

# 屏蔽线缆的接地仿真研究

朱婷婷<sup>1</sup>, 王英浩<sup>1</sup>, 庄伟<sup>2</sup>

(1.南京师范大学计算机与电子信息学院, 江苏 南京 210023)

(2.南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210023)

**[摘要]** 在外界电磁波的干扰下, 线缆会在车辆内部产生很强的耦合电流和电压, 严重影响车辆正常工作, 一般需要采用屏蔽线缆来减少干扰. 屏蔽线缆抑制电磁干扰的能力, 不仅和线缆本身的屏蔽层有关, 还须选择正确的接地方式. 着重对线缆的多种接地方式进行仿真研究, 分析不同接地位置和数目对线缆抗干扰性能的影响, 为实际车辆线缆防护提供参考.

**[关键词]** 屏蔽线缆, 接地方式, 电磁脉冲, 线缆防护

**[中图分类号]** TN973.3 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2021)03-0028-05

## Research on Grounding Simulation of Shielded Cable

Zhu Tingting<sup>1</sup>, Wang Yinghao<sup>1</sup>, Zhuang Wei<sup>2</sup>

(1.School of Computer and Electronic Information, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Under the interference of external electromagnetic waves, the cable generates a strong coupling current and voltage inside the vehicle, which seriously affects the normal operation of the vehicle. Generally, the shielded cables are required to reduce the interference. The ability of shielded cables to suppress electromagnetic interference is not only related to the shielding layer of the cable itself, but also selected the correct grounding method. This article focuses on the simulation study of various grounding methods of cables, and analyzes the influence of different grounding positions and numbers on the anti-jamming performance of cables, and provides a reference for actual vehicle cable protection.

**Key words:** shielded cable, grounding method, electromagnetic pulse, cable protection

大多数军用车和民用车上的线缆是连接不同设备与系统的重要工具, 其功能是传输信息和能量. 在外界电磁波干扰下, 车辆内部的线缆是引入电磁干扰的一个重要途径. 线缆通过耦合外界电磁波而产生很大的电流和电压, 并传输到车辆内部的电子设备中, 严重干扰车辆的正常工作. 因此, 需要对这种干扰进行抑制, 抑制电磁干扰的方法主要有屏蔽、接地和滤波等. 本文主要采用屏蔽线接地的方式进行抑制.

采用屏蔽线缆可以有效地抑制空间电磁场对传输线的影响, 避免出现通信失效、信号误差等现象. 也可以降低不同线缆间的辐射和串扰带来的影响<sup>[1]</sup>. 影响屏蔽线缆屏蔽效能的关键点在于线缆的接地, 如果接地不正确非但不会起到屏蔽外界干扰的作用, 可能会引入更大的干扰. 电磁干扰随着线缆进入电子设备内部, 严重影响车辆的正常性能. 屏蔽层接地后, 使得干扰电流经屏蔽层短路入地, 从而对线缆传输信号起到屏蔽作用<sup>[2-6]</sup>. 本文主要探讨高空核电磁脉冲干扰下, 车内屏蔽线缆的最佳接地方式.

## 1 线缆的接地方式

常用的线缆接地方式一般有单点接地、两点接地和多点接地. 单点接地常采用端点接地, 常用的两点接地方式指的是接地位置在线缆两个端点处. 由于波长较长低频电磁问题常用单点接地, 单点接地一般要求地线长度不超过信号波长的二十分之一<sup>[7]</sup>, 高频电场问题由于波长短, 单点接地不再适用, 于是采用两点接地. 在更高频还有多点接地模式, 如果设备较为复杂, 还可以采用混合接地的方式解决问题<sup>[8]</sup>.

根据法拉第电磁感应定律<sup>[9]</sup>可知

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S B \cdot dS. \quad (1)$$

式中, $\varepsilon$ 表示感应电动势, $\Phi$ 表示磁通量, $B$ 为磁感应强度, $t$ 和 $S$ 分别表示时间和闭环回路面积.图1为闭环回路面积示意图.当接地位置位于线缆端点时,闭环回路面积最大,穿过闭合电路的磁通量最多,相应的感应电动势最大.当线缆的接地位置不在端点处时,相比现有两端点接地方法,非端点的接地回路面积减小了,穿过闭合电路的磁通量发生变化,在这种情况下感应电动势和线缆屏蔽层电流也相应地发生变化,即芯线电流与线缆耦合的电磁能量减小,线缆的屏蔽效能增大<sup>[10-11]</sup>.因此,本文主要的研究内容是在线缆上寻找出合适的接地方式以及最佳接地位置,以降低线缆上的感应电流,让屏蔽线缆的防护效果达到最佳.

## 2 算例分析

首先通过一个仿真算例<sup>[12]</sup>来验证本文方法的准确性.仿真模型如图2所示.

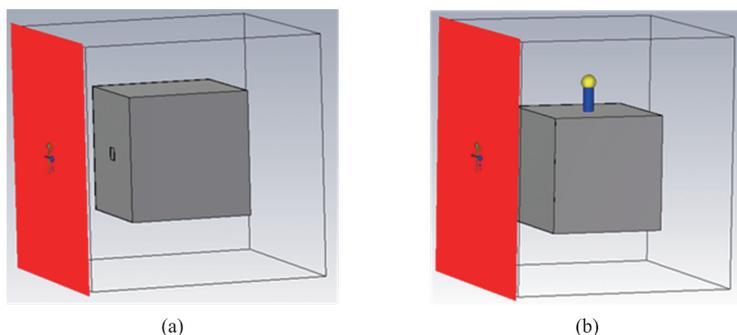


图2 仿真模型

Fig. 2 Simulation model

在CST软件中设置核电磁脉冲进行侧面照射,入射方向为 $-Z$ 方向.仿真结构尺寸为 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 金属屏蔽腔体,并开有 $8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ 的方形孔缝.另外,在腔体上方开孔,半径为 $1\text{ cm}$ ,并放置 $10\text{ cm}$ 的线缆, $5\text{ cm}$ 在腔体外侧, $5\text{ cm}$ 在腔体内侧.计算两种不同耦合通道的比较系数<sup>[12]</sup>.将其与参考文献<sup>[12]</sup>中的实测结果进行对比.如图3所示.

从图3中可以看出,文献<sup>[12]</sup>的实测结果和仿真结果基本吻合.验证了本文方法的准确性.

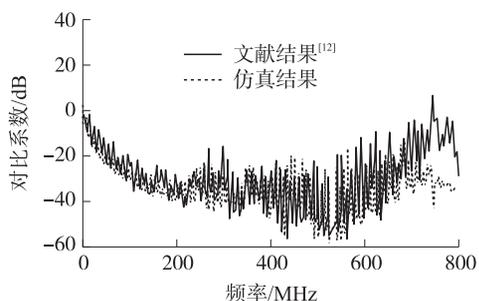


图3 试验结果与仿真结果对比图

Fig. 3 Comparison of test results and simulation results

## 3 屏蔽线缆接地仿真研究

本文采用CST仿真软件对线缆模型进行验证仿真,分析不同接地位置和数目对线缆的抗干扰性能的影响.图4为屏蔽线缆示意图,主要研究线缆距地高度和长度变化对电流的影响.对比感应电流在不同接地位置的大小,找出最佳接地位置<sup>[13]</sup>,进而得到最佳接地方式.

仿真一根线缆放置在 $7\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的地平面上,线缆

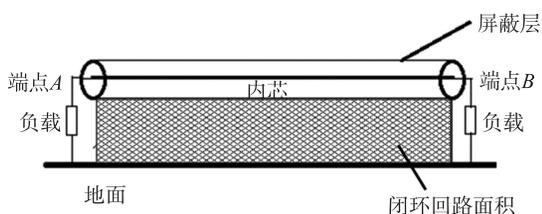


图1 闭环回路面积示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the closed loop circuit area

即芯线电流与线缆耦合的电磁能量减小,线缆的屏蔽效能增大<sup>[10-11]</sup>.因此,本文主要的研究内容是在线缆上寻找出合适的接地方式以及最佳接地位置,以降低线缆上的感应电流,让屏蔽线缆的防护效果达到最佳.

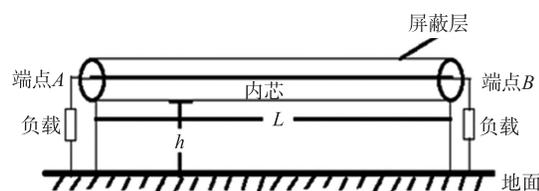


图4 屏蔽线缆示意图

Fig. 4 Schematic diagram of shielded cable

长度为  $L$ , 线缆距离地面为  $h$ , 线缆型号为同轴线 RG58 (导体为直径  $9.4 \times 10^{-4}$  m 的镀锡铜、绝缘体为直径  $2.95 \times 10^{-3}$  m 的聚乙烯、屏蔽层为直径  $3.6 \times 10^{-3}$  m 的镀锡铜、护套为直径  $4.95 \times 10^{-3}$  m 的聚氯乙烯). 激励源使用核电磁脉冲平面波照射, 侧面入射, 入射方向为  $-Z$  方向, 极化方向平行于线缆, 为  $+X$  方向. 在线缆两端分别接  $50 \Omega$  的电阻并接地.

### 3.1 距地高度和线缆长度对电流的影响

基于图 2 的线缆模型, 通过控制变量法改变线缆距地高度和长度, 仿真线缆单点接地时线缆上的感应电流. 接地点在端点 A, 当线缆长度为 5 m 时, 改变线缆距地高度  $h$  (取 0.1 m、0.3 m、0.5 m、0.7 m); 当线缆距地高度为 0.3 m 时, 改变线缆长度  $L$  (取 2 m、5 m、8 m、10 m), 得到的端点 A 感应电流仿真结果如图 5、图 6 所示.

由图 5、图 6 可以看出, 线缆距离地面越高, 电流越大; 线缆长度越长, 电流越大.

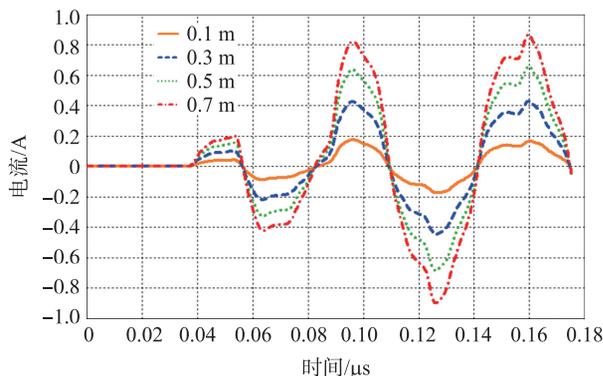


图 5 不同距地高度的端点 A 感应电流波形对比

Fig. 5 Comparison of terminal A induced current waveforms at different heights from the ground

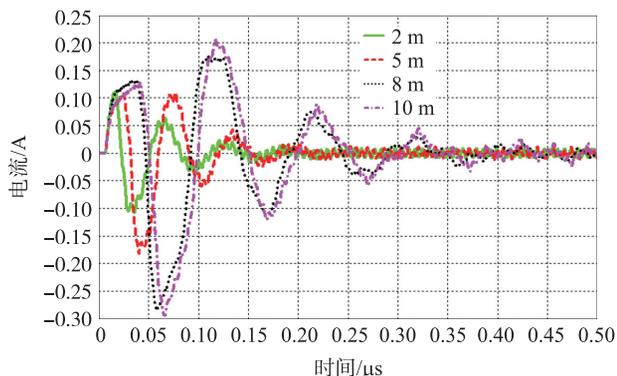


图 6 不同线缆长度的端点 A 感应电流波形对比

Fig. 6 Comparison of terminal A induced current waveforms with different cable lengths

### 3.2 接地点位置变化对电流的影响

为了研究不同接地点位置对屏蔽线缆感应电流的影响, 本文使用线缆单点接地, 改变线缆模型中的接地点位置进行仿真分析. 如图 7 所示, 线缆长度为 5 m, 距地高度为 0.3 m. 接地点与 A 点之间的距离为  $d$ , 每次变化步长为 0.2 m, 逐渐增加到 4.8 m. 在端点及接地点两侧放置探针,  $P1$  和  $P4$  是线缆两端的探针,  $P2$ 、 $P3$  是接地点两侧的探针. 当接地点与 A 点之间的距离  $d$  从 0.2 m 增加到 4.8 m 时, 依次对比线缆两端和接地点两侧 4 个探针相应的感应电流峰值的变化. 仿真结果如图 8 所示.

结果表明,  $P1$  和  $P2$  的感应电流峰值随着  $d$  的增大而增大,  $P3$  和  $P4$  的感应电流峰值随着  $d$  的增大而减小. 接地点位置在 2.5 m 左右, 也就是接地点处于线段中点时, 4 个探针的感应电流峰值均小于 0.2 A, 即为最佳接地位置.

以上仿真结果符合法拉第电磁感应定律, 即线缆距地高度变高或长度变长, 则闭合回路面积会相应变大, 穿过闭合回路的磁通量也随之变多, 感应电流变大. 接地位置位于线缆端点时, 接地回路面积最大, 电

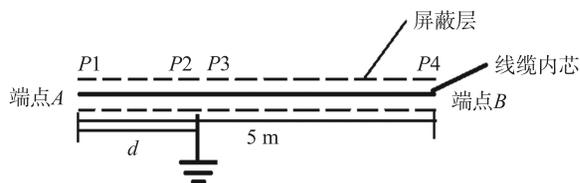


图 7 单点接地示意图

Fig. 7 Schematic diagram of single point grounding

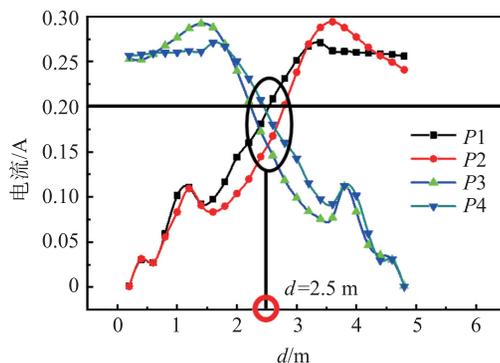


图 8 4 个探针的感应电流峰值变化曲线

Fig. 8 The peak change curve of induced current of 4 probes

场积分路径最长,产生的感应电动势最大,相应的感应电流最大<sup>[11]</sup>。所以,在线缆防护中,铺设线缆要尽量减小距地高度;并且连续线缆长度不宜过长,以减小线缆上的感应电流,进而降低电磁脉冲对线缆的损害<sup>[11]</sup>;需使用单点接地方式时,要避免端点接地,取中点接地方式最佳。

## 4 多点接地方式对电流的影响

为了研究屏蔽线缆单点接地、两点接地、多点接地对线缆感应电流的影响,采用核电磁脉冲侧面照射线缆的方式来进行仿真分析。不同接地方式的接地位置示意图如图9所示,取线缆长度为5 m、距地高度为0.3 m。线缆单点接地为端点A接地,中点接地为中点C接地,两端接地为端点A和端点B接地,3点接地为端点A、端点B和中点C接地。4种不同接地方式均探测端点A处的感应电流进行分析。仿真结果如图10和表1所示。

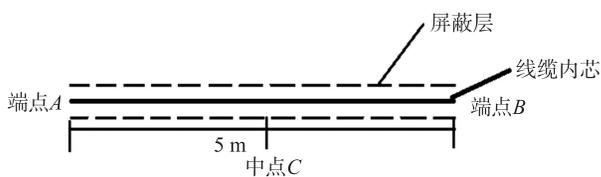


图9 仿真线缆接地位置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the simulation cable grounding position

从图10和表1可以看出,使用三点接地方式时,电流峰值最小为0.087 8 A;其次是两点接地方式,电流峰值为0.103 8 A;单点接地方式感应电流峰值最大,其中端点接地电流峰值为0.293 1 A,中点接地电流峰值为0.199 4 A。因此,在几种接地方式中,多点接地时,线缆的抗干扰能力最好,其次是两端接地,单点接地方式效果最差。而在单点接地方式中,中点接地比端点接地的感应电流要小,抗干扰能力好。在实际应用中,线缆要使用多点接地方式,而必须使用单点接地方式时,要避免端点接地,取中点接地方式最佳。

## 5 结论

屏蔽线缆是连接各个电子设备的关键纽带,也是电磁能量进入电子电控系统的重要耦合通道,研究线缆在不同接地方式下的抗干扰能力尤其重要。本文在理想地平面上使用屏蔽线缆对不同接地方式、不同接地位置进行仿真分析。结果表明,在几种接地方式中,多点接地线缆的抗干扰能力最好,单点接地方式抗干扰能力最差。其次,在单点接地方式的不同接地位置中,中点接地比端点接地的抗干扰能力强。因此,在车辆内各类电子设备应用中,线缆要使用多点接地方式,而必须使用单点接地方式时,要避免端点接地,取中点接地方式最佳。与此同时,也要综合考虑车辆系统中的其他电磁干扰的要求,从而保证整个系统安全稳定的运行。

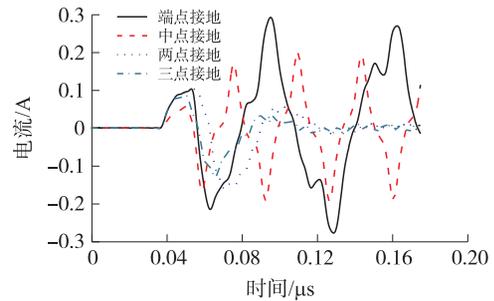


图10 4种不同接地方式的感应电流波形对比

Fig. 10 Comparison of induced current waveforms of 4 different grounding methods

表1 不同接地方式的感应电流峰值

Table 1 Peak induced currents of different grounding methods

接地方式	电流峰值/A
端点A接地	0.293 1
中点C接地	0.199 4
两点接地(A、B)	0.103 8
三点接地(A、B、C)	0.087 8

## [参考文献] (References)

- [1] 张莹,张东亮,黄定卫,等. 电缆屏蔽层接地方式及抗干扰分析[J]. 国外电子测量技术,2010,29(11):29-30,41.
- [2] 王迪. HEMP环境下车辆电磁屏蔽技术的防护效能研究[D]. 长春:吉林大学,2015.
- [3] 张斌,秦会斌. 屏蔽电缆的接地问题[J]. 科技资讯,2006,3(7):44-45.
- [4] 余定华,王益民. 机车电缆的抗电磁干扰性研究[J]. 机车电传动,2005,34(6):32-36.

- [5] 郑生全,温定娥,刘其凤,等. 屏蔽电缆的电磁脉冲时域耦合特性研究[J]. 中国舰船研究,2011,6(1):56-63.
- [6] PAUL C R. A brief history of work in transmission lines for EMC applications[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,2007,49(2):237-252.
- [7] 路宏敏,余志勇,李万玉. 工程电磁兼容[M]. 2 版. 西安:西安电子科技大学出版社,2010.
- [8] 赵辉. 复杂车辆线缆电磁效应研究[D]. 长春:吉林大学,2015.
- [9] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [10] 霍亚飞. 强电磁脉冲下车辆线束等效模型及屏蔽接地研究[D]. 长春:吉林大学,2017.
- [11] 胡宽. 车载线缆的高空核电磁脉冲响应分析[D]. 西安:西安电子科技大学,2019.
- [12] 胡文文. 电子设备的电磁脉冲耦合特性研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2020.
- [13] 闵建军,杨德勇. 机车电缆屏蔽层接地分析与仿真[J]. 大功率变流技术,2015(1):39-42.

[责任编辑:陈 庆]