
文章编号: 2095-4980(2019)06-1056-04

基于 PWB 方法的飞机机舱电磁屏蔽效能分析

郭 琦, 赵俊栋, 邓晓伟

(中航飞机股份有限公司, 陕西 西安 710089)

摘要: 外部电磁场辐照下飞机的电磁兼容分析和电磁效应评估, 需要进行飞机机舱的电磁耦合分析, 以评估其屏蔽效能(SE)。由于全波分析方法的巨大计算代价和高响应敏感性现象, 统计电磁学理论的功率平衡(PWB)方法更适用于飞机机舱的 SE 分析。基于该方法开发了开孔腔体 SE 分析程序, 通过和文献结果比较验证了程序的正确性和有效性。将其用于某飞机机舱在多种条件下的 SE 分析。结果证明有助于掌握舱壁电导率、舷窗、载客量、内部接收天线等影响 SE 的情况。

关键词: 功率平衡; 屏蔽效能; 飞机机舱

中图分类号: TN811^{+.1}

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201906.1056

Analysis of electromagnetic shielding effectiveness of an aircraft cabin based on PWB method

GUO Qi, ZHAO Jundong, DENG Xiaowei

(Avic Aircraft Company Limited, Xi'an Shaanxi 710089, China)

Abstract: Electromagnetic compatibility analysis and electromagnetic effect evaluation of an aircraft illuminated by an external electromagnetic field are of great significance to flight safety. For this purpose, electromagnetic coupling analysis is needed to evaluate the Shielding Effectiveness(SE) of the aircraft cabin. Due to the high computational cost of full-wave analysis methods and the phenomenon of high frequency response sensitivity, the Power Balance(PWB) method based on statistical electromagnetics is more suitable for SE analysis for the aircraft cabin. An analysis program based on PWB method is developed, whose correctness and effectiveness are verified by comparing with literature results. The program is utilized to analyze SE of an aircraft cabin under various conditions. The obtained results contribute to understand how the various factors such as wall conductivity, portholes, passenger loads as well as internal receiving antennas affect the SE.

Keywords: Power Balance; Shielding Effectiveness; aircraft cabin

雷电电磁脉冲、高空电磁脉冲和高功率微波等外部复杂电磁场辐照对飞机的飞行安全有重要影响。而飞机机舱作为保护舱内设备和人员的第一条防线, 评估其电磁屏蔽效能(SE)意义重大。由于飞机机体的几何尺寸较大, 采用经典的全波分析方法将导致巨大的计算代价, 包括需要花费海量的存储空间和难以承受的、过长的计算时间。另一方面, 还存在高响应敏感性的问题。高响应敏感性是指激励条件、边界条件的微小变化所导致的腔内场分布的巨大变化^[1-2]。高响应敏感性会导致: 即便可以承受全波分析的巨大计算代价, 其计算出的电磁场时间和/或空间分布也难以具有足够的置信度, 不可避免的建模误差会导致确定性的计算结果和实际情况相去甚远。有研究者基于统计电磁学理论采用功率平衡(PWB)法进行电大腔电磁耦合分析^[3-5], 该方法能够快速估算开孔腔体的电磁能量耦合情况, 并由此得到其 SE。本文将 PWB 方法应用于某飞机机舱的 SE 分析。

1 PWB 方法原理

PWB 方法基于这样的假设: 电大尺寸开孔腔体的内部电磁场空间分布具有统计均匀性。于是通过腔内场强

均值 \mathbf{E} 来反映场环境特征。当腔内场环境达到稳态，储存的电磁能量密度为 $W = \varepsilon_0 \mathbf{E}^2$ ，其中 ε_0 为自由空间介电常数，则进入腔的电磁功率 P_t 正好等于耗散掉的功率 P_d ，即：

$$P_t = P_d = \sum_i P_{d_i} \quad (1)$$

式中 P_{d_i} ($i=1, 2, \dots$) 是各种机制导致的多个耗散功率，通常包括非理想导体腔壁、腔壁上各种孔缝泄漏、腔内损耗材料和腔内接收天线等所导致的功率损失。这些耗散功率的大小正比于腔内功率密度水平 $S_c = \mathbf{E}^2 / \eta_0$ ，其中 η_0 为自由空间波阻抗。由此可以定义对应的平均耦合/耗散/吸收截面：

$$\sigma_i = P_{d_i} / S_c \quad (2)$$

由于各种功率损耗机制导致腔体 Q 值降低，可以建立平均耦合截面和 Q 值的关系：

$$Q_i = \frac{2\pi V}{\lambda \sigma_i} \quad (3)$$

式中： Q_i 为腔体仅存在第 i 个耗散功率时的 Q 值； V 为腔体容积； λ 为电磁波波长。

对于不同的功率耗散机制，可以建立不同的平均耦合截面计算公式。例如，

1) 腔壁损耗对应的耦合截面：

$$\sigma_{\text{wall}} = \frac{4\pi S}{\varepsilon \lambda} \sqrt{\frac{\mu_r}{\pi f \mu_0 \sigma}} \quad (4)$$

式中： S 为腔体表面积； μ_r 为腔壁的相对磁导率； σ 为腔壁的电导率； μ_0 为自由空间的磁导率； f 为频率。

2) 圆形孔缝对应的耦合截面：

电大的圆形孔缝对应的耦合截面，即 $f < 1.3c / (2\pi a)$ 时：

$$\sigma_{\text{aperture}} = 16k^4 a^6 / (9\pi) \quad (5)$$

电大的圆形孔缝对应的耦合截面，即 $f \geq 1.3c / (2\pi a)$ 时：

$$\sigma_{\text{aperture}} = \pi a^2 / 2 \quad (6)$$

式中： a 为圆形孔缝半径；自由空间波数和波速分别为 $k = 2\pi / \lambda$ 和 c 。

3) 接收天线对应的耦合截面：

$$\sigma_{\text{antenna}} = (1 - |S_{11}|^2) \lambda^2 / (8\pi) \quad (7)$$

式中 $|S_{11}|$ 为天线在自由空间的反射系数模值。

已有研究证实，虽然 PWB 方法不能像全波分析方法那样给出精确的电磁场时空分布，但其得到的场强均值、SE 等却能在数量级上以及趋势变化上给出和实际测量较为一致的结果。

根据上述原理，本文开发了开孔腔体的 SE 分析程序，并用其分析了文献[3]中一实际开孔腔体(开有一个圆孔，半径分别 3.51 cm 和 2.94 cm)的 SE，所得结果(图 1(a))和文献结果(图 1(b)、含测量数据)完全吻合，证实了本文程序的正确性和有效性。

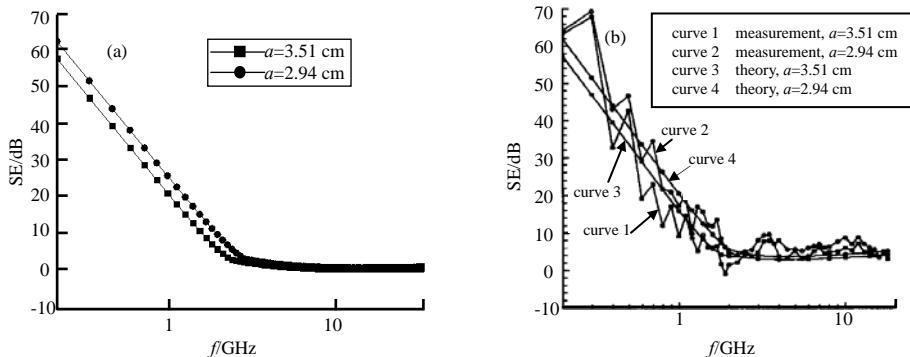


Fig.1 Comparison of PWB analysis program calculation results and the literature results
图 1 本文 PWB 分析程序计算结果和文献结果的比较

2 某飞机机舱 SE 分析

本节将上述分析程序用于某飞机机舱 SE 的分析，该飞机机舱尺寸长×宽×高为 51 m×2.5 m×5.49 m，内部布局见图 2。为考虑载客情况，采用图 3 所示的人体平均耦合截面^[6]。

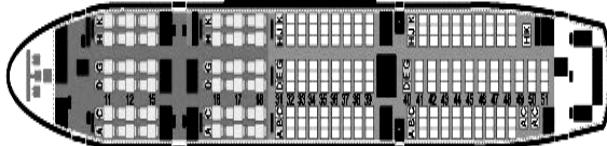


Fig.2 Interior layout of an aircraft cabin
图 2 某飞机机舱内部布局图

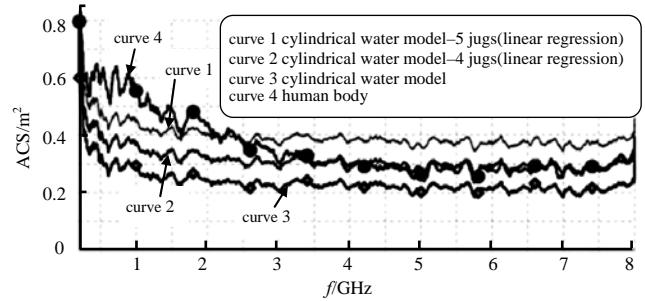


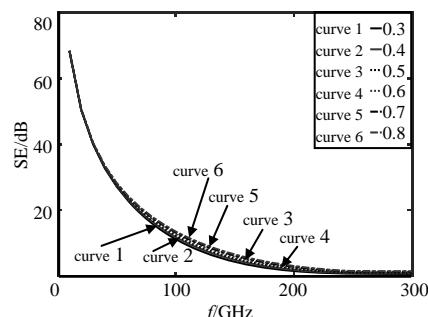
Fig.3 Average coupled section of human body
图 3 人体平均耦合截面

在实际分析时，将该机舱等效为长 50 m、半径为 5 m 的圆柱体，舷窗等效为半径 25 cm 的圆形窗。下面分析在 10~300 MHz 范围内 2 种不同材质条件下的 SE。

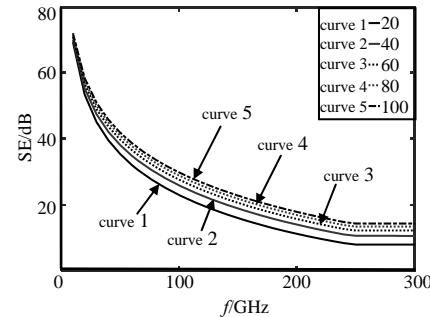
1) 飞机舱壁材质为理想导体

当飞机舱壁由理想导体构成时，其腔壁损耗为零，因此 SE 评估中只需考虑舷窗的孔缝损耗、人体损耗和各种等效天线损耗即可。首先分析了仅考虑孔缝损耗和天线损耗(假设天线匹配)时的 SE。图 4 给出了 SE 随舷窗数量变化。可以看出，SE 随频率增加逐渐下降，当频率高于 200 MHz 时，SE 几乎下降为零。此外，SE 随舷窗的增加而逐渐下降，这与电磁波传播理论相符合。

其次分析了同时考虑孔缝损耗、天线损耗和人体损耗情况下的 SE。根据图 3 数据，1 GHz 以下时人体平均耦合截面主要分布在 0.3~0.8 之间。这里以开有 40 个人体的情况为例，分析 SE 在仅有单个人体以及装载人数变化时的情况，计算结果见图 5。可以看出，人体平均耦合截面越大，腔体的屏蔽效能越高，而这与人体的体重、身高、性别有关。此外，随装载人数的增加 SE 逐渐增大。



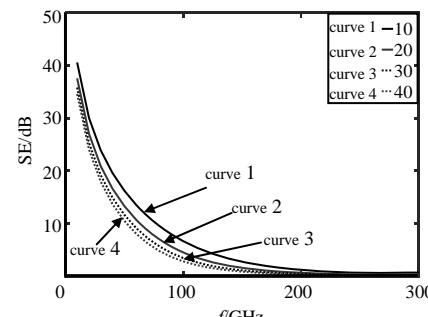
(a) SE changes with the average coupled section of human body



(b) SE changes with the number of people

Fig.5 SE changes with the average coupled section and the number of people

图 5 SE 随人体平均耦合截面以及人数的变化



(a) SE changes with the number of portholes

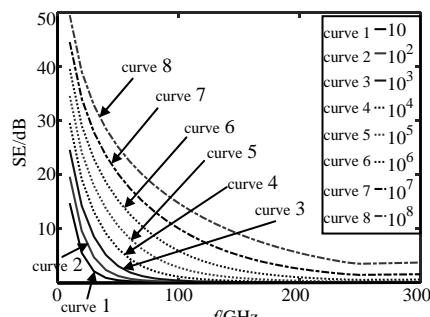


Fig.6 SE changes with the number of portholes and the aircraft cabin conductivity

图 6 SE 随舷窗数量与舱壁电导率的变化

2) 飞机舱壁材质为金属(有限电导率)

通常飞机的蒙皮由强硬度的铝合金组成,这里取电导率为 3.56×10^7 S/m 的铝进行分析。首先计算考虑孔缝损耗和腔壁损耗时的 SE。图 6(a)给出了考虑腔壁损耗时 SE 随舷窗数量的变化,图 6(b)为舷窗数量为 40 时 SE 随腔壁电导率的变化。

当同时考虑孔缝损耗、腔壁损耗和人体损耗时,单人 SE(舷窗数量为 40)随人体平均耦合截面的变化如图 7(a)所示,可以看出不同的人体耦合截面对飞机内的 SE 影响较小,而人的数量对 SE 影响较大,如图 7(b)所示。

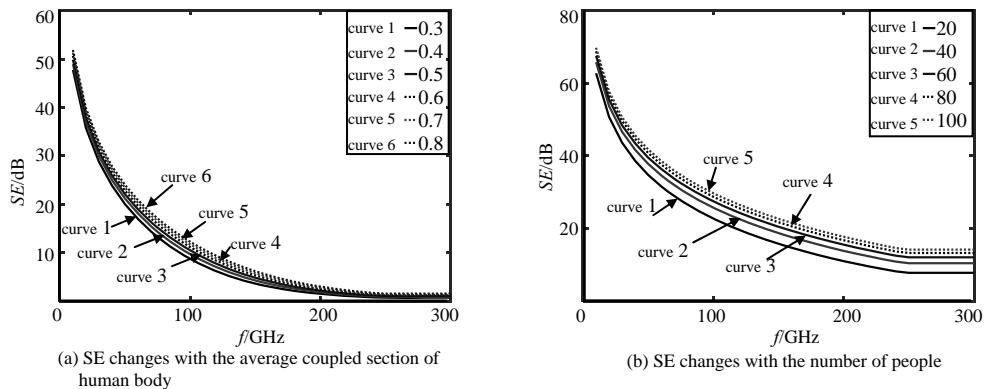


Fig.7 SE changes with the average coupled section and number of people under limited conductivity

图 7 有限电导率条件下 SE 随人体平均耦合截面与人数的变化

3 结论

本文运用 PWB 方法对某飞机机舱进行了 SE 分析,验证了开发的 PWB 分析程序的正确性和有效性。所有分析结果均在不超过 1 s 的时间内得到,展现出 PWB 方法极富吸引力的快速的特点。它虽然是一种估算的方法,但是仍然能为实际 SE 评估提供具有较高参考价值的分析数据。

参考文献:

- [1] HOLLAND R,JOHN R S. Statistical electromagnetics[M]. Philadelphia:Taylor & Francis, 1999.
- [2] 赵远,赵翔,闫丽萍,等. 开孔电大腔高频响应敏感性及其统计分析[J]. 微波学报, 2014(s2):81–84. (ZHAO Yuan, ZHAO Xiang, YAN Liping, et al. High frequency response sensitivity of electrically large enclosure with aperture and its statistical analysis method[J]. Microwave Journal, 2014(s2):81–84.)
- [3] 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.
- [4] BIAOU U,IBEN-JELLAL S,BOCQUET M,et al. Hybrid model for fast EM simulation of wireless interferences in railway system[C]// International Symposium on Electromagnetic Compatibility–EMC Europe. Poland:[s.n.], 2017:1–6.
- [5] 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.
- [6] SENIC D,ŠAROLIĆ A,JÓSKIEWICZ Z M, et al. Absorption cross-section measurements of a human model in a reverberation chamber[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016,58(3):721–728.

作者简介:



郭 琦(1985—),男,陕西省宝鸡市人,硕士,高级工程师,主要研究方向为飞机机体结构电磁防护、飞机结构设计等.email:guoqi896@163.com.