

第三轨受流地铁车辆牵引系统若干问题探讨

张佳波¹ 葛航奇² 马升潘³ 高 瀚¹ 张新宇¹ 邱 峰¹

(1. 中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266111, 青岛; 2. 青岛地铁集团有限公司运营分公司, 266031, 青岛;

3. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266111, 青岛//第一作者, 工程师)

摘 要 针对第三轨受流存在无电区的问题, 从车辆牵引系统角度进行了分析。深入分析了无电区的准确检测及控制方法的可靠性, 剖析了检修线上目前采用的几种受流方式的优缺点。阐述了蓄电池自牵引技术。介绍了洗车模式下车辆运行的控制方式。通过青岛地铁 11 号线的试验, 验证了所选方法的可行性。

关键词 地铁车辆; 第三轨受流; 牵引系统; 无电区

中图分类号 U463.91; U231.8

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.01.040

Discussion on Issues about Metro Vehicle Traction System with Third Rail Current Collection

ZHANG Jiabo, GE Hangqi, MA Shengpan, GAO Han, ZHANG Xinyu, DI Feng

Abstract The problem of no power area existing in third rail current collection is analyzed from the perspective of vehicle traction system. The reliability of accurate detection and control method of no power area is analyzed in depth. The advantages and disadvantages of several current collecting methods used on maintenance lines are compared and analyzed. The technology of battery self-traction is expounded. The control method of vehicle operation under car washing mode is described in detail. Through tests on Qingdao Metro Line 11, the feasibility of the selected method is verified.

Key words metro vehicle; third rail current collection; traction system; no power area

First-author's address CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266111, Qingdao, China

采用第三轨供电的地铁线路, 第三轨沿轨道两侧近地面架设, 出于安全考虑, 在折返线、车辆段内难免有无电区存在^[1]。车辆在牵引工况下通过无电区时, 牵引系统会短时失电, FC(支撑电容)电压跌落。当车辆所有集电靴失电时间较短时, 可能存在 FC 电压未跌落至欠压保护值以下、主接触器未断开的情况。此时若车辆刚好再进入有电区, 由于

第三轨网压与 FC 电压存在较大压差, 网压通过电抗器直接对支撑电容进行充电。当压差较大时, 轻则引起牵引系统过压、过流故障, 重则引起变电所跳闸、线路瘫痪, 且长时间直冲对支撑电容寿命也会造成一定影响。

如果检修线设有第三轨, 当车辆检修人员进行车下作业时, 第三轨会给检修人员带来一定的安全风险, 因此检修线内通常不架设第三轨^[2-3]。若不采用其他受流方式, 就只能依靠机车提供动力进行挪动, 移车效率极低。

在洗车库内的第三轨受流线路上可能存在第三轨分断区。洗车过程中车速较低, BLB(母线接触器)未闭合, 会存在部分牵引逆变器失电又得电的情况, 导致整车牵引力随之波动, 使得洗车模式下的恒速控制精度不足。

本文针对上述第三轨受流中存在的问题进行了深入探讨。在青岛地铁 11 号线上进行的试验验证, 验证了本文所选方法的可行性。

1 第三轨供电线路的无电区控制方式

1.1 无电区检测

因为没有提示信号, 无电区检测只能通过网压信息来识别。但网压在 1 000~1 900 V 之间均认为在正常供电范围, 因此不能简单通过网压低于某固定阈值的方法来检测无电区。然而进入无电区时, 由于负载消耗 FC 电容能量, 网压会存在一定的快速跌落。因此, 可以通过网压下降斜率来识别无电区, 无电区检测原理图如图 1 所示。

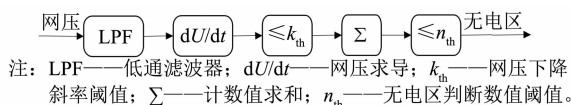


图 1 第三轨供电线路无电区检测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of no power area detection in the third rail power supply line

网压信号包含较大谐波,直接进行斜率计算会引起误判断,因此采集到的网压需进行滤波处理。对网压滤波值求导即为网压下降斜率 k 。为避免误判断,当 k 小于网压下降斜率阈值 k_{th} 时,对无电区判断计数值 n 进行连续累积计数,当累积计数值大于无电区判断设定计数值 n_{th} 时,认为检测到无电区。其中无电区判断计数值阈值随斜率改变,斜率绝对值大则阈值小,斜率绝对值小则阈值大,以确保在 FC 电压跌落到系统耐受临界值以上时正确识别无电区。

1.2 无电区控制及保护

无电区控制的主要目的在于防止车辆再次进入有电区时,因压差太大而引起故障。目前无电区控制方法有两种:一是识别到无电区后快速封锁变流器,在无负载消耗能量下,可将 FC 电压维持在系统可接受值以上;二是识别到无电区后迅速转换为微电制动模式,牵引电机制动能量与辅助负载消耗能量平衡,可将 FC 电压控制在目标值附近,此种控制方式与动车组过分相控制相类似。两种无电区控制方式电压波形示意图如图 2 所示。

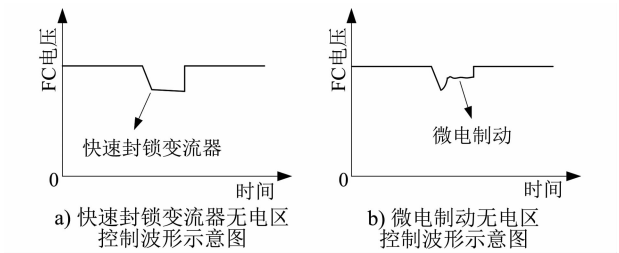


图 2 第三轨供电线路无电区控制电压波形示意图
Fig. 2 Diagram of control voltage waveform in no power area of third rail power supply line

无电区分为失电时间较长无电区(以下简称“长无电区”)和失电时间较短无电区(以下简称“短无电区”)。对于长无电区,可断开接触器。当再次检测到有电区时,再依次闭合接触器进行预充电;亦可进行微电制动,进入有电区后再退出微电制动模式。在无电区较多时,反复进行预充电,需对预充电电阻温度进行温度估算保护,防止温度过高而烧毁。微电制动方式虽可避免反复预充电,但该方式对车辆速度有要求,速度太低时制动功率小不足以维持电压,且车辆滑行距离缩短,一旦停到无电区中,车辆将无法移动。

对于短无电区,则来不及断开接触器,当检测到无电区后,快速封锁变流器,可将电压基本维持在封

锁变流器时刻的电压,当再次进入有电区时,因压差在可接受范围之内,造成的冲击则较小。此种方式牵引力阶跃到 0,车辆有一定冲动感。在车辆速度较高时,可采用微电制动方式,辅助设备不停机,空调及照明运行正常。但该方式在大牵引模式下,牵引力下降过程中,电压会被拉到检测到无电区时刻的电压以下。若无电区足够短,在转换到微电制动前再进入有电区,电流冲击则会增大。需注意的是,应将微电制动的网压控制值与线路正常网压值区分开,以避免无法识别车辆再次进入有电区。

2 检修线受流方式

2.1 第三轨加架空接触网供电方式

第三轨加架空接触网供电方式是指在正线采用第三轨受流,在正线到车辆段入口处转换为架空接触网受流,在车辆段内停车线、检修线等均采用架空接触网受流。此种方式可避免车辆段内存在无电区,在段内可随意移车。但由于一条线路上存在两种供电方式,会给线路日常检修带来不便;而且车辆主电路较复杂,司机还需在进出段位置处进行受流方式切换,影响进出段效率。第三轨加架空接触网受流方式车辆电气原理图如图 3 所示。

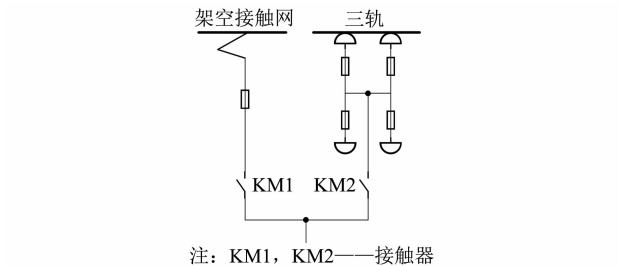


图 3 第三轨加架空接触网受流方式车辆电气原理图
Fig. 3 Vehicle electrical schematic diagram of third rail and overhead catenary current collecting method

在车辆由正线回段入库时,断开接触器 KM2,落下集电靴,然后升起受电弓,闭合接触器 KM1,完成第三轨到架空接触网受流方式切换。车辆出库时则降下受电弓,断开接触器 KM1,收起集电靴,闭合接触器 KM2,完成架空接触网到第三轨受流方式切换。为避免这两种受流方式同时供电,应在两者之间设置互锁功能。

2.2 滑触线方式

除检修线外,在车辆段其他线路上通常不进行车下作业。因此,也可在检修线上采用滑触线,其

他线如出入车辆段线及停车线仍然采用第三轨供电。滑触线由静止的滑线导轨、移动的集电器、供电线缆及插头组成。集电器可在滑线轨道上来回滑动,通过高压电缆与车辆相连,为移动的车辆供电^[3-4]。供电模式转换时,需工作人员下车开箱操作,检修效率不高,操作非常繁琐。

如果采用滑触线供电方式,车辆牵引出入库可分为以下几步:车辆进入转换区;人工插拔插头及操作转换供电模式;车辆由第三轨供电牵引出库或由滑触线供电牵引入库。因此,需在牵引系统中配置专用装置进行安全可靠的供电切换。车辆供电模式切换原理图如图 4 所示。

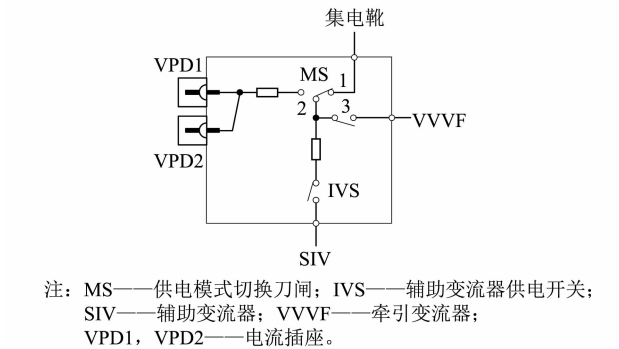


图 4 滑触线车辆供电模式切换原理图

Fig. 4 Schematic diagram of power supply mode switching of vehicle with sliding contact line

车辆首尾两端的拖车设置有模式转换开关箱,当车辆需第三轨受流时,供电模式切换刀闸 MS 的 1 位闭合,2 位和 3 位断开。当车辆需要滑触线受流时,则要将集电器插头接入车辆车间电源插座 VPD1 和 VPD2,同时刀闸 MS 的 2 位和 3 位闭合,1 位断开,将直流电源引入到靠近该拖车的牵引逆变器中,此时车辆只有 1 个动车提供牵引力。

2.3 蓄电池自牵引方式

在外部无法正常供电或车辆通过无电区时,蓄电池自牵引采用车载 DC 110 V 蓄电池给牵引逆变器供电,实现车辆自行牵引移车。采用蓄电池自牵引可以杜绝列车进出库的安全隐患,减轻司机和地面人员操作复杂、检修效率低的弊端。当蓄电池容量足够大还可实现正线自救,使车辆安全行驶至附近站点疏散乘客,避免造成人身伤害和经济损失。

当满足进入蓄电池自牵引模式时,司机只需在车上按下蓄电池牵引按钮,即可进行自牵引移车,

操作简单、安全可靠。但是,如果采用该方式,车辆需集成蓄电池自牵引所需相关器件,并对蓄电池的放电倍率、充放电次数等有更高的要求,同时需开发针对蓄电池牵引的专用控制算法。其中,蓄电池自牵引所需器件包含接触器 KMB 及二极管 D。接触器用于连接蓄电池电源和牵引逆变器,二极管则是为防止牵引逆变器侧可能出现的高压影响蓄电池组。蓄电池自牵引高压原理如图 5 所示。

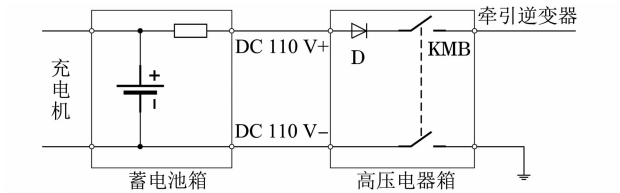


图 5 蓄电池牵引高压原理图

Fig. 5 Schematic diagram of battery traction high voltage

进入蓄电池自牵引必须具备以下条件:当前车速为 0;支撑电容电压已降到蓄电池电压以下;高速断路器已断开,避免第三轨上高压接入牵引逆变器。若满足上述条件,按下蓄电池牵引按钮即可进入蓄电池自牵引模式。牵引控制器降低欠压保护值,同时依次闭合蓄电池自牵引接触器、预充电接触器及主接触器完成预充电。推动手柄,牵引逆变器按照修改后的电机磁链及蓄电池牵引特性输出牵引力。为了简化主电路及提高系统效率,在蓄电池自牵引模式下只有部分牵引逆变器工作。由于输出牵引力较正常模式小,因此在该模式下需同时修改保持制动缓解阈值,保证车辆可正常起动。蓄电池自牵引控制流程图如图 6 所示。

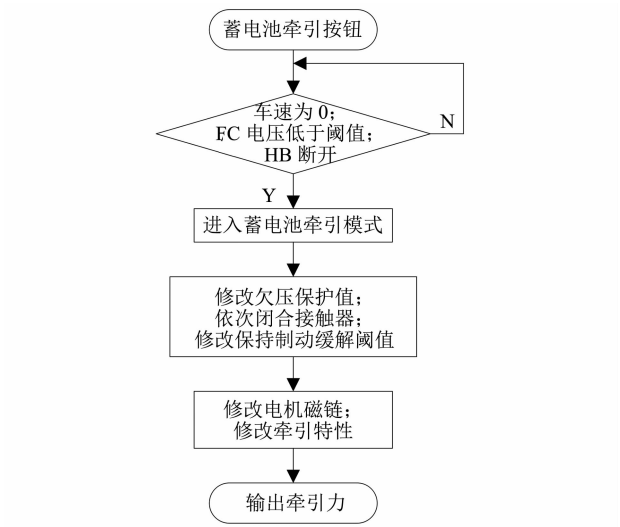


图 6 蓄电池牵引控制流程图

Fig. 6 Flow chart of battery traction control

3 洗车模式控制方式

当车辆运行速度大于 5 km/h 时闭合 BLB(母线接触器),以防止不同供电区段通过车辆桥接引起供电跳闸保护^[5]。洗车模式下车辆的限定速度约为 3 km/h,未达到闭合 BLB 条件。车辆段内属于同一个供电所供电,网压基本一致,即使不同第三轨区段通过车辆桥接时也不会有太大电流冲击。因此,在洗车模式下可闭合 BLB,即使只有 1 台集电靴受流,所有逆变器也可得电工作。洗车模式下电机输出功率较小,长时间只有一只集电靴搭接,也不会烧坏熔断器。

洗车模式下,应输出连续平滑的牵引力,牵引特性可按照图 7 所示给定。车辆运行速度在 1.5 km/h 以下时,输出恒定牵引力;车辆运行速度在 1.5~3.5 km/h 时,不响应牵引级位,线性降低牵引力。车辆运行速度在 3 km/h 左右时,行车阻力与车辆牵引力平衡,车辆可以 3 km/h 左右速度匀速前行。由此可见,洗车模式控制方式简单可靠,整车牵引力平滑。

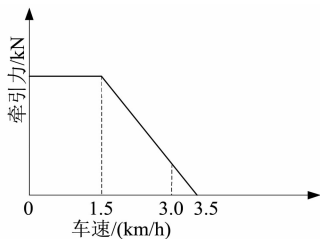


图 7 洗车模式下的牵引特性图

Fig. 7 Traction characteristic diagram under car washing mode

4 试验验证

在青岛地铁 11 号线上对本文提出的方法进行试验验证。该线路仅在车辆段存在较短的无电区,采用检测到无电区后即封锁变流器的方式维持电压。现场试验波形图如图 8 所示。

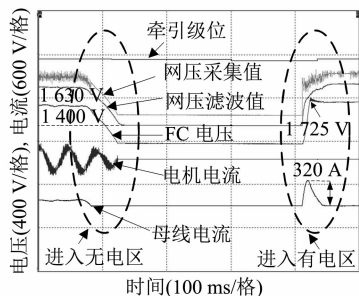


图 8 过无电区试验波形

Fig. 8 Waveform of no power area test

在进入无电区前网压约为 DC 1 630 V。识别到无电区后立刻封锁变流器,将电压维持在 DC 1 400 V 左右。再次进入有电区后,由于受滤波电抗器对冲击电流限制,最大冲击电流约为 320 A,FC 最高电压为 1 725 V,均在可接受范围之内。

青岛地铁 11 号线车辆具有蓄电池自牵引功能,在检修线采用蓄电池自牵引方式进行移车,试验波形如图 9 所示。

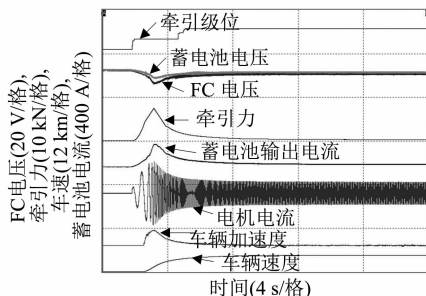


图 9 蓄电池自牵引试验波形

Fig. 9 Waveform of battery self-traction test

蓄电池自牵引模式下,车辆运行速度小于等于 1.5 km/h 时,输出牵引力为恒定值;车辆运行速度大于 1.5 km/h 时,牵引力随速度值反比例下降,同时进行 5 km/h 限速控制。车辆加速过程中电机电流平滑,输出牵引力平稳,最后以 5 km/h 恒速前行。

青岛地铁 11 号线洗车库只在进出库端有第三轨,库内未架设第三轨。因此,在洗车模式下闭合 BLB,车辆进库时主要依靠尾车上的集电靴取电,出库时靠头车上的集电靴取电,整个洗车过程中所有牵引逆变器均正常得电工作。洗车模式下试验波形如图 10 所示。

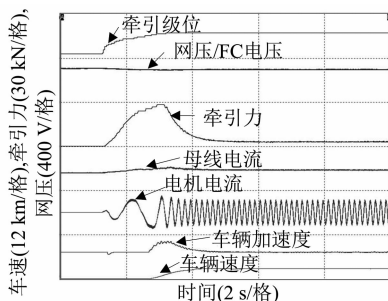


图 10 洗车模式下的试验波形

Fig. 10 Waveform of car washing mode test

洗车模式下,车辆运行速度加速到 3 km/h 左右后,车辆加速度趋于 0,证明车辆输出总牵引力平稳。车辆运行速度在 ± 0.5 km/h 以内波动,满足 3 km/h 恒速控制要求。

(下转第 215 页)