

文章编号: 1001-4322(2006)09-1524-03

# 多层电磁屏蔽的电磁拓扑图分析方法\*

戴 丽<sup>1</sup>, 谢 政<sup>1</sup>, 罗建书<sup>1</sup>, 陈 挚<sup>1</sup>, 李传胪<sup>2</sup>

(1. 国防科学技术大学 理学院, 长沙 410073; 2. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

**摘 要:** 提出了一种用于多层电磁屏蔽条件下分析系统电子器件之间相互耦合的电磁拓扑模型。将该模型与求第  $k$  最短路算法结合, 得出在不同频率范围下求从源点到终点屏蔽系数小于规定值路径的算法, 得到需要改进的电磁耦合路径。该算法是通过第  $k$  最短路算法修改而得到的, 不要求最小树和时间复杂度。仿真实验证明该算法是有效的, 可以用于大型复杂电子系统耦合问题的分析。

**关键词:** 多层屏蔽; 电磁拓扑; 最短路

中图分类号: O157.5 文献标识码: A

随着电子技术的不断发展和应用, 电磁干扰问题也越来越严重, 特别是当干扰源为高功率微波脉冲时, 甚至可以烧毁电子器件<sup>[1]</sup>。另一方面由于电子系统的规模越来越大, 结构越来越复杂, 电子系统的各个部件间的相互耦合也使系统间的电磁干扰增多。屏蔽腔是用来减小电磁干扰的有效方法, 由于在屏蔽腔上一般都不不可避免地开有用于电源线连接、通风或其他用途的孔缝或孔隙, 降低了屏蔽腔的屏蔽作用, 使电磁耦合进入腔内, 影响电子设备的正常工作。因此, 必须研究在多层屏蔽条件下大型复杂电子系统的各个电子器件间的交互作用, 找出总屏蔽系数不符合规定要求的路径, 对这些路径进行特别电磁防护, 使其达到设计要求。

## 1 电磁屏蔽拓扑模型

许多重要的大型复杂电子系统, 为了使其在强电磁干扰条件下仍能正常工作, 往往对其进行多层电磁防护。以双层屏蔽为例来说明如何建立多层电磁屏蔽条件下的电磁拓扑模型。假设采用一个简化的电脑机箱, 对其进行双重防护, 其电子设备和对应的电磁屏蔽拓扑图分别如图 1, 图 2 所示。

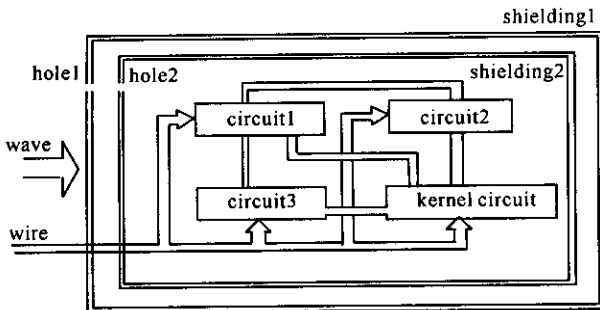


Fig. 1 Figure of the electrical devices

图 1 电子设备结构图

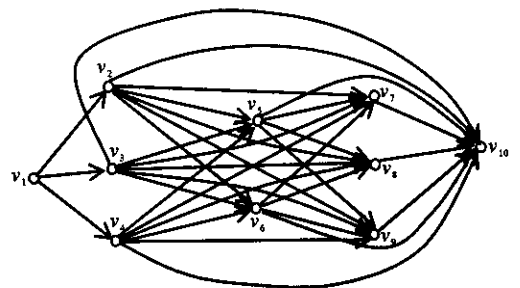


Fig. 2 Topological diagram

图 2 模型的电磁屏蔽拓扑图

图 2 中  $v_1$  对应入射电磁波,  $v_2 \sim v_4$  分别对应孔 1、屏蔽层 1、电线,  $v_5 \sim v_6$  分别对应孔 2、屏蔽层 2,  $v_7 \sim v_9$  分别对应电路 1(光驱)、电路 2(软驱)、电路 3(硬盘),  $v_{10}$  对应核心电路(主板)。边  $v_i v_j$  赋权为顶点  $v_i$  与顶点  $v_j$  间的屏蔽系数, 是入射电磁波频率的函数, 每边加权值都是变化的。在进行系统间耦合分析时, 需要针对不同的频率值才能进行准确的计算。当有多个屏蔽层时, 只需在相应的电磁拓扑图中添加相应的顶点和边即可。值得注意的是, 此时, 确定顶点  $v_i$  与顶点  $v_j$  间的屏蔽系数是比较困难的。本文旨在已知各顶点间的屏蔽系数的条件下, 寻找从源点到终点的总屏蔽系数不满足要求的路径。

在利用电磁屏蔽拓扑图进行系统耦合的分析和设计时, 往往要求从源点到终点的所有路径的总屏蔽系数达到规定值。文献 [2] 运用 Dijkstra 算法给出了总屏蔽系数和最小的路径。文献 [3] 运用 MPS 算法找出所有

\* 收稿日期 2005-09-02; 修订日期 2005-12-06

基金项目 国家 863 计划项目资助课题

作者简介 戴 丽(1974—), 女, 博士生, 主要从事网络算法、电磁防护研究; dai\_li\_math@yahoo.com.cn.

总屏蔽系数和不满足要求的路径,但 MPS 算法执行时,首先要求给出电磁屏蔽拓扑图中的最小树  $T_1^*$ ,而求最小树  $T_1^*$  并非易事。本文给出另一种求总屏蔽系数和不满足要求的所有路径的算法。该算法通过修改第  $k$  最短路算法实现<sup>[4-5]</sup>。

## 2 算法描述

设电磁屏蔽拓扑图  $D$  的顶点集合为  $N = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ,边集合为  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ ,设  $e_i = (v_i, v_k)$ ,边  $e_i$  的权为  $u(e_i)$  ( $i = 1, \dots, m$ )  $\mu(e_i)$  的大小为  $v_i$  与  $v_k$  间的屏蔽系数,这样的拓扑图我们记之为  $D = (N, E, \mu)$ 。设路径  $P = v_{i_1} v_{i_2} \dots v_{i_k}$ ,则路径  $P$  的总屏蔽系数为  $u(P) = \sum_{j=1}^{k-1} u(v_{i_j} v_{i_{j+1}})$ 。若  $(v_1, v_n)$  路径  $P^*$  为电磁屏蔽拓扑图  $D = (N, E, \mu)$  中满足总屏蔽系数  $u(P)$  达最小的  $(v_1, v_n)$  路径,则称  $P^*$  为最短  $(v_1, v_n)$  路径,也称为第 1 最短  $(v_1, v_n)$  路径。

为了找出拓扑图中从源点  $(v_1)$  到终点  $(v_n)$  的所有总屏蔽系数小于给定值的路径,我们首先给出第  $k$  最短  $(v_1, v_n)$  路径定义。设  $P_1$  是  $D$  中第 1 最短  $(v_1, v_n)$  路径,如果  $D$  中有一条  $(v_1, v_n)$  路径  $P_2$  满足条件:  $P_2 \neq P_1$ ;  $D$  中不存在异于  $P_1$  的  $(v_1, v_n)$  路径  $P$  使得  $u(P_1) \leq u(P) < u(P_2)$ ,则称  $P_2$  为  $D$  中第 2 最短  $(v_1, v_n)$  路径。

类似地,定义  $D$  中的第  $k$  最短  $(v_1, v_n)$  路径如下:设  $P_i$  是  $D$  中第  $i$  最短  $(v_1, v_n)$  路径 ( $i = 1, 2, \dots, k-1$ ),如果  $D$  中有一条  $(v_1, v_n)$  路径  $P_k$  满足条件:  $\forall 1 \leq i \leq k, P_k \neq P_i$ ;  $D$  中不存在异于  $P_1, P_2, \dots, P_{k-1}$  的  $(v_1, v_n)$  路径  $P$ ,使得  $u(P_{k-1}) \leq u(P) < u(P_k)$ ,则称  $P_k$  为  $D$  中第  $k$  最短  $(v_1, v_n)$  路径。第  $k$  最短  $(v_1, v_n)$  路径的求解方法已有许多种<sup>[4-5]</sup>,但是在实际分析中,事先并不知道到底有几条路径不符合设计要求,所以,要对这些算法加以改进。

注意到电磁屏蔽拓扑图均为非负权网络,因此,我们采用 Dijkstra 算法求  $D$  的最短  $(v_1, v_n)$  路径  $P_1$ 。设要求总屏蔽系数至少达到  $K$ ,若  $u(P_1) \geq K$ ,则说明  $D$  中所有路径均满足要求,以下不妨假设  $u(P_1) < K$ 。下面,我们给出求解  $D$  中所有屏蔽系数不符合要求的路径的算法,其步骤如下。

Step1 用 Dijkstra 算法求出  $D$  的最短  $(v_i, v_n)$  路径  $R(v_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),记  $N_D^E(S) = \{(v_j, v_i) | v_i \in S, (v_j, v_i) \in E(D)\}$ ,  $N_D^V(S) = \{v_j | v_i \in S, (v_j, v_i) \in E(D)\}$ ,令  $P_1 = R(v_1)$ ,  $\hat{D} := P_1$ ,  $k = 1$ ,  $S := \{v_n\}$ ,  $\tilde{D} := D$ ;

Step2 对于  $S$  中的每个顶点  $v_i$ ,令  $\bar{D} := \tilde{D} - N_D^E(v_i)$ ,求  $\bar{D}$  中的最短  $(v_1, v_i)$  路径  $\hat{P}(v_i)$ ,令  $P(v_i) := \hat{P}(v_i) + R(v_i)$ ;

Step3 令  $\tilde{D} := \bar{D} - N_D^E(S)$ ,  $S := N_D^V(S)$ 。若  $S \neq \emptyset$  转 Step2,若  $S = \emptyset$  转 Step4;

Step4 设  $u(P(v_i)) = \min\{u(P(v_i)) | v_i \in V(\hat{D})\}$ ,则  $P(v_i)$  为  $D$  中的第  $k+1$  条最短  $(v_1, v_n)$  路径;

Step5 若  $u(P_{k+1}) \geq K$ ,算法结束,否则,令  $k := k+1$ ,  $\hat{D} := \hat{D} \cup P_{k+1}$ ,  $S := \{v_n\}$ ,  $\tilde{D} := D$  转 Step2,继续搜索下一条最短  $(v_1, v_n)$  路径。

通过本算法,可以找出在不同频率点下总屏蔽系数小于规定值  $K$  的所有路径,而且,算法不要求最小树  $T_1^*$ 。本算法的时间复杂度为  $O(n^3)$ ,因此,本算法是多项式算法。

下面给出一个仿真算例,所用数据为随机获得的数据。在实际分析中,也可用实验数据说明,我们仅以此例说明算法的正确性。

对于图 2,假设在某频率点  $f_0$  下的邻接矩阵为

$$G_{f_0} = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 4 & 4.2 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & 0 & \infty & \infty & 5 & 10 & 8 & 10 & 20 & 11 \\ \infty & \infty & 0 & \infty & 1 & 3.5 & 2 & 5 & 6 & 8 \\ \infty & \infty & \infty & 0 & 7 & 20 & 10 & 6 & 5 & 9.5 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & 0 & \infty & 30 & 10 & 20 & 5 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 0 & 5 & 8 & 2 & 3.5 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 0 & \infty & \infty & 1 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 0 & \infty & 2 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 0 & 4 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 0 \end{bmatrix}$$

根据本文提出的算法,找出总屏蔽系数小于 15 dB 的路径有:

$$\begin{aligned}
&v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_7 \rightarrow v_{10}; v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_5 \rightarrow v_{10}; v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_8 \rightarrow v_{10}; v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_7 \rightarrow v_{10}; \\
&v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_6 \rightarrow v_{10}; v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_{10}; v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_5 \rightarrow v_{10}; v_1 \rightarrow v_4 \rightarrow v_8 \rightarrow v_{10}; \\
&v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_{10}; v_1 \rightarrow v_4 \rightarrow v_9 \rightarrow v_{10}; v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_6 \rightarrow v_7 \rightarrow v_{10}; \\
&v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_6 \rightarrow v_9 \rightarrow v_{10}; v_1 \rightarrow v_4 \rightarrow v_{10}; v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_9 \rightarrow v_{10}; v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_9 \rightarrow v_{10}。
\end{aligned}$$

针对不符合要求的路径进行改进,即可使系统达到电磁防护的设计要求。本文给出的算法与文献[2]以及文献[3]中的算法不同,文献[2]中的 Dijkstra 算法只能求出总屏蔽系数和最小的 $(v_1, \rho_n)$ 路径,而在实际问题中往往需要找出总屏蔽系数小于某规定值  $K$  的所有 $(v_1, \rho_n)$ 路径;文献[3]和本文提出的算法都能够找出总屏蔽系数小于某规定值  $K$  的所有 $(v_1, \rho_n)$ 路径,但文献[3]运用 MPS 算法找出所有总屏蔽系数和不满足要求的路径,而 MPS 算法执行时,首先要求给出电磁屏蔽拓扑图中的最小树  $T_1^*$ ,求最小树  $T_1^*$ 并非易事。通过修改第  $k$  最短路算法得到本文算法的时间复杂度为  $O(n^3)$ ,是快速寻找路径的另一种算法。

### 3 结 论

本文建立了多层电磁屏蔽拓扑图模型,并将求第  $k$  最短路的算法与多层电磁屏蔽拓扑图模型相结合,提出了一种适用于多层电磁屏蔽分析的算法。利用该算法,可以找出在不同频率点下从源点到终点总屏蔽系数不符合要求的所有路径,这为改进多层电磁屏蔽条件下电子系统之间的耦合提供了另一种方法。通过本文给出的多层电磁屏蔽拓扑图模型以及相应的算法,可以找出所有的总屏蔽系数不满足要求的路径。但是电子系统十分复杂,几乎每个器件和器件之间都存在耦合,在多层电磁屏蔽条件下确定各器件间的屏蔽系数是十分困难的,所以本文采用的是假设数据,如何确定多层电磁屏蔽条件下各器件间的屏蔽系数需要进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 程引会,周辉,乔登江,等.带阻性负载细导线对电磁脉冲响应的有限差分算法[J].强激光与粒子束,2005,17(2):237-240.(Cheng Y H, Zhou H, Qiao D J, et al. FDTD algorithm for EMP response calculation on thin wire with resistance load. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(2):237-240)
- [2] Joe L, George I. An electromagnetic interaction modeling advisor[J]. *IEEE Trans on EMC*, 1991, 33(3):241-251.
- [3] 付继伟,侯朝桢,龚丽华.一种电磁拓扑图的分析方法[C]//2004年全国博士生学术论坛论文集.2004:247-251.(Fu J W, Hou C Z, Dou L H. An analytical method of the electromagnetic topological diagram//Proceeding of 2004 Academic Forum for Chinese Doctoral Candidates. 2004:247-251)
- [4] 谢政.网络算法与复杂性理论(第二版)[M].长沙:国防科技大学出版社,2003.(Xie Z. Network algorithm and complexity theory (the second edition). Changsha: National University of Defense Technology Press, 2003)
- [5] Ermesto D, Marta M, Barz P. The  $k$  shortest paths problem[EB]. <http://www. Imforms. Org/ Conf/ Montreal198/ TALK/ TD36. html>. 1998-01-21.

## Analytical method of multi-level shielding electromagnetic topological diagram

DAI Li<sup>1</sup>, XIE Zheng<sup>1</sup>, LUO Jian-shu<sup>1</sup>, CHEN Zhi<sup>1</sup>, LI Chuan-lu<sup>2</sup>

(1. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** An electromagnetic topological model used to analyze the interaction of the different electrical components is presented. Combining this model with the algorithm which may find the  $k^{\text{th}}$  shortest path, an algorithm that can find the paths whose shielding electromagnetic values from source node to destination node are less than prescribed value under different frequency range is obtained. The electromagnetic coupling paths needed to be improved can be got with this algorithm.

**Key words:** Multi-level shielding; Electromagnetic topology; The shortest path