

基于油量区间估计的飞机左右机翼油箱输油不平衡故障诊断

靳国涛, 解海涛, 丁 舸

(中国航空工业集团公司成都飞机设计研究所, 成都, 610091)

摘要 对于机翼油箱载油量较多的飞机,左右机翼输油不平衡故障将会影响飞机操纵甚至飞行安全。针对地勤人员在飞机维护时普遍缺乏机翼输油不平衡故障诊断手段的问题,研究了一种基于油量区间估计的故障诊断方法。利用已有飞行数据得到左右机翼油量间的回归方程,求得机翼油量个别值的估计区间,修正后作为机翼油量的正常分布区间和故障检测方法,通过设置合理的故障判断条件,实现左右机翼油箱输油不平衡故障的有效诊断。实例验证结果表明:该方法可以准确检测出飞机机翼输油不平衡故障,降低再次飞行时故障发生率;同时该方法易实现,无需增加软硬件,可在地勤人员间快速推广使用,具有一定的应用前景。

关键词 机翼油箱;输油不平衡;区间估计;故障诊断

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.01.008

中图分类号 V233.2;TP277 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)01-0045-05

A Fault Diagnosis of Unbalanced Fuel Delivery of Aircraft Left and Right Wing Tanks Based on Fuel Quantity Interval Estimation

JIN Guotao, XIE Haitao, DING Ge

(AVIC Chengdu Aircraft Design Research Institute, Chengdu 610091, China)

Abstract For aircraft with more fuel quantity in the wing tank, imbalance of fuel delivery between left and right wing tanks affects control and even flight safety of aircraft. Aimed at the problems that ground crew generally have lack of fault diagnosis methods of wing tank transportation imbalance in aircraft maintenance, the fault diagnosis methods based on fuel quantity interval estimation are studied. The regression equation between the left and the right wing tanks fuel quantity is obtained by using the existing flight data, and the estimation interval of the individual value of wing tanks fuel quantity is obtained, which is used as the normal distribution interval of the wing tanks fuel quantity and fault detection method after being modified. By setting reasonable fault judgment conditions, the fuel delivery imbalance fault of left and right wing tanks can be realized effectively. The results show that the method can accurately detect the imbalance fuel delivery fault of aircraft's wing tanks and reduce the failure rate when flying again. At the same time, the method is easy to realize without adding software and hardware, can be quickly used among ground crew, and has a certain application prospect.

Key words wing tank; unbalanced fuel delivery; interval estimation; fault diagnosis

收稿日期: 2020-08-30

作者简介: 靳国涛(1984—),男,河北邯郸人,硕士,研究方向:飞机机电系统故障诊断。E-mail:jgt_cadi@163.com

引用格式: 靳国涛,解海涛,丁舸.基于油量区间估计的飞机左右机翼油箱输油不平衡故障诊断[J].空军工程大学学报(自然科学版),2021,22(1):45-49. JIN Guotao, XIE Haitao, DING Ge. Fault Diagnosis of Unbalanced Fuel Delivery of Aircraft's Left and Right Wing Tanks Based on Fuel Quantity Interval Estimation[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(1): 45-49.

燃油系统的主要功能是储存燃油,在飞机飞行包线内连续、可靠地向发动机供油,同时保持飞机重心在规定范围内。燃油系统左右机翼油箱输油比例通常设定为1:1,但受机上管路布置、附件工作差异、飞行姿态等因素影响,左右机翼油箱经常无法按设定比例输油。当飞机出现机翼油箱^[1]或副油箱不输油故障时,会对飞机重心和操纵产生不利影响。大多数飞机没有有效可用的机翼输油不平衡故障检测方法和判断标准,使得既能准确检测出故障,又不引发虚警。目前常采用的方法是设置一个左右机翼油量差值告警点,以便向空勤发出告警信息和进行应急处置,保障飞行安全,但对未引发系统告警的机翼输油不平衡故障无法进行检测。

在飞机日常维护工作中,地勤人员对飞机系统的学习越来越深入,除了查看故障信息外还会对各自关心的重要数据信息进行判读,对发现的异常(与以往数据差别较大)进行研究和排查。当燃油系统左右机翼油量数据差值较大且无告警信息时,由于缺乏有效的故障检测方法和判断故障标准,地勤人员会感到困惑,无法确定燃油系统是否真实存在机翼输油不平衡故障,设计人员也无法从技术上进行准确判断。

故障诊断技术主要有基于信号处理、基于数学模型和基于知识3种方法。基于信号处理的方法侧重于对单个产品的振动等信号进行处理和分析后给出故障诊断结论,如SINGH采用独立的角度重采样技术和连续小波变换对齿轮箱进行故障诊断^[2]。基于数学模型的方法需要建立系统精确的数学模型,诊断准确性易受模型准确性、系统参数及噪声的影响,一般与其他诊断方法结合后进行故障诊断。随着人工智能和计算机技术的飞速发展,基于知识的智能故障诊断方法逐渐成为故障诊断研究的主流和发展方向,主要包括基于神经网络的诊断方法、基于粗糙集的诊断方法、遗传算法、基于故障树的诊断方法和基于专家系统的诊断方法等。这些诊断方法建立在对诊断对象深入了解的基础上,且结构较为复杂,需要较多的迭代计算、维护知识库、故障库、不断获取专家经验等。现阶段飞机燃油系统已经实现了燃油泵等成品部件级的故障诊断,文献[3~4]通过燃油泵的状态监控完成了燃油泵的故障检测和健康评估;系统级的故障多依靠故障树分析法进行事后诊断,由于难以建立完整的故障信息库和存在认知盲区,诊断效果有时难以令人满意,而专家系统目前还处于发展和尝试阶段^[5]。

1 问题提出

与商用飞机相比,军用飞机燃油输油系统日趋复杂,专用输油泵是当前军用飞机最广泛使用的燃油输送方法^[6]。军用飞机机翼油箱常见输油控制原理如图1所示,输油部件主要包括输油泵、单向活门、管路、接头、输油阀门等。输油泵故障或吸油口堵塞、管路破损泄漏、接头泄漏等都会导致单侧机翼输油异常,打破左右机翼输油平衡;油量测量故障也会导致系统出现机翼输油不平衡现象。

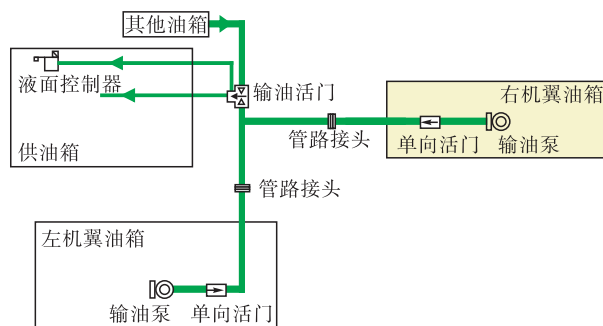


图1 飞机左右机翼油箱输油原理

目前大多数飞机不具备对输油泵吸油口局部堵塞、管路或接头泄漏等故障进行有效监控和检测的能力,地勤人员也缺乏实际可行的机翼输油不平衡故障检测手段。虽然飞机上设有机翼输油不平衡故障告警系统(机翼油量差值大于设定值时发出告警信号),但该告警信号主要用于向空勤发出告警信息,以做出应急处置保证飞机飞行安全,对于经常出现的机翼油量差值小于告警值或正处于发展期的故障无法进行检测和告警,使得故障隐患在地面维护检查时不能被及时发现和排除,可能影响飞机任务执行甚至危及飞行安全。

2 区间估计诊断原理

区间估计是参数估计的一种形式,通过从总体中抽取样本,根据一定的正确度与精确度要求,构造出适当的区间,以作为总体的分布参数(或参数的函数)的真值所在范围的估计。本文通过回归分析法和样本数据建立机翼油量的估计区间,修正后作为故障检测手段,在设置合理的判故条件后,可用于机翼输油不平衡故障诊断。

从机翼正常输油油量数据中选取 n 个单侧机翼(如右机翼)油量的样本数据作为自变量:

$$m_{RW} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (1)$$

与之相对应的左机翼油量样本数据为因变量

$$m_{LW} = [y_1, y_2, \dots, y_n] \quad (2)$$

燃油系统左右机翼输油比例通常设定为 1 : 1, 机翼油量分布也基本呈线性关系。根据选取的油量样本数据求得估计的一元线性回归方程:

$$\hat{y} = a + bx \quad (3)$$

式中: x 为自变量; \hat{y} 为因变量 y 均值的估计; a 为样本回归方程常数项; b 为样本回归系数。为使数据的观察值与通过回归方程求得的估计值的残差平方和最小, 用最小二乘法估计得到 a 和 b , 求出一元线性回归方程, 然后进行显著性检验和拟合优度检验。显著性检验主要用 F 检验法, 通过比较计算的 F 值和查到的 F 表值大小, 得出回归方程中自变量与因变量的线性关系是否显著的结论; 拟合优度检验主要取决于可决系数 R^2 , R^2 值越接近 1, 说明回归直线对观测值的拟合程度越好。

$$R^2 = \left(\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \right) / \left(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right) \quad (4)$$

式中: \bar{y} 为样本数据 y_i 的平均值; n 为样本个数。确定左右机翼油量线性关系显著后, 可求出左机翼油量个别值相对右机翼油量的估计区间为:

$$\hat{y}_0 \pm t_{\alpha/2}(n-2) \times \sqrt{\frac{S_E^2}{(n-2)}} \times \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (5)$$

式中: x_0 为右机翼油量个别值; \hat{y}_0 为与 x_0 相对应的通过回归方程计算得到的左机翼油量值; α 为置信水平; $t_{\alpha/2}(n-2)$ 为查到的 t 表值; S_E^2 为样本残差平方和; x_i 和 \bar{x} 分别为右机翼油量样本值和样本平均值。估计区间表示左机翼油量以一定的置信水平分布的区间, 为了提高检测准确度, 降低误判概率, 结合工程经验对估计区间进行修正。一般通过修正值 ($\pm \Delta$) 或修正因子进行修正, 修正后的估计区间作为机翼油量值的正常分布区间, 它是左右机翼输油不平衡故障的主要检测方法和手段。

设定机翼输油不平衡故障判断条件如下:

“若 $m_1/m > x\%$, 则存在左右机翼输油不平衡故障。” m 为待诊断的油量数据个数, m_1 为分布在区间外的油量数据个数, $x\%$ 为设定的判断故障比例。

故障诊断初期, 由于缺乏足够的的数据验证和经验积累, 上文设定的机翼输油不平衡故障判断条件和 $x\%$ 的判定值可能会存在一定偏差。为提高故障诊断的准确性, 防止出现故障漏检情况, 采用借鉴飞机系统常用故障判断逻辑的方法, 补充判断条件: “若 m 中连续有 m_2 个数据出现在区间外, 则存在左右机翼输油不平衡故障。”

上述判断条件中满足任一条件, 即判定存在机翼输油不平衡故障。将机翼油量数据导入到机翼油量值正常分布的区间中, 依照故障判断条件可以诊

断出系统是否存在机翼输油不平衡故障。随着基于大量数据的实践验证, 故障判断条件将不断修正和完善, 故障诊断会更加准确。

3 实例验证

某飞机经常出现机翼输油不平衡故障, 为了保证飞行安全, 机翼油量差值大于 300 kg 时系统会发出“机翼输油不平衡”故障告警信息。用户在判读油量数据时, 常发现左右机翼油量差值与以往数据相差较大, 由于系统未报故, 无法确定是否真正存在故障, 但频繁出现的输油不平衡故障给用户造成了很大困扰。为解决该问题, 运用油量区间估计方法对飞机燃油系统进行机翼输油不平衡故障诊断。

3.1 建立油量估计区间

表 1 是从飞机燃油系统历史工作数据库中选取的 100 组机翼正常输油时左右机翼油量值样本数据。

表 1 机翼油量样本数据 单位: kg

右翼	左翼	右翼	左翼	右翼	左翼	右翼	左翼
1 188	1 191	803	785	519	444	1 187	1 179
794	779	501	425	1 179	1 179	779	792
470	404	1 175	1 175	776	758	465	380
1 172	1 182	764	738	458	437	1 166	1 166
759	761	440	371	1 154	1 154	743	744
431	375	1 152	1 146	734	719	413	345
1 143	1 140	731	731	387	318	1 125	1 122
716	690	384	332	1 101	1 098	710	716
374	327	1 100	1 098	707	696	338	267
1 083	1 074	702	702	335	303	1 080	1 074
690	665	290	249	1 076	1 073	684	651
282	207	1 059	1 061	675	665	264	234
1 052	1 043	653	612	246	150	1 047	1 041
650	638	240	206	1 025	1 014	642	609
212	183	1 013	1 002	633	584	206	113
1 001	993	630	596	204	108	980	975
611	551	191	107	968	963	606	543
186	164	957	951	605	581	174	92
932	918	602	525	171	147	926	935
585	504	170	165	923	912	584	554
141	78	896	881	576	539	134	116
881	879	570	498	117	59	858	839
555	521	101	89	845	851	554	470
98	36	824	804	543	483	59	9
821	833	536	459			810	821
530	446						

以右机翼油量值作为自变量, 左机翼油量值作为因变量, 样本数据散点图如图 2 所示。可以看出

左右机翼油量值之间基本呈线性关系,左机翼油箱耗油略快于右机翼油箱,这是由左右机翼输油管路布置差异导致的。

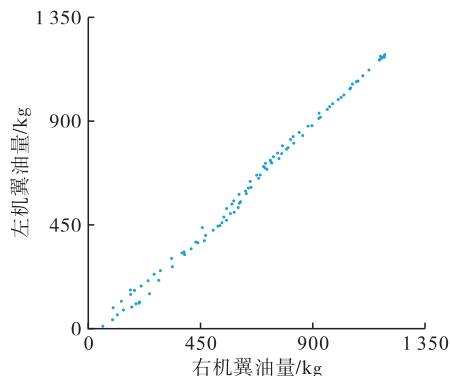


图2 样本散点图

根据样本数据求得估计的一元线性回归方程

$$\hat{y} = 1.064x - 72.509 \quad (6)$$

用 F 检验法进行显著性检查,设显著水平 $\alpha = 0.05$,即置信概率为 95%,计算得到的 F 值远大于查到的 F 表值,说明左右机翼油量值线性关系显著;拟合优度检验的可决系数 R^2 值为 0.9957,表明回归直线对观察值的拟合效果非常好。

设定置信水平为 95%,根据样本数据求得飞机左机翼油量个别值相对右机翼油量值的估计区间如图 3 所示。

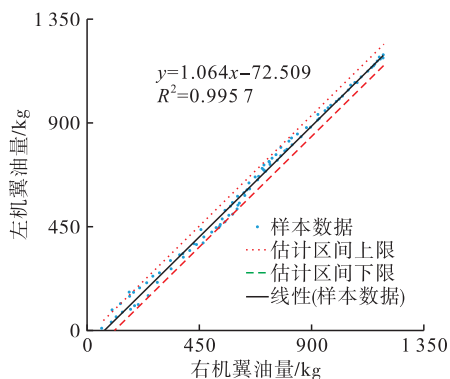


图3 左机翼油量个别值估计区间

通过修正值(Δ 约取区间平均宽度的 10%)对估计区间进行修正,修正后的估计区间如图 4 所示。

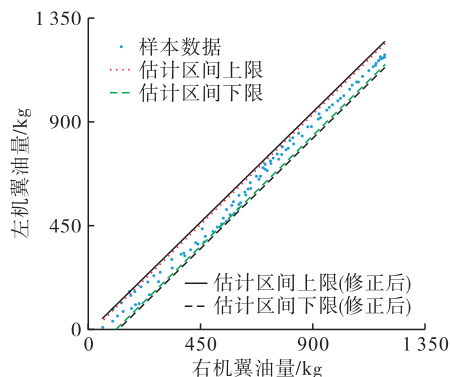


图4 修正后左机翼油量个别值估计区间

设定机翼输油不平衡故障判断条件如下:

“若 $m_1/m > 15\%$,则存在左右机翼输油不平衡故障。”或“若 m 中连续有 7 个(m_2 取值)数据分布在油量估计区间外,则存在左右机翼输油不平衡故障。”

根据修正后的左机翼油量个别值估计区间,结合故障判断条件就可以对机翼输油不平衡故障进行诊断。

3.2 应用实例

从飞机曾出现的机翼输油不平衡故障中选取两个典型故障,一个故障系统报出了“机翼输油不平衡”告警信息;另一个故障系统未报故,地勤人员查看机翼油量数据差值略大,但未到告警门限,不清楚系统是否存在故障。随后在执行某项检查时意外发现右机翼输油泵吸油口附近有一块异物,推测异物曾堵塞过输油泵。

现通过油量区间估计方法对选取的两个典型故障数据进行诊断。先对数据进行预处理,去掉数据野值,然后按一定的采样频率获得左右机翼油量数据,放入油量估计区间后根据数据分布情况和判故障条件进行故障诊断。

3.2.1 诊断实例 1

飞机空中飞行时燃油系统报出“机翼输油不平衡”故障告警信息。飞机着陆后,从燃油系统工作数据中取左右机翼油量有效工作数据共 46 组放入机翼油量估计区间如图 5。

图 5 可以看出机翼油量值在估计区间的分布情况。开始输油后不久,左机翼油量急剧下降,右机翼油量基本保持不变,机翼油量值很快就超出了油量估计区间,说明系统中存在机翼输油不平衡故障;当机翼油量差值大于 300 kg 设定值时,系统报出“机翼输油不平衡”故障告警信息,待告警消失并持续一段时间后,机翼油量值又重新分布在油量估计区间内,表明机翼输油不平衡故障消失。

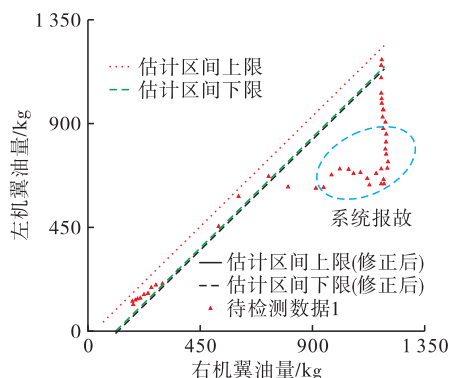


图5 机翼油量数据故障检测 1

对 46 组机翼油量数据在油量估计区间上的分布情况进行统计,位于区间外的数据有 30 组,占比

65.2%(>15%),同时出现了连续 7 组数据分布在油量估计区间外的情况,依照故障判断条件可知存在左右机翼输油不平衡故障。经查,左机翼油箱中有 1 根油位传感器故障,导致左翼油量测量偏差。信号干扰^[7]、线路故障、内部接触不良等都会导致油位传感器出现测量故障,确认故障原因并采取措施后,机翼输油不平衡故障消失。

该诊断应用表明,诊断方法可在告警信号发出前预先检测出机翼输油不平衡故障,诊断结果与告警信息吻合,说明该方法是准确和有效的。

3.2.2 诊断实例 2

飞机飞行时燃油系统未报故,着陆后地勤人员按例行要求查看燃油系统工作数据,未发现有“机翼输油不平衡”“输油泵低压”等任何故障信息。取左右机翼油量有效工作数据共 46 组放入到机翼油量估计区间,见图 6。

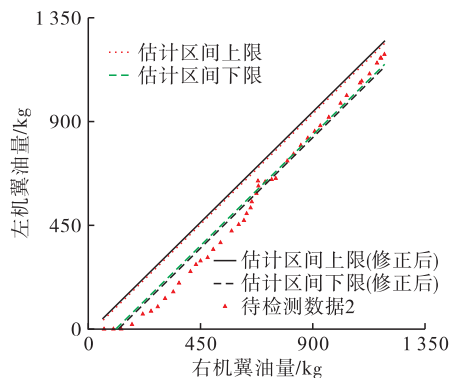


图 6 机翼油量数据故障检测 2

从图 6 看,刚开始机翼油量值分布正常,随后逐渐“滑向”估计区间下限边界并偏出估计区间,最终在机翼油量耗尽后又重新回归到估计区间内,可以推测机翼刚开始输油正常,随后出现右翼输油变慢或左翼输油变快故障,导致左右机翼油量差值超过估计区间范围,原因可能与输油管路或接头泄漏^[8]、输油泵故障、输油泵吸油口被堵塞有关。由于左右机翼均能耗尽燃油,最终油量差值又回归到正常范围内。

46 组机翼油量数据位于区间外的数据有 23 组,占比 50%(>15%),同时也出现了连续 7 组数据分布在油量估计区间外的情况,依照故障判断条件可知存在左右机翼输油不平衡故障。地勤人员意外在右机翼输油泵吸油口滤网附近发现一块异物,异物上有明显滤网痕迹,同时检查系统管路和接头未发现异常,推断输油泵吸油口局部被异物堵塞导致右机翼输油变慢,进而出现机翼输油不平衡故障。清除异物后再次开车检查,机翼输油不平衡故障消失。

尽管飞机系统未发出“机翼输油不平衡”故障告

警信息,但通过油量区间估计诊断方法可以检测出确实存在机翼输油不平衡故障。应用实例表明该方法对于机翼输油不平衡故障的诊断是准确的,为地勤人员提供了一种可行的故障诊断手段,有助于地勤人员提前发现和排除机翼输油不平衡故障,降低飞机再次飞行时的故障发生率。

4 结语

基于油量区间估计的故障诊断方法,依托机翼油量数据和回归分析法建立机翼油量值的估计区间,修正后结合判故条件对待检测数据在油量估计区间上的分布情况进行分析判断,可实现左右机翼输油不平衡故障诊断。实例验证结果表明,对于油测故障或输油故障等引起的机翼输油不平衡故障,该方法的诊断结果是准确和令人满意的,是一种有效的故障检测方法,可以降低飞机再次飞行时的故障发生率;故障诊断程序可集成到飞参判断软件中,为地勤人员提供一种简便快捷的故障诊断手段,满足维护工作需要;还可推广应用于左右机翼副油箱输油不平衡故障诊断。该方法具有诊断效果好、易实现、改动少、成本低、推广速度快等优点。

参考文献

- [1] 王朋. 某型飞机机翼油箱不输油故障分析[J]. 科技资讯, 2019, 17(6): 21-22.
- [2] SINGH A, PAREY A. Gearbox Fault Diagnosis under Non-Stationary Conditions with Independent Angular Re-sampling Technique Applied to Vibration and Sound Emission Signals[J]. Applied Acoustics, 2019, 144: 11-22.
- [3] MURALIDHARAN V, SUGUMARAN V. Rough Set Based Rule Learning and Fuzzy Classification of Wavelet Features for Fault Diagnosis of Monoblock Centrifugal Pump[J]. Measurement, 2013, 46(9): 3057-3063.
- [4] ZHANG X, TANG L, DECASTRO J. Robust Fault Diagnosis of Aircraft Engines: A Nonlinear Adaptive Estimation-Based Approach [J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2013, 21(3): 861-868.
- [5] 姜伟华. 飞机燃油系统故障诊断研究[J]. 山东工业技术, 2015(23): 55-56.
- [6] 罗伊·兰顿. 飞机燃油系统[M]. 颜万易, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 2010.
- [7] 陈智, 杨学莉. 某型飞机燃油测量系统电磁干扰问题研究[J]. 信息通信, 2019(4): 104-105.
- [8] 龚昊, 江华, 卞刚. 飞机燃油导管柔性接头泄漏量计算分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(25): 358-363.

(编辑: 姚树峰)