

文章编号: 2095-4980(2018)04-0658-04

高功率激光装置同轴电缆电磁脉冲耦合仿真

于瑞珍, 易涛*, 景峰, 王新彬, 江少恩

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘要: 高功率激光装置开展实验会产生强烈的电磁脉冲辐射。电缆端口是电磁干扰耦合的重要途径。针对高功率激光装置上广泛使用的同轴电缆开展电磁脉冲耦合问题仿真研究, 建立同轴电缆的电磁脉冲耦合仿真模型, 研究不同入射方向、不同长度同轴电缆电磁脉冲耦合的感应电压。仿真结果显示, 同轴电缆部署方向以及长度对电磁脉冲耦合具有显著的影响。本文对装置靶场线缆选型、线缆铺设以及诊断仪器电磁屏蔽设计有着参考价值。

关键词: 高功率激光装置; 电磁脉冲辐射; 耦合仿真; 同轴电缆

中图分类号: TN432

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0658

Simulation on coaxial cable electromagnetic pulse coupling at high power laser facility

YU Ruizhen, YI Tao*, JING Feng, WANG Xinbin, JIANG Shaoen

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Intense electromagnetic pulse will be generated during experiments at high power laser facility. The cable ports are the important routes of electromagnetic coupling. Highlighting the simulation on the electromagnetic pulse coupling of coaxial cables, which are widely used at high power laser facility, a simulation model on coaxial cable electromagnetic pulse coupling is established. The electromagnetic pulse coupling effect is studied with various cable lengths and two characteristic radiation directions. Simulation results show that the direction and length of coaxial cables will influence the electromagnetic pulse coupling. This study presents a good guide for electromagnetic simulation at high power laser facility and is helpful for cable selections, cable pavements and electromagnetic compatibility for precise diagnostics.

Keywords: high power laser facility; electromagnetic pulse; coupling simulation; coaxial cable

高功率激光装置是开展惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)以及极端物理实验的大型科研平台。近年来, 我国陆续建成了神光系列高功率激光装置, 在聚变物理、高温等离子体、实验室天体物理以及 X 射线激光等领域开展了大量的基础研究工作, 取得了很大的进展^[1-2]。在神光高功率激光装置上, 多束高能量短脉冲激光束被同时聚焦注入到靶材料上, 在百微米尺度空间内创造出高温、高压、高密度的极端条件, 为开展各类物理实验提供实验条件。通常研究人员更加关注高功率激光与靶材料相互作用过程中产生的光学辐射、X 射线、伽马射线以及带电粒子等物理量, 并将其作为实验诊断的重要观测量。随着激光功率的不断提升, 人们发现高功率激光与靶材料相互作用的同时也会产生强烈的电磁脉冲辐射, 并对测量仪器造成严重的干扰和影响^[3-6]。

射频同轴电缆是高功率激光装置上普遍使用的数据传输线, 将探测器采集的数据信号传输给记录设备。电缆端口是重要的电磁干扰耦合途径。放置在靶场中的同轴电缆, 在激光打靶过程中受到电磁脉冲辐射的照射, 通过电磁耦合在内部芯线产生感应电压或电流, 从而对数据传输产生干扰。本文以靶场常用的射频同轴电缆为研究对象, 选取强激光与靶相互作用产生的电磁脉冲作为辐射源^[7-14], 建立电磁耦合仿真模型, 研究不同入射方向下不同长度的同轴电缆电磁脉冲耦合的感应电压。

收稿日期: 2018-01-15; 修回日期: 2018-03-06

基金项目: 中国工程物理研究院质量与可靠性共性技术研究课题资助项目

*通信作者: 易涛 yitao2008@caep.cn

1 激光诱导电磁脉冲辐射

强激光与金属靶材料相互作用产生电磁脉冲辐射，这种激光诱导的电磁脉冲辐射主要来源于 2 种机制：激光烧蚀靶材料产生的等离子体喷射和相应产生的靶电流。激光打靶过程中，在极短的时间内(通常为 1 ns 时间)激光能量沉积在靶材料表面，导致材料表面迅速离化形成高温等离子体并向外喷射，形成带电粒子流，产生电磁脉冲辐射。同时由于电子快速脱离靶面，使得靶面瞬态带正电，产生从靶面向靶支杆流动的脉冲电流，同时也会产生电磁脉冲辐射，如图 1 所示。

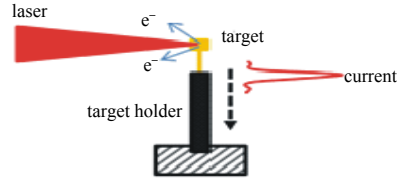


Fig.1 Electromagnetic pulse radiation by laser-target interaction
图 1 激光与靶相互作用电磁脉冲发射模型

在神光 II 激光装置上测量的电磁脉冲辐射信号如图 2 所示，左图为时域信号波形图，右图为频谱图。实验条件：激光脉冲宽度 1 ns，能量约 1.6 kJ，靶材料为 Au。从图 2 可以看到强激光与金属靶材料产生的电磁脉冲辐射持续时间约为 100 ns 左右，峰值出现 7 ns 左右。从电磁脉冲辐射波形可以分析激光与靶相互作用的基本物理过程，激光注入到靶点上，导致材料迅速离化形成等离子体并向外喷射形成带电粒子流，随即产生电磁脉冲辐射。随着激光能量不断沉积，等离子体喷射速度不断增加，相应的电磁辐射强度不断增强，达到峰值后，喷射速度以及电磁脉冲辐射随之下降直到结束。从频谱分析图中可以看出，强激光与金属靶材料产生的电磁脉冲主要辐射集中在 1 GHz 频段左右。

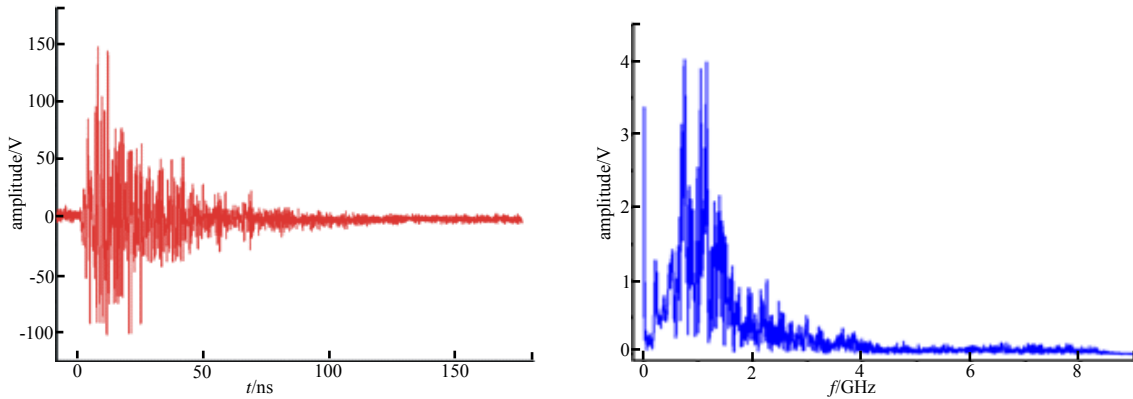


Fig.2 Electromagnetic pulse induced by laser-target interaction
图 2 强激光与靶作用产生电磁脉冲

2 同轴电缆仿真模型

采用 CST CABLE STUDIO 进行建模。选取软件自带的 RG58 同轴电缆模型。RG58 同轴电缆是一种特征阻抗为 50 Ω 的射频同轴电缆，用于通信和信号控制系统中高速数据传输。选取 2 个电磁脉冲传播方向，垂直于同轴电缆方向(direction 1)和沿着同轴电缆方向(direction 2)，如图 3 所示。激光诱导电磁脉冲波形特殊，导入实际测量波形值作为辐射源。在 RG58 同轴电缆模型的一端设置电压探测器(voltage monitor)，记录同轴电缆上电压随着时间变化的数值。

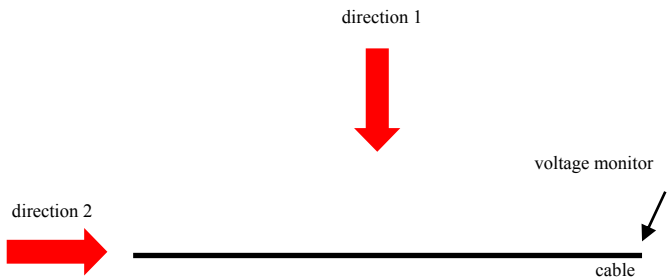


Fig.3 Coaxial cable simulation model
图 3 同轴电缆仿真模型

3 仿真结果分析

利用图 3 的线缆模型分别对 1 m,2 m,5 m,10 m,30 m 和 50 m 长度的同轴电缆进行建模和耦合仿真分析，仿真中将同轴电缆的一段作为检测端口，在电磁脉冲辐射垂直入射的条件下，不同长度的同轴电缆检测端口的感应电压响应随时间的变化曲线如图 4 所示。

从图 4 的分析可以看到,在同等辐照条件下,同轴电缆长度越长,其感应电压幅度也越大,同时感应电压信号持续的时间也更长。10 m 长度以及更长的同轴电缆,其检测端口的感应电压随时间变化分为 2 个阶段,第一阶段,前 0~100 ns 时间内,感应电压呈现高频振荡,第二阶段是 100 ns 后感应电压波形呈现缓慢变化。

为了进一步研究 2 个阶段感应电压的特点,将 30 m 和 50 m 同轴电缆 1 000 ns 时间内的感应电压进行对比,如图 5 所示。可以看到,对于长线缆而言,2 个阶段区分非常清晰。对于 30 m 和 50 m 线缆而言,第二阶段的感应电压起始时间差为 61 ns 左右,根据公式:

$$L=ct \quad (1)$$

61 ns 时间内射频微波传播的距离约为 18 m,与 2 根线缆的长度差 20 m 相当。式中: L 为线缆长度; c 为光速; t 为传播时间,可以看到第一阶段的信号振荡来源于电磁辐射在检测端口形成的感应电压,而第二阶段的感应电压振荡则来源于与线缆检测端口对应的另一端口处产生的感应电压脉冲,该电压脉冲沿着同轴电缆内传播到达检测端口。对于长度较短的线缆,如 5 m 的同轴电缆,2 个阶段的感应电压在一段时间内相互重叠。

图 6 是电磁脉冲辐射沿着线缆方向入射条件下,1 m,2 m,5 m,10 m,30 m 和 50 m 长度的同轴电缆耦合感应电压响应。可以看到,与垂直入射情况相比,同轴电缆的电磁感应效应非常微弱。对于 30 m 和 50 m 的线缆而言,其感应电压来源于对着电磁脉冲辐射方向的端口产生的感应电压,并沿着线缆传播过来。仿真结果表明,线缆的布局方式对电磁耦合有较大影响,可以通过精确测量高功率激光装置中电磁脉冲的传播方向,合理布局线缆的走向,让电磁耦合效应尽可能小,从而降低电磁辐射对数据传输的干扰。

4 结论

针对高功率激光与靶相互作用产生的电磁脉冲辐射,利用电磁仿真技术,对高功率激光装置靶场的同轴电缆进行了电磁脉冲耦合仿真。研究了不同入射方向、不同长度等同轴电缆内部芯层耦合的感应电压。本文的仿真模型可用于高功率激光装置线缆电磁干扰仿真研究,对装置靶场线缆选型、线缆铺设以及诊断仪器电磁屏蔽设计有着参考价值。

参考文献:

- [1] 江少恩,丁永坤,刘慎业,等. 神光系列装置激光聚变实验与诊断技术研究进展[J]. 物理, 2010,39(8):531-542. (JIANG Shaoen, DING Yongkun, LIU Shenye, et al. Recent inertial confinement fusion experiments and diagnostic techniques on the Shenguang laser facility[J]. Physics, 2010,39(8):531-542.)
- [2] 郑万国,魏晓峰,朱启华,等. 神光-III 主机装置成功实现 60 TW/180 kJ 三倍频激光输出[J]. 强激光与粒子束, 2016,28(1):1-2. (ZHENG Wanguo, WEI Xiaofeng, ZHU Qihua, et al. SG-III Laser facility has successfully achieved 60 TW/180 kJ ultraviolet laser(351 nm) output[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016,28(1):1-2.)
- [3] MEAD M J. Electromagnetic pulse generation within a petawatt laser target chamber[J]. Review of Scientific Instruments, 2004,75(10):4225-4227.

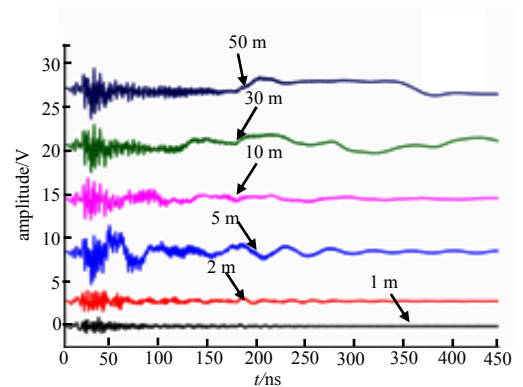


Fig.4 Simulation results of coaxial cable with various lengths(vertical to the cable)
图 4 不同长度同轴电缆仿真结果(垂直入射)

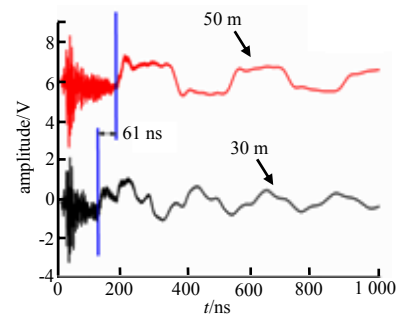


Fig.5 Comparison of coaxial cable simulation results with 30 m and 50 m lengths
图 5 30 m 和 50 m 同轴电缆仿真结果对比

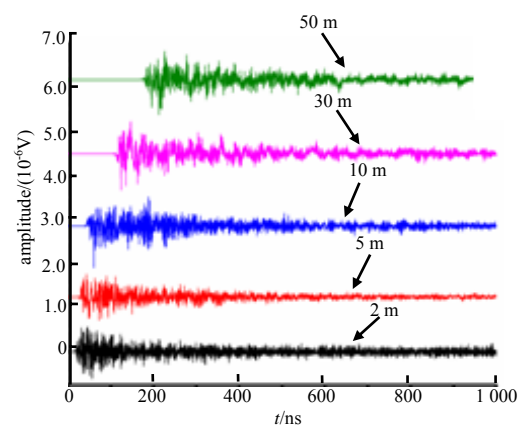


Fig.6 Simulation results of coaxial cable with various lengths(along the cable)
图 6 不同长度同轴电缆仿真结果(沿着线缆方向)

- [4] RAIMBOURG J. Electromagnetic compatibility management for fast diagnostic design[J]. Review of Scientific Instruments, 2004,75(10):4234-4236.
- [5] BROWN C G, CLANCY T J, EDER D C, et al. Analysis of electromagnetic pulse(EMP) measurements in the national ignition facility's target bay and chamber[J]. EPJ Web of Conferences, 2013(59):1-4.
- [6] JR BC, AYERS J, FELKER B, et al. Assessment and mitigation of diagnostic-generated electromagnetic interference at the national ignition facility[J]. Review of Scientific Instruments, 2012,83(10):1-3.
- [7] YI Tao, YANG Jinwen, YANG Ming, et al. Investigation into the electromagnetic impulses from long-pulse laser illuminating solid targets inside a laser facility[J]. Photonic Sensors, 2016,6(3):249-255.
- [8] 杨进文, 易涛, 王传珂, 等. 激光打靶过程中的电磁脉冲特性[J]. 强激光与粒子束, 2015,27(10):1-6. (YANG Jinwen, YI Tao, WANG Chuanke, et al. Electromagnetic pulse characteristic in process of laser shooting[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015,27(10):1-6.)
- [9] YANG Ming, WANG Chuanke, LI Tingshuai, et al. Characterization of electromagnetic pulses via antenna arrays on Shenguang-III laser facility[J]. Chinese Optics Letters, 2016,14(10):1-6.
- [10] 高崇信, 易涛, 王传珂, 等. 用于强激光靶耦合诊断的脉冲天线[J]. 红外与激光工程, 2016,45(6):1-6. (GAO Chongxin, YI Tao, WANG Chuanke, et al. Pulse antenna in application of high power laser target electromagnetic pulse diagnosis[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016,45(6):1-6.)
- [11] 杨鸣, 易涛, 王传珂, 等. 强激光辐照平面靶与柱腔靶产生电磁脉冲对比研究[J]. 中国激光, 2016,43(8):1-8. (YANG Ming, YI Tao, WANG Chuanke, et al. Comparative investigation of electromagnetic pulses generated by strong laser irradiating planar and hohlraum targets[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016,43(8):1-8.)
- [12] 杨为明, 王传珂, 易涛, 等. 神光 III 原型高功率激光装置电磁脉冲辐射[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(6):905-909. (YANG Weiming, WANG Chuanke, YI Tao, et al. Investigation of electromagnetic pulse emission from Shenguang high power laser facilities[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(6):905-909.)
- [13] 李廷帅, 杨进文, 刘西云, 等. 强激光靶耦合产生电磁脉冲信号处理方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2016:45(5):757-762. (LI Tingshuai, YANG Jinwen, LIU Xiyun, et al. Study on the methods of processing electromagnetic pulses generated by the intense laser interacting solid targets[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2016:45(5):757-762.)
- [14] 杨进文, 杨鸣, 李廷帅, 等. 强激光靶耦合过程中激发的电磁脉冲诊断与分析[J]. 电气技术, 2016,21(12):5-10. (YANG Jinwen, YANG Ming, LI Tingshuai, et al. Measurement and analysis of EMP generated from the interaction between laser and target[J]. Electrical Engineering, 2016,21(12):5-10.)

作者简介:

于瑞珍(1966-), 女, 山东省潍坊市人, 本科, 工程师, 现从事高功率激光装置电子学系统研究。

江少恩(1964-), 男, 湖北省黄冈市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为高温等离子体物理。

易涛(1980-), 男, 武汉市人, 博士, 副研究员, 现从事高功率激光装置电磁辐射与电磁兼容研究。

景峰(1968-), 男, 四川省西昌市人, 博士, 研究员, 现从事神光高功率激光装置总体设计。

王新彬(1972-), 男, 重庆市人, 博士, 研究员, 从事激光聚变物理诊断技术研究。