



·电磁防护与应用·

车辆发动机管理系统线缆强电磁脉冲耦合 与防护仿真研究*

祝 挺, 付华芳, 杨国超, 余祖念

(东风越野汽车有限公司, 武汉 430056)

摘 要: 强电磁脉冲可通过外部线缆耦合进入车辆发动机管理系统(EMS)内,造成发动机管理系统设备干扰甚至损伤,电磁防护组件可为车辆EMS防护设计提供支撑。以车辆EMS为研究对象,综合考虑EMS设备及其外部连接线缆,建立EMS设备电磁仿真模型,对不同长度线缆的端口耦合特性及EMS金属壳体表面感应电流进行了仿真研究。基于防护电路仿真,设计了一种应用于车辆EMS设备的电磁防护组件。仿真结果表明,该防护组件能将5 kV的电磁脉冲限制在最高峰值幅度为18 V以内,防护效能达到48 dB,将其加装于EMS线缆接口处可有效提高强电磁环境下的可靠性,对于车辆平台控制系统的电磁防护设计具有一定的参考意义。

关键词: 电磁脉冲; 车辆; 防护器件; 电磁防护; 线缆耦合

中图分类号: TN97

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230327

Research on cable strong electromagnetic pulse coupling and protection simulation of vehicle engine management system

Zhu Ting, Fu Huafang, Yang Guochao, Yu Zunian

(Dongfeng Off-road Vehicle Co., Ltd, Wuhan 430056, China)

Abstract: Strong electromagnetic pulse can be coupled into vehicle engine management system (EMS) through external cables, causing interference and even damage to EMS equipment. Electromagnetic protection components can provide support for vehicle EMS protection design. This article takes vehicle EMS as the research object, comprehensively considers EMS equipment and its external connecting cables, establishes an electromagnetic simulation model of EMS equipment, and conducts simulation research on the port coupling characteristics of cables of different lengths and the induced current on the surface of EMS metal shell. Based on protective circuit simulation, an electromagnetic protection component applied to vehicle EMS equipment was designed. The simulation results show that the protection component can limit the 5 kV electromagnetic pulse to the maximum peak amplitude of 18 V, and the protection efficiency reaches 48 dB. Adding the protection component to the EMS cable interface can effectively improve the reliability in strong electromagnetic environment, which has certain reference significance for the electromagnetic protection design of the vehicle platform control system.

Key words: electromagnetic pulse, vehicle, protection device, electromagnetic protection, cable coupling

电磁空间是当前国家间争夺的最重要领域之一,是未来国家之间博弈的重要领域,国外先进发达国家高度重视对电磁空间的掌握,且在电磁频谱领域开展了长期且全面的研究,取得了大量的技术与新质设备研制成果,并得到了很好的试验验证,尤其是强电磁脉冲环境在未来随时可能出现,对车辆装备将会形成较为严重的威胁,因此引起了广泛的关注^[1-3]。车辆是指挥、电子对抗、保障装备的搭载平台。现有车辆电子系统设备种类、数量和密度不断增多。车辆电控系统采用了大规模集成电路和微控制芯片,对电磁脉冲的敏感性不断增加。其中,发动机管理系统(EMS)是车辆电控系统中最为重要也是对电磁能量最为敏感的设备。强电磁脉冲具有上升时间快、场强强等特点,可通过车辆设置的各类“窗口”,以及各类连接缝隙进入车辆内部敏感设备,形成毁伤效应。强电磁脉冲

* 收稿日期:2023-06-30; 修订日期:2023-12-01
联系方式:祝 挺, zhut@dfmc.com.cn。

通过各类“窗口”,如车窗、发动机舱盖等,可在车辆发动机表面形成数十千伏每米的强电磁环境^[4]。另外,电源线、信号线等引入设备的干扰也是后门效应不可忽略的一部分。电子设备连接线缆耦合到设备端口的电压可达数千伏^[5],能够让电子节气门、转速传感器等敏感设备受到干扰^[6-7],进而容易导致车辆发动机工作异常甚至损毁^[8-10]。可以预见,当遭受电磁脉冲攻击时,电控控制单元最易受到威胁,轻则导致复位,重则导致其彻底损毁。图为某型号汽车 EMS 的电路结构实物图。因此,以高功率微波为代表的强电磁脉冲形成的高强辐射场对于车辆电控系统的威胁日益加剧,而目前车辆电控系统普遍停留在满足基本的电磁兼容水平上,尚不具备抵御强电磁脉冲攻击的能力。强电磁脉冲能量高且上升沿在纳秒量级,传统电磁兼容领域常用的滤波器无法达到预期电磁防护效果^[11]。气体放电管、瞬态抑制二极管、齐纳二极管及热敏电阻等新型防护器件能够承受高脉冲能量,且反应时间快,因此需要开展新型防护材料和器件在强电磁防护领域的应用研究^[12-15]。

为了提高车辆电控系统,特别是 EMS 敏感电子设备的抗强电磁脉冲性能,本文拟以典型的电控系统 EMS 为研究对象,考虑发动机 EMS 金属结构和线缆建立电磁仿真模型,获取瞬态电磁脉冲作用下 EMS 端口耦合特性。在此基础上,开展 EMS 防护组件仿真设计研究,为车辆抗强电磁脉冲加固提供参考。

1 车辆 EMS 线缆电磁耦合仿真分析

1.1 EMS 模型建立

根据提供的 EMS 结构及其典型线束走向,建立 EMS 模型及连接的线束简化模型,如图 1 所示,通过仿真计算获得端口耦合电压。

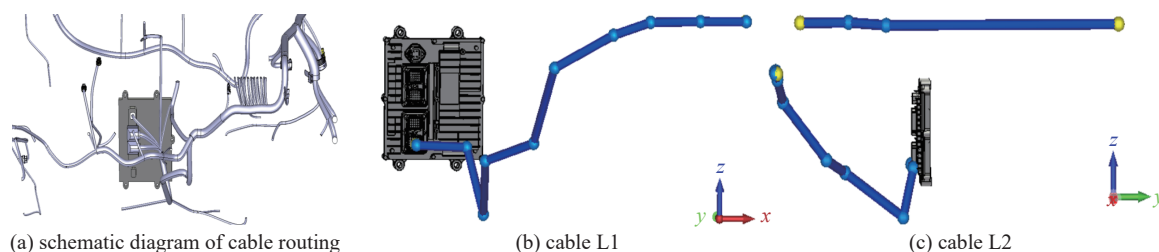


Fig. 1 Wire harness routing diagram and simplified model

图 1 线束走向图及简化模型

1.2 设备互连线模型建立

将提供的 EMS 模型导入仿真软件中,模型材质设置为理想导体 (PEC)。以线束分布及结构为参照,兼顾仿真效率与结果的准确性,对线束进行简化,同时建立了 L1 和 L2 两条不同走向的单芯线作为线束仿真模型。

1.3 激励源设定

采用调制高斯脉冲波形作为激励波形,定义为

$$E(t) = E_0 \cos[2\pi f_0(t - t_s)] \exp\left[-\left(\frac{2(t - t_s)}{\alpha}\right)^2\right] \quad (1)$$

式中: $t_s=20$ ns, $\alpha=10$ ns。

L 波段计算频率范围 1~2 GHz,其中载波频率 f_0 设为 1.5 GHz。窄带高功率微波 (HPM) 时域波形如图 2 所示,

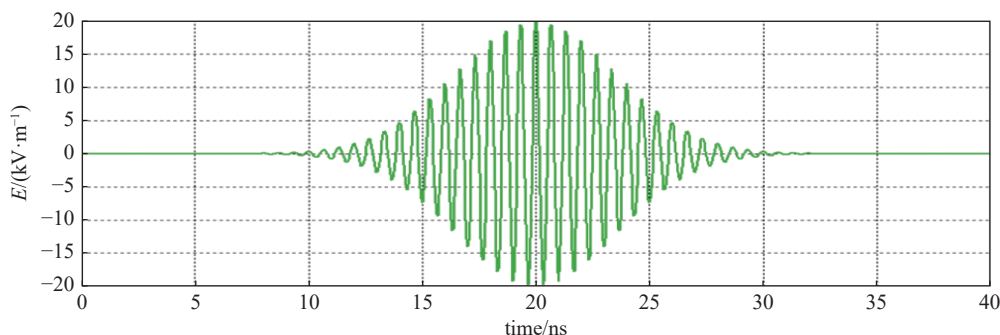


Fig. 2 Simulated time-domain waveform

图 2 仿真时域波形

峰值场强设置为 20 kV/m。

脉冲激励源的辐照方向设置为入射方向沿 y 轴正方向(EMS 正向), 电场方向为沿 z 轴正方向(垂直极化)。

L1、L2 单芯线的点坐标设置分别如表 1、表 2 所示。L1 长度约 1145 mm, L2 长度约 1010 mm。其中点 N1 为线缆 L1 的起点(连接 EMS 端), 点 N11 为线缆 L1 的末端; 点 N13 为线缆 L2 的起点, 点 N16 为线缆 L2 的末端。

1.4 端接阻抗设定

单芯线模型两端的端接阻抗均为 $50\ \Omega$, 仿真电路如图 3 所示。

图 4 所示为 L1、L2 两条单芯线端接阻抗 $50\ \Omega$, 入射方向沿 y 轴正面照射 EMS, L1、L2 线缆两端耦合的感应电压波形。线缆 L1 的起点 N1 端(连接 EMS)的感应电压峰值最大值 30 V; 线缆 L1 的止点 N11 端的感应电压峰值最大值 9 V; 线缆 L2 的起点 N13 端的感应电压峰值最大值 2.2 V; 线缆 L2 的止点 N14 端的感应电压峰值最大值约 4 V。

表 1 单芯线 L1 坐标点设置

Table 1 Coordinate point setting of single core line L1

point	x/mm	y/mm	z/mm
N1	63	-220	320
N2	63	-236	320
N3	166	-234	316
N4	200	-269	189
N5	180	-455	306
N6	278	-518	345
N7	304	-657	498
N8	429	-678	562
N9	508	-685	587
N10	616	-689	590
N11	616	-684	590

表 2 单芯线 L2 坐标点设置

Table 2 Coordinate point setting of single core line L2

point	x/mm	y/mm	z/mm
N13	679	-610	719
N14	677	-456	719
N15	715	-339	712
N16	779	392	712

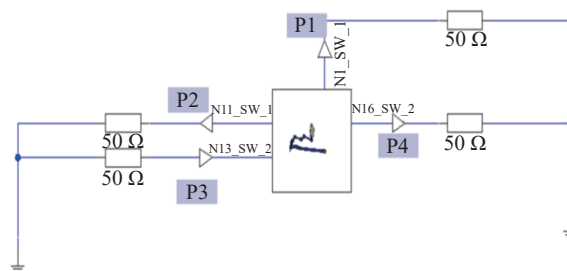
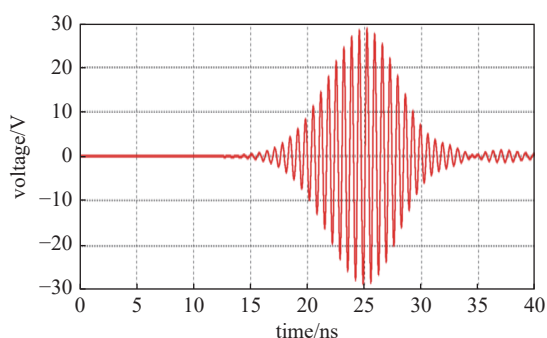
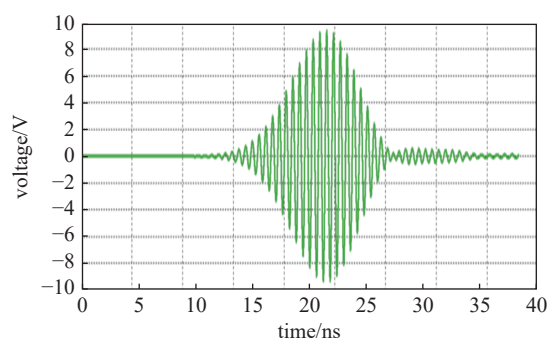


Fig. 3 Load situation at both ends of cables L1 and L2

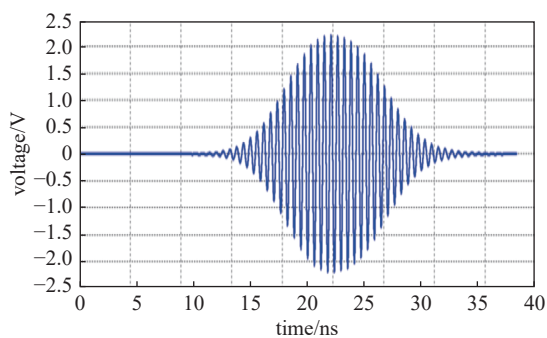
图 3 线缆 L1、L2 两端负载情况



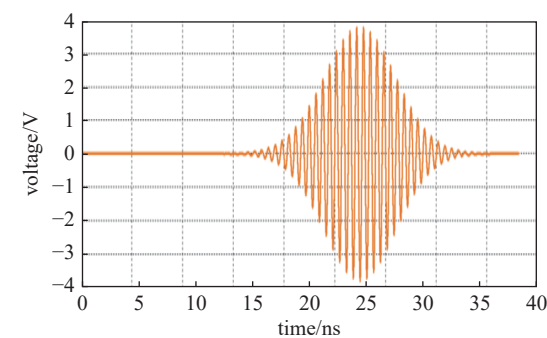
(a) P1



(b) P2



(c) P3



(d) P4

Fig. 4 Coupling voltage waveforms of cable port when excited by modulated Gaussian pulse signal

图 4 调制高斯脉冲信号激励时线缆端口耦合电压波形

1.5 线缆长度对线缆耦合电压影响

为了研究线缆长度的影响,在前述基础上将线缆 L1 始端 N1 从一个 Pin 脚移动到另一个 Pin 脚,使得线缆始端的长度沿 z 方向增加了 36 mm。此时 L1、L2 单芯线的点坐标设置分别如表 3、表 4 所示。其中点 N1 为线缆 L1 的起点(连接 EMS 端),点 N12 为线缆 L1 的末端;点 N13 为线缆 L2 的起点,点 N16 为线缆 L2 的末端。

表 3 延长单芯线 L1 坐标点设置

Table 3 Coordinate point setting of extended single core line L1

point	x/mm	y/mm	z/mm
N1	63	-220	356
N2	63	-236	356
N3	63	-236	320
N4	166	-234	316
N5	200	-269	189
N6	180	-455	306
N7	278	-518	345
N8	304	-657	498
N9	429	-678	562
N10	508	-685	587
N11	616	-689	590
N12	616	-684	590

表 4 延长单芯线 L2 坐标点设置

Table 4 Coordinate point setting of extended single core line L2

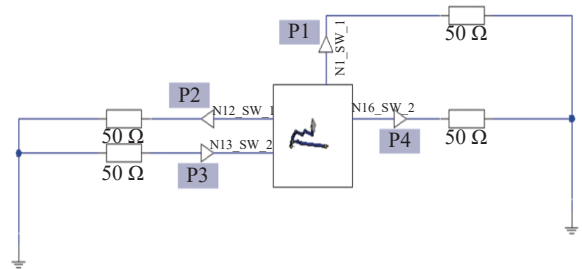
point	x/mm	y/mm	z/mm
N13	679	-610	719
N14	677	-456	719
N15	715	-339	712
N16	779	392	712

单芯线模型两端的端接阻抗均为 50Ω , 仿真电路如图 5 所示。

图 6 所示为 L1、L2 两条单芯线端接阻抗 50Ω , 入射方向沿 y 轴正面照射 EMS, L1、L2 线缆两端耦合的感应电压波形。线缆 L1 的起点 N1 端(连接 EMS)的感应电压峰值最大值 169 V; 线缆 L1 的止点 N12 端的感应电压峰值最大值 9 V; 线缆 L2 的起点 N13 端的感应电压峰值最大值 2.2 V; 线缆 L2 的止点 N14 端的感应电压峰值最大值约 4 V。可以看出,随着线缆长度增加感应电压的峰值逐渐减小。传输高频信号的线缆为分布参数,线缆本身存在着电阻、电感和电容特性,线缆越长电阻、电感和电容对信号的影响越大,信号衰减也就越明显。具体来说,电缆的电阻会导致信号的功率衰减,而电感和电容则会导致信号的相位和幅度失真。根据传输线理论,电缆的衰减与频率、电缆长度和电缆特性参数有关。一般而言,衰减与频率成正比,与电缆长度成正比,与电缆特性参数成反比。

1.6 EMS 表面电流分布

在 HPM 辐照下,EMS 金属壳体表面将产生感应电流,频率 1.5 GHz 时壳体表面感应电流分布如图 7 所示。可以看出,电磁能量在 EMS 金属壳体表面的耦合规律,其中表面电流在插头附近强度较大,大部分电磁能量从插头

Fig. 5 Load situation at both ends of cable L1 as it increases in the z -direction图 5 线缆 L1 末端沿 z 方向增加时两端负载情况

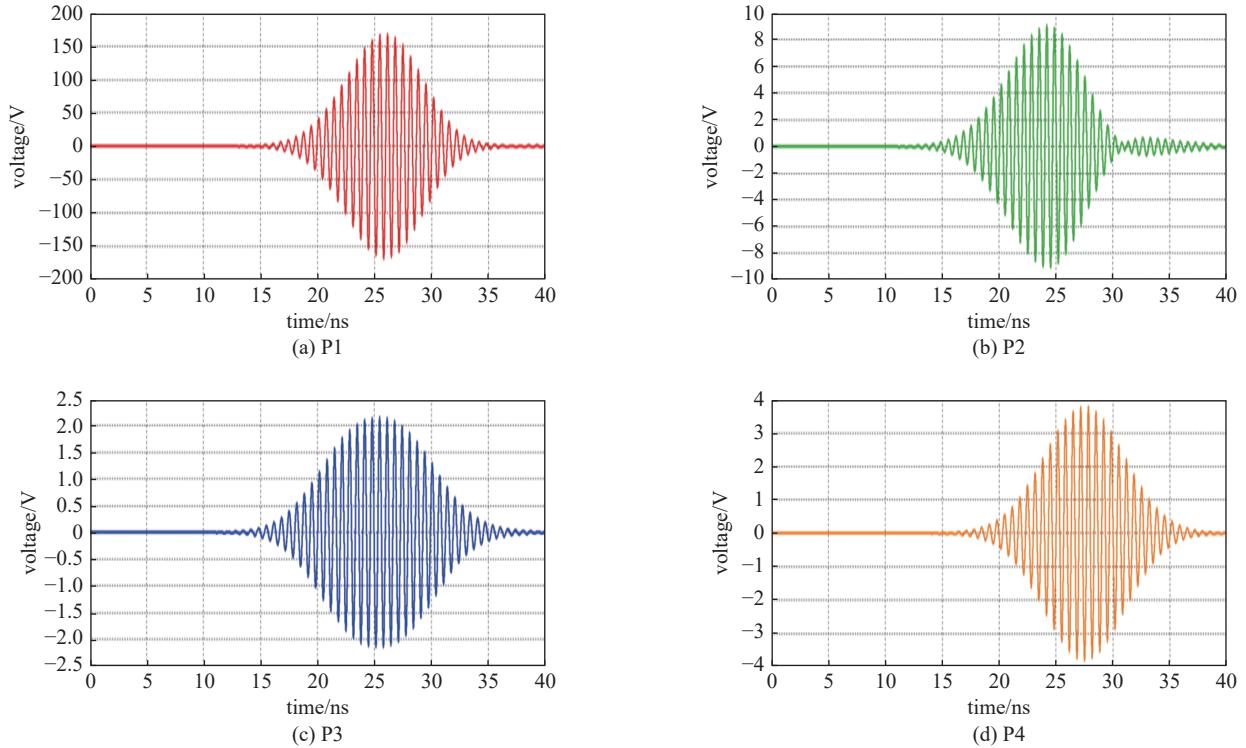


Fig. 6 Coupling voltage waveform of the cable port when the starting end of cable L1 increases in the z-direction

图6 线缆 L1 始端沿 z 方向增加时线缆端口耦合电压波形

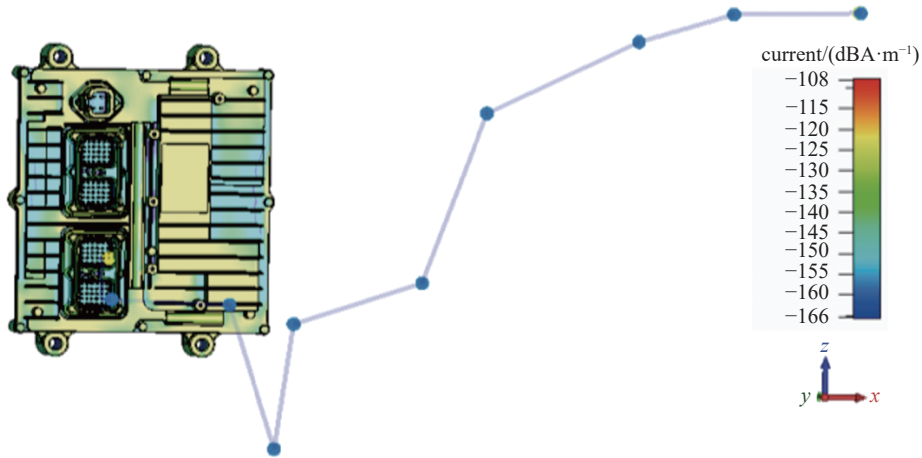


Fig. 7 Surface current distribution at a frequency of 1.5 GHz

图7 频率 1.5 GHz 时表面电流分布

进入到 EMS 内部对电路进行破坏。所以在设计防护电路时, 应注意插头附近的电磁屏蔽。在做好屏蔽之后, 从线缆耦合的电磁能量就只会经由防护电路流入 EMS 电路, 防护电路对信号进行滤波和泄放后, 进入到 EMS 电路的电压值较小, 不会对 EMS 电路产生损伤。

2 EMS 防护组件仿真设计与分析

2.1 EMS 传输线分类

EMS 接口总共包含 34 路的传输线, 按照其特定的功能和类型分别进行相应的防护设计。总共分为六类, 分别为对凸轮轴转速传感信号/曲轴转速信号进行 2 路防护; 对四种压力传感器进行 4 路防护; 对 EMS 信号进行 2 路防护; 对其他传感器信号进行 18 路的防护; 对传感器 VS 供电线进行 2 路防护; 对信号线进行 6 路防护。

2.2 EMS 防护电路设计与仿真

防护电路采用滤波与泄放两种防护手段。滤波网络采用 LC 集总参数电路构成, 由高压电容电感组成。保证正常小信号通过, 滤除干扰信号。泄放网络采用气体放电管与半导体放电管组成。两级泄放网络保证残压低于设

计值。

在 ADS 中, 绘制了完整的 EMS 防护件原理图, 如图 8 所示, 由于仿真只能选择两个端口, 故而只在原理图中的两个电路端口之间加载仿真控件, 其他电路端口一次留空, 从而便于进行整体电路的 S 参数仿真与电磁脉冲瞬态仿真。图 9 反映了防护电路的工作频率, 在该频率下可以保证正常工作信号的通过。

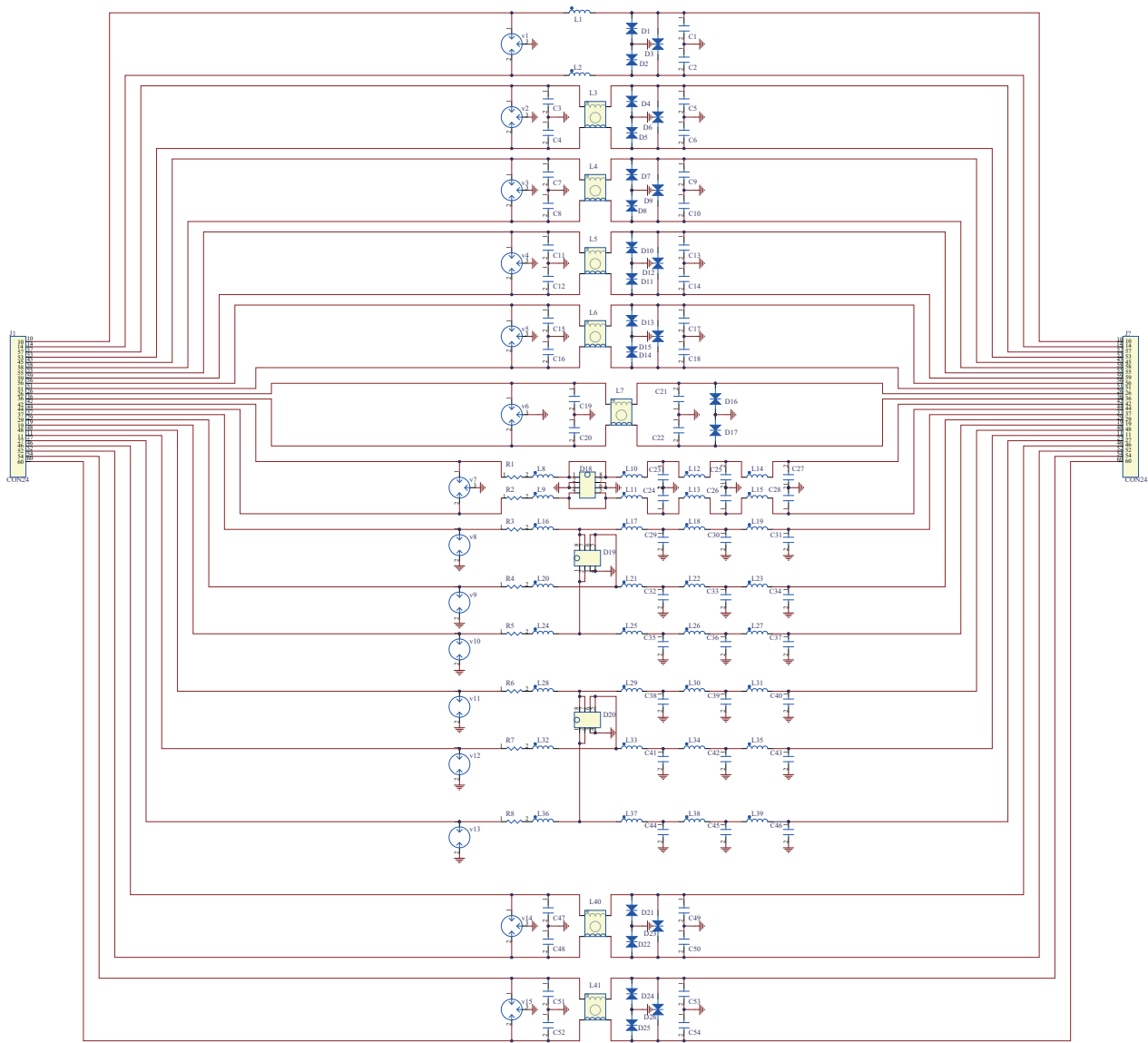


Fig. 8 Schematic diagram of EMS overall circuit

图 8 EMS 整体电路原理图

从以上仿真结果可以看出, 利用条件开关可以精确模拟非线性器件在防护组件中的响应, 为 EMS 电磁防护组件设计提供可靠的仿真分析模型。

从图 10 可以看出, 该电磁防护组件能将 5 kV 的电磁脉冲限制在最高峰值幅度为 18 V 以内, 防护效能达到 48 dB, 满足防护要求。

3 结 论

本文对不同线缆长度和入射方向时单芯线缆两端感应电压耦合进行了仿真。从仿真可知: 在强电磁脉冲入射下, 对于沿选取路径布置的两条单芯线缆 L1 和 L2, 正入射垂直极化情况下线缆端口耦合电压最大 60 V; 在线缆 L1 一端长

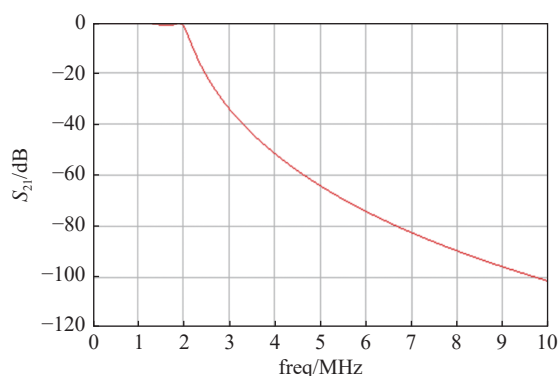


Fig. 9 EMS S parameter simulation result

图 9 EMS S 参数仿真结果图

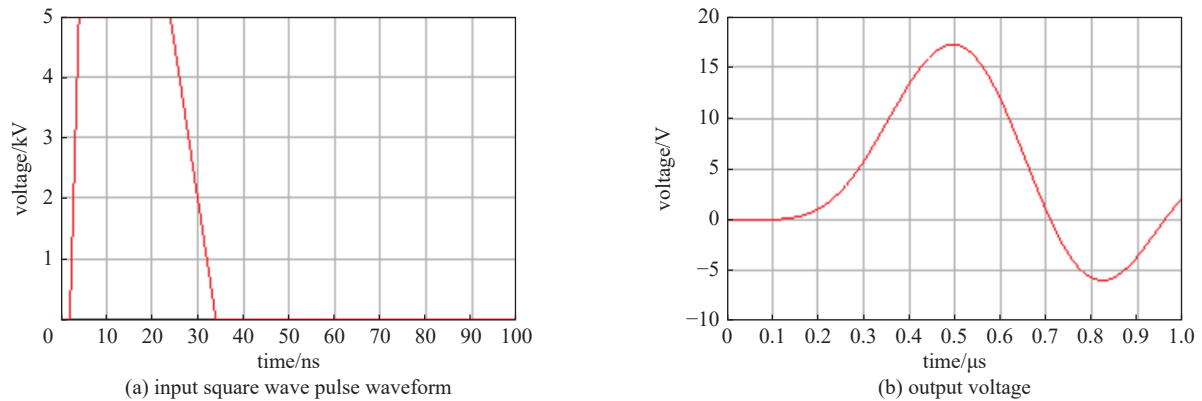


Fig. 10 Electromagnetic pulse transient simulation results

图 10 电磁脉冲瞬态仿真结果图

度增加时,耦合电压增加至 169 V。为了降低强电磁脉冲对 EMS 的影响,基于仿真,设计了一种可用于 EMS 防护的组件,该组件能将 5 kV 的电磁脉冲限制在最高峰值幅度为 18 V 以内,防护效能达到 48 dB。

致谢 感谢中国舰船研究设计中心温定娥给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] Radasky W A, Baum C E, Wik M W. Introduction to the special issue on high-power electromagnetics (HPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI)[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, 46(3): 314-321.
- [2] 李名杰,刘进. 电子装备面临的强电磁脉冲环境分析[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(2): 69-73. (Li Mingjie, Liu Jin. Environmental analysis of high power EMP on electronic equipment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 9(2): 69-73)
- [3] Savage E, Radasky W. Overview of the threat of IEMI (intentional electromagnetic interference)[C]//*Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2012: 317-322.
- [4] 蔡金良,孙晓颖,赵晓晖. 考虑复杂金属设备的车辆发动机舱电磁环境效应分析[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2016, 46(4): 1360-1367. (Cai Jinliang, Sun Xiaoying, Zhao Xiaohui. Electromagnetic environment effects for automotive engine block with complex metallic equipments[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2016, 46(4): 1360-1367)
- [5] 郑浩月,贺志昂,宋滔,等. 车辆平台电磁安全威胁量化分析[J]. *通信技术*, 2019, 52(2): 460-465. (Zheng Haoyue, He Zhiang, Song Tao, et al. Quantitative analysis of electromagnetic safety threats on vehicle platforms[J]. *Communications Technology*, 2019, 52(2): 460-465)
- [6] 王震,蔡金良,秦风,等. 汽车发动机转速传感器瞬变脉冲敏感性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 083003. (Wang Zhen, Cai Jinliang, Qin Feng, et al. Susceptibility of automotive engine speed sensor to transient electromagnetic pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 083003)
- [7] 孙晓颖,王震,杨锦鹏,等. 基于贝叶斯网络的电子节气门电磁敏感度评估[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2018, 48(1): 281-289. (Sun Xiaoying, Wang Zhen, Yang Jinpeng, et al. Electromagnetic susceptibility assessment of electronic throttle based on Bayesian network[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2018, 48(1): 281-289)
- [8] 李慧梅,唐彦峰,刘祥凯,等. 电磁脉冲武器对车辆装备的损伤效应研究[J]. *装备环境工程*, 2010, 7(3): 31-34,55. (Li Huimei, Tang Yanfeng, Liu Xiangkai, et al. Study of destructive effects of electromagnetic pulse weapon on vehicle[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2010, 7(3): 31-34,55)
- [9] 秦风,蔡金良,曹学军,等. 车辆强电磁脉冲环境适应性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 103203. (Qin Feng, Cai Jinliang, Cao Xuejun, et al. Investigation on the adaptability of vehicle in high-intensity electromagnetic pulse environment[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 103203)
- [10] Yang Shenghui, Tang Yanfeng, Liu Xiangkai, et al. Study on effects of high-altitude electromagnetic pulse to engine electronic control system[J]. *Advanced Materials Research*, 443/444: 894-898.
- [11] Hobbins K A W. EMP and transient suppressed mains filters[C]//*Proceedings of the Seventh International Conference on Electromagnetic Compatibility*. 1990.
- [12] 张希军,杨洁,张庆海. 瞬态电压抑制器在快上升沿电磁脉冲作用下的瞬态响应[J]. *高压技术*, 2012, 38(9): 2242-2247. (Zhang Xijun, Yang Jie, Zhang Qinghai. Transient response of transient voltage suppressor device under EMP with fast rise time[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(9): 2242-2247)
- [13] 王磊,周彪,邓世雄,等. 半导体电磁防护限幅器的发展[J]. *安全与电磁兼容*, 2023(3): 17-23. (Wang Lei, Zhou Biao, Deng Shixiong, et al. Progress on semiconductor limiters for electromagnetic defense[J]. *Safety & EMC*, 2023(3): 17-23)
- [14] 赵展,尚逸帆,赵启龙,等. 滤波电路的电磁脉冲防护效应研究[J]. *航天电子对抗*, 2020, 36(5): 28-33. (Zhao Zhan, Shang Yifan, Zhao Qilong, et al. Study on the protection of filter circuit against electromagnetic pulse[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2020, 36(5): 28-33)
- [15] 谢斌,刘洁,王波,等. 强电磁脉冲防护技术研究[J]. *火控雷达技术*, 2020, 49(2): 111-115. (Xie Bin, Liu Jie, Wang Bo, et al. Research on strong electromagnetic pulse protection technology[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2020, 49(2): 111-115)