

文章编号:1674-8190(2020)04-563-09

# 飞机电液伺服阀早期故障征兆诊断

靳国涛

(中国航空工业集团有限公司 成都飞机设计研究所, 成都 610073)

**摘要:** 电液伺服阀是飞机刹车系统的重要执行部件,影响着飞机的着陆安全。针对某型飞机电液伺服阀故障多发的问题,运用一元线性回归分析方法构建刹车系统电液伺服阀的分析模型,根据分析模型和故障征兆判据对电液伺服阀近期的工作数据进行分析和故障征兆诊断。结果表明:基于回归分析的故障诊断方法可以准确地诊断电液伺服阀存在的故障征兆;早期故障征兆诊断可以预先发现电液伺服阀潜在的故障隐患,降低故障发生率,显著提高飞机刹车系统的安全性和可靠性,也有助于优化维修策略和降低飞机全寿命维护成本。

**关键词:** 电液伺服阀;线性回归;预测区间;故障征兆;诊断

**中图分类号:** {V240.2}; TP277

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.04.015

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Early Fault Symptom Diagnosis of Aircraft Electro-hydraulic Servo Valve

JIN Guotao

(Chengdu Aircraft Design Research Institute, Aviation Industry Corporation of  
China, Ltd., Chengdu 610073, China)

**Abstract:** Electro-hydraulic servo valve is an important part of aircraft brake system, which affects the safety of aircraft landing. In order to solve the problem of frequent failure of a certain type of electro-hydraulic servo valve, a model of electro-hydraulic servo valve of the brake system is established by using the regression analysis method. According to the analysis model and the fault symptom criterion, the recent working data of the electro-hydraulic servo valve are analyzed and the fault symptom is diagnosed. The results show that the method can accurately diagnose the fault symptoms of the electro-hydraulic servo valve. The early fault symptom diagnosis can detect the potential fault of the electro-hydraulic servo valve in advance, reduce the fault rate, improve the safety and reliability of the aircraft brake system significantly, and also help to optimize the maintenance strategy and reduce life cycle maintenance costs of the aircraft.

**Key words:** electro-hydraulic servo valve; linear regression; prediction interval; fault symptom; diagnosis

## 0 引言

刹车系统是飞机着陆制动的重要系统,主要用于在飞机着陆时快速降低滑跑速度,使飞机安全刹

停在跑道上。刹车系统除了具有正常刹车、应急刹车、差动刹车、起飞线停机刹车、起落架收起时自动刹车、牵引刹车、地面停放刹车等功能外,还有接地保护及故障检测等辅助功能<sup>[1]</sup>。刹车系统对飞机

收稿日期:2020-03-03; 修回日期:2020-03-30

通信作者:靳国涛,jgt\_cadi@163.com

引用格式:靳国涛. 飞机电液伺服阀早期故障征兆诊断[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 563-571.

JIN Guotao. Early fault symptom diagnosis of aircraft electro-hydraulic servo valve[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 563-571. (in Chinese)

安全起飞和着陆起着至关重要的作用,同时受飞机重量、跑道摩擦系数及使用环境(如高原)等各种因素的影响,刹车性能的好坏将直接影响飞机、机组人员及乘员的安全。

电液伺服阀作为刹车系统的重要执行部件,直接影响着飞机的着陆安全。某型机着陆滑跑过程中,出现过多起由于电液伺服阀输出异常刹车压力导致飞机无法及时刹停而冲出跑道或主机轮拖胎爆破的事故,给用户心理造成了较大压力。目前,电液伺服阀多采用定时维修方式,容易导致维修不足或维修过剩,且仅针对电液伺服阀某一故障模式有效,预防性维修意义有限。

经历了 50 多年的发展,故障诊断技术涉及到越来越多的学科,包含信号处理、模式识别、人工智能、神经网络、计算机工程等,应用了多种新理论和算法<sup>[2]</sup>。目前故障诊断方法主要有基于信号处理的诊断方法、基于模型的诊断方法和基于知识的诊断方法。基于信号处理的诊断方法,主要是通过通过对故障设备工作状态下的信号进行诊断,当超出一定的范围即判断为存在故障。王晓龙<sup>[3]</sup>利用变分模态分解等新颖的信号处理方法,从拾取的原始振动信号中有效提取轴承状态特征,实现了对滚动轴承的早期故障诊断。该诊断方法只能根据诊断对象所表现出来的特定信号诊断特定类型的故障,无法对多故障同时发生和各种故障之间可能存在的相互联系及影响加以分析。基于模型的诊断方法,需建立诊断对象的数学模型,然后根据模型获得预测形态,通过与所测量形态对比产生残差信号并进行分析,诊断系统运行中出现的故障,主要分为参数估计法、状态估计法和等价空间法三种。近年来在飞机起落架、液压、电源等系统上应用广泛<sup>[4-6]</sup>,T. Escobet 等<sup>[7]</sup>通过该方法对 PEM 燃料电池系统进行了故障诊断,并给出了诊断结果。但在面对具有强耦合、参数时变等严重非线性特征的复杂大系统时,由于通常无法获取较为精准的模型,使得该诊断方法的应用存在一定局限性<sup>[8]</sup>。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,它不需要研究对象有精确的数学模型,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。其中专家系统是最引人注目、研究最多、应用最广泛的智能诊断方法,该方法依赖于丰富的专家知识库和完备的推理库。金吉<sup>[9]</sup>、刘平华<sup>[10]</sup>和 Cao Junbin 等<sup>[11]</sup>分别通过专家系统实现了对飞机飞控系统、发动机系统、电源系统的智能故障诊断,并给出了维修改进的合理化建议。

现阶段飞机系统故障诊断多采用故障树分析法,它依赖于各领域专家丰富的专业知识和工程实践经验。王雪飞等<sup>[12]</sup>、王立纲<sup>[13]</sup>运用基于故障树分析法的故障诊断系统完成了对现役飞机刹车系统的故障诊断;Zhao Ningning 等<sup>[14]</sup>采用故障树分析法对一个典型的飞机雷击案例进行了系统分析,提出了防止飞机雷击的具体措施;H. Zerrouki 等<sup>[15]</sup>则对比分析了故障树分析法的局限性。基于故障树分析法的故障诊断系统能够直观表达系统的故障模式,便于快速准确地进行故障诊断,但该方法要求具备完整的故障信息库,这通常需要专家运用工程知识并结合外场大量故障案例花费较长时间来建立。对于刚交付使用的飞机,建立一套完整的故障信息库是非常困难的,因此采用故障树分析法有时难以给出满意的诊断结果。另外,基于故障树分析法的故障诊断系统侧重于对已发生的故障进行定位,对飞机系统隐藏的故障征兆通常无法检测,存在一定的不足之处。由于刹车系统故障会严重影响飞行安全,飞行前对刹车系统故障率高的产品进行故障征兆检测、隔离和排除,可以将故障扼杀在萌芽状态,远比出现故障后再进行诊断更有意义,同时也能弥补现阶段飞机故障诊断系统存在的不足。

基于此,本文针对某型飞机刹车系统电液伺服阀使用过程中故障频发的问题,依据电液伺服阀大量工作数据的变化规律,运用统计学中回归分析的一元线性回归分析统计方法,建立电液伺服阀输入量与输出量之间的回归关系函数表达式,确定模型参数并对模型进行检验,然后根据建立的模型和故障征兆判据对电液伺服阀近期的工作数据进行早期故障征兆诊断,以期在飞行前发现和排除电液伺服阀潜在的故障隐患,降低实际故障发生率,提高

刹车系统的安全性和可靠性。

## 1 故障诊断技术概述

### 1.1 故障诊断技术的发展

故障诊断技术起源于20世纪60年代的美国,我国对故障诊断技术的研究是在20世纪80年代开始的,目前已在航空、航天及汽车等领域取得了不错的成绩。故障诊断技术主要通过对系统和设备的状态进行检测,达到对其故障进行诊断的目的<sup>[16]</sup>。回顾故障诊断技术的发展历程,经历了由人的感官和专业经验判断到通过传感器技术、动态测试技术及信号分析技术判断,再到利用计算机技术和人工智能技术等手段进行判断的阶段,故障诊断手段越来越智能化和自主化。

### 1.2 故障诊断的主要作用

故障诊断的作用是及时和提前发现设备存在的故障和安全隐患,降低设备故障率和维修保障费用,保证设备安全运行。

在军事领域,通过故障诊断可以减少飞机执行任务过程中由于故障而引起的风险,提高任务成功率,保障飞机飞行安全,还有助于优化维修策略,减少设备维修次数,提升飞机完好率<sup>[17]</sup>;在民用领域,故障诊断主要用于减少设备事故率,降低维修费用,提升经济效益。例如某汽车故障诊断系统可以把诊断过程产生的数据文件同时传输到指定的数据库,汽车生产商的设计、生产、售后等部门可以从数据库上及时清楚地了解车辆故障率的统计分析结果,以方便汽车生产商在生产过程中有针对性地改善生产环境,控制生产过程,提高产品质量,降低产品故障率和维修费用<sup>[18]</sup>。

## 2 飞机刹车系统简介

### 2.1 刹车系统原理

飞机刹车系统一般由主刹车系统和备份刹车系统组成,主刹车系统使用液压刹车,备份刹车系统使用冷气刹车。当主刹车系统由于故障不能满足飞机刹车需求时,飞机会根据系统控制逻辑或飞行员指令切断主刹车系统,同时启用备份刹车系统对飞机进行刹车,备份刹车系统一般不具备防滑功

能,刹车过程中容易出现拖胎问题。飞机刹车系统原理简图如图1所示。

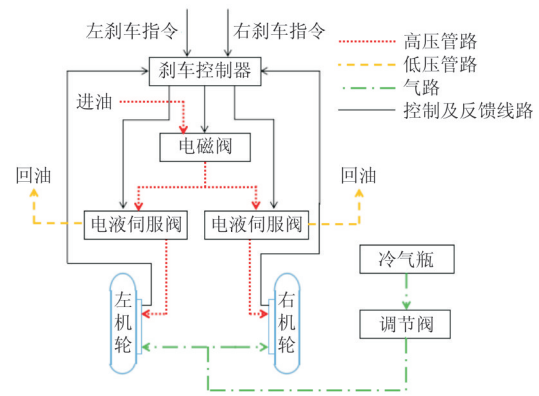


图1 飞机刹车系统原理简图

Fig. 1 Schematic diagram of aircraft brake system

主刹车系统主要包括刹车控制器、电磁阀、电液伺服阀、机轮刹车装置等。当飞机需要刹车时,刹车控制器接收来自飞机管理计算机的刹车指令,控制打开电磁阀,使液压油进入到电液伺服阀中,刹车控制器根据轮速传感器和压力传感器反馈的机轮转速信号和刹车压力信号,并结合刹车指令,控制电液伺服阀输出合适的刹车压力至机轮刹车装置进行刹车。当两侧机轮轮速相差较大时,刹车控制器会启动防滑功能,自动减小轮速较低一侧机轮的刹车压力,防止机轮抱死。当飞机需要解除刹车时,系统控制电磁阀关闭,切断液压进油,同时控制刹车管路与回油管路接通,泄掉机轮刹车装置内的压力。

### 2.2 电液伺服阀

电液伺服阀是飞机刹车系统的关键部件,它根据接收到的刹车控制器的控制指令(电压信号),向机轮刹车装置输出相对应的刹车压力。某电液伺服阀结构如图2所示<sup>[19]</sup>,主要由壳体、力矩马达、挡板、喷嘴、阀芯和弹簧组成。当无刹车控制器电信号时,挡板处于中立位置,通过阀芯左右端的压力相等,在弹簧力作用下,阀芯处于右极限位置,此时电液伺服阀输出的刹车压力与输入压力相等;当需要减小刹车压力时,刹车控制器输出电信号至力矩马达,驱动挡板偏转,使右喷嘴阻力增大,阀芯右端压力变大,使阀芯克服弹簧力向左运动,减少刹车管路供油量,达到降低刹车压力的目的。

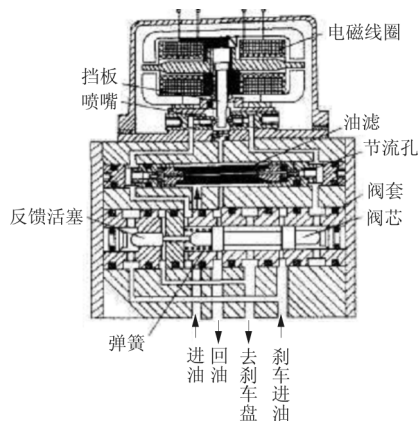


图 2 某电液伺服阀结构图

Fig. 2 Structure diagram of an electro-hydraulic servo valve

电液伺服阀虽然型号众多,但工作原理基本相同,其内部结构通常比较复杂,喷嘴与挡板、阀芯与衬筒配合间隙普遍较小,易受液压油液污染影响,因而对液压油液清洁度要求较高。电液伺服阀工作中常见故障如表 1 所示,故障可能导致飞机出现偏航、刹车距离变长或主机轮拖胎爆破的事故,严重影响飞行安全。由于电液伺服阀结构复杂,故障模式较多,且目前定期清洗的维修方式不能有效预防故障的发生,对飞机刹车系统电液伺服阀进行早期故障征兆诊断显得颇为重要和紧迫。

表 1 电液伺服阀常见故障及影响  
Table 1 Common faults and influence of electro-hydraulic servo valve

序号	故障现象	对飞机影响
1	输出刹车压力偏大	拖胎、一侧偏航
2	输出刹车压力偏小	刹车距离长、一侧偏航
3	输出刹车压力波动大	左右偏航

### 3 回归分析法

回归分析法作为统计学中一个重要的分支,是应用极为广泛的数据分析方法之一,它基于观测数据建立两种或两种以上变量(自变量和因变量)之间相互依赖的定量关系,以分析数据的内在规律。按照自变量的多少,可分为一元回归分析和多元回归分析;按照自变量和因变量之间的关系类型,可分为线性回归分析和非线性回归分析。厉广广等<sup>[20]</sup>通过回归分析法对隧道继续开挖的二衬时机

进行了准确的预测;Wang Yongpei 等<sup>[21]</sup>通过建立回归模型确立了非化石燃料发电份额增加量与减少电力相关的二氧化碳排放量之间的关系。本文借助一元线性回归分析方法对隐藏在电液伺服阀工作数据中的故障征兆进行检测,一元线性回归分析方法如下。

#### 3.1 构建模型

根据已有的统计数据,选择合适的因变量和自变量,建立一元线性回归模型:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (1)$$

式中: $y$  为因变量; $x$  为自变量; $\epsilon$  为随机误差项; $\beta_0$  为常数项; $\beta_1$  为回归系数。

模型由非随机部分  $\beta_0 + \beta_1 x$  和随机部分  $\epsilon$  组成。 $\epsilon$  反映了除  $x$  和  $y$  线性关系之外的随机因素对  $y$  的影响,它是无法由  $x$  和  $y$  线性关系解释的非趋势性随机变量。

#### 3.2 建立回归方程

假定回归模型中随机误差项  $\epsilon$  是期望值为 0 ( $E(\epsilon) = 0$ ) 的随机变量,服从正态分布,那么对于一个给定的  $x$  值, $y$  的期望值为

$$E(y) = \beta_0 + \beta_1 x \quad (2)$$

由于总体回归参数  $\beta_0$  和  $\beta_1$  是未知的,需用样本数据进行估计。对于一个选定的样本,用样本统计量  $\hat{\beta}_0$  和  $\hat{\beta}_1$  代替模型中的回归参数  $\beta_0$  和  $\beta_1$ ,得到一元线性回归中估计的回归方程:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x \quad (3)$$

对于一个容量为  $n$  的样本,用最小二乘估计法估计  $\hat{\beta}_0$  和  $\hat{\beta}_1$ ,可使数据的观察值与通过回归方程求得的估计值的残差总和为 0,且残差平方和最小。用最小二乘估计法估计得到的  $\hat{\beta}_0$  和  $\hat{\beta}_1$  值为

$$\begin{cases} \hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \\ \hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \end{cases} \quad (4)$$

$\hat{\beta}_0$  和  $\hat{\beta}_1$  已知后,即可得到一元线性回归方程。

#### 3.3 回归方程检验

一元线性回归方程检验主要包括拟合优度检



验和显著性检验。

拟合优度是指回归直线对观察值的拟合程度。度量拟合优度的统计量是可决系数  $R^2$ ,  $R^2$  的值越接近 1, 说明回归直线对观测值的拟合程度越好, 反之拟合程度越差。可决系数  $R^2$  的计算公式为

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

显著性检验是对原假设  $H_0$  作出否定或不否定的推断, 假设检验的基本思想是采用某种带有概率性质的反证法<sup>[22]</sup>。回归方程显著性检验包括  $F$  检验法、 $t$  检验法和相关系数 ( $r$ ) 检验法。本文选取  $F$  检验法进行介绍, 对于容量为  $n$  的样本, 设定显著水平为  $\alpha$ ,  $S_R^2$  和  $S_E^2$  分别表示样本的回归平方和、残差平方和, 回归平方和是指因变量回归值与因变量平均值的离差平方和, 残差平方和是指因变量与因变量回归值差值的平方和。检验假设:

$$\begin{cases} H_0 : \hat{\beta}_1 = 0 \\ H_1 : \hat{\beta}_1 \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

原假设  $H_0$  的拒绝域为

$$\frac{(n-2)S_R^2}{S_E^2} > F_{1-\alpha}(1, n-2) \quad (7)$$

若拒绝  $H_0$ , 表示回归方程中自变量与因变量的线性关系显著, 反之则二者不存在线性关系。

### 3.4 回归方程式的预测

利用估计的一元线性回归方程, 对于自变量  $x$  的一个给定的值  $x_0$ , 可求出对应的因变量  $y$  的一个个别值  $y_0$  的估计区间, 即预测区间。假定样本容量为  $n$ , 置信水平为  $1-\alpha$ , 则个别值  $y_0$  的预测区间上下限为

上下限 =

$$\hat{y}_0 \pm t_{\alpha/2}(n-2) \times \delta \times \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (8)$$

其中,

$$\delta = \sqrt{\frac{S_E^2}{(n-2)}} \quad (9)$$

确定  $y_0$  的预测区间后, 即可结合工程知识对给定的数据进行故障征兆诊断。

## 4 电液伺服阀早期故障征兆诊断

电液伺服阀根据来自刹车控制器的刹车控制指令(电压信号)向机轮刹车装置输出相对应的刹车压力, 刹车压力是刹车系统最重要的工作指标。因此, 一旦电液伺服阀出现故障, 会严重影响飞机的着陆安全。借助一元线性回归分析法建立电液伺服阀输入电压与输出刹车压力两个变量之间的关系, 确定刹车压力值的预测区间; 根据预测区间和故障征兆判据对电液伺服阀每次的工作数据进行故障征兆诊断, 对发现的故障征兆及时排除, 达到降低电液伺服阀故障率的目的。

### 4.1 样本确定

从电液伺服阀在飞机滑跑阶段的历史工作数据库中抽取 54 个数据作为样本数据, 如表 2 所示。

表 2 样本数据

Table 2 Sample data

序号	电压/V	刹车压力/MPa	序号	电压/V	刹车压力/MPa
1	0.06	1.702	28	0.37	3.093
2	0.07	1.836	29	0.38	3.048
3	0.09	1.971	30	0.39	3.721
4	0.10	2.106	31	0.47	3.542
5	0.12	2.734	32	0.48	3.856
6	0.13	1.926	33	0.49	3.901
7	0.14	1.881	34	0.56	5.068
8	0.15	2.240	35	0.59	4.080
9	0.16	2.150	36	0.60	3.856
10	0.17	1.971	37	0.63	4.484
11	0.19	2.150	38	0.69	4.439
12	0.20	2.420	39	0.71	4.394
13	0.21	2.465	40	0.76	5.561
14	0.22	2.330	41	0.77	5.382
15	0.23	2.240	42	0.84	4.798
16	0.24	2.522	43	0.86	5.561
17	0.25	2.734	44	0.87	6.549
18	0.26	2.734	45	0.88	6.683
19	0.27	2.958	46	0.90	6.593
20	0.28	3.138	47	0.91	6.459
21	0.29	3.228	48	0.93	6.638
22	0.30	3.183	49	0.98	6.908
23	0.31	3.138	50	0.99	6.638
24	0.32	3.631	51	1.03	7.671
25	0.33	3.452	52	1.19	7.356
26	0.34	3.452	53	1.27	7.626
27	0.35	3.093	54	1.28	8.566

### 4.2 一元线性回归分析

根据抽取的样本数据绘制散点图,如图 3 所示,可以看出:电液伺服阀输入的电压值与输出的刹车压力值之间基本呈线性关系。

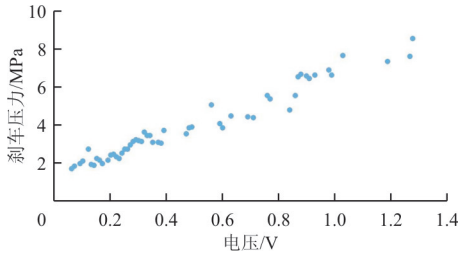


图 3 样本散点图  
Fig. 3 Sample scatter

下,说明滑跑阶段飞机普遍使用较小的刹车压力(多与飞机使用减速伞有关);4 MPa 以下的刹车压力值比较集中,说明电液伺服阀在低输入电压下的输出比较稳定,同时与回归直线的拟合程度较高。

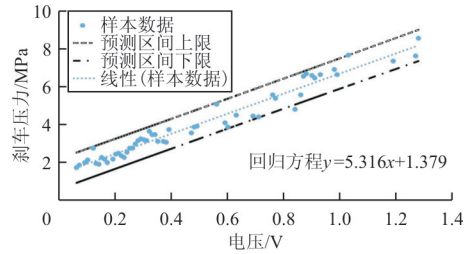


图 4 刹车压力值  $y_0$  的预测区间  
Fig. 4 Prediction range of brake pressure value  $y_0$

#### 4.2.1 建立一元线性回归方程

设电液伺服阀输入电压与输出刹车压力的一元线性回归方程为

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x \quad (10)$$

输入电压为自变量,输出刹车压力为因变量。

根据最小二乘估计法可求得  $\hat{\beta}_0 \approx 1.379, \hat{\beta}_1 \approx 5.316$ ,因此所求的一元线性回归方程为

$$\hat{y} = 1.379 + 5.316x \quad (11)$$

进行拟合优度检查,计算得到

$$R^2 = 0.956x \quad (12)$$

说明回归直线对观察值的拟合效果较好。

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%,求得原假设  $H_0$  的拒绝域:

$$\begin{cases} \frac{(n-2)S_R^2}{S_E^2} = 1141.333 \\ F_{1-\alpha}(1, n-2) = 4.027 \end{cases}$$

即,

$$\frac{(n-2)S_R^2}{S_E^2} > F_{1-\alpha}(1, n-2)$$

$H_0$  的拒绝域成立,拒绝  $H_0$ ,说明电液伺服阀输入电压与输出刹车压力之间的线性关系显著。

#### 4.2.2 一元线性回归方程式的预测

设定置信水平为 95%,根据计算得到的一元线性回归方程,对于任一电压值  $x_0$ ,可计算得到回归方程  $y$  的个别值  $x_0$ (刹车压力值)在 95%置信水平下的预测区间,如图 4 所示,可以看出:样本中电液伺服阀输出的刹车压力值多分布在 5 MPa 以

### 4.3 故障征兆诊断

#### 4.3.1 诊断流程

故障征兆隐藏在大量实际飞行数据中,需要经过一定的获取技术去挖掘、判断,飞行数据是获取故障征兆的重要信息源<sup>[23]</sup>。基于一元线性回归分析法的电液伺服阀早期故障征兆诊断流程如图 5 所示,通过借助回归分析法从飞行数据中挖掘电液伺服阀故障征兆并进行诊断,达到消除电液伺服阀潜在故障隐患的目的。

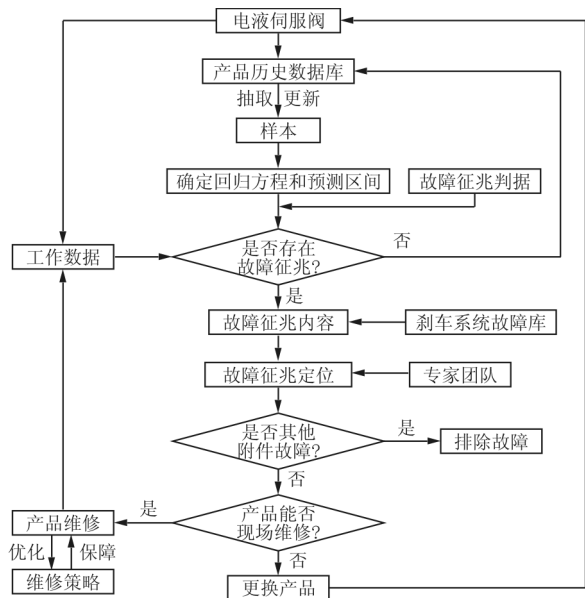


图 5 电液伺服阀早期故障征兆诊断流程  
Fig. 5 Early fault symptom diagnosis process of electro-hydraulic servo valve

故障征兆诊断包含故障征兆检测和故障征兆隔离。故障征兆检测的目的是判断电液伺服阀是否存在故障征兆。首先在电液伺服阀历史数据库中抽取一定容量的样本,建立输入电压值与输出刹车压力之间的回归方程,并确定回归方程中刹车压力值的预测区间;然后结合预测区间与故障征兆判据对电液伺服阀近期的工作数据进行分析判断。若判断结果显示无故障征兆,则将工作数据放入产品历史数据库中,并在更新样本和适当扩大样本容量后结束流程;若发现故障征兆,则通过刹车系统故障库确定故障征兆内容,并对故障征兆进行隔离。

故障征兆隔离的目的是把发现的故障征兆定位到实施修理时可更换的产品层次。有些故障征兆机理比较复杂,隔离时可能涉及到其他系统或附件,需要依赖专家团队的现场或远程支持来完成故障征兆隔离,故障征兆隔离后,应尽可能采用基层级维修方式实施修理。对于频繁诱发故障征兆的产品元器件,应进行健康管理和剩余使用寿命预测研究,优化维修策略,降低故障率。Hong Sheng 等<sup>[24]</sup>通过建立不同退化阶段的轴承模型,实现了不同状态下轴承的健康趋势分析和剩余使用寿命预测,对实际工业系统的应用具有一定的指导意义。

#### 4.3.2 诊断实例

##### (1) 故障征兆检测

通过表 2 中的样本数据确定电液伺服阀的电压与刹车压力之间的一元线性回归方程及刹车压力的预测区间(设定置信水平为 95%)。故障征兆检测时,近似认定预测区间为电液伺服阀在任一确定输入电压值下输出的刹车压力应正常分布的范围,同时根据工程经验对该范围进行修正,修正后的预测区间可用于对刹车压力数据进行故障征兆检测。故障征兆判据用于对检测结果进行判断,给出是否存在故障征兆的结论。

假定共有  $n$  个待诊断的刹车压力数据,其中在预测区间上限外分布有  $a$  个,在预测区间下限外分布有  $b$  个。设定故障征兆判据为:

若  $(a+b)/n > 15\%$ , 认为电液伺服阀存在故障征兆。其中:

①若  $a/(a+b) > 80\%$ , 对应故障征兆为“刹车压力偏大”;

②若  $b/(a+b) > 80\%$ , 对应故障征兆为“刹车压力偏小”;

③不满足上述两个条件时,对应故障征兆为“刹车压力波动大”。

取一组曾导致飞机主机轮拖胎爆破的某电液伺服阀故障前的有效工作数据放入预测区间图表中,进行故障征兆检测,如图 6 所示。

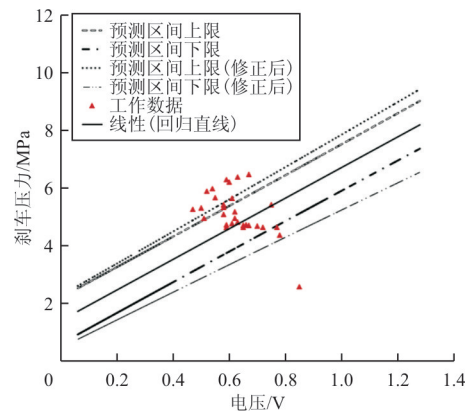


图 6 电液伺服阀故障征兆检测图

Fig. 6 Fault symptom detection diagram of electro-hydraulic servo valve

从图 6 可以看出:电液伺服阀输出的刹车压力值共有 30 个,绝大部分位于 4~7 MPa 范围内,根据经验判断,飞机此次使用的刹车压力较平常偏大;30 个刹车压力值中有 10 个刹车压力值分布在修正后的预测区间外部,占比为 33.3%,依照故障征兆判据判断电液伺服阀存在故障征兆;预测区间外的 10 个刹车压力值中,预测区间上限外和下限外的占比分别为 90%和 10%,可以确定故障征兆为“刹车压力偏大”。电液伺服阀存在输出比控制指令偏大刹车压力的故障隐患,尤其在飞机使用大压力刹车时,电液伺服阀输出过高的刹车压力可能导致飞机在着陆过程中出现拖胎爆破和偏离跑道的事故。事实上,该电液伺服阀随后便导致飞机在着陆滑跑过程中出现了一起单侧主机轮短时拖胎爆破的事故,表明采用回归分析法对电液伺服阀的故障征兆检测是准确的,故障征兆判据是合理的。

##### (2) 故障征兆隔离

为了防止电液伺服阀在后续使用中“刹车压力偏大”的故障,对检测到的故障征兆进行隔离是非常必要的。根据专家经验判断,引起电液伺服阀出现“刹车压力偏大”故障征兆的原因可能是线

缆屏蔽破损,受外界干扰导致传输异常、刹车压力信号器故障和电液伺服阀故障。根据故障原因,建

立故障征兆隔离流程如图 7 所示。

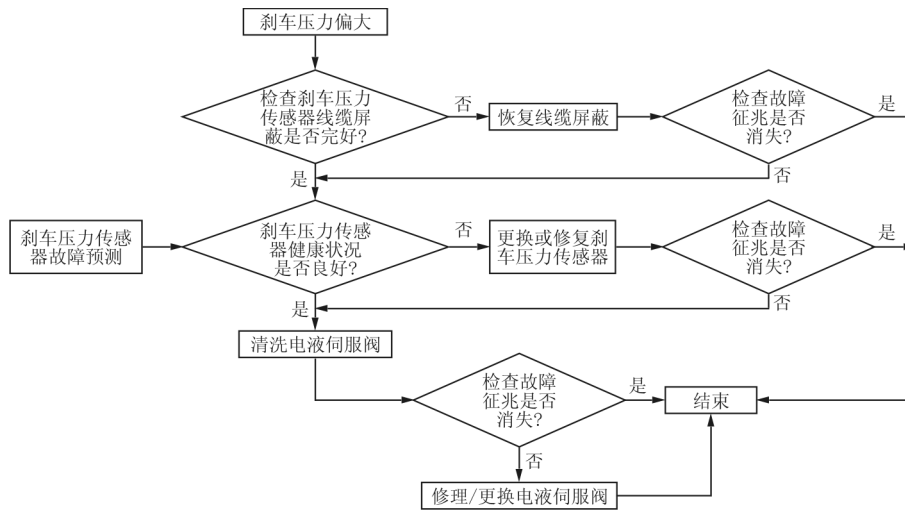


图 7 “刹车压力偏大”故障征兆隔离流程

Fig. 7 Isolation process of “excessive brake pressure” fault symptoms

通过一系列检查,排除了线缆和刹车压力信号器故障的可能性,同时发现电液伺服阀内部存在污染物。污染物多来自于液压系统内部附件运动、摩擦产生的金属屑和拆卸附件时外部侵入的异物,是液压刹车伺服系统控制失灵和引起故障的主要原因<sup>[25]</sup>。因此将故障征兆隔离到电液伺服阀上,采取处理措施后,电液伺服阀故障征兆诊断流程结束。

## 5 结 论

(1) 通过回归分析法建立的电液伺服阀输出刹车压力值的预测区间经工程修正后,可以有效地检测出电液伺服阀工作数据中隐藏的故障征兆。

(2) 故障征兆的检测、隔离和排除,可以有效降低电液伺服阀的故障发生率,提高飞机刹车系统的可靠性。

(3) 基于回归分析的故障诊断方法侧重于从产品工作数据中检测潜在的故障隐患,做到了故障的提前发现和排除,弥补了现阶段飞机故障诊断系统的不足,该方法还可用于压力传感器、油位传感器、燃油泵等机载设备的故障征兆诊断,具有一定的应用前景。

## 参考文献

[1] 刘忠平, 韩亚国, 李文革, 等. 飞机防滑刹车系统最佳刹车

压力研究[J]. 测控技术, 2018, 37(s1): 299-300.

LIU Zhongping, HAN Yaguo, LI Wenge, et al. Study on the optimum brake pressure of aircraft antiskid arake system[J]. Measurement and Control Technology, 2018, 37(s1): 299-300. (in Chinese)

[2] 臧大进, 曹云峰. 故障诊断技术的研究现状及展望[J]. 矿山机械, 2010, 38(18): 9-13.

ZANG Dajin, CAO Yunfeng. Present study situation and prospect of fault diagnosis technology[J]. Mining Machinery, 2010, 38(18): 9-13. (in Chinese)

[3] 王晓龙. 基于振动信号处理的滚动轴承故障诊断方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.

WANG Xiaolong. Research on fault diagnosis method of rolling bearing based on vibration signal processing[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017. (in Chinese)

[4] 魏志超. 飞机起落架系统故障诊断仿真分析[J]. 工程技术研究, 2018, 15(7): 162-163.

WEI Zhichao. Simulation analysis of fault diagnosis of aircraft landing gear system[J]. Engineering Technology Research, 2018, 15(7): 162-163. (in Chinese)

[5] 王自强, 江亮亮. 基于模型的故障诊断在飞机电源系统中的应用[J]. 飞机设计, 2014, 34(5): 20-24.

WANG Ziqiang, JIANG Liangliang. Application of model-based fault diagnosis in aircraft power system[J]. Aircraft Design, 2014, 34(5): 20-24. (in Chinese)

[6] 韦世林. 某型通航飞机液压系统故障诊断仿真研究[J]. 西安航空学院学报, 2018, 36(3): 31-35.

WEI Shilin. On fault diagnosis simulation of a general aircraft's hydraulic system[J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2018, 36(3): 31-35. (in Chinese)



- [7] ESCOBET T, FERROIDI D, LIRA D S, et al. Model-based fault diagnosis in PEM fuel cell systems[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 192(1): 216-223.
- [8] 许明轩. 飞机航电系统故障分析方法与故障诊断技术研究[J]. *中国设备工程*, 2018(14): 96-97.  
XU Mingxuan. Research on fault analysis method and fault diagnosis technology of aircraft avionics system[J]. *China Equipment Engineering*, 2018(14): 96-97. (in Chinese)
- [9] 金吉. 基于专家系统的无人机故障诊断系统研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018.  
JIN Ji. Study on fault diagnosis system of unmanned aerial vehicles based on expert system[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [10] 刘平华. 飞机发动机故障诊断专家系统研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2017.  
LIU Pinghua. Research on fault diagnosis expert system of aircraft engine accessory[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [11] CAO Junbin, GUO Ermin, LI Yan. Design of fault diagnosis expert system for certain type of aircraft electrical power [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 466/467: 1186-1190.
- [12] 王雪飞, 李青, 冯力. 基于模型和故障树的飞机故障诊断方法[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(20): 308-313.  
WANG Xuefei, LI Qing, FENG Li. Aircraft fault diagnosis method based on model and fault tree[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(20): 308-313. (in Chinese)
- [13] 王立纲. Cessna525 飞机刹车系统典型故障分析[J]. *西安航空学院学报*, 2018, 36(3): 20-24.  
WANG Ligang. Typical failure analysis of brake system of Cessna525 airplane [J]. *Journal of Xi'an Aeronautical University*, 2018, 36(3): 20-24. (in Chinese)
- [14] ZHAO Ningning, WANG Yiqian. A fault tree analysis of a typical lightning strike on aircraft[C]// *First International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*. Wuhan: ASCE, 2011: 2024-2031.
- [15] ZERROUKI H, SMADI H. Reliability and safety analysis using fault tree and Bayesian networks[J]. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*, 2019, 11(1): 73-86.
- [16] 赵庆海, 赵玮, 石玉霞. 现代故障诊断技术研究现状与趋势[J]. *包装工程*, 2018, 39(15): 11-17.  
ZHAO Qinghai, ZHAO Wei, SHI Yuxia. Present situation and trend of modern fault diagnosis technology[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(15): 11-17. (in Chinese)
- [17] 洪晟, 陶文辉, 路君里, 等. 基于综合 PHM 方法的导弹维修保障综述[J]. *计算机测量与控制*, 2012, 20(4): 862.  
HONG Sheng, TAO Wenhui, LU Junli, et al. Maintenance supportability of the missile weapon systems based on rognostic and health management[J]. *Computer Measure-*
- ment and Control, 2012, 20(4): 862. (in Chinese)
- [18] 张书乾, 邓召文. 汽车故障诊断技术研究现状及发展趋势研究[J]. *汽车实用技术*, 2018(22): 260.  
ZHANG Shuqian, DENG Zhaowen. Review of the vehicle fault diagnosis technology research state and development trend[J]. *Automobile Applied Technology*, 2018(22): 260. (in Chinese)
- [19] 吝渭阳. 飞机刹车系统常见故障和维修技术[D]. 汉中: 陕西航空职业技术学院, 2012.  
LIN Weiyang. Common faults and maintenance technology of aircraft brake system[D]. Hanzhong: Shaanxi Aviation Professional Technical Institute, 2012. (in Chinese)
- [20] 厉广广, 孙飞, 尹文静. 基于回归分析法隧道二衬时机的预判研究[J]. *内蒙古公路与运输*, 2016(5): 10-12.  
LI Guangguang, SUN Fei, YIN Wenjing. Study on the pre-judgment of the secondary lining time of tunnel based on regression analysis[J]. *Highway and Transportation in Inner Mongolia*, 2016(5): 10-12. (in Chinese)
- [21] WANG Yongpei, ZHANG Qian, LI Chenhua. The contribution of non-fossil power generation to reduction of electricity-related CO<sub>2</sub> emissions: a panel quintile regression analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 207(8): 531-541.
- [22] 张宇. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2017: 183.  
ZHANG Yu. Probability theory and mathematical statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2017: 183. (in Chinese)
- [23] 郎荣玲, 潘磊, 吕永乐. 基于飞行数据的民航飞机故障诊断专家系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 36.  
LANG Rongling, PAN Lei, LÜ Yongle. Fault diagnosis expert system for civil aviation based on flight data[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 36. (in Chinese)
- [24] HONG Sheng, ZHOU Zheng, ZIO E, et al. An adaptive method for health trend prediction of rotating bearings[J]. *Digital Signal Processing*, 2014, 35: 117-123.
- [25] 祁功道. 某型飞机刹车压力伺服阀油液污染及控制[J]. *机床与液压*, 2012, 40(8): 103-104.  
QI Gongdao. Oil pollution and control for elect-hydraulic servo valve in an aeroplane brake system[J]. *Machine Tool and Hydraulics*, 2012, 40(8): 103-104. (in Chinese)

#### 作者简介:

靳国涛(1984—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机故障诊断、综合诊断技术。

(编辑:马文静)