

# 车体过电压对动车组轴端速度传感器的影响机理

张国芹 高国强

(中车长春轨道客车股份有限公司电气研发部,130062,长春//第一作者,高级工程师)

**摘要** 针对动车组在运行过程中因速度传感器被干扰导致车门无法开启的故障,分析了速度传感器发生电磁干扰的原因,建立和验证了速度传感器的电磁耦合仿真模型,采用仿真模型研究了车体浪涌过电压幅值、信号传输电缆长度及屏蔽层串联电容对速度传感器电磁干扰的影响。研究结果表明,速度传感器的电磁干扰与车体浪涌过电压幅值、信号传输电缆长度和屏蔽层串联电容成正比,其中车体浪涌过电压幅值的变化对速度传感器产生的电磁干扰影响最大。研究结论为速度传感器的电磁干扰深化研究提供了参考依据。

**关键词** 动车组;车体浪涌过电压;速度传感器;电磁干扰

**中图分类号** U270.7

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2019.02.014

## Impact Mechanism of EMU Body Overvoltage on the Shaft End Speed Sensor

ZHANG Guoqin, GAO Guoqiang

**Abstract** In view of the open door failure caused by the disturbed speed sensors during EMU operation, the electromagnetic interference of speed sensors is analyzed. Then, an electromagnetic coupling simulation model of the speed sensor is established, verified and used to study the impact of the amplitude of vehicle body surge voltage, the length of signal transmission cable, and the series capacitance of signal transmission cable shielding layer on the electromagnetic interference of speed sensor. The results show that the electromagnetic interference of speed sensor is positively related to the amplitude of the surge voltage, the length of the signal transmission cable and the series capacitance of the shielding layer, in which the variation of the surge voltage amplitude of the vehicle body has the greatest impact on the electromagnetic interference produced by speed sensor. The conclusion of this research provides a reference for further researches on the electromagnetic interference of speed sensor.

**Key words** electric multiple unit(EMU); body surge overvoltage; speed sensor; electromagnetic interference

**Author's address** CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

近年来,我国高速动车组取得了快速的发展,但在运行过程中,也发生过一些因车载轴端速度传感器被车体浪涌过电压干扰后,输出脉冲信号异常,导致其他车载设备无法正常工作的故障情况<sup>[1-4]</sup>。这类故障严重影响高速铁路的正常运营。

日本铁路技术研究所的 Satoru Hatsukade 分析了车体浪涌过电压产生的原因,认为过高的车体浪涌过电压会引起车载设备尤其是车载电子设备故障和损坏<sup>[5-6]</sup>;北京全路通信信号研究设计院的杨剑和北京通号国铁城市轨道交通技术有限公司的王晟各自通过对速度传感器工作原理及安装方式的分析,均认为车体与转向架之间的浪涌过电压会影响速度传感器的输出信号甚至导致速度传感器损坏<sup>[1,7]</sup>;青岛四方机车车辆股份有限公司的马云双通过对动车组电磁干扰问题的研究,认为车体产生过高的浪涌过电压会导致速度传感器内部绝缘薄弱处被击穿<sup>[4]</sup>;西南交通大学的严加斌对速度传感器电磁干扰问题进行了分析,认为车体浪涌过电压会通过屏蔽层与芯线间的寄生电容耦合到芯线内,进而对速度传感器芯线中传输的速度信号造成干扰<sup>[3]</sup>;西南交通大学的朱峰研究了弓网离线电弧对速度传感器电磁干扰的影响,认为弓网离线电弧产生的辐射干扰会导致车体地电位升高,进而对速度传感器的正常工作造成干扰<sup>[2]</sup>。已有文献表明,车体浪涌过电压会引起速度传感器输出脉冲信号异常,也会导致速度传感器损坏,但目前尚缺乏可用于定量分析的仿真模型。

本文首先介绍了速度传感器的安装方式,在此基础上分析了速度传感器发生电磁干扰的原因,然后建立了速度传感器的电磁耦合仿真模型。通过试验验证了模型的正确性,同时采用仿真模型研究了车体浪涌过电压幅值、信号传输电缆长度及信号传输电缆屏蔽层串联电容对速度传感器电磁干扰的影响。

## 1 速度传感器工作原理及安装方式

轴端速度传感器以检测轮轴转速的方式,实现动车组运行速度及运行方向的检测。其工作原理如图1所示。

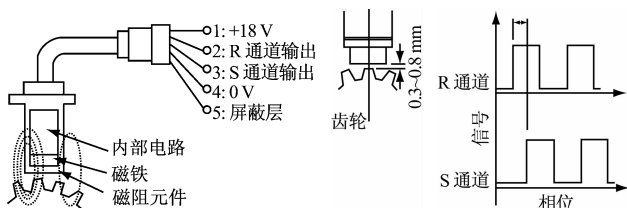


图1 速度传感器工作原理

由图1可见,当齿轮接近磁铁时,磁力线就会集中到齿轮的齿部,并随齿轮旋转发生变化。磁力线的移动变化经磁阻元件检测和电路处理后转变为脉冲信号输出,传感器R通道、S通道的输出脉冲信号相位相差 $90^\circ$ ,可以用来判断轮轴的旋转方向。例如,当动车组正向行驶时,R通道信号超前S通道信号 $90^\circ$ ,逆向行驶时,则R通道信号滞后S通道信号 $90^\circ$ <sup>[4]</sup>。

速度传感器电源与信号之间通过通过 $100\ \Omega$ 电阻相连。当速度传感器前端的磁场改变时,传感器依次输出 $7\ \text{mA}$ 和 $14\ \text{mA}$ 两个电流,该电流在电阻上形成 $0.7\ \text{V}$ 和 $1.4\ \text{V}$ 的两个电压,电源电压减去电阻上的电压得到速度信号的电压<sup>[8]</sup>。如果在动车组运行过程中由于电磁干扰或其他原因导致速度传感器的信号输出异常,则可能威胁到动车组的安全运行。

图2为速度传感器的安装方式示意图。从图2可以看出,速度传感器外壳使用钢板固定于转向架上,为减小传感器信号电缆屏蔽层中流过的低频干扰电流,在传感器外壳与电缆屏蔽层之间串联一个小封装的 $4.7\ \text{pF}$ 电容。速度传感器使用多芯屏蔽电缆,穿过列车车体机舱,与SDU模块的X4连接器相连(SDU模块为列车自动保护(ATP)系统的测速测距单元,能够接收速度传感器发出的脉冲信号<sup>[4]</sup>)。

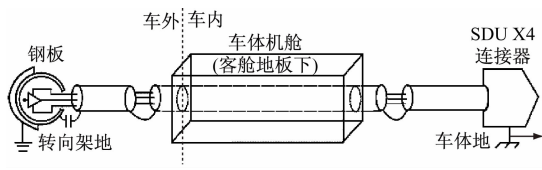


图2 速度传感器安装示意图

由于屏蔽层的一端与车体相连,另一端与转向架地相连,车体浪涌过电压会通过屏蔽层与芯线间的耦合电感和耦合电容对芯线内传输的速度信号造成干扰。

## 2 电磁干扰仿真分析

### 2.1 仿真模型构建

动车组在升降弓、主断路器闭合以及接触网遭到雷击时车体容易产生浪涌过电压<sup>[9-13]</sup>。经现场测试,车体浪涌过电压典型波形如图3所示。通过对实测车体浪涌过电压进行傅里叶频谱分析,可以得到图4所示频谱波形。

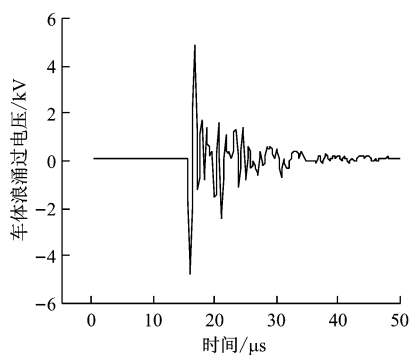


图3 车体浪涌过电压实测波形

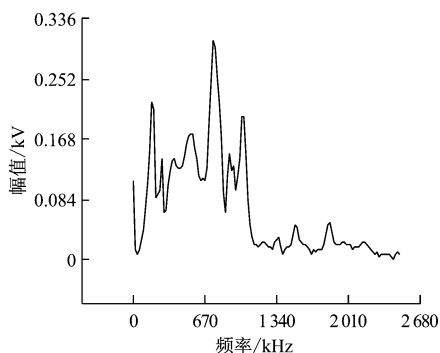


图4 车体浪涌过电压频谱波形

从图4可以看出,车体浪涌过电压频率分量集中在 $1\ \text{MHz}$ 以内。以最高频率 $1\ \text{MHz}$ 来考虑,车体浪涌过电压的最短波长为 $300\ \text{m}$ 。又由于速度传感器信号传输电缆的长度小于单节车厢的长度( $25\ \text{m}$ ),所以车体浪涌过电压的波长远远超过信号传输电缆的长度,因此,信号传输电缆上各点电压和电流可看成恒定值,车体浪涌过电压通过电缆屏蔽层对电缆芯线的干扰可以看成是由集总电容和电感引入的。建立的速度传感器电磁干扰仿真模型如图5所示。

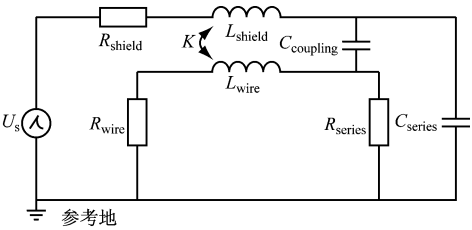


图5 速度传感器电磁耦合仿真模型

图5中,两根导线平行,其中一根导线为等效屏蔽层,一端有干扰源 $U_s$ ,另一端有串联电容 $C_{series}$ ,而 $R_{shield}$ 和 $L_{shield}$ 分别为屏蔽层等效电阻和电感;另一根导线为等效芯线, $R_{series}$ 为芯线串联电阻, $R_{wire}$ 和 $L_{wire}$ 分别为芯线等效电阻和电感, $K$ 为屏蔽层与芯线间耦合电感的耦合因数, $C_{coupling}$ 为屏蔽层与芯线间耦合电容。这里由于 $R_{shield}$ 和 $R_{wire}$ 远小于芯线串联电阻 $R_{series}$ ,因此可以被忽略。

车体浪涌过电压一方面引起电缆屏蔽层通过浪涌电流,进而通过耦合电感影响到芯线的输出信号;另一方面直接通过电缆屏蔽层与芯线间耦合电容在芯线上产生干扰。

### 2.2 仿真参数确定

根据速度传感器发生电磁干扰的理论分析可知,多芯屏蔽电缆和屏蔽同轴电缆受到干扰的基本原理相同,因此,本文采用屏蔽同轴电缆进行仿真分析。

动车组常用的编织型同轴电缆参数如下:电缆屏蔽层以及芯线材料均为铜<sup>[14]</sup>,屏蔽层直径 $D=2.95\text{ mm}$ ,厚度 $\Delta=0.15\text{ mm}$ ,内芯直径 $d=0.9\text{ mm}$ ,电导率 $\sigma=5.8\times10^7\text{ s/m}$ ,磁导率 $\mu_0=4\pi\times10^{-7}\text{ H/m}$ ,芯线与屏蔽层间绝缘材料为聚乙烯,其相对介电常数为2.3。这里假设速度传感器信号传输电缆长度为1 m。

$R_{series}$ 为速度传感器电源与信号之间的串联电阻,阻值为 $100\text{ }\Omega$ ;  $C_{series}$ 为屏蔽层串联电容,电容值为 $4.7\text{ pF}$ ;  $L_{wire}$ 为芯线自感,芯线为圆截面直导线,其计算公式和计算结果如下<sup>[15]</sup>:

$$L_{wire} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4} \right) =$$

$$15.2 \times 10^{-6} \text{ H} = 1.52 \text{ }\mu\text{H}$$

式中:

$l$ ——导线长度,m;

$r$ ——导线截面半径,m。

$L_{shield}$ 为电缆屏蔽层的自感,屏蔽层类似圆截面空心直导线,其计算公式和计算结果如下:

$$L_{shield} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{rc} - 1 \right) =$$

$$14.8 \times 10^{-6} \text{ H} = 1.48 \text{ }\mu\text{H}$$

式中:

$c$ ——屏蔽层内半径 $q$ 和外半径 $r$ 之比对应的距离系数,由表1<sup>[15]</sup>取值。

表1 屏蔽层圆环截面几何平均距离系数

$q/r$	$c$	$q/r$	$c$	$q/r$	$c$
0.0	0.778 8	0.4	0.828 6	0.8	0.935 8
0.1	0.782 5	0.5	0.851 9	0.9	0.967 2
0.2	0.793 0	0.6	0.877 8	1.0	1.000 0
0.3	0.808 7	0.7	0.908 5		

$K$ 为屏蔽层与芯线间耦合电感的耦合系数,其计算公式和计算结果如下<sup>[16]</sup>:

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_{wire} L_{shield}}} = 0.986$$

式中:

$L_{wire}$ ——芯线自感;

$L_{shield}$ ——屏蔽层自感;

$M$ ——屏蔽层与芯线的互感。

由于所有屏蔽层上电流产生的磁通全部包围着芯线,所以屏蔽层与芯线的互感等于屏蔽层的自感<sup>[17]</sup>。

$C_{coupling}$ 为电缆屏蔽层与芯线的耦合电容,其计算公式和计算结果如下<sup>[18]</sup>:

$$C_{coupling} = \frac{1\,000\xi_r l}{18\ln \frac{D}{d}} = 107 \text{ pF}$$

式中:

$\xi_r$ ——聚乙烯材料的相对介电常数;

$l$ ——导线长度,m;

$D$ ——电缆屏蔽层直径,mm;

$d$ ——电缆内芯直径,mm。

干扰源 $U_s$ 采用Pspice软件自带的指数电压源。仿真模型中各元件参数如表2所示。

### 2.3 仿真结果分析

现场实测车体浪涌过电压的持续时间为微秒级<sup>[19-20]</sup>,标准中规定车载电子设备的浪涌试验波形为 $5/50\text{ }\mu\text{s}$ <sup>[21]</sup>,因此,仿真所加信号源为单极性浪涌过电压波形(见图6),其上升时间为 $5\text{ }\mu\text{s}$ ,电压峰值为 $10\text{ V}$ 。

图7所示为芯线串联电阻 $R_{series}$ 两端的串扰电

表 2 电磁耦合仿真模型元件参数

序号	元件名称	标识符号	设定值
1	芯线串联电阻	$R_{\text{series}}$	100 $\Omega$
2	屏蔽层串联电容	$C_{\text{series}}$	4.7 pF
3	电缆屏蔽层自感	$L_{\text{shield}}$	1.48 $\mu\text{H}$
4	芯线自感	$L_{\text{wire}}$	1.52 $\mu\text{H}$
5	屏蔽层与芯线的耦合系数	$K$	0.986
6	屏蔽层与芯线的耦合电容	$C_{\text{coupling}}$	107.0 pF
7	浪涌电压源	$U_{\text{S}}$	10 V

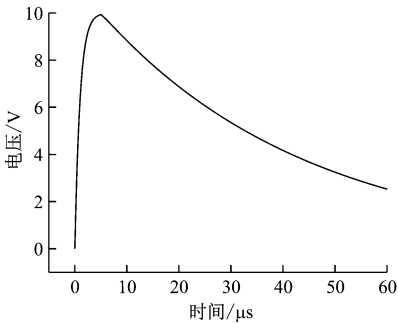


图 6 车体浪涌过电压仿真波形

压波形。由图可知,在车体浪涌过电压峰值为 10 V 时,芯线串联电阻感应出峰值为 0.012 V 的浪涌电压。可以推测,当车体浪涌过电压进一步增大时,芯线干扰电压也会随之增大。当芯线干扰电压超过速度传感器正常最低输出信号电压 0.7 V 时,则可能对速度传感器正常工作造成干扰。

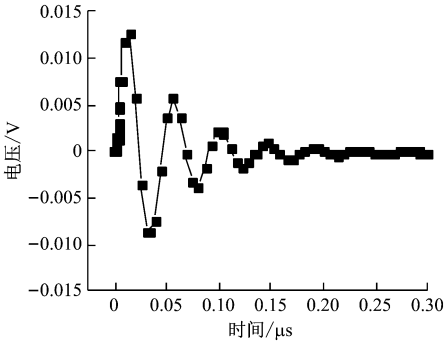


图 7 电缆芯线串联电阻两端电压

3 试验验证

为进一步证实车体浪涌过电压对速度传感器的电磁干扰问题,本文还进行了试验验证工作。试验模型如图 8 所示。

图 8 中信号发生器与屏蔽层及 4.7 pF 电容串联,同轴电缆芯线串联 100  $\Omega$  的电阻  $R_{\text{series}}$ ,信号发生器输出电压的峰值为 10 V,波形如图 9 所示。

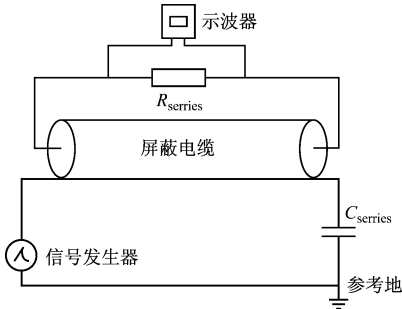


图 8 速度传感器电磁干扰试验模型

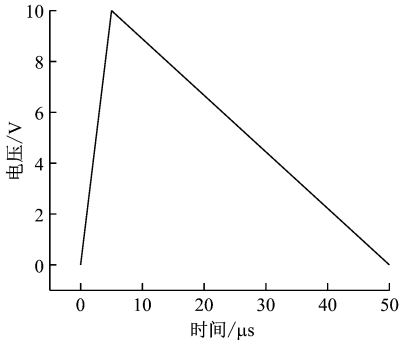


图 9 信号发生器输出电压仿真波形

图 10 为芯线串联电阻感应电压的实测波形。由图可知,当信号发生器输出浪涌电压峰值为 10 V 时,在电缆芯线串联电阻可以感应出峰值为 0.010 V 的干扰电压。试验波形和仿真波形两者均发现出现振荡衰减,衰减时间约 0.3  $\mu\text{s}$ 。在幅值方面,仿真值 0.012 V 与试验值 0.010 V 基本一致。

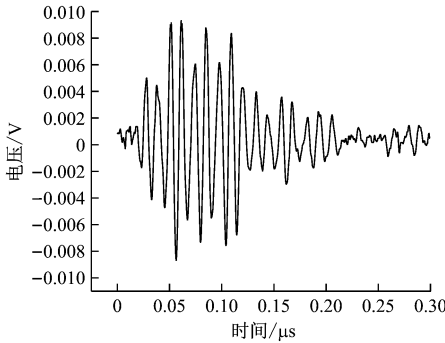


图 10 芯线串联电阻感应电压实测波形

4 干扰因素分析

4.1 车体浪涌过电压的干扰

动车组在不同运行工况下,车体浪涌过电压是不断变化的。在电缆长度为 1 m、屏蔽层串联电容为 4.7 pF 的情况下,车体浪涌过电压对芯线串联电阻感应电压的干扰仿真如图 11 所示。

仿真结果表明,芯线串联电阻感应电压与车体

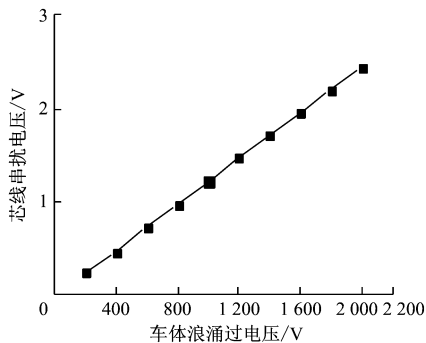


图 11 车体浪涌电压的干扰仿真波形

浪涌电压幅值基本呈正比。当车体浪涌电压为 2 000 V 时,芯线串联电阻感应电压为 2.4 V,增幅为原来的 10 倍。而速度传感器的正常输出信号在串联电阻上产生的电压为 0.7 V 和 1.4 V。由此可见,车体浪涌电压幅值过大会可能会影响速度传感器的正常输出信号。

#### 4.2 电缆长度的干扰

动车组的速度传感器与 SDU 单元通过信号传输电缆相连。由于速度传感器安装于不同的转向架上,SDU 单元安装于列车自动驾驶(ATP)机柜内部,因此,速度传感器至 SDU 单元的电缆长度会发生变化。

图 12 所示为在车体浪涌电压为 10 V、屏蔽层串联电容为 4.7 pF 的情况下,信号电缆长度与芯线串联电阻感应电压的关系。由图可见,当信号电缆长度从 2 m 至 20 m 变化时,芯线串联电阻感应电压从 0.023 V 增加到了 0.180 V,增幅为原来的 7.5 倍。

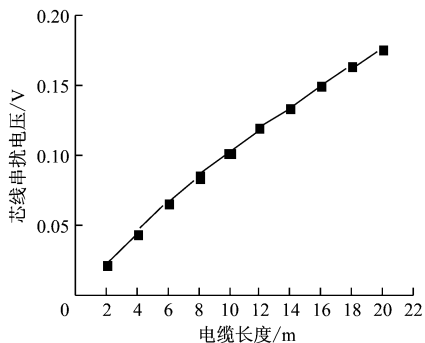


图 12 电缆长度的干扰仿真波形

#### 4.3 屏蔽层串联电容的干扰

信号传输电缆屏蔽层串联的电容大小不同,会直接影响到通过屏蔽层的浪涌电流的大小。由于屏蔽层的浪涌电流会通过感性耦合对传感器芯线产生干扰,因此选择不同大小的耦合电容分析其对芯线串联电阻感应电压的影响。

图 13 中反映了在车体浪涌电压为 10 V、信号电缆长度为 1 m 时,电缆屏蔽层串联电容对芯线串联电阻感应电压的干扰。由图可以看出,当电容值从 100 pF 至 1 000 pF 变化时,芯线感应电压从 0.016 V 增加到了 0.043 V,增幅为原来的 2.6 倍。

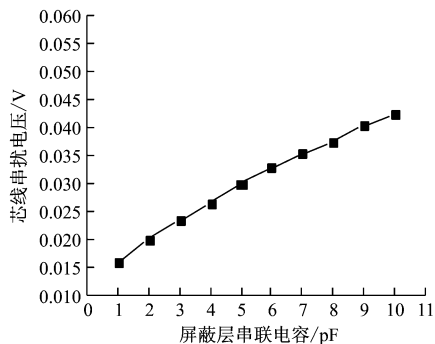


图 13 电缆屏蔽层串联电容的干扰仿真波形

## 5 结论

本文对动车组速度传感器电磁干扰问题进行了分析,建立了速度传感器的电磁耦合仿真模型。基于仿真分析,得出以下结论:

(1) 车体浪涌电压越大,对速度传感器的电磁干扰也越大。当车体浪涌电压为 2 000 V 时,芯线串联电阻感应电压可达 2.4 V。

(2) 信号电缆越长,对速度传感器的电磁干扰也越大。当电缆长度从 2 m 到 20 m 变化时,芯线串联电阻感应电压从 0.023 V 增加到了 0.18 V,增幅为原来的 7.5 倍。

(3) 屏蔽层串联电容越大,对速度传感器的电磁干扰也越大。当电容值从 100 pF 到 1 000 pF 变化时,芯线串联电阻感应电压从 0.016 V 增加到了 0.043 V,增幅为原来的 2.6 倍。

(4) 对比车体浪涌电压与信号电缆和屏蔽层串联电容变化对速度传感器的电磁干扰影响可知,车体浪涌电压的变化对速度传感器的电磁干扰影响最大,且基本成正比例关系。

本文建立的仿真模型只考虑了传导干扰对速度传感器传输信号的影响,如增加考虑辐射干扰的影响,则分析结果会更加完善。

## 参考文献

- [1] 杨剑. CRH2 列车车载测速测距设备 EMC 实验及防护方法[J]. 铁路通信信号工程技术, 2010, 07(5):21.
- [2] 朱峰,唐毓涛,高晨轩. 弓网离线电弧对 CRH380BL 型动车

- 组速度传感器的电磁干扰机理及抑制[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(6):69.
- [3] 严加斌, 朱峰, 李军, 等. 高速动车组速度传感器的电磁干扰测试与分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2015(3):433.
- [4] 马云双. 新一代动车组电磁兼容关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [5] HATSUKADE S, MAEDA T. Experiment and basic analysis of surges on a rolling stock's body[J]. IEEJ Transactions on Power and Energy, 2005, 125(8): 754.
- [6] HATSUKADE S. Reduction method of surge voltage on ac railcar's body[J]. Foreign Rolling Stock, 2010, 50(2):70.
- [7] 王晟. CRH2 型高速动车组车载信号系统电磁干扰分析与解决方案[J]. 铁道技术监督, 2015, 43(9): 32.
- [8] 严加斌. CRH3 型动车组轴端速度传感器的电磁兼容性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
- [9] 韩伟锋, 胡学永, 肖石, 等. 雷击接触网高速列车车体过电压分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(4):117.
- [10] HATSUKADE S, FUJINO K, KANNO S. Suppressing over-voltage on carbodies of a highspeed EMU[C]// 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications. Lille: IEEE, 2013:1.
- [11] 高国强. 高速列车运行状态暂态过电压机理与抑制方法的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [12] 杨帅, 曹保江, 高国强, 等. 高速动车组降弓浪涌过电压分析[J]. 铁道学报, 2015(7):46.
- [13] 高国强, 刘耀银, 万玉苏, 等. 高速动车组升弓浪涌过电压研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2909.
- [14] 马云双, 闻映红, 张丹, 等. 动车组屏蔽线缆间串扰特性及其试验验证研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1188.
- [15] 卡兰塔罗夫. 电感计算手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [16] 邱关源. 电路[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [17] 刘帆, 陈柏超, 卞利钢. 变电站二次电缆屏蔽层接地方式探讨[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 63.
- [18] 肖飏. 圆形金属丝缠绕型外导体同轴电缆工作电容的计算[C]// 中国通信学会 2011 年光缆电缆学术年会. 成都:中国通信学会, 2011.
- [19] 聂颖, 胡学永. 高速动车组升弓浪涌过电压研究[J]. 机车电传动, 2013(4):9.
- [20] 陈盼. 高速动车组升降弓暂态过电压形成机理与抑制方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局. 轨道交通机车车辆电子装置: GB/T 25119—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

(收稿日期:2018-10-11)

(上接第 59 页)

网压	网流	列车速度	手柄角度	恒速模式	TCU反馈 转矩	恒速手柄 百分比	制动请求	电制动且 锁闭	电制动使 能	电制动命 令使能	1年电制 动故障	2年电制 动故障	4年电制 动故障
tzvl25	tzccorr1	frveloc	tzenco	tzmarci	frtcueb	tzcoppi	tzrichf	tzinibi	frabilf	tzabilf	tzavafri	tzavafi	tzavafri
29000	151	197	126	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	153	197	126	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	151	197	126	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	148	197	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	149	197	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	146	197	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	137	197	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	135	197	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	139	197	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	151	194	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	153	194	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	156	194	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	157	194	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	156	194	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	150	194	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	148	194	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	149	194	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	146	194	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	143	194	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	139	194	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	146	194	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
29000	151	194	125	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1

图 8 网压超时禁止施加电制动的监控界面

根据电制动失效的运行情况分析,采用调整网压限制电制动力阈值的配置参数,能够有效保证电制动力的正常使用,降低制动摩擦副过度磨损问题,保证高速动车组的运行可靠度,在安全可靠的前提下拓宽网压的有效应用范围。

参考文献

[1] BOUCLET D. Software flow charts documents; Inverter handler

functions[R]. Savigiano; Alstom Villeurbanne Cedex, 2008.

[2] FIGINI G. Requirements secification for the clt application SW [R]. Savigiano; Alstom Sesto S Giovanni, 2008.

[3] BARBIERI D. Traction control unit interface requirements secification for EMU for MoR CA250 TCU[R]. Savigiano; Alstom Sesto S Giovanni, 2006.

(收稿日期:2018-10-11)