

文章编号: 2095-4980(2018)04-0682-07

PWB方法在矩形开孔电大腔中的应用及其拓展

欧阳婷¹, 刘 强², 赵 翔¹, 闫丽萍¹, 周海京², 黄卡玛¹

(1.四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064; 2.北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘 要: 用功率平衡(PWB)方法快速评估了在平面电磁波照射下矩形开孔电大腔内的平均场值水平, 且随着频率的升高, 此结果与全波分析软件所得结果的吻合度越来越高。为了得到更完备的腔内场环境描述, 采用统计的方法生成不同入射频点下的腔内归一化电场模值概率密度函数(PDF)图, 并发现了腔壁电导率的变化对腔内归一化电场模值 PDF 的影响规律: 在各入射频点下, 随着腔壁电导率从 10 S/m 逐渐增大到 10^7 S/m , 腔内归一化电场模值 PDF 曲线越来越趋于平缓并趋于稳定; 腔壁电导率为 10^6 S/m 和 10^7 S/m 时的腔内归一化电场模值 PDF 非常相似, 以入射波频率在 10 GHz 时为例, 利用 PWB 方法的原理说明了上述现象发生的原因。

关键词: 矩形孔缝; 电大腔体; 功率平衡; 统计分析

中图分类号: TN03

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0682

Application and extension of PWB method in an electrically large cavity with rectangular aperture

OUYANG Ting¹, LIU Qiang², ZHAO Xiang¹, YAN Liping¹, ZHOU Haijing², HUANG Kama¹

(1.College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China;

2.Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: Power Balance(PWB) method is utilized to quickly estimate the magnitude of the mean electric field in an electrically large cavity with rectangular aperture when it is illuminated by a plane electromagnetic wave. As the incident frequency is increased, results obtained by PWB method are more consistent with the results of full-wave analysis software. In order to get more complete information of EM-field environment in the cavity, Probability Distribution Functions(PDFs) of the normalized electric field in the cavity are generated at different incident frequencies. It is found that at each specific frequency when conductivity of the cavity wall gets higher from 10 S/m to 10^7 S/m , the PDFs get flatter and tend to be stable; and when the conductivity of the cavity wall is 10^6 S/m , the PDF of the normalized electric field is similar with the one obtained in the case of 10^7 S/m . The reason is explained taking the incident wave frequency of 10 GHz as an example according to PWB.

Keywords: rectangular aperture; electrically large cavity; power balance; statistical analysis

现代电子电气设备的金属外壳一方面可以屏蔽来自外部的电磁干扰, 另一方面它也可屏蔽自身向外的电磁辐射。然而在金属外壳表面常常会开有各种孔缝用来通风散热或进行信号传输, 外部干扰源会通过这些孔缝穿透进腔体内部, 并在电子电气设备上引起不希望的电磁响应而影响其正常工作。因此研究外部电磁波入射到开孔电大腔内所形成的腔内电磁场环境是很有必要的。

电磁能量耦合进电大腔体形成的腔内电磁场环境, 理论上可以由全波分析方法例如时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)、矩量法(Method of Moments, MoM)以及有限元法(Finite Element Method, FEM)等求解麦克斯韦方程组得到, 尽管这些数值方法的代码一直在改进, 但是在高频下的这些方法需要巨大的网格数, 且因为多重反射以及谐振的缘故, 通过求解麦克斯韦方程组精确地计算出腔体里的场需要付出许多时间以及内存代价来达到计算精确度^[1]。另外, 由于高频电磁响应敏感性的存在^[2], 入射波角度的微小变化都会引起腔内每一

收稿日期: 2017-03-06; 修回日期: 2017-05-07

基金项目: 国家自然科学基金委员会—中国工程物理研究院 NSAF 联合基金资助项目(U1530143)

点的场值发生巨大变化, 此时确定性解预测高频电磁耦合将不再适用。而且对于全波分析法^[3-5]和快速计算法^[6-7](半解析方法), 大多计算的是腔内单个位置点上的屏蔽系数, 这不足以反映整体的电磁环境特性。1994年 Hill 提出了基于宏观角度来分析高频下开孔电大腔体中的功率传输和耗散的功率平衡(PWB)方法^[8]。

基于统计理论^[9-12]的 PWB 方法运用的前提是系统的尺寸远大于入射的电磁干扰波的波长, 在这样的内部系统里产生的随机分布场中, 例如精确的系统的形状、线缆或设备的位置都不再需要明确给出^[13-14], 也不再需要划分网格求解麦克斯韦方程组, 描绘干扰源产生的腔内电磁环境特性的参量即为系统内的平均功率密度(在各个位置上的平均), 这也极大地缩短了计算时间, 提高了效率。从 PWB 方法提出以来, 对开孔腔体的圆形孔缝研究居多, 例如文献^[13-15]。本文用 PWB 方法分析矩形开孔电大腔内的场环境, 并验证其有效性。由于 PWB 方法仅给出了腔内场强均值, 本文将对其进行拓展, 通过运用统计的方法处理全波分析解, 得到描述腔内场环境更精细的信息——腔内场值的统计分布即其概率密度函数(PDF)^[16], 并进一步研究腔壁电导率的变化对腔内归一化电场模值 PDF 分布的影响规律。

1 PWB 方法的原理

PWB 方法的思想在于电大腔体内能量达到稳态时, 从孔缝进入腔体的功率等于腔内耗散的功率 $P_t = P_d$ ^[17], 而耗散的功率 P_d 通常由 4 部分组成:

$$P_d = P_{\text{wall}} + P_{\text{aperture}} + P_{\text{object}} + P_{\text{antenna}} \quad (1)$$

式中: P_{wall} 为腔壁的损耗功率; P_{aperture} 为通过孔缝二次辐射的功率; P_{object} 为在腔内的损耗部件吸收的功率; P_{antenna} 为接收天线的损耗功率(即接收功率)。

1) 腔壁的损耗功率 P_{wall} 与腔壁品质因数 Q_{wall} 分别为^[18]:

$$P_{\text{wall}} = \omega U_s / Q_{\text{wall}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{wall}} = 3V / (2\mu_r S \delta) \quad (3)$$

式中: ω 为入射波的角频率; U_s 为腔内的稳态能量; 趋肤深度 $\delta = (2/\omega\mu_w\sigma_w)^{1/2}$, μ_w 为腔壁的磁导率, σ_w 为腔壁的电导率; S 为腔体表面面积; V 为腔体体积; 腔壁的相对磁导率为 $\mu_r = \mu_w / \mu_0$ 。

2) 孔缝二次辐射的功率 P_{aperture} 与孔缝品质因数 Q_{aperture} 分别为:

$$P_{\text{aperture}} = \omega U_s / Q_{\text{aperture}} \quad (4)$$

$$Q_{\text{aperture}} = 4\pi V / (\lambda \langle \sigma_{\text{ap}} \rangle) \quad (5)$$

式中 $\langle \sigma_{\text{ap}} \rangle$ 为孔缝的传输面积。

a) 圆形孔缝:

电小的圆形孔缝的传输面积, 即 $f \leq 1.3c/(2\pi a)$ 时:

$$\langle \sigma_{\text{ap}} \rangle = 16k^4 a^6 / (9\pi) \quad (6)$$

电大的圆形孔缝的传输面积, 即 $f \geq 1.3c/(2\pi a)$ 时:

$$\langle \sigma_{\text{ap}} \rangle = \pi a^2 / 2 \quad (7)$$

式中: $c = 3 \times 10^8$ m/s 为光速; λ 为波长; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; a 为圆形孔缝半径。

b) 矩形孔缝:

矩形孔缝的传输面积^[19-20]:

$$\langle \sigma_{\text{ap}} \rangle = T_A(f) A \quad (8)$$

式中: $T_A(f)$ 为孔缝的传输系数, 依赖于频率、孔缝尺寸、入射和极化角度; A 为矩形孔缝几何面积。

边长为 a, b 的矩形孔缝的传输系数为:

$$T_A(f) = \frac{4abf^2}{c^2} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} [\alpha\beta]^2 \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (9)$$

式中: $\alpha = \frac{\sin\{\pi a f \sin(\theta) \cos(\phi)/c\}}{\pi a f \sin(\theta) \cos(\phi)/c}$; $\beta = \frac{\sin\{\pi b f \sin(\theta) \sin(\phi)/c\}}{\pi b f \sin(\theta) \sin(\phi)/c}$; θ 为入射波的仰角; ϕ 为入射波的方位角。

3) 损耗物质的吸收功率 P_{object} 与损耗物质的品质因数 Q_{object} 分别为:

$$P_{\text{object}} = \omega U_s / Q_{\text{object}} \tag{10}$$

$$Q_{\text{object}} = 2\pi V / (\lambda \langle \sigma_{\text{obj}} \rangle) \tag{11}$$

式中 $\langle \sigma_{\text{obj}} \rangle$ 为损耗物质的吸收面积。

4) 接收天线的损耗功率 P_{antenna} 与接收天线的品质因数 Q_{antenna} 分别为:

$$P_{\text{antenna}} = \omega U_s / Q_{\text{antenna}} \tag{12}$$

$$Q_{\text{antenna}} = 16\pi^2 V / ((1 - |S_{11}|^2) \lambda^3) \tag{13}$$

式中 $|S_{11}|$ 为天线在自由空间的反射系数。

传入腔体内的功率 P_t 为:

$$P_t = S_i \langle \sigma_{\text{ap}} \rangle / 2 \tag{14}$$

在已知入射波功率密度 S_i 时, 由 $P_t = P_d$ 可得到腔内稳态能量 U_s , 又由 $S_c = cW = cU_s/V$, 其中 $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$, W 为腔内能量密度, 联合上述公式可求得腔内平均功率密度 S_c :

$$S_c = \frac{c}{\omega V} \cdot \frac{P_t}{\frac{1}{Q_{\text{wall}}} + \frac{1}{Q_{\text{aperture}}} + \frac{1}{Q_{\text{object}}} + \frac{1}{Q_{\text{antenna}}}} \tag{15}$$

2 PWB 方法的应用

将 PWB 方法用于研究如图 1 所示开孔腔体, 腔体体积为 500 mm×500 mm×500 mm, 孔缝大小为 100 mm×100 mm, 由式(15)可得此腔体内的平均功率密度:

$$S_c = \frac{c}{\omega V} \cdot \frac{P_t}{\frac{1}{Q_{\text{wall}}} + \frac{1}{Q_{\text{aperture}}}} \tag{16}$$

式中: $Q_{\text{wall}} = \frac{3V}{2S} \sqrt{\frac{\pi f \mu_0 \sigma}{\mu_r}}$ 为腔壁损耗品质因数; $Q_{\text{aperture}} = \frac{4\pi V}{\lambda \langle \sigma_{\text{ap}} \rangle}$ 为孔缝损耗品质因数。

图 2(a)~(h) 为 3~10 GHz 范围内不同入射频点下腔壁电导率从 10 S/m 增大到 10^7 S/m 的由 PWB 方法与全波仿真软件所得的腔内电场平均值的曲线对比图。由式(16)可知, 随着腔壁电导率 σ_w 的增大, Q_{wall} 会增大, Q_{wall}^{-1} 会减小, Q_{aperture} 为常数, 在入射波功率不变的情况下, 则腔内的平均功率密度会增大。又 $S_c = E^2/\eta$, 则腔内的电场平均值也会增大, 即 PWB 方法预测: 随着腔壁电导率的增大, 腔内电场平均值也随之增大。这与全波仿真软件处理后的腔内电场平均值的变化趋势一致, 且随着频率的升高, 两者吻合度越来越高, 这也同时验证了 PWB 方法的有效性。

相对于全波仿真软件, PWB 方法所需的计算时间更短, 例如计算入射频点为 3 GHz 腔壁电导率 $10 \sim 10^7$ S/m 的腔内电场平均值, 全波仿真软件所需时间为 180~33 000 s, 而 PWB 方法几乎 1 s 就能算出结果。

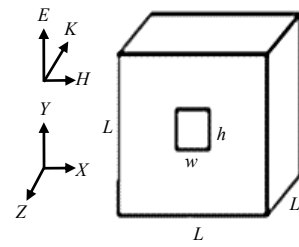
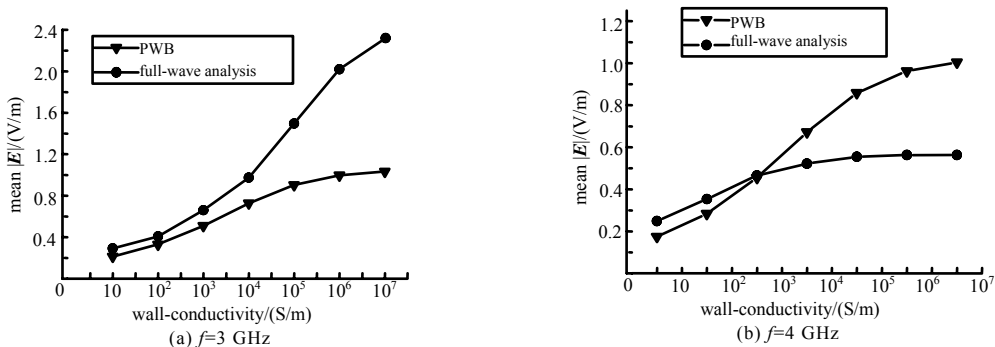


Fig.1 An electrically large cavity with rectangular aperture
图 1 矩形开孔电大腔体模型



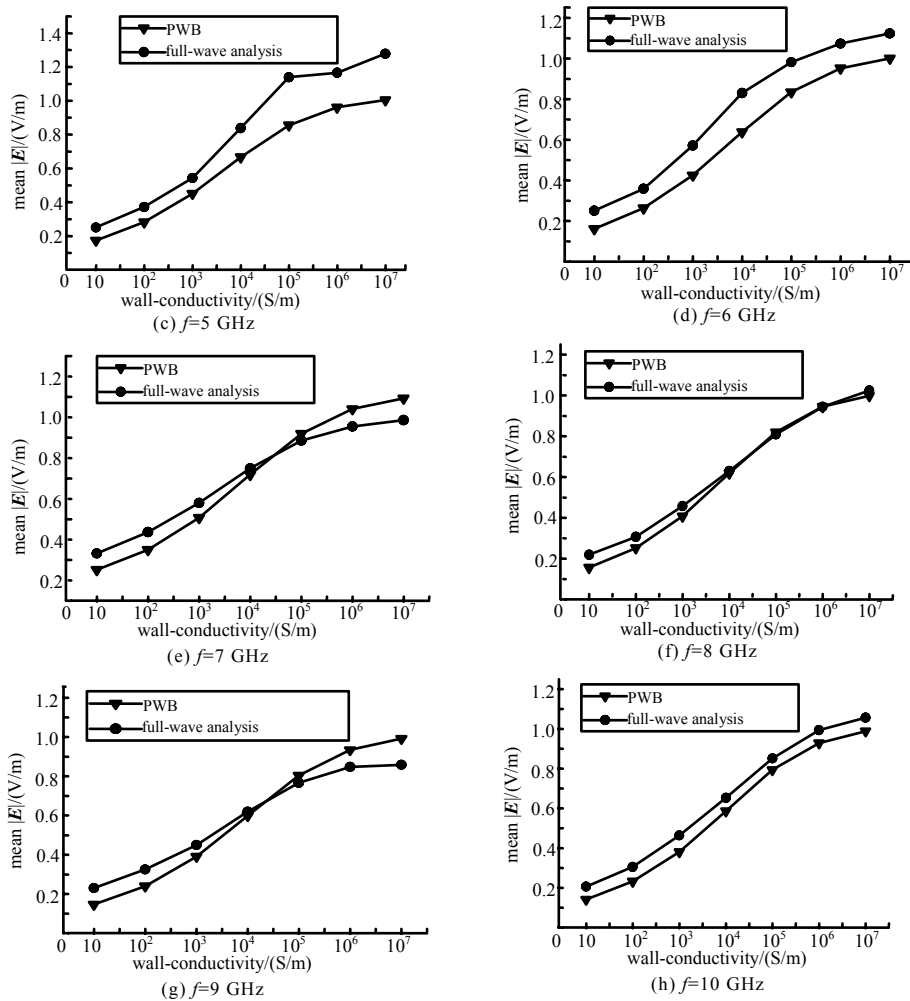


Fig.2 Computation of mean e-field amplitude by PWB method and full-wave analysis at different incident frequencies
图 2 不同入射频点下全波分析软件与 PWB 方法所得腔内平均电场值对比曲线图

3 腔内电场统计分布—PDF

由于 PWB 方法仅能得到腔内场强均值(或平均功率密度), 为了更全面地了解腔内场环境, 运用统计的方法处理全波分析解, 可给出各入射频点下完备表征腔内归一化电场模值统计特征的 PDF 图。图 3(a)~(h)为 3~10 GHz 范围内各入射频点下不同腔壁电导率的腔内归一化电场模值 $|E|/E_0$ (E_0 为入射场强幅值) 的 PDF 图, 即图中不同颜色的实线。图中的虚直线为 PWB 方法算得的各入射频点下不同腔壁电导率的腔内电场平均值, 可以明显看出 PDF 给出了更详细的腔内场分布信息, 且可根据 PDF 图得到腔内电场平均值超过某一阈值的概率。从图中还可以看出各入射频点下随着腔壁电导率从 10 S/m 逐渐增大到 10^7 S/m, 腔内归一化电场模值 PDF 具有明显的规律性: 随着腔壁电导率从 10 S/m 逐渐增大到 10^7 S/m, 腔内归一化电场模值 PDF 曲线越来越趋于平缓并趋于稳定, 且腔壁电导率为 10^6 S/m 和 10^7 S/m 时的腔内归一化电场 PDF 非常相似。

下面选取入射平面波频率 $f=10$ GHz 时腔壁电导率从 10 S/m 变到 10^7 S/m 的腔内场环境的统计分布—PDF 来说明原因。根据式(16)可得, 在入射波功率不变的情况下, 腔内的平均功率密度 S_c 由公式分母中的 Q_{wall} 和 Q_{aperture} 所决定, 两者中数值较小者对 S_c 影响更大。由 PWB 方法算得入射平面波频率 $f=10$ GHz 的不同腔壁电导率下的 Q_{wall} 和 Q_{aperture} 如表 1 所示, 当腔壁电导率在 $10\sim 10^4$ S/m 之间时, 始终小于 Q_{aperture} , S_c 的大小主要由 Q_{wall} 决定, 而 Q_{wall} 在相同频率下由腔壁电导率决定, Q_{wall} 腔壁电导率在 $10\sim 10^4$ S/m 之间时的腔内归一化电场模值 PDF 曲线形状相差特别大。当腔壁电导率在 $10^5\sim 10^7$ S/m 之间时, Q_{aperture} 始终小于 Q_{wall} , S_c 的大小主要由 Q_{aperture} 决定, 而 Q_{aperture} 对于特定的孔缝是一个常数, Q_{wall} 只能引起微小的变化。腔壁电导率为 $10^5\sim 10^7$ S/m 时的腔内归一化电场模值 PDF 很相似, 特别是腔壁电导率为 10^6 S/m 与 10^7 S/m 时的腔内归一化电场模值 PDF 非常相似, 因为它们 Q_{wall} 数量级相同且都高于 Q_{aperture} , 而影响 S_c 的主要是 Q_{aperture} , Q_{wall} 只引起微小的变化, 所以它们的 PDF 曲

线非常相似。

表 1 入射频率为 10 GHz 时不同腔壁电导率下的腔壁损耗因数和孔缝损耗因数
Table 1 Quality factor of cavity wall and aperture for different cavity wall conductivities at incident frequency of 10 GHz

conductivity of cavity wall σ_w /(S/m)	quality factor of cavity wall Q_{wall}	quality factor of aperture Q_{aperture}
10	78.54	5.28×10^3
10^2	2.48×10^2	5.28×10^3
10^3	7.85×10^2	5.28×10^3
10^4	2.48×10^3	5.28×10^3
10^5	7.85×10^3	5.28×10^3
10^6	2.48×10^4	5.28×10^3
10^7	7.85×10^4	5.28×10^3

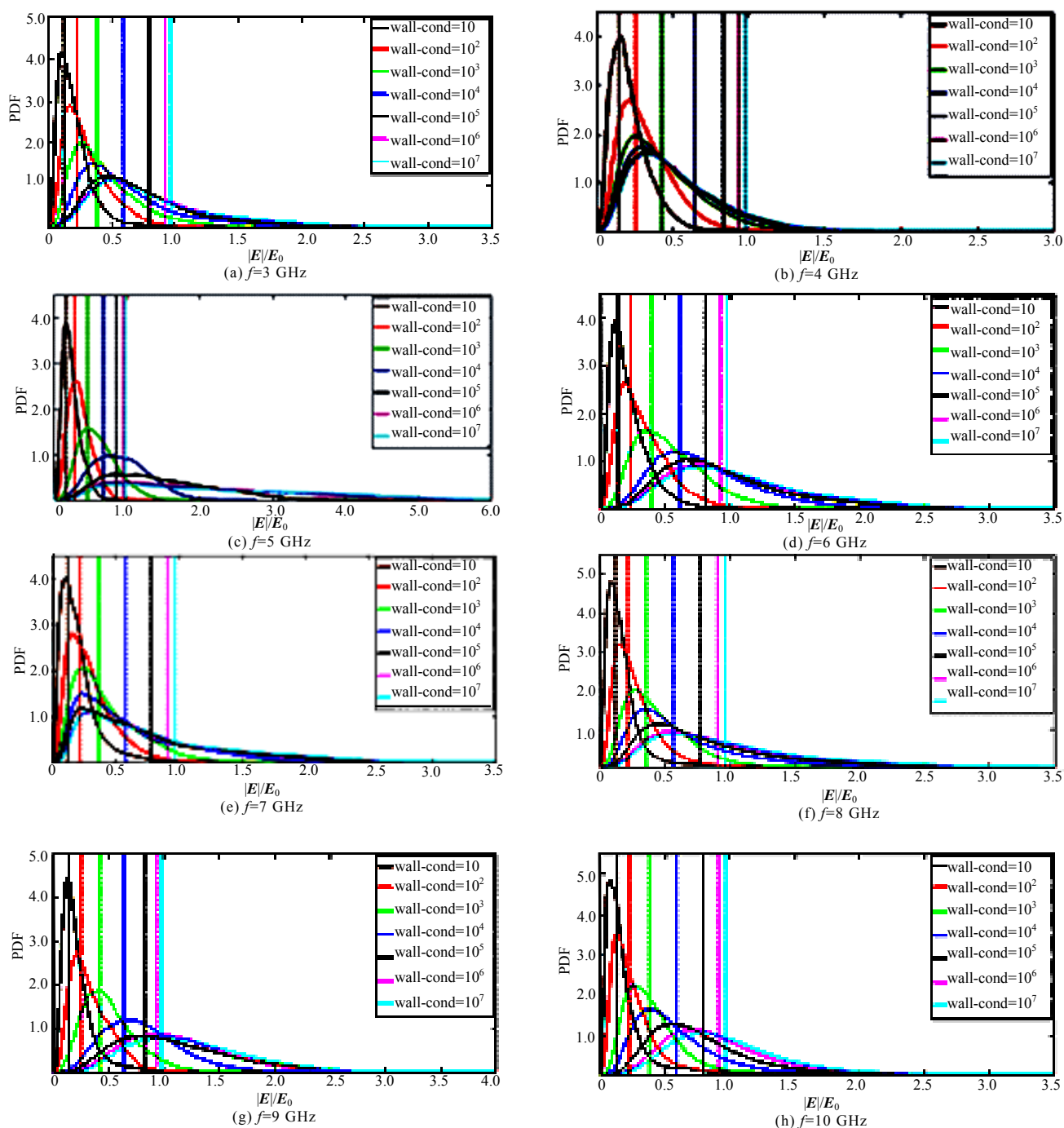


Fig.3 PDF of the normalized electric field in the cavity at different incident frequencies

图 3 不同入射频率下的腔内归一化电场 PDF 图

4 结论

本文用PWB方法分析了矩形开孔电大腔内场环境,并与全波仿真软件结果进行了对比,在高频处取得了较好的一致性,且相对于全波仿真软件极大地缩短了计算时间。为了得到更完备的腔内场环境描述,运用统计的方法处理全波分析解,可给出各入射频点下完备表征腔内归一化电场模值统计特征的PDF图,并得到了腔壁电导率的变化对腔内归一化电场模值PDF的影响规律,即各入射频点下腔壁电导率逐渐从 10 S/m 增大到 10^7 S/m 时,腔内归一化电场模值PDF曲线越来越趋于平缓并趋于稳定;各入射频点下腔壁电导率为 10^6 S/m 和 10^7 S/m 时的归一化电场模值PDF非常相似,以入射波频率在 10 GHz 时为例,利用PWB方法的原理说明了上述现象发生的原因。后续研究中将使用PWB方法研究单腔内存在损耗物质时的腔内场环境以及多腔体内的场环境统计特征。

参考文献:

- [1] JUNQUA I, GUIBERT L, PARMANTIER J P. Assessment of high frequency coupling in a generic object by the power balance method[C]// International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. Munich, Germany: IEEE, 2007: 397–400.
- [2] ZHAO Y, ZHAO X, YAN L, et al. High frequency response sensitivity of electrically large enclosure with aperture and its statistical analysis method[J]. *Electromagnetic Compatibility*, 2015, 36(1): 185–188.
- [3] MURANO K, SANPEI T, XIAO F, et al. Susceptibility characterization of a cavity with an aperture by using slowly rotating EM fields: FDTD analysis and measurements[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, 46(2): 169–177.
- [4] LI M, NUBEL J, DREWNIK J L, et al. EMI from cavity modes of shielding enclosures-FDTD modeling and measurements[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2000, 42(1): 29–38.
- [5] 黄辉敏, 张卫东, 李继琨, 等. 含有介质板的有孔矩形腔体耦合特性分析[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2012, 10(2): 161–164. (HUANG Huimin, ZHANG Weidong, LI Jikun, et al. Coupling characteristics analysis of rectangular cavity with substrates[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2012, 10(2): 161–164.)
- [6] YU D P, SONG H, LIU Y G. Estimate of shielding efficiency for double layer enclosure with apertures array[C]// International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. Kunming, China: IEEE, 2008: 446–449.
- [7] REN D, DU P A. Numerical simulation for the shielding effectiveness of enclosure with apertures[C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Chengdu, China: IEEE, 2012: 843–848.
- [8] HILL D A, MA M T, ONDREJKA A R, et al. Aperture excitation of electrically large, lossy cavities[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1994, 36(3): 169–178.
- [9] LEHMAN T H. A statistical theory of electromagnetic fields in complex cavities[M]. New York: Taylor & Francis, 1999.
- [10] LEE Y S, CHOI S, KWON J H. On the statistical characteristics of power balance approach: theoretical study[C]// Antennas and Propagation (EuCAP), 2014 8th European Conference on Antennas & Propagation. [S.l.]: IEEE, 2014: 1155–1157.
- [11] TODESCHINI F, BERTRAND A, RAMOS M. Search for limits of complex cavity model by progressive simplification[C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. The Hague, Netherlands: IEEE, 2014: 787–791.
- [12] KOSTAS J G, BOVERIE B. Statistical model for a mode-stirred chamber[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1991, 33(4): 366–370.
- [13] SCHAFFAR A, GINESTE P N. Application of the power balance method to E field calculation in the ARIANE 5 launcher payloads cavities[C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.l.]: IEEE, 2011: 284–289.
- [14] JUNQUA I, PARMANTIER J P, ISSAC F. A network formulation of the power balance method for high-frequency coupling[J]. *Electromagnetics*, 2005, 25(7/8): 603–622.
- [15] JUNQUA I, PARMANTIER J P, RIDEL M. Modeling of high frequency coupling inside oversized structures by asymptotic and PWB methods[C]// International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. [S.l.]: IEEE, 2011: 68–71.
- [16] SCHAFFAR A, HERLEM Y. Assessment of the power balance method for e field calculations in complex cavities[C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.l.]: IEEE, 2009: 305–309.
- [17] BACKSTROM M, NILSSON T, VALLHAGEN B. Guideline for HPM protection and verification based on the method of power balance[C]// International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.l.]: IEEE, 2014: 128–133.
- [18] CORDILL B D, SEGUIN S A, EWING M S. Shielding effectiveness of carbon-fiber composite aircraft using large cavity theory[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2013, 62(4): 743–751.
- [19] RUDDLE A R. Validation of simple estimates for average field strengths in complex cavities against detailed results obtained from a 3D numerical model of a car[J]. *IET Science Measurement Technology*, 2008, 2(6): 455–466.

(下转第 708 页)