

轨道交通杂散电流腐蚀的监测及防护研究

蔡彬彬, 裴丽君, 赵晨

(南京地铁建设责任有限公司, 南京 210017)

摘要: 南京港华燃气公司发现马群区域天然气高压管道上有强烈干扰的杂散电流存在, 大大超过了行业规范《SY/T0017—2006 埋地钢质管道直流排流保护技术标准》规定, 该规定中提出当管道任意点的管地电位正向偏移均值大于 100 mV 时, 必须采取排流保护或其他防护措施, 结合常规技术杂散电流防护存在的不足, 提出了新型的监测及防护方法; 文章研究设计的方案采用了杂散电流补偿的方法, 避免杂散电流对天然气高压管道的杂波干扰, 通过设计出一套监测与防护系统, 在系统中加入与地铁供电电流大小相等、方向相反的补偿电流, 进而减小或抵消在特定区间内产生的杂散电流; 试验结果表明, 燃气管道中出现的极化电位大致处于 50 mV 附近, 极化电位平均值比起优化前的平均值下降约 75%, 由此, 设计的方法大大减少了杂散电流, 符合燃气管道相关标准, 大大提高了轨道交通的安全性。

关键词: 轨道交通; 杂散电流; 杂散电流补偿; 电流防护; 监测与防护

Monitoring and Protection of Stray Current Corrosion in Rail Transit

Cai Binbin, Pei Lijun, Zhao Chen

(Nanjing Metro Construction Co., Ltd., Nanjing 210017, China)

Abstract: Nanjing Ganghua Gas Company discovered that there are strong interference stray currents on the high-pressure pipeline of natural gas in the Maqun area, which greatly exceeds the industry standard “Technical Standard for DC Discharge Protection of Buried Steel Pipeline SY/T0017—2006”. It is proposed that when the mean value of the forward displacement of the ground potential at any point of the pipeline is greater than 100 mV, drainage protection or other protective measures must be taken. Aiming at the shortcomings of conventional technology stray current protection, a new monitoring and protection method is proposed. The scheme designed in this study adopts the method of stray current compensation to avoid the clutter of the stray current to the natural gas high-pressure pipeline. By designing a monitoring and protection system, the system is added with the same magnitude and opposite direction of the subway power supply. The compensation current, which in turn reduces or cancels the stray current generated in a particular interval. The test results show that the polarization potential that appears in the gas pipeline is approximately 50 mV, and the average value of the polarization potential is about 75%, which is lower than the average value before optimization. Therefore, the method designed in this paper greatly reduces the stray current, which meets the relevant standards of gas pipelines, and greatly improves the safety of rail transit.

Keywords: rail transit; stray current; stray current compensation; current protection; monitoring and protection

0 引言

目前, 地铁建设在当今社会发展中日益蓬勃, 在设计或者建设地铁时, 杂散电流的监测是目前各个项目考虑的重点。由于地铁的金属结构在自然环境中, 本身就on容易受到腐蚀, 这就给技术人员带来很大的困扰^[1-2]。地铁在运行过程中, 通常采用直流供电的方式供其运转, 如果列车的负荷量不停, 也会在走行轨上形成数值不等的工作电流。还有一种情况, 走行轨上的一部分电流还能够通过走行轨, 与电源的负极构成电路闭环, 进而使得部分电流回流到电源负极, 另一部分电流经由轨道, 能够接触到地面绝缘不良的位置处。这对周围的地铁道床、非介质或者四周的土壤造成电流污染, 形成杂散电流^[3-5]。该现象对地铁的运行

很容易造成事故^[6-7]。尤其是在采用直流供电的大型运输设备中, 比如地铁、轻轨等, 这种情况尤为严重, 由于杂散电流的存在, 很容易对地铁的关键部件造成损害^[8-9], 严重时将危及地铁或者其周围建筑设施的安全, 继而将酿成无法挽回的交通事故。

因此, 在确保地铁建设、地铁运营能否正常运行时, 如何防护杂散电流就是有待研究的关键技术问题。常规技术中采用被动“堵截”和“疏导”^[10-12]的方式, 但是地铁走行轨上泄漏的杂散电流具有诸多不容易防护的特点, 比如杂散电流样式繁多、分散性强、防护困难, 难以预测等。针对上述问题, 本文提出了电能补偿的方法来解决杂散电流, 以克服上述问题, 下文将详细描述。

1 监测及防护系统设计

由于在常规应用中, 杂散电流分布不集中, 因此, 利用计算模型直接、精确地测量杂散电流也将变得困难重重。单纯地利用现有技术中所监测到的各项技术参数, 精确地

收稿日期: 2020-03-09; 修回日期: 2020-03-25。

基金项目: 南京市市级重大科技项目(897Y498389H03)。

作者简介: 蔡彬彬(1982-), 男, 南京人, 硕士, 高级工程师, 主要从事轨道交通供电系统方向的研究。

衡量、预测金属结构也不容易实现,尤其是杂散电流作用下,设备上所设置排流网的腐蚀程度和腐蚀趋势的衡量也将变得举步维艰^[13-14]。由于排流网为预埋基础建设工程,杂散电流对地铁的腐蚀地点不确定,腐蚀程度无法进行精确度量。在克服这些技术问题时,本研究根据杂散电流补偿原理,设计出一套新型的监测及防护系统。在补偿电路中生成的补偿电流与地铁供电电流相比,其数值相等,矢量相反,这样,在存在杂波的区域,能够将设备中产生的杂散电流抵消一部分,从而减少或者消除杂散电流,系统结构如图 1 所示。

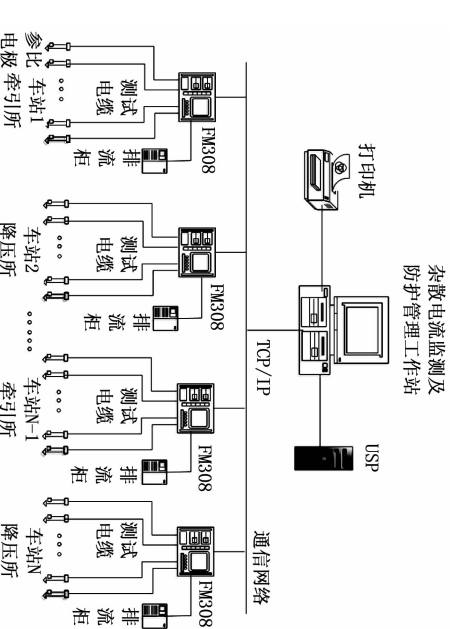


图 1 系统结构示意图

图 1 的系统在工作时,能够根据现场杂散电流的布局情况和漏电流浓度分布情况进行智能排流,排流的数据信息通过测试电缆发送到主站后台,用户通过到主站后台显示窗口能够清楚地观察到杂散电流的实时监测信息。系统监测的参数信息内容包括各种情况下的杂散电流,比如对直流牵引供电列车运行时泄露到道床上的杂散电流、隧道泄露的杂散电流及其周围土壤介质中的杂散电流等。该系统设计的杂散电流监测及防护系统适用范围比较广,比如城市轨道交通中的地铁、轻轨等直流牵引供电轨道线路^[15-16]。在本研究中,利用数据采集系统采集轨道交通在运行期间的状况,采集完该信息后,通过测试电缆将该信息与各个采集装置进行信息通讯,并且传递到应用服务的实时数据库内。其中主站后台中的数据采集与监视控制系统(SCADA, supervisory control and data acquisition)连接杂散电流监控系统,这样,杂散电流监控系统的信息可以实时传递到 SCADA 系统。采集系统还设置有不同形式的通讯接口,比如 TCP/IP、SPI、EPCALIE 协议、NetBIOS 协议、GSM 接口协议和 SAS 协议等。能够满足多种通讯的需要,兼容性较强。该接口还能够通过前置服务器对远方终端数据进行采集,并且通过通讯规约解释模块转换各种不同类型的规约数据,以使 SCADA 系统能够识别。前置服务器能够采用双机热备用方式,采用两台节点计算机互为备用。

其中的机型为 Sun (Oracle)、IBM、Intel 系列工作站或服务器^[17-18]。通过本技术方案设计,实现杂散电流信息的可靠采集和实时监控,下面对其关键技术进行研究。

1.1 开关电源设计

如图 2 所示,开关电源基本电路包含有交流一直流转换电路、开关型功率变换、控制电路、整流滤波电路等不同单元^[19-20]。通过交流一直流转换电路的转换,能够将输入端的电网电压转换为直流工作电流,通过交流一直流转换电路内的整流器,能够将输入的交流电流进行整流、滤波,以将不必要的杂散波进行整理,其内设置的滤波器将接收到的交流信号转换成直流信号,供电路中的各个部件使用。控制电路在电路中用于控制开关型功率变换器。

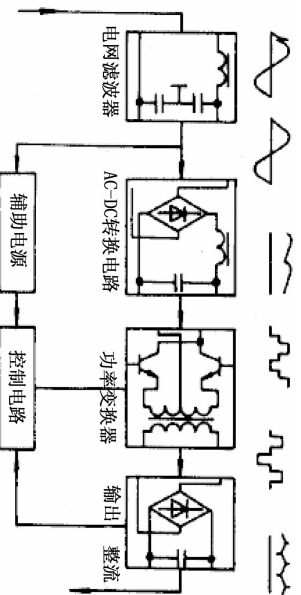


图 2 开关电源原理结构示意图

在本系统中,开关型功率变换器用于将主电路的能量转换为开关电源的能量,是转换开关电源能量关键部件,在具体应用中,通过电压变换来实现。电压变换可以使用很多种类,比如整流功率变换器、全桥式开关型功率变换器、逆变功率变换器、斩波功率变换器、交交功率变换器、半桥式开关型功率变换器、单端反激式开关型功率变换器(该变换器不仅电路简单,而且能够输出高效的直流电)、快速磁放大器式开关型功率变换器等。在具体应用中,功能不同,转换器类型的使用也不同。在控制方法上,采用脉冲宽度调制技术(PWM, pulse width modulation)和脉冲频率调制(PFM, pulse frequency modulation)两种^[21-22]。采用 PWM 技术,能够在整流的作用下,并且输出的直流电压值恒定的情况下,将半导体开关器件进行导通或者关断的方式,将输出的直流电压转换为电压脉冲序列,并对输出电压脉冲的宽度或者周期进行控制,使等效输出电压得以改变。

在开关型功率变换器中,其内的核心部件包含有开关电源变压器,该变压器的作用具有多种,比如:将电网中的磁能转换为电能,或者将电能转换为磁能等,将高电压转换为低电压或者将低电压转换为高电压等。在开关元件的作用下,将直流电有效、及时地转换成直流电。开关电源变压器工作后,又将电路中的电能转换为磁能,负载将接受该功率,通过负载最终输出电路中所需要的电压。

1.2 隔离与耦合技术设计

在实现杂散电流的隔离方面,本文采用光电耦合技术

完成, 该隔离技术的工作原理为借助于光电三极管的输出特性, 图 3 为其原理结构图和输出特性曲线图。图 3 在工作过程中, 需要对光电三极管两端施加电压, 当所施加的电压达到 U_{PM} 时, 这能通过通过光电三极管的输出特性看出, 光电接收管内的电流输出的最大值为 I_{PM} , 当施加在发光管两端的电压信号在某一段范围内变化时, 比如 U_0-U_{PS} , 则流过光电接收管中的电流值将会 $0 \sim I_{PM}$ 之间的范围波动。

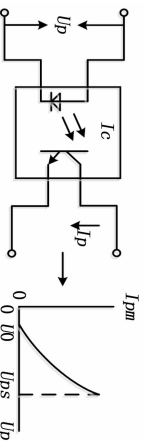


图 3 光电三极管内部结构和特性曲线示意图

基于上述讨论, 本研究能够在电源电路中将该隔离技术和耦合技术融合一起使用。融合电路如图 4 所示。该电路在工作时, 当升高输出的电压值时, 则光电耦合器中的发光二极管的电流能够相应地增加, 进而使得光强度输出值也会随之变化、增加, 最后使得晶体三极管的集电极端的输入电流也逐渐增加, 这样使得功率开关 V 基极的电流下降。该电路在工作过程中, 功率开关 V 的导通时间会更短, 输出的电压值也会降低, 进而输出较为稳定的电压值, 使电路的安全性得以提高^[23-24]。

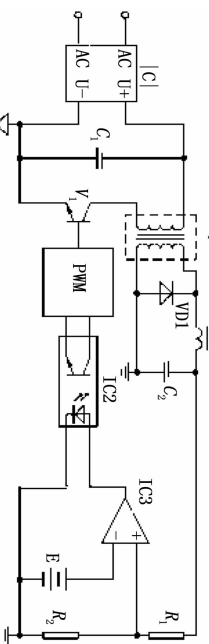


图 4 融入光电耦合器的开关电源电路

2 杂散电流腐蚀分析

2.1 杂散电流腐蚀原理

下面结合图 5 中的杂散电流腐蚀原理结构对杂散电流腐蚀原理进行说明。下面以地铁隧道为例, 在以混凝土结构为主要材料进行构建的地铁隧道中, 当地铁隧道附近的钢筋泄露出杂散电流时, 钢筋中的电势将从高电势移动到低电势, 该过程称为阳极极化过程。在以金属为载体发生氧化还原反应时, 通过电荷吸引游离出的金属电子, 进而将金属氧化。

在地铁交通中, 利用上述原理可以这样进行, 将走行轨或者金属管线作为反应中的电子导体使用, 将地面作为离子导体, 当走行轨或者金属管线中的电子电荷从图 5 中的 A 点和 D 点泄露流出时,

则组成、组建了氧化还原反应的条件, 此时, 金属导体和地面二者之间组成的 e^-i 界面可以作为氧化还原反应中的阳极使用。当走行轨或者金属管线中的电子电荷在图 5

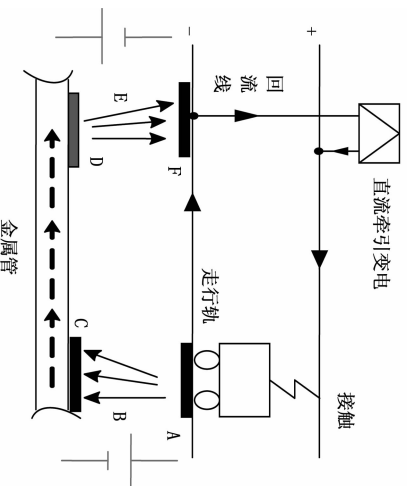


图 5 杂散电流腐蚀原理结构示意图

中的 C 点和 F 点流入时, 则将地面与金属导体二者之间组成的 $i-e$ 界面当作阴极使用。这样, 则将 A、B、C 和 D、E、F 构成两个不同的串联电解池来使用。通过上文描述, 氧化还原反应中的电流电荷流向通过以下流程进行:

第一电池: A 钢轨 (作为阳极区使用) \rightarrow B (地铁交通道床) \rightarrow C (地铁交通道床中的金属管线, 可以将其作为阴极区使用)。

第二电池: D (地铁交通道床中的金属管线, 将其作为阳极区使用) \rightarrow E (地铁交通道床中的金属管线, 可以将其作为阴极区使用) \rightarrow F (金属管线中的钢轨, 将其作为阴极区使用)。

在上述工作过程中, 当杂散电流通过两个阳极区域流出时, 氧化反应则会发生, 此时, 该部件的金属 (Fe) 将被腐蚀。

2.2 杂散电流泄漏路径分析

在发生杂散电流泄漏时, 其路径选择也是极其重要的, 下面对其路径进行分析。当电路中的绝缘部件两端之间的电势差值比消弧装置启动值后电势大时, 则正线的电流通过回流轨向车辆段流动, 这种方式能够大大减少地铁在运行时产生杂散电流泄漏, 特别是当正线电流流入车辆段引起的杂散电流中。在具体实施例中, 由于车辆段轨道流向正线轨道的电流由燃气管道的杂散电流引起的, 在这种情况下, 可以通过控制二极管的导通或者关闭来减少车辆段流向正线的电流引起的杂散电流泄漏。因此, 杂散电流路径初步分析为:

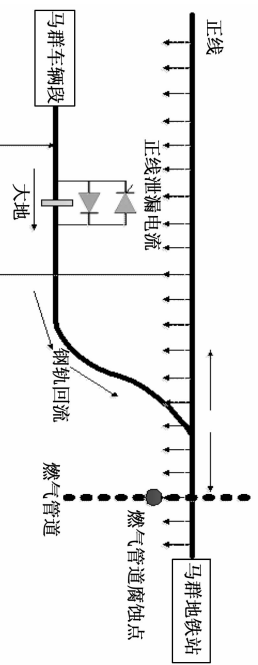


图 6 地铁杂散电流泄漏路径示意图

正线杂散电流—大地；

车辆—大地—车辆段轨道—正线轨道—地铁站牵引电源负载。

2.3 限制杂散电流泄漏优化方案

如何限制杂散电流的泄漏也是本文要研究的重点，当对区域范围内的杂散电流泄漏进行优化时，可以将二极管优化为晶闸管，通过晶闸管的通与断来控制车辆段到正线方向的持续导通。在晶闸管进行作用时，当无车辆进出时，则可将晶闸管处于断开状态，以在正向晶闸管方向上控制电路中电流的通路。通过这种方式，在一定程度上避免了地线杂散电流的泄漏。现有技术如图 7 所示，在现有技术的基础上，优化后的方案如图 8 所示。

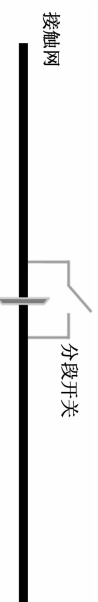


图 7 单向导通装置原方案示意图

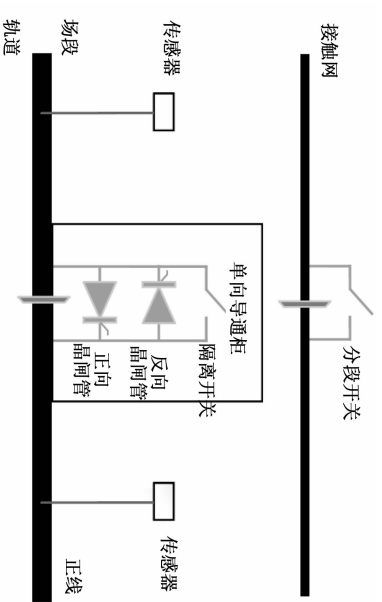


图 8 单向导通装置优化方案示意图

3 试验结果与分析

通过上述分析，下面对本文设计的技术方案进行如下分析，首先，建立试验结构架构图，如图 9 所示。在进行地铁站极化电位测量时，马群地铁站轨行区参比电极、排流网接线端子全部拉线至配电房采集器箱内端子。本次测量从采集器箱内端子接线至 DA—SU 采集器，然后再经由 DA—C341 杂散电流监测装置，对发送到 D6000 杂散电流监控系统的数据进行实时数据监控。

下面在不同的晶闸管导通阈值情况下进行试验分析。试验时，通过数据曲线来表示，在图 10 中，其为晶闸管导

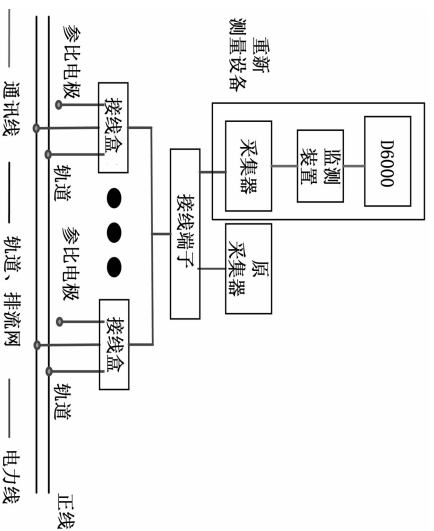


图 9 杂散电流腐蚀模拟试验示意图

通阈值为 12 V 时数据曲线图。在试验时，将原单导柜在一段时间范围内运行，为了提高测试评估的精度，将其在长时间时段内运行，并设置晶闸管导通阈值为 12 V 时，通过图 10 可以看出其运行曲线。

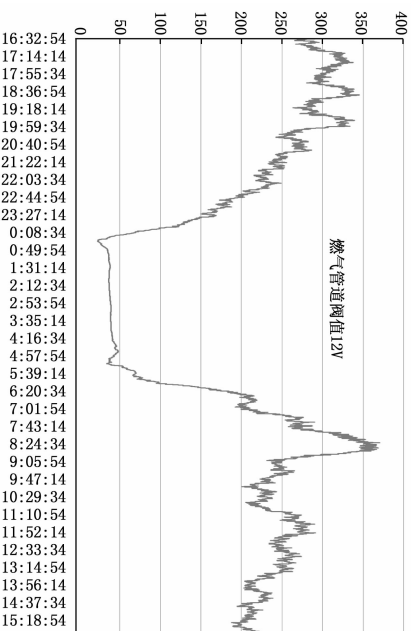


图 10 晶闸管导通阈值为 12 V 时数据曲线图

在进一步试验所设置的晶闸管导通阈值与杂散电流之间关系时，选择在不同的时间时段，设置不同的阈值进行对比分析。比如在晚上将晶闸管阈值为 70 V，次日 08:30 时，再将阈值更改为 12 V，通过这种方式，观察数据曲线图。

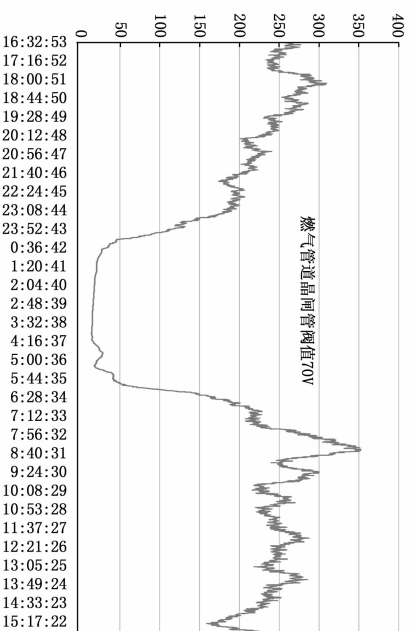


图 11 晶闸管导通阈值为 70 V 时数据曲线图

然后, 再将晶闸管关闭, 当单导柜晶闸管已经完全关闭时, 得出图 12 所示的曲线图。

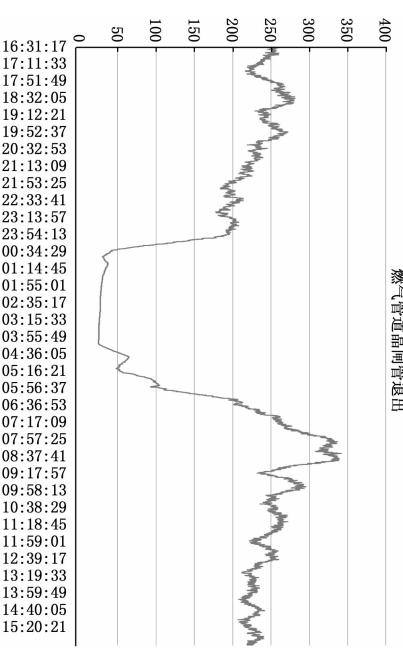


图 12 燃气管道极化电位正向偏移半小时平均值曲线

再次将单导柜上的接线断开一段时间, 比如晚上断开, 次日早上恢复。经过一段时间的通断, 得出图 13 所示的曲线图。

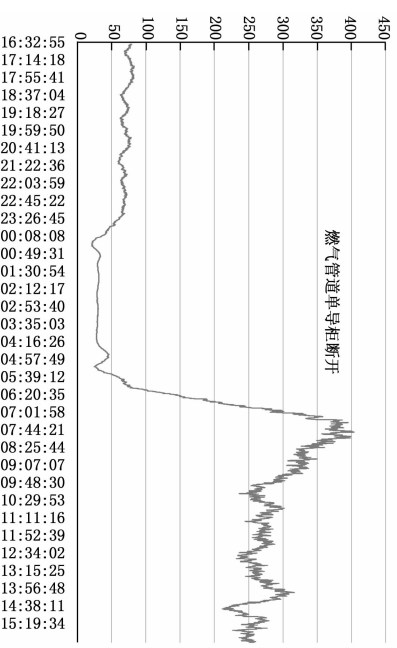


图 13 燃气管道极化电位正向偏移半小时平均值曲线

通过上述测量, 得出数据如表 1 所示。

表 1 极化电位测量数据统计表

方案	时间		正向偏移平均值	<100 mV 占比/%	100~200 mV 占比/%	16:00~23:00 mV >200 mV 占比/%
	16:00~23:00	16:00~23:00				
晶闸管阀值 12 V			273.80	42.23	11.54	46.23
晶闸管阀值 70 V			235.69	42.57	16.91	40.52
晶闸管退出			232.40	37.75	17.49	44.76
单导柜接线断开			71.29	68.76	26.92	4.32

通过上述各种情况下的分析比较, 在不同的工作状况下, 通过提高晶闸管的动作电压值, 能够有效地减小晶闸

管的导通频率。通过上述方式虽然减少了杂散电流, 但这种方式无法满足燃气管道标准要求, 比如《SY/T0017—2006 埋地钢管道直流排流保护技术标准》。因此, 在管道中, 其上的任意点管道电动势与自然电动势相比较, 在其正向偏移上的数量值小于 99 mV。在断开单导柜接线时, 通过上述表格可以看到, 杂散电流便有稍微明显的改变, 能够符合上述标准。

因此, 影响燃气管道杂散电流的主要因素就能够看的很清楚了。当前车辆段到正线方向区间, 在具体实施中, 其采用的是二极管, 在该二极管一直处于导通状态的情况下, 车辆段出现有持续性较大电流流向正线, 这在地铁运行时间内, 很有可能产生对于干扰因素, 比如对其他管道、燃气管道等。

通过本研究的技术方案进行优化设计, 燃气管道极化电位正向偏移半小时平均值曲线如图 14 所示。

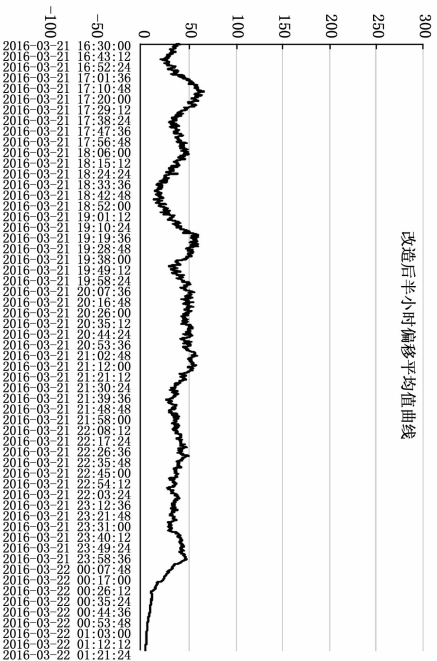


图 14 燃气管道极化电位正向偏移半小时平均值曲线

通过上述数据及相关图标表示, 采用优化后的设计方案后, 燃气管道中出现的极化电位大大地降低, 其数值大致处于 50 mV 附近, 此时, 极化电位平均值比起优化前的平均值将下降约 75%, 这将有效地降低地铁杂散电流对铁道道路中不同管道电动势的影响。

4 结束语

本研究通过设计出新型的监测及防护系统, 实现地铁、车辆段等电流泄露的监测。并将隔离与耦合技术融合在电源设计中, 实现杂散波的隔离与防护。本研究还对杂散电流腐蚀原理进行了说明, 结合该原理, 分析出杂散波的泄露路径, 并对限制杂散电流泄漏优化方案进行了设计。通过该试验, 借助于曲线图, 能够看出地铁杂散电流对铁道道路中不同管道电动势的影响。但是, 在实际工作中, 在单向通道装置中, 更具体的是, 在出入段线与车辆段分界处时, 在车辆段至正线方向上, 通常设置有二极管, 在正线至车辆段方向上, 通常设置有晶闸管。通过这种方式, 虽然在一定程度上能够减少正线对车辆段的影响, 但仍存

• 40 •

在杂散电流泄露的风险和隐患,因此,杂散电流腐蚀的监测技术仍旧是长期研究的课题,本研究为日后更深层次的研究奠定技术基础。

参考文献:

- [1] 马德良,方江敏,钱瑶虹.排流网情况下地铁杂散电流分布数值模拟研究[J].机电工程,2017(12):1465-1468.
 - [2] 覃慧敏,都业强,吕超,等.埋地管道动态直流杂散电流干扰评估及防护技术的研究现状[J].腐蚀与防护,2018,39(6):409-417,424.
 - [3] 陈耀,严显智,阮建平,等.油气管道地铁杂散电流直接排流技术应用[J].石油化工腐蚀与防护,2017(4):45-47.
 - [4] 高玉珍.轨道交通电流对天然气主干网的腐蚀影响及防护探究[J].上海煤气,2016(2):6-11,31.
 - [5] 徐颖,李代莉.轨道交通直流杂散电流给埋地钢管防腐系统带来的新风险[J].城市燃气,2016(3):12-17.
 - [6] 刘军.动态直流杂散电流干扰中极化试片电流测量[J].腐蚀与防护,2016(1):68-70,75.
 - [7] 柯甜甜,方江敏,钱瑶虹,等.地铁杂散电流对埋地金属管道阴极保护的影响[J].城市轨道交通研究,2017(3):90-93.
 - [8] 张超.强制排流器在消除埋地金属管道杂散电流干扰中的应用[J].石油库与加油站,2017(3):4-7.
 - [9] 韩非.馈电试验在地铁杂散电流干扰排流中的应用[J].腐蚀与防护,2015(11):1101-1103,1108.
 - [10] 周吉祥.城镇燃气管道直流杂散电流排流保护[J].煤气与热力,2015(4):38-42.
 - [11] 王祥辉,李威,许少毅,等.一种无热化高灵敏度的杂散电流光纤传感器[J].仪表技术与传感器,2017(8):1-5,10.
 - [12] 胡文平.地铁施工工地试验检测与工程质量探析[J].建筑工程技术与设计,2018(17):2263.
- (上接第 34 页)
- #### 参考文献:
- [1] 卢玉斌,程永生,孙远程,等.高 g 值加速度传感器校准数值模拟[J].太赫兹科学与电子信息学报,2014(5):761-766.
 - [2] 李婉蓉,范锦彪,王燕,等.基于小尺寸 Hopkinson 杆的动态校准系统[J].传感技术学报,2013(11):1617-1620.
 - [3] 王华军,王燕,李新娥.基于 Hopkinson 杆的高 g 值加速度传感器的动态特性分析[J].应用光学,2011,32(5):1049-1052.
 - [4] 许富景,祖静,尤文斌.高 g 值加速度传感器的动态建模与校正[J].计算机测量与控制,2014(1):314-316.
 - [5] 康凤霞.高 g 值加速度传感器的动态特性研究[D].太原:中北大学,2009.
 - [6] 胡红波,于梅. Hopkinson 杆冲击激励系统的原理与应用[J].计量技术,2011(2):36-38.

- [13] 袁靖乙.地铁盾构设备状态故障与检测[J].中国高新技术企业,2016(17):109-110.
- [14] 黄涛,吕红强,王维.基于多技术融合的地铁列车障碍物检测系统设计[J].制造业自动化,2016(8):59-60,69.
- [15] 李亚宁.兰州轨道交通 1 号线杂散电流实验研究[J].自动化与仪器仪表,2015(1):195-197.
- [16] 陈志光,秦朝葵,唐继旭.城市轨道交通动态杂散电流理论分析及计算[J].城市轨道交通研究,2014(3):24-29.
- [17] 周云祥,曹昉.基于数据挖掘的变电站监控后台告警信号自动分析[J].工业控制计算机,2017,30(4):121-122,125.
- [18] 蔡力,王建国,樊亚东,等.地铁走行轨对地过渡电阻杂散电流分布的影响[J].高压电技术,2015(11):3604-3610.
- [19] 庞丹,耿蒲龙,田慕琴,等.矿用橡套屏蔽电缆绝缘不平衡对杂散电流分布的影响[J].煤炭学报,2017,42(6):1614-1619.
- [20] 安娜,吴积钦,梁奎.直流牵引供电系统轨道电位影响因素的分析[J].电气化铁道,2014(4):21-24.
- [21] 韩晓慧,杜松怀,苏娟,等.触电信号暂态特征提取及故障类型识别方法[J].电网技术,2016,40(11):3591-3596.
- [22] 何涛,李培强,王璜,等.地铁牵引回流系统的钢轨电位和杂散电流仿真[J].福建工程学院学报,2017(4):386-392.
- [23] 贺红燕.基于大数据的智能电网关键技术研究[J].电源技术,2016,40(8):1713-1714.
- [24] Ogunnsola A, Mariscotti A, Sandrolini L. Estimation of stray current from a DC-electrified railway and impressed potential on a buried pipe [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 4(4): 2238-2246.
- [7] 潘龙丽,石云波,周智君,等. MEMS 高量程加速度传感器的动态特性分析[J].传感技术学报,2012,25(10):1392-1394.
- [8] 范锦彪,王燕,徐鹏,等.高 g 值加速度传感器的窄脉冲校准理论与方法[J].传感技术学报,2012,25(9):1242-1245.
- [9] 祖静,马铁华,裴东兴,等.新概念动态测试[M].北京:国防工业出版社,2016:98-100.
- [10] 张浩,王建林,赵利强,等.基于加窗插值 FFT 的加速度传感器信号处理方法[J].仪表技术与传感器,2016(2):12-14,17.
- [11] Link A, Taubner A, Wabinski W, et al. Calibration of accelerometers: determination of amplitude and phase response upon shock excitation [J]. Institute Physics Publishing, 2006, 17(7): 1888-1894.
- [12] 刘爱莉.压阻式高 g 值加速度传感器的动态特性研究[D].太原:中北大学,2013.