飞机起落架液压收放系统多故障仿真与健康评估

和麟[1]，梁丽媛[2]，马存宝[1]

（1.西北工业大学 航空学院，陕西 西安　710072；2.西安飞豹科技发展公司 仿真部，陕西 阎良　710089）

摘　要：起落架不能正常收放严重威胁飞行安全，迫切需要掌握其健康状态以便提前预防故障发生。以典型支线客机的起落架收放系统为研究对象，探索了对不同故障模式下的健康程度进行评估的方法。利用 AMESim 软件建立了该系统的仿真模型，研究液压回路中元件参数性能变化对系统工作性能的影响。选取系统输出参数，提取故障特征，利用神经网络算法实现了系统的健康评估。结论表明该方法是可行的，为新一代飞机起落架液压收放系统的健康评估提供了思路。

关　键　词：飞机液压系统；起落架收放；故障模式；AMESim 仿真；健康评估；神经网络
中图分类号：TP3　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-2758(2016)06-0990-06

起落架液压收放系统是对安全要求最高的飞机系统之一，其工作是否正常直接影响飞机正常起降和乘客生命安全，近年来，飞机起落架不能正常收放的事故屡见报端。飞机系统健康管理是近年来的研究热点，通过对设备进行状态监控、故障诊断以及预测等工作，能够将传统的定期维修转变为视情维修，提前预防故障的发生[1-2]。健康评估是健康管理系统中重要的组成部分。一直以来，飞机发动机等系统的健康管理受到更多重视[1-3]，近年来人们也开始研究飞机液压、起落架系统甚至机载设备的健康管理[4-10]。波音公司已经将起落架收放系统健康管理进行了应用，但其采用的方法没有文献可以参考。国内目前的研究工作主要针对起落架收放过程及故障的仿真，其主要目的是用于指导系统的设计工作[11-16]，在健康管理方面开展的研究还很少。起落架液压收放系统元件性能参数的退化可能会引起系统工作性能恶化，严重时会造成收放工作不能完成，因此，有必要对其开展健康评估工作。

起落架、液压等系统都是具有分布参数的复杂非线性系统，影响系统工作特性的因素较多，故障模式多样，仿真分析是比较理想的一种分析方法。AMESim 是基于键合图的液压、机械系统建模、仿真及动力学分析软件，波音、空客等在系统设计研发中都不同程度地使用了该软件[15-17]。本文利用该软件进行起落架液压收放系统建模仿真，分析了影响起落架收放的因素，并给出了不同部件在不同故障下对系统输出参数的影响，然后对该系统进行了健康评估。

1　起落架液压收放系统仿真建模

1.1　系统原理模型

起落架收放系统的基本结构如图 1 所示。

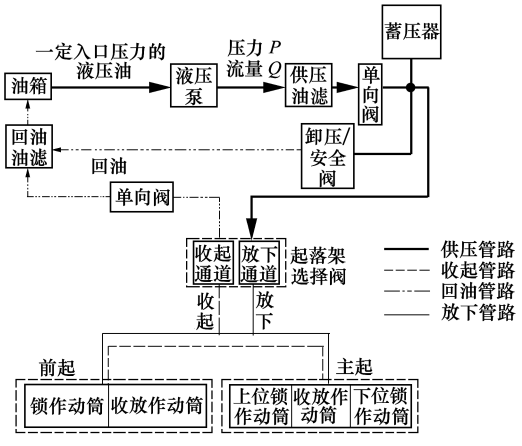


图 1　起落架液压收放系统基本原理

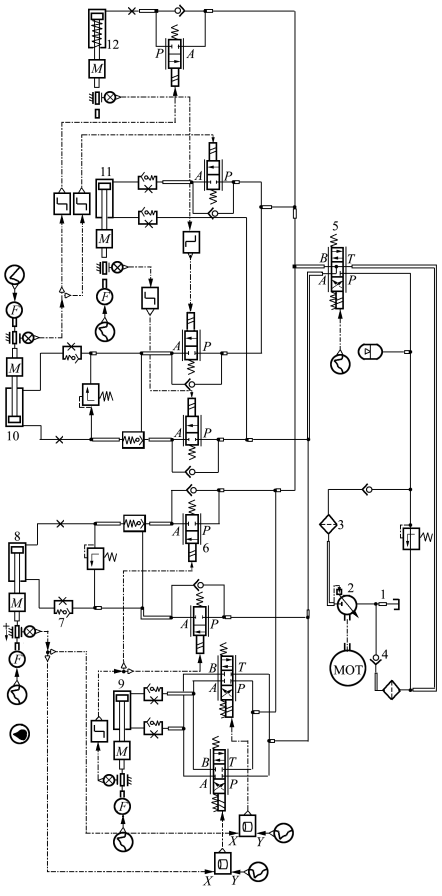
液压源部分包括液压泵、油箱、油滤组件及蓄压

收稿日期：2016-04-20　　**基金项目**：国家自然科学基金(51475368)与国家重点基础研究发展计划(2014CB744902)资助
作者简介：和麟(1973—)，女，西北工业大学副教授，主要从事航电系统仿真、故障诊断与健康管理、系统测试性/安全性研究。

器等。液压泵将电动机或发动机输出的机械能转变为液压能,为起落架收放系统提供一定的压力和流量,并维持系统出口压力稳定;油液流经液压油滤、单向阀、蓄压器及卸压安全阀流向起落架选择阀,通过选择阀的收起或放下通道流向起落架收放系统的收起或放下回路,驱动收放系统中各个锁作动筒及收放作动筒运动,完成起落架的收放动作。

1.2　仿真模型

仿真的主要步骤为:在草图模式下搭建系统的结构模型,在子模型模式下给每个元件分配合适的数学模型,在参数模式下为每个子模型设置参数,最后运行仿真。根据对起落架收放系统工作原理的分析,建模时需要重点考虑的是起落架收放系统的顺序动作实现、前起锁作动筒的顺序动作实现,以及作动筒速度的调节,以实现在规定时间内收放到位。所建立的模型如图 2 所示。



(1.油箱 2.液压泵 3.液压油滤 4.单向阀 5.电磁换向阀 6.电磁阀和单向阀的组合 7.单向节流阀 8.前起收放作动筒 9.前起锁作动筒 10.主起收放作动筒 11.主起下位锁作动筒 12.主起上位锁作动筒)

图 2　起落架收放系统液压回路模型

模型初步搭建后,给每个元件分配合适的子模型,并根据典型支线客机的系统参数对各元件的参数进行设置。例如,作动筒为双腔单杆液压缸模型,参数包括作动筒的活塞直径/行程、活塞杆直径、运动部件等效质量;电磁换向阀为 3 位四通电液比例阀,参数有自然频率、阻尼率、通道流量/压降,等等。

模型参数设置好之后,结合某型飞机起落架收放系统的收放所需时间,设计起落架收起时间为 8 s,放下时间为 10 s。该时间设置可以通过调节节流阀开口量的大小对起落架收放作动筒的运动速度进行调节来实现。仿真得到的起落架收放作动筒和锁作动筒的位移曲线如图 3 所示,从中可以看出起落架收起和放下符合设计要求。

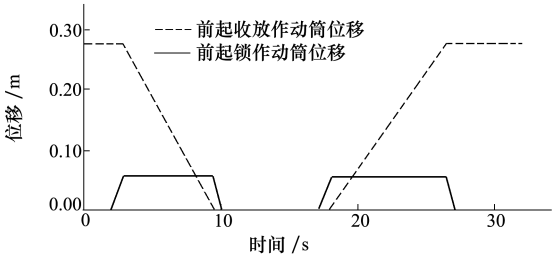


图 3　前起落架收放及锁作动筒位移变化

2　系统多故障模式仿真结果

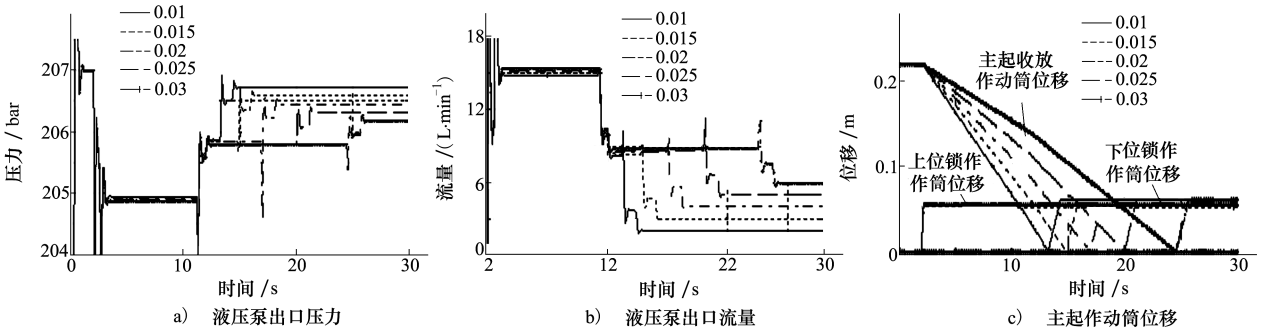
2.1　健康性能影响仿真结果与分析

健康性能影响因素分析是实现健康状态监测和评估的基础。元件性能参数的退化可能会引起系统工作性能恶化,严重时会造成收放工作不能完成。下面,我们利用系统的仿真模型,研究元件性能参数变化对系统工作特性的影响,就可以通过对关键的状态参数进行监测来评估其健康情况。

根据故障模式及影响分析(failure mode and effect analysis,FMEA)可知[17],该系统易发生电磁换向阀开口量不足、作动筒泄漏、液压泵泄漏等问题。系统液压回路主要动态参数中反映系统健康状态信息最多的是压力、流量和时间 3 个参数。作者仿真了不同故障模式下这几个参数的变化情况。限于篇幅,我们仅以作动筒发生不同程度内泄漏为例给出仿真结果。

作动筒发生内泄漏时,一部分液压油会从作动筒的进油腔进入回油腔,使得液压泵出口压力减小。为了补充泄漏引起的流量损失,液压泵出口处的流

量会增大。泄漏导致活塞杆运动速度减慢,使得活塞杆缩进到位所需的时间延长,即主起落架放下过程所需的时间增加。随着内泄漏程度的不断增大(泄漏系数从 0.01 变化到 0.03 L/min/bar),参数的减小或增大越明显。



a) 液压泵出口压力 b) 液压泵出口流量 c) 主起作动筒位移

图 4 作动筒不同程度泄漏时输出参数变化曲线

通过全部仿真结果分析可得,当发生电磁换向阀开口量不足、作动筒泄漏、液压泵部件功能降级等问题时,压力、流量和起落架运动到位所需时间均会有明显的单调变化。

2.2 特征参数提取

从仿真结果可以看出,利用 AMESim 建模仿真得到的信号都是时域信号,这些信号能够直观反映系统的状态,因此我们将直接提取相应的统计特征作为后续诊断模型的输入。我们以液压泵动态工作过程和稳定状态时泵的出口压力平均值、压力的峭度值、起落架放下过程中泵出口流量的均值和起落架放下时间为健康特征,将这其作为输入量,并采用如下的归一化映射:

$$y = (y_{\max} - y_{\min}) \times \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \times y_{\min} \qquad (1)$$

式中,$x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 是原始数据的最小值和最大值,$y_{\min}$ 和 $y_{\max}$ 是映射的范围参数,分别为 - 1 和 1。

我们将每种故障类别对应的健康程度分为健康、轻微故障、中等故障和严重故障四级。故障类型为选择阀开口不足故障、作动筒内漏故障和液压泵内漏。在此基础上进行健康评估。

3 多故障健康评估

一般的健康评估是指判断退化过程中的所处的健康降级程度,本文的健康评估还包括判断引起健康水平降级的故障模式。这实际上是一个分类问题,但需要同时考虑系统的故障模式以及故障程度。现有的健康评估方法主要有模型法、层次分析法、模糊评判法、贝叶斯网络法,这些方法存在建模过程复杂、主观影响大等问题[18]。而神经网络具有非线性映射关系及较强的分类性能,在已有的历史对应关系的训练下,可记忆系统的分类特性,本文即采用该方法。

3.1 算法模型及参数设置

典型的向前型神经网络具有 1 个输入层、数个隐含层和 1 个输出层,层与层之间采用全连接的方式,同一层的神经元之间不存在相互连接。理论上已经证明[19],具有 1 个隐含层的 3 层网络可以逼近任意非线性函数,因此 3 层网络的应用最为普遍[18-19],如图 5 所示。

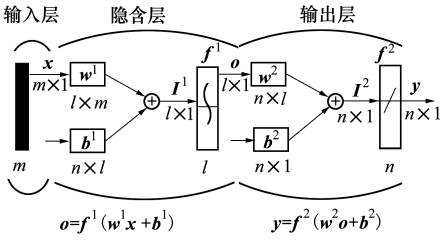


图 5 神经网络结构图

模型输入信号为 $\boldsymbol{x}$,$\boldsymbol{x} = [x_1, x_2, \cdots x_m]^{\mathrm{T}}$;输出信号为 $\boldsymbol{y}$,$\boldsymbol{y} = [y_1, y_2, \cdots y_n]^{\mathrm{T}}$;隐含层共有 l 个节点,其中第 i 个节点的信号为:

$$I_i^1 = \sum_{j=1}^{m} w_{ij} x_j - b_i^1 \qquad (2)$$

式中,w_{ij} 为权值 $\boldsymbol{w}^1$ 中位于第 i 行第 j 列的元素,表示输入层第 i 个节点与隐含层第 j 个节点间的连接权值;$\boldsymbol{b}^1$ 为阈值,b_i^1 为其中第 i 个元素,表示第 j 个节点的阈值。隐含层第 i 个节点的输出为:

$$o_i = f^1(I_i^1) \tag{3}$$

式中,f^1 为隐含层的激励函数。输出层的关系与隐含层相似,权值、激励函数和阈值分别为 $\boldsymbol{w}^2$ f^2 和 $\boldsymbol{b}^2$。网路初始权值设定后,就可以得到网络输出,比较该输出与期望输出,将误差信号反向传播用于调整各层神经元的连接权值,使误差达到精度要求。权值的更新一般采用基于梯度下降的算法:

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}(k) \tag{4}$$

式中,η 为学习速率或步长,E 表示误差,通常用网络实际输出与期望输出之间误差平方和的平均值即均方误差来计算:

$$E_{\text{mse}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(e_i^2) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - q_i)^2 \tag{5}$$

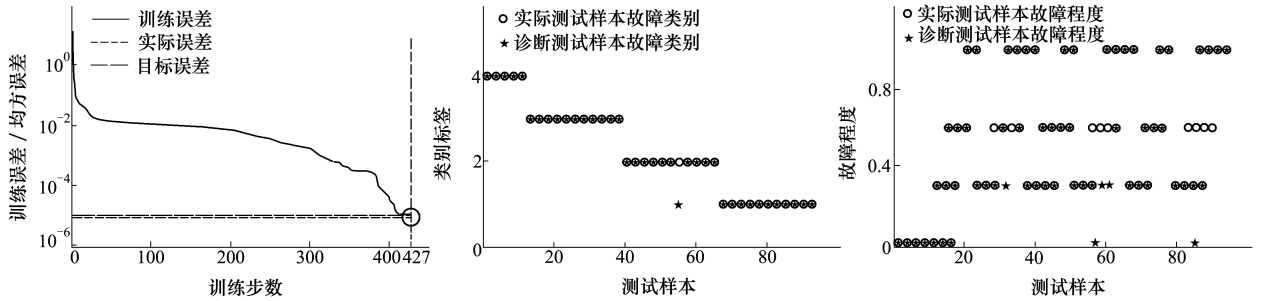
式中,y_i 表示实际输出,q_i 表示期望输出。

隐含层节点数 $l = 2m + a$,a 为 0 ~ 8 之间的调节常数,因此隐含层的数目可以有几种不同取值。网络的隐含层神经元激励函数采用 tansig 型,输出层的激励函数采用 purelin 型,学习训练采用 Levenberg-Marquardt 算法,期望误差值选为 1×10^{-5},学习速率设定为 0.4,网络的最大迭代次数为 2 000次。

为了将故障模式和故障程度同时划分,将特征向量对应的故障模式和健康程度表示为二维矢量,则网络的输出层神经元个数为 2。每种故障模式的每种健康程度分别有 20 组数据作为训练样本,共有 200 组数据构成网络的训练样本。采集系统处于 3 种故障模式时的状态数据各 27 组,和正常状态时的 12 组数据,共 93 组数据作为测试样本。

3.2　健康评估结果

在不同隐含层节点数下分别对对网络进行训练,然后将测试样本输入其中进行健康评估。图 6 为隐含层节点为 17 时网络的训练误差曲线和健康评估结果。



a)　网络训练误差曲线　　b)　故障类别诊断结果　　c)　故障程度评估结果

图 6　健康评估结果

经过迭代后网络的最终训练误差为 8.15×10^{-6},满足误差要求,而且分类效果也比较好。我们分别计算不同隐含层节点数下的故障类别和故障程度的诊断正确率,结果如表 1 所示。

可以看到,隐含层节点数目的取值对故障识别正确率有较大的影响,隐含层节点数为 17 时最佳,对故障类别的诊断正确率达到了最高,但故障程度评估正确率略低。以上结果说明该方法能够对健康进行比较好的分类,诊断出故障类别并评估出故障程度,即采用该方法对系统进行健康评估是可行的,而且故障特征选取也是合理的。由图 4 的参数变化曲线也可以看到,部件参数退化时起落架收放系统

表 1　各隐含层节点数下的评估结果

隐含层节点数	健康评估结果	
	故障类别诊断正确率/%	故障程度评估正确率/%
10	81.7	81.7
11	72.0	69.9
12	68.9	80.7
13	86.0	81.7
14	83.9	88.2
15	53.8	72.0
16	74.2	86.0
17	98.9	85.0

输出参数变化值实际上是非常小的,这也给故障程度的判定带来一定的困难。

4 结 论

本文根据典型支线客机起落架收放系统的结构和参数,通过 AMESim 软件建立系统模型,仿真了电磁换向阀开口量不足、作动筒泄漏、液压泵泄漏等问题引起的输出参数变化,从中选取典型故障和参数进行了健康评估。结果证明,对起落架收放系统的故障特征选取合理,健康评估结果较理想。通过该方法可以 及时掌握系统的健康状态,从而为视情维修提供依据,提前预防故障发生。本文对新研飞机起落架液压收放系统的健康评估提供了一种思路和方法。

参考文献:

[1] Zhang Huiguo, Kang Rui, Recht Michael. A Hybrid Prognostics and Health Management Approach for Condition-Based Maintenance[C]//IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2009: 1165-1169

[2] Ahmadi Alireza, Fransson Torbjorn, Crona Anneli, et al. Integration of RCM and PHM for the Next Generation of Aircraft[C]//IEEE Aerospace Conference, 2009: 1-9

[3] 曹惠玲, 黄乐腾, 李志伟, 庞思凯. 基于 SOM 神经网络的航空发动机滑油系统健康评估[J]. 中国民航大学学报, 2014, 32(6):19-22
Cao Huiling, Huang Leteng, Li Zhiwei, Pang Sikai. Health Assessment Study of Aero-Engine Oil System Based on SOM Neural Network[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2014, 32(6):19-22 (in Chinese)

[4] 赵四军, 王少萍, 尚耀星. 飞机液压泵源预测与健康管理系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(1):14-17
Zhao Sijun, Wang Shaoping, Shang Yaoxing. Prognostics and Health Management System of Hydraulic Power Supply[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(1):14-17 (in Chinese)

[5] 张金春, 张继军, 曹彪. 基于 HMM 的机载设备状态健康评估方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(2):491-493
Zhang Jinchun, Zhang Jijun, Cao Biao. Research on State Health Evaluation Method of Airborne Equipment Based on HMM[J]. Computer Measurement & Control. 2015, 23(2):491-493 (in Chinese)

[6] 崔建国, 林泽力, 陈希成, 等. 飞机液压系统健康状态综合评估技术研究[J]. 控制工程, 2014, 21(3):446-449
Cui Jianguo, Lin Zeli, Chen Xicheng, et al. Research on Health Assessment of the Aircraft Hydraulic System[J]. Control Engineering of China, 2014, 21(3):446-449 (in Chinese)

[7] Phillips Paul, Diston Dominic, Starr Andrew. Perspectives on the Commercial Development of Landing Gear Health Monitoring Systems[J]. Transportation Research Part C, 2011, 19:1339-1352

[8] Yang Yang. Aircraft Landing Gear Extension and Retraction Control System Diagnostics Prognostics and Health Management [D]. United Kingdom, Cranfield University, 2012

[9] Gokdere L U, Chiu S L, Keller K J, et al. Lifetime Control of Electromechanical Actuators[C]//IEEE Aerospace conference, United States, 2005:3523-3531

[10] Batzel T D, Swanson D C. Prognostic Health Management of Aircraft Power Generators[J]. IEEE Trans on Aerospace & Electronic Systems. 2009, 45(2): 473-483

[11] 屠毅, 肖翔, 李楠. 大型飞机起落架收放控制系统仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(5):595-599
Tu Yi, Xiao Xiang, Li Nan. Computer Analysis of Large-scale Aircraft Landing Gear Retraction and Extension Control System [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(5):595-599 (in Chinese)

[12] 朱武峰, 李旭东, 丁文勇, 林明. 飞机起落架液压收放系统仿真分析与维修应用[J]. 液压与气动, 2013(6):87-90
Zhu Wufeng, Li Xudong, Ding Wenyong, Lin Ming. Simulation and Maintenance of Aircraft Landing Gear Hydraulic System[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2013(6):87-90 (in Chinese)

[13] 于方圆, 高永, 程钊. 起落架液压收放系统建模与故障仿真[J]. 液压与气动, 2013(4):45-48
Yu Fangyuan, Gao Yong, Cheng Zhao. Modeling and Fault Simulation of Landing Gear Retraction System[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2013(4):45-48 (in Chinese)

[14] 张强, 于辉, 童明波. 某型飞机起落架收放过程仿真[J]. 流体传动与控制, 2009, 2:29-31
Zhang Qiang, Yu Hui, Tong Mingbo. Simulation of Extending and Retracting Process for Aircraft Landing Gear[J]. Fluid Power Transmission and Control, 2009, 2:29-31 (in Chinese)
[15] 周小军, 姜乐华, 高经纬. 基于 AMESim 的液压缸内泄漏仿真分析[J]. 机床与液压, 2012, 40(23):147-150
Zhou Xiaojun, Jiang Lehua, Gao Jingwei. Simulation Analysis for Inner Leakage of Hydraulic Cylinder Based on AMESim[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(23):147-150 (in Chinese)
[16] 夏鹤鸣, 王鸿鑫. 基于 AMESim 飞机液压能源系统用户可用压力仿真计算[J]. 机械设计与制造工程. 2014, 43(7):20-23
Xia Heming, Wang Hongxin. The Simulation of Pressure Available to the User in Aircraft Hydraulic Energy System Based on AMESim[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2012, 40(23):147-150 (in Chinese)
[17] 梁丽媛. 飞机起落架收放系统仿真与健康评估[D].西安:西北工业大学, 2014
Liang Liai. Aircraft Landing Gear Retraction/Extension System Simulation and Health Assessment[D]. Xi′an, Northwestern Polytechnical University, 2014 (in Chinese)
[18] 任占勇. 航空电子产品预测与健康管理技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2013
Ren Zhanyong. Prognostics and Health Management Technology for Avionics[M]. Beijing, National Defence Industry Press, 2013 (in Chinese)
[19] 史峰, 王辉, 郁磊等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M].北京:北京航空航天大学出版社, 2011
Shi Feng, Wang Hui, Yu Lei, et al. 30 Cases Analysis of MATLAB Intelligence Algorithms[M]. Beijing, Beihang University Press, 2011 (in Chinese)

Multiple Failure Simulation and Health Evaluation of Aircraft Landing Gear Hydraulic Retraction/Extension System

He Lin[1], Liang Liai[2], Ma Cunbao[1]

(1.School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi′an 710072, China
2.Xi′an Feibao Technology Development Company, Yanliang 710089, China)

Abstract: Abnormal landing gear retraction/extension(R/E) will make the aircraft unable to land and endanger the flight safety. It is necessary to prevent the failure and avoid the accident by knowing its health condition. A multiple failure modes based health evaluation of aircraft landing gear hydraulic R/E system is developed. For typical regional aircraft, a simulation model of this system is built by AMESim software. The effects of degradation of different component parameters in the hydraulic loop are calculated and fault characteristics are extracted. Health evaluation is performed through neural network algorithm. Simulation and calculation results show that the fault characteristics are reasonable and this method is feasible, which provide a way for health evaluation of new generation aircraft landing gear hydraulic R/E system.

Keywords: aircraft hydraulic system; landing gear retraction/extension, failure mode, AMESim, health evaluation; neural network