

基于仿生原理的板壳结构加强筋优化设计

薛文彬^a, 倪维宇^{a*}, 张横^b, 姚胜卫^a

(上海理工大学 a.公共实验中心 b.机械工程学院, 上海 200093)

摘要: **目的** 加强筋的合理分布可有效提升结构抗振性, 为了提高板壳结构的抗振性能, 本文基于仿生原理, 以板壳加强筋分布为研究目标, 进行动力学的优化与设计研究。**方法** 采用自适应成长法, 通过引入等效静态载荷法, 建立以动柔度为目标的加强筋分布优化模型, 推导出基于准则法的设计变量迭代更新公式, 分别研究单点激励和多点不同动态载荷作用下板壳结构的加筋分布设计, 并研究单点激励和多点不同动态载荷激励下的板壳加筋结构特性。**结果** 研究表明, 板壳结构加强筋采用仿生原理对其分布进行优化, 可实现任意动态载荷作用下加强筋分布的设计, 且优化的加强筋形态分布清晰, 无须再处理即可应用到加强筋的生产制造中。**结论** 根据对不同约束的板壳结构进行优化设计, 通过加强筋的设计, 提升了板壳结构的抗振性能。

关键词: 板壳结构; 仿生设计; 加强筋; 优化设计

中图分类号: TB482; TH113.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)13-0308-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.13.036

Optimization Design of Reinforcement Ribs for Plate and Shell Structures Based on Biomimetic Principles

XUE Wenbin^a, NI Weiyu^{a*}, ZHANG Heng^b, YAO Shengwei^a

(a. Centre of Public Experiment, b. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The reasonable distribution of reinforcement ribs can effectively improve the vibration resistance of the structure. The work aims to study the dynamic optimization design of reinforcement rib distribution in plate and shell structures based on biomimetic principles to improve the vibration resistance of plate and shell structures. A reinforcement rib distribution optimization model with dynamic flexibility as the objective was established by adopting the adaptive growth method and introducing the equivalent static load method, to derive a design variable iterative update formula based on the criterion method. The reinforcement rib distribution design of plate and shell structures under single point excitation and multi-point different dynamic loads was studied, and the structural characteristics of reinforcement ribs under single point excitation and multi-point different dynamic loads were investigated. The research results indicated that the distribution optimization of reinforcement ribs in plate and shell structures based on biomimetic design could achieve the design of reinforcement ribs under any dynamic load, and the optimized reinforcement ribs had clear shape distribution, and could be applied to the manufacturing of reinforcement ribs without further treatment. According to the optimization design of plate and shell structures with different constraints, the vibration resistance of plate and shell

收稿日期: 2024-02-27

基金项目: 国家自然科学基金 (52005337)

*通信作者

structures is improved through the design of reinforcement ribs.

KEY WORDS: plate and shell structures; biomimetic design; reinforcement ribs; optimization design

在海洋船舶、汽车工业以及运输包装箱等领域中,板壳结构由于其自身高刚轻质的特点而被广泛应用^[1]。在制造设计时,为了能够使这些设备正常运转工作,往往要将其中板壳结构件的振动水平控制在能承受的范围之内。结构振动的问题在工程中变得更加突出^[2-3],故多年来对设备包装使用的材料——板壳结构,进行振动控制与设计研究成为了重要的问题研究。为了得到抗振性能良好的板壳结构,对板壳结构设计加强筋是一种有效的方法。板壳加强筋的分布直接影响其整体的动力学性能,因此寻求板壳结构上的加强筋最优分布至关重要。

板壳结构加强筋合理的布置可使其具有高刚轻质的力学特性,因此针对板壳结构加强筋分布的动力学设计问题,就成为众多学者的研究内容。Maute 等^[4]采用变密度法设计了流固耦合时飞机机翼的加强筋布置方案。Ansola 等^[5]优化了壳面的几何形状及外壳表面加强筋分布的方法。Stanford 等^[6]基于变密度法,对金属刀片考虑膨胀特征值和气动弹性颤振时的加筋进行了优化。尽管上述已有的研究在板壳结构动力学设计上取得了一定的成功,但所提的设计方法也均有一些不足,他们都是通过材料分布来解决加强筋分布问题^[7-8],以致其设计的加强筋布局往往不清晰,仍需要后处理布置方案,才能真正应用加强筋的设计结果,从而导致设计结果难以直接应用,关键问题是其设计结果并非最优解。在板壳结构加强筋分布设计中,为解决传统的拓扑优化设计方法存在的不足,本文提出一种基于仿生原理的拓扑优化方法,通过优化加强筋截面积,获得了加强筋分布的离散状态,设计得到的板壳加强筋分布相较于变密度法^[9]等拓扑优化方法得到的结果更加清晰,且不再需要后处理即可直接应用。

为了在最小材料利用率下达到最优的设计效果,针对任意动载荷作用下的板壳结构加强筋分布设计问题,本文以仿生原理为导向,提出一种板壳结构加强筋分布的动力学优化设计方法。基于仿生原理对任

意动态载荷作用下板壳结构加强筋分布动力学优化设计进行研究,采用自适应成长法,通过引入等效静态载荷法,建立以动柔度为目标的加强筋分布优化模型,并推导基于准则法的设计变量迭代更新公式。分别对单点激励和多点不同动态载荷作用下的板壳结构加筋分布设计问题进行研究,从而提高板壳结构抗振性能。

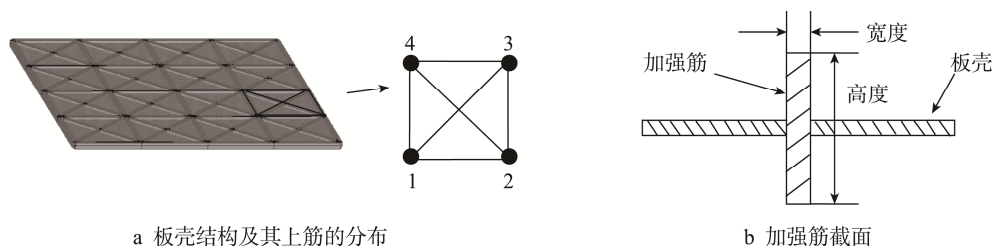
1 板壳加强筋分布的仿生优化设计

1.1 仿生原理

在自然界中,多数生物分枝系统均具有明显的分布形态^[10]。分枝受外部环境影响和生物生长内部营养需求等因素影响,调整结构自身,以满足生物成长内部需求和适于外部环境,从而最终实现一个最优的过程^[11]。板壳加强筋类似于一个缓慢生长的过程,在这个过程中,其自适应于某些约束条件,例如设定合适的材料体积约束,可使加强筋板结构的形成,慢慢成长为具有最佳力学性能的最优结构^[12]。因此结构加强筋分布设计与生物分枝系统的自然成长存在一些相似性,故通过研究生物分枝系统的形态形成机理,设计基于这种形成机理的板壳加强筋分布优化方法,就能实现类似于生物分枝系统最优性能的板壳加强筋分布。要实现这个过程,就必须对生物分枝系统形态形成过程中的自适应成长规律——趋光性、趋水性等^[13],以及相关结构加强筋分布优化设计的成长准则进行研究。

1.2 优化设计几何模型

为了对板壳结构加强筋分布进行设计,则先需研究其几何模型的建立方法。建立方法为采用 4 节点四边形板单元或壳单元离散板壳结构,分别连接节点 {1,2}、{2,3}、{3,4}、{1,4}、{1,3}、{2,4},如图 1 所示,形成梁单元来模拟板壳结构上加强筋,加强筋的截面设为常用的矩形。



a 板壳结构及其上筋的分布

b 加强筋截面

图 1 板壳加强筋结构的几何模型建立

Fig.1 Geometric model establishment of plate and shell reinforcement rib structure

1.3 单元刚度矩阵和质量矩阵

图 1 中的板壳加强筋结构几何模型中包含有梁单元和壳单元,这 2 种单元的刚度矩阵的形式是不同的,需要分别处理。在板壳加强筋结构模型中,该结构的总刚度矩阵为:

$$K = \sum_{q=1}^Q k_q + \sum_{j=1}^n k_j \quad (1)$$

式中: K 为结构总刚度矩阵; Q 为梁单元数目; n 为壳单元数目; k_q 为第 q 个加强筋单元刚度矩阵; k_j 为第 j 个壳单元刚度矩阵。设计变量为加强筋的截面积,在设计过程中壳单元保持不变。

结构的质量矩阵为:

$$M = \sum_{j=1}^n m_j + \sum_{q=1}^Q m_q \quad (2)$$

式中: M 为结构总质量矩阵; m_q 为第 q 个加强筋单元质量矩阵; m_j 是第 j 个壳单元质量矩阵。

对空间梁单元而言,每一节点有 6 个自由度,因此梁单元的刚度矩阵为 12×12 阶。同时梁单元的质量矩阵也是 12×12 阶。

对于弹性薄壳单元的模拟,可通过板单元组成的折板系统替代原来的薄壳结构,由板的平面应力和弯曲应力状态组合得到薄壳的应力状态^[14]。而薄壳单元的刚度矩阵由两部分组成:一部分为平面力状态下的刚度矩阵,另一部分为弯曲应力状态下的刚度矩阵^[15]。在小变形时,薄壳单元的刚度矩阵就平面应力和弯曲应力而成,且二者不互相耦合。

单元刚度矩阵求解如式(3)所示,

$$k = \iiint B^T D B dx dy dz \quad (3)$$

式中: k 为单元刚度矩阵; B 为几何矩阵; D 为弹性矩阵。

当薄板处于平面应力状态时,此时每个节点的 2 个自由度分别为 u_i 、 v_i ,其中 i 为节点编号。根据式(3)可得弹性矩形薄板单元平面应力状态下的刚度矩阵为:

$$k^p = \begin{bmatrix} k_{11}^p & & & \\ k_{21}^p & k_{22}^p & & \\ k_{31}^p & k_{32}^p & k_{33}^p & \\ k_{41}^p & k_{42}^p & k_{43}^p & k_{44}^p \end{bmatrix} \quad (4)$$

当薄板处于弯曲应力状态时,每个节点的 3 个自由度分别是 θ_{xi} 、 θ_{yi} 、 w_i ,根据式(3)可得弹性矩形薄板单元弯曲应力状态下的刚度矩阵为:

$$k^b = \begin{bmatrix} k_{11}^b & & & \\ k_{21}^b & k_{22}^b & & \\ k_{31}^b & k_{32}^b & k_{33}^b & \\ k_{41}^b & k_{42}^b & k_{43}^b & k_{44}^b \end{bmatrix} \quad (5)$$

结合平面应力和弯曲应力状态下的刚度矩阵,可

得到二者组合应力状态下的矩阵薄板单元的刚度矩阵为:

$$k_{rs} = \begin{bmatrix} k_{rs}^p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & & & 0 \\ 0 & 0 & k_{rs}^b & & 0 \\ 0 & 0 & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$k_{rs} = \begin{bmatrix} k_{rs}^p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & & & \\ 0 & 0 & k_{rs}^b & & \\ 0 & 0 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (r, s = 1, 2, 3, 4)$$

式中: r 、 s 为节点对于位置下标; k_{rs}^p 、 k_{rs}^b 为平面应力和弯曲应力相应的子矩阵。

同理可得弹性薄壳单元的质量矩阵。因为梁单元和壳单元每个节点都是 6 个自由度,所以这 2 种单元也可以直接耦合。

1.4 加强筋分布优化设计的数学模型

在板壳结构优化设计中,灵敏度表示设计变量的变化对目标函数或约束函数的影响程度^[15]。灵敏度的设计可以作为加强筋分布优化设计中自适应成长的设计准则。在加强筋寻优设计过程中,借助灵敏度的计算分析值,以确定板壳结构上不同位置和方向的加强筋对结构刚度的贡献值——对板壳性能改善贡献量大的加强筋则成长,对板壳性能改善贡献量较小的加强筋则退化。

对于板壳结构加强筋分布的优化问题,其数学意义可表示为:在某一体积分数约束下,将加强筋作为优化设计变量,在某种载荷工况下,寻求结构某种力学性能最优的解。因此,板壳结构加强筋分布的优化数学模型可以表示如下:

$$\begin{aligned} & \text{find } T = [T_1, T_2, \dots, T_I]^T \\ & \text{min } F(T) \\ & \text{s.t. } g(T) = v - f v_0 \leq 0 \\ & \quad 0 < T_{\min} \leq T_i \leq T_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, I \end{aligned} \quad (7)$$

$F(T)$ 是优化的目标函数,表示结构动态载荷下的动柔度;参数 v 表示优化后结构的体积; v_0 表示优化前结构的体积; f 表示体积分数; T_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) 是设计变量,即第 i 个加强筋的截面积; $T_{\min}$ 和 $T_{\max}$ 是 T_i 的上限和下限。

借助拉格朗日方程,构造相关的优化准则,对式(7)进行求解,见式(8)。

$$La(T) = F(T) + \chi g(T) \quad (8)$$

式中: χ 为拉格朗日乘子^[16]。

基于卡罗需-库恩-塔克 (Karush-Kuhn-Tucker Condition, KKT) 最优准则^[17]—一阶必要条件,在最优

T^* 处应满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial L_a}{\partial T_i} = \frac{\partial F}{\partial T_i} + \chi \frac{\partial g}{\partial T_i} = \begin{cases} < 0 & T_i = T_{\max} \\ = 0 & T_{\min} < T_i < T_{\max} \\ > 0 & T_i = T_{\min} \end{cases} \\ \chi_{T=T^*} \geq 0 \\ \chi(v(T^*) - \eta v_0) = 0 \\ v(T^*) - \eta v_0 \leq 0 \\ T_{\min} < T_i < T_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

由 $\frac{\partial L_a}{\partial T_i} = 0$, 为寻找最优解而构造函数迭代式,

在优化迭代过程中加以相应的控制, 从而让 T^* 严格满足式 (9) 约束极值问题的 KKT 条件。

由

$$\frac{\partial L_a}{\partial T_i} = \frac{\partial F}{\partial T_i} + \chi \frac{\partial g}{\partial T_i} \quad (10)$$

可以得到:

$$\chi \frac{\partial g}{\partial T_i} = -\frac{\partial F}{\partial T_i} - T_i \frac{\partial F}{\partial T_i} = 1 \quad (11)$$

为简化计算, 令:

$$G_i = -T_i \frac{\partial F}{\partial T_i} = -T_i S_i \quad (12)$$

式中: S_i 为第 i 个加强筋对目标函数的设计灵敏度。

优化后加强筋的总体积 v 可表达为:

$$v = \sum_{i=1}^n A_i T_i \quad (13)$$

式中: A_i 为第 i 个加强筋单元的长度。

约束函数的灵敏度为:

$$\frac{\partial g}{\partial T_i} = A_i \quad (14)$$

将式 (12)、式 (14) 代入式 (11) 得:

$$T_i = \frac{G_i}{\chi A_i} \quad (15)$$

因约束是单性态的, 故式 (15) 中的拉格朗日乘子 χ 可通过简单的方法求解。优化过程中每次迭代时的 χ 均可通过当时每个加强筋单元来表示:

$$\chi = \frac{G_i}{A_i T_i} = \frac{G_i}{v_i} \quad (16)$$

因此

$$\chi = \frac{G_1}{v_1} = \frac{G_2}{v_2} = \dots = \frac{G_n}{v_n} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{\sum_{i=1}^n v_i} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{\eta v_0} \quad (17)$$

优化结构初始体积 v_0 , 体积约束因子 f 和 G_i 均已知时, 可求出拉格朗日乘子 χ 。

通过采用直接迭代步长因法, 可得设计变量 T_i 的迭代公式:

$$T_i^{k+1} = \begin{cases} T_{\min} & \text{if } T_i^k \leq T_{\min} \\ \alpha \left(\frac{G_i}{\chi A_i} \right) + (1-\alpha) T_i^k & \text{if } T_{\min} \leq T_i^k \leq T_{\max} \\ T_{\max} & \text{if } T_i^k \geq T_{\max} \end{cases} \quad (18)$$

式 (18) 为优化结构加强筋分布的迭代公式, α 表示步长因子, χ 表示拉格朗日乘子。

1.5 设计流程

基于仿生原理——分枝网形成的板壳结构加强筋分布优化设计方法, 以式 (18) 为寻优迭代公式对结构进行加强筋分布优化设计。如图 2 所示, 具体流程主要分为 4 步。

1) 建立基结构。将设计对象进行简化, 建立基结构。加强筋厚度设置为与板壳单元相同, 初始的加强筋高度设置为一个很小值。

2) 选取“种子”, 设置优化参数。基于结构承载和支撑能力, 设置基结构上一定数量的初始成长点作为“种子”, 也就是成长的初始点, 在活动加强筋数组 $\{R_b\}$ 中加入与“种子”相关的加强筋单元。给定步长因子 α 、加强筋的初始高度 T_0 、分歧临界值 T_b 、加强筋的总体积上限因子 η , 以及收敛容差 ε 和最大迭代次数 N 。

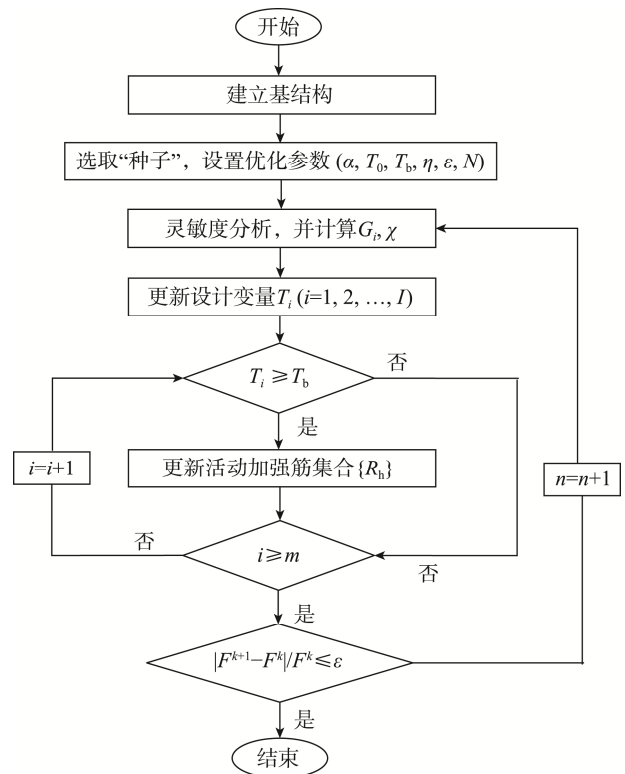


图 2 自适应成长法的设计流程
Fig.2 Design process of adaptive growth method

3) 灵敏度分析。对整体结构进行有限元分析, 通过式(12)和式(17)计算 G_i 和 χ , 分析计算活动加强筋单元 $\{R_b\}$ 的灵敏度。

4) 成长和重建。判断活动加强筋单元的状态。若加强筋满足成长条件, 则加强筋的设计变量 T_i 通过式(18)更新; 若加强筋满足分歧值 T_b , 则把与该加强筋单元节点相关联的加强筋单元归入活动加强筋单元数组 $\{R_b\}$ 中, 参与下一步迭代; 若加强筋满足退化条件, 则该加强筋单元将退出活动筋数组 $\{R_b\}$, 对该加强筋单元进行退化。

在优化过程中, 如果优化迭代的目标函数相邻的差值小于收敛容差, 或者迭代次数到达设定的最大值 N , 则退出循环, 否则返回优化中, 继续成长, 直到满足收敛条件。

2 加强筋板设计应用

2.1 悬臂板结构

悬臂板结构, 如图 3a 所示, 研究其受法向简谐激励作用的加强筋分布设计问题, 定义其长度 $L=150\text{ mm}$ 、宽度 $W=100\text{ mm}$ 、板厚度为 2 mm 。简谐激励载荷如图 3b 所示, 幅值为 200 N 、频率为 $1\ 000\text{ Hz}$ 。加强筋分布优化结果图 3c、d、e 所示, 种子点选取为支撑端上下 2 点和加载点, 共计 3 个初始种子点, 具体如设计结果图 3 中的圆点所示。从加强筋生长过程可以得出, 随着迭代的进行, 加强筋从种子点开始成长, 逐渐与支撑端连接起来, 最终形成了一条由加载点连接到支撑位置的具有最短距离的加强筋分布形态, 与图

3f 静力载荷作用下设计结果相同。这主要是由于动态载荷作用频率较高, 高频时机械波介质传播的波长较小, 结构主要承受弯曲载荷作用, 而这种加强筋结构能有效抵抗弯曲载荷作用。图 4 为设计过程迭代历程图, 最终设计结果收敛, 体积收敛于设定的体积分数 1.25 , 目标函数收敛于 $d/d_0=0.000\ 5$ 。 d 为优化后结构的动柔度, d_0 为初始结构的动柔度。

当悬臂板受 2 个不同载荷作用时, 激励载荷位置如图 5a 所示, 分别为自由端的 2 个端点。激励力的时间历程如图 5b、c 所示, 幅值为 20 N 、频率为 1 Hz , $F_1(t)=200\sin(\omega t)$ (式中, ω 为激励频率, t 为时间), $F_2(t)=-200\sin(\omega t)$ 。从载荷的时间历程可知, 2 个激励力在相同时刻方向相反, 在一个周期内, 前半周期和后半周期结构受到的扭转力的方向相反。图 5d~f 为设计结果, 从加强筋生长过程可得, 随着迭代的进行加强筋首先从受载点和结构上下两侧开始成长, 从载荷的时间历程上可知, 结构在同一时刻所受的载荷是相反的, 即受扭转力作用, 最终形成了自由端交叉筋的分布形态, 同时交叉筋在结构上下边缘连接到支撑位置, 形成了最优的抗扭加强筋分布形态。图 5g 为静态扭转载荷优化结果, 当悬臂板长宽比较小时, 在板两边分布有加强筋; 当长宽比较大时, 靠近载荷处加强筋呈对角线分布, 靠近约束处加强筋分布在板两边。而承受图 5b 和 c 所示的动态扭转载荷作用时, 结构长宽比较小时设计结果在靠近载荷处也有交叉筋分布, 这是因为在动态载荷作用下结构的扭转变形随时间呈周期性变化。由于动态载荷的频率小, 使得机械波在板上的传播波长较大, 而交叉筋分布可以有效减小波动过程中的结构变形。

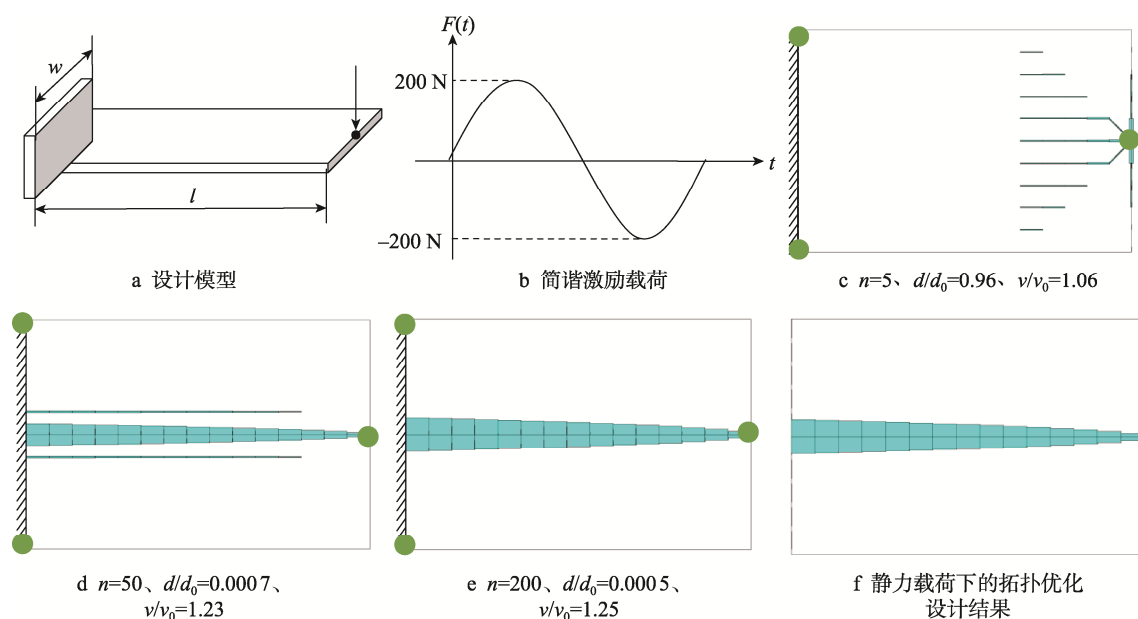


图 3 悬臂板结构受单个激励载荷时加强筋设计

Fig.3 Design of reinforcement ribs for cantilever plate structure under single excitation load

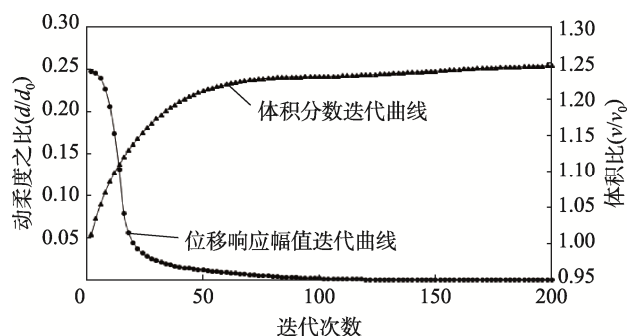


图 4 悬臂板结构受单个激励载荷时设计过程迭代历程

Fig.4 Iteration history of design process for cantilever plate structure under single excitation load

2.2 两边固支板结构

两端固定板结构,如图 6a 所示,研究其受法向简谐激励的加强筋布局设计,定义板长度 $L=200\text{ mm}$ 、宽度 $W=100\text{ mm}$;简谐激励力如图 3b 所示,幅值为 200 N 、频率为 $1\ 000\text{ Hz}$ 。设计结果如图 6b~d 所示,在整个加强筋成长过程中,可以得出加强筋生长形式与悬臂板加强筋形式基本一致,都是形成了加载点到支撑位置的最短传力路径,不同的是在两边固支板加强筋设计中,设计结果加强筋中间位置的截面积较大朝着两侧逐渐减小,随后又逐渐增大。与图 6c 静态载荷作用下的拓扑优化设计结果基本相同,这是因为高频时机械波介质传播的波长较小。从迭代历程图 7 可知,设计结果最终收敛。

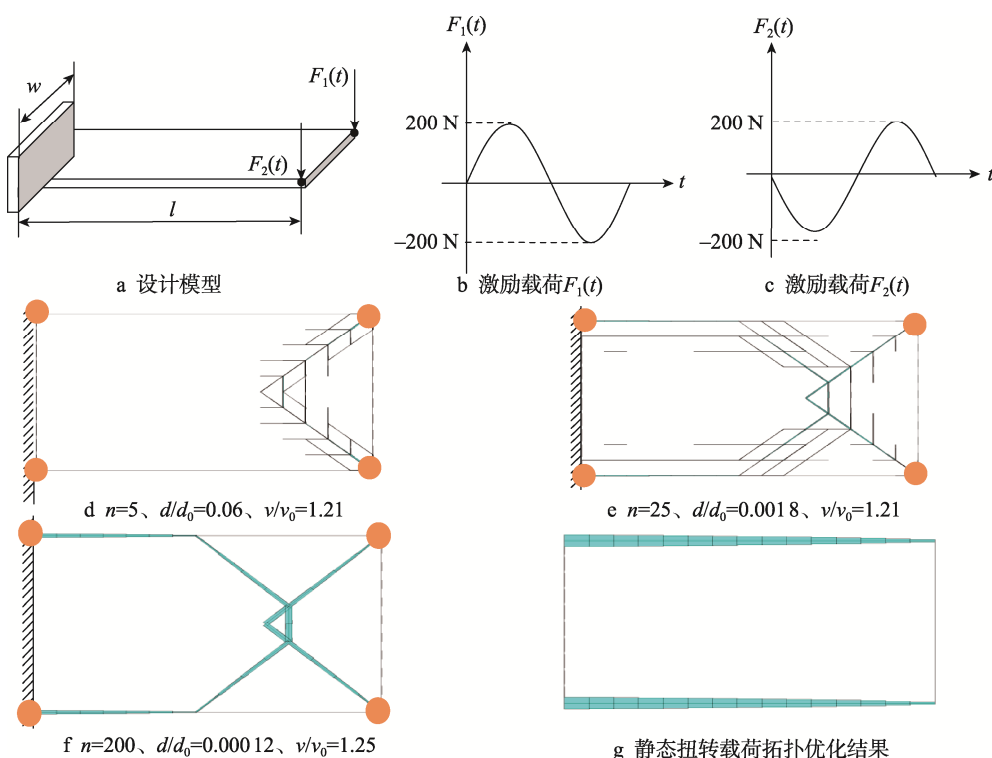


图 5 悬臂板结构受 2 个不同激励载荷时加强筋设计

Fig.5 Reinforcement rib design of cantilever plate structure under two different excitation loads

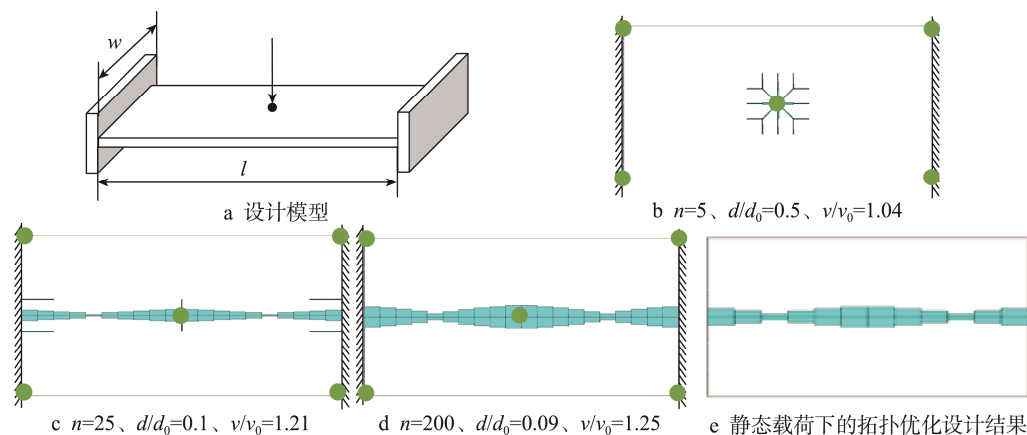


图 6 两边固支板受单个激励载荷时加强筋设计结果

Fig.6 Design results of reinforcing ribs for fixed support plates on both sides under single excitation load

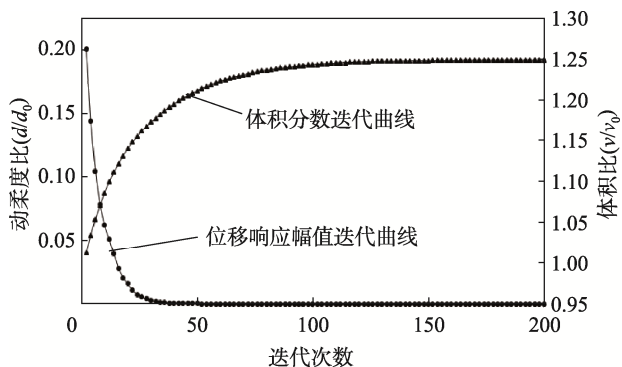


图 7 两边固支板受单个激励载荷时设计过程迭代历程

Fig.7 Iteration process diagram of the design process for fixed support plates on both sides under single excitation load

当两端固定板受 2 个不同载荷作用时,激励载荷位置如图 8a 中黑色点所示,分别位于 L 方向 1/2 处,激励力的时间历程如图 8b、c 所示, $F_1(t)=200\sin(\omega t)$, $F_2(t)=200|\sin(\omega t)|$,幅值都为 200 N,频率都为 1 Hz。

种子点为结构四角和 2 个加载点位置,具体的种子点如图 8d~f 所示。加强筋分布优化结果如图 8d~f 所示。从载荷的时间历程上可知,由于载荷 2 是将载荷 1 取绝对值,因此从激励频率上看载荷 2 的激励频率为载荷 1 的 2 倍,从结构受载情况来看,在一个载荷周期内,在前半个周期,载荷 1 和载荷 2 的大小都为正,结构受垂直向下载荷作用,而在后半周期,载荷 1 和载荷 2 的大小相反,结构受扭转力的作用,因此结构受到交替的弯曲和扭转载荷作用。从加强筋生长过程可以看出,随着迭代的进行加强筋首先从种子点开始成长,从受载点开始分别形成了 2 条连接至支撑位置的最短加强筋路径,又由于结构受扭转载荷作用,形成了连接结构上下 2 条主加强筋的 3 条细加强筋,以抵抗结构扭转载荷,加强筋的分布形态符合结构的受力状态。与图 8g 和图 8h 分别承受静态弯曲和扭转载荷相比,承受动态载荷时板中间会多出一些加强筋,这些细小的加强筋可以减小机械波在板上的传播强度,进而减小结构振动。

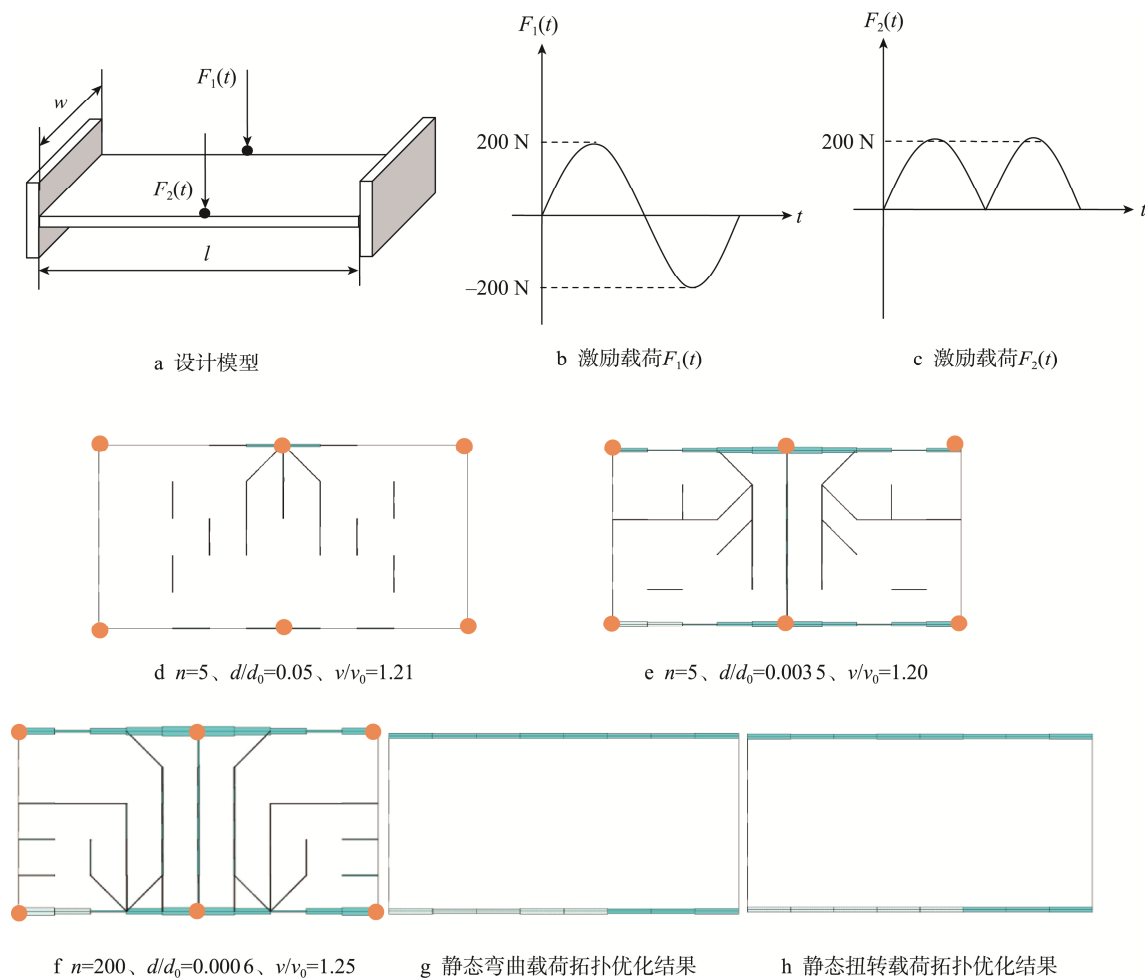


图 8 两边固支板受 2 个不同激励载荷时加强筋设计结果
Fig.8 Design results of reinforcement ribs for fixed support plates on both sides under two different excitation loads

3 结语

本文主要研究了基于仿生原理的板壳结构加强筋分布动力学设计方法,建立了板壳结构加强筋分布设计的几何模型,并建立了加强筋分布优化数学模型,分别对单点激励和多点不同动态载荷激励下的板壳加筋分布进行设计应用。研究表明:当结构承受单点高频动态载荷时,设计结果与静态载荷作用下设计结果基本相同,因此对承受单点高频激励下的板壳加筋结构设计可直接通过静态载荷设计得到,可大大减小计算量,且设计结果较好;当结构承受多点不同载荷激励时,由于结构随时间承受的载荷工况一直发生变化,使得设计问题与静态载荷完全不同,因此设计结果与静态载荷设计结果不同。动载荷作用下设计结果有细小的交叉筋分布,这些细小的交叉筋可有效减小振动形成的机械波在板上的传播强度,进而减小结构振动响应,达到动力学设计目的。同时研究结果也表明,基于仿生的板壳结构加强筋分布设计方法可实现对任意动态载荷作用下的板壳加筋结构的设计,且得到的设计结果中加强筋分布形态清晰,不需要后处理即可得到加强筋的实际布局。

参考文献:

- [1] 倪维宇,张横,姚胜卫. 双材料自由阻尼层结构拓扑优化设计方法[J]. 包装工程, 2021, 42(15): 156-164.
NI W Y, ZHANG H, YAO S W. Topology Optimization Design of Bi-Material Free-Layer Damping Treatments[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(15): 156-164.
- [2] 黄志诚,秦朝烨,褚福磊. 附加粘弹阻尼层的薄壁构件振动问题研究综述[J]. 振动与冲击, 2014, 33(7): 105-113.
HUANG Z C, QIN C Y, CHU F L. A Review about Vibration Problems of Thin-Walled Structures with Viscoelastic Damping Layer[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(7): 105-113.
- [3] 田士涛. 分段约束阻尼层结构及其在空间机械臂减振中的应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
TIAN S T. Segmented Constrained Damping Layer Structure and Its Application in Vibration Reduction of Space Manipulator[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [4] MAUTE K, ALLEN M. Conceptual Design of Aeroelastic Structures by Topology Optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004, 27(1): 27-42.
- [5] ANSOLA R, CANALES J, TARRAGO J A, et al. Combined Shape and Reinforcement Layout Optimization of Shell Structures[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004, 27(4): 219-227.
- [6] STANFORD B, BERAN P, BHATIA M. Aeroelastic Topology Optimization of Blade Stiffened Panels[C]// 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Boston, 2013.
- [7] BENDSØE M, KIKUCHI N. Generating Optimal Topologies in Structure Design Using Homogenization Method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 71(1): 197-224.
- [8] ZHANG X P, KANG Z. Vibration Suppression Using Integrated Topology Optimization of Host Structures and Damping Layers[J]. Journal of Vibration and Control, 2016, 22(1): 66-76.
- [9] 王端奇,解志坚,杨臻,等. 基于变密度法的武器站塔台发射支架拓扑优化[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(3): 60-66.
WANG D Q, XIE Z J, YANG Z, et al. Topology Optimization of the Launching Bracket for Weapon Station Towers Based on the Variable Density Method[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(3): 60-66.
- [10] 刘世豪,林茂. 高速数控转台优化设计方法研究现状与展望[J]. 中国机械工程, 2020, 31(13): 1629-1637.
LIU S H, LIN M. Research on Status and Prospects of Optimization Design Method of High-Speed CNC Turntables[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(13): 1629-1637.
- [11] 滕晓艳,江旭东,邹广平,等. 简谐激励下板壳结构加强筋仿生布局降噪方法[J]. 振动与冲击, 2016, 35(6): 1-6.
TENG X Y, JIANG X D, ZOU G P, et al. Bionic Approach for Stiffener Layout on Plate and Shell Structure under Harmonic Excitation for Noise Reduction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(6): 1-6.
- [12] 季金,丁晓红,熊敏. 基于最优准则法的板壳结构加筋自适应成长技术[J]. 机械工程学报, 2014, 50(11): 162-169.
JI J, DING X H, XIONG M. Adaptive Growth Technique of Stiffener Layout Design for Plate/Shell Structures Based on Optimality Criterion[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(11): 162-169.

- [13] 张德慧, 丁晓红, 胡天男, 等. 基于改进自适应成长法的薄壁结构频率优化设计[J]. 航空学报, 2023, 44(19): 199-212.
- ZHANG D H, DING X H, HU T N, et al. Optimization Design of Natural Frequencies for Thin-Walled Structures Based on Improved Adaptive Growth Method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(19): 199-212.
- [14] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- ZHU B F. Finite Element Method Theory and Applications[M]. 3rd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2009.
- [15] 伞冰冰, 吴泽球, 邱冶, 等. 一种考虑损伤的自由曲面形态创建方法: 中国, 106503305B[P]. 2019-05-03.
- SAN B B, WU Z Q, QIU Z, et al. A Method for Creating Freeform Surface Morphology Considering Damage: China, 106503305B[P]. 2019-05-03.
- [16] 王诗雨, 王栋. 考虑材料参数不确定性结构动力学稳健性拓扑优化设计[J]. 振动工程学报, 2024, 37(1): 95-103.
- WANG S Y, WANG D. Robust Dynamic Topology Optimization of Structure with Uncertain Material Parameters[J]. Journal of Vibration Engineering, 2024, 37(1): 95-103.
- [17] 王生楠. 有限元素法中的变分原理基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005: 36.
- WANG S N. The Basis of Variational Principle in Finite Element Method[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005: 36.