

复杂地形条件下接触网设计难点与对策分析

杨承

中铁二院工程集团有限责任公司 四川成都 610000

DOI:10.32629/ems.v8i6.20612

[摘要] 在山区、河谷或地质不稳定等地形环境下,电气化铁路接触网设计面临诸多实际问题。文章总结分析了山地、河谷、地质不稳定等地形环境下大坡度和小曲线的机械应力集中、强风的导线摆动振动、地基位移的结构稳定性三个难点,给出相应的工程对策,包括结构加固、抗风减振和适应性维护设计,并结合西南、东南等地的线路实例进行验证。通过分析改造前后运行数据,证明所提方法可以降低故障率、延长设备寿命并节省维护费用。

[关键词] 接触网;复杂地形;设计难点;抗风措施;基础稳定性

一、引言

接触网是电气化铁路受流质量和运行安全的重要保障。在平原地区,接触网设计和施工已相对成熟,但是在山地峡谷或者地质活动较多的复杂地形中,情况则大相径庭。这类地区一般具有高差大、曲线半径小、风大、地基不稳的特点,导致传统设计方法不能满足要求,容易造成导线磨损、结构偏移或者断线等现象。近年来,随着铁路网络向西部和边远地区逐渐覆盖,接触网问题逐渐凸显。本文从工程实际的角度分析复杂地形给接触网带来的主要设计问题,结合实际案例给出相关优化对策,力争为相关工程提可借鉴且可落地的技术参考。

二、复杂地形对接触网设计的主要难点分析

接触网的稳定性决定了列车运行的安全和效率。然而,当线路经过山区、河谷或地质条件复杂地形时,原本应用于平原地区的设计会变得难以适应,且这些复杂地形还会改变外部荷载分布,对接触网的机械性能、结构强度和长期耐久性提出更高的要求。本章从三类典型复杂地形出发,分析其对接触网设计带来的难点。

2.1 山区高差与曲线段的机械应力集中问题

山区铁路通常具有较大的纵向坡度和较多的小半径曲线,在这种条件下接触线运行时会受到不平衡的张力的影响^[1]。举例来讲,在连续下坡接急弯区段,受电弓通过时会对接触线造成横向推力,导致局部张力突增,进而造成吊弦松脱、定位器移动或导线断股等问题。同时由于高差变化较大,补偿装置的调节范围可能不足以适应温度变化引起的伸缩,造成张力失衡。不仅如此,小半径还会导致受电弓滑板与接触线接触点频繁偏移,导线磨损加速,寿命缩短等。这些问题在运营初期看似不显著,但运行时间越长,累计效应越大。

2.2 河谷与峡谷地带的强风与微风振动影响

河谷和峡谷通常形成“狭管效应”,此类地形风速大且风

向多变。接触网是裸露在外的柔性结构,极易受到横向风荷载的影响。强风会使接触线产生剧烈摆动,严重时还可能发生舞动,导致弓网脱线或短路^[2]。微风振动是更为隐蔽和危险的问题,在风速较小的区间(一般为3~10米/秒)内,会在导线后方产生涡流使线路产生高频小幅振动,而这种振动虽然不易察觉,但会在数月或者数年内造成金具松动、线夹疲劳开裂,最终造成断线事故。尤其在跨距较大的峡谷区段,没有中间支撑点,振动能量更难耗散,风险进一步加大。由此观之,仅靠加大支柱强度已经很难应对这种动态荷载,需从整体结构动力学视角重新调整设计参数。

2.3 地质不稳定区域的基础稳定性挑战

在滑坡、沉降带或冻土地区,地基的慢动、突变移动会直接改变接触网支柱的垂直度和相对位置,从而影响整个悬挂系统的几何参数。例如,某处支柱因地表沉降倾斜2度就可能导致相邻跨距内接触线高度超过允许值,形成受电弓打弓。在季节性冻融地区,土壤反复膨胀收缩会导致基础松动,使支柱随着风或列车振动产生微小的晃动,长此以往,会削弱连接螺栓的紧固性^[3]。更为严重的是,这些问题具有滞后性和隐蔽性,常规的巡检无法及时发现,只有在出现明显变形或故障时才能察觉。由此可见,地质条件的不确定性是复杂地形接触网设计中最难预测和最需重视的因素之一。

上述三类问题并非孤立存在,而是常常相互叠加。例如,一段位于滑坡区的山区曲线可能同时承受高应力、强风和地基位移的多重作用,极大增加了设计的复杂性。总体来看,复杂地形下的接触网设计不能简单套用某种标准模式,而必须结合具体环境特征,进行精细化、针对性的调整。

三、针对性设计对策与技术优化

面对复杂地形带来的诸多挑战,传统接触网设计模式已不能满足长期运行的需要,为解决这一问题,工程实践中发

展出一些针对性强、实施便捷的技术对策。这些方法立足于现有的材料和施工条件，通过结构、细节和维护理念上的优化和改进，提高接触网在恶劣环境中的适应能力。本章将从结构强化、抗风减振和维护适应性三方面系统介绍接触网设计的优化方法。

3.1 结构强化与材料选型策略

在山区或大高差区段，首要任务是提升接触网整体刚度和张力调节能力。一种常见做法是采用高强度铜镁合金或铜锡合金导线，抗拉强度比普通铜线高出20%以上，能承受较大的曲线附加应力。该导线机械性能好，在高温或频繁振动条件下仍可保持良好导电、耐磨性，适用于坡度超过千分之二或曲线半径小于600米的困难路段^[4]。另外，在小半径曲线处适当缩短跨距（例如从60米减至45米），可有效降低受电弓通过时的横向冲击力。这种“密支柱”的布置会稍微增加初期投资，但能大大降低吊弦疲劳断裂和定位器偏移的发生频率，从生命周期角度来说更具经济性。在此基础上，还可对腕臂结构进行局部加强，例如采用双腕臂或加厚型腕臂管来提高抗弯能力。在极端情况下，甚至可以用轻型钢结构支架代替混凝土支柱，既能减轻基础荷载，又能满足狭窄山体安装要求。

在支柱基础方面，应根据地质情况，在松软土层或易沉降土层采用深桩或采用地锚拉线将荷载传递至稳定土层；在冻土地区则采用保温基础或架空基础，避免冬季因冻融循环产生基础的位移。同时，补偿装置也要选择合适的类型，在温差大、高差明显的线路，应采用大行程棘轮补偿或弹簧补偿，保证导线张力在全年温度范围内的稳定性。上述措施可从根本上解决机械应力集中问题，减少吊弦断裂或定位偏移等故障。

3.2 抗风与减振措施

针对河谷、峡谷等强风频发区域，需要重点抑制接触线摆动和微风振动。工程上常采用防风拉线系统，即在支柱顶部或腕臂处加斜向拉索，形成三角稳定结构以限制横向位移^[5]。拉线一般以镀锌钢绞线为主，兼顾强度和耐腐蚀，安装角度需控制在30至45度以平衡效果和占用面积。某些区域风速常年超过25米/秒，这是可考虑采用双层拉线，分别约束上部腕臂和下部定位点，从而实现多级防风防护。

对于微风振动，可在跨中位置安装防振锤或阻尼线夹，通过增大局部质量或者引入摩擦耗能，扰乱涡流共振频率，从而降低振动幅值。常用的防振锤多采用铅芯橡胶结构，既能够吸收振动能量又不会老化失效。接触线的预弛度也很重要，适当增大初始弛度（即“下垂量”）可减小风致张力波动，但要避免过于松弛，影响受流质量。在实际工程中，应在仿

真软件中模拟不同风速下导线的动态响应，得到最佳弛度值。

值得注意的是，跨距的长度也会影响接触网的抗风性能。在强风地区，应将标准跨距由60米缩小至50米以内，优先选择刚度更强的简单链形悬挂而不是弹性链形悬挂。图1展示了典型防风优化方案的构造，包括防风拉线的安置位置、阻尼器的安装位置以及与传统结构的对比，直观地说明了各项措施如何协同提升整个系统的稳定性。

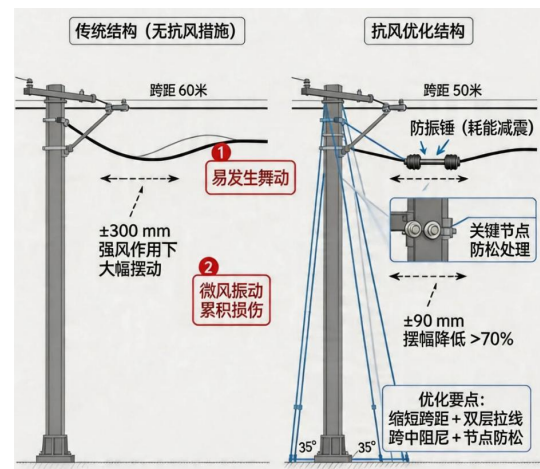


图1 接触网抗风与减振优化构造对比示意图

3.3 动态监测与维护适应性设计

在地质不稳定的区域，被动加固无法解决突发的地基变化，应引入主动监测和快速响应机制。在关键支柱上采用简易倾角传感器或位移标尺，配合定期的人工巡查，及时发现毫米级倾斜或沉降。这些设备成本低且不需要复杂的供电，适合偏远地区的接触网部署。在新建线路上可以应用LoRa或NB-IOT无线监测终端，将支柱状态信息实时回传至调度中心，从而提前预警。结构设计上需注重“可更换性”，采用模块化腕臂组件，如果某部件损坏，则可在不拆卸整套悬挂的前提下实现快速替换。在支柱法兰连接处留出调节孔，以方便后期微调垂直度。这些结构设计理念既加快了应急抢修效率，又降低了日常维护的技术门槛。维护通道的规划也不容忽视，对于陡坡或密林区段，提前预留检修便道或预留直升机吊装点，进而大幅减少故障处理时间。另一个方向是实施“预防性维护”，通过分析历史故障数据，识别高风险区段并制定不同的巡检周期，例如，对位于滑坡带的支柱每季度检测一次，而稳定岩层区段则可延长至半年。同时，建立接触网健康档案，记录每次调整、更换或加固的参数，为后续优化提供依据。这些看似微小的设计考量实则极大提升了系统在不可预测环境中的韧性。

四、工程案例验证与效果评估

为了检验前文提出的具体设计对策在真实工程环境中是否有效，本章选取3个代表性复杂地形铁路案例，分别位于

高海拔山区的曲线段、沿海台风易发的峡谷区以及地质灾害活跃区，涵盖接触网所面临的主要外部环境问题，对比改造前后的运行情况，以检验技术改进措施的实际效果。

4.1 西南山区铁路项目应用实例

西南某高海拔电气化铁路新建线跨越横断山脉，其中K128+300-K132+700区段最大坡度为26%，最小曲线半径仅480m，海拔超过2800米，昼夜温差大。初期采用标准平原设计后，半年试运行期间发生吊弦断裂12次、定位器偏移9次，弓网故障率全线最高。2023年对该段进行改造，混凝土支柱由Q345B钢柱改为Q345B钢柱，跨距由60米变为45米，采用大行程弹簧补偿装置。改造后12个月监测结果显示，同类机械故障为零，受电弓离线率降低92%，接触线张力波动范围由±15%减小到±5%，受流稳定性提升。

4.2 沿海峡谷线路的抗风改造实践

在东南沿海地区，某铁路穿越闽江峡谷段，每年6级以上大风天数110天，夏秋季经常遭受台风。原设计未考虑强风影响，2022年“梅花”台风时接触网大面积舞动，导致接触网48小时供电中断。2023年初加装全高防风拉线系统：每根H型钢柱顶部安装双侧镀锌钢绞线拉索，倾斜35度，跨中安装双锤式防振器，腕臂结构由单臂改为三角稳定构型。改造后2023年、2024年两次强台风期间，未发生一次风致

摆动造成的供电中断，日常运行平均接触线横向摆幅由平均±320毫米减小为±90毫米，弓网动态接触力标准差降低37%，有效保障了高速列车通过时的受流质量。

4.3 地质灾害区的预防性维护成效

在西北某铁路穿越黄土滑坡高风险区的C段(K89+100~K91+500)，地基因受季节性湿陷影响，导致3根支柱倾斜超出安全限值，造成接触线高度异常。2023年当地采用“加固+监测”策略。一方面，将基础结构加固为15米深钻孔灌注桩，并采用四向地锚增强整体稳定性；另一方面，在每根支柱法兰盘位置粘贴数字倾角传感器，通过低功耗无线网络每天上传数据至运维平台，并每季度进行人工复核，实现微小位移的早发现、早干预。两年来未发生结构性位移，成果显著。年度维护成本从改造前的28万元下降至14万元，降幅达50%；设备平均无故障运行时间从11个月上升至26个月，系统可靠性得到提高。这再次验证了预防性维护对延长接触网服役寿命和降低运维投入的价值。

以上三个案例分别从机械强度、抗风性能和地质适应性方面检验了针对性设计对策的有效性。为了便于横向比较，表1列出了各个项目改造前后主要指标变化情况，这些数据表明，无论地形多复杂，只要实施符合环境特征的技术措施，接触网的可靠性均可得到改善。

表1 复杂地形接触网改造前后关键指标对比

项目区域	评估指标	改造前（年均）	改造后（年均）	改善幅度
西南高海拔山区	吊弦/定位器故障次数	21次	0次	100%
	接触线张力波动范围	±15%	±5%	—
沿海峡谷	风致供电中断事件	2.3次	0次	100%
	接触线横向摆幅（mm）	±320	±90	71.9%
地质灾害区	支柱倾斜超限点数	3.5处	0处	100%
	年度维护成本（万元）	28	14	50%

五、结束语

复杂地形对接触网设计提出了挑战，但可以采取特定技术对策进行防范。本文研究表明，在高差大、曲线急的山区，采用高强度材料、短跨距与优化补偿装置可有效降低机械应力集中；在强风峡谷，采用防风拉线、阻尼减振可有效抑制导线摆动与振动；在地质不稳定区域，深桩基础结合实时监测可保证结构稳定。因此，复杂地形下接触网的设计应告别“一刀切”的思路，采用精细化、差异化和预防性的设计思想。本文研究为今后类似线路的设计提供了可复制、可推广的技术路线，有助于提高我国电气化铁路在艰险地区的建设质量与可靠性。

【参考文献】

[1]吴凡平,徐钊,刘志刚,等.山区峡谷地形风场下柔性

接触网风振特性研究[J].铁道学报,2021,43(5):15.

[2]余纲.铁路隧道内接触网预埋槽道环境适应性研究[J].铁道标准设计,2022,66(11):158-162.

[3]梁婧文,蔡俊宇,赖馨.市域快线轨道交通的接触网设计难点研究[J].车时代,2023(5):37-39.

[4]杨佳,杨洋,鲁小兵,等.复杂艰险山区铁路接触网设计技术思考[J].高速铁路技术,2023,14(6):35-38.

[5]王加杰.强风区接触网腕臂施工技术分析[J].科技创新,2021,(26):128-129.

作者简介：杨承，1986年12月，男，汉族，籍贯：四川自贡，学历：大学本科，职称：工程师，研究方向：接触网。