

基于变刚度纤维曲线铺放的机器人铺放 路径规划及运动仿真

戴维蓉^{1,2} 杨 涛^{1,2} 王天琪² 李亮玉²

(1 天津市现代机电装备技术重点实验室,天津 300387)

(2 天津工业大学机械工程学院,天津 300387)

文 摘 根据平面变刚度纤维曲线铺放路径设计了圆柱芯模的变刚度铺放路径规划;应用 Denavit-Hartenberg (D-H) 矩阵法解出铺放机器人的末端位姿数学模型;运用 Solidworks 软件建立了铺放机器人的虚拟样机模型并仿真出了末端铺放轨迹;运用 Matlab 软件对其进行运动仿真分析,绘制并研究各关节的运动参数特性,证明了轨迹设计的合理性;利用 Matlab 软件将仿真结果与数学模型求解结果进行对比,验证了末端位姿数学模型的准确性与可靠性。

关键词 变刚度,纤维曲线铺放,圆柱芯模,铺放机器人,运动仿真

The Path Planning and Motion Simulation of The Fiber-Placed Robot Based on Variable Stiffness Curved-Fiber Placed

Dai Weirong^{1,2} Yang Tao^{1,2} Wang Tianqi² Li Liangyu²

(1 Advanced Mechatronics Equipment Technology Tianjin Area Major Laboratory, Tianjin 300387)

(2 School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387)

Abstract According to the position equation of variable stiffness curved-fiber placed in plane, the trajectory of variable stiffness composite cylinders were designed. The mathematical model of the fiber-placed robot configuration is solved by the Denavit - Hartenberg method. The virtual prototype model of the fiber-placed robot is established, while kinematics simulation is implemented using Solidworks software. The kinematics simulation is analyzed, while the motion parameters of each joint are drawn and studied. It is proved the rationality of the designed trajectory. The simulation results and the results of the mathematical model are compared using Matlab software. The results confirm that the mathematical model is accurate and reliable.

Key words Variable stiffness, Curved-fiber placed, Cylinders, Fiber-placed robot, Simulation

0 引言

纤维铺放传统的设计方法是直线铺放纤维形成复合材料层合板,在工程中为了简化设计和减少工作量,大多采用 0° 、 $\pm 45^\circ$ 、 90° 铺层方向,而这种传统的复合材料层合板在承受面内压缩和剪切时,易发生失

稳破坏。因此为了满足更高的性能需求,加之现代自动铺放制造技术的发展,纤维曲线铺放制备的变刚度复合材料就成了一个新的研究方向。与传统的直线铺放相比,纤维曲线铺放的变刚度层合板的成本和结构质量可降低 10% ~ 30%,并且在结构性能方面也

收稿日期: 2013-01-14

基金项目:天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目(11JCZDJC23000);天津市科技支撑计划重点项目(10ZCKFGX03900)

作者简介:戴维蓉,1988 年出生,硕士研究生,研究方向为复合材料成型技术与装备。E-mail:dwrh930@163.com

通讯作者:杨涛,1970 年出生,副教授。E-mail: yangtao@tjpu.edu.cn

得到了显著的提高。

当前有多种不同的纤维曲线设计方法。如 Hyer 等人^[1-2]最先提出用曲线代替直线铺放,通过有限元法模拟设计纤维曲线的铺放路径。此种铺放采用分段连续的铺放方法,且相邻单元的纤维铺放角度的变化比较小,因此易于实现。随后出现的变刚度铺放的概念由 Gürdal 和 Olmedo 等人^[3]提出,假设铺放纤维的角度沿参考轴线成线性变化的建模方法,然后面内其余曲线利用平移法或平行法生成。Nagendra 等人^[4]应用单一立方的 NURBS 曲线来设计铺放轨迹,再利用平行法对层合板进行整体铺放。最后将铺放的拓扑构型植入有限元网格划分程序,从而确定单元内部的优化纤维的角度值。近几年,我国有关学者在力学方面进行了相关分析和进一步的研究^[5-8]。如马永前等人^[6]将纤维曲线铺放所引起的层合板面内

应力重新分布,提高了复合材料层合板的屈曲载荷,达 14% 左右。本文利用 Gürdal 和 Olmedo 等人提出的建模方法设计了圆柱芯模的纤维曲线铺放路径,建立了铺放机器人的末端姿态数学模型,对铺放机器人仿真建模,进行了连续变刚度纤维铺放轨迹模拟和运动仿真分析,并取得了良好效果。

1 变刚度铺放轨迹的模型建立与分析

1.1 变刚度铺放曲线的几何模型

如图 1 所示,纤维曲线的参考坐标系与基坐标系的夹角为 Φ , 纤维曲线与 x' 轴的夹角 T 在 $(0, a/2)$ 范围内随着曲线的方向呈线性递增变化,在 $(a/2, a)$ 范围内随着曲线的方向呈线性递减变化。则纤维曲线与基坐标系 x 轴的夹角 $\theta = \Phi + T$ 。相应的曲线位置方程为:

$$x = x' \cos \Phi + y' \sin \Phi \quad (1)$$

$$y(x) = \begin{cases} \frac{a}{2(T_0 - T_1)} \left\{ \ln \cos T_0 - 2 \ln \cos T_1 + \ln \left[\cos \left(-T_0 + 2T_1 + \frac{2(T_1 - T_0)}{a} x \right) \right] \right\} & -a \leq x \leq -\frac{a}{2} \\ \frac{a}{2(T_1 - T_0)} \left\{ -\ln \cos T_0 + \ln \left[\cos \left(T_0 + \frac{2(T_0 - T_1)}{a} x \right) \right] \right\} & -\frac{a}{2} \leq x \leq 0 \\ \frac{a}{2(T_0 - T_1)} \left\{ -\ln \cos T_0 + \ln \left[\cos \left(T_0 + \frac{2(T_0 - T_1)}{a} x \right) \right] \right\} & 0 \leq x \leq \frac{a}{2} \\ \frac{a}{2(T_1 - T_0)} \left\{ \ln \cos T_0 - 2 \ln \cos T_1 + \ln \left[\cos \left(-T_0 + 2T_1 + \frac{2(T_0 - T_1)}{a} x \right) \right] \right\} & \frac{a}{2} \leq x \leq a \end{cases} \quad (2)$$

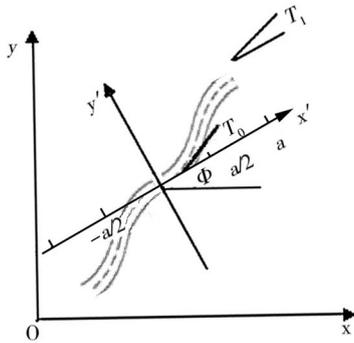


图 1 纤维曲线的参考路径的定义

Fig. 1 Reference path definition of curved fiber

1.2 圆柱芯模变刚度纤维曲线铺放分析

利用铺放曲线中心线的位置表达式来确定铺放带上下边缘的表达式,从而确定铺放带的整体位置。铺放带有效宽度的表达式为^[9]:

$$W_{\text{pro}} = \frac{W_{\text{nom}}}{\cos \theta} \quad (3)$$

当 $\theta = 0^\circ$ 时, $W_{\text{pro}} = W_{\text{nom}}$; 随着 θ 的增加,有效宽度也不断的增加,如图 2 所示。

联立方程(1)(2)(3)解出铺放带的上下边缘方程。本文要模拟芯模为圆柱的铺放轨迹,所以须将平面内纤维曲线的位置方程转换到圆柱曲面上,其转换方程为:

$$\begin{cases} X = r \sin \left(\frac{x}{r} \right) \\ Y = r \cos \left(\frac{x}{r} \right) \\ Z = y \end{cases} \quad (4)$$

式中, r 为圆柱的半径。转化后的结果如图 3 所示。

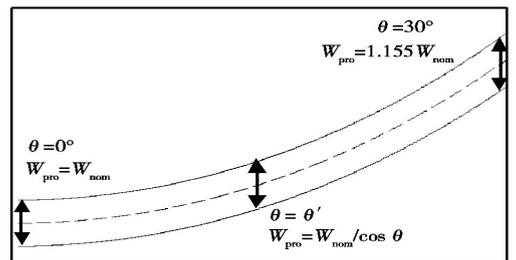


图 2 铺放带有效宽度变化

Fig. 2 Change in projected tow path height for lamina

然后采用主要轨迹规划铺放方法中的平移法生成圆柱面内其他曲线,如图4所示。因为平移法计算简单,且铺放二维刚度变化保留对称的属性。

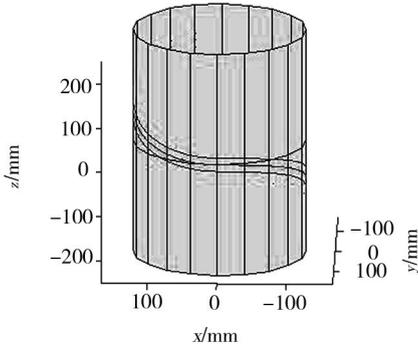


图3 圆柱芯模铺放路径
Fig.3 Path of the cylinder

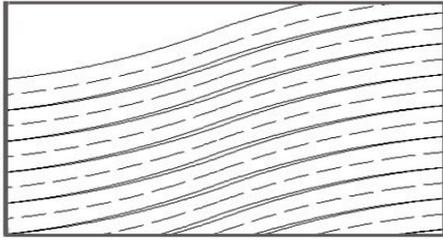


图4 纤维曲线平移铺放法
Fig.4 Shifted method of curvilinear fiber path

2 铺放机器人的运动学模型

本文采用的铺放机器人是由一台六自由度 ABB 机器人和一个转台构成,即铺放路径由机器人和转台相互协作共同完成。则此铺放机器人的末端是铺放头。然后用 D-H 矩阵法建立一系列笛卡尔坐标系,如图5所示。

分别用 T_1^0 、 T_2^1 、 T_3^2 、 T_4^3 、 T_5^4 、 T_6^5 、 T_7^6 矩阵表示转台坐标系相对于基坐标系,基座坐标系相对于转台坐标系,大臂坐标系相对于基座坐标系,小臂坐标系相对于大臂坐标系,转臂坐标系相对于小臂坐标系、腕坐标系相对于转臂坐标系、铺放头坐标系相对于腕坐标系的位姿。

建立相邻连杆坐标系间的齐次变换矩阵:

$$T_i^{i-1} = \text{Rot}(z, \theta_i) \text{Trans}(0, 0, d_i) \text{Rot}(x, a_i) = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos a_i & \sin\theta_i \sin a_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos a_i & -\cos\theta_i \sin a_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin a_i & \cos a_i & d_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

则将表1中的参数分别带入方程(7),联立方程(5)(6)(7)得:

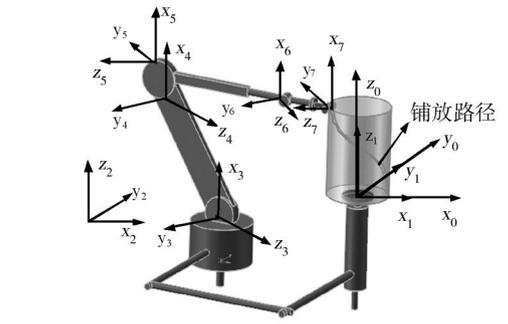


图5 铺放机器人坐标系

Fig.5 Coordinate systems of the fiber-placed robot

则该6连杆(基座、大臂、小臂、转臂、腕、铺放头)机器人末端铺放头坐标系相对于固定参考系下的位姿 T_7^0 ,等于从固定参考系到末端坐标系的各连杆坐标系之间的变换矩阵的连乘,即:

$$T_7^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 T_7^6 \quad (5)$$

则

$$T_7^0 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

图5所示的7自由度铺放机器人D-H参数见表1。

表1 7自由度铺放机器人D-H参数

Tab.1 D-H table of 7-DOF fiber-placed robot

连杆 i	转角 $\theta_i / (^\circ)$	连杆偏距 d_i / mm	连杆长度 a_i / mm	连杆扭转角 $\alpha_i / (^\circ)$
1	θ_1	0	0	0
2	θ_2	$-d_2$	$-a_2$	0
3	θ_3	0	a_3	90°
4	θ_4	0	a_4	0
5	θ_5	0	a_5	-90°
6	θ_6	$-d_6$	0	90°
7	θ_7	0	0	-90°

$$n_x = c\theta_7(c\theta_6 c\theta_{45} c\theta_{123} - s\theta_6 s\theta_{123}) - s\theta_7 s\theta_{45} c\theta_{123}$$

$$\begin{aligned}
n_y &= c\theta_7(c\theta_6s\theta_{123}c\theta_{45} + s\theta_6c\theta_{123}) - s\theta_7s\theta_{123}s\theta_{45} \\
n_z &= s\theta_7c\theta_{45} + c\theta_6c\theta_7s\theta_{45} \\
o_x &= -s\theta_6c\theta_{45}c\theta_{123} - c\theta_6s\theta_{123} \\
o_y &= c\theta_6c\theta_{123} - s\theta_6s\theta_{123}c\theta_{45} \\
o_z &= -s\theta_{45}s\theta_6 \\
a_x &= -c\theta_7c\theta_{123}s\theta_{45} - s\theta_7(c\theta_6c\theta_{123}c\theta_{45} - s\theta_6s\theta_{123}) \\
a_y &= -c\theta_7s\theta_{123}s\theta_{45} - s\theta_7(c\theta_6s\theta_{123}c\theta_{45} + s\theta_6c\theta_{123}) \\
a_z &= c\theta_7c\theta_{45} - c\theta_6s\theta_7s\theta_{45} \\
p_x &= d_6s\theta_{45}c\theta_{123} + a_3c\theta_{123} - a_2c\theta_{12} + \\
&\quad a_4c\theta_4c\theta_{123} + a_5c\theta_{123}c\theta_{45} \\
p_y &= a_3s\theta_{123} + d_6s\theta_{123}s\theta_{45} - a_2s\theta_{12} + \\
&\quad s\theta_{123}(a_4c\theta_4 + a_5c\theta_{45}) \\
p_z &= -d_2 + a_4s\theta_4 + a_5s\theta_{45} - d_6c\theta_{45}
\end{aligned}$$

式中:

$$\begin{aligned}
\theta_{ijk} &= \theta_i + \theta_j + \theta_k, \\
c\theta_{ijk} &= \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k), \\
s\theta_{ijk} &= \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k),
\end{aligned}$$

则求解出铺放机器人的末端位姿数学模型。

3 铺放机器人路径规划及仿真实现

应用 Solidworks 软件对铺放机器人进行仿真建模,合理布局铺放工作系统,并确定铺放参数及其初始条件。绘制纤维曲线及末端铺放头位姿,建模和路径规划完成后利用 Solidworks 软件对铺放机器人进行动态仿真。如图 6、图 7 所示。

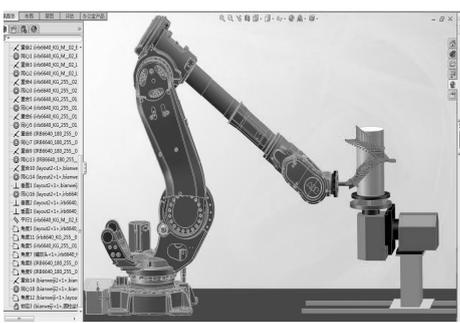


图 6 铺放机器人动态仿真

Fig. 6 Simulation of the fiber-placed robot

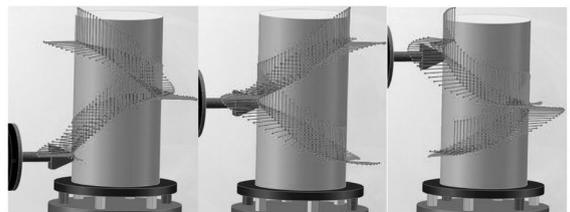


图 7 纤维曲线铺放路径规划

Fig. 7 Simulation of the fiber curves placement trajectory

观察图 6、图 7 可知在仿真过程中,铺放机器人

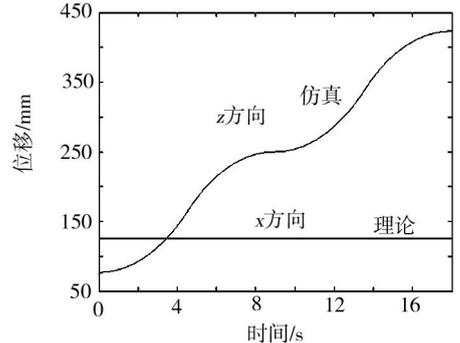
的运动连续、平稳且无停顿现象。由此证明铺放机器人能够根据规划路径到达规划点,且铺放过程中运动平稳,无剧烈的抖动现象,运转时冲击不大。

4 变刚度铺放机器人运动分析

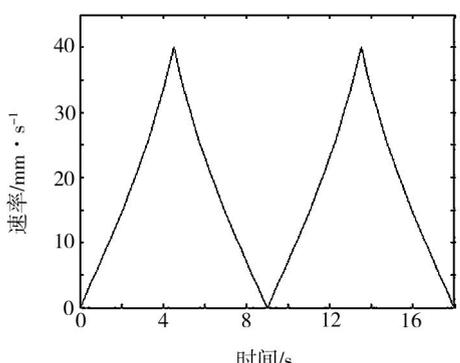
铺放头的位移、速率以及各个关节的角位移、角速率是保证铺放质量的重要参数,也是铺放机器人运动学研究的重要参数。利用软件 Matlab 计算在铺放仿真过程中这些重要参数的变化情况,然后绘制出铺放机器人各个关节的运动特性曲线,便于及时发现纤维曲线轨迹规划的设计不合理性,可及时得到修正。

4.1 铺放头的位移、速率分析

利用 Matlab 绘制出铺放头的位移、速率曲线,如图 8 所示。由图 8(a)可知,铺放头 x 、 z 方向的位移曲线光滑连续,没有尖点,这说明机器人在铺放过程中铺放头的动作符合铺放运动轨迹的要求。由图 8(b)可知,铺放头的速率曲线光滑连续没有突变,则说明铺放头在铺放过程中运动平稳,无较大的冲击,可以保证铺放质量。



(a) 位移



(b) 速率

图 8 铺放头的位移、速率曲线

Fig. 8 Curves of displacement velocity for placement head

4.2 各关节角位移、角速率分析

利用 Matlab 绘制出整个运动过程中各个关节的关节角位移、角速率的曲线图。文中以大臂与基座关节、小臂与大臂关节及腕与小臂关节为例来说明各个关节的运动特性。其角位移、角速率如图 9 所示。

可以看出,末端铺放头数学模型位姿曲线与仿真结果非常接近,这就说明理论与仿真分析一致,仿真结果正确且合理,验证了铺放机器人数学建模的正确性。

5 结论

由理论曲线与仿真曲线对比结果可以看出铺放机器人能够按照预先给定的铺放轨迹运动,并且铺放机器人的各个关节运动平稳、连续,运动性能良好,而且各个关节运动无剧烈抖动现象,无较大冲击,各构件间也没有产生干涉,因此表明上述方法可以实现变刚度纤维曲线的连续铺放,并且能够保证铺放质量。

本文所提出的方法为实现连续变刚度纤维曲线铺放具有一定的参考意义;并且在没有专业虚拟样机仿真软件的情况下,对铺放机器人及其他类似机器人进行轨迹模拟、运动仿真、运动分析及预测机械系统的性能,也具有一定的参考价值。

参考文献

[1] Hyer M W, Charette R F. Use of curvilinear fiber format in composite structure design[J]. AIAA Journal, 1991, 29(6): 1011-1015

[2] Hyer M W, Lee. The use of curvilinear fiber format to improve buckling resistance of composite plates with central holes [J]. Composite Structures, 1991, 18(3): 239-261

[3] Gürdal Z, Olmedo R. In-plane response of laminates with spatially varying fiber orientations: variable stiffness concept [J]. AIAA Journal, 1993, 31(4): 751-758

[4] Nagendra S, Kodiyalam S, Dvis J. Optimization of tow fiber paths for composite design [C]. Proceedings of the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 36th Structural Dynamics and Materials Conference. New Orleans LA, 1995: 1031-1041

[5] 秦永利, 祝颖丹, 范欣愉, 等. 纤维曲线铺放制备变刚度复合材料层合板的研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(1): 61-63

[6] 马永前, 张淑杰, 许震宇. 纤维曲线铺放的变刚度复合材料层合板的屈曲[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(5): 31-35

[7] 杨刚, 张爱锋. 几种层合板壳分层后屈曲分析[J]. 纤维复合材料, 2003(1): 3-5

[8] 邵冠军, 游有鹏, 缪群华. 复合材料开孔层合板的纤维铺放路径优化设计[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006(4): 31-34

[9] Patrick Tyler Langley. Finite element modeling of tow-placed variable-stiffness composite laminates [D]. USA: The Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999

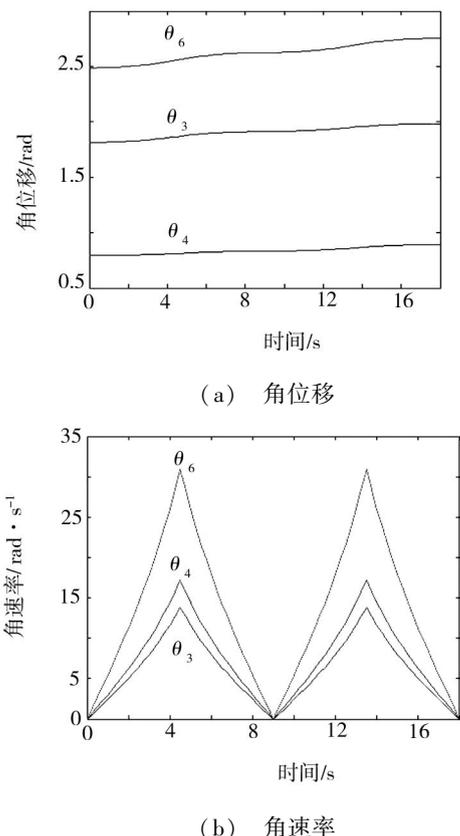


图9 主要关节角位移和角速率曲线

Fig. 9 Curves of angular displacement and angular velocity for main joints

由图9可知,整个铺放过程中,铺放机器人的基座与大臂关节,小臂与大臂关节及腕与小臂各个关节的角位移,角速率变化连续,无剧烈的抖动现象,表明各关节运动平稳,无较大冲击,则说明纤维曲线的路径设计合理可以实现。同时也表明铺放过程中减少了机器人的零件磨损,延长铺放机器人的使用寿命。

4.3 理论计算与仿真分析对比

将表1中的理论数据及铺放过程中各关节转角 θ_i 的值带入到铺放头的位姿数学模型中,利用 Matlab 软件绘制出铺放头的末端位姿曲线图。然后将此曲线图与图8做对比,比较结果如图10所示。

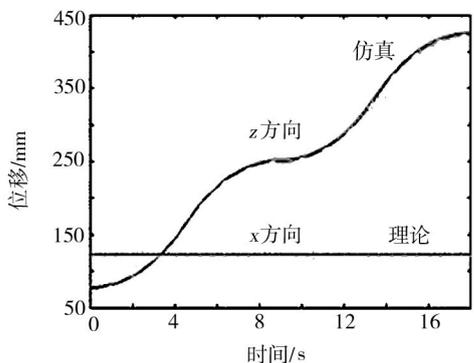


图10 铺放头理论数学模型位姿与仿真对比图

Fig. 10 Comparison of the theoretical mathematical model pose for placement head and simulation curve

(编辑 任涛)