

文章编号:1000-8055(2011)08-1860-06

基于渐进结构优化法的结构动力学 设计方法的初步研究

刘妲妮, 洪 杰

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 利用渐进结构优化法并结合结构效率的概念, 提出了一种新型的结构动力学设计思路 and 一套基于 ANSYS 平台的优化程序开发技术. 其中单目标、多约束优化模型的建立, 融入了质量、应力、位移以及频率等动力学设计参数, 研究初期阶段只依次对各约束进行了单独处理. 相关算例的计算结果表明, 在相同条件下, 忽略数值不稳定性带来的影响, 优化程序得到的最终拓扑、结构进化历程以及参数变化都和已有成果基本一致, 由此也验证了设计方法的可行性与程序的可靠性.

关 键 词: 渐进结构优化; 结构效率; 动力学设计; ANSYS; 拓扑优化

中图分类号: V214.19

文献标志码: A

Preliminary research on structural dynamical design based on evolutionary structural optimization method

LIU Da-ni, HONG Jie

(School of Jet Propulsion,

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

Abstract: A new idea of structural dynamical design and a development technology of optimization program based on ANSYS platform were proposed by using the evolutionary structural optimization method and structural efficiency. A single objective, multi-constraint optimization model was created by incorporating the dynamical design parameters of mass, stress, displacement and frequency; and the constraints were considered separately at the start of the study. The feasibility of this method and reliability of the program were proved by some examples, of which the final topology, evolution and variation of parameters were similar to the previous research under the same conditions and without consideration of influences caused by numerical instability.

Key words: evolutionary structural optimization; structural efficiency;
dynamical design; ANSYS; topology optimization

目前国内高推质比发动机技术的发展使得结构设计中引入了不少新结构、新材料, 以此来满足对发动机结构完整性、可靠性以及发动机质量控制等问题的更高需求^[1-2]. 结构效率作为一个评价新结构、新材料对整机系统收益的综合性指标, 是发动机结构设计过程中一个有效的借鉴目标和评

估手段, 它包含了以下几个方面: ①结构材料使用效率, 反应结构的结构质量和静强度特性, 是稳定载荷作用下结构力学性能的体现; ②结构抗变形能力, 反应结构的刚度特性和间隙变化引起的效率损失, 是极限载荷或冲击载荷作用下结构力学性能的体现; ③结构动力敏感度, 反应结构的振动

收稿日期: 2010-08-30; 修订日期: 2010-12-10

作者简介: 刘妲妮(1986—), 女, 湖南靖州人, 硕士生, 主要研究方向为板壳结构设计和结构效率评估.

固有特性和振动响应,是复杂力学环境下结构力学性能的体现.同时,随着航空发动机设计技术的发展和进步,新结构的设计和采用将会越来越复杂,结构优化设计作为近几十年来发展起来的一门新技术得到了广泛的应用^[3].而所谓的动力学设计,即对主要承受动载荷而动特性又至关重要的结构,以动态特性指标作为设计准则,对结构进行优化设计.它既可在常规静力设计的结构上运用优化技术,对结构的元件进行结构动力修改;也可从满足结构动态性能指标出发,综合考虑其他因素来确定结构的形状,乃至结构的拓扑(布局设计、开孔、增删元件)^[4].结构动力学设计将处于被动状态的工程结构设计转为主动,具有巨大的经济效益潜力.

综上所述,如何利用最新的结构设计手段,使得设计出来的结构具有良好的工程实用性就成为了一个关键性问题,而考虑将结构效率评估手段与优化设计相结合则为结构动力学设计提供了一条新思路.因此,参考结构效率的评估内容为优化设计选取适当的目标、约束函数,同时选用适当的优化算法和工程软件进行优化程序的二次开发,将成为一种高效、经济且应用前景良好的新型结构动力学设计方法.

在目前的结构优化设计领域内,主要的研究方法包括以下几种:均匀化方法、变厚度法、相对密度法、渐进结构优化法(ESO)和 ICM(独立、连续和映射)方法等^[5-7].相比较而言,渐进结构优化法简单易行,可方便地基于现有的有限元分析软件实现,具有良好的通用性,计算效率较高^[8],是目前最适用于工程应用的结构优化设计方法之一.本文采取在大型商用有限元软件 ANSYS 10.0 的平台上,利用 APDL(ANSYS parametric design language)和 MATLAB 进行二次开发,将结构分析和结构优化功能集成,最大限度的降低了优化程序的开发难度,提高了设计效率.

1 问题描述

高推质比需求带来的静强度限制使得转子系统减轻质量的设计裕度很小,而结构优化设计的目标一般是为了满足减轻质量、强度、变形或者振动的需求,因此,本文的研究对象主要为在高推质比航空发动机静子系统中被大量使用的轻质板壳结构.

传统的板壳结构设计内容包含了静态应力、刚度、弹性稳定性、有害振动、寿命设计等多方面

内容^[9],结合结构效率的具体内涵,同时为了降低研究难度,本文将结构质量、静态应力、刚度以及固有频率作为优化设计的内容,并结合渐进结构优化算法的特点,指定质量为单一目标函数,其余几项转化为约束函数共同参与优化设计,拓扑优化模型可以表述为:以质量为目标函数,应力、位移、固有频率等为约束函数,以表征单元“有”“无”的拓扑变量为设计变量^[10],其数学描述如下:

设计变量

$$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$$

目标函数

$$W = \sum_{l=1}^p w_l \beta_l$$

约束函数

$$\begin{aligned} |u_v| &\leq u_v^u \\ \omega_r &\geq \omega_r^{u1}, \quad \text{or}, \quad \omega_r \leq \omega_r^{u2} \\ \max(\sigma_l^{\max}) &\leq \sigma^* \\ \beta_l &\in \{0, 1\}, \quad l = 1, 2, \dots, p \\ v &= 1, 2, \dots, m \\ r &= 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

其中 β_l ——第 l 号单元对应设计变量,取 0 或 1;

p ——单元的总数目;

w_l ——第 l 号单元的质量;

u_v ——第 v 个约束单元的位移;

u_v^u ——第 v 个约束单元的给定位移上限;

m ——位移约束的总数;

ω_r ——第 r 阶固有频率;

ω_r^{u1} ——第 r 阶固有频率的下限;

ω_r^{u2} ——第 r 阶固有频率的上限;

n ——频率约束的总数;

$\sigma_l^{\max}$ ——保留单元中的最大应力值;

σ^* ——给定的应力上限值.

1.1 应力约束

ESO 方法首先是针对应力约束提出来的,优化准则为:逐渐去掉结构中的低应力材料,使剩下的结构更有效地承担荷载,从而应力分布更加均匀^[11].

具体的优化步骤如下^[12]:①建立有限元模型,给定相应的载荷和边界条件.②进行有限元静力分析.③明确强度理论(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 应力和结构中最大的 Von Mises 应力如果满足 $\frac{\sigma_e^{\text{VM}}}{\sigma_{\max}^{\text{VM}}} < R_i$ ($*$)则认为该单元处于低应力状

EKILL,I
.....
Finish
.....
* enddo

! 杀死单元

! 优化迭代结束

3 算例分析

3.1 应力约束

如图 2 所示,平面应力状态下两端固支的板,在底边中点施加有大小为 1000 N 的集中力载荷.厚 $t=0.01\text{ m}$, $H=0.5\text{ m}$,弹性模量 $E=100\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$,选用 plane42 单元.初始拒绝率 $R_0=0.001$,进化率 $E_r=0.001$.结构初始最大应力为 33.48 kPa,指定的应力限值为 42 kPa.图 3 为平面应力板应力约束进化历程,表 1 为最大、最小应力及体积比进化表.

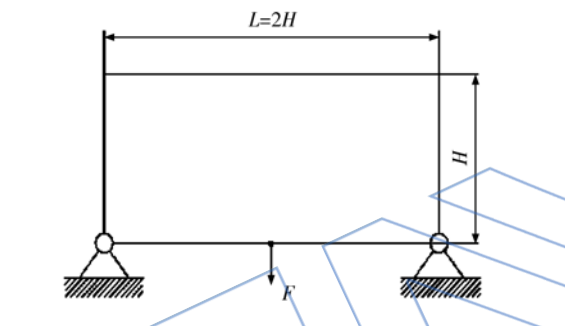


图 2 平面应力板初始结构模型及边界、载荷条件
Fig. 2 Initial structure modal and boundary, load conditions for plane stress board

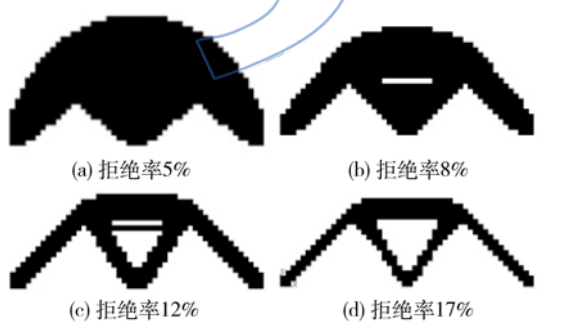


图 3 平面应力板应力约束进化历程
Fig. 3 Evolution of plane stress board with stress constrain

当结构的最大应力值超过指定的约束限制时,优化迭代停止,图 3(d)即为最终的优化构型.与初始结构相比,该结构最大应力值上升到了 40.17 kPa,而体积降为原始体积的 19%,同时结构中的最大应力与最小应力值之比下降,应力水平趋于均匀.

表 1 最大、最小应力及体积比进化表
Table 1 Evolution table of the maximum, minimum stress and volume ratio

	拒绝率/%			
	5	8	12	17
迭代次数	50	80	120	170
最大应力/kPa	34.25	36.92	38.75	40.17
最小应力/kPa	0.013	0.048	0.136	0.251
体积比	0.68	0.47	0.3	0.19

3.2 位移约束

图 4 为一左端固定右端自由的平面应力状态下的悬臂梁,宽 0.16 m,高 0.1 m,厚 $t=0.001\text{ m}$,弹性模量 $E=207\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$,在其自由端面中心施加一大小为 3 kN 的集中力载荷,位移约束点也为该点.指定约束位移限值为 0.7 mm.选用 plane42 单元,删除率 $M_{rr}=1.2\%$.

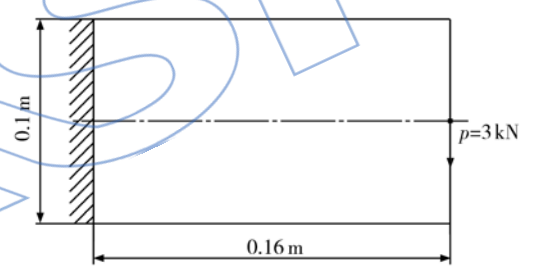


图 4 悬臂梁初始结构模型及边界、载荷条件
Fig. 4 Initial structure modal and boundary, load conditions for a cantilever

图 5 为悬臂梁位移约束进化历程.此算例通过删除位移灵敏度绝对值最小的单元来限制约束点位移,当结构的约束点位移超过指定的约束限制时,优化迭代停止,图 5(d)即为最终的优化构型.此时,约束点位移为 0.699 mm,体积为初始结构的 0.383.

考虑到可能的工程需要,同时由于最终结构中的奇异现象比较严重,因此试探性的在此模型左端设计一条宽度为 2 mm 的非设计域,而其他条件均不变,以此来研究初始设计域对于优化过程以及数值不稳定现象的影响.图 7 为带非设计域的位移约束进化历程.

在本次优化过程当中,优化算法以及优化参数均不做任何改动,当约束点位移近似相等时,带非设计域的结构迭代次数比不带非设计域的少,

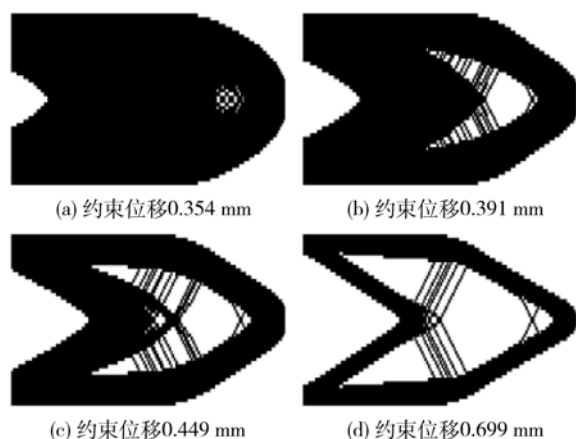


图5 悬臂梁位移约束进化历程

Fig. 5 Evolution of cantilever with displacement constrain

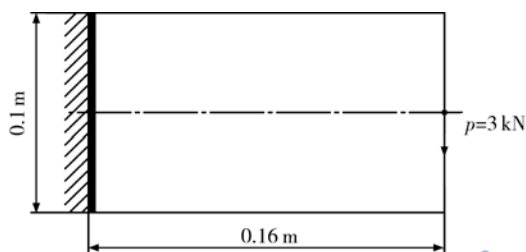


图6 带非设计域的初始结构模型

Fig. 6 Initial structure modal with non-design domain

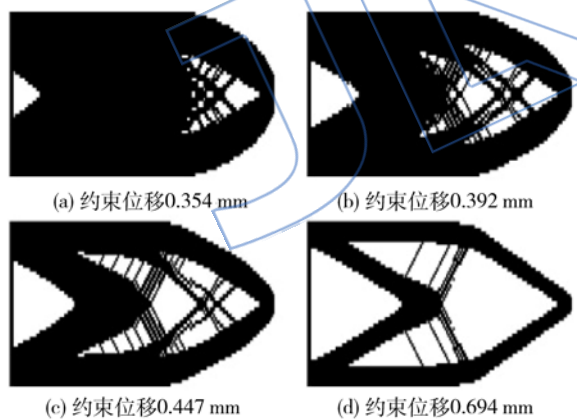


图7 带非设计域的位移约束进化历程

Fig. 7 Evolution of cantilever with non-design domain and displacement constrain

而且最终得到的优化结构中,奇异现象有所减轻。这是由于非设计域的存在提高了结构的整体刚度,降低了优化的震荡次数,减轻了数值不稳定现象。

3.3 频率约束

图8为一两角点简支的平面应力状态下的矩形板,尺寸为 $0.15\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 。弹性模量 $E=70$

GPa,泊松比 $\nu=0.3$,板厚 $t=0.01\text{ m}$,材料密度 $\rho=2700\text{ kg/m}^3$ 。选用 plane 42 单元,每次删除单元数目不多于 12 个,以基频为约束进行优化,初始基频为 2.36 kHz ,设定基频最高值不能超过 3.33 kHz 。图9为平面应力板基频约束进化历程。

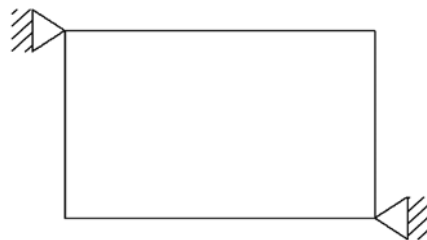


图8 平面应力板初始结构模型

Fig. 8 Initial structure modal of plane stress board

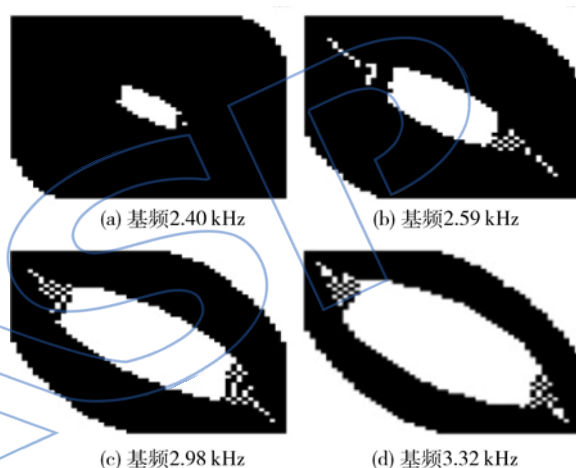


图9 平面应力板基频约束进化历程

Fig. 9 Evolution of plane stress board with first frequency constrain

为增大结构基频,选择删除频率灵敏度为正的单元,当结构的基频超过指定上限或者单元的灵敏度值全为负时,优化停止。最终得到的结构基频为 3.32 kHz ,上升了 40.7% ,质量为初始结构的 0.476 。值得说明的是,在此算例中,当结构基频超过约束上限值时,结构中仍然存在频率灵敏度为正的单元,表明该结构基频仍有上升空间。

4 结论

本文基于渐进结构优化法,结合结构效率的概念,对结构动力学优化设计方法进行了初步研究,其中优化模型的提出为今后的研究指明了方向。

1) 由于本文只研究了单个约束条件下的优化设计,因此多约束优化问题将成为下一阶段的主要研究内容。如何协调各个约束对优化进程的影响以得到最佳的结构,使结构效率最大化,将主

要取决于算法的改进和优化准则的设定。

2) 结构优化中出现的奇异现象本质上仍然是数值不稳定问题^[14], ANSYS 自身单元和求解器特性, MATLAB 与 ANSYS 数据交换、优化参数的给定等等都对优化结果产生了一定的影响, 但是本文给出的算例和已有的经典算例是基本一致的, 而且数值不稳定现象可以由选取高阶单元, 改进灵敏度计算方法等手段得到改善^[15], 因此渐进结构法在 ANSYS 平台上的应用是可行可靠的, 在工程性结构设计领域的推广有较好的发展前景。

3) 结构动力学设计是一个涵盖面广、内涵极其丰富的复杂问题, 它的发展和优化设计算法以及优化软件的发展密不可分, 因此本文只涉及了动力学设计中的部分内容, 然而, 目前渐进结构法已有多种改进算法和更多的应用成果, 同时由 APDL 与 MATLAB 语言编写的优化程序有很好的开放性, 因此在以后的研究中可以考虑将之推广到更为复杂的三维结构、屈曲优化、振动响应优化等问题中, 使结合了结构效率评估的结构动力学设计方法更完善、更系统化。

参考文献:

- [1] 张大义, 马艳红, 梁智超, 等. 整机结构设计的新评估方法——结构效率[J]. 航空动力学报, 2010, 25(10): 2170-2176.
ZHANG Dayi, MA Yanhong, LIANG Zhichao, et al. New evaluation method on whole engine structural design — structural efficiency [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(10): 2170-2176. (in Chinese)
- [2] 梁智超. 高推重比发动机总体结构方案与设计技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2009.
LIANG Zhichao. Research on general structure scheme and design technology of high thrust-to-weight aero-engine [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [3] 汪树玉, 刘国华, 包志仁. 结构优化设计的现状与进展[J]. 基建优化, 1999, 20(4): 3-14.
WANG Shuyu, LIU Guohua, BAO Zhiren. Current situation and progress of optimum structural design[J]. Optimization of Capital Construction, 1999, 20(4): 3-14. (in Chinese)
- [4] 顾松年, 徐斌, 荣见华, 等. 结构动力学设计优化方法的新进展[J]. 机械强度, 2005, 27(2): 156-162.
GU Songnian, XU Bin, RONG Jianhua, et al. Recent progresses on structural dynamic design methods[J]. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(2): 156-162. (in Chinese)
- [5] Bendsoe M P, Sigmund O. Material interpolation schemes in topology optimization[J]. Archive of Applied Mechanics, 1999, 69(9): 635-654.
- [6] 朱灯林, 陈俊伟, 俞洁, 等. 结构拓扑优化设计的研究现状及其应用[J]. 机械制造和自动化, 2005, 34(6): 7-11.
ZHU Denglin, CHEN Junwei, YU Jie, et al. Developments of structural topology design and its application in structural design[J]. Machine Building & Automation, 2005, 34(6): 7-11. (in Chinese)
- [7] 周克明, 李俊峰, 李霞. 结构拓扑优化研究方法综述[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 70-76.
ZHOU Keming, LI Junfeng, LI Xia. A review on topology optimization of structures [J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 70-76. (in Chinese)
- [8] 谢亿民, 杨晓英, Steven G P, 等. 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, et al. The theory and application of evolutionary structural optimization method[J]. Engineering Mechanics, 1999, 16(6): 70-81. (in Chinese)
- [9] 龚良慈, 李永新, 高德平, 等. 航空发动机设计手册, 第17册: 载荷及机匣承力件强度分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001: 71-80.
- [10] Sui Y K, Yang D Q. A new method for structural topological optimization based on the concept of independent continuous variables and smooth model[J]. Acta Mechanica Sinica, 1998, 18(2): 179-185.
- [11] Xie Y M, Yang X Y, Liang Q Q, et al. Evolutionary structural optimization[M] // Burns S A. Recent Advances in Optimal Structural Design. [S. l.]: ASCE, 2002: 125-164.
- [12] 张伟, 鹿晓阳, 杜忠友, 等. 渐进结构优化方法及算例[J]. 山东建筑工程学院学报, 2006, 21(2): 95-103.
ZHANG Wei, LU Xiaoyang, DU Zhongyou, et al. Evolutionary structural optimization method and typical examples[J]. Journal of Shandong University of Architecture and Engineering, 2006, 21(2): 95-103. (in Chinese)
- [13] 荣见华. 渐进结构优化方法及其应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
RONG Jianhua. Research on evolutionary structural optimization method and its application[D]. Changsha: School of National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [14] 齐恩伍. 基于 ESO 法的循环结构的优化设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
QI Enwu. Optimal design of periodic structures based on ESO method[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese)
- [15] 贺丹. 渐进结构优化方法的改进策略及应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
HE Dan. Improved approaches and application of evolutionary structural optimization[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)