应用机器人自动铺丝技术成型卫星反射器面板

董晓阳[1]　刘永佼[2]　潘　江[1]　郭金海[1]　左龙彦[1]
（1　上海复合材料科技有限公司工程技术研究中心，上海　201112）
（2　南京航空航天大学，南京　210016）

文　摘　采用自动铺丝技术成型卫星反射器面板，通过机器人平台进行自动铺丝试验。根据反射器面板抛物线方程特性，采用等距偏移方法规划铺丝轨迹；通过分析自动铺放过程中铺放压力、铺放覆盖完整性以及铺放平整性对轨迹规划的要求，确定铺放压力为 0.2 MPa、铺放丝束为 4 丝束。同时对机器人连杆机构及参数进行分析，基于 CATIA 软件 DMU 模块对铺丝轨迹进行仿真，并在 26℃、16 mm/s 铺放速度下通过自动铺放试验验证了反射器面板自动铺丝工艺成型的可行性。

关键词　复合材料，反射器，铺丝，机器人
中图分类号：TB3　　DOI：10.3969/j.issn.1007-2330.2016.06.007

Reflector Panel Processing Applied by the Auto Fiber Placement

DONG Xiaoyang[1]　LIU Yongjiao[2]　PAN Jiang[1]　GUO Jinhai[1]　ZUO Longyan[1]
（1　Shanghai Composite Science and Technology Ltd.，Shanghai Aerospace Engineering Technology Research Center of Resin Matrix Composites，Shanghai　201112）
（2　Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，Nanjing　210016）

Abstract　In this paper，the auto fiber placement machine was applied to process antenna plane，and the fiber placement experiment was conducted with robot. Due to the equation of the antenna，the fiber placement track was designed with the equidistant offset method. By analyzing the placement pressure and the full as time as the smooth during the fiber placement，which decides that placement pressure is 0.2 MPa，and the number of fiber tow is 4. In addition，the joint and the paramedic of the robot are analyzed，the placement tract is simulated by DMU module of CATIA. The fiber placement test is conducted with 16 mm/s speed at 26℃ in order to test and verify the process.

Key words　Composite，Reflector，Fiber placement，Robot

0　引言

CFRP 因其比强度高、比模量高、可设计性强等诸多优点，近年来在航空航天领域得到广泛应用。由于空间冷热交替的恶劣环境，要求复合材料卫星反射器在轨能保持足够高的热稳定性，维持反射器的形面精度，保证通讯质量，避免因反射器热变形导致形面精度下降影响地面与卫星联系。采用复合材料制造的卫星反射器具有质量轻、刚度大、设计性强等特点，但是目前成型反射器面板的主要方式是采用人工铺层，降低了反射器面板的精度及热稳定性。

针对开放曲面复合材料结构件成型问题，国内外已经开展铺丝、铺带自动化成型研究[1]，自动铺丝工艺具有铺放精度高、成型质量好，而且适用于大曲率曲面的复合材料结构成型。LONG YAN[2] 研究了机器人铺丝机在自由曲面上的铺丝轨迹；PIERRE DEBOUT[3] 研究了机器人铺丝路径柔顺性；TOMáš MARTINEC[4] 基于机器人系统研究了纤维铺放缠绕复合材料折弯管件工艺；BIJAN[5] 采用柔性轨迹方法研究了机器人纤维铺放工艺；周吉等[6] 研究了机器人铺丝程序并成型管状零件；龚长斌等[7] 研究了机器人铺丝路径逆解问题；许斌等[8] 研究了自动铺丝机运动控制信息的生成并进行软件仿真；郭娟[9] 以某型号飞机的 S 形进气道加工为例，对铺丝机器人末端执行器的运动轨迹进行了仿真分析。本文采用基

收稿日期：2016-04-15；修回日期：2016-08-08
基金项目：国家科技部 863 项目（2015AA03A201）
作者简介：董晓阳，1988 年出生，硕士，主要从事卫星反射器研究工作。E-mail：dongxiaoyang1112@163.com

于 KUKA KR150R2700-extra 机器人铺丝机平台，采用等距偏移方法对抛物面反射器面板铺丝路径进行规划，求解逆解，并基于 CATIA 软件 DMU 模块进行仿真，研制了反射器面板进行工艺验证。

1 试验

1.1 材料及设备

T700/环氧树脂预浸料，含胶量 33%，单层厚度 0.125 mm，威海光威生产；将预浸料分切成宽度 6.35 mm 纤维带。KR150R2700-extra 机器人，KUKA 公司生产；铺丝头为 8 丝束，分切机为 8 丝束，均为南京航空航天大学研制；直径 4 m 辅助转台，上海复合材料科技有限公司研制。

1.2 轨迹规划

某型号卫星反射器承担卫星与地面通讯功能，反射器结构采用蒙皮与铝蜂窝夹层芯子胶接成型。其电磁波反射面以 x 轴为中心旋转 360°形成的抛物曲面，其母线抛物线方程：

$$Y^2 = 6400X \qquad X \subset [0,87.9] \tag{1}$$

采用等距偏移轨迹规划方法，对反射器面板进行轨迹规划，采用以参考基线为基准，定距离偏移轨迹点方法对反射器面板模具面进行网格化。得到铺丝路径上插值点。

取平面 $X=x_0$，平面 $Y=y_0$。X 和 Y 与抛物面的交线位于抛物面上，分别为 C_{x_0} 和 C_{y_0}。抛物面上的曲线 C_{x_0} 和 C_{y_0} 分别为抛物面上大圆上的一段圆弧线。沿着 x、y 轴分别以圆弧线 C_{x_0} 和 C_{y_0} 为固定参考曲线，将圆弧线 C_{x_0} 和 C_{y_0} 上插值点为基准以一定的距离 Δx_i、Δy_i 作偏移得到一组偏移点，偏移点在抛物面上拟合得到一条曲线，即偏移线（图 1）。

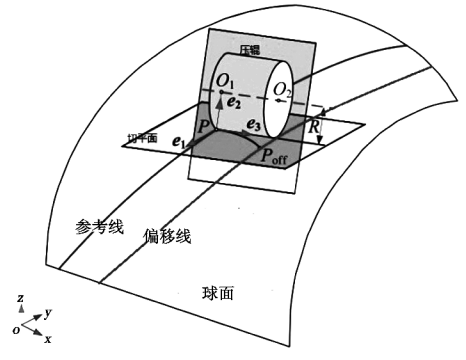


图 1 等距偏移

Fig.1 Equidistant offset

假设抛物面参数方程为 $S=(u,v)$，抛物面上参考曲线 $C=C[u(t),v(t)]$，铺放压辊与模具接触点 $P=C(t_{pc})$，点 P 在模具表面的标架 (e_1,e_2,e_3)，如图 1 所示。则：

$$e_1(t) = \frac{c'(t)}{|c'(t)|}\Big|_{t=t_{pc}} \tag{2}$$

$$e_2(t) = \frac{n(t)}{|n(t)|}\Big|_{t=t_{pc}} \tag{3}$$

$$e_3(t) = [e_2(t) \times e_1(t)]\Big|_{t=t_{pc}} \tag{4}$$

式中，$n(t)$ 为曲线在曲面上的法向量。从图 1 可以看出，e_2、e_3 位于法平面内，且法平面经过点 P 以及偏移路径上的偏移点 P_{off}。图 1 可知，PO_1 平行于 e_2，O_1 的坐标[2]：

$$\begin{bmatrix} x_{o1} \\ y_{o1} \\ z_{o1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{2x} \\ e_{2y} \\ e_{2z} \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中，(x_p,y_p,z_p) 为曲线上点 P 坐标。R 为橡胶压辊的半径。(e_{2x},y_{2y},z_{2z}) 为向量 e_2 的一组基；同时 O_1O_2 平行于 e_3，O_1O_2 直线方程可表达为：

$$\frac{x - x_{O1}}{e_{3x}} = \frac{y - y_{O1}}{e_{3y}} = \frac{z - z_{O1}}{e_{3z}} \tag{6}$$

式中，(x_{o1},y_{o1},z_{o1}) 为点 O_1 坐标，(e_{3x},e_{3y},e_{3z}) 为向量 e_3 的一组基；因为直线 O_1O_2 与 e_3 平行，且 $O_1O_2=L$（L 为压辊宽度），公式（10）可求取点 O_2 坐标 (x_{o2},y_{o2},z_{o2})。

以参考曲线为基准偏移时偏移方向沿着模具表面并在参考点垂直于参考曲线。图 1 可知，在模具表面点 P 的标架 (e_1,e_2,e_3) 是一组正交标架，包含 e_2、e_3 单位向量的法平面通过参考点 P、偏移点 P_{off}，并其法向量为 e_1，则通过压辊中心轴 O_1O_2 的法平面的方程：

$$e_{1x}(x - x_p) + e_{1y}(y - y_p) + e_{1z}(z - z_p) = 0 \tag{7}$$

式中，(e_{1x},e_{1y},e_{1z}) 为向量 e_2 的一组基。偏移点 P_{off} 为抛物面上点，同时偏移点 P_{off} 在通过压辊中心轴 O_1O_2 的法平面上，则偏移点 P_{off} 的坐标可根据偏移距离确定，偏移距离：

$$\Delta d = \sqrt{(x_{off} - x_p)^2 + (y_{off} - y_p)^2 + (z_{off} - z_p)^2} \tag{8}$$

式中，$(x_{off},y_{off},z_{off})$ 为偏移点 P_{off} 坐标。

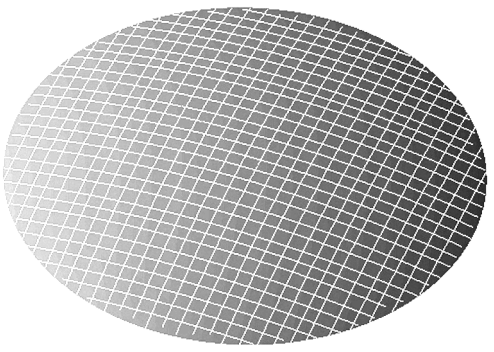


图 2 抛物面偏移网格

Fig.2 Offset mesh on paraboloid

通过参考曲线上的参考点做偏移得在抛物面上得到铺丝轨迹插值点 (P_{x0},P_{y0})、(P_{x1},P_{y1})，……

(P_{xn}, P_{yn})。将插值点拟合分别得到抛物面上曲线 $C_{x0}, C_{x1}, C_{x2}, \cdots\cdots, C_{xn}; C_{y0}, C_{y1}, C_{y2}, \cdots\cdots, C_{yn}$。即反射器抛物面铺放轨迹。

2 铺放工艺

2.1 铺放压力

在铺放过程中往往因为压辊与曲面不完全贴合，导致压辊无法对复合材料纤维丝束加压，铺放纤维时留存的空气等杂质在固化后形成层间缺陷，降低复合材料力学性能。为了降低复合材料丝束层间的缺陷，铺丝头部压辊需要与模具贴合，对纤维丝束进行加压，要求铺丝头部压辊与偏移点之间距离 O_2P_{off} 满足：

$$R - \Delta\varepsilon \leqslant d_{O_2P_{\text{off}}} \leqslant R \tag{9}$$

式中，$\Delta\varepsilon$ 为铺丝头部压辊最大变形量。式(9)压辊对模具加压产生的最大变形量条件下，铺丝头部压辊中心与偏移点之间距离 $O_2P_{\text{off}} \geqslant$ 压辊半径与其最大变形量之差；式(9)右边为铺丝头部压辊中心与偏移点之间距离 $O_2P_{\text{off}} \geqslant$ 压辊半径；保证压辊具有一定的压缩量，即压辊可以对纤维丝束进行加压。

2.2 铺放覆盖性

纤维自动铺放，要求纤维丝束能够完全覆盖模具表面，否则在铺放时会在面内形成空隙等缺陷，为了降低铺放缺陷，两条铺丝路径中心线之间弧长 S 满足：

$$S = nw_s \tag{10}$$

式中，n 为每次铺放时丝束数，w_s 为铺放单丝束宽度。纤维铺放时需要合理计算偏移距离，使得纤维完全覆盖模具表面，则偏移距离 Δd 满足：

$$\Delta d = S\sin\theta \tag{11}$$

由式(10)、(11)可得偏移间距与每次铺放丝束之间的关系：

$$\Delta d = nw_S\sin\theta \tag{12}$$

式(12)说明为了模具铺放覆盖完全，偏移距离和每次铺放纤维丝束数量有关。

2.3 铺放平整性

在满足铺放压力、铺放完整性条件下，还要求纤维铺放具有良好铺放工艺性，铺放工艺的好坏与铺放路径测地曲率有关。图 3 为以抛物面大圆为参考线偏移测地曲率示意图。图 3 中，抛物面参考曲线上基准点偏移 Δd 距离后曲线上偏移点 P_{off}，偏移平面与抛物面相交圆曲线在偏移点 P_{off} 对应的曲线曲率为：

$$K_c = \frac{1}{\rho} \tag{13}$$

式中，ρ 为偏移点 P_{off} 所在交圆的半径；偏移点 P_{off} 在抛物面测地曲率和曲线曲率关系为[10]：

$$K_g = K_c\cos\theta \tag{14}$$

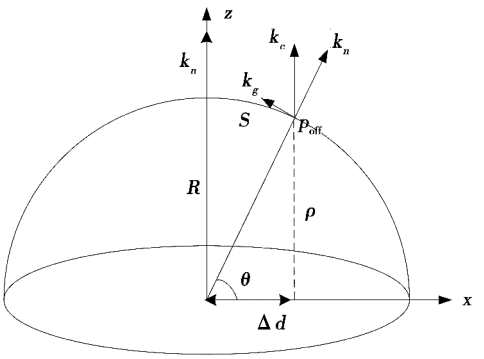


图 3 抛物面偏移曲线测地曲率

Fig.3 Geodesic curvature of curve on paraboloid

在纤维铺放过程中，在满足纤维铺放覆盖完整性同时，还需要保证纤维铺放时纤维弯曲变形量最小。预浸纱压缩应变与测地曲率关系[11]：

$$\varepsilon = -\frac{nw_s}{\dfrac{1}{k_g} + \dfrac{nw_s}{2}} \tag{15}$$

式中，ε 是压缩应变，k_g 是测地曲率，w_s 是铺放时单根预浸纱的宽度。由式(13)(14)(15)可计算预浸纱应变与偏移距离关系：

$$\varepsilon = -\frac{nw_s}{\dfrac{1}{\left(\dfrac{R}{\cos\theta} - \dfrac{\Delta d}{\sin\theta}\right)} + \dfrac{nw_s}{2}} \tag{16}$$

式(16)表明，当所使用预浸纱宽度一定时，偏移距离 Δd 越大，θ 减小，ε 增加，预浸纱出现皱褶程度增加，轨迹的铺放工艺性越差。

3 机器人逆解及仿真

3.1 机器人逆解

铺丝机器人为六旋转轴开链结构工业机器人，其六轴结构示意图见图 4。

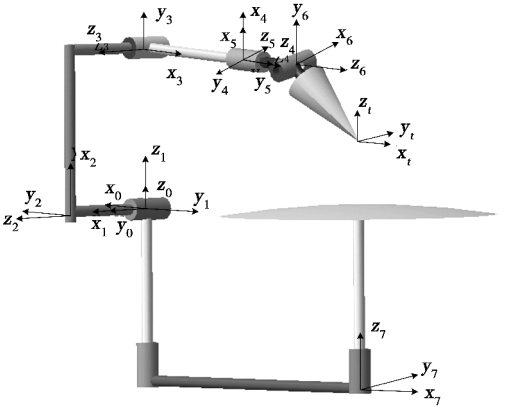


图 4 铺丝机器人连杆坐标系

Fig.4 Joint coordinate system of fiber placement robot

基于 D-H 法建立铺丝机器人六轴连杆空间坐标系，连杆转换矩阵为：

$$
{}^{0}_{1}T=\begin{bmatrix}\cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0\\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},{}^{1}_{2}T=\begin{bmatrix}\cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ -\sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},{}^{2}_{3}T=\begin{bmatrix}\cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & a_2\\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & d_3\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},
$$

$$
{}^{3}_{4}T=\begin{bmatrix}\cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & a_3\\ 0 & 0 & 1 & d_4\\ \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},{}^{4}_{5}T=\begin{bmatrix}\cos\theta_5 & -\sin\theta_5 & 0 & 0\\ 0 & 0 & -1 & 0\\ \sin\theta_5 & \cos\theta_5 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},{}^{5}_{6}T=\begin{bmatrix}\cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0\\ 0 & 0 & -1 & 0\\ -\sin\theta_6 & -\cos\theta_6 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}
$$

$$
{}^{6}_{t}T=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & p_x\\ 0 & 0 & 0 & p_y\\ 0 & 0 & 0 & p_z\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{17}
$$

铺丝头的长度是常量,记为 d_t, 则铺丝头末端的坐标可求得:

$$
{}^{0}_{t}T=\begin{bmatrix}n_x & o_x & a_x & p_x+a_xd_t\\ n_y & o_y & a_y & p_y+a_yd_t\\ n_z & o_z & a_z & p_z+a_zd_t\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{18}
$$

*KUK*150 *R*2500 *extra* 机器人的连杆参数为图 4 中机器人参数; α_i 为连杆转角;a_{i-1}为长度;d_i 为连杆偏距;θ_i 为关节角。

表 1　铺丝机器人 D-H 参数

Tab.1　D-H parameter of fiber placement robot

关节	运动范围/(°)	α_i/(°)	a_{i-1}/mm	d_i/mm	θ_i/(°)
1	[-180,180]	180	0	-675	θ_1
2	[-60,140]	90	350	0	θ_2-90
3	[-170,80]	0	1150	0	θ_3
4	[-360,360]	90	-41	-1000	θ_4
5	[-120,135]	-90	0	0	θ_5
6	[-360,360]	90	0	0	θ_6

令 d_t=900 mm,则在初始位置铺放头压辊端部位姿矩阵为:

$$
{}^{0}_{t}T=\begin{bmatrix}0 & 0 & -1 & 2250\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 1734\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{19}
$$

基坐标系{0}相对于工件坐标系{$\boldsymbol{S}$}的变换矩阵为${}^{S}_{0}\boldsymbol{T}$,工具坐标系{$\boldsymbol{T}$}相对于末端连杆坐标系{0}的变换矩阵为${}^{0}_{t}\boldsymbol{T}$,则工具坐标系相对于工件坐标系的位姿为:

$$
{}^{S}_{t}T={}^{S}_{0}T{}^{0}_{t}T \tag{20}
$$

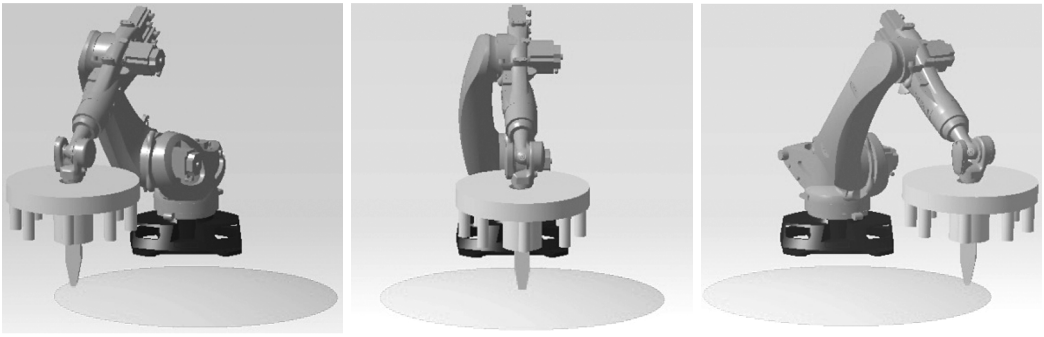
根据变换矩阵${}^{i-1}_{i}\boldsymbol{T}$,可求出机器人末端连杆相对于基坐标系的位姿,即变换矩阵:

$$
{}^{0}_{6}\boldsymbol{T}={}^{0}_{1}\boldsymbol{T}(\boldsymbol{\theta}_1){}^{1}_{2}\boldsymbol{T}(\boldsymbol{\theta}_2){}^{2}_{3}\boldsymbol{T}(\boldsymbol{\theta}_3){}^{3}_{4}\boldsymbol{T}(\boldsymbol{\theta}_4){}^{4}_{5}\boldsymbol{T}(\boldsymbol{\theta}_5){}^{5}_{6}\boldsymbol{T}(\boldsymbol{\theta}_6) \tag{21}
$$

式(21)称为机器人的运动学方程,根据公式(21)可解析求解出各个关节运动方程,进而控制铺丝头运动轨迹。

3.2　机器人仿真

将规划轨迹应用 CATIA 软件 DMU 模块进行运动仿真,底座固定为基座标,铺放头坐标为工具坐标,连杆之间通过旋转结合方式定义连接,连杆之间只允许一个旋转自由度进行运动,图 5 所示为铺丝路径仿真位置示意图。铺放过程中满足铺放头垂直铺放曲面要求。



(a)　铺放开始　　(b)　铺放中间位置　　(c)　铺放结束

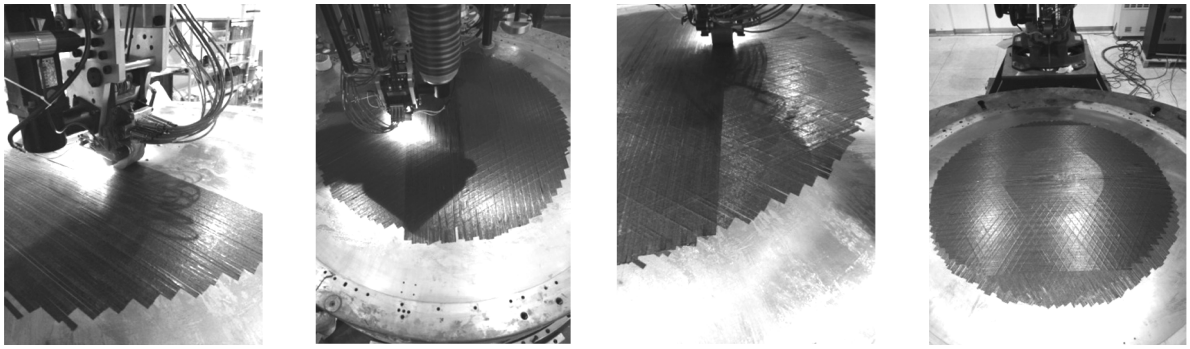
图 5　铺丝机铺放仿真

Fig.5　Simulation of fiber placement by robot

4 工艺试验验证

为了验证反射器面板自动铺丝工艺可行性,在机器人自动铺丝机上进行工艺试验,某型号反射器面板铺层设计:[-60/0/+60]。试验材料为 T700/环氧预浸料,单层厚度 0.125 mm,丝束宽度 6.35 mm。

根据铺放工艺要求,压力设置为 0.2 MPa,丝束数为 4,速度为 16 mm/s,温度为 26℃,湿度为 70%。图 6 为铺放试验。图 6 可见,纤维铺放时,预浸料与模具贴合平整、无纤维皱褶扭曲缺陷;采用自动铺丝成型反射器面板,纤维方向精准度高,铺放覆盖性完整,满足高精度反射器面板性能要求,采用自动铺丝技术成型卫星反射器面板具有较高的可行性。



(a) -60°铺放效果 (b) 0°铺放 (c) +60°铺放 (d) 整体铺放

图 6 反射器面板自动铺丝试验

Fig.6 Auto fiber placement experiment of the antenna plane

5 结论

采用自动铺丝技术成型反射器面板,应用等距偏移方法对抛物面规划铺丝路径,同时对铺放工艺性进行分析,并采用 D-H 法分析了机器人运动轨迹,基于 CATIA 软件进行运动仿真,验证了轨迹规划的正确性;最后在自动铺丝机进行工艺试验:

(1)采用等距偏移轨迹规划方法适用于抛物面反射器面板自动铺丝成型;

(2)铺放压力、铺放丝束数量对轨迹规划具有限制性条件,针对某型号反射器面板铺放压力为 0.2 MPa,铺放丝束数为 4,铺放速度 16 mm/s;

(3)采用自动铺丝技术成型高精度反射器面板具有可行性。

参考文献

[1] 肖军,李勇,李建龙.自动铺放技术在大型飞机复合材料构件制造中的应用[J].航空制造技术,2008(1):50-53.

[2] LONG Y,ZE Z,CHEVY C,et al.An accurate approach roller path generation for robotic fibre placement of free-form surface composites[J].Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2014(30):277-286.

[3] PIERRE D, HéLèNE C, EMMANUEL D. Tool path smoothing of a redundant machine:Application to Automated Fibre [J].Placement Computer-Aided Design,2011(43):122-132.

[4] TOMáš M,Jaroslav M,Michal P.Calculation of the robot trajectory for the optimum directional orientation of fibre placement in the manufacture of composite profile frames[J].Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2015(35):42-54.

[5] BIJAN S, GURSEL A, CHEE W F, et al. Fabrication process of open surfaces by robotic fibre placement[J].Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2004(20):17-28.

[6] 周吉.纤维铺放机器人及其关键技术研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.

[7] 龚长斌,游有鹏.自动铺丝束机器人逆运动学问题的解析法[J].机械工程与自动化,2006, 1 (134):1-4.

[8] 许斌,安鲁陵,肖军,等.自动铺丝机运动控制信息的生成与仿真[J].制造业自动化,2005,27(1):1-4.

[9] 郭娟,林勇.自动铺丝机器人运动学逆解的求解算法[J].机电工程,2015,32(4):575-578.

[10] 陈维桓.微分几何初步[M].第一版.北京:北京大学出版社, 1990:167.

[11] 李俊斐.基于结构设计的开孔曲面自调节铺丝轨迹规划算法研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.