

电气化铁路接触网动态性能指数 (CDI) 分析及整治措施研究

刘志敏

(中国铁建电气化局集团第五工程有限公司, 四川 成都 610031)

摘要 在我国高速铁路网络中, 接触网是为电力机车提供动能的载体, 其动态性能的稳定性直接决定了电力机车运行的安全性与能效水平。本文聚焦接触网动态性能指数 (Catenary-pantograph Dynamic Index, CDI) 的量化分析体系与工程整治技术, 通过整合动态检测数据与现场复检验证, 构建了多维度的 CDI 评价模型, 旨在为电气化铁路接触网的精准运维、性能优化提供参考。

关键词 高速铁路; 接触网; 动态性能; CDI 指数; 运维整治

中图分类号: U28

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.012

0 引言

接触网作为电气化铁路的关键供电装置, 其与受电弓的动态耦合性能是影响列车运行品质的核心因素。传统采用的接触网运行质量指数 (CQI) 在动态工况适应性、评价维度全面性等方面存在局限, 难以满足高速列车对供电稳定性的严格要求。为此, 在 CQI 评价框架基础上, 通过引入层次分析法优化指标权重分配, 改进评价函数的非线性拟合精度, 提出了接触网动态性能指数 (CDI), 实现对接触网动态运行状态的精准量化评估^[1]。

1 接触网动态性能指数 (CDI)

1.1 指数定义

接触网动态性能指数 (CDI) 是表征接触网—受电弓耦合系统动态运行状态的综合量化指标, 其核心特征在于实现对弓网关系与受流质量的多维度评价。该指数选取动态拉出值、接触线高度平顺性、弓网接触力稳定性及燃弧率四个关键检测参数, 基于各参数对系统运行的影响权重, 通过层次分析法确定指标系数, 构建综合评价模型, 计算公式如下:

$$CDI = 0.18CDIS + 0.36CDIH + 0.36CDIF + 0.1CDIA \quad (1)$$

式(1)^[2]中, CDIS 为动态拉出值分量; CDIH 为动态接触线高度分量; CDIF 为弓网接触力分量; CDIA 为燃弧率分量。

1.2 CDI 分量研究

1.2.1 CDIS: 动态拉出值分量

$$CDIS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_s^2(S_{\max-i})}{n}} \quad (2)$$

式(2)中: n 为评价单元的具体跨数; i 为评价单元内, 每跨的位置标识, 第一跨位置标识为 1; $S_{\max-i}$ 为评价单元内第 i 跨中最大的动态拉出值; f_s 为评价单元内各跨动态拉出值评价函数。

解析: 动态拉出值是反映接触网空间位置稳定性的核心参数, 根据评价函数特性, 当跨内最大动态拉出值控制在 150 ~ 350 mm 区间时, 该分量贡献值为 0。

1.2.2 CDIH: 动态接触线高度分量

$$CDIH = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_H^2(H_{std-i})}{n}} \quad (3)$$

式(3)中: H_{std-i} 为评价单元中第 i 跨的动态接触线高度标准偏差; f_H 为评价单元内各跨动态接触线高度评价函数。

解析: 接触线高度标准偏差是反映导高平顺性的关键统计指标, 其物理意义为测量数据偏离均值的离散程度。标准偏差计算公式如下:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\chi_i - \bar{\chi})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(\chi_1 - \bar{\chi})^2 + (\chi_2 - \bar{\chi})^2 + \dots + (\chi_n - \bar{\chi})^2}{n-1}} \quad (4)$$

作者简介: 刘志敏 (1979-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电气化铁道接触网。

式(4)中, S 为标准偏差; n 为试样总数或测量次数, 一般 n 值不应少于 20 ~ 30 个; i 为测量数据中某数据的排序, 1 ~ n。(可利用 EXCEL 表格标准偏差函数 STDEV. S 研究和计算标准偏差)

1.2.3 CDIF: 弓网接触力分量

$$CDIF = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_F^2(F_{std-i})}{n}} \quad (5)$$

式(5)中: F_{std-i} 为评价单元内第 i 跨受电弓—接触网接触力标准偏差; f_F 为评价单元内各跨受电弓—接触网接触力的评价函数。

解析: 接触力标准偏差反映弓网接触压力的稳定性, 该分量优化的核心在于缩减跨内接触力波动范围。通过改进接触网悬挂结构弹性特性、优化受电弓碳滑板材质等技术手段, 可有效降低接触力波动幅度, 提升 CDIF 分量指标。

1.2.4 CDIA: 燃弧率分量

$$CDIA = f_A(NQ) \quad (6)$$

公式(6)中: NQ 为评价单元内的弓网燃弧率; f_A 为评价单元内弓网燃弧率的评价函数。

解析: 燃弧率是反映受电弓从接触网获取电流质

量的关键指标, 以评价单元为基本单位进行计算。在受电弓常规运行工况下, 弓网燃弧率一般低于 0.1%, 对应 CDIA 分量值小于 0.1, 而且该指标权重仅为 0.1, 对 CDI 总指数影响有限。

综上所述说明, 接触网 CDI 指数优化的优先级排序为: 首先是跨内高差调整, 其次是动态接触力范围控制, 最后是最大拉出值调整。其中跨内高差与接触力范围的调整可协同实施, 主要是对接触网定位点与跨中吊弦线夹位置的导高精准调控^[3]。

2 案例分析

2.1 典型 CDI 缺陷案例

以南昆客专下行线路 K194.524-K195.785 区段的 CDI 整治为例, 该评价单元全长 1.261 km。2021 年 8 月国铁集团 CRH380AJ-0201 综合检测列车两次检测结果显示, 该评价单元的 CDI 管理值为 2.1, 超出规定的 2.0 的安全控制标准值, 为提高弓网受流质量, 因此需要对该单元进行整治。

首先要对该单元 CDI 各分量的构成占比进行分析工作, 找出造成本单元 CDI 管理均值扣分高的原因, 以此作为整治的方向重点, 经过分析, 该单元各分量的占比数据如表 1 所示。

表 1 整治前 CDI 各分量占比分析表

项目	起始里程 (km)	终止里程 (km)	CDI _s (拉出值)	CDI _H (导高)	CDI _F (接触力)	CDI _A (燃弧)	CDI
分量			0.0 297	1.8 271	1.3 212	9.9 566	2.1
权重系数			0.18	0.36	0.36	0.1	1
加权后 CDI	194.524	195.785	0.0 053	0.6 577	0.4 756	0.9 956	2.1 343
占比			0.25%	30.82%	22.28%	46.65%	100%

由表 1 可以看出, CDI_H 占比 30.82%, CDI_F 占比 22.28%, 而 CDI_A 占比高达 46.65%, 拉出值分量占比非常小可以忽略不计, 可以看出, 燃弧是造成 CDI 管理值扣分高的主要原因, 其次是导高平顺性不足及接触力缺陷的问题。

2.2 主要影响因素分析

1. 接触线内应力: 采用接触网张力测试仪对该锚段的接触线进行张力检测, 测试结果表明该锚段接触线的张力差值均控制在允许范围内, 排除因补偿装置卡滞或定位装置失效导致的应力不均原因^[4]。

2. 专业结合部: 通过进一步分析对应区段的轨道线路的 TQI 检测数据(轨道质量指数), 结果显示各项指标均满足线路标准, 无明显几何偏差。同时, 结合线路平面线形与纵断面坡度分析, 排除因线路基础变形引发的弓网耦合不良的问题。

3. 导高平顺性: 通过对这个单元锚段 8 月份的两次 1C 动态检测数据的对比分析, 发现该单元的动态燃弧分量 CDIA 值为 9.9 566, 主要问题体现为整个接触网锚段存在多处燃弧点, 同时通过现场的静态测量发现, 该锚段存在 12 处相邻定位点导高差值超过 50 mm 的超标处所, 其中最大高差竟达 72 mm, 形成明显的 V 型或倒 V 型的缺陷, 导致动车组通过时受电弓对接触线的冲击加剧, 引发了燃弧现象。

4. 接触线平直度: 对比《高速铁路接触网运行维修规则》的接触线平直度标准要求(平直度 ≤ 0.1 mm/m), 采用接触网平直度检测仪对该锚段进行平直度测量, 发现该锚段硬点集中区段存在 23 处平直度超标, 最大值达 0.7 mm/m, 接触线表面存在明显的机械损伤与局部变形, 是导致该锚段弓网离线燃弧的直接原因。

通过以上检测分析表明, 该单元 CDI 指数超标是

接触线平直度不达标与导高平顺性不足协同作用的结果，其中平直度缺陷为主要影响原因。

2.3 整治措施

1. 导高平顺性处置：根据现场测量的静态参数进行调整，主要是将定位点、吊弦点的导高调整至允许的误差范围内，杜绝V字和倒V字，现场作业尽量将相邻定位点、吊弦点的导高差控制在2 mm内。

2. 接触线平直度处置：（1）确保接触网补偿装置的有效性：检查补偿装置转动灵活性，松开补偿框架锁定装置，确保任何时间补偿坠砣串均可随线索的延展而自由升降。（2）对平直度超标处所整治作业：采

表2 整治前后 CDI 各分量占比的对比数据

项目	起始里程 (km)	终止里 程(km)	检测车	1C 动态检 测时间	CDI _s (拉出值)	CDI _h (导高)	CDI _F (接触力)	CDI _A (燃弧)	CDI	变化 幅度
整治前	194.524	195.785	CRH380AJ-0201	8月9日	0.0 297	1.8 271	1.3 212	9.9 566	2.1	—
整治后			CRH380AJ-0201	12月9日	0.0 935	1.2 654	0.9 096	3.1 769	1.1	-47%

形图上可以看出，其各参数的波形已得到明显改善。

2.5 影响因素综合分析

1. 设计影响因素：接触网中锚在轨道线路上的设置位置直接影响接触线张力分布，故建议在图纸审核阶段时需对中锚张力差开展检算，优化中锚布置位置。

2. 材料影响因素：接触线绕盘时需严格其张力大小，避免线索产生永久性变形；同时应对线索表面进行抛光处理，消除毛刺、坑点等缺陷。

3. 施工机械影响因素：（1）接触线恒张力架线车在大坡道区段作业时，需确保放线张力稳定；（2）在接触线展放过程中，架线车的张力需线性加载，减少硬点形成与线索内应力残留^[5]。

4. 施工质量影响因素：（1）接触线展放时，临时悬挂点较少，接触线未进行超拉释放其应力，不及时安装定位及吊弦，在接触线自重的影响下，易造成接触线扭面或不平顺；（2）安装精度不足、接触网参数调整不到位，导高参数较差，受电弓在高速行驶时易造成“离线”或冲击接触线从而导致燃弧及接触力、硬点等问题；（3）下锚补偿装置卡滞、线锚、承锚大小轮满圈或空槽，腕臂偏移因补偿卡滞导致接触网张力不均衡，也可能导致接触网及接触力问题^[6]。

3 结束语

本文通过理论建模与工程实践相结合，构建了完善的 CDI 指数评价体系与整治技术框架，实现了接触网动态性能的精准评估与高效提升。研究表明，CDI 指数能够有效表征接触网—受电弓系统的动态运行状态，

用五轮液压整弯器，从中锚向两端下锚方向进行单向的平推作业，施加均衡压力，每完成一个跨距立即恢复安装定位线夹及吊弦，严禁跨距内往复作业。

2.4 整治效果

2021年12月9日、20日国铁集团综合检测列车对南昆客专下行线路进行检测，其中K194.524-K195.785评价单元的 CDI 管理值已经下降为1.1分，整治取得明显效果，整治前后各 CDI 分量对比情况见表2。

从表2的两组数据对比可以看出，该单元的 CDI 均值由整治前的2.1下降到了整治后的1.1，下降幅度47%，特别是 CDI 燃弧分量的下降幅度最大，从检测波

其核心影响因素包括接触线平直度、导高平顺性与接触力稳定性，通过针对性的工艺改进与参数优化，可实现 CDI 指数的显著降低。南昆客专的工程案例验证了本文提出的整治技术方案的有效性，通过导高精准调整与接触线平直度修复，实现了 CDI 指数47%的降幅，为同类工程提供了可参考的技术经验。未来研究可聚焦三个方向：一是极端气候条件（高温、高寒、强风）下 CDI 指数的动态变化规律，建立适应性评价模型；二是开发接触网动态性能自动化监测系统，实现缺陷的实时预警与精准定位；三是探索新型复合材料与智能结构在接触网中的应用，进一步提升系统动态性能与耐久性。

参考文献：

- [1] 冷旭. 高速铁路接触网系统关键技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2020.
- [2] 王婧, 张文轩, 王斌, 等. 弓网运行质量指数评价函数优化研究[J]. 中国铁路, 2020(08):1-6.
- [3] 乔凯庆, 汪海瑛, 杨志鹏, 等. 接触网动态性能评价指标应用研究[J]. 中国铁路, 2021(04):80-84.
- [4] 杨宾汇, 杨志鹏, 王婧, 等. 基于 CDI 分析的接触网整锚段燃弧诊断及精调整治[J]. 电气化铁路, 2023,34(S1):132-136.
- [5] 任朋顺. 铁路接触网悬挂施工技术研究[J]. 工业 A, 2016(07):104.
- [6] 周玉伟, 泉金龙, 朱政, 等. 电气化铁路接触网附加导线覆冰舞动等状态监测技术研究[J]. 电气化铁道, 2025,36(S1):120-124,139.