# 管梁耦合宽带换能器\*

柴 勇 莫喜平 刘永平 潘耀宗 张运强 李 鹏

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

2016 年 12 月 20 日收到

2017年2月21日定稿

**摘要** 对一种管梁耦合宽带换能器进行了研究,通过在圆环换能器中加入弯曲梁组成管梁耦合结构,增加有效工作模态,利 用多模谐振耦合优化设计,可使换能器的工作带宽向低频大幅扩展。理论计算与实测结果均表明,管梁耦合换能器具备频带 宽、功率大、尺寸小、深水性能好等特点,兼具圆环换能器与弯张换能器的优势,工作性能优良,设计灵活多变。 PACS 数: 43.38

## Broadband transducer with tube-beam coupling structure

CHAI Yong MO Xiping LIU Yongping PAN Yaozong ZHANG Yunqiang LI Peng

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100190)

Received Dec. 20, 2016

Revised Feb. 21, 2017

**Abstract** A broadband transducer with tube-beam coupling structure is presented. Flexural beams are put into a traditional segmented ring transducer including inactive portions to form a new tube-beam coupling structure with more useful working modes. Using multiple-mode-coupling design technique, the bandwidth of transducer could be expanded efficiently towards low frequency range. The optimization study of the electroacoustic parameters is carried out by finite element analysis at first. Then a prototype is manufactured and measured. It is shown that this projector combines the fine qualities of flextensional transducer with those of ring transducer by both the simulated and experimental results. It could achieve low frequency, high power and wide band performance from compact size. In addition, it is suitable for deep submergence operation when using free-flooded design.

# 引言

圆环换能器是最常用的水声换能器类型之一, 具有结构简单、性能稳定、布阵方便等优点,其工 作原理、结构设计和工艺优化等各方面研究均比较 成熟<sup>[1-9]</sup>。传统圆环换能器一般使用压电陶瓷元件 的径向振动基频模态进行工作,需要大功率工作时 通常设计成镶拼结构,镶拼单元可以全部由压电陶 瓷元件组成,也可以加入金属或非金属的无源材料 部分<sup>[10-13]</sup>,用来对换能器的性能进行调节。除了压 电陶瓷,激励元件亦可采用稀土棒组成正多边形形 式<sup>[14-15]</sup>,以利于获得更低的谐振频率和更高的发射 功率。

随着海洋科学和水声工程的发展,对圆环换能器的低频小型化设计提出了更高的要求。传统圆环 换能器的工作带宽有限,尤其是在低于其径向谐振 基频的频段。现有方法主要是采用溢流式圆环换能 器内部的液腔振动与径向振动模态耦合来拓宽工作 频带,对换能器几何尺寸等边界条件的限制较多,往 往只有特定的结构参数才能达到较好的工作性能, 存在较大局限性。本文探讨了一种新型管梁耦合换 能器,通过在圆环换能器中加入具有辐射能力的弯 曲梁组成管梁耦合结构<sup>[16]</sup>,增加有效工作模态,利 用多模谐振耦合使换能器的工作带宽向低频大幅扩 展,将圆环换能器与弯张换能器的优势有效结合起

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(11074276)资助

<sup>†</sup> 通讯作者: 柴勇, chaiyong@mail.ioa.ac.cn

来,用紧凑的结构实现低频、宽带的优良工作性能。

## 1 管梁耦合换能器设计与分析

#### 1.1 管梁耦合换能器设计原理

新型管梁耦合换能器的结构示意图如图1所 示:图 1(a) 为包含部分无源材料的镶拼圆环,在其 中加入图 1(b) 所示的弯曲梁翼板,两者通过镶拼圆 环中的无源材料部分相连接,组成圆环-弯张换能器 复合的管梁耦合结构,镶拼圆环的有源材料通常洗择 压电陶瓷,也可以是稀土材料;弯曲梁翼板和镶拼圆 环中的无源材料可以选择金属或有机高分子材料。

对于此种新型换能器而言,由于弯曲梁翼板结 构的引入,一方面可以调节圆环换能器的刚度-质量 比,控制换能器的径向谐振频率;另一方面,翼板结 构本身具有声辐射能力,能够在圆环径向振动模态 之外增加新的有效工作模态,使得谐振频率、工作带 宽、空间指向性等主要性能参数的调节机制更加灵 活,最终通过多模谐振耦合的优化设计,实现更佳的 工作性能。

### 1.2 管梁耦合换能器振动特性分析

新型管梁耦合换能器的结构较为复杂,需要使 用有限元方法对其振动特性进行建模分析,以指导 换能器的结构优化设计。

利用管梁耦合换能器的结构对称性,可以选取 部分结构并施加周期性对称边界约束,建立有限元 分析简化模型,进行模态分析后,优选出可以利用的 工作模态。换能器的前几个特征模态如图 2 所示。 换能器的第1种模态以翼板结构的一阶弯曲振动为



(c) 第3种模态

图 2 管梁耦合换能器特征模态图

主,振幅也较大,但是与圆环的振动相位相反,因此 总体辐射能力较弱;第2种模态是圆环径向振动与 翼板一阶弯曲振动的复合振动,整体振动相位基本 一致,且幅值较大,是可以利用的主要工作模态;第 3种模态是翼板结构自身的扭转,振动存在大幅反相 区,圆环基本不参与振动,辐射能力也较差;第4种 模态是圆环径向振动与翼板二阶弯曲振动的复合振 动,存有部分反相区,不过由于振幅较大,经过合理 设计后,也是可以利用的另一种工作模态。

根据模态分析的结果可见,新型管梁耦合换能器的可用工作模态更加丰富,可以通过选择调整镶拼圆环和翼板结构的材料参数及结构参数、合理利用模态耦合来进行优化设计,有利于在缩减径向尺寸的同时,实现低频、宽带的优良工作性能。

# 2 管梁耦合换能器性能模拟分析

运用有限元分析软件,对管梁耦合换能器的主要 电声性能参数进行了模拟计算与优化分析,包括换能 器的阻抗特性、发送电压响应及空间指向性等。经过 结构优化后,最终镶拼圆环有限元模型的几何尺寸 为 Φ360×Φ332×80 mm,镶拼圆环分为6等分,嵌入 6条弯曲梁翼板,翼板高80 mm、壁厚4.0 mm,曲 率半径为500 mm;镶拼圆环有源材料使用 PZT-4 压 电陶瓷,无源材料及翼板结构均使用金属铝,换能器 整体采用溢流式结构设计。

#### 2.1 阻抗特性

换能器在空气中和水中的导纳模拟计算结果分别示于图 3 和图 4 中。由图可见,换能器在空气中和水中都有两个明显的谐振频率,空气中位于 2.4 kHz 和 3.2 kHz,水中位于 1.5 kHz 和 3.2 kHz,分别对应 于图 2 中的第 2 和第 4 种模态,证明这两个工作模 态下换能器结构振动的总体积位移较大,适于进行 大功率发射。空气中导纳在 1.5 kHz 处还有一个较小 的谐振峰,对应于图 2 中的第一种模态,此时的辐射 能力较弱。水中导纳在 2.5 kHz 附近也有一个较小的 谐振峰,综合模态分析结果可见,由于换能器本体结 构在此频段并无有效工作模态,推断这是换能器液 腔振动的频率。

#### 2.2 发送电压响应

换能器发送电压响应 (对应图 6 中 0° 位置) 的 模拟计算结果示于图 5 中。由图可见,换能器在水 中有两个谐振点,第 1 个位于 1.8 kHz,发送电压响 应为 134.2 dB;第 2 个位于 3.2 kHz,发送电压响应 为 136.9 dB;换能器 -3 dB 工作带宽可覆盖 2.6 ~ 4.0 kHz 频段, -6 dB 工作带宽覆盖 1.4~4.3 kHz 频 段, 具有良好的宽带工作性能。

图 5 中一并示出了全部由压电陶瓷镶拼组成的 相同尺寸圆环换能器的发送电压响应计算结果,在 圆环径向谐振与液腔谐振的共同作用下,发送电压 响应在 2.3 kHz 附近达到峰值, -6 dB 工作带宽可 覆盖 1.8~4.3 kHz 频段。两者对比分析后可知,管梁 耦合换能器在低频段具有较大优势,由于弯曲梁翼 板的作用,增加了有效工作模态,大幅提高了换能器 的发射性能;在高于径向谐振的频段,受到弯曲梁翼 板高阶弯曲模态的影响,管梁耦合换能器的发送响 应低于传统圆环换能器。同时,传统圆环换能器在径 向谐振时的发送响应峰值要略大一些,这是由于管 梁耦合换能器在圆环中加入了部分无源材料,导致



图 5 管梁耦合换能器与传统圆环换能器发送电压响应对比图

有效机电耦合系数和机电转换系数略有降低,因此 在满足弯曲梁翼板结构连接要求的前提下,应尽量 减少圆环结构中无源材料所占的比重。

### 2.3 圆周指向性

由于管梁耦合换能器并非工作在单纯的圆环径 向呼吸模态下,因此有必要对其圆周方向指向性进 行重点分析。

换能器圆周方向指向性的模拟计算结果如图 6 所示。2.5 kHz 以下圆周方向指向性起伏均小于 0.1 dB, 图中省略未示出; 3.15 kHz 时起伏约 0.1 dB, 4.0 kHz 时起伏约 0.3 dB, 5.0 kHz 时起伏约 1.5 dB; 此外,随着频率改变,最大值点位置也会发生变化。

对照模态分析结果可知,这是由于换能器的工作模态逐渐改变所导致:在低频段,换能器起初工作在第 1种模态,由于翼板尺寸远小于此时的波长,接近于 点声源发射,因此圆周方向基本无指向性;频率逐渐 升高,换能器振动转入第2种工作模态,与普通圆环 换能器的呼吸模态类似,圆周方向指向性起伏也很 小;接下来,换能器在由第2种模态向第4种模态 转变的过程中,受到第3种工作模态的影响,圆周方 向指向性起伏会略有增大;频率升高到第4种工作 模态附近时,由于换能器振动的总体一致性较好,圆 周方向指向性起伏也较小;随着频率继续升高,翼板 结构高阶弯曲振动模态的影响逐渐显现,圆周方向 指向性起伏又开始增大,逐渐表现出较明显的圆周 方向指向性。



图 6 管梁耦合换能器圆周指向性模拟计算图

值得指出的是,如果需要换能器进行指向性发 射时,可以通过对翼板结构参数进行调整,比如改变 翼板数目即可实现,而无需改变换能器的主体结构 形式与激励方式,非常灵活方便。使用同样尺寸的换 能器模型,工作频率为 5.0 kHz 时,换能器圆周方向 指向性起伏随翼板数目变化对比如表 1 所示,可见 能够很好地实现管梁耦合换能器的设计思想。

表 1	管梁耦合换	能器圆周指向	1性起伏随翼	板数目变化对	北
<u> </u>					1 1/1

翼板数目	$n\!=\!3$	$n\!=\!4$	$n\!=\!5$	$n\!=\!6$
指向性起伏 (dB)	13.6	5.0	2.2	1.5

# 3 管梁耦合换能器测试结果与分析

根据仿真优化的结果,制作了新型管梁耦合 换能器样品,实物如图7所示。换能器外形尺寸为 Φ380×Φ248×125mm,空气中重约18kg(不包含电缆 等附件)。



图 7 管梁耦合换能器实物图

#### 3.1 发送电压响应及声源级测试结果

换能器的发送电压响应 (对应图 9 中 0° 位置) 测试结果如图 8 所示。为了方便比较,将图 5 中模拟 计算结果也一并示出,可见两者吻合较好。在 1.0~ 5.0 kHz 频段内,换能器有两个谐振点,第 1 个位 于 1.9 kHz,发送电压响应为 134.0 dB;第 2 个位于 3.3 kHz,发送电压响应为 136.5 dB。-6 dB 工作带宽 覆盖 1.4~4.2 kHz 频段,具有良好的宽带工作特性。



对换能器进行了无匹配状态下发射声源级的测试,结果如表2所示,最大声源级达到了201.0 dB。 表中一并列出了对应测量声源级时大激励信号下的 发送响应,以及对应图7所示小激励信号下的发送 响应测量值,对比可见两者差值均在 1.0 dB 以内, 表明换能器具有良好的线性工作特性。

频率 (kHz)	声源级 (dB)	发送响应 – 大信号 (dB)	发送响应 – 小信号 (dB)
1.25	191.4	128.7	128.3
1.60	195.3	132.9	132.8
2.00	196.9	133.9	134.0
2.50	197.2	133.6	132.7
3.15	201.0	137.1	136.3
4.00	196.9	133.3	132.4
5.00	183.7	120.9	121.5

表 2 管梁耦合换能器声源级及发送响应测试结果

#### 3.2 圆周指向性测试结果

换能器圆周指向性测试结果如图 9 所示。

为方便比较,将其与图 6 中理论计算结果的对 比列于表 3 中。分析可见两者总体趋势保持一致, 实测的圆周指向性起伏程度略大一些,在 5.0 kHz 时 起伏接近 3.0 dB。排除低频段因测量时信噪比不佳 带来的误差因素,产生差异的原因主要有两部分: 一是建模系统误差,理论计算将压电陶瓷圆环视为 圆周方向极化的连续体,而实际的镶拼圆环是由若 干厚度方向极化的压电陶瓷元件组成,可以通过适 当增加压电陶瓷元件的数量来缩减系统误差;二是 加工误差,也是主要的误差来源,包括压电陶瓷元件 性能不一致,以及翼板等结构零件在加工、装配过程 中产生的尺寸误差等,这部分误差可以通过挑选一 致性较好的压电陶瓷元件、结构零件采用一体化精 加工成型等方法来减小。总体而言,通过合理设计, 管梁耦合换能器在大幅拓宽工作带宽的同时,仍然 能够较好保持传统圆环换能器圆周方向无指向性的 特点。

表 3 管梁耦合换能器圆周指向性起伏对比

频率 (kHz)	指向性起伏-实测 (dB)	指向性起伏−计算 (dB)
1.00	1.2	$\leqslant 0.1$
1.25	0.8	$\leqslant 0.1$
1.60	0.7	$\leqslant 0.1$
2.00	1.2	$\leqslant 0.1$
2.50	0.9	$\leqslant 0.1$
3.15	1.4	0.1
4.00	1.2	0.3
5.00	2.6	1.5





由于管梁耦合换能器采用溢流结构,其工作深 度理论上可不受限制。经过 30 MPa 压力实际测试, 换能器各项电声参数均保持正常,表明可稳定工作 于大压力环境下,是一种具备频带宽、功率大、尺寸 小、深水性能好等诸多优点的新型低频换能器。

## 4 结论

本文设计制作了一种新型宽带管梁耦合换能器,在普通圆环换能器中加入具有辐射能力的翼板 结构,将圆环换能器与弯张换能器的优势有机结合 起来,为实现换能器的低频、宽带、小型化设计开辟 了灵活有效的新思路,具有良好的应用前景。进一步 的工作将围绕此种换能器的成阵研究开展,考虑利 用液腔谐振,进一步提升低频段的工作性能。

#### 5 致谢

作者感谢国家自然科学基金 (11074276) 对本文 工作的资助。

#### 参考文献

- McMahon G W. Performance of open ferroelectric ceramic cylinders in underwater transducers. J. Acoust. Soc. Am., 1964; 36(3): 528—533
- Sherman C H, Parke N G. Acoustic radiation from a thin torus, with application to the free-flooding ring transducer. J. Acoust. Soc. Am., 1965; 38(5): 715-722

- 3 王鸿樟, 钱德初, 丁缨. 薄壁压电陶瓷圆管机电参数的测定. 声 学学报, 1986; 11(4): 197—204
- 4 Rogers P H. Mathematical model for a free-flooded piezoelectric cylinder transducer. J. Acoust. Soc. Am., 1986; 80(1): 13—18
- 5 曹承伟. 多层有限高度圆柱型水声换能器的研究. 声学学报, 1988; **13**(6): 424—431
- 6 周心一,孙进才.有限长薄壁弹性圆柱的径长耦合振动.声学学报, 1996; 21(3): 224—230
- 7 林书玉.弹性薄圆环的超声频径向振动及其等效电路研究.声学 学报, 2003; 28(2): 102—106
- Kuntsal E. Free-flooded ring transducers design methods and their interaction in vertical arrays. OCEANS 2003 Proceedings, 2003; 4: 2074—2078
- Aronov B. Coupled vibration analysis of the thin-walled cylindrical piezoelectric ceramic transducers. J. Acoust. Soc. Am., 2009; 125(2): 803-818
- 10 Butler J L. Model for a ring transducer with inactive segments. J. Acoust. Soc. Am., 1976; 59(2): 480-482
- 11 谢朝矩,姚国华. 低频宽带大功率溢流式镶拼圆管换能器. 应用 声学, 1996; 15(1): 30—34
- 刘公侠,陈兴华. 低频宽带大功率镶拼圆管换能器. 应用声学, 2002; 21(6): 32—35
- 13 黄树枝, 王宏, 王艳. 一种自由溢流式压电圆环阵. 声学技术, 2003; 22(4): 227—229
- 14 Butler J L, Ciosek S J. Rare earth iron octagonal transducer. J. Acoust. Soc. Am., 1980; 67(5): 1809—1811
- 15 Cohick S M, Butler J L. Rare-earth iron "square ring" dipole transducer. J. Acoust. Soc. Am., 1982; 72(2): 313—315
- Pan Yaozong, Mo Xiping, Chai Yong et al. A new design on broadband flextensional transducer. Applied Acoustics, 2011; 72(11): 836—840