



电力机车负载运行对城轨车辆供电品质的影响分析与对策

杨守君¹, 高洪光¹, 张立臣¹, 李雪莉¹, 宿钰明², 李少强³

(1. 中车大连机车车辆有限公司, 辽宁 大连 116045;

2. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031;

3. 中车大连电力牵引研发中心有限公司, 辽宁 大连 116052)

摘要: 交流接触网与城轨直流供电接触网近距离并行敷设时, 易通过电磁耦合产生感应电压, 危及人员安全并影响机车运行。为解决该工程难题, 文章以大连机车旅顺试验环线(交、直流间距仅5 m)为研究对象, 针对双网无法同步开展车辆出厂试验的痛点, 研究感应电压机理建模与抑制技术。通过构建等效电路模型, 基于 MATLAB/Simulink 搭建仿真平台并结合实测数据校准, 揭示了不同线间距下感应电压的衰减规律及特殊工况下的瞬态特性。根据仿真分析结果, 设计了 LC/LRC 滤波抑制方案并开展工程验证, 在试验线加装3组 LRC 与1组 LC 滤波装置后, 成功将感应电压抑制至安全范围, 解决了多车型同步试验难题, 显著提升了生产效率。研究成果可为四网融合背景下的交直流线路规划与电磁兼容治理提供重要的理论依据与工程参考。

关键词: 电力机车; 城轨直流接触网; 感应电压; 电磁耦合; 线路间距; 抑制对策; 四网融合

中图分类号: U223.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2026)01-0167-08

0 引言

当前, 国家大力推进铁路四网融合建设^[1], 实现了轨道交通供电系统交流网络与直流网络的一体化协同布局, 电力机车(或高铁)与城轨车辆的交、直流接触网近距离并行运行已成为一种典型工况。然而, 电力机车运行过程中产生的大牵引电流(重联运行时最高达1 200 A)与短路电流(瞬时峰值可达12 000 A), 会通过电场与磁场的复合耦合作用, 在邻近的城轨直流接触网中引发强烈的电磁干扰, 导致直流网即便在非供电状态下仍可能出现感应电压超标的问题^[2-3]。此类问题不仅直接影响城轨车辆电气设备安全, 还可能在电力机车过分相工况下引发电压互感器故障^[4-5], 进而阻碍交直流线路并行使用, 制约四网融合建设质量

与协同运行^[3]。

大连机车旅顺环线试验线作为多类型机车车辆的试验线, 内环供电线路(交流27.5 kV)与外环供电线路(直流750 V/1 500 V)间距仅5 m^[4], 属于四网融合建设中的典型交直流并行场景。在实际运行中, 该试验线存在感应电压超标问题: 当内环有电力机车运行时, 外环的城轨直流接触网即便处于非供电状态, 其感应电压仍会超过1 500 V, 导致电力机车与城轨车辆始终无法同步试验, 严重降低了试验线的利用率与试验效率。

本文依托大连机车旅顺环线试验线, 系统开展电力机车运行对城轨直流接触网感应电压的影响分析, 通过仿真分析与现场试验研究^[6-7], 明确不同线路间距下感应电压的变化规律, 并针对性地设计高效可行的抑制对策, 以满足旅顺厂区不同车型同步试验的迫切

基金项目: 大连市科技人才创新支持计划项目(2024RG02)

通信作者: 高洪光, 男, 正高级工程师, 主要从事铁路机车研发工作; E-mail: dlchg@163.com

引用格式: 杨守君, 高洪光, 张立臣, 等. 电力机车负载运行对城轨车辆供电品质的影响分析与对策[J]. 机车电传动, 2026(1): 167-174. DOI: 10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.022.

Citation: YANG Shoujun, GAO Hongguang, ZHANG Lichen, et al. Analysis and countermeasures of influence of electric locomotive on-load running on power quality of urban rail vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2026(1): 167-174. DOI: 10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.022.

需求。

1 供电网影响机理与仿真建模

1.1 影响机理分析

电力机车运行对城轨直流接触网感应电压的影响源于电磁耦合效应,具体分为两类:一是电场耦合,交流接触网的高压电场会在邻近直流导线表面感应出对地电位,从而产生感应电压;二是磁场耦合,电力机车运行产生的交变电流会形成交变磁场,在直流线路中感应出电动势,进一步叠加形成感应电压。两种耦合效应叠加,共同导致城轨直流接触网的感应电压升高,其影响程度与机车负载、运行工况及线路间距直接相关^[8-9]。

1.2 仿真模型构建

基于电磁耦合原理,在 MATLAB/Simulink 平台构建交直流接触网耦合仿真模型,模型包括参数计算模块和工况模拟模块。参数计算模块精准计算线路单位长度的电容及阻抗参数,用来表征耦合强度。工况模拟模块实现对空载、不同负载(1 000~9 600 kW)及故障暂态(断路器跳闸、合闸)工况的动态模拟,明确不同工况下感应电压的变化特性^[6]。

1.2.1 仿真基础条件

本研究选定环形试验线路作为仿真对象,构建交流与直流供电接触网近距离平行敷设条件下的感应电压耦合仿真模型;并综合考虑交流电源、接触网高度与间距、LRC 滤波器和 LC 滤波器等要素,开展直流接触网感应电压计算^[7]。

旅顺环形试验线路是国内首个能同时满足电力机车、内燃机车及城轨车辆主要型式试验与例行试验需求的线路,而且还支持上述各类车型的线路试验^[10]。相关试验车型包括大功率交流传动电力机车(HXD3B 型,9 600 kW;HXD3C 型,7 200 kW 等)、6 000 HP 大功率内燃机车以及城轨车辆^[11]。试验线内环为机车车辆试验线,架空敷设交流 27.5 kV 接触网;外环为城轨车辆试验线,架空敷设直流 750 V/1 500 V/3 000 V(预留)接触网,地面敷设直流 750 V/1 500 V 接触轨。环形试验线内环长 4.551 km,外环长 4.583 km,呈近似椭圆状环绕厂区,内外环间线间距 5.0 m。

1.2.2 线路等效结构

电气化铁路静电感应耦合模型如图 1 所示。图 1(a)为等效电容模型,其中 1 为交流带电接触网导线,2 为直流无电接触网导线, C_{11} 为 1 号导线与大地间单位长度等效电容, C_{12} 为 1 号导线与 2 号导线间单位长度等效电容, C_{22} 为 2 号导线与大地间单位长度等效电容;该电容模型将线路间的静电耦合简化为含对地电容 C_{11} 、 C_{12} 与互电容 C_{22} 的三电容网络。图 1(b)为基于镜像法的

几何模型,模型明确了导线高度、导线半径、线间距等参数,其中, $+P_1$ 为带电导线 1 所带电荷, $-P_1$ 为导线 2 上的感应电荷, d 为双网线间距, a 为接触网等效半径, h 为接触网高度, r_1 、 r_2 为基于镜像法定义的几何距离参数。

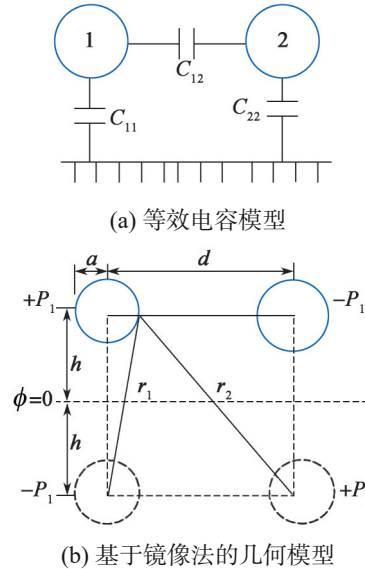


图 1 电气化铁路静电感应耦合模型

Fig. 1 Electrostatic induction coupling model of electrified railway

1.2.3 单位长度的阻抗

由于 $a \ll d$ 、 $a \ll h$,采用镜像法对导线在空间产生的电场和电位进行处理,导线上的电荷可用线电荷密度 $\pm\rho_1$ 表示。

根据电位计算公式可得出导线 1 表面的电位近似为

$$\Phi_1 = \frac{\rho_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{a} + \frac{-\rho_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\sqrt{4h^2 + d^2}}{d} \quad (1)$$

导线 2 表面的电位近似为

$$\Phi_2 = \frac{\rho_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\sqrt{4h^2 + d^2}}{d} + \frac{-\rho_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{a} \quad (2)$$

式中: Φ_1 为交流接触网导线 1 表面的电位; Φ_2 为城轨直流接触网导体 2 表面的电位; ρ_1 为单位长度线电荷密度; ϵ_0 为真空介电常数。

1) 单位长度的电容计算

采用矩阵对空间电位进行求解,为简化计算,记为:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{11} &= \alpha_{22} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{a} \\ \alpha_{12} &= \alpha_{21} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\sqrt{4h^2 + d^2}}{d} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

可得

$$\begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_1 \\ -\rho_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: α 为电位系数,用于描述电荷对电位的贡献; α_{ii} ($i=1,2$) 为自有电位系数; α_{ij} ($i=1,2;j=1,2;i \neq j$) 为互有电

位系数^[7-8]。

对电位系数矩阵求逆, 计算公式为

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \\ -\rho_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \alpha_{11} & -\alpha_{12} \\ -\alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, Δ 为电位系数矩阵的行列式, $\Delta = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{vmatrix}$,

可得

$$\beta_{11} = \frac{\alpha_{11}}{\Delta}, \beta_{12} = \beta_{21} = -\frac{\alpha_{12}}{\Delta}, \beta_{22} = \frac{\alpha_{22}}{\Delta} \quad (6)$$

式中: β 为静电感应系数; $\beta_{ii}(i=1,2)$ 为自有感应系数; $\beta_{ij}(i=1,2; j=1,2; i \neq j)$ 为互有感应系数^[7-8]。

根据电容的定义, 线密度可以表示为对地电容和互电容的组合, 具体如下:

$$\begin{cases} \rho_1 = (C_{11} + C_{12})\Phi_1 - C_{12}\Phi_2 \\ -\rho_1 = -C_{12}\Phi_1 + (C_{12} + C_{22})\Phi_2 \end{cases} \quad (7)$$

代入式(5)解得:

$$\left. \begin{aligned} C_{11} = C_{22} = \beta_{11} + \beta_{22} &= \frac{2\pi\epsilon_0 \ln \frac{\sqrt{4h^2 + d^2}}{d}}{\left(\ln \frac{2h}{a}\right)^2 - \left(\ln \frac{\sqrt{4h^2 + d^2}}{d}\right)^2} \\ C_{12} = -\beta_{12} = \beta_{21} &= \frac{2\pi\epsilon_0 \ln \frac{2h}{a}}{\left(\ln \frac{2h}{a}\right)^2 - \left(\ln \frac{\sqrt{4h^2 + d^2}}{d}\right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: C_{11} 、 C_{22} 为导线 1、2 的单位长度对地电容; C_{12} 为导线 1 与导线 2 之间的单位长度互电容^[7-8]。

通过以上公式计算可以得出, C_{11} 、 C_{22} 、 C_{12} 分别为 13.60 nF/km、10.36 nF/km、2.40 nF/km。

2) 环线自感与互感计算

交流接触网与直流接触网对地回路间的单位长度互感近似值为

$$L_d = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{\delta}{d} \quad (9)$$

导线回路对地单位长度自感近似值为

$$L_z = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{\delta}{r_{eq}} \quad (10)$$

式中: L_d 为两线路间的单位长度互感; L_z 为导线回路对地单位长度自感; μ 为相对磁导率; δ 为电流在大地中的镜像深度; r_{eq} 为导线等效半径。

经公式计算可以得出, 交流线路自感、直流线路自感以及两条线路间互感分别为 2.10 mH/km、1.63 mH/km、0.96 mH/km。

1.2.4 感应电压仿真模型

单位长度交流输电线与直流输电线模型均采用 π 型等效电路, 并基于接触网单位长度参数, 构建系统感应电压仿真模型, 如图 2 所示。

图 2 中, C_{11} 为交流接触网导线对地单位长度等效电容, C_{12} 为交流接触网导线与直流接触网导线之间单位长度等效电容, C_{22} 为直流接触网导线对地单位长度等效电容, R_1 、 L_1 为交流接触网导线单位长度阻抗, R_2 、 L_2 为直流接触网导线单位长度阻抗, M_{12} 为交流接触网导线与直流接触网导线之间互感。

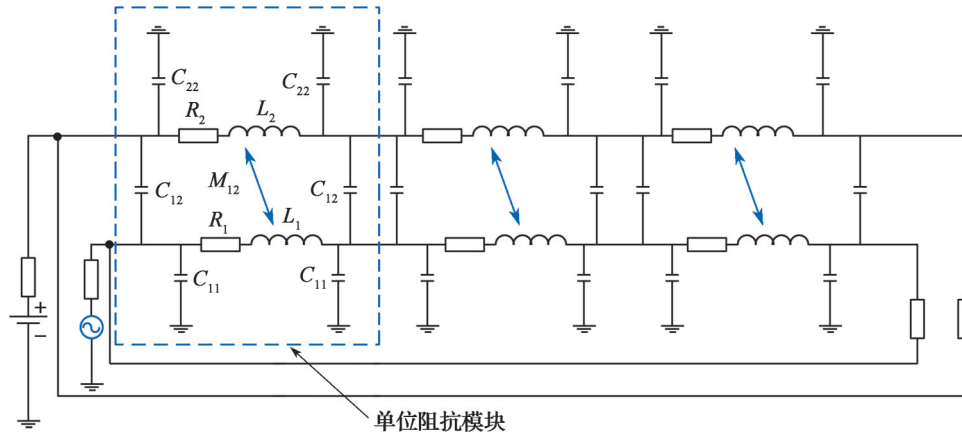


图2 感应电压 Simulink 仿真模型

Fig. 2 Simulink simulation model of induced voltage

1.3 仿真模型验证

以环线电源首端 (0 km) 为测试点, 开展空载工况 (交流接触网 25 kV 空载, 直流接触网不供电) 仿真与现场实测对比。

1.3.1 空载工况的感应电压仿真计算

基于图 2 电路, 在直流母线不接滤波器的条件下, 采用仿真模型计算交流接触网 25 kV 空载、直流接触网

不供电条件下其首端感应电压值, 得到仿真波形如图 3 所示。由图 3 可知, 感应电压的峰峰值为 3 552.8 V。

1.3.2 空载工况的感应电压的测试

在交流接触网空载、环线无车运行条件下, 现场测试直流接触网首端空载感应电压波形如图 4 所示。

图 4 中, 示波器通道 1 (CH1) 为交流 25 kV 供电电压; 通道 3 (CH3) 为直流 1 500 V 供电网感应电压。由图 4 可知, 1 500 V 直流供电接触网的感应电压 RMS

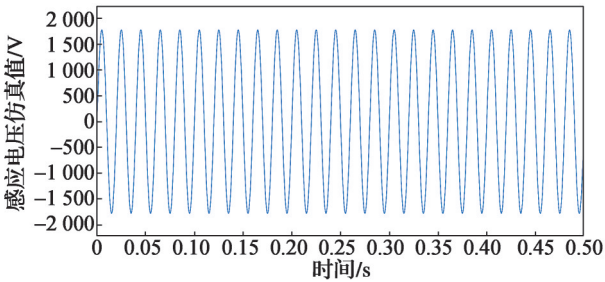


图 3 首端感应电压仿真波形
Fig. 3 Induced voltage simulation waveform at head end

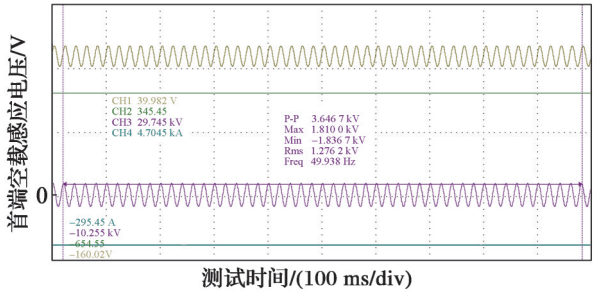


图 4 首端感应电压测量波形
Fig. 4 Induced voltage measured waveform at head end

(有效值) 为 1 276.2 V, 峰峰值电压为 3 646.7 V, 频率为 49.9 Hz。测试结果显示, 通过仿真得到的感应电压与实测结果高度一致, 验证了仿真计算模型的准确性。

1.4 不同线路间距感应电压计算分析

基于交直流接触网耦合仿真模型, 在保持其他参数不变的前提下, 分别计算 5 m、10 m、15 m、20 m、30 m、50 m 共 6 种线路间距下, 空载及电力机车 2 500 kW、7 000 kW 负载工况下的感应电压数值, 以研究感应电压随线路间距的变化规律。计算过程中, 重点关注感应电压的峰峰值与有效值两项指标, 计算结果如表 1 所示。

表 1 不同线路间距感应电压的计算结果

Table 1 Calculation results of induced voltage at different line spacings

线路间距/m	空载工况感应电压 (峰峰值/有效值)	2 500 kW 负载工况感应电压 (峰峰值/有效值)	7 000 kW 负载工况感应电压 (峰峰值/有效值)
5	3 552.8 / 1 256.1	184.9 / 65.4	220.34 / 77.9
10	1 802.8 / 637.4	93.9 / 33.2	111.80 / 39.5
15	1 010.0 / 357.1	52.6 / 18.6	62.64 / 22.2
20	635.5 / 224.7	33.1 / 11.7	39.41 / 13.9
30	309.9 / 109.6	16.2 / 5.7	19.2 / 6.8
50	117.6 / 41.6	6.2 / 2.2	7.29 / 2.6

由表 1 可知, 感应电压随线路间距的增大呈显著衰减趋势: 间距从 5 m 增至 50 m 时, 空载工况感应电压有效值从 1 256.1 V 降至 41.6 V, 衰减幅度达 96.69%; 负载工况下感应电压的衰减规律与空载工况下一致, 且不同负载等级对感应电压衰减趋势无明显影响^[12]。

2 感应电压的抑制方案与仿真验证

2.1 感应电压的抑制方案

针对交直流并行线路电磁耦合引发的感应电压问题, 结合现场运行条件, 通过在变电所首端设置可控式 LRC 滤波器, 在直直流接触网线路设置多个固定式 LRC 滤波器来抑制感应电压^[13-14], 系统整体拓扑结构如图 5 所示, 滤波装置技术参数如表 2 所示。基于仿真电路拓扑, 所有滤波装置电气参数一致。变电所直流供电首端装设可控 LRC 滤波器, 内部设置 LC 滤波控制器, 可实现 LC 滤波模式的灵活切换。在直直流接触网线路均匀布置多套 LRC 滤波装置, 可持续削弱暂态冲击电压; 两级滤波器相互配合, 可有效降低全线路感应电压。

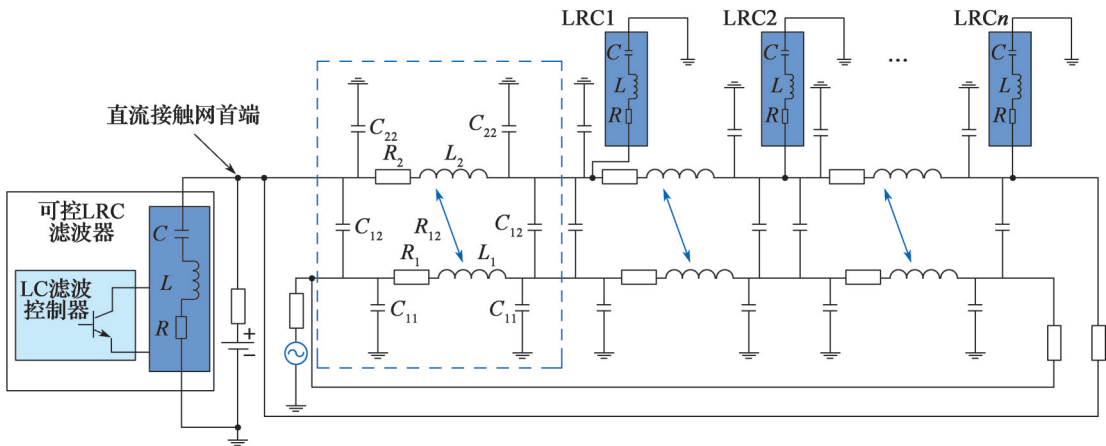


图 5 感应电压抑制方案系统拓扑
Fig. 5 System topology of induced voltage suppression scheme

2.2 感应电压仿真

为验证所设计的 LRC、LC 两种滤波电路对感应电压的抑制效果, 将电路接入仿真系统进行仿真计算。

2.2.1 LRC 滤波器工况仿真

直流接触网空载情况下接入 LRC 滤波器, 得到首端处感应电压的波形如图 6 所示。由图 6 可知, 感应电压最大值约为 5.9 V, 有效值约为 2 V, 感应电压抑制

效果良好。

表2 滤波装置技术参数

Table 2 Technical parameters of filter

物理量	参数值
电感/mH	48
电容/ μ F	211
阻尼电阻/ Ω	250
额定工作电压/V	1 500
固有谐振频率/Hz	50
短时 (20 ms) 过电压/V	4 000

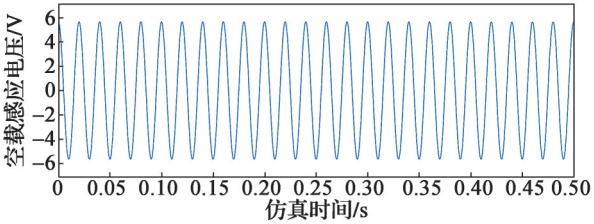


图6 首端处感应电压波形(空载,LRC滤波)

Fig. 6 Induced voltage waveform at head end (no load, with LRC filter)

2.2.2 LC 滤波器工况仿真

直流接触网空载情况下接入LC滤波器, 得到感应电压仿真结果如图7所示。由图7可知, 感应电压几乎为0 V, 感应电压抑制效果显著。

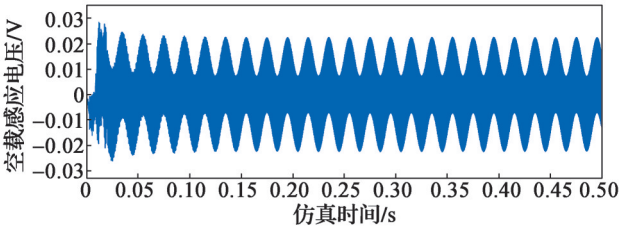


图7 首端处感应电压波形(空载,LC滤波)

Fig. 7 Induced voltage waveform at head end (no load, with LC filter)

2.2.3 特殊工况下感应电压变化仿真

1) 电力机车在运行时机车断路器突然跳闸工况

在直流接触网投入供电的条件下, 设置仿真时间的0.3 s处为故障发生时间, 远离电源3 km处为测试点, 分别针对不设滤波器和设滤波器两种情况下的感应电压波形变化进行仿真, 得到不架设滤波器时感应电压仿真结果如图8、图9所示。

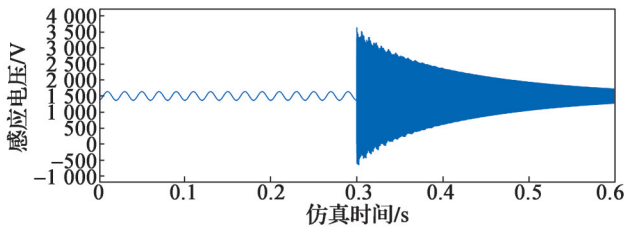


图8 无滤波器3 km处电压波形

Fig. 8 Voltage waveform at 3 km without filter

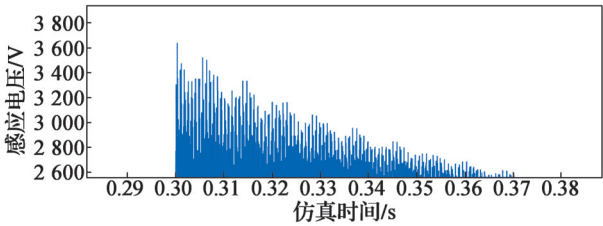


图9 3 km处电压局部波形(无滤波器)

Fig. 9 Partial voltage waveform at 3 km (without filter)

设置仿真时间的0.3 s处为故障发生时间, 针对环线架设滤波器后的感应电压变化进行仿真计算, 得到3 km处局部感应电压变化波形如图10所示。

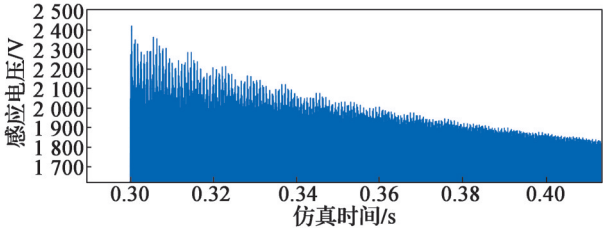


图10 3 km处电压局部波形(有滤波器)

Fig. 10 Partial voltage waveform at 3 km (with filter)

根据EN 50163轨道交通牵引系统的供电电压标准, DC 1 500 V供电系统持续时间20 ms的短时过电压 $U_{\max 3}$ 为2 538 V。图9的仿真结果显示无滤波状态下的感应电压值超标, 在实际运行时如果发生该故障可能产生危害。图10环线设置LRC滤波器后的仿真结果显示, 感应电压在暂态过程中的最大幅值均低于2 500 V, 满足标准要求。因此, 感应电压抑制装置不仅在正常工况下能有效抑制感应电压, 而且在故障工况下同样具有良好的抑制效果, 可防止因感应电压与直流1 500 V供电电压叠加, 从而出现实际电压超过标准允许的安全供电范围的风险^[15]。

2) 电力机车合闸瞬间电压情况

在城轨车辆通过DC 1 500 V供电的条件下, 分别针对不设滤波器和设滤波器两种情况下的暂态电压波形变化进行仿真对比。故障发生时间设置在仿真时间0.3 s处, 得到感应电压变化仿真波形如图11、图12所示。对图11、图12进行分析可知, 不设滤波器时, 感应电压与DC 1 500 V叠加, 产生大量谐波电压, 对供电质量产生一定影响; 设置LRC+LC滤波器后, 交流

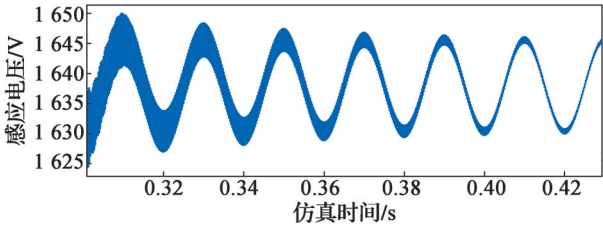


图11 3 km处局部电压波形(无滤波器)

Fig. 11 Partial voltage waveform at 3 km (without filter)

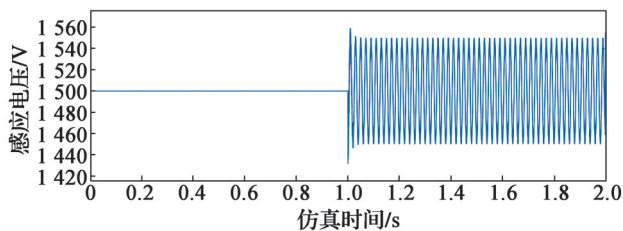


图 12 3 km 处电压波形(LRC+LC滤波)

Fig. 12 Voltage waveform at 3 km (with LRC filters and LC filters)

供电接通的暂态过程中, 直流接触网不会出现瞬时过电压。可见, 滤波器既能够防止感应电压与直流输电线原有电压发生叠加, 又能够改善供电质量。

2.3 滤波器对城轨车辆电源质量的影响

在直流输电线投入供电的条件下, 对户外LRC滤波器与变电所LC滤波器同时投入时的直流接触网电压质量影响进行仿真分析, 得到7 000 kW负载时3 km处电压变化波形仿真结果如图13所示。由图13可知, 供电电压符合GB/T 1402—2010《轨道交通 牵引供电系统电压》技术标准的要求, 该仿真结果验证了通过这种滤波器组合抑制感应电压的效果可以满足供电需求。

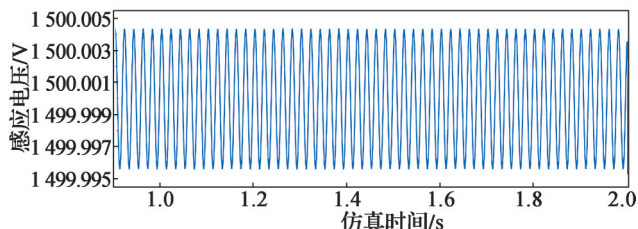


图 13 7 000 kW 负载时 3 km 处电压波形

Fig. 13 Voltage waveform at 3 km with 7 000 kW load

3 现场试验验证

3.1 试验方案设计

根据仿真结果, 在旅顺环形试验线按“户外LRC+变电站LC”滤波器方案安装滤波器, 开展多工况现场试验:

①空载工况 (环线交流接触网带电、直流接触网不供电);

②负载工况 (环线交流接触网带电、直流接触网不供电, HXD3B型电力机车按1 000~9 600 kW调节负载, HXN3内燃机车制动运行);

③直流供电工况 (环线交流接触网带电、直流接触网DC 1 500 V供电)。

试验时, 重点测量直流网感应电压有效值、峰值、谐波含量等指标, 验证实际感应电压抑制效果。

3.2 试验结果分析

3.2.1 直流接触网未供电时感应电压的测试情况

试验时滤波器投入, DC 1 500 V直流接触网未供电, HXD3B机车牵引运行, HXN3机车制动运行, 得到相关试验结果如图14所示。由图14可知, 环线DC 1 500 V直流接触网感应电压有效值为39.32 V, 感应电压峰峰值为177.5 V, 频率为50.03 Hz。

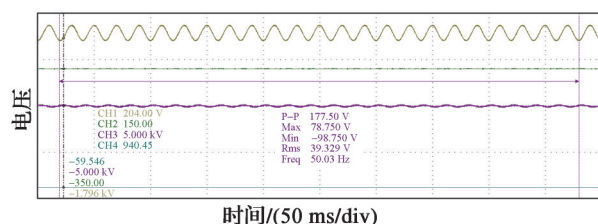


图 14 滤波器投入时HXD3B机车牵引和HXN3机车制动运行试验波形

Fig. 14 Operation test waveform with filter operation, HXD3B locomotive traction and HXN3 locomotive braking

3.2.2 直流接触网供电时的电压输出情况

试验时25 kV交流接触网投入, 滤波器投入, 直流接触网DC 1 500 V供电, 测试25 kV交流接触网对直流接触网供电质量的影响, 结果如图15所示。图15记录了直流接触网投入的过渡过程, 包括25 kV交流接触网电压、电流, 1 500 V直流接触网电压、电流。由图15可知, 此工况下DC 1 500 V投入前后未见感应电压, 伴随开关操作出现了倒闸瞬间的操作过电压, 其峰值为1 983 V; 滤波器对直流接触网感应电压的抑制有明显效果。

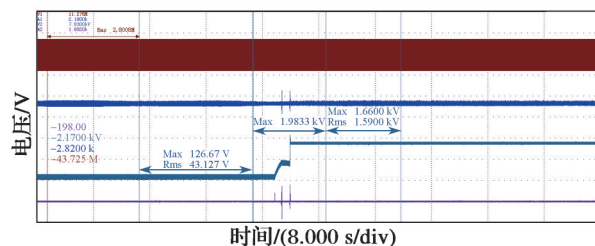


图 15 直流接触网1 500 V和滤波器投入的交直流接触网电压电流波形

Fig. 15 Voltage and current waveforms of AC and DC OCSs with 1 500 V DC OCS and the filter

4 仿真计算与现场试验对比

对不同工况下的仿真结果与现场实测结果进行量化对比, 对比情况如表3所示。各工况下感应电压峰值偏差均在20%以内, 其中负载7 000 kW工况下的偏差仅8.59%, 表明仿真模型可精准表征实际线路特性, 基于模型设计的滤波器组合方案具有可靠的指导意义。滤波器组合投入后, 各工况下城轨直流接触网感应电压指标均满足相关标准, 验证了本文所提方法的高效

性与工程实用性。

表3 不同工况下仿真结果与现场实测结果的对比

Table 3 Comparison between simulation results and field measurement results under different conditions

工况	仿真结果 (峰峰值) /V	现场测试结果 (峰峰值) /V	偏差
空载 (无抑制装置)	3 552.8	3 646.7	-2.57%
空载 (有抑制装置)	11.2	9.4	19.15%
负载 2 500 kW (有抑制装置)	121.0	140.0	-13.57%
负载 7 000 kW (有抑制装置)	240.0	221.0	8.60%

5 结束语

本文以旅顺环形试验线为工程背景, 揭示了交直流线路近距离并行敷设条件下电磁耦合引发感应电压超标的机理, 明确了感应电压随线路间距的衰减规律。结合牵引供电系统暂态特性, 构建仿真模型并提出“户外LRC+变电站LC”组合滤波治理方案。经仿真与现场试验验证, 该方案可将感应电压控制在安全范围, 满足电力系统安全稳定与轨道交通供电标准要求。研究成果有效解决了双网同步运行难题, 可为铁路四网融合场景下交直流并行线路的电磁干扰治理与工程布局优化提供参考。

参考文献:

[1] 国家铁路局. 新版市域 (郊) 铁路工程验收标准发布, 以标准协同助力轨道交通“四网融合”[EB/OL]. (2025-06-04) [2025-11-10]. <https://www.chnrailway.com/index.php/index/shows?catid=10&id=25456>.
National Railway Administration of the People's Republic of China. New version of urban (suburban) railway engineering acceptance standards released: promoting "four-network integration" of rail transit through standard coordination[EB/OL]. (2025-06-04) [2025-11-10]. <https://www.chnrailway.com/index.php/index/shows?catid=10&id=25456>.

[2] 王玉强. 轨道交通四电工程电磁兼容控制研究[J]. 工程建设与设计, 2020(22): 88-89.
WANG Yuqiang. Research on electromagnetic compatibility control of rail transit four-electric power station[J]. Construction & design for project, 2020(22): 88-89.

[3] 刘松林, 朱柄全, 王涛, 等. 轨道交通牵引系统感应电压测试与抑制技术[J]. 机车电传动, 2024(4): 51-58.
LIU Songlin, ZHU Bingquan, WANG Tao, et al. Measurement and suppression technology of induced voltage generated by traction system in rail transit applications[J]. Elec-

tric drive for locomotives, 2024(4): 51-58.

[4] 王瑞, 李新, 张立臣, 等. HXd3C 型电力机车高压电压互感器故障与分析[J]. 机车电传动, 2014(3): 106-109.
WANG Rui, LI Xin, ZHANG Lichen, et al. Fault and analysis of high-voltage voltage transformer for HXd3C electric locomotive[J]. Electric drive for locomotives, 2014(3): 106-109.

[5] 高洪光, 张立臣, 李雪莉, 等. HXd3 系列电力机车过分相不间断供电技术的研究与实现[J]. 机车电传动, 2016(4): 11-15.
GAO Hongguang, ZHANG Lichen, LI Xueli, et al. Research and implementation of passing neutral section uninterruptible power supply technology of HXd3 series electric locomotive[J]. Electric drive for locomotives, 2016(4): 11-15.

[6] 朱华, 应宜辰, 刘书铭, 等. 牵引供电系统建模及其对电网电能质量的影响分析[J]. 机车电传动, 2022(4): 62-69.
ZHU Hua, YING Yichen, LIU Shuming, et al. Modeling of traction power supply system and analysis on its influence on power quality of power grid[J]. Electric drive for locomotives, 2022(4): 62-69.

[7] 林莘, 李学斌, 徐建源. 特高压同塔双回线路感应电压、电流仿真分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2193-2198.
LIN Shen, LI Xuebin, XU Jianyuan. Simulation and analysis of induced voltage and current for UHV double circuit transmission lines on the same tower[J]. High voltage engineering, 2010, 36(9): 2193-2198.

[8] 解绍锋, 孙镜堤, 骆冰祥, 等. 高速铁路对邻近普速铁路电力电缆的干扰机理[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(1): 206-213.
XIE Shaofeng, SUN Jingdi, LUO Bingxiang, et al. Mechanism of high-speed railway interference on power cables of adjacent normal-speed railway[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2021, 56(1): 206-213.

[9] 韩旭东, 王斌, 高仕斌, 等. 基于车网耦合的高速铁路 AT 供电系统谐振特性[J]. 西南交通大学学报, 2014(4): 582-589.
HAN Xudong, WANG Bin, GAO Shibin, et al. Harmonic resonance of AT power supply system of high speed railway based on train-network coupling[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2014(4): 582-589.

[10] 史艳丽. 大连机车旅顺基地环线试验线主要技术标准研究[J]. 中国设备工程, 2021(1): 229-231.
SHI Yanli. Study on main technical standards of the loop test line in Dalian locomotive Lyushun base[J]. China plant engineering, 2021(1): 229-231.

[11] 王威, 杨守君, 柳占宇. HXd3C 型交流传动客货通用电力机车[J]. 电力机车与城轨车辆, 2011, 34(1): 12-15.
WANG Wei, YANG Shoujun, LIU Zhanyu. Type HXd3C AC drive passenger/freight electric locomotive[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2011, 34(1): 12-15.

- [12] 熊伟. 高速铁路 10~35 kV 电力电缆与信号电缆平行间距研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(8): 139-143.
XIONG Wei. Research on parallel distance between 10 ~ 35 kV power cable and signal cable in high speed railway[J]. Railway standard design, 2021, 65(8): 139-143.
- [13] 游诚曦, 莫作权, 高仕斌, 等. 铁路供电中励磁涌流的特性分析及应对措施综述[J/OL]. 西南交通大学学报. (2025-09-05) [2025-11-10]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1277.U.20250905.1301.009>.
YOU Chengxi, MO Zuoquan, GAO Shibin, et al. Review of characteristics analysis and countermeasures of excitation inrush current in railway power supply[J/OL]. Journal of southwest jiaotong university. (2025-09-05) [2025-11-10]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1277.U.20250905.1301.009>.
- [14] 张岩, 祁霁舫, 张志刚, 等. 基于宽频带滤波器的牵引供电系统谐波治理[J]. 电气工程学报, 2024, 19(4): 434-440.
ZHANG Yan, QI Jishan, ZHANG Zhigang, et al. Harmonic control of traction power supply system based on broadband filter[J]. Journal of electrical engineering, 2024, 19(4): 434-440.
- [15] 舒印彪, 汤涌, 孙华东. 电力系统安全稳定标准研究[J]. 中国电机工程学报, 2013(25): 1-8.
SHU Yinbiao, TANG Yong, SUN Huadong. Research on power system security and stability standards[J]. Proceedings of the CSEE, 2013(25): 1-8.

Analysis and countermeasures of influence of electric locomotive on-load running on power quality of urban rail vehicles

YANG Shoujun¹, GAO Hongguang¹, ZHANG Lichen¹, LI Xueli¹, SU Yuming², LI Shaoqiang³

(1. CRRC Dalian Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116045, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. CRRC Dalian R&D Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116052, China)

Abstract: To address the engineering challenge that induced voltage generated by electromagnetic coupling between AC OCS and DC urban rail power supply OCS during parallel laying poses threats to personnel safety and disturbs vehicle operation, this study focuses on the Lvshun test loop of Dalian Locomotive, where a 5 m spacing between AC/DC lines hinders synchronous factory testing of rolling stocks. Mechanism modeling and suppression technology research were conducted. An equivalent circuit model was established, and a simulation platform based on MATLAB/Simulink was built and calibrated with field data. The attenuation law of induced voltage with varying line spacing and transient characteristics under special conditions were revealed. Based on simulation results, an LC/LRC filtering suppression scheme was designed and verified through engineering implementation. By installing 3 groups of LRC filters and 1 group of LC filters on the test loop, the induced voltage was effectively suppressed to a safe range, resolving the bottleneck of synchronous multi-type vehicle testing and significantly improving production efficiency. This research provides important theoretical basis and engineering reference for AC/DC line planning and electromagnetic compatibility management in the context of integration of high-speed rail, inter-city rail, suburban railway and metro.

Keywords: electric locomotive; urban rail DC OCS; induced voltage; electromagnetic coupling; line spacing; suppression countermeasures; integration of high-speed rail, inter-city rail, suburban railway and metro