

## 磁电机机械天线的阻抗特性分析\*

宋凯欣<sup>1)2)3)</sup> 闵书刚<sup>4)</sup> 高俊奇<sup>1)2)3)†</sup> 张双捷<sup>1)2)3)</sup>毛智能<sup>1)2)3)</sup> 沈莹<sup>1)2)3)</sup> 储昭强<sup>1)2)3)4)‡</sup>

1) (哈尔滨工程大学, 水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

2) (海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学), 哈尔滨 150001)

3) (哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001)

4) (青岛哈尔滨工程大学创新发展中心, 青岛 266071)

(2022 年 3 月 30 日收到; 2022 年 5 月 19 日收到修改稿)

机械天线被认为是目前能够实现甚低频和超低频天线小型化的新方案. 本文针对 1-1 型和 2-1 型磁电机机械天线的阻抗特性进行系统研究. 基于天线振子的阻抗曲线和修正的 Butterworth-van Dyke 模型, 分别获得阻抗最小频率  $f_m$ 、串联谐振频率  $f_s$  以及谐振频率  $f_r$ . 在此基础上, 本文通过实验分析了驱动电压、偏置磁场和机械品质因数 ( $Q$  值) 对磁电机机械天线阻抗特性的影响规律, 并结合磁电机机械天线的实际工作频率  $f_d$ , 获得了 1-1 型和 2-1 型磁电机机械天线的电阻和电抗分量. 实验结果表明: 无论是 1-1 型还是 2-1 型磁电机机械天线, 其电抗分量均小于  $100\ \Omega$ , 基本可以看成是一个纯阻性振子. 但是高  $Q$  值的磁电机机械天线非线性效应强, 且自身阻抗相对较小, 难以支持高驱动电压的加载, 辐射能力有限. 本文对磁电机机械天线的设计优化, 特别是在认识其阻抗特性的基础上进行  $Q$  值选择, 为下一代高辐射性能天线振子的设计提供了重要数据参考.

**关键词:** 机械天线, 磁电耦合, 阻抗特性, 机械品质因数, 修正的 Butterworth-van Dyke 模型

**PACS:** 75.85.+t, 43.38.Fx, 43.38.Ct, 43.40.Yq

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220591

## 1 引言

为了实现在损耗介质以及跨域环境中的信息交换, 发展高效率、小型化的低频通信天线是学术界的一个研究热点和难点<sup>[1,2]</sup>. 传统射频偶极子天线依赖导体中电子的加速运动产生时变电磁场, 其辐射效率与物理尺寸相互制约, 无法同时满足高效、便携的应用需求<sup>[3,4]</sup>. 从突破传统天线设计思路的角度出发, 2018 年美国国防高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 首次公布了机械天线的研究计划

(AMEBA)<sup>[2]</sup>. 所谓的机械天线是通过控制电偶极子或者磁偶极子的机械运动, 在空间建立时变的电场或磁场来传输信息. 在 4 种典型机械天线的设计方法中<sup>[5]</sup>, 宏观上旋转驻极体或者永磁体, 受限于驱动电机, 存在信息加载困难的突出问题. 而在微观上动态调制材料中的电/磁偶极子, 基于降低的机械能密度, 更易提高天线的辐射效率和信息带宽<sup>[3,5]</sup>. 其中, 基于磁电耦合效应的偶极振荡式机械天线综合了压电驱动的高效性和偶极调制的可控性, 是发展甚低频通信技术的关键基础<sup>[5]</sup>. 目前, 以美国为主的多家研究机构在磁电机机械天线的基础理论及原型样件方面已开展了一些重要的工作<sup>[5–20]</sup>.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 52102127)、山东省自然科学基金 (批准号: ZR2021QF021) 和国防重点实验室基金 (批准号: KY10500220007) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gaojunqi@hrbeu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhaoqiangchu@hrbeu.edu.cn

例如, 2017 年美国东北大学 Nan 等<sup>[15]</sup>首次在实验上报道了基于磁电多铁异质结 FeGaB/AlN 的 NEMS 机械天线, 解决了传统天线小型化的设计难题. 2019 年, 弗吉尼亚理工学院的 Xu 等<sup>[10]</sup>证实: 基于 2-1 型磁电复合材料的机械天线与同等尺寸下的线圈发射天线相比, 辐射效率提高了近  $10^4$  倍. 最近美国东北大学孙年详教授课题组<sup>[21]</sup>进一步利用 2-1 型磁电复合材料, 搭建了甚低频磁场通信系统, 在 400 mW 的功耗下, 实现了 120 m 的发信距离和 100 Hz 的调制带宽. 此外, Schneider 等<sup>[16]</sup>提出的应力耦合型 PZT/FeGa 多铁天线在极低频 (10 Hz) 400 V/mm 的驱动电场下有望在 1 km 远处, 产生近 1 fT 的交流磁场. 理论方面, 美国加州大学洛杉矶分校的 Luong 和 Wang<sup>[11]</sup>基于 LLG (Landau-Lifshitz-Gilbert) 方程和磁性材料中有效场的来源, 定量分析了磁电机机械天线中磁弹耦合过程的影响因素. 北京大学的储昭强等<sup>[22,23]</sup>基于软磁材料中的 Delta-E 效应和磁电谐振器中的非线性动力学模型, 研究了磁电机机械天线在高场谐振驱动下的双稳态非线性响应行为, 也为进一步优化机械天线的结构设计, 提高其功率容量和信息带宽提供了物理基础.

机械天线相较于传统天线的优势, 学术界一般的观点在于: 1) 为了提高辐射效率, 传统天线的口径大小应与发射电磁波的波长相比拟. 但是在同一介质中由于声速远小于光速, 机械天线基于声波驱动可以突破传统低频天线体积庞大的限制; 2) 磁电机机械天线工作在声学谐振模态, 基本没有欧姆损耗, 也无需馈电的阻抗匹配网络, 具有进一步增强的辐射效率<sup>[1,3,5]</sup>. 现有的研究主要是通过参考同等尺寸下的环形天线, 验证了磁电机机械天线中增强的辐射效率, 但是基本没有涉及机械天线的馈电问题, 对其阻抗特性也需更加系统和深入地分析.

本文以 1-1 型 (Metglas/PMN-PZT/Metglas) 和 2-1 型 (Metglas/PZT/Metglas) 磁电谐振器为研究对象, 实验总结了应变耦合型磁电机机械天线的阻抗特性, 并揭示了机械品质因数 ( $Q$  值) 对天线设计的关键作用. 首先, 通过实验观察两种天线振子的阻抗曲线, 阐明驱动电压和偏置磁场对磁电机机械天线阻抗特性的影响规律. 然后基于修正的 Butterworth-van Dyke (modified Butterworth-van Dyke, MBVD) 模型, 提取磁电机机械天线的 3 种特征频率 (阻抗最小频率  $f_m$ 、系统谐振频率  $f_r$  以及

MBVD 模型中的串联谐振频率  $f_s$ ), 进一步对比了不同  $Q$  值磁电机机械天线的阻抗特征. 研究发现: 2-1 型低  $Q$  值天线振子不具有纯阻性特点, 其逆磁电耦合最强的频率点不是谐振频率而是串联谐振频率. 而对于高  $Q$  值的磁电机机械天线, 三种谐振频率基本一致, 但是均偏离其实际工作频率. 此外, 实验测得 1-1 型磁电机机械天线的阻抗实部约为 200  $\Omega$ , 难以支持高电压加载, 不满足磁电机机械天线在电场驱动下欧姆损耗小的基本假设. 而 2-1 型磁电机机械天线的阻抗实部则高达 6000  $\Omega$ , 导致其耦合能力较弱, 但一定程度上可以通过增大驱动电压来弥补, 实测的磁场辐射能力强于高  $Q$  值的 1-1 型天线振子. 但是两种天线的电抗分量均小于 100  $\Omega$ , 因此都不需要大的阻抗匹配网络进行调谐.

## 2 样品性能

图 1(a) 和图 1(b) 分别给出了 1-1 型和 2-1 型磁电机机械天线的结构示意图和实物照片. 有关 1-1 型和 2-1 型磁电复合材料的制备与性能信息, 可以参考早期的文献<sup>[24, 25]</sup>. 两种结构均使用非晶软磁合金 Metglas 作为压磁相, 所采用的压电材料则分别为 [011] 切向厚度方向极化的单晶纤维 PMN-PZT ( $\text{Pb}(\text{Mg}_{2/3}\text{-Nb}_{1/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zr, Ti})\text{O}_3$ ) 和叉指极化的宏观陶瓷纤维 PZT( $\text{Pb}(\text{Zr, Ti})\text{O}_3$ ). 两相材料通过环氧树脂 (West System, 105/206) 进行复合. 这两种振子分别工作于 L-T 模式和 L-L 模式, 具有很好的代表性. 图 1(c) 和图 1(d) 对比了 1-1 型和 2-1 型磁电谐振器的正/逆磁电耦合系数和对应的机械品质因数 ( $Q$  值). 正/逆磁电系数用来衡量磁电机机械天线磁-电耦合能力的强弱. 逆磁电系数的测量, 实验中通过法拉第电磁感应定律, 将接收线圈的感应电压转换为磁通密度值  $B_r$ , 再根据公式  $|B_r| = \frac{\Delta B_{\text{mat}} V}{2\pi r^3} \sqrt{(1 + r^2 \beta^2) \cos^2(\theta)}$ , 计算出振子软磁材料中磁感应强度的调制幅度  $\Delta B_{\text{mat}}$ , 其中  $V$  为软磁材料体积,  $r$  为接收线圈与磁电机机械天线之间的距离,  $\beta$  为辐射电磁场的波数, 当接收线圈与磁电机机械天线在同一矢径上时  $\theta$  为  $0^\circ$ <sup>[16]</sup>. 已有研究指出: 在磁电谐振器的谐振频率处发生的是逆磁电效应的共振增强现象, 而在反谐振频率处产生的是正磁电效应的共振增强<sup>[26]</sup>. 从图 1(c) 和图 1(d) 可知对于 1-1 型磁电谐振器, 测试得到的正/逆磁电效应分别为 6000 V/(cm·Oe) 和 68 (Oe·cm)/V (1 Oe =

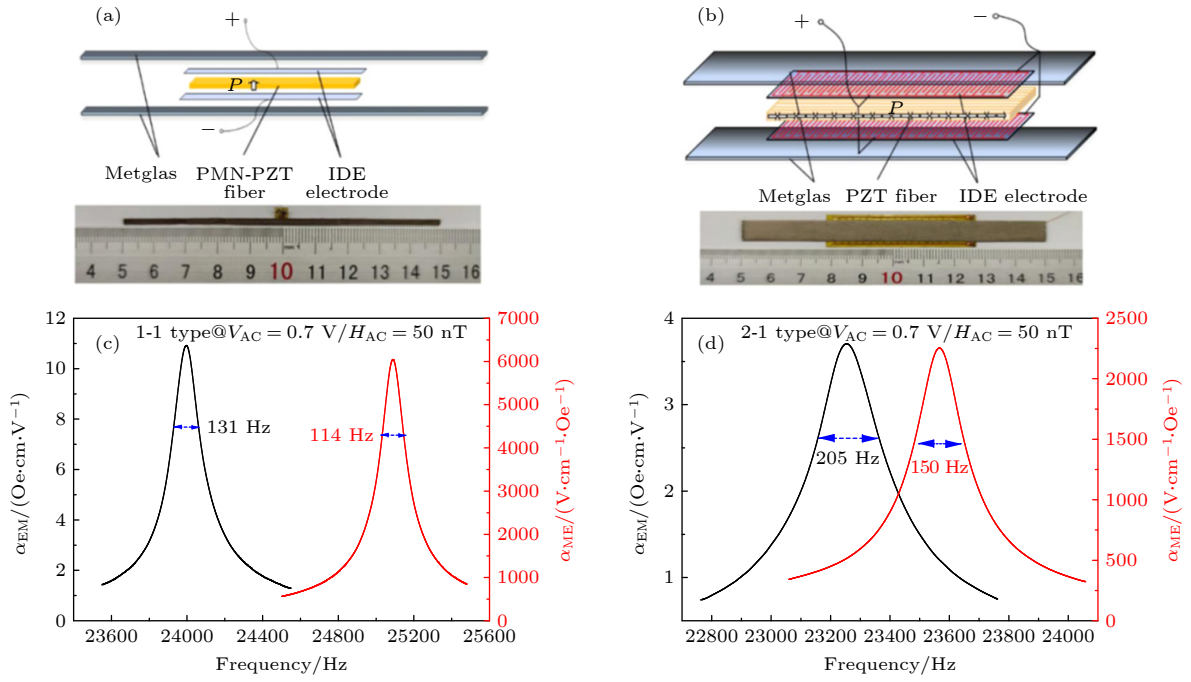


图 1 (a) 1-1 型和 (b) 2-1 型磁电机机械天线结构示意图及实物图; (c) 1-1 型和 (d) 2-1 型磁电机机械天线的正、逆磁电系数的频响曲线; 对于正磁电系数的测量, 激励磁场为 50 nT; 对于逆磁电系数的测量, 驱动电压为 0.7 V

Fig. 1. Schematic diagram and the snapshot of 1-1 type (a) of and 2-1 type (b) of magnetoelectric antenna; (c), (d) the direct magnetoelectric coefficient  $\alpha_{ME}$  and the converse counterpart  $\alpha_{EM}$  as a function of driving frequency for 1-1 type (c) of and 2-1 type (d) of magnetoelectric antenna. The driven magnetic field for direct magnetoelectric coefficient measurement and the driven voltage for converse magnetoelectric coefficient measurement is 50 nT and 0.7 V, respectively.

$10^3/(4\pi)$  A/m), 而 2-1 型磁电谐振器只有 2250 V/(cm·Oe) 和 23 (Oe·cm)/V. 本文旨在分析  $Q$  值对磁电机机械天线的阻抗特性和振子辐射性能的影响规律. 聚焦到逆磁电耦合系数, 计算得出两种样品的  $Q$  值分别为 189 和 113, 具有很好的代表性.

### 3 结果和讨论

图 2 给出了对两种磁电机机械天线阻抗曲线的测试结果, 主要研究了磁电机机械天线驱动电压和偏置磁场对阻抗特性的影响. 在图 2(a) 和图 2(b) 中固定直流偏置磁场, 将加载在磁电机机械天线压电材料上的驱动电压从 0.1 V 增至 0.9 V. 阻抗曲线通过阻抗分析仪 (E4990A, Keysight, USA) 扫频获得. 从图 2(a) 可知, 随着驱动电压的增大, 1-1 型磁电机机械天线的谐振峰向左偏移, 即系统发生了弹簧软化行为 (是指对于一个非线性的振动系统, 其等效刚度随着振动幅度的增大而下降). 而 2-1 型磁电机机械天线的谐振峰位置则基本不变, 系统维持了很好的线性动力学响应. 在图 2(c) 和图 2(d) 中, 设置磁电机机械天线的激励电压为 1 V, 偏置磁场从

2.68 Oe 增至 29.48 Oe. 这里单独给出两种磁电机机械天线阻抗的幅频响应曲线, 可以看出逐渐增大 1-1 型磁电机机械天线的直流偏置磁场时, 其谐振峰位置先左移后右移, 满足软磁材料 Delta-E 效应 [22]. 而 2-1 型磁电机机械天线也表现了类似的行为. 以上是传统文献对磁电谐振器阻抗特性的基本描述. 借鉴水声换能器理论, 谐振式磁电器件客观上有 3 个所谓的“谐振频率”: 第 1 种为阻抗最小的频率点  $f_m$ , 在此频率点上磁电机机械天线整体的阻抗模值最小. 第 2 种为纯阻性频率点  $f_r$ , 在此频率点上磁电机机械天线的阻抗角为  $0^\circ$ , 可认为整体为纯阻性的状态. 第 3 种为磁电机机械天线等效电路 MBVD 模型中的串联谐振频率点  $f_s$ . 但是目前对磁电机机械天线的研究基本不区分这 3 种频率. 下面, 本文将通过 MBVD 模型 [27,28], 提取出磁电机机械天线的串联谐振频率  $f_s$ , 并在不同驱动条件下分析 3 种特征频率的变化规律, 以进一步认识其阻抗特性.

如图 3 所示, 磁电机机械天线可以通过等效电路模型进行分析. 常见的有 Mason 模型、BVD 模型和 MBVD 模型等. MBVD 模型可以更准确地体现元器件整体的损耗特性, 多用于压电器件的等效分析.



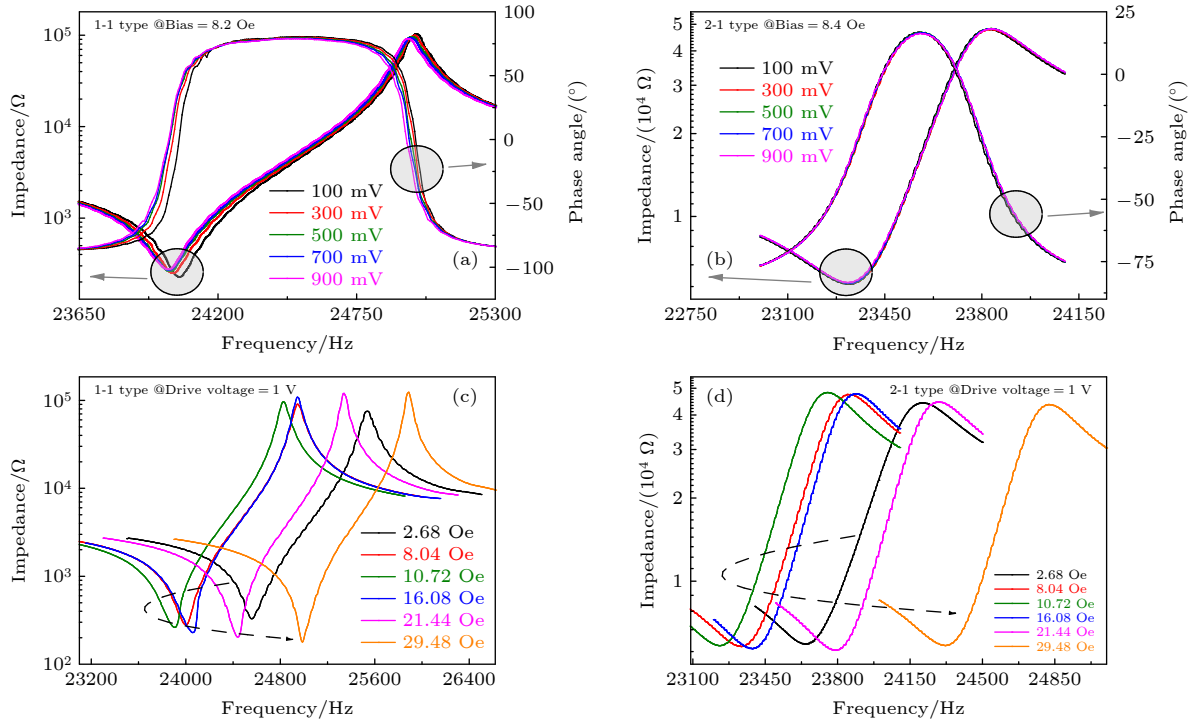


图 2 不同驱动条件下磁电机机械天线的阻抗特性 (a), (b) 不同驱动电压下 (a) 1-1 型和 (b) 2-1 型磁电机机械天线的阻抗、阻抗角频响曲线; (c), (d) 不同直流偏置磁场下 (c) 1-1 型和 (d) 2-1 型磁电机机械天线的阻抗频响曲线

Fig. 2. Impedance characteristics of 1-1 type (a), (c) of and 2-1 type (b), (d) of magnetoelectric antenna under different driven conditions: (a), (b) Different driven voltages with constant bias fields; (c), (d) different bias fields with constant driven voltage.

磁电机机械天线的典型等效电路 MBVD 模型如图 3 所示, 其中  $L_m$ ,  $C_m$ ,  $R_m$  分别为磁电机机械天线的等效电感、等效电容和等效电阻, 三者构成了动态支路;  $C_0$  和  $R_0$  分别是静态电容与静态电阻,  $R_s$  表示电极损耗. 在图 3 所示电路中,  $f_s$  对应动态支路的串联谐振 ( $f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_m}}$ ). 在磁电机机械天线实际工作时, 从输出磁场的扫频曲线中提取的谐振频率, 称为工作频率  $f_d$ .

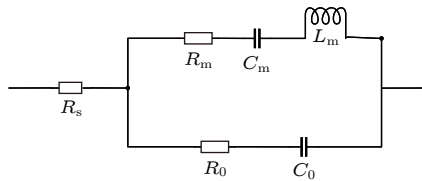


图 3 磁电机机械天线的等效电路 MBVD 模型

Fig. 3. Equivalent circuit MBVD model of magnetoelectric antenna.

由图 3 可知: 整个回路的阻抗模值

$$|Z| = \left| R_s + \left[ \left( \frac{1}{j\omega C_0} + R_0 \right) // \left( j\omega L_m + \frac{1}{j\omega C_m} + R_m \right) \right] \right|.$$

基于实验测量的阻抗模值曲线和非线性参数拟合可以确定 MBVD 模型中的参数值, 进而获取串联

谐振频率  $f_s$ . 非线性曲线拟合方法较多, 常用的有 Levenberg-Marquardt 法、Gauss-Newton 法、Gradient descent 法以及 Powell 法等, 本文拟合中选择 Levenberg-Marquardt 法. Levenberg-Marquardt 算法作为非线性优化的标准方法, 能提供非线性最小化 (局部最小) 的数值解, 适合对于谐振频率和非谐振频率的搜索, 并且具有 Gauss-Newton 法和 Gradient descent 法的优势, 同时又降低了初始值离局部极小值太远时优化失效的失败率, 即对初值不敏感. 拟合结果如图 4 所示.

图 4(a) 和图 4(b) 中, 两种磁电机机械天线的驱动电压统一为 0.5 V, 偏置磁场分别固定为 8.2 Oe 和 8.4 Oe. 从图 4 可以看到, 阻抗曲线的 MBVD 模型拟合结果和实测结果基本吻合. 相应的拟合参数在图中也有标注 (见图 4(a) 和图 4(b) 中的插图). 通过计算, 图 4(c) 和图 4(d) 分别给出了 1-1 型和 2-1 型磁电机机械天线中 3 种谐振频率 ( $f_m$ ,  $f_s$ ,  $f_r$ ) 的位置. 对于  $Q$  值更高的 1-1 型机械天线, 3 种谐振频率相差较小  $f_m \approx f_s \approx f_r$ , 说明此时磁电机机械天线的机械损耗很小. 在这种情况下基本可以认为谐振式磁电机机械天线工作于纯电阻状态, 这对于磁电机机械天线的阻抗匹配, 即“馈电”的设计是有利的.

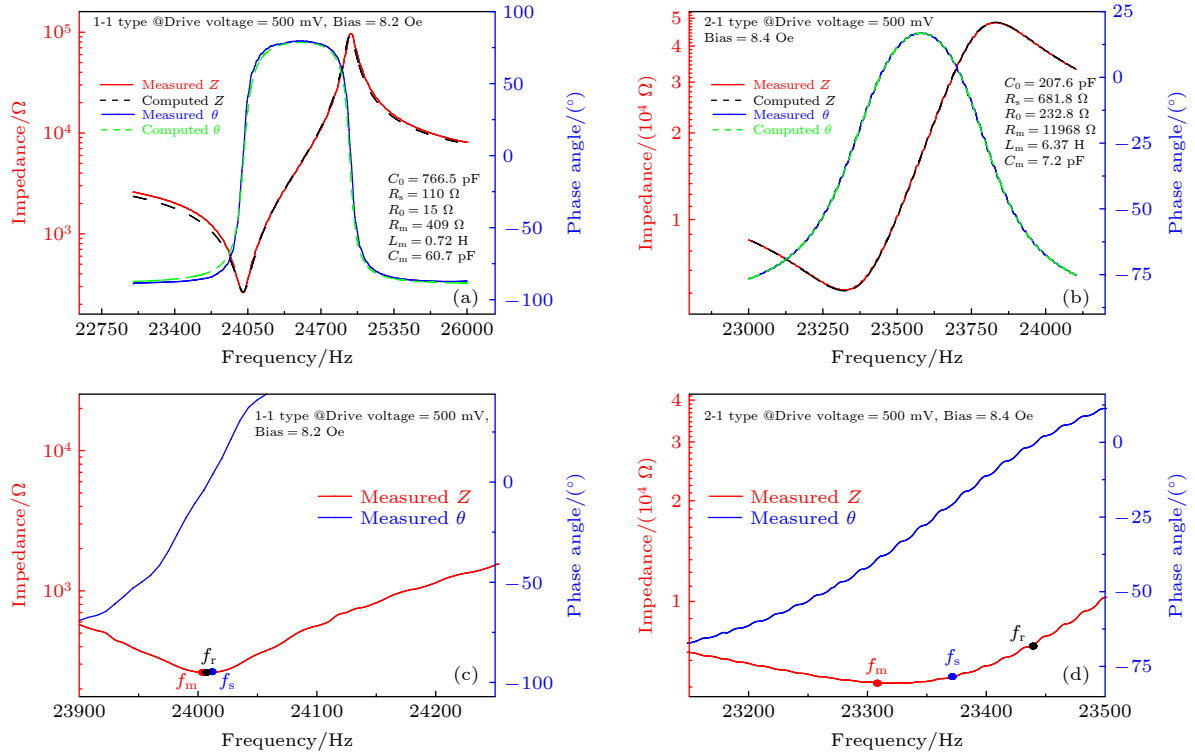


图 4 (a), (c) 1-1 型和 (b), (d) 2-1 型磁电机械天线的实测阻抗曲线及其拟合计算结果. (c), (d) 分别标注了对应的 3 种特征频率  $f_m$ ,  $f_s$ ,  $f_r$

Fig. 4. Measured and the fitted impedance curves for 1-1 type (a), (c) of and the 2-1 type (b), (d) of magnetoelectric antenna. Three kinds of resonance frequencies  $f_m$ ,  $f_s$ ,  $f_r$  are marked on panel (c) and (d).

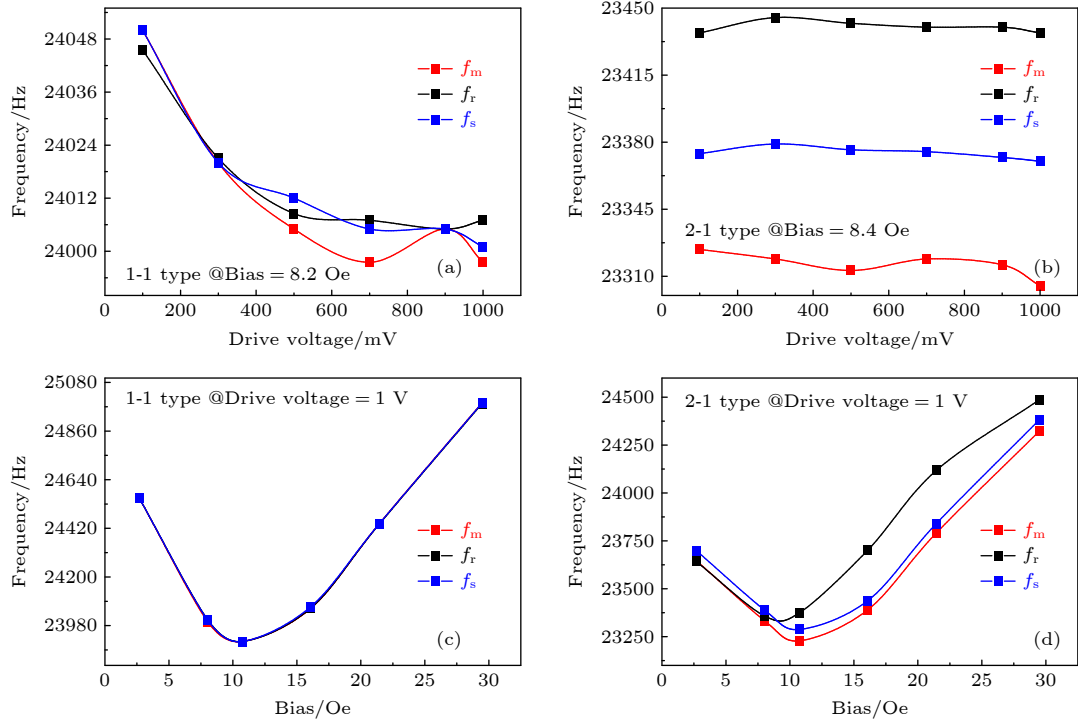


图 5 (a), (c) 1-1 型和 (b), (d) 2-1 型磁电机械天线的 3 种特征频率 ( $f_m$ ,  $f_s$ ,  $f_r$ ) 与驱动电压 (a), (b) 和偏置磁场 (c), (d) 的关系.

Fig. 5. Three kinds of resonance frequencies  $f_m$ ,  $f_s$ ,  $f_r$  for 1-1 type (a), (c) of and 2-1 type (b), (d) of magnetoelectric antenna as a function of the driven voltage (a), (b) and the applied bias field (c), (d).

但是对于  $Q$  值较低的 2-1 型磁电机械天线, 3 种谐振频率之间的关系则为  $f_m < f_s < f_r$ , 此时则需要进一步研究不同  $Q$  值下的机械天线 3 种谐振频率在不同驱动条件下的变化规律.

以 1-1 型和 2-1 型两种不同  $Q$  值磁电机械天线中的 3 种谐振频率为观察对象, 图 5 定量分析了驱动电压和偏置磁场对两种磁电机械天线的影响规律. 从图 5(a) 可看到在固定偏置磁场时, 1-1 型磁电机械天线在较低的电压 (驱动电压  $\leq 1$  V) 驱动下表现了明显的弹簧软化行为, 频率的变化说明此时系统存在非线性效应. 3 种谐振频率在不同驱动电压下也是基本重合 ( $\Delta f < 10$  Hz). 有关磁电谐振器的非线性动力学理论可参考我们过去的研究结果 [22,23]. 而对于 2-1 型磁电机械天线, 3 种谐振

频率在不同驱动电压下基本保持不变, 说明此时系统基本没有非线性效应. 考虑偏置磁场对 3 种谐振频率的影响, 图 5(c) 和图 5(d) 给出的结果和前文的分析结论一致. 只是在较低的磁场偏置 ( $H_{\text{bias}} < 10$  Oe) 下, 2-1 型磁电机械天线中的 3 种谐振频率的大小关系出现了异常, 其原因不是本文的关注内容, 有待将来进一步的研究.

图 6 分析了磁电机械天线的实际工作频率  $f_d$  与 3 种谐振频率的关系, 并计算了其工作状态下的阻抗实部与相角. 采用文献 [23] 中的试验方法. 通过空芯螺线管来接收磁电机械天线在近场 (距离 30 cm) 产生的磁能量. 图 6(a) 和图 6(b) 给出了接收螺线管中感应电流的扫频结果, 其中工作频率  $f_d$  对应于扫频曲线中峰位. 图 6(c) 和图 6(d) 汇总了

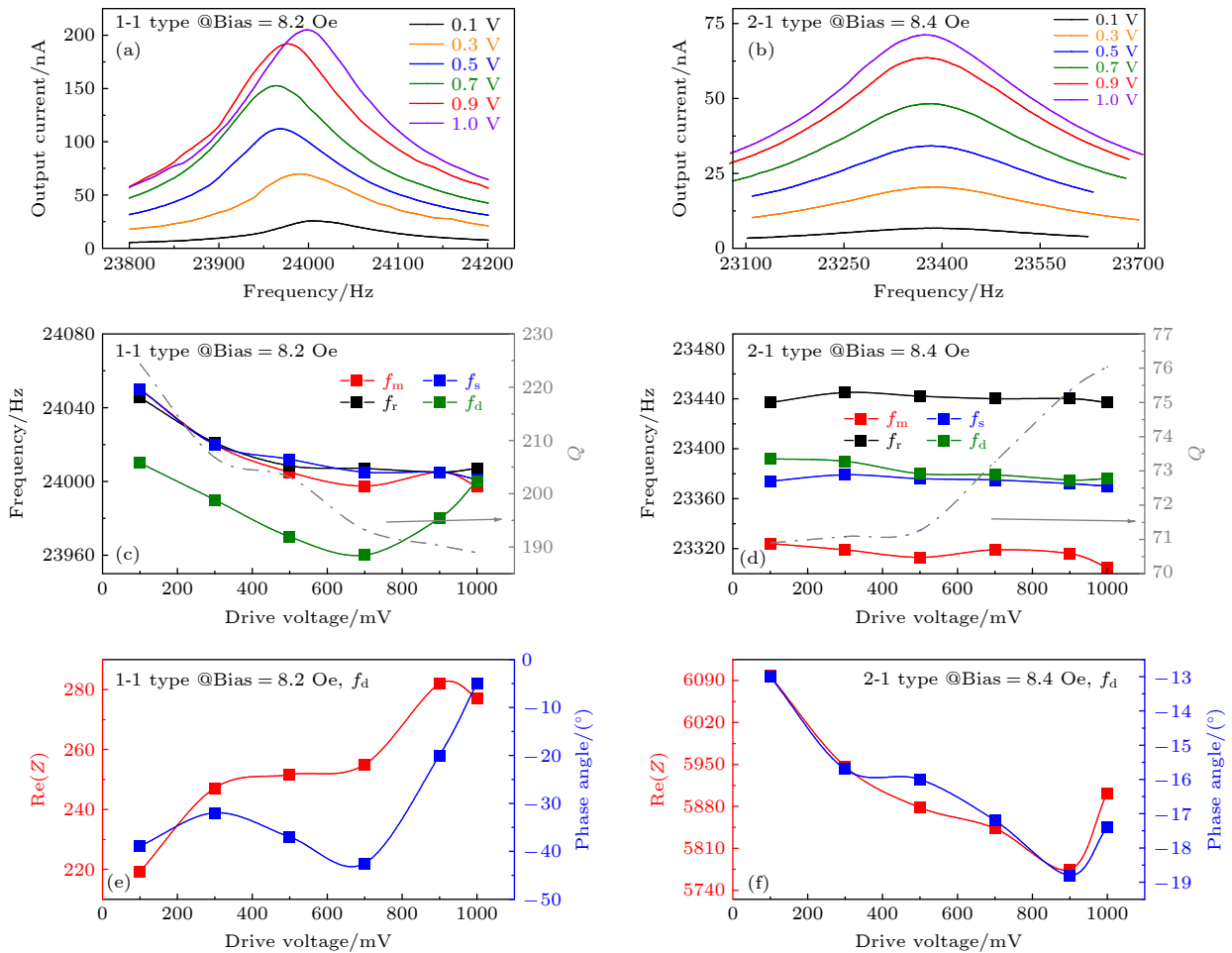


图 6 不同驱动电压下, 1-1 型 (a) 和 2-1 型 (b) 磁电机械天线辐射场强 (以接收螺线管中的感应电流为替代测试对象) 的扫频曲线; 不同驱动电压下, 1-1 型 (c) 和 2-1 型 (d) 磁电机械天线的 3 种特征频率与实际工作频率 (对应于接收信号频响曲线的最高值); 不同激励电压下 1-1 型 (e) 和 2-1 型 (f) 磁电机械天线实际工作的电阻和相角

Fig. 6. Induced current in the pick-up coil as a function of the driving frequency under different driving voltages for 1-1 type (a) of and 2-1 type (b) of magnetoelectric antenna; three kinds of resonance frequencies ( $f_m$ ,  $f_s$ ,  $f_r$ ) and the working frequency  $f_d$  as a function of the driving voltages for 1-1 type (c) of and 2-1 type (d) of magnetoelectric antenna; the resistance component and the phase angle of 1-1 type (e) of and 2-1 type (f) of magnetoelectric antenna under different driving voltage.

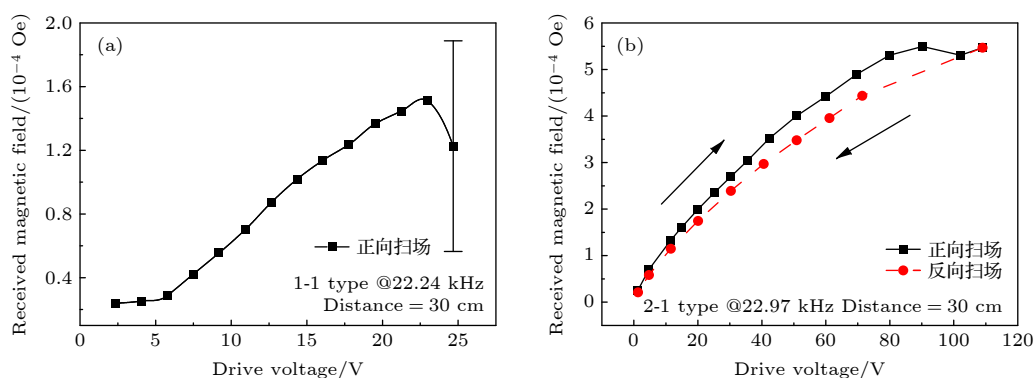


图 7 1-1 型和 2-1 型磁电机机械天线辐射能力对比 (a) 1-1 型磁电机机械天线在正向扫场下的辐射磁场大小; (b) 2-1 型磁电机机械天线在正反向扫场下的辐射磁场

Fig. 7. Comparison of the radiation capability of magnetolectric antennas with different  $Q$  values: The received magnetic field from 1-1 type (a) of and 2-1 type (b) of magnetolectric antenna by electric field sweeping.

3 种谐振频率及工作频率随驱动电压的变化情况. 从图 6(c) 可以看到, 在驱动电压低于 1 V 的情况下, 1-1 型磁电机机械天线的实际工作频率偏离其谐振频率. 另外需要注意的是, 对于高  $Q$  值的磁电机机械天线, 随着驱动电压的增加, 其  $Q$  值有明显下降的趋势 (见图 6(c) 的右侧轴). 图 6(c) 中, 在 1 V 驱动时, 1-1 型机械天线的  $Q$  值从 225 下降到 190. 此时其实际工作频率基本和其串联谐振频率相重合. 对于低  $Q$  值的 2-1 型磁电机机械天线, 可以明显看到: 其实际工作频率接近串联谐振频率. 和 1-1 型磁电机机械天线所不同, 2-1 型磁电机机械天线的  $Q$  值随着驱动电压的增大, 没有表现出下降的行为, 反而有轻微的上升趋势. 最后图 6(e) 和图 6(f) 计算了两种天线的阻抗实部和相角, 以反映其电抗和电阻大小. 可以看出 1-1 型磁电机机械天线的阻抗实部只有 250  $\Omega$  左右, 但是其低场驱动下的相角较大. 2-1 型磁电机机械天线的阻抗实部大约是 6000  $\Omega$ , 但是其相角小, 容抗并不大, 大约只有几十欧姆. 因此, 无论是 1-1 型还是 2-1 型机械天线, 均不需要大的匹配网络进行调谐.

图 7 最后对比了 1-1 型和 2-1 型磁电机机械天线磁场辐射能力和功率容量的差异, 实验中磁场接收线圈与磁电机机械天线距离 30 cm. 对于高  $Q$  值的 1-1 型磁电机机械天线, 在驱动电压增至 25 V 时, 系统表现出了强的混沌现象. 辐射的磁场强度在  $6 \times 10^{-5}$ — $1.9 \times 10^{-4}$  Oe 之间呈现无规律的跳变, 其物理起源是高  $Q$  值谐振器在高场谐振驱动下强的非线性特性. 而对于 2-1 型机械天线, 当驱动电压增至 90 V 时, 此时系统的辐射能力趋于饱和, 最大辐射磁场强度约为  $5.5 \times 10^{-4}$  Oe. 在进一步降低驱

动电压的过程中, 2-1 型磁电机机械天线的辐射性能表现了一定的洄滞现象, 这可以归因于软磁材料中磁畴的不可逆翻转. 不难看出 2-1 型磁电机机械天线的辐射能力强于 1-1 型磁电天线. 前者的功率容量受限于系统的饱和问题, 而后者则是系统的非线性混沌现象.

## 4 结 论

本文系统研究了 1-1 型和 2-1 型磁电机机械天线的阻抗特性, 重点分析了天线振子机械品质因数对天线设计的重要影响. 研究发现: 对于低  $Q$  值的磁电机机械天线, 辐射强度在串联谐振频率处具有最大值; 对于高  $Q$  值的天线振子, 本文研究的 3 种特征频率基本重合, 但是均偏离其实际工作频率. 另一方面, 两种天线的电抗分量均小于 100  $\Omega$ , 因此都不需要大的阻抗匹配网络进行调谐. 然而高  $Q$  值的磁电机机械天线振子在串联谐振频率处, 阻抗实部只有 200  $\Omega$  左右, 难以支持高电压加载, 而且非线性效应较强, 输出响应容易饱和. 低  $Q$  值高带宽机械天线耦合能力弱的不足, 一定程度上则可以通过增大驱动电压来弥补. 因此在进行磁电机机械天线的结构和馈电设计时, 需要对  $Q$  值进行平衡, 以同时实现强耦合强辐射的应用需求. 在本文的基础上, 我们也在进行下一代磁电天线振子的结构设计, 希望能够解决目前甚低频磁电天线难以走向应用的瓶颈问题.

## 参考文献

- [1] Domann J P, Carman G P 2017 *J. Appl. Phys.* **121** 044905
- [2] Troy Olsson P M 2017 *A MEchanically Based Antenna*

- (AMEBA) (DARP: HR001117S0007)
- [3] Bickford J A, Duwel A E, Weinberg M S, McNabb R S, Freeman D K, Ward P A 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 2209
  - [4] Manteghi M 2019 *IEEE Antennas Propag.* **61** 14
  - [5] Shi W, Zhou Q, Liu B 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 188401 (in Chinese) [施伟, 周强, 刘斌 2019 物理学报 **68** 188401]
  - [6] Cui Y, Wang C, Song X 2021 *Acta Automatica. Sin.* **47** 1335 (in Chinese) [崔勇, 王琛, 宋晓 2021 自动化学报 **47** 1335]
  - [7] Ding C Q, Song H Y 2019 *Ship Electron. Eng.* **39** 166 (in Chinese) [丁春全, 宋海洋 2019 舰船电子工程 **39** 166]
  - [8] Zhou Q, Shi W, Liu B, Wei Z H, He P F, Zhang J 2020 *J. National Univ. Defense Tech.* **4** 128 (in Chinese) [周强, 施伟, 刘斌, 魏志虎, 何攀峰, 张江 2020 国防科技大学学报 **4** 128]
  - [9] Wang X Y, Zhang W H, Sun L H, Zhou X, Cao Z X, Quan X 2021 *Acta Electron. Sin.* **49** 824 (in Chinese) [王晓煜, 张雯厚, 孙丽慧, 周鑫, 曹振新, 全鑫 2021 电子学报 **49** 824]
  - [10] Xu J R, Leung C M, Zhuang X, Li J F, Bhardwaj S, Volakis J, Viehland D 2019 *Sensors* **19** 853
  - [11] Luong K Q T, Wang Y 2022 *Sensors* **22** 455
  - [12] Hassanien A E, Breen M, Li M H, Gong S 2020 *Sci. Rep.* **10** 17006
  - [13] Zhou P, Popov M A, Liu Y, Bidthanapally R, Filippov D A, Zhang T, Qi Y, Shah P J, Howe B M, McConney M E, Luo Y, Sreenivasulu G, Srinivasan G, Page M R 2019 *Phys. Rev. Mater.* **3** 044403
  - [14] Kemp M A, Franzi M, Haase A, Jongewaard E, Whittaker M T, Kirkpatrick M, Sparr R 2019 *Nat. Commun.* **10** 1715
  - [15] Nan T X, Lin H, Gao Y, Matyushov A, Yu G, Chen H, Sun N, Wei S, Wang Z, Li M, Wang X, Belkessam A, Guo R, Chen B, Zhou J, Qian Z, Hui Y, Rinaldi M, McConney M E, Howe B M, Hu Z, Jones J G, Brown G J, Sun N X 2017 *Nat. Commun.* **8** 296
  - [16] Schneider J D, Domann J P, Panduranga M K, Tiwari S, Shirazi P, Yao Z, Sennott C, Shahan D, Selvin S, McKnight G, Wall W, Candler R N, Wang Y E, Carman G P 2019 *J. Appl. Phys.* **126** 224104
  - [17] Hassanien A E, Breen M, Li M H, Gong S 2020 *J. Appl. Phys.* **127** 014903
  - [18] Nie C W, Wu H Z, Wang S H, Cai Y Y, Song S, Sokolov Oleg, Bichurin M I, Wang Y J 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 247501 (in Chinese) [聂长文, 吴瀚舟, 王书豪, 蔡园园, 宋树, Sokolov Oleg, Bichurin M I, 汪尧进 2021 物理学报 **70** 247501]
  - [19] Cui Y, Wu M, Song X, Huang Y P, Jia Q, Tao Y F, Wang C 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 164 (in Chinese) [崔勇, 吴明, 宋晓, 黄玉平, 贾琦, 陶云飞, 王琛 2020 物理学报 **69** 164]
  - [20] Wang C, Cui Y, Song X, Yuan H W 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 321 (in Chinese) [王琛, 崔勇, 宋晓, 袁海文 2020 物理学报 **69** 321]
  - [21] Dong C, Wang X, Lin H, Gao Y, Sun N X, He Y, Li M, Tu C, Chu Z, Liang X, Chen H, Wei Y, Zaeimbashi M, Wang X, Lin H, Gao Y, Sun N X 2020 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Letters* **19** 398
  - [22] Chu Z, Dong C, Tu C, He Y, Liang X, Wang J, Wei Y, Chen H, Gao X, Lu C, Zhu Z, Lin Y, Dong S, McCord J, Sun N X 2019 *Phys. Rev. Appl.* **12** 044001
  - [23] Chu Z, Gao J, Sun Z, Mao Z, Zhang S, Shen Y, Dong S 2021 *Appl. Phys. Lett.* **119** 182901
  - [24] Chu Z, Shi H, Shi W, Liu G, Wu J, Yang J, Dong S 2017 *Adv. Mater.* **29** 1606022
  - [25] Dong S, Zhai J, Li J, Viehland D 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 252904
  - [26] Cho K H, Priya S 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 232904
  - [27] Chen L, Wang Y 2021 *Materials (Basel)* **14** 4730
  - [28] Karapetyan G, Kaysashev V, Kutepov M, Minasyan T, Kalinin V, Kislitsyn V, Kislitsyn V, Kaidashev E 2020 *J. Adv. Dielect.* **10** 2060009



# Impedance characteristics of magnetoelectric antennas\*

Song Kai-Xin<sup>1)2)3)</sup> Min Shu-Gang<sup>4)</sup> Gao Jun-Qi<sup>1)2)3)†</sup> Zhang Shuang-Jie<sup>1)2)3)</sup>

Mao Zhi-Neng<sup>1)2)3)</sup> Shen Ying<sup>1)2)3)</sup> Chu Zhao-Qiang<sup>1)2)3)4)‡</sup>

1) (*Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

2) (*Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security, Ministry of Industry and Information Technology (Harbin Engineering University), Harbin 150001, China*)

3) (*Underwater Acoustics College of Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

4) (*Innovation and Development Center, Harbin Engineering University, Qingdao 266071, China*)

( Received 30 March 2022; revised manuscript received 19 May 2022 )

## Abstract

Mechanical antenna, a novel scheme for realizing very low frequency (VLF) and portable transmitters, has been investigated recently. In this work, the impedance characteristics of 1-1 type of and 2-1 type of magnetoelectric (ME) mechanical antennas are systematically studied and compared with each other. Based on the measured frequency-impedance curves and the corresponding modified Butterworth-van Dyke (MBVD) model, three characteristic frequency points, i.e. the minimum impedance frequency  $f_m$ , the series resonance frequency  $f_s$ , and the resonance frequency  $f_r$  are obtained and discussed. On this basis, the influence of driving voltage, bias magnetic field, and the quality factor ( $Q$  value) on ME antenna impedance characteristics are experimentally explored. Finally, the reactance components of both 1-1 type of and 2-1 type of ME antenna are collected by referring to the actual working frequency  $f_a$ . Experimental results prove that the resonant ME antennas are basically pure resistive vibrators, while an ME antenna with high  $Q$  value normally fails to support high driving field because of the low resistance ( $< 100 \Omega$ ) and the strong nonlinearity. Thus, the field radiation capability in 2-1 type of ME antenna is higher than that in 1-1 typed one. This work provides the ideas for choosing  $Q$  value and further optimizing a magnetoelectric antenna based on the understanding of its impedance characteristics.

**Keywords:** mechanical antenna, magnetoelectric coupling, impedance characteristic, mechanical quality factor, modified Butterworth-van Dyke model

**PACS:** 75.85.+t, 43.38.Fx, 43.38.Ct, 43.40.Yq

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220591

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52102127), the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2021QF021), and the Foundation of National Defense Key Laboratory, China (Grant No. KY10500220007).

† Corresponding author. E-mail: [gaojunqi@hrbeu.edu.cn](mailto:gaojunqi@hrbeu.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [zhaoqiangchu@hrbeu.edu.cn](mailto:zhaoqiangchu@hrbeu.edu.cn)

## 磁电机械天线的阻抗特性分析

宋凯欣 闵书刚 高俊奇 张双捷 毛智能 沈莹 储昭强

### Impedance characteristics of magnetoelectric antennas

Song Kai-Xin Min Shu-Gang Gao Jun-Qi Zhang Shuang-Jie Mao Zhi-Neng Shen Ying Chu Zhao-Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 247502 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220591

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220591>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于旋转永磁体的超低频机械天线电磁特性分析

Performance analysis of spinning magnet as mechanical antenna

物理学报. 2019, 68(18): 188401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190339>

#### 基于驻极体材料的机械天线式低频/甚低频通信磁场传播模型

Magnetic field propagation model of low frequency/very low communication based on mechanical antenna of electret

物理学报. 2020, 69(15): 158401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200314>

#### 小型低频发射天线的研究进展

Research progress of small low-frequency transmitting antenna

物理学报. 2020, 69(20): 208401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200792>

#### 复合多铁链的磁电耦合行为与外场调控

Magnetoelectric coupling and external field modulation of a composite multiferroic chain

物理学报. 2018, 67(24): 247501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181561>

#### 多阶有序钙钛矿多铁性材料的高压制备与物性

High pressure synthesis and physical properties of multiferroic materials with multiply-ordered perovskite structure

物理学报. 2018, 67(15): 157505 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180878>

#### 基于单层二硫化钼的高品质因子、高品质因数的四波段完美吸收器

A four-band perfect absorber based on high quality factor and high figure of merit of monolayer molybdenum disulfide

物理学报. 2021, 70(12): 128101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202163>