

兆瓦级风电叶片玻璃纤维布自动铺层系统研究与设计

陈传训¹, 张华强^{1*}, 刘卫生², 杨先海¹

(1. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255049; 2. 中复连众复合材料集团有限公司, 连云港 222000)

摘要: 为解决风电叶片玻璃纤维布人工铺层劳动强度大、效率低及有损健康的问题,通过对风电叶片玻璃纤维铺层原理及工序进行研究,设计了一套风电叶片玻璃纤维布自动铺层系统,采用先进传感器信息采集技术、自动控制原理技术、信息融合技术等,可根据叶片外形轮廓进行路径的最优规划和布辊姿态及放布速度的自适应调整。结果表明,所设计的铺层系统稳定性好,铺层效率高,极大地降低了劳动强度,具有很强的工程应用价值。

关键词: 风电叶片; 自动铺层; 路径规划; 自适应

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0999(2019)06-0049-05

1 引言

我国丰富的风电新能源已成为我国发展的重要目标。叶片是风力发电最核心的部件,据统计,2017年全球叶片装机量达到432.9 GW,到2020年将达到792.1 GW,叶片市场存在巨大潜力^[1]。随着叶片逐渐向兆瓦级大功率方向发展,叶片尺寸随之增大,增加了生产难度。叶片生产的快慢主要取决于铺层速度,兆瓦级风电叶片的生产要经过4道铺放玻璃纤维布(简称“玻纤布”)工序,调查表明,国内叶片铺层均由人工完成,一个8人小组1天(平均8 h)才能完成一件叶片的铺层,效率低下。裁剪玻纤布会产生大量危害人体的飞絮,工人穿戴笨重的护具也会降低铺层速度。

综上,本文设计研发了一种以运动控制卡和PLC作为控制器的玻纤布自动铺层控制系统^[2,3],系统通过融合传感器信息采集、路径规划和现代控制理论等技术,实现了风电叶片生产的玻纤布全自动铺层。

2 铺层系统构成及功能

铺层系统为模块化结构,如图1所示。运动控制主要由机架(龙门架、左右移动装置、上下移动装置)来执行,龙门架沿导轨在x轴方向移动,上下移动装置、左右移动装置沿龙门架在z轴、y轴移动,机械手绕x轴旋转;系统内的运动装置由伺服电机和气缸对各部分独立控制,对伺服电机采用S型曲线加减速算法控制,避免伺服电机在运转过程中速度剧烈变化,使伺服电机速度平稳过渡^[3]。

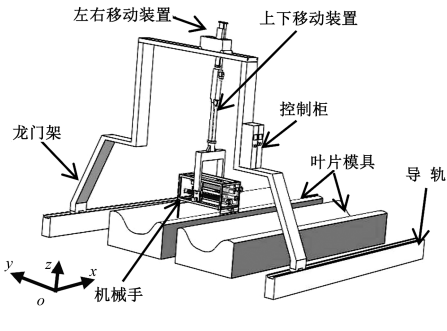


图1 铺层系统整体结构
Fig. 1 Overall structure of layering system

铺层机械手(以下简称“机械手”)完成铺放、压紧、裁剪玻纤布,是铺层系统的核心部件之一,结构如图2所示。机械手可根据伺服误差函数计算驱动器所需扭矩,实时调整铺层姿态,保持与模具表面平行;可在裁剪涨紧玻纤布,平滑裁剪,若系统通过压紧轴不能压紧玻纤布达到预定压力,还可使挂料辊反向转动拉紧玻纤布;可在结束对一侧模具的铺层后,绕z轴旋转180°,按相同工作模式对另一侧进行铺层。

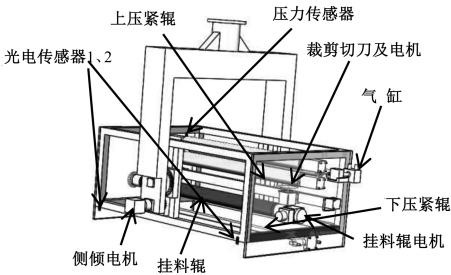


图2 铺层机械手结构
Fig. 2 Layering manipulator structure

收稿日期: 2018-10-29
基金项目: 山东省重点研发计划, 风电叶片玻璃纤维布全自动铺层装备研发 (2018GGX100304)
作者简介: 陈传训 (1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能测试技术及仪器。
通讯作者: 张华强 (1982-), 男, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为检测与智能仪器技术, huaqiang.zhang@163.com。

3 铺层系统路径规划

铺层系统的关键问题是铺层路径及轨迹优化,需规划一条从起始点到目标点的路线^[4],使机械手实现自主航行及作业,机械手通过文献[5,6]所述方法获得初始步长,采用非等距偏置获得覆盖叶片模具大曲率曲面全部路径,用贝塞尔曲线拟合方法得到最优路径。

为确定机械手在空间的姿态,建立如图 3 所示基坐标系与连体坐标系:

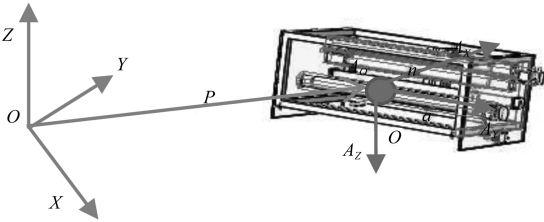


图 3 系统坐标系构建

Fig. 3 Coordinate system construction of system

定义机械手长、宽、高分别为 $2o$ 、 $2n$ 、 $2a$,连体坐标系中 A_o 位于机械手中心, A_x 、 A_y 、 A_z 通过机械手所在面的正中间,在基坐标系给出连体坐标系位置,在连体坐标系描述机械手姿态,则机械手可用位姿矩阵描述其空间姿态。

机械手中心位置为 $p = [p_x p_y p_z]^T$,其中 p_x 、 p_y 、 p_z 为机械手在基座标下在 x 、 y 、 z 轴的分量。则连体坐标系下及基坐标系下姿态描述为:

$$R = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

机械手沿坐标系 x 、 y 、 z 轴移动 Δx 、 Δy 、 Δz 的转换矩阵为:

$$Tr = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

定义逆时针为正,机械手绕 x 轴旋转 θ ,绕 y 轴旋转 0° ,绕 z 轴旋转 γ ,角度变换矩阵为:

$$T = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\cos\gamma\sin\theta & \cos\theta\cos\gamma & \sin\theta & 0 \\ \sin\theta\sin\gamma & -\sin\theta\cos\gamma & \cos\theta\cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

得到正向解后结合初始矩阵 M ,可以得到机械手在空间的位置及姿态 $M_1 = MTT_r$ 。

初始矩阵 $M(X_{i0}, Y_{i0}, Z_{i0})$,在机械手绕 x 轴转动 θ 并移动 t 后为 $M_2(X_{i1}, Y_{i1}, Z_{i1})$,则机械手在基坐标系坐标为 $(X_{31}, (Y_{11}+Y_{21})/2, Z_{31})$,用正切公式将转角 θ 代入 M 和 M_1 ,当初始和终止位置可知,就可得到机械手转角及适量位移,其中 $i=1,2,3$ 。

$$\begin{cases} t_x = X_{31} - X_{30} \\ t_y = (Z_{21} + Z_{30} - Z_{20} - Z_{31})/2 \\ t_z = Z_{31} - Z_{30} \end{cases} \quad (5)$$

$$\theta = \arctan \frac{[(Z_{21}-Z_{11})(X_{20}-X_{10})-(Z_{20}-Z_{11})(X_{21}-X_{11})]}{[(X_{21}-X_{11})(X_{20}-X_{10})+(Z_{21}-Z_{11})(Z_{20}-Z_{10})]} \quad (6)$$

为确定挂料滚在空间中的姿态,对模具及机械手简化模型在 $yo z$ 面投影,挂料辊与模具上两点 A 、 B 间直线平行且长度相等为 $2a$, A 、 B 点高度为 h ,则挂料辊倾角 θ 为:

$$\theta = \arccos(h/a) \quad (7)$$

式中: a 为机械手长度; h 通过确定系统位置,投影模具获得,见图 4。

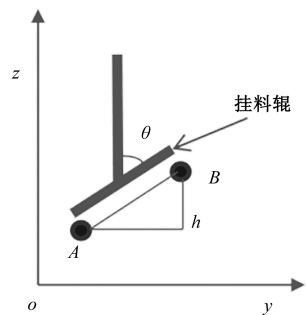


图 4 简化模型

Fig. 4 Simplified model

为获得初始步长,需要将叶片模型曲面细分,给定模具表面方程为 $r=r(u,v)$,采用 Catmull-Clark 细分曲面法将叶片模具初始网格细分获得初始步长^[7]。首先定义模具方向向量 $\mathbf{m}=[m_x \ m_y \ m_z]^T$ 与铺层方向向量 $\mathbf{n}=[n_x \ n_y \ n_z]^T$ 过同一点 $E(E_x, E_y, E_z)$,

n 平行投影面,那么 **m** 和 **n** 的夹角 θ 就是铺层角度^[8],如图 5 所示。

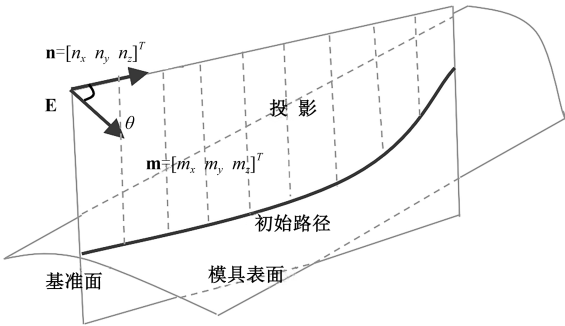


图 5 铺层路径
Fig. 5 Layer path

确定模具方向向量 **m** 和铺层角度 θ ,则铺层方向向量表示为:

$$\begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\cos\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

将 **n** 在二维坐标平面 xoy 投影可得投影方向向量 $\mathbf{l}=[l_x \ l_y \ l_z]^T$,则基准面为 **n** 和 **l** 张成的平面,即:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (9)$$

式中: $[A \ B \ C]^T = \mathbf{l} \times \mathbf{n}$; $D = -AE_x - BE_y - CE_z = -[E_x \ E_y \ E_z][A \ B \ C]^T$ 。

给定模具表面方程:
 $r(u,v)=[x(u,v),y(u,v),z(u,v)]^T$ (10)
将式(10)代入式(9),由于基准面与模具平面的交线为开曲线,求得 u,v 的表达式:

$$f(u,v)=Ax(u,v)+By(u,v)+Cz(u,v)+D=0 \quad (11)$$

令 u 或 v 按照平面-曲面求交获得的步长变化,就可利用 Newton 迭代法求解方程,即可求得交线上点坐标 (u,v) 和模具方程的交点 (x,y,z) 坐标,利用交点关系获得拟合曲线,就可确定机械手在三维空间内的初始路径 $S_1:s=s(u(t_1)-v(t_1))=s(t_1)$ 。

现场实测偏置距离插入初始路径函数当中,获得折线形式完整路径,利用贝塞尔工具处理折线路径,即可得机械手运动的光滑路径。Matlab 拟合路径^[9-13]如图 6 所示。

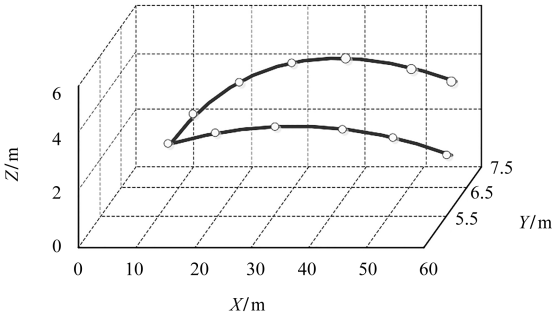


图 6 机械手移动路径
Fig. 6 The mobile manipulator the path

4 铺层张力控制

机械手铺层分为传送玻纤布、铺放玻纤布、裁断玻纤布三种状态,再加上裁断时对玻纤布的施加张力和裁断动作的结束,构成了玻纤布铺层的循环。裁断玻纤布时,玻纤布的张力会影响裁剪效果,为解决张力不足导致无法裁断或将切刀卡死的问题,在裁断装置引入 PID(比例积分微分)控制玻纤布张力。

模拟状态 PID 表达式为:

$$u(t)=K_p\left[e(t)+\frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)dt+T_d\frac{de(t)}{dt}\right] \quad (12)$$

式中: $e(t)$ 为控制器的输入误差; $u(t)$ 为控制器的输出量; K_p 为比例系数; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数。

将模拟公式离散化,即:

$$t \approx kT, k=0,1,2,\dots \quad (13)$$

$$\int_0^t e(t)dt \approx T\sum_{j=0}^k e(jT) \quad (14)$$

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT)-e[(k-1)T]}{T} \quad (15)$$

将式(13)、式(14)、式(15)代入式(12),可得离散 PID 表达式:

$$u(k)=K_p e(k)+K_i \sum_{j=0}^k e(j)+K_d [e(k)-e(k-1)] \quad (16)$$

式中: $k=0,1,2,\dots$ 为采样序号; $e(k)$ 为第 k 次采样时刻的输入偏差; $e(k-1)$ 为第 $k-1$ 次时刻的输入偏差; K_p 为比例系数; K_i 为微积分系数; K_d 为微分系数。

为减少积分项,需要存储大量偏差信号进行累加运算,采用增量形式计算积分项可得:

$$u(k)=(K_p+K_i)e(k)+K_d \times [e(k)-e(k-1)] \quad (17)$$

式中 $u_i(k-1)=K_i \sum_{j=0}^{k-1} e(j)$ 。

PLC 程序应用式(17),当检测到玻纤布张力不足时,PLC 控制挂料辊反向转动和气缸收紧,增大张力。

使机械手与模具平行,保证玻纤布平滑、不起褶皱地铺放在模具上,选用自带三角测量法的红外测距传感器进行测距^[15]。通过对比传感器得到的距离,调整电机转向,进而调整机械手的倾斜角度。

5 铺层系统的测试实验

测试实验对系统的实际轨迹及在不同速度下的裁剪长度、铺放位置进行测试,根据系统在实际铺层中的要求,试验中将速度设定为 0.7 m/s~1.5 m/s,铺层长度为 30 m~50 m,实验在连云港某叶片生产厂房进行。

系统在实际中生成的轨迹验证了仿真轨迹的准确性,实验获取轨迹如图 7 所示。

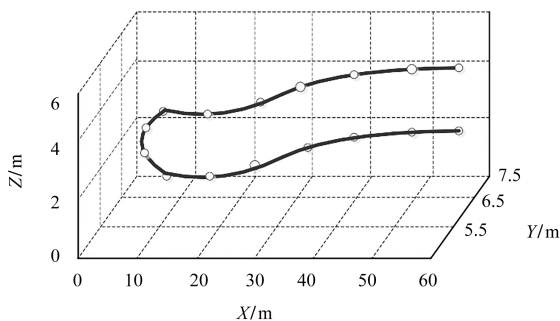


图 7 实际生成的轨迹

Fig. 7 The actual trajectories generated

现场测试表明,自动铺层系统的铺放位置误差和裁剪长度误差都控制在 ± 3 cm 以内,裁剪长度最大平均误差为 -1.1 cm,最大标准差为 6.06 cm;铺放位置最大平均误差为 1.32 cm,最大标准差为 2.38 cm,图 8 给出了在速度增大时不同长度下的标准差。

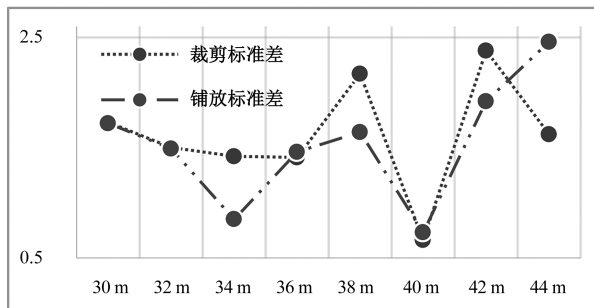


图 8 系统标准差

Fig. 8 Standard deviation of system

分析图 8 可以看出,系统不因铺放速度增快、铺层长度增大从而误差增大,而人工铺层的裁剪长度误差和铺放位置误差在 ± 5 cm 范围内,自动铺层系统与人工相比大大提高了裁剪和铺放的准确性,可

以完全取代人工。

6 结 论

(1)设计并提出一种兆瓦级风电叶片玻纤布全自动铺层系统,建立系统结构模型并进行了系统轨迹规划和运动学分析,并对系统控制方式进行阐述;

(2)对系统进行运动轨迹和铺层测试,采集实际运动轨迹与模型轨迹对比,验证了模型的准确性,能对机械手姿态实现准确定位,完全符合实际生产要求;

(3)实际验证表明,铺层系统能在 4 h 内完成铺层任务,效率提升 100%。

参考文献

- [1] 徐宇,廖猜猜,张淑丽,等.大型风电叶片设计制造技术发展趋势[J].中国科学物理学,力学,天文学,2016,46(12):124702-1-124702-10.
- [2] 曹忠亮.基于 PLC 的三面铣组合机床焊机控制系统研究[J].组合机床与自动化加工技术,2017(2):86-88.
- [3] 张从鹏,刘同,张康康.基于 DSC 和 FPGA 的运动控制卡设计[J].机床与液压,2016,44(2):156-158.
- [4] 王邦继,刘庆想,周磊,等.步进电机控制系统建模及加减速曲线优化[J].电机与控制学报,2018,22(3):37-42,52.
- [5] 李丽丽.水下多障碍区域机器人的路线规划模型优化设计[J].科学技术与工程,2016,16(10):186-190.
- [6] 朱建宁,王敏杰,魏兆成,等.快速计算平面与高精度细分曲面交线的方法[J].计算机集成制造系统,2014,20(6):1322-1329.
- [7] Ginkel I, Peters J, Umlauf G. On normal and control nets[M]. Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer, 2005, 3064: 233-239.
- [8] Royu D. Implementation of polygonal algorithm for surface-surface intersections[J]. Computer Industry Engineering, 1998, 34(2): 399-412.
- [9] Shirinzadeh B, Cassidy G, Otem D, et al. Trajectory generation for open-contoured structures in robotic fiber placement[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2007, 23(4): 380-394.
- [10] 孙一平.基于 UG 和 Matlab 的“S”轨迹无碳小车设计与运动学仿真研究[J].现代机械,2018(1).
- [11] 姜园,赵新华,杨玉维,等.基于牛顿-欧拉递推法的 3-RRRT 并联机器人动力学建模及仿真[J].高技术通讯,2016,26(z1): 780-785.
- [12] 黄振鑫,岳遂录,李初蕾,等.基于 MATLAB 的绳牵引动平台运动仿真[J].陕西理工大学学报(自然科学版),2018,34(5): 7-12.
- [13] 张天一,杨巍,郝玉然.基于 Matlab/Simulink 的风力机特性仿真[J].电子产品世界,2018,25(10): 68-70.
- [14] 吕兴贺,孔德彪,胡光.基于 Matlab 的双三相 PMSM 建模与仿真[J].微电机,2017,50(11): 64-67.
- [15] 王振宇,李烨,郁丰,等.一种激光三角测量的标定方法及误差分析[J].激光技术,2017,41(4): 521-525.

(下转第 89 页)