

强激光打靶辐射电磁脉冲诱导线缆串扰模拟



李廷帅¹, 李子豪¹, 易涛², 王传珂², 何强友¹, 杨雨¹, 王峰^{2*}

(1. 电子科技大学材料与能源学院 成都 611731; 2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心 四川 绵阳 621900)

【摘要】以在神光 II 升级靶场使用九路激光打靶实测的电磁脉冲信号为输入源, 建立平行线缆模型, 研究电磁脉冲耦合电缆产生的串扰现象, 揭示不同线缆间距、线缆长度受串扰的规律, 以及线缆长度对串扰信号频率的影响机制。同时探讨铜箔屏蔽处理后对串扰信号的衰减。结果表明, 增大平行线缆的间距有利于抑制串扰, 增大线缆长度抗干扰能力减弱, 谐振频率降低; 屏蔽处理能有效抑制信号串扰, 为高功率激光装置安全精确地开展各类物理诊断提供实验与理论支持。

关键词 线缆串扰; 电磁脉冲; 高功率激光; 线缆屏蔽

中图分类号 TN813; O532

文献标志码 A

doi:10.12178/1001-0548.2021262

Simulation of Cable Crosstalk Generated by Electromagnetic Induced by High-Power Laser Shooting Targets

LI Tingshuai¹, LI Zihao¹, YI Tao², WANG Chuanke², HE Qiangyou¹, YANG Yu¹, and WANG Feng^{2*}

(1. School of Materials and Energy, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics Mianyang Sichuan 621900)

Abstract In this study, the electromagnetic pulse (EMP) signals were measured at the Shenguang II Upgrade Range and used as the input source to establish a parallel cable model to reveal the crosstalk phenomenon generated by the EMP coupled cables. The law of crosstalk induced by varying cable distances and cable lengths were investigated, and the influence of cable length on the frequency of crosstalk signals was also unraveled. Meanwhile, the attenuation of the cable to the crosstalk signal after the copper foil shielding is discussed. The results indicate that increasing the distance between parallel cables is beneficial for suppression of crosstalk, while increasing the length of parallel cables reduce the anti-interference ability and lower resonance frequency. Therefore, proper shielding can effectively suppress signal crosstalk and provide experimental and theoretical support for implementing various physical diagnostics safely and accurately.

Key words cable crosstalk; electromagnetic pulse; laser; shielding

激光打靶驱动惯性约束聚变的过程中会产生大量的带电粒子, 如高能电子^[1]、X 射线^[2]、带电离子^[3], 进而产生大量的强电磁脉冲^[4]。脉冲信号的瞬态强度高达几百 MV/m, 频域分布在几百 MHz 到几个 GHz^[5-7]。电磁辐射特性与靶材和靶型有关, 掺杂不同含量 Ti 的靶产生的脉冲强度不同^[8], 激光与不同靶型包括真空球腔靶、真空柱腔靶、平面靶、金球靶、网格靶、半黑腔靶、充气球腔靶、桶腔靶等作用产生的电磁波形也有很大差异, 波形时间演变规律与激光能量有关^[9]。文献 [10] 的研究结果表明黑腔靶的开口尺寸会影响电磁辐射的强

度。距离靶室中心不同距离处的电磁辐射测量结果表明, 靶室内的电磁波形极为复杂, 应该是多个辐射与震荡过程的混合信号, 靶室内外信号强度差异较大^[11]。这些电磁脉冲信号对物理诊断和数据采集造成干扰, 同时脉冲信号耦合进传输线后会对其他线缆产生串扰影响。探究激光打靶过程中串扰信号造成的影响和如何进行减小串扰信号, 能够有效提高实验诊断结果的准确性。

电磁辐射环境下的线缆信号串扰现象普遍存在, 如动车和地铁里的传感器连接的线缆放置在金属沟槽当中, 沟槽的金属结构对线缆的分布参数产

收稿日期: 2021-09-16; 修回日期: 2022-04-11

作者简介: 李廷帅 (1983-), 男, 博士, 副教授, 主要从事强激光打靶产生电磁脉冲的规律探索与机制方面的研究。

*通信作者: 王峰, E-mail: lfrc_wangfeng@163.com

生影响,进而影响线缆的串扰情况^[12-14];飞行器里的电子设备使用不同种类的线缆,会存在串扰^[15-16];在实验室环境下,不同放置方式下不同种类线缆会产生串扰^[17-18]。在强激光物理实验中,准确测量电磁辐射的分布有助于深刻理解激光与靶耦合的物理过程,但围绕靶室周围的各种诊断设备线缆必然受到强电磁脉冲的影响,造成信号串扰。因此,对强激光打靶过程中产生的电磁脉冲耦合线缆造成串扰的规律进行深入系统的探讨,揭示关键影响因素,设计合理的屏蔽,具有重要的理论与工程价值。本文通过传输线理论^[19-20]建立串扰等效模型,并使用 CST 2019 电缆工作室建立平行线缆模型^[21],馈入神光 II 升级靶场中一发实际测得的电磁脉冲信号,研究了不同线缆间距、线缆长度对串扰信号幅值的影响,并探讨了添加金属屏蔽层后对串扰的衰减机制。

1 串扰原理

电信号在电缆中传输泄露电磁辐射,这个现象可以通过传输线原理来研究。由于同轴线缆芯线与屏蔽层之间有分布式电感、电容和电阻,每条电缆之间也有互电感和互电容,因此线缆信号耦合时会受到这些参数的影响,线缆的性质也会对串扰信号产生很大的影响。图 1 为两根平行线缆串扰的传输线模型,馈入信号的线缆是信号源线缆,受串扰信号影响的是接收线缆,其中 L_1 、 L_2 、 C_1 、 C_2 、 R_1 、 R_2 分别是单位长度信号源线缆和接收线缆的自电感、自电容和内阻, L_M 、 C_M 是单位长度线缆之间的互电感和互电容。

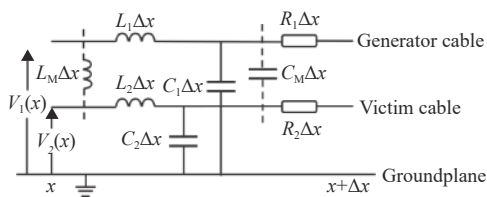


图 1 线缆串扰等效模型

两条平行线缆的传输线方程可以表示为:

$$\frac{d}{dx} \mathbf{V}(x) = -(\mathbf{R} + j\omega \mathbf{L}) \mathbf{I}(x) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx} \mathbf{I}(x) = -j\omega \mathbf{C} \mathbf{U}(x) \quad (2)$$

式中, $\mathbf{V}(x)$ 和 $\mathbf{I}(x)$ 可以表示为:

$$\mathbf{V}(x) = \begin{bmatrix} V_1(x) \\ V_2(x) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{I}(x) = \begin{bmatrix} I_1(x) \\ I_2(x) \end{bmatrix} \quad (4)$$

\mathbf{L} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{R} 分别是由线缆的分布式电感、电容、电阻确定的矩阵,表示为:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 & L_M \\ L_M & L_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_1 + C_M & -C_M \\ -C_M & C_2 + C_M \end{bmatrix} \quad (7)$$

如果已知信号源线缆和接收线缆的分布式参数,那么可以通过传输线方程来计算串扰信号的大小。计算机仿真技术软件 CST 电缆工作室是通过计算电缆之间的各种电参数,并基于传输线理论来进行建模仿真。

2 电磁脉冲实验测试结果

在神光 II 升级靶场内进行打靶实验,激光与靶相互作用的过程中,以靶为中心辐射出电磁脉冲信号。在靶场不同位置放置脉冲诊断装置采集靶场的电磁脉冲信号,并连接 70 m 长的同轴线缆到示波器上,以此来评估靶场受电磁脉冲干扰的程度,靶场示意图如图 2 所示。

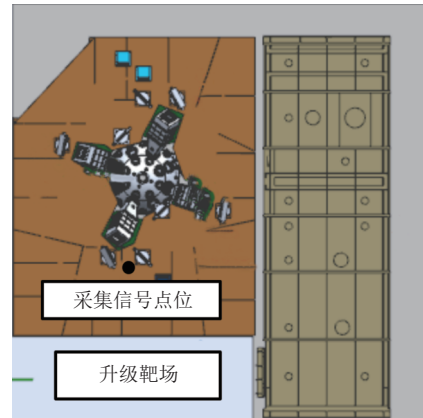


图 2 神光 II 升级靶场点位示意图

在神光 II 升级装置中进行打靶实验,用九路皮秒激光 (319.19 J) 入射铜平面靶,在升级靶场靶球外的激光入口处放置垂直安装的微带天线,通过线缆连接示波器收集电压信号,示波器放置在法拉第笼中,防止打靶产生的强电磁脉冲直接对示波器产生影响,靶场示意图如图 3 所示。测得此点位时域电压信号,采集数据显示电磁信号幅值为 52.79 V,脉冲持续时间约 400 ns,通过傅里叶变换得到其频

域信号, 可以看出电压信号主频率在 3 GHz 内, 峰值在 1.5 GHz 左右。将该信号作为馈入信号源线缆端口的串扰源信号。激光入口点位时域、频域电压信号如图 4 所示。

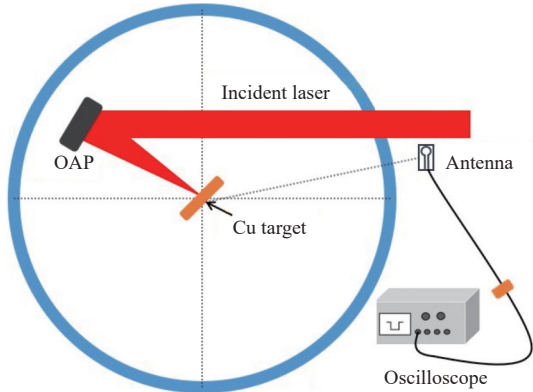
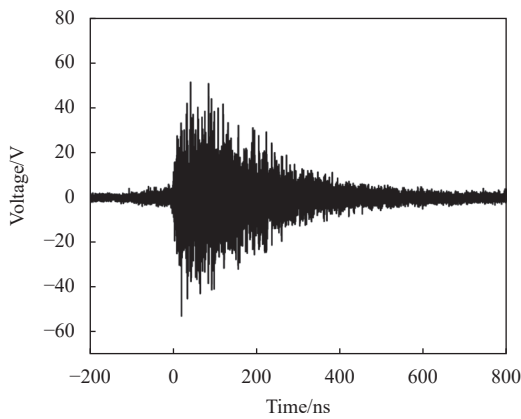
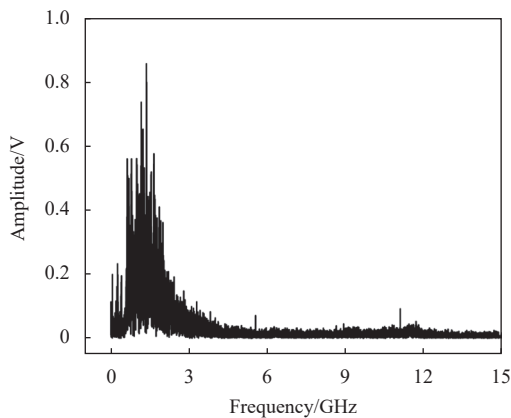


图 3 神光 II 升级靶场布置示意图



a. The time domain signal at B06



b. The frequency domain signal at B06

图 4 B06 点位电磁辐射信号

3 模拟仿真

在 CST 电缆工作室中建立模型, 靶室内部环境中, 线缆放置距离往往很近, 将 4 根长度为 2 m

的 RG58 同轴线缆与信号源线缆分别间隔 2、5、10、15 cm 平行放置, 离地高度均为 5 cm, 同轴线缆外屏蔽层接地, 屏蔽层与内芯之间做内阻为 50 Ω 的匹配, 线缆连接如图 5 所示。对信号源线缆端口馈入采集信号后进行模拟, 线缆输出端口信号为串扰信号。

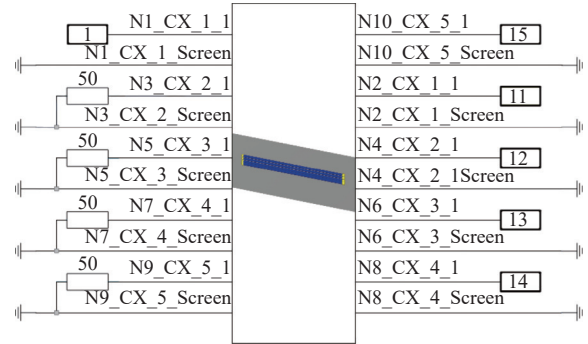


图 5 线缆模型连接示意图

图 6 给出电磁脉冲馈入后的串扰信号与间距的关系, 其幅值在距离信号源线缆 2 cm 外为 180.56 μV, 5 cm 为 115.38 μV, 10 cm 为 100.83 μV, 15 cm 为 80.42 μV, 由近到远逐渐减小, 两条传输线的信号串扰时, 电磁波在空气介质中传播, 随传播距离的增加, 受到空气散射和吸收的影响增强, 表现出串扰信号幅值随距离增加而衰减的趋势。

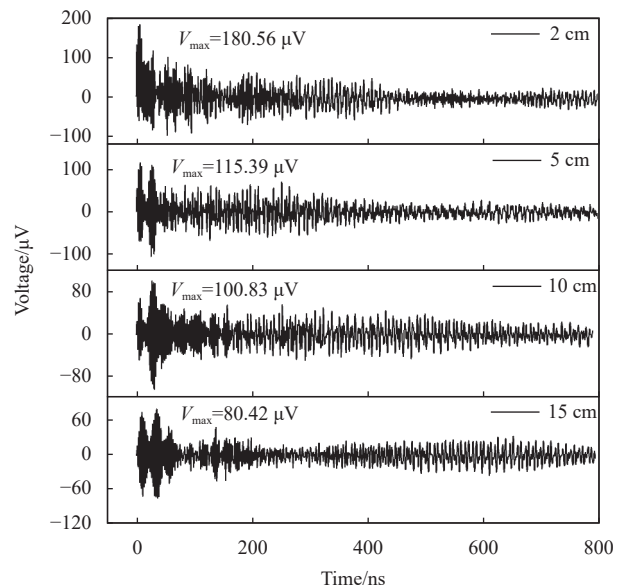


图 6 不同间距线缆受到的串扰信号

在实际打靶测试实验中, 铺设线缆的长度通常为 20 和 70 m, 线缆衰减会导致测试信号与实际信号不匹配。为了研究线缆长度对信号串扰的影响, 将两根线缆间隔 5 cm 平行放置, 长度分别设置为

2、20、70 m 进行电磁脉冲信号的馈入模拟。图 7 和图 8 分别给出不同长度线缆的串扰系数和电压谱密度, 2 m 长线缆串扰系数为 -131 dB, 20 m 长线缆串扰系数为 -111 dB, 70 m 长线缆串扰系数为 -102 dB。由此可见, 增长线缆长度可以减弱对串扰信号的衰减能力。当信号达到一定频率时, 线缆的频率与串扰系数不再完全呈正比或反比关系, 线缆对其屏蔽效果不能用数字表达, 即达到了线缆的谐振频率。长度为 2 m 的线缆的谐振频率在 100 MHz 左右, 长度为 70 m 的线缆的谐振频率已经下降到几 MHz, 可以看出线缆长度越长, 谐振频率越小, 谐振频域越宽。信号通过线缆传播时, 金属芯线的介质损耗会导致输出信号幅值的减小, 且芯线的介电常数和频率有关, 越高频信号受到的损耗越大, 所以线缆长度会影响高频信号的传输, 线缆越长, 介电损耗越严重, 串扰系数越大, 对高频信号的衰减越大。

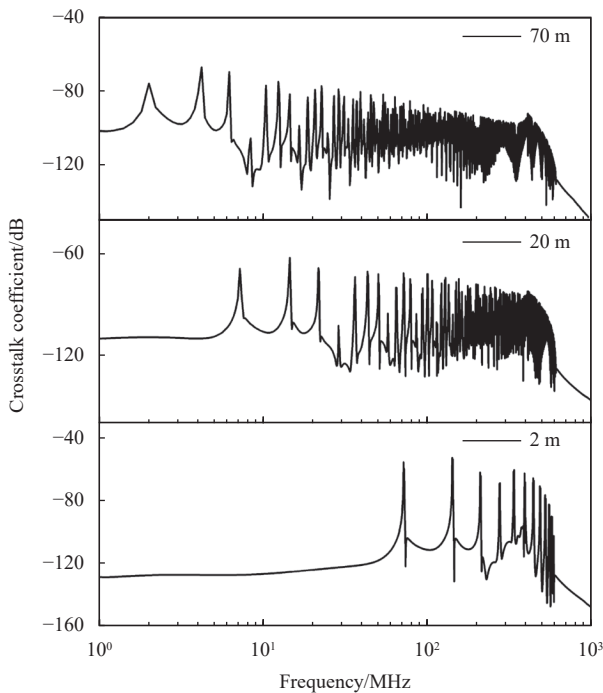


图 7 不同长度线缆串扰系数

为了消除电磁脉冲耦合进线缆造成的串扰, 将距离信号源线缆 2、5、10、15 cm 的线缆用 0.1 mm 厚的铜箔包裹, 对屏蔽处理过后的线缆进行 S 参数模拟, 进一步计算获得串扰信号的大小。不同端口之间的 S 参数即为线缆串扰系数, 图 9 对比了不同间距线缆在屏蔽前后的串扰系数。串扰系数越小, 线缆之间的串扰信号越弱, 可以看出屏蔽处理后线缆的串扰系数显著小于未屏蔽的线缆; 线

缆间距相同的情况下, 线缆屏蔽前后串扰系数相差约 30 dB, 且与信号源的间距越大, 串扰系数减小的程度越小, 间距 2 和 5 cm 线缆串扰系数相差约为 15 dB, 间距 5 和 10 cm 线缆串扰系数相差约为 9 dB。

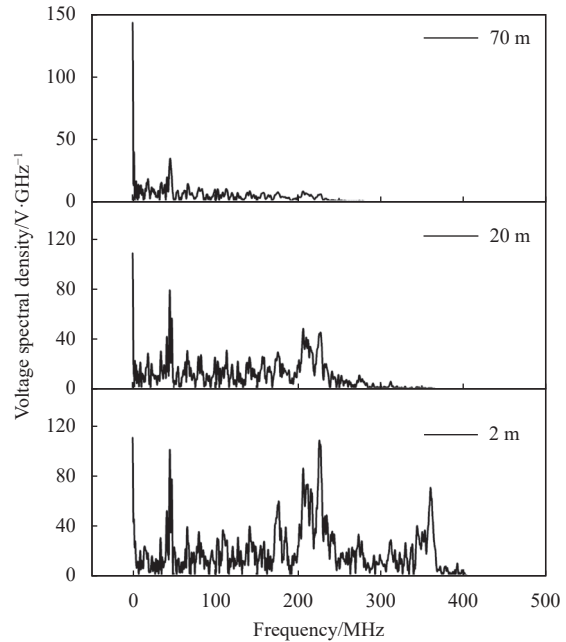


图 8 不同长度线缆频谱电压谱密度

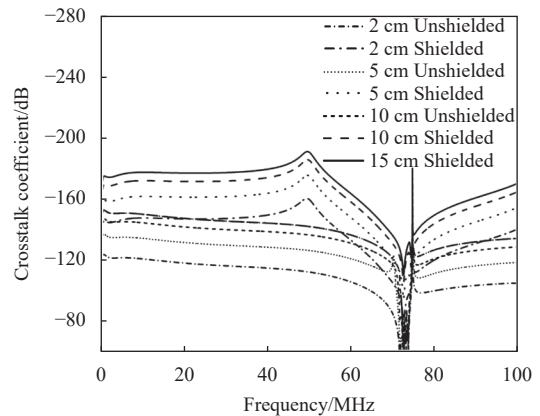


图 9 不同间距线缆屏蔽前后的串扰系数对比

图 10 为 0.1 mm 厚铜箔屏蔽处理后线缆端口的串扰信号, 信号幅值在几个 μV 数量级, 而未经过屏蔽处理的线缆受到的串扰信号在 100 μV 左右, 相同间距线缆在屏蔽前后所受串扰信号相差 20~30 倍。铜作为金属介质对电磁波的影响作用明显, 通过反射、吸收和趋肤效应原理阻碍电磁波的传播, 线缆经过铜箔屏蔽处理后, 可以防止线缆传输信号的泄漏, 同时也显著增强了抗串扰干扰的能力。因此, 对线缆进行屏蔽处理能够有效减弱串扰作用。

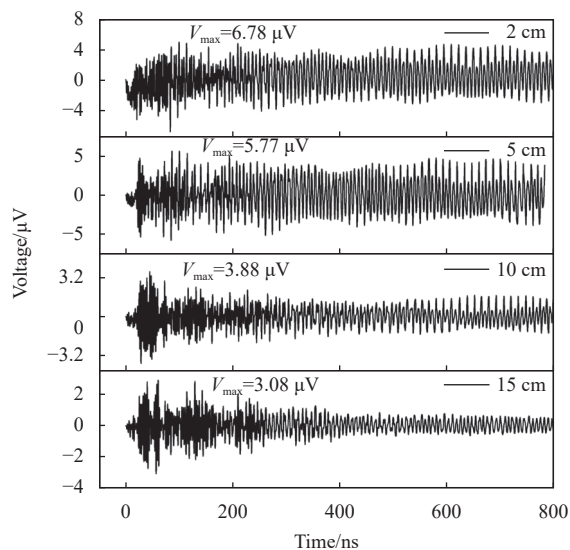


图 10 0.1 mm 铜箔屏蔽处理后不同间距线缆受到的串扰信号

4 结束语

本文建立了线缆模型, 馈入在神光 II 升级装置打靶过程中产生的电磁脉冲信号进行线缆串扰模拟, 分别讨论了线缆间距、长度对串扰信号在时域和频域中的影响和屏蔽处理后对串扰的衰减, 得出以下结论: 1) 串扰信号的幅值随距离的增大而衰减, 衰减的程度随线缆间距增大而变小; 2) 线缆对串扰信号的衰减能力随长度的增大而减弱, 谐振频率随长度的增大而减小, 线缆所受串扰的频率随长度的增加而减小; 使用 0.1 mm 厚度的铜箔对线缆进行屏蔽处理后, 串扰信号幅值减小到几个 μV 数量级, 在强激光打靶实验中几乎可以忽略串扰的影响。

参 考 文 献

- [1] COWAN T E, PERRY M D, KEY M H, et al. High energy electrons, nuclear phenomena and heating in petawatt laser-solid experiments[J]. *Laser and Particle Beams*, 17(4), 1999: 773-783.
- [2] ANAND M, KAHALY S, RAVINDRA G K, et al. Enhance hard x-ray emission from microdroplet preplasma[J]. *Appl Phys Lett*, 2016, 88: 181111.
- [3] HENIG A, STEINKE S, SCHNÜRER M, et al. Radiation-Pressure acceleration of ion beams driven by circularly polarized laser pulses[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 245003.
- [4] POYÉ A, HULIN S, BAILLY-GRANDVAUX M, et al. Physics of giant electromagnetic pulse generation in short-pulse laser experiments[J]. *Phys Rev E*, 2015, 91: 0432106.
- [5] YANG J W, LI T S, YI T, et al. Electromagnetic pulses generated from laser target interactions at Shenguang II laser facility[J]. *Plasma Science and Technology*, 2016, 18(10): 1044-1048.
- [6] YANG M, LI T S, WANG C, et al. Characterization of electromagnetic pulses via arrays on ShenGuang-III laser facility laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(10): 70-75.
- [7] XIA Y D, LI D Y, ZHANG S C, et al. Enhancing electromagnetic radiations by a pre-ablation laser during laser interaction with solid target[J]. *Physics of Plasmas*, 2020, 27: 032705.
- [8] YANG M, YANG Y M, LI T S, et al. Electromagnetic radiations from laser interaction with gas-filled Hohlraum[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(1): 016101.
- [9] XIA Y D, ZHANG F, CAI H B, et al. Analysis of electromagnetic pulses generation from laser coupling with polymer targets: Effect of metal content in target[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2020, 5(1): 017401.
- [10] YANG Y M, YI T, YANG M, et al. Effect of target size on electromagnetic pulses generation from laser radiation with targets[J]. *Laser Physics*, 2019, 29(1): 016003.
- [11] YANG J W, LI T S, YI T, et al. Measurement and analysis of electromagnetic pulse from laser-target interaction at ShenGuang II laser facility[J]. *Fusion Science and Technology*, 2017, 72(1): 41-48.
- [12] 杨君, 苑丰彪. 高速动车组电磁兼容性设计研究[J]. *机电传动*, 2009(2): 13-16.
- [12] YANG J, YUAN F B. Study on the design of EMC for high speed EMUs[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2009(2): 13-16.
- [13] HE X D, WEN Y H, ZHANG J B, et al. Analysis of crosstalk between cables on board in high speed EMUs[C]//2015 IEEE 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE). [S.l.]: IEEE, 2015: 454-457.
- [14] GUAN J J, ZHOU K S. Analysis of the radiation field distribution characteristics of the LTE-R leakage coaxial cable in the high-speed train[C]//2013 5th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. [S.l.]: IEEE, 2013: 728-731.
- [15] YU W L, YAN Z W, CAO J. Simulation analysis of crosstalk and radiation effects of cables inside aircraft[C]//International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). [S.l.]: IEEE, 2012: 755-758.

- [16] GAYNUTDINOV R R, CHERMOSHENTSEV S F. Study of crosstalks in the cables of unmanned aerial vehicle[C]//2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). [S.l.]: IEEE, 2017: 1-4.
- [17] SOLAK V, EFENDIOGLU H S, COLAK B, et al. Analysis and simulation of cable crosstalk[C]//2017 IV International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye). [S.l.]: IEEE, 2017: 1-4.
- [18] VAN L B J A M, THOMAS D W P, BERGSMA J G, et al. Cable crosstalk and separation rules in complex installations[C]//International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE. [S.l.]: IEEE, 2012: 1-6.
- [19] LIU Q F, YIN W Y, TANG M, et al. Time-Domain investigation on cable-induced transient coupling into metallic enclosures[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2009, 51(4): 953-962.
- [20] CHIARIELLO A G, MAFFUCCI A, MIANO G, et al. A transmission-line model for full-wave analysis of mixed-mode propagation[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2018, 31(2): 275-284.
- [21] 乔新, 杨晨, 董秋杰. 基于 CST 的平行线缆串扰仿真分析[J]. *航空兵器*, 2020, 27(3): 98-102.
- QIAO X, YANG C, DONG Q J. Simulation and analysis of parallel cables crosstalk based on CST[J]. *Aero Weaponry*, 2020, 27(3): 98-102.

编辑 叶芳