

基于快响空间的地面控制系统设计

陈韬亦^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081;

2. 中国电子科技集团公司 航天信息应用技术重点实验室, 石家庄 050081)

摘要: 结合虚拟任务操作中心思想, 提出了构建快响空间地面控制系统的初步设计方案; 其方法是融合快响空间任务控制流程和业务应用流程, 以“快”为核, 以“服务化”云架构为基, 构建面向服务的快响空间地面控制系统; 最后指出, 通过采用虚拟任务操作中心技术, 探索了天基信息快速支援地面技术体制创新; 通过采用云服务架构及天地安全互联技术, 实现用户终端以调用服务的方式远程快速使用资源; 通过重构快响空间地面控制流程, 实现快响力量的统一控制, 协同快速反应; 通过采用微服务+容器架构实现任务规划、调度和控制功能的快速构建。

关键词: 快响空间 (ORS); 控制系统; 任务规划; 服务架构

Design of Ground Control System Bared on ORS

Chen Taoyi^{1,2}

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China;

2. CETC Key Laboratory of Aerospace Information Applications, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Based on the idea of virtual mission operation center (VMOC), this paper puts forward the preliminary design of building ORS ground control system. The proposed method is to integrate ORS process and the business application process. The proposed method takes “fast” as core, takes “servicizing” cloud architecture as basis, and build the service-oriented ORS ground control system. Finally, it is pointed the ground technology system innovation of the rapid support of space-based information by adopting VMOC; The user terminals call remote service to the rapid use the resources by the technology of cloud service architecture and space-earth security interconnection; The unified control and rapid response can be achieved through the reconstruction of ground control process; The rapid construction of the task planning, scheduling and control functions is realized by micro-service and container technology.

Keywords: control system; operationally responsive space (ORS); task planning; service architecture

0 引言

21 世纪是人类全面进入、控制和利用太空的世纪。快速响应空间简称快响空间^[1-9], 涉及到航天器、运载器、发射支持、地面控制及应用系统等, 并在时间快、操作易、成本低、任务专的需求牵引下逐步形成以标准化模块化平台技术、快速集成测试发射技术、自主运行控制技术为代表的技术体系。美国在快速响应空间领域全面开展研究基础上, 重点放在战术卫星生成和设计的流水线化、模块化、标准化; 俄罗斯与欧空局则主要集中在快速响应运载器上以期获得空间快速响应发射的能力; 英国和德国专注于微小卫星及星座计划; 日本航天器大量采用 IT 技术, 用人工智能完成火箭射前测试检查, 用模块化结构设计、即插即用技术实现卫星功能定制。

地面控制及应用系统是快响空间体系的重要组成部分,

作为快响空间任务实施的中心枢纽, 该系统为各级各类太空操作人员提供控制手段, 对任务进行需求分析部署, 提供任务规划和调度服务, 为快响空间应急场景提供环境模拟和态势综合, 对空间资源进行配置。当前针对快响空间任务正在研制、演示和验证的控制与应用系统主要包括美国的虚拟任务操作中心 (virtual mission operation center, VMOC)、战术航天器指挥服务体系 (tactical spacecraft commanding service architecture, TSCSA)^[1]等。VMOC 提供了一个快响空间战术应用的虚拟任务操作中心, 其主要思想是通过将应用用户直接纳入在轨航天器有效载荷的框架内, 使用户通过安全互联网络获取卫星数据, 动态地给卫星有效载荷分派任务, 实施在轨卫星设备的遥测、跟踪和控制, 以达到卫星直接支持应用的目的。TSCSA 是以操作人员为中心, 符合 WEB 服务规范的, 用于战术空间资源访问接入、任务分派和接收信息的一种全新方式。

1 能力需求

当前快响空间系统主要立足于快速满足各类信息支援需要, 支持快速组织和补充精干高效的太空资源, 力求满足国家重大突发事件、反恐维稳、灾害救援等空间信息综合保障需求。这些需求可分为四个等级: 等级一为在轨卫

收稿日期: 2020-04-09; 修回日期: 2020-05-29。

基金项目: 装发“十三五”装备预研领域基金 (JZX7Y20190258057301); 中国电子科技集团公司航天信息应用技术重点实验室开放基金 (XX17629X009)。

作者简介: 陈韬亦 (1984-), 男, 河南许昌人, 博士, 高级工程师, 主要从事航天地面系统方向的研究。

星载荷分配；等级二为在轨卫星机动变轨；等级三为在储快速发射入轨；等级四为在研快速生产运输发射。从任务角度可将等级四合并到等级三，三个等级的需求对地面系统提出了关键能力要求，主要有以下几个方面：在轨卫星快速信息支援，包括快速需求统筹分析分配、快速任务控制、快速业务测控，快速获得信息并下传，以及信息快速处理与分发等五项活动；在轨卫星快速机动变轨，包括快速变轨组网分析、快速上传轨道机动指令（快速变轨测控）以及快速轨道机动等三项活动；航天器快速发射入轨补网，包括快速发射任务规划，载荷、平台和运载器长期存储，载荷与平台灵活配置，载荷、平台与运载器快速集成测试，快速发射和工程测控、快速自主在轨检测，以及地面系统快速构建（地面系统基于新发射卫星特点快速构建）等七项活动。

通过对上述快响活动进行分析，快响控制的能力需求主要包括：1) 需求受理分析、资源分配和批准。辅助操作人员根据空间信息进行需求分析，确定需求等级，合理分配资源和批准需求；2) 任务规划、方案制定与推演。对空间快速信息支援、卫星变轨和快速发射任务进行规划、拟制和推演；3) 调度与控制、过程监控。对快响力量的调度，监控快响任务的控制过程、星地资源使用过程等；4) 态势显示与信息分发。为完成快响活动而进行空间态势、地面任务系统的态势综合处理、显示和分发；5) 快响任务执行效果评估。对需求满足度、资源使用效率以及快响任务各项活动情况进行评估等。

2 初步设计

2.1 思路和方法

快响控制系统设计的基本思路是融合快响空间任务控制流程和现有业务应用流程，以“快”为核，以“服务化”云架构为基，构建面向服务的快响空间地面控制系统。其基本方法是基于云服务架构，从快响任务剖面构建现有地面业务或任务中心的信息服务系统；然后研究 VMOC 及天地安全互联技术^[10]，构建基于多层次多类型的半自动化、全自动化快响任务规划、调度和控制核心应用及服务；支撑实现控制系统的快响空间态势综合、任务筹划、任务控制和综合保障功能，达到提高快响空间能力的目的。

2.2 体系视图

体系视图描述控制系统外部环境及其基本结构，如图 1 所示。以控制中心为核心，以栅格网络连结基础，形成“外围—后台—前台”控制系统三层结构。外围主要包含快响火箭等航天器、卫星等传感器、站网等地面资源及其他系统；后台主要包含与各卫星控制中心、应用处理中心、地面站网中心等业务中心和发射、测控等任务中心相关的信息服务系统，以及控制系统所属资源管理系统等。前台主要包含控制中心和用户终端。信息服务系统主要通过通过对各类业务中心、任务中心的功能进行抽取并服务化封装，资源管理系统提供控制功能和信息服务的云基础平台及云资源管理和维护。前台、后台、外围是调用与被调用、控

制与被控制的关系。图 1 所示的大外围、强后台、精前台表示控制系统体系发展的方向。

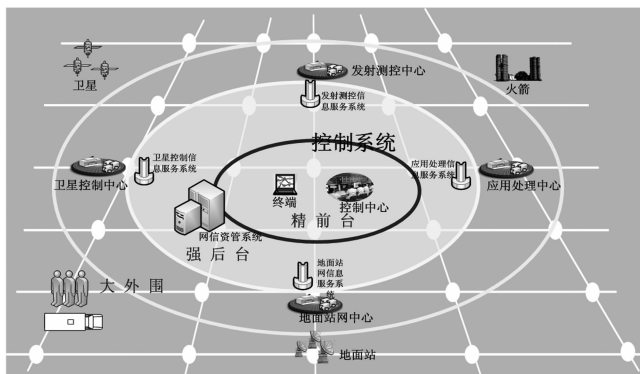


图 1 快响空间地面控制系统体系视图

2.3 功能视图

基于对快响空间地面控制系统能力需求与使用模式的分析，设计快响空间地面控制系统的功能体系架构，主要包括态势综合、任务决策、任务控制、综合保障四大功能。态势综合功能主要包括多源信息接入、信息处理、态势综合、态势分发共享、态势显示等功能。任务决策功能主要包括快响任务分析、天基信息需求受理分析、卫星变轨与组网分析、快响发射规划分析、计划方案生成和评估推演、人员管理和筹划产品管理。任务控制功能主要包括行动控制、任务/设备调度控制、综合监视、关键事件告警、临机情况处置、任务效果评估等功能。综合保障功能主要包括通信保障、设备保障、后勤保障等。系统功能视图如图 2 所示。

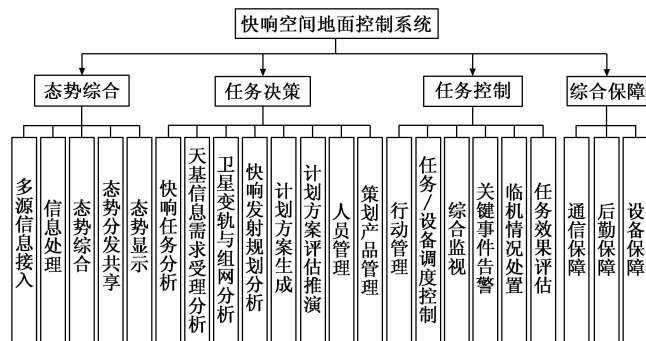


图 2 快响空间地面控制系统功能视图

2.4 运行视图

基于对快响控制流程与信息交互关系的分析，设计快响空间地面控制系统运行流程。控制中心位于运行核心，可包含多个分中心；卫星控制中心管理各类太空快响资源；地面站网中心支持太空快响资源的测控和数传执行；应用处理中心提供数据产品，包括图像数据、信号数据、情报处理、数据融合、民用数据等。用户终端系统包括固定、船载、机载、车载、个人便携式等终端，必要时还配属机动保障车（含测控、数传和应用处理）。快响发射和测控系统用于卫星快速发射和应急组网补网。其运行视图如图 3

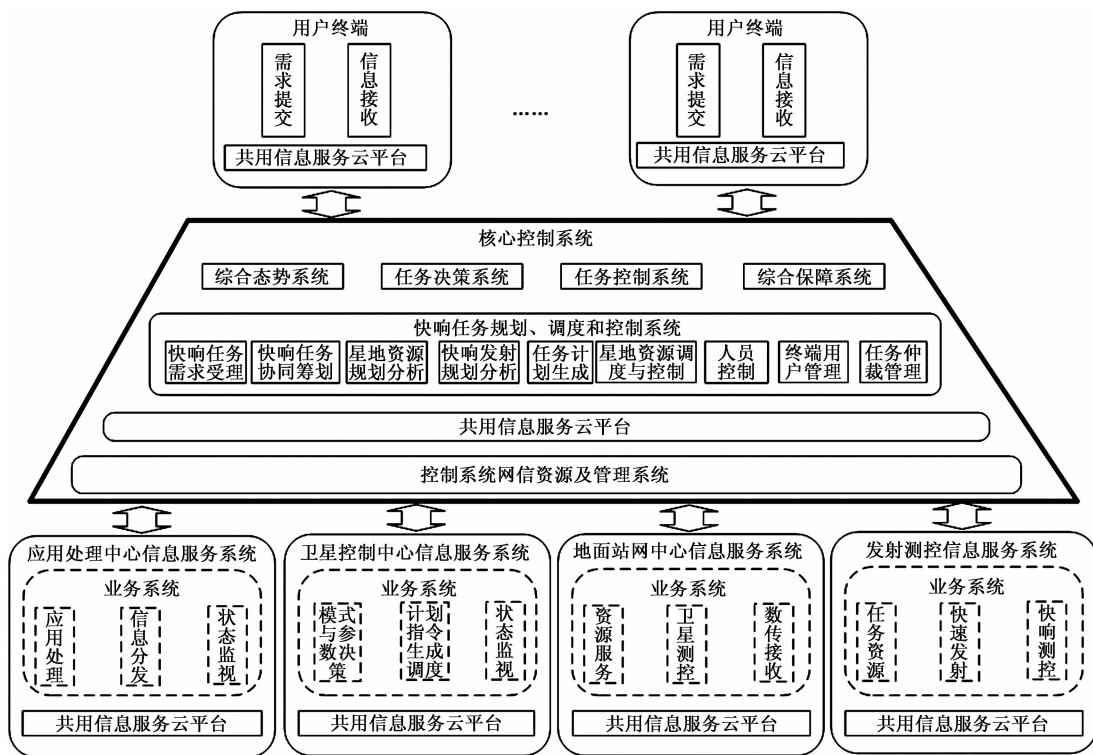


图 4 快响空间地面控制系统系统视图

星地资源规划分析子系统：负责对各类卫星资源、接收资源、测控资源、快响发射资源等天地快响资源的分析和规划，生成快响任务方案；

快响发射规划分析子系统：根据快响任务方案或快响发射任务进行任务规划，生成快响发射测控方案；

任务计划生成子系统：根据快响任务方案或/和发射测控方案，生成卫星工程测控计划、卫星业务测控计划、有效载荷控制计划、地面站接收和传输计划，以及发射/测控计划、保障计划、应急处置计划等；

人员控制子系统：下达任务指令，进行任务/装备调度控制、综合监视、关键事件告警、临机情况处置、任务效果评估；

星地资源调度与控制子系统：依据任务计划生成和调度分发指令，并上注卫星。调度和分发依据（元）任务优先级、时间序列和其它规则进行；

终端用户管理子系统：审核终端用户的注册请求和配置使用权限、增强用户跟踪和接收来自多个卫星资源数据的能力；

任务仲裁管理子系统：将操作人员的请求、空间协调部门的请求，以及所有支持指令的请求进行优先级排序，并根据空间资源的可用性进行分配，对于冲突的需求按照任务执行规则自动裁决取舍。

任务规划、调度和控制系统作为整个快响空间控制系统重要组成部分，提供了一个虚拟的快响空间任务中心，弥补了传统航天控制系统在支持高时效性应用方面存在的

不足以及任务准确性的需求。传统航天任务控制系统通过获取用户的需求，进行复杂的任务规划和任务优化，然后控制航天器及地面资源完成对用户需求的响应，航天任务的管理控制过程及星地资源的使用对操作人员不透明，操作人员无法直接获取当前航天器载荷及地面资源状态，不能直接准确地体现操作人员的应用目的。

任务规划、调度和控制系统在现有业务系统的基础上，通过对功能的抽象构建服务，提供一种向终端用户满足高时效性应用的任务服务，将原有卫星地面系统的操作控制前移，由操作人员使用 IP 的方式获取有效载荷状态，结合需求动态地给有效载荷及地面资源分派任务，实施在轨卫星设备的控制，直接获取卫星有效载荷数据。

任务规划、调度和控制系统提供下述能力和特性：

- 1) 用户通过系统提供的服务或应用直接实现与在轨航天器和地面接收处理等资源的互通；
- 2) 任何经过授权和认证的用户可以直接通过安全网络从系统获取卫星应用服务；
- 3) 能够极大地提高卫星的使用效率和操作人员指令的执行效率；
- 4) 使操作人员和数据用户可以远离地面站，卫星地面站接入安全互联网之后，任务规划、调度和控制系统就成了能够协调用户和卫星及地面资源之间联系的控制单元；
- 5) 能够对每个用户进行核实与授权；
- 6) 建立平台间安全的对话机制；
- 7) 对用户、任务和指令等的优先级竞争进行仲裁与

控制；

- 8) 进行任务规划，并执行合理性指令测试；
- 9) 在无人干预的情况下，将数据直接转发给远程用户；
- 10) 为可信任的传感器数据远程用户提供访问用的加密网关。

2.6 技术架构视图

快响空间地面控制系统初步构建资源层、服务层和应用层三层开放式服务化的技术架构。如图 5 所示。

资源层提供通信网络、计算存储、时空基准、安全保密、综合管理、数据资源，以及传感探测等资源要素，为系统提供安全可靠的信息传输、处理、存储、应用等提供基础支撑。

服务层对资源层进行虚拟化管理，形成以网络为中心的服务运行管理调度平台；提供资源管理、资源服务、系统集成服务、共性服务；聚合快响空间任务规划、调度和控制核心应用，实现态势综合、任务决策、任务控制、综合保障等基本功能。

应用层是基于资源层和服务层支撑，在各种应用场景下，通过对应用功能的灵活编排组合构建的应用系统，包括快响任务中心控制系统、天基信息支援控制系统、快响测控控制系统、应急发射控制系统和应用端系统等。

快响空间地面控制系统采用云平台技术架构，依托资源管理系统，构建地面“控制云”，支持组网共享、按需服务的“云+端”模式。卫星控制中心、地面站网中心、应用处理中心、发射测控中心等进行功能服务化封装、云化构

建，纳入“控制云”体系。资源管理系统提供各级各类控制系统服务化、云化物质载体和系统构建工具，支持地面、地下、机动多种模式的快速转换和体系容灾抗毁，支持应用软件在线版本升级和新研软件的即插即用。

3 关键技术

3.1 星地任务协同规划技术

1) 快响空间多星协同任务规划技术：

快响空间多星任务规划涉及多部门、多卫星、多载荷的统筹分析、协同规划与快速调整。通过分析天基地面资源的能力约束、快响任务需求特点以及多任务间的关联关系，对各类天基资源以及地面控制、接收、测控、处理资源进行协同规划，合理分配天地基资源，达到半自动化、自动化卫星控制、测控、接收、记录、传输活动的任务调度和最大化任务完成率的目的。

采用层次任务网络 (hierarchical task network, HTN) 与专家决策技术进行快响空间任务可行性分析、任务分解与资源需求分配方案。采用多 Agent 系统 (multi-agent system, MAS) 进行多部门分布式协作与资源协同规划，将复杂任务分解为各资源可独立完成的子任务，确定和分配快响空间任务需要的卫星资源、载荷资源、管理资源、测控资源、接收资源、应用处理资源等。

根据不同快响任务需求特征，分析各类任务规划算法的适用性，分析不同资源分配策略，建立多策略资源分配模式；根据天基地面资源的能力约束特点，建立天基地面资源能力体系，设计并实现多星协同任务规划算法。借鉴

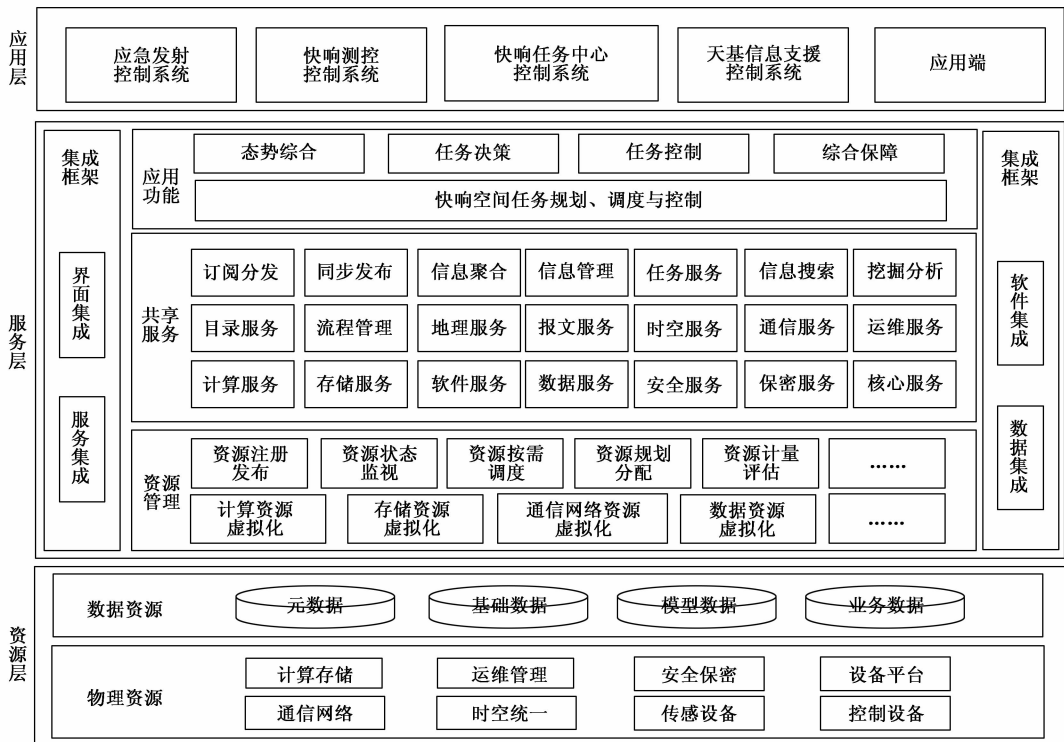


图 5 快响控制系统技术架构视图

多智能体 (Multi-Agent) 协作技术中的合同网招标投标机制, 基于多 Agent 系统进行分布式多星协同任务规划快速调整, 多星之间通过合同网协商机制进行快响任务与资源协调^[11]。

2) 快速发射任务规划技术:

快速发射任务规划根据补网/组网需求进行应急发射的活动。发射规划要求从全局统筹考虑所有星地资源情况, 依据快响任务及组网需求分析任务卫星、发射运载、时间窗口、发射方式、发射流程安排、设施安排、行动路线、协同计划、保障计划、应急处置计划和风险控制要求, 确定快响火箭、组网/补网卫星、发射窗口、轨道根数、发射阵地等要素^[12]。

根据快响任务需求特点, 研究不同卫星快响发射任务协同优化模型, 设计求解模型的多目标进化算法, 研究并行规划模型及算法, 模拟不同方案的每次发射任务、每道工序的工作过程, 结合算法寻找任务规划的最优方案, 研究仿真推演技术确定方案合理性与有效性。

3.2 高效调度与实时控制技术

快响空间任务在高时效性任务调度与控制过程中, 要求系统尽可能采用“发现即跟踪”的运行模式。系统常常被要求在尽可能短的时间内完成载荷实时控制指令生成及上注, 地面控制系统应具备高时效、高可靠、高自动化特点。

常规观测任务对卫星资源、载荷约束、数据接收资源, 观测目标 (区域) 选择确定具有可预见性, 任务安排具有周期性, 方案制定具有很强的计划性和稳定性。快响空间观测任务往往具有应急特点, 对目标实施紧急观测。面向高时效性的快响任务保障需求, 为减少星上指令调整频次, 采用滚动式动态任务管理模式, 实现常规流程可由测控周期自动触发调度, 快响流程可由快响任务自动触发调度。

高效调度与实时控制技术主要解决星地一体合理高效自动化调度, 以及地面对载荷的实时控制。基于快响空间任务特点, 通过对控制流程进行分析, 梳理重要环节及其相互关联, 采用预置自动化判断规则, 规则库中定义了星地一体控制的各种约束条件及调度流程的相关配置信息。对于固化规则和配置, 可定义为模板, 如指令模板, 在进行指令编制时, 可依据指令模板快速生成指令序列。针对控制流程可能随业务变化的情况, 引入 workflow 机制, 将流程配置作为规则库的一部分。

针对准确性和时效性的要求, 采用智能化虚拟控制、测控技术, 针对服务化封装, 云化迁移, 建立面向用户的虚拟任务中心, 用户通过地面终端及安全互联技术直接操控和使用星上资源, 业务人员通过后台管理和配置星地资源。

3.3 资源优化分配技术

对快响空间资源统筹分配, 就是根据卫星资源、数传资源、测控资源的使用特点, 按照一定的分配策略, 对资源进行合理的高效分配。其问题可描述为: 对多类型任务集合, 依据多颗观测卫星、可用数传资源、测控资源各自的能力及约束条件, 以协作方式将任务集中的任务根据类型优化分配至观测卫星时间窗口、数传窗口、测控站测

控窗口等资源, 为观测、数传、测控规划提供输入。在协同分配过程中, 任务分配以卫星资源的能力为依据, 保证分配给每个观测平台的任务能够完成; 而数传窗口的分配主要面向卫星, 分配时以各个卫星的任务负载以及卫星与地面站的可见性为依据; 测控资源的分配主要以满足卫星观测任务的测控需求, 保证资源约束、时间约束、状态约束、关系约束前提下完成测控资源的分配。

研究采用分布式异步协同机制确定观测资源分配模式; 研究采用测控任务综合优先度概念, 启发式算法解决多星测控资源复杂组合优化分配问题; 研究地面接收站网资源分配技术和中继卫星系统资源分配技术解决多星数传资源分配问题。

3.4 空/地接口标准化技术研究

针对快速响应作业, 实现多星多站无缝互联, 设计基于国际空间数据系统咨询委员会 (consultative committee for space data systems, CCSDS) 标准的快响空间地面控制系统空/地协议体系, 兼容现行卫星接口规范, 遵循我国国家军用标准 GJB1198.1-91《卫星测控和数据管理》标准。其协议体系中包含应用层、传输层、网络层、数据链路层和物理层, 协议体系架构如图 6 所示。

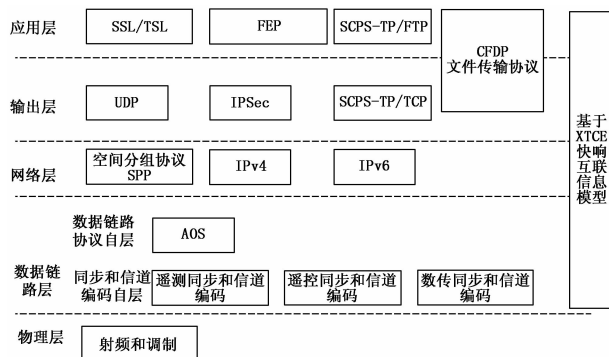


图 6 基于 CCSDS 框架的快响控制系统空/地协议体系架构

针对快响空间控制系统, 为了提高信息在多星多站间异构网络中灵活传输, 高效交互卫星各类数据, 首先要对信息传输进行层次化设计与规范, 遵循协议框架标准, 基于可扩展标记语言的遥测遥控信息交换 (XML telemetric and command exchange, XTCE) 的快响互联信息模型是贯穿从数据链路层到应用层的分层规范描述, 研究 XTCE 标准, 将其作为地面遥控、遥测、和数传接口规范, 并兼容现有传统遥测遥控格式, 作为高级在轨系统 (advanced orbiting systems, AOS) 协议补充; 同时研究处于网络层空间通信协议的空间分组协议 SPP, 根据特定路由策略与算法生成的路由信息, 形成传输数据包; 研究空间通信协议规范—传输协议 (space communication protocol standard—transmission protocol, SCPS—TP) 和 CCSDS 文件传输协议 (CCSDS file delivery protocol, CFDP), 以向空间通信用户提供端到端传输服务; 在应用层提供面向应用与信息交换的快速响应信息预处理服务。