

基于遗传算法的发动机性能监控与故障诊断*

胡金海, 谢寿生

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要: 利用综合加权法计算表征发动机整体性能的综合指数时, 各参数的权系数难于确定。利用遗传算法确定各参数的权系数, 使所得到的综合指数值比采用专家调查法所得综合指数值更能灵敏、准确地反映发动机整体性能的变化情况, 提高了发动机性能正常与否的识别率, 并以此来发现发动机潜在早期故障, 防止故障的扩大。通过对某涡扇发动机进行监控, 证明该方法确实有效。

关键词: 航空发动机; 性能参数; 故障诊断

中图分类号: V231

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2003) 03-0198-03

Performance monitoring and fault diagnosis of engines based genetic algorithm

HU Jin-hai, XIE Shou-sheng

(Coll. of Engineering, Air Force Engineering Univ., Xi'an 710038, China)

Abstract: According to the problem on calculating the synthetic exponent characterizing the whole performance of engine by using the synthetic weighted method, the weights of every parameter are difficult to be determined. To solve this problem, a method of determining the weights of every parameter by genetic algorithm is presented. The synthetic exponent gained by GA is more sensitive and exact than the one gained by the expert investigated method in reflecting the whole performance of the engines. Meanwhile, this method improves the rate of identifying whether the performance of the engine is normal or not, finds the potential forepart fault of engine and prevents the spread of the fault. The validity of the method is testified by monitoring certain type of turbine-fan engine.

Key words: Aircraft engine; Performance monitoring; Fault diagnosis

1 引 言

目前, 要在航空发动机上监控突发型故障(异常)和基于时间型的故障(异常)是不易实现的^[1]。

基于时间延迟型(或称渐发型)的故障(异常), 往往由某种缺陷不断扩大经由异常再进一步发展而形成的。这一阶段, 发动机的有关参数越来越偏离正常值; 而且, 即使工作正常, 但随着使用时间的延长, 发动机的参数也会逐渐偏离正常值, 导致性能下降。因此可根据发动机多次工作后的参数变化情况, 发现此类渐发性故障; 同时可对处于正常工作状态的发动机性能状况作出判断。

由于反映发动机工作状态的参数较多, 为了对整

体性能提供较合理的评价, 通过综合发动机多项指标进行计算得到定量反映发动机工作性能的性能综合指数。它的大小直接反映了发动机性能的好坏程度。采用综合加权法^[2]计算综合指数的表达式如下:

$$Q(t) = \frac{\sum_{s=1}^m v_s \cdot \hat{x}_s(t)}{\sum_{s=1}^m v_s} \quad s = 1, 2, 3, 4 \dots m \quad (1)$$

式中 m 为发动机被监测参数的个数, v_s 为参数 x_s 的权, 反映了估计被监测状态该参数的重要性($0 \leq v_s \leq 1$), $\hat{x}_s(t)$ 为被监测的发动机参数的功效函数值^[3], 是将发动机各参数无量纲化以后的值($0 \leq \hat{x}_s(t) \leq 1$), 当发动机处于最佳工作状态时, $\hat{x}_s(t) = 1$; 当发动机

* 收稿日期: 2002-05-16; 修订日期: 2002-08-12。

作者简介: 胡金海 (1978—), 男, 硕士生, 研究领域为飞机推进系统控制与状态监控。

处于故障状态时, $\hat{x}_s(t) = 0$ 。

由于被监测参数较多, 而且各参数反映发动机性能的重要程度, 也无法确知。因此各参数权值的合理确定比较困难。文献[1]采用德尔菲法(即专家调查法), 凭借发动机方面专家的经验, 根据被监测参数对发动机整体性能影响的重要性, 分别给出其权值。本文就是根据遗传算法原理来确定各参数的权值。

鉴于简单遗传算法^[4,5](SGA)的选择算子、杂交算子寻优功能随着进化迭代次数的增加而逐渐减弱, 在应用中常出现早熟熟练; 且计算量大、全局优化速度慢; 优化结果的精度受编码长度控制; 控制参数的设计技术复杂, 目前尚无好的准则指导。故本文采用加速遗传算法^[6], 称为改进的遗传算法(AGA)。

2 基于改进的遗传算法的权值确定

2.1 改进的遗传算法

改进的遗传算法, 实质就是在SGA的基础上, 加了一步称之为加速循环的过程, 在这一步中, 以SGA进化迭代所产生的优秀个体的产量变化空间, 作为变量的初始变化区间, 替代最原始设定的变量的变化区间, 随着进化迭代次数的增加, 逐步缩小各变量的变化区间。接着又重新运行SGA, 直到满足算法终止条件。设一般优化问题为:

$$\begin{cases} \min f(c_1, c_2, \dots, c_p) \\ a_j \leq c_j \leq b_j \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

其中, $\{c_j\}$ 为 p 个变量; $\{a_j, b_j\}$ 为 c_j 的初始变化区间; f 为非负的优化准则函数。

AGA的主要步骤如下: (1) 变量初始化空间的离散和编码; (2) 初始父代群体的随机生成; (3) 父代个体串的解码和适应度评价; (4) 父代个体的概率选择; (5) 父代个体的杂交; (6) 子代个体的变异; (7) 进化迭代。由上步得到的 n 个子代个体作为新的父代, 算法转入步3, 进入下一次进化过程, 如此循环往复。以上7步构成SGA; (8) 加速循环。根据SGA各算子的寻优性能和大量的数值实验与实际应用, 用第一次、第二次进化迭代所产生的优秀个体的变量变化空间, 作为变量新的初始变化区间, 算法转入步1, 重新运行SGA, 如此加速循环, 直到最优个体的适应度值小于某一设定值或算法运行达到预定加速循环次数, 结束整个算法的运行。此时把当前群体中最佳个体和某个优秀个体指定为最后需要的结果。

2.2 基于改进遗传算法的各参数的权值确定

本文将AGA应用于确定发动机各被监测参数的

权值, 由综合指数来表征发动机的性能, 发动机性能正常时, 其综合指数必须尽可能大, 且正常时的综合指数值之间离散度不应很大; 在发动机性能恶化或故障时, 其综合指数值必须尽可能小, 且离散度也不应很大。由此得到的综合指数才明确地分辨出发动机的性能正常与否或正常时性能下降的速度。

综合指数值表达式为

$$Q(t) = \frac{\sum_{i=1}^{15} w_i \times d_i}{\sum_{i=1}^{15} w_i} \quad (3)$$

15个参数($d_1 \sim d_{15}$)分别为发动机惯性时间、高压转子换算转速、低压转子换算转速、高压转子导流叶片角度、低压导流叶片角度、涡转后排气温度、尾喷口指示值、振动值、滑油压力、滑油消耗量、转差率、推力、燃油消耗率、风扇效率、高压压气机效率。可根据记录的发动机实测数据进行计算得到^[3]。需要确定的是15个参数的权值 $w_1 \sim w_{15}$ 。选取优化准则函数^[7]为

$$f = \frac{|u_n - u_f|}{\sigma_n + \sigma_f} \quad (4)$$

式中, u_n , σ_n 和 u_f , σ_f 为发动机正常状态和失常时的综合指数值 $Q(t)$ 的平均值和方差。从式(4)可见, f 值越大, 该权系数下得到的综合指数值就越能灵敏地反应发动机的性能正常与否, 该权系统也就越合理, 因此选取 f 作为优化准则函数, 来评价所得权系统的优劣。定义适应度函数为:

$$F(i) = f^2(i) \quad i = 1 \sim n \quad (5)$$

式中 $f(i)$ 的平方形式是为了增强个体适应度值之间的差异。对某型涡扇发动机^[1], 取其中30次正常工作和30次故障(异常)的15个参数的功效函数值, 作为优化准则函数中发动机正常工作和故障状态数据。15个权值的范围均在 $[0, 1]$ 之间, 采用长度为10的二进制编码串分别表示15个权变量, 将15个10位长的二进制编码串连接在一起, 组成一个150位长的二进制编码串, 表示一个个体的基因型, 每10位表示一个权变量。选择运算采用比例选择方式。每代选取群体规模为400, 优秀个体数目为40, 复制概率为0.2, 杂交概率为0.95, 变异概率为0.6^[6]。加速循环20次后得最优值2322080.282007。

根据所得最优个体, 进行解码得15个十进制数的权系统。确定权系统后的综合指数表达式为

$$Q(t) = (0.402538 \times d_1 + 0.402637 \times d_2 + 0.457798 \times d_3 +$$

$$0.875358 \times d_4 + 0.425128 \times d_5 + 0.008698 \times d_6 + \\ 0.625424 \times d_7 + 0.965507 \times d_8 + 0.798979 \times d_9 + \\ 0.000008 \times d_{10} + 0.956398 \times d_{11} + 0.823641 \times d_{12} + \\ 0.203256 \times d_{13} + 0.753641 \times d_{14} + 0.398712 \times d_{15}) / 7.976487$$

3 基于 AGA 的模型与专家调查法确定的模型结果比较

文献[1]根据被监测的发动机参数对发动机整体性能影响的重要程度,采用专家调查法确定了一组权重系数。由其确定的综合指数表达式为

$$Q(t) = (0.4 \times d_1 + 1.0 \times d_2 + 0.5 \times d_3 + 0.05 \times d_4 + \\ 0.05 \times d_5 + 5.0 \times d_6 + 0.1 \times d_7 + 1.5 \times d_8 + \\ 0.6 \times d_9 + 1.2 \times d_{10} + 0.8 \times d_{11} + 0.5 \times d_{12} + \\ 0.2 \times d_{13} + 1.0 \times d_{14} + 0.1 \times d_{15}) / 11.7$$

为了比较这两种方法所确定的综合指数,我们采用某台被长期监控的该型发动机工作 109 次,工作时间为 122h 的实测参数值,进行检验。

由这两种方法所确定的该发动机性能变化趋势如图 1 所示。由图可见,两种方法得到的综合指数值均出现过大幅下降,表明该台发动机的性能出现过明显的恶化。实际情况是该台发动机在装机工作 37.45h,电子综合调节器故障,更换了电子综合调节器。图 1 中综合指数值大幅下降是由于在调节器故障前,调节器的有关工作参数漂移,已处于异常工作状态,故导致发动机的有关参数也偏离正常值,随着调节器参数的继续漂移,最终导致在工作到 37.45h,调节器故障,综合指数值也降到最低点。但从图 1 可看出,由遗传算法得到的综合指数值反映发动机的性能变化更为明显,异常和正常时综合指数值变化更大。

由图 1 可看出,采用遗传算法明显提高了发动机

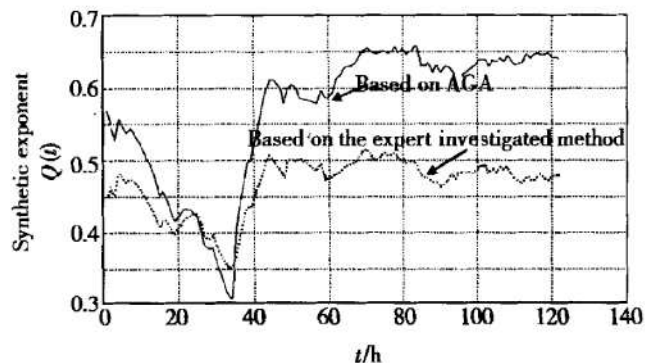


Fig. 1 Performance synthetic exponent by two methods

性能正常时的综合指数值(由 0.483 提高到 0.635),减少了发动机故障(性能失常)时的综合指数值(由 0.356 减少到 0.311),且性能正常时的综合指数值的方差也有所减小(由 0.0033 减小到 0.0024)。故由遗传算法确定的综合指数更为准确、灵敏地反映发动机性能恶化趋势。如果在平时维护过程中,对该发动机进行重点监控,发现性能综合指数值大幅减小时,进行排故检查,便可起到对潜在故障提前预报的功能。

4 结 论

本文利用遗传算法原理和发动机实际工作(正常和故障时)数据来自动生成发动机各被监测参数的权重系数,得到表征发动机性能的综合指数值。通过对某涡扇发动机进行监控,表明该法比专家调查法更有效。利用遗传算法所依据的是发动机的实际工作数据,而专家调查法是基于专家对各项指标重要性的主观认知程度,故采用遗传算法客观性更强;并且整个算法简单、意义明确、利用计算机程序易于实现;更主要的是该法便于推广使用到其它型号的发动机上使用,只要收集到发动机的工作(正常和故障)数据,适当调整遗传算法的某些控制参数,便可得到表征发动机性能的有效综合指数,对其性能变化进行监控,针对性能综合指数变化较大的发动机,可进行排故检查,做到对故障的早期发现、排除。

参考文献:

- [1] 谢寿生. 某型飞机发动机故障诊断与性能趋势监测研究[D]. 西安: 西北工业大学博士学位论文, 1998.
- [2] 项静恬, 史久恩. 非线性系统中数据处理的统计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997, 8.
- [3] 李 珈, 陶增元. 某型发动机性能衰退的统计分析和预测[J]. 航空动力学报, 1994, 7(2).
- [4] 周 明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999, 6.
- [5] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning[M]. MA: Addison-Wesley, 1989: 1~ 83.
- [6] 金菊良, 杨晓华, 丁 晶. 标准遗传算法的改进方案—加速遗传算法[J]. 系统工程理论与实践, 1994, 5(4).
- [7] 徐章遂, 房立清, 王希武, 等. 故障信息诊断原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000, 7.

(编辑: 朱立影)