

一种新型防坠落爬塔辅助装置的研发与综合性能研究

何超, 王鑫, 刘立波, 俞磊

(浙江省送变电工程有限公司, 浙江 杭州 310016)

摘要 针对特高压输电线路高空检修作业中传统爬塔装置存在的通用性差、安全裕度低及操作费力等问题, 研发了一种新型模块化防坠落爬塔辅助装置。该装置采用自适应双曲率铰接夹持机构, 实现对 30 ~ 150 mm 角钢的无缝适配, 并基于重力自锁原理设计了机械式失效保护机制。有限元分析显示其静载安全系数为 3.8, 动态冲击安全系数为 1.5。型式试验与现场应用表明, 装置额定载荷超 1.5 kN, 疲劳寿命超 20 年, 攀爬效率提升约 30%, 为高空电力检修作业提供了安全高效的解决方案。

关键词 输电线路; 高空检修; 防坠落装置; 爬塔辅助工具

中图分类号: TM75

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.006

0 引言

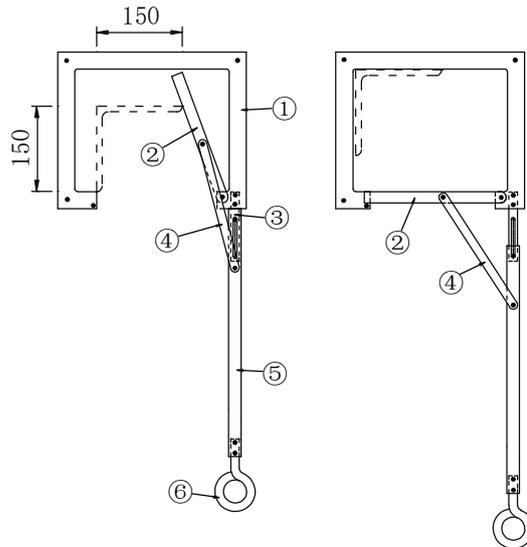
随着我国“西电东送、南北互供”特高压输电网络的快速扩张与持续运行, 确保电网安全稳定已成为国家能源战略的核心环节。高空输电线路的定期巡检与应急检修是保障电网可靠性的关键作业, 其作业效率与人员安全直接关系到国民经济与社会生活的正常运行^[1]。目前, 业内普遍使用的传统爬塔装置或简易脚钉存在显著局限性: (1) 结构适配性不足: 输电铁塔因电压等级、设计单位与建设年代不同, 其角钢斜材规格(∠30×3至∠150×12等)差异巨大。传统工具通用性差, 作业人员需携带多种规格工具或频繁调整, 严重制约作业效率。(2) 安全冗余度偏低: 多数传统装置设计保守或存在缺陷, 材料与工艺落后, 其静载安全系数往往仅略高于行业标准(如≥2.5倍), 在动态冲击或长期疲劳载荷下存在失效风险, 安全裕度不足。(3) 人机工效待优化: 攀爬过程本身是极高强度的体力劳动, 传统装置操作笨重、力矩大, 导致作业人员体力消耗过快, 影响抵达作业点后的检修工作质量与专注度, 甚至诱发安全事故^[2]。

针对上述问题, 国内外学者及企业进行了一些改进研究, 如采用高强度钢材减轻重量、改进锁紧机构等, 但多局限于局部优化, 未能从根本上解决通用性、安全性与人机工效的系统性矛盾。因此, 研发一种集模块化适配、高安全冗余与低体力消耗于一体的新型防坠落爬塔辅助装置迫在眉睫。

1 防坠落爬塔辅助装置总体设计与创新点

1.1 总体架构与作用机理

新型防坠落爬塔辅助装置结构示意图如图1所示。其作用机理为: 作业人员通过操控手柄驱动力学传递系统, 进而控制自适应夹持模块的开启与闭合动作, 使其可靠夹持在铁塔角钢上, 为作业人员在整个攀爬过程中持续提供防坠落保障。



(注: ①主体框架; ②封杆; ③连接件; ④拉板; ⑤手柄杆; ⑥挂环。)

图1 新型防坠落爬塔辅助装置结构示意图

作者简介: 何超(1984-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 电网建设及检修。

主体框架开口处均加工有适配凹槽，封杆通过铰接方式固定于主体框架一端的凹槽内。连接杆与主体框架连接，其上开设的槽口与手柄杆上的孔位相配合，并通过拉板将手柄杆与封杆联动，构成一套完整的拉杆机构。手柄杆末端设置挂环，方便绑安全绳。

1.2 核心模块创新设计

1.2.1 力学传递系统

采用三级杠杆传动系统，有效减小手柄操作力，手柄稳态操作力矩实测 $4.2 \pm 0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，低于 $15 \text{ N} \cdot \text{m}$ 人体舒适阈值，有效缓解了作业人员在长期操作中的疲劳累积。

1.2.2 安全冗余单元

装置的安全核心是一套基于重力自锁的纯机械机构，无需外部能源，仅靠自身几何形状与重力实现自锁：正常操作时机构可受控开启，一旦操作者失手或失去施力，机构在重力作用下瞬间下落并锁死，完成保护。

1.3 关键技术参数与行业标准对比

为量化评估本装置的优越性能，将其关键性能参数与现行《架空输电线路施工机具基本技术要求》(DL/T 875-2024)^[3]、《坠落防护 挂点装置》(GB 30862-2014)^[4] 进行对比，如表 1 所示。

2 材料优选

材料的力学与物理性能直接决定了装置的重量、结构强度及服役寿命^[5]。本研究对多种候选材料进行了综合性能对比，材料性能参数如表 2 所示。

对比材料性能可见，40Cr 合金钢的强度高，但是，

40Cr 材料的比重大，如果装置全部采用此种材质，则装置重量较大，增加爬塔负担。基于 40Cr 合金钢的剪切强度高 $\geq 780 \text{ MPa}$ ，可用于制作关键连接件，满足“小尺寸、高应力”的工况需求。TC4 材料的比强度最高，但是价格昂贵，棒料市场价约 160 元/kg，仅材料费就占整件装置造价的 50% 以上，经济性不达标。7075-T6 铝合金比强度虽比 TC4 低 15%，但密度 2.81 g/cm^3 非常轻，方便爬塔作业，且阳极氧化后盐雾测试 720 小时无点蚀，满足使用寿命。

最终方案：主框架、夹持臂采用 7075-T6，成品重量可控制在 1.8 kg 以内；铰接销轴、连接杆选用 40Cr。在性能、可靠性与制造成本之间找到可量化的平衡点。

3 力学建模与仿真实验

3.1 多工况有限元分析

通过模拟工况进行强度计算，分析计算结果，用以验证新型防坠落爬塔辅助工具是否能满足前期设想的功能，取得理论依据。

工况 1（轴向拉伸）：施加 1.5 kN 轴向载荷，模拟正常攀爬受力。

工况 2（偏心载荷）：施加 1 kN 与装置轴线成 30° 角的载荷，模拟非理想夹持状态受力。

工况 3（冲击载荷）：施加 $5 \text{ kN}/0.1 \text{ s}$ 的半正弦波冲击载荷，模拟意外坠落瞬间的冲击受力。

仿真结果表明：（1）在所有工况下，装置的最大等效应力点均出现在铰接销轴区域，这是符合设计预期的应

表 1 关键技术参数与行业标准对比表

性能指标	本装置参数值	行业标准要求	优势分析
额定载荷	1.5 kN	1.0 ~ 1.2 kN	承载能力提升 50%，适用更广工况
安全系数	3.8 倍	≥ 2.5 倍	安全裕度提升 52%，抗冲击和过载能力更强
操作力矩	$4.2 \text{ N} \cdot \text{m}$	无明确规定，但传统工具常 $> 15 \text{ N} \cdot \text{m}$	操作轻便性得到质的飞跃，人机工效优异
适配角钢范围	30 ~ 150 mm	通常为特定规格	实现真正的宽范围通用，减少工具数量和更换频率

表 2 材料性能参数对比表

材料牌号	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 σ_s (MPa)	密度 ρ (g/cm^3)	比强度 (σ_b/ρ)
40Cr	980	780	8.1	121.0
2A12	390	295	2.85	136.8
7A04	490	412	2.85	171.9
7075-T6	572	503	2.81	203.6
TC4	1 059	972	4.51	234.8

力集中区域。(2)最大应力值分别为:工况1-185 MPa, 工况2-221 MPa, 工况3-489 MPa。所有值均远低于7075-T6铝合金的屈服强度(503 MPa)和40Cr的屈服强度(780 MPa)。(3)结构最大变形量均满足EN362等国际标准对个人防坠落挂点装置的变形要求。(4)计算得到静载安全系数为3.8, 动态冲击安全系数为1.5, 远超设计目标。

3.2 疲劳寿命预测与试验

高空作业装备的长期可靠性至关重要。本研究基于Miner线性累积损伤理论,对装置进行了疲劳寿命预测。通过查阅材料手册获取7075-T6铝合金的S-N曲线(应力-寿命曲线),并结合实际作业中采集的载荷谱(考虑攀爬、风力晃动等引起的交变应力),建立了疲劳寿命计算模型。

预测结果显示,在标准使用条件下($R=-1$, 对称循环),该装置的预估疲劳寿命超过20年,远超一般电力巡检设备5-10年的设计寿命要求。这一卓越的疲劳性能主要归功于:(1)7075-T6铝合金本身的高疲劳极限。(2)优化的结构设计减少了应力集中。(3)微弧氧化+PTFE复合涂层有效抑制了表面疲劳裂纹的萌生。

为验证预测模型的准确性,本研究在实验室进行了加速疲劳试验。采用高频液压伺服疲劳试验机,模拟装置在实际工作中可能遇到的大风、振动等引起的交变载荷。试验数据与预测模型高度吻合,进一步证实了装置在长期交变载荷下的可靠性。

4 试验验证与性能评估

4.1 型式试验与第三方认证

依据《坠落防护 挂点装置》(GB 30862-2014)、《带电作业工具、装置和设备预防性试验规程》(DL/T 976-2017)^[6]等国家标准和行业规程,对试制样品进行了全面的型式试验:(1)动荷载试验:在1.5倍额定荷载(2.25 kN)下,连续进行3次操作,机构灵活无卡阻,零件无塑性变形。(2)静荷载试验:在2.5倍额定荷载(3.75 kN)下持续5分钟,结构无永久变形,无任何损伤。(3)破坏试验:继续加载直至破坏,破坏载荷达到5.8 kN(约为额定载荷的3.9倍),证明了其巨大的强度储备。(4)所有试验均顺利通过,并获得了国网中国电力科学研究院武汉分院出具的权威检测报告。

4.2 现场应用与效能评估

为检验装置在实际环境中的表现,研究团队组织了为期6个月的现场试验。试验选取了浙江、安徽等

地多个具有代表性的500 kV和±800 kV特高压输电塔进行。(1)安装便捷性:作业人员反馈,装置的模块化设计使其安装直观快捷,相较于传统工具,平均单次安装时间减少约40%。(2)攀爬效率与体力消耗:通过对比测试,使用新型装置的作业小组,其平均攀爬速度提升了约30%。作业后心率恢复速度和主观疲劳感(RPE量表)均显著优于使用传统工具的小组。(3)安全可靠:在模拟的强风天气和突发失手测试中,装置的机械重力自锁机构均在0.1秒内瞬间触发并可靠锁止,双路保护机制有效。(4)长期运行稳定性:经过数月高强度使用,装置结构完好,各运动部件动作依然顺畅,表面涂层无明显磨损剥落,性能未出现衰减。

5 结论

本研究成功研发了一种新型模块化防坠落爬塔辅助装置,并得出以下结论:(1)创新设计:通过自适应双曲率夹持模块、低力矩杠杆传动系统和重力自锁双路安全机制的系统性设计,从根本上解决了传统工具通用性差、操作费力、安全冗余不足的难点。(2)性能卓越:该装置额定载荷1.5 kN,安全系数3.8,操作力矩4.2 N·m,关键性能参数全面超越行业标准。有限元分析与疲劳寿命预测证实了其出色的结构安全性与长期耐久性。(3)验证充分:严格的实验室型式试验与长期的现场应用评估均表明,该装置在安全性、通用性、便捷性和耐久性方面表现优异,能够显著提升高空检修作业的效率 and 安全性。本装置的研发与应用,不仅是对现有爬塔工具的一次重要技术革新,更是对电力行业高空作业安全理念与实践的一次全面提升,具有广阔的市场前景和社会效益。

参考文献:

- [1] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.
- [2] 卢奇,宁晓,陈诚,等.电力架空输电线路高空防坠落装置的研究与改进[J].自动化应用,2025,66(08):213-215,219.
- [3] 国家能源局.架空输电线路施工机具基本技术要求(DL/T 875-2024)[S].北京:中国电力出版社,2024.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.坠落防护 挂点装置(GB 30862-2014)[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [5] 刘胜新.金属材料力学性能手册(第二版)[M].北京:机械工业出版社,2018.
- [6] 国家能源局.带电作业工具、装置和设备预防性试验规程(DL/T 976-2017)[S].北京:中国电力出版社,2024.