DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.128

城轨车辆牵引系统电磁发射机理分析与滤波研究

杨德勇[1,2]，朱柄全[1,2]
（1.中车株洲所电气技术与材料工程研究院，湖南 株洲 412001；
2.动车组和机车牵引与控制国家重点实验室，湖南 株洲 412001）

摘　要：城轨车辆牵引系统采用脉宽调制控制，具有高电压、大电流、脉冲干扰特性，作为主要的电磁干扰源之一，对列车系统的电磁兼容性产生重要影响；文章根据车辆系统设计，结合电磁干扰电流流通路径，分析牵引逆变系统主要电磁发射回路；通过建立高频干扰电流简化计算模型，研究减小牵引系统电磁发射的滤波参数设计方法，仿真对比各种滤波方案的抑制效果；最后，通过列车对外辐射发射测试验证优化方法的有效性。

关键词：城轨车辆；牵引系统；电磁干扰；滤波设计；整车辐射

中图分类号：U239.5；TN03　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2024)03-0130-08

0　引言

城轨地铁车辆采用电力牵引，具有载客量大、运行速度快、绿色环保等优点，已成为城市公共交通运输的主要工具。其车载设备具有种类多样、系统复杂、集成度高等特点，在有限的空间内既有高压大电流的牵引辅助设备，又有低压小电流的网络通信、车载信号等电磁敏感设备，如何保证系统的电磁兼容性是影响车辆系统可靠性的关键。

城轨车辆牵引逆变系统采用脉宽调制控制（Pulse Wide Module，PWM）方式，输出为一系列宽度周期性变化的近似方波脉冲电压，具有很高的电压变化率，成为列车主要的电磁干扰源之一，是影响车辆系统电磁兼容性的关键因素[1-2]。关于变频驱动系统电磁干扰问题，文献[3-6]已分别从干扰原理、噪声源模型、干扰预测等方面进行了深入研究，但主要针对传统供电方式下的变流系统，城轨牵引逆变系统由于其特殊的接地方式[7]，干扰路径存在较大差异，相关研究较少。为此，本文基于城轨牵引逆变系统特点，对干扰电流流通路径进行分析，建立其等效简化计算模型，重点研究减小系统电磁发射的滤波参数设计方法，并结合某城轨车辆进行高频传导建模，对比分析各滤波方案对主发射回路干扰电流的抑制效果，最后通过实测验证了理论模型和滤波参数的有效性。

1　干扰原理分析

本文研究对象如图1所示，牵引系统的“正线”通过受电弓与DC 1 500 V供电网连接，而“负线”则连接到接地汇流排，并通过4个轮对连接到钢轨，实现工作回流。牵引逆变器外壳与车体相连，牵引电机外壳通过转向架与车体相连，而车体经低阻值电阻连接到汇流排实现保护性接地。由于系统中存在许多寄生参数，如IGBT与散热器、逆变输出动力线缆与车体、电机绕组与外壳都存在分布电容，当牵引系统正常工作时，逆变输出的脉冲电压会对这些电容进行充放电，从而产生共模干扰电流，其流通路径为“牵引逆变器—动力电缆—

基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFB2502803）
通信作者：杨德勇，男，高级工程师，研究方向为电磁兼容设计与仿真；E-mail: yangdy@csrzic.com
引用格式：杨德勇, 朱柄全. 城轨车辆牵引系统电磁发射机理分析与滤波研究[J]. 机车电传动, 2024(3): 130-137.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.128.
Citation：YANG Deyong, ZHU Bingquan. Electromagnetic emission mechanism analysis and filtering research for traction system in urban rail transit vehicle[J]. Electric drive for locomotives,2024(3): 130-137.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.128.

电机—转向架—车体—汇流排—负线—牵引逆变器”，干扰电流产生的磁场可简化为图2所示。

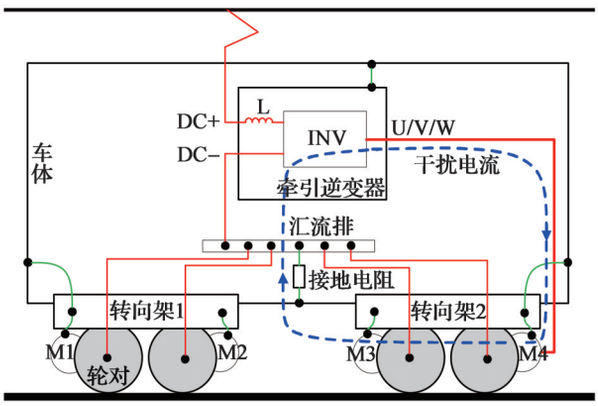


图1　牵引逆变系统干扰电流流通路径

Fig. 1　Flow path of interference current in traction inverter system

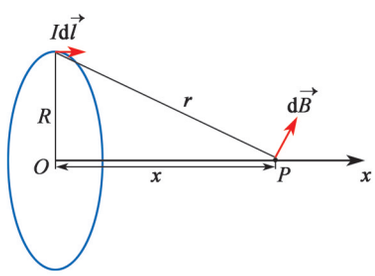


图2　干扰电流产生的磁场

Fig. 2　Magnetic field generated by interference current

根据毕奥萨伐尔定律，干扰电流源在空间产生的磁场为

$$\mathrm{d}\vec{B}=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\mathrm{d}\vec{l}\times\vec{r}}{r^3} \tag{1}$$

根据叠加原理，任意干扰电流回路在点P处的磁感应强度为

$$\vec{B}=\int\mathrm{d}\vec{B}=\int\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\mathrm{d}\vec{l}\times\vec{r}}{r^3} \tag{2}$$

对于圆形干扰回路，其轴线上产生的磁感应强度为

$$B=\frac{\mu_0 IR}{4\pi r^3}\int_0^{2\pi R}\mathrm{d}l=\frac{\mu_0 IR^2}{2\left(x^2+R^2\right)^{\frac{3}{2}}} \tag{3}$$

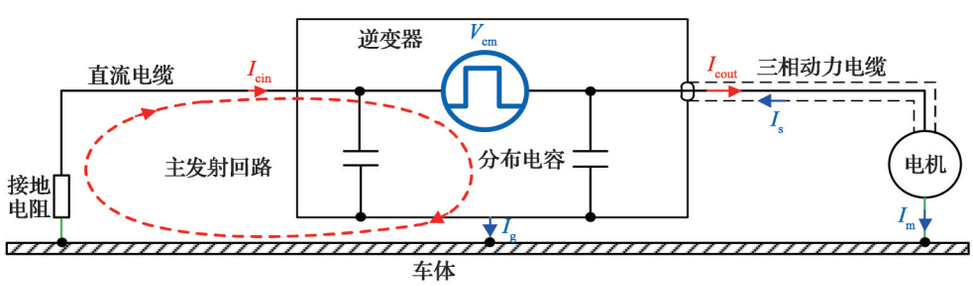
式中：I为干扰电流源；$\mathrm{d}\vec{l}$为干扰电流微小线元素；R为干扰电流回路半径；x为干扰回路到测量点的间距；μ_0为真空磁导率，其值为$4\pi\times10^{-7}$ T·m/A。

对于轨道交通车辆，列车辐射发射测试采用10 m法，通常测量距离远大于牵引系统共模干扰环路等效半径，则

$$B\approx\frac{\mu_0 IR^2}{2x^3}=\frac{\mu_0 IR^2}{2\pi x^3} \tag{4}$$

基于上述分析，在标准测量间距下牵引系统电磁发射幅值与干扰电流I及其流经的环路面积S成正比。

为降低牵引系统电磁发射干扰，逆变输出动力电缆常采用屏蔽线，并且进行双端接地，使得逆变输出的高频干扰电流绝大部分通过屏蔽层回到变流器柜体[8]。由于柜体通过车体与逆变器的“负线”低阻抗连接，使得回到柜体的这部分干扰电流无法就近回到逆变器，而是通过车体、接地电阻和“负线”这个大环路回到逆变器，此时该环路成为主要电磁发射路径。系统干扰简化模型如图3所示。



V_{cm}—共模干扰电压；I_{cout}—输出侧共模电流；I_{cin}—输入侧共模电流；I_s—通过屏蔽层回到变流器柜体的共模电流；I_m—通过电机外壳流经车体的共模电流；I_g—柜体流经车体的共模电流。

图3　干扰简化模型

Fig. 3　Simplified model of interference analysis

基于干扰传播路径分析，系统共模干扰高频电路模型如图4所示。

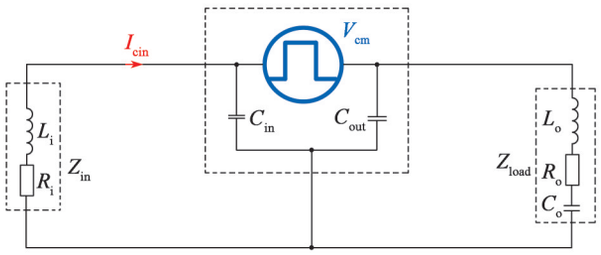
逆变器输出端共模干扰电压V_{cm}为阶梯式的跃变电压，幅值与直流母线电压相关，并随着开关器件导通状态的不同，在0、$\frac{1}{3}U_{dc}$、$\frac{2}{3}U_{dc}$和U_{dc}之间跳变（U_{dc}为逆变器中间直流母线电压），其频谱特征与梯形脉冲电压类似。

其中，共模电流I_{cm}为

$$I_{cm}=\frac{V_{cm}}{Z_{cm}} \tag{5}$$

由于电缆和电机绕组对地电容相对于IGBT对地电容大1个数量级以上，由式(5)可知，系统干扰主要由共模干扰电压、电机侧共模阻抗和直流侧共模阻抗决定。忽略逆变器内部分布电容影响，共模电流I_{cm}和谐振频点f_s如下：

$$I_{cm}\approx\frac{V_{cm}}{Z_{load}+Z_{in}}\approx I_{cin} \tag{6}$$



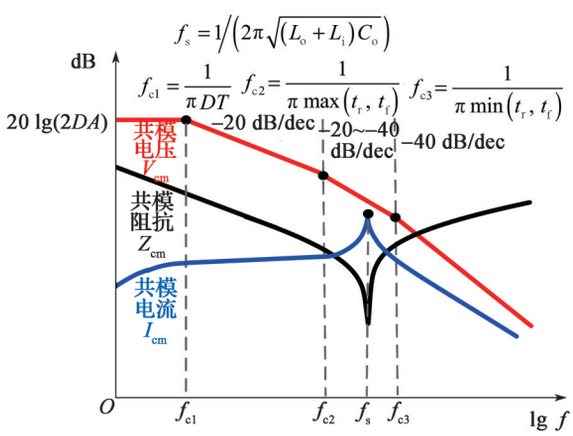
Z_{load}—电机侧共模阻抗，包括动力线缆和电机，可采用LRC串联模型进行等效；Z_{in}—直流侧共模阻抗，由于车体与直流负线低阻抗连接，可采用LR串联模型进行等效；C_{in}—逆变器输入侧对地电容，通常为nF级；C_{out}—逆变器内输出侧对地电容，通常为nF级。

图4　传导干扰高频电路模型

Fig. 4　Conducted interference high-frequency circuit model

$$f_s=\frac{1}{2\pi\sqrt{(L_0+L_i)C_0}} \tag{7}$$

牵引系统共模干扰电压、共模阻抗和共模电流的典型频谱如图5所示。共模干扰电压与直流电压、开关频率、器件的开关特性等因素相关。轨道交通车辆牵引逆变器的开关频率较低，通常小于1 kHz，故共模干扰电压随着频率增加下降明显，呈现出低频干扰特性；系统共模阻抗在串联谐振点处阻抗最小，在该频点附近共模干扰电流较大。



A—脉冲电压幅值；*T*—脉冲周期；*D*—占空比；t_r—脉冲上升时间；t_f—脉冲下降时间；f_{c1},f_{c2},f_{c3}—共模电压频谱的3个转折频点。

图5　干扰频谱示意图

Fig. 5　Schematic diagram of interference spectrum

2　EMI滤波研究

对于牵引逆变器，为进一步降低牵引系统电磁发射干扰，可在逆变器输入“负线”与柜体间增加滤波电容，使得柜体上的高频电流通过电容提供的低阻抗路径回到变流器，从而降低流经车体通过大环路的干扰电流[9]。干扰电流抑制效果与滤波回路阻抗相关，滤波后干扰电流相对于未滤波时减小幅度为

$$K_{at}=20\lg\left(1+\frac{Z_{in}Z_{load}}{(Z_{in}+Z_{load})Z_f}\right) \tag{8}$$

式中：K_{at}为干扰电流衰减系数，dB；Z_f为滤波回路阻抗。

滤波回路高频模型可用LRC串联模型等效，其阻抗Z_f为

$$Z_f=R_f+j\omega L_f+\frac{1}{j\omega C_f} \tag{9}$$

式中：C_f为滤波电容值；L_f，R_f分别为电容和连接引线的寄生电感和电阻。

为保证滤波性能，在目标频段内，滤波回路阻抗应小于外部并联回路阻抗的$\frac{1}{10}$，即

$$Z_f<\frac{Z_{in}}{10} \tag{10}$$

滤波回路存在自谐振频点f_f，该自谐振频点由电容和寄生电感决定。当滤波回路处于自谐振频点时，滤波回路阻抗最低，该频点滤波性能最佳，故考虑滤波设计时应将滤波回路自谐振频点设计在系统共模阻抗串联谐振频点f_s附近，自谐振频点计算如下：

$$f_f=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_fC_f}} \tag{11}$$

增加的滤波电容可有效降低外部主发射回路在滤波目标频段内的干扰电流，但由于柜体通过车体、接地电阻与“负线”连接，使得滤波电容易与该外部回路产生LC并联谐振，其等效模型如图6所示。

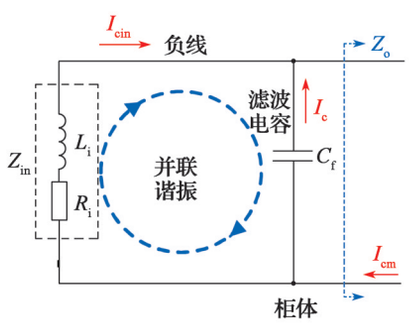


图6　并联谐振电路模型

Fig. 6　Parallel resonant circuit model

当并联回路谐振时，虽然对外总阻抗最大，但各支路会产生很大的谐振电流。并联谐振频率f_O、谐振时回路等效阻抗Z_O和各支路电流计算公式如下：

$$f_O=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_iC_f}} \tag{12}$$

$$Z_O=\frac{L_i}{R_iC_f} \tag{13}$$

$$|\dot{I}_{cin}|\approx|\dot{I}_c|=Q|\dot{I}_{cm}| \tag{14}$$

$$Q=\frac{1}{R_i}\sqrt{\frac{L_i}{C_f}} \tag{15}$$

式中：Q为并联谐振电路品质因素。

需要注意的是，由于Q通常远大于1，谐振频点处的并联谐振电流会远大于输入电流。

此时，外部主要发射回路干扰电流较未滤波时的增益为

$$K_{\text{in}}=20\lg\frac{(Z_{\text{in}}+Z_{\text{load}})Q}{Z_{\text{O}}+Z_{\text{load}}} \tag{16}$$

式中：K_{in}为干扰电流放大系数，dB。

当柜内增加的滤波电容与外部回路并联谐振时，通过外部大环路的干扰电流会显著增大，从而产生很强的电磁发射。因此，滤波设计关键是如何有效降低系统主要发射回路干扰电流峰值，同时减小并联谐振发射。

由式(12)~式(16)分析得出，在一定条件下，减小并联回路电感、增大电容和电阻可以有效降低并联谐振电流。由于并联回路电感主要由外部系统设计决定，在变流装置层面，主要是通过优化滤波参数进行谐振电流抑制。

并联谐振电流抑制措施如下：

①增大滤波电容值，从而降低并联谐振电流，但需注意电容值增大后，滤波回路自谐振频点向低频偏移，使得高频滤波效果变差。

②采用不同容值的电容并联保证高频滤波效果，同时降低并联谐振电流。不同容值的电容并联滤波，电容之间的自谐振频点应相差3倍以上，以便充分利用自谐振频点附近低阻抗特性，增大有效滤波频段范围。

③“负线”与柜体间采用RC串联滤波，可降低并联谐振电流，但电阻会增大滤波回路阻抗，降低对目标频段干扰的抑制效果。为保证滤波性能，电阻值应小于目标频段内外部回路阻抗的$\frac{1}{10}$。

3　仿真分析

基于以上理论分析，对某城轨车辆牵引系统建立图4所示的高频传导模型，分析无滤波时系统主要发射回路的干扰电流，以此为基础研究不同滤波方案对主发射回路干扰电流的抑制效果。

3.1　传导干扰仿真

考虑高频时模型误差影响，传导仿真模型的频域分析范围为0.01~1.00 MHz，为牵引系统主要干扰频段。系统模型中的共模电压通过电路仿真获取，基本电气参数如表1所示。各部件高频模型采用Agilent4294A精密阻抗分析仪进行阻抗测试，并对所测阻抗曲线采用电路进行解析拟合获得[10-11]。

电机侧与直流侧共模阻抗曲线如图7和图8所示，计算得到的各部分高频电路模型参数如表2所示；系统传导干扰时域仿真步长为100 ns，仿真得到的系统共模干扰电压时域波形和干扰电流频谱如图9和图10所示。由图10可知，当牵引系统工作时，会产生400 kHz的峰值干扰电流，最大幅值约为100 dB·μA。

表1　系统仿真基本电气参数

Table 1　Basic electrical parameters for system simulation

参数名称	中间直流母线电压U_{dc}/V	开关频率f/Hz	输出电流频率f_{i}/Hz	IGBT开关时间T_{r}/μs
参数值	1 500	500	25	0.5

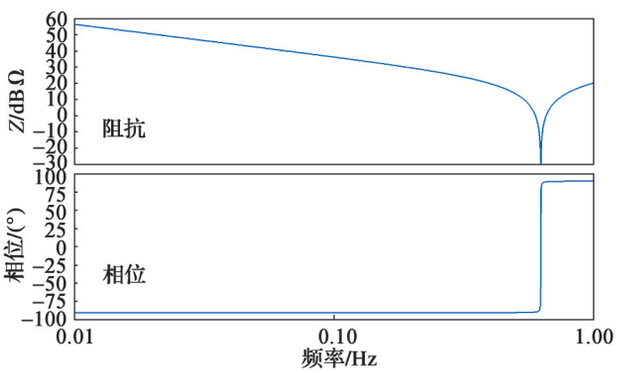


图7　电机侧共模阻抗曲线

Fig. 7　Curve of common mode impedance on the motor side

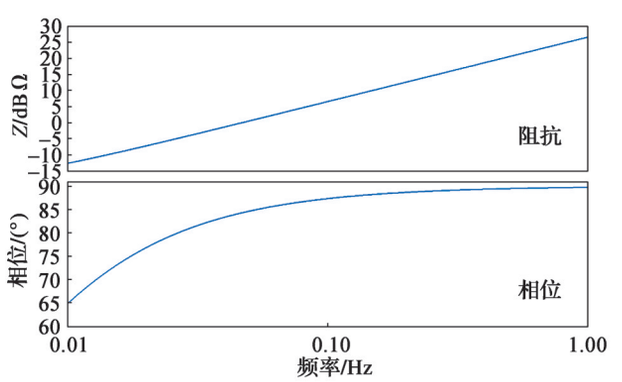


图8　直流输入侧共模阻抗曲线

Fig. 8　Curve of common mode impedance on the DC input side

表2　各部分高频电路模型

Table 2　High frequency circuit models for each part

模型参数	电机侧等效阻抗模型Z_{load}			直流输入侧等效阻抗模型Z_{in}		模块内部分布电容	
	L_{O}/μH	R_{O}/mΩ	C_{O}/nF	L_{i}/μH	R_{i}/mΩ	C_{in}/nF	C_{out}/nF
参数值	2.7	30	24.0	3.4	85	3.0	1.5

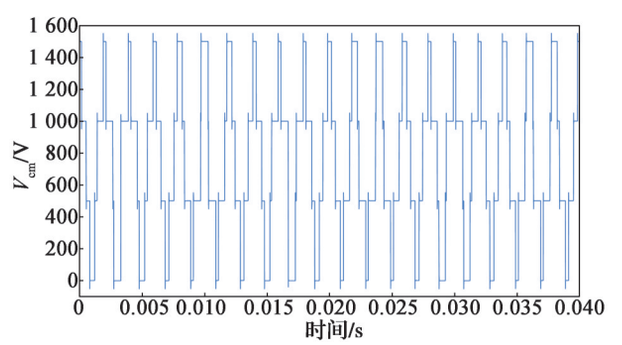


图9　共模干扰电压波形

Fig. 9　Common mode interference voltage waveform

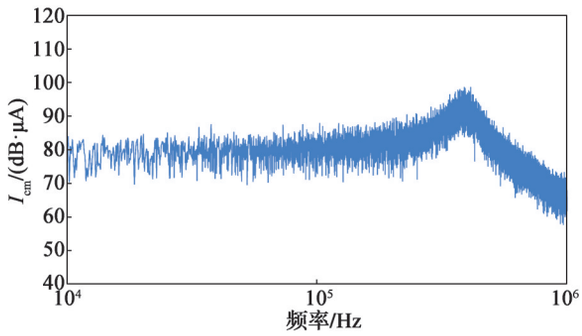


图 10　干扰电流频谱

Fig. 10　Interference current frequency spectrum

3.2　滤波设计及仿真验证

基于 EMI 滤波理论分析，设计 4 种典型滤波方案，如表 3 所示；结合频域仿真可得到采用不同滤波方案输入侧共模阻抗曲线如图 11 所示；通过系统传导干扰仿真得到不同滤波方案主发射回路干扰电流频谱波形如图 12 所示。

表 3　滤波方案

Table 3　Filtering scheme

滤波方案	滤波高频模型	滤波高频模型 f_f/kHz	系统并联谐振频点 f_O/kHz
小容值电容	L_{f1} C_{f1} R_{f1}	410	85
大容值电容	L_{f2} C_{f2} R_{f2}	30	10
不同容值电容并联	L_{f1} C_{f1} R_{f1} 并联 L_{f2} C_{f2} R_{f2}	30	10
		410	200
小容值电容串联电阻	L_{f1} C_{f1} $R_{f1}+R$	410	85

通过图 12 对比分析得出：

①通过采用小容值滤波参数，并将滤波回路自谐振频点设计在系统串联谐振频点附近，可以很好抑制主发射回路 400 kHz 峰值干扰电流，衰减幅值可达到 45 dB；但增加的滤波电容会与外部电路产生并联谐振，使得在 85 kHz 频点附近干扰电流增大 20 dB，其干扰有效滤波频段约为 0.2~1 MHz。

②采用大容值滤波参数，由于自谐振频点较低，低频干扰抑制效果明显，其有效滤波频段约为 30~400 kHz，其中对 400 kHz 峰值干扰电流可降低约 20 dB，由于并联谐振电流的影响，在 10 kHz 频点附近干扰电流增大约 6 dB。

③采用大小电容并联滤波方案，可以有效增大滤波频段，保证高频滤波性能，同时对低频干扰也有较好抑制作用，虽然大小电容间也会产生并联谐振，但由于并联回路电感较小，对外阻抗较低，在 200 kHz 并联谐振点附近主发射回路干扰电流也略有降低。

④采用小电容串联电阻进行阻容滤波，可以有效抑制并联谐振电流，使得并联谐振电流减小约 16 dB，但增加的电阻也会影响高频滤波效果，使得 400 kHz 频点滤波性能降低约 18 dB。

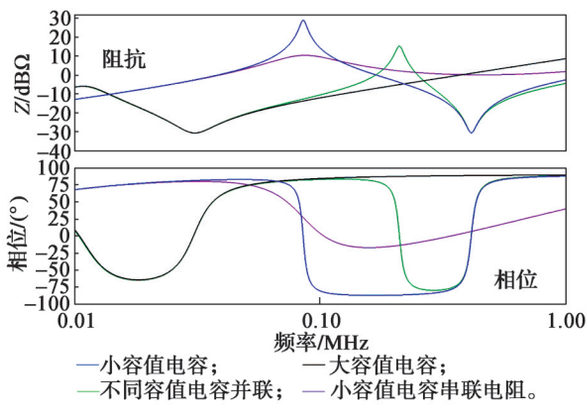


图 11　输入侧共模阻抗曲线

Fig. 11　Curve of common mode impedance on the input side

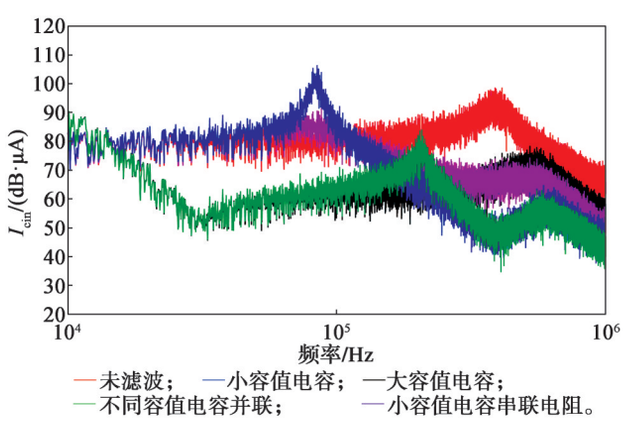


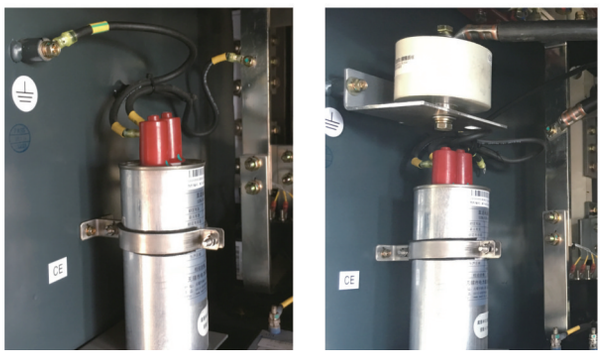
图 12　主发射回路干扰电流频谱

Fig. 12　Interference current spectrum of main emission loops

4　试验验证

为验证牵引系统电磁发射原理与滤波方案的有效性，参照 EN 50121-3-1: 2006 中的慢行试验，对采用不同滤波参数的列车在动态条件下进行对外发射测试对比，测量频段为 9~1 150 kHz，试验前应排除牵引系统外其他辅助设备和环境噪声对动态发射数据的影响，图 13 和图 14 分别为滤波实物和现场测试照片。

采用不同滤波参数的列车对外发射实测波形如图 15 所示。从图 15 可以看出，牵引逆变器未滤波时列车在宽频带 50~700 kHz 内存在动态超标问题；采用小容值电容滤波后，150~600 kHz 干扰可大幅下降，满足标准要求，但在 85 kHz 频点附近存在峰值干扰，超标明显；采用大容值电容滤波后，20~500 kHz 内干扰可大幅降低，但在 600 kHz 频点附近略有压限；采用不同容



(a) 单电容　　(b) 双电容

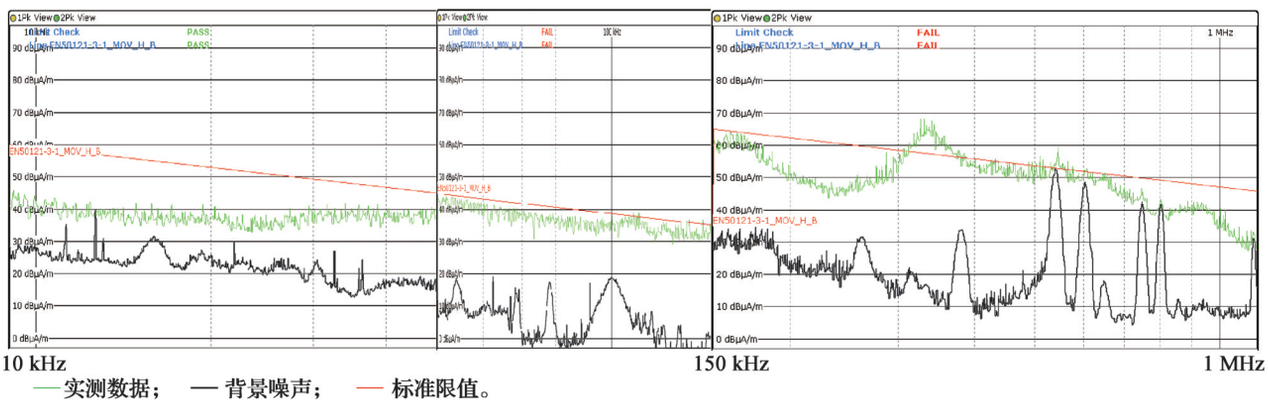
图 13　滤波实物

Fig. 13　Photo of filter

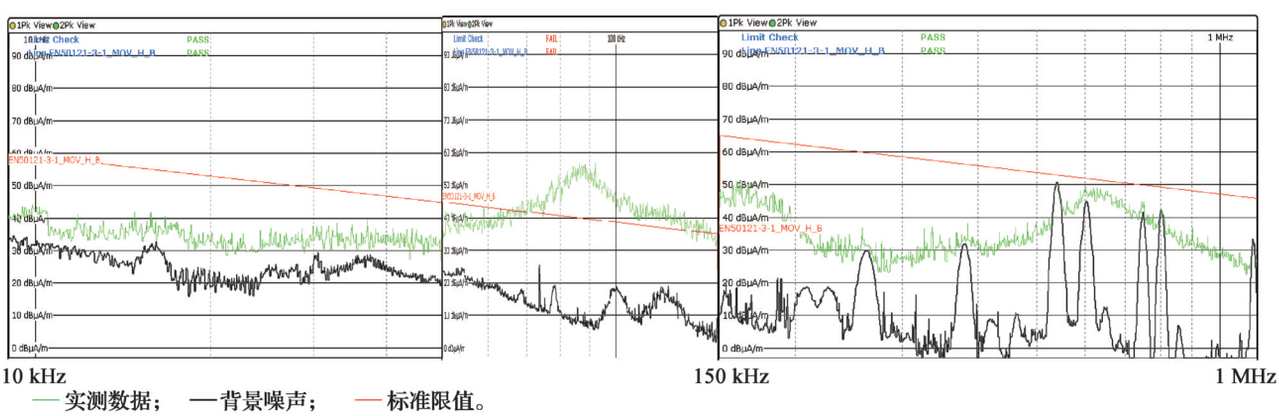


图 14　列车对外发射测试

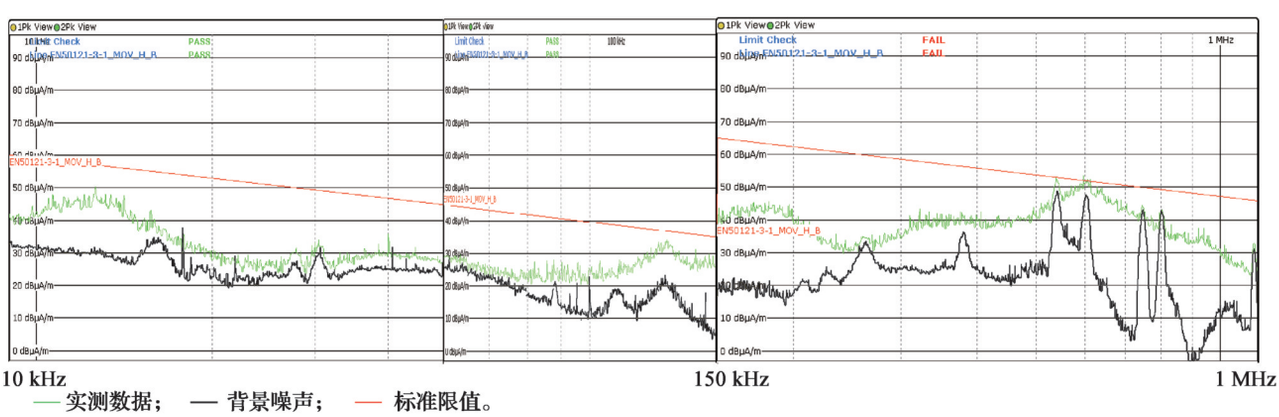
Fig. 14　External emission test on train



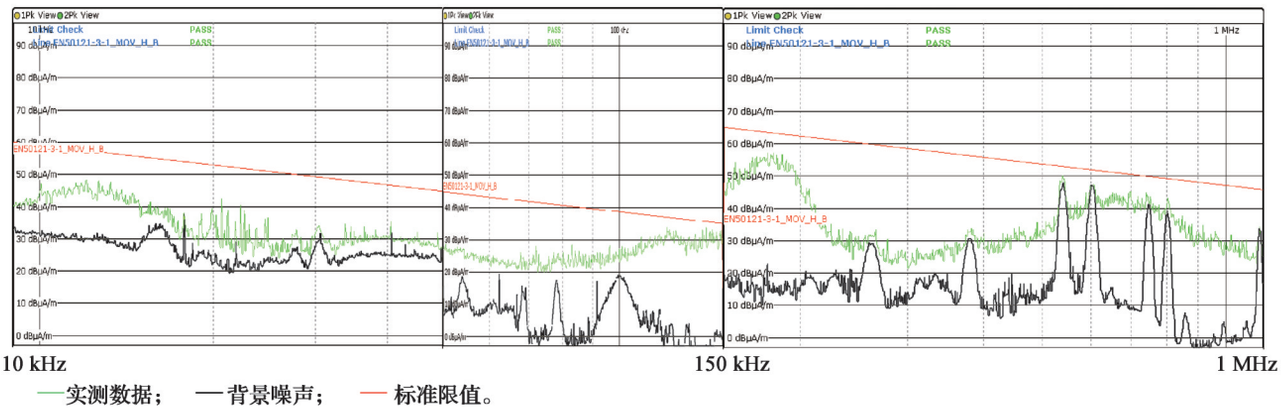
(a) 未滤波



(b) 小容值电容滤波



(c) 大容值电容滤波



(d) 不同容值电容并联滤波

图 15　不同滤波方案列车对外发射测试波形

Fig. 15　Waveforms in external emission tests using trains in different filtering schemes

值的电容并联滤波后，对外发射在宽频段范围内可得到有效抑制，满足限值要求。列车动态电磁发射测试结果与牵引系统主发射回路干扰电流仿真结果具有相同趋势性变化，各种滤波优化效果幅值接近，证明了理论分析的正确性。

5　结束语

本文基于城轨车辆牵引系统电磁干扰电流路径分析，提出干扰电流简化计算模型，基于该模型重点研究降低系统辐射发射的 EMI 滤波参数设计方法，最后通过传导干扰仿真和列车对外辐射试验验证了理论模型和滤波方案的有效性。由于牵引系统电磁干扰特性与整车系统存在强相关性，故变流器 EMI 滤波方案应结合实际车辆系统和相关标准要求进行设计。通过理论分析可知，通过减小变流器柜体接地、车体保护接地和回流负线形成的环路面积也可降低牵引系统电磁发射，这也为主机厂从车辆系统设计角度出发解决电磁干扰问题提供方向指导。本文研究内容可为城轨车辆牵引系统电磁干扰简化分析及 EMC 优化提供理论支撑。

参考文献：

[1] 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.
MA Yunshuang. Research on EMC key technologies for the new generation of EMU[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.

[2] HATSUKADE S, YAMANAKA A. Calculation of interference between railway traction inverters and balises[C]// IEEE. 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Tokyo: IEEE, 2014: 65-68.

[3] ZARE F. EMI in modern AC motor drive systems[C]// IEEE. IEEE EMC Society Newsletters. Piscataway: IEEE, 2009: 53-58.

[4] 孟进, 马伟明, 张磊, 等. 基于 IGBT 开关暂态过程建模的功率变流器电磁干扰频谱估计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 16-20.
MENG Jin, MA Weiming, ZHANG Lei, et al. EMI evaluation of power converters considering IGBT switching transient modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 16-20.

[5] BISHNOI H, BAISDEN A C, MATTAVELLI P, et al. Analysis of EMI terminal modeling of switched power converters[J]. IEEE transactions on power electronics, 2012, 27 (9): 3924-3933.

[6] 肖芳, 孙力. 功率变换器 IGBT 开关模块的传导电磁干扰预测[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 157-164.
XIAO Fang, SUN Li. Predicting conducted electromagnetic interference for IGBT switching module in power converter systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 157-164.

[7] 李恩龙, 于青松. 城市轨道交通车辆接地方案分析[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(8): 139-140.
LI Enlong, YU Qingsong. Analysis of urban rail transit vehicle grounding scheme[J]. Urban mass transit, 2012, 15(8): 139-140.

[8] HATSUKADE S, NAGATA M. Reduction of EMI from traction circuits using shielded cable[J]. QR of RTRI, 2008, 49(1): 20-25.

[9] 杨德勇, 支永健, 杨天矾, 等. 城轨车辆牵引系统电磁干扰分析及优化[J]. 机车电传动, 2019(2): 111-116.
YANG Deyong, ZHI Yongjian, YANG Tianfan, et al. Electromagnetic interference analysis and optimization of traction system for urban rail vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2019(2): 111-116.

[10] 孟进, 马伟明, 张磊, 等. PWM 变频驱动系统传导干扰的高频模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(15): 141-146.
MENG Jin, MA Weiming, ZHANG Lei, et al. High frequency model of conducted EMI for PWM variable-speed drive systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(15):

141-146.

[11] 杨德勇, 朱柄全, 陈颖, 等. 高速动车组牵引系统电磁干扰分析及抑制方法研究[J]. 机车电传动, 2022(6): 87-94.
YANG Deyong, ZHU Bingquan, CHEN Ying, et al. A study on electromagnetic interference analysis and suppression method for traction system of high-speed EMU[J]. Electric drive for locomotives, 2022(6): 87-94.

Electromagnetic emission mechanism analysis and filtering research for traction system in urban rail transit vehicle

YANG Deyong[1,2], ZHU Bingquan[1,2]

(1. CRRC ZIC Research Institute of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China;
2. State Key Laboratory for Traction and Control System of EMU and Locomotive, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The traction system of urban rail transit vehicles is recognized as one of the main electromagnetic interference sources significantly impacting the electromagnetic compatibility of trains, primarily attributed to the implementation of pulse width modulation control, which involves high voltage, high current, and pulse interference characteristics. This study analyzed the main electromagnetic emission loops of the traction inverter system, taking into account both the vehicle system design and the flow path of electromagnetic interference current. By establishing a simplified calculation model for high-frequency interference currents, this study explored the method for designing filtering parameters aimed at reducing electromagnetic emissions from the traction system. Moreover, a comparative simulation was conducted to evaluate the suppression effects of various filtering schemes. Finally, the effectiveness of the proposed optimization method was verified by external radiation emission tests using trains.

Keywords: urban rail transit vehicles; traction system; electromagnetic interference; filtering design; vehicle radiation

收稿日期：2023-04-21；修回日期：2023-11-22