

新一代航天地面测控装备模块化发展构想

韩志会, 何国龙, 刘敏, 张任天, 杜小鸣
(北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

摘要: 航天任务的多种多样使得地面测控装备研制面临巨大挑战, 而装备模块化建设可以给航天装备建设带来多方面提升。本文首先通过分析航天任务的需求特点, 明确地面测控装备建设的要点和内涵; 其次, 对模块化建设的基础发展要素、地面测控装备的能力需求和装备建设现状进行分析, 提出了新一代地面测控装备模块化建设思路; 最终, 结合模块化建设发展的积极作用, 提出了地面测控装备模块化建设的有效建议, 可以为航天地面测控装备模块化建设发展提供有效支撑。

关键词: 地面测控装备; 模块化; 标准化

中图分类号: V556 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2025)01-0115-11

DOI: 10.12347/j.ycyk.20240717001

引用格式: 韩志会, 何国龙, 刘敏, 等. 新一代航天地面测控装备模块化发展构想[J]. 遥测遥控, 2025, 46(1): 115-125.

Modular Development Conception of New Generation Aerospace Ground TT&C Station

HAN Zhihui, HE Guolong, LIU Min, ZHANG Rentian, DU Xiaoming
(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094)

Abstract: The diversity of space missions presents enormous challenges to the development of satellite ground TT&C station. The modular construction of equipment can bring about many improvements to space equipment construction. First, this paper analyzes the demands of space missions to find out the key points and connotations of satellite ground TT&C station. Second, the basic development elements of modular connotations, the capacity requirements of satellite ground TT&C station and the current status of equipment construction are analyzed, and the modular construction of satellite ground TT&C station is proposed. Finally, combined with the positive role of modular construction and development, suggestions for the modular construction of satellite ground TT&C station are presented, which can effectively support the modular construction and development of satellite ground TT&C station.

Keywords: Satellite ground TT&C station; Modularization; Standardization

Citation: HAN Zhihui, HE Guolong, LIU Min, et al. Modular Development Conception of New Generation Aerospace Ground TT&C Station[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2025, 46(1): 115-125.

0 引言

在太空竞争日益激烈的背景下, 世界各航天大国均在制定顶层战略政策, 积极构建更为完备坚实的航天装备体系, 大力培育发展航天装备产业。2015年后, 我国航天技术不断发展、航天产业规模不断扩大, 促使商业航天不断发展并改变传统航天格局, 航天产业呈现出新的发展态势。然而, 现有航天装备产业中存在质量不高、周期过长、成本偏高、产能较低等诸多问题, 又同可

靠性和低成本的要求相矛盾, 迫切需要进一步加强航天装备建设, 鼓励商业航天积极参与装备竞争, 促进装备研制生产和先进技术发展。为此, 各方均不约而同地提出了对航天装备开展模块化建设的新途径, 以提高装备产能、质量、经费使用效益, 增强装备自主开发能力, 加快装备升级创新的步伐^[1-3]。

自20世纪70年代起, 美国便以独立技术路径着力推进开放系统架构 (OSA, Open System Architecture) 的演进。直至2000年以后, 方逐步认

知到此种方式实则作为一种可对整个装备设计产生深远影响的系统方法论。自 2009 年始, 美国国会对于模块化与开放系统架构所蕴含的优势予以高度重视并展开深入探讨, 同时敦促美国国防部积极构建模块化开放系统架构 (MOSA, Modular Open Systems Architecture)。至 2016 年, 美国于其法典中正式确立了模块化开放系统方法 (MOSA, Modular Open Systems Approach) 的法规条文, 该方法旋即被广泛应用于装备采办领域。2019 年 1 月, 美国海陆空三军共同签署联合备忘录, 明确将采用模块化开放系统方法视作现代作战的关键路径; 美国国防部随即将此方法深度融入海陆空现代化国防事业建设进程之中^[4-6], 持续开展模块化与开放性的前沿研究^[7], 全力以赴为装备系统的建设与发展提供坚实支撑。于航天装备范畴而言, 其涵盖卫星、火箭、地面装备三大主要类别。在卫星领域, 美国洛马公司精心打造了 LM2100 系列卫星平台, 该平台能够充分契合一星多能综合应用以及通用集成快速交付等多元需求。与此同时, 同步开发了超 280 个通用化卫星部件, 此举不仅成功将卫星核心部件种类削减 56%, 交货周期缩短 28%^[8], 而且极大提升了卫星平台的可靠性与稳定性。在火箭领域, SpaceX 公司凭借创新性的模块化组装理念, 对最为核心的发动机实施并联式重复利用策略。例如其猎鹰九号火箭配备 9 台梅林发动机, 即便在飞行进程中有 2 台发动机出现故障失效, 仍可确保任务顺利达成。而其最新研发的星舰一级超级重型推进器更是装配 29 台猛禽发动机, 展现出强大的动力冗余与任务保障能力。在地面装备领域, 美国基于开放系统架构 (MOSA), 全力推动航天通用模块化架构 (SUMA) 与软件化装备的构建与完善^[9,10], 卓有成效地化解了装备升级维护过程中所面临的诸多难题与困境。

随着航天系统规模的持续扩张以及航天器数量的不断攀升, 地面测控系统亦呈现出相应的增长态势。美国提出“企业级地面体系”(EGA, Enterprise Ground Architecture)^[11]的架构规划蓝图, 其核心在于对测控系统的软硬件设施及接口实施全面的通用化与标准化改造。与此同时, 该架构在智能化与信息化技术维度持续发力, 有力推动测控作业向智能化、网络化方向深度演进。具体举措包括基于云测控资源管理模式以切实提

高测控网资源利用率, 以及将地面测控站与地面网络予以虚拟化处理, 从而达成更为高效、精准的信息交互效能。

经由对美国模块化发展实践案例的深入剖析可知, 模块化建设路径能够显著缩减开发周期时长, 加速技术应用与落地转化进程, 有效提升系统可靠性, 降低产品全生命周期支持成本, 为装备现代化建设注入强劲动力^[12]。据此可证, 测控标准化、模块化、通用化的协同推进可为商业航天、云测控以及智能一体化测控的蓬勃发展构筑坚实基础并贡献卓越价值。

然而, 从中国航天发展的实际状况与迫切需求来看, 我国装备模块化建设起步相对迟缓。在航天装备领域, 中国空间技术研究院借助东方红 (代号: DFH) 卫星平台推进了类似的卫星模块化工作, 能够依据需求灵活调整、适配有效载荷并契合多种任务需求, 达成了卫星研制周期缩短、成本降低以及精准度提升等目标^[13]。中国运载火箭技术研究院以“一个系列、两种发动机、三个模块”为基石, 构建出中国新一代大型运载火箭“长征五号”系列^[14]。凭借这一创新的火箭发展理念与模块化建设方案, 有效降低了现有火箭的研制难度, 并大幅增强了其可靠性。

在与卫星和火箭相匹配的地面装备方面, 当前我国已初步构建起测控标准体系与软件化标准框架, 众多学者亦积极探索具备基础资源可重组特性的软件定义测控系统^[15], 这些均为我国测控装备模块化发展奠定了初步根基。然而, 鉴于传统航天地面测控装备作为天地信息传输的关键纽带, 航天测控任务呈现出多域性、多任务性以及多目标性的显著特征^[16]。但因任务需求状态存在差异, 且多为单套装备研制模式, 导致已有的模块化产品难以在行业内广泛推广。此外, 随着新技术的不断涌现, 这些成果亦难以迅速融入现有装备建设进程之中。

总体而言, 由于各类地面测控装备大量生产建设, 其种类与数量颇为繁杂, 致使型号科研生产任务繁重与时间紧迫的矛盾愈发尖锐。加之装备结构复杂, 为满足多种装备型号研制要求, 同一类别的地面测控装备可能由多家单位分别研制, 其部件更是由不同厂家生产, 进而造成装备研制门槛较低、部件标准缺乏一致性、装备接口互不

兼容、可靠性欠佳、维修性与保障性低下等问题,难以契合现有的装备管理需求,且在装备损坏后必须依赖原研制单位进行维修恢复,对装备后续的维修保障工作产生了极为不利的影 响。

因此,为强化航天测控装备体系的稳固性,有力推动商业航天测控事业的进步与发展,化解现有地面测控装备运行保障的困境,构建能够满足多种航天任务需求的多功能测控站,实现快速接入测控网等目标,亟需在现有测控装备的基础上,于有限经费保障条件下,开展周期短、可靠性高、研制成本低且维修便捷的模块化建设工作。同时,强化顶层设计规范,制定统一的对外开放标准,促进地面测控装备的良性发展,从而切实提升装备质量,缩短装备研制周期,降低装备生产成本,减少装备研制风险,扩大装备生产产能,提高装备的质量可靠性与综合保障能力。为此本文针对航天任务发展需求以及装备模块建设过程中存在的诸多问题,提出新一代航天地面测控装备模块化发展的理念与思路。

1 航天任务和测控装备需求分析

随着航天事业的快速发展和任务类型的不断丰富,航天型号任务面临着高强密度态势,各种科学试验卫星、载人航天器和深空探测器纷纷入轨。各类航天任务对航天测控装备提出了多种极富挑战性的要求,本章节主要从航天任务需求和测控装备需求的特点方面分别进行分析,如图1所示。

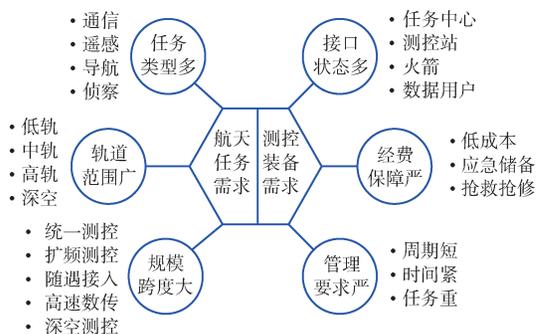


图1 航天任务和测控装备需求特点

Fig.1 Requirements of space missions and TT&C equipment

1.1 航天任务需求特点分析

① 任务类型多

根据不同的应用需求,航天任务的类型多种

多样,如遥感、通信、导航等。为了能够快速高效实时获取地球表面海量数据,全天时、全天候对全球进行多层次、多视角和多领域的观测,发展了天基对地遥感技术^[17];为了直接对航天器和承载空间活动的运载器进行跟踪、测量和监控等,以便地面工作者随时掌握其执行任务实时状态,发展了航天测控通信系统^[18];为了解决用户更加准确授时、定位等问题,以GPS、北斗为代表的各类导航卫星应运而生。针对不同的任务应用需求,需要地面测控设备具备多种工作能力,如遥感需要接收大数据量回传,通信需要保证大带宽高时效性,导航则需要超灵敏的时空基准信息。

② 轨道范围广

根据任务特点和工作需求,航天器会被布设 在不同轨道高度。其中,大部分对地观测卫星、空间站、星链卫星及一些新的通信卫星一般采用低轨;导航卫星一般采用中轨;地球同步轨道卫星主要用于通信、广播电视等;在深空探测方面,探测器被布设在月球、火星、小行星等轨道周围。因此,地面测控装备趋向多功能化的同时,对其工作能力也提出了更高要求,不同轨道高度、不同应用背景对地面装备的上行发射功率、下行接收灵敏度提出了完全不同的要求。

③ 规模跨度大

资源探测、环境监测、遥感、通信等系列卫星不断发展,促进了我国大卫星、小卫星、微纳卫星以及卫星星座的发展。这些卫星遍布低轨、中轨、高轨各级轨道,地面测控装备需要对不同轨道上运行的卫星进行全时段监控,面临测控支持的卫星数目多、多颗星同时过境、卫星相继过境间隔时间缩短等新形势,对测控装备提出了多种极富挑战性的测控要求,因此形成了统一测控、扩频测控、高速数据传输、随遇接入^[19]、深空测控等多种工作模式来实现测控支持能力,增加了测控装备复杂度。

1.2 航天测控装备需求特点分析

① 接口状态多

在航天测控系统中,由于我国航天器类型较多,不同航天器、不同用途、不同传输信道的天地通信业务种类也较多,导致监测目标存在差异,进而使得对不同航天器、卫星相应部分的测控设备要求也有所不同^[20]。部分测控设备要求箭星通

用, 针对不同任务中心或测控站, 会造成地面测控装备接口状态五花八门。加之地面测控装备可能由多家单位研制形成, 存在装备接口版本多、装备形态多等问题, 同时又缺乏顶层引领、行业标准, 导致装备接口杂乱无章、互不兼容, 难以做到有效的规范统一。

② 管理要求高

随着航天任务需求的不断增加, 且当前的航天任务量大、场景复杂、种类繁多, 促使装备的功能指标不断增多, 可靠性持续提高。随着任务密度的迅速增长, 航天任务呈现时间紧、节奏快的态势, 加之具有强复杂性, 涉及行业领域多, 对装备建设周期和要求均比较高, 航天测控装备建设正向着高效率、高可靠性、高标准要求方向发展, 因此造成测控装备研制难度增大, 研制单位的压力愈大。

③ 经费保障严

随着航天形势的不断变化, 现有航天测控装备组成规模庞大、综合成本高、建设周期长、操作维护难等问题越来越突出, 在面对装备建设问题又同可靠性和节省费用要求相矛盾时, 如何才能降低装备研制成本和装备全生命周期维护成本, 满足以低成本和短周期研制出高水平、高质量、高利用率装备的要求, 及时完成对在用装备进行维修器材购置、应急储备、抢救抢修等工作, 最终在装备研制和维修保障阶段, 用有限经费实现最大经济效益。

总结梳理目前新时代航天测控发展需求和挑战主要包含:

① 测控系统的通用性需求: 由于目前研制单位差异性, 相应测控产品缺乏兼容性, 加之航天任务时间紧任务重, 当前航天测控系统在研制生产协调过程中面临技术风险。故而需要系统具备通用性, 以迅速响应不同航天任务需求。

② 可扩展和可继承性需求: 现有的航天测控系统一直是按型号研制, 存在出厂定终身的不足。因现有的航天任务多样性和差异性, 航天测控需求与现有的测控服务能力差距过大, 难以及时迭代和灵活适用其他多种任务场景。若能将原测控系统中的固定硬件资源标准化并进行功能重组, 可为不断增长的航天任务提供灵活的测控服务。

通过以上分析可以看出, 要想在有限周期内

研制建设满足多功能、高质量、低成本等各方要求的地面测控装备, 技术和管理等多方面存在很大压力。当前, 传统测控装备主要开发流程包括需求分析、总体论证、研制单位研制、试验鉴定和量产等环节。为了完成研制任务, 缓解研制压力, 测控系统建设通常由不同的研制单位抓总, 其开发进程受多家研制单位各自状况的影响与制约, 研发周期长、资源浪费, 加之国内各航天领域研制单位技术特长、技术水平的差异很大, 缺少相关方面的顶层文件进行规范, 导致航天研制产品五花八门、缺乏一致性, 因此对航天地面测控网全网状态统一和装备后期使用维护开始都带来了极大困难。为此, 必须大力开始新一代地面测控装备模块化建设新思路, 才能在实现装备高效研制建设和良好维护能力的基础上, 有效地提高航天测控的服务能力。

2 模块化发展的基础要素

开展航天地面测控装备模块化建设, 必须具备一些基础要素: 首先, 要进行开放式系统架构设计, 允许同一个架构上开发不同装备类型; 其次, 以装备功能分析为基础, 遵循各个模块功能的独立原则, 划分形成方便交互的功能模块; 同时, 要求各模块界面清晰, 并使其易于指标考核, 便于装备设计时进行指标分解和集成; 最后, 对模块接口加以规范, 便于模块互联和信息交互。本文通过模块化发展基础要素开展模块化建设, 以地面测控装备分析为基础, 设置开放式体系架构, 以解耦为中心, 适时辅以体系仿真, 优化模块划分与接口标准, 最终实现降低研制建设成本、提高维修保障能力和促进单机发展水平的作用效能, 提高专业化技术并行迭代与系统集成水平, 达到装备建设创新、提质、增效和降本的目的。地面测控装备模块化建设思路如图 2 所示。

2.1 系统架构开放

传统测控系统主要以硬件为核心, 软件根据硬件定制, 软硬件紧密耦合, 捆绑严重, 且其体系结构为封闭式, 互不兼容, 导致现有的地面测控系统功能和性能固化严重。同时, 现有的分系统除了时频、标校、监控分系统外, 其他分系统采用热备份模式, 现有的测控系统体系架构造成了严重的资源浪费。通过分析后续装备建设能力需求, 在地面测控装备规划建设之初, 对现有地

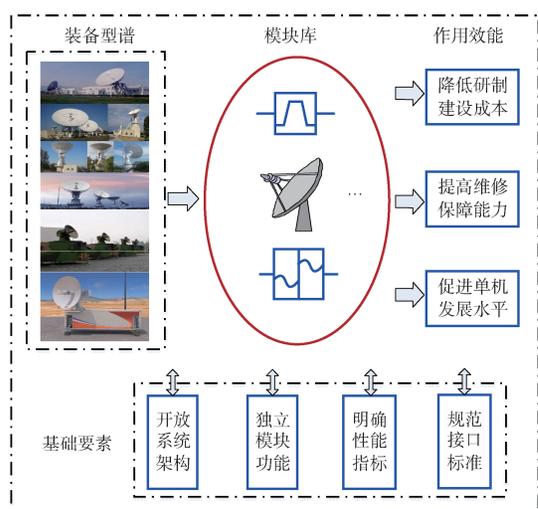


图2 地面测控装备模块化建设思路

Fig.2 Modular construction of ground TT&C equipment

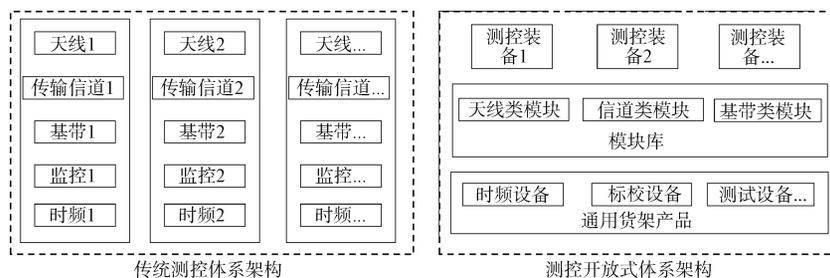


图3 地面测控体系架构

Fig. 3 System architecture of ground TT&C station

2.2 模块功能独立

模块化设计是根据不同需求将功能进行细分，再根据不同功能划分成不同模块，保证同一功能不在多个模块中出现，同一个模块不实现多个功能^[22]。如果装备功能需要大而全的话，那么装备模块化就要求由多个功能独立且具有标准接口的功能模块组成系统^[23]，各模块之间具有可连接性、互换性，方便连接、分离和置换，并能在保持整体性同时做到相关功能的扩展。因此，将地面测控装备划分为若干个功能模块，主要改变现有装备内部分系统划分过多过细的现状，将原有十多个分系统重组整合，将原有大量跨分系统实现的功能集中到分系统内部实现，每种模块可与具体任务需求解耦，相对独立发展，实现功能内聚，减少接口数量，屏蔽内部设计，减少模块间耦合。

2.3 性能指标明确

通过对各模块设置科学、合理且易于考核的指标，有利于地面测控装备总体设计时进行指标分解和集成，同时需要检验设置的指标体系是否

完整，并不断对其进行完善。因此，模块化应具有清晰的界面和简单易考核的性能指标，易于满足装备整体设计功能需求，可以快速完成装备的迭代和升级。最终以此形成的模块化产品，具有完整性、独立性、可扩展性，有助于整体装备的生产制造。

面测控装备进行整合，形成满足不同任务需求的装备型谱，确定其系统架构和特征参数。在此基础上，对测控系统进行模块化分解，同时按照一定的标准进行连接，形成能够被某一系列装备共享的模块组合^[21]，这样相同的模块可以配置在不同的测控装备上，如图3所示。即以同一个系统架构为基础，通过添加满足不同任务需求下实现装备多样性的不同模块，以此梳理各个分系统的设备，不需要再针对每套系统进行设备配置，而是对具有标准化的模块进行选择。最终通过本文开放式体系架构设计研究开发出具有标准化、模块化、通用化、软件化和智能化的地面装备体系结构，获得满足相应需求的地面测控装备。

完整，并不断对其进行完善。因此，模块化应具有清晰的界面和简单易考核的性能指标，易于满足装备整体设计功能需求，可以快速完成装备的迭代和升级。最终以此形成的模块化产品，具有完整性、独立性、可扩展性，有助于整体装备的生产制造。

2.4 接口标准规范

为了形成复杂的系统，除了需要建立相对独立的特定模块，模块之间的标准接口需要按照一定规范进行连接。因此，需要不断完善更新装备接口标准，使得模块与模块能够在这个标准下融合，满足装备的整体功能性和装备的发展需求；模块输入输出接口要简单规范，便于模块互联和信息数据交互，最终提高装备的可操作性、可用性和使用成功率。同时通过对接口进行统一标准化规范，可以有效缩短商业测控任务周期，促进商业卫星和测控公司间的合作，同时满足商业卫星测控与通用测控网的互联，最终可以有效促进商业航天测控的发展。

3 地面测控装备模块化发展方案

3.1 模块划分

由于具体航天任务需求各异, 对地面测控装备在目标、功能、使用要求、性能指标和接口设计等方面存在较大的技术状态差异, 而传统的地面测控装备都是单套研制, 仅满足具体任务需求,

并多为相对封闭的系统。因此, 为支持不同的航天任务, 需要重新划分地面测控装备, 通过相对灵活的模块化方式, 高质量低成本地实现装备所需的功能性能。现有地面测控装备主要由天伺馈、发射、高频接收、数字基带、监控、时频、测试标校等多个分系统组成, 各个分系统功能和组成见表 1。

表 1 现有地面测控装备分系统的功能和组成

Table 1 The function and composition of the existing sub-system of ground TT&C equipment

分系统	功能	组成
天伺馈分系统	主要通过伺服控制天线指向转动等,保持对目标的跟踪,并通过连接发射分系统和接收分系统,以实现信号的接收和发送。	包括天线结构、馈源网络、天线驱动(ADU)、伺服控制单元(ACU)、轴角编码单元(PDU)
发射分系统	接收基带送来的信号,经过信号放大形成射频功率信号,通过天线辐射出去。	包括本振、上变频器、功放等
高频接收分系统	将射频信号进行放大、滤波,实现中频信号的转换等,发送给基带分系统。	包括场放、下变频器、本振等
数字基带分系统	实现各类数据传输和信号处理功能,主要用来接收高频接收分系统送出的中频信号,形成中频信号发给发射分系统。	包括工控机、基带板卡等
监控分系统	具备基带监视、控制、信息交换的记录功能。	包括计算机、监控单元、网络交换机等
时频分系统	实现时间信息和输出频率参考源保持高精度同步。	包括频标终端、B码终端、GPS接收机、铷钟等
测试标校分系统	包含标校设备和测试相关仪器,完成装备的测试和标校。	包括信号源、射频模拟源、联试应答机、校零变频器等

系统大项功能虽然便于实施, 但规模过于庞大, 不利于后续维护和模块化建设。因此, 在保障模块功能完整独立、性能指标明确、接口简单规范的基础上, 结合现有装备建设现状, 通过分析不同装备能力需求获得相应的地面测控装备后, 科学、合理地对现有航天地面测控装备进行模块划分和分类, 将各型装备平台进行划分, 总体划

分为天线、信道、信号处理、综合运管、综合保障五个大类的模块, 展示如图 4 所示。

① 天线类模块主要包括天线结构、天线驱动、馈源网络、天线控制、射电星标校单元、天线罩等。其中, 天线结构、天线驱动、馈源网络、天线控制高度耦合, 共同决定了天线整体射频性能和运动性能, 因此捆绑作为一个独立模块(统称

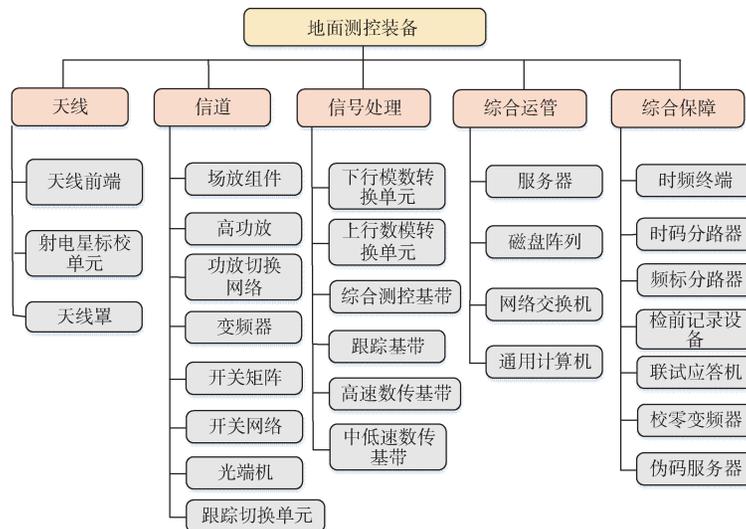


图 4 地面测控装备模块化划分

Fig.4 Modular of ground TT&C equipment

为天线前端)。天线前端主要是继承前期的天伺馈分系统，通过伺服控制完成天线的转动，实现信号的接收和发送。天线类模块主要功能性能与任务要求、轨道星的分布等密切相关，因此根据其功能性能特性划分天线类模块，可以快速实现装备的建设。

② 信道类模块主要包括高功放、功放切换网络、场放组件、上下变频器、开关矩阵、开关网络、光端机等。其中高功放包括了功率放大器、合成网络、隔离器等；功放切换网络包括了波导切换开关、大负载、谐波滤波器、收阻滤波器、隔离器等；场放组件包括了低噪声放大芯片、滤波器、隔离器、耦合器等。信道类模块主要包含发射和接收分系统，主要用于信号的转换，划分此类模块是通过装备性能形成相应的模块化产品，以便于后续装备的调配组装等。

③ 信号处理类模块主要包括各类型基带，通过在基带平台上加载不同的软件实现各类数据传输和信号处理功能，同时在硬件资源设计方面要求留有充足余量，具有扩展其他工作模式的能力。由于任务需求、数据传输要求等方面的因素，地面测控装备基带不同。

④ 综合运管类模块主要以通用计算平台、磁盘阵列、服务器、网络交换机为主，并通过软件实现系统监控、健康管理、自动测试、存储转发、数据交互等功能。

⑤ 综合保障类模块主要包括时频终端、时码分路器、频标分路器等时频设备，检前记录设备，伪码服务器，射频模拟源、校零变频器、联试应答机等标校设备，示波器、信号源、频谱仪等通用测试仪器，机柜、操作台、UPS不间断电源、空调等通用货架产品。

3.2 典型模块分析

针对上述地面测控装备模块化划分方案，以天线类的天线前端、信道类的变频器、信号处理类的综合测控基带、综合保障类的时频终端等模块作为示例，并依托模块化设计过程，深入分析其主要功能、指标体系和物理接口等模块化建设基本要素，最终为模块化建设提供发展思路。

3.2.1 天线前端

天线前端主要用于收发地面与卫星之间电磁波信号，主要由天线结构、天线驱动 (Antenna Drive Unit, ADU)、馈源网络、伺服控制单元(An-

tenna Control Unit, ACU)、轴角编码单元 (Position Display Unit, PDU) 等组成。天线前端输出信号去往低噪放 (Low-Noise Amplifier, LNA) 为测距、测速等提供射频接收通道；来自功放 (High-Power Amplifier, HPA) 的发射信号经过方位旋转关节、俯仰旋转关节等天线结构连接到天线的发射端口，使射频信号按照需要的极化方式辐射至空间目标，如图5所示。

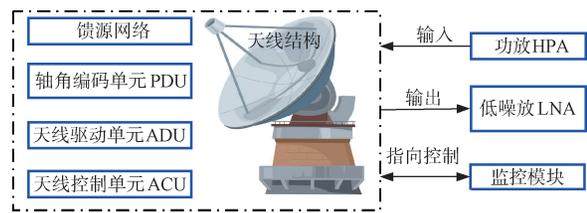


图5 天线前组成功能图

Fig.5 Function diagram of antenna front-end

天线前端的指标体系主要包含微波类、机械类和控制类三种类型，其中微波类指标主要包含工作频段、天线增益、旁瓣电平的噪声温度等；机械类指标主要说明天线运动情况，包含指向精度、运动速度等；控制类指标主要是明确天线控制方式。天线前端的接口类型主要包括低噪放、功放和监控的接口，见表2和表3。

表2 天线前端模块指标体系

Table 2 Key characteristics of antenna front-end module

序号	子类型	典型指标类型
1	微波类	工作频段、天线增益、旁瓣电平噪声温度、差波束零深、收发隔离、极化方式
2	机械类	指向精度、运动范围、最大角速度范围、最大角加速度范围
3	控制类	跟踪方式、指向方式

表3 天线前端模块接口类型

Table 3 Interface types of antenna front-end module

序号	接口名称	输入输出类型	推荐接口类型
1	低噪放	O	N, SMA 型
2	功放	I	N 型
3	监控	I/O	RJ45

3.2.2 变频器

变频器主要用于射频/中频信号的变频、放大、滤波、调制、解调等操作，主要包含电源、变频、监控等单元。变频单元主要由本振、混频器、滤波器等组成，如图6所示。其中，变频通道完成信

号变换、功率监测以及增益调节、放大、滤波和中频信号切换等功能；本振单元产生变频所需要的本振信号；监控单元完成对各单元的功能进行控制和监视，并响应远程控制；AC/DC 电源单元完成对外交流电的转换并给各模块供电。

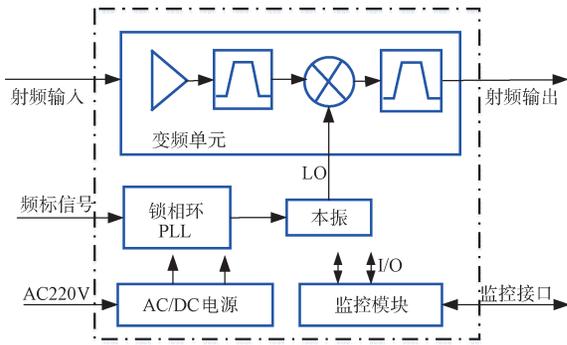


图 6 变频器组成功能图

Fig.6 Function diagram of frequency converter

变频器的指标体系主要包含通带类和阻带类指标，通带类主要包括工作频率、3 dB 带宽、增益调节等，阻带类主要包括谐波、镜像及杂波抑制、相位噪声等。其接口类型主要为 10 MHz 频标信号、射频输入、射频输出、监控接口，具体见表 4 和表 5。

表 4 变频器模块指标体系

Table 4 Key characteristics of frequency converter module

序号	子类型	典型指标类型
1	通带类	工作频率、3 dB 带宽、增益调节、通道数量
2	阻带类	谐波、镜像及杂波抑制、相位噪声

表 5 变频器模块接口类型

Table 5 Interface types of frequency converter module

序号	接口名称	输入输出类型	推荐接口类型
1	频标信号	I	SMA
2	射频输入	I	SMA
3	射频输出	O	SMA
4	监控接口	I/O	RJ45

3.2.3 综合测控基带

综合测控基带主要用于实现标准测控、非相干测控、测控数传一体化、扩跳频测控等测控体制的信号处理。现有综合测控基带一般采用 PCIE (一种高速串行计算机扩展总线标准) 硬件架构和软件无线电思想，具有高度灵活性和扩展能力，主要由工控机、信道板、信号处理板等硬件板卡组成，如图 7 所示，通过加载不同软件模块实现不同

的测控功能，完成相应的信号处理同时，对基带板卡资源进行统一调配，由基带软件实时监控板卡资源使用情况，并向监控上报，由监控按照任务需求进行基带资源的配置和释放。

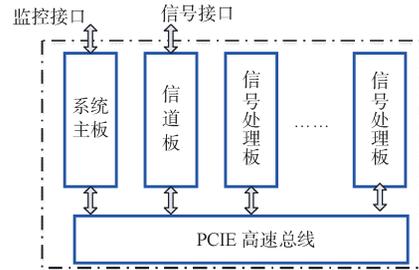


图 7 综合测控基带组成功能图

Fig.7 Function diagram of baseband processor

综合测控基带的指标体系主要包含遥测、遥控和数传类指标。三类指标均包含信息速率、编码格式、码速率、加解密、调制体制、中频频点、接收带宽等指标。主要接口类型包含监控、通用接口等，具体见表 6 和表 7。

表 6 综合测控基带指标体系

Table 6 Key characteristics of baseband processor

序号	子类型	典型指标类型
1	遥测类	信息速率、编码格式、码速率、加解密、调制
2	遥控类	体制、中频频点、接收
3	数传类	带宽等

表 7 综合测控基带接口类型

Table 7 Interface types of baseband processor

序号	接口名称	输入输出类型	推荐接口类型
1	监控	I/O	RJ45
2	频标、B 码	I	N、SMA
3	数字、模拟中频信号	I/O	SMA

3.2.4 时频终端

时频终端主要是通过北斗、GPS 等外部参考对原子钟进行驯服，并对时间信息进行校准，实现时间信息与输出频率参考源保持高精度同步。如图 8 所示，时频终端主要由导航接收机、铷原子钟、频标单元、时码单元、时频信号处理单元及电源模块等组成。其中导航接收机主要接收北斗、GPS 等外部参考信号，时频信号处理单元是时频终端的核心部分，完成时码信号的解译、频率信号的校准和处理，频标单元和时频单元实现频标和时码的输出。

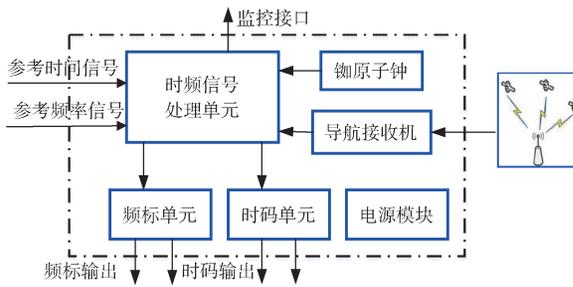


图8 时频终端总体组成功能图

Fig.8 Overall composition and function diagram of time-frequency terminal

时频终端的指标体系主要是包含时间类、频率类和其他类三类指标。时间类主要包括时码格式、授时精度等，频率类主要包含内外频标准准确度、稳定度等指标。接口类型有时间和频率参考输入、频标输出、时码输出和监控等，具体见表8和表9。

表8 时频终端指标体系

Table 8 Key characteristics of time-frequency terminal

序号	子类型	典型指标类型
1	时间类	时码格式、授时精度
2	频率类	频率标准、内频标准准确度、内频标稳定度、内频标相噪、外频标准准确度、外频标稳定度
3	其他类	1PPS秒脉冲信号准确、NTP授时准确度

表9 时频终端接口类型

Table 9 Interface types of time-frequency terminal

序号	接口类型	输入输出类型	推荐接口类型
1	外参考输入	I	N
2	频标输出、时码输出	O	SMA
3	监控	I/O	RJ45

4 地面测控装备模块化发展作用和后续发展建议

4.1 模块化发展作用

经现有装备实践证明，模块化在装备研制、生产和应用的全寿命周期发挥着不可替代的作用，其不但能够提高装备质量，提升装备保障能力，增强装备实用效能，同时能够带来显著的技术、经济、社会和军事效益。因此，在地面测控装备研制过程中，开展模块化建设，对加快产品系列化、适应性、可靠性等方面有明显作用。具体表现在以下几个方面：

① 降低装备生产成本

根据现实需求进行装备模块化配置，促使装备向全新方向发展，可以在确保装备研制、生产的高效性基础上，使装备具有较好的统一性和通用互换性，实现“一机多用”，“一机多能”，从而降低装备生产成本。通过地面测控装备模块化建设，可以大大提高装备生产效率和产量，从而实现降低现有装备生产成本的目的。

② 提高单机发展水平

装备模块化建设是将装备制造过程中的各个部分分解成相应的模块，在成熟技术的平台上局部突破，并在提升可靠性的基础上，以高水平继承为前提，进行有重点地创新，从而有效提高装备整体性能；同时根据不同任务环境需求，建立具有不同环境适应性的装备模块库，以便能更加灵活多变、安全可靠的使用，有利于装备管理及供应。因此，通过对地面测控装备模块化建设，可以提升单机产品的可靠性和创新技术，增加装备的环境可控性，从而大大提高装备实用效能。

③ 提高维修保障能力

目前测控装备因缺乏一套完整的模块化建设标准，导致装备后期维修保障成本高、难度大，效率低，装备缺乏灵活性和环境适应性。因此，开展地面测控装备模块化建设，可以快速适应不同环境场景下需求，在保障装备可靠性的前提下，实现装备快速故障定位和维修，快速形成装备能力，灵活适应不同的场景需求，从而降低地面测控装备的维修保障难度，提高测控装备的维修性和保障性。

4.2 模块化后续发展建议

随着技术的不断发展，目前地面测控装备已经具备了开展模块化建设的条件和基础，但也还存在着一些制约因素和问题。为了完善现有地面测控装备模块化建设，规范和促进装备模块化设计，提高装备的通用性、可靠性和可维护性，对地面测控装备模块化建设发展提出以下三个方面的建议。

① 加强顶层设计，规范模块化建设

当前不同装备研制生产厂家存在各自为战的情况，在地面测控装备模块化建设方面无法做到统一行动。应由总部机关牵头，相关部门及各研制生产厂家参与，根据不同装备的架构特点，及时制定各类地面测控装备模块化建设急需的模块

规范, 通过顶层设计各个模块规范以指导研制单位开展装备模块化建设。

② 形成行业标准, 建立迭代优化机制

在测控系统中, 各个功能模块间需要通过一些模块接口进行连接, 若模块外部接口结构不合理, 存在着不同的标准交叉使用的情况, 以及相互之间缺乏统一的接口, 装备互换性较差, 则将会影响到模块之间的组合。因此, 需要在装备模块化建设中建立相应的行业标准和规范, 主要包括接口、协议、硬件和软件等方面, 使模块之间能够在这个标准下互相融合, 降低研发成本和时间。同时, 根据装备需求发展状态, 需要建立相应的标准迭代优化机制, 使得模块化之间能及时调整并满足装备整体功能要求。

③ 开展软件模块化, 制定开放通用接口

由于测控系统多为“烟囱式”建设方式, 加之测控系统的软件种类多、规模大, 软件之间存在密切信息交换关系, 具有实时性强、可靠性高、周期性等特点。在装备建设过程中, 不同研制部门“各自为研”, 导致测控领域的软件设计和开发缺乏统一标准、执行场景单一、条块分割、重复开发和共用程度低的问题。因此, 通过统一集中监控所有的硬件, 构造面向服务的云平台, 采用以“平台+插件”的运行方式, 实现软件模块在线升级更新, 在完成测控资源管理任务的同时, 使得测控系统的服务功能更具有灵活性; 同时需要统一接口标准规范, 制定具有统一且开放的通用接口标准规范, 实现新增硬件模块随插随用, 来满足用户不断开发的需求等等。最终, 通过加强软件总体技术研究, 开展软件系统的模块化建设, 不断进行软件配置和适应性升级, 可以更好地适应不同场景需求, 满足未来不断变化的航天任务需求, 提升现有地面测控装备建设能力。

5 结束语

本文主要通过分析国内外模块化建设发展现状和我国地面测控装备存在的问题, 结合航天任务需求特点以及地面测控装备能力需求, 依据开放式架构下模块发展的基础要素, 结合现有地面测控装备分系统的功能与组成情况, 提出新一代地面测控装备模块化发展构想, 并以此为研究重点形成了新一代地面测控装备模块方案, 可以满足大批量地面测控装备建设发展需求, 为后续地

面测控装备在快速研制、装备维护、升级改造方面提供有效帮助。同时, 仍需要不断深化顶层研究和地面测控系统设计, 建立相关行业标准和软件标准, 最终可以根据不同航天任务需求, 及时升级完善地面测控装备的功能需求, 从而促进商业航天测控的快速发展, 为未来测控智能化、网络化和工业化发展作出贡献。

参考文献

- [1] 陈惠云, 花兴来, 郑龙, 等. 雷达模块化效益综合评价研究[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(6): 503-509.
CHEN Huiyun, HUA Xinglai, ZHENG Long, et al. Research on comprehensive evaluation of radar modularization benefit[J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(6): 503-509.
- [2] 吴礼科, 张建新, 谢立中. 火箭武器装备模块化总体设计方法研究[J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(1): 33-36.
WU Like, ZHANG Jianxin, XIE Lizhong. Research on modular overall design method of rocket weapon equipment [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2023, 36(1): 33-36.
- [3] 李春田. 现代标准化前沿——“模块化”研究报告(9)[J]. 信息技术与标准化, 2007(12): 49-52.
- [4] JAKOVLJEVIC M. Modular Open System Approach (MOSA) and TTP-based platforms for aerospace control systems[C]//2006 IEEE/AIAA 25th Digital Avionics Systems Conference, IEEE, 2006: 1-6.
- [5] STOUGH J, HAMMOND A, KELLOW C, et al. A holistic approach to open systems architecture for army aviation[C]//Proceedings of the Vertical Flight Society 75th Annual Forum, 2019.
- [6] RENDON R G. Analysis of Modular Open Systems Approach (MOSA) implementation in Navy Acquisition Programs[R]. Monterey California Naval Postgraduate School, 2010.
- [7] DAVENDRALINGAM N, GUARINIELLO C, TAMASKAR S, et al. Modularity research to guide MOSA implementation[J]. The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, 2019, 16: 389-401.
- [8] 翟峰, 朱贵伟. 洛马公司 A2100 卫星平台的设计与应用[J]. 国际太空, 2012(11): 41-43.
- [9] 马文超, 李玉亮, 袁飞马, 等. 模块化弹载测控设备内总线交互技术研究与应用[J]. 遥测遥控, 2024, 45 (1): 74-81.
MA Wenchao, LI Yuliang, YUAN Feima, et al. Research and application of bus interaction technology in modular missile-borne telemetry and control equipment[J]. Journal

- of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45 (1): 74-81.
- [10] 黄璐, 王洋, 金胜, 等. 航天测控雷达标准开放系统架构研究[J]. 航天标准化, 2021(3): 1-5, 16.
- [11] 张威, 吴涛, 马宏, 等. 智能一体化航天测运控网络发展探析[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(2): 82-89.
ZHANG Wei, WU Tao, MA Hong, et al. Discussion on the development of integrated and intelligent space TTC & OC network[J]. Space-Ground Integrated Information Network, 2021, 2(2): 82-89.
- [12] 黄璐, 孙斌, 华煜明, 等. 航天测控雷达标准化信息处理平台架构研究[J]. 航天标准化, 2023(1): 1-4.
- [13] 李正举, 崔颖慧, 蔡亚星, 等. 国外新一代高轨通信卫星平台现状与分析[J]. 航天器工程, 2023, 32(5): 128-136.
LI Zhengju, CUI Yinghui, CAI Yaxing, et al. Development status and analysis of new generation high earth orbit telecommunications satellite platform abroad[J]. Spacecraft Engineering, 2023, 32(5): 128-136.
- [14] 李东, 李平岐, 王珏, 等. "长征五号"系列运载火箭总体方案与关键技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(4): 335-343.
LI Dong, LI Pingqi, WANG Jue, et al. General scheme and key technologies of Long March 5 launch vehicle [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(4): 335-343.
- [15] 李超, 焦义文, 傅诗媛, 等. 软件定义测控系统体系架构与关键技术[J]. 中国空间科学技术, 2023, 43(3): 14-24.
LI Chao, JIAO Yiwen, FU Shiyuan, et al. Software defined TT&C system architecture and key technology[J]. Chinese Space Science and Technology, 2023, 43(3): 14-24.
- [16] 于志坚. 我国航天测控系统的现状与发展[J]. 中国工程科学, 2006(10): 42-46.
YU Zhijian. Status quo and development of China's spaceflight TT&C systems [J]. Engineering Science, 2006(10): 42-46.
- [17] 赖积保, 康旭东, 鲁续坤, 等. 新一代人工智能驱动的陆地观测卫星遥感应用技术综述[J]. 遥感学报, 2022, 26(8): 1530-1546.
LAI Jibao, KANG Xudong, LU Xukun, et al. A review of land observation satellite remote sensing application technology driven by new generation artificial intelligence[J]. Journal of Remote Sensing, 2022, 26(8): 1530-1546. DOI: 10.11834/jrs.20221555
- [18] 曲卫, 贾鑫. 我国航天测控系统体制与技术现状以及发展[J]. 科技信息, 2010(14): 481-482.
- [19] HE Guolong, GAO Xin, ZHANG Rentian, et al. Multi-beam phased array antennas as satellite constellation ground station[M]. Singapore: Springer, 2024: 90-94.
- [20] HE Guolong, GAO Xin, SUN Liangliang, et al. A review of multibeam phased array antennas as LEO satellite constellation ground station[J]. IEEE Access, 2021, 9: 147142-147154.
- [21] 李福龙, 刘安心, 刘红良, 等. 工程装备模块化理论与设计研究[J]. 兵工自动化, 2008, 27(3): 36-38, 45.
LI Fulong, LIU Anxin, LIU Hongliang, et al. Research on the theory and design of engineering equipment modularization[J]. Ordnance Industry Automation, 2008, 27(3): 36-38,45.
- [22] 肖振华, 吕彬, 姚伟召. 基于需求模块化的军民融合式武器装备科研生产体系优化研究[J]. 装备学院学报, 2023, 24(5): 23-29.
XIAO Zhenhua, LYU Bin, YAO Weizhao. Research on the optimization of the civil-military integrated weapon equipment research and production system based on modularity of requirement[J]. Journal of Academy of Equipment, 2023, 24(5): 23-29.
- [23] 彭祺擘, 武新峰, 王北超, 等. 航天器构型重构技术研究进展与展望[J]. 中国空间科学技术, 2023, 43(2): 16-31.
PENG Qibo, WU Xinfeng, WANG Beichao, et al. Research progress and prospect of spacecraft configuration reconfiguration technology[J]. Chinese Space Science and Technology, 2023, 43(2): 16-31.
- [作者简介]
- | | |
|-----|--------------------|
| 韩志会 | 1994年生, 硕士, 助理研究员。 |
| 何国龙 | 1986年生, 博士, 助理研究员。 |
| 刘敏 | 1975年生, 本科, 研究员。 |
| 张任天 | 1987年生, 硕士, 助理研究员。 |
| 杜小鸣 | 1983年生, 硕士, 副研究员。 |
- (本文编辑: 杨秀丽)
(英文编辑: 赵尹默)