

文章编号: 1000-8055(2009)02-0427-05

基于多元线性回归的发动机性能参数预测

宋云雪, 张科星, 史永胜
(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘 要: 在对发动机性能参数相关性研究基础上, 结合多元线性回归预测模型, 提出了一种能够考虑发动机众多因素对因变量影响的发动机性能预测模型. 使用该模型对发动机排气温度 (EGT) 进行预测时, 能够兼顾到 $p_{4.95}$, N_2 , T_3 , N_1 , p_B 等性能参数对 EGT 影响. 最后使用一组某民用机型发动机飞行试验数据对模型进行了验证, 并与加权一阶局域法进行了对比. 结果表明, 该模型预测精度优于加权一阶局域法, 该方法可以为这种机型发动机故障预测提供决策依据.

关 键 词: 民航发动机性能参数; 排气温度; 统计检验; 多元线性回归预测法
中图分类号: V231 **文献标识码:** A

Research on aeroengine performance parameters forecast based on multiple linear regression forecasting method

SONG Yun-xue, ZHANG Ke-xing, SHI Yong-sheng
(College of Aeronautical Engineering,
Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Based on the research of aeroengine performance parameters relativity, an aeroengine performance parameters forecasting method was proposed using multiple linear regression model, in which the effect of multiple factors on dependent was considered. Some aeroengine performance parameters, such as $p_{4.95}$, N_2 , T_3 , N_1 , p_B , were analyzed before forecasting of EGT series. At last, the proposed model was verified through some types of aircraft aeroengine performance parameters data obtained from flight experiment, and then compared with adding-weight one-rank local-region method. The result shows that the proposed model has a better forecast accuracy. It can be used as a supporting model in the decision-making of this aeroengine fault forecast.

Key words: aeroengine performance parameters; exhaust gas temperature; test of statistics; multiple linear regression forecasting method

保证飞机安全、可靠、高效、经济地运行是航空公司追求的目标. 发动机作为飞机的心脏, 是飞机预防重大事故时应考虑的重要因素之一, 近年来与其相关的状态监视和视情维修工作日益受到重视. 随着航空公司运营规模的扩大, 发动机数量在不断地增加, 维修工程师需要维护一种 (或数

种) 类型的多台发动机. 如何依据状态监视信息准确把握各发动机性能变化状况, 是实现发动机高安全性和可靠性要求的根本保证.

在巡航状态下, 发动机性能参数的变化趋势能够客观反映发动机性能衰退情况, 因而根据监视信息对同类型发动机进行动态的性能排序, 能

收稿日期: 2008-07-15; 修订日期: 2008-10-14

收稿日期: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空总局联合资助 (60879017); 天津市自然科学基金 (08JCYBJC11600)

作者简介: 宋云雪 (1968 -), 女, 辽宁鞍山人, 高级工程师, 硕士, 主要从事民航发动机故障诊断与预测的研究.

够及时了解同型发动机性能衰退的梯次差异,进而预测各参数的变化率,并利用此变化率来推断相应的参数在未来多长时间内会达到什么值,为判断发动机性能衰减的快慢速度及预测提供了科学依据.对发动机性能参数进行预测,有助于制定最优的发动机换发、维修计划,有目的地进行排故和维护工作,从而降低发动机的维修费用,这对于航空公司在竞争环境下的生存和发展有着深远意义^[1].

目前,国内外已有相关研究人员开展了这方面的工作.胡金海等^[2]利用自回归模型对航空发动机滑油系统中的金属元素含量进行预测,预测结果反映出了金属含量的变化趋势,但预测精度不高. Xu K 等^[3]利用径向基神经网络对发电机故障和可靠性进行预测并与 ARMA (Auto-regressive moving average) 模型进行了比较.王树明等^[4]利用改进的反向传播神经网络对飞行器轨迹进行预测,提高了网络预测的实时性和精确性.但是,神经网络存在过学习和训练不稳定的问题.

尽管民航发动机是一个复杂的非线性系统,

表征发动机性能的参数通常是一个复杂的、非线性的、非平稳,并且带有随机波动的时间序列;但是,通过对某系列民用航空发动机的 EGT 等性能参数的相关性分析中发现,发动机性能参数之间存在较强的线性相关性,因此本文尝试采用多元线性回归预测法来对发动机的重要性能参数进行短期预测,提高预测精度.

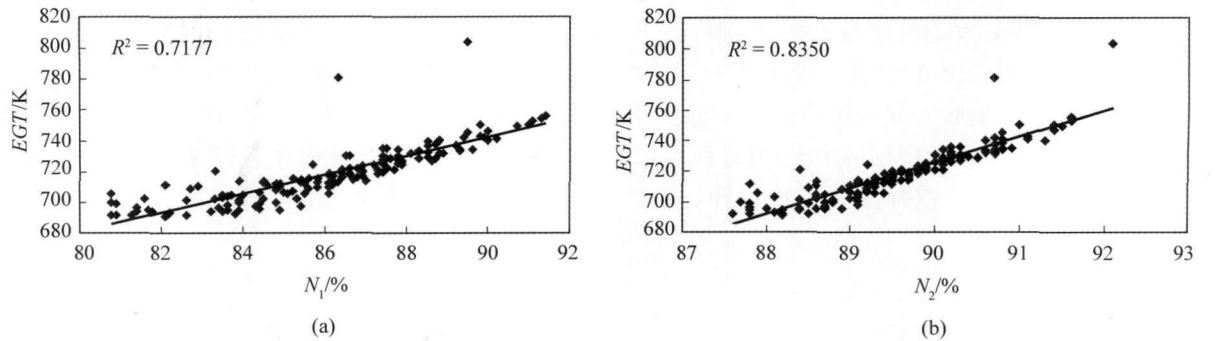
1 发动机特征参数的线性相关分析

本文采用某民用机型发动机飞行试验数据^[5]作为原始数据,如表 1 所示.限于篇幅所限,本文仅显示部分数据.表 1 中各发动机性能参数的含义为: N_1 —低压转子转速; N_2 —高压转子转速; $p_{2.5}$ —低压压气机出口压力; p_B —高压压气机出口压力; $p_{4.95}$ —低压涡轮出口压力; $T_{2.5}$ —低压压气机出口温度; T_3 —高压压气机出口温度; EGT—发动机排气温度.

本文把 EGT 作为待预测变量,做出 EGT 与其它参数的散点图 1 所示.

表 1 民航发动机原始数据
Table 1 Aeroengine actual data

序号	N_1 / %	N_2 / %	$p_{2.5}$ / kPa	p_B / kPa	$p_{4.95}$ / kPa	$T_{2.5}$ / K	T_3 / K	EGT / K
1	83.3	88.4	42.31	377.95	15.164	399.8	794.1	720.9
2	85.2	89.3	45.528	404.71	15.698	409.7	815.4	715.9
3	83.2	88.4	43.029	382.49	14.997	401.7	801.5	694.1
...	...	...	...	...	...	...	...	...
161	88.8	90.8	49.745	450.67	16.99	421	845.6	740.7
162	89.3	90.9	50.574	454.64	17.049	422.5	844.7	734.5
163	89.3	90.8	50.753	456.86	17.128	421.4	842.6	733.6



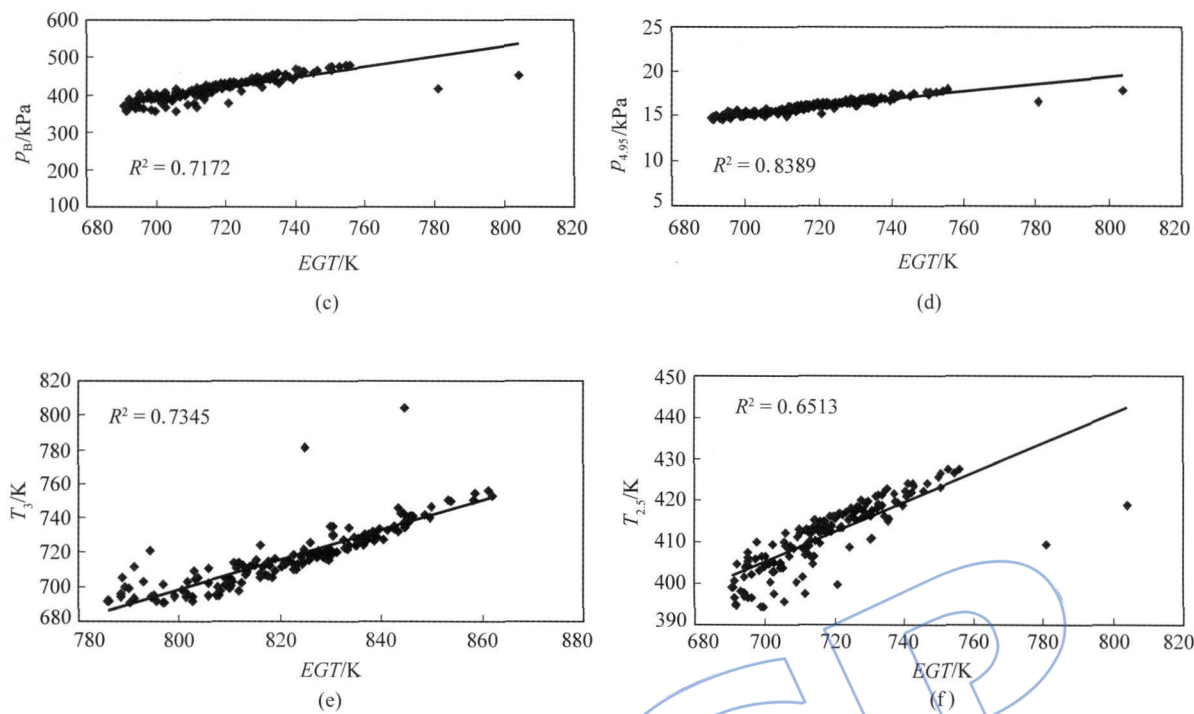


图 1 EGT 与各参数的散点图

Fig. 1 Scatter plot of EGT with other parameters

从图 1 散点图中,我们可以看出发动机参数 EGT 与参数 N_1 , N_2 , p_B , $p_{A.95}$, T_3 和 $T_{2.5}$ 都具有明显的线性关系,因此本文拟采用多元线性回归方法来对发动机性能参数进行预测.以下对多元线性回归模型进行简要介绍.

2 多元线性回归分析预测模型

设被解释变量 Y 与多个解释变量 $X_1, X_2, \dots, X_k$ 之间的线性回归模型为

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \mu$$
 (1)

其中 Y 为被解释变量, $X_j (j = 1, 2, \dots, k)$ 为 k 个解释变量, $\beta_j (j = 0, 1, 2, \dots, k)$ 为 $k + 1$ 个未知参数, μ 为随机误差项.

对于 n 组观测值 $Y_i, X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ki} (i = 1, 2, \dots, n)$, 其方程组形式为

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + \mu_i$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

即

$$Y = X\beta + \mu$$
 (2)

其中 $Y_{n \times 1} = [Y_1 \ Y_2 \ \dots \ Y_n]^T$ 为被解释变量的观测值向量;

$$X_{n \times (k+1)} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \dots & X_{k1} \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \dots & X_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_{1n} & X_{2n} & \dots & X_{kn} \end{bmatrix}$$
 为解

释变量的观测值矩阵;

$\beta_{(k+1) \times 1} = [\beta_0 \ \beta_1 \ \dots \ \beta_k]^T$ 为总体回归参数向量;

$\mu_{n \times 1} = [\mu_1 \ \mu_2 \ \dots \ \mu_n]^T$ 为随机误差项向量.

总体回归方程表示为

$$E(Y) = X\beta$$
 (3)

对于多元线性回归模型

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + \mu_i = X_i \beta + \mu_i$$

其中

$$X_i = (1, X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ki})$$
,
$$\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k)^T, (i = 1, 2, \dots, n)$$
 根据样本观测值 $(1, X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ki}; Y_i)$, $(i = 1, 2, \dots, n)$ 利用最小二乘法求得回归方程
$$\hat{Y}_i = X_i \hat{\beta}$$
 (4)

预测就是给解释变量某一特定值 $X_0 = (1, X_{10}, X_{20}, \dots, X_{k0})$ 对被解释变量的值 Y_0 进行估计, $\hat{Y}_0$ 作为 Y_0 的预测值. 设 $e_0 = Y_0 - \hat{Y}_0$, 称其为预测误差^[6].

3 实例分析

在本文第 1 节中已对线性关系进行分析,本文采用发动机性能参数 EGT 作为被解释变量. 发动机排气温度 (EGT) 裕度是跟踪发动机性能状况最重要的一个指标,它的衰退情况,标志着该台发动机的性能水平. 因此对 EGT 进行预测,可为排故与维护工作提供可靠的依据.

对表 1 数据进行相关分析,可以得到各个变量分别对参数 EGT 的关联度系数,其中 N_1 为 0.847, N_2 为 0.914, $p_{2.5}$ 为 0.768, p_B 为 0.847, $p_{4.95}$ 为 0.916, $T_{2.5}$ 为 0.807, T_3 为 0.857.

比较得知,各变量对参数 EGT 的关联度的大小排序为: $p_{4.95}$, N_2 , T_3 , N_1 , p_B , $T_{2.5}$, $p_{2.5}$; 关联度越大说明某个参数对 EGT 的相关性越强,所以采用与 EGT 具有较好的相关性关系的 5 个因子,即 $p_{4.95}$, N_2 , T_3 , N_1 , p_B 作为 EGT 预测指标.

首先建立多元线性回归模型,取 EGT 为因变量, $EGT = f(p_{4.95}, N_2, T_3, N_1, p_B)$. 取表 1 数据序号 (1~100) 作为原始数据,剩余数据作为预测精度检验. 用最小二乘法求得多元线性回归预测模型,回归方程如下:

$$EGT = -1807.005 + 13.057 \times N_1 + 17.413 \times N_2 + 2.389 \times p_B + 43.910 \times p_{4.95} + 0.162 \times T_3$$

对表 1 数据序号 (101~163) EGT 的预测结果如表 2 所示 (限于篇幅限制,只选取部分数据).

表 2 EGT 的原始值与预测值对比
(多元线性回归预测法)

Table 2 Comparison of actual and forecasting result of EGT

序号	原始值	预测值	绝对误差	相对误差/ %
101	713.4	712.7	- 0.7	- 0.10
102	722.1	718.1	- 4	- 0.56
103	729	724.2	- 4.8	- 0.66
...	...	...	...	...
161	740.7	739.9	0.8	- 0.10
162	734.5	741.2	6.7	0.91
163	733.6	737.2	3.6	0.50

对回归模型进行统计检验,拟合度检验是指所建立的模型与观察的实际情况轨迹是否吻合、接近,接近到什么程度. 统计学是通过构造统计量 R^2 来度量的,可由样本数据计算得出,若建立的模型越接近于实际,则 R^2 越接近于 1. 对以上模型进行拟合度检验,可得: $R^2 = 0.960$,接近于 1,说明以上回归模型与实际吻合的很好,证明该模型有效.

从以上表 2 和图 2、图 3 中可以看出,多元线性回归预测方法的最大绝对误差为 0.98 %,只有一个点的误差达到了此值;而最小绝对误差为 0.01 %,平均绝对误差为 - 0.08 %,平均相对误差为 0.36 %,误差小于 1 %的情况达到了 100 %,可以说多元线性回归预测方法取得了很好的预测结果.

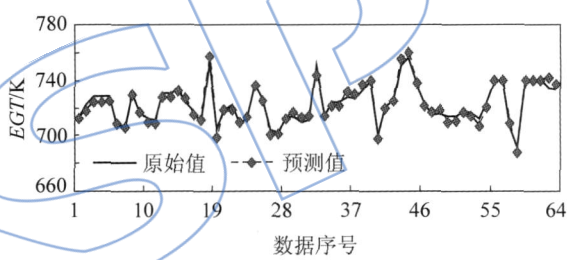


图 2 EGT 原始值与预测值对比图
Fig. 2 Figure of actual data and forecasting result of EGT

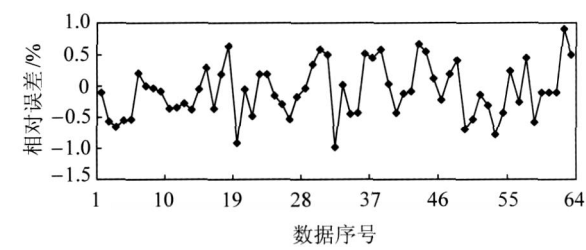


图 3 EGT 预测相对误差
Fig. 3 Figure of relative error of EGT 's forecasting result

为说明多元线性回归预测法的预测精度,我们又采取加权一阶局域法对同样的数据进行预测,得到如图 4 和图 5 所示的结果. 从图 4 和图 5 中可以看出,多元线性回归法的预测精度要明显高于加权一阶局域法,即多元线性回归法在发动机参数 EGT 的预测中要优于加权一阶局域法,可以为该机型发动机的故障预测提供决策依据.

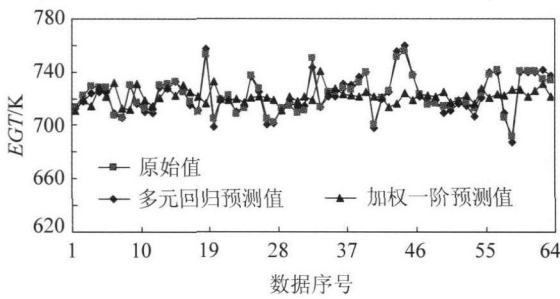


图 4 EGT 原始值与预测值对比图

Fig. 4 Figure of actual data and forecasting result of EGT

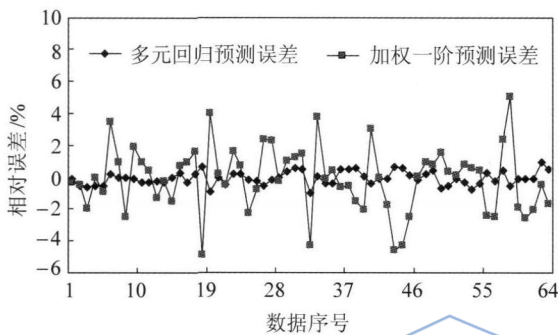


图 5 EGT 预测相对误差

Fig. 5 Figure of relative error of EGT's forecasting result

4 结 论

本文在分析发动机性能参数之间具有线性关系基础上,采用多元线性回归模型对发动机性能参数进行预测.从对某民用机型发动机排气温度(EGT)数据进行预测的结果和与加权一阶局域法的对比分析来看,多元线性回归预测法具有较高的预测精度,证明多元线性回归模型可以用于该机型发动机性能参数的预测.该模型可以为制定最优的发动机换发、维修计划,有目的地进行排故和维护工作提供了可靠的依据.

参考文献:

- [1] 张海军,左洪福,梁剑. 航空发动机多指标模糊信息熵的性能排序研究[J]. 应用科学学报,2006,24(3):288-292. ZHANG Haijun, ZUO Hongfu, LIANG Jian. Multi-parameter performance ranking of aeroengines based on fuzzy information entropy method[J]. Journal of Applied Sciences, 2006,24(3):288-292. (in Chinese)
- [2] 胡金海,谢寿生. 基于 AR 模型对滑油中金属元素含量的预测[J]. 燃气涡轮试验与研究,2003,16(1):32-36. HU Jinhai, XIE Shousheng. AR model - based prediction of metal content in lubricating oil[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2003,16(1):32-36. (in Chinese)
- [3] Xu K, Xie M, Tang L C. Application of neural networks in forecasting engine systems reliability[J]. Applied Soft Computing, 2003,4(2):255-268.
- [4] 王树明,夏国平. 基于 BP 神经网络的飞行动态实时预测方法[J]. 北京航空航天大学学报,2001,27(6):636-639. WANG Shuming, XIA Guoping. Method of flying dynamic real-time forecasting based on BP neural network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001,27(6):636-639. (in Chinese)
- [5] 张传超. 基于模糊粗集的诊断算法研究及在飞机上的应用[D]. 天津:中国民航大学,2008. ZHANG Chuanchao. Study of diagnosis algorithms based on rough sets and fuzzy sets and their application for aircraft[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2008. (in Chinese)
- [6] 刘稳殿,王丰效,刘佑润. 基于多变量灰色预测模型的多元线性回归模型[J]. 科学技术与工程,2007,7(24):3046-6046. LIU Wendian, WANG Fengxiao, LIU Yourun. Multiple linear regression model based upon multi-variables grey forecast model[J]. Science Technology and Engineering, 2007,7(24):3046-6046. (in Chinese)
- [7] LIN Zongching, WU Wenjang. Multiple linear regression analysis of the overLay accuracy model[J]. IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing, 1999,12(2):229-237.
- [8] DAI Hong, YANG Zhaosheng. Real-time traffic volume estimation with fuzzy linear regression[C]// Proceeding of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, China: WCICA, 2006,6:21-23.