

文章编号:1000-8055(2013)05-1013-06

基于神经网络与果蝇优化算法的涡轮叶片 低循环疲劳寿命健壮性设计

周 平, 白广忱

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 在对涡轮叶片低循环疲劳寿命概率分析的基础上,将广义回归型神经网络(generalized regression neural network, GRNN)与果蝇优化算法(fruit fly optimization algorithm, FFOA)结合,利用果蝇优化算法的多点全局的快速搜索能力来优化影响疲劳寿命的随机变量,进行涡轮叶片低循环疲劳寿命健壮性优化设计.优化结果表明:疲劳寿命的概率区间减小 17.9%,对随机变量的敏感度降低,从而可以更精确地对疲劳寿命进行估计.计算结果验证了该方法在工程应用中的可行性.

关 键 词: 涡轮叶片; 低循环疲劳; 概率寿命; 广义回归型神经网络; 果蝇优化算法; 健壮性

中图分类号: V21

文献标志码: A

Robust design of turbine-blade low cycle fatigue life based on neural networks and fruit fly optimization algorithm

ZHOU Ping, BAI Guang-chen

(School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: By combining generalized regression neural network (GRNN) with fruit fly optimization algorithm (FFOA) and using FFOA multi-point global search ability to optimize the random variable which affects the fatigue life, a robust optimization design for low cycle fatigue life of turbine-blade can be made on the base of probability analysis for turbine-blade low cycle fatigue life. Optimization results show that the probability interval of fatigue life decreases 17.9%, and the sensitivity of the low cycle fatigue life of the random variable can be reduced, so the fatigue life can be estimated more accurately. Optimization results indicate that the proposed method is available and feasible for the engineering application.

Key words: turbine-blade; low cycle fatigue; probability life;
generalized regression neural network (GRNN);
fruit fly optimization algorithm (FFOA); robust

涡轮叶片低循环疲劳失效是涡轮叶片结构失效的主要形式之一^[1],并且低循环疲劳寿命具有很大的分散性,因此对涡轮叶片进行低循环疲劳寿命概率分析具有重要意义.传统的强度寿命分析都是以确定性的几何参数和材料参数进行分析

计算,而涡轮叶片真实工作环境中各种参数都存在着不确定性,因此考虑参数的不确定性对叶片结构进行低循环疲劳寿命概率分析才能更真实展现疲劳寿命概率分布.由于涡轮叶片模型非常复杂,直接利用 Monte-Carlo 方法结合有限元进行

收稿日期:2012-05-19

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130508.0949.201305.1013_008.html

作者简介:周平(1989-),男,陕西兴平人,硕士生,研究方向为发动机结构可靠性和优化设计.

疲劳寿命概率分析,计算量大,效率低.广义回归型神经网络(GRNN)具有强大的非线性映射能力,训练速度快,精度高.用GRNN来模拟随机变量与疲劳寿命之间的函数关系,然后用Monte-Carlo方法结合GRNN进行疲劳寿命概率分析,不但可以满足精度要求,而且效率高,已经在相关文献中得到验证^[2-3].

健壮性设计是由日本质量专家Taguchi^[4]提出的一种质量改进技术,是一种有效减小产品质量波动的方法,近年来健壮性设计思想被引入工程领域^[5-7].健壮性设计基于两点原则,一方面使目标值接近最优均值,另一方面使目标值的波动范围越小越好.

由于随机变量波动的影响使得涡轮叶片低循环疲劳寿命分布具有很大的概率区间,因此需要对涡轮叶片低循环疲劳寿命进行健壮性设计^[8].对疲劳寿命分布产生影响的变量分为可控变量和不可控变量^[9],在低循环疲劳寿命概率分析的基础上通过FFOA算法结合GRNN对可控变量进行优化,使疲劳寿命对变量波动的敏感性降低,概率分布区间减小,进而更精确地估计涡轮叶片低循环疲劳寿命.

1 广义回归型神经网络

GRNN是径向基函数神经网络的一种变化形式,它由一个径向基隐含层和一个特殊的线性网络层组成,由于训练速度快,非线性映射能力很强,通常用来实现函数逼近^[10].GRNN的结构如图1所示,它由输入层(m 个神经元),隐含层(p 个径向基神经元)和输出层(q 个线性神经元)组成,其中隐含层选用Gauss函数 $R(x)$ 作为基函数.

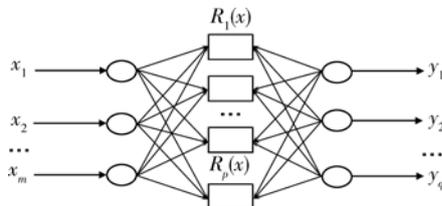


图1 GRNN结构
Fig.1 Structure of GRNN

2 果蝇优化算法

果蝇优化算法(FFOA)是由中国台湾学者

Pan^[11]根据果蝇寻找食物的方法得到启发而提出的一种新型优化算法.果蝇寻找食物是根据食物气味浓度来判断飞行方向,而且果蝇种群初始飞行方向是随机的,如果一个种群中的某个果蝇飞行方向的食物气味浓度最高,其他的果蝇都会朝此方向飞行,以此位置为初始位置继续随机飞行,以此类推就会寻找到食物.将其原理用于优化算法,就可以由目标函数与目标值之间的差来寻找飞行方向,最终找到最优解.由于果蝇种群是在全局范围随机飞行,因此可以避免局部最优化,而且由于众多果蝇同时寻找,因此收敛速度快.FFOA的流程图如图2所示.

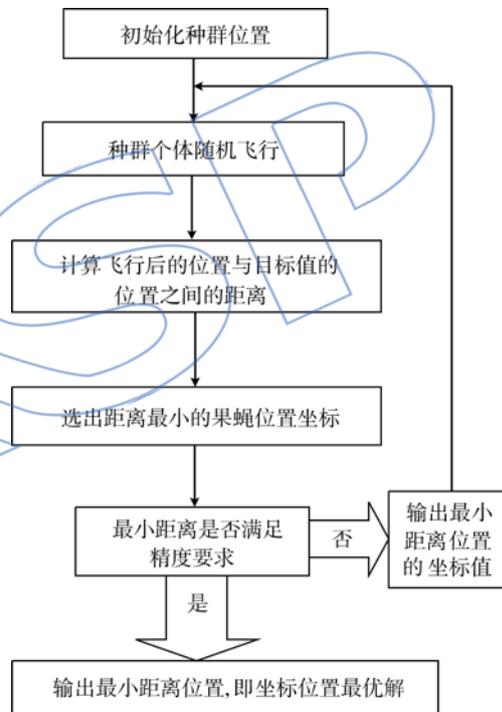


图2 FFOA流程图
Fig.2 Flow chart of FFOA

3 涡轮叶片热-结构耦合分析

涡轮叶片结构复杂,直接在有限元软件中进行建模很困难,因此在三维绘图软件UG中对叶片进行建模,然后将建好的模型导入到有限元分析软件ANSYS中对叶片结构进行网格划分和热-结构耦合分析,涡轮叶片的叶身部分采用六面体单元进行网格划分,榫头部分采用四面体单元进行网格划分,涡轮叶片结构网格划分后模型如图3所示.涡轮叶片材料为GH4033高温合金,叶片工作转速为4700 r/min,密度为8.2 g/cm³.

3.1 涡轮叶片载荷加载

涡轮叶片进行静强度分析时,叶片表面的气动载荷可以看作是定常的,气动载荷引起的叶片应力远小于离心力和热应力引起的叶片应力.因此对涡轮叶片进行静强度分析时只考虑离心载荷和热载荷,气动载荷不予考虑^[12].为了简化分析过程,温度载荷以一维分段函数插值的方式加入到叶片结构中^[13],插入后的温度分布如图 4 所示,离心力载荷以转速形式加入到叶片结构中.

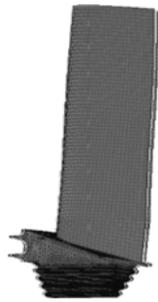


图 3 涡轮叶片有限元模型

Fig. 3 Finite element model of turbine-blade

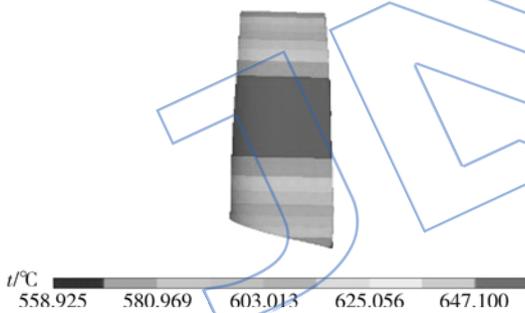


图 4 叶片温度分布

Fig. 4 Temperature distribution on blade

3.2 涡轮叶片边界条件

位移边界条件通过对叶片榫头最下面一对榫齿表面的法向方向施加位移约束来完成,其他两个方向防止刚体移动即可.

力边界条件通过对其余榫齿表面法向方向施加大小由离心力载荷平均到各个齿面所得的力来完成^[14].

3.3 涡轮叶片应力分析

边界条件和载荷都设置完成后对叶片进行热-结构耦合应力分析,分析后的叶片的等效应力分布如图 5 所示,由图可知叶片根部的应力值最大,因此选择叶片根部最大应力处作为分析对象进行低循环疲劳寿命概率分析.

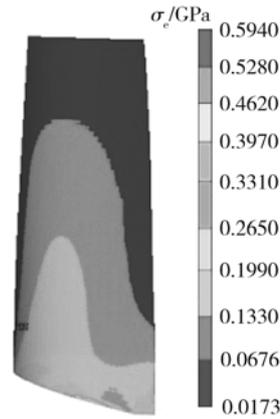


图 5 叶片等效应力分布

Fig. 5 Equivalent stress distribution on blade

4 涡轮叶片低循环疲劳寿命概率分析

由于叶片最大应力位置处平均应力大于 0,对叶片进行低循环疲劳寿命计算应采用 Morrow 法,用平均应力修正的 Mason-Coffin 公式进行计算,如式(1)所示

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \left[\frac{\sigma'_i - \sigma_m}{E} \right] (2N_f)^b + \varepsilon'_i (2N_f)^c \quad (1)$$

式中 σ'_i , ε'_i , b , c 分别是材料的疲劳强度系数、疲劳延性系数、疲劳强度指数和疲劳延性指数; E 为弹性模量, σ_m 为平均应力, $\Delta \varepsilon$ 为循环应变幅, N_f 为叶片低循环疲劳寿命.

4.1 随机变量的选取

求解涡轮叶片低循环疲劳寿命过程中,涉及众多变量,因此只能选取主要变量进行疲劳寿命概率分析.叶片叶身温度 t 受运转状态波动具有不确定性,叶片转速 ω 作为随机变量可以反映离心力载荷的不确定性,热膨胀系数 α 和弹性模量 E 可以反映材料参数的不确定性,疲劳强度系数 σ'_i 、疲劳强度指数 b 、疲劳延性系数 ε'_i 、疲劳延性指数 c 可以反映 Mason-Coffin 公式中材料常数的不确定性,以上随机变量均假设为正态分布,所有选取的随机变量的均值和标准差如表 1 所示.

4.2 涡轮叶片低循环疲劳寿命 GRNN 模拟

以表 1 中的参数为随机输入变量,涡轮叶片低循环疲劳寿命为随机输出变量,利用 Monte-Carlo 方法在有限元中进行 150 次随机抽样,计算相应的低循环疲劳寿命.将其中 120 组随机输入变量和对应疲劳寿命作为训练样本,通过设置合理的 GRNN 参数来训练拟合随机输入变量与疲劳寿命之间的函数关系.剩下的 30 组数据作为验

证样本,对训练好的 GRNN 进行检验,结果显示 GENN 的函数拟合精度满足相对误差小于 1%。

表 1 可靠性分析随机变量
Table 1 Random variables for reliability analysis

| 随机变量 | 均值 | 标准差 |
|--|--------|------|
| $t/^{\circ}\text{C}$ | 570 | 10 |
| $\omega/(\text{rad/s})$ | 492.2 | 8 |
| E/GPa | 184 | 3 |
| σ'_f/MPa | 23241 | 50 |
| b | -0.651 | 0.02 |
| ϵ' | 0.455 | 0.02 |
| $\alpha/10^{-5} (^{\circ}\text{C}^{-1})$ | 1.507 | 0.1 |
| c | -0.446 | 0.02 |

利用 Monte-Carlo 方法对训练好的 GRNN 进行 100000 次随机抽样,得到叶根最大应力处的低循环疲劳寿命分布,如图 6 所示,横坐标是低循环疲劳寿命 N_f ,纵坐标是抽样次数。由图可知最小的寿命为 9301,最大的寿命为 109360。均值为 30611。叶片低循环疲劳寿命 N_f 的累计概率分布函数如图 7 所示。

通过 Monte-Carlo 方法结合 GRNN 进行低循环疲劳寿命计算,只需 1h 左右时间,而且精度可以达到工程要求水平,而直接调用有限元进行 100000 次抽样将要花费几千小时,所耗费的时间是难以承受的,因此使用 GRNN 来模拟复杂程度高、多输入变量、非线性程度高的问题不但精度高,而且效率也非常高。

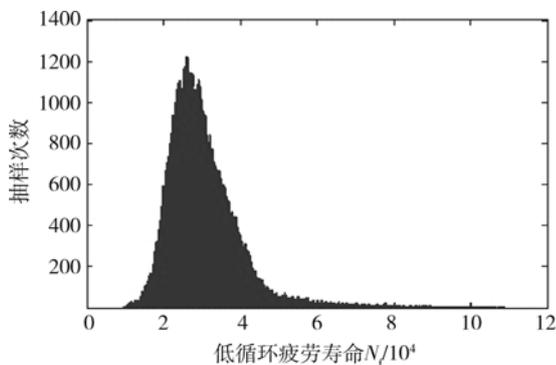


图 6 低循环疲劳寿命分布

Fig. 6 Distribution of low cycle fatigue life

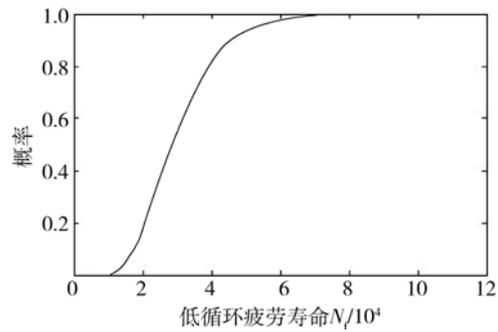


图 7 低循环疲劳寿命累计概率分布

Fig. 7 Cumulative probability distribution of low cycle fatigue life

5 涡轮叶片低循环疲劳寿命健壮性设计

5.1 低循环疲劳寿命健壮性的分位数优化设计模型

健壮性分位数优化模型^[15]一方面使得设计目标尽可能地接近均值,另一方面使得在概率区间里的波动范围尽可能小,通过对两者进行权衡比重组成目标函数,而约束条件使得概率寿命的分位数区间的上限小于优化前,下限大于优化前,其具体表达式如式(2)所示。

$$\begin{cases} \min a(N^{0.5} - \mu)^2 + (1-a)(N^{0.95} - N^{0.05}) \\ \text{s. t. } N^{0.95} - W < 0 \\ N^{0.05} - W_1 > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 $N^{0.5}$ 为概率为 0.5 的下侧分位数, $N^{0.95} - N^{0.05}$ 为概率为 0.95 与概率为 0.05 的下侧分位数之差, μ 为优化前的均值, a 为权重系数,取 0.3, W 为优化前概率为 0.95 的下侧分位数, W_1 为优化前概率为 0.05 的下侧分位数。

5.2 健壮性优化变量的选取

由于随机变量中一部分是不可控随机变量,此类随机变量大小不能进行控制,只能作为随机输入参数而不能将其作为待优化参数。热膨胀系数 α 、弹性模量 E 、疲劳强度系数 σ'_f 、疲劳强度指数 b 、疲劳延性系数 ϵ' 、疲劳延性指数 c 均为与材料有关参数,不可以控制其大小,因此为不可控变量。另一部分为可控随机变量,可以对其大小进行控制,因此可以作为待优化参数,可以通过改变其大小来寻找最优目标值。温度和转速大小均可以进行控制,因此可作为可控变量;为了满足发动机

性能要求,温度 \bar{t} 的取值范围为 [540, 600], 转速 $\bar{\omega}$ 的取值范围为 [460, 520]. 各变量具体情况如表 2 所示.

表 2 健壮性优化随机变量
Table 2 Random variables for robustness optimization

| 随机变量 | 均值 | 标准差 |
|---|----------------|------|
| $t/^\circ\text{C}$ | \bar{t} | 10 |
| $\omega/(\text{rad/s})$ | $\bar{\omega}$ | 8 |
| E/GPa | 184 | 3 |
| σ'_f/MPa | 23 241 | 50 |
| b | -0.651 | 0.02 |
| ϵ'_f | 0.455 | 0.02 |
| $\alpha/10^{-5}(\text{ }^\circ\text{C}^{-1})$ | 1.507 | 0.1 |
| c | -0.446 | 0.02 |

5.3 优化过程和结果分析

采用 GRNN 将随机变量与寿命分位数关系式表达出来,然后再利用 FFOA 与 GRNN 结合的方式进行涡轮叶片低循环疲劳寿命健壮性优化,优化后与优化前概率密度函数分布如图 8 所示.优化前低循环疲劳寿命概率密度函数分布区间较宽,分散性较大;优化后低循环疲劳寿命概率密度函数分布区间较窄,分散性减小.

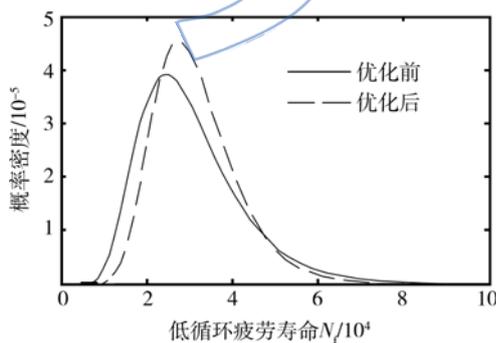


图 8 优化前后低循环疲劳寿命概率密度函数分布
Fig. 8 Probability density function distribution of low cycle fatigue life before and after optimization

涡轮叶片低循环疲劳寿命健壮性优化前后被优化参数和分位数寿命数据对比如表 3 所示.

由表 3 可知优化后平均值增加了 901,分位数概率区间减少了 6 835,所以疲劳寿命进行健壮

性优化的效果是很明显的,可以更好、更加精确地去估计疲劳寿命的分布情况,而且提高了低循环疲劳寿命的抵抗参数波动干扰能力.

表 3 优化前后数据对比
Table 3 Comparison of data before and after optimization

| | 优化前 | 优化后 |
|-------------------------|--------|--------|
| $N^{0.5}$ | 30 611 | 31 512 |
| $N^{0.95}$ | 53 397 | 49 601 |
| $N^{0.05}$ | 15 215 | 18 254 |
| $N_{0.05}^{0.95}$ | 38 182 | 31 347 |
| $\omega/(\text{rad/s})$ | 492.2 | 501 |
| $t/^\circ\text{C}$ | 570 | 579 |

6 结 论

通过 GRNN 来拟合随机变量和寿命之间的函数关系,然后应用 Monte-Carlo 方法调用训练好的 GRNN 进行低循环疲劳寿命概率分析,不但精度高而且效率高.

使用 GRNN 和 FFOA 结合的方式,对低循环疲劳寿命进行健壮性优化设计,提高了疲劳寿命抗干扰能力,缩小了疲劳寿命分布的概率区间,可以更加精确地对叶片低循环疲劳寿命进行估计和预测.

以上涡轮叶片低循环疲劳寿命概率分析与健壮性优化设计方法也可用于其他工程结构的可靠性分析与健壮性优化设计中.

参 考 文 献:

[1] 陶春虎,钟培道,王仁智,等.航空发动机转动部件的失效与预防[M].北京:国防工业出版社,2001:31-67.
[2] 高阳,白广忱,于霖冲.基于 RBF 神经网络的涡轮盘疲劳可靠性分析[J].机械设计,2009,26(5):9-10.
GAO Yang, BAI Guangchen, YU Linchong. Fatigue reliability analysis of turbine-disk based on RBF neural network[J]. Journal of Machian Design, 2009, 26(5): 9-10. (in Chinese)
[3] 段巍,赵峰.结构可靠性分析的响应面方法比较研究[J].中国工程机械学报,2009,7(4):393-396.
DUAN Wei, ZHAO Fen. Comparative study on response surface methods for structural reliability analysis[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2009, 7(4): 393-396. (in Chinese)
[4] Taguchi G. Taguchi on robust technology development;

- bringing quality engineering upstream[M]. New York: ASME Press, 1993.
- [5] Ghanmi S, Bouazizi M L, Bouhaddi N. Robustness of mechanical systems against uncertainties[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2007, 43(9): 715-731.
- [6] 朱学军, 王安麟, 黄洪钟. 基于健壮性的机械设计方法[J]. *机械科学与技术*, 2000, 19(2): 230-233.
ZHU Xuejun, WANG Anlin, HUANG Hongzhong. Mechanical design for robustness[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2000, 19(2): 230-233. (in Chinese)
- [7] Ghanmi S, Bouazizi M L, Bouhaddi N. Robustness of mechanical systems against uncertainties[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2007, 43(9): 715-731.
- [8] LI Feng, MENG Guangwei, SHA Lirong, et al. Robust optimization design for fatigue life [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2011, 47(10): 1186-1190.
- [9] 刘春涛, 林志航. 基于响应面和支持向量机的产品健壮设计方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2006, 18(8): 1175-1178.
LIU Chuntao, LIN Zhihan. Robust design of product based on response surface and support vector machine[J]. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 2006, 18(8): 1175-1178. (in Chinese)
- [10] 闻新, 周露, 李翔, 等. MATLAB 神经网络仿真与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [11] Pan W T. A new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example[J]. *Knowledge Based Systems*, 2012, 26(2): 69-74.
- [12] Hohlrieder M, Irretier H. Numerical study of the fatigue life of a gas turbine blade in transient operations[R]. ASME Paper 94-GT-108, 1994.
- [13] 艾书民, 王克明, 缪辉, 等. 稳态温度场作用下涡轮叶片振动特性的研究[J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2011, 28(4): 18-21.
AI Shumin, WANG Keming, MIAO Hui, et al. Research on turbine blade vibration characteristic under steady state temperature field[J]. *Journal of Shenyang Aerospace University*, 2011, 28(4): 18-21. (in Chinese)
- [14] 王相平, 徐鹤山. 有限元计算中的叶片边界条件的选取[J]. *航空发动机*, 1998(4): 43-46.
WANG Xiangping, XU Heshan. The selection of the blade boundary conditions in finite element calculation[J]. *Aero-engine*, 1998(4): 43-46. (in Chinese)
- [15] 刘春涛, 林志航, 周春景. 具有随机型和区间型干扰因素的产品健壮设计研究[J]. *中国机械工程*, 2007, 18(5): 505-509.
LIU Chuntao, LIN Zhihang, ZHOU Chunjin. Study on product robust design with a mixture of random and interval noise factor[J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(5): 505-509. (in Chinese)