

文章编号:1000-8055(2012)10-2329-07

等强度三维空心叶片的内部拓扑结构

李 琳, 薛 铮

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 以 ANSYS 软件为平台, 基于双向渐进结构优化法对所提出的等强度风扇叶片的内部结构形式进行探索性研究, 在对叶片内部结构进行拓扑优化的过程中提出了中面应力基准法, 简化了优化模型, 同时有针对性的解决了双向渐进结构优化法在应用中的一些技术问题, 实现了等强度风扇叶片内部结构的优化, 获得了内部结构的拓扑形式。所得结果可为发动机轻量化设计提供参考。

关 键 词: 航空发动机风扇叶片; 等强度; 轻量化设计; 拓扑优化; 双向渐进结构优化法

中图分类号: V232.4

文献标志码: A

Internal structure of three-dimensional hollow blade with equal strength

LI Lin, XUE Zheng

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A research on the internal structure of the blade with equal strength was presented. The research was based on bi-directional evolutionary structural optimization (BESO) method and ANSYS platform. In the topology optimization process of the internal structure of the blade, a method of stress reference on middle face was proposed to simplify the optimization model. Some special technical problems in the application of BESO were also solved. Finally, an optimized topological form of internal structure of the fan blade with equal strength was obtained. The results can provide a reference for the lightweight design of the aero-engine.

Key words: aero-engine fan blades; equal strength; light weight design; topology optimization; BESO (bi-directional evolutionary structural optimization) method

低展弦比、高效、高负荷是大涵道比涡轮风扇航空发动机的关键部件——风扇现今的发展方向^[1-2]。低展弦比的叶型有效提高了风扇的效率, 高负荷则要求风扇具有更高的强度和刚度。经过数十年的发展, 风扇叶片已由窄弦带凸肩的实心叶片发展为宽弦无凸肩的空心叶片^[3]。空心叶片的内部结构经过发展形成了 3 种主流形式, 即蜂窝芯结构形式(图 1(a))、波纹板结构形式(图 1(b))和如图 1(c)所示^[1]的空心结构。这些空心结

构形式兼顾了叶片的强度、刚度设计要求和叶片的制造和加工工艺。目前先进的叶片制造工艺与加工技术的发展已使得具有任意复杂结构形式的叶片的制造成为可能, 任意形式的内部结构都可实现。

制造工艺的进步向叶片结构设计人员提出了挑战: 没有制造工艺的限制, 叶片的设计是否可以达到结构设计的理想目标——等强度? 本文结合结构优化设计理论及有限元结构分析技术的发展

收稿日期: 2011-11-29

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121015.1020.201210.2329_023.html

作者简介: 李琳(1956—), 女, 河北唐山人, 教授, 博士, 主要研究方向为航空发动机结构强度振动。E-mail: feililin@buaa.edu.cn

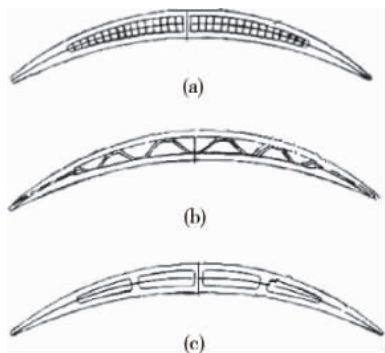


图 1 风扇叶片空心结构

Fig. 1 Hollow structure of fan blade

现状探索了等强度叶片空心结构的设计方法及拓扑形式. 所谓等强度结构即在标准工况下使叶片结构受力均匀且处在一个接近安全应力水平状态下的叶片结构形式. 近 10 年在结构优化领域发展起来的双向结构渐进优化法^[4-5], 即是一个基于等强度概念并结合有限元结构分析技术的结构优化设计方法. 其基本原理是: 在设计过程中, 如果结构某一局部的材料处于没有充分利用的低应力状态, 则将该局部的材料删除. 如果材料处于高应力状态, 则向该局部添加单元. 如此逐渐地删除低应力材料并向高应力单元周围添加单元可以使结构应力水平变得更均匀. 双向渐进结构优化法自问世以来, 受到结构设计及研究人员的高度关注, 人们对将其在工程结构设计的应用中所出现的问题开展了大量的研究工作. 然而到目前为止, 这些应用性研究一般限于平面问题或比较简单的结构形式与受力形式^[6-8]. 本文针对具有扭向的三维风扇空心叶片, 以等强度为设计目标结合有限元分析软件 ANSYS, 通过编写基于 Von Mises 应力的双向渐进结构优化法的程序探索了等强度风扇叶片内部结构的拓扑形式.

1 双向渐进结构优化法原理

双向渐进结构优化法(BESO 法)是由渐进结构优化法(ESO 法)^[9-11]发展而来. 双向渐进结构优化法的概念很简单, 即通过一步步去掉无效的或低效的材料, 同时逐渐向高效的材料周围添加材料来使结构逐步趋于优化. 这种方法解决了传统的 ESO 法只能删除单元, 而不能将某些迭代步中错误删除的单元添加的弊端. 在有限元分析过程中采用固定的有限元网格, 对存在的材料单元, 其材料数编号为非 0 数, 而对不存在的材料单元, 其材料数编号为 0, 当计算结构刚度矩阵等特性时不计材料数编号为 0 的单元特性. 通过这种 0

和非 0 的模式实现对结构的拓扑优化^[12].

同一般结构优化问题相似, BESO 法的拓扑优化模型也包含了设计变量、约束函数、目标函数三大要素, 这三大要素随着不同的优化模型而发生变化. 基于 Von mises 应力的 BESO 法的优化模型如下:

设计变量

$$A = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}$$

目标函数

$$\min W = \sum_{e=1}^n w_e \beta_e$$

约束函数

$$\sigma_{\max} < \sigma^*$$

$$\beta_i \in \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式(1)中 W 是结构质量, w_e 是第 e 个单元的质量; $\beta_e (e = 1, 2, \dots, n)$ 为设计变量, 取 0 和 1 两个值; $\sigma_{\max}$ 是结构最大 Von mises 应力, σ^* 是 $\sigma_{\max}$ 的许用值; n 是全部设计区域包含的单元总数.

基于 Von Mises 应力的 BESO 法的主要步骤如下^[12]:

- 1) 指定结构允许占有的最大物理区域作为最大设计区域.
- 2) 同时指定支撑边界条件, 相关载荷以及初始删除率 R_0 、初始添加率 I_0 、删除进化率 G 和添加进化率 H .
- 3) 建立实体模型后按有限元法对整个物理区域进行细致的划分, 指定单元特性, 建立有限元模型.
- 4) 在设计区域里的所有没有被标记为初始模型的单元的特性值将被赋予 0. 这意味着虽然它们储存在结构数据文件中, 但是实际上它们既不作为结构的一部分而存在也不参与到有限元求解的过程中.
- 5) 对结构进行有限元静力分析.
- 6) 确定强度理论(根据不同问题采取不同应力准则), 如 Von Mises 应力准则、Ishai 应力准则等). 以 Von Mises 应力准则为例, 单元的 Von Mises 应力 σ_{von} 和结构中最大的 Von Mises 应力

若满足: $\frac{\sigma_{\text{von}}}{\sigma_{\max}} \leq R_i$ (删除率), 则认为该单元处于低应力状态, 可从结构中删除, 这些单元的特性值将被赋予 0, 不再参与到有限元求解的过程中. 相应地, 若单元的 Von Mises 应力和结构中最大的 Von Mises 应力满足: $\frac{\sigma_{\text{von}}}{\sigma_{\max}} \geq I_i$ (添加率), 则认为

该单元处于高应力状态,可向其周围添加单元.新添加的单元的特性值将由 0 变为 1,开始参与到有限元求解的过程中.

7) 以上有限元分析和单元的增减重复进行,直至不再有满足 $\frac{\sigma_{\text{Von}}}{\sigma_{\text{max}}} \leq R_i$ 和 $\frac{\sigma_{\text{Von}}}{\sigma_{\text{max}}} \geq I_i$ 的单元.即在当前迭代步不能进一步删除材料或添加材料.

在未达到优化目标时为使优化过程进行下去,需对添加率和删除率进行修正,引入删除进化率 G 和添加进化率 H ,然后按照下式增加删除率: $R_{i+1} = R_i + G$ 和减小添加率 $I_{i+1} = I_i - H$.

8) 重复步骤 5)~7)直到结构的最大应力或质量达到给定值为止,这个时候可以认为得到了相应条件下的最佳优化布局.

2 发动机风扇叶片内部结构优化模型的建立及简化

发动机风扇叶片的几何特征是包含叶型和扭向的复杂三维结构,承受的主要载荷为离心力和气动力.风扇叶片的做功效率主要由其低展弦比的叶型保证,在对其结构进行优化时应尽量保证其叶型不变.因此内部结构的优化设计区域可考虑为由展弦比及叶型确定的具有一定厚度 δ 的轮廓所限定的区域.鉴于本文以探讨等强度叶片空心结构的拓扑形式为主要目的,同时研究采用基于应力的 BESO 优化方法所需解决的关键技术问题,而叶型对该方法的适用性基本上没有影响,因此在研究优化方法时对应于叶型的设计区域取为矩形,即优化对象是 1 个与真实风扇叶片长宽高比例相似、沿叶高方向带扭向、每一横截面为矩形的三维实体(如图 2 所示,其中实线包围的是设计区域,虚线与实线之间为非设计区域),本文将探究其在气动力(利用在简化模型的侧面均匀施加面载荷来模拟叶片所受气动力)和离心力共同作用下的最优结构形式.

考虑到实际的宽弦叶片非常薄(厚度尺寸/弦长尺寸和叶高尺寸)的几何特征,在对三维叶片进行内部结构优化时,提出如下中面应力基准的简化方法:在应用基于应力的 BESO 法时,将叶片中面(如图 2 中间粗实线所描述的曲面)应力作为应力水平的参考,忽略应力沿叶片厚度方向(中面法线方向)的变化对优化的影响;在结构优化进程中,若中面上的某一单元被判断为低应力单元,则在该单元位置沿叶片厚度方向设计区域中的所有单元将会在单元删除步骤中删除;同理在添加单

元的过程中,若中面上的某一单元被判断为高应力单元,则在中面上与其相接触的单元及它们位置沿叶片厚度方向设计区域中的所有单元将会在单元添加步骤中添加.我们称这种简化方法为中面应力基准法,这种方法完全适用于具有真实叶型的三维叶片内部结构的优化.

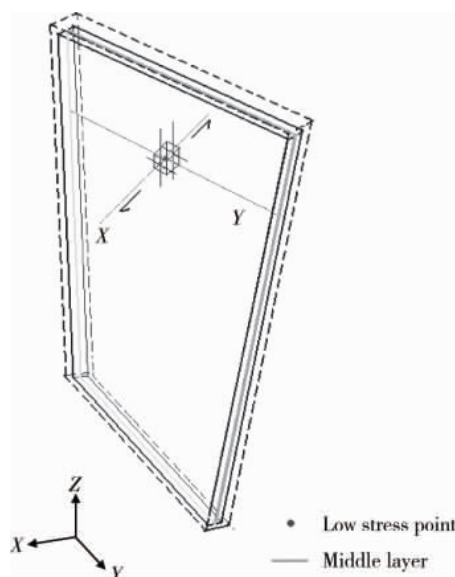


图 2 风扇叶片优化模型的示意图

Fig. 2 Illustration of the optimization approach for fan blades

3 基于 ANSYS 分析平台的风扇叶片内部结构拓扑优化的实现

根据基于 Von mises 应力的 BESO 法的基本思想,利用 ANSYS APDL 语言编写的优化流程图如图 3 所示.该程序相对常规的 BESO 法做了如下改进,以解决优化过程中的技术问题.

1) 针对结构优化过程中的跳跃现象改进了单元删除率和单元添加率的设置方法,保证了优化进程的稳定性.

在优化过程中由于删除单元产生的应力集中经常会出现个别单元的 Von mises 应力远大于其他单元的 Von mises 应力的现象,即结构中最大 Von Mises 应力 $\sigma_{\text{max}}^{\text{Von}}$ 远远大于其他绝大多数单元的 Von Mises 应力 σ^{Von} ,这导致在设计区域中,即使删除率的值设定的不是很大也会有数量巨大的单元由于满足了单元删除的判据 $\frac{\sigma_{\text{Von}}}{\sigma_{\text{max}}} \leq R_i$ 而被删除,以致在这次优化循环后,结构的进化产生跳跃.

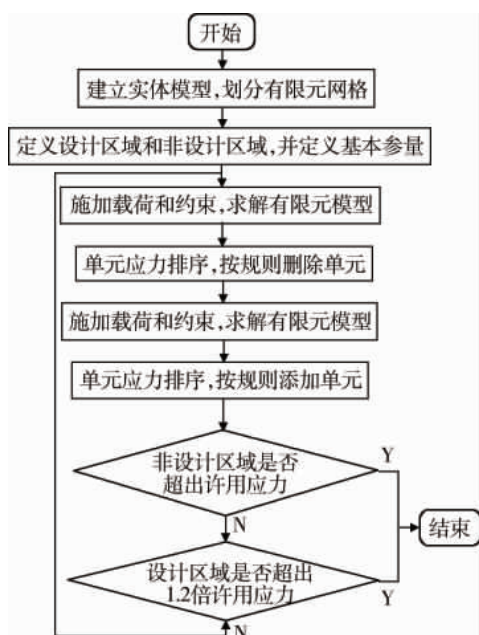


图 3 优化流程图

Fig. 3 Flow chart of optimization process

针对这一问题,在单元删除和添加的步骤中将常规渐进结构优化法中利用 $\frac{\sigma_{\text{Von}}}{\sigma_{\text{max}}} \leq R_i$ 和 $\frac{\sigma_{\text{Von}}}{\sigma_{\text{max}}} \geq I_i$ 来选定单元删除范围和单元添加范围的模式修改为:对单元按应力值大小排序并根据 $n_r = n_0 \times J_i$ 和 $n_i = n_0 \times K_i$ 来确定按中面应力基准法进行优化的中面删除单元数量和中面需要添加的单元数量,从而得出单元的删除范围和添加范围(J_i, K_i 分别为根据优化模型设定的中面删除单元率和中面添加单元率, n_0 为当前优化模型的中面所包含的单元数量)。具体做法是结合中面应力基准法对活单元(单元特性值为 1 的单元)进行排序,应力最低的 n_r 个单元为低应力基准单元,在删除单元的步骤中,低应力基准单元以及沿其厚度方向的单元的单元特性值均修改为 0;应力最高的 n_i 个单元为高应力基准单元,在添加单元的步骤中,高应力基准单元和其四周单元以及沿它们厚度方向的单元的单元特性值均修改为 1。这样解决了结构优化过程中可能出现的跳跃现象,保证了优化过程的稳定性。

2) 把添加单元和删除单元在同一步骤进行的方式更改为“删除”与“添加”顺次进行,即先进行删除单元步骤,接着进行一次有限元求解然后再进行添加单元步骤。

在添加和删除同时进行的方式中,添加和删除单元都是针对上一次迭代循环中得到的应力分析结果,而当次删除单元产生的应力改变在当次

添加单元时并没有考虑进去,这可能会导致当次迭代后优化进程因应力超出而终止,而先进行“删除”后“添加”的方式可以避免这种情况:添加步骤总会将本次删除步骤引发的应力变化计入考虑,避免了因本次删除步骤导致的应力超出而退出优化进程,从而更进一步的抑制了优化过程中产生的应力集中对优化进程的干扰。

3) 考虑到重新建模的光滑处理可以降低结构设计区域中的应力集中而不会对非设计区域产生较大影响的情况,在判断优化过程的退出准则上,将通常的以结构中最大应力是否超出许用应力的单一判据修改为设计区域和非设计区域的双重判据取一,即优化过程中非设计区域的最大应力须小于许用应力而设计区域的最大应力可以适当超出许用应力(根据实际情况选取不同的值,本文取 1.2 倍),两个条件之一不满足时优化进程即结束,这样避免了重新建模光滑处理后设计区域最大应力偏小的现象。

下面给出按图 3 所示流程对图 2 所示模拟叶片模型的内部结构优化的部分中间结果和最终结果。该模型的几何尺寸:长为 480 mm,宽为 40 mm,高为 640 mm,沿叶高方向均匀扭曲,扭曲角为 20° ,底面模拟叶片根部为全约束,距离旋转轴为 320 mm,转速为 300 r/s;侧面均布面力为 $1 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ (用于模拟气动载荷)。材料参数:密度为 $4.48 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$,泊松比为 0.307 82,弹性模量为 1.15 GPa。按基于应力的 BESO 方法并采用上述技术进行的优化过程中风扇叶片内部设计区域结构的衍变如图 4。

从图 4 可以看出叶片内部材料被大幅消减。图 5~图 8 分别给出了优化过程中材料体积、最小 Von mises 应力、最大 Von mises 应力和 Von mises 应力方差随迭代次数的变化。

表 1 给出了叶片空心结构拓扑优化结果与实心叶片的对比。

从材料体积变化曲线可以看出:随着优化迭代的进行,叶片材料体积逐渐减小,满足了叶片减重的需求;从设计区域最小 Von mises 应力的变化曲线看,随着优化迭代的进行,最小 Von mises 应力逐渐增大,说明设计区域材料利用率在逐步提高;从 Von mises 应力方差的变化曲线看,随着优化迭代的进行, Von mises 应力方差逐步减小,相比优化前达到了一个很小的值并逐渐趋于稳定,这正符合了等强度叶片的应力分布要均匀的要求。图 9 是 Von mises 应力方差达到最小

值时的优化结果.

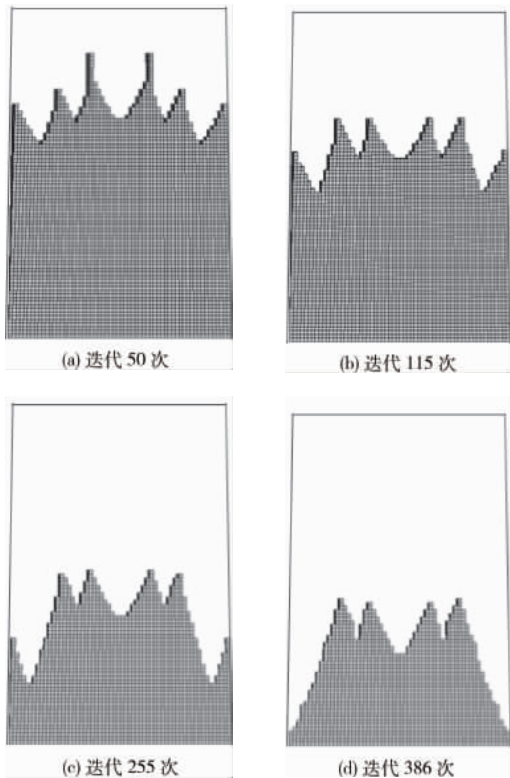


图 4 优化衍变过程图

Fig. 4 Iteration details of the optimization process

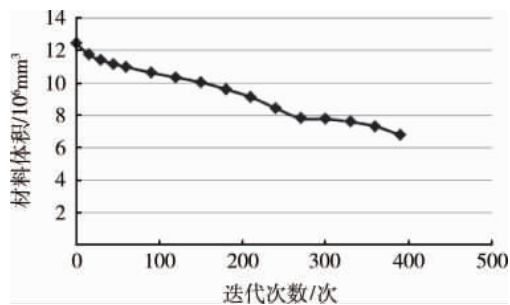


图 5 材料体积随优化迭代次数的变化

Fig. 5 Tendency of materials volume with respect to iteration times in optimizing process

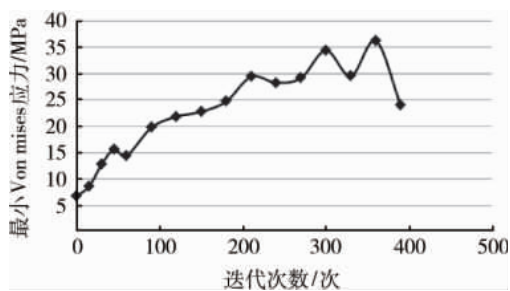


图 6 最小 Von mises 应力随优化迭代次数的变化

Fig. 6 Tendency of minimum Von mises with respect to iteration times in optimizing process

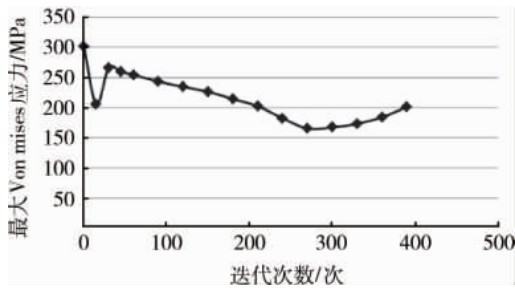


图 7 最大 Von mises 应力随优化迭代次数的变化

Fig. 7 Tendency of maximum Von mises with respect to iteration times in optimizing process

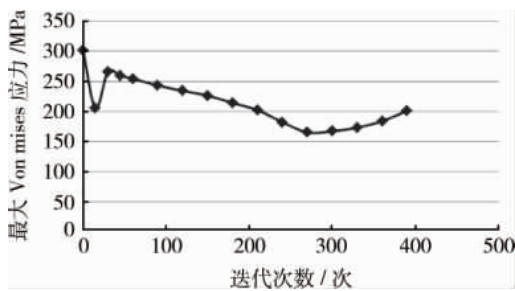


图 8 Von mises 应力方差随优化迭代次数的变化

Fig. 8 Tendency of stress standard deviation with respect to iteration times in optimizing process

表 1 叶片空心结构拓扑优化结果与实心叶片的对比
Table 1 Optimized results in comparison to the original solid blade

叶片	实心叶片	拓扑优化空心叶片
优化前后材料体积比/%	100	62.5
最大 Von mises 应力/MPa	301	167
最小 Von mises 应力/MPa	6.8	34.2
Von mises 应力方差	1956.2	98.9

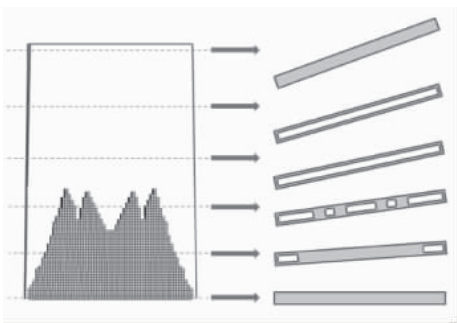


图 9 应力方差最小的优化结果

Fig. 9 Optimized results based on minimum stress standard deviation

必须强调,上述优化结果仅代表叶片内部结构. 优化区域外部还有一定厚度的非设计区域(外壳). 图 10 为对应于 Von mises 应力方差最小的应力分布优化结果与优化前的 Von mises 应力云图对比.

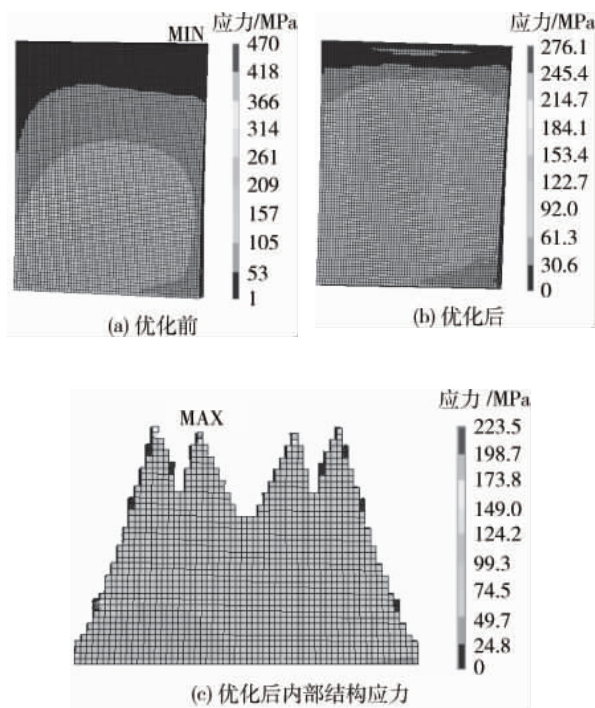


图 10 优化前后叶片 Von mises 应力云图

Fig. 10 Von mises stress cloud images of blade before and after optimization

从图 10 的应力云图对比中可以看出,在减小了叶片的最大应力的同时,低应力区域大幅减少由 $1/2$ 减少为不足 $1/4$; 而低应力区域大幅增加,同时根部高应力区域消失,也就是,在优化后有很多低应力区域转变为中间应力区域,这样低应力区域和高应力区域的面积远小于中间应力区域的面积,受力均匀程度相比优化之前得到很大改善,同时一定程度改善了根部的受力情况. 观察优化后的空心结构受力云图可以看到,空心结构受力云图颜色较为均匀,说明优化后的空心结构受力相对平均,也就是说从设计区域来看,已经近似的达到了等强度的设计要求.

4 等强度拓扑优化结构形式对叶片刚度的影响

在优化过程中没有考虑材料分布变化对叶片刚度的影响,这主要基于优化过程中保持叶片的叶型结构不变,对叶片刚度影响可能较小的考虑.

本节对这一点进行仔细分析.

发动机的高转速使得叶片的周向变形构成了变形的主要部分. 图 11~图 12 分别为优化前后叶片的位移幅值以及周向位移云图对比.

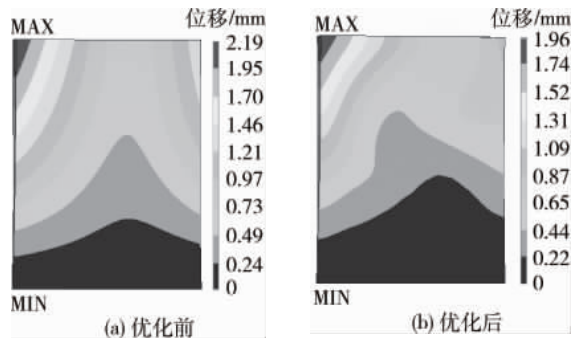


图 11 优化前和优化后叶片位移幅值云图

Fig. 11 Blade displacement amplitude cloud images before and after optimization

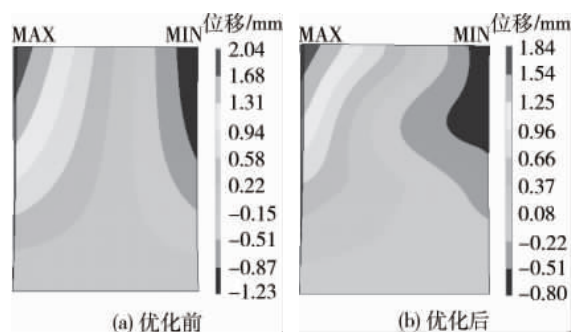


图 12 优化前和优化后叶片周向位移云图

Fig. 12 Cloud images of blade displacement on circumferential direction before and after the optimization process

优化前后叶片模型的最大位移幅值、最大周向位移、最大轴向位移、最大径向位移均发生在叶尖的边缘处,其中最大位移幅值与最大周向位移及径向位移发生在同一边缘,而最大轴向位移发生在另一边缘. 表 2 为优化前后叶片的位移对比.

表 2 优化前后叶片的位移对比

Table 2 Comparison of blade displacement before and after optimization

叶片	实心叶片	拓扑优化空心叶片
最大位移幅值/mm	2.190	1.960
最大周向位移/mm	2.041	1.837
最大轴向位移/mm	0.601	0.562
最大径向位移/mm	0.724	0.668

由以上的位移云图和数据不难看出优化前后叶片各处的位移变化不大. 这说明叶型及叶片外轮廓是决定叶片刚度的主要因素. 本文采用的叶型及叶片外轮廓不变的优化思想是合理可行的. 尽管如此, 如何在等强度的设计思路下保证刚度, 特别是振动设计要求还是值得做进一步的探究.

5 结 论

针对具有扭向的三维风扇叶片内部结构形式优化设计问题本文提出了以中面应力为基准的简化方法, 并有针对性的解决了双向渐进结构优化法在应用中的一些技术问题, 从而实现了等强度风扇叶片内部结构的优化, 获得了内部结构的拓扑形式. 需要指出的是实际优化的结果并不意味着绝对的等强度; 本文采用了结构 Von mises 应力方差最小作为最接近等强度的优化设计标准, 这种最接近等强度设计下结构的应力水平并不一定处在一个满应力的状态, 即应力虽然分布的比较平均, 但平均值低于材料的安全应力. 尽管如此由于材料得到了最大程度的利用, 因此使叶片结构在质量、受力等方面得到大幅的优化. 进一步的研究需要加入频率的约束.

参考文献:

- [1] 郝勇, 李志强, 杜发荣, 等. 大涵道比涡扇发动机的宽弦空心风扇叶片技术研究[M]. 北京: 航空工业出版社, 2007.
- [2] 梁春华. 高性能航空发动机先进的风扇和压气机叶片[J]. 航空发动机, 2006, 32(3): 49-52.
LIANG Chunhua. Overview of advanced fan and compressor blade/vane in high performance aeroengine[J]. Aero-engine, 2006, 32(3): 49-52. (in Chinese)
- [3] 侯冠群, 尚波生. 宽弦风扇叶片技术的发展[J]. 国际航空, 2002(12): 45-47.
HOU Guanqun, SHANG Bosheng. Development wide chord fan blades technological[J]. International Aviation, 2002(12): 45-47. (in Chinese)
- [4] Querin O M, Steven G P, Xie Y M, et al. Evolutionary structural optimization(ESO) using bi-directional algorithm[J]. Engineering Computations, 1998, 15(8): 1031-1048.
- [5] Querin O M, Young V, Steven G P, et al. Computational efficiency and validation of bi-directional evolutionary structural optimization[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 189(2): 559-573.
- [6] 刘丰睿, 赵丽滨, 韩邦成, 等. 磁悬浮控制力矩陀螺框架结构的拓扑优化设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(4): 455-459.
LIU Fengrui, ZHAO Libin, HAN Bangcheng, et al. Topology optimization design of frame structure for magnetic suspension control moment gyroscope[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(4): 455-459. (in Chinese)
- [7] 王明强, 姚峰. 基于应力刚度约束的连续体双向渐进结构优化[J]. 机械设计, 2008, 25(9): 38-40.
WANG Mingqiang, YAO Feng. Bi-directional progressive structural optimization of continuous body based on constraints of stress and stiffness[J]. Journal of Machine Design, 2008, 25(9): 38-40. (in Chinese)
- [8] 李晶, 鹿晓阳, 赵晓伟. 统一强度双向渐进结构拓扑优化方法[J]. 山东建筑大学学报, 2008, 23(1): 65-69.
LI Jing, LU Xiaoyang, ZHAO Xiaowei. Topology optimization based on bi-direction evolutionary structural of unified strength[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2008, 23(1): 65-69. (in Chinese)
- [9] Xie Y M, Steven G P. Evolutionary structural optimization[M]. Berlin: Springer, 1997.
- [10] Rong J H, Xie Y M, Yang X Y. An improved method for evolutionary structural optimization against buckling[J]. Journal of Computers and Structures, 2001, 79(3): 253-263.
- [11] Rong J H, Xie Y M, Yang X Y, et al. Topology optimization of structures under dynamic response constraints[J]. Journal of Sound Vibration, 2000, 234(2): 177-189.
- [12] 荣建华, 姜节胜, 胡德文, 等. 基于应力及其灵敏度的结构拓扑渐进优化方法[J]. 力学学报, 2003, 35(5): 584-591.
RONG Jianhua, JIANG Jiesheng, HU Dewen, et al. A structural topology evolutionary optimization method based on stresses and their sensitivity[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 35(5): 584-591. (in Chinese)