

基于 MAS 的航天器故障诊断系统模型

宋其江,徐敏强,王日新

(哈尔滨工业大学 深空探测基础研究中心,哈尔滨 150080)

摘要:为了实现航天器故障处理的实时性、智能性,本文构建了基于 MAS(Multi-Agent System)的航天器故障诊断系统模型。该结构通过分层实现了系统级诊断、缩小计算空间及加快隔离故障源。诊断智能体根据本系统的领域知识特点,建立自己的智能诊断模型,能够自主处理紧急故障;多个智能体能够协同并行地工作,提高了诊断速度。本文还构建了基于 HLA(high level architecture)的故障诊断系统的仿真平台,通过仿真证明了该航天器故障诊断系统模型的优越性,也验证了仿真平台的可行性。

关键词:航天器;MAS;诊断系统模型;分层诊断;HLA

中图分类号:V476; TP391 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2009)02-0546-05

MAS-based fault diagnosis system model of spacecraft

SONG Qi-jiang, XU Min-qiang, WANG Ri-xin

(Deep Space Exploration Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: To realize real-time and intelligence in fault diagnosis system, a Multi-Agent System (MAS) based fault diagnosis system model of spacecraft was proposed. The framework of the model realizes system-level diagnosis by hierarchical strategy, reduces computer space, and accelerates the isolation of fault source. The diagnosis Agent may construct its own diagnosis model according to the features of the domain knowledge of the subsystem, and can autonomously deal with emergency fault. Multi-Agents can accomplish mission coordinately, thus the diagnosis efficiency is improved due to concurrent work. Furthermore, a High-Level Architecture (HLA) based fault diagnosis system simulation platform is constructed. Simulation results show the superiority of the proposed fault diagnosis system model and validate the simulation platform.

Key words: spacecraft; MAS; diagnosis system model; hierarchical diagnosis; HLA

传统的航天器故障诊断一般由地面负责其状态监测和故障诊断工作,但是对一些需要紧急处理的故障,如危及到航天员生命的突发故障等,由于航天器与地面站通讯时间上的延迟,建立在轨自主

故障诊断系统,进行自主诊断来应对紧急故障,已经成为地面航天器故障诊断的有力补充。1999年4月,NASA在DS1(Deep space one)上进行了自主控制试验,DS1上的RA(Remote agent)成为人工

收稿日期:2007-06-01.

基金项目:“863”国家高技术研究发展计划项目(2003AA735080).

作者简介:宋其江(1975-),男,博士研究生.研究方向:航天器的自主控制,智能诊断,系统仿真.

E-mail: songqijiang@hit.edu.cn

通信作者:徐敏强(1960-),男,教授,博士生导师.研究方向:信号处理,故障诊断,自主控制.

E-mail: xumq@hit.edu.cn

智能技术在航天器自主控制与诊断技术应用的首例,其中故障诊断部分为基于定性模型的模式识别与系统重构模块^[1]。2000 年 9 月发射了 EO-1 (The earth observing one satellite),为了验证星上的自主故障诊断系统,故障诊断系统采用 L2 (Livingstone 2) 基于模型的诊断引擎^[2]。NASA 基于 ANTS (The autonomous nano-technology swarm) 的任务成为 NASA 的一个新的任务观念,是基于智能群集技术的任务系统架构,它与 MAS 有相同的思想^[3]。针对太空生命维持系统,文献^[4]提出混合 livingstone 和三层多智能体结构的控制和诊断系统。可见,国外在航天器故障诊断中已经开始采用人工智能技术实现故障诊断的智能化。基于模型诊断的一个主要障碍是待诊断系统中部件数目很大时,要考察的诊断解的空间也非常大,降低了诊断的速度和精确度。分层实现系统级诊断是解决基于模型诊断计算复杂性、加快诊断速度的一种可行的方法。此外,航天器故障诊断已经不是传统意义的范畴,正向着包括状态监测、故障预警、故障诊断、故障隔离和系统重构等内容构成的独立的集成健康管理系发展^[5]。

本文构建了基于 MAS 的航天器故障诊断系统模型,该结构通过分层实现了系统级诊断,可缩小计算空间、加快隔离故障源;诊断智能体根据本系统的领域知识特点,建立自己的智能诊断模型,能够自主处理紧急故障;多个智能体能够协同地、并行地工作,提高了诊断的速度。而且,本文还构建了基于 HLA 的故障诊断系统的仿真平台,通过仿真结果证明了基于 MAS 结构能够实现分层的系统级诊断,也验证了该仿真平台的可行性。

1 分层诊断

航天器作为一个复杂的大系统,各个分系统间紧密耦合,例如,电源系统与其他系统就具有耦合关系,航天器的结构和功能是分布式和多层次的,这在一定程度上要求其诊断系统也是分布式和多层次的。分层诊断属于系统级的诊断,能够更好地隔离故障源,保护系统不会因为一个子系统的单个故障而连锁引发其他相关子系统也发生故障。而且,分层诊断是解决基于模型诊断计算复杂性的一种可行的方法^[6]。一开始在最高抽象层进行诊断,直至分隔出故障部件,分层诊断使得每层系统模型简单,搜索空间小,搜索得到的粗略的解被用于指导其细化层诊断的搜索,然后在

细化层再诊断。

从系统论的观点,一个系统是由有限个“元素”按照某种“联系”构成的多层次系统,这种联系可以从结构、功能、故障相关性等方面体现^[7]。系统分层可以根据系统特点,按照结构、功能等来分层。

按照航天器结构和功能,航天器故障分层诊断模型如图 1 所示。航天器被分为系统级、子系统级、部件级 3 个层次。

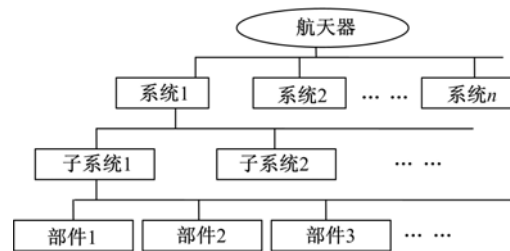


图 1 航天器分层故障诊断模型

Fig. 1 Hierarchical fault diagnosis model of spacecraft

2 基于 MAS 的故障诊断系统模型

MAS 源于 DAI (Distribute AI),它是为智能化求解复杂问题而发展起来的,涉及并行计算、分布式问题求解、知识工程和专家系统等许多领域,目的就是使多个 Agent 之间进行交互、协调与合作共同完成一个任务或问题求解,表现出一定的群体智能性。本文将 MAS 技术引入航天器故障诊断领域,设计了基于 MAS 的分布式故障智能诊断模型,实现了分层的系统级诊断,同时对各 Agent 的内部诊断机制、多 Agent 间的交互和协作,以及诊断策略问题进行了研究。

2.1 故障诊断系统结构模型

将图 1 所示的分层结构映射为一个故障诊断 MAS,由于 MAS 中的 Agent 的知识、能力和目标是分散的,缺乏全局的目标和控制,容易造成 Agent 间的任务目标和求解结果的冲突。要实现协同、消除冲突,本系统模型采用了集中式 MAS 结构,即其中有多数 Agent 作为集中管理机构,负责对其下属的诊断 Agent 成员的行为、任务分配和信息资源的共享提供一个统一的协调和管理的中心。故障诊断系统结构模型如图 2 所示,将系统 Agent、诊断 Agent 分别映射为对航天器的系统和子系统的智能诊断系统。

模型中全局 Agent、系统 Agent、诊断 Agent 的功能模块如图 3~图 5 所示,功能说明如下。

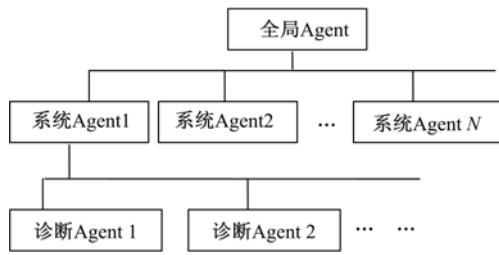


图 2 故障诊断系统结构模型

Fig. 2 Fault diagnosis architecture model

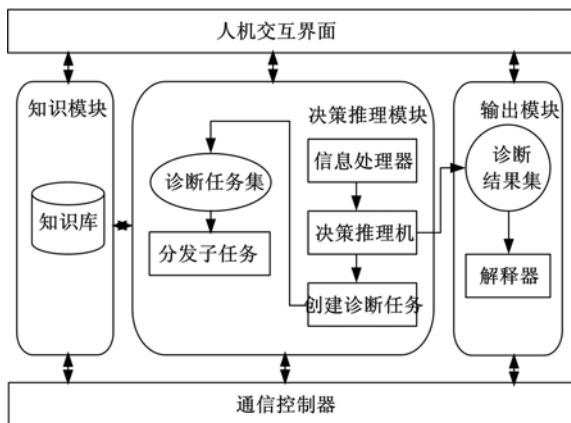


图 3 全局 Agent 模型

Fig. 3 Global Agent model

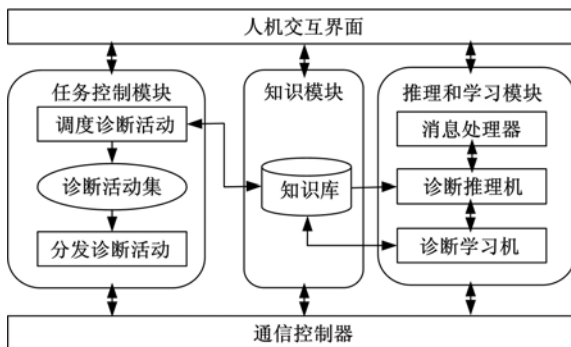


图 4 系统 Agent 模型

Fig. 4 System Agent model

(1)全局 Agent 负责全局的诊断任务的分配、协调控制;与地面故障诊断系统的协作,诊断结果的融合和决策。主要功能有:根据其下级系统 Agent 通告的故障信息,通过地面故障诊断系统创建诊断任务(确定参与诊断的 Agent 组合),根据诊断对象的结构特点和故障特点等知识对诊断任务进行分解,并将分解后子任务分配到相关的下级 Agent 上;对下级系统送来的诊断结果通过与地面故障诊断系统通讯进行融合和决策,形成诊断结果集。特别需指出的是,当检测到某系统 Agent 对应的实际系统发生了严重故障,而且

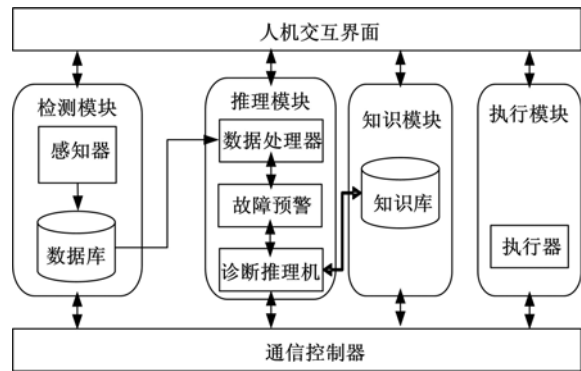


图 5 诊断 Agent 模型

Fig. 5 Diagnosis Agent model

威胁到其他系统的安全时,应关闭通往其他系统的通道,同时使该实际系统进入安全模式,自主创建诊断任务,进行自主诊断,根据系统的冗余备份情况,向下级发送重构指令,进行自主的系统重构。

(2)系统 Agent 主要负责系统级诊断,对诊断活动的分配、调度以及协调控制具体内容包括:根据其管理的下级 Agent 通告的故障消息上传给全局 Agent 模块,当检测到某个诊断 Agent 对应的实际子系统发生了严重故障并威胁到其他子系统的安全时,应关闭通往其他子系统的通道,隔离故障源;对于分发下来的诊断任务,根据知识库中的系统知识,经过任务控制模块,按结构和功能把诊断任务分解成局部的诊断活动,形成诊断活动集。接着,对诊断活动进行分发,向上传递收集来的诊断结果。学习机通过对一次系统级的成功诊断的学习,将诊断以案例的形式存储到知识库中,提供给诊断推理机诊断时查询。

(3)诊断 Agent 组成部分的主要功能如下:
 ①感知器:通过传感器监测环境信息和航天器状态信息,并将这些信息处理后储存到数据库中,提供给故障推理机进行故障预测和诊断。
 ②故障推理机:分析数据库中信息数据,进行故障预测,将故障预测结果和发生故障时故障状态信息发送到上级系统 Agent;对上级 Agent 分发的诊断任务,根据知识库的经验知识或模型知识,还有来自感知器的信息,利用诊断推理机完成对故障初步诊断。
 ③执行器:执行系统重构指令,成功后发送反馈消息。其中各层 Agent 中相同模块的功能说明如下。人机交互界面:显示该 Agent 工作状态和诊断结果,而且可以通过人机交互向 Agent 提出诊断要求,还可以完成对各模块的更新。通信

控制器:完成对来自上级 Agent 的消息进行接收,并分发给本 Agent 的相关模块,同时将各模块产生的结果发送给上级 Agent。

2.2 诊断任务的分配和控制策略

分解原则是:诊断子任务目标明确,减少子任务间的耦合性,从而减少子任务间的协作和通信,增加子任务间执行的并行程度。诊断活动是指包含明确的故障诊断操作的任务,可以对某部分结构作出明确的诊断结果^[8]。诊断活动间的耦合性相对要强,需要协调控制。

采用并行和串行相结合的任务控制策略,在诊断系统的顶层宜采用并行控制策略,在下层宜采用串行控制策略,在执行速度和控制上获得均衡。

对于紧急故障,在轨自主故障诊断系统作为地面航天器故障诊断系统的有力补充,进行自主诊断。对于非紧急故障,地面诊断系统具有绝对的控制权。地面诊断系统通过对下传的故障预测和故障诊断信息进行全面分析后,创建诊断任务,再上传到在轨自主故障诊断系统,对诊断结果进行融合和决策,建立重构指令,进行系统重构。

3 故障诊断系统的仿真环境构建

3.1 MAS 的通信模式

诊断 Agent 间要相互交互和协作就必须有通讯,KQML (Knowledge query and manipulation language)是用来实现 MAS 中 Agent 之间交互的消息格式和消息处理的一套协议。KQML 语言可扩展,针对不同领域的 MAS 系统可以定义新的行为词,为满足航天器系统的诊断的要求,扩展的行为词如表 1 所示。

表 1 诊断系统扩展的行为词

Table 1 Extend performative for diagnosis system

行为词	含义
SendFault	发送故障信息
SendPrognostics	发送故障预测信息
Request	发送查询
SendGoal	发送诊断任务
SendActivity	发送诊断活动
Result	返回诊断结果
Reconfigure	重构指令
Confirm	确认执行有效

3.2 诊断系统仿真平台

DMSO (美国国防部与仿真办公室)提出的 HLA 是分布式交互仿真的高层体系结构,由于

HLA 促进了仿真部件的互操作性和可重用性,使得它在一些分布式交互仿真领域中得到了广泛的应用,已经成为 IEEE 的建模与仿真标准^[9-10]。本文的仿真环境是将 HLA 规范和 Agent 所具有的智能化有机结合起来,构建一个基于 HLA 的 MAS 技术实现框架,这种结合能使 MAS 体系建立在较为成熟的 HLA/RTI 框架结构基础之上,是实现将 AI 技术和仿真技术相结合的一种尝试。

基于 HLA 的仿真系统,可以通过定义联邦成员的交互类表示 Agent 之间通信的行为元语。在 FOM 中将行为元语定义为交互类,并将每个行为元语的参数定义为相应交互的参数。对于行为词 SendFault 定义的交互类如表 2 所示。

表 2 行为词对应的交互类

Table 2 Interaction class corresponding performative

交互类	参数	数据类型
SendFault	Send	string
	Receive	string
	language	string
	Ontology	string
	Priority	unsigned long
	content	string

将 KQML 集成到 HLA/RTI 的体系结构中,RTI 成为 Agent 间通信的基础。基于 MAS 的故障诊断系统仿真平台通讯模型如图 6 所示。

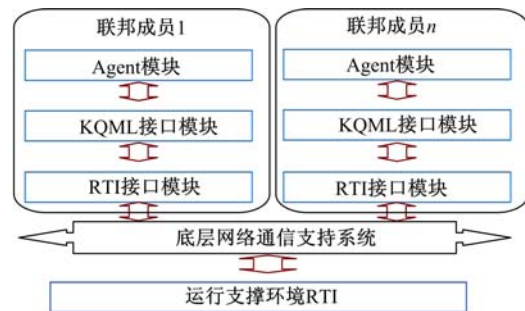


图 6 仿真平台通讯模型

Fig. 6 Simulation platform communication model

仿真平台系统采用了瑞典 Pitch 公司 pRTI 商业软件实现基于 HLA 的 RTI 部分。开发工具采用 VC6.0,各 Agent 软件分布在网络各结点的计算机上,形成分布式的仿真体系结构。

3.3 诊断系统仿真运行结果分析

诊断 Agent 采用基于模型的诊断方法,建立了卫星电源系统的模型,通过该模型和设定好的故障模式场景进行了故障诊断。

仿真诊断结果表明,各 Agent 间的通讯准确

无误,诊断结果正确。由于采用了分层的系统级诊断思想,缩小了计算空间,与单一结构的系统进行故障诊断相比,诊断速度更快,诊断的精确度更高。同时,也证明了基于 MAS 结构能够更好地实现分层的系统级诊断,验证了该仿真平台的可行性。

4 结束语

为了实现航天器故障处理的实时性和智能性,本文将 MAS 技术引入航天器故障诊断系统,构建了基于 MAS 的航天器在轨自主故障诊断系统模型。该结构体现了分层的系统级诊断思想,缩小计算空间、加快隔离故障源;诊断智能体可以根据本系统的领域知识特点,建立自己的智能诊断模型,适应了不同子系统的要求,能够自主处理紧急故障;多个智能体能够协同地并行地工作,提高了诊断的速度。该系统结构包括状态监测、故障预警、故障诊断、故障隔离和系统重构、自我学习的内容,构成了一个独立的集成健康管理系統。本文还构建了基于 HLA 的故障诊断系统的仿真平台,通过仿真表明了基于 MAS 结构能够实现分层的系统级诊断,同时也验证了该仿真平台的可行性。

参考文献:

- [1] Nayak P P, Bernard D E, Dorais G, et al. Validating the DSI remote agent experiment [J]. European Space Agency, 1999, 440:349-356.
- [2] Hayden S C, Sweet A J, Christa S E. Livingstone model-based diagnosis of earth observing one[C]// Collection of Technical Papers-AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference, Chicago, USA, 2004.
- [3] Sterritt R, Rouff C A, Hinchey M G, et al. Next generation system and software architectures challenges from future NASA exploration missions[J] Science of Computer Programming, 2006, 61: 48-57.
- [4] Malin J T, Kowing J, Schreckenghost D, et al. Multi-agent diagnosis and control of an air revitalization system for life support in space[C]// Aerospace Conference Proceedings IEEE, Big Sky, Montana, 2000.
- [5] Paris D E, Trevino L C, Watson M D. A framework for integration of IVHM technologies for intelligent integration for vehicle management[C]// Aerospace IEEE Conference, Big Sky, Montana, 2005.
- [6] Peischl B, Wotawa F. Model-based diagnosis or reasoning from first principles[J]. Intelligent Systems, 2003, 18(3):32-37.
- [7] 黄文虎,夏松波,刘瑞岩,等. 设备故障诊断原理、技术及应用[M]. 北京:科学出版社,1996.
- [8] 蒋伟进,许宇胜. 基于 MAS 的分布式智能故障诊断模型与关键技术研究[J]. 南京大学学报:自然科学版, 2004, 40(4):484-496.
Jiang Wei-jin, Xu Yu-sheng. MAS-based distribute intelligence malfunction diagnosis model and key technology[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2004, 40(4):484-496.
- [9] Kuhl Frederick, Weatherly Richard, Dahmann Judith. 计算机仿真中的 HLA 技术[M]. 付正军,王永红,译. 北京:国防工业出版社,2003.
- [10] 周彦,戴剑伟,蒋晓原. HLA 仿真程序设计[M]. 北京:电子工业出版社,2002.