

复合材料自动铺带技术研究 (I)

——“自然路径”特性分析及算法

胡翠玲 肖军 李勇 吴海桥

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京 210016)

文 摘 分析了可展面上“自然路径”的几何本质,推演证明其在可展曲面上与测地线的等价性。应用和拓展可展面“自然路径”数值算法,在一般曲面上引入边界控制点调整预浸带中心点以减小预浸带变形、实现铺放,构造了一般曲面“自然路径”求解格式。

关键词 复合材料,自动铺带,自然路径,测地线

Study on Automated Tape-Laying Technique for Composites Part I: Natural Path Property Analysis and Calculation Method

Hu Cuiling Xiao Jun Li Yong Wu Haiqiao

(College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract The geometric property of natural path on developable surface is analyzed, and it is proved that the natural path and the geodesic line is equivalent on the developable surface. By application and modification of the natural path calculating method on developable surface, a new approach for calculating natural path on general surface is developed, in which new control points are induced to adjust center point of prepreg tape so as to decrease its global deformation.

Key words Composites, Automated tape-laying, Natural path, Geodesic line

1 前言

连续纤维层合复合材料具有可设计、设计制造一体化和结构功能一体化的优点,是高性能复合材料的主要形式之一。制造过程包括三个阶段:用纤维和树脂制备的单向预浸布/带;根据铺层设计要求剪裁,并逐层铺叠到模具表面;固化成型。其中铺叠过程是保证材料性能、提高生产效率和降低制造成本的重要环节,铺叠自动化是复合材料制造技术的重要发展方向。如预浸布数控自动剪裁、激光辅助定位铺叠、自动铺带技术等。自动铺带主要用于铺放小曲率大构件,如翼面、壁板等,现已成为发达国家复合材料构件的典型制造技术,用于哥伦比亚号航天飞机 18.2 m × 4.6 m 的主货舱门、A380 飞机的中央翼盒、787 飞机机翼制造等^[1-3]。

自动铺带成形时将带有隔离背衬纸的单向预浸带在铺带头中完成预定形状的切割,加热后在压辊的作用下直接铺叠到模具表面形成待固化坯材;由于纤

维和背衬纸的刚性,预浸带呈硬挺状,预浸带只能在很小范围有限变形。预浸带中心线只有沿特定轨迹才能使预浸带变形最小,否则将导致预浸带屈皱或撕裂,这种特定轨迹称为“自然路径”^[4]。用迭代格式计算“自然路径”虽有专利报道^[5-6]并已经形成商品软件,如 FBERSM 软件、ACRAPH 软件模块^[7]等,但对于“自然路径”的内涵、数学模型及特性分析少有报道,虽然文献[4]指出“对于单曲面上,‘自然路径’在其展开曲面上是一条直线”,但未给予证明。

曲面“自然路径”的构造与分析是自动铺带 CAD 软件算法的核心之一。本文根据微分几何理论,按照“自然路径”的特征建立了可展面上“自然路径”的数学模型;证明了可展曲面上“自然路径”与测地线的等价性,构造了基于曲面三角面片离散的求解格式,在此基础上研究了一般曲面上自然路径的构造方式,提出了相应的算法,为形成具有自主知识产权的自动铺带 CAD/CAM 软件奠定了算法基础。

收稿日期:2005-10-27

作者简介:胡翠玲,1976年出生,硕士,主要从事先进复合材料纤维缠绕与铺放 CAD 开发工作

2 可展面上的“自然路径”

2.1 可展面上“自然路径”与测地线等价

测地线是曲面上测地曲率恒等于零的曲线,如圆柱面上的螺旋线。

可展面是指沿一条母线的所有的切平面都相同的直纹面,可以连续展开成平面;包括柱面、锥面及切线曲面。可展面上的曲线随可展面展开时有三个特点:(1)等长——曲线展开后弧长不变;(2)保角——两条曲线的夹角展开后不变;(3)等测地曲率——曲线展开后测地曲率不变^[8]。由于曲面连续可展,可以寻求“自然路径”的精确解,便于分析;同时可为进一步研究一般曲面上的“自然路径”奠定算法基础。

按照“自然路径”的物理内涵,严格的“自然路径”应当使预浸带完全自然舒展贴合在待铺曲面上,预浸带单元上的纤维长度和彼此间的距离相等。将沿着“自然路径”铺放的预浸带随可展面展开到平面上,如图1所示。

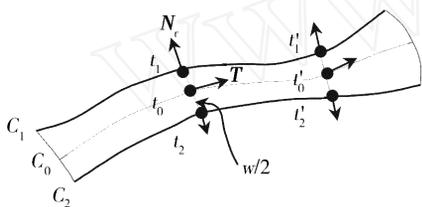


图1 预浸带展开

Fig 1 Developed prepreg tape

C_0 、 C_1 、 C_2 分别是预浸带中心线和左右边线, T 和 N_r 分别是 C_0 上 t_0 处的单位切向矢量和法向矢量, t_1 、 t_2 分别是法线 N_r 与 C_1 、 C_2 的交点, t_0 是 C_0 上的任意一点, t_1 、 t_2 分别是 t_0 处法线与 C_1 、 C_2 的交点, w 为带宽。由于“自然路径”须保证预浸带横向不屈皱不撕裂,根据可展面在展开时的保长和保角特性,得到 $t_0 t_1 = t_0 t_2 = w/2$ 故 C_1 、 C_2 是 C_0 上每一点沿所在处的法线的正(负)方向移动 $w/2$ 距离形成的曲线,它们是 C_0 的内(外)等距曲线。另一方面“自然路径”还应保证预浸带纵向等弧长,再利用可展面的保长特性,得到 $t_0 t_0 = t_1 t_1 = t_2 t_2$ 。根据正则曲线弧长的积分公式 $s(t) = \int_0^t |r'(t)| dt$ 只有 C_0 、 C_1 、 C_2 曲线的一阶导矢模长相等,它们的弧长才相等。选择 C_0 的参数方程为 $r = (x(t), y(t))$, ($x(t)$ 、 $y(t)$ 为任意函数),则有:

$$\begin{cases} T = (x, y) / \sqrt{x^2 + y^2} \\ N_r = (-y, x) / \sqrt{x^2 + y^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中,上角标“ \cdot ”表示对参数 t 求导(下同), C_1 、 C_2 的方程分别为:

$$\begin{cases} r_1 = [x(t) - wy/2 \sqrt{x^2 + y^2}, y(t) + wx/2 \sqrt{x^2 + y^2}] \\ r_2 = [x(t) + wy/2 \sqrt{x^2 + y^2}, y(t) - wx/2 \sqrt{x^2 + y^2}] \end{cases} \quad (2)$$

对 C_0 、 C_1 、 C_2 分别求模长,且使 $|r_1| = |r_2| = |r_0|$,有

$$(y / \sqrt{x^2 + y^2}) = (x / \sqrt{x^2 + y^2}) = 0 \quad (3)$$

积分式(3)得到:

$$\begin{cases} y / \sqrt{x^2 + y^2} = a \\ x / \sqrt{x^2 + y^2} = b \end{cases} \quad (a, b \text{ 为常数}) \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)有

$$\begin{cases} T = (b, a) \\ N_r = (-a, b) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)表明: C_0 切向矢量和法向矢量为常向量,即 C_0 为直线。

根据可展面保曲率特性和测地线定义,展开面上的直线 C_0 唯一对应被展曲面上的测地线。上述演绎结果证明:可展面上“自然路径”与测地线等价。可展面上求解给定初始条件的“自然路径”即为寻找给定初始条件的测地线。

2.2 “自然路径”的离散逼近

可展面上求“自然路径”即为求测地线。鉴于测地线微分方程数值解法需要针对不同的曲面求解微分方程,兼顾研究一般曲面上“自然路径”的需要,本文采用三角面片逼近法求解测地线。这种方法计算简单、格式一致、通用性好,尤其适合于数字曲面的计算。如图2所示,把曲面三角面片化以后获得各个面片 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 ... 其单位法向矢量为 N_0 、 N_1 、 N_2 、 N_3 ...; L_0 、 L_1 、 L_2 ... 分别为面片 S_0 与 S_1 、 S_1 与 S_2 、 S_2 与 S_3 ... 之间的脊线,给定预浸带中心线的起点 P_0 和铺放方向 V_0 ,用下列条件

$$\begin{aligned} L_0 &= N_0 \times N_1, V_0 \cdot L_0 = V_1 \cdot L_0, V_1 \cdot N_1 = 0; \\ L_1 &= N_1 \times N_2, V_1 \cdot L_1 = V_2 \cdot L_1, V_2 \cdot N_2 = 0; \end{aligned}$$

.....

可确定各个面片上的测地线方向 V_1 、 V_2 、 V_3 ...^[9-10], 从而得到一系列的点 P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 ... 连接诸点 P 即得到所求曲面上的测地线。在展开面上求出相应的测地线即可得到“自然路径”。图3为柱面上的计算结果。

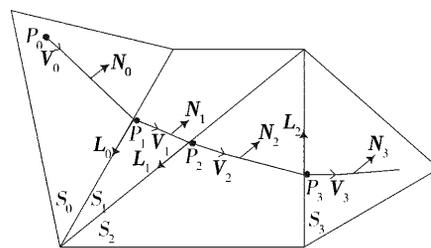


图2 三角面片上的测地线

Fig 2 Geodesic line on triangular meshes

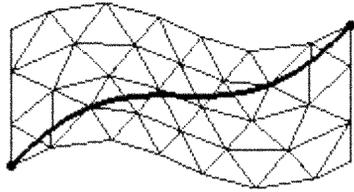


图 3 柱面上的自然路径

Fig 3 Natural path on cylinder

3 一般曲面上的“自然路径”

3.1 一般曲面上“自然路径”的分析

一般曲面未必可展,其上测地线与“自然路径”不等价。如图 4所示,组成预浸带的每根纤维获得初始方向后将有各自的轨迹,沿着不同的测地线前进若干步长后,它们间的曲率和挠率相差可能越来越大,导致预浸带撕裂或重叠。

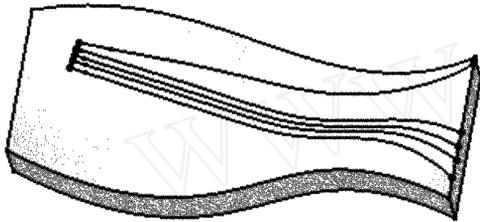


图 4 预浸带撕裂

Fig 4 Prepreg tape divulsion

将曲面离散,局部区域展开后作为可展面处理,离散后面片上的“自然路径”为一段测地线。因此可以用一系列连接起来的测地线段构造一般曲面上的“自然路径”,各测地线段方向的选择应使相邻展开区预浸带撕裂的趋势最小,从而保证预浸带在整个曲面满足铺放的要求。

3.2 算法

如图 5所示,将一般曲面三角面片化。 P_0 为预浸带中心线起点, V_0 为给定的初始铺放方向。在过 P_0 垂直于 V_0 的测地线 C_0 上取两点 L_0 、 R_0 作为预浸带边点,它们到 P_0 点的弧长等于带宽的一半。以 L_0 、 R_0 为起点,在曲面上沿各自所在 C_0 处的法向矢量方向,按照可展面“自然路径”的算法前进一个步长得到新点 L_{11} 、 R_{11} 。为控制预浸带总体变形,在二者之间的测地线 C_1 上取中点 P_1 ,将其作为行进一个步长后中心点的位置;在 C_1 上再取两个新控制点 L_1 、 R_1 ,它们与 P_1 的距离等于带宽的一半。取 P_0 、 P_1 之间的测地线 D_0 在 P_1 处的切向矢量方向作为下一个步长的初始铺放方向 V_1 ,依此类推得到一系列中心点位置,把这些中心点之间的测地线顺序连接起来,作为所求的“自然路径”。

上述对控制点—预浸带边点的选择,虽然会使局部纤维偏离测地线,但由于 L_0R_0 、 L_1R_1 相等,作为铺

放边界预浸带横向变形最小。

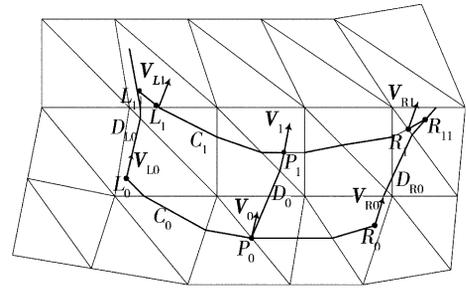


图 5 一般曲面上的“自然路径”

Fig 5 Natural path on general surface

计算格式如下:

(1)根据复合材料铺层参数确定 V_0 、 P_0 ,在测地线 C_0 上确定初始控制点 L_0 、 R_0 及前进步长方向 V_{L_0} 、 V_{R_0} 。

(2)按照可展面“自然路径”的算法计算一个步长后它们的位置 L_{11} 、 R_{11} 。

(3)确定一个步长后中心点的位置 P_1 和铺放方向 V_1 。

(4)确定一个步长后控制点的位置 L_1 、 R_1 和前进步长方向 V_{L_1} 、 V_{R_1} 。 V_{L_1} 、 V_{R_1} 满足下列条件:

$$V_{L_1} \cdot (N_{L_1} \times N_1) = V_1 \cdot (N_{L_1} \times N_1), V_{L_1} \cdot N_{L_1} = 0$$

$$V_{R_1} \cdot (N_{R_1} \times N_1) = V_1 \cdot (N_{R_1} \times N_1), V_{R_1} \cdot N_{R_1} = 0$$

(5)重复 (2) ~ (4) 步骤,得到一系列的点 P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 ..., 顺序连接过这些中心点的测地线 C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 ..., 即为所求的“自然路径”。

这种构造方式初始控制点及以后求得的一系列控制点与中心点始终位于同一测地线上,前进步长按照测地长度计算,相邻中心点之间的轨迹也是测地线,这给编写相应的计算机程序带来方便:设置一个测地线计算模块反复调用即可。

$L_{11}L_1$ 、 $R_{11}R_1$ 表征了预浸带边缘纤维偏离局部测地线的程度。作为特例,当曲面趋近可展面时,根据可展面的特性, L_{11} 将与 L_1 重合、 R_{11} 将与 R_1 点重合,算法是收敛的。

4 结论

(1)可展面上“自然路径”与测地线等价。这为研究单曲面自动铺带提供了重要依据。例如:柱面上的“自然路径”可以在其展开后的平面上直接构造直线研究,建立平面铺带与曲面铺带的转换关系。

(2)非可展面上测地线不再是“自然路径”;对于有限宽度的预浸带,使预浸带完全不变形的铺放轨迹并不存在,只能求其近似解,使预浸带整体变形趋向减小。

(3)应用局部可展原理和可展面“自然路径”算法,构造了一种一般曲面“自然路径”的算法格式。

尽管每根纤维相对于局部可展面的“自然路径”均稍有偏离,但预浸带整体变形减小。

参考文献

- 1 Mills A. Automation of carbon fiber perform manufacture for affordable aerospace applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2001; 32 (7): 955 ~ 962
- 2 Grimshaw M N, Grant C G, Luna Diaz J M. Advanced technology tape laying for affordable manufacturing of large composite structures <http://www.lambtech.com>. 2005
- 3 赵稼祥. 2000年美国材料与加工工程促进学会年会与展览简介. *宇航材料工艺*, 2001; 31 (1): 58 ~ 61
- 4 陈祥宝. 先进复合材料低成本技术. 北京:化学工业出版社, 2004: 69 ~ 99
- 5 Lewis H W, Romero J E. Composite tape placement apparatus with natural path generation means. U. S. patent document: 4696707, 1987

- 6 Nobuo Shinno, Toshikazu Shigematsu. Method for controlling tape affixing direction of automatic tape affixing apparatus. U. S. patent document: 5041179, 1991
- 7 Grimshaw M N. Automated Tape Laying <http://www.lambtech.com>. 2005
- 8 陈维桓. 微分几何初步. 北京:北京大学出版社, 1990: 56 ~ 108
- 9 Martinez Dimas, Velho Luiz, Carvalho P C. Geodesic paths on triangular meshes. In: *Proceedings of the computer graphics and image processing, XV II brazilian symposium on (SIBGRAPI'04)*, 2004: 210 ~ 217
- 10 Lanthier M, Nussbaum D, Sack J R. Parallel implementation of geometric shortest path algorithm. *Parallel Computing*, 2003; 29 (10): 1 445 ~ 1 497

(编辑 李洪泉)

(上接第 31 页)

4 结论

(1)通过对比试验,研制了一种以环氧改性有机硅树脂为主体树脂、以低分子量聚酰胺为固化剂、以颗粒状及片状填料来实现隔热耐热功能的室温固化涂料体系,溶剂为一定比例的丙酮与二甲苯的混合物。

(2)所研制的涂料热导率为 $0.266 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 比热容为 $1.993 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$; 拉伸强度为 3.15 MPa , 断裂伸长率为 30% ; 具有较好耐热性能, 较低的线烧蚀率及质量烧蚀率, 良好的附着力。

(3)所研制的涂料与碳纤维环氧复合材料之间具有较好的界面性能,二者之间的拉剪强度为 4.29 MPa 。涂料具有较好的隔热性能,短时可耐 450 的高温,可以用于碳纤维环氧复合材料壳体表面的外热防护。

参考文献

- 1 赵英民,刘瑾. 高效隔热涂层应用研究. *宇航材料工艺*, 2001; 31 (3): 42 ~ 45

- 2 王晓洁,梁国正,张炜等. 低密度高弹性隔热复合材料研制. *功能材料*, 2004; (35)增刊: 1 741 ~ 1 744
- 3 高南主编. 特种涂料. 上海:上海科学技术出版社, 1987: 32
- 4 于翹主编. 材料工艺(下). 北京:宇航出版社, 1993: 136 ~ 139
- 5 王德中主编. 环氧树脂生产与应用. 北京:化学工业出版社, 2002: 198 ~ 230
- 6 孙曼灵主编. 环氧树脂应用原理与技术. 北京:机械工业出版社, 2003: 111 ~ 146
- 7 程能林主编. 溶剂手册. 第 2 版. 北京:化学工业出版社, 1994: 33
- 8 于翹主编. 材料工艺(下). 北京:宇航出版社, 1993: 87 ~ 88
- 9 惠雪梅,张炜,王晓洁. 纤维型纳米隔热材料的研制. *宇航材料工艺*, 2005; 35 (3): 24 ~ 27
- 10 居滋善主编. 涂料工艺. 北京:化学工业出版社, 1994: 194 ~ 195

(编辑 任涛)