

接触网冷滑试验数据分析与弓网关系动态优化策略

冀泽宇

中铁电气化局，北京市，100036；

摘要：接触网冷滑试验是电气化铁路开通前验证弓网系统匹配性的关键环节，其数据蕴含了接触线几何参数、硬点分布及受电弓动态响应等多维信息。本文聚焦于冷滑试验数据的深度挖掘，构建基于多源传感融合的数据特征提取模型，揭示静态测试条件下弓网关系的潜在非线性耦合机制。在此基础上，提出一种动态优化策略，通过迭代修正接触网悬挂参数与受电弓运行轨迹的匹配度，实现从静态验收向动态性能预演的跨越。研究旨在为提升高速列车弓网受流稳定性提供理论支撑与技术路径，避免传统经验式调整带来的滞后性缺陷。

关键词：接触网冷滑试验；弓网关系；数据分析；动态优化

DOI：10.69979/3041-0673.26.01.106

引言

伴随着高速铁路技术的不断发展，弓网系统作为电力牵引供电的重要组成部分，它的安全可靠性同与列车运输效率、乘客舒适度相关联的程度也越来越高。电气化铁路投入运营前要经过一系列的检测，接触网冷滑试验属于非带电状态下的一项重要检测，它的主要任务就是检验接触网的几何尺寸、弹性均匀性以及受电弓动态包络线是否符合要求。传统的冷滑试验只注重对单个参数的定性判断或者简单的阈值比较，没有对大量的原始数据进行系统的关联分析，从而造成一些潜在的弓网冲突隐患不能被及时发现。

1 冷滑试验多维数据特征解析与重构机制

1.1 多源异构数据的时空对齐与清洗策略

冷滑试验时数据采集系统一般会包含激光测距仪、加速度传感器、视频监控系統、惯性导航单元等。这些设备所产生出来的数据，在采样频率、时间戳基准和坐标空间的定义方面存在着较大的差别，属于典型的多源异构数据集。为了达到有效的深度分析目的，首先要解决数据时空一致性的问题。不同的传感器时钟漂移会造成同一个时间点的物理现象在数据流里出现时间错位，从而影响后面特征之间的关联分析。因此必须使用高精度的时间同步算法，用主时钟为基准，给各个子系统做微秒级的时间戳校正，保证所有的观测数据都在时间轴上严格对齐。

从空间角度来说，激光测距数据一般是以线路里程标或者局部坐标系为基准，而受电弓姿态数据则是依靠车载惯性测量单元所构建起来的相对坐标系。为了把两者映射到同一个参考系上，就要创建复杂的坐标转换矩阵，再配合轨道几何参数做空间配准。在车辆运行轨迹

的平滑性以及由于轮轨磨耗、轨道不平顺所造成的微小位移误差修正方面都要考虑进去。除此之外，现场环境因素风载荷、温度变化、电磁干扰等都会造成随机噪声，使原始数据中包含大量的无效或者失真的信息。针对以上问题应该设计自适应滤波算法，用小波变换去噪和卡尔曼滤波平滑相结合的方式，有效地去掉高频噪声和离群点，保留反映弓网真实状态的有用信号成分。

1.2 接触网几何形态与弹性分布的隐性特征提取

冷滑试验的主要目的就是可以清楚地反映出接触网的几何形状和弹性分布情况。低速滑行时，受电弓滑板与接触线之间的接触压力虽然小，但是仍然可以迅速发现接触线高度变化、拉出值偏移、定位器坡度不均等几何参数问题。传统的分析方法一般只会对宏观参数进行分析，不考虑连续波形中所含有的微观特征。接触线高度的微小改变就有可能是吊弦松动或者支撑装置失效的信号，在常规的阈值判断中很容易被忽视。

为了挖掘出这些隐性的特征，就要用到时频域分析和统计特征提取的方法。对接触线高度变化曲线做希尔伯特-黄变换，可以把非平稳信号分解成本征模态函数，从而把不同频率分量对应的物理意义分开。低频分量一般对应着长波长的几何变形，比如跨中弛度不均；高频分量大多体现短波长的局部缺陷，譬如硬点或者磨耗不均匀。利用滑动窗口统计法得到各个区间内方差、偏度、峰度，可以定量分析接触网弹性分布是否均匀。弹性不均匀区一般表现为局部刚度突然变化，在冷滑数据中就会出现一些特殊的波形畸变。

2 基于数据驱动的弓网关系非线性耦合机理探究

2.1 静态几何参数对动态受流稳定性的传导效应

冷滑试验得到的静态几何参数,比如接触线高度、拉出值、导高变化率这些,看上去是独立的静态指标,实际上会对高速运行时的动态受流稳定性产生十分深远的影响。传导不是简单的线性叠加,是弓网系统非线性动力学机制放大或者衰减。微小的接触线高度偏差在低速冷滑时只引起接触力的微小波动,但是高速运行时由于离心力和气动升力的共同作用,该偏差就会变成剧烈的上下跳动,从而引起离线现象的发生。

探究这种传导效应就要建立从静态几何场到动态受力场的映射关系。经过数值仿真的结果和实测的数据对比之后可知,接触线高度的梯度变化率是造成受电弓垂向加速度的主要因素。当梯度变化大于某个阈值的时候,受电弓跟随性变差,接触力波动幅值呈指数级增大。拉出值设置不当会造成受电弓横向运动时产生额外侧向力,造成滑板不均匀磨损或者脱弓。静态参数对于动态性能的制约作用,一般具有隐蔽性和滞后性,只有在冷滑阶段经过细致的数据分析之后,才会被完全地展现出来。

2.2 弓网接触界面的摩擦学特性与磨损演化规律

接触网和受电弓的接触界面属于典型的摩擦学系统,工作状态的好坏直接影响到受流是否连续。冷滑试验中虽然没有电流通过,但是机械摩擦仍然存在。通过对冷滑过程中接触力波动和振动信号的分析,可以间接地得到接触界面的摩擦学特性。摩擦系数发生改变的时候,接触压力的分布情况也会随之变动,而这些因素均会左右到界面处的磨损速度及其形态变化过程。

冷滑数据所包含的摩擦学信息主要是接触力的稳定性。如果接触力出现频繁且大的波动,那么接触界面就存在打滑或者粘滞的情况,这种现象一般和接触线表面的粗糙程度、氧化层的厚度以及滑板所用材料有关。利用长时间的冷滑数据来分析摩擦界面的劣化趋势,可以得到接触力频谱的特征。冷滑次数增多的时候,如果某一个频率成分的振幅变大,那么就说明接触线表面存在疲劳裂纹或者局部硬化的情况。

磨损演化规律的研究还要考虑受电弓的横向摆动轨迹。在曲线区段,受电弓滑板和接触线之间有相对滑动,造成滑板边缘磨损加快。冷滑数据中横向位移和速度信息可以用来计算滑板等效磨损量。利用磨损累积模型可以预测出不同运行工况下滑板的使用寿命,给接触线材质选择及表面处理工艺提供依据。更重要的是,摩擦学特性发生改变之后,又会对弓网系统动力学响应产生影响,从而形成正反馈或者负反馈回路,进而加剧或者缓解系统的振动。因此,对接触界面的摩擦学性质及

演变规律进行研究,是认识弓网关系复杂性的关键所在。

2.3 多物理场耦合下的弓网系统非线性动力学行为

冷滑数据给研究这种非线性行为赋予了重要的实验根基。通过对受电弓在不同速度下动态响应的分析,可以找到系统发生分岔、混沌或者极限环振荡的临界条件。当接触网弹性系数和受电弓固有频率接近的时候,系统就会出现强烈的共振现象,使接触力剧烈波动。非线性行为一般不能用线性理论来解释,需要用相平面分析、李雅普诺夫指数等非线性动力学工具来加以分析。

另外环境因素风载荷、温度变化都会给系统带来外部激励,引起系统的平衡状态的变化。冷滑试验一般在自然环境中进行,所以数据中包含有风致振动和热胀冷缩的影响。通过对环境因素进行解耦,就可以清楚地看到弓网系统本身所具有的非线性特征。研究发现,在一定的风速和温度组合下,弓网系统稳定性会出现突然变化的情况,这种情况叫做失稳阈值。通过对冷滑数据进行统计分析,可以得到不同的气候条件下失稳阈值,为设计出适应性强、鲁棒性高的弓网控制策略提供理论基础。

3 弓网关系动态优化策略的构建与实施路径

3.1 基于数据反馈的接触网悬挂参数迭代修正方法

对于冷滑试验数据分析时出现的几何偏差和弹性不均问题,必须要创建起一个闭环的迭代修正体系。传统的修正方式一般是一次性的,即发现问题后立即进行调整,缺少对调整效果的预测和验证。基于数据驱动的动态优化策略就是把预测模型加入到修正过程中,形成分析、修正、验证、再修正的循环。

就具体的分析而言,首先要利用冷滑数据建立接触网悬挂参数的敏感性分析模型,定量地确定各个参数(吊弦长度、定位器角度、支柱倾斜度等)对弓网动态性能影响的权重。按照权重大小,首先调整对系统稳定影响最大的参数。根据动力学仿真软件对调整后弓网响应进行模拟,预测会出现新的不平衡点。仿真结果如果还存在潜在的风险,就返回重新调整参数组合,直到找到最优解为止。

迭代修正时还要利用历史数据积累的经验知识库。用机器学习算法来训练模型去识别出弓网病害的常见模式,并给出修障方案,提高修障的准确性和效率。建立修正效果的后评估机制,在每次调整之后再冷滑试验或者局部复测,把实测数据同预测结果加以比较,不

断对模型参数实施校准,从而保证修正策略的持续改善。根据数据反馈进行迭代修正的方法可以有效地防止由于盲目调整而造成的资源浪费,大大提高接触网系统初始运行品质。

3.2 受电弓运行轨迹的动态规划与自适应控制策略

除了接触网参数的优化,受电弓的运行轨迹规划也是提高弓网关系动态性能的一种方式。根据冷滑试验的数据可以找出受电弓在某一段的运行最佳轨迹,即理想的横向摆动幅值、垂向跟随速度、角速度的变化规律。根据以上轨迹特征来制定出相应的动态规划策略,使受电弓控制系统在以后的运行过程中主动调节姿态,从而适应接触网的几何变化。

高速铁路受电弓自适应控制策略更加重要。采用实时监测接触线高度变化、横向偏移的方式,用模糊控制或者模型预测控制算法来调节受电弓的升降力和横向阻尼,保证滑板始终处在最佳接触位置上。冷滑数据给这些控制算法的训练提供大量的边界条件和约束参数。根据冷滑数据得到的最大允许横向摆动范围,就可以设置控制器的输出限幅,防止由于过调而造成的脱弓危险。

除此之外对于不同的线路状况(隧道口、桥梁区、大坡道等)所采用的轨迹规划方式是不一样的。冷滑试验数据可以反映特殊区段的弓网相互作用特点,给定制化控制策略提供依据。把全局优化目标分解成局部轨迹控制任务,就可以实现受电弓在复杂工况下平滑过渡、稳定受流。动态规划和自适应控制相结合,不但可以提高受电弓跟随性,而且可以降低机械磨损和能耗,延长系统寿命。

3.3 全生命周期视角下的弓网系统健康管理 with 预测维护

弓网关系动态优化不能只在开通前的冷滑阶段进行,应该渗透到系统的全生命周期里。根据冷滑试验数据建立的初始基准模型,可以作为后面健康管理的起点。通过对运行过程中弓网数据的定时采集,同冷滑基准数据比较,可以对系统退化情况及可能发生的故障做出及时的判断。

健康管理策略的中心就是预测性维修。用深度学习算法来训练历史数据,创建弓网系统健康状态预测模型。该模型可以依据目前的运行数据来预测一段时间后接触网几何参数和受电弓性能的变化趋势,在故障出现之

前发出预警。当检测到接触线磨损速率突然变快的时候,系统就会发出提示更换滑板或者调整张力的指令,防止出现突然断线或者刮弓的情况。

还要创建弓网系统大数据云平台,实现各个线路、各种车型数据互通互认。将大量的冷滑、热滑数据汇聚起来,就可以找到普遍存在的设计缺陷和制造质量的不足,从而促使行业标准和规范的更新完善。从全生命周期的角度来说,冷滑试验数据不再只是个孤立的验收报告,它成了联系设计、制造、运维等各个环节的纽带。依靠不断的数据驱动来改进弓网系统整体的可靠性及经济性,由原来的“事后维修”变为现在的“事前预防”。

4 结论

本文主要对接触网冷滑试验数据进行深度挖掘和弓网关系动态优化策略的研究,发现冷滑数据里包含着很多物理信息和工程价值。经过创建多源数据融合分析架构之后,成功地解析出接触网几何形状、弹性分布以及受电弓动态响应之间复杂的耦合情况,清楚地表现出了静态参数对于动态受流稳定性非线性传导的规律。在此基础上提出以数据反馈为基础的参数迭代修正、受电弓轨迹动态规划、全生命周期健康管理等新的方法,给弓网系统高精度匹配、长效稳定运行提供理论依据和技术途径。从研究结果可以看出,冷滑试验数据分析的深入可以有效地消除开通前存在的隐患,而且也可以促使弓网运维模式由原来的依赖经验向智能化、预测化转变,对提高我国电气化铁路的安全保障能力有着十分重要的学术价值和应用前景。

参考文献

- [1]冯军锋.高速铁路接触网关键施工工艺探讨及参数冷滑微机自动检测装置[D].石家庄铁道大学,2017.
- [2]郜均晗.接触网冷滑常见问题的分析[J].上海铁道科技,2007,(01):26-27.
- [3]陈跃,刘杰.接触网冷滑常见问题的分析[J].铁路技术创新,2004,(04):25-26+29.
- [4]王宁.关于接触网冷滑运行检测结果的总结和分析[J].中国铁路,2000,(11):37-38.
- [5]吴积钦,李岚.便携式接触网参数微机冷滑检测装置[J].电气化铁道,1998,(04):20-21.

作者简介:冀泽宇(1996.11.27),男,汉族,山西汾阳,本科,助理工程师,研究方向:接触网。