

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200873

## 点云数据温度变化环境下输电线形态模拟

麻卫峰<sup>1,2,3</sup>, 王成<sup>1,4</sup>, 王金亮<sup>1,2,3</sup>, 麻源源<sup>5</sup>

(1. 云南师范大学旅游与地理科学学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省高校资源与环境遥感重点实验室, 云南 昆明 650500; 3. 云南省地理空间信息工程技术研究中心, 云南 昆明 650500; 4. 中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室, 北京 100094; 5. 武汉大学中国南极测绘研究中心, 湖北 武汉 430079)

**摘要:** 气温是影响架空输电线路电气间距和机械强度的主要气象参数之一。针对当前输电线路实时工况运营状态安全监测的需求, 基于机载激光点云数据, 提出了一种线路环境温度变化下架空输电线空间形态模拟及精度验证方法。首先利用点云数据重建输电线空间模型并提取初始温度下输电线水平应力, 然后根据状态方程求解模拟温度下输电线水平应力。最后根据静力平衡原理实现输电线空间形态模拟, 并提出了两期激光点云交叉验证方法验证模拟结果的可靠性和准确性。选择具有典型代表性的输电线点云数据进行试验, 结果表明: 该方法能很好地实现任意温度变化环境下架空输电线空间形态模拟, 模拟中误差 0.027, 平均误差 0.066 m, 最大误差 0.471 m。研究为机载激光雷达电力巡检及高压输电线路设计提供参考价值。

**关键词:** 气温; 架空输电线; 点云; 弧垂; 交叉验证

### Shape simulation for a transmission line under different temperatures based on point cloud data

MA Weifeng<sup>1,2,3</sup>, WANG Cheng<sup>1,4</sup>, WANG Jinliang<sup>1,2,3</sup>, MA Yuanyuan<sup>5</sup>

(1. College of Tourism and Geographic Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. Key Laboratory of Resources and Environmental Remote Sensing for Universities in Yunnan, Kunming 650500, China; 3. Center for Geospatial Information Engineering and Technology of Yunnan Province, Kunming 650500, China; 4. Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, China Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 5. Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Air temperature is one of the main meteorological parameters that affect the electrical distance and mechanical strength of overhead transmission lines. Given the need for real-time operation state safety monitoring of overhead transmission lines, a method of spatial shape simulation and accuracy verification of the lines under environmental temperature changes is proposed. It is based on airborne LiDAR point cloud. First, the spatial model of a transmission line is constructed using point cloud, and the horizontal stress of the transmission line at the initial temperature is extracted. Then, the horizontal stress of the line under simulated temperatures is solved according to the state equation. Finally, the spatial shape simulation of a transmission line is realized according to the principle of static balance. A two-phase cross validation method of excitation point cloud is proposed to verify the reliability and accuracy of the simulation results. The typical point cloud data of transmission lines are selected for test. The results show that the method can well simulate the spatial shape of overhead transmission lines under any temperature change environment. The simulation error is 0.027, the average error is 0.066 m, and the maximum error is 0.471 m. The research provides reference value for airborne LiDAR power inspection and high voltage transmission line design.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China for the “Natural Forests Biomass Estimation at Tree Level in Northwest Yunnan by Combining ULS and TLS Cloud Points Data” (No. 41961060).

**Key words:** air temperature; overhead transmission line; point cloud; sag; cross validation

## 0 引言

架空输电线路长期露置在大气中, 时刻受到周

围各种自然环境和气象条件的影响, 其空间形态处于动态变化中<sup>[1-2]</sup>。气温是影响弧垂大小的主要气象因子之一<sup>[3]</sup>, 是输电线路运行管理及风险监测研究的重点。为防止和杜绝电网事故的发生, 电网运行维护部门每年都要投入大量的人力、物力和财力对输电线进行周期性巡检<sup>[4-5]</sup>。有/无人机载激光雷达

基金项目: 国家自然科学基金项目资助“联合 ULS 与 TLS 点云数据的滇西北天然林单木生物量估算研究”(41961060)

(Light Detection and Ranging, LiDAR)系统能快速获取输电线路高精度、高密度的三维空间点云数据<sup>[5-6]</sup>, 具有巡检效率高、巡检结果可靠等优势, 已在高压输电线路自动化巡检应用中得到广泛应用。但静态点云数据是特定时刻输电线路实时状态描述, 缺乏周围气象条件(如温度)变化环境下线路运行信息的动态反映。因此, 如何利用静态点云数据模拟温度变化下输电线三维空间形态及弧垂是机载激光雷达电力巡检技术研究的重点, 也是电网运行安全维护与管理部门关注的焦点。

针对气温变化下架空输电线三维空间形态模拟, 国内外学者开展了大量的研究, 其研究方法可概括为 3 类。(1) 直接测量法<sup>[7-9]</sup>。直接测量法通常采用 GPS、全站仪、数码相机、激光雷达等测量设备, 利用人工巡检方式直接获取输电线弧垂, 如图像提取法、全站仪测量法等, 该方法作业成本低, 弧垂测量精度较高, 但对于线路走廊穿过湖泊、陡崖等人员不便到达的复杂区域, 该方法实施较为困难, 虽然数码相机能实时获取输电线运营状态连续的视频数据, 但二维的影像表达输电线三维状态的能力还有待提高。另外三维激光点云数据能精确描述输电线路空间信息, 但其电力巡检应用研究大多集中在三维模型重建、状态检测等方面, 对覆冰、温度变化、大风等复杂气象环境下弧垂动态监测研究相对较少<sup>[10]</sup>。(2) 传感器间接反演法<sup>[11-14]</sup>。传感器间接反演法通常在输电线悬挂点处安置角度、拉力等传感器, 根据倾角、应力等物理参数间接反演输电线弧垂大小, 具有典型代表性的有倾角-弧垂监测法、拉力-弧垂监测法等。受传感器性能的影响, 该方法在实际应用时存在弧垂模拟精度较低、人工干预和普适性较差等不足之处。如倾角传感器获取的倾角包含导线刚度产生的粗差, 该粗差后续处理时很难消除; 受导线电流荷载及周围环境差异性的影响, 导线存在径向温度梯度导致弧垂模拟结果失真。(3) 统计分析法<sup>[15-17]</sup>。该方法基于长期的电力巡检数据, 结合统计分析原理和专家知识建立弧垂分析的统计模型。该方法没有很好地顾及输电线路“微地形”和“微气象”现象, 输电线弧垂模拟的精度不高。

针对当前输电线路实时工况运营状态安全监测的需求, 提出了一种基于机载激光点云数据的线路环境温度变化下架空输电线弧垂和三维空间形态模拟方法。该方法从整体输电线模型中提取初始应力参数, 消除了传统传感器局部定点量测精度不高的缺陷, 具有操作方便、自动化程度高的优势。该研究对动态环境下的机载激光雷达电力巡检及高压输电线路设计具有参考价值。

## 1 原理与方法

首先利用机载激光点云数据重建初始温度下(数据获取时)输电线三维空间模型, 然后从空间模型中提取初始温度水平应力, 并根据状态程法求解模拟温度下的输电线水平应力; 最后根据模拟温度输电线水平应力重建弧垂模型和三维空间模型, 并根据两期激光雷达点云数据, 提出了一种交叉验证的架空输电线空间形态模拟精度验证方法。具体研究技术流程如图 1 所示。

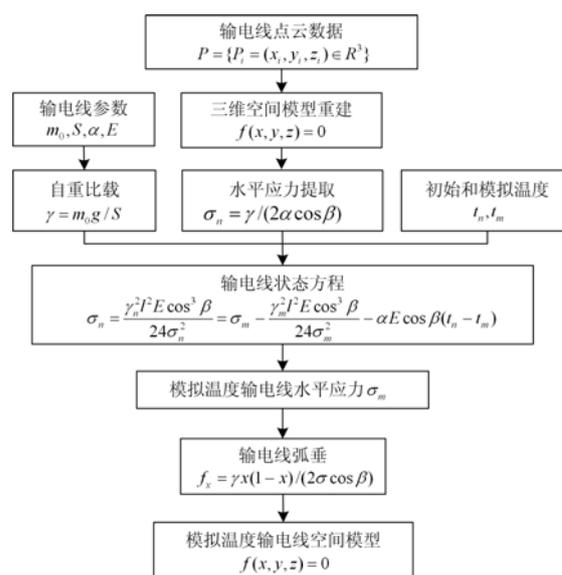


图 1 激光点云输电线弧垂模拟技术流程图

Fig. 1 Flow chart of simulated technology for laser-point cloud transmission line sag

### 1.1 点云数据输电线模型重建

在自然状态下, 架空输电线可视为没有刚性的理想柔性索链, 只承受其自身重力处于力学平衡状态<sup>[18]</sup>, 如图 2 所示。

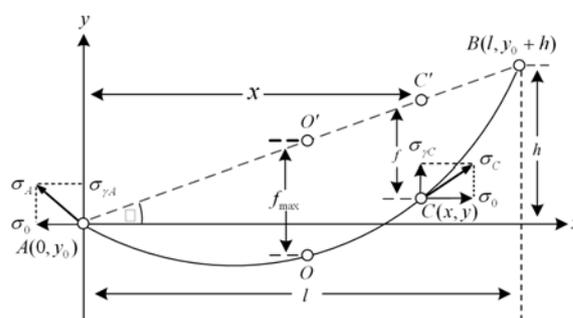


图 2 自然状态下输电线受力情况

Fig. 2 Stress of transmission line in natural state

按照静力学平衡原理, 架空输电线理论模型可用悬链线方程精确描述, 而抛物线方程可视为理论

模型的近似表达,但基于离散激光点云的输电线三维模型重构,抛物线方程具有更高的效率和可操作性<sup>[19]</sup>,因此本文采用抛物线方程作为电力线空间形态模型重建的理论依据。文献[20]采用受力分析微分方法推导了架空输电线抛物线方程,如式(1)所示。其中,  $\gamma$  为输电线垂直比载,  $\text{N}/(\text{m}\cdot\text{mm}^2)$ ,  $l$  为档距(两悬挂点水平距离),  $m$ ;  $\beta$  为高差角,  $\sigma_0$  为输电线水平应力,  $\text{N}/\text{mm}^2$ 。  $y_0$  为低悬挂点 A 点高程,  $m$ 。

$$y = \frac{\gamma}{2\sigma_0 \cos \beta} x^2 + \left( \tan \beta - \frac{\gamma l}{2\sigma_0 \cos \beta} \right) x + y_0$$

即:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (1)$$

根据架空输电线弧垂的定义,弧垂可用式(2)表示。

$$f_x = \left( \frac{h}{l} x + y_0 \right) - y = \frac{\gamma}{2\sigma_0 \cos \beta} x(l-x) \quad (2)$$

点云数据集  $P = \{p_i = (x_i, y_i, z_i) \in R^3\}$  重建输电线三维空间模型,通常包括三个步骤:(1)二维直线方程拟合。将输电线点云数据投影至水平面,拟合二维直线以确定输电线路走向。(2)二维抛物线方程拟合。将输电线点云数据投影至过悬挂点的铅垂面,拟合二维抛物线以确定输电线形态。(3)三维抛物线模型重建。根据二维直线和抛物线空间关系,即直线方程为抛物线方程的横坐标轴,重建输电线三维抛物线模型。则模型曲线上任一点  $p_i$  坐标可用式(3)表示,其中  $s$  为  $p_i$  沿电力线走向点与起始点  $p_0$  的水平距离,  $(x_0, y_0, z_0)$  为电力线起始点  $p_0$  坐标。

$$\begin{cases} x_i = \frac{1}{\sqrt{k^2 + 1}} \times s + x_0 \\ y_i = \frac{k}{\sqrt{k^2 + 1}} \times s + y_0 \\ z_i = a \times s^2 + b \times s + z_0 \end{cases} \quad (3)$$

## 1.2 温度变化输电线形态模拟

当周围气温发生变化时,受金属材质热胀冷缩效应的作用输电线线长发生改变,导致弧垂发生变化。由于气温变化是连续而缓慢的过程,在短暂时间内输电线可视为处于力学平衡状态,其空间形态模型仍可用空间抛物线方程表示。因此,模拟温度下的输电线抛物线模型可用两悬挂点联线方程与模拟温度下的弧垂反演得到,如式(4)所示,其中  $\sigma_n$  表示模拟温度下的输电线水平应力,其余参数同上,由此可见,水平应力是输电线空间形态模拟的唯一待定参数。

$$y = y_{AB} - f_x = \frac{h}{l} x + y_0 - \frac{\gamma}{2\sigma_n \cos \beta} x(l-x) \quad (4)$$

电力工业领域推导了架空导线从一种气象条件(初始温度)改变到另一气象条件(模拟温度)下的各个参数之间的关系<sup>[21-22]</sup>,如式(5)所示,可用于求解模拟状态下的输电线的水平应力,其中  $\sigma_n$ 、 $\sigma_m$  分别表示两种温度下导线的水平应力,初始状态导线水平应力可根据式(1)得到,即  $\sigma_n = \gamma / (2a \cos \beta)$ ;  $\gamma_n$ 、 $\gamma_m$  分别表示两种温度下导线的比载,周围环境温度变化下输电线无外在荷载,此时  $\gamma_n = \gamma_m = m_0 g / S$ ,  $m_0$ 、 $S$  为导线材质单位重量和截面基本参数;  $t_n$ 、 $t_m$  分别表示初始和模拟温度;  $l$ 、 $\beta$  分别表示档距和高差角;  $\alpha$ 、 $E$  分别表示导线温度膨胀系数和弹性系数(其值查表可得)。

$$\sigma_n - \frac{\gamma_n^2 l^2 E \cos^3 \beta}{24\sigma_n^2} = \sigma_m - \frac{\gamma_m^2 l^2 E \cos^3 \beta}{24\sigma_m^2} - \alpha E \cos \beta (t_n - t_m) \quad (5)$$

上式为高次方程,可通过牛顿迭代法计算得到模拟温度下的输电线水平应力,结合式(4)即可得到模拟温度下的输电线空间形态模型,如式(6)所示。

$$\begin{cases} x_i = \frac{1}{\sqrt{k^2 + 1}} \times s + x_0 \\ y_i = \frac{k}{\sqrt{k^2 + 1}} \times s + y_0 \\ z_i = \frac{h}{l} \times s - \frac{\gamma}{2\sigma_n \cos \beta} \times s \times (l-s) + z_0 \end{cases} \quad (6)$$

## 2 试验与分析

### 2.1 实验材料与准备

以 Matlab2019b 为输电线模型重建及模拟方法的计算机程序实现平台,实验平台配置:华硕笔记本电脑, CPU 为 Intel 酷睿 i7-6700HQ 2.60 Hz。选择安徽某地 220 kV 高压输电线路单档输电线路点云为试验数据,原始点云数据如图 3 所示,数据获取平台为大疆无人机 M600 Pro 搭载瑞格 VUX-1LR 轻小型激光雷达系统(主要性能参数:最大扫描点速率 75 万点/s;测距精度  $\pm 15$  mm;设计飞行高度 135 m)。线路走廊地形以平原为主,分布有少量的植被。手动提取输电线点云为输电线三维空间模型重建的样本数据集,输电线点云数为 9 068 个,所选试验数据在电网输电线路中具有普遍代表性,能满足本文所提出的输电线空间形态模拟的可行性和可靠性验证需求。数据获取时间为 2018 年 7 月,初始气温(数据获取时实时气温)为 30.0  $^{\circ}\text{C}$ 。

该档输电线档距  $L=500.00$  m, 悬挂点高差为 15.36 m, 包括 3 根非分裂导线和 2 根单根避雷线共 5 根架空输电线, 架空输电线间距约 5.0 m。其中导线由钢芯铝绞线 LGJ-400/35 型材质组成, 经查表可得导线参数为: 截面积  $S=425.24$  mm<sup>2</sup>; 导线单位重  $m_0=1349$  kg/km; 温膨系数  $\alpha=2.05\times 10^{-5}$ ; 弹性模量  $E=65000$  MPa; 导线直径  $d=26.82$  mm; 避雷线由 JLBGJ-80-20AC 型九钢芯铝合金绞线组成, 其基本参数为: 截面积  $S=78.9$  mm<sup>2</sup>; 导线单位重量  $m_0=522.7$  kg/km; 温膨系数  $\alpha=1.3\times 10^{-5}$ ; 弹性模量  $E=1395105$  MPa; 导线直径  $d=11.50$  mm。

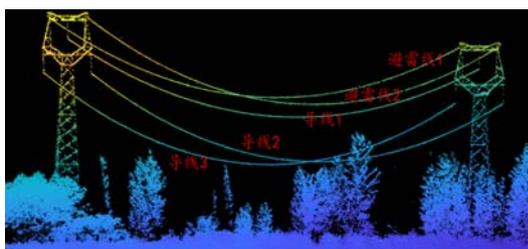


图3 实验数据原始点云

Fig. 3 Original point cloud of experimental data

## 2.2 试验结果与分析

在自然环境中, 输电线通常承受气温、覆冰、风等多种气象因子综合作用。受激光雷达传感器性能和输电线危险区域无人机飞行条件限制, 输电线路点云数据采集时多选择无风或风速较小的环境, 风对输电线空间形态的影响可忽略不计。为了研究气温对输电线空间形态的影响, 本文暂不考虑覆冰、风等其他气象因子。图 4 展示了基于原始激光点云数据的输电线三维空间模型重建与模拟结果, 此时模拟温度  $t_m=18.0$  °C。其中绿色点为输电线点云数据, 蓝色线为初始温度下输电线三维空间模型, 红色线为模拟温度下输电线三维空间模型。基于激光点云数据的输电线三维抛物线模型与离散点很好地贴合, 输电线点均匀地围绕在模型曲线的周围, 表明激光点云能较好地描述输电线实时空间分布形态。当输电线周围气温降低时, 输电线线长变小, 同时弧垂减小, 模拟气温下的输电线三维空间模型位于原始模型的正上方, 即气温影响输电线弧垂在垂直方向上变化。

图 5 展示了不同温度环境下输电线弧垂变化曲线, 弧垂变化曲线是输电线空间形态变化规律的定量描述, 其中  $f_m$  表示最大弧垂变化量, 其值为正表示弧垂增大, 用绿色曲线表示, 其值为负表示弧垂减小, 用红色曲线表示。沿档距方向, 输电线弧垂变化量先增大后减小, 并在档距中央处达到最大值。由此可见, 对于温度环境下输电线运行安全监测, 其档距中央处为敏感区域。不同气温环境下, 随着

温差逐渐增大, 弧垂变化量也同步增加, 且相同温度变化条件下, 温度降低时弧垂较温度升高时敏感。如当温度升高 15 °C 时(由初始温度 30 °C 升高到 45 °C)档距中央弧垂增加量  $f_m=0.737$  m; 当气温降低 15 °C 时(由初始温度 30 °C 降低到 15 °C)对应点弧垂减小量  $f_m=0.757$  m。

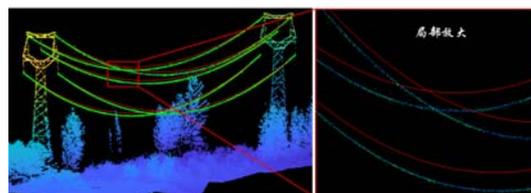


图4 初始温度和模拟温度下输电线三维模型

Fig. 4 Three dimensional model of transmission line with initial and simulated temperature

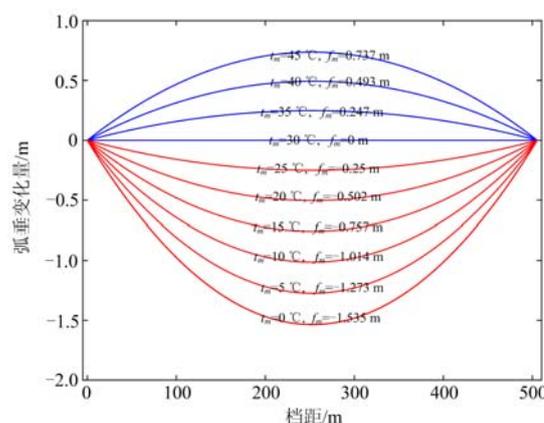


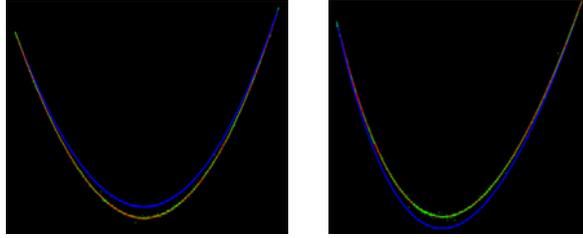
图5 不同温度弧垂变化曲线(档距  $L=500$  m)

Fig. 5 Sag curve under different temperature conditions (span  $L=500$  m)

## 2.3 交叉验证法精度评定

气象环境下输电线空间形态监测一直是输电线路自动化运行管理与维护研究的重点之一, 其难点主要表现在: (1) 受风力、温度、覆冰等外界自然环境的作用, 输电线处于动态变化中, 传统的全站仪、GPS 弧垂实时人工测量方法很难捕捉整条输电线同步运动状态, 导致弧垂测量的可靠性不高, 精度评定时的理论参考值精度不高; (2) 传统的测量方法是对输电线有限个采样点的测量, 是输电线特定点的弧垂大小描述, 不能综合评定整条输电线的弧垂精度。针对以上弧垂精度评定方法的不足, 提出了一种两期点云数据交叉验证的弧垂模拟方法, 具体操作步骤如下: (1) 分别获取不同气温下相同输电线路的两期机载激光点云数据, 其中气温为  $T_1$  时点云为实验数据 1, 气温为  $T_2$  时点云为实验数据 2,  $T_1 > T_2$ ; (2) 正向验证, 即升温输电线形态模拟精度

验证。实验数据 1 为理论参考值，验证实验数据 2 在气温为  $T_1$  时的输电线形态模拟结果如图 6(a)，蓝色曲线为气温为  $T_1$  时的模型曲线，红色曲线为模拟曲线，绿色点为验证点云数据；(3) 反向验证，即降温输电线形态模拟精度验证。同理，以实验数据 2 为理论参考值，验证实验数据 1 在气温为  $T_2$  时的输电线形态模拟结果，如图 6(b)所示。



(a) 正向验证 (b) 反向验证

图 6 形态模拟精度交叉验证

Fig. 6 Cross validation of simulation accuracy

以实测点云数据与模拟输电线三维模型的空间距离为误差变量  $d_i$ ，选择中误差  $s$ 、平均误差  $\eta$  和最大误差  $M$  为精度评定指标，其中中误差反映了误差分布的离散程度；平均误差为误差值的平均值，反映了误差大小的平均分布，最大误差反映了误差的分布范围。通过以上精度评定指标，采用交叉验证方法综合评价温度变化环境下输电线三维空间形态模拟的精度。

证方法综合评价温度变化环境下输电线三维空间形态模拟的精度。

(1) 误差变量  $d_i$ ，其中  $d_v$  表示离散点到模拟输电线三维模型的水平距离； $d_h$  表示离散点到模拟输电线模型的垂直距离。

$$d_i = \sqrt{d_v^2 + d_h^2}$$

(2) 中误差  $s$ ，其中  $n$  是输电线点云数目。

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2 / (n-1)}$$

(3) 平均误差  $\eta$

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$$

(4) 最大误差  $M$

$$M = \max(d_i)$$

表 1 展示了基于机载激光点云数据输电线三维空间形态模拟精度交叉验证结果。架空输电线是断面规则的非线性圆柱，其三维空间模型重构是将空间实体等效为空间曲线。因此误差变量  $d_i$  是由输电线截面半径(固定误差)和点云数据误差组成。由表中可以看出，初始温度下(原始点云数据)输电线模型重建中误差最大值为 0.021；平均误差最大值为 0.037 m；最大误差最大值为 0.404 m。

表 1 实验数据输电线形态模拟精度交叉验证

Table 1 Cross validation of simulation accuracy of experimental data transmission line model

类型	精度指标	避雷线 1	避雷线 2	导线 1	导线 2	导线 3
T1 初始 输电线模型	中误差	0.011	0.010	0.015	0.016	0.015
	平均误差/m	0.025	0.022	0.029	0.031	0.030
	最大误差/m	0.244	0.238	0.351	<b>0.404</b>	0.388
T2 初始 输电线模型	中误差	0.018	0.011	<b>0.021</b>	0.020	0.020
	平均误差/m	0.023	0.024	0.033	<b>0.037</b>	0.031
	最大误差/m	0.241	0.239	0.396	0.403	0.382
温度校正前 正向验证	中误差	0.015	0.018	0.023	0.028	0.025
	平均误差/m	0.054	0.042	0.204	0.251	0.237
	最大误差/m	0.356	0.321	0.574	0.366	0.345
温度校正前 反向验证	中误差	0.016	0.015	0.027	0.029	0.020
	平均误差/m	0.050	0.055	0.210	0.277	0.256
	最大误差/m	0.361	0.377	0.627	0.391	0.430
温度校正后 正向验证	中误差	—	—	0.019	0.025	0.022
	平均误差/m	—	—	0.062	<b>0.066</b>	0.064
	最大误差/m	—	—	0.426	0.451	0.466
温度校正后 反向验证	中误差	—	—	0.017	0.022	<b>0.027</b>
	平均误差/m	—	—	0.058	0.063	0.055
	最大误差/m	—	—	0.411	<b>0.471</b>	0.429

避雷线点云数据温差条件下空间形态模拟误差最大值为 0.018, 平均误差最大值为 0.055 m, 最大误差的最大值为 0.377 m; 相比避雷线点云数据模拟结果, 导电线点云数据三维空间形态模拟精度相对较低, 其中误差最大值为 0.029, 平均误差最大值为 0.277 m, 最大误差最大值为 0.627 m。出现该现象的原因为模拟温度与验证数据获取时的温度存在偏差, 即模拟温度为输电导线平均温度, 验证数据获取时温度为周围大气温度, 受导线承载电流热效应和日晒不均匀导致周向传热路径差异的影响, 导线存在径向和周向温度梯度差<sup>[23]</sup>, 使得验证数据获取时的实测温度与导线模拟温度存在差异, 导致架空输电线三维空间形态模拟精度较低。为了消除导线温度与导线表面温度的差异, 采用文献[24]方法对导线表面温度进行校正, 校正后的架空输电线三维空间形态模拟中误差最大值为 0.027, 平均误差最大值为 0.066 m, 最大误差最大值为 0.471 m, 如表 1 中加粗数字所示, 温度校正后架空输电线空间模型精度得到很大提升。随机选择一根导电线, 温度校正前后输电线误差分布如图 7 所示, 其中蓝色曲线为温度校正前架空输电线空间形态模拟误差分布曲线; 红色曲线为温度校正后架空输电线三维空间形态模拟误差分布。从图中可以看出, 温度校正后点云误差分布更为集中, 平均误差大幅度降低, 表明本文方法架空输电线三维空间形态模拟精度较高。

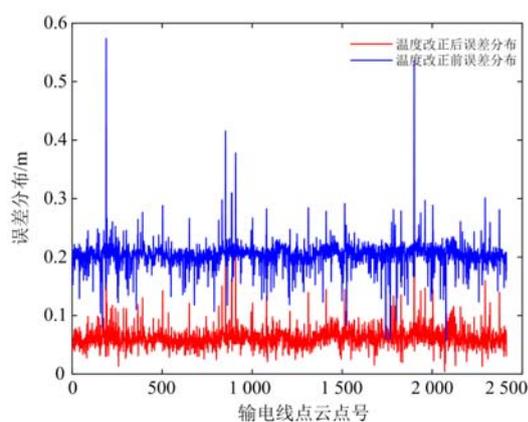


图 7 温度校正前后输电线模拟误差分布

Fig. 7 Error distribution of transmission line simulation before and after temperature correction

### 3 结论

架空输电线三维空间形态模拟是输电线增容、运营安全监测和线路设计的关键指标, 一直是电网安全运营与管理部门研究的热点和难点。本文基于机载激光点云数据, 提出了一种温度变化条件下架

空输电线三维空间形态模拟的方法, 该方法利用高精度的输电线三维点云数据重建空间模型, 并从模型中提取水平应力等弧垂模拟的关键参数, 有效地克服了“微地形”和“微气象”对传统输电线应力监测的缺陷, 提高了输电线三维空间模拟的适用性和可靠性。两期点云数据输电线空间形态模拟精度交叉验证的方法操作方便, 精度评定结果可靠, 研究可为输电线路安全运行及线路改造等工程应用提供技术参考。

本文研究所选择的点云数据在机载激光雷达电力巡检工程应用中具有普遍的代表性, 但在实际的生产应用中还包括点云噪声较大、数据缺失严重等极端情况, 点云数据质量较差会影响初始温度模型重建结果, 导致初始应力提取结果误差较大造成输电线三维空间形态模拟精度较低, 因此, 如何提高在机载激光点云数据缺失、噪声等极端情况下输电线空间形态模拟精度是本研究后续重点关注的内容。致谢:

感谢中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室王成团队提供输电线路机载激光点云数据。

### 参考文献

- [1] 常康, 徐泰山, 郁琛, 等. 自然灾害下电网运行风险控制策略探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 73-81.  
CHANG Kang, XU Taishan, YU Chen, et al. Discussion of power system operation risk control strategy in natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 73-81.
- [2] ZHU L, HYYPPÄ J. Fully-automated power line extraction from airborne laser scanning point clouds in forest areas[J]. Remote Sensing, 2014, 6: 11267-11282.
- [3] ABBOUD A W, GENTLE J P, MCJUNKIN T R, et al. Using computational fluid dynamics of wind simulations coupled with weather data to calculate dynamic line ratings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 745-753.
- [4] ZHANG R, YANG B, XIAO W, et al. Automatic extraction of high-voltage power transmission objects from UAV Lidar point clouds[J]. Remote Sensing, 2019, 11(22): 2600.
- [5] 麻卫峰, 王金亮, 王成, 等. 电力线点云精细提取与重建的模型残差实现[J]. 测绘科学, 2020, 45(2): 60-66.  
MA Weifeng, WANG Jinliang, WANG Cheng, et al. Model residual realization of precise extraction and reconstruction of power line point cloud[J]. Surveying and Mapping Science, 2020, 45(2): 60-66.
- [6] SONG Xiaojun, QU Chuan, DU Yong, et al. An automatic extraction algorithm of high voltage transmission lines

from airborne LIDAR point cloud data[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer ENCES, 2018, 26(4): 2043-2055.

[7] MENSAH-BONS U, HEYD T. Overhead transmission conductor sag: a novel measurement technique and the relation of sag to real time circuit ratings[J]. Electric Machines & Power Systems, 2003, 31(1): 61-69.

[8] AGGARWAL R K, JOHNS A T, JAYASINGHE J A S B, et al. Overview of the condition monitoring of overhead lines[J]. Electric Power Systems Research, 2000, 53(1): 15-22.

[9] AHMAD J, MALIK A S, ABDULLAH M F, et al. A novel method for vegetation encroachment monitoring of transmission lines using a single 2D camera[J]. Pattern Analysis and Applications, 2015, 18(2): 419-440.

[10] MATIKAINN L, LEHTOMAKI M, AHOKAS E, et al. Remote sensing methods for power line corridor surveys[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 119: 10-31.

[11] 王孔森, 孙旭日, 盛戈皞, 等. 架空输电线路导线弧垂在线监测误差分析及方法比较[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 27-34.  
WANG Kongsen, SNU Xuri, SHENG Gehao, et al. Error analysis and method comparison of on-line sag monitoring of overhead transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 27-34.

[12] LUO J, HAO Y, YE Q, et al. Development of optical fiber sensors based on Brillouin scattering and FBG for on-line monitoring in overhead transmission lines[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(10): 1559-1565.

[13] CHEN K L, GUO Y, MA X. Contactless voltage sensor for overhead transmission lines[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(4): 957-966.

[14] YANG Y, LI L, DU L, et al. Study on non-contact transmission line overvoltage sensor and analysis of influencing factors[J]. International Review of Electrical Engineering, 2012, 7(6): 6153-6160.

[15] ADOMAH K, MIZUNO Y, NAITO K. Probabilistic assessment of the sag in an overhead transmission line[J]. Transactions-Institute of Electrical Engineers of Japan B, 1999: 120-168.

[16] ANA K, DAVOR S, DARKO D. Reliability assessment of overhead transmission line towers in the Republic of Croatia[J]. Tehnicki Vjesnik, 2013, 20(3): 381-390.

[17] 李明明, 王建, 熊小伏, 等. 高温天气下架空线路运行温度与弧垂超限预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 25-33.  
LI Mingming, WANG Jian, XIONG Xiongf, et al. Operating temperature and sag off-limit warning method for overhead transmission lines in the conditions of high-temperature weather[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 25-33.

[18] 麻卫峰, 王金亮, 王成, 等. 一种基于机载 LiDAR 点云电力线自动提取方法[J]. 测绘科学技术学报, 2019, 36(1): 39-44.  
MA Weifeng, WANG Jinliang, WANG Cheng, et al. An automatic power line extraction method based on Airborne LIDAR point cloud[J]. Journal of Surveying and Mapping Science and Technology, 2019, 36(1): 39-44.

[19] 张继贤, 段敏燕, 林祥国, 等. 激光雷达点云电力线三维重建模型的对比与分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2017, 42(11): 1565-1572.  
ZHANG Jixian, DUAN Minyan, LIN Xiangguo, et al. Comparison and analysis of 3D reconstruction model of LIDAR point cloud power line[J]. Journal of Wuhan University: Information Science Edition, 2017, 42(11): 1565-1572.

[20] 孟遂民, 孔伟. 架空输电线路设计[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2015.

[21] 王艳玲, 莫洋, 韩学山, 等. 考虑气象时空分布特性的输电线路模型和分析方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 636-645.  
WANG Yanling, MO Yang, HAN Xueshan, et al. Transmission line model and analysis method considering temporal and spatial distribution characteristics of weather[J]. Acta Electrotechnics Sinica, 2020, 35(3): 636-645.

[22] TOMASZEWSKI M, RUSZCZAK B, MICHALSKI P, et al. The study of weather conditions favourable to the accretion of icing that pose a threat to transmission power lines[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2019, 25(6): 139-151.

[23] 胡剑, 熊小伏, 王建. 基于热网络模型的架空输电线路径向和周向温度计算方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 139-152.  
HU Jian, XIONG Xiaofu, WANG Jian. Calculation method of overhead transmission line path and circumferential temperature based on thermal network model[J]. Acta Electrotechnics Sinica, 2019, 34(1): 139-152.

[24] 刘刚, 李炆, 陈垣, 等. 基于电磁-热耦合模型的架空导线温度分布和径向温差的计算与实验验证[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 7-13.  
LIU Gang, LI Yang, CHEN Yuan, et al. Frequency band sequence allocation of magnetically coupled resonant wireless power transmission systems based on SS type[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 7-13.

收稿日期: 2020-07-21; 修回日期: 2020-10-12

作者简介:

麻卫峰(1987—), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为激光雷达技术与应用; E-mail: 2433278222@qq.com

王成(1975—), 男, 通信作者, 博士, 研究员, 研究方向为机载激光雷达电力巡检技术与应用。E-mail: wangcheng@radi.ac.cn

(编辑 魏小丽)