

【引用格式】滕俊哲, 王久法, 杨明智. 甚低频声源用新型电磁驱动结构的建模与分析[J]. 数字海洋与水下攻防, 2025, 8 (1): 61-68.

甚低频声源用新型电磁驱动结构的建模与分析

滕俊哲^{1, 2}, 王久法^{1, 2}, 杨明智^{1, 2, *}

(1. 中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;

2. 清江创新中心, 湖北 武汉 430200)

摘要 针对适装于无人反水雷平台的扫雷声源要求结构紧凑、输出位移大、甚低频辐射能力强的特点, 提出一种可模块化组装的新型电磁驱动结构。该驱动结构具有结构简单、输入-输出线性化、驱动力电流比高等优点。在分析该新型电磁驱动结构运行原理的基础上, 建立了其等效磁路模型, 进一步根据单自由度带阻尼受迫振动模型建立了新型电磁驱动结构的动力学模型。为验证等效磁路模型及动力学模型的正确性, 建立了该驱动结构的有限元仿真模型, 将仿真所得的电磁力及输出位移与基于等效磁路的仿真模型结果进行对比, 有限元分析结果和磁路分析结果较好吻合, 证明了所建模型的准确性。进一步根据声辐射模型计算得到声源在 30~200 Hz 激励下的输出声源级, 计算结果表明: 所提出的新型电磁驱动结构驱动的甚低频声源在 70 Hz 谐振频率下, 输出声源级可达 185 dB, 在 30~200 Hz 频带内输出声源级均大于 145 dB, 能够满足甚低频大功率输出的要求, 且通过模块化组装能够实现高声源级输出, 可为新型扫雷声源的设计提供理论支撑。

关键词 扫雷声源; 甚低频; 电磁驱动; 电磁力

中图分类号 TM 57

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2025)01-0061-08

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2025.01.008

Modeling and Analysis of Innovative Electromagnetic Driving Structures for Very Low Frequency Sound Sources

TENG Junzhe^{1, 2}, WANG Jiufa^{1, 2}, YANG Mingzhi^{1, 2, *}

(1. No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China;

2. Qingjiang Innovation Center, Wuhan 430200, China)

Abstract In response to the needs of unmanned mine countermeasures platforms, a novel electromagnetic driving structure is designed to achieve a compact structure, large displacement output, and powerful very low frequency (VLF) radiation capabilities. This structure is characterized by simple design, linearization of input and output, and a high driving force-to-current ratio. Based on the operating principles of the electromagnetic driving structure, an equivalent magnetic circuit model is established and the dynamic model is then established according to the single-degree-of-freedom damped forced vibration model. These models are verified through a finite element simulation model. The simulated electromagnetic force and output displacement are compared with the simulation results based on the equivalent magnetic circuit. The finite element analysis results are in good agreement with the magnetic circuit analysis results, which proves the accuracy of the models. Then, based on the sound radiation model, the output sound source level under 30~200 Hz

收稿日期: 2024-10-31

作者简介: 滕俊哲 (2001-), 男, 硕士生, 主要从事甚低频水声换能器建模与设计研究。

*通信作者: 杨明智 (1992-), 男, 博士, 工程师, 主要从事大功率超低频水下声发射装备关键技术研究。

excitation is calculated. The results show that the output level of the very-low frequency sound source driven by the proposed new electromagnetic driving structure can reach 185 dB at the resonant frequency of 70 Hz, and the output level of the sound source in the frequency band of 30~200 Hz is greater than 145 dB, which can meet the requirements of the very-low frequency high-power output, and the high sound source level output can be realized through modular assembly. It can provide theoretical support for the design of new minesweeping sound source.

Key words minesweeping sound source; very low frequency; electromagnetic driving; electromagnetic force

0 引言

反水雷装备作为水中兵器装备的重要组成部分,在保障国家安全过程发挥着重要作用^[1]。随着“零伤亡”的战争理念日趋深入人心,以无人技术为代表的高新技术广泛渗透和深入应用到反水雷中,并正在更大范围、更深层次深刻影响反水雷装备和技术的发展^[2-3]。传统的反水雷装备的尺寸、重量、功耗等较大,无法适装于无人反水雷平台,扫雷声源作为反水雷作战的重要装备之一,亟需研制重量轻、体积小、控制简单、甚低频辐射能力强的轻小型扫雷声源,以适应无人艇、无人潜航器、半潜式无人潜航器等无人平台的搭载需求。

由于声源在甚低频段辐射阻非常小^[4-5],大功率发射需要声源具有大的振动体积位移,实现大的振动体积位移主要通过增大声源辐射面面积和增大声源输出直线位移 2 种方式。辐射面面积过大会严重影响扫雷声源适装性。因此,采用具有大位移特性的直线驱动技术是实现扫雷声源轻小型化的有效途径。相比于有源材料驱动技术,电磁驱动技术由于其谐振频率不受自身质量和体积的限制,在甚低频发射上具有一定优势^[6],根据结构的不同分为动圈式、动铁式、动磁式^[7],其中动铁式电磁驱动结构由于结构简单、工艺成熟、输出力大等优点受到广泛的研究与关注。文献[8]研制了水下谐振频率为 24 Hz 的动铁式电磁驱动结构甚低频声源,最大声源级为 182 dB。文献[9]研制了一台动铁式电磁驱动结构甚低频声源,通过在消声水池中进行测量,在水中谐振频率 51 Hz 处有最大声源级为 189.3 dB,重 75 kg。文献[10]设计的单面活塞动铁式电磁驱动结构声源,谐振频率 74 Hz 处的最大声源级可达 185.45 dB,重 150 kg。文献[4]在单面活塞动铁式电磁驱动结构声源基础上改进提出了双活塞面辐射动铁式驱动结构甚低频声源,该声源在

水中谐振频率为 80 Hz,最大声源级为 191.6 dB。文献[11]设计了一种双动铁式电磁结构的甚低频声源,谐振频率为 80 Hz,发射声功率为 500 W。然而,上述文献中所设计的声源均采用传统无永磁偏置的动铁式电磁驱动结构,在线圈电流变化的 1 个周期内,会产生 2 次电磁力最大值,导致声源工作频率为激励频率的 2 倍。在使用声源时,所发射的信号需要进行转化以适应倍频工作的特性,这使得声源在使用上缺乏一定的便利性^[5],并且倍频驱动条件下,输出声波线性度较差,不利于提升扫雷声源的舰船噪声模拟精度。文献[12]提出了一种在罐型铁芯中心罐芯上增加永磁偏置的高效动铁式驱动结构,并以此为基础研制了一台小型低频声源,然而其设计的声源仅工作在小功率条件下,并未开展大功率条件下的研究和测试。

综上所述,现有的动铁式电磁驱动结构的研究较多是针对传统无偏置结构和小功率条件下的永磁偏置结构,针对于大功率条件下的永磁偏置型动铁式驱动结构的研究还相对较少。因此,本文提出了一种可大功率工作的新型动铁式电磁驱动结构,基于等效磁路建立了动铁式电磁驱动结构的动力学模型,计算得到了其在目标频率条件下的电磁力和振动位移,并与有限元仿真结果进行对比验证,进一步的结合声辐射理论计算了在 20~300 Hz 激励条件下声源的辐射声源级。计算结果表明:所提出的新型动铁式电磁驱动结构能够满足大功率输出的要求,且通过模块化组装能够实现高声源级输出,可为新型扫雷声源的设计提供理论支撑。

1 新型动铁式电磁驱动结构

新型动铁式电磁驱动结构(以下简称“驱动器”)主要包括铁芯、动铁、线圈和永磁体。当给线圈施加交变电流 i 时,线圈中会产生交变磁场,磁力线通过铁芯、永磁体、动铁和气隙构成闭合磁

路, 如图 1 所示。动铁在电磁力驱动作用下做周期性振动, 进一步可通过多个驱动器驱动圆形活塞辐射面振动, 向外辐射声波。

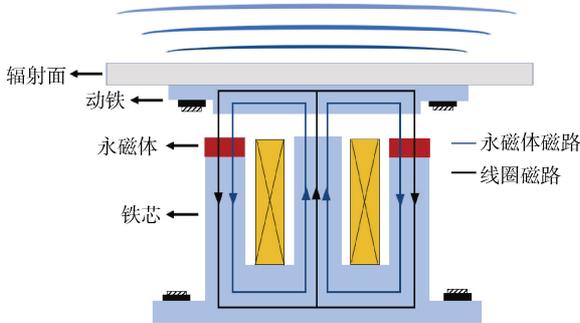


图 1 新型动铁式电磁驱动结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of novel electromagnetic driver with moving iron

图中: 永磁体厚度为 σ ; 气隙高度为 d ; 罐形铁芯中间磁极面积为 S_1 ; 罐形铁芯两端磁极面积均为 S_2 。环形线圈绕制于环形铁芯中, 线圈匝数为 N 。采用具有回转体结构特性的罐形硅钢铁芯, 可有效降低漏磁, 减小涡流损耗, 提高电-磁-机转换效率。驱动器各部件尺寸及磁学性能参数如表 1 所示。

表 1 驱动器尺寸及磁学性能参数

Table 1 Driver size and magnetic performance parameters

| 结构 | 厚度/mm | 直径/mm | 磁导率 | 匝数 |
|-----|-------|--------------|-------------|-----|
| 动铁 | 10 | 90 | 见图 3 | / |
| 铁芯 | 见图 2 | 见图 2 | 见图 3 | / |
| 永磁体 | 2 | 内径 60, 外径 90 | $1.06\mu_0$ | / |
| 线圈 | / | / | / | 300 |
| 气隙 | 4 | / | μ_0 | / |

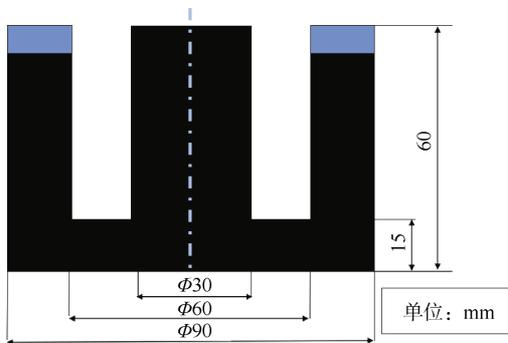


图 2 驱动器铁芯各部分尺寸示意图

Fig. 2 Dimensions of each part of driver core

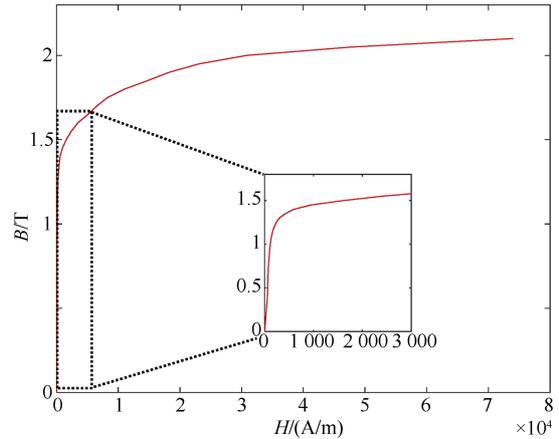


图 3 驱动器用硅钢 B-H 曲线图

Fig. 3 B-H curve diagram of silicon steel for drivers

2 基于等效磁路的动力学模型

甚低频大功率声源所采用的驱动器是其关键部件。本节以机电能量转换原理, 电磁学基本原理和机械振动理论为基础, 利用等效磁路法对驱动器进行分析, 得到了驱动器输出电磁力表达式, 并对该驱动器的动力学特性进行了分析计算。

活塞声源作为一个机械振动系统, 可以简化为一个单自由度的具有阻尼的受迫振动系统, 同时, 活塞声源的辐射面在振动时会受到水介质的反作用力, 可将其等效为一个辐射阻抗^[13-14]。其动力学方程可表示为

$$m \frac{du_0}{dt} + cu_0 + k \int_0^t u_0 dt = F - u_0(R_s + jX_s) \quad (1)$$

式中: R_s 为辐射阻; X_s 为辐射抗。由于在水中振动时, 辐射阻带来的阻尼效应远大于在水中振动时的阻尼, 因此将阻尼项 cu_0 忽略, 将辐射阻项 $u_0 R_s$ 和辐射抗项 $ju_0 X_s$ 移至等式左边, 可将该式改写为

$$(m + m_1) \frac{du_0}{dt} + R_s u_0 + k \int_0^t u_0 dt = F \quad (2)$$

式中, m_1 为辐射抗带来的等效附加质量, 其值为 $2\rho a^3$ 。根据该动力方程可得位移 x 与电磁驱动力 F 的关系为

$$F = x(k - \omega^2 M + jR_s \omega) \quad (3)$$

其中, $M = m + m_1$ 。基于此, 可知当 $k = \omega^2 M$ 时, 达到相同振动位移时所需电磁力最小。

对于图 1 结构形式的驱动器, 由等效磁路法可将其等效至如图 4 所示磁路。

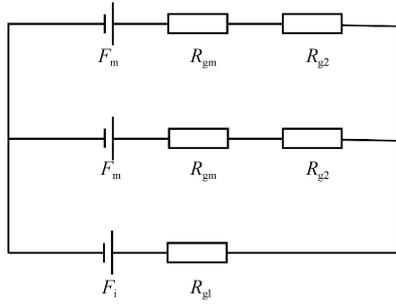


图 4 驱动器等效磁路图

Fig. 4 Equivalent magnetic circuit diagram for drivers

图中： F_i 为交流线圈所提供磁动势； F_m 为永磁体提供磁动势； R_{gm} 为半块永磁体环的磁阻； R_{g1} 为中间气隙磁阻； R_{g2} 为外环气隙磁阻。令 μ_r 为永磁体相对磁导率，经分析可得中间气隙主磁通 ϕ_0 为

$$\phi_0 = \frac{\mu_0 N(I_0 + i)}{\frac{\sigma}{2\mu_r S_2} + \frac{d}{S_1} + \frac{d}{2S_2}} \quad (4)$$

中间气隙处磁感应强度 B_1 以及外环气隙处磁感应强度 B_2 为

$$B_1 = \frac{\mu_0 N(I_0 + i)}{\frac{\sigma}{\mu_r} + d + \frac{dS_1}{2S_2}} \quad (5)$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 N(I_0 + i)}{\frac{\sigma}{\mu_r} + \frac{2dS_2}{S_1} + d} \quad (6)$$

最终，可得驱动器中电磁力 F 表达式为

$$F = \mu_0 N^2 \frac{S_1(1 + \frac{S_1}{2S_2})}{2(\frac{\sigma S_1}{2\mu_r S_2} + d + \frac{dS_1}{2S_2})^2} (I_0 + i)^2 \quad (7)$$

将式 7 代入式 2 中，最终可将该驱动器的动力学模型写作如下形式：

$$M \frac{du_0}{dt} + R_s u_0 + k \int_0^t u_0 dt = F = \mu_0 N^2 \frac{S_1(1 + \frac{S_1}{2S_2})}{2(\frac{\sigma S_1}{2\mu_r S_2} + d + \frac{dS_1}{2S_2})^2} (I_0 + i)^2 = A(I_0 + i)^2 \quad (8)$$

式中， A 随动铁与铁芯之间的气隙厚度 d 进行变化， $(I_0 + i)^2$ 展开后可以看作一个带直流偏置的角频率为 ω_1 的正弦信号和一个角频率为 $2\omega_1$ 的谐波信号的叠加。

基于式 8，在 Simulink 中建立其动力学模型，如图 5 所示。

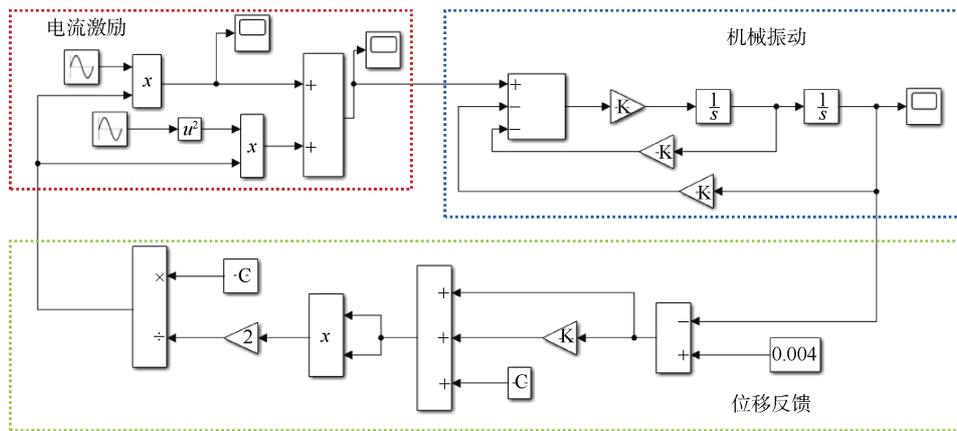


图 5 基于 Simulink 建立的驱动器动力学模型

Fig. 5 Driver dynamic model based on Simulink

针对适装于无人反水雷平台的扫雷声源要求结构紧凑、输出位移大、甚低频辐射能力强的特点，以及式 8 中驱动结构的动力学模型，本文首先选取频率为 70 Hz，幅值为 1.65 A 的正弦电流对新型动铁式驱动结构进行驱动，并在 Simulink 中对动铁所受电磁力及输出位移进行计算。

取计算时长为 0.8 s，最终得到动铁所受电磁力计算结果，如图 6 所示。

由图 6 可知，约 0.5 s 进入稳态后电磁力最大值为 77.91 N，最小值为 22.65 N，近似为谐波振荡，振动幅值为 27.63 N，频率为 70 Hz。

另一方面，动铁位移计算结果如图 7 所示。

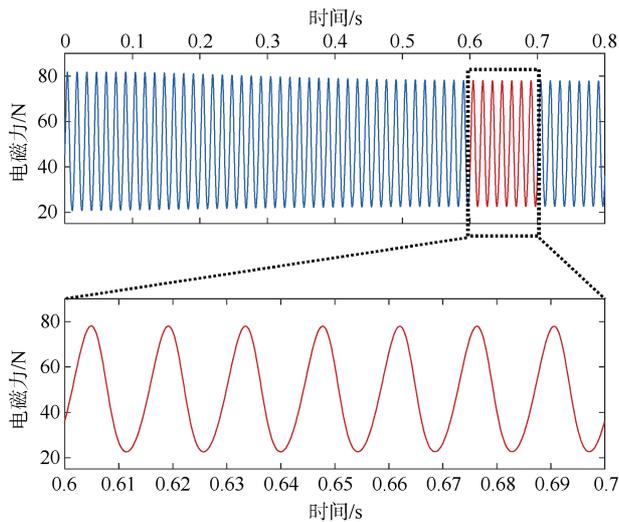


图 6 Simulink 中驱动器动铁所受电磁力计算结果
Fig. 6 Calculation results of electromagnetic force on moving iron of driver in Simulink

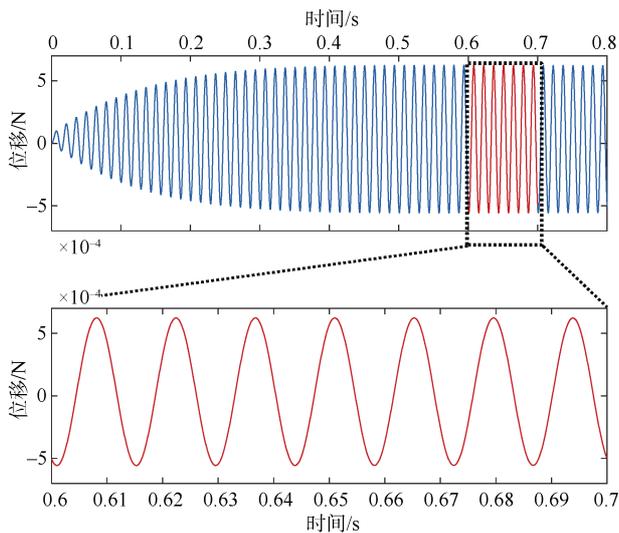


图 7 Simulink 中驱动器动铁位移计算结果
Fig. 7 Calculation results of displacement of moving iron in Simulink

由图可知, 动铁在电磁力作用下, 振动的峰峰值逐渐变大, 约在 0.5 s 后进入稳态, 其进入稳态后振动峰峰值为 1178.1 μm , 振动幅值为 589.05 μm , 可进一步计算得此时发射声源级为 185.05 dB。另一方面, 动铁振动频率、电磁力频率、驱动电流频率三者相同。因此在该输入下驱动器可以满足 185 dB 的发射声源级, 振动频率为 70 Hz 的大功率甚低频发射要求的同时, 通过在磁路中引入永磁体也克服了传统电磁声源的倍频效应。

3 有限元仿真分析

单独使用 Simulink 对驱动器动力学特性进行仿真时未考虑铁芯存在的磁阻以及实际磁路中存在的漏磁、能量损耗等问题。为验证第 2 节建立的驱动器动力学模型正确性, 并进一步得到更贴近驱动器实际工作工况时振动特性, 采用电磁有限元分析软件 Maxwell 3D 对驱动器输出电磁力及位移进行仿真计算。

基于第 2 章节的理论计算, 在 Maxwell 软件中建立驱动器实体三维模型。将求解环境设定为瞬态求解器, 给实体模型各部分赋予材料参数, 其中预先设定硅钢图 3 中的 $B-H$ 曲线。线圈材料为铜, 动铁和铁芯的材料为硅钢, 永磁体材料为 SmCo_{24} 。在建模时只考虑动铁在合力作用下做直线往复运动, 将其设置为一个 Band, 并忽略其由于气隙的不均匀造成的扭曲。同时设置运动部分质量为动铁、辐射面、流体附加质量之和; 根据第 2 章节中的计算结果设置刚度和阻尼系数。对运动气隙处的网格进行局部加密, 以更精确地计算运动区域磁场分布和动铁的运动情况。最后, 设置相应的电流激励和求解边界条件, 得到电磁驱动有限元模型, 如图 8 所示。

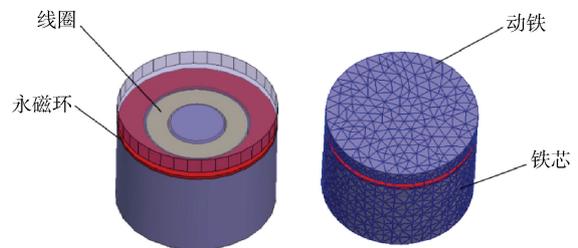


图 8 Maxwell 中驱动器有限元模型
Fig. 8 Finite element model of driver in Maxwell

取总计算时间为 800 ms, 计算步长为 0.1 ms。驱动器动铁在谐波电流激励下输出电磁力如图 9 所示。

由图 9 可知, 动铁所受电磁力同样约 0.5 s 后进入稳态, 进入稳态后电磁力峰峰值为 47.76 N, 电磁力振动幅值为 23.88 N, 振动频率为 70 Hz。

动铁输出位移如图 10 所示。

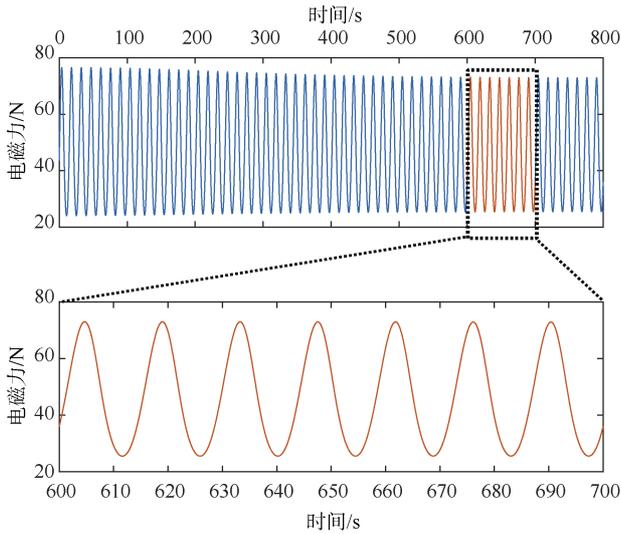


图 9 Maxwell 中驱动器动铁所受电磁力计算结果
Fig. 9 Calculation results of electromagnetic force on moving iron of driver in Maxwell

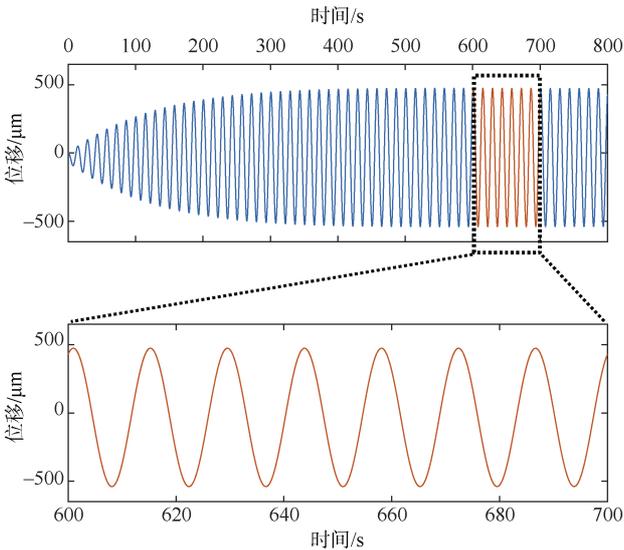


图 10 Maxwell 中驱动器动铁位移计算结果
Fig. 10 Calculation results of displacement of moving iron in Maxwell

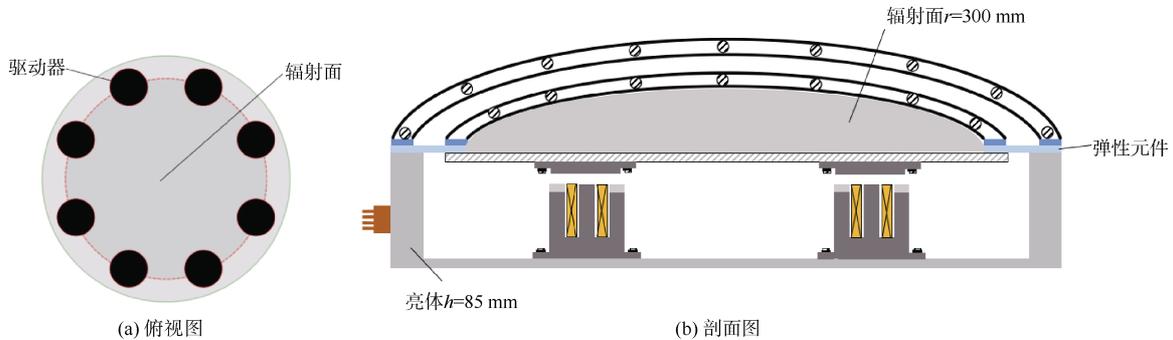


图 11 甚低频声源结构示意图
Fig. 11 Schematic diagram of very low frequency sound source structure

由图 10 可知，输出位移进入稳态后振动峰峰值为 $1\ 019.99\ \mu\text{m}$ ，振动幅值为 $510\ \mu\text{m}$ ，经计算得相应的发射声源级为 $183.83\ \text{dB}$ ，振动频率为 $70\ \text{Hz}$ 。Simulink 和 Maxwell 的仿真结果对比如表 2 所示。

表 2 Simulink 和 Maxwell 的仿真结果对比
Table 2 Comparison of simulation results between Simulink and Maxwell

| 仿真方法 | 电磁力 /N | 输出位移 / μm | 频率 / Hz | 声源级 /dB |
|----------|--------|----------------------|---------|---------|
| Simulink | 27.63 | 589.05 | 70 | 185.08 |
| Maxwell | 23.88 | 510 | 70 | 183.83 |

由表 2 及图 6、图 7、图 9、图 10 可以看出：Maxwell 和 Simulink 中动铁所受电磁力和位移仿真结果趋势大致相同，但在数值上 Maxwell 中电磁力、位移、声源级结果要略低于 Simulink 中的结果，这是实际磁路中存在的漏磁、涡流损耗导致的^[15-16]。

另一方面，每一个驱动器所需激励电流幅值仅为 $1.65\ \text{A}$ ，可以在铁芯不达到磁饱和的情况下适当加大使用电流，以提供驱动器更大的输出位移。在某一驱动器出现故障时也可较为方便地进行更换，这也表明本文提出的小型化、可模块化使用的直线驱动器在甚低频水声换能器中具有广阔的应用前景。

4 基于新型电磁驱动结构的甚低频声源水中辐射性能仿真

基于单个驱动器的输出振动位移结果，对分布式激励结构的甚低频声源在频率为 $30\sim 200\ \text{Hz}$ 电流激励条件下输出声源级进行理论分析和仿真计算。该甚低频声源结构示意图如图 11 所示。

甚低频声源发射的声波波长相对较长, 基本无指向性, 在忽略指向性的情况下, 声源水下辐射声源级与声功率的关系^[17]可以表示为

$$SL = 10 \lg P + 170.7 \quad (9)$$

因此, 当声源进行工作时, 若声源辐射声功率需达到 P , 由于整个声源由 8 个相同的驱动器驱动, 则每一个驱动器所要承担的声功率需要 $P/8$ 。根据活塞声场模型, 面积为 S , 振动速度为 u_0 的活塞声源的辐射声功率 P 计算公式^[18]为

$$P = \frac{1}{2} u_0^2 \frac{\pi \rho_0 c_0 S^2}{\lambda^2} \quad (10)$$

考虑活塞振动形式为简谐运动, 则其振动速度和位移有如下关系:

$$u = x\omega \quad (11)$$

代入化简后可得辐射面半径为 a 的活塞振动位移 x_m 与输出声功率 P 的关系如下:

$$x_m = 0.0496 \frac{\sqrt{P}}{f^2 a^2} \quad (12)$$

基于式 12 中关系, 取辐射面半径为 300 mm, 对声源输出声源级仿真结果如图 12 所示。

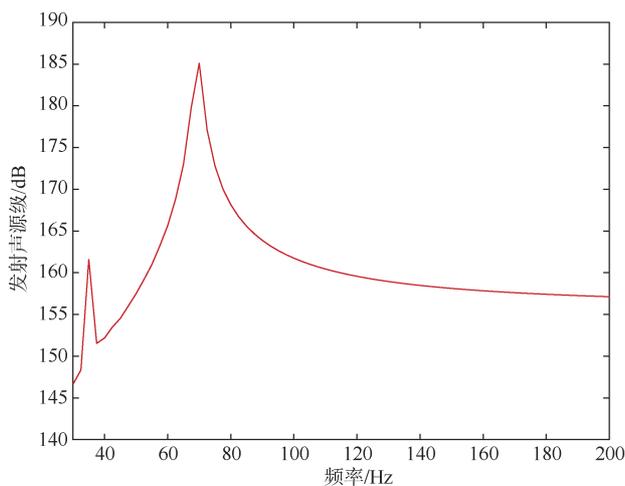


图 12 甚低频声源不同激励频率下发射声源级

Fig. 12 Emission sound source level of very low frequency sound source at different excitation frequencies

由图 12 可知, 本文提出的甚低频声源具有典型的谐振式声源输出特点, 在 30~200 Hz 频率范围内声源级仿真计算结果均大于 145 dB, 在谐振频率 70 Hz 处, 声源级可达 185 dB, 可基本满足大功率甚低频发射的设计需求, 能够为新型扫雷声源的

设计提供理论支撑。

5 结束语

本文提出了一种新型电磁驱动结构作为甚低频声源的激励单元进行大功率发射。根据机械振动理论和等效磁路法建立了驱动器的动力学模型。基于该动力学模型分别利用 Simulink 以及 Maxwell 对驱动器中动铁所受电磁力和位移进行仿真, 并分析对比了二者的结果。最后由活塞声辐射模型对由 8 个驱动器组成甚低频声源在 30~200 Hz 频带范围内的声源级进行了仿真计算, 主要得出了以下结论:

1) 驱动器在 Simulink 和 Maxwell 仿真的结果能够较好吻合, 得到的发射声源级结果相差 0.67%, 证明本文建立的等效磁路模型及动力学模型能够为驱动器激励电流幅值大小的选择提供一定的依据。

2) 当输入电流幅值为 1.65 A 时, 驱动器在谐振频率处的 Simulink 和 Maxwell 仿真计算位移幅值分别为 589.05 μm 和 510 μm 。计算结果表明: 通过相对较小的电流实现了较大的输出位移, 能够满足甚低频大功率发射需求。

3) 本文提出的驱动器最大直径为 90 mm, 结构简单紧凑, 工艺简单, 具有小型化、可模块化使用的特点, 在某一驱动器出现故障时仍能保证声源具有一定的输出能力, 并可相对较为方便地进行更换, 具有较高的可靠性, 且通过施加永磁偏置能够使输入输出线性化, 有效克服传统电磁声源的倍频效应, 有利于声源与功放的系统集成。

4) 甚低频声源在 30~200 Hz 频带范围内的声源级的声源级仿真计算结果均大于 145 dB, 谐振频率 70 Hz 处声源级可达 185 dB, 证明本文提出的新型电磁驱动结构能够满足甚低频大功率输出的要求, 且通过模块化组装能够实现高声源级输出, 可为新型扫雷声源的设计提供理论支撑。

本模型中依然存在一些问题有待解决, 主要有:

1) 对驱动器的仿真及计算过程中, 未充分考虑声源在实际应用环境中所必需的耐压性能和热

管理特性的仿真分析。

2) 该声源的工作频带范围依然相对有限, 未来可通过一定手段扩展声源的工作带宽, 增强其在甚低频下的声波发射性能。

参考文献

- [1] 王久法, 吴乔, 高频, 等. 国外无人反水雷特点及关键技术分析[J]. 数字海洋与水下攻防, 2020, 3(5): 382-386.
- [2] 倪华, 赵治平, 官红, 等. 我国反水雷支援舰能力建设探讨[J]. 数字海洋与水下攻防, 2019, 2(2): 1-6.
- [3] 赵治平, 官红, 艾艳辉, 等. 无人化时代反水雷装备体系构想[J]. 数字海洋与水下攻防, 2018, 1(1): 1-6, 29.
- [4] 杨明智, 王文彬, 吴萌, 等. 大功率超低频电磁换能器国内外发展现状及关键技术分析[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(4): 426-435.
- [5] 卢苇. 大功率甚低频水下声源研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [6] 卢苇, 蓝宇. 电磁式大功率水下超低频声源研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(7): 877-883.
- [7] 雷蕾, 余海涛, 费腾, 等. 一种动磁式直线振荡电机的设计与分析[J]. 微电机, 2017, 50(2): 1-4, 10.
- [8] 周瑜. 超低频声源研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [9] 张振铎. 超低频大功率电磁式换能器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [10] 李赞. 大功率超低频电磁式换能器研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- [11] БОГОЛЮБОВ Б Н, КИРСАНОВ А В, МУХИН Е Н, et al. Создание мощных низкочастотных (500 Вт 80 Гц) электромагнитных гидроакустических излучателей, коррекция резонансной частоты путем механической обработки упругих элементов[C]// Труды Всероссийской Конференции "Прикладные Технологии Гидроакустики И Гидрофизики". Санкт-Петербург: ПП Ширшова Российской академии наук, 2016.
- [12] 杨郑. 低功耗低频电磁式水下声源关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [13] 吴昌聚, 沈润杰. 水下振动动态特性研究[J]. 机械设计, 2003, 20(3): 35-39.
- [14] 何文. 宽屏大尺寸水下振动台关键技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [15] 杨明智, 胡敏, 汪柏松, 等. 大功率超低频膜结构电磁声源振动特性研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(2): 146-155.
- [16] 汪柏松. 大功率低频电磁膜式换能器研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
- [17] 滕舵, 杨虎, 李道江. 水声换能器基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2016.
- [18] 杜功焕, 朱哲民. 声学基础[M]. 2版. 南京: 南京大学出版社, 2001.

(责任编辑: 曹晓霖)