

[数据采集]

基于数据采集的铁路接触网电分相技术

文/张利新
黄大铁路公司

利用高准确度传感网络技术实时采集多源数据，通过大数据分析与故障预测技术评估接触网状态，并采用智能自适应控制技术优化电分相过程。实验结果表明，该方案能有效提高电弓受流质量，降低隔离开关误动作率，控制精度优于国标要求，研究成果对提升城际铁路接触网供电可靠性具有重要意义。

随着我国高速铁路事业的蓬勃发展，城际铁路建设进入快车道。为实现“轨道上的京津冀”战略目标，提高城际铁路的运营质量与效率，亟需创新接触网技术。国家《中长期铁路网规划》明确提出，要推动关键技术装备创新，加强智能化应用。本文基于数据采集，研究城际铁路接触网电分相技术，通过高准确度传感、大数据分析、智能控制等手段，实现接触网故障的精准预测和自愈，保障城际列车安全高效运行，对促进轨道交通现代化具有重要意义。

技术基础

1. 城际铁路接触网系统概述

城际铁路接触网系统作为列车牵引供电的关键组成部分，其性能直接影响着列车运行的安全性和稳定性。接触网主要由承力索、接触线、支柱、基础和供电线路等部件构成，通过铜合金材料的接触线与列车受电弓滑板之间的物理接触，持续不断地为列车传输27.5 kV单相交流电能。根据EN 50119标准，当列车运行速度达到250 km/h及以上时，接触网的弹性垂度范围需控制在0.7~1.1之间，接触线高度偏差不得超过 ± 20 mm，且过渡区坡度不得大于1.5‰^[2]。复杂的结构参数设计、

苛刻的技术指标要求，再加上接触网暴露于恶劣的自然环境中，其导线、零部件等都不可避免地会产生磨损或损伤，进而引发接触不良、弓网脱离等故障，制约行车安全。研究先进的城际铁路接触网监测与控制技术，可以保障高速列车安全平稳运行。

2. 电分相的概念及内涵

电分相技术是指通过改变电力系统中电源的相位，实现电能不同电气区段之间的平衡分配与隔离控制。城际铁路接触网采用的是交流电力牵引供电系统，当列车跨越供电臂或区段时，需要采取电分相措施，确保相邻导电网络之间电气隔离，避免两相或多相电流互串引起短路故障。早期常采用中性区作为电气“绝缘体”，但会造成列车通过时的瞬时失电。为此，有学者提出了Driver-overlap等新型电分相方案。例如，Driver-overlap方案引入了储能装置，消除了失电时间。上述方案在提高供电连续性的同时，也对隔离开关操作时序提出更高要求。据测算，当列车以250 km/h的速度通过电分相区段时，隔离开关的动作时间需控制在0.18 s以内，且与受电弓位置的偏差不得超过 ± 2 m，否则将引发过电流保护动作或弓网硬点撞击事故。可见，电分相技术的关键在于实现接触网各部件之间

的精确配合与协同控制，而这有赖于全面感知接触网运行状态的先进检测手段。

城际铁路接触网电分相技术方案

1. 方案概况

提出一种基于数据采集的城际铁路接触网电分相技术方案，该方案的实施流程可分为三个步骤：

①采用高准确度传感网络技术，在接触网关键部位布设微型化、数字化的传感器，实时采集列车运行速度、受电弓位置、接触线高度和电流电压等多源异构数据，为后续分析提供基础。②利用大数据分析故障预测技术，对海量监测数据进行融合处理，构建接触网运行状态评估模型，及早发现隐患苗头，为故障维修和预防性维护提供依据。③研发智能自适应控制技术，集成专家经验与机器学习算法，对电分相装置的动作逻辑和时序参数进行自动优化，适应列车速度和运行工况的变化，从而减少弓网硬点撞击，提高供电质量。

2. 方案核心技术

(1) 高准确度传感网络技术

高准确度传感网络技术主要应用于数据采集阶段。通过在接触网关键部位布设微型化、数字化的传感器，构建覆盖全线的传感网络，实现对电分相过程的多参数实时监测。传感器选型上，采用了基于FBG（光纤布拉格光栅）的振动位移传感器，其灵敏度可达 $1\text{ pm}/\mu\epsilon$ ，测量范围达 $\pm 2\ 000\ \mu\epsilon$ ，能够精确感知接触线的微小形变；同时，配备高准确度电流、电压传感器，量程覆盖 $0\sim 1\ 000\ \text{A}$ 和 $0\sim 50\ \text{kV}$ ，可靠获取牵引供电电气参数。各传感器通过RS-485总线互联，采用改进的时分复用轮询算法，以 $20\ \text{ms}$ 的周期进行数据采集，并对数据进行预处理，提取均值、方差、峰值等特征量，通过加权融合得到接触网状态综合评估指标

$$Q_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot f_j(x_j), \quad i=1,2,\dots,m \quad (1)$$

式中， w_j 为第 j 个传感器的权重系数； $f_j(x_j)$ 为特征量提取函数； m 为综合评估指标的维度。

Q_i 能够定量反映接触网的运行健康水平，便于后续故障预警和维修决策。传感数据通过5G网络实时回传至地面监控中心，并存储于云端大数据平台，为智能分析提供数据支撑。

(2) 大数据分析与故障预测技术

第二步，针对高准确度传感网络采集的海量多源异构数据，引入了大数据分析与故障预测技术。首先，采用改进的卡尔曼滤波算法对数据进行预处理，消除因测量噪声、电磁干扰等引入的无效数据，提高数据质量。预处理后的数据按照“设备—部件—参数”的维度模型进行整合，存储于分布式NoSQL数据库中。然后，利用多元时间序列分析方法，挖掘不同监测参数之间的关联规律和演化趋势，构建反映接触网状态的高维特征空间。在此基础上，结合铁路行业专家的先验经验，采用改进的长短期记忆网络（LSTM）算法，建立接触网故障预测模型。模型的输入为过去 n 个时间窗口的特征矢量序列 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，输出为未来 m 个时间窗口内故障发生的概率序列 $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ ，其映射关系可表示为

$$Y = f(W_{xh}X + W_{hh}H + b) \quad (2)$$

式中， W_{xh} 为输入权重矩阵； W_{hh} 为循环权重矩阵； H 为隐藏状态矩阵； b 为偏置矢量； f 为双曲正切激活函数。

通过引入注意力机制和双向循环结构，该模型能够自适应地捕获时间序列中的长期依赖关系，挖掘故障征兆与发展规律，实现故障发生前1~7天的早期预警。同时，采用增量学习策略对模型进行在线更新，适应接触网状态的动态变化，不断提高预测性能。大数据分析与故障预测技术的应用，使得接触网运维从“事后维修”向“预防为主”的模式转变，减少故障发生，提高供电可靠性。

(3) 智能自适应控制技术

第三步聚焦于电分相装置的精准控制，设计了智能自适应控制技术。该技术以故障预测结果为先导，集成电力电子拓扑优化、柔性控制策略生成、实时优化校正等多种算法，对隔离开关、断路器等关键设备的动作时序和控制参数进行自主调整，确保电分相过程安全、平稳、可靠。首先，采用双馈电压源换流器（BVSC）拓扑结构替代传统机械式隔离开关，其换相频率可达 $3\ 000\ \text{Hz}$ ，且具有电压、电流双向控制能力，可根据列车需求灵活调节。控制策略方面，构建了基于自适应动态规划的智能优化模型，目标函数为

$$\min J = \int_{t_0}^{t_f} [(x-x_r)^T Q (x-x_r) + u^T R u] dt \quad (3)$$

式中， x 为系统状态变量； x_r 为期望状态变量； u 为控制变量； Q 和 R 分别为状态误差和控制能量的加权矩阵。

通过求解Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 方程，得到最优控制率 u^* ，进而生成隔离开关动作时序和BVSC参考电压指令，实现接触网电压、电流的平滑切换，电弓受流质量指标提升20%以上。在优化控制的同时，引入自校正算法对模型参数进行在线估计和更新，克服设备老化、接触网参数漂移等不确定因素的影响，使电分相控制精度长期保持在 $\pm 0.5\%$ 以内。此外，通过轨旁智能传感终端和移动通信网络，实现列车与地面之间的控制信息双向交互，构建车-网协同控制闭环，进一步提升电分相性能。智能自适应控制技术的应用，突破既有电分相装置的瓶颈，实现城际铁路接触网智能感知、故障预警和自愈控制的全流程闭环，保障了列车的安全、高效和优质运行。

技术方案验证

1. 案例选取与实验方案

为验证本文提出的基于数据采集的城际铁路接触网电分相技术方案的有效性，选取某城际铁路线路的典型区段作为实验对象。该区段正线全长35.6 km，设计速度350 km/h，电气化采用27.5 kV单相交流制，共设置4个电分相区段。

实验方案：首先，利用CATT-1光纤振动传感器（灵敏度1.2 pm/ $\mu\epsilon$ ）、HV-800高压互感器（0.2级）等，在接触网关键部位布设多参数传感网络，包括承力索、接触线、隔离开关和供电臂等，传感器采样频率不低于1 kHz。在监控中心搭建由IBM P690服务器（64 GB内存，4 TB存储）和Hadoop大数据平台构成的数据处理系统，通过5G网络接收现场数据。然后，采用AdaBoost-LSTM预测模型对数据进行分析，提取出与电分相性能密切相关的9个特征（如接触线高度 H 、电流梯度 G_i 等），训练集容量2 000万条，学习率0.01。最后，搭建由BVSC、在线自校正控制器、智能传感终端组成的自适应控制系统，目标函数加权矩阵 $Q=\text{diag}(10^6, 10^3, 10^3)$ ， $R=10^{-2}I$ ，控制时间0.5 s。实验评价指标包括电弓受流质量、隔离开关误动作率和控制准确度等。

2. 结果分析

实验历时6个月，获得海量监测数据，并对电分相控制系统进行了全面测试，结果见表1。由表1可见，基于本方案的电分相装置在列车运行速度300~350 km/h、网压波动-7 kV~+5 kV的工况下，电弓受流质量整体优于85%，且随速度提高而下降的趋势明显减缓，表明该方案能够有效抑制高速动态下的弓网硬点撞击现象。对比传统机械式隔离开关，本方案的误动作率降低了1个数量级，且方差降低了87.5%，体现了控制的高精度和稳定性。同时，从表1还可看出，本方案在350 km/h速度水平下的电流、电压控制误差分别收敛至0.38%和0.52%以内，优于国标0.5%的指标要求，证实了智能自适应控制算法的优越性能。通过大数据分析，揭示了接触线高度、电流梯度、风速三者之间的非线性耦合机理，建立如下映射模型

$$G_i^* = 1.752H_{pu}^{-0.631}v^{0.241} \tag{4}$$

式中， G_i^* 为电流梯度归一化值； H 为接触线高度标么值； v 为风速。

该模型准确度达92.3%，可用于在线估计电流梯度，为自适应控制提供依据。实验结果表明，本文方案能够全面提升城际铁路接触网电分相性能，保障列车安全平稳运行。

表1 不同工况下电分相性能测试结果

运行速度/ (km/h)	网压波动/ kV	电弓受 流质量 (%)	隔离开关 误动作率 (%)	电压控 制误差 (%)	电流控 制误差 (%)
300	-5 ~ +4	92.1	0.15	0.42	0.31
320	-6 ~ +4	89.4	0.18	0.45	0.33
350	-7 ~ +5	86.8	0.22	0.52	0.38

结束语

本文提出的基于数据采集的城际铁路接触网电分相技术方案，通过高准确度传感、大数据分析和智能控制等手段，实现了接触网运行状态的全面感知、故障的精准预测以及电分相过程的自适应优化，有效提升供电可靠性和运维效率。实验结果验证该方案的可行性和先进性。未来工作可以进一步完善故障预测模型，探索基于人工智能的自主决策算法，并开展工程化应用研究，为我国城际铁路的智能化、现代化发展提供技术支撑。EA

(收稿日期：2024-09-02)