

# 基于 T-S 模糊 FTA 与仿真的舱盖机构 故障诊断方法

陈鹏飞, 吴 锋, 何培垒, 文晓武

(中国航发四川燃气涡轮研究院 航空发动机高空模拟技术重点实验室, 四川绵阳 621024)

**摘要:**针对高空舱盖机构系统故障源与故障程度难以判定以及故障特征值难以提取的问题,提出了基于 T-S 模糊故障树分析与仿真相结合的故障诊断方法。将 T-S 模型引入到舱盖机构不同步的典型故障分析中,用模糊可能性描述部件的故障概率;用 T-S 门来描述事件间的联系;用模糊数描述部件的故障程度,结合模型仿真模拟故障分析,获取部件发生故障时对顶事件的贡献或重要度,计算出顶事件发生故障的模糊可能性及其诊断决策。为高空舱盖机构的故障诊断和维修保养提供参考。

**关键词:** 高空舱;模糊故障树;故障重现;综合决策;航空发动机

中图分类号: V21 1.72

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2018.01.018

## Fault Diagnosis Method of Chamber Cover Mechanism Based on T-S Fuzzy FTA and Simulation

CHEN Peng-fei, WU Feng, HE Pei-lei, WEN Xiao-wu

(Key Laboratory of Technology on Aero-engine Altitude Simulation, Sichuan Gas Turbine Establishment of AECC,  
Mianyang Sichuan 621024, China)

**Abstract:** According to the problem of difficult to determine fault source and fault degree and difficult to obtain fault characteristic value of high-altitude simulation test chamber cover mechanism system, a fault diagnosis method of chamber cover mechanism system based on T-S fuzzy fault tree analysis and fault simulation was proposed. T-S model was presented to typical fault analysis unsynchronized for chamber cover mechanism, which fault probabilities were described as fuzzy possibilities, events' relationships were described by T-S gates, and fault degrees were described as fuzzy numbers. The fault were simulated in the failure mode, which the fault contribution to top event were achieved, as well as fuzzy fault possibilities of top event and comprehensive decision were achieved. It provides reference for the troubleshooting and maintenance of high-altitude simulation test chamber cover mechanism.

**Key words:** high-altitude simulation test chamber; Fuzzy Fault Tree; failure to reproduce; comprehensive decision; aeroengine

## 0 引言

高空模拟试验是航空发动机研制过程中实现全工作包线范围内特性摸索与评价的重要方法<sup>[1]</sup>,其中,高空模拟试验舱(简称高空舱)的精度和可靠性是确保飞行环境条件模拟、工作参数测试和性能评定不失真的关键因素<sup>[2]</sup>。大型高空舱(密闭舱)一般采用具有较大横向/纵向开启面积的大扩口仰挂式舱门开闭

方式<sup>[3]</sup>,便于被试发动机及试验装置的舱内外转运与安装,但此种方式,对舱盖操纵机构开闭和密封的可靠性要求较高<sup>[4]</sup>。

某大型大扩口仰挂式高空舱舱盖的开闭是通过基于液压传动的 2 组并联连杆机构实现(简称舱盖机构),舱盖质量约为 19000 kg,文献[5]对舱盖机构工作原理进行了描述。该机构始建于 20 世纪 80 年代,由于试验过程中需要频繁开启和关闭,加之经历了

收稿日期: 2017-03-14

作者简介: 陈鹏飞(1986),男,工程师,主要从事航空发动机高空模拟试验工作;E-mail: zhongguoren.cpf@qq.com。

引用格式: 陈鹏飞, 吴锋, 何培垒, 等. 基于 T-S 模糊 FTA 与仿真的舱盖机构故障诊断方法[J]. 航空发动机, 2018, 44(1): 97-102. CHEN Pengfei, WU Feng, HE Peilei, et al. Fault diagnosis method of chamber cover mechanism based on T-S fuzzy FTA and simulation [J]. Aeroengine, 2018, 44(1): 97-102.

2008 地震, 此机构逐渐出现了不同步以及不稳定等问题<sup>[6]</sup>。同步性是确保高空舱密闭性能的最重要体现, 但该机构使用年限较长, 并经历过多次维修, 系统故障源及故障程度难以判定, 且存在多种因素相互作用的可能, 属于疑难故障<sup>[7]</sup>。

故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)方法是当代系统可靠性研究的重要方法<sup>[8]</sup>, 为建立在故障原因与故障现象之间因果关系已知基础上的 1 种有向树; 为解决复杂系统组件及其之间的作用关系无法准确表达等问题, 文献[9]引入模糊事件和事件信息模糊性的表达方法, 优化了传统 FTA 方法; 宋华等将 T-S 模型和模糊理论引入到 FTA 分析中<sup>[10]</sup>, 首次提出基于 T-S 模型的模糊 FTA 方法; 并通过组合导航系统验证了此方法的有效性。文献[11]在 T-S 模糊 FTA 算法基础上, 提出了 T-S 模糊重要度计算方法, 并验证了 T-S 模糊重要度算法的适用性; 文献 [12] 提出基于 T-S 故障树的模糊可靠性评估方法, 对舱盖机构液压系统进行模糊可靠性评估。以上所述诊断方法, 故障特征值的提取是难点, 且需具备一定的试验条件才能完成。文献[13]通过计算机仿真, 分析并得到了航空发动机复杂管路系统的结构振动分布状况以及直观的振型特征, 为所研究对象的故障诊断提供样本; 文献 [14]针对传统的方法无法解决元件老化、磨损等问题, 通过建立其数学模型, 仿真计算了 2 种典型故障模式, 直接描述了基于模型的故障诊断方法。由此可见, 虚拟环境下的故障仿真可以在不同的条件下, 甚至在试验人员不便参与的环境下, 得到可能的故障模式和路径, 并充实到故障诊断知识库中, 最后根据反推机理和搜索策略将其应用于故障诊断。

本文针对传统故障分析方法在故障程度和事件间关系难以确定, 以及故障特征值提取难题的基础上, 提出引入 T-S 模糊故障树分析与故障虚拟重现相结合的故障诊断方法, 开展舱盖机构的可靠性研究。

## 1 基于 T-S 模糊 FTA

### 1.1 建立 T-S 模糊故障树

舱盖机构液压原理如图 1 所示, 为简化故障模型, 仅对小盖系统不同步的故障模式、故障机理等进行分析, 确定故障树顶事件和底事件。系统各事件代码见表 1, T-S 模糊故障树如图 2 所示。

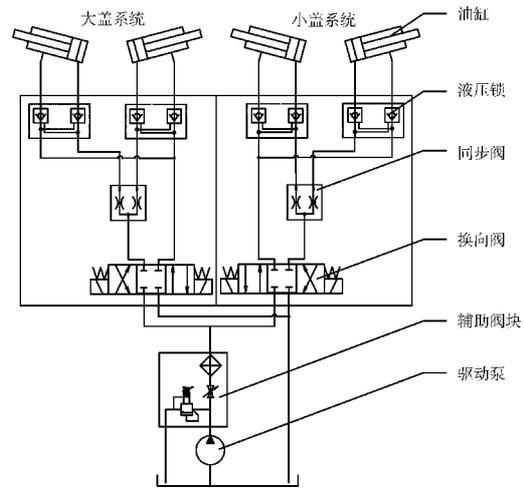


图 1 舱盖机构液压原理

表 1 小盖机构故障树中各代码表示的事件

代码	事件	代码	事件
T	小盖系统不同步	x <sub>4</sub>	泵密封件失效
T <sub>1</sub>	执行机构故障	x <sub>5</sub>	液压油污染
T <sub>2</sub>	驱动泵故障	x <sub>6</sub>	管路 / 过滤器堵塞
T <sub>3</sub>	动力源系统故障	x <sub>7</sub>	弹簧失效
T <sub>4</sub>	控制阀故障	x <sub>8</sub>	密封件失效
T <sub>5</sub>	机械故障	x <sub>9</sub>	阀芯卡死
x <sub>1</sub>	活塞密封失效	x <sub>10</sub>	轴销磨损
x <sub>2</sub>	活塞杆弯曲变形	x <sub>11</sub>	连杆弯曲变形
x <sub>3</sub>	柱塞泵磨损		

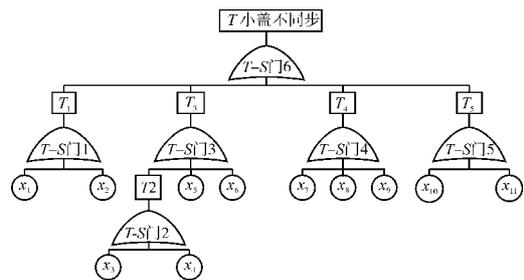


图 2 小盖系统 T-S 模糊故障树

### 1.2 模糊可能性计算

设  $x_1 \sim x_{11}$  和  $T_1 \sim T_5, T$  的常见故障程度为  $(0, 0.5, 1.0)$ , 隶属函数参数选为  $s_1 = s_2 = 0.1, m_1 = m_2 = 0.3$ 。T-S 模糊门见表 2-7。

表 2-7 中的每行均代表 1 条模糊规则, 如表 2 中第 1 行代表的规则: 若  $x_1$  为 0,  $x_2$  为 0, 则  $T_1$  为 0 的可能性为 1, 为 0.5 的可能性为 0, 为 1 的可能性为 0。

小盖系统的各部件故障率见表 8。

表 2 T-S 门 1 规则

规则	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>		
			0	0.5	1.0
1	0	0	1	0	0
2	0	0.5	0.2	0.3	0.5
3	0	1	0	0	1
4	0.5	0	0.1	0.6	0.3
5	0.5	0.5	0.1	0.3	0.6
6	0.5	1	0	0	1
7	1	0	0	0	1
8	1	0.5	0	0	1
9	1	1	0	0	1

表 3 T-S 门 2 规则

规则	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	T <sub>2</sub>		
			0	0.5	1.0
1	0	0	1	0	0
2	0	0.5	0.2	0.4	0.4
3	0	1	0	0	1
4	0.5	0	0.2	0.5	0.3
5	0.5	0.5	0.1	0.3	0.6
6	0.5	1	0	0	1
7	1	0	0	0	1
8	1	0.5	0	0	1
9	1	1	0	0	1

表 4 T-S 门 3 规则

规则	T <sub>2</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>	T <sub>3</sub>		
				0	0.5	1.0
1	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0.5	0.4	0.5	0.1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
27	1	1	1	0	0	1

表 5 T-S 门 4 规则

规则	x <sub>7</sub>	x <sub>8</sub>	x <sub>9</sub>	T <sub>4</sub>		
				0	0.5	1.0
1	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0.5	0.1	0.5	0.4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
27	1	1	1	0	0	1

表 6 T-S 门 5 规则

规则	x <sub>10</sub>	x <sub>11</sub>	T <sub>5</sub>		
			0	0.5	1.0
1	0	0	1	0	0
2	0	0.5	0.2	0.4	0.4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
9	1	1	0	0	1

表 7 T-S 门 6 规则

规则	T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T		
					0	0.5	1.0
1	0	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0	0.5	0.2	0.4	0.4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
36	1	1	1	1	0	0	1

表 8 小盖系统的各部件故障率

事件	部件	故障率 / (10 <sup>-6</sup> /h)	事件	部件	故障率 / (10 <sup>-6</sup> /h)
x <sub>1</sub>	活塞密封失效	10	x <sub>7</sub>	弹簧失效	4
x <sub>2</sub>	活塞杆弯曲形变	3	x <sub>8</sub>	密封件失效	6
x <sub>3</sub>	柱塞泵磨损	4	x <sub>9</sub>	阀芯卡死	2
x <sub>4</sub>	柱塞泵密封件失效	6	x <sub>10</sub>	轴销磨损	7
x <sub>5</sub>	液压油污染	8	x <sub>11</sub>	连杆弯曲变形	4
x <sub>6</sub>	管路 / 过滤器堵塞	7			

表中数据根据样本手册获得的各部件故障程度为 1 的可能性。假设各部件故障程度为 0.5 的模糊可能性与为 1 的故障率相同,则可根据表 2,按文献[12]的 T-S 算法得到 T<sub>1</sub> 的模糊可能性为

$$P(T_1=0.5) = \sum_{i=1}^9 P_0^1 P^1(T_1=0.5) = P_0^2 P^2(T_1=0.5) + P_0^4 P^4(T_1=0.5) + P_0^5 P^5(T_1=0.5) = 0.3P_0^2 + 0.6P_0^4 + 0.3P_0^5 = 6.90 \times 10^{-6}$$

$$P(T_1=1) = \sum_{i=1}^9 P_0^1 P^1(T_1=1) = 17.50 \times 10^{-6}$$

同理可求出 T<sub>2</sub>~T<sub>5</sub> 的模糊可能性,并由表 7 以及中间事件的数据可以得到舱盖机构小盖系统 T 的故障模糊可能性为

$$P(T=0.5) = \sum_{i=1}^{36} P_0^1 P^1(T=0.5) = 12.74 \times 10^{-6}$$

$$P(T=1) = \sum_{i=1}^{36} P_0^1 P^1(T=1) = 93.28 \times 10^{-6}$$

上述结果说明:系统故障的模糊可能性与部件的模糊可能性基本为 1 个数量级。系统出现故障程度为 1 的模糊可能性大于油缸、动力源系统、控制阀以及机械等故障的模糊可能性,这与实际工况相符;计算结果与统计的小盖系统不同步故障概率分布吻合,验证了该方法的正确性。

## 2 故障虚拟重现

### 2.1 仿真建模

建立舱盖机构机电液系统仿真模型如图3所示。通过设置系统参数,利用仿真结果与系统正常工作时的性能比对,调整仿真模型参数值使所建模型与实际液压系统性能达到最佳近似。舱盖机构运动曲线如图4所示。从图中可见,为证明仿真模型的正确性,模拟了开关盖过程中液压缸行程、系统压力,整个动作分为4步:开小盖、开大盖、关大盖、关小盖,各动作之间间隔10s。仿真模型在运动行程与系统压力上,同实物系统只有微小差异<sup>[6]</sup>,因此,后面采用此模型进行不同步误差分析。

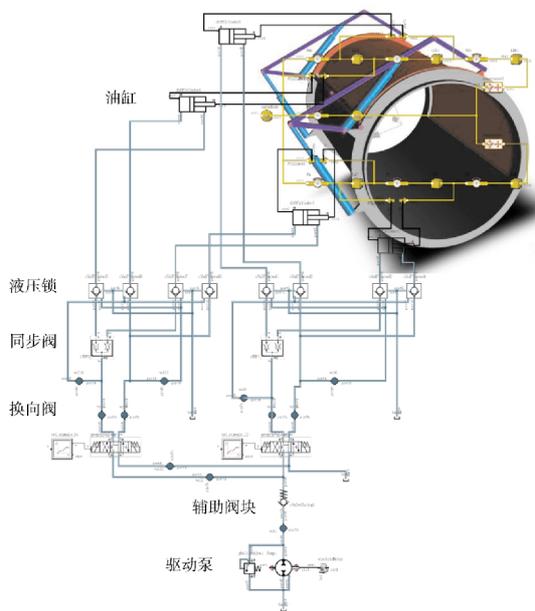


图3 舱盖机构仿真模型

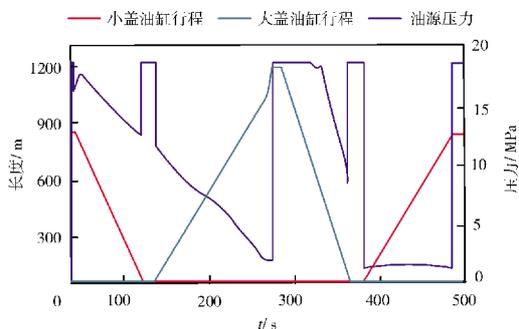
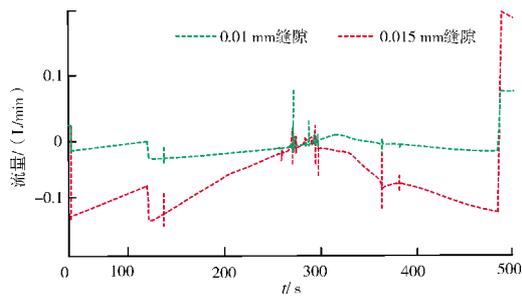


图4 舱盖机构运动曲线

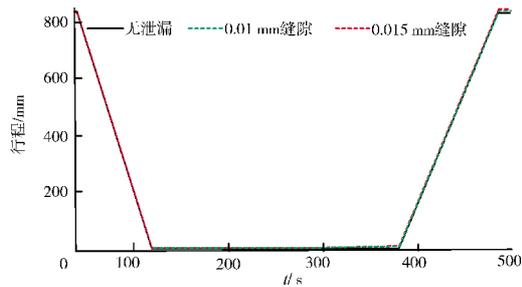
### 2.2 故障重现

根据表1的故障事件,对调设系统模型各元件处于异常状态下的参数进行仿真试验,利用软件模拟出系统的故障,得到元件各故障样本曲线。油缸内泄(故

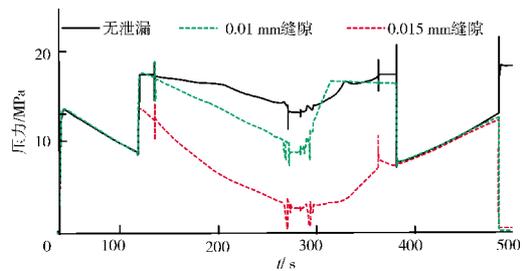
障事件  $x_1$ )是小盖系统发生过的1种典型故障,因此,选取了该底事件开展故障仿真算例研究,执行机构一活塞不同程度密封失效的仿真结果如图5所示。从图中可见,密封失效引起了油缸行程不同步(如图5(b)所示)、油缸压力变化(如图5(c)所示)以及舱盖倾斜(如图5(d)所示)等故障特征,同时不同内泄程度对应的故障表现明显不同。



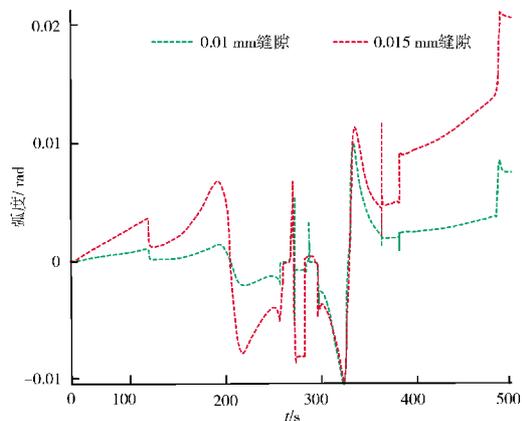
(a) 油缸泄漏量曲线



(b) 油缸行程曲线



(c) 油缸有杆腔压力曲线



(d) 舱盖横向旋转弧度曲线

图5 小盖油缸活塞密封失效故障仿真

通过 T-S 模糊 FTA 计算可知 (假设其他液压元件无故障), 假定油缸活塞密封故障工况下小盖系统完全故障的可能性为 1, 即  $P(T_i=1)=1$ , 且  $P(T=1)=1$ 。而通过模型仿真得出活塞密封完全故障时油缸也出现完全故障, 内泄将导致油缸压力波动, 非运动状态时不能锁定油缸长度, 并最终导致系统不同步, 即舱盖倾斜。这也表明仿真结果与故障树分析计算结果是一致的, 同理, 可以得出系统异常运行与系统故障  $x_2-x_{11}$  事件之间的联系, 进而获取故障程度特征值, 即部件发生故障时对顶事件的贡献或重要度。

### 3 故障搜索决策

在利用故障树自顶事件向下至底事件搜索故障原因时, 为指导系统故障诊断搜索步骤的合理排序, 将 T-S 模糊故障树计算的各底事件作为候选方案, 并将故障虚拟仿真初步计算出的重要度、搜索成本和维修代价等作为属性<sup>[15-16]</sup>, 根据所得信息建立拓扑结构; 并依据专家经验或历史数据确定各因素之间的关系, 得到条件概率分布。通过计算分析给定各属性评价值; 最后确定故障诊断决策次序。故障搜索决策流程如图 6 所示。

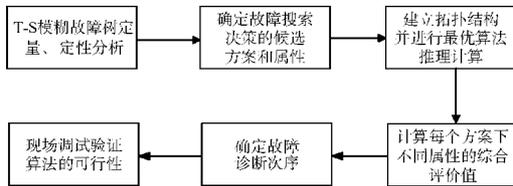


图 6 故障诊断决策流程

设决策系统的  $m$  个方案, 记为  $X=\{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ ; 同时, 用集合  $Y=\{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$  表示  $n$  个属性;  $W=(W_1, \dots, W_n)^T$  表示  $n$  个属性的权重向量。在给定每个集合后, 以方案和属性集合中的各元素构成决策矩阵记为  $C=(c_{ij})_{m \times n}$ , 其中随机向量  $c_{ij}$  表示在不确定环境下, 第  $i$  个方案在第  $j$  个属性下的评价值, 假设此随机向量有  $K$  种取值, 每种取值的概率分布已知, 其中  $\pi_k(c_{ij})$  表示第  $K$  种取值  $c_{ij}^k$  的概率。在确定上述信息的情况下, 利用式(1)在  $m$  种方案中选择最优的方案或对  $m$  种方案进行排序。

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j \sum_{k \in K} c_{ij}^k \pi_k(c_{ij}) \quad (1)$$

为了更直观、简洁地介绍算法的演算过程, 本文的属性主要考虑有搜索成本  $S$ 、故障概率  $P$  和重要度

$I$ , 结合实际情况、专家经验及有关数据, 其权重值见表 9。

表 9 故障权重值

事件	S	P	I
$x_1$	5	7	6
$x_2$	7	1	5
$x_3$	5	2	4
$x_4$	3	2	3
$x_5$	2	7	1
$x_6$	1	6	2
$x_7$	4	6	3
$x_8$	4	4	4
$x_9$	4	4	5
$x_{10}$	6	1	3
$x_{11}$	1	1	4

计算<sup>[7]</sup>可得搜索方案的排序为:  $x_1, x_7, x_2, x_9, x_{10}, x_3, x_8, x_6, x_4, x_5, x_{11}$ , 故优先诊断排在前面的决策方案。经过依次实际检查, 确系液控单向阀(故障事件  $x_7$ )故障引起的。在执行机构和负载(舱盖)关小盖或小盖悬空停止的过程中, 液控单向阀承受较大负载力考验, 经检验发现, 舱盖能够正常开关, 但小盖悬空停止后, 存在舱盖缓慢下降(倾斜)的情况, 系统更换液控单向阀后, 故障得以解决。

需要指出的是: 采用模糊数学来描述事件发现概率, 既可以减小获取大型复杂系统事件发生概率精确值的难度; 同时搜索策略又能将现场数据与工程经验结合起来, 这种方法具有较大的灵活性和适应性。该方法所得结果尽管是“模糊的”, 但这不影响故障模型和搜索策略对设备故障定位排故与修护的指导性。

### 4 结论

(1) 引入模糊故障树分析方法。针对高空舱盖机构系统故障源以及故障程度难以判定问题, 引入了 T-S 模糊故障树分析方法, 将模糊数学与故障诊断方法相结合。

(2) 基于虚拟技术的故障诊断方法。基于系统性能及可能出现的故障进行模拟仿真, 直观、明了地确定了底事件与系统故障的关系及其表现形式。

(3) 通过故障机理分析与虚拟仿真技术相结合, 并融合多属性决策搜索方法作为系统故障诊断决策依据, 为高空舱盖机构的故障诊断和维修保养提供

理论支撑,也为类似深层次的智能故障诊断研究奠定基础。

参考文献:

- [1] Chen Pengfei, Wu Feng, Xu Jinglei, et al. Design and implementation of rigid-flexible coupling for a half-flexible single jack nozzle[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(6):1477-1483.
- [2] 侯敏杰, 刘志友, 文刚. 高空舱内次流与真空度对发动机台架测量推力影响的分析[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3):384-388.  
HOU Minjie, LIU Zhiyou, WEN Gang. Research of the secondary flow and vacuum impact on the thrust measurement[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(3):384-388. (in Chinese)
- [3] Holger Klinger, Sebastian Bake, Hans-Frieder Vogt, et al. Altitude testing of the E3E core engine [C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, Vancouver, British Columbia, Canada.
- [4] 马俊太, 朱光辰, 郝平. 航天密封舱设备安装精度仿真分析方法[J]. 航天器工程, 2014, 23(3):37-42.  
MA Juntai, ZHU Guangchen, HAO Ping. Simulation analysis method of mounting accuracy of space sealed cabin equipments[J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(3):37-42. (in Chinese)
- [5] 万世华. 高空舱液压开盖机构运动不同步分析及设计改进[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2006, 19(4):52-55.  
WAN Shihua. Analysis and improvement of the hydraulic control system of the altitude simulation test chamber cover [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2006, 19(4):52-55. (in Chinese)
- [6] 陈鹏飞, 吴锋, 王润明, 等. 高空模拟试验舱开盖机构液压系统优化设计[C]// 第11届发动机试验与测试技术学术论文集. 成都: 中国航空学会, 2012: 677-684.  
CHEN Pengfei, WU Feng, WANG Runming, et al. Improvement design for the hydraulic control system of the altitude simulation test chamber cover [C]// The proceedings of the 11th Conference of Engine Test and Ttest Technology. Chengdu: Chinese Society of Aerospace Power, 2012: 677-684. (in Chinese)
- [7] 姚成玉, 赵静一, 杨成刚. 液气气动系统疑难故障分析与处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 2-5.  
YAO Chengyu, ZHAO Jingyi, YANG Chengang. Trouble analysis and treatment of hydraulic pneumatic system[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 2-5. (in Chinese)
- [8] 周汝胜, 焦宗夏, 王少萍. 液压系统故障诊断技术的研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2006, 42(9):6-12.  
ZHOU Rusheng, JIAO Zongxia, WANG Shaoping. Current research and developing trends on fault diagnosis of hydraulic systems [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(9):6-12. (in Chinese)
- [9] Mehra R K, Peschon J. An innovations approach to fault detection and diagnosis in dynamic systems[J]. Automatica, 1971, 7(5): 637-640.
- [10] Song Hua, Zhang HongYue, Chan C W. Fuzzy fault tree analysis based on T-S model with application to INS/GPS navigation system [J]. Soft Computing, 2009, 13(1):31-40.
- [11] 姚成玉, 张炎驿, 陈东宁, 等. T-S 模糊重要度分析方法研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12):163-169.  
YAO Chengyu, ZHANG Yingyi, CHEN Dongning, et al. Research on T-S fuzzy importance analysis methods [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12):163-169. (in Chinese)
- [12] 陈鹏飞, 吴锋, 嵇晓昱, 等. 基于 T-S 模糊故障树的开盖机构故障分析[C]// 中国航空学会 16 届机械动力传输学术论文集. 岳阳: 中国航空学会, 2013: 909-913.  
CHEN Pengfei, WU Feng, JI Xiaoyu, et al. Based on T-S fuzzy analysis methods of the altitude simulation test chamber cover [C]// The proceedings of the 16th Conference of Mechanical Power Transmission of China Society of Aeronautics. Yueyang: Chinese Society of Aerospace Power, 2013: 909-913. (in Chinese)
- [13] 贾志刚, 陈志英. 基于参数化的航空发动机管路调频方法研究[J]. 航空发动机, 2008, 34(4):34-37.  
JIA Zhigang, CHEN Zhiying. Investigation of frequency modulation for aeroengine pipeline based on parameterization [J]. Aeroengine, 2008, 34(4):34-37. (in Chinese)
- [14] 谢小平, 张学军, 贺孝涛, 等. 某型航空发动机燃油流量调节器建模与故障仿真[J]. 航空发动机, 2011, 37(4):15-19.  
XIE Xiaoping, ZHANG Xuejun, HE Xiaotao, et al. Modeling and fault simulation of an aeroengine fuel regulator[J]. Aeroengine, 2011, 37(4): 15-19. (in Chinese)
- [15] 郝春生, 秦月. 航空发动机故障诊断及测试流程分析[J]. 航空发动机, 2014, 40(3):71-74.  
HAO Chunsheng, QIN Yue. Fault diagnosis methods and testing procedure of aeroengine [J]. Aeroengine, 2014, 40(3):71-74. (in Chinese)
- [16] 徐健. 基于 RCM 和模糊综合评判的航空发动机附件维修决策分析[J]. 航空发动机, 2015, 41(4):98-102.  
XU Jian. Maintenance decision analysis based on RCM and fuzzy comprehensive evaluation of aeroengine accessories [J]. Aeroengine, 2015, 41(4):98-102. (in Chinese)

(编辑:张宝玲)