

运载火箭飞行控制软件的多任务设计方法

许传明, 邹 军, 安占新, 王晓玲

北京航天自动控制研究所, 北京 100854



摘 要 为适应新一代运载火箭电气设备数字化、智能化的发展,提出了基于嵌入式实时操作系统的飞行控制软件多任务设计方法。设计了飞行控制、数据管理、精确关机等任务,根据实时性要求设置了相应任务的优先级;设计了飞行控制任务在三冗余处理器中一致性运算的机制;提出了控制周期内多任务共用临界资源的约束性要求作为冗余同步运行的余量指标。本文设计的多任务已在新一代中型运载火箭飞行试验中得到验证。

关键词 运载火箭;飞行控制;嵌入式操作系统;多任务设计

中图分类号: TP319 **文献标识码:** A

文章编号: 1006-3242(2023)03-0063-06

Multi-Task Design of Fly Control Software for Launch Vehicle

Xu Chuanming, Zou Jun, An Zhanxin, Wang Xiaoling

Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China

Abstract Aiming at adapting to the digital and intelligent development of the electrical equipments of new generation launch vehicle, the multi-task design method of fly control software is introduced in this paper. The tasks are designed such as fly control task, data management task and correct cutoff task, and the corresponding execution priorities are set, and the synchronous operation method of fly control task in three redundant processors is proposed. The constraint requirement for multi-task sharing critical resource in one control cycle is proposed as a reliable margin index to control synchronization operation of fly control task in the three processors. The multi-tasks designed have been validated in flight experiments of the new medium launch vehicles.

Key words Launch vehicle; Fly control; Embedded operating system; Multi-task design

0 引言

目前,新一代运载火箭控制系统架构已经完成了电气设备的数字化升级,箭载计算机的运算处理能力也大幅提高,实现了模拟控制向数字控制的跨越式进步。火箭控制系统形成了“箭载计算机+控

制器”的新型分布式三冗余数字控制架构,各电气设备、传感器通过 1553B 总线、422 总线以及 485 总线等数字总线实现了全数字通信与控制,提升了控制系统的可靠性与健康监测能力^[1-4]。箭载计算机作为运载火箭的大脑,运行的飞行控制软件承担了箭地指令通信、弹道参数装订、设备状态监测、飞行过程控制、数据采集处理等功能。该软件经历了由

收稿日期:2023-01-09

作者简介:许传明(1985-),男,工程师,主要从事运载火箭嵌入式软件设计研究;邹 军(1974-),男,研究员,主要从事嵌入式软件系统研究;安占新(1980-),男,研究员,主要从事嵌入式软件系统研究;王晓玲(1970-),女,研究员,主要从事航天软件工程管理。

原来相对简单的无操作系统设计到基于嵌入式实时操作系统的设计,通过合理的架构设计、设备接口封装、任务模块划分、调度机制安排、冗余决策设计,可以有效地适应新一代运载火箭数字设备多、信息数据量大、智能故障检测与重构的工程应用需求。

本文依据新一代中型运载火箭控制系统的三冗余电气架构,设计的飞行控制软件包括了底层、中间层和应用层的 3 层架构:底层采用可编程逻辑器件编程,自主承担一部分接口通信、数据同步交换的功能,减轻应用层的处理压力;中间层采用经过优化设计的嵌入式实时操作系统,承担任务调度、中断管理、I/O 管理等核心功能,将面向硬件的访问均按照统一 I/O 接口进行管理,提高系统的可维护性、安全性^[5];应用层通过合理划分飞行控制软件多个任务,设计各任务的调度策略,从而最大化提高 CPU 利用率,软件中的任务功能相对独立,功能模块满足“高内聚、低耦合”原则,降低软件逻辑功能复杂度,使软件具有较好的可扩展性和移植性。本文提出的多任务设计方法可以对中断事件产生可预期的实时响应,灵活地调度系统资源,实现了运载火箭三冗余 CPU 多任务运算节拍一致、数据管理高效、运行稳定可靠的目标。

1 飞行控制软件的多任务设计

火箭控制系统电气架构由箭载计算机(简称“箭机”)、时序控制器(多个)、1553B 总线、惯性测量组合(简称“惯组”)、速率陀螺、伺服控制器、地面测发控系统等组成。箭载计算机的 3 个冗余 CPU 中运行完全相同的飞行控制软件,与上述电气设备通信实现数据采集、指令传输,完成飞行控制的功能。飞行控制软件架构以及功能任务模块与各电气设备连接关系如图 1 所示。

根据飞行控制软件功能点的内聚程度、工作时段、实时性要求、安全关键等级对功能进行归类,将功能耦合度高、关联密切的功能在同一个任务中实现。应用层完成对中间层硬件支持模块的初始化后,调用中间层的任务管理模块任务创建接口,按照任务优先级由高到低依次创建 5 个任务,包括精确关机任务、飞行控制任务、数据管理任务、箭地通信任务和流程控制任务,任务情况见表 1 所示。

流程控制任务在飞行控制软件入口创建后首先执行,其优先级最低,可被其他高优先级任务抢

占,主要完成系统初始化、设备注册、参数装订和发射前自检等流程控制。

精确关机任务在等待获取 1ms 定时中断释放的信号量时处于挂起状态,获得信号量即满足抢占调度执行条件,用于飞行过程精确制导关机的指令发送。

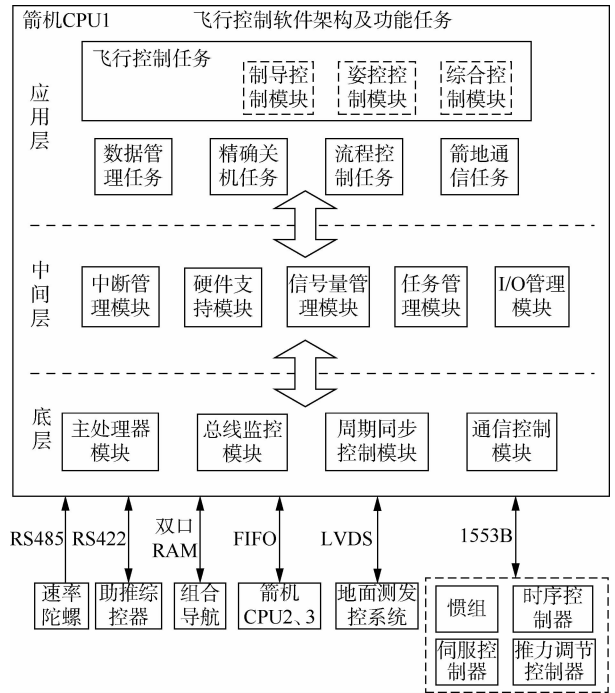


图 1 飞行控制软件系统架构

飞行控制任务在获取其对应的信号量时任务可抢占执行,等待信号量时处于挂起状态。飞行控制任务是火箭飞行的核心关键任务,调用 3 个功能模块:综合控制模块完成与各电气设备的指令通信、数据采集;制导控制模块完成惯性导航计算、关机计算、导引计算及组合导航修正计算,并发送姿态角偏差、导引信号至姿态控制模块;姿态控制模块完成速率陀螺数据采集、校正网络计算、姿态控制指令计算,并将姿态控制指令发送至综合控制模块。

数据管理任务在飞行控制任务每控制周期驱动释放信号量后调度执行,完成箭上电气设备 1553B 总线站点遥测数据采集、串口数据转换遥测数据、速率陀螺数据转遥测数据等数据管理功能。数据管理任务作为飞行控制软件与测量遥测系统的数据传递接口,实现对传感器原始数据、时序输出、储箱增压、伺服工况等状态的监测,同时遥测输出飞行控制任务实时计算的箭体姿态、伺服指令、喷管指令、导航参数、惯组冗余信息等关键数据。

信号量和优先级调度执行飞行控制任务。

2) 三 CPU 运行的飞行控制任务交互共享采样数据。在箭机的三 CPU 控制板之间设计内部 FIFO 交互接口,飞行控制任务调度执行后,先录取本控制周期的输入数据、I/O 信号;然后,将录取的数据发送给另两个 CPU 控制板;最后,读取另两个 CPU 控制板发送来的数据和信号,三 CPU 使用交互共享一致的数据源作为运算的输入。

3) 设计基于同步陷阱的飞行控制任务指令级同步方法。飞行控制任务在使用 FIFO 交互采用数据时,写入 FIFO 数据与读取 FIFO 数据之间设计同步陷阱环节。三 CPU 在同步陷阱环节完成三机或者两机的指令级同步。

三个处理器指令级同步过程为:CPU1 落入同步陷阱将同步信号发送至 CPU2/3,并无限期地等 CPU2/3 落入同步陷阱的信号,当 CPU2 落入同步陷阱发送信号后,则 CPU1/2 在同步陷阱环节完成同步,CPU1/2 按照超时时间 T 等待 CPU3 落入同步陷阱的同步信号,如果 CPU3 在超时时间 T 内落入同步陷阱,则三机同步成功,形成三个单机同步运行的模式;否则已经同步上的 CPU1/2 在超时 T 后不再等待 CPU3,继续运行程序^[9]。图 3 所示为三机指令级同步示意。

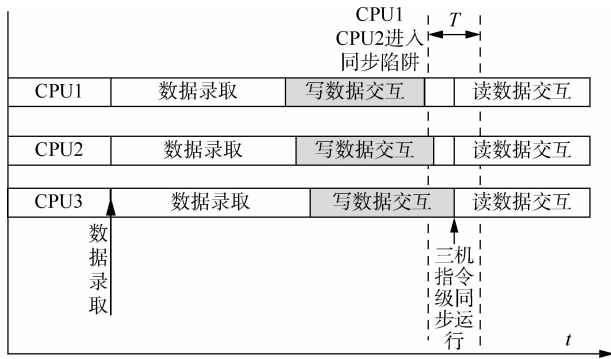


图 3 控制任务指令级同步过程

通过上述设计,运行于箭机三 CPU 的飞行控制任务可以实现控制运算的输入数据一致、运算节拍一致,在一度故障情况下仍可通过三取二冗余运算满足火箭飞行的可靠性。

3 多任务共用临界资源的管理设计

飞行控制软件中各任务使用的资源有重叠部分,本文将多个任务都会使用的设备资源定义为临

界资源。临界资源已经被其它任务占用,高优先级任务抢占调度执行后需要使用该临界资源时,只能处于挂起等待状态,直至该临界资源释放后高优先级的任务再运行。1553B 总线作为一种命令/响应式分时复用数据总线设备,飞行控制任务需要使用其录取惯组数据作为本控制周期的计算输入,而数据管理任务需要使用其录取箭上各电气设备遥测数据以记录设备工作状态。一个任务占用 1553B 总线传输数据时,其它任务不能使用该资源而处于等待状态,直至传输完成释放总线^[10-11]。本文将 1553B 总线设备定义为临界资源,在软件中为该临界资源设置使用标志,指示其处于“占用”或“空闲”状态。只有处于空闲状态,才允许任务使用该资源,并将标志更新为“占用”状态。

为保证飞行控制任务不因临界资源被占用而处于挂起状态,可以按触发周期正常调度执行,并且完成三 CPU 的冗余同步运算,设计 1553B 总线使用的约束条件如下:

1) 飞行控制任务运行结束时,释放数据管理任务的就绪信号量,任务管理模块再调度执行数据管理任务。控制周期中两个任务依次顺序执行,分时使用临界资源。

2) 飞行控制任务开始调度执行时,记录系统时间 T_1 ;数据管理任务释放总线临界资源时,记录系统时间 T_2 。本控制周期对应的临界资源占用时间段长度为 $\Delta T = T_2 - T_1$ 。数据管理任务通过合理优化设计,先集中使用 1553B 总线处理数据,再处理各串口数据,使其占用 1553B 总线临界资源时间及早释放。设计控制周期内临界资源占用的指标约束: $\Delta T \leq 16\text{ms}$ 。保证数据管理任务对临界资源的占用不会影响下一个控制周期飞行控制任务的调度执行。图 4 为控制周期内临界资源占用时间示意, T_1 至 T_2 时间段内为临界资源占用时间段。

4 多任务设计方法的验证

本文提出的多任务设计方法已经在四种构型的新一代中型运载火箭飞行试验中得以应用验证,火箭以较高精度将卫星送入预定轨道。

图 5 所示为根据飞行遥测数据生成的任务调度关系。在火箭飞行过程中,嵌入式操作系统响应 20 ms 中断事件实时调度执行高优先级的飞行控制任务,飞行控制任务完成传感器数据采集、制导运算、

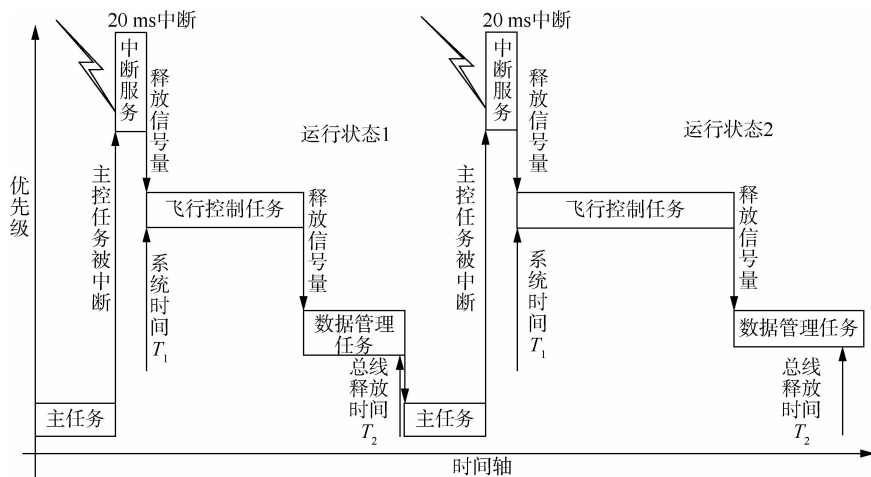


图 4 控制周期内 1553B 总线临界资源占用时间

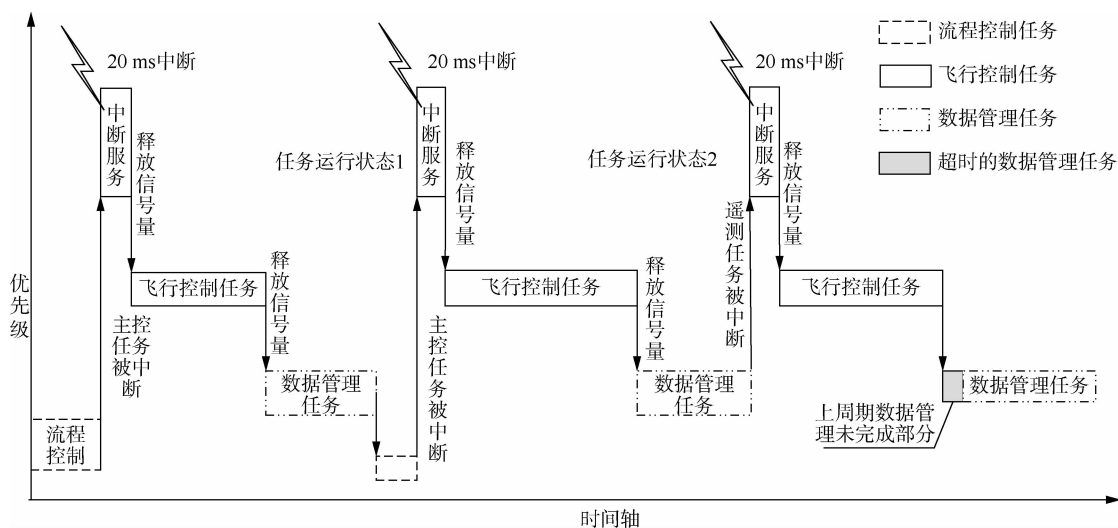


图 5 任务抢占调度运行过程

姿态控制和指令控制输出等功能。数据管理任务在采集推力调节数据时运行时间较长,会不连续地超出 20 ms 控制周期的情况,但在飞行控制任务就绪时数据管理任务被挂起等待,此时 1553B 总线临界资源在控制周期内占用时间为 15.8 ms,满足临界资源占用的指标约束要求。飞行控制任务完成后,数据管理任务得以继续完成上周期未完成的数据处理工作。相比于不使用操作系统基于无限循环

的设计方法需要预留固定 20% 的安全余量,基于实时操作系统的多任务设计方法显著提高了 CPU 的使用效率。

表 2 所示为模拟飞行状态二级发动机关机时三冗余 CPU 计算的火箭速度和位置,3 个 CPU 计算的导航速度、位置、关机时间数据对比一致,可以验证 3 个 CPU 在传感器数据录取、数据交互、冗余计算方面表现完全同步,实现了冗余控制机制。

表 2 火箭模拟飞行时二级关机的速度和位置

序号	遥测参数	CPU1	CPU2	CPU3
1	T/s	1032.56	1032.56	1032.56
2	$V_x/(m \cdot s^{-1})$	5959.2015284	5959.2015284	5959.2015284
3	$V_y/(m \cdot s^{-1})$	-4653.3834719	-4653.3834719	-4653.3834719
4	$V_z/(m \cdot s^{-1})$	716.4515632	716.4515632	716.4515632
5	X/m	4206613.0778263	4206613.0778263	4206613.0778263
6	Y/m	-933102.3928956	-933102.3928956	-933102.3928956
7	Z/m	161294.0808582	161294.0808582	161294.0808582

5 结 论

根据新一代运载火箭三冗余电气架构特点和飞行控制要求,提出了基于嵌入式实时操作系统的飞行控制软件多任务设计方法。本方法设计的多任务功能划分合理,调度执行策略清晰,提高了CPU使用率,具有良好的移植、裁剪能力,已在四种构型的新一代中型运载火箭飞行试验中成功应用,并且满足火箭数字化控制的可靠性要求。

参 考 文 献

- [1] 胡海峰,宋征宇,孙海峰. 新型中型运载火箭控制系统架构及发展[J]. 导弹与航天运载技术, 2019(2): 49-53. (Hu Haifeng, Song Zhengyu, Sun Haifeng. Review of avionics architecture of new medium launch vehicle and development [J]. Missiles and Space Vehicles, 2019 (2): 49-53.)
- [2] 顾胜,祝学军,杨华. 基于1553B总线的运载火箭控制系统分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2005(3):9-12. (Gu Sheng, Zhu Xuejun, Yang Hua. The analysis of launch vehicle control system based on 1553B bus [J]. Missiles and Space Vehicles, 2005(3): 9-12.)
- [3] 宋征宇. 信息集成在航天运输控制系统中的应用研究[J]. 宇航学报, 2015, 36(4):365-374. (Song Zhengyu. Application study of information integration in aerospace transportation control system [J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(4): 365-374.)
- [4] 刘克亚,刘经宇,杨峰,等. 基于1553B总线三冗余飞行控制系统设计与可靠性研究[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(1):119-123. (Liu Keya, Liu Jingyu, Yang Feng, et al. TMR design of FCS based on 1553B bus and reliability analysis [J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26(1): 119-123.)
- [5] 宋征宇. 嵌入式实时操作系统在运载火箭中的应用研究[J]. 航天控制, 2013, 31(3):3-10. (Song Zhengyu. The application study on embedded real-time operation system in launch vehicle [J]. Aerospace Control, 2013, 31(3): 3-10.)
- [6] 高小安,皮操,于丹丹,等. 运载火箭三冗余飞行控制软件的数字仿真设计[J]. 飞控与探测, 2018, 1(3):7-11. (Gao Xiaolan, Pi Cao, Yu Dandan, et al. Triple-redundant fly control software digital simulation design for launch vehicle [J]. Flight Control & Detection, 2018, 1(3): 7-11.)
- [7] 陈超. 三机二冗余的实时嵌入式容错系统研究[J]. 航天控制, 2008, 26(6):82-85. (Chen Chao. Research on real-time fault-tolerant embedded system for two redundancy with three subsystem [J]. Aerospace Control, 2008, 26(6): 82-85.)
- [8] 安占新,许传明,王晓玲. 多模异构冗余软件系统同步技术研究[J]. 航天控制, 2019, 37(5):46-50. (An Zhanxin, Xu Chuanming, Wang Xiaoling. Synchronization technology research of multi-mode heterogeneous redundant software system [J]. Aerospace Control, 2019, 37(5): 46-50.)
- [9] 宋征宇. 运载火箭冗余设计中的同步控制技术[J]. 载人航天, 2013, 19(2):11-16. (Song Zhengyu. The synchronization control technology in launch vehicle redundant design [J]. Manned Spaceflight, 2013, 19(2): 11-16.)
- [10] 刘士全,隽扬,蔡洁明,等. 1553B总线应用发展研究[J]. 电子与封装, 2013, 13(12):12-15. (Liu Shiquan, Juan Yang, Cai Jieming, et al. Research on the application development of 1553B bus[J]. Electronics & Packaging, 2013, 13(12): 12-15.)
- [11] 詹盼盼,郭坚,刘欣. 基于时间触发的1553B总线实时调度设计[J]. 中国空间科学技术, 2016, 36(6):77-82. (Zhan Panpan, Guo Jian, Liu Xin. Real time scheduling based on time triggered 1553B bus [J]. Chinese Space Science and Technology, 2016, 36(6): 77-82.)