

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)04-0101-04

# 基于双目立体视觉的输电走廊紧张地区弧垂测量方法

谢春

(贵州电网有限责任公司智能作业中心, 贵州 贵阳 556000)

**摘要:**在输电走廊紧张地区,传统弧垂测量方法可能因环境复杂、测量视角受限等因素,导致测量结果与实际值偏差较大,拟合优度欠佳。为此,提出基于双目立体视觉的输电走廊紧张地区弧垂测量方法。运用双目立体视觉测量系统采集输电线路图像,利用该系统丰富的空间信息获取能力。结合图像视觉分布域构建图像成像重构检测函数,实现线路弧垂视景的重构,清晰呈现输电线路的空间形态。提取架空线路图像的特征点与辅助点,以此建立弧垂数学模型,通过模型确定线路特征分布权值并拟合悬链线。依据输电线路空间曲线方程,计算线路观测点云的权重,结合弧垂点的位置坐标,精确求取线路弧垂。实验结果表明,基于双目立体视觉的测量方法得到的弧垂测量值与实测值间的拟合优度更高,测量效果优于传统方法,能有效提高弧垂测量的准确性和可靠性,为输电走廊紧张地区的弧垂监测提供了有力支持。

**关键词:**双目立体视觉技术;输电走廊;紧张地区;弧垂测量;弧垂模型

中图分类号: TN751

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)04-0101-04

## Sag measurement method for tension areas in transmission corridors based on binocular stereo vision

XIE Chun

(Intelligent Operation Center Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 556000, Guizhou, China)

**Abstract:** In areas with tight transmission corridors, traditional sag measurement methods may have significant deviations from actual values and poor fitting due to complex environments and limited measurement perspectives. Therefore, this article proposes a method for measuring sag in tense areas of power transmission corridors based on binocular stereo vision. Using a binocular stereo vision measurement system to capture images of transmission lines and utilizing the system's rich spatial information acquisition capability. An image imaging reconstruction detection function is constructed based on the visual distribution domain of the image, to achieve the reconstruction of the sag scene of the transmission line and clearly present the spatial form of the transmission line. Feature points and auxiliary points are extracted from overhead line images, to establish a mathematical model for sag, determine the distribution weights of line features through the model, and fit the catenary. Based on the spatial curve equation of the transmission line. It calculates the weight of the observation point cloud of the line, and combine the position coordinates of the sag points to accurately calculate the sag of the line. The experimental results show that the measurement method based on binocular stereo vision has a higher degree of fitting between the measured sag values and the actual measured values, and the measurement effect is better than traditional methods. It can effectively improve the accuracy and reliability of sag measurement, providing strong support for sag monitoring in areas with tight transmission corridors.

**Keywords:** binocular stereo vision technology; transmission corridors; areas of tension; sag measurement; sag model

在输电走廊狭窄的地区,弧垂的测量和监测对整个电力系统的稳定运行至关重要。传统的弧垂测量方法往往依赖于人工操作,不仅效率低,而且存在较高的安全风险<sup>[1]</sup>。在国外,弧垂测量的研究已经发展到了一个相对成熟阶段,国外关于电弧垂测量方法主要是以 KEYS、ERTS 等为代表,而国内由于起步较晚,在这方面的研究也相对缓慢,主要是以 GRAS、BPO 等为代表的自动化控制技术。因此,研究一种高效、准确的弧垂测量方法具有重要的现实意义和应用价值。相关方法一直是研究的重点。

文献[2]在输电线路路上设置测量基线,并在待测导线

的中间选择一个测量点,利用测量设备来读取导线与水平线之间的垂直距离,结合弧垂观测表计算弧垂值。该方法具有强实时性的特点,可以降低手动操作的风险和误差。但需要安装测量设备,可能会受到风力、温度等环境因素的影响,导致测量误差。文献[3]依据导线的水平跨度和长度,以及电缆两端的的地面高差,采用差值算法计算弧垂。该方法综合考虑了多种因素,可以更全面地反映导线弧垂的实际情况。然而,计算结果的准确性受到线材、环境条件等多种因素的影响。文献[4]通过激光测距和光栅角度测量技术获得架空输电线路导线弧垂的测量数据。然

收稿日期:2024-11-09;录用日期:2024-12-08

基金项目:贵州省电网科技项目(GZDW-FW-0145-22-01)

作者简介:谢春(1994—),男,工程师,研究方向:智能输电。

引用本文:谢春. 基于双目立体视觉的输电走廊紧张地区弧垂测量方法[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(4):101-104. (XIE Chun. Sag measurement method fortension areas in transmission corridors based on binocular stereo vision[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(4):101-104.)

后,使用牛顿插值方法对这些数据进行插值,并通过优化算法求取导线弧垂。该方法可以充分利用现有的测量数据,减少对数据量的依赖,提高测量的便利性。但这种方法在实际应用中可能需要进一步考虑不同导线类型、环境因素等对测量结果的影响,以确保测量的准确性和可靠性。文献[5]根据导线结构特点,建立有限元模型。然后,对不同运行条件下的输电线路进行了有限元仿真分析,揭示了输电线路的径向温度分布规律。在此基础上,结合导线应力、径向热膨胀和蠕变机理求取弧垂性。该方法考虑到导线的径向温度和蠕变对弧垂的影响,能更准确地反映不同运行条件下导线的弧垂情况。但这种方法主要关注导体本身的物理特性,很少考虑风速、风向等微观气象数据等外部因素,这可能会影响弧垂计算的全面性。

针对以上分析,本文引入双目立体视觉技术对输电走廊紧张地区弧垂测量方法展开分析。双目立体视觉技术作为一种新兴的非接触测量方法,具有精度高、效率高、实时性强等优点,在三维重建、目标定位等领域得到了广泛应用。本文重点研究了基于双目立体视觉的输电走廊张拉区弧垂测量方法,旨在探索一种适用于输电走廊张拉区的弧垂测量新技术。

## 1 弧垂测量方法设计

### 1.1 线路弧垂视景重构

双目立体视觉技术模拟了人眼观察物体的方式,使用两个或多个相机从不同角度捕捉同一场景,并获得包含弧垂信息的多个图像。通过对多幅图像进行匹配和视景重构,可以获得精确的弧垂几何形状<sup>[6]</sup>。这种可视化重建不仅有助于直观地显示线路弧垂的实际情况,而且为后续弧垂测量和分析提供了基础数据。

本文采用室内三维校验场标定固定极限的双目立体测量系统采集电力走廊紧张地区输电线路的影像,根据相似三角形可以得到输电线路物体高度与影像中物体高度的关系<sup>[7]</sup>,表达式为

$$h = f_j \frac{H_0}{Z_0} \quad (1)$$

式中, $f_j$ 表示相机焦距长短; $H_0$ 表示相机分辨率大小; $Z_0$ 表示相机到输电线路的距离。

结合双目视觉分析,进行输电线路弧垂视觉成像和边缘连通线进行特征分解,得到架空线图像的匹配度,计算公式为

$$V_s = \int e_s(t) + g_s(t) dt - \frac{h}{s_0} \quad (2)$$

式中, $V_s$ 表示匹配度; $t$ 表示采样时间; $e_s(t)$ 表示特征向量; $g_s(t)$ 表示计算矩阵; $s_0$ 表示转换函数。

对双目立体视觉成像的自适应参数进行设置,由此得到架空线的偏向图像中心点<sup>[8]</sup>,即

$$a(x, y) = \frac{V_s \times \alpha_k}{\sqrt{\frac{p_0}{2\theta}}} \quad (3)$$

式中, $\alpha_k$ 表示相机径向畸变系数; $p_0$ 表示图像视差; $\theta$ 表示顺序一致性约束,用于规范相邻像素之间的视差。

假设输电线路架空线弧垂的视觉图像 $I$ 在 $t$ 时刻的特征分布最优解为 $r_t$ ,则图像的视觉分布域可表示为

$$X_n = a(x, y) \times \frac{r_t \times n_0}{2 \times y_0} \quad (4)$$

式中, $n_0$ 表示边缘点个数; $y_0$ 表示调整参数。

利用核函数对架空线图像的的边缘尺度进行自适应分解,得到线路视觉图像重构检测函数为

$$Y = \frac{l_0 \sum \sqrt{X_n \parallel p_u \parallel}}{z_s} \quad (5)$$

式中, $p_u$ 表示图像空间离散点; $z_s$ 表示运算误差; $l_0$ 表示线路长度。

采用双目立体视觉测量系统采集输电线路图像,并对图像进行匹配,结合图像视觉分布域构建图像成像重构检测函数,完成线路弧垂视景的重构,为接下来悬链线拟合奠定基础。

### 1.2 悬链线拟合

架空输电线路可视为无刚性特征的柔性锁链,电力线上的载荷沿轴线呈均匀分布<sup>[9]</sup>。假设导线的最低点为基准坐标系的原点,则电力线水平与垂直方向的平衡方程可表示为

$$\begin{cases} X_1 = \frac{Y(1 - t_p)}{A_0} \\ X_2 = \frac{Y \times \varepsilon_0}{k_j} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $Y$ 表示线路视觉图像重构检测函数; $t_p$ 表示能量函数; $A_0$ 表示空间像素的位置; $\varepsilon_0$ 表示数据项; $k_j$ 表示源图像梯度。

在可视化场景下,提取架空线路图像的特征点与辅助点<sup>[10]</sup>,并建立弧垂数学模型,如图1所示。

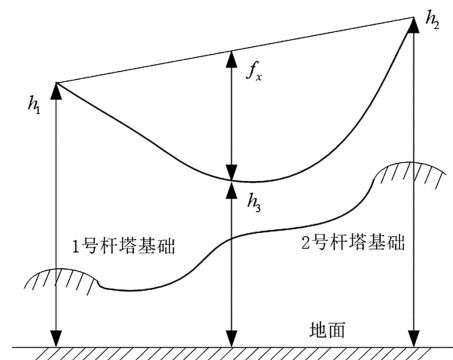


图1 电力线弧垂数学模型

Fig. 1 Mathematical model of power line sag

图中, $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ 均表示线路特征点的高程数据, $f_x$ 表示中点弧垂。则弧垂模型的数学表达式为

$$Q_h = \frac{(h_1 + h_2 + h_3) \sqrt{X_1^2 + X_2^2}}{u_c} \quad (7)$$

式中, $u_c$ 表示水平面到特征点的海拔高度,其计算公式为

$$u_c = \frac{\sum \frac{\zeta_i}{H_a W_p}}{\sqrt{G(x)}} \quad (8)$$

式中,  $\zeta_i$  表示比例系数;  $H_a$  表示截距;  $W_p$  表示尺度因子;  $G(x)$  表示粗糙度函数。

由此计算线路三维动态特征的分布权值<sup>[11]</sup>, 即

$$\tilde{\omega}_s = \frac{Q_h \times \varphi_0 \times k_b}{h_c \times g_0} \quad (9)$$

式中,  $\varphi_0$  表示图像亮度通道信息;  $h_c$  表示时间常数;  $g_0$  表示特征融合的归一化系数;  $k_b$  表示图像组对个数。

依据线路方位角和弧垂点的切线斜率拟合悬链线, 计算公式为

$$D_n = \frac{\tilde{\omega}_s a_u}{\sqrt{\frac{w_c}{t_s}}} \quad (10)$$

式中,  $a_u$  表示线路方位角;  $w_c$  表示切线斜率;  $t_s$  表示尺度变换因子。

基于线路弧垂视景, 构造线路的水平与垂直平衡方程, 以分析其受力情况, 结合弧垂数学模型求取线路特征分布权值, 进而拟合悬链线, 为后续实现电力线弧垂的测量提供便利条件。

### 1.3 线路弧垂计算

在紧张山区高压线路中, 一个档距内通常包含 5~7 个隔离棒, 依据悬链线拟合模型和前后杆塔的悬挂点距离, 构造输电线路的空间曲线方程<sup>[12]</sup>, 即

$$f^i = D_n \sum \frac{\pi \times b_0}{h_v} \quad (11)$$

式中,  $D_n$  表示悬链线拟合模型;  $\pi$  表示输电线上某点的纵坐标;  $b_0$  表示悬挂点间距;  $h_v$  表示模拟参数。

假设待测量输电线上共有  $n'$  个特征点, 则特征点的角点响应函数<sup>[13]</sup>可表示为

$$R(x) = \sum_{i=1}^{n'} \frac{f^i \times \rho_c}{V_0} \quad (12)$$

式中,  $\rho_c$  表示导线上某点距离参考点的水平距离;  $V_0$  表示导线比载。

将线路观测点云压缩到超平面, 以完成数据的解算, 从而获取各个观测值的权重<sup>[14]</sup>, 即

$$\tilde{\omega}_j = \frac{\|R(x) \times d_n\|^2 \times e_p}{q_c} \quad (13)$$

式中,  $d_n$  表示档距;  $q_c$  表示悬挂点高差;  $e_p$  表示叠加标度函数。

由此得到弧垂点的二维坐标为

$$\begin{cases} a = \tilde{\omega}_j \times u_\phi \\ b = \frac{\tilde{\omega}_j}{m_r} \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $u_\phi$  表示随机变量;  $m_r$  表示光滑系数;  $a, b$  分别表示弧垂点的横坐标与纵坐标。

进而可采用下式计算线路弧垂, 计算公式为

$$\vartheta = \frac{k_c \sqrt{a^2 + b^2}}{c_p \times \zeta_0} \quad (15)$$

式中,  $k_c$  表示特征采样点;  $c_p$  表示尺度函数;  $\zeta_0$  表示分配的可靠性函数。

依据输电线路空间曲线方程, 计算线路观测点云的权重, 结合弧垂点的位置坐标, 求取线路弧垂<sup>[15]</sup>。至此, 完成基于双目立体视觉的输电走廊紧张地区弧垂测量方法的设计。

## 2 实例论证分析

为验证本文设计的基于双目立体视觉的输电走廊紧张地区弧垂测量方法在实际应用中的效果, 将本文方法应用在某架空线路中, 并对其电力线的弧垂进行测量, 根据实验结果分析该方法的测量效果。

### 2.1 研究背景

该地区该输电走廊共有 120 座塔架, 其中自立式铁塔 90 座, 主要分布在地形复杂、风荷载大的地区; 共有 30 座斜拉铁塔, 主要布置在平原和丘陵地区。自立式铁塔平均高度为 45 m, 最高可达 60 m; 斜拉铁塔的平均高度为 30 m, 最低的为 25 m。

根据地形和跨度的不同, 塔间距从 80 m 到 200 m 不等。在平坦地区, 塔楼之间的距离相对较大, 平均可达 150 m; 在山区或地形复杂的地区, 塔与塔之间的距离平均减少到 100 m。该输电走廊的跨度设计充分考虑了地形、气候条件和设计要求。平均跨度 120 m, 最大跨度达 180 m。

该输电走廊采用 220 kV 高压输电线路, 导线型号为 LGJ—400/35, 具有良好的导电性和机械强度。线路全长 100 km, 其中架空线路长度占 95%。

### 2.2 实验准备

依据该地区输电走廊的基本概况与电力线的相关数据, 采用 MV-VS220 双目立体视觉系统开放平台采集输电线路的基本数据, 该系统的基本性能参数如表 1 所示。

表 1 双目立体视觉系统的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of binocular stereo vision system

参数名称	参数设置
分辨率	1 920×1 080 像素
帧率	30 fps
镜头焦距	16 mm
视场角	水平:60°;垂直:45°
深度测量范围	0.1~10 m
深度测量精度	±1 mm
供电方式	DC12 V, 2 A
基线距	120 mm
最小视差	1 像素
最大视差	100 像素
畸变系数	0.1
采样频率	30 fps
标定精度	亚像素级

利用该系统采集的线路图像与点云数据完成对线路弧垂视景的重构, 本实验以 MV-VS220 双目立体视觉系统为实验平台, 包括两台摄像机、一个支架、一台计算机和相应的软件处理系统。根据实验环境和输电走廊的特点,

设置相机分辨率为3 264×244 8像素、帧速率15 fps、曝光时间1/100 s。

通过上述实验准备和数据描述,可以基于双目立体视觉技术测量输电走廊紧张区域的弧垂。为验证本文方法的有效性,进行对比实验。在实验中,采用常规方法作为对比组,本文方法为实验组,以便于更加清楚地展示本文提出方法的优势。

### 2.3 线路弧垂测量结果与分析

基于以上实验准备与相关参数的设置,将本文设计的方法应用于图2所示的输电线路弧垂测量中,选取目标线路10个档距内本文算法测量的弧垂与经纬仪实测的弧垂值进行比较,进而分析本文方法的测量项目。实验结果如表2所示。

表2 实验结果

Tab. 2 Experimental results m

档距编号	弧垂计算值	弧垂实测值
1	8.124	8.152
2	7.256	7.223
3	9.366	9.324
4	8.520	8.517
5	7.459	7.491
6	7.366	7.326
7	10.320	10.341
8	9.567	9.578
9	9.123	9.143
10	8.257	8.212

由表2中的实验数据可以看出,应用本文方法得到的输电线路弧垂计算值与实测值相比较,两者之间的测量误差较小,最大仅为±0.03 m,说明本文方法能够准确测量目标线路的弧垂,测量效果较好。接下来,对测量结果进行不确定度分析,计算所有误差的平均值和标准偏差,结果分别为-0.007 9 m和0.028 51 m,由此可知其测量结果较为准确。

### 2.4 对比实验与分析

在上述实验基础上,引入航拍序列图像方法(方法1)、相似性度量方法(方法2)作为本文方法的对比方法。分别采用3种方法对该输电走廊电力线弧垂进行测量。采用拟合优度 $R^2$ 作为评估各种方法测量效果的指标。 $R^2$ 越接近1,说明方法计算的结果与实际结果越接近,测量性能更佳。对比结果如图2所示。

分析图2可知,利用本文方法对目标电力线的弧垂进行测量,与其他两种方法相比,本文方法输出的拟合优度更加接近于1.0,说明本文方法的弧垂计算值与实际值的拟合程度更高,从而证明了本文方法的实际有效性。

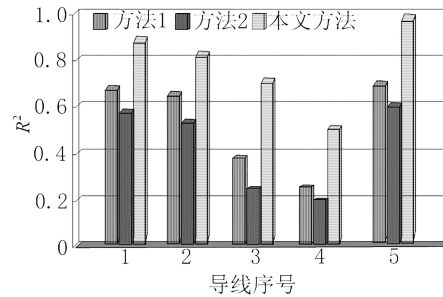


图2 对比结果

Fig. 2 Comparison results

## 3 结论

本文通过深入的理论探索和实验验证,实现了输电走廊紧张地区弧垂的精确测量。该方法不仅具有较高的自动化和实时性,而且显著提高了测量的准确性,为输电走廊的安全运行提供了有力保障。本研究成果可为输电走廊狭窄地区的弧垂测量提供一种新的技术手段,同时促进了双目立体视觉技术在电力行业的深入应用,也为相关领域的研究提供了有益的参考和启示。

## 参考文献

- [1] 张晓东, 金长双. 基于 ArcGIS 技术的输电线路走廊三维可视化系统[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(3): 180-184.
- [2] MAHIN A U, ISLAM S N, AHMED F, et al. Measurement and monitoring of overhead transmission line sag in smart grid: a review[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 28(18): 159-162.
- [3] HITZEROTH H. Sag and tension calculation for ACSR overhead conductor[J]. 2022, 52(26): 333-335.
- [4] 周孝法, 张越港, 方宇, 等. 相似性度量与牛顿插值融合的架空输电线路弧垂测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7): 221-229.
- [5] 赵隆, 王如水, 代鹏飞, 等. 基于导线径向温度和蠕变的导线弧垂计算方法[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(4): 21-29.
- [6] 程羲. 基于 GPS 测绘技术的建筑物外立面轮廓测量方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(5): 70-74.
- [7] 周恩泽, 王磊, 王彤, 等. 植被火条件下考虑导线不均匀温升的弧垂计算[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 6074-6080.
- [8] 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.
- [9] 钱建国, 宋江, 周佳慧, 等. 无人机航拍的输电线路弧垂测量研究[J]. 测绘科学, 2023, 48(6): 189-197.
- [10] 李晓娟, 李建科, 刘力军, 等. 基于自发布里渊散射的电缆弧垂在线监测研究[J]. 光通信研究, 2023(5): 63-66, 78.
- [11] 刘晖, 向璋, 周恩泽, 等. 基于动态贝叶斯网络的输电走廊山火风险时空评估[J]. 南方电网技术, 2023, 17(11): 148-158.
- [12] 戴锋, 刘贞瑶, 陈轩, 等. 考虑输电线路档距及弧垂影响的故障精确定位[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 97-104.
- [13] 范佳欣, 郭权利. 基于容积卡尔曼滤波的输电线路弧垂预测[J]. 现代电子技术, 2023, 46(23): 173-177.
- [14] 杨小龙, 袁朝青, 孙辰军, 等. 架空输电线路弧垂及覆冰的在线监测[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2023, 28(2): 99-107.
- [15] 周孝法, 张越港, 方宇, 等. 相似性度量与牛顿插值融合的架空输电线路弧垂测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7): 221-229.