

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.054

输电线路防台风脱线保杆装置及传感器监测系统研究

高耀光,王贵奇,李珺,张志豪,童卓皓,许林峰

(广西大学 机械工程学院,广西 南宁 530004)

摘要:针对台风灾害会对输电线路造成破坏的问题,对一种输电线路防台风脱线保杆装置进行研究。通过理论计算和 ANSYS 力学性能仿真分析,完成对互换自锁机构中关键部件的研究,并对其进行运动仿真和实验。结果表明:该装置在台风来临时能够使定位自锁并让电线自动脱落,实现对高压线杆的保护。同时,建立以传感器为基础的远程监测系统,实现管理部门对输电线路的及时维修。该装置使用双弹簧设计,提高了机构的安全性和稳定性,同时便于安装和维修,确保电力供应和人员安全,减少触电风险。它还能根据环境变化调整弹簧,适应性强,应用范围广。

关键词:输电线路保护;脱线保杆;监测;安全;自锁;ANSYS;传感器

中图分类号:TP212.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0287-06

Research on Anti-typhoon Disconnecter for Transmission Lines and Sensor Monitoring System

GAO Yaoguang, WANG Guiqi, LI Jun, ZHANG Zhihao, TONG Zhuohao, XU Linfeng

(School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: This paper studies a typhoon-resistant overhead power line anti-disconnection and pole protection device to cope with the losses caused by typhoon disasters. Through theoretical calculations and ANSYS mechanical performance simulation analysis, the research on key components of the interchangeable self-locking mechanism is completed, on which kinematic simulation and experiments is conducted. The results show that the device can enable self-locking and automatic disconnection of the wires during typhoons, thus protecting the high-voltage poles. A sensor-based remote monitoring system is established to facilitate timely maintenance of transmission lines by management departments. The device features a dual-spring design, enhancing stability and ease of installation and maintenance, ensuring the continuity of power supply and personnel safety, and reducing the risk of electric shock. It can also adjust the springs according to environmental changes with strong adaptability and a wide range of applications.

Keywords: power transmission line protection; off-line protection pole; monitoring; safety; self-locking; ANSYS; sensor

0 引言

随着全球生态环境不断恶化,世界范围内台风和极端气候事件频繁发生。中国位于西北太平洋的西岸,受热带洋面的影响,每年平均有 9.09 个热带气旋在中国登陆,其中 3.17 个达到台风等级。电力作为生产和生活的能源供给,对经济发展和社会稳定起到了重要支撑作用。2016 年厦门遭受台风“莫兰蒂”侵袭,自然灾害对输电线路的损坏包括杆塔倒塌、折断变形等,造成二十余基输电塔杆的破坏^[1]。虽然台风发生的概率较低,但其带来的损失是非常严重的。台风不仅容易对电力传输系统造成损坏,严重威胁供给的稳定^[2-3]。而且,因电网线路具有传输距离远、范围

广、连续性和复杂的网架结构等特点,其受强台风和暴雨的影响较大,易出现杆塔倾斜、倒塌和线路断裂等断电事故,进而会导致部分电力系统的瘫痪^[4]。台风天气频发,造成我国东南沿海地区电网线路严重损毁,不仅导致社会生产和居民用电中断,还阻碍了抢险救灾任务的有效开展^[5]。由于高压线或特高压线经常受到台风影响,高压线杆被破坏的频率较高,具体表现为强台风及持续暴雨引发群发性的断线与倒塔灾害,造成局部地区电力瘫痪及电力安全事故。由于高压线杆人工维修过程中存在一定的危险性,并在一定程度上影响供电效率^[6]。因此,高压线杆的防台风设计成为研究的热门课题之一。

近年来,针对输电线路的防台风课题国内学

基金项目:广西大学国家级大学生创新创业训练计划项目(202210593031)

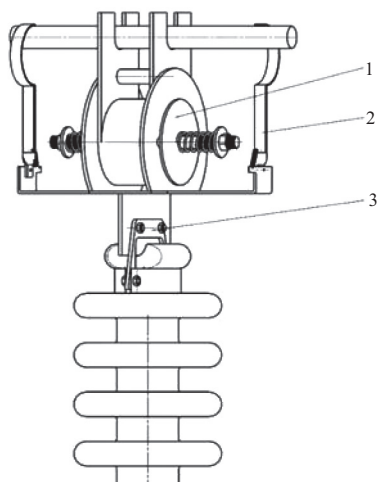
第一作者简介:高耀光(2002—),男,河北石家庄人,本科,研究方向为机械和传感器,x15081191812@163.com。

者做了大量的研究和设计。耿贞伟等^[7]对三线两塔的电力塔耦合系统进行力学模型的构建,并利用 ANSYS 进行风载荷的模拟分析。梁龙腾^[8]对输电塔的动力特性和风振响应进行了有限元分析,并设计了输电塔抗风装置。田利等^[9]对输电塔构建了有限元模型,并进行静力和动力分析,根据分析结果对输电塔的结构进行了优化,提高了输电线路的抗灾能力。张华恺等^[10]研究了强对流天气下的输电塔-线体系风雨荷载作用下的响应变化规律,并建立了风雨组合系数,为输电线路的抗风雨研究和设计提供了指导。靳庆通等^[11]利用多尺度方法分析了无损加固后的输电塔杆在风载荷下的非线性响应和倒塌连续性,验证了无损加固措施对输电线路抗风载荷的有效性。

本文研究设计了一种输电线路防台风脱线保杆装置,其在高压线杆断裂时,能够自动脱线保杆,防止触电事故的发生。该装置的研究具有重要的现实意义,除了能够加强电网线路的抗风性能,还有助于电网线路的灾后抢修,及时恢复供电^[12]。

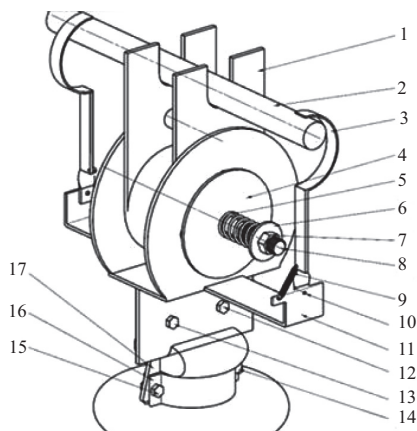
1 输电线路防台风脱线保杆装置的结构设计

输电线路防台风脱线保杆装置的结构包括双弹簧定位机构、夹紧机构和防跳机构。它是把风力当作动力源,通过弹簧的弹力来控制装置的运转,当滚珠受力大于设定值时,实现自动脱线保杆的功能。总体机构如图 1—图 2 所示。本文主要是对一种输电线路防台风脱线保杆装置的结构设计进行研究。



1—双弹簧定位机构;2—防跳机构;3—夹紧机构。

图 1 总体机构图 1



1—可旋转的定位电线套;2—电线;3—右防跳夹;4—右滚珠压板;
5—右弹簧;6—右压紧板;7—螺母;8—带有螺纹的定位轴;
9—右防跳弹簧;10—销钉;11—定位支撑座;12—螺栓;
13—螺栓;14—螺栓;15—螺栓;16—右夹紧环;17—连接定位板。

图 2 总体机构图 2

2 工作原理

双弹簧定位机构由带有螺纹的定位轴连接多个构件,通过双弹簧向内挤压滚珠压板和 8 个滚珠,实现对可旋转的定位电线套的精准定位,使得整个装置更加稳定。

在可旋转的定位电线套两侧各开有左右对称的 4 个凹槽,在定位支撑座两侧各开有左右对称的 4 个贯穿孔。静止时 8 个滚珠嵌在凹槽和贯穿孔中。电线在风力的作用下会发生摆动,当装置受到的电线摆动产生的力与风力之和大于阈值时,会产生位移从而使可旋转的定位电线套转动,致使滚珠全部滑出凹槽。

当可旋转的定位电线套转过角度达到 90° 时,滚珠重新被压入凹槽,实现可旋转的定位电线套的精准定位和固定自锁。此时,电线将从可旋转的定位电线套中脱落,达到保护电线杆的目的。

3 双弹簧定位机构的力学模型

双弹簧定位机构由带有螺纹的定位轴连接多个构件,通过双弹簧向内挤压滚珠压板和 8 个滚珠,实现对可旋转的定位电线套的精准定位,使得整个装置更加稳定。

由于机构前、后、左、右对称,故只分析单边的单个滚珠的受力情况即可,如图 3 所示。

当装置受到微弱风力影响时,滚珠的主要受力如图 4 所示^[13-14](各处摩擦力较小,忽略不计),其中: F_x 为可旋转的定位电线套所受的水平力; F 为可旋转的定位电线套给滚珠的合力; F_y 为

滚珠压板对滚珠的挤压力(即为弹簧弹力); F'_x 为定位支撑座给滚珠的反力; F_y 为滚珠受到可旋转的定位电线套的竖直分力; F_{y0} 为初始竖直力; α 为 F 与水平方向的夹角。

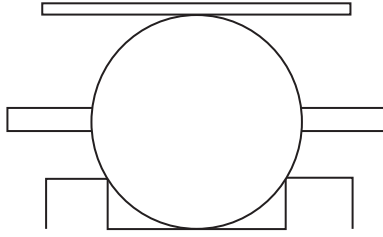


图3 滚珠结构示意图(俯视)

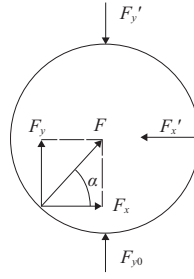


图4 滚珠初始状态受力图

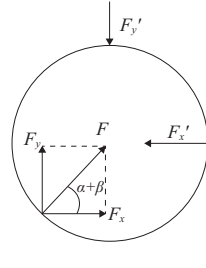


图5 滚珠受力图

在忽略摩擦力的影响下,综合图4、图5建立力学平衡方程。

$$\begin{cases} F_y = F_x \tan \alpha = F'_y = kX_1 \\ F_x = F'_x \\ F_2 \tan(\alpha + \beta) = k(X_1 + X_2) \\ X_2 = r[\sin(\alpha + \beta) - \sin \alpha] \\ F_2 \tan(\alpha + \beta) \geq \frac{F_1 \tan \alpha \{r[\sin(\alpha + \beta) - \sin \alpha] + X_1\}}{X_1} \end{cases} \quad (1)$$

联立式(1)解得

$$\frac{F_1}{F_2} \geq \left\{ \frac{\tan \alpha}{X_1} \cdot \frac{r[\sin(\alpha + \beta) - \sin \alpha] + X_1}{\tan(\alpha + \beta)} \right\} = Y \quad (2)$$

式中:假设 $F_x = F_1$ 时, $F_y = F'_y$,即 $k = \frac{F_1 \tan \alpha}{X_1}$; F_2 为假设能使滚珠完全从凹槽滚出的力; $\alpha \in (0, 90^\circ)$; $\beta \in (0, 90^\circ - \alpha)$ 。

为达到试验目的,因此限制 α 为 30° , $X_1 = 0.01$ m, $r = 0.08$ m, $X_2 = 0.04$ m。

以 β 为自变量,利用 GeoGebra 分析 Y 的图像,如图6所示。

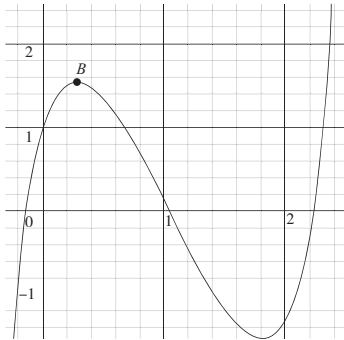


图6 Y的图像

由图6分析, Y 的最大值为1.54。

当风力变大,小球绕接触点滚过 β 角时(即滚珠受到定位电线套和定位支撑座的综合力,产生滚出凹槽的趋势,竖直处无接触力, F_{y0} 为0),受力情况如图5所示。

综合分析,在 $F_2/F_1 = 1.54$ 时,滚珠恰好被挤出凹槽,且弹簧刚度要求为

$$k = F_2 \cdot \frac{\tan 30^\circ}{1.54 \times 0.1} = 3.75 F_2 \quad (3)$$

4 双弹簧定位机构关键部位力学性能仿真

弹簧是影响自锁效率和安全性的关键零部件,故应对所选取弹簧不同的压缩量情况进行力学分析,即弹簧把滚珠变成挤出趋势和恰好挤出凹槽两种状态下的应力和变形。选取的弹簧规格为YA 16×140×260—3,钢丝直径为16 mm,弹簧中径为140 mm,自由高度为260 mm,有效圈数为6,支撑圈数为2。

对模型进行简化,假设 F_2 为933.33 N,导入 ANSYS Workbench 中进行受力仿真,得到 ANSYS 等效应力图。

当弹簧压缩量为50 mm时,弹簧的变形如图7所示,应力如图8所示。当弹簧压缩量为10 mm时,弹簧的变形如图10所示,应力如图11所示。

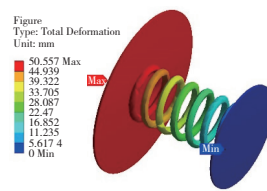


图7 50 mm 变形图

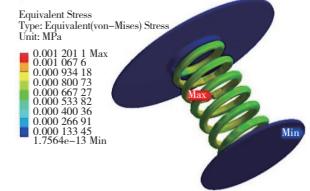


图8 50 mm 应力图

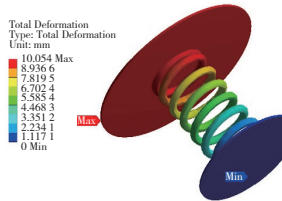


图9 10 mm 变形图

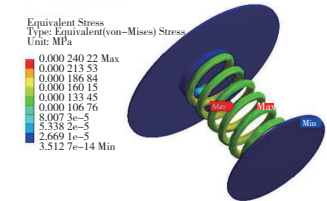


图10 10 mm 应力图

ANSYS 仿真结果如表 1 所示,弹簧的规格满足实验所需的要求。

表 1 力学仿真结果

参数名	弹簧压缩量/mm	
	50	10
最大应力值/kPa	1.20	0.24

5 实验结果

5.1 模拟测试

本文制作了双弹簧定位机构实物模型如图 11 所示,并进行了模拟实验测试。在模拟测试中,选用由电动机驱动的曲柄连杆机构来模拟风载荷,通过曲柄连杆机构的反复运动来推动电线摆动,调节各项参数来模拟电线在实际状况下的受力情况。



图 11 实物模型图

本测试为达到可行性和实用性的目的,根据固有装置来假设实际上的电线杆客观参数,取水平档距 $L=300\text{ m}$,临界力为 $2\times 933.33\text{ N}$,选取 5 组风速(分别为 4、5、6、7、8 级风),其中导线的风荷载计算公式^[15-16]:

$$W_{\text{line}} = \frac{1}{16} \cdot g \cdot C \cdot F \cdot V \quad (4)$$

式中: W_{line} 为导线的风荷载, N; g 为重力加速度, 其值为 9.807 m/s^2 ; C 为风荷载的体型系数(导线直径小于 17 mm 时, C 取 1.2 , 导线直径大于 17 mm 时, C 取 1.1 , 在此导线直径等于 21.6 mm 时, 则 C 应取 1.1); F 为导线外径与水平档距的乘积, 取 1.08 m^2 ; v 为最大风速, 30 m/s 。

当风速等级达到 8 级(强风)时, 风速 V 大约等于 20.7 m/s ^[17], W_{line} 等于 $1\ 872.1\text{ N}$, 超过了装置的临界力 $2\times 933.33\text{ N}$, 电线杆极易发生损坏, 需脱线保杆。

当风速等级在 7 级及以下时, 取风速最大值

V 约为 17.1 m/s ^[18], W_{line} 等于 $1\ 546.5\text{ N}$, 未达到临界力, 电线所承受的风荷载在允许范围内, 装置不需运作。

测试表明在本实验设定的条件下, 在风速达到 8 级风时, 装置的参数应已同时达到设计的临界值, 就能达到脱线保杆的效果。既不会因为频繁的断电影响居民的正常用电, 也能够保证电线杆的安全使用。

5.2 脱线实验

为了进一步验证防台风脱线保杆装置在不同强度台风下的可靠性和稳定性, 我们在模拟风洞中进行了脱线实验。风洞实验运用缩尺模型, 在实验成本和实验条件控制方面具有显著优势, 不仅能够有效降低实验的经济和时间成本, 还方便人为调节风速、风向等参数, 使得研究具有更加可控和理想化的实验条件^[19]。实验风速分别设置为 6 级、7 级和 8 级, 模拟不同强度台风下的脱线效果。

在 6 级风(风速约为 12.8 m/s)条件下, 装置未发生脱线, 电线保持正常工作状态。在此条件下, 我们监测了装置的受力情况, 包括弹簧的压缩量、滚珠与凹槽的接触力等参数。实验结果显示: 弹簧压缩量约为 10 mm , 滚珠与凹槽的接触力约为 400 N 。这些数据表明装置在较弱的台风下仍能保持良好的稳定性。

在 7 级风(约为风速 17.1 m/s)条件下, 装置也未发生脱线, 电线仍然保持正常工作状态。在此条件下, 我们继续监测了装置的受力情况。实验结果显示, 弹簧压缩量约为 22 mm , 滚珠与凹槽的接触力约为 780 N 。这些数据表明装置在中等强度的台风下仍能保持较好的稳定性。

在 8 级风(风速约为 20.7 m/s)条件下, 装置成功实现脱线, 电线与杆塔分离, 保护了高压线杆不受损坏。在此条件下, 我们监测了装置的受力情况。实验结果显示: 弹簧压缩量约为 28 mm , 滚珠与凹槽的接触力约为 $1\ 200\text{ N}$ 。这些数据表明, 装置在强台风下仍能保持良好的稳定性, 并且成功实现了脱线保护功能。

此外, 我们还监测了脱线后的电线与杆塔的分离距离。实验结果显示, 在 8 级风条件下, 电线与杆塔的分离距离约为 1.5 m 。这一数据表明装置在强台风下能够确保电线与杆塔的有效分离, 为维修人员提供足够的空间进行抢修。

实验证明该装置在不同强度台风下表现良

好,只有在强台风条件下才会发生脱线,确保了高压线杆的安全。同时,脱线后的电线与杆塔分离,便于维修人员及时抢修,尽快恢复供电。实验验证了该装置的实用性和可靠性。整个装置结构巧妙,易于大批量生产,并且价格低廉,可以有效提高工人维修的安全性和线杆的使用寿命。当然该装置参数设定,需视当地的具体情况而定。

6 传感器监测系统设计

为了实现将脱线信息及时反馈给管理部门,我们在脱杆机构下方安装了压力传感器并设计了监测系统。当台风达到一定级别,脱杆机构脱杆后,会向下旋转,与压力传感器接触,触发信号发送给管理部门监控系统,及时进行灾后抢修,恢复供电。

6.1 传感器选型

考虑到极端天气条件,选择了防水防风的工业级传感器,型号为 Futek LCB305,材质为不锈钢,具备防风防水能力,能够在极端环境下稳定工作。具体技术参数如表 2 所示。该型号的压力传感器内置滤波器,可有效抵抗输电线的电磁干扰,同时具有高精度、宽温工作、防水防尘、响应速度快,基本符合输电线路防台风脱线保杆装置的使用需求。

表 2 Futek LCB305 技术参数

参数	取值
测量范围/N	0~200
输出信号/mA	4~20
工作电压/V	DC 24
工作温度/℃	-40~70
防护等级	IP67
直径/mm	25
长度/mm	50
质量/g	约 100

6.2 脱线监测系统设计

脱线监测系统设计包括数据采集和无线传输两个部分,系统模型如图 12 所示。其中数据采集包括传感器模块、微控制器模块和 LoRa 模块等,利用锂电池进行稳定供电。无线传输主要包括 LoRa 模块、微处理器模块和以太网模块组成,选择 LoRa WAN 协议提供长距离、低功耗的无线通信,非常适合远程监控应用^[20]。

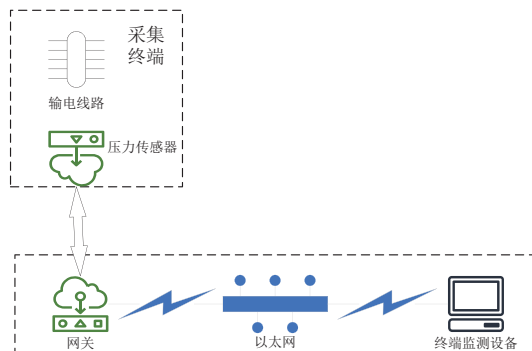


图 12 脱险检测系统模型

1) 采集层设计

数据采集层是对传感器模块、微控制器模块和无线通信模块的集成,实现压力数据的采集和无线传输。如图 13 所示。

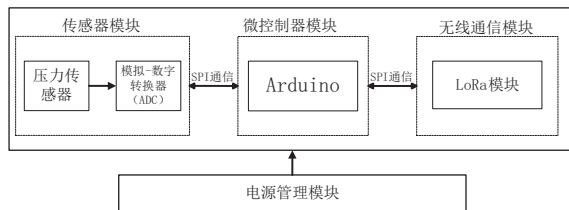


图 13 采集层结构

传感器模块中,压力传感器将对环境输入的响应通过模拟-数字转换器(ADC)将模拟信号转化为数字信号,然后以 SPI(serial peripheral interface)通信协议传输给 Arduino。为提高信号的精度,该模块中没有采用 Arduino 的内置 ADC,而使用了外部 ADC。

微控制器 Arduino 主要负责配置 LoRa 模块的参数,以及接收 ADC 的数字信号,并将数据封装处理,通过 LoRa 模块发送。无线通信模块选用安信可 Ra-02,可实现超长距离扩频通信,具有很强的抗干扰能力和低电流消耗特性,可满足真实工作环境。

2) 网关设计

网关部分主要负责接受采集端的信息并进行处理后,上传至上位机。结构如图 14 所示。

采集层与网关之间通过 LoRa 模块进行无线通信,网关与终端服务器之间通过 HTTP 协议进行连接,LoRa 网关对接收到的数据包进行解码,再通过以太网模块将数据转发给终端设备,实现脱线情况的远程监测。

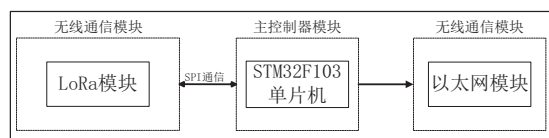


图 14 网关结构

7 结语

本文设计了一种输电线路防台风脱线保杆装置。该装置基于双弹簧机构,通过弹簧的弹力控制装置运转,以实现对高压线杆的保护。详细阐述了双弹簧定位机构、夹紧机构和防跳机构的工作原理和结构设计。通过理论计算、仿真分析和实验验证,证实了该装置在台风来临时可以自动脱落电线,保护高压线杆。同时,设计了基于传感器的远程监测系统,可及时反馈脱线信息,方便管理部门进行维修。该装置具有环境适应性强、实用性高的特点,可为电网线路抗风和灾后抢修提供重要支持。未来工作将进一步完善装置性能,优化监测系统,并进行现场试验,以促进该技术的应用和推广。

参考文献:

- [1] 程江洲,谢卓然,李欣,等. 海洋大气环境下输电塔线体系强风响应模拟分析[J]. 装备环境工程, 2025, 22(2): 52-61.
- [2] 罗俊平. 浅谈配网防风加强措施[J]. 南方电网技术, 2013, 7(3): 63-66.
- [3] 彭伟松. 台风登陆后对沿途电网线路破坏量预测研究[D]. 北京:华北电力大学, 2019.
- [4] 吴优,黄秀兵,王乃玉. 基于易损性分析的台风过程输电杆塔时变风险预测[J]. 自然灾害学报, 2025, 34(1): 137-146.
- [5] 梁树猷,冯志刚,程兴无,等. 影响淮河流域的台风统计特征分析[J]. 治淮, 2018(4): 13-16.
- [6] 张卓群,李静,秦玮,等. 138kV 输电线路连续倒塔原因分析[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2016, 15(2): 18-22.

- [7] 耿贞伟,苏文伟,于凤荣,等. 基于 Ansys 的高压输电塔风振特性分析[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 84-90.
- [8] 梁龙腾. 基于 TMD 的高压输电杆塔风振控制研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2016.
- [9] 田利,罗贤超,付朝阳,等. 基于倒塌延性的输电塔地震抗倒塌设计方法[J]. 振动·测试与诊断, 2024, 44(5): 916-921, 1037.
- [10] 张华恺,菅明健,张都清,等. 强对流天气下输电塔—线体系倒塌破坏与风雨组合系数研究[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(3): 111-121.
- [11] 靳庆通,田利,刘俊才,等. 强风下输电塔破坏分析与加固研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(5): 1133-1142.
- [12] 王贵奇,陈于思,马运阳,等. 一种防台风双弹簧定位输电线路脱线保杆装置:中国, CN218976292U[P]. 2023-05-05.
- [13] 刘玉峰,吴海军,易戮. 台风阵风特性对配电线路电杆破坏受力分析[J]. 结构工程师, 2021, 37(6): 114-121.
- [14] 陈钧孚,郑寅,池小佳,等. 输电线路力学计算的作用[J]. 自动化应用, 2015(12): 125, 128.
- [15] 潘彩容. 10kV 军民输电线路电杆的受力分析[J]. 广东电力, 2008, 21(1): 47-49.
- [16] 肖元博,张林枫,张广玉,等. 架空输电线路荷载规范中导线风荷载的分析[J]. 电力勘测设计, 2024(2): 45-50.
- [17] 吴明祥,包建强,叶尹,等. 超强台风“桑美”引起温州电网输电线路事故的分析[J]. 电力建设, 2007, 28(9): 39-41.
- [18] 印华,方挺,董冲,等. 基于 LoRa 的低功耗温度采集传感器系统设计[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2024, 41(1): 53-59.
- [19] 周琦,王振华. 输电塔风致倒塌破坏研究进展[J]. 南方能源建设, 2024, 11(6): 59-68.
- [20] 顾志强,朱武,王光东. 基于 LoRa 和 NB-IOT 的远程温室监控系统的设计与应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2025(2): 48-53, 75.

收稿日期: 2024-03-26

(上接第 264 页)

- [16] 荆航,续彦芳. 基于改进人工蜂群算法优化的汽车主动悬架 PID 控制[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(5): 232-235.
- [17] 孙建民,王燕,赵国浩,等. 基于新型趋近律的半主动悬架模糊滑模控制[J]. 河北科技大学学报, 2023, 44(2): 123-131.
- [18] 朱茂源,朱洪林,刘小亚,等. 车身高度调节中的滑模控制神经网络消抖技术[J]. 中国测试, 2025,

51(6): 150-159.

- [19] 李刚,陈典锋,徐涵,等. 磁流变半主动空气悬架及复合控制策略研究进展[J]. 华东交通大学学报, 2023(6): 90-99.
- [20] 李彦阳. 汽车电控半主动空气悬架控制方法研究[D]. 长春:长春工业大学, 2018.

收稿日期: 2024-01-03