

一种用于无人机的分布式飞行控制系统设计^①

张增安 陈欣 吕迅竑 (南京航空航天大学 自动化学院 江苏 南京 210016)

摘要: 分布式结构已广泛应用于高可靠航空电子设备的设计中。设计了一种基于控制局域网(CAN)的分布式飞行控制计算机,用于在执行飞行任务过程中无人机的飞行控制律解算和系统管理。根据无人机控制的实时性和可靠性需求,提出了一种CAN通信、双端口随机访问存储器(DPRAM)通信和控制任务相互配合的内部通信机制。实验表明根据该通信机制设计的通信方案完全满足无人机控制的实时性和可靠性要求,同时解决了分布式结构引入的数据延时问题。

关键词: 无人机;飞行控制计算机;分布式;通信机制;数据延时

Design of a Distributed Flight Control Computer for UAV

ZHANG Zeng-An, CHEN Xin, LV Xun-Hong

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 210016, China)

Abstract: Distributed architecture has been widely used in the design of reliable avionics. Distributed flight control computer designed based on Controller Area Network (CAN) is used for flight control law solution and system management of unmanned aerial vehicle (UAV). According to real-time UAV control and reliability needs, an inner communication mechanism of distributed flight control computer which integrates CAN communication, dual-port random access memory (DPRAM) communication and control tasks is put forward. Experimental results show that the communication mode designed according to the communication mechanism meets the real-time UAV control and reliability requirements, and solves the problem of the data delay caused by distributed architecture.

Keywords: UAV; flight control computer; distributed; communication mechanism; data delay

自上世纪90年代以来,CAN以其成本低、可靠性高、抗干扰能力和实时性强等特点,在与控制相关的行业中得到广泛应用^[1,2],并扩展到航空航天领域^[3]。

作为无人机机载系统的核心,飞行控制计算机的主要功能包括无人机姿态控制、位置控制、飞行模式管理及优化、任务规划及管理、设备管理、故障监控等^[4]。现有的无人机飞行控制计算机多采用集中式体系结构,不方便维护,系统软件设计复杂,因而需要开发新结构的飞行控制计算机。与集中式结构的飞行控制计算机相比,采用分布式结构的飞行控制计算机扩展性好,管理方便,因而有必要对采用分布式结构

的飞行控制计算机进行设计研究。

本文设计了一种基于CAN的分布式飞行控制计算机,提出了一种基于CAN通信、DPRAM通信和控制任务相互配合的内部通信机制。

1 分布式飞行控制计算机的结构

1.1 分布式飞行控制计算机的硬件组成

分布式飞行控制计算机由四个功能模块组成,包括中央处理单元(CPU)模块、串口通信模块、模拟量接口模块和开关量接口模块。CPU模块上有两片微处理器,一片为微控制器(MCU),另一片为数字信号处理

^① 收稿时间:2009-11-13;收到修改稿时间:2009-12-14

器(DSP), MCU 与 DSP 通过 DPRAM 电路相连;其他功能模块上各有一片微处理器,为 MCU。四个功能模块通过 MCU 外部扩展的 CAN 电路相连。

其中 MCU 选用 C8051F040,DSP 选用 ADSP 21062L, 其结构如图 1 所示。

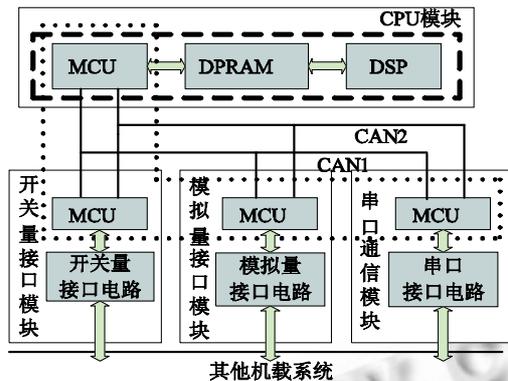


图 1 分布式飞行控制计算机组织结构框图

1.2 分布式飞行控制计算机的通信体系

在分布式飞行控制计算机中, CPU 模块负责飞行控制律解算与系统管理, 为系统的主控单元; 其它接口模块则负责专门信号数据的输入输出处理, 为系统的从单元。

主控单元上的 DSP 为分布式飞行控制计算机 CPU 模块主控芯片, 它与其他机载系统的数据交互过程就构成了分布式飞行控制计算机的通信体系。由图 1 可知, 分布式飞行控制计算机的通信由三部分组成:

- (1) 三种类型信号的采集、输出及数据预处理;
- (2) 主控单元 MCU 和从单元 MCU 的 CAN 通信;
- (3) 主控单元上 DSP 与 MCU 的 DPRAM 通信。

2 数据通信需求分析

2.1 无人机控制的特性

应用场合的特殊性决定了飞行控制计算机是一种强实时、高可靠系统^[5]。强实时特性决定飞行控制计算机的内部通信必须在时间上严格地周期执行, 包括上行数据和下行数据的实时传输。高可靠特性决定了飞行控制计算机所处理的数据在传输过程中不能丢失且不能出现错误。

2.2 数据延时问题的引入

由于无人机飞行控制计算机与机载系统的接口为

串口、模拟量和开关量, 与传统采用集中式结构的飞行控制计算机相比, 采用基于 CAN 的分布式结构, 主控单元的主控芯片与各种机载系统资源不能直接进行数据交互, 需要通过 CAN 和 DPRAM 来进行传递, 上行数据从采集到处理, 下行数据从产生到输出的过程增加了 CAN 和 DPRAM 传输环节。CAN 和 DPRAM 传输环节的引入使数据从被采集到被处理, 从产生到输出的时间延长, 即产生了数据延时问题。

无人机控制的实时性决定系统使用的通信机制必须解决数据延时问题。

3 分布式飞行控制计算机内部通信机制

3.1 飞行控制计算机所传输数据的统计

飞行控制计算机软件主要分为三个功能模块组: 控制功能模块组、设备功能模块组和通信功能模块组, 其中通信功能模块组就负责整个分布式计算机的通信功能。

飞行控制计算机通信功能模块组处理的数据是飞行控制计算机与其他机载系统的交互数据, 包括机载传感器数据、舵回路数据、发动机系统数据、外围设备数据, 数据信号的统计如图 2 所示。

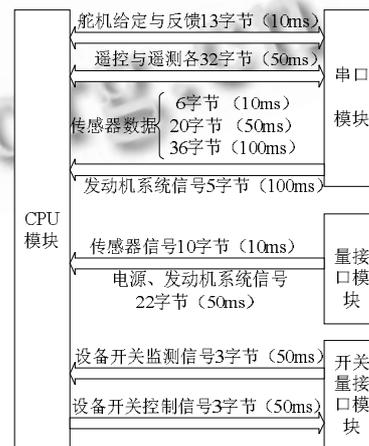


图 2 通信功能模块处理的数据统计

飞行控制计算机从单元向主控单元发送机载传感器信号、舵机给定反馈信号、遥控指令信号、发动机系统状态信号和设备开关状态信号; 主控单元向从单元发送舵机给定信号、遥测数据信号和设备开关控制信号。其中姿态控制回路的信号传输最为重要, 假设周期为

10ms, 电源、发动机系统状态信号和位置控制传感器信号周期为 50ms, 遥控遥测的数据传输周期根据相应传输协议, 开关量信号的处理周期为 50ms, 其他用于遥测组帧的数据传输周期设定为 100ms。

3.2 分布式飞行控制计算机的通信机制

3.2.1 通信机制的时间约定

根据无人机的控制需要, 以发动机状态的监测周期 100ms 为数据通信的系统周期, 以无人机姿态控制的控制周期 10ms 为数据通信的基本周期, 其中 1ms 定义为数据通信的原子时间, 每个系统周期的原子时间序号为 0~99。

3.2.2 通信机制描述

分布式飞行控制计算机多个处理器间的数据传输由主控单元的主控芯片 DSP 统一调度, 如图 3 所示。

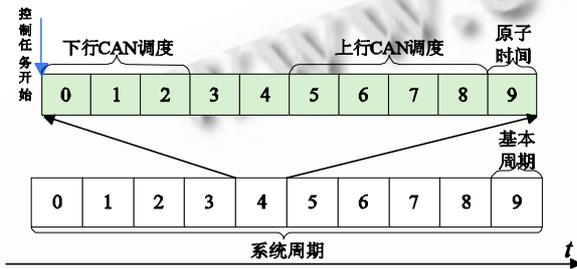


图 3 多个处理器通信调度示意

分布式飞行控制计算机的通信机制:

- A. 每个基本周期的第 0 原子时间开始时, DSP 的功能任务队列执行;
- B. 每个基本周期的第 0、1、2 原子时间下行 CAN 进行数据调度;
- C. 每个基本周期的第 5、6、7、8 原子时间上行 CAN 进行数据调度;
- D. 每个基本周期第 9 个原子时间用于主控单元 MCU 数据处理延时等待;
- E. DSP 在执行功能任务前从 DPRAM 获取该任务所需的上行数据;
- F. 上行 CAN 采用基于时间的主从静态调度方式, 下行 CAN 采用即时标准调度方式。

3.3 CAN 通信方式

3.3.1 基于时间的主从静态 CAN 调度

分布式飞行控制计算机主控单元的 MCU 为主节点, 其他从单元的 MCU 为从节点。主节点以 DSP 的时钟时间作为 CAN 的系统时间对飞行控制计算机获

取的所有其他机载系统数据进行统一的调度。CAN 调度时, 主节点发送带有本地时间信息的数据请求帧, 从节点根据数据请求帧的时间信息发送相应的 CAN 数据帧, 当多个从节点在同一时间发送数据时, CAN 根据自身的仲裁机制在仲裁时间窗内确定主节点获取 CAN 数据帧的顺序, 调度方式如图 4 所示^[6]。



图 4 基于时间的主从静态调度方式

3.3.2 即时标准 CAN 调度

CAN 标准调度是指 CAN 节点根据 CAN 自身竞争的无损仲裁机制按照优先级顺序进行 CAN 数据帧调度的方式。由于下行 CAN 传输的数据量较小, 主空单元的 MCU 获取更新的下行数据后, 即时传输给其他从单元。

3.4 数据的调度描述

3.4.1 上行数据调度策略

主控单元主控芯片 DSP 通过 DPRAM 邮箱中断向主控单元 MCU 发送系统周期的原子时间序号, MCU 根据 DSP 原子时间序号在每个上行 CAN 调度原子时间开始时发送同步请求数据帧, 从单元的 MCU 根据同步请求数据帧的原子周期序号将相应原子时间的上行数据组成 CAN 数据帧发送到 CAN 上, CPU 板的 MCU 从 CAN 上接收 CAN 数据帧后将其解帧并存储到 DPRAM 环形队列中, DSP 根据功能任务的需要从 DPRAM 中获取需要的上行数据进行处理。

3.4.2 下行数据调度策略

主控单元主控芯片 DSP 的功能任务产生下行数据后将其存储到 DPRAM 的环形队列中, 主控单元的 MCU 对 DPRAM 进行不间断查询, 当下行数据更新时, 立即将其组成 CAN 数据帧发送到 CAN 上, 从单元的 MCU 从 CAN 上接收 CAN 数据帧后将其解帧, 并直接发送给其他机载系统。

3.5 数据延时问题的解决

分布式结构引入的数据延时问题是不能完全解决的, 但可以通过上层软件功能任务与通信任务的配合来减少延时时间以满足无人机控制的设计需求。采用在控制任务前调度上行数据的方式, 同时每个数据通信的基本周期设定 1ms 的延时等待来

保证无人机控制所需的上行数据能够及时为控制任务获取,同时下行数据的调度采用即时输出的方式,延时问题获得解决。

4 实验验证

为了验证本文设计的通信机制的可行性及计算机的功能,在分布式飞行控制计算机硬件系统平台上进行了性能测试和半实物仿真。

4.1 实验方案

按照预先设定的分布式飞行控制计算机要求对整个通信过程的各个环节进行长时间实验测试,测试包括 CAN 可靠通信、各通信传输环节传输数据的延时及稳定性。

主控单元的 MCU 发送数据请求帧,从单元的各个 MCU 根据主节点的时间信息发送相应时间的上行 CAN 数据帧。主控单元的 MCU 接收到 DSP 的功能任务产生新的下行数据后马上组 CAN 数据帧发送给从单元。

实验过程中,各个单元对接收到的数据帧进行计数,然后将统计的系统周期数和丢失的数据帧个数传输给主单元的 MCU,MCU 传输给 DSP 后由其串口下传。

使用 DSP 和 MCU 的信号灯对通信各个环节所使用的时间及导致的延时进行定量测试分析。

最后与仿真计算机组成完整系统进行了半实物仿真功能验证。

4.2 实验结果与分析

4.2.1 CAN 可靠性测试结果

对 CAN 通信进行了 12 小时的测试,实验结束时各功能模块的记录如表 1 所示。

表 1 功能模块的 CAN 测试记录

数据帧名称	系统周期	丢帧数
CPU 模块	435400	0
串口通信模块	435400	0
模拟量接口模块	435400	0
开关量接口模块	435400	0

上述的实验结果表明 CAN 通信在实验过程中没有丢失数据的情况发生,根据笔者提出的多处理器通信机制设计的 CAN 通信协议方案满足可靠性需求。

4.2.2 数据延时的测试结果

实验中分布式计算机所处理数据的数据延时统计如表 2 所示。

表 2 数据延时统计表

数据名称	周期	时延
数据请求	10ms	0ms
姿态传感器数据	10ms	2ms
位置传感器数据	50ms	4ms
发动机状态数据	50ms	14ms
遥控指令数据	50ms	5ms
设备状态监测信号	50ms	14ms
遥测组帧数据	100ms	20ms
舵机给定数据	10ms	1ms
遥测输出数据	40ms	1ms

上述的实验结果表明无人机姿态和位置控制所需数据的传输时延很小,满足一般无人机控制的实时性设计需求,根据笔者提出的多处理器通信机制设计的通信方案解决了分布式结构引入的数据延时问题。

4.2.3 半实物仿真验证结果

对分布式飞行控制计算机进行了全包线范围内的半实物仿真验证,仿真结果如图 5 所示。

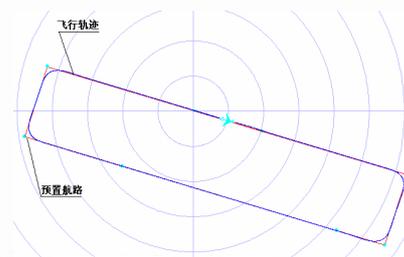


图 5 半实物仿真曲线图

图 5 表明分布式飞行控制计算机控制下的飞机模型能够按照预定的控制策略进行航迹跟踪,结果表明根据论文设计的通信机制满足无人机控制的需要。

5 结语

本文根据分布式飞行控制计算机的结构特征及无人机控制的特性提出了一种 CAN 通信、DPRAM 通信和控制任务相互配合的多处理器通信机制,基于该通信机制的分布式飞行控制计算机完全满足无人机控制的实时性和可靠性设计要求,设计结果对实际工程项目具有很高参考价值。本文提出的通信机制可以为同类系统或类似系统的设计提供有益借鉴。

(下转第 61 页)

参考文献

- 1 王桂荣,钱剑敏.CAN 总线和基于 CAN 总线的高层协议.计算测量与控制,2003,11(5):391-394.
- 2 Liu WD, Gao LE, Xu JN, et al. Intervehicle Communication and Simulation for Autonomous Underwater Vehicle Based on CAN. Journal of System Simulation, 2007,19(6):1320-1322.
- 3 梁君,熊华钢.CAN 总线及其较高层网络协议在航空航天上的可适用性探讨.导弹与航天运载技术, 2004,(4): 47-50.
- 4 于秀萍,王超.基于 ARM 的嵌入式飞行控制计算机系统.嵌入式计算机应用, 2009,25(2):53-55.
- 5 Jane W. S. Liu, Real-Time Systems,1th ed., Bergen County: Prentice Hall, 2000:30-56.
- 6 张兵,陈欣,吕迅.基于 CAN 总线的分布式无人机实时仿真设备研究.系统仿真学报, 2009,21(6):1587-1590.