

基于速度信号的内燃轨道车卸载控制分析与优化

薛兵杰,徐亚昆,赵方

(中车永济电机有限公司,陕西 西安 710016)

摘要:非正常卸载是机车常见运行故障之一,会造成牵引力的损失,增加纵向冲击,影响车钩的寿命,导致中间直流母线电压直线上升,甚至引起过压等一系列故障。机车速度干扰引起的非正常卸载往往很难定位及处理。基于GCD-1000交流传动轨道车在台架试验中发生的非正常卸载,通过试验数据分析机车速度干扰导致非正常卸载的原因,从整车控制的角度提出了速度信号滤波及多速度信号综合判断的优化改进措施,增加了信号滤波算法,修改了控制逻辑策略。通过仿真及实验验证了该优化方案的可行性,有效地降低了故障发生率,达到了预期的效果,对机车非正常卸载故障的分析及解决具有指导意义。

关键词:轨道车;卸载;机车速度;控制逻辑

中图分类号:TP20 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd20094

Analysis and Optimization of Unloading Control Based on Locomotive Speed Signal

XUE Bingjie, XU Yakun, ZHAO Fang

(CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an 710016, Shaanxi, China)

Abstract: Abnormal unloading is one of the common operating faults of locomotives, which will cause loss of traction, increase longitudinal impact, affect the life of the coupler, cause the voltage of the intermediate DC bus to rise linearly, and even cause a series of faults such as overvoltage. Unusual unloading due to locomotive speed disturbance is often difficult to locate and handle. Based on the abnormal unloading of the GCD-1000 AC drive railcar in the bench test, the test data was used to analyze the cause of the abnormal unloading caused by the locomotive speed disturbance. From the perspective of vehicle control, the optimization improvement measures of the speed signal filtering and multi-speed signal synthesis judgment were proposed. The signal filtering algorithm was added, and the control logic strategy was modified. The feasibility of the optimization scheme was verified by simulation and experiment, which effectively reduced the failure rate and achieved the expected result. The optimization scheme proposed has guiding significance for the analysis and solution of abnormal unloading faults of locomotives.

Key words: rail car; unloading; locomotive speed; control logic

内燃轨道车卸载包含正常卸载和非正常卸载故障。在内燃轨道车出现空转和滑行的工况下快速地卸载,即迅速降低牵引系统输出的牵引力或制动力,可以恢复机车的黏着控制,抑制空转和滑行的发生,保证行车的安全。但是在行车过程中,由于机车速度的采样干扰,或者卸载逻辑的不完善导致的非正常卸载也会发生。非正常卸载故障的发生,会引起机车的纵向冲击,对车钩等机车机械部件的寿命产生影响,严重时会引起直流母线电压升高,对牵引变流器产生损坏

甚至机破的风险^[1]。

导致内燃轨道车发生非正常卸载的原因往往有很多,例如常见的冷却水循环设备故障、控制线路的“松虚短坡”及总风缸故障等硬件设备或线路接线导致的非正常卸载,这类故障往往通过检修确认原因并解决。还有一类原因是由于控制逻辑及机车运行中的干扰导致的非正常卸载,这类故障原因受到运行条件及实验手段的限制,往往很难分析原因并制定解决措施。司机往往通过手柄回到惰转位后进行重投的措施进行

紧急处理^[2-3]。

本文从GCD-1000轨道车在运行过程中出现的非正常卸载故障出发,通过整车台架试验,分析速度信号干扰引起整车卸载的发生机理和原因,通过对电机速度和雷达速度信号进行软件滤波处理,同时采用多速度信号综合判断的方式进行卸载逻辑的控制。经过改进后的方案在整车台架试验中进行了测试,试验证明改进后的方案解决了由于速度信号干扰导致整车异常卸载的问题,该设计方案对内燃轨道车异常卸载故障的排查和整改具有指导意义^[4-5]。

1 卸载控制原理

当轨道车处于牵引或者电阻制动工况时,主发励磁接触器开关闭合,主发电机工作发电,轨道车系统正常运行。当司机手柄位回到惰转位,退出牵引或者制动模式时,主发励磁接触器断开,正常卸载。

内燃轨道车的正常卸载可以迅速隔离主发电机,有效保护机车。为了增加系统的安全可靠性,在机车的整车控制逻辑中包含很多卸载保护逻辑,如中间电压过压、中间电流过流、主发缺相、正接地、负接地、牵引变流器等故障都会导致机车卸载。正是由于卸载保护逻辑的存在,如果保护条件设置不合理或者有错误干扰,就可能误触发卸载保护逻辑,造成机车卸载。运行中机车非正常卸载可能会造成机破、临修,影响较大,因此要尽量避免^[6-7]。

以GCD-1000内燃轨道车为例,启动操作步骤如图1所示。

1)需要先检测辅助系统是否存在故障,在没有故障的情况下投入辅发励磁接触器,辅助开始工作。

2)检测牵引系统是否存在故障,在正常的情况下投入主发励磁接触器,牵引系统开始工作。

3)机车的速度和档位信号两个参数用于计算直流母线电压给定值和电机转矩给定值,分别用于控制主发电机和牵引变流器。

4)出现故障的情况下,进行机车卸载。

从上述逻辑中可以看出,电机速度是影响直流母线电压和机车牵引力关键参数之一。轨道车在牵引的工况下,根据档位信号和速度信号计算需要的直流母线电压,控制主发电机,牵引8档时中间直流电压给定公式如下:

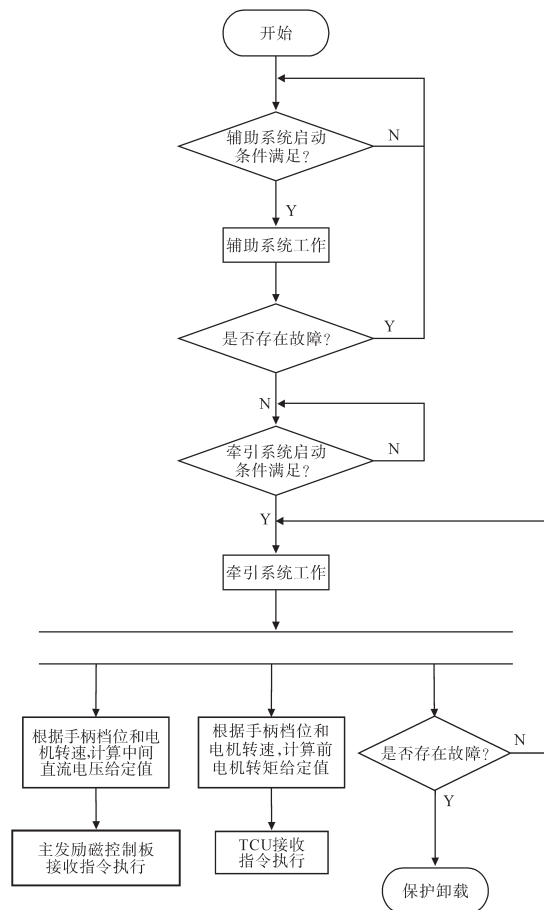


图1 GCD-1000轨道车启动逻辑

Fig.1 GCD-1000 rail car startup logic

$$\begin{cases} U = 1500 & n < 150 \\ U = 1500 + \frac{11}{6} (n - 150) & 150 \leq n \leq 750 \\ U = 2600 & n > 750 \end{cases} \quad (1)$$

式中: U 为直流母线电压给定值; n 为电机转速信号。

牵引变流器采集电机转速,将转速转发给整车控制单元,整车控制单元结合电机速度信号和档位信号计算机车运行需要的牵引转矩。整车牵引8档时牵引转矩给定公式如下:

$$\begin{cases} T = (5582.4 - 9500.7) \times n / 299.4 + 9500.7 & n \leq 300 \\ T = 175.0 \times 9550 / n & 300 < n \leq 2862 \\ T = 0.354 \times n + 1592 & n > 2862 \end{cases} \quad (2)$$

式中: T 为牵引转矩给定值。

由式(1)、式(2)可知,转速信号直接影响了直流母线电压和牵引的给定值。因此转速的波动会直接影响主发励磁的控制及电机转矩的控制,若波动较大,会出现车辆抖动甚至故障卸载的情况。

2 故障案例分析

2.1 试验方案简介

本文以GCD-1000内燃轨道车为试验对象,该车为交流传动内燃轨道车,整车功率1 000 kW,主要用于线路检修作业。试验采用台架试验的方式进行,台架试验是围绕机车车辆动态性能的试验技术,可进行全功能的机车车辆整车滚动振动试验。试验台采用轨道轮模拟无限长的钢轨,被试机车轮对落在轨道轮上,利用负载电机的发电工况模拟被试机车的牵引工况,利用负载电机的电动工况为被试机车提供运动惯量,从而达到被试机车线路运行的制动工况,对机车总体性能及主要部件进行测试^[8-9]。

2.2 牵引工况下试验结果及分析

实验中控制整车牵引系统启动,通过负载拖动系统控制整车转速保持120 km/h,司机手柄档位从1档提高到8档,逐渐加大输出转矩。手柄位到达8档后,轨道车保持满功率运行状态,通过负载电机控制整车速度逐渐下降,根据 $P = F \times V$,保

持轨道车满功率运行的工况下,电机转矩会逐渐增大。当车速降至30 km/h左右时,转矩达到6 785 N·m,牵引系统发生了非正常卸载,牵引系统封脉冲,牵引转矩降为0。但是故障保护系统没有报故障,显示轨道车状态正常。试验波形如图2所示。

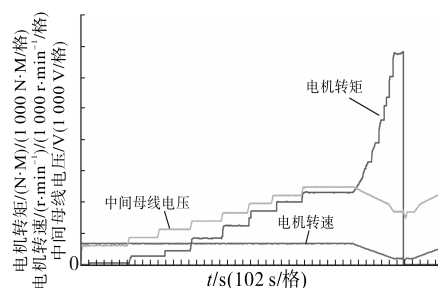


图2 牵引系统扫频试验

Fig.2 Frequency sweep test of traction system

图2中,可以看出电压和转矩随档位变化的趋势,电机转速与轨道车速度对应。

为了查找卸载原因,将此次试验数据进一步整理,电机转速的波动如图3所示。同时对比整车配置的4台牵引电机同一时刻的转速波动情况,如图4所示。

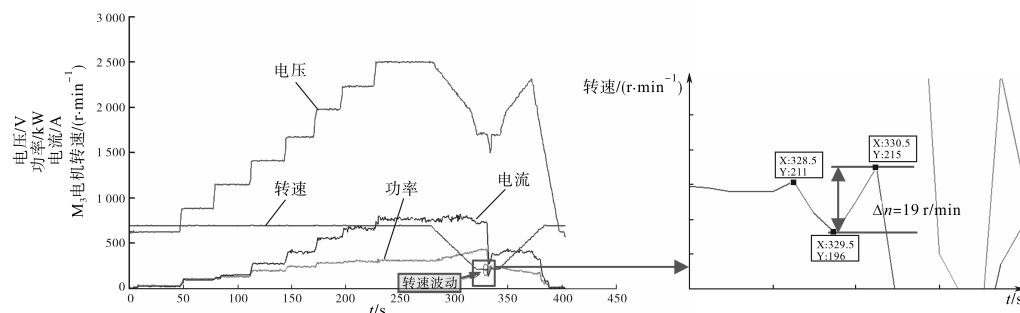


图3 扫频试验数据分析

Fig.3 Analysis of sweep frequency test data

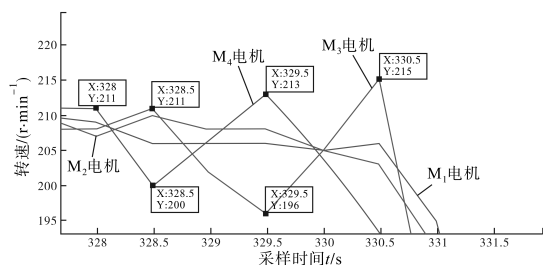


图4 4台电机的转速

Fig.4 Speed of four motors

结合图3和图4的数据,我们可以看出,在转速下降的过程中 M_1 和 M_2 牵引电机的转速较为平稳, M_3 和 M_4 牵引电机的转速出现了波动。放大 M_3 牵引电机速度波动,可以看出速度连续波动差

值在19 r/min上下,根据式(2)进行计算可知,转矩波动达到196 N·m。

根据防滑防空转的逻辑,控制系统通过各动轮间的线速度差 Δv 以及每个动轮的线加速度 dv/dt 来判断是否发生了空转。结合上述数据分析,在转速下降过程中,由于牵引电机的转速出现了波动,控制逻辑换算后的线速度也出现波动,整车进入了防滑防空转的逻辑,整车控制单元发出牵引卸载的指令。

2.3 制动工况下试验结果及分析

在制动工况下,GCD-1000轨道车采用雷达速度传感器的速度信号作为发电机和牵引电机

转矩控制的参数之一。在多次制动试验中,复现了非正常卸载的发生。

在试验中,我们对比了制动过程中的雷达速度和电机转速的差别,如图5所示。正常情况下,2个速度值应相等,只存在允许的采样误差。但是在图5中可以看到,雷达信号存在干扰。同时使用录波仪对雷达信号进行采样,与轨道车采样的雷达速度信号进行对比,如图6所示。

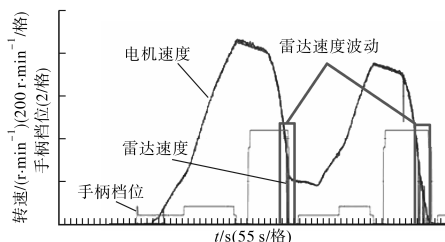


图5 雷达速度分析

Fig.5 Radar speed analysis

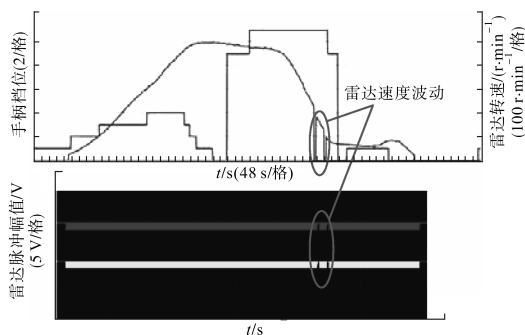


图6 雷达脉冲采样波形

Fig.6 Radar pulse sampling waveforms

从图5和图6的试验结果可以判断,轨道车的雷达信号存在异常,且异常是由雷达速度传感器本身产生,并非因轨道车的采样电路引起。从图5中观察到,在制动过程中,雷达速度出现多次最低数值为0的现象。根据整车电制动逻辑,在制动过程中,若检测到速度为0,整车会产生制动已完成的错误判断,发出制动力卸载的指令。

3 控制与逻辑优化

结合上述故障试验结果的分析,速度信号的异常波动极易引发内燃轨道车发生非正常卸载故障。其中,在牵引工况下,由于电机速度采样的波动引起轨道车进入防空转逻辑,进而导致轨道车卸载。在制动工况下,是由于制动中及雷达传感器的信号不稳定导致轨道车误动作^[10]。

对于以上问题,本文提出了以下2点优化处理措施:1)在整车控制逻辑中对电机速度和雷达速度信号均进行软件低通滤波处理。2)在控制

逻辑中,通过对不同来源的速度信号进行信号对比和状态判断^[11]。

3.1 低通滤波

本文对电机转速信号进行低通滤波处理,采用常用RC电路的数学模型进行处理,RC电路如图7所示。

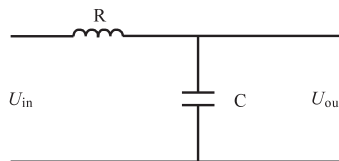


图7 RC低通滤波电路

Fig.7 RC low-pass filter circuit

RC电路的s域的传递函数如下所示:

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{1}{RCs + 1} \quad s = j\omega \quad (3)$$

式中: U_{in} 为输入电压; U_{out} 为RC滤波后的输出电压; R 为串联在电路中的电阻值; C 为并联在电路中的电容值。

对其进行z变换(一阶后差分):

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{T} \quad (4)$$

式中: T 为采样周期。

则传递函数变为

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{T}{RC(1 - z^{-1}) + T} \quad (5)$$

同时又有 $Y(z) = Y(n)z^{-n}$, $\frac{Y(n-1)}{Y(n)} = z^{-1}$,

$X(z) = X(n)z^{-n}$, $\frac{X(n-1)}{X(n)} = z^{-1}$,将其代入到式

(5)传递函数得:

$$Y(n) = \frac{T}{T + RC} X(n) + \frac{RC}{T + RC} Y(n-1) \quad (6)$$

式中: $X(n)$ 为本次采样值; $Y(n-1)$ 为上次滤波值。

令 $a = \frac{T}{T + RC}$,则滤波公式简化为

$$Y(n) = aX(n) + (1 - a)Y(n-1) \quad (7)$$

对 $y=10\sin(5t)$,叠加-10到10之间的随机数, a 取0.1。滤波函数输入运算如图8所示。

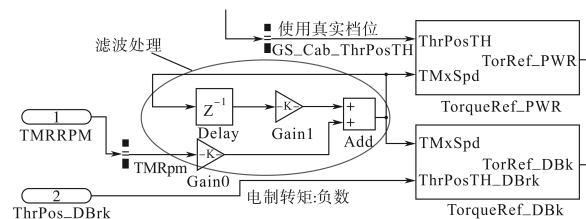


图8 滤波运算

Fig.8 Filtering algorithm

对信号进行仿真对比,滤波后的波形明显得到改善,仿真波形如图9所示。

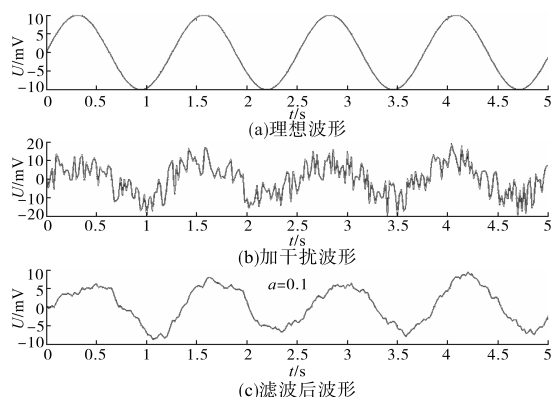


图9 低通滤波仿真波形

Fig.9 Low-pass filter simulation waveforms

3.2 速度信号的选择

本文在整车控制逻辑中,对电机速度和雷达速度信号分别做状态判断。电机速度通过换算成整车运行速度,作为优先级更高的速度信号参与整车牵引和制动的逻辑运算。在4台牵引电机转速差值超出允许范围的情况下,选择雷达电机参与运算。整体的逻辑运算框图如图10所示。

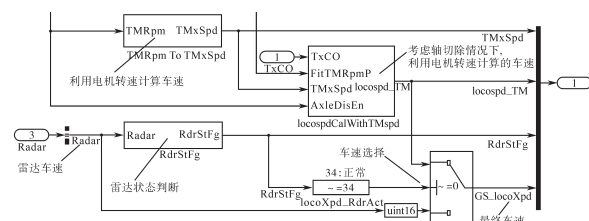


图10 机车速度选择逻辑

Fig.10 Locomotive speed selection logic

模块及信号说明:

TMRpmToTMSpd 模块: 根据电机转速计算机车速度。输入信号 $TMxRpm$: 电机转速; 输出信号 $TMxSPd$: 机车速度。在模块中可以根据实际情况设置齿轮箱变比和轮径大小。

LocoSpdCalWithTmspd 模块: 同样是根据电机转速计算机车速度,与 $TMRpmToTMSpd$ 模块不同之处在于多了TCU的故障检测信号 $FltTM-RpmP$ 和显示屏发出的轴切除信号 $AxleDisEn$ 。

RdrDtFg 模块: 雷达状态检测。输入信号 $Radar$: 雷达车速。

雷达车速和综合考虑各种工况下电机车速同时进入车速选择模块,根据雷达状态检测结果进行选择。

3.3 试验验证及结果

通过以上的改进,在机车的台架试验中对优化结果进行验证。台架试验现场如图11所示。



图11 台架试验

Fig.11 Bench test

进行整车的扫频试验,分别在牵引工况和制动工况下对比4台电机的转速是否一致,优化后的速度曲线如图12所示。对比电机转速和雷达速度信号的差别,对比曲线如图13所示,因实际采样到的雷达速度与电机转速的比值为0.7,和图5进行对比分析可知,雷达信号的波动得到了明显改善,且雷达速度信号和电机速度的跟随保持一致。

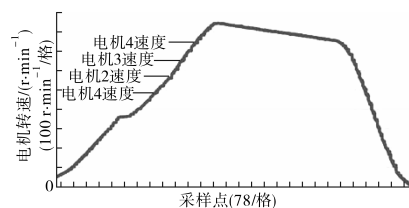


图12 优化后的4台电机速度曲线

Fig.12 Optimized speed curves of 4 motors test

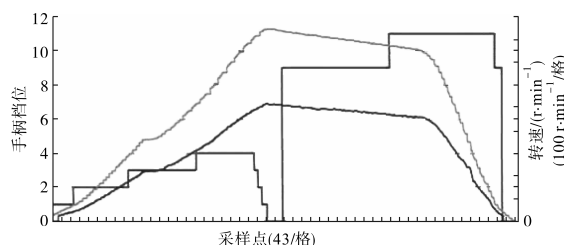


图13 优化后电机速度和雷达速度的对比

Fig.13 Comparison of motor speed and radar speed after optimization

在后续的台架试验中,整车控制逻辑的速度信号明显得到改善和优化,异常卸载的故障没有再发生。

4 结论

在车辆试验中,存在很多卸载保护情况,有些卸载并不是逻辑设计所预期的,影响机车的正常运行,本文对GCD-1000轨道车试验中两种工

(下转第87页)

能下降,提出一种将FLNN和RFNN相结合的RFLFNN方法。该方法可在线估计系统不确定性并适时调整参数抑制不确定性因素的影响,同时通过FLNN提高神经网络的收敛速度,保证系统稳定快速运行。实验结果表明,该方法切实可行,可明显提高系统的跟踪精度。

参考文献

- [1] Chen M Y, Lu J S. High-precision Motion Control for a Linear Permanent Magnet Iron Core Synchronous Motor Drive in Position Platform[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1): 99-108.
- [2] Yang Junyou, He Guofeng, Cui Jiefan. Sliding Mode Variable-structure Direct Thrust Control of PMLSM Using SVM [C]// Eighth International Conference on Electrical Machines & Systems. IEEE, 2005.
- [3] 曹文霞,汪永华,钱多德. 基于RBF神经网络整定PID的PMLSM控制研究[J]. 安徽农业大学学报, 2012, 39(1): 154-158.
- [4] Su W T, Liaw C M. Adaptive Positioning Control for a LPMSM Drive Based on Adapted Inverse Model and Robust

Disturbance Observer[J]. IEEE Transactions on Power Electron, 2006, 21(2): 505-517.

- [5] 韩雪岩,祁坤,张哲,等. 永磁同步直线电机磁阻力分析及抑制措施[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 70-76.
- [6] Lin F J, Chou P H, Hung Y C, *et al.* Field-programmable Gate Array-based Functional Link Radial Basis Function Network Control for Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Servo Drive System[J]. Iet Electric Power Applications, 2010, 4(5): 357-372.
- [7] 徐保友,周浩,黄攀雄. 基于模糊神经网络的异步电机DTC研究[J]. 变频器世界, 2012(2): 64-67.
- [8] 刘凤春,段征宇,牟宪民. 永磁同步电机动态模糊神经网络控制器设计[J]. 电气自动化, 2013, 35(3): 19-21, 44.
- [9] 张佳媛,王丽梅. 基于模糊神经网络补偿控制器的H型平台同步控制[J]. 电气工程学报, 2015, 10(9): 54-61.
- [10] Lin J F, Wai R J, Shyu K K, *et al.* Recurrent Fuzzy Neural Network Control for Piezoelectric Ceramic Linear Ultrasonic Motor Drive[J]. IEEE Trans. Ultrason Ferroelect. Freq. Contr., 2001, 48(4): 900-913.

收稿日期:2018-12-05

修改稿日期:2019-03-28

(上接第76页)

况下由于速度信号异常导致的卸载故障进行了详细分析,并从优化整车控制逻辑的角度出发,提出了信号滤波及信号融合选择的优化措施,降低了卸载故障率,目前系统运行良好。本文轨道车卸载故障作出的分析及提出的改进措施对国内同类型的轨道车的卸载故障的排查和解决具有极高的推广和应用价值。

参考文献

- [1] 岳芃喜. 内燃机车典型非正常卸载故障的判断与处理[J]. 铁道机车车辆工人, 2008(3): 1-6.
- [2] 段崇义,孟东,邵学,等. DF10D型机车水温高卸载故障的原因分析及处理措施[J]. 内燃机车, 2011(8): 41-44.
- [3] 康成伟,姜航. CRH5型动车组列车速度计算原理及逻辑应用[J]. 铁道车辆, 2017, 55(8): 36-39.
- [4] 万学一. DF4型内燃机车突然卸载的故障分析及处理[J]. 中

国新技术新产品, 2016(12): 60-61.

- [5] 陈华国,肖功彬,彭辉水,等. 基于雷达测速的SDA1型交流传动内燃机车粘着利用控制[J]. 机电传动, 2012(6): 5-7, 26.
- [6] 黄丽湘,张卫华,马启文,等. 机车车辆动态模拟和台架试验[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(2): 14-18.
- [7] 王秀红. 机车防滑控制关键技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [8] 陈鹏. 电力机车的空转识别及防空转研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [9] 钱钧惠,王伟,高莹,等. RC滤波电路实验设计与研究[J]. 大学物理实验, 2017, 6(5): 58-62.
- [10] 张武娟. 雷达测速在列车运行中的研究与应用[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [11] 郭自刚,赵建波,倪明. 基于嵌入式多信息融合的列车测速定位系统[J]. 计算机工程, 2013, 39(12): 11-17.

收稿日期:2019-03-29

修改稿日期:2019-05-12