

双星计划中的有效载荷公用设备分系统

陈小敏 孙辉先 王平连 赵天麟
中国科学院空间科学与应用研究中心

摘要 双星有效载荷公用设备分系统由总线控制器、高速多路复接器、大容量存储器、远置终端、载荷配电器和 S 波段发射机组成。系统采用基于 1553B 总线的分布式系统,总线控制器管理有效载荷 1553B 总线通讯,为欧空局有效载荷设计了符合 Cluster II 标准的接口,其它仪器则通过 1553B 总线或远置终端与公用设备分系统相接。有效载荷公用设备分系统完全按照 Cluster II 卫星的速率、周期和顺序采集欧空局仪器的科学数据和工程参数,但这些数据将由公用设备分系统重新组织和打包,存入大容量存储器。当卫星经过地面站接收区时,存储的数据、实时探测数据和工程参数将传送给高速多路复接器,数据按照 CCSDS 高级在轨系统(AOS)的标准被复接为编码虚拟信道数据单元(CVCDU)经 S 波段数传发射机下行。由于这两颗卫星都将运行于大椭圆轨道,为了获得尽可能多的数据,按照卫星距离地面站的远近采用了三种不同的数传速率。整个系统灵活而有效,当某一载荷退出运行时,其它载荷分享其存储和传输的资源。

关键词: Cluster II, 双星计划, 1553B 总线, CCSDS, AOS。

1 引言

Cluster 计划于 1982 年提出并和 SOHO 计划一起被欧空局确定为日地科学计划(STSP)的重要探测项目之一。Cluster II 计划是利用 4 颗卫星来探测地球磁层等离子体过程。4 颗相同的卫星在空间置于远地点 19.6 个地球半径,近地点 4 个地球半径,倾角 90° 的大椭圆极轨轨道上,彼此形成距离可调的四面体结构,用以探测磁层的三维分布和时空变化现象,可以对地球磁层进行中小尺度的研究。Cluster II 计划的每个卫星装有 11 台有效载荷探测仪器,可以对磁层等离子体空间环境进行多方面的探测。

双星计划(Double Star Plan)是 1997 年 4 月由中国科学院空间中心刘振兴院士提出的一项地球空间探测卫星计划。双星计划的两颗小卫星运行于目前国际上地球空间探测卫星尚未覆盖的两个重要活动区:近地磁层赤道区和极区两个主要活动区。赤道星近地点高度 550 公里,远地点高度 78000 公里,倾角 28.5° ;极轨星近地点高度 700 公里,远地点高度 39000 公里,倾角 90° 。该计划通过两颗小卫星对地球空间赤道区与极轨区环境中的磁场、宽能谱粒子场、星体电位、等离子体波动等,进行相互配合的星座式组合探测,从而分析发现由于太阳活动引起的近地空间中的各种扰动活动(磁暴、亚暴等空间暴)的触发机制和发展变换规律。这两颗卫星还可以与欧空局 Cluster II 任务中的 4 颗卫星相互配合进行 6 点探测,揭示空间磁场时空结构的三维变化,系统研究太阳活动和行星际扰动影响的全球过程。该计划提出后得到了国际空间界特别是欧空局的积极响应和我国有关部门的大力支持,目前该项目已成为中国和欧空局的合作项目。欧空局将为这两颗卫星提供部分有效载荷试验设备,其中包括三分量磁通门磁强计、电位主动控制仪、热离子分析仪、电子和电流仪、磁场波动分析仪、中性原子成像仪等。中国将自行研制高能电子、质子、重离子探测器、低能离子探测器和低频电磁波探测器等有效载荷试验设备。双星计划的第一颗卫星即探测一号卫星于 2003 年 12 月 30 日 3:06 在西昌卫星发射中心成功发射,探测二号卫星计划于 2004 年 7 月 26 日在太原卫星发射中心发射。

为节省研制时间和经费,所有由欧空局提供的试验载荷将保持与 Cluster II 计划中完全同样的技术状态,包括电接口、数据注入编码、数据采集的顺序和采集时钟频率及各种服务信号。这些欧洲有效载荷对于卫星有特殊的电源、数据管理和传输的需求,与中国研制的有效载荷探测

仪器有很大差别。但双星的卫星平台却与 Cluster II 卫星截然不同,给星上有效载荷的供配电、数据管理和传输带来很大的困难。为解决这一问题中国科学院空间科学与应用研究中心专门设计了双星有效载荷公用设备分系统。

2 有效载荷公用设备分系统的设计约束条件

在双星计划有效载荷公用设备分系统的设计中要充分注意卫星轨道、能源等方面的约束条件,考虑有效载荷(特别是欧空局有效载荷)电接口的特性,满足有效载荷在电源、遥测、遥控、运行监控、数据管理和传输等各方面的需求。

欧空局有效载荷探测设备的主要任务是探测磁场和粒子时空变化规律,为了保证探测结果的准确度,要求在卫星设计中注意磁洁净度和电磁兼容性。以卫星的几何中心为原点,半径为 3.5 米的球面上由卫星产生的磁场不应超过 3nT。对于低频电磁波探测器所工作的频段(10kHz 以下)所允许的磁场辐射发射有较高的要求,该要求高于国军标 151A(美军标 461)的相应标准,特别是在 1kHz 以下的频段内所允许的磁场辐射发射要低于国军标 151A 所规定的磁场辐射发射 70dB 以上。

欧空局有效载荷探测设备的主要需求和电性能要求为:

- a. 对一次电源输出电压稳定度和锁定电流限流保护有特殊要求,并要求提供 DC/DC 变换器同步信号以满足电磁兼容性要求。
- b. 要求提供和发送低功耗开关指令和存储器加载命令等遥控信号。
- c. 要求提供遥测服务,包括定期采集和处理工程参数、科学数据和设备内部温度。
- d. 要求提供特殊的服务信号,如高频时钟(HFC)、复位脉冲(RES)、太阳参考脉冲(SRP)、自旋分段时钟(SSC)和 DC/DC 变换器同步信号(CSY)。太阳参考脉冲和自旋分段时钟有严格的相位关系、稳定度和不确定度的要求。在卫星每自旋 1 周(4s)的过程中,当卫星装有太阳敏感器的子午面与太阳向量一致时,应产生一个太阳参考脉冲。自旋分段时钟是根据卫星每自旋 1 周(4s)产生 16384 个脉冲。探测仪器利用这两个信号可以精确地确定探测器的指向,其精度可达 0.02°。
- e. 要求对于欧空局有效载荷的重要工程参数进行在线监控,在连续多次超限时采取故障对策,发送相应的故障处理命令和切断电源等。
- f. 在电接口设计上要求充分地注意磁洁净问题,所有的串行接口,服务信号接口,定时信号接口等,均采用差分平衡传输方式,传输介质全部为屏蔽双绞线。并且将开关指令传送电流限制在 100 μ A 以下,使环电流产生的干扰磁场的可能性减少到最低的程度。
- g. 有效载荷数据传输需求和数据存储需求。双星计划中赤道星有效载荷探测时产生的总数据率为 16202bps。极轨星有效载荷数传需求与赤道星接近。由于需要传输的科学数据量较大,地面接收站少,通信覆盖率低,要求将有效载荷科学探测数据,特别是暴发模式下的数据存储下来,在经地面站接收范围内时回放。

有效载荷公用设备分系统的设计中还要充分注意卫星轨道、能源等方面的约束条件。根据卫星轨道设计,数据传输距离从近地点 550 公里到远地点 78000 公里,卫星距离北京密云站 5000 公里以下的可视弧段(按仰角大于 5°考虑所有过境时间)很少,在双星同时经过同一地面站时对数据传输和接收有影响。而且有效载荷数传能力受到卫星能源的限制,不可能有很大的发射功率,同时卫星总体将根据星上能源情况和阴影区时间,控制 S 波段数传发射机的工作时间,不允许数传发射机在卫星可视弧段完全加电或长时间加电,以保证卫星热控系统正常工作。

有效载荷公用设备分系统需要认真分析和考虑空间环境对于设备的严重影响。双星的运行轨道为大椭圆轨道。双星在轨工作期间(赤道星 1.5 年,极轨星 1 年),长时间经过地球内外辐射带,设备需要耐受较大的电子和质子辐照剂量。根据卫星总体的估算,假定卫星外壳折合为厚度为

3mm 铝, 赤道星 1 年半的总辐照剂量为 88.4 krad Si, 极轨星 1 年的总辐照剂量为 67.3 krad Si, 对设备长期工作的可靠性及抗辐照性能提出了较高的要求。

有效载荷公用设备分系统在设计时充分地考虑到这些特点和约束条件, 注意磁洁净、电磁兼容性、耐辐照、电源和信号接口的特殊要求, 最大限度地满足有效载荷需求, 合理安排工作模式, 尽可能地设计足够的数传能力和与之相匹配的存储能力, 采用通用的系统结构和灵活的数据结构, 实现信道的动态调度, 适应不同载荷的变化和需求。

3 有效载荷公用设备分系统的组成和结构

有效载荷公用设备分系统由有效载荷总线控制器、高速多路复接器、大容量存储器、远置终端、载荷配电器和 S 波段发射机构成。并在主要设备设计中考虑了备份冗余结构。

公用设备分系统的载荷配电器从卫星获取一次电源, 通过卫星遥控指令控制, 将一次电源和经 DC/DC 变换器产生的工作电源和维持电源分配给有效载荷和公用设备。系统采用分布式的结构, 采用 1553B 总线作为有效载荷系统通讯网络, 将公用设备和有效载荷连接在一起。有效载荷不仅可以通过 1553B 总线, 也可以通过欧空局标准测控通道或远置终端遥测接口进行通讯。有效载荷的科学探测数据和欧空局设备的工程参数经处理和存储后, 由高速多路复接器采用 3 种不同的速率进行复接, 然后将数据送 S 波段发射机下行。

系统结构见图 3。

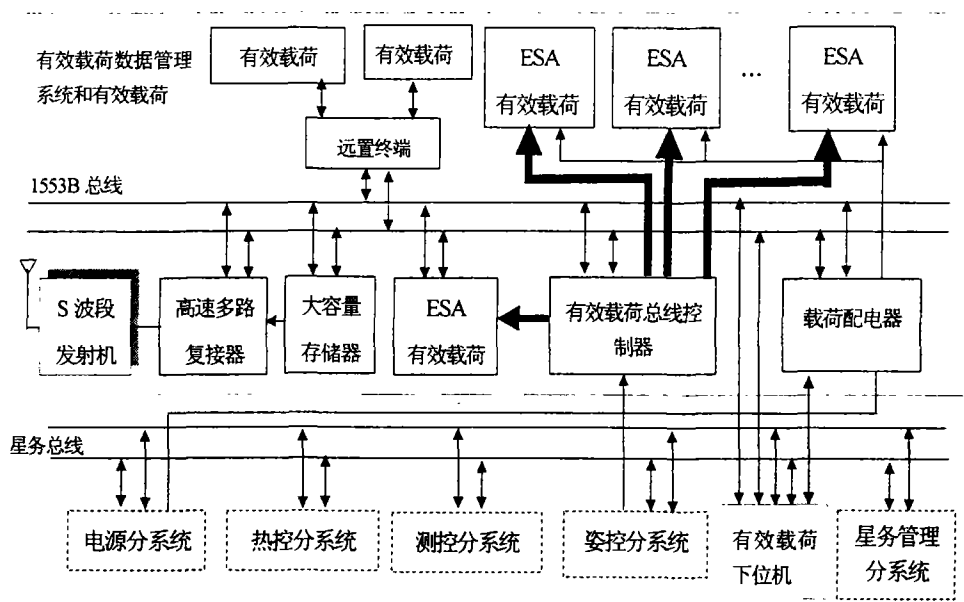


图 3 有效载荷公用设备分系统结构框图

4 有效载荷公用设备分系统设计特点

有效载荷公用设备分系统在设计上的主要技术特点为：

- 数据传输采用先进的 CCSDS 标准。系统采用了符合国际数据网络通信协议的数据传输标准, 利用分包遥测和虚拟信道的概念, 将不同速率, 不同应用过程, 不同性质的有效载荷数据复接成为一串行数据流, 经同一物理信道传送到地面站。数据传输允许对被传数据的动态调度, 最大限度地利用信道的能力, 充分适应不同有效载荷不同数据率的变化。双星计划向国际 CCSDS 组织提出申请并得到正式分配的赤道星和极轨星的航天器标识符。

- 系统采用 1553B 总线通讯网络。1553B 总线是现代小卫星数据管理系统的发展方向。有效载荷数据管理系统采用以 MIL-STD-1553B 总线为通讯网络的分布式结构,将公用设备和各有效载荷连接起来,具有方便、灵活和高可靠性的特点。

- 高速多路复接器是实现按 CCSDS 标准传送数据的关键设备,通过对多路信号的异步复接,可以使被复接的设备连续或间歇地,等速或变速地进行数据传输,可以将来自不同信源的数据(如动画图像、静止图象、科学实验数据、工程参数等)装配成为传输帧,在同一物理信道上传输。在高速多路复接器中还采用可编程逻辑器件实现了实时的 RS(255, 223) 纠错编码,交错深度为 2。RS(255, 223) 纠错编码是一种高效的编码,具有很强的纠错能力,在交错深度为 2 时可以纠正长度为 510 个字节的码块中 32 个字节的任意组合形式的错误,有效地减少了由干扰所引起的传输错误。

- 系统采用综合设计满足有效载荷进行科学探测的数据需求。

在系统设计中考虑北京密云站和西班牙 Villafranca 同时接收,按传输距离的远近和不同接收站的情况进行变速率传输,数传发射机适应 3 种不同速率传输,当距离为 <5000km 时,传输速率为 1.024Mbps; 距离为 5000~15000km 时,速率为 128kbps; 距离为 15000~45000km 时,速率为 16kbps。在多站接收弧段重叠时选择较高数传速率。

在有效载荷的数据管理上采用灵活的数据结构存储有效数据,而不采用固定分配的遥测帧格式。软件可以根据用户的要求选择存储有效的科学数据和选择传输下行用户感兴趣时段(如暴发模式)的探测数据,最大限度地利用信道传输有效探测数据。

- 大容量存储器具有容量大、存取速率高、体积小、重量轻、耗电省等优点。大容量存储器采用存储密度为 2Gb 的 DRAM 器件实现,采用软件进行的 RS(256, 252) 纠错编码,可以纠正 256 个字节的码块中 2 个字节的任意形式的错误,有效地减少单粒子事件造成的数据错误率。软件的存储单元失效检测和旁路功能进一步提高了设备的可靠性。

- S 波段发射机具有作用距离远、工作时间长、频谱纯度高、小型高效率的特点。S 波段发射机采用了锁相倍频单元集成和微波电路集成(MMIC)等新技术,发射机的输出功率高达 16W,整机功耗 55W,重量 3.3 公斤,传输距离达 78000 公里,工作时间长达 5.5 小时。

- 载荷配电器设计有对于每个仪器的精细可调限流保护功能,为欧空局有效载荷提供变换器同步信号。载荷配电器内嵌 1553B 接口单元,作为卫星遥控遥测单元的备份。

- 在材料和器件选用、电路板布局布线、磁补偿和接地设计中进行磁设计,满足设备剩磁矩、磁化场和工作时的杂散磁场等各方面的严格要求。

- 进行抗辐照和抗单粒子事件设计。在系统设计中关键器件进行了辐照试验,根据试验结果对设备的结构进行了抗辐照设计,并对辐射敏感的关键器件重点采取屏蔽措施,使辐照总剂量大为下降,满足了任务要求。为了减少空间单粒子事件的影响,计算机的电路板采用 EDAC 纠错电路,并采取了其它抗单粒子事件措施。对于 CMOS 器件发生的单粒子锁定现象进行了限流保护设计。

5 在轨运行情况

从探测一号卫星发射到目前有效载荷公用设备分系统在轨运行良好,可靠地为中国和欧洲有效载荷供配电,准确地进行了探测仪器的电流检测,灵活高效地实现了数据采集、处理、存储和传输,完整无误地执行和转发了卫星传输的数据注入,实时在线监控欧洲仪器的运行状态,向密云、上海和西班牙三个地面接收站传送了大量高质量的科学数据。所有的公用设备工作正常,性能稳定,运行可靠,完全满足任务和设计要求,数据传输能力大大超出了信道的原设计能力。

高速多路复接器将各种不同应用过程、不同速率、不同性质的数据异步复接为一串行位流数据送往数传发射机,使信道利用率提高到 99%以上。实际在轨运行时的信道利用率分析结果见

下表。

表 5.1 信道利用率

序号	下行数传速率	在轨运行载荷数据占信道比例	在轨运行填充数据占信道比例
1	1024Kbps	99.61%	0.39%
2	128Kbps	100%	0%
3	16Kbps	100%	0%

由于星地间数据传输实际上通过的是有噪信道，不可避免的会产生误码，造成数据错误。高速多路复用器采用了 Reed_Solomon 编码，且交错深度为 2，对所传输的数据实施编码保护，在每 512 字节一帧的数据中可纠正不多于 32 字节的误码。从对卫星地面站接收的原始数据及 RS 解码后的报告分析，实际信道误码率近似 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ ，纠错编码有效。高速多路复用器以适度的编码开销获得较高的编码增益，保证数传系统获得较低的误码率，优化了系统性能。

以 128Kbps 数传模式为例，分析密云站接收数据情况，结果见下表。

表 5.2 信道误码及纠错结果

地面站	时间	数传模式	信道误码	RS 纠错	说明
密云站	20040116 01: 50	128Kbps	3×10^{-7}	误码得到纠正	地面站正常跟踪时接收的数据。

在轨测试期间对于 RS 编码的纠错能力进行了统计和分析。分析结果表明，在受到空间环境和地面接收站运行状况的影响致使信道误码率较高时，不仅会在科学探测数据中产生误码，而且会因同步码和虚拟信道主导头中的误码而产生失步和丢帧，RS 纠错编码在降低传输误码同时，可大大降低下行数据的丢帧数量。以 1024Kbps 数传模式为例，分析密云站接收数据，结果见下表。

表 5.3 数据丢帧及纠错统计

地面站	时间	数传模式	RS 纠错前丢帧数	RS 纠错后丢帧数	说明
密云站	20040127 07: 39	1024Kbps	15869	580	总 帧 数 为 323098。

S 波段无线传输信道的数据传输能力大大超出了信道的原设计能力。信道性能测试和分析结果表明，实际信道余量达到 14 dB。在距离密云站的接收距离为 30000 公里时，以 1024Kbps 的码速率进行数据传输，其传输误码率约为 10^{-6} 量级；同样，以 128Kbps 的码速率进行数据传输，测得的接收极限距离为 83000 公里；可以得出如下结论：由于数据传输速率的提高，在满足数据传输需要的前提下，原定采用三站（密云站、上海站、西班牙站）接收的方案可改为两站接收，即密云站和西班牙站。考虑到在各种情况下确保数传信道的可靠和正常工作，并留有一定的备余量，密云站仍按三种速率进行接收，而西班牙站只接收 1024Kbps 速率的数据。下表给出了目前采用的传输码速率和传输距离的关系，同时还列出了设计值，以便进行比较。

表 5.4 数传速率测试结果

传输码速率	1024kbps		128kbps		16kbps	
	设计值	实用值	设计值	实用值	设计值	实用值
密云站接收距离 (km)	<5000	<15000	5000-15000	15000-45000	15000-45000	>45000
西班牙站接收距离	<6650	<25000	6650-	25000-	19950-	>60000

(km)			19950	60000	59850	
------	--	--	-------	-------	-------	--

6 结语

双星是我国首次与欧空局合作的卫星工程项目,为欧空局有效载荷提供电源、数据管理和传输完全是由有效载荷公用设备分系统设计和实现的。有效载荷公用设备分系统在系统设计中不仅注意到欧空局有效载荷的需求和设计特色,符合 Cluster II 卫星的技术要求,考虑到双星轨道的特点和卫星平台的约束条件,而且采用了多项国际先进技术和新技术,如在我国航天器上首次正式实现 CCSDS 标准,并得到 CCSDS 国际组织正式注册;系统采用以 1553B 总线为基础的分布式结构,以及与 Cluster II 卫星兼容的电接口设计;高速多路复接器完全实现了信道的动态调度,使信道利用率提高到 99%以上;根据双星轨道特点采用了 3 种速率向地面传输数据,大大提高了探测数据的获取能力;小型高效率的 S 波段发射机作用距离远、工作时间长;交错深度为 2 的 RS(255, 223) 信道纠错编码;高集成度和高灵活性的大容量存储器;对于每个科学探测仪器的电源进行精细可调的限流保护和首次应用的基于 1553B 总线的遥测遥控终端等。同时在系统设计中高磁洁净度、电磁兼容性和抗辐照设计也独具特色。双星有效载荷公用设备分系统的设计和实现为我国发展空间科学卫星及有效载荷系统,为与国际先进国家在空间科学与探测领域的合作迈出了重要的一步,打下了良好的基础。

7 参考文献

- [1] Cluster Solar Terrestrial Science Program Experiment Interface Document Part A.
- [2] MIL-STD-1553B, Aircraft Internal Time Division Command/Response Multiplex Data Bus, 21 September 1978
- [3] CCSDS 701.0-B-3: *Advanced Orbiting Systems, Networks and Data Links: Architectural Specification*. Blue Book. Issue 3. June 2001.
- [4] CCSDS 202.0-B-3: *Telecommand Part 2 -- Data Routing Service*. Blue Book. Issue 3. June 2001.