

特高压工程导线展放质量控制体系优化与应用研究

邹捷,唐玮,刘宇翔,袁梦祥

(国网江西省电力有限公司建设分公司,江西 南昌 330012)

摘要:针对特高压输电线路导线展放施工中存在的工艺控制手段不足、高空验收缺陷率偏高等问题,文中构建了一套集自动化设备、标准化保护、数字化管控于一体的特高压导线展放全流程质量控制体系,实现机械化施工、工艺创新与全过程管理的有效协同。该体系具备清晰的逻辑结构与可复用的管理范式。实际应用表明,工程成本得到有效节约,综合施工效率显著提升,可为同类特高压输电工程施工提供有益的技术参考与实践路径。

关键词:特高压输电线路;导线展放;施工质量;全过程控制;工艺优化;缺陷率

中图分类号:TM 726 文献标志码:A 文章编号:1006-348X(2026)03-0054-05

0 引言

目前,我国已建成多条 1000 kV 交流和±800 kV 直流特高压输电工程,形成了以“西电东输”为核心的输电格局。特高压输电线路的安全可靠运行直接关系到国家能源安全和社会经济发展,而导线展放作为输电线路施工中最关键的环节,其质量控制水平直接影响整条线路的运行品质。在特高压直流输电工程中,±800 kV 及以上线路多采用 1 250 mm²或更大截面的导线,这类导线具有铝钢比高、结构复杂、弯曲半径要求高等物理特性。导线展放作为特高压工程建设的核心环节,其施工质量直接决定了线路运行的安全稳定,对缺陷率控制提出了较高要求。

虽然大截面、多分裂导线提高了输电容量^[1],但也给展放施工带来了前所未有的挑战。一方面,传统牵张设备面临牵引力不足问题,需要采用一牵四、八牵八等复杂的展放工艺,同时集控化设备通过集控室操作,精准控制导线张力,并全过程监控放线工况,以确保导线展放过程的平稳^[2];另一方面,文献[3]指出大截面导线易出现“散股”、磨损等质量问题,且多分裂导线的同步张力控制难度大^[1]。目前行业内虽然提出了智能集控、导引绳腾空展放等创新技术^[4-5],但

这些技术的系统集成、质量指标体系建立、工程应用转化等方面仍存在不足,缺乏完整的质量体系指导。

近年来,随着大截面导线的普及,行业关注点开始转向导线损伤防治与压接管性能评估。尽管在理论层面已有一些针对导线力学特性的研究,文献[6]基于 ABAQUS 平台,对展放张力进行了有限元分析,重点解析了压接区域断裂失效及铝管鼓胀变形的主导因素。但该研究为降低计算成本,仅模拟了铝管与导线的压接过程,未包含钢锚端压接计算,未提出在不压区注导电脂的消缺措施。

在实际施工层面,现有的质量控制手段仍面临一些问题。首先是“经验依赖性”,传统压接作业高度依赖熟练工的手感与保压计时,在山区极端环境下极易出现压接管弯曲度超标现象;其次是物资运输保障困难,尤其是在云贵、鄂西等高海拔山地地形,传统畜力运输对绝缘子等脆性材料的磕碰损伤率居高不下;最后是“防护措施滞后”,普通接续管在过滑车时呈刚性状态,难以适应滑车轮槽的曲率要求,往往造成接续管端部导线因硬折弯产生断丝隐患。

1 实例研究

以某±800 kV 特高压直流输电线路工程为例,通

收稿日期:2026-03-05

作者简介:邹捷(1989),男,硕士,高级工程师,从事电网建设、电力电网规划研究。

过分析导线展放高空一次验收缺陷现状,优化质量管理体系,提升工程质量水平。

1.1 工程背景

某±800 kV 特高压直流输电线路工程路径约 130 km,新建铁塔 313 基,地形以山地和高山为主,海拔 500~2000 m,施工条件复杂,工程将导线展放高空一次验收缺陷率作为工程创优的基本考核项。

1.2 质量调查

如表 1 所示,某公司近五年承接的不同电压等级输电线路工程导线展放高空一次验收缺陷率,可见 500 kV 线路工程的验收缺陷率最低,而特高压线路工程的导线展放一次缺陷率较高,达到了 9.03%。

表 1 某公司承接不同电压等级输电线路工程导线展放一次验收缺陷率

电压等级	110 kV	220 kV	500 kV	特高压
验收缺陷率	12.02	9.68	8.36	9.03

1) 按跨越段统计

针对该±800 kV 特高压直流输电线路工程,各提前跨越段导线展放完工后的统计数据显示(如表 2 所示),不同施工标包的高空一次验收缺陷率普遍偏高,总体平均值超过了该公司同类工程 9.03% 的平均缺陷率。

表 2 某特高压直流输电线路工程提前跨越段导线展放高空一次验收缺陷率统计

提前跨越区段	检查点数	合格点数	缺陷点数	缺陷率/%
跨越段 I	141	125	16	11.35
跨越段 II	138	126	12	8.70
跨越段 III	159	146	13	8.18
跨越段 IV	124	114	10	8.06
合计	562	511	51	9.07

2) 按原因分类统计

为了找到缺陷的产生原因,对该工程发现的导线展放高空一次验收缺陷问题开展归类占比统计,其结果见表 3。

表 3 某特高压直流输电线路工程导线展放高空验收缺陷问题分类统计

类型	数量	占比/%
导线损伤及散股	19	37.25
压接管弯曲度超标	13	25.49
绝缘子边缘损伤、表面磨损	7	13.73
金具螺栓未紧固	5	9.80
开口销缺失或开口角度过小	4	7.84
铝包带缠绕长度不足	3	5.88
合计	51	100

2 成因分析与验证

2.1 质量体系

电力建设施工质量受管理、设备、物资、环境多因

素制约,“4M1E”法是全面质量管理(TQM)和精益生产的核心工具,用于分解生产/施工过程影响因素,实现对“人、机、料、法、环”五大要素的全覆盖,在输电线路导线展放施工中,该法可精准判定导线展放缺陷成因。

施工质量管理体系的建立需要从人员管理、技术工艺及措施、物资供应与管理、环境与过程保护措施等方面搭建。

1) 展线质量控制

导线展放缺陷的产生是一个系统性问题,主要可归纳为四大类原因:首先,是施工管理体系与执行层面的不足,表现为技术交底不清、设备维保制度执行不严及临时防护措施缺失;其次,在于核心施工装备与工艺的落后,如压接设备精度不足、传统压接工艺不适应大截面导线特性,以及放线段规划不合理;第三涉及物资供应链的管理漏洞,包括材料源头质量把关不严、山区运输损耗率过高,以及压接前清洗工序不到位;最后是施工环境与过程保护措施的缺陷,着重体现在导线全程物理防护不足、现场防污控制不力,以及针对特殊地形的防振措施欠缺。这些因素相互关联、彼此叠加,共同导致了高空验收缺陷率的攀升,因此必须通过技术升级、管理强化、供应链优化和防护体系完善进行系统性综合治理。

2) 体系构建

制定科学的行动路线是确保输变电导线展放质量的前提与保障。通过制定包含“资料建模、现场排查、根因锁定、闭环整改”的系统化行动路线,能够将分散在人、机、料、法、环中的末端因素串联成严密的管控链条,图 1 反映了导线展放质量控制体系的行动路线。

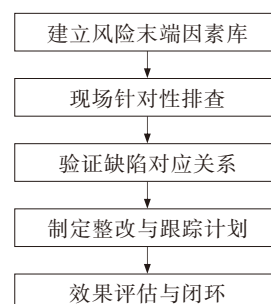


图 1 导线展放质量体系行动路线

2.2 因素验证

按照资料梳理与因素建库、现场针对性排查、缺

陷与末端因素验证、整改与效果评估的要求制定行动计划,明确时间、责任人和输出文档。

1) 开展资料梳理与因素建库,整理与导线展放相关的清单条目,重点抽取:交底不到位、导线展放保护措施不到位、牵张两场和放线段选择不到位、导线临时防振措施不到位等信息,作为可能导致展放缺陷的末端因素库。

结合清单,逐项确认检查内容和方法,结合以往导线划伤、松股、散股、鞭击损伤等缺陷案例,构建“缺陷类型-清单条目-末端因素”表,将每个缺陷至少关联 1-2 条清单检查点,形成初步风险矩阵。

2) 按“先管理与交底一再物资与设备一最后工艺与运行环境”的顺序,结合清单逐项确认检查内容和方法。物资末端因素排查:依据“导线、绝缘子、金具质量不合格”“绝缘子运输损耗率较大”“绝缘子、导线防污措施不完善”等条目,对材料站的导线、绝缘子、金具进行到货外观检查和合格证查验,抽查运输过程是否有刮蹭、变形、破损及雨季防污遮盖记录;管理末端因素排查:按照“交底不到位——现场是否进行交底、内容是否详尽”的要求,查技术交底记录、施工日志,并随机抽问作业人员对展放工艺、保护措施的了解情况,确认交底是否真正落实到人;设备末端因素排查:对照“机械没有定期维修”“压接设备选择不当”的要求,检查牵张机、张力机、压接设备的巡查、维修、保养记录以及设备选型是否与导线规格匹配。

对使用“传统压接方式质量工艺不良”“导线断线作业工艺不良”条目,现场旁站检查压接和断线端头剥铝股工艺,重点观察导线是否出现松股、散股、毛刺等,避免为后续展放埋下缺陷风险。

3) 汇总现场发现的导线展放缺陷(如局部划伤、压扁、散股、局部过度振动等),逐条对照阶段一形成的“缺陷-清单条目-末端因素”矩阵,确认每一处缺陷对应的可能末端因素,并给出证据链。对有多个可能末端因素的缺陷,按“是否直接作用于导线表面或受力状态”排序,锁定主导末端因素。

4) 针对确认的末端因素,逐条制定整改措施和责任清单,例如:对“交底不到位”的情况,明确增加展放前专项交底并要求作业人员签字确认;对“导线展放保护措施不到位”的情况,在作业指导书中

固化保护工艺并设置监理旁站必检点;对“机械没有定期维修”的情况,完善设备巡检台账和停机检修制度。

这样,将“检查点-末端因素-展放缺陷-整改措施”串成闭环,既突出了发现末端因素的系统性,又通过阶段划分和时间安排体现了行动路线的科学性与计划性。

3 实施措施与效果

围绕压接设备及传统压接方式问题,在施工现场对压接后的导线钢管进行游标卡尺测量,部分压接管的标准范围内(其中 D 为压接管标称外径),且存在飞边过大现象,确认设备老化及传统工艺是导致压接质量不合格的关键;针对绝缘子运输损耗现象,现场调查了运输记录并抽检了进场绝缘子,统计出较高的破损率,确认运输不当为关键因素。

针对导线展放保护不足的问题,现场跟班检查,发现展放过程中,导线与地面接触缺乏有效的护套或滚轮支撑,直接导致了导线磨损,从而确认保护措施不到位是造成缺陷的主要原因。

3.1 实施措施

针对上述关键诱因,文中从装备自动化、保护标准化及管理数字化三个维度,结合经济性与可靠性因素开展多维评估,确立了最优改进措施并付诸于实施。

1) 为了解决传统压接方式的技术缺陷,可以采用自动压接机,实现导线压接全过程的精细化控制。该设备通过嵌入式开发与 App 软件协同控制,利用传感器反馈实现 $1\ 250\ \text{mm}^2$ 及以下导线的自动化压接(含自动算模、移模、保压及切剥线功能),如图 2、图 3 所示。在压接过程中,App 能自动采集测量数据与质量照片,并通过 AES 加密将所有数据实时上传至云平台,实现压接质量的数字化与物联网管理。

该导线压接实行自动化作业,施工人员仅需辅助操作,大幅降低了对人工技能的依赖,有效预防了操作不当引发的质量通病,显著提升了压接管弯曲度及对边距的合格率,确保了耐张管和接续管的施工质量。

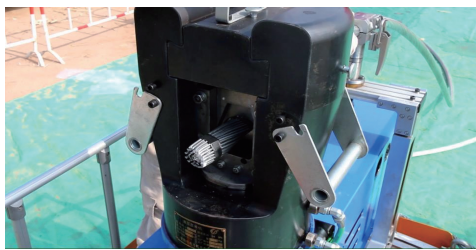


图2 导线自动切线、剥线



图3 耐张管自动压接

2) 综合考量地形、运输条件及经济效益等因素,现场设计了多跨的单索循环式与往复式两种索道方案,根据塔基调节灵活设置。

多跨单索循环式索道由承载索、返空索、牵引索及驱动装置等组成,具备运量大、运距远、效率高的特点;多跨往复式索道:牵引与返空索共用,无需单独设置返空索,该方案结构精简,能大幅减少搭设工作量。

工程中采用2 t级货运索道,每基塔位日运输总量可达12 t,相比传统储运方式,运输效率得到了有效提高。此外,货运索道运输过程匀速、平稳,有效降低了运输过程中绝缘子边缘破损率和表面磨损率,有效保证了导地线架设过程中绝缘子、金具等材料质量。

3) 针对特高压大截面导线的特性,采用蛇节型接续管保护装置。当导线通过滑车时,蛇节能灵活弯曲形成缓冲过渡,避免端部应力集中,有效解决常规装置易导致出现的导线断丝问题。

如图4所示,导线展放后临时锚固时,为防鞭击,每根子导线单独设置线端调节装置(包含卡线器等),使各导线张力略有差异,上下错开位置,避免松线时互相阻碍;同时,在卡线器尾部套上护线橡胶套,防止导线与拉环磕碰损伤。



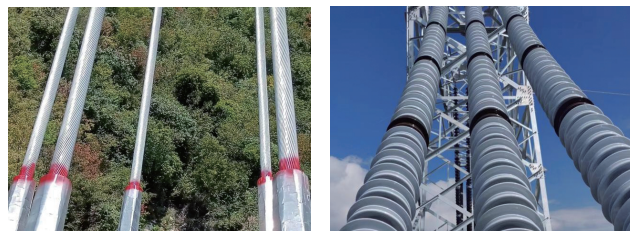
图4 导线卡线器

同时,工程中实施标准化作业要求杜绝金具螺栓未紧固、铝包带缠绕长度不足等问题,例如配发专用开口工具,强制要求开口销掰开角度必须达到 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$,严禁简单弯折;在地面准备阶段,根据不同管径和缠绕层数,计算好所需的铝包带总长度,进行定长裁剪后再分发给高空人员,从源头上保证材料长度符合要求。

针对检查发现的问题和拟采取的措施,制定了详尽的整改与跟踪计划,确立了“即查即改、专人跟踪、闭环验收”的管理原则,明确了每项缺陷的整改责任人、技术措施及完成时限,要求责任班组在规定时间内完成消缺并提交整改凭证;同时,建立整改台账,对整改后的关键点进行二次复核与实地验证,防止同类隐患回潮,从而实现质量缺陷的全周期闭环管控。

3.2 实施效果

实施以上改进策略后,对后续现场导线展放施工质量进行了跟踪检查,并对现场的实际质量进行了检测,现场施工成品情况如图5所示。



(a) 压接后导线

(b) 绝缘子安装

图5 现场成品情况

在检查点数相近的前提下,对比改善前后该特高压直流输电线路工程展放高空一次验收缺陷数量,结果如图6所示。

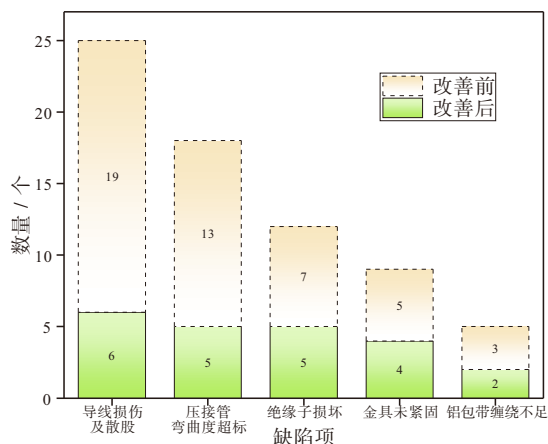


图6 改善前后缺陷数量变化

可以看出,各类典型缺陷的数量均有下降,影响特高压输电线路高空一次验收缺陷率的A类问题(导线损伤及散股、压接管弯曲度超标和绝缘子边缘损伤、表面磨损)出现较大降幅。

得益于新工艺的全面应用,施工效率得到了多维度的提升。在物料运输环节,自动化与索道技术的引入削减了转运耗时,也减少了导线补修与绝缘子修复更换作业的耗时;而针对压接管校直,新工艺更是从源头上规避了反复调整的繁琐工序。这些改进措施共同作用,有效缩短了整体施工周期(据统计,施工周期平均缩短8天),节约了施工成本。

4 结语

文中构建了一套集自动化设备、标准化保护、数字化管控于一体的特高压导线展放全流程质量控制体系,并在某±800 kV特高压直流输电线路工程的实际应用。

应用该体系后,导线展放高空一次验收缺陷率由常规工艺的9.03%显著降低至5.1%,质量风险得到有效遏制。在经济与效率方面,通过工序优化与机械化操作,减少了工作人员,单区段施工周期平均缩短8天,也大幅降低了高空作业风险与绝缘子

运输损耗。

文中构建的特高压导线展放质量控制体系,能有效降低展放缺陷率,可转化为标准化的施工范本,为后续同类线路工程的智能化施工提供成熟经验。引入的自动化压接机、数字化管理平台等智能手段,对于资金预算有限或规模较小的常规线路工程会有一定应用门槛,建议联合设备厂商开展轻量化、模块化研发,降低设备采购与运输成本。

参考文献:

[1] 景国明.特高压8分裂导线八牵8同步展放施工技术探讨[J].工程建设与设计,2018(04):73-74.

[2] 张贵林.输电线路以旧带新张力展放导线施工技术[J].低碳世界,2017(32):49-50.

[3] 洪诗鹏.特高压输电线路大跨越工程智能化施工建设与安全管控[J].城市建筑与发展,2025(06):1-3.

[4] 郑申安.110 kV-220 kV输电线路展放工艺[C].2015年4月建筑科技与管理学术交流会议论文集,北京:《建筑科技与管理》组委会,2015:76,37.

[5] 孙俊.输变电工程线路施工技术研究[J].建筑与预算,2023(07):68-70.

[6] 吕东泽.架空输电线路连接性能的有限元分析[D].南宁:广西大学,2023.