

中等导电性材料覆盖的金属腔体的 电磁屏蔽效能研究*

牛帅[†] 焦重庆 李琳

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

(2013年7月11日收到; 2013年7月31日收到修改稿)

基于传输线和波导理论, 提出了一种用于计算覆盖中等导电性材料的金属腔体电磁屏蔽效能的解析理论模型, 并通过和全波电磁模拟结果比较检验了该模型的有效性. 计算分析了屏蔽体屏蔽效能的位置效应和谐振效应. 建议了一种评价导电材料电磁屏蔽效能的方法, 能很好的削弱谐振效应和位置效应的影响, 直接反映出材料本身的电磁屏蔽效能.

关键词: 电磁屏蔽, 导电材料, 金属腔体, 屏蔽效能

PACS: 41.20.-q, 41.20.Jb, 84.32.-y

DOI: 10.7498/aps.62.214102

1 引言

随着科学技术的进步, 人类社会正迈入信息化时代, 电气电子设备的广泛应用使人类和设备所处的电磁环境日益复杂. 电磁干扰不但会破坏或降低电子设备的工作性能也会对人体造成危害^[1-6]. 怎样减少电气电子设备之间的电磁干扰, 使设备正常工作是一个亟待解决的问题; 同样, 降低恶劣的电磁环境对人体及生态产生的有害影响也是一个不容忽视的问题. 电磁屏蔽是抑制电磁干扰的最基本方法之一, 其常见形式是用屏蔽壳体将敏感设备或干扰源封闭起来, 以阻碍外来电磁干扰的进入或抑制内生电磁干扰的外泄.

目前, 制造屏蔽体的材料主要是铝、钢等金属材料. 金属材料电磁屏蔽的优势是金属本身对电磁波具有很高的屏蔽效能, 因此影响金属屏蔽体屏蔽效能的主要因素是其上存在的各种开孔和接缝, 如通风孔、观察窗等. 目前关于屏蔽体电磁屏蔽效能的研究也主要集中在金属腔体的孔缝电磁泄漏的建模、计算方法和实验研究方面^[7-15].

近年来, 随着材料科学技术的发展, 非金属类的复合型导电材料, 如导电橡胶、导电织物及导电涂料等, 尽管导电性相对较差(电导率从几十到数千 S/m), 但由于具有可调控的力学性能和物理参数, 在特殊场合电磁屏蔽应用方面具有优势. 例如, 封堵屏蔽体接缝的导电橡胶和用于观察窗的导电玻璃.

屏蔽效能计算模型和评价方法是复合材料电磁屏蔽应用中亟待解决的重要学术问题^[16-19]. 本文避开复杂的实际问题, 以一种较为简单的模型——覆盖有中等导电性材料的矩形金属腔体为对象, 探索带复合材料的屏蔽体屏蔽效能的计算方法、变化规律以及材料本身屏蔽效能的评价方法. 为此, 论文建立了一种解析理论模型, 它基于传输线理论和波导理论, 具有易于实施、计算快捷且物理意义清晰的优点. 同时, 论文还给出了全波电磁仿真的结果, 检验了解析理论的有效性. 基于这一解析理论, 计算发现屏蔽体的绝对屏蔽效能受谐振效应和位置效应的影响很大, 但相对屏蔽效能则基本不受谐振效应和位置效应的影响. 根据这一特点, 本文建议了一种基于参考样品比对的新的材料屏

* 国家自然科学基金(批准号: 51307055)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: jr7121062jr@163.com

蔽效能评价方法.

2 理论模型

如图 1 所示, 矩形屏蔽体的宽度、高度、深度分别为 b, a, d . 坐标系原点位于屏蔽体中心, 三个坐标轴分别与屏蔽体的三个边平行. 屏蔽体的左壁 ($x = d/2$) 为复合材料, 其厚度为 t , 电导率为 γ . 其余 5 个面为金属材料, 可以当理想导体处理. 波矢量为 \mathbf{k} 、极化方向为 z 的平面电磁波垂直入射, 通过上述复合材料进入屏蔽体. 设坐标为 $(d/2 - p, b/2, a/2)$ 的点 P 为屏蔽体屏蔽效能观测点, p 为该观测点到左壁的距离.

存在屏蔽材料时, 观测点处电场强度 E_g 可以通过图 2 所示的等效电路模型得到. 其中, 将入射平面波等效成电压源 V_0 和内阻抗 $Z_0 = 377 \Omega$. 将复合材料等效成长度为 t 、特性阻抗和传播常数分别为 Z_{g1} 和 k_{g1} 的传输线 AB, 具体表达式为

$$Z_{g1} = (1 + j) \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\gamma}}, \quad (1)$$

$$k_{g1} = (1 - j) \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \gamma}{2}}. \quad (2)$$

将金属腔体看成一段终端 ($x = -d/2$) 短路的波导, 并将该波导等效成一段特性阻抗和传播常数

分别为 Z_g 和 k_g 的传输线 BC. 其中, Z_g 等于该波导中传输的波导模式的横向波阻抗, k_g 等于波导模式的传播常数. 当入射波的频率低于第二波导模式时, 可以近似假设波导中只存在 TE_{10} 模式. 此时, Z_g 和 k_g 可以分别表示成

$$Z_g = Z_0 / \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}, \quad (3)$$

$$k_g = k_0 / \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}. \quad (4)$$

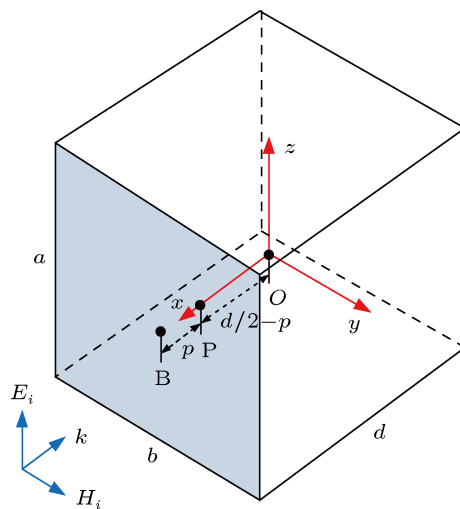


图 1 平面波照射下屏蔽体示意图

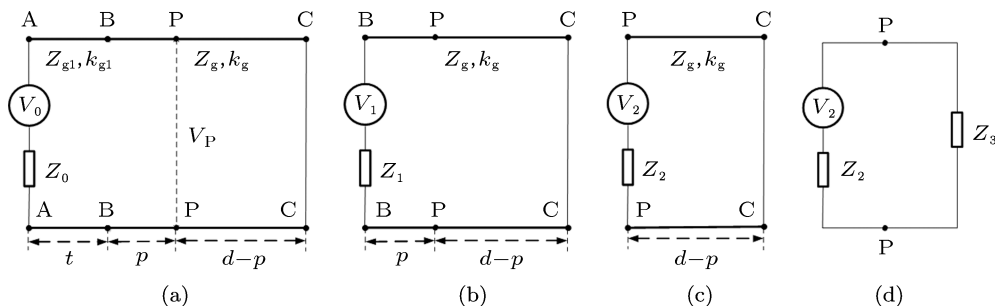


图 2 (a) 等效电路图; (b), (c) 和 (d) 为 (a) 的简化形式

从 B 端口向左看去的戴维南等效电路参数

$$V_1 = \frac{V_0}{\cos k_{g1}t + j(Z_0/Z_{g1}) \sin k_{g1}t}, \quad (5)$$

$$Z_1 = \frac{Z_0 + jZ_{g1} \tan k_{g1}t}{1 + j(Z_0/Z_{g1}) \tan k_{g1}t}. \quad (6)$$

从 P 端口向左看去的戴维南等效电路参数

$$V_2 = \frac{V_1}{\cos k_g p + j(Z_1/Z_g) \sin k_g p}, \quad (7)$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 + jZ_g \tan k_g p}{1 + j(Z_1/Z_g) \tan k_g p}. \quad (8)$$

P 端口向右看去的负载阻抗为

$$Z_3 = jZ_g \tan k_g(d - p). \quad (9)$$

P 点的电压可表示成

$$V_P = V_2 \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3}. \quad (10)$$

当屏蔽体和屏蔽材料都不存时, P 端口向右看去的负载阻抗为 Z_0 . 此时, P 点的电压为

$$V'_P = V_0/2. \quad (11)$$

由于屏蔽后观测点的电场强度 E_s 正比于 V_p , 未屏蔽时的电场强度 E_0 正比于 V'_p , 所以屏蔽体的电场屏蔽效能可表示为

$$SE_1 = 20 \log_{10} \left| \frac{E_0}{E_s} \right| = 20 \log_{10} \left| \frac{V'_p}{V_p} \right| \text{ (dB)}. \quad (12)$$

3 结果与讨论

3.1 屏蔽效能分析

取 $a = b = d = 0.3 \text{ m}$, $t = 1 \text{ mm}$, $\gamma = 100 \text{ S/m}$, 图 3 给出了点 P_1 (100 mm, 0 mm, 0 mm) 和点 P_2 (0 mm, 0 mm, 0 mm) 处的屏蔽效能随频率的变化情况.

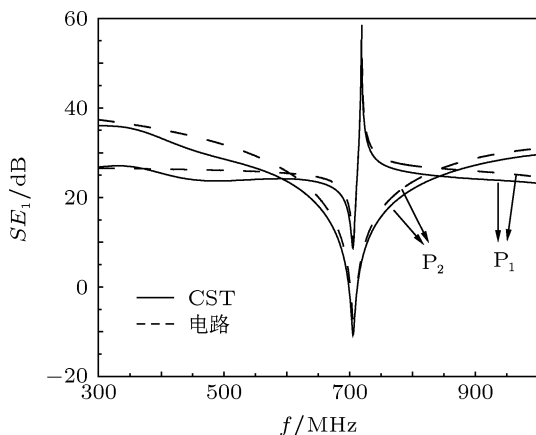


图 3 不同观测点下的 SE_1

由图 3 可知: 1) 解析理论的计算结果与全波电磁模拟软件 CST 的计算结果的一致性很好, 最大误差在 5 dB 以内; 2) 点 P_1 和点 P_2 的屏蔽效能差别很大, 说明屏蔽效能的值会随观测点位置的变化而变化, 即存在所谓的“位置效应”; 3) 在屏蔽体的谐振频率 ($f \approx 707 \text{ MHz}$) 附近的一段较宽的频率范围 (约 600—800 MHz) 内, 屏蔽效能急剧变化, 甚至出现负值, 即存在所谓的“谐振效应”.

图 4 给出了屏蔽效能随观测点 P 到左壁的距离 p 的变化而变化情况.

由图 4 可知, 在不同频率下, 观测点的位置变化均对屏蔽体屏蔽效能的计算结果有很大影响. 由于终端短路, 屏蔽体内沿 x 轴的电压幅值分布可以表示为 $V \propto |\sin k_g(d-p)|$. 当 $f = 0.3 \text{ GHz}$ 时, 由 (4) 式可得 $k_g \approx 8.38 i$ 是一个纯虚数. 利用欧拉公式, $V \propto |e^{8.38(d-p)} - e^{-8.38(d-p)}|/2$, 它是关于 p 的减函数, 因此, 屏蔽效能随着 p 的增大而增大, 即观测点离覆盖面的距离越远则屏蔽效果越好. 当

$f = 0.9 \text{ GHz}$ 时, 可得 $k_g \approx 15.67$, 则 x 轴上的电压波节点位于 $p = d - (\pi/k_g) \approx 100 \text{ mm}$ 处. 因此, 在图 4 中 $p \approx 100 \text{ mm}$ 处屏蔽效能会出现一个极大值点.

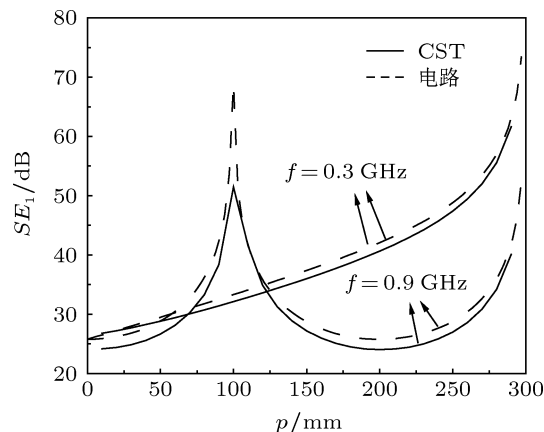


图 4 屏蔽效能随观测点到左壁的距离 p 变化的情况

3.2 相对屏蔽效能

由于屏蔽体的屏蔽效能 SE_1 是由金属腔体和复合材料整体与无屏蔽的情况作对比得到的, 因此它反映的是金属腔体和复合材料整体的屏蔽效能, 而不是材料本身的屏蔽效能. 谐振效应和位置效应均源自腔体封闭而导致的驻波行为. 换一种角度, 如果比较封堵两种不同电导率的材料时的屏蔽效能, 从概念上理解二者屏蔽效能的差值应该受谐振效应和位置效应的影响较小, 这是因为两种情况下的谐振和位置因数在屏蔽效能相减的过程中被抵消了. 因此, 定义材料 a 相对于材料 b 的屏蔽效能为

$$SE_2 = SE_1(a) - SE_1(b). \quad (13)$$

图 5 计算了 γ 分别为 100 S/m, 300 S/m, 500 S/m, 700 S/m 和 900 S/m, 观测点位于腔体中心时, 屏蔽体的屏蔽效能随频率的变化情况.

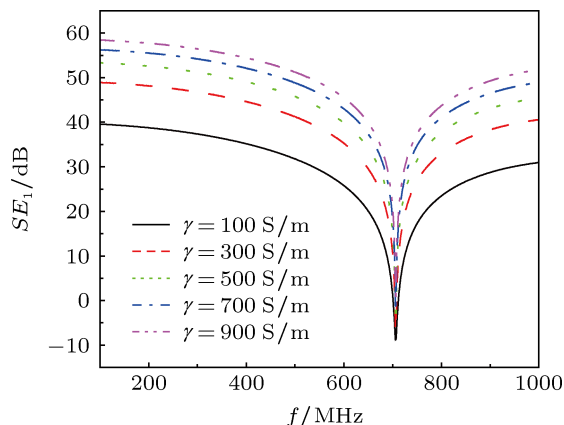


图 5 SE_1 随频率变化情况

将 $\gamma = 100 \text{ S/m}$ 的材料看作参考样品, 封堵其他材料的屏蔽体的屏蔽效能与封堵参考样品材料的屏蔽体的屏蔽效能相减得到的曲线见图 6. 可见, 除在谐振频率附近很小的范围 (约 20 MHz) 外, 各条相对屏蔽效能曲线都是很光滑的曲线, 说明这种评价材料屏蔽效能的方法能很好地削弱屏蔽体谐振的影响.

取入射波频率为 1 GHz, 改变观测点到窗口的距离得到屏蔽体屏蔽效能随 p 变化的情况, 如图 7 所示. 可见, 封堵不同电导率材料的腔体的屏蔽效能曲线随 p 的增加都有较大变化, 并且可以计算得到 $p \approx 127 \text{ mm}$ 处为 x 轴上的电压波节点, 因此在该点出现一个屏蔽效能的极大值点. 同样, 将 $\gamma = 100 \text{ S/m}$ 的材料看作参考样品, 得到 4 种材料的相对屏蔽效能曲线见图 8. 可见, 4 种材料的相对屏蔽效能都是水平的直线, 说明这种评价材料屏蔽效能的方法能很好地消除观测点位置的影响.

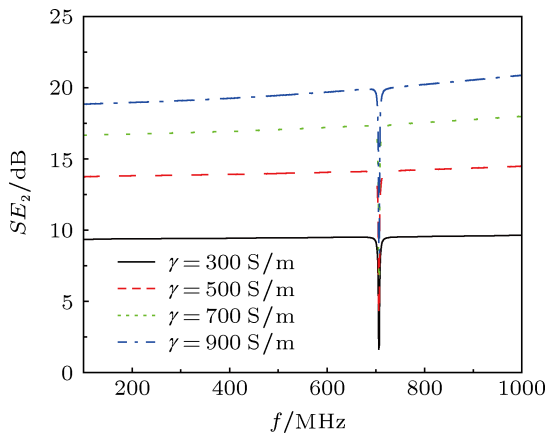


图 6 SE_2 随频率变化的情况

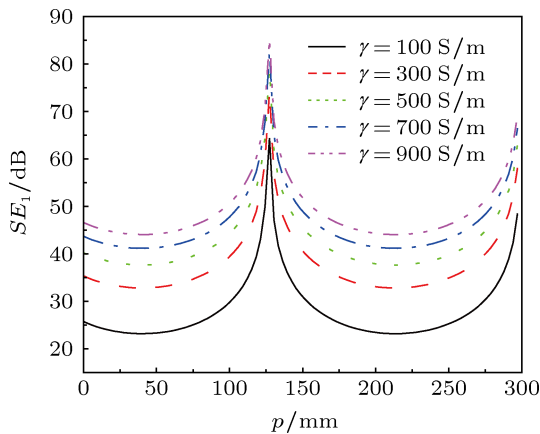


图 7 SE_1 随观测点到左壁的距离 p 变化的情况

3.3 相对屏蔽效能的解释

厚度、电导率、介电常数和磁导率分别为 $t, \gamma,$

ϵ_0 和 μ_0 的无限大平板对角频率为 ω 的平面电磁波的屏蔽效能可表达为^[1]

$$SE = 20 \log_{10} \left| \frac{(Z_0 + Z_{g1})^2}{4Z_0 Z_{g1}} \left[1 - \left(\frac{Z_0 - Z_{g1}}{Z_0 + Z_{g1}} \right)^2 \right] \times e^{-2\frac{t}{\delta}} e^{-j2\frac{t}{\delta}} \right| e^{t/\delta}, \quad (14)$$

其中, $\beta_0 = \omega(\mu_0 \epsilon_0)^{1/2}, \delta = (2/(\omega \mu_0 \gamma))^{1/2}$.

根据 (15) 式, 分别计算获得了 $t = 1 \text{ mm}, \gamma = 900 \text{ S/m}, 300 \text{ S/m}$ 和 100 S/m 的三种材料对平面波的屏蔽效能, 并将 100 S/m 的材料看作参考样品, 将另两种材料的相对屏蔽效能显示在图 9 中. 同时, 图 6 中的曲线也显示在图 9 中. 从图 9 可以看出, 除谐振频点附近很小的范围外, 基于腔体模型的相对屏蔽效能曲线与基于无限大平板模型的相对屏蔽效能曲线符合很好, 说明用屏蔽腔法计算得到的材料的相对屏蔽效能消除了金属腔体的影响, 反映的是材料本身变化引起的屏蔽效能的差异.

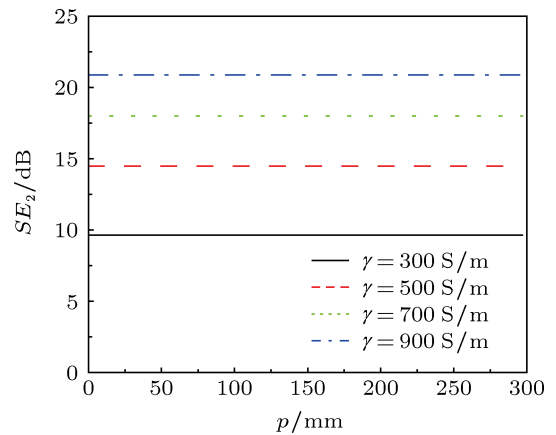


图 8 SE_2 随观测点到左壁的距离 p 变化的情况

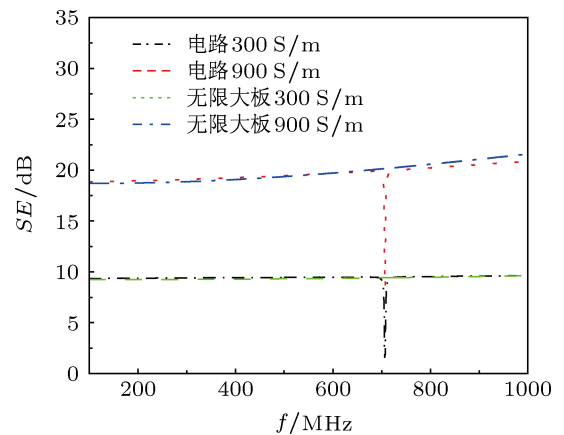


图 9 不同方法计算的 SE_2

这一发现有较好的实际应用意义: 可用于评估未知电导率的待测材料的平面波屏蔽效能或者估计其电导率范围. 具体思路为: 通过 (15) 式计算获

得电导率已知的参考样品的平面波屏蔽效能,再加上屏蔽腔法测试获得的相对屏蔽效能,就可以得出待测材料对平面波的屏蔽效能;通过和一系列不同电导率的参考样品的屏蔽效能曲线的对比,可以评估待测材料的电导率在参考样品电导率序列中所处的区间范围.需要说明的是,之所以不直接测试材料(15)式所描述的平面波屏蔽效能,是因为实际中无法将材料做到“无限大板状”.理论上,采用同轴波导 TEM 模式可以构造与“无限大板-平面波”模型相等效的环境,但频率升高以后同轴波导中会出现 TE 或 TM 模式,破坏这一等效性.

4 结论

论文基于传输线理论建立了一种计算平面波照射下覆盖中等导电性材料的金属腔体的电磁屏蔽效能的等效电路理论模型,该模型实施简单、计

算速度快,与全波电磁模拟软件 CST 的计算结果一致性很好.文中计算分析了封堵不同电导率材料的腔体的屏蔽效能曲线,结果表明屏蔽体的屏蔽效能有较大的谐振效应和位置效应.发现当封堵的材料电导率变化时,屏蔽体屏蔽效能随频率和观测点到左壁的距离变化的曲线总是近似上下平移.提出了材料的相对屏蔽效能的定义,即将材料屏蔽效能定义为测试窗口先后被参考样品和待测样品封堵情况下接收信号的比值.结果表明,相对屏蔽效能基本消除了位置效应和谐振效应的影响,并且与无限大导体板法计算的平面波相对屏蔽效能很接近.这一关系可以用来评估未知电导率的待测材料的电导率范围及其平面波屏蔽效能.然而,本文工作目前只考虑最低阶模式,因此适用频率范围限制在第二波导截止模式以下,在未来的工作中可以通过多模叠加的方式吸收高阶模式的影响以扩大频率范围.

- [1] He J L 2010 *Introduction to Electromagnetic Compatibility* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [何金良 2010 电磁兼容概论 (北京: 科学出版社)]
- [2] Gomory F, Solovyov M, Souc J, Navau C, Prat-Camps J, Sanchez A 2012 *Science* **335** 1466
- [3] Wang J G, Zheng X S, Yang J, Zhao Y, Zhang Q L, Yuan T, Zhou J J, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1968 (in Chinese) [王建国, 郑秀书, 杨静, 赵阳, 张其林, 袁铁, 周筠珺, 冯桂力 2008 物理学报 **57** 1968]
- [4] Zhang S Q, Wu Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 029202 (in Chinese) [张少卿, 吴群 2013 物理学报 **62** 029202]
- [5] Chen J, Wang J G 2007 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **49** 354
- [6] Zhang S Q 2012 *Chin. Phys. B* **21** 065101
- [7] Jiao C Q, Qi L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134104 (in Chinese) [焦重庆, 齐磊 2012 物理学报 **61** 134104]
- [8] Jiao C Q, Niu S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 114102 (in Chinese) [焦重庆, 牛帅 2013 物理学报 **62** 114102]
- [9] Jiao C Q, Zhu H Z 2013 *China. Phys. B* **22** 084101
- [10] Robinson M P, Benson T M, Christopoulos C, Dawson J F, Ganley M D, Marvin A C, Porter S J, Thomas D W P 1998 *IEEE Trans. Electromagn. Compat* **40** 240
- [11] Dehkhoda P, Tavakoli A, Moini R 2008 *IEEE Trans. Electromagn. Compat* **50** 208
- [12] Azaro R, Caorsi S, Donelli M 2001 *Microwave and Optical Tech. Lett.* **28** 289
- [13] Audone B, Balma M 1989 *IEEE Trans. Electromagn. Compat* **31** 102
- [14] Wallyn W, Zutter D D, Rogier H 2002 *IEEE Trans. Electromagn. Compat* **44** 130
- [15] Wang J G, Liu G Z, Zhou J S 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 1093 (in Chinese) [王建国, 刘国治, 周金山 2003 强激光与粒子束 **15** 1093]
- [16] Olyslager F, Laermans E, Zutter D D, Criel S, Smedt R D, Lietaert N, Clercq A D 1999 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **41** 202
- [17] Manara A 1996 *IEEE Trans. Electromagn. Compat* **38** 327
- [18] Wilson P F, Ma M T 1985 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **27** 137
- [19] Konefal T, Dawson J F, Marvin A C, Robinson M P, Porter S J 2006 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **48** 134

Shielding effectiveness of a metal cavity covered by a material with a medium conductivity*

Niu Shuai[†] Jiao Chong-Qing Li Lin

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

(Received 11 July 2013; revised manuscript received 31 July 2013)

Abstract

The electromagnetic shielding effectiveness (SE) of a metal cavity covered by a material of medium conductivity is investigated theoretically by using an equivalent circuit method based on the transmission line and waveguide theory. The validity of the theoretical model is verified by comparison with the electromagnetic simulation software. The position effect and the resonance effect of the SE are calculated. A method for evaluating the SE of materials is suggested. With this method, the influence of the resonance effect and the position effect can be impaired greatly, also the SE of materials against plane wave can be evaluated directly.

Keywords: electromagnetic shielding, conductive material, metal cavity, shielding effectiveness

PACS: 41.20.-q, 41.20.Jb, 84.32.-y

DOI: 10.7498/aps.62.214102

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51307055).

[†] Corresponding author. E-mail: jr7121062jr@163.com