

基于星务管理系统的小卫星自主健康管理系统

李 晴, 孙国江, 李孝同

(航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要: 为了适应小卫星电子信息系统的快速发展, 使卫星能够自行规划工作流程, 实现在轨自主管理, 需要构建合理有效的小卫星自主健康管理系统。文章以星务管理系统为基础, 针对目前健康管理中存在的问题, 构建了一套小卫星自主健康管理系统。它包括整星级、系统级和部件级3个层面。设计了自主健康管理执行模块构成整星级层面, 其中包括自主健康管理规则库和自主健康管理任务执行模块。文章提出的小卫星自主健康管理系统, 可以提高小卫星自主诊断、自主运行能力, 最终实现小卫星长寿命、安全可靠运行。

关键词: 自主健康管理系统; 执行模块; 管理规则库; 管理执行任务

中图分类号: TP311

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2012)05-0574-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2012.05.020

0 引言

国外从20世纪70年代起, 故障诊断、故障预测、健康管理等系统逐渐投入工程应用, A-7E飞机的发动机监控系统(EMS)就是故障预测与健康管理的(PHM)应用的早期典型案例^[1]。近年来, 美国NASA为了提高飞行器的安全性、可靠性, 提出了飞行器综合健康管理的飞行安全计划, 包括故障监测、故障诊断、影响评估、故障预测等功能。然而到目前为止, 国外还没有一个具备完整健康管理功能的综合健康管理系统投入工程应用^[2]。

目前, 我国卫星自主健康管理方面的研究仍处于初级阶段, 管理系统构建所涉及的相关技术有待攻关突破。北京航空航天大学可靠性工程研究所初步地开展了PHM系统的相关研究^[3]; 近年来, 根据航天器的结构特点和功能的层次性, 提出了航天器分布式的故障诊断专家系统^[4], 但还是以地面诊断为主。现阶段, 我国卫星在轨健康管理主要依靠地面测控站, 并通过人工判读大量遥测信息以获取卫星运行状态进行管理。这种健康管理方法只能在有限的测控弧段内采用上注遥控指令的方式对卫星进行状态调整和控制, 针对

卫星遥测量大、参数类型多、变化复杂的特点, 无法满足监测处理的时效性要求; 另外, 上行、下行链路也会极大地限制健康管理工作的时效性, 而且可能出现空间链路不安全、人为操作失误等问题。

针对上述存在的问题以及在轨健康管理的新需求, 本文开展了小卫星自主健康管理系统的初步应用研究, 在星务管理系统的基础上, 将已有的大量人工管理方法和策略通过代码化过程转换为星载专家系统, 变成卫星自身的知识库, 来实现卫星的自主诊断和自主控制。

1 小卫星自主健康管理系统

1.1 系统构建的基本思路

星务管理系统采用了嵌入式技术和现场总线技术, 构建了以星务管理主机为控制和调度中心、以面向控制对象的各分系统计算机为执行单元的网络分布式系统, 实现了对各分系统健康状态的管理、对卫星进行综合信息处理的功能^[5]。因此, 以星务管理系统为基础的小卫星自主健康管理系统分为整星级、系统级和部件级3个层面来完成。

收稿日期: 2012-04-16; 修回日期: 2012-04-27

基金项目: 国家863项目“即插即用模块化卫星技术研究”

作者简介: 李晴(1978—), 女, 硕士研究生, 从事小卫星星务系统设计工作。联系电话: (010) 68746824-130。

小卫星自主健康管理系统基本框架如图 1 所示。

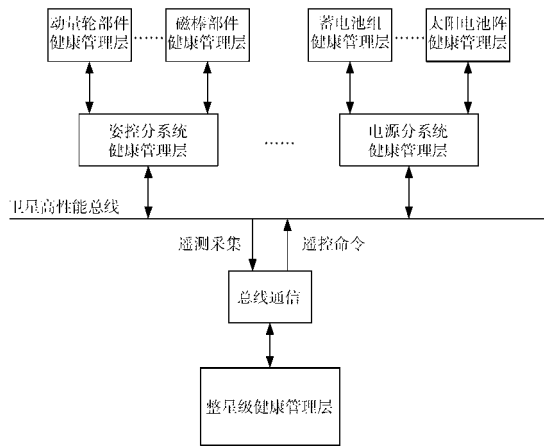


图1 小卫星自主健康管理系统基本构架

Fig. 1 Framework of autonomous health management system for small satellites

1) 整星级自主健康管理负责完成整星电子系统的故障诊断和健康评估及任务处理, 通过对各分系统输入的初步诊断结论进行全局决策和统一调度来完成, 重点放在整星级故障诊断和综合评估及恢复处理功能上。

2) 系统级自主健康管理负责对各分系统的检测、诊断与评估, 建成相对独立的分系统级诊断评估模块。

3) 部件级自主健康管理主要针对部件、设备、模块设置传感器或状态采集点, 对采集到的数据进行传输和处理, 作为高一级的健康管理系统的的基本输入数据。

3个层面的信息交换通过卫星总线网络进行传输, 最终由整星级健康管理层做全局决策。

1.2 整星级自主健康管理层单元及功能

1.2.1 整星级自主健康管理层构成

小卫星自主健康管理系统由整星级自主健康管理层、系统级健康管理层和部件级管理层组成。本文重点介绍整星级自主健康管理层, 其他两部分将在今后的研究中进行报道。

小卫星整星级自主健康管理层主要由自主健康管理执行模块、自主健康管理规则库和自主健康管理的任务执行各模块组成, 如图 2 所示, 图中虚线部分为其他健康管理层。

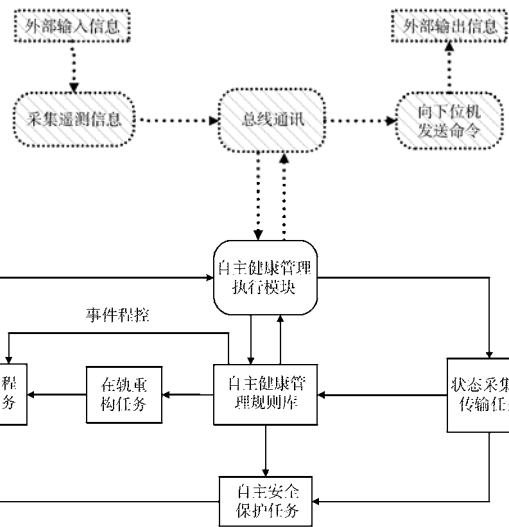


图2 小卫星整星级自主健康管理层构成

Fig. 2 The structure of the autonomous health management system for small satellites

1.2.2 各模块功能

1) 自主健康管理执行模块

在星务管理主机上内嵌自主健康管理执行模块, 并与其他管理层相连。自主健康管理执行模块作为健康管理的控制中心, 一方面负责对卫星各分系统数据的采集、实现对各分系统的控制; 另一方面控制运行自主健康管理执行任务, 并从自主健康管理规则库中调用管理规则, 对卫星健康状态进行实时监测和综合判断, 根据判断结果控制自主健康管理的任务执行方式来完成卫星的自主健康管理。

2) 自主健康管理规则库

自主健康管理规则库是卫星自主健康管理的依据, 负责引导执行模块完成对卫星的自主健康管理。它的建立过程就是将以往人工健康管理手段和管理策略通过代码化过程转化为星载专家系统的过程。其中的规则可以被总结为“IF THEN”形式的逻辑推理, 作为固化到程序中的核心逻辑, 在每次管理任务执行时被调用。

3) 管理任务执行模块

执行自主健康管理任务主要包括自主安全保护任务、相对程控任务、状态采集与传输任务和轨重构任务4个部分。

① 自主安全保护任务模块。以卫星重要参数信息作为输入条件, 根据调用的自主健康管理规则进行推理, 从自身的故障处理数据库中调出故障处理方法进行故障处理。其中重要参数信息可由状态

采集与传输任务模块给出,故障处理方法由相对程控任务模块负责执行。

② 相对程控任务模块。主要针对有效载荷任务进行自主规划执行的功能模块,根据有效载荷任务启动标志自动运行有效载荷,除完成有效载荷任务外还可作为其他任务模块进行故障处理和健康管理执行的执行手段,可通过星上时刻或某一事件等自动激活执行。

③ 状态采集与传输任务模块。它是自主健康管理系统获得卫星健康信息的重要手段,同时具有可控遥测传输功能,通过调用管理规则并根据卫星健康状态自行调整下传遥测信息。

④ 在轨重构任务模块。通过调用管理规则自主判断执行时机,对于硬件重构可自行发送重构指令;对于软件重构可自行激活附加任务模块运行,并通过与星务管理主机软件事先约定的软件操作接口,实现对星务管理主机功能和任务的添加与完善。

1.3 整星级自主健康管理层的软件实现

1.3.1 整星级自主健康管理层的软件构成

整星级自主健康管理层的实现软件可分为系统软件和应用软件两部分,其中系统软件采用了实时多任务操作系统和中断服务程序,而实时多任务操作系统又具有及时、合理地安排和调度各种软硬件资源的功能,可用于对各任务模块的调度、控制和管理。整星级自主健康管理层的软件构成如图3所示。

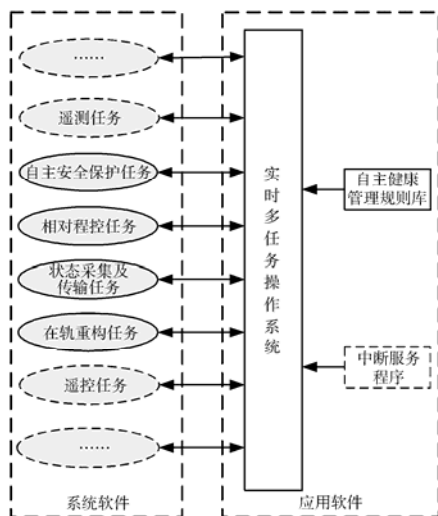


图3 整星级自主健康管理层的软件构成

Fig. 3 Software structure of autonomous health management system

1.3.2 软件测试

星务管理主机在性能上满足软件测试要求,对机时占用率情况如下:

- 1) 最大CAN总线占用率约15%;
- 2) SRAM内存余量约64.2%;
- 3) 1 s内软件各任务(除内存刷新任务外)全部激活,且满负荷时软件最大运行时间为586 ms,与1 s的周期相比,机时余量为41.4%。

上述数据表明:目前星务管理主机软件在性能上有充足的余量,在顺利完成现有软件各种功能的同时,能够实现对整星级自主健康管理层软件及功能的扩充。

2 任务实现流程

针对自主健康管理任务执行中的4个模块进行了详细设计,任务实现流程如下。

1) 自主安全保护任务

故障处理数据库作为健康管理的依据,包括故障模式数据库和故障处理方法库两部分。故障模式数据库包含卫星各关键系统的故障模式判据,故障处理方法库包括故障模式下需要执行的指令模块,以地址指针将故障模式数据库与故障处理方法库进行关联。以蓄电池组充放电故障模式为例,进行某项故障诊断的步骤如下:

第一步,从星上网CAN总线获取蓄电池充电电压数据 V_{charge} ;第二步,从故障模式数据库调出故障判断法则,即电池充电电压上限值 $V_{chargeup}$, If $V_{charge} < V_{chargeup}$ Then (跳入下一项故障诊断), Else (转入故障处理方法库);第三步,从故障处理方法库调出蓄电池过充处理指令串,送星务系统激活事件程控或相对程控执行;第四步,跳入下一项故障诊断。

故障处理过程如图4所示。

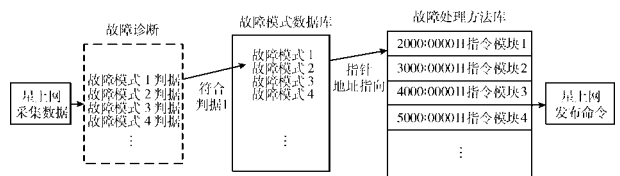


图4 故障处理流程

Fig. 4 Procedures of fault treatment

自主安全保护任务的实现可以提高卫星的自主诊断和处理能力,故障模式数据库的实现有助于

丰富卫星的自主健康管理策略。

2) 相对程控任务

由若干相对时间程控指令构成,并以分组的形式对相对时间程控指令进行设计,每一组指令对应于一种卫星工作模式,提前写入健康管理模块的相对程控缓存区。同时,每一组相对时间程控指令可以根据需要自由分成两段,每段指令条数不限。针对每一组相对时间程控指令,通过一条程控指令(时间激活、事件激活)在不同的时间可执行多次,而不必重复地上注程控数据。该程控指令规定了要启动的相对时间程控指令组号和该组指令内第一段指令执行结束到第二段指令开始执行的时间间隔 Δt 。相对程控任务中可以编制各种不同功能的相对时间程控指令组,通过星上时刻、异常事件、有效载荷任务等自行激活,完成如卫星自主校时、自主故障处理、有效载荷任务的自动执行等各种不同功能,实现对卫星运行流程的控制。相对时间程控指令处理功能的层次如图5所示。

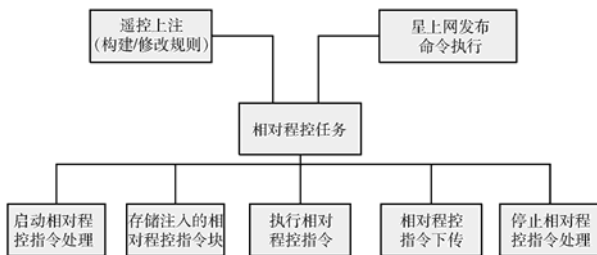


图5 相对时间程控指令处理功能层次

Fig. 5 Levels of relative time program control command processing function

相对程控任务使本来需要多次上注的大量数据可以提前存储,并且可以多次重复使用,解决了卫星在轨操作过程过于复杂的问题,减少了人为操作失误和空间链路问题带来的不安全因素。

3) 状态采集与传输任务

在分包遥测^[6]的基础上,实现了可控遥测传输功能^[7],即自动判断生成指示性参数(部件、分系统、整星的健康状态遥测参数)、自动对遥测数据的下行传输进行统一管理控制,可对遥测数据内容、采集速率、遥测格式、遥测码速率等进行灵活调整。

在实际应用过程中,任务按以下等级对遥测数据进行下行传输过程如下:

第一等级,实时遥测和延时遥测。

自主判断传送完实时遥测缓冲区中的数据后,利用剩余信道传送延时遥测缓冲区中的数据;对指示性遥测参数进行自主判断,正常时仅传输指示性参数,停止相应遥测包的下传。

第二等级,有效载荷图像数据(数据量大、实时性要求不高)。

当实时遥测和延时遥测传送完成,剩余信道可以用来传送有效载荷图像数据;同时在任务中设立了有效载荷图像健康标志判读,当认为图像数据不符合要求则不进行下传。

第三等级,分系统设备参数和代码数据。

当分系统设备健康标志超限时,任务自动控制开启相应分系统设备参数和代码遥测包进行下传;同时将此遥测包的延时遥测压缩比设置为1:1存储;停止下传其他遥测包,关闭有效载荷图像数据包。

这种可控传输功能大大节省了信道资源,使有限的信道资源得到了合理的利用,同时在卫星出现故障时便于快速定位,也简化了地面监控人员对遥测数据的判读。

4) 在轨重构任务

在轨重构任务中包括关闭危及卫星生存的任务和设备,还包括多个不同功能的附加任务模块,它们被提前写入任务存储区,任务运行时可根据卫星运行状态自主关闭或激活运行相应的任务和设备,完成对卫星软件功能的调整和完善。任务的自主管理过程采用了与自主安全保护任务同样的方法来实现,同时也支持地面上注的控制方式。

在实际应用中,重点解决了附加任务模块与主程序的融合问题,使附加任务模块既可与主程序共用资源又不影响主程序的运行。附加任务与主程序不是统一编译连接的,因此附加任务不能直接访问和修改主程序中的变量、参数以及子函数;而附加任务功能的完成又不可避免地要利用到主程序中的各种资源,因此在主程序和附加任务中设计了接口函数,利用接口函数进行间接调用。从理论上讲,主程序的所有资源都可以通过接口函数被附加任务所访问和调用,但接口函数的数量不可能无限多,因此在实践中,为比较常用的和重要的数据与功能函数添加了相应的接口函数,丰富了附加任务的功能。

3 结束语

本文通过对自主健康管理系统的深入研究和分析,针对目前小卫星健康管理存在的问题以及新的发展需求,提出了一种分层次、分布式的小卫星自主健康管理设计思路,以星务管理系统为基础构建了小卫星自主健康管理系统。为了验证研究成果,设计了4个自主健康管理任务执行模块,各模块功能均可在地面模拟环境中实现,部分任务模块已在小卫星上进行了飞行实践,完成了小卫星的局部自主健康管理。这不仅证明了本文研究内容的正确性和有效性,也证明了小卫星自主健康管理系统的研究与应用对保证卫星的安全运行,提高卫星的自主诊断、自主运行、自主规划能力具有重要意义。至于小卫星自主健康管理系统的全面性及可靠性评定、自主健康管理规则模型的建立与完善等,还须在实践中作进一步验证。

参考文献 (References)

- [1] 曾声奎, Pecht M G, 吴 际. 故障预测与健康 PHM 技术的现状与发展[J]. 航空学报, 2005, 26(5): 26-32
Zeng Shengkui, Pecht M G, Wu Ji. Status and perspectives of prognostics and health management technologies[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 26-32
- [2] 常琦, 袁慎芳. 飞行器综合健康管理(IVHM)系统技术现状及发展[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(11): 52-57
Chang Qi, Yuan Shenfang. Overview of integrated vehicle health management(IVHM)technology and development[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(11): 52-57
- [3] 孙博, 康锐, 谢劲松. 故障预测与健康管理系统研究和应用现状综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(10): 1762-1767
Sun Bo, Kang Rui, Xie Jinsong. Research and application of the prognostic and health management system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(10): 1762-1767
- [4] 李清东, 张庆振, 任章, 等. 航天器分布式智能故障诊断专家系统[J]. 战术导弹控制技术, 2006, 55(4): 107-110
Li Qingdong, Zhang Qingzhen, Ren Zhang, et al. Design of distributed fault diagnosis expert system for the spacecraft[J]. Control Technology of Tactical Missile, 2006, 55(4): 107-110
- [5] 李孝同. 小卫星星务管理技术[J]. 中国空间科学技术, 2001, 21(1): 29-36
Li Xiaotong. Satellite keeping technology of small satellite[J]. Chinese Space Science and Technology, 2001, 21(1): 29-36
- [6] 国防科学技术工业委员会. GJB 11986—2004 航天器测控和数据管理 第6部分: 分包遥测[S]. 国防科工委军标出版社, 2004
- [7] 李孝同. 小卫星星务系统的遥测技术研究[J]. 航天器工程, 2008, 17(2): 38-43
Li Xiaotong. Telemetry in computer integrated satellite system[J]. Spacecraft Engineering, 2008, 17(2): 38-43

Autonomous healthy management system based on satellite keeping operator

Li Qing, Sun Guojiang, Li Xiaotong
(DFH Satellite Co. Ltd, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to accommodate the rapid development of the electronic information system on satellites, to make satellites work out their schedules by themselves, and to enable satellite's autonomous management and autonomous operation, it is necessary to construct a reasonable and effective autonomous healthy management system. Based on the satellite mission management requirements, a small satellite autonomous healthy management system is constructed in this paper to address the current issues of the small satellite autonomous healthy management. The satellite autonomous healthy management includes three levels: the satellite system, the subsystem and components. The autonomous healthy management execution module in the level of the satellite system is designed, including the autonomous healthy management rule base and the autonomous healthy management execution mission. The paper proposes a satellite autonomous healthy management system to improve the small satellite autonomous diagnosis, its independent operation ability, and finally to realize the requirements of long life, safe and reliable operation of satellites.

Key words: autonomous health management system; execution module; management rule base; management execution mission