

卫星运行中的自主控制技术*

代树武 孙辉先

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

阐述了卫星自主控制的必要性,分析了卫星自主控制的要求和特点.在此基础上,设计了分布式多 Agent 自主控制系统;介绍了主控单元 Agent 中智能规划与调度功能的实现方式;在自主控制系统中其他 Agent 采用分层控制,介绍了各部分的功能和实现方式.

关键词 自主控制—Agent—卫星

1 引言

在航天活动中,传统的测轨与遥测遥控占有重要的地位.但传统的测控方式受很多条件制约,首先,在卫星发射升空后,需要大量的工程师对飞行任务进行分析,制定飞行计划,安排上行指令,监控指令的执行,这需要大量的人力和物力.第二,传统测控对地面测控站有较高的要求,它需要有一定的通信能力和抗干扰能力,需要在全球建立多个测控站或移动测控站.而在深空探测中,由于天体的遮蔽还会形成测控盲区.这些都不利于飞行任务的完成,因此有必要改进传统的测控手段,发展自主控制技术^{[1],[2]}.

自主控制就是在卫星上建立远程自主控制系统,这个自主控制系统具有智能性,它代替地面测控工程师对卫星进行在轨控制.本文第2部分分析了卫星自主控制的需求,建立了分布式自主控制的结构框架.第3部分介绍了各个 Agent 的实现,最后进行了总结.

2 自主控制系统原理

卫星自主控制与其他领域的自主控制有很大相似性,然而由于卫星工作环境和工作任务的特殊性,又使它和其他控制领域有很大差异.

2.1 卫星自主控制需求

自主控制系统的根本任务就是代替测控工程师对卫星进行控制,完成自主导航定位和各种飞行任务.同传统测控工程师一样,自主控制主要需要完成以下任务.

1) 自主制定飞行指令序列.飞行任务是通过执行一系列指令序列完成的,在自主控制中,卫星接收使命级任务,根据存储的卫星模型,结合智能算法,设计出满足各种约束条件的指令序列,发送给卫星的各个软硬件,完成有效载荷控制,自主导航,姿态控制等任务,达到实时控制目的.

* 中国科学院知识创新工程方向性项目 (KG CX2-JG-07)
2001-10-15 收到原稿, 2002-01-28 收到修定稿

2) 监控计划执行情况和卫星状态, 确保任务完成. 由于卫星处在恶劣的工作环境中, 因此, 需要监视卫星的状态, 协调各部分的工作, 在出现故障时进行故障定位, 故障模式识别和系统重构, 确保卫星安全, 保证任务正常完成.

3) 自主导航. 利用各种导航方法, 使卫星不依赖于地面站, 能实时地确定卫星在轨的位置和速度并进行必要的轨道修正.

由于卫星造价昂贵, 而且工作在恶劣的太空环境中, 因此对控制系统提出了许多额外要求. 如:

1) 高可靠性. 大型卫星的制造, 发射耗资巨大, 研制周期长, 因此要求控制系统具有高可靠性和鲁棒性, 以防止意外.

2) 任意层面的控制介入能力. 虽然从理论上讲, 自主控制可以代替传统测控. 然而飞行任务的变更, 以及卫星模型的不完善等, 需要保留必要的地面测控能力, 使地面测控人员必要时可以介入, 保障卫星安全.

3) 系统重构能力. 与其他物体不同, 卫星运行在太空环境中, 维修的可能性很小, 因此, 必须有自我诊断和系统重构能力, 在发生故障时能及时排除或降级使用.

2.2 自主控制结构

卫星是一个复杂的系统, 它由姿态控制、轨道控制、有效载荷、星务管理、热控、数传、能源等多个分系统组成. 这些分系统具有相对独立的功能, 能完成各自的子任务, 而这些任务有较大的差异. 例如姿态控制子系统主要完成姿态测量和姿态调整两个功能, 温控系统主要负责星上敏感仪器的温度监测和调节. 另一方面, 卫星是一个整体, 各个分系统是相互联系的, 它们必须相互协同, 才能有效地完成任务, 例如有效载荷工作时会对姿态指向提出一定要求, 同时需要占用一定的星上资源, 这需要各个分系统相互配合. 由以上分析可知, 卫星的各个功能分布在不同的分系统中, 而这些分系统需要互相配合才能完成任务, 因此卫星的自主控制系统适合采用分布式的多 Agent 协作方式^[3].

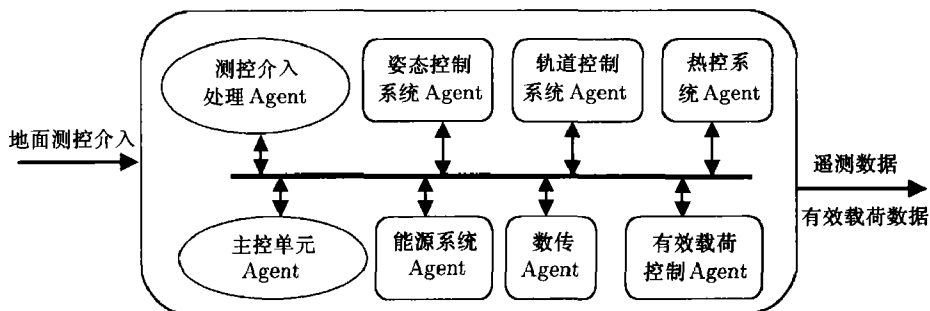


图 1 卫星自主控制体系

Fig.1 Schematic diagram of autonomous control system

卫星自主控制体系如图 1 所示, 它含有姿控、轨控、热控、能源、数传、有效载荷、主控单元、测控介入处理等多个 Agent, 它还应该含有自主导航部分, 此处不作讨论. 各个 Agent 可以是逻辑分布的也可以是物理分布的. 也就是说, Agent 可以集成在一个计

算机环境中,也可以分布在不同位置的不同计算机中,具体情况由卫星复杂程度和计算机处理能力确定.当 Agent 是物理分布时,必须考虑不同计算机间的通信协议.各个 Agent 单元的功能如下.

- 1) 姿态控制 Agent 进行姿态捕获,控制卫星姿态.
- 2) 轨道控制 Agent 通过 GPS 等手段测量卫星的位置,进行轨道计算和轨道维持.
- 3) 热控 Agent 测量卫星各监控点的温度,并按需求进行温度调节.
- 4) 能源系统 Agent 管理星上太阳能电池阵和蓄电池等能源部分.
- 5) 有效载荷控制 Agent 对有效载荷进行监测和控制,当卫星有多个有效载荷时也可以建立多个 Agent.
- 6) 数传 Agent 负责数据管理和传输.
- 7) 主控单元 Agent 负责制定整体计划,协调各个 Agent 工作.

测控介入处理 Agent 是接收地面控制命令的 Agent. 2.1 节分析中提到,地面测控人员必须对卫星有任意层面的控制介入能力,这一功能是通过测控介入处理 Agent 完成的,它赋予地面测控工程师三种介入能力:上行使命级任务,由自主控制系统根据使命级任务产生指令序列,这是最高级别的自主;上行整体飞行计划,取代主控单元产生的飞行规划;最后,地面测控工程师可以直接上行控制指令,控制飞行器,这实质上是传统意义上的遥控.测控介入处理 Agent 可以接收这三种类型的上行信息,然后根据信息的类型自动判断应该采取哪一种操作,完成地面控制系统的控制介入.

主控单元 Agent 在制定计划时需要从总体上考虑卫星的工作情况,尤其要防止各个 Agent 对资源的过调用,避免损坏卫星.它按照飞行任务,卫星模型,各子系统的动态模型,资源使用情况等产生一个整体计划,然后将这个计划中相应的部分传递给对应的 Agent. 主控单元 Agent 在自主控制中起到重要的协调作用.

姿态控制等其他 Agent 存储本分系统的各种知识和控制算法,它们接收主控单元中相应的子计划,自主完成这些计划,并将执行情况,本身的健康情况等信息传回主控单元,以利于主控单元 Agent 按照这些信息进一步调整计划.同时这些 Agent 自身也可以产生任务,例如热控系统可以请求对某个部件进行加热,但必须得到主控单元的认可后才可以执行,以防止和其他 Agent 产生冲突.这样,实现了多个分布式 Agent 在协调基础上的合作,完成对卫星的有效控制.

最后自主控制系统通过向地面站传送遥测数据包,有效载荷数据等为地面提供信息.

3 Agent 结构与原理

如前节介绍,自主控制系统由多个 Agent 组成,这些 Agent 主要有 3 种类型,分别是测控介入处理 Agent,主控单元 Agent 和其他类型的 Agent. 测控介入 Agent 功能比较单一,主要完成地面测控系统的多层次介入,在前一节已经介绍过.本部分主要介绍主控单元 Agent 和其他类型的 Agent 的具体组成.

3.1 主控单元 Agent

主控单元负责制定整体计划,协调各个 Agent 的工作,也就是完成卫星规划与调度工作.在所有 Agent 中,它的智能化程度最高.本部分以地球遥感卫星为例介绍规划与调度

的实现。规划周期可以为数周或更长,地球遥感卫星也可以以几个回归周期为规划单位。

地球遥感卫星的任务是根据用户需求,收集地面各种特定图像,发送至地面站。本系统中选取卫星的有效载荷——相机,姿态控制系统,数据采集存储与压缩系统,数传系统,电源等作为控制对象,这些分系统互相配合,完成图像收集以及数据下传等任务。

一般情况下,规划与调度需要完成两类任务,一类是根据轨道覆盖情况确定拍摄图像的时间,另一类是将飞行任务分解成比较具体的飞行计划。这两种任务需要的知识不同,采用的方法也不同,因此本文将两种任务分开处理。本文设计的主控单元 Agent 如图 2 所示,上层是抽象规划与调度,它的主要任务是确定飞行任务的执行时间。当对地观测任务确定后,主控单元综合考虑观测任务的重要性,图像分辨率精度要求,任务完成期限,完成时间,日照情况等条件,结合卫星轨道地面覆盖的情况,对飞行任务进行排序,确定各任务的执行时间。由于星上存储器容量有限,在排序过程中还需要为数据下传以及一些常规任务预留一定的执行时间。排序的目的是达到最优或者近似最优(优化目标可以为所有观测任务最小完成时间,最大信息获取量或者综合目标最优)。这一排序任务可以采用传统的规划方法或者专家系统,以及具有学习功能的神经网络等方法实现。

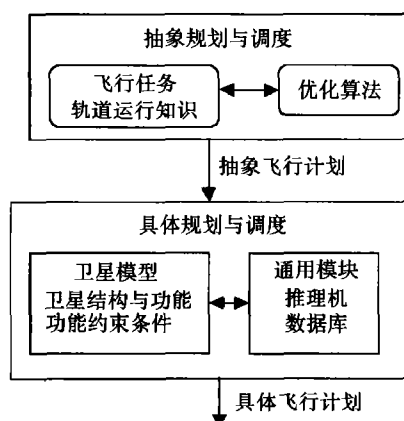


图 2 主控单元 Agent

Fig.2 Main control subsystem

由于抽象规划的周期比较长,计算工作量很大,同时它产生的规划是一个抽象计划,数据量很小,所以可以在地面完成,这样能够充分利用地面的计算能力。当抽象规划完成后,得到一个飞行任务排序,在这个排序中每个飞行任务都安排了一个合适的执行时间,这时具体规划与调度模块就可以工作了。具体规划与调度系统由两部分组成,一个是专用卫星模型,另一个是通用模块推理机。

为了自主制定卫星飞行计划,规划与调度模块必须了解卫星的构造与功能以及完成各种功能所需的条件,即各种约束,例如在完成拍摄图像任务时,要求相机必须指向拍摄目标,存储器有足够的存储空间,有足够的电源可用,这些知识统称为卫星模型。在自主控制中,这些知识必须表示成计算机可以理解的语言,它可以用规则和语义网络表示。

卫星模型建立以后,规划与调度系统就可以理解各种卫星资源和约束了。在这个基础

上, 推理机选择各个使命级任务, 采用一系列扩展计划的方法对它们进行分解, 解决各种约束问题, 直到计划中所有的任务约束都得到满足. 这时, 主控单元得到一个具体的飞行计划, 它描述了各个分系统应该完成的工作, 由于这个计划是根据卫星模型统一建立的, 它在整体上不存在冲突.

智能规划是一个复杂的过程, 它涉及到知识的表示, 逻辑搜索处理等技术, 并且需要建立一个良好的界面. 它的实现可以分两步走, 首先在地面作为辅助工具使用, 积累一定经验与信心后, 再移植到卫星上, 实现真正的自主控制.

3.2 其他 Agent 结构与原理

轨控 Agent、姿控 Agent、热控 Agent、能源 Agent 等虽然功能不同, 但它们完成任务的方式相似, 具有相同的结构, 它们都适合采用分层控制. 分层控制能够将快速反应能力和智能性有效地集成到一起^{[4],[5]}, 这正是卫星自主控制所需要的. 分层控制主要由 3 部分组成, 如图 3 所示, 为了清楚起见, 将 Agent 的相关部分也画在图中, 图中虚线框内是 Agent 的结构, 它的工作原理介绍如下.

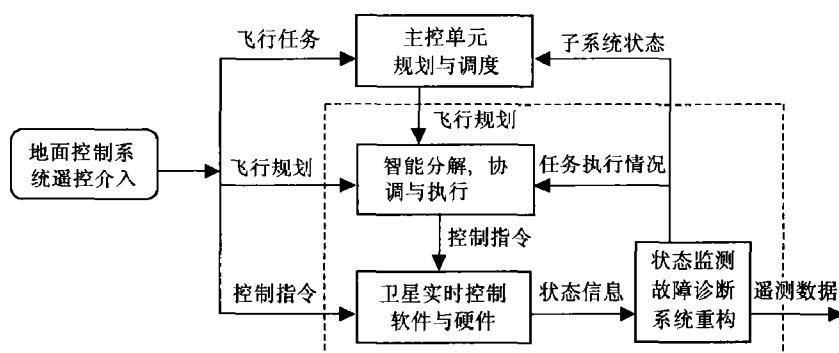


图 3 Agent 结构

Fig.3 Architecture of Agent

(1) 智能分解, 协调与执行模块. 这一模块是主控单元和实时控制模块的中间层. 主控单元制定飞行计划后, 各个 Agent 中的这一模块接收整体计划中属于自己的那一部分计划, 这些计划不能直接执行, 必须进一步处理. 智能分解, 协调与执行模块负责将这些计划分解成可执行的控制指令; 对各个任务进行同步处理, 协调各个任务执行时的先决条件; 完成本系统中资源与设备的进一步管理等. 它的设计侧重于执行任务的能力, 具有一定的智能性. 这一模块的存在减轻了规划与调度系统的工作量, 提高了响应速度.

(2) 卫星实时控制软件与硬件系统. 这是卫星的底层控制部分, 飞行任务的具体实现就是由这一层完成的. 它从动作种类上可以分为软件处理和硬件动作两类, 而从功能上看也可分为两种, 一种负责响应控制指令, 当接收到控制指令后, 完成相应的功能; 另一种负责对外部环境的变化做出反应, 处理异常情况等. 从可靠性和实际应用角度出发, 底层控制基本上采用传统的控制方式. 这样卫星底层的设计基本不变, 符合航天系统中尽可能采用成熟技术的原则. 底层控制采用直接控制方法, 当满足条件时立即响应, 这有利于提高系统响应能力.

(3) 状态监测, 故障诊断和系统重构模块. 这一模块监听实时控制软件和硬件接收到的控制命令, 利用卫星模型和算法推理出执行这些指令时系统应处的状态, 然后和传感器采集的信息相比较, 如果传感器采集的信息和推理模型中正常执行指令的情况一致, 它认为控制命令已经正确执行; 如果传感器采集的信息和推理模型中正常执行指令的情况不一致, 它认为系统处在异常状态; 当出现故障时, 需要根据传感器的信息和推理得到的模型识别具体的故障部件以及引起故障的模式; 故障无法排除时, 进行系统重构; 最后, 将卫星命令执行情况传递给上层模块, 将系统重构情况传递给主控单元, 进行状态更新, 并根据这些情况作为进一步执行任务的基础.

以上 3 个模块构成了卫星自主控制的 Agent 系统, 同时它保留了地面控制系统的控制能力, 地面控制系统可以从多个层面介入自主控制, 例如可以修改飞行任务, 修改规划与调度模块产生的飞行规划, 直接控制卫星的实时控制软硬件等. 其中, 地面控制工程师可以发出指令直接控制卫星的底层软件和硬件, 并通过状态监测模块获取遥测信息, 这构成传统的卫星测控体系, 在需要的时候可以完全取代自主控制.

4 小结

卫星的自主控制是一项复杂的控制技术, 它需要在智能性, 可靠性和快速反应能力之间做出折衷. 本文在分析了卫星功能基础上建立了一个分布式多 Agent 控制系统, 每个子系统控制 Agent 采用分层控制, 完成各项功能. 这种分布式设计方法将飞行任务分布在不同 Agent 中解决, 提高了问题求解能力, 而不同的控制知识分散在不同 Agent 中, 可以同时设计, 降低软件复杂性和相互干涉的可能.

卫星自主控制的实现对航天事业有重要的意义. 在短期内, 自主控制的成果可以用作地面辅助工具, 例如, 规划与调度系统, 状态监测的自动实现可以减轻地面操作人员的劳动强度. 从长期看, 自主控制系统和自主导航的研究为卫星组网和深空探测打好了基础.

参 考 文 献

- [1] Barney Pell *et al.* An Autonomous Spacecraft Agent Prototype. *Autonomous Robots*, 1998, 5(1):1—9
- [2] Nicola Muscettola *et al.* Remote Agent: To Boldly Go Where No AI System Has Gone Before. *Artificial Intelligence*, 1998, 103(1-2):5—48
- [3] 史忠植. 高级人工智能. 北京: 科学出版社, 1998. 212—249
- [4] 蔡自兴, 徐光祐. 人工智能及其应用. 北京: 清华大学出版社, 1996. 329—364
- [5] Jorg P. Muller. The Design of Intelligent Agents: A Layered Approach, Berlin: Springer-Verlag, 1996
- [6] N Muscettola. HSTS: Integrating planning and scheduling, Intelligent scheduling. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1994. 169—212
- [7] Steve Chien *et al.* Using Iterative Repair to Increase the Responsiveness of Planning and Scheduling for Autonomous Spacecraft. IJCAI99 Workshop, Sweden, 1999. 1—8

AUTONOMOUS CONTROL FOR SPACECRAFT

DAI Shuwu SUN Huixian

(Center for Space Sciences and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

A distributed multi-agents autonomous control system that satisfies the control needs of spacecraft is designed. The planning and scheduling subsystem that is composed of an abstract scheduling and a precise scheduling, is discussed in the paper. At last, a layered architecture is chosen for agent structure. Layered architecture allows integrating reactivity and deliberation together, which are all necessary for spacecraft control.

Key words Autonomous control, Layered Agent, Spacecraft