

文章编号:1000-8055(2013)09-2090-10

基于自适应随机抽样敏度分析的双向渐进 结构优化方法

宋 健, 温卫东, 张宏建

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为了解决周期循环结构拓扑优化难题,在传统的双向渐进结构优化方法(BESO)的基础上,引入了一种自适应参数策略和随机抽样的方法,提出了基于自适应随机抽样敏度分析的双向渐进结构优化方法,该方法同样适用于非周期结构.以该方法为基础,对 Michell 桁架结构进行了拓扑优化设计,得到了与理论解一致的结构,并且相对初始结构质量减少了 71.5%,说明了所提方法的正确性.基于此方法对多辐板风扇盘进行了结构拓扑优化设计,得到了三辐板风扇盘结构,相比同等设计条件下的参考风扇盘质量减少了 17.12%,进一步说明了此方法具有处理复杂周期循环结构拓扑优化设计问题的能力,另外此方法克服了传统双向渐进结构优化方法中容易产生的振荡问题.

关 键 词: 自适应策略; 随机抽样方法; 周期循环结构; 双向渐进结构优化; 多辐板风扇盘

中图分类号: V214.19

文献标志码: A

Bi-directional evolutionary structural optimization method based on self-adaption and random sampling sensitivity analysis

SONG Jian, WEN Wei-dong, ZHANG Hong-jian

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to solve the issue of periodic structural topology optimization with design-dependence, the self-adaption strategy and random sampling method were developed, and a topology optimization approach called bi-directional evolutionary structural optimization (BESO) using self-adaption and random sampling sensitivity analysis was proposed based on traditional BESO method. It is also suitable for the non-periodic structures. Based on the approach, the Michell truss structure topological optimization design was carried out, and the optimum structure was obtained in consistence with the theoretical solution. The mass was reduced by 71.5%, compared with the initial structure, showing the proposed method is reasonable; moreover, the multi-web fan disk was designed by the above method, and a new three-web fan disk was obtained. The mass declined by 17.21% in relation to the reference fan disk. The results further illustrates that the method has the ability to cope with the complex issue of periodic structural topology optimization. Additionally, the prone oscillation problems of classical BESO method has been overcome by the algorithm.

Key words: self-adaption strategy; random sampling method; periodic structure; bi-directional evolutionary structural optimization; multi-web fan disk

收稿日期:2012-09-27

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130926.1103.201309.2090_014.html

作者简介: 宋健(1986—),男,吉林长春人,硕士生,主要从事航空发动机零件结构优化设计方法研究.

结构优化设计是在满足约束条件下,采用一定的优化技术在预定结构设计域上,寻找材料的最优分配。目前主要的结构优化技术可以分为尺寸、形状及拓扑优化,其中拓扑优化技术相当复杂。在拓扑优化设计领域中,可以分为离散体拓扑优化和连续体拓扑优化,由于连续体拓扑优化模型具有描述复杂和数值计算量大等特点,成为拓扑优化领域的难点。目前连续体拓扑优化方法中主要有变厚度法^[1]、均匀化法^[2]、变密度法^[3]、ICM(独立、连续、映射)法^[4]、水平集法^[5]和渐进结构优化方法^[6]。在这些连续体拓扑优化方法中渐进结构优化方法具有优化概念清晰、易程序化、便于处理大规模优化问题等优点,被广泛地应用于应力、频率、位移和多约束、多目标的连续体结构优化设计中。

谢亿民等^[7]指出渐进结构优化(evolutionary structural optimization, ESO)方法可以对桁架、钢架、板壳和三维连续实体结构进行优化,优化的设计条件可以包括应力、刚度、位移、频率及临界压力,并采用ESO方法对Michell桁架进行了拓扑优化,得到了与Michell桁架理论解相一致的构型。由于ESO方法存在误删单元的缺点,Quer-in等^[8]于1998年提出了基于应力的双向渐进结构优化(bi-directional evolutionary structural optimization, BESO)方法,并用该方法对双杆桁架问题进行了拓扑优化设计,得到的最优构型与ESO方法得到的最优构型相同,并且其方法在效率上高于ESO方法,但文中的方法存在多次振荡的问题。荣见华等^[9]于2003年提出了基于应力及其敏度的结构拓扑优化方法,并认为满应力设计和结构最大应力最小化是工程设计中结构优化追求的两个方面,同时受变密度法的启发,提出了基于人工材料的渐进结构优化方法^[10],该方法有效地减少或避免了总刚度矩阵病态现象。考虑到BESO或ESO均是一类硬杀类方法,Huang和Xie^[11]在BESO方法的基础上引入了SIMP(solid isotropic material with penalization)材料模型^[12],提出了一种基于SIMP模型的软删单元的BESO方法,并从理论上证明了此方法的合理性。刘书田等^[13]采用基于SIMP插值模型的渐进结构优化方法对Zhou和Rozvany^[14]的算例模型(本算例为ESO优化失败的典型算例)进行优化,得到了合理的拓扑构型,同时给出了ESO方法失败的原因:单元进化步长较大,导致灵敏度失真。刘超^[15]在BESO方法的基础上,引入了随机抽样敏度分析的

概念,提出了基于随机抽样敏度分析(RSSA)的双向渐进结构优化方法,并对航空发动机涡轮盘进行拓扑优化设计,得到了一种双辐板形式的新型涡轮盘结构,同比参考单辐板涡轮盘质量减少12.76%,但在该方法中单元的删除率和添加率在结构优化过程中是不变的,无法反映出每一代单元删除个数对结构优化的影响。

以上研究的拓扑优化模型只涉及到单一结构,但考虑到加工制造的要求,越来越多的周期循环结构被广泛地应用。Wadley等^[16]在对含蜂窝结构的三明治平板进行周期微结构设计时,将结构设计等价于只对代表性微结构(单胞)进行设计。Sigmund等^[17]将周期性边界条件加入到代表性微结构中,研究了剪切力对此微结构设计的影响。然而,对于宏观成周期循环的结构而言,并不能简单地将载荷对整体结构的影响等价于对结构中微小单元的影响,即整体结构受力的响应(应力、应变等)并不能简化为部分结构受部分力的响应。Zhang和Sun^[18]将宏观结构质量作为优化目标,通过对组成它的代表性单元结构进行设计,得到了周期循环结构最优构型,但该方法由于在每一代要执行两次有限元计算而存在效率问题。为了兼顾效率和结构循环性要求,Huang等^[19]于2008年提出了一种在BESO方法中加入重复性约束条件,即对应单元同步增减的方法,他认为:因为循环性约束的作用,所以去除(添加)代表性结构中某一单元的灵敏度等价于去除(添加)所有循环结构中对对应位置的单元对整体结构的敏度平均值,并应用该方法对凯迪拉克车轮进行拓扑优化设计,得到了与宝马车轮一致的构型,同时很好地回避了随着周期数增加方法效率下降的问题。

本文以随机双向渐进结构优化方法为基础,提出一种基于自适应随机抽样敏度分析双向渐进的结构优化方法(A-RSSA-BESO),该方法采用一种自适应删除率的计算方法,并引入Huang等提出的周期性约束条件,重新调整方法结构。文中通过算例分析验证了本文方法是合理而有效的。

1 基于A-RSSA-BESO方法的结构拓扑优化

本文受Michell桁架具有最小的体积/刚度比的启发^[20],以无量纲化的结构总应变能与结构总体积的乘积作为性能指标,并认为单元应变能敏度低为低效单元,反之为高效单元。应用随机抽样方法,将结构单元分成一定数量的子样本(单元

集),分别计算每个子样本集的敏度,实现删除和添加单元集的过程,最终结构趋于最优.下面对A-RSSA-BESO方法进行详细阐述.

1.1 结构拓扑优化数学模型

$$\begin{cases} \text{find} & \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \\ \text{min} & P = [\lg(S_e)_{d,i} \cdot V_{d,i}] / [\lg(S_e)_{d,0} \cdot V_{d,0}] \\ \text{s. t.} & \mathbf{F} = \mathbf{K}\mathbf{u} \\ & \sigma_{\max,r} < [\sigma^*]_r / n_r \quad r = 1, 2, \dots \\ & x_i = \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{x}$ 为设计变量,取值为 0 或者 1; P 为无量纲目标函数,表征当前结构的体积/刚度比,也常被称为性能指标数; $(S_e)_{d,i}$ 为当前结构总应变能; $(S_e)_{d,0}$ 为初始结构总应变能; $V_{d,i}$ 为当前结构总体积; $V_{d,0}$ 为初始结构总体积; $\mathbf{F}$ 为当前结构所承受的载荷向量; $\mathbf{K}$ 为当前结构的总刚度矩阵; $\mathbf{u}$ 为当前结构的位移向量; $\sigma_{\max,r}$ 为第 r 个应力约束所表示的最大值; $[\sigma^*]$ 为第 r 个应力约束所表示的许用值; n_r 为相应应力下的安全系数.

随着结构向最优化目标逼近,性能指标是逐渐趋于最小值的,因此 P 的走势与质量最轻、结构柔顺度最小化的优化目标走势一致.

1.2 自适应随机抽样敏度分析

随机抽样敏度拓扑优化方法是采用随机抽样策略实现成组删除和增加单元的渐进结构优化方法.

1.2.1 删除单元的抽样策略

单元删除的过程:首先将当前结构单元按照应变能密度大小逐步选进搜索单元集 Φ ,直至单元集 Φ 的体积达到体积阈值 V_s , V_s 计算公式为

$$V_s = R_{mf} \times R_t \times V_{d,0} \quad (2)$$

式中 R_{mf} 为搜索范围倍数; R_t 为自适应单元删除率.

其次,在上述搜索单元集中应用随机抽样方法,得到指定数量的样本,其中每一个样本最大体积上限为 V_{del} ,按如下公式计算:

$$V_{del} = R_t \times V_{d,i} \quad (3)$$

1.2.2 添加单元的抽样策略

首先,将外边界单元按其邻接 1, 2, 3 和 4 个当前结构单元分类,并分别选进单元集 Φ_1, Φ_2, Φ_3 和 Φ_4 .其次,分别以 10%, 20%, 30% 和 40% 的概率从 Φ_1, Φ_2, Φ_3 和 Φ_4 中随机抽取单元并选进样本单元集 Φ_a ,直至 Φ_a 中单元的总积大于 V_a . V_a 的计算公式为

$$V_a = J \times V \quad (4)$$

式中 J 为单元添加率.

1.2.3 样本敏度计算

如果当前结构为可行解,则按下式计算样本敏度:

$$S = \left[1 - \frac{P_s}{P} \right] \exp \left[\beta \left(\frac{l_0}{l_s} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

式中 P 为当前结构的性能指标数; l_0 为当前结构的边界长度; P_s 为删除或添加样本单元集后结构的性能指标数; l_s 为删除或添加样本单元集后结构的边界长度; β 为放大系数,通常取 $\beta=10$.

如果当前结构为非可行解,则首先判断危险模式

$$C_i = \frac{c_{si}}{[c_{si}]} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (6)$$

式中 C_i 为第 i 个约束的危险系数,是第 i 个约束值 c_{si} 与其许用值 $[c_{si}]$ 的比值,表征了第 i 个约束的危险程度.则

$$K = \text{index}[\max(C_1, C_2, \dots, C_k)] \quad (7)$$

式中 index 取 $\max$ 函数的下标, K 为危险模式,数值上等于最危险约束的索引值.则样本敏度可由下式计算:

$$S = \left[1 - \frac{C_{K,s}}{C_K} \right] \exp \left[\beta \left(\frac{l_0}{l_s} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

式中 C_K 为当前结构第 K 个约束条件的危险系数; $C_{K,s}$ 为删除或添加样本单元集后第 K 个约束条件的危险系数.

由式(5)和式(8)可以发现本文给出的敏度计算公式由两部分组成:差分项(线性项)和放大项(比例项).差分项反映了性能参数的梯度,与传统 ESO 方法中的单元灵敏度意义一致;放大项是考虑到拓扑边界对结构的影响,是对差分项的一种缩放作用.

1.2.4 自适应删除率

由于采用随机抽样策略会出现一次性删除大量单元,根据式(5)、式(8)可知样本敏度是性能参数的梯度,所以删除率对样本敏度会产生较大影响,甚至导致样本敏度的失真,因而本文提出了一种删除率计算方法,此方法的基本出发点是当单元删除过多时,减小单元删除率;当单元删除过少时,增加删除率.计算公式如下:

$$R_t = R_{dl} + \Delta^n (R_{ul} - R_{dl}) \quad (9)$$

$$\Delta^n = \begin{cases} \left[1 - \frac{S^{(n-1)}}{\lambda S_{ul}} \right]^A & S^{(n-1)} \leq \lambda S_{ul} \\ \left[\frac{\lambda S_{ul}}{S^{(n-1)}} \right]^P & S^{(n-1)} > \lambda S_{ul} \end{cases} \quad (10)$$

式中 R_{all} 为自适应删除率下限; R_{ul} 为自适应删除率上限; S_{ul} 为样本敏度上限, 此值可以取 BESO 方法中的删除率, 为 0.1; $S^{(n-1)}$ 为前一代样本敏度; A 为自适应调节因子; λ 为截断因子, 取 0.6; n 为进化代数。

自适应策略的意义为: 当上一代最优样本的敏度超过 60% 的敏度上限时, 判定为删除率过大, 所以通过式(10)下式减小删除率, 相反则通过式(10)上式增大删除率, 另外, 截断因子取 0.6 (大于 0.5), 主要从提高方法效率角度考虑。

1.2.5 宏观周期循环结构拓扑优化约束条件

在原有模型的基础上考虑周期循环性, 设计域将被均匀分成 $m = m_1 \times m_2$ 个周期子结构, 其中 m_1 和 m_2 分别为 x 和 y 方向的子结构数量, 如图 1 所示。

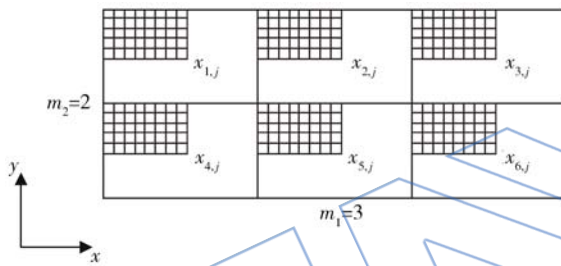


图 1 含 6 个子结构的周期性二维结构 ($m=6$)

Fig. 1 2-D periodic structure with six substructures ($m=6$)

其中二元设计变量 x_{ij} 中, i 是子结构的序号, j 为子结构中所含有限元个数。

当结构为非周期性结构时令 $m=1$, 本文方法仍然适用, 即非周期结构 ($m=1$) 是周期结构 ($m \geq 1$) 的特例。

对比一般结构拓扑优化数学模型式(1), 周期循环结构拓扑优化数学模型可以采用如下式表达:

$$\begin{cases} \text{find} & \mathbf{x} = (x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{mk})^T \\ \min & P = [\lg(S_e)_{d,i} \cdot V_{d,i}] / [\lg(S_e)_{d,0} \cdot V_{d,0}] \\ \text{s. t.} & \mathbf{F} = \mathbf{K}\mathbf{u} \\ & \sigma_r \leq [\sigma_r] / n_r \quad r = 1, 2, \dots, p \\ & x_{1k} = x_{2k} = \dots = x_{mk} \\ & x_{mk} \in \{0, 1\} \\ & i = 1, 2, \dots, n_1 \quad k = 1, 2, \dots, n_2 \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中第 3 个约束条件表明: 在不同的子结构的同一位置上的不同单元的存在状态(0 或 1)是始终保持一致的, 这样就可以保证由拓扑优化设

计出来的结构保持循环特点, 这就是周期循环结构约束条件。另外, 通过式(11)可以看出, 与把结构简化为每一个子结构分析是不同的, 宏观周期结构是整体结构进行有限元分析, 而单元的进化是在某子结构中实现的。该方法既可以合理地解决宏观周期性拓扑优化问题, 又很好地回避了周期性导致效率下降的问题。

周期循环结构的样本集增删发生在代表性结构中, 受 Huang 等^[19]的启发, 本文首先将整体结构中对位置相同的单元应变能密度取平均值, 将此值赋给代表性子结构对应位置上的单元, 之后当第 m 个子结构的第 k 个样本集被删除或添加时, 整体结构的敏度式(5)、式(8)变为

可行解

$$S^k = \left[1 - \frac{P_s}{P}\right]^{m,k} \exp\left[\beta \left[\frac{l_0}{l_s} - 1\right]^{m,k}\right] \quad (12)$$

非可行解

$$S^{m,k} = \left[1 - \frac{C_{K,s}}{C_K}\right]^{m,k} \exp\left[\beta \left[\frac{l_0}{l_s} - 1\right]^{m,k}\right] \quad (13)$$

由于子结构具有循环性, 不同子结构的第 k 个样本集中的单元状态相同, 即这些样本集中的单元应该同时被删除或被添加。式(12)、式(13)由不同子结构上的单元删除或添加所引起的对整体结构的敏度变化应近似等于各个子结构中的子样本集所引起子结构敏度变化的平均值。因此, 本文引入代表性子结构的概念, 即整体结构单元的增删过程完全可以由代表性子结构中单元的增删代替。

1.2.6 A-RSSA-BESO 方法流程

A-RSSA-BESO 方法流程如图 2 所示。

1) 优化参数初始化。

2) 几何建模, 用规则有限元网格离散最大初始设计域, 初始化单元材料编号, 迭代数 $I=1$, $S_F=0$ 时为删除操作, $S_F=1$ 时为添加操作。

3) 对整体结构进行有限元分析, 判断 S_F 是否为 0, 若是则进行第 4) 步, 否则跳至第 9) 步。

4) 计算整体结构性能参数, 判断是否产生新局部最优解: 若是, 更新最优解集, 局部最优解停滞计数器清零, 否则, 局部最优解停滞计数器加 1。

5) 按周期性约束条件, 根据结构单元应变能密度大小, 确定代表性子结构, 并计算自适应删除率, 确定采样空间。

6) 判断结构危险模式, 根据自适应删除单元抽样策略计算样本敏度, 并提取敏度值最大的单

元集。

7) 若最大样本敏度大于0,则删除敏度值最大的样本单元集,更新结构,并令局部最优解停滞计数器 $N_w=0$;若最大样本敏度小于或等于0,则判断 N_w 是否大于允许值,若 N_w 大于或等于允许值,则删除敏度值最大样本单元集,更新结构,并令 $N_w=0$;若 N_w 小于允许值,则 N_w 加1。

8) 根据代表性子结构中单元存在状态还原整体结构,令 $S_F=1$,并返回第3)步。

9) 按周期性约束条件,确定代表性子结构。

10) 按添加单元的抽样策略计算样本敏度,

并提取敏度值最大的单元集。

11) 若最大样本敏度值大于0,则添加敏度值最大子样所对应的样本单元集,更新结构,并令 $N_w=0$,令 $S_F=0$;否则直接令 $S_F=0$ 。

12) 判断是否满足终止条件:①最大迭代步数达到指定值;② N_w 达到指定值;③体积达到下限。若满足终止条件则选择最优拓扑构型进行空隙过滤,拓扑优化结束;否则迭代数 I 加1,根据代表性子结构中单元存在状态还原整体结构,返回第3)步。

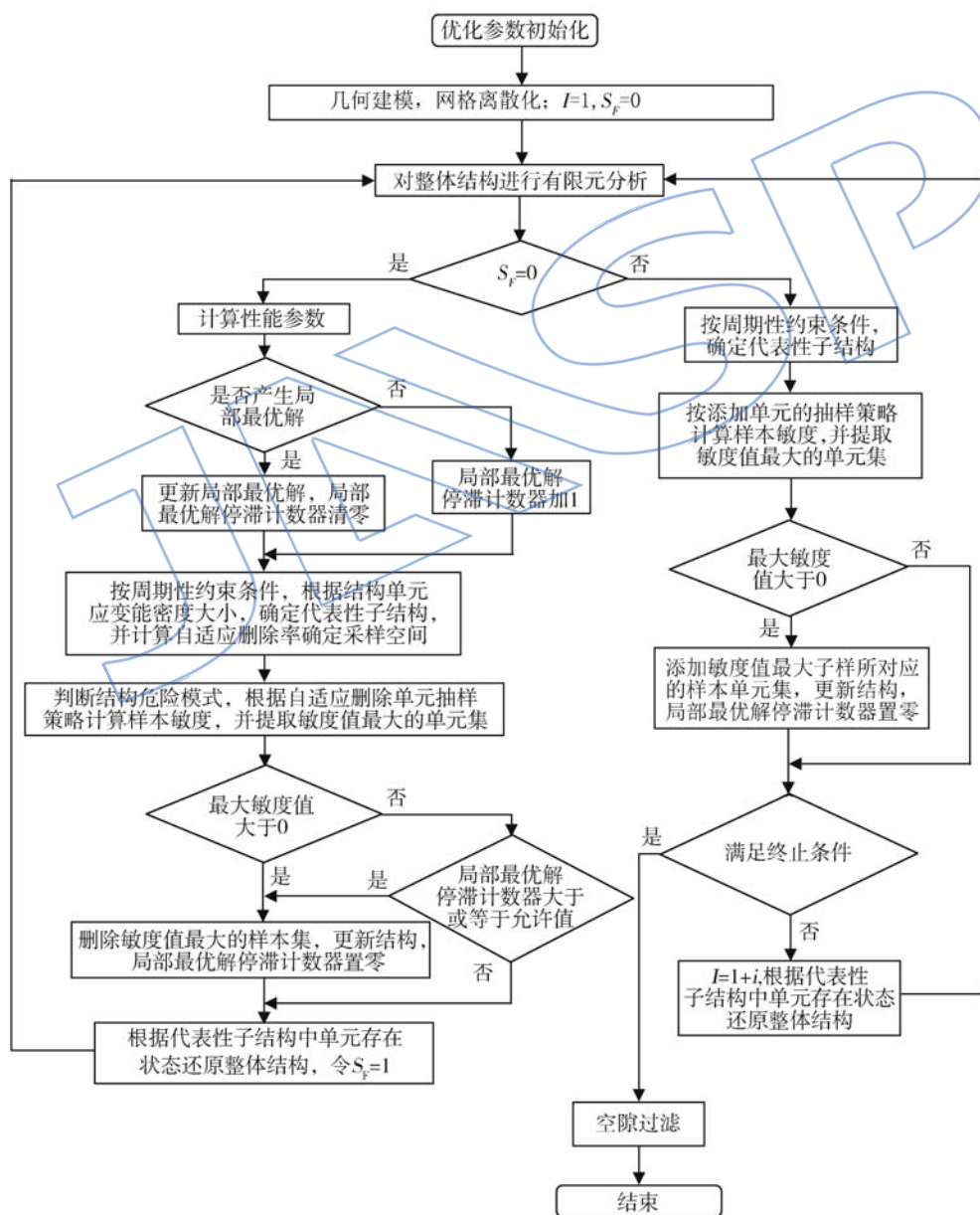


图2 A-RSSA-BESO方法流程图

Fig. 2 A-RSSA-BESO flow chart

2 算例及结果分析

2.1 两端固支的 Michell 桁架结构设计

2.1.1 问题描述

如图3所示二维矩形结构,初始设计域为 $2\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的矩形区域,厚度为 1 mm ,两端固支,受集中力 $F=200\text{ N}$ 作用. 弹性模量 $E_0=1\text{ N/m}^2$,泊松比 $\nu=0.3$. 并取周期数 $m=1$.

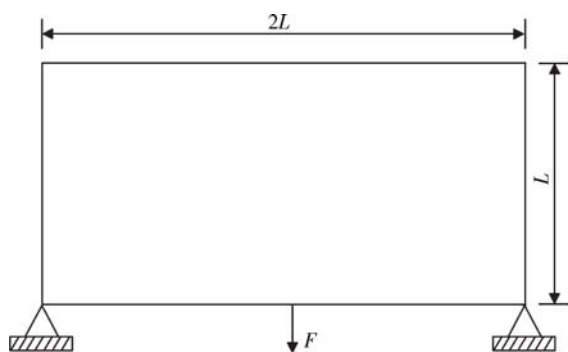


图3 受集中载荷作用的两端固支二维矩形结构
Fig. 3 2-D rectangular structure fixed at both ends with concentrated load

优化参数设置:搜索范围数 $R_{mf}=3$,自适应因子 $P=1$,单元添加率 $J=0.005$,抽样个数为 $N_{seed}=20$,最大停滞次数为5,局部最优解允许停滞次数为50,最大允许迭代次数为400,周长因子 $\beta=20$,孔洞滤波因子为0.1. 约束条件为 $V_i \geq 0.1$.

2.1.2 优化结果及分析

加入自适应策略的拓扑优化方法共经历81代到达收敛,而不加入自适应策略(删除率恒为1)的拓扑优化方法经历155代到达收敛,图4、图5分别给出了加入自适应策略与不加入自适应策略得到的最优结构。

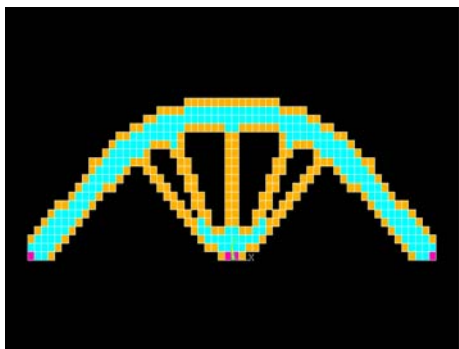


图4 加入自适应策略得到的最优结构
Fig. 4 Optimum structure with self-adaption strategy

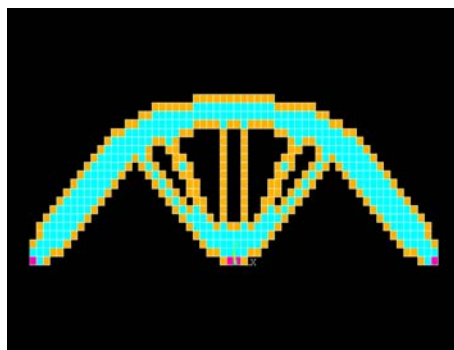


图5 不加入自适应策略得到的最优结构
Fig. 5 Optimum structure without self-adaption strategy

图6、图7给出了文献[20]中的 Michell 桁架的理论构型和文献[21]中采用 BESO 方法获得的最优拓扑构型。

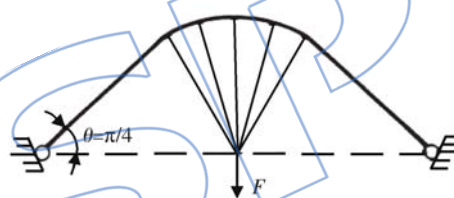


图6 文献[20]中的 Michell 桁架的理论构型
Fig. 6 Theoretical solution of Michell truss structure in Ref. [20]

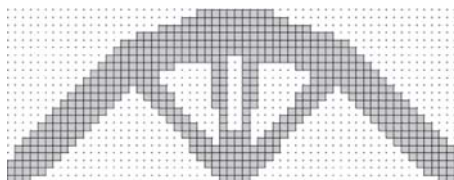


图7 文献[21]中 BESO 方法获得的 Michell 桁架的最优拓扑构型
Fig. 7 Optimum solution of Michell truss structure with BESO in Ref. [21]

由图4~图7可知,A-RSSA-BESO方法和RSSA-BESO方法均得到了与 Michell 桁架理论构型相似的结构,说明了方法是正确的. 另外,通过迭代次数可知,加入自适应策略可以在保证方法稳定的同时提高方法效率. 图8和图9给出了性能指标数和体积比的迭代情况。

从图8和图9可以看出,自适应策略可以显著提高方法效率。

最终拓扑优化质量减少了71.5%。

2.2 多辐板风扇盘结构拓扑优化分析

2.2.1 数学模型

针对目前先进航空发动机风扇多采用多辐板

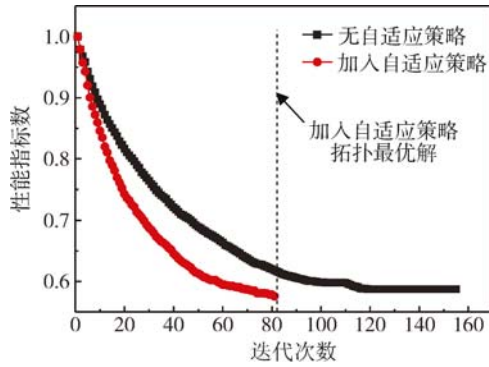


图8 性能指标数随迭代次数的变化曲线

Fig. 8 Evolution curves of performance index with iteration number

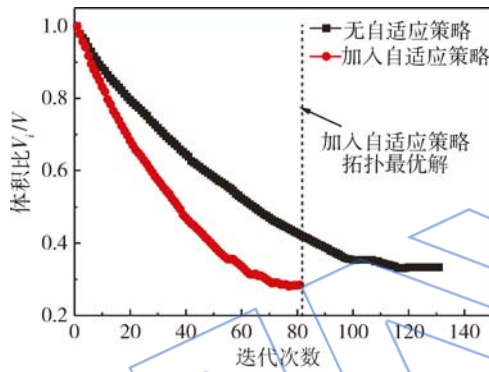


图9 体积比随迭代次数的变化曲线

Fig. 9 Evolution curves of volume ratio with iteration number

风扇盘的情况,并且该类多辐板体现出周期性结构特征,下面采用本文的拓扑优化方法,将多辐板风扇盘结构拓扑优化表达为如下数学模型:

$$\begin{cases}
 \text{find} & \mathbf{x} = \{x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{nk}\} \\
 \text{min} & P(\mathbf{x}) = \frac{\lg(S_e)_{d,i} \cdot V_i}{\lg(S_e)_{d,0} \cdot V_0} \\
 \text{s. t.} & \mathbf{F} = \mathbf{K}\mathbf{u} \\
 & \sigma_x \leq [\sigma_x]/n_x \quad \sigma_{za} \leq [\sigma_{za}]/n_{za} \\
 & \sigma_{zb} \leq [\sigma_{zb}]/n_{zb} \quad \sigma_{zh} \leq [\sigma_{zh}]/n_{zh} \\
 & \sigma_{eqvb} \leq [\sigma_{eqvb}]/n_{eqvb} \\
 & x_{1k} = x_{2k} = \dots = x_{mk} \\
 & x_{mk} \in \{0, 1\} \\
 & i = 1, 2, \dots, n_1 \quad k = 1, 2, \dots, n_2
 \end{cases} \quad (14)$$

式中 σ_x 为风扇盘最大径向应力,其许用值为 $[\sigma_x]$,对应的安全系数为 n_x ; σ_{za} 为风扇盘子午面平均周向应力,其许用值为 $[\sigma_{za}]$,对应的安全系数为 n_{za} ; σ_{zh} 为风扇盘盘心最大周向应力,其许用值为

$[\sigma_{zh}]$,对应的安全系数为 n_{zh} ; σ_{eqvb} 为风扇盘盘心最大等效应力,其许用值为 $[\sigma_{eqvb}]$,对应的安全系数为 n_{eqvb} .

2.2.2 物理模型

图10给出了本算例用到的某参考风扇盘子午轮廓图。

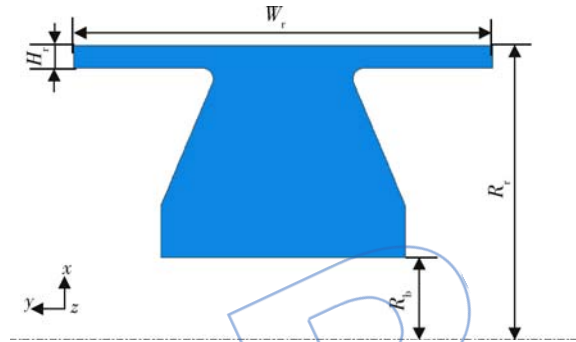


图10 某参考风扇盘子午轮廓图

Fig. 10 Profile of a reference fan disk's meridian plane

本文取风扇盘辐板的周期数 $m=3$ 的区域作为拓扑设计域,初始拓扑域如图11所示。其中灰色代表轮缘,为非拓扑设计域,红色区最终进化为轮辐,蓝色区最终进化为轮毂,红色区和蓝色区为代表性子结构区,绿色区和黄色区为子结构区,其内部单元的存在状态由代表性子结构区中对应位置单元决定。

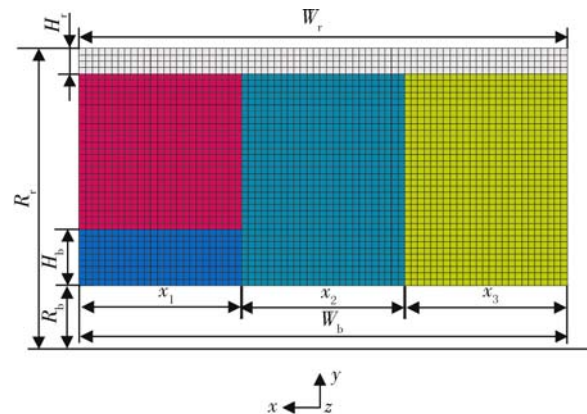


图11 $m=3$ 的周期结构风扇盘初始拓扑设计域

Fig. 11 Initial topological design zoom of periodic structural fan disk with $m=3$

1) 几何尺寸

表1给出了风扇盘相应几何尺寸及载荷工况。

表 1 $m=3$ 的风扇盘几何尺寸及载荷工况参数
Table 1 Geometric dimensions and load parameters of fan disk ($m=3$)

参数	符号	初始值/mm
轮缘半径	R_r	150
中心孔半径	R_b	75
轮缘宽度	W_r	150
轮毂宽度	W_b	150
轮缘厚度	H_r	8
轮毂高度	H_b	18.287
轮毂轴向载荷约束高度	H_l	15

2) 约束参数

表 2 给出了风扇盘的各约束参数.

表 2 $m=3$ 的风扇盘的约束参数
Table 2 Constrained parameters of fan disk ($m=3$)

应力约束类型	0.1%屈服强度
风扇盘最大径向应力危险系数 K_r	0.80
风扇盘子午面平均周向应力危险系数 K_{za}	0.80
风扇盘盘心最大周向应力危险系数 K_{zh}	0.95
风扇盘轮辐最大周向应力危险系数 K_{zh}	0.85
风扇盘盘心最大等效应力危险系数 K_{eqb}	0.80

注:表 2 中危险系数为安全系数的倒数(与斯贝 MK202 发动机标准一致).

3) 优化参数

表 3 给出了风扇盘的优化参数.

表 3 $m=3$ 的风扇盘的优化参数
Table 3 Optimization parameters of fan disk ($m=3$)

参数说明	数值	参数说明	数值
初始删除率	0.010	添加率	0.005
搜索范围数	3	样本个数	16
自适应删除率下限	0.008	最大停滞数	5
自适应删除率上限	0.02	局部最优解停滞数	50
自适应调节因子	1	最大迭代允许数	400

4) 载荷及约束

风扇盘工作时主要承受两方面的载荷:①叶片、锁板和隔圈等产生的等效均布外载荷($p_r=112.5\text{ MPa}$);②由于自身旋转而引起的离心载荷

(工作转速 $N_y=10\,980\text{ r/min}$).

采用轴对称模型进行弹性有限元分析,为了模拟叶片对轮缘的钢化作用,在风扇盘轮缘耦合部分节点($x_1:-63.815\sim63.815\text{ mm}$,相当于左右两边各余 6 个单元宽度),在轮缘上加等效均布载荷 p_r ,只约束风扇盘轴向位移.

2.2.3 优化结果分析

代表性子结构拓扑区域总共被划分 25×35 个单元,加入自适应策略的拓扑优化共进行了 35 次迭代,最优可行解出现在第 30 代,如图 12 所示为加入自适应策略的最优可行结果构型,图 13 为文献[22]中通过尺寸优化得到的三辐板风扇盘最优构型.

从图 12 可以看到子结构数为 3 的风扇盘最优构型为子结构为单辐板的三辐板风扇盘结构,从图 12、图 13 可以看出本文通过拓扑优化的最优解与文献[22]和 GE90 风扇盘结构相近,证明了本文提出的方法的合理性.

图 14 给出子结构体积、对数应变能随迭代次数的变化曲线.从图 14 可以看出随着优化的进行,结构体积在不断地减小,对数应变能在不断地增大,说明了结果正在向满应力的方向变化.

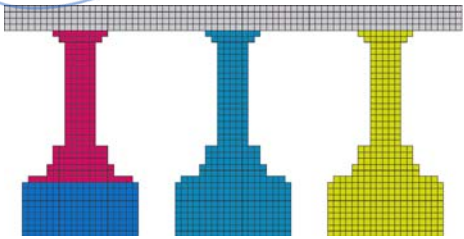


图 12 含 3 个子结构的周期结构风扇盘拓扑优化最优构型

Fig. 12 Optimum topology configuration of periodic structural fan disk with three substructures

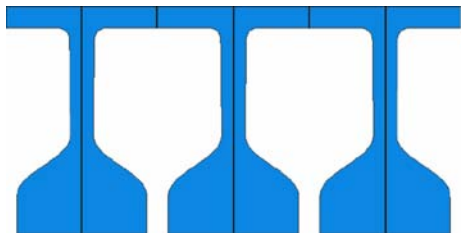


图 13 三辐板风扇盘最优构型^[22]

Fig. 13 Optimum configuration of three-web fan disk^[22]

图 15 给出了最优可行解的危险系数最大值随迭代次数的变化曲线.从图 15 可知,随着结构不断减少质量,各个性能参数均上升,在 30 代之后由于

径向应力和盘心等效应力的限制,使得质量不能进一步减少,最后结构由于局部最优解停滞计数器达到上限而终止。

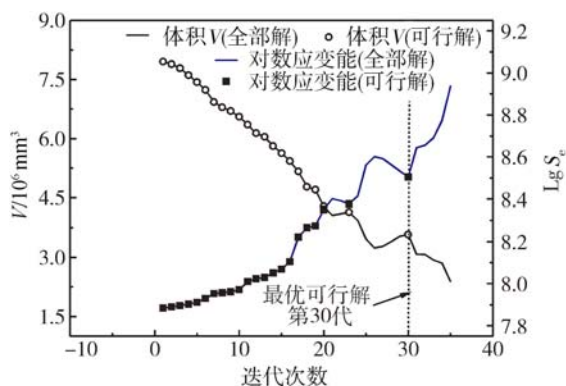


图 14 体积、对数应变能随迭代次数的变化曲线

Fig. 14 Curves of volume and $\lg S_e$ with iteration number

表 4 给出了最优解性能参数,从表 4 中可以看出,最优解各项性能参数均满足强度要求,为可行解,并且盘心等效应力约束趋于约束上限,成为

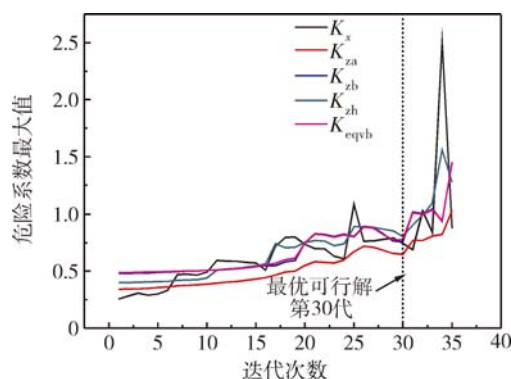


图 15 危险系数最大值随迭代次数的变化曲线

Fig. 15 Curves of the maximum of danger coefficient with iteration number

限制风扇盘质量减少的主要因素,相对于参考风扇盘,本文拓扑优化最优风扇盘质量减少了 17.1%。

本文又给出了考虑自适应策略与不考虑自适应策略方法的对比,验证周期结构下本文提出的自适应策略的适用性,如图 16 所示。

表 4 三辐板风扇盘拓扑优化设计结果

Table 4 Topology optimization results of three-web fan disk

性能参数	参考风扇盘	本文风扇盘	约束
风扇盘最大径向应力危险系数	0.726	0.745	0.80
风扇盘子午面平均周向应力危险系数	0.562	0.648	0.80
风扇盘盘心最大周向应力危险系数	0.744	0.760	0.95
风扇盘轮辐最大周向应力危险系数	0.744	0.805	0.85
风扇盘盘心最大等效应力危险系数	0.795	0.777	0.80
性能指标数	1	0.485	
总体积/ 10^6 mm^3	4.3183	3.5790	

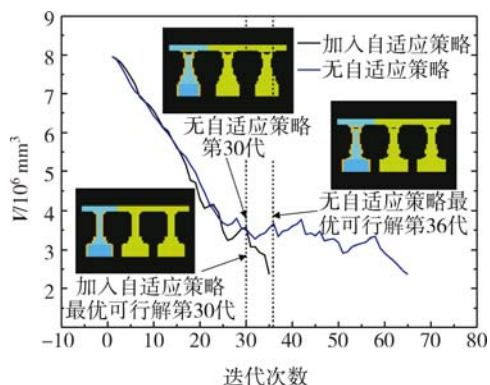


图 16 有无自适应策略对结构总体积的影响对比

Fig. 16 Comparison of whole volume of structure with and without self-adaption strategy

从图 16 可以清晰地看到,在得到合理的情况下,自适应策略可以加快方法的优化进程,说明了本文提出的自适应策略是普遍适用的。

3 结 论

本文的研究工作和得到的结果如下:

1) 提出了一种新的拓扑优化方法——A-RSSA-BESO 方法,并加入了自适应策略,相对于 RSSA-BESO 方法,在优化效率上有一定的提高,并且适用于周期性的结构和非周期性结构,方法的通用性好,通过算例结果表明本文方法是合理的。

2) 本文提出的自适应策略,可以很好地解决拓扑优化参数选取困难的问题,使得方法在删除大量单元的过程中保证结构敏度不失真。

参考文献:

- [1] Rossow H P, Taylor J E. A finite element method for the optimal design of variable thickness sheets [J]. AIAA Journal, 1973, 11(11):1566-1569.
- [2] Bends E M P, Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method[J]. Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 71(2):197-224.
- [3] Mlejnek H P, Schirmacher R. An engineer's approach to optimal material distribution and shape finding[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1993, 106(1/2):1-26.
- [4] 隋允康. 建模变换优化-结构综合方法新进展[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1996.
- [5] Osher S, Sethian J A. Fronts propagating with curvature dependent speed; algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations[J]. Journal of Computational Physics, 1988, 79(5):12-49.
- [6] Xie Y M, Steven G P. Evolutionary structural optimization for dynamic problems[J]. Computers & Structures, 1996, 58(6):1067-1073.
- [7] 谢亿民, 杨晓英, Steven G P. 渐进结构优化法的基本理论及应用[J]. 工程力学, 1999, 16(6):70-81.
XIE Yimin, YANG Xiaoying, Steven G P. The theory and application of evolutionary structure optimization method [J]. Engineering Mechanics, 1999, 16(6):70-81. (in Chinese)
- [8] Querin O M, Steven G P, Xie Y M. Evolutionary structural optimization(ESO) using a bidirectional algorithm[J]. Engineering Computations, 1998, 15(8):1031-1048.
- [9] 荣见华, 姜节胜, 胡德文, 等. 基于应力及其敏度的结构拓扑渐进优化方法[J]. 力学学报, 2003, 35(5):585-591.
RONG Jianhua, JIANG Jiesheng, HU Dewen, et al. A structural topology evolutiona method based on stresses and their sensitivity[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 35(5):585-591. (in Chinese)
- [10] RONG Jianhua. Bi-direction evolutionary optimization of structures with stress and displacement constraints based on man-made material [M]. Beijing: Science Press, 2003: 1094-1109.
- [11] Huang X D, Xie Y M. Bi-directional evolutionary topology optimization of continuum structures with one or multiple materials[J]. Computational Mechanics, 2009, 43(3):393-401.
- [12] Rozvany G I N, Zhou M, Birker T. Generalized shape optimization without homogenization[J]. Structural Optimization, 2000, 20(6):2-11.
- [13] 刘书田, 贺丹. 基于 SIMP 插值模型的渐进结构拓扑优化方法[J]. 计算力学学报, 2009, 26(6):761-777.
LIU Shutian, HE Dan. SIMP-based evolutionary structural optimization method for topology optimization[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(6):761-777. (in Chinese)
- [14] Zhou M, Rozvany G. On the validity of ESO type methods in topology optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 21(1):80-83.
- [15] 刘超. 涡轮盘结构拓扑与形状优化方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
LIU Chao. Topology and shape optimization method for turbine disk[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [16] Wadley H N G, Fleck N A, Evans A G. Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures[J]. Computers & Structures, 2003, 63(12):2331-2343.
- [17] Sigmund O, Torquato S. Design of materials with extreme method[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1997, 45(6):1087-1067.
- [18] Zhang W, Sun S. Scal-raleted topology optimization of cellular materials and structures[J]. International Journal for Numerical Methods in Engeering, 2006, 68(9):993-1011.
- [19] Huang X, Xie Y M. Optimal design of periodic structures using evolutionary topology optimization[J]. Struct Multidisc Optim, 2008, 36(5):597-606.
- [20] Michell G M. The limits of economy of material in frame-structures[J]. Philosophical Magazine: Series 6, 1904, 47(8):589-597.
- [21] Querin O M. Evolutionary structural optimisation stress based formulation and implementation[D]. Sydney: University of Sydney, 1997.
- [22] 李伦未, 陆山. 基于 ANSYS 的多辐板风扇盘结构优化设计技术[J]. 航空动力学报, 2011, 10(26):2245-2250.
LI Lunwei, LU Shan. Structure optimum design techniques for multi-web fan disk based on ANSYS[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 10(26):2245-2250. (in Chinese)