

基于电网信息模型的输电线路交叉跨越距离测量应用研究

张劲波¹, 尹元², 石建¹, 林少远², 颜磊¹, 黄晓予¹, 林宇彬¹, 杨迪珊¹, 程诺¹

(1. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建 福州 350012;

2. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350001)

摘要: 为了降低输电线路交叉跨越距离测量误差, 减少输电线路事故发生率, 研究提出基于电网信息模型的输电线路交叉跨越距离测量方法。设计包含数据采集单元、传输网络及测量单元的跨越距离测量平台。通过采集单元内电网信息模型获取输变电工程各阶段数据; 借助测量单元从电网信息模型基础数据库内提取待测线路相关数据, 创建悬链线模型与线路交叉跨越三维空间模型, 实现输电线路交叉跨越距离的测量。实验结果表明: 运用所提方法对输电线路交叉跨越距离的信息采集用时短且精度高, 具备较高应用价值与可行性。

关键词: 电网信息模型; 输电线路; 悬链线模型; 线路交叉模型; 交叉跨越; 距离测量

中图分类号: TM726 文献标识码: A DOI: 10.19457/j.1001-2095.dqed23281

Research on Transmission Line Crossing Distance Measurement Based on Grid Information Model

ZHANG Jinbo¹, YIN Yuan², SHI Jian¹, LIN Shaoyuan², YAN Lei¹, HUANG Xiaoyu¹,

LIN Yubin¹, YANG Dishan¹, CHENG Nuo¹

(1. State Grid Fujian Power Economic Research Institute, Fuzhou 350012, Fujian, China;

2. State Grid Fujian Electronic Power Co., Ltd., Fuzhou 350001, Fujian, China)

Abstract: In order to reduce the measurement error of transmission line crossing distance and reduce the occurrence rate of transmission line accidents, a method of transmission line crossing distance measurement based on grid information model was proposed. The platform of crossing distance measurement including data acquisition unit, transmission network and measurement unit was designed. The data of transmission and transformation engineering phases was obtained by grid information model in the data acquisition unit, the data of the lines to be measured was extracted from the basic database of the grid information model by the measurement unit, the catenary model and the three-dimensional spatial model were created to realize the transmission line crossing distance measurement. The experimental results show that the proposed method has a high application value and feasibility for the information acquisition of transmission line crossing distance with short time and high precision.

Key words: grid information model (GIM); transmission line; catenary model; line crossing model; crossing; distance measurement

输电线路属于电力系统中关键构成部分, 主要承担电能输送任务。特别是作为电网主干线路的高压输电线路, 其运行稳定性对经济平稳发展具有直接影响作用^[1-2]。随着我国电网线路架设工程规模的逐渐扩大, 电网越发密集, 交叉跨越、并行、远距离的输电线路越来越多, 因输电线路交叉跨越距离过低而导致线路放电跳闸等事故也随之增加^[3]。

因此, 针对输电线路交叉跨越距离的监测与测量工作成为输电线路施工与运行的关键。当输电线路所架设环境较为复杂时, 监测与测量输电线路交叉跨越距离变得尤为困难^[4]。架空输电线路在长时间的运行过程中, 因受到本身运行状态干扰, 导致线路在悬垂线夹中发生滑动现象, 致使输电线路弧垂增加; 同时, 由于高温膨胀作用, 也会导致输电线路间距逐渐变小, 造成电容、

基金项目: 国家电网公司科技项目 (52130N19000S)

作者简介: 张劲波 (1990—), 男, 硕士研究生, 工程师, Email: zjbb2021@163.com

电磁严重耦合及相间闪络等问题发生,令电力系统出现异常^[5-6]。故为有效保障电力工作人员的人身安全及电力系统的安全稳定运行,需对输电线路交叉跨越距离实施精准测量。文献[7]提出了一种基于双目测距的空间交叉输电线路测量方法。该方法首先将链码算法进行改进,获取电力线路的坐标点,通过双目测距构建测量模型,实现了交叉输电线路的测量。该方法可有效降低交叉输电线路测量误差,但针对跨度较大的交叉线路测量存在一定难度。

电网信息模型(grid information model, GIM)是依托于地理信息系统(geographic information system, GIS),将数据库作为其基础,具备统一编码系统与通用模型接口技术,贯穿于输变电工程全生命周期的信息模型,可高效精准地采集并整合输变电不同阶段数据资料,将其存储于基础数据库内,便于输变电工程全生命周期内不同阶段用户使用,具有高效、全面、精准等特点^[8-9]。

因此本文研究一种基于电网信息模型的输电线路交叉跨越距离测量平台,通过电网信息模型高效精准地采集包含输电线路施工与运行等过程中输变电工程全生命周期数据信息,创建输电线路悬链线模型与交叉跨越空间模型,实现输电线路交叉跨越距离的测量。与传统方法相比,所提方法在实际测量中可高效精准地实现对输电线路交叉跨越距离的测量,依据所得测量结果可及时预判输电线路运行的稳定性,为保障电力系统的正常安全运行提供有效帮助。

1 输电线路交叉跨越距离测量研究

1.1 测量平台整体架构

为了提升输电线路交叉跨越距离测量的精度,设计基于电网信息模型的输电线路交叉跨越距离测量平台,该平台主要由数据采集单元、传输网络及测量单元构成。整体测量平台结构如图1所示。

图1中,数据采集单元核心为电网信息模型,任务是采集电网输变电工程不同阶段数据信息,并进行整合、存储,便于平台应用相应信息,实时测量输电线路交叉跨越距离;传输网络实现数据采集单元与测量单元之间的信息传输;测量单元依据测量需求,经传输网络由数据采集单元内提取所需信息,运用相应测量算法实现对输电线路交叉跨越距离的测量。

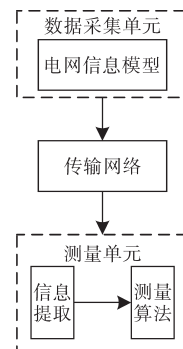


图1 整体测量平台结构图

Fig.1 Overall measurement platform structure diagram

1.2 基于电网信息模型的数据采集单元设计

输电线路交叉跨越距离测量时需使用输电线路设备等相关数据信息,这些数据可通过数据采集单元获取。数据采集单元的核心即为电网信息模型(GIM),通过GIM可实时采集输变电工程不同阶段数据信息,提升数据采集能力,为输电线路状态监测及测量等工作提供结构化与非结构化信息数据^[10];同时GIM作为开放式信息载体,可将所采集数据信息同步存储于自身的基础数据库内,有效实现信息的共享与传递,解决数据断层问题,达到数据信息的一次录入数次应用的目的。

GIM以地理信息系统(GIS)作为依托,是数字化电网重要组成元素,将信息模型作为其载体,对各元素全生命周期中全部信息实施有效采集,提升信息应用的全面性、精确性及高效性^[11-12]。GIM结构如图2所示。

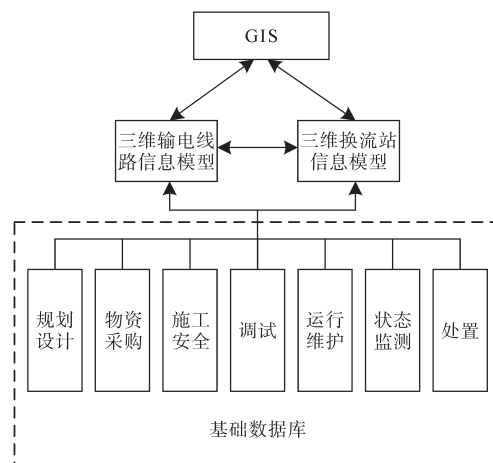


图2 GIM结构框架图

Fig.2 GIM frame diagram

1.3 输电线路交叉跨越距离测量算法设计

1.3.1 悬链线模型设计

由于架空输电线路均具有较大档距跨度,悬于空中的输电线几何形态受材料刚性的影响极

低^[13],故可假设输电线为一根柔索,其悬链线模型如图3所示。

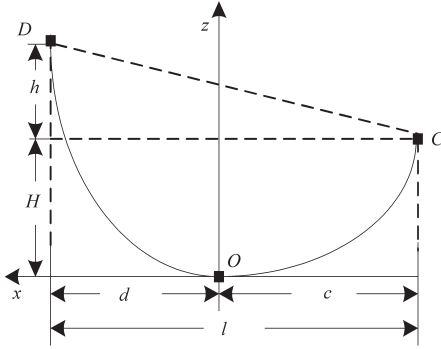


图3 悬链线模型图

Fig.3 Catenary model diagram

图3中, h, l 分别为悬挂点高差与档距; O 为输电线最低点; C, D 分别为低悬挂点和高悬挂点; H 为低悬挂点 C 的弧垂; c 为低悬挂点 C 同输电线最低点 O 之间的水平间距; d 为高悬挂点 D 同输电线最低点 O 之间的水平间距; z 为输电线的垂直坐标; x 为输电线的水平坐标。通过悬链线方程表示其数学模型为

$$z(x) = p \left(\operatorname{ch} \frac{x}{p} - 1 \right) \quad (1)$$

式中: p 为输电线最低点的水平应力同自重力比较的比值,即荷重比。

荷重比 p 作为已知量其直接影响因素为输电线的结构与材质。通过荷重比 p 可反映悬链线的高度与形状等信息。为简化运算,选取坐标原点为低悬挂点 C 位置,此时悬链线方程可表示为

$$z(x) = p \operatorname{ch} \frac{(x - c)}{p} - p - H \quad (2)$$

1.3.2 弧垂测量算法

在上述分析基础上,选用档端角度法计算输电线悬挂点的弧垂,此方法操作简便且适用范围广^[14-15]。测量时,在档距端点处放置测量仪器,观测人员位于一档线路两侧杆塔下方,通过仪器观测输电线弧垂,当视线同输电线相切时将测量数据记录。档端角度法计算输电线弧垂的表达式为

$$H = \left(\frac{\sqrt{b} + \sqrt{L \tan \phi - L \tan \lambda}}{2} \right)^2 \quad (3)$$

式中: ϕ 为观测点同视点输电线悬挂点的竖直夹角; L 为观测档档距; λ 为观测点同输电线弧垂切点的竖直夹角; b 为观测点同输电线悬挂点的垂直距离。

1.3.3 交叉跨越空间模型与运算

输电线路交叉跨越的空间模型图如图4所示。

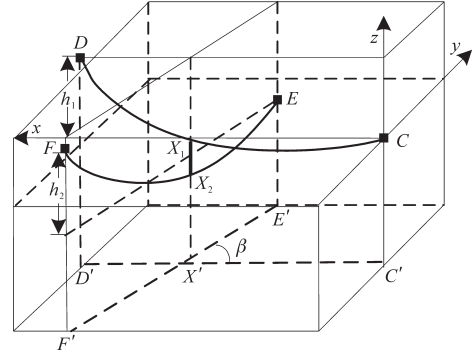


图4 输电线路交叉跨越空间模型图

Fig.4 Spatial model diagram of transmission line crossing

图4中共有2条输电线路,分别为输电线路 CX_1D, EX_2F 。其中, X_1, X_2 分别为输电线路 CX_1D 和 EX_2F 的交叉跨越点;输电线路 EX_2F 由 CX_1D 下方跨越,在 X_1X_2 位置两条输电线路产生交叉; X', β 为 X_1X_2 的对地投影与投影夹角,两条输电线路交叉跨越距离即为线段 X_1X_2 的长度。将输电线路 CX_1D 的低悬挂点 C 作为坐标原点,创建空间直角坐标系,输电线路 CX_1D 的表达式为

$$\begin{cases} z = p_1 \operatorname{ch} \frac{(x - c)}{p_1} - p_1 - H_1 \\ y = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: p_1 为输电线路 CX_1D 的荷重比; H_1 为输电线路 CX_1D 低悬挂点 C 的弧垂。

通过极坐标变换与反变换可得出输电线路 EX_2F ,如果将 E 点坐标设为 (x_e, y_e, z_e) ,输电线路 EX_2F 的表达式为

$$\begin{cases} z = p_2 \operatorname{ch} \frac{(x - x_e) \cos \beta - (y - y_e) \sin \beta - f}{p_2} - p_2 - H_2 \\ y = y_e - (x - x_e) \tan \beta \end{cases} \quad (5)$$

式中: p_2 为输电线路 EX_2F 的荷重比; H_2 为低悬挂点 F 的弧垂; f 为低悬挂点 F 同最低点的水平间距。

两条输电线路 CX_1D 与 EX_2F 上每个点空间坐标可通过式(4)与式(5)获取,运用所获取到的各点空间坐标创建输电线路交叉跨越的三维空间模型。其中,两条输电线路交叉跨越的位置信息可通过 X_1X_2 的对地投影点 X' 反映出,将此投影点的水平面坐标设为 $(y_e \cot \beta + x_e, 0)$,代入式(4)与式(5)中后所得交叉跨越距离为

$$|X_1X_2| = \left| p_1 \operatorname{ch} \left(\frac{y_e \cot \beta + x_e - c}{p_1} \right) - (p_1 - p_2) - (H_1 - H_2) - p_2 \operatorname{ch} \left[\frac{y_e (\cot \beta \cos \beta + \sin \beta) - f}{p_2} \right] - z_e \right| \quad (6)$$

通过交叉跨越空间模型的构建,分析其中坐标点之间的关系,创建输电线路交叉跨越的三维空间模型,完成输电线路交叉跨越距离的测量。

2 实验分析

2.1 实验环境

将本文平台应用于某电力公司输电线路监测系统内,通过检验实际应用结果分析本文平台的采集与测量效果。实验电力公司的输电线路覆盖范围较广,存在的交叉跨越输电线路较多,实际应用中随机选取10组交叉线路作为实验对象,每组路线均进行10次实验分析,获取的每组实验数据均为10次实验的均值,以保证实验的精度。运用本文平台采集各组实验交叉线路的详

细数据信息,并依据采集信息测量跨越距离。实验环境如图5所示。



图5 实验环境

Fig.5 Experimental environment

2.2 实验参数

通过采集实验交叉线路数据信息,以其中2组为例呈现所采集信息情况,详见表1。

表1 本文平台采集的两组实验交叉线路信息

Tab.1 Two groups of experimental crossing line information collected by this platform

信息名称	信息数据			
	第1组线路		第2组线路	
导线型号	JKLYJ-10/95	JKLYJ-10/240	JKLYJ-10/120	JKLYJ-10/185
导线直径/mm	26.13	29.87	28.55	27.12
自重比载/(N·m ⁻¹ ·mm ⁻²)	0.0338 9	0.0347 5	0.0345 9	0.0342 3
档距/m	280	280	280	280
交叉角/(°)	86.7		84.4	
高差/m	4.87	8.44	4.65	8.22
应力/Pa	61.9	49.7	59.7	47.5
低悬挂点坐标	(124.4,172.6,-8.4)	(0,0,0)	(122.2,170.4,-8.2)	(0,0,0)
交叉点坐标	(137.6,0)		(135.4,0)	

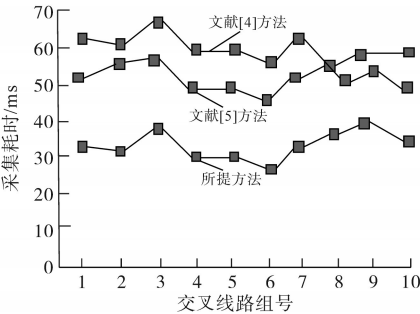
通过统计采集10组实验交叉线路信息所消耗的时长,以及所采集信息同实验电力公司系统记录大数据相比精确度,检验不同平台的数据采集效果。

2.3 结果分析

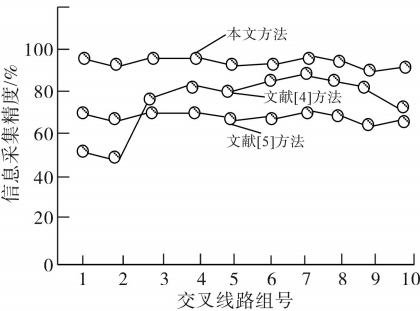
为验证所提方法的有效性,实验分析了本文方法、文献[4]方法和文献[5]方法在进行输电线路交叉跨越距离测量时获取数据的耗时和精度,得到的结果如图6所示。

通过图6可得出,在相同实验环境下,采用三种方法进行输电线路交叉跨越距离测量时获取数据的耗时和精度存在一定差异。其中,所提方法的采集耗时最短,约为31 ms,采集精度最高,约为97%;其他两种方法的性能始终低于所提方法。验证了所提方法可实现电网输电线路的相关信息采集,采集效率高且十分精准,为之后的测量提供精确的数据依据。

为进一步验证所提方法的有效性,实验通过



(a)采集耗时统计结果



(b)数据采集精度统计结果

图6 不同方法性能分析

Fig.6 Performance analysis of different methods

美国天宝 Trimble S8 型号高精度精密监测全站仪测得各组实验交叉线路的跨越距离作为实际值,与本文方法各组测量值实施对比,检验本文方法的测量效果,对比结果如表2所示。

表2 本文平台测量值与实际值对比结果
Tab.2 Comparison results between the measured value and the actual value of this platform

线路组号	本文平台测量值/m	实际值/m	误差/m
1	6.88	7.06	0.18
2	7.25	7.38	0.13
3	7.61	7.73	0.12
4	8.35	8.40	0.05
5	9.36	9.32	0.04
6	5.97	5.99	0.02
7	6.37	6.38	0.01
8	7.05	7.06	0.01
9	7.52	7.53	0.01
10	6.46	6.47	0.01

由表2能够得知,在对10组交叉线路的跨越距离实施测量中,本文平台所得测量结果的误差范围在0.01~0.20 m之间。由误差结果可以发现,随着交叉线路组的增加,测量误差不断下降,误差最终保持在0.01 m内。可见,本文平台测量结果与实际情况较为吻合,测量精度较高,且测量性能十分稳定,具有较高的可靠性与实际应用价值。

3 结论

输电线路交叉跨越距离过小易导致输电线路事故的发生,对工作人员的人身安全及电力系统的正常运行均会带来严重后果,为此本文设计基于电网信息模型的输电线路交叉跨越距离测量平台。运用平台中数据采集单元内电网信息模型采集输变电工程全生命周期数据信息,整合后并存储于自身的数据库内,将所提取数据用于测量单元内的测量算法中,创建相关运算模型获取到待测输电线路的交叉跨越距离,完成输电线路交叉跨越距离测量。实验结果表明:本文平台可高效精准地采集所需输电线路相关信息数据,可为后期测量奠定坚实基础,所得测量结果误差较低,且误差波动范围较小,整体性能稳定可靠,可用于实际输电线路交叉跨越距离的测量。

参考文献

[1] 姚艺,付万璋,何旺龄,等.多回超/特高压交流输电线路交

叉跨越情况下无线电干扰特性研究[J].水电能源科学,2018,36(06):201-204,170.

Yao Yi, Fu Wanzhang, He Wangling, *et al.* Study of radio interference characteristics of multi-turn EHV/UHV AC transmission lines in crossing erection[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(6): 201-204, 170.

[2] 王怡爽,苑朝,翟永杰.一种新型架空输电线路巡检机器人的机构设计[J].西北工业大学学报,2020,38(5):1105-1111. Wang Yishuang, Yuan Chao, Zhai Yongjie. Mechanism design and analysis of a new overhead transmission line inspection robot[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(5): 1105-1111.

[3] 董爱,夏芒,李陟,等.空中分布式协同时差测量系统目标定位技术研究[J].系统工程与电子技术,2020,42(4):799-805. Dong Ai, Xia Mang, Li zhi, *et al.* Research on air distributed coordinated time difference measurement system target location technology[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(4): 799-805.

[4] 张广新,穆景龙,马晖,等.输电线路交叉跨越距离在线监测系统[J].现代电子技术,2018,41(24):14-17.

Zhang Guangxin, Mu Jinglong, Ma Hui, *et al.* Design of cross-span distance online monitoring system for power transmission lines[J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(24): 14-17.

[5] 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 Xiaofu, *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.

[6] 况立群,常敏,庞敏,等.准共形映射的三维模型变形算法[J].中国科技论文,2020,15(1):15-22.

Kuang Liqun, Chang Min, Pang Min, *et al.* 3D model deformation algorithm for quasi-conformal mapping[J]. China Science-paper, 2020, 15(1): 15-22.

[7] Sun S, Lü Y, Wang S, *et al.* Measurement of space crossing transmission line based on binocular ranging[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3657-3663.

[8] 吴善,郝思鹏,杨李星,等.基于CIM的智能配电台区信息模型及应用[J].电测与仪表,2018,55(10):46-51,89.

Wu Shan, Hao Sipeng, Yang Lixing, *et al.* Information model and application of intelligent distribution area based on CIM[J]. Electrical measurement & instrumentation, 2018, 55(10): 46-51, 89.

[9] 王云,刘东,翁嘉明,等.电网信息物理系统建模与仿真验证平台研究[J].中国电机工程学报,2018,38(1):130-136,349. Wang Yun, Liu Dong, Weng Jiaming, *et al.* The research of power CPS modeling and simulation verification platform[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 130-136, 349.

[10] 谈竹奎,班国邦,徐玉韬,等.基于城市配电网柔性互联示范工程信息建模[J].可再生能源,2019,37(3):393-398.

(下转第59页)

- distribution network considering different control strategies of VSC stations[C]//2018 China International Conference on Electricity Distribution, 2018.
- [11] 杨旭红,尹聪聪.基于孤岛模式光储直流微电网的协调控制策略[J].电气传动,2020,50(5):75-80.
- Yang X H, Yin C C. Coordinated control strategy of light storage and DC microgrid based on islanding mode[J]. Electric Drive, 2020, 50(5): 75-80.
- [12] 温剑锋,陶顺,肖湘宁,等.基于出行链随机模拟的电动汽车充电需求分析[J].电网技术,2015,39(6):1477-1484.
- Wen J F, Tao S, Xiao X N, *et al.* Analysis on charging demand of EV based on stochastic simulation of trip chain[J]. Power Systems Technology, 2015, 39(6): 1477-1484.
- [13] 麻秀范,李颖,王皓,等.基于电动汽车出行随机模拟的充电桩需求研究[J].电工技术学报,2017,32(S2):190-202.
- Ma X F, Li Y, Wang H, *et al.* Research on demand of charging piles based on stochastic simulation of EV trip chain[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S2): 190-202.
- [14] 李含玉,杜兆斌,陈丽丹,等.基于出行模拟的电动汽车充电负荷预测模型及V2G评估[J].电力系统自动化,2019,43(21):88-96.
- Li H Y, Du Z B, Chen L D, *et al.* Trip simulation based charging load forecasting model and vehicle-to-grid evaluation of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 88-96.
- [15] 雷婧婷,安婷,杜正春,等.含直流配电网的交直流潮流计算[J].中国电机工程学报,2016,36(4):911-918.
- Lei J T, An T, Du Z C, *et al.* A unified AC/DC power flow algorithm with DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 911-918.
- [16] 符杨,张智泉,李振坤,等.基于二阶段鲁棒博弈模型的微电网群及混合交直流配电系统协调能量管理策略研究[J].中国电机工程学报,2020,40(4):1226-1240,1413.
- Fu Y Q, Zhang Z Q, Li Z K, *et al.* A two-stage robust game approach for coordinated energy management in hybrid AC/DC distribution system with microgrid clusters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1226-1240, 1413.

收稿日期:2021-03-12

修改稿日期:2021-04-02

(上接第52页)

- Tan Zhukui, Ban Guobang, Xu Yutao, *et al.* Information modeling based on urban distribution network flexible interconnected demonstration project[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(3): 393-398.
- [11] 谢桦,陈俊星,郭志星,等.基于随机森林算法的架空输电线路状态评价方法[J].现代电力,2020,37(6):559-565.
- Xie Hua, Chen Junxing, Guo Zhixing, *et al.* Condition evaluation method of overhead transmission line based on random forest algorithm[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(6): 559-565.
- [12] 李春晓,李祝莲,汤儒峰,等.一发两收卫星激光测距系统中目标距离测量试验[J].红外与激光工程,2020,49(S1):19-25.
- Li Chunxiao, Li Zhulian, Tang Rufeng, *et al.* Target distance measurement experiment with a bi-static satellite laser ranging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(S1): 19-25.
- [13] 程知己,黄强先,应前程,等.自准直测量系统中离焦误差分析及修正[J].中国测试,2020,46(5):7-12.
- Cheng Zhiji, Huang Qiangxian, Ying Qiancheng, *et al.* Analysis and correction of defocus error of auto-collimation measurement system[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(5): 7-12.
- [14] 麻卫峰,王金亮,王成,等.机载激光雷达点云数据输电线路弧垂模拟[J].测绘科学技术学报,2019,36(4):394-399,405.
- Ma Weifeng, Wang Jinliang, Wang Cheng, *et al.* Transmission line sag simulation from airborne LiDAR point cloud data[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2019, 36(4): 394-399, 405.
- [15] 姬波,杨文东,张弛,等.基于GA-SVM的高压输电线路弧垂预测模型[J].郑州大学学报(理学版),2018,50(4):94-100.
- Ji Bo, Yang Wendong, Zhang Chi, *et al.* High voltage transmission line sag prediction model based on GA-SVM [J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2018, 50(4): 94-100.

收稿日期:2021-03-29

修改稿日期:2021-04-14