

doi: 10.7690/bgzd.2022.12.009

水面无人艇系统架构设计与构建

韩 玮¹, 冯伟强², 骆福宇¹

(1. 中国船舶集团有限公司系统工程研究院, 北京 100094; 2. 中国人民解放军 92942 部队, 北京 100000)

摘要: 针对新技术新能力快速形成的装备发展趋势, 分析水面无人艇系统的组成和架构设计需求。明确面向无人艇系统设计的原则和目标, 提出水面无人艇架构设计的技术路线、构建步骤、分层功能域架构设计和通用接口设计参考规范。实艇测试证明了整体架构设计的有效性。结果表明, 该系统架构设计可有效缩短无人艇新任务能力的开发和部署时间。

关键词: 无人艇; 系统架构; 无人海上自主架构

中图分类号: TJ83 **文献标志码:** A

Design and Construction of Unmanned Surface Vehicle System Architecture

Han Wei¹, Feng Weiqiang², Luo Fuyu¹

(1. Systems Engineering Research Institute, China Shipbuilding Cooperation Limited, Beijing 100094, China;

2. No. 92942 Unit of PLA, Beijing 100000, China)

Abstract: According to the equipment development trend of the rapid formation of new technologies and new capabilities, the composition and architecture design requirements of unmanned surface vehicle (USV) system are analyzed. The principles and objectives of USV system design are clarified, and the technical route, construction steps, hierarchical functional domain architecture design and common interface design reference specifications of USV architecture design are proposed. The effectiveness of the overall architecture design is proved by the real boat test. The results show that the system architecture design can effectively shorten the development and deployment time of the new mission capability of the USV.

Keywords: unmanned surface vehicle; system architecture design; unmanned maritime autonomy architecture (UMAA)

0 引言

水面无人艇作为海上无人装备体系重要节点装备, 是典型的软件定义型、智能密集型和数据驱动型装备, 是装备无人化、智能化及网络化发展趋势下, 各种相关技术集成赋能的结果。随着装备数字化和智能网联等技术的发展和联合推动, 水面无人艇迫切需要从顶层构建不依赖于某种特定技术实现的通用化、模块化、易集成、可扩展的开放性软件系统架构。无人装备软件的高效复用扩展和软硬件解耦带来的硬件使用周期的延长, 可解决高技术应用带来的“高成本”研发与无人装备集群使用“低损耗”需求的矛盾。

无人艇软件系统架构设计需适应高新技术的快速发展和任务要求的快速变化, 成为实现水面无人艇自身能力快速迭代的研发基础。水面无人艇是高度集成的复合型装备, 其模块化集成要求高、互操作要求高、同构性通用化要求高。无人艇装备需要执行多种任务, 无人艇集群是其主要运用形式。无

人艇装备软件系统应有效应对复杂性和便捷性问题, 实现快速迭代; 因此, 无人艇软件系统架构设计应着重在设计层面考虑系统组成、逻辑、过程、部署和实现; 在研发层面考虑工程实践中复用、构建化、标准化、跨平台等顶层设计抽象。

笔者通过分析水面无人艇系统的组成和架构设计需求, 明确面向无人艇系统设计可靠性、开放性、安全性及高性能的设计原则和系统(集群)的统一数据服务、统一通信服务、统一接入服务及统一计算服务的设计目标; 设计以服务网格为基础, 以任务实施组织最优为目标的水面无人艇系统分层功能域共性技术基础架构, 以及包括虚拟设备抽象描述、应用和服务抽象描述的通用服务接口规范。

2 相关工作

张平^[1]研究了水面舰艇模块划分方法。杨学斌^[2]在分析近海防卫无人艇功能需求的基础上, 提出一种无人艇系统物理架构和逻辑架构设计, 设计层次化无人艇航行控制系统结构。谢慧等^[3]在分析

收稿日期: 2022-08-23; 修回日期: 2022-09-25

作者简介: 韩 玮(1980—), 男, 河北人, 硕士, 研究员, 从事水面无人系统总体、水面无人艇(群)控制技术的研究。

E-mail: Hanwei_seri@163.com。

水面无人艇系统功能需求的基础上,提出基于物联网技术的水面无人艇系统五级技术体系架构模型。架构模型包括满足环境感知需求的感知层、满足通信需求的网络层、满足数据分析需求的数据层、满足视频功能需求的应用层、满足智能控制需求的用户层。上述工作集中在水面无人艇系统的组成结构、系统物理和逻辑架构、控制系统结构,而对软件系统架构设计和实现方式分析较少,且缺少参考实现或正式的软件定义来验证架构设计的可用性。Wang 等^[4]提出一种基于云的水面无人艇任务控制架构,以实现水面无人艇舰队之间灵活的远程访问和协调的任务控制。该架构利用云和艇上板载系统实现水面无人艇集群的监控、远程控制、数据采集和任务共享功能。该架构重点关注利用云服务协调多无人艇任务控制,单艇系统架构设计较简略。

无人海上自主架构(unmanned maritime autonomy architecture, UMAA)旨在促进研发基于标准接口不依赖于特定自主系统实现的通用、模块化和可扩展的海上无人航行器(unmanned maritime vehicle)软件^[5]。UMAA 定义了一种海上无人系统架构框架、关键功能服务接口、数据模型和管理规范。UMAA 定义了海上无人系统的 8 项核心功能,包括任务管理、工程操作、机动操作、处理操作、传感器和执行器管理、通信操作、支持操作和态势感知。UMAA 为上述核心功能服务定义了标准接口,以便开发人员基于标准接口开发相应功能程序,且满足标准接口规范的程序可共享软件库。UMAA 定义的架构重在核心服务定义、接口定义和参考实现。

3 系统组成和架构设计需求

3.1 水面无人艇系统组成

水面无人艇主要担负对基地、港口、岛礁等要地周边海域及母船、舰艇编队外围海域的持续性、常态化警戒巡逻任务,并可与其他无人艇协同执行任务;担负反水雷、反蛙人、确潜、情报侦察、海战场环境调查、信息对抗、通信中继、物资运输及海上搜救等其他任务。通过对无人艇执行任务的能力需求,装备基本形态和载荷组合配置等方面的深入分析,提取系统整体的“共性”和“个性”配置,装备形态设计可采用自主航行的“通用平台”与面向特定任务作业能力的“任务载荷”相结合的基本模式,以构建系统总体的多任务能力并提升装备综合效益。

采用多任务模型下“公用+专用”模块化集成

设计方法,通过场景-事件-过程-功能-模型的设计步骤,形成“通用平台+任务模块”形式的典型水面无人艇装备设备组成,如图 1 所示。

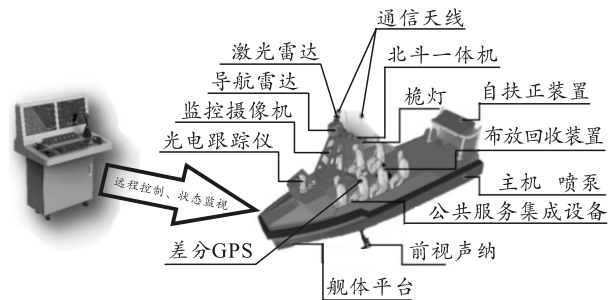


图 1 典型水面无人艇设备组成

在水面无人艇设备组成中,对通用平台和任务载荷进行如下划分:

1) 通用平台主要包含艇平台、航行任务自主控制设备及通用载荷(主要包括:北斗、惯导等导航定位设备;导航雷达、光学探测等环境感知设备;通信设备及远程指挥控制设备)。

2) 任务载荷主要包含执行任务所必需的特定载荷,主要包含声纳等水下目标探测设备、导弹及轻武器站等火力打击设备等。

3.2 系统设计需求

仅从设备组成进行基本划分不足以完成真正的无人艇整体系统设计,不足以支撑解决无人艇架构发展所要面临的主要问题——构建共同的技术基础。以下从不同角度进一步探讨系统架构设计需求。

在水面无人艇操控方面,需具备与一对多或多对多平台端的便捷链接能力,有效支持任务执行过程中的人机协作和敏捷规划,向控制者及时呈现其关注的信息,根据具体特定需求、特定事件、特定时间、特定方式向控制者推送特定的信息以便于指挥决策。系统架构设计应通过软硬件模块化、服务化,解决互操作困难、资源无法共享等问题,达到与现有有人装备的有机融合。

在装备部署和接入方面,需提供算法和软件组件的服务化封装,支持面向关键设备和核心算法的统一服务接口,支持设备虚拟化和设备数据资源化;系统应易于在现有基础设施进行部署,少依赖控制端硬件和基础软件的跨平台部署能力,便于为业务应用提供支撑服务(包括设备控制和数据使用能力,算法统一调度和流程无关能力);支持自定义接口扩展,实现无人艇高度集成与灵活架构的统一。

在资源运用和管理方面,需提供能力导向的数据统一管理,以及所有计算和存储资源的统一调度

管理,支持跨平台的资源载荷设备互操作保护,管理分布共享环境下的数据访问权限,提供权限管理下的跨平台资源调度和互操作能力,实现统一态势生成所需的分布式统一处理机制,以及跨平台数据资源统一管理 with 访问。

在系统逻辑设计层面,需通过载荷设备资源服务化使载荷与软件算法在系统架构层面同构。基于接口标准化,使服务和应用便于网络化调用。从任务实现设计的角度,可将任务过程理解为通过业务流程应用对服务的调用和协调过程,从而在通用软件服务的基础上专注业务流程的设计和实现。

在扩展性和发展层面,系统设计需聚焦任务领域,专注任务驱动,支持通过服务流程组合形成各具特色的任务应用;需聚焦场景理解和决策的发展,通过复用和调用机制的构建,提供以少量的投入发展新型的任务能力,实现更少的投入和更快的新集成能力的生成。系统应更好地采用物联网松散耦合的互操作性来实现服务共享和数据共享;更好地使用、整合和利用数据及载荷,提升载荷与船艇平台的协同能力和复杂动作执行能力,形成良好的智能算法的接入生态,促进决策应用的有效更新,随外部变化更容易地调整和部署。

3.3 设计需求分析与扩展

单艇架构设计要考虑整个组成体系设计的便利性、装备运用体系整体环境对单个平台的要求、互联性和开放性,从控制、功能、数据等不同纬度考虑整个体系集成的便利性,统一的架构设计更便于集成和发展更多更复杂的体系环境。

载荷域、应用域及数据域的统一设计直接决定了生态发展的开放性、资源使用的便利性和新能力形成的快速性。统一的架构设计目前最值得关注的是接入服务的一致性和接口设计的标准化,以及应用基础能力实现中充分考虑载荷设备虚拟化和服务抽象,充分考虑数据的有效性和及时性,确保系统数据可用性。

软件架构需从“信号导向”转变为“服务导向”,从“唯控制导向”转变为“自主能力导向”;从根本上将与单一功能实现高度耦合的“传感器-处理器-执行器”固有循环在系统设计中充分解耦;在程控模式的基础上充分考虑未来智能化应用的空间,从纯粹的控制问题变成可能性空间的探索决策问题。面向服务的架构设计和实现会使系统具备更强的多种功能重组能力和调用便利性。

电子电气架构需从“上位机集中架构下的分散控制模式”转变为“高性能分布计算架构下的协同控制模式”。软硬件的完全解耦,共性技术基础的提炼和沉淀,将使专用软件彻底独立,生态基础更具活力。共性基础+专用软件+高性能计算的模式将带来更好的规模化效应,使系统承载更多数量、类型的功能服务成为可能。

4 架构设计的基本原则和目标

4.1 水面无人艇架构设计的基本原则

1) 可靠性:无人装备的基本运用模式决定了装备对高可靠的无尽追求。架构设计要充分考虑架构通用服务的可靠性,对关键服务软件充分冗余设计的支持性;要以任务完成为目标,支持关键计算和关键环节的多线处理。

2) 安全性:无人化可能导致装备由于没有人对网络威胁和网络攻击进行预计、评估和解决。架构设计要在平台端对新的形势采用特定的网络安全管理、数据远程销毁软件;采取针对装备软件、通信、多级安全和防篡改功能的网络安全措施。同时,在载荷域和数据域应接入和使用更多的多源定位、多手段通信能力,为实现拒止条件下的有效定位导航提供必要的支撑。

3) 开放性:架构设计应充分考虑软硬件的解耦、任务应用和共性服务的解耦,以实现特定共性功能组成的基础支撑环境,构建核心功能集成的服务层;还应定义开放标准接口,解决应用和算法软件与载荷设备的强相关性,支持算法软件服务的竞争;应提供以网络为中心的服务互操作能力,能够将服务网格中的服务提供给外部应用方或上级系统;应充分考虑平台与集群的技术体制贯通,最大限度地在集群应用中复用已有服务,提供模块化标准化接口形式,满足跨平台应用调用。

4) 高性能:架构设计应充分考虑智能应用对计算资源的需求,面向软件设计电子电气架构,充分考虑能力的持续更新需求。硬件架构设计应考虑发展的一致性和前瞻性,减少基础硬件的颠覆性变更,尽量延长硬件架构的使用周期,降低高性能计算和新兴技术对硬件更新的适应性影响,解决高性能硬件需求与成本的矛盾。

4.2 水面无人艇架构设计目标

架构设计聚焦于统一通信服务、统一接入服务、统一数据服务和统一计算服务,满足水面无人

艇架构设计高可靠、高安全、高性能和可扩展的设计原则。

统一通信服务:构建系统整体的软件总线体制,兼容异构数据源和异构数据的统一传输要求,充分利用发布/订阅、请求/应答或命令/响应等多种机制,适当考虑和扩展数据库共享机制,形成独立的系统信息传输服务。

统一接入服务:统一设备接入方式,提供一致的可扩展设备接入接口,提供设备控制和数据服务化能力,能够在服务网络里提供服务映射和调用;

统一数据服务:面向任务,建立统一的结构化和非结构化数据存储、关联、预处理、访问服务,明确数据接口规范,设定松散耦合的、独立于传输协议的数据服务,保证服务间共享信息的有效性、完整性、一致性和及时性,面向任务应用确保系统数据可用。

统一计算服务:在分布式计算架构的基础上整合共性基础服务,将提供更加便利和高效的计算调度能力;统一的服务调用标准接口和整体架构上的服务一致性,使业务处理流程的优化成为可能,从而能够简化应用部署和管理,增加关键软件的冗余性备份,提升系统整体可靠性。

5 架构设计构建与参考实现

5.1 技术路线

5.1.1 构建以服务网格为基础的应用和服务通信基础服务

采用轻量级网络代理为应用和服务提供无感的调用、限流、熔断和监控;解耦应用和服务连接的重试/超时、监控、追踪和服务发现机制;请求逻辑与服务共同构建基础通信架构,便于识别和诊断问题;应用和服务更容易抵御停机影响,可从发生故障的服务中重启路由请求。图 2 是服务网格网络结构,其中白色方块为应用或服务,灰色方块为服务代理。应用和服务之间通过服务代理通信。

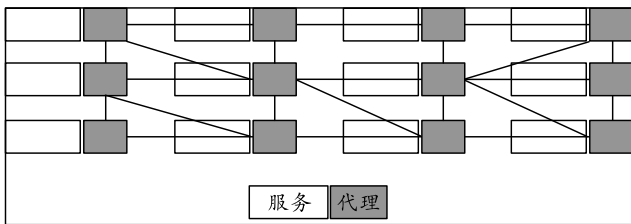


图 2 服务网格网络结构

5.1.2 构建面向业务的微服务架构

提供与服务访问路径无关的一致业务行为(与

业务流程无关),接口独立于实现服务的硬件平台、操作系统和编程语言;为业务功能提供一致的业务数据访问方式;业务功能内聚的独立服务可灵活组合及复用,提供高可用、良好伸缩性服务调用机制;业务功能垂直划分,降低互相依赖,松散耦合的服务可协同工作;服务统一监控,易于维护管理,支持对单个服务的独立更新。

图 3 展示了系统组件逻辑关系。应用、服务和载荷等通过分布式信息总线进行信息和能力交互。设备虚拟化服务提供虚拟设备发现接口、虚拟设备功能的接口、底层设备注册接口;设备接入代理或者真实设备提供底层设备的功能接口。应用程序或服务通过调用虚拟设备发现接口来发现设备,通过调用虚拟设备功能接口来使用设备。设备虚拟化服务通过调用底层设备功能接口来使用设备。设备接入代理或真实设备通过调用底层设备注册接口来告知设备虚拟化服务。应用程序、设备虚拟化服务和设备接入代理均通过公共信息服务平台进行通信和数据传输。

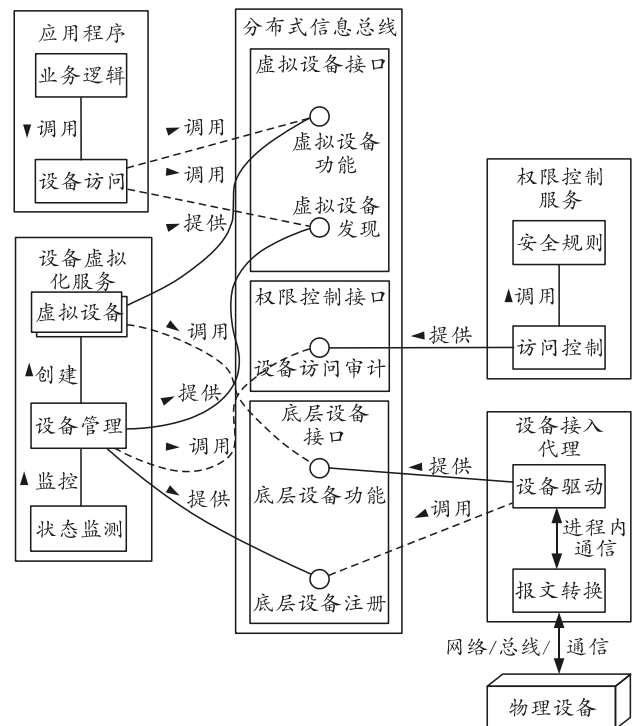


图 3 系统组件逻辑关系

5.2 架构构建步骤

基于系统架构设计需求、设计原则和技术路线的确定,使用系统工程的方法确定水面无人艇架构构建步骤。

1) 基于典型任务对无人艇能力要求,提出无人艇系统功能需求。

2) 将业务功能细分成独立单元服务, 达到分散关注、松散耦合、标准定义的目的; 分散关注是将整体业务功能区分, 分散的同时聚焦某一个业务点。

3) 将无人艇系统功能分层隔离关注, 每个逻辑层聚焦一组业务功能内聚的服务集合。逻辑层间松散耦合将业务功能之间的耦合度降到最低, 系统维护和系统稳定性较高。

4) 逻辑层间接口按照服务调用接口标准设计, 让各层内服务根据统一标准实现、调用和使用接口。

通过上述构建步骤对共性技术基础和主要接口进行设计和构建, 形成以系统服务层、传输服务层、基础服务层、业务应用层为主要层次, 以各层次功能服务为核心的共性技术基础; 以面向虚拟设备抽象描述定义(设备、功能、属性、方法、事件), 应用和服务抽象描述定义, 载荷、应用或服务信息交互定义为主的系统逻辑接口。系统共性技术基础架构如图 4 所示。

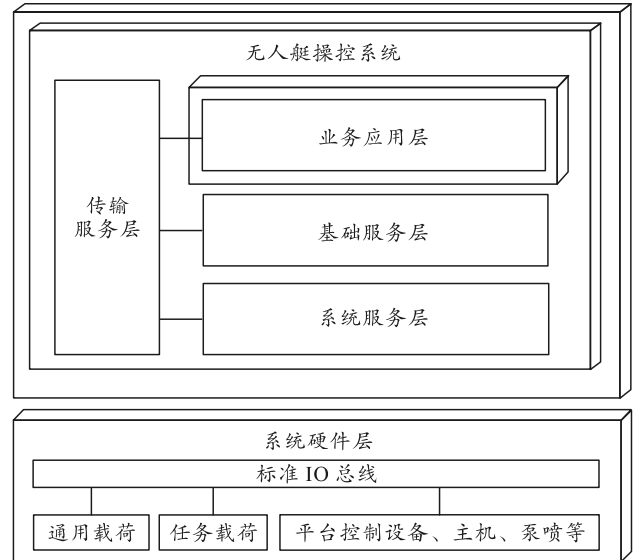


图 4 系统共性技术基础架构

5.3 分层功能域架构设计

图 5 展示了系统分层主要功能域功能。

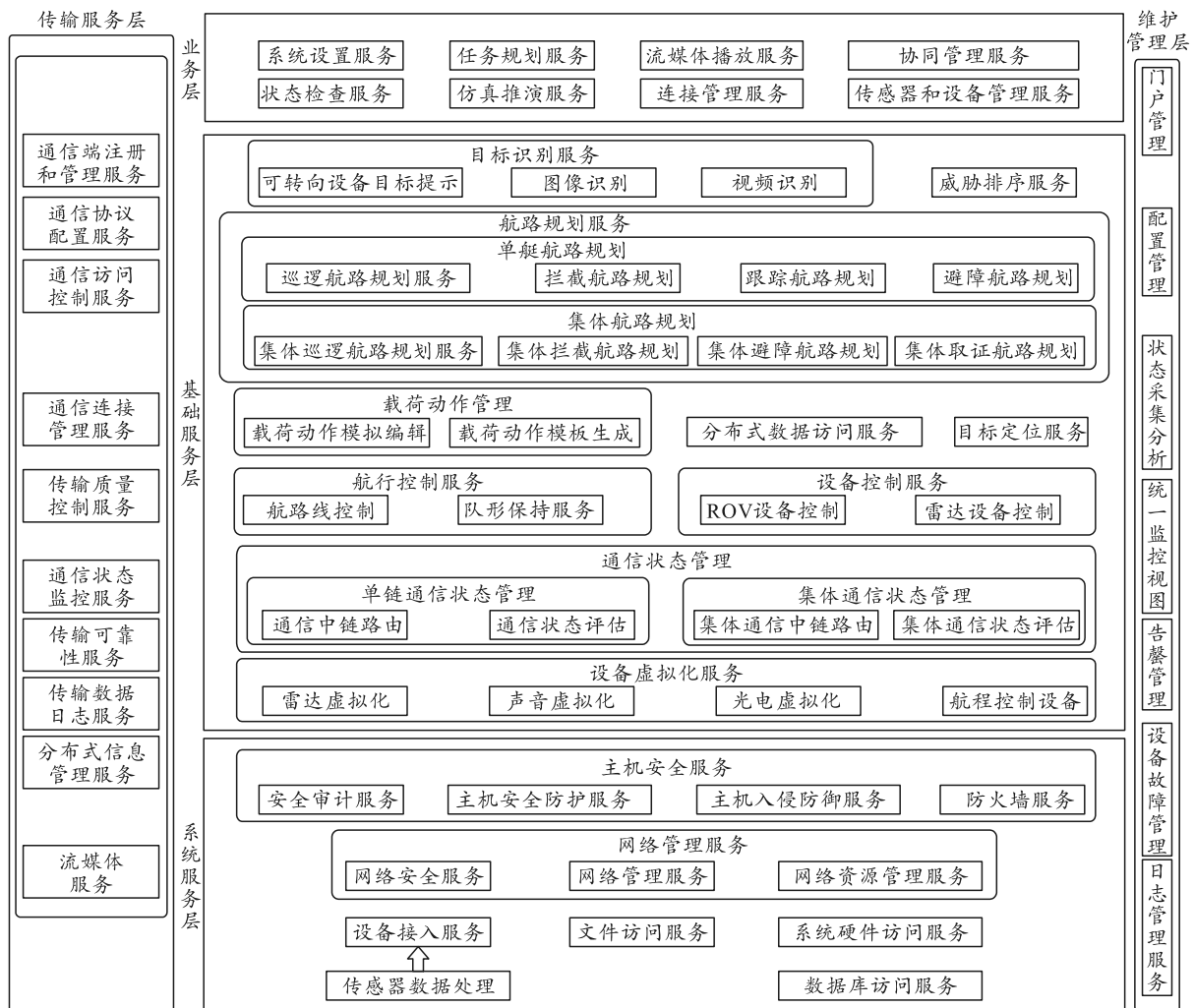


图 5 分层主要功能域功能

各层功能概述如下:

1) 系统服务层提供对系统硬件的硬件操纵、文

件和数据库访问以及网络访问和控制机制。为无人艇操作系统提供底层系统功能服务,屏蔽无人艇操作系统与特定通用操作系统和硬件之间的耦合关联。

2) 传输服务层是应用和服务间通信的基础设施层,提供服务网格的核心功能。支持面向域的数据通信隔离、通信端传输权限管理、通信端注册和自动发现、通信端主题发布、通信端订阅主题、通信端发布远程过程调用、数据监控、调用链路监控等功能。

3) 基础服务层是无人艇操作系统的核心服务层,提供包括态势融合服务、航路规划服务、集群协同服务、航行控制服务载荷控制服务、设备虚拟化服务等核心功能。

4) 业务应用层包括面向特定任务场景的应用。通常这类应用都具有人机交互图形界面,用户可基于系统应用开发规范和 SDK 开发定制的应用。

5.4 系统通用接口设计参考规范

1) 虚拟设备抽象描述主要包括以下内容:

① 设备规范定义,包含设备标识、设备类型、设备描述、功能列表等;

② 功能规范定义,包含功能标识、功能类型、功能描述、属性列表、方法列表、事件列表等;

③ 属性规范定义,包含属性标识、属性类型、属性描述、属性值格式、属性值取值范围、属性值单位、属性值最大长度、属性值读写权限等;

④ 方法规范定义,包含方法标识、方法描述、方法输入参数列表、方法输出参数列表等;

⑤ 事件规范定义,包含事件标识、事件描述、参数列表等。

2) 应用、服务抽象描述主要包括以下内容:

① 应用、服务规范定义,包含应用或服务标识、应用或服务类型、应用或服务描述、应用或服务功能列表等;

② 功能规范定义,包含功能唯一标识、功能名称和类型、功能描述、属性列表、方法列表和事件列表等;

③ 属性、方法和事件规范定义内容跟与虚拟

设备抽象描述中的属性、方法和事件规范定义类似;

3) 载荷、应用或服务信息交互,主要体现在对多种交互方式的支持。通常对虚拟设备、服务或应用发起控制命令、功能请求的通信端请求-应答模式通信,而被控制端或被请求端使用通知模式通信。基于请求-应答模式和通知模式的信息交互报文规范定义了 5 种报文:属性获取报文、属性设置报文、属性通知报文、方法调用报文和事件通知报文(Notice-Event)。属性获取报文、属性设置报文、属性通知报文是 3 种涉及设备、应用和服务属性获取和事件的标准报文;方法调用报文和事件通知报文提供了一定的扩展性,支持更多数据交换。

6 结束语

笔者在分析水面无人艇系统组成、架构设计需求的基础上,明确水面无人艇系统架构设计的基本原则和目标,提出架构设计的技术路线、构建步骤、分层功能域设计和通用接口设计参考规范。笔者提出的系统架构已经成功应用于某型水面无人艇系统设计,实现了任务导向的基于元动作无人艇不同任务过程的高度复用和灵活重组。在确保任务有效执行的情况下,系统可高效地支撑多任务的快速部署,有效缩短无人艇新任务能力的开发和部署时间,并通过多次实艇测试证明了整体架构设计的有效性。

参考文献:

- [1] 张平. 水面舰艇模块划分方法[J]. 中国舰船研究, 2006, 1(4): 7-10.
- [2] 杨学斌. 无人艇体系结构研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
- [3] 谢慧, 杨忠, 吴有龙, 等. 基于物联网的水面无人艇技术体系和系统功能架构的研究[J]. 物联网技术, 2020, 109(3): 58-63.
- [4] WANG Z, YANG S, XIANG X, et al. Cloud-based mission control of USV fleet: Architecture, implementation and experiments[J]. Control Engineering Practice, 2021, 106: 104657.
- [5] Unmanned Maritime Autonomy Architecture [R/OL]. <https://www.auvsi.org/unmanned-maritime-autonomy-architecture>.