

# 风电叶片玻璃纤维布铺层装备的运动学分析

张磊安<sup>1</sup>, 王景华<sup>1</sup>, 黄雪梅<sup>1</sup>, 刘卫生<sup>2</sup>, 魏修亭<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255049;

2. 江苏省海上风电叶片设计与制造技术重点实验室, 连云港中复连众复合材料集团有限公司, 连云港 222006)

**摘 要:** 针对风电叶片玻璃纤维布铺层过程的多自由度特性, 开发一套自动化铺层装备。对布辊回转单元构建基于双坐标系的位姿变换矩阵, 得到布辊的运动学模型, 并获得影响铺层路径及速度的因素, 可视化得到玻璃纤维布的铺层曲面轨迹。采用该装备进行现场铺布试验表明, 叶片模具的实际曲面, 仿真与试验的铺层路径轨迹误差不得超过 20 mm, 速度误差小于 1.5 mm/s, 机构的试验误差符合玻璃纤维布铺层的技术要求, 可为后续铺层控制算法开发奠定了理论依据。

**关键词:** 运动学分析; 运动模拟; 自动化装备; 风电叶片; 铺层试验

**中图分类号:** TH113

**文献标识码:** A

## 0 引 言

风电作为一种绿色清洁能源, 正在为实现“美丽中国梦”发挥积极作用。风电叶片作为风力发电机组的重要部件, 其质量直接影响风电设备的运行可靠性<sup>[1,2]</sup>。玻璃纤维布(玻纤布)作为叶片的“骨骼”, 其铺层质量与效率极其重要, 目前国内外的玻纤布的铺层工序基本采用手动操作。由于叶片模具表面形状不规则, 尺寸巨大, 人工铺层难以保证铺层精度, 且劳动强度太大。因此, 面向风电叶片玻纤布的自动化铺层技术及装备正成为风电制造业一个崭新的发展方向<sup>[3]</sup>。

玻纤布铺放装备的核心技术主要集中在铺放路径及轨迹优化<sup>[4]</sup>。发达国家靠自身的前沿技术积累, 在相关领域取得了众多技术成果。达诺巴特斯公司拥有成熟技术但机器售价昂贵, Shirinzadeh 等<sup>[5]</sup>通过正交投影法获取了判断铺放路径的边界条件, Blom 等<sup>[6]</sup>在变角度铺放技术上研究出了新的轨迹规划算法。在中国, 宋清华等<sup>[7]</sup>提出一种新的铺放技术, 但其只适用于热塑性复合材料; 邵冠军等<sup>[8]</sup>设计的路径规划能够适应各种材料

面, 但其运算量巨大; 孙鹏文等<sup>[9]</sup>提出基于遗传算法的铺层厚度优化, 同样存在运算量大的缺陷。综上, 国内外鲜有对风电叶片玻纤布自动化铺层技术与装备的技术报道。

因此, 亟需开发能替代人工操作的智能化铺层装备, 并分析其运动学特性。在叶片制造车间的玻纤布铺放环节, 根据已知的模具曲面参数, 使叶片玻纤布铺放过程自适应跟随模具不规则曲面, 保证运动轨迹精准可控, 实现降本增效。

## 1 铺层装备机构分析

铺层装备为模块化结构, 执行部件主要包括移动单元和回转单元, 其结构参数可根据工况进行人工调整。地轨及叶片模具与大地固定, 龙门架与地轨沿  $x$  轴方向作相对移动, 移动单元与龙门架可沿  $y$  轴、 $z$  轴方向作相对移动, 回转单元与移动单元铰接, 绕  $x$  轴转动, 总体如图 1 所示。

图 1 机构中, 布辊在回转单元内部绕平行于  $y$  轴的方向转动, 布辊有相应的玻璃纤维布裁切装置, 控制玻璃纤维布的铺放长度以及  $y$  轴方向的移动以达到总体铺层设定的不同厚度及宽度。回转

收稿日期: 2018-08-01

基金项目: 山东省重点研发计划(2018GGX100304); 第 11 批中国博士后科学基金特别资助(2018T110704); 第 62 批中国博士后科学基金一等资助(2017M620291)

通信作者: 黄雪梅(1974—), 女, 博士、教授, 主要从事新能源工程产业化方面的研究。huangxuemei@sdut.edu.cn

单元可根据工况适当增加  $x$  轴方向的长度, 以设置多个料辊, 装载不同的玻璃纤维布, 按设定的路径及布料类别进行铺放。

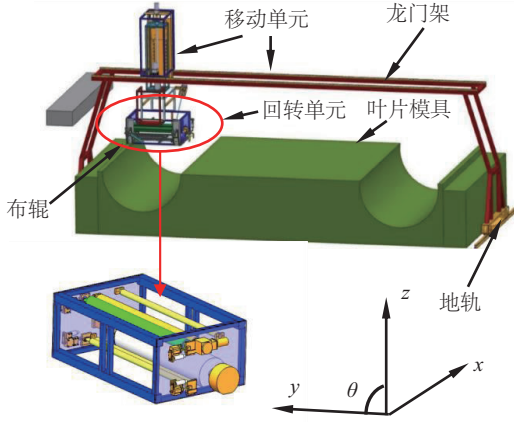


图1 铺层装备模块化结构

Fig. 1 Modular construction of laying device

根据图1和式(1)联合得到铺布设备的自由度为4。

$$F = 6(N-1) - \sum_{i=1}^g u_i \quad (1)$$

式中,  $N$  ——活动部件数量;  $u_i$  ——第  $i$  个运动副带来的约束;  $g$  ——运动副数量。

### 1.1 坐标系构建

将固定坐标系与连体坐标系相结合, 在固定坐标系中给出连体坐标系的位置, 然后在连体坐标系内对物件的姿态进行描述。固定坐标系位于基础平台, 连体坐标系位于固定坐标系内部, 表示回转单元的空间角度。

### 1.2 运动学建模

设定回转单元在固定坐标系中的坐标为  $(0, a_1, a_2)$ ,  $a_1 \geq 0, a_2 \geq 0$ 。为描绘其姿态, 按最低限度原则, 在回转单元上标点, 位置如图2所示。  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  点皆位于回转单元上下底板正中间,  $A_3$  处在  $A_1$ 、 $A_2$  所在平面的相对平面的正中间, 3 个点结合得到回转单元角度, 即布辊角度。因回转单元中点是连体坐标系原点, 且中点可用固定坐标系进行矢量描述, 将连体坐标系与固定坐标系结合, 固定坐标系表示矢量位置, 连体坐标系表示空间角度。为区分两坐标系的变量, 固定坐标系中的变量下标字母为小写, 连体坐标系中的变量下标字母为大写。

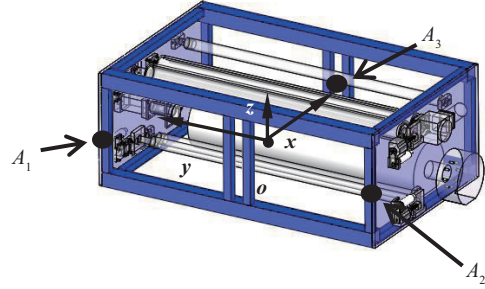


图2 回转单元标记点

Fig. 2 Roll unit mark

图2中, 回转单元模型长度为  $m$ , 宽度为  $n$ , 高度为  $h$ , 中心点  $o$  的坐标  $(0, 0, 0)$ , 则:

$A_1$  点的坐标值为  $(-\frac{n}{2}, \frac{n}{2}, 0)$ ,  $A_2$  点的坐标值为  $(-\frac{n}{2}, -\frac{m}{2}, 0)$ ,  $A_3$  点的坐标值为  $(\frac{n}{2}, 0, 0)$ 。

### 1.3 机构逆向求解

首先计算回转单元在固定坐标系内的移动坐标, 标记点坐标值从初始坐标  $m_0(x_0, y_0, z_0)$  转化为实时坐标  $m_{t1}(x_1, y_1, z_1)$ , 其变换可用式(2)表示:

$$\begin{cases} \Delta x = x_1 - x_0 \\ \Delta y = y_1 - y_0 \\ \Delta z = z_1 - z_0 \end{cases} \quad (2)$$

将  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  用  $t_x$ 、 $t_y$ 、 $t_z$  表示, 得到位置变换矩阵:

$$[m_{t1} \ 1] = [m_0 \ 1]T \quad (3)$$

$$\text{式中, } T \text{ ——转换矩阵, } T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & t_z & 1 \end{bmatrix}。$$

$A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  的初始坐标记作  $M_{i0}(X_{i0}, Y_{i0}, Z_{i0})$ ,  $i=1, 2, 3$ , 回转单元在连体坐标系的初始状态  $M_{R0}$  表示为:

$$M_{R0} = \begin{bmatrix} X_{10} & Y_{10} & Z_{10} & 0 \\ X_{20} & Y_{20} & Z_{20} & 0 \\ X_{30} & Y_{30} & Z_{30} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

设回转单元绕  $x$  轴转换角度为  $\theta$ , 转换矩阵:

$$T_{y1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

若回转轴拓展为三自由度多轴旋转体, 逆时针为正, 对其  $x$  轴的旋转  $\theta$ ,  $y$  轴的旋转  $\beta$ ,  $z$  轴的旋转  $\gamma$ , 其角度变换矩阵:

$$t = \begin{bmatrix} \cos\beta \cos\gamma & \cos\beta \sin\gamma & -\sin\beta \\ \sin\theta \sin\beta \cos\gamma - \cos\theta \sin\gamma & \sin\theta \sin\beta \sin\gamma + \cos\theta \cos\gamma & \sin\theta \cos\beta \\ \cos\theta \sin\beta \cos\gamma + \sin\theta \sin\gamma & \cos\theta \sin\beta \sin\gamma - \sin\theta \cos\gamma & \cos\theta \cos\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

空间角度变换矩阵:

$$T_Y = \begin{bmatrix} t & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

将  $T$  与  $T_Y$  结合,得到机构的逆向求解矩阵,在转角及矢量位移已知条件下,代入式(8)得到布辊位置及空间姿态。

$$M_{Z1} = M_{Z0} T T_Y \quad (8)$$

式中,  $M_{Z0}$  ——初始矩阵;  $M_{Z1}$  ——变换后的机构位姿矩阵。

#### 1.4 机构正向求解

初始矩阵  $M_{Z0}(X_{i0}, Y_{i0}, Z_{i0})$ ,  $i=1,2,3$ , 在布辊绕  $x$  轴转动  $\theta$  角并移动一个空间位置后变为  $M_{Z1}(X_{i1}, Y_{i1}, Z_{i1})$ ,  $i=1,2,3$ , 回转单元在固定坐标系内坐标值为  $(X_{31}, \frac{Y_{11}+Y_{21}}{2}, Z_{31})$ , 其移动值为  $t$ , 如式(9)所示。转角  $\theta$  通过正切公式代入  $M_{Z0}$  和  $M_{Z1}$  得式(10), 在初始及最终位置矩阵已知时, 联立式(9)、式(10)可求得布辊转角及矢量位移。

$$\begin{cases} t_x = X_{31} - X_{30} \\ t_y = \frac{Z_{21} + Z_{31}}{2} - \frac{Z_{20} + Z_{30}}{2} \\ t_z = Z_{31} - Z_{30} \end{cases} \quad (9)$$

$$\theta = \arctan \left[ \frac{(Z_{21} - Z_{11})(X_{20} - X_{10}) - (Z_{20} - Z_{10})(X_{21} - X_{11})}{(X_{21} - X_{11})(X_{20} - X_{10}) + (Z_{21} - Z_{11})(Z_{20} - Z_{10})} \right] \quad (10)$$

## 2 运动学分析及仿真

### 2.1 运动学分析

回转单元结构如图3所示,布辊安装在回转单元内部。由中心原点分别向  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴延伸3条线  $L_4$ 、 $L_5$ 、 $L_6$ , 长度分别为  $\frac{m}{2}$ 、 $\frac{n}{2}$ 、 $\frac{h}{2}$ 。以  $A_1$  点为例,在极短时间  $\Delta t$  内,已知  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$ 、 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$  为常数,未知量为  $\Delta x_A$ 、 $\Delta y_A$ 、 $\Delta z_A$ , 在  $\Delta t$  内,常数  $\Delta\theta$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma \leq 30^\circ$ 。

在该姿态下,可建立式(11)运动学方程。同理,  $A_2$ 、 $A_3$  的等式数据也依据式(11)得出。对式(11)求

导,得式(12)代表回转单元的边界运动轨迹。

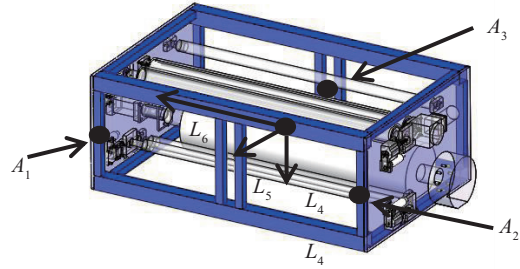


图3 布辊坐标变换图

Fig. 3 Coordinate transformation diagram of material roll

$$\begin{cases} \Delta x_A = \Delta x + L_4 [\cos\beta - \cos(\beta + \Delta\beta)] - \\ L_4 [\cos\gamma - \cos(\gamma + \Delta\gamma)] \\ \Delta y_A = \Delta y + L_5 [\cos\theta - \cos(\theta + \Delta\theta)] + \\ L_5 [\cos\gamma - \cos(\gamma + \Delta\gamma)] \\ \Delta z_A = \Delta z + L_5 [\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin\theta] - \\ L_4 [\sin(\beta + \Delta\beta) - \sin\beta] \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} v_{Ax} = v_x + L_4 [\omega_\beta \sin(\beta + \Delta\beta) - \omega_\gamma \sin(\gamma + \Delta\gamma)] \\ v_{Ay} = v_y + L_5 [\omega_\theta \sin(\theta + \Delta\theta) + \omega_\gamma \sin(\gamma + \Delta\gamma)] \\ v_{Az} = v_z + L_5 \omega_\theta \cos(\theta + \Delta\theta) - L_4 \omega_\beta \cos(\beta + \Delta\beta) \end{cases} \quad (12)$$

### 2.2 运动仿真

为获得布辊的姿态运动数据,设计自动铺层装备仿真模型,参数如表1所示。该系统集成了编码器测速、拉绳传感器测位移、倾角传感器测角度等多个单元,基于运动学模型进行轨迹仿真,所得布辊的位移、速度曲线如图4所示。从图4可知位移轨迹基本斜率不变,速度曲线后期为平直线,因为克服初始静摩擦造成布辊速度在0~2 s内不稳定。

布辊宽度为1.5 m,初始距离地面为2.5 m,根据前述运动学模型,仿真得到布辊的铺层轨迹如图5所示,铺层过程基本为自下而上,铺层曲面颜色以高度为依据渐变显示(自上而下的颜色梯层过度变化表示铺层的高度,右侧为高点)。

表1 型参数  
Table 1 Model parameters

模型尺寸及配置			
总长/m	总宽/m	总高/m	铺层长度/m
65	12	6.6	60

动力及传动配置		
模型组件	数量	参数
X轴电机	2	功率7.5 kW, 额定力矩2.1 Nm
Y轴电机	1	功率2.3 kW, 额定力矩15 Nm
Z轴电机	2	功率1.5 kW, 额定力矩2.0 Nm
$\theta$ 角电机	1	功率0.4 kW, 额定力矩2.2 Nm

传动系统		传动方式
X轴移动传动系统		滚子导轨传动
Y轴移动传动系统		齿轮齿条
Z轴移动传动系统		丝杠螺母
$\theta$ 角转动传动系统		双圆柱齿轮

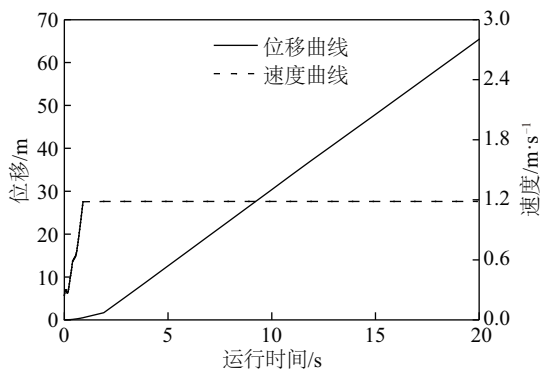


图4 位移、速度曲线  
Fig. 4 Location and velocity curves

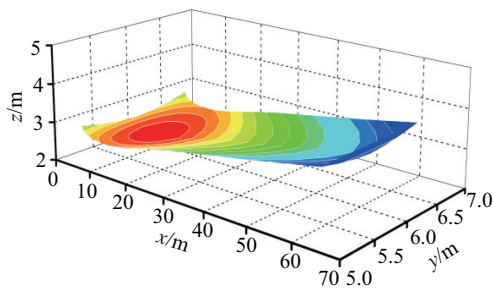


图5 铺层仿真轨迹  
Fig. 5 Laying simulation trajectory

### 3 现场测试

为验证理论推导与仿真结果的准确性,研制了玻纤布自动化铺层装备,以叶片阳模为例进行铺层

试验,试验现场如图6所示。回转单元内部的布辊位姿代表玻纤布的铺放路径,以三维激光扫描仪多段扫描获取布辊位姿数据,试验结果如图7所示。采集的布辊表面运动点云与图5的布辊铺放姿态基本一致,验证了仿真轨迹的准确性。仿真轨迹与试验的单向误差如图8所示。得出两者的轨迹误



图6 铺布试验  
Fig. 6 Layering test

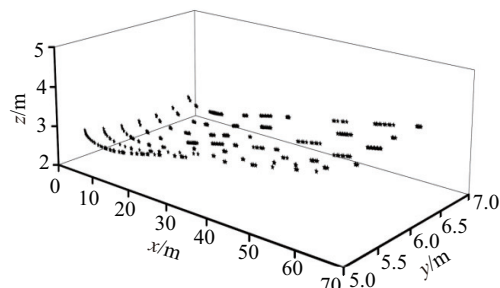


图7 试验轨迹  
Fig. 7 Test trajectory

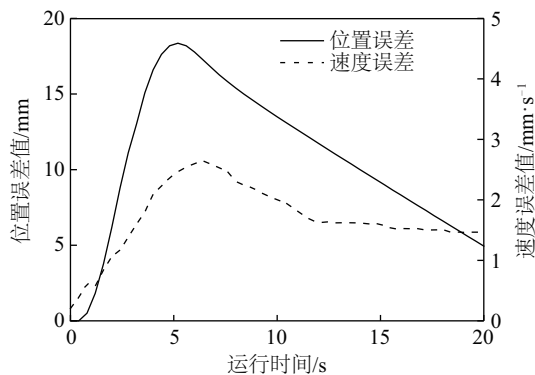


图8 位置、速度误差曲线  
Fig. 8 Location and velocity error curve



差不超过 20 mm,开始由于处于电机加速阶段,布辊动力头的运动惯性较大,铺层路径轨迹误差在 0~5 s 内上升,以后匀速运行同时位置误差减小。初始阶段,电机突然加速导致速度误差前 2 s 剧烈上升,稳定阶段布辊的仿真速度与实测误差不超过 1.5 mm/s。

## 4 结 论

针对叶片模具曲面不规则的技术特征,开发风电叶片玻璃纤维布智能化铺层装备。通过对布辊的运动学分析,并结合回转单元姿态的正逆变换矩阵,完成对玻璃纤维布铺层装备的运动学仿真。现场铺层试验验证运动学模型的准确性,得出该装备能实现布辊姿态的准确定位,铺层覆盖范围较大,其 4 自由度机构所铺玻纤布符合铺放的技术要求。

### [参考文献]

- [1] 石可重,赵晓路,徐建中.大型风电机组叶片疲劳试验研究[J].太阳能学报,2011,32(8):1264—1268.
- [1] Shi Kezhong, Zhao Xiaolu, Xu Jianzhong. Research on fatigue test of large horizontal axis wind turbine blade [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(8): 1264—1268.
- [2] Chen Xiao, Zhao Wei, Zhao Xiaolu, et al. Failure test and finite element simulation of a large wind turbine composite blade under static loading[J]. Energy, 2014, 7: 2274—2297.
- [3] Hayashi D, Huenteler J, Lewis J I. Gone with the wind: A learning curve analysis of China's wind power industry [J]. Energy Policy, 2018, 120: 38—51.
- [4] Zhao Pan, Shirinzadeh Bijan, Shi Yaoyao, et al. Multi-pass layup process for thermoplastic composites using robotic fiber placement [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2018, 49: 277—284.
- [5] Shirinzadeh B, Cassidy G, Oetomo D, et al. Trajectory generation for open-contoured structures in robotic fiber placement [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007, 23: 380—394.
- [6] Blom A W, Abdalla M M, Gürdal Z. Optimization of courselocations in fiber-placed panels for general fiber angledistributions [J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(4): 564—570.
- [7] 宋清华,肖 军,文立伟,等.热塑性复合材料自动纤维铺放装备技术[J].复合材料学报,2016,33(6): 1214—1222.
- [7] Song Qinghua, Xiao Jun, Wen Liwei, et al. Automated fiber placement system technology for thermoplastic composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(6): 1214—1222.
- [8] 刘 哲,金达锋,范志瑞.基于密度分布曲线法的复合材料变刚度铺层优化[J].复合材料学报,2015,32(6): 1737—1744.
- [8] Liu Zhe, Jin Dafeng, Fan Zhirui. Ply optimization of variable stiffness for composite based on density distribution curve method [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(6): 1737—1744.
- [9] 孙鹏文,侯战华,岳彩宾,等.基于遗传算法的风力机叶片结构铺层厚度优化[J].太阳能学报,2016,37(6): 1566—1572.
- [9] Sun Pengwen, Hou Zhanhua, Yue Caibin, et al. Ply thickness optimization of wind turbine blade based on genetic algorithm [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2016, 37(6): 1566—1572.

## KINEMATICS ANALYSIS OF EQUIPMENT FOR WIND TURBINE BLADE FIBERGLASS FIBRIC

Zhang Leian<sup>1</sup>, Wang Jinghua<sup>1</sup>, Huang Xuemei<sup>1</sup>, Liu Weisheng<sup>2</sup>, Wei Xiuting<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. Key Laboratory of Marine Wind Power Blade Design and Manufacturing Technology of Jiangsu Province,  
Lianyungang Zhongfu Lianzhong Composite Materials Group Co., Ltd., Lianyungang 222006, China)

**Abstract:** Director of the multidimensional characteristics of wind turbine blade laying process, a set of automated equipment of laying for fiberglass fabric was designed. The pose transformation matrix based on the two-coordinate system was constructed for the cloth roller rotating head, and the kinematic model of the cloth roller was obtained. The factors affecting the track and speed of the laying were obtained, and the pavement surface track of the fiberglass fabric was obtained visually. The on-site paving test showed that the paving track error, which based on the actual curved surface of the blade mold, between simulation and test was within 20 mm, at the same time, speed error was within 1.5 mm/s. The test error of the mechanism could meet the requirements of the fiberglass fabric laying technology and provided subsequent layer control algorithm with the theoretical basis.

**Keywords:** kinematic analysis; motion simulation; automated equipment; wind turbines blades; layering test