

空间飞行器及其推进系统智能自治控制技术分析*

吴建军 李洪伟

(国防科技大学航天与材料工程学院,湖南长沙 410073)

摘要 空间飞行器及其推进系统由于系统本身的复杂性、工作环境的不确定性和未知性等,利用传统的现代控制理论与方法对其进行控制十分困难。文中深入分析了智能自治控制系统内涵、功能及其构成框架,解析了空间飞行器 Remote Agent 智能自治控制系统的基本构成,对空间飞行器推进系统重构问题进行了应用分析,对研究和发展我国空间飞行器的智能自治控制系统有一定的借鉴作用。

关键词 :自治控制 ;智能控制 ;空间飞行器 ;推进系统

中图分类号 :V475.9 文献标识码 :A

Analysis of Autonomous Intelligent Control Techniques for Spacecraft and Its Propulsion Systems

WU Jian-jun, LI Hong-wei

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract : For spacecrafts and its propulsion systems, it is very difficult to apply the classical modern control technology to solve the concerned control problems owing to the complexity of systems, the uncertainty and the unknown of the operating circumstances. The implication, function and construction framework of autonomous intelligent control systems are clarified and discussed. The system architecture of remote agent is analyzed. The reconfiguration of propulsion systems for spacecrafts by autonomous control techniques is also discussed. The analyses and discussion can be available for reference in the development of autonomous control systems for our spacecrafts in the future.

Key words : autonomous control ; intelligent control ; spacecraft ; propulsion systems

空间飞行器,如飞船、空间站、空间探测器、卫星及星座系统等,从控制的角度来看,是一类十分复杂的特殊混合系统(Hybrid Systems)。由于系统本身的复杂性,如系统多模块集成、运行与工作过程多模式、行为特性不连续,以及工作环境的不确定性和未知性等,使得求解这类系统的控制问题极为困难。对该类系统控制问题的研究,往往涉及到非线性、鲁棒性、不确定性以及柔性结构系统和离散事件动态系统等,而传统的现代控制理论与方法对此常常无能为力。近十年,随着科学与技术的快速发展,人们已将解决这类复杂控制问题的方法与手段投注于智能控制技术,特别是智能自治控制技术(Autonomous Intelligent Control)。

美国 MIT 人工智能实验室教授 Brian C. Williams 博士在 NASA 的支持下,从 1994 ~ 1999 年在 Ames 研究中心计算科学部,开展了以基于模型的智能自治系统与技术及其在空间飞行器中的应用为研究主题的 MBA(Model-based Autonomous Systems)研究,并成功地将他们研发的 Livingstone、HSTS 以及 Smart Executive 等系统集成用于“新盛世”计划的第一艘飞船“深空一号”中具有高度自治功能的控制系统 Remote Agent,实现了空间飞行器在长时间不与地面联系的情况下能自行处理各类故障、自行调整局部任务目标并完成总体任务的能力。当前,他们正围绕着 NASA 的“新盛世”、“火星探测”、“可重复使用运载器”等计划研究和发展相关的理论、技术和系统集成。

在国内航天领域,对智能自治空间飞行器研究引起了广泛的重视。随着我国航天技术的快速发展,

* 收稿日期 :2002 - 06 - 28

基金项目 :国家 863 青年基金项目资助

作者简介 :吴建军(1967—)男,副教授,博士。

特别是未来载人登月计划的实施和深空探索计划的发展,迫切要求对空间飞行器智能自治控制系统与冀术进行系统深入的工程应用研究。

1 自治控制系统内涵与构成框架

自治(Autonomy)意味着具有自我管理的能力。具有高度自治能力的智能控制系统应当具备在无人干涉的情况下、在相当长的工作时间内能够满足各种控制性能指标要求的自我管理的能力,特别是在故障情况下和未知环境中具备自适应、自调节、自免疫、容错及自恢复等功能。

1.1 自治控制系统内涵

由于空间探索任务的复杂性和长期性,建立具有高度自治能力的控制系统需要具备对设备、环境、目标很高的自适应能力。一方面,要求广泛运用传统的控制、辨识、估计理论与方法和人工智能技术,对故障进行检测、隔离和确认;另一方面,自治控制器必须具有对完成某一复杂任务进行规划和调度的能力,它必须具有良好的与其它系统或操作者相互沟通的界面,同时它还要具有自学习功能,以提高执行计划的能力。因此,自治控制系统的实现依赖于先进的计划与调度、自学习和专家系统等与传统控制理论的有机结合。

对空间飞行器及其推进系统而言,完整的自治控制系统至少要具备以下性能:(1)必须保证具有在不与技术人员联系情况下长时间工作的能力。这是由空间飞行器深空探测长时间工作要求所确定的。(2)在给予严格时间期限和能源约束条件下,必须保证任务成功。这是由空间飞行器在空间预定轨道运行中有可能发生不可预知事件决定的。(3)高可靠性。这是由空间飞行器的昂贵造价与任务的一次性决定的。同时,自治系统本身不能降低空间飞行器本身的可靠性。(4)具有协调多重约束子系统工作的能力。这是由空间探索任务的多重性与多样性决定的。

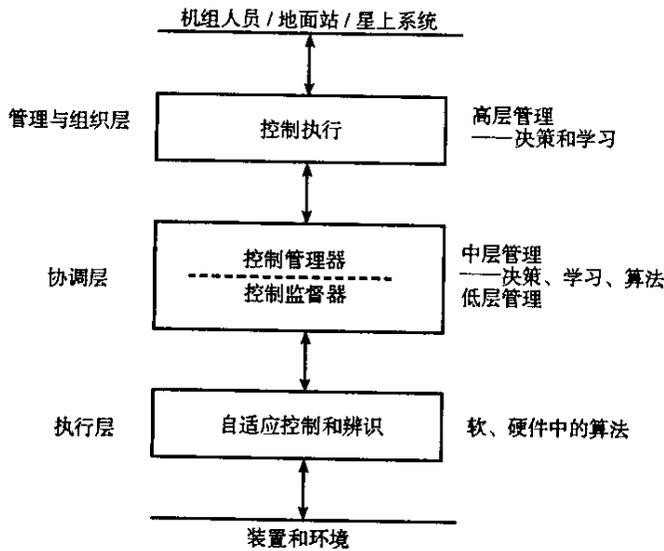


图 1 自治控制系统功能结构图

Fig.1 The function architecture of autonomous control system

1.2 自治控制系统构成框架

从功能结构上划分,一个完整的具有高度自治能力的控制系统,一般而言主要由三部分组成或者说由三个层次构成^[4],即执行层、协调层、管理与组织层,如图 1 所示。这也是自治控制系统的基本组成。自治系统主要由三层组成,实际它或者低于三层或者多于三层,但这三层基本体现了自治控制系统的基本构成框架。

执行层位于系统的底层,它通过传感器和执行机构直接接触装置和环境,包括了传统控制的特点和

功能。一方面,它通过传统的算法完成由高层传达给底层的控制任务;另一方面,它将控制信息和硬件状态、性能信息反馈到上一级以便管理层更好地做出决断,故障诊断与隔离(FDI)运算器也需要这些信息以便检测故障。

中间层称为协调层,为执行层和管理与组织层提供连接,它在其它两层之间起一个连接作用,融合了智能化与传统控制功能。一方面,它接收从上层控制管理部分传来的预先定好的命令,然后定好一定的执行次序和算法传到下一级的执行层;另一方面,它将从执行层传来的信息进行分类与整理,在传送到控制管理层的同时对执行层的状态起监控作用。此外还有对某些故障进行紧急处理的功能,这包括一些保障性能和在一定程度上保证安全的方案。

管理与组织层为最高层,直接面对机组成员、地面工作站或者星上系统,是自治控制系统中自治特性的主要体现,具有高级管理和智能化方案制定的功能,这对发展一个真正的自治系统学习功能是十分必要的。自治控制的学习能力在管理与组织层体现出来。

2 Remote Agent 系统构成分析^[1,7]

“Remote Agent (RA)系统是 NASA 为满足未来进一步空间探索要求而研制的具有高度自治的智能控制系统。构建它的基本原理是:基于模型的编程技术,在线实时推理与搜索技术,面向目标的闭环指令技术。RA 必须保证空间飞行器在严格限制条件下长时间工作的可靠性,能源足够以保证任务执行安全性和各子系统工作的协调性。RA 主要由以下几部分组成(如图 2 所示):在严格的时间要求和一定的能源限制条件下满足自治运行需求的总体规划和调度(Planner/Scheduler, P/S)部分;在一定的时间内达到任务目标并对能源进行控制管理的任务管理(Mission Manager, MM)部分;使控制部分具有强鲁棒性并协调任务之间时间分配的执行部分(Executive, EXEC);在有限的观测信息下能对故障做出快速反应能力的基于模型的模式识别与重构部分(Mode Identification and Reconfiguration system, MIR)。从 RA 的结构可以看出,其 P/S 部分与 MM 的一部分和图 1 中的管理与组织层对应,MM 的另外一部分与协调层对应,EXEC 与 MIR 和执行层对应。

在整个空间飞行器系统中,若将 RA 作为一个黑箱来看,它向实时控制系统(Real-Time control system, RT)输出命令,实时控制系统通过改变控制部分的状态对命令做出反应。同时,实时控制系统的循环状态和传感器硬件的信息通过直接方式或监控器反馈到 RA 系统。

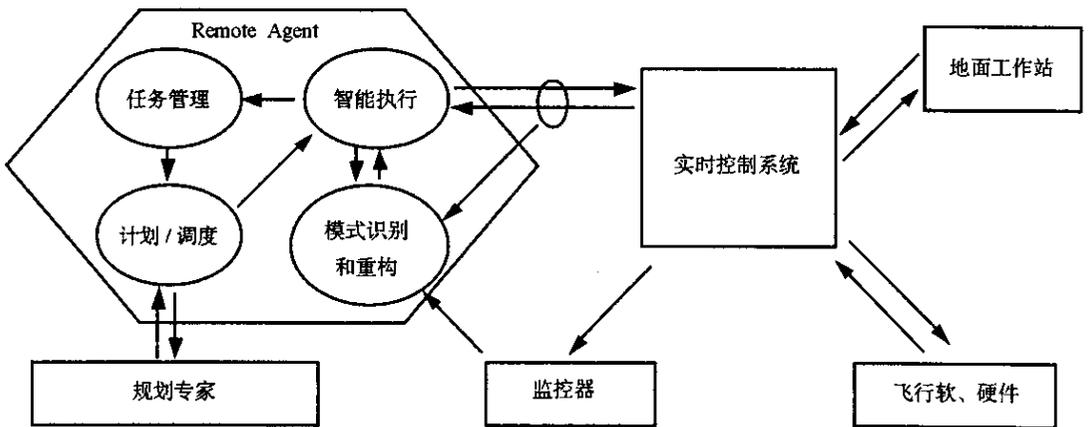


图 2 Remote Agent 系统结构^[1]

Fig.2 The system architecture of Remote Agent^[1]

2.1 计划/调度与任务管理

P/S 的主要功能是对由执行部分反馈到任务管理部分的新任务,在结合子任务和对能源与资源安排的基础上,提出新计划。当 EXEC 对期望的新计划发出请求指令时,基于长期总任务目标轨迹,MM

形成 P/S 的短期子任务计划。长期总任务目标轨迹在发射时确定,必要时可由地面修改与更新,其中包括了一系列在任务正常执行阶段要达到的目标。MM 确定在下一阶段的任务目标,并且将它们与由 EXEC 提供的飞行器预定状态信息融合。这种将任务分为长期总任务和短期子任务的方式,保证了 RA 系统具备在极少有人干预情况下承担多种任务的能力。

2.2 模式识别与重构^[1]

RA 系统中 MIR 部分是 Livingstone 中提供的一种基于模型的离散控制器。Livingstone 明显的特性是利用单一的、描述性的空间飞行器模型提供所需的全部功能,并在响应控制回路内进行状态辨识,推理和搜索实现任务的途径。Livingstone 中的 MIR 通过辨识模型状态来跟踪飞行器的最可能的状态,同时将命令传到实时控制系统。MIR 将所推断出的状态变化信息报告给 EXEC,并提供抽象层次的信息给 EXEC,使 EXEC 仅根据飞行器的状态进行推理。例如,姿态错误的部分信息使 MIR 可推断出某推进器有故障。EXEC 得知的仅仅是推进器的故障状态,而不是低层次传感器的观测值。

2.3 任务执行(EXEC)

EXEC 是一个对协调执行时间活动负责的响应计划执行系统。EXEC 执行计划是通过将高层次活动分成许多命令传到实时控制系统而完成的。EXEC 采用了一种特别的程序语言(ESL)来确定将活动分解的不同方法。

当 EXEC 在工作状态下被通知执行新任务时,EXEC 会给 MM 提供目前任务结束后的飞行器状态信息,同时请求新任务。如果 EXEC 不能够执行或修复目前的计划,它会终止任务,使控制系统处在安全状态下。EXEC 会在目前状态下提供给 MM 目前状态信息同时请求新的任务,直到接收到新任务。

3 应用分析

随着国内“神州”号系列飞船相继开展的无人、载人空间计划及对可重复使用天地往返系统等航天器技术的深入研究,在国内航天领域对智能自治控制技术的工程应用研究已迫在眉睫。下面以图 3 所示的具有阀门冗余备份的推进系统故障检测与系统重构为例,分析智能自治控制系统在其中的应用。

如果将智能自治控制系统分为三部分,即管理层、协调层、执行层,那么在空间推进系统故障检测和系统重构中,各层的功能作用及其实现方式为(1)在执行层,一方面它与外界传感器直接相连,接收阀门的各种工作状态信息,然后上传到协调层;另一方面,它将协调层传来的操作命令通过控制系统或机器人完成。(2)在协调层,将执行层传来的各种信息进行处理,运用各种算法判定阀门的状态(此部分对数据信息的处理应具有自学习功能,以不断完善各种处理算法与方法),随后将处理后的信息传送到管理层,供管理层进行判断。(3)在管理层,随时协调整个系统的各种功能,对各子系统的任务做出时间与能源上的安排,在接收到协调层传来的信息后,它及时做出反应,对阀门发生的故障做出重构的安排,这种安排要在系统总体统筹规划的基础上,随后,它将系统重构命令传达给协调层,完成一系列的系系统重构工作。

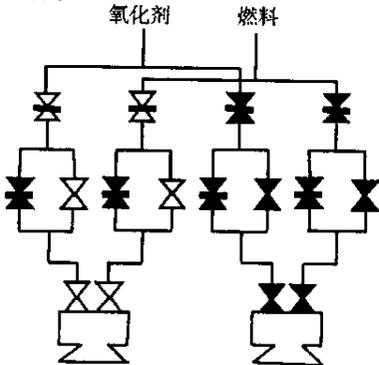


图3 推进系统阀门模型示意图

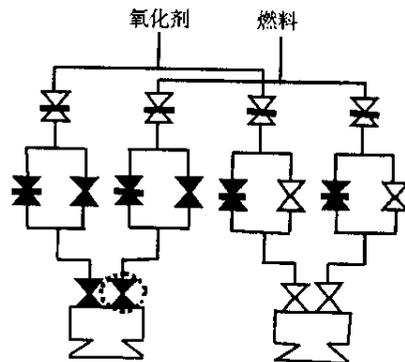


图4 推进系统阀门系统重构

在本例中,通过执行层传来信息数据,协调层经数据分析处理后,确定推力室燃料进口处阀门发生故障(如图4虚线圆所指),并将信息传到管理层,由管理层做出中止当前工作、启动冗余备份系统的安排。执行层接到命令后,启动各种控制系统完成任务。

在上述过程中,技术上需要解决以下问题:

(1)故障检测与定位。在智能自治控制系统中,由于系统大多十分复杂,且内部模型及数据不易掌握,如大型空间飞行器是离散事件系统与连续动态系统的混合系统,采用传统的基于数学模型的定量计算方法会很困难。在RA系统中,提出了用基于模型的定性推理方法,但文献中没有给出技术上细节。文献[6]提出了一种将键图理论用于推进系统故障检测的方法,对该类自治系统故障检测与定位有一定借鉴作用。

(2)管理层语言的采用。智能自治控制系统与传统自适应控制系统的最大不同在于系统具备自我管理并执行各种工作任务的能力。在管理层,由于对各种事情的判断、分析,及其本身需具备的自学习功能,不可能采用传统的程序设计语言。RA系统采用了HSTS框架中的系统描述语言(DDL)^[1],为上述系统的建立可起到指导作用。

(3)各层语言的融合问题。由于各层之间对问题处理方式所采用的语言不同,各层之间在信息相互传送时,需要设定共同的接口语言以完成不同语言之间的转换。

(4)管理功能对任务规划的确定。对任务的规划包括初始计划的安排、在工作过程中额外计划的设计等,这些可采用传统的启发式网络搜索方法^[1],或是采用具备自学习功能的神经网络方法,或是专家系统等。

(5)其它在传统控制遇到的需要解决的重要问题,如鲁棒性等。

4 结束语

空间飞行器及其推进系统的远程操作与控制问题是当今航天领域科研人员需要探索解决的一个十分重要的问题。由于传统的现代控制理论与方法对非线性、鲁棒性、不确定性以及柔性结构系统和离散事件动态系统的无能为力,使人们将目光和精力投注于智能自治控制技术。“深空一号”探空飞船上成功应用的RA系统表明,智能自治控制系统有能力有效地完成远距离、未知环境、长时间空间探测的控制任务。以RA系统为参考,本文分析将自治控制技术用于空间推进系统阀门故障检测与重构的例子,阐述了应用中的基本思路及需要解决的技术问题,对国内开展智能自治控制技术在航天领域中的研究与应用具有积极的作用。

参考文献:

- [1] Nicola Muscettola. Remote Agent: To Boldly Go Where No AI System Has Gone Before[J]. Artificial Intelligence, 1998.
- [2] Holdaway R. A Program for Autonomous Ground Station Control of Small Scientific Satellites[C]. IFAC IFAC '96, San Francisco, USA, July, 1996.
- [3] Yang Jiachi. Development of Intelligent Autonomous Control Technology for Chinese Space Program[C]. IFAC IFAC '96, San Francisco, USA, July, 1996.
- [4] Antsaklis Panos J. An Introduction to Intelligent and Autonomous Control[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [5] 韩曾晋. 自适应控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [6] 李洪伟, 吴建军. 基于键图理论的液体火箭发动机故障检测与隔离方法研究[C]. 中国航空学会动力专业分会火箭发动机专业委员会论文集, 2001.
- [7] 吴建军, 李洪伟. 智能自治控制技术应用于空间飞行器及其推进系统的分析[C]. 国家高技术航天航空技术领域第三届青年学术研讨会论文集(A集), 2002.

