

ditie zasan dianliu fushi jiance ji fanghu jishu

地铁杂散电流腐蚀 监测及防护技术

李 威 著

中国矿业大学出版社

CHINA UNIVERSITY OF MINING AND TECHNOLOGY PRESS

地铁杂散电流腐蚀监测及防护技术

李 威 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书重点应用电路网络理论推导了杂散电流分布的理论模型,利用计算机仿真分析总结了地铁杂散电流的分布规律;提出了能够反映杂散电流腐蚀特性的有关参数的监测方法和实现手段;针对现有的杂散电流防护手段中极性排流方法的副作用和使用单向导通装置产生电弧的问题,提出了应用模糊控制的方法计算排流量并进行自动调节控制;研究分析了单向导通装置产生电弧的原因,设计了带消弧功能的单向导通装置;建立了基于人工神经网络的地铁杂散电流腐蚀的预测模型。

本书可作为研究生的教材,也可作为从事地铁杂散电流腐蚀研究、设计人员和有关技术人员的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

地铁杂散电流腐蚀监测及防护技术/李威著. —徐州:

中国矿业大学出版社, 2004. 10

ISBN 7 - 81070 - 968 - 2

I. 地… II. 李… III. ①地下铁道—杂散电流腐蚀—研究②地下铁道—杂散电流—监测 IV. U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 093170 号

书 名 地铁杂散电流腐蚀监测及防护技术

著 者 李 威

责任编辑 何 戈

责任校对 杜锦芝

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 江苏徐州新华印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×960 1/16 印张 12 字数 260 千字

版次印次 2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月第 1 次印刷

定 价 25.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

地铁的机车通常都是电牵引机车,供电系统一般为直流牵引供电。变电所通过接触网或导电轨向列车供电,列车的轮轨与轨道接触,牵引电流通过轨道返回变电所。由于钢轨对地面的绝缘不是无穷大,一部分回流电流流入大地而形成杂散电流。杂散电流对城市轨道交通机车的安全运行的危害极大,对地下的金属结构造成严重的腐蚀,可导致某些设备无法正常工作,甚至危及人身安全。

在地铁设计、建设和运营过程中,必须要考虑杂散电流腐蚀的监测和防护。由于杂散电流分布复杂,目前监测和防护的措施存在腐蚀参数监测困难、腐蚀情况的判定依据不明、防护的手段和设备存在一定的不足等问题,给地铁杂散电流腐蚀的防治工作带来了一定的困难。由于我国地铁建设起步较晚,在此方面研究较少,因此,深入开展地铁杂散电流腐蚀监测和防护方面的研究工作尤为重要。本书是在国内外专家、学者和工程技术人员有关研究工作的基础上,结合作者的研究成果写作而成的,以期对地铁杂散电流腐蚀监测和防护技术的进一步发展起到促进作用。

本书第1章论述了目前地铁杂散电流监测和防护的意义、存在的问题及本书的主要研究内容;第2章讨论了地铁杂散电流分布的解析公式,并使用计算机仿真的方法分析了杂散电流分布的规律;第3章对地铁杂散电流腐蚀的本质、规律以及对地铁金属结构的腐蚀危害进行了分析;第4章论述了地铁杂散电流腐蚀监测参数的选择、监测系统的实现,提出了在线监测地铁轨地过渡电阻和轨道纵向电阻的方法,并进行了理论分析和实验研究,同时对铜/硫酸铜参比电极在地铁杂散电流腐蚀监测方面的应用进行了实验研究分析;第5章系统地论述了地铁杂散电流腐蚀的防护方法和存在的问题,建立了应用模糊控

制方法计算排流量并进行自动调节控制的排流系统,研究分析了单向导通装置产生电弧的原因,设计了带消弧功能的单向导通装置;第6章应用人工神经网络对地铁杂散电流腐蚀进行预测,提出了使用BP网络模型进行地铁轨地过渡电阻和轨道纵向电阻的预测模型和地铁杂散电流腐蚀可能性的预测模型,其研究成果已经应用于实际地铁系统,并取得了满意的效果。

作者在写作过程中参阅了大量的有关文献,在此向这些文献的作者一并致谢。本书的研究工作和实验工作得到了广州地铁公司的有关领导和技术人员的大力支持,在此表示感谢。

由于作者的水平有限,书中错误或不妥之处在所难免,恳切希望各位读者批评指正。

作 者

2004 年 8 月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 地铁杂散电流腐蚀监测和防护的意义	1
1.2 地铁杂散电流腐蚀监测和防护的现状	3
1.2.1 地铁杂散电流腐蚀防护标准	3
1.2.2 地铁杂散电流的分布及其腐蚀机理和危害	4
1.2.3 地铁杂散电流腐蚀的监测及判定依据	5
1.2.4 地铁杂散电流腐蚀的防护手段	5
1.3 目前存在的问题	6
1.4 本书的主要研究内容	7
第2章 地铁杂散电流分布及其计算机仿真	8
2.1 地铁直流供电系统及其杂散电流的形成	8
2.2 地铁系统杂散电流分布的数学模型推导	10
2.2.1 轨道—大地电阻结构的杂散电流分布	10
2.2.2 轨道—埋地金属—大地电阻结构的杂散电流分布	13
2.2.3 轨道—排流网—埋地金属—大地电阻结构的杂散电流分布	15
2.3 地铁系统杂散电流分布的计算机仿真	23
2.3.1 轨道—大地电阻结构的杂散电流分布情况	23
2.3.2 轨道—埋地金属—大地电阻结构的杂散电流分布情况	29
2.3.3 轨道—排流网—埋地金属—大地电阻结构的杂散电流分布情况	36
2.3.4 杂散电流分布的一般形式	44
2.4 本章小结	48
第3章 地铁杂散电流腐蚀机理	49
3.1 电化学腐蚀基本原理	49
3.1.1 腐蚀的定义和分类	49
3.1.2 电化学腐蚀现象	51

3.1.3	金属电化学腐蚀倾向的判断	54
3.2	地铁金属结构杂散电流腐蚀基本原理	58
3.3	地铁金属结构杂散电流腐蚀的影响因素	60
3.3.1	电解法则	60
3.3.2	电蚀系数	61
3.3.3	杂散电流腐蚀环境因素	61
3.4	地铁杂散电流腐蚀的危害	62
3.4.1	钢轨及其附件的腐蚀	62
3.4.2	钢筋混凝土金属结构物的腐蚀	62
3.4.3	埋地管线的腐蚀	63
3.4.4	异常腐蚀	63
3.5	地铁金属结构电腐蚀危险性指标及判定依据	63
3.6	本章小结	64
第4章	地铁杂散电流腐蚀监测	65
4.1	埋地金属结构物电化学腐蚀的检测方法	65
4.1.1	土壤中金属结构电化学腐蚀的检测方法	65
4.1.2	混凝土中金属结构电化学腐蚀的检测方法	70
4.2	地铁系统中杂散电流腐蚀检测方法	72
4.2.1	埋地金属结构对地电位和轨道电位的检测	73
4.2.2	轨地过渡电阻及轨道纵向电阻在线测量方法	78
4.2.3	应用于地铁杂散电流腐蚀测量的硫酸铜电极实验分析	89
4.3	常用的杂散电流腐蚀监测系统	95
4.3.1	集中式监测系统	95
4.3.2	大容量数据存储监测系统	97
4.3.3	杂散电流自动在线监测系统	99
4.4	本章小结	101
第5章	地铁杂散电流腐蚀防护	103
5.1	防止杂散电流腐蚀的常规方法	103
5.1.1	地下设施防止杂散电流腐蚀的措施	103
5.1.2	地铁线路防止杂散电流腐蚀的措施	107
5.2	排流法防止杂散电流腐蚀	117
5.2.1	排流法存在的问题	117

5.2.2	新型智能排流系统的实现	122
5.2.3	排流量模糊控制器的设计	125
5.3	地铁特殊地段防止杂散电流腐蚀	134
5.3.1	单向导通装置防止杂散电流腐蚀的作用及存在 的问题	134
5.3.2	单向导通装置的设计	136
5.3.3	使用单向导通装置产生电弧的理论分析及试验验证	137
5.3.4	具有消弧功能的单向导通装置的实现	148
5.4	地铁防止杂散电流腐蚀的新方法	151
5.5	本章小结	154
第 6 章	地铁杂散电流腐蚀预测	156
6.1	神经网络基本原理	156
6.1.1	人工神经元模型	156
6.1.2	网络结构及工作方式	158
6.1.3	神经网络的学习方法	159
6.2	神经网络 BP 模型预测轨地过渡电阻和轨道纵向电阻	164
6.2.1	输入参数的选择	165
6.2.2	隐含层神经元数目及网络结构	166
6.2.3	网络训练	166
6.2.4	网络预测	168
6.2.5	预测误差	168
6.3	使用 BP 模型预测地铁杂散电流腐蚀危险性等级	169
6.3.1	网络结构及学习样本	169
6.3.2	网络训练	172
6.3.3	网络预测	173
6.3.4	预测结果分析	175
6.4	本章小结	175
	参考文献	177

第1章 绪 论

1.1 地铁杂散电流腐蚀监测和防护的意义

随着科学技术和城市化的发展,大运量的轨道交通在现代化大城市中起着越来越重要的作用。经济发达国家城市交通的发展历史告诉我们,只有采用大容量的地铁和轨道交通系统,才能从根本上改善城市公共交通状况。1863年,世界上第一条用蒸汽机车牵引的地下铁道在英国伦敦建成通车,至今已有140多年的历史。1879年电力驱动机车的研究成功,使地下客运环境和服务条件得到了空前的改善,地铁建设显示出强大的生命力。从此以后,世界上一些著名的大都市相继建造地下铁道。目前,在世界127个大、中城市内,已经拥有5 263.9 km地铁线路,城市轨道交通——地铁和轻轨,已经成为各国经济发展和改善人民生活的一个不可分割的部分。

由于历史原因,我国城市轨道交通起步较晚。尽管我国百万人以上的大城市已有30多个,但到目前为止,仅在京、沪、津及广州四城市有地铁线路在运营,而且不能较为普遍地满足需要。鉴于城市轨道交通在缓解城市交通矛盾中起到的作用越来越受到重视,所以,未来几年内,全国将有超过20个城市计划修建20条以上的地铁及城市轨道交通线路,总里程达到850 km。我国目前已批准深圳、南京、武汉、重庆、长春、成都、青岛、大连以及哈尔滨等城市启动各自的地铁与轻轨工程项目。届时,这些城市将成为继北京、上海、天津、广州之后,拥有自己的地铁与轻轨线路的城市。在第十个五年计划中,国家至少投入2 000亿元用于地铁项目建设。北京的地铁里程将从目前的55 km延伸到408 km;上海将从现在的65 km延伸到780 km;天津将从26.69 km延伸到72.195 km;广州将从18.5 km延伸到129.4 km。

由于我国城市轨道交通的应用技术和基础理论都还处于开拓阶段,项目实施时大多数情况下都要引进技术和设备,国产化率低,这已成为工程造价昂贵的主要原因。因而提高我国城市轨道交通行业的技术力量,发挥自主建设能力,努力降低工程造价,已成为健康发展大运量轨道交通的关键。

目前地铁和轻轨的牵引方式采用电力牵引,轨道交通的电力牵引系统有运输能力大、牵引性能好、经济效益好、需要司机人数少、司机工作条件好、车辆准

备时间少、运行效率高、不污染环境和不受寒冷气候影响等优点。目前电力牵引大多采用直流供电,其电压分别为直流 600 V、750 V、1 500 V 和 3 000 V(标称值)。列车所需电流由牵引变电所提供,通过接触网(架空线或接触轨)向列车送电,并通过走行轨作为牵引电流回路,返回到牵引变电所。由于钢轨很难做到完全对地绝缘,所以在直流牵引供电系统中,牵引电流并非全部由钢轨流回牵引变电所,而是有一部分由钢轨杂散流入大地,再由大地流回钢轨并返回牵引变电所。走行钢轨中的牵引电流越大或钢轨对地面的绝缘程度越差,地下杂散电流也就相应越大,这种地下杂散电流又称为地下迷流。

走行轨铺设在轨枕、道渣和大地上,由于轨枕等的绝缘不良和大地的导电性,地下杂散电流杂散流入大地,并在某些地方重新流回钢轨和牵引变电所。如果在走行轨附近埋有地下管道、电缆和任何其他金属结构件时,一部分地下杂散电流就会从导电的金属件上流过。在列车附近的杂散电流从钢轨流向金属体,使金属体对地电位形成阴极区。在变电所附近,杂散电流从金属体流回钢轨和变电所,使金属体对地电位形成阳极区。在阳极区,杂散电流从金属体流出的地方将出现电解现象,这种电解现象使金属物体温度升高,加速了金属物体的腐蚀。在长期的电腐蚀作用下,地下金属物体(如管道、电缆等)将受到严重的损坏。若地下杂散电流流入电气接地装置,又将引起过高的接地电位,导致某些设备无法正常工作。同时杂散电流过大时将产生对地电压,严重时可危及人身安全。从以上分析可知,地下杂散电流及其影响是直流牵引供电系统中必须高度重视的问题。

防止杂散电流腐蚀及其他危害的措施主要是减少杂散电流的泄漏,一般采取增加绝缘和加强排流的手段。在地铁建成并投入运营的初期,各项防护措施良好,泄漏的杂散电流很小,不会造成严重的腐蚀。随着地铁运营时间的推移,由于受到不可避免的污染、潮湿、渗水、漏水和高地应力作用等因素的影响,先期的防护措施失效,势必增大泄漏的杂散电流,造成较为严重的杂散电流腐蚀。在我国早期建成的地铁(北京地铁、天津地铁)中,杂散电流已造成主体结构发生严重腐蚀、隧道内水管腐蚀穿孔等现象。由于地铁是一种复杂的地下工程,其结构在施工完成后已定型,经若干年运营后,要对主体结构因杂散电流的腐蚀而进行更换和翻新是十分困难的。所以在地铁正常运行时加强监测和有效判断杂散电流的腐蚀状况是非常必要的,在有杂散电流腐蚀趋势发生时,应该采取积极有效的防治方法进行防护,以避免造成灾难性的后果。

我国目前正在掀起建设地铁的高潮,在地铁的设计、建设和正常运营过程中,杂散电流的防护和监测问题是必须考虑的,而且在这方面都投入了巨额的资金。目前所采用的标准和相应的手段,存在着一些机理不清、判断依据不明确、监测手段落后、防护措施不得当等缺陷。而我国实际上在地铁杂散电流腐蚀方面的

研究比较少,缺乏理论指导和应用经验。若能够全面分析杂散电流分布的机理,建立新的分析模型,把先进的微电子技术、计算机技术、通讯技术引用到杂散电流腐蚀监测上来,并设计先进的、行之有效的杂散电流腐蚀防护设备,对减少地铁建设投资、减少运营成本、减少地铁杂散电流腐蚀的危害将会有积极意义。

1.2 地铁杂散电流腐蚀监测和防护的现状

自从有直流电力牵引的地铁系统诞生以来,杂散电流腐蚀及其防护在发达国家一直受到较高程度的重视,美国、德国、日本和苏联在此课题上都投入了巨大的人力和财力,取得了丰硕的成果,所取得的成果已经成功应用于实际地铁系统,而且到目前为止,还在不断地研究新的防护方法和防护手段。我国在20世纪90年代以前,只有北京地铁和天津地铁的一小段在投入运行,有关地铁杂散电流腐蚀和防护的研究很少。为了证明地铁里杂散电流的情况,1979年北京地铁科研所进行了大规模的测量调查,测量结果表明北京地铁确实存在杂散电流,从而引起了各方面的广泛关注。北京地铁公司当时以科研所为主,立即研究分析了国外地铁防治杂散电流的理论和经验,并结合北京地铁的实际情况,制定了一套整治措施。以下就有关地铁杂散电流腐蚀防护标准、地铁杂散电流的分布及腐蚀机理、地铁杂散电流监测及判定依据、地铁杂散电流腐蚀防护等方面的国内外研究现状进行介绍。

1.2.1 地铁杂散电流腐蚀防护标准

目前国际上通常采用VDE0115国际标准和德国VDV501/2标准,适用于采用直流电力牵引和走行轨回流方式的地铁系统的设计、施工和运行维护等各个环节。其中包括:

- (1) 地铁直流牵引供电系统中与限制和减少杂散电流值有关的措施;
- (2) 地铁系统中可能受到杂散电流腐蚀或影响其外泄的结构与设备;
- (3) 地铁系统中的防锈措施。

这两个标准从制订之初到目前为止,经过了不断的补充和完善,目前已被大多数国家所采用。我国制订相应的标准比较晚。由于对地铁杂散电流的限制及电腐蚀防护牵涉到地铁的供电、建筑结构、工务、信号等专业,关系到地铁的设计、建设施工和运行管理各个方面,因此,为了协调各有关专业和有关方面的工作,制订一个这方面的专业标准以便使相应的工作有章可循并提高其标准化水平是十分必要的。根据原城乡建设环境保护部的要求,以北京市地下铁道科研所为主制订了《地铁杂散电流腐蚀防护技术规程》,并被批准为行业标准,编号是

CJJ 49—92。这个标准对此后我国城市轨道交通建设起到了重要作用。随着我国地铁建设的发展,我国新的地铁建设都援用这个标准。上海地铁、广州地铁、深圳地铁和武汉轻轨的杂散电流防护措施,基本上都采用以上几个标准进行设计。

1992年颁布的《地铁杂散电流腐蚀防护技术规程》作为我国地铁杂散电流腐蚀防护专业的第一个行业标准,一个时期内在我国地铁工程建设与运行中发挥了十分重要的作用。但是,当时我国地铁刚起步不久,没有像国外类似标准那样做严格规定,有些项目采取了缓解一下的方式,可根据具体情况灵活掌握。10多年来,国内外地铁和城市轨道交通已有很大的发展和变化,而且地面电气铁道与地铁又有某些不同之处,因此在我国很多城市正在建设和发展城市轨道交通的时候,对原《地铁杂散电流腐蚀防护技术规程》进行修订是十分必要的。

1.2.2 地铁杂散电流的分布及其腐蚀机理和危害

在杂散电流的分布模型的推导过程中,杂散电流的大小一般仅能由极端简化的假定来估算,计算的目的是为了宏观定性地对泄漏电流有个基本的了解,用公式指出减少泄漏电流的条件或手段,在理论上给处理杂散电流腐蚀问题以指导。国内外研究人员按照不同的限定条件,推导出不同的解析公式。在给定的理想条件下,利用解析法确定轨道的电位和电流分布的解析公式,然后根据求得(看成是给定)轨道电位与电流分布,同样得出钢轨纵向电阻和钢轨对地电阻是影响杂散电流分布的最重要的因素。根据地铁列车运行以及走行轨、排流网、主体结构钢筋和各过渡电阻的组成情况,可形成用于走行轨和排流网电位分布的计算以及杂散电流分析的等效电阻网络,直接的解析公式是很难得到的,往往采用不同的数字仿真模型来进行仿真运算。

经过研究,地铁杂散电流对埋地金属管线和混凝土主体结构中钢筋的腐蚀在本质上是电化学腐蚀,而且这种腐蚀属于局部腐蚀。钢筋混凝土结构中,直流电场引起的杂散电流是离子流,杂散电流腐蚀的机理是钢筋钝化膜的破坏。实际上钢筋的腐蚀速率还应当与周围电解质导电性能和电阻率有关,对钢筋混凝土中的钢筋而言,其发生电化学腐蚀的电化学当量还与混凝土的水灰比 W/C 有很大的关系。在稳定电压时,流经地铁主体结构中的杂散电流不是一个定值,而是随时间发生变化的,因此在自然腐蚀状态下的电化学当量并不适用于地铁杂散电流的腐蚀情况。

杂散电流造成腐蚀的危害是巨大的。杂散电流会引起钢轨及其附件、钢筋混凝土结构物、埋地管线的异常腐蚀,如不采取有效的防治措施,会造成不可估量的损失。

1.2.3 地铁杂散电流腐蚀的监测及判定依据

地铁杂散电流难以直接测量,一般都采用间接的办法来反映杂散电流的腐蚀情况。腐蚀防护标准给出了需要监测的杂散电流腐蚀的各项参数和监测方法,并制订了判定依据。地铁结构与设备受杂散电流腐蚀的危险性指标,是由结构表面向周围电解质的电流密度和由此引起的电位极化偏移来确定的。而电流密度难以直接测量,只有通过测量极化电位来判断。地铁杂散电流腐蚀主要监测的参数有轨道电位、埋地金属结构的极化电位、轨地过渡电阻和轨道纵向电阻等。就给出的监测手段和监测方法来看,都需要人工参与,缺乏自动在线测量功能,这给地铁运营的运行维护带来了困难。国外对杂散电流腐蚀的日常维护管理非常重视,德国柏林交通公司的做法是:成立专业检查测量部门,共配备25人,其中专业工程师1人,长年累月、周而复始地监察、检查庞大复杂的有轨交通网络的杂散电流防护情况,把杂散电流的危害性控制在VDE0150标准规定的范围之内。而就我国地铁的运行情况来看,由于测量工作比较麻烦,许多工作基本上没做。有些标准上规定要进行测量的参数,而实际上用常规的办法是无法测量的。例如,轨道的纵向电阻,已铺设的轨道是不可能直接测量其电阻的,即使交通停止时,也没有一条完全隔离的轨道。对于测量埋地金属结构的极化电位时所用的参比电极,目前地铁一般使用长效 Cu/CuSO_4 参比电极,此电极在土壤环境下使用已经比较成熟,而在混凝土环境的使用过程中存在什么问题,有待于进一步探讨。在杂散电流的自动在线监测方面,国外已经研究出了长线管道受杂散电流腐蚀的监测方法,使用了大存储量的数据采集装置,利用计算机进行数据采集和数据分析。

总之,研究新的监测方法和在线监测系统,提出合理的判断依据,是地铁杂散电流腐蚀监测发展的要求和趋势。

1.2.4 地铁杂散电流腐蚀的防护手段

从原理上讲,消除泄漏电流即可防止杂散电流腐蚀,但这在实际上几乎是不可能的。因此在实践中,一方面要尽可能减少泄漏电流,即从“源头”上消除杂散电流的影响;另一方面要对各种设施和金属结构物分别采取相应的防护措施。从理论上讲,减少泄漏电流的途径有:减小轨道的纵向电阻,增大轨地过渡电阻。通过增大钢轨横截面积和缩短负载与变电站间的距离(即减小变电站的间距)即可达到减小轨道纵向电阻的目的。美国波特兰轻轨系统采取的办法是使用规格为 54 kg/m 的工字钢轨,从而增大了其横截面积,而且使用了连续焊接的钢轨,从根本上消除了钢轨接头引起的纵向电阻,变电所之间的平均距离减少到 1.8

km,这是现代轻轨系统中最短的距离。增大轨地过渡电阻就要提高钢轨对地的绝缘水平。国外的其他地铁、轻轨系统往往采用同样的方法减少杂散电流腐蚀。

排流法在国外取得了成功应用,但使用排流法也可能带来副作用,会对没有采取排流措施的金属结构造成干扰。在我国目前地铁建设过程中,就是否增加排流装置产生了争论。因此非常有必要综合研究新的排流装置,减少杂散电流对金属结构的腐蚀,同时消除其副作用。目前广泛采用的是杂散电流分区域防护,而分区域防护必然在绝缘结上使用单向导通装置,在使用单向导通装置的地铁线路上观察,在绝缘结处就存在产生电弧烧损轨道的问题,这对地铁的安全运营是不利的,应该采取有效的措施来解决这一问题。

1.3 目前存在的问题

地铁杂散电流腐蚀的防护和监测,是地铁设计、建设、运营维护中必须考虑的问题。而地铁杂散电流的腐蚀是一个长期累积的结果,短期内无法体现,这也给研究工作带来一定难度。因此,一项新的技术的应用效果,只能局部考核,最终的效果若干年后才能表现出来。目前在地铁杂散电流腐蚀监测和防护方面主要存在以下问题:

① 杂散电流分布的精确模型很难确定,杂散电流难以直接准确测量,根据所监测的参数,很难预测出金属结构在杂散电流作用下的腐蚀程度和腐蚀趋势;

② 目前广泛使用整体道床排流网进行杂散电流的排流,其杂散电流的分布情况、排流机理、排流网的合理分布等都需要进一步研究;

③ 地铁系统中缺少合理的地铁杂散电流腐蚀自动在线监测系统,因此无法自动监测地铁杂散电流的腐蚀情况,不能为运行维护人员提供维护依据;

④ 影响地铁杂散电流分布的重要参数——地铁轨地电阻和轨道纵向电阻,缺乏有效的在线测量方法和实现手段;

⑤ Cu/CuSO_4 参比电极在地铁混凝土结构中使用,其使用方法、判定标准有待于进一步研究;

⑥ 如何有效地配置和设计排流装置,使其既能尽量减少副作用,又能最大限度地减少杂散电流腐蚀;

⑦ 在地铁正线上使用单向导通装置后,能否减少特殊区段的杂散电流;地铁正线使用单向导通装置是绝缘结处产生电弧的原因,如何设计具有消弧功能的单向导通装置;

⑧ 如何在地铁供电系统设计和回流方式上进行研究,采取积极主动的防护措施来消除杂散电流的产生,并在工程实践中应用。

1.4 本书的主要研究内容

综合考虑目前地铁杂散电流腐蚀防护和监测的现状及存在的问题,结合我们已在这方面所做的工作和实际条件,本书的主要研究内容有以下几个部分:

① 理论推导具有排流网的地铁杂散电流分布的数学模型,给出数字算法用于仿真计算,并实验确定 Cu/CuSO_4 参比电极在地铁混凝土结构中使用的规律,以及在检测杂散电流分布时的特性;

② 研究在线测量地铁轨地电阻和轨道纵向电阻的方法,并形成地铁杂散电流自动在线监测系统;

③ 综合分析排流法防止杂散电流腐蚀的机理,使用排流法带来副作用的原因,设计新型智能排流装置,使排流装置与杂散电流监测系统融为一体,并设计出模糊控制算法来控制排流装置的排流;

④ 理论和试验分析地铁绝缘结使用单向导通装置产生电弧的原因,研制具有消弧功能的单向导通装置;

⑤ 建立基于人工神经网络的杂散电流腐蚀的预测模型,分析地铁杂散电流腐蚀情况,解决目前存在的腐蚀判断依据不明确的问题。

第2章 地铁杂散电流分布及其计算机仿真

在直流牵引供电系统中,牵引电流并非全部由钢轨流回牵引变电所,而是有一部分由钢轨杂散流入大地,再由大地流回钢轨并回到牵引变电所。走行钢轨中的牵引电流越大或钢轨对地面绝缘程度越差,地下杂散电流也就越大,这种地下杂散电流又称为地下迷流。走行钢轨铺设在轨枕、道岔和大地上,由于轨枕等的绝缘不良和大地的导电性能,地下杂散电流杂散流入大地,并在某些地方重新流回钢轨和牵引变电所,在走行钢轨附近埋有地下金属管道、电缆和任何其他金属构件时,一部分地下杂散电流就由导电的金属体上流过。在电动列车附近的杂散电流从钢轨流向金属体,使金属体对地电位形成阴极区。在变电所附近,杂散电流从金属体流回钢轨和变电所,金属体对地电位形成阳极区。在阳极区,杂散电流从金属体流出的地方将出现电解现象,这种电解现象使金属物体温度升高,加速了金属物体的腐蚀。在长期的杂散电流腐蚀作用下,地下金属物体(如管道、电缆等)将受到严重的损坏。若地下杂散电流流入电气接地装置,又将引起过高的接地电位,导致某些设备无法正常工作。同时,杂散电流过大时将产生对地电压,严重时可危急人身安全。因此研究地铁杂散电流分布是地铁直流牵引供电系统中必须高度重视的大问题。

2.1 地铁直流供电系统及其杂散电流的形成

目前地铁和轻轨的牵引方式采用电力牵引,其供电系统大多采用直流供电,供电电压有直流 600 V、750 V、1 500 V 和 3 000 V(标称值)。图 2-1 所示为地铁牵引供电系统示意图。

其各部分的名称及功能简述如下。

- ① 牵引变电所:供给地铁一定区段内牵引电能的变电所。
- ② 接触网(架空线或接触轨):经过电动列车的受电器向电动列车供给电能的导电网。其中:北京、天津地铁采用接触轨;上海、广州地铁采用架空接触网。
- ③ 回流线:用以供牵引电流返回牵引变电所的导线。
- ④ 馈电线:从牵引变电所向接触网输送牵引电能的导线。
- ⑤ 电分段:为便于检修和缩小事故范围,将接触网分成若干段称为电分段。
- ⑥ 轨道电路:利用走行轨作为牵引电流回流的电路。

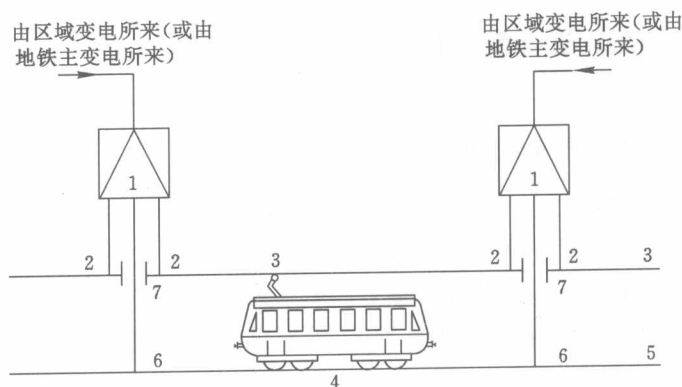


图 2-1 地铁供电系统示意图

1——牵引变电所；2——馈电线；3——接触网；4——电动机车；
5——钢轨；6——回流线；7——电分段

列车所需电流由牵引变电所提供，通过接触网（架空线或接触轨）向列车送电，并通过走行轨作为牵引电流回路，返回到牵引变电所。由于钢轨很难做到完全对地绝缘，所以在直流牵引供电系统中，牵引电流并非全部由钢轨流回牵引变电所，而是有一部分由钢轨杂散流入大地，再由大地流回钢轨并返回牵引变电所，从而形成杂散电流。走行轨中的牵引电流越大或钢轨对地面的绝缘性能越差，地下杂散电流也就越大。如图 2-2 所示， I_1 和 I_2 分别为一个供电区间两边变电所向列车的供电电流， I_3 和 I_4 分别为通过走行轨向两边变电所的回流电流， I_{Z1} 和 I_{Z2} 分别为泄漏到地下的杂散电流。

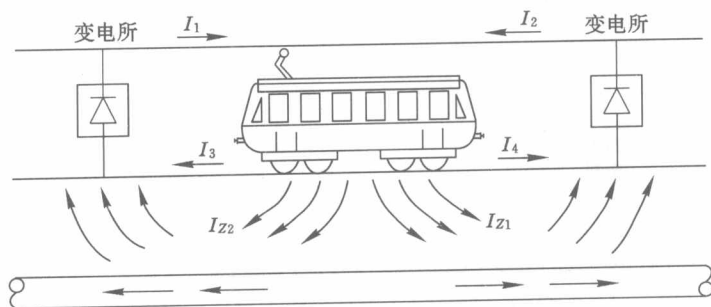


图 2-2 地铁杂散电流形成示意图