

# 低反射、高吸收海水电磁屏蔽体

王身云, 岑大维, 兰桂英

(南京信息工程大学 应用电磁研究中心, 南京 210044)

**摘要:** **目的** 通过在有耗海水电磁屏蔽体上加载阻抗匹配层, 研究具有低反射、高吸收特性海水电磁屏蔽体结构。**方法** 基于有耗海水电磁屏蔽体的输入阻抗, 并利用传输线原理, 计算对应匹配媒质层的结构与电磁参数。针对初始具有较好电磁屏蔽效能的反射型海水电磁屏蔽体样本, 计算和加载工作在 ISM 433 MHz 频段的匹配媒质层。**结果** 加载了匹配媒质层的海水电磁屏蔽体能展示出良好的低反射、高吸收电磁屏蔽特性。当入射电磁波全部穿透进入海水层, 产生传导和极化衰减后, 对屏蔽效能影响较小。**结论** 由海水层和匹配媒质层组成的多元材料电磁屏蔽体, 可以实现低反射、高吸收电磁屏蔽效果, 并保持良好电磁屏蔽效能的优势。低反射电磁屏蔽体有望在精度仪器、目标反探测等领域发挥重要作用。

**关键词:** 电磁屏蔽; 屏蔽效能; 阻抗匹配; 吸收

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.04.018

**中图分类号:** TJ811 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)04-0114-04

## Low-reflection and High-absorption Seawater Electromagnetic Shielding

WANG Shen-yun, CEN Da-wei, LAN Gui-ying

(Research Center of Applied Electromagnetics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate low-reflection and high-absorption electromagnetic (EM) shielding of seawater by applying air impedance matching layers on initial seawater EM shielding. Based on the impedance of the initial seawater EM shielding and transmission line theory, the structure and EM parameters were calculated for the matching layers. For the reflective seawater EM shielding with high shielding effectiveness, the corresponding matching layers working at 433 MHz in ISM band were calculated and applied. The seawater electromagnetic shielding with matching layers could exhibit good EM shielding effectiveness with low-reflection and high-absorption. When all the incident electromagnetic waves penetrated into the seawater layer, resulting in conduction and polarization attenuation, the shielding effectiveness was less affected. Multi-material electromagnetic shielding consisting of seawater and matching materials can realize low-reflection and high-absorption EM shielding and keep the advantage of reflective seawater EM shielding. Matching seawater EM shielding is expected to play an important role in precision instrument electromagnetic shielding, target reverse detection and other fields.

**KEY WORDS:** electromagnetic shielding; shielding effectiveness; impedance matching; absorption

收稿日期: 2019-10-16; 修订日期: 2019-11-20

**Received:** 2019-10-16; **Revised:** 2019-11-20

**基金项目:** 国家自然科学基金 (61302048); 江苏省自然科学基金 (BK20151528)

**Fund:** Supported by National Natural Science Foundation of China (61302048) and Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20151528)

**作者简介:** 王身云 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电磁兼容、计算电磁学和智能天线。

**Biography:** WANG Shen-yun (1981—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: electromagnetic compatibility, computational electromagnetics and smart antenna.

电磁辐射产生的危害主要包括电磁干扰、电磁信息泄露和电磁环境污染等方面<sup>[1]</sup>。降低电磁辐射危害的有效手段包括限制电磁辐射剂量、利用电磁屏蔽技术等。电磁屏蔽是利用屏蔽体来阻挡或减弱电磁能量传输的一种技术，通常采用屏蔽效能来定量描述电磁波屏蔽的效果，其定义为在防护区域未加载屏蔽体时和加载屏蔽体时的电场幅值之比。从物理机制上看，电磁波被屏蔽体阻挡的机制包括反射效应、吸收效应以及多次反射和吸收效应。因此，电磁屏蔽材料主要包括三种类型：以反射损耗为主的电磁屏蔽材料，这类材料以导电材料为主，如金属材料<sup>[2]</sup>、导电涂料<sup>[3]</sup>、导电塑料<sup>[4]</sup>等；反射损耗与吸收损耗相结合的电磁屏蔽材料，以具有磁性的导电材料为主，如 Ni-P 合金<sup>[5]</sup>，其主要应用于低频磁屏蔽<sup>[6]</sup>；以吸收损耗为主的低反射电磁屏蔽材料，主要应用于精密电子设备和隐身目标的电磁屏蔽。当电子设备内壁产生强电磁反射时，可能导致自干扰现象，从而影响电子设备的性能发挥。在军事上，针对敌方强电磁干扰，低反射电磁屏蔽材料在保护电磁能量入侵的同时，还具有反电磁探测的能力。目前研究低反射、高吸收的电磁屏蔽材料，存在一定的困难。从材料的电磁本构关系上可以看到，单元材料在增加损耗因素的同时，难以满足电磁阻抗匹配。因此，通常采用多元材料来同时满足这两个条件。文献[7]指出，采用多元材料来设计低反射、高吸收电磁屏蔽体时，应同时考虑材料损耗和阻抗匹配两个因素。近期的研究表明，具有较高电导率的海水层结构对电磁传输产生较强损耗，从而展示出较好的电磁屏蔽效能<sup>[8]</sup>。海水的高电导率特性会引起阻抗失配，类似于其他高电导率材料，从而产生较强的电磁反射，不利于应用在精密电子设备和电磁隐身目标等场合。因此，有耗海水物质属于第一类电磁屏蔽材料。为了消除电磁屏蔽体表面产生的电磁反射，本质问题是重新设计其输入阻抗，使其与电磁入射空间媒质的特性阻抗相匹配。

文中首先针对反射型海水电磁屏蔽体结构，研究其输入阻抗特性。利用平面波和传输线理论，针对反射型海水电磁屏蔽体，设计了对应的阻抗匹配媒质层，使得入射电磁波能够有效或全部穿透到海水电磁屏蔽体内部，产生传导损耗和极化损耗，从而实现具有低反射、高吸收特性的海水电磁屏蔽体。

### 1 研究方法

考虑层状海水电磁屏蔽体结构，入射波为平面电磁波。文献[8]研究表明，平面波照射到多层（有耗或无耗）媒质的反射系数和透射系数表达式为：

$$r(\omega) = \frac{E_x^{(-)}(0, \omega)}{E_x^{(+)}(0, \omega)} = \frac{\left[ X_{22}(\omega) - X_{11}(\omega) \frac{k_S \mu_0}{k_0 \mu_S} \right] - j \left[ X_{21}(\omega) \frac{\omega \mu_0}{k_0} + X_{12}(\omega) \frac{k_S}{\omega \mu_S} \right]}{\left[ X_{22}(\omega) + X_{11}(\omega) \frac{k_S \mu_0}{k_0 \mu_S} \right] + j \left[ X_{21}(\omega) \frac{\omega \mu_0}{k_0} + X_{12}(\omega) \frac{k_S}{\omega \mu_S} \right]} \quad (1)$$

$$t(\omega) = \frac{E_x^{(+)}(d_{\max}, \omega)}{E_x^{(+)}(0, \omega)} = \frac{\left[ X_{22}(\omega) + X_{11}(\omega) \frac{k_S \mu_0}{k_0 \mu_S} \right] + j \left[ X_{21}(\omega) \frac{\omega \mu_0}{k_0} + X_{12}(\omega) \frac{k_S}{\omega \mu_S} \right]}{2} \quad (2)$$

式中： $k_0$  和  $k_S$  分别为干扰源区域和防护区域的媒质波数； $\mu_0$  和  $\mu_S$  分别为干扰源区和被屏蔽区域的磁导率； $X_{ij}$  为多层介质结构的传输矩阵元素。由于海水是有耗介质，而空气可近似为理想的无损耗介质，二者的特性阻抗存在较大差异。为了使入射电磁波能够有效穿透到海水电磁屏蔽体内部，则必须加载额外的匹配介质层，来满足阻抗匹配条件。利用传输线理论的电路匹配思想，反射型海水电磁屏蔽体的阻抗匹配层可由 2 层媒质构成。因此，具有电磁匹配特性的海水电磁屏蔽体可以采用 4 层材料构成，如图 1 所示。其中，第 1 层为封装玻璃层，第 2 层为有耗海水层，第 3 层介质为海水电磁屏蔽体输入阻抗  $\eta_{in(2)}$  的实数变换层，第 4 层为实数输入阻抗  $\eta_{in(3)}$  的空气阻抗匹配变换层。

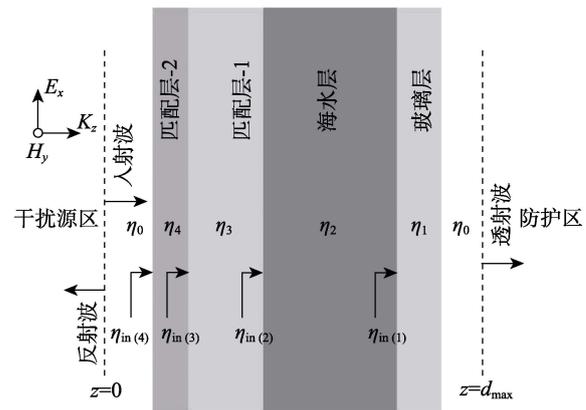


图 1 基于匹配层的海水电磁屏蔽体结构  
Fig.1 Seawater electromagnetic shielding structure based on matching layer

针对第  $i$  层媒质的输入阻抗，其计算公式为：

$$\eta_{in(i)} = \eta_i \frac{\eta_{in(i-1)} \cos(d_i \hat{k}_i) + j \eta_i \sin(d_i \hat{k}_i)}{\eta_i \cos(d_i \hat{k}_i) + j \eta_{in(i-1)} \sin(d_i \hat{k}_i)} \quad (3)$$

式中： $d_i$  为第  $i$  层媒质的厚度； $\eta_i$  为第  $i$  层媒质的特性阻抗， $\eta_i = \sqrt{\hat{y}(\omega) / \hat{z}(\omega)}$ ， $\hat{y}(\omega)$ 、 $\hat{z}(\omega)$  和  $\hat{k}_i$  分别

为媒质的导纳率、阻抗率和复数波数, 分别由媒质的电磁特性参数表示<sup>[8]</sup>。

研究过程中, 当第1层和第2层媒质的结构和参数确定时, 其复数输入阻抗  $\eta_{in(2)}$  为确定值。采用两层理想媒质来对其输入阻抗进行匹配设计。为了节省材料类型, 第3层媒质采用第1层相同媒质, 实现复数到实数输入阻抗变换。利用传输线原理, 第3层媒质的厚度  $d_3$  应为满足条件:  $d_3 = (\pi - \varphi_2) / 2\hat{k}_3$ ,  $\varphi_2$  为复数输入阻抗  $\eta_{in(2)}$  的复角。最后, 通过第4层媒质实现前3层媒质实数输入阻抗  $\eta_{in(3)}$  到空气特性阻抗变换, 即满足  $\eta_{in(4)} = \eta_0$ 。第4层媒质采用四分之一波长阻抗变换器原理, 其媒质特性阻抗  $\eta_4$  和厚度  $d_4$  应满足条件:  $\eta_4 = \sqrt{\eta_0 \eta_{in(3)}}$ ,  $d_4 = \pi / 2\hat{k}_4$ 。

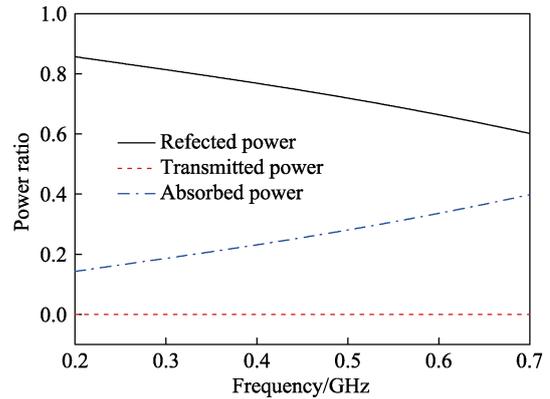
## 2 实例分析

为了对比, 以文献[8]中所计算的反射型海水电磁屏蔽体为研究基础。其中, DM305 型号的封装玻璃层厚度  $d_1 = d_3 = 3.0$  cm, 介电常数的实部  $\varepsilon'(\omega) = 3.5\varepsilon_0$ , 虚部忽略。海水层厚度  $d_2 = 9.0$  cm, 海水电磁参数取标准条件  $t = 20$  °C, 盐度值  $S = 3.5\%$  时, Klein 和 Swift 拟合的海水 Debye 模型参考值。根据能量守恒关系, 入射波照射到电磁屏蔽体上的反射功率  $|r(\omega)|^2$ 、透射功率  $|t(\omega)|^2$  和吸收功率  $A(\omega)$  之间的关系可表示为:

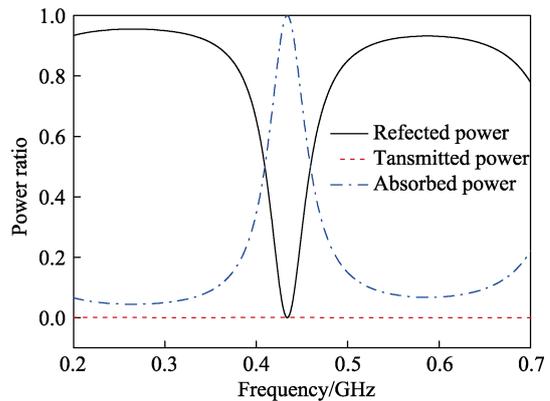
$$A(\omega) = 1 - |t(\omega)|^2 - |r(\omega)|^2。$$

这种未加匹配结构的海水电磁屏蔽体的电磁能量配比如图 2a 所示。可以看到, 在所计算的工作频段 (200~700 MHz), 非匹配海水电磁屏蔽体对电磁能量的阻挡机制以电磁反射为主。针对 ISM 频段 (433.05~434.79 MHz), 其中心频率  $f_0 = 433.92$  MHz。利用上述传输线设计原理, 重新计算第3层媒质厚度:  $d_3 = 18$  cm; 第4层媒质厚度和相对介电常数:  $d_4 = 4.1$  cm,  $\varepsilon_{r,4} = 18$ 。该匹配海水电磁屏蔽体对平面照射电磁波的能量分配比值如图 2b 所示。可以看到, 入射电磁波在中心频率处产生了零反射功率和接近于 1 的吸收功率, 半吸收功率带宽覆盖了 ISM 频段。

从图 2 中可以看到, 两种海水电磁屏蔽体的透射功率均接近于 0, 表明低反射海水电磁屏蔽体能够保持良好电磁屏蔽的优势。为了更好地比较两种海水电磁屏蔽体的电磁屏蔽效果, 图 3 给出了对应的电磁屏蔽效能。可以看到, 二者在 200~700 MHz 频段内的电磁屏蔽效能达到 60 dB 以上, 满足二级屏蔽要求。在低反射、高吸收频段内, 匹配海水电磁屏蔽体的屏蔽效能略有下降, 这是由于入射电磁波有更多的功率进入电磁屏蔽体内部, 多次反射和多次透射效应略有增强所致。最后, 为了验证匹配海水电磁屏蔽体的低反射、高吸收物理机制, 计算了其输入阻抗。



a 非匹配海水电磁屏蔽体



b 匹配海水电磁屏蔽体

图 2 屏蔽体电磁能量 (反射、穿透与吸收) 损耗比  
Fig.2 Shielding electromagnetic energy (reflection, penetration and absorption) loss ratio: a) Unmatched seawater magnetic shielding; b) Matched sea water magnetic shielding

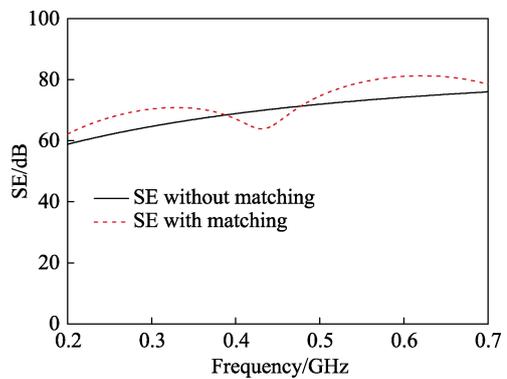


图 3 屏蔽效能比较

Fig.3 Comparison of shielding effectiveness

从图 4 中可以看出, 针对没有匹配的海水电磁屏蔽体, 输入阻抗与空气特性阻抗具有较大差异, 从而导致较强的反射效应。针对匹配海水电磁屏蔽体, 其输入阻抗在中心频点处满足实部  $\text{Re}[\eta_{in(4)}] = \eta_0$  (377  $\Omega$ ), 虚部  $\text{Im}[\eta_{in(4)}] = 0$ 。匹配海水电磁屏蔽体的输入阻抗与空气阻抗完全匹配, 从而导致入射电磁波功率全部进入到海水层内部, 以传导损耗和极化损耗方式转换成热能。

在上述匹配媒质设计过程中, 为了计算方便, 将

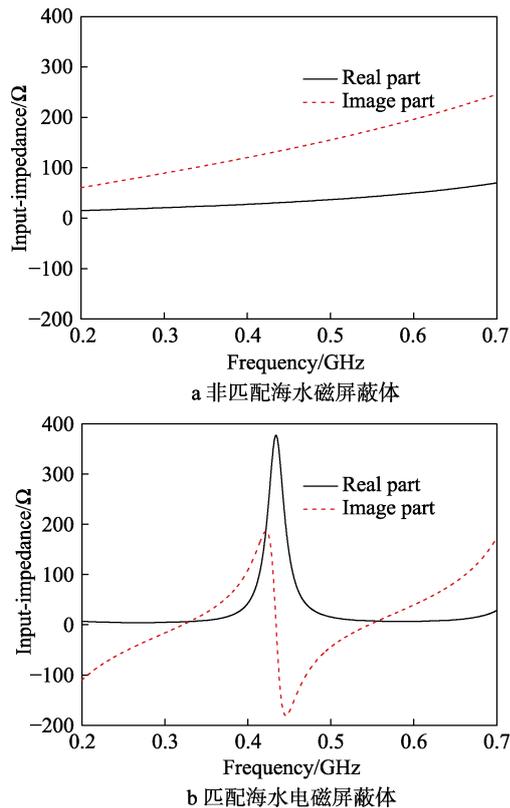


图 4 输入阻抗比较

Fig.4 Comparison of input impedance: a) unmatched seawater magnetic shielding; b) matched seawater magnetic shielding

第 1、3 层玻璃媒质和第 4 层匹配媒质的损耗忽略。当匹配媒质为良介质时，即其损耗因素非常小时（例如文献 [8] 中给出的玻璃损耗因素仅为  $\varepsilon''(\omega) = 0.0003\varepsilon_0$ ），对上述计算结果影响非常小。另外，文中所设计的低反射、高吸收电磁屏蔽体结构针对所考虑频段的中心频率，半功率相对带宽约 12%。为了扩展低反射电磁屏蔽的匹配带宽，可以增加匹配媒质层和媒质类型，通过串联形成多频点匹配，从而达到宽带低反射、高吸收特性。

### 3 结语

文中提出了一种低反射、高吸收海水电磁屏蔽体的设计方法。根据反射型海水电磁屏蔽体的输入阻抗和传输线理论，可以计算对应的电磁匹配媒质结构和电磁参数。实例计算结果表明，加载了匹配媒质结构的海水电磁屏蔽体可以展示出较好的低反射、高吸收电磁屏蔽特性。该方法可以有效推广到针对其他反射型电磁屏蔽体的低反射、高吸收特性设计，并有望在精密仪器设备的电磁屏蔽和目标反探测等领域得到广泛应用。

### 参考文献：

- [1] 李超, 吴焱, 袁霖. 美国水面舰船电磁脉冲防护标准浅析[J]. 装备环境工程, 2018, 15(3): 71-75.  
LI Chao, WU Yao, YUAN Ben. Protective Standards for Electromagnetic Pulse of American Surface Ship[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(3): 71-75.
- [2] 聂秀丽, 赵晓凡. 车辆强电磁脉冲条件下的分层防护及验证方法探讨[J]. 装备环境工程, 2017, 14(4): 36-41.  
NIE Xiu-li, ZHAO Xiao-fan. Layered Protection and Verification Method for the Vehicle under the Condition of Intensive Electromagnetic Pulse[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(4): 36-41.
- [3] 白翰林, 王执乾. 导电涂料应用研究现状与展望[J]. 天津化工, 2017, 31(4): 12-14.  
BAI Han-lin, WANG Zhi-qian. Application and Prospect of Conductive Coating[J]. Tianjin Chemical Industry, 2017, 31(4): 12-14.
- [4] 刘艳丽, 井元良, 石海平, 等. 导电塑料在航天领域的应用展望[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(6): 676-681.  
LIU Yan-li, JING Yuan-liang, SHI Hai-ping, et al. Applications of Conductive Plastic in Aerospace Field[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(6): 676-681.
- [5] 吴雪艳, 姚恺, 安振涛, 等. 非晶态 Ni-Fe-P 和 Ni-P 合金屏蔽织物的制备及其性能比较研究[J]. 功能材料, 2015, 46(20): 20140-20144.  
WU Xue-yan, YAO Kai, AN Zhen-tao, et al. Contrast Studies of the Process Optimization and Characterization of Shielding Fabric by Amorphous Ni-Fe-P and Ni-P Alloy[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(20): 20140-20144.
- [6] 金鑫, 王群, 唐章宏. 结构分隔金属软磁材料的性能[J]. 安全与电磁兼容, 2018(2): 69-73.  
JIN Xin, WANG Qun, TANG Zhang-hong. Performance Study of Structural Separation Metal Soft Magnetic Material[J]. Safety & EMC, 2018(2): 69-73.
- [7] 杜军, 张平, 田飞. 低反射高吸收电磁屏蔽材料的研究现状[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2009, 8(2): 96-100.  
DU Jun, ZHANG Ping, TIAN Fei. The Current Status of Research on Low-Reflection and High-Absorption Electromagnetic Shielding Material[J]. Journal of Taiyuan Normal University (Natural Science Edition), 2009, 8(2): 96-100.
- [8] 王身云, 计想建, 岑大维. 海水电磁屏蔽体[J]. 装备环境工程, 2019, 16(5): 9-12.  
WANG Shen-yun, JI Xiang-jian, CHEN Da-wei. Seawater Electromagnetic Shield[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(5): 9-12.