

文章编号:1005-0523(2001)04-0012-03

复合材料层板的频散和声辐射特性研究

童谷生

(华东交通大学 土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:对复合材料无限大板中弯曲波的频散特性、结构和声波之间的交互作用进行了理论研究¹⁹得到了该类结构中弯曲波所激发的声速和声压的解析表达式,揭示了层板中弯曲波和其传播方向对声波的影响¹⁹为噪声控制和无损检测提供了理论依据¹⁹.

关键词:复合材料板;弯曲波;声辐射;声—超声技术;无损检测

中图分类号: TB532

文献标识码: A

0 引言

各类结构的振动与噪声控制^[1-2]、超声无损^[3-4]检测都要从其基本原理和本质方面来理解结构在外载作用下的声辐射和声传播的过程¹⁹对于各向同性材料制成的杆、板和壳类结构,其声波与固体结构间的交互作用已经有广泛的研究,其相关结果已经用来对结构进行噪声、振动控制和无损检测¹⁹.

然而,随着复合材料结构在航空航天工程和交通运输工程中的日益广泛的应用,对该类结构的声辐射机理的研究也日显重要¹⁹由于复合材料结构的各向异性,其声辐射规律与各向同性结构肯定有不同的特点¹⁹因此,从理论和实验等方面对该类结构的声辐射规律进行深入研究,有助结构的振动与噪声控制,对用目前正在研究和发展中的声—超声^[5]检测技术和兰姆波^[6]检测技术的理解也是有益的¹⁹.

正如 Vary 指出,声—超声技术中应该包括面波、板波、体波与板的边界和缺陷反射折射散射等因数在内的随机波¹⁹由于问题的复杂性,目前,国内外对该问题的研究都还不够深入^{[7]19}.

本文对在声辐射和传播中起直接作用的弯曲波在各复合材料板中的传播过程,结构与声之间的交互作用,弯曲波激发的声速和声压的理论计算公式进行了推演,并对应用中要注意的问题进行了分析¹⁹.

1 基于经典板理论的弯曲波速度的计算

1.1 问题模型及描述

为了简化分析,这里假设:(1)复合材料板为对称铺层的无限大板;(2)由发射传感器(或其它机械激励)激发的弯曲波沿板内某一方向传播¹⁹如图1所示,建立直角坐标系 $o-x_1x_2x_3$ (其中 x_1 沿0度层纤维方向, x_2 与 x_1 垂直, x_3 垂直于板面^[13])

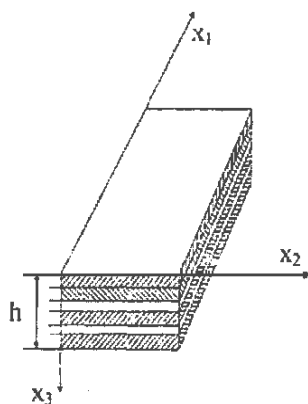


图1 层板模型及坐标表示

1.2 板的弯曲波的频散关系和波长

由经典板理论考虑力矩的平衡,可得弯曲波运动的控制方程如下

$$\frac{\partial M_1}{\partial x_1^2} + 2 \frac{\partial M_6}{\partial x_1 \partial x_2} + \frac{\partial M_2}{\partial x_2^2} = -p h \frac{\partial u}{\partial t^2} \quad (1)$$

收稿日期:2001-05-10;

基金项目:国家自然科学基金资助(5967025)

作者简介:童谷生(1962-),男,江西石城人,华东交通大学副教授¹⁹.

这里 M_i 为板对 x_i 的弯矩, p 和 h 分别为质量密度和板的厚度^[13]

对于对称板, 弯曲运动和面内运动可以解耦, 板的弯矩可由板中面的曲率给出

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

这里 D_{ij} 为弯扭刚度, k_i 为板的曲率^[13]

如果假定板的弯曲波的位移为下列形式

$$u_3 = A \exp(i(k(x_1 l_1 + x_2 l_2) - \omega t)) \quad (3)$$

这样将上式代入(1)和(2)便得到弯曲波的频散方程如下

$$k^4 (l_1^4 D_{11} + 4l_1^3 l_2 D_{16} + 2l_1^2 l_2^2 (D_{12} + 2D_{66}) + 4l_1 l_2^3 D_{26} + l_2^4 D_{22}) = p h \omega^2 \quad (4)$$

当弯曲波沿某一方向余弦为 l_1, l_2 的方向传播时, 可得弯曲波的相速度

$$V_p = \left(\frac{\Delta \omega^2}{\rho h} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{4 \pi^2 f^2 \Delta}{\rho h} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

其中, $\Delta = l_1^4 D_{11} + 4l_1^3 l_2 D_{16} + 2l_1^2 l_2^2 (D_{12} + 2D_{66}) + 4l_1 l_2^3 D_{26} + l_2^4 D_{22}$

(5) 式表明, 复合材料层板中的弯曲波和各向同性板一样, 具有频散性质, 同时还和弯曲波的传播方向有关^[19]为了说明频散关系的方向性, 这里利用^[8]的数据对按 $[0, 45, 90, -45]_s$ 和 $[0]_8$ 两种铺层方式的同一种碳纤维增强层合板 (T 300, N 5208) 进行了数值计算, 结果如图 2 和 3 所示^[19]

图 2, 3 中自上至下分别为 0 度、45 度和 90 度方向传播的弯曲波的频散曲线^[19]从图 2 可见随着频率的增大, 不同方向传播的弯曲波的相速度也有较大差别^[19]比较图 2 和图 3 可见, 同样材料的板, 其铺层方式对频散曲线也有很大影响^[19]如果求出相速度, 便可以由下式求出波长

$$\lambda = \frac{V_p}{f} = \left(\frac{4 \pi^2 \Delta}{\rho h f^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

2 复合材料板结构与声之间的交互作用

2.1 波长比、临界频率

从声辐射的观点, 最重要的参数是在同一频率下板的表面位移(弯曲)波长 λ 对相应的声波长 λ_c 之比^[13]设一块无阻尼无限薄板在频率 f 时, 使结构内产生波长为 λ 的弯曲波^[13]在同一频率 f 下, 能够在板的周围的流体介质中激励起相应的声波长为

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (7)$$

这里 c 为声速^[19]于是可得在同一频率下结构波和声

波长比为

$$\frac{\lambda}{\lambda_c} = \left(\frac{4 \pi^2 \Delta}{\rho h c^4} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (8)$$

由(6)和(7)式可见, 当 $V_p = c$ 时, $\lambda = \lambda_c$ 即结构中弯曲波速度等于流体中的声速^[13]由此可得

$$\left(\frac{4 \pi^2 \Delta}{\rho h} \right)^{\frac{1}{2}} = c$$

所以, 临界频率为

$$f_c = \left(\frac{\rho h c^4}{4 \pi^2 \Delta} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

2.2 声辐射条件

如果一块无阻尼的无限板传输一个幅值恒定传播速度为 V_p 的平面弯曲波, 则辐射条件为平面声波以垂直于弯曲波波前的方向传播^[19]设辐射方向与板的法向夹角为 θ 则声波长为

$$\lambda = \lambda \sin \theta \quad (10)$$

另外, 根据波速与波数的关系可得板的弯曲波数为

$$k_B = \frac{2\pi}{\lambda} = \left(\frac{\rho h f^2}{\Delta} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (11)$$

从上式可以看出, 对于给定的频率, 弯曲波数也和其传播方向有关^[19]相应的声波数为

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{c} \quad (12)$$

3 弯曲波发出的声波的声速和声压

由基础声学可知^[9], 由于振动的板在流体中某点 (x_1, x_3) 处引起的声压级为

$$p(x_1, x_3, t) = p(x_1, x_3) e^{i\omega t} = p_{\max} e^{-ik_B x_1} e^{-ik_3 x_3} e^{i\omega t} \quad (13)$$

这样, 由流体中的声微粒速度和声压的关系可计算声微粒的速度

$$\bar{u} = \int \frac{1}{\rho} \nabla p dt \quad (14a)$$

这里 ρ 为流体密度, ∇ 为拉普拉斯算子^[13]

对于谐波情形, 有

$$\bar{u} = -\frac{1}{i\omega\rho} \nabla P \quad (14b)$$

根据波和边界匹配条件, 即垂直于板的声微粒速度分量应等于板表面上的法向振动速度^[19]

$$(u_{3fluid})_{x_3=0} = (u_3)_{plate} = u_{3p} = -\frac{1}{i\omega\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x_3} \right)_{x_3=0} p \quad (15)$$

将(13)式代入(15)式得

$$u_{3p} = u_{3p\max} e^{-ik_B x_1} = \frac{k_3 P_{\max} e^{-ik_B x_1}}{\omega\rho} \quad (16)$$

因此得到

$$p_{\max} = \frac{k c \rho u_{3\max}}{(k^2 - k_B^2)^{0.5}} \quad (17)$$

这样由板的振动在流体中点 (x_1, x_3) 中引起的声压级为

$$p(x_1, x_3, t) = \frac{c \rho A}{(1 - k_B^2/k^2)^{0.5}} e^{i\omega t} e^{-ik_B x_1} e^{-ix_3} \quad (18)$$

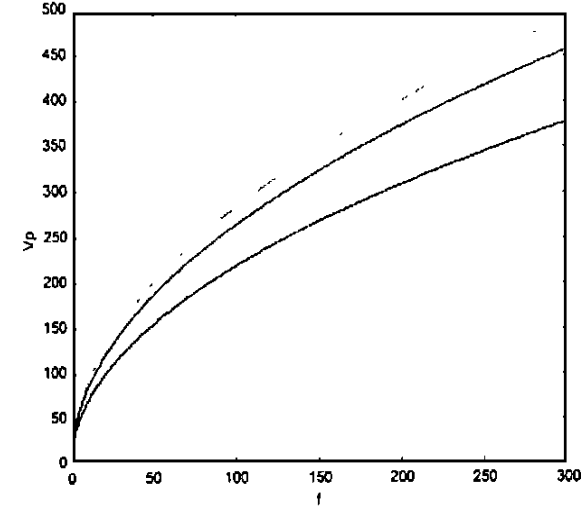


图 2 传播方向对频散关系的影响([0, 45, 90, -45]。铺层)

4 结束语

由图 2 及(18) 式可见:
(1) 与各向同性板不同, 复合材料层板中的弯曲波的频散曲线和其铺层方式及传播方向有很大关系, 从而, 层板中的弯曲波所激发的声波与弯曲波的传播方向有关;

(2) 与各向同性板相同, 对于按给定方向传播的一定频率弯曲波, 激发的声波仍为平面波;

(3) 当 $k = k_B$, 或弯曲波波长等于声波的波长($\lambda = \lambda$) 时, 理论上板中弯曲波辐射的声波声压级将达到无限大¹⁹。本文研究了无限大复合材料层板弯曲波的声辐射特性, 讨论了弯曲波的传播方向对频散关系的影响, 对层板中按指定方向传播的弯曲波的所激发声波声速、声压得出了理论解¹⁹得到了声波和复合材料结构中弯曲波传播方向之间的定量的联系¹⁹。所得结论可以用来理解和指导噪声控制和相关无损检测¹⁹。

参考文献:

[1] KESSISOGLOU N J. Active control of the structural and acoustic responses of a fluid-loaded plate; part I:

从上式可见, 复合材料板中弯曲波所激发的声波为平面波¹⁹。但同样可见声压的变化除了和弯曲波的传播方向有关¹⁹。

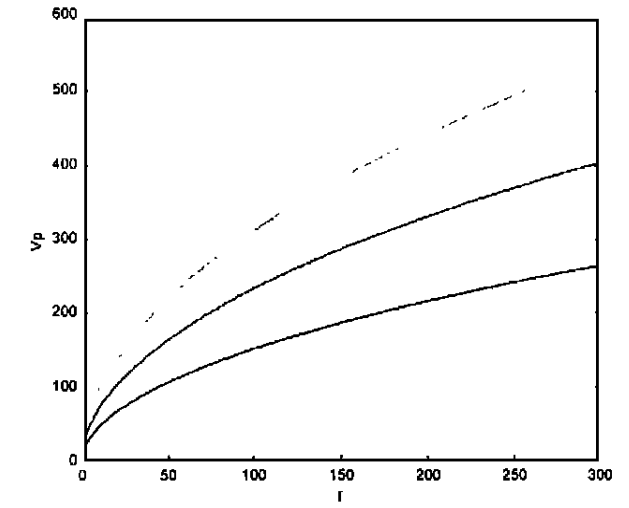


图 3 传播方向对频散关系的影响([0] 铺层)

analysis of the physical system[j]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. Vol 17 No1, 1998; 11~25.

[2] THOMPSON D J. Predictions of acoustic radiation from vibrating wheels and rails[J]. Journal of Sound and Vibration. Vol 120 No2, 1988; 275~280.

[3] HENNEKE E G, et al. Characterizing the damage state of composite laminate via the acousto-ultrasonic technique[J]. In: Solid Mechanics Research for Quantitative Nondestructive Evaluation. eds: Achenbach J D et al. 1987, 217~235.

[4] 童谷生, 孙良新. 应力波因子技术中一些问题的回顾和展望. 振动、测试与诊断, 1999, 19(4) : 320~326.

[5] ADUDA B O, et al. Spectral analysis of acousto-ultrasonic waves for defect sizing[j]. NDT & E International Vo. 129 No. 4, 1996, 237~240.

[6] TANG B, et al. Lamb-wave monitoring of axial stiffness reduction of laminated composite plates. Materials Evaluation Vo. 147 No. 8, 1989, 928~933.

[7] 童谷生, 用于结构损伤评估中的应力波因子技术研究[C]. 博士学位论文, 2000(2) : 1~14.

[8] 周履, 范赋群. 复合材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社. 1989, 232~239.

[9] [澳] M. P. 诺顿. 工程噪声和振动分析基础[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993, 71~148. (下转第 17 页)

可作碎石桩填料或换填用碎石资源丰富,运至现场
价仅 35 元/m³ 19.经与预制桩加基础梁型式比较,碎
石振冲桩处理较为经济,且能充分利用当地资源 19.
碎石振冲桩处理法用水量较大,缺水地区慎用 19.

参考文献:
[1] GBJ7-89. 建筑地基基础设计规范.
[2] 唐锦春,郭鼎康. 简明建筑结构设计手册[M]. 北京:
中国建筑工业出版社,1992.

The Application of Vibratory Impulse Method in Partial Building Construction Work of Shenyang Railway Line

YU Zeng-zhou, SU Jie

(Survey and Design Institute, Tunnel Eng. Bureau, Ministry of Railways, Luoyang, 471009 China)

Abstract: In confrontation with a bad geolocal condition, especially a soft foundation, such a the desert re-
gion also with high level groundwater, the compound foundation should be formed in the vibratory impulse
method. The paper discusses the application of vibratory impulse method in such aspects as design, con-
struction and test.

Key words: vibratory impulse method; compound foundation

(上接第 14 页)

A Study on Characteristic of Acoustic Radiation from Bending Wave of Infinite Composite Plate

TONG Gu-sheng

(School of Civil Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The theoretical study on interaction between infinite composite plate and acoustic radiation is
present. The dispersive characteristic on bending wave of composites plate is studied. The analytical results
of acoustic speed and acoustic pressure is presented. The effect on acoustic wave excited by composite
bending wave transmitting directions is discovered. It can be useful to noise control and NDT evaluation.

Key words: composite plate; bending wave; acoustic radiation; acousto-ultrasonic technique; NDT evalua-
tion