

小型空间飞行器通用化遥测系统设计与实现*

王洪凯, 李东星, 田恒春, 宋蔚阳, 陈华杰
(北京航天长征飞行器研究所 北京 100076)

摘要: 针对传统遥测系统多设备、复杂电缆连接架构无法满足小型空间飞行器对小体积、轻重量、自主化程度高的遥测系统需求的问题, 提出了一种小型空间飞行器通用化遥测系统设计方法。该方法引入集成化、模块化设计理念, 采用混合编帧、双时序设计和故障自检测等方法, 设计形成了一种通用化架构, 包含了多种硬件模块和软件单元, 集成于遥测综合装置, 满足了空间飞行器小型化轻量化要求, 系统时序灵活, 自主化程度高。地面和飞行试验表明, 该方法可快速适配小型空间飞行器需求, 体积小、重量轻, 具有良好的应用前景和推广价值。

关键词: 空间飞行器; 遥测系统; 小型化; 双时序设计; 故障自检测

中图分类号: V441 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)01-0040-06

Design and implementation of a modularity telemetry system for small space vehicle

WANG Hongkai, LI Dongxing, TIAN Hengchun, SONG Weiyang, CHEN Huajie
(Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China)

Abstract: With the development of space vehicle, telemetry system becomes dimension limited, while the design period of system has been shortened obviously and traditional telemetry system can hardly meet the demand. In order to solve these problems, a miniaturized and modularized telemetry system is designed and implemented. Based on the analysis of telemetry system, most of the telemetry functions have been realized in several modules. With these modules, one device called telemetry kernel device is implemented that makes telemetry system very small and light. In addition, high integration and adaption design makes telemetry system applied to other space vehicle easily. Recent tests show that this telemetry system is well applied to new space vehicle to acquire the flight test data. The prospect of this telemetry system can be attractive both in application and promotion.

Key words: Space vehicle; Telemetry system; Miniaturization; Dual-timing Sequence; Self-detection

引 言

空间飞行器遥测系统用于获取飞行器系统内部环境状态参数及目标相关参数, 为评定飞行器性能及后期数据分析、故障分析及设计改进提供重要依据。传统遥测系统一般由传感器、采集单元、调制单元、发射机、遥测天线等设备和配套电缆网组成^[1-3]。传统遥测系统虽然系统功能强、测量参数多, 但设备多、体积大、重量重, 电缆连接和安装复杂。文献[4]提出了基于某小型空间飞行器任务需求的遥测系统设计方案; 文献[5]提出了一种小型图像遥测系统硬件设计方案; 文献[6]提出了基于 MCU 和 DSP 架构的小卫星遥测系统方案; 文献[7]提出了一种基于 AD9364 芯片的小型化航空用遥测系统方案。上述方法均针对特定应用场景, 采用定制化的设计方案, 应用场景和测量需求相对单一。

随着航天技术发展, 空间飞行器小型化集成化趋势明显, 测量需求、参数种类和数量不断增多, 传统遥测系统已无法适应小型空间飞行器需求。定制的小型遥测系统又存在设计周期长, 通用化程度低的情况。针对上述问题, 结合某小型空间飞行器需求, 本文介绍了一种小型化通用化遥测系统, 在有限体积内实现了传统遥测系统各项功能, 满足了空间飞行器各种状态下的测试需求和有限周期下的研制要求, 为飞行器评估和分析提供了重要依据。

*基金项目: 航天预研项目

收稿日期: 2020-11-05 收修改稿日期: 2020-12-20

1 小型空间飞行器遥测需求

小型空间飞行器一般由运载器搭载升空，在真空段释放后开展独立自主工作，其应用场景使其具有体积小，重量轻，自主化程度和集成度高，飞行过程动作多且时序复杂，外部接口少等特点。针对上述特点，对小型空间飞行器遥测系统的需求分析如下：

- ① 遥测系统高度集成，体积、重量受到严格约束；
- ② 为应对飞行器功能和动作多样性，遥测系统需具备多路模拟量、数字量的高速采样和混合编帧能力；
- ③ 为实现对飞行器关键动作的准确记录，遥测系统混合编帧过程中需要做好时序设计；
- ④ 飞行器先工作再遥测的工作时序使遥测系统数据一般采用记忆重发方式；
- ⑤ 飞行器外部接口少，在飞行试验前的多个测试环节，很难开展全流程测试，故障诊断和在线检测功能需求强烈。

2 小型空间飞行器遥测系统设计方案

本方案采用了 S 波段 PCM/FM 体制的遥测传输体制，设计方案如图 1 所示。系统方案采用综合电子集成技术，将配电、变换、采集、编码、存储、加密、调制和发射等功能集成于小尺寸一体化遥测综合装置，由综合装置接收模拟量和数字量参数数据，并通过遥测配套发射天线，实现遥测数据的下传；地面遥测系统采用遥测地面站，实现遥测信号下变频、滤波解调和数据处理。

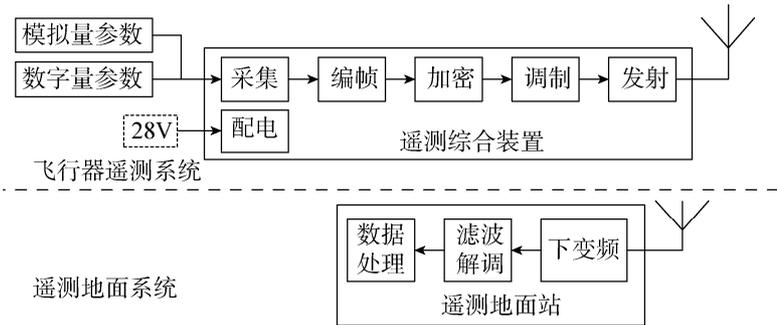


图 1 空间飞行器遥测系统组成
Fig. 1 The functional block diagram of space vehicle telemetry system

2.1 遥测综合装置设计方案

考虑到各类小型空间飞行器测量参数需求的差异性，遥测综合装置按照功能和硬件需求进行划分，分别设计成电源、主控、模拟量采集、数字量采集、调制和功放多个功能模块，以按需选配各类模块，快速适配飞行器测量需求，缩短研制周期。各个模块通过背板总线连接。遥测综合装置整体设计如图 2 所示。

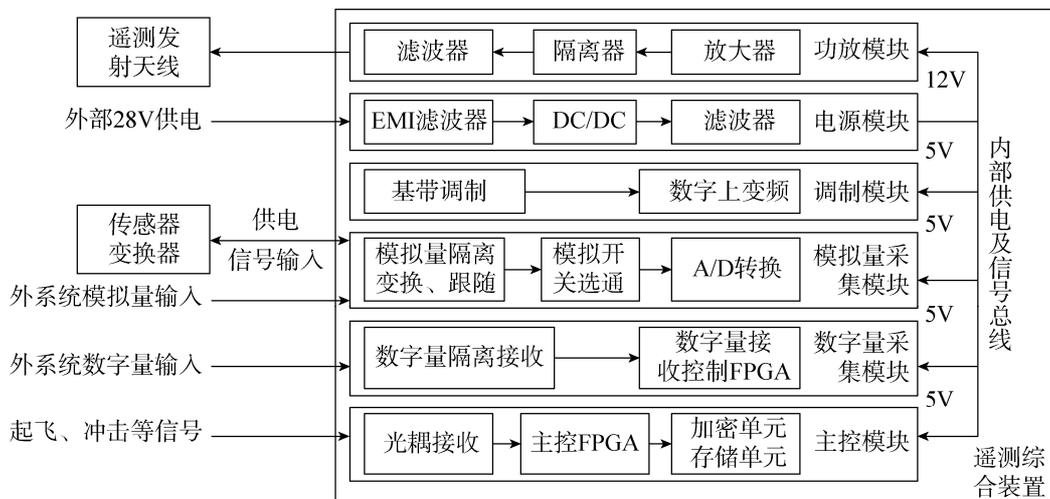


图 2 遥测综合装置整体设计
Fig. 2 Diagram of telemetry kernel device

电源模块原理如图 3 所示, 接收外部 2 路 28V 供电。其中, 一路供电变换为 12V, 专用于功放模块使用; 一路供电变换为 5V、15V, 5V 用于主控模块、采集模块、调制模块内部使用, 并向温度等 5V 传感器供电, 15V 用于向压力、数字量传感器供电。

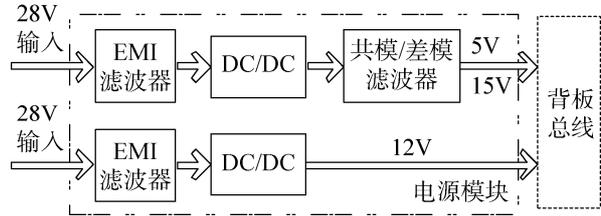


图 3 电源模块功能

Fig. 3 Diagram of power supply module

主控模块设计如图 4 所示, 基于 SOB 方案, 将模拟量采集控制、编帧、存储、加密、传输、系统工作模式和流程控制等功能进行集成, 以高性能 FPGA 作为系统控制核心, 实现整个遥测系统流程控制和数据处理。通过 SPI 总线实现模拟量参数通路选择、AD 转换, 数字量采集模块通信交互; 光耦接收接口完成起飞、冲击等信号的隔离接收; 采用 EEPROM 实现遥测系统帧结构等定制化参数的预置, 提升主控模块通用性; 通过 Flash 数据缓存单元实现遥测数据存储, 实现遥测数据的记忆重发等功能。

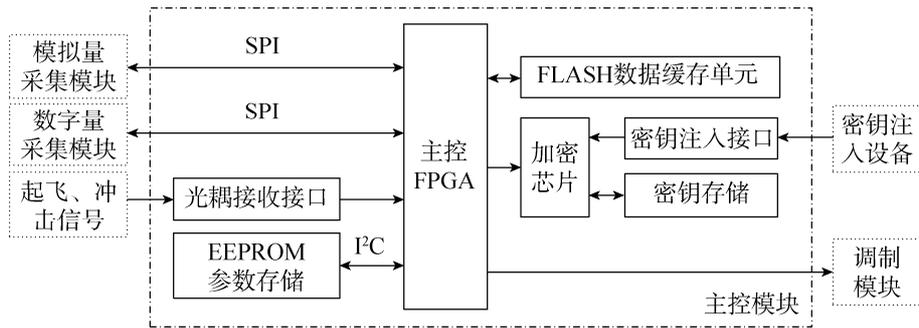


图 4 主控模块功能

Fig. 4 Diagram of control center module

模拟量采集模块如图 5 所示, 包含隔离部分和非隔离两个部分。其中, 非隔离部分由保护跟随电路、模拟开关、分压电路、AD 转换电路组成, 可实现 64 路模拟量输入的采集和转换。系统配套的传感器、变换器输出信号可直接输入非隔离部分进行采集。隔离部分主要实现外系统参数的电压变换和隔离, 将隔离后的数据输入通用部分进行采集。

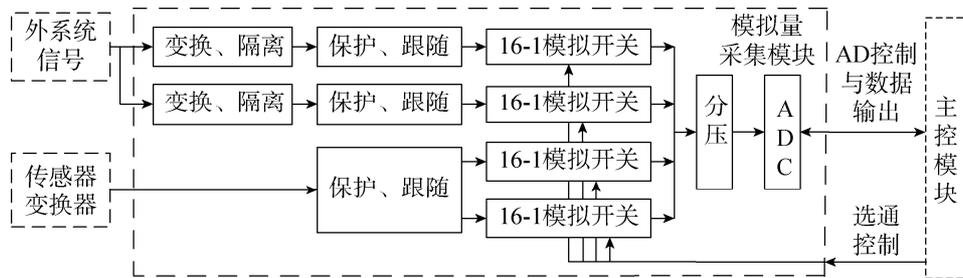


图 5 模拟量采集模块功能

Fig. 5 Diagram of analog signal sample module

数字量采集模块以 FPGA 为核心, 搭配数字量隔离接收电路, 可实现最多 6 路数字量数据的隔离接收, 满足系统同时接收数字量传感器数据和外系统数字量数据的需求。外部输入数字量数据经隔离接收和 FPGA 预编帧后, 通过 SPI 总线发送至主控模块。

调制模块主要由基带调制和上变频两部分组成。其中, 基带调制部分主要由调制控制 FPGA 和正交上变频器 AD9957 组成, 调制控制 FPGA 实现上变频器初始化、加密数据接收处理、正交调制信号输出等功能, AD9957 接收数据后输出调制后的中频信号。上变频模块主要由载波本振产生、混频器和带通

滤波器组成，实现基带调制后中频信号的上变频，并发送至功放模块。

基于小型空间飞行器的应用场景，功放模块设计功率不低于 6W，采用三级放大电路的设计。其中，一级选用放大单片 ERA-5SM+，线性增益为 18dB；二级选用功率管 NPTB00004A，线性增益为 13dBm；三级选用功率管 CGH40025F，线性增益为 11.5dB，通过隔离器和滤波器进行处理后，输出功率约为 39dBm。

2.2 遥测系统软件实施方案

2.2.1 软件组成

按照遥测系统各个功能进行划分，并考虑软件模块通用化能力，遥测系统主控软件分为顶层控制模块、时钟产生模块、复位信号产生模块、数据接收模块、信号接收模块、数据编帧模块、存储控制模块、加密控制模块、数据发送模块。其中，顶层控制模块实现遥测系统工作流程和全局时序控制，并包含自检模块，用于实现系统在地面试验过程中的状态检查。

2.2.2 软件运行流程

遥测软件流程控制如图 6 所示。系统加电后，进行初始化，之后并行开展系统自检和混合编帧，在收到释放信号后开始计时。根据系统飞行时序，进入实时传输或记忆重发模式。实时传输模式下，实时发送编帧数据；记忆重发模式下，飞行器工作期间所需采集的模拟量、数字量信息均采集编帧至数据缓存单元，之后根据功放模块加电信号或达到计时时间的先后，将数据缓存单元中的数据循环发送。

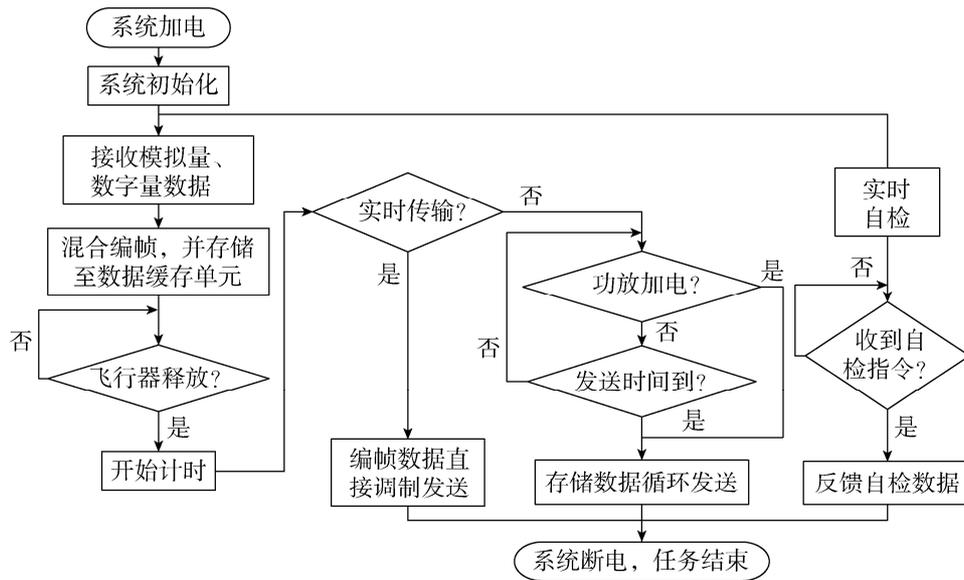


图 6 主控软件流程

Fig. 6 The flow chart of control center software

2.3 混合编帧及时序设计

遥测系统帧结构采用定频帧结构，每帧数据包含模拟量、数字量数据和帧计数、同步字等信息。帧计数采用双帧计数的设计，包含供电计数和释放计数两部分。供电计数用于表征整个数据采集时段的时间，从系统加电后开始计数，停止编帧时停止计数。释放计数用于多路测量数据的数据同步，飞行器释放时，计数从 0 重新开始。

对于数字量数据，每帧数据在系统接收后，混合编帧前添加标识字和供电计数、释放计数，便于在数据处理时精确地将飞行器状态信息与数字量数据对应。

实时传输模式下，仅需释放计数即可对标出模拟量、数字量数据与飞行时序的对应关系。

记忆重发模式下，数据会重发多次。数据处理时，首先通过供电计数的零值及前后数帧计数判断出第 1 次至第 N 次重发数据，进行数据分包，并通过多次数据的计数值比判断出每次数据的完整性。之后，依托某次较完整数据中的释放计数，将模拟量、数字量数据与飞行时序对标。最后，针对传输过程中的误码

丢帧信息, 通过供电和释放计数标记出数据位置, 通过其他几次的重发数据进行误码纠正和数据拼接。

2.4 故障诊断与在线检测

系统通过系统自检测、自检测试设备检测和状态回报检测三种方式实现故障诊断与在线检测。

系统自检测: 系统内部设计有关键信号测量接口, 可通过采集实现内部+5V、+15V 和功放+12V 等二次电源的自检测, 以及功率检测等信号的采集, 通过自检测信号阈值判断逻辑设备工作是否异常。

自检测试设备检测: 利用自检测试设备提供+28V 电源、模拟信号源, 监视设备工作电流、电压, 并对系统发送的 PCM 数据进行测试, 数据判读。

状态回报检测: 在射前流程中, 系统上电后, 接收到飞行器发送的自检 UART 指令后, 进行内部状态在线检测, 将关键信息汇编成帧, 通过与状态回报 UART 接口, 回报系统工作状态。

3 系统应用情况

本设计已成功应用于某新型空间飞行器遥测系统设计。从体积规模上, 相比于传统遥测系统不低于 20kg 的设备总重量, 系统核心设备遥测综合装置重量不足 3kg, 且尺寸与传统遥测系统单机设备尺寸相当。从功能上, 本设计在传统遥测系统采集、编码、加密、调制和发射功能基础上, 新增记忆重发、故障诊断与在线检测等功能。全系统经环境试验验证, 在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 各项功能工作正常。在某小型空间飞行器飞行试验中, 系统采集了飞行器热学、力学等模拟量参数和姿态、动作等数字量参数, 数据采用记忆重发方式。图 7 为试验数据中供电计数和释放计数图。由图 7 可知, 地面共接收到不少于 3 次数据, 飞行器释放时刻为图中标注位置。经进一步评估, 数据正确可靠, 遥测系统工作正常, 满足了飞行器需求。

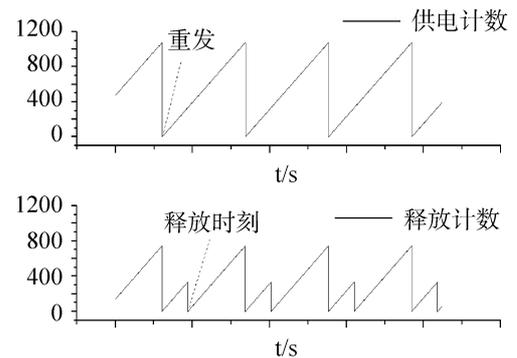


图 7 供电计数和释放计数图

Fig. 7 The diagram of timing test data

4 结束语

本文针对新型空间飞行器遥测系统小型化发展趋势, 通过对多类遥测系统研制需求进行分析, 引入小型化、模块化设计理念, 将遥测系统核心功能集成于由多个功能模块组成的一体化遥测综合装置, 进而实现了一种适配新型空间飞行器需求的遥测系统。该系统具有体积小、重量轻、集成度高、设计可靠、适配能力强等优点, 现已成功应用于某新型空间飞行器, 系统工作正常, 获取了飞行器飞行试验数据, 为飞行器的研制和评估提供了重要依据, 具有较高的工程应用价值。

参考文献

- [1] 李智中, 金文, 王小琿. 基于 1553B 总线的再入遥测系统[J]. 遥测遥控, 2018, 39(1): 53-56.
LI Zhizhong, JIN Wen, WANG Xiaohui. Reentry digital telemetry system based on 1553B bus[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39(1): 53-56.
- [2] 林涓, 贺峥光. 载人火箭的遥测系统[J]. 导弹与航天运载技术, 2006(4): 5-10.
LIN Juan, HE Zhengguang. Telemetry system of manned launch vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2006(4): 5-10.
- [3] 李安顺, 邢威, 谢立. 一种运载火箭高码率遥测系统设计方案[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(6): 1915-1918.
LI Anshun, XING Wei, XIE Li. Design of launch vehicle high bit-rate measure system[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(6): 1915-1918.
- [4] 闫新峰, 金文, 耿健, 等. 小型空间飞行器集成化遥测系统设计与实现[J]. 测控技术, 2020, 39(7): 73-77.
YAN Xinfeng, JIN Wen, GENG Jian, et al. Integrated telemetry system for small space vehicle[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(7): 73-77.
- [5] 田玉琴, 朱峰, 杜继超, 等. 一种小型视频图像遥测系统硬件设计[J]. 通讯世界, 2017(23): 5-6.

- [6] 刘强, 李志刚, 赵文彦, 等. 基于主从式双 CPU 的小卫星智能遥测系统设计[J]. 遥测遥控, 2015, 36(5): 55–61.
LIU Qiang, LI Zhigang, ZHAO Wenyan, et al. Design of intelligent telemetry system of small satellite based on master-slave dual CPU[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2015, 36(5): 55–61.
- [7] 栾东海, 肖慧敏, 王庆博, 等. 基于 AD9364 的小型化航空遥测系统设计[J]. 遥测遥控, 2018, 39(5): 33–36.
LUAN Donghai, XIAO Huimin, WANG Qingbo, et al. Design of miniaturized aeronautical telemetry system based on AD9364[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39(5): 33–36.
- [8] 黄信安, 李亚. 基于 PCM-FM 体制下遥测作用距离研究[J]. 现代电子技术, 2012, 35(9): 16–18.
HUANG Xin'an, LI Ya. Investigation on operating distance of telemetry base on PCM-FM system[J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(9): 16–18.
- [9] 闫新峰, 邝浩欣, 金文, 等. 再入飞行器低误码率数字化遥测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(7): 138–141.
YAN Xinfeng, KUANG Haoxin, JIN Wen, et al. Design of low error rate digital telemetry system for reentry vehicle[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(7): 138–141.
- [10] 刘倩, 李雷, 张永杰, 等. 小型遥测数据采集存储装置设计[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(2): 140–143.
LIU Qian, LI Lei, ZHANG Yongjie, et al. Design of small telemetry data acquisition and storage device[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(2): 140–143.

[作者简介]

- 王洪凯 1990 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为遥外测系统设计。
李东星 1989 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为遥外测系统设计。
田恒春 1970 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计。
宋蔚阳 1983 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为控制系统设计。
陈华杰 1965 年生, 学士, 研究员, 主要研究方向为遥外测系统设计。