

列具有足够重叠度的影像。全面、高质量的影像数据是保证重建精度的基础,旨在尽可能覆盖物体的全部表面几何信息。

#### 4.3.2 数据预处理

在正式重建前,采集的原始影像需进行预处理。此阶段主要包括辐射校正(如亮度与对比度调整)与几何校正(如裁剪、旋转),旨在提升图像质量的一致性,并消除部分噪声,为后续计算步骤奠定基础。

#### 4.3.3 特征提取与匹配

预处理后的影像被用于提取显著的局部特征点(如角点、边缘等)及其特征描述符。通过比对不同图像中特征描述符的相似性,建立跨图像的对应关系,即特征匹配。该步骤是关联多视角图像、恢复三维空间关系的关键。

#### 4.3.4 稀疏重建与稠密重建

基于匹配的特征点,结合相机参数(内参与外参),利用运动恢复结构和多视几何算法,可计算出特征点在三维空间中的坐标,形成初步的稀疏点云。为进一步丰富模型细节,常通过多视立体视觉等算法进行稠密重建,生成蕴含表面连续几何信息的稠密点云。

#### 4.3.5 模型生成与后处理

三维点云需转换为更具实用价值的网格模型。通常通过曲面重建算法实现,并对生成的网格进行一系列后处理操作,包括但不限于噪声滤波、孔洞修补、网格简化与平滑,最终得到一个完整、光滑且结构准确的三维模型。

### 4.4 飞行规划

风机叶片的高耸立体结构对其巡检航线的设计提出了特殊要求,主要表现在以下两方面:

首先,在航线构型上,必须摒弃适用于平坦地形的常规平面航线,转而采用能够全方位包裹风机主体的三维立体航线。该构型需依据叶片的长度、弯曲弧度及其空间分布进行定制化设计,以确保飞行轨迹能实现对叶片上下表面、前缘与后缘等所有关键部位的无遗漏覆盖。

此外,在影像采集策略上,为保证后续三维重建与缺陷识别的精度,无人机必须在每个预设航点上调整其空间姿态与云台角度,确保相机光轴尽可能垂直于叶片表面,以获取无透视畸变的正视影像。这一精确指向性是获取高质量分析数据的关键。

巡检航线的技术要点:

- ① 无人机起飞,爬升至中间位置处
- ② 远离塔筒方向飞行,飞出风轮半径
- ③ 爬升至安全高度,飞向待巡检风机
- ④ 返航逆向执行

云台角度的规划主要依赖于航点与风机轮毂中心的相对位置。通过计算航点到轮毂中心的方向向量,确定云台需

要指向的方向,将该方向分解为水平和垂直两个角度,得到云台的偏航角和俯仰角。

### 4.5 数据采集

航线规划完成后,系统进入数据采集阶段。规划好的航线指令被注入无人机飞控系统,无人机即可依托卫星导航与遥测系统,沿预定三维航线进行自主飞行。飞行全程,无人机严格按预设航点、高度与云台角度自动采集数据。同时,系统保留了人工介入的权限,支持操作人员在飞行过程中根据实时状况进行监控与干预。

### 4.6 叶片缺陷识别

数据处理软件是无人机巡检的核心,主要是对叶片的原始影像进行图片处理,分析缺陷类型和缺陷所在位置,生成缺陷结构化数据,并生成巡检报告。

图像分析模块集成了目标检测与变化检测两种核心方法。目标检测方法通过提取航空影像中的颜色、纹理与形状等多维特征,初步识别出潜在异常区域,进而将候选区域输入经大规模样本集训练的卷积神经网络模型,实现裂缝、掉漆等典型目标的精确分类。而变化检测方法则侧重于对同一区域、不同时相的序列影像进行配准与比对,通过分析在空间位置上高度重合的影像对象所发生的变化,来侦测那些形态不固定、分布范围广的弥散性异常。二者结合,构成了从定点识别到区域变化发现的多维度分析能力。

缺陷报告包括每个叶片的缺陷概况统计、缺陷的类别、缺陷的定位、缺陷的图像,为管理人员提供检修的依据。

## 5 结语

本文对无人机自主叶片巡检系统的组成进行了分析,论述了各部分的功能,重点介绍了巡检的基本流程,无人机叶片巡检彻底改变了传统人工高空攀爬的巡检模式,保障了人员安全,通过自动化巡检与智能分析,大幅提升了巡检作业的效率 and 覆盖度,实现了运维管理的可追溯与数据驱动,保障了发电量并降低全生命周期运维成本。

### 参考文献

- [1] 李哲.风电场风机叶片无人机自主巡检系统分析设计与研究[J].机电信息,2024(19):7-12.
- [2] 曾勇刚,陈丽城,申毅莉,等.海上风电场风机叶片巡检方法研究[J].装备维修技术,2024,(03):91-93+97.
- [3] 朱锐答,王凤颖,李建刚,等.基于图像处理技术的风力发电机组叶片智能巡检系统设计[J].电气技术与经济,2025,(11):95-99.
- [4] 朱锐答,王凤颖,李建刚,等.基于图像处理技术的风力发电机组叶片智能巡检系统设计[J].电气技术与经济,2025,(11):95-99.
- [5] 谭兴国,张高明.基于无人机巡检的风机叶片表面缺陷检测技术[J].电测与仪表,2025,62(03):183-189.
- [6] 马敏敏,刘昊,高毓欣,等.基于无人机与人工智能的风机叶片全自主巡检[J].电气时代,2023,(S2):44-48.

# Modeling method for shaping follow-up wire harnesses

Jingkai Feng Zhibing Lu Guangchao Zhang Yaxin Dai Jun Zhan

Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing, 100854, China

## Abstract

Aiming at the problems such as the difficulty in characterizing the physical properties of wire harnesses composed of multiple cables, low spatial shaping efficiency, and poor consistency, this paper combines measurement with theory and proposes a modeling method for the shaping of follow-up wire harnesses. Firstly, a tracking 3D scanner was used to map the alignment of the wire harness. Considering the influence of the deviation of the contour collection points from the centerline comprehensively, the spatial discrete data points of the centerline of the actual continuous wire harness alignment were obtained. Secondly, adjust the physical properties of the cable. Based on the finite particle method, solve the theoretical wiring harness alignment and compare it with the actual wiring harness alignment. The physical properties when the two are close are the parameters for inversion. Finally, the extracted particle position data is fitted into curves to obtain the theoretical midline of the wire harness shape. A negative mold is generated using 3D software and then 3D printed into a wire harness shaping fixture. Actual production shows that this method has greatly improved the shaping efficiency and consistency of cables.

## Keywords

Wire harness shaping Linear mapping Finite particle method Physical property inversion

## 随动线束塑形建模方法

冯靖凯 卢治兵 张广超 代亚新 詹俊

北京遥感设备研究所, 中国·北京 100854

## 摘 要

针对多根线缆组成的线束物性难以表征、空间塑形效率低、一致性不高等问题, 本文将测量与理论相结合, 提出一种随动线束塑形建模方法。首先, 采用跟踪式三维扫描仪对线束线形进行测绘, 综合考虑轮廓采集点偏离中线的影响, 得到实际连续线束线形中线的空间离散数据点。其次, 调整线缆物性, 基于有限质点法对理论线束线形进行求解, 并与实际线束线形比对, 二者接近时的物性即为反演的参数。最后, 对提取到的质点位置数据拟合为曲线, 得到理论线束线形中线, 使用三维软件生成阴模, 再3D打印成线束塑形工装。实际生产表明, 该方法极大地提高了线缆塑形效率和一致性。

## 关键词

线束塑形; 线形测绘; 有限质点法; 物性反演

## 1 引言

线缆作为电气连接件, 广泛存在于各类产品中, 单根线缆两端固定时受安装空间和最小半径约束, 线形容易确定。而由多根线缆组成线束且随动时, 虽然在某一位置可认为是两端边界固定, 但线束物性难以描述, 线缆找形不易。生产前期操作人员需经过很多次试装后, 确定出较理想的线形, 后续生产中操作人员根据布线经验, 以之前的状态为参考进行线形比对和调整。即便是同一人作业, 也难以保证线形状态的一致性, 不同作业人员技能的差异性, 更是造成线束塑形效率低、一致性不高等问题。

柔性线缆塑形对保证产品装配质量至关重要, 相关研

究较多。马世纪<sup>[1]</sup>基于改进A\*算法研究了2D路径仿真和3D虚拟布线的最优路径, 以指导工程布线。陈杨<sup>[2]</sup>基于Cosserat弹性杆模型, 结合牛顿法、二次规划法, 对线缆物性建模与求解。吴保胜<sup>[3,4]</sup>借助CREO三维线缆布线模块, 基于改进蚁群算法对线缆路径进行空间规划。罗权<sup>[5]</sup>建立了基于物理特性的离散弹性线缆模型, 采用半隐式欧拉法与位置动力学方法相结合进行求解, 研究了工程约束下的线缆布局。但现有成果对线缆形态求解与建模依赖于线缆物性, 尤其对于由多根线缆组成线束, 其表征参数难以获取, 求解算法适用性和效率受到局限, 采用力学试验方法成本高, 研究内容较少。

因此, 本文将测量与理论相结合, 提出一种随动线束塑形建模方法, 具体组织结构如下。第二节对实际线束线形进行测绘, 去除轮廓采集点偏离中线的影响, 得到实际线束线形中线离散点数据。第三节基于有限质点法, 并与第二节

【作者简介】冯靖凯(1992-), 男, 中国北京人, 博士, 工程师, 从事智能制造研究。

中线数据对比,反演出线缆物性和求解出理论线束线形。第四节对第三节的理论线束线形进行三维建模,并 3D 打印制造出用于辅助成形的塑形工装。最后,第五节对本文的研究内容进行总结。

## 2 实际线束线形测绘

为准确获取线束在三维空间内的实际线形,本文使用 TrackScan-Sharp 49 跟踪式三维扫描仪对线束线形进行测绘,主要包括跟踪仪 i-Tracker、扫描仪 i-Scanner 等硬件。设备最高分辨率 0.02mm,体积精度 0.049mm(距离跟踪仪 3.5m),研究对象长度为  $200 \pm 2\text{mm}$ 、直径为  $7 \pm 0.2\text{mm}$ ,满足场景使用需求。其工作原理含两步,一是相机采集随扫描对象形状变形的激光,计算得到线状三维信息;二是 i-Tracker 实时跟踪 i-Scanner 上的反光标记点,经过空间坐标变换得到空间位置。采集过程如图 1 所示,将 i-Scanner 的针头与线束轮廓接触,识别状态显示在 90%~100% 时进行数据采集。



图 1 线形测绘

而实际线束线形测绘是寻找中线,而非简单的由与中线偏移线束半径的轮廓数据点组成。线束由 6 根线缆组成,其中锦纶丝套线 1 根,金属编织线 5 根,用屏蔽胶带缠绕成圆柱状。在对线缆上任意一点采集前,先用空芯锦丝线在该位置截面方向绑扎线扣(见图 2(a)),再沿两根绑线槽采集三点(见图 2(b)),该三点的圆心 O 即位于该线束线形采集点的中线上。手持 i-Scanner 沿线束轮廓从起始端到终止端进行数据采集,在曲率半径变化较大的位置,可以适当增加采集点,最后计算得到的所有空间圆心即为连续空间线束线形中线的离散点数据。沿线束共采集生成中线离散点数据 113 个,使用样条曲线进行拟合,得到线形中线,完成线束线形测绘。

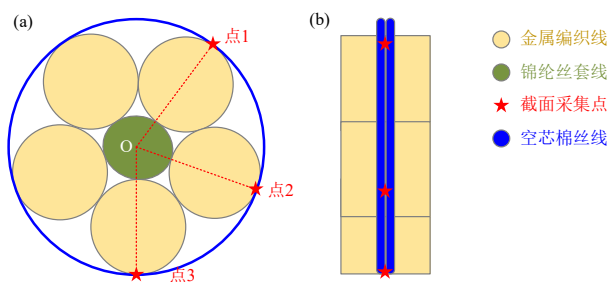


图 2 中线确定

## 3 理论线束线形求解

线缆在使用过程中,通常关注线缆强度,在出厂时产品合格证中只会提供弯曲半径、抗拉强度指标。由于线缆由多层不同材料制成,具有较强非线性特性,其弹性模量等物理属性不便于直接测量。且多根线缆组成线束后,线束形态更不容易预测,布线只能依赖于反复试验,生产成本低、效率低,且难以获取理论线束线形。在对实际线束线形测绘后,可以使用有限元方法对线束物理属性反演。但经典结构力学采用偏微分方程描述结构行为,而向量式结构力学控制方程是质点运动公式,求解效率高。故本节采用有限质点法来研究,任一线束单元质点 i 上的总力和总力矩遵循牛顿第二定律:

$$m_i \ddot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{F}_i^{\text{ext}} + \mathbf{F}_i^{\text{int}}$$

$$\mathbf{I}_i \ddot{\boldsymbol{\theta}}_i = \mathbf{M}_i^{\text{ext}} + \mathbf{M}_i^{\text{int}}$$

其中,  $m_i$ 、 $\ddot{\mathbf{x}}_i$  分别为质点 i 的质量、线加速度;  $\mathbf{I}_i$ 、 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_i$  分别为质点 i 的质量惯性矩阵、角加速度;  $\mathbf{F}_i^{\text{ext}}$ 、 $\mathbf{M}_i^{\text{ext}}$  分别为质点所受外力和外力矩;  $\mathbf{F}_i^{\text{int}}$ 、 $\mathbf{M}_i^{\text{int}}$  分别为质点所受内力和内力矩。

线束起始端固定在产品结构件,终止端用金属卡箍固定,为提高程序的收敛性和求解稳定性,采用位姿边界加载方式,而非外力加载方式,即  $\mathbf{F}_1^{\text{ext}} = [0\text{N}, 0\text{N}, 0\text{N}]$ ,  $\mathbf{M}_1^{\text{ext}} = [0\text{N} \cdot \text{m}, 0\text{N} \cdot \text{m}, 0\text{N} \cdot \text{m}]$ 。线束初始化建模为直线,起始端的位姿对应三维扫描仪测绘的点 1,位置分量为  $\text{UP}_1 = [39.6\text{mm}, 95.5\text{mm}, -556\text{mm}]$ ,姿态分量为  $\text{URP}_1 = [0\text{rad}, 0.35\text{rad}, 0.35\text{rad}]$ ,设起始端为完全固定约束,则质点 1 运动方程中位姿保持。线束初始状态沿 -X 向,则终止端初始位置分量为  $\text{UP}_{113q} = [-180.4\text{mm}, 95.5\text{mm}, -556\text{mm}]$ ,姿态分量为  $\text{URP}_{113q} = [0\text{rad}, 0.35\text{rad}, 0.35\text{rad}]$ 。三维扫描仪测绘的点 113 对应线束成形后终止端的位置分量为  $\text{UP}_{113h} = [-42.0208\text{mm}, 84.9497\text{mm}, -454\text{mm}]$ ,姿态分量为  $\text{URP}_{113h} = [-1.57\text{rad}, 1.92\text{rad}, -0.44\text{rad}]$ ,则终止端成形后的位置增量为  $\Delta \text{UP}_{113} = \text{UP}_{113h} - \text{UP}_{113q} = [138.4\text{mm}, -10.5\text{mm}, 102\text{mm}]$ ,姿态增量为  $\Delta \text{URP}_{113} = \text{URP}_{113h} - \text{URP}_{113q} = [-1.57\text{rad}, 1.57\text{rad}, -0.79\text{rad}]$ 。成形后的位姿增量随时刻的变换迭代更新质点 2~113 的状态。

给定线缆不同的材料属性,可求解出成形后线束形态,并将其与实际线束线形测绘曲线比对,选最接近的作为理论线束线形,图 3(a)、(b) 分别对应实际线束线形测绘曲线、理论线束线形求解曲线。该理论曲线设定的材料属性,为反演出的成形线束等效材料属性,在此基础上,改变线束边界条件,可求解出任一工作空间内的理论线束线形。

## 4 线束塑形工装建模

基于有限质点法完成理论线束线形求解后,提取最后一个时刻更新的质点位置矩阵  $\mathbf{x} = [\text{UP}_1; \text{UP}_2; \dots; \text{UP}_i; \dots; \text{UP}_{113}]$ ,维度为  $3 \times 113$ ,  $\text{UP}_i$  表示质点 i 的空间位置坐标,