

空气中纵向加肋混凝土圆柱壳的结构噪声辐射分析

孙亮明, 谢伟平

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:城市高架轨道箱形梁产生以低频噪声为主的结构噪声对周边建筑物的安全、精密仪器的正常使用、沿线居民的日常生活等均造成了很大的影响。为探求轨道箱形梁结构噪声产生的机理,研究了空气中无限长纵向加肋混凝土圆柱壳。考虑流固耦合作用,利用波数域法和传递矩阵法研究了耦合系统的声辐射特性,并分析了观察点位置、外激励幅值、结构阻尼、纵向肋骨数量等参数变化的影响规律。结果表明:增加纵向肋骨的数量,可以有效降低混凝土圆柱壳的振动和结构噪声。可为实际工程中管道结构的减振降噪研究和轨道箱形梁结构噪声的理论研究提供基础。

关键词:声辐射;轨道箱形梁;混凝土圆柱壳;流固耦合;波数域法;结构噪声

中图分类号:X503; TB532 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)03-0041-05

Structural Noise Analysis of Longitudinal Stiffened Concrete Cylindrical Shell in Air

SUN Liang-ming, XIE Wei-ping

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P. R. China)

Abstract: Structural noises induced by urban viaduct box beam basically comes from the vibration responses with low frequency noises, which may affect the surrounding buildings' security, the common using of high-precision instruments and the living of human beings etc. In order to study the principles of structural noise of railway box beams, the infinite longitudinal stiffened concrete cylindrical shell in air was actively investigated. Aimed at the fluid structure interaction, the characteristics of sound radiation of coupling system were investigated by the wave-number domain approach and transfer matrix method. And the effects of various parameters on the properties of concrete cylindrical shell, including the position of observation point, the size of the external excitation force, structural damping and the amount of longitudinal ribs, were numerically simulated based on the proposed analytical model. It is found that the increase of longitudinal ribs can effectively reduce the vibration and structural noises of concrete cylindrical shell. The observations would be provided as beneficial guidelines for the noise mitigation of pipeline structures and railway box beams.

Key words: radiation; railway box beam; concrete cylindrical shell; fluid structure interaction; wave-number domain approach; structural noise

收稿日期:2009-11-26

基金项目:国家自然科学基金面上项目(50678141);武汉理工大学自主创新研究基金(2010-Va-014)

作者简介:孙亮明(1983-),男,博士生,主要从事轨道交通系统环境振动和噪声的评价与控制策略研究,(E-mail) sunliangming@126.com。

谢伟平(联系人),男,教授,博士生导师,博士后,(E-mail) wpxie@sina.com。

城市轨道交通具有方便、快捷、准时、运量大等优点,它极大地缓解了城市交通拥挤的现状,也给出行带来了方便,但是它长期反复产生的环境噪声和振动对周边建筑物的安全、精密仪器的正常使用、沿线居民的正常工作、学习、生活等均造成了很大的影响。特别是高架轨道箱形梁结构振动时辐射的低频噪声,传播远,通透力强,衰减慢,并且通过媒介传播后容易与房屋结构产生共振现象,诱发结构的二次噪声,此种情况较难治理。医学专家研究发现^[1],人如果长期受到低频噪声的干扰,容易造成神经衰弱、失眠、头痛、综合判断能力下降等各种神经官能症;人如果长期处在低频振动的环境下,容易导致心脏、肺、脾、肾、肝等受到不可逆的损害。因此,能否有效控制城市轨道交通引起的环境噪声和振动的污染问题,实质上涉及到轨道交通在城市建设中的发展和推广,并且已经成为环境保护领域亟待研究和解决的重要问题。

城市高架轨道箱形梁振动引起的声辐射问题本质上属于结构流固耦合问题,一直是结构声学和控制领域的难点问题。目前,前人的研究^[2-12]大多集中在军事和机械领域中水下规则壳体(如圆柱壳、球壳)的研究上,而关于不规则壳体的研究几乎没有,并且很少考虑甚至忽略空气作用的影响。例如:CHEN^[3]在 BURROUGHS^[2] 研究工作的基础上研究了纵横双向加肋无限长圆柱壳的振动声辐射问题。LAULAGNET^[4]利用模态分析法首次对轻质和重质流体中有限长圆柱壳的声辐射能力进行了对比研究,研究中发现圆柱壳在空气中和水中的声振特性有很大的差异。WU^[5]利用波数域和边界积分方程相结合的方法研究了复杂多层流固耦合圆柱壳受径向点载荷激励作用的远场声辐射特性。陶猛^[10]研究了有限长圆柱壳覆盖多层柔性材料的声辐射特性,计算表明减小柔性层的声速或密度均能增加辐射声功率降低量。

在土木工程领域中,只有少数学者从事结构流固耦合问题的研究,主要集中于试验研究^[13-14]和圆柱壳的数值模拟^[15],解析法研究几乎没有。Ngai^[13]应用快速 Fourier 变换分析了高架轨道箱形梁结构噪声和振动的测量结果,并用有限元方法模拟验证箱形梁的噪声和振动的共振频率。轨道箱形梁由于结构截面周向变曲率,导致结构流固耦合方程求解困难,至今仍未解决好。因此,为了探求轨道箱形梁结构噪声产生的机理,该文开展了对空气中无限长纵向加肋混凝土圆柱壳结构噪声的理论研究。

1 理论分析

建立计算模型及相关坐标系如图 1 所示,无限长混凝土圆柱壳沿周向均匀设置纵向肋骨,并置于空气中,空气为无粘性、静止的均质流体。设壳体中性面半径为 a ,厚度为 h ,壳体材料的弹性模量为 E ,泊松比为 μ ,密度为 ρ ;空气密度为 ρ_0 ,声速为 c_0 。设壳体受简谐激励集中点力作用,方向与作用点处壳体外法线方向相反,时间因子取为 $\exp(-i\omega t)$,其中 ω, t 分别为外激励圆频率和时间,为计算方便起见,公式中 $\exp(-i\omega t)$ 均已省略。声压计算点位于远场,且满足 $k_0 r \gg 1$, k_0 为声波数, r 为声压计算点到 z 轴的垂直距离。

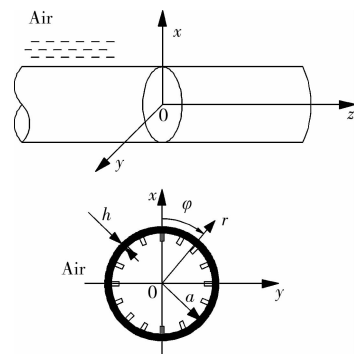


图 1 空气中无限长纵向加肋混凝土圆柱壳

1.1 结构动力方程

采用 Donnell—Mushtari 壳体理论来描述壳体的运动,由于无限长纵向加肋混凝土圆柱壳与内、外空气之间的作用属于流固耦合问题,则结构动力方程可以表示为^[5]:

$$[R] \cdot \begin{bmatrix} u_z(a, \varphi, z) \\ u_\varphi(a, \varphi, z) \\ u_r(a, \varphi, z) \end{bmatrix} = \frac{1 - \mu^2}{E^* h} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ p(r_i, \varphi, z) - p_l(a, \varphi, z) \\ -F(r_0, \varphi, z) - p(r_0, \varphi, z) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $u_z(a, \varphi, z)$, $u_\varphi(a, \varphi, z)$, $u_r(a, \varphi, z)$ 分别为圆柱壳中截面的轴向、切向、径向位移; $p(r_i, \varphi, z)$, $p(r_0, \varphi, z)$ 分别为作用于壳体内、外表面的声压; $p_l(a, \varphi, z)$ 为纵向肋骨对壳体表面产生的压力; $F(r_0, \varphi, z)$ 为作用于壳体外表面的机械激励力; $[R]$ 为 Donnell 微分算子; $E^* = E(1 + i\eta)$ 为壳体的复弹性模量, η 为壳体的结构阻尼; $\beta = h^2/12 a^2$, $c_1 = (E^*/\rho(1 - \mu))^{0.5}$ 为壳体中纵波速度。

定义 Fourier 积分变换关系为:

$$\tilde{f}_n(r, \zeta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(r, \varphi, z) e^{-m\varphi} d\varphi e^{-i\zeta z} dz \quad (2)$$

利用波数域法和传递矩阵法进行求解,可得位移的波数域形式为:

$$\frac{1-\mu^2}{E^* h} \tilde{\Gamma}_n \cdot \begin{bmatrix} \tilde{u}_{z,n}(a, \zeta) \\ \tilde{u}_{\varphi,n}(a, \zeta) \\ \tilde{u}_{r,n}(a, \zeta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{p}_n(r_i, \zeta) - \tilde{p}_{ln}(a, \zeta) \\ -\tilde{F}_n(r_0, \zeta) - \tilde{p}_n(r_0, \zeta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $\zeta = (k_0^2 - \gamma_0^2)^{0.5}$ 为空气中的轴向声波数,其中 γ_0 为空气中的径向声波数, $[\tilde{\Gamma}_n]$ 见文献[5]。

可以求出圆柱壳波数域的径向振动速度分量:

$$\tilde{u}_{r,n}(a, \zeta) = \frac{i\omega(\mu^2 - 1)}{E^* h} \cdot \tilde{\Gamma}_{n3}^3 \cdot [\tilde{p}_n(r_i, \zeta) - \tilde{p}_{ln}(a, \zeta) - \tilde{F}_n(r_0, \zeta) - \tilde{p}_n(r_0, \zeta)] \quad (4)$$

对于薄壳结构存在以下关系:

$$\tilde{u}_{r,n}(r_i, \zeta) = \tilde{u}_{r,n}(r_0, \zeta) = \tilde{u}_{r,n}(a, \zeta) \quad (5)$$

由于圆柱壳同一径向上各点的振动速度相等,利用传递矩阵法得到圆柱壳波数域外表面径向振动速度为:

$$\tilde{u}_{r,n}(r_0, \zeta) = \tilde{F}_n(r_0, \zeta) / [\tilde{Z}_{i,n}(r_i, \zeta) - \tilde{Z}_{i,n}(a, \zeta) - \tilde{Z}_{s,n}(a, \zeta) - \tilde{Z}_{0,n}(r_0, \zeta)] \quad (6)$$

式中, $\tilde{Z}_{s,n}(a, \zeta) = E^* h / [i\omega(\mu^2 - 1)\tilde{\Gamma}_{n3}^3]$ 为壳体波数域径向机械阻抗。

1.2 流场 Helmholtz 方程

在柱坐标系下,壳体周围空气必须满足流场 Helmholtz 方程:

$$(\nabla^2 + k_0^2)p(r, \varphi, z) = 0 \quad (7)$$

式中, $\nabla^2 = (1/r)(\partial/\partial r)[r(\partial/\partial r)] + (1/r^2)(\partial^2/\partial \varphi^2) + \partial^2/\partial z^2$ 。

在波数域的通解为:

$$\tilde{p}_n(r, \zeta) = A_1(n, \zeta) J_{|n|}(\gamma_0 r) + A_2(n, \zeta) H_{|n|}(\gamma_0 r) \quad (8)$$

其中 $J_n()$ 和 $H_n()$ 为第 1 类 Bessel 函数和 Hankel 函数。

波数域声压满足空气与圆柱壳交界面上的协调条件有:

$$\partial \tilde{p}_n(a, \zeta) / \partial r = i\omega \rho_0 \tilde{u}_{r,n}(a, \zeta) \quad (9)$$

利用 Sommerfield 辐射条件可得内、外部空气波数域声压表达式及声辐射阻抗为:

$$p_n(r_i, \zeta) = Z_{i,n}(r_i, \zeta) \tilde{u}_{r,n}(r_i, \zeta)$$

$$\tilde{Z}_{i,n}(r_i, \zeta) = i\omega \rho_0 J_{|n|}(\gamma_0 r_i) / [\gamma_0 J_{|n|}'(\gamma_0 r_i)] \quad (10)$$

$$p_n(r_0, \zeta) = \tilde{Z}_{0,n}(r_0, \zeta) \tilde{u}_{r,n}(r_0, \zeta) \\ Z_{0,n}(r_0, \zeta) = i\omega \rho_0 H_{|n|}(\gamma_0 r_0) / [\gamma_0 H_{|n|}'(\gamma_0 r_0)] \quad (11)$$

1.3 纵向肋骨的作用力

纵向肋骨对圆柱壳作用的法向力可写成:

$$p_l(a, \varphi, z) = \sum_{j=1}^M p_l^j(a, z) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta\{a[\Phi - (\Phi_j + 2\pi n)]\} \quad (12)$$

式中, $p_l^j(a, z)$ 是第 j 根纵向肋骨对壳体产生的法向分布力; $\Phi_j = (2\pi/M)j$, M 是纵向肋骨的数量。

将纵向肋骨作为欧拉梁处理,忽略剪切变形和转动惯量,利用纵向肋骨作用的线分布力和它的挠度幅值的关系和式(12),通过 Fourier 变换可得:

$$\tilde{p}_{ln}(a, \zeta) = \frac{k^4 E_1 I_1 - \rho_1 A_1 \omega^2}{-2i\omega \pi a} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=1}^M e^{i(m-n)\varphi_j} \tilde{u}_{r,n}^j(a, \zeta) = Z_l \sum_{m=-\infty}^{+\infty} A_{nm} \tilde{u}_{r,n}^j(a, \zeta) \quad (13)$$

式中, A_1 、 I_1 分别为纵向肋骨的横截面积和转动惯量, ρ_1 、 E_1 分别为材料密度和弹性模量。

由式(13)可知,纵向肋骨对外壳板的第 n 阶模态作用力不能仅由第 n 阶模态径向速度决定,其它各阶模态径向速度分量对它也有影响。纵向肋骨的存在使得圆柱壳周向模态发生耦合,增加了问题的复杂性。分析表明,如果纵向肋骨沿圆周方向均匀排列,则纵向肋骨引起的圆柱壳周向模态之间的耦合是一种非常弱的耦合,计算 A_{nm} 矩阵的各元素,可以发现主对角元素明显占优,大约比非主对角元素高几个数量级,因此非主对角元素可以忽略,圆柱壳周向模态速度方程可以解耦。故式(13)可写为:

$$\tilde{p}_{ln}(a, \zeta) = Z_l M \tilde{u}_{r,n}^j(a, \zeta) = \tilde{Z}_{l,n}(a, \zeta) \tilde{u}_{r,n}^j(a, \zeta) \quad (14)$$

1.4 辐射声压求解

圆柱壳外表面上点 (φ_0, z_0) 处受到径向简谐集中激励力作用,表达式如下:

$$F(r_0, \varphi, z) = F_0 \delta(z - z_0) \delta(\varphi - \varphi_0) / r_0 \quad (15)$$

外荷载波数域的表示形式为:

$$\tilde{F}_n(r_0, \zeta) = (F_0 / 2\pi r_0) e^{-in\varphi_0 - i\zeta z_0} \quad (16)$$

把式(10)、(11)、(14)、(16)代入式(6)就可以得到圆柱壳外表面的波数域径向振动速度,进而用边界积分方程可以求得圆柱壳的辐射声压:

$$p(r, \varphi, z) = \frac{i\rho_0 \omega}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty}$$

$$e^{in\varphi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{H'_{|n|}(r\gamma_0)}{\gamma_0 H'_{|n|}(r_0\gamma_0)} \tilde{u}_{r,n}(r_0, \zeta) e^{i\zeta z} d\zeta \quad (17)$$

引入球坐标系, $r = R \sin \theta, z = R \cos \theta, \varphi = \psi$, 设点 $M(r_0, \varphi, z)$ 为壳体外表面上的声源点, $N(R, \theta, \psi)$ 为壳体外部的观察点, 如图 2 所示。利用稳相法可得空气中无限长加肋混凝土圆柱壳辐射声压的理论表达式为:

$$p(R, \theta, \psi) = \frac{\rho_0 c_0 e^{ik_0 R}}{\pi R \sin \theta} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(-i)^{|n|}}{H'_{|n|}(k_0 a \sin \theta)} \tilde{u}_{r,n}(a, k_0 \cos \theta) e^{in\psi} \quad (18)$$

则相应的声压级为 $L_p = 20 \lg_{10}(p/p_0), p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 。

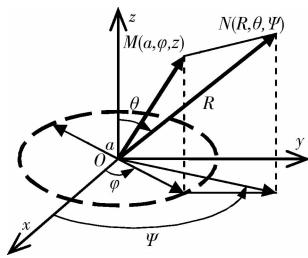


图 2 声源点与观察点的几何示意图

2 数值计算及讨论

根据空气中无限长加肋混凝土圆柱壳辐射声压的理论表达式(18),通过数值算例分析观察点位置、外激励幅值、壳体内部流体性质、结构阻尼、纵向肋骨数量等参数变化对辐射声压级的影响规律。

数值算例中混凝土圆柱壳的主要参数有: $a = 1 \text{ m}, h = 0.05 \text{ m}, E = 3.25 \times 10^{10} \text{ N/m}^2, \mu = 0.2, \rho = 2550 \text{ kg/m}^3, (z_0, \varphi_0) = (0, 0), F_0 = 10 \text{ N}, N_1(5 \text{ m}, \pi/2, 0), \rho_0 = 1.21 \text{ kg/m}^3, \eta = 0, c_0 = 343 \text{ m/s}, \rho_1 = 1000 \text{ kg/m}^3, c_1 = 1500 \text{ m/s}, A_1 = 5.22 \times 10^{-3} \text{ m}^2, I_1 = 3.28 \times 10^{-5} \text{ m}^4$ 。各种参数变化的辐射声压级曲线如图 3—图 7 所示。

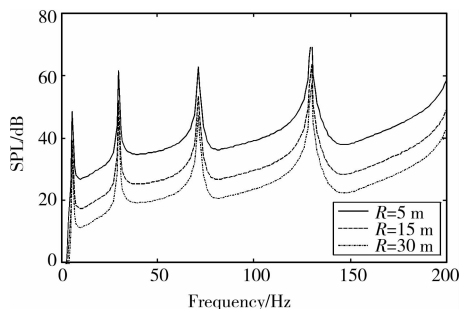


图 3 观察点位置变化的辐射声压级曲线

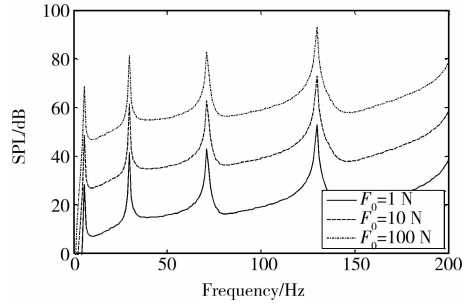


图 4 外激励幅值变化的辐射声压级曲线

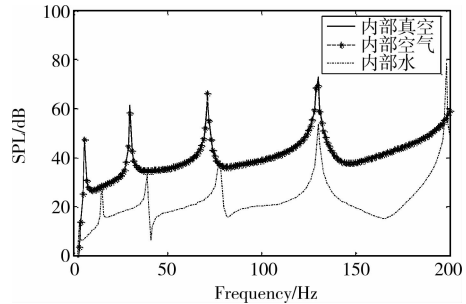


图 5 内部流体性质变化的辐射声压级曲线

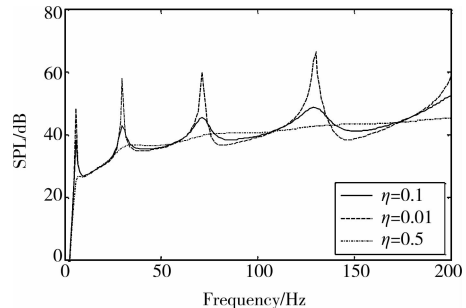


图 6 结构阻尼变化的辐射声压级曲线

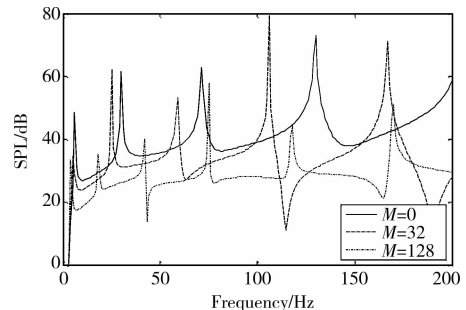


图 7 纵向肋骨数量变化的辐射声压级曲线

由图 3-图 7 可知,观察点距离壳体越远,同一频率对应的辐射声压级越小,在频率 $0 \sim 200 \text{ Hz}$ 之间出现 4 个峰值,最大声压级出现在 130 Hz 附近;外激励幅值越大,辐射声压级越大,外激励幅值增大 10 倍,声压级增加约 20 dB ;壳体内部空气对壳体的作用很小,相比内部水对壳体的作用要更小,但是空气作为结构噪声传播的媒介以及由此耦合效应引起的环境问题,则空气与壳体之间的作用不容忽视;增大结构阻尼,可以有效降低辐射声压级的波峰波谷

值,但是在没有波峰波谷的位置,曲线几乎重合,其原因是辐射声压主要由声源附近的强迫波控制,不会因为结构阻尼的变化而变化;增加纵向肋骨的数量,辐射声压级随之减小,则表明纵向肋骨可以有效降低混凝土圆柱壳的振动和结构噪声。通过对以上各种参数影响的分析,结合城市高架轨道交通的实际情况,寻求一种可行、经济、有效的减振降噪措施,达到防治环境噪声和振动污染的目的。

3 结论

研究了空气中无限长纵向加肋混凝土圆柱壳的结构噪声。研究这种理想介质中结构声辐射问题的关键是求解由结构动力方程、流场 Helmholtz、Sommerfield 辐射条件、流体和结构交界面上的协调条件组成的流固耦合方程。利用波数域法和传递矩阵法得到了混凝土圆柱壳辐射声场的预估理论模型,并利用这个理论模型,研究了观察点位置、外激励幅值、壳体内部流体性质、结构阻尼、纵向肋骨数量等参数变化对无限长混凝土圆柱壳辐射声压级的影响规律。研究结果表明:观察点距离壳体越远,辐射声压越小;外激励幅值越大,辐射声压越大;壳体内部空气作用对辐射声压的影响比水作用对辐射声压的影响要小得多;增大结构阻尼,可以有效降低辐射声压的波峰波谷值;增加纵向肋骨的数量,可以有效降低辐射声压。该文的研究成果可为实际工程中管道结构的减振降噪研究和城市高架轨道交通中轨道箱形梁结构噪声的理论研究提供基础。

参考文献:

- [1] MIROWKA M. Effect of low-frequency noise at low levels on human health in light of questionnaire investigation[C]//Internoise 2000 Special:41-45.
- [2] BURROUGHS C B. Acoustic radiation from fluid-loaded infinite circular cylinders with periodic ring supports [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1984, 75(3): 715-722.
- [3] CHEN JUN-MING, HUANG YU-YING, ZENG GE-WEI. Vibration and acoustic radiation from orthogonally stiffened infinite circular cylindrical shells in water [J]. China Ocean Engineering, 2002, 16(4):437-452.
- [4] LAULAGNET B, GUYADER J L. Modal analysis of a shell's acoustic radiation in light and heavy fluids [J]. Journal of Sound and Vibration, 1989, 131(3): 397-415.
- [5] WU C J. Double-layer structural-acoustic coupling for cylindrical shell by using a combination of WDA and BIE [J]. Applied Acoustics, 2002, 63(10):1143-1154.
- [6] TONG Z, ZHANG Y, ZHANG Z, et al. Dynamic behavior and sound transmission analysis of a fluid-structure coupled system using the direct-BEM/FEM [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 299(3): 645-655.
- [7] RAMACHANDRAN P, NARAYANAN S. Evaluation of modal density, radiation efficiency and acoustic response of longitudinally stiffened cylindrical shell [J]. Journal Sound and Vibration, 2007, 304(1):154-174.
- [8] DENLI H, SUN J Q. Structural-acoustic optimization of sandwich cylindrical shells for minimum interior sound transmission [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 316(1):32-49.
- [9] YAN J, LI T Y, LIU J X, et al. Input power flow in a submerged infinite cylindrical shell with doubly periodic supports [J]. Applied Acoustics, 2008, 69(8): 681-690.
- [10] 陶猛,范军,汤渭霖. 覆盖多柔性层的有限长圆柱壳声辐射特性[J]. 声学学报, 2008, 33(3):220-225.
TAO MENG, FAN JUN, TANG WEI-LIN. The characteristics of sound radiation from a cylindrical shell coated with multiple compliant layers [J]. Acta Acustica, 2008, 33(3):220-225.
- [11] DANESHJOU K, NOURI A, TALEBITOOTI R. Analytical model of sound transmission through orthotropic cylindrical shells with subsonic external flow [J]. Aerospace Science and Technology, 2009, 13(1):18-26.
- [12] JUNGER MC, FEIT D. Sound, structures and their interaction. [M]. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 1986.
- [13] NGAI KING-WAH. The model of local mode analysis for structural acoustics of box structures [D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2004.
- [14] 常亮. 箱形梁结构的振动和噪声辐射研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [15] 谢伟平,陈西德,潘支明. 空气中钢筋混凝土圆柱壳声辐射特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2008, 28(3):109-112.
XIE WEI-PING, CHEN XI-DE, PAN ZHI-MING. Analysis of acoustic radiation from reinforced concrete cylindrical shell in air [J]. Noise and Vibration Control, 2008, 28(3):109-112.

(编辑 胡 玲)