文章编号:1008-1534(2024)02-0141-07

输电杆倒塌破坏模式分析及安全防护装置研制

蒙文富,代张音,陈有成

(贵州大学矿业学院,贵州贵阳 550025)

摘 要:为了解决输电杆倒塌事故对电力系统稳定运行造成的影响,保障电力输送,以输电杆为研究对象,研究制造了输电杆安全防护装置。基于输电杆倒塌典型事故分析,理清输电杆倒塌破坏的力学特点,掌握其破坏模式,设计了相应的输电杆安全防护装置结构,并搭建模拟实验平台,验证装置的实用有效性。结果表明:输电杆倒塌破坏的主要模式为异物压覆输电线产生张力,并沿线路作用于输电杆杆体,当超出输电杆的破坏阈值时,就会导致输电杆倒塌破坏;输电杆安全防护装置以牺牲薄弱环节的方式卸载卸荷,准确动作保护输电杆;装置可减少各类灾害对输电杆的损伤和因输电杆倒塌事故造成的损失,提高了抢修效率和电力供给的可靠性。所研制的输电杆安全防护装置具有结构简单、适用范围广等特点,可为配网系统的抗灾预防提供新的借鉴。

关键词:安全电气工程;输电杆;破坏模式;主动防护;安全防护装置

中图分类号:TM752 **文献标识码**:A **DOI**: 10.7535/hbgykj.2024yx02008

Analysis of transmission pole collapse damage pattern and development of safety protection device

MENG Wenfu, DAI Zhangyin, CHEN Youcheng

(Mining College, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: In order to solve the impact of transmission pole collapse accidents on the stable operation of the power system and safeguard power transmission, a transmission pole safety protection device was researched and manufactured with the transmission pole as the research object. Based on the analysis of typical accidents of transmission pole collapse, the mechanical characteristics of the collapse damage of transmission poles were clarified, the damage mode were mastered, the corresponding structure of the safety protection device of transmission poles was designed, and a simulation experiment platform to verify the practical effectiveness of the device was built. The results show that the main mode of transmission pole collapse damage is the tension generated by the foreign objects overriding the transmission line and acting on the transmission pole body along the line, which will lead to the collapse damage of the transmission pole when it exceeds the damage threshold of the transmission pole. The transmission pole safety protection device unloads the load by sacrificing the weak link, and accurately protects the transmission pole. The device can reduce all kinds of disasters on the transmission pole damage and losses due to the collapse

收稿日期:2023-10-12;修回日期:2024-01-18;责任编辑:王淑霞

基金项目:国家自然科学基金(52264005)

第一作者简介:蒙文富(1998—),男,贵州纳雍人,硕士研究生,主要从事安全科学与工程方面的研究。

通信作者:代张音副教授。E-mail: zydai1@gzu.edu.cn

蒙文富,代张音,陈有成.输电杆倒塌破坏模式分析及安全防护装置研制[J].河北工业科技,2024,41(2):141-147.

MENG Wenfu, DAI Zhangyin, CHEN Youcheng. Analysis of transmission pole collapse damage pattern and development of safety protection device[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2024, 41(2): 141-147.

accident of the pole, improve the emergency repair efficiency and the reliability of power supply. The developed safety protection device for transmission poles is characterized by simple structure and wide applicability, which can provide new reference for the disaster prevention in distribution network system.

Keywords: safety electrical engineering; transmission poles; damage patterns; active protection; safety protective devices

输电杆是保证电力输送的重要设施,其正常运行对保障电力系统安全稳定具有重要意义。极端天气给中国电网造成了极大的破坏,如南部沿海强台风导致输电杆倒塌、南方出现持续的低温雨雪冰冻天气导致部分区域电力系统几近瘫痪等[1-5]。因此,开展防止输电杆倒塌破坏的研究具有重要意义。

目前,国内外开展了许多对灾害性气象条件下配网系统的防护技术研究工作,多是根据经验设计来提高设备本身的强度,从而提高抗灾能力。采用大规模大范围的设备改造,如提高输电杆等级、加装防风拉线、加固电杆基础、提高线路设计标准要求、杆塔改造和角钢加固等方法[6-14],提高线路灾害气象条件下的预防能力。学术研究领域也提出多种电杆保护机械装置,如电杆安装及“弃线保杆”方案[15],线路防台风保杆保线及保杆弃线吸能脱离一体化装置[16],剪切螺栓方案、弹簧掉脱线装置、两相载荷一体化装置和环形圈受力变形在“弃线保杆”装置上的应用等装置[17-19]。但是,一方面,大规模的设备改造需要投入巨额的成本,且设备本身抗灾能力受工程成本及实际情况限制提升有限,同时由于不同地区环境的差异性,以及灾害性气象条件本身的差异性,设备改造工程的普适性受到一定的限制。另一方面,这些技术仅属于一种被动的防护方式,即事后预防或处理,在灾害气象频发时,配网系统受损仍然严重。配网系统是生产生活的主要能源载体,其安全运行受到重视[20]。从历史事故经验来看,在所有电网设备故障类型中,输电杆破坏造成的后果最为严重[21],若能保护住输电杆,将极大缩短抢修时间,减少停电损失。

针对目前被动防护方式的不足,本文通过分析极端条件下输电杆破坏典型案例,得出输电杆倒塌的破坏模式,加入“主动防护”的安全理念,研制输电杆安全防护装置,将事后预防的风险控制理念转变为事前控制,并通过模拟实验验证该装置的有效性和实用性。

1 输电杆倒塌破坏模式分析

1.1 输电杆受损原因分析

收集近年来具有代表性的输电杆倒塌事故,相关内容见表 1。由事故案例可知,在极端天气下当输电杆塔受损严重时,必然会导致大范围停电,影响人们的生产和生活,造成巨大的经济损失,甚至人员伤亡。在所有的电力系统故障中,输电杆倒塌破坏是后果最为严重、抢修最为困难、停电时间长的事故之一。

表 1 输电杆倒塌事故典型案例

Tab. 1 Typical cases of transmission pole collapse accidents

时 间	地 点	事故原因	事故损失
2019.01	云南省红河县	树木倒覆压断电杆	局部地区停电 4 d
2019.08	海南省三亚龙门镇	大树被台风折断,压倒电杆	7 岁小孩重伤住院,局部停电
2020.01	云南省曲靖市陆良县	树木被大雪压断,进而压覆电路导致电杆断裂	高压线路受损,电力供应被强制中断
2022.01	广西省梧州藤县太平镇	电线杆附近堆置木材,木材倒塌压倒电线杆	一骑车男子当场身亡,部分地区停电
2022.02	湖北省武汉市东西湖区	大雪堆积压倒电杆	商铺招牌被毁,交通堵塞,局部停电
2022.04	云南省富宁县新华镇	安全监督管理不到位,未按建设标准施工	1 人死亡,造成经济损失 102 万元
2022.06	湖南省株洲市五里牌社区	大货车剐蹭电缆,电杆年久失修	现场交通严重堵塞,局部地区停电
2022.11	北京市昌平区太平庄	货车倾斜,划破通讯电缆并拉倒 4 根电线杆	1 辆货车当场起火,2 名行人受伤
2023.01	广西省南宁市青秀区	大车经过刮到电缆线	小车被严重砸坏,局部地区停电
2023.02	南京市江北新区浦珠北路	施工过程中电杆被损坏,电杆年久失修	交通严重堵塞,局部地区停电

输电杆倒塌事故案例表明,导致输电杆倒塌的直接原因主要有:树木倒覆和货车超载等挂拉输电线路;极端天气如大风、覆冰、暴雪和雷击等作用于输电线路;外部物体直接作用于输电杆本身(汽车碰撞和树木倒覆于输电杆杆体等)。

通过对输电杆倒塌事故进行分析得出,输电杆的主要破坏模式是由异物压覆输电杆杆体或输电线路,导致输电杆因受外力作用而发生倾斜或

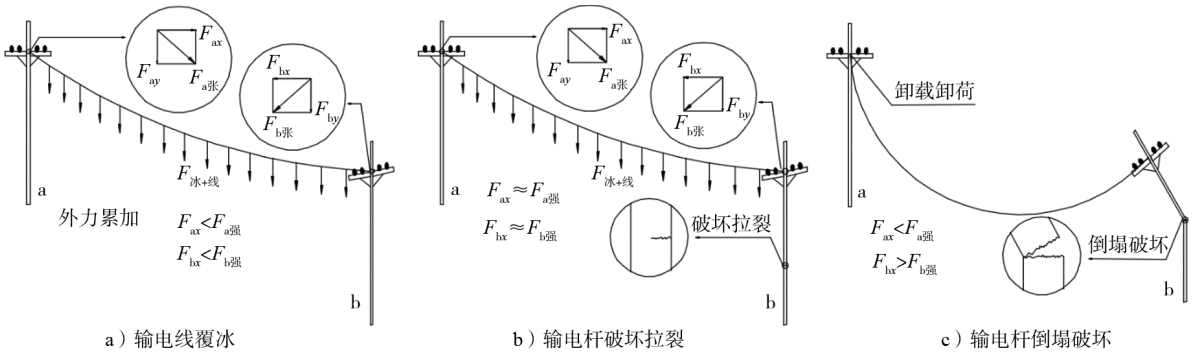
倒塌，如图 1 所示[22-23]。本文主要研究输电线路突遭异物压覆的情况，如暴雪、覆冰、雷击、大风、树木倒伏和车辆挂拉等。外部物体作用于输电线进而产生对输电杆的张力，当其数值超过输电杆的破坏阈值时，输电杆就极易发生破坏倾倒。或外部物体对输电杆杆体产生巨大冲击，当产生的碰撞冲击超过了输电杆塔的承受极限时，也会导致输电杆倒塌受损。

图 1　配网线路输电杆塔受损图

Fig. 1　Damage diagram of transmission tower of distribution network line

1.2　破坏模式分析

输电杆塔以及绝缘子多为刚性结构，所以可将输电线路与输电杆塔视为一个整体，当线路受力时输电杆杆体也连带受到力的作用[24]。异物压覆输电线产生的张力主要可分为垂直和水平 2 类[25]，并通过线路作用于输电杆杆体，当超出输电杆的破坏阈值时，就会导致输电杆被破坏。以电杆覆冰倒塌为例，其力学破坏模式如图 2 所示。



a）输电线覆冰　　b）输电杆破坏拉裂　　c）输电杆倒塌破坏

注：a-左电杆；b-右电杆；F_{ax}、F_{bx}-水平分力；F_{ay}、F_{by}-垂直分力；$F_{冰+线}$-冰与导线的重力；$F_{a强}$、$F_{b强}$-电杆强度；$F_{a张}$、$F_{b张}$-输电线张力。

图 2　覆冰状态输电杆倒塌破坏模式图

Fig. 2　Collapse failure mode diagram of transmission pole in ice-covered state

由输电杆倒塌受损事故分析结果结合图 2 可知，输电杆倒塌受损主要分为 3 个阶段。图 2 a）中输电线表面覆冰，质量大幅度增加，产生向下的张力 $F_{冰+线}$，并通过导线产生对输电杆 a 和输电杆 b 的张力 $F_{a张}$、$F_{b张}$，$F_{a张}$ 和 $F_{b张}$ 又可分为水平分力 $F_{a\,x}$、$F_{b\,x}$ 和垂直分力 $F_{a\,y}$、$F_{b\,y}$，输电杆的破坏阈值设为 $F_{a强}$、$F_{b强}$，当（$F_{a\,x}/F_{b\,x}$）<（$F_{a强}/F_{b强}$）时输电杆保持完好。图 2 b）中随着冰的质量逐渐增加，$F_{冰+线}$ 增大，$F_{a\,x}$、$F_{b\,x}$ 和 $F_{a\,y}$、$F_{b\,y}$ 也随之增大，当（$F_{a\,x}/F_{b\,x}$）≈（$F_{a强}/F_{b强}$）时输电杆破坏拉裂，强度降低。图 2 c）中张力 $F_{冰+线}$ 持续增大，当 $F_{a\,x}<F_{a强}$、$F_{b\,x}>F_{b强}$ 时输电杆 b 倒塌破坏，输电杆 a 卸载卸荷。综上所述，输电杆的破坏模式主要为电线受力电杆受剪→外力达到破坏阈值→电杆拉裂倒塌。

2　输电杆安全防护装置

2.1　装置结构

本文设计了一种输电杆安全防护装置，包括剪切螺栓、螺母、上盖板、固定器以及固锁环。装置结构如图 3 所示。在固定器的顶部开设有螺纹孔，在螺纹孔上螺纹连接有剪切螺栓，在剪切螺栓上套有上盖板，且上盖板可沿剪切螺栓轴线方向调节，在剪切螺栓的上端螺纹连接有螺母，在固定器的下方设置有固锁环，固锁环的 2 侧通过连接带与固定器固定连接。

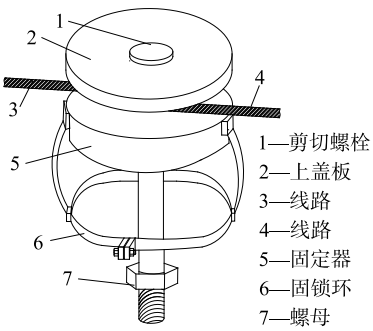


图 3 安全防护装置结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the safety protection device structure

安全防护装置整体安装如图 4 所示，由剪切螺栓 1 将上盖板 2 和固定器 5 衔接，线路 3 和线路 4 位于盖板 2 和固定器 5 之间，绕过剪切螺栓 1；上盖板 2 由剪切螺栓 1 通过螺母 7 固定，具体实施为向上旋转螺母 7，使剪切螺栓 1 下降，直到上盖板 2 压实线路 3 和线路 4 即完成安装。由固锁环 6 固定于绝缘子 9 上，剪切螺栓 1 穿过螺栓孔 8 将绝缘子固定于横担上，线路箍 10 设有逆止防滑脱结构，用于扎紧输电线路。

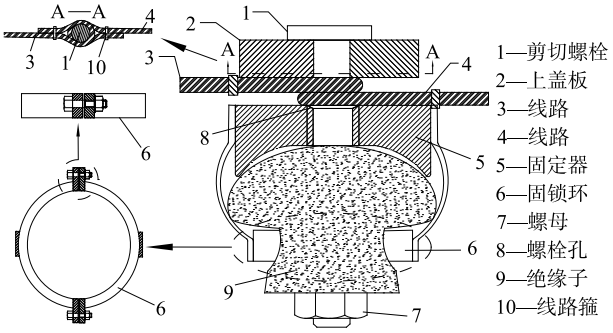


图 4 安全防护装置整体安装布置图

Fig. 4 Overall installation layout of the safety protection device

2.2 装置工作机理

在正常情况下，左部线路和右部线路对剪切螺栓的作用力小于其自身的剪切强度；当输电线路受到树木倒覆和极端天气等强大外力作用时，该外力通过输电线路作用在剪切螺栓上，若该力达到剪切螺栓的剪切强度阈值，则剪切螺栓被剪断，发生断裂破坏，随即连接在剪切螺栓上的线路脱离，该强大外力得以释放，实现杆线分离，避免输电杆发生倾斜或破坏。

该装置可通过生产不同规格的剪切螺栓来调节其破坏阈值，以满足不同型号的输电杆塔的需求。当事故发生时，剪切螺栓破坏，维修时只需更换剪切螺栓，并将之安装在固定器上，然后绕扎并压紧线路即可，修复过程简单高效。

2.3 选材要求及测试

输电杆安全防护装置主要部件为剪切螺栓、上盖板、固定器、固锁环以及螺母，除受力部件剪切螺栓外，其他部件制作材料只需具有一定的耐久度和强度即可。作为装置核心受力部件的剪切螺栓，所选材料则需满足以下性质。

1)剪切螺栓需要承受较大的外力，需具有一定的强度，避免在未达到设定力值时就发生破坏。

2)在达到既定的破坏阈值时，剪切螺栓要及时准确地发生动作，释放输电线路上的极大外力，实现断开线路保护输电杆塔的目的，所以要求其在未达到破坏阈值时不发生扭曲变形，避免强度降低，使工作准度下降。

3)因为剪切螺栓是装置中的消耗品，在推广的前提下，要尽可能降低生产成本，就必须考虑使用普遍易得的材料，如铸铁等脆性材料。

根据以上要求，选择以 HT200 灰口铸铁为剪切螺栓制作材料，实验仪器为微机双臂拉力机，做螺栓三点弯曲剪切测试，剪切螺栓抗剪试验图如图 5 所示。设定实验中螺栓的跨距为 20 mm，直径为 12.5 mm，实验结果如图 6 所示。

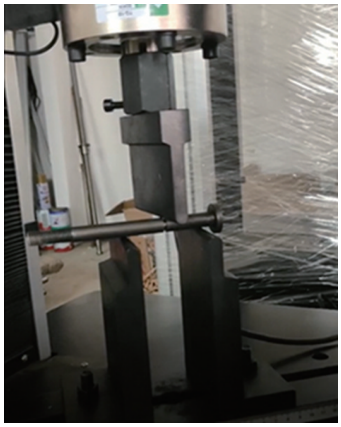


图 5 剪切螺栓抗剪试验图

Fig. 5 Shear test diagram of shear bolt

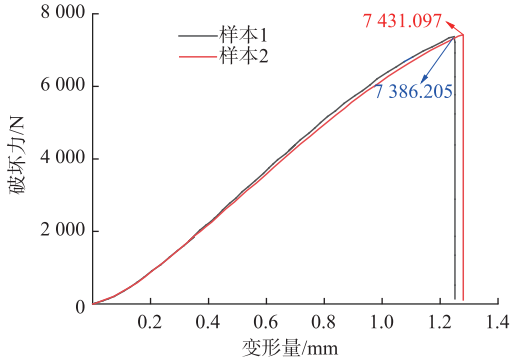


图 6 剪切螺栓抗剪试验数据图

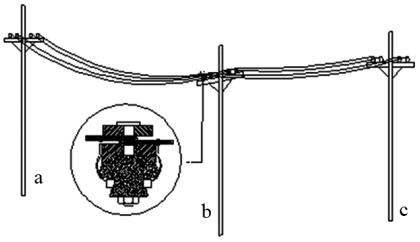
Fig. 6 Shear bolt shear test data chart

由图 6 可得，2 个样本的破坏阈值分别为 7 431.097 N 和 7 386.205 N，且在达到破坏阈值时准确动作，剪切螺栓断裂，2 组数据的差值仅为 44.892 N，平均值为 7 408.651 N，与平均值的差值的绝对值为 22.446 N，比值为 0.303%，且剪切螺栓变形量小于 1.3 mm。由文献[26]可知，取 12 m 的 K 级电杆，电线型号为 JL/G1A-150 /25，当输电杆断裂面距绝缘子 3.75 m 时，输电杆受到的外力达到 7 500 N 时，输电倒塌破坏。由以上数据分析可知，装置中剪切螺栓破坏阈值小于输电杆破坏阈值，当外力超过剪切螺栓设定的破坏阈值时，剪切螺栓为脆性材料，可精准地发生断裂动作，使输电杆和线路断开，而此时外力还未达到输电杆的破坏阈值，从而达到断线保杆的目的。实验结果表明 HT200 灰口铸铁满足制作该装置核心受力部件剪切螺栓的要求。

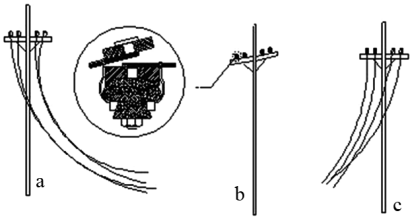
3　安全防护装置实用有效性研究

3.1　安全防护装置安全防护方案

输电杆安全防护装置以断线保杆的方式，在输电杆的横担、绝缘子和电线之间设置一种配网薄弱单元结构装置，正常状态下如图 7 a)所示，当线路遭受的载荷超越设计值时，装置内部的薄弱单元结构率先发生动作，使输电线能够从薄弱单元结构中脱离开来，卸载卸荷，从而实现了输电线和输电杆的分离，如图 7 b)所示，以达到保护输电杆的目的。



a）装置动作前



b）装置动作后

图 7　安全防护装置工作原理图

Fig. 7　Working schematic diagram of the safety protection device

3.2　安全防护装置效果检验

根据现场实际，设计并搭建模拟实验平台。实验平台简图如图 8 所示，主要包括小灯泡、电源、6 个绝缘子、开关、2 个输电杆安全防护装置和输电线，输电杆安全防护装置整体见图 8 中的保护装置，实验装置主要采用 HT200 灰口铸铁制作。保护装置采取插空法布置，各器材用输电线连接，闭合开关，小灯泡正常发光，装置导电性良好。施加外力 $F_{外}$，模拟强大外力作用于输电线路，实验结果表明，当达到破坏阈值时，保护装置准确动作，剪切螺栓断裂，卸载卸荷，装置动作后损坏示意图如图 9 所示。

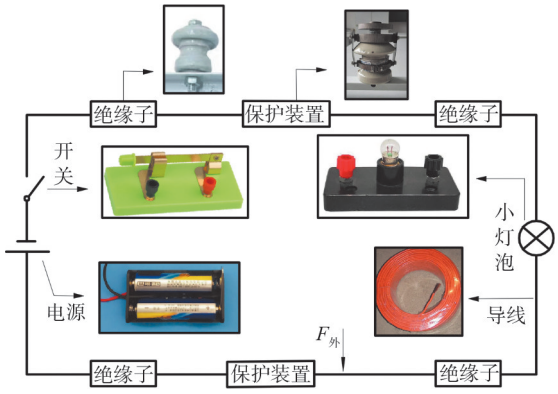


图 8　模拟实验线路图

Fig. 8　Simulation experiment wiring diagram

图 9　装置损坏示意图

Fig. 9　Device damage diagram

本模拟实验验证了装置的实用性和准确性，证明装置在使用过程中能准确有效地保护输电杆，且不影响输电线路的导电性。装置还设有绝缘保护外壳，可将裸露的电线和剪切螺栓部位包裹住，防止触电等意外事故的发生，也可有效保护本装置，避免因雨淋日晒而发生锈蚀朽化等现象，降低工作准确度。

具有过载保护功能的输电杆安全防护装置的主要应用效果如下。

1)可以在灾害发生时以牺牲薄弱环节的方式保护电杆，提高抢修效率，从而将自然灾害对输电杆的

影响降至最低。

2)安全防护装置主要由剪切螺栓、螺母、上盖板、固定器、线路箍和绝缘保护外壳 6 个部件组成，装置结构简单，且成本低廉。

3)安全防护装置通过固锁环固定在绝缘子上，输电线路绕扎在剪切螺栓上，安装步骤简单、操作方便易行，有利于装置的安装、维护、更换和推广。

4)安全防护装置主体结构套装于绝缘保护外壳中，且固定器和绝缘保护外壳均与绝缘子连接固定，绝缘性能好，安全可靠。

5)安全防护装置可采用间隔安装方式，即每间隔 1 个电杆安装 1 个，在减少安装数量和安装强度的同时，也大大降低了投入成本，也可根据具体需求在有关地区安装，灵活多变，适应性强。

6)针对不同型号的输电杆分别使用不同规格的剪切螺栓，破坏阈值不同，螺栓直径也不同，可以适应不同的电杆型号，能有效推广到许多地区。

综上所述，输电杆安全防护装置安全可靠、结构简洁、安装简单、维护方便、成本低廉、适用范围广，能够在树木倒覆、极端天气等强大外力作用于输电线路时，及时断开线路，卸荷卸载，从而避免输电杆发生倾斜或断杆，实现了断线保杆作用。

4 结 语

根据输电杆倒塌破坏特征，研制了一种具有过载保护功能的输电杆安全防护装置，能够在输电线路遭受强大外力时准确断开线路，卸荷卸载，实现断线保杆，研究结论如下。

1)通过对大量输电杆倒塌事故的分析，得到输电杆的破坏模式主要为输电线受力输电杆受剪→外力达到破坏阈值→电杆拉裂倒塌。

2)输电杆安全防护装置可以在灾害发生时以牺牲薄弱环节的方式主动保护电杆，具有良好的安全裕度，从而提高抢修效率，将自然灾害对配网系统的影响降至最低。

3)输电杆安全防护装置具有安装步骤简单，成本低廉，操作方便等优点，且能适应不同型号的输电杆，可有效推广到不同地区，为配电网系统的抗灾预防提供了新借鉴。

本文研发的输电杆安全防护装置可有效保护输电杆，避免了投入巨额成本进行大规模设备改造，也将事后的风险控制理念转变为事前预防。但仍然存在些许不足：首先，装置主要采用 HT200 灰口铸铁制作，未能得知其抗锈蚀能力，后期可在湿润环境长时间存放后再进行力学实验，探究其抗锈蚀能力，并采取喷漆方式提高抗性；其次，因条件限制，未能进行实际应用验证，在后续的研究工作中，应进行实地工况验证，并测试相关数据，观察装置的运行状态，作进一步改进。

参考文献/References：

[1] 佚名. 习近平向《联合国气候变化框架公约》第二十六次缔约方大会世界领导人峰会发表书面致辞[N]. 人民日报. 2021-11-02(1).

[2] 张行，王逸飞，何迪，等. 电网防灾减灾现状分析及建议[J]. 电网技术，2016，40(9)：2838-2844.
ZHANG Hang，WANG Yifei，HE Di，et al. Overview of situation，problems and suggestions of disaster prevention and mitigation in power systems[J]. Power System Technology，2016，40(9)：2838-2844.

[3] 李存斌，计丽妍，赵德福，等. 基于数据驱动的电力系统灾变演化及防控研究与展望[J]. 电力系统自动化，2020，44(9)：1-11.
LI Cunbin，JI Liyan，ZHAO Defu，et al. Research and prospect of data-driven based disaster evolution and prevention of power system[J]. Automation of Electric Power Systems，2020，44(9)：1-11.

[4] GUIKEMA S D，NATEGHI R，QUIRING S M，et al. Predicting hurricane power outages to support storm response planning[J]. IEEE Access，2014，2：1364-1373.

[5] 李晓明，周冬旭，江建飞，等. 输电线覆冰自动防御系统建模及其对电网的影响分析[J]. 高电压技术，2013，39(3)：698-704.
LI Xiaoming，ZHOU Dongxu，JIANG Jianfei，et al. Modeling for de-icing automatic defense system of transmission lines and analysis of influence on power grid[J]. High Voltage Engineering，2013，39(3)：698-704.

[6] 李禾. 输电杆塔用上了新型高强铝合金材料[N]. 科技日报. 2022-12-15(6).

[7] 张振泉，张东，李晓光，等. 一起 750 kV 输电线路风偏跳闸原因分析及改造措施研究[J]. 电瓷避雷器，2017(2)：168-173.
ZHANG Zhenquan，ZHANG Dong，LI Xiaoguang，et al. Analysis and transformation measures of 750 kV transmission line wind biased tripped[J]. Insulators and Surge Arresters，2017(2)：168-173.

[8] 李文斌，王伟煌，吴佳佳，等. 输电杆塔采用十字型主材加固装置的抗风加固研究[J]. 武汉理工大学学报，2022，44(11)：39-44.
LI Wenbin，WANG Weihuang，WU Jiajia，et al. Research on wind resistance reinforcement of transmission tower by cross type devices on major members[J]. Journal of Wuhan University of Technology，2022，44(11)：39-44.

[9] 徐国新，夏清，康重庆. 电网抗灾投资决策方法研究[J]. 电力自动化设备，2010，30(2)：22-27.
XU Guoxin，XIA Qing，KANG Chongqing. Research on investment decision-making method of disaster-proof power grid[J]. Electric Power Automation Equipment，2010，30(2)：22-27.

[10] 李军阔，郜帆，刘春城，等. 输电塔倒塌失效模式和主材角钢加固方法研究[J]. 自然灾害学报，2023，32(5)：139-148.
LI Junkuo，GAO Fan，LIU Chuncheng，et al. Study on failure

modes and retrofitting method for leg members of transmission tower[J]. Journal of Natural Disasters，2023，32(5)：139-148.

[11] XIE Qiang，ZHANG Jian. Experimental study on failure modes and retrofitting method of latticed transmission tower[J]. Engineering Structures，2021，226：111365.

[12] LI Junxin，WU Xiaohong，YANG Bin，et al. Experimental study and bearing capacity analysis of retrofitted built-up steel angle members under axial compression[J]. Applied Sciences，2023，13(16)：9280.

[13] AHMADI H，SHAKIBA M，MORTAZAVI S M R，et al. Feasibility of using static-cast concrete transmission poles fully reinforced with glass-fibre reinforced polymer bars and stirrups：A case study[J]. Case Studies in Construction Materials，2023，18：e01780.

[14] KHEDR M A. Design of steel transmission pole base plates using yield line method[J]. Journal of Constructional Steel Research，2022，199：107642.

[15] 肖凯，温嘉祺，谢文平，等. 配网线路电杆安装及排布位置对电杆受力方式的影响及“弃线保杆”方案研究[J]. 科学技术与工程，2016，16(13)：68-73.
XIAO Kai，WEN Jiaqi，XIE Wenping，et al. The influence of the installation and configuration of the poles on its stress in the distribution network lines and the research of program in the "abandoning lines to protect electric poles" project[J]. Science Technology and Engineering，2016，16(13)：68-73.

[16] 钟北良. 10 kV 架空线路弃线保杆装置的研究与应用[J]. 中国高新技术企业，2016(15)：140-142.

[17] 广州开能电气实业有限公司. 输配电线路弃线保杆装置以及弃线保杆装置的安装方法：CN103904602A[P]. 2014-07-02.

[18] 肖凯，宋珂，余兆荣，等. 环形圈在配网线路“弃线保杆”装置薄弱环节中的应用研究[J]. 科学技术与工程，2016，16(32)：243-246.
XIAO Kai，SONG Ke，YU Zhaorong，et al. The practical research of annular rings for "abandoning lines to protect electric poles" devices in distribution network lines[J]. Science Technology and Engineering，2016，16(32)：243-246.

[19] 肖凯，林志生，李文胜，等. 环形圈受力变形的研究及其在“弃线保杆”装置上的应用[J]. 机械设计与制造，2017(10)：36-39.
XIAO Kai，LIN Zhisheng，LI Wensheng，et al. The study of mechanical deformation about the annular ring and its application on the device of"abandoning lines to protect electric poles"[J]. Machinery Design & Manufacture，2017(10)：36-39.

[20] YIN Jie，WU Shaohong，DAI Erfu. Assessment of economic damage risks from typhoon disasters in Guangdong，China[J]. Journal of Resources and Ecology，2012，3(2)：144-150.

[21] 李文斌，陈剑平，周方，等. 强风作用下输电杆塔损伤破坏特点研究[J]. 武汉理工大学学报，2019，41(12)：81-88.
LI Wenbin，CHEN Jianping，ZHOU Fang，et al. Research on damage and destruction characteristics of transmission tower subjected to strong wind[J]. Journal of Wuhan University of Technology，2019，41(12)：81-88.

[22] 刘梅. 低温凝冻来袭，文山电力人全力以赴保供电！[EB/OL]. (2021-01-12). http://www.wsnews.com.cn/wsnews_bmdt/p/235740.html.

[23] 肖肖. 开阳供电局“四项措施”让群众凝冻用电无忧[EB/OL]. (2019-01-03). https://www.sohu.com/a/286458286_194885.

[24] 郭思顺. 架空送电线路设计基础[M]. 北京：中国电力出版社，2010：69-74.

[25] 毛晓桦. 输电线路设计基础[M]. 北京：中国水利水电出版社，2007：84-85

[26] 蒙文富，代张音，陈有成，等. 配网电杆主动安全防护技术研究[J]. 工业安全与环保，2022，48(5)：74-76.
MENG Wenfu，DAI Zhangyin，CHEN Youcheng，et al. Research on active safety protection technology for electric poles in distribution network[J]. Industrial Safety and Environmental Protection，2022，48(5)：74-76.