

航天器自主故障诊断技术研究进展

姜连祥^{1,2,3}, 李华旺^{1,2}, 杨根庆^{1,2}, 杨勤荣^{1,2,3}, 黄海宇^{1,2,3}

(1. 上海微小卫星工程中心, 上海 200050; 2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 阐述了航天器自主故障诊断的必要性、特点和主要挑战。将自主故障诊断技术分为基于解析模型的方法、基于信号处理的方法和基于知识的方法三类,重点归纳了近年来国内外航天器自主故障诊断技术的最新研究进展和存在的主要问题,总结了国内航天器自主故障诊断技术在实际项目中应用的现状,最后展望了航天器自主故障诊断技术未来的发展方向。

关键词: 自主故障诊断; 自主智能控制; 系统重构; 航天器

中图分类号: TP277; TP306+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2009)04-1320-07

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.00.003

0 引言

具有高自主性是现代小卫星的一个显著特点,作为自主运行必须具备的能力之一就是在轨运行的状态检测与故障发现、诊断和恢复(FDIR)^[1],自主运行管理控制模式具有更高性能、更低费用,以及更好的容错性、可靠性、可重构性和可升级性。未来航天器的运营模式必将被以自主控制管理为主、地面站遥测遥控为辅的控制运行管理方式所取代^[2-8]。杨嘉墀早在1995年就指出自主故障诊断与系统重构是发展空间智能自主控制的关键技术之一^[9]。西安卫星测控中心的郭义琪等在对中国海洋一号卫星运行一年来的测控管理总结时针对小卫星平台提出了卫星自主故障定位等建议^[10]。此外,分布式卫星对卫星的自主运行能力提出了更高的要求,因此在轨自主故障诊断能力能够进一步提高卫星的自主运行能力。

以上分析可以看出,自主故障诊断是航天器智能自主控制和分布式卫星系统自主运行的关键支撑技术之一。面对航天器自主控制和分布式卫星系统自主运行的发展趋势,大力开展航天器自主故障诊断理论与技术的研究具有重大的理论意义和现实意义。国外航天器科研人员对航天器的自主故障诊断技术已经展开了大量的研究,国内在航天器故障诊断领域也做了很多的研究,但主要思路是借助于高

性能计算机通过对遥测参数进行监控和分析,对航天器的健康状况进行评估和诊断。本文首先分析航天器自主故障诊断的特点与挑战,接着梳理国内外在航天器自主故障诊断领域近几年来取得的具有代表性的研究成果,然后分析了国内目前航天器自主故障诊断技术在实际型号任务中的应用现状;最后展望航天器自主故障诊断的发展方向。

1 航天器自主故障诊断技术的特点与挑战

某统计资料表明,在1990-2001年间所发射的卫星、空间站等764个航天器中总共有121个出现故障,占航天器总数的15.8%,其中控制系统的故障占37%^[11]。故障诊断为提高系统的可靠性、可维护性和有效性开辟了一条新的途径,为航天器的容错设计奠定了基础。虽然航天器领域的故障诊断技术很早就有航天器设计人员进行研究,但是目前大部分研究是基于地面高性能计算机利用遥测数据对卫星的运行状态进行分析诊断,航天器缺乏自主诊断能力。由于航天器恶劣的运行环境和航天器设计技术的现状,航天器自主故障诊断技术具有的特点和挑战如下:

(1) 星上资源有限:星上计算机存储空间和处理能力相比地面高性能计算机有很大的差距;能源与燃料的储量有限。因此在设计故障诊断推理算法与重构方法时应该简明有效,防止过分复杂导致正

常运行模式的软件可靠性下降;而且强调诊断的实时性和准确性,防止故障传播引发灾难性的故障和耗费过多的能源与燃料,影响卫星正常飞行任务的需求。

(2) 运行环境特殊,不确定因素多:航天器在轨道上始终受着空间环境各种摄动力的作用,另外还有高温、低温、噪声、电磁干扰、空间粒子辐射、振动、流星体撞击、太阳、地球月亮杂散光的干扰、空间环境化学污染等多方面的环境因素,导致航天器上使用的元器件、部件的故障指数较实验室条件下成倍剧增。因此要求航天器自主故障诊断技术具有很好的鲁棒性,在恶劣环境干扰影响下避免虚警和漏报现象发生。

(3) 自主诊断系统需要具有良好的实时性和准确性,以及时发现航天器的故障,防止故障传播引发其他故障,这也是自主诊断区别于地面诊断的优势之一。

(4) 其他领域的故障诊断及航天器的地面诊断技术已经取得了大量的研究成果,然而如何结合航天器的特点借鉴已有的研究成果,提高航天器故障诊断的自主能力和智能化程度是一个非常具有挑战性的问题。

2 国内外航天器自主故障诊断技术研究现状

航天器的故障诊断技术是随着航天器的飞行任务扩展、控制精度提高以及工作寿命延长等要求而发展起来的。国外以美国为代表的航天大国在该领域起步较早,在技术上也领先国内较多。根据德国故障诊断权威 P. M. Frank 教授的观点,故障诊断方法可以划分成基于知识的方法、基于解析模型的方法、基于信号处理的方法三种。本文沿用该分类方法归纳近年来国内外在航天器自主故障诊断领域的最新进展。总体来看,基于知识的方法近年来取得的研究成果最多,也是当今航天器自主故障诊断技术的研究热点之一。

2.1 基于解析模型的自主故障诊断技术

基于解析模型的故障诊断技术是研究最早、最深入、最成熟的方法,可分为状态估计方法、等价空间方法和参数估计方法。由于设计非线性系统的状态观测器比较困难,因此参数估计法更适用于非线性系统,而一般的等价空间法仅适用于线性系统。加拿大肯考迪娅大学 Khorasani 教授带领的团队将

神经网络和解析模型的方法相结合,利用神经网络函数逼近和分类能力生成残差或估计参数^[12-17],并对神经网络的学习能力进行了研究,神经网络权值修正的方法有扩展卡尔曼滤波^[12]和修正的 BP 算法^[13],结合的神经网络有前馈 BP 网络^[14]、多层感知器^[15-16]、Eleman 网络^[17]等。近年来还提出了基于二阶滑模观测器^[18]、高阶滑模观测器^[19]、交互多模型^[20]等故障诊断方法。陈雪芹等人^[21]针对小卫星姿态系统执行机构和敏感器故障,采用 H_2 和 H_∞ 范数作为系统故障诊断和容错控制的性能指标,设计了一种输出反馈混合 H_2 和 H_∞ 控制律,运用线性矩阵不等式(LMI)求解集成故障诊断与容错控制问题。文献[22]提出一种基于 IMM/EA 的卫星姿态控制系统重构容错控制方法,该方法采用交互式多模型(IMM)算法得到故障发生的位置以及故障模型,利用故障模型中的动力学系统进行特征结构配置(EA),生成重构控制器对原系统进行补偿控制。此外,利用卫星姿控系统的多传感器和执行器之间的动力学模型解析冗余关系,进行故障诊断^[23-25]。

2.2 基于信号处理的自主故障诊断技术

基于信号处理的故障诊断方法是根据系统的输入输出等直接可测量的信号,找出这些信号和故障源之间存在的关系,应用相关函数、高阶统计量、频谱、自回归滑动平均、小波技术等提取幅值、相位、频谱等特征值,用这些特征值来进行故障的诊断。优点是实现简单、实时性较好;缺点是对潜在的早期故障的诊断能力不足。Qing Wu^[26]等人提出利用小波网络进行故障隔离与评估,并且提出自适应更新网络权值的算法。国内郝慧^[27]提出将小波用于卫星姿态控制系统的故障诊断。小波变换对噪声的抑制能力强,运算量不大,利用这些优点与其他故障诊断技术如多 Agent^[28]、小波神经网络^[29]等故障诊断技术结合,可以提高故障诊断的性能。

2.3 基于知识的自主故障诊断技术

人工智能及计算机技术的飞速发展,为故障诊断技术提供了新的理论基础,产生了基于知识的诊断方法,并显示出强大的生命力和优越性,由于其智能性,因此逐渐成为航天器自主故障诊断的研究热点,也取得了大量的研究成果。按照所采用的智能方法可以分为神经网络方法、定性模型方法、专家系统方法、基于一致性检查的方法等以及以上方法的综合运用等。

2.3.1 基于神经网络的故障诊断技术

神经网络在故障诊断领域的应用研究主要集中在两个方面:(1)用神经网络作为分类器,将故障向量作为输入,诊断结果作为输出,实现故障特征空间到故障诊断空间的映射;如BP网络、RBF网络,作为分类器时也有人用支持向量机作为分类器,可以取得比神经网络更好的效果;(2)神经网络与其他方法结合使用,主要体现在用神经网络生成或评价残差^[12-17]、和专家系统结合用神经网络解决知识获取问题、用神经网络作为自适应误差补偿和模糊神经网络等方面。神经网络使用前需要大量的历史数据事先训练网络,因此需解决数据采集的问题,此外,神经网络的规模(层数和隐层节点数)的确定目前往往通过实验或经验值确定,没有成熟的理论指导。

2.3.2 基于定性模型的方法

国外针对可重复使用运载器和国际空间站研究的最新故障诊断系统基本上都是采用基于定性模型的推理技术。基于定性模型的诊断(model-based diagnosis; MBD)方法是由人工智能领域学者提出的一类新的诊断方法,“模型”是指一种定性模型,包括逻辑系统模型、图论模型、定性微分方程(qualitative differential equations; QDE)模型、定性偏差模型(qualitative deviation model; QDM)等。其诊断的基本思想是:根据系统组成元件与元件之间的连接(或参数间的依赖关系)建立诊断系统的模型,该模型描述了系统的结构、功能和行为;根据系统模型和系统输入,可以通过定性推理技术推导出系统在正常情况下的预期行为,如果观测到的系统实际行为与系统预期行为有差异,就说明系统存在故障;利用定性推理技术,能够确定引发故障的元件(或参数)集合。NASA开发的基于定性模型的诊断推理软件(Livingstone)先后在深空一号^[30-31]、对地观测卫星EO-1^[32-35]、X-34、X-37飞船等实际型号中进行了科学验证或应用^[36]。2004年美国发射的三角卫星(The Three Corner Sat; 3CS)星载自主运行软件集成了多模型自主故障检测模块。由以上几个项目可以看出基于模型的故障诊断技术将在美国航天器故障自主诊断领域得到广泛的应用。国内在航天领域基于定性模型的诊断技术主要在液体火箭发动机的故障诊断领域取得了一些研究成果^[37-38]。

基于定性模型的故障诊断技术优点是不需要建立系统的数学模型,计算复杂度低等;同时也存在很

多缺点,主要体现在:(1)诊断的准确性完全依赖于模型;(2)潜在故障诊断能力弱;(3)目前采用的模型是离散模型,因此对连续系统建模首先要离散化,这会影响到诊断的准确性;虽然基于定性模型的故障诊断技术的诊断对象已从离散系统扩展到连续系统,并由静态系统向动态系统发展,诊断算法的计算复杂性也不断的减小,但在航天器自主故障诊断领域尚未见报导。将定性模型与定量模型结合能够大大提高诊断的准确性,因此这将是基于定性模型诊断技术的发展方向之一^[39]。

2.3.3 基于专家系统的故障诊断技术

基于专家系统的故障诊断技术在航天器自主故障诊断领域取得了广泛的应用,ISACS-DOC^[40]在深空探测器如GEOTAIL、NOZOMI和HAYABUSA上应用有了十几年的历史。美国Santa Clara大学研制的Emerald纳卫星上采用专家系统来进行故障的监测,采用产生式规则来表示专家的知识,检测到故障后做出简单的处理并向地面测控站发出信标告知航天器的健康状况,旨在增加卫星的自主性和减轻地面人员的投入^[41]。故障诊断专家系统的缺点是只能诊断预知故障,因此专家知识的来源成为其诊断能力的瓶颈,此外,还存在逻辑推理的“组合爆炸”问题。结合Petri网、故障树与专家系统的故障诊断能够大大提高专家系统的推理能力和速度,利用神经网络的在线学习能力可以解决专家系统的知识获取瓶颈等问题。

2.3.4 基于一致性检查的方法

基于一致性检查的方法在航天器故障诊断领域得到了广泛的应用,传统的地面诊断和航天器自主诊断都可以应用该方法。基于一致性检查的方法的优点是简单易实现,推理简单,但是由于通常采用产生式规则表示诊断知识,因此不可避免的存在以下缺点:(1)处理不确定情况时,自适应能力差,带来较惯的虚警率和漏报率;(2)预先设定的逻辑决策不一定是最优的方法;(3)产生式规则只能表达预知故障。Michael A. Swartwout^[42]等人针对产生式规则的缺点提出一致性计数的改进方法可以明显降低虚警率。JPL的Dennis DeCoste^[43]和日本东京大学的Takehisa Yairi等人分别提出利用回归树学习^[44]、机器学习、数据挖掘、相关向量机^[40]等人工智能方法从大量历史数据中学习知识,自适应调整门限值。

2.3.5 其他航天器自主故障诊断技术

其他航天器自主诊断方法还有基于信息融合的方法^[45]、多级故障诊断技术^[46]、模糊聚类方法^[47]、混合系统故障诊断技术^[48]、基于索引推理机(Index Based Reasoners: IBR)故障诊断方法^[49]、动态贝叶斯网络^[40]等。

3 国内航天器自主故障诊断型号应用现状

国内航天器在自主故障诊断技术在实际型号中的应用远远落后于国内外在该领域所取得的科研成果。国内大部分卫星在设计时考虑了一些突发故障的自主判断与应急处理,主要是基于硬件冗余方面的重构,即当主部件出现故障自动切换到备用部件。当出现系统级故障的时候使卫星自动进入安全/故障模式,太阳帆板自动对日定向,关闭不用的系统,等待测控站故障处理指令。目前国内在“东方红-3号”、“资源-1号”、“资源-2号”和神舟飞船等项目应用中部分子系统已采用故障隔离、诊断和系统重构等智能化技术,收到了良好效果^[5]。星载计算机一般具有部件故障的检测能力,并能够自主切换部件及改变系统工作模式。哈工大研制的“实验卫星一号”立体测绘小卫星的星载计算机采用了自检、冗余心跳检测,和外部看门狗检测进行故障检测和定位,发生看门狗咬事件则对故障机进行重启来恢复故障。

目前国内航天器自主故障诊断基本上是针对单点失效自主进行的,双点或双点以上故障由测控站处理;系统级故障发生时虽然能够自主进行模式切换,但故障诊断仍需要地面参与,这种非自主处理方式受地面测控的时空限制,处理能力及处理效率较低;故障处理主要表现为部件、工作模式和工作参数的切换上;专为少数预知故障而设计的在线模式切换可能是保守的或诊断能力有限;自主故障重构大多数都是基于硬件冗余的,动力学之间的解析冗余关系没有得到充分利用等。面对航天器智能自主控制和分布式卫星自主运行的发展趋势,以上这些实际应用的故障诊断措施远远不能满足航天器自主智能控制的要求和分布式卫星自主运行的需求。因此如何将已有科研成果应用到实际型号任务中去还值得进一步研究。

4 航天器自主故障诊断技术的发展方向

自主故障诊断技术在理论和实际应用方面都取

得了一定的成果。从当前的研究进展和需要解决的问题来看,自主故障诊断技术在航天领域研究和应用的发展方向为:

(1) 基于定性模型故障诊断技术的研究

国外针对可重复使用运载器和国际空间站研究的最新故障诊断系统基本上都是采用基于模型的推理技术。NASA先后在DS-1、IVHM X-系列飞船和EO-1卫星上展开的自主运行关键技术验证实验中的故障诊断、重构系统都采用了基于定性模型的诊断技术。Livingstone采用了基于部件的定性模型,本身存在一些局限性,随着基于定性模型故障诊断技术的发展,诊断对象已从离散系统扩展到连续系统,并由静态系统向动态系统发展,如何把这些技术应用到航天器的自主故障诊断领域非常值得研究。

(2) 故障诊断系统已从原来单一的各个分系统(如电源系统和热控系统)的故障诊断专家系统,向集系统状态监测、故障诊断和故障修复为一体的航天器集成健康管理(IVHM)^[49]系统发展;故障诊断方法已由原来单一的诊断方法(如基于规则诊断方法、基于故障树诊断方法等),向各个诊断方法相结合的方向发展。如神经网络和专家系统相结合的故障诊断技术方法、模糊推理、故障树、小波神经网络、信息融合技术和petri网模型的故障诊断技术。

(3) 人工智能在自主故障诊断领域的应用

虽然人工智能在故障诊断领域已经有了广泛的应用,但是如何克服现有智能诊断技术的局限性仍值得深入研究,如神经网络的训练样本获取和网络规模的确定,专家系统的知识获取等问题。为了克服以上问题,采用混合智能诊断技术是一个不错的选择。近年来基于多Agent的故障诊断方法不仅能提高诊断准确率,而且增强环境的适应性,使系统在运行过程中发现和挖掘知识,提高学习能力,实现诊断系统性能的自我完善、发展和提高,很适合大规模诊断问题的智能求解。

(4) 基于信息融合的故障诊断策略问题

信息融合就是对多种传感器产生的冗余信息在一定准则下加以分析、综合,得到比单一信源更精确、更全面的信息。信息融合可以增加系统的信息利用率,提高合成信息的可信度和精度。航天器控制系统中包括惯性传感器、光学传感器等多种传感器,多传感器提供了大量的冗余信息。同构传感器提供的冗余信息经处理后可以抑制噪声,降低信息

的不确定性;异构传感器采集的信息具有互补性,经过适当处理后可以补偿单一传感器的不确定性和测量范围的局限性。

(5) 故障恢复、系统重构技术的研究

目前国内的故障恢复措施大多是冗余部件的切换,应该充分利用动力学之间的解析冗余关系。特别是控制系统多传感器提供的冗余信息,对于传感器的漂移和偏差之类的故障应该用软件控制去提高传感器的精度而不仅仅是硬件切换。

(6) 航天器自主故障诊断系统的可靠性以及与航天器系统的整合问题研究

航天器自主故障诊断是一个具有挑战性的研究课题,以高可靠性为特点的航天器对诊断系统的可靠性要求更加苛刻,绝对不能出现因为诊断系统的可靠性问题而出现故障误报、漏报等现象。如何在保障可靠性的同时提高航天器故障诊断的自主性,减轻地面的干预也是值得研究的方向之一。

5 结束语

航天器实现自主故障诊断可以大大增强航天器故障诊断的实时性,可以减轻航天器测控人员的压力和地面测控站的人力、财力投资,克服航天器测控的空间限制。面对国内航天器在自主故障诊断方面的研究、应用现状和国外航天大国的差距,我国航天器科研人员应该大力开展自主故障诊断技术的研究和科学实验。在国内航天器科研人员的努力下,我国在航天器故障诊断方面也取得了研究成果,例如结合人工智能技术开发了很多故障诊断专家系统等,部分成果已经初步应用到航天器故障地面诊断领域,促进了地面故障诊断的自动化程度。虽然这些研究成果大部分是卫星过境时进行离线诊断,随着星载计算机处理能力的增强,航天器自主故障诊断技术可以借鉴和改进这些研究成果,最终实现航天器自主故障诊断,提高我国航天器自主智能控制和自主运行能力。

参考文献:

- [1] Schetter T, Campell M, Surka D. Multiple agent-based autonomy for satellite constellations[J]. Artificial Inteligence (S1076 - 9757), 2003,145(1): 147 - 180.
- [2] 高黎,沙基昌. 分布式卫星系统自主运行技术研究进展[J]. 舰船电子工程, 2007,27(1):4 - 9. [GAO Li, SHA Ji-chang. Research progress on technologies with autonomy of distributed satellite systems [J]. Ship Electronic Engineering, 2007, 27(1):4 - 9(in Chinese).]
- [3] Nicola Muscettolay, Pandurang Nayak P, Barney Pell, et al. Remote agent: to boldly go where no AI system has gone before[J]. Artificial Intelligence, 1998,103(1 - 2):1 - 46.
- [4] Sara Hedberg. AI coming of age: NASA uses AI for autonomous space exploration[J]. IEEE EXPERT, 1997(5/6):13 - 15.
- [5] 李智斌. 航天器智能自主控制技术发展现状与展望[J]. 航天控制, 2002,4:1 - 8. [LI Zhi-bing. Current situation and prospective of intelligent autonomous control for spacecrafts [J]. Aerospace Control, 2002,4:1 - 8(in Chinese).]
- [6] 代树武,孙辉先. 卫星运行中的自主控制技术[J]. 空间科学学报, 2002,22(2):147 - 153. [DAI Shu-wu, SUN Hui-xian. Autonomous control for spacecraft[J]. Chinese Journal of Space Science, 2002,22(2):147 - 153(in Chinese).]
- [7] 代树武,孙辉先. 航天器自主运行技术进展[J]. 宇航学报, 2003,24(1):17 - 22. [DAI Shu-wu, SUN Hui-xian. Technical overview of autonomous control and on-board data processing for spacecrafts[J]. Journal of Astronautics, 2002, 22(2):147 - 153(in Chinese).]
- [8] 李智斌,李果. 航天器自主控制与智能信息处理技术[J]. 航天控制, 2004,22(5):20 - 26. [LI Zhi-bin, LI Guo. Autonomous control and intelligent information processing technique for spacecrafts processing technique for spacecrafts [J]. Aerospace Control, 2004,22(5):1 - 8(in Chinese).]
- [9] 杨嘉焯. 中国空间计划中智能自主控制技术的发展[C]// IFAC, IACA95,北京,1995,8. [YANG Jia-chi. Technical overview of Intelligent autonomous control of Chinese space plan [C]// Proceeding of 95·IFAC, IACA. Beijing, 1995 (in Chinese).]
- [10] 郭义琪,李肖瑛,李方正,等. 中国海洋一号卫星在轨管理及问题分析[J]. 航天器工程, 2003,12(3):135 - 133. [GUO Yi-qi, LI Xiao-ying, LI Fang-zheng, et al. The on-board management and problem analysis of HY - 1 Satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2003, 12(3): 135 - 133(in Chinese).]
- [11] 林来兴. 1990 ~ 2001 年航天器制导、导航与控制系统故障分析研究[J]. 国际太空, 2005(5):9 - 13. [LIN Lai-xing. The failure analysis and research of spacecrafts' control, guide and navigation system during 1990 ~ 2001 [J]. International Space, 2004,5:9 - 14(in Chinese).]
- [12] Talebi H A, Patel R V, Khorasani K. Fault detection and isolation for uncertain nonlinear systems with application to a satellite reaction wheel actuator[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE, 2007:3140 - 3145.
- [13] Talebi H A, Khorasani K. A robust fault detection and isolation scheme with application to magnetorquer type actuators for satellites[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE, 2007:3165 - 3170.
- [14] LiLi, Liying Ma, Khashayar Khorasani. A dynamic recurrent neural network fault diagnosis and isolation architecture for satellite's

- actuator/thruster failures [C]// Proceedings of Second International Symposium on Neural Networks. Chong Qing, Springer Berli, 2005; 574 - 583.
- [15] Al-Dein Al-Zyoud, I, Khorasani K. Neural network-based actuator fault diagnosis for attitude control subsystem of a satellite [C]// Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, 2006. IEEE, 2006; 3686 - 3693.
- [16] Al-Dein Al-Zyoud, I, Khorasani K. Neural network-based actuator fault diagnosis for attitude control subsystem of an unmanned space vehicle [C]// Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks. Vancouver, BC, Canada, 2006; 3868 - 3693.
- [17] Li Z Q, Ma L, Khorasani K. A dynamic neural network-based reaction wheel fault diagnosis for satellites [C]// Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks. Vancouver, BC, Canada, 2006; 3714 - 3721.
- [18] Tao Jiang, Khorasani K. A fault detection, isolation and reconstruction strategy for a satellite's attitude control subsystem with redundant reaction wheels [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE, 2007; 3146 - 3152.
- [19] Mehrdad Saif, Weitian Chen, Qing Wu. High Order Sliding Mode Observers and Differentiators-Application to Fault Diagnosis Problem. Lecture Notes on Control and Information Sciences. Springer Berlin, 2008; 375; 321 - 344.
- [20] Tudoroiu N, Khorasani K. Fault detection and diagnosis for satellite's attitude control system (ACS) using an interactive multiple model (IMM) approach [C]// Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications. IEEE, 2005; 1287 - 1292.
- [21] 陈雪芹, 耿云海, 张世杰, 等. 基于混合 H_2/H_∞ 的集成故障诊断与容错控制研究 [J]. 宇航学报, 2007, 28 (4): 891 - 897. [CHEN Xue-Qin, GENG Yun-hai, ZHANG Shi-jie et al. A Mixed H_2/H_∞ approach to integrated fault diagnostic and fault-tolerant control [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28 (4): 891 - 897 (in Chinese).]
- [22] 陈雪芹, 张迎春, 耿云海, 等. 基于 IMM/EA 的卫星姿态控制系统重构容错控制 [J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29 (5): 774 - 775. [CHEN Xue-qin, ZHANG Ying-chun, GENG Yun-hai, et al. IMM/EA-based on-orbit reconfigurable fault-tolerant control for satellite attitude control system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29 (5): 774 - 775 (in Chinese).]
- [23] 荣吉利. 基于模型的航天器在轨传感器故障诊断方法 [J]. 兵工学报, 2002, 23 (2): 242 - 245. [RONG Ji-li. A mode-based on-board fault diagnosis for spacecraft sensors [J]. ACTA Armamentarii, 2002, 23 (2): 242 - 245 (in Chinese).]
- [24] 段晨阳, 汤国建, 张世杰. 单轴飞轮故障时的小卫星姿态控制方法研究 [J]. 航天控制, 2007, 25 (3): 48 - 52. [DUAN Chen-yang, TANG Jian-guo, ZHANG Shi-jie. Attitude control method of small satellite in the case of single reaction wheel failure [J]. Aerospace Control, 2007, 25 (3): 48 - 52 (in Chinese).]
- [25] 陈闯, 张世杰, 陈艳军, 等. 飞轮故障时的小卫星轮控与磁控联合控制方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39 (5): 811 - 815. [CHEN Min, ZHANG Shi-jie, CHEN Yan-jun, et al. Combined control method of small satellite in the case of reaction wheel failed [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39 (5): 811 - 815 (in Chinese).]
- [26] Qing Wu, Mehrdad Saif. Robust fault detection and diagnosis for a multiple satellite formation flying system using second order sliding mode and wavelet networks [C]// Proceedings of the 2007 American Control Conference, New York, IEEE, 2007; 426 - 431.
- [27] 郝慧, 王南华. 基于小波分析的航天器姿态控制系统故障诊断方法研究 [J]. 航天控制, 2005, 23 (5): 73 - 78. [HAO Hui, WANG Nan-hua. Research on wavelet analysis based fault diagnosis for attitude control subsystem of spacecraft [J]. Aerospace Control, 2005, 23 (5): 73 - 78 (in Chinese).]
- [28] 高洪波. 智能故障诊断系统中综合信号处理的研究 [D]. 西北工业大学硕士学位论文, 2003. [GAO Hong-bo. Research on integrated signal processing in intelligent diagnosis system [D]. Master thesis of Northwestern Polytechnical University, 2003 (in Chinese).]
- [29] 吴丽娜. 卫星姿态控制系统故障诊断研究 [D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2006. [WU Li-na. Research on fault diagnosis of satellite attitude control system [D]. Master thesis of Harbin Institute of Technology, 2006 (in Chinese).]
- [30] Williams B, Nayak P. A model-based approach to reactive self-configuring systems [C]// Proceedings of Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI96), Portland, Oregon: AAAI, 1996; 1 - 8.
- [31] Douglas E, Bernard, Edward B, Gamble, Nicola Muscettola, et al. Remote Agent Experiment DS1 Technology Validation Report [R]. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology & NASA Ames Research Center, 2000; 366 - 400.
- [32] Meyer C, Cannon H, Balaban E, et al. Propulsion IVHM technology experiment overview [C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, 2005, 2; 2859 - 2868.
- [33] Hayden S, Sweet A, Christa S. Livingstone model-based diagnosis of earth observing one [C]// Proceedings of AIAA 1st Intelligent Systems Conference, Chicago, 2004; 1 - 11.
- [34] Sandra C, Hayden, Adam J, Sweet, Scott E, Christa, et al. Advanced diagnostic system on earth observing one [C]// Proceedings of AIAA Space 2004 Conference and Exhibit, San Diego, California, Sep. 2004; 28 - 30.
- [35] Sandra C, Hayden, Adam J, Sweet, Seth Shulman. Lessons Learned in the Livingstone2 on Earth Observing One Flight Experiment [R]. NASA Report, 2004; 1 - 15.
- [36] Schwabacher M, Sanuels J, Brownston L. The NASA integrated vehicle health management technology experiment for X - 37 [C]// Proceedings of the SPIE AeroSense 2002 Symposium, Florida. 1 - 11.
- [37] 刘洪刚, 吴建军, 陈启智. 基于模型知识的液体火箭发动机故

- 障诊断方法研究[J]. 宇航学报, 2002, 23(2): 41 - 44. [LIU Hong-gang, WU Jian-jun, CHEN Qi-zhi. Research of liquid engine fault diagnosis method based on model knowledge[J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(2): 41 - 44(in Chinese).]
- [39] 郑威, 吴建军. 液体火箭发动机基于定性键合图模型的故障诊断方法研究[J]. 宇航学报, 2004, 25(6): 604 - 608. [ZHENG Wei, WU Jian-jun. Qualitative bond-graph based fault diagnosis for liquid-propellant rocket engine[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(6): 604 - 608(in Chinese).]
- [40] 朱永娇, 刘洪刚. 基于定性模型和定量知识集成的智能故障诊断方法研究[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(13): 3108 - 3111. [ZHU Yong-jiao, LIU Hong-gang. Research of intelligent fault diagnosis method based on integration of qualitative model and quantitative knowledge[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(13): 3108 - 3111(in Chinese).]
- [41] Takehisa Yairi, Yoshinobu Kawahara, Ryohei Fujimaki, et al. Telemetry-mining: a machine learning approach to anomaly detection and fault diagnosis for space systems[C]// Proceeding of the 2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology(SMA - IT06). IEEE Computer Society, 2006: 1 - 8.
- [42] Robert K, Lee, Robert Watson, Christopher Kitts, et al. Anomaly detection using the emerald nanosatellite on-board expert system [C]// 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings, IEEE, 2004: 84 - 97.
- [43] Michael A, Swarwout, Christopher A, Kitts, Rajesh K, Batra. Persistence-based production rules for on-board satellite automation[C]// Proceedings of 1999 IEEE Conference on Aerospace, IEEE, 1999, 1: 273 - 281.
- [44] Dennis DeCoste. Learning envelopes for fault detection and state summarization[C]// Aerospace Conference Proceedings on Aerospace Conference, 2000 IEEE, 2000: 337 - 344.
- [45] Takehisa Yairi, Minoru Nakatsugawa, Naoko Ishihama. Adaptive limit checking for spacecraft telemetry data using regression tree learning[C]// Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, IEEE, 2004: 5130 - 5135.
- [46] 彭荣, 秦永元. 基于多传感器卫星姿态确定系统故障检测技术研究[J]. 机械强度, 2007, 29(3): 487 - 491. [PENG Rong, QIN Yong-yuan. Research on fault detection method of satellite attitude determination system based on multi-sensors[J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(3): 487 - 491(in Chinese).]
- [47] 姚敏, 赵敏. 小卫星多级故障诊断系统设计[J]. 中国空间科学技术, 2007, 4(2): 47 - 52. [YAO Min, ZHAO Min. Multi-grade faulty diagnosis design of small satellite[J]. Chinese Space Science and Technology, 2007, 4(2): 47 - 52(in Chinese).]
- [48] 杨家军, 曹喜滨. 用模糊聚类算法快速定位小卫星在轨运行故障[J]. 空间科学学报, 1999, 19(4): 354 - 361. [YANG Jia-jun, CAO Xi-bin. Fast locating onboard fault of small satellites using fuzzy clustering algorithms[J]. Chinese Journal of Space Science, 1999, 19(4): 354 - 361(in Chinese).]
- [49] Mohammadi R, Hashtrudi-Zad S, Khorasani K. A hybrid architecture for diagnosis in hybrid systems with applications to spacecraft propulsion system[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, IEEE, 2007: 3184 - 3190.
- [50] Ibrahim N, Tansel, Ming Li, Ahmet Yapici. Integrated systems health monitoring for autonomous space access vehicles and satellites[C]// Proceedings of 3rd International Conference on Recent Advances in Space Technologies, IEEE, 2007: 187 - 192.

作者简介: 姜连祥(1981 -), 男, 博士生, 研究方向为小卫星自主故障诊断技术和星载计算机系统。
通信地址: 上海市长宁区 865 号 6 号楼 601 室(200050)
电话: (021)62511070 - 2404
E-mail: lianxiang_jhust@163.com

A Survey of Spacecraft Autonomous Fault Diagnosis Research

JIANG Lian-xiang^{1,2,3}, LI Hua-wang^{1,2}, YANG Gen-qing^{1,2}, YANG Qin-rong^{1,2,3}, HUANG Hai-yu^{1,2,3}

(1. Shanghai Engineering Center for Micro-satellite, Shanghai 200050, China;

2. Shanghai Institute of Micro-system and Information Technology Chinese Academy Of Science, Shanghai 200050, China;

3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The necessity, characteristic and main challenges are analyzed. The spacecraft autonomous fault diagnosis research development and the existing problems around the world are summarized in detail according to the categories: analytical mode-based approach, signal processing based approach and knowledge based approaches. The present state of domestic spacecraft autonomous fault diagnosis for practical application is presented. The development trends of autonomous fault diagnosis techniques and the summarization of the paper are given at last.

Key words: Autonomous fault diagnosis; Autonomous control; System reconfiguration; Spacecraft