

复合材料铺丝成型中的路径规划

李善缘 王小平 朱丽君

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

文 摘 针对复合材料自动铺丝路径规划问题,提出了一种新的基于正交投影的铺丝路径生成算法。首先根据铺丝意图设计空间曲线,然后正交投影到铺丝面上,利用经典的微分几何方法建立特征投影曲线的微分方程,用数值方法求解得到铺丝面上数据点,并用 B 样条曲线拟合这些点即是铺丝参考线,再对其进行等距得到一条铺丝路径,进而得到所有路径。经过算例进行验证,该算法能实现任意方向的纤维铺放,满足铺丝技术工艺要求。应用本文的研究成果,在 CATIA 利用 CAA 中完成了自由曲面的铺丝路径仿真。

关键词 复合材料,自动铺丝,正交投影,B 样条,仿真

Path Planning for Composite Fiber Placement

Li Shanyuan Wang Xiaoping Zhu Lijun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract Targeting at path planning for composite fiber placement, a novel path generation algorithm based on orthogonal projection is proposed. Firstly, we designed a continuous curve in 3D space and then projected orthogonally it onto the mould surface. We derived a system of differential equations characterizing the projection curve and integrated it to obtain the projection curve described by a set of discrete points. Subsequently the initial path was created by fitting these discrete points with B-spline curve. Offsetting the initial path and hence offsetting the resulting path in turn, a uniform path coverage was constructed on the mould surface. The practical examples indicate that this algorithm can achieve fiber placement from arbitrary angle and the precision requirements of automatic fiber placement are readily satisfied. At last, the algorithms proposed above are verified through fiber placement process simulation in the CATIA with CAA.

Key words Composite material, Fiber placement, Orthogonal projection, B-spline, Simulation

0 引言

复合材料自动铺丝技术是最近发展起来的先进复合材料自动成型技术之一,是在缠绕技术和自动铺带技术基础上综合各自优点发展起来的。自动铺丝设备主要由旋转主轴和多自由度机器人手臂构成,当铺丝时,根据芯模所设计的铺设材料、铺设路径和方向,将数根预浸丝经过压辊下集为丝带,铺放在芯模表面,铺放过程中加热软化预浸丝带并压实定型,整个过程由计算机控制和协调完成。自动铺丝技术具

有一般成型技术所不具备的优点,采用机器人系统和多组预浸丝束,具有增减纱束根数的功能,带宽可变可铺放大曲率复杂构件;能实现高度的自动化,构件的敏捷制造,迅速形成批量生产;采用 CAD/CAM 及仿真技术,可以实现复合材料设计成形一体化和数字化。自动铺丝成形技术经过 20 余年的发展已经成熟,在国外已经大规模应用到大型商用飞机,而国内则处于刚刚起步阶段,目前国内高性能复合材料结构的制造基本上以手工铺层、真空热压罐为主^[1]。

收稿日期:2008-10-07;修回日期:2008-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60673026)

作者简介:李善缘,1982 年出生,硕士研究生,主要从事 CAD/CAM 方面的研究工作

自动铺丝技术^[2]的核心问题是铺丝路径设计,铺丝路径是指复合材料纤维在芯模铺丝面上的排列分布方式,是为了自动铺丝加工而设计的。目前,国内外研究人员开发了以下几种方法,美国弗吉尼亚理工大学的 C. Waldhart 提出了平移参考丝束轨迹和平行参考丝束轨迹两种方法,简化了路径设计规划步骤,但对于复杂曲面铺丝问题算法有待修正;南京航空航天大学周焱等利用几何插值的方法^[3~4],按载荷主方向铺设纤维,铺层取向主要分为 0°、90° 和 ±45°,铺丝方向比较固定单一,只能沿着一定的方向进行铺放,而且主要针对特殊形状,比如飞机进气道展开讨论。王念东等^[5]也讨论了类似于进气道的管状结构自动铺丝路径规划问题。党旭丹等提出了一种新的基于测地线的平行等距轨迹规划算法生成铺丝路径^[6],该算法需要计算高阶微分方程,计算量较大。

针对开边自由形面,Shirinzadeh^[7]给出了基于平截线、等距的铺丝路径规划方法,该方法先用平面去截铺丝面得到一条曲线作为初始路径,然后再等距得到均匀覆盖铺丝面的全部铺丝路径。平截线加等距是铺丝路径规划中的一个很有效的方法,然而大多情形适合小曲率或单曲率铺丝面。对于复杂形状的铺丝面,比如螺旋形,很难用平截线构造理想的初始路径。

根据以上国内外自动铺丝路径设计技术的分析以及自由形状铺丝面的路径规划问题,本文提出了新的基于正交投影的铺丝路径算法。依照铺丝意图,在空间设计一条曲线,然后法向投影到铺丝面上作为初始路径,再进行等距运算得到一系列路径使其覆盖整个铺丝面。通过与其他投影方式比较发现,只要曲面法向量确定,那么所得投影插值曲线的常微分方程就是确定的,因此投影曲线的解是存在的。

1 基准铺丝路径的设计

1.1 正交投影方法

用正交投影算法在空间里设计一条连续的曲线,然后正交投影到给定的铺丝曲面形成铺丝的初始参考路径,即基准铺丝路径。利用经典微分几何,推导出投影曲线的一阶常微分方程。在参数域内求解初值问题的一阶微分方程,从而得到投影曲线的离散点集。

1.1.1 数学基础

用 u, v 两个参数定义一个参数曲面如下:

$$S(u, v) = x(u, v), y(u, v), z(u, v) \quad (u, v) \in D \subset R^2 \quad (1)$$

式中, D 表示曲面域,通常(1)式被称为曲面 S 的参数化表达式。从经典微分几何可以知道,曲面 S 的偏导矢 S_u 和 S_v 是曲面在点 (u, v) 处的切向量, $S_u \times S_v$ 称为在曲面在 (u, v) 处的法向量,向量 $N = \frac{S_u \times S_v}{|S_u \times S_v|}$ 称为单位法向量。假设曲面是正则的,既是 $S_u \times S_v \neq 0$ 。面上的曲线参数方程:

$$P(t) = S(u(t), v(t)) \quad t \in [a, b] \quad (2)$$

考虑 $P(t)$ 的微分,即将(2)式线性化,得到曲线的切向量:

$$P'(t) = S_u \frac{du}{dt} + S_v \frac{dv}{dt} \quad t \in [a, b] \quad (3)$$

沿着曲线 $P(t)$ 曲线的法矢 $N, N(t) = N(u(t), v(t))$,由经典微分几何可以知道

$$I\left(\frac{du}{dt}, \frac{dv}{dt}\right) = \left(\frac{dP}{dt}\right)^2 = E\left(\frac{du}{dt}\right)^2 + 2F\frac{du}{dt} \cdot \frac{dv}{dt} + G\left(\frac{dv}{dt}\right)^2, \\ II\left(\frac{du}{dt}, \frac{dv}{dt}\right) = N\left(\frac{d^2P}{dt^2}\right) = e\left(\frac{du}{dt}\right)^2 + 2f\frac{du}{dt} \cdot \frac{dv}{dt} + g\left(\frac{dv}{dt}\right)^2$$

式中, I 和 II 分别叫做曲面的第一基本形式和第二基本形式,除此之外还有其他的公式

$$N_u = a_{11}S_u + a_{12}S_v; N_v = a_{12}S_u + a_{22}S_v \quad (4)$$

$$\text{而} \quad a_{11} = (fF - eG)/(EG - F^2) \\ a_{12} = (gF - fG)/(EG - F^2) \\ a_{21} = (eF - fG)/(EG - F^2) \\ a_{22} = (fF - gE)/(EG - F^2)$$

所以

$$N'(t) = (a_{11}S_u + a_{21}S_v)\frac{du}{dt} + (a_{12}S_u + a_{22}S_v)\frac{dv}{dt} \quad (5)$$

1.1.2 正交投影曲线的计算

如图 1 所示, $C(t)$ 是待投影到曲面上 S 的空间曲线参数表达形式,现在考虑 $C(t)$ 上的一点以及其垂直投影到曲面点 S 上的 $P(t)$,两点的连线当然垂直于曲面,移动 $C(t)$ 上的点在曲面上形成一系列点,它的轨迹即为投影线 $P(t)$ 。投影曲线 $P(t)$ 继承了空间曲线 $C(t)$ 的参数 t ,此外若曲线 $C(t)$ 是连续的,则曲线 $P(t)$ 也是连续曲线。

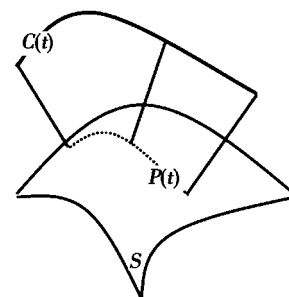


图 1 正交投影曲线

Fig. 1 Orthogonal projection

计算投影曲线,首先设定空间曲线 $C(t)$ 是连续可微的。正交投影的计算公式:

$$[C(t) - P(t)] \times N(t) = 0 \quad (6)$$

对式(6)求微分并把式(3)和式(5)代入可得:

$$\{ [a_{11}(P-C) - N] \times S_u + a_{21}(P-C) \times S_v \} \times \frac{du}{dt} + [a_{21}(P-C) \times S_u + [a_{22}(P-C) - N] \times S_v] \times \frac{dv}{dt} = C \times N \quad (7)$$

两边分别点乘矢量 S_u 和 S_v 得到以下方程:

$$\begin{cases} a_{21}(C-P) \cdot N \frac{du}{dt} + [a_{22}(C-P) \cdot N + 1] \frac{dv}{dt} = (C \times N) \cdot S_u / |S_u \times S_v| \\ [-a_{11}(C-P) \cdot N - 1] \frac{du}{dt} - [a_{12}[(C-P) \cdot N] \frac{dv}{dt} = (C \times N) \cdot S_v / |S_u \times S_v| \end{cases} \quad (8)$$

如果空间曲线不穿过曲面主曲率中心则可以得到如下公式:

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = \frac{-a_{11}(C-P) \cdot N(C'' \times N) \cdot S_u - [a_{22}(C-P) \cdot N + 1](C'' \times N) \cdot S_v}{\{ (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) [(C-P) \cdot N]^2 + (a_{11} + a_{22}) [(C-P) \cdot N + 1] \} |S_u \times S_v|} \\ \frac{dv}{dt} = \frac{a_{21}(C-P) \cdot N(C'' \times N) \cdot S_v + a_{11}[(C-P) \cdot N + 1](C'' \times N) \cdot S_u}{[(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) [(C-P) \cdot N]^2 + (a_{11} + a_{22}) (C-P) \cdot N + 1] |S_u \times S_v|} \end{cases} \quad (9)$$

由初始条件

$$\begin{cases} u(0) = u_0 \\ v(0) = v_0 \end{cases} \quad (10)$$

利用式(9)和式(10)由数值积分解得 u 和 v , 带入式(2)中即可求出投影曲线。

1.2 用三次 B 样条曲线进行初始路径设计

我们的方法是给定一组数据点 $q_i (i=0, 1, \dots, m)$, 确定初始路径的大致轮廓, 然后构造一条三次 B 样条曲线使其以这组数据点为控制顶点, 或通过这组数据点。本文采用后者。

为了使一条三次 B 样条曲线通过一组数据点 $q_i (i=0, 1, \dots, m)$, 反算过程一般地使曲线的首末端点分别与数据点一致, 使曲线的分段连接点分别依次与 B 样条曲线定义域内的节点一一对应, 点 q_i 点有节点值 $u_{3+i} (i=0, 1, \dots, m)$ 。该 B 样条插值曲线将由 n 个控制顶点 $d_i (i=0, 1, \dots, n)$ 与节点矢量 $U = [u_0, u_1, \dots, u_{n+4}]$ 来定义。其中, $n = m + 2$, 即控制顶点的数目要比数据点的数目多出 2 个, 共有 $m + 2$ 个未知顶点。由端点插值要求, 应取 4 重节端点的固支条件。又取规范定义域, 于是有 $u_0 = u_1 = u_2 = u_3 = 0$, $u_{n+1} = u_{n+2} \dots = u_{n+4} = 1$ 。接着的问题是怎样确定定义域的内节点值。对数据点取规范累积弦长参数化 $\tilde{u}_i, (i=0, 1, \dots, m)$ 。相应可确定定义域内节点值为 $u_{3+i} = \tilde{u}_i (i=0, 1, \dots, m)$ 。这样得到由插值条件给出的以 $n + 1$ 个控制顶点为未知矢量 $m + 1$ 个线性方程组成的线性方程组

$$P(u) = \sum_{j=0}^n d_j N_{j,3}(u) = \sum_{j=i-3}^i d_j N_{j,3}(u) \quad u \in [u_i, u_{i+1}] \subset [u_k, u_{n+1}] \quad (11)$$

将曲线定义域 $u \in [u_i, u_{i+1}] \subset [u_k, u_{n+1}]$ 内的节点值依次带入方程, 应该满足插值条件, 即

$$\begin{cases} P(u_i) = \sum_{j=i-3}^i d_j N_{j,3}(u_i) = q_{i-3} & i=3, 4, \dots, n \\ P(u_{n+1}) = \sum_{j=n-3}^n d_j N_{j,3}(u_{n+1}) = q_m \end{cases} \quad (12)$$

上式共含 $m + 1 = n - 1$ 个方程。不足以决定其中包含的 $n + 1$ 个未知控制顶点, 还必须增加两个通常有边界条件给定的附加方程。这时求解三次 B 样条插值曲线未知控制顶点的线性方程组写成如下形式:

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n-2} & b_{n-2} & c_{n-2} \\ a_{n-1} & b_{n-1} & c_{n-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{n-2} \\ d_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_{n-2} \\ e_{n-1} \end{pmatrix}$$

数矩阵中首行元素 a_1, b_1, c_1 与右端列矩阵中矢量 e_1 表示了首端点边界条件; 系数矩阵末行非零元素 $a_{n-1}, b_{n-1}, c_{n-1}$ 与右端列矩阵中矢量 e_{n-1} 表示了末端边界条件。通常有几种可供选择的附加方程系数与右端矢量见文献[8]。

由上述方法构造一条空间曲线, 再利用正交投影方法投射到铺丝面上得到初始路径 $P(u)$ 。

1.3 初始路径设计实例

为了验证上述算法的正确性, 给出了两个计算实例, 首先圆柱面方程为: $f(x, y, z) = x^2 + z^2 - 1$, 正交投影算法生成的轨迹如图 2 所示, 抛物面的方程 $f(x, y, z) = x^2 + y^2 + z$, 如图 3 所示, 图 2 和图 3 中 $C(t)$ 为

设计的空间曲线, $P(t)$ 为生成的铺丝参考线。

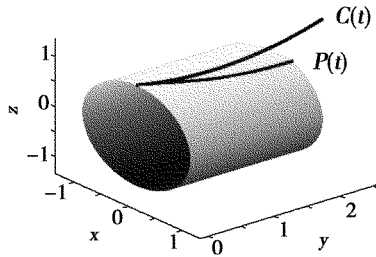


图2 圆柱面铺丝参考线的生成
Fig.2 Creating reference path for placement over cylinder

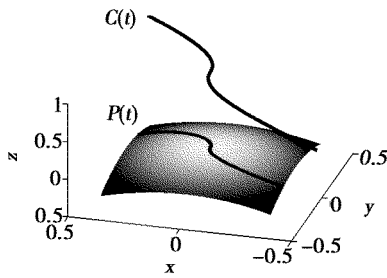


图3 抛物面铺丝参考线的生成
Fig.3 Creating reference path for placement over paraboloid

2 铺丝路径的均匀等距覆盖

通过上一节得到铺丝面上初始路径 $P(u)$, 又叫基准铺丝路径。为了能均匀铺满整个铺丝面, 使其既不重叠又不漏铺芯模表面, 第二条路径以基准铺丝路

从式(13)和式(14)可得出:

$$\begin{cases} \frac{du}{ds} = \frac{\pm S_v \cdot P'(t_i)}{\sqrt{E(S_v \cdot P'(t_i))^2 - 2F(S_v \cdot P'(t_i))S_u \cdot P'(t_i) + G(S_u \cdot P'(t_i))^2}} \\ \frac{dv}{ds} = \frac{\pm S_u \cdot P'(t_i)}{\sqrt{E(S_v \cdot P'(t_i))^2 - 2F(S_v \cdot P'(t_i))S_u \cdot P'(t_i) + G(S_u \cdot P'(t_i))^2}} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)可有初始条件: $u(0) = u_0, v(0) = v_0$ (16)

而 $P(t_i) = S(u_0, v_0)$, 由式(15)和(16)数值积分得出 u 和 v , 并代入铺丝面方程可得交线上的等距点 $Q(s_0)$, 以同样方式可得到一系列等距点 $Q = Q(s_0)$,

径为参考, 沿着铺丝面垂直于初始参考路径按丝带宽度进行等距。第三条路径按相同的方式进行等距, 以此类推直到可以铺满整个芯模表面。

现在是如何在铺丝面上等距初始路径, 首先已知初始路径的离散点 $P = P(t_i), i = 1, 2, \dots, n$ 。由 $P(t_i)$ 计算相对应的等距点, 如图4所示。首先计算曲线 $P(t)$ 在点 $P(t_i)$ 的切矢 $P'(t_i)$, 然后构建 Π 通过 $P(t_i)$ 并垂直于切矢 $P'(t_i)$, 再计算铺丝面和平面 Π 交线 $Q(s)$, 并以弧长为参数, 其中在交线上点 $Q(s_0)$ 是点 $P(t_i)$ 的相对应的等距点。

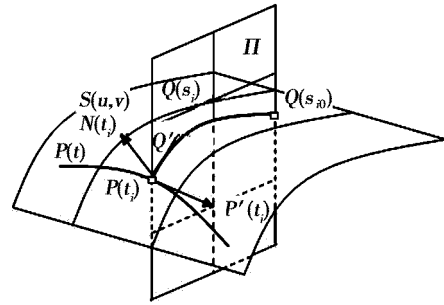


图4 等距点计算
Fig.4 Computation of offset points

为了计算等距点 $Q(s_0)$, 要求出铺丝面和平面 Π 交线 $Q(s)$ 的微分方程, 显然有

$$S_u \cdot P'(t_i) du/ds + S_v \cdot P'(t_i) dv/ds = 0 \quad (13)$$

因为弧长为参数, 所以有公式

$$E(du/ds)^2 + 2F(du/ds)(dv/ds) + G(dv/ds)^2 = 1 \quad (14)$$

$i = 1, 2, \dots, n$, 而 $s_0 = s_0, i = 1, 2, \dots, n$ 被构造。即可得到下一条等距铺丝路径, 重复上述过程直到完成整个铺丝面的铺放规划, 整个铺丝过程如图5所示。

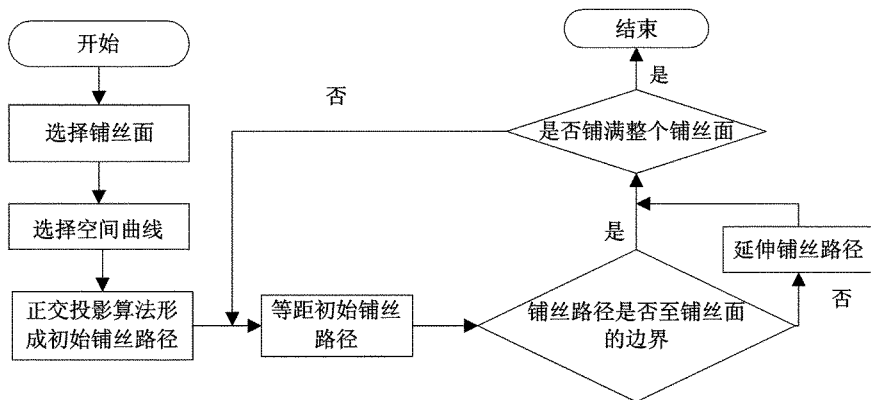


图5 铺丝过程流程图

Fig.5 Flow chart of fiber placement process

3 数值积分

将铺丝路径的计算归结为一阶微分方程的初值问题的解,可以利用成熟的数值技术计算求解曲线^[9]。例如以4阶龙格—库塔公式为基础的数学计算软件, MATLAB 中 ODES 方法解初值问题的常微分方程。该方法不但有自适应步长控制功能,也有绝对误差以及相对误差的控制机制。

一般情况下,初始条件可以从空间曲线的首末端点计算而得,具体计算涉及射线与曲面求交算法^[10]。

目前的方法可以应用在各种铺丝面上,应该被强调,一些特殊情况需要仔细分析,例如一些铺丝面是由几个曲面片组成,在每个曲面片边界之间连续条件被考虑,以保证建立的微分模型是存在的。另外在拓扑曲面中,一些附加条件必须加入以保证投影线完全在铺丝面上。

由前面的数值积分得到常微分方程的解获得的解曲线是由前面给出一系列离散点。在实际应用中,可能需要铺丝路由 B 样条或 NURBS 来表示,比如得到了初始路径而计算等距线时必须得到由离散点集合表示的曲线的参数化方程(B 样条或 NURBS 形式),从而进一步计算等距所必需的几何信息,如曲线的法方向等。因此利用 B 样条或 NURBS 曲线拟合这些点,得到由 B 样条表达的铺丝路径(本文例子是用三次 B 样条曲线拟合),是路径规划的另一环节,关于这一点,有许多成熟的方法^[11~12]。

4 应用实例仿真

为了实现本算法的仿真,本文应用 CATIA 二次开发平台工具 CAA 实现了上述算法,开发了相应的程序模块,可根据需要任意设计铺丝路径,满足各方向的强度要求,首先将计算出铺丝离散点的信息导入铺丝仿真模块,利用 CATIA 二次开发平台工具 CAA 进行样条拟合,可生成所需的铺丝初始参考路径,铺丝参考路径由图 6 和图 7 生成。然后实现铺丝路径均匀等距,最后铺满整个芯模表面。图 8 和图 9 是生成的铺丝路径示例。

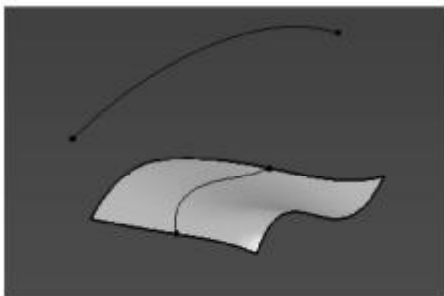


图 6 自由曲面铺丝初始路径的生成
Fig. 6 Initial path for fiber placement over freeform surface

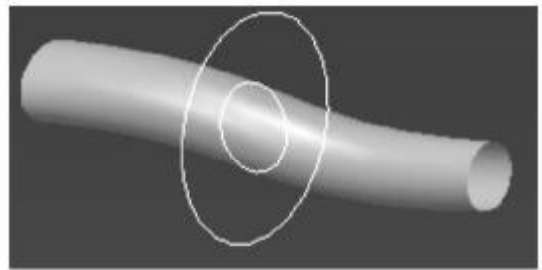


图 7 管道面铺丝初始路径的生成
Fig. 7 Initial path for fiber placement over pipeline surface

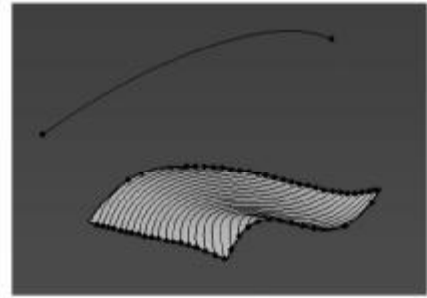


图 8 自由曲面铺丝路径的等距覆盖
Fig. 8 Path uniform coverage by offsetting initial path over freeform surface

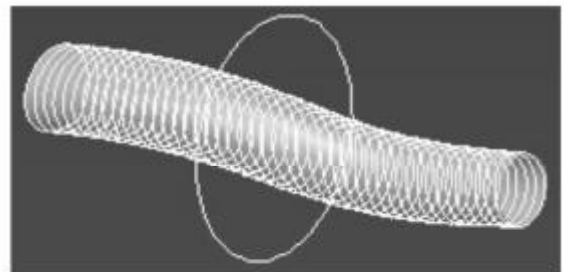


图 9 管道面铺丝路径的等距覆盖
Fig. 9 Path uniform coverage by offsetting initial over pipeline surface

5 结论

提出了一种基于正交投影的算法,实现了在自由曲面上按任意方向进行铺放的要求。为了根据铺丝面强度要求设计出铺丝路径,首先合理设计出空间曲线段,然后正交投影到铺丝面形成最终的铺丝参考线(可以由数值技术计算出的微分方程得到)。上述得到的铺丝离散点的信息导入铺丝仿真模块加以实现。实例表明本算法形成的铺丝路径良好,可以满足铺丝工艺要求。需要进一步指出的是,对于分叉类芯模或者是曲率变化较大芯模,本算法有待进一步的研究。

参考文献

- 1 李勇,肖军. 复合材料纤维铺放技术及其应用. 纤维复合材料,2002;(3):39~41

(下转第 41 页)