

基于多信号流图的亚跨超声速风洞故障诊断方法

杨 敬¹, 贾召会¹, 龚梦彤², 蔡 伟³, 刘佳豪¹, 王 轩², 樊艳春²

(1. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041;

2. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191;

3. 航空工业吉林航空维修有限责任公司, 吉林 132102)

摘要: 为了在风洞系统发生故障时实现快速准确的诊断与定位, 提出了基于多信号流图模型的风洞测试性建模方法; 针对风洞结构复杂、解析建模困难等特点, 首先通过分析系统组成与设备的功能结构对风洞进行了层次性划分, 并根据实际运行中出现的故障情况得到了风洞关键设备的 FMEA 结果; 而后以 FD-12 亚跨超声速风洞为研究对象建立了系统的多信号流图模型, 利用故障模式与测点对应关系建立了相关性矩阵; 最后采用 TEAMS-RT 算法对系统的测试性水平进行了分析和评估, 验证结果表明该方法对于风洞系统的测试性建模与故障诊断是有效的, 为风洞系统健康管理相关研究提供了参考。

关键词: 风洞; 多信号流图模型; 测试性建模; 故障诊断

A Multi-signal Flow Graph-based Fault Diagnosis Method for Subsonic Transonic Wind Tunnel

YANG Jing¹, JIA Zhaohui¹, GONG Mengtong², CAI Wei³, LIU Jiahao¹,
WANG Xuan², FAN Yanchun²

(1. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China;

2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. AVIC JILIN Aviation Maintenance Co., Ltd., Jilin 132102, China)

Abstract: A testability modeling method based on the multi-signal flow graph model was proposed to deal with the fault diagnosis problems of the wind tunnel system. According to the system composition and the functional structure of devices, the wind tunnel is divided into different levels, and the FMEA results of devices in wind tunnel are obtained according to the failure cases in the actual operation. Then a multi-signal flow graph model of FD-12 wind tunnel was established, and the correlation matrix was constructed using the corresponding relationship between the failure mode and the measuring point. Finally, the TEAMS-RT algorithm was used to evaluate the testability level and fault diagnose capability of the established model. Results show that this method is effective for testability modeling and fault diagnosis of wind tunnel system.

Keywords: wind tunnel; multi-signal flow graph model; testability modeling; fault diagnosis

0 引言

近年来随着我国航空航天领域相关技术的快速发展, 风洞在飞行器研制中的重要作用日益凸显。在风洞的长期运行过程中, 设备疲劳、老化和不及时的故障检测导致的维护时间消耗和经济损失逐年增加^[1]。为了增强风洞各测试段的性能监测和诊断能力, 提高风洞设备的可靠性和稳定性, 有必要对其进行可测试性分析, 并对故障诊断方法进行研究, 从而实现快速而精确的故障检测与隔离, 提升风洞试验的成功率, 为飞行器设计提供可靠的测试支撑^[2-4]。

基于多信号模型^[5]的故障诊断方法最初由美国康涅狄

格大学的 Pattipati 和 Deb 等人提出, 目前已广泛应用于测试性工程与系统维修领域^[6-12]。该方法以有向图的形式描述了系统组件与故障传播路径之间的关联关系, 能够清晰地体现实际组件与测点之间的对应关系。基于多信号流图的故障诊断具有故障建模难度低、故障诊断速度快、使用便捷等优点, 能够识别出已知的正常、故障和被怀疑的组件, 是一种通用的基于规则的诊断算法^[13]。

本文结合亚跨超声速风洞系统的特点, 提出了基于多信号流图的风洞系统故障知识描述方法, 并采用 Teams-RT 算法实现了对该型风洞的故障诊断, 验证结果表明该方法能够保证较高的故障检测率与隔离率, 进而为风洞故障维修决策提供相应参考。为实现多信号流图的快速建立,

收稿日期: 2021-02-07; 修回日期: 2021-03-09。

作者简介: 杨 敬(1985-), 女, 河北保定人, 博士研究生, 工程师, 主要从事装备损伤测试及装备 PHM 管理方向的研究。

引用格式: 杨 敬, 贾召会, 龚梦彤, 等. 基于多信号流图的亚跨超声速风洞故障诊断方法[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 67-71.

开发了多信号流程图建模工具,提高测试开发过程的灵活性。

1 风洞系统组成及测试性分析

1.1 风洞系统组成及关键部件

典型风洞通常由气源系统、真空及阀门系统、试验段、测量及控制系统和勤务系统组成,根据流场模拟要求的不同,具体风洞的尺寸、结构和功能有所差异^[14]。风洞正常运行依赖于各系统的协同工作,影响风洞性能的因素包括气源系统的气源压力、真空及阀门系统的流量控制、试验段的压力控制、测量及控制系统性能等。上述因素可能受到多部件的交联耦合影响,考虑到故障检测、隔离及维修保障要求,将风洞划分为整体、子系统(LRU)、部件(SRU)、各部件的故障模式4个层级,结构如图1所示,图中仅列出子系统中关键部件的常见故障模式,其余部分省略。

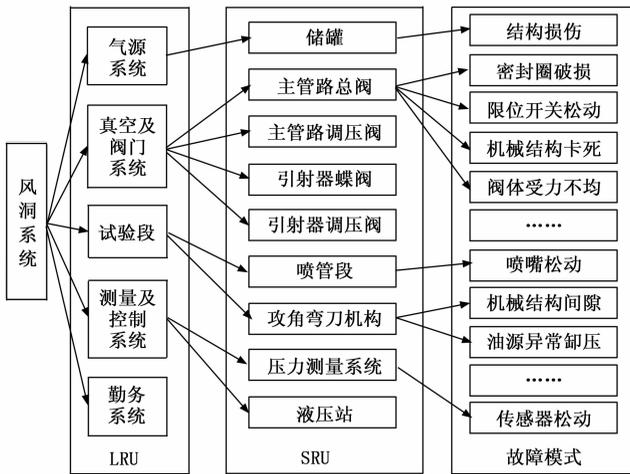


图1 风洞结构层次划分

1.2 风洞关键部件测试性研究

亚跨超声速风洞中的SRU主要包含储罐、主管路总阀、主管路调压阀、引射器蝶阀、引射器调压阀、喷管段、攻角弯刀机构、总压测量系统、液压站等。根据FD-12风洞实际运行中出现的故障情况,通过系统分析,能够确定系统的各个部件在设计和制造过程中所有可能的故障模式以及每一故障模式的原因及影响^[15],最终建立的风洞关键部件可测试性分析报告如表1所示。其中,故障模式定义为对象部件能观测到的故障现象的客观描述^[16],故障原因由故障机理和间接原因两部分决定^[17],故障等级体现了不同失效模式最终影响的严重程度^[18]。以主管路调压阀为例,

其故障模式主要包括密封不严、振动异常与动作异常,对应的故障原因分别为密封圈破损、受力不均与结构损坏,其中密封不严的故障严重程度最高。为了实现故障识别与定位,需针对每种故障模式归纳其故障检测方法,诊断结果可通过传感器监测信号分析得出。根据FD-12风洞系统中的传感器布局与可测试性分析报告中总结的检测方法构建故障模式集F与测试集T,如表2所示。考虑到诊断过程的复杂程度,文中仅涵盖了实际运行中经常出现的12种故障类型,分别对应16个测点,故障类型与测点的对应关系能够为后续多信号流程图建模提供依据。

2 基于多信号流程图的建模方法

多信号流程图模型描述了系统各层次之间故障模式交联耦合关系和测点与故障模式依赖性关系,是一种层次化故障测试有向传播网络模型。该建模方法的优势在于能够融合诊断知识、维修知识与预测知识,构建诊断、预测和维修一体化模型,同时降低建模难度,适用于复杂大型系统的模型构建。

多信号流程图模型组成元素包括^[19]:

- 1) 在有限的系统中构造部件集合 C ;
- 2) 构建与系统相关的独立信号集合 S ;
- 3) 构造 n 维有限测试集合 T ;
- 4) 有限的测试点集合 P ;
- 5) 每个测试点 p_i 对应的一组测试集 $TP(p_i)$;
- 6) 每个部件 c_i 影响的一组信号集 $SC(c_i)$;
- 7) 每个测试 t_j 检测到的一组信号子集 $ST(t_j)$;

多信号流程图模型可通过有向图 $DG = \{C, TP, E\}$ 表示,边 E 代表了系统中的故障传播关系。有向图中的基本元素包括子系统节点、故障节点、输出节点、输入节点和测试节点等,此外,与节点和开关节点等逻辑性节点也可加入到模型中。其中故障节点与部件的故障模式对应;子系统节点由多个故障节点封装组成,使故障源可以隔离到不同的层次^[20];测试节点表征一个故障节点的可测试性,只有输入端口属性;开关节点可用于表示系统的多模式特性;与节点则用于表示系统的冗余特性,连接线表示了信号的流向^[21]。

多信号流程图建模过程的具体步骤如下:

- 1) 输入结构模型、原理图或概念方框图;
- 2) 将信号加入模块或测试中,根据系统的结构和功能,确定每个模块或测点应该包含的信号集。

表1 风洞关键部件测试性分析

SUR	故障模式	故障等级	故障现象	故障原因	故障检测方法
主管路调压阀	密封不严	IV	阀门漏气	密封圈破损	检查阀间气压
	振动异常	I	阀体振动频谱发生显著变化	阀体受力不均	振动数据分析
	动作异常	II	总压调节规律异常	机械结构损坏	总压、位移数据分析
.....

表 2 风洞关键部件属性集描述

故障模式集 F	测试集 T
主管路总阀开关不到位 F_0	气源压力 T_0
主管路调压阀密封不严 F_1	总阀阀门杆行程 T_1 阀间压力 T_2
主管路调压阀振动异常 F_2	主管路调压阀振动 T_3
主管路调压阀动作异常 F_3	主管路调压阀阀门杆行程 T_4
攻角弯刀机构动作异常 F_4	管道及平稳段压力 T_5 试验段总静压 T_6
攻角弯刀机构振动异常 F_5	试攻角弯刀机构振动 T_7
引射器喷嘴松动 F_6	试攻角弯刀机构位移 T_8 阀间压力 T_9
引射器蝶阀开关不到位 F_7	引射器蝶阀阀门杆行程 T_{10}
引射器调压阀密封不严 F_8	引射器调压阀振动 T_{11}
引射器调压阀振动异常 F_9	引射器调压阀阀门杆行程 T_{12} 引射器稳定室压力 T_{13}
引射器调压阀动作异常 F_{10}	引射器喷嘴振动 T_{14}
扩散段振动异常 F_{11}	扩散段结构振动 T_{15}

3) 对一些特殊的情形进行模型修正:

- (1) 如果系统含有冗余, 通过与节点构建冗余组件;
- (2) 如果系统包含不同的运行模式, 采用开关节点对其建模;

在多信号流图模型中, 故障源与测试之间的依赖关系是通过对模块和测试定义关联信号来实现的, 以此为基础生成故障-测试相关矩阵 (D 矩阵) 对模型进行故障诊断。故障-测试相关矩阵是不同测试节点与部件故障模式集合之间的数学表示。

D 矩阵中, 行代表测试节点, 列代表某个部件的某种故障类型。系统故障 (第 j 个部件) 如果无法测出 (第 i 个测试), 则有 $d_{ij} = 0$; 如果能够测出, 则有 $d_{ij} = 1$; 数据 (源于传感器实时采集) 处理结束条件下所获得的检测结果为实时监测向量 $T = [t_i]$, 且 $t_i = 1, 0$ 分别表示测试没有通过或测试通过。

D 矩阵生成是进行可达性分析和相关性分析的过程。本文的 D 矩阵假设故障元件与其可达的测试之间均有信号关联 (对应完全故障), 各矩阵行的具体生成步骤如下:

- 1) 将 D -矩阵行所对应故障模式节点 F 作为中心, 建立空节点集合 T 、 O 、 N ;
- 2) 清空集合 N , 将各中心的后继节点放到集合 N 和集合 O 中, 如果后继节点为 test 节点, 则将该节点添加到集合 T 中; 如果生长中心为 switch 节点则根据 switch 的状态决定其后继节点; 如果后继节点为 and 节点, 且其前驱节点被遍历的个数未达到设定阈值, 则该 and 节点不并入 N , 否

则 and 节点并入 N ; 如果后继节点在集合 O 中, 则该节点不并入 N 中;

3) 如果 N 为空集结束生长, 集合 T 中的节点即为故障模式 F 所影响的测试, 否则将 N 中的节点作为节点, 进行步骤 2);

4) 对 D -矩阵各行对应的故障模式依次进行上述操作, 即可得到多信号流图模型完整的 D -矩阵; 若故障模式 F 是功能故障节点, 那么在步骤 3) 中删除集合 T 里所有与节点 F 没有信号交联的测试, 剩下的就是故障模式 F 所影响的测试。

为简化多信号流图模型的建模过程, 本文开发了一套多信号流图建模可视化软件, 如图 2 所示。建模过程中用户可自定义节点的属性, 并实现复杂系统的分层次建模。

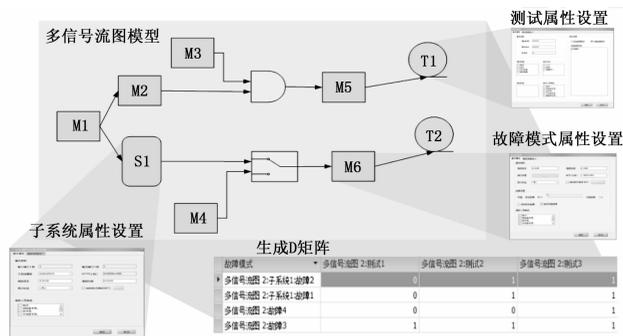


图 2 多信号流图建模可视化软件框图

3 基于多信号流图模型的故障诊断方法

基于风洞系统的多信号流图模型, 本文采用 TEAMS-RT 算法^[22-24]实现风洞系统的故障诊断。TEAMS-RT 算法以监测系统健康状态的智能传感器处理结果 (实时监测向量 T) 作为输入, 根据系统多信号流图模型生成的 D 矩阵进行实时故障诊断。系统各部件的健康状态定义为健康、故障、怀疑以及未知共 4 种。TEAMS-RT 算法的特点包括:

- 1) 传感器结果的高效实时处理;
- 2) 故障测试点依赖性的更新响应于系统状态的改变;
- 3) 依赖关系的更新取决于冗余组件的故障。

TEAMS-RT 算法计算复杂度低, 能够胜任大规模系统的快速故障诊断^[25]。但这种算法的缺点是得到的推理结果会将所有的可能性列出, 即除了故障部件外还会找出所有可疑部件。当故障源的个数未知时会造成较高的虚警率, 给维修人员带来不便。算法流程如下:

- 1) 初始化将所有潜在的系统故障置于 Unknow 集合中: 系统故障对应于 D 矩阵的每一行, 可通过遍历得到;
- 2) 处理通过的测试遍历通过的测试: 将影响这些测试的故障移动到 Good 集合中;
- 3) 处理失败的测试遍历失败的测试: 如果在 Unknow 集合中影响某一失败测试的故障源只有一个, 则将该故障添

表 3 风洞测试性模型相关性矩阵

F	T_0	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}	T_{12}	T_{13}	T_{14}	T_{15}
F_0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_3	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
F_5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
F_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
F_7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0
F_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
F_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
F_{10}	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0
F_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

加到 Bad 集合中，遍历结束后将 Bad 集合中的故障从 Unknow 集合中删去；

4) 添加可疑故障遍历失败的测试：如果在 Unknow 集合中仍存在导致测试失败的故障源，则将所有影响该测试的故障移动到 Suspected 集合中。

TEAMS-RT 推理用于实时诊断系统的故障，输入为系统健康状态的实时监测向量和系统当前工作模式下的 D 矩阵，输出为部件状态（未知、正常、怀疑、故障全部包括在内）的集合，算法流程如图 3 所示。



图 3 TEAMS-RT 算法流程

4 亚跨超声速风洞的故障诊断过程及结果分析

4.1 亚跨超声速风洞的多信号流图模型

基于 1.2 节中风洞关键部件测试性分析的相关结论，采用多信号流图建模方法对亚跨超声速风洞进行测试性建模。根据实际应用中风洞气流的流向与故障传播关系，将故障模式集 F 中对应的部件依次连接，并根据故障模式与测试集中的对应关系引出测试节点，建立的多信号流图模型如图 4 所示。模型中故障被隔离到 SRU 层，除喷口外各部件均对应 1 个或以上测试节点，体现了测点选择的合理性。基于该多信号流图模型生成的相关性矩阵如表 3 所示，根据结果可知共有 4 个故障模式与测点一一对应，分别为

F_2 、 F_6 、 F_9 与 F_{11} ，以上故障模式在诊断中应不存在漏检与虚警。而 F_1 与 F_8 所对应的测点存在能够检测多个故障的特点，因此其虚警率可能较高。

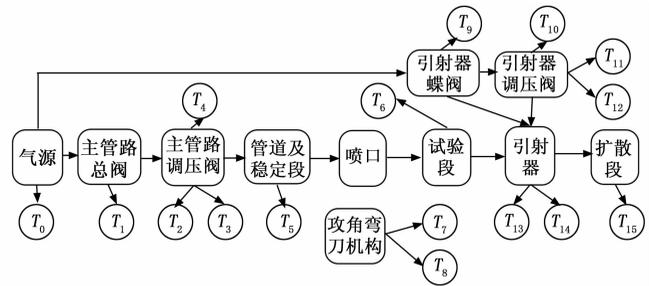


图 4 FD-12 风洞多信号流图模型

4.2 故障诊断结果

在风洞系统实际运行过程中，将表 3 所示的相关性矩阵与实时观测向量作为输入，可通过第 3 节给出的 TEAMS-RT 诊断算法实现故障诊断。系统中各部件的健康状态分为正常和故障 2 种，假设不存在状态未知的测试，通过仿真对系统注入数种或单一故障组合，应用上述方法对风洞系统关键设备进行故障诊断，验证结果如表 4 所示。其中，故障注入与风洞系统设备的多信号流图中的故障模式编号相对应，故障部件代表可确定的故障模式，可疑部件为不能确定但有故障可能的故障模式，未列出的部件为正常部件。由测试结果可知，针对本文搭建的风洞系统多信号流图模型，无论是注入单故障还是多故障，TEAMS-RT 算法均能将故障元件和可疑元件全部列出，不存在漏检，但存在一定虚警率。特别的，该模型对于单故障的检测效果较好，如表 4 所示当单独注入故障 F_3 与 F_6 时算法能够进行准确识别故障部件，无其他部件被列为可疑部件。此外，注入故障中涉及 F_1 与 F_8 时易产生虚警，这与 4.1 节中的分析相符合。

表 4 TEAMS-RT 算法诊断结果

故障注入	TEAMS-RT 算法诊断结果	
	故障部件	可疑部件
F_3	F_3	Φ
F_6	F_6	Φ
F_0	F_0	F_1
$F_8 \& F_{10}$	F_{10}	F_8
$F_3 \& F_7$	$F_3 \& F_7$	$F_1 \& F_8$
$F_1 \& F_4 \& F_8 \& F_{10}$	$F_1 \& F_4 \& F_{10}$	$F_5 \& F_8$

5 结束语

本文根据故障检测、隔离及维修保障要求对亚跨超声速风洞进行了层次划分,并依据实际运行中出现的故障情况对风洞关键设备进行了测试性分析,采用多信号流图模型建立了风洞的测试性模型,根据生成的相关矩阵实现了基于 TEAMS-RT 算法的风洞故障诊断。结果表明本文建立的多信号流图模型能够实现风洞故障诊断需求,但与建模过程中对风洞结构进行了简化,导致故障模式与测点数量相较于实际情况有所欠缺,后续将对风洞多信号流图模型进行优化,并基于模型构建风洞的诊断策略。

参考文献:

[1] 孙勇堂,赵之平,石运军,等. CAAA 新建 $\Phi 1.2$ 米常规高超声速风洞 [C] // 中国力学学会、北京理工大学. 中国力学大会-2017 暨庆祝中国力学学会成立 60 周年大会论文集 (B), 中国力学学会、北京理工大学: 中国力学学会, 2017: 8.

[2] 李杰,朱涛,许晓斌,等. $\Phi 1$ 米高超声速风洞自主式维修保障系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (2): 126-129, 136.

[3] 陈海峰,高鹏,阎成,等. 某跨超声速风洞运行监测及故障诊断系统 [J]. 兵工自动化, 2019, 38 (9): 35-38.

[4] 陈万华,王元兴,王超琪,等. 基于有限元法的风洞结构故障诊断 [J]. 实验流体力学, 2011, 25 (2): 63-67.

[5] DEB S, PATTIPATI K R, RAGHAVAN V, et al. Multi-signal flow graphs: a novel approach for system testability analysis and fault diagnosis [C] // Proceedings of AUTOTESTCON94. IEEE, 1994: 361-373.

[6] 顾艺,车兵辉,曹宇,等. 面向风洞群的装备自主式维修保障系统框架设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (2): 171-175.

[7] 张钊旭,王志杰,李建辰,等. 基于多信号模型的鱼雷测试性建模方法 [J]. 水下无人系统学报, 2017, 25 (5): 339-343.

[8] 吕晓明,黄考利,连光耀. 基于多信号流图的分层系统测试性建模与分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37 (9): 1151-1155.

[9] 薛凯旋,黄考利,张玮昕,等. 基于多信号模型的测试性分析与故障诊断策略设计 [J]. 弹箭与制导学报, 2008 (4): 225-227, 305.

[10] 杨智勇,许爱强,牛双诚. 基于多信号模型的系统测试性建模与分析 [J]. 工程设计学报, 2007 (5): 364-368, 394.

[11] 欧爱辉. 一种基于多信号流图的雷达系统测试性建模分析方法 [J]. 兵工自动化, 2014, 33 (4): 56-60.

[12] 韩宇杰,吕政良,林志文,等. 基于多功能故障模型的多信号流图建模及分析方法 [J]. 计算机研究与发展, 2010, 47 (s1): 96-100.

[13] 李凯凯,丁天宝,吕启元. 基于多信号流图模型的装备故障诊断方法 [J]. 火炮发射与控制学报, 2012 (1): 68-71.

[14] 陈天毅,陈旦,张永双,等. 风洞控制系统测试性的优化 [J]. 电子技术与软件工程, 2018 (5): 133-134.

[15] 王迪,刘佳,王岩峰,等. 基于多信号流模型的电子设备故障诊断方法 [J]. 强激光与粒子束, 2017, 29 (7): 99-103.

[16] CARMIGNANI G. An integrated structural framework to cost-based FMECA: the priority-cost FMECA [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 94 (4): 861-871.

[17] 康锐,石荣德. FMECA 技术及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 7-9.

[18] ZAFIROPOULOS E P, DIALYNAS E N. Reliability prediction and failure mode effects and criticality analysis (FMECA) of electronic devices using fuzzy logic [J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 2005, 22 (2): 183-200.

[19] 梁爽,于劲松,唐荻音,等. 基于多信号流图与分支定界算法的故障诊断 [J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42 (1): 180-186.

[20] PATTIPATI K R, DEB S, DONTAMSETTY M, et al. Start: System testability analysis and research tool [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1991, 6 (1): 13-20.

[21] 龚勇,景小宁,陈云翔,等. 基于多信号流图的飞控系统实时故障诊断 [J]. 光电与控制, 2006 (6): 89-92.

[22] 田华明,孙华,赵宏家. 复杂电子系统的 TEAMS 测试性研究 [J]. 测控技术, 2009, 28 (9): 72-76.

[23] 石君友,张鑫,邹天刚. 多信号建模与诊断策略设计技术应用 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33 (4): 811-815.

[24] 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, 1462.

[25] MATHUR A, DEB S, PATTIPATI K R. Modeling and real-time diagnostics in TEAMS-RT [C] // Proceedings of the 1998 American Control Conference, ACC (IEEE Cat. No. 98CH36207), IEEE, 1998, 3: 1610-1614.