

一种评估多孔阵复杂腔体屏蔽效能的解析模型

陈克俭¹ 马雪峰¹ 马小鸿¹ 马天龙¹ 刘政强²

(1. 国网甘肃省电力公司超高压公司 兰州 730070; 2. 国网庆阳供电公司 甘肃庆阳 745000;)

摘要: 金属腔体能够有效屏蔽电磁波对电子设备的干扰, 为准确评估开孔腔体的屏蔽效能, 本文针对具有孔阵的多腔体混联结构, 建立了一种基于电磁拓扑理论计算屏蔽效能的解析方法。首先根据模型的几何结构, 结合电路理论得出了模型的等效电路图, 通过引入位置偏移系数将孔阵导纳扩展到非中心位置; 其次, 由等效电路图及电磁波的能量流动情况, 构建了模型的信号流图; 最后, 基于电磁拓扑理论的 BLT 方程推导出了屏蔽效能的解析表达式。通过对比电磁仿真软件 CST 的计算结果验证了本文所建立解析模型的可行性, 该模型可有效评估多孔阵腔体混联情况的屏蔽效能, 能够为相关研究人员及屏蔽腔体设计人员就类似结构的腔体探究和设计提供可靠的理论指导。

关键词: 电磁干扰; 开孔腔体; 电磁拓扑理论; BLT 方程; 屏蔽效能

中图分类号: TM15 文献标志码: A

引言

随着我国电网向智能化数字化的发展, 各在线监测设备中集成了大量的敏感电子元件, 这就导致各元件面临的电磁干扰问题复杂多样。为使这些元器件达到电磁兼容的状态, 加装金属屏蔽腔体不但能起到保护敏感电子元件, 而且能有效阻断电磁波的传播通道, 防止内部设备受到电磁干扰。然而, 屏蔽腔体在设计过程中不得不考虑内部电子设备散热的需求, 通常不可避免的会存在孔缝, 这就破坏了金属腔体的完整性和连续性, 导致其屏蔽性能被减低。因此, 近年来研究开孔腔体的屏蔽效能也是备受大量学者青睐。

判断金属腔体对电磁干扰屏蔽能力强弱的物理量, 通常用屏蔽效能(Shielding Effectiveness, SE)来定义, 其单位为分贝(dB)。由于实验受场地和仪器等条件的局限性, 目前对于开孔腔体屏蔽效能的研究主要集中于数值法和解析法。数值法能够对计算模型精确建模, 特别是对于一些复杂模型, 只要对所建立的模型进行合理的网格剖分即可得到精确的解, 但其对计算机处理器, 内存等硬件更要求高, 且计算时间漫长。而解析方法的局限性主要在于模型结构, 在建模过程中需要对模型做合理的等效处理, 但是计算效率高, 占用计算机内存少, 因此对于此问题的相关研究近年来也备受广大学者关注。文献基于电路模型和全波方法建立了一种混合解析模型, 能够计算具有任意形状开孔腔体的屏蔽效能。文献在等效电路法的基础上进行了改进, 提出了一种可计算腔体孔缝填充充电介质或磁性材料的屏蔽效能。文献建立了基于 BLT 方程的拓扑模型, 提出了腔体内置介质板的屏蔽效

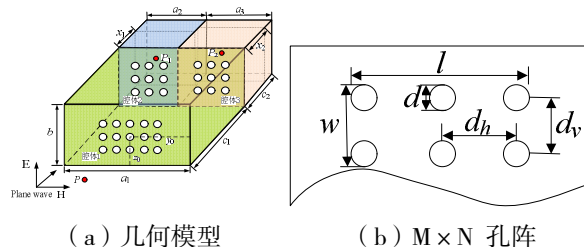
能计算方法, 并考虑了介质板的厚度、高度、位置对屏蔽效能的影响。文献在等效电路法的基础上进行了扩展, 解析模型中在不规则结构腔体中内设了有损介质板, 计算了其屏蔽效能, 考虑对不规则腔体结构参数的改变, 探寻了对应屏蔽效能的变化规律。通过上述研究可以看出, 有关多腔体混联结构的屏蔽效能研究较少。

针对在实际工程应用中屏蔽腔体内部可能存在子腔体, 且孔缝为圆形的孔阵结构, 本文以电磁拓扑理论的 BLT 方程为基础, 建立了一种计算具有孔阵的多腔体屏蔽效能的解析模型。通过对比电磁仿真软件 CST 的计算结果验证了本文所建立解析模型的可行性, 可为类似结构的屏蔽腔体设计通过参考。

1 理论分析

1.1 解析模型的建立

多孔阵复杂腔体的计算模型及等效电路如图 1 所示。该金属屏蔽腔体为一个开有圆形孔阵的三腔体混联的矩形结构, 其尺寸为 $a_1 \times b \times (c_1 + c_2)$, 在腔体壁面上开有直径为 d , 尺寸为 $l \times w$ 的圆形孔阵, 其数量在水平和竖直方向分别表示为 M 和 N , 距离表示为 d_h 和 d_v 。外部监测点为 P , 内部监测点位于腔体 2 和腔体 3 中, 分别表示为 P_1 和 P_2 。



$$\rho_3 = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & 0 \\ \rho_{31} & 0 & \rho_{33} \end{bmatrix};$$

传播矩阵 Γ 表示为:

$$\Gamma = \text{diag}(\Gamma_1 \quad \Gamma_2 \quad \Gamma_3 \quad \Gamma_4 \quad \Gamma_5 \quad \Gamma_6) \quad (7)$$

其中

$$\Gamma_1 = \begin{bmatrix} 0 & e^{jK_0 x_0} \\ e^{jK_0 x_0} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Gamma_2 = \begin{bmatrix} 0 & e^{jK_{g1} c_1} \\ e^{jK_{g1} c_1} & 0 \end{bmatrix}, \quad \Gamma_3 = \begin{bmatrix} 0 & e^{jK_{g2} x_1} \\ e^{jK_{g2} x_1} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Gamma_4 = \begin{bmatrix} 0 & e^{jK_{g2} (c_2 - x_1)} \\ e^{jK_{g2} (c_2 - x_1)} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Gamma_5 = \begin{bmatrix} 0 & e^{jK_{g3} x_2} \\ e^{jK_{g3} x_2} & 0 \end{bmatrix}, \quad \Gamma_6 = \begin{bmatrix} 0 & e^{jK_{g3} (c_3 - x_2)} \\ e^{jK_{g3} (c_3 - x_2)} & 0 \end{bmatrix}$$

分别将 (4) 式至 (7) 式代入 (3) 式中, 每一个节点对应的电压均可求解出, 其中腔体内部监测点 P_1 和 P_2 的电压可分别表示为:

$$V_{P_1} = V_{34} + V_{44} \quad (8)$$

$$V_{P_2} = V_{56} + V_{66} \quad (9)$$

因此, 根据式 (8) 和式 (9) 求出的腔体 2 中 P_1 点的电压和腔体 3 中 P_2 点的电压, 可得到监测点 P 的屏蔽效能表达式为:

$$SE_{P_i} = -20 \lg \left| \frac{V_{P_i}}{V_P} \right| (i=1, 2) \quad (10)$$

其中 $V_P = V_0/2$ 。

2 解析模型验证与分析

为了验证本文建立的解析方法的可靠性和准确性, 将解析方法计算的结果与相同参数条件下的 CST 数值仿真结果进行比较。多孔阵复杂腔体的几何结构如图 1(a) 所示, 假设腔体 1 尺寸为 $a_1 \times b \times c_1 = 300\text{mm} \times 120\text{mm} \times 300\text{mm}$, 腔体 2 尺寸为 $a_2 \times b \times c_2 = 170\text{mm} \times 120\text{mm} \times 200\text{mm}$, 腔体 3 尺寸为 $a_3 \times b \times c_3 = 130\text{mm} \times 120\text{mm} \times 200\text{mm}$, 腔体壁厚均为 1mm , 且材料为良导体。腔体 2 和腔体 3 中的监测点位于腔体内部中心位置, 其中 $x_1 = x_2 = 100\text{mm}$, 腔体其他具体参数如表 1 所示。不失一般性, 将腔体 1 孔阵设置在腔体壁面中心位置, 腔体 2 和腔体 3

孔阵位于偏腔体壁面中心位置, 计算频率为 $0 \sim 2.5\text{GHz}$ 。

表 1 计算模型参数

		Cavity size			Holes number		Holes size			Array position	
		a/m	b/m	c/m			d/m	d_v/m	d_h/m	y_0/m	z_0/m
		m	m	m	M	N	m	m	m	m	m
Mode 1	Cavity 1	300	120	300	5	3	10	20	20	150	60
	Cavity 2	170	120	300	3	3	10	20	20	75	80
	Cavity 3	130	120	300	5	3	10	20	20	85	40

如图 3 和图 4 所示, 分别计算了腔体 2 中监测点 P_1 和腔体 3 中监测点 P_2 处的屏蔽效能, 即监测位置处的长和宽分别位于腔体 2 和腔体 3 中的 60mm 、 65mm 和 60mm 、 85mm 处, 另外腔体 2 和腔体 3 中孔阵位置在偏离其腔体壁面中心, 腔体 1 和腔体 3 的孔阵数量为 5×3 , 腔体 2 的孔阵数量为 3×3 , 各腔体中孔直径和孔距离均相等, 可以明显地看出在给出的频率范围内, 本文建立的解析方法与电磁仿真软件 CST 计算结果变化趋势一致性较好, 从而证明了本文解析方法的正确性和可靠性。在多腔体混联的模型中, 由于腔体 1 出现谐振时其内部电磁很强, 这就使得通过孔缝耦合进入腔体 2 和腔体 3 中电场强度大幅增加, 导致腔体 2 和腔体 3 屏蔽效能腔体 1 谐振点处急剧下降。电磁波在传播过程中遇到腔体壁面会发生立体反射, 入射波和反射波叠加而形成驻波, 导致腔体内部监测点处的电场增大, 因此在谐振点处屏蔽效能出现了最小值。

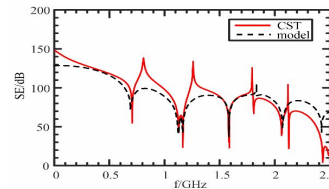


图 3 P_1 点屏蔽效能

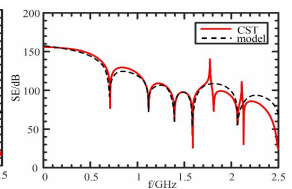
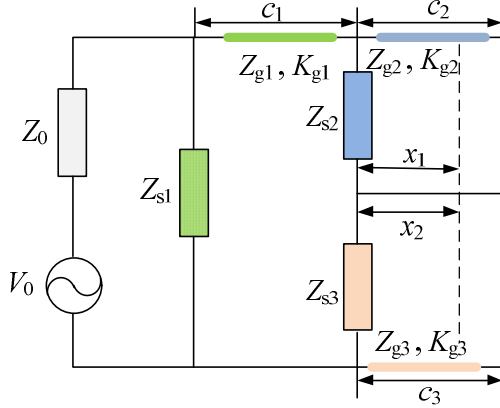


图 4 P_2 点屏蔽效能

为进一步研究腔体内部的电场分布情况, 如图 5 所示给出了谐振频率处的电场分布, 其中 (a) 为 TE_{101} 模式下腔体 1 中的谐振频率电场分布, (b) 为 TE_{101} 模式下腔体 2 中的谐振频率电场分布, (c) 为 TE_{101} 模式下腔体 3 中的谐振频率电场分布, (d) 为 TE_{104} 模式下腔体 1 中的谐振频率电场分布。由图 5 可以看出在谐振频率处的



(c) 等效电路图

图 1 复杂腔体模型

根据计算模型,在图 1(c)的等效电路图中,将入射平面波等效的电压源 V_0 ,其在空间中的内阻抗等效为 $Z_0 = 120\pi$,腔体传输模式的波阻抗和传播常数分别用 Z_{gi} 和 K_{gi} 表示 ($i=1,2,3$)。对于 TE_{10} 模, $Z_{gi} = Z_0 / \sqrt{1 - (\lambda/2a_i)^2}$, ($i=1,2,3$), $K_{gi} = K_0 / \sqrt{1 - (\lambda/2a_i)^2}$, ($i=1,2,3$)。腔体长度分别用 c_1, c_2, c_3 表示, x_1 和 x_2 表示为腔体内部监测点离孔阵的距离。

孔阵和腔体之间的位置因子可以根据在孔阵处的强场连续性来评估,基于波导激励理论,孔阵中(激励点处)的总模态场必须与孔阵场相对应。对于法向平面波的激励,耦合系数可以表示为:

$$C_a = \sin\left(\frac{m\pi}{a_i} y_0\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} z_0\right), (i=1,2,3)$$

因此,如图 1(b)所示在有限大腔体壁上的非中心孔阵阻抗可表示为:

$$Z_s = C_a Z_0 \frac{j\pi d^3}{3d_h d_v \lambda_0} \frac{l \times w}{a_i \times b}, (i=1,2,3)$$

1.2 屏蔽效能的计算

对于图 1 给出的计算模型,根据其等效电路图结合电磁波在腔体内部的能量流动,对应的信号流程图如图 2 所示。节点 J_1 表示外部监测点, J_2 表示腔体 1 孔阵, J_3 表示腔体 2 和腔体 3 孔阵所在的截面, J_4 表示腔体 2 中的内部监测点, J_5 表示为腔体 2 的末端,类似的 J_6, J_7 分别表示为腔体 3 的内部监测点和末端。 W_s 表示激励源,电磁波在自由空间中的传播表示为 $T_1, T_2 \dots T_6$ 表示为电

磁波在腔体中的传播。每个节点对应的入射波表示为 V^{inc} , 反射波表示为 V^{ref} 。

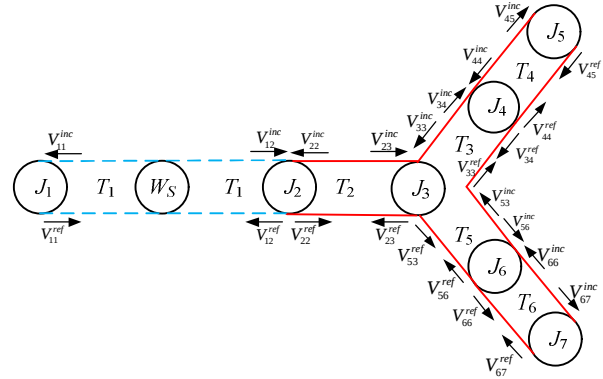


图 2 信号流程图

图 2 所示的信号流程图,对应的 BLT 方程为:

$$V = (U + \rho)(\Gamma - \rho)^{-1} S \quad (3)$$

U 表示 12×12 阶单位矩阵;按节点顺序排列的电压矢量和激励源矢量分别表示为 V 和 S ;按节点顺序排列的散射矩阵表示为 ρ ;以管道顺序排列的传播矩阵表示为 Γ 。

按节点顺序排列的电压矢量矩阵 V 可表示为:

$$V = [V_{11} \ V_{12} \ V_{22} \ V_{23} \ V_{33} \ V_{34} \ V_{44} \ V_{45} \ V_{56} \ V_{66} \ V_{67}]^T \quad (4)$$

按节点顺序排列的激励矢量矩阵 S 可表示为:

$$S = [V_0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (5)$$

式中, V_0 为 T_1 中激励源 W_s 产生的信号, $V_0=1$

散射矩阵 ρ 表示为:

$$\rho = \text{diag}(\rho_1 \ \rho_2 \ \rho_3 \ \rho_4 \ \rho_5 \ \rho_6 \ \rho_7)$$

根据微波理论,式中 $\rho_1 = 0$; $\rho_5 = -1$; $\rho_7 = -1$ 。

$$\rho_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad \rho_6 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\rho_2 = \begin{bmatrix} \frac{Y_0 - Y_{g1} - Y_{ZS1}}{Y_0 + Y_{g1} + Y_{ZS1}} & \frac{2Y_{g1}}{Y_0 + Y_{g1} + Y_{ZS1}} \\ \frac{2Y_0}{Y_0 + Y_{g1} + Y_{ZS1}} & \frac{Y_{g1} + Y_0 + Y_{ZS1}}{Y_0 + Y_{g1} + Y_{ZS1}} \end{bmatrix};$$

式中 $Y_0=1/Z_0$ 表示在自由空间电磁波的传播导纳, Y_{g1} 表示电磁波在腔体 1 中传播导纳, Y_{ZS1} 表示孔阵等效阻抗的导纳形式。

节点 J_3 可等效为一个三端口网络,因此

电场强度最大值分布在腔体内部中心位置,因此腔体内部在装设该频率运行的敏感电子元件时应尽量避开中心位置,以达到最佳屏蔽效果。

当多个腔体混联时会出现大量谐振点,这不仅是腔体 2 和腔体 3 自身的谐振点,而且还包含了在 TE_{10} 模式下腔体 1 中的谐振点。例如 0.707 GHz (TE_{101} 模)、1.118 GHz (TE_{102} 模)、1.581 GHz (TE_{103} 模)和 2.060 GHz (TE_{104} 模)。这是由于孔阵位于腔体壁面中心位置时,它与腔体呈对称结构,此时的中心线位于电磁场抵消的位置,导致无法激发某些谐振模式。因此相比于腔体壁面中心开孔,偏离腔体壁面中心开孔结构所激发的谐振模式会更多。

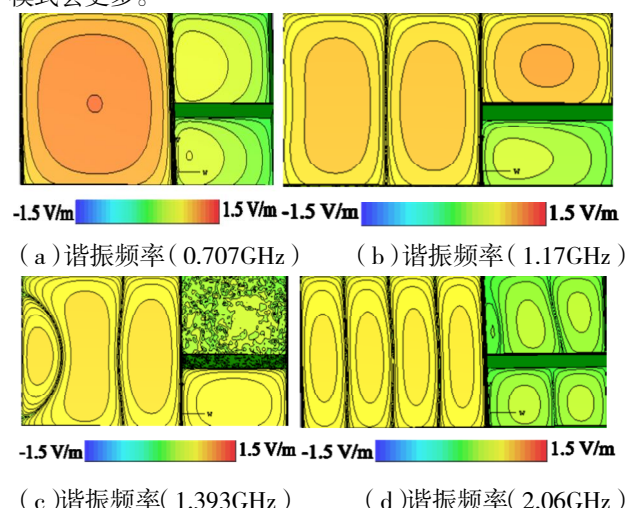


图 5 谐振频率电场分布

本文所建立的解析模型计算结果尽管与 CST 仿真软件趋势一致性较好,但是在高频下仍然存在一定误差。这主要是因为(1)解析模型中的表达式忽略了屏蔽腔体的壁厚,而在 CST 模型中腔体壁厚为 1mm,这导致计算结果产生误差;(2)将孔阵等效为阻抗时假设孔阵是没有电阻性损耗的,这种近似计算并不能准确反映电磁波在孔缝耦合中的真实情况。(3)腔体壁上的孔洞在横向和纵向的间距在解析模型中必须要小于波长,而波长和频率成反比关系,因此随着频率增大计算误差会越明显。

3 结论

本文建立了一种具有孔阵的多腔体混联结构的屏蔽腔体模型,基于电磁拓扑理论推导出了评估其屏蔽效能的解析表达式,为了验证解析模型的准确性,将计算结果与电磁仿真软件 CST 的结果做了对比。仿真验证表明,在给定的频率范围内本文建立的解析模型能够准确评估腔

体 TE_{10} 的谐振模式,且计算时间相比于数值仿真软件更短;另外,对于多腔体混联的偏心孔阵结构,在内部会激发出更多的谐振点。本文建立的解析方法有效的弥补了具有多孔阵腔体混联的开孔屏蔽腔体在评估屏蔽效能的不足,能够为相关研究人员及屏蔽腔体设计人员就类似结构腔体的探究和设计提供可靠的理论指导,在实际工程应用具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1]毋召锋,徐延林,刘培国,等.电磁防护技术发展综述与展望[J].强激光与粒子束,2024,36(04): 5-17.
- [2]刘尚合,马贵蕾,满梦华等.电磁防护仿生研究进展[J].高电压技术,2022,48(05): 1750-1762.
- [3]JIN H, ZHANG H, MA Y, et al. An analytical hybrid model for the shielding effectiveness evaluation of a dual-cavity structure with an aperture array[J]. Progress In Electromagnetics Research Letters, 2020, 91: 109-116.
- [4]Hu P Y, Sun X Y, Chen J. Hybrid model for estimating the shielding effectiveness of metallic enclosures with arbitrary apertures[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2020, 14(4): 462-470.
- [5]IVANOV A A, DEMA KOV A V, KOMNATNOV M E, et al. Semi-analytical approach for calculating shielding effectiveness of an enclosure with a filled aperture[J]. Electrica, 2022, 22(2): 220-225.
- [6]张岩,田铮,刘尚合等.内置介质板开孔腔体电磁屏蔽效能拓扑模型[J/OL].微波学报,1-10[2024-03-12].
- [7]CHEN K J, JIN H, ZHANG H L, et al. A hybrid analytical model for estimating the shielding effectiveness of an irregular cavity structure with aperture arrays[C] // International Symposium on High Voltage Engineering (ISH2021), Xi'an, China.
- [8]张晗,李常贤,胡小龙.快速预测干扰下斜开孔腔体屏蔽效能的模型[J].微波学报,2023,39(03): 73-79+84.
- [9]阙勇,闫丽萍,赵翔,等.基于电磁拓扑的多腔体屏蔽效能快速算法[J].物理学报,2016,65(03): 88-99.

作者简介:陈克俭(1994-),男,甘肃武威人,硕士研究生,主要从事电磁场分析研究。

E-mail: chenkj2208@163.com