

±500 kV 德宝线大档距线路段防振方案试验研究

刘敬华¹, 赵彬², 邹赫³, 李鹏², 李孟轩², 汉京善², 杨知²

(1. 国家电网有限公司, 北京 100031; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100055;
3. 中国电力技术装备有限公司, 北京 100052)

摘要:受冷空气过程影响,四川北部地区时常出现突发性降温及大风天气,导致架空导线微风振动动弯应变接近常规线路段安全阈值(200 $\mu\epsilon$),超过大跨越线路段安全阈值(120 $\mu\epsilon$)的情况频繁发生;现有导线端部位置及常规防振锤长时间处于高强度工作状态,严重威胁四川电网运行安全。针对此问题,文中以1437 m档距的±500 kV德宝线424号至425号塔线路段为例,依照现有大跨越线路段防振设计标准,开展了防振设计效果评估试验优化研究,给出了更适用于川北大风区大档距线路段的防振设计形式。推荐的防振设计方案是在室内试验档上经过模拟试验、分析和优选后得到,满足防振相关技术要求,可最大程度降低输电线路大档距线路段出现致命缺陷的风险,确保区域电网长期安全稳定运行。

关键词:电网运维;输电线路;低温强风;防振设计

中图分类号:TM 75 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)01-0001-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230101

Research on Anti-vibration Optimization Design of Line Section with Large Span for ±500 kV Debao Line

LIU Jinghua¹, ZHAO Bin², ZOU He³, LI Peng², LI Mengxuan², HAN Jingshan², YANG Zhi²

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100055, China; 3. China Electric Power Technology and Equipment Co., Ltd., Beijing 100052, China)

Abstract: Affected by the cold air, northern Sichuan is easy to suffer from sudden low temperature and strong wind, which causes the dynamic bending strain of aeolian vibration of overhead conductors to approach the safety threshold (200 $\mu\epsilon$) for ordinary section, or even exceed the safety threshold (120 $\mu\epsilon$) for large-crossing section frequently. The end position of the existing conductor and the conventional vibration damper are in high-intensity working state for a long time, which seriously threatens the operation safety of Sichuan power grid. Aiming at this problem, taking No. 424 ~ 425 line section with a span of 1437 m in ±500 kV Debao line for example, and according to the existing anti-vibration design standards of large-span line section, the optimization research for the effect evaluation test of anti-vibration design is carried out, and the anti-vibration design which is more suitable for large-span line section in sudden low temperature and strong wind area in northern Sichuan is given. The recommended anti-vibration design scheme is obtained through simulation test, analysis and optimization in the indoor test, which meets the relevant technical requirements of anti-vibration. It is of great significance to avoid fatal defects in large-span line sections of transmission lines and ensure the long-term safe and stable operation of regional power grid.

Key words: grid operation and maintenance; transmission line; low temperature and strong wind; anti-vibration design

0 引言

四川地区地域广阔,东有四川盆地,西接川藏高

原,具有山地多、地貌复杂等客观自然条件。目前,四川500 kV线路已实现全省覆盖,形成“梯格状双环”布局,500 kV线路里程和变电站运营规模位居电力系统前列。而且,四川电网通过“八交四直”超、特高压线路,东与华东和华中、西与西北和西藏

基金项目:国家电网有限公司科技项目“输电线路通道资源保护利用与通道扩容技术研究”(5500-202118138A-0-0-00)

区域实现能源互联,每年送出大量水利清洁能源,成为中国能源可持续发展的关键环节,在现代能源供应体系中发挥着重要的枢纽作用。然而,由于四川地区秋冬季节时常受到西北地区冷空气的影响^[1-2],四川北部地区部分输电线路易受到风振影响而出现故障^[3],加之全球气候异常演化加剧,传统方式下的四川地区线路风振防治工作面临较大挑战。

四川地区由于特殊的水文、地貌条件,大跨越线路段相对较少,但大档距(≥ 1000 m)线路段较多,在 500 kV 及以上电压等级线路中共有 1000 余处。由于现阶段输电线路结构设计标准体系中,对川北地区特殊的突发性低温、大风环境条件考虑不足,传统防振设计难以满足全寿命周期下大档距线路段的安全防护需求,导致近年低温和大风作用下的微风振动现象^[4]、架空导线动弯应变接近常规线路段安全阈值($200 \mu\varepsilon$)、超过大跨越线路段安全阈值($120 \mu\varepsilon$)的情况频繁发生^[5-6]。由于微风振动对导线的影响每时每刻都存在,若防振措施不当,则极易发生导线疲劳断股、断线、防振锤失效等故障。

为了降低大档距线路段出现致命缺陷的风险,下面基于现有防振设计原则和思路、实地风振状态监测情况以及大跨越电路段防振试验方案^[7-9],开展了防振设计效果评估等一系列试验研究工作。作为川北地区典型大跨越线路之一,对 1437 m 档距的 ± 500 kV 德宝线 424 号至 425 号塔线路段进行分析并推荐了防振优化设计方案,保证导线各夹固点的最大动弯应变单峰值小于 $120 \mu\varepsilon$,为四川地区电网防灾减灾和线路安全运维工作提供借鉴和参考。

1 现有防振设计方案

± 500 kV 德宝线是陕西宝鸡至四川德阳的跨区域电力互联线路,这里重点分析的 424 号至 425 号塔线路段,属于西南—东北走向档段,行政区划位于四川省广元市,周围地貌以低山为主,如图 1 所示,海拔高度约为 880~1100 m。历史气象数据资料统计显示,该地区为亚热带湿润季风气候^[10],冬寒夏凉,且由于地处秦岭南麓,副热带高压边缘气压极不稳定,秋冬季节时常遭遇来自青藏高原的冷空气影响,气温下降快,并伴随出现持续性大风天气,加上

此线路区段所处“两山夹一沟”的西北—东南导流效应,大风与线路段走向夹角约 $80^\circ \sim 90^\circ$ 。

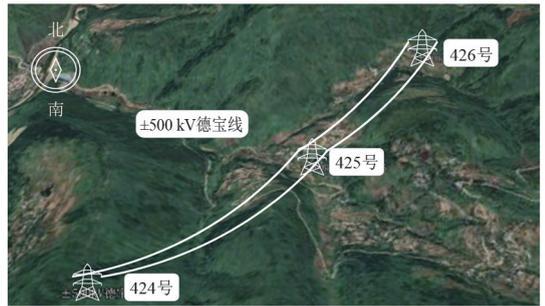


图 1 ± 500 kV 德宝线 424 号至 425 号塔线路段走向及周围地貌

同时,424 号至 425 号塔线路段采用了传统的 $4 \times \text{ACSR}-720/50$ 形式,依照现有相关设计规程和防振标准^[11],最大允许动弯应变按照 $200 \mu\varepsilon$ 控制。现有防振设计如图 2 所示,在每根子导线的两端分别布置 3 个 FR-4 型防振锤,采用等间距方式,间距 $S_0 = 1.28$ m,测试点位置 $S_c = 0.089$ m。

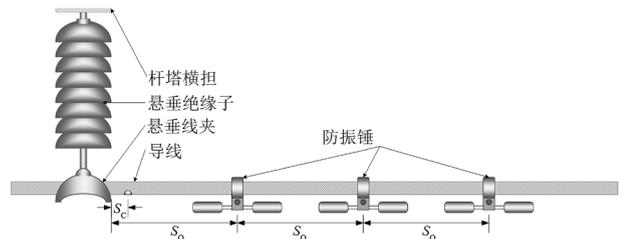


图 2 现有防振设计方案

2 防振方案效果监测

在德宝线投运 10 年后,考虑到该线路段的重要性,对部分关键档段的导线风振水平进行实地监测分析,获取导线端部动弯应变数据,为现有防振设计优化和防振效果提升提供可靠数据支撑。

首先,为了不影响线路正常运行,采用非接触式测振装置,对 424 号至 425 号塔间导线微风振动状态开展持续监测。该设备是基于激光测试技术研发^[12-14],具有不影响被测体状态、便捷性好、测试精度高等优势和特点。具体测试位置见图 2 所示,测试设备安装情况及导线测点见图 3。

经长期监测分析(统计结果见图 4 所示),现有防振设计方案下,微风振动导致架空导线端部位置动弯应变接近常规线路段安全阈值($200 \mu\varepsilon$)、超过大跨越线路段安全阈值($120 \mu\varepsilon$)的情况频繁发生,



(a) 测试设备安装



(b) 导线测试点位

图 3 微风振动状态测试

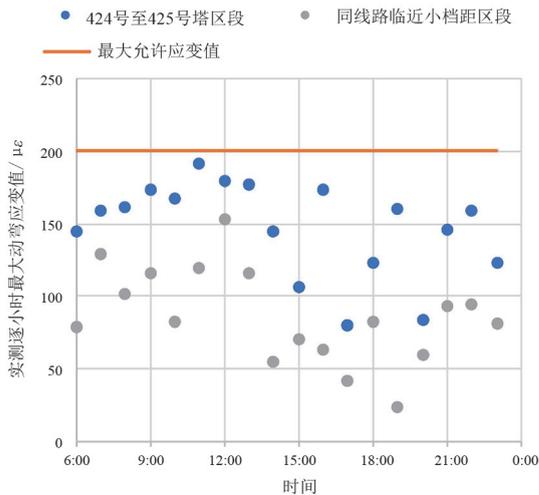


图 4 微风振动水平监测结果分布 (基于 2021 年 11 月 7 日测试数据)

表明导线和防振锤长时间处于高强度工作状态,给德宝线的正常运行带来极为不利影响。而且,相比 424 号至 425 号塔大档距段,临近地区较小档距段导线端部动弯应变值则处于较低水平。

初步分析表明,424 号至 425 号塔间线路导线

端部应变较大的主要原因在于该线路段档距大,且附近风速较大,动弯应变载荷处于较恶劣状态,风振问题较为突出。因此,此档线路段虽不属于大跨越形式,但常规标准下的防振设计无法满足实际运行要求,需要考虑参考大跨越区段的防振设计标准来降低导线动弯应变水平。

3 防振设计优化

现有大跨越工程防振设计方案,一般采用“ β 阻尼线+防振锤”的组合形式^[15-17],见图 5 所示,防振锤一般采用 1~3 个,阻尼线长度一般为 1~4 m 间隔分布。



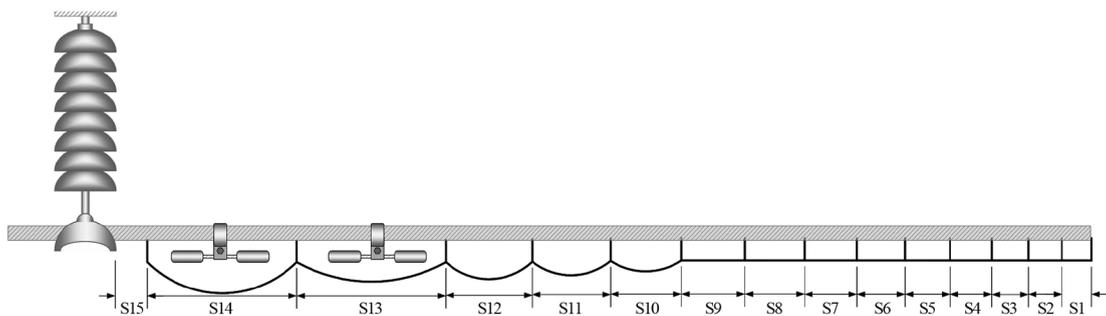
图 5 “ β 阻尼线+防振锤”组合设计形式

其基本工作原理是改变导线局部的刚度、阻尼以及质量分布,调整导线作为长柔度体的振动模式,通过导线和阻尼线内部绞线的摩擦,来消耗系统整体的振动能量,减弱导线端部动弯应变集中效应。该组合方案具有原理清晰明确、原材料工艺成熟、经济性好、可靠性高等优点,是目前超、特高压线路大跨越区段常用的防振装置设计和安装方案。

推荐采用的防振锤型号为 FDY-6(保持原型号不变), β 阻尼线型号为 JL/G2A-300/40,实物如图 6 所示。考虑 β 阻尼线不同花边长度(即相邻固定线夹之间的间隔)的频率特征响应情况,选择不



图 6 β 阻尼线(左)和防振锤(右)

图 7 拟分析的 β 阻尼线+防振锤防振设计

同花边长度组合方案,使其在 10~70 Hz 风振频率范围内均具有良好的耗能防振作用;同时在左侧花边(靠近档端)中间安装防振锤,来调整不同频率区间的位移响应及耗能效果。

拟分析的防振装置安装设计方案及试验室内测试安装见图 7 和图 8,其中需要说明的是,对右侧(靠近档中侧)的 S1 至 S5 共 5 个花边进行剥层处理,进一步优化该区域响应频率、幅值,改善防振设计方案的频响特性。

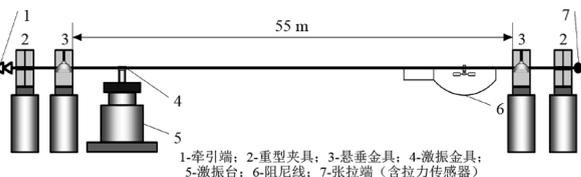


图 8 防振效果评估试验所用模拟试验档内布置情况

表 1 阻尼线线夹固定位置及剥层处理情况

编号	长度/ m	剥层 处理	编号	长度/ m	剥层 处理	编号	长度/ m	剥层 处理
S15	1.0		S10	2.4		S5	1.4	
S14	4.0		S9	2.0		S4	1.3	
S13	3.6	不剥层	S8	1.8	不剥层	S3	1.2	剥掉最外层
S12	3.2		S7	1.6		S2	1.1	
S11	2.8		S6	1.4		S1	1.0	

4 防振效果试验评估与对比

根据 DL/T 1099—2021《防振锤技术条件和试验方法》^[11]相关要求,重要线路段开展防振方案设计,需针对导线-防振装置耦合系统的位移、频率以及应力应变峰值等特性开展试验测试,旨在明确防振方案调整前后微风振动特性的差异,以及安装后是否可以将各共振频率点下的应变峰值降低至技术条件要求的阈值之下,满足该大档距导线在运行过程中的防振需求。其中,室内防振效果评估试验是

大跨越工程防振设计方案过程中最为重要的试验,试验结果可直接表征防振效果的优劣。

现有防振设计在进行效果评估时,需要在相同型号的导线上开展模拟分析试验,采用的室内模拟档如图 8 所示。试验测试方法、流程和数据分析方面完全遵照 DL/T 1099—2021 的相关要求。为了引入低温环境条件,充分利用北京地区遭遇寒潮的时间(2022 年 1 月 9 日至 11 日)开展相关试验,试验期内试验档所在室内温度约 5℃~10℃,可充分体现±500 kV 德宝线 424 号至 425 号塔线路段环境实际特征情况。

对比方案设置方面,传统大跨越线路在设计防振方案时,一般采用导线自阻尼试验、防振锤功率特性试验与防振效果评估试验相结合的方式,来验证防振装置自身防振效果以及耦合形式下防振方案整体对导线的保护效果。而针对在运线路进行防振方案分析研究,旨在进一步地优化功能和提升效果,所以不需要考虑导线或防振锤自身单独的耗能特性,仅需考虑图 2 所示的原有防振设计方案(以下简称原方案)以及图 7 所示优化后的组合防振设计方案(以下简称组合方案),来进行效果评估和对比分析。

试验过程中,通过在 10~70 Hz 内调整风振频率,并依照 DL/T 1099—2021 附录所述风功率曲线,测试该频率区间内,各主模式下主频率点对应的悬垂线夹、防振锤线夹、阻尼线夹出口处最大动弯应变响应情况,分析试验数据,得到结果如图 9 至图 11 所示。

由图 9 至图 11 可知,阻尼线和防振锤组合使用的防振效果,可以大大提升线路在不同风振频率下的防振能力,主要体现在:

1) 悬垂线夹出口处导线的最大动弯应变出现在风振频率 16.92 Hz 时,为 113 $\mu\epsilon$,满足小于 120 $\mu\epsilon$ 的防振要求;阻尼线夹出口处的最大动弯应

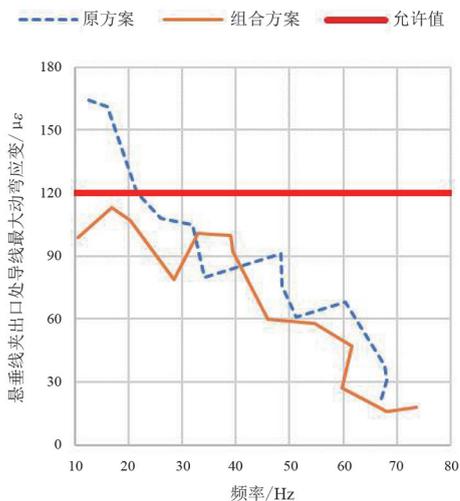


图 9 悬垂线夹出口处最大动弯应变响应

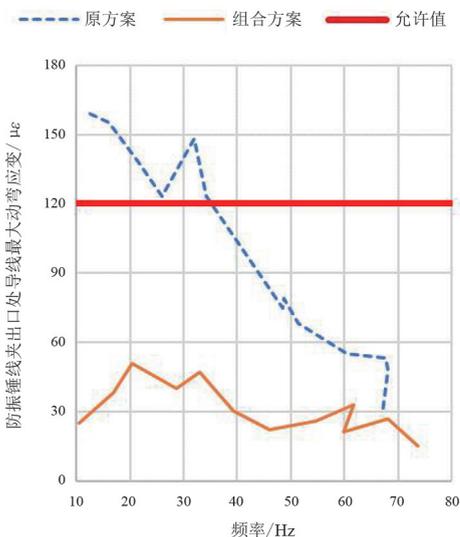


图 10 防振锤线夹出口处最大动弯应变响应

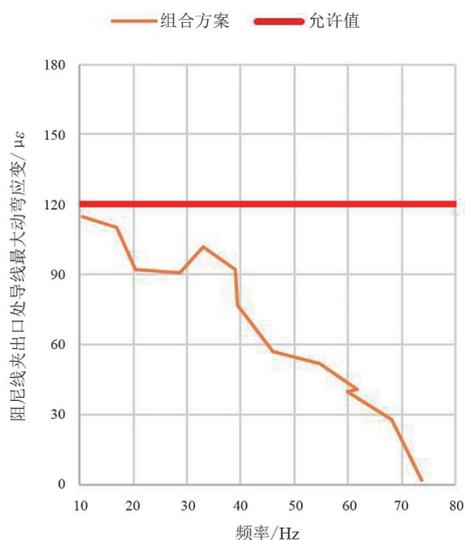


图 11 阻尼线夹出口处最大动弯应变响应

变出现在风振频率 10.55 Hz 时,为 $115 \mu\epsilon$,同样满足小于 $120 \mu\epsilon$ 的防振要求。

2) “ β 阻尼线+防振锤”组合形式中,按照花边位置来进行不同的剥线设置。一方面可以减轻导线整体负荷,降低线夹处导线的动态载荷水平;另一方面可以改变该区域花边的响应频率,改善防振设计方案的频响特性。

3) 通过引入阻尼线,悬垂线夹和防振锤线夹出口处导线峰值应变均有大幅降低,相比原方案,组合方案导线上出现的最大动弯应变值可降低约 30%。

4) 防振锤线夹附近的动弯应变值降低至 $50 \mu\epsilon$ 以下;同时,由于安装数量的减小,可大大减小导线、金具的故障风险及其维护成本。

由此可见,二者联合使用并调整优化布置位置,可使整个防振性能达到最佳。

5 结 论

上面充分考虑了四川广元地区环境条件,利用大跨越防振设计原则和方法,对川北地区典型大档距线路段(± 500 kV 德宝线 424 号至 425 号塔间)开展了现场测振和防振方案优化试验。结果表明,利用“ β 阻尼线+防振锤”组合防振设计形式,可大大降低导线上出现的最大动弯应变。优化后,悬垂线夹与阻尼线线夹出口处的最大动弯应变试验测试值均满足“ $\leq 120 \mu\epsilon$ ”的防振要求,故所推荐方案为 ± 500 kV 德宝线 424 号至 425 号塔线路段所采用。

参考文献

- [1] 李大勇,李颖慧.微气象条件对输电线路的影响及防御措施[J].四川电力技术,2013,36(5):91-94.
- [2] 刘翔云,黄兴,廖邢军,等.高烈度地震触发山区输电线路震害发育分布规律[J].四川电力技术,2020,43(5):11-13.
- [3] 赵隆.输电线路导线微风振动在线监测系统的研究与设计[D].西安:西安工程大学,2012.
- [4] ZHAO B, LI P, YANG Z, et al. Analysis on data of galloping and wind deviation sensors in eastern mongolia during the winter of 2021[C]. 2nd International Conference on Consumer Electronics and Computer Engineering (ICCECE)2022; 261-264.
- [5] 安慧蓉,王旭锋,辛鹏.750 kV 送电线路大档距 OPGW 防振设计[J].电力系统通信,2006,27(8):11-14.

(下转第 58 页)

绝对互相关系数序列曲线可以有效提升故障处异常峰的幅值和陡度,便于电缆故障定位。

3) 仿真和实测结果表明,所提方法可以有效提升对低压脉冲法中反射信息的识别能力,提高对电缆故障的定位能力。

参考文献

- [1] 饶显杰,周凯,汪先进,等. 基于改进 SVD 算法的局部放电窄带干扰抑制方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(2): 705-713.
- [2] 高树国,刘贺晨,范辉,等. 考虑波速特性的小波变换模极大值法的电力电缆局部放电定位研究[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2244-2250.
- [3] 王丹阳,唐健钧,陈讴,等. 基于时域反射法的航空电缆故障定位技术研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(S2): 84-88.
- [4] 李露. 船用电力电缆故障诊断的仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [5] 杨帆,曾莼,阮羚,等. 中压交联电缆接头复合界面受潮缺陷的诊断方法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 1-5.
- [6] 余坤,赫志伟,王善民,等. 基于低压脉冲法的电力

电缆外力破坏检测技术研究[J]. 四川电力技术, 2017, 40(4): 48-52.

- [7] 陈伟,王谦,吴高林,等. 基于时域脉冲反射的高压电力电缆测长技术研究[J]. 中国仪器仪表, 2020(8): 83-87.
- [8] 李启飞,温玮,韩蕾蕾,等. 基于短时互相关算法对航空磁异常信号的检测[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(6): 178-183.
- [9] 孟佳彬,李智华,吴春华,等. 基于 SSTDR 的光伏系统对地故障检测方法[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 109-118.
- [10] 白春乐,马娇. 一种基于互相关系数的白噪声不相关性检验方法[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(10): 67-69.
- [11] 谢敏,周凯,赵世林,等. 新型基于反射系数谱的电力电缆局部缺陷定位方法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 3083-3089.
- [12] 尹振东,王莉,陈洪圳,等. 增广时频域反射法在电缆复合故障检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7760-7773.

作者简介:

周涛(1984),男,工程师,主要从事电气设备试验和故障诊断方面的工作。(收稿日期:2022-07-15)

(上接第 5 页)

- [6] 宋玉才,冯智慧. 架空电力线路导线断股原因分析及预防措施[J]. 电工技术, 2015(12): 11-12.
- [7] SI Jiajun, ZHU Kuanjun. Aerodynamic analysis of bundle with six cables for UHVDC by numerical simulation based on LES[C]. Power Engineering and Automation Conference (PEAM), IEEE, 2012: 1-5.
- [8] 万建成,周立宪,刘臻,等. 1000 mm² 大截面导线用防振锤设计[J]. 电力建设, 2011, 32(1): 94-98.
- [9] LIU S, SUN N, YIN Q, et al. Study of new vibration suppression devices for application to EHV transmission line groundwires[J]. Energy Procedia, 2011(12): 313-319.
- [10] 赵颖越. 我国南北气候分界线对全球变化的响应[D]. 成都: 四川师范大学, 2019.
- [11] 全国架空线路标准化技术委员会. 防振锤技术条件和试验方法: DL/T 1099—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [12] 程敏杰,王建文. 利用机器视觉的直齿轮在线测量方法研究[J]. 机械设计, 2020, 37(3): 19-22.
- [13] 王刚,彭商贤,黄时聪,等. 一种非接触式机器人位姿精度测量系统[J]. 机械设计, 1992, 9(6): 37-38.
- [14] 谢源,康双扬. 基于四目白光视觉的蜗杆压力角检测研究[J]. 机械设计, 2021, 38(6): 70-74.

- [15] 陈嘉麟,李金奎. 光纤复合架空地线的防振[J]. 电力系统通信, 2006, 27(9): 6-9.
- [16] 王藏柱,杨晓红. 输电线路导线的振动和防振[J]. 电力情报, 2002(1): 69-70.
- [17] 刘胜春,王景朝,吴建生,等. 500 kV 大跨越四分分裂导线及地线防振试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2007(4): 332-336.

作者简介:

刘敬华(1977),男,教授级高级工程师,研究方向为电网设备运维管理;

赵彬(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为电网风振防治;

邹赫(1985),女,博士,经济师,研究方向为对外直接投资、电力设备技术经济性评价;

李鹏(1984),男,博士,高级工程师,研究方向为电网风振防治;

李孟轩(1991),男,博士,高级工程师,研究方向为电网智能感知与传感;

汉京善(1992),男,硕士,工程师,研究方向为人工智能技术;

杨知(1992),男,博士,高级工程师,研究为输电线路防灾减灾。

(收稿日期:2022-07-20)