

多点驱动调控的低频宽带弯曲板换能器

王秋木, 莫喜平, 刘永平, 杨荣耀, 王厚琦

(中国科学院声学研究所, 北京 100190)

摘要:针对稀土超磁致伸缩材料在低频领域的应用局限于弯张换能器的问题,本文提出一种可由稀土材料驱动的弯曲板换能器。通过在两短边固定的矩形薄板一侧铺设纵振动稀土棒材,驱动矩形薄板进行弯曲振动。利用有限元方法仿真分析,调整弯曲板多组驱动的幅度及相位等,高效激励矩形薄板的一阶弯曲振动,提高辐射能力。换能器样机尺寸:791 mm×227 mm×121 mm(长×宽×高),一阶谐振频率 130 Hz,对应发送电流响应级 153 dB;二阶谐振峰 450 Hz,对应发送电流响应级 161.4 dB。本研究结果进一步拓展了稀土超磁致伸缩材料在低频领域的应用。

关键词:弯曲板;多点驱动;稀土超磁致伸缩材料;幅相控制;弯曲振动;低频;宽带;纵振棒

DOI: 10.11990/jheu.202506050

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.U.20250626.0913.002>

中图分类号: TB565 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2025)08-1644-06

Low-frequency broadband curved plate transducer with multi-point drive regulation

WANG Qiumu, MO Xiping, LIU Yongping, YANG Rongyao, WANG Houqi

(Laboratory of Ocean Acoustic Technology, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: To solve the problem that the application of rare earth giant magnetostrictive materials in the field of low frequency is limited to flextensional transducers, this paper proposes a flexure plate transducer that can be driven by rare earth materials. By laying longitudinal vibration rare earth rods on one side of the rectangular plate fixed on two short sides, the rectangular plate can be driven to bend. The finite element method is used to simulate and analyze the amplitude and phase of multiple groups of drives of large-size flexure plate, which can effectively excite the first-order flexure mode of rectangular plates and improve its radiation capacity. Transducer dimension: 791 mm×227 mm×121 mm (length × width × height), 1st order response peak occurs at 130 Hz, corresponding to the transmitting current response value of 153 dB, 2nd order resonance peak occurs at 450 Hz, corresponding to the transmitting current response value of 161.4 dB, this paper further expands the application of rare earth giant magnetostrictive materials in the field of low frequency.

Keywords: flexure plate; multi-point drive; rare earth giant magnetostrictive materials; amplitude and phase control; flexure vibration; low-frequency; broadband; longitudinal rods

稀土超磁致伸缩材料 Terfenol-D 由于具有更大的磁致伸缩应变、更高的能量密度以及更小的杨氏模量,更适用于低频、超低频大功率发射换能器的制作^[1]。20世纪80年代,美国制备出<112>轴向取向的超磁致伸缩材料 Terfenol-D;20世纪90年代,北京科技大学研制出<110>轴向取向材料 TDT110^[2-3];对 Terfenol-D 棒施加正向磁场时,材

料内部其他方向的磁畴将向与磁场平行的方向偏转,材料伸长。为了获得大应变,通常将 Terfenol-D 材料制备成柱状结构,利用其纵振动驱动水声换能器。美国海底作战中心将磁致伸缩棒用于驱动 2.5 kHz 的纵振动换能器^[4]。而低频领域,早期 Butler 用 Terfenol-D 棒驱动多边形换能器^[5-6],多边形的各边与沿圆周排布的多根稀土棒错位 45° 排布,每 2 根稀土棒推动一个辐射面振动。Moffett^[7-8]利用磁致伸缩棒驱动桶板弯张换能器、VII 弯张换能器实现低频大功率发射。刘永平^[9-10]利用 Terfenol-D 棒驱动双壳嵌套鱼唇式换能器,获得了低频、大功率的工作特性。李德鹏等^[11-12]将

收稿日期:2025-06-23.

网络出版日期:2025-06-26.

基金项目:国家自然科学基金项目(52250313).

作者简介:王秋木,女,博士后;

莫喜平,男,研究员,博士生导师;

刘永平,男,研究员.

通信作者:刘永平,Email: lypzsl@mail.ioa.ac.cn.

Terfenol-D 棒用于 IV 型弯张换能器、桶板型弯张换能器、多级壳体弯张换能器^[13]、四边型弯张换能器^[14]等。宁倩等^[15]将 Terfenol-D 棒用于驱动 IV 型弯张换能器。综上,由于 Terfenol-D 棒纵振动的限制,在低频领域的应用多集中于弯张换能器,因此探索更多的 Terfenol-D 材料适用的低频换能器结构是具有重要意义的。

本文提出一种大尺寸弯曲薄板作为辐射面, Terfenol-D 棒作为驱动的超低频弯曲换能器,利用大尺寸薄板一阶谐振频率低和 Terfenol-D 棒声速低的特性实现超低频声发射。通过有限元分析和实际情况相结合,确定适用于大尺寸弯曲薄板的多点驱动结构。此外,选取某一尺寸的矩形薄板作为辐射面,进行弯曲板换能器驱动部分幅度与相位的调控,实现换能器的大功率发射,并通过样机试验验证了分析结果。

1 基本结构和模态分析

1.1 基本结构

基于大尺寸薄板结构弯曲模态频率低的特点,本文选取板结构作为换能器的辐射面。图 1 所示该换能器辐射结构为矩形薄板,将其向外辐射的面定义为 A 面,另一面定义为 B 面。在 B 面沿其长度方向装配驱动振子,同时在 B 面两端沿其宽度方向施加固定边界条件。为了获得超低频工作频段,经过优化分析,该矩形薄板的结构尺寸最终确定为 764 mm×200 mm×16 mm(长×宽×高),辐射面部分采用钛合金材料。

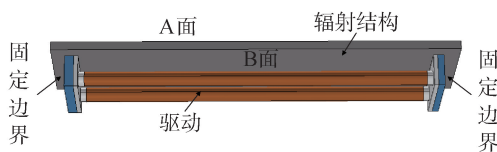


图 1 弯曲板换能器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the flexure plate transducer

根据图 2 所示换能器模态分析结果,对于大尺寸矩形薄板的驱动,利用单个长驱动振子并不合适,原因为:1)在该尺寸下,由稀土超磁致伸缩材料 Terfenol-D 构成的长驱动振子刚度较小,驱动振子的一阶弯曲振动先于辐射面的一阶弯曲振动,同时其二阶弯曲振动紧随辐射面一阶弯曲振动之后,导致换能器的工作频段较窄;2)稀土棒材一般设计为纵向振子,由于单个棒材很难在长度方向达到较大尺寸,通常对于大长度驱动振子,需要将多个棒材沿其轴向串联^[9]。磁路设计导致超磁致伸缩驱动振子的最大设计长度有限,无法满足大尺寸薄板的驱动需求。

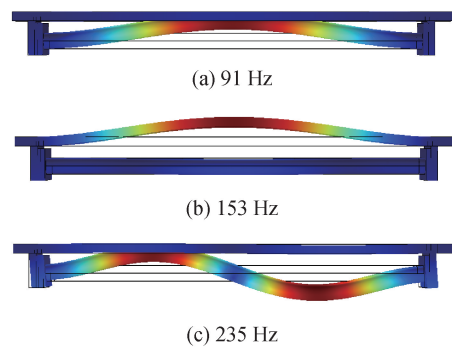


图 2 弯曲板换能器模态示意

Fig. 2 Schematic diagram of the vibration mode of the flexure plate transducer

1.2 多点驱动结构

本文提出如图 3 所示多点驱动大尺寸薄板的设计思路,将大尺寸薄板沿其长度方向分为多个部分,每个部分分别配置驱动振子。

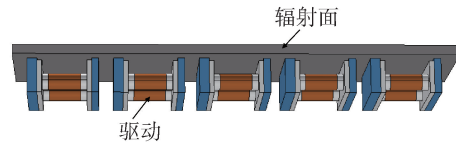


图 3 多点驱动弯曲板换能器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the flexure plate transducer driven at multi-point

图 4 为将换能器的驱动部分分为 5 组驱动振子后,在 100~800 Hz 频段范围内,仅存在大尺寸薄板的多阶弯曲振动模态,不再糅杂驱动振子的弯曲振动模态。其中第 2 阶和第 3 阶模态为反对称模态,无法实现换能器的有效声辐射;第 1 阶和第 4 阶振动模态为对称模态,可以实现换能器的有效声辐射,但是第 4 阶振动模态由于存在抵消,整体辐射效率要小于第 1 阶振动模态。

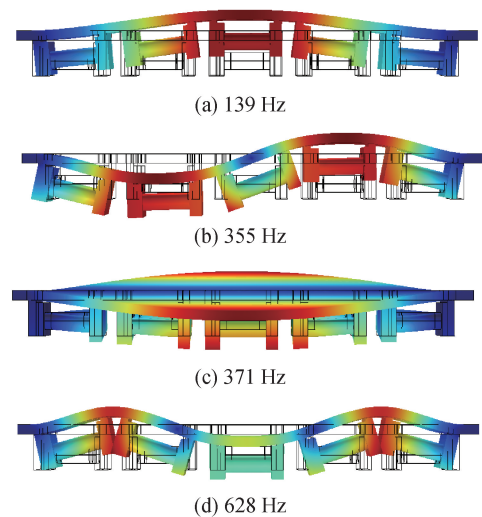


图 4 多点驱动弯曲板换能器模态示意

Fig. 4 Schematic diagram of the vibration mode of the flexure plate transducer driven at multi-point

2 工作特性分析

本文对稀土超磁致伸缩振子的分析采用压磁压电类比的方法进行。

2.1 常规驱动

初始分析时,对图 3 中换能器的 5 组驱动振子施加等幅同相的电流,为后续叙述方便,将其称为常规驱动。换能器发送电流响应计算曲线见图 5,其中一阶谐振频率为 105 Hz,发送电流响应为 132 dB,对应图 4 中的一阶振动模式;二阶谐振频率为 555 Hz,发送电流响应为 144 dB,对应图 4 中的四阶振动模式;换能器总体发送电流响应较小,而且 2 个谐振峰之间存在较大凹坑,位于 310 Hz,对应响应仅为 96 dB。因此在常规驱动下换能器不仅发送电流响应低,而且工作带宽窄,不利于换能器的应用。

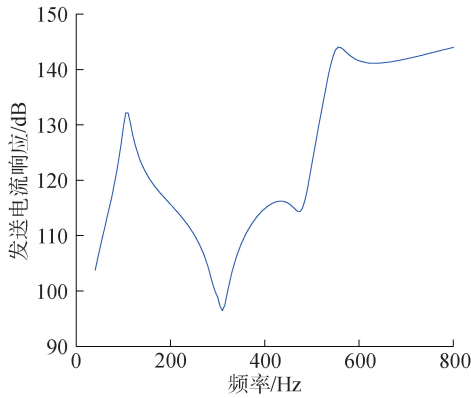


图 5 换能器发送电流响应计算曲线 (常规驱动,水下)
Fig. 5 Variation of the transmitting current response as a function of frequency (conventional drive method, in water)

图 6 从应力角度解析换能器在常规驱动下发送响应低且工作带宽窄的原因:定义辐射面中心区域的驱动振子为主驱动,即 1#驱动,紧邻主驱动两侧的驱动振子定义为边驱动,即 2#驱动。1)在主驱动与边驱动等幅同相的情况下,当 3 组振子同时收缩,辐射板 B 面的 3 部分均进行收缩振动,辐射板 A 面的 3 部分均进行拉伸振动;2)主辐射与边辐射之间的部分,2 组驱动振子所施加的外力方向相反,作用在截面上的应力产生抵消,振幅减小;3)主辐射部分与边辐射部分的弯曲振动相互抑制,促使整个辐射板振幅减小,根据换能器的实际情况,将图 6 中换能器的主驱动进一步分为主驱动与次驱动,如图 7 所示。图 8 所示为常规驱动下换能器的一阶振型图,与定性分析结果一致;4)如图 9 所示,由于二阶振动模式的存在,一阶谐振峰之后换能器的振型为一阶振动模式与二阶振动模式的耦合,然而由于常规驱动下换能器的一阶振型本身幅值较小,与反对

称振动的二阶振动模式耦合后,换能器的有效声辐射大幅度降低,因此响应曲线上出现大于 30 dB 的“凹谷”。

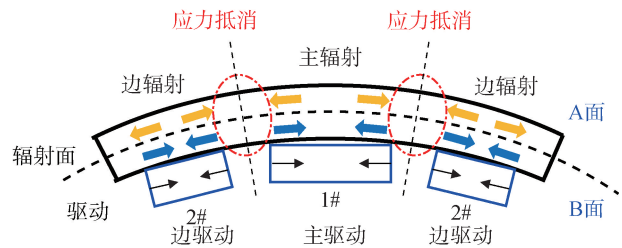


图 6 换能器常规驱动下应力分析示意
Fig. 6 Schematic diagram of stress analysis of the transducer under the conventional drive

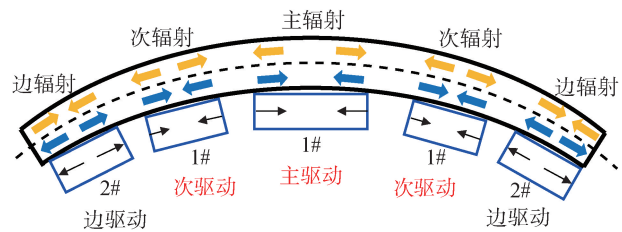


图 7 多点驱动换能器结构示意图
Fig. 7 Schematic diagram of structure of transducer under the multi-point drive

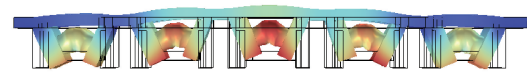


图 8 换能器常规驱动下一阶振型
Fig. 8 Schematic diagram of the first vibration mode of the transducer under the conventional drive

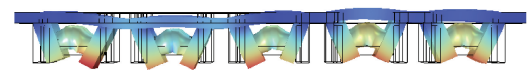


图 9 换能器响应曲线上“凹谷”振型
Fig. 9 Schematic diagram of the “valley” vibration mode of the transducer under the conventional drive

2.2 相位控制分析

本文基于常规驱动方式对大尺寸薄板进行多点驱动无法实现高效声辐射,且换能器工作带宽有限,为此将进一步探索大尺寸薄板的多点驱动方式。在保持 5 组驱动振子驱动电流等幅的情况下,分析改变驱动电流的相位差对换能器声辐射性能的影响。首先保持主驱动与次驱动等幅同相时,分析如表 1 所示,边辐射部分驱动与主辐射部分驱动电流相位差对换能器辐射的影响。图 10 所示,随着边驱动与主驱动、次驱动的相位差逐渐增大,一阶振动模式对应的第 1 阶谐振峰峰值逐渐增大,同时响应曲线上位于 310 Hz 处大于 30 dB 的凹坑逐渐“填平”;此时在四阶振动模式对应的原二阶谐振频率处出现相对凹坑,主要是因

为此时随着一阶谐振峰峰值的增大, 在原二阶谐振频率之前的频段内, 响应值总体增大, 而原二阶谐振频率对应的四阶振动模态由于存在辐射抵消, 响应值增大有限, 同时由于四阶振动模态的存在, 新的二阶谐振频率在四阶振动模态之前出现, 其对应振型与一阶谐振模态近似。

表 1 多点驱动弯曲板换能器驱动方式 (相位控制)

Table 1 Drive method of the flexure plate transducer driven at multi-point (phase control)

方式	电压	主驱动	次驱动	边驱动
方式 1	幅度(归一化)	1	1	1
	相位/(°)	0	0	φ
方式 2	幅度(归一化)	1	1	1
	相位/(°)	0	φ	180

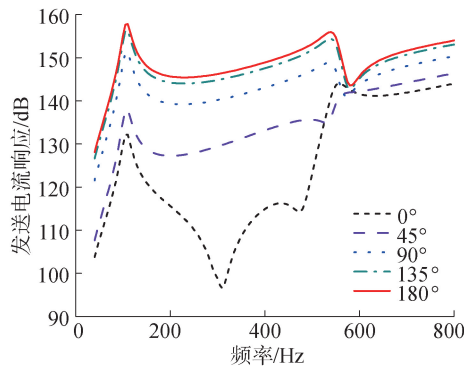


图 10 换能器发送电流响应曲线 (变化边驱动的相位, 水中)

Fig. 10 Variation of the transmitting current response as a function of frequency (phase control of the edge drive, in water)

根据边驱动相位调试结果, 确定当边驱动与主驱动及次驱动相位差为 180° 时, 发送电流响应曲线表现最好。在此基础上, 进一步分析次驱动相位对换能器发送电流响应曲线的影响, 如图 11 所示。随着相位差的增大, 一阶谐振峰略有下降, 二阶谐振峰上升较多, 破坏了换能器的宽带特性。因此保持主驱动、次驱动以及边驱动 0° 、 0° 、 180° 的相位梯度有利于换能器的宽带特性。

2.3 幅度控制分析

在相位控制分析的基础上, 分析换能器各组驱动的幅度比变化对换能器性能的影响, 如表 2 所示。首先对边驱动进行幅度调控。需要说明的是, 若对应不同比值 n 时, 施加在主驱动与次驱动的电值不变, 那么施加在整个换能器的总电值将不同。为了对比合理, 以 $n=1$ 为参考确定总电流, n 不同时, 按比例将总电流分配给各驱动堆。假设总电流为 5 A, 以 $n=0$ 为例, 此时只有主驱动与 2 个次驱动工作, 因此每个驱动堆施加电压 $(5/3)$ A。如图 12

响应曲线所示, $n=1$ 时, 换能器发送电流响应值整体最大, $n=0.5$ 时略低, $n=0$ 时最低。虽然 $n=0.5$ 时, 发送电流响应略低于 $n=1$ 时, 但由于各驱动堆所能施加最大电流受限, $n=0.5$ 时, 换能器的声源级将比后者小得多。

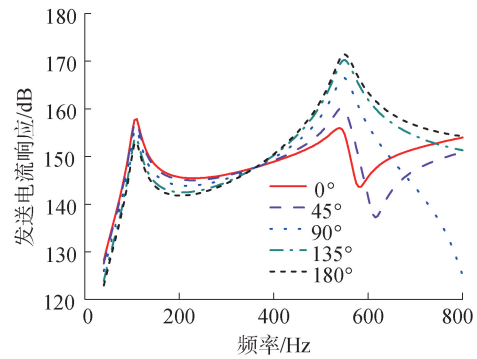


图 11 换能器发送电流响应曲线 (变化次驱动的相位水中)

Fig. 11 Variation of the transmitting current response as a function of frequency (phase control of the secondary drive, in water)

表 2 多点驱动弯曲板换能器驱动方式 (幅度控制)

Table 2 Drive method of the flexure plate transducer driven at multi-point (amplitude control)

方式	电压	主驱动	次驱动	边驱动
方式 1	幅度(归一化)	1	1	n
	相位(°)	0	0	180
方式 2	幅度(归一化)	1	n	1
	相位(°)	0	0	180

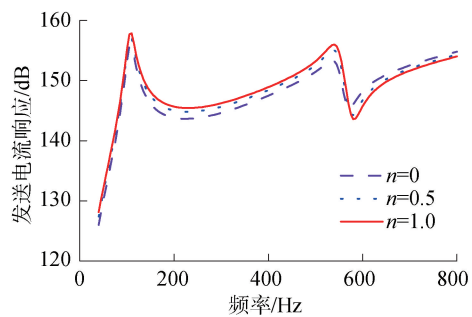


图 12 换能器发送电流响应曲线 (边驱动幅度变化, 水中)

Fig. 12 Variation of the transmitting current response as a function of frequency (amplitude control of edge drive, in water)

其次对次驱动进行幅度调控。如图 13 响应曲线所示, 随着 n 的减小, 二阶谐振峰峰值逐渐增大, 一阶谐振峰峰值略有升高, 不利于换能器的宽带特性。

综合考虑换能器的宽带特性、声源级等因素, 最终确定换能器的加电方式为“ $-1 \sim 1 \sim 1 \sim 1 \sim -1$ ”, 即主驱动、次驱动、边驱动等幅, 主驱动、次驱动等相, 而边驱动与两者反相的加电方式, 为叙述方便, 后续称为优化驱动方式。

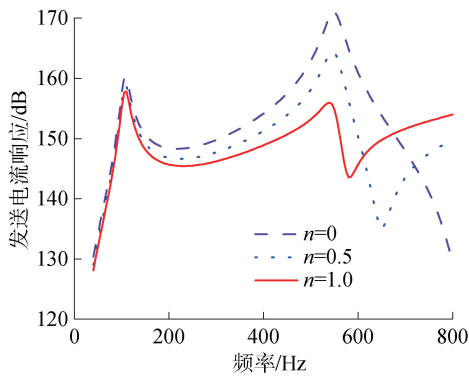
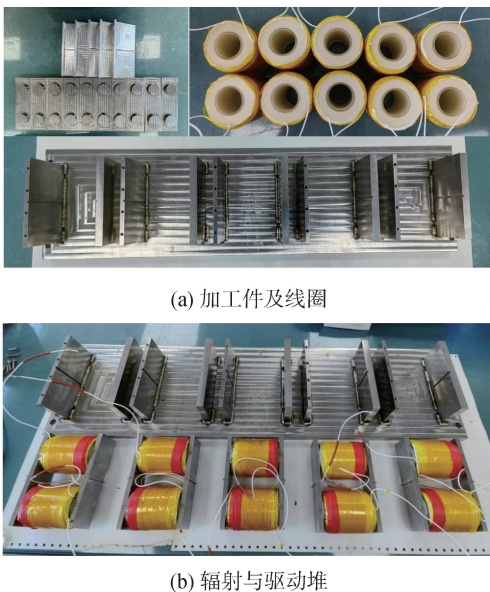


图 13 换能器发送电流响应曲线 (次驱动幅度变化, 水中)
 Fig. 13 Variation of the transmitting current response as a function of frequency (amplitude control of secondary drive, in water)

3 弯曲板换能样机

如图 14 换能器样机所示,制作弯曲板换能器样机(质量 75.5 kg、长 791 mm×宽 227 mm×高 121 mm)。该样机由大尺寸平板辐射面(长 764 mm×200 mm×16 mm)、楔形块、5 组驱动源(图 14(a))、驱动源与辐射面连接所需的加肋板(图 14(b))以及实现空气背衬的长矩形腔(图 14(c))构成;驱动源为稀土超磁致伸缩纵振棒;驱动源与加肋板之间由楔形块刚性连接,可以调节施加到驱动振子的预应力。为实现仿真过程中对辐射面长边两端所设置的固定边界条件,长矩形腔体两侧短边内侧设置凹型台,弯曲板换能器的辐射面与凹型台之间通过螺杆连接。

如图 15 测试仪器所示,为了进一步验证该换能器的辐射特性,在湖北省水布垭试验基地进行了弯曲板换能器的湖上试验。弯曲板换能器辐射面垂直向下,位于水下 10 m,水听器位于辐射面下方 5 m。



(c) 样机装配

图 14 换能器样机

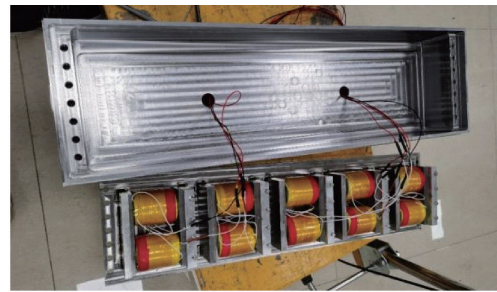


Fig. 14 Transducer prototype

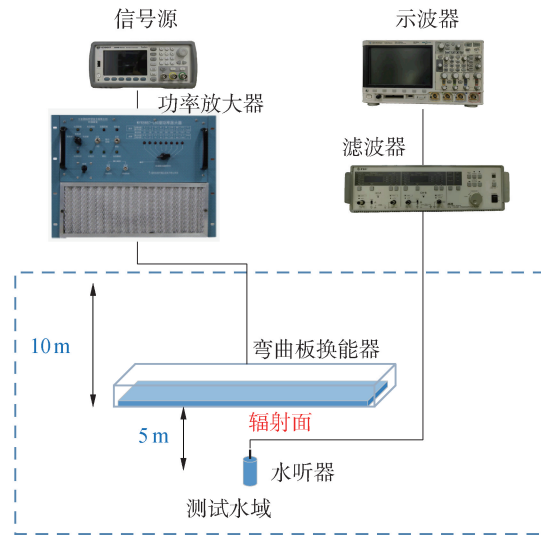


图 15 测试仪器连接示意

Fig. 15 Schematic diagram of test instrument connection

如图 16 所示,在优化驱动方式与常规驱动方式 2 种驱动下测试了换能器样机的发送电流响应曲线,其中优化驱动方式情况下,换能器整体响应较高,同时一阶谐振峰和二阶谐振峰之间的“凹谷”较小。一阶谐振频率为 130 Hz,对应峰值 153 dB;二阶谐振频率为 450 Hz,对应峰值为 161.4 dB。常规驱动情况下,一阶谐振频率为 120 Hz,对应峰值 144.5 dB;二阶谐振频率为 450 kHz,对应峰值为 156 dB。优化驱动方式下,通过加功率测试实现了最大声源级达 173 dB。图 16 中的测试结果再次表明,在多点驱动情况下,通过驱动源的相位控制和优化,可实现发射换能器性能的大幅度提升。

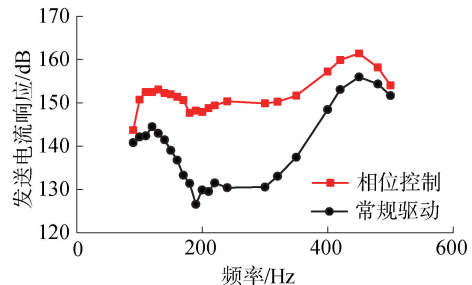


图 16 换能器样机发送电流响应曲线

Fig. 16 Variation of the transmitting current response as a function of frequency of the prototype

样机测试结果与仿真结果(图 10 中“180°”)略有差异,主要是因为本文采用压磁-压电类比方法,仿真过程中无法模拟稀土驱动的换能器磁场均匀性等,其次仿真过程也无法模拟对驱动振子的预应力施加等。

4 结论

1) 大尺寸弯曲板换能器,经过幅相控制可以实现 100~350 Hz 范围内电流响应起伏 6 dB,最大发送电流响应 153 dB,最大声源级可达 173 dB 的工作特性。

2) 本文将换能器辐射面的模态控制与驱动的激发控制相结合,优化换能器辐射性能。

3) 通过计算分析及样机试验,验证了多点驱动幅相控制提高换能器辐射性能的可行性,该设计思想可用于其他大尺寸声源的驱动设计。

4) 本文所选幅度加权系数和 180°相控,可以通过线圈匝数比及反相接线的内部设计实现,得到低频宽带换能器。

5) 弯曲板换能器的提出为稀土超磁致伸缩纵振棒在低频和超低频领域的应用提供了更多可能。

参考文献:

- [1] 莫喜平. 新型弯张换能器的研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 1998.
MO Xiping. Research and design of a new type of flexensional transducer[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 1998.
- [2] 周寿增,梅武,史振华,等. 稀土铁超磁致伸缩材料:中国, CN93106941.6 [P]. 1999.
ZHOU Shouzheng, MEI Wu, SHI Zhenhua, et al. Rare earth iron giant magnetostrictive materials: China, CN93106941.6 [P]. 1999.
- [3] 周寿增,张茂才,高学绪,等. 稀土铁超磁致伸缩材料及制造工艺:中国, CN1067481C [P]. 2001.
ZHOU Shouzheng, ZHANG Maocai, GAO Xuexu, et al. Rare earth iron giant magnetostrictive materials and Manufacturing process: China, CN1067481C [P]. 2001.
- [4] BUTLER S C. A 2.5 kHz magnetostrictive tonpizl sonar transducer design[J]. The journal of the acoustical society of America, 2001, 109(5): 2459.
- [5] BUTLER J L, CIOSEK S J. Rare earth iron octagonal transducer[J]. The journal of the acoustical society of America, 1980, 67(5): 1809-1811.
- [6] COHICK S M, BUTLER J L. Rare-earth iron “square ring” dipole transducer[J]. The journal of acoustical society of America, 1982, 72(2): 313-315.
- [7] BUTLER J L, MOFFETT M B, ROLT K D. A finite element method for estimating the effective coupling coefficient of magnetostrictive transducers [J]. The journal of the acoustical society of America, 1994, 95(5): 2533-2535.
- [8] MOFFETT M B, PORZIO R, BERNIER G L. High-power terfenol-D flexensional transducer [R]. Naval undersea warfare center newport div new london ct new london detachment, 1995.
- [9] 刘永平. 复合壳体结构弯张换能器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022: 61-90.
LIU Yongping. Study on flexensional transducer with composite shell structure[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022: 61-90.
- [10] 刘永平,莫喜平,柴勇,等. 双壳嵌套鱼唇式弯张换能器[J]. 声学学报, 2019, 44(6): 1060-1067.
LIU Yongping, MO Xiping, CHAI Yong, et al. Fish-mouth flexensional transducer with nested double shells [J]. Acta acustica, 2019, 44(6): 1060-1067.
- [11] 李德鹏. 变曲率壳体宽带弯张换能器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024: 68-97.
LI Depeng. Study on broadband flexensional transducer of variable curvature shell [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024: 68-97.
- [12] LI Depeng, LAN Yu, ZHOU Tianfang. Numerical and experimental investigation of a variable-curvature shell class I flexensional transducer[J]. The journal of the acoustical society of America, 2023, 154(3): 1800-1812.
- [13] 许延峰. 超磁致伸缩材料驱动低频宽带弯张换能器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020: 19-41.
XU Yanfeng. Study on low-frequency broadband flexensional transducer driven by giant magnetostrictive material[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020: 19-41.
- [14] 刘柯寒. 新型四边形弯张换能器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019: 25-39.
LIU Kehan. Study on a new quadrilateral flexensional transducer[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019: 25-39.
- [15] 宁倩,李桥,高兵,等. 电—磁—机—声多场边界下的超磁致伸缩IV型弯张换能器设计方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(12): 3112-3121.
NING Qian, LI Qiao, GAO Bing, et al. Design of giant magnetostrictive class IV flexensional transducer under electrical-magnetic-mechanical-acoustic multi-field boundaries[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2023, 38(12): 3112-3121.

本文引用格式:

王秋木,莫喜平,刘永平,等. 多点驱动调控的低频宽带弯曲板换能器[J]. 哈尔滨工程大学学报,2025,46(8):1644-1649.

WANG Qiumu, MO Xiping, LIU Yongping, et al. Low-frequency broadband curved plate transducer with multi-point drive regulation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1644-1649.