

用于水下探测的宽带超声换能器设计

刘晓晓,张 浩,曾 涛

(上海材料研究所 上海市工程材料应用与评价重点实验室,上海 200437)

摘 要: 为研制一种可用于水下探测的宽带纵振换能器,采用双激励设计方法拓宽换能器带宽,预设换能器目标谐振频率为 23,42 kHz,基于双激励纵振换能器共振频率方程,对双激励纵振换能器进行了理论设计,在此基础上通过有限元建模优化设计,并对其在空气和水中的导纳曲线和发射电压响应进行了仿真。仿真结果表明,该换能器在空气中的谐振频率为 22.56,42.56 kHz,对应导纳为 53.44,22.7 mS;在水中的工作频带为 19.6~43.6 kHz,最大发射响应为 147.1 dB,带内起伏为 6.7 dB。制作的换能器在空气中的谐振频率为 22.14,41.2 kHz,对应的导纳为 47.4,17.7 mS;在水中的工作频带为 19.0~43.5 kHz,带内起伏为 8 dB,与理论设计基本一致,符合设计要求。

关键词: 双激励夹心式换能器;带宽;共振频率方程;仿真设计;性能测试

中图分类号: TB552;TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2022)01-0074-06

Design of wideband ultrasonic transducer for underwater detection

LIU Xiaoxiao, ZHANG Hao, ZENG Tao

(Shanghai Key Laboratory of Engineering Materials Application and Evaluation,
Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China)

Abstract: To develop a broadband longitudinal vibration transducer which can be used for underwater detection, this paper adopts the method of double incentive design to broaden the bandwidth of the transducer. Setting the target resonant frequency of the transducer as 23 kHz, 42 kHz, based on double incentive resonance frequency equation of longitudinal vibration transducer, this paper carried on the theoretical design of the double incentive longitudinal vibration transducer. On the basis of optimization design by finite element modeling, we simulate its admittance curve and transmission voltage response in air and water. The simulation results show that the resonant frequency of the transducer in air is 22.56 kHz and 42.56 kHz, the corresponding admittance is 53.44 mS and 22.7 mS, the bandwidth of the transducer in water is 19.6~43.6 kHz, the maximum emission response is 147.1 dB, and the in-band fluctuation is 6.7 dB. The transducer prototype was made and its resonant frequency in air is 22.14 kHz and 41.2 kHz, the corresponding admittance is 47.4 mS and 17.7 mS, the work bandwidth in water is 19.0—43.5 kHz, and the fluctuation in the band is 8 dB, which is basically consistent with the theoretical design and meets the design requirements.

Key words: double excitation sandwich transducer; bandwidth; resonant frequency equation; simulation design; performance test

迄今为止,声波是人类所发现的能在水中远距离传输信号和能量的唯一载体,现有的水声设备都依靠

声波来传递信息^[1]。利用声波可以完成水下目标的检测、识别、定位、通讯、导航、水中成像等^[2]。水声换能器是声呐探测设备的核心部件,承担着信号发射和接收的使命,在水声探测领域发挥着重要作用^[3]。

纵振换能器是水声换能器领域的一个分支,其设计理论成熟、制作工艺简单、性能稳定,在水下目标探测中有着广泛的应用^[4]。为了能准确探测到障

收稿日期: 2021-06-10
基金项目: 上海材料研究所技术创新项目(21181302)
作者简介: 刘晓晓(1995—),女,助理工程师,主要从事超声换能器的研究工作
通信作者: 张 浩, zhanghao324419@126.com

碍物位置并提前规避,使用的纵振换能器需具有低频、宽带、大功率等特性^[5-6]。

目前,多模态振动耦合是拓宽纵振换能器工作带宽的有效方法之一,其能调整结构设计,使换能器中两种或两种以上的振动模态频率相距适中并有效耦合,达到拓宽带宽的目的^[7]。常见的拓宽纵振换能器带宽的设计方法有纵弯、匹配层、单端激励、双激励、柔顺层等^[8]。

笔者研制了一种可用于水下探测的宽带纵振换能器,采用双激励设计方法拓宽换能器带宽,并基于双激励夹心式换能器共振频率方程,对目标谐振频率为 23,42 kHz 的双激励纵振换能器进行了理论设计,然后通过有限元建模优化设计了一种双激励宽带纵振换能器,并制作测试了换能器样机。

1 双激励纵振换能器设计理论

1.1 双激励纵振换能器机电等效电路

双激励夹心式纵振换能器的典型结构示意图如图 1 所示(图中 R_1, R_2 为半径; L_a 为后盖板长度; L_m 为质量块长度; L_b 为前盖板长度; L_{e1}, L_{e2} 分别为后晶堆与前晶堆的长度),其由两个金属圆柱、一个金属喇叭形前盖板和两组压电晶堆组成。压电晶堆由两个极化方向相反的压电晶片组成,压电晶片之间采用机械端串联、电端并联的方式相连接。两组压电晶堆与 3 个金属块通过应力螺栓相连接,在实际制备过程中,往往会在各部件连接面涂抹环氧胶,进一步加强部件间的连接。由于双激励夹心式换能器的长度可与波长相比,换能器中的压电晶堆振动模态可视为电场平行于长度方向的长度伸缩。

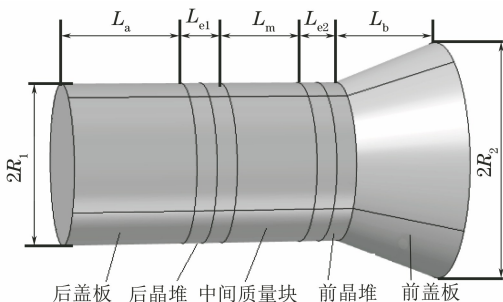


图 1 双激励夹心式纵振换能器的典型结构示意图

基于梅森等效电路和换能器的一维振动理论,可得到双激励夹心式纵振换能器的机电等效电路(见图 2)^[4]。图 2 中 C_1, C_2 分别为两组压电晶堆的一维截止电容, N_1, N_2 分别为其机电转换系数,表达式分别为

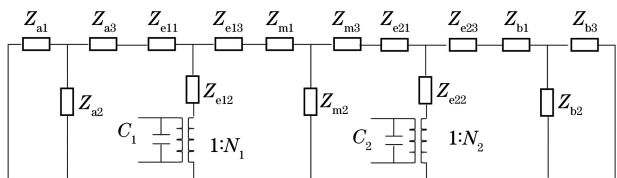


图 2 双激励夹心式纵振换能器的机电等效电路

$$C_1 = \frac{S_{e1}}{L_{e1} \cdot \beta_{33}} \quad (1)$$

$$C_2 = \frac{S_{e2}}{L_{e2} \cdot \beta_{33}} \quad (2)$$

$$N_1 = \frac{g_{33} \cdot S_{e1}}{L_{e1} \cdot S_{33}^D \cdot \beta_{33}} \quad (3)$$

$$N_2 = \frac{g_{33} \cdot S_{e2}}{L_{e2} \cdot S_{33}^D \cdot \beta_{33}} \quad (4)$$

$$\overline{\beta_{33}} = \beta_{33}^T \left(1 + \frac{g_{33}^2}{S_{33}^D \cdot \beta_{33}^T} \right) \quad (5)$$

式中: $S_{e1} = S_{e2} = S_1 = \pi R_1^2$, 为两组压电晶堆的横截面积; $S_{33}^D, g_{33}, \beta_{33}^T$ 分别为压电陶瓷材料的柔性常数、压电常数、介电常数; $Z_{a1}, Z_{a2}, Z_{a3}, Z_{m1}, Z_{m2}, Z_{m3}, Z_{b1}, Z_{b2}, Z_{b3}$ 分别为后盖板、中间质量块、前盖板的阻抗; $Z_{e11}, Z_{e12}, Z_{e13}, Z_{e21}, Z_{e22}, Z_{e23}$ 分别为后晶堆、前晶堆的阻抗分量,其具体表达式可参考文献[9-10]。

前后晶堆材料的纵向振动传播速度 c_0 为

$$c_0 = \sqrt{1/(S_{33}^E \cdot \rho_0)} \quad (6)$$

式中: S_{33}^E 是压电材料的恒电场柔性常数分量; ρ_0 为压电材料密度。

将图 2 进行多次的 T 型网络、II 型网络等效阻抗变换,可得到如图 3 所示的等效电路。图中 Z_{q1}, Z_{q2}, Z_{q3} 为等效阻抗。

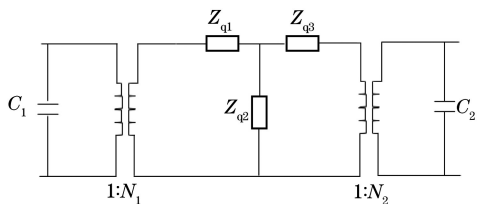


图 3 双激励夹心式纵振换能器的简化等效电路

根据图 3 可计算得到整个双激励纵振换能器的输入阻抗 Z_e 。根据换能器共振频率方程的定义可知,在共振频率下 $Z_e = 0$,即换能器导纳曲线极大值对应的频率即为换能器共振频率点。

1.2 双激励纵振换能器共振频率方程

双激励换能器工作在低频时,前晶堆阻抗很大,近似于开路,其机械端 $n-N$ 的反射阻抗 Z_{nN} 为

$$Z_{nN} = \frac{N_2^2}{j\omega C_2} \tag{7}$$

式中： ω 为角频率。

低频时的换能器机电等效电路如图 4 所示^[11]。利用 1.1 节的方法，可得到低频前晶堆开路情况下换能器的共振频率方程为

$$Z_{e-L} = 0 \tag{8}$$

工作在高频时，后晶堆近似于短路，其机械端 m - M 的反射阻抗 $Z_{mM} = 0$ ，则高频时的换能器机电等效电路如图 5 所示^[11]。同样可得到高频后晶堆短路情况下换能器的共振频率方程为

$$Z_{e-H} = 0 \tag{9}$$

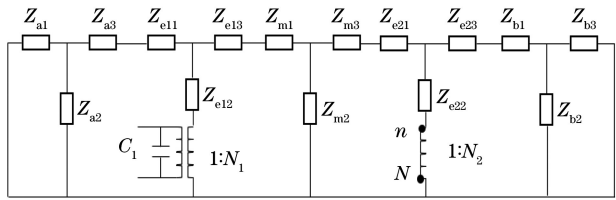


图 4 低频时双激励换能器的机电等效电路

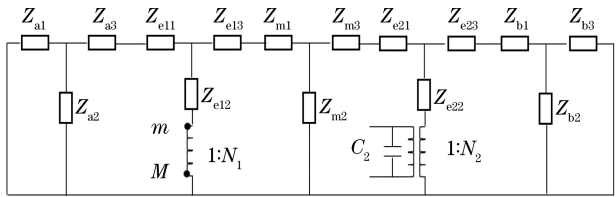


图 5 高频时双激励换能器的机电等效电路

纵振换能器在振动时其中间存在振动位移为 0 的截面，称为节面。对于双激励纵振换能器，其在一阶谐振频率（低频）下振动时，有一个节面，在二阶谐振频率（高频）下振动时，有两个节面。为了简化计算过程，在进行双激励换能器设计时，假定双激励换能器的两个节面分别位于前、后晶堆的前、中、后 3 个位置，根据节面位置可将换能器分为 3 部分（A，B，C），节面位置如图 6 所示。

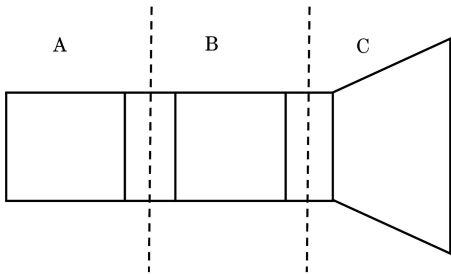


图 6 节面位置示意

A，C 部分的机电等效电路如图 7 所示（图中 Z_m 为前后盖板的等效阻抗； Z_{pe1} ， Z_{pe2} ， Z_{pe3} 为等效阻抗； C_0 为截止电容； N_0 为机电转换效率）。由图

7 可得到低频时，A 部分的共振频率方程为

$$Z_{A-L} = 0 \tag{10}$$

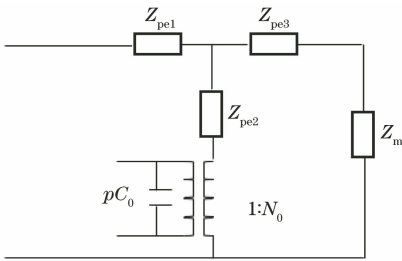


图 7 A，C 部分的机电等效电路

高频时，C 部分的共振频率方程为

$$Z_{C-H} = 0 \tag{11}$$

在目标频率已知、换能器结构尺寸未知的情况下， Z_{e-L} ， Z_{e-H} 是 L_a ， L_m 及 L_b 的函数； Z_{A-L} 是 L_a 的函数， Z_{C-H} 是 L_b 的函数。

根据以上分析，对于所研究的双激励纵振换能器，其设计步骤如下所述。

（1）将目标频率 f_1 ， f_2 分别代入式（10），（11）可求得 L_a ， L_b 。

（2）将求得的 L_a ， L_b 以及目标频率 f_1 ， f_2 代入式（8），（9），分别求得 2 个中间质量块的长度 L_{m1} ， L_{m2} 。二者很可能不相同，当差距较大时，需重新选定节面组合，重复上述步骤，直至 L_{m1} 与 L_{m2} 的值接近。

（3）将求得的 L_a ， L_b ， L_m 代入共振频率方程，求得该设计尺寸下双激励换能器的谐振频率，并与预设的目标频率做对比，以验证设计的准确性。

2 双激励纵振换能器仿真设计

基于上述换能器设计理论，首先利用共振频率方程计算得到 23.42 kHz 目标频率下换能器前、后盖板及中间质量块的长度，然后借助有限元建模将螺栓考虑在内，对换能器结构进行优化设计，并分别计算其在空气、水中的模态及频率响应。设计的双激励纵振换能器的压电材料采用 PZT-4 压电陶瓷，后盖板、中间质量块材料为 45 钢，前盖板材料为喇叭状硬铝。

2.1 理论计算

将换能器节点位置均预设于两组压电晶堆前部。利用共振频率方程求得前盖板长度 L_b 、后盖板长度 L_a 以及中间质量块长度 L_{m1} ， L_{m2} ，计算得到换能器前盖板理论长度为 25.6 mm；中间质量块理论长度为 16.3，15.9 mm；后盖板理论长度为 26.4 mm。

可以看出，通过高、低频共振频率方程求得的中

间质量块长度 $L_{m1} \neq L_{m2}$, 但两者相差较小 (相差 0.4 mm)。为进一步验证计算结果的准确性, 分别计算空气中 $L_m = 16.3$ mm 和 $L_m = 15.9$ mm 时的换能器理论导纳曲线, 计算结果如图 8 所示。

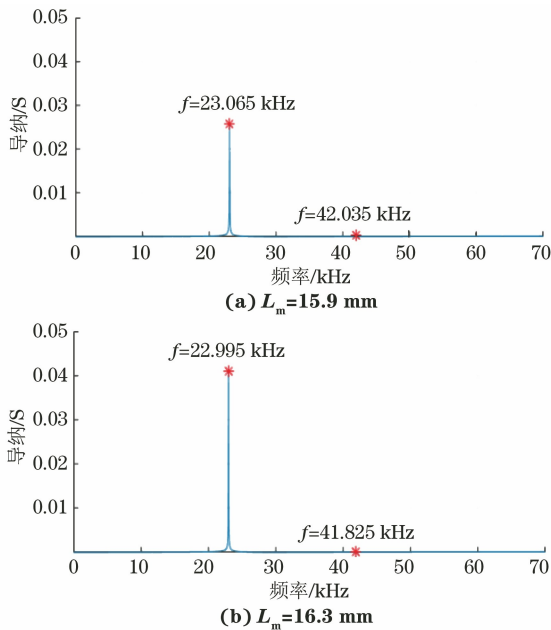


图 8 空气中双激励换能器导纳曲线的理论计算结果

从图 8 可以看出, 当 $L_m = 15.9$ mm 时, 计算得到的换能器理论谐振频率为 23.065, 42.035 kHz; 当 $L_m = 16.3$ mm 时, 理论谐振频率为 22.995, 41.825 kHz。两者计算结果接近, 且与预设目标频率 23, 42 kHz 相吻合。由于 $L_m = 15.9$ mm 时, 其计算结果与目标频率更为接近, 所以初步确定换能器中间质量块的长度为 15.9 mm。

为进一步验证理论计算结果的准确性, 利用有限元软件对上述设计的换能器进行建模仿真, 由于其具有轴对称性, 为简化模型, 建立了二维对称模型进行计算, 其导纳计算结果如图 9 所示。图 9 中前两阶频率分别为 23.233, 39.273 kHz, 与理论计算相比, 一阶谐振频率的误差为 0.168 kHz, 二阶谐振频率误差为 2.762 kHz, 误差产生的原因在于: ① 理论

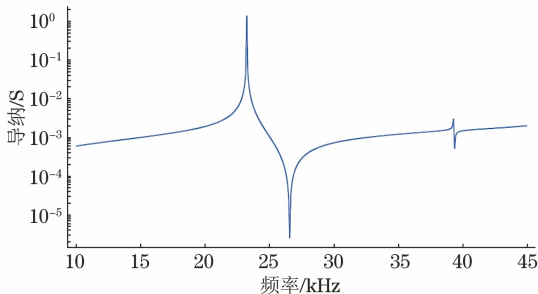


图 9 空气中双激励换能器导纳曲线的模拟计算结果

计算参数与有限元材料参数存在误差; ② 理论计算过程忽略了换能器的机械损耗、介电损耗以及其他损耗的影响。

双激励换能器在 2 个谐振频率下的振动模态如图 10 所示。从图 10 可以看出: 换能器在 23.233 kHz 谐振频率下, 只有一个节点, 位移最大值在换能器两端且振动相位相反, 此时换能器为纵向振动模式; 在 39.273 kHz 谐振频率下, 换能器有两个振动节点 (位于前、后盖板与晶堆的接触面上), 此时换能器为二阶纵向振动模式。

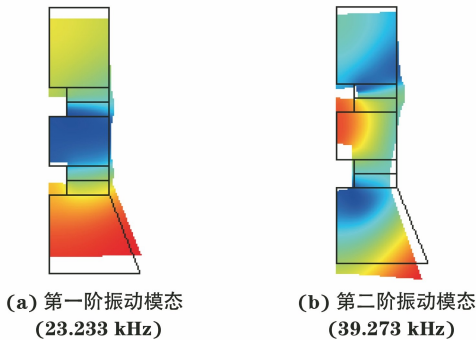


图 10 双激励换能器在 2 个谐振频率下的振动模态

2.2 有限元模拟优化设计

在实际换能器制作过程中, 需要预应力螺栓施加预应力, 在上节的有限元建模中未考虑螺栓。此外, 相比于目标频率 42 kHz, 上节设计换能器的二阶谐振频率较低, 且其对应的导纳过低, 这会导致换能器在水中的发射电压响应起伏过大, 因此本节将预应力螺栓纳入模型中, 并对双激励换能器的结构尺寸进行调整, 使其谐振频率更接近目标频率, 且在目标频率内, 在水中的发射电压响应起伏较小。

基于上节理论计算得到的双激励换能器设计参数, 利用有限元软件对换能器设计进行优化, 优化后的换能器前盖板长度为 32 mm, 中间质量块长度为 8 mm, 后盖板长度为 30 mm。

优化后的双激励换能器, 除前、中、后质量块长度发生变化外, 喇叭状前盖板的辐射面直径也进行了调整, 且考虑到制备换能器过程中, 压电晶堆与前盖板的对中问题, 在前盖板上设计了一定厚度的台阶, 优化后的双激励纵振换能器二维模型如图 11 所示。

对优化设计后的双激励换能器在空气中的振动模态进行仿真模拟, 模拟计算结果如图 12 所示。从图 12 可以看出, 其在空气中的前两阶谐振频率为 22.56, 41.56 kHz, 与预设目标频率接近, 对应的导纳为 53.4, 22.7 mS。

同时, 利用有限元软件对优化后双激励换能器

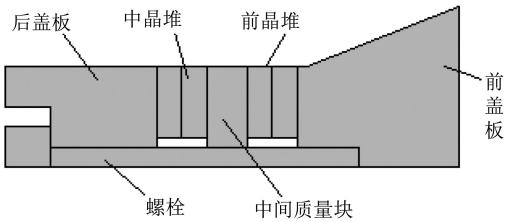


图 11 优化后的双激励纵振换能器二维模型

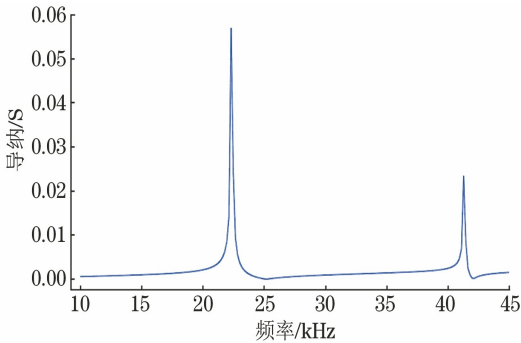


图 12 优化后双激励纵振换能器在空气中的导纳曲线
模拟计算结果

在水中的导纳曲线、发射电压响应曲线进行模拟计算,结果如图 13,14 所示。由图 13 可知,该换能器在水中工作时,导纳存在两个谐振峰,分别为 22.261, 40.754 kHz。相较于空气,水中的谐振频率有所下降,这是因为水的声阻抗大于空气的,所以前盖板的等效阻抗增大,前后盖板的振速比减小,从而使得换能器在水中的谐振频率向低频移动。从换能器发射

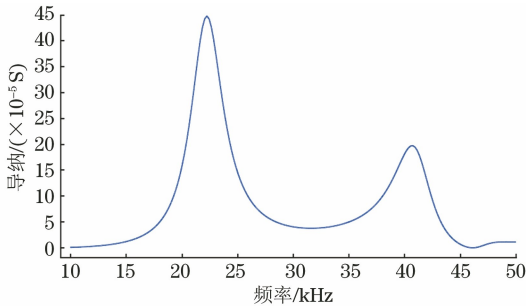


图 13 优化后双激励纵振换能器在水中的导纳曲线
模拟计算结果

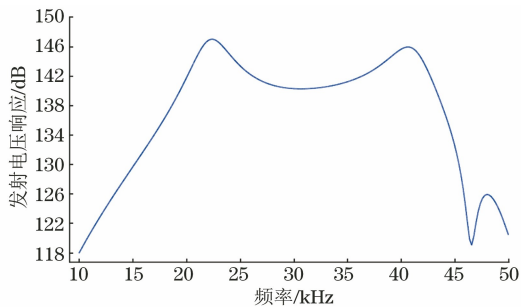


图 14 优化后双激励纵振换能器在水中的
发射电压响应曲线

电压响应曲线可以看出,频率为 19.5 kHz~43.2 kHz 时,最大发射电压响应为 147.1 dB,最小发射电压响应为 140.4 dB,起伏为 6.7 dB,带宽为 23.7 kHz。

3 换能器性能测试

根据理论计算及优化设计的结果,制作了双激励纵振换能器样机,其实物如图 15 所示。

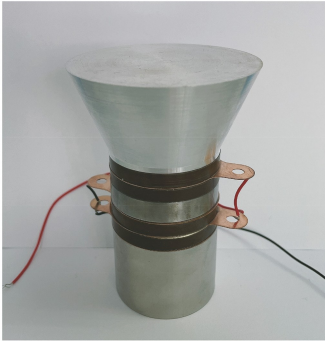


图 15 双激励纵振换能器实物

使用阻抗分析仪对制作的双激励换能器输入导纳进行测试,得到换能器在空气中的输入导纳实测曲线(见图 16)。从图 16 可以看出,制作的换能器实测频率为 22.14,41.2 kHz,对应的导纳为 47.4, 17.7 mS,实测与仿真结果的谐振频率对比如表 1 所示。从表 1 可以看出,制作的双激励换能器在空气中实测的谐振频率及其对应的导纳较仿真结果略低,主要原因为仿真时未考虑环氧树脂、电极片的影响,且实际结构的材料参数与仿真的有区别,但实测与仿真的结果相差不大,仿真结果可以为实际制作换能器提供理论依据。

利用水中测量系统对制作的换能器的水下发射

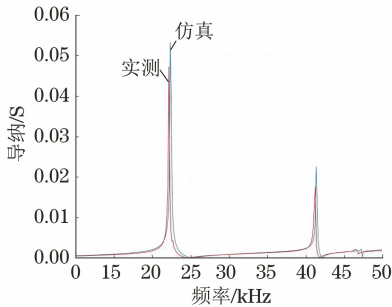


图 16 空气中双激励纵振换能器导纳曲线的实测与
仿真结果

表 1 空气中双激励纵振换能器实测与仿真的
谐振频率

项目	第一阶谐振 频率/kHz	一阶谐振对应 导纳/mS	第二阶谐振 频率/kHz	二阶谐振对应 导纳/mS
仿真	22.56	53.4	41.56	22.7
实测	22.14	47.4	41.20	17.7

电压响应进行了测试,结果如图 17 所示。从图 17 可以看出,在 19 kHz~43.5 kHz 频带内,发射电压响应起伏为 8 dB,发射电压响应为 137~145 dB,相较于仿真结果,实测的响应值整体有所降低,起伏增加了 1 dB。

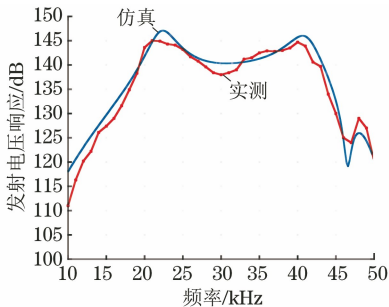


图 17 双激励纵振换能器水中发射电压响应的
实测与仿真结果

4 结语

首先基于双激励换能器的共振频率方程初步确定换能器尺寸,并通过有限元软件验证了理论计算的正确性。同时在理论设计的基础上,利用有限元软件对换能器进行优化设计,并分别计算了其在空气、水中的导纳曲线和发射电压响应。在此基础上制作了双激励纵振换能器,并对其性能进行测试,实测结果与仿真结果基本吻合。这表明了双激励纵振换能器理论设计方法可以为实际换能器的制作提供依据,为进一步研制双激励纵振换能器奠定了基础。



(上接第 55 页)

经过试验,笔者建议:当暗区环境白光强度小于 20 lx 时,零件表面最低黑光灯照度为 $50\text{ }\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$;当暗区环境白光在 20~100 lx 时,零件表面最低黑光灯照度为 $100\text{ }\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$,且每月采用高一级灵敏度的渗透液对零件进行复查。

4 结语

结合零件荧光渗透检测的结果,笔者通过更改加工工具和加工参数,采用润滑性能好的切削液,避免了精加工中积屑瘤的产生。优化了渗透检测预处

参考文献：

[1] 刘孟庵,连立民. 水声工程[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,2002.

[2] 何祚镛,赵玉芳. 声学理论基础[M]. 北京:国防工业出版社,1981.

[3] 刘伯胜,雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2002.

[4] 栾桂冬,张金铎,王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京:北京大学出版社,2005.

[5] 赵欢. 双激励源宽带纵振换能器研究[D]. 北京:中国舰船研究院,2014.

[6] 莫喜平. 水声换能器研究新进展[J]. 应用声学,2012, 31(3):171-177.

[7] 周天放. 宽带纵向换能器研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.

[8] YAO Q S,BJORNO L. Broadband tonpilz underwater acoustic transducers based on multimode optimization [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics,Ferroelectrics and Frequency Control,1997,44(5):1060-1066.

[9] 孟祥迪,林书玉. 级联式变截面压电换能器尺寸对其性能的影响[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2019,47(2):51-56.

[10] 林书玉. 夹心式复频功率超声压电换能器及其电端匹配电路的研究[J]. 声学电子工程,1997(3):24-28.

[11] 林书玉. 双激励源压电陶瓷超声换能器的共振频率特性分析[J]. 电子学报,2009,37(11):2504-2509.

理清洗方式及手工补洗时零件表面的黑光照度参数,同时规定了定期进行现场监控,更好地控制了零件的品质,对零件后续工序的正常进行有重要意义。

参考文献：

[1] 林猷文,任学冬. 渗透检测[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

[2] 郭建烨,于超,张艳丽. 机械制造技术基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2016.

[3] 刘素平. 从外贸航空发动机零部件的荧光检测要求浅析荧光检测时规范与工艺控制的重要性[J]. 无损检测,2012,34(2):52-56.