

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306372

# 相似性度量与牛顿插值融合的架空输电线 弧垂测量方法\*

周孝法<sup>1</sup> 张越港<sup>2</sup> 方宇<sup>2</sup> 杨皓<sup>2</sup> 夏严峰<sup>1</sup> 武欣<sup>2</sup> 范狄庆<sup>2</sup> 孙博洋<sup>1</sup>

(1. 国网上海市电力公司 上海 200122; 2. 上海工程技术大学 上海 201620)

**摘要:** 架空输电线路导线弧垂是架线施工质量和线路安全运行的关键指标之一, 针对目前弧垂测量方法在准确性、便捷性等方面存在的不足, 提出了一种基于激光测距与光栅测角技术的输电线路弧垂测量数学模型, 并在该模型的基础上, 针对单根导线测量鲁棒性不足的情况, 提出一种基于相似性度量与牛顿插值法相融合的多分裂导线弧垂测量数据质量评估优化算法, 实现对数据集的补偿与弧垂计算。与点云提取电力线方法相比, 该测量方法只需通过少量测量数据即可拟合出导线模型并计算出弧垂值。以 220 kV 双分裂导线为测量对象, 进行试验验证, 并与现有测量方法弧垂测量值作比较, 试验结果表明数据优化后的弧垂误差率最大为 1.47%, 证明了该方法的准确性, 能够满足工程现场测量精度要求, 并提高了架空输电线路弧垂测量工作的安全与效率。

**关键词:** 相似性度量; 牛顿插值法; 激光测距; 架空输电线路; 导线弧垂

**中图分类号:** TM752; TM932 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Research on sag measurement method of overhead transmission line based on fusion of similarity measure and Newton interpolation method

Zhou Xiaofa<sup>1</sup> Zhang Yuegang<sup>2</sup> Fang Yu<sup>2</sup> Yang Hao<sup>2</sup> Xia Yanfeng<sup>1</sup> Wu Xin<sup>2</sup> Fan Diqing<sup>2</sup> Sun Boyang<sup>1</sup>

(1. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China;

2. Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** The sag of conductor and ground wire is one of the key indicators for the construction quality and safety operation of the overhead transmission line. Aiming at the shortcomings of current sag measurement method's accuracy and convenience, a mathematical model is proposed based on laser ranging and grating angle measurement technology for the sag measurement of the line. On the basis of this model, a data quality evaluation optimization algorithm which the similarity measure combined with the Newton interpolation method is put forward to realize the data set compensation and sag calculation for the case of insufficient robustness of the single conductor's sag measurement of the multi-split line. Compared with point cloud extraction power line method, only a small amount of measurement data is needed for the proposed method to fit the line model and calculate the sag value. In order to verify the proposed method and compare with current sag measurement methods, a 220 kV double-split line is used in a test, and the result shows that the maximum sag error rate of the optimized data is only 1.47%, which proves that the proposed method's measurement accuracy can meet the requirement of engineering sites, and can improve the security and efficiency of the overhead transmission line's sag measurement.

**Keywords:** similarity measure; Newton interpolation method; laser ranging; overhead transmission line; sag of conductor and ground wire

## 0 引言

随着我国经济社会的发展, 电网建设工作进入了快

车道, 其中超/特高压架空输电线路建设占了很大比重。架空输电线路导线弧垂是架线施工质量和线路安全运行的关键指标之一, 目前架空输电线路弧垂的测量技术手段已经较为成熟, 如等长法、异长法、角度法、平视法等

方法,但上述传统方法一方面基于人工作业易受现场环境和天气的制约,使得测量难度较大,另一方面人工上塔观测耗时较长、劳动强度大且增加作业风险。因此,研究一种不受地域、现场环境影响且便捷高效的弧垂测量方法尤为迫切。

在电力线路建设施工中,节约成本和减少人力是很重要的,机载激光扫描以其密集、快速和准确的测量,在输电线路识别监测的测量任务中越来越受欢迎<sup>[1-3]</sup>。例如,Jwa 等<sup>[4]</sup>提出了分段悬链线曲线模型生长算法来识别点,通过迭代悬链线曲线拟合和三次生长来实现聚类。该方法在一定程度上受拟合曲线和初始生长立方体选择的限制。Zhu 等<sup>[5]</sup>提出利用 ALS 点云数据对森林环境下低压电力线的自动、计算有效的电力线检测,该算法的平均准确率为 93.26%。Guo 等<sup>[6]</sup>提出了一种利用两个相邻塔架之间导体群的特性来改善重建结果的重建方法。一方面机载激光扫描存在数据量大、获取时间较长的现状,如 Mclaughlin<sup>[7]</sup>利用 13.8 km 获取的 562.2 万左右个点云数据集并提取电力线,Guan 等<sup>[8]</sup>利用两个车载激光雷达数据集分别为 780 万及 840 万来提取电力线和输电塔,类似地,Zhang 等<sup>[9]</sup>利用 377.9 万左右的点云数据进行 220 kV 线路仿真试验,另一方面,空中机载激光雷达存在一定的危险性。

激光测距仪利用激光束来确定物体的距离(或深度),在机器人领域得到了广泛的应用。它具有精度高、检测范围广<sup>[10-13]</sup>、抗干扰能力强<sup>[14]</sup>等优点。针对架空电力线路导体对地间隙的测量,Golinelli 等<sup>[15]</sup>首先提出了一种基于红外激光的便携式测量系统。但并未实现对弧垂的计算。

针对架空输电线路弧垂测量的问题,本文提出一种采用激光测距和光栅测角技术建立输电线路弧垂测量数学模型实现数据的采集,并针对单根导线只测量局部形状存在的属性缺陷<sup>[6]</sup>且鲁棒性差的情况,提出基于相似性度量和牛顿插值法融合的多分裂导线数据质量评估优化算法。通过试验验证,所提方法能较好实现输电线路导线数据便捷测量、模型拟合、弧垂计算,弧垂测量结果精度较高,满足线路架设相关标准要求,为架空输电线路建设施工质量管控和日常运维监测提供了一种便捷、快速且准确率较高的测量方法。

## 1 架空输电线路弧垂数学定义与测量模型

### 1.1 架空输电线路弧垂特征及问题分析

高压架空输电线路的架设过程包括架空导线、架空地线的架设以及附件的安装,精确的弧垂计算是保证架线施工质量和线路运营安全的关键一环<sup>[16-18]</sup>。

在现有架空输电线路弧垂计算方法中,较为典型的是悬链线法和抛物线法,理论分析和工程实践证明悬链线法比抛物线法精度更高,也是目前架线施工中弧垂测算的主要方法。

对于悬链线法,根据导线的悬挂点是否联有绝缘子串,分为联有绝缘子串和未联有绝缘子串两种情况。联有绝缘子串分为一端联有绝缘子串和两端联有绝缘子串的情况,未联有耐张绝缘子串分为两悬挂点等高、两悬挂点不等高两种情况。悬链线方程与架空线水平张力、应力等具有直接关系,但现实情况中架空线张力、应力的实时获取较为困难,且接触式测量<sup>[19-21]</sup>耗费人力、危险程度较高。

本文通过非接触式测量方法测量导线弧垂,推导将基于悬链线法展开。

### 1.2 架空输电线路弧垂数学定义

架空输电线路弧垂数学定义如下:导线两悬点连线上的任意一点到架空导线间的垂直距离称为该点弧垂,即图 1 中  $f_1$ 、 $f_2$  所示,而对于架线施工来说,架设标准都是参照最大弧垂值确定紧线量和保证施工质量,即图 1 中的  $f_{max}$ 。目前,对于悬挂点的定义有很多种,本文按照如下标准定义悬挂点:当杆塔为耐张塔时,选择 U 型挂环与横担的交点作为悬挂点;当杆塔为直线塔时,选择架空线穿过悬垂线夹与线夹交点为悬挂点,图 1 为输电线路模型,导线悬挂点  $Q_1$ 、 $Q_2$  如图所示。

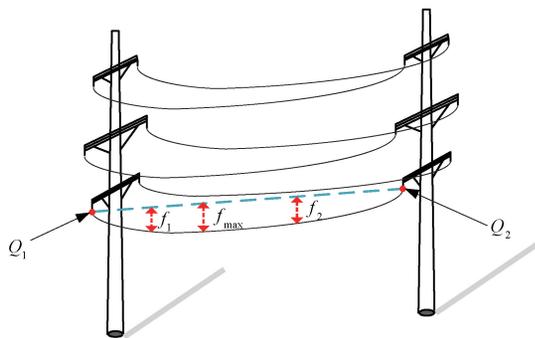


图 1 输电线路模型图

Fig. 1 Transmission line model diagram

## 2 架空输电线路弧垂测量模型与算法

本文的弧垂测量模型利用激光测距与光栅测角这两项关键技术的相互配合来实现数据采集,并针对数据属性提出一种相似性度量和牛顿插值法相融合的算法对数据的质量进行评估和补偿优化,最终进行导线模型拟合和弧垂计算的目的。

本文提出的架空输电线路弧垂测量方法如下:  
输电线路曲线模型的悬链线表示形式为:

$$\begin{cases} y = \frac{\sigma}{g} \cosh\left(\frac{g}{\sigma}x\right) - \frac{\sigma}{g} \\ g = 9.8 \times \frac{m}{s} \times 10^{-3} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\sigma$  为架空线水平应力, 单位为  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;  $g$  为架空线的自重比载, 单位为  $\text{N}/\text{m} \cdot \text{mm}^2$ ;  $m$  为每千米导线质量, 单位为  $\text{kg}/\text{km}$ ;  $s$  为导线截面积, 单位为  $\text{mm}^2$ ;  $y$  和  $x$  分别是坐标系中的纵坐标和横坐标值。为方便计算, 将方程按照泰勒展开后得到:

$$y = \frac{1}{2!} \left(\frac{g}{\sigma}\right) x^2 + \frac{1}{4!} \left(\frac{g}{\sigma}\right)^3 x^4 + \frac{1}{6!} \left(\frac{g}{\sigma}\right)^5 x^6 \quad (2)$$

经过计算验证, 按照此项数进行泰勒展开后的计算结果与原式在各横坐标下的误差最大为  $10^{-6}$  数量级, 因此, 该精度已经满足本文计算采用的精度要求。

### 2.1 架空输电线弧垂测量模型

如图2所示, 测量设备放置于  $O'$  处, 被测架空输电线如图2中  $AB$  所示, 在架空输电线  $AB$  所在平面内建立坐标系  $xOy$ , 当获得该坐标系下架空输电线  $AB$  中部分点的坐标数据时, 可将架空输电线的形态进行三维拟合, 得到目标架空线的方程, 进而计算弧垂值, 从而将工程中的弧垂测量问题, 转化为求解三维空间中架空线平面下的导线拟合及弧垂计算问题。

数据测量、建模方法如下: 通过激光测距获得  $l_1, l_2$  的值, 并通过光栅测角获得角度  $\alpha_1, \alpha_2, \beta$  等信息, 计算每个测量点在坐标系  $x'O'y'$  下的三维信息。以  $O$  为原点,  $A$  为曲线起始点, 利用坐标平移将坐标系  $x'O'y'$  下的坐标点信息转为坐标系  $xOy$  下的数据。

具体过程如下: 利用斜距  $l_1, l_2$  和俯仰角  $\alpha_1, \alpha_2$  得到斜距在水平面的投影距离  $L_{\alpha_1}, L_{\alpha_2}$ 。

$$\begin{cases} L_{\alpha_1} = l_1 \times \cos(\alpha_1) \\ L_{\alpha_2} = l_2 \times \cos(\alpha_2) \\ h_1 = l_1 \times \sin(\alpha_1) \\ h_2 = l_2 \times \sin(\alpha_2) \end{cases} \quad (3)$$

两点在水平面投影的差值  $\Delta x$  通过以下计算获得, 两个测量点的旋转角度差值为  $\beta_1$ 。

$$\Delta x = \sqrt{L_{\alpha_1}^2 + L_{\alpha_2}^2 - 2L_{\alpha_1}L_{\alpha_2}\cos(\beta)} \quad (4)$$

图2中夹角  $\varphi$  是投影线段  $L_{\alpha_2}$  与导线平面坐标轴  $x$  的夹角。

$$\varphi = \arccos\left(\frac{\Delta x^2 + L_{\alpha_2}^2 - L_{\alpha_1}^2}{2\Delta x L_{\alpha_2}}\right) \quad (5)$$

从坐标系  $x'O'y'$  到坐标系  $xOy$  进行坐标变换前, 利用光栅沿  $x'$  轴逆时针转到  $z'$  轴时测出  $F_1, F_2$  点对应的旋转角度, 由式(6)计算出测量设备垂直测量导线平面  $xOy$  时的光栅编码器刻度  $\theta$ , 即求出坐标轴  $z'$  与坐标值  $z$  平行时的光栅编码器刻度  $\theta$ 。

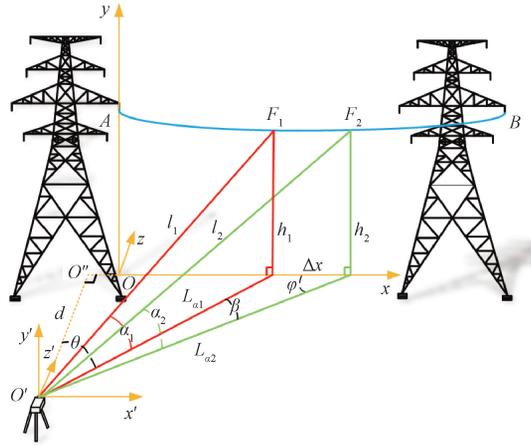


图2 测量模型

Fig. 2 Measurement model

$$\begin{cases} d = L_{\alpha_2} \times \sin(\varphi) \\ \theta = 90^\circ - (\beta + \varphi) \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $d$  是测量设备到悬挂点  $A$  在水平面投影的垂直距离,  $\theta$  是设备垂直测量导线平面时的光栅编码器刻度。只需提前得到两个随意的点后, 通过计算, 得到设备垂直测量导线平面时的光栅编码器刻度  $\theta$ , 为坐标系间转换提供基础角度。

### 2.2 数据采集及预处理

#### 1) 数据采集及坐标变换

在上述测量模型的基础上, 数据采集根据跨越档距与同相多分裂导线的形式进行自动调整, 这里以 220 kV 双分裂导线为例。

首先, 已知目标输电线档距跨度以及双分裂子导线的间隔距离, 该数据信息可由设计图纸获取。

如图3所示,  $A_1B_1$  是在坐标系  $xOy$  平面内的导线,  $A_2B_2$  是二分裂导线的另一条, 与  $A_1B_1$  相对平行, 并且认为同相子导线之间在曲线拟合的相关参数上基本相同, 具有一致性<sup>[6]</sup>。假设  $C_1, C_2$  是需要获取的数据点, 首先获取  $C_1$  的斜距  $l_1$ , 根据式(3), 获得水平面  $xOz$  投影线段  $L_{\alpha_1}$  以及高程  $h_1$ , 根据已知分裂子导线之间的距离, 计算得到  $C_2$  点对应的光栅角度  $\theta_1$ , 其中图3中  $\alpha_1, \alpha_2$  是俯仰角。根据式(6)可以得到设备垂直测量导线平面时的光栅编码器刻度  $\theta$ 。在直角三角形  $PO'O''$  中, 利用式(7)求取数据点的横坐标表示。

$$x_1 = L_{\alpha_1} \times \sin(\theta) \quad (7)$$

依据式(7)和高程,  $C_1, C_2$  在坐标系  $x'O'y'$  中坐标可以表示为  $(x_1, h_1), (x_1, h_2)$ 。值得注意的是两点的横坐标相同, 如图所示, 两点是在与  $y'O'z'$  相平行的同一剖面内。导线上其他各点数据的获取均同上述方法。

假设图3中  $A_1$  为架空输电线路导线悬挂点, 测量时首先测出悬挂点的坐标, 本文称为首测点, 坐标平移涉及

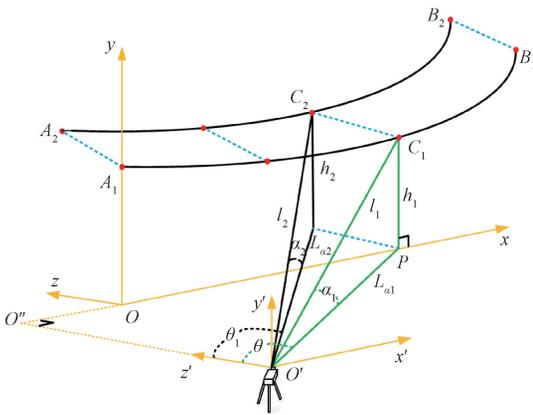


图 3 数据采集示意图

Fig. 3 Data collection schematic diagram

坐标系  $x'O'y'$  到坐标系  $xOy$ , 将首测点  $A_1$  在坐标系  $xOy$  中表示为  $(0, h)$ , 且  $A_1$  在曲线建模中作为端点,  $h$  是  $A_1$  在坐标系  $x'O'y'$  中的高程值。在上述基础上, 将数据集中的点按照  $A_1$  为基准进行坐标变换, 得到对应坐标系  $xOy$  下的数据集。

2) 数据预处理

通过上述数据采集过程, 可以获得一定规模的数据集, 且分别对应于分裂子导线。预处理方法是针对数据集中对应个别数据点产生较大数值偏差的情况。以 220 kV 输电线路为例, 双分裂同相子导线的距离为 400 mm, 由如图 3 中双分裂导线的对应关系可知, 横纵坐标都不会发生大幅变化, 如出现明显较大偏差即可自动删除并进行重采样。

2.3 数据集质量评估方法

同相分裂子导线间的垂度和方向都相同且基本平行。由于在上述数据采集过程中, 相同横坐标下获取的点都在同一剖面内, 因此通过基于剖面分割的方法检测这些相似的属性, 根据相似性度量算法对同相子导线上的各数据点进行质量评估。

1) 相邻剖面间相似性度量算法

由于测量时风偏影响, 数据点集中会出现明显偏差点以及无数据的情况, 为此, 本文采用相似性度量算法来检测邻域内数据点的质量。

目前常用的相似性度量算法有欧氏距离法、编辑距离法、豪斯多夫距离法等<sup>[21]</sup>。利用相似性质, 可以大致检测出不同剖面间属于同一输电线的点。图 4 表示的是对同相分裂子导线进行剖面分割的相似性度量, 数据点集(圆点表示)已知, 将各数据点按照剖面分割形成类似  $abcd$  剖面, 并将图 4 的各数据点 1、2 创建数据组, 共形成 3 组相邻剖面。为了保持不同剖面间坐标的一致性, 投影平面的坐标按如下规则构造: (1)  $x, y$  轴与电力线主方

向正交; (2) 原点是剖面内一点, 且相邻剖面分布一致。且如图 4 所示, 相邻剖面上的原点分布相似。

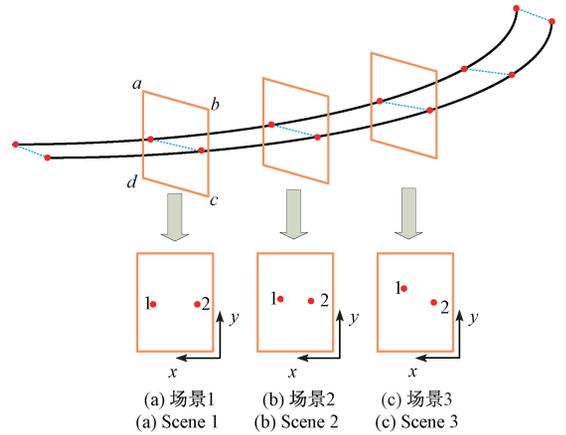


图 4 基于剖面分割的相似性度量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of similarity measure based on profile segmentation

以双分裂导线为例, 图 5 区域是 4 组数据点的剖面, 各点坐标均已知。创建矩形预测区  $P_1P_2P_3P_4$ , 连接数据点 1、2, 依据欧氏距离、斜率对预测区内直线进行相似性度量。 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  为数据点 1、2 在剖面坐标系下的值, 计算直线斜率为  $k_i$ 。

$$k_i = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \tag{8}$$

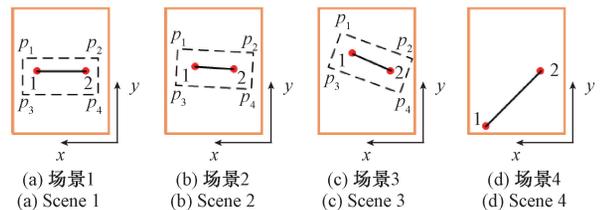


图 5 相邻剖面相似性度量匹配

Fig. 5 Adjacent profile similarity metric matching

斜率阈值设定为:

$$\rho = |k_s - k_i| \tag{9}$$

直线斜率阈值  $\rho$  与第 1 组直线斜率  $k_s$  和其他匹配直线斜率  $k_i$  相关。直线斜率的阈值取决于同向子导线直线距离和数据点波动范围。

试验中导线间距 400 mm, 数据点波动阈值设为  $\pm 50$  mm, 图 5 中 (a) 和 (b) 是合格的。图 5 (a) 和 (c) 斜率不合格, 图 5 (a) 和 (d) 欧氏距离超过阈值因此滤除。

2) 多邻域综合评估

在上述两个邻域相似性度量的基础上, 推广到多邻域情况下, 体现为一个邻域与多个邻域同时评估, 增强了数据评估的准确性和鲁棒性。

### 2.4 数据集误差补偿及优化方法

图5(c)和(d)中数据点有明显的偏差,造成偏差的原因有:1)物体遮挡、激光测量其他导线或激光未瞄准,导致误测、漏测的情况;2)导线舞动,对测量产生干扰;3)空气中粒子折射使激光值获取错误。针对这种情况,本文提出基于牛顿插值的误差补偿及优化算法。

牛顿插值公式:

$$\begin{cases} a_0 = f(x_0) \\ a_1 = f[x_0, x_1] \\ \dots \\ a_n = f[x_0, x_1, \dots, x_n] \\ N_n(x) = a_0 + a_1(x - x_0) + \dots + \\ a_n(x - x_0)(x - x_1)\dots(x - x_{n-1}) \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $a_0$  是一阶差商,  $a_1$  是二阶差商,  $a_n$  是  $n$  阶差商,  $N_n(x)$  是牛顿插值多项式。利用牛顿插值法能够高效的对已知点在原有基础上进行误差补偿,对缺漏点进行插补预测,针对数据偏差情况,本文提出的相似性度量和牛顿插值法的结合提高了数据的准确度和测量效率。

### 2.5 输电线拟合与弧垂计算

#### 1) 输电线拟合与可视化处理

通过2.1、2.2、2.3节得到了需要拟合的数据集,输电线拟合采用成熟的整体最小二乘法。拟合的形式根据式(2)进行坐标平移后的公式:

$$y = \frac{1}{2!}a(x-b)^2 + \frac{1}{4!}a^3(x-b)^4 + \frac{1}{6!}a^5(x-b)^6 + h \quad (11)$$

拟合的目的如下:(1)求出非线性多项式方程的系数;(2)实现单回路导线的三维可视化;(3)找到曲线上切线斜率为  $k_p$  时的切点,方便计算弧垂值。

#### 2) 弧垂计算

弧垂计算在实际架线工程中具有重要的意义,图6需要计算弧垂  $f$ ,利用整体最小二乘法拟合得到非线性多项式方程后,求出两端点连线直线的斜率  $k_p$ ,求出拟合曲线斜率为  $k_p$  时点的横纵坐标,并标记点为  $d(x_0, y_0)$ 。特别指出的是,悬挂点  $a$  与  $b$  对弧垂计算的准确度有很大的影响,因此悬挂点需精确测量,在图示坐标系构造直线方程,计算  $c$  的坐标,记为  $c(x', y')$ ,弧垂值计算公式为:

$$f = |y' - y_0| \quad (12)$$

在上述基础上,架空输电线弧垂测量的流程如图7所示。

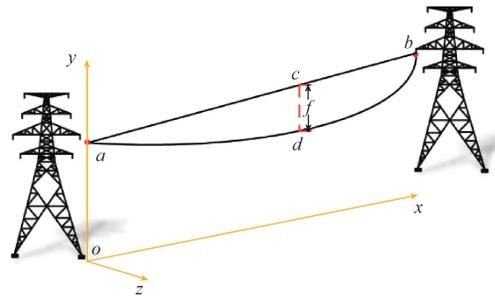


图6 弧垂计算示意图

Fig. 6 Schematic diagram of sag calculation

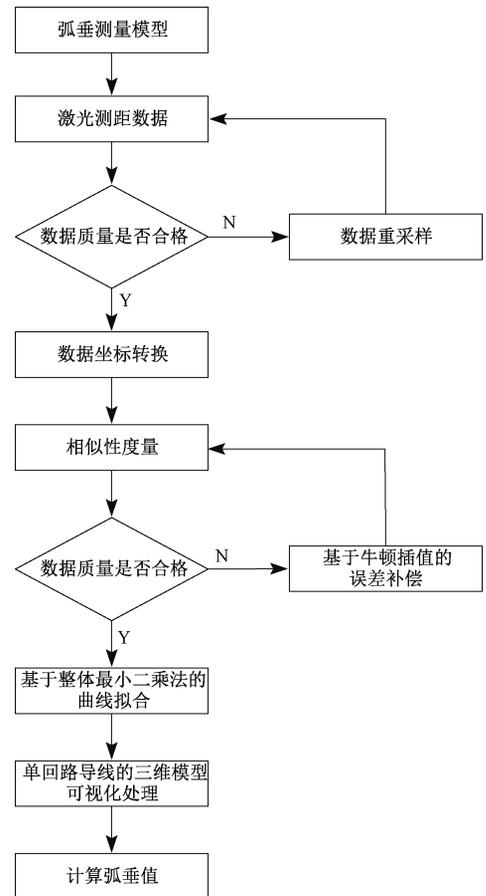


图7 输电线路弧垂测量流程

Fig. 7 Flow chart of transmission line sag measurement

范》的相关要求<sup>[23]</sup>,紧线弧垂在挂线后应随即在该观测档检查,其允许偏差应符合表1所示。

表1 弧垂允许偏差  
Table 1 Sag tolerance

电压等级	紧线弧垂在挂线后	跨越通航河流的大跨越档弧垂
110 kV	+5%, -2.5%	±1%, 正偏差不应
220 kV 及以上	±2.5%	超过 1 m

## 3 实验结果及分析

### 3.1 输电线路弧垂测量标准

按照《110 kV~750 kV 架空输电线路施工及验收规

### 3.2 试验平台与条件

基于上述理论,本文研发了架空输电线路导线弧垂智能测量仪,并以上海某 220 kV 输电线路为对象,选择两组观测档,分别是 206、239.3 m 进行测量试验,验证所提方法的可行性与有效性。该智能测量仪中采用高精度远距离激光测距仪、高精度光栅(测距精度可达 $\pm 2$  cm,角度测量精度可达 $3''$ )。同时,采用全站仪(测距精度可达 $\pm 1$  mm,角度测量精度可达 $3''$ ),用传统方法测量相同档段导线弧垂数据进行试验数据对比。具体试验条件:选择环境温度 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,现场风速 $0.5\sim 1\text{ m/s}$ 的晴天展开多次测量,每次测量数据量为 $40\sim 50$ 点。

### 3.3 试验方法与步骤

按照 2.1、2.2 节介绍的方法,进行弧垂智能测量仪现场布置,测量时从悬挂点一端出发,测量仪自动向另一端依次进行激光测距、读取激光和光栅的示数,并通过坐标平移计算得到相应点的坐标信息。针对数据缺失的情况,首选重采样。在所有样本数据都采集完成的情况下,对样本数据进行相似性度量,针对不合格的数据,采用牛顿插值法进行数据的补偿,最将得到的一组优化后的数据集进行输电线路拟合和弧垂计算。

### 3.4 试验结果分析

#### 1) 导线重构分析

下面分别表示的是两组数据补偿前与补偿后的输电线路拟合示意图,补偿前的原始数据存在数据缺失的问题,当重采样不能解决缺失问题时,本文采用的数据补偿有很好的数据优化和数据增强的作用。

利用优化的数据进行曲线拟合,可以很大程度上体现测量导线的三维形貌,为计算弧垂提高精度。

本文曲线拟合采用的是整体最小二乘法进行曲线拟合,而针对数据缺失的数据集采用分段曲线拟合,整体拟合会加大曲线拟合误差,影响弧垂计算结果如图 8~11 所示。

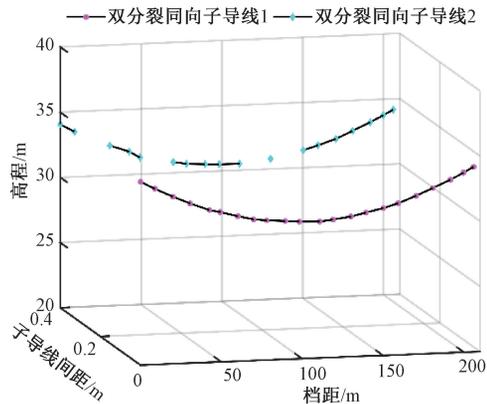


图 8 优化前双分裂导线 1、2 拟合示意图

Fig. 8 Schematic diagram of double-split wire 1 and 2 fitting before optimization

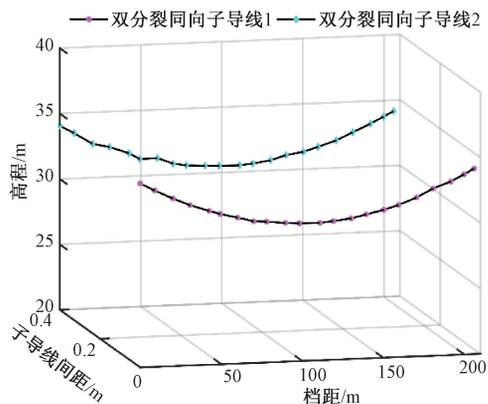


图 9 优化后双分裂导线 1、2 拟合示意图

Fig. 9 Schematic diagram of double-split wire 1 and 2 fitting after optimization

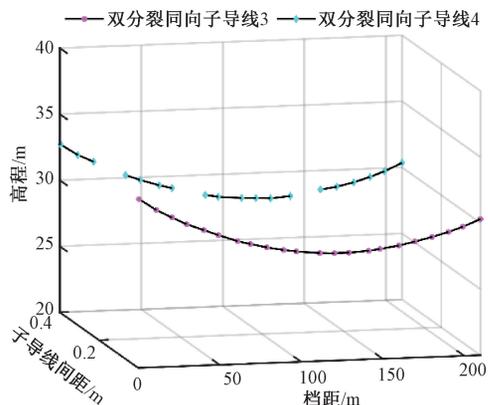


图 10 优化前双分裂导线 3、4 拟合示意图

Fig. 10 Schematic diagram of double-split wire 3 and 4 fitting before optimization

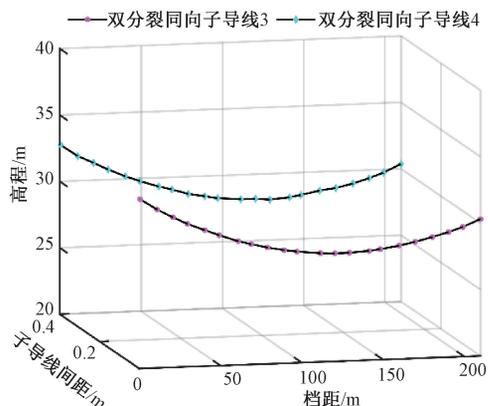


图 11 优化后双分裂导线 3、4 拟合示意图

Fig. 11 Schematic diagram of double split wire 3 and 4 fitting after optimization

图 9 是图 8 数据优化后的拟合示意图,图 11 是图 10

数据优化后的拟合示意图,通过数据优化,可以更好的体现导线三维形貌,解决导线拟合时断点问题,效果显著,并且本文采用相关系数  $R^2$  评价拟合优度。

相关系数  $R^2$  是拟合优度的关键评价指标,越接近 1 拟合效果越好,如表 2 所示,优化后拟合效果较优化前显著提高,优化算法较好解决了关键数据集数据存在缺失的问题,提高测量效率,并且,针对多分裂导线的测量方法较单根导线测量具有较好的鲁棒性和参考意义。可以证明基于激光测距和光栅测角技术的弧垂测量模型的合理性。

表 2 优化前后相关系数  $R^2$

Table 2 Correlation coefficient  $R^2$  before and after optimization

目标导线	优化前 $R^2$	优化后 $R^2$
导线 1	0.923 6	0.953 6
导线 2	0.995 4	0.998 5
导线 3	0.936 5	0.996 1
导线 4	0.998 6	0.999 7

## 2) 准确性分析

在输电线路导线拟合完成的基础上,计算基于激光测距与光栅测角技术相配合的数据优化前与优化后的弧垂值,与现有人工测量的弧垂值作比较。

如表 3 所示,数据集在优化后相对优化前误差有较为明显的减少,且优化后的弧垂误差率最大为 1.47%。试验结果表明基于激光测距与光栅测角技术相融合的弧垂测量模型构建合理,所提出的相似性度量和牛顿插值法相结合的方法可以提高弧垂计算的精度,满足弧垂测量工程应用标准要求。

表 3 优化前后弧垂值与标准弧垂对比

Table 3 Comparison of sag value before and after optimization with standard sag

目标导线	标准弧垂	优化前弧	优化前误	优化后弧	优化后误
	值/m	垂值/m	差率/%	垂值/m	差率/%
导线 1	3.549	3.619	1.97	3.601	1.47
导线 2	3.553	3.623	1.97	3.596	1.21
导线 3	4.234	4.328	2.22	4.294	1.42
导线 4	4.262	4.349	2.04	4.312	1.17

## 3) 普适性分析

目前,导线弧垂人工测量使用的全站仪已得到广泛应用,但其测量原理使得对仪器布置位置要求较高,特别是在山区、水网地带视野受限时测量作业非常不便。而且,测量过程自动化程度低,对测量人员的技术要求较高。相对于全站仪,基于本文所提方法研发的弧垂智能

测量仪只需有一段导线在视野范围内即可,对仪器位置布置要求低。且相比较点云提取电力线方法,本文测量方法所需数据量小,作业快速。能自动控制测距、测角、精确计算弧垂值,提高了测量作业效率和安全性。

## 4 结 论

针对目前架空输电线路导、地线弧垂测量方法在准确性、便捷性等方面存在的不足,本文提出了一种利用激光测距与光栅测角技术相结合进行架空输电线路弧垂测量的建模方法。同时针对单根导线测量鲁棒性不足的问题,提出了一种基于相似性度量与牛顿插值法相融合的多分裂导线弧垂测量数据质量评估优化算法,实现对数据集的补偿,只需通过少量测量数据即可拟合出导线模型并计算出弧垂值。以 220 kV 双分裂导线为测量对象,进行试验验证,并与现有测量方法弧垂测量值作比较,本文算法计算的弧垂误差率最大为 1.47%,结果证明了该方法的准确性和便捷性,能够满足工程现场作业标准要求。后续将对更高电压等级的多分裂导线开展试验验证工作,改进完善后进行推广应用,为架空输电线路建设、运检工作中弧垂测量作业提供数字化、智能化技术支撑。

## 参考文献

- [1] MATIKAINEN L, LEHTOMÄKI M, AHOKAS E, et al. Remote sensing methods for power line corridor surveys[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 119: 1031.
- [2] TURNER R, PANCIERA R, TANASE M A, et al. Estimation of soil surface roughness of agricultural soils using airborne LiDAR [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 107-117.
- [3] NIEMEYER J, ROTTENSTEINER F, SOERGEL U. Contextual classification of lidar data and building object detection in urban areas [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 87: 152-165.
- [4] JWA Y, SOHN G. A piecewise catenary curve model growing for 3D power line reconstruction [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2012, 78(12): 1227-1240.
- [5] ZHU L, HYYPPÄ J. Fully-automated power line extraction from airborne laser scanning point clouds in forest areas[J]. Remote Sensing, 2014, 6(11): 11267-11282.
- [6] GUO B, LI Q, HUANG X, et al. An improved method

- for power-line reconstruction from point cloud data[J]. Remote Sensing, 2016, 8(1): 36.
- [ 7 ] MCLAUGHLIN R A. Extracting transmission lines from airborne LIDAR data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(2): 222-226.
- [ 8 ] GUAN H, YU Y, LI J, et al. Extraction of power-transmission lines from vehicle-borne lidar data [ J ]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(1): 229-247.
- [ 9 ] ZHANG S C, LIU J Z, NIU Z, et al. Power line simulation for safety distance detection using point clouds[J]. IEEE Access, 2020, 8: 165409-165418.
- [10] 吴培鹏, 蔡文郁, 唐国栋, 等. 激光测距动态多阈值误差修正技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 170-177.
- WU P P, CAI W Y, TANG G D, et al. Laser range measuring system based on dynamic multi-threshold error correction method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 170-177.
- [11] 曲兴华, 戴建芳, 张福民. 基于激光测距的大尺寸测量应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(3): 481-485.
- QU X H, DAI J F, ZHANG F M. Application study on laser ranging in large-scale measurement [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(3): 481-485.
- [12] EHLERT D, HORN H J, ADAMEK R. Measuring crop biomass density by laser triangulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 61(2): 117-125.
- [13] ZHANG X, YANG Y, LIU Z, et al. An improved sensor framework of mono-cam based laser rangefinder[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2013, 201: 114-126.
- [14] 孙墨祺, 刘星, 王明辉. 云雾环境下脉冲激光目标回波信号分离算法[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(11): 11-17.
- SUN M Q, LIU X, WANG M H. Pulse laser target echo signal separation algorithm in cloud environment [ J ]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(11): 11-17.
- [15] GOLINELLI E, PERINI U, OGLIARI G. A new IR laser scanning system for power lines sag measurements [ C ]. Proceedings of 18th Italian National Conference on Photonic Technologies, Italy: Rome, 2016: 59.
- [16] 黄新波, 张晓霞, 李立涅, 等. 采用图像处理技术的输电线路导线弧垂测量[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1961-1966.
- HUANG X B, ZHANG X X, LI L CH, et al. Measurement of transmission lines conductor sag using image processing[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 1961-1966.
- [17] 全卫国, 李宝树, 苑津莎, 等. 基于航拍序列图像的输电线路弧垂测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 115-120.
- TONG W G, LI B SH, YUAN J SH, et al. Method of transmission line sag measurement based on aerial image sequence[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 115-120.
- [18] 胡建林, 刘杰, 蒋兴良, 等. 基于弧垂测量的综合荷载下导线等值覆冰厚度监测方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 584-593.
- HU J L, LIU J, JIANG X L, et al. Monitoring method for equivalent icing thickness of conductor under complex load based on sag measurement [ J ]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 584-593.
- [19] MAHAJAN S M, SINGAREDDY U M. A real-time conductor sag measurement system using a differential GPS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 475-480.
- [20] KHAWAJA A H, HUANG Q, LI J, et al. Estimation of current and sag in overhead power transmission lines with optimized magnetic field sensor array placement [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(5): 1-10.
- [21] MUKHERJEE M, OLSEN R G, LI Z. Noncontact monitoring of overhead transmission lines using space potential phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(10): 7494-7504.
- [22] 刘一飞, 张宁, 赵鹤达, 等. 基于相似性度量的磁异信号匹配检测算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9): 103-110.
- LIU Y F, ZHANG N, ZHAO H D, et al. Matching detection algorithm for magnetic anomaly signal based on similarity measure [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(9): 103-110.
- [23] 中国电力企业联合会. 110 kV~750 kV 架空输电线路施工及验收规范: GB/T 50233—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- China Electricity Council. Code for construction and acceptance of 110 kV ~ 750 kV overhead transmission line: GB/T 50233—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.

## 作者简介



周孝法, 2009年于上海交通大学获得博士学位, 现为国网上海市电力公司专职、实验室主任, 主要研究方向为电网建设技术管理。

E-mail: jackiezhou\_no.1@163.com

**Zhou Xiaofa** received his Ph. D. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2009.

Now he is a professional engineer and laboratory director at State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company. His main research interest includes the technical management of power grid construction.



方宇(通信作者), 2006年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为上海工程技术大学教授, 主要研究方向为机器视觉与图像检测、智能装备研发。

E-mail: fangyu\_hit@126.com

**Fang Yu** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2006. Now he is a professor at Shanghai University of Engineering Technology. His main research interests include machine vision, image detection, and intelligent equipment research and development.