

一端周向激励的圆柱壳声辐射特性研究

钱 斌¹, 汪源源¹, 杨世兴², 李志舜²

(1 复旦大学电子工程系, 上海 200433 2 西北工业大学航海工程学院, 西安 710072)

摘要: 针对一端受周向均布激励的圆柱壳建立了新的理论模型, 结合线激励下平板的有效传递导纳理论对圆柱壳表面的振动响应及声辐射功率进行仿真计算和分析, 结果表明一端受均布激励作用的圆柱壳表面的声辐射功率在中低频段随频率的增大而增加, 在临界频率处出现较大的波动, 在环频处达到最大值, 之后仍有较小波动并略有下降。实验测量结果证明了理论模型的有效性。

关键词: 圆柱壳; 有效导纳; 振动响应; 辐射功率

中图分类号: TB559 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2005)01-0021-05

Radiation analysis for cylindrical shell with circumferential excitation on one end

QIAN Bin¹, WANG Yuan-yuan¹, YANG Shi-xing², LI Zhi-shun²

(1 Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;

2 College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract A novel theoretical model is established for cylindrical shells with the circumferential excitation on one end. An effective transfer mobility method for the finite plate with line excitation is introduced to solve the problem of vibration response and sound radiation of a cylindrical shell. Simulation results show that the radiation power from a cylindrical shell with circumferential excitation on its one end increases with frequency in the middle and low frequency band. The calculated power curve strongly fluctuates at the critical frequency, reaches its maximum at the ring frequency, and remains fluctuation with slight decline as frequency continues to increase above the ring frequency. Experiment results show validity of the theoretical model.

Key words cylindrical shell; effective mobility; vibration response; radiation power

1 引 言

圆柱壳是工程系统(如工业设备、军事设施等的结构设计)中常见的基本结构单元。了解圆柱壳表面的振动和功率流传递规律,有助于了解圆柱壳类结构或组合结构的功率流传递规律,从而了解其声辐射特性,控制振动传递的路径,达到减振降噪的目的。

导纳因其简洁明了的物理意义引起众多研究者的重视,圆柱壳导纳的研究也得到了人们的关注。由于圆柱壳的轴对称性和圆柱壳波传播的特性,在

圆柱壳的功率传递过程中,只有前面的几阶模态对振动的传递起有效作用。在此基础上,无限长、半无限长和有限长圆柱壳体在简单激励作用下的导纳得到了较多的研究,对简支圆柱壳的输入模态阻抗、半无限圆柱壳在径向力作用下的输入导纳进行了计算。R. S. Ming^[1]利用无限和半无限圆柱壳体的导纳函数来计算管状系统的结构振动能量。O. Fegeant^[2,3]研究了圆柱壳一端在轴向单点激励、周向单点激励和弯矩作用下产生的振动响应,利用匹配渐近展开法得到了圆柱壳输入点导纳的近似解,并与 Flugge 理论计算得到的结果进行了对比说明。但在实际工程系统中,圆柱壳极少以单独的系统存在,当圆柱壳结构与其它结构相连时也极少以单点连接的状态存在,因此需要对圆柱壳的复杂连接下的功率传递规律进行研究,进一步得到其声辐射

收稿日期: 2004-04-14 修回日期: 2004-09-23

作者简介: 钱斌(1975-),女,浙江人,博士后,研究方向:环境声学、医学超声等。

特性。

1980年, B. Petersson 等人^[4]发表了有效点导纳的概念,使研究复杂激励或复杂连接结构的功率流传递成为可能。之后,针对梁线激励、平板在线激励^[5-6]作用下的输入导纳进行了研究。利用有效导纳对圆柱壳体的振动响应及声辐射特性进行分析,不仅可以获取圆柱壳体作为独立单元的整体声辐射特性,还可以获取圆柱壳不同位置处的响应大小,为研究加筋圆柱壳及圆柱壳组合结构的功率传递打下基础。

2 系统模型

系统结构示意图如图 1(a)所示,圆柱壳沿 x 轴平放,其一端受周向均布力 $F/2a$ 作用。由于圆柱壳的轴对称性,且圆柱壳受周向均布力作用,因此圆柱壳表面产生的振动响应分布也具有轴对称性,在圆柱壳周向均匀分布,仅随着轴向位置的不同而不同,因此知道圆柱壳轴向振动响应的分布就可以知道圆柱壳表面的振动响应分布。建立系统模型和坐标系如图 1(b)所示,将圆柱壳展开为一平板,平板一端受均布力作用,则圆柱壳一端受周向均布力的问题等效为平板上的线激励问题,对轴向振动响应的求解转化为对平板上沿 x 轴分布的各点振动响应的求解。这里说明两点:

(1)圆柱壳展开后轴向任一点的振动响应与平板的振动响应有所不同,由于圆柱壳的回转几何特点,展开后其表面任一点的振动响应实际上可以看作是在两端无限长的线激励作用下所产生的,因此这里选取展开后平板中线上的点作为研究对象;

(2)在平板的线激励中,激励线为有限长,但是在圆柱壳受周向激励时,其壳体表面任一点都受到的复杂激励实际上是向两端无限延伸的无限长线激励。根据有效线导纳的研究,虽然激励线越长,表面上任一点受到的振动响应值越大,但当激励线长到一定程度,其远处的点到该点的传递导纳也越小,对该点振动响应贡献可以忽略^[7],因此这里取圆周线长为结构的线激励长度。

3 理论分析

3.1 壳体的振动响应

与壳体模态相对应,圆柱壳体中存在三类与径

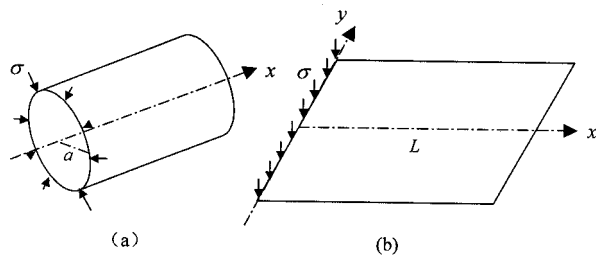


图 1 一端受周向均布力作用的圆柱壳系统模型

向、周向和轴向位移都有关系的行波。其中与周向和轴向位移相关的行波属于面内波,几乎不向外辐射能量,因此对结构噪声的贡献很小,可以忽略不计。弯曲波表现为圆柱壳的径向振动位移,是产生噪声的主要原因,也是研究圆柱壳声辐射所感兴趣的振动类型。

一端受周向激励的圆柱壳展开后的结构振动响应模型如图 1(b)所示,平板上任意两点间的传递导纳^[6]计算公式表示为:

$$M_{ji} = M(x_j, y_j | x_i, y_i) = M_0(kr) \quad (1)$$

其中 M_0 是平板的原点导纳,这里用圆柱壳输入点导纳代入, (kr) 是传播函数,定义为第二类零阶汉克尔(Hankel)函数之差^[8]:

$$(kr) = H_0^{(2)}(kr) - H_0^{(2)}(-kr) \quad (2)$$

k 为弯曲波波数,距离 r 为:

$$r = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3)$$

图 1(b)中均布线激励作用于 y 轴,这里所关心的是 x 轴上任意一点的响应大小,则由式(1)得到 y 轴上任意一点到 x 轴上任意一点的传递导纳

$$M_{ji} = M(y_j, 0 | x_i) = M_0(kr) \quad (4)$$

这里,

$$r = \sqrt{(x_i^2 + y_j^2)} \quad (5)$$

当 y 轴上一点受激励作用在 x 轴上一点产生的振动响应为:

$$v(y_j | x_i) = M_{ji} \quad (6)$$

线激励可以看作是点激励的连续,则当 y 轴上有线激励作用时,在 x 轴上该点产生的振动响应为 y 轴上各点激励作用在该点产生的振动响应之和,用积分表示有

$$\begin{aligned} v(x_i) &= v(y_j | x_i) dy_j = \int_l M_{ji} dy_j = M_{0l}(kr) dy_j \\ &= \frac{FM_0}{2a} \int_l [H_0^{(2)}(kr) - H_0^{(2)}(-kr)] dy_j \end{aligned} \quad (7)$$

其中 a 为圆柱壳半径。从式(7)可以看出, $v(x)$ 与

kr 密切相关, 说明在周向线激励作用下, 壳体表面的振动响应不仅与圆柱壳本身的物理特性、几何尺寸有关, 还与周向激励的激励频率有关。频率对振动响应的影 响是本文研究的主要方面。

3.2 圆柱壳声辐射功率

如图 1 所示的圆柱壳体结构, 其辐射噪声功率可表示为

$$Q_R = \rho_0 c S_{rad} \langle v^2 \rangle \quad (8)$$

$$\eta_{rad} = \begin{cases} \frac{\rho_0^{\frac{3}{2}} F_1}{2B(q-1/q)} [1 - \rho_0(1 - \rho_0^2 F_1^2)^{\frac{1}{2}}] \left[\frac{1}{(1/q - \rho_0)^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{(q - \rho_0)^{\frac{1}{2}}} \right] [12(1 - \rho_0^2)]^{\frac{1}{2}} & \text{当 } \{ \rho_0 < 1/q \text{ 且 } \rho_0 < 0.65 \lg(3/F_1) \} \text{ 或 } \{ F_1 > 1.5 \text{ 且 } \rho_0 < 1/F_1 \} \\ (h/aL^2)^{\frac{1}{2}} \left[\ln \left(\frac{1 + (\rho_0 F_1)^{\frac{1}{2}}}{1 - (\rho_0 F_1)^{\frac{1}{2}}} \right) + \frac{2(\rho_0 F_1)^{\frac{1}{2}}}{1 - \rho_0 F_1} \right] / \{ [12(1 - \rho_0^2)(\rho_0 - 1)]^{\frac{1}{4}} (1 - \rho_0 F_1)^{\frac{1}{2}} \} & \text{当 } \frac{1}{\rho_0} < 0.52 \text{ 且 } 1 < \rho_0 < \frac{1}{F_1} \\ 1 & \text{当 } \rho_0 > \frac{1}{F_1} \end{cases} \quad (9)$$

其中 ρ_0 是频带的无量纲中心频率, q 是带宽因子, 对 1/3 倍频程分析取 $q = 1.122$, 对倍频程分析取 $q = 1.414$, F_1 是环频率 f_r 与截止频率 f_c 之比, 即 $F_1 = f_r / f_c$, $B = h n(f) / L$, 为圆柱壳模态密度函数, 其中 $n(f)$ 为圆柱壳的模态密度:

$$n(f) = \begin{cases} \frac{5S}{c_1 h} \sqrt{\frac{f}{f_r}}, & \text{当 } f/f_r < 0.48 \\ \frac{7.2S}{qh} \frac{f}{f_r}, & \text{当 } 0.48 < f/f_r < 0.83 \\ \frac{2S}{c_1 h} \left\{ 2 + \frac{0.596}{q-1/q} [q \cos \left(\frac{1.745 f_r^2}{q f^2} \right) - 1/q \cos \left(\frac{1.745 f_r^2}{f^2} \right)] \right\}, & \text{当 } 0.83 < f/f_r \end{cases} \quad (10)$$

结构单元的振动响应往往受结构的共振模态所支配, 当结构受一定带宽的频率激励时, 能量的传递主要表现为各共振模态组之间的能量流动, 因而模态密度对描述结构在外部力作用的共振响应十分重要。从式 (10) 可以看出, 圆柱壳的模态密度与环频率密切相关, 在不同的频段呈现出不同的规律。因此圆柱壳体在外部激励作用下, 其声辐射效率不仅与结构形状、几何尺寸、厚度以及边界条件有关, 而且取决于沿长度方向的声相消的程度, 因此它是 f_c

其中 ρ_0 是介质密度, c 是介质中声波的波速, $\rho_0 c$ 为介质的特性阻抗, S 为圆柱壳结构声辐射面面积, 即圆柱壳外表面积, η_{rad} 称为结构的辐射效率, 也称为辐射比。

从式 (8) 可以看出, 圆柱壳体的声辐射功率不仅与壳体表面的振动响应大小有关, 与声辐射效率也密切相关。Szechenyi^[7] 给出了薄壁圆柱壳体辐射效率的表达式为:

和 f_c 的函数。 f_c 和 f_r 是圆柱壳振动噪声研究中的两个重要频率, 可分别由下面两式计算:

$$f_r = c_1 / 2r \quad (11)$$

$$f_c = c^2 / 2Rq \quad (12)$$

其中 $c_1 = \sqrt{E / [(1 - \nu^2)]}$ 是圆柱壳二维纵向波速, E 为弹性模量, ν 为泊松比, r 是圆柱壳中面半径, c 是声波在圆柱壳周围介质里的传播声速, R 是圆柱壳的弯曲回转半径。

4 仿真计算和实验验证

圆柱壳的结构参数如表 1 所示, 其一端周向受均布单位径向激励作用, 本文研究所关心的频段范围为 100 Hz ~ 10 kHz, 根据式 (8) 计算得到圆柱壳表面的声辐射功率级如图 2 中实线所示, 从图中可以看到, 圆柱壳表面声辐射级在较低频 (小于 1 kHz) 时上升趋势较快, 从小于 20 dB ($f = 100$ Hz) 迅速上升到 70 dB ($f = 900$ Hz), 在截止频率 2 kHz 附近辐射功率波动较大, 但仍呈上升趋势, 最后在环频 5438 Hz 附近达到最大值, 在高于环频时, 圆柱壳的声辐射规律类似于平板的声辐射规律, 但仍有一定的下降, 这正说明了圆柱壳表面的圆周界存在一些声相消, 圆柱壳的声辐射功率不仅与频率有关, 它还

取决于声波围绕圆柱壳体发生声相消的程度。

表 1 圆柱壳体的结构参数

长度 /m	0.8	密度 /(kg/m^3)	$2.7 \cdot 10^3$
中面半径 /m	0.159	泊松比	0.33
厚度 /m	0.006	弹性模量 /(N/m^2)	$7.1 \cdot 10^{10}$

图 3 为圆柱壳表面振动响应峰值分布与频率的关系图, x 轴表示圆柱壳轴向距离, y 轴表示频率的改变, 从图中可以看到振动响应峰值沿 x 轴向的呈现较有规律性的分布, 相对比较均匀, 沿 y 轴变化比较大, 但可以看出, 响应峰值出现在频率 5000 Hz 附近, 与壳体的声辐射功率级出现峰值的频率不同, 这也正说明了声辐射功率不仅取决于结构的振动响应大小, 同时会受到辐射效率的影响。另外图中曲线显示, 较高频段振动响应峰值分布较为密集而均匀, 因此在较高频段比较适合对结构表面的振动响应做均值处理, 以大大减少计算量。

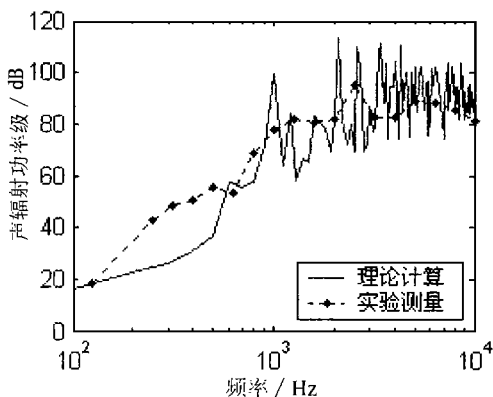


图 2 一端受周向均布激励的圆柱壳声辐射功率级

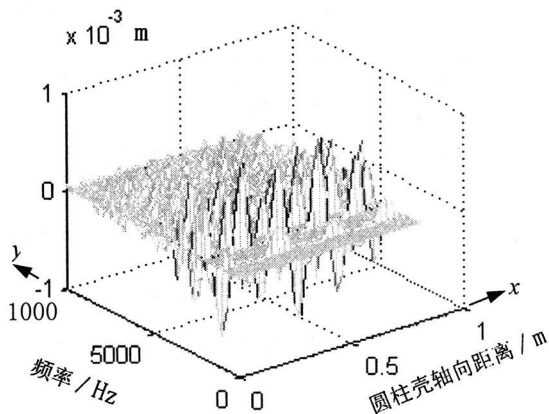


图 3 圆柱壳表面振动响应峰值分布

图 4 是周向激励圆柱壳声辐射实验测量示意图, 圆柱壳周向均布激励利用圆板与圆柱壳的联接, 在圆板中心固定激励器激振, 通过振动的传递在圆柱壳一端产生均布激励来实现。实验测量中心频率

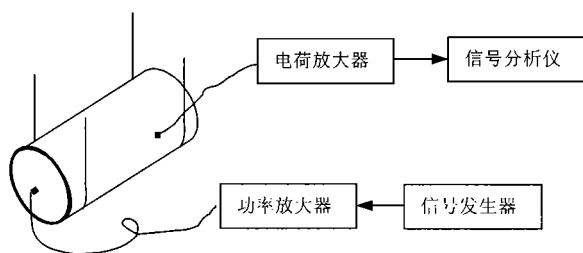


图 4 周向激励圆柱壳声辐射实验测量示意图

取 $1/3$ 倍频程, 测量点尽量避开线悬挂处, 这里在圆柱壳轴线方向选取 6 个点, 周向选取 4 个点, 多点多次测量取平均值。实验结果做归一化处理, 得到的实验测量曲线如图 2 中虚线所示。从图 2 中两条曲线的比较可以看出, 理论计算曲线和实验测量曲线的在高于 630 Hz ($kr=3.26$) 的时候变化规律基本一致, 但是在低于 630 Hz 时有较大的差值, 这是因为在较低频率时, 圆柱壳表面的振动响应峰值分布稀疏而不均匀, 不同时刻不同测量点得到的值会有较大的差异, 而理论计算中结构表面的振动响应取均值处理也会存在一定的误差。另外, 实验测量曲线没有给出环频点的测量值, 仅给出了 5000 Hz (曲线上倒数第四个点) 时的测量值, 但从曲线的变化趋势可以看出, 在该点和其后一点 (6300 Hz) 之间可能存在一个峰值点; 两条曲线理论计算和实验测量的结果表明: 在 100 Hz ~ 10 kHz 频率范围内, 利用有效导纳对周向均布激励下的圆柱壳表面声辐射预测适用于中高频的计算, 在低频可能存在较大的误差。

5 小 结

本文分析了一端受周向均布激励作用的圆柱壳功率传递情况, 建立了新的圆柱壳理论模型, 在分析过程中采用复杂激励下的有效点导纳理论对圆柱壳表面的声辐射功率以及振动响应进行了仿真计算和分析, 得到了圆柱壳在一端受均布激励情况下的振动响应分布规律和声辐射功率的大小。主要表现为以下几点:

(1) 圆柱壳表面的声辐射功率在中低频段增加较快, 在截止频率处出现较大的波动, 最后在环频处达到最大值;

(2) 在环频处, 圆柱壳的振动响应特性接近于平板振动响应特性, 离开激振处越远, 响应值越趋于平坦;

(3) 高于环频时, 由于声波沿圆周界仍存在一

定程度的声相消,所以在环频以上,声辐射功率仍有较小的波动且略有下降;

(4) 频率越高,模态越密集,导致振动响应的峰值分布越密集且均匀。

理论计算和实验测量的结果表明:在仅考虑频率(100 Hz~10 kHz)对壳体振动和声辐射影响的情况下,利用有效导纳对周向均布激励下的圆柱壳表面声辐射预测适用于中高频的计算,在较低频时可能存在较大的误差。

参 考 文 献

- [1] Ming R S, Pan J, Norton M P. The mobility functions and their application in calculating power flow in coupled cylindrical shells[J]. *J. Acoust Soc. Am.*, 1999, **105** (3): 1702-1713.
- [2] Fegeant O. Closed-form solutions for the point mobilities of axisymmetrically excited cylindrical shells[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2001, **243**(1): 89-115.
- [3] Fegeant O. Structural mobilities for the edge-excited

semi-infinite cylindrical shell using a perturbation method [J]. *Journal of Sound and Vibration* 2001, **248** (3): 499-519.

- [4] Petersson B, Plant J. On effective mobilities in the prediction of structure-borne sound transmission between a source structure and a receiving structure; part i: Theoretical background and basic experimental studies [J]. *Journal of Sound and Vibration* 1982, **82**(4): 517-529.
- [5] Hammer P, Petersson B. Strip excitation; part i: strip mobility [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1989, **129** (1): 119-132.
- [6] 钱斌, 杨世兴, 李志舜. 有效线导纳的仿真研究 [J]. *声学学报*, 2004, **29**(2): 137-142.
- [7] Szechenyi E. Modal densities and radiation efficiencies of unstiffened cylinders using statistical methods [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1977, **19**(1): 65-81.
- [8] Dai J, Lai J C S, Williamson H M, et al. Investigation of vibration power transmission over a rectangular excitation area using effective point mobility [J]. *Journal of Sound and Vibration* 1999, **225**(5): 831-844.

(上接第 3 页)

对电路板进行了实验室测试, 结果为:

- 1) 电源供电: 5V, 工作电流 5mA。
- 2) 系统工作带宽 30Hz~1.8kHz。
- 3) 带内移相范围: 80~100。
- 4) 输入信号范围: 20mV~3.5V。

以上测量指标基本达到设计要求。虽然输入范围达不到电源电压,但这也满足值班系统远距离探测的需要。考虑到大型目标噪声主要在低频几百 Hz 范围内,可以进一步降低系统带宽,从而降低功耗。这还需要更多的电路实验。

5 结束语

本文用具有抗干扰高增益的平均声强器作为检测测量,兼顾低功耗、简单稳定的实际需要,解决了矢量信号特有的 90°移相、乘法积分、全方位检测、正负双极性等问题,设计出完备的低功耗值班检测系统。初步实验电路测试结果基本达到设计指标。该

系统是国内预研的首个矢量声引信值班检测系统,对水雷声引信现代化改造具有一定参考价值。

本文最后感谢 710 研究所提供的支持合作!感谢冯海泓教授、丁士圻教授、袁茂章高工给予的热情帮助和指导! MAX M 公司为实验板的研制提供了免费样片,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] 傅金祝. 未来水雷的发展 [J]. *水中兵器*, 1997 (3): 12.
- [2] 王华, 马春燕. 国外水雷非触发引信的发展 [J]. *水中兵器*, 1998 (3): 31.
- [3] 陈新华. 矢量阵信号处理技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.
- [4] 惠俊英, 刘宏. 声压振速联合信息处理及其物理基础初探 [J]. *声学学报*, 2000, **25**(4): 303-307.
- [5] 全景才, 刘琼发. 宽带 90°移相网络的设计与实现 [J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 1995, **3**: 17-23.