

文章编号: 2095-4980(2013)05-0770-05

Livingstone 用于航天器推进系统故障诊断

陈治佐, 刘兴钊, 吕高焕

(上海交通大学 电子工程系, 上海 200240)

摘 要: 航天器通常造价昂贵且无法批量生产, 对其进行故障检测和诊断研究实用且必要。由美国宇航局 NASA 开发的 Livingstone 软件系统, 使用一组多层次的定性逻辑模型来描述系统的行为, 通过比较模型预测数据和传感器实测数据来检测和诊断系统故障。本文旨在说明 Livingstone 软件能够应用于航天器故障检测和诊断领域。通过对 Livingstone 工作原理和过程的详细阐述, 并利用 Livingstone 对航天器推进系统简化模型做仿真实验, 给出可能的故障原因及可能性大小, 说明 Livingstone 是一种有效而可靠的故障检测和诊断工具, 能够快速、准确地诊断出航天器系统故障所在。

关键词: Livingstone 软件; 航天器; 基于模型诊断; 推进系统

中图分类号: TH165⁺.3

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201305.0770

Fault diagnosis of spacecraft propulsion system by using Livingstone

CHEN Zhi-zuo, LIU Xing-zhao, LV Gao-huan

(Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Spacecrafts are usually expensive and can not be put into mass production, thus it is very practical and necessary to do research on fault detection and diagnosis on spacecrafts. The Livingstone software system, developed by NASA, employs a group of multi-level qualitative logistic models to describe the behavior of the system, and detect and diagnose faults by comparing model prediction values and sensed values of the sensors. This paper is aimed at explaining the usage of Livingstone software in the area of fault detection and diagnosis on spacecrafts. The principle and working process of Livingstone are elaborated in detail. A simulation experiment is performed on a simplified model of spacecraft propulsion system. The reasonable fault causes and probabilities are analyzed. The experimental results show that Livingstone is an effective and reliable tool for fault detection and diagnosis, which can find the faults within system rapidly and correctly.

Key words: Livingstone; spacecrafts; model-based diagnosis; propulsion system

航天器, 又称空间飞行器, 是在地球大气层以外的宇宙空间中, 按照天体力学的规律运动的飞行器^[1]。它有以下几个特点: 1) 造价高昂, 如通信卫星的造价通常为上亿美元, 而军用通信卫星造价则更加高昂; 2) 生产周期长, 且无法批量生产, 如我国的“风云”气象卫星, 同一系列仅生产 1~2 颗; 3) 工作环境恶劣, 需要不间断地在强电磁辐射下的空间环境工作至少 2 年以上; 4) 故障诊断必须远程进行, 当航天器上天之后, 将脱离地面环境, 一旦出现问题, 将无法像汽车一样送到指定的维修点或者返厂进行故障诊断、测试和维修。随着我国航空航天事业的飞速发展, 航天器的发射已经从试验型转变为应用型。因此, 使用专门的软件工具, 对航天器进行系统的故障检测和诊断处理技术的研究, 可以提高航天器空间运行的可靠性并延长寿命, 具有很高的实际意义和经济实用性^[2]。

目前, 故障诊断已成为一个重要研究领域^[3]。航天器故障诊断方法主要分为 3 类: 一是基于信号处理的故障诊断方法, 该方法是诊断领域应用较早的方法之一。它以信号处理方法为主, 主要采用阈值模型^[4]; 二是基于模型的故障诊断方法, 可以分为定性模型诊断与定量模型诊断两类^[5]; 三是基于人工智能的故障诊断方法, 包括基于规则的专家系统诊断方法和基于神经网络的诊断方法^[6]。信号处理方法在故障诊断领域内发展较早, 已经成为

其他诊断方法的基础。基于规则的专家系统对人类专家的故障诊断经验加以总结,诊断速度快,容易应用于软件开发,但对历史故障经验的依赖性较强,难以诊断知识库以外的未知故障。基于神经网络的诊断方法具有高度的非线性和容错性,但其诊断过程的理论解释不够明确,并且可能因训练样本的问题而导致错误诊断。基于模型的诊断方法通过对比模型预期和系统实际间的差异来发现故障,诊断效率和准确率较高,在航天器故障检测和诊断中得到了广泛应用。

由美国国家航空航天局 NASA 开发的 Livingstone 开源软件系统是一个基于定性模型的故障诊断和恢复引擎。Livingstone 使用一组多层次的定性逻辑模型来描述系统的行为,能够在最小人工干预的情况下高效、鲁棒地实现对航天器、生命支持系统、化工厂或者其他复杂系统的故障检测和诊断,具有能诊断并发出现的多项故障、提供具体故障原因、检测未知故障以及选择故障恢复方案等诸多强大的功能^[7]。

本文首先阐述基于模型的故障诊断原理,在此基础上说明 Livingstone 的工作过程,以及 Livingstone 建模的基本原理。随后对航天器推进系统的简化模型进行仿真,在说明各个元件正常工作的条件和故障模式以及其可能性之后,假定若干可能出现的系统故障特征(即传感器数据异常),通过 Livingstone 引擎自动分析异常的传感器数据,得出故障诊断结果并按照故障可能性高低进行排序。

1 Livingstone 工作原理和过程

1.1 基于模型的故障诊断原理

基于模型的故障诊断采用一个通用的内部结构模型来实施对系统的诊断任务(故障检测和诊断)。诊断过程建立在模型的基础上,通过系统的输入输出间的静态或者动态关系加以判断。基于模型的故障诊断的基本原理就是系统预测行为和观测行为间的相互关系。如图 1 所示,系统的观测行为通过系统内的传感器实测给出。系统模型则用来预测在正常情况下系统应有的观测结果,即图 1 中的预测行为。通过预测行为和观测行为的比较和分析,确定其中的不一致性,即可完成诊断。

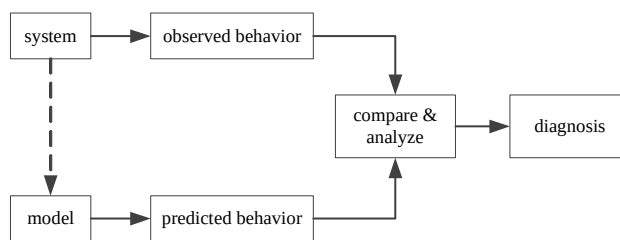


Fig.1 Principle of model-based diagnosis
图 1 基于模型的故障诊断原理

1.2 Livingstone 工作过程

图 2 给出了 Livingstone 工作过程的原理图,它由航天器(Spacecraft)、航天器模型(Spacecraft Model)、规划系统(Planner)以及配置管理器(Configuration Manager)构成。规划系统负责监控和调度航天器的运行,通常是位于地面的航天器控制中心。配置管理器包括 MI(Mode Identification)和 MR(Mode Reconfiguration)两部分,它可以确定航天器的当前状态,同时也可以使航天器进入下一个预定状态。MI 负责模式确定,根据将要执行的命令和元件的故障状况跟踪航天器状态的变化。MI 根据航天器模型和执行命令来预测下一个结构状态,然后通过与传感器观测结果的对比来了解航天器的结构状态,从而达到监控的目的。预测和实际观测值之间的差异就表征了一个故障。MI 为规划系统提供航天器已经成功完成的结构模式,确定航天器的空间运行状态与预期的不一致性,并能够根据模型确定引起故障的元件。如航天器运行正常,则系统仅保持实时观测而不作干预。如果出现故障,航天器的结构状态不能满足当前的预期目标时, Livingstone 启用 MR 来确定一系列控制过程,使航天器达到一个新的状态结构以满足预期目标。MR 根据规划系统的目标配置要求,将航天器配置到一个最低代价的硬件结构以达到目标,或者将航天器从一个故障状态转移到一个有复原功能的状态。如果无法完全恢复,那么 MR 就将航天器恢复到一个安全状态,等待地面运行团队的援助^[8]。

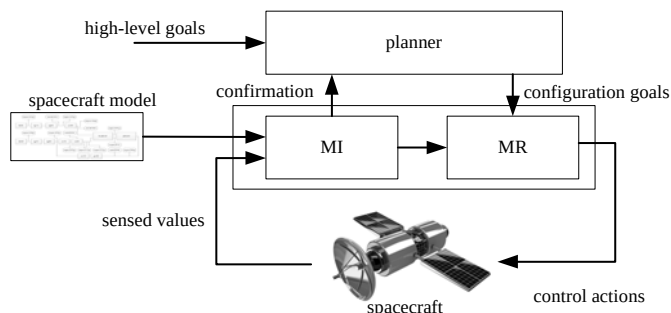


Fig.2 Working process of Livingstone
图 2 Livingstone 工作过程

1.3 Livingstone 建模

Livingstone 中的模型包括元件和连接两类。连接表示元件间的相互关联和影响。元件包括终端(输入端和输出端), 模式(正常模式、故障模式以及未知模式)以及其在正常模式和故障模式下的观测行为。元件包括一组变量。Livingstone 中的变量值将实际中连续变化的传感器观测数值抽象为与故障诊断相关的定性离散变量, 如“低于门限”和“高于门限”。当元件中的变量满足一定要求时, 元件就处于某种模式下。例如, 对于阀门而言当输出端的压力与输入端的压力相等时, 阀门就处于“打开”模式^[9]。

在 Livingstone 中, 元件的工作状态是定性的、有限的, 可以用状态转移模型来加以描述。图 3 展示了一个典型的阀门元件的状态转移模型。阀门中的每一个模式都和一定的限定条件相关联。如图 3 中“打开”状态的限定条件为输入端压力等于输出端压力, “关闭”状态的限定条件为输入端流量和输出端流量均为零。每一次状态转移或者是一次正常的状态转移, 或者是一次引发故障的状态转移。正常的状态转移由一条执行命令驱动, 如图 3 中的“阀门打开”和“阀门关闭”命令。引发故障的状态转移存在一定的发生概率, 如图 3 中状态转移至“打开卡住”的概率为 0.02, 状态转移至“关闭卡住”的概率为 0.01^[7]。

对于故障出现的可能性大小, Livingstone 中使用了 Ra(Rank) 加以描述。Ra 表示一次状态转移所对应的合理性。对于正常的状态转移, Ra 值为零。对于引发故障的状态转移, 设故障出现的概率为 p , 则 Ra 定义为最接近 $-\log(p)$ 的自然数。根据这样的定义, Ra 数值越小, 则对应故障出现的可能性越大, 某个故障的 Ra 值为 1 则表示该故障的可能性最大。同时, Ra 是可加的。对于由多个元件异常引起的故障, 其 Ra 值等于每个元件异常的 Ra 值之和^[9]。

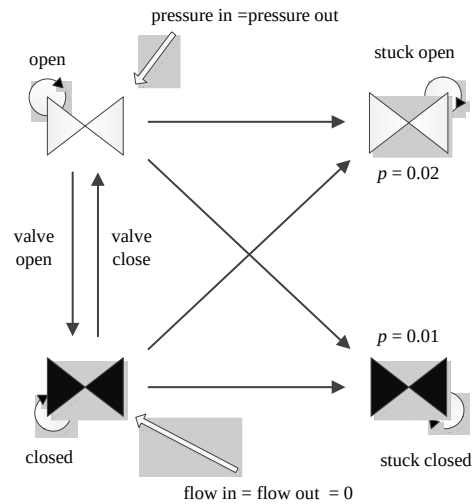


Fig.3 A typical transition model of a valve component

图 3 一个典型的阀门元件的状态转移模型

2 仿真实验

使用一个简化的航天器推进系统模型(如图 4 所示)进行仿真。图 4 中各符号含义: rg: regulator 调节器; tk: Helium tank 氦气箱; sv: Solenoid valve 电磁阀; vr: Vent relief valve 排气泻压阀; pv: Engine inlet valve 发动机进气阀; mpre: Pressure sensor 压力传感器; mrttd: Temperature sensor 温度传感器; fwdLO2: Forward LOX tank 前进用液氧存储箱; aftLO2: Afterward LOX tank 后退用液氧存储箱。

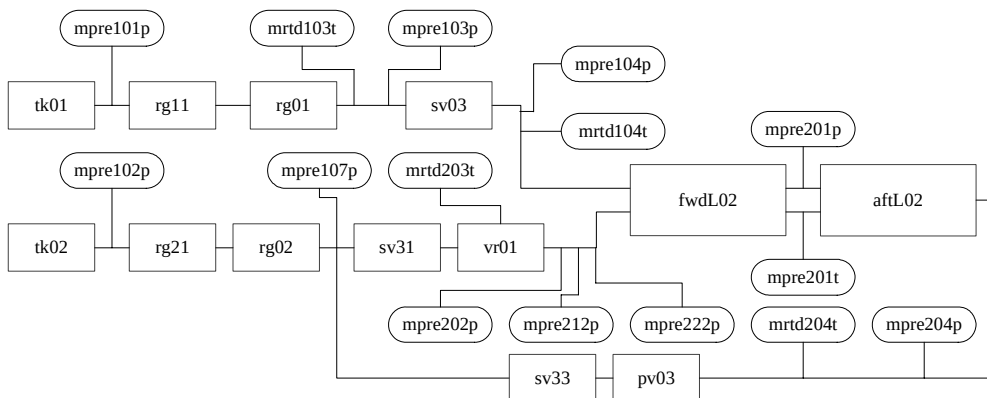


Fig.4 Propulsion system model of the spacecraft

图 4 航天器推进系统模型

表 1 列出了图 4 中各个元件的符号、正常模式、故障模式以及对应的 Ra 值。在仿真中使用了多个测试脚本, 对推进系统的各个部分进行测试。测试脚本由一系列对元件发布的控制命令和观测到的传感器状态数据组成。测试结果包括测试脚本描述、诊断结果以及对应的 Ra 值, 如表 2 所示。每次测试开始时 sv03, sv31 和 sv33 均处于关闭模式, 其余元件处于正常模式。

表 1 推进系统模型中各元件的符号、正常模式、故障模式及 Ra 值

Table1 Symbols, nominal modes and Ra values of the components in the propulsion system model				
component	symbol	nominal mode	failure mode	Ra
regulators	rg	when pressure in $\geq$ set point, pressure out=set point when pressure in<set point, pressure out=pressure in	regulating high	1
			regulating low	1
			unknown	10
helium tank	tk	pressure out>secondary regulator set point	unknown	10
solenoid valves	sv	when open and pressure $\geq$ set point, flow>0 when closed, flow=0	stuck open	2
			stuck closed	3
			unknown	10
vent relief valve	vr	when open, flow>0 and temperature in tank(lo2) mixture range when closed, flow=0 and temperature in ambient range	stuck open	1
			stuck closed	1
			unknown	10
engine inlet valve	pv	when open, pressure $\geq$ pressurization indicator when closed, flow in=flow out=0	stuck open	2
			stuck closed	2
			unknown	10
pressure sensors	mpre	pressure reading=sensed pressure	unknown	10
temperature sensors	mrt	temperature reading=sensed temperature	unknown	10

表 2 仿真测试结果

Table2 Results of simulation tests		
description of test scripts	diagnosis	Ra
mpre103p: rg01 pressure in range, rg11 pressure above threshold command: sv03 open	mpre103p unknown fault	10
mpre104p: rg01 pressure below threshold, rg11 pressure in range		
	rg11 regulating high	1
	rg01 unknown fault	10
	rg11 unknown fault	10
	mpre103p unknown fault	10
pv03: open indicator not open, close indicator closed mpre107p: rg02 pressure below threshold, rg21 pressure in range	pv03 stuck closed	2
	sv33 stuck closed	3
	sv33 unknown fault	10
pv03: open indicator open, close indicator not closed mpre202p: pressurization rate below threshold, boil off rate below threshold, bleed rate in range, venting rate above threshold	pv03 stuck open	2
	sv33 stuck open	2
	pv03 unknown	10
	sv33 unknown	10
command: sv31 open sv31: micro switch open mrt203t: ambient temperature below threshold, tank mixture temperature in range mpre202p: pressurization rate below threshold, boil off rate below threshold, bleed rate below threshold, venting rate in range	vr01 stuck closed	13
	pv03 stuck open	
	mrt203t unknown fault	13
	vr01 stuck closed	
	sv33 stuck open	13
	mrt203t unknown fault	
	rg02 regulating low	13
	pv03 stuck open	
	mrt203t unknown fault	13

通过上述仿真实验结果，可以看到 Livingstone 有效地在不同的条件下，根据不同的传感器异常数据进行自动分析，成功诊断出了符合逻辑的故障原因(列举了相关故障元件及其故障模式)，并给出了相应的 Ra 值(即故障可能性大小)。

3 结论

Livingstone 系统通过基于元件的离散模型，能够准确描述航天器系统。通过比较模型预测结果和传感器观测结果，Livingstone 能够准确预测航天器系统当前状况，判断航天器是否出现故障，以及从故障中选择最佳恢复方案。本文首先阐述了基于模型的 Livingstone 的基本工作原理和工作过程，并在此基础之上对航天器推进系统简化模型做仿真实验，说明了 Livingstone 可以有效应用于推进系统的故障检测和诊断。可以预见，Livingstone 不仅能够运用于航天器的推进系统，对于其他子系统也同样适用。通过引入 Livingstone 软件系统，可以帮助相关研发人员在航天器仿真测试、设备地面调试和空间运行监测等多个环节做到实时监测、快速发现故障并准确诊断出故障原因。

参考文献：

[1] 谢础,贾玉红,黄俊,等. 航空航天技术概论[M]. 2nd ed. 北京:北京航空航天大学出版社, 2008:7-8. (XIE Chu,JIA Yuhong,HUANG Jun,et al. Introduction to Aerospace Technology[M]. 2nd ed. Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2008:7-8.)

- [2] 杨莉. 基于主元分析的多变量统计过程的故障辨识技术[J]. 信息与电子工程, 2004,2(4):477-479. (YANG Li. Faults Distinguish Technology of Multivariate Statistical Process Based on Principle Component Analysis[J]. Information and Electronic Engineering, 2004,2(4):477-479.)
- [3] 段平,胡捷. 基于 MATLAB 的串联系统可靠性整数优化[J]. 信息与电子工程, 2009,7(5):256-313. (DUAN Ping,HU Jie. Integer optimization of the series system reliability based on MATLAB[J]. Information and Electronic Engineering, 2009, 7(5):256-313.)
- [4] Poter I E,Sunman M C. Threshold Redundancy Management with Arrays of Skewed Instrument[J]. Automatica, 1989,25(1): 59-77.
- [5] 韩旭,史忠植,林芬. 基于模型诊断的研究进展[J]. 高技术通讯, 2009,19(5):543-550. (HAN Xu,SHI Zhongzhi,LIN Fen. Research advances in model-based diagnosis[J]. Chinese High Technology Letters, 2009,19(5):543-550.)
- [6] 宋政吉. 航天器分布式融合诊断理论与技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2001:37-43. (SONG Zhengji. Spacecraft distributed fusion diagnostic theory and technology research[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2001: 37-43.)
- [7] Gao X Y,Jun Z,Ning N. The Livingstone Model of a Spacecraft Power System[C]// Proceedings of the 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Washington:IEEE Computer Society, 2010,3:896-899.
- [8] Williams B C,Nayak P P. A Model-based Approach to Reactive Self-Configuring Systems[C]// Proceedings of AAAI-96. Oregon:AAAI Press, 1996:971-978.
- [9] Bajwa A,Sweet A. The Livingstone Model of a Main Propulsion System[C]// Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2003,2:869-876.

作者简介:



陈治佐(1988-), 男, 成都市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为复杂系统的故障检测、高性能服务器与数据库系统. email:bigzuozuo@gmail.com.

刘兴钊(1962-), 男, 南京市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为自适应信号处理、阵列信号处理、信号检测与估值.

吕高焕(1977-), 男, 山东省巨野市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为 SAR 信号处理与地面移动目标识别.

(上接第 756 页)

- [5] Li P,Liu L,Wu K,et al. Interleave-division multiple-access[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2006,5(4):938-947.
- [6] Wu K,Li P. A quasi-random approach to space-time codes[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2008,54(3):1073-1085.
- [7] Kusume K,Bauch G,Utschick W. IDMA vs. CDMA:analysis and comparison of two multiple access schemes[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2012,11(1):78-87.
- [8] Griffin J D,Durgin G D. Gains for RF tags using multiple antennas[J]. IEEE Trans. Antennas Propag, 2008,56(2):563-570.

作者简介:



沈伟杰(1988-), 男, 上海市人, 在读硕士研究生, 研究方向为无线传感器网络技术. email:10210720096@fudan.edu.cn.

周小林(1973-), 男, 南京市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为无线通信信号处理.

屠艳菊(1989-), 女, 上海市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线通信、光信号接收.