

基于分层多信号流图的飞机空调系统故障诊断*

孙 智¹, 孙建红¹, 李冰月², 张雪枫¹

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院 南京, 210016) (2. 沈阳飞机设计研究所 沈阳, 110035)

摘要 在对飞机空调系统各主要部件进行故障模式影响分析(failure mode and effects analysis, 简称 FMEA)的基础上, 采用分层多信号流图(hierarchy multi-signal flow, 简称 HMSF)方法对飞机空调系统进行故障诊断与仿真分析, 得出了飞机空调系统的故障-测试关联矩阵, 并给出系统各部件的故障检测率和故障隔离率。针对系统故障隔离率较低的情况, 在尽可能少增检测点的前提下, 对飞机空调系统分层多信号流故障模型进行了改进, 增加了涡轮等部件共 5 个检测点, 使飞机空调系统的故障检测率从 91.4% 提高到 100%, 故障隔离率从 32.9% 提高到 83.9%。研究发现, 分层多信号流图方法有助于改善飞机空调系统的故障检测率和故障隔离率, 提高系统的故障诊断效率, 为飞机空调系统健康管理的设计提供技术基础。

关键词 故障诊断; 分层多信号流图; 故障模式影响分析; 故障检测率; 故障隔离率

中图分类号 TH17; V240.2

引 言

随着我国航空航天技术的不断发展, 通用航空得到了更多关注, 飞机数量不断增加, 但维护技术相对滞后, 如何利用新技术保障飞行安全越来越被关注。另一方面, 随着航空母舰的服役以及舰载机需求的增加, 如何在远海状态下对飞机及时进行故障预测, 并在出现故障时快速进行故障诊断, 从而提高飞机的作战效率越来越被关注。飞机空调系统为飞机航电设备的正常工作以及飞行员的生命安全提供着重要保障, 因此飞机空调系统的故障预测、诊断及排除显得至关重要。

近年来, 国内外学者针对飞机环控系统故障进行了一定的研究。Price^[1]对飞机环控系统结构原理进行了详细介绍, 并运用模糊控制的方法对环控系统故障诊断研究。Laster 等^[2]运用专家系统的方法对飞机环控系统进行了故障诊断研究。危虹等^[3]用故障模式、影响和危害性分析(failure mode, effects and criticality analysis, 简称 FMECA)和故障树分析(fault tree analysis, 简称 FTA)分析方法, 针对飞机空调系统的设计过程, 结合可靠性鉴定试验, 提出了环控系统中非指数分布的产品的可靠性指标评价方法。赵俊茹^[4]针对飞机空调系统的各主要部件进行了仿真研究和故障诊断, 采用了参数估

计、专家系统和基于观测器的故障诊断方法。何杰等^[5]对飞机换热器故障进行了故障诊断仿真研究。贾宝惠等^[6]采用故障树方法对某型飞机空调系统常见故障进行了分析。李冰月等^[7]采用 FMECA 和故障数值仿真相结合的方法, 对机载空调系统进行了 FMECA 分析和故障仿真。王辉等^[8]利用民机空调系统故障的大量统计数据, 采用时间序列算法对飞机空调系统故障进行预测, 发现该方法对空调系统故障的短期预测良好, 但不能精确到具体的故障位置。

对于飞机空调系统故障检测目前普遍存在的问题是故障检测率低和故障隔离效果差, 缺少一种基于多信号流的分析办法。多信号流图的方法^[9]是采用关联矩阵表现故障与信号之间的检测关系, 对故障诊断有较好的检测和隔离性, 被广泛应用在电子雷达和航空航天等领域。李登等^[10]对某型舰载短波综合通信系统(high frequency integrated communication system, 简称 HFICS)进行了多信号建模和测试性分析, 发现该方案提高了该型装备的测试性水平, 同时对其他复杂电子装备的测试性设计具有一定的指导作用。胡泊等^[11]采用多信号流软件 TEAMS 对某型柴油机系统进行了仿真测试, 验证了该方法对复杂设备故障检测的可行性。秦文娟等^[12]提出了一种基于 TEAMS 软件的空空导弹系统测试性建模方法, 并将其应用于某型空空导弹伺

* 江苏高校优势学科建设工程资助项目
收稿日期: 2017-10-13; 修回日期: 2017-11-10

服系统,验证了该方法的可行性和有效性。方甲永等^[13]针对导弹系统电子设备系统故障诊断精度低和虚警高等问题,采用多信号流图模型获取贝叶斯网络,采用后验概率推理对某型导弹制导电子部件进行了故障诊断。文献[14]在 FMECA 分析的基础上,采用多信号流图方法对航天器的电力系统进行了故障检测。文献[15]面向新一代飞机机电系统的故障,指出了故障模型和分析方法等方面的需求,提出了多信号流软件 TEAMS 在 EMAs 故障预测与健康应用。文献[16]采用多信号流图方法对猎户座飞行试验数据相关的故障进行了故障诊断,并针对航天的相关特性改进了其推理机。朱海鹏等^[17]采用 TEAMS 软件对机载燃油测量系统进行了测试性设计,针对结果对系统进行了改进。李冰月^[18]采用多信号流模型对民机中央维护系统中的故障问题进行诊断,发现该方法可以有效解决机载系统的关联故障。

已有关于飞机空调系统故障的研究大部分只进行了定性的分析,定量的分析较少,特别是机载空调系统和多信号流图方法相结合的研究十分有限。笔者在对飞机空调系统各元部件进行 FMECA 分析的基础上,采用多信号流图方法对某型机载空调系统进行了建模与分析,阐述了飞机空调系统多信号流图的建模分析方法,并对系统进行了故障分析。在此基础上对系统的故障检测率和故障隔离率对系统进行了改进,发现改进后系统的故障检测率和故障隔离率显著提高。

1 多信号流图方法

1.1 分层多信号流图模型

分层多信号流图模型是通过系统每一部件的信息流向和测试点的测试信号进行分析判断,在系统模型的基础上确定故障和测试信号间的关联关系,从而实现故障诊断的一种故障诊断方法。模型主要包括以下元素:系统元件集 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$; 系统与故障源相关的独立信号特征集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$; 系统的有限测试集 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_l\}$; 系统的 r 维测试点集 $T_p = \{tp_1, tp_2, \dots, tp_r\}$; 每个测点对应的测试集 $S_p(t_p)$; 每个故障源对应的信号集 $S_c(c_i)$; 每个测试检测的信号集 $S_T(t_i)$; 系统多信号流图 $DG = \{C, T_p, E\}$, 其中有向图的边 E 为系统的信号流向。

1.2 故障关联矩阵

在多信号流图模型中,系统的故障与测试信号

之间的关联关系可以表示为

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1j} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{i1} & d_{i2} & \dots & d_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)为多信号流图的故障关联矩阵,是一个二值矩阵,每一行代表一个故障源,每一列代表一个测试。值为 1 代表故障能够被检测,值为 0 代表故障不能被检测。例如: $d_{ij} = 1$, 表示第 i 个测试能够检测到第 j 个故障源的故障; $d_{ij} = 0$, 表示第 i 个测试无法检测到第 j 个故障源的故障。故障关联矩阵通过遍历模型图的方式获得,即通过对分层多信号流模型的参数及所有节点之间的连接关系进行读取,并结合节点之间的信号关联关系生成相关关联矩阵。

2 飞机空调系统故障建模

某型飞机的空调系统如图 1 所示。根据系统结构可以将系统分为部件级故障和元件级故障。例如,单向活门、压力调节器、热交换器、水分离器、涡轮、温度调节器和流量调节器等故障属于部件级故障。每个部件故障又可以细分为多个元件级故障。例如,热交换器故障可以分为热边进口封头组件故障、热边出口封头组件故障、冷边进口封头组件故障、冷边出口封头组件故障、芯体组件故障和支架组件故障等元件级故障。某型飞机空调系统的分层结构如图 2 所示。

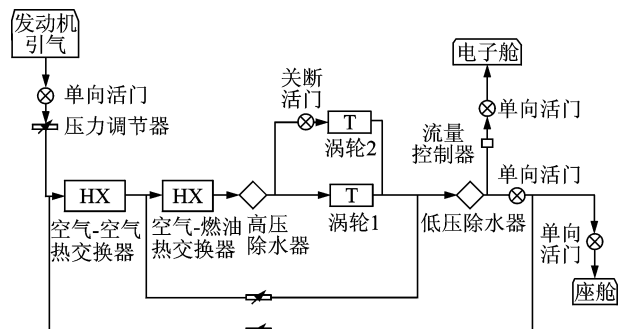


图 1 某型飞机空调系统图

Fig. 1 Schematic diagram of simple air conditioning system in aircraft

根据多信号流图基本原理,某型飞机空调系统故障多信号流图模型的主要要素如下。

1) 系统故障源集 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{15}\}$, 其中, $c_1 \sim c_{15}$ 分别为发动机引气单向活门 01、发动机引气压力调节器、空气-空气热交换器、空气燃油热交换器、高压水分离器、大涡轮、小涡轮、低压水分离器、座舱供气单向活门 02、座舱供气单向活门 03、电子舱供气单向活门 04、电子舱供气流量调节器、小涡轮

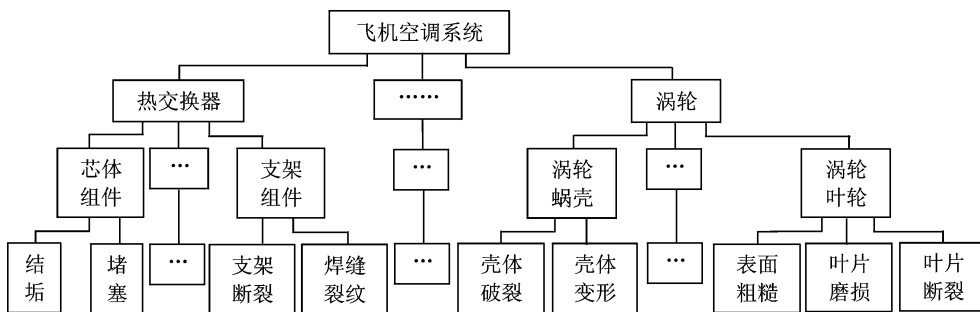


图 2 飞机空调系统分层结构

Fig. 2 The layered structure of aircraft air conditioning system

轮关断活门、涡轮出口温度流量调节器 01、座舱供气温度流量调节器 02。

2) 系统与故障源相关的独立信号特征集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{16}\}$, 其中, $s_1 \sim s_{16}$ 分别为系统供气温度升高、系统供气温度降低、部件出口温度升高、温度不变无法调节、压力升高、压力降低、部件进出口压差减小、部件进出口压差增大、压力不变无法调节、压力振荡(系统不稳定)、流量增大、流量减小、流量损失(出口流量小于进口流量)、流量为 0、回流(流量小于 0)、含湿量增大。

3) 系统的 16 维有限测试集 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{16}\}$, 测试集的各测试内容及测试异常响应如表 1 所示。

4) 系统的 11 维测试点集 $T_P = \{tp_1, tp_2, \dots, tp_{11}\}$ 。

5) 每个测点对应的测试集 $S_P(tp_i) = \{S_{P1}, S_{P2}, \dots, S_{P11}\}$ 。

6) 每个故障源对应的信号集 $S_C(c_i) = \{sc_1, sc_2, \dots, sc_{15}\}$ 。

7) 每个测试检测的信号集 $S_T(t_i) = \{st_1, st_2, \dots, st_{16}\}$ 。

根据上述多信号流要素、机载空调系统的工作原理及各元、部件之间的输入输出信号关系, 建立如

图 3 所示的多信号流图故障分析模型。系统中的各底层元件故障发生概率由 FMEA 分析得到。关断活门的 FMEA 分析数据如表 2 所示, 其他各部件的 FMEA 分析数据参见文献[7]和文献[18]。

表 1 飞机空调系统测试集

Tab. 1 The test set of aircraft air conditioning system

测试集	测试内容	测试异常响应
t_1	系统供气温度升高测试	测量温度升高
t_2	系统供气温度降低测试	测量温度降低
t_3	部件出口温度升高测试	测量温度升高
t_4	温度不变, 无法调节	测量温度不变
t_5	压力升高测试	测量压力升高
t_6	压力降低测试	测量压力降低
t_7	进出口压差减小测试	测量压差减小
t_8	进出口压差增大测试	测量压差增大
t_9	压力不变, 无法调节	测量压力不变
t_{10}	压力振荡、系统不稳定	测量压力不稳定
t_{11}	流量增大测试	测量流量增大
t_{12}	流量减小测试	测量流量减小
t_{13}	流量损失测试	测量流量小于进口流量
t_{14}	流量为 0 测试	测量流量为 0
t_{15}	回流测试	测量流量为负
t_{16}	含湿量增大测试	测量含湿量增大

表 2 关断活门 FMEA 表

Tab. 2 The FMEA data of shut-off valve component

产品编号	产品名称	功能	故障模式	故障原因	任务阶段	故障影响			故障在线检查方法	措施结果					
						局部影响	所属系统影响	最终影响		采取的措施	严重程度	故障模式等级	故障发生频率比	故障发生概率	风险优先数
1	单向活门	对旁路气流进行关断	无法打开	轴卡死	全阶段, 飞行全过程	不能打开, 流阻增大	系统旁路流量下降, 下游压力下降	影响座舱或电子舱的制冷和加温能力	进出口压差大于 5 kPa	/	III	D	0.1	50	(5, 2) 10
2			活门漏气	系统旁路流量下降, 下游压力下降		影响座舱或电子舱的制冷和加温能力	进出口压差大于 5 kPa	/	IV	D	0.6	50	(2, 2) 4		
3			无法关闭	无法关断气体会出现反流		座舱设备及飞行员可能无法正常工作	入口压力小于出口压力	/	I	E	0.3	0.5	(9, 1) 9		

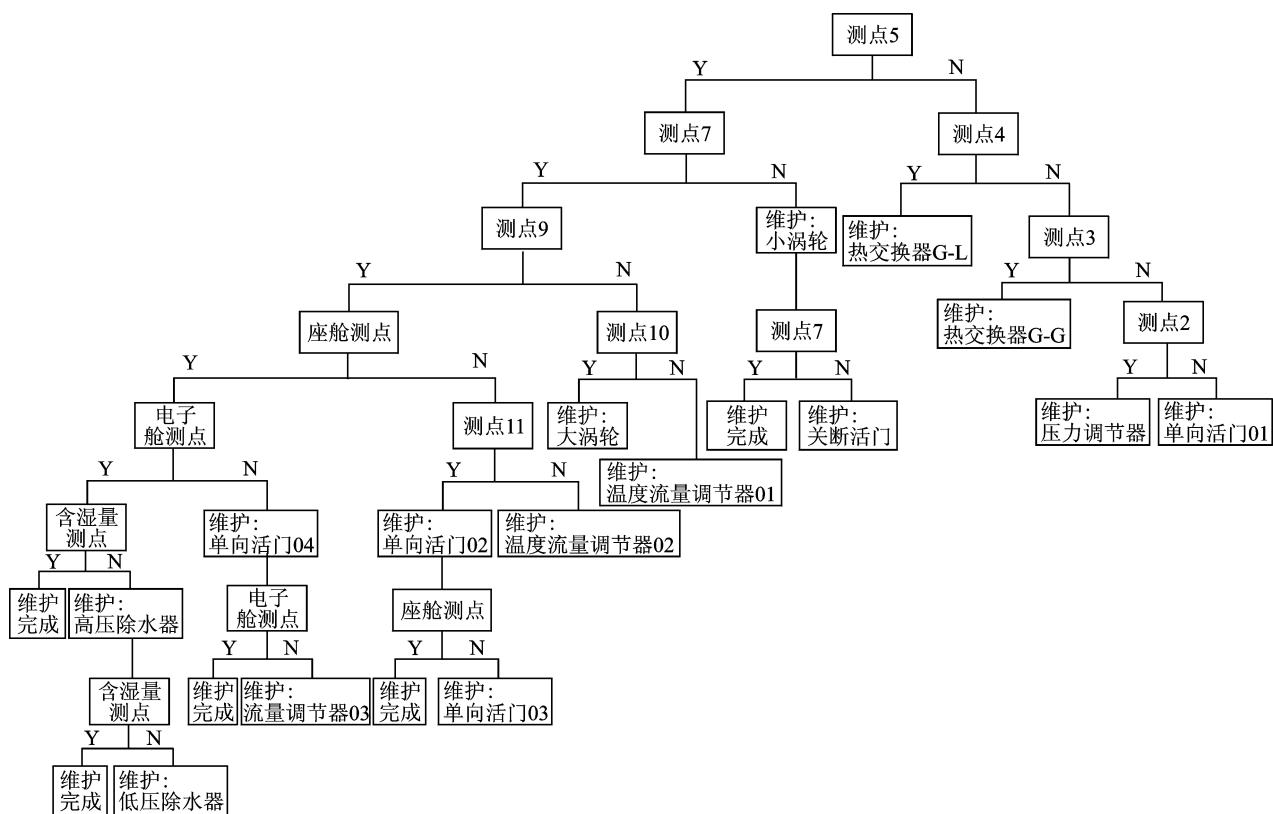


图4 飞机空调系统故障诊断树

Fig. 4 The fault diagnosis tree for aircraft air conditioning system

为 91.4%，系统部件级的故障隔离率为 85.5%，系统底层元件级故障源的故障隔离率仅为 32.9%。各部件的故障检测率和故障隔离率如表 4 所示。

表 4 飞机空调系统多层故障模型各部件 FDR/FIR 表

Tab. 4 The FDR/FIR of component fault model in aircraft air conditioning system

序号	系统部件	故障检测率	故障隔离率
1	单向活门 01	1.000	1.000
2	压力调节器	0.178	0.165
3	热交换器 G-G	0.608	0.445
4	热交换器 G-L	0.607	0.444
5	高压除水器	9.16×10^{-6}	0.000
6	大涡轮 01	0.999	0.000
7	小涡轮 02	0.999	0.000
8	低压除水器	9.16×10^{-6}	0.079
9	单向活门 02	1.000	0.000
10	单向活门 03	1.000	0.000
11	单向活门 04	0.073	0.952
12	流量调节器 03	1.000	0.000
13	关断活门	0.408	0.656
14	温度流量调节器 01	0.998	0.999
15	温度流量调节器 02	0.998	0.998

通过表 4 发现，压力调节器、高压除水器、低压除水器和单向活门 04 等部件的故障检测率较低。同时，对于压力调节器、高压除水器、大小涡轮、单向

活门 02、单向活门 03 和流量调节器 03 等部件的故障隔离率较低，特别是大小涡轮等部件的故障隔离率为 0，因此在故障诊断中难以对其进行故障隔离。为了改善飞机空调系统的故障检测率和故障隔离率，需要增加一定的测点来改善系统的故障诊断效率。考虑到增加测点的经济性与测量的实效性，这里仅对几个关键部件进行改进。在飞机空调系统中，涡轮的故障率是最高的。研究表明，涡轮的故障率约占整个系统的 61.8%^[7]。因此，首先对系统中的大小涡轮增加温度测点，再结合表 2 的故障检测和故障隔离结果，对压力调节器、高压除水器和流量调节器 03 等部件增加 5 个检测点。改进后的多信号流故障分析系统的故障检测率从 91.4% 提高到 100%，系统底层故障源的故障隔离率从 32.9% 提高到 83.9%，大大提高了系统的故障检测维修效率。

4 结束语

笔者在对某型飞机空调系统各部件进行 FMEA 分析的基础上，采用分层多信号流图方法对飞机空调系统进行了故障诊断与分析。通过研究给出了系统各故障源与检测点之间的关联矩阵，得出了空调系统的故障诊断树，为飞机空调系统故障诊断与故障维修提供了一定的基础。同时，研究发现该方法能够对飞机空调系统的各故障进行诊断和隔

离,其系统的故障检测率为91.4%,故障隔离率为32.9%。另外,通过增加涡轮、除水器等部件的检测点的方法,对飞机空调系统分层多信号流故障模型进行改进,改进后的系统可以使飞机空调系统的故障检测率提高到100%,故障隔离率提高到83.9%,大大提高了系统的故障诊断和维修效率。

参 考 文 献

- [1] Price D. Thermal management of military fighter aircraft electro-optics pod: an invited paper[C]// Semiconductor Thermal Measurement & Management Symposium. [S.l.]:IEEE,2003: 341-350.
- [2] Laster J P, Maxwell M J, Garner J E. Proven dynamic modeling techniques for concurrent design and analysis of ECS controllers [J]. SAE Transactions, 1990, 99(1):520-536.
- [3] 危虹,王浚.飞机环控系统可靠性设计与评价[J].航空学报,1998(2):224-227.
Wei Hong, Wang Jun. Aircraft ECS reliability design and evaluation [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998(2): 224-227. (in Chinese)
- [4] 赵俊茹.飞机环境控制系统的故障诊断研究[D].西安:西北工业大学,2005.
- [5] 何杰,朱磊,赵竞全.飞机换热器故障诊断仿真研究[J].计算机仿真,2012(7):65-69.
He Jie, Zhu Lei, Zhao Jingquan. Research on simulation of fault diagnosis of aircraft heat exchangers[J]. Computer Simulation, 2012(7):65-69. (in Chinese)
- [6] 贾宝惠,高蕾,杜宜东.基于FTA的飞机空调系统安全性分析[J].航空维修与工程,2010(3):74-76.
Jia Baohui, Gao Lei, Du Yidong. Air conditioning system safety analysis of aircraft based on FTA[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2010(3): 74-76. (in Chinese)
- [7] 李冰月,孙建红,刘海港,等.基于FMEA的飞机空调系统故障诊断与仿真[J].振动、测试与诊断,2017,37(3):588-595.
Li Bingyue, Sun Jianghong, Liu Haigang, et al. Fault diagnosis and simulation of aircraft air conditioning system based on FMEA [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(3): 588-595. (in Chinese)
- [8] 王辉,齐亚东.飞机空调系统频发故障模型构建及预测[J].航空维修与工程,2017(3):39-43.
Wang Hui, Qi Yadong. Modeling and forecasting frequent fault of aircraft air conditioning system[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2017(3): 39-43. (in Chinese)
- [9] Deb S, Pattipati K R, Raghavan V, et al. Multi-signal flow graphs: a novel approach for system testability analysis and fault diagnosis[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1994, 10(5):14-25.
- [10] 李登,尹亚兰,万福,等.基于TEAMS的短波综合通信系统多信号建模与分析[J].电子测量技术,2013,36(11):124-127.
Li Deng, Yin Yalan, Wan Fu, et al. Multi-signal modeling and analysis of HFICS based on TEAMS[J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(11): 124-127. (in Chinese)
- [11] 胡泊,常少莉.基于TEAMS的测试性仿真技术与应用研究[J].计算机测量与控制,2013,21(6):1434-1436.
Hu Bo, Chang Shaoli. Research of testability simulation technology and application based on TEAMS[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(6): 1434-1436. (in Chinese)
- [12] 秦文娟,王魁.基于TEAMS软件的空空导弹测试性建模方法[J].弹箭与制导学报,2011,31(5):44-46.
Qin Wenjuan, Wang Kui. The research on testability modeling method of air-to-air missile based on TEAMS[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(5): 44-46. (in Chinese)
- [13] 方甲永,肖明清,王学奇,等.测试不可靠条件下多故障诊断方法[J].北京航空航天大学学报,2011,37(4):433-438.
Fang Jiayong, Xiao Mingqing, Wang Xueqi, et al. Multiple fault diagnosis method with unreliable test [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(4): 433-438. (in Chinese)
- [14] Dai Zehua, Wang Li, Yang Shanshui, et al. Multi-signal model in application of spacecraft power system testability[C]//AIAA Aviation Forum. Washington, D C: AIAA, 2016: 4138-4144.
- [15] Azam M, Ghoshal S, Bell J, et al. Prognostics and health management (PHM) of electromechanical actuation (EMA) systems for next-generation aircraft [C]//Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences. Boston: AIAA, 2013:5138-5151.
- [16] Aaseng G B, Barszcz E, Valdez H, et al. Scaling up model-based diagnostic and fault effects reasoning for spacecraft[C]//American Institute of Aeronautics and Astronautics, Space Forum. Pasadena, California: AIAA, 2015: 4465-4485.
- [17] 朱海鹏,景博,杨洲,等.基于TEAMS的机载燃油测量系统测试性设计[J].电子测量技术,2012,35(7):12-16.
Zhu Haipeng, Jing Bo, Yang Zhou, et al. Airborne fuel measuring system testability analysis based on TEAMS [J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(7): 12-16. (in Chinese)
- [18] 李冰月.基于FMECA和FTA的机载制冷系统故障分析[D].南京:南京航空航天大学,2016.



第一作者简介:孙智,男,1987年6月生,博士生。主要研究方向为飞机热管理与热防护、飞机环控系统故障诊断与健康管

E-mail:sunnylegend@nuaa.edu.cn

通信作者简介:孙建红,男,1968年4月生,教授、博士生导师。主要研究方向为飞行器环控与健康管

E-mail:jhsun@nuaa.edu.cn