



·高功率微波技术·

建筑物墙壁电磁耦合截面建模及应用*

贺志涵, 洪居亭, 闫丽萍, 赵翔

(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

摘要: 电磁波照射下的建筑物室内电磁环境具有混响效果, 因此可采用功率平衡法(PWB)快速评估室内电磁环境水平。然而目前PWB方法中电大腔壁耦合截面(CCS)的计算模型建立在腔内电磁波不穿透腔壁的条件下, 无法直接用于电磁波可穿透室内建筑物墙壁的耦合截面计算。为此, 提出了一种适用于电磁波穿透有限厚度建筑物墙壁的CCS计算新模型。该模型考虑实际建筑物墙体的厚度和材料电磁特性, 能够充分反映电磁波因有限厚度墙壁多次反射对室内电磁环境水平的影响。将该模型应用于室内电场水平的快速评估, 预测结果与实际测量结果吻合较好, 证明了所提有限厚度建筑物墙壁CCS模型的合理性。

关键词: 功率平衡法; 室内电磁环境; 墙壁材质; 墙壁耦合截面; 品质因数

中图分类号: TN911

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230006

Modeling and application of electromagnetic coupling cross section of building walls

He Zhihan, Hong Juting, Yan Liping, Zhao Xiang

(College of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The electromagnetic waves radiating inside a building can cause reverberation effect, which can be evaluated using power balance method (PWB) to quickly determine the field level of indoor electromagnetic environment. However, the current calculation models of wall coupling cross section (CCS) in PWB method for electrically large enclosure are based on the assumption that electromagnetic waves cannot penetrate through the enclosure walls. As a result, these models are not applicable for calculating the CCS of penetrable indoor building walls. To address this issue, a novel CCS model applicable for building walls with finite thickness is presented. The proposed CCS model considers the thickness and electromagnetic characteristics of building walls and can effectively reflect the effects of electromagnetic wave's multiple reflections inside the walls on the indoor electromagnetic environment. The proposed model has been employed to estimate the indoor electric field level. The predicted results agree with the measurements, which validates the proposed CCS model for building walls with finite thickness.

Key words: power balance method, indoor electromagnetic environment, wall material, wall coupling cross section, quality factor

室内电磁环境水平评估在复杂电磁环境效应分析和无线通信中都有着重要意义。目前常用的室内电磁环境评估方法主要分为两类: 一是使用场强计、接收天线配合频谱分析仪等仪器设备直接测量场水平; 二是依据经验模型(如 COST231 室内模型、ITU-R P.1238 室内模型^[1]等)或电磁场数值方法(如射线追踪法(RT)和时域有限差分法(FDTD)等)进行计算。这些方法对电磁环境评估发挥了重要作用, 但直接测量法影响因素较多且所需成本和工作量巨大; 经验模型则需要根据场景实测数据选取合适的传播模型; 数值建模预测结果依赖对环境建模的准确性, 同时对计算资源要求较高。因此, 迫切需要一种适用于快速评估建筑物室内电磁环境水平的方法, 为主动电磁干扰下重要设施室内电磁场水平评估和室内无线通信站点布局提供参考依据。

* 收稿日期: 2023-01-10; 修订日期: 2023-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(61877041); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U22A2015)

联系方式: 贺志涵, 2063735652@qq.com。

通信作者: 闫丽萍, liping_yan@scu.edu.cn。

实验表明,当发射和接收装置都位于同一房间时,该房间电磁环境可产生混响^[2]。2019年 Yusuf 通过实验获得了某建筑物房间的品质因数和混响时间^[3],进一步验证了这一结论。因此,室内电磁环境可采用统计方法进行分析。David A. Hill 基于统计理论提出了适用于电大有损腔体的功率平衡法(PWB)^[4],该方法不追求腔内电磁场分布的精细计算,而是能够快速有效地评估电磁波耦合到各子系统处的功率密度或系统内部的平均场水平。使用 PWB 方法求解问题的关键在于获取系统内各损耗机制(如孔缝损耗、腔壁损耗、散射物损耗、天线接收损耗等)的耦合或吸收截面。然而现有计算腔壁损耗的耦合截面(CCS)模型建立在电磁波不穿透腔壁的基础上^[5],因此适用于趋肤效应明显的良导体材料构成的电大空间,例如飞机机舱^[6]、混响室^[7]和开孔电大金属腔^[8]等。而将 PWB 方法用于建筑室内环境时,对于电磁波能够穿透建筑物墙壁情况,如混凝土内墙、砖墙、石膏板隔断等厚度和损耗较小的腔壁时,该模型不再适用。例如 2019 年 Lee 等将 PWB 方法应用于大型建筑环境^[9],在计算混凝土墙壁损耗时采用文献 [4] 中基于良导体损耗的计算公式,导致预测结果与商业软件 Wireless Insite 结果之间差异大。

不同建筑物具有不同的材料电磁特性与墙壁厚度,使得电磁波入射到其上的反射和透射特性不同。因此将 PWB 方法用于建筑物时,有必要充分考虑电磁波入射到不同厚度不同材质墙壁上的反射和透射,建立准确的墙壁耦合截面建模方法,从而为室内电磁环境场水平评估提供可靠依据。

为此,本文充分考虑不同建筑材料的电磁特性和墙壁厚度,推导电磁波入射到有限厚度有耗介质的反射和透射取代电磁波入射到无限厚媒质的反射系数,建立了适用于不同建筑材料在常规厚度下的 CCS 计算新模型。将该模型用于居民建筑内电场水平预测,结果与测试结果吻合。本文所提方法为电磁波照射下建筑物内电磁场水平的快速评估提供了有效的解决途径。

1 常见电大腔壁耦合截面建模方法回顾

Hill 提出的 PWB 方法里面为了计算不同损耗机制的耗散功率,明确定义了电磁波照射下耗散物的平均吸收截面(ACS)或耦合截面(CCS) $\langle\sigma\rangle$ 为耗散功率与腔内功率密度之比。根据该定义,腔壁耦合截面可根据下列方法进行计算^[4]

$$\langle\sigma_w\rangle = \frac{3V}{2\mu_r\delta S} = \frac{3V}{2S} \sqrt{\frac{\pi f \mu_0 \sigma}{\mu_r}} \quad (1)$$

式中: V 为电大腔的体积; S 为其表面积; μ_0 为自由空间磁导率; δ 为腔壁的趋肤深度; μ_r 为腔壁的相对磁导率; σ 为腔壁的电导率; f 为电磁波工作频率。或者^[5]

$$\langle\sigma_w\rangle = \frac{1}{2} S \langle(1 - |\Gamma|^2) \cos\theta\rangle \quad (2)$$

式中: Γ 为电磁波入射到腔壁的反射系数; $\langle\rangle$ 表示对入射到腔壁所有可能电磁波入射角度和极化的统计平均,即

$$\langle f(\theta, \varphi) \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi f(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta \quad (3)$$

这两种计算模型中,式(1)的前提条件是腔壁为良导体,式(2)仅考虑了电磁波入射到无限厚媒质的情况。对于建筑房屋构成的电大空间,墙壁为有限厚度,电磁波从自由空间入射到墙壁时,其反射系数不只包含电磁波在分界面上的反射,还应该包含电磁波在墙壁内部的多次反射。而电磁波穿透墙壁进入隔壁房间的能量,对于建筑物整体电磁环境评估也起着重要作用,因此其透射耦合截面的建模计算也具有重要意义。此外,建筑物材料的介质损耗随频率发生变化,尤其在高频时损耗增加,从而对反射系数和透射系数产生影响,这也应在墙壁的耦合截面建模与计算中进行考虑。为此,下文首先给出了电磁波对有限厚度墙壁的反射系数和透射系数计算,并简要总结了建筑常用材料的电磁特性模型。

2 电磁波入射到有限厚度建筑物墙壁的反射和透射

2.1 计算模型

图 1 为电磁波入射到有限厚度建筑物墙壁的示意图,墙壁的厚度为 d (单位: m),其中 $\theta_i = \theta_0$ 和 $\theta_t = \theta_1$ 分别为入射角和折射角,为了描述方便,后文中“ \perp ”和“ \parallel ”分别表示垂直极化波和平行极化波。

根据电磁波斜入射到分层媒质理论^[10-11],推导获得垂直极化和

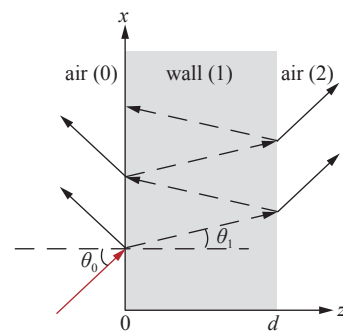


Fig. 1 Simplified model of EM wave incident wall

图 1 电磁波入射墙壁简化模型

平行极化波斜入射到建筑物墙壁的总反射系数和总透射系数为

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\frac{1}{2Y_1} \left[\frac{e^{\psi_1}}{2} (1 - Y_1^2) - \frac{e^{-\psi_1}}{2} (1 - Y_1^2) \right]}{\frac{1}{2Y_1} \left[\frac{e^{\psi_1}}{2} (1 + Y_1)^2 - \frac{e^{-\psi_1}}{2} (1 - Y_1)^2 \right]} \quad (4a)$$

$$T_{\perp} = \frac{1}{\frac{1}{2Y_1} \left[\frac{e^{\psi_1}}{2} (1 + Y_1)^2 - \frac{e^{-\psi_1}}{2} (1 - Y_1)^2 \right]} \quad (4b)$$

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{\frac{1}{2Z_1} \left[\frac{e^{\psi_1}}{2} (1 - Z_1^2) - \frac{e^{-\psi_1}}{2} (1 - Z_1^2) \right]}{\frac{1}{2Z_1} \left[\frac{e^{\psi_1}}{2} (1 + Z_1)^2 - \frac{e^{-\psi_1}}{2} (1 - Z_1)^2 \right]} \quad (4c)$$

$$T_{\parallel} = \frac{1}{\frac{1}{2Z_1} \left[\frac{e^{\psi_1}}{2} (1 + Z_1)^2 - \frac{e^{-\psi_1}}{2} (1 - Z_1)^2 \right]} \quad (4d)$$

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{\eta_1 \cos \theta_1}{\eta_0 \cos \theta_0}, & Y_1 = \frac{\eta_0 \cos \theta_1}{\eta_1 \cos \theta_0} \\ \psi_1 = d\gamma_1 \cos \theta_1, & \gamma_1 = \pm \sqrt{j\omega\mu_0\epsilon_1} \\ \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}, & \eta_1 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_1}} \end{cases} \quad (5)$$

式中： ϵ_1 是墙壁的复介电常数； ϵ_0 为自由空间的介电常数。

建筑物材料的复介电特性随频率的变化可采用 Cole-Cole 模型^[12] 进行描述，即

$$\epsilon_1(\omega) = \epsilon_0 \left[\epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^{(1-\alpha)}} + \frac{\sigma_s}{j\omega\epsilon_0} \right] \quad (6)$$

式中： ϵ_s 和 ϵ_{∞} 分别为静态和高温相对介电常数； σ_s 为静态电导率； τ 为弛豫时间； α 为常数。表 1 给出的 20 种常见建筑材料的相应参数取值见文献 [13]。为了描述方便，本文对这些材料进行编号，并给出部分常用材料在建筑物中的常规厚度 d ^[14-16]，如表 1 所示。

表 1 材料序列号

Table 1 Material serial number

No.	material	d/mm	No.	material	d/mm
1	plexiglass	6, 10, 12	2	PP	—
3	teflon	—	4	polystyrene	—
5	pine wood	—	6	hardboard	—
7	5-ply plywood	—	8	MDF	2–30
9	MDF with gray veneer	2–30	10	MDF with brown veneer	2–30
11	chipboard	—	12	chipboard with veneer	—
13	glass	6, 10, 12	14	wood-cement board	—
15	gypsum plaster	—	16	plasterboard	6, 8, 9, 12, 14, 16, 18
17	red brick	120, 240, 370, 490	18	yellow brick	120, 240, 370, 490
19	concrete with small gravel	75, 100, 150; 160, 180, 200	20	concrete with large gravel	75, 100, 150; 160, 180, 200

2.2 电磁波入射到建筑墙壁时的反射和透射

为了验证上述反射和透射系数推导的正确性，本文首先利用公式(4)~(6)和全波分析软件(图中用 software 表述)分别计算了电磁波垂直入射到混凝土墙壁的透射系数，这里混凝土的电磁特性分别取 No.19、No.20 以及文献 [17] 中的混凝土材料数据($\epsilon_r=6.5$, $\tan\delta=0.05$)，并将计算结果与该文献的计算结果进行了对比，如图 2 所示。

从图 2(a)可知，混凝土墙壁厚度越厚，频率越高，对电磁波损耗也就越大。而对于相同厚度(如 $d=200\text{ mm}$)的

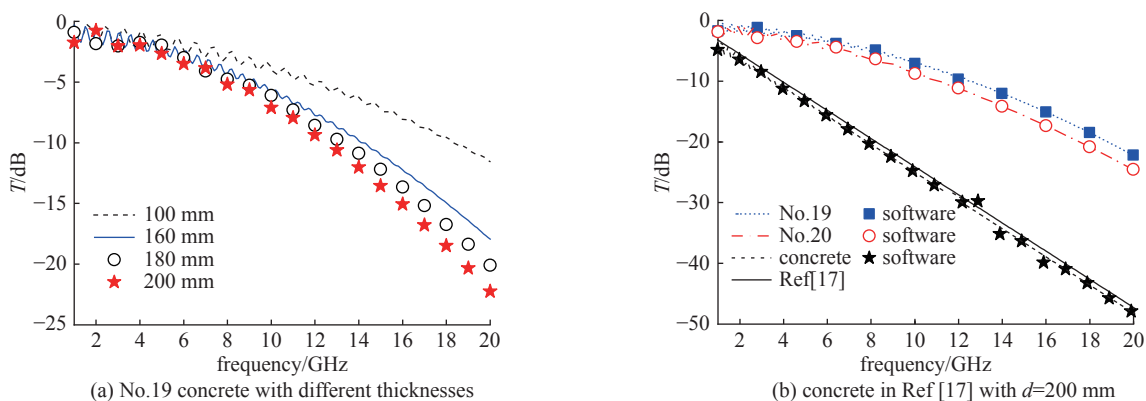


Fig. 2 Normal incident transmission coefficient of electromagnetic wave impinging upon concrete

图 2 电磁波垂直入射到有限厚度混凝土的透射系数

混凝土墙壁(见图 2(b)), 基于本文公式的计算结果与软件计算结果完全吻合, 表明推导所得反射与透射系数公式的正确性。同时, 采用文献 [17] 的混凝土电磁特性数据, 本文公式计算结果与 software 软件结果吻合良好, 而文献结果透射系数略高。这是因为文献主要考虑了介质分界面的反射损耗以及介质内的损耗, 忽略了介质内来回反射和透射的影响, 且没有考虑混凝土电磁参数随频率的变化。

本文还计算了当频率为 $f=2.4$ GHz, 5.5 GHz, 27 GHz 和 39 GHz 时, 电磁波以不同角度斜入射到厚度为 $d=150$ mm 的混凝土(No.19)墙体的透射和反射系数, 如图 3(a) 和图 3(b) 所示。图中 TV 和 RV、TH 和 RH 分别是垂直极化和平行极化情况下的透射、反射系数。

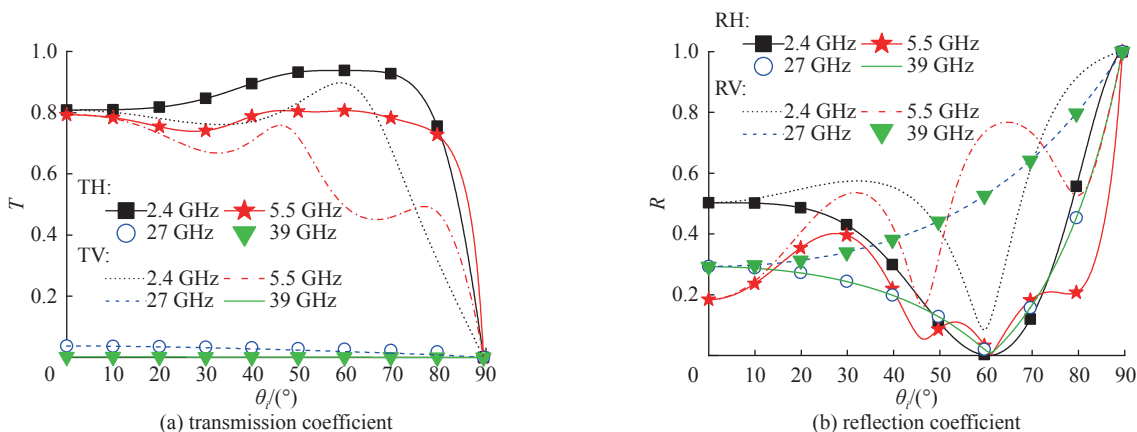


Fig. 3 Transmission and reflection coefficients of electromagnetic wave impinging upon concrete (No.19) with thickness of $d=150$ mm

图 3 电磁波斜入射到厚度为 $d=150$ mm 混凝土(No.19)墙壁时的透射和反射系数

从图 3 可知, 由于高频时损耗显著增加, 27 GHz 和 39 GHz 的反射系数基本重合, 并接近电磁波照射到无限厚混凝土墙壁时的反射系数。但低频时电磁波照射到常规厚度混凝土墙壁的反射系数和透射系数差异明显, 且随极化方式而不同。为了进一步说明这一点, 图 4 给出了不同频率电磁波垂直入射到厚度为 $d=150$ mm 时反射系数和透射系数的变化。

由图 4 可知, 低频时考虑与不考虑墙壁内部的多次反射和透射的结果差异明显; 但随着频率的升高, 电磁波在墙壁内损耗迅速增加, 二者趋于一致。这是由于不考虑墙壁厚度(即墙壁等效为无限厚)时, 反射只考虑空气和墙壁前分界面上的一次反射, 且不随频率变化。而本文模型考虑了墙壁厚度和电磁特性随频率的变化, 即电磁波在有限厚度墙壁内的多次反射和透射。由于墙壁厚度导致的相位差随频率不同,

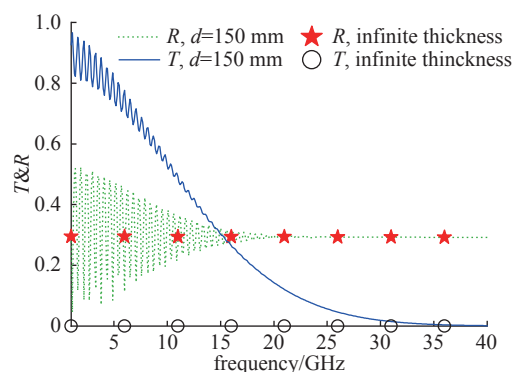


Fig. 4 Normal incident reflection coefficient and transmission coefficient with respect to frequency ($d=150$ mm)

图 4 垂直入射时反射系数和透射系数随频率的变化 ($d=150$ mm)

图 4 中可明显观察到反射和透射系数在低频时随频率振荡明显。

由此可见,建筑物墙壁厚度和材料的电磁特性对电磁波的传播特性有明显影响,因此在分析墙壁损耗时,应考虑墙壁厚度和材料电磁特性的反射和透射系数计算模型。

3 有限厚度建筑物墙壁耦合截面建模及室内电磁环境评估

3.1 耦合截面建模与分析

在 Hill 的 CCS 计算模型基础上,本文考虑墙壁材料的电磁特性以及墙壁厚度,将 CCS 修正为频率和墙壁厚度的函数。首先,定义归一化 CCS 如下

$$\langle \sigma_w \rangle = S \langle \sigma_w \rangle_N \quad (7)$$

式中: $\langle \sigma_w \rangle_N$ 为归一化耦合截面。为了区分墙壁自身损耗和透射损耗,修正表征建筑物墙壁自身损耗的归一化耦合截面(WCCS)为

$$\langle \sigma_{w_self}(f, d) \rangle_N = \frac{1}{2} \left\langle \left[1 - |T(f, d)|^2 - |R(f, d)|^2 \right] \cos \theta \right\rangle \quad (8)$$

注意此时式中的反射和透射系数包括电磁波以不同角度斜入射有限厚墙壁的所有垂直极化波和平行极化波产生的反射和透射(见(4)式)即

$$\langle \sigma_{w_self}(f, d) \rangle_N = \frac{1}{2} \left\langle \left[1 - \frac{1}{2} (|T_{\perp}|^2 + |T_{\parallel}|^2) - \frac{1}{2} (|R_{\perp}|^2 + |R_{\parallel}|^2) \right] \cos \theta \right\rangle \quad (9)$$

同时为了计算透射到邻近房间的传输功率,定义墙壁的归一化透射耦合截面(TCCS)为

$$\langle \sigma_{w_trans}(f, d) \rangle_N = \frac{1}{2} \left\langle \frac{1}{2} (|T_{\perp}|^2 + |T_{\parallel}|^2) \cos \theta \right\rangle \quad (10)$$

将文献[5]中 Hill 方法与本文所提方法用于墙壁损耗的归一化 CCS($\langle \sigma_w \rangle_N$) 计算。计算中电磁波频率为 $f=5.5$ GHz, 墙壁厚度为 $d=200$ mm, 介电常数为 $\epsilon_r=4.3$, 结果对比如图 5 所示。可以看出,当墙壁的电导率较小时,由于 Hill 模型未能区别电磁波穿透墙壁的损耗,使得两种计算方法获得的 CCS 相差甚远。但随着电导率的增大,电磁波在墙壁中损耗较大,无法穿透墙壁,两种计算方法趋于一致。这不仅证明了本文所提模型的合理性,同时也说明所提模型突破了原有模型用于有限墙体厚度建筑物的局限性。

这里还给出了常见建筑材料在常规厚度时的归一化 WCCS 和 TCCS,并与文献结果进行对比,如表 2 所示。

3.2 基于 Q 值的 CCS 分析

电大腔的品质因数 Q 与表征腔内各种耗散机制的 Q_i 关系为^[4]

$$Q^{-1} = \sum Q_i^{-1} \quad (11)$$

表 2 常见建筑材料归一化耦合截面计算

Table 2 Normalized CCS calculation for common building materials

material	d/mm	WCCS/m ²	TCCS/m ²	WCCS/m ²	TCCS/m ²	WCCS/m ²	TCCS/m ²	Ref [5] CCS/m ²
		2.4 GHz		5.5 GHz		27 GHz		
plexiglass	6~12	0.001~0.002	0.214~0.185	0.002~0.004	0.181~0.211	0.012~0.021	0.215~0.187	0.223
glass	6~12	0.001~0.001	0.150~0.120	0.002~0.009	0.122~0.178	0.062~0.084	0.138~0.088	0.194
plasterboard	6~18	0.009~0.016	0.210~0.169	0.013~0.041	0.177~0.179	0.054~0.117	0.176~0.105	0.224
red brick	120~490	0.007~0.025	0.196~0.178	0.026~0.084	0.183~0.128	0.201~0.219	0.018~0.000	0.219
concrete with small gravel	75~200	0.013~0.039	0.163~0.170	0.047~0.099	0.158~0.111	0.209~0.215	0.006~0.000	0.215
concrete with large gravel	75~200	0.016~0.048	0.144~0.145	0.057~0.117	0.142~0.089	0.205~0.210	0.005~0.000	0.210

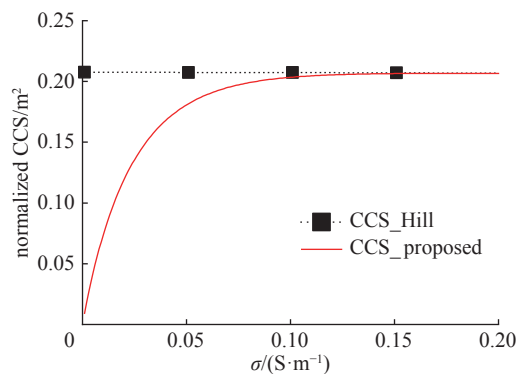


Fig. 5 Normalized CCS with respect to electrical conductivity

图 5 归一化 CCS 随电导率的变化

当建筑物内仅有墙壁损耗时,可得建筑物房间品质因数 Q 与墙壁自身损耗耦合截面 (WCCS) 和透射出墙壁的损耗耦合截面 (TCCS) 的关系为

$$Q = \frac{2\pi V}{\lambda S (\langle \sigma_{w_self}(f, d) \rangle_N + \langle \sigma_{w_trans}(f, d) \rangle_N)} = \frac{2\pi V}{\lambda \langle \sigma_w \rangle} \quad (12)$$

式中: S 为房间表面积; V 为体积。因此,通过房间品质因数也可以获得墙壁的耦合截面。

文献 [3] 通过实验测量了 $9.1 \text{ m} \times 4.8 \text{ m} \times 4.1 \text{ m}$ 房间的品质因数,指出了品质因数与房间体积和面积有关,并拟合获得该房间品质因数 $Q(f) = -0.86f^2 + 109.25f + 29.49$, 式中频率单位为 GHz。这里采用该品质因数 Q 的实测值和拟合式结合式 (12) 得到房间的耦合截面 (标记为 Ref[3]), 与本文所提方法计算结果和 Hill 模型计算结果进行了对比,如图 6 所示。可以看出, Hill 模型不随频率变化,而本文所提模型与文献 [3] 计算结果都呈现出随频率变化的特点,且所提模型结果与文献结果总体变化趋势较吻合。随着频率的升高,三种方法计算结果基本趋于一致,这从侧面表明了本文所提耦合截面模型的合理性。

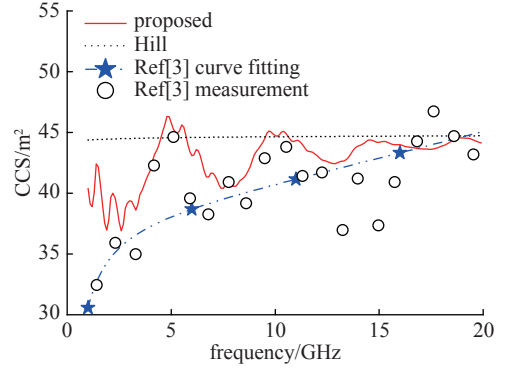


Fig. 6 Literature [3] versus theoretical CCS

图 6 文献 [3] 与理论 CCS 对比

3.3 基于实验测量的墙壁 CCS 计算以及所提方法的实验验证

为了进一步验证本文所提的 CCS 建模方法,在 $4.28 \text{ m} \times 3.14 \text{ m} \times 2.782 \text{ m}$ 的清水房 (指未装修的空房间) 内搭建了实验测量系统,如图 7(a) 所示。实验中测量频段为 $1 \sim 6 \text{ GHz}$, 步长为 100 MHz 。为了仅考虑墙体损耗,实验测试期间使用电磁屏蔽布覆盖所有门窗。同时室内放置采用步进电机自动控制转速的模式搅拌器^[18],以通过在不同角度下同一位置的测量模拟在房间中多个位置的测量。实验中使用一对宽带喇叭天线进行发射和接收。测量中,接收天线和 Nadar EP603 场强计同时放置在室内的三个典型位置 (角区、房间中央和靠墙区),分别测量搅拌器不同位置时发射和接收天线不同极化方式时以及不同朝向时的传输系数 $|S_{21}|$ 和电场值。

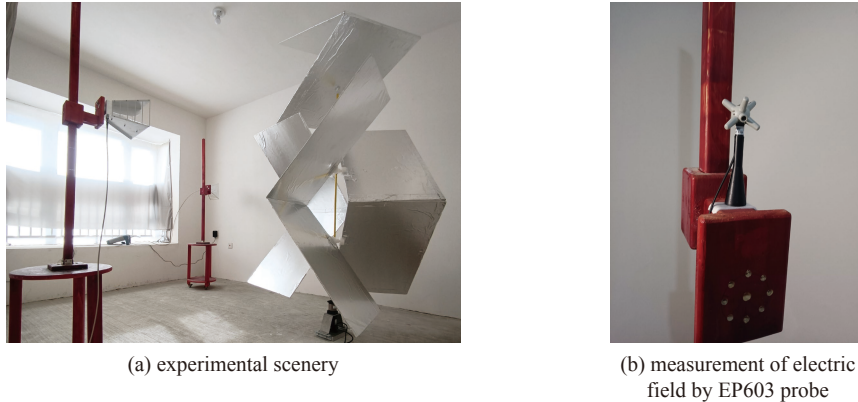


Fig. 7 Experimental system

图 7 实验测量场景与电场探头

根据耦合截面和房间总 Q 值^[4] 的关系,室内总耦合截面可表示为

$$\langle \sigma_{tot}(f, d) \rangle = \frac{2\pi V}{\lambda Q_{tot}} = \frac{2\pi V}{\lambda \left(\frac{16\pi^2 V P_r}{\lambda^3 P_t} \right)} = \frac{\lambda^2 P_t}{8\pi P_r} \quad (13)$$

式中: P_r 和 P_t 分别为天线的收发功率; λ 为电磁波波长。

本文实验中房间内的损耗包含天线损耗和墙壁损耗,则室内总的品质因数可表示为

$$Q_{tot}^{-1} = Q_w^{-1} + Q_{ant}^{-1} \quad (14)$$

接收天线的耦合截面为 $\sigma_{ant} = \lambda^2 / 8\pi$ ^[4], 由此可得墙壁的总耦合截面为

$$\langle \sigma_w(f, d) \rangle = \frac{\lambda^2}{8\pi} \left(\frac{1}{|S_{21}|^2} - 1 \right) \quad (15)$$

式中： $|S_{21}|$ 为房间中收发天线之间的传输系数。由于天线接收功率较小，则实际测量获得的墙壁耦合截面可近似为

$$\langle \sigma_w(f, d) \rangle = \frac{\lambda^2}{8\pi} \frac{1}{\text{ME}[|S_{21}|^2]} \quad (16)$$

式中： $\text{ME}[\cdot]$ 表示数学期望。在此基础上，根据功率平衡条件，可得房间内的平均电场为

$$E = \sqrt{\frac{\eta_0 P_d}{\langle \sigma_{\text{tot}}(f, d) \rangle}} \approx \sqrt{\frac{\eta_0 P_t}{\langle \sigma_w(f, d) \rangle}} \quad (17)$$

式中： P_d 为该系统的总耗散功率，从而实现房间内电磁环境水平的快速评估。

图8给出了实验测量结果与本文所提模型和 Hill 模型计算墙壁总损耗的 CCS，以及根据该 CCS 获得的室内电场均值。由图8(a)可知，实验测量结果获得的 CCS 随频率变化呈现波动性，且和本文所提模型计算结果随频率变化趋势基本一致，而 Hill 模型的计算结果随频率不发生变化。实际测量 CCS 偏大，可能的原因包括：1) 尽管门窗覆盖了电磁屏蔽布，但仍有部分电磁波通过门窗产生损耗，而这部分损耗在测量结果的处理中被计入墙壁损耗；2) 测量所用房间墙壁、地板和天花板的厚度和电磁特性与计算模型结果之间存在一定的差异；3) 测量中接收天线的朝向仅改变了四次，而理论模型中考虑了入射到墙壁的半个球面上所有可能的电磁波入射方向，因此造成实测结果获得的 CCS 和计算 CCS 之间的差异。

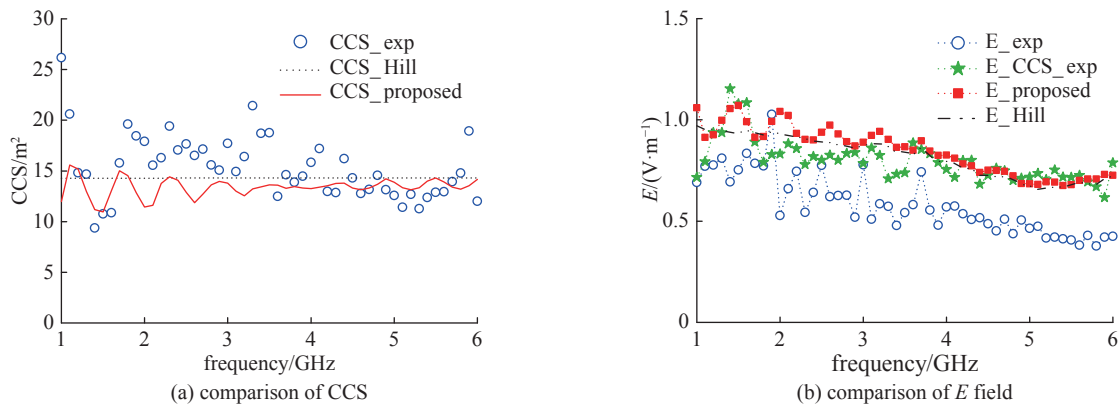


Fig. 8 Measured and theoretical results comparison

图8 实测和理论对比

基于 CCS 结果，计算了该房间内的平均电场值，并与场强计测量结果进行了对比，如图8(b)所示。从图中可知，根据测量结果获得的 CCS 和本文所提 CCS 模型计算的电场均值在低频时随频率呈现出波动性，并且电场探头的测量结果也在低频时随频率变化呈现出波动性，这体现了墙壁厚度对电磁波反射进而对室内电磁环境的影响，而基于 Hill 模型的计算结果未呈现出波动性。并且，本文所提 CCS 模型的估算结果与实际场强计测量结果的数量级一致，且数值差别不大，也充分表明了本文所提模型的合理性。值得一提的是，本文测量系统借助于 LabVIEW 软件实现自动测试，在 1~6 GHz 范围内所有搅拌器角度位置(72 个位置)的测量时间仍需近 2 h。而采用本文的计算模型，即使是数千个频点的计算也只需几十 s，这为主动电磁干扰情况下关键建筑的电磁环境效应快速评估提供了有效解决方案，且该方法借助于电磁拓扑网络可用于整栋建筑中多个房间电磁环境的快速评估^[19-20]。

4 结论

本文推导了有限厚度损耗媒质斜入射情况下的反射和透射计算公式，并基于此修正了基于功率平衡法(PWB)快速评估建筑物室内电磁环境所必需的墙壁耦合截面(CCS)的建模方法。通过与文献结果对比，证明了本文所提 CCS 模型适用于有限厚度的建筑物墙壁。在清水房内搭建实验测试系统，测量获得的墙壁 CCS 与本文所提模型计算结果相吻合。将所提墙壁 CCS 的计算模型用于房间内电场均值评估，估算结果与实验测试结果数量级吻合，且随频率波动变化呈现一致性，验证了本文所提模型的合理性和有效性。本文所提模型不仅考虑了墙壁的自身损耗，还考虑了墙壁的透射损耗，尤其适用于主动电磁干扰下建筑物中各关键房间中电磁环境水平的快速评估。

参考文献:

- [1] Obeidat H, Alabdullah A, Elkhazmi E, et al. Indoor environment propagation review[J]. *Computer Science Review*, 2020, 37: 100272.
- [2] Steinböck G, Pedersen T, Fleury B H, et al. Experimental validation of the reverberation effect in room electromagnetics[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(5): 2041-2053.
- [3] Yusuf M, Tanghe E, Martinez-Ingles M T, et al. Frequency-dependence characterization of electromagnetic reverberation in indoor scenarios based on 1- 40 GHz channel measurements[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(10): 2175-2179.
- [4] 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.
- [5] Hill D A. A reflection coefficient derivation for the Q of a reverberation chamber[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1996, 38(4): 591-592.
- [6] Junqua I, Parmantier J P, Ridet M. Modeling of high frequency coupling inside oversized structures by asymptotic and PWB methods[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. 2011: 68-71.
- [7] 贾锐, 耿利飞, 王川川, 等. 混响室内加载物损耗特性试验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 113003. (Jia Rui, Geng Lifei, Wang Chuanchuan, et al. Research on the characteristics of lossy objects in a reverberation chamber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 113003)
- [8] 欧阳婷, 刘强, 赵翔. 有球形损耗物的矩形开孔电大腔的PWB分析[J]. *无线电工程*, 2017, 47(8): 71-74. (Ouyang Ting, Liu Qiang, Zhao Xiang. Application of PWB method in the analysis of EM-field environment in an electrically large cavity with rectangular aperture when a spherical loss material inside[J]. *Radio Engineering*, 2017, 47(8): 71-74)
- [9] Lee H H, Lee J W. Analysis of electromagnetic effect inside large-scaled building by external electromagnetic wave using PWB method[C]//Proceedings of 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). 2018: 1-2.
- [10] Balanis C A. *Advanced engineering electromagnetics*[M]. New York: Wiley, 1989.
- [11] 德马雷斯特. *工程电磁学*[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (Demarest K R. *Engineering electromagnetics*[M]. Beijing: Science Press, 2003)
- [12] Jensen P D, Meaney P M, Epstein N R, et al. Cole-Cole parameter characterization of urea and potassium for improving dialysis treatment assessment[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11: 1598-1601.
- [13] Zhekov S S, Franek O, Pedersen G F. Dielectric properties of common building materials for ultrawideband propagation studies [measurements corner][J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2020, 62(1): 72-81.
- [14] 杨柳, 朱新荣, 刘大龙, 等. *建筑物理*[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2014. (Yang Liu, Zhu Xinrong, Liu Dadong, et al. *Architectural physics*[M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2014)
- [15] 杨春宇, 唐鸣放, 谢辉. *建筑物理(图解版)*[M]. 2版. 北京: 中国建材工业出版社, 2021. (Yang Chunyu, Tang Mingfang, Xie Hui, et al. *Building physics (graphic edition)*[M]. 2nd ed. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2021)
- [16] 王成平, 王远东. *建筑材料与检测*[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2021. (Wang Chengping, Wang Yuandong. *Building materials and testing*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2021)
- [17] 郭山红, 孙锦涛, 谢仁宏, 等. 电磁波穿透墙体的衰减特性[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(1): 113-117. (Guo Shanrong, Sun Jintao, Xie Renhong, et al. Attenuation characteristics of electromagnetic wave penetrating walls[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(1): 113-117)
- [18] 赵翔, 茹梦圆, 闫丽萍, 等. 电磁混响室搅拌方式研究综述[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 063001. (Zhao Xiang, Ru Mengyuan, Yan Liping, et al. A review of research on stirring methods of electromagnetic reverberation chamber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 063001)
- [19] 胡明浪, 周世华, 闫丽萍, 等. 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[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 053002. (Hu Minglang, Zhou Shihua, Yan Liping, et al. Development and validation of electromagnetic coupling solver for electrically large-sized cavity structure based on power balance method[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 053002)
- [20] 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.