

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.04.008

周期性下网架结构振动特性分析

苟海朝, 路国运

(太原理工大学土木工程学院, 太原 030024)

摘要: 针对工程结构减隔振需求, 基于网架结构的周期特性对其进行减隔振性能分析。通过改变节点质量、杆件截面参数, 分析其对网架结构减隔振性能的影响; 再对实际工程网架-悬挂吊车结构进行分析, 运用频响函数综合法建立整个系统的振动传递模型, 在隔振系统中评价该结构的隔振性能。结果表明, 网架结构具有一定抑制振动效果, 可通过调节杆件截面刚度来影响结构的带隙特征以实现预期减隔振效果; 增加网架节点质量, 可以很好地改变结构振动特性, 尤其是对高频阶段有较好的抑制作用, 但减隔效果与截面刚度呈负相关; 网架-悬挂吊车结构双层隔振系统具有良好隔振效果。合理运用网架结构的周期特性, 对结构进行优化布置, 可以有针对性地增强网架结构的减隔振性能。

关键词: 周期结构; 网架结构; 频响函数综合; 有限元分析; 振动传递

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)04-078-11

Analysis of vibration characteristics of space truss structure under periodic characteristics

GOU Haichao, LU Guoyun

(School of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China)

Abstract: To meet needs of the vibration reduction of the engineering structure, the vibration reduction and isolation performance of the space truss structure are analyzed based on its periodic characteristics. By changing the mass of joints and the bar section parameters, their influence on the vibration reduction performance of the space truss structure is investigated. Then the actual engineering space truss - suspension crane structure is examined. First, the vibration transfer model of the whole system is established with the frequency response function synthesis method. Next, the vibration isolation performance of the structure is evaluated in the vibration isolation system. The results show that the space truss structure has a certain vibration suppression effect, and the band gap characteristics of the structure can be changed by adjusting the section stiffness of the member to achieve the expected vibration isolation effect. Increasing the mass of the space truss structure joints can change the vibration characteristics of the structure well, especially showing a good inhibitory effect at the high-frequency stage. However, the damping effect is negatively correlated with the cross-sectional stiffness. In addition, the double-layer vibration isolation system of the space truss-suspension crane structure has a good vibration isolation

收稿日期: 2022-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12172244); 山西省自然科学基金(201901D111089)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(12172244), Natural Science Foundation of Shanxi Province(201901D111089).

作者简介: 苟海朝(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事结构隔振研究, (E-mail)1034073391@qq.com。

通信作者: 路国运(1973—), 男, 教授, (E-mail)luguoyun@tyut.edu.cn。

effect. Therefore, the layout of the structure can be optimized in the design stage by rationally making use of the periodic characteristics of the space truss structure, so as to enhance its vibration damping performance.

Keywords: periodic structure; space truss structure; synthesis of frequency response functions; finite element analysis; vibration transmission

振动是工程中一种常见的现象^[1],部分频率的振动会影响结构的正常运行使人体产生不适感,严重者会造成大量经济损失和人员伤亡^[2]。目前,结构减振的研究越来越受到重视^[3-4]。由应力波理论可知,振动在结构中导致的应力、应变主要以波的方式传播^[5]并与周围介质发生耦合作用,对应力波的传播机理及其特性的研究^[6]是工程减振的核心问题之一。周期结构是物理晶体结构的延伸,其任意单胞的位置均可用正格矢公式 $R_n = n_1 a_1 + n_2 a_2 + n_3 a_3$ 来表示,具有波形转换^[7]和带隙^[8]等特点,其对应力波的传播具有选择性透过的作用,通过计算布里渊区 $\left[-\frac{\pi}{2a}, \frac{\pi}{2a}\right]$ 以及频率 ω 和波矢 κ 之间的色散曲线绘制振动频谱可知,应力波传播时部分频段内不存在对应的振动传播模式,该频率范围内振动不能稳定传播,将此段频率范围称为频率禁带也称为带隙,其余范围为频率通带,当振动产生的应力波处于禁带范围内时,其传播受阻,周期结构起到减振作用。该特性吸引了众多学者研究,Zuo等^[9]通过合理有效设计周期结构参数,可在优化结构隔振效果中起到一定作用。Muhamma等^[10]在二维周期结构中提出了正弦形连接单元,发现此类几何参数对周期结构的通断带特性有一定影响。在实际工程中,可将周期结构引入结构中增强隔振性能,朱冬梅^[11]基于周期结构特性设计了一种由弹性片和支撑柱组成的新型隔振器,具有良好的隔振效果;宋玉宝^[12]将周期性设计带入直升机舱内有效抑制了结构振动与噪声,程世祥^[13]将周期桁架结构引入到浮阀隔振系统中提出周期桁架浮筏结构,通过增强隔振层的周期特性提升了该系统的隔振性能。

文中对网架结构的三维点阵周期性结构进行了动力学特性研究,利用带隙特性控制应力波^[14]在结构中的传递。以工程中常见的正交正放四棱锥网架结构为研究对象,区别于传统的隔绝地震,对不同频率振动响应的危害进行分段分析,得到不同频率下产生的振动响应。采用有限元方法建立网架模型,研究了网架结构的隔振特性随杆件截面刚度、节点质量参数的变化而变化的规律。对实际工程网架-悬挂吊车结构进行分析,运用频响函数综合法建立整个系统的振动传递模型,在隔振系统中通过振动传递特性评价该结构的隔振性能,以期对网架结构以及网架-悬挂吊车结构的隔振设计提供参考数据。同时,基于网架结构的周期特性(带隙特性)对网架进行隔振设计,为该类结构的健康监测与振动控制提供了理论依据。

1 网架结构模型

如图1所示,网架模型选自文献[15]中的正方四棱锥网架模型,网架结构由空心钢管和节点构成,钢管外径 $R=0.1$ m,内径 $r=0.05$ m,节点质量为 1 kg,钢材弹性模量为 210 GPa,密度为 7.85 g/cm³。通过 abaqus 有限元软件中梁单元建立相对应的有限元模型,网架节点质量用等效节点集中力表示,网架结构四周角点采用铰接约束。该结构的俯视图及其周期性如图2所示,网架总体尺寸为 45 m \times 45 m \times 3 m; x , y 方向各有 15 层周期性,建立两向正交正放四棱锥网架模型,该模型在 2 个方向的排布具有周期性,在应力波传播过程中起到一定的阻碍效果;其中,force 点对应激励点,取在网架上表面中间位置,于此处施加荷载,能最大程度增长振动传递沿网架结构横向传递的距离,为分析振动传递沿结构周期性的效果,在网架中选取沿激励点水平方向(H系列点),竖直方向(S系列点)以及斜方向(X系列点)排布的点提取位移进行分析,具体选点位置及点标号,如图2(a)所示;网架在激励点受竖向荷载后,应力波首先沿网架结构横向传播,最后传递到后续响应结构,如图3所示。

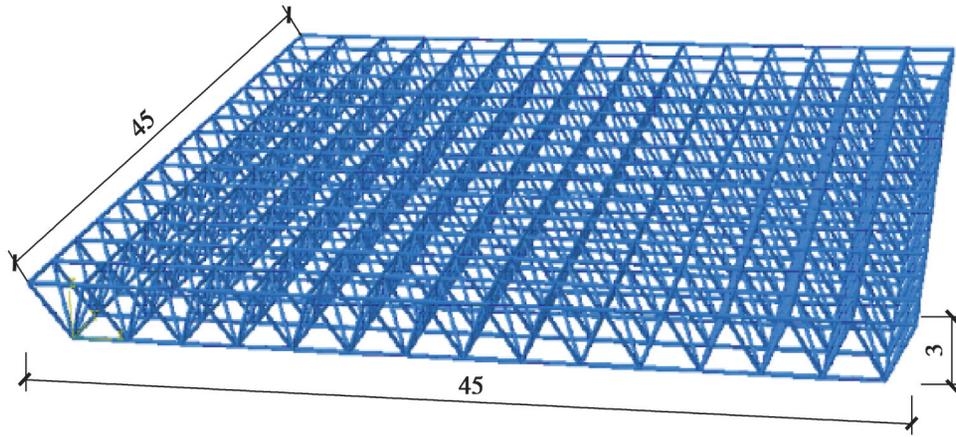


图1 网架结构示意图(单位:m)

Fig.1 Schematic diagram of the space truss structure

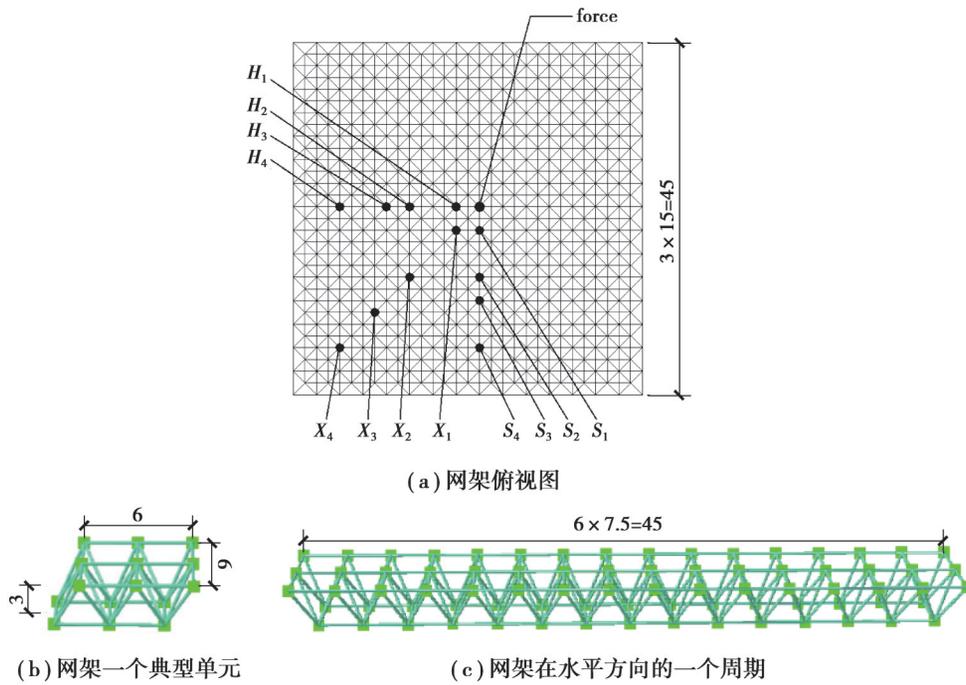


图2 网架结构的周期性(单位:m)

Fig.2 Periodicity of the space truss structure

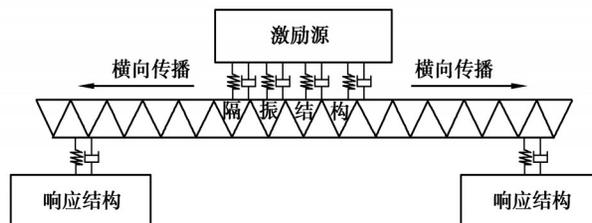


图3 隔振系统综合示意图

Fig.3 Comprehensive schematic diagram of vibration isolation system

2 基于频响函数的子结构综合法

依据网架结构本身的动力效应,文中将真实结构体系进行简化,建立如图3所示的动力学模型,该隔振系统模型由激励源、隔振结构(由网架结构组成)、响应结构构成,将与隔振结构连接并向其施加激励作用的外部结构及其相关附属部件,简化为刚体结构,连接关系转换为阻尼器连接,受到隔振结构传来的荷载的响应结构也采用该种简化方法,基于频响函数综合的建模方法,给出其组合系统的振动方程。

依据上述方法分别计算出各个子结构的频响函数,再进行结合。它的优点在于分别计算子结构频响函数后再进行总和分析,避免一次性计算量过大导致计算不精确。文中基于频响函数综合方法对网架隔振系统进行建模计算时,需要进行2次子结构结合隔振结构和响应结构,计算出响应结构与隔振结构之间的频响函数,结果为

$$\begin{Bmatrix} X_I^A \\ X_C^A \\ X_C^B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} H_{II}^A & H_{II}^A & H_{IC}^{AB} \\ H_{CI}^{AA} & H_{CC}^{AA} & H_{CC}^A \\ H_{CI}^{BA} & H_{CC}^{BA} & H_{CC}^B \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} F_I^A \\ F_C^A \\ F_C^B \end{Bmatrix} \quad (1)$$

将响应结构-隔振结构综合体和激励源相结合,由文献[16]可知,该结构整体的频响函数综合结果为

$$\begin{Bmatrix} X_I^D \\ X_C^A \\ X_C^B \\ X_C^D \\ X_I^A \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} H_{II}^D & H_{IC}^{DA} & H_{IC}^{DB} & H_{IC}^{DD} & H_{II}^{DA} \\ H_{CI}^{AD} & H_{CC}^{AA} & H_{CC}^{AB} & H_{CC}^{AD} & H_{CI}^{AA} \\ H_{CI}^{BD} & H_{CC}^{BA} & H_{CC}^{BB} & H_{CC}^{BD} & H_{CI}^{BA} \\ H_{CI}^{DD} & H_{CC}^{DA} & H_{CC}^{DB} & H_{CC}^{DD} & H_{CI}^{DA} \\ H_{II}^{AD} & H_{IC}^{AA} & H_{IC}^{AB} & H_{IC}^{AD} & H_{II}^{AA} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} F_I^D \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

式中:上标A表示网架结构;D表示激励源;B表示响应结构;下标I表示隔振结构与阻尼器未连接点的频响函数;C表示隔振结构与阻尼器连接点的频响函数;左边的X代表着位移量;右边的F代表力向量;H代表着点与点之间的频响函数,例如, F_I^D 为作用在激励源的未连接点施加的力; H_{CI}^{DA} 为激励源D的连接点与隔振结构A上的未与阻尼器连接的点之间的频响函数; X_I^D 代表激励源未连接点的位移。

3 数值计算

3.1 单点激励下网架结构振动传递特性

首先,对原始参数下即1 kg节点模型1(具体参数如表1所示)的网架模型进行谐响应分析,扫频分析范围为0~1 000 Hz,在激励点处施加竖向100 N荷载,计算出激励点处和网架结构中响应点处的位移(点位置见图2)。现行评估减隔振效果的常用方法有:力传递率、插入损失、振级落差和功率流等方法^[17]。同其他方法相比,振级落差的测量更为简单方便,在采用振级落差方法的基础上,对公式进行变体来评价网架的隔振效果。位移振级落差是指隔振系统两端位移比值的对数的20倍,表达式为

$$D_a = 20 \lg (D_i / D_f), \quad (3)$$

式中: D_i 为响应点位移, D_f 为激励点位移;将各响应点位移分开与激励力点位移比较,将式(3)拆开分别计算各点振级,公式为

$$D = 20 \lg D_x, \quad (4)$$

式中, D_x 为选取施力点激励点和响应点处的位移,通过比较激励点和响应点振级以及振级落差来分析网架结构的振动特性,有限元分析结果如图4所示。

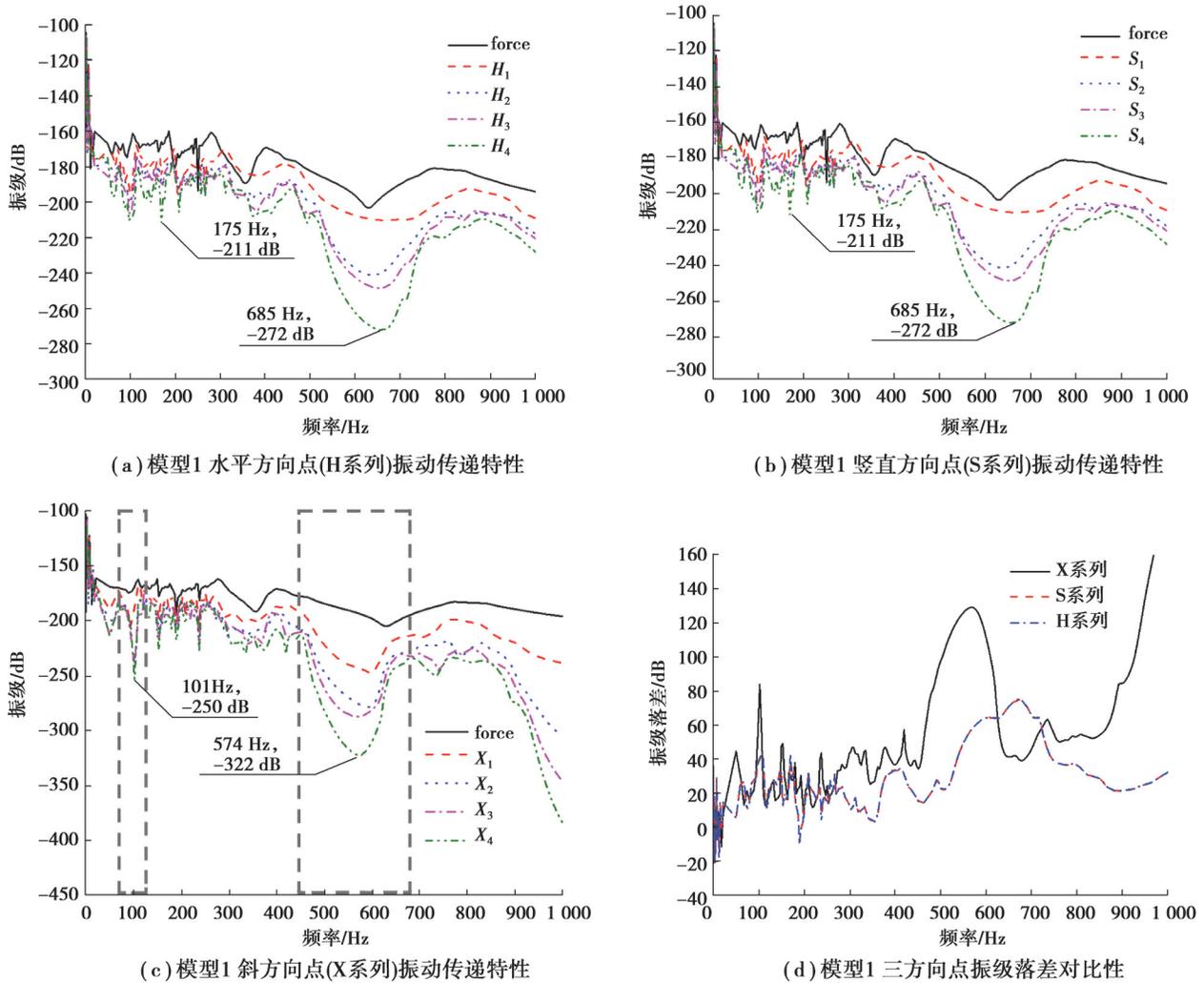


图4 模型1振动传递特性

Fig.4 Vibration transfer characteristics of the model 1

对比图4中 force点和H、S、X系列点振级曲线可知,分析频段内,激励荷载产生振级经过模型1横向传播(H系列点),竖向传播(S系列点),以及斜方向传递(X系列点)后有明显衰减,部分频段出现振级突变较大的带隙现象,表示网架具有周期结构特有的带隙现象和一定频段内的隔振性能,且在500 Hz后开始有较大幅度的衰减。由于X系列点相较于S、H系列点振动传递距离最远,振级落差也更大,减振效果更明显,在后续模型响应点选中统一采用X系列点。由X系列点计算结果可知,网架结构的减振效果主要体现在高频段,例如, X_4 点在66~112 Hz以及450~672 Hz频段内有明显的带隙现象的发生,但是在低频阶段的振级落差数值低于高频阶段。这是因为应力波在低频传动时,弹性波波长较长,低频变形振动更具有整体性,周期结构的带隙作用以及波形转换作用不明显;而在高频阶段,波长较短,振动更加偏向于局部振动,应力波在周期结构的节点汇聚并发生透射和反射效应,引起周期布置的网架形成局域共振等效效应,从而抑制振动的传播。另一方面,应力波在周期结构中的反射透射和散射,加上阻尼作用,可以减少和抑制振动。程世祥等^[13]在周期桁架结构的隔振性能试验中得到的周期桁架的隔振特性与文中模拟结论一致,证明本次有限元模拟结论正确,由此可知,网架结构作为一种周期结构,对外荷载产生的振动效应具有一定频率范围内削弱效果。

3.2 不同结构参数下网架结构振动传递特性

在网架结构设计中,杆件和节点等一系列结构参数的设计尤为重要,即使同周期排列的周期结构但不同结构参数,其隔振特性也会有较大差别。通过改变部分结构参数分析对网架结构隔振特性的影响,结构参数包括杆件截面刚度和节点质量。在有限元建模中,通过改变杆件截面尺寸,来改变截面刚度;增加等效节点

集中力,来修改节点质量参数,具体参数如表 1 所示。

表 1 网架计算参数
Table 1 Calculation parameters of the space truss

模型	截面信息/ m^2/m^4	节点质量/kg
1	$R=0.1$ $r=0.05$ $A=2.36 \times 10^{-2}$ $I=7.35938 \times 10^{-5}$	1/3/5/7/10/13/15
2	$R=0.2$ $r=0.1$ $A=9.42 \times 10^{-2}$ $I=1.1775 \times 10^{-3}$	1/3/5/7/10/13/15
3	$R=0.05$ $r=0.02$ $A=5.02 \times 10^{-3}$ $I=4.2704 \times 10^{-6}$	1/3/5/7/10/13/15

首先,选取模型 2、3 进行谐响应分析,模型 2、3 采用 1 kg 节点来分析杆件截面刚度对网架结构的隔振性能的影响(除讨论节点重量对网架隔振性能影响外,其余所涉及网架模型节点重量均采用 1 kg)。在模型 2、3 的激励点处加 100 N 竖向的载荷进行谐响应分析,计算结果如图 5 所示。其中,a 模型为表 1 模型 2,b 模型为表 1 模型 3。

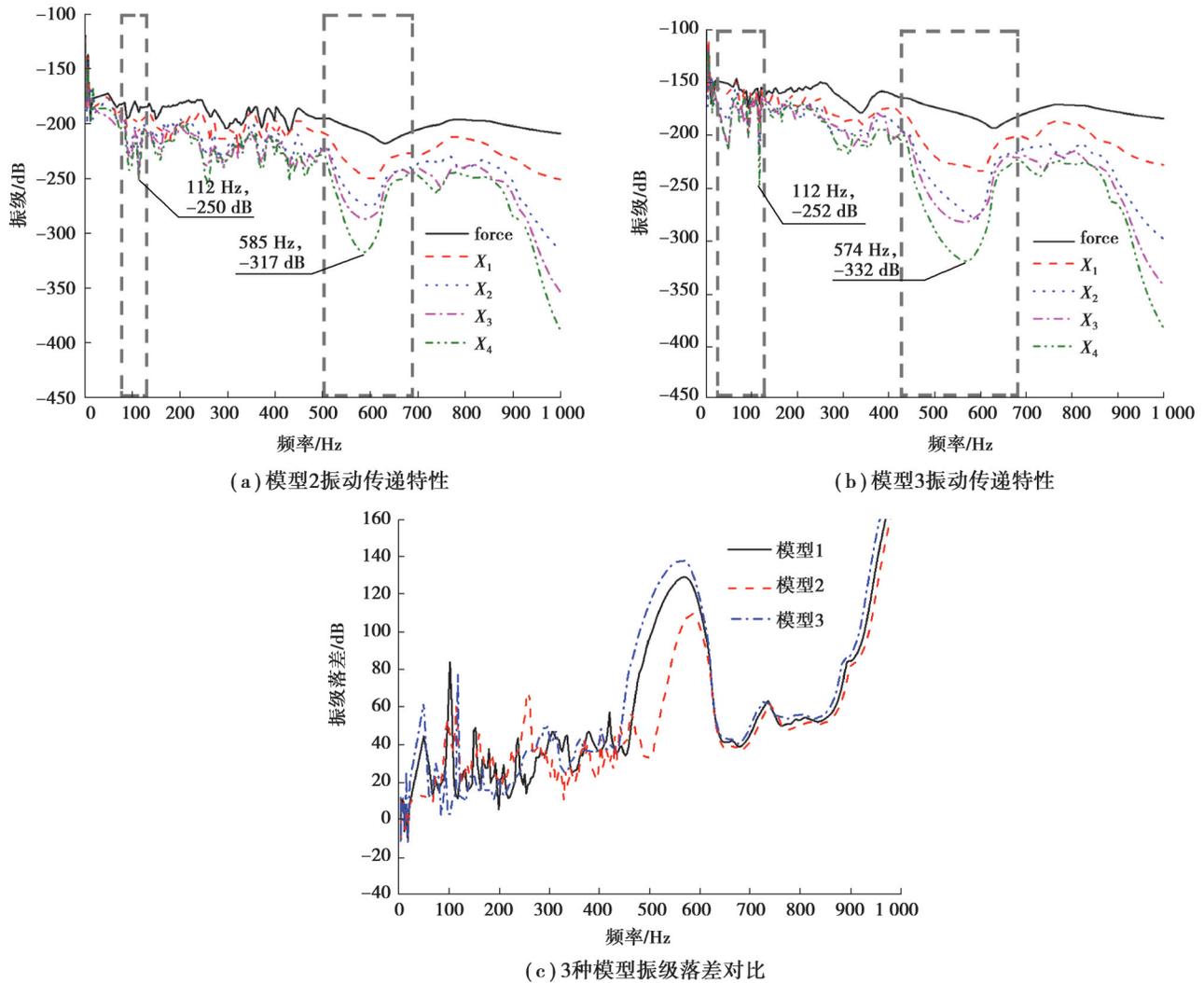


图 5 不同截面网架振动传递特性对比

Fig. 5 Comparison of vibration transmission characteristics of different cross-section space truss

通过对比模型1、2、3计算结果可知:在图4模型1中 X_4 点在低频阶段和低频阶段出现的带宽较宽的2个带隙分别位于66~112 Hz和450~672 Hz范围内;在图5(a)模型2中加强截面刚度后 X_4 点在低频阶段和低频阶段出现的带宽较宽的2个带隙位于82~122 Hz和500~689 Hz范围内;在图5(b)模型3中,减小杆件截面刚度后 X_4 点在低频阶段和低频阶段出现的带宽较宽的2个带隙频率位置位于16~109 Hz和430~656 Hz范围内。由图5(c)可知,在高频以及低频带隙范围内振级落差随着截面刚度减小而增大。因此,增大杆件截面刚度后网架带隙出现的位置向高频移动,带隙宽度越来越窄;减小杆件截面刚度后,网架带隙出现的位置向低频移动,带隙宽度越来越宽,杆件截面刚度与结构波动效应以及带隙效应呈负相关。张峰^[18]的周期结构试验中,关于截面尺寸、刚度对周期结构的隔振性能的影响与本节模拟结论一致,证明本次有限元模拟结论正确。如果能在网架结构设计中合理选择杆件尺寸对应加强或减弱杆件刚度,利用周期结构的通断带特性,网架结构可以有效避开整个结构主激励频率,达到一定抑制振动的效果,仅文中有限元模拟计算分析中效果如此,在实际中运用还需深入研究。

周期结构构件中,网架节点是周期结构各杆件的连接件,单根网架杆件振动通过节点散射到其他连杆上去,应力波在网架节点汇聚并发生透射和反射效应,引起周期布置的网架形成局域共振等效应,从而抑制振动的传播。选取模型1、2、3不同节点质量模型进行谐响应分析,质量参数如表1所示,分析节点质量参数改变对网架结构的隔振性能的影响(整组试验中节点改变质量占网架结构总质量百分比低于2%对整体模态及刚度不会产生过多影响)。在激励点处加100 N竖向的载荷进行谐响应分析,结果如图6所示;选取 X_4 点及其周围杆件(选点位置见图7)进行能量计算,结果如图8所示。

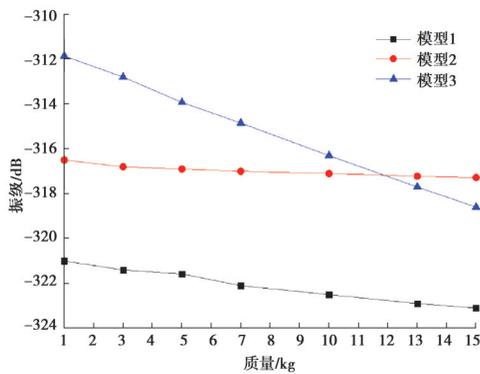


图6 不同节点质量网架振动传递特性对比

Fig. 6 Comparison of vibration transmission characteristics of space truss frames with different node masses

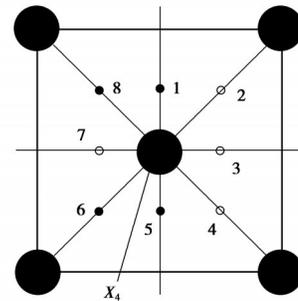


图7 X_4 点及其周围杆件选点

Fig. 7 X_4 point and the rod selection points around it

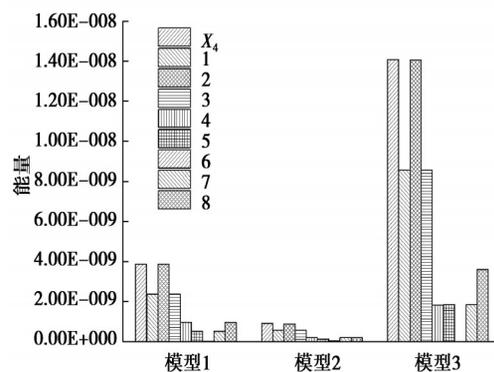


图8 X_4 点及其周围杆件能量对比图

Fig. 8 X_4 point and the rod energy comparison diagram around it

由图6可知,节点质量参数的变化会影响网架结构周期排列隔振特性,随着节点质量增加,网架振动效应减小;对比图6中模型1、2、3振级曲线斜率和图8中3种模型节点与周围杆件能量对比可知,随着截面刚度增加,节点质量增加所带来的振级衰弱程度也有所降低,节点与周围杆件间能量也趋于平衡。这是因为节点作为周期结构的连接构件,在节点质量增加后,网架质量分布不均匀,致使波动效应在网架中起主导作用;但随着截面刚度增加后,网架质量分布不均匀减弱,此种效果也随之逐渐减弱;节点同时可以对纵波、扭转波起到散射作用使2种波相互之间发生交叉变化,传播一定距离后各种波振动能量趋于一致,使得能量分配更均匀,增大网架节点质量可控制网架隔振特性。因此,在网架结构设计中,大质量的节点有利于网架隔振设计,但效果会受截面刚度影响。

3.3 网架-悬挂吊车结构双层隔振系统振动传递特性

在网架结构下方设置悬挂吊车可满足多样化的生产工艺需求^[19],布置方式灵活。在实际工程中由于悬挂吊车荷载的作用,整体结构中的薄弱环节容易发生破坏^[20-21]。近年来,研究人员对该结构受到振动冲击导致破坏问题开展了大量的试验和理论研究,取得了重要成果^[22-23],但研究主要集中在网架疲劳抗力方面,对整体振动隔振性能方面的研究较为缺乏。

为了更好地评价网架结构的隔振特性,以长春某钢结构加工车间为例^[24]分析网架-悬挂吊车结构双层隔振系统在实际应用中的隔振特性。文中以1部吊车为例,振动由吊车传递给轨道再传给网架,但由于轨道与网架下弦杆焊接连接为一体,对振动传递影响很微弱,可忽略,在建模时省略轨道建模,利用abaqus建立振动传递模型,如图9所示。该网架模型为下弦点支撑,柱子作为本系统响应结构尺寸为 $0.6\text{ m}\times 0.6\text{ m}\times 8\text{ m}$,横纵向间距分别为 18 m 和 12 m ,网架与响应结构之间连接关系转换为阻尼器连接,刚度为 $3\times 10^9\text{ N/m}$,柱顶中心坐标对应阻尼器在响应结构坐标如表2所示。在网架中下部设置1跨吊车区间,吊车大车尺寸为 $0.45\text{ m}\times 0.45\text{ m}\times 12\text{ m}$;小车在吊车大车上运行,将其简化为竖向集中力,将吊车大车及小车作为系统中激励源;网架与激励源之间连接关系转换为2个阻尼器,刚度为 $3\times 10^9\text{ N/m}$;分析网架结构的隔振效果,使激励源到响应点距离最远,即当吊车大车运行到吊车大车轨道中部,小车运行到吊车大车中部,简化为在吊车大车中部施加竖向 100 N 集中力,如图9(a)所示。所用钢材屈服强度 $f_y=235\text{ MPa}$,弹性模量 $E=210\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$,柱子混凝土强度等级为C30,结构阻尼系数为0.03,阻尼器连接点的位置如表2所示。该系统传力路线为:吊车作为激励源通过阻尼器将振动传递给网架结构,振动响应在网架结构沿横向传播后到达与响应结构连接的阻尼器,通过阻尼器将振动传递给响应结构。提取force, R_1, R_2, R_3 三点位移进行比对(见图9);force点为小车化为集中力施加在吊车大车位置坐标点为 $(9, 4.5, -1.6)$; R_1, R_2 为网架上点; R_3 为柱顶中点,计算结果如图10所示。

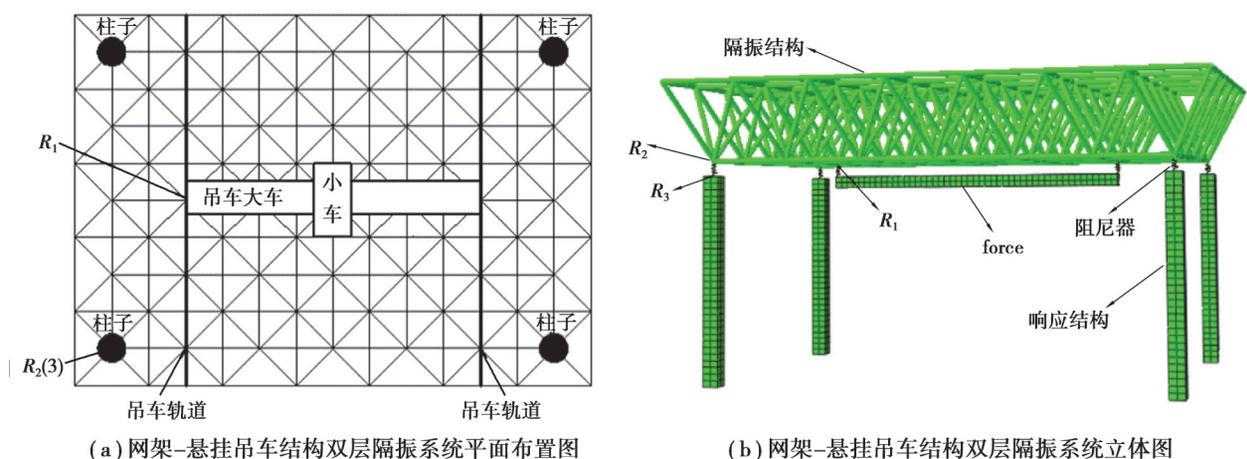


图9 网架-悬挂吊车结构双层隔振系统模型

Fig. 9 The model of double-layer vibration isolation system of space truss frame - suspension crane structure

表2 阻尼器参数
Table 2 Parameters of the damper

阻尼器编号	网架和激励源之间阻尼器			
	x	y	z	
			网架	激励源
5	3	6	0	-0.6
6	15	6	0	-0.6
阻尼器编号	网架和响应结构之间阻尼器			
	x	y	z	
			网架	响应结构
1	0	0	0	-0.6
2	18	0	0	-0.6
3	0	12	0	-0.6
4	18	18	0	-0.6

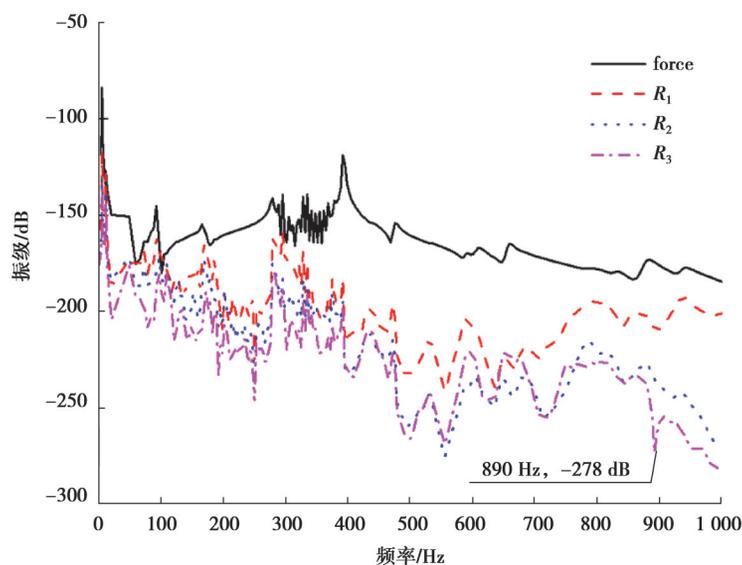


图10 网架-悬挂吊车结构双层隔振系统振动传递特性

Fig.10 Vibration transmission characteristics of double-layer vibration isolation system of space truss-suspension crane structure

由此可知,网架-悬挂吊车结构双层隔振系统可将外界传来的荷载,经过网架结构的隔振处理后,传递到支撑柱子的振动响应从低频到高频都有一定程度的衰减;该系统可以有效抑制从吊车大车传来的低频和高频振动响应,将传递给支撑柱的力在某频段内进行削弱,以此来达到良好的隔振效果。因此,网架隔振系统隔振效果比较明显,网架结构隔振性能良好。

4 结 论

基于网架结构的周期特性对其整体振动传递特性进行分析。通过改变网架接头质量、杆件截面刚度,研究其对网架结构减振性能的影响。运用频响函数综合法分析网架在机组隔振系统中的隔振效果,通过有限元仿真模拟计算,得出以下结论:

- 1)网架结构在高频振动范围内具有一定的隔振效果,但在低频振动范围效果不明显。
- 2)适当调节杆件截面刚度可影响结构的带隙特征,从而避开结构共振频率,达到减隔振效果,并且杆截

面刚度与带隙效应强度呈负相关。

3)增加网架节点质量可减弱振级,有利于隔振,但效果会受截面刚度影响。

4)网架-悬挂吊车结构双层隔振系统具有良好的隔振效果。

参考文献

- [1] Wu P B, Guo J Y, Wu H, et al. Influence of DC-link voltage pulsation of transmission systems on mechanical structure vibration and fatigue in high-speed trains[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 130: 105772.
- [2] Isavand J, Peplow A, Kasaei A. Performing building vibration assessments by acoustic measurements[J]. *Building Acoustics*, 2020, 27(1): 21-33.
- [3] Liu L X, Yang W Y, Chai Y Y, et al. Vibration and thermal buckling analyses of multi-span composite lattice sandwich beams [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2021, 91(6): 2601-2616.
- [4] Zhang Z, Ding H, Zhang Y W, et al. Vibration suppression of an elastic beam with boundary inerter-enhanced nonlinear energy sinks[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2021, 37(3): 387-401.
- [5] 李曦, 刘占芳. 矩形板中应力波主波和次波的传播与反射[J/OL]. *重庆大学学报*, 2022: 1-16. (2022-09-14). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.n.20220913.1055.002.html>.
Li X, Liu Z F. Propagation and reflection of stress wave about primary and secondary waves in rectangular plates [J/OL]. *Journal of Chongqing University*, 2022: 1-16. (2022-09-14). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.n.20220913.1055.002.html>.(in Chinese)
- [6] 金红春, 刘占芳. 柱坐标系下修正弹性应力波理论及数值分析[J]. *重庆大学学报*, 2020, 43(2): 100-111.
Jin H C, Liu Z F. Wave theory of modified elasticity under column coordinate system and numerical analysis[J]. *Journal of Chongqing University*, 2020, 43(2): 100-111.(in Chinese)
- [7] 高盟, 孔祥龙, 赵礼治, 等. 周期结构波阻板的带隙特性研究[J/OL]. *土木工程学报*, 2022: 1-11. (2023-03-22). <https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.22020168>.
Gao M, Kong X L, Zhao L Z. Study on band gap characteristics of periodic structure wave impeding block[J/OL]. *China Civil Engineering Journal*, 2022: 1-11. (2023-03-22). <https://doi.org/10.15951/j.tmgcxb.22020168>.(in Chinese)
- [8] Lin Q D, Zhou J X, Wang K, et al. Low-frequency locally resonant band gap of the two-dimensional quasi-zero-stiffness metamaterials[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 222: 107230.
- [9] Zuo S L, Li F M, Zhang C Z. Numerical and experimental investigations on the vibration band-gap properties of periodic rigid frame structures[J]. *Acta Mechanica*, 2016, 227(6): 1653-1669.
- [10] Lim C W, Yaw Z, Chen Z Y. Periodic and aperiodic 3-D composite metastructures with ultrawide bandgap for vibration and noise control[J]. *Composite Structures*, 2022, 287: 115324.
- [11] 朱冬梅, 范占贝, 刘海平, 等. 一种周期结构隔振器力学性能研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(4): 32-39.
Zhu D M, Fan Z B, Liu H P, et al. Study on mechanical properties of a periodic structure vibration isolator[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2020, 47(4): 32-39.(in Chinese)
- [12] 宋玉宝, 李征初, 黄奔, 等. 周期隔振设计用于直升机舱内噪声抑制的研究[J]. *振动工程学报*, 2020, 33(4): 764-771.
Song Y B, Li Z C, Huang B, et al. Reduction of helicopter cabin noise using periodic isolation design[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2020, 33(4): 764-771.(in Chinese)
- [13] 程世祥, 张志谊, 华宏星. 周期桁架结构浮筏隔振特性分析与实验研究[J]. *噪声与振动控制*, 2011, 31(6): 5-9.
Cheng S X, Zhang Z Y, Hua H X. Analysis and experiment on vibration isolation characteristics of a periodic truss raft system [J]. *Noise and Vibration Control*, 2011, 31(6): 5-9.(in Chinese)
- [14] Harley J B, Moura J M F. Sparse recovery of the multimodal and dispersive characteristics of Lamb waves[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 133(5): 2732-2745.
- [15] 网架结构设计手册编辑委员会. 网架结构设计手册: 实例及图籍[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
Grid Structure Design Manual Editorial Committee. *Grid Structure Design Manual: Examples and Illustrations*[M]. Beijing: China Architecture and Construction Press, 2003.(in Chinese)
- [16] 况成玉, 张志谊, 华宏星. 周期桁架浮筏系统的隔振特性研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(2): 115-118, 135.
Kuang C Y, Zhang Z Y, Hua H X. Vibration isolation characteristics analysis of a floating raft system constructed with periodic truss structures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(2): 115-118, 135.(in Chinese)
- [17] 朱石坚, 楼京俊, 何其伟, 等. 振动理论与隔振技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

- Zhu S J, Lou J J, He Q W, et al. Vibration theory and vibration isolation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [18] 张峰. 空间桁架浮筏声学设计方法及降噪特性研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2012.
Zhang F. Acoustic design method and noise reduction performance analysis of space truss raft system[D]. Beijing: China Naval Ship Research Institute, 2012. (in Chinese)
- [19] 焦晋峰, 郝海舒, 刘勇, 等. 平板网架结构用高强度螺栓疲劳问题研究进展[J]. 建筑科学, 2021, 37(3): 85-92.
Jiao J F, Hao H S, Liu Y, et al. Research progress on fatigue of high strength bolts for flat frame structure[J]. Building Science, 2021, 37(3): 85-92.(in Chinese)
- [20] 雷宏刚, 尹德钰. 网架结构在悬挂吊车作用下疲劳问题研究进展[J]. 空间结构, 2008, 14(4): 32-36, 52.
Lei H G, Yin D Y. Research progress on fatigue of grid structure with suspension cranes[J]. Spatial Structures, 2008, 14(4): 32-36, 52.(in Chinese)
- [21] 张建丽, 靳世宏, 雷宏刚. 基于红外热像的网架焊接空心球节点疲劳试验研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8): 183-188.
Zhang J L, Jin S H, Lei H G. Research on fatigue test of welded hollow spherical joints in grid structure based on infrared thermography[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(8): 183-188.(in Chinese)
- [22] 冯秀娟, 林醒山, 潘文, 等. 在悬挂吊车作用下螺栓球节点网架的疲劳性能[J]. 建筑结构学报, 1995, 16(4): 3-12.
Feng X J, Lin X S, Pan W, et al. Fatigue behavior of space grid with bolt sphere joints under suspended crane loading[J]. Journal of Building Structures, 1995, 16(4): 3-12.(in Chinese)
- [23] Qiu B, Yang X, Zhou Z C, et al. Experimental study on fatigue performance of M30 high-strength bolts in bolted spherical joints of grid structures[J]. Engineering Structures, 2020, 205: 110123.
- [24] 邱斌, 雷宏刚, 白少华. 悬挂吊车作用下网架结构应力监测与模拟分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(5): 1119-1129.
Qiu B, Lei H G, Bai S H. Stress monitoring and simulation analysis of the grid structure under the actions of suspension cranes [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2021, 46(5): 1119-1129.(in Chinese)

(编辑 陈移峰)