

文章编号:1006-1355(2020)06-0193-05

声子晶体结构板件在车内噪声控制中的应用研究

何宇漾

(江苏信息职业技术学院, 江苏 无锡 214153)

摘要:声子晶体具有隔振特性,可用于减震降噪领域。为探索声子晶体结构板件在汽车噪声控制的应用,以某汽车为研究对象,建立具有声子晶体顶棚的汽车整车车身结构有限元模型。在此基础上,创建声子晶体顶棚声学空腔有限元网格,并运用声学仿真软件进行声学模态有限元计算。建立整车边界元模型,选择发动机激励信号的频谱,在发动机悬置处施加载荷,计算得到汽车车内声场中不同位置处声压分布。选取具有声子晶体顶棚汽车模型中驾驶员、前排乘员等头部位置作为响应点,与汽车原始模型的声压级结果进行对比分析。结果表明在一定频率范围内,汽车的声压级有一定程度的降低。有关结论可为声子晶体板件结构在汽车降噪中的应用提供借鉴。

关键词:声学;声子晶体结构板件;车内噪声;有限元;边界元;声学响应分析

中图分类号:TB533.2

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2020.06.033

Application of Phononic Crystal Plates in Vehicle's Noise Control

HE Yuyang

(Jiangsu Vocational College of Information Technology, Wuxi 214153, Jiangsu, China)

Abstract: The phononic crystal has the characteristic of vibration isolation and can be used in the field of vibration and noise reduction. In order to explore the application of the phononic crystal panel in the automotive noise reduction control, a finite element model of the whole automobile body with the phononic crystal roof is established. The finite element mesh of the acoustic cavity of the vehicle with the phononic crystal roof is established and the acoustic modal calculated by means of the acoustic finite element simulation software. Then, the boundary element model of the entire vehicle is established. The frequency spectrum of the engine excitation signal is selected. The load is added to the engine mount and the sound pressure distribution at different positions in the sound field is calculated. In the vehicle model, the head positions of the driver and the front passengers are selected as the measurement points of the sound field. The results of the sound pressure level of the vehicle model with the phononic crystal roof are compared with those of the original ones. It is concluded that the vehicle's sound pressure level has a certain degree of reduction in a certain frequency range. This conclusion may have some reference significance for the application of phononic crystal plate in vehicle's noise reduction.

Keywords: acoustics; phononic crystal structural panel; vehicle noise; finite element; boundary element method; acoustic response analysis

国内外汽车行业发展迅猛,驾乘人员对汽车行驶舒适性提出更高的要求。车辆的NVH(Noise噪声、Vibration振动、Harshness声振粗糙度)是国际汽车业各大整车制造企业和零部件企业关注的问题之一。汽车NVH控制技术发展已经进入了新时代,由被动的减振降噪升级为主动的声学设计。声子晶体是存在弹性波带隙、弹性常数及密度周期分布的材料或结构,弹性波在带隙频率范围内,其传播将会被抑制^[1]。通过分析声子晶体的带隙的影响参数,对

周期结构进行设计,可人为地调控声波的流动,因此声子晶体可以用于声滤波器、声波导、声学透镜以及减振降噪控制^[2-4]。声子晶体具有的这种弹性波带隙特性为汽车车内低频噪声控制提供了一种新的研究方法。

郑玲、赵树恩等^[5-6]对一维声子晶体的振动特性进行理论和试验研究,阐述了声子晶体在振动与噪声控制领域的研究现状及声子晶体在汽车减振降噪方面的应用。张三强^[7]针对车辆壳体振动辐射噪声,对阻尼减振降噪方法中阻尼材料的应用部位和阻尼结构进行了探索性研究。其他学者和专家提出了由单侧复合圆柱共振单元周期排在基板上构成的新型准二维声子晶体板;通过改变结构的材料和尺寸参数可以将共振带隙调节到满足实际应用要求的极

收稿日期:2020-02-25

作者简介:何宇漾(1973-),女,黑龙江省佳木斯市人,教授,博士,主要研究方向为汽车噪声与振动控制、汽车电子控制技术。

E-mail: wxhey@126.com

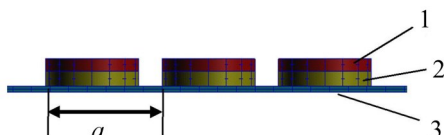
低频范围;提出了基于局域共振声子晶体的带隙理论;通过分析汽车车身顶棚不同区域板件的振动对车内噪声的贡献,在贡献较大的区域设计具有双带隙和点缺陷的声子晶体结构;基于局域共振声子晶体的带隙理论,提出了一种基于空腔阻隔材料的结构设计,说明选择合适的材料和结构形式,可以获得相应的减振和降噪效果,从而进一步证明了声子晶体在汽车隔振降噪领域可应用性,为声子晶体在车板件减振中的实际应用提供了依据^[8-11]。

本文以具有声子晶体结构顶棚的汽车模型为研究对象。运用声学仿真软件创建声子晶体顶棚汽车声学空腔有限元网格,并进行声学模态有限元计算。建立整车的边界元模型,模拟实际环境中的发动机激励,计算得到汽车车内声场中不同位置处的声压分布。分别对于声子晶体顶棚汽车和原始顶棚汽车,选取驾驶员、前排乘员、后排乘员头部位置作为响应点,对声压级计算的结果进行对比分析。

1 声子晶体结构板件有限元模型建立

1.1 声子晶体结构板件传输特性分析

局域共振型声子晶体结构板件产生机理为:在特定频率的弹性波激励下,单个散射体产生共振,并与入射波相互作用,使其不能继续传播^[1]。声子晶体带隙的产生主要取决于各个散射体本身的结构与弹性波的相互作用,单个散射体的共振特性起主要作用。为研究声子晶体结构板件传输特性,创建声子晶体结构板几何模型如图1所示。每个声子晶体单元由基体、包覆层、散射体3部分组成。其中,声子晶体基体板的尺寸为600 mm×400 mm×2 mm,基体材料选为铝板。包覆层的直径为40 mm、厚度为5 mm的圆柱体,材料为硅橡胶,其阻尼为0.1。声子晶体板的散射体选用钢圆柱,直径为40 mm,厚度为4 mm。沿x轴方向布置3个周期的声子晶体单元,沿y轴方向布置7个周期的声子晶体单元。 a 为晶格常数,即两个声子晶体单元之间的距离,设为50 mm。



1-散射体 2-包覆层 3-基体 a -晶格常数

图1 声子晶体板的几何模型

对图1中的几何模型进行有限元网格的划分,基体板、振子钢柱和硅胶采用的有限元网格为tria形式,网格总数23 588个。铝板、硅胶、钢柱材料参数设置如表1所示。分别对铝板和声子晶体结构板进

行传输特性分析。板件采用自由悬挂模式,靠近板的一侧施加垂向激励,力的大小为1 000 N,在另一端拾取响应。声子晶体板和铝板频率响应对比如图2所示。

表1 声子晶体组元的材料参数

组元材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/Pa	泊松比
钢	7 840	2.16×10^{11}	0.28
硅橡胶	1 300	1.37×10^5	0.47
铝	2 799	7.2×10^{10}	0.344

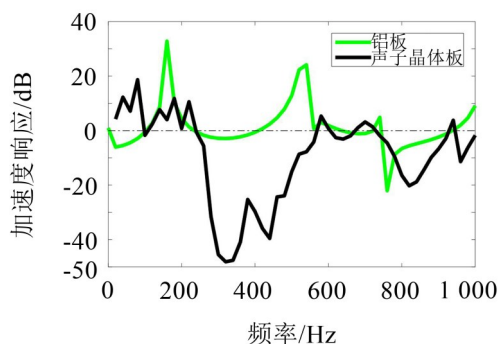


图2 声子晶体板和铝板频率响应对比

从图2中可以得出,在240 Hz~560 Hz频率范围内出现明显的带隙,声子晶体板的频率响应相对于铝板有较大衰减,最大衰减量发生在320 Hz处的45.2 dB。

1.2 声子晶体结构汽车有限元模型

根据某品牌汽车参数,建立汽车整车车身结构有限元模型。在建立的模型中,车门和车身连接部分采用刚性连接代替,前挡风玻璃和后窗玻璃与车身结构之间的连接定义为黏性连接。实际车辆上采用悬置元件连接发动机和车身,模型中则是在相应的位置用加多点约束的方法来代替。汽车整车车身结构有限元模型中所添加的各单元的材料属性如表2所示。

表2 车身部件材料参数

参数 材料	弹性模量/ MPa	剪切模量/ MPa	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3}$)	泊松比
钢	2.16×10^5	8.3×10^4	7 850	0.266
玻璃	2.0×10^4	8.73×10^3	2 530	0.145
黏胶	3.6×10^3	2.5×10^3	1 200	0.35

在汽车整车有限元模型中建立声子晶体结构顶棚模型时,为了不改变原车的顶棚结构,在原始顶棚上沿x轴方向布置5个周期的声子晶体单元,在y轴方向布置15个周期的声子晶体单元,晶格常数为50 mm。添加声子晶体单元顶棚的汽车整车有限元模型如图3所示。声子晶体单元的散射体和包覆层分

别由钢柱和硅胶构成,直径均为40 mm,其中钢片的厚度为4 mm,硅胶的厚度为5 mm。硅胶材料的阻尼为0.1。声子晶体单元和基板(顶棚钢板)的连接方式采用共节点形式。选用的声子晶体组元材料参数如表2所示。

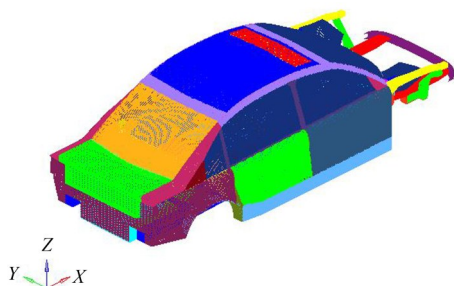


图3 声子晶体结构顶棚汽车有限元模型

2 汽车车内声学模态分析

2.1 车内声学空腔有限元模型的建立

声学模态频率是声学共鸣频率。声波以某一声学模态频率,在轿车车内空腔传播时,入射波与由空腔边界反射而成的反射波相互叠加或相互衰减,因而在不同位置处产生不同的声压分布。在进行声学空腔网格划分之前,必须注意要使导入的BDF模型网格封闭。考虑到耦合界面上流体单元的节点与结构单元的节点的一一对应关系,确定所要划分的车内声学空腔声学单元的长度为40 mm,网格形式为hexa tetrahedra,生成后的车内空腔有限元模型如图4所示。声波在空气中的传播速度为340 m/s,空气的密度为 1.225 kg/m^3 ,计算乘员室声腔模态时,假设声腔壁为刚性壁。

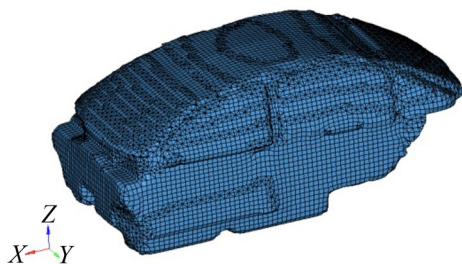


图4 车内声学空腔有限元模型

2.2 车内声学空腔模态计算

根据建立的车内声学空腔有限元模型,利用Virtual. lab软件进行声学模态有限元计算,共计算10阶声学模态。选取其中的第1阶、第4阶、第7阶、第10阶的声学模态如图5(a)至图5(d)所示。

图中的颜色由深蓝、浅蓝、绿色变化到黄色,声压幅值依次降低。图5(a)为第1阶模态,声学空腔模态频率为70.405 Hz,声压沿着纵向分布,为纵向第1阶。图5(b)为第4阶模态,声学空腔模态频率为

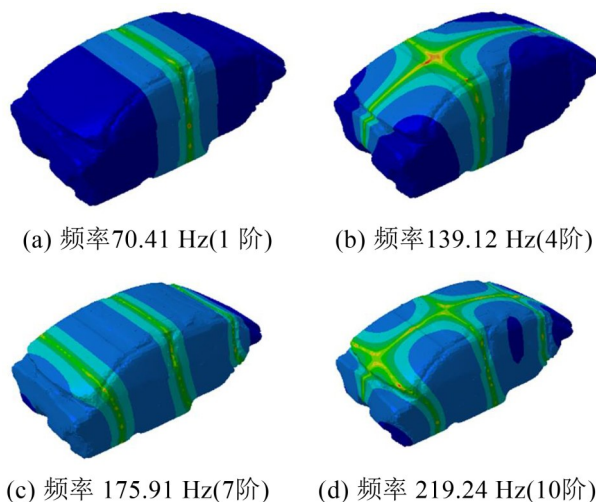


图5 车内空腔声学模态

139.12 Hz,声压同时沿着纵向和横向分布,为横向第1阶+纵向第1阶综合声学模态。图5(c)为第7阶模态,声学空腔模态频率175.91 Hz,声压沿着纵向分布,纵向有3条节线,为纵向第3阶声学模态。图5(d)为第10阶模态,声学空腔模态频率为219.24 Hz。声压同时沿着横向和纵向分布,为纵向第3阶+横向第1阶综合声学模态。在后排座椅位置,第1阶、第4阶、第7阶和第10阶模态的节线位于人耳位置附近,使乘员处于较好的声学环境。

3 汽车车内声学响应分析

3.1 整车声学边界元模型的建立

结构声学的分析方法主要有声学边界元法和声学有限元法。由于边界元法既可以计算封闭空间中的声场,也可以计算非封闭空间中的声场,因此选择间接边界元法进行汽车车内声场分析。

某个车内空气声学网格单元的长度是 L ,假设这个单元是线性单元,则这个单元可以计算到的最高频率 $f_{\max} = c/6L$ 。式中, c 是声波在流体中的速度,即可以通过该式来确定空腔边界元网格模型的网格大小^[12]。考虑到计算频率以及空腔网格与边界结构网格的对应关系,选取网格大小为80 mm,对空腔结构进行网格划分,得到汽车空腔边界元模型如图6所示。

3.2 汽车整车场点网格的创建

为了计算汽车车内声场中不同位置处的声压分布,需要模拟实际环境中的声辐射环境,建立场点网格。在汽车车内声学响应分析中,选择驾驶员头部位置(FL)、前排乘员头部位置(FR)、后排左侧乘员头部位置(RL)、后排右侧乘员头部位置(RR)4个位置作为场点计算声学响应。建立的4个场点网格的中心点坐标如表3所示。场点半径为50 mm,对其

进行有限元网格划分。场点模型及在汽车声腔边界元中的位置如图7所示。在场点有限元模型的一侧选取一点作为声学响应点,来模拟人左耳的位置。

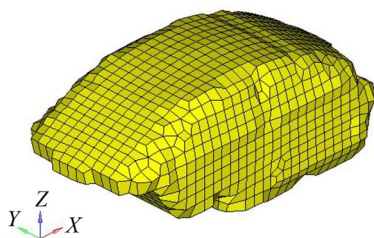


图6 汽车空腔边界元模型

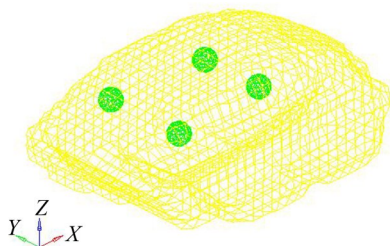


图7 场点模型及边界元网格

表3 场点网格中心点坐标

场点网格	说明	中心点坐标/mm
FL	驾驶员头部	(320, 300, -340)
FR	前排乘员头部	(320, 300, -340)
RL	后排左侧乘员头部	(-650, 380, -340)
RR	后排右侧乘员头部	(-650, -380, -340)

3.3 载荷点的加载

为了更好地评价和比较汽车车内声场的声学响应,选择发动机激励信号频谱作用激励载荷谱,并将载荷加载在发动机悬置处。汽车整车有限元模型中的4个载荷加载点位置如图8所示。分别为:1-左前副车架橡胶衬套与车身连接点;2-右前副车架橡胶衬套与车身连接点;3-左后副车架橡胶衬套与车身连接点;4-右后副车架橡胶衬套与车身连接点。

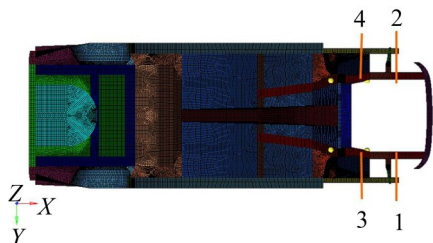


图8 载荷点加载位置

3.4 响应点声压级对比分析结果

在具有声子晶体结构汽车顶棚的模型和原始汽车模型中,分别运用间接边界元法计算车内空腔的声学响应点的声压级。选取驾驶员头部位置(FL)、前排乘员头部位置(FR)、后排左侧乘员头部位置

(RL)、后排右侧乘员头部位置(RR)等4点的声压级响应。有声子晶体结构板件顶棚和无声子晶体顶棚汽车空腔内各位置的声压级响应比较结果如图9至图12所示。

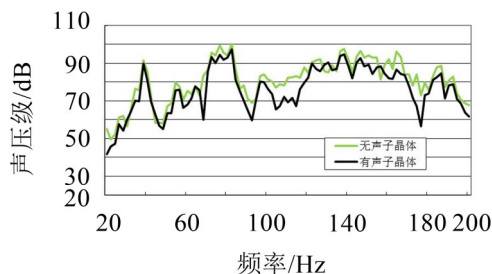


图9 FL位置声压比较

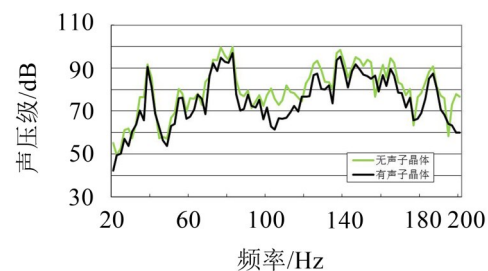


图10 FR位置声压比较

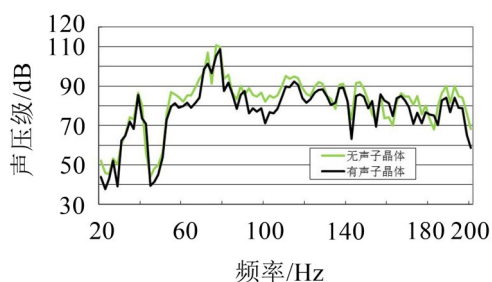


图11 RL位置声压比较

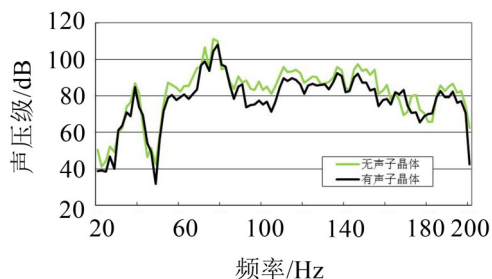


图12 RR位置声压比较

选用声子晶体汽车顶棚时4个响应点的声压级与无声子晶体顶棚汽车车内声压级相比均存在一定程度的降低。其中驾驶员左耳处(FL)的声压级在96 Hz至112 Hz频率范围内降低比较明显,最大值在104 Hz处,声压级降低9 dB。前排乘员(FR)左耳处的声压级在100 Hz至118 Hz频率范围内明显降低,最大值在102 Hz处,声压级降低14 dB。后排左侧乘员(RL)左耳处的声压级在90 Hz至110 Hz频率

范围内明显降低,最大值在 92 Hz 处,声压级降低 10 dB。右侧后排乘员(RR)左耳处声压级在 92 Hz 至 108 Hz 频率范围内明显降低,最大值在 92 Hz 处,声压级降低 12 dB。计算各响应点的声压级的均方根值并进行对比,如图 13 所示。

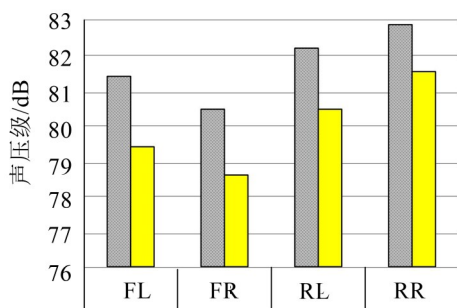


图 13 各响应点均方根值对比

从图 13 中可以看出,在驾驶员(FL)、前排乘员(FR)、后排左侧乘员(RL)和后排右侧乘员(RR)头部位置的声压级均出现降低。其中,驾驶员(FL)处的均方根值降低 1.6 dB,(FL)处降低 1.6 dB,后排左侧乘员(RL)处降低 1.5 dB,后排右侧乘员(RR)处降低 1.45 dB。4 个响应点的均方根值平均降低 1.53 dB。

4 结 语

本文根据声子晶体结构板件的特性,建立了具有声子晶体顶棚的汽车整车车身有限元模型。运用声学仿真软件对声学空腔有限元模型进行声学模态计算,得到前 10 阶声学模态。在前排座椅位置,第 1 阶、第 4 阶、第 7 阶和第 10 阶模态的节线位于人耳位置附近,使乘员处于较好的声学环境中。

在汽车整车声学边界元模型中,建立场点网格模拟实际环境中的声辐射环境。选择发动机激励信号的频谱作为激励载荷谱,并将载荷加载在发动机悬置处。对车内腔室模型的噪声声场进行声学响应分析。

对于具有声子晶体结构汽车顶棚的模型和原始汽车模型,分别运用间接边界元法计算车内空腔的声学响应点的声压级。选取驾驶员、前排乘员、后排左侧乘员、后排右侧乘员头部位置处的响应点进行比较分析。当选用声子晶体汽车顶棚时,4 个响应点

的声压级与无声子晶体顶棚汽车车内声压级相比均存在一定程度的降低。其中驾驶员左耳处(FL)的声压级在 96 Hz 至 112 Hz 频率范围内降低比较明显,最大值在 104 Hz 处,声压级降低 9 dB。对各响应点的均方根值进行对比分析,结果表明在一定频率范围内,汽车的声压级有一定程度的降低。4 个响应点的均方根值平均降低 1.53 dB。说明声子晶体板件结构顶棚对发动机激励引起的汽车车内噪声具有一定的降噪效果,这对于其在汽车降噪中的应用具有一定借鉴意义。

参考文献:

- [1] 温熙森. 光子/声子晶体理论与技术[M]. 北京: 科学技术出版社, 2006: 1-18.
- [2] GAO N, WU J H, YU L. Research on bandgaps in two-dimensional phononic crystal with two resonators[J]. *Ultrasonics*, 2015, 56: 287-293.
- [3] RATIBA F, GHACH. Flexural vibration attenuation properties of phononic crystals[J]. *Key Engineering Materials*, 2019, 4830(1642): 414-418.
- [4] 姜超君, 向阳, 张波, 等. 二维声子晶体带隙特性分析与应用研究[J]. *噪声与振动控制*, 2018, 38(4): 7-11.
- [5] 郑玲, 李以农. 一维声子晶体的振动特性与试验研究[J]. *振动工程学报*, 2007, 20(4): 417-421.
- [6] 赵树恩, 李以农, 郑玲, 等. 声子晶体与汽车振动噪声控制[J]. *材料导报*, 2007, 21(4): 84-86.
- [7] 张三强. 基于周期性阻尼结构的车内振动与噪声控制研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2009.
- [8] 左曙光, 黄海东, 吴旭东, 等. 基于声子晶体及其缺陷态特性的车内降噪方法[J]. *汽车工程*, 2017, 39(5): 569-574.
- [9] 岳东鹏, 夏洪兵, 高辉, 等. 电动汽车驱动电机电磁噪声的仿真分析[J]. *噪声与振动控制*, 2018, 38(Z1): 175-180.
- [10] 张思文, 庞剑, 张军, 等. 基于局域共振声子晶体结构的汽车空腔阻隔材料[J]. *汽车工程*, 2015, 37(10): 1179-1184.
- [11] 麻乘榕, 邵晨, 万庆冕, 等. 用于汽车低频振动控制的局域共振声子晶体[J]. *应用声学*, 2018, 37(1): 152-157.
- [12] 李增刚, 詹福良. *Virtual. lab Acoustics 声学仿真计算高级应用实例*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 20-50.