

一种航天器推进剂补加飞控模拟器设计

程 伟, 梁 克

(中国空间技术研究院 载人航天总体部, 北京 100094)

摘要: 推进剂补加飞控模拟器是飞控中心用来验证推进补加程序和地面测控方案、训练操作人员的模拟仿真系统, 为系统演练构造一个尽量逼真的任务环境; 提出了一种用于推进剂在轨补加任务准备的飞控模拟器设计, 详细介绍了系统结构和原理, 给出了系统信息流向、软件设计, 最后对主要技术难点及解决措施进行了说明, 该模拟器具有真实性高、通用性高及灵活性高的特点, 可以实现对推进剂在轨补加过程的动态模拟, 在我国首次推进剂补加任务准备中得到了充分的应用和验证, 取得了较好的效果。

关键词: 航天器; 推进剂补加; 飞行控制; 模拟器

Design of a Kind of Propellant Refueling Simulator Used in Spacecraft Flight Control

Cheng Wei, Liang Ke

(Institute of Manned Space System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: propellant refueling simulator for flight control is a simulation system used to validate the flight program and ground control schemes, to train mission operators, constructing a realistic mission environment for system testing in the flight control center. A design of flight control simulator used in the preparation of propellant refueling mission is put forward, the system structure and principle are introduced in detail, the system information flows and the soft design are showed, the technical difficulties and the solutions are illuminated at last. this design brings the simulator high comparability, high universality and high agility, and can simulate the propellant refueling process dynamically, it has been applied to the preparation of the first propellant refueling mission in our country, and good results have been achieved.

Keywords: spacecraft; propellant refueling; flight control; simulator

0 引言

推进剂在轨补加技术为空间站建造所必需的关键技术之一, 目前国际空间站上所用的推进剂补加系统采用是俄罗斯的补加技术, 其基本过程为: 携带推进剂的货运飞船(补加航天器)与空间站(被补加航天器)对接, 空间站通过自身携带压机为膜盒贮箱建立低气压环境, 利用压力差将货运飞船携带的推进剂传输至空间站膜盒贮箱。

目前我国正在开展航天器推进剂在轨补加技术的攻关及研制工作, 其中推进补加程序^[1]及推进剂在轨补加的飞控实施过程是掌握推进剂在轨补加技术的重要组成部分。因此有必要研制推进剂在轨补加飞控模拟器, 用于飞控中心任务准备阶段开展航天器推进剂在轨补加飞控任务的演练工作, 包括对推进补加流程及程序进行演练、对推进补加飞控实施方案和实施流程进行验证、对推进补加飞控地面监控软件进行测试、对参加飞控试验人员进行训练等^[2-4]。本文介绍了一种航天器推进剂在轨补加飞控模拟器的设计方案, 可以实现对推进剂在轨补加过程的动态模拟, 具有真实性高、通用性高、灵活性高的特点, 可有效验证推进补加飞控实施方案和实施流程的有效性和正确性。

1 系统结构及原理

1.1 系统结构

推进补加模拟器包括补加仿真计算机和被补加仿真计算机两部分, 与实现其他功能的数管仿真计算机、测控仿真计算机、姿轨控仿真计算机、仿真主控机等共同组成了飞控中心的地面飞控模拟器系统, 各仿真计算机之间通过以太网连接进行通信; 飞控模拟器系统又与飞控中心的数字仿真系统、任务系统一起构成任务演练的数据回路与仿真环境。其中, 仿真主控机可以本地发起控制命令或接收并转发数字仿真系统通过网络传送的控制命令, 实现对相应模拟计算机的控制, 任务系统的遥控指令和注入数据经数字仿真系统统一发送到飞控模拟器系统, 飞控模拟器系统正确响应后, 生成相应的遥测参数再经数字仿真系统送回任务系统进行处理和显示, 地面飞控模拟器系统和系统演练回路组成如图1所示。

推进补加飞控模拟器硬件系统由2台仿真计算机组成, 分别对应补加仿真计算机和被补加仿真计算机, 其中两台仿真计算机实现的主要功能及对外接口相同, 只是各仿真计算机具体的配置参数存在差异; 每台仿真计算机软件系统由Windows操作系统和推进剂补加仿真软件组成, 仿真软件采用Visual C

进行开发, 采用多线程和模块化、构件化设计思想, 以提高软件的通用性和可复用性。推进补加飞控模拟器实现的功能包括对补加过程中遥测参数进行动态仿真模拟, 模拟航天器上补加管理计算机的控制、采集及处理功能, 模拟推进补加的故障模式, 模拟两补加航天器间的信息交互, 以及模拟与其他设备间的通信等功能。具体如下:

收稿日期:2017-05-08; 修回日期:2017-06-04。

作者简介:程 伟(1986-),男,河南人,硕士研究生,主要从事载人航天器信息系统方向的研究。

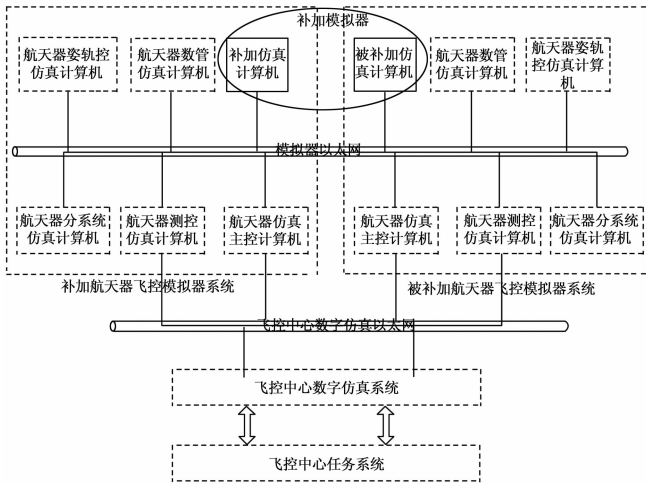


图 1 地面飞控模拟器系统和系统演练回路组成

- 1) 通过以太网与其他仿真计算机进行通信, 如控制命令的接收、遥测参数的定时输出、信息交互数据的收发等;
- 2) 接收到仿真主控机的控制命令后, 实现仿真的启动、停止及跳时功能, 以及在任意时刻的断点保存及重新启动功能;
- 3) 实现对推进补加各种故障模式的模拟, 以及根据控制命令实现故障模式的加载及撤销的功能;
- 4) 对接收到的推进补加指令、注入数据进行判断、解析处理及响应;
- 5) 对推进补加过程中的遥测参数进行动态仿真模拟, 进行组包后输出下行并送地面任务监显系统进行显示;
- 6) 接收来自另一补加仿真计算机的补加信息交互数据, 进行判断和处理; 根据自身遥测状态定时更新补加信息交互数据帧内容并输出给另一补加仿真计算机, 实现两补加航天器间状态的同步。

1.2 基本原理

航天器推进剂在轨补加的基本原理为: 补加航天器与被补加航天器对接形成组合体后, 首先由地面发送指令完成两航天器间推进剂管路物理上的连通, 然后进行补加管路检漏, 确认两航天器补加管路系统密封性能满足要求后, 地面发送指令给被补加航天器, 并启动压气机将被补加航天器推进剂贮箱中的增压气体回抽到推进气瓶中, 待贮箱中的增压气体压力下降到预定值后停止压气机抽气, 地面发送指令打开两航天器相应的补加阀门, 由补加航天器将其推进剂贮箱中的推进剂通过补加管路输送给被补加航天器的推进剂贮箱, 推进剂输送完成后地面发送指令对相关补加管路进行吹除, 保证两航天器分离时管路中不会有残留的推进剂。在整个补加过程中, 补加管路及气瓶的温度、压力及贮箱剩余量等参数, 以及补加过程中各设备的遥测参数、补加状态信息等均随着补加动作的执行及补加阶段的变化而改变, 同时两航天器间周期交互关键状态信息, 并进行相应的判断和处置。

推进补加飞控模拟器实现对以上补加过程的动态仿真, 如遥测参数的模拟、指令及注入数据等补加动作的响应处理、航天器间的信息

交互、故障模式模拟等, 模拟器主要功能实现的原理如下:

1) 遥测参数仿真模拟: 推进管路、气瓶及贮箱等的温度、压力、剩余量等为缓变类型数据, 随时间动态变化, 如压气机抽气过程中, 气瓶压力随时间逐渐增加、贮箱压力逐渐减小, 可以建立随时间变化的数学仿真模型, 软件依据数学模型进行实时计算并按固定周期对这些遥测参数值进行数值更新, 从而实现对这些遥测参数的动态模拟; 对于补加设备的开关机状态参数、补加过程中的状态信息、阀门开关状态等, 地面无上行指令时其遥测为固定的状态, 仅当接收到地面发送的指令或注入数据执行相应补加动作时其参数值才发生变化, 当软件接收到指令或注入数据信息时进行解析、识别和处理, 按照预期值对该指令对应的遥测参数进行数值设置, 实现对补加动作的响应。

2) 补加信息数据交互: 两航天器间信息交互内容为补加过程中的关键状态量, 如补加故障状态信息、补加到位信息等, 其数据来源均为补加遥测参数, 并随补加过程的开展动态更新。由补加模拟器软件根据遥测参数最新状态按照信息交互的通信周期对数据帧中的参数值进行定时更新并组包输出, 并对接收到的信息交互数据进行解析判断及相应处置。

3) 故障模式模拟: 对于某一故障模式, 当故障发生时, 其对应的遥测参数会发生变化。模拟器按照故障模式中的故障判据对该故障相关的遥测参数进行数值设置, 从而实现对故障现象的模拟, 同时采用数据库索引方式对所有的故障模式进行存储和区分, 实现对所有故障的模拟。

2 信息流向

推进补加飞控模拟器内外部数据信息流如图 2 所示, 箭头方向代表数据流向, 由于两台仿真计算机对外接口功能相同, 因此以其中的补加仿真计算机为例进行说明。当补加仿真计算机接收到数管仿真计算机的程控指令和注入数据, 或接收到测控仿真计算机的遥控指令时, 对指令及注入数据内容解析、识别后进行相应功能的模拟, 对与指令或注入数据相关的遥测参数动态模拟其数值的变化, 并周期性将遥测数据组包发送给数管仿真计算机, 由数管仿真计算机按照航天器的遥测格式统一进行组帧输出至地面任务监显系统进行显示, 从而实现遥测数据的动态变化模拟; 补加仿真计算机接收到来自仿真主控计算机的启动、停止、跳时及断点保存、故障模拟等命令后, 解析处理后进行相应操作, 并回复操作完成应答信息; 补加和被补加两个仿真计算机间依据约定的数据格式和通信周期进行相互通信, 并根据接收到的数据内容状态进行相应处置, 实现补加过程中信息的实时交互, 如补加故障状态字、补加到位信息等, 保证两航天器间的补加状态信息的同步。

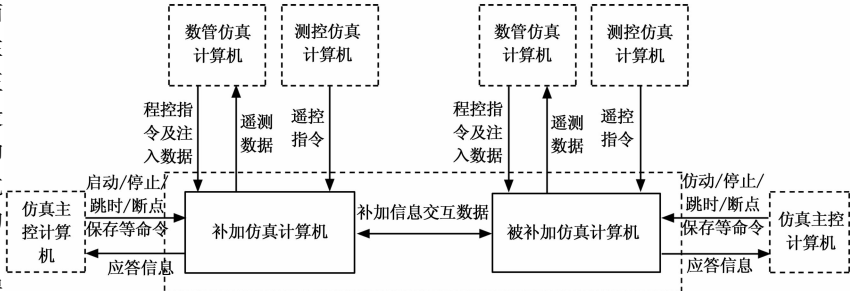


图 2 推进补加飞控模拟器内外部数据信息流

3 软件设计

3.1 软件组成

本系统软件要实现的功能比较复杂,为了提高补加模拟器系统的可维护性、可扩展性,采用模块化设计思想,由于两台仿真计算机主要功能需求相同,只是具体的配置参数不同,因此两台仿真计算机软件采用相同的功能模块设计。根据功能需求,将每台仿真计算机软件划分为以下几大模块:网络通信功能模块、指令及注入处理功能模块、遥测模拟功能模块、补加信息交互功能模块、补加故障模拟功能模块、控制功能模块及数据库功能模块,每台补加仿真计算机内部各功能模块间数据交互关系如图 3 所示。

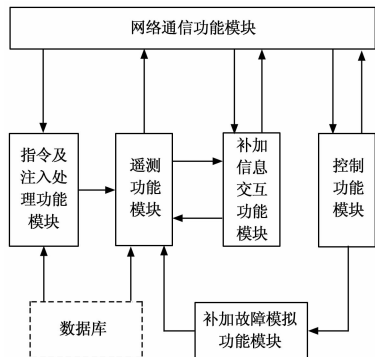


图 3 软件各模块间数据交互关系图

3.1.1 网络通信功能模块

网络通信功能模块采用 UDP 协议实现两个补加仿真计算机间,及与其他仿真计算机之间的以太网数据交互:1)接收网络报文数据,根据约定的报文功能类型进行识别,并转发给相应的功能模块进行处理;2)将各功能模块的数据组成网络报文数据后发送给其他仿真计算机。

网络报文数据格式由报头和数据区两部分组成,其中报头又包括节点 ID、报文功能类型及报文长度三部分,节点 ID 用于区分不同的仿真计算机,每个仿真计算机对应一个唯一的 ID 号,报文功能类型用于表征该帧数据内容的功能,用不同的数值进行定义,如遥测数据帧、指令数据帧等。

3.1.2 指令及注入解析功能模块

指令及注入解析功能模块接收来自网络通信模块转发的遥控指令、程控指令及注入数据,从中提取出指令或注入数据对应的编码,根据编码查询数据库中指令或注入数据对应的遥测参数,将查询结果送遥测功能模块,由遥测功能模块实现遥测参数对指令的响应变化。

3.1.3 遥测模拟功能模块

遥测模拟功能模块主要实现对航天器补加子系统所有遥测参数的动态模拟:1)对地面发送的指令或注入数据进行动态响应,模拟相关遥测参数的变化,如接收到补加阀门开关指令后实时更新补加阀门的开关状态遥测信息;2)实现对补加管路、阀门及气瓶等的温度、压力参数,推进剂剩余量参数,压气机转速等相关参数的动态模拟;3)实现对补加故障状态参数的动态模拟。

3.1.4 控制功能模块

控制功能模块主要实现对来自外部仿真主控机控制命令的响应:1)接收来自仿真主控计算机的启动、停止、跳时及断点保存等命令后,执行相应操作,并回复应答信息;2)接收

到相应的故障模拟状态字后进行解析,并送补加故障模拟功能模块实现相应故障模拟的模拟。

3.1.5 补加故障模拟功能模块

补加故障模拟功能模块主要实现对不同补加故障模式的模拟,根据控制功能模块给出的故障状态字信息,通过调用遥测模拟功能模块实现对该故障现象的动态模拟。

3.1.6 补加信息交互功能模块

补加信息交互功能模块主要实现两个补加仿真计算机间互传数据的动态模拟,主要为补加阶段字信息、补加到位信息、补加故障状态信息、补加管路压力等比较重要的状态信息。每个信息交互周期到来时,由补加信息交互功能模块从遥测功能模块中读取互传遥测参数的当前状态,并对信息交互数据帧中的内容进行更新,然后发送给网络通信功能模块组成网络报文数据后发送给另一个补加仿真计算机;当接收到信息交互数据时,对数据内容进行判断,若需进行处置,则调用遥测功能模块模拟相关遥测参数的变化。

3.1.7 数据库功能模块

数据库功能模块主要负责实现对补加指令、注入数据、遥测参数,以及故障模式进行存储及查询等功能,指令及注入解析功能模块、遥测模拟功能模块基于数据库实现指令的解析、遥测参数的模拟及故障现象的模拟。

3.2 编程方法

编程过程中采用循环采集处理与中断触发相结合的方法,同时程序中广泛采用模块化及 C# 类的构造函数的编程思想,提高程序的通用性和复用性,提高编程效率,减少重复性,并对补加的关键状态信息,采用标志位方式提高程序的可靠性。飞控补加模拟器软件主程序流程如图 4 所示。

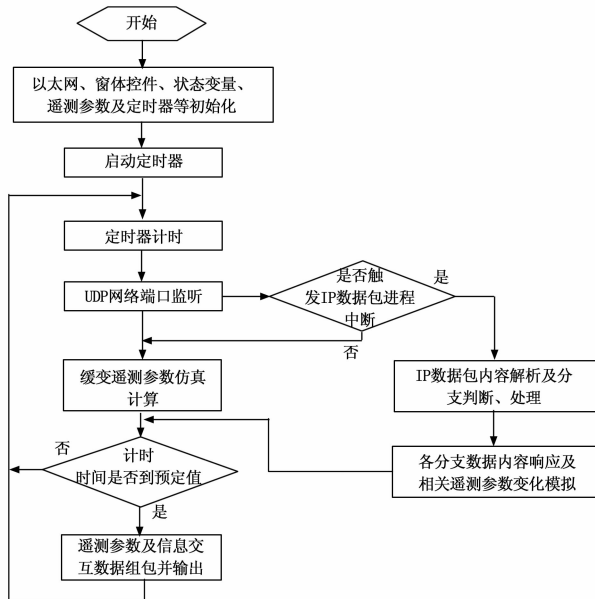


图 4 软件主程序流程图

系统首先进行程序初始化设置,包括以太网接口初始化、人机操作界面窗体控件的初始化、程序中状态变量的初始化、补加遥测参数初值设置及定时器的初始化等,其中网络 IP 地址、端口号及补加遥测参数等变量,由于需初始化变量数较多,采用了专门的数据文件对其初值进行赋值,并在初始化时由程序读入数据文件实现对这些变量的初始化设置。

表 1 指令、注入数据及遥测参数对应数据库格式

指令或注入代号	指令或注入编码	指令或注入名称	对应遥测参数代号	参数变化方式	参数值	转换公式	遥测参数对应通道	复帧数
B0001	XXXX	XXXX	XXXX	设置数值/增加数值/按位变更	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX

表 2 故障描述文件格式

故障 ID	故障类型	故障对应参数	故障对应参数值	故障引入时间	故障结束时间
0001	紧急	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX

初始化完成后，程序中开启定时器开始计时，并打开 UDP 网络端口监听功能，同时程序根据定时器计时的时间对温度、压力等参数进行实时仿真计算。当定时器计时时间达到预定值时，由程序根据补加遥测参数的当前状态分别组成补加数管遥测参数包和信息交互数据包，组包完成后组成网络报文数据包格式分别发送给数管仿真计算机和另一补加仿真计算机，然后定时器从零重新计时，实现遥测数据的循环输出。

采用网络端口监听功能实现对指令数据、控制命令及信息交互数据等的接收，从而减少对计算机资源的占用，当系统接收到来自其他仿真计算机的 IP 数据包后，首先判断其目标端口是否为自己的端口号，若是则进入中断程序对数据包内容进行解析处理，判断为哪个处理分支。若为指令数据包，则按预定值更改相应的遥测参数值；若为控制命令数据包，则按命令要求执行相应的动作；若为信息交互数据，则先对数据进行缓存，然后判断是否满足触发条件，并执行相应操作，如若表征补加到位，则模拟相应阀门开关状态的变化；若为补加故障模拟数据，则根据数据内容查询数据库，调用相应的遥测参数值，实现故障的模拟。

4 主要技术难点及措施

4.1 指令实时响应及遥测动态刷新

由于推进补加所需的指令、注入数据及遥测参数较多，达到上千的规模，且一般每条指令对应多个遥测参数，若完全通过代码对指令进行解析及逐个对遥测参数进行模拟，会导致程序代码量巨大，程序可读性及可修改性变差，且不利于程序后续的维护升级^[5-6]。基于该问题，采用数据库方式对补加指令、注入数据及遥测参数进行存储和查询，在数据库中对每条指令或注入数据的编码、对应的遥测参数代号、对遥测参数的模拟方式、遥测参数值、遥测参数的转换公式、遥测参数在下行遥测数据包中的通道号，以及遥测参数是否为复帧数据等进行定义，具体格式如表 1 所示。指令及注入解析功能模块、遥测模拟功能模块对数据库进行访问，根据指令或注入数据的编码信息查找其对应哪些遥测参数，并读取这些遥测参数的数值、通道及复帧等信息，根据这些信息实现遥测参数变化的模拟。

4.2 补加参数模拟

推进剂在轨补加过程中，补加管路、气瓶及贮箱的温度、压力参数，推进剂贮箱的剩余量参数，以及压气机的转速等参数，为补加过程中需重点监视的状态参数，同时这些参数为缓

变类型数据，且主要随时间缓慢变化，同时地面试验积累了大量相关的数据，可以建立相应的数学模型。为尽可能真实的模拟这些参数的在轨实际工作状态，对地面补加试验中获得的数据进行整理、分析及统计，建立每类参数的数学模型^[7]，由遥测模拟功能模块基于各类参数的数学模型实现对这些参数实时的动态模拟。

4.3 补加故障模拟

推进剂在轨补加对应的故障模式较多，且每个故障模式内部又有多重分支，为实现对补加各类故障现象的模拟，采用数据库查询方式，将各故障模式按照顺序进行排列并给予唯一的 ID 号，每一个 ID 号对应一个故障描述文件，文件格式如表 2 所示。遥测模拟功能模块接收到来自故障模拟功能模块的故障 ID 号后，从数据库中提取该 ID 号所对应的故障数据，根据故障描述文件内容对故障源相关的遥测参数进行设置，实现补加故障现象的模拟。

5 结论

推进剂补加飞控模拟器充分利用现代计算机技术、系统仿真技术和面向对象编程技术，完成了补加指令及注入数据的正确响应、遥测功能的动态仿真、补加故障模式的仿真及两航天器间补加数据交互的动态仿真，具有真实性高、通用性高、灵活性高的特点，该模拟器在我国首次推进剂补加任务准备中得到了充分的应用，有效地验证了推进剂补加飞控实施方案的有效性和完备性，取得了较好的效果。

参考文献：

[1] 江铭伟. 俄罗斯空间站推进剂补加程序分析 [J]. 火箭推进, 2013, 39 (4): 8-12.

[2] 郭坚 张猛 赵蕾. 一种用于航天器飞控演练的数管模拟器设计 [J]. 航天器工程, 2011, 20 (2): 35-40.

[3] 郑爱武 周建平 麻永平. 嫦娥一号卫星飞行控制模拟器的设计与研制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39 (1): 57-61.

[4] 张启 陈欣. 一种基于工控机的飞控系统模拟器 [J]. 工业控制计算机, 2005, 18 (3): 33-37.

[5] 孙瑞志. 支持工作流动态变化的过程元模型 [J]. 软件学报, 2003, 18 (11): 62-67.

[6] 王文义. 基于并行程序效率和通用性的实践与研究 [J]. 计算机科学, 2009, 19 (6): 290-293.

[7] 廖瑛, 龚明方, 尹嘉娃, 等. 空间补加过程的建模与仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22 (6): 1535-1538.