

一种适用于飞行器航电综合的故障检测和重构方法

胡 欣, 王健康, 姚 旺, 刘 飞, 刘文文, 王琳娜, 欧连军, 梁 君

(中国运载火箭技术研究院 研究发展中心, 北京 100076)

摘要: 鉴于特殊的飞行任务需求, 某型号航电综合单一的故障逻辑难以满足多元故障状态下自主重构需求, 降低了系统容错性; 为解决航电综合多元故障模式难以量化表征影响故障重构的工程难题, 创新地提出了一种适用于航电综合的故障检测和重构方法, 基于决策表数据挖掘技术的航电综合故障预测流程和多源信息故障检测技术确保常规故障检测率大于 98%, 航电系统重构状态的量化表征分类方式确保了系统快速重构设计, 文章提出的故障检测和重构方法极大地提高航电综合系统的故障检测率与容错能力。

关键词: 航电综合; 故障检测; 重构

Method of Avionic Fault Diagnosis and System Reconfiguration

Hu Xin, Wang Jiankang, Yao Wang, Liu Fei, Liu Wenwen, Wang Linna, Ou Lianjun, Liang Jun

(R&D Center of China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: For the special flight mission, the single fault logic of one type of avionics is difficult to meet the demand of autonomous reconfiguration on the multiple failure condition, and the system fault tolerance is reduced. To solve the difficult to quantify impact fault reconstruction of the avionics integrated multiple failure modes, one method of avionic fault diagnosis and system reconfiguration was put forward. By combining data mining technology based on the decision table of avionics integrated fault prediction process and multi-source information fault detection technology, the normal fault detection rate can be ensured more than 98%. And the results of avionics system reconfigurable show that state of the avionics system reconstruction of quantitative characterization of classification can be used to ensure the design of rapid system reconfigurable. In this paper, the method improves avionic fault detection rate and system fault tolerance.

Keywords: avionic system; fault diagnosis; system reconfiguration

0 引言

根据任务需求, 某飞行器航电综合涵盖 GNC 系统、测控通信、任务管理、电源及配电等多个专业, 采取自上而下的顶层设计方法, 秉承一体化设计理念, 以高速数据总线为数据交互纽带, 将飞行器上电子设备进行连接, 大大减小航电综合系统的重量、功耗的同时, 也实现了系统内部的信息共享和综合控制。

飞行器上航电综合故障检测一般涉及内部测试 (BIT)。BIT 自检测包括系统加电自检测、周期自检测和指令自检测。在自检测方式中, 测试系统对检测到的故障自动分类为警告级和注意级, 并记录出现故障代码, 同时根据故障代码, 显示故障提示信息, 从而确定故障源^[1]。为实现飞行任务的高可靠性, 针对航电综合内部的故障多样性及复杂性, 内部测试 (BIT) 只能完成单一故障的定位和故障重构, 难以满足航电综合这类复杂系统的故障检测和重构需求。在对航电综合故障现象及原因研究的基础上, 综合运用综合推理方法和故障预测技术, 提出了一种适用于航电综合的故障检测和重构方法, 解决了航电综合系统多元故障模式难以量化表征及故障重构的工程难题, 极大地提高航电综合系统的可靠性与容错能力。

1 一种适用于某型飞行器航电综合的故障检测方法

在常规故障检测的基础上, 本文图 1 所示的故障预测流程,

用于对未来可能出现的故障情况进行预测, 及时告警, 为后续故障处理提供参考。图 1 中, 经数据采集、预处理获取航电综合故障信息数据, 然后将数据采集获得的监测数据同期望指标极限值 (阈值) 进行比较, 判别系统状态。同时综合利用预处理的数据信息评估航电综合工作状态是否恶化, 并确定故障发生的可能性, 预测航电综合工作状态, 比如剩余寿命预测等。

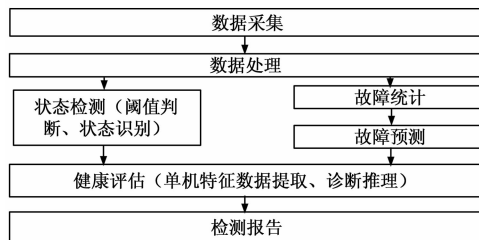


图 1 航电综合故障预测流程

结合图 1 的航电综合故障预测流程, 本文提出了一种适用于飞行器航电综合的故障检测方法, 利用基于决策表的数据挖掘技术, 通过对航电综合系统故障的识别、预测以及定位实现对航电综合系统的余度管理, 同时结合自适应算法实现航电综合系统的自学习, 通过大量历史数据不断建模, 完善故障诊断列表, 最大限度提高飞行器故障检测率, 步骤如下:

1) 建立飞行器航电综合系统故障诊断知识库; 所述故障诊断知识库包括故障诊断决策表和故障诊断规则; 利用基于粗糙集属性约简算法的数据挖掘方法获取飞行器航电综合系统故障类型, 进而建立无人机飞行器航电综合系统故障诊断知识库, 具体步骤为:

(1) 获取飞行器航电综合系统历史故障样本, 建立无人飞

收稿日期:2015-11-10; 修回日期:2015-12-09。

作者简介:胡 欣(1985-),男,湖北襄阳人,博士,高级工程师,主要从事航电综合设计方向的研究。

行器航电综合系统历史故障样本库；

(2) 对无人飞行器航电综合系统历史故障样本库中样本按故障类型进行划分，得到按故障类型划分的历史故障样本库，建立按故障类型划分的历史故障样本库集合；

(3) 分别对步骤(2)中得到的按故障类型划分的历史故障样本库进行数据预处理，构建每个按故障类型划分的历史故障样本库的故障诊断决策表；所述预处理包括故障提取、离散化和删除重复对象；

(4) 用基于差别矩阵的决策表属性约简算法对步骤(3)形成的故障诊断决策表进行属性约简，删除所有冗余条件属性；具体为：

令故障诊断决策表为 $S = \langle U, R, V, f \rangle$, $U = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ 为论域，其中 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为历史故障样本， n 为历史故障样本数， $R = P \cup D$ 为故障诊断决策表的属性集合，其中 $P = \{a_i \mid i = 1, \dots, m\}$ 为故障诊断决策表的属性集合， a_i 为第 i 个故障属性， m 为故障属性数， $D = \{d\}$ 为故障诊断决策表的决策属性集合，令 $C_D(i, j)$ 为差别矩阵中第 i 行 j 列的元素，则差别矩阵为：

$$C_D(i, j) = \begin{cases} \{a_k \mid a_k \in P \wedge a_k(x_i) \neq a_k(x_j)\}, & d(x_i) \neq d(x_j) \\ 0, & d(x_i) = d(x_j) \end{cases}$$

其中： $i, j = 1, \dots, n, a_i(x_j)$ 为历史故障样本 x_j 在故障属性 a_i 上的取值；所述 V 为历史故障样本库， f 为历史故障样本库的子集；

(5) 求出(4)差别矩阵中所有取值非空元素 $C_D(i, j)$ 的析取表达式 L_{ij} ，具体由公式： $L_{ij} = \bigvee_{a_i \in C_{ij}} a_i$ 给出；所述非空元素 $C_D(i, j)$ 满足 $C_D(i, j) \neq 0$ 和 $C_D(i, j) \neq \emptyset$ ；

(6) 将步骤(5)中的全部析取表达式 L_{ij} 罗列，并对它们进行整体合取运算，从而得出合取范式 L ，具体由公式： $L = \bigwedge_{C_{ij} \neq 0, C_{ij} \neq \emptyset} L_{ij}$ 给出；

(7) 将步骤(6)中的合取范式 L 化成析取表达式，完成决策表的属性约简，进而获取具备适应性的诊断规则；具体由公式： $L' = \bigvee_i L_i$ 给出；

(8) 利用步骤(7)中获取到的具备适应性的诊断规则更新飞行器航电综合系统故障诊断知识库中的初始诊断规则，并删除与初始诊断规则相冲突的具备适应性的诊断规则，所述初始诊断规则为人工获取的诊断规则。

2) 获取飞行器航电综合系统故障症状集合，令该故障症状集合为 C_1 ，将故障症状集合 C_1 存储于中间数据库；

3) 利用步骤2)中的故障症状集合 C_1 与步骤1)中故障诊断知识库中的所有故障诊断规则进行匹配，取出完整包含 C_1 中所有症状的故障诊断规则，设为 R_1 ，令 R_1 的全部故障诊断决策表组成的集合为 D_1 ；

4) 将集合 D_1 中对应的故障原因按照以往诊断成功次数进行降序排列，将决策集合 D_1 中诊断成功次数最多的故障原因 d_1 作为故障诊断预测结果输出，同时输出 d_1 所对应的故障症状集合中除去 C_1 之外的故障症状集合 C_2 ；

5) 逐项检查飞行器航电综合是否存在 C_2 中的各故障症状，若飞行器航电综合存在 C_2 中的各故障症状，则 d_1 为正确的诊断结果，结束故障诊断过程；否则， d_1 为错误的诊断结果，进入步骤6)；

6) 从 D_1 中删除 d_1 ，即 $D_1 = D_1 - d_1$ ，重复步骤4)~步

骤6)，直至获取正确的诊断结果 d_n ，进入步骤7)；

7) 输出最终诊断结果 d_n ，根据诊断结果 d_n 从预先给定的故障模式查找表中搜索定位故障模式，并且根据故障模式实现飞行器航电综合的自主快速动态重构。

2 某型号航电综合具体重构方案

2.1 某型号航电综合原重构方案

某型号航电综合通过对非关键短路单机进行供电自动切断的故障隔离，对关键单机进行多余度设计和故障后冗余度切换设计，采用多源信息故障检测、隔离与重构的信息融合设计实现系统重构设计。提高航电综合系统的容错性、可靠性，具体的冗余度设计如图2所示。

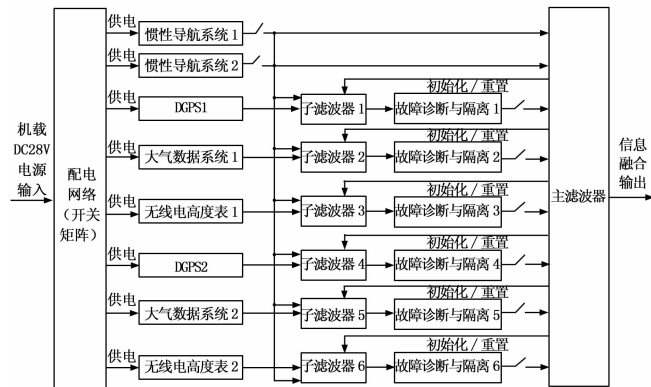


图2 某型号航电综合系统冗余度示意图

在配电方案设计中，首先依据航电综合设备的重要性进行分类配电，将飞行器上航电综合设备分为关键设备（为保证飞行器飞行安全所必需的用电设备）与非关键设备（飞行器上除关键用电设备之外的用电设备，如可见光摄像装置、传感器等，设备的失效不影响飞行任务的成败）。在此基础上，结合负载的供电类型以及负载所处的飞行器位置，将用电设备接入图1所示的配电网络中。鉴于关键设备一般在飞行器上均考虑冗余设计，单个负载的失效不会导致其功能的丧失，非关键设备的失效不影响飞行任务的前提条件，在航电综合设备发生短路时，通过断路器、磁保持继电器的断路实现故障隔离，在航电综合设备发生断路时，通过另一路备保线路（磁保持继电器的闭合）实现配电网络有效连接。对飞行控制与管理计算机、舵机控制器、舵机进行双冗余设计，自动检测主通道通信、供电、时钟、CPU状态等参数，在故障情况下切换至备通道，对惯组、雷达高度表、DGPS、大气数据系统进行主备设计，飞行控制与管理计算机全程监视通信状态、单机状态、测量异常等，并进行主备信号源的切换。在信息融合方面，首先对各信息源设置独立的滤波器，在信息源正常的情况下，利用局部测量进行参数更新，把更新后的局部信息融合成新的全局状态估计。一旦某一信息源出现故障，该故障被限制在其子滤波器内，当检测出故障后隔离有故障的子滤波器，最终的输出结果通过其它正常子滤波器的解合成，保证系统正常工作，通过联合滤波的方法实现故障的有效隔离和系统重构。

2.2 某型号航电综合改进后重构方案

对于航电综合系统来说，为更好地进行故障诊断及实现有效故障隔离，利用本文提出的一种适用于某型飞行器航电综合的故障检测方法，重新构建了适用于某型航电综合的系统重构

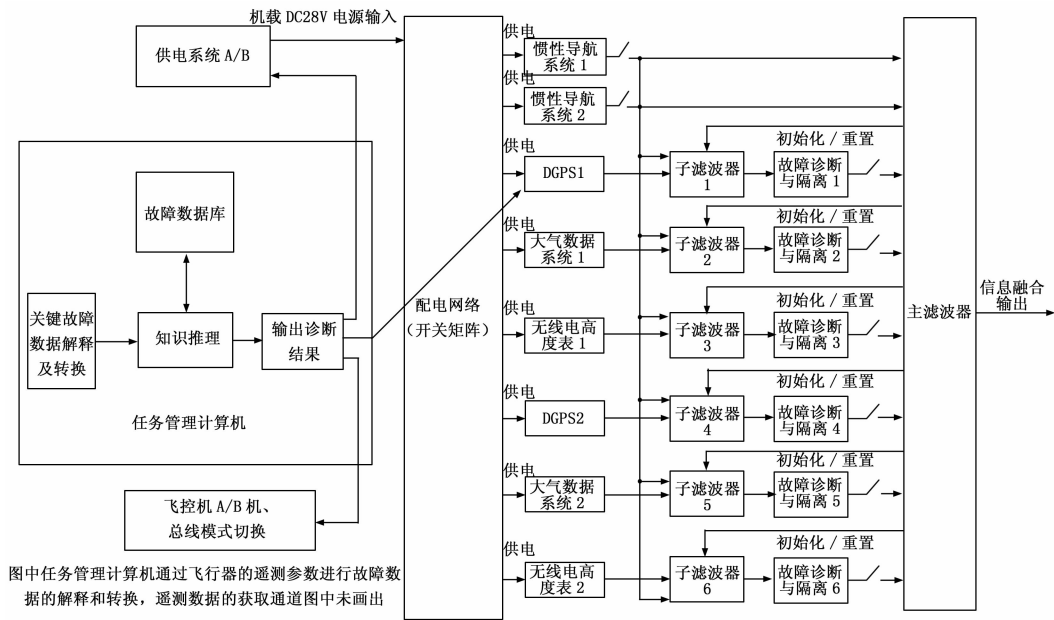


图 3 某型号航电综合系统重构流程(改进型)

流程,如图 3 所示,根据不同的故障模式进行单机、主总线、配电模块的余度切换,以及针对飞控机的降级重构。

将某型号航电综合系统的重构状态量化表征为 6 类,分别为, S_1 : 初始化工作方式; S_2 : 任务重启动方式; S_3 : 启动备份模块方式; S_4 : 降级重构方式; S_5 : 电源备份切换方式; S_6 : 总线备份切换方式。基于图 2,建立了故障模式与动态重构对照表,如表 1 所示,明确了多元故障状态下系统重构方式,所述故障模式与动态重构对照图如图 4 所示。

表 1 故障模式与动态重构对照表

重构状态	故障模式	重构动作
S_1 到 S_2	单机的硬件故障或软件故障导致单机工作状态字上报单机工作不正常。 硬件故障包括: 1. 通过 SBIT/PBIT/IBIT 测试程序检测出的单机模块中某硬件资源的故障,它包括 CPU、RAM、ROM、TIMER、WATCH-DOG; 2. 接口模块故障; 3. 电源模块故障。 软件故障包括: 1. 定时运行的任务,未能按时被系统调度而引发的超时故障; 2. 任务在运行过程中发现其控制或计算结果超出临界值的故障。	重新启动对应单机
S_2 到 S_3	硬件故障或软件故障发生率超过门限值 2 次	启动备份单机并切换至备份单机
S_1 到 S_4	处理模块上报已知故障代码,在没有可用的备份单机情况下进行模块降级重构	降级重构
S_1 、 S_3 、 S_4 到 S_6	在同一通信周期中,若飞控机与其它单机间连续通信五次故障(响应超时或状态字错误),则判定该总线通讯故障	总线备份切换
S_1 、 S_3 、 S_4 到 S_5	28V 电源母线上采集电压小于 16V 时,系统将启动备份电源工作	电源备份切换

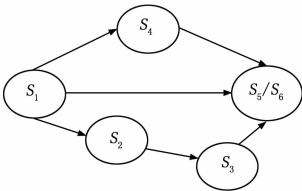


图 4 故障模式与动态重构对照图

各种重构状态对应的操作如下:

S_1 : 初始工作方式,代表无故障工作模式,不进行操作。

S_2 : 单机重新启动方式,重新启动关键单机,以便恢复未预知故障。

S_3 : 启动备份模块方式,当关键单机的硬件故障发生或软件故障发生,并且故障发生率超过 2 次门限值,则启动备份模块。

S_4 : 降级重构方式,本状态发生在关键单机已有故障而又没有可用的备份模块替代,这样为了保证系统继续有效,选择高优先功能工作,而放弃低优先功能工作。

S_5 : 电源备份切换方式,在当前工作电源模块发生故障时,系统将启动备份电源工作,而将故障电源模块隔离。

S_6 : 总线备份切换方式,在确认当前工作总线发生故障后,系统将启动备份总线工作,而将故障总线隔离。

3 试验结果与分析

按照本文的算法对某型航电系统进行故障检测与重构试验,具体的试验详见表 2。从预先给定的故障模式查找表中成功搜索定位故障模式,常规故障检测率均大于 98%,且根据不同的故障模式进行了飞控机、主总线、配电模块的余度切换。

4 结论

本文提出了一种适用于飞行器航电综合的系统故障检测方

(下转第 55 页)

间隙；

2) 当过载逐渐增大，头盔相对头模的线位移和角位移变化量很小，基本处于稳定状态，此时头模和头盔间的静摩擦力与过载惯性力平衡；

3) 当过载增大到一定的值，头盔相对头模出现大的线位移和角位移，静摩擦力与过载惯性力平衡被破坏；

4) 在较大的稳态载荷作用下，头盔相对头模的变化基本处于稳定状态。

结果表明，试验状态的综合显示头盔重心设计方案在动态载荷作用下，头盔和头模产生了较大的线位移和角位移，不能满足飞行工效要求，需要进行改进设计。

4 结束语

本文利用非接触式的测量方法实现了头盔与头模相对运动参数的测量，为综合显示头盔系统的研究设计，尤其是头盔质心位置设计提供了量化的依据。应用表明，其测量精度取决于摄像机内外参数标定的精度和拍摄帧频，因此，试验前的标定过程和摄像机参数的设置非常重要，其中后者应根据测量目标的动态特性选择合适的帧频，保证捕获到目标运动状态快速变化时的细节，同时应兼顾拍摄图像的分辨率和大小能够在后期图像处理时被可靠识别。

参考文献：

[1] 鲁 廷，王亚伟，柳松杨，等. 拦阻着舰过程中飞行员头颈部的动力学响应 [J]. 医用生物力学，2012，27（6）：642－647.

（上接第 23 页）

表 2 故障检测与重构试验

序号	模拟故障模式	故障检测率	重构	重构动作
1	模拟飞控机接口模块故障	98％	S ₁ 到 S ₂	重启动飞控机
2	模拟飞控机电源模块故障	100％	S ₁ 到 S ₂	重启动飞控机
3	模拟飞控机中调度而引发的超时故障	98％	S ₁ 到 S ₂	重启动飞控机
4	模拟飞控机中运算结果超出临界值故障	98％	S ₁ 到 S ₂	重启动飞控机
5	模拟飞控机故障发生率超过门限值 2 次	/	S ₂ 到 S ₃	启动备份飞控机并切换至备份单机
6	模拟惯导故障发生率超过门限值 2 次	/	S ₂ 到 S ₃	启动备份惯导并切换至备份单机
7	在同一通信周期中,模拟飞控机与其它单机间连续通信五次故障（响应超时或状态字错误）	99％	S ₁ 、S ₃ 、 S ₄ 到 S ₆	飞控机对外总线 备份切换
8	供电电压拉偏至 16V	100％	S ₁ 、S ₃ 、 S ₄ 到 S ₅	飞控机电源 备份切换

法和重构流程，构建了 6 类重构状态，解决了某型号电气系统故障模式分类量化表征问题，极大地提高电气系统的可靠性与容错能力，实现了电气功能复用、统一任务流程管理、能源统一配置优化、故障隔离与余度管理和导航信息故障检测重构，可推广应用于其它型号。

参考文献：

[1] 杨占才，王 红，朱永波，等. 飞机航电设备综合智能故障诊断专家系统研究 [J]. 测控技术，2006，25（4）：4－7.

[2] Mott D R, Young T R, Schwer D A. Blast loading on the head under a military helmet: effect of face shield and mandible Protection [A]. 52nd Aerospace Sciences Meeting [C]. 2014.

[3] Nichols J P. Windbalst assessment of helmet tether restraint for ejection [A]. 44th Annual SAFE Symposium [C]. 2006.

[4] 章毓晋. 图像理解与计算机视觉 [M]. 北京：清华大学出版社，2000.

[5] 崔彦平，葛杏卫. 飞行目标落地姿态视觉测量方法研究 [J]. 传感器与微系统，2010，29（7）：17－20.

[6] 毕 萍. 基于双目视觉的运动目标检测系统 [J]. 西安邮电学院学报，2012，17（1）：71－74.

[7] 宋 晋，马 军，蒋 敏. 双目视觉系统在风洞伞摆角测量中的研究与应用 [J]. 计算机测量与控制，2012，20（8）：2042－2044.

[8] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence，2000，22（11）：1330－1334.

[9] 林俊义，黄常标，刘 斌，等. 双目立体视觉摄像机标定及精度分析 [J]. 华侨大学学报（自然科学版），2011，32（4）：364－367.

[10] 陈玉萍，苏 博. 摄影测量中标记点编码与解码的方法 [J]. 技术与管理创新，2009，30（4）：516－525.

[11] 康喜若，姚东星. 基于双目视觉的相对物体的姿态测量 [J]. 导弹与航天运载技术，2014（1）：45－47.

[12] 沈文波，洪建忠，闵立武，等. 航空装备高动态大型离心机研制 [J]. 测控技术，2015，34（6）：85－88.

[2] 曹立军，王兴贵，秦俊奇，等. 融合案例与规则推理的故障预测专家系统 [J]. 计算机工程，2006，32（1）：208－210.

[3] 张金泽，蓝江桥. 基于支持向量机的装备故障诊断专家系统 [J]. 火力与指挥控制，2007，32（5）：28－31.

[4] 安跃文，李贤玉，王 晖，等. 基于故障树的导弹发动机失效诊断专家系统设计与实现 [J]. 弹箭与制导学报，2006，26（4）：218－220.

[5] 张叔农，谢劲松，康 锐. 电子产品健康监控和故障预测技术框架 [J]. 测控技术，2007，26（2）：12－18.