



·高功率微波技术·

基于 PWB 方法的电大尺寸腔体结构电磁耦合求解器的开发与验证*

胡明浪, 周世华, 闫丽萍, 赵翔

(四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

摘要: 功率平衡(PWB)法是基于统计电磁学的求解电大尺寸腔体结构电磁耦合问题的快速方法。在 PWB 方法的基础上, 开发了一个电大尺寸腔体结构电磁耦合求解器, 实现了对不同腔体形状、不同孔缝形状、不同源类型等条件下的电大尺寸腔体结构电磁耦合水平的快速求解, 并与已发表文献的结果和实验结果进行了对比, 验证了求解器的有效性和高效性。

关键词: 功率平衡法; 统计电磁学; 电大腔体; 电磁拓扑; 耦合截面

中图分类号: O441.4

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220026

Development and validation of electromagnetic coupling solver for electrically large-sized cavity structure based on power balance method

Hu Minglang, Zhou Shihua, Yan Liping, Zhao Xiang

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: The power balance (PWB) method is a fast method based on statistical electromagnetics for solving electromagnetic coupling problems in electrically large-sized cavity structures. Based on the PWB method, an electromagnetic coupling solver is developed to solve the electromagnetic coupling level of electrically large-sized cavity structure with different cavity shapes, different aperture shapes and different source types, etc. The validity and efficiency of the solver is validated by comparing its output with the results in the published literature and those of experiments.

Key words: power balance method, statistical electromagnetics, electrically large cavity, electromagnetic topology, coupling cross section

各种电子电气设备通常都置于各种腔体结构如船舱、机舱、车辆、建筑物、方舱、机箱机柜等中, 这些腔体结构的几何尺寸对于较高频段的电磁干扰, 构成了电大尺寸系统(即几何尺寸远大于干扰电波波长)。为了进行信号交换、能量供给以及通风散热等, 这些腔体结构表面和/或内部会开有各种孔缝, 使得外部电磁干扰信号可以穿过这些孔缝耦合进腔体和/或子腔体内部, 存在着干扰或者损坏腔体内部精密元件的风险。因此如何快速地估算腔体内电磁耦合水平对于设备电磁兼容设计具有重要的指导意义。

在分析电大尺寸腔体结构的电磁环境效应时, 外部电磁能量耦合进入形成的腔体内电磁环境理论上可以由全波分析方法^[1-6]求解麦克斯韦方程组或其等价方程而得到。但由于全波分析技术建立在对待分析系统结构进行精确建模和精细几何网格划分的基础上, 这就带来了建模时的巨大人力资源和计算时的巨大计算机时间/空间开销, 很多时候已经超越了目前的计算能力。此外, 还可以采用基于等效模型的半解析法^[7-10]来研究电大尺寸腔体的电磁耦合问题, 相较于全波分析方法, 半解析法简化了计算模型, 一定程度上提高了计算效率, 但其往往针对特定模型, 不具有普适性。另外, 电大尺寸腔体结构存在高频电磁响应敏感性, 系统一旦有 1° 的倾斜或者在系统内放置

* 收稿日期: 2022-01-15; 修订日期: 2022-04-07
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61877041)
联系方式: 胡明浪, ml_hu_scu@163.com。
通信作者: 赵翔, zhaoxiang@scu.edu.cn。

物体都可能会导致系统内场分布产生高达 20 dB 的变化^[11-12], 所以确定性解甚至腔体内单个或几个特殊点的解对于电大尺寸腔体的电磁耦合评估意义不大^[13-15]。

为解决电大尺寸腔体高频响应敏感性和整体电磁耦合情况的问题, 在 1994 年, Hill 等人提出了基于统计电磁学的功率平衡(PWB)法, 为求解电大尺寸腔体电磁耦合提供了一种快速简便的方法^[16]。在 2005 年, Junqua 等人将电磁拓扑学融入 PWB 方法中, 推导了 PWB 方法的网络化公式^[17]。在 2011 年, 赵翔等人开发了一款自动分析软件, 将 Junqua 等人的方法发展为更具一般性的一套分析方法^[18]。在 2016—2017 年, 英国约克大学开发了一个基于 PWB 方法的开源求解器^[19]。2021 年, Bremner 和 Pazos 等人使用 PWB 方法对航天器的电磁耦合问题进行了分析^[20-21]。本文在已有研究的基础上, 开发了一种更加具有普适性的求解器, 实现了不同腔体形状、不同孔缝形状、不同源类型等条件下电大尺寸腔体结构的电磁耦合问题的快速分析, 同时求解器会给出描述电大尺寸腔体结构电磁耦合关系的拓扑图。

1 PWB 求解器的开发

1.1 PWB 原理

PWB 方法是一种基于统计电磁学的电大尺寸腔体结构电磁耦合效应快速分析方法。其运用的前提是整个腔体结构的尺寸远大于干扰电磁波的波长, 在这样的腔体内产生的统计均匀场中, 精确的腔体及其内容物的形状、位置等都不再需要明确给出, 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体内电磁环境特性的参量即为腔体(包括子腔体)的平均功率密度或平均电场强度, 这极大地提高了计算效率。

PWB 方法认为, 当腔内场分布达到统计均匀时, 腔内的稳态能量 U_s 可由腔内能量密度 W (假设在整个腔体内部能量密度 W 是一致的) 和腔体体积 V 的乘积得到

$$U_s = WV \quad (1)$$

$$W = \epsilon_0 E^2 \quad (2)$$

式中: ϵ_0 为自由空间的介电常数; E^2 代表的是整个腔体内的电场模值平方的平均(假设储存的电场和磁场能量相等)。

E^2 和腔体内的功率密度 S_c 具有关系

$$S_c = E^2 / \eta_0 = cW \quad (3)$$

式中: $\eta_0 = \mu_0 / \epsilon_0$; $c = 1 / \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$; μ_0 为自由空间的磁导率。

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

$$P_t = P_d \quad (4)$$

而耗散的功率 P_d 通常由 4 部分组成, 即

$$P_d = P_w + P_{ap} + P_{an} + P_{ab} \quad (5)$$

式中: P_w 是腔壁的耦合功率; P_{ap} 是通过孔缝二次耦合出去的功率; P_{an} 是腔体内天线的耦合功率; P_{ab} 是腔体内损耗物质的耦合功率。

$P_w, P_{ap}, P_{an}, P_{ab}$ 分别可以写为

$$P_w = \langle \sigma_w \rangle S_c \quad (6)$$

$$P_{ap} = \langle \sigma_{ap} \rangle S_c \quad (7)$$

$$P_{an} = \langle \sigma_{an} \rangle S_c \quad (8)$$

$$P_{ab} = \langle \sigma_{ab} \rangle S_c \quad (9)$$

式中: $\langle \sigma_w \rangle, \langle \sigma_{ap} \rangle, \langle \sigma_{an} \rangle, \langle \sigma_{ab} \rangle$ 分别为腔壁、孔缝、天线和吸收体的平均耦合截面, 表征各部分对电磁波功率的吸收程度。

1.2 求解器的求解过程

在每一个腔体中, 可以列出一个功率平衡的方程, 以图 1 的例子来具体说明求解器的求解过程。

图 1(a) 是文献 [17] 中简化的例子, 它是一个圆柱体双腔结构, A1 表示发射天线, A2 表示接收天线, Cirhole 为

两个腔体之间的一个圆形孔缝, A3 为上腔壁上的一个方形孔缝。图 1(b) 是求解器画出的模型拓扑图, 蓝色 RC1 表示上腔, RC2 表示下腔, 黄色 Cirhole 表示两腔之间的圆孔, 灰色 SA1 表示上腔中的天线源 A1, 红色的 RC1W 表示上腔壁的耦合功率, A1 表示发射天线的耦合功率, A3 表示通过孔缝 A3 耦合到外部环境的功率, RC2W 表示下腔壁的耦合功率, A2 表示接收天线的耦合功率, 可以列出以下 3 个方程

$$\begin{cases} \sigma_{A3}S_0 = P_0 + \sigma_{A3}S_1 \\ (\sigma_{RC1} + \sigma_{A1} + \sigma_C + \sigma_{A3})S_1 = P_1 + \sigma_{A3}S_0 + \sigma_C S_2 \\ (\sigma_{RC2} + \sigma_{A2} + \sigma_C)S_2 = P_2 + \sigma_C S_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: σ_{RC1} 表示上腔壁的平均耦合截面; σ_{RC2} 表示下腔壁的平均耦合截面; σ_{A1} 表示发射天线的平均耦合截面; σ_{A2} 表示接收天线的平均耦合截面; σ_{A3} 表示孔缝 A3 的平均耦合截面;

σ_C 表示圆孔 Cirhole 的平均耦合截面; S_0 表示外部环境的平均功率密度; S_1 表示上腔的平均功率密度; S_2 表示下腔的平均功率密度; P_0 表示外部环境中存在的功率; P_1 表示上腔中存在的功率; P_2 表示下腔中存在的功率。

式(10)第 1 个方程表示外部环境的功率平衡, $\sigma_{A3}S_1$ 表示上腔通过孔缝 A3 耦合到外部环境的功率, $\sigma_{A3}S_0$ 表示外部环境通过孔缝 A3 耦合到上腔的功率。

式(10)第 2 个方程表示上腔的功率平衡, $\sigma_{A3}S_0$ 表示外部环境通过孔缝 A3 耦合到上腔的功率, $\sigma_C S_2$ 表示下腔通过 Cirhole 孔耦合到上腔的功率, $\sigma_{RC1}S_1$ 表示上腔壁的耦合功率, $\sigma_{A1}S_1$ 表示发射天线的耦合功率, $\sigma_C S_1$ 表示上腔通过 Cirhole 孔耦合到下腔的功率, $\sigma_{A3}S_1$ 表示上腔通过 A3 孔耦合到外部环境的功率。

式(10)第 3 个方程表示下腔的功率平衡, $\sigma_C S_1$ 表示上腔通过 Cirhole 孔耦合到下腔的功率, $\sigma_{RC2}S_2$ 表示下腔壁耦合的功率, $\sigma_{A2}S_2$ 表示接收天线的耦合功率, $\sigma_C S_2$ 表示下腔通过 Cirhole 孔耦合到上腔的功率。

由上述 3 个方程得到一个线性代数方程组

$$\begin{bmatrix} +\sigma_{A3} & -\sigma_{A3} & 0 \\ -\sigma_{A3} & \sigma_{RC1} + \sigma_{A1} + \sigma_C + \sigma_{A3} & -\sigma_C \\ 0 & -\sigma_C & \sigma_{RC2} + \sigma_{A2} + \sigma_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

由此可以求得上腔和下腔的平均功率密度 S_1 和 S_2 , 再由式(3)可以求得上腔和下腔的电场强度。

1.3 求解器结构

在式(10)中, 耦合截面 σ 和功率 P 是已知量, 功率密度 S 为未知量, 但在实际场景中, 并不能直接得到各部分的平均耦合截面, 这就需要通过输入模型各部分的物理参数计算各部分的平均耦合截面。求解器使用 xlsx 文件来读取模型文件, 模型的主要参数为频率、腔体、孔缝、天线、源和吸收体这 6 个部分。频率参数主要包括频率间隔类型、起始频率、终止频率和频率数; 腔体参数主要包括腔体的物理尺寸、腔壁的电导率及相对磁导率; 孔缝的参数主要包括孔缝的形状、物理尺寸; 天线参数主要为天线的 S_{11} ; 源的参数主要为源的类型、功率或者功率密度(平面波还需要仰角、方位角和极化角); 吸收体参数主要包括吸收体的表面积、电导率和相对磁导率。

求解器的流程图如图 2 所示, 在设置好求解的频率之后, 根据输入的源参数求得功率 P , 再由输入的腔体、孔缝、吸收体、天线参数来求得对应的平均耦合截面 σ , 同时画出描述模型结构的拓扑图, 最后再根据 P 和 σ 求得功率密度 S 。

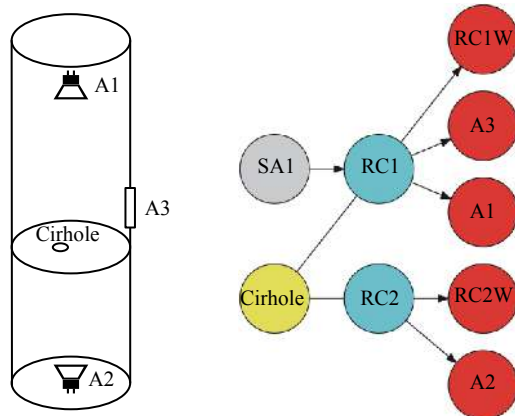
2 算例验证

本节使用了几个算例来对 PWB 求解器的有效性进行验证。

2.1 验证算例 1

算例 1 为文献 [17] 中简化的圆柱体双腔结构, 如图 1(a) 所示, 其底面直径为 0.5 m, 上腔的高度为 0.9 m, 下腔的高度为 0.6 m, 上下腔之间的圆形孔缝 Cirhole 半径为 1.2 cm, 上腔中的方孔 A3 边长为 0.1 m, 入射源为上腔中的发射天线 A1。

图 3 是图 1(a) 腔体使用本文 PWB 求解器的计算结果与文献 [17] 推导的公式的计算结果的对比图, 上腔与下腔的场值在 1 GHz 到 100 GHz 频段内变化趋势吻合良好, 验证了求解器本身程序的正确性。



(a) structure diagram of cavity (b) topological diagram of cavity

Fig. 1 The cavity presented by Junqua et al [17]

图 1 文献 [17] 腔体

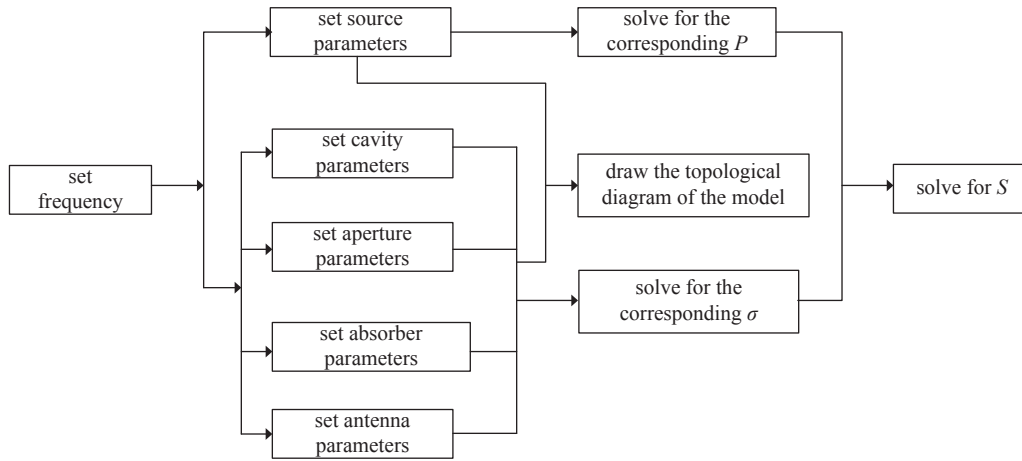


Fig. 2 Solver flowchart
图 2 求解器流程图

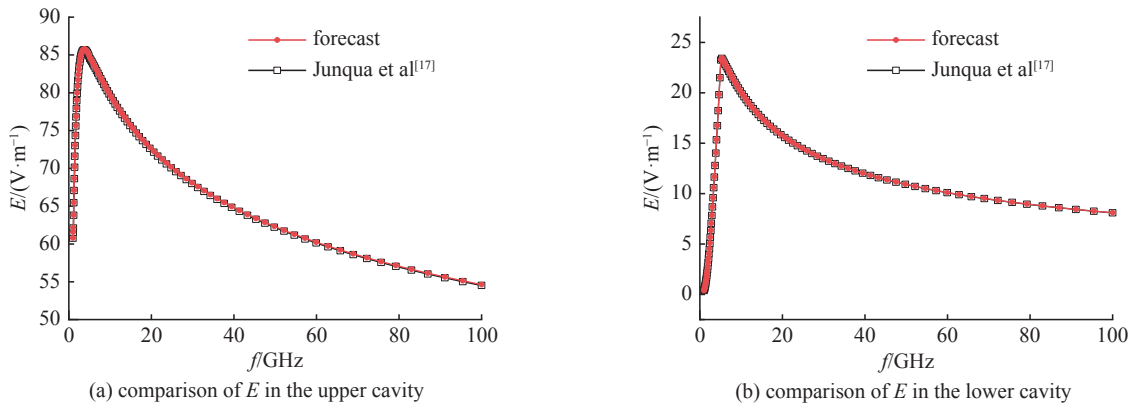


Fig. 3 Example presented by Junqua et al [17]
图 3 文献 [17] 算例

2.2 验证算例 2

算例 2 为带有圆形孔缝的长方体腔,如图 4(a)所示,腔体尺寸为 $l=1.213\text{ m}$, $w=0.603\text{ m}$, $h=0.937\text{ m}$,整个腔体由铝构成,在腔体上开有半径为 $r(r_1=2.94\text{ cm}$, $r_2=3.51\text{ cm}$) 的圆孔。整个腔体在混响室中测试,入射源为从孔缝 A2 进入的随机平面波。

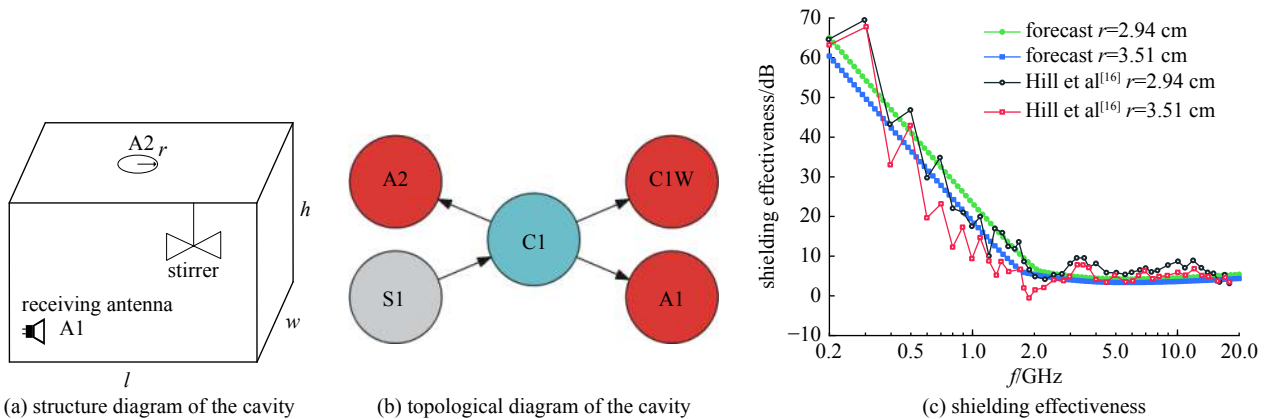


Fig. 4 Example presented by Hill et al [16]
图 4 文献 [16] 算例

腔体的拓扑图如图 4(b)所示,其中蓝色 C1 表示腔体,红色 C1W 表示腔壁耦合功率, A1 表示接收天线的耦合功率, A2 表示通过圆孔耦合到外部环境的功率,灰色 S1 表示入射源。图 4(c)对比了在不同圆孔半径下文献实验结果和本文 PWB 求解器计算的腔体屏蔽效能,从图中可以看出在 0.2 GHz 到 20 GHz 频段内,本文 PWB 求解器很

好地评估了腔体屏蔽效能随频率下降的趋势。

2.3 验证算例 3

算例 3 使用的腔体为文献 [22] 中的 GO26 腔体, 该腔体是一个飞机的缩比简化模型, 由一个圆柱体和两个半球体组成, 腔体两侧各有 6 个圆形孔缝, 腔体的尺寸如图 5(a) 所示。整个腔体在混响室中测试, 入射源为从圆形孔缝进入的随机平面波。

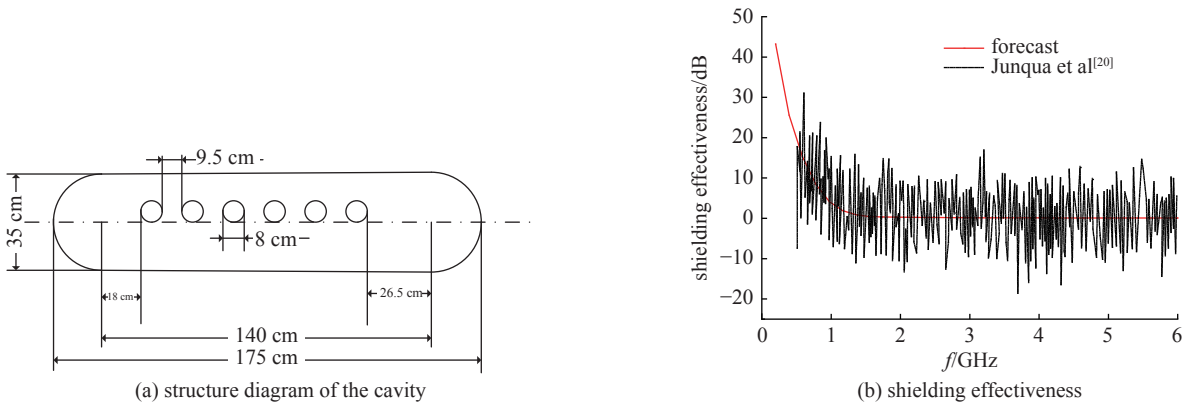


Fig. 5 Example presented by Junqua et al [22]

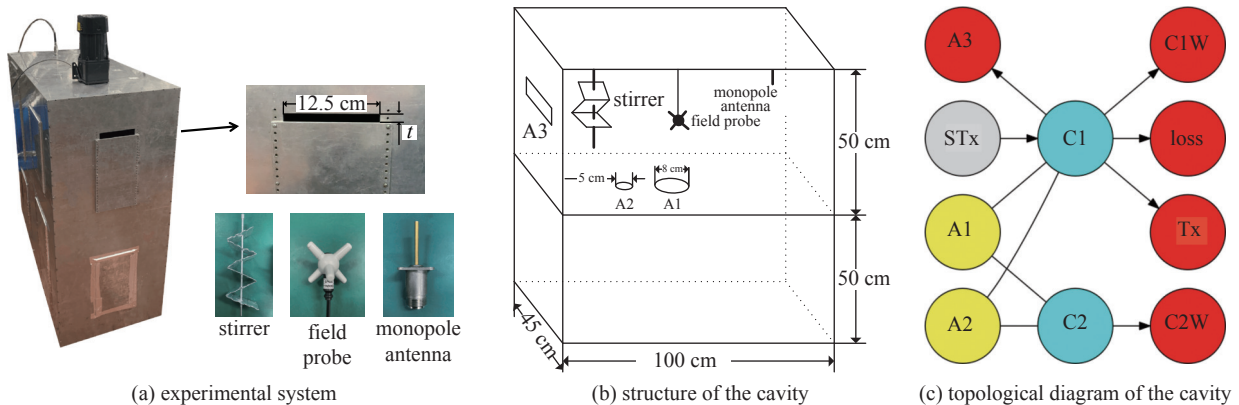
图 5 文献 [22] 算例

算例 3 的拓扑结构图和算例 2 的拓扑图(图 4(b))基本相同, 需要注意的是两者具有不同的腔体结构和孔缝。图 5(b)为文献中的实验结果和本文 PWB 求解器计算的腔体的屏蔽效能对比, 从图中可以看出, 本文 PWB 求解器的计算结果很好地反映了 0.2 GHz 到 6 GHz 腔体屏蔽效能的变化趋势。

2.4 验证算例 4

为了进一步验证求解器的有效性, 在一个铝制的长方体双腔结构中进行了实验测试。整个实验系统如图 6(a) 所示, 腔体由两个 $100\text{ cm} \times 45\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 的子腔体构成, 上下腔之间开有半径为 4 cm 和 2.5 cm 的两个圆孔 A1 和 A2, 在上腔的左侧开有一个宽度为 t 的矩形孔缝 A3, 孔缝的大小可调。入射源为放置在上腔顶部的单极子天线, 场强测试工具为 Narda 公司的 EP-600, 为能更方便的测得上腔中的电场均值, 在上腔中放置了模式搅拌器。值得注意的是, 该双腔结构由 7 块铝板拼接而成, 连接处不可避免地存在着缝隙, 且腔体预留了线缆传输的小孔, 都可能使得电磁波耦合到外部环境中, 这些固有的功率损耗因素无法单纯通过计算得到其耦合截面, 只能采用测量的方法。为此通过 $t=0\text{ cm}$ 时的实验数据来得到实验系统中上腔固有损耗的耦合截面, 并在计算开有 $t=1.2, 2.2, 3.2, 4.2\text{ cm}$ 孔缝的腔内场值时使用了该值。

图 6(c)是腔体的拓扑结构图, 蓝色的 C1 和 C2 分别表示上腔和下腔, 黄色的 A1 和 A2 分别表示上腔和下腔之间的圆形孔缝, 红色的 Tx 表示上腔中天线的耦合功率, C1W 表示上腔壁的耦合功率, A3 表示通过宽度为 t 的孔缝耦合到外部环境中的功率, loss 为上腔中的固有损耗功率, C2W 表示下腔壁的耦合功率。图 6(d)为 2~8 GHz 时上腔中的场强随矩形孔缝 A3 宽度 t 变化而变化的对比图, 从图中可以看出大部分频点下, 实验结果都与本文 PWB 求解器预测值吻合良好, 反映出了上腔中泄露的电磁能量随着孔缝宽度增加而增加, 从而导致上腔中的场强随孔缝宽度增加而减小的趋势。



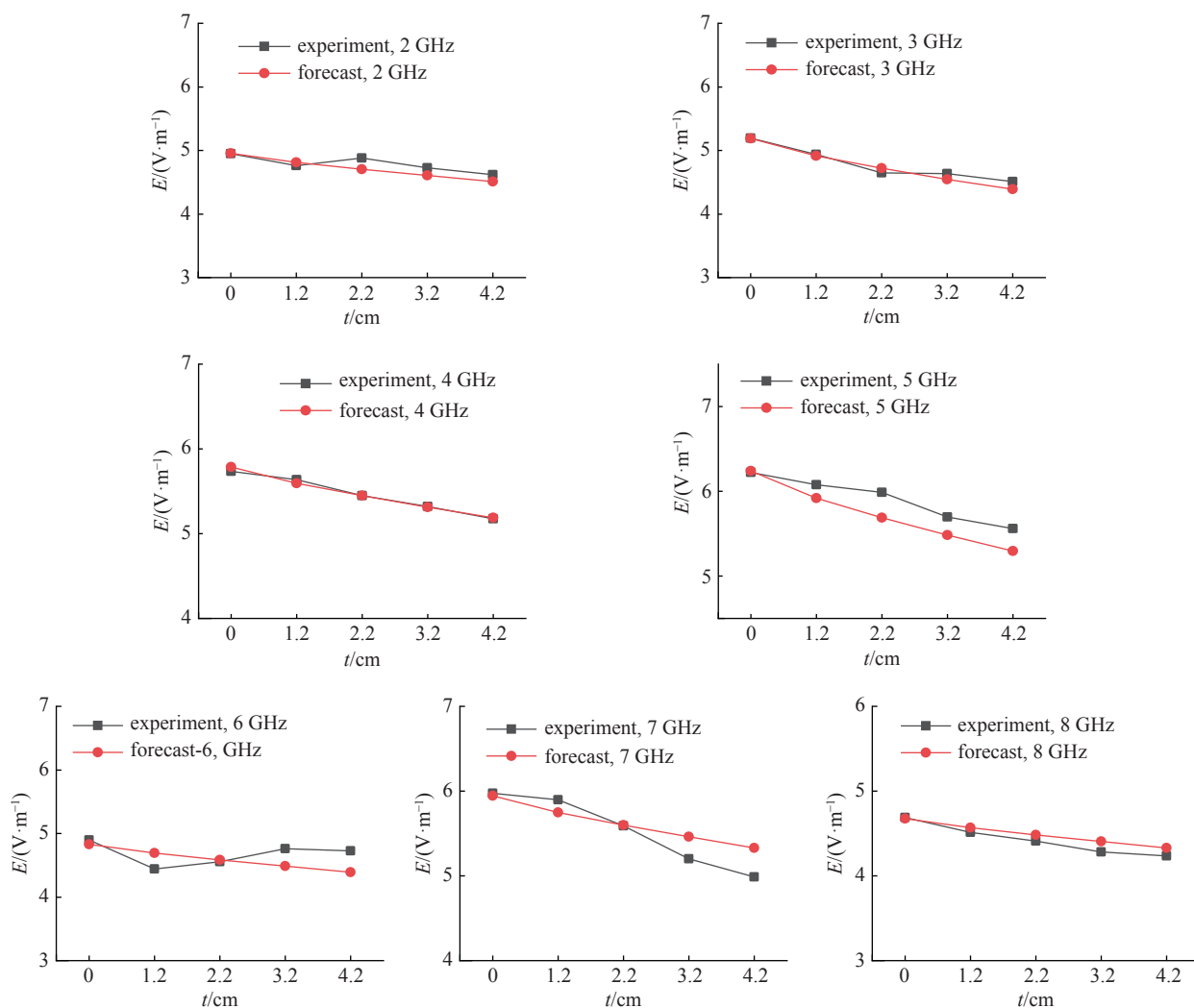
(d) comparison of E in the upper cavity at different frequency

Fig. 6 Example of cuboid double cavity

图 6 长方体双腔算例

值得一提的是,上述算例在 PC 机(CPU: AMD Ryzen 7 1700 3 GHz, 内存: 16 G)的计算时间均为 1 s 左右。

3 结论

PWB 方法是建立在统计电磁学基础上求解电大尺寸腔体电磁耦合的系统级评估方法,可以快速求解出电大尺寸腔体内场值量级。本文在已有研究的基础上,开发了一款电大尺寸腔体结构电磁耦合求解器,实现了不同腔体形状、不同孔缝形状、不同源类型等条件下的电大尺寸腔体结构电磁耦合快速分析。在多个算例中,本文开发的 PWB 求解器以极快的求解速度获得了与文献或实验吻合良好的计算结果,证实了该求解器的有效性和高效性。

参考文献:

- [1] 张子恒, 田杨萌, 王彩霞. 基于XFDTD的箱变开孔金属外壳雷电电磁脉冲防护[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2020, 18(5): 863-869. (Zhang Ziheng, Tian Yangmeng, Wang Caixia. Lightning electromagnetic pulse protection ability of box-type substation with slots based on XFDTD[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2020, 18(5): 863-869)
- [2] Kubik Z, Skála J. Shielding effectiveness measurement and simulation of small perforated shielding enclosure using FEM[C]//2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering. 2015: 1983-1988.
- [3] Ali Khorrami M, Dehkoda P, Mazandaran R M, et al. Fast shielding effectiveness calculation of metallic enclosures with apertures using a multiresolution method of moments technique[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, 52(1): 230-235.
- [4] Mrdakovic B L, Kolundzija B M. Accurate analysis of electromagnetic shielding problems using MoM SIE method[C]//2016 International Symposium on Antennas and Propagation. 2016: 162-163.
- [5] Lü Qilong, Lv Zhiqing, Xue Zhenhao, et al. Research on shielding effectiveness of spacecraft shielding box to electromagnetic pulse[C]//2020 International

- Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. 2020: 1-3.
- [6] Campione S, Warne L K, Reines I C, et al. Modeling and experiments of high-quality factor cavity shielding effectiveness[C]//2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium. 2019: 1-2.
- [7] 宋航, 胡涛, 侯德亭, 等. 有孔双层屏蔽腔体屏蔽效能的多模分析方法[J]. 微波学报, 2009, 25(2): 25-29,82. (Song Hang, Hu Tao, Hou Deting, et al. Shielding effectiveness of double layer rectangular enclosure with apertures over wide frequency range[J]. Journal of Microwaves, 2009, 25(2): 25-29,82)
- [8] Li Fulin, Han Jihong, Zhang Chang. Study on the influence of PCB parameters on the shielding effectiveness of metal cavity with holes[C]//2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference. 2019: 383-387.
- [9] Radivojević M V, Rupčić S, Alilović V, et al. The shielding effectiveness measurements of a rectangular enclosure perforated with slot aperture[C]//2017 International Conference on Smart Systems and Technologies. 2017: 121-126.
- [10] Rabat A, Bonnet P, Drissi K E K, et al. Analytical formulation for shielding effectiveness of a lossy enclosure containing apertures[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, 60(5): 1384-1392.
- [11] Holland R, John R S. Statistical electromagnetics[M]. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- [12] 赵远, 赵翔, 闫丽萍, 等. 开有不同矩形孔缝的电大腔中场分布的统计分析[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2014, 51(4): 738-744. (Zhao Yuan, Zhao Xiang, Yan Liping, et al. Statistical analysis of EM field distribution in the electrically large enclosure with different rectangle aperture[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2014, 51(4): 738-744)
- [13] 罗静雯, 杜平安, 任丹, 等. 基于BLT方程的双层腔体屏蔽效能计算方法[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 113201. (Luo Jingwen, Du Ping'an, Ren Dan, et al. BLT equation-based approach for calculating shielding effectiveness of double layer rectangular enclosures with apertures[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 113201)
- [14] 公延飞, 郝建红, 蒋璐行, 等. 基于Bethe小孔耦合理论和镜像原理的双腔体电磁泄漏的解析模型[J]. 电工技术学报, 2018, 33(9): 2139-2147. (Gong Yanfei, Hao Jianhong, Jiang Luhang, et al. An analytical model for electromagnetic leakage from double cascaded enclosures based on Bethe's small aperture coupling theory and mirror procedure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(9): 2139-2147)
- [15] 王殿海, 石成英, 蔡星会, 等. 有内置薄板腔体的HEMP屏蔽效能研究[J]. 微波学报, 2019, 35(1): 87-90. (Wang Dianhai, Shi Chengying, Cai Xinghui, et al. Research on the shielding effectiveness of rectangular cavity with embedded thin plate under HEMP irradiation[J]. Journal of Microwaves, 2019, 35(1): 87-90)
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 赵翔, 张华彬, 刘娟, 等. 基于PWB-EMT的电磁效应评估方法与软件实现[J]. 河北科技大学学报, 2011, 32(S2): 165-167. (Zhao Xiang, Zhang Huabin, Liu Juan, et al. Electromagnetic effect evaluation method and software implementation based on PWB-EMT[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2011, 32(S2): 165-167)
- [19] Flintoftid. AEGPWB: an open source electromagnetic power balance toolbox and solver[DB/OL]. [2016-05-18]. <https://github.com/flintoftid/aegpwb>.
- [20] Bremner P G, Bahadorzadeh M, West J C, et al. Statistical field model for performance of localized RF absorption blankets in a payload fairing[C]//2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium. 2021: 136-141.
- [21] Pazos J J, Phillips J, Miller E, et al. Estimating fields in spacecraft cavities: experimental validation of finite-difference time-domain and power balance computational tools[C]//2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium. 2021: 798-803.
- [22] Junqua I, Parmantier J P, Ridet M. Modeling of high frequency coupling inside oversized structures by asymptotic and PWB methods[C]//2011 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. 2011: 68-71.