

文章编号: 1672-2892(2012)02-0161-05

含有介质板的有孔矩形腔体耦合特性分析

黄辉敏, 张卫东, 李继琨, 陈沛龙

(华北电力大学 电气工程学院, 河北 保定 071003)

摘 要: 采用基于时域有限差分法(FDTD)的电磁仿真软件, 对开孔腔体内存在介质基板的情况进行仿真。通过改变介质板与开孔的距离、数量和大小, 得到不同情况下的时域与频域结果, 并将其与腔体内无介质板的情况进行比较。结果表明: 根据时域波形, 介质板距离开孔越近, 数量越多及尺寸越大, 腔内的耦合场越小。当腔体内存在介质板时, 会对耦合场的高频振荡有较为明显的抑制作用; 与空腔时的频域曲线相比, 当腔体内存在介质板时, 会改变腔体的谐振点分布, 同时会产生新的谐振点。腔体内的介质板能提高腔体的屏蔽效能, 特别是对于谐振区域, 介质板对场强值的抑制效果更为明显。

关键词: 开孔; 介质板; 时域有限差分法; 时域特性; 频域特性

中图分类号: TN03

文献标识码: A

Coupling characteristics analysis of rectangular cavity with substrates

HUANG Hui-min, ZHANG Wei-dong, LI Ju-kun; CHEN Pei-long

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China)

Abstract: An electromagnetism simulation software based on Finite Difference Time Domain(FDTD) theory is applied to simulate the influence of the substrates in a cavity with a rectangular hole. Through changing the number and the size of the substrates as well as the distances between the substrates and the hole in the cavity, time-domain and frequency-domain results can be obtained. Compared to the empty cavity, computation result indicates that the coupling in the cavity will decrease if the number and size of substrates increase and the distance reduces. Compared to the frequency domain curves, it can be found that the substrates in the cavity will change the distribution of resonant points. According to the simulation results, a conclusion is drawn that substrates loaded in the cavity could restrain coupling, and the anti-interference ability of equipment can be improved.

Key words: hole; substrates; Finite Difference Time Domain; time-domain characteristics; frequency-domain characteristics

随着电压等级的升高, 变电站中的电磁环境也变得非常恶劣, 特别是在气体绝缘变电站中, 由于隔离开关操作所产生特快速暂态过电压向空间辐射幅值极大、高频分量丰富的电磁波^[1], 容易对变电站中正在工作的电子设备形成干扰。通常情况下, 采用设备外壳来减弱空间电磁波对电子线路的干扰, 但在设备外壳上由于通风散热, 电源线或信号线的进出, 不可避免地会导致设备外壳出现开孔或接缝, 外界电磁波的高频部分会通过这些孔缝很容易进入到设备内部, 耦合到电子线路上, 即所谓的“后门耦合”, 从而影响设备的正常工作, 甚至导致电子线路的损坏。

在变电站中, 二次设备内的电子线路并不是独立存在的, 必须焊接到介质板上, 而介质板会改变腔体内部耦合场特性。已有大量的文献针对空的不同形式的开孔腔体的耦合特性进行了研究, 如改变开孔的形状^[2], 外壳上的不同长度的缝隙^[3], 不同形式及面积的开孔阵列^[4-5], 改变激励源的入射方向^[6], 入射波的不同极化方向^[6-7]等, 但针对腔体内部介质板对耦合场影响的研究还比较少。基于此, 本文建立含有介质板开孔腔体的仿真模型, 采用基于时域有限差分法(FDTD)的电磁场软件对其进行仿真, 分析腔体内介质基板与开孔的不同距离、不同数量以及不同尺寸的介质基板对开孔腔体的耦合特性的影响。

1 耦合模型的建立

本文所计算的开孔屏蔽腔模型及坐标系的建立如图1所示,屏蔽腔体的长、高、宽分别为 $X=25\text{ cm}$, $Y=25\text{ cm}$, $Z=50\text{ cm}$, 腔体厚度为 0.2 cm , 采用铝制材料。在腔体正对入射波的面上开有一矩形孔, 其长、宽分别为 16 cm , 2 cm 。在腔体中, 设有正对矩形孔的介质板, 若无特殊说明, 介质板的长、宽均为 23 cm , 厚度为 0.4 cm , 相对介电常数 $\varepsilon_r=4.3$, d 表示介质基板与开孔的距离。平面波正对开孔入射, 电场方向垂直矩形开孔的长边。根据 FDTD 分析所建模型, 网格划分方式为 $\Delta x=\Delta y=\Delta z=0.3\text{ cm}$, 上限频率为 $f=10\text{ GHz}$, 采用 PML 边界^[8]来进行截断。

针对变电站干扰源幅值高、上升沿陡、高频分量丰富的特点, 文中的仿真激励源采用正弦调制的高斯脉冲作为平面波入射, 其时域表达式为:

$$E_i = E_0 \sin[2\pi f_0(t-t_0)] \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{\tau^2}\right] \quad (1)$$

式中: 幅值 $E_0=1\times 10^4\text{ V/m}$; 载波频率 $f_0=1.5\text{ GHz}$; 延迟时间 $t_0=1.5\times 10^{-9}\text{ s}$; 脉冲宽度 $\tau=1.172\times 10^{-9}\text{ s}$, 其高斯激励源时域波形如图2所示。

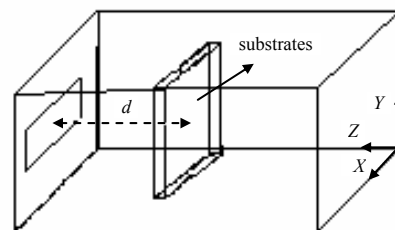


Fig.1 Calculation model
图1 计算空间模型图

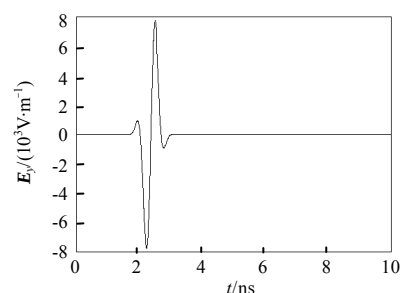


Fig.2 Sine modulation of the Gaussian excitation
图2 正弦调制的高斯激励源

2 介质基板在腔体中不同情况下的耦合特性分析

先考察空的开孔矩形腔的耦合特性, 如图3和图4为腔体内无介质基板时, 开孔中心及腔体中心的场强值。图3所示为孔缝中心发生孔缝耦合增强效应^[9], 且主脉冲在进入腔体后迅速衰减, 瞬态场的高频分量在腔体内发生振荡, 这一过程会持续较长的一段时间。腔体内的振荡波在遇到腔体上的开孔时, 又会耦合到腔体外, 因此随着时间的推移, 腔体内的场强会逐渐减弱, 这些都与文献[6]的结论是一致的。

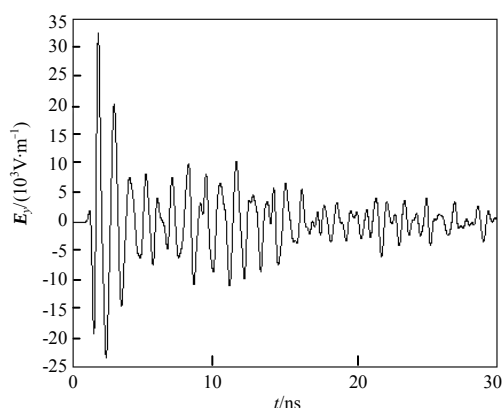


Fig.3 Center field of rectangular hole
图3 矩形开孔中心场强

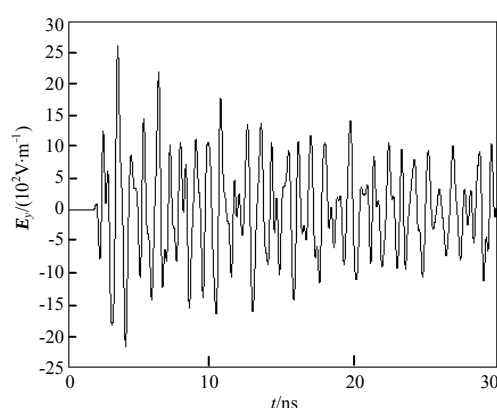


Fig.4 Center field of cavity
图4 腔体中心场强

2.1 介质板与开孔距离的变化对耦合特性的影响

在开孔矩形腔内加入介质板, 介质板中心点与开孔中心在同一直线上, 改变其与开孔的距离, 不同距离下的仿真波形如图5(a)~5(d)所示。当腔体内存在介质基板时, 通过介质基板耦合到腔体内的场强将显著减弱。这是由于入射波耦合到腔体内后, 遇到介质基板, 发生介质损耗, 但是介质基板与腔体之间存在缝隙, 耦合场会通过该缝隙进一步向腔内传播, 同时也会发生透射, 因此在介质基板后还存在电场。当介质基板距开孔的距离 $d=5\text{ cm}$ 时, 大部分耦合场会直接在介质基板上发生反射, 耦合出腔体, 此时腔体中心场强是最小的, 如图5(a)所示。比较图5(b)~5(d)可以看到, 随着介质板与开孔距离的增大, 腔体中心场强值也在逐渐增大。当 $d=45\text{ cm}$ 时, 腔体中心场强的最大值与腔体无介质板时(图4)的场强值变得很接近。通过比较腔体内有、无介质基板时的耦合场波

形可以看到,介质基板的存在对腔体内高频振荡有一定的抑制作用,因此高频振荡衰减较快。同时还发现,随腔体内介质板距开孔距离不同,时域耦合波形也存在差异:与腔内介质板靠近腔体两侧相比,当靠近腔内中心位置时,腔体内的耦合场出现最大值的时间会出现延迟。同时存在介质基板也会发生孔缝增强效应,但与空腔时相比,介质基板对其影响较小。

将图 5(a)~5(d)各时域波形进行 FFT 变换,其电场频域曲线如图 6 所示,当腔体内无介质板时,在 670 MHz 左右开始发生谐振,与腔体的主模(TE₁₀₁)谐振频率 f_m 一致,即:

$$f_m = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{e}\right)^2} \quad (2)$$

式中: $c=3 \times 10^8 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$; a, b, e 为屏蔽机箱的尺寸; m, n, l 分别表示电磁波在 X, Y, Z 方向的半波数。

从图 6 可以看到,当腔体中存在介质基板时,腔体的最低次模向高频方向发生移动,同时在 1.201 GHz 处有一个新的模式被激励起来。根据频域图形可以看出,腔体内的介质基板对各谐振频点的场强起到抑制作用,这是由于介质基板的介质损耗作用提高了腔体的屏蔽效能,但在谐振点以外的区域与无介质板时相比变化不明显。

2.2 不同数量的介质板对耦合特性的影响

保持腔体内介质板的尺寸不变,改变它的数量(其数量用 n 表示)。在相同屏蔽腔内分别放置 2 块和 3 块大小相同的介质基板,介质基板的朝向不变,分为 2 种方式进行摆放。方式 1:当 $n=2$ 时,介质板的摆放位置为 $d_1=5 \text{ cm}$, $d_2=10 \text{ cm}$;方式 2:当 $n=3$ 时,介质板的摆放位置分别为 $d_1=5 \text{ cm}$, $d_2=10 \text{ cm}$, $d_3=15 \text{ cm}$,其时域仿真结果如图 7 所示。

比较图 5 和图 7 可得,随着介质基板数量的增加,介质损耗增强,腔体中心场强比腔体内只有 1 块介质板时减小程度更为明显。

比较图 6 和图 8 所示的腔体谐振点在不同情况下的分布(考察 1 GHz 内的频点分布情况),其分布如下:当 $n=0$

时,谐振频点分别为 677.26 MHz, 831.52 MHz, 923.07 MHz;当 $n=1$ 时,谐振频点分别为 705.88 MHz, 918.08 MHz;当 $n=2$ 或 3 时,谐振频点为 770.06 MHz。通过以上比较,可以很明显地看出,腔体内有无介质基板或其数量的变化都会显著改变腔体的谐振频点分布。由图 8 还可以看出,当 $n=2$ 或 3 时,2 种情况的谐振点分布基本一致,

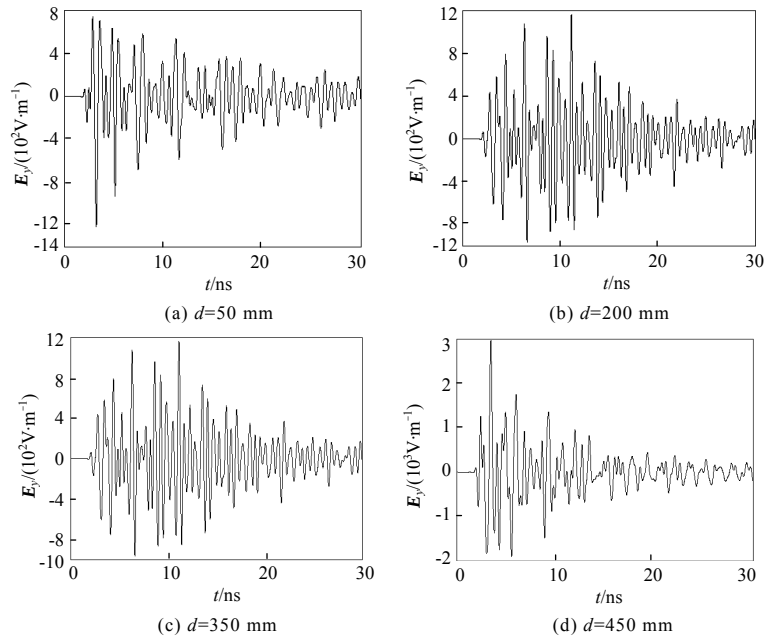


Fig.5 Time-domain center field at different distances between hole and substrates
图 5 不同距离时的时域腔体中心场强

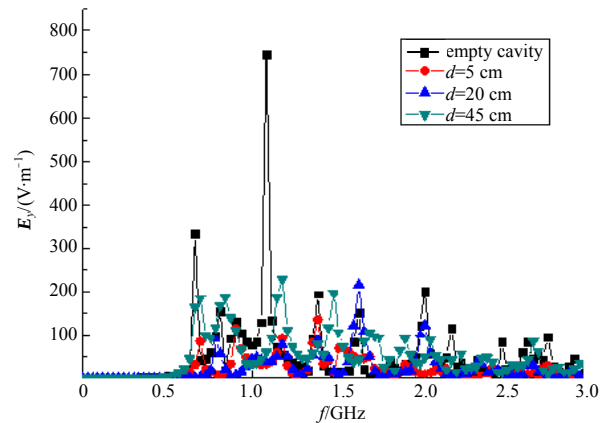


Fig.6 Frequency-domain center field at different distances between hole and substrates
图 6 不同距离时的频域场强

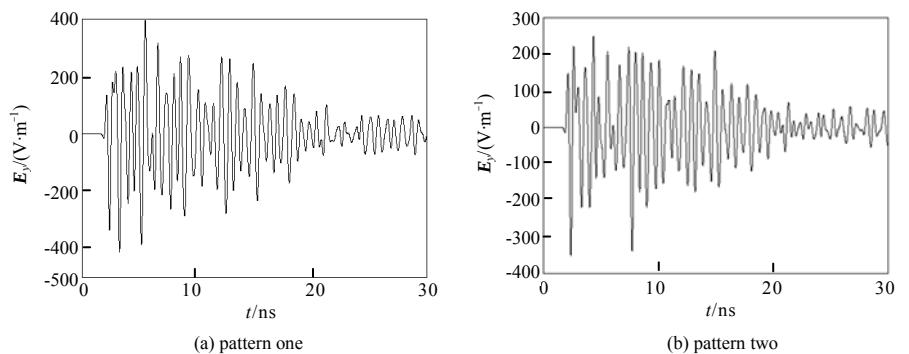


Fig.7 Time-domain curves of the cavity center field when containing substrates in different numbers
图 7 腔体中含不同数量的介质板时的腔体中心场强时域曲线

但在同一谐振点, $n=3$ 时的场强值较小, 该结果表明: 当腔体内的介质板数量达到一定值时, 谐振点将基本一致, 但随着介质板数量的增加, 同一谐振点的场强值将减小。

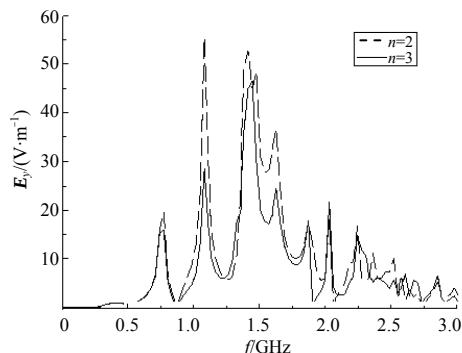


Fig.8 Frequency-domain curves of the cavity center field when containing substrates in different numbers

图8 腔体内包含不同数量的介质基板时中心场强频域曲线

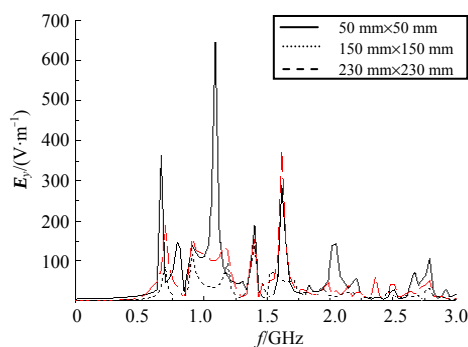


Fig.9 Frequency-domain curves of the cavity center field when containing substrates in different sizes

图9 腔体内包含不同尺寸的介质基板时中心场强频域曲线

2.3 不同尺寸的介质板对腔内耦合特性的影响

分别考察介质基板的尺寸为 50 mm×50 mm, 150 mm×150 mm 和 230 mm×230 mm 时对腔体耦合特性的影响。如图 9 所示, 腔体内介质板大小的不同也会影响腔体谐振点的分布, 介质板越小, 其谐振点越接近无介质板时的谐振分布; 同时, 介质板越大, 介质损耗越大, 各谐振点的场强幅值越小, 屏蔽体的屏蔽效能越好, 但是频率高于 1.5 GHz 时, 这种现象不明显, 这说明介质板的增大只在某一定的频率范围内可以改善腔体的屏蔽效能。

3 结论

针对在变电站中常用的一种二次设备外壳模型, 本文采用基于 FDTD 的电磁场仿真软件, 分析了介质板对开孔腔体耦合特性的影响。结果发现: 开孔附近的场强强度较强, 随着距离的增加, 耦合场强度在减小; 在介质板大小一定的情况下, 腔体内的介质板距离开孔越近, 透过介质板到腔体内的耦合场强度越小; 介质板数量的增加, 导致介质损耗作用加强, 会进一步减弱耦合场强度; 介质板尺寸越大, 通过介质板进入腔内的耦合场越小。根据频域结果分析, 腔体内的介质板会改变空腔时的谐振点分布, 同时由于腔体与介质板组成新的腔体, 会激励起新模式; 当腔体内的介质板增加到一定数量后, 再进一步增加, 腔体内的谐振点分布将基本不变, 但同一谐振点的场强随介质板数量的增加而减小。含有较为敏感电路的介质板应尽量避免直接面对开孔, 同时对于因介质板的存在而产生的新的模式也是必须要考虑的。

参考文献:

- [1] Rao M M, Thomas M J, Singh B P. Electromagnetic Field Emission From Gas-to-Air Bushing in a GIS During Switching Operations[J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat., 2007, 49(2): 313-321.
- [2] 周金山, 刘国治, 彭鹏, 等. 不同形状孔缝微波耦合的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(1): 88-90. (ZHOU Jinshan, LIU Guozhi, PENG Peng, et al. Experimental studies on microwave coupling coefficient for different shaped apertures[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(1): 88-90.)
- [3] 徐亮. 缝隙对屏蔽效能的仿真[J]. 信息与电子工程, 2008, 6(3): 176-179. (XU Liang. Analysis of influence of slot on shielding effectiveness[J]. Information and Electronic Engineering, 2008, 6(3): 176-179.)
- [4] 范颖鹏, 杜正伟, 龚克. 不同形状孔阵屏蔽效应分析[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(11): 69-72. (FAN Yingpeng, DU Zhengwei, GONG Ke. Analysis on shielding effectiveness of aperture arrays with different shapes[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(11): 69-72.)
- [5] 路宏敏, 罗朋, 刘国强, 等. 有孔阵矩形机壳屏蔽效能研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(6): 695-700. (LU Hongmin, LUO Peng, LIU Guoqiang, et al. Study on shielding effectiveness of the rectangular enclosure with aperture arrays[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(6): 695-700.)
- [6] 付继伟, 侯朝桢, 窦丽华. 电磁脉冲斜入射时对孔缝耦合效应的数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(3): 249-252. (FU Jiwei, HOU Chaozhen, DOU Lihua. Numerical analysis on coupling effects of an oblique incidence of electromagnetic pulse[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(3): 249-252.)

(下转第177页)