



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102930068 B

(45) 授权公告日 2016.03.02

(21) 申请号 201110327666.4

(22) 申请日 2011.10.26

(73) 专利权人 中国人民解放军重庆通信学院
地址 400035 重庆市沙坪坝区林园甲1号

(72) 发明人 王盛春 沈卫东 徐嘉锋 宋思洪
王建立 王培文 刘晓军

(74) 专利代理机构 重庆大学专利中心 50201
代理人 郭吉安

Wang Shengchun, et al.. Sound transmission loss characteristics of unbounded orthotropic sandwich panels in bending vibration considering transverse shear deformation. 《Composite Structures》. 2010, 第92卷(第12期), 2885-2889.

审查员 林婉娟

(51) Int. Cl.

G06F 17/50(2006.01)

(56) 对比文件

CN 101593745 A, 2009.12.02,

CN 101286483 A, 2008.10.15,

靳国永, 等.. 弹性板结构封闭声腔的结构-声耦合特性分析. 《声学学报》. 2007, 第32卷(第2期), 178-188.

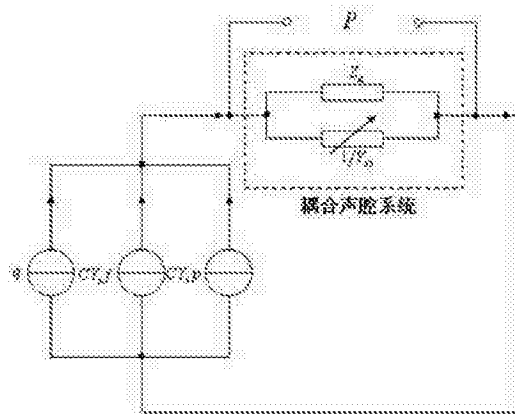
权利要求书1页 说明书3页 附图1页

(54) 发明名称

一种结构-声耦合系统的等效电路模型

(57) 摘要

一种结构-声耦合系统的等效电路模型,由耦合声腔子系统和耦合弹性板子系统组成,耦合声腔子系统由广义源激励和可调并联电路组成,其中广义源激励以相互并联的恒流源表示,可调并联电路中一条支路是阻值为未耦合声模态阻抗的固定电阻,另一支路是阻值为耦合结构模态导纳倒数的可调电阻;耦合弹性板子系统由广义力激励和可调并联电路组成,其中广义力激励以相互串联的恒压源表示,可调并联电路中一条支路是阻值为未耦合结构模态导纳的固定电阻,另一支路是阻值为耦合声模态阻抗倒数的可调电阻。借助本模型可计算耦合板、腔系统的固有频率,方便直观的分析系统耦合机制和影响耦合程度的因素,有利于工程设计人员进行结构-声耦合问题的分析和优化设计。



1. 一种结构-声耦合系统的等效电路模型,由耦合声腔子系统和耦合弹性板子系统组成,其特征在于:耦合声腔子系统由广义源激励和可调并联电路组成,其中广义源激励以相互并联的恒流源表示,可调并联电路由两条支路组成,一条支路是阻值为未耦合声模态阻抗的固定电阻,另一条支路是阻值为耦合结构模态导纳倒数的可调电阻;耦合弹性板子系统由广义力激励和可调并联电路组成,其中广义力激励以相互串联的恒压源表示,可调并联电路由两条支路组成,一条支路是阻值为未耦合结构模态导纳的固定电阻,另一条支路是阻值为耦合声模态阻抗倒数的可调电阻;

未耦合的声模态阻抗为:

$$Z_m(\omega) = \frac{\rho_0 c_0^2}{V} \left(\frac{j\omega}{\omega_m^2 - \omega^2 + 2j\omega\omega_m\xi_m} \right) = \frac{\rho_0 c_0^2}{V} H_m(\omega) \quad (1)$$

未耦合的结构模态导纳为:

$$Y_m(\omega) = \frac{1}{\rho S_f} \left(\frac{j\omega}{\omega_n^2 - \omega^2 + 2j\omega\omega_n\zeta_n} \right) \quad (2)$$

其中: ω_m 、 ω_n 分别为结构和声腔的第m阶、第n阶固有频率, V 为声腔体积, S_f 为弹性板的面积, ρ 为弹性板的面密度, ξ_m 、 ζ_n 分别为结构和声压模态的第m阶、第n阶阻尼因子, c_0 和 ρ_0 分别为声媒质处于平衡状态时的声速和密度, $H_m(\omega)$ 为声模态共振因子;耦合的声模态阻抗为 $Z_{ca} = CZ_a C^T$,耦合的结构模态导纳为 $Y_{cs} = CY_s C^T$,其中 C 为耦合系数矩阵;

当耦合后的声腔系统共振时:将式(1)和 $Y_{cs} = CY_s C^T$ 代入 $\frac{1}{Z_s} = -Y_s$ 中,忽略阻尼项,则耦合后声腔系统的固有频率可用“ $\omega_s^2 - \omega^2 + \omega \operatorname{Im} \left[\sum_{m=1}^M C_{sm} C_{sm}^T Y_m(\rho_0 c_0^2 / V) \right] = 0$ ”进行估计。

一种结构 - 声耦合系统的等效电路模型

技术领域

[0001] 本发明涉及结构 - 声耦合系统的等效电路模型,属于声学工程技术领域。

背景技术

[0002] 由弹性板类结构的振动而引起的声辐射问题一直是相关声学工程领域的重要研究课题。弹性板封闭腔体结构广泛应用于实际工程领域,如车辆、船舶、飞机的乘坐舱室等,其弹性板类结构的声辐射是舱室内的主要噪声源之一。随着对乘坐舒适性要求的不断提高,舱室内噪声控制和声学设计越来越引起人们的重视,而对舱室结构 - 声耦合特性的研究是进行噪声控制和声学设计的关键。针对这一问题,1999年 Kim 等人在前人研究的基础上用阻抗和导纳方法分析了结构 - 声耦合问题,但其提出的理论模型不直观,不方便对系统耦合特性以及影响系统耦合程度的因素作具体研究。国内的靳国永等将空腔结构 - 声耦合系统模拟成控制理论中的反馈与前馈系统对其耦合特性进行了分析,但模型中各要素的物理意义不甚明确,且无法通过该模拟计算耦合后弹性板和声腔的固有频率等关键参数,这在一定程度上限制该模型的应用。

发明内容

[0003] 针对上述结构 - 声耦合分析方法和模型存在的问题,本发明提出一种方便直观、物理意义明确、应用范围广泛的结构 - 声耦合系统等效电路模型。

[0004] 为达到上述目的,本发明所涉及的一种结构 - 声耦合系统的等效电路模型,由耦合声腔子系统和耦合弹性板子系统组成,耦合声腔子系统由广义源激励和可调并联电路组成,其中广义源激励以相互并联的恒流源表示,可调并联电路由两条支路组成,一条支路是阻值为未耦合声模态阻抗的固定电阻,另一条支路是阻值为耦合结构模态导纳倒数的可调电阻;耦合弹性板子系统由广义力激励和可调并联电路组成,其中广义力激励以相互串联的恒压源表示,可调并联电路由两条支路组成,一条支路是阻值为未耦合结构模态导纳的固定电阻,另一条支路为阻值为耦合声模态阻抗倒数的可调电阻,声腔内声压响应表示为并联电阻的端电压,而弹性板结构模态响应表示为流过并联电阻的总电流。

[0005] 上述方案中的未耦合的声模态阻抗为:

$$[0006] \quad Z_{un}(\omega) = \frac{\rho_0 c_0^2}{V} \left(\frac{j\omega}{\omega_n^2 - \omega^2 + 2j\omega\omega_n \zeta_n} \right) = \frac{\rho_0 c_0^2}{V} H_n(\omega) \quad (1)$$

[0007] 未耦合的结构模态导纳为:

$$[0008] \quad Y_{sm}(\omega) = \frac{1}{\rho S_f} \left(\frac{j\omega}{\omega_m^2 - \omega^2 + 2j\omega\omega_m \xi_m} \right) \quad (2)$$

[0009] 其中 ρ 、 S_f 分别为弹性板的面密度和面积, V 为封闭声腔体积; ω_m 、 ω_n 分别为结构和声腔的第 m 阶、第 n 阶固有频率, ξ_m 、 ζ_n 分别为结构和声压模态的第 m 阶、第 n 阶阻尼因子, c_0 和 ρ_0 分别为声媒质处于平衡状态时的声速和密度, $H_n(\omega)$ 为声模态共振因子。

[0010] 耦合的声模态阻抗为 $Z_{ca} = CZ_a C^T$, 耦合的结构模态导纳为 $Y_{cs} = CY_s C^T$, 其中 C 为耦

合系数矩阵。

[0011] 本发明提出的结构-声耦合系统的等效电路模型,不受弹性板材料性质和声腔形状的限制,借助此模型可以计算耦合后弹性板和声腔的固有频率,并可以方便直观的分析系统耦合机制和决定系统耦合程度的影响因素,有利于工程设计人员进行不同性质板件结构封闭空间结构-声耦合问题的分析和声学优化设计。

附图说明

[0012] 图 1 为耦合声腔子系统的等效电路模型。

[0013] 图 2 为耦合弹性板子系统的等效电路模型。

具体实施方式

[0014] 下面结合附图和实例对本发明做进一步说明。

[0015] 任意形状声腔内声压和结构模态响应可用下式计算：

$$[0016] \quad P = (I + Z_a Y_{cs})^{-1} Z_a (q + C Y_s f + C Y_s p) \quad (3)$$

$$[0017] \quad V = (I + Y_s Z_{ca})^{-1} Y_s (f + p - C^T Z_a q) \quad (4)$$

[0018] 其中 P 、 V 分别为腔内声压和弹性板的结构模态幅值； C 为耦合系数矩阵； f 为作用于夹层板的广义模态力； p 为结构-声边界表面声压； q 为声腔内的广义声源强度； I 为单位矩阵， Z_a 、 Y_s 分别为未耦合的声模态阻抗矩阵和结构模态导纳矩阵。

[0019] 由式 (3) 和 (4) 可以看出，耦合系统的声腔、结构响应可分为两部分：前一部分 $(I + Z_a Y_{cs})^{-1} Z_a$ 和 $(I + Y_s Z_{ca})^{-1} Y_s$ 分别代表了耦合后声腔与弹性板系统的固有特性，也因此决定了系统的频率响应特性；后一部分 $(q + C Y_s f + C Y_s p)$ 和 $(f + p - C^T Z_a q)$ 分别为耦合声腔的广义源向量和弹性板的广义力向量，它们不决定耦合后声腔与弹性板系统的固有特性，而只代表系统的广义激励。

[0020] 系统的耦合特性可以借助可调并联电路来进行分析。声腔和弹性板的耦合作用框图可分别表示为图 1 和图 2。图中声腔系统的各广义源激励分别用相互并联的恒流源表示，它们之和构成声腔系统的总体广义源激励；弹性板系统的各广义力激励分别用相互串联的恒压源表示，它们之和构成弹性板系统的总体广义力激励；未耦合的声模态阻抗和未耦合的结构模态导纳分别用固定阻值的电阻表示，而耦合声模态阻抗的倒数和耦合结构模态导纳的倒数分别用可调电阻表示；声腔内声压响应表示为并联电阻的端电压，而弹性板的结构模态响应则表示为流过并联电阻的总电流。

[0021] 从图 1、2 可知，由于并联可调电阻支路的存在，系统的固有频率和频率响应将随 Y_{cs} 、 Z_{ca} 的变化而发生改变，其中 Y_{cs} 决定了由声腔-结构响应引起的弹性表面作用于声腔的广义源强度大小；而 Z_{ca} 则决定了由结构-声腔响应引起的作用于夹层板的广义力的大小。并联电阻值越大，即 Y_{cs} 、 Z_{ca} 越小，则耦合作用越弱，系统固有特性受到的影响越小；反之，并联电阻值越小，即 Y_{cs} 、 Z_{ca} 越大，则耦合作用越强，系统固有特性受到的影响越大。

[0022] 接下来从耦合系统结构、物理参数及耦合项的角度分析整个系统的耦合程度的影响因素。如果系统参数改变使得系统的可调并联支路对并联电阻值的影响较小，即 $Z_a \approx 0$ ， $Y_s \approx 0$ 或 $Y_{cs} \approx 0$ ， $Z_{ca} \approx 0$ ，以致 $1/Y_{cs} \rightarrow \infty$ 或 $1/Z_{ca} \rightarrow \infty$ ，使耦合项 $Z_a Y_{cs} \approx 0$ ， $Y_s Z_{ca} \approx 0$ ，则可调并联支路可近似按断路处理，此时系统便为弱耦合系统。

[0023] 耦合后声腔和弹性板系统的固有频率可用回路总阻抗进行计算。

[0024] 耦合声腔的回路总阻抗为：

$$[0025] \quad Z = \frac{Z_a}{1 + Z_a Y_{cs}} = \frac{1}{\frac{1}{Z_a} + \frac{1}{1/Y_{cs}}} \quad (5)$$

[0026] 当耦合后的声腔系统共振时，声腔模态幅值应趋于无穷，则回路总阻抗应趋近于无穷，这时有：

$$[0027] \quad \frac{1}{Z_a} = -Y_{cs} \quad (6)$$

[0028] 将式 (1) 和 $Y_{cs} = CY_s C^T$ 代入式 (6)，忽略阻尼项，则耦合后声腔系统的固有频率可用下式进行估计：

$$[0029] \quad \omega_n^2 - \omega^2 + \omega \operatorname{Im} \left[\sum_{m=1}^M C_{n,m} C_{n,m} Y_{sm} (\rho_0 c_0^2 / V) \right] = 0 \quad (7)$$

[0030] 同理，当耦合后的弹性板系统共振时，板模态幅值应趋于无穷，回路总阻抗趋近于零，这时有：

$$[0031] \quad \frac{1}{Y_s} = -Z_{ca} \quad (8)$$

[0032] 将式 (2) 和 $Z_{ca} = CZ_a C^T$ 代入式 (8)，忽略阻尼项，则耦合后弹性板系统的固有频率可用下式进行估计：

$$[0033] \quad \omega_m^2 - \omega^2 + \omega \operatorname{Im} \left[\sum_{n=1}^M C_{n,m} C_{n,m} Z_{an} / (\rho S_f) \right] = 0 \quad (9)$$

[0034] 利用本模型对耦合系统固有频率的计算式 (7) 和 (9) 与靳国永等人在《声学学报》2007 年第 32 卷第 2 期上发表的论文《弹性板结构封闭声腔的结构-声耦合特性分析》得出的结果完全相同，说明利用本发明提出的模型可用于计算耦合后弹性板和声腔的固有频率，并可以方便直观的分析系统耦合机制和决定系统耦合程度的影响因素。

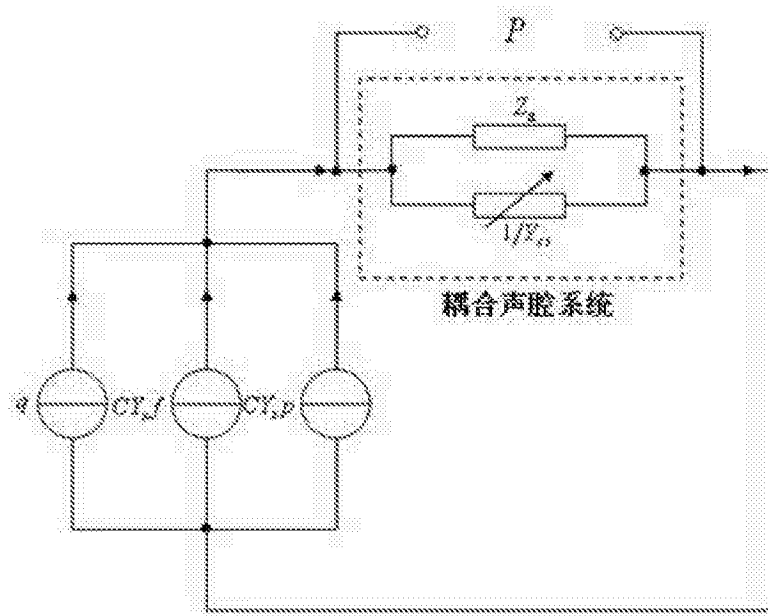


图 1

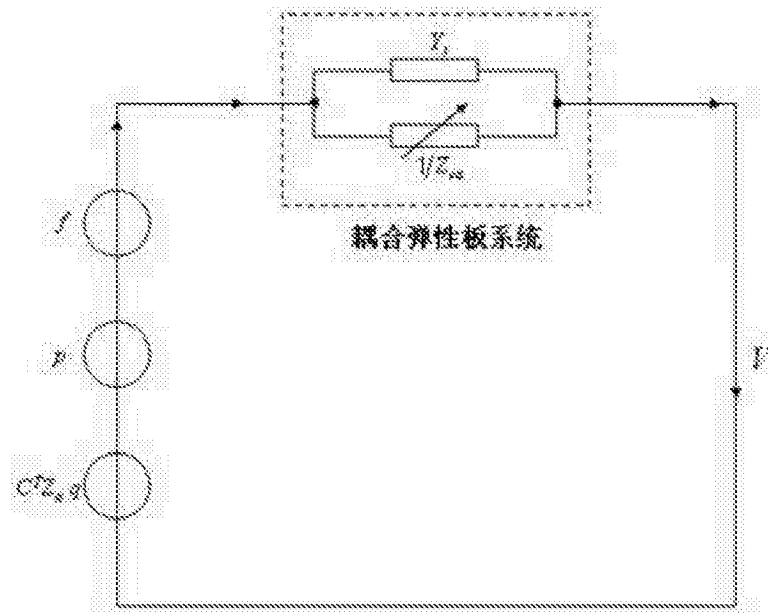


图 2