

doi: 10.7690/bgzd.2021.02.016

基于飞参数据的总温传感器故障诊断方法研究

邱亚洲, 王元鑫, 王小飞, 袁 涛

(海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 为有效测量飞机的飞行速度, 对用于飞行真空速解算的热力测量法和压力测量法进行研究。结合飞参系统记录的气压高度、指示空速、马赫数和总温参数与真空速之间的关系, 通过最小二乘支持向量回归(least squares support vector regression, LS-SVR)方法来拟合真空速并进行残差对比, 根据最小二乘支持向量回归方法的特点, 可解算出不同时刻的真空速。结果表明: LS-SVR 拟合精度高, 泛化能力强, 可有效地对总温传感器性能漂移和故障进行性能监测与诊断, 具有应用推广价值。

关键词: 总温传感器; 最小二乘支持向量回归; 飞参系统; 真空速

中图分类号: V241.7 **文献标志码:** A

Study on Fault Diagnosis Method of Total Temperature Sensor Based on Flight Data Recorder

Di Yazhou, Wang Yuanxin, Wang Xiaofei, Yuan Tao

(Qingdao Branch, Navy Aviation University, Qingdao 266041, China)

Abstract: In order to effectively measure the flight speed of the aircraft, the thermal measurement and pressure measurement used to calculate the true airspeed measurement are studied. Combined with the relationship among pressure altitude, calibrated airspeed, mach, total temperature parameter, true airspeed of flight data recorder, fit true airspeed and carry out residual comparison through least squares support vector regression (LS-SVR). According to the feature of LS-SVR, calculate different true airspeed at deferment time. The results show that the LS-SVR method has high precision and strong generalization ability, which can effectively monitor and diagnose the performance of total temperature sensor performance drift and fault, and has application value.

Keywords: total temperature sensor; least square support vector regression; flight data recorder; true airspeed

0 引言

在飞机飞行过程中, 飞行速度是飞机最主要的参考数据之一, 而飞行速度无法直接测得, 要通过其他大气数据来间接计算, 其中, 大气总温是需要用到的参数之一。在现代飞机上, 大气总温由总温传感器进行测量, 利用总温传感器测量全阻滞温度可以解算静温、真空速等参数, 同时也可作为飞机发动机进口总温信号, 参与飞机发动机性能监测和故障诊断^[1-2]; 因此, 大气总温会影响到相关机载设备性能和地勤机务保障。飞参系统记录了标准气压高度、指示空速和马赫数等大气参数以及总温信息, 利用总温与大气数据参数之间的关系可以有效地对总温传感器进行性能监测和故障诊断^[3]。

1 真空速测量原理

1.1 热力测量法

总温传感器测量到的总温 T_t 由 2 部分组成: 一

部分是未受扰动气流的温度, 即大气静温 T_s ; 另一部分是由动能转换成热能所产生的温度, 与真空速 v_t 有关, 一般称为动力附加温度或动力温度^[4]。即

$$T_t = T_s + \frac{K-1}{2KR} v_t^2 = T_s \left[1 + \frac{K-1}{2} M^2 \right] \quad (1)$$

式中: Ma 为马赫数; $R=287.052\ 87\ (\text{m}^2/\text{k}\cdot\text{s}^2)$; $K=1.4$ 。

由于在总温传感器中驻点空气的动能不可能全部转换成热能, 因此, 式(1)改写成:

$$T_t = T_s \left[1 + \gamma \frac{K-1}{2} M^2 \right] = T_s \left[1 + \frac{\gamma}{5} M^2 \right] \quad (2)$$

其中, γ 称为恢复系数, 其值与马赫数有关且小于 1。

由式(1)可知: V_t 是 T_t 和 T_s 的函数, 只要测量 T_t 和 T_s 即可计算出 V_t 。而在飞机上直接准确测量 T_s 很困难, 由式(2)得知, T_s 可以通过测量 T_t 和 M 得到, 即

$$T_s = T_t / (1 + \gamma/5 M^2) \quad (3)$$

根据马赫数定义 $Ma=v_t/C$, 可得

收稿日期: 2020-09-03; 修回日期: 2020-10-16

作者简介: 邱亚洲(1968—), 男, 河北人, 硕士, 副教授, 从事飞参数据研究及应用、航空仪表与控制研究。E-mail: wyx13@163.com。

$$v_t = \sqrt{\frac{20.05M^2}{1 + \gamma/5M^2}} \cdot \sqrt{T_t} \quad (4)$$

上式反映了真空速、马赫数与总温之间的关系。

1.2 压力测量法

1) $Ma < 1$ ，且不考虑空气压缩性^[5]

$$v_t = \sqrt{2(p_t - p_s)RT_s/P_s} = \sqrt{2q_c RT_s/p_s} \quad (5)$$

式中： p_s 为静压， p_t 为全压

2) $Ma > 1$ ，考虑空气压缩性

$$v_t = \sqrt{2K/(K-1) \cdot R \cdot T_s \cdot \left[(1 + q_c/p_s)^{(K-1)/K} - 1 \right]} \quad (6)$$

3) $Ma \geq 1$

$$v_t = \sqrt{2q_c/\rho_s(1 + \varepsilon)} \quad (7)$$

其中， ε 可以由 v_t 、 M 和 C 联合计算。

2 总温传感器基本原理

某型飞参系统记录了 H 、 v_i 和 M 3 个大气数据参数。其中： H 、 v_i 分别是 p_s 和 p_t 的函数，压力测量法公式也表明了 v_t 与 p_s 、 p_t 之间的对应关系，利用 LS-SVR 函数拟合方法可以获得 v_t 与 H 、 v_i 之间的对应关系，从而求得不同时刻的真空速（记作 v_t^P ）；同时，飞参系统还记录了 T_t ，利用热力测量法公式，也可求得不同时刻的真空速（记作 v_t^T ）。由于大气数据计算机采用了高精度数字式压力传感器、对静压源误差进行补偿和性能定期标校等多种方法保证其输出信号的准确性^[6]。总温传感器内部结构如图 1 所示，采用感温电阻作为敏感元件，电阻变化的范围为 216.63~688.93 Ω ，对应的温度变化范围为 -700~350 $^{\circ}\text{C}$ ，存在连接部件的电阻、温度方法误差以及环境等因素的影响，误差会增大，发生故障的概率较高；因此，可以利用压力测量法求得的真空速 v_t^P 作为标准，与热力测量法求得的真空速 v_t^T 进行比较，即可对总温传感器的性能进行监测、判断其故障、预测性能变化趋势，为视情机务维护提供依据。

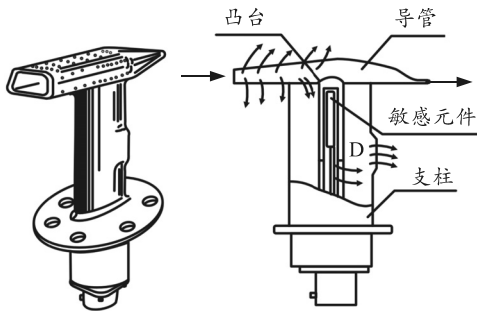


图 1 总温传感器外形结构

3 基于 LS-SVR 的性能监测与故障诊断

某型飞机上总温传感器的温度恢复系数 γ 与马赫数 Ma 之间的关系如表 1 所示。利用飞参数据中所记录 Ma 、 T_t 以及表 1 所示的 γ 与 Ma 之间的关系，通过式(4)即可解算出不同时刻的真空速 v_t 。

表 1 恢复系数 γ 与 Ma 对应关系

Ma	γ	Ma	γ	Ma	γ	Ma	γ
0.10	1.000	0.50	0.984	0.90	0.982	1.50	0.988
0.20	0.987	0.60	0.983	1.00	0.982	1.75	0.992
0.30	0.985	0.70	0.983	1.10	0.986	2.00	0.992
0.40	0.984	0.80	0.982	1.20	0.987	2.50	0.993

3.1 模型构建

利用 H 、 v_i 、 v_t 与 p_s 、 p_t 之间的关系产生训练样本和测试样本，样本 p_s 范围：6~106 kPa； q_c 范围：0~50 kPa，计算生成的 H 范围：-382~19 420 m， v_i ：0~955 km/h。将 H 、 v_i 作为输入， v_t 作为输出，利用 LS-SVR 在 Matlab 环境下进行函数拟合仿真。LS-SVR 选用高斯核作为核函数，采用交叉验证法对参数进行优化处理^[7]，优化后核函数参数 $\sigma^2=4.901$ ，系数 $C=146\ 756.7$ 。随机选用测试样本进行测试。图 2、图 3 是一组数据的仿真测试结果。其中：残差最大值为 2.093 3 km/h；残差的平均值为 0.643 1 km/h；标准差为 0.777 5 km/h，函数拟合精度高，泛化能力好，可用于总温传感器性能监测和故障诊断。

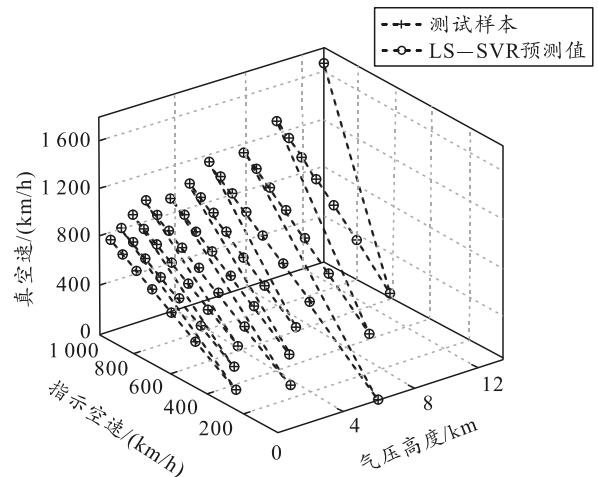
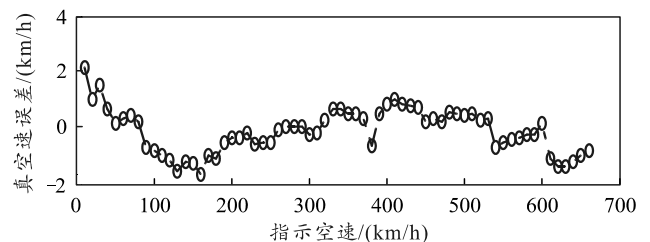
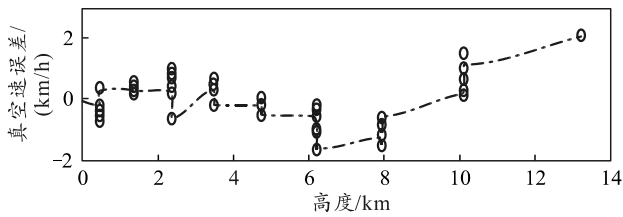


图 2 基于 LS-SVR 真空速预测与理论值对比关系仿真



(a) 真空速预测各点误差



(b) 预测误差与标准气压高度关系

图 3 基于 LS-SVR 真空速预测误差

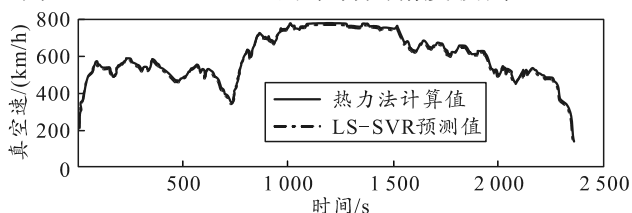
3.2 故障诊断标准

将函数拟合训练后的 LS-SVR 模型用于总温传感器性能监测和故障诊断，参数性能指标参考大气数据计算机系统履历本中相关内容，即当 $H \leq 0$ m 时，对应的残差 $error(i) \leq 15$ km/h；当 $0 \text{ m} \leq H \leq 4$ km 时，对应的残差 $error(i) \leq 30$ km/h；当 $4 \text{ km} \leq H \leq 8$ km 时，对应的残差 $error(i) \leq 40$ km/h；当 $8 \text{ km} \leq H \leq 12$ km 时，对应的残差 $error(i) \leq 50$ km/h；当 $12 \text{ km} \leq H \leq 15$ km 时，对应的残差 $error(i) \leq 60$ km/h；当 $H \geq 15$ km 时，对应的残差 $error(i) \leq 60$ km/h。如果真空速 v_t^T 的部分数据出现超差，同时大气数据计算机系统无故障，且在满足性能指标的情况下，可初步判断总温传感器出现了性能超差。

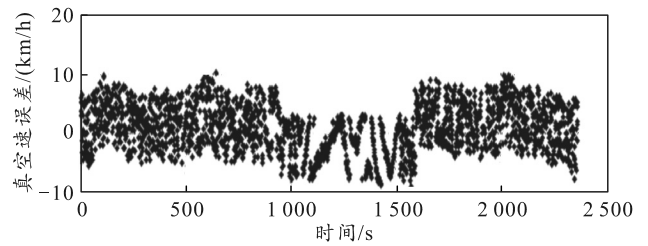
3.3 样本测试

分别选取正常数据 2 组、超差数据 1 组和异常数据 1 组，共 4 组数据进行样本测试的仿真，图 4—7 是采用 4 组飞参数据中的马赫数和大气总温参数计算出的真空速(利用热力法)与利用 LS-SVR 预测结果的对比关系、误差与飞行时间关系、误差与标准气压高度关系曲线图。由于笔者利用热力法计算真空速是采用飞参数据中的马赫数和大气总温值，而飞参数据中的马赫数和大气总温值最大误差分别是 ± 0.005 和 ± 0.5 °C，记录精度较低，增加了仿真结果中真空速 v_t^T 的计算误差，但设备履历本中性能指标要求余度大，仿真结果可用于工程应用。

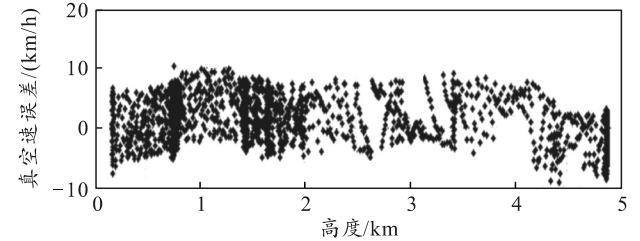
为了考察总温传感器的初始性能，第 1 组选用刚装备使用的某架飞机的飞参数据，仿真结果如图 4 所示，经过精确统计可以得到：残差的最大值为 10.239 1 km/h；残差的平均值为 3.270 4 km/h；标准差为 3.870 7 km/h，总的来讲其精度较高。



(a) 利用热力法与 LS-SVR 预测的真空速对比关系



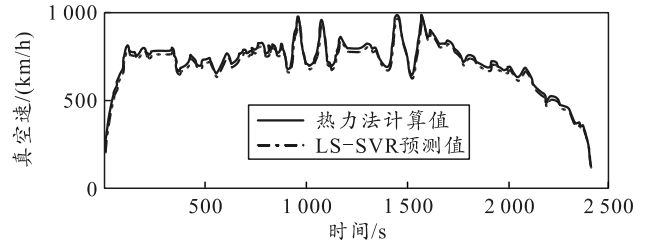
(b) 误差与飞行时间关系



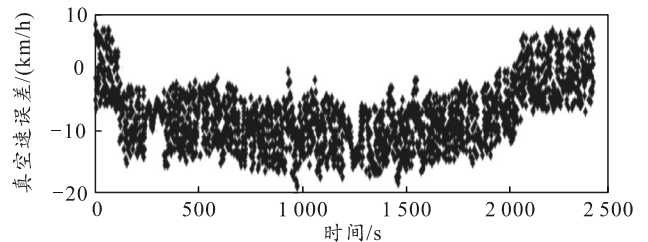
(c) 误差与标准气压高度关系

图 4 第 1 组飞参数据真空速比较和误差

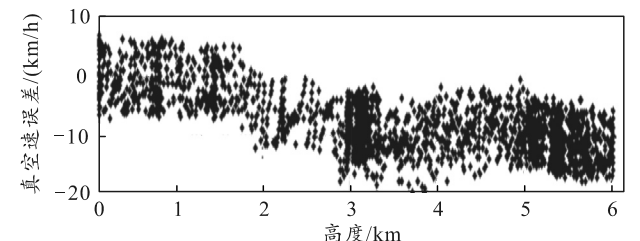
第 2 组选用飞行一段时间后的同架飞机的飞参数据，仿真结果如图 5 所示：残差最大值为 18.937 5 km/h；残差的平均值为 8.139 9 km/h；标准差为 4.851 0 km/h。虽然部分残差超过了 15 km/h，但相对应的飞行高度均超过了 3 500 m 如图 5(c)，能够满足设备性能指标的要求，精度明显低于第 1 组数据，反映了大气总温传感器性能的变化。



(a) 利用热力法与 LS-SVR 预测的真空速对比关系



(b) 误差与飞行时间关系

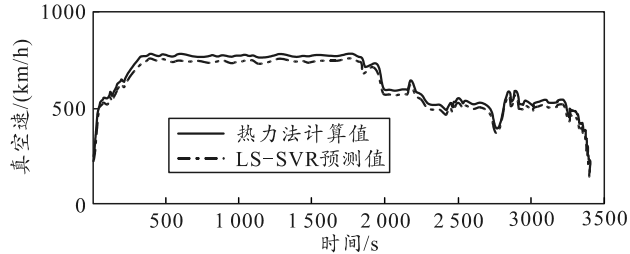


(c) 误差与标准气压高度关系

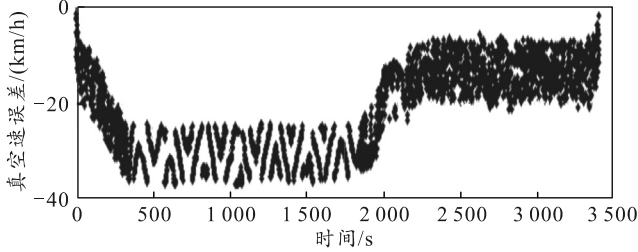
图 5 第 2 组飞参数据真空速比较和误差

第 3 组选用了一组大气总温传感器性能超差的

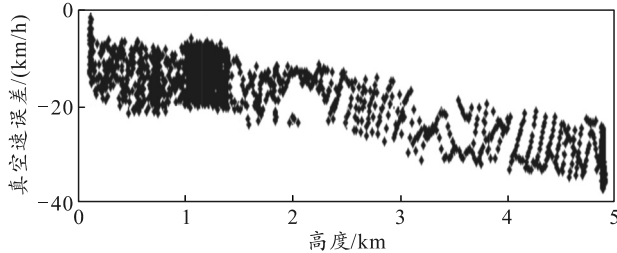
飞参数据, 仿真结果如图 6 所示: 残差最大值为 37.214 4 km/h; 残差的平均值为 22.341 5 km/h; 标准差为 8.948 7 km/h, 误差随着标准气压高度的升高有增大的趋势如图 6(c), 其中介于 3~4 km 部分数据超差, 不能满足设备性能指标的要求, 应对大气总温传感器通道进行检查、标校、修理或更换。



(a) 利用热力法与 LS-SVR 预测的真空速对比关系



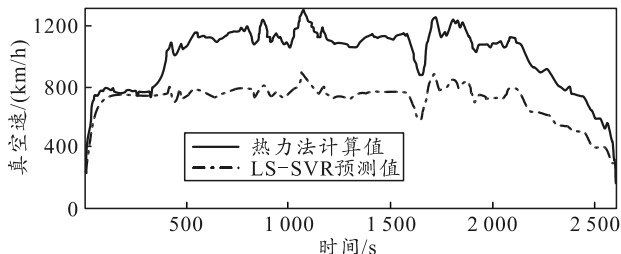
(b) 误差与飞行时间关系



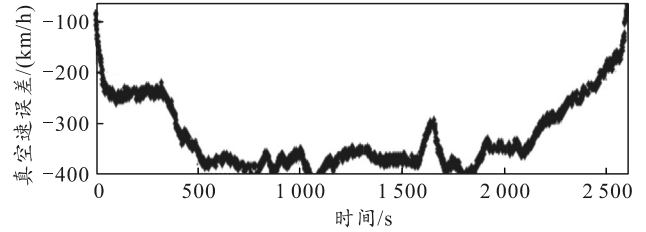
(c) 误差与标准气压高度关系

图 6 第 3 组飞参数据真空速比较和误差

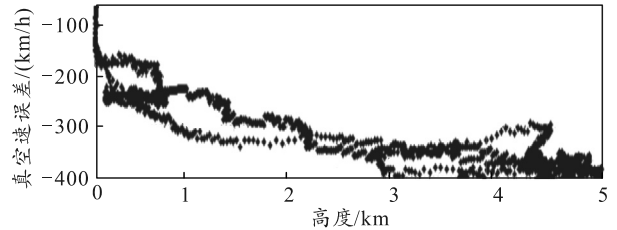
第 4 组选用大气总温传感器输出异常的飞参数据, 仿真结果如图 7 所示: 残差最大值为 427.940 6 km/h; 残差的平均值为 323.533 5 km/h; 标准差为 69.034 2 km/h, 所有数据均超差如图 7(c), 经地面检查, 大气总温传感器损坏, 无输出信号。



(a) 利用热力法与 LS-SVR 预测的真空速对比关系



(b) 误差与飞行时间关系



(c) 误差与标准气压高度关系

图 7 第 4 组飞参数据真空速比较和误差

4 结束语

笔者根据大气数据参数与总温信号之间的关系, 利用飞参系统记录参数实现了总温性能监测与故障诊断, 可以推广到飞机关联参数的监测与诊断。仿真结果表明: 在解决回归预测等问题方面, LS-SVR 精度高、泛化能力强、稳定性好, 并且不会出现过学习现象, 可在飞参地面站系统中进行应用, 以辅助机务维修保障。

参考文献:

- [1] 贺涛, 何嵘, 陈江苏. 直升机大气数据系统应用研究[J]. 信息周刊, 2019(11): 203-207.
- [2] 丛志民, 唐福军. 某型飞机模拟式大气数据系统的故障分析[J]. 航空维修与工程, 2018, 15(6): 85-87.
- [3] 邱亚洲, 姚凌虹. 基于飞参数据的大气数据计算机系统故障诊断[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(3): 449-452.
- [4] 张宏宇, 刘琦. 一种组合式空速表测量理论误差浅析与测量不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2017, 44(12): 70-73.
- [5] TURKMEN I. An alternative neural airspeed computation method for aircrafts[J]. Aircraft engineering and aerospace technology. 2018, 90(2): 368-378.
- [6] 邱亚洲, 姚凌虹. 基于飞参数据的大气数据计算机系统故障诊断[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(3): 449-452.
- [7] 袁从贵, 徐淑琼, 张新政. 一种大样本学习最小二乘支持向量回归模型[J]. 控制工程, 2017, 24(9): 1768-1773.