文章编号：1006-1355(2014)01-0092-03

敷设二维周期块状阻尼结构的薄板声辐射数值计算

陈 源，田 丰，周敬东，周明刚，王焱清

（湖北省农业机械工程研究设计院，湖北工业大学，武汉 430068）

摘 要：本文借助有限元和边界元的数值算法，针对特定的薄板结构，探讨敷设二维周期块状阻尼结构对薄板声辐射特性的影响。数值计算结果表明，在特定频段内，敷设二维周期块状阻尼结构的薄板辐射声能量要小于敷设传统等面积的整块自由阻尼结构。同时，适当增加阻尼敷设面积及块状阻尼的结构周期数能有效降低薄板声辐射。

关键词：声学；声辐射；二维周期结构；块状阻尼

中图分类号：TB535 **文献标识码**：A DOI **编码**：10.3969/j.issn.1006-1335.2014.01.021

Numerical Calculation for Sound Radiation of Thin Plate with Two-dimensional Periodically Distributed Bulk-damping

CHEN Yuan, TIAN Feng, ZHOU Jing-dong,
ZHOU Ming-gang, WANG Yan-qing

(Hubei Research and Design Institute of Agriculture Machinery Engineering,
Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract : Using FEM and BEM, the sound radiation characteristics of a thin plate with two-dimensional periodically distributed bulk-damping are studied. Numerical results show that the sound radiation power of this thin plate is less than that of the plate with the traditional uniformly coated damping in specific frequency bands. Properly increasing damping laying area and the period number of the bulk damping can effectively reduce the acoustic radiation of the thin plate.

Key words : acoustics ; sound radiation ; two-dimensional periodic structure ; bulk damping

金属薄板结构在生产生活中已经大量存在，而由此带来的振动噪声很难避免，如何更好地解决薄板中低频振动及辐射噪声问题，已经受到了越来越多国内外研究学者的关注。

随着周期性结构的提出[1]，研究者发现在某些频段范围内，弹性波在周期性结构中传播存在通带和禁带特性。由于周期性结构具有这一独特的特性，它在薄板振动控制运用方面已有不少的研究成果。其中包括国防科技大学温熙森等提出的声子晶体材料[2]，华中科技大学陈源等提出的人工编制周期性结构的方法[3]以及周期性条形阻尼结构[4]。而对于薄板声辐射特性的研究，目前主要集中在薄板尺寸、激励力激励力的位置、激励频率以及各类约束条件对薄板声辐射特性的影响[5]，研究表明，激励力位置、激励频率、薄板的厚度及约束条件对薄板声辐射特性均有较大的影响。部分文献[6]从阻振质量块结构形式的角度，研究了单一质量块包括矩形质量块以及环形质量块对结构振动与声辐射特性的影响。

目前，现有文献的研究主要集中在结构带隙理论算法的验证，薄板声辐射特性影响因素的分析，以及少量周期阻尼薄板结构形式的优化讨论。而对于敷设周期块状阻尼这种结构形式对薄板声辐射特性的影响尚涉及较少。本文针对特定薄板敷设二维周期块状阻尼结构，利用有限元和边界元法计算了该结构的振动和声学响应，探讨了敷设二维周期块状阻尼结构与敷设等面积整块自由阻尼结构对薄板声辐射特性的影响，并分析了块状阻尼结构参数与薄板声辐射特性的关系，为实际工程中利用二维周期块状阻尼结构降低薄板声辐射提供参考。

收稿日期：2013-06-28

项目基金：国家自然基金项目（50975081）

作者简介：陈 源（1971- ），男，武汉市人，博士，主要研究振动与噪声控制，周期结构带隙机理与运用。

E-mail: cy17220@163.com

1　模型建立及计算流程

本文主要利用有限元及边界元法探讨敷设二维周期块状阻尼结构对薄板声辐射特性的影响。通过ANSYS进行频率响应分析求解得到结构表面的节点位移，将其导入到Virtual. Lab作为结构声学响应求解的边界条件。结构有限元模型如图1所示。

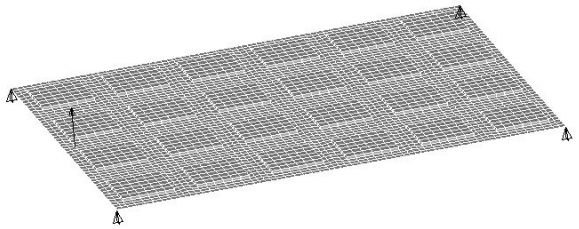


图1　薄板敷设二维周期块状阻尼的有限元模型

由于本文只考虑薄板敷设二维周期块状阻尼结构在中低频段的声辐射特性，因此将求解频段定义为0～1 000 Hz。同时，为满足声学计算中最小波长内有6个单元的要求，则单元最大长度为

$$L \leqslant \frac{c}{6 \times f} \tag{1}$$

其中 c 为声速，f 为求解频率。

综合考虑有限元计算对网格精度的要求，将网格总体单元尺寸设定为0.005 m。

目前对于评价结构声学特性的参量主要有场点声压、结构辐射声功率、结构辐射效率以及结构表面均方速度。由于场点声压值只能表征结构振动对外部声场某一场点的辐射情况，与场点位置及传递路径存在密切关系。因此，仅通过部分场点的声压值来反映整体结构的辐射情况存在很大的局限性。同时，结构声辐射效率表征的是结构向外辐射的有效声功率与结构表面所有单元声功率和之比，由于它与结构参数存在直接联系。因此，不同的结构之间对比声辐射效率数值并无太大意义。

而结构表面均方速度和结构辐射声功率均是单一的全局变量，分别表征的是不同频率下结构表面的总体速度分布趋势和结构表面所有单元对外部声场辐射能量的叠加数值，均可以很好地反映平面声源的声学特性。因此，本文主要采用结构辐射声功率和结构均方速度作为评价整体结构声学特性的声学参数。

2　薄板敷设二维周期块状阻尼与敷设等面积阻尼声辐射特性对比

本文主要考虑特定尺寸的薄板敷设二维周期块状阻尼结构及等面积整块自由阻尼的声辐射特性。薄板的长度为0.5 m，宽度为0.4 m，厚度为0.001 m；方形块状阻尼的厚度为0.003 m。其中，薄板为304不锈钢板材料，而阻尼材料为常用轿车热熔普通型阻尼片。具体材料参数如表1所示。

薄板采用四个角点简支的约束方式，在板上如图1所示位置的位置施加幅值为5 N的简谐激励力。图2为敷设二维周期块状阻尼的薄板结构模型。其中阴影部分即为最小周期结构，L_a、L_b分别为x、y方向上的晶格常数，a、b分别为块状阻尼的长度和宽度,阻尼敷设总面积占板表面面积的百分比为$a \times b / L_a \times L_b$。相应结构的材料属性如表1所示。

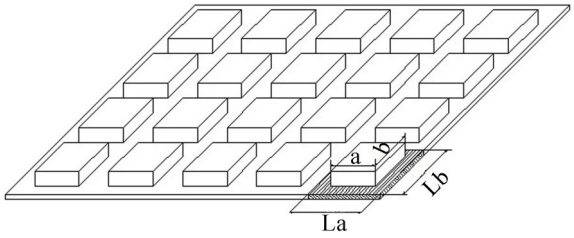


图2　薄板敷设二维周期块状阻尼结构的模型

表1　材料参数

材料	密度 (kg·m^{-3})	弹性模量(pa)	泊松比	阻尼系数
钢板	7 780	2.16 E 11	0.27	0
阻尼	1 180	4.35 E 9	0.37	0.135

分别计算光板、薄板敷设二维周期方形块状阻尼结构以及敷设相等面积的整体大块自由阻尼结构的辐射声功率和结构表面均方速度。其中块状阻尼结构在x方向的结构周期数为4，在y方向的结构周期数为6，阻尼敷设总面积占薄板表面面积的40 %。

如图3所示，通过对比，我们发现薄板敷设整块自由阻尼结构的辐射声功率要低于光板。其中，光板各阶模态下对应的辐射声功率峰值均得到了明显地降低。这说明敷设整块自由阻尼结构对降低薄板声辐射具有一定的效果。同时，在阻尼敷设总面积相等的前提下，在410 Hz～910 Hz的频段内，薄板敷设二维周期阻尼结构的辐射声功率要明显小于敷设等面积整块自由阻尼结构。

如图4中所示，通过对比，我们同样可以看出，薄板敷设二维周期块状阻尼结构的结构表面均方速度，与未敷设阻尼结构和敷设整块自由阻尼结构相比，在整个频段内均有明显地降低。由于结构辐射噪声能量与结构表面均方速度的大小有着直接联

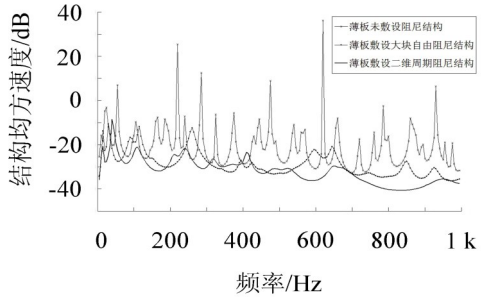


图 3 辐射声功率对比图

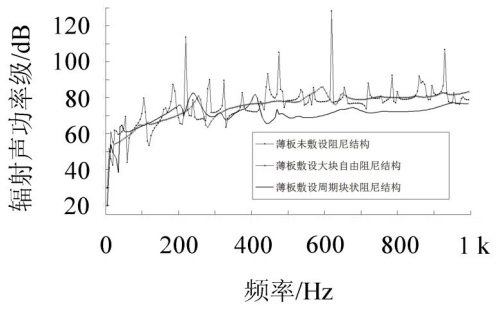


图 4 结构表面均方速度的对比

系，这从另一个角度验证了薄板敷设二维周期块状阻尼结构更有助于降低结构的辐射噪声。

3 二维周期块状阻尼结构参数对薄板声辐射特性的影响

3.1 阻尼敷设面积对薄板声辐射的影响分析

以薄板敷设的块状阻尼在 x 和 y 方向的 ji 结构周期数分别为4和6为例，分别计算阻尼敷设面积占板表面总面积的10 %、20 %、40 %、70 %、80 %和100 %的各结构辐射声功率。

图5中即为周期块状阻尼结构在 x 方向和 y 方向的结构周期数一定的前提下，薄板所敷设的块状阻尼面积与结构辐射声功率的关系。通过对比，可以发现在400 Hz～1 000 Hz的频段内，随着块状阻尼敷设面积从10 %增至40 %，结构辐射声功率随着阻尼敷设面积的增加而明显地减小。而当阻尼敷设面积过大时，如图5中阻尼敷设面积占薄板表面面积的70 %、80 %以及100 %时，其结构辐射声功率并不是越来越小，反而在290 Hz～900 Hz的频段范围内，其结构辐射声功率值明显增大。

可见，对于薄板敷设二维周期块状阻尼结构，适当增加阻尼的敷设面积有助于削弱薄板声辐射能力。而单纯增加结构表面的阻尼敷设面积，即在结构表面敷满整块自由阻尼的方式，并非能最大程度地降低结构声辐射。

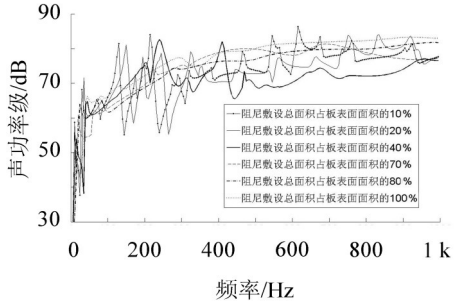


图 5 辐射声功率对比图

3.2 块状阻尼结构周期数对薄板声辐射的影响

以敷设的块状阻尼敷设总面积占板面面积的40 %为例，计算薄板敷设的周期块状阻尼结构在 x 方向的结构周期数为4，而 y 方向的结构周期数分别为4、6、8、10的四种结构的辐射声功率。

由图6可以看出，随着 y 方向的结构周期数的增加，其结构的辐射声功率并不是呈现简单的线性变化。为探寻各结构在不同频段内的声辐射特性变化趋势，计算了其在5～100、100～400、400～1 000、5～1 000这5中频率段内的结构辐射声功率均方值。

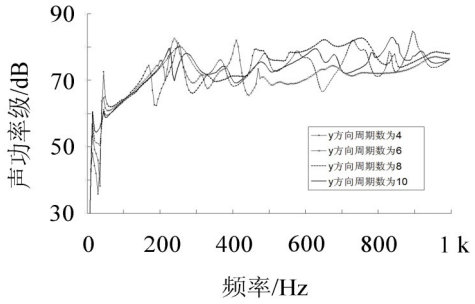


图 6 辐射声功率对比图

由表2可以得出，在5～1 000 Hz整个频段内，随着 y 方向的结构周期数的增加，结构辐射声功率均方值呈现先增大后减小的趋势；当 y 方向的结构周期数等于8时，其结构辐射声功率均方值降低到最小。其实，在阻尼敷设面积一定的前提下，若某个方向的结构周期数过大即块状阻尼间的间距过小，二维周期块状阻尼结构将转变为一维周期条形阻尼结构，这将无法体现出二维周期块状阻尼结构的特性。

由表2对比还可以得出，在400 Hz～1 000 Hz频段内，y 方向的结构周期数为6的结构辐射声功率均方值要比其他结构明显低。

因此，可根据实际工况，合理布置周期块状阻尼结构在两个方向的结构周期数，使得在人为需要的频段内最大程度削弱结构声辐射能力。

(下转第145页)