

文章编号: 1000-8055(2005)02-0314-04

基于混沌变量的航空发动机性能监控与故障诊断

侯胜利, 胡金海, 李应红
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 针对在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, 本文提出利用混沌变量确定各参数的权系数, 使优化得到的综合指数值比采用专家调查法所得到的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。通过对某型涡扇发动机进行监控, 证明该方法确实有效。

关键词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 性能监控与故障诊断; 综合指数; 混沌变量

中图分类号: V 263. 6

文献标识码: A

Aeroengine Performance Monitoring and Fault Diagnosis Based on Chaos Variable

HOU Sheng-li, HU Jing-hai, LI Ying-hong

(The Engineering Institute,

Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: While the synthetic weighted method is used to calculate the synthetic exponent characterizing the overall engine performance, the weights of every parameter are difficult to determine. To solve this problem, a method of chaos variable was introduced. The synthetic exponent optimized by chaos variable is more sensitive and accurate than the one gained by the expert investigation method in reflecting the overall engine performance change. This method improves the successful rate of identifying whether the engine performance is normal or not, and can be used to detect the potential incipient fault, thus prevents the spread of the fault. The validity of this method is verified by monitoring a turbofan engine.

Key words: aerospace propulsion system; aeroengine; performance monitoring and fault diagnosis; synthetic exponent; chaos variable

航空发动机是一个非常复杂的系统, 反映发动机工作状态的参数较多, 为了对发动机进行连续的性能趋势监控, 需要一个定量反映发动机工作性能的综合特征参数。我们可以通过综合发动机多项性能指标得到性能综合指数^[1], 它的大小直接反映了

发动机性能的好坏程度。

本文采用综合加权法^[2]计算综合指数, 表达式如下:

$$Q(t) = \frac{\sum_{s=1}^m v_s^* \hat{x}_s(t)}{\sum_{s=1}^m v_s}$$

收稿日期: 2004- 05- 24; 修订日期: 2004- 09- 20

作者简介: 侯胜利(1977-), 男, 河北石家庄人, 西安空军工程大学工程学院博士生, 主要从事航空发动机可靠性与故障诊断研究

$(s = 1, 2, \cdots, m)$ (1)

其中, m 为发动机被监测参数的个数。 v_s 为参数 x_s 的权, 反映了在估计被监测状态该参数的重要性。 v_s 的限制条件是: $0 \leq v_s \leq 1$ 。 $\hat{x}_s(t)$ 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, 且 $0 \leq \hat{x}_s(t) \leq 1$, $\hat{x}_s(t)$ 值反映发动机工作性能的好坏。 当发动机处于最佳工作状态时, $\hat{x}_s(t) = 1$; 当发动机处于故障状态时, $\hat{x}_s(t) = 0$ 。

现在的问题是, 航空发动机被监测参数较多, 而且各参数反映发动机性能的重要程度, 也无法确切得知。 因此各参数权值的合理确定比较困难。 文献[1]采用的是德尔菲法(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。 文献[4]采用的是根据遗传算法原理来确定各参数的权值, 但是遗传算法还存在一些不足之处^[5], 一方面收敛速度较慢, 算法自身参数选取存在困难, 另一方面存在早熟问题。

混沌是存在于非线性系统中的一种较为普遍的现象, 它看似一片混乱, 实际上含有内在的规律性。 混沌运动具有遍历性、 随机性等特点, 它能在一定的范围内按其自身规律不重复地遍历所有状态。 利用混沌变量所具有的随机性、 遍历性、 规律性 3 个基本特点, 可以进行全局最优搜索^[6]。 为了找到所优化参数的全局最优值, 文献[7]提出了一种混沌优化方法, 将混沌动力学特性与模拟退火方法结

合在一起, 实现了混沌全局粗搜索与局部细搜索的结合。 本文采用这种混沌优化方案, 将混沌状态的变量引入到航空发动机各参数权值域的寻优方式中, 直接利用混沌变量在权值域空间内丰富的时空动态特性, 利用动态演变导致吸引子转移, 在域空间内进行全局粗搜索寻优参数权值, 然后在粗寻优基础上进入混沌局部细搜索, 最后搜索出参数权值的全局最优值。

1 基于混沌变量的权值确定

1.1 混沌优化算法

设一般优化问题的性能指标为:

$$\begin{cases} J = \min f(x_1, x_2, \cdots, x_m) \\ a_j \leq x_j \leq b_j \\ j = 1, 2, \cdots, m \end{cases} \quad (2)$$

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

本文混沌运动采用 Logistic 映射: $x_{n+1} = \mu x_n(1 - x_n)$, $n = 1, 2, \cdots, N$, ($0 < x_0 < 1$), 若取 $\mu = 4$, 则完全处于混沌状态, 且 x_n 在 $(0, 1)$ 范围内遍历。 由于混沌状态具有对初始值极其敏感的特点, 取不同的初始值, 即可得到不同轨迹的混沌变量, 但只要迭代次数足够多, 对最后的优化结果基本没有影响, 都能够收敛到全局最优解。

考虑下列等式:

$$V_{n+1} = \mu V_n(1 - V_n) \quad (V_n = (v_{1,n}, v_{2,n}, v_{3,n}, \cdots, v_{m,n}) \quad , \quad n = 1, 2, \cdots, N) \quad (3)$$

$$m \text{ 个 } \begin{cases} x_{1,n}^* = x_1^* + z_t v_{1,n} & (n = 1, 2, \cdots, N) \\ x_{2,n}^* = x_2^* + z_t v_{2,n} & (n = 1, 2, \cdots, N) \\ \vdots \\ x_{m,n}^* = x_m^* + z_t v_{m,n} & (n = 1, 2, \cdots, N) \end{cases} \quad (4)$$

$$z_{t+1} = (1 - \lambda) z_t \quad (0 < \lambda < 1) \quad (5)$$

(4) 式中 $x_1^*, x_2^*, \cdots, x_m^*$ 为经过混沌全局粗搜索找到的次优值, 式(5)中 λ 为时变参数 z_t 的衰减因子, 目的是为了在次优值的领域内通过时变参量 z_t 逐步地缩小混沌变量遍历的区域范围, 实现混沌细搜索, 加快搜索速度, 找到全局最优值。

混沌优化算法的基本步骤是:

(1) 取 m 个不同的初始值分别代入 Logistic 映射, 则可得到 m 个不同轨迹的混沌变量, 然后将 m 个混沌变量分别带入(2)式中参数 $x_1, x_2, \cdots, x_m$ 。

(2) 根据(2)式计算优化准则函数, 从较小的性能指标找到所对应的 m 个次优参数值 $x_1^*, x_2^*, \cdots, x_m^*$ 。

(3) 根据(4)式产生 $x_{1,n}^*, x_{2,n}^*, \cdots, x_{m,n}^*$, 并根据(2)式计算相应的性能指标 J 。

(4) $t = t + 1$ 。

(5) 根据(5)式, 计算 z_t , 若 $z_t \leq Q$ (搜索终止条件), 则转 6; 否则, 返回 3。

(6) 从最小的性能指标中找到最优参数值。

1.2 基于混沌优化算法的各参数的权值确定

本文将混沌优化算法应用于确定发动机各被监测参数的权值,其基本思路是,由综合指数来表征发动机的性能,必须是在发动机性能正常时,其综合指数值必须尽可能大,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,且故障时的综合指数值之间离散度也不应很大。由此得出的综合指数才能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。

综合指数表达式为:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^{10} w_i \times d_i / \sum_{i=1}^{10} w_i \quad (6)$$

10 个参数分别为发动机惯性时间 T 、高压转子换算转速 n_{hco} 、低压转子换算转速 n_{lo} 、高压转子导流叶片角度 α_{h} 、低压导流叶片角度 α_{l} 、涡轮后排气温度 T_4 、尾喷口指示值 l_e 、振动值 B 、滑油压力 p_o 、转差率 S 。 $d_1 \sim d_{10}$ 分别为与其相对应的功效函数值,可根据记录的发动机实测数据进行计算得到,在此不作详细阐述,可参阅文献[3]。需要确定的是 10 个参数的权值 $w_1 \sim w_{10}$ 。

根据上述分析的思路,选取优化准则函数^[6]

$$Q(t) = \left[\begin{array}{l} 0.8588 \times d_1 + 0.9550 \times d_2 + 0.2700 \times d_3 + 0.0317 \times d_4 + \\ 0.7465 \times d_5 + 0.6535 \times d_6 + 0.5644 \times d_7 + \\ 0.0583 \times d_8 + 0.0031 \times d_9 + 0.1007 \times d_{10} \end{array} \right] / 7.976487$$

2 基于混沌变量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系数。由其确定的综合指数表达式为:

$$Q(t) = \left[\begin{array}{l} 0.4 \times d_1 + 1.0 \times d_2 + 0.5 \times d_3 + 0.05 \times d_4 + 0.05 \times d_5 + \\ 5.0 \times d_6 + 0.1 \times d_7 + 1.5 \times d_8 + 0.6 \times d_9 + 0.8 \times d_{10} \end{array} \right] / 11.7$$

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 122 小时的实测参数值,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 1 可看出,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 37.45 小时,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

为:

$$f = \frac{\sigma_n + \sigma_f}{|u_n - u_f|} \quad (7)$$

式中, u_n, σ_n 为在发动机正常状态时的综合指数值 $Q(t)$ 的平均值和方差。 u_f, σ_f 为在发动机故障或性能失常时的综合指数值 $Q(t)$ 的平均值和方差。

从(7)式可以看出, f 值越小,该权系数下得出的综合指数值就越能灵敏地反应发动机的性能正常与否,该权系数也就越合理,因此选取 f 作为优化准则函数,来评价所得权系数的优劣。

对某型涡扇发动机^[1],通过性能趋势分析程序的计算,可以得到其中 30 次正常工作和 30 次故障(异常)的 10 个参数的功效函数值。首先确定 10 个权值的范围均在 $[0, 1]$ 之间,取 $(0, 1)$ 范围内 10 个不同的初始值分别带入 Logistic 映射,可得到 10 个不同轨迹的混沌变量。把 10 个混沌变量作为参数的权值 $w_1 \sim w_{10}$,分别代入式(6)计算每次的综合指数,从而可以根据(7)式计算相应的性能指标 J 。混沌优化参数取 $\lambda = 0.001, z_0 = 0.5$,其终止条件取 $z_t \leq 0.001$,经过混沌粗搜索和细搜索的寻优过程很快找到参数权系数的最优值,确定权系数后的综合指数表达式为:

常值,随着调节器参数的继续漂移,最终导致在工作到 37.45 小时,调节器故障,综合指数值也降到最低点。但从图 1 可看出,由混沌优化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。

由表 1 可看出,采用混沌优化算法明显提高了发动机性能正常时的综合指数值(由 0.483 提高到 0.598),减小了发动机故障(性能失常)时的综合指数值(由 0.356 减小到 0.247),且性能正常时的综合指数值的方差也有所减小(由 0.003 3 减小到 0.002 1)。故由混沌优化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

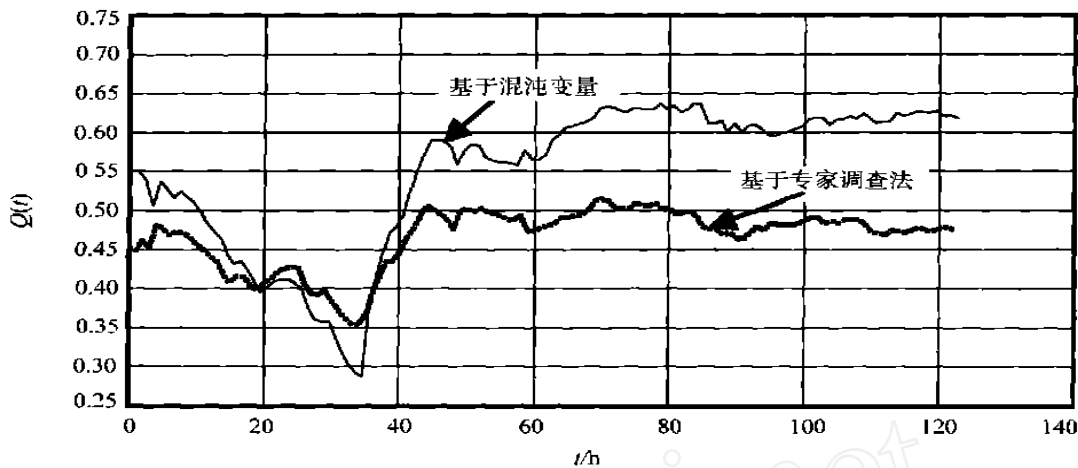


图 1 两种方法确定的发动机性能综合指数曲线

Fig 1 The performance synthetic exponent by two methods

表 1 两种方法确定的发动机性能指标

Table 1 The index of the pefomence synthetic exponent by two methods

	专家调查法	混沌优化方法
发动机性能正常时的综合指数平均值	0.483	0.598
发动机性能正常时综合指数的方差	0.003 3	0.002 1
发动机故障时的综合指数平均值	0.356	0.247

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。

3 结 论

本文利用混沌优化算法和发动机实际工作(正常和故障)数据来自动生成发动机各被监测参数的权系数,得到表征发动机性能的综合指数值。通过对某型涡扇发动机进行监控,表明该法确实比专家调查法更有效。利用混沌优化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,故采用混沌优化算法客观性更强;并且整个算法简单、意义明确、利用计算机程序易于实现。但混沌优化方法也有不足之处,如优化计算工作量大,对初始值选取敏感等问题。

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,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.

[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,1992,7(2): 173~176

LI Jia, TAO Zeng-yuan. Statistical Analysis of Aeroengine and its Significance[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1992, 7 (2): 173~176

[4] 胡金海,谢寿生 基于遗传算法的航空发动机性能监控与故障诊断[J]. *推进技术*, 2003, 24(3): 198~200

HU Jin-hai, XIE Shou-sheng. The Performance Monitoring and Fault Diagnoses of Engines Based Genetic Algorithm [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24 (3): 198~200

[5] 戴晓晖,李敏强,寇纪淦 遗传算法的性能分析研究[J]. *软件学报*, 2001, 12(5): 742~750

DAI Xiao-hui, LI Min-qiang, KOU Ji-song. Study on the Performance Analysis of Genetic Algorithms[J]. *Journal of Software*, 2001, 12(5): 742~750

[6] 李兵,蒋蔚孙 混沌优化方法及其应用[J]. *控制理论与应用*, 1997, 14(4): 613~615

LI Bing, JIANG Wei-Sun. Chaos Optimization Method and Its Application[J]. *Control Theory and Applications*, 1997, 14 (4): 613~615

[7] 李祥飞,邹恩,张泰山 一种模糊神经网络控制器参数的混沌优化设计[J]. *控制与决策*, 2002, 17(3): 320~323

LI Xiang-fei, ZOU En, ZHANG Tai-shan. Optimization Design of Fuzzy Neural Networks Controller Parameter Based on Chaos[J]. *Control and Decision*, 2002, 17(3): 320~323

[8] 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