

文章编号: 1000-8055(2002)04-0421-05

基于遗传算法的航空发动机管路优化设计

陈艳秋 朱梓根

(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 本文根据航空发动机管路的结构和振动特点, 以有限元计算为基础, 采用遗传算法为优化方法, 在通用有限元软件NASTRAN 的平台上开发了管路振动设计优化程序。本文以调频和调幅为目标函数, 对某一真实导管进行了优化设计, 计算和分析表明, 本方法能快速高效地获得最优解, 应力计算证明这些解满足工程要求的应力分布, 并建议在必要情况下增加管路用金属橡胶减振器以降低可能出现的振动过大。

关键词: 航空发动机; 遗传算法(GA); 管路; 优化设计

中图分类号: V 233

文献标识码: A

Piping System Design of Aero-Engine Using Genetic Algorithms

CHEN Yan-Qiu, Zhu Zhi-gen

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract In this paper, a universal and effective optimal program for piping system of aero-engine is presented. Based on the finite element method, the genetic algorithm (GA) is selected for optimization according to the structure and vibration characteristics of the piping system. And this program is carried out on the FEM software NASTRAN. A full size pipe is designed using frequency and amplitude adjustment as the optimization objective functions. The calculation result and analysis show that this design method can acquire optimization solutions effectively. These solutions are testified to satisfy the stress distribution of the engineering requirements. A proposal is made that a damper of metal rubber should be fixed on the pipe to avoid greater vibration which emerges during the operation of aero engine.

Key words aeroengines; Genetic Algorithm (GA); piping system; optimal design

1 引言

航空发动机外部管路是故障多发生部件, 工作环境比较恶劣, 导管断裂及管接头故障经常发生, 而振动是导致导管故障的主要原因^[1]。管路的振动优化设计, 是指应用优化理论, 以非共振或使管路上各点的振动水平最小为目的, 进行管路设计, 选择最佳的卡箍位置分布及刚度。

遗传算法是一种基于自然选择和遗传机制, 在计算机上模拟生物进化机制的搜索寻优算法。

近年来被广泛应用于各个领域, 尤其在振动主动控制领域, 如文献[2~4]将遗传算法用于柔性结构传感器/作动器的位置优化, 都取得了较好的效果。这说明了遗传算法的高效性和较好的全局收敛性。航空发动机的外部管路是一个复杂的空间结构系统, 数量较多, 管路支承不仅包括悬地卡箍和接地卡箍的不同形式, 还存在个数、刚度的变化, 设计变量较多, 由于遗传算法直接以目标函数值作为搜索信息, 且可以同时搜索多个点, 是一种高效的优化算法, 因此, 采用遗传算法并结合通用

收稿日期: 2001-08-21; 修订日期: 2001-12-25

作者简介: 陈艳秋(1972-), 女, 北京航空航天大学动力系博士生

有限元软件开发管路优化程序是一条可行的途径。

2 管路优化设计与遗传算法优化程序的开发

考虑到程序的工程实用性、易操作性,并方便地引入有限元方法,本文选用了大型通用有限元软件 NASTRAN 提供的二次开发语言 DMAP (Direct Matrix Abstraction Program) 进行遗传算法优化程序的开发,并使之运行于 NASTRAN 平台上。该程序有两个主要优点,首先,它具有标准的输入/输出格式;其次,具有高度灵活的开放式结构。这些优点,保证了程序的通用性、可持续发展性,并能满足多种设计要求。

2.1 管路优化设计的目标函数

2.1.1 调频

将管路系统的频率都调节至发动机工作转速 20% 之外,使其在发动机工作转速内不发生共振,只要不在共振情况下工作,各种支承状况的应力差别不大,再加上阻尼器的作用,应力就很小了。但是,对许多细长的管路,在卡箍的安装位置有限的情况下,往往难以达到调频要求,这就需要其他的设计方法。

2.1.2 调幅

调幅是指通过调节卡箍的位置和支承刚度使管路在指定频率(如:发动机工作转速)激励下的稳态响应的最大幅值在指定的范围之内或最小。

多自由度系统在激振力作用下的运动微分方程为:

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

假设阻尼矩阵是可以解耦的,运用模态叠加法可得位移响应幅值为:

$$\{Y\} = \sum_{r=1}^N \frac{\{\varphi_r\}\{\varphi_r\}^T\{F\}}{k_r[1 - (\omega/\Omega_r)^2 + j2\zeta_r(\omega/\Omega_r)]} \quad (2)$$

$$\Omega_r = \sqrt{k_r/m_r}$$

则管路上所有点的最大幅值 Y 就是所要计算的目标函数值,优化的目标是使 Y 最小。

2.2 遗传算法

遗传算法是一种基于自然选择和遗传机制,在计算机上模拟生物进化机制的搜索寻优算法。它把优化问题解的搜索空间映射为遗传空间,把每一可能的解编码为一个染色体,首先随机地产生一些个体组成初始群体(即问题的一些候选

解),按预先根据目标函数确定的适应度函数计算各个个体对问题环境的适应度,再根据个体适应度对个体进行选择,抑止适应度低的染色体,弘扬适应度高的染色体,然后进行交叉、变异等遗传操作,产生进化了的一代群体。如此反复操作,一代一代不断向更优解方向进化,最后得到满足收敛条件的最适应问题环境的群体,获得问题的最优解。管路遗传算法优化程序框图如图1所示。

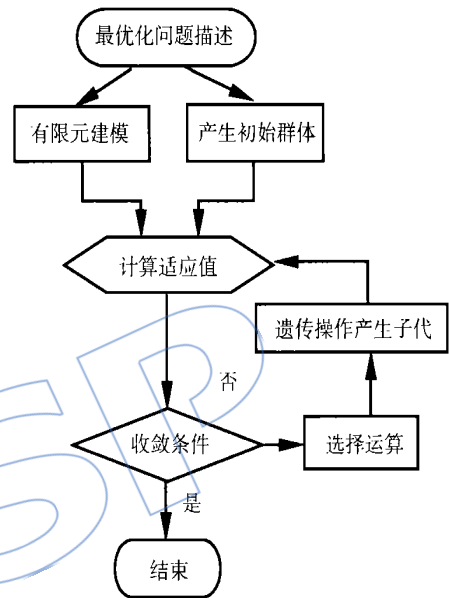


图1 管路遗传算法优化程序框图

Fig 1 The GA optimization program frame of piping system

本文所采用的编码方法和遗传操作如下:

(1) 编码: 遗传算法将优化问题的变量描述为编码,由于本文问题的变量既有离散的,也有连续的,所以采用传统的二进制编码方法就不太直观,也不方便。本文中采用浮点数的编码方法,每一代群体用一个维数与变量个数、个体数目有关的矩阵表示,矩阵中的每个元素代表一个变量,每个向量代表一个个体。

(2) 选择操作: 本文中选择操作用随机联赛选择(Stochastic Tournament Model)方法,这是一种基于个体适应度之间大小关系的选择方法。其基本思想是每次选取几个个体之中适应度最高的一个个体遗传到下一代群体中。

(3) 交叉操作: 是对两个相互配对的染色体按某种方式相互交换其部分基因,从而形成新的个体。本文采用多点非均匀交叉方法,用下式产生两个新的基因:

$$\begin{aligned} X_A^{k'} &= \alpha X_B^k + (1 - \alpha) X_A^k \\ X_B^{k'} &= \alpha X_A^k + (1 - \alpha) X_B^k \end{aligned} \tag{3}$$

其中: X 表示一个个体, k 表示个体中的某个基因座(即变量位置)。

(4) 变异操作: 非均匀变异主要是对原有的基因值作一随机地扰动, 以扰动后的结果作为变异后的新基因值。对每个基因座以相同的概率进行变异运算之后, 相当于整个解空间中做了一个轻微的变动。新的基因值由下式确定:

$$\begin{aligned} X_k' &= X_k + \gamma (U_{\max}^k - X_k) \quad \text{IF RAND}() = 0 \\ X_k' &= X_k - \gamma (X_k - U_{\min}^k) \quad \text{IF RAND}() = 1 \end{aligned} \tag{4}$$

式中: γ 为 $[0, 1]$ 范围内符合均匀概率分布的一个随机数。

(5) 适应度: 遗传算法中使用适应度(F)来度量群体中各个个体在优化计算中有可能达到或接近于或有助于找到最优解的优良程度。本问题定义为最大值优化问题, 针对上面提到的两个目标函数, 调频优化就以每个个体的频率值作为适应度; 而调幅优化以计算的振动幅值的负值作为适应度, 即: $F = -Y$, Y 为由式(2)计算的幅值。

在本文中, 遗传算法的运行参数设为: 群体大小 20, 交叉概率 0.5, 变异概率 0.06, 迭代截止误差 1.0^{-9} 。

3 管路的优化算例

图2为一根空间分布的发动机滑油导管, 直径 8 mm, 壁厚 1 mm, 长度 1082 mm。优化过程中, 垂直于导管的两个方向的支承刚度范围取为 $[5.0 \times 10^5, 5.0 \times 10^6] \text{ N/m}$, 导管轴线方向的刚度即纵向刚度影响很小, 可取一个常数值。以下所给的优化结果的刚度值是指垂直于导管的两个方向即横向刚度值。支承的位置范围用有限元计算所划分的

节点号表示。导管的边界条件为两端固支。

3.1 调频

运用本程序对该导管进行计算, 遗传优化过程仅进行了一代就找到满足要求的解。可见, 其优化速度是非常快的。调频结果的支承位置在图2中用 $\triangle$ 表示。设发动机转速为 12000 r/min, 即 200 Hz。优化结果显示, 在图2所示位置, 支承刚度值大于 $1.5 \times 10^6 \text{ N/m}$, 可以使该导管的一阶固有频率大于 240 Hz。调整优化过程的终止准则, 获得多个可行解。由结果可知, 满足要求的 3 个支承位置基本在图2所示的位置附近, 这 3 个位置为节点 13 ~ 17, 25 ~ 29, 35 ~ 39 附近; 这就是说, 我们获得的不只是一个解, 而是一个可行的范围。

3.2 调幅

文献[5]指出, 在 M L-STD-810C 中定义航空发动机附件试验的振动环境, 规定在其使用时间范围内不能有损伤和磨损, 在支承点的激励输入水平通常是 20 g。不仅要避免共振, 还要满足疲劳强度要求和静态应力极限。典型的振动应力水平应低于 35 MPa, 这将确保无限寿命。因此, 本文优化设计中, 激励水平采用 20 g。

假设导管的支承位置有限, 无法达到调频的要求, 例如, 本例中如果只能安装两个卡箍, 则进行调幅优化, 其优化结果为, 支承位置 16, 40 节点(参见图2); 支承刚度 $5.94 \times 10^5 \text{ N/m}$, 优化过程如图3, 此时导管的一阶固有频率为 100.7 Hz, 由于适应度采用幅值的负值, 所以图中纵坐标为负值。

由图3可见, 应用遗传算法, 适应度可迅速接近最大值, 但是, 其最后终止的代数与其收敛误差有关。收敛误差定义为适应度的最大值与其最小值之差的绝对值, 记为 ϵ 。在这里, 其收敛条件取

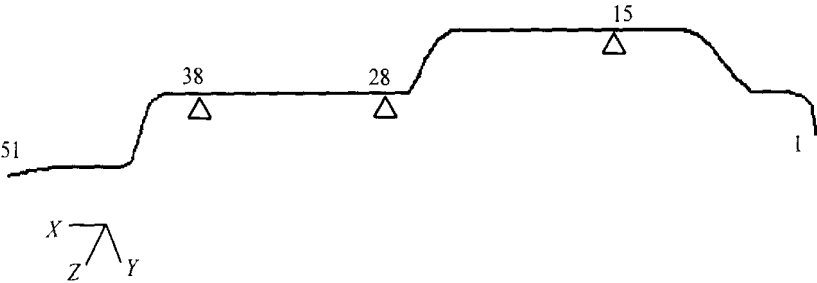


图2 导管调频结果的卡箍位置

Fig 2 The clamp locations of pipe after frequency adjustment

为进化代数 $T = 150$ 和 $\epsilon \leq 1.0^{-9}$, 当迭代循环数大于 T 或 $\epsilon \leq 1.0^{-9}$ 时, 优化过程终止。在这个条件下, 遗传过程进行了 95 代; 如果 ϵ 增大, 则进化代数也会减少。另外, 由调频、调幅的优化结果的应力计算结果: 激励幅值 20 g, 激励频率 200 Hz, 初始个体的最大应力 76.3 MPa, 初始个体的最大幅值 2.10 mm, 调幅结果的最大应力 15.8 MPa, 调幅结果的最大幅值 0.15 mm, 调频结果的最大应力 10.4 MPa。可以看到, 优化由初始个体的最大应力 76.3 MPa, 最大幅值为 2.1 mm, 经过调幅优化后降至最大应力 15.8 MPa, 最大幅值 0.15 mm。而调频的应力计算结果也表明, 将导管的共振频率调节至发动机工作转速之外 20%, 结构上的最大应力为 10.4 MPa, 都小于 35 MPa, 满足设计要求。

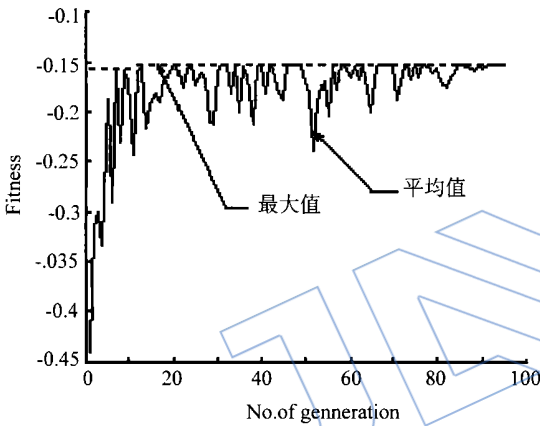


图3 调幅计算的遗传优化进程

Fig 3 The GA optimization process of amplitude adjustment

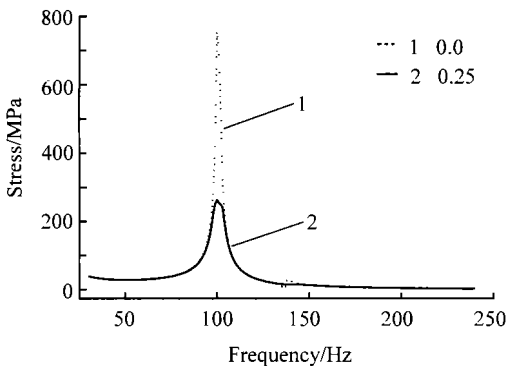


图4 增加减振器前后最大应力点的频率—应力曲线
Fig 4 The stress vs frequency in the Max stress node fixed damper or not (1—without the damper $\zeta = 0.0$; 2—with the damper $\zeta = 0.25$)

当然, 实际发动机的管路数目较多, 结构复杂且有些管路之间相互关联。这些, 都可以应用本文所开发的遗传算法优化程序进行优化设计。

3.3 管路在发动机启动至正常工作的响应计算

本文所研究的是航空发动机的外部管路的振动设计, 而调幅计算的结果有可能会使管路的共振频率落在发动机工作转速范围之内。因此, 我们对算例中的导管进行了从发动机启动到正常工作附近的频率范围 0~260 Hz 稳态响应计算。计算中设结构阻尼比 $\zeta = 0.005$, 考虑了支承不加减振器和增加航空发动机管路用的金属橡胶减振器^[6]两种情况, 设支承的阻尼比 $\zeta = 0.25$ 。计算结果见图 4 中的曲线 1 和 2, 增加减振器后共振时的最大应力点 29 节点的应力峰值由 754 MPa 降至 263 MPa, 共振峰处应力降低 65.1%, 而非共振时的应力水平普遍较低。

4 结 论

(1) 本文采用了遗传算法对航空发动机外部管路的支承参数包括支承位置、个数和刚度进行优化设计, 以不发生共振即调频和振动幅值最小为优化目标, 开发了以有限元计算为基础的遗传算法管路振动优化设计程序。

(2) 本文算例表明, 运用遗传算法可较好地实现航空发动机管路的振动设计, 能够满足快速高效的工程设计要求。另外, 在大型通用有限元软件 NASTRAN 平台上开发应用程序, 提高了程序的实用性、通用性和可持续开发性。

(3) 计算结果表明调频和调幅均能满足振动应力水平的要求; 此外, 由于调频过程快速方便且在工作范围内应力水平普遍较低, 所以, 建议在支承位置、个数满足要求的前提下, 优先考虑调频设计。另一方面, 由于实际管路的支承位置可能是有限制的, 在无法满足调频要求时, 可考虑调幅或其他设计方式。

(4) 如果调幅结果使管路的共振频率落在发动机转速范围之内, 可通过增加管路减振器使其共振时的应力峰值降低。

参考文献

- [1] 李勇. 航空发动机外部导管的振动[A]. 中国航空学会第七届发动机结构强度振动学术会议论文集[C]. 1994, 281-286
- [2] 杜立群, 颜云辉, 王德俊. 智能结构振动主动控制中驱动器的最优配置[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1999, 20(2):

192- 194

[3] 张宏伟, 徐世杰, 黄文虎 一种混合的遗传算法在压电智能结构振动控制全局优化设计中的应用[J]. 振动与冲击, 1999, 18(4): 6- 11.

[4] 刘福强, 张令弥 遗传算法在主动构件优化配置中的应用[J]. 振动与冲击, 1999, 18(4): 16- 21.

[5] Barry L. Stoner. The Importance of Engine External's Health [A]. The 7th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery [C]. 22- 26 February, Honolulu Hawaii, U SA. Edited by Dr. Agnes Muszynska, 1998, Volume A: 572- 580.

[6] 陈艳秋, 朱梓根 用于管路的薄金属橡胶减振器的性能研究[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 175- 178.

(责任编辑 王震华)

