

城市轨道交通直流牵引供电系统故障状态主动预警研究

王元貴

重庆市铁路(集团)有限公司, 重庆, 401120;

摘要: 城市轨道交通作为现代城市公共交通的重要部分之一,具有高效、便捷、快速、环保等优势,其中直流牵引供电系统是轨道交通核心子系统之一,为列车提供动力支持。然而,长期在高负荷的运行环境中,随着设备老化会出现多种故障问题,影响列车的正常运行等,严重的还会威胁乘客的安全。传统的被动维修方式难以满足现代运营需求,因此需研究直流牵引供电系统故障主动预警,提前预测故障的出现,采取相关措施,降低故障发生率,保障系统的稳定,提高城市轨道交通的高效运行。

关键词: 城市轨道交通; 直流牵引供电系统; 故障状态; 主动预警

DOI: 10.69979/3029-2727.25.09.037

引言

城市轨道交通的正常运行，与供电系统的稳定性有密切联系，其中直流牵引供电系统是轨道交通的核心动力，可以直接影响列车的安全与效率。但随着轨道交通网络的不断拓展，并且运营负荷提高，直流牵引供电系统故障频繁发生，严重影响运营安全。对此，对城市轨道交通直流牵引供电系统故障状态主动预警，可及时发现故障及时处理，保障交通运行安全。

1 直流牵引供电系统运行方式

1.1 单边供电方式

单边供电方式是直流牵引供电系统中常见的运行模式，如图 1 所示，为单边供电方式示意图。单边供电是通过一个牵引变电所，通过接触网，向同侧的一段线路列车供电，列车受电弓或者电流器等，从接触网上获取电能保障列车运行。单边供电方式其系统结构简单，故障影响的范围比较小，在故障排查期间可减少排查范围，缩短故障修复时间等。但是该方式供电能力有限，并且对牵引变电会产生一定的依赖性，一旦牵引变电所出现故障，则会导致供电区会失去电力供应，造成列车停运。对此，在实际应用中需要综合考虑线路特点以及运营需求，选取单边供电方式，并采用针对性措施弥补缺点，保障直流牵引供电系统稳定运行。

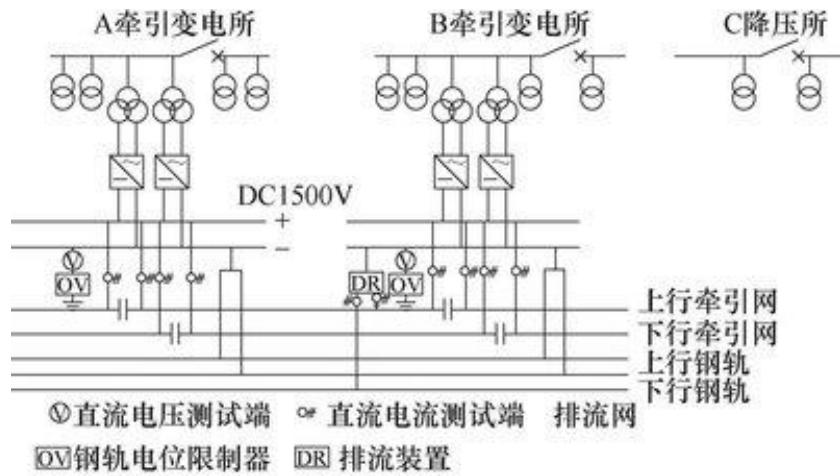


图 1 单边供电方式系统

1.2 双边供电方式

双边供电是轨道交通线路的供电分区，同时由相邻

的两个牵引变电所，通过接触网向该区域提供电能。两个牵引变电将交流电转换为直流电后，通过各自的馈线

与统一供电分区的接触轨相连，令列车在运行期间，可从供电分区的接触网，获得电能。双边供电可提高供电的可靠性，并增强供电能力、优化电压质量等，并且双边供电下，临近供电区间可实现独立供电，彼此之间的影响小。但是该系统复杂程度高，在故障分析以及处理期间的难度大，增加故障的处理时间与成本^[1]。

1.3 双双边供电方式

双双边供电方式是指在中间牵引变电出现故障，或者在实施检修期间，地铁牵引网供电模式会相应调整，由中间牵引变电所相邻的两个变电站，采用隔离开关等设备，进而实现越区供电。双双边供电同样提高供电的可靠性，并且可以优化供电资源分配，同时可适应城市轨道交通复杂的运营场景，可以提高轨道交通系统的运营效率等。但是该供电模式系统建设成本相对较高，运维管理难度较大等，进而提高供电系统建设成本，并提高运维管理工作量等。

1.4 Tee型供电方式

Tee型供电方式在轨道交通运行并不常用，只在直流馈线出现故障的时候，才会使用。该供电方式是通过牵引变电将交流电转化为直流电后，通过往馈线传输电能，然后在往馈线位置，通过开关设备与分支馈线连接，同时连接不同的接触网区域，为该区域的列车供电。Tee型供电方式灵活性高，建设成本低，因为各分支馈线独立存在，因此在一分支馈线出现故障期间，可对其实施独立维护与检修，对其他供电区域不会产生影响，进而降低对系统整体运行的干扰。但是该供电可靠性有限，极容易出现电压过低等问题，影响列车的速度与安全^[2]。

2 供电系统故障信号采集与预处理

2.1 供电系统故障信号采集

为实现供电系统故障信号采集，需要选择适宜采集点，首先在牵引变电所中整流机组、直接开关柜选取采集点，整流机组是将交流电转化为直流电的核心设备，可在晶闸管、变压器等位置设置采集点，可采集电流、电压、温度等数据，了解系统工作状态，同时可检测绕组是否存在短路、铁芯故障等问题。直接开关柜中触头作为采集重点，主要采集电阻、温度信号，判断操作机构的情况，避免开关出现误动故障。其次，接触网中可在接触线本体、与受电弓接触区域选取采集点，如在接触线本体中可沿着接触线长度方向，每隔一段距离则可

以设置一个采集点，可检验接触线与受电弓磨损程度，以及判断接触线是否存在短路、接触不良等故障。最后，回流网中可在回流电缆、接地装置区域选取采集点，回流电缆中可在电缆接头处设置采集点，采集温度、电阻信号，检验是否因接触不良导致电阻增加，温度升高等，最终导致电缆故障等问题^[3]。

在各个采集点附近要设置分布式采集单元，收集附近多个传感器的数据，通过模数转换功能，可将传感器输出模拟信号转换为数字信号并储存。然后将不同分布式采集单元的数据，通过数据汇聚层对数据进行检验，筛选有价值的数据，并进行整理分析。最后将数据投入到数据处理中心，对数据进一步处理与储存，然后将数据运用在故障分析、预警模型训练等操作中，为直流牵引供电系统故障状态的主动预警提供数据支持。

2.2 供电系统故障预处理

城市轨道交通直流牵引供电系统中，从各采集点收集故障信号，会受到噪声、异常值等影响，同时数据的格式、量纲、分布等均存在差异，对此需要对收集到的故障信号进行预处理，提高数据的质量。首先，数据清洗。在数据采集期间，因传感器、电磁干扰等原因，会出现异常值，影响数据分析的准确性。可采用 3σ 准则识别出现偏离其他数据的异常值，如数据呈正态分布，若数据集数值分布在均值加减 3 倍标准差范围外，则可标记为异常值。对异常值会结合实际情况处理，如异常值是因为传感器瞬间故障引起，则可以选取临近数据点均值等代替异常值。缺失值在数据采集期间最为常见，是由传感器故障、通信中断等因素引起，缺失值出现会影响数据的完整性等，进而需要进行填补。如在接触网电压数据中，若出现缺失值，可通过计算正常电压值均值填补。其次，数据归一化。在直流牵引供电系统中，不同类型的故障信号具有不同的量纲、取值范围。如电流信号的取值在几百安培、几千安培之间，而温度信号的取值范围可在几十度到几百度之间，通过数据归一化，可将不同数据统一，提高数据可比性等。最后，在原有故障信号中提出有效的特征，可准确反映出直流牵引供电系统的运行状态以及故障特征。小波变换作为特征提取工具，可同时在时域、频域上分析信号如表 1 所示，在直流牵引供电系统中，其中很多故障信号具有非平稳性特点，如接触网的电弧故障信号，小波变化可准确捕捉信号，为故障诊断提供丰富的信息。在提取大量特征

后,需要选择具有价值的特征,其中相关性分析作为常见的特征选择方式,可计算特征与故障标签间的相关性

系数等,检验特征与故障之间的关联程度,可反映故障状态,并提高模型在预测故障时的准确性。

表 1 故障特征

故障类型	时域特征	频域特征
接触网电弧故障	电流骤升	宽频谐波
绝缘劣化	泄漏电源缓增	低频分量增加
钢轨电位异常	电压偏移	直流分量叠加工频干扰

3 主动预警技术与方法

3.1 数据采集与监测技术

3.1.1 传感器技术

在直流牵引供电系统中的设备、各类传感器等,均可实时采集运行参数,如电流传感器、电压传感器、温度传感器、振动传感器等,可在系统中采集电流、电压、温度、振动等数据,并且可以将物理量转化为电信号,为后续数据处理与分析奠定基础。如电流传感器,电流可反映系统运行状态,电流传感器在系统中可实时以及准确测量电流的大小,以及电流变化情况,为检验系统负载、设备运行、故障诊断等方面提供参考。

3.1.2 智能监测终端

智能监测终端可将传感器采集的数据进行实时处理、传输,在采集期间智能监测终端具有高精度模数转换功能,可以令数据及时反映出传感器测量的物理量。同时智能监测终端可对采集的数据进行处理,如通过数字滤波算法,将传感器信号中高频噪声等实现有效去除,提高数据质量,为之后的数据分析提供支持。同时,智能监测终端可实现数据存储、缓存、分析、通信等功能,可对采集的数据进行处理与筛选,提出关键性特征数值,并传输到监测中心。

3.2 故障机理分析

故障机理分析是城市轨道交通直流牵引供电系统主动预警核心环节,通过分析牵引变电所、接触网、回流网等部件发生故障期间物理、电气等变化过程,可了解故障发生原因、规律等,为设置主动预警模型奠定基础。在系统中可建立故障模型,深入分析直流牵引供电系统各个部分工作原理,以及分析故障机理等,建立相应故障模型。如整流机组晶闸管故障,可根据晶闸管故障电气特征、热特性等建立故障模型,分析晶闸管在不同故障下的电气参数变化情况。随后可以采用 FMEA 方

法,对直流牵引供电系统中的部件、功能等进行分析,确定可能存在的故障模式,以及故障对系统性能、安全等产生的影响,经过 FMEA 分析可发现系统的薄弱环节,为主动预警提供参考。

3.3 智能算法在预警中的应用

3.3.1 神经网络算法

该算法可通过神经网络的强大非线性映射能力、自学能力等,对采集到的设备数据进行学习与分析,进而可建立故障预警模型。如运用多层前馈神经网络将设备的电流、电压、温度等各项输入值输入其中。然后系统可输出设备的故障状态,通过多个样本数据对神经网络开展训练,能够有效识别设备的故障特点,实现故障提前预警。

3.3.2 支持向量机 (SVM) 算法

SVM 算法在小样本、非线性以及高维数据等方面处理具有独特优势,可将设备的运行数据作为样本,然后通过支持向量计算法,可找到最优分类超平面。将正常运行以及故障状态进行合理分类,在实际运用中将采集到的数据输入该模型中,进而可检验设备是否存在故障,或者是否接近故障状态,从而有效实现故障预警。

3.3.3 数据分析与挖掘技术

采用数据分析与挖掘技术,可以对系统运行的数据进行收集,实时监测并做好相关处理,提取数据中的规律以及特征。如采用关联规则挖掘并分析设备运行参数,了解彼此之间的关系,同时可找到与故障发生相关的数据,随后通过分析设备运行状态,若发现异常状态则及时建立预警。

4 主动预警模型与系统构架

4.1 主动预警模型

建立主动预警模型期间,可设置基于数据驱动,以及融合故障机理的两种预警模型。基于数据驱动的预警

模型,是将采集到的设备运行数据作为基础,然后采用智能算法建立数据驱动预警模型,在该模型中会对之前所产生的历史数据进行学习,并深入挖掘设备的运行状态,以及该状态与故障之间的联系,进而可有效建立故障特征与故障发生概率关系。在实时监测数据与模型故障特征相符时,则可运算故障发生的情况,并及时发出预警信号。融合故障机理预警模式方面,可结合故障机理的结果,将故障物理模型以及数据驱动模型进行融合,建立出故障机理预警模型,该模型不仅对设备运行数据的变化进行监测,还针对故障产生的物理原因进行深入分析,准确预测故障的发生情况。如在分析整流机组故障期间,将晶闸管电器与热故障机理模型,与数据驱动神经网模型进行融合,进而提高故障预警的准确性。

4.2 系统架构

主动预警系统架构的构成可分为数据采集层、数据处理层、预警角色层、用户管理层等。数据管理层是由直流牵引供电系统,各关键设备传感器以及智能监测终端组成,主要实时采集设备的运行参数,并且将数据传输到数据管理层;数据管理层对采集到的数据进行预处理,如数据清洗、特征提取等操作,去除数据中的噪声以及异常值,然后提取出可反映设备运行状态等参数,然后采用智能算法对处理后的数据进行分析以及建模,可有效实现对故障的诊断以及预警;预警决策层中根据数据处理层所输出的故障诊断以及预警结果,结合预先设定的预警规则以及阈值等作出预警决策。在判断设备是否处于故障预警状态时,可采用短信、声光报警等向维护人员发出信息,提醒相关人员及时进行处理;用户

管理层可为运营管理人员提供交互界面,然后管理人员可通过机械观察设备的运行状况以及预警信息、历史数据等。此外用户管理层还具备用户权限管理功能,不同权限的用户可访问不同的功能模块,进而可保证系统的安全性。

5 结束语

综上所述,城市轨道交通作为城市的重要交通工具之一,可为人们的出行提供便利,其中直流牵引供电系统的稳定运行,可保障列车的正常运行。但在运行期间系统故障会阻碍列车的运营,以及威胁人们的安全,因此要重视故障预警系统的建立,可在故障发生前发出警告,让运维人员及时处理。通过数据采集与检测、故障机理分析、智能算法等,建立电供电系统故障预警,保障列车与人员的安全。

参考文献

- [1] 李建. 基于 IGBT 技术的城市轨道交通直流牵引供电系统优化[J]. 电气时代, 2025, (02): 99-101.
- [2] 孟军锋, 胡根水, 郭志奇, 何行健. 城市轨道交通牵引供电系统直流快速断路器开断及灭弧分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(07): 338-343.
- [3] 钟元. 城市轨道交通中的直流牵引供电系统接触网残压分析[J]. 集成电路应用, 2022, 39(02): 264-265.
- [4] 韦庭三. 分析城市轨道交通直流牵引供电系统接触网残压[J]. 通讯世界, 2020, 27(04): 149-150.
- [5] 赵春波. 城市轨道交通 DC1500V 牵引供电系统短路故障研究[J]. 中国高新科技, 2019, (11): 108-110.