

基于模糊综合评判的飞机液压泵故障预测

林泽力¹, 郑 国¹, 莫固良¹, 王景霖¹, 崔建国²

(1. 中航工业上海航空测控技术研究所故障诊断与健康管理工作室 上海, 201601)

(2. 沈阳航空航天大学自动化学院 沈阳, 110136)

摘要 针对飞机液压泵故障难以准确预测的技术难题, 提出了基于模糊综合评判和层次分析法的飞机液压泵故障预测方法。根据液压泵的工作机理及形成机制, 分析液压泵在运行过程中的几种常见故障形式, 得到液压泵常见故障模式和故障因素集, 采用层次分析法计算故障预测中的各项权重, 运用模糊综合评判法对液压泵的故障进行预测。以某型飞机液压泵为具体研究对象, 对提出的方法进行试验验证。结果表明, 该方法能够实现飞机液压泵故障预测的效能, 对其他航空设备的故障预测也具有良好的应用前景。

关键词 液压泵; 故障模式; 故障预测; 层次分析法; 模糊综合评判

中图分类号 TH322; TP206⁺.3

引 言

故障预测与健康管理工作 (prognostics and health management, 简称 PHM) 能够根据武器装备的运行状态, 快速实现对武器装备进行故障诊断、故障预测以及健康管理等一系列保障活动, 实现武器装备的自主综合保障^[1-2]。PHM 技术的研究已成为各国争相研究的热点问题。故障预测作为 PHM 的重要技术之一, 能够根据部件或系统的各种状态, 及早地预测即将发生故障的状况。故障预测技术最初是用来对武器装备在发生灾难事故之前安全性能的检测^[3-4]。随着科技手段的更新, 故障预测技术得到了发展。现代故障预测技术能够用来实现飞机等武器装备早期故障的预测, 提早预测故障发生时间并采取防范措施, 最大化地提高飞机的使用寿命^[5-6]。同时, 故障预测技术还能根据武器装备的故障预测信息、可用资源及使用需求, 对武器装备的维修维护活动给出适当决策规划, 提高武器装备的自主综合保障能力, 减少由于故障引起的各项维修或维护费用, 并降低武器装备的使用风险, 提升武器装备的作战能力^[7]。

作为飞机上的重要系统, 液压系统具有广泛的适应性、优良的控制性、反应快、输出动力足、可实现无级调速且调速范围大等优点, 在现代军用以及民用飞机中得到广泛应用^[8]。液压泵作为液压系统的

关键部件, 其良好的性能是保证飞机液压系统安全运行的前提。一旦液压泵出现故障, 将会直接影响飞机上众多系统或部件的工作状态^[9-10]。飞机液压泵故障预测技术是采用各种先进的技术方法, 实现液压泵故障的早期诊断与预报。在液压泵未发生故障之前, 对液压泵的运行状态进行检测, 预知液压泵是否发生故障或者是即将发生故障。因此, 研究飞机液压泵故障预测技术对于提高飞机安全飞行具有重要作用。

1 液压泵故障模式分析

作为飞机液压系统中的关键部件, 液压泵的性能状态将会直接决定液压系统能否正常工作。由于飞机液压泵工作的特殊环境, 其也是飞机上常发故障的部件之一^[11]。常见的飞机液压泵故障有液压泵输油故障、逆流阀故障、减压阀故障和换向阀故障等^[12]。通过对液压泵故障模式的分析, 得到液压泵故障模式的故障因素, 如图 1 所示。

这些故障模式的发生均会导致液压系统无法正常完成相应的动作。例如, 液压泵输油故障形成原因有电动机反转、吸油管或过滤嘴堵塞、轴向间隙或径向间隙过大、连接处泄露或混进空气、油液黏度太大或油液温升过高等, 这些故障将会直接导致液压系统无法正常工作。对其进行检修主要有以下几种

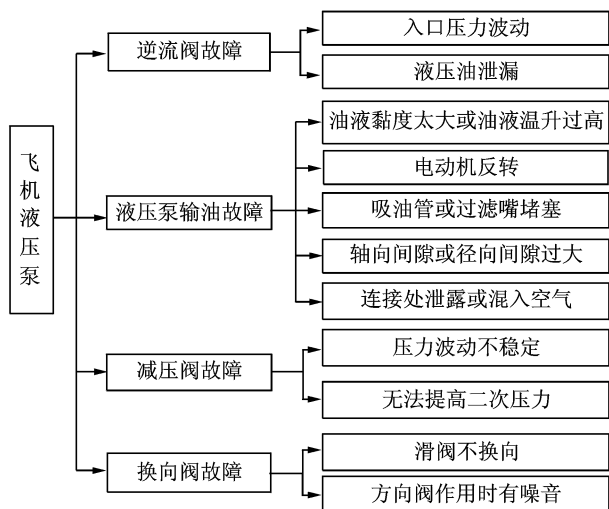


图 1 飞机液压系统常见故障模式

Fig. 1 The familiar fault mode of airplane hydraulic system

手段:a. 检查电动机转向;b. 疏通管道,清洗过滤器,换新油;c. 检查更换有关零件;d. 紧固各连接处螺钉,避免泄漏,严防空气混入;e. 正确选用油液,控制温度升高。同样,其他故障模式也有其形成原因及检修策略。因此,根据飞机液压泵常见故障模式及其发生机理,研究飞机液压泵故障预测技术,预测飞机液压泵的故障模式,从而可确定飞机液压泵的检修方法,为飞机液压泵的检修提供参考。

2 模糊综合评判和层次分析法

2.1 模糊综合评判法

模糊数学理论能够对故障预测中出现的 uncertain 信息或不完整信息进行分析与处理。不仅能够解决由于过程本身的不确定性、精确性低所带来的影响,还能利用集合论中的隶属度函数和模糊关系矩阵解决故障症状与故障原因之间的不确定性关系^[13-14]。模糊综合评判是模糊数学理论中一种应用较经典的方法,能够对具有模糊多属性的事物做出一个能合理综合这些因素的总体评价^[15]。故障预测的建模是将故障因素集映射到某一故障点发生故障的可能性等级,从而对故障的发生进行预测。模糊综合评判的数学理论模型包括因素集 U 、评判集 V 、权数矩阵 W 和评判矩阵 R 等 4 要素^[16]。模糊综合评判的逻辑步骤如图 2 所示。

2.2 层次分析法

层次分析法(analytic hierarchy process,简称

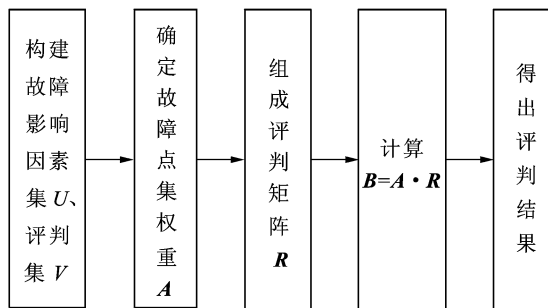


图 2 模糊综合评判故障预测步骤

Fig. 2 The forecast fault step of fuzzy comprehensive evaluation

AHP)能够将定性和定量相结合,在各种故障诊断和预测等技术的权重确定上是应用最为广泛的一种方法^[17]。运用层次分析法进行权重系数的计算时,主要分 4 个步骤^[18]。

1) 根据各故障因素之间的隶属关系构成一个能够反映这个隶属关系的递阶层次结构,从而确定目标和评价因素集。

2) 通过两两比较的方法自下而上逐层计算,确定底层指标相对于存在隶属关系的上一层指标的相对重要性,用一种标度形式来表示(一般采用 1~9 比例标度),如表 1 所示,并构造出具有相对属性的判断矩阵 A 。

3) 对判断矩阵 A 进行一致性检验,采用 $CR = CI/RI$ 来实现。其中: CR 为判断矩阵的随机一致性比率; CI 为判断矩阵的一致性指标; RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标。

4) 判断矩阵 A 通过一致性检验后,利用 $AW = \lambda_{max}W$ 计算权重。其中: λ_{max} 为 A 的最大特征根; W 为属于特征值 λ_{max} 的特征向量,即所求的权向量。

层次分析法对于多数权重的确定问题能得到较为准确的权值,且根据评估指标变化趋势实时调整各项指标赋权,具有适用性强和实时性高等优点^[19]。

表 1 1~10 阶判断矩阵的 RI 值

Tab. 1 The RI result of the 1~10 steps verdict matrix

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

3 基于模糊综合评判法的飞机液压泵故障预测技术

3.1 飞机液压泵故障预测模型的构建

将模糊综合评判法和层次分析法相结合,对飞

机液压泵进行故障预测。通过对飞机液压泵工作机理和形成机制的分析,得到飞机液压泵部分可能发生故障的影响因素集。 $U = u_1, u_2, \dots, u_n$, 为所有故障点的集合; $V = v_1, v_2, \dots, v_n$ 。 U 和 V 之间对应的模糊隶属度矩阵为

$$\mathbf{R} = F(U, V) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{12} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix} = (r_{ij})_{n \times m}$$

其中: \mathbf{R} 为 U 到 V 的模糊关系; r_{ij} 为经过模糊推理得到的故障因素 u_i 与故障点 v_j 之间的模糊隶属度,即第 i 个故障因素导致第 j 个故障点故障的置信度。

对于故障影响集 U , 定义向量 $\mathbf{W} = w_1, w_2, \dots, w_n$; w_i 为 u_i 出现的程度,即 u_i 的权重。当权重因素 A 和隶属度矩阵 \mathbf{R} 确定之后,根据模糊合成运算得到模糊预测评判结果。因此,构建飞机液压泵故障预测模型为

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{w}_i \circ \mathbf{R}_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}) \circ$$

$$\begin{pmatrix} r_{11}^{(i)} & r_{12}^{(i)} & \cdots & r_{1m}^{(i)} \\ r_{21}^{(i)} & r_{22}^{(i)} & \cdots & r_{2m}^{(i)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1}^{(i)} & r_{n2}^{(i)} & \cdots & r_{nm}^{(i)} \end{pmatrix} = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im})$$

其中: \circ 为模糊算子; \mathbf{w}_i 为该因素集的权重向量; \mathbf{B}_i 为该因素集对应第 $(i+1)$ 层的模糊预测向量; \mathbf{R}_i 为第 i 层因素 $(n \times m)$ 阶模糊评语矩阵。

评判结果 \mathbf{B} 可采用最大隶属度原则最后确定,得到的 b_j 即表示故障将在 j 点发生。模糊算子有很多种,常用的包括主故障决定型 $M(\wedge, \vee)$ 和主故障突出型 $M(\cdot, \vee)$ 等^[20]。

3.2 权重的确定

3.2.1 判断矩阵的一致性检验

在计算权重之前,须将构造的判断矩阵进行一致性检验,具体实现步骤如下。

1) 根据 $\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i}$ 计算出判断矩阵的最大特征值。

2) 根据 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n}$ 计算出判断矩阵的一致性指标。其中: n 为判断矩阵的阶数; λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值。一般情况下,CI 值越大,表示偏离一致性越大,反之则越小。

3) 选择平均随机一致性指标。如果判断矩阵的阶数越大,判断结果由于主观因素造成的偏差就会越大,其偏离一致性也就越大。因此,引入平均随

机一致性指标 RI, RI 的取值如表 1 所示。

4) 计算一致性比率。为了计算一致性比率 CR,可将一致性指标 CI 与平均随机一致性指标 RI 相除,通过观察 CR 值的大小,确定构造的判断矩阵是否满足一致性,公式为

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

一般的,当 $CR \leq 0.1$ 时,说明构造的判断矩阵具有一致性,由此得到的各故障因素的权重系数是可以接受的;否则需要修正判断矩阵,直到满足一致性检验。

3.2.2 计算权重系数

当构造的判断矩阵通过一致性检验后,就认为该矩阵能够用来求相应权重。通过一致性检验的判断矩阵进行 $\mathbf{AW} = \lambda_{\max} \mathbf{W}$ 运算,计算各因素的权重。

3.3 预测方法步骤

根据构建的飞机液压泵故障预测模型,设计飞机液压泵故障预测步骤^[21]如下:

1) 通过对液压泵进行分析,得到飞机液压泵常见故障模式,建立飞机液压泵故障因素集 $U = u_1, u_2, \dots, u_n$ 和故障模式集 V ;

2) 在步骤 1 的基础上,建立飞机液压泵故障评判矩阵 \mathbf{R} ;

3) 采用层次分析法求取飞机液压泵故障因素集的权重 w_i ;

4) 采用模糊综合评判法求取飞机液压泵模糊综合评判结果 \mathbf{B} ;

5) 根据最大隶属度原则,得到飞机液压泵即将发生第 j 种故障。

4 试验验证

将某型号的飞机液压泵长期维修统计数据作为原始数据,对飞机液压泵进行故障预测。

4.1 权重的计算

根据图 1,针对 4 种故障模式的故障因素集,采用层次分析法分别确定这 4 种故障模式各因素的权重。首先,构造判断矩阵,根据层次分析法两两比较的思想,结合经验专家意见,够造判断矩阵 $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3, \mathbf{A}_4$ 分别为

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 & 1/2 & 1/3 \\ 1/2 & 1 & 4 & 3 & 1/2 \\ 1/5 & 1/4 & 1 & 1/4 & 1/5 \\ 2 & 1/3 & 4 & 1 & 3 \\ & 3 & 2 & 5 & 1/3 \end{bmatrix};$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix}; A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 \\ 5 & 1 \end{bmatrix}。$$

对判断矩阵 A_1, A_2, A_3, A_4 进行一致性检验,得到矩阵满足一致性,即可求取 4 种故障形式的权重值。运用 $AW = \lambda_{\max}W$ 求得各权重值 $W_1 = [0.585 8, 0.414 2]$; $W_2 = [0.195 2, 0.211 9, 0.116 4, 0.235 8, 0.240 7]$; $W_3 = [0.634 0, 0.366 0]$; $W_4 = [0.309 0, 0.691 0]$ 。因此,可将所有因素集的权重组合成一个矩阵 $W, W = [W_1, W_2, W_3, W_4]$ 。

4.2 构造模糊综合评判矩阵

采用模糊综合评判法对飞机液压泵进行故障预测,还需要构造模糊综合评判矩阵。根据长期统计结果,在对飞机液压泵进行维修的过程中,得到每种故障模式的因素在 100 次故障维修中所占的概率。将此概率统计结果作为飞机液压泵故障预测的模糊综合评判矩阵,具有一定代表意义,可代表飞机液压泵发生故障情况的一个鉴定,可作为飞机液压泵故障预测的模糊综合评判矩阵。各故障模式的维修概率分别为 $R_1 = [0.06, 0.15]$; $R_2 = [0.10, 0.07, 0.13, 0.09, 0.12]$; $R_3 = [0.08, 0.05]$; $R_4 = [0.09, 0.06]$ 。在得到各故障因素集概率的基础上,为了能够方便运用模糊综合评判矩阵计算,将其组合成整体矩阵 R, R 为 4×11 的矩阵,即

$$R = \begin{bmatrix} 0.06 & 0.015 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.10 & 0.07 & 0.13 & 0.09 & 0.12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.08 & 0.05 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.09 & 0.06 & 0 \end{bmatrix}$$

4.3 飞机液压泵故障预测

根据构建的飞机液压泵故障预测模型,对飞机液压泵的常见故障模式进行预测,此时模糊算子选用主故障决定型 $M(\wedge, \vee)$ 。运算过程为

$$B_i = w_i \cdot R_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}) \cdot \begin{bmatrix} r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{im} \\ r_{i21} & r_{i22} & \dots & r_{i2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{in1} & r_{in2} & \dots & r_{inm} \end{bmatrix} =$$

$$W \cdot R = [0.097 3, 0.099 6, 0.069 0, 0.069 3]$$

结果如表 2 所示。

表 2 飞机液压泵故障预测模糊综合评判结果

Tab. 2 Airplane hydraulic pump fault forecast fuzzy comprehensive evaluation result

故障模式	逆流阀故障	液压泵输油故障	减压阀故障	换向阀故障
预测结果	0.097 3	0.099 6	0.069 0	0.069 3

求得模糊评判结果为 $B = [0.097 3, 0.099 6, 0.069 0, 0.069 3]$ 。根据最大隶属度原则,该液压泵使用一段时间后,可能会发生液压泵输油故障。根据检修措施,对其进行定期检查维修,以保障长期安全运行。飞机液压泵的维修记录表明,液压泵确实出现了输油故障,进一步验证了该方法的有效性,具有一定的工程应用价值。

5 结束语

提出了一种基于模糊综合评判和层次分析法相结合的飞机液压泵故障预测新方法,并以某型飞机液压泵为具体研究对象,验证了提出方法的准确性和可靠性。该方法弥补了以往液压泵故障预测方法中数据不足或不充分而导致的故障预测结果不准确问题,能够很好地解决以往单纯依赖专家打分策略确定权重所带来的主观不确定性问题,提升了故障预测的准确性与客观性。研究结果表明,该方法对飞机液压泵进行故障预测的结果与实际相符。因此,该方法能够实现对飞机液压泵故障预测,具有重要的研究和应用价值,且对其他复杂系统故障预测问题提供了借鉴,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

[1] 莫固良,汪慧云,李兴旺,等. 飞机健康监测与预测系统的发展展望[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(6): 925-930.
Mo Guliang, Wang Huiyun, Li Xingwang, et al. The develop and expectation of airplane health monitor and forecast system[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(6): 925-930. (in Chinese)

[2] Guillen A J, Gomez J F, Crespo A, et al. Advances in PHM application frameworks: processing methods, prognosis models, decision making[J]. The Italian Association of Chemical Engineering, 2013, 33: 391-396.

[3] Simon D L, Borguet S, Olivier L, et al. Aircraft engine gas path diagnostic methods: public benchmarking results[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136: 1-10.

[4] 时旺,孙宇锋,王自力,等. PHM 系统及其故障预测模型研究[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(10): 29-35.
Shi Wang, Sun Yufeng, Wang Zili, et al. A study of PHM system and its fault forecasting model[J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(10): 29-35. (in Chinese)

- [5] 孙博, 康锐, 谢劲松. 故障预测与健康管理系统研究和应用现状综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(10): 1762-1767.
Sun Bo, Kang Rui, Xie Jinsong. Research and application of the prognostic and health management system [J]. System Engineering and Electronics, 2007, 29(10): 1762-1767. (in Chinese)
- [6] Azam M, Ghoshal S, Bell J, et al. Prognostics and health management (PHM) of electromechanical actuation (EMA) systems for next-generation aircraft[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013(56):478-487.
- [7] 马飒飒, 陈国顺, 方兴桥, 等. 复杂装备故障预测与健康管理系统初探[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(1): 1-4.
Ma Sasa, Chen Guoshun, Fang Xingqiao, et al. Research on prognostic and health management system of complex equipment [J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(1): 1-4. (in Chinese)
- [8] 唐有才, 孙立金, 陈新波. 飞机液压泵故障分析及预防[J]. 液压与气动, 2002, 3:24-26.
Tang Youcai, Sun Lijin, Chen Xinbo. The analysis and prevent the faults of aircraft hydraulic pump[J]. Hydraulics & Pneumatics, 2002,3:24-26. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 王海涛. 飞机液压元件与系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2012: 36-62.
- [11] 李军. 飞机液压系统压力脉冲试验的机理分析与控制[D]. 西安:西北工业大学, 2007.
- [12] 孙文胜, 毕玉泉, 祁功道, 等. 油液污染对某型飞机液压泵性能影响的分析[J]. 机床与液压, 2012, 40(7): 204-206.
Sun Wensheng, Bi Yuquan, Qi Gongdao, et al. The analysis of oil pollution for a type aircraft hydraulic pump performance influence[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(7): 204-206. (in Chinese)
- [13] 陈玮. 基于灰色聚类与模糊综合评判的空气质量评价[D]. 上海:华东师范大学, 2012.
- [14] 武朝, 胡军华, 黎申, 等. 基于二级模糊综合评判的液压系统故障诊断方法[J]. 液压与气动, 2013, 5: 130-133.
Wu Chao, Hu Junhua, Li Shen, et al. Fault diagnosis of hydraulic system based on two-level fuzzy comprehensive evaluation [J]. Hydraulics & Pneumatics, 2013, 5: 130-133. (in Chinese)
- [15] 陈源. 基于模糊 FMECA 方法的飞机供电系统可靠性分析研究[D]. 西安:电子科技大学, 2011.
- [16] 黄景德, 王兴贵, 王祖光. 基于模糊评判的故障预测系统研究[J]. 电子机械工程, 2000, 88(6): 42-55.
Huang Jingde, Wang Xinggui, Wang Zuguang. The study of fault estimation system based on fuzzy evaluation[J]. Electro - Mechanical Engineering, 2000, 88(6): 42-55. (in Chinese)
- [17] 李同锁, 何启林. 基于层次分析和模糊综合评判的降温系统优选[J]. 矿业工程研究, 2014, 39(1): 39-43.
Li Tong suo, He Qilin. Optimization of cooling system based on analytic hierarchy process and fuzzy synthetic evaluation[J]. Mineral Engineering Research, 2014, 39(1): 39-43. (in Chinese)
- [18] 何逢标. 综合评价方法 MATLAB 实现[M]. 北京:中国社会科学出版社, 2010: 326-334.
- [19] 孙宏才, 田平, 王莲芬. 网络层次分析法与决策科学[M]. 北京:国防工业出版社, 2011: 5-28.
- [20] 王文祥, 安维峥, 王维民, 等. 基于模糊综合评判与故障树法德燃气轮机故障诊断[J]. 船舶工程, 2013, 35: 52-55.
Wang Wenxiang, An Weizheng, Wang Weimin, et al. Fault diagnosis of gas turbine engine based on fuzzy comprehensive evaluation and failure tree method[J]. Ship Engineering, 2013, 35: 52-55. (in Chinese)
- [21] 苏欣平, 聂广坤, 郭爱东, 等. 基于二级模糊综合评判的液压系统故障诊断研究[J]. 中国工程机械, 2011, 9(4):482-486.
Su Xinp ing, Nie Guangkun, Guo Aidong, et al. Hydraulic system fault diagnosis based on two-phase synthesized fuzzy evaluation[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2011, 9(4): 482-486. (in Chinese)



第一作者简介:林泽力,男,1987年9月生,工程师。主要研究方向飞机故障诊断、预测及健康管理技术等。曾发表《基于模糊灰色聚类和组合赋权法的飞机健康状态综合评估方法》(《航空学报》2014年第35卷第3期)等论文。

E-mail:linxi5211987@126.com

