

编者按 近年来,城市轨道交通发展迅速,作为城轨列车的主要动力来源,直流牵引供电系统的安全供电技术至关重要。一方面,列车频繁启停过程产生大量的再生制动能量,处理不当会造成接触网压剧烈波动,以及交流电网的电能质量问题;另一方面,直流牵引供电回流路径潜在的钢轨电位和杂散电流问题,会对轨道交通的安全运营及其周边金属管线设施产生严重的危害。在此背景下,特邀本刊编委、北京交通大学杨晓峰副教授担任本期热点研讨栏目主编,携手中国矿业大学张栋梁副教授、西南交通大学林圣教授、苏州大学杜贵府副教授、北京城建设计发展集团陈德胜教授级高工、中铁二院张开波高工、北京地铁公司宋杰高工、天津地铁集团龙赤字高工等,共同组织“城市轨道交通杂散电流及安全供电技术”专题,并得到了相关专家学者的积极响应与大力支持。本专题内容覆盖列车再生制动能量高效利用、接触网残压治理、网侧谐波和变压器偏磁分析、杂散电流和轨道电位的分布规律、动态模拟、治理技术等多方面,分2期陆续刊登,以期为同类工程提供借鉴。

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2022.02.001

城市轨道交通牵引供电系统 接触网和回流安全综述

杨晓峰, 郑琼林

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 作为城市轨道交通的主要动力来源,直流牵引供电安全至关重要。本文围绕接触网压波动、钢轨电位和杂散电流治理等安全供电技术开展系统综述。首先分析导致接触网压波动的主要原因,总结各类再生制动能量利用技术的研究现状。然后讨论钢轨电位和杂散电流的产生机理,分别系统回顾钢轨电位抑制技术和杂散电流治理技术的国内外研究进展。在此基础上,指出城市轨道交通安全供电技术亟待开展深入研究的关键问题,为安全供电技术的研究和工程化应用提供借鉴和参考。

关键词: 城市轨道交通; 直流牵引供电; 再生制动能量; 钢轨电位; 杂散电流

中图分类号: TM 922.3, U231.8

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2022)02-0001-09

A Review of Studies on Traction Power Supply Catenary and Reflux Safety in Urban Rail Transit

YANG Xiaofeng, ZHENG Trillion Q

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: Safe power supply is essential to guarantee the operation of urban rail transit. In this paper, a comprehensive review

收稿日期: 2022-02-08 修回日期: 2022-03-25

第一作者: 杨晓峰, 男, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术轨道交通中的应用、柔性直流输电技术等, xfyang@bjtu.edu.cn

基金项目: 北京市自然科学基金(3222054); 国家自然科学基金重点项目(51737001)

引用格式: 杨晓峰, 郑琼林. 城市轨道交通牵引供电系统接触网和回流安全综述[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(2): 1-9.

YANG Xiaofeng, ZHENG Trillion Q. A review of studies on traction power supply catenary and reflux safety in urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(2): 1-9.

is presented on safe power supply technologies including catenary voltage fluctuation, rail potential, and stray current mitigation. Considering that the source of catenary voltage fluctuation is train regenerative braking energy, this study first summarizes the research status of various regenerative braking energy utilization technologies. Then, it analyzes the generation mechanism of rail potential and stray current. Furthermore, it reviews and discusses the research status of rail potential and stray current mitigation technologies. On this basis, the key issues of safe power supply technology for urban rail transit are also pointed out, which will provide a practical basis for industry application of future safe power supply technology.

Keywords: urban rail transit; DC traction power system; regenerative braking energy; rail potential; stray current

近年来,随着城市化进程加快,城市轨道交通(简称“城轨交通”)以其运量大、安全环保等特点得到快速发展。截至2021年底,中国内地共有50个城市开通城轨交通线路,运营线路总里程达到9 192 km^[1]。运营的城市轨道交通制式通常包括地铁、有轨电车、轻轨、市域快轨等^[2]。作为城轨交通的主要动力来源,直流牵引供电系统的安全供电技术至关重要。一方面,列车频繁启停过程将产生大量的制动能量,处理不当将会造成直流接触网压剧烈波动以及交流电网的电能质量问题^[3];另一方面,城轨交通系统普遍采用直流牵引供电方式,其回路路径潜在的钢轨电位和杂散电流将不可避免对轨道交通系统的安全运营及其周边金属管线设施产生严重的危害^[4-5]。直流接触网压波动、钢轨电位和杂散电流问题已成为城市轨道交通安全供电面临的3大挑战。

鉴于此,笔者围绕城市轨道交通直流牵引供电系统面临的上述安全供电挑战开展综述,在分析其产生机理的基础上,系统梳理了再生制动能量利用、钢轨电位和杂散电流问题及相关治理技术的最新研究成果,并对其中一些尚待解决的问题进行展望,为业内同仁开展相关研究工作提供借鉴和参考。

1 直流接触网压波动

1.1 直流接触网压波动产生机理

图1为典型直流牵引供电系统示意图,包括牵引所(traction power station, TPS)、接触网(或第三轨)、走行轨(或钢轨)、列车等。当列车牵引出站时,沿线的牵引所将中压交流电网降压整流后为直流接触网供电。列车制动时将产生大量的再生制动能量并注入直流接触网。一方面,城轨交通具有列车运行密度大、站间距小、启停频繁的特点^[6],列车的再生制动能量相当可观;另一方面,牵引所普遍采用的二极管单向整流方式,其能量仅可由中压交流电网侧流向直流接触网侧,除一部分再生制动能量被相邻列车吸收利用外,其余能量无法反馈到中压交流电网,导致接触网电压急剧上升。然而,城轨交通接触网允许的电压波

动范围有限,1 500 V和750 V直流牵引供电系统中接触网电压波动安全范围分别为1 000~1 800 V和500~900 V^[7]。近年来,宁波市轨道交通2号线、北京地铁等先后出现了接触网压过高导致的列车停车事故^[8-9]。

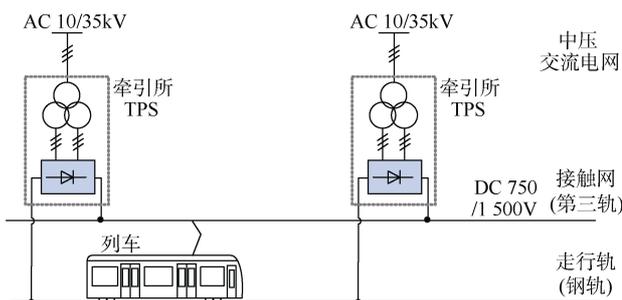


图1 直流牵引供电系统示意

Figure 1 Illustration of DC traction power supply system

为避免接触网过压,制动列车通常采用车载式或地面式制动电阻以热能的形式消耗^[10]。其中车载式电阻制动广泛应用于国内外城轨交通线路,仅少数新建线路采用地面式制动电阻,如郑州地铁1号线、广州地铁4号线等^[11]。需要注意的是,制动电阻的能耗方式直接将再生制动能量转换为热能,造成巨大电能浪费和隧道温度升高。据中国城市轨道交通协会统计,我国2020年度的直流牵引能耗约占城轨交通总能耗的49%,可见,充分利用列车再生制动能量,不仅是改善直流接触网压波动的重要途径,同时对促进城市轨道交通行业的可持续发展、实现“双碳”目标具有重要意义^[3]。

1.2 再生制动能量利用技术

近年来,列车再生制动能量利用技术受到国内外学者的广泛关注,并在城轨交通线路中逐步推广应用,典型列车再生制动能量利用措施包括列车运行优化、能量回馈式和储能式方案^[12-14]。接下来将分别对上述方案进行总结。

1.2.1 列车运行优化方案

在城轨交通系统中通常多辆列车同时运行,以此

为基础,列车运行优化方案通过优化列车发车间隔、上下行列车同步时间、站间运行时间和停站时间等参数,以增大相邻列车在制动工况和牵引工况的重叠时间,即可确保更多的列车再生制动能量被邻近的牵引列车吸收利用,其原理如图2所示。

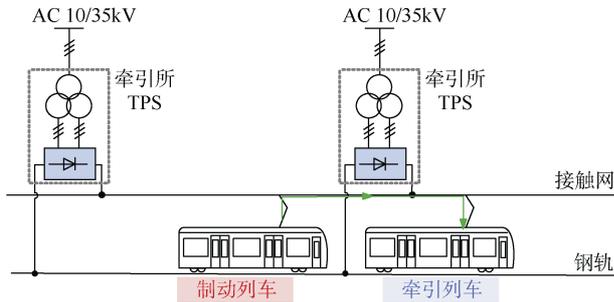


图2 列车运行优化方案示意

Figure 2 Illustration of train operation optimization scheme

目前列车运行优化方案已在西班牙布鲁塞尔等城轨交通中进行了推广,取得了不错的成效。列车运行优化方案无需增加硬件设备和投资成本,但实际效果受实际列车运行准点率、车间追踪间隔等影响显著,当实际列车运行与预期规划存在短时偏差,就极可能导致再生制动能量利用率大幅降低^[14]。

随着自动驾驶技术的推广,在线路、车辆参数已知的条件下对列车运行图、运行曲线进行离线优化,使列车按照优化模式运行,可增大列车间能量交互,减少再生制动能量吸收装置的配置功率和容量需求。基于列车运行优化实现列车再生制动能量高效利用的技术,在未来高度智能化的城轨交通中展现出了良好的应用潜力。

1.2.2 能量回馈式方案

能量回馈式方案通过在牵引所配置逆变能馈装置直接将列车制动时产生的多余能量回馈到交流电网,能维持直流牵引网压的稳定,保证车辆运行的安全可靠。典型能量回馈式方案如图3所示,能馈装置可与牵引所的二极管整流器并联,也可直接替代二极管整流机组构成双向变电站。当接触网压超过阈值时,能馈装置将列车制动能量逆变成工频交流电回馈至交流电网。由于交流电网承载能力较大,能馈方式可实现良好的直流畅触网压波动抑制和节能效果。目前已在北京地铁10号线和14号线、长沙地铁2号线等城轨线路中得到应用^[15]。

然而,大规模列车再生制动能量回馈会对交流电网造成一定冲击,回馈装置向交流电网注入大量谐波

对交流电网电能质量的影响不可忽视。当然,能馈装置除了抑制接触网压波动,也可同时工作在逆变能馈、牵引供电、无功补偿等多种模式,进而缓解牵引所的供电压力,并改善供电系统的电能质量。但随着工作模式增多,能馈装置的硬件和控制成本提高,并使得系统继电保护设计更为复杂^[16]。

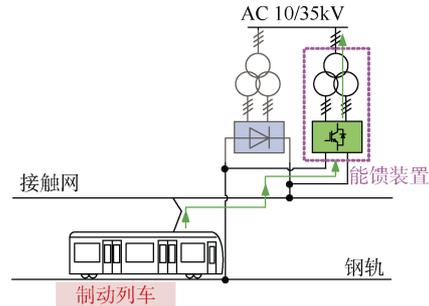


图3 能量回馈式方案示意

Figure 3 Illustration of energy feedback scheme

1.2.3 储能式方案

储能式方案是指在列车制动时,将再生制动能量暂时存储在储能装置中,并在后续列车牵引工况时释放回接触网。典型储能式方案如图4所示,储能装置一般由储能元件和变流器构成。储能元件是决定上述储能装置在城轨交通应用效果的关键,通常需要综合考虑能量密度、功率密度、充放电率、持续时间、成本等因素,目前应用于城轨交通的储能元件主要包括超级电容、电池、飞轮等。若储能元件为超级电容或电池,则变流器为双向直流变流器;若采用飞轮储能元件,则变流器为逆变器^[3]。

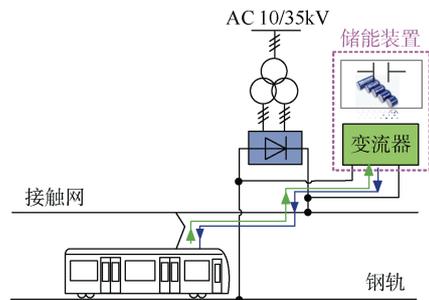


图4 储能式方案

Figure 4 Illustration of energy storage scheme

储能装置可有效回收利用列车再生制动能量,提高用电效率,并发挥稳定接触网电压、紧急牵引供电等功能。随着储能技术的快速发展,储能式方案已成为解决城轨交通再生制动能量利用问题的主流方式之一。

根据储能安装位置不同，储能装置通常分为车载式和地面式，其中车载式储能装置安装于列车顶部或底部，快速回收列车再生制动能量，并为该列车提供牵引能量，此外车载式储能装置可兼作临时电源使列车短暂脱离接触网运行。目前车载式储能装置已在日本、西班牙、德国等城轨交通得到应用^[17]。然而，车载式储能装置的引入往往需要对列车车体进行改造，硬件成本相对较高。受列车重量和空间制约，车载式储能装置容量有限，难以满足列车再生制动能量充分回收的需求。地面式储能装置则安装于地面牵引所或城轨沿线，可同时向线路中所有列车供电，且无需增加列车安装空间和质量，开发成本低。目前地面式储能装置已在我国北京和青岛、美国、日本、德国、法国等数十条城轨线路推广，效果显著^[18]。

此外，近年来混合储能装置也逐渐受到广泛关注和研究^[19]，其中最具代表性的方案即为超级电容和蓄电池混合储能，该混合储能装置兼具高功率密度和高能量密度等优势，目前已在北京地铁八通线挂线运行，并且相对于超级电容储能装置，该混合储能装置的节电效果更为显著^[20]。

1.2.4 再生制动能量利用技术对比

“列车运行优化”“能量回馈式”和“储能式”方案均可实现制动能量再利用，减少或避免制动能量以热能的形式浪费在制动电阻上。除上述储能装置外，城市轨道交通还可设置节能坡等转化制动能量^[21]。但考虑到城市轨道交通运营的复杂性和不确定性，实际系统列车再生制动能量利用仍以能量回馈式或储能式为主、以列车运行优化为辅，并且借助储能装置中存储电量或能馈电量来衡量列车再生制动能量利用率^[22]。然而，现有能量回馈式和储能方案实际推广往往需要综合考虑系统容量、能效、成本等的限制。

2 钢轨电位问题及其研究现状

2.1 钢轨电位产生机理

城轨交通普遍采用走行轨回流的直流牵引供电系统，由于走行轨本身具有一定的纵向电阻，列车电流通过走行轨回流时，将在走行轨上产生钢轨电位(也称“轨道电位”)，如图 5 所示。其中， R_{c1} 、 R_{c2} 是接触网纵向电阻， R_{r1} 、 R_{r2} 是走行轨纵向电阻， V_s 和 R_s 分别是牵引所电压和内阻， I_t 是列车牵引电流， I_{r1} 、 I_{r2} 是走行轨回流电流。接触网纵向电阻和钢轨纵向电阻构成的电阻网随着列车移动而改变，回流电流在相应的走行轨纵向电阻上产生相应的钢轨电位。影响钢轨电

位的因素主要包括回流电流、走行轨纵向电阻等^[23]。

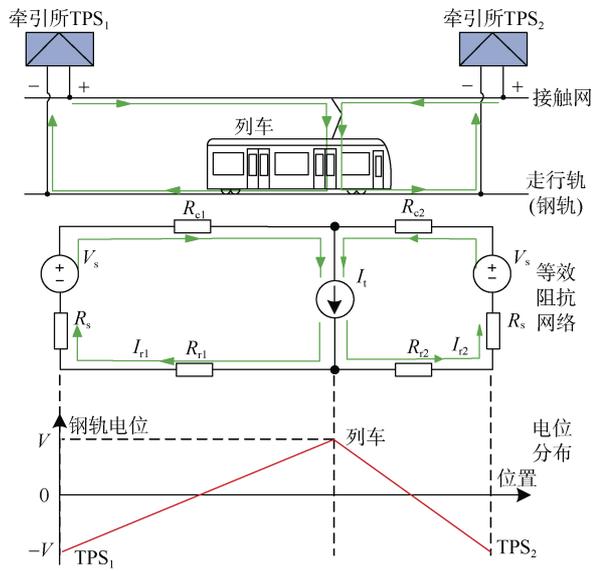


图 5 钢轨电位产生机理

Figure 5 Rail potential generation mechanism

1) 回流电流影响：钢轨电位跟走行轨回流电流水平成正比，回流电流越小，在相同回流路径上产生的钢轨电位越小，反之越大。

2) 走行轨纵向电阻影响：钢轨电位跟走行轨纵向电阻成正比，走行轨纵向电阻越大，则相同走行轨回流电流产生的钢轨电位越大，反之越小。

城轨交通普遍采用浮地方式，导致钢轨和地之间存在电位差。一方面，考虑到车体与钢轨电气连通，为避免跨步电压对上下车乘客造成伤害，在工程设计中常利用电缆将钢轨与站台门连接以保证二者的等电位^[24]；另一方面，钢轨电位也会导致局部打火及转辙机外壳接地电缆烧熔等危险。北京、上海、广州、深圳、南京等城轨线路均先后多次发生道岔电火花故障事故^[25]。

综上分析，过高的钢轨电位会危及司乘人员及轨旁设备安全，并可导致继电保护装置误动作，给城轨安全运营带来风险^[26]。为此，钢轨电位抑制技术近年来受到国内外学者的广泛关注，并在实际城轨交通线路中逐步推广。典型钢轨电位抑制措施包括减小回流电流、减小钢轨纵向电阻、钢轨电位限制装置等^[27]。接下来将分别对上述方案进行说明。

2.2 钢轨电位抑制技术

2.2.1 减小回流电流措施

回流电流由牵引电流和列车位置决定，前者通常可达 4 000 A 甚至更高，后者则决定相应回流路径的

走行轨纵向电阻。鉴于钢轨电位与回流电流正相关,在相同牵引功率下,提高直流畅触网压,能显著降低列车牵引电流及相应的回流电流等级。目前,有轨电车多采用 600 V 和 750 V 的额定直流电压;对于城市长距离运行城轨线路及大功率的直流供电线路推荐采用 1 500 V 的额定电压等级,对于市域郊铁路、城际铁路及通勤铁路可采用 3 000 V 的额定电压等级来满足大功率、长距离的运输需求^[28]。

2.2.2 减小钢轨纵向电阻措施

影响钢轨纵向电阻的因素主要包括钢轨横截面积、焊点电阻等。为此,采用重型钢轨、并联回流线缆、设置均流线、采用无缝线路等措施均可降低回路路径的钢轨纵向电阻^[29]。重型钢轨通过增加横截面积降低了相应的钢轨纵向电阻,以常用的 60 kg/m 和 50 kg/m 钢轨为例,前者相比后者的横截面积增大 18.6%,相应纵向电阻值降低了 17.2%^[30]。而在轨道两侧并联回流线缆也可增大相应区段的等效钢轨截面积,进而降低钢轨纵向电阻。上下行走行轨之间通常每隔 400~600 m 设置均流线,即通过将二者并联来降低钢轨纵向电阻。此外,推广无缝线路措施中将标准长度的钢轨焊接成长钢轨线路,通过优化焊接技术尽量减小焊接点处的电阻。

2.2.3 钢轨电位限制装置

在城轨交通中,通常在车站的钢轨与大地之间设置如图 6 所示的钢轨电位限制装置(over voltage protection device, OVPD)。典型 OVPD 包括接触器和晶闸管/GTO 构成的短路环节及测量环节。一旦检测到钢轨电位超过安全阈值, OVPD 立即动作,强制将该位置的钢轨与大地短接,进而使得此处钢轨电位立即被箝位到零,

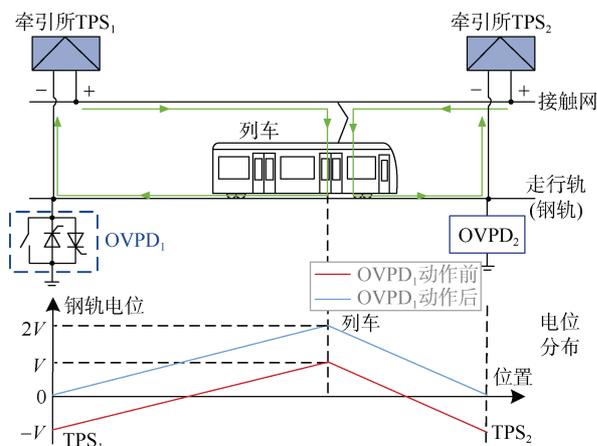


图 6 OVPD 工作原理

Figure 6 Operation principle of OVPD

以避免过高钢轨电位对人身及轨旁设备的影响。OVPD 通常选取 3 段式保护阈值策略,典型 I 段、II 段和 III 段电压动作阈值分别为 120 V(或 90 V)、150 V 和 600 V^[31]。触发 I 段保护后,接触器导通一定时间后自动断开;而触发 II、III 段保护后,接触器或晶闸管导通,此时均需要人工手动复位才能断开接触器^[32]。

需要注意的是,尽管 OVPD 能够保护牵引所或车站处的人身安全和轨旁设备,但 OVPD 动作时会显著抬高走行轨沿线钢轨电位水平(如图 6 所示),导致更多回流电流向周边土壤泄漏^[33]。对于城轨交通运营,特别在高峰运营时段, OVPD 可能频繁动作甚至闭锁,而由于人工手动复位不及时,极可能引发附近车站内 OVPD 接连动作,进一步加剧沿线杂散电流泄漏,此时泄漏杂散电流可能达到几百甚至上千安培,严重威胁城轨交通安全运营^[34]。

3 杂散电流治理问题及其研究现状

3.1 杂散电流产生机理和危害

由于钢轨与大地之间非完全绝缘,在前述钢轨电位的影响下,部分牵引回流电流泄漏到大地中,并通过较小电阻的路径(包括埋地金属管线、结构钢筋等金属构件),形成杂散电流(也称“迷流”)^[35-36],如图 7 所示。

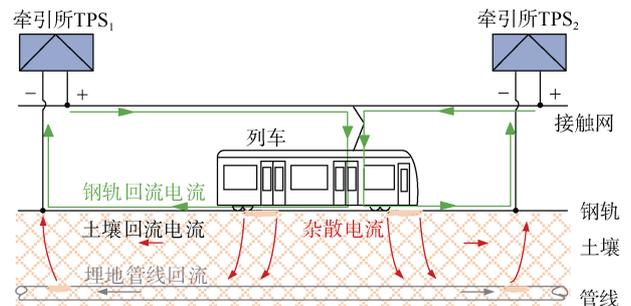


图 7 杂散电流产生机理

Figure 7 Stray current generation mechanism

根据法拉电解定律,杂散电流会对城轨隧道及附近建筑物的结构钢筋、埋地金属管线设施造成严重的电化学腐蚀^[36]。一方面造成钢轨及其附件的腐蚀,除了定期更换的维护成本外,引发潜在的城轨安全运营风险;另一方面,城轨附近金属管线一旦发生腐蚀穿孔破裂,将可能引起火灾和爆炸事故,并产生巨大的经济损失。如香港曾因杂散电流对煤气管道的腐蚀穿孔,而造成煤气泄漏事故。北京地铁一期工程投入运营数年后,其主体结构钢筋发现严重腐蚀,隧道内水

管腐蚀穿孔，仅东段部分区段更换穿孔水管 54 处。杂散电流已成为城轨交通领域面临的重要安全挑战之一。

3.2 杂散电流治理技术

近年来，围绕杂散电流问题各国相继出台了一系列行业或国际标准^[37-40]，杂散电流治理技术受到国内外学者的广泛关注，并在实际城轨线路中逐步推广。现有的杂散电流治理措施，普遍采用“以防为主、以排为辅、防排结合、加强监测”的设计思想^[41]。根据工作原理可将其大致分为 4 类：控制走行轨回流电流、阻碍回流电流对地泄漏、阴极保护对象、电力电子硬件治理方案。

3.2.1 控制走行轨回流电流方案

作为回流电流泄漏至钢轨周围大地中的部分，杂散电流与走行轨回流电流成正比，与回流至牵引变电所的距离平方成正比，因此可通过提高直流接触网压、缩短牵引所间距等措施来减小走行轨回流电流及相应的杂散电流。采用第四轨回流是另外一种控制轨道回流电流的方法，即列车通过专用轨向牵引所回流，此时走行轨回流电流几乎降低为零，从而解决杂散电流问题^[42]。但上述方案仅适用于新建线路，无法在既有城轨交通线路中推广。

3.2.2 阻碍回流电流对地泄漏方案

通过增强轨地绝缘水平和杂散电流收集网等方法实现阻碍回流电流对地泄漏^[43]。轨地过渡电阻常被用来衡量轨道和大地之间的绝缘效果，《地铁杂散电流腐蚀防护技术标准》(CJJ/T 49-2020)规定新建线路中轨地过渡电阻不应小于 $15 \Omega \cdot \text{km}$ ^[37]。为增强轨地绝缘水平，典型实施方案包括走行轨绝缘固定、采用无砟轨道和高阻率混凝土枕木、铁轨表面涂抹绝缘材料、保持道床区域的清洁等，有助于减小泄漏到大地中的杂散电流。杂散电流收集网被普遍用于既有城轨系统中，通过收集由轨道泄漏出的杂散电流，并将其沿收集网流回牵引所负极，可有效防止杂散电流向城轨周边的结构钢筋和金属管线中扩散^[44]。

3.2.3 阴极保护对象方案

阴极保护对象方案可有效防止杂散电流对沿线埋地金属管线、结构钢筋等产生的电化学腐蚀。阴极保护的基本原理是向被保护对象提供阴极保护电流，使其阴极极化到一定范围，抑制金属腐蚀引发的电子迁移，避免或减弱腐蚀的发生^[45]。常见的阴极保护方案

包括牺牲阳极法和外加电流法^[46]。然而，作为杂散电流治理的一种辅助手段，阴极保护往往只局限于被保护对象，无法完全消除杂散电流对其他区域所带来的负面影响。

3.2.4 电力电子硬件治理方案

随着电力电子技术的发展，近年来国内外学者陆续提出一系列杂散电流的新型硬件治理方案。Fabre 等^[47]提出了高压直流三线供电系统，通过设置直流变换器 and 高压回流线，降低了走行轨回流电流；但电压等级提高会带来一些新挑战，如高压直流断路器、设备电气绝缘性要求提高等。Fotouhi 等^[48]采用了图 8 所示的直流吸流变压器供电系统硬件治理措施，利用吸流变压器(BT)内部直流电感续流作用，将走行轨回流电流转移至专用回流线上；但直流吸流变压器供电系统存在较长的吸流间隙，此时列车电流仍会通过走行轨回流至牵引所。

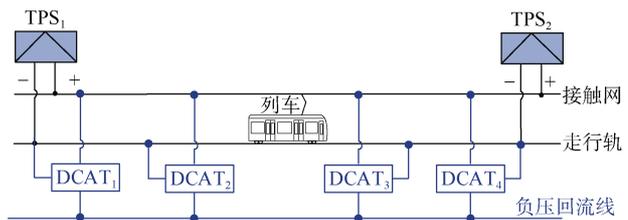


图 8 直流吸流变压器牵引供电系统示意

Figure 8 Illustration of DC booster based solution

此外，文献[49-50]分别提出了直流自耦变压器(DCAT)牵引供电系统和负阻变换器(NRC)牵引供电系统的硬件治理措施。前者通过沿线路设置 DCAT 和负压回流线，将轨道划分为多个子区段，如图 9 所示；后者则通过沿线路设置开关单元和回流线、在牵引所所处设置负阻变换器，同样将轨道划分为多个子区段，如图 10 所示。此时仅列车所在的区段内轨道上有电流，其余区段内轨道电流均为零，可有效解决杂散电流问题。上述电力电子硬件治理方案普遍处于实验室测试阶段，有待开展进一步的工程示范研究。

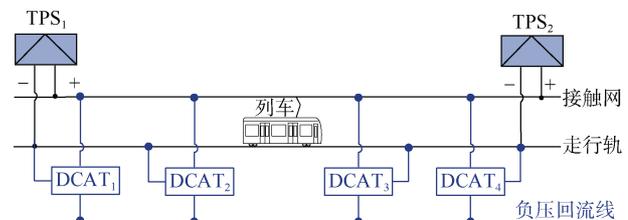


图 9 DCAT 牵引供电系统示意

Figure 9 Illustration of DCAT based solution

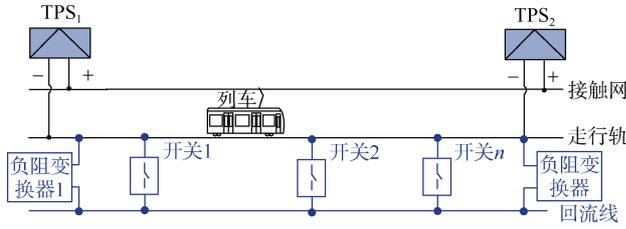


图 10 NRC 牵引供电系统示意

Figure 10 Illustration of NRC based solution

3.3 杂散电流治理技术对比

选择几种典型杂散电流治理技术开展性能对比, 如表 1 所示, 其中*表示治理效果、成本、失效速度和成熟度指标^[51]。可以看出, 减小走行轨纵向电阻、增强轨地绝缘水平和杂散电流收集网等传统杂散电流治理措施普遍成熟度高, 但实际推广存在一定的局限性, 如治理成本高但效果有限、性能随运行时间推移而降低、多适用于新建线路而在既有线路改造困难等。第四轨回流方案具有较好的杂散电流治理效果, 但涉及供电线路和车辆特殊设计改造, 建设成本相对提高。相比之下, 电力电子的硬件治理措施表现出了一定优势, 同时适用于既有线路和新建线路, 但尚需在工程示范、关键技术方面开展深入研究。

表 1 杂散电流治理技术性能对比

Table 1 Performance comparison of stray current mitigation

措施	效果	成本	失效速度	成熟度
减小走行轨纵向电阻	***	****	***	*****
增强轨地绝缘水平	***	****	*****	*****
杂散电流收集网	***	****	****	*****
第四轨回流	*****	*****	**	***
BT 牵引供电系统	***	*****	**	**
NRC 牵引供电系统	****	***	**	**

4 结语

鉴于城轨交通面临的安全供电技术挑战, 围绕直流牵引供电的接触网压波动、钢轨电位和杂散电流问题及其治理技术开展了分类综述, 详细分析了各类技术的原理和特点。然而上述安全供电技术尚存在一些问题, 亟待开展深入的研究:

1) 作为解决列车再生制动能量利用问题的技术措施, 列车运行优化、能量回馈式、储能式和能耗式方案在实际推广中需综合考虑性能和成本。随着自动驾驶技术的推广, 结合列车运行优化的综合再生制动能量利用解决方案展现出了良好的应用前景。

2) 钢轨电位跟杂散电流之间存在内在关联, 相应治理措施的实施效果亦相互影响。用于解决车站处钢轨电位过高风险的 OVPD 动作后, 将同时抬高沿线钢轨电位, 加剧杂散电流泄漏, 这在实际工程应用中必须加以考虑。

3) 目前世界上仅少数城市采用第四轨回流方案, 关于该方案下的列车再生制动能量利用、钢轨电位和杂散电流研究较少, 这将是未来的一个研究方向。

此外, 在能源互联网和国家“双碳”目标的背景下, 未来分布式可再生能源接入城轨交通带来了新特征, 相应安全供电技术值得关注。

参考文献

- [1] 韩宝明, 李亚为, 鲁放, 等. 2021 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(1): 5-11.
HAN Baoming, LI Yawei, LU Fang, et al. Statistical analysis of urban rail transit operations in the world in 2021: a review[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(1): 5-11.
- [2] 侯秀芳, 梅建萍, 左超. 2021 年中国内地城轨交通线路概况[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(1): 12-13.
HOU Xiufang, YANG Jianping, ZUO Chao. An overview of urban rail transit lines in the Chinese mainland in 2021[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(1): 12-13.
- [3] 刘宇嫣, 林飞, 杨中平. 城轨交通地面储能系统的能量管理策略综述[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(6): 9-17.
LIU Yuyan, LIN Fei, YANG Zhongping. Overview of energy management strategies for wayside energy storage system of urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(6): 9-17.
- [4] 徐杰, 杨晓峰, 王慧康, 等. 一种多区段地铁轨道电位动态模拟系统[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(3): 57-65.
XU Jie, YANG Xiaofeng, WANG Huikang, et al. A multi-section metro rail potential dynamic emulator system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(3): 57-65.
- [5] YANG X F, GU J D, ZHENG T Q, et al. Faults and reliability analysis of negative resistance converter traction power system[J]. Microelectronics reliability, 2020, 114: 113911.
- [6] WANG M, YANG X F, LI S X, et al. High voltage DC auto-transformer traction power supply for braking energy utilization, rail potential and stray current mitigation[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2022, early access.
- [7] 城市轨道交通直流牵引供电系统: GB/T 10411-2005[S].

- 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [8] 易健, 黄慧建. 宁波市轨道交通 2 号线一期列车网压过压故障分析及改进[J]. 机车电传动, 2017(6): 117-119.
YI Jian, HUANG Huijian. Line supply overvoltage failure analysis and protection strategy improvement of Ningbo rail transit Line 2 phase 1 trains[J]. Electric drive for locomotives, 2017(6): 117-119.
- [9] 北京交通广播. 北京地铁 5 号线、10 号线早高峰因故障晚点官方: 迟到乘客可在车站领取延误证明[EB/OL]. (2021-03-01)[2022-03-24]. <https://china.huanqiu.com/article/427unIPGrKV>.
- [10] 李友瑜, 杨守焕, 阳吉初, 等. 地铁列车制动电阻的种类及优化设计[J]. 城市轨道交通研究, 2010, 13(5): 49-53.
LI Youyu, YANG Shouhuan, YANG Jichu, et al. Types of metro braking resistor and optimal design[J]. Urban mass transit, 2010, 13(5): 49-53.
- [11] 张天彤, 高民富. 郑州地铁 1 号线制动电阻选型方案分析[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(5): 119-122.
ZHANG Tiantong, GAO Minfu. Analysis on the selection schemes of braking resistor for Zhengzhou metro line 1[J]. Urban mass transit, 2014, 17(5): 119-122.
- [12] SHEN X J, WEI H Y, LIE T T. Management and utilization of urban rail transit regenerative braking energy based on the bypass DC loop[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2021, 7(3): 1699-1711.
- [13] ZHU F Q, YANG Z P, LIN, et al. Decentralized cooperative control of multiple energy storage systems in urban railway based on multiagent deep reinforcement learning[J]. IEEE transactions on power electronics, 2020, 35(9): 9368-9379.
- [14] YANG X, LI X, NING B, et al. A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2016, 17(1): 2-13.
- [15] 卫巍, 韩志伟, 张钢. 再生能馈装置在北京地铁工程中的应用及节能效果分析[J]. 都市轨道交通, 2016, 29(4): 107-110.
WEI Wei, HAN Zhiwei, ZHANG Gang. Application of energy feedback traction power supply device and analysis on energy conservation effect for Beijing subway[J]. Urban rapid rail transit, 2016, 29(4): 107-110.
- [16] HAO F J, ZHANG G, CHEN J, et al. Distributed reactive power compensation method in DC traction power systems with reversible substations[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(10): 9935-9944.
- [17] Ratniyomchai T, Tricoli P, Hillmansen S. Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways[J]. IET electrical systems in transportation, 2014, 4(1): 9-20.
- [18] 杨中平, 林飞. 储能技术在地面式再生制动能量吸收和利用装置中的应用[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(6): 1-8.
YANG Zhongping, LIN Fei. Application of energy storage technology in stationary regenerative braking energy absorption and utilization devices[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(6): 1-8.
- [19] Herrera V I, Gaztanaga H, Milo A, et al. Optimal energy management and sizing of a battery: supercapacitor-based light rail vehicle with a multiobjective approach[J]. IEEE transactions on industry applications, 2016, 52(4): 3367-3377.
- [20] 杨浩丰, 刘冲, 李彬, 等. 基于列车运行工况的城轨地面式混合储能系统控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(s1): 168-178.
YANG Haofeng, LIU Chong, LI Bin, et al. Research on control strategy of urban rail ground hybrid energy storage device based on train operating condition[J]. Transactions of China electrotechnical Society, 2021, 36(s1): 168-178.
- [21] 郑翔, 侯依梦, 董欣垒, 等. 市域轨道快慢车组合运营线路节能坡方案优化探讨[J]. 都市轨道交通, 2020, 33(3): 54-62.
ZHENG Xiang, HOU Yimeng, DONG Xinlei, et al. Optimization of energy efficient vertical alignment design based on multiple trains in regional express rail[J]. Urban rapid rail transit, 2020, 33(3): 54-62.
- [22] 白宣. 北京地铁再生制动能量吸收装置节能效果对比分析[J]. 铁道技术监督, 2021, 49(5): 43-46.
BAI Xuan. Comparative analysis of energy-saving performance of beijing metro regenerative braking energy absorption devices[J]. Railway quality control, 2021, 49(5): 43-46.
- [23] 杨晓峰, 王慧康, 郑琼林. 直流牵引供电系统中有限边界边缘效应对轨道电位的影响[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(3): 1-11.
YANG Xiaofeng, WANG Huikang, ZHENG Trillion Q. Influence of finite boundary fringe effect on the rail potential in DC traction power supply system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(3): 1-11.
- [24] 王哲. 地铁站台门绝缘问题分析及应对措施[J]. 工程建设与设计, 2020(13): 84-86.
WANG Zhe. Analysis on the insulation problem of platform

- edge door and its countermeasures[J]. Construction & design for project, 2020(13): 84-86.
- [25] 王宝顺. 地铁车辆段/停车场的杂散电流打火问题分析及回流系统优化[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(11): 160-163.
WANG Baoshun. Analysis of arcing problem caused by stray current and backfeeding system optimization in metro vehicle depot and stabling yard[J]. Urban mass transit, 2020, 23(11): 160-163.
- [26] Memon S A, Fromme P. Stray Current corrosion and mitigation: a synopsis of the technical methods used in dc transit systems[J]. IEEE electrification magazine, 2014, 2(3): 22-31.
- [27] 唐靖坤, 刘炜, 王沛沛, 等. 单向导通装置和钢轨电位限制装置对钢轨电位影响的仿真研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 87-91.
TANG Jingkun, LIU Wei, WANG Peipei, et al. Simulation of the track unilateral connecting device and over-voltage protection device influence on rail potential[J]. Urban mass transit, 2020, 23(1): 87-91.
- [28] 范锦江, 陈慧民, 姜东杰. 城市轨道交通不同牵引供电制式的比较[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(12): 97-100.
FAN Jinjiang, CHEN Huimin, JIANG Dongjie. On different urban rail transit traction power supply mode[J]. Urban mass transit, 2016, 19(12): 97-100.
- [29] 宋奇吼, 杨颀, 童岩峰, 等. 南京地铁 1 号线轨电位异常的抑制方法[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(4): 114-118.
SONG Qihou, YANG Yang, TONG Yanfeng, et al. Research on the control of abnormal rail potential for nanjing metro line 1[J]. Urban mass transit, 2018, 21(4): 114-118.
- [30] 王奎鹃, 李夏青, 田行军, 等. 地铁直流牵引供电回路电气参数的数值计算[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(6): 30-36.
WANG Kuijuan, LI Xiaqing, TIAN Xingjun, et al. Numerical calculation of electrical parameters in DC traction power supply loop[J]. Urban mass transit, 2014, 17(6): 30-36.
- [31] XIAO N, LIU J, WU J Z, et al. Analysis on rail potential distribution characteristics considering OVPD in metro system[J]. IEEE access, 2021, 9: 141295-141306.
- [32] 陈民武, 赵鑫, 丁大鹏, 等. 城市轨道交通供电系统钢轨电位限制装置操作过电压研究[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(6): 94-99.
CHEN Minwu, ZHAO Xin, DING Dapeng, et al. Research on switching surge of rail over-voltage protection device in power supply system for urban rail transit[J]. China railway science, 2017, 38(6): 94-99.
- [33] 王慧康, 杨晓峰, 倪梦涵, 等. 轨道电位与杂散电流动态模拟实验平台[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3609-3618.
WANG Huikang, YANG Xiaofeng, NI Menghan, et al. Rail potential and stray current dynamic emulator[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2020, 35(17): 3609-3618.
- [34] DU Guifu, WANG Jun, JIANG Xingxing, et al. Evaluation of rail potential and stray current with dynamic traction networks in multitrain subway systems[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2020, 6(2): 784-796.
- [35] Charalambous C A, Aylott P. Dynamic stray current evaluations on cut-and-cover sections of DC metro systems[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2014, 63(8): 3530-3538.
- [36] 杨晓峰, 薛皓, 郑琼林. 基于双向可变电阻模块的杂散电流与轨道电位动态模拟系统[J]. 电工技术学报, 2019, 34(13): 2793-2805.
YANG Xiaofeng, XUE Hao, ZHENG Trillion Q. Stray current and rail potential dynamic simulation system based on bidirectional variable resistance module[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2019, 34(13): 2793-2805.
- [37] 地铁杂散电流腐蚀防护技术标准: CJJT49-2020[S]. 北京: 中国建筑出版传媒有限公司, 2020.
- [38] Protection against corrosion by stray current from direct current systems: EN 50162: 2004[S]. ECS, GEL, 2005.
- [39] Railway applications-fixed installations-electrical safety, earthing and the return circuit-part 2: provisions against the effects of stray currents caused by D.C. traction systems: DS/EN 50122-2[S]. Dansk-Standard, 2010.
- [40] Railway applications-fixed installations-electrical safety, earthing and the return circuit-part 2: provisions against the effects of stray currents caused by D.C. traction systems: 62128-2[S]. IEC, Standard IEC, 2013.
- [41] 北京市规划委员会, 北京市规划委员会. 地铁设计规范: GB50157-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

(下转第 24 页)