

直升机带电修补雷击受损光缆技术及应用研究

杨 暘¹, 卢金奎², 邱中华¹, 王 爽³

(1. 国网四川省电力公司超高压分公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 3. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 高压架空输电线路的光缆修补技术直接影响修补作业的安全顺利实施和线路运行的可靠性。针对姜资一线500 kV 输电线路雷击导致的光缆断股危急缺陷, 考虑迎峰度夏期间电网无法停电检修的特殊情况, 文中采用直升机绞车吊椅作业法成功实现了该500 kV 输电线路受损光缆修补。所提方法采取地电位带电作业方式, 提出了运用“楔形线夹+纯铝引流线”全新修补模式修补断股光缆, 安全高效地完成了光缆断股危急缺陷消除工作, 为超高压输电线路的安全稳定运行提供了坚强保障, 为类似输电线路缺陷消除具有指导意义和参考价值。

关键词: 光缆断股; 直升机绞车吊椅作业法; 楔形线夹; 纯铝引流线; 修补

中图分类号: TM 726.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)06-0080-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.202212

Research on Helicopter Live Repair Technology for Optical Cable Damaged by Lightning and Its Application

YANG Yang¹, LU Jinkui², QIU Zhonghua¹, WANG Shuang³

(1. State Grid Sichuan Extra High Voltage Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. Electrical Engineering & Renewable Energy School, Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: The optical cable repair technology of high-voltage overhead transmission lines directly affects the safe and smooth implementation of repair operations and the reliability of line operation. In view of the critical defects of optical cable breaking caused by lightning strike on 500 kV transmission line of JiangZi line, and considering the special situation that the power grid cannot be cut off for maintenance during the peak summer, the helicopter winch lifting chair operation method is used to successfully realize the repair of the damaged optical cable of 500 kV transmission line. This method adopts the live working mode of ground potential, and uses the new repair mode of "wedge clamp+pure aluminum drainage line" to repair the broken optical cable. By formulating all-round organization, technical and safety measures and emergency plans, the elimination of critical defects of broken optical cable is safely and efficiently completed, which provides a strong guarantee for the safe and stable operation of extra-high voltage transmission lines, and has an important guiding significance and reference value for similar defect elimination of transmission lines.

Key words: broken strand of optical cable; helicopter winch lifting chair operation method; wedge clamp; pure aluminum drainage line; repair

0 引言

高压架空输电线路常分布于高山峡谷等复杂恶劣的地理环境中^[1-2], 缺陷检修技术往往受到环境、

安全等诸多因素的影响, 检修工作呈现处理难度大、技术性强的特点^[3-5]。并且在实际操作过程中, 还需结合具体情况, 制定科学合理的检修方案。因此, 结合实际案例对线路缺陷检修技术的研究具有重要指导意义和工程应用价值。

1 故障概况

2022年7月13日,四川地区500 kV姜资一线光缆通信出现部分中断,查询雷电定位系统显示,500 kV姜资一线66-67号在同时间段内遭受过188.2 kA的雷击,运行单位随即开展无人机特巡工作。经排查,500 kV姜资一线66-67号光缆出现17股断12股的危急缺陷,还有2根光纤也严重受损,如图1所示。500 kV姜资一线是四川地区重要水电外送通道,一旦出现光缆断线,将导致线路跳闸,严重影响成都地区供电。

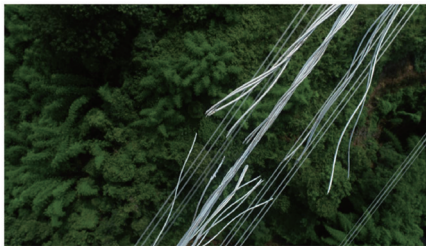


图1 500 kV姜资一线雷击导致光缆严重受损

经勘查发现,500 kV姜资一线光缆断股点位对地很高,现场吊车无法摆放,不具备吊车临停检修作业条件。因光缆断股数量过多,承载能力严重受损,光缆无法直接承载人员带电抢修。为了避免抢修过程中光缆断裂导致500 kV姜资一二线跳闸,同时为了降低抢险作业中人身安全风险,较有效的抢修方案是停电作业,采用放松直线串或放松耐张串至导线的修补法。但该方法需要500 kV姜资一二线同时停电12 h(含变电站操作时间),在迎峰度夏电网大负荷期间,无法满足500 kV姜资一二线同时停运条件。综合考虑上述影响因素,结合线路实际运行环境,最终确定采用直升机对光缆进行带电修补的技术方案。该方案运用直升机绞车吊椅作业、楔形线夹和纯铝引流线相结合的全新作业模式,在国网四川省电力公司和国家电网通用航空有限公司(以下简称国网通航公司)技术人员的密切合作下,现场应用得以顺利实施,达到了预期目标,取得了良好的效果。

下面给出的直升机带电修补雷击受损光缆技术方案在四川省境内为首次应用,通过方案设计和案例分析,得到了可供参考的工程经验,对消除类似的输电导线和光缆缺陷具有重要的指导意义和参考价值。

2 光缆修补技术原理

为了保证直升机带电修补光缆任务能够安全顺利完成,参考国内外光缆修补的相关方法,同时结合此次光缆断股严重的特殊情况,提出了以下3种修补方案及其对应的技术原理。

1)方案1:在断股点两侧首先加装卡线器作为后备保护,然后采用“直线帕尔普修补条修复和两侧耐张帕尔普修补条后保”的施工工艺。

该工艺首先加装2套卡线器作为后备保护,再安装直线帕尔普修补条,可以避免安装帕尔普修补条时光缆突然断线,导致作业人员受伤。同时考虑到断股点两侧光缆散股比较长,直线帕尔普修补条承受张力可能不够,耐张帕尔普修补条可以作为直线帕尔普修补条失效后的后备保护,后期运行比较可靠。但该工艺在实施过程中,卡线器及中间钢丝套比较长,直升机操作人员加装困难,同时若安装卡线器时光缆突然断线,卡线器飞起可能会对作业人员和直升机造成伤害。并且,在帕尔普修补条缠绕过程中,作业人员需要使用很大力气去缠绕,容易导致光缆断股位置发生断裂。

2)方案2:采用并沟线夹/元宝卡和引流线作为后备保护,然后采用直线帕尔普修补条进行修复的施工工艺。

该工艺实施过程中,并沟线夹/元宝卡安装对光缆断股位置外加荷载小,光缆突然断裂时对人员和直升机伤害比较小。但也存在明显的不足:光缆突然发生断裂时,虽然断点两侧光缆张力会出现下降,但并沟线夹/元宝卡可能无法承受断点张力,不能起到后备保护作用。同时只采用直线帕尔普修补条修复,因光缆散股比较长,直线帕尔普修补条本身长度有限,实际承受张力的帕尔普修补条受力面很可能不足,后期运行过程中依然有断线的风险。

3)方案3:施工过程中不采用后备保护,采用“楔形线夹+纯铝引流线”的全新施工工艺,如图2所示。

应用该工艺进行修补作业时,楔形线夹可以分体式安装,人员在安装过程中对光缆断股位置外加荷载很小,减少了光缆断线风险。同时为了防止雷击大电流烧损楔形线夹,导致楔形线夹失效,在楔形线夹外侧加装一组纯铝引流线,确保雷电流不对楔

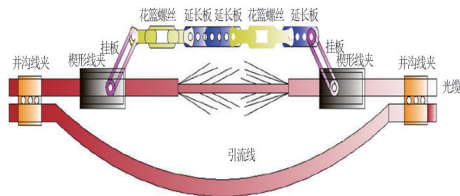


图2 “楔形线夹+纯铝引流线”连接工艺

形线夹造成损伤。但是,该工艺的施工过程中没有后备保护,楔形线夹及配套连接金具安装完成前,依然存在光缆断线风险,须加以防范。

考虑到直升机作业难度和每次作业时间的限制,为了最大程度保障作业人员和直升机的安全,同时最大程度减少作业环节,保障电网安全,经专家论证,最终确定方案3为该次直升机修补光缆作业的最佳方案。

3 光缆修补方案分析和设计

3.1 导线和光缆张力计算

1) 直升机作业时导线张力计算

查询该输电线路的设计文件可知,断股的光缆型号为 OPGW-36B1-120,抗拉强度 R_m 为 97 kN,承载截面积 A 为 121 mm^2 ,弹性模量 E 为 132 GPa,线膨胀系数 α 为 $13.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。耐张段长度为 3524 m,代表档距为 586 m,断股档的档距为 428 m。该代表档距下线路的控制气象为覆冰气象。气象条件 1 时气温为 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$,覆冰为 10 mm,风速为 10 m/s;为了确保作业安全,在直升机起飞时,现场测得直升机下方地面最大风速约为 25 m/s。故取作业现场风速为 25 m/s。气象条件 2 时气温为 $40 \text{ }^\circ\text{C}$,覆冰为 0,风速为 25 m/s。依据状态方程式^[6],有

$$\sigma_2 - \frac{E\gamma_2^2 l^2}{24\sigma_2^2} = \sigma_1 - \frac{E\gamma_1^2 l^2}{24\sigma_1^2} - \alpha E(t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中: σ_2 为光缆在气象条件 2 时的应力; γ_2 为光缆在气象条件 2 时对应的比载; l 为档距; σ_1 为光缆在气象条件 1 时的应力; γ_1 为光缆在气象条件 1 时对应的比载; t_2 为气象条件 2 对应的温度; t_1 为气象条件 1 对应的温度。

$$F = \sigma \times A \quad (2)$$

式中: F 为光缆的张力; σ 为光缆的应力; A 为光缆的截面积。

根据以上公式计算,光缆在气象条件 2 时,张力 F 为 19.8 kN。

2) 光缆断股后剩余张力校核

根据光缆生产厂家提供的该型号光缆断股后残余力值测试结果,在光缆外层单丝全部断裂,剩余未断裂的 5 根铝包钢单丝整体完好时,未遭受雷击侵害的情况下,理论额定拉断力 F_1 为 29 kN。

因 $F_1 > F$,因此受损光缆理论上还可以承受 9.2 kN 张力,可以满足作业人员在断股光缆上的作业承载要求,故该次直升机作业理论上是安全的。为了确保现场安全,在直升机正式作业前,现场还进行了模拟试验。直升机由斜上方逐步进入光缆受损点正上方,并进行停留测试,经现场验证,受损光缆可以承受直升机自身风速带来的下压力。

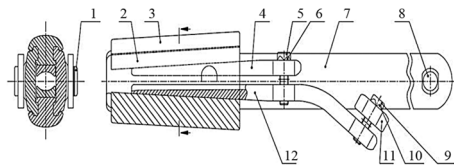
3.2 修补连接金具选配

1) 光缆散股长度测量

运用激光点云测量数据、无人机搭载竹竿刻度测量法和图纸刻度测量法,综合评估断股光缆散股长度约为 1.9 m,因此,现场作业时需要使用 2 套楔形线夹对接,线夹中间采用延长板和花篮螺丝进行长度调整,以完全覆盖光缆散股点。

2) 楔形线夹选型

该次修补点位光缆直径为 15.2 mm,据此选用配套的德国 Gorny 公司楔形线夹,如图 3 所示。该线夹采用楔形原理,卡住光缆受力后,越拉越紧,可承受 100 kN 张力,配套的延长板 PT-10 可以承受 100 kN 张力,花篮螺丝可以承受 120 kN 张力,满足此耐张段光缆金具 100 kN 设计值,符合使用要求。



1-支点;2-线夹本体;3-上方滑板;4-下楔子;5-六角形螺栓;6-防松扣;7-挂板;8-螺栓;9-螺栓;10-防松扣;11-盖板;12-上楔子

图3 楔形线夹

楔形线夹安装简便,使用时先在光缆上安装上楔子和下楔子;然后盖上楔形线夹本体和上方滑板,将楔形线夹挂板与延长板、花篮螺丝进行连接;最后通过收紧花篮螺丝让楔形线夹受力。这种修补方式可以最小程度减少作业人员对断股光缆的扰动,极大地降低了断线风险。

3) 并沟线夹选型

根据德国 Gorny 公司楔形线夹技术参数,线夹最大通流能力为 32 kA/s,考虑光缆运行过程中仍

然有遭受雷击的可能性,为保障光缆在通过雷电大电流的情况下,楔形线夹仍能正常工作,应在楔形线夹外侧加装一组引流线,保证流经楔形线夹最大电流低于 32 kA/s。根据 GB/T 2314—2008《电力金具通用技术条件》和 DL/T 765.1—2021《架空配电线路金具技术条件》的规定^[7-8],选用并沟线夹和纯铝引流线的处理模式。由于并沟线夹导电能力不得低于接触光缆的电阻,因此选用 15.2 mm 光缆配套铝并沟线夹,且引流线也采用纯铝线。并沟线夹常见的结构形式有螺栓式并沟线夹、楔型并沟线夹和 H 型并沟线夹 3 种,为便于直升机作业人员一次性安装到位,该次作业选用螺栓式并沟线夹。

3.3 作业安全距离控制措施

1) 绝缘绳选择

直升机作业时,为了保证直升机的安全,同时避免感应电伤人,一般按照 10 kV 感应电进行预防。按照 Q/GDW 1799.2—2013《国家电网公司电力安全工作规程 线路部分》的规定^[9],至少要加装有效绝缘长度大于 60 cm 的绝缘绳。经国网通航公司综合分析和验证,现场选用 2 根直径为 16 mm、长为 3 m 绝缘绳并列使用,额定载荷为 1 t,充分保证作业的安全性。

2) 检修安全距离分析

采用激光雷达扫描点云数据,如图 4 所示,分析得到导线和光缆之间的距离为 11.74 m,考虑直升机吊椅操作人员活动站位 2 m,携带的最长物体为纯铝引流线长 2.6 m,直升机作业人员距离带电体的最小距离 $S = 11.74 - 2 - 2.6 = 7.14$ m,作业点海拔高度为 698 m,符合安规规定的 500~1000 m 海拔,安全距离大于 3.4 m 的要求。

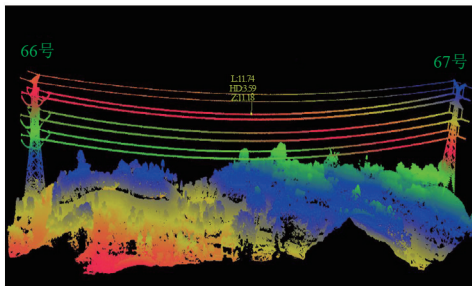


图4 激光点云计算的导线和光缆距离

3.4 直升机作业方法选择

根据综合评估,该次作业计划选用国网通航公司 Bell429 双发轻型直升机。目前国内直升机带电作业常用的方法有吊篮法、吊索法和绞车法 3 种^[10]。考虑光缆受损严重,同时兼顾作业效率,因

此选用绞车法,即在直升机上配置绞车设备。作业人员上下依靠绞车控制,绞车额定载荷约 249 kg,最大摆幅夹角不超过 20°。综合考虑海拔、温度、重量、风力、燃油消耗等因素,直升机一次空中作业可以持续约 35 min,考虑驾驶安全等因素,单次悬停修补作业不超过 10 min。本次直升机作业流程为: 1) 将散股光缆用铝丝简单绑扎,在完好光缆位置安装 2 套楔形线夹,再次估算安装总长度; 2) 将 2 套楔形线夹挂板与延长板、花篮螺丝进行螺栓连接,通过花篮螺丝收紧整串金具,使楔形线夹受力; 3) 在 2 套楔形线夹外侧,使用铝并沟线夹安装纯铝引流线。

4 现场应用

2022 年 7 月 17 日,在 500 kV 姜资一线断股光缆上,首次采用“楔形线夹+纯铝引流线”方式开展直升机修复作业。按照 MH/T 1064.4—2017《直升机电力作业安全规程 第 4 部分:带电作业》^[11]、DL/T 1720—2017《架空输电线路直升机带电作业技术导则》规定^[12],风速小于 5 m/s,相对湿度不大于 80%,能见度大于 3 km,垂直能见度大于 500 m,云底高度不低于吊挂作业点以及往返航线最高点为 300 m,即可开展现场作业。按照抢修作业流程,国网通航公司用 4 个飞行架次完成了楔形线夹及连接金具安装工作,1 个飞行架次完成了并沟线夹引流线安装工作。现场作业如图 5 所示,光缆修补后的现场如图 6 所示。



图5 现场作业

5 结论

针对 500 kV 姜资一线光缆雷击断股的危急缺陷,考虑迎峰度夏期间电网无法停电检修的特殊情况,上面给出了详细的直升机绞车吊椅作业方案。



图 6 光缆修补后现场

该方案运用了地电位带电作业方式修补断股光缆,修补作业采用“楔形线夹+纯铝引流线”全新修补模式,在保障人身、电网安全的基础上,高效完成了光缆断股危急缺陷修复工作,为四川地区超高压输电线路的安全稳定运行提供了强有力的保障。该方案首次在四川省境内得以应用,可为工程中类似缺陷的消除提供重要的参考价值。

参考文献

- [1] 邹德华,严宇,王伟,等.基于 ToF 技术的高压输电线路带电作业安全监测方法[J].高电压技术,2020,46(7):2570-2577.
- [2] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.
- [3] 胡毅,刘凯,彭勇,等.带电作业关键技术研究进展与趋势[J].高电压技术,2014,40(7):1921-1931.
- [4] 陶留海,孙超,李雪奎. ± 1100 kV 特高压直流输电线路带电作业实用化技术研究[J].中国电机工程学报,2020,40(1):134-139.
- [5] 梁栋.500 kV 输电线路 OPGW 光缆断股原理及分析[J].电工技术,2021(19):97-99.

- [6] 孟遂民,孔伟.架空输电线路设计[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [7] 全国架空线路标准化技术委员会.电力金具通用技术条件:GB/T 2314—2008[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [8] 全国架空线路(电力金具)标准化技术委员会.架空配电线路金具技术条件:DL/T 765.1—2001[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [9] 国家电网科技部.国家电网公司电力安全工作规程线路部分:Q/GWD 1799.2—2013[S].北京:中国电力出版社,2013.
- [10] 杨佳睿,陈炜,李胜花,等.吊索法带电作业在 ± 1100 kV 特高压直流输电线路的应用[J].宁夏电力,2021(6):62-65.
- [11] 中国民航科学技术研究院.直升机电力作业安全规程:MH/T 1064.4—2017[S].北京:中国民航出版社,2017.
- [12] 全国带电作业标准化技术委员会.架空输电线路直升机带电作业技术导则:DL/T 1720—2017[S].北京:中国标准出版社,2018.

作者简介:

杨 暘(1987),男,硕士,高级工程师,主要从事输电线路运维技术工作;

卢金奎(1981),男,高级工程师,主要从事输电线路管理工作;

邱中华(1986),男,硕士,高级工程师,主要从事超特高压输电线路带电作业工作;

王 爽(1987),男,博士,讲师,主要从事高压输电线路运维检修技术研究工作。

(收稿日期:2022-08-09)

《四川电力技术》投稿步骤及方法

1) 注册。在本刊首页(<https://scdljs.ijournals.cn/scdljs/home>)进入“作者登录”,点击“新用户注册”链接,以 E-mail 地址作为用户名进行注册,进入注册页面后填写注册信息,填写完毕提交后,您将收到注册成功的电子邮件,请按电子邮件提示激活账户后方可登录。(注:本刊已注册用户名的作者,使用用户名和 E-mail 均可登录。)

2) 登录。在首页进入“作者登录”,输入您新注册的 E-mail(已注册过用户名的作者也可使用原用户名)和密码,以作者身份登录,进入“作者中心”。点击“投稿”,按照页面提示填写全部投稿信息和作者信息后提交即可。建议投稿作者就是论文的通讯作者,以方便联系。

3) 投稿后作者可随时登录网站,查询稿件的审理情况以及有关稿件的其他信息。个人信息或通信方式有变化时,请及时更新,便于联系。

4) 在提交修改稿时,请直接以作者身份登录本网站,点击“待修改稿件”可查阅作者所有需要修改的稿件信息、修改意见。找到该稿件编号对应的稿件后,请先点击“下载修改稿”可查阅编辑部是否有直接的批注或修改;修改稿或补充的内容需点击“上传修改稿”功能上传即可。请不要再使用投稿功能重投此修改稿,否则会被视为新稿件,已有的审稿结果将作废。