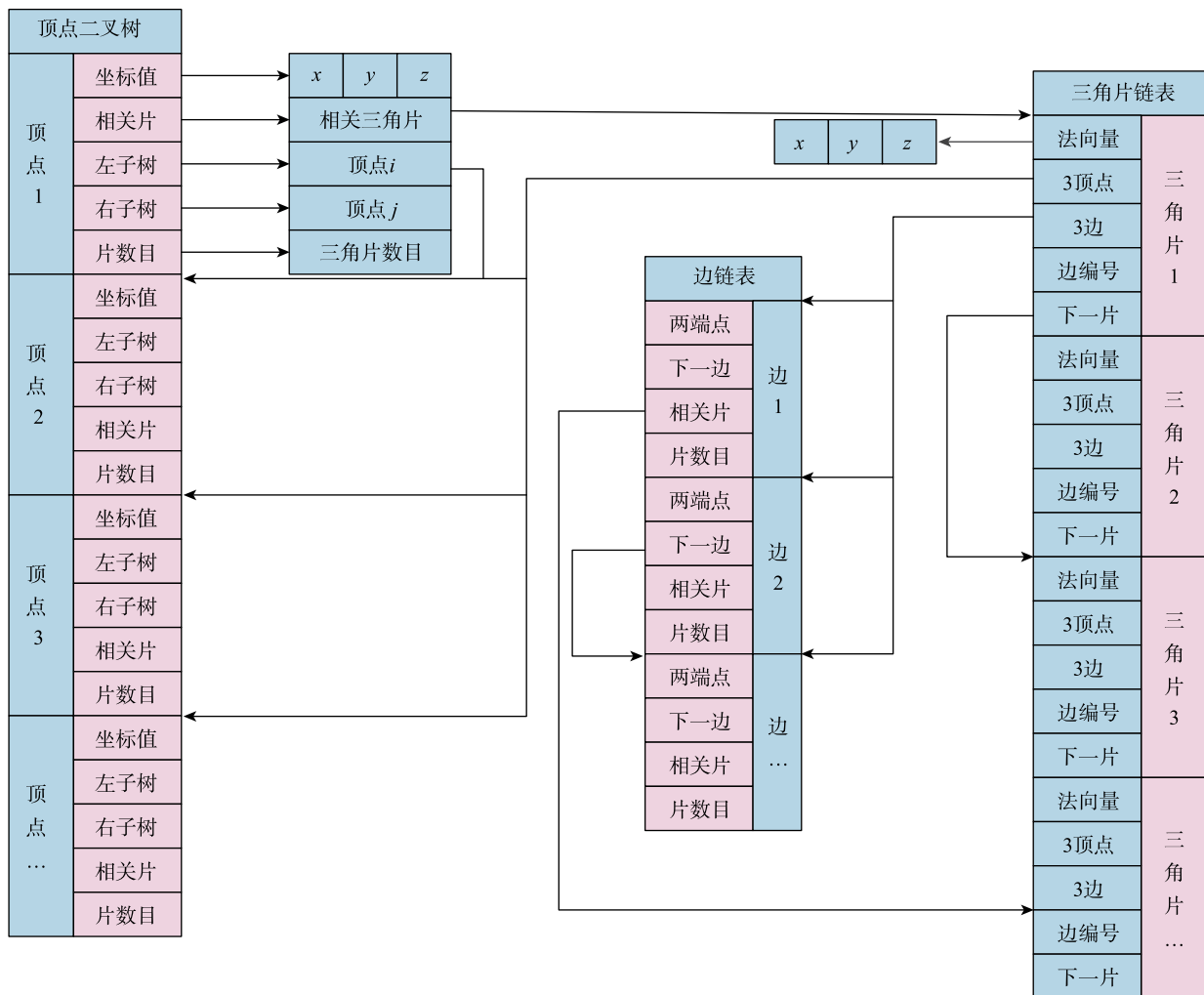


图1 拓扑关系

Fig.1 Topological relationship

量进行求解。本文基于现有的网格模型上法向量加权算法<sup>[9]</sup>与曲面曲率理论,提出一种新的基于三角片重心的法向量计算加权算法。

首先,需求解网格上各顶点处的法向量并进行单位化处理(下同)。如图2所示,根据网格拓扑关系获得任意顶点的相关三角片,依次获取三角片重心,并取该点到各三角片重心距离 $l_i$ 的倒数 $\frac{1}{l_i}$ 为权值,则顶点处的法向量加权计算公式为:

$$N_v = \frac{\sum_i N_i / l_i}{\sum_i 1 / l_i} \quad (1)$$

式中, $N_i$ 为该顶点相关三角片 $T_i$ 的单位法向量。

其次,根据当前点所在位置分别进行处理。

case1:当点落于三角网格边线上时,以点 $P_e$ 为例。求取该段边线长度为 $L$ ,点 $P_e$ 距端点 $P_v$ 距离为 $L'$ ,改边线两端点处法向分别为 $N_{P_v}, N_{P_e}$ ,则点 $P_e$ 处的法向量为:

$$N_e = N_{P_v} + \frac{L'}{L}(N_{P_e} - N_{P_v}) \quad (2)$$

case2:当点落于三角片内时,以点 $P_1$ 为例,以其所在三角片 $T_1$ 进行加权。依次计算点 $P_1$ 与三角片 $T_1$ 顶点 $P_1, P_2, P_3$ 的距离 $l_i$ ,以其倒数 $\frac{1}{l_i}$ 为权值进行加权,此计算公式与顶点处法向量计算公式相同。

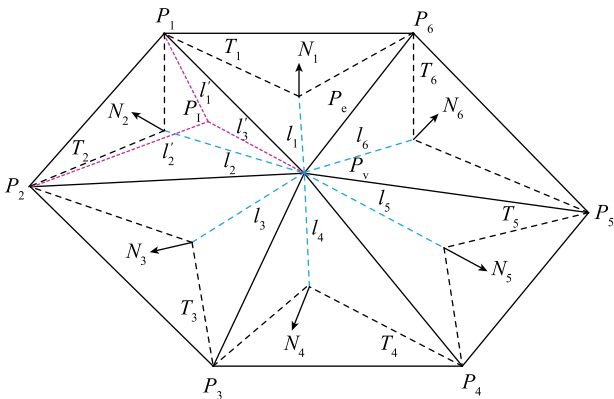


图2 网格上点处法向量获取

Fig.2 Acquisition of normal vectors at a point on the grid

## 2 丝束几何路径过程中的可铺放性分析

丝束路径分为基准路径和等距路径,首先通过给定铺层信息与参考几何计算基准路径,在获得基准路径后,考虑到丝束铺放时相邻丝束之间相互平行且距离恒定,采用平行等距思想进行后续等距路径计算。不同算法所得的基准路径一般不同,存在一定的偏差,需根据实际需求选取合适的基准路径生成算法。

### 2.1 基准路径生成算法分析

当参考几何为某一条曲线时,将该曲线投影至网格模型作为基准路径,并根据原曲线方向自然延伸至网格边界;当参考几何为给定点时,常用的基准路径生成算法包括测地线算法<sup>[10]</sup>(如图3(a)所示)、固定角度算法(如图3(b)所示)以及变角度算法<sup>[11]</sup>(如图3(c)、(d)所示)。

测地线具有可展性,即若曲面可展,则测地线展开为一条直线,使用测地线铺设可最大程度避免丝束褶皱和撕裂现象;工艺上要求纤维铺放需满足一定的角度,各铺层在设计时均规定了铺放角度 $\alpha$ ,采用固定角度法能最大限度满足工艺需求;对曲面曲率变化较大的型面进行丝束几何规划时,使用上述两种算法具有一定的局限性,可综合这两种算法优点,使用变角度算法。即在进行基准路径规划时,根据测地方向 $V_1$ 与固定角度方向 $V_2$ 夹角 $\theta$ 、工艺允许最大角度偏差 $\gamma$ ,实时调整规划方向,在保证丝束铺放质量的前提下最大限度满足构件力学需求及设计要求。

### 2.2 等距路径生成算法分析

为避免出现等距路径自交或断裂情况,提高纤维丝束的可铺放性,在等距路径规划时需对当前路径各端点处的等距方向进行调整<sup>[12]</sup>。

结合几何学分析,在端点处取两线角平分线方向进行等距,等距值依据夹角 $\theta$ 的大小进行调整,如图4(a)所示。

在获取等距方向和实际等距距离后,进行点等距操作,如图4(b)所示, $P_{src}$ 为起始点, $D_{off}$ 为等距方向, $P_{off}$ 为等距点,其中等距值 $d_{val}=d_1+d_2+d_3$ ,首段交线 $d_1$

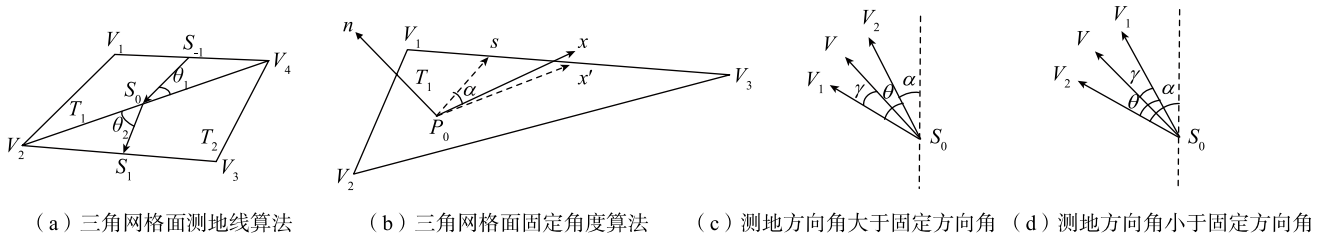


图3 基准路径线型规划算法

Fig.3 Algorithm of linear reference path planning

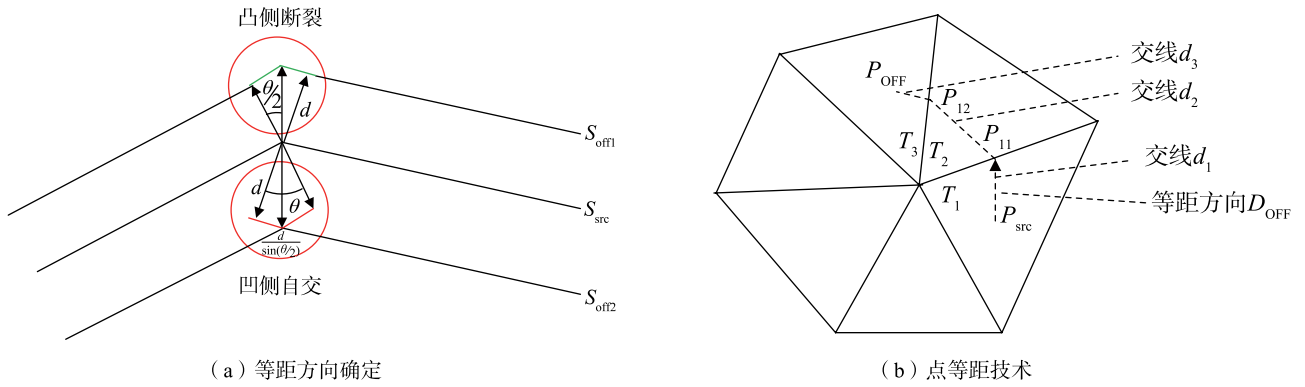


图4 等距技术  
Fig.4 Technology of equidistant

由  $D_{OFF}$  确定,由于丝束紧贴模具表面,因此其余交线依次沿测地方向延伸获得。由上述论述可知,通过该等距路径生成算法计算所得等距路径可满足丝束宽度,避免出现丝束叠压现象,有助于提高纤维丝束的可铺放性。

结合铺层轮廓信息对计算所得丝束中心线进行截取,保留有效丝束中心线信息,在此基础上计算丝束轮廓线和铺放轨迹线,进而生成丝束几何。

### 3 基于丝束几何的可铺放性分析

一般的丝束几何信息包括丝束中心线、丝束轮廓线、铺放轨迹线等,根据铺放的工艺性,丝束可铺放性分析可分为针对丝束的侧向转弯<sup>[13]</sup>分析与铺放角度偏差分析。由于丝束几何是基于三角网格计算而成,为保证结论一致性,丝束的可铺放性分析也需在网格模型上进行讨论。

#### 3.1 针对丝束侧向转弯的分析

结合铺放工艺性,丝束轨迹侧向转弯半径(简称转弯半径)需在丝束变形能力范围内,才能避免丝束曲皱变形而失效。根据几何思想,曲线上某一点处的曲率  $K$  为针对该点处切线方向角对弧长的转动率,与当前位置曲率半径  $\rho$  互为倒数。结合解析几何相关知识,提出基于网格的丝束转弯半径计算方法。

由于在三角片上通过两点即可获得唯一直线段,因此仅需保留位于三角网格边上或顶点处的点即可保存所有丝束信息。由于在铺放过程中铺放轨迹线上某点处法向与运动至该点处铺丝头末端轴向保持一致,因此在计算中心线上某点处曲率时需将丝束中心线投影到相应点所在切平面。首先需结合前述网格模型点处法向量获取方法对各点处法向量  $\vec{N}$  进行计算,再按照法向  $\vec{N}$  与当前点所确定平面  $\Pi$  对丝束进行投影,最后对投影线按照端点处的离散曲率进行曲率半径计算,做转弯半径分析。定义折线段端点处的离散曲率为  $K=\cos(\theta/2)$ ,

其中  $\theta$  为两投影向量夹角,如图 5 所示两虚线向量所成夹角。则曲率半径  $R=\frac{1}{K}$ ,此时当前点的  $R$  即为丝束的转弯半径,根据分析结果对丝束几何进行调整。

#### 3.2 针对丝束角度偏差的分析

根据经典层合板理论,自动铺丝成型的构件是由一根根的丝束铺叠、压实、固化成型而成。在复合材料构件设计中,各个铺层均指定了铺放角度,不同角度的铺放用于承受不同方向的载荷,因此在丝束几何生成时需尽量满足设计要求,以达到最佳铺放效果,提高制品质量。

由于采取线型规划算法的不同,计算所得的丝束中心线、轮廓线等相较于起始给定铺放方向有一定的偏差,为精确起见,需对该偏差进行分析。按前述固定角度规划算法确定理论铺放方向  $\vec{s}$ ,如图 6 所示,计算  $\vec{s}$  与当前实际丝束方向  $\vec{S}_0\vec{S}_1$  的夹角  $\theta$ , $\theta$  即为丝束中心线该点处的角度偏差。计算所有角度偏差值,根据分析结果对丝束几何进行调整。

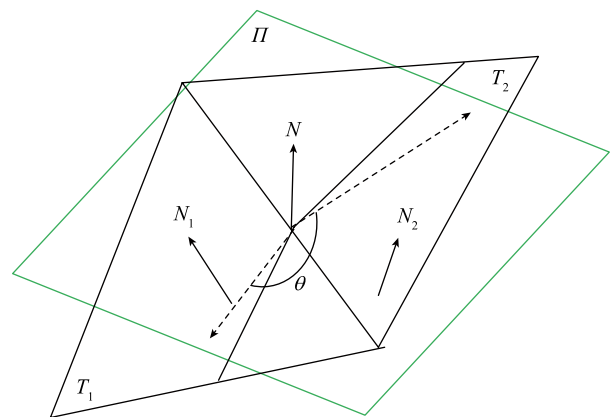


图5 网格模型上点处曲率计算  
Fig.5 Calculation of curvature at a point on mesh model

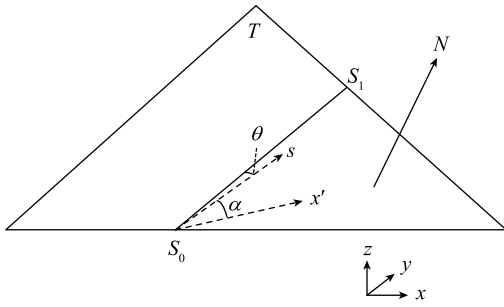


图6 角度偏差计算

Fig.6 Calculation of angle deviation

### 3.3 基于分析结果的区域划分原则

若整个铺层分析结果均能满足设计或制造需求,则不进行分区;若分析结果在某一区域范围内曲率变化明显、角度偏差过大,则表明在此区域内纤维丝束的可铺放性较差,不能满足相关需求,则需根据分析结果与工艺需求对整个铺层进行分区处理。分区时需满足以下原则:

- (1) 分区由铺层轮廓、区域边界线组成,区域边界线为当前分析指标某一确定范围的最外侧丝束的单侧轮廓线;
- (2) 为保证相邻区域纤维的连续性与铺设方向的一致性,各分区的铺放参数与原铺层铺放参数需保持一致;
- (3) 同一铺层各分区之间相互独立,无重叠区域,且所有分区合集应为整个铺层面。

## 4 实例验证

为验证上述分析方法的实用性,基于 Microsoft Visual Studio 2005 平台,利用 CATIA 二次开发工具 CAA,在 CATIA 机械设计平台开发丝束几何生成与分析功能模块。

### 4.1 功能设计

首先确定测试件模型,通过 CATIA 的复合材料设计模块(Composite Design, CPD)对测试件模型进行铺层设计,给定参考几何,设定铺层面离散参数和丝束铺放参数,计算即可生成丝束几何,其操作界面如图 7(a)所示。

选择需要分析的指标以及丝束几何、铺层信息等进行丝束几何分析,点击预览即可获得相应分析结果,其操作界面如图 7(b)所示。

### 4.2 结果展示

利用由上述方法生成的丝束几何信息,并结合铺丝头相关参数以及设备运动机构需求,计算铺丝设备铺放路径及姿态调整信息,得到铺丝设备所需的铺放数据<sup>[14-15]</sup>。

如图 8(a)和 8(b)所示,将所得丝束几何数据加



(a) 丝束几何生成界面

(b) 丝束几何分析界面

图7 操作界面

Fig.7 Interface of operation

载到 CATIA 模型下保存,也可输出至文件保存;如图 8(c)和 8(d)所示,对所得丝束几何分别进行转弯半径分析和角度分析,得到相应的分析结果。根据分析结果与前述分区原则,选取整根丝束均满足误差且位于最外侧的丝束轮廓线作为区域轮廓,此时可保证该铺层内不同区域的纤维丝束连续性与铺设方向的一致性。获得分区结果后,固定满足误差范围内的区域,仅对其他区域设定新的参考几何重新进行丝束几何规划。重复上述步骤,直至整个铺层上的丝束几何均满足相关指标,则丝束几何规划完成。

经测试模型验证,通过变角度法和平行等距算法计算所得的丝束几何在丝束曲率变化和角度控制上均能满足工艺需求。

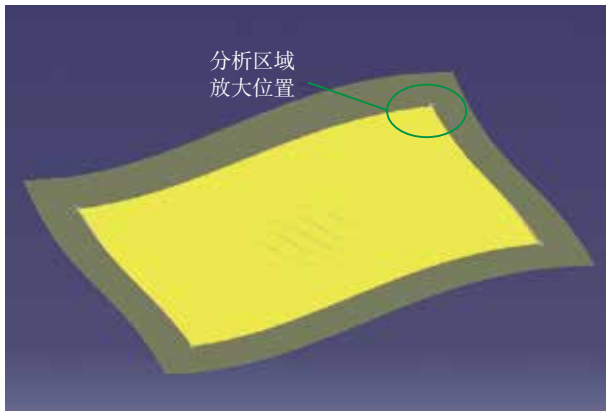
## 5 结论

本文对复合材料及其制造技术进行分析总结,综合分析了自动铺丝技术工艺与设计相关要求,确定了基于三角网格模型的丝束几何生成与分析技术,并通过 Microsoft Visual Studio 2005 平台以及 CATIA 二次开发工具 CAA 实现了相应功能。

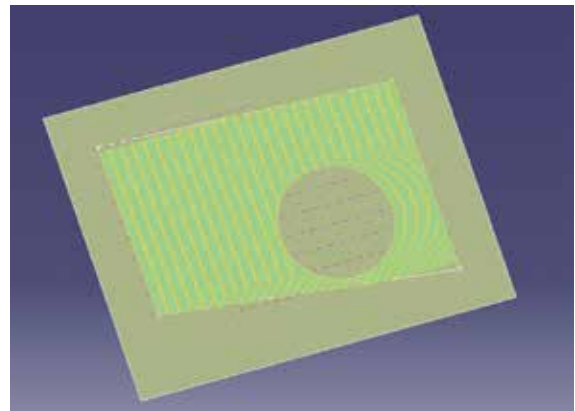
(1) 实现了对铺层曲面的离散与拓扑关系建立功能,节省了数据存储空间,提高了计算效率;同时提出基于网格模型的任意位置处法向量的加权计算方法。

(2) 在丝束几何生成模块加入铺丝设备出丝数目、铺放间隙等参数,可满足任意给定铺放设备数据计算与验证。提供了铺放设备参数编辑界面,可根据当前使用铺放设备调整参数,进行铺放数据计算。

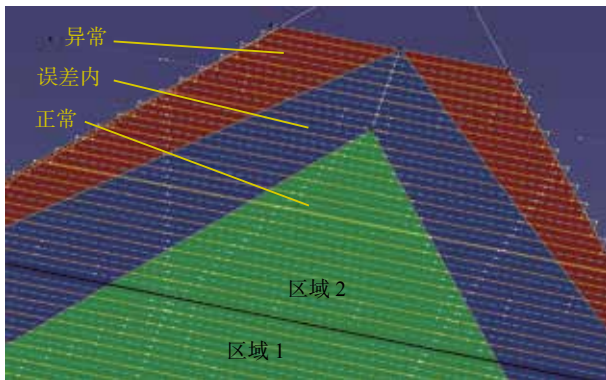
(3) 提供了基于网格的纤维丝束几何信息分析功能,系统分析丝束几何相关指标,包括转弯半径分析和角度偏差分析等,根据分析结果合理分区,可进一步提高铺放质量。



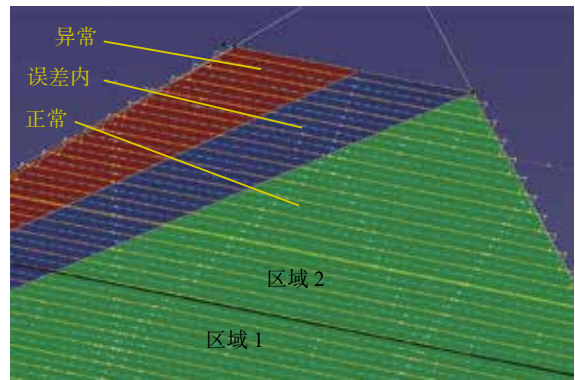
(a) 曲板面丝束几何生成结果



(b) 平板面丝束几何生成结果



(c) 转弯分析与分区结果



(d) 角度分析与分区结果

图8 软件测试结果

Fig.8 Result of software test

## 参 考 文 献

- [1] 沈观林, 胡更开. 复合材料力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- SHEN Guanlin, HU Gengkai. Mechanics of composite materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [2] 余正生, 杨章通, 楚广琳. 纤维缠绕弯管的线型设计与仿真 [J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(4): 90-93.
- YU Zhengsheng, YANG Zhangtong, CHU Guanglin. Pattern design and simulation of elbows for filament winding[J]. Computer Application and Software, 2009, 26(4): 90-93.
- [3] LEWIS H W, ROMERO J E. Composite tape placement apparatus with natural path generation means: US4696707[P]. 1987-09-29.
- [4] SHIRINZADEH B, CASSIDY G, OETOMO D, et al. Trajectory generation for open-contoured structures in robotic fibre placement[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2007, 23(4): 380-394.
- [5] 林福建. 自由型面复合材料零件铺丝束成型轨迹规划 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.

LIN Fujian. Trajectory planning of automatic fiber placement of composite material parts with free profile[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.

[6] 卢敏. 复合材料构件自动铺丝成型中的路径生成算法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

LU Min. Fundamental research on path generation algorithm of composite components in automatic fiber placement[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[7] 纪峰, 陈荔, 李占利. 基于 STL 文件的模型及应用 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2006, 26(1): 104-107.

JI Feng, CHEN Li, LI Zhanli. Model and application of stereo lithography (STL) files[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2006, 26(1): 104-107.

[8] 刘金义, 侯宝明. STL 格式实体的快速拓扑重建 [J]. 图学学报, 2003, 24(4): 34-39.

LIU Jinyi, HOU Baoming. Efficient topological reconstruction of solids in STL format[J]. Journal of Graphics, 2003, 24(4): 34-39.

[9] 罗良峰. 离散三角网格上的法向量和曲率估计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.

(下转第 100 页)

54(5): 1300–1310.

[4] LIAO Y S, CHEN Y C, LIN H M. Feasibility study of the ultrasonic vibration assisted drilling of Inconel superalloy[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(12–13): 1988–1996.

[5] MAKHDUM F, PHADNIS V A, ROY A, et al. Effect of ultrasonically-assisted drilling on carbon-fibre-reinforced plastics[J]. Journal of Sound & Vibration, 2014, 333(23): 5939–5952.

[6] HEISEL U, STEHLE T, SCHAAL M, et al. Burr formation in short hole drilling by ultrasonic assistance[J]. Production Engineering, 2014, 8(1): 1–6.

[7] ALAM K, HASSAN E, BAHADUR I. Experimental measurements of temperatures in ultrasonically assisted drilling of cortical bone[J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2015, 29(4): 753–757.

[8] LI Z, YANG D, HAO W, et al. A novel technique for micro-hole forming on skull with the assistance of ultrasonic vibration[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2015, 57: 1–13.

[9] PAKTINAT H, AMINI S. Ultrasonic assistance in drilling: FEM analysis and experimental approaches[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(5–8): 2653–2665.

[10] LOTFI M, AMINI S. Experimental and numerical study of ultrasonically-assisted drilling[J]. Ultrasonics, 2016, 75: 185–193.

[11] 闫明鹏, 邵华. 超声振动钻削钛合金的刀具温度和磨损分析[J]. 工具技术, 2011, 45(8): 26–30.

YAN Mingpeng, SHAO Hua. Tool temperature and wear in ultrasonic vibration drilling titanium alloy[J]. Tool Engineering, 2011, 45(8): 26–30.

[12] AZIZ M, OHNISHI O, ONIKURA H. Novel micro deep drilling using micro long flat drill with ultrasonic vibration[J]. Precision Engineering, 2012, 36(1): 168–174.

[13] SUGANTHI X H, NATARAJAN U, RAMASUBBU N. A review of accuracy enhancement in microdrilling operations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1): 199–217.

[14] 张学忱, 吕康, 史尧臣, 等. 振动钻削钻头刚性化理论分析与试验研究[J]. 制造技术与机床, 2017(11): 52–55.

ZHANG Xuechen, LÜ Kang, SHI Yaochen, et al. Theoretical analysis and experimental research of vibration drilling bit rigidity[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2017(11): 52–55.

[15] 杨杰, 田锡天, 刘书暖. 钛合金超声振动钻削特性研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(15): 83–85.

YANG Jie, TIAN Xitian, LIU Shunuan. Study on ultrasonic vibration drilling of titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(15): 83–85.

[16] 吴明阳, 赵旭, 陈勇, 等. 高压冷却下 PCBN 刀具切削高温合金切屑卷曲折断机理及试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(9): 187–192.

WU Mingyang, ZHAO Xu, CHEN Yong, et al. Research on mechanism and experimental of chip breaking during high pressure

cooling turning of superalloys with PCBN tool[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(9): 187–192.

[17] 马利杰, 刘贯军, 王贵成. 轴向振动钻削的断屑机理研究[J]. 机械设计与制造, 2009(2): 228–230.

MA LiJie, LIU Guanjun, WANG Guicheng. Study on mechanism of breaking chip of axial vibration drilling[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(2): 228–230.

通讯作者: 梁志强, 博士、副教授、博士生导师, 研究方向为先进切削磨削与刀具技术、微细加工、微细刀具设计与制造技术、特种机床与装备制造, E-mail: liangzhiqiang@bit.edu.cn。

(责编 铃兰)

(上接第 93 页)

LUO Liangfeng. Normal vector and curvatures estimation on triangular mesh[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.

[10] 段玉岗, 葛衍明, 孟洋, 等. 基于角度与间距可控的纤维铺放轨迹规划[J]. 航空学报, 2015, 36(10): 3475–3482.

DUAN Yugang, GE Yanming, MENG Yang, et al. Trajectory planning of fiber placement based on controlled angle and interval[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(10): 3475–3482.

[11] 熊文磊, 肖军, 王显峰, 等. 基于网格化曲面的自适应自动铺放轨迹算法[J]. 航空学报, 2013, 34(2): 434–441.

XIONG Wenlei, XIAO Jun, WANG Xianfeng, et al. Algorithm of adaptive path planning for automated placement on meshed surface[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2): 434–441.

[12] 陈正鸣, 刘景, 王志坚. 一个三角网格上曲线的等距线计算方法[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(1): 124–131.

CHEN Zhengming, LIU Jing, WANG Zhijian. Offset algorithm for curves on triangle meshes[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(1): 124–131.

[13] 方宜武, 王显峰, 顾善群, 等. 自动铺丝过程中预浸料的侧向弯曲[J]. 材料工程, 2015, 43(4): 47–52.

FANG Yiwu, WANG Xianfeng, GU Shanqun, et al. Lateral bending of prepreg during automated fiber placement[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(4): 47–52.

[14] 曹德华. 纤维铺放机构的研究与运动分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.

CAO Dehua. Study and motion analysis on fiber placement machine[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.

[15] 许斌. 复合材料自动铺丝编程技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.

XU Bin. Research on automatic wire laying technology of composite material[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.

通讯作者: 孟月梅, 研究员级高工, 研究方向为计算机辅助软件研究与开发, E-mail: meng625\_105@163.com。

(责编 逸飞)