轨道列车电缆故障定位方法研究

梁文彪 向银强

中车南京浦镇车辆有限公司, 江苏 南京 211800

摘要: 轨道列车电缆作为确保列车安全运行的关键组成部分, 其故障定位技术在现代轨道交通中具有重要的研究意义。本文主要探讨了轨道列车电缆故障定位的现状与技术挑战。针对现有的时域反射法(TDR)和行波法的应用局限性, 本文提出了分布式光纤传感技术与人工智能(AI)波形识别技术的优化方案。通过结合这些先进技术, 能够提高故障定位的准确性、实时性以及抗干扰能力。最后, 文章展望了轨道列车电缆故障定位技术的未来发展趋势, 提出智能化、多传感器融合的技术路径, 为轨道交通安全提供坚实保障。

关键词: 轨道列车; 电缆故障; 故障定位; 时域反射法; 人工智能技术

Research on Cable Fault Location Method of Rail Train

Liang, Wenbiao Xiang, Yinqiang

CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu, 211800, China

Abstract: As a key component to ensure the safe operation of train, the fault location technology of rail train cable has important research significance in modern rail transit. This paper mainly discusses the present situation and technical challenges of cable fault location for rail trains. Aiming at the limitations of the existing time domain reflection (TDR) and traveling wave methods, this paper proposes an optimization scheme of distributed optical fiber sensing technology and artificial intelligence (AI) waveform recognition technology. By combining these advanced technologies, the accuracy, real-time performance and anti-interference ability of fault location can be improved. Finally, the paper looks forward to the future development trend of cable fault location technology for rail trains, and puts forward an intelligent and multi-sensor fusion technology path to provide a solid guarantee for rail transit safety.

Keywords: Rail train; Cable failure; Fault location; Time domain reflection method; Artificial Intelligence technology

DOI: 10.62639/sspis39.20250203

引言

轨道列车的安全运行依赖于复杂的电力和信号传输系统, 而电缆作为列车核心部件之一, 承载着重要的电力供应与数据传输任务。电缆故障不仅会直接影响列车运行的稳定性, 还可能引发更严重的安全事故。因此, 如何实现电缆故障的快速、精准定位, 成为轨道列车安全保障中亟待解决的关键问题。

现有的故障定位技术, 如时域反射法(TDR)和行波法, 虽然在电缆故障检测领域取得了一定的应用进展, 但在轨道列车这种特殊的工作环境下, 仍面临着高噪声、振动和电磁干扰等问题, 这些因素大大降低了传统技术的准确性与可靠性。因此, 本文将回顾现有故障定位技术的不足, 提出新型技术的应用方向, 并展望轨道列车电缆故障定位技术的发展趋势, 旨在为提升轨道列车的安全性及稳定性提供理论支持。

一、轨道列车电缆故障定位技术概述

(一) 时域反射法(TDR)

时域反射法(TDR)是一种基于信号反射时间差来测定电缆故障位置的技术。该技术通过发

送脉冲信号到电缆中并接收反射信号, 根据反射波的传播时间差来计算故障的位置。TDR技术的优势在于其操作简便, 适用于多种电缆类型, 尤其是在电力系统中得到广泛应用。TDR能够提供较为准确的故障定位结果, 因此在电力电缆的故障检测中具有重要的意义。

然而, 在轨道列车电缆的应用中, TDR的定位精度受限于其工作环境。轨道列车电缆通常位于强电磁干扰和剧烈振动的环境中, 这对TDR信号的传播产生了较大的影响。在高速运行的轨道列车中, 电缆受到温度波动和振动的双重影响, 这可能导致反射信号的干扰, 使得TDR技术在此类环境下难以提供精确的故障定位。因此, 尽管TDR在常规电缆故障检测中表现出色, 轨道列车环境的复杂性使得其应用面临一定挑战。

(二) 行波法

行波法是通过分析电缆故障点产生的行波信号来进行故障定位的技术。该方法利用电缆中信号传播的特性, 通过多端测距和波形分析实现对电缆故障的精确定位。行波法相比于时域反射法, 具有更好的适应性, 尤其适用于长距离电缆故障的定位。在大范围电力系统故障检测中, 行波法

(稿件编号: IS-25-3-1031)

作者简介: 梁文彪(1996-), 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯: 山西省晋中市, 学历: 本科, 职称: 助理工程师, 研究方向: 电气诊断。向银强(1989-), 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯: 江苏省泰州市, 学历: 本科, 职称: 高级工程师, 研究方向: 电气诊断。

基金项目: 中车科技项目: “轨道交通电缆故障点快速定位装置开发”(PMADP)。

能够提供更高的效率,尤其在复杂电缆结构或长距离电缆中,行波法能够精准测量故障位置。

然而,行波法同样存在一定的局限性。在多分支结构的电缆系统中,信号反射和行波的干扰问题严重影响了行波法的精确度。特别是在轨道列车的电缆中,电缆的长距离、多分支结构和复杂的信号传播路径,使得行波法难以在高电磁干扰和信号反射强烈的环境下保持高精度。信号的反射和多路径传播可能导致错误的定位结果,这也为行波法的普及和应用带来了挑战。

(三) 现有技术的局限性

尽管时域反射法(TDR)和行波法是当前应用最为广泛的电缆故障定位技术,但在轨道列车电缆系统的实际应用中,这些技术面临着显著的局限性。轨道列车电缆往往需要在复杂的环境中工作,电缆的长距离、多分支结构以及电磁干扰等因素对传统定位方法的精度与可靠性构成了巨大挑战。特别是在轨道列车高速运行时,复杂的振动、温度变化和强电磁场会影响信号的传播特性,导致定位误差或信号丢失。

这些挑战使得现有的故障定位技术难以满足轨道列车电缆故障定位的高精度和高实时性要求。因此,为了克服这些问题,如基于分布式光纤传感技术和人工智能(AI)的故障定位系统。这些新兴技术通过提高信号处理的精度和抗干扰能力,能够有效提升轨道列车电缆故障定位系统的可靠性和准确性,从而满足复杂运行环境下的需求。

二、轨道列车电缆故障定位技术的应用现状与挑战

(一) 环境影响与噪声干扰

轨道列车电缆通常位于电磁干扰强烈、振动剧烈的环境中,这种恶劣的工作条件给传统的故障定位技术带来了严峻的挑战。电磁干扰是轨道列车电缆系统的常见问题,尤其在高速运行时,电缆系统暴露在强大的电磁波和机械振动中,极大地影响了信号的稳定性和传输质量。振动和电磁波不仅增加了信号噪声,还使得信号的传播特性发生变化,从而降低了故障定位的准确性。

在这种环境下,传统的时域反射法(TDR)和行波法往往难以保证定位的高精度。尽管TDR技术通过测量信号的反射时间来定位故障,但在存在强电磁干扰的情况下,反射信号容易受到干扰,导致定位精度下降。行波法也同样面临类似问题,尤其是在复杂环境中,信号的传播路径和反射效应会进一步影响定位结果。因此,提升故障定位技术的抗干扰能力和信号处理精度,已成为解决这一问题的关键。

(二) 电缆结构与复杂路径

轨道列车的电缆系统结构通常较为复杂,包含多个分支以及长距离的电缆。这种复杂的结构使得传统的故障定位方法在实施时面临困难。在长电缆中,信号的传播时间较长,信号的反射与散射效应会导致定位误差的产生。尤其是电

径中存在多个转接点或分支时,信号的多路径效应和反射波会引起定位系统的混淆,影响故障点的准确识别。

例如,在轨道列车的电缆网络中,信号传播的路径可能会受到多个分支、连接点及电缆长度变化的影响。传统的定位方法通常假设信号沿着直线传播,但在复杂的电缆布局中,信号的反射和折射会使得定位系统无法有效区分故障点。因此,对于复杂电缆系统的故障定位,现有技术往往难以保证高效和精确的定位结果。研究者们正在寻求新的方法,以更好地处理这些复杂结构下的电缆故障定位问题。

(三) 故障类型的多样性

轨道列车电缆的故障类型繁多,涵盖了高阻故障、低阻故障以及电缆损伤等多种形式。每种故障类型的电气特性不同,会导致信号的反射特性发生变化,从而影响故障定位算法的准确性。高阻故障与低阻故障在信号反射的幅度、时域特性上存在显著差异,传统的故障定位方法往往难以同时适应这两种故障类型,导致定位精度的下降。

在电缆损伤的情况下,损伤类型的差异也会导致信号变化,例如由于电缆外皮损伤引起的信号衰减或由于内部接触不良导致的信号反射。如何针对不同的故障类型调整定位算法,并在复杂环境中快速区分不同故障类型,是目前电缆故障定位技术面临的核心挑战之一。针对这一问题,研究者正在探索新的算法和多种信号处理技术的结合,以实现更精准的故障定位。

三、轨道列车电缆故障定位技术的优化策略

(一) 时域反射法与行波法的融合

传统的时域反射法(TDR)和行波法各自有其应用优势,但在复杂的轨道列车电缆环境中,它们各自的局限性显得尤为明显。因此,近年来,研究者们提出了一种将TDR与行波法结合的优化策略,通过融合两者的优点来提升故障定位的精度和可靠性。TDR能够提供快速的初步定位,而行波法在长电缆和复杂电缆结构中的精确度则得到显著增强。

为了进一步优化这两种方法的性能,可以辅以小波变换和经验模态分解(EMD)技术。小波变换通过对信号进行时频分析,能够有效去除信号中的噪声,提高信号质量,尤其在存在强电磁干扰的环境中,具有显著的优势。EMD技术则通过将信号分解成本征模态分量,帮助提取电缆中故障波的特征信号,从而优化故障定位的结果。综合运用这些技术,能够显著提高电缆故障定位的精度,尤其在轨道列车复杂的工作环境中,提供更高效、稳定的故障定位方案。

(二) 分布式光纤传感技术

分布式光纤传感技术是近年来电缆监测领域的重要发展方向,尤其在轨道列车电缆故障定位中展现了巨大的潜力。这项技术利用光纤作为传感介质,通过分布式光纤传感器实时监测电缆的

温度、振动、压力等物理量, 能够实现对电缆状态的全面监控。当电缆发生故障时, 传感器能够快速探测到温度异常、振动变化等信号, 从而准确定位故障发生的具体位置。

在轨道列车的长距离电缆中, 分布式光纤传感技术尤其具有优势。相比传统的点式传感技术, 光纤传感器能够覆盖更广泛的监测区域, 且具有较高的空间分辨率和实时响应能力。在轨道列车中, 尤其是在隧道、桥梁等复杂环境下, 分布式光纤传感技术能够提供精准的实时监测数据, 极大地提高故障检测的实时性和准确性。这为轨道列车电缆故障定位提供了强有力的技术支持。

(三) 人工智能技术应用

随着人工智能(AI)技术的迅猛发展, AI算法在轨道列车电缆故障定位中的应用逐渐成为研究的热点。通过深度学习算法, AI技术能够对故障波形进行自动分析, 提取故障特征, 并根据大数据分析自动识别故障类型。与传统的基于信号分析的定位方法相比, 基于AI的波形自动识别方法具有更强的自适应能力和学习能力, 能够应对复杂的信号变化和多样的故障类型。

在轨道列车电缆的故障定位中, AI技术的引入使得定位系统能够自动化地处理各种类型的故障信号, 准确判断故障类型并快速给出故障位置。这种技术不仅提高了故障定位的精度和效率, 还大大减少了人为干预的需求, 从而提升了系统的稳定性与可靠性。AI算法的不断优化, 使得电缆故障定位逐步向智能化、自动化发展, 未来有望实现全自动化的故障诊断与修复。

四、轨道列车电缆故障定位技术的发展趋势

(一) 智能化与自动化

随着信息技术的飞速发展, 尤其是大数据和云计算的广泛应用, 轨道列车电缆故障定位系统正在朝着智能化与自动化的方向快速演进。实时数据采集与云端处理技术的结合, 使得故障诊断不仅更加高效, 还能够在故障发生的第一时间进行快速响应。通过云计算平台, 系统能够集中处理来自各个传感器的数据, 并实时分析, 从而大大缩短故障诊断与处理的时间。

自动化的引入不仅减少了人工干预的需求, 还提高了故障定位的效率和准确性。智能化系统能够根据历史数据和实时数据进行分析, 预测潜在故障, 实施预警, 避免突发性故障的发生, 从而降低了人力成本并提升了整体安全性。随着技术的进一步发展, 未来的电缆故障定位系统将具备自适应能力, 能够根据不同工作环境和电缆状态, 自动调整工作模式, 进一步提高故障定位的准确性。

(二) 多技术融合

未来轨道列车电缆故障定位系统将不再依赖单一技术, 而是向多技术融合的方向发展。多传感器融合技术将在未来的电缆故障定位系统中发挥重要作用。通过将振动传感器、温度传感器、压力传感器等多种传感技术相结合, 系统能够全面监测电缆的工作状态, 从多个维度获取数据,

提供更为全面和精准的故障信息。

多传感器融合能够有效提高系统对电缆故障的识别能力。每种传感器在不同的工作条件下具有不同的响应特性, 通过综合分析来自不同传感器的数据, 系统能够更加准确地判断电缆故障的性质和位置。这种技术的引入不仅提升了故障诊断的准确性和可靠性, 还使得系统能够更好地应对复杂的电磁干扰、高噪声环境等挑战, 提高了轨道列车电缆故障定位技术的整体性能。

(三) 基于AI的自学习系统

基于人工智能(AI)的技术在电缆故障定位中的应用将成为未来的重要趋势。随着机器学习和深度学习技术的成熟, 未来的电缆故障定位系统将具备强大的自学习能力。通过不断学习和优化, AI系统能够在不断变化的环境中实现更精准的故障诊断和定位。AI算法能够处理大量的电缆故障数据, 并通过模式识别、分类与回归分析, 自动识别不同类型的故障, 准确判断故障位置。

AI技术的引入, 不仅提高了故障识别的自动化水平, 还减少了误诊和漏诊的概率。与传统的信号处理方法相比, AI系统能够实时处理更复杂的信号, 并在多变的环境中自我优化, 确保电缆故障的高效定位。未来, 基于AI的电缆故障定位系统将具有更强的适应性, 能够应对更为复杂的工作环境, 提升轨道列车的整体运行安全性。

五、结束语

轨道列车电缆故障定位技术在保障列车安全运行中起着至关重要的作用。尽管传统的时域反射法(TDR)和行波法在一定条件下有效, 但面对复杂的轨道列车运行环境, 这些方法的局限性使得其无法满足高精度定位的需求。随着分布式光纤传感和人工智能(AI)技术的发展, 轨道列车电缆故障定位的精度和实时性将得到显著提升。未来, 随着智能化、自动化和多技术融合的推进, 轨道列车电缆故障定位技术必将为轨道交通安全提供更加坚实的保障。

参考文献:

- [1] 颜秋容, 徐勋建. 铁路信号电缆网络故障在线检测系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2007.
- [2] 米建伟. 电力电缆故障诊断中信号检测与增强技术研究[D]. 西安电子科技大学, 2018.
- [3] 张岚, 王献军, 赵卫华. 电力电缆故障定位在线检测研究[J]. 电气技术, 2018.
- [4] 高建平. 电力电缆故障定位技术分析 with 系统设计[D]. 华北电力大学(河北), 2010.
- [5] 张建勋. 电力电缆故障检测及故障点定位技术探讨[J]. 电子技术与软件工程, 2015.
- [6] 魏书宁, 龚仁喜, 刘珺. 电力电缆故障检测的方法与分析[J]. 计算技术与自动化, 2005.
- [7] 张仲文. 电力电缆故障检测及故障点定位方法探究[J]. 中国高新技术企业, 2016.
- [8] 李建辉. 电力电缆故障检测方法与应用[J]. 河北电力技术, 2009.
- [9] 刘瑜. 10kV 配网电力电缆故障检测与定位技术[J]. 电子制作, 2017.
- [10] 石磊, 杨智伟. 电力电缆故障检测及故障点定位方法分析[J]. 内蒙古电力技术, 2014.