

文章编号: 1005-0523(2020)03-0027-10

地铁杂散电流腐蚀评估及建模分析的研究现状

蔡智超, 张献伟

(华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:随着我国地铁铺设里程的不断增加,钢筋混凝土、埋地管道等基础设施被广泛应用于地铁系统。地铁杂散电流泄漏会对基础设施造成严重破坏,混凝土钢筋和埋地金属的腐蚀问题值得城市运维部门的高度关注。分别从杂散电流作用下的金属腐蚀,杂散电流建模分析等方面,系统介绍了国内外对杂散电流金属腐蚀研究的现状和进展,并对杂散电流建模方案进行了比较与展望。

关键词:杂散电流;埋地管道;钢筋混凝土;腐蚀;分布模型

中图分类号: TG172.84

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.03.004

随着中国经济的蓬勃发展,能源和交通运输行业得到了快速发展,截至2019年6月,中国内地累计有37个城市,投运城轨交通线路6 126.82 km。以地铁为主的城市轨道交通运输系统,一般采用直流牵引,经走行轨回流,由于轨道不完全对地绝缘,有部分电流会从走行轨泄入大地,形成杂散电流^[1],如图1所示,杂散电流的泄漏会对周边埋地金属构件(混凝土钢筋、城市地下管道)造成干扰,导致走行轨和牵引系统附近的金属结构遭到严重的电化学腐蚀^[2-3],大大降低金属构件的使用寿命;长时间的腐蚀将导致埋地管线泄漏和基础设施塌方,甚至引发火灾和爆炸事故^[4-10]。杂散电流的大小和分布主要受变电所的位置、馈电区段、负荷分担状态、负荷电流、土壤电阻以及钢轨对地过渡电阻等因素影响,同时随着列车不断运行,杂散电流的分布也会随时间而变化。因此,杂散电流的波动特征已成为地铁对埋地金属干扰的典型特征。开展地铁杂散电流的研究对于埋地金属安全运维具有重要的借鉴和指导意义。

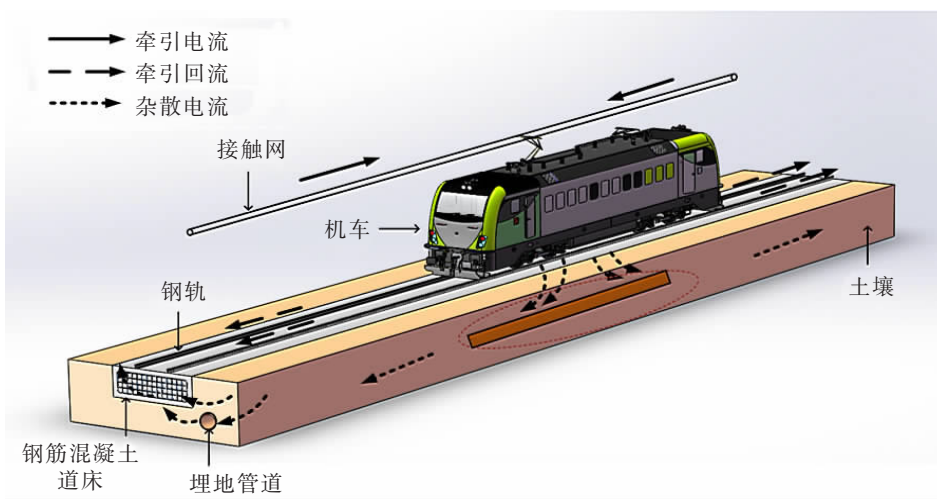


图1 地铁杂散电流泄漏三维示意图

Fig.1 Three-dimensional diagram of subway stray current leakage

收稿日期: 2019-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51807065)

作者简介: 蔡智超(1989—),男,副教授,博士,研究方向为电工理论与新技术和电磁无损检测等。

通讯作者: 张献伟(1985—),男,工程师,硕士研究生,研究方向为地铁杂散电流分布规律与腐蚀。

目前,国内外的学者主要从杂散电流的分布模型及规律、金属设施杂散电流作用下的腐蚀机理、杂散电流的在线监测方法等多个角度开展研究,并取得了丰硕成果。本文结合国内外最新的研究成果,对杂散电流腐蚀机理、杂散电流分布模型及数值计算、杂散电流腐蚀防护及未来研究方向进行了总结。

1 杂散电流腐蚀机理研究

研究表明杂散电流腐蚀的本质是电化学腐蚀的电解作用^[1]。金属在土壤电解质中同样遵循电化学腐蚀反应。具体的说杂散电流流经埋地金属,阳极区域金属失去电子变成离子而被腐蚀;阴极区域,根据电解质酸碱性的不同表现为吸氧反应或析氢反应。

埋地管道和钢筋混凝土是杂散电流最常见的腐蚀对象,也是国内外学者研究杂散电流腐蚀机理的重点。大量学者通过搭建模拟杂散电流泄露环境实验平台,探究杂散电流作用下钢筋混凝土钢筋和埋地管道的腐蚀机理,研究成果对现实工程中钢筋混凝土基础设施建设和埋地管道防护具有重要的指导意义。

1.1 杂散电流作用下埋地管道金属腐蚀研究

埋地管道金属的电导率与土壤相比更大,泄漏至土壤的杂散电流很容易将金属结构作为导流路径。无杂散电流流过时,管道对地电位通常在 -0.65 V 左右,有杂散电流流经时,管地电位高达 $8\sim 9\text{ V}$ 。早在20世纪60年代,Schwalm等^[2]以及王小璐^[3]研究表明杂散电流泄漏会加速埋地管道的腐蚀速度,并证实了杂散电流对金属的腐蚀作用本质是电化学腐蚀,杂散电流的存在可以促使管道金属短时间内被腐蚀,具体表现为电流流过金属并发生电解反应,其特征表现为高强度性和局部性。为了明确哪些因素可以促进杂散电流对管道金属的腐蚀,学者们从多个角度作为切入点开展了研究。

曹阿林^[4]从土壤电阻率、金属管道埋深以及管道金属的极化电位偏移的角度进行研究,实验分析了这3个因素与埋地管道腐蚀率之间的关系。Qian等^[5]以X52管线钢作为研究对象,探究了直流杂散电流干扰下阴极保护效率降低的机理,证实杂散电流对于阴极干扰,主要表现为溶液pH值的增加,进而导致金属涂层的脱粘。祝邴伟等^[6]搭建了Q235碳钢的交、直流杂散电流腐蚀试验模型,对比分析了交、直流杂散电流作用下金属电位、杂散电流变化规律。Q235碳钢在杂散电流的作用下,腐蚀速率会急剧增加,相同电流幅值下,直流杂散电流下的金属腐蚀速率是交流腐蚀速率的18倍。莫伊达^[7]针对重庆轨道交通三号线并行段的燃气管道多次泄漏问题,设计了恒定电流作用下的管道金属腐蚀试验平台,杂散电流对实验试件的极化曲线表明,施加杂散电流干扰的阴极塔菲尔常数变化比阳极塔菲尔常数更明显,即杂散电流对电极的阴极反应干扰更大。Wang等^[8]则对含NaCl溶液中覆有聚乙烯涂层的X80碳钢开展杂散电流作用下的电化学试验,重点研究了直流杂散电流作用下的电极极化。在直流杂散电流的作用下,X80钢试样电极反应平衡被打断,金属电极电位会发生位移,阴极的电位偏差远大于阳极的电位偏差。Wang等^[9]对不同氯离子浓度耦合作用下杂散电流腐蚀Q235A钢电化学腐蚀实验,发现Q235A钢的腐蚀电流密度随杂散电流与氯离子的耦合呈增大趋势,腐蚀电流密度随氯离子浓度的增加而增大,金属在杂散电流和氯离子的共同作用下会产生点蚀孔。王力伟等^[20]重点研究了Q235管线钢腐蚀速率、腐蚀形貌与分形维数之间的关系。结果表明杂散电流密度很大程度上决定了金属分形维数和金属腐蚀;而土壤电导率和土壤酸碱的变化对分形维数的影响不大,因此利用分形维数可以作为金属腐蚀程度的量化指标。

以上研究主要介绍了杂散电流作用下埋地管道金属腐蚀机理和规律的相关工作,这些研究主要通过实验开展,实验过程中模拟不同的杂散电流环境,从不同角度分析了杂散电流作用下的金属腐蚀现象,为埋地金属的防腐蚀工作提供了理论参考。

1.2 钢筋混凝土杂散电流腐蚀研究

钢筋混凝土是我国城市化建设的主要材料,杂散电流对其具有极大的破坏作用,突出表现为杂散电流加速钢筋混凝土的水化产物分解,降低钢筋和混凝土的结合强度,以及降低钢筋混凝土的力学性能和耐久性,给建筑设施的安全性构成了极大威胁

周晓军等^[21]对钢筋混凝土的自然腐蚀和杂散电流腐蚀进行对比。研究表明杂散电流作用下的钢筋混凝土因为阳极反应腐蚀物的积累而更容易开裂。Rasheeduzzafar等^[22]和Orellan等^[23]通过实验,验证了杂散电流作用下 Na^+ 和 K^+ 离子更容易进入混凝土内部,从而会引起水化产物的累积,而混凝土水化产物的软化则是混凝土强度降低的原因之一。Aghajani等^[24]的研究进一步表明,杂散电流促使钢筋混凝土结构劣化的原因是水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的分解,其结果是钢筋混凝土的孔隙率增大,进而降低了钢筋混凝土的力学性能和耐久性。张威^[25]的研究也证实了钢筋与混凝土界面处水泥产物的分解是混凝土与钢筋结合度降低的主要原因。韦江雄等^[26]和Deng等^[27]则将研究重点放在杂散电流作用下钢筋混凝土阴极的析氢反应。研究表明,析氢反应产生的氢气会迫使钢筋与混凝土分离现象,且降低了钢筋混凝土的强度。

Bertolini等设计了实验平台,对比分析混凝土钢筋在杂散电流单独作用及与氯离子耦合作用下的腐蚀研究,结果证实相同浓度的氯离子溶液在杂散电流的耦合作用下,会显著加速钢筋的腐蚀速率。吴雄^[28]实验也发现,地铁混凝土钢筋在杂散电流作用下,即使低浓度的氯离子存在也会使钢筋锈蚀加速。杂散电流和氯离子的共同作用主要表现在3个方面。第一,杂散电流的作用会使钢筋混凝土内部固化的氯离子游离化,进而降低钢筋混凝土结构的耐久性。第二,杂散电流的作用降低了混凝土钢筋的氯离子临界浓度值,使得混凝土钢筋更易遭到破坏。第三,杂散电流会加速氯离子的钢筋混凝土内部迁移速度,进而增加了钢筋的腐蚀速率。

也有学者从钢筋混凝土的防腐角度出发,研制新型混凝土结构,提高混凝土抵抗杂散电流腐蚀的性能。杜应吉等^[29]通过试验分析发现,活性掺合料可以增加地铁钢筋混凝土结构中钢筋的累积电量和钝化膜电阻,进而提高了钢筋混凝土抵抗杂散电流侵蚀的能力。Tinnea等^[30]研制了由矿渣煤灰粉和硅粉共同打造的高阻抗混凝土道床,与普通道床相比,电阻率提升了100倍,有效缓解了杂散电流的腐蚀作用。Tang^[31]和林龙篔等^[32]针对应用日益广泛的钢纤维混凝土展开了系列研究。钢纤维混凝土氯离子的阈值明显高于传统钢筋混凝土;因此钢纤维混凝土可以降低杂散电流或与氯离子共同作用下造成的腐蚀,钢纤维混凝土可以作为防杂散电流腐蚀的一个重要选择。

在杂散电流作用下,混凝土钢筋阳极和阴极的电化学反应会破坏钢筋混凝土,氯离子的浸入会加速混凝土钢筋锈蚀。现阶段杂散电流作用下的钢筋混凝土腐蚀研究主要通过实验实现。与实验不同,实际中钢筋混凝土的腐蚀是复杂环境下多种因素共同作用的结果,除了杂散电流和氯离子的耦合作用外,碳化、应力以及冻融等同样是影响钢筋混凝土腐蚀的重要因素,所以多因素作用下的钢筋混凝土杂散电流腐蚀有待深入研究。

2 杂散电流防护标准及分布模型研究现状

上述模拟杂散电流金属腐蚀的实验多是在恒定电源条件下开展的,然而现实中杂散电流并不是一个稳定的物理量,杂散电流的泄漏和分布受到很多因素的影响。比如地铁系统中,钢轨阻抗、土壤电导率、牵引变电所分布以及牵引电流大小都是影响杂散电流分布和大小的重要因素。弄清杂散电流在土壤中的分布是研究金属腐蚀规律的重要前提,现有研究杂散电流分布及腐蚀预防的措施主要有2个:一是现场采集数据,并根据杂散电流相关的防护标准间接判断杂散电流的泄漏情况和潜在腐蚀危险;第二是建立杂散电流分布的解析或数值模型,并通过仿真方式直接分析杂散电流的大小和分布。

2.1 杂散电流防护标准

《地铁杂散电流腐蚀防护规程》即CJJ 49-92^[33]是我国地铁杂散电流防护专业的第一个行业标准,内容包括地铁杂散电流腐蚀的指标,杂散电流的防治措施以及地铁沿线金属结构和管道的防护措施等。CJJ 49-92规定杂散电流泄漏密度以及由此引起的金属对地电位偏移是判断金属结构是否受到地铁杂散电流腐蚀的重要指标,并规定电位正向偏移不应超过0.5 V。

国标 GB50991-2014^[34]针对埋地管道,给出了管道受杂散电流干扰程度的判断指标:① 管道工程处于设计阶段,当管道附近 20 m 范围内地电位梯度 >0.5 mV/m 时,确认存在杂散电流干扰;当管道附近 20 m 范围内地电位梯度 ≥ 2.5 mV/m 时,应进行管道敷设后可能受到的杂散电流干扰影响评估,根据评估结果预设干扰防护措施。② 没有实施阴极保护的管道,当管地电位相对于自然电位正向或负向偏移 >20 mV 时,确认存在直流干扰;当任意点的管地电位较自然电位正向偏移 ≥ 100 mV 时,应采取干扰防护措施。③ 已投运阴极保护的管道,当干扰导致管道不满足最小保护电位要求时,应采取杂散电流干扰的防护措施。

在国际标准 IEC62128-2-2013^[35]中,将钢轨纳入到杂散电流的腐蚀防护对象,并引入钢轨单位长平均杂散电流的概念,当单位长平均杂散电流值不大于 2.5 mA/m 时,即认为钢轨满足杂散电流防护的要求,其测量通过钢轨单位电导和平均钢轨电位实现。标准规定牵引供电系统的开式路基单线区段单位电导及钢轨电位的限值分别为 0.5 S/km 和+5 V;闭式路基单线区段单位电导及钢轨电位的限值分别为 0.5 S/km 和+5 V。

国际标准 EN50162-2004^[36]针对港口码头、通信、牵引供电、高压输电及阴极保护等直流杂散电流的泄漏提供了相应的技术和判断指标。对于没有实施阴极保护的金属结构而言,标准考虑土壤电阻率和 IR 降的影响,规定了构筑物的正向电位偏移值,见表 1。

表 1 未实施阴极保护构筑物金属允许电位正向偏移

Fig.1 Acceptable positive potential shifts for metal structures which are not cathodically protected by the standard EN50162-2004

构筑物金属	电解质电阻率 $\rho/(\Omega \cdot m)$	含 IR 降的最大正电位 偏移 $\Delta U/mV$	不含 IR 降的最大正电位 偏移 $\Delta U/mV$
	≥ 200	300	20
钢, 铸铁	15~200	1.5ρ	20
	<15	20	20

国内外相关杂散电流的防护标准为判断杂散电流的泄漏和干扰提供依据,其判断方法主要通过现场采集土壤电位梯度和电位偏移等相关数据进行间接实现。但由于数据采集现场环境的复杂性,以及电位梯度、电位偏移值并不是一成不变的,真实情况很难通过指标值精准反应。另外,对于动态杂散电流干扰尚未有相应的规范。除了借助相关规范间接判断杂散电流的分布及腐蚀隐患,建立杂散电流的分布模型是研究散电流分布和大小的直接研究手段,也是目前研究的重点手段之一。

2.2 杂散电流分布模型研究现状

随着计算机计算能力的不断提升以及新的数值模拟方法的不断出现,建立杂散电流的分布模型,通过数学解析的方法或数值模拟技术可以更好地求解杂散电流的分布大小和腐蚀趋势,这为杂散电流防治工作提供了有效的分析手段。

研究地铁杂散电流最常见的模型是电阻网络模型,模型通常将钢轨、排流网、管道、大地等理想化为均匀的电阻,然后建立电阻网络的数学表达式,最后计算各部分之间的杂散电流值,如图 2 所示。文献[37-38]建立钢轨-大地的电阻网络模型,首次提出杂散电流泄漏率的概念,为杂散电流提供评估方法。Fichera 等^[39]针对钢轨-大地模型,对比分析在单层均匀土壤模型和不同电导率的多层土壤模型中的分布,认为多层的土壤模型更具代表性,更能代表实际情况。刘威^[40]分别建立钢轨-大地,钢轨-埋地金属-大地和钢轨-排流网-埋地金属-大地的电阻网络模型,分析列车取流、变电所距离、过渡电阻、轨道纵向电阻、埋地金属纵向电阻

等对轨道电压、轨道电流和泄露杂散电流的影响。结果表明减小变电所距离、提高牵引电压、增大轨地过渡电阻、降低轨道纵向电阻都可以作为减少杂散电流泄露的手段。Zhao 等^[41]提出了一种基于单列车单变电所下的四层电阻网络模型,将变电所和列车看作电流源向大地注入电流(模拟杂散电流),并将微元法和叠加法推广到多列车和多变电所模型。Ogunsola 等^[42]提出了直流电气化铁路杂散电流的集成数学模型,并在此模型上考虑了列车特性、时间图、间隔时间、多列车运动等因素对杂散电流的影响。学者 Charalambous 等^[43]则针对同一供电区间,首次将再生制动纳入考量范围,分析了回流参数和杂散电流受到再生制动能量的影响。结论是再生制动对杂散电流分布的影响是不能忽视的,在设计杂散电流收集系统时,必须将再生制动的因素考虑进去。Xu 等^[44]不但考虑到列车的运行工况,同时将再生制动因素考虑进去,通过建立仿真模型与线路实测分析,研究了列车工况对回流系统参数的影响,研究表明,当列车处于加速工况和再生制动工况时,钢轨电位水平较高,杂散电流泄漏增大。

电阻网络模型是最常见的电流分布分析模型,模型简单且计算方便,为研究杂散电流的分布规律提供了重要的理论依据。但杂散电流电阻网络分布模型存在很多理想化假设,很难用于所有实际场合,以其他理论为基础的杂散电流分布模型应运而生。

在实际条件中,杂散电流并非沿着钢轨均匀泄漏,所以电阻网络模型在解决实际问题过程中存在很多困难。研究人员运用新的数学理论,试图建立新的杂散电流数学解析模型。Pham 等^[45]从电流泄漏点的角度出发,提出一种基于电场求解杂散电流的球形电极模型,该模型通过计算某点杂散电流泄漏产生的电场强度,推算电场内的电位梯度,然后通过欧姆定律的微分形式求解电场中杂散电流的大小。庞原冰等^[46]则将半球形单电极模型进一步扩展至多电极模型,并视杂散电流流入到埋地金属的损伤程度为衡量腐蚀的直观标准,然后依据模型计算电场分布及流入埋地金属的腐蚀电流,并对埋地金属某一点的腐蚀量进行计算。Simulders 等^[47]将电场模型由二维拓展至三维,分析杂散电流分布过程中用半球形接地电极表示与大地在一定范围内接触的导体。分析模型同时考虑了横向截面间的耦合效应以及纵向截面和横向截面之间的耦合效应,并将导纳矩阵建立在横截面上。

上述数学理论解析模型给杂散电流的防治工作提供一定的理论支持,但是由于求解过程对很多参数进行了理想化假设,模型的计算准确性难免和实际测量有一定的出入。随着数值模拟仿真软件的发展,利用仿真软件可以准确地模拟和预测杂散电流在研究物理场中的电流密度和电位分布,这为研究人员提供了新的研究方法和手段。

Simulink 软件具有动态系统建模、仿真以及综合分析计算等功能,许多学者通过 Simulink 实现了对杂散电流问题的建模和仿真分析。Cerman 等^[48]通过 Simulink 对地铁系统的一个供电区间建立二维电阻网络模型,仿真分析土壤电阻率变化对杂散电流分布的影响,并对比分析不同接地方式(不接地、直接接地、二极管接地等)下轨道电压和杂散电流分布。杨嘉琛^[49]采用 Simulink 仿真平台构建了走行轨-收集网-结构钢筋-大地四层杂散电流防护系统模型,结合工程参数进行仿真计算,分析了走行轨和结构钢筋极化电压的分布规律,并讨论了通过设置排流网和提高走行轨绝缘性减小杂散电流的泄漏的可行性。Jabbehdari 等^[50]建立的 Simulink 基于多层地层结构(不同电导率)仿真模型,并将模型从二维拓展到三维,分析杂散电流分布规律

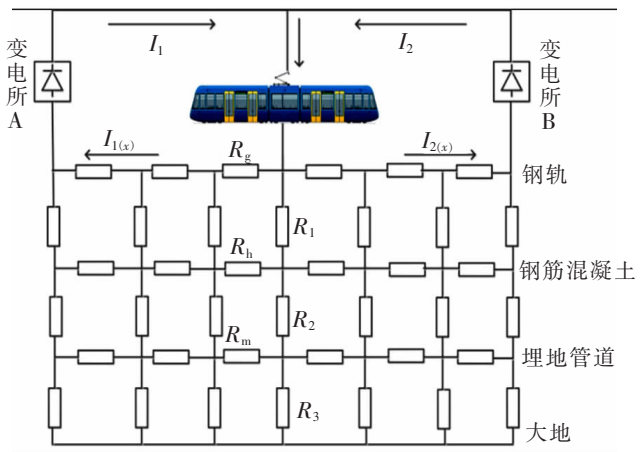


图2 杂散电流电阻网络模型
Fig.2 Stray current resistor network

时还将非线性最小二乘法引入了计算过程。

CDEGS 软件是加拿大 SES 公司开发的主要用于分析电气系统接地、电流分布、电磁场等问题,该软件同样可以应用到杂散电流的仿真分析中。Charalambos^[51]利用 CDEGS 分析了复杂环境下矩形隧道和盾构隧道的杂散电流分布,并从隧道几何拓扑的角度,建立了矩形隧道及盾构片的 CDEGS 地铁直流牵引模型。Cotton 等^[52]从杂散电流收集系统设计和效率的角度着手,分析了如何有效控制杂散电流泄漏。通过 CDEGS 构建包含轨道和杂散电流收集系统(含杂散电流收集垫和收集电缆)的几何模型,探究杂散电流收集垫混凝土含水量、杂散电流收集电缆截面积和土壤电阻率对杂散电流收集效率的影响。于凯等^[53]建立了基于 CDEGS 的地铁隧道三维有限元模型,结构中包括土壤层、空气层、结构钢筋网、排流网、回流轨、馈电线等,通过仿真对杂散电流的静态分布进行了研究。Liu 等^[54]基于石家庄地铁 3 号线的施工情况,建立 CDEGS 杂散电流动态分布模型,研究恒定牵引电流和列车目标速度下钢轨电位分布和杂散电流的泄漏情况。仿真结果表明牵引运行方式和机车位置对钢轨电压、杂散电流分布有较大影响。

在现实工程中,许多物理或化学现象都不是单独存在的,很多问题通常是多个物理场(电场、温度场、应力场、湿度场等)共同作用的结果,杂散电流造成的金属腐蚀同样是在外界应力、环境湿度、pH 值、电化学反应等多种因素耦合作用下产生的。所以,对于地铁杂散电流的分布和金属腐蚀研究,也应从多物理场耦合的角度进行分析。随着多物理场仿真软件的不断发展,探索多物理场耦合作用下的杂散电流问题已经成为研究的最新趋势。基于有限元法的仿真软件 ANSYS、COMSOL 等不但可以从单一物理场的角度仿真分析杂散电流问题,同时可以实现多个物理场耦合作用的杂散电流分析,现已被广泛应用到杂散电流的研究中。COMSOL 软件还设置有电化学腐蚀模块,这使得定量计算杂散电流引起的电化学腐蚀变成了现实。

Zaboli 等^[55]建立了均匀土壤和分层土壤下的有限元模型。仿真分析发现在均匀土壤模型中,杂散电流的泄漏随着土壤电导率增大而增加;在分层土壤模型中,不同层的土壤中,土壤层电阻率越小,杂散电流越大。胡云进等^[56]用有限元法提出了一种杂散电流场的三维有限元模型,模型分析了杂散电流和电位在不同位置的分布。总的来说离隧道的距离越远的地方其杂散电流强度越低,地铁中的隧道至周围地下环境的电位呈现出了一种非线性下降的趋势。Brenna^[57]研究了地面有轨电车对隧道结构钢筋的腐蚀影响,通过建立隧道结构的有限元模型,仿真发现腐蚀几乎都发生在隧道结构的阳极区域,并且验证了等电位连接隧道钢筋相邻节段能够有效减小杂散电流的腐蚀。张攀峰等^[58]利用 ANSYS 软件对埋地金属的杂散电流干扰进行研究,分析了管道金属对地电位以及附近电场的变化规律。王安辉^[59]针对钢筋混凝土桥梁建立杂散电流分布的三维模型,分析了桥梁结构钢筋阳极区域腐蚀随外加电压变化的规律。研究发现杂散电流泄漏处,钢筋表面半电位负向偏移,阴极钢筋处于合理保护、欠保护或过保护状态;杂散电流的回流处,半电位正向偏移,阳极处于加速腐蚀状态。韩雪^[60]通过 COMSOL 软件中的腐蚀模块建立了三维埋地管道腐蚀模型,对杂散电流作用下的单根管道、平行管道和交叉管道进行了仿真,分析了不同电压、不同土壤电阻率和不同腐蚀深度条件下的管道腐蚀规律。

有限元法目前是工程中应用最广泛的数值解析方法,其求解方法是把求解域划分成有限个小单元,并根据实际情况对不同的求解域施加边界条件,然后计算每个节点上的物理量,与传统的数学解析法相比,其求解精度高,应用范围更广泛。目前,通过有限元软件直接定量分析杂散电流的腐蚀问题的研究还比较少,这是未来研究可以拓展的重要方向。

3 杂散电流腐蚀防护研究

地铁杂散电流的防护手段可以归纳为两大类。第一类,从源头控制杂散电流泄漏;第二类,从末端对泄漏的杂散电流进行排流和收集。

早在 1921 年,美国国家安全委员会就提出了源头控制杂散电流泄漏的一些措施,比如提高牵引电压^[61],合理设置变电所之间的距离^[62],对钢轨进行绝缘处理及选择合适的钢轨^[63]等。研究表明,对于 60 kg/m 型钢

轨线路,将各段钢轨之间进行电气连接,并在道岔与辙岔的连接部位设置电缆连接,回路电阻便会降至原来的1/4左右,这将大大降低杂散电流的泄漏。以上源头控制杂散电流泄漏的措施时至今日仍然具有重大的参考价值。

对于已经泄露的杂散电流可以通过排流和收集的方法进行处理。排流法是把埋地结构物与地铁钢轨连接起来,使进入到结构物的杂散电流返回至钢轨。地铁中常见的杂散电流排流法主要有直接排流法、选择排流法、强制排流法和接地排流法。赵永刚^[64]和查鑫堂^[65]详细对比分析了4种排流法的应用条件和优缺点。汤丁等^[66]针对不同排流法开展实验,结果表明上述4种排流措施中强制排流法的效果最好。杨华等^[67]研制了一种管道杂散电流智能排流装置,该装置既能独立进行,实现管道杂散电流的实时在线监测和自动排流,也可以作为管道杂散电流监测防护系统的一部分,将装置的工作状态和工作参数等通过无线通信方式远传到监控中心。在杂散电流泄露的严重区域,可以设置一个杂散电流收集装置(收集垫或收集电缆)来控制杂散电流返回到变电站的路径,进而降低杂散电流对其他设备的威胁。成都地铁1号线工程便将整体道床结构钢筋设置为杂散电流主收集网,将区间隧道结构钢筋设置为杂散电流辅助收集网实现对杂散电流收集。牛安心^[68]结合成都地铁工程实际,对比分析了有无收集网的杂散电流分布模型,结果表明杂散电流收集网不但可以有效收集杂散电流,还可以降低钢轨电位。Cotton等^[52]研究了土壤电阻对直流轨道系统以及地下设施杂散电流腐蚀的影响,研究表明:道床下的土壤特征对道床中杂散电流收集网的收集效果有很大影响,土壤电阻越大,收集效果越好。

杂散电流的防护措施一定程度上降低和减缓了杂散电流的腐蚀危害,是地铁杂散电流防治工作中不可缺少的环节。有针对性的布置和实施杂散电流腐蚀防护措施必须以杂散电流的腐蚀特性和杂散电流在环境中的分布规律为基础。所以,在解决地铁杂散电流腐蚀问题中,应将杂散电流的腐蚀机理研究、分布规律研究以及监测和防护研究当成一个有机的整体进行开展。

4 结论及展望

随着研究的深入,杂散电流的泄露以及杂散电流作用下金属腐蚀机理不断被实验证实。学者在研究杂散电流分布模型方面取得了丰硕成果,为工程建设及杂散电流腐蚀防治工作提供了分析手段和理论支撑。计算机数值仿真方法使计算复杂环境中的杂散电流问题变为可能,随着计算机仿真软件不断发展,在多物理场耦合分析下,定量分析杂散电流分布和腐蚀问题也逐渐变成研究的热点方向。不过,现有杂散电流腐蚀实验以及分布模型还有一定的局限性。比如,腐蚀试验多在室内开展,实验过程无法将所有实际条件都考虑进去;实验多是在恒定电源下开展,不能反映出杂散电流的不稳定性。在杂散电流的分布模型方面,模型虽然由二维扩展到了三维空间,但对影响杂散电流分布参数进行理想化处理依然存在,这影响了模型结果的准确性。在数值模拟方面,现有研究一定程度上解决了杂散电流复杂环境条件下的计算困难,通过仿真直接定量计算影响杂散电流大小和其他参数也变为现实,但是多物理场条件下仿真杂散电流分布和定量计算腐蚀的研究还有待进一步深入。未来的研究工作可以从以下3个方面开展:

- 1) 充分利用地铁的试验线路,将实验室研究工作拓展至工程实际,开展符合实际的杂散电流腐蚀实验研究。
- 2) 搭建更加符合地铁实际运营情况的三维杂散电流动态分布模型,研究分析地铁列车动态工况条件下杂散电流的分布规律。
- 3) 借助现有仿真软件,研究多物理场耦合作用下的杂散电流腐蚀问题,实现金属腐蚀的定量计算和预测,评估埋地金属构件的运行状况。

参考文献:

- [1] CHENG H, XIAO Z, WANG X. Study on protection from stray current in the metro system[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT), 2017(483): 709-716.
- [2] 刘杰, 杜艳霞, 覃楚敏, 等. 地铁杂散电流对埋地管道的干扰规律[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(1): 43-47.
- [3] 王泽学. 城市轨道交通的杂散电流施工[J]. 华东交通大学学报, 2005, 22(4): 60-64.
- [4] SOLADARD A, CARANA M, GEIKER M R. Experimental observations of stray current effects on steel fibres embedded in mortar [J]. Corrosion Science, 2013, 74(12): 1.
- [5] OGUNSOLA A, MARISCOTTI A, GEIKER M, et al. Estimation of stray current from a DC-Electrified railway and impressed potential on a buried pipe[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2238-2246.
- [6] 仇洪云, 张辉, 刑琳琳, 等. 杂散电流对埋地燃气管道腐蚀影响研究[J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(11): 75-77.
- [7] 马晓华. 上海虹桥机场航油输送管道受地铁杂散电流干扰的检测与防护[J]. 腐蚀与防护, 2016(5): 364-367.
- [8] 肖景文. 对地铁运营初期客流量的调查分析[J]. 交通企业管理, 2011(6): 64-65.
- [9] 李猛猛. 新型城市轨道交通杂散电流监测防护系统研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [10] 赵铁军, 姜福香. 海底隧道工程耐久性技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [11] BERTOLINI L, CARANA M, PEDEFERRI P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current[J]. Corrosion Science, 2007(3): 1056-1068.
- [12] SCHWALM L, SANDOR J. Stray current—the major cause of underground plant corrosion[J]. Material Performance, 1969(6): 31-36.
- [13] 王小璐. 埋地钢制燃气管道受地铁直流杂散电流干扰的影响与分析[J]. 城市燃气, 2017(4): 20-24.
- [14] 曹阿林. 埋地金属管线的杂散电流腐蚀防护研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [15] QIAN S, FRANK Y. Accelerated corrosion of pipeline steel and reduced cathodic protection effectiveness under direct current interference[J]. Construction and Building Materials, 2017(148): 675-685.
- [16] 祝邴伟, 杨丙坤, 刘敏, 等. Q235 扁钢接地材料杂散电流腐蚀行为研究[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2016(5): 45-50.
- [17] 莫依达. 杂散电流对凯源燃气公司埋地管道的腐蚀与控制研究[D]. 重庆: 重庆科技学院, 2017.
- [18] WANG X, WANG Z, CHEN Y, et al. Effect of a DC stray current on the corrosion of X80 pipeline steel and the cathodic disbondment behavior of the protective 3PE coating in 3.5% NaCl solution[J]. Coatings, 2019, 9(1): 29.
- [19] WANG C, LI W, WANG Y, et al. Chloride-induced stray current corrosion of Q235A steel and prediction model[J]. Construction and Building Materials, 2019(219): 164-175.
- [20] 王立伟, 唐兴华, 王新华, 等. 基于分型的管线钢直流杂散电流腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(3): 218-223.
- [21] 周晓军, 高波. 地铁迷流对钢筋混凝土中钢筋的试验研究[J]. 铁道学报, 1999, 21(5): 99-105.
- [22] RASHEEDUZZAFAR, ALI M G, ALSULAIMANI G J. Degradation of bond between reinforcing steel and concrete due to cathodic protection current[J]. Aci Materials Journal, 1993, 90(1): 8-15.
- [23] ORELLAN J C, ALIGUIE G. Electrochemical chloride extraction: efficiency and side effects[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(2): 227-234.
- [24] AGHGJANI A, URGEN M, BERTOLINI L. Effects of DC stray current on concrete permeability[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(4): 04015177.
- [25] 张威. 钢筋混凝土结构轨道交通杂散电流腐蚀损伤机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [26] 韦江雄, 王新祥, 郑靓, 等. 电除盐中析氢反应对钢筋-混凝土黏结力的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2009(12): 30-34.
- [27] DENG C L, XU Y, XIONG J B, et al. Effects of hydrogen evolution during ECE on the bond strength between steel and concrete [J]. Advanced Materials Research, 2013(602/604): 952-956.
- [28] 吴雄. 杂散电流和氯离子共同作用下钢筋混凝土的劣化特征研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [29] 杜应吉, 李元婷. 活性掺合料对地铁混凝土杂散电流的抑制作用[J]. 混凝土, 2005(6): 77-79.
- [30] TINNEA R, TINNEA J, KUDER K. High-early-strength, high-resistivity concrete for direct-current light rail[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 29(4): 04016260.
- [31] TANG K. Stray current induced corrosion of steel fibre reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2017(100): 445-456.

- [32] 林龙斌,赖秀英,丰正伟. 杂散电流及氯离子腐蚀共同作用下钢纤维混凝土强度的试验[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2018(3):425-431.
- [33] 中华人民共和国建设部. CJJ 49-92 地铁杂散电流腐蚀防护技术规程[S]. 北京:中国计划出版社,1993.
- [34] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50991-2014 埋地钢质管道直流干扰防护技术标准[S]. 北京:中国计划出版社,2015.
- [35] THE INTERNATIONAL ELECTROTRCNICAL COMMISSION. IEC 62128-2:2013 Provisions against the effects of stray currents caused by d.c traction systems[S]. CENELEC,2013.
- [36] STANDARDS POLICY AND STRATEGY COMMITTEE. BS EN50162-2004 Protection against corrosion by stray current from direct current systems[S]. London:BSI,2005.
- [37] MCOLLUM B,AHLBORN G H. The influence of frequency of alternating or infrequently reversed current on electrolytic corrosion[J]. Journal of the Franklin Institute,1916,182(1):108-110.
- [38] FICHERA F,MARISCOTTI A,OGUNSOLA A,et al. Evaluating stray current from DC electrified transit systems with lumped parameter and multi-layer soil models[C]//Eurocon,Zagreb,2013:1187-1192.
- [39] FICHERA,FABIO M,et al. Evaluating Stray Current from DC Electrified Transit Systems with Lumped Parameter and Multi-Layer SoilModels[J]. IEEE Euro Con,2013(2013):1187-1192.
- [40] 李威. 地铁杂散电流腐蚀监测及防护技术[M]. 徐州:中国矿业大学,2010.
- [41] ZHAO L P,LI J H,LIU M J. Simulation and Analysis of Metro Stray Current Based on Multi-Locomotives Condition[C]//Proceedings of The 35th Chinese Control Conference,2016:9252-9258.
- [42] OGUNSOLA A,SANDROLINI L,MARISCOTTI A. Evaluation of stray current from a DC-electrified railway with integrated electric-electromechanical modeling and traffic simulation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2015,51(6):5431-5441.
- [43] CHARALAMBOUS C A,COTTON I,AYLOTT P. Modeling for preliminary stray current design assessments:the effect of crosstrack regeneration supply[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(3):1899-1908.
- [44] XU S,LI W,WANG Y. Effects of vehicle running mode on rail potential and stray current in DC mass transit systems[J]. IEEE transactions on vehicular technology,2013,62(8):3569-3580.
- [45] PHAM K D,THOMAS R S,STINGER W E. Analysis of stray current,track-to-earth potentials and substation negative grounding in DC traction electrification system[C]//Proceedings of the 2001 IEEE/ASME Joint Railroad Conference,Toronto,Canada,141-160.
- [46] 庞原兵,李群湛. 电场杂散电流模型讨论[J]. 重庆工程学报,2007:11.
- [47] SMULDES H,JANSSEN M. Modeling DC stray currents using a multi-layer model[C]//Proceedings of the 7th World Congress on Railway Research,Montréal,Canada,2006.
- [48] CERMAN A,JANICEK F,KUBALA M. Resistive-type network model of stray current distribution in railway DC traction system [C]//16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering IEEE,Kouty nad Desnou,Czech,2015:364-368.
- [49] 杨嘉琛. 城市轨道交通杂散电流防护系统仿真分析[J]. 科技创新与生产力,2018(2):101-103.
- [50] JABBEHDARI S,MARISCOTTI A. Distribution of stray current based on 3-Dimensional earth model[C]//2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft,Railway,Ship Propulsion and Road Vehicles(ESARS),2015:7101440.
- [51] CHARALAMBOUS C A. Comprehensive modeling to allow informed calculation of DC traction systems' stray current levels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2017,66(11):9667-9677.
- [52] COTTON I.?Stray current control in DC mass transit systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2005,54(2),722-730.
- [53] 于凯. 基于 CDEGS 的地铁杂散电流仿真研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
- [54] LIU M,LIN S,ZHAO L,et al. Study on dynamic characteristics of metro stray current based on CDEGS[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT),2018(483):571-578.
- [55] ZABOLI A. Evaluation and Control of stray current in DC-electrified railway systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2017,66(2):974-980.
- [56] 胡云进,钟振,方镜平. 地铁杂散电流场的有限元模拟[J]. 中国铁道科学,2011,32(6):129-133.

- [57] BRENNAN M. Effects of the DC stray currents on subway tunnel structures evaluated by FEM analysis[C]//IEEE PES General Meeting, Providence, RI, 2010: 1-7.
- [58] 张攀峰, 於孝春. 受直流杂散电流影响埋地管线的 ANSYS 模拟[J]. 腐蚀与防护, 2011(2): 146-149.
- [59] 王安辉. 重要基础设施轨道交通杂散电流腐蚀机理与影响规律[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [60] 韩雪. 直流杂散电流下埋地金属管线的腐蚀与防护研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
- [61] 刘艳梅. 直流牵引供电回流系统安全参数分布特性与限制方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [62] CHARALAMBOS A, CHARALAMBOUS, AYLOTTET P, et al. Stray current calculation and monitoring in DC mass-transit systems[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(2): 24-31.
- [63] 孙云峰, 李毅, 王中良, 等. 油气管道直流杂散电流腐蚀防护研究进展[J]. 管道技术与设备, 2015(6): 34-36.
- [64] 赵永刚. 阴极保护系统中管道受杂散电流干扰分析与排流保护研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2016.
- [65] 查鑫堂. 利用 EIS 研究杂散电流干扰下阴极保护对碳钢腐蚀的保护效果[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
- [66] 汤丁, 何鑫, 许捷, 等. 埋地输气管道的直流杂散电流干扰分析与排流措施[J]. 天然气勘探与开发, 2018, 41(4): 94-99.
- [67] 杨华, 史秀敏. 管道杂散电流智能排流装的研制[J]. 管道技术与设备, 2014(2): 41-43.
- [68] 牛安心. 地铁杂散电流腐蚀防护研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.

A Comprehensive Survey of Subway Stray Current Corrosion Assessment and Modeling Analysis

Cai Zhichao, Zhang Xianwei

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: With the continuous increase of subway lines in China, infrastructures such as reinforced concrete and buried pipelines are widely used in subway systems. The leakage of stray current in the subway will cause serious damage to the infrastructures, and the corrosion of concrete reinforcement and buried metals deserves high attention of the urban operation and maintenance departments. This paper introduces the current status and progress of researches on stray current metal corrosion at home and abroad from the aspects of metal corrosion and stray current modeling under stray current. Finally, the system comparison and prospect of the stray current modeling schemes are discussed.

Key words: stray current; buried pipeline; reinforced concrete; corrosion; distribution model