

复合材料自动铺带的预浸带规划技术*

Prepreg Tape Designing Technology on Automatic Tape-Laying for Composites

中航工业北京航空制造工程研究所 孟月梅
沈阳航空航天大学 王伟

[摘要] 针对复合材料自动铺带技术的铺放要求,对预浸带的几何构成与规划初始条件设定进行了介绍,提出了基于铺层信息的预浸带铺放路径规划、预浸带轮廓边界生成以及展平几何计算等实现方法,并从不同侧面阐述了预浸带可铺放性的分析方法。通过预浸带规划模块开发以及曲面铺层上预浸带几何的生成,证明了该方法的可行性。

关键词: 自动铺带 预浸带规划 铺放路径 预浸带轮廓 展平几何

[ABSTRACT] Geometric elements and the initial conditions of prepreg tape designing are introduced, which is based on automatic tape-laying technology for composites. According to ply information, geometric element of tape is generated, and the method of tape analysis is discussed. The module of tape designing is developed, and an example shows that the method of generating tape geometries on surface is feasible.

Keywords: Automatic tape-laying Prepreg tape designing Tape-laying path Contour of prepreg tape Flattening geometry

自动铺带技术是复合材料构件自动化制造发展的产物。该技术利用数控技术实现预浸带定位、铺覆、裁剪、压实等过程的自动完成,是数控、CAD/CAM、预浸带铺放工艺等多个技术领域的综合应用。自动铺带将一定宽度的单向预浸带按预定方向进行铺覆,不仅要满足所铺放的预浸带不能有皱褶、撕裂等现象,且相邻预浸带不允许搭接。对于一些尺寸大、曲率变化较小的复合材料构件,手工制造难度大,精度、工艺性能难以保证,采用自动铺带技术不仅能够很好地解决这类问题,而且效率也有显著提高^[1-2]。

在自动铺带 CAD/CAM 软件开发中,预浸带铺放路

径规划是其关键技术之一,它直接关系到复合材料构件的成型精度与质量。国外已有商业化的自动铺带 CAD/CAM 软件,如美国 CINCINNATI 公司的 ACRAPATH 软件,法国 CIMPA 公司的 TAPELAY 软件等。国内针对自动铺带 CAD/CAM 技术也进行了深入研究,如南京航空航天大学等单位,在自动铺带相关软件开发方面取得了一些成果,并进行了应用验证^[3-4]。在自动铺带的预浸带规划研究中,从目前报道发现,针对路径规划算法方面的研究较多,而对基于铺层信息的预浸带规划技术方面的研究较少。

本文针对复合材料自动铺带技术的铺放要求,明确了预浸带几何构成及规划初始条件,提出了基于铺层信息的预浸带铺放路径规划、预浸带边界生成以及展平几何获取等实现方法,并从不同侧面预浸带可铺放性进行了分析,使自动铺带的预浸带规划方法更具有实用性。运用本文提出的实现方法,借助 CATIA 提供的二次开发工具 CAA,开发了预浸带规划功能模块,并在曲面铺层上生成了预浸带相关几何,验证了该方法的可行性。

1 预浸带几何元素构成及规划初始条件设定

1.1 预浸带几何元素

在复合材料构件铺层设计模型中,铺层信息包括纤维方向、铺层轮廓线及铺层所在面(可为平面或曲面)。自动铺带的预浸带规划,将以铺层信息为基础,提供能够完整描述整个铺层中所有预浸带定位、铺放、裁剪等过程所需的各类数据。通过对铺带设备与所需制造数据的综合分析,确定预浸带几何类型主要包括预浸带铺放路径、轮廓边界以及其展平几何^[5]。

(1) 预浸带铺放路径是铺放带的轨迹数据,位于整个预浸带沿纤维方向的中部,也称为预浸带中心线。

(2) 预浸带轮廓边界由带侧边线、铺层轮廓边界等构成,为一封闭轮廓线。带轮廓边界决定了带的实际形状。

(3) 预浸带展平几何是对预浸带平直状态时的形状描述。该数据主要用于铺放设备的自动裁剪。

* 用于翼面类结构的大型复合材料铺带机(2009ZX04004-101“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项)、基于全三维信息模型的复材工艺设计技术(先进制造技术预研项目)、基于全三维信息模型的复材工装设计技术(先进制造技术预研项目)资助。

预浸带几何元素构成如图 1 所示。

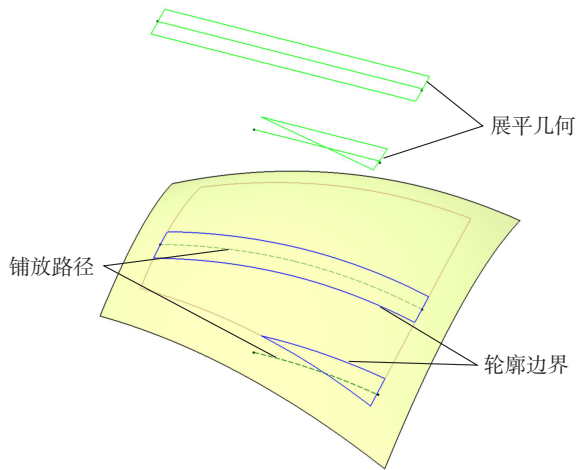


图1 预浸带几何元素构成
Fig.1 Geometrical elements of prepreg tape

1.2 预浸带规划初始条件设定

预浸带规划初始条件包括 2 种,一是规划相关参数的设置,另一个是指各铺层确定预浸带分布的依据。预浸带规划参数包括带间隙、间隙偏差范围、纤维角度偏差最大值、铺放方向相同铺层的预浸带偏移量等。通过在每个铺层中设定起始位置,确定各铺层预浸带的分布状态。

2 基于铺层的预浸带几何生成

根据以上所述,预浸带几何元素主要包括铺放路径、轮廓边界及展平轮廓。首先,在铺层面上生成铺放路径所在的直线或曲线。通过铺放路径所在线、铺层轮廓及带宽可获得预浸带的轮廓边界。在此基础上,计算铺层中所有预浸带在参考平面上展平几何。铺层面可为平面或曲面,平面时实现方法相对来讲比较简单,本文主要介绍铺层面为曲面时预浸带规划实现方法。预浸带几何生成流程如图 2 所示。

2.1 预浸带铺放路径与轮廓边界计算

在预浸带铺放路径与轮廓边界计算时,所需的初始条件有铺层面、铺层轮廓、纤维方向、初始位置、带宽 (Width)、间隙 (Gap) 等。根据这些条件,首先计算铺层面上铺放路径所在线及带两侧边线,接着按照铺层轮廓生成每条带的轮廓边界。在铺放路径及两侧边线的计算中,将多次用到曲面上偏置曲线的计算。因此,曲面上偏置曲线的计算方法是实现预浸带规划的关键技术之一。

(1) 曲面上偏置曲线的计算。

将原曲线 C 按一定精度离散,得到离散点集 $\{P_i\}$ ($i=1, 2, \dots, n$)。设离散点 P_i 处沿曲线 C 的切向为 T_i ,

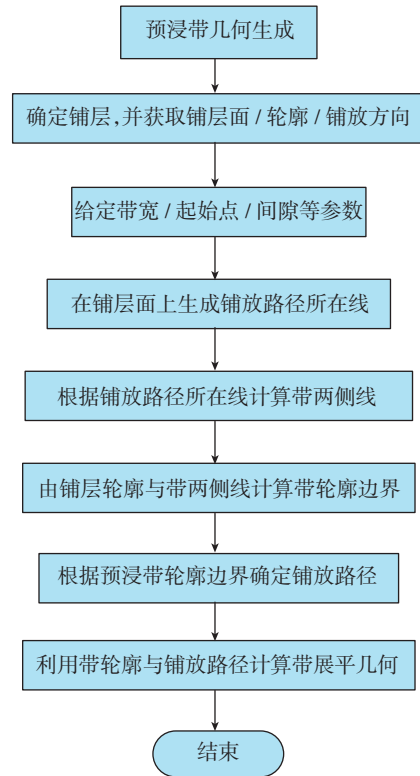


图2 预浸带几何生成实现流程
Fig.2 Flow of creating tape geometries

法向为 N_i ,则向量 V_i 为:

$$V_i = \pm (N_i \times T_i) \quad (1)$$

过 P_i 点沿方向 V_i 在曲面上生成曲线 L_i , d 为偏置距离,在 L_i 上取偏置点 P'_i ,满足:

$$d = P_i P'_i \quad (P_i P'_i \text{ 为曲线上的弧长}) \quad (2)$$

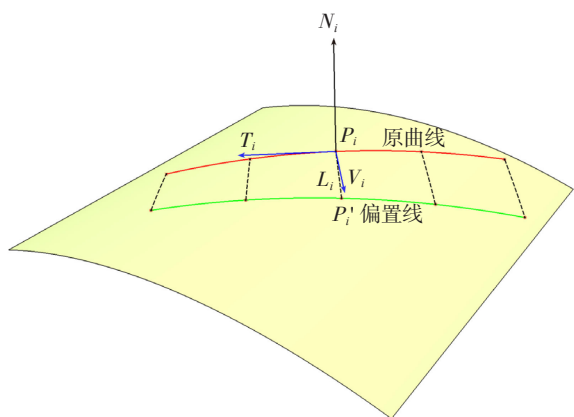
P'_i 点即为 P_i 的偏置点。将所有偏置点 $\{P'_i\}$ ($i=1, 2, \dots, n$) 进行曲线拟合,即可获得偏置曲线。如图 3 (a) 所示。

另一种适用于自动铺带工艺的曲面偏置线算法,在原曲线上取等分点,得到点集 $\{P_i\}$ ($i=1, 2, \dots, n$),按偏置距离计算各点的偏置点,即 $\{P'_i\}$ ($i=1, 2, \dots, n$)。根据铺层纤维方向计算过偏置点的测地线,并通过适当调整纤维方向,使所生成测地线与相邻偏置点最近距离。如图 3 (b) 所示。利用这种方法生成的偏置线,既可以保证曲线走向,还能够满足偏置距离。

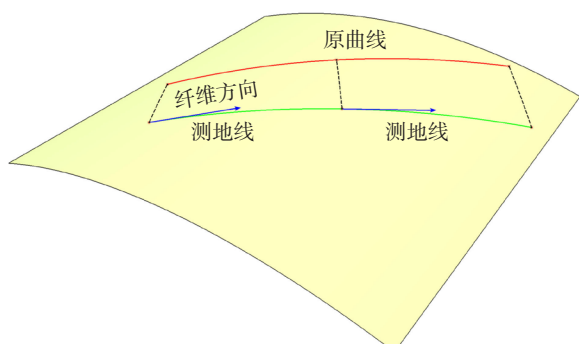
前一种偏置曲线生成方法运算较快,但缺陷就是铺层面曲率变化较大时,会导致带的方向不符合构件设计要求;第二种偏置曲线计算方法较为复杂,计算时间长、效率低。在实际应用中,可根据需要适当选择,也可两种形式结合使用。

(2) 铺层面上铺放路径所在曲线的计算。

根据铺层的初始位置、纤维方向在铺层面上生成



(a) 曲面上偏置曲线的计算



(b) 利用测地线的偏置曲线计算

图3 曲面上偏置曲线计算示意图
Fig.3 Calculating offset curves on surface

第一条曲线 C_0 (通常为测地线,且贯穿整个铺层面)。设定偏置距离 $d = \text{Width} + \text{Gap}$,按照偏置距离 d 在 C_0 右侧依次生成曲面上的偏置线 $\{C_i\}$ ($i=1, 2, \dots, m$); 在 C_0 左侧计算铺层面上所有偏置曲线 $\{C_i'\}$ ($i=1, 2, \dots, m'$)。这些线决定了带的分布状况,带的铺放路径就在这些线上。

(3) 预浸带轮廓边界的生成。

对于任一条曲线 C_i (或 C_i'),首先按带宽的一半计算其两侧的偏置曲线,生成带的两侧边线,接着确定铺层轮廓与两侧边线的关系,由此生成带轮廓边界。

对于相交的情况,取出与带相关部分(如 CS_1 、 CS_2 、 CP_1 、 CP_2 等),构成带轮廓边界。如果铺层有多个轮廓,则铺层内外轮廓共同决定了预浸带轮廓。预浸带轮廓边界构成如图 4 所示。

2.2 预浸带铺放路径的计算

预浸带铺放路径位于曲线 C_i (或 C_i') 上,带铺放路径曲线段由预浸带轮廓线决定。当铺层面为平面时,找到带轮廓最外侧点就可获得铺放路径曲线段端点,如图 5 中的 P_1 、 P_2 即为铺放路径端点。

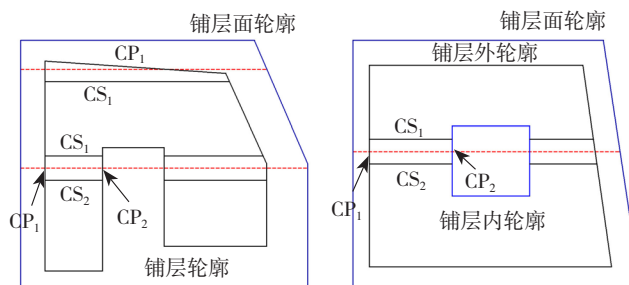


图4 预浸带轮廓边界构成示意图
Fig.4 Tape contour component

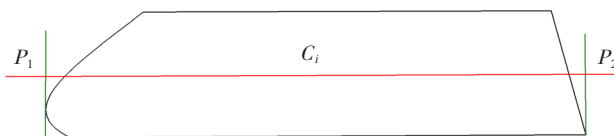


图5 铺放路径端点的确定
Fig.5 Endings of tape tool-path

当铺层面为曲面时,无法精确计算轮廓最外侧点到 C_i 的垂线。因此,需要通过迭代方式,近似找到轮廓线最近点与垂线,最终求得铺放路径曲线段端点。曲面上铺放路径生成流程如图 6 所示。

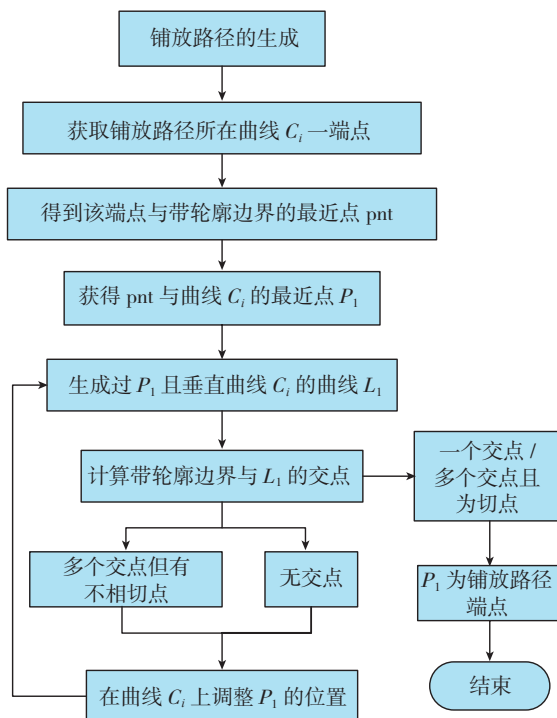


图6 根据预浸带轮廓生成铺放路径流程
Fig.6 Flow chart of getting tape tool-path by tape contour

2.3 预浸带展平几何生成

铺层面为曲面时,通常为不可展曲面。对于这类曲面,其预浸带并不能精确展平,利用离散方法,近似计算

带的展平数据^[5]。为了满足铺带设备裁剪要求,展平后的预浸带应为平直状态。

根据预浸带在铺层面的相对位置,按铺放路径弧长在参考平面上建立直线段 L_i 。在预浸带建立一广义局部坐标系 XOY 。同样,在参考平面上,对应地建立一局部直角坐标系,如图7所示。

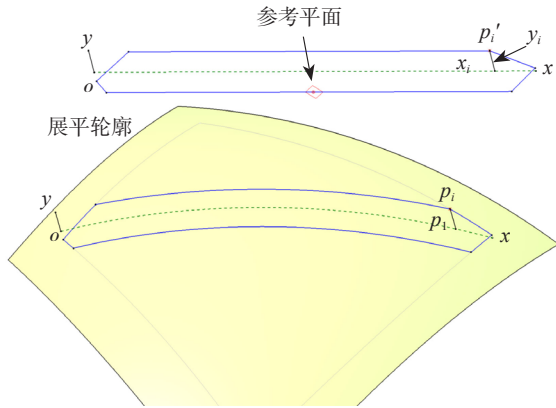


图7 预浸带展平几何的生成
Fig.7 Getting flattening geometry of tape

将预浸带轮廓边界按一定精度离散,得到离散点集 $\{P_i\}$ ($i=1, 2, \dots, n$)。取轮廓线上任意一点 P_i ,计算 P_i 点在 XOY 坐标系的坐标位置 (x_i, y_i) 。

设铺放路径为 C_i , P_i 为 P_i 到 C_i 在曲面上的最近点,则可得到局部坐标系的坐标值 (x_i, y_i) 。

$$x_i = OP_1, \quad (3)$$

$$y_i = \pm P_i P_1, \quad (4)$$

式中, OP_1 、 $P_i P_1$ 为曲面上的弧长; P_i' 在参考平面局部坐标系的坐标值为 (x_i, y_i) 。

3 预浸带可铺放性分析

针对自动铺带工艺需求,影响预浸带铺放及成型质量的因素,主要有带间隙、搭接、皱褶、撕裂等。因此,对预浸带可铺放性分析,是确保构件质量和精度的重要步骤。预浸带可铺放性分析主要包括间隙、扭曲变形、角度偏差等。

3.1 相邻预浸带的间隙分析

对于相邻预浸带,获取两条预浸带轮廓边界的相邻部分,并按照给定条件离散边界,得到分析点集 $\{P_i\}$ ($i=1, 2, \dots, n$),并计算相邻带边界的最近点 $\{P_i'\}$,其间隙为:

$$D_i = \pm |P_i P_i'| \quad (|P_i P_i'| \text{ 为两点的距离})。 \quad (5)$$

当 $D_i > 0$ 时,则相邻带间有间隙; $D_i < 0$ 时,相邻带有搭接。

3.2 预浸带扭曲变形分析

预浸带扭曲变形到一定程度,在铺放过程中会出现皱褶、撕裂等现象。为了避免这种情况的发生,需要对预浸带进行变形分析。预浸带变形量由铺放路径的曲率半径以及带宽决定。通过计算带铺放路径上各点的曲率半径,并参考带宽,确定其变形量的大小。变形量变化范围可通过预浸带工艺试验得到。

3.3 预浸带角度偏差分析

复合材料构件每个铺层的纤维方向是一定的,为满足工程制造需求,通常会提供构件最大角度偏差值 α_{max} ,即预浸带铺放后的纤维方向与给定纤维方向的夹角不能超出 α_{max} 。在带铺放路径上取点,计算该点的切线方向,并得到切线方向与其纤维方向的夹角 β 。

当 $\beta > \alpha_{max}$ 时,则说明该点的铺放方向不符合要求。

通过预浸带间隙、变形、角度偏差等分析结果,可直观地反映出带的可铺放性。工程人员利用分析结果,结合实际工艺需求,综合分析预浸带质量,最终给出恰当的处理方式。

4 预浸带规划实现方法验证

利用CATIA系统提供的二次开发工具CAA C++,在Visual Studio 2005上开发了预浸带规划功能模块。在复合材料铺层模型中,通过该功能模块可生成各铺层的预浸带几何。

5 结束语

由于自动铺带技术主要用于大型复合材料构件的铺叠,不仅构件尺寸大,铺层也较多。这种情况下,所有铺层生成的预浸带数量非常惊人,计算量也很大。因此,在自动铺带规划软件开发过程中,特别是预浸带几何生成功能,不仅要考虑用户操作的方便性,还要将实现方法与工程应用实际情况有机结合,在满足自动铺带工艺需求条件下,尽量简化相关计算方法以及处理过程,达到提高预浸带规划效率的目的。

参考文献

- [1] 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(上). 世界制造技术与装备市场, 2009,(4): 84-89.
- [2] 周晓芹,曹正华. 复合材料自动铺放技术的发展及与应用. 航空制造技术, 2009(增刊):1-7.
- [3] 还大军,肖军,李勇. 基于弧长的复合材料自动铺带统一边界处理方法. 南京航空航天大学学报, 2010,42(5): 645-649.
- [4] 罗海燕,李勇,肖军,等. 复合材料自动铺带技术研究——曲面铺带轨迹算法. 航空学报, 2009, 30(9): 1782-1787.
- [5] 孟月梅. 复合材料构件自动铺带支撑软件实现方法的探讨. 航空制造技术, 2009(24): 104-107.

(责编 深蓝)