

文章编号:1671-251X(2013)07-0058-03 DOI:

王小燕. 矿用电气设备电缆电磁干扰建模与仿真分析[J]. 工矿自动化, 2013, 39(7): 58-60.

矿用电气设备电缆电磁干扰建模与仿真分析

王小燕

(安徽工贸职业技术学院 机械工程系, 安徽 淮南 232001)

摘要:分析了互连电缆的电磁干扰机理,建立了多导体互连线串扰耦合数学模型;运用有限元分析软件 Ansys 提取了矿用四芯电缆互联线的电容矩阵和电感矩阵;应用场-路结合的方法对电子设备互连电缆进行电磁干扰预测分析,得到了与理论分析相一致的数值计算结果。

关键词:矿用电气设备; 电缆; 电磁干扰; 电磁耦合

中图分类号:TD611 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

Modeling and simulation analysis of electromagnetic interference of cables of
mine-used electrical equipment

WANG Xiao-yan

(Department of Mechanical Engineering, Anhui Vocational and Technical
College of Industry and Trade, Huainan 232001, China)

Abstract: Electromagnetic interference mechanism of interconnect cables was analyzed, and mathematical model of multi-conductor interconnect crosstalk coupling was established. Capacitance matrix and inductance matrix of mine-used four-core interconnect cables were extracted using the finite element analysis software Ansys. The electromagnetic interference of interconnect cables of electronic equipment was predicted and analyzed applying field-road combined method, and the numerical calculation result was consistent with the theoretical analysis result.

Key words: mine-used electrical equipment; cable; electromagnetic interference; electromagnetic coupling

0 引言

矿用电子设备之间及内部的互连电缆间的电磁耦合导致系统性能降低甚至失效的现象非常普遍,大量的电磁干扰信号通过互连电缆间的电磁耦合来传播^[1-2]。为保证整个电子系统安全可靠地工作,必须解决互连电缆间的电磁耦合带来的不良影响,以实现整个电子系统的电磁兼容性。电缆内部导线束之间的电磁耦合对矿用设备的影响最为直接,因此,本文针对这种耦合进行分析。

1 多导体互连线串扰耦合数学模型

以多导体传输线方程^[3]为基础,建立矿用电子设备互连电缆的电磁耦合数学模型,并以此为依据,分析、计算互连电缆的电磁耦合量。为适当简化计算,假定多导体传输线均为均匀传输线且平行放置,穿过传输线横截面的电流和为零,场结构为准 TEM 波。图 1 给出了多导体传输线示意图,0— n 为导体编号。选取第 0 号导体为参考导体,通过麦克斯韦方程导出多导体传输线的耦合模型:

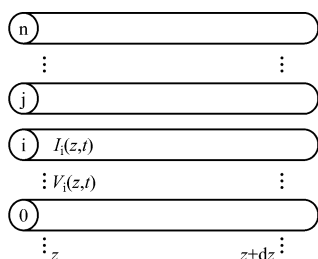
收稿日期:2013-04-23。

基金项目:安徽省高校省级自然科学基金项目(KJ2012B028)。

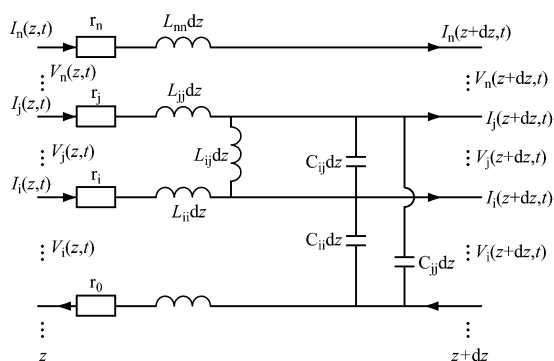
作者简介:王小燕(1977—),女,安徽太湖人,讲师,硕士,研究方向为机械电子工程,E-mail:gfchen@aust.edu.cn。

$$\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{V}(z, t) = -\mathbf{R} \mathbf{I}(z, t) - \mathbf{L} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{I}(z, t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{I}(z, t) = -\mathbf{G} \mathbf{V}(z, t) - \mathbf{C} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{V}(z, t) \quad (2)$$



(a) 多导体传输线



(b) 等效电路

图 1 多导体传输线示意图

简化的电子设备互连线的耦合数学模型为

$$\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{V}(z, t) = -\mathbf{L} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{I}(z, t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{I}(z, t) = -\mathbf{C} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{V}(z, t) \quad (4)$$

以上互连线的自电容、自电感以及线间互电容、互电感等电路参数,可通过有限元分析软件 Ansys 建模并提取电容矩阵和电感矩阵而获得。

2 基于 Ansys 的互连电缆电路参数的提取

对于不同结构的电缆、不同的布线方式、不同的材料等,都存在不同的电容矩阵和电感矩阵,即不同的电路参数。下面采用电磁场有限元的数值方法^[4-5]来提取电路参数。

电容矩阵和电感矩阵的提取可以归结为二维静电场的求解问题。互连线电磁耦合量的计算主要考虑平行放置结构,该结构用二维静电场模型能够很精确地描述,因此,这种近似不会降低数值分析的重要性和准确性,同时应用二维模型可大大简化问题的计算。

四芯非屏蔽电缆的实体模型如图 2 所示,有限元模型如图 3 所示。仿真的频率范围为 100 kHz~1 GHz,耦合长度 $l=1$ m。由于信号频率处于相对

高频的范围,以分布参数的等效电路为基础,建立导体系统的电磁干扰等效电路。仿真模型在干扰源线的负载端以及被干扰线的两端分别接 50 Ω 电阻,取干扰源的内阻为 0 Ω ,干扰源线信号端接 1 V 的交流激励电压源,仿真计算主要考虑导体 1 与其他导体在不同频率上的耦合关系。

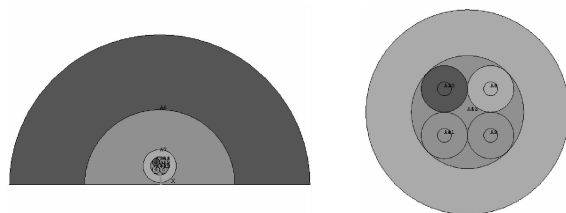


图 2 四芯非屏蔽电缆实体模型

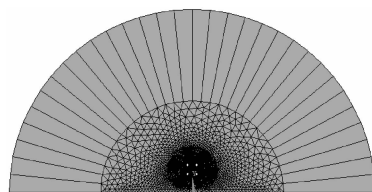


图 3 四芯非屏蔽电缆有限元模型

由于近端的干扰较强,所以主要计算近端耦合的结果。耦合量 $X=20\lg(U_2/U_1)$,其中 U_2 和 U_1 分别为源电路导线上的电压和接收电路近端负载的感应电压,相应的 U_3, U_4 为导体 3 和导体 4 的近端感应电压。四芯非屏蔽电缆在 0.01 m 离地高度下的等效电路参数如下。

电容: $C_1 = C_2 = 6.0005$ pF, $C_3 = C_4 = 7.7657$ pF。

互容: $C_{12} = 22.940$ pF, $C_{13} = 22.563$ pF, $C_{14} = 5.2945$ pF, $C_{23} = 5.2945$ pF, $C_{24} = 22.563$ pF, $C_{34} = 22.093$ pF。

电感: $L_1 = L_2 = 542.6$ nH, $L_3 = L_4 = 446.8$ nH。

互感: $L_{12} = 320.5$ nH, $L_{13} = L_{24} = 296.8$ nH, $L_{14} = L_{23} = 264.2$ nH, $L_{34} = 272.4$ nH。

耦合系数: $K_{12} = 0.6638$, $K_{13} = K_{24} = 0.6104$, $K_{14} = K_{23} = 0.5024$, $K_{34} = 0.5862$ 。

3 电磁干扰耦合建模与仿真分析

当线间耦合长度 l 和信号波长 λ 相比属于高频耦合情况时,为了能够应用等效电路模拟分析线间干扰,将导体按长度分成若干等分,使每段长 Δl 满足 $\Delta l \leq \lambda/10$ 的条件,得到若干个集中参数等效电路的串级电路,如图 4 所示。在高频情况下,不分段会带来很大的误差,分段越多则计算越精确,但是段数

越多仿真电路越复杂,分析计算量也会成平方倍增加,而且当 $\Delta l=0.05\lambda$ 时,再继续增加段数对提高准确性效果不大,因此,取段长在 $(0.05\sim 0.1)\lambda$ 之间为宜。

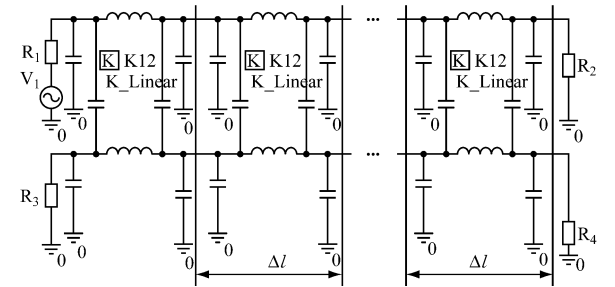


图 4 高频耦合的仿真电路模型

下面分析电缆离地高度一定($h=0.01\text{ m}$)时,导体 1 对导体 2—导体 4 的干扰情况。通过电路级模拟程序 SPICE 仿真计算可知,在导体 1 干扰信号的作用下,导体 2、导体 3、导体 4 产生的电磁干扰响应电压随信号频率变化曲线如图 5 所示。从图 5 可看出,随着干扰频率的增加,干扰响应电压也增加。在相同信号干扰频率下,导体 4 的串扰响应最小,而导体 2、导体 3 的串扰响应相差不大。导体 2、导体 3、导体 4 与导体 1 之间的耦合关系可以用图 6 所示的串扰耦合响应曲线来表示。从图 6 可见,导体 2、导体 3 受到的耦合量比导体 4 受到的耦合量要高约 5 dB,这可以通过导体 4 与导体 1 的间距大于其他导体与导体 1 的间距来说明,随着导体间距加大,互

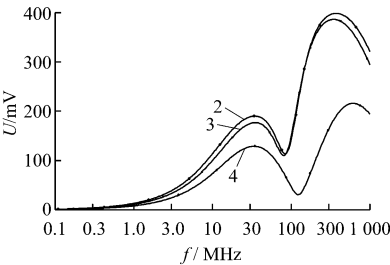


图 5 电磁干扰电压响应曲线

容和互感相应减少,线间的电容耦合和电感耦合也随之降低。

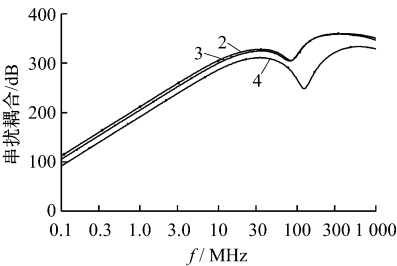


图 6 电磁干扰耦合响应曲线

4 结语

分析了互连电缆的电磁干扰机理,运用 Ansys 软件提取多导体线间的电路参数;针对高频电磁干扰预测提出了电路仿真模型,应用场-路结合的方法对电子设备互连电缆进行电磁干扰预测分析,得到了与理论相一致的数值计算结果。本文实现的仿真预测对矿用电子设备的电磁兼容性设计有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 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(6): 36-40.
- [2] 廖志强,陈东春,刘水文. 煤矿井下电磁干扰源及抗干扰技术研究[J]. 工矿自动化,2012,38(7):25-28.
- [3] CHELDAVI A,KAMAREI M, NAEINI S S. Analysis of coupled transmission lines with power-law characteristic impedance[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,2000,42(3):308-312.
- [4] 金建铭. 电磁场有限元方法[M]. 王建国,译. 西安:西安电子科技大学出版社,1998.
- [5] 张榴晨,徐松. 有限元在电磁计算中的应用[M]. 北京:中国铁道出版社,1996.