

文章编号:1674-8190(2016)04-447-05

基于 SVR 的航空发动机抗性能退化容错研究

杨蓓, 张宸宇

(南昌航空大学 飞行器工程学院, 南昌 330063)

摘要: 涡轮风扇发动机工作环境复杂, 长期工作在高温、高压状态下, 使得发动机不断老化、性能衰退, 由性能退化导致的航空发动机可靠性降低问题不容忽视。采用支持向量回归方法 SVR 对测量参数进行估计, 获得发动机性能退化模型; 应用支持向量机的非线性回归的核函数变换法, 对特征空间优化获得最优分类面, 同时基于 Mann-Kendall 算法对发动机性能退化参数进行评估。结果表明: 该方法能有效地评估分析发动机性能退化趋势和衰退程度。

关键词: 涡轮风扇发动机; SVR; Mann-Kendall 检验; 性能退化; 故障诊断

中图分类号: V263.5

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2016.04.008

Research on Aero-engine Fault-tolerant Control of Considering Performance Degradation Based on Support Vector Regression

Yang Bei, Zhang Chenyu

(School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: As operations under high pressure and temperature differentials and different atmospheric conditions, the turbofan engine performance will be affected, and degeneration and damage will happen. The decrease of reliability arising from degeneration can not be neglected. Support vector regression(SVR) is applied to estimate the degree of degradation and loss of flow coefficient based on the data collected from engine. Nonlinear regression of support vector machine is proposed based on the kernel function transform method. The optimal classification plane can be obtained by optimizing the feature space. Mann-Kendall test is used to estimate the parameters of performance degeneration. Results show that SVR can be applied to estimate the degeneration trend of performance degradation and the degree of degeneration.

Key words: turbofan engine; SVR; Mann-Kendall check; performance degradation; fault diagnose

0 引言

涡轮风扇发动机作为当今最有效的推进方式之一, 在航空领域应用广泛^[1]。涡轮风扇发动机结构复杂, 长期工作在高温、高压的恶劣环境中^[2]。高纬度寒冷地带、低纬度高温地带、海上、沙漠低空环境及长期经受空气携带外物的腐蚀、磨损都将对压气机、涡轮、燃烧室等造成不利影响, 使得发动机

在运行一段时间后, 部件性能将不可避免地逐渐退化, 进而对整机性能产生影响。发动机性能退化不仅影响发动机经济性, 还将降低发动机可靠性, 危及飞行安全。航空发动机部件发生性能退化后, 部件的性能参数会随之变化, 导致发动机总体性能退化。基于发动机使用寿命相对较短以及维修性的考虑, 为了制定优化合理的发动机维护策略, 开展航空发动机性能退化趋势预测研究具有十分重要的现实意义^[3-4]。

气路部件退化情况可用近似的低阶多项式过程来表示, 风扇、压气机、涡轮的性能退化是逐渐积累发展、非常缓慢的过程, 其监测是一个较为耗时、且不易进行的过程。美国为了便于维修和降低成

收稿日期: 2016-11-11; 修回日期: 2016-11-19

基金项目: 航空科学基金(2014ZB56002)

通信作者: 杨蓓, peipeiyang99@sina.com

本,以CF6和JT9D为基础进行了最早的气路部件性能退化方面的研究。国内也取得了许多研究成果,例如林学森等^[5]采用退化因子方法评估部件退化对测量参数及发动机性能的影响;赵运生等^[6]通过模拟部件老化来研究其对发动机总体的影响;李睿超等^[7]研究了退化条件下发动机的控制问题。

现有文献缺乏对退化趋势和退化速率的定量计算,本文将主要解决部件退化趋势与速度的定量估计,采用SVR方法对测量参数进行估计,获得发动机性能退化模型;采用Mann-Kendall检验对效率序列的趋势进行检验,判断序列变化趋势(退化趋势)并计算趋势变化速率,从而为发动机控制和维修提供理论依据。

1 涡轮风扇发动机建模以及退化特性的模拟

由于缺乏足够的涡轮风扇发动机实验数据样本,为了获取发动机性能退化过程中测量参数的变化趋势,用以分析预测燃气轮机未来的性能退化程度,需建立全包线涡轮风扇发动机非线性模型,并通过非线性模型模拟退化发动机的部件性能参数和发动机总体性能参数,以此得到气路退化过程中的燃气轮机性能参数变化趋势和可测参数变化趋势之间的关系模型^[8]。由于燃气涡轮发动机的多变量、非线性、时变的复杂特性,航空发动机建模较为复杂,在进行具体的发动机控制系统设计时,一般采用部件级模型^[4]。

涡扇发动机的各个部件都有若干输入/输出变量,形成一个独立的功能模块。首先建立发动机各个部件的输入/输出关系,再根据各部件之间的匹配关系(共同工作条件)建立发动机非线性数学模型。部件级模型建模过程中所需的特性数据从GSP软件中获取^[8]。

发动机动态过程模型中需要考虑转子的惯性,获得高、低压转子动量方程:

$$\begin{cases} \frac{dn_L}{dt} = \frac{N_{LT}\eta_L - N_F - N_b}{n_L J_L \left(\frac{\pi}{30}\right)^2} \\ \frac{dn_H}{dt} = \frac{N_{HT}\eta_H - N_C - N_A}{n_H J_H \left(\frac{\pi}{30}\right)^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: J_H 和 J_L 分别为发动机高压转子和低压转子的转动惯量。

以发动机各部件数学模型为基础,结合转子动量方程、流量连续方程、压力平衡方程等,采用GSP中的特性线族(如压气机特性)及性能参数,可以得到发动机非线性模型^[9]:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = g(x, u) \end{cases} \quad (2)$$

式中: f 为 n 维非线性状态空间向量函数; g 为 m 维非线性输出向量函数; x 为 n 维状态向量, $x = [n_i \quad p_i \quad T_i]^T$; u 为 r 维控制向量, $u = [q_{m,f} \quad q_{m,faf} \quad A_g \quad \varphi_L \quad \varphi_H]^T$; y 为 m 维输出向量, $y = [F \quad T_i \quad q_{m,a}]^T$ 。

为了降低优化计算量,需将非线性模型先线性化,再以此为基础进行模型预测控制相关的设计。

在缺乏大量实验数据的情况下,通过建立涡轮风扇发动机部件退化模型,得到气路退化过程中发动机性能参数退化趋势和可测参数变化趋势之间的关系模型,从而获取燃气轮机性能退化过程中测量参数的变化趋势,用以分析预测燃气轮机未来的性能退化程度。

2 基于支持向量回归的退化水平估计

本文采用基于支持向量回归的性能评估方法对涡轮风扇发动机性能退化进行研究,并根据发动机工作过程中的可测参数评估发动机各部件退化水平^[10]。

2.1 支持向量回归

支持向量机方法最初由Vapnik提出,该理论建立在VC维理论和结构风险最小化的基础上,根据有限的样本信息,在模型的复杂性和学习能力之间寻求最佳折衷,以期获得最好的推广泛化能力^[11]。支持向量机理论用于非线性回归的基本思想是通过非线性核函数变换,将输入空间映射到一个高维特征空间,并在相应的特征空间中求取最优线性分类面。

将数据点用 x 表示, $x \in \mathbf{R}^n$, y 表示类别,分类问题中取1或-1,代表两个不同的类。一个线性分类器的学习目标是在 n 维的数据空间中找到一个分类超平面,其方程为

$$g(x) = \mathbf{w}^T \cdot x + b \quad (3)$$

若 $g(x_i) = \mathbf{w}^T \cdot x_i + b = 0$,则 x_i 表示为分类

面上的点。

通过将分类问题转化为求解分类面函数的参数 w 和 b 的问题,最终实现分类。将求解参数问题转化为求解如下优化问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ \text{s. t.} \quad & y_i(w^T \cdot x + b) \geq 1 \quad (i=1,2,3,\dots,l) \end{aligned} \quad (4)$$

定义拉格朗日函数:

$$L(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^l \alpha_i [y_i(w^T \cdot x + b) - 1] \quad (5)$$

式中: α 为拉格朗日乘子向量, $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]$ 。

应用 KKT 条件,将相应的结论代入拉格朗日函数中,进行整理消去 w 和 b 可得:

$$\begin{aligned} J(\alpha) &= \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^l \alpha_i y_i x_i \cdot \sum_{j=1}^l \alpha_j y_j x_j \right) + \sum_{i=1}^l \alpha_i - \\ & \quad \left(\sum_{i=1}^l \alpha_i y_i x_i \cdot \sum_{j=1}^l \alpha_j y_j x_j \right) - b \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i \\ &= \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^l \alpha_i y_i x_i \cdot \sum_{j=1}^l \alpha_j y_j x_j \right) \\ &= \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i \cdot x_j) \end{aligned} \quad (6)$$

原先的优化问题转化为

$$\begin{aligned} \max \quad & J(\alpha) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i \cdot x_j) \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0 \quad (\alpha_i \geq 0, i=1,2,3,\dots,l) \end{aligned} \quad (7)$$

求出该二次规划问题的解即可得到 $\alpha_i (i=1, 2, 3, \dots, l)$ 。

线性不可分问题需要通过非线性变换转化为高维空间中的线性问题来解决。通过非线性映射将样本 x 映射到高维空间 Z 中,在 Z 中构造最优超平面。设所用非线性变换为

$$\varphi: x \rightarrow \varphi(x) \quad (8)$$

获得最优分类面:

$$M(x) = \text{sgn} \left[\sum \alpha_i^* y_i K(x \cdot x_i) + b^* \right] \quad (9)$$

支持向量回归的基本问题是发现一个函数,使某种期望风险系数最小,即

$$\begin{aligned} \min \quad & \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) \right\} \\ \text{s. t.} \quad & y_i - (w^T \cdot x_i + b) \leq \varepsilon + \xi_i \\ & w^T \cdot x_i + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \quad (\xi_i, \xi_i^* \geq 0) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: ε 为不敏感函数,可以作为松弛变量。

为了验证 SVR 方法的可行性,以第 1 节中所建立的某发动机为例进行说明。选择压气机效率作为评估发动机退化程度的表征参数,用于评估退化程度的参数为:空气流量,压气机进口总压,压气机出口总压,转速 $N1$,喘振裕度,燃油消耗率。

在一定条件下,分别将压气机效率设置为: 0.995, 0.990, 0.985, 0.980, 0.970, 0.965, 0.960, 0.955, 0.940, 0.935, 0.930, 0.920, 0.910, 0.900, 0.890, 0.880, 0.870, 0.860, 0.850, 0.820, 总共 20 组数据。根据不同效率,获得上述六个参数。具体使用 SVR 时,核函数选择指数核函数,惩罚系数为 20,通过二次优化获得相应的支持向量加权系数,相当于通过支持向量得到回归方程的参数。基于所获得的加权系数,SVR 对压气机效率的估计效果如图 1 所示,误差为 0.488%。

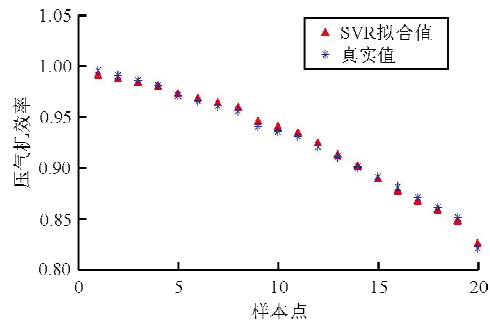


图 1 压气机效率的 SVR 估计

Fig. 1 Compressor efficiency estimation based on SVR

对两组不同压气机效率下的测试数据进行检验,SVR 估计值分别为 0.975 1 和 0.861 6,实际设置的压气机效率分别为 0.975 0 和 0.865 0,故误差为 0.016 8%、-0.397 7%。结果表明:SVR 方法可以对选取的表征发动机退化水平的不可测参数进行精确估计。

2.2 基于 Mann-Kendall 方法的退化趋势分析

考虑到系统将受到传感器噪声及其他干扰的影响,仅通过 SVR 获得发动机性能退化参数的估计值,难以判断其变化趋势,因此采用 Mann-Kendall 检验对获得的退化水平表征参数进行趋势分析,以判定涡轮风扇发动机部件退化速度^[10,12-13]。

对于时间序列 $\{X_t, t=1,2,3,\dots,n\}$,首先定义 Mann-Kendall 检验统计量 S :

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sgn}(X_i - X_j) \quad (11)$$

其中,符号函数 $\text{sgn}(\cdot)$ 取值随着 $(X_i - X_j)$ 不同而分别取 $-1, 0, 1$ 。当 n 足够大时, S 满足均值为 0 的正态分布。标准化统计量 Z 可以根据 Mann-Kendall 检验统计量 S 进行计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (12)$$

Z 为正值表示该时间序列有增大趋势,为负值表示该序列有减小趋势。给定显著性水平 α , 有 $\Phi(Z_{\alpha/2}) = \frac{\alpha}{2}$, 其中 $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数, 当

$$|Z| \leq Z_{\alpha/2} \quad (13)$$

则接受零假设,认为该序列没有显著变化趋势;当 $Z > Z_{\alpha/2}$, 序列存在上升趋势;当 $Z < -Z_{\alpha/2}$, 则序列存在下降趋势。衡量趋势大小的指标可以由序列的 Sen 非参数斜率估计的中位数获得:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{X_i - X_j}{i - j}\right) \quad (14)$$

显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时,对应的 $Z_{\alpha/2} = 1.645$ 。

仅考虑高压压气机效率不断衰退而其他条件不变的情况,应用 Mann-Kendall 检验对高压转子转速的变化趋势进行分析,具体压气机效率参数从 1.000 降低到 0.999。通过仿真获得高压转子转速变化如图 2 所示,转子转速最大改变量只有 -0.1277% 。

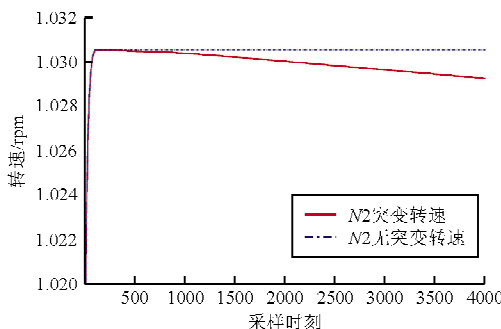


图2 压气机衰退与无衰退时转子转速对比

Fig. 2 Compressor recession compared with normal

选择置信度 $\alpha = 0.5$, 根据式(12)得到统计值 $Z = -297.2549$, 由式(13)判断该序列有下降趋势,其 Sen 斜率值为 -9.4723×10^{-6} , 表示有退化趋势。

2.3 基于 Mann-Kendall 方法的突变检测

根据 2.2 中的时间序列构造表示 $(X_i > X_j, 1 \leq j \leq i)$ 样本累集数的秩序列 r_i ^[14]:

$$r_i = \begin{cases} 1 & (X_i > X_j) \\ 0 & (X_i \leq X_j) \end{cases} \quad (15)$$

根据 r_i 定义 S_k 、均值 $E(S_k)$ 、方差 $\text{var}(S_k)$ 、 UF_k :

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i$$

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (16)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}$$

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n)$$

UF_k 为标准正态分布, $UF_1 = 0$ 。给定显著性水平 α , 有 $\Phi(UF_{k_{\alpha/2}}) = \frac{\alpha}{2}$ 。当 $|UF_i| > UF_{k_{\alpha/2}}$, 则说明该序列有明显的趋势变化(增加或减少)。

对该序列的逆序重复上述过程, 可得 UF_k 的逆序 UB_k 。当 UF_k 和 UB_k 两条曲线出现交点, 且交点在由显著性水平确定的界限内, 则交点对应的时刻就是突变开始的时间, 超过临界值的范围为发生突变的时间范围。根据 2.2 中获得的退化序列, 选择置信度 $\alpha = 0.05$, $UF_{k_{\alpha/2}} = 1.64$ 。执行 Mann-Kendall 突变检测, 检测结果如图 3 所示, 可以看出, UF_k 、 UB_k 在一段时间后, 始终在 -1.26 以下, 压气机效率不断降低, 可以显著判断下降趋势。对于较小的压气机效率突变, 不会显示为故障。

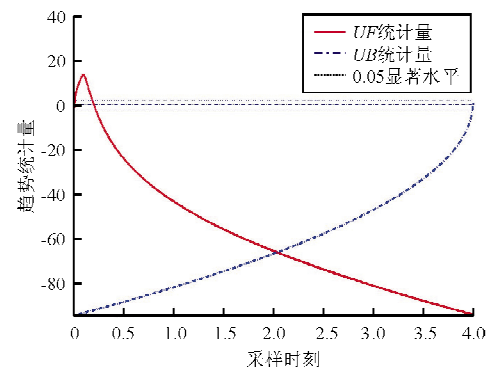


图3 转速突变信号检测

Fig. 3 Signal detection of speed mutations

3 结论

(1) 在采集到小样本发动机可测参数的情况

下,本文应用的 SVR 方法可以有效估计发动机各部件的效率、气体流通能力等表征部件退化水平的不可测参数。

(2) 针对得到的部件效率序列,本文采用 Mann-Kendall 检验对效率序列的趋势进行检验,判断序列变化趋势(退化趋势)并计算趋势变化速率,从而判断涡轮风扇发动机部件退化水平,可以有效地发现微小的变化趋势并对变化速率进行定量计算。相比于传统的衰退检测方法,Mann-Kendall 检验方法受各种干扰、噪声等影响因素小,抗干扰能力强,可以实现定量判断。此外,还可以通过 Mann-Kendall 的突变检测功能对故障的发生情况进行辅助诊断。

参考文献

- [1] Jaw L, Mattingly J. Aircraft engine controls; design, system analysis, and health monitoring[M]. USA: AIAA, 2009.
- [2] 黄开明, Li Y, 张伟, 等. 某型涡轴发动机性能衰减与部件退化评估[J]. 航空动力学报, 2015, 30(11): 2673-2679.
Huang Kaiming, Li Y, Zhang Wei, et al. Performance degradation and components deterioration degree estimation for a turboshaft engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(11): 2673-2679. (in Chinese)
- [3] 孙跃武. 燃气轮机性能退化及趋势预测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
Sun Yuewu. Research on performance degradation of gas turbine and trend forecasting technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014. (in Chinese)
- [4] 孙健国, 李秋红, 杨刚, 等. 航空燃气涡轮发动机控制[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014.
Sun Jianguo, Li QiuHong, Yang Gang, et al. Aircraft gas turbine engine control[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2014. (in Chinese)
- [5] 林学森, 李本威, 赵勇, 等. 涡轴发动机性能退化分析与诊断[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2015, 28(6): 34-38.
Lin Xuesen, Li Benwei, Zhao Yong, et al. Analysis and diagnosis of a turbo-shaft engine performance deterioration [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2015, 28(6): 34-38. (in Chinese)
- [6] 赵运生, 胡骏, 屠宝锋, 等. 部件老化对大涵道比涡扇发动机性能影响仿真[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(4): 447-452.
Zhao Yunsheng, Hu Jun, Tu Baofeng, et al. Simulation of component deterioration effect on performance of high bypass ratio turbofan engine[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(4): 447-452. (in Chinese)
- [7] 李睿超, 郭迎清. 涡扇发动机性能退化缓解控制与推力设定[J]. 航空发动机, 2015, 41(2): 12-16.
Li Ruichao, Guo Yingqing. Research on performance deterioration mitigating control of turbofan engine and thrust setting[J]. Aeroengine, 2015, 41(2): 12-16. (in Chinese)
- [8] 夏超, 王继强, 商国军, 等. 基于 Matlab/Simulink 的航空发动机部件级建模与分析[J]. 航空发动机, 2012, 38(4): 31-33.
Xia Chao, Wang Jiqiang, Shang Guojun, et al. Component-level modeling and analysis of aeroengine based on Matlab/Simulink[J]. Aeroengine, 2012, 38(4): 31-33. (in Chinese)
- [9] 樊思齐. 航空发动机控制[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
Fan Siqu. Aircraft engine control[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2008. (in Chinese)
- [10] 周念清, 杨硕, 沈新平, 等. 洞庭湖流域降雨序列突变性和多尺度特征分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 42(6): 867-872.
Zhou Nianqing, Yang Shuo, Shen Xinping, et al. Mutation and multi-scale characteristics analysis of rainfall series in Dongting lake watershed[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(6): 867-872. (in Chinese)
- [11] 汪江. 汽轮机组振动故障诊断 SVM 方法与远程监测技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
Wang Jiang. Study on fault diagnosis based-on SVM and remote condition monitoring for turbine generator unit vibration[D]. Nanjing: Southeast University, 2005. (in Chinese)
- [12] Gocic M, Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia[J]. Global and Planetary Change, 2013, 100: 172-182.
- [13] Khaled H, Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. Journal of Hydrology, 1998, 204(1-4): 182-196.
- [14] Serrano A, Mateos V L, Garcia J A. Trend analysis of monthly precipitation over the iberian peninsula for the period 1921-1995[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 1999, 24(1-2): 85-90.

作者简介:

杨蓓(1979—),女,硕士,讲师。主要研究方向:航空发动机控制。

张宸宇(1979—),男,硕士,讲师。主要研究方向:光测力学。

(编辑:赵毓梅)