

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.01.014

自动铺丝轨迹理论铺放角度偏差算法

薛柯, 王显峰, 王东立, 宋桂林, 高天成

(南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京, 211106)

摘要: 铺放角是复合材料铺层设计的重要参数,在对铺层进行轨迹规划时采取不同的规划算法可能会导致轨迹角度偏离设计角度。本文从轨迹的方向性和可铺放性对固定角度法和测地线法进行了对比分析,在此基础上研究了复合材料自动铺丝轨迹的理论铺放角度偏差,提出了计算理论铺放角度偏差的几何算法,并基于 Visual Studio 2010 平台,应用 CATIA 二次开发技术实现了理论铺放角度偏差的计算。最后通过计算复合材料截锥壳 45°测地线轨迹的铺放角度偏差验证了角度偏差算法的可行性、可靠性、实用性与高效性。

关键词: 自动铺丝;角度偏差;固定角度法;测地线法;CATIA 二次开发

中图分类号: TB332;TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2020)01-0110-08

Algorithm of Theoretical Placement Angle Deviation for Automated Fiber Placement Trajectory

XUE Ke, WANG Xianfeng, WANG Dongli, SONG Guilin, GAO Tiancheng

(College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: The fiber placement angle is an important parameter in composite layer design. Different trajectory planning algorithms may lead to the deviation of trajectory angle from the design angle. In this paper, the fixed angle algorithm and geodesic algorithm are compared and analyzed in terms of the direction and paving property of trajectory. On this basis, the theoretical placement angle deviation of composite automatic fiber placement trajectory is studied. Then, a geometric algorithm for calculating the theoretical placement angle deviation is proposed. Furthermore, based on Visual Studio 2010 Platform, CATIA secondary development technology is applied to realize the calculation of theoretical placement angle deviation. Finally, the feasibility, reliability, practicability and efficiency of the algorithm are verified by calculating the laying angle deviation of 45°geodesic trajectory on the truncated composite conical shell.

Key words: automatic fiber placement; angle deviation; fixed angle algorithm; geodesic algorithm; CATIA; secondary development

先进复合材料轻质高强,并具有各向异性及可设计性等特点,作为理想的航空结构材料,其适用范围日益广泛,这也更加推动了自动铺放技术的发展。根据铺放时预浸料宽度的不同,复合材料的自动铺放技术可分为自动铺带技术(Automated

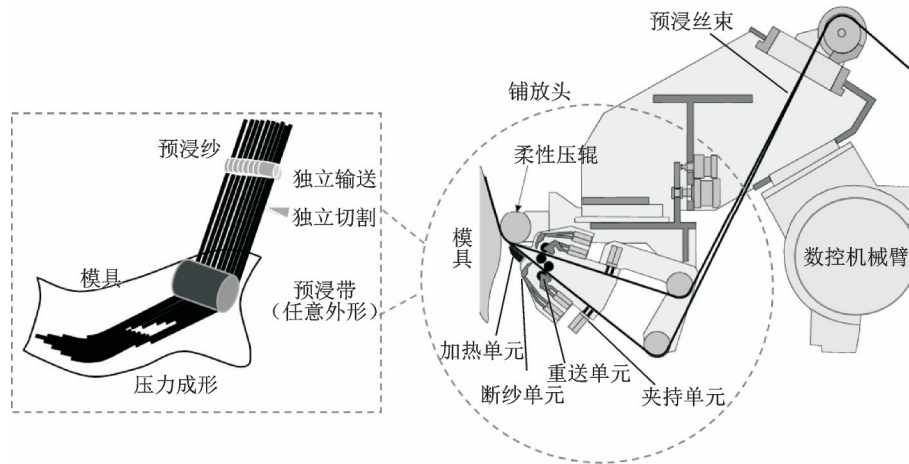
tape layer, ATL)和纤维自动铺放技术,即自动铺丝技术(Automated fiber placement, AFP)^[1-3]。AFP是指多束预浸纱在一定的压力和温度下通过压辊并排铺覆在模具表面(图1),它是复合材料制件高效成形的一种重要的技术手段^[2,4]。该技术成

基金项目: 装备发展部装备预研共用技术(41422010403)资助项目;“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项基金(2017ZX04009001)资助项目。

收稿日期: 2019-09-16; **修订日期:** 2019-12-10

通信作者: 王显峰,男,副教授, E-mail: wangxf@nuaa.edu.cn。

引用格式: 薛柯,王显峰,王东立,等. 自动铺丝轨迹理论铺放角度偏差算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 110-117. XUE Ke, WANG Xianfeng, WANG Dongli, et al. Algorithm of theoretical placement angle deviation for automated fiber placement trajectory[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1): 110-117.

图1 自动铺丝技术原理图^[5]Fig.1 Schematic diagram of AFP technology^[5]

形效率高,废料率低,制成的构件质量好,尤其适用于大型飞机中复合材料构件的制造,对于某些复杂机身的类回转体复材构件的制造成形也同样适用。

自动铺丝成形的复合材料构件各项性能的好坏受铺放轨迹的路径规划及铺层成形方式的影响^[5]。当前在实际工程应用中,自动铺丝技术常用的轨迹规划方法有3种:固定角度法、测地线法及变角度(变刚度)法。固定角度法是各条轨迹线与选定的某条参考线始终成一固定角度,是基于复合材料铺放方向性要求进行设计的轨迹规划方法。采用该方法进行复合材料自动铺放成形的构件具有较为理想的强度。测地线法是根据已知的起始点和起始方向在曲面上确定测地线为轨迹线,是基于铺放的工艺性要求进行设计的轨迹规划方法。测地线是曲面上测地曲率为零的曲线,沿着该曲线铺放的预浸纱不会发生褶皱、变形,铺放质量好。变角度轨迹设计方法通常用于变刚度复合材料层合板的轨迹设计,对于某些复杂构件,当固定角度法和测地线法都不适用时,可考虑采用变刚度法进行铺放^[6]。

自动铺丝轨迹的方向性和可铺放性是进行轨迹规划的两个重要设计要求。按照结构工艺设计要求的纤维方向进行铺放不仅是实现结构设计要求的基础,也是铺放轨迹规划算法的基本准则,铺放时,纤维的铺放方向必须满足复合材料结构的铺层设计方向^[7]。固定角度法适用于各种曲面,尤其适用于固定角度轨迹线与测地线重合的曲面(如圆柱面)。但对于复杂曲面如果采用固定角度法规划轨迹,则容易使得预浸纱出现褶皱、气泡等问题,导致铺放质量差,影响构件强度,此时应考虑铺放的工艺性要求对铺丝方向进行适当修正。如图2所

示,圆锥面上丝束沿着 45° 固定角轨迹铺放时产生了褶皱现象。测地线线型稳定,具有良好的可铺放性,然而对于曲率变化的复杂曲面,测地线轨迹会偏离理论设计铺放角度,产生角度偏差,进而也会对强度产生影响。

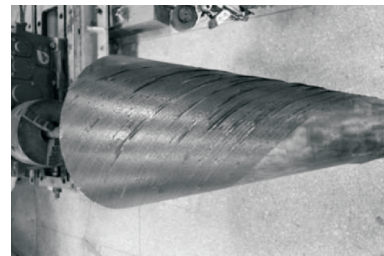


图2 丝束褶皱

Fig.2 Fiber wrinkle

铺放角(轨迹线与参考线之间的夹角)以满足复材构件的力学性能要求为第一目标,它是复合材料构件进行结构设计的主要参数。铺放角度偏差作为影响构件性能的重要因素之一,对其进行研究很有必要。目前,将角度偏差作为影响因素所做的研究有:卞航等^[8]考虑下料误差及铺叠偏差,对铺层角度偏差对某变厚度曲面结构复合材料固化变形的影响进行了研究;佟丽莉等^[9]以碳纤维(M40)/环氧复合材料板为例,研究了铺层角度和厚度偏差对层合板热性能的影响;Pervushin等^[10]研究了多层复合材料层合板在弯曲过程中由层合板铺设角的偏差和铺设顺序中的缺陷产生的不平衡结构对层合板应力状态和应变行为的影响;Arian等^[11]研究了自动铺放过程中的纤维角度偏差、间隙和重叠对变刚度层压板的屈曲载荷的影响。

上述研究中涉及的铺放角度偏差多为实际机器铺放或人工铺叠时产生的角度偏差及人为调整的角度偏差,对于轨迹规划方面,选取的轨迹规划

方法的不同,将会使得生成的轨迹线较设计角度产生不同程度的偏差,本文定义此种角度偏差为理论铺放角度偏差,可从轨迹线的实际角度入手对其进行分析。刘永佼等^[12]给出了固定角、测地线以及等测地曲率曲线3种轨迹上从小端到大端各点处轨迹与圆锥母线的夹角,以此来判断各轨迹角度与设计角度的偏差;熊文磊^[13]在对其提出的固定角算法进行验证时给出了45°参考线在各切片轮廓处计算得到的实际铺放角;徐涛^[14]针对不可解析的类回转体自动铺丝轨迹规划提出了由等分弧度平移法生成的其他轨迹线的铺丝角度不严格等于铺丝角度,并给出了实际铺丝角度的计算公式。综上所述可以发现,轨迹理论铺放角度偏差的计算可从路径的规划方式上进行分析研究,通过轨迹线与参考线的实际铺放角度获得轨迹线的角度偏差。

目前,国内外对采用不同的轨迹规划算法可能产生的理论角度偏差分析并不多见。对于可解析曲面,可通过建立数学模型推导出轨迹线的数学解析表达式,从而获得所需轨迹线上各位置的角度偏差,但该方法计算过程复杂,不便在工程当中应用;对于不可解析的曲面,也无法确定轨迹线的解析表达式,通常采用几何上的近似方法规划轨迹,不能直接获取轨迹线上各个位置处的角度偏差。CATIA是法国Dassault System公司旗下的一款通用的多功能集成于一体的大型CAD/CAE/CAM软件,它具备开放式的内部命令集合,并且提供了二次开发接口——CAA应用接口和自动化应用接口,可方便用户根据自身的需求定制、改进软件,从而提高工作效率和产品质量^[15-16]。因此,本文针对具有复杂曲面的复合材料构件对理论铺放角度偏差进行分析,提出了计算理论铺放角度偏差的几何方法,以Visual Studio 2010为开发平台,基于VB.NET语言应用CATIA Automation二次开发技术开发了复合材料自动铺丝轨迹理论铺放角度偏差计算软件,可准确高效地实现对自由曲面、回转体及类回转体等复杂构件曲面的各轨迹铺放角度偏差数据的获取,为后续科研人员开展理论铺放角度偏差对构件性能的影响、参照角度偏差进行轨迹调整等相关研究提供方便。

1 理论铺放角度偏差的定义与分析

如图3所示,对理论铺放角度偏差进行分析。取一曲面上的某个面片 P 为例, N 为该面片的法向量, LA 为铺放角的参考线,理论设计的纤维铺放方向为 M ,实际轨迹的纤维方向为 M_1 , M 与参考线

之间的夹角即为理论设计角度, M_1 与参考线之间的夹角即为轨迹的实际铺放角度,则 M 和 M_1 之间的夹角 α 即为所求的理论铺放角度偏差。因此,计算理论铺放角度偏差可先求出轨迹线在各个位置处的实际铺放角度,将其与设计角度作差即可得到铺放角度偏差。

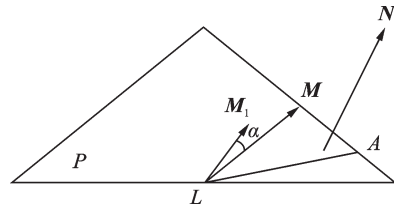


图3 角度偏差示意图

Fig.3 Calculation of angle deviation

一方面,通常芯模曲面轨迹线上的任意轨迹点并不总能经过参考线,不能直接求轨迹线上各个位置处的实际铺放角度;另一方面,比如锥壳结构,以母线为参考线,其轨迹线上任意点都能经过参考线,但由于各个位置处母线空间方向的变化,不便进行实际铺放角度的几何求解。因此,当不能直接计算轨迹线与参考线之间的夹角来获取实际铺放角度时,可采用间接参考的方法,选取合适的间接参考线,根据间接参考线与直接参考线之间的几何关系对轨迹线与间接参考线所成角度进行转换来获得实际铺放角度,从而计算轨迹线的理论铺放角度偏差。

2 理论铺放角度偏差的几何算法

自动铺丝轨迹的理论铺放角度偏差通常产生于存在曲率变化的复杂模型曲面上。复合材料锥壳在航空航天领域应用广泛,如各类运载器与载荷的连接过渡段、火箭发动机喷管扩张段^[17]、人造卫星的碳纤维缠绕锥壳^[18]以及飞机雷达罩等,如图4所示为复合材料锥壳在飞机尾锥上的应用。锥壳为对称的变截面回转体构件,其曲面的曲率随截面半径的变化而不断变化,构件结构具有代表性,因此本文选取锥壳结构为研究对象介绍理论铺放角度偏差算法。



图4 飞机尾锥

Fig.4 Aircraft tail cone

锥面上的轨迹线与母线相交,因此本文选取锥壳轴线为基本参考线,锥壳母线为参考线,定义锥面上的铺放角为轨迹线与母线之间的夹角。锥壳理论铺放角度偏差的求取过程示意图如图 5 所示,在轨迹线上创建一系列的点,如 P_0, P_1, P_2, \dots 点的数量需足够反映整条轨迹线上角度的连续变化。在各点处作一系列与轴线垂直的平面,并在各点处求出平面与锥壳曲面的交线,即一系列环线,以环线作为铺放角的间接参考线,轨迹线与各环线相交,计算出各个点处对应的环线切矢 v_1, v_2, \dots ,与轨迹线切矢 f_1, f_2, \dots 的夹角 $\theta_1, \theta_2, \dots$,如式(1)所示,最终根据母线与环线切线的几何关系进行角度转换便可求出各个位置处的实际铺放角度,从而得到理论铺放角度偏差。

$$\cos\theta = \frac{vf}{|v||f|} \quad (1)$$

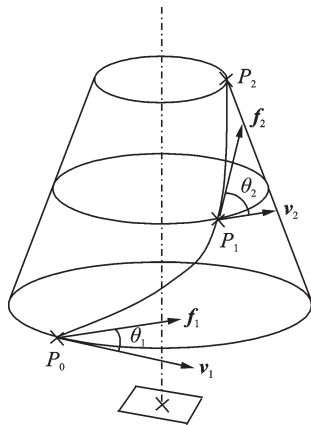
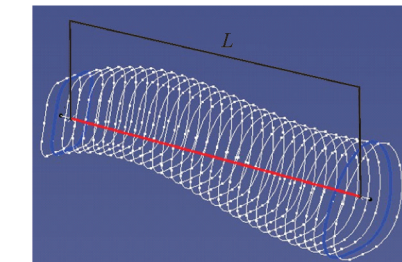
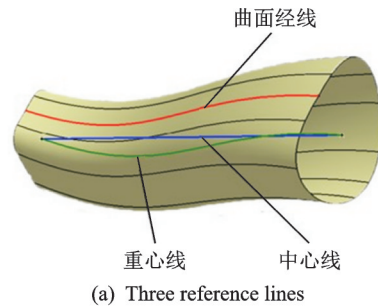


图 5 铺放角度偏差求解过程示意图

Fig.5 Schematic diagram for solving laying angle deviation

对于如图 6(a)所示的类回转体曲面,可选取中心线、重心线或曲面经线为基本参考线,以与基本参考线垂直的平面与芯模曲面的相交线为铺放角的直接参考线时,可直接求出各轨迹线与相交线之间的实际铺放角度,据此计算角度偏差。图 6(b)为基于该曲面中心线生成的各个参考环,即相交环线。参考线始终与参考环垂直,当铺放角以曲面经线等参考线为基准定义时,根据几何关系进行基准转换即可获得轨迹的实际铺放角度,同锥壳轨迹线的实际铺放角度算法相同。同样地,对于自由曲面构件,选取某坐标轴或自由曲面上任意一条边线为参考线,均能求出其任意轨迹的理论铺放角度偏差。

任意曲面上任意铺层的铺放角度均是以某给定的参考线或参考环为基准定义的,本文从铺放角度的定义及轨迹生成的方法入手提出的角度偏差算法适用于各种复材曲面构件。



(b) Reference loop generated based on centerline

图 6 类回转体曲面的参考线与相关参考环

Fig.6 Reference lines and related reference loops of structures in similar revolving shell

3 软件开发

本节基于上述提出的自动铺丝轨迹理论铺放角度偏差的几何算法,借助 Visual Studio 2010 平台,应用 CATIA Automation 二次开发技术设计并开发了角度偏差计算软件,软件界面如图 7 所示。



图 7 软件界面

Fig.7 Software interface

软件运行,需要在 CATIA 结构树中对所需元素进行选取,数据信息输出过程中包括了点、平面、切线等元素的创建、选取及角度的计算,图 7 界面中显示了计算过程中所需的基本参数信息,包括参考线、曲面及各角度轨迹等,基于各个基本参数,设计的软件功能模块有参数选取与输入模块、角度偏差计算模块、效果显示模块、数据输出模块和相交角度计算模块。其中,软件的角度偏差计算流程图如图 8 所示。

软件最终的角度偏差数值可以 TXT 文档的形式输出保存,同时可在 CATIA 界面中以颜色变化的形式宏观显示模型曲面轨迹线理论铺放角度偏

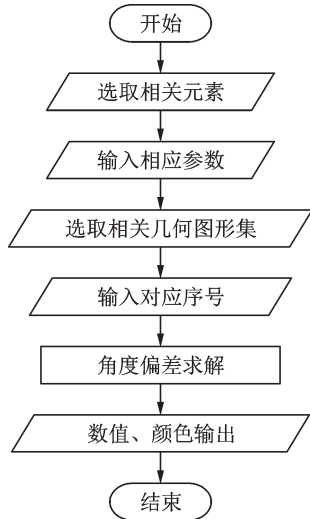


图8 软件流程图

Fig.8 Software flow chart

差的变化。结合所设计的颜色图例,如图9所示,轨迹线上颜色的变化可以更加直观地反映出角度变化的趋势。

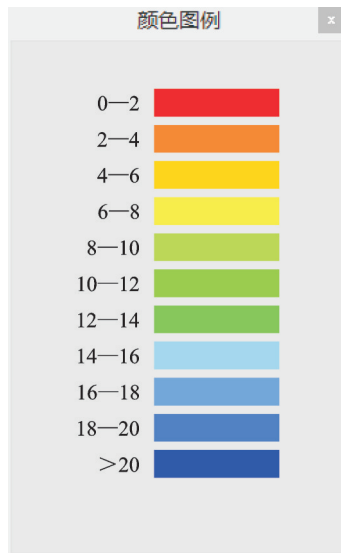


图9 颜色图例

Fig.9 Colour legend

通过自动铺丝轨迹理论铺放角度偏差计算软件的开发,计算模型表面各条轨迹线的角度偏差可评估轨迹线的方向性,实现对复杂曲面轨迹线分布的铺放区域中存在较大角度偏差区域的预测。

4 实例分析与计算

4.1 锥壳测地线轨迹角度偏差程序计算

本文以锥角为 20.8°,大端直径 883.3 mm,小端直径 595.7 mm,高 783.6 mm 的锥壳为例,取锥壳大端面上一点为起始点,利用课题组开发的自动铺丝轨迹规划软件生成完整的 45°测地线轨迹,编写代码将其导入 CATIA 中,如图 10 所示。

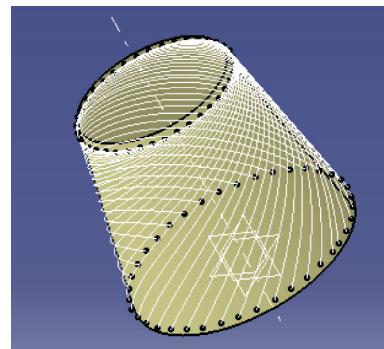


图10 锥壳 45°测地线轨迹

Fig.10 45° layout using geodesic algorithm on conical shell

从图 10 中可以看出,对于锥壳结构,按照测地线算法得到的轨迹角度在锥壳小端已严重偏离了初始设计角度。因此,可对锥壳的测地线轨迹进行理论铺放角度偏差的分析与计算。

将开发的理论铺放角度偏差计算软件,应用于上述锥壳进行验证分析,对其 45°测地线轨迹的理论铺放角度偏差数值进行求取,软件运行界面如图 11 所示。

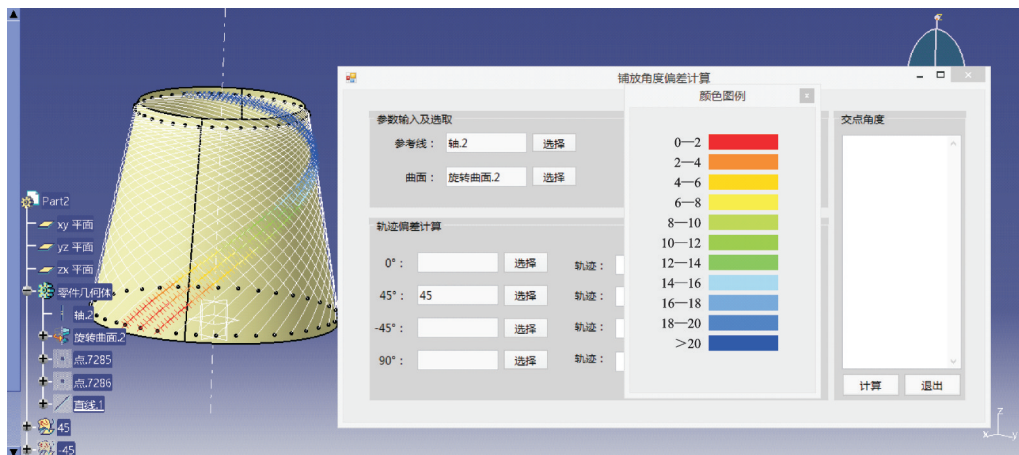
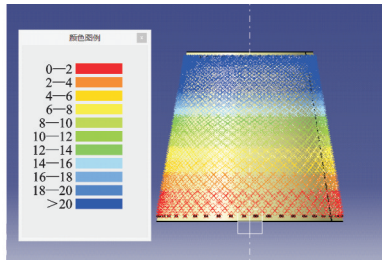


图11 软件运行界面

Fig.11 Software running interface

锥壳结构为规则的回转体,在其同一截面上的各位置处曲率相同,因此同一铺放角度对应的各条轨迹线经过同一截面时的铺放角度也都相同,图 11 为从 44 条轨迹中取任意 3 条进行分析时的软件运行界面。从图中轨迹线上颜色的变化可以看出,各条轨迹的角度偏差变化情况相同,从锥壳大端到小端,随着截面直径的减小,锥壳的 45°测地线轨迹铺放角度偏差越来越大,中上部的角度偏差大于 10°,小端的角度偏差已经大于 20°。

对锥壳表面所有轨迹的角度偏差进行计算,计算结果以颜色变化的形式显示如图 12(a)所示,说明本文软件可实现计算曲面上任意一条轨迹的理论铺放角度偏差的功能。同时,对结果进行输出保存,如图 12(b)所示。本程序设置轨迹线上起始点序号为 0,也可调整为 1。



(a) Display of calculation results of laying angle deviation

40	0	892.3000
445.4607	-24.7913	29.9671
0.572	1	888.0481
443.8303	-13.1145	41.4505
0.306	2	883.8161
441.9057	-1.4290	53.0798
0.0321	3	879.6041
439.6824	10.2576	64.5544
0.2386	4	875.4125
437.1562	21.9370	75.9734
0.5153	5	871.2418
434.3231	33.6007	87.3356
0.7973	6	867.0920
431.1791	45.2405	98.6409
1.0815	7	862.9635
427.7206	56.8473	109.8880
1.3644		

(b) Output TXT document data

图 12 全部轨迹的铺放角度偏差计算

Fig.12 Calculation of laying angle deviation for all trajectories

根据软件运行输出的 TXT 文档可查看各点具体的角度偏差数值,轨迹线上对于每个点输出的数据有 3 行,各行数据含义如表 1 所示。整理输出的文档数据信息,绘制锥壳 45°测地线轨迹上各点处的角度偏差与其所处截面圆直径的关系图如图 13 所示。

分析图 13 可知,锥壳表面 45°测地线轨迹的角

表 1 TXT 文档数据含义

Table 1 The meaning of data in TXT documents

行号	第 1 列	第 2 列	第 3 列
第 1 行	轨迹序号	点序号	截面直径/mm
第 2 行	点 x 坐标	点 y 坐标	点 z 坐标
第 3 行	角度偏差		

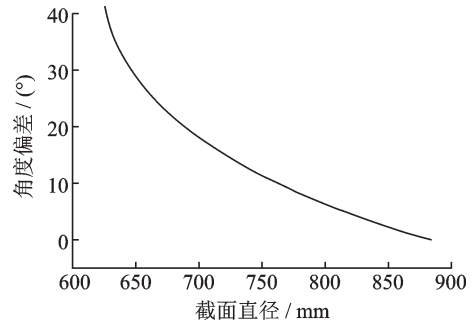


图 13 截面直径变化对轨迹角度偏差的影响

Fig.13 Effect of section diameter variation on angle deviation of trajectory

度偏差随着轨迹线上各点所处截面圆直径的减小而逐渐增大,对于此锥壳结构而言,截面圆直径变化至 750 mm 的截面附近时,轨迹角度偏差达到 10°,角度偏差持续增大将会对构件性能产生较大影响,因此,应综合考虑轨迹的工艺性和铺放方向性对此截面上方曲面的测地线轨迹进行适当调整。

4.2 锥壳测地线轨迹角度偏差解析计算

如图 14 所示,假设锥面 S 上有一测地线 g ,测地线 g 上任意一点用 q 表示, r 为锥面 q 点处的截面圆半径,根据 Clairant 定理^[19]和文献^[20]可知,锥面上任一点处测地线与圆锥母线 \overline{OA} 的夹角 θ 满足

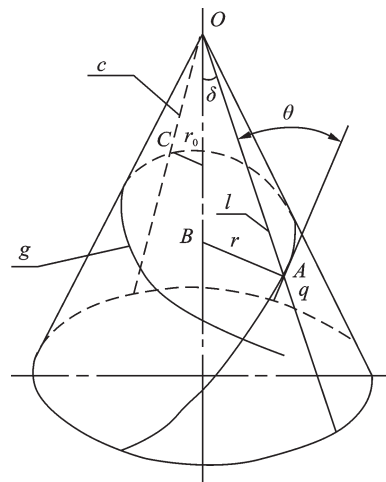


图 14 圆锥面上的测地线

Fig.14 Geodesic line on conical shell

$$\sin\theta = \frac{r_0 \sin\theta_0}{r} \quad (2)$$

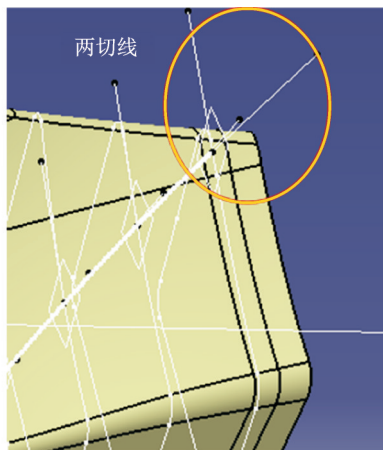
式中: r_0 为测地线起始位置对应的截面圆半径, θ_0 为起始点处测地线与母线的夹角, θ 为其他各点处测地线与母线的夹角。对应于自动铺丝测地线轨迹, θ_0 即为锥面测地线轨迹初始设计角度, θ 则为测地线在锥面各位置处的实际铺放角度。

4.1 节中锥壳结构的 45°测地线轨迹是从大端起始生成,因此将 4.1 节中锥壳尺寸数据代入式(2)中有

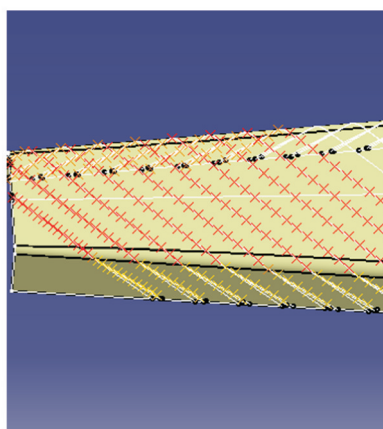
$$\sin\theta = \frac{312.294}{r} \quad (3)$$

任取锥面上一点进行铺放角度计算,如图11所示,当截面直径为879.604 mm时,软件得到测地线轨迹的铺放角度偏差为0.238°。将 $r=879.604/2$ 代入式(3),计算得到此时的铺放角度偏差为0.234°。同时,在CATIA界面使用测量工具对数据信息进行测取,结果显示与TXT文档数据一致。程序算法、解析算法以及CATIA软件自带的测量工具对锥壳结构测地线轨迹角度偏差计算结果的一致性,充分说明了本文自动铺丝轨迹理论铺放角度偏差几何算法的正确性及对应软件的可行性。

另外,将该软件应用于复杂曲面以及开放型的C型翼梁曲面上进行了轨迹角度偏差的计算,如图15所示,图15(a)为在复杂构件表面进行轨迹角度偏差求取的过程,图15(b)则是对C形翼梁的测地线轨迹所产生的角度偏差进行计算后得到的结果。



(a) Calculation process for solving angle deviation of 45° trajectory on complex surface



(b) Calculation results of angle deviation of geodesic trajectory on wing beam surface

图15 角度偏差计算软件的实际应用

Fig.15 Practical application of angle deviation calculation software

本文自动铺丝轨迹理论铺放角度偏差算法在两种类型曲面上进行应用计算,可对针对不同曲面所规划的轨迹的铺放方向性是否满足设计要求进行验证,同时也证明了本文所开发的自动铺丝轨迹理论铺放角度偏差计算软件对复杂类回转体曲面和开放型曲面的便捷性与通用性。

5 结 论

本文通过CATIA提供的Automation应用接口,基于VB.NET语言实现了对CATIA的二次开发,开发了理论铺放角度偏差计算软件,并通过在锥壳结构上的应用对算法的实现问题进行了说明,同时也验证了算法的可行性、可靠性与准确性,在复杂曲面及翼梁曲面上的应用也验证了所开发的软件对复杂类回转体曲面构件及开放型曲面构件的通用性与高效性。在自动铺丝领域,国内外对关于采用不同的轨迹规划算法可能产生的理论角度偏差的具体研究并不多见,本文实现的理论铺放角度偏差的编程计算对开发、完善具有自主知识产权的铺放系统软件中的铺层分析模块有一定的参考价值,且在实际工程应用中对轨迹规划方法的调整与完善具有重要应用价值。另外,本文所开发的角度偏差计算软件的界面具有良好的人机交互性,用户通过对界面进行简单操作即可获得所需数据,极大地提高了运算效率,这也充分证明了CATIA二次开发技术的便利性。

参考文献:

- [1] 黄文宗,孙容磊,张鹏,等.国内复合材料自动铺放技术发展[J].航空制造技术,2014,460(16):84-89. HUANG Wenzong, SUN Ronglei, ZHANG Peng, et al. Development of automated placement technology for composite material[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 460(16): 84-89.
- [2] LUKASZEWICZ H J A, WARD C, POTTER K D. The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future [J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(3): 997-1009.
- [3] GRIMSHAW M N, GRANT C G, DIAZ J M L. Advanced technology tape laying for affordable manufacturing of large composite structures[C]// Proceedings of the 46th International SAMPE Symposium and Exhibition. Long Beach: SAMPE in Covina, 2001: 2484-2494.
- [4] 赵聪.铺丝过程纤维面内屈曲机理及其对构件力学性能影响规律研究[D].南京:南京航空航天大学,2017. ZHAO Cong. Formation mechanism of in-plane fiber

- waviness and its effect on performance of composites in automated fiber placement[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [5] 韩振宇,李玥华,富宏亚,等.锥壳零件自动铺丝变角度轨迹规划算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2012,24(3):400-405.
HAN Zhenyu, LI Yuehua, FU Hongya, et al. Variable-angles trajectory planning algorithm of automated fiber placement for conical shell[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(3): 400-405.
- [6] 段沐枫,秦田亮,沈裕峰,等.自动铺丝最小间隙路径规划与复合材料锥壳结构制造[J].航空学报,2019,40(2):188-196.
DUAN Mufeng, QIN Tianliang, SHEN Yufeng, et al. Minimum gap layout algorithms for automatic fiber placement and manufacture of conic composite structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(2): 188-196.
- [7] 还大军,肖军,李勇.复合材料自动铺放CAD/CAM软件技术[J].航空制造技术,2010(17):33-36.
HUAN Dajun, XIAO Jun, LI Yong. CAD/CAM software technology for composites automated placement[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(17): 33-36.
- [8] 卞航,梁宪珠,张铖,等.铺层角度偏差对曲面复合材料结构固化变形的影响分析[J].材料开发与应用,2012,27(4):38-41.
BIAN Hang, LIANG Xianzhu, ZHANG Cheng, et al. The effect of ply angle declination on deformation of cure composite structure[J]. Development and Application of Materials, 2012, 27(4): 38-41.
- [9] 佟丽莉,葛源源.铺层角度和厚度偏差对层合板热性能的影响[C]//第十五届全国复合材料学术会议论文集(下册).北京:国防工业出版社,2008:1288-1291.
TONG Lili, GE Yuanyuan. The impact of lalyer angles and thickness error on thermal expansion properties of laminste[C]// Proceedings of the 15th National Conference on Composite Materials (Volume II). Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 1288-1291.
- [10] PERVUSHIN Y S, SOLOVIEV P V. Peculiarities of strain behaviour and stressed state of plates made of unbalanced laminated composite materials[J]. Samara State Aerospace University, 2012, 32(1): 153-160.
- [11] ARIAN N M, FAYAZBAKSH K, PASINI D, et al. Optimization of variable stiffness composites with embedded defects induced by automated fiber placement[J]. Composite Structures, 2014(107): 160-166.
- [12] 刘永佼,王显峰,肖军.圆锥面等测地曲率曲线的轨迹规划方法[J].航空学报,2017,38(7):291-298.
LIU Yongjiao, WANG Xianfeng, XIAO Jun. Trajectory planning method for constant geodesic curvature curve of cone[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(7): 291-298.
- [13] 熊文磊.基于网格化曲面的自动铺丝轨迹规划研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.
XIONG Wenlei. Research on fiber placement trajectory design algorithm on meshed surface[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [14] 徐涛.不可解析的类回转体自动铺丝轨迹规划的研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.
XU Tao. Research on trajectory planning of automatic fiber placement for structures in similar revolving shell [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [15] 康文利,张颖.CATIA二次开发技术在齿轮参数化设计中的应用[J].机械工程师,2010(11):81-83.
KANG Wenli, ZHANG Ying. Application of the secondary CATIA-based development in the parametric design of wheel gear[J]. Mechanical Engineer, 2010(11): 81-83.
- [16] 彭欢.基于V5 Automation的CATIA二次开发技术研究[J].电子机械工程,2012,28(2):61-64.
PENG Huan. Study on secondary development technology for CATIA based on V5 automation[J]. Electro-mechanical Engineering, 2012, 28(2): 61-64.
- [17] 霍肖旭,刘红林,曾晓梅.碳纤维复合材料在固体火箭上的应用[J].高科技纤维与应用,2000(3):1-7.
HUO Xiaoxu, LIU Honglin, ZENG Xiaomei. Applications of carbon fiber composites on SRM [J]. Hi-tech Fiber Application, 2000(3): 1-7.
- [18] 吴宏伟,王桂英,张福成.圆锥台柱体上的纤维缠绕[J].纤维复合材料,2000,17(2):31-34.
WU Hongwei, WANG Guiying, ZHANG Fucheng. Filament winding of circular truncated cone[J]. Fiber Composites, 2000, 17(2): 31-34.
- [19] 马惠仙,郑鹏飞,赵菊娣.回转曲面的测地线求解方法[J].图学学报,2017,38(2):170-173.
MA Huixian, ZHENG Pengfei, ZHAO Judi. Method for solving geodesic line on revolving surface[J]. Journal of Graphics, 2017, 38(2): 170-173.
- [20] BLOM A W, TATTING B F, HOL J M A M, et al. Fiber path definitions for elastically tailored conical shells[J]. Composites Part B, 2009, 40(1): 77-84.