

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)06-0058-07

一种多传感器融合的输电线路工程量核算方法

贺 臣, 刘 银, 许建远, 丁 鹏, 莫小梅

(广东电网有限责任公司茂名供电局, 广东 茂名 525000)

摘要:在分析输电线路工程量时,若依靠单一传感器获取施工数据,易存在很多测量死角,导致工程量核算结果相对误差较大。为此,提出以多传感器融合为基础的新的输电线路工程量核算方法。首先,利用双目摄像头、激光雷达、倾角传感器等多种传感单元采集输电线路工程数据,并利用一致性算法融合多传感器测量数值。根据多传感器数据融合结果构建点云地图,并结合因子图优化策略不断更新地图,生成全方面的输电线路工程环境地图。最后,通过特征提取、空三测量、多视角影像密集匹配等操作环节,构建工程实景三维可视化模型,再对工程量核算区域设置方格网,获取每个方格的工程量清单,汇总后得到最终的工程量核算结果。实验结果表明,该方法可以将工程量核算结果相对误差保持在5%以下,具有可行性。

关键词:多传感器融合; 输电线路; 工程量核算; 实景三维模型; 空三测量; 方格网

中图分类号: TP212; TP391

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)06-0058-07

A method of the engineering quantity calculation of transmission lines based on multi-sensor fusion

He Chen, Liu Yin, Xu Jianyuan, Ding Peng, Mo Xiaomei

(Maoming power Supply Buresu, Guangdong Power Grid Company Limited, Maoming 525000, Guangdong, China)

Abstract: When analyzing the quantity of transmission line engineering, relying on a single sensor to obtain construction data can easily lead to many measurement blind spots, resulting in relatively large errors in the calculation results of the engineering quantity. Therefore, a new method for calculating the engineering quantity of transmission lines based on multi-sensor fusion is proposed. Firstly, various sensing units such as binocular cameras, LiDAR, and tilt sensors are used to collect data on transmission line engineering, and consistency algorithms are used to fuse multi-sensor measurement values. It constructs a point cloud map based on multi-sensor data fusion results, and continuously updates the map by combining factor graph optimization strategies to generate a comprehensive map of the transmission line engineering environment. Finally, through feature extraction, aerial triangulation, and dense matching of multi view images, a three-dimensional visualization model of the engineering scene is constructed. Then, a grid is set up in the engineering quantity accounting area to obtain the engineering quantity list for each grid. After summarizing, the final engineering quantity accounting result is obtained. The experimental results show that this method can keep the relative error of the engineering quantity accounting results below 5%, which is feasible.

Keywords: multi-sensor fusion; transmission line; engineering quantity accounting; realistic 3D model; space measurement; square grid

随着电网建设力度不断加强,特高压输变电工程也迎来了建设高峰期^[1]。在特高压工程覆盖范围越来越大时,工程建设耗费资金也逐年增加^[2]。这种情况下,如何科学管控特高压工程的成本造价,尽量减少投资成本,成为社会资源优化配置过程中被关注的热门问题。输电线路工程量核算,是工程造价管控的基础,现有的方法应用到大规模特高压工程中,却无法准确核算输电线路工程量。因此,急需设计一种符合要求的工程量核算方法,辅助输电线路施工管理。

近年来,随着科技的不断进步,国内外在输电线路工程量核算领域也取得了一些研究成果。李鹏等^[3]将实景

三维技术应用于市政亮化工程量核算中,通过获取实景三维模型来分析工程量,但该方法在输电线路工程中可能会受到地形复杂等因素的影响,导致核算精度不够理想。张波等^[4]提出了基于隔离森林-MLP的输变电工程量智能评估方法,利用机器学习算法对工程量进行评估,然而该方法对数据的依赖性较强,且在处理大规模复杂工程数据时可能存在一定的局限性。乔雄辉^[5]基于混合神经网络模型对架空输变电工程量进行分析与评估,虽然能够对工程量进行一定程度的预测,但在实际应用中,对于不同地形、不同施工条件下的工程量核算精度还有待提高。

在国际上, Ye等^[6]开展了基于卷积神经网络的多传

收稿日期:2025-05-22; 录用日期:2025-08-05

基金项目:南网科技项目(030900KK52220008)

作者简介:贺 臣(1979—),男,硕士研究生,高级工程师,研究方向:高电压及绝缘技术、电气设备绝缘测试及监测技术。

引用本文:贺臣,刘银,许建远,等.一种多传感器融合的输电线路工程量核算方法[J].自动化技术与应用,2026,45(6):58-64.(He Chen, Liu Yin, Xu Jianyuan, et al. A method of the engineering quantity calculation of transmission lines[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(6): 58-64.)

传感器数据融合分析研究,为输电线路工程量核算提供了一种新的思路。该研究利用卷积神经网络对多传感器数据进行融合分析,能够有效处理复杂的传感器数据,提高数据的利用效率。然而,该研究主要集中在数据融合分析方面,对于工程量核算的具体应用和精度提升还不够深入,且在实际工程中的适用性和计算效率还需要进一步验证。

综上所述,现有输电线路工程量核算方法在复杂工程场景下存在核算精度不高、数据处理复杂、适用范围有限以及计算效率不足等问题,难以满足高精度、高效率 and 多样化工程需求。

鉴于此,本研究提出应用多传感器融合技术,设计一种新型输电线路工程量核算方法。该方法通过融合多种传感器数据,充分发挥多传感器的优势,克服单一传感器的局限性,提高输电线路工程量核算的准确性和可靠性。同时,本研究还将重点解决现有方法中存在的数据处理复杂、适用范围有限以及计算效率不足等问题,为输电线路工程的科学管理和成本控制提供有力支持。

1 输电线路工程量核算方法设计

1.1 多传感器量测信息融合方案

1.1.1 多传感器系统配置

应用双目摄像头、激光雷达、感应取电系统、倾角传感器等多种传感器^[7-9],关键参数如下所示。

1) 双目摄像头。型号为 TW100-SM1080S-V1.0,其焦距为 8 mm,能够提供高分辨率的图像数据,有效像素达到 1 920 × 1 080,视场角为 60°,帧率为 30 帧/s,可实现对输电线路及其周围环境的清晰成像,为后续的数据处理和分析提供可靠的图像基础。

2) 激光雷达。型号为 Velodyne HDL-64E,具有极高的分辨率,水平分辨率为 0.4°,垂直分辨率为 2.5°,测量范围可达 120 m,能够精确地获取输电线路及其周边地形的三维点云数据,为构建高精度的工程场景地图提供有力支持。其扫描频率为 10 Hz,可快速获取大量点云数据,确保数据的实时性和完整性。

3) 毫米波雷达。型号为 FR24S4H8-102-B1,工作频率为 24 GHz,探测距离为 100 m,角度分辨率为 1°,能够实时监测输电线路周围的动态物体和环境变化,为工程量核算提供重要的环境信息,增强系统的环境感知能力。

4) 倾角传感器。型号为 SCL3300-D01,测量范围为 ±30°,精度可达 0.1°,用于实时监测输电线路的倾斜角度,确保线路的安全运行,并为工程量核算提供准确的倾斜数据,以便进行精确的工程量计算^[10]。

1.1.2 多传感器数据融合流程

同时采集输电线路工程施工现场数据,并应用图 1 所示的量测融合方式,将多传感器采集的量测信息融合起来。

按照图 1 所示的量测融合模式处理多传感器信息,需要经过数据关联分析、数据对比分析、数据组合等多个环节,不同传感器在测量过程中受环境干扰因素影响,可能

出现数据误差和偏差,影响整体数据质量^[11]。而一致性算法以集成多个传感器获取的数据,消除数据误差和不一致性为主要目的,进行多传感器数据融合。主要通过对比分析不同传感器数据,明确各个传感器之间的差异性,抵消数据偏差。因此,本研究从异构传感器的数据关联性入手,建立基于一致性算法的信息融合策略。

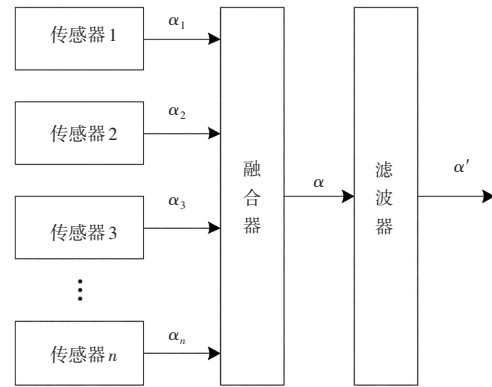


图 1 多传感器量测融合示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-sensor measurement fusion

对于任意一个传感器来说,可以将其对应的量测模型表示式为

$$P(\alpha_i) = \frac{1}{\sqrt{2}\delta_i} e^{-\frac{(\alpha - \bar{\alpha})^2}{2\delta_i^2}} \quad (1)$$

式中, α_i 表示第 i 个传感器的量测值, δ 表示量测精度系数, $\bar{\alpha}$ 表示平均量测值, e 表示指数函数。

针对任意的两个传感器,根据两者间的置信距离可以判断两者间的数据支持度^[12],具体计算公式为

$$\begin{cases} d_{ij} = 2 \left| \int_{\alpha_i}^{\alpha_j} P_i(\bar{\alpha} | \alpha_i) \right| \\ d_{ji} = 2 \left| \int_{\alpha_j}^{\alpha_i} P_j(\bar{\alpha} | \alpha_j) \right| \end{cases} \quad (2)$$

式中, d 表示数据支持度, j 表示另一个传感器编号。

结合此前多传感器量测场景中产生的测试数据,参考传感器定标结果,定义一个参数,以此来展示两个传感器量测数据之间的关联性,过程如下。

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & d_{ij} \leq \varepsilon_{ij} \\ 0, & d_{ij} > \varepsilon_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

式中, ε 表示给定参数。以式(3)计算结果为基础,定义传感器支持向量矩阵^[13-14],结果如下。

$$\mathbf{R} = [r_{ij}]_{n \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, \mathbf{R} 表示传感器支持度向量, n 表示传感器数量。

依托于传感器支持度向量值,可以确定多传感器量测数据的互相传输状态,保留所有状态较优的传感数据,再通过式(5)确定每个传感数据的权重值,即可完成多传感数据融合处理^[15-16]。

$$\alpha = \sum_{i=1}^n w_i \alpha_i \quad (5)$$

式中, w 表示权重值。

在多传感器数据融合过程中,为了充分发挥各传感器的优势,提高数据的准确性和可靠性,研究采用了以下数据融合流程^[17]。

1) 数据预处理:对各传感器采集的原始数据进行校准,如双目摄像头图像畸变校正、激光雷达点云噪声滤除等,以确保数据准确性和一致性。接着,通过时间戳对齐实现不同传感器数据的时间同步。最后,根据传感器安装位置和姿态信息,将各传感器数据统一到同一空间坐标系下,完成空间对齐^[18]。

2) 数据关联分析:从预处理后的数据中提取关键特征,如双目摄像头图像的边缘和角点、激光雷达点云的几何特征、倾角传感器的倾斜角度变化等。然后,采用基于特征相似度的匹配算法,如最近邻匹配,将不同传感器的特征信息进行匹配,建立数据间的内在联系。

3) 一致性算法融合:对比分析不同传感器的对应数据,基于支持向量机(SVM)构建数据关联模型,通过置信距离 D_{ij} 量化传感器数据一致性,即

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (6)$$

基于此,计算每个传感器数据的权重值,反映其在融合过程中的重要性。按权重对各传感器数据进行加权融合,消除误差和不一致性,提高融合数据的准确性和可靠性。

4) 数据融合结果优化:构建因子图模型,利用因子图优化策略调整传感器数据的相对位置和姿态关系,提高数据精度和一致性^[19]。根据优化结果,更新全局位姿地图,确保地图的准确性和完整性,为工程量核算提供精确的场景信息。

1.2 绘制工程场景地图

在多传感器信息融合完成后,得到输电线路工程对应的点云地图,为了更详细地描述工程建设环境^[20-22],提出基于多传感器融合的工程场景稠密地图绘制方案,以便准确核算工程量。实际操作过程中,运用因子图优化原理不断更新场景地图,再对多传感器采集数据进行同步处理和外参标定,提取各类传感数据的共有特征^[23],经过平移变换和旋转变换后,实现多传感器进行的进一步融合。

$$z \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda & T \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, (u_0, v_0) 表示相机坐标系的初始坐标, (x_L, y_L, z_L) 表示激光雷达采集的三维点阵云, L 代表 Laser, f 表示相机焦距, λ 表示旋转矩阵, T 表示平移矩阵。

上述计算过程中涉及的旋转矩阵和平移矩阵,需要根据传感器点的对应关系来确定,对于任意一个输电线路工程区域来说,获取其在不同坐标系下的数据点,然后求解旋转矩阵和平移矩阵,过程为

$$\min F(\lambda, T) = \frac{1}{m} \sum_{o=1}^m \|\lambda p_o - q_o + T\|_2^2 \quad (8)$$

式中, \min 表示最小值, F 表示求解函数, m 表示数据点数量, o 表示数据点编号, p, q 表示两个组数据点对应的两个数据点。

根据式(8)求解结果,可以使得不同传感器采集数据呈现在相同坐标系中,再统一迁移到图像坐标系,更新全局位姿地图,得到输电线路工程场景稠密地图。其中,图像所在坐标系如图2所示。

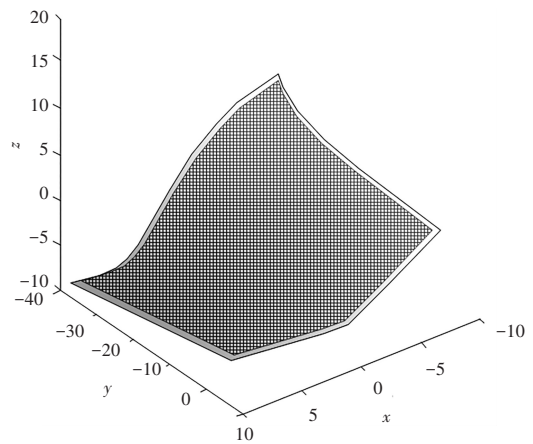


图2 图像所在坐标系

Fig. 2 Coordinate system of image

需要注意的是,当点云配准过程中出现点云为空、点云过小的情况,直接返回配准候选集条件,经过对比分析判断是否出现位置重访现象。明确没有出现位置重访情况后,可以将目标点云与原始点云合并^[24-25],生成新的点云地图。

1.3 构建工程实景三维可视化模型

为了构建可视化输电线路工程实景三维模型,需要针对采集的单一传感影像,展开空中三角测量^[26],对影像连接点进行相对定向、绝对定向、整体平差处理,如图3所示。

按照图3所示的空三测量流程,针对工程场景地图进行分析,提取影像特征信息。从工程场景地图入手,结合空三测量和光束法优化高精度外方位元素,应用影像不固定匹配策略,结合改进前后影像外方点位元素特征属性与影像点位信息,匹配不同视角的工程场景地图影像,并通过观测控制权阵重叠图像控制点位,在消除畸变后即可构建输电线路工程三维模型,并获取模型纹理特征,输电线路工程实景三维可视化模型可表示^[27-28]为

$$\begin{cases} S_1 = C\lambda + K_1 V_1 + K_2 V_2 - E \\ S_2 = I\lambda - \mathcal{D} \\ S_3 = IV_1 - \mathcal{D} \end{cases} \quad (9)$$

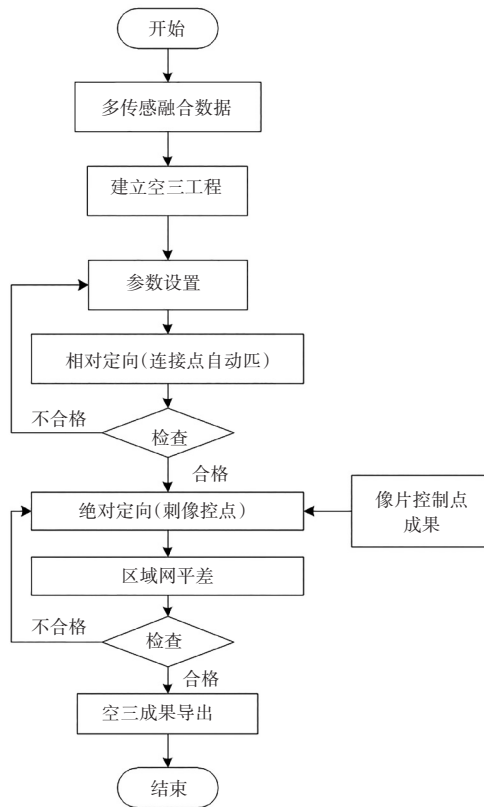


图 3 空三测量流程图

Fig. 3 Flow chart of air three measurement

式中, S_1 表示输电线路工程场景地图像点观测方程权阵, S_2 表示外方位元素虚拟观测方程权阵, S_3 表示控制条件方程权阵, C 表示系数矩阵, X 表示改正的影像外方位元素数量, K_1 表示控制点改正数的系数矩阵, V_1 与 V_2 分别表示改正后的控制点与连接点的数量, E 表示像点观测误差, I 表示单位矩阵, ϑ 表示虚拟观测向量。

利用式(9)完成工程场景地图处理,构建输电线路工程实景三维可视化模型。

1.4 输电线路工程量核算

为了便于输电线路工程量核算,在工程实景三维可视化模型上布置一个方格网,将整个工程施工区域划分为多个方格,分别计算每个方格内输电线路工程量,将多个方格的工程量核算结果累加起来,得到区域总工程量。对于方格网内任意一个网格来说,获取网格内各目标点的高程和设计高程,得出网格内目标点高程平均值,过程为

$$H_{ab} = \frac{1}{\psi} \sum_{b=1}^{\psi} (H_b - H')$$

(10)

式中, a, b 分别表示方格网的行数和列数, H 表示实际高程, H' 表示设计高程, ψ 表示方格内存在的点数量。

在此基础上,本研究从单个方格入手,以输电线路工程量核算项目中的挖填方量为例,根据地形高程数据,完成施工区域地形的数字化模拟,基于此推算出原始地形表面体积和工程建设后地形表面体积,并将这两个计算结果看作两个 DEM(数字高程模型),通过计算二者之间的高程差,即可计算出当前方格内的挖填方量。计算时,可以

将两个 DEM 叠加起来,形成一个新的 DEM,其分量可以表示为

$$\xi'(X, Y) = \xi_1(X, Y) - \xi_2(X, Y)$$

(11)

式中, (X, Y) 表示方格坐标, ξ' 表示输电线路工程施工过程中挖填高程, ξ_1 表示施工前方格内地形高程, ξ_2 表示施工后方格内地形高程。

当式(11)计算结果大于 0 即可判断出当前网格属于挖方工程,反之则属于填方工程。再结合方格面积,即可求出最终的挖填方量。

$$A(X, Y) = \xi'(X, Y) \times B$$

(12)

式中, A 表示挖填方工程量, B 表示方格面积。

通过上述计算可以确定单个网格的挖填方工程量,再将各方格工程量加起来,得到最终的挖填方工程量核算结果。考虑输电线路施工涉及的工程步骤和安装设备较多,在工程量核算过程中,先列出一张工程量清单,针对清单上的每一项工程,分别按照相似的计算步骤进行核算,再将各方格工程量加起来,得到最终的工程量核算结果。

2 实验与分析

2.1 实验环境

为了验证基于多传感器融合的新型输电线路工程量核算方法的应用效果,选择某条已经运行的特高压工程线路作为研究目标,该输电线路属于 800 kV 的直流输电工程,工程起始点在溪洛渡,施工终点在浙江金华。考虑到风速、覆冰等气象条件、施工地形都会影响输电线路工程量,在实验开始之前从国家电网福建省经济技术研究院,获取特高压线路工程相关数据。

针对研究资料进行分析可知,该线路中一共存在 70 余条子线路,所有线路的施工区域地形比例,如图 4 所示。

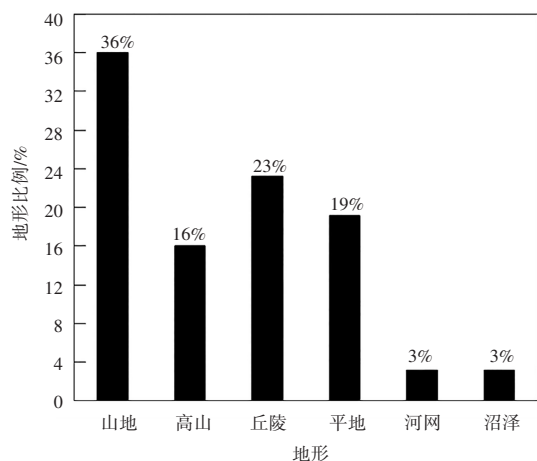


图 4 输电线路工程地形比例图

Fig. 4 Topographic scale of transmission line project

从图 4 可以看出,输电线路工程施工区域共包括 6 种地形,除了平地外,其余地形上进行输电线路施工,需要的工程量都更大。

应用本文方法进行工程量核算时,需要先针对目标区域,布设双目摄像头(型号为 TW100-SM1080S-V1.0)、毫

米波雷达(型号为FR24S4H8-102-B1)、激光雷达(型号为Velodyne HDL-64E)、倾角传感器(型号为SCL3300-D01)等传感设备。在布设传感设备时,需要确保多个传感器能够同时覆盖目标输电线路工程施工区域。正常情况下,符合要求的多传感器覆盖范围如图5所示。

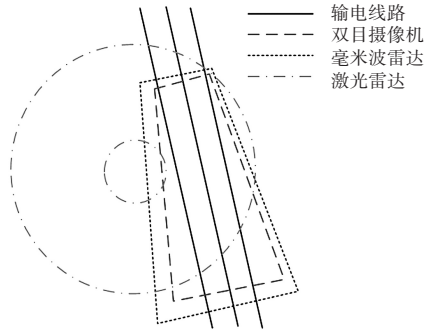


图5 多传感器覆盖范围示意图

Fig. 5 Schematic diagram of multi-sensor coverage

如图5所示,双目摄像机和毫米波雷达的覆盖范围表现为梯形,而激光雷达的探测范围表现为圆环形,3种传感器此时都覆盖了输电线路,将3种传感器都假设在12 m的高度,才可以全方面获取工程数据,满足工程量核算要求。

2.2 工程量核算结果

为了简化实验步骤,在工程量核算过程中,从目标输电线路工程中截选华安化县至桃江县路段作为研究区段。

表1 工程量核算结果对比

Tab. 1 Comparison of engineering quantity accounting results

工程量核算结果	土方石量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-1}$)	基础混凝土/ ($\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-1}$)	基础钢材/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-1}$)	地脚螺栓/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-1}$)	塔材/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-1}$)	导线/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-1}$)	地线/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-1}$)	合成绝缘子/ (支· km^{-1})	瓷盘式绝缘子/ (片· km^{-1})	金具/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-1}$)
实际值	736.54	326.18	25.51	2.39	159.31	44.56	1.97	10.89	217.34	6.63
本文设计方法	765.97	341.42	26.25	2.42	165.44	46.56	2.03	11.09	221.61	6.72
文献[3]方法	771.56	350.92	28.14	2.75	199.04	57.33	2.17	14.52	236.78	7.15
文献[4]方法	775.34	352.37	29.33	2.77	198.76	59.14	2.19	15.77	239.19	7.26

除了本文方法外,本次实验过程中,还应用文献[3]方法和文献[4]方法针对目标工程区段进行工程量核算,所得结果也记录在表1中。通过对比可以明显看出,两种文献提出方法的核算结果与实际值相差较大,而本文方法核算结果虽然与实际值不完全一致,但相差却较小。

2.3 核算结果相对误差对比

为了加强实验结果的直观性,选定相对误差作为评价字指标,对实验结果进一步计算。

$$\varphi = \frac{|g' - g|}{g} \times 100\% \quad (13)$$

式中, φ 表示相对误差, g' 表示工程量核算值, g 表示工程量实际值。

利用式(13)进一步计算表1中数据后,绘制图7所示

按照本文提出的步骤,构建输电线路工程三维场景模型,作为后续工程量核算的基础。其中,以某平地工程区域为例,其三维实景模型如图6所示。

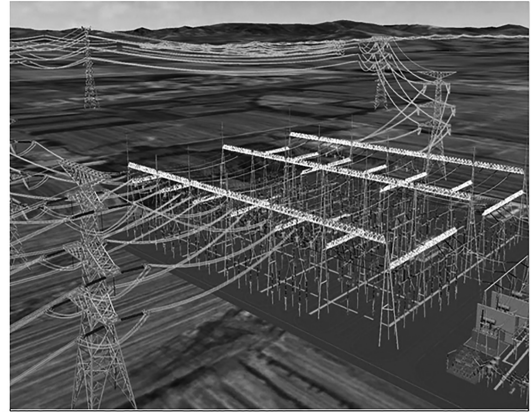


图6 输电线路工程三维场景模型

Fig. 6 Three dimensional scene model of transmission line project

利用输电线路工程三维场景模型进行工程量核算时,对输电线路工程的施工阶段进行划分(包括:土方石量工程、基础混凝土工程、基础钢材架设工程、地脚螺栓安装工程、塔材建设工程、导线布设工程、地线布设工程、合成绝缘子安装工程、瓷盘式绝缘子安装工程和金具安装工程),从而建立10个工程量指标。最终得到的核算结果如表1所示。

的相对误差对比结果。

根据图7可知,本文方法应用后得出的各工程量核算结果,相对误差都低于5%。而其他两种方法核算结果的相对误差明显更高,尤其是导线、合成绝缘子两类工程量指标,文献[3]方法核算结果的相对误差分别为28.68%、32.72%,而文献[4]方法核算结果的相对误差达到了33.33%、44.81%。综上所述,运用本文方法可以得到更加准确的工程量核算结果,指导工程管理工作的开展。

2.4 不同地形对核算精度的影响

为验证多传感器融合方法在不同地形条件下的适应性,选取平原、丘陵、山地、河网、沼泽、城市六类典型地形(图4)进行误差敏感性测试。实验以 ± 800 kV特高压输电线路为对象,分析地形起伏、植被覆盖、人工障碍物等因

素对工程量核算精度的影响。

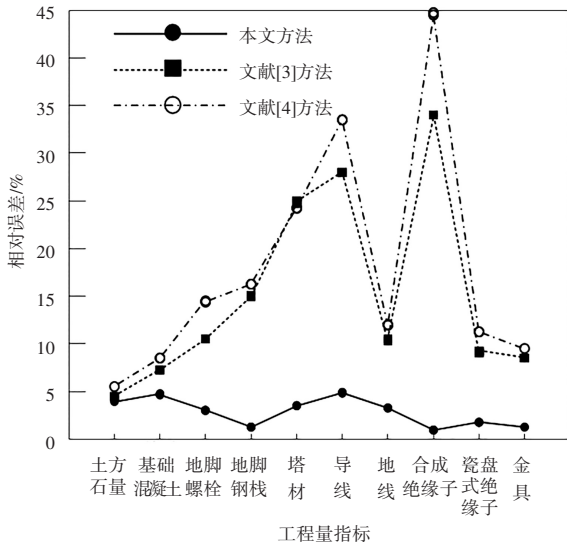


图7 不同方法核算结果相对误差对比

Fig. 7 Comparison of relative errors of accounting results by different methods

2.4.1 地形分类与数据采集

平原:地势平坦,植被覆盖率<10%,无高大障碍物。

丘陵:相对高差 20~50 m,植被覆盖率 30%~50%,存在少量农田。

山地:相对高差>100 m,植被覆盖率>70%,存在陡坡和岩石裸露区。

河网:水系密集,河床软土层厚度 0.5~3.0 m,需考虑

基础沉降。

沼泽:地表含水量>40%,植被以芦苇为主,传感器易受潮湿环境干扰。

城市:建筑物密集,存在电磁干扰和 GPS 信号遮挡。

2.4.2 精度对比与适应性优化

研究通过多地形实验验证了多传感器融合的输电线路工程量核算方法:平原地区误差低至 2.1%~3.4%,城市环境因 GPS 干扰误差达 7.1%~9.5%,需通过 IMU 与视觉 SLAM 修正;山地(坡度>30°)和沼泽(湿度>90%)地形误差分别为 4.7%~6.9%和 6.2%~8.4%,需采用分层扫描、温度补偿及密封封装优化;河网区域软土沉降导致±8%偏差,引入地质雷达后降至±3%。当地形高差>50 m或植被覆盖率>60%时,需启动增强型数据采集模式。多源融合技术(IMU、地质雷达、温度补偿)将复杂地形误差控制在8%以内,精度较单一传感器提升近一倍;山地地形中优化迭代次数后,数据处理时间缩短至 12 min/km,满足工程进度要求。该方法已应用于南方电网特高压工程,核算超 200 km,误差稳定在 4%~6%,较传统方法降低 60%,节约成本约 8%,验证了其工程适用性与技术优势。

研究通过量化不同地形下的误差来源与优化效果,证明了多传感器融合方法在输电线路工程量核算中的技术优势:平原地区精度接近理论极限,复杂地形通过数据融合与算法优化满足工程需求,整体误差控制在 8%以内。未来研究将进一步探索 AI 驱动的自适应误差补偿机制,以应对极端环境(如极寒、强风)下的核算挑战。

表2 不同地形的核算误差及优化措施

Tab. 2 Accounting errors and optimization measures for different terrains

地形类型	核算误差(相对值)/%	关键影响因素	优化措施
平原	2.1~3.4	无显著干扰	常规流程
丘陵	3.8~5.1	植被遮挡	增加激光雷达扫描密度
山地	4.7~6.9	坡度、点云稀疏	引入高精度 IMU 辅助定位
河网	5.3~7.6	软土沉降	结合地质雷达数据修正基础模型
沼泽	6.2~8.4	湿度、传感器漂移	密封封装+温度补偿算法
城市	7.1~9.5	GPS 信号遮挡、电磁干扰	融合 5G 基站定位+抗干扰滤波

3 结论

输电线路工程建设规模越来越大后,其工程量的核算成为一项难题。文中提出基于多传感器融合的新型工程量核算方法,保证了采集工程数据的全面性,基于此得出的工程量核算结果更加真实。多传感器融合技术在工程应用中具有显著优势,但也面临计算效率和工程适用性的挑战。通过优化数据预处理、特征提取和融合策略,以及采用分布式处理和硬件加速等手段,可以有效提高计算效率,满足实时性要求。同时,针对复杂环境和不同工程场景,合理选择和校准传感器,优化数据采集和融合策略,能够增强系统的适应性和可靠性。未来研究将进一步聚焦于算法优化、硬件加速、分布式处理以及传感器校准等方面,以提升多传感

器融合技术在更多工程领域的应用效果。

参考文献

[1]张波,黄江倩,姜霓裳,等.结合RBM的MLP神经网络输变电工程量评估方法[J].高校应用数学学报:A辑,2023,38(2):181-189.

[2]马跃武,王敏杰,贾东,等.基于Qt的异构传感器信息融合显示设计[J].国外电子测量技术,2022,41(9):176-182.

[3]李鹏,马建芳,张永庭.实景三维技术在市政亮化工程量核算中的应用[J].测绘通报,2022(增刊2):273-276.

[4]张波,杨轶涵,胡锡燎,等.基于隔离森林-MLP的输变电工程量智能评估方法[J].浙江电力,2023,42(8):60-67.

[5]乔雄辉.基于混合神经网络模型的架空输变电工程量分析与评估[J].电力设备管理,2024(21):204-206.

[6]Ye J, Chen Y, Xia Y, et al. Convolutional neural networks-based multi-sensor data fusion analysis for transmission lines[J]. Journal of

- Physics; Conference Series, 2024, 2846(1):012014-012014.
- [7]李奇, 苏兰茜, 何祖祥, 等. 中缅管道初设阶段水工保护工程量优化计算方法[J]. 油气储运, 2019, 38(5):590-594,600.
- [8]徐家俊, 贺文武, 李溢荣, 等. BIM+无人机激光扫描技术在土石方工程量计算中的应用[J]. 广州建筑, 2024, 52(8):77-80.
- [9]钱原铭, 陈良志, 朱峰. 自主产权的航道设计 BIM 软件的研发与工程应用[J]. 水运工程, 2024(4):150-156.
- [10]付欢, 史健勇, 王凯. 基于 BIM 的工程量计算与计价方法[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(1):138-145.
- [11]崔艳军, 陶刚, 刘永涛. 基于航空摄影的输电线路环水保三维设计应用研究[J]. 电力勘测设计, 2024(2):74-80.
- [12]卢文飞, 袁竞峰, 张嘉澍, 等. 基于机器学习算法的输电线路工程投资预测[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(17):6992-7001.
- [13]高贺, 孔超, 屠庆波, 等. 建立配网典型工程量清单计价管控体系[J]. 中国电力企业管理, 2024(15):52-53.
- [14]严尔梅, 时磊, 刘博迪, 等. 基于北斗定位和数据融合的输电线路在线监测应用研究[J]. 电力信息与通信技术, 2025, 23(6):23-30.
- [15]黄琪训, 李海强, 周锴鹏, 等. 基于多传感器融合的变电站多节点数据传输方法[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(6):80-84.
- [16]黄琪训, 刘璨真, 曾伟胜, 等. 基于数据融合的变电站无线传感器网络控制方法[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(5):24-27.
- [17]王海明, 贾玲, 黄琪训, 等. 基于深度混合卷积的变电站多传感器数据融合方法[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(4):130-133,158.
- [18]熊彪. 基于视觉与激光雷达的输电线路无人机自动化巡检控制[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(7):37-41.
- [19]Changbin Tian, Xin Ma, Xiangxue Ma, et al. Optimal design of FBG flexible sensor for high-precision monitoring of three-dimensional deformation of power transmission line tower foundation[J]. Energy Reports, 2023, 9(Sup. 3):46-54.
- [20]垢元培, 张鸽. 航测点云数据在矿山修复工程量复核中的研究与应用[J]. 金属矿山, 2024(8):191-196.
- [21]李晓康, 李文彬. 特高压输电线路覆冰舞动防治技术研究[J]. 电气技术与经济, 2025(6):86-89.
- [22]仇安兵, 张洪达, 贾北凝, 等. BIM 在改造项目工程量复核中的应用[J]. 建筑经济, 2025, 46(5):61-66.
- [23]任春光, 孟长虹, 史卓鹏, 等. 智能变电站施工控制的三维可视化系统研究和设计[J]. 制造业自动化, 2023, 45(9):79-83.
- [24]谢从珍, 梁国龙, 王纪港, 等. 基于种群自适应蜣螂优化算法的输电铁塔传感器优化布置[J]. 广东电力, 2025, 38(2):75-84.
- [25]冯迪, 刘灏, 李嘉贤, 等. 基于电场传感器阵列的输电线路电压非接触式测量方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(1):292-301.
- [26]吴海涛, 史梦梦, 王鹏, 等. 北斗系统在输电线路监测中的应用综述[J]. 电讯技术, 2025, 65(6):997-1004.
- [27]Guangxin Zhang, Minghui Liu, Shichao Cheng, et al. Research on transmission line tower tilting and foundation state monitoring technology based on multi-sensor cooperative detection and correction[J]. Energy Engineering, 2023, 121(1):169-185.
- [28]刘浩, 史新华, 陈强. 基于传感器技术的智能电网输电线路监测系统[J]. 电子设计工程, 2023, 31(10):172-176.

(上接第 41 页)

案。这不仅提升了咖啡的品质和顾客的满意度,也在一定程度上减轻了劳动力压力,减少专业咖啡师在工作中的重复劳动,让他们能够将精力更多投入到咖啡品质提升与创新服务上,降低企业的人力成本,提升营业效益。此外,全自动智能咖啡拉花机能够作为餐饮业技术现代化的缩影,成为推动该行业现代化、品牌差异化的重要因素^[14]。

通过对全自动智能咖啡拉花机项目的深入研究,我们预见该创新设备具有广阔的发展前景。随着消费者对于个性化和高品质咖啡体验需求的持续增长,相信该类机器能力的提升也预示着未来在高端咖啡厅及家庭消费场景中有着巨大的发展潜力^[15]。

参考文献

- [1]王炎. 乡村振兴背景下艺术色彩在美食文创设计中的运用[J]. 食品与机械, 2025, 41(5):255-256.
- [2]刘昊, 王祝华, 赵汉斌, 等. 消费热浪之下,咖啡产业该如何“强链补芯”[N]. 科技日报, 2026-04-09(005).
- [3]闫帅. 咖啡拉花机关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2019.
- [4]王羽. 植物蛋白基材料 3D 打印特性及工艺研究[D]. 重庆:西南大学, 2024.
- [5]但誉宏. 用于植物蛋白 3D 打印的设备设计及仿真研究[D]. 南昌:南昌大学, 2023.
- [6]蒲俊, 王植平, 黎文远. 图像处理技术在糖画机中的运用[J]. 科技风, 2020(31):13-14.
- [7]寇锟, 陈复生, 杜艳, 等. 挤出型食品 3D 打印技术及其在蛋白基食品中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(16):374-385.
- [8]何晓建, 马海琴, 冯小芸. 浅谈 APP+3D 打印快速成型技术商业模式加工模具的市场前景[J]. 模具制造, 2024, 24(4):44-47.
- [9]戴小炼. 基于稳定控制策略的三维雕刻平台[D]. 南京:南京信息工程大学, 2024.
- [10]吴海帆, 李树东, 朱广亚. 基于 ESP32 的脚踝康复机器人的控制系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(6):136-139.
- [11]苏祥江. 基于绿色低碳理念的 STM32 步进电机智能控制系统设计与实现[J]. 现代工业经济和信息化, 2025, 15(12):131-132,135.
- [12]蒋方懿. 基于数字散斑的图像处理性能优化研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2025.
- [13]何志勇, 李伟, 闫松, 等. 数字图像边缘检测算法研究[J]. 电子技术应用, 2025, 51(8):70-73.
- [14]于璇. 千亿咖啡市场引混战,咖啡机能否借势起飞?[J]. 电器, 2021(5):48-50.
- [15]蒋加云. 3D 打印技术在个性化食品成型机械中的应用探索[J]. 现代食品, 2026(1):4-6.