

动车组黏着控制方法研究

马法运 张佳波 苗存绪 林显琦 杨其林 曾凡飞

(中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266031, 青岛)

摘要 [目的] 针对动车组运行速度高、剩余加速度余量小、线路露天架设等特点,以及传统组合校正法判据提取准确性较差、转矩调节损失较多等不足,从速度采集及故障识别、判据提取、转矩调节三个方面进行分析优化,以提升动车组黏着利用。[方法] 速度采集采用分段T法及中位值滤波方法,并对故障速度进行识别替换,以降低速度干扰或故障时对黏着控制的影响。选用加速度差值冲击率替代冲击率,并采用高通滤波器替代微分器,以减小复杂的轨面情况对黏着判据提取带来的影响。转矩调节时锁存上一触发空转/滑行时刻的转矩,并以此转矩为基准,实时计算转矩下降、上升步长;降、升转矩步长均分为10段,由大到小执行,以减小转矩损失。并以某型动车组为例进行了试验,来验证所选方法的可行性。[结果及结论] 试验结果表明:在进行防空转、防滑试验的整个加、减速过程中,动轴速度偏离参考速度有限;转矩调节未有大幅度反复波动,列车冲击较小;对牵引、制动两次试验数据进行计算分析,得到牵引防空转、制动防滑行的黏着利用率均大于90%,黏着利用得到有效提升。

关键词 动车组; 防空转; 防滑行; 黏着控制

中图分类号 U260.37:U266

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.041

Adhesion Control Method for EMU

MA Fayun, ZHANG Jiabo, MIAO Cunxu, LIN Xianqi, YANG Qilin, ZENG Fanfei

(CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266031, Qingdao, China)

Abstract [Objective] Given the high operating speeds, minimal residual acceleration margin, and open-air track conditions of EMU (electric multiple units), as well as the deficiencies in conventional combination correction methods such as poor accuracy in criterion extraction and significant torque adjustment losses. It is aimed to optimize EMU adhesion utilization by analyzing and improving speed acquisition, fault identification, criterion extraction, and torque adjustment. [Method] A segmented T-method and median filtering method for speed acquisition is employed, and faulty speed data is identified and substituted to reduce the impact of speed interference/faults on adhesion control. The acceleration difference impact rate is used instead of impact rate and the differentiator is sub-

stituted with a high-pass filter to minimize the impact of complex track surface conditions on adhesion criterion extraction. For torque adjustment, it latches the torque at the previous wheel slip/skid trigger moment and uses this as a reference to calculate the reducing and increasing torque step sizes in real-time. The reducing and increasing step sizes are divided into 10 segments, executed from large to small to minimize torque losses. The feasibility of these methods is verified through experiments using a type of EMU as example. [Result & Conclusion] Experimental results demonstrate that during the entire acceleration and deceleration process of anti-slip and anti-skid tests, the deviation of the axle speed from the reference speed is limited. Torque adjustments do not exhibit significant repeated fluctuations, resulting in relatively less train impact. The traction and braking test data calculation analysis show that the adhesion utilization rates of traction anti-slip and braking anti-skid are both greater than 90%, effectively improving adhesion utilization.

Key words EMU; anti-slip; anti-skid; adhesion control

动车组运行速度高,剩余加速度余量小,线路露天架设,雨、雪天轮轨间可用黏着降低,系统黏着利用不足,导致牵引不能达到目标速度和制动距离增长,影响了列车正常运营,甚至造成晚点^[1]。因此,动车组对黏着控制提出了更高的要求。

目前,黏着控制的工程化应用方法有黏着斜率法、组合校正法等。黏着斜率法通过在给定转矩上叠加一定频率和幅值的正弦测相信号,并对电机转速进行滤波处理,通过正交相关法实现相位差的测量或计算,间接地获取黏着特性曲线斜率^[2]。此方法虽可通过黏着斜率实现黏着利用的相对最优控制,但需在电机转矩上叠加一定频率和幅值的正弦测相信号,存在一定转矩脉动;转速信号也存在噪声,计算相位时存在一定误差,对准确控制也有一定影响。组合校正法通过速度差、轴加速度、轴加速度微分(冲击率)等判据对输出转矩进行实时调节。当实时检测值大于一定阈值时,可判断发生了

空转/滑行,则应降低牵引/制动力;当小于判据阈值时,可增加牵引/制动力^[3-4]。该方法当检测到空转/滑行时已经是空转/滑行发生后,存在一定滞后性,难于实现最优黏着控制,但其计算简单、反应速度快、安全可靠、易于工程化实现,目前被广泛应用于动车组、电力机车及地铁上。

但既有组合校正法存在以下不足:① 组合校正法依赖于速度采集的准确性,在实际应用中,速度通道易受干扰发生跳变,以及速度传感器供电失效,而使速度持续为 0,导致黏着控制误动作甚至失效。② 采用动轴冲击率作为判据条件时,在过道岔或钢轨接头处,冲击率易超阈值,误触发黏着控制而进行卸力,因而损失牵引/制动力。③ 黏着控制过程中,按照固定的几个步长调节力,控制不够精细化,力损失较多,黏着利用不足。

为了解决上述技术不足问题,本文重点从速度采集及故障识别方法、黏着控制判据选择及提取、黏着控制转矩调节三个方面进行分析,提出了一种鲁棒性强、黏着利用高的动车组黏着控制方法,并在某型高速动车组上进行了试验验证,试验效果良好。

1 电机速度采集及故障识别

1.1 电机速度采集

为了保证采样精度,通常采用 T 法采样,即通过测量电机速度脉冲信号两个上升沿时长来计算转速。转速计算如式(1)所示。

$$n = \frac{60}{PT_N} = \frac{60}{PIT_s} \quad (1)$$

式中:

n ——电机转速,单位 r/min;

P ——测速齿盘齿数;

T_N ——两个脉冲上升沿间隔时长,单位 s;

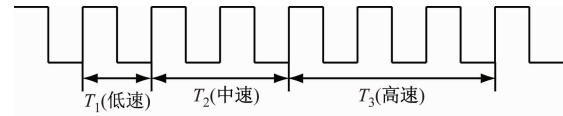
T_s ——处理器(FPGA/DSP)对速度脉冲的采样周期,单位 s;

l —— T_N 内处理器采样周期个数。

由于处理器能力限制,采样周期 T_s 不可能无限小,则两个上升沿实际时长位于两个整数倍采样周期之间,即 $lT_s \leq T_N \leq (l+1)T_s$ 。因此,计算脉冲时长与实际脉冲时长会存在最大一个采样周期的误差,误差 δ 定义为 $\delta = \frac{T_s}{T_N} \times 100\%$ 。

当列车速度升高时, T_N 减小, l 减少, δ 随之增

加,会对控制精度造成一定影响。兼顾速度采样精度及误差,本文依据速度等级,选择不同的脉冲间隔时长。即在低速段测量相邻 2 个脉冲上升沿时长,中速段测量 3 个脉冲上升沿时长,高速段测量 4 个脉冲上升沿时长。这样,在不影响速度精度的前提下,采样误差得到有效降低,如图 1 所示。



注: T_1 、 T_2 、 T_3 —不同速度脉冲上升沿间隔时长。

图 1 速度分段 T 法采样示意图

Fig. 1 Diagram of speed sampling by segmented T method

动车组速度信号易受干扰,偶尔会出现部分异常数据,引起黏着控制误动作。通常黏着控制周期远大于速度采样周期,因此,本文对初始采样速度 $n_{ori,i}$ 采用中位值平均滤波剔除干扰速度值,如图 2 所示。即对一个黏着控制周期内 M 个初始采样速度 $n_{ori,i1}$ 、 $n_{ori,i2}$ 、 \dots 、 $n_{ori,iM}$ 进行大小排序,剔除最大、最小值,选取中间 $M-2$ 个速度的平均值 n_i 作为黏着控制速度,可有效降低速度干扰对黏着控制的影响。

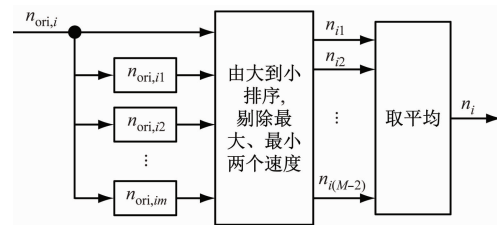


图 2 速度中位值平均滤波法原理图

Fig. 2 Diagram of median speed average filtering method principle

1.2 故障识别及替换

新型动车组通常采用架控模式,每台功率模块并联两台牵引电机。电机 1 有 2 路速度通道 A、B,用于测量速度及转向;出于成本考虑,电机 2 只有 1 路速度通道,只用于测量速度。同时采集 1 路拖轴速度作为初始列车参考速度。

列车轮周速度在忽略蠕滑且无空转/滑行时保持一致,因此在进行故障识别时,首先将采集到的所有动、拖轴速度换算为轮周速度,如公式(2)所示。

$$V_i = 0.06\pi D_i n_i / g \quad (2)$$

式中:

V_i ——轮周速度,单位 km/h;

D_i ——轮径,单位 mm;

n_i ——电机转速,单位 r/min;

g ——齿轮传动比。

速度跳变及持续为 0 故障是动车组在运行中常遇到的速度问题。本文采用的具体故障识别方法如下:当本次采集速度与上一次采集步长限制后速度差值大于 10 km/h 并持续 0.3 s,则判断为速度跳变故障;当本通道速度在未发生滑行且速度持续为

0,但其他正常通道在未发生空转情况下速度超 5 km/h 持续 0.1 s,则判断本通道为速度持续为 0 故障。

由于同一台功率模块对应的速度传感器较多,有一定冗余性。本文采用速度替换的方法提高系统鲁棒性,即当部分速度传感器故障后采用其他正常速度进行替换,以确保黏着控制可正常执行。速度通道替换原则如表 1 所示。

表 1 速度通道替换原则

Tab. 1 Speed channel replacement principle

电机 1 速度通道 A(编号 1)	电机 1 速度通道 B(编号 2)	电机 2 速度通道(编号 3)	电机 1 采用速度通道	电机 2 采用速度通道	逆变器状态
Y	Y	Y	1	3	正常
N	Y	Y	2	3	正常
Y	N	Y	1	3	正常
Y	Y	N	1	2	正常
N	N	Y	3	3	正常
Y	N	N	1	1	正常
N	Y	N	2	2	正常
N	N	N			故障

注:速度传感器正常表示为 Y,故障表示为 N。

正常情况下,电机 1 只采用通道 A 用作控制,当通道 A 故障时采用通道 B 替换;当通道 A、B 均故障,采用电机 2 速度通道替换。当电机 2 速度故障,采用电机 1 通道 B 替换;当电机 1 通道 B 也故障,采用电机 1 通道 A 替换。当电机 1、2 所有通道均故障时,则逆变器发生故障。当拖轴速度通道故障,采用正常动轴速度通道替换。

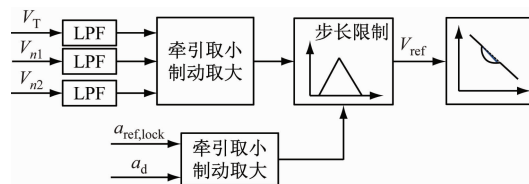
2 黏着判据提取

2.1 参考速度计算

参考速度作为计算速度差的基准速度,当参考速度不准时,易导致动轴速度与真实列车速度差值较大,影响黏着控制。因此,参考速度对于黏着控制至关重要。

本文采用电机 1、2 及拖轴 3 个速度进行筛选,尽可能得到准确的参考速度。首先对所有速度进行低通滤波,剔除高频干扰,然后对滤波后的速度依据牵引、制动模式进行大小比选,得到初始参考速度。牵引模式下,3 个速度取最小值;制动模式下,3 个速度取最大值。由于制动情况下,轴上也可能施加空气制动,导致拖轴不能完全反映列车真实

速度,因此,本文对筛选后的速度进行了步长限制,尽量还原真实列车速度。其中,参考速度步长限制依据空转/滑行前锁存的列车加速度 $a_{\text{ref,lock}}$ 及车辆设计的理论加速度 a_d 确定(考虑坡道, a_d 设定应较计算值大一些),选取二者中绝对值较小的作为限制步长,限制后得到黏着控制用参考速度 V_{ref} (如图 3 所示)。



注:LPF—低通滤波器; V_T —拖轴速度; V_{n1} 、 V_{n2} —动轴速度。

图 3 参考速度计算框图

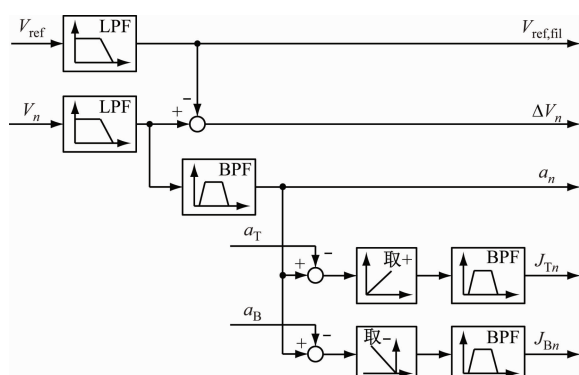
Fig. 3 Block diagram of calculating reference speed

2.2 相关判据提取

速度差为动轴速度与计算参考速度差值,具有较强的可信度,尤其能检测出一些缓慢空转。加速度为轮速对时间的微分值,只与本轴有关,与其他轴无关。当发生空转时,轮速势必突然增大,加速度值也相应增大。

由于列车在过道岔或钢轨接头处时冲击率会突变,因而冲击率判据易误触发黏着控制。针对该问题,本文采用加速度差值冲击率作为冲击率的替代判据。加速度差值冲击率为实际动轮加速度与理论加速度差的微分。在进行微分计算时牵引模式加速度差值只取正部分,反之制动模式只取负部分。当发生空转时,加速度增大,在加速度大于理论加速度后,差值冲击率增大,同样可反映动轮的空转情况,而不受轨面条件影响,制动滑行同理。

鉴于速度信息自身含有许多杂波,采用微分器的方式计算加速度,微小的速度波动就能激起较大的加速度波动,所提取的加速度含有一定噪声量,在进行黏着判断时很容易造成误触发^[3]。因此,对于加速度及加速度差值冲击率提取采用高通滤波器的方式,可减小速度噪声对提取值的影响,如图4所示。



注: BPF—带通滤波器; $V_{ref,fil}$ —参考速度滤波值; V_n —动轴速度; ΔV_n —速度差; a_n —动轴加速度; a_T —理论牵引加速度; a_B —理论制动减速度; J_{Tn} —牵引差值冲击率; J_{Bn} —制动差值冲击率。

图4 黏着判据相关参数计算框图

Fig. 4 Block diagram of calculating parameters related to adhesion criterion

3 黏着控制转矩调节

当加速度或加速度差值冲击率超过阈值时,或速度差超阈值且对应动轮加速度 >0 (或制动动轮加速度 <0),则判断轮对发生空转,随即进行降力,同时锁存此刻输出转矩 T_{lock} ,黏着控制标志位置1。

在进行降转矩初期,为避免空转/滑行状态继续扩大,转矩应迅速降低;同时为了防止转矩在调节过程损失过多,后期应减缓转矩下降速度。当相关判据恢复到阈值以内后开始进行升转矩,在升转矩初期实际利用黏着小于可用黏着,可快速上升转矩,当上升到接近上一时刻锁存转矩时,可防止再

次触发降转矩,可减缓转矩上升速度。当再次触发阈值后,再次进行降转矩调节,同时更新锁存转矩。黏着控制需要进行若干个周期不断调节,使得实际采用黏着逐渐接近当前轨面可用黏着。

为了黏着控制时转矩调节能更加精细,以提高黏着利用,本文以上一时刻触发空转/滑行锁存转矩 T_{lock} 为基准,实时计算转矩下降、上升步长。同时降转矩步长 η_{di} 、升转矩步长 η_{ui} 均分为10段执行,且降转矩及升转矩过程均由快到慢,即步长由大到小。即 $\eta_{di} = \lambda_{di} T_{lock}$, $\eta_{ui} = \lambda_{ui} T_{lock}$,降、升转矩系数 $\lambda_{d1} > \lambda_{d2} > \dots > \lambda_{d10}$, $\lambda_{u1} > \lambda_{u2} > \dots > \lambda_{u10}$ 。

在转矩下降过程中,为了防止过度下降,当加速度及加速度差值冲击率恢复到设定阈值以内,而速度差仍然大于阈值且加速度 $< -a_m$ (牵引时 $a_m > 0$,制动时 $a_m < 0$)时,此时已下降到可用黏着以下安全区域,斜率置0,输出转矩保持不变。黏着控制输出转矩示意图如图5所示。

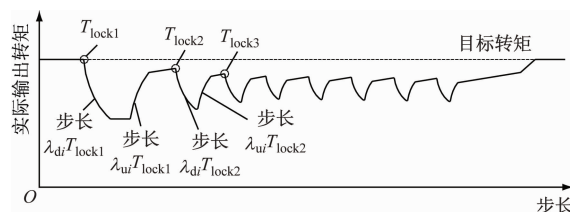


图5 黏着控制过程输出转矩示意图

Fig. 5 Diagram of output torque in adhesion control process

当由一个较差的轮轨黏着环境到一个较好环境后,升转矩过程最后一个步长较慢,转矩恢复到目标值可能需要较长时间。针对此工况,在最后一个步长持续升力5 s后,增大升转矩步长,快速跟随上目标力。当实际输出转矩与给定目标转矩相等时,黏着标志位清0,同时退出黏着控制。

4 试验验证

在铁路正线上对某型动车组进行了空转/滑行试验,以验证上述方法的可行性。现场防空转/滑行试验设备布置如图6所示,存储减磨液的容器放于车上,通过水管将减磨液引到车下,动车组主控方向的第一组动轮两侧布置出水口。开始试验时,打开出液阀门,减磨液喷洒在钢轨上,以降低轮轨间黏着力。

列车以最大牵引级位起动,同时打开喷洒减磨液阀门,使减磨液喷洒在钢轨上,轮轨间黏着力降低,随即开始执行防空转调节,去适应轨面黏着情

况。防空转试验波形如图 7 所示。



a) 车上存储减磨液容器



b) 车下出水口

图 6 防空转/滑行试验设备布置图

Fig. 6 Layout of anti slip/slid test equipment

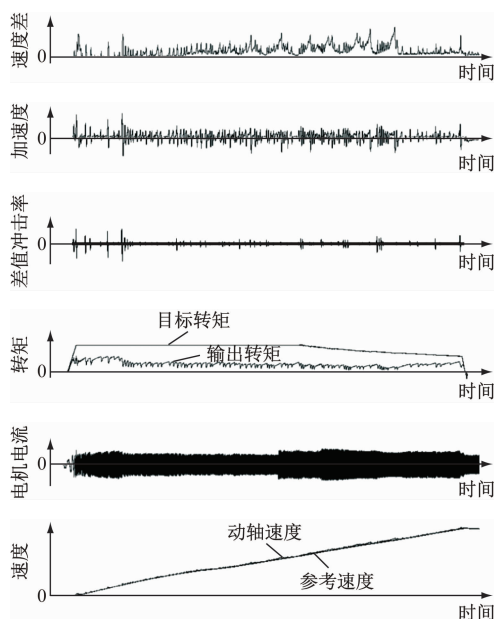


图 7 防空转试验波形

Fig. 7 Waveform of anti-slip test

列车加速到高速后,以最大制动级位停车,同时打开喷洒减磨液阀门,轮轨间黏着力降低,随即开始执行防滑行调节,去适应轨面黏着情况,防滑行试验波形图如图 8 所示。

在进行防空转、防滑行试验的整个加、减速过程中,动轴速度偏离参考速度减小,转矩调节未有大幅度反复波动,列车冲击较小,黏着力利用较高。

采用文献[3]中黏着利用率计算方法,对两次试验数据进行分析,牵引防空转、制动防滑行黏着利用率分别为 91.5%、90.8%,均满足需求。

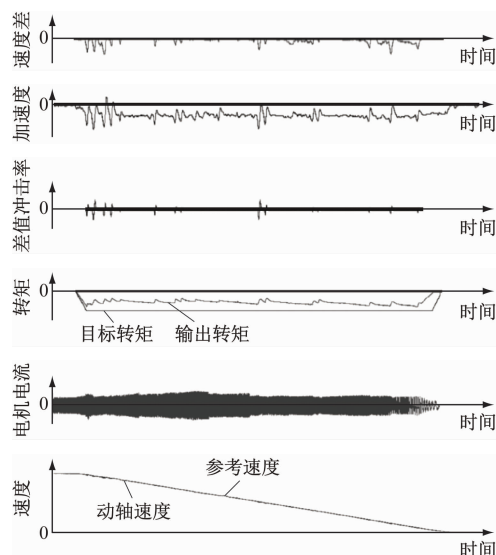


图 8 防滑行试验波形

Fig. 8 Waveform of anti-slip test

5 结语

本文针对动车组特点,从速度采集及故障识别、黏着判据提取、黏着控制转矩调节三个方面进行分析,提出了一套鲁棒性强、乘坐舒适度好、黏着利用高的动轴车黏着控制方法,并在某型动车组上进行了试验验证,得出如下结论:

1) 根据不同速度等级采用分段法采样,以提高全速域速度采样精度;对初始采集速度信号进行中位值平均滤波,以降低速度干扰时对黏着控制的影响;并对故障速度进行替换,以增强系统鲁棒性。

2) 选用加速度差值冲击率替代冲击率,并采用高通滤波器替代微分器,在确保响应速度的同时,可有效降低复杂的轨面情况对黏着判据提取带来的影响,避免误触发黏着控制。

3) 锁存上一触发空转/滑行时刻转矩,并以此转矩为基准,实时计算转矩下降、上升步长;降、升转矩步长均分为 10 段,由大到小执行;黏着控制时转矩调节更加精细,可避免空转/滑行状态继续扩大,同时可提高黏着利用。

参考文献

- [1] 张立伟,喻励志,张征方. 高寒动车组再粘着快速平稳恢复方法[J]. 机车电传动, 2018(5): 24.
ZHANG Liwei, YU Lizhi, ZHANG Zhengfang. Rapid and stable recovery method in re-adhesion for high-cold EMUs[J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(5): 24.

(下转第 243 页)

生的干扰,由于未在根本上杜绝干扰的产生,因而针对方案 3,在接地回流线上缠绕屏蔽编织网管,在传输路径上降低干扰源干扰的累积影响。

通过方案 2 和方案 3 的应用,进行多次信号车载设备的重启试验,均能成功启动,未再报故障现象,且从频谱上也能看出干扰在很大程度上得到了削弱。可见,以上两种方案的应用能够有效改善应急启动模块的电磁干扰问题。

5 结语

综上所述,地铁车辆中信号应答器天线受到的干扰主要源于 DC/DC 模块。通过增加磁环和屏蔽措施,成功从源头和路径两方面降低了干扰影响。为避免电磁干扰,设计和制造过程中应注意:

1) 干扰源头:电源设备整流逆变时的高频通断是主要干扰源,需优先排查;高频电源与信号天线设备应尽量保持 100 mm 以上距离,必要时增加天线屏蔽罩;避免使用独立式应急启动装置(DC/DC),如使用需确保其 EMC 性能达标。

2) 干扰路径:与电源元件直接相连的电缆应屏蔽处理,并与其他线束隔离;接地回流线应远离信号天线设备。通过这些措施,可有效减少电磁干扰对地铁车辆信号系统的影响。

参考文献

- [1] 中国铁路总公司. 高速铁路信号工程施工技术规程: Q/CR 9607—2015[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.

China Railway Corporation. Technical specification for construction of high-speed railway signaling engineering: Q/CR 9607—2015 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015.

- [2] 国家铁路局. 高速铁路信号工程施工质量验收标准: TB 10756—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.

National Railway Administration. Standard for acceptance of signaling works in high-speed railway: TB 10756—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.

- [3] 王潇. BIM 技术在铁路弱电行业的应用[J]. 铁路通信信号工程技术, 2018, 15(6): 79.

WANG Xiao. Application of BIM technique in railway weak current field[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2018, 15(6): 79.

- [4] 宋微, 林凯, 黄植卓. 车载 BTM 天线电磁干扰耦合规律研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 3(20): 91.

SONG Wei, LIN Kai, HUANG Zhizhuo. Research on electromagnetic interference coupling laws of onboard btm antennas[J], Electric Railway, 2022, 3(20): 91.

- [5] 齐万明, 慕光远, 蒋建挺. 交流牵引市域(郊)铁路车载信号设备电磁干扰防护研究[J]. 长江信息通信, 2024, 37(3): 93.

QI Wanming, MU Guangyuan, JIANG Jianting. Research on electromagnetic interference protection for on-board signal equipment of urban railway[J]. Changjiang Information & Communications, 2024, 37(3): 93.

· 收稿日期:2022-09-29 修回日期:2022-12-30 出版日期:2024-10-10

Received:2022-09-29 Revised:2022-12-30 Published:2024-10-10

· 通信作者:何玉琴,高级工程师,river1970@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 239 页)

- [2] 赵丹, 王嵩, 代高富, 等. 基于改进相位移法电力机车粘着控制[J]. 计算机仿真, 2015, 32(4): 133.

ZHAO Dan, WANG Song, DAI Gaofu, et al. Adhesion control of electric motor coach based on improved phase shift[J]. Computer Simulation, 2015, 32(4): 133.

- [3] 张佳波, 马法运, 刘天宇, 等. 基于组合校正的城市轨道交通列车轮轨黏着控制方法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(3): 140.

ZHANG Jiabo, MA Fayun, LIU Tianyu, et al. Wheel/rail adhesion control of urban rail transit vehicle based on combined correction method[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(3): 140.

- [4] 高翔, 张波. 电力机车黏着控制分析[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(3): 22.

GAO Xiang, ZHANG Bo. Analysis on adhesion control of electric locomotive[J]. Railway Locomotive & Car, 2011, 31(3): 22.

· 收稿日期:2022-06-28 修回日期:2024-05-13 出版日期:2024-10-10

Received:2022-06-28 Revised:2024-05-13 Published:2024-10-10

· 通信作者:张佳波,高级工程师,15898876995@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license