



·建模与数值模拟·

地面装备电源变换系统高低压线缆串扰仿真研究

熊 瑛, 李小健, 王 彪, 张 莹, 杜晓琳, 聂秀丽, 王天楠

(中国北方车辆研究所 电磁兼容实验室, 北京 100072)

摘 要: 电源变换系统中功率器件如 MOSFET 和 IGBT 开关管的高速切换将产生高幅值和宽频段的电磁干扰, 是电动车辆最为常见也无法避免的电磁干扰源。同时, 互连线缆是机电设备传递信号和能量的载体, 是实现设备功能不可或缺的组成部分, 线缆的天线效应使其成为设备产生电磁干扰的主要途径, 是系统电磁兼容问题的主要根源之一。为了分析高压电源变换系统对低压控制系统的电磁耦合, 以某典型地面装备电源变换系统 IGBT 开关管产生的脉冲宽度调制波 (PWM 波) 作为电磁干扰源, 以实装线缆作为分析对象, 构建高低压线缆串扰模型, 仿真分析不同线缆对地距离、线缆间距条件下单线、屏蔽线、双绞线等多类低压线缆的近端串扰电压, 得出低压线缆的抗干扰性, 为系统线缆的布线提供指导。

关键词: 线缆; 电磁兼容; 电源变换系统; 线缆串扰; 共模干扰

中图分类号: TM341

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230276

Research on crosstalk simulation of high and low voltage wiring harnesses in ground equipment power conversion system

Xiong Ying, Li Xiaojian, Wang Biao, Zhang Ying, Du Xiaolin, Nie Xiuli, Wang Tiannan

(EMC Laboratory, China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: The high-speed switching of power devices such as MOSFETs and IGBT switches in power conversion systems will generate high amplitude and broadband electromagnetic interference (EMI), which is the most common and unavoidable EMI for electric vehicles. At the same time, interconnecting cables are the carrier of signals and energy transmitted by electrical devices, the antenna effect of cables is the main pathway for EMI radiation propagation, and is one of the main sources of system electromagnetic compatibility (EMC) problems. To analyze the electromagnetic coupling between the high-voltage power conversion system and the low-voltage control system, this paper takes the pulse width modulation (PWM) wave generated by the IGBT as the EMI source, and uses the actual cable as the analysis object to construct a high and low voltage harness crosstalk model. The simulation analysis analyzes the near-end crosstalk voltage of multiple types of low voltage cable under different conditions of cable spacing and ground distance, obtains the anti-interference performance of low-voltage cables, thus provides guidance for the wiring of the system cable harness.

Key words: cable harness, electromagnetic compatibility, power conversion system, harness crosstalk, common mode interference

为了满足地面装备机动性能及任务载荷日益增长的工程需求, 装备电压体制已由单一电压体制逐步转变为多电压混合供电体制^[1-4], 以实现功率的最优化分配。然而, 电源变换体制中功率器件的高 du/dt 和 di/dt 开关特性将产生高幅值和宽频带的电磁干扰, 这部分干扰将通过动力线缆、寄生通道、壳体传导或耦合至低压控制系统, 对低压系统造成不可忽视的电磁威胁^[5-7]。

与此同时, 地面装备内部集成了各种大功率电力电子设备, 电子电气系统之间、设备之间、电路之间以及系统、设备、电路之间的互连结构越来越复杂, 互连空间越来越小、互连线缆数量越来越多, 且电压等级不尽相同, 多种线缆混合交联导致的线缆串扰使得电磁环境变得异常复杂, 已成为电磁兼容性设计面临的一个重要问题。

* 收稿日期: 2023-08-18; 修订日期: 2023-11-21

联系方式: 熊 瑛, xiongying_1989@163.com。

通信作者: 李小健, bandage@126.com。

传统设备/系统/整机(车)电磁兼容设计通常是在产品设计完成后按照国家标准进行试验测试,若不通过则修改设计后再次测试,如此反复设计,测试,整改,再设计的过程,将大大延长设计周期并增加设计成本。若在设计初期,通过建模仿真手段对敏感设备的线缆进行串扰和抗扰性仿真,预估线缆的电磁干扰耦合量级,并通过模型对线缆选型、布局进行优化设计,可为早期系统布线提供电磁兼容优化设计方案,节约研制时间和设计成本^[8]。

本文针对某型装备高低压线缆串扰问题,以实测共模干扰作为电磁干扰源,以高压动力线缆和控制线缆作为分析对象,构建场-线-路耦合的电磁串扰仿真模型;并基于高低压线缆串扰模型,仿真分析不同线缆对地距离、线缆间距条件下单线、屏蔽线、双绞线等多类低压线缆的近端串扰电压,得出低压线缆的抗干扰性;并面向装甲高压电源变换系统构建线缆串扰分析模型,开展高低压线缆串扰仿真优化分析。

1 场-线-路耦合电磁串扰仿真模型

电磁干扰通过互联线缆、寄生(感性及容性耦合)通道、设备间电路、设备壳体、地平面等多种途径从干扰源耦合至敏感电子电气设备中。当线缆传输电信号时,线缆自身、线缆对线缆及线缆对地所存在的分布参数将提供线间能量的耦合通道,其形成的闭合通路也将对外辐射电磁能量^[9-11]。对地面装备电源变换系统的高低压线缆串扰建模需要重点考虑对高压源、线缆束、以及干扰寄生通道等因素的建模,下面对各部分的建模工作展开介绍。

1.1 PWM 干扰发生模拟电路

电源变换器中 IGBT 开关管的高速通断,使得其集电极和发射极之间的电压在高低电平之间高速转换,从而产生较大的 du/dt 和 di/dt 。因此,将 IGBT 开关管集电极与发射极之间的梯形脉冲电压作为高压电源变换系统的 EMI 干扰源。由于驱动电路加在 IGBT 栅极和发射极之间的驱动电压使得 IGBT 高速通断产生梯形脉冲电压,通过建立 IGBT 驱动电路模型可获得干扰源的梯形脉冲电压。

本文描述的驱动控制策略采用正弦脉冲宽度调制 (SPWM) 控制策略^[12-15],首先构建三角波载波和正弦调制波发生电路,然后用比较器确定他们的交点,并在交点时刻对 IGBT 开关管的通断转换进行控制,进而生成 SPWM 波形。本文采用的三角载波幅值为 10 V,周期为 8.3 μs ;正弦调制波幅值为 3 V,频率为 12 kHz;供电电压为 ± 15 V,图 1(a)和图 1(b)分别为仿真后三相线缆共模电压的时域波形和频谱特性。

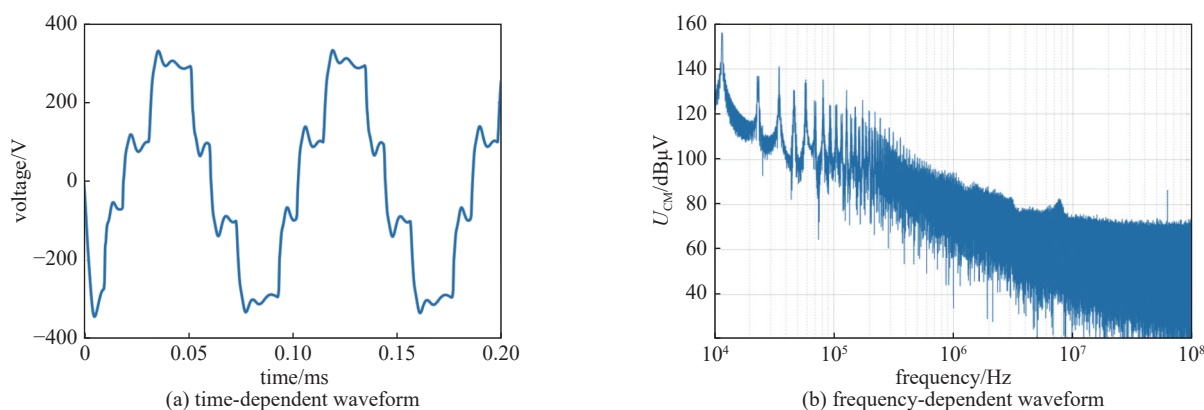


Fig. 1 Common mode voltage simulation waveforms

图 1 共模电压仿真波形

1.2 线缆建模

电源变换系统动力线缆结构参数如表 1 所示。根据线缆结构特征,构建动力线缆基础电磁模型。由于本阶段重点分析线缆基本电磁特性,因此模型的构建先不考虑线缆的实车排布方式,设定线缆长度为 2 m,离地高度为 5 cm,线缆类型为高压同轴线缆。

由于电源变换系统电源变换器内 IGBT 开关的高速切换动作,以及系统、线缆及地平面形成的共模干扰流路径,导致宽频共模干扰在路径内流通。在电源变换系统中,旋变信号线紧邻动力线缆,一端连接电机状态监测传感器,一端连接控制器,高压动力线缆上传导的干扰极易在信号线上进行近场耦合。旋变信号线总共 3 捆电缆束,其中线缆 1 和线缆 2 包含 3 组屏蔽双绞线,线缆 3 包含 2 组屏蔽双绞线和 1 组同轴线,如图 2 所示。

表 1 动力线缆结构参数

Table 1 Structural parameters of power cable

	material	thickness/mm
wire	copper	15.0
insulator inside	PE	3.0
screen	tinned copper	0.2
insulator outside	PE	2.5

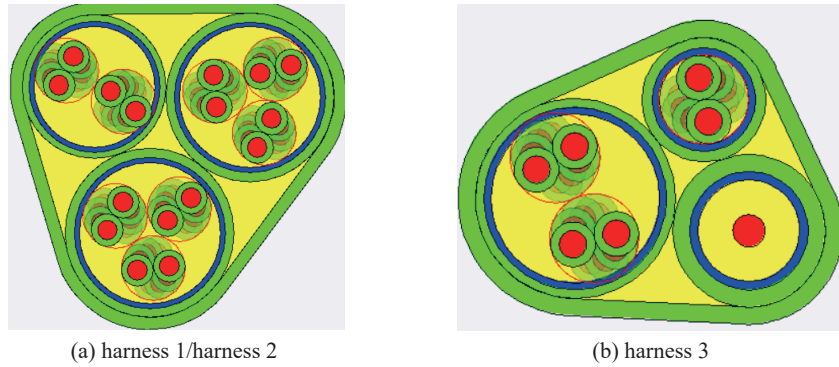


Fig. 2 Electromagnetic structure model of signal cables

图 2 旋变信号线电磁结构模型

1.3 电磁串扰仿真模型构建

为便于分析高压动力线缆对旋变信号线的串扰,在建立信号线与动力线缆串扰模型时,信号线缆与动力线缆平行放置,间距为 5 cm,线缆对地高度 5 cm。同时,将信号线缆简化为单根线缆进行串扰分析,分别分析屏蔽及非屏蔽线缆的近端串扰。其中,信号线单线端接标准 $50\ \Omega$ 阻抗负载,双绞线端接 $100\ \Omega$ 阻抗负载,动力线缆端接电机共模等效电路负载,电机负载的等效电路模型基于共模端口阻抗的矢量拟合法得出^[16-17]。

2 线缆串扰影响因素仿真分析

本节基于场-线-路耦合电磁串扰模型,仿真分析不同线缆类型、线缆对地距离、线缆间距因素对线缆近端串扰的影响,得出低压线缆的抗干扰性,为系统线缆的布线提供指导。

2.1 线缆类型因素影响

通过对场-线-路耦合电磁串扰模型进行时域仿真,得到不同类别信号线上的近端串扰耦合电压,其时域响应分别如图 3 所示。

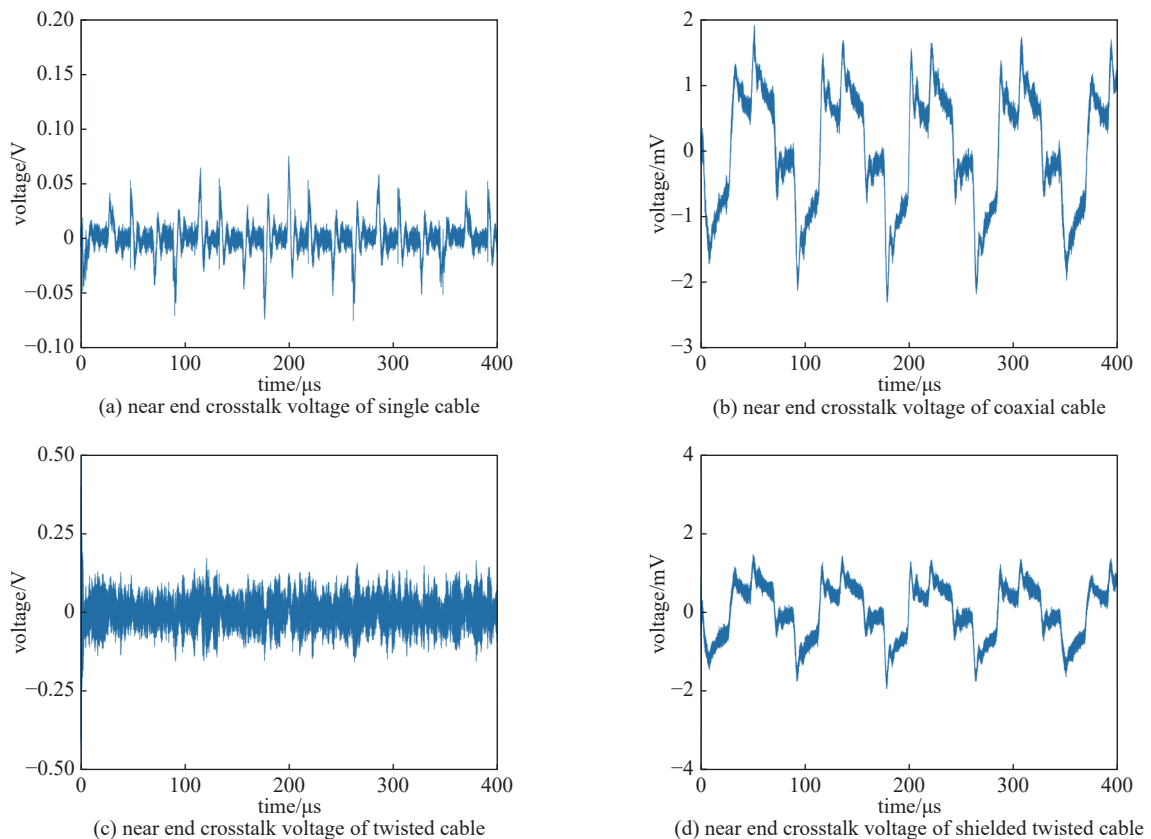


Fig. 3 Near end crosstalk coupling voltage on different types of signal cables

图 3 不同类别信号线上的近端串扰耦合电压

通过上述仿真结果可以看到,在与动力线缆等间距条件下,单线、同轴线、双绞线及屏蔽双绞线平均近端耦合电压分别约为 0.08、0.002、0.18 及 0.002 V。分析得出,单线、同轴线、双绞线、屏蔽双绞线的抗干扰能力:单线 < 同轴线,双绞线 < 屏蔽双绞线。因此,当环境干扰源情况复杂时,对于信号线应优先采用屏蔽双绞线。

2.2 线缆间距因素影响

仿真线距为 2、5 及 8 cm 情况下屏蔽线缆的近端串扰,其时域响应如图 4 所示。

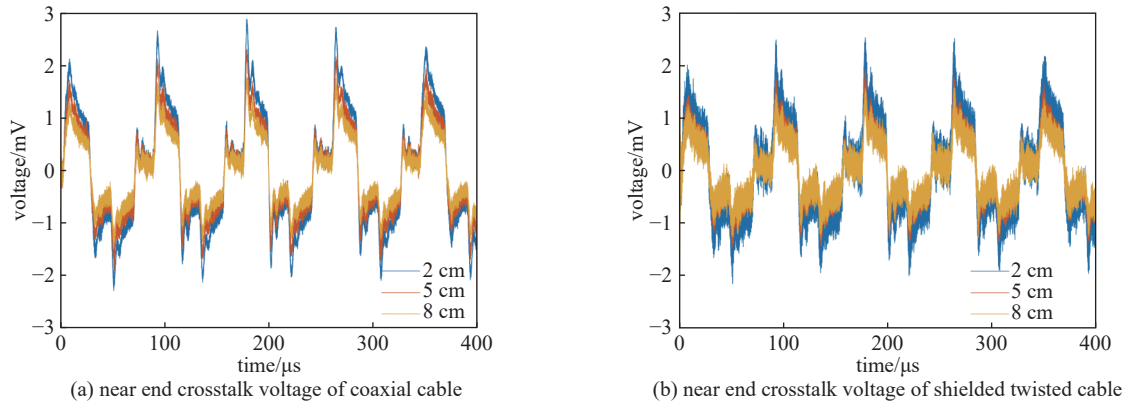


Fig. 4 Near end crosstalk coupling voltage of shielded cables with different cable spacing

图 4 不同线缆间距下屏蔽线缆的近端串扰耦合电压

通过上述仿真结果可以看到,受绕线与干扰线线间距离越大,串扰耦合约小;反之,耦合越大。因此,在实车布线时,信号线应尽量离干扰线缆分开较远距离,以降低干扰信号的串扰。

2.3 线缆对地距离因素影响

仿真线缆对地距离为 2、5 及 8 cm 情况下屏蔽线缆的近端串扰,其时域响应如图 5 所示。

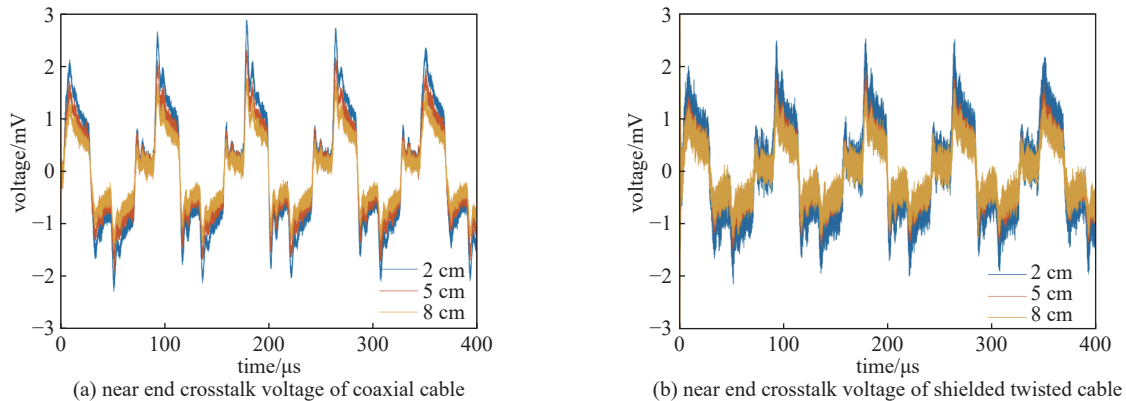


Fig. 5 Near end crosstalk coupling voltage of shielded cables under different cable to ground distances

图 5 不同线缆对地距离下屏蔽线缆的近端串扰耦合电压

通过上述仿真结果可以看到,线缆对地距离越大,串扰耦合约大;反之,耦合越小。因此,在实车布线时,线缆应尽量贴地布置,以降低信号串扰。

3 某地面装备电源变换系统高低压线缆串扰仿真优化分析

本节研究内容将面向装甲高压电源变换系统构建线缆串扰分析模型,开展高压线缆对信号线的串扰分析研究。研究对象包括电机控制器(ECU)与 DC/AC 逆变器、电机控制器与车辆控制器(VCU)、控制器类设备之间的信号线缆等。

3.1 电源变换系统场路协同分析模型

某高压电源变换系统拓扑结构如图 6 所示,由 600 V 高压配电箱、中低压配电箱、DC/AC 逆变器、电机、ECU、VCU、DC/DC 转换器、显示器、控制器类设备及其之间相连的动力电缆、CAN 总线等组成。其中,系统内部线缆一共有三种类型,分别是高压线缆、中低压线缆和信号线。高压线缆包括 600 V 高压配电箱与 DC/AC 逆变器、

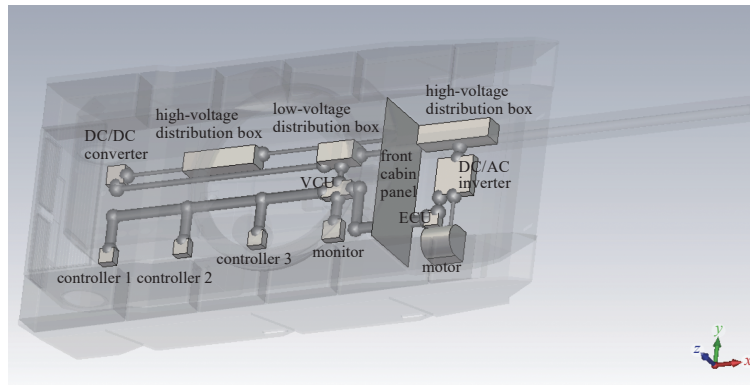


Fig. 6 Topology of a high voltage power supply transformation system

图 6 某高压电源变换系统拓扑

DC/AC 逆变器与电机、600 V 高压配电箱与 600 V 高压配电箱、600 V 高压配电箱与 DC/DC 转换器之间的线缆; 中低压线缆包括中低压配电箱与 ECU、中低压配电箱与 VCU、DC/DC 转换器与中低压配电箱之间的线缆; 信号线包括 ECU 与 DC/AC 逆变器、ECU 与 VCU、VCU 与控制器类设备、控制器与控制器类设备、控制器与显示器之间的线缆等。

依据图 6 所示的高压电源变换系统拓扑, 以及图 7(a) 所示的信号线缆布线情况, 构建信号线缆电磁模型, 如图 7(b) 所示, 其中线缆类别和相关参数在表 2 中列出。

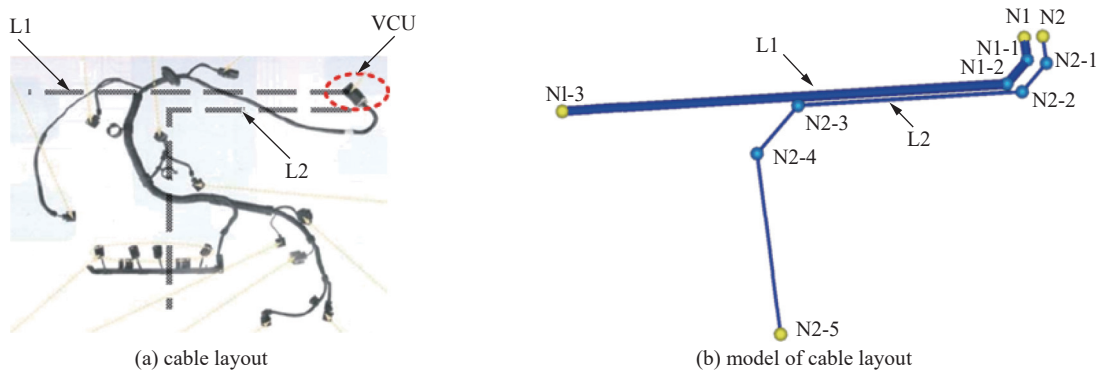


Fig. 7 Signal cable layout and its electromagnetic model

图 7 信号线缆布局及其电磁模型

表 2 信号线缆电磁模型参数

Table 2 Electromagnetic model parameters of signal cables

No.	cable name	start port	end port	length/mm	cable type
1	VCU-ECU	N1	N1-1	50.00	single cable
2	ECU-DC/AC	N1-1	N1-2	70.71	single cable
3	DC/AC-motor signal cable	N1-2	N1-3	950.00	twisted pair cable
4	VCU-controller 3	N2	N2-1	60.00	twisted pair cable
5	controller 3-monitor	N2-1	N2-2	84.85	twisted pair cable
6	monitor-controller 2	N2-2	N2-3	480.00	single cable
7	controller 2-controller 1	N2-3	N2-4	141.42	twisted pair cable
8	controller 1-DC/DC converter	N2-4	N2-5	400.00	twisted pair cable

3.2 电源变换系统线缆串扰仿真及优化分析

线缆间串扰仿真采用“场”与“路”的耦合分析手段, 干扰时域波形为共模时域干扰波形。选取 1、2、4、8 号线缆作为观测信号线缆, 对比分析线缆端口近场耦合电压。同时, 对每组观测信号线缆设置屏蔽线缆对照组, 对比观察非屏蔽及屏蔽信号线上近场耦合电压。仿真结果如图 8~图 11 所示。

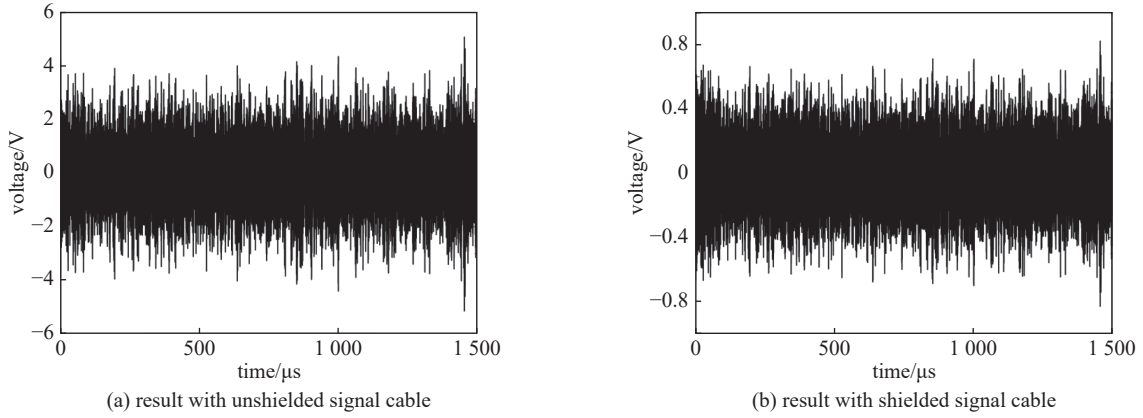


Fig. 8 Near field coupling voltage of signal cable between ECU and DC/AC

图 8 ECU 与 DC/AC 的信号线缆近场耦合电压

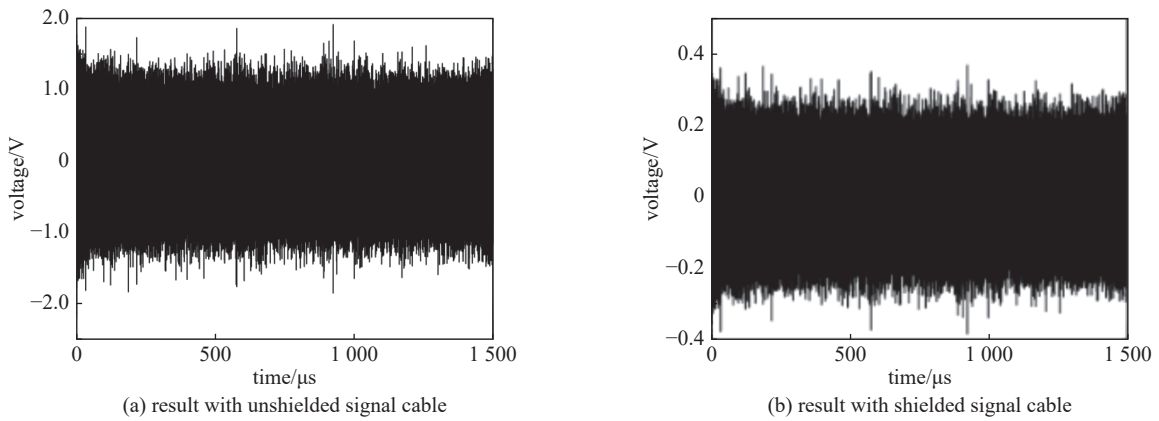


Fig. 9 Near field coupling voltage of signal cable between ECU and VCU

图 9 ECU 与 VCU 的信号线缆近场耦合电压

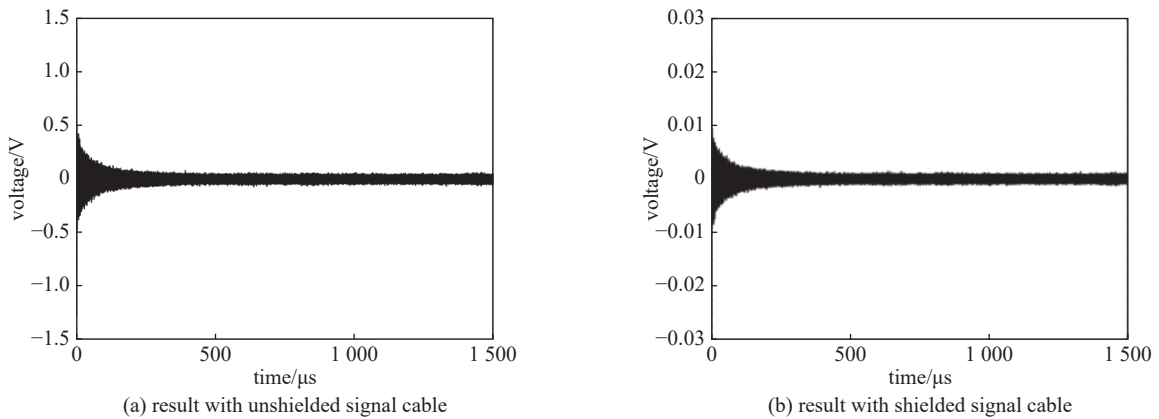


Fig. 10 Near field coupling voltage of signal cables between VCU and controller 3

图 10 VCU 与控制 3 的信号线缆近场耦合电压

从图 8~图 11 可以看出, 高压线缆的干扰信号会在信号线上产生明显的串扰, 其中 ECU 与 DC/AC 信号线缆离高压干扰线缆最近, 其耦合电压最高为 5.2 V; ECU 与 VCU 信号线缆的耦合电压最高为 1.9 V; VCU 与控制 3 信号线缆的耦合电压最高为 0.49 V; 控制器与 DC/DC 变换器信号线缆离高压干扰线缆最远, 其耦合电压最高为 0.01 V。由此可知, 信号线离高压线缆越远, 信号线受到的串扰越小。

此外, 通过对信号线缆屏蔽后的串扰电压进行仿真分析可以看到, 屏蔽后线缆端口耦合的干扰电压明显下降, 其中 ECU 与 DC/AC 信号线缆的耦合电压从最高 5.2 V 降至 0.81 V, ECU 与 VCU 信号线缆的耦合电压从最高 1.9 V 降至 0.39 V, VCU 与控制 3 信号线缆的耦合电压从最高 0.49 V 降至 0.01 V, 控制器与 DC/DC 变换器信号线缆耦合电压从最高 0.01 V 降至 0.004 8 V。由此可知, 对线缆进行良好屏蔽可有效优化系统的线缆串扰问题。

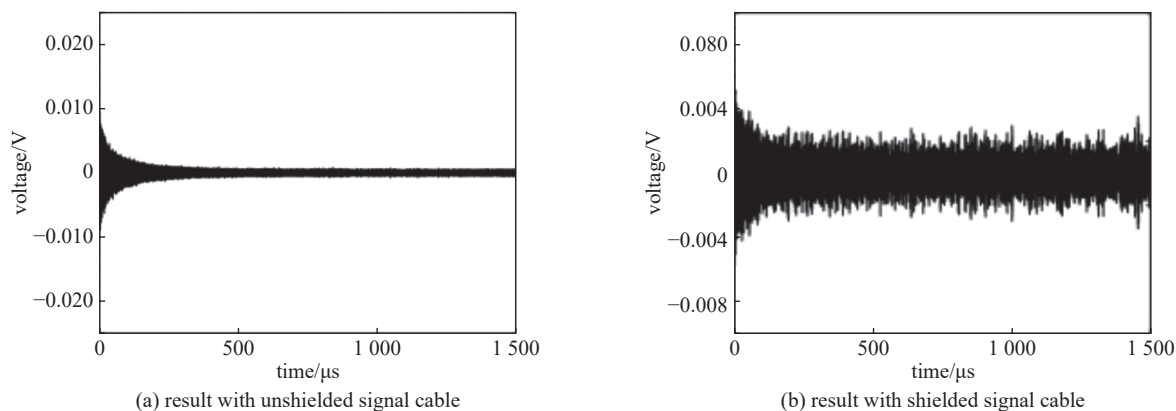


Fig. 11 Near field coupling voltage of signal cables between controller 1 and DC/DC

图 11 控制器 1 与 DC/DC 变换器的信号线缆近场耦合电压

4 结 论

本文以电源变换系统实测共模干扰作为干扰源,以实装动力线缆和低压控制线缆作为干扰和受扰线缆分析对象,构建场-线-路耦合的电磁串扰仿真模型。经过仿真分析得出,线缆电磁干扰耦合量级与线缆类型、屏蔽方式、线距、线缆对地距离等因素相关。根据本文可对系统电磁兼容布线优化提出以下建议:车内重要控制类信号线应进行电磁屏蔽加固,并远离高压干扰电缆束贴地放置。

参考文献:

- [1] Zheng Feng, Wang Wugang, Zhao Xiaofan, et al. Identifying electromagnetic noise-source impedance using hybrid of measurement and calculation method[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(10): 9609-9618.
- [2] 龙海清. 电动汽车 PWM 驱动电机系统 EMC 研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014. (Long Haiqing. Study on the EMC of PWM drive motor system of electric vehicle[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014)
- [3] Wang Biao, Sun Yongwei, Wei Guanghui, et al. Research on test method of ignition temperature of electric explosive device under electromagnetic pulse[J]. *Radioengineering*, 2021, 30(3): 510-516.
- [4] Wang Biao, Sun Yongwei, Wang Xuertian, et al. Equivalent test method for strong electromagnetic field radiation effect of EED[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2021, 2021: 7331428.
- [5] Gubia E, Sanchis P, Ursua A, et al. Frequency domain model of conducted EMI in electrical drives[J]. *IEEE Power Electronics Letters*, 2005, 3(2): 45-49.
- [6] Kim T, Feng Dong, Jang M, et al. Common mode noise analysis for cascaded boost converter with silicon carbide devices[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(3): 1917-1926.
- [7] Grandi G, Casadei D, Reggiani U. Analysis of common- and differential-mode HF current components in PWM inverter-fed AC motors[C]//Proceedings of the 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. 1998: 1146-1151.
- [8] 冯冉冉. 电动汽车线束的电磁干扰建模与抑制技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021. (Feng Ranran. Research on electromagnetic interference and suppression technology of electric vehicle harness[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021)
- [9] 高建凯, 周德俭. 三维布线技术的电磁兼容性预测[J]. 现代表面贴装资讯, 2004, 3(5): 34-37. (Gao Jiankai, Zhou Dejian. Microwave circuit interconnect and manufacture technology[J]. *Modern Surface Mounting Technology Information*, 2005, 3(5): 34-37)
- [10] 肖培. 机电设备互连线缆电磁干扰建模及计算方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019. (Xiao Pei. Study on modeling and calculation method for the electromagnetic interference of interconnection cable in electromechanical equipment[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019)
- [11] 林森. 线束串扰和抗扰性仿真在车辆上的应用[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(14): 35-38,109. (Lin Sen. Application of crosstalk and immunity simulation in vehicle[J]. *Automobile Applied Technology*, 2021, 46(14): 35-38,109)
- [12] 汪泉弟, 安宗裕, 郑亚利, 等. 电动汽车开关电源电磁兼容优化设计方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 225-231. (Wang Quandi, An Zongyu, Zheng Yali, et al. Electromagnetic compatibility optimization design for switching power supply used in electric vehicle[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(9): 225-231)
- [13] Wang Kunbo, Lu Hongmin, Chen Chongchong, et al. Modeling of system-level conducted EMI of the high-voltage electric drive system in electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, 64(3): 741-749.
- [14] Revol B, Roudet J, Schanen J L, et al. EMI study of three-phase inverter-fed motor drives[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, 47(1): 223-231.
- [15] Bondarenko N, Zhai Li, Xu Bingjie, et al. A measurement-based model of the electromagnetic emissions from a power inverter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(10): 5522-5531.
- [16] Xiong Ying, Li Xiaojian, Li Yan, et al. A high-frequency motor model constructed based on vector fitting method[C]//Proceedings of 2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sapporo and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2019: 191-194.
- [17] 熊瑛, 李小健, 周伟, 等. 装甲车辆三相同步电机宽频电磁兼容模型构建方法[J]. 兵工学报, 2022, 43(7): 1467-1477. (Xiong Ying, Li Xiaojian, Zhou Wei, et al. Broadband electromagnetic compatibility modeling for three-phase synchronous motor of armored vehicle[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(7): 1467-1477)