doi:10.11887/j.cn.201902023 http://journal.nudt.edu.cn

耦合封闭声腔的主导声辐射模态确定方法*

苏常伟[1,2],朱海潮[1],毛荣富[1]
(1. 海军工程大学 船舶振动噪声重点实验室,湖北 武汉 430033;
2. 中国人民解放军92578部队,北京 100161)

摘 要:将在某一频率下或某一频段内对封闭声腔声势能起主要作用的一阶或几阶声辐射模态定义为耦合封闭声腔的主导声辐射模态。准确认定主导声辐射模态至关重要,直接影响有源控制效果。然而,现有的主导声辐射模态确定方法,要么仅考虑辐射效率的作用而忽视模态幅度的影响,要么就需要用到结构模态信息,难以实现工程应用。基于此,综合运用计算和测试手段,全面考虑辐射效率和模态幅度两个因素,提出了一种基于"初选—预留—后验"的主导声辐射模态确定方法,并通过实验研究证明了该方法的有效性和可行性。结果表明:提出的确定方法能够准确认定主导声辐射模态,确定过程中不需要用到辐射体的结构模态信息,可用于指导控制目标选取或重构封闭声腔声势能。

关键词:主导声辐射模态;确定方法;耦合封闭声腔;有源结构声控制
中图分类号:TB535 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2019)02-158-05

Determination method of dominant acoustic radiation modes in coupling enclosure

SU Changwei[1,2], *ZHU Haichao*[1], *MAO Rongfu*[1]
(1. National Key Laboratory on Ship Vibration and Noise, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;
2. The PLA Unit 92578, Beijing 100161, China)

Abstract: At a certain frequency or in a band, one or several acoustic radiation modes which make a major contribution to the acoustic potential energy are defined as DARMs (dominant acoustic radiation modes) of coupling enclosure. The determination of DARMs is of virtual importance, and it directly affects the effect of active structural acoustic control. However, the current determination methods either one-sidedly emphasize the effect of radiation efficiency while ignoring the impact of modal amplitude, or require the knowledge of structural modes which was difficult to be extracted in engineering applications. To overcome these problems, comprehensively by the means of computation and testing, and fully considering both radiation efficiency and modal amplitude, a method based on "primary election-reservation-posteriori correction" was proposed to determine DARMs in coupling enclosure, and an experimental research was performed to verify the effectiveness and feasibility of the proposed method. Results show that the proposed method can accurately identify DARMs and does not require the knowledge of structural modes throughout the process, so it can be used to guide the selection of control objective or reconstruct the acoustic potential energy of coupling enclosure.

Keywords: dominant acoustic radiation mode; determination method; coupling enclosure; active structural acoustic control

研究结构振动向封闭声腔中辐射噪声这一课题具有实际意义,例如船舶舱室及飞机座舱内噪声分析和控制。国内外学者针对此类腔体结构声辐射问题开展了大量的研究[1-5],其中Snyder等[5]通过对封闭声腔声势能解耦,首次提出了耦合封闭声腔的声辐射模态(Acoustic Radiation Mode, ARM)概念并初步探讨了利用其进行有源结构声控制(Active Structural Acoustic Control, ASAC)的可能性。耦合封闭声腔的声辐射模态消除了利用结构模态表示封闭声腔声势能时复杂的耦合项,而且在中、低频时通常只有一阶或几阶模态对封闭声腔声势能的贡献起主要作用,这使得分析和控制此类声辐射问题更为简单,成为近年来结构声学领域的研究热点[6-8]。

在实际设计基于声辐射模态的耦合封闭声腔ASAC系统时,如果能够精准确定对声势能有主

* **收稿日期**:2018-01-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675529)
作者简介:苏常伟(1990—),男,山东滕州人,博士研究生,E-mail: scwtz@163.com;
朱海潮(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail: haiczhu@163.com

要贡献的声辐射模态,那么在选取控制目标时就具有非常明确的针对性,这直接影响控制效果,而且能够有效减少控制通道数。然而,文献[5-8]中仅依据辐射效率选择前一阶或前几阶声辐射模态进行控制,自由空间 ASAC 中的相关研究[9-10]也大都强调辐射效率的作用而忽视模态幅度的影响,这显然是不全面的。李双等[11]、和卫平等[12]指出利用声辐射模态和结构模态之间的内在联系,可以有效确定主导声辐射模态,但该方法需要用到结构模态信息,而实际中要准确获得辐射体的结构模态信息并不容易,因此这一方法在应用上存在不便之处。截至目前,还没有一种准确的、便于工程应用的确定方法。

本文在前期研究中,将封闭声腔声势能直接表示为结构振动表面法向速度的二次型形式,重新定义了耦合封闭声腔的声辐射模态概念[13]。在此基础上,本文进一步给出了耦合封闭声腔中主导声辐射模态的定义;然后全面考虑辐射效率和模态幅度的作用,提出了一种基于"初选—预留—后验"的主导声辐射模态确定方法;最后通过实验研究验证了上述方法的有效性和可行性。

1　耦合封闭声腔的主导声辐射模态

文献[13]定义的耦合封闭声腔的声辐射模态是结构振动表面法向速度的一组可能分布形式。因此,结构振动表面法向速度向量 $\boldsymbol{v}$ 可由这组模态线性叠加表示,即

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{D}\boldsymbol{y} = \sum_{i=1}^{M} y_i \boldsymbol{d}_i \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{D}$ 为声辐射模态矩阵,满足正交性(即 $\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D} = \boldsymbol{E}$),其列向量 $\boldsymbol{d}_i (i = 1,2,\cdots,M)$ 即为重新定义的耦合封闭声腔的声辐射模态;$\boldsymbol{y}$ 为声辐射模态(速度)幅度向量,其元素 $y_i (i = 1,2,\cdots,M)$ 对应第 i 阶声辐射模态幅度;M 为结构振动表面的离散单元数目。

封闭声腔声势能 E_{p} 也可进一步写成

$$E_{\mathrm{p}} = \boldsymbol{y}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{y} = \sum_{i=1}^{M} \lambda_i |y_i|^2 \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{A}$ 为对角矩阵,其对角线元素 $\lambda_i (i = 1,2,\cdots,M)$ 为误差加权矩阵 $\boldsymbol{\Omega}$ 的特征值,均为正实数,与第 i 阶模态的辐射效率成正比,称之为第 i 阶模态对应的辐射效率系数。由式(2)可得,耦合封闭声腔的声辐射模态能够实现声势能解耦。因此,只要减小任意一阶声辐射模态幅度,就能保证总的封闭声腔声势能降低。

将在某一频率下或某一频段内对封闭声腔声势能起主要作用的一阶或几阶声辐射模态定义为耦合封闭声腔的主导声辐射模态(Dominant Acoustic Radiation Mode, DARM)。在中、低频时,一般只需抵消主导声辐射模态贡献的声势能,就能获得较为理想的有源控制效果。

2　主导声辐射模态确定方法

在实际设计 ASAC 系统时,首要环节就是要准确认定主导声辐射模态,从而正确选取控制目标,以保证控制效果。由式(2)可得,各阶声辐射模态单独贡献的声势能 $E_{\mathrm{p}i}$ 为

$$E_{\mathrm{p}i} = \lambda_i |y_i|^2, i = 1,2,\cdots,M \tag{3}$$

可见,各阶声辐射模态单独贡献的声势能为该阶模态幅度幅值的平方与辐射效率系数的乘积。已有的主导声辐射模态确定方法大都强调辐射效率的作用而忽视模态幅度的影响,这显然是不全面的。

为直观说明,以一尺寸为 $L_x \times L_y \times L_z = 0.65\ \mathrm{m} \times 0.50\ \mathrm{m} \times 0.45\ \mathrm{m}$、顶面为四边固支的弹性钢板(尺寸为 $L_x \times L_y = 0.65\ \mathrm{m} \times 0.50\ \mathrm{m}$,板厚 $h = 0.002\ 6\ \mathrm{m}$)、其余 5 个面均为刚性壁面的矩形声腔为例进行仿真分析。腔内介质为空气,设弹性板左下角为坐标原点,将弹性钢板表面均匀离散为 15 × 15 个小面积元。假设弹性板受到集中点力激励,激励频率为 150 Hz,激励位置为(0.152 m, 0.117 m)。图 1 ~ 3 分别给出了该激励下此耦合板-腔模型各阶声辐射模态的辐射效率系数、模态幅度的幅值及其单独贡献的声势能随阶数变化情况(为便于观察,这里只显示前 20 阶)。分析图 1 ~ 3 可知:如果某阶声辐射模态的模态幅度很小,即使该阶模态的辐射效率很高,其辐射声势能还是很小,即该阶模态不能作为主导声辐射模态,比如第 1 阶模态;反之亦然,比如第 12 阶模态。

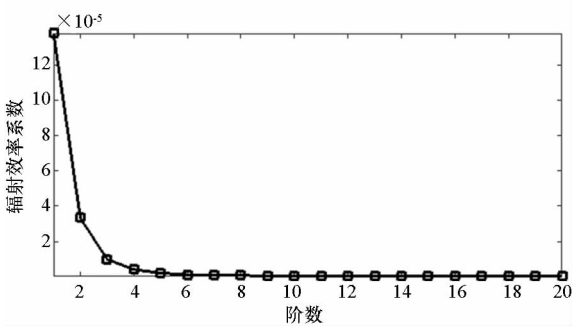


图 1　前 20 阶声辐射模态对应的辐射效率系数

Fig. 1　Radiation efficiency coefficients of the first twenty ARMs

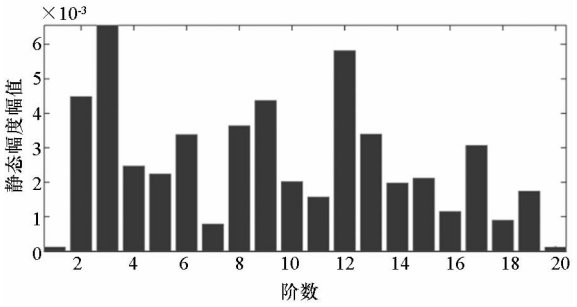


图2 前20阶声辐射模态幅度幅值

Fig. 2 Magnitudes of modal amplitude of the first twenty ARMs

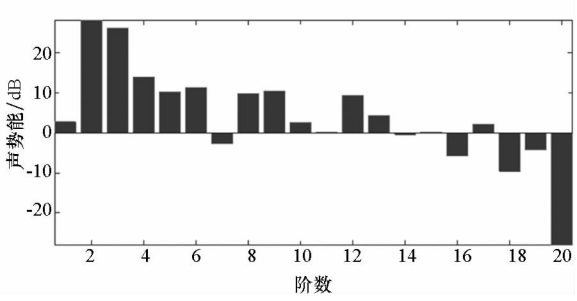


图3 前20阶声辐射模态单独贡献的声势能

Fig. 3 Acoustic potential energy of the first twenty ARMs

基于此,本文全面考虑了辐射效率和模态幅度两个因素,提出了一种基于“初选—预留—后验”的主导声辐射模态确定方法,具体如下:

1)计算辐射效率,初选可能的主导声辐射模态。单频分析时,计算各阶模态对应的辐射效率系数,初步选择辐射效率系数不小于最大值1%的声辐射模态作为可能的主导声辐射模态[6];宽频分析时,绘制各阶辐射效率系数-频率曲线,将在分析频段内出现峰值的最高模态阶数作为主导声辐射模态的初选阶数,记为js。

2)考虑模态幅度作用,放大初选阶数以预留余量。设预留余量后的主导声辐射模态阶数为JS,则$JS=\mu\times js$。其中,μ为放大因子,一般取整,根据经验赋初值。

3)传感前JS阶声辐射模态幅度,直接对比声势能后验初选结果。具体可分成以下两个步骤:

①在结构振动表面布置传感器阵列测量振速数据,传感前JS阶模态幅度。在结构表面均匀离散的前提下,可类比自由空间声辐射模态[14],将不同自由度下的声辐射模态向量均转换为标准声辐射模态(声辐射模态函数的离散形式),以保证振型的一致性。因此,可以利用低自由度下的标准声辐射模态设计前JS阶模态幅度传感策略,即

$$\boldsymbol{y}_1'=(\boldsymbol{D}_1')^{-1}\boldsymbol{v}_1=\sqrt{s_1/S}\boldsymbol{D}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}_1 \tag{4}$$

$$\boldsymbol{y}(1:JS)=\sqrt{s_1/s_h}[\boldsymbol{D}_l(:,1:JS)]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}_1 \tag{5}$$

其中:$\boldsymbol{y}_1'$为低自由度M_l下标准声辐射模态幅度向量,有$JS<M_1\ll M$;$\boldsymbol{D}'_1$和$\boldsymbol{D}_1$分别为低自由度下的标准声辐射模态矩阵和未经转换处理的声辐射模态矩阵;$\boldsymbol{v}_1$为低自由度下结构振动表面M_1个单元中心的法向速度向量,由传感器阵列测量得到;s_1、s_h分别表示低自由度M_1和高自由度M下的结构振动表面均匀离散单元的面积;S为结构振动表面面积;$\boldsymbol{y}$即为高自由度M下前JS阶声辐射模态幅度向量。

②将利用式(4)~(5)获得的前JS阶模态幅度代入式(3),计算前JS阶模态单独贡献的声势能$E\mathrm{p}_i(i=1,2,\cdots,JS)$,直接观察$E\mathrm{p}_i$随阶数收敛情况,最终确定主导声辐射模态。

上述确定方法的流程图如图4所示。不难发现,该方法综合运用计算和测试手段,本质上是通过直接对比前JS阶声辐射模态单独贡献的声势能确定主导声辐射模态,一方面保证了主导声辐射模态的精准认定,另一方面通过“初选”环节进行了模态阶数截断,较大程度地减小了工作量,而且整个过程中不需要用到辐射体的结构模态信息,便于工程实现。

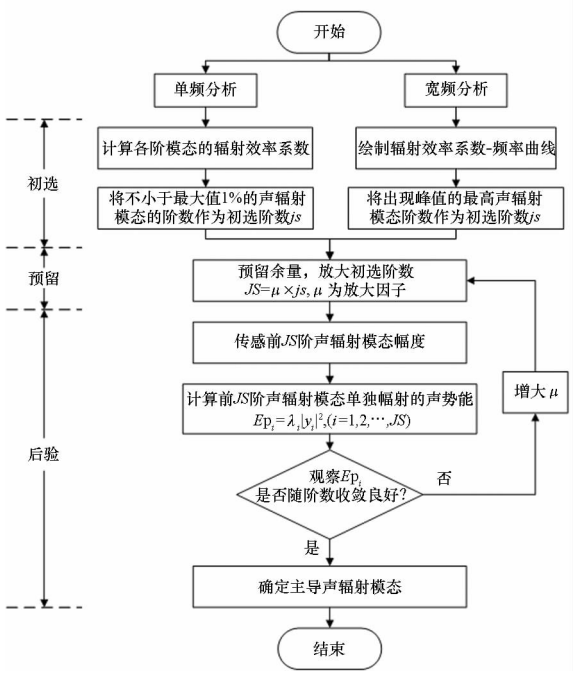


图4 主导声辐射模态确定流程

Fig. 4 Determination process of DARM

值得一提的是,利用该方法确定主导声辐射模态后,不仅能够指导ASAC中控制目标选取,还可以用于实现封闭声腔声势能重构,即

$$\tilde{E}_{\mathrm{p}}=\lambda_{d_1}|y_{d_1}|^2+\lambda_{d_2}|y_{d_2}|^2+\cdots \tag{6}$$

式中,$\tilde{E}_p$ 为重构得到的封闭声腔声势能,d_1,d_2,…则为最终确定的主导声辐射模态阶数。

3　实验研究

为验证主导声辐射模态确定方法的有效性及可行性,按照第 2 节中尺寸设计、制作固支弹性板 - 矩形腔耦合模型,开展实验研究。采用 HEV -50型激振器向弹性板施加带宽为 30 ~ 300 Hz 的白噪声激励,激励位置为(0.155 m, 0.05 m)。将弹性板表面均匀离散为 13 × 11 个小面积元,图 5给出了该激励频段内前 6 阶声辐射模态的辐射效率系数随频率变化曲线。

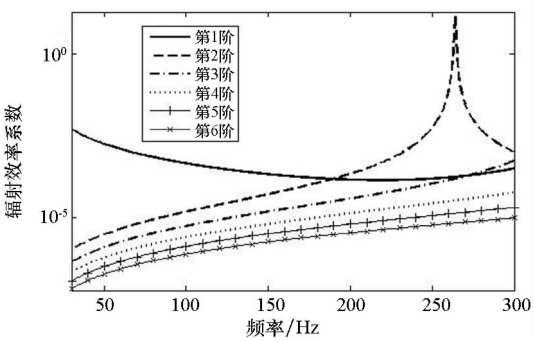
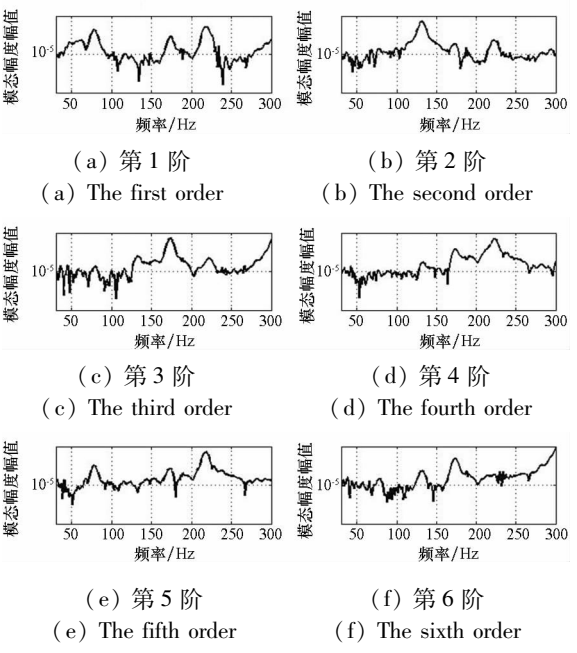


图 5　前 6 阶模态的辐射效率系数随频率变化曲线

Fig. 5　Radiation efficiency coefficients of the first six ARMs as a function of frequency

首先,根据图 4 中流程逐步确定该激励下的主导声辐射模态,具体为:观察图 5 中给出的辐射效率系数 - 频率曲线可得,初选前 2 阶模态作为可能的主导声辐射模态,即 $js = 2$;为充分考虑模态幅度的作用,将初选阶数放大 3 倍以预留余量,即令 $\mu = 3$,则 $JS = 6$;根据式(4) ~ (5)给出的模态幅度传感策略,假设将弹性板表面均匀离散为 4 × 3 个小面积元,利用均布在面元中心的 12 个加速度传感器测量弹性板表面法向速度,传感此耦合板 - 腔的前 6 阶声辐射模态幅度,然后代入式(3)计算得到前 6 阶模态单独贡献的声势能。前 6 阶声辐射模态幅度的幅值及单独贡献的声势能分别如图 6 和图 7 所示。观察图 7 中各阶声势能 - 频率曲线可得:在不同频率下,不同阶次的声辐射模态对总的封闭声腔声势能起主导作用,比如第 1 阶声辐射模态在 30 ~ 100 Hz 时对声势能起主要贡献;从整个分析频段来看,对封闭声腔声势能起主要贡献的是第 1 ~ 3 阶声辐射模态,第 4 ~6阶模态的贡献量则相对较小。因此,可最终确定该激励下此耦合板 - 腔模型的主导声辐射模态为第 1 ~3 阶声辐射模态。后续控制中,若能有效抵消第 1 ~3 阶主导声辐射模态贡献的声势能,就可以获得较为理想的宽频(30 ~ 300 Hz)控制效果。



(a) 第 1 阶　(b) 第 2 阶

(a) The first order　(b) The second order

(c) 第 3 阶　(d) 第 4 阶

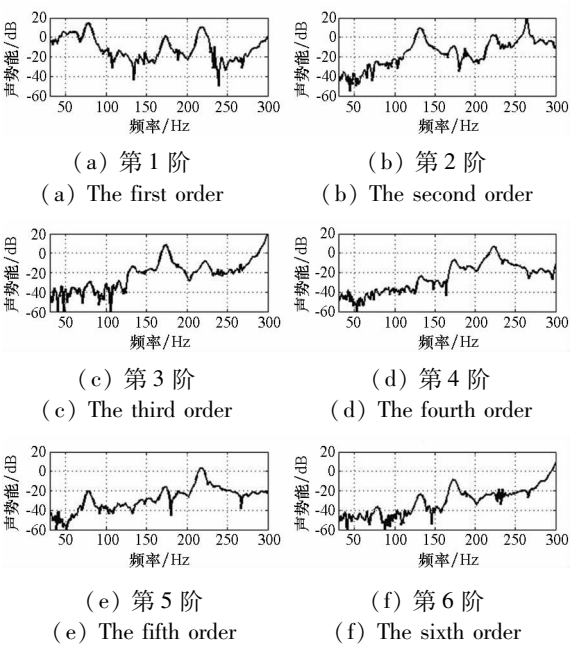
(c) The third order　(d) The fourth order

(e) 第 5 阶　(f) 第 6 阶

(e) The fifth order　(f) The sixth order

图 6　前 6 阶声辐射模态幅度的幅值随频率变化曲线

Fig. 6　Magnitudes of modal amplitude of the first six ARMs as a function of frequency



(a) 第 1 阶　(b) 第 2 阶

(a) The first order　(b) The second order

(c) 第 3 阶　(d) 第 4 阶

(c) The third order　(d) The fourth order

(e) 第 5 阶　(f) 第 6 阶

(e) The fifth order　(f) The sixth order

图 7　前 6 阶声辐射模态的声势能随频率变化曲线

Fig. 7　Acoustic potential energy of the first six ARMs as a function of frequency

利用 4 个布置在矩形腔底部四个角落的 MPA416 型参考传声器估算封闭声腔声势能[15],记为测量值。同时,将第 1 ~3 阶主导声辐射模态代入式(6)重构封闭声腔声势能,记为重构值。将两者对比,以验证上述确定结果的正确性,结果如图 8 所示。可见,分别经重构和测量得到的声

势能曲线除在波谷处由于信噪比低略有差别外，总体吻合良好，尤其在波峰处两者基本重合。这就证明了上述确定结果的正确性，从而表明本文提出的主导声辐射模态确定方法是有效且可行的。

最后，分析图5～7中第3阶声辐射模态的辐射效率系数、模态幅度的幅值及其单独贡献的声势能随频率变化曲线，可以发现：在162～186 Hz频段内，虽然该阶模态的辐射效率相比第1、2阶模态低，但其模态幅度的幅值较大，因而此时该阶模态单独辐射的声势能在总声势能中的占比明显大于第1、2阶模态，成为该频段内的主导声辐射模态。这就再次说明了在确定主导声辐射模态时综合考虑辐射效率和模态幅度两个因素的必要性，这也正是本文所提方法的意义所在。

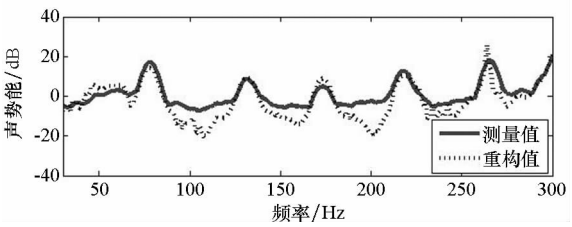


图8 声势能对比

Fig. 8 Comparison of acoustic potential energy

4 结论

在前期研究的基础上，定义了耦合封闭声腔的主导声辐射模态，提出了一种基于“初选—预留—后验”的主导声辐射模态确定方法，并以固支板－腔耦合模型为例开展了实验研究，验证了上述方法的有效性和可行性，得到结论如下：①提出的主导声辐射模态确定方法综合运用计算和测试手段、全面考虑辐射效率和模态幅度两个因素，能够精准认定主导声辐射模态；②该方法通过“初选”环节较大程度地减小了工作量，且整个过程中不需要用到辐射体的结构模态信息，便于工程实现；③该方法可用于指导ASAC中控制目标选取或重构封闭声腔声势能，而且“初选—预留—后验”的主导声辐射模态确定思路在自由空间中同样适用。

参考文献(References)

[1] Pan J, Hansen C H, Bies D A. Active control of noise transmission through a panel into a cavity: Ⅰ analytical study[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1990, 87(5): 2098－2108.

[2] Kim S M, Brennan M J. Active control of harmonic sound transmission into an acoustic enclosure using both structural and acoustic actuators [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 107(5): 2523－2534.

[3] Hill S G, Tanaka N, Iwamoto H. A generalized approach for active control of structural-interior global noise: practical implementation [J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(14): 3227－3239.

[4] Chen D L, Chen N. Active control of structural sound radiation in an acoustic enclosure consisting of flexible structure [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2014, 30(3): 318－322.

[5] Snyder S D, Tanaka N. On feedforward active control of sound and vibration using vibration error signals [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 94(4): 2181－2193.

[6] Cazzolato B S, Hansen C H. Active control of sound transmission using structural error sensing[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 104 (5): 2878－2889.

[7] 靳国永，杨铁军，刘志刚. 基于声辐射模态的有源结构声传入及其辐射控制[J]. 声学学报，2009，34(3)：256－265.
JIN Guoyong, YANG Tiejun, LIU Zhigang. Active control of sound transmission and radiation into a enclose based on acoustic radiation modes [J]. Acta Acustica, 2009, 34(3): 256－265. (in Chinese)

[8] Hesse C, Papantoni V, Algermissen S, et al. Frequency-independent radiation modes of interior sound radiation: Experimental study and global active control[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 401: 204－213.

[9] Elliott S J, Johnson M E. Radiation modes and the active control of sound power[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 94(4): 2194－2204.

[10] 毛崎波，姜哲. 通过声辐射模态研究结构声辐射的有源控制[J]. 声学学报，2001，26(3)：277－281.
MAO Qibo, JIANG Zhe. Research on active structural acoustic control by radiation modes [J]. Acta Acustica, 2001, 26(3): 277－281. (in Chinese)

[11] 李双，陈克安. 结构振动模态和声辐射模态之间的对应关系及其应用[J]. 声学学报，2007，32(2)：171－177.
LI Shuang, CHEN Kean. The relationship between acoustic radiation modes and structural modes and its applications[J]. Acta Acustica, 2007, 32(2): 171－177. (in Chinese)

[12] 和卫平，陈美霞，魏建辉，等. 基于有限测点的单层圆柱壳辐射声功率计算[J]. 船舶力学，2012，16(10)：1204－1211.
HE Weiping, CHEN Meixia, WEI Jianhui, et al. Calculation of acoustic power radiated from a cylindrical shell based on a limited number of measurements [J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(10): 1204－1211. (in Chinese)

[13] 毛荣富，苏常伟，朱海潮. 弱耦合封闭声腔的声辐射模态理论和计算[J]. 声学学报，2019，44(3)：297－302.
MAO Rongfu, SU Changwei, ZHU Haichao. Theory and calculation for acoustic radiation mode of weak coupling enclosure [J]. Acta Acustica, 2019, 44(3): 297－302. (in Chinese)

[14] 聂永发. 声辐射模态理论及其应用研究[D]. 武汉：海军工程大学，2014.
NIE Yongfa. Study on acoustic radiation modes theory and its applications [D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2014. (in Chinese)

[15] Tanaka N, Kobayashi K. Cluster control of acoustic potential energy in a structural/acoustic cavity [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 119(5): 2758－2771.