

S 型进气道纤维铺放轨迹网格化生成

Meshing Method of Fiber Placement Track for S-Shaped Inlet

哈尔滨工业大学机电学院 韩振宇 邵忠喜 富宏亚 刘 源

[摘要] 将网格化方法应用到飞机 S 型进气道模型的铺放轨迹规划中,即利用 UG 网格生成器网格化进气道 CAD 模型,并生成网格化数据,以该数据为基础建立网格单元和节点之间的拓扑关系,在每个网格单元中计算铺放轨迹和轨迹点的法向量。通过仿真试验证明该方法具有程序执行速度快、生成的铺放轨迹曲线光滑、无曲线突变情况等特点,具有一定的工程应用价值。提出利用 UG 的二次开发功能开发适用于该轨迹生成方法的网格化工具。

关键词: 纤维铺放 轨迹 网格化 S型进气道

[ABSTRACT] The meshing method is applied to the placement track planning of S-shaped inlet model. Namely, CAD software model of inlet is meshed by using UG meshing generator and the meshing data is created. Based on these data, the topology relation between meshing element and nodes is set up. The normal vector of placement track and track points are calculated in each meshing element. The simulation test shows that this method has some performances such as high speed program performing, the smooth curve of placement track, no mutation of track and so on. So this method has certain application value in engineering. It is put forward to develop a meshing tool for the track generation by using the secondary development function of UG.

Keywords: Fiber placement Track Meshing S-shaped inlet

纤维铺放技术(Fiber Placement)融合了纤维缠绕、复杂型面铺放和计算机控制的优点,实现了复杂外形复合材料生产的自动化,并且可节约成本和时间,减少手工重复劳动。适用于制造简单的回转体,以及飞机的机身、机翼和汽车车身等非回转体部件。在国外这项技术已经非常成熟,实现了航空、汽车、船舶、医学等领域的成功应用。在硬件方面,出现了能够进行双向铺放的铺放头,成型设备总自由度达到 7 个、纱束数目可达 32

根,预计到 2010 年世界上将有 60 多台纤维铺放机投入使用;在软件方面,已经开发出适用于 CAD 系统的 CEE (Composite Engineering Environment)软件,CEE 能够生成铺放数据文件,该数据文件包含零件铺层表面、铺层、铺层方向等信息。在铺放轨迹规划方面堪萨斯大学的 Kurt Schueler 等开发了复合材料分析和设计控制系统(Steered Composite Analysis and Design System, SCADS)^[1],并且利用近似的算法生成初始铺放轨迹的等距偏置曲线作为铺放轨迹^[2]。该近似算法主要有 2 点近似:①偏置距离的曲线长度用直线长度近似;②计算分析局部铺放曲面用等曲率的圆弧面近似。Monash 大学的 Bi Jan Shirinzadeh 等人在开放式零件表面的轨迹生成方面提出了一种新型的路径规划算法——纤维铺放曲面轨迹算法(SCAR)^[3],该算法以产生纤维束之间没有空隙和重叠的复合材料层合板铺层为目标。国内纤维铺放技术刚刚起步,南京航空航天大学通过对构件模型进行有限元分析,获得构件的内部应力分布,根据主应力的方向和方向合理规划出若干基准纤维铺放路径;提出了基于等距线、等分点原理的 2 种算法,对基准铺放路径进行均匀密化,实现整个构件曲面的纤维铺放路径规划;讨论了铺丝宽度和铺放精度的控制策略,并给出了铺放头压辊中心控制轨迹,以满足纤维铺放机械手的控制需求^[4-7]。哈尔滨工业大学提出了一种主动重送方式的铺放头,并对其可行性进行了论证^[8]。

纤维铺放成型设备由旋转主轴和多自由度的机器人手臂构成,其运动由计算机控制和协调,铺层方向、铺层厚度、增减纤维等信息按复合材料结构设计及相应的 CAM 软件确定,用多自由度机器人手臂将多组纤维预浸纱束/窄带自动铺放在旋转主轴上的芯模表面。纤维铺放技术的独特性决定了必须重新开发与之相匹配的 CAM 软件,铺放该数据文件应该包含零件的铺层表面、铺层厚度、铺层方向、铺放轨迹、增减纤维等加工信息,而现有的 CAM 软件无法生成。本课题以 S 型进气道模型为例,就铺放轨迹的生成算法进行研究,并提出网格化方法的解决方案。纤维铺放轨迹网格化生成法的特

点为:

① 将复杂、连续铺放轨迹曲线的求取分解成在每个二维四边形单元中逐段求取,简化了计算;

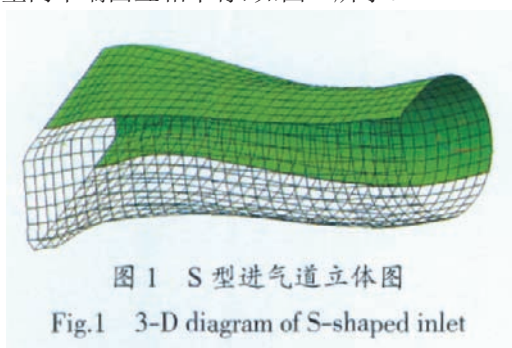
② 将自由曲面网格化以后,曲面上所有点的信息由网格单元来表示,设计者可以很容易地找到需要点的坐标;

③ 借助UG的网格生成器和自主开发的网格化工具网格化曲面,设计者不需要在自由曲面的网格化上消耗时间和精力。该算法是以哈尔滨工业大学提出的面片缠绕思想为基础的^[9-12],面片缠绕也以网格化数据为基础对芯模缠绕轨迹进行计算,这里不作赘述。

本文讨论的前提是在被铺放表面铺放基准(由复合材料结构设计决定)已知的条件下构建芯模表面的四边形网格,其中 U 、 V 向网格由铺放基准生成,代表 0° 和 90° 轨迹方向,而铺放基准应该由复合材料结构设计的相关理论知识和经验计算得到。所以本文铺放轨迹没有考虑铺放基准是否满足实际被铺放零件结构性能要求,而只是为铺放设备提供铺放轨迹路径信息,同时轨迹方向符合复合材料结构设计人员提出的要求。

1 利用UG的网格生成器网格化芯模曲面

某类型飞机进气道的CAD模型由2片自由曲面组成,模型两个端面互相平行,如图1所示。



在模型网格化之前必须对模型进行预处理,在UG的有限元分析环境下利用缝合功能将2片自由曲面缝合生成1个片体。然后利用UG的网格生成器中四节点四边形薄壳单元Quad4 Thin Shell类型^[13],对自由曲面进行网格划分(见图1)。如果得到网格的单元均是四边形单元,则单元编号按模型轴向从大到小顺序排列;另外,在两个曲面片体的接缝处节点编号存在冗余的现象,这些将在以后讨论。最后利用UG的识别节点和单元功能输出网格单元和节点的信息文件,其输出的文件结构如表1所示。在网格单元和节点信息数据的基础上建立网格单元、节点的拓扑关系^[13]。

表1 网格单元、节点信息

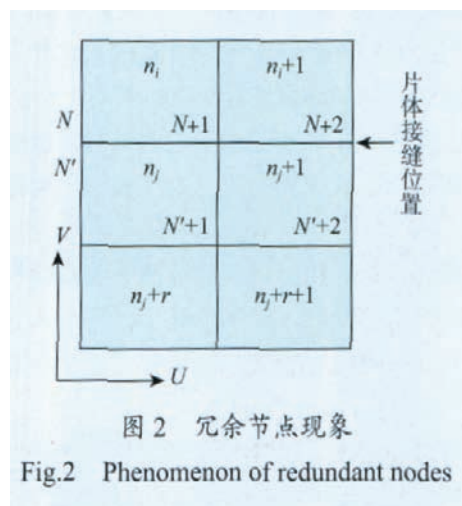
单元编号	单元对应的节点编号	节点编号	节点坐标
442	644 643 610 611	644	3.244 304e+002 1.194 907e+002 3.169 708e+001

2 建立网格化数据的拓扑关系

为使程序执行的效率更高,需要重新排列单元信息、去除冗余节点,即建立单元、节点之间的拓扑关系^[14]。

2.1 处理节点信息

由于该模型由2片自由曲面组成,且在曲面接缝处没有缝隙,所以对缝合处理以后的模型进行二维四节点四边形单元网格划分后,在片体的接缝位置出现了同一个节点分别被两个片体的单元共享,但节点编号不相同的现象,即在节点坐标信息文件中存在冗余节点。此时需要去除冗余节点并在片体的接缝处统一节点编号。如图2所示,单元 n_i 、 n_{i+1} 属于同一片体,单元 n_j 、 n_{j+1} 属于同一片体。但片体 n_i 与相邻片体 n_j 公用节点编号具有2个编号,编号 N 和 N' 是同一个节点, $N+1$ 和 $N+1'$ 是同一个节点,片体 n_{i+1} 与 n_{j+1} 同理。片体接缝处同一节点在两个片体中存在2个节点编号。



2.2 处理单元信息

UG生成的单元编号顺序有一定规律,如果模型边缘平行且曲面比较平滑,输出的四边形单元编号信息是按自由曲面的 U 向进行顺序排列,且 U 向单元总数相同,设 U 向单元总数为 r ,则 V 向相邻单元间编号之差为 r ,如图2所示。但是在片体接缝处相邻行之间的单元编号之差不是 r ,因为组成模型的两片自由曲面在UG中的网格单元编号是相对独立的。但每片自由曲面单元编号的规则是相同的,即 U 向单元编号顺序排列, V 向单元编号之差为 r 。通过研究发现两个片体单元编

号的顺序正好相反,所以必须按照以上分析的单元编号规律处理单元信息文件中的数据,去除冗余信息,使两个片体的单元编号统一。

3 自主开发网格化曲面工具

利用现有的网格化工具网格化被铺放表面具有节约时间、网格线能够代表零件承载受力方向、自动建立网格和节点的拓扑关系等优点,但也存在如下缺点:

① 现有的网格化工具生成的网格不满足铺放轨迹网格化生成法的要求。被铺放表面的 U 、 V 向网格由铺放基准生成并承担 0° 和 90° 铺设方向的任务,所以要求网格化工具必须能够设定网格方向,现有的网格化工具不具备这项功能。

② 大曲率曲面利用现有网格化工具生成的网格容易产生网格不均匀的现象,有时利用四边形单元网格化曲面会产生三角形单元。

③ 对于曲率变化较大的被铺放曲面部分不能根据网格化生成法的要求进行局部加密网格。

④ 对于多个片体拼接的曲面情况,建立网格、节点的拓扑关系复杂。

正是这些缺点促使我们自主开发适用于这种铺放轨迹生成法的网格化工具。选择 UG 的二次开发功能开发网格化工具,该网格化工具功能如下:

① 依据铺放基准、结合复合材料结构要求对被铺放曲面进行网格化,设定网格 V 、 U 方向、选择网格单元的大小。

② 能够计算利用网格表达被铺放表面所带来的误差及网格表达误差。

③ 划分的网格均是四边形单元,不会出现其他单元形式。

④ 可以直接建立网格单元、节点信息的拓扑关系。

该网格化工具网格化进气道表面情况如图 3 所示,以 30mm 的四边形网格单元为例。需要说明的是,该网格化工具的铺放基准选择了贯穿芯模中心的直线,当然

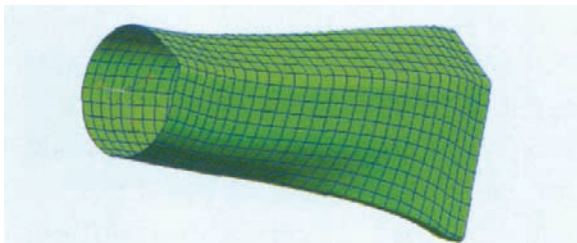


图 3 自主开发的网格化工具网格化曲面结果
Fig.3 Result of meshing surface by self-developed meshing tool

如果需要也可以选择空间曲线作为铺放基准,或者在不同的曲面部分选择不同的铺放基准,这是现有的网格化工具所不具备的特点。

4 铺放轨迹网格化生成法

4.1 算法的分析

网格中 U 、 V 两个方向是 0° 和 90° 的方向,所以铺放基准既可选择 U 向,也可以选择 V 向,以下讨论除特别说明外铺放基准均选择为 V 向网格线。

如图 4 所示, n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 是自由曲面的四边形(并不一定是矩形)网格单元,铺放轨迹是通过这些四边形边的一条空间曲线,所以只需在轨迹经过的四边形单元中计算轨迹点,最后将计算得到的所有轨迹点顺次连接就可得到铺放轨迹,同时计算每个轨迹点的曲面法向量。在每个四边形单元中计算轨迹点时,需要用铺放基准来确定轨迹点在四边形中的位置,我们希望铺放基准是四边形中一边,这样可为计算带来方便。图 4 中, N_0 、 N_1 、 N_5 在一条直线上,且为铺放基准, p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 是铺放轨迹点,轨迹向量 p_1p_2 与铺放基准的夹角即为铺放角 ϕ 。

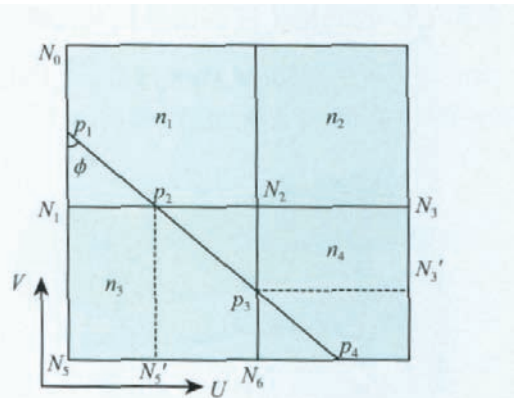


图 4 铺放轨迹网格化生成法
Fig.4 Meshing method of fiber placement track

当铺放轨迹点在四边形单元的一边,那么下一个轨迹点在这个四边形中有 5 中情况:位于四边形的一边,见图 5 中点 p_1 、 p_3 、 p_5 ;与四边形的某个顶点重合,见图 5 中点 p_2 、 p_4 。这种计算方法的优点是考虑到了所有的铺放方向;缺点是计算繁琐、编制程序麻烦。由于设定 AB 、 CD 为铺放基准方向,所以 0° 铺放方向向量过点 P 且垂直于 AB 边。以 0° 铺放方向向量为基准,分 $(0^\circ, 90^\circ)$ 和 $(0^\circ, -90^\circ)$ 2 个铺放方向,逆时针为正,顺时针为负。以负铺放方向为例进行分析,首先对四边形单元进行裁剪,即将 AD 边沿向量 Ap 平移到 pD' 。在新的四边形

$pBCD'$ 中推导图迹点各种位置情况的理论公式,这就简化了计算,易于程序实现。这些公式也可以应用到正铺放方向迹点的计算中,只需重新调整四边形单元顶点 A, B, C, D 的顺序,同理也需要对四边形单元进行裁剪,如图 5 所示线段 pC' 。

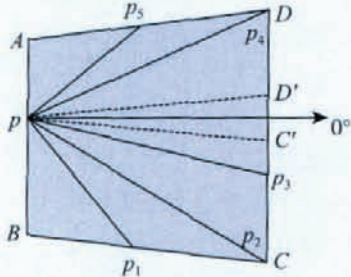


图 5 迹点计算方法分析

Fig.5 Calculation analysis of track points

4.2 算法的实现

由以上分析确定在四边形单元中计算铺放轨迹的步骤如下:(1)裁剪四边形单元,裁剪分 2 种情况,如图 4 中 n_3, n_4 单元中的虚线所示;(2)在新的四边形中按铺放角要求计算下一个迹点的坐标。下面具体讨论步骤 (2)。

图 6 中,四边形 $ABCD$ 是经裁剪后的四边形,铺放迹点与四边形的顶点 A 重合。由 4.1 分析可知,下一个铺放迹点在四边形 $ABCD$ 中的位置有 4 种情况:位于四边形一边(见图 6 中 p_1, p_3);与四边形的一个顶点重合(见图 6 中 p_2, p_4)。迹向量 Ap_i ($i=1, 2, 3, 4$) 与 AB 的夹角即是铺放角 ϕ , 设 $\beta_1=\angle BAC, \beta_2=\angle BAD, \alpha_1=\angle ABC, \alpha_2=\angle ADC$ 。

(1) 当 $\phi=\beta_1$ 或 $\phi=\beta_2$ 时,铺放迹线分别经过四边形的 C, D 点,迹点 p_2, p_4 分别与 C, D 点坐标相同。

(2) 当 $0<\phi<\beta_1$ 时,铺放迹线交四边形单元 BC 边于

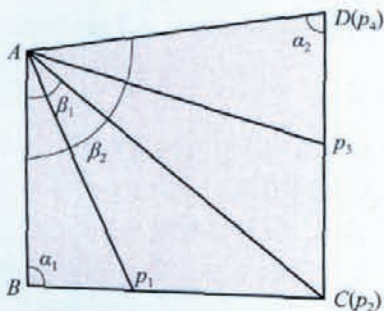


图 6 铺放迹点的计算

Fig.6 Calculation of placement track points

点 p_1 。在 $\triangle BAp_1$ 中推导点 p_1 的坐标公式:

$$\begin{cases} x_{p_1} = x_B + \frac{|AB|(x_C - x_B) \sin \phi}{|BC| \sin(\phi + \alpha_1)} \\ y_{p_1} = y_B + \frac{|AB|(y_C - y_B) \sin \phi}{|BC| \sin(\phi + \alpha_1)} \\ z_{p_1} = z_B + \frac{|AB|(z_C - z_B) \sin \phi}{|BC| \sin(\phi + \alpha_1)} \end{cases}$$

(3) 当 $\beta_1<\phi<\beta_2$ 时,铺放迹线交二维四边形单元 CD 边于点 p_3 。在 $\triangle Ap_3D$ 中推导点 p_3 的坐标公式:

$$\begin{cases} x_{p_3} = x_D + \frac{|AD|(x_C - x_D) \sin(\phi - \beta_2)}{|CD| \sin(\phi - \beta_2 - \alpha_2)} \\ y_{p_3} = y_D + \frac{|AD|(y_C - y_D) \sin(\phi - \beta_2)}{|CD| \sin(\phi - \beta_2 - \alpha_2)} \\ z_{p_3} = z_D + \frac{|AD|(z_C - z_D) \sin(\phi - \beta_2)}{|CD| \sin(\phi - \beta_2 - \alpha_2)} \end{cases}$$

当计算得到的铺放迹点在四边形单元的某个顶点(p_2)时,为了满足迹曲线不产生突变现象的要求,下一步迹点的计算应该在其对角的单元中进行,且这两个单元编号之差为 $r+1$ (r 为 U 向单元总数),见图 7,箭头所指的方向是铺放迹的计算方向,其中 $n_4-n_1=r+1$ 。

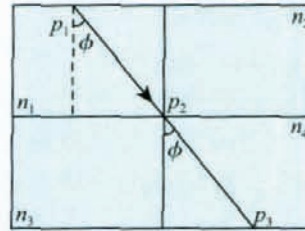


图 7 迹点位于单元的顶点

Fig.7 Track point on node of elements

4.3 环向迹的计算方法

环向铺放路径可设计成一条纤维带在不剪切的情况下环向铺满整个芯模表面,实际近似为一条螺旋线。取芯模 V 向的薄切片,将该薄切片体假设成圆柱体,切片体越薄越近似于圆柱体。在以上假设的前提下将该切片体展开即是矩形条,如图 8 所示。在该切片内环向迹的铺放角按如下公式计算:

$$\phi = \arcsin \frac{w}{l}$$

其中 l 是切片体的底边周长, w 是纤维带宽度。如果采用 U 向网格为基准 $\phi = 90^\circ - \arcsin(w/l)$ 。将芯模表面分割成多个薄的切片体,在每个切片体内按上述公式计算环向迹的铺放角,最后顺次连接生成环向迹。

利用圆柱螺旋线法生成环向迹,由于将每个切片体假设成圆柱,所以展开后的切片体与矩形的近似程度

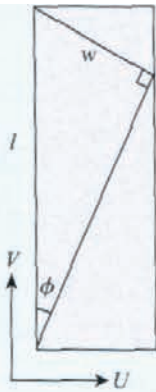


图8 圆柱螺旋线法

Fig.8 Method of cylindrical helix

影响 ϕ 的计算精度。当被铺放芯模表面曲率变换较大时,减小切片体厚度可以提高 ϕ 的计算精度,从而达到纤维带在不剪切的情况下环向布满芯模表面的目的。

5 轨迹点法向量的确定

铺放轨迹的法向量必须已知,用来控制铺放头的姿态,使铺放头的中心线垂直于芯模表面。本文用网格单元的法向量表征轨迹点的法向量。每个网格单元的法向量等于在这个单元平面内任意2个向量(一般选择四边形单元的顶点作为向量的起点和终点)向量积的单位化向量^[14],同时注意求得的法向量方向要指向模型外侧。

计算轨迹点法向量时会出现2种情况^[14]:

(1) 轨迹点位于网格单元的一边,且这条边在模型的端面内(如图9中的点 p_1)。轨迹点所在网格单元的法向量就是轨迹点的法向量。

(2) 轨迹点位于两个网格单元的公共顶点或公共边(如图9中的点 p_2 、 p_3)。法向量的方向是轨迹点两侧的铺放轨迹所经过的两个网格单元的法向量之和,再将这个向量单位化即为轨迹点的法向量。

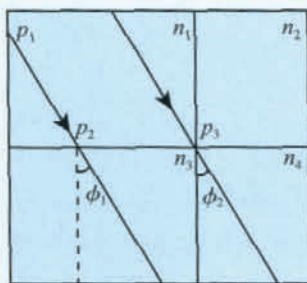


图9 轨迹点法向量

Fig.9 Normal vector of track points

6 铺放层内轨迹起点的计算

纤维带宽度 w 等于一次铺设的纱束数目与纱束宽度的乘积,在垂直于轨迹的方向上,相邻轨迹线之间的距离应不大于纤维带宽度。做相邻轨迹线之间的等距线,可通过比较等距线长度与纤维带宽度来判断纱束数量的增减位置,同时判断是否满足设计要求的纤维重叠系数。

由于模型方口端轮廓线的长度大于圆口端轮廓线的长度,且为最大横截面,所以从模型的方口端计算轨迹线,每计算一个新的轨迹点,都要做这个轨迹点到上一条已经计算完的轨迹线的等距线,通过等距线长度和纤维重叠系数判断该点的纱束数目。当在某个轨迹点纱束的数目小于1时,认为这条轨迹线在该点终止。图10中 A 点为已知的铺放轨迹起点,下一条铺放轨迹的起点 B 按以下公式求取(适用于 0° 、 $\pm 45^\circ$ 、 45° 轨迹方向):

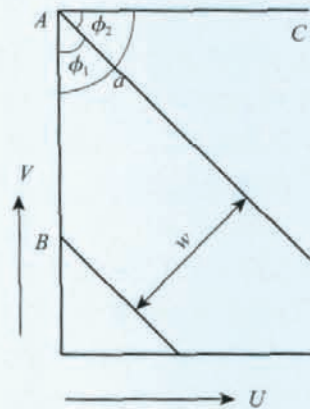


图10 铺放轨迹起点计算方法

Fig.10 Calculation of placement track start points

(1) V 向网格作为铺放基准

$$|AB| = w / \sin |\phi_1| ;$$

(2) U 向网格作为铺放基准

$$|AB| = w / \sin (\angle CAB - |\phi_2|) ;$$

其中 w 为纤维带宽度, ϕ_1 、 ϕ_2 为铺放角。

7 形成铺放层

以上铺放轨迹的计算方法分析均采用 V 向网格为基准,如果选择 U 向网格只需将公式稍加改动。利用以上铺放轨迹的计算方法编制程序,基准选择 U 向网格,网格单元尺寸大小 20mm,对 S 型进气道模型实现了 $\pm 45^\circ$ 、 0° 、 90° (环向轨迹) 轨迹求取(见图 11)。计算某条 90° 、 $\pm 45^\circ$ 轨迹相邻轨迹点法向量的夹角,并绘制夹角变化曲线图(见图 12)。由图 12 可见,利用以上方法求

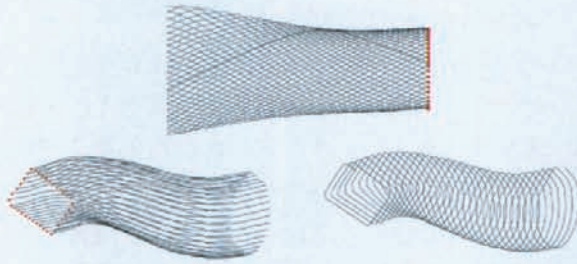


图 11 各种角度的铺放轨迹
Fig.11 Placement tracks of different angles

得的轨迹点法向量夹角变化量均匀,各方向轨迹点法向量夹角最大值与最小值之差分别为 5.27° 、 6.51° 、 5.92° 。轨迹点法向量与手臂末端坐标系的接近矢量 a 大小相等方向相反, a 又包含在铺放设备机械手腕部分后置处理公式(1)~(3) [15] 中。铺放设备由 3P-3R 型机械手臂和旋转主轴组成,具有 7 个自由度,且机械手臂手腕部分的 3 个转动关节回转中心相交于一点。所以法向量夹角变化曲线反应了铺放头姿态的变化,轨迹点法向量夹角变化曲线的尖点位置是铺放头姿态变化剧烈的点。

$$\theta_1 = \text{atan2}(n_x \sin \beta + \alpha_x \cos \beta, n_z \sin \beta + \alpha_z \cos \beta), \quad (1)$$

$$\theta_2 = -\arccos(n_x \sin \beta + \alpha_x \cos \beta), \quad (2)$$

$$\theta_3 = \text{atna2}(\alpha_x, n_x \cos \beta - \alpha_x \sin \beta). \quad (3)$$

* $\text{atan2}()$ 函数:返回两个参数的反正切值,其值范围为 $[-\pi, \pi]$ 。

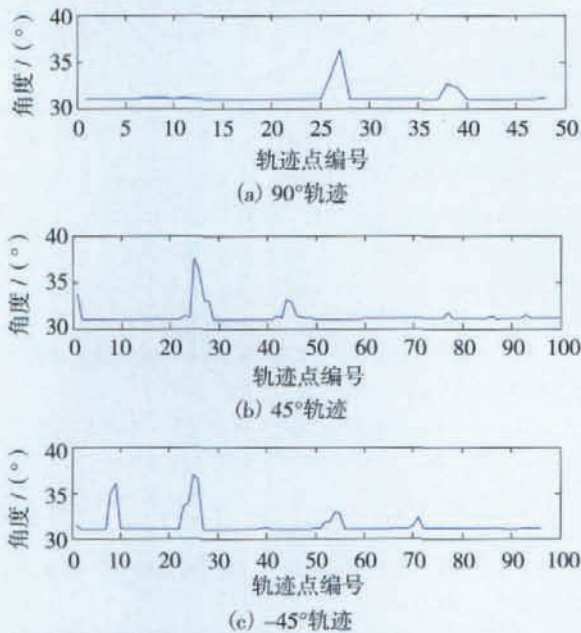


图 12 相邻轨迹点法向量夹角变化曲线
Fig.12 Variations of normal vector angle between adjacent points

其中 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 为机械手腕的 3 个旋转关键变量; α, o, n 为机械手臂末端坐标系单位矢量; β 为铺放头角度参数。

8 纤维裁剪算法

资料介绍基于压辊施压点(铺放过程中压辊与被铺放表面的接触线段的中点)的纤维裁剪算法,具体思路为:程序生成的曲线是压辊施压点的位置,按压辊方位矢量方向作每个轨迹点的偏置点,偏置距离为 $w/2$,将轨迹两侧的偏置点顺次连接就是纤维带边缘曲线。根据相邻轨迹的纤维带边缘曲线的相交情况和纤维覆盖率 f 就可以确定纤维带的裁剪信息。但是该算法存在如下缺点:

(1) 纤维带边缘曲线是空间曲线,不易判断空间曲线的相交。如果偏置方向改成偏置弧长,纤维带边缘曲线的相交情况就容易通过程序计算来判断(偏置弧是过轨迹点垂直于轨迹线的平面与铺放曲面相交的曲线),但这种方法同时也破坏了纤维裁剪的精度。

(2) 编制程序复杂,程序运行时间大大增加。

通过分析以上基于压辊施压点的纤维裁剪算法,提出基于纤维带边缘的纤维裁剪算法。具体表述如下:程序生成的轨迹曲线是纤维带边缘曲线,压辊施压点曲线由纤维带边缘曲线按照偏置算法重新生成。该算法的思想与基于压辊施压点的纤维裁剪算法相反,提高了纤维裁剪的精度,算法简单、编制程序容易、程序运行时间缩短;由于施压点轨迹由纤维带边缘曲线偏置得到,所以存在施压点轨迹不准确的缺点,为了最大限度地减小这个误差,使用了边缘曲线等距弧长点计算施压点轨迹的方法。下面具体介绍这种新的纤维裁剪算法。

如图 13 所示,空间曲线 $P_1P_1', P_2P_2', P_3P_3'$ 是利用网格化方法生成的曲线,即纤维带边缘曲线,点 A, B 是

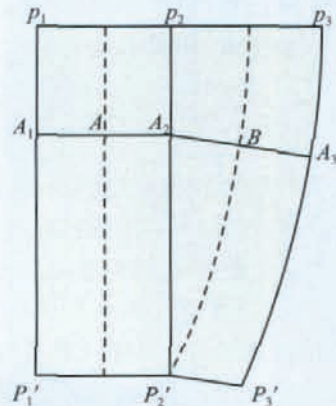


图 13 纤维裁剪算法分析图
Fig.13 Algorithm analysis of fiber cut-off

压辊施压点, A_1 、 A_2 、 A_3 点是施压点曲线的标识点, 同时也是曲线 P_1P_1' 、 P_2P_2' 、 P_3P_3' 的等弧长点, 即每条曲线上标识点数 N 相同, 且标识点等弧长分曲线 N 份。施压点 A 的曲面法向量是未知的, 为了计算准确, 取曲面法向量平均值作为 A 点的法向量 n 。过点 A_1 、 A_2 和法向量 n 做平面, 该平面与被铺放曲面的交线是施压曲线, A_1A_2 弧长的中心点就是施压点 A 。同理 B 点也按该方法求取。当弧长 $l_{A_1A_2} < w$ 时, 纤维带需要裁剪, 如图 13 中边缘曲线 P_2P_2' 上 A_2 、 P_2' 间的纤维需要裁剪。设 $l_{A_2A_3} = w$, $l_{P_2P_3'} = \frac{w}{2}$, 则纤维带边缘在 A_2 点剪切一束, 纤维覆盖率 $f=0$; 在 P_2' 点纤维带剪切一半, 纤维覆盖率 $f=1$; 在点 A_2 、 P_2' 间某个位置剪切纤维边缘, 覆盖率

$$f = \frac{2l}{w} - 1。$$

其中 l 是施压曲线的弧长, 此时纤维重叠面积和纤维间隙的面积如下:

$$S_{\text{重叠}} = fS_{\Delta A_2BP_2'}，$$

$$S_{\text{间隙}} = (1 - f)S_{\Delta A_2BP_2'}，$$

根据以上算法, 对某类型曲面进行 5 根纤维裁剪的仿真实验, 局部放大情况如图 14 所示, 实线和虚线表示不同的纤维带。

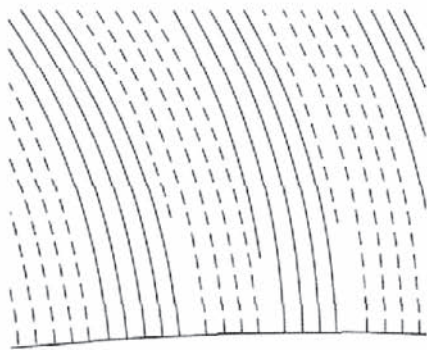


图 14 纤维裁剪算法仿真图

Fig.14 Algorithm simulation of fiber cut-off

9 结束语

铺放轨迹的网格化生成法计算方法简单, 编制程序容易, 生成轨迹曲线光滑, 不会出现突变的情况, 相邻轨迹点法向量夹角变化量均匀, 法向量的方向能够反映实际曲面法向量方向。网格的方向由铺放基准决定, 所以轨迹方向能够反应真实的纤维铺设方向。为适用这种铺放轨迹生成法的需要, 利用 UG 二次开发功能开发了网格化工具, 这种工具生成的曲面网格方向由复合材料结构要求的铺放基准决定, 这就保证了在这个网格基础

上计算的铺放轨迹方向的准确性。

由于网格化的自由曲面只有单元的节点是曲面上的实际点, 且利用此方法求取的轨迹点在四边形单元的边上, 这样就出现了轨迹点与实际曲面的偏离。当轨迹的曲率半径较大时, 这个误差可以忽略; 反之不可忽略, 需用更小的单元网格尺寸对铺放曲面进行网格化。可以通过网格化工具来计算这个误差, 以决定利用曲面网格单元的尺寸。

该方法需要在网格表达精度、纤维裁剪算法^[4]、铺放轨迹在曲面上等距偏置算法^[2]等方面继续研究。

参 考 文 献

- [1] Schueler K, Hale R. Object-oriented implementation of an integrated design and analysis tool for fiber placed structures. 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structural Dynamics and Materials Conference. 2002: 1-8.
- [2] Schueler K, Miller J, Hale R. Approximate geometric methods in application to the modeling of fiber placed composite structures. Journal of Computing and Information Science in Engineering. 2004 (4):18-27.
- [3] Shirinzadeha B, Cassidya G, Oetomoa D, et al. Trajectory generation for open-contoured structures in robotic fibre placement. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2007 (23):380-394.
- [4] 安鲁陵, 周焱, 周来水. 复合材料纤维铺放路径规划与丝数求解. 航空学报, 2007(3): 745-750.
- [5] 邵冠军, 游有鹏, 熊慧. 自由曲面构件的纤维铺放路径规划. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(S1): 144-148.
- [6] 杨玉岭. 复合材料自动铺丝 CAM 技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [7] 周焱, 安鲁陵, 周来水. 复合材料自动铺丝路径生成技术研究. 航空精密制造技术, 2006(2): 39-41.
- [8] 韩振宇, 孟庆鑫, 路华, 等. 新型纤维铺放头的方案设计与实验研究. 玻璃钢/复合材料, 2007(3): 45-47.
- [9] Wang Xianfeng, Fu Hongya, Han Zhenyu. The validation of the feasibility of abnormal form patch winding. The 12th International Manufacturing Conference. Xi'an, China, 2006: 401.
- [10] 韩振宇, 富宏亚, 王永章, 等. 90°弯管的缠绕线性的设计. 玻璃钢/复合材料, 2004(5): 31-33.
- [11] 王显峰, 富宏亚, 韩振宇, 等. 复杂形体面片缠绕成型方法的分析与实现. 宇航材料工艺, 2006(6): 39-41.
- [12] 王显峰, 韩振宇, 张勇, 等. 复合材料缠绕法的对比研究. 硅酸盐学报, 2007(3): 358-363.
- [13] 马秋民, 韩利芬, 罗盖宁, 等. UG.CAE 篇. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [14] 张全伙, 张剑达. 计算机图形学. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [15] 蔡自兴. 机器人学. 北京: 清华大学出版社, 2000.

(责编 小颖)