

基于 QC 方法的输电线路杆塔标识使用寿命延长研究

胡亚斌

河南送变电建设有限公司 河南 郑州 450000

摘要：输电线路杆塔标识是电力运维的关键载体，传统喷涂、粘贴类标识易受户外环境影响出现模糊、脱落等问题，增加运维安全风险与成本。本文依托河南送变电建设有限公司输电运检分公司杏林QC小组实践，运用PDCA循环法，明确标识材质性能不足和户外气候环境影响为失效核心原因。通过方案比选选定UV转印贴为最优替代材料，制定标准化选材、设计、制作及安装流程。实施结果表明，UV转印贴标识经198天户外验证无失真问题，杆塔标识失效占比从81%降至0%，大幅提升运维效率；以工区3846基杆塔10年周期核算，可节省最大运营开支154655元，为输电线路杆塔标识优化升级提供了可复制的实践方案。

关键词：输电线路；杆塔标识；QC方法；UV转印贴；耐候性；使用寿命

一、引言

输电线路杆塔标识承担着身份识别、安全警示、运维指引的核心功能，其清晰度和完整性直接关系到线路巡检、故障抢修、现场作业的安全性与效率。随着电网快速建设，输电线路覆盖广、环境复杂，传统自喷漆刻板喷涂、普通贴纸粘贴的标识方式，在紫外线、降水、风沙、温湿度剧变等户外因素作用下，极易出现褪色、粉化、起皮、脱落等问题。相关统计显示，多数杆塔标识投运1-2年内即明显失真，不仅引发误登塔、误操作等安全隐患，还会加速杆塔钢结构腐蚀、增加防腐成本，不符合《电力设施标识设置规范》要求^[1]。为解决该痛点，输电运检分公司杏林QC小组以“延长输电线路杆塔标识的使用寿命”为课题开展问题解决型QC活动，优化标识材料与施工工艺，提升户外耐候性，实现运维降本增效与安全升级。

二、现状调查与问题剖析

2.1 标识失效现状统计

小组对工区所辖500kV、1000kV、±800kV、±1100kV等（除新投运线路外）我21条输电线路开展杆塔标识现

状全面排查，对存在喷涂字迹褪色、掉漆，贴纸起皮、开裂、粉化等问题的杆塔进行分类统计，结果显示，杆塔标识问题基数总占比达81%，其中喷涂类失效（褪色、掉漆）占比最高，粘贴类失效（起皮、开裂、粉化）次之，是标识失效的主要表现形式如图1所示。

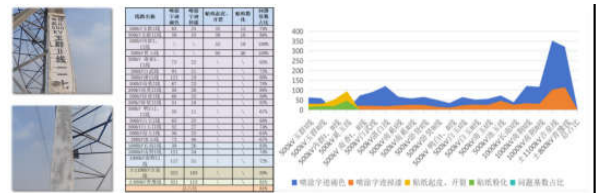


图1：杆塔标识问题统计表

2.2 失效环境影响分析

对标识失效的区域特征进行深入分析，地形方面，平原地区问题杆塔2262基，占比79%，丘陵、山地分别占11%和10%，平原因工业污染、风沙、降水等因素叠加，成为标识失效重灾区；气候因素方面，降水多（66%）、风沙大（23%）、昼夜温差大（7.3%）、日照时间长（3.5%）为主要影响因素，其中降水侵蚀导致的漆膜溶解、风沙磨损造成的物理损伤是标识快速失效的核心环境因素如表2所示。

表1：杆塔标识周围环境影响统计表

杆塔标识问题	涉及杆塔数量	对应区域地形			对应区域气候
		平原	丘陵	山地	
喷涂字迹褪色	1880	1528	132	220	常年降水多、周围有工厂、污秽度在d-6级
喷涂字迹掉漆	651	521	103	27	风沙大
贴纸起皮、开裂	209	142	41	26	季节内昼夜温差大
贴纸粉化	98	71	27	\	日照时间长
总数	2838	2262	303	273	



2.3 传统工艺固有弊端

当前杆塔标识采用的两种传统工艺均存在明显缺陷：

自喷漆刻板喷涂工艺，携带不便，单人操作难以保证喷涂均匀性，漆膜附着力弱，易受风沙冲刷脱落；普通贴

纸粘贴工艺,虽便携性好,但贴纸粘性不足,耐候性差,易受紫外线和水汽影响出现粉化、开裂,两种工艺均无法适应户外复杂的气候环境,难以满足输电线路长期运维的需求。

三、目标设定

基于现状调查结果,小组明确研究重点为解决平原地区杆塔标识失效问题,判定雨水、日照、风沙等环境影响因素可通过材料优化实现有效抵御,因此设定阶梯式量化目标:阶段目标,将杆塔标识失效问题占比从81%降至50%;最终目标,将失效问题占比降至20%,通过材料升级和工艺标准化,实现杆塔标识使用寿命的显著延长,满足输电线路全生命周期运维需求^[3]。

四、原因分析与要因确认

4.1 失效原因全面梳理

小组采用头脑风暴法,结合现场实际运维经验,梳理出影响杆塔标识使用寿命的6项末端因素:杆塔标识设计、标识材质性能、地形影响、气候环境影响、操作工艺、人为破坏。

同时深入分析气候环境对标识的核心作用机制:①紫外线照射破坏漆膜高分子化学键,引发树脂老化、颜料分子分解;②温湿度变化导致漆膜反复热胀冷缩,产生内应力并加速基材电化学腐蚀;③降水(含酸雨)冲刷溶解漆膜可溶性成分,降低漆膜附着力;④风沙磨损造成漆膜表层物理损伤,加速颜料氧化褪色。

4.2 要因科学确认

制定《要因确认计划表》,通过研究分析、现场勘察、统计分析、问卷调查、现场确认等方法,对6项末端因素逐一验证:

表2:杆塔标识失效要因确认表

序号	末端原因	确认方法	确认结果	是否要因
1	杆塔标识设计	研究分析	符合《线路标识实施规定》,规格、内容、位置规范	非
2	标识材质性能	现场勘察+统计分析	传统材料无防刮、防晒、防水、防高温“四防”性能	是
3	地形影响	现场勘察+统计分析	各地形均存在失效问题,仅平原占比偏高	非
4	气候环境影响	现场勘察+统计分析	紫外线、降水、风沙等协同加速漆膜老化	是
5	操作工艺	问卷调查	操作不规范导致的问题占比极低,可忽略	非
6	人为破坏	现场确认+统计分析	未发现人为故意破坏现象	非

最终确认,标识材质性能不足和户外气候环境影响是导致输电线路杆塔标识使用寿命短的核心要因,如表2所示。

五、对策制定与方案优选

5.1 对策制定核心思路

针对核心要因,确定“材料优化为主、工艺标准化为辅”的对策思路:筛选具备“四防”性能、适配户外复杂

环境的标识材料,通过材料升级从根源上抵御气候环境的不利影响;同时制定标准化的选材、设计、制作及安装流程,确保标识施工质量,进一步提升标识使用寿命^[4]。

5.2 可行性方案比选

小组结合现场实际,提出4种杆塔标识优化方案,从现场效果、优点、缺点三个维度进行全面对比分析,综合评估后确定最优方案。

表3:杆塔标识优化方案对比表

方案选择	方案内容	现场实际效果	优点	缺点	结论
方案一	采用以往刻板喷漆+加厚白漆打底+字体加厚复喷		能够一定程度延长标识的使用寿命	费时、费力,增加材料成本,需要周期性反复喷漆。	不采用
方案二	采用以往的贴纸+透明防水漆		便于现场携带	极大增加了材料的支出,增加了工序,防水漆喷于贴纸上,难以保证均匀,对贴纸保护有限。	不采用
方案三	使用数码喷码机		现场操作便捷	喷码机较重,重量达2千克,携带不便,喷码效果不佳,易崩散,机器造价高,耗材价格高,对使用人员要求较高,喷头易堵塞,维修成本高。	不采用
方案四	使用UV转印贴		成本低、重量轻,易于安装,有“四防”性能	无明显缺点	采用

经综合比选,确定UV转印贴标识为本次研究的最优实施方案,如表3所示。

5.3 UV转印贴核心性能

UV转印贴(水晶贴)经UV光固化工艺成型,以UV固化树脂为核心基材,具备优异的户外耐候性和物理机械性能,完全适配输电杆塔户外使用场景,核心性能如下:

户外耐候性：抗紫外线老化，长期使用不褪色、不粉化；耐受-30℃~80℃宽温区变化，漆膜无开裂、起边；表面致密无孔隙，防水、盐雾、酸雨侵蚀，无渗透、溶胀现象；

基材附着力：对镀锌钢、玻璃钢、彩钢等杆塔常用基材附着力强，无需复杂预处理，贴合后无胶痕，户外长期使用不起边、不脱落；

物理机械性能：表面硬度 $\geq 3H$ ，抗刮擦、耐风沙磨损，具备一定柔韧性，可适应杆塔轻微震动和基材微小形变，无脆裂、掉块问题；

施工与使用特性：可工厂批量预制，现场仅需清洁基材表面即可快速转印，1人单基杆塔标识安装时间 ≤ 8 分钟；后期更换无残胶残留，不损伤杆塔基材^[5]。

六、对策实施

6.1 精准选材，明确性能标准

通过市场调研，对比UV转印贴与普通贴纸的工艺、材质差异，明确选用高耐候性UV转印贴。UV转印贴采用“离型膜+UV打印胶水层+白墨层+彩墨层+光油层”多层结构，经转印成型后具备立体凸起、高光泽、色彩鲜艳的特点，可适配杆塔曲面基材，远优于普通贴纸的平面印刷工艺，从材料层面保障标识的耐候性。

6.2 标准化设计，统一标识规格

统计工区所辖线路杆塔塔材具体尺寸，运用专业制图软件完成标识加工图纸设计，明确线路名称、电压等级、杆塔编号、警示语、举报电话等核心内容的字体、字号、排版及尺寸规格，确保标识信息准确、醒目，符合《电力安全工作规程》要求，实现标识设计的标准化、规范化。

6.3 严控制作，保障标识质量

联系具备专业资质和生产经验的厂家，根据设计图纸进行UV转印贴打样，对样品的附着力、清晰度、耐刮擦性、耐水性开展现场测试，针对打样过程中发现的文字间距、色彩饱和度等细节问题进行优化调整，确认样品完全符合现场使用要求后，开展批量制作，确保标识质量统一、稳定。

6.4 规范安装，强化施工质量

制定《UV转印贴标识现场安装操作规程》，明确标准化施工步骤，安排专业人员现场指导，确保安装质量：①清洁表面，采用砂纸、抹布去除杆塔贴标位置的铁锈、油污、灰尘，保证表面干燥、平整；②精准定位，将UV转印贴按设计位置贴放，利用水平尺校准，避免偏移；③按压排气，用刮板从标识中心向四周用力刮压，彻底挤出空气，确保标识与基材完全贴合；④缓慢撕膜，以15-

45°低角度匀速撕下转印膜，若出现标识连带撕起现象，立即复位并再次用力压合，重新撕膜；⑤现场检查，安装完成后即时核对标识信息准确性和贴合质量，确保无翘边、气泡、模糊等问题。具体步骤如图2所示。



图2：杆塔标识施工步骤

七、效果检查与目标达成

对策实施后，对安装UV转印贴标识的杆塔开展持续跟踪检查，结果显示标识性能稳定、效果良好：①信息准确性：标识核心信息与设计图纸完全一致，无错漏、重复；②外观清晰度：在20米距离下，文字、符号清晰可辨，作业前杆号核准时间从原3分钟缩短至0.5分钟，大幅提升运维效率；③性能稳定性：油墨层附着力达0级（划格试验无脱落），180°剥离强度 $\geq 0.5N/cm$ ，无分层、起翘、开裂现象；经4752小时紫外老化模拟试验、240小时中性盐雾试验，标识无褪色、变形、破损；④施工效率：1人单基杆塔标识安装时间 ≤ 8 分钟，远高于传统喷涂和贴纸工艺，适配现场高效运维需求。

小组对已安装198天（4752小时）UV转印贴标识的杆塔进行随机抽样检查，随机抽取500kV玉群I线、II线的典型杆塔样本，均未出现褪色、粉化、开裂、起皱、脱落等问题。对工区所辖线路杆塔标识整体统计显示，失效问题占比从81%降至0%，超额完成阶段目标（50%）和最终目标（20%），实现了杆塔标识使用寿命的显著延长如图3所示。

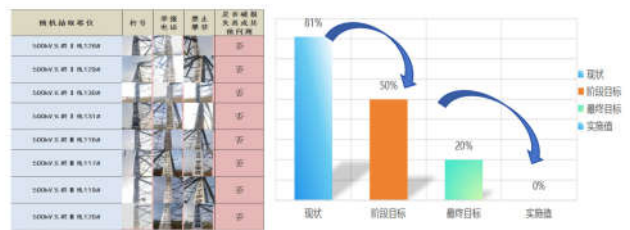


图3：新型杆塔标识效果检查与目标达成

7.1 综合效益分析

7.1.1 社会效益

清晰、持久的杆塔标识保障了身份信息和警示信息的有效识别，周边群众可通过标识上的举报电话及时反馈线路安全隐患，应急人员能够快速赶赴现场处置，有效保障了输电线路的安全稳定运行，避免因线路故障跳闸造成的社会生产生活损失，提升了电力供应的可靠性和社会满意度^[7]。

7.1.2 安全效益

从根本上杜绝了因标识模糊导致的误登塔、误操作等安全隐患,避免非运维人员违规进入危险区域、违规作业引发的触电、高空坠落等安全事故;同时规范了电力设施标识管理,符合行业合规性检查要求,大幅提升

了输电线路运维和现场作业的安全性。

7.1.3 经济效益

以工区现有3846基杆塔、10年为周期进行成本核算,UV转印贴标识相比传统喷涂、数码喷码机喷涂工艺具备显著的成本优势:

表4:不同标识工艺材质10年成本核算表

工艺类型	一次性投入/设备采购	耗材/维护费用(元)	总支出(元)
传统刻板喷涂	21600(制版+喷漆)	186798(5次复喷)	208398
数码喷码机喷涂	54000(2台设备)	16100(耗材+维修)+54000(换新)	124100
UV转印贴标识	54343(全基杆塔制作)	0(无后续维护)	54343

由上表可知,采用UV转印贴标识,10年周期可节省最大运营开支154655元(较传统喷涂),同时大幅缩短巡检核杆时间,提升运维效率,实现降本增效的双重目标如表4所示。

八、巩固措施

为将研究成果固化并推广,保障UV转印贴标识的长期稳定使用,制定以下标准化、常态化巩固措施:

基材预处理标准化:铁塔贴标位置优先采用喷砂除锈,达到Sa2.5级标准,喷砂后4小时内完成贴标作业,避免基材二次返锈;无法喷砂的部位采用电动打磨机除锈,确保表面粗糙度达到40-70 μm ,增强标识与基材的附着力。

施工环境规范化:粘贴施工需在温度5-35 $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $\leq 85\%$ 、基材表面温度高于露点3 $^{\circ}\text{C}$ 以上的环境下进行,禁止在低温、雨天、雾天、大风天开展施工,确保施工环境符合工艺要求。

差异化巡检维护:对多雾、高盐雾、工业污染严重等特殊区域的杆塔标识,每2-3年开展一次专项维护,清理表面积尘、苔藓,检查标识贴合质量,及时处理轻微翘边等问题,做到差异化管理、精细化维护。

质量意识常态化:将UV转印贴标识的选材、设计、制作、安装标准纳入运维人员培训体系,持续开展质量管理和QC知识培训,强化运维人员的质量意识、责任意识和标准化施工意识,提升现场操作水平。

成果内部全面推广:将本次QC活动成果形成《输电线路杆塔UV转印贴标识技术规范》,在公司各输电运行工区全面推广实施,统一杆塔标识的选材、设计、制作及安装标准,实现标识管理的标准化、规范化^[8]。

九、结束语

本次研究以QC方法为指导,针对输电线路杆塔标识使用寿命短的行业痛点,精准找到标识材质性能不足和

户外气候环境影响的核心症结,实现了杆塔标识失效占比从81%降至0%的目标,经198天(4752小时)户外验证,标识性能稳定、效果良好,大幅提升了户外耐候性和使用寿命,为电力运维领域运用QC方法解决实际问题积累了可复制、可推广的实践经验。

未来将进一步优化UV转印贴标识的性能,结合智能运维发展需求,研发二维码识别、定位功能的智能UV转印贴标识,实现杆塔标识的智能化、数字化升级,通过二维码快速调取杆塔台账信息,提升巡检、抢修的信息化水平。同时,将本次研究成果在电力行业内进一步推广,为输电线路杆塔标识的标准化、规范化建设提供参考,助力电力系统安全、可靠、高效运行。

参考文献

- [1]国家电网有限公司.电力安全工作规程线路部分[GB/T36085-2021][S].北京:中国标准出版社,2021.
- [2]中国电力企业联合会.输电线路运行与维护技术规程[DL/T741-2019][S].北京:中国电力出版社,2019.
- [3]国家能源局.电力设施标识设置规范[DL/T1345-2014][S].北京:中国电力出版社,2014.
- [4]张宏亮,李洋,王健.输电线路杆塔标识优化设计与应用[J].电力建设,2020,41(S1):123-127.
- [5]王兆义,刘鹏.户外电力设施标识耐候性材料的选择与应用[J].新型建筑材料,2021,48(8):156-159.
- [6]李建峰,赵鑫.QC方法在输电线路运维优化中的应用[J].电力工程技术,2022,41(3):211-216.
- [7]刘俊,王明,李刚.特高压输电线路杆塔标识耐候性提升技术研究[J].高压电器,2023,59(7):210-216.
- [8]全国质量管理和质量保证标准化技术委员会.质量管理方法计划-实施-检查-处置(PDCA)循环[GB/T19000-2016][S].北京:中国标准出版社,2016.