

文章编号:1006-1355(2021)01-0168-09

# 复杂截面周期性隔振桩带隙特性构型影响因素研究

姜博龙

(中国铁路设计集团有限公司 城市轨道交通数字化建设与测评技术国家工程实验室,  
天津 300308)

**摘要:**提出带隙特性丰富的蜂窝截面、正交截面和X截面三种周期性隔振桩,采用平面波展开法对三种隔振桩进行频散及带隙分布展开研究,揭示平面内和平面外首阶完全带隙的起始频率、截止频率以及带宽随构型影响因素如周期常数、填充率以及控制尺寸变化的规律,为该类型排桩应用及设计选型提供理论依据。研究表明:降低周期常数可以增加三种隔振桩平面内和平面外的首阶带隙带宽,但是也会提高它们首阶带隙的起、止频率;增大填充率可以增加蜂窝截面隔振桩平面内和平面外首阶带隙的带宽,也会提高首阶带隙的起、止频率;正交截面隔振桩和X截面隔振桩首阶带隙伴随填充率变化规律不明显,二者的几何控制尺寸更复杂、带隙调节能力更丰富。

**关键词:**振动与波;隔振;周期排桩;复杂截面;带隙;构型

中图分类号:O328;TB535<sup>+.1</sup>

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2021.01.031

## Study on Configuration Influencing Factors of Band Gap Characteristics of Vibration Isolation Periodic Piles with Complex Sections

JIANG Bolong

(National Engineering Laboratory of Rail Transit Digital Construction and Measurement Technology,  
China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** Three new types of vibration isolation periodic piles with complex sections including honeycomb piles, orthogonal cross-bonding piles and X-type piles are proposed. The dispersions of three kinds of the isolation periodic piles are calculated based on plane wave expansion method. The influences of periodic constant, filling rate and control size of the piles on the initial frequency, truncation frequency and the variation law of the bandwidth in the cases of in-plane and out-of-plane vibrations are revealed. It provides a theoretical basis for the application and selection design of these types of periodic piles. The research results show that reducing the periodic constant can increase the band width of the initial completion band gap of in-plane and out-of-plane vibrations, but also increase the lower bound frequency and upper bound frequency of the initial band gap. Increasing the filling rate can widen the band width of the initial completion band gap of the in-plane and out-of-plane vibrations of the honeycomb piles, as well as raise their lower bound frequency and upper bound frequency. The initial completion band gap changing rules with the filling rate of the orthogonal cross-bonding piles and the X-type piles are not obvious. The geometric control sizes of the two types of periodic piles are more complex and the band gap adjustment ability is more abundant.

**Key words:** vibration and wave; vibration isolation; periodic pile; complex section; band gap; configuration

在城市轨道交通快速发展、城市土地利用集约化的双重背景下,城市轨道交通线位逐步逼近甚至下穿既有或规划建筑物敏感点,造成了一定的负面

影响和经济损失,亟需采取防治措施。当线路开通运营无法更换减振轨道、既有建筑物无法搬迁或加装隔振支座的情况下,传播路径控制具有一定的必要性,对其展开研究具有重要意义。其中,排桩作为一种典型的隔振屏障,被认为在低频隔振中有潜在优势<sup>[1]</sup>。与此同时,受凝聚态物理及声子晶体的启发,周期结构的带隙特性<sup>[2]</sup>被引入到隔振排桩的研究中。所谓带隙,是指存在于无限尺寸的周期结构中、具有抑制某个频段内的波传播的特性<sup>[3]</sup>。带隙特性

收稿日期:2020-03-30

基金项目:中国铁路设计集团有限公司科技开发项目计划重点课题资助(2020YY241012,7217131)

作者简介:姜博龙(1989-),男,哈尔滨市人,工程师,工学博士,主要研究方向为交通环境振动影响、预测与控制,周期结构隔振理论。

E-mail: bolongjiang@126.com。

引入一方面改善了城市轨道交通隔振排桩设计缺乏理论指导的现状,另一方面,通过周期结构或材料的人为设计来调节带隙的带宽和分布,可更具针对性地阻隔目标频段振动,具有良好的应用前景。

周期性隔振桩带隙特性的研究才刚刚起步,目前还是以理论研究为主。黄建坤<sup>[3]</sup>以圆截面排桩为例,针对周期常数、土体弹性模量和桩半径等各类因素对圆截面排桩带隙起止频率、带宽的影响展开研究,并获得其规律;刘心男等<sup>[4]</sup>针对采用平面应变模型求解无限周期排桩带隙问题中桩长无限长的假设,建立了三维有限元模型,讨论三维模型与二维模型计算结果的差异,发现随着桩长的增加,二者的结果差异逐步减小,这也说明了在有限周期和有限桩长条件下,带隙范围内的振动可有效衰减,可实现相当的隔振效果;蒲兴波等<sup>[5]</sup>提出了一种全新方法,用于获取二维周期桩隔振系统的面波频散曲线;此外,甘莹莹<sup>[6]</sup>针对复阻尼周期排桩的减振性能展开研究,孟庆娟等<sup>[7]</sup>针对饱和土条件下隔振排桩的衰减特性展开研究。文献[8]利用原理性试验获得了周期结构带隙理论指导下设计排桩的振动传输衰减规律,并与带隙计算结果对比,吻合情况良好,验证了该理论的正确性;姜博龙等<sup>[9-10]</sup>建立了隧道-地层-隔振周期排桩耦合的三维有限元数值模型,获得了计算带隙范围内隔振排桩的衰减效果,验证了周期结构带隙理论指导下设计排桩隔离轨道交通环境振动的可行性和有效性;提出了基于带隙性能评价函数的选型方法,为隔振周期排桩选型和设计提供依据,提高了选型设计效率。此外,Kattis、冯桂帅等<sup>[11-12]</sup>研究了隔离桩截面形状对隔振效果的影响,Takemiya等<sup>[13]</sup>研究了蜂窝形波阻块(WIB)的隔振效果,而这些构型因素对于带隙特性的影响尚不明确。为进一步丰富该问题的研究,本文提出了带隙特性丰富的三种周期性隔振桩,并对带隙特性的构型影响因素展开研究,为该类型排桩应用及设计选型提供理论依据。本文研究的带隙特性全部为首阶完全带隙,其在隔振应用中有重要意义。

## 1 周期排桩频散计算的平面波展开法

平面波展开法<sup>[2]</sup>可用于求解周期排桩带隙特性,其基本假设包括无限周期假设和无限桩长假设,此时振动在排桩-土层中的传播可视为平面应变问题,并解耦为平面内问题和出平面问题。不失一般性,波动方程可表示为式(1)的形式:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot u) + \mu \nabla^2 u \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为密度; $\lambda$ 和 $\mu$ 为拉梅常数; $u$ 为位移矢量; $u_i$

表示位移分量。

其中:

$$\begin{aligned} u &= [u_x, u_y, u_z] \\ u_i (i &= x, y, z) \\ \Delta &= \left[ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right] \end{aligned}$$

由于排桩的周期性排列,密度 $\rho$ 和拉梅常数 $\lambda$ 和 $\mu$ 可按照傅里叶级数展开为

$$f(r) = \sum_{G_1} f_{G_1} e^{iG_1 \cdot r} \quad (2)$$

式中: $G_1$ 为倒格矢; $r$ 为位置矢量。

其中:

$$f = \rho(r), \lambda(r) \text{ 或 } \mu(r)$$

$$r = (x, y, z)$$

根据 Bloch-Floquet 理论,位移解可展开为

$$u(r, t) = e^{-i\omega t} \sum_{G_2} u_K(G_2) e^{i(K+G_2) \cdot r} \quad (3)$$

式中: $K$ 为波矢; $G_2$ 为倒格矢; $\omega$ 为角频率; $u(r, t)$ 为位移矢量。

把方程(2)和方程(3)代入方程(1),可得到本征方程:

$$\omega^2 \begin{bmatrix} \sum_{G_2} \rho_{G_3-G_2} & 0 \\ 0 & \sum_{G_2} \rho_{G_3-G_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{K+G_2}^x \\ u_{K+G_2}^y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} \\ M_{yx} & M_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{K+G_2}^x \\ u_{K+G_2}^y \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} M_{jl} &= \sum_{G_2} \{ \mu_{G_3-G_2} \sum_l [(K+G_2)_l (K+G_3)_l] \delta_{jl} + \\ & \quad [ \lambda_{G_3-G_2} (K+G_2)_l (K+G_3)_j + \\ & \quad \mu_{G_3-G_2} [(K+G_2)_j (K+G_3)_l] \} \\ G_3 &= G_2 + G_1 \\ i, j, l &= x, y, z \end{aligned}$$

对于散射型排桩,傅里叶系数可表示为

$$f_{G_1} = \begin{cases} f_B \eta + f_A (1 - \eta) & G_1 = 0 \\ (f_B - f_A) P(G_1) & G_1 \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\eta = (\pi R^2) / S$$

$$P(G_1) = \frac{2\eta J_1(|G_1| \cdot R)}{|G_1| \cdot R}$$

式中: $\eta$ 为单个基本单元中桩的占比; $P(G_1)$ 为结构函数; $S$ 为典型单元面积; $J_1$ 为第一类第1阶贝塞尔函数。

使波矢 $K$ 扫掠第一不可约 Brillouin 区<sup>[2]</sup>即得到排桩-土体体系的频散曲线和带隙。该方法的正确性和有效性已经过实验验证<sup>[14]</sup>。

## 2 蜂窝截面隔振桩构型影响因素研究

蜂窝截面隔振桩首阶完全带隙主要受填充率和周期常数两个构型因素影响。本节以六角晶格排列形式为例,如图1(a)所示,简化的基本单元和计算用到的六角晶格第一不可约 Brillouin 区分别见图1(b)和图1(c),其中A为散射体(蜂窝截面桩),B为基体(土体),计算所采用的参数如下:土体密度 1 900 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量 65 MPa,泊松比 0.35;混凝土排桩密度 2 300 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量 30 000 MPa,泊松比 0.18。本节计算蜂窝截面隔振桩所采用的几何参数如表 1 所示。

开展频散关系计算,并画出频散曲线获得其带隙分布。研究其几何构型,包括周期常数和填充率,对其平面内和平面外首阶完全带隙的起始频率、截止频率和带宽的影响规律。其中填充率  $\eta$  可表示为

$\eta$ =基本单元中散射体所占面积/基本单元面积,在本例中, $\eta=(b/a)^2$ 。

图2给出了平面内和平面外首阶完全带隙的起、止频率以及对应的带宽随周期常数变化的规律,其中阴影部分表示带宽,余同。

由图2可知,无论是平面内还是平面外,在填充率不变的情况下,首阶完全带隙的起、止频率和带宽都随着周期常数的变大而降低,且平面外的带宽比平面内带宽更大。因此,若设计带隙需具有较宽的带宽,则需要缩小周期常数;若设计带隙需要出现在较低频段,则需要增大周期常数。

图3给出了平面内和平面外首阶完全带隙的起、止频率以及对应的带宽随填充率变化的规律。由图可知,无论是平面内还是平面外,在周期常数一定的情况下,首阶完全带隙的起、止频率以及对应的带宽都随着填充率的降低而减小,起始频率随填充

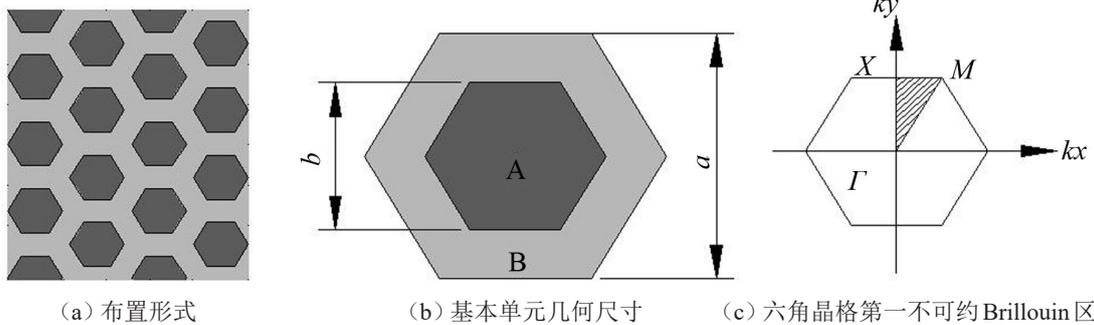


图1 蜂窝截面隔振桩平面构型示意图

表1 蜂窝截面隔振桩构型影响因素计算工况

工况	a/m	b/m	填充率/(%)	工况	a/m	b/m	填充率/(%)
1	4	3.6	81	7	3	2.1	49
2	4	3.2	64	8	2	1.4	49
3	4	2.8	49	9	5	3.5	49
4	4	2.4	36	10	6	4.2	49
5	4	2	25	11	7	4.9	49
6	4	1.6	16				

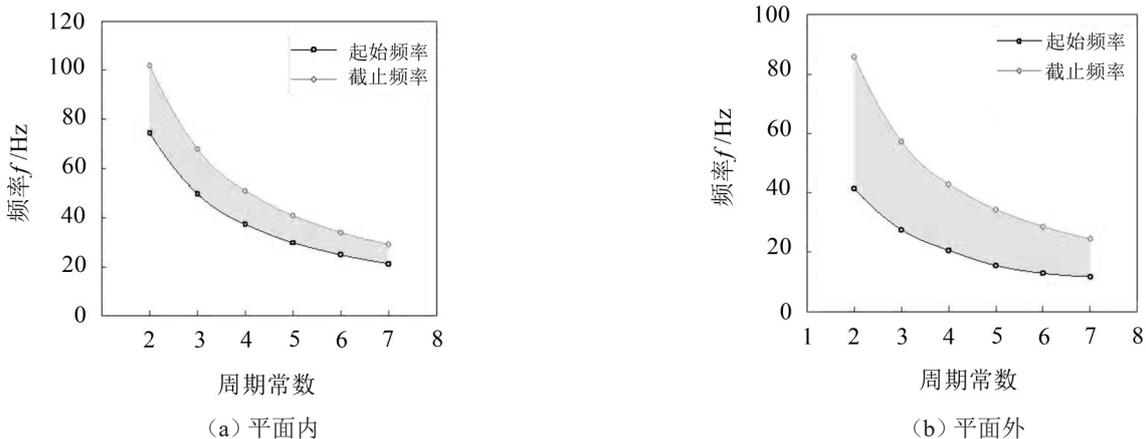


图2 周期常数对蜂窝截面隔振桩首阶完全带隙的影响

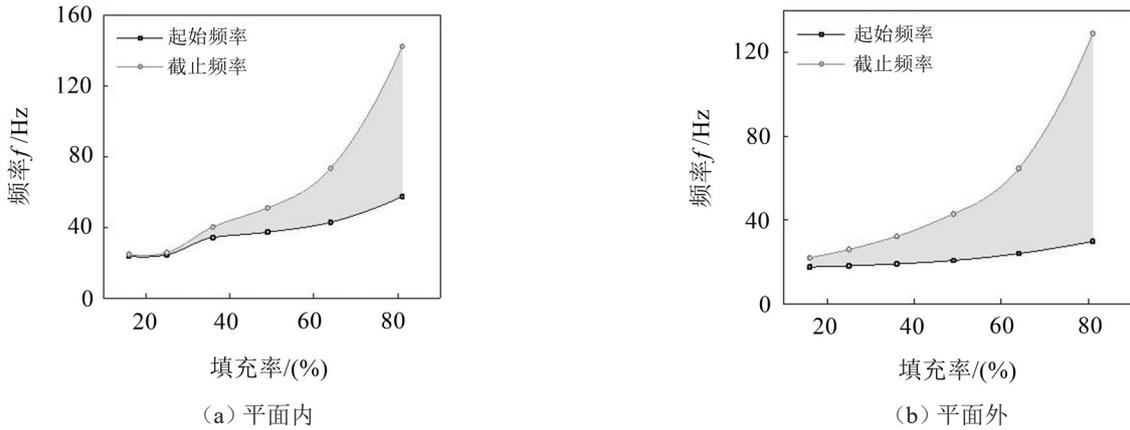


图3 填充率对蜂窝截面隔振桩首阶完全带隙的影响

率增加而变大的速度较缓慢,截止频率和带宽在填充率达到50%以上时,随填充率增加速度变快;同样平面外带隙宽度较平面内更大。从这里可以看出,通过增大蜂窝桩的截面尺寸可有效增加其填充率,对获得低频且具有较宽的首阶完全带隙具有良好的效果。

### 3 正交截面隔振桩构型影响因素研究

对正交截面隔振桩进行研究,排桩截面形式是正交十字型,以正方晶格排列形式为例,如图4(a)所示,简化的基本单元和正方晶格第一不可约 Brillouin 区分别见图4(b)和图4(c),其中A为散射体(正

交截面桩),B为基体(土体),材料类型和参数同蜂窝截面隔振桩,图4(c)中字母X、M、Γ为第一不可约 Brillouin 区顶点,余同。由图4(b)不难看出,正交截面隔振桩具有m、n两个控制尺寸,几何参数更加丰富。本节计算正交截面隔振桩所采用的几何参数参见表2。

根据上述几何参数和材料参数,对以正方晶格排列的正交截面隔振桩结构进行频散关系计算,并画出频散曲线获得其带隙分布情况。研究其几何构型,包括周期常数、填充率和控制参数m、n,对其平面内和平面外首阶完全带隙的起、止频率和带宽的影响规律。其中填充率η可表示为η=基本单元中散

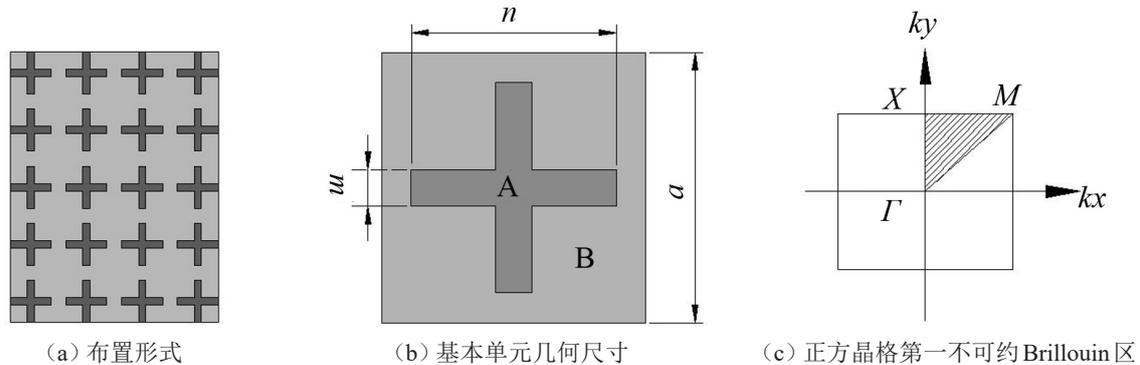


图4 正交截面隔振桩平面构型示意图

表2 正交截面隔振桩构型影响因素计算工况

工况	a/m	m/m	n/m	填充率/(%)	工况	a/m	m/m	n/m	填充率/(%)
1	4	1.2	2.6	42	11	4	2.4	3.6	72
2	4	1.2	3.8	78	12	4	2	3.6	80
3	4	1.2	3	54	13	4	1.6	3.6	80
4	4	1.2	2.4	36	14	4	0.8	3.6	56
5	4	1.2	2.8	48	15	3	2.1	2.7	56
6	4	1.2	3.2	60	16	2	1.4	1.8	56
7	4	1.2	3.6	72	17	5	3.5	4.5	56
8	4	1.2	3.4	66	18	6	4.2	5.4	56
9	4	3.2	3.6	32	19	7	4.9	6.3	56
10	4	2.8	3.6	56					

射体面积/基本单元面积,在本例中, $\eta=(2mn-m^2)/a^2$ 。

图5给出了平面内和平面外首阶完全带隙的起、止频率以及对应的带宽随周期常数变化的规律。可以看出,无论是平面内还是平面外,在填充率不变的情况下,首阶完全带隙的起、止频率和带宽都随着周期常数的变大而降低,且平面外的带宽比平面内带宽更大,这与蜂窝截面隔振桩规律相一致。

图6给出了平面内和平面外首阶完全带隙的起、止频率以及对应的带宽随填充率变化的规律。可以看出无论是平面内还是平面外,在周期常数不变的情况下,首阶完全带隙的起、止频率和带宽随着填充率的变化波动十分大。在低填充率和高填充率两个极端值附近出现了较宽的带隙分布,且平面外带隙在这两种填充率附近分布频段也较低,平面内首阶完全带隙不具备明显规律,从这里可以看出,由填充率作为变量来研究正交截面隔振桩带隙是不合理的,因此,要进一步研究其首阶完全带隙随着几何控制参数 $m$ 、 $n$ 的变化规律。

图7给出了平面内和平面外首阶完全带隙的起、止频率以及对应的带宽随控制参数 $m$ 变化的规律。当周期常数一定时,平面内,随着 $m/a$ 增大(由于 $a$ 不变,即 $m$ 增大),起始频率变化不大,截止频率

和带宽先增大后减小,当 $m/a$ 达到0.8附近时截止频率和带宽最大;平面外,随着 $m/a$ 增大,起始频率、截止频率先减小后增大,带宽先增大后减小,起、止频率在 $m/a=0.8$ 附近达到最小值,带宽在此处达到最大值。

图8给出了平面内和平面外首阶完全带隙的起、止频率以及对应的带宽随控制参数 $n$ 变化的规律。当周期常数一定时,平面内,随着 $n/a$ 增大(由于 $a$ 不变,即 $n$ 增大),起、止频率和带宽都增大,且当 $n/a$ 超过0.85时增速变大;平面外,随着 $n/a$ 增大,起始频率、截止频率减小,带宽增大,但是变化幅度均不如平面内大。

上述分析再次印证了当周期常数和晶格类型确定时,填充率受到两个控制参数 $m$ 、 $n$ 共同影响,因此,仅仅从填充率来探寻正交截面隔振桩的首阶完全带隙分布规律是不合理的。

#### 4 X截面隔振桩构型影响因素研究

本节对X截面隔振桩进行研究,X截面隔振桩排布形式如图9(a)所示,晶格类型选取六角晶格,图9(b)、图9(c)为简化的基本单元和六角晶格第一不可约Brillouin区,其中A为散射体(排桩),B为基体(土

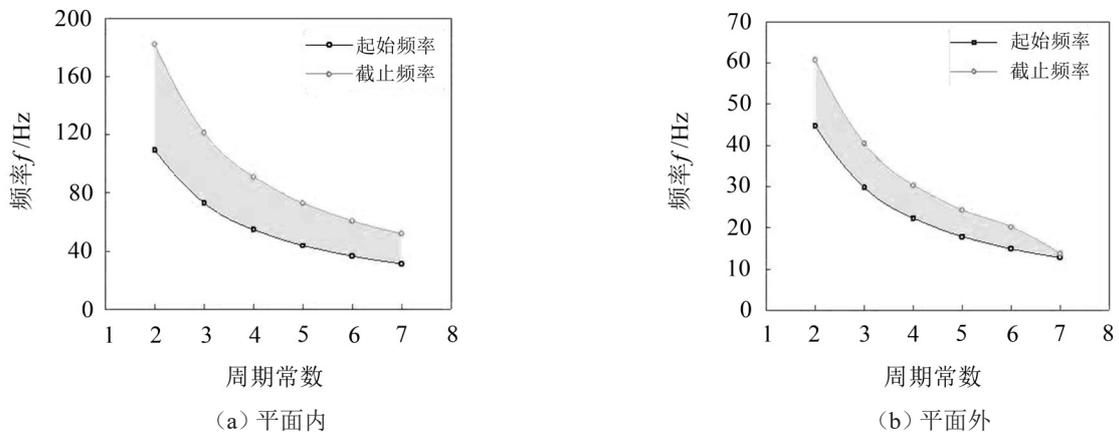


图5 周期常数对正交截面隔振桩首阶完全带隙的影响

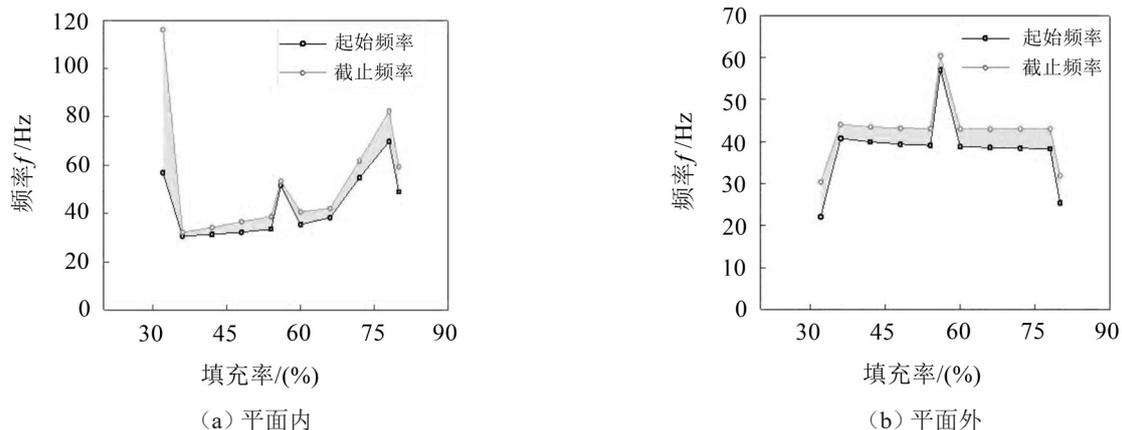


图6 填充率对正交截面隔振桩首阶完全带隙的影响

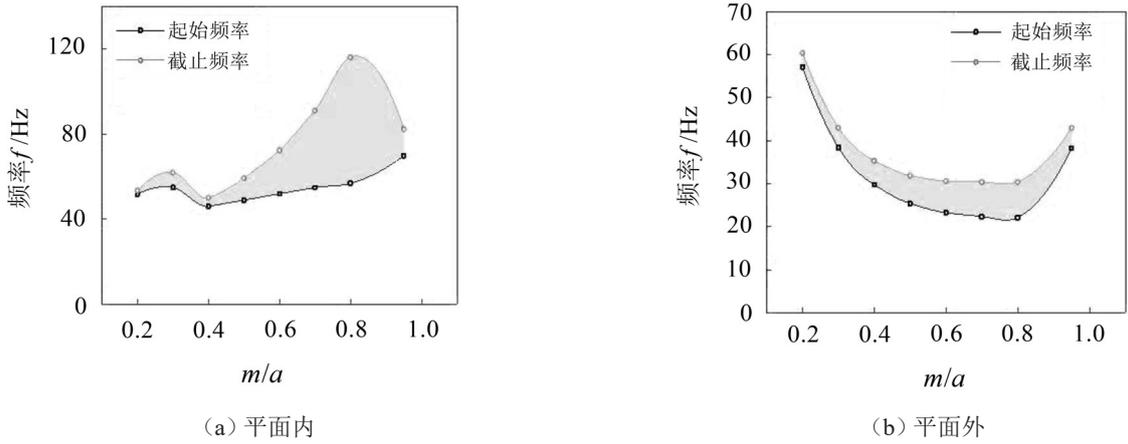


图7 参数  $m$  对正交截面隔振桩首阶完全带隙的影响

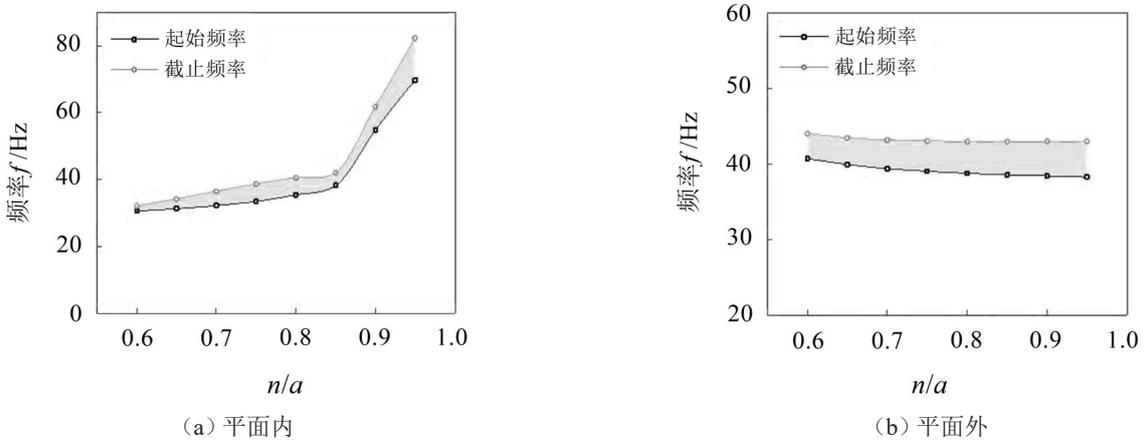


图8 参数  $n$  对正交截面隔振桩首阶完全带隙的影响

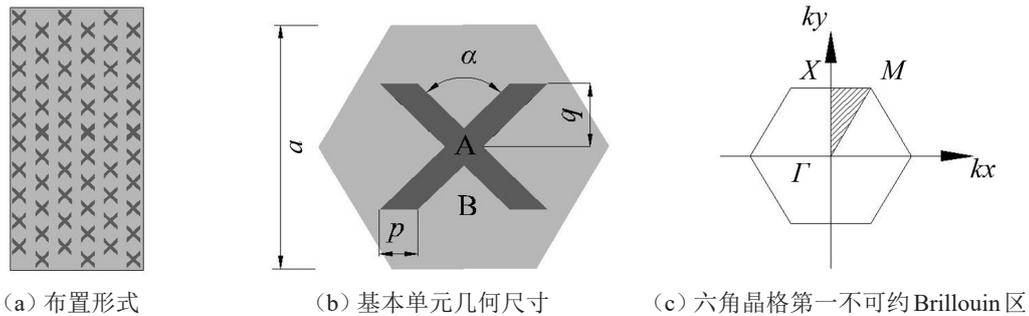


图9 X截面隔振桩平面构型示意图

体)。从图9(b)中不难看出,相比于正交截面隔振桩,X截面隔振桩又增加了一个几何参数,夹角 $\alpha$ ,因此,具有更加复杂的调节规律。本节计算所采用的几何参数参见表3,材料参数同蜂窝截面隔振桩。

根据上述几何参数和材料参数对以六角晶格排列的X截面隔振桩结构进行频散关系计算并画出频散曲线获得其带隙分布情况,来研究其几何构型,包括周期常数、填充率和控制参数 $p$ 、 $q$ 、 $\alpha$ ,对其平面内和平面外首阶完全带隙的起、止频率和带宽的影响效果进行分析,具体见图10。在本例中,填充率 $\eta$ 可由式(6)计算得到。

$$\eta = [4pq - p^2 \cot(\alpha/2)] / (a^2 \sin 60^\circ) \quad (6)$$

图10给出了平面内和平面外首阶完全带隙的起、止频率以及对应的带宽随周期常数变化的规律。由图可知,无论是平面内还是平面外,在填充率不变的情况下,首阶完全带隙的起、止频率和带宽都随着周期常数的变大而降低,且平面外的带宽比平面内带宽更大,这与蜂窝截面隔振桩和正交截面隔振桩的规律相一致。

图11给出了平面内和平面外首阶完全带隙的起、止频率以及对应的带宽随填充率变化的规律。平面内,首阶完全带隙整体随着填充率增大而增大,但是在25%~30%之间出现了一个明显的突变,起止频率突然变大、带宽突然变小,这个规律在平面外

表3 X截面隔振桩构型影响因素计算工况

工况	$a/m$	$p/m$	$q/m$	$\alpha/(\circ)$	填充率/(%)	工况	$a/m$	$p/m$	$q/m$	$\alpha/(\circ)$	填充率/(%)
1	4	0.8	1.2	90	27.71	12	4	0.8	1.4	60	32.33
2	4	0.8	1	90	23.09	13	4	0.7	1.4	60	28.29
3	4	0.8	0.8	90	18.47	14	2	0.65	0.7	60	52.53
4	4	0.8	0.9	90	20.78	15	3	0.975	1.05	60	52.53
5	4	0.8	1.1	90	25.40	16	5	1.625	1.75	60	52.53
6	4	0.8	0.7	90	16.16	17	6	1.95	2.1	60	52.53
7	4	1.3	1.4	60	52.53	18	7	2.275	2.45	60	52.53
8	4	1.2	1.4	60	48.49	19	4	0.6	0.8	45	13.85
9	4	1.1	1.4	60	44.45	20	4	0.6	0.8	60	13.85
10	4	1	1.4	60	40.41	21	4	0.6	0.8	90	13.85
11	4	0.9	1.4	60	36.37	22	4	0.6	0.8	75	13.85

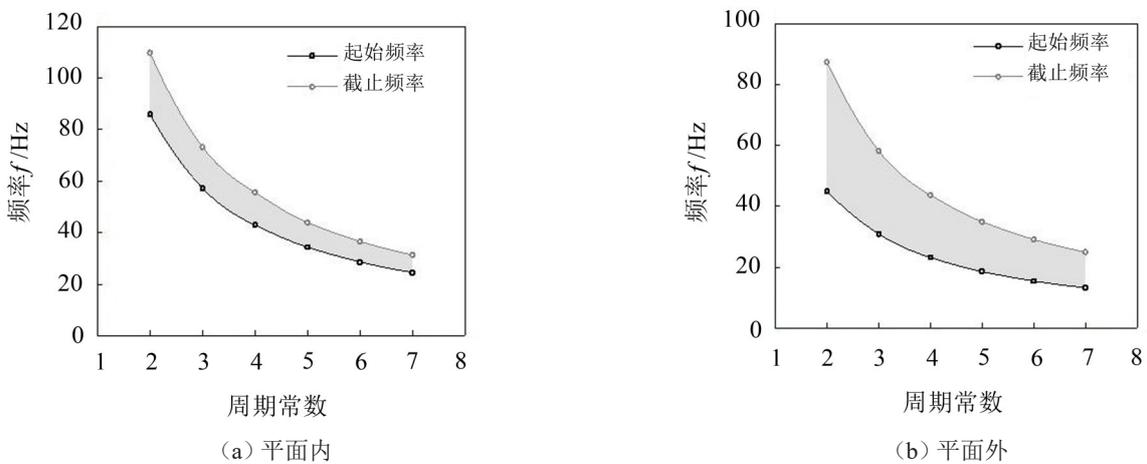


图10 周期常数对X截面隔振桩首阶完全带隙的影响

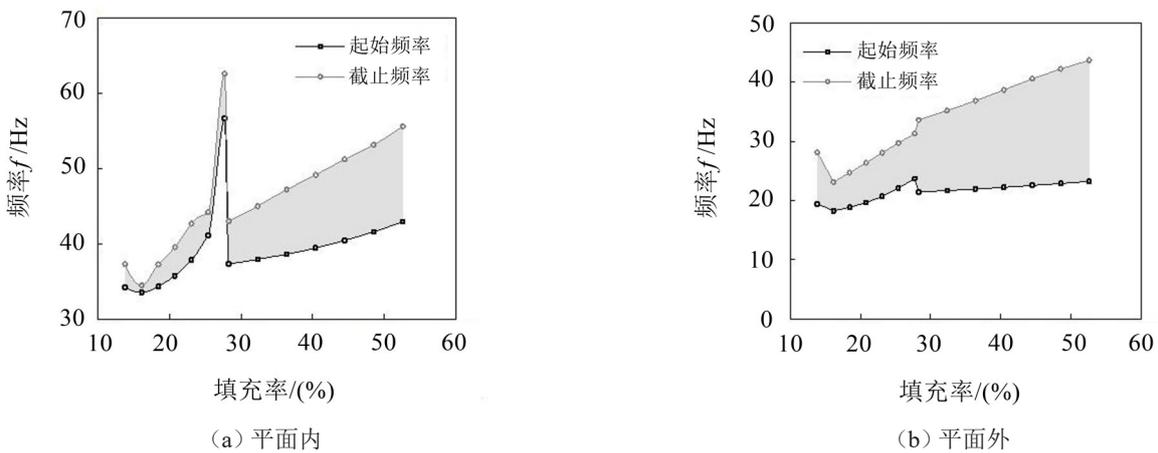


图11 填充率对X截面隔振桩首阶完全带隙的影响

首阶完全带隙变化规律也有所体现,这主要是因为周期常数一定时,填充率大小同时受到控制尺寸 $p$ 、 $q$ 、 $\alpha$ 三个参数的影响,且起、止频率对于三个参数变化的敏感性差异较大,因此,单独讨论填充率对带隙分布的影响是不合理的,下面将分别讨论带隙分布随参数 $p$ 、 $q$ 、 $\alpha$ 单独变化规律。

图12给出了平面内和平面外首阶完全带隙的起、止频率以及对应的带宽随控制参数 $p$ 变化的规

律。当周期常数一定时,平面内,随着 $p/a$ 增大(由于 $a$ 不变,即 $p$ 增大),起始频率、截止频率和带宽都增大,变化幅度不大;平面外,随着 $p/a$ 增大,起始频率略增加,变化幅度不大,截止频率和带宽增幅较大。

图13给出了平面内和平面外首阶完全带隙的起、止频率以及对应的带宽随控制参数 $q$ 变化的规律。当周期常数一定时,平面内,随着 $q/a$ 增大(由于 $a$ 不变,即 $q$ 增大),起始频率、截止频率都增大,且当

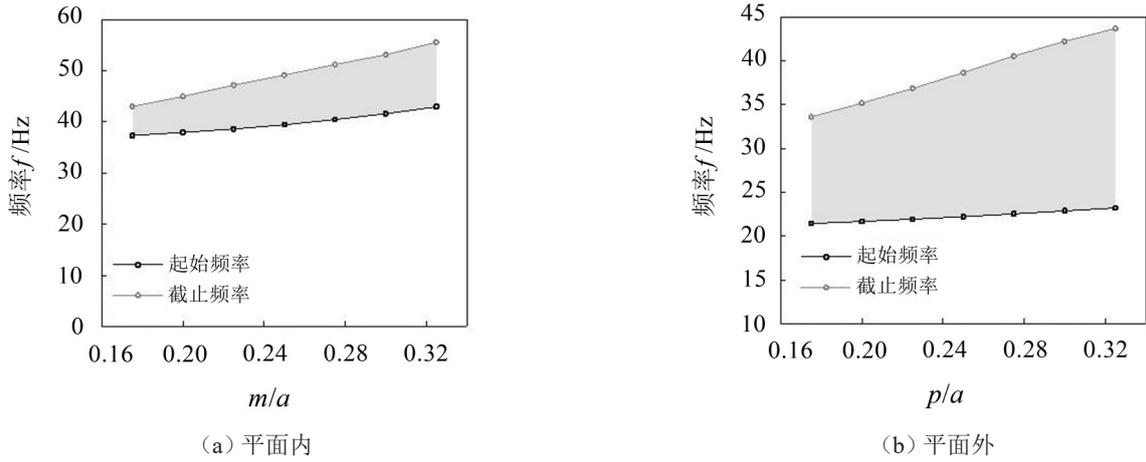


图 12 参数  $p$  对  $X$  截面隔振桩首阶完全带隙的影响

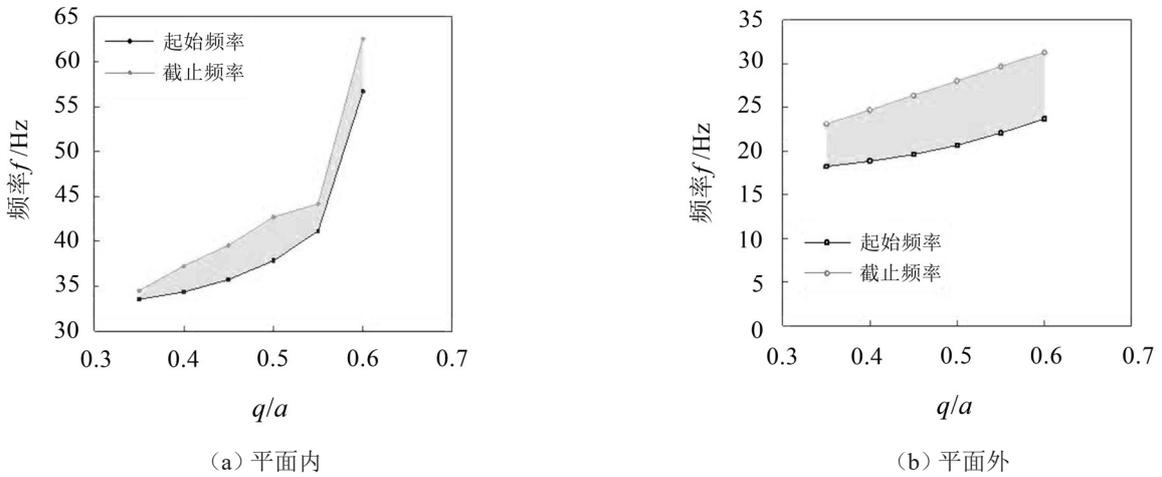


图 13 参数  $q$  对  $X$  截面隔振桩首阶完全带隙的影响

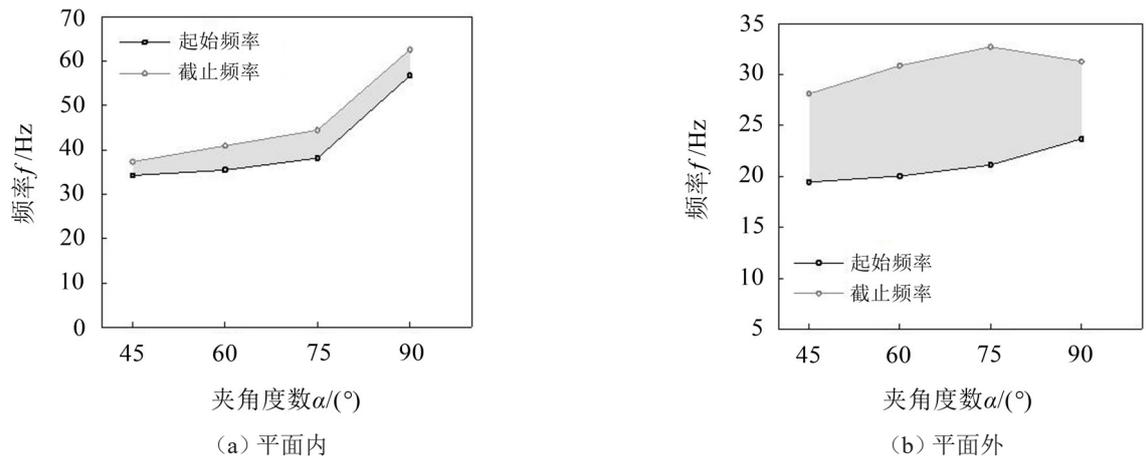


图 14 夹角  $\alpha$  对  $X$  截面隔振桩首阶完全带隙的影响

$q/a$  超过 0.55 时增速变大,带宽变化幅度不大;平面外,随着  $q/a$  增大,起始频率、截止频率和带宽都增大,但是变化幅度不大。

图 14 给出了平面内和平面外首阶完全带隙的起、止频率以及对应的带宽随控制参数夹角  $\alpha$  变化的规律。平面内,当夹角超过  $75^\circ$  时带隙起止频率变大,但对带宽影响不大;平面外,夹角达到  $75^\circ$  以

上时,带宽急剧下降。可见夹角对平面内带隙起、止频率影响较大,对平面外带宽影响较大。

### 5 结语

本文提出了三种全新构型的排桩形式,包括蜂窝截面隔振桩、正交截面隔振桩和  $X$  截面隔振桩,并根据带隙分析理论对三种排桩进行了频散计算,掌

握了其带隙分布特征,揭示了几何构型因素对带隙分布及变化的影响规律。研究发现:

(1) 随着周期常数的增加,三种排桩的平面内和平面外首阶带隙的起始频率、截止频率、带宽都呈下降趋势,且平面外的带宽比平面内带宽更大;

(2) 随着填充率的增加,蜂窝截面隔振桩平面内、外首阶完全带隙的截止频率和带宽都呈上升趋势,且在填充率达到50%以上时上升变快,起始频率增幅较平缓;

(3) 填充率变化对正交截面隔振桩和X截面隔振桩平面内、外首阶带隙分布影响规律不明显;

(4) 正交截面隔振桩和X截面隔振桩的几何控制尺寸更复杂、带隙调节能力更丰富。

#### 参考文献:

- [1] 高广运,杨先健,王贻荪,等.排桩隔振的理论与应用[J].建筑结构学报,1997,18(4):58-69.
- [2] 温熙森,温激鸿,郁殿龙,等.声子晶体[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [3] 黄建坤.周期性排桩和波屏障在土木工程减振中的应用研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- [4] LIU XINNAN, SHI ZHIFEI, MO Y L. Comparison of 2D and 3D models for numerical simulation of vibration reduction by periodic pile barriers[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 79: 104-107.
- [5] PU XINGBO, SHI ZHIFEI. A novel method for identifying surface waves in periodic structures[J]. Soil Dynam-

ics and Earthquake Engineering, 2017, 98: 67-71.

- [6] 甘莹莹.考虑复阻尼周期排桩减振性能分析[D].北京:北京交通大学,2018.
- [7] MENG QING JUAN, S ZHI FEI. Vibration isolation of plane waves by periodic pipe pile barriers in saturated soil [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2019, 32(1): 04018114.
- [8] MA MENG, JIANG BOLONG, GAO JIAN, et al. Experimental study on attenuation zone of soil-periodic piles system[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126: 105738.
- [9] 姜博龙,刘维宁,马蒙,等.基于Bloch-Floquet理论的周期性排桩在轨道交通隔振中的应用研究[J].铁道学报,2018,40(3):146-152.
- [10] 姜博龙,刘维宁,马蒙,等.基于带隙性能评价函数的特征频段隔振周期排桩选型[J].中国铁道科学,2018,39(6):29-36.
- [11] KATTIS, S E, POIYZOS D, BESKOS D E. Modeling of pile wave barriers by effective trenches and their screening effectiveness[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, 18(1): 1-10.
- [12] 冯桂帅.高速铁路非连续隔振屏障隔振效果隔振机理研究[D].张家口:河北建筑工程学院,2019.
- [13] TAKEMIYA H, CHEN F, SHIMABUKU J. Application of WIB for better seismic performance of bridge foundation [J]. JSCE Journal of Earthquake Engineering, 2003, 27:193.
- [14] 刘维宁,姜博龙,马蒙,等.周期性排桩设计频段隔振原理性试验研究[J].岩土力学,2019,40(11):4138-4148.

(上接第112页)

- [2] SUNGHOON CHOI. 韩国高速列车在隧道内的车内噪声[J]. 国外铁道车辆,2016,53(5):15-18.
- [3] 孙强,张捷,肖新标,等.低温环境下高速列车车内噪声问题及控制方案[J]. 振动、测试与诊断,2018,38(6): 1217-1222+1296.
- [4] 柳明,张捷,高阳,等.隧道内高速列车车内噪声特性及声源识别试验分析[J/OL]. 机械工程学报:1-10[2020-02-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20190719.0916.004.html>.
- [5] 毛杰,郑旭,郝志勇,等.基于SAEF方法计算高铁车内全频噪声[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2015,48(11):960-968.
- [6] 罗乐.高速列车多物理场激励源与车内全频噪声的预测研究[D].杭州:浙江大学,2017.
- [7] 代文强,郑旭,郝志勇,等.采用能量有限元分析的高速列车车内噪声预测[J]. 浙江大学学报(工学版),2019,53(12):2396-2403.
- [8] 张伟,陈光雄,肖新标,等.高速列车车内噪声声品质客观评价分析[J]. 铁道学报,2011,33(2):13-19.

- [9] Sunghoon Choi, 阎锋. 韩国高速列车车内噪声声学舒适性评价指标[J]. 国外铁道车辆,2016,53(4):24-27.
- [10] LE LUO, XU ZHENG, ZHI-YONG HAO, et al. 基于自适应Moore响度算法研究高速列车车内声品质(英文)[J]. Journal of Zhejiang University-Science A(Applied Physics & Engineering), 2017, 18(9): 690-703.
- [11] 郭建强,葛剑敏,张华丽.高速列车受电弓区车内噪声研究与控制[J]. 振动、测试与诊断,2017,37(4):662-666+836.
- [12] 李晔,王瑞乾,徐秋婷,等.基于心理声学的高速列车车内噪声预测及选材方法[J]. 机械工程学报,2018,54(12):78-85.
- [13] ZHANG G, VLAHOPOULOS N. Validation of an EFEA formulation for computing the vibrational response of complex structures[J/OL]. SAE Technical Papers, 2007, 2007-01-2324. <https://doi.org/10.4271/2007-01-2324>.
- [14] 毛杰.多物理场耦合激励下的高速列车车内全频噪声预测与声品质优化[D].杭州:浙江大学,2015.