

隧道沉降致低净空接触网新型悬挂安装方式研究

吕荣寿

南昌轨道交通集团有限公司运营分公司 江西南昌 330038

摘要: 城市轨道交通隧道沉降易引发接触网净空不足问题,直接威胁列车运营安全。本文以1号线孔长区间M041、M042锚段接触网设备为研究对象,针对隧道持续沉降导致的17处定位点导高调整失效问题,系统调研低净空隧道接触网悬挂技术现状。通过对比角钢+单伞弹性绝缘组件、U型底座+针式绝缘子、U型底座+单伞弹性绝缘组件三种新型悬挂方式的净空适配性、绝缘性能及机械特性,结合广州、杭州等地铁应用案例,提出分梯度的整改方案。同时,从技术检测、风险评估及监测机制层面构建保障体系,为类似隧道沉降区段接触网设备改造提供理论依据与实践参考。

关键词: 隧道沉降; 低净空; 接触网; 悬挂方式; 绝缘性能; 整改方案

1 低净空接触网设备现状与问题分析

1.1 设备现状与沉降影响

经现场勘查,1号线刚性接触网悬挂系统采用三种整改形式:12处采用角钢切割定位,3处安装U型底座,2处应用单伞弹性绝缘悬挂组件。通过对2024与2025年导高数据发现,17处定位点导高变化量介于3~24mm之间,其中M041~30定位点导高下降最为显著,从4037mm降至

4013mm,变化量达24mm。

隧道拱顶高度监测数据显示,17处定位点净空高度差异较大,M041~23定位点净空最低(4336mm),M042~31定位点净空最高(4454mm)。其中6处定位点净空低于4365mm,传统角钢+针式绝缘子悬挂方式已无法满足绝缘距离要求,具体数据如表1所示。

序号	定位点号	2025年导高 (mm)	隧道拱顶高度 (mm)	现有悬挂方式	核心问题
1	M041~23	4034	4336	角钢切割	净空不足,无调整余量
2	M041~24	4032	4367	槽钢切割	绝缘距离接近临界值
3	M041~25	4023	4366	槽钢切割	导高偏低,绝缘风险升高
4	M041~26	4030	4347	角钢切割	净空不足,无法采用传统方式
5	M041~27	4028	4363	角钢切割	动态绝缘距离存在隐患
6	M041~28	4032	4366	U型底座+单伞	静态绝缘距离待强化

注:表中数据来源于2025年9~10月现场实测结果

1.2 传统悬挂方式的局限性

1号线隧道沉降区段原有悬挂系统采用了A型单支悬吊角钢(型号为SZ1/GXJL12(A)-09)与刚性悬挂用针式绝缘子(型号为GJ-1.5A)的组合结构形式,同时安装过程中要求化学锚栓与接触线之间的垂直距离必须大于或等于150毫米。该悬挂方式在隧道净空高度较为充足的区段内运行表现良好,系统稳定性较高。然而,在净空高度受限的低净空隧道环境中,该悬挂系统暴露出多个显著缺陷:

首先,该结构对净空高度的适配范围较为狭窄。当隧道拱顶的实际高度低于4390毫米时,角钢底座会与隧道顶

部结构发生物理干涉,导致接触线导高无法进行精细调节,严重制约了悬挂系统的调整能力。

其次,系统的绝缘性能存在冗余不足的问题。一旦净空高度进一步降低至4365毫米以下,带电体与接地体之间的静态电气距离便会小于150毫米,这一状况直接违反了现行国家标准《地铁设计规范》(GB 50157-2013)中的强制性安全条款,存在电气击穿及运营安全隐患。

最后,既有的整改措施缺乏可持续性。现场通常采用反复切割角钢的方式来临时适应更低的净空,但这一操作会显著削弱底座的结构机械强度,影响长期使用安全。即便更

换为 U 型底座结构，也仅能有限地提升 30–50 毫米的净空利用空间，无法从根本上应对隧道区段可能出现的持续沉降问题，因而难以作为一种长久可靠的技术解决方案。

2 低净空接触网新型悬挂技术方案

通过对国内多家设计单位的调研，结合郑州、长沙、南京等城市地铁的运营实践经验，针对地铁隧道中不同的净空高度限制，研究形成了三种新型接触网悬挂技术方案。其核心设计思路是通过对悬挂组件的结构优化与组合方式创新，在有限空间内同时保障电气绝缘性能与机械结构稳定性，以适应苛刻的安装环境并提升运营可靠性。

2.1 方案一：角钢 + 单伞弹性绝缘悬挂组件

该方案采用 A 型单支悬吊角钢与 DS-TXZJ-CWL 型单伞弹性绝缘悬挂组件相结合的方式。其核心优势在于充分发挥弹性悬挂组件的形变能力，有效提升绝缘系统的安全冗余。该组件主要由硅橡胶材质伞裙和高强度弹性金属支架构成，在列车经过时可有效吸收振动带来的动态荷载，同时借助多层伞裙结构设计显著增加沿面爬电距离，有效防范因污染、潮湿导致的绝缘击穿。

技术参数表明，该方案适用于净空高度大于等于 4390 毫米的区段，静态绝缘距离可达到 180 毫米，明显超出规范中 150 毫米的最低要求。其机械承载能力与传统悬挂方式基本一致，可安全承受 8 千牛的汇流排垂直重力及 5 千牛的水平拉力。实际安装过程中，需严格控制角钢底座与隧道顶板之间预留 10 至 15 毫米的合理间隙，以防止因结构沉降引起刚性接触和附加应力。该方案已在广州地铁 13 号线同类净空限制区段成功应用，并实现连续三年无绝缘故障的稳定运行记录。

2.2 方案二：U 型底座 + 针式绝缘子

针对净空高度在 4365 至 4390 毫米之间的过渡区段，本方案使用 U 型底座（型号 850-R11）替代传统悬吊角钢，同时配合既有的 GJ-1.5A 型针式绝缘子与 B 型汇流排定位线夹。U 型底座通过高强度螺栓直接固定于隧道侧壁，与角钢安装方式相比可节约约 30 毫米的纵向安装空间，净空利

用效率因此提升 7%。

现场实测结果显示，该方案静态绝缘距离达到 167 毫米，完全符合现行规范标准。此外，U 型结构设计使底座受力更为均匀分散，抗疲劳性能较角钢底座提高约 20%。在长沙地铁 2 号线某些存在沉降问题的区段实施后，该方案显著提高了导高调整精度，误差控制在 ± 2 毫米范围内，轨道调整后基本无需频繁返工整改，使运维成本下降 40%。但需注意的是，该方案对施工安装精度提出较高要求，底座安装的水平误差须控制在 3 毫米以内，否则易导致汇流排发生偏磨，影响受流质量与设备寿命。

2.3 方案三：U 型底座 + 单伞弹性绝缘悬挂组件

面向净空高度仅 4330 至 4365 毫米的极端低净空区段，本方案将 U 型底座与单伞弹性绝缘悬挂组件结合使用，借助双重结构优化实现在极限空间内的设备布设。该方案净空高度适应下限较方案二再降低 35 毫米，能够覆盖如 1 号线 M041–23 等关键低净空隐患区段。但其静态绝缘距离仅 122 毫米，略低于通常要求的 150 毫米标准。

为弥补绝缘距离的不足，需采取多项复合绝缘强化措施：一是在带电体与接地体之间的空气隙中涂覆耐高温绝缘漆，该涂层绝缘电阻不低于 $10^{12} \Omega$ ；二是在汇流排定位线夹外侧加装厚度不小于 5 毫米的硅橡胶绝缘护套，通过材料介电特性提升等效绝缘性能。厦门地铁在北站预留的低净空区段采用本技术，经绝缘介质补偿后等效静态绝缘距离可达 180 毫米，完全满足实际运营需求。该方案同时也符合《杭州地铁 2 号线安全论证会专家意见》中所提出的“净空不足区段绝缘距离不小于 100 毫米”的特殊技术要求，动态绝缘距离在实际运行中稳定保持在 80 毫米以上，具备较高的工程适用性与安全性。

2.4 三种方案对比与适配建议

从净空适配、绝缘性能、施工难度等维度对三种方案进行综合评估，结果如表 2 所示。结合 1 号线现场数据，形成分区整改建议：

悬挂方式	净空适配范围 (mm)	静态绝缘距离 (mm)	施工成本	运维周期	适配定位点
角钢 + 单伞组件	≥ 4390	180	中	2 年	M041–18、19、20 等 7 处
U 型底座 + 针式绝缘子	4365–4390	167	低	1.5 年	M041–24、25、27 等 6 处
U 型底座 + 单伞组件	4330–4365	122(补偿后 180)	高	1 年	M041–23、26、28 等 4 处

3 新型悬挂方式的风险控制与应用保障

3.1 技术风险评估与防控

新型悬挂方式在技术层面所面临的核心风险主要集中在机械结构强度与电气绝缘性能两大方面。针对单伞弹性组件，厂家提供的第三方检测报告明确显示：在 1.2 倍额定荷载条件下，组件最大变形量不超过 2 毫米，卸载后未出现任何永久形变，表明其具备良好的弹性恢复能力与结构可靠性；在电气性能方面，该组件顺利通过了 15 千伏耐压试验并持续 1 分钟无闪络击穿现象，证明其绝缘性能完全符合地铁运行标准。

针对方案三中所提出的绝缘补偿措施，项目组开展了从 -25℃ 至 70℃ 的高低温循环试验，试验结果表明绝缘涂层与护套材料在极端温度条件下性能保持稳定，未出现开裂、老化或绝缘性能下降，能够充分适应地铁隧道复杂多变的气候与运行环境要求。

为进一步验证该悬挂方案的实际应用效果，建议选取典型区段 M041-23 定位点（该处隧道净空高度为 4336 毫米）开展试点安装与测试。试点期间需重点监测以下三项关键指标：一是动态绝缘距离，借助受电弓模拟装置在不同运行速度下测试受电弓与接触网之间的最小电气间隙；二是组件运行温度，在夏季用电高峰时段实时监测弹性组件表面温度，排查是否存在局部过热风险；三是结构稳定性表现，每周定期对底座连接螺栓的扭矩及组件是否发生塑性形变进行专项检查。整个试点运行应持续至少一个月，如未出现异常情况，再逐步将该项技术推广至其他定位点。

3.2 施工质量控制要点

新型悬挂系统的安装施工应严格遵循“精准定位、分级验收”的基本原则，其中关键质量控制环节包括以下三项：一是基础固定阶段，化学锚栓的钻孔深度误差须控制在 5 毫

米以内，锚栓安装后需进行拉拔试验，其承载力不应低于 12 千牛；二是组件装配环节，单伞弹性组件与 U 型底座之间的连接螺栓须按设计要求施加扭矩，范围严格限定在 45 至 50 牛·米之间，防止因过紧造成弹性元件的预紧失效；三是绝缘补偿施工，绝缘护套的包裹范围应超出电气间隙区域 20 毫米以上，所有接缝位置需使用高性能绝缘胶带进行完全密封，杜绝局部放电风险。

施工结束后必须执行三项专项验收测试：首先使用高精度激光测距仪测量接触线高度，确保其偏差严格控制在 4040 ± 3 毫米设计范围内；其次通过绝缘电阻表测量带电体与接地体之间的电阻值，绝缘电阻大于 10^6 欧姆方视为合格；最后模拟列车运行中的振动环境，对悬挂系统施加频率 5 赫兹、振幅 2 毫米的振动荷载，持续 30 分钟后全面检查各组件有无松动、裂纹或位移。

参考文献：

[1] 黄大维, 胡新平, 耿大新, 等. 盾构下穿既有隧道诱发沉降后注浆抬升试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2025, 47(11):2255-2263.

[2] 徐泽全, 张正, 赵伏田, 等. 结构下穿隧道地表沉降变形解析预测方法 [J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2025, 42(05):71-78.

[3] 刘增炜, 王敬德, 郭垚, 等. 基于动态卡尔曼滤波的电力隧道顶管施工地表沉降变形监测 [J]. 河北电力技术, 2025, 44(05):75-80.

[4] 吴建中, 史玉金, 张振. 地下水位持续抬升条件下软土地铁隧道变形的影响 [J]. 上海建材, 2025,(05):114-117.

作者简介: 吕荣寿(1989.11-),男,汉,江西人,大学本科,研究方向: 电气及其自动化