

基于图形法的仿生拓扑优化方法

丁 友¹, 周 洲¹, 祝小平²

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072;

2. 西北工业大学 无人机特种技术重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 针对图形系统自动生成图形拓扑形式的优势,提出了一种以隐式方式表征结构拓扑形式的分步拓扑优化设计方法。该分步优化方法首先以基结构法(ground structure method)的计算结果为基础,并通过均匀化方法得到设计区域内的离散拓扑信息,利用第一步所得的拓扑数据指导分形系统中每一级新增拓扑结构的生长方向,以类似细胞分裂生长的形式完成整体结构拓扑形式生成。最后以参数化建模方式完成模型的结构有限元的批量计算,并结合进化算法,完成对设计模型的优化。其中第一个案例通过本文仿生方法在多目标优化方法下得到了近似 Michell 结构的最优拓扑结构,第二个方案中机翼蒙皮的屈曲载荷系数提升了 10.61%,并且质量降低了 10.85%,验证了本文方法在类平面结构拓扑优化方面的可行性。

关 键 词: 轻量化设计; 拓扑优化; 基结构法; 仿生结构; 进化算法

中图分类号: V224

文献标志码: A

Bionic topology optimization method based on graph method

DING You¹, ZHOU Zhou¹, ZHU Xiaoping²

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Science and Technology on Unmanned Aerial Vehicle Laboratory,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: For taking the advantages of the fractal system in automatically generating graph topological forms, an implicit method was presented to express the structure topology and optimization. This stepped method was firstly based on the results computed by the ground structure method, then a homogenization operation was performed to get the discrete data in the design domain. Through the data got from the previous step to guide the new structure topology direction for the next level from the fractal system, which was similar to the plant growth to get the final structure topology. At last a finite element calculation with parametric modeling was used for the evolution method to get the optimal result. Two cases respectively presented specific implementation process of the optimization system and verified the feasibility of the method. In the first case, an approximate Michell structure was obtained through bionic method under the multi-objective optimization method. In the second case, the buckling load factor of the wing skin was increased by 10.61%, and the mass was reduced by 10.85%, which verified the feasibility of our method to the similar planar structure topology optimization.

收稿日期:2021-01-15

基金项目:民机专项(MJ-2015-F-009); 陕西省重点研发计划(2018ZDCXL-GY-03-04, 2021ZDLGY09-08, 2021GY-339);
陕西省自然科学基金(2019JM-044)

作者简介:丁友(1989—),男,博士生,主要从事飞行器结构设计及仿生优化方面的研究。

引用格式:丁友,周洲,祝小平. 基于图形法的仿生拓扑优化方法[J]. 航空动力学报, 2021, 36(11): 2389-2399. DING You, ZHOU Zhou, ZHU Xiaoping. Bionic topology optimization method based on graph method[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(11): 2389-2399.

Key words: lightweight design; topology optimization; ground structure method; bionic structure; evolution method

结构拓扑优化作为一种数学描述方法,主要针对给定载荷下,满足边界条件以及约束条件时,设计区域内材料的位置分布优化。传统的结构拓扑优化方法主要基于梯度模型,如SIMP(solid isotropic material with penalization)以及ESO(evolutionary structural optimization),这些方法“减法”为核心,采用直接编码的形式,每个设计变量决定了其所对应的材料单元的特性,因此,即使是在二维设计域内,所需设计变量的数量也会随网格分辨率的增加而急速增加^[1-2],最终使得最优的计算结果的获取更加困难。另一种直接编码的方式为基结构法(ground structure method),该方法从一系列备选杆中寻求最佳的结构布置,其缺点是需要对每一个优化问题事先定义基结构,且由于细小杆的存在,优化结果需要进行后续处理^[3]。不同于上述减法方式,边界变化法如水平集方法(level set methods)^[4],将结构边界表示标量为零的水平线函数,通过使用物理问题和优化条件来控制水平集函数的输出从而修改边界的形状。但这种方法的一个缺点是必须指定初始拓扑布局,并且会极大地影响最终的最优拓扑形状。

近年来采用间接编码的方式形成结构拓扑形式,进而优化结构的方式得到了快速的发展。仿生结构设计(bionic structure design),正是在这一基础上发展而来,并为结构件的拓扑形式提供了另一种不同的实现方式。如何模拟自然界中结构的成形过程,成为了该研究领域的工程师们所要解决的关键问题。分枝形式作为一类特殊的结构模式,在许多自然界的生物系统中都能发现,例如树叶的叶脉,植物的根系、昆虫的翅脉,动物的血管以及黏菌的营养通道等。虽然在数学上已经有很多种方法可以描述上述结构的形态特征,但是要将上述分枝结构应用到具体的工程设计中,就需要了解这些生物结构的成形方式,并指导开发相应的程序来模拟上述结构演变的规则。

对于利用仿生方法进行结构优化设计,Dimic^[5]通过模仿自然界中的气泡结构的特点,通过力平衡方法来松弛仿生图形Voronoi,从而得到Voronax(Voronoi+Relax)图形,并通过将Voronoi初始站点(site)位置与结构承载相关联,最终由遗传算法优化得到满足结构设计要求的曲面结

构。空客公司也在未来的飞机设计中提出这种仿生曲面网格结构的设计概念,并与APWorks公司合作,通过模拟多头绒泡菌觅食的生物特性,得到相应的平面网格构型,通过成千上万次的迭代“进化”结构模型,取得最终的设计结果。该设计理念首先通过机舱仿生分隔墙设计得到印证,最终分隔墙不仅保持着相当高的结构强度,且其结构质量至少减少45%,结构变形减少8%^[6]。德国亥姆霍兹极地和海洋研究中心的Hamm教授及其团队通过仿生浮游生物的壳结构来进行结构的优化设计,其过程主要是根据目标结构的受力特性,类比已有的浮游生物结构,从成百上千的结构方案中选出最优结构构型,最终通过详细设计,得到最终结果^[7-8]。Ding等^[9]模拟自然界分枝系统的自适应生长规则,以加筋板壳结构的最小柔度为目标,通过预先选定的种子分叉点生长出有效的筋条结构。Li等^[10]根据叶脉分枝图案元素及几何特征,从Kuhn-Tucker条件得出了关于分支模式自适应增长的数学解释,并根据宏观微观的设计仿生思路得到工程上加强筋结构最优布局设计。Pedro等^[11]以及Hartl等^[12]采用Lindenmayer-system方法,将结构的拓扑形式与几何图形相结合,并以基因编码的形式编译不同的图形特征,最后通过有限元方法计算以及遗传算法得到结构的近似最优解。上述这类生物学启发式仿生设计方法,以“增材”的形式转变了传统的“减材”设计思路,不仅可以有效地解决拓扑优化过程中结构连续性问题,并且在多目标、多功能、多尺度等领域都有着良好的适应性。尽管仿生方法在实际工程中可以提供可靠的新颖结构形式,但是当前的设计方式还是有一定的缺点,比如结构生长过程采用迭代启发式的情况下,其根据结构的物理意义指导生长的影响因素较小。而对于基于物理意义迭代生长的算法当中,判定公式中的某些系数,往往根据经验选择,并可能影响设计结果,且计算量会随着样本空间的变大呈指数性增加。此外仿生优化设计所得到的结构模型,多是逼近最优结构的近似解,这也是限制了仿生生长方法的应用的原因之一。

针对上述问题,本文借鉴进化算法的编码特点,以生成分形结构的方式间接表达结构的拓扑形式,其中新结构的生长方向以基结构法得到的

拓扑结构数据为指导,整个优化以遗传算法为核心,并结合有限元软件的计算结果,最终通过不断进化得到满足结构设计要求的最优结构拓扑形式。

1 基结构拓扑优化设计方法

基结构法最初由 Dorn 等^[13]在 1964 年提出,主要针对桁架结构,通过删减设计区域内全连通状态下低效的杆件,最后以剩余的高效杆件表达近似 Michell 结构的最优解。其最优桁架拓扑形式的求解过程可看作在单载荷作用下,满足线弹性以及应力约束条件下的线性规划问题。随着不断改进、简化,基结构方法被越来越多的学者用于结构的拓扑优化设计当中, Sokół^[14]针对大规模桁架拓扑优化问题提出了一系列解决方案。虽然基结构法可以快速求得最优解,但由于该方法是从已有的候选杆件集中对杆进行删减,而无法增加新的节点及杆件,因而其最优解的质量依赖于初始基结构的节点位置以及杆件的全连通情况。此外通常得到的最优解无法实际使用,存在杆件相交重叠或杆件过多的情况,且设计区域局限在矩形等规则几何图形。针对上述问题, Martinez 等^[15]提出了在拓扑优化过程中不断增加杆件,即“拓扑增长法”, Talischi 等^[16]采用类似连续体拓扑优化的滤波技术对桁架优化过程中迭代步的结果进行滤波,从而得到清晰的拓扑结构, Smith^[17]将原有规则的基结构网格拓展到非规则网格, Lewiński 等^[18]拓展基结构法,提供了复杂区域的拓扑优化的精确解。Zegard 等^[19-20]提出了 GRAND (ground structure analysis and design) 方法,主要用于快速获得非盒状设计区域内,非规则网格节点位置并采取分级的形式分类全连通杆件,从而可以根据实际情况选择所需的候选杆件数量。此方法最大的意义是为桁架拓扑优化的工程应用开辟了道路,通过结合后处理技术可以应用于结构优化的概念性设计阶段。本文以 GRAND 基结构法的杆件拓扑结构的计算结果为基础,为后续的仿生结构拓扑生长提供生成依据。

1.1 GRAND 基结构法基本原理

本工作中使用的问题公式是基于塑性条件,即无刚度矩阵,兼容性方程或应力-应变关系。在这里考虑含具有 N_b 杆件以及 N_n 个节点的平面刚性桁架基结构,在单工况作用下,假设具有足够的

约束 N_{sup} 以防止桁架结构发生刚体位移,其中在二维平面中自由度 $N_{dof} = 2N_n - N_{sup}$, 此时以最小体积(最小质量)为目标函数,以柔顺度为约束条件的桁架拓扑优化模型可以写成以下形式:

$$\begin{aligned} \min_a \quad & V = l^T a \\ \text{s.t.} \quad & B^T n = f \end{aligned} \quad (1)$$

$$-\sigma_c a_i \leq n_i \leq \sigma_t a_i \quad i = 1, 2, \dots, N_b$$

这里 $l = [l_1, l_2, \dots, l_{N_b}]^T$ 代表各杆件的长度, $a = [a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_{N_b}]^T$ 代表杆的横截面积,满足非负条件,当其取下限 0 (或某个极小值) 时,认为该杆件不起作用,可将其从基结构中删除,从而实现了拓扑关系的变化。 f 和 n 分别是节点载荷和杆件轴向内应力, B 为杆件的方向余弦所表示的几何矩阵;其矩阵大小为 $N_{dof} \times N_b$ 。 σ_t 和 σ_c 表示杆的许用拉、压应力。在二维计算中,具体形式如公式所示^[19]

$$\hat{b}_{i,p} = \begin{cases} \cos \theta_i & p = 2r - 1 \\ -\cos \theta_i & p = 2s_i - 1 \\ \sin \theta_i & p = 2r \\ -\sin \theta_i & p = 2s_i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

这里 $\hat{b}_{i,p}$ 表示第 i 根杆 $\hat{b}_i$ 中的第 p 个元素, r 和 s_i ($r < s_i$) 分别是第 i 根杆的两个端点下标, θ_i 表示 x 轴与节点 r, s 的连线方向 (从 r 到 s_i) 的夹角, b_i 表示缩减几何向量,即 $\hat{b}_i$ 中去掉自由度被约束位置上的元素所形成的向量。且 $B = [b_1, b_2, \dots, b_m]$, 其中 $m = N_b$ 。

优化过程中杆件中的内力必须满足应力约束条件,即 $n_i \leq \sigma_c a_i$ 或者 $n_i > -\sigma_t a_i$, 避免在减少杆件面积时,为超出应力的约束范围。在上述的公式中,引入了松弛变量 s_i^+, s_i^- 表示各杆的内应力 (拉力和压力), 将上述不等式转化为等式

$$\begin{cases} n_i + 2 \frac{\sigma_0}{\sigma_c} s_i^- = \sigma_t a_i \\ -n_i + 2 \frac{\sigma_0}{\sigma_t} s_i^+ = \sigma_c a_i \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)简化可得

$$\begin{cases} a_i = \frac{s_i^+}{\sigma_t} + \frac{s_i^-}{\sigma_c} \\ n_i = s_i^+ - s_i^- \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)带入式(1)可得,依据塑性设计的数学模型公式的最终形式为

$$\begin{aligned} \min_{s_i^+, s_i^-} \quad & V^* = \frac{V}{\sigma_i} = l^T (s^+ + \kappa s^-) \\ \text{s.t.} \quad & B^T (s^+ + s^-) = f \\ & s^+, s^- \geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\kappa = \sigma_i / \sigma_c$, s^+ , s^- 至少有一个值为 0, 且如果 $s^+ > 0$, 表示杆受拉应力, 反之则杆受压应力, 如果 s^+ 和 s^- 都为 0, 则表示杆件不起作用, 可以删除。上述的数学模型为标准的线性规划(LP)问题, 此时设计变量为杆件的轴向力, 属于线性规划问题, 因此本文可采用基于原始—对偶内点法的 MATLAB 内嵌求解器 Linprog 进行矩阵的求解。

1.2 GRAND 基结构法数据处理

对于 GRAND 方法中, 基结构的实现主要通过 4 个集合变量的定义实现, 分别是节点集合 N_n , 单元集合 N_e , 边界节点参数集合 N_f , 载荷节点参数集合 $N_l^{[19]}$ 。GRAND 方法中的初始网格的单元类型可以是任意形状, 可以是三角形, 四边形, 多边形或者上述网格的组合, 上述的信息只是定义节点的连接关系、设计区域的边界等。对于初始网格, GRAND 方法可以提供 3 种网格类型, 一类是根据上述的节点坐标单元集合生成所需网格, 一类是正交化的网格, 最后一类是质心泰森多边形 (centroidal voronoi diagrams, CVDs) 网格^[21], 如图 1 所示, 这类非规则多边形网格结构, 可以根据设计区域的改变自动生成, 且节点位置随机布置, 其多边形的形式可以增加基结构的候选样本空间, 并有利于使用短杆分段表示曲线状拓扑结构。

基结构结果数据中, 包含了经优化删减后的杆件两端的节点编号, 以及对应杆件的面积, 通过后处理可得到其材料拓扑分布, 如图 2 就是图 1 中使用基结构法得到的最优拓扑结果。

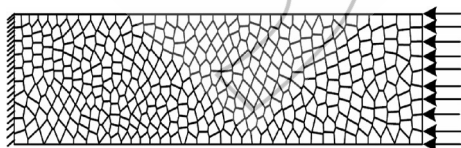


图1 质心泰森多边形基结构初始网格

Fig.1 Initial mesh performed by the CVDs for the ground structure

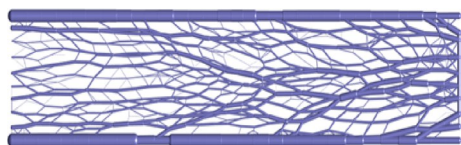


图2 基结构结果示意图

Fig.2 Schematic diagram of the ground structure result

2 基于基结构数据的仿生拓扑优化方法

基结构法虽然可以通过快速建模以及计算得到可靠的拓扑优化数值解, 但很难将其直接运用到工程应用中。最常使用的方法是根据轮廓手动设计结构的拓扑形式, 且随着问题规模的扩大, 其连续性也受到很大的影响。针对上述问题, 本文提出了仿生方法, 以基结构的计算结果为指导, 并结合进化算法, 以“增材”的方式, 形成结构的最优拓扑形式。

自然界中的生物生长, 虽然功能各异, 但都以合理利用能源为原则, 从而提升自身的生存能力。例如多头绒菌的生长, 如图 3 所示, 首先扩散出大量的网络通道去寻找食物源, 接着对连接网络进行精简化, 只保留那些最有效的连接通道来连接食物源, 并根据能量源大小分配连接通道的宽窄, 这种行为生成了复杂、高效且冗余的自适应网络结构。植物的叶脉生长, 如图 4 所示, 采取分层的概念, 以主级叶脉、次级叶脉等分级结构共同支撑叶片结构。根据植物这一生长特点, Lindenmayer 提出的 Lindenmayer 系统 (以下简称 L 系统) 方法^[22], 以一系列不同语法规则为基础, 通过修改变量字符所定义的线段长度值以及常量字符所定义的角度值, 并按照轴向树 (axial tree) 所定义的模型格式得到的类似枝杈结构的图形, 如图 4(b) 所示。

这种结合图形法中的图案生成原理, 以隐式方法得到的拓扑结构方式, 其优点在于可将复杂的公式计算以及结构设计参数转换成初始公理中的设计参数, 以递归规则控制结构拓扑生成。

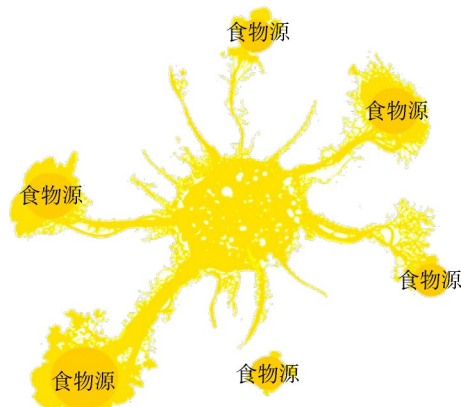
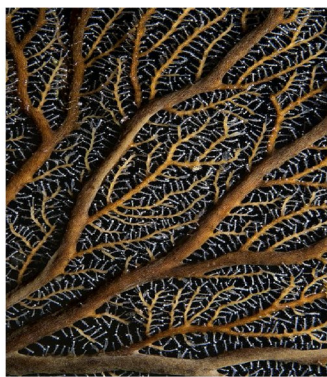


图3 多头绒菌的食物资源网络

Fig.3 A network to the food resources for the slime mould



(a) 植物叶脉结构



(b) 分形算法模拟植物生长

图4 仿生方法模拟自然结构

Fig.4 Natural structure simulated by the bionic method

其一般表达式如式(6)所示^[23]:

$$P_i: \alpha_i \rightarrow \lambda_1^i \lambda_2^i, \dots, \lambda_j^i, \quad i=1, \dots, k \quad (6)$$

其中 P_i 表示递归规则, α_i 表示递归规则的参数变量, λ_j 表示组成递归参数所需的元素, 如 $\{[,], \{+, _, -\}$ 等。 i 表示递归参数的选取集合数, 由于所需设计参数受递归规则数量影响, 如规则较少, 其各级的拓扑形式单一, 而规则较多则带来样本数量的增多, 带来计算成本的增加。本文结合 L 系统隐式构件结构拓扑形式的优点, 针对分形形式单一的问题, 结合基结构法拓扑优化所得的结果数据, 建立了一套“自下而上”的分步优化策略: 首先以基结构法所得的结构拓扑信息为基础, 通过进行均匀化处理后离散到整个设计区域内, 然后以分形系统为框架, 结合分形规则以及上一步过程中离散到设计域内的权重值, 形成类似植物的生长模式, 指导分枝拓扑结构的生长。最后结合参数化建模方法以及进化算法, 搭建有限元计算分析优化平台, 并最终得到优化结果。

2.1 基结构数据处理

GRAND 基结构法输出数据的主要由杆件的尺寸以及各尺寸所对应的基结构信息组成, 其拓扑形式输出经常会出现如图 2(d) 所示的不连续

的现象, 且该方法受外力变化的影响较大, 其杆件尺寸也与局部受力大小密切相关, 对于不同工况下的最优拓扑结构, 其结构形式以及杆件连续性各不相同, 这也为基结构法在多工况问题以及具体详细设计时带来困难。因此, 如何利用基结构法快速求解结构最优拓扑形式的优势, 在变化的设计范围内, 利用基结构法计算所得的数据, 指导后续的仿生优化, 是整个仿生分步拓扑优化的关键之一, 也为仿生分步方法中的第一步。

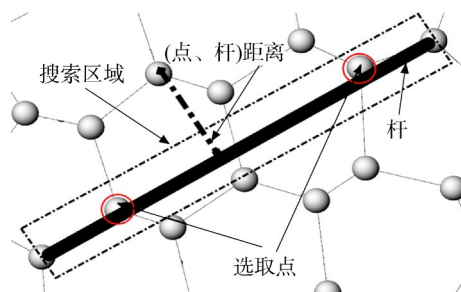
利用基结构计算得到的杆件尺寸信息以及拓扑位置信息, 可以非常直观地看出材料的分布情况, 因而对基结构的数据处理, 主要是根据初始的网格信息, 将所得到的尺寸信息进行均匀化处理。所谓的均匀化, 即将离散的杆件材料信息, 经均匀化处理后分散在受影响的节点区域, 如图 5 所示。其主要包含如下步骤:

- 1) 定义两点所决定的杆件影响区域 Ω_i 。
- 2) 计算在杆件影响区域内节点, 其距离杆件的距离。
- 3) 将材料信息与距离信息进行等效, 并分配杆件的材料信息到各自对应的节点中。
- 4) 对所有的杆件进行计算, 并将结果进行单位化处理, 从而得到个初始离散网格节点所表示的材料信息 w_i^e 。

$$w_i^e = \frac{\sum_{j=1}^m w_j}{(w_i^e)_{\max}}$$

这里 m 表示影响第 i 节点的杆件数目, w_j 表示第 j 根杆对点 i 的材料分配值, $(w_i^e)_{\max}$ 表示节点材料分配的最大值。图表示的就是将基结构法得到的尺寸信息转换到初始的离散网格节点中去。

5) 将单元各节点权重值均匀化并以单元质心点输出。具体过程为按照各节点所属单元总数对其均分, 将均分后的单元各节点权重值依次求和并除以其所属单元面积, 最后将值分配到单元质心点, 如图 5(b)。



(a) 各节点材料权重值计算

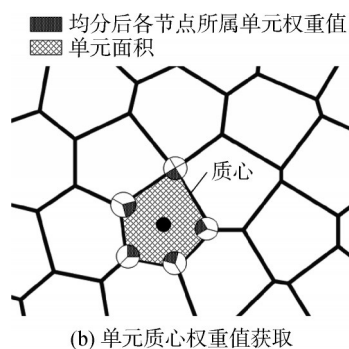


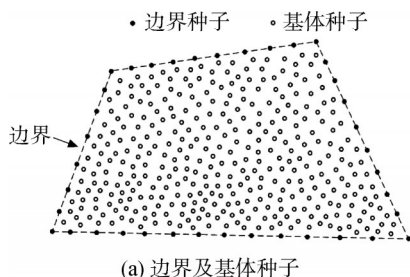
图5 基结构数据均匀化示意图

Fig.5 Schematic diagram of the ground structure data homogenization

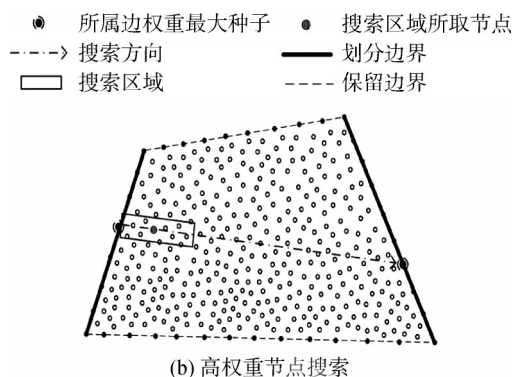
2.2 仿生分步拓扑结构生成方法

通过文中第2.1节方法对基结构所得的计算数据进行处理,将离散数据点的材料权重系数结合仿生方法并对结构生长进行指导。其中,仿生方法主要具有两类功能:①寻找结构生长方向;②分形化得到分层结构。

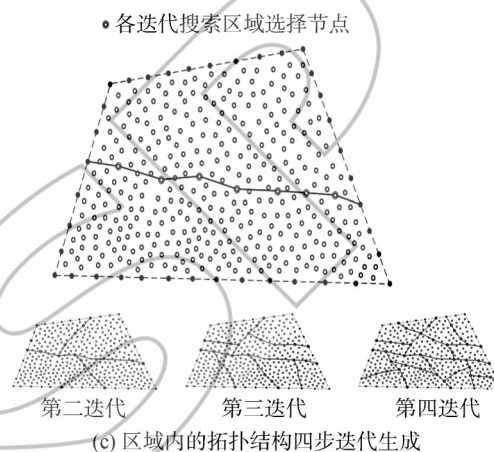
图6为基于分枝仿生拓扑结构生长示意图。在寻找结构生长方向的过程中,引入多头绒菌寻找食源的生长概念,将初始网格节点分为两类外部边界“种子”以及内部基体“种子”,在高权重值两点间建立连接关系并作为新拓扑结构的生长方向,并进行如图6(a)、图6(b)所示。在分层方面,以二进制传递映射OL系统(binary propagating map OL-systems)^[23]的思想为基础,并将边界分为“分割边界”以及“保留边界”,其中“保留边界”不参与分割,并组成下一级胞体的边界。分割边界进行二分操作,使得新的拓扑结构的生长在“界内”生成,分割后的边与保留边界形成下一级细胞的整体“边界种子”,模拟寻找合适的内部体内“种子”的过程,来指导分割线的生长方向,为了防止权重大的设计点被重复选中,在下次迭代中乘以缩减系数 λ_k (k 为所属迭代代数)。重复上述操作,直至满足终止条件(如迭代步骤、面积限制等)。



(a) 边界及基体种子



(b) 高权重节点搜索



(c) 区域内的拓扑结构四步迭代生成

图6 基于分枝仿生拓扑结构生长示意图

Fig.6 Schematic diagram of structure topology growth based on branch bionic

2.3 模型建立及迭代优化

本文主要的目的是得到类似肌肉骨骼的结构拓扑形式,并满足多工况、多功能等设计目标,因此需要建立一个迭代优化系统,包含上述的拓扑结构生成方案以及遗传算法的有限元结构求解器,使结果朝着最优形式演化。

按照文中第2.2节的分形生长规则,将建立模型的变量分为三类:①初始边界分布种子的权重值,其数量与初始网格总数有关,且各点的取值范围为(0,1);②初始边界控制参数,由控制边界形状的控制点坐标值组成;③终止条件,最小分割面积 $S_{\min}$ 以及最大分形级数 $L_{\max}$,前者为判定下一级区域是否需要分割时,最小面积值,后者为终止时达到的最大级数。这些参数通过Isight遗传算法模块进行传递,其每步迭代通过Rhino中的python编译对模型进行详细建模,并采用Abaqus中python编译模块对导入结构进行参数化有限元分析,其具体过程如图7所示。

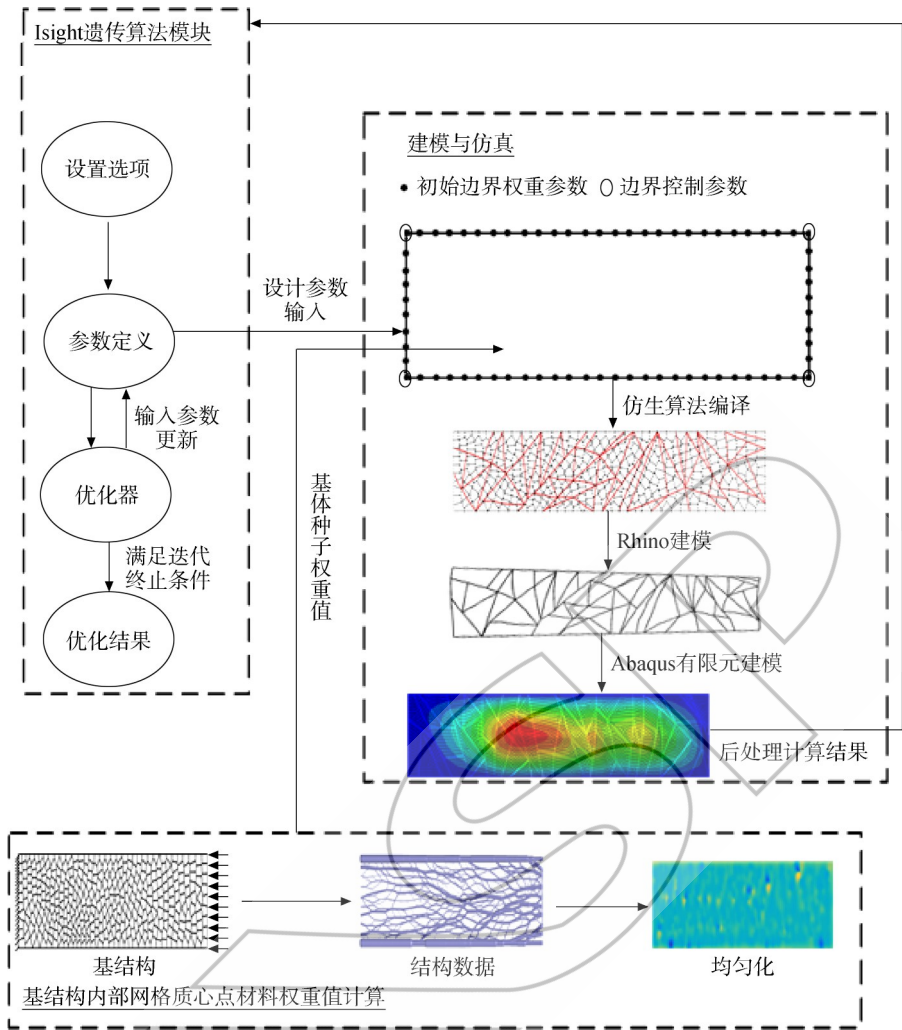


图 7 通用仿生拓扑优化流程图
Fig.7 Flow chart of general bionic topology optimization

3 设计实例

为了验证上述仿生方法在结构拓扑优化中的实用性,本节给出两种案例,其结构模型首先按照基结构法进行前期计算,并通过均匀化处理后,利用本文提出的仿生方法对设计区域内的拓扑结构生成进行指导。

3.1 结构梁

第一个示例设计研究考虑了由铝制框架元素组成的简单结构梁。其初始尺寸参数、边界条件以及载荷(F)如图 8(a)所示。图 8(b)、图 8(c)为基结构网格以及基结构计算结果,通过均匀化方法,将计算参数分散到各初始网格的质心点处,以类似分枝生长的方式在设计区域内形成结构的拓扑形式。其详细的计算以及优化参数如表 1~表 2 所示。其中 l_i 为杆件长度, l_{crmax} 为分段杆件最大长度。以设计目标为结构总质量以及结构变形扰

度最小化,限制条件为单个杆件的长度小于杆件发生屈曲最大杆长,由于都采用各部件截面积相同,结构质量由内部分枝结构总长度决定。其中初始边界种子参数控制分割的起始方向,而终止条件直接影响杆件的系数程度。所有的有限元分析建立在线性分析的基础上,能够快速得到有限元计算结果。由于本文中的分形是基于多段线段的基础来形成结构的拓扑形式,因此在最后计算过程中需要对多段线段直线化,如图 9 所示。

最终多目标优化所得的优化结果如图 10 所示,其中位移单位为 mm,质量单位为 t。用惩罚值函数将两种目标参数归一化后,随着迭代次数增加快速下降并收敛。

其中第④点为最优值点,第①数据点为初始外框架结构参数,第②点为分形等级为 2 时的优化框架结构拓扑示意图,第③和第④数据点为分形等级为 4 时优化框架结构拓扑示意图。从第②

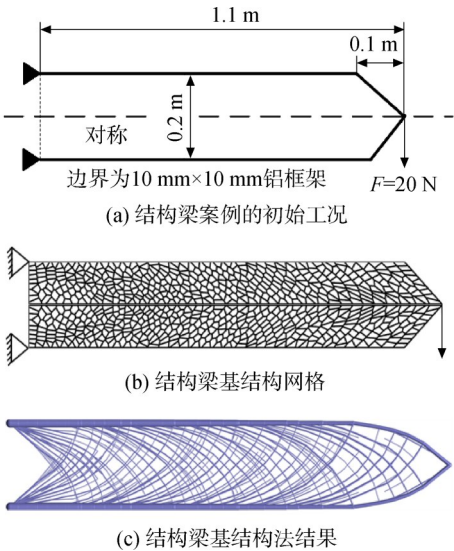


图 8 结构梁案例示意图及基结构法计算结果
Fig.8 Schematic diagram of structural beam and calculation result of base structure method

表 1 结构梁拓扑优化问题说明

Table 1 Specification of the topology optimization problem for structural beams

优化参数与条件	数值及详情
优化目标	最小化质量及变形挠度
限制条件	$l_i < l_{crmax} = 70 \text{ mm}$
初始基结构网格密度	500
初始边界种子数量	220(上下边各 100, 右边 20) 无边界控制参数
最小分割面积 S_{min}/mm^2	5 000
最大分形级数 L_{max}	4

表 2 结构梁多岛遗传算法参数设置

Table 2 Multi-islands genetic algorithms setting for structure beams

参数	数值
每代种群数量	30
迭代次数	50
岛数	10
交叉率	0.9
变异率	0.03

数据点以及第③数据点可以看出,其质量值与最大分形等级关联很大,且可以与最小分割面积相关联来控制结构拓扑的进一步增加,从而影响最终的惩罚值。由于计算案例为平面模型,可直接

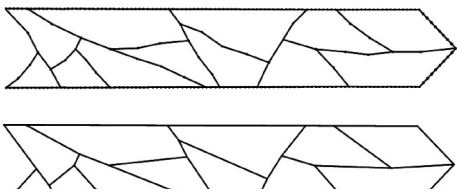


图 9 仿生方法生成拓扑结构并进行后期处理
Fig.9 Structure topology generated by bionic method and performed post-processing

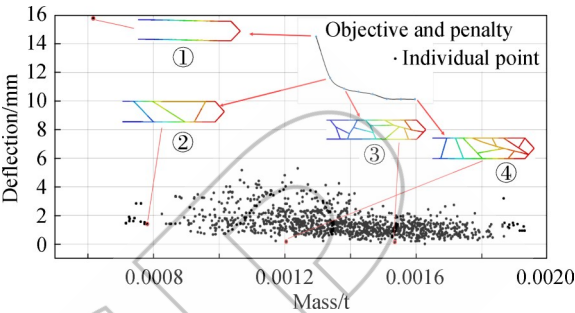
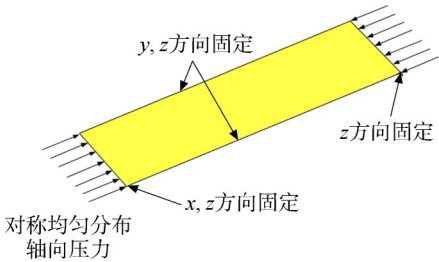


图 10 横向载荷作用下结构梁双目标优化结果
Fig.10 Dual objective optimization results for structural beams under transverse loading

调用 Abaqus 的 python 模块进行快速参数化建模。且在优化过程中,由于初始拓扑数据在基结构法中计算求得,并且隐式的表达方式使得整个模型不会因为网格精度的变化而使计算难以收敛,因而可以实现快速计算,节省计算成本。该案例单个个体完成计算时间只需 5 s,整个迭代过程只需几个小时左右便可得到收敛结果。

3.2 机翼蒙皮加筋结构

为了说明这种仿生拓扑方法在结构优化设计中的潜力,以大跨度面板屈曲优化为验证。壳体模型由长度为 1.5 m,宽度为 0.264 m 的单层复材蒙皮结构制成。面板厚度厚度为 0.21 mm。本文以单轴压缩加载情况为算例,如图 11(a)所示。其中由于蒙皮结构为三维曲面,因此需要建立一套平面与曲面的映射系统,图 11(b)、图 11(c)就是在此基础上建立基结构并得到相应的



(a) 大跨度蒙皮面板加载示意图

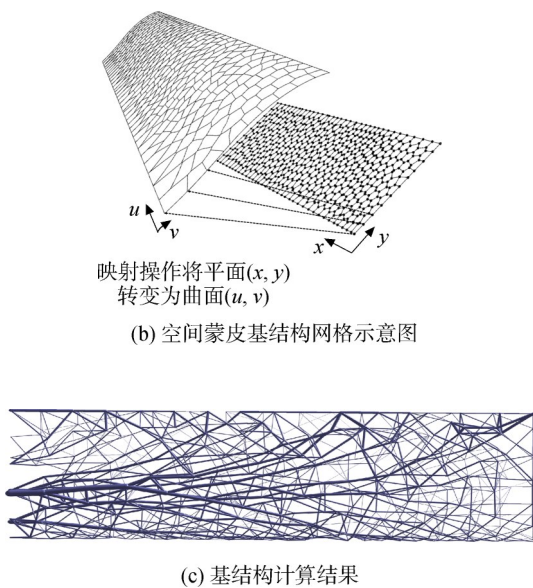


图 11 大跨度蒙皮面板案例示意图

Fig.11 Schematic diagrams of the long-span wing skin

计算结果。表 3、表 4 为机翼蒙皮优化问题的设置参数。表 5 列出了用于定义梁单元的工程常数。优化时,曲面加筋结构的筋条横截面积进行统一处理,并根据复合材料各向异性的结构特征,通过 Halpin-Tsai^[24]半经验关系确定其工程常数。

图 12 为优化计算的历程以及最终优化结果,表 6 给出了该方法与常规加筋结果在相同加筋截面的结果对比,其中 λ 为屈曲载荷系数,且为无量纲系数。优化后其蒙皮的屈曲载荷系数提升了 10.61%,并且质量降低了 10.85%。达到了优化设计的目的,进一步地验证了仿生优化方法在建模以及结构分析中解决工程问题的可行性。

表 3 机翼蒙皮拓扑优化问题说明

Table 3 Specification of the topology optimization problem for the wing skin

优化参数与条件	数值及详情
优化目标	最大化屈曲载荷系数 λ
限制条件	质量小于优化前常规质量
初始基结构网格密度	1 000
初始边界种子数量	240(上下边各 100,左右边各 20,无边界控制参数)
最小分割面积 $S_{\min}$	10 000
最大分形级数 $L_{\max}$	5

表 4 机翼蒙皮多岛遗传算法参数设置

Table 4 Multi-islands genetic algorithms setting for the wing skin

参数	数值
每代种群数量	30
迭代次数	20
岛数	10
交叉率	0.9
变异率	0.03

表 5 复合材料工程常数

Table 5 Composite material engineering constants

参数	数值
纵向刚度 $E_1/(N/mm^2)$	157 650
横向刚度 $E_2(E_3)/(N/mm^2)$	13 280
剪切刚度 $G_{12}(G_{13})/(N/mm^2)$	4 561
面内剪切刚度 $G_{23}/(N/mm^2)$	4 538
泊松比 $\nu_{12}(\nu_{13})$	0.256
泊松比 ν_{23}	0.463

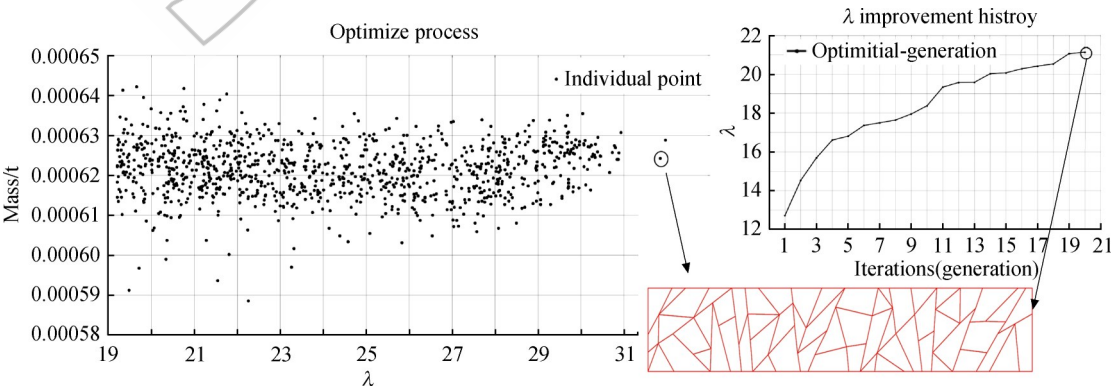


图 12 单项压缩作用下机翼蒙皮屈曲拓扑优化结果

Fig.12 Buckling topology optimization results to the wing skin under uniaxial compression load

表6 机翼蒙皮单向受力状态下优化结果对比
Table 6 Comparison of wing skin optimization under uniaxial compression load

模态	常规加筋 λ	仿生加筋 λ	提升率/%
1	22.557	23.345	3.49
2	25.282	27.561	9.01
3	28.815	31.874	10.61

4 结 论

本文通过分形系统的研究,建立了一种基于基结构法计算结果的仿生拓扑优化结构设计流程,建立了二维图形与三维结构的映射关系,并根据两类工程案例对该方法的可行性进行了验证。相比于其他传统拓扑优化方法,该生物启发式拓扑优化方法具有以下优势:

1) 以间接参数形式表达结构的拓扑特征,因而受尺寸规模影响较小。

2) 该方法生成的拓扑构型简单,无需多余的后续处理。其单个模型生成及计算快捷,适合于进化算法在大计算量下对全局进行最优解求解。

3) 具有多种参数设置接口,可将复杂的物理模型如气动载荷分布、热分布等参数揉入优化进程中,为未来探索新颖、高效的自适应飞机结构提供有效的技术支持。

总的来说,本文提出的拓扑优化方法为传统的结构优化设计提供了一种不同的设计思路,并可为对设计目标快速提供一系列近似最优解,为前期方案设计提供有效的数据以及概念支撑。

参考文献:

- [1] DEATON J D, GRANDHI R V. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000 [J]. Structural and Multi-disciplinary Optimization, 2014, 49(1): 1-38.
- [2] ESCHENAUER H A, OLHOFF N. Topology optimization of continuum structures: a review [J]. Applied Mechanics Reviews, 2001, 54(4): 331-390.
- [3] ZHANG X S, DE STURLER E, PAULINO G H. Stochastic sampling for deterministic structural topology optimization with many load cases: density-based and ground structure approaches [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 325: 463-487.
- [4] ALLAIRE G, JOUVE F, TOADER A M. Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method [J]. Journal of Computational Physics, 2004, 194(1): 363-393.
- [5] DIMCIC M. Structural optimization of grid shells based on

genetic algorithms [D]. Stuttgart, Germany: Stuttgart University, 2011.

- [6] NAGY D, ZHAO D, BENJAMIN D. Nature-based hybrid computational geometry system for optimizing component structure [C] // Humanizing Digital Reality. Singapore City, Singapore: Springer Nature Singapore Private Limited, 2018: 167-176.
- [7] HAMM C. Evolution of lightweight structures: analyses and technical applications [M]. Berlin, Germany: Springer, 2015.
- [8] MAIER M, SIEGEL D, THOBEN K D, et al. Transfer of natural micro structures to bionic lightweight design proposals [J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10(4): 469-478.
- [9] DING X, YAMAZAKI K. Adaptive growth technique of stiffener layout pattern for plate and shell structures to achieve minimum compliance [J]. Engineering Optimization, 2005, 37(3): 259-276.
- [10] LI B, HONG J, WANG Z, et al. An innovative layout design methodology for stiffened plate/shell structures by material increasing criterion [J]. Journal of engineering materials and technology, 2013, 135(2): 021012.1-021012.11.
- [11] PEDRO H T C, KOBAYASHI M H. On a cellular division method for topology optimization [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2011, 88(11): 1175-1197.
- [12] HARTL D J, REICH G W, BERAN P S. Additive topological optimization of muscular-skeletal structures via genetic L-system programming [C] // Proceedings of 24th AIAA/AHS Adaptive Structures Conference. San Diego, US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016: 1569-1582.
- [13] DORN W, GOMORY R E, GREENBERG H G. Automatic design of optimal structures [J]. Journal de Mécanique, 1964, 3(1): 25-52.
- [14] SOKÓL T. A 99 line code for discretized Michell truss optimization written in Mathematica [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2011, 43(2): 181-190.
- [15] MARTINEZ P, MARTI P, QUERIN O M. Growth method for size, topology, and geometry optimization of truss structures [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2007, 33(1): 13-26.
- [16] TALISCHI C, PAULINO G H, PEREIRA A, et al. PolyTop: a Matlab implementation of a general topology optimization framework using unstructured polygonal finite element meshes [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2012, 45(3): 329-357.
- [17] SMITH O D S. Generation of ground structures for 2D and 3D design domains [J]. Engineering Computations, 1998, 15(4): 462-500.
- [18] LEWIŃSKI T, ROZVANY G I N, SOKÓL T, et al. Exact analytical solutions for some popular benchmark problems in topology optimization: III L-shaped domains revisited [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2013, 47(6): 937-942.
- [19] ZEGARD T, PAULINO G H. GRAND: ground structure

- based topology optimization for arbitrary 2D domains using MATLAB[J].Structural and Multidisciplinary Optimization, 2014, 50(5):861-882.
- [20] ZEGARD T, PAULINO G H. GRAND3: ground structure based topology optimization for arbitrary 3D domains using MATLAB[J].Structural and Multidisciplinary Optimization, 2015, 52(6):1161-1184.
- [21] DU Q, GUNZBURGER M. Grid generation and optimization based on centroidal Voronoi tessellations[J]. Applied Mathematics and Computation, 2002, 133(2/3):591-607.
- [22] LINDENMAYER A. Developmental algorithms for multicellular organisms: a survey of L-systems[J]. Journal of Theoretical Biology, 1975, 54(1):3-22.
- [23] DE BOER M J M, LINDENMAYER A. Map OL-systems with edge label control: comparison of marker and cyclic systems[C]//International Workshop on Graph Grammars and Their Application to Computer Science. Berlin: Springer, 1986:378-392.
- [24] KUEH A, PELLEGRINO S. ABD matrix of single-ply triaxial weave fabric composites[C]//Proceedings of 48th AIAA/ASME/AS-CE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Honolulu, US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007:2161-2478.

(编辑:张 雪)