



华中师范大学
CENTRAL CHINA NORMAL UNIVERSITY

宇宙X射线偏振探测器电子学固件设计

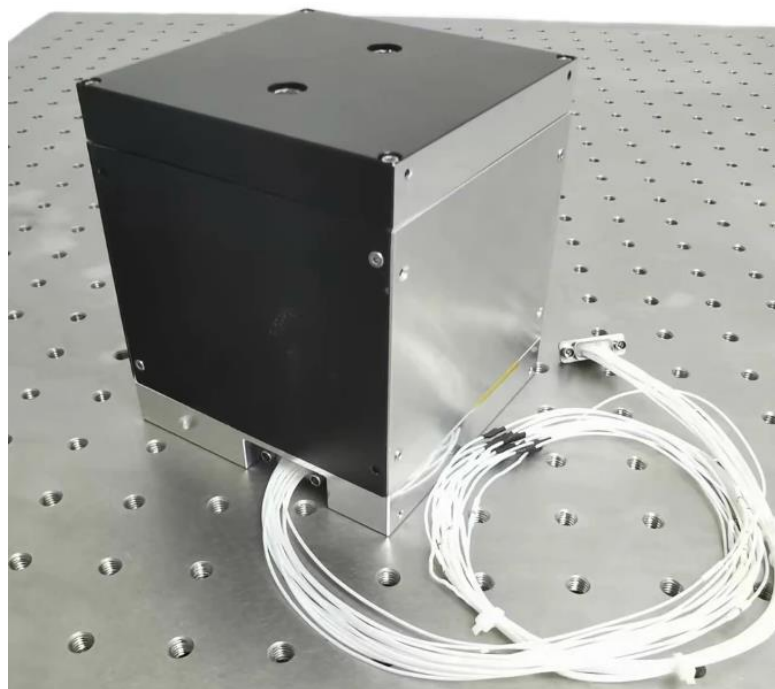
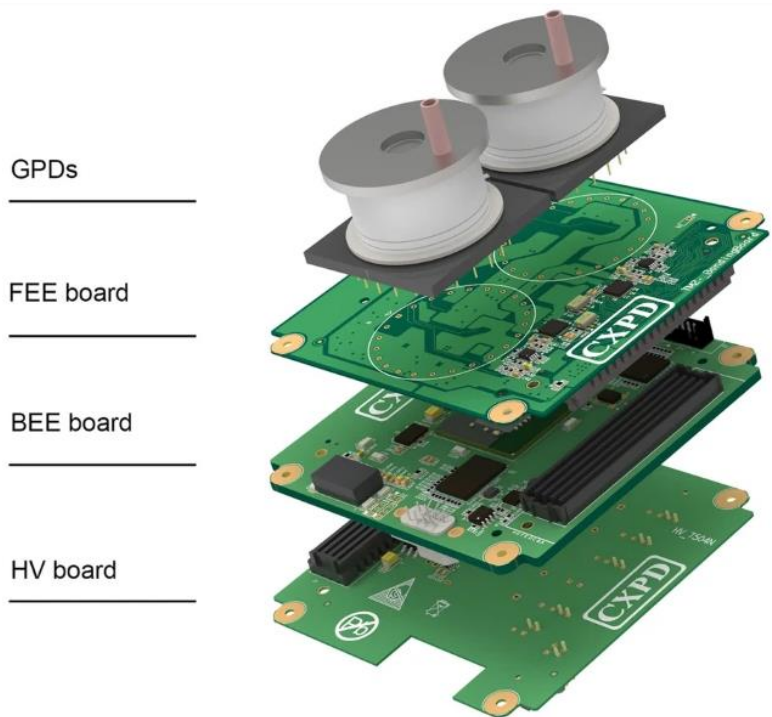
汇报人：陈燃





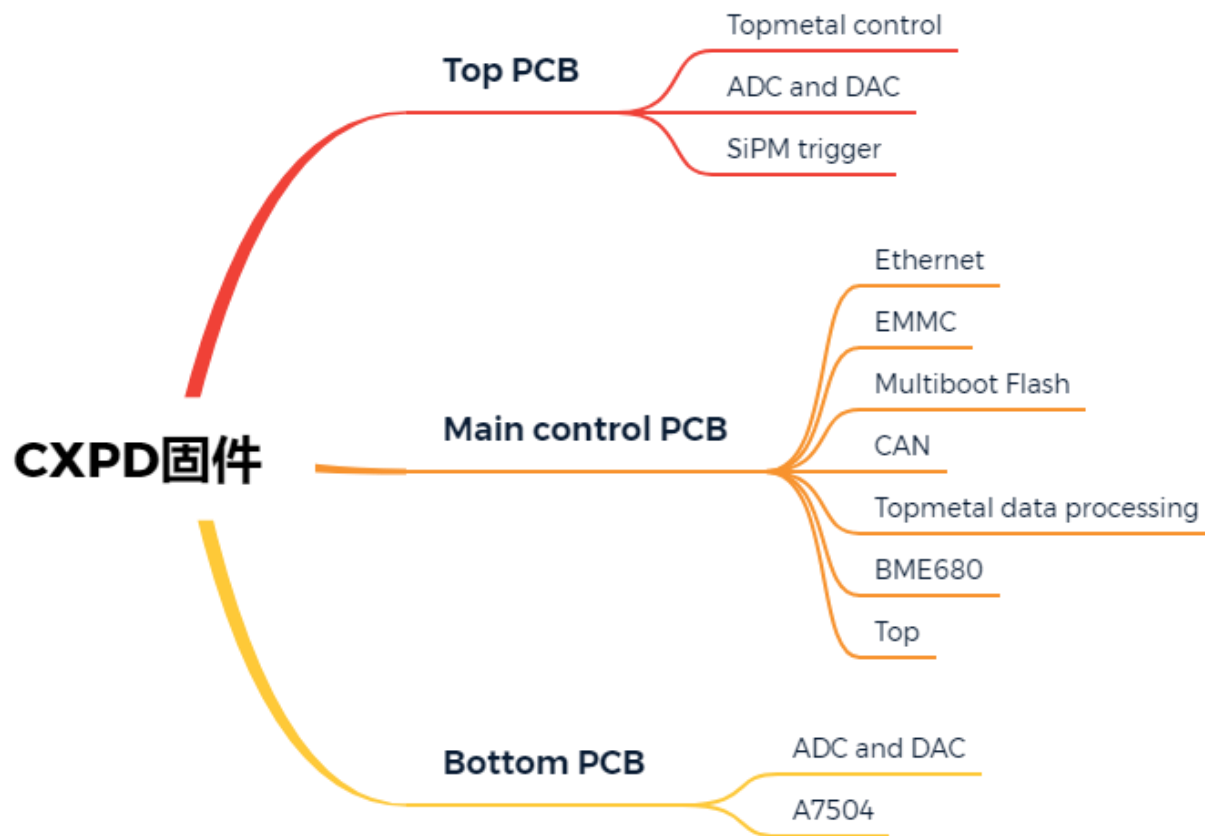
探测目标：X射线偏振是研究天体物理的重要工具，是除了光谱、时变、成像外的第四维度，通过它来研究天体物理学中一些重要的问题，比如中子星、伽马暴、黑洞等天体的磁场类型、辐射机制、结构演化等问题。

探测器：宇宙X射线偏振探测器（Cosmic X-ray Polarimeter Detector, CXPDP）是一个卫星载荷，工作在550km高度的太空中，其主要由气体像素探测器（Gas Pixel Detector, GPD）和电子学组成。CXPDP已于2023年6月7日在酒泉卫星发射升空，目前已成功在轨运行。





载荷在轨需要具有数据采集、计算、通信、存储、控制等功能，固件采用Top-down方法，实现星上电子学基本功能。



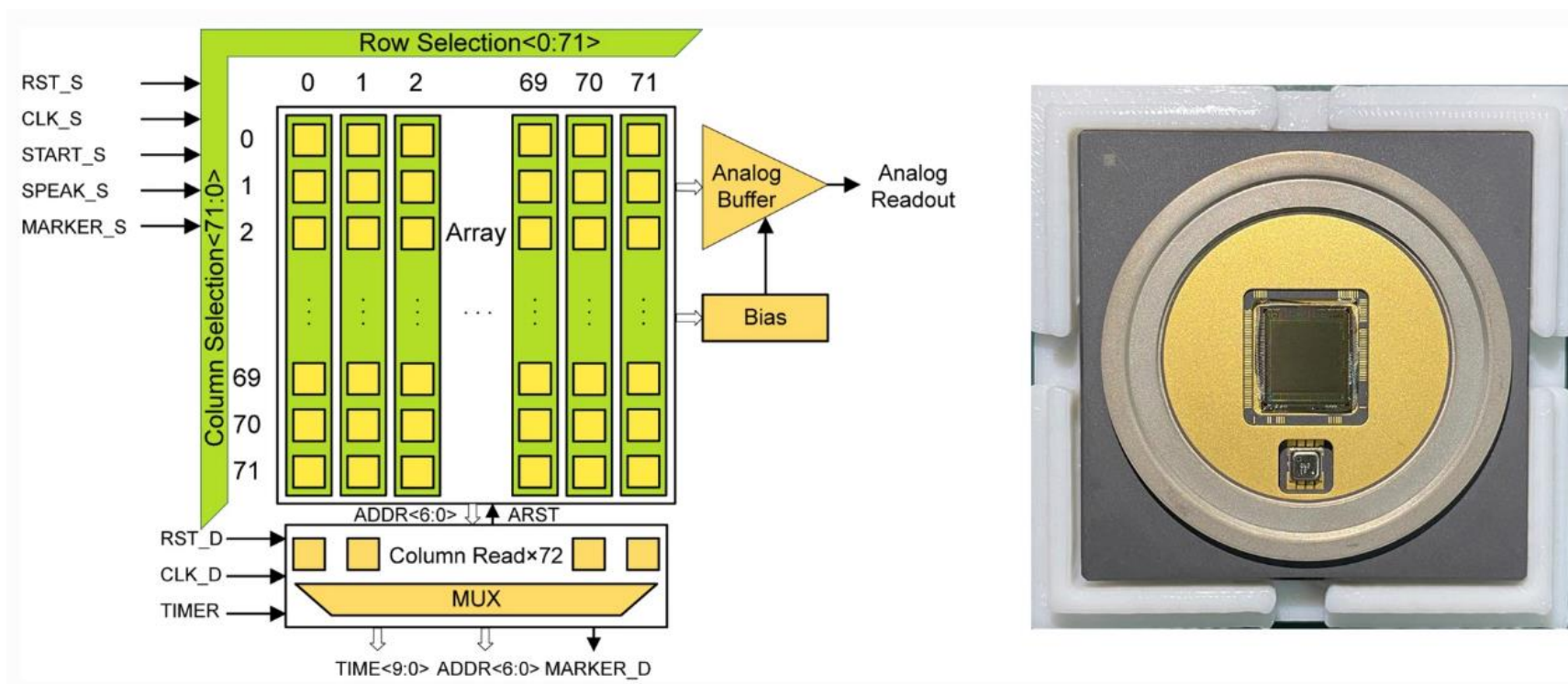


- 1 数据采集设计
- 2 数据存储设计
- 3 通信设计
- 4 星上固件更新设计



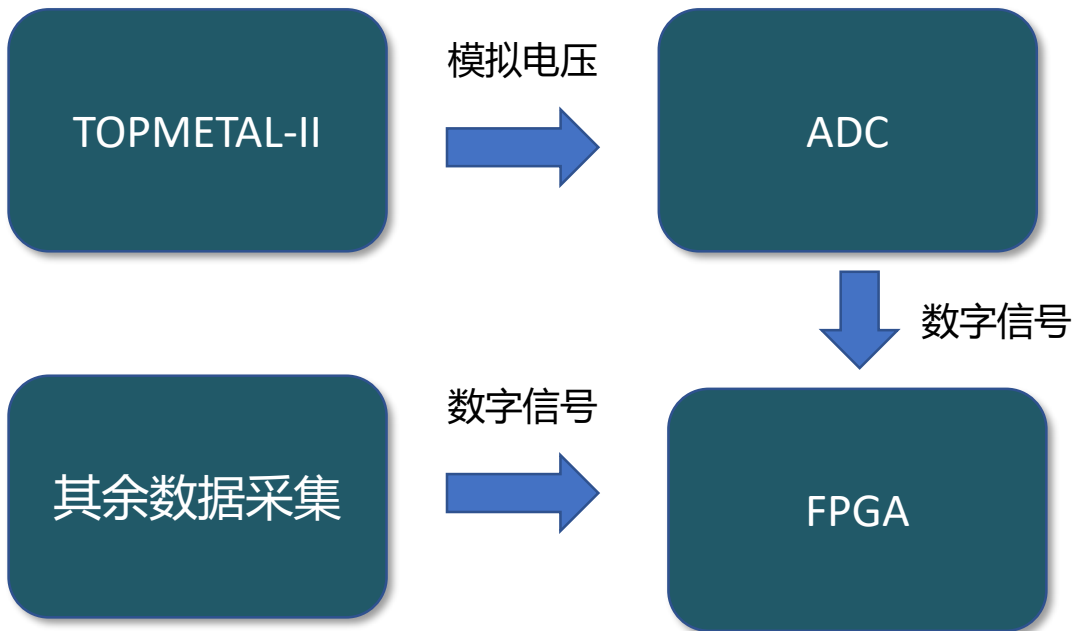


CXPD 载荷中GPD探测器的主要像素探测传感器为我校硅像素实验室TOPMETAL-II像素芯片，像素尺寸为72*72。





CXPD 立方星载荷采集的GPD探测器数据主要为TOPMETAL芯片输出的单像素模拟电压，经过模拟数字转化器（ADC）后由FPGA读取。温度气压传感器、高压模块、GMCP下表面电路等的信息转化为数字信号后由FPGA读取。



星上数据获取



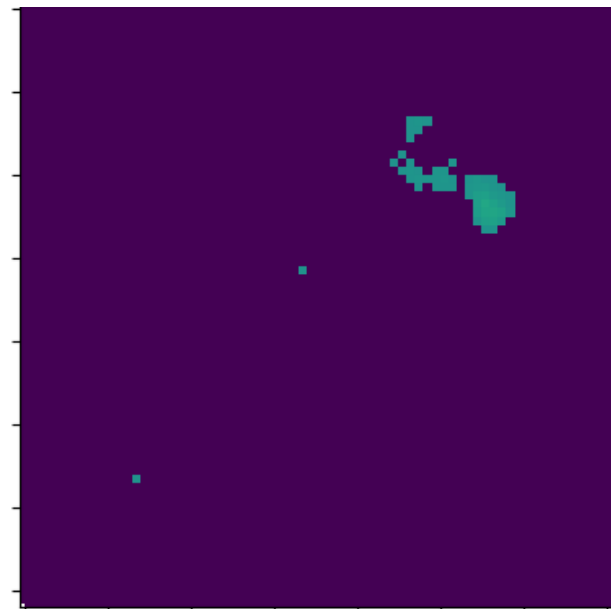


CXPD上有两个GPD探测器，在和观测原始数据率达到**675GB/天**，远远超过卫星下发数据容量1.5625GB/天，所以需要进行星上数据压缩处理。压缩后每天数据量为0.154GB/天压缩率为**0.023%**。

固件中像素数据压缩采用**零压缩+图像腐蚀筛选+有效前后帧保留**方案：

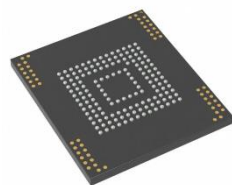
- ①零压缩方法：对连续两帧的像素点数据作差，将差值过阈的像素数据保留；
- ②图像腐蚀筛选：为了滤除只包含电子学噪声的数据帧，对零压缩后的像素帧进行腐蚀筛选，保留真实有效的帧图像；
- ③有效前后帧保留，在①②的有效帧的基础上，保留这些有效帧前、后未过零压缩阈值的帧。

压缩后的在轨图像

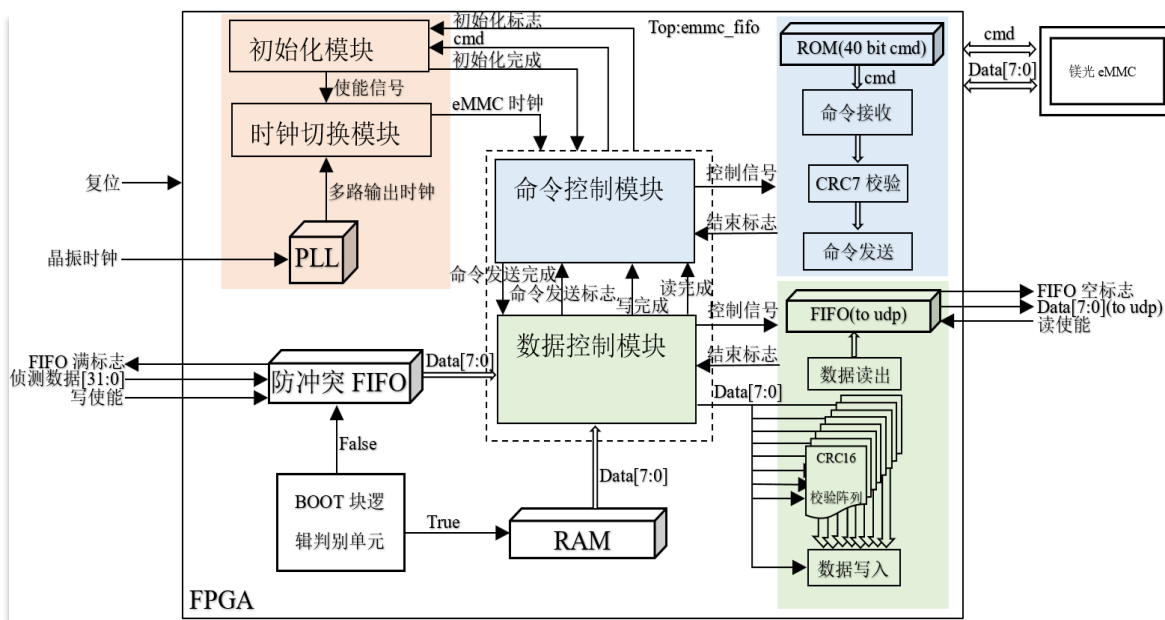




嵌入式多媒体卡 (Embedded Multimedia Card, eMMC) 具有速度快、掉电非易失性等特点，被用于CXPD立方星探测数据存储。固件根据eMMC读写协议与立方星数据存储需求，将读写控制封装为了一个**FIFO IP核**。



eMMC芯片



eMMC FIFO固件结构图



为了保证星上数据完整性，我们在固件中设计了eMMC BOOT块、多重CRC校验等机制保证数据不丢失、不出错。

eMMC BOOT块：

载荷数据上传频率较低，并且需要完整保存所有数据，所以在eMMC中设计BOOT块用于存储每次开机、关机配置数据。

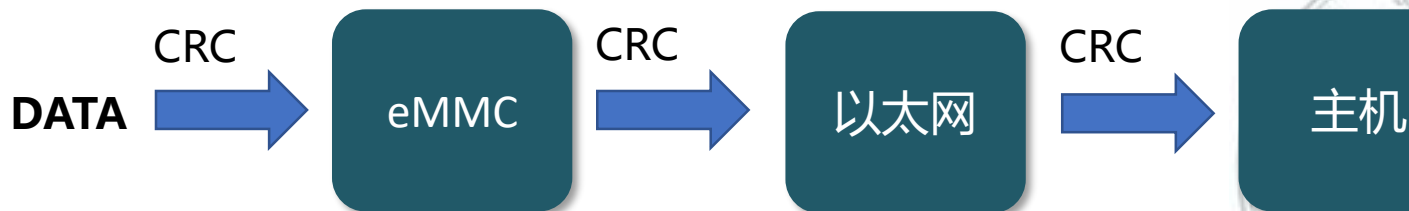
BOOT块还可以把eMMC的读写性能提高。eMMC上电后第一次写入和读出时，有一段较长的忙信号时间（1ms），先进行一次BOOT块的读写，可以在正常写入读出时提前渡过第一个忙信号时间。





多重CRC校验：

循环冗余校验（Cyclic Redundancy Check, CRC）是一种用于校验的编码技术，主要用来检测或校验数据传输或存储后可能出现的错误。CXPD载荷数据在存储、上传时需要经过三次CRC编码、校验，保证数据完整性。





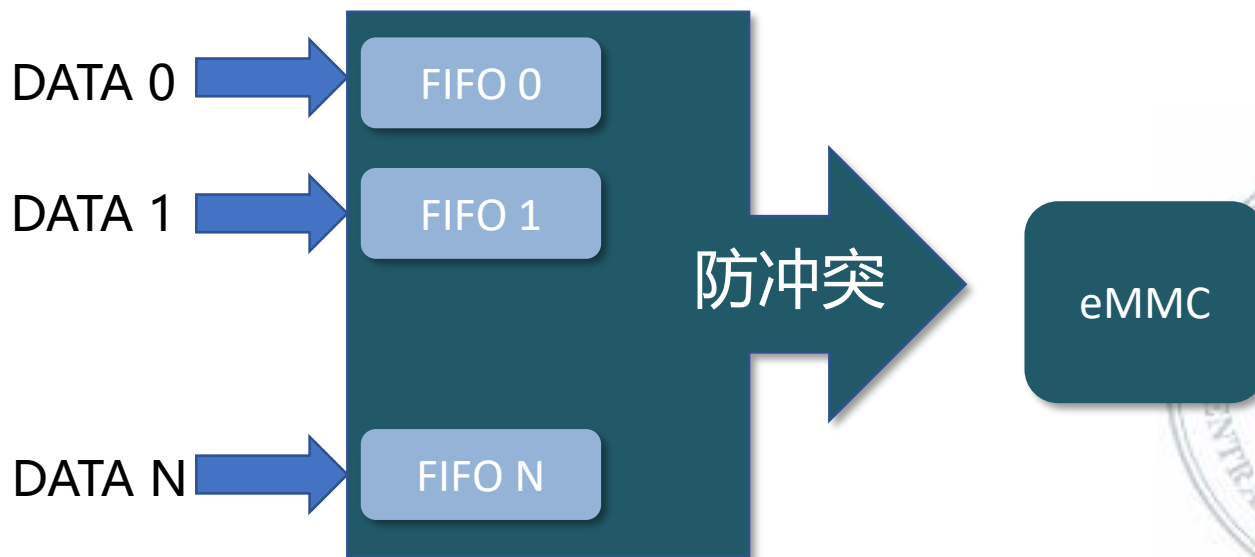
我们在固件中设计了**数据格式与多路数据防冲突**机制。星上数据以帧为单位，单帧数据有两种数据大小，分别为4Byte和8Byte。

4Byte:两个的探测器的压缩数据，包含像素地址、像素值等信息；

8Byte:探测器帧时间戳，UTC时间戳，反符合系统时间戳，GMCP下表面电路数据、电子学监测数据。

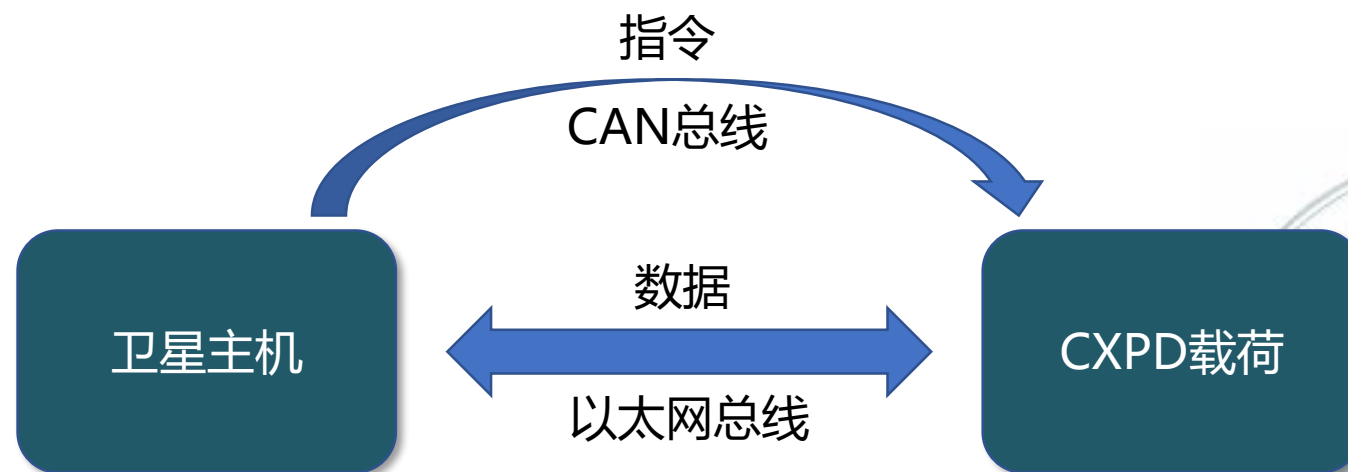
多路数据防冲突：

载荷运行时数据并发产生，防冲突机制可以防止数据混乱或数据冲突。





CXPD 载荷由CAN总线、以太网总线实现指令下传、数据收发。
指令下传用于星上UTC同步、立方星控制、星上遥测等功能；
数据收发用于上传探测器数据、星上更新固件等功能。





CAN总线使用CAN2.0B协议，以扩展帧为单位进行发送与接收。我们在固件中设计了指令系统与指令协议。

指令系统用于控制电子学各器件；
指令协议用于与卫星主机（OBC）通信，除UTC帧以外，其余帧均需要回复，协议具有重发机制。

UTC帧用于载荷上电后时间同步；
遥测帧用于传输电子学状态信息；
指令帧用于控制载荷。

◆ OBC发送给设备的CAN ID分段情况

CANID bit28-21	CANID bit20-13	CANID bit12-9	CANID bit8	CANID bit7-0
OBC ID	设备 ID	CAN 帧类型	帧信息	OBC 帧计数
0X00	0X--	0b--	0b0	0X--

◆ 设备发送给OBC的CAN ID分段情况

CANID bit28-21	CANID bit20-13	CANID bit12-9	CANID bit8	CANID bit7-0
设备 ID	OBC ID	CAN 帧类型	帧信息	设备帧计数
0X--	0X00	0b--	0b0	0X--

说明：

- OBC ID -- 固定为 0x00
- CAN 设备 ID -- 系统为 CAN 设备分配的 ID，每个 CAN 设备固定且互不相同；
- CAN 帧类型 -- 标识发送的数据包是单个 can 帧（8 字节），还是由多个 can 帧组成；
0b0001 表示发送的数据是单个 can 帧；
0b0010 表示多个 can 帧组成的复合帧的第一帧数据；
0b0011 表示多个 can 帧组成的复合帧第一帧以后的数据；
- 帧信息 -- 固定为 0b0；
- OBC 帧计数 -- OBC 根据 can 发送情况自动计数，设备不用管；
- 设备帧计数 -- 设备每发送一个单帧数据包或者一个复合帧数据包时，增加 1，复合帧内部的多个单帧数据帧计数不增加，例如某设备一次遥测应答一共 10 帧，那么第一次遥测应答的十个帧里为 10，下一次遥测应答的 10 个帧里都为 11，再下一次遥测应答的 10 个帧里都是 12，以此类推；

CAN总线协议（帧ID部分）



CXPD 载荷指令指令共17种，分别控制电子学的三块PCB上的各器件，调整载荷运行状态。

卫星主机根据上电、探测、掉电、固件更新四种状态发送预设的指令。

指令编号	指令功能
0x01	高压 Vset DAC 配置
0x02	高压 Iset DAC 配置
0x03	高压模块使能
0x04	探测器 0 DAC 配置
0x05	探测器 1 DAC 配置
0x06	上位机读取数据
0x07	掉电提示指令
0x08	探测器 0 开始取数
0x09	探测器 1 开始取数
0x0a	探测器 0 停止取数
0x0b	探测器 1 停止取数
0x0c	监测指令
0x0d	TOPMETAL 芯片配置
0x0e	GMCP 0 DAC 配置
0x0f	GMCP 1 DAC 配置
0x10	压缩阈值设置

CXPD载荷指令列表



CXPD载荷使用百兆以太网以太网UDP协议传输数据。
UDP具有**高速**、**不可靠**的特点，所以固件中设计了基于UDP的星上数据帧协议，该协议包含数据信息、CRC数据校验、数据重传等内容，在百兆以太网下传输速率稳定在**3MB/s左右**，CRC校验、数据重传功能保证了数据完整性。

序号	名称	标识	长度(字节)	描述
1	报文同步字头	HEADER	4	帧头定义，值待定
2	报文类型	PACKET TYPE	4	0 数据报文； 1 数据应答报文：包数据收到、校验成功； 2 数据应答报文：单包数据接收失败； 3 遥测遥控报文
3	报文序列号	SEQUENCE NUM	4	每个 UDP 报文的序列号需要不一样，可以采用自增方式。 报文类型是 1、2、4、5 时，报文序列号要用收到报文的序列号，发送方用它来判断返回那个报文的执行情况。
4	文件编号	FILE NUM	4	报文类型为 0 时，文件编号用来标识多个 UDP 报文的内容属于同一个文件。
5	文件总长	FILE LENGTH	6	传输的文件总长度
6	数据偏移量	DATA OFFSET	6	本报文的数据在文件的起始偏移量
7	有效数据长度	DATA LENGTH	4	文件的最后一包的有效数据可能小于 1024 字节。有效数据不足 1024 的，用 0xFF 补齐。
8	校验码	CRC	4	1024 字节数据段的 CRC 值。具体 CRC 算法另行提供。如果没有数据段，可填任意值。
9	数据	DATA	1024	1024 字节的数据段

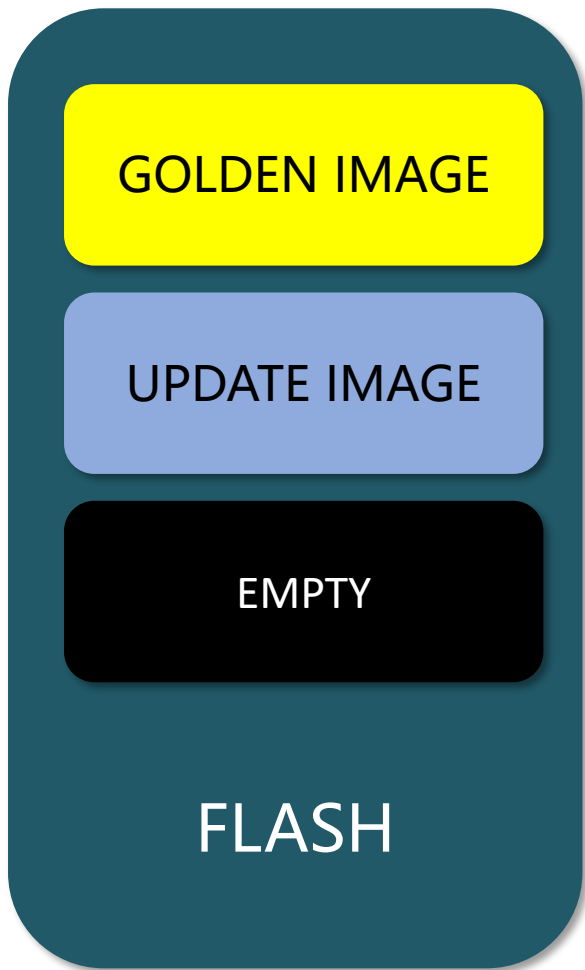
CXPD载荷 UDP通信协议



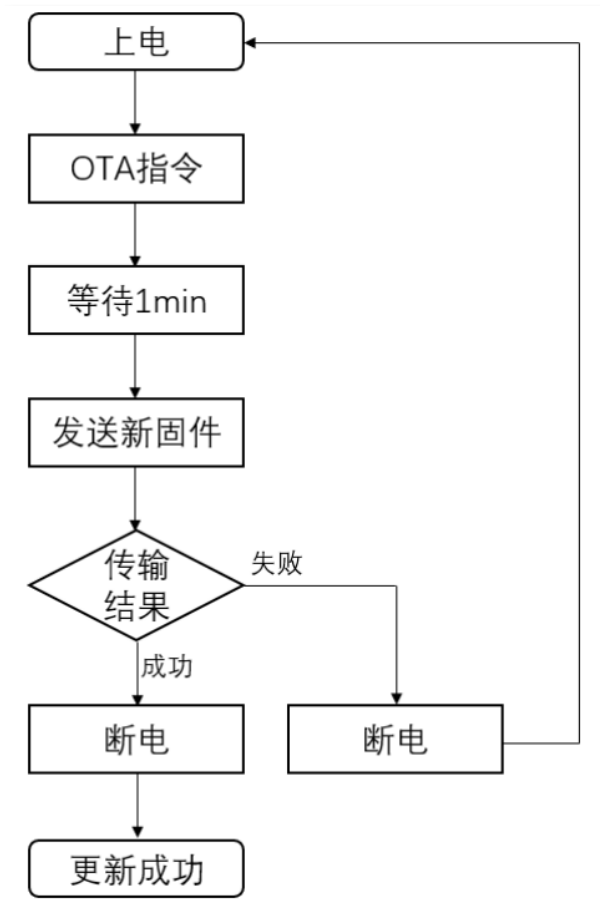
在FLASH中有两个固定区域存储固件，分别为GOLDEN\UPDATE，其余区域不存储数据，为EMPTY。

GOLDEN IMAGE：地面烧写后不再更新的固件，固件更新失败后电子学使用该固件完成再次更新；

UPDATE IMAGE：可重复更新的工作固件，用于完成立方星正常探测，也有固件更新接口。



FLASH内部数据



星上固件更新流程



CXPD电子学固件设计主要完成以下功能：

- ①数据采集、压缩、存储、发送；
- ②电子学系统控制与监测；
- ③固件更新。

在经过多轮测试、修改、调试后，固件设计满足电子学需求。自2023年6月发射至今，固件在轨稳定运行。

