

智慧渔业时代的深远海养殖平台控制系统

张建波^{1,2}, 王宇², 聂雪军^{1,2}, 吴国庆², 刘久军², 严俊¹

(1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 广东 湛江 524013; 2. 湖北海洋工程装备研究院有限公司, 湖北 武汉 430223)

摘要: 分析了深远海养殖平台控制系统, 在云计算的开放架构下引入边缘智能的协同控制技术, 建立起深远海养殖平台的分布式智能控制模式, 探索性地提出“云-网-边-端-智”可灵活部署的深远海养殖平台云边协同控制系统总体框架体系和智能养殖云平台开放式架构体系, 提出了深远海养殖平台控制系统的开发思路、云中心控制和边缘智能的实现方案。试图建立云边协同控制的理论框架和思想体系, 构建深远海渔场的全过程智能化养殖方式和陆海联动的运营管理模式, 以期最终实现智慧渔业产业生态和绿色可持续发展目标。

关键词: 深远海养殖; 云边协同控制系统; 云平台开放式架构体系; 边缘智能; 智慧渔业

中图分类号: TP273.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2021.00247

Offshore aquaculture platform control system in intelligent fishery era

ZHANG Jianbo^{1,2}, WANG Yu², NIE Xuejun^{1,2}, WU Guoqing², LIU Jiujun², YAN Jun¹

1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang 524013, China

2. Chinese Institute of Marine & Offshore Engineering HB. Co., Ltd., Wuhan 430223, China

Abstract: The control system of offshore aquaculture platform was analyzed and the collaborative control technology with edge intelligence was introduced under the open architecture of cloud computing. A distributed intelligent control mode was established. A general framework architecture of cloud-edge collaborative control system for offshore aquaculture platform and an open architecture of intelligent aquaculture cloud platform were proposed exploratively, which could be deployed flexibly with different patterns of cloud-network-edge-terminal-intelligence. A development idea of control system and an implementation scheme of could central control and edge intelligence for offshore aquaculture platform were put forward. An attempt was made to build the theoretical framework and ideology system of cloud-edge collaborative control, and it was to construct the manner with the whole process of intelligent aquaculture and land-sea linkage operation and management mode for offshore fish-farm, with a view to finally realizing the intelligent fishery industrial ecology and green sustainable development goals.

Key words: offshore aquaculture, cloud-edge collaborative control system, open architecture of cloud platform, edge intelligence, intelligent fishery

1 引言

随着社会经济的发展和人民生活水平的提高,

人们越来越追求高品质、高营养的优质蛋白质的摄取, 对渔业养殖的产量和品质需求越来越高。受近海或湾内环境条件的限制, 养殖鱼类的品质和产量

收稿日期: 2021-06-15; 修回日期: 2021-10-27

通信作者: 张建波, kryne_zhang@hotmail.com

基金项目: 工业和信息化部高技术船舶科研计划项目(No.[2019]360); 中国船舶集团有限公司科技创新与研发项目(No.[2018]1718); 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)基金资助项目(No.ZJW-2019-01)

Foundation Items: The Research and Development Project of High-tech Ship from China's Ministry of Industry and Information Technology (No.[2019]360), the Science and Technology Innovation and Research and Development Project from China Shipping Group Co. Ltd. (No.[2018]1718), The Fund of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang) (No.ZJW-2019-01)

逐渐受到影响, 为扩大养殖容量、降低环境风险、提升鱼类品质, 海洋渔业养殖由近海走向深远海已势所必然。为摆脱近海和湾内的地域限制, 使养殖区域由封闭海域向开放海域扩展, 提高深远海养殖的常态化生存和海洋环境适应能力、提高深远海养殖的远程监控和运营管理能力, 亟须开发成熟的深远海养殖装备^[1]。

近年来, 国家提出智慧水产养殖和深水网箱智能化发展的要求。发展适合中国海域养殖特点的深远海智能化养殖装备将是今后科技攻关的重点领域, 要在网箱设计、养殖方法、投饲系统、收捕系统、网衣清洗、智能决策等方面实现自主创新和成熟应用, 逐步缩小与挪威等深远海养殖发达国家的差距。

本文基于深远海智慧渔业养殖的发展背景和需求, 综合利用互联网、物联网、人工智能、大数据、云计算与边缘计算等新一代信息通信与计算机技术, 在云计算的开放架构下引入边缘智能的协同控制技术, 构建基于云边协同的深远海养殖平台控制系统, 汇聚深远海养殖装备感知、计算、通信、控制、决策的技术体系与能力, 旨在提高深远海智能养殖装备的国产化水平和自主可控能力, 提高养殖生产效率、降低人工养殖成本, 改变传统的个体渔业养殖模式, 建立集约化、规模化、工业化的渔业养殖模式, 最终实现渔业养殖“高效、优质、生态、健康、安全”的绿色可持续发展战略目标^[2]。

2 深远海养殖平台及控制系统的发展

2.1 深远海养殖平台研究进展

深远海养殖平台是指放置在低潮位水深超过 15 m 且有较大浪流的开放性水域、在离岸 3 n mile 外岛礁水域或养殖水体超过 1 万 m³ 的海水养殖网箱平台。深远海养殖的特点是离岸距离远、工作环境恶劣、人工巡检不便, 为确保鱼群的安全健康生长, 对养殖水域的水文、水质、气象信息的监控以及养殖设备的远程控制与维护、养殖过程管理提出了更高的要求。伴随新一代信息通信技术与计算机技术的融合发展, 通过微电子技术、远程通信技术、先进的控制理论集成多种能源形式的供能与能源管理、抗台抗高海况风浪的自平衡沉降、网箱自动投喂、养殖环境监测、养殖过程监控与管理等系统, 实现养殖装备与系统设备、传感器的全面集成与融合, 实现深远海养殖的远程监控, 形成无人值守的

网箱养殖系统, 实现深远海养殖的自动化、网络化、信息化、数字化与智能化, 实现养殖装备与养殖过程的全生命周期的精准化与智能化管理, 是深远海养殖的发展趋势。

国外在深远海智能养殖方面的开发应用较早, 从 1970 年美国国家气象局第一次有组织地研究深远海养殖开始, 至今已有美国、挪威等十几个国家开展深远海养殖。经过几十年的发展, 国外在深远海养殖方面已经取得较为成熟的技术成果, 如挪威 AKVA Smart 公司研制出自动投饵系统和 Fishtalk 水产养殖管理系统^[3], 芬兰 Arvo-tecOy 公司研制出漏斗形投饵机器人^[4], 日本 NITTO 公司研制出基于小料仓的自动投喂系统^[5]。目前, 挪威在深远海养殖方面已经走在世界前列, 在巨大的研发投入下, 取得了较为明显的技术成果, 更新了新一代的深远海养殖装备, 比较有代表性的养殖设施有“Ocean Farm 1”深远海养殖平台^[6](如图 1 所示)和“HAV FARM 1”深水养殖工船^[6]。其中, 比较典型的是“Ocean Farm 1”深远海养殖平台, 该平台是由武昌船舶重工集团有限公司(海洋工程装备研究院有限公司)为挪威 SalMar 公司建造的直径 110 m、高度 69 m、空体重量 7 700 t、养殖容量 25×10⁴ m³ 的深海渔场, 平台安装有 2 万个传感器、100 余个监控设备和 100 余个生物光源, 配备全球最先进的大西洋鲑智能养殖系统, 一次可养殖 150 万尾大西洋鲑, 由 8 根缆索连接海底固定, 可抗 12 级台风。“Ocean Farm 1”在 2017 年交付给 SalMar 公司, 是世界首座半潜式大型渔业智能养殖平台, 平台上配备了鱼种投放系统、摄食系统、网衣清洗系统、死鱼收集系统、自适应升降系统、深海定位系统, 可实现饲料供应、环境监测、养殖对象行为识别与密度分布、鱼群逃逸、饲料密度分布等信息的实时感知和获取, 通过末端执行装置实现网衣清洗、活鱼驱赶、成鱼捕捞等设备的驱动控制, 通过数据处理与分析、管理决策系统控制投喂、捕捞、清洗的最佳时机, 实现了集三文鱼智能养殖、自动化保障、深海运营管理为一体的深海智能养殖模式, 被业界认为是深远海养殖发展史上的里程碑式装备。

“Ocean Farm 1”和“HAV FARM 1”均是挪威设计、中国建造的深远海智能养殖装备的典型代表^[7], 对中国渔业装备的发展起到非常好的牵引和带动作用。在此之后, 我国在网箱材料与防污^[8-10]、网箱系统与配套设备^[11-13]、抗风浪装置^[14-15]、箱体沉浮方

法^[16]、养殖综合平台^[17]等深远海养殖方面持续开展技术创新,表1列出了我国近年来在深远海养殖平台方面的创新实践^[6,18-21]。



图1 Ocean Farm 1

2.2 深远海养殖控制系统关键技术

深远海养殖控制系统,建立在分布式网络体系和分层架构体系中,至少涵盖人机交互界面、处理计算、数据采集等层面,系统基于模块化软件设计

思路,利用功能区块构建监测、报警、控制、防护等功能,可以自动存储系统的修改变更,控制系统通过专用冗余处理计算器和智能输入/输出单元进行实时处理和计算,系统满足可操作性、可移植性、可扩展性等方面的要求。系统通过一个通用通信基础设施集成渔业养殖平台主要监测和控制任务模块,这些任务模块由专用处理控制器、通信段和外围设备组成的自主子系统执行,利用一个通用技术平台尽可能集成所有子系统和相关硬件与软件,单一子系统的失效将不影响和降低控制系统内其他子系统的操作和功能。

虽然中国已经具备一定的基础工业能力,但由于中国深受农耕经济和小农经济的影响,深远海养殖装备发展起步较晚,较国外发展严重滞后,还未普遍形成深远海大规模集约化工业养殖。深远海养

表1 中国深远海养殖平台发展近况

序号	平台名称	结构型式	操作性(智能化程度)	技术创新	交付投产时间
1	深蓝1号	全潜式深海渔场	依水温控制渔场升降、水下锚泊导缆装置、大型特种网具、海洋环境监测	自适应水温层控制渔场升降,实现黄海冷水团大西洋鲑养殖	2018年5月
2	德海1号	半潜式桁架结构大型渔场	全锚链单点系泊系统,平台前后端浮体压载水调节上浮和下潜,前后浮体采用钢管桁架连接,配备智能化投喂养殖专家系统、自动投饵机、监控检测系统、风光互补能源系统、海水制淡系统、起网机、水下洗网机、高弹性锚泊系统	半潜船形桁架浮体混合结构,实现一体化管理及无人驻守养殖	2018年9月
3	长鲸1号	深远海钢结构坐底式网箱	坐底式四边形钢结构,搭载太阳能清洁能源、网衣自动提升、自动投饵、水下监测、死鱼回收、网衣清洗等自动化装备	网衣升降防污,集鱼捕捞和网衣检查于一体,实现养殖智能化和无污染	2019年4月
4	福鲍001	智能环保型鲍鱼养殖平台	配备风光发电、水质监测、视频监控、数据无线传输、增氧装置等	深远海规模化鲍鱼养殖	2019年4月
5	澎湖号	半潜式波浪能养殖旅游平台	半潜船型和方形围网设计,自动投饵、鱼群健康、水体监测、活鱼传输和制冰等现代化渔业生产设备,集养殖、清洁能源供给、休闲渔业为一体	海洋可再生能源驱动的智能养殖,实现由绿色能源支持的新型深远海养殖旅游平台	2019年6月
6	哨兵号	无人可升降试验养殖平台	自动水下增氧、水下投喂、水下照明,不间断水下监控,采用龟甲网衣	抗台风海洋平台,北冷水团养殖	2019年6月
7	振渔1号	旋转笼式深远海机械化养殖平台	浮体平台、养殖框架、旋转机构组成,养殖框架呈橄榄球形	解决海洋养殖网箱网衣附着物难题	2019年6月
8	蓝鑫号	深远海大型养殖网箱	框架型船舶与浮体、单点系泊系统,拥有远程投喂、网衣清洗、智能起捕、环境监控、死鱼收集、渔业互联等多项机械化与智能化系统	大西洋鲑深远海智能养殖,防磨网衣的设计、优化、连接、装配、监测	2020年1月
9	海峡1号	单柱式半潜深海渔场	光伏发电、铜合金网衣、钢制悬链系泊系统、水下监测系统,压载潜浮系统	大黄鱼仿野生养殖,深远海养殖网衣防污损,抵御17级台风	2020年5月
10	嵎海1号	全潜式深远海大黄鱼养殖平台	3层超高分子网衣,装备定位和水深、水流监控等多项智能设备,装备智能深远海养殖保障系统	实时监测网箱姿态,具有较高的抗风浪和智能化水平,“公司+养殖户”联合养殖经营模式	2020年6月
11	长渔1号	深远海大网箱养殖平台	采用太阳能加风力发电的形式,搭载5G通讯基站、海洋牧场大数据监测系统,配备污水处理装置,风力自动投饵机	“安全、环保、无污染”,海洋数据的实时监测,全国首个示范应用5G技术的海洋牧场平台	2020年6月
12	耕海1号	现代化海洋牧场综合体	采用太阳能、风能等多种清洁能源,安装南极长城站同款的污水处理设备,配备自动投饵、环境监测、大数据分析、5G通信、安全管理等系统	使用自动化设备精准控制投喂数量,避免残存饵料污染,提升海洋渔业精细化管理水平	2020年7月

殖装备在信息感知与获取、数据处理与分析、科学养殖与智能决策方面与世界先进水平存在差距，需在顶层设计上开展深远海养殖平台控制理论与体系建设，开展多技术与多维度融合的深远海养殖感知探测技术研究，开展多参数传感器自组织与分布式组网通信技术研究，开展水下复杂场景的特征提取技术研究，开展水下生物动态识别与目标追踪技术研究，开展深远海养殖水下作业机器人研究，开展不同养殖模式下水体控制模型、投喂控制模型、鱼类生长模型的构建技术研究，开展融合边缘智能的养殖数据处理技术研究，建立深远海养殖的专题数据库、智能算法库、模型训练集和知识图谱，建立深远海养殖的数据采集与通信规范标准体系，建立深远海养殖数据安全体系，建立深远海养殖的组织调度与保障体系，推动国家政府和民间资本的融合开展深远海养殖的实践探索，引领深远海养殖装备及控制系统的发展。

2.3 控制系统发展演化的启示

随着电子信息技术、计算机技术、网络通信技术的发展，工业控制系统的控制对象从简单到复杂、从局部到整体、从单点到多点变化，使网络控制系统在生产实践中得到普遍应用，在生产控制领域衍生出大型复杂分布式网络控制系统。同时，物联网技术的快速发展，实现了物物之间的互联、互通、互控，并催生出海量数据的存储与融合处理，控制系统呈现出网络化、数字化、智能化的发展趋势。

为满足海量设备高品质实时控制的要求，结合网络控制系统和云计算^[22]的技术优点，逐渐发展出云控制系统的概念^[23]，通过云计算的引入降低控制系统计算时延，在强大的云端资源条件下可利用深度学习等智能算法，基于网络化预测控制、数据驱动控制等方法实现系统的自主智能控制。

然而，随着终端设备的大量接入，逐渐暴露出基于云计算模型的控制系统的缺陷，受云端网络核心节点的限制，云控制系统无法有效地应对智能终端产生的海量数据对实时传输、计算和存储的要求。随着微机电一体化系统的发展，处于网络边缘侧且具备计算、存储、应用等能力的智能终端得以部署，使得具备边缘计算能力的网络化分布式控制系统受到工业界的广泛关注。

边缘计算赋予网络边缘侧数据融合与处理能力，可作为未来大规模智能终端分布式智能控制与

管理的一种理想解决方案。不过，边缘计算并不能完全替代云计算，是对云计算的有效补充和延展，为网络化控制系统提供了丰富、便捷、灵活的弹性资源。云计算和边缘计算的相互协同弥补了网络控制系统在不同应用场景下的短板，国内学者提出了云边协同和边边联邦协同的联合训练框架^[24]，将其应用在电力系统的运行与控制中。可以预见，基于云边协同的网络化分布式控制系统将成为未来控制系统的主要发展方向，也是未来智能产业发展的增长点。

随着计算机、通信、控制技术的发展与融合，逐渐衍生出信息物理系统（CPS, cyber-physical system）^[25]，CPS集成了先进的感知、计算、通信、控制技术，构建了物理空间与信息空间相互映射的复杂智能系统，使得其中的人、机、物、环境、信息等要素相互映射、实时交互、高效协同^[26-27]。可见，CPS是融合云边协同、边缘智能之后的网络化控制系统，更加强调自主感知控制，更加强调人机融合，建立起“人-信息-物理”三元体系关系^[28-29]。从某种意义上讲，基于云边协同的网络化控制系统将逐渐与CPS趋同，只是云边协同控制的侧重点在感知、计算、通信、控制、决策的分布式系统架构的实现，CPS的侧重点在物理空间和空间各要素的相互映射、交互和协同的实现，最终都将完成“人-信息-物理”世界的融合，形成广义互联的社会信息物理系统^[30-31]。

国内学者王飞跃在研究复杂系统的过程中提出平行系统和并行控制的理论框架^[32-35]，并通过团队研究尝试利用ACP方法^[36]（人工社会（artificial societies）、计算实验（computational experiments）、平行执行（parallel execution））解决核电站^[37,38]、机器人^[39-40]、交通^[41]、油气田^[42]、农业^[43]、城市^[44-45]等领域面临的问题。尽管平行系统理论与方法具有普遍意义，但ACP的3个关键步骤是系统建模、计算实验与评估分析、虚实互动与平行执行，本文认为其在现有技术水平下仍存在局限性，难以满足动态变化的生产管控系统的复杂需求。

经上述比较分析，深远海养殖平台的生产管控系统将采用云边协同的分布式网络控制系统，融合信息物理系统的感知、计算、通信、控制、决策的5层架构体系，融入数字孪生技术构建物理空间和信息空间的映射关联关系，实现深远海

养殖生产体系的人、机、物、环境、信息等要素相互映射、实时交互、高效协同，指导和操控深远海养殖生产实践。

3 深远海养殖平台控制模式与方法

3.1 深远海养殖平台作业过程分析

深远海养殖平台的作业任务，主要分为 3 类：

- 1) 平台水面上监控与通信操作任务，如监视、AIS（自动识别系统）、雷达与指挥通信，还包括饲料装卸、补给品装卸、直升机起降；
- 2) 生物与环境的监测操作任务，包括饲料投喂、水下摄像机控制、基于水下仪器与传感器的环境参数的监测；
- 3) 网箱平台和工业处理流程的控制与监测，如鱼处理、压载、系泊、动力能源供应、死鱼收集、网衣清洗。

为尽可能避免干扰，保证养殖平台的安全性，3 类操作根据操作特点分别由不同的操作站控制，渔业养殖平台操作站作业任务分配见表 2。一台操作站执行网箱平台水面上的任务，如水面监视、AIS、直升机甲板监控雷达及与其他船舶的通信与操作，还包括直升机甲板的监控；一台操作站执行生物与环境的监测，包括饲料投喂、水下摄像机控制、基于水下仪器与传感器的环境参数的监测；一台操作站执行网箱平台和工业处理流程的控制与监测，如能源管理、压载控制、系泊控制、死鱼收集与处理等操作。

表 2 渔业养殖平台操作站作业任务分配

操作站	作业任务
操作站 1:	水面监视
水面监视控制	AIS
	直升机甲板监控
	雷达
	与其他船舶的通信与操作
操作站 2:	饲料投喂
生物与环境监测	鱼群密度监测
	死鱼识别
	水下环境监测
	水下视频监控
操作站 3:	能源管理
网箱平台与工业处理	压载控制
流程控制与监测	系泊控制
	死鱼收集与处理

3.2 深远海养殖平台控制模式

工业控制系统一般分成 3 个层次的控制层级：信息管理层、过程监控层和设备控制层。3 个层次又可以细分为设备级、单元控制级、监督级、厂级管理级、企业管理级 5 个层级的工业控制系统网络分层结构模型^[46]，如图 2 所示。

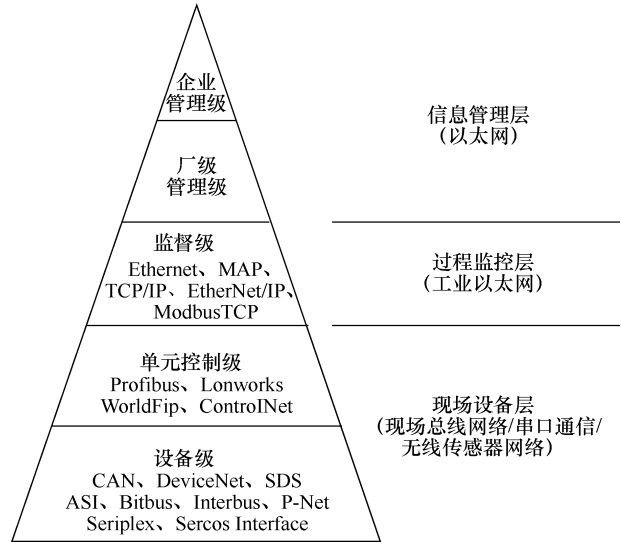


图 2 工业控制系统网络分层结构模型

网络控制系统本质上是一个多时滞闭环控制系统，其子系统是一个具有多个独立传感器和执行器的多输入多输出（MIMO, multiple-input multiple-output）网络控制系统，由被控对象、控制器和公共的通信网络组成闭环结构的 MIMO 控制网络基本结构模型^[47]如图 3 所示。分布式网络控制系统可以根据拓扑结构抽象出单环控制基本结构模型，对于多环控制的节点，则可转换为单环控制的多个节点的叠加。深远海养殖控制系统的每个子系统拥有独立的控制器，通过现场总线网络和串口通信接口将分散的多个执行器和传感器连接起来，构成一个 MIMO 控制网络。

结合深远海养殖平台作业过程，根据工业控制系统网络分层结构模型，将深远海养殖平台控制系统的控制层级分为现场设备层（本地仪器室）、集控室站控层（养殖平台集控室）、中心控制层（岸基指挥控制中心），建立如图 4 所示的养殖平台控制系统结构模型。其子系统通过 MIMO 控制网络，实现对现场设备及仪器仪表、传感器的监测与控制，实现现场设备层的监控；各子系统通过工业以太网与操作站连接组成上一级的站控网络控制系统，形成一个分布式的站控网络控制系统；各养殖

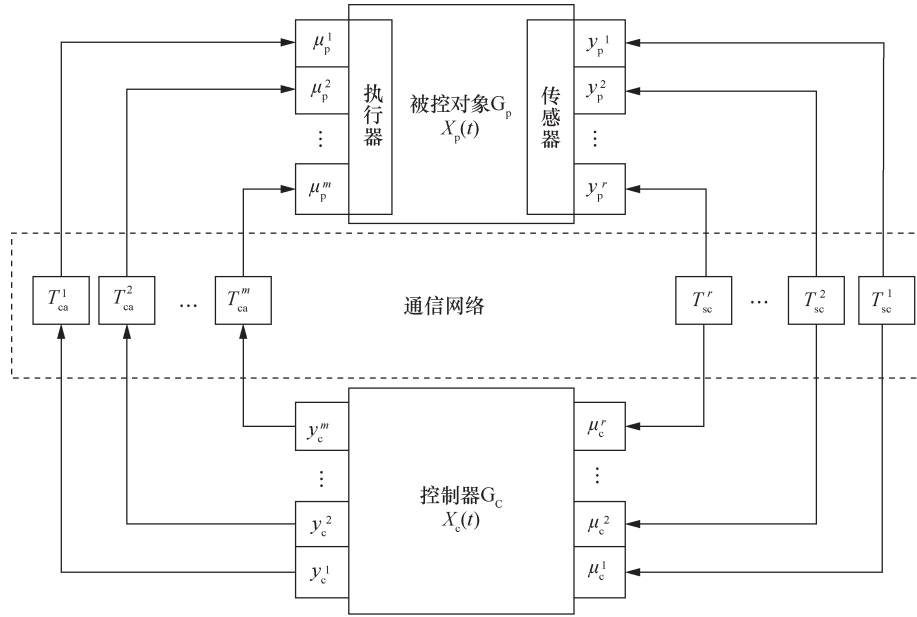


图 3 MIMO 控制网络基本结构模型

平台的集控室分布在同一海域或不同海域，通过海上无线宽带通信网络实现与岸基指挥控制中心的连接组网，完成中心级的控制和信息管理。3 层网络之间通过网关或网桥连接，通过通信协议转换或数据格式交换实现异构网络间的通信与数据交换。

由此可知，深远海养殖平台控制系统建立在两级管理三级控制的结构体系^[48]下，管理分为岸基指挥控制中心和养殖平台集控室两级管理，控制则分为中心控制、集控室操作站控制、现场设备控制三级控制，其中，岸基指挥控制中心为主控级、养殖平台集控室为分控级，实现了养殖平台分布式智能控制模式。现场监控系统安装在养殖平台就地控制的数据采集点和控制点，包括对各类传感器、执行器、远程 I/O 模块、接口模块的控制和设置，一般仅在紧急情况或故障情况下，才执行本地现场控制。集控室控制系统安装在养殖平台集控室，具备监视和控制养殖平台本地的各子系统的运行状态，协调各子系统的联动功能，提供集控室级的决策，完成养殖平台本地的实时信息采集、设备监控与维护及报警处理等基本操作功能，在特殊或紧急情况下，可代行中心监控的功能。中心级控制系统安装在岸基指挥控制中心，除具备站控系统的控制、报警及画面展示等功能外，可用于区域范围内的各养殖平台及其子系统的监视和控制，制定全面的养殖计划和综合调度及综合决策，与信息管理系统进行数据和信息交换，完成中心级的控制功能。

深远海养殖平台控制系统按照分层网络结构

和冗余配置的设计思路，融合了串口通信、现场总线通信、工业以太网通信以及无线通信网络等多种异构网络，建立一个分层架构体系下的冗余备份的分布式网络控制系统，综合使用了环形拓扑、总线拓扑、树形拓扑等多种拓扑结构，形成 3 层网管型汇聚网络。养殖平台控制系统现场的设备、仪器仪表和传感器采用现场总线连接，对带有 RS232 或 RS422/RS485 接口的仪器仪表进行接口转换现场总线。控制系统对于服务器、工作站和主干网络之间的信息管理采用以太网连接，以太网采用两台互为热备份的核心交换机将各个服务器和工作站连接起来，同时连接下级千兆环形主干网络，保证服务器和工作站与下级设备的通信质量和可靠性，并为服务器提供足够的带宽能力。下级千兆主干环形网络是控制系统网络的重要组成部分，环形网络节点交换机与下级星形分支交换机连接，通过下级分支交换机将数据采集终端和系统设备的主控制器以及其他关联设备的 PLC 控制器连接起来，形成系统设备与传感器的接入网络，实现系统设备、传感器的互联互通。控制系统通过数据接口从现场设备提取大量的数据和信息，按照一定的规则将来源、位置、类型不同且庞大的数据发送给数据管理中心，进行规范化统一处理和存储，并按照约定的规范化格式发送数据，通过建立统一的接口标准和数据规范实现控制系统及其子系统间的数据互联共享。采用现场总线和以太网相结合组网，以提高系统的传输速度和稳定性，各子系统服务器和工作站以及主

干网络采用双份冗余配置，以抵御海洋恶劣环境的影响，保证系统的安全性和可靠性，同时也兼顾了系统可灵活扩展的应用需求。

分布式网络控制系统一般具有两种连接形式：直接结构和递阶结构^[49]。深远海养殖平台控制系统采用的是递阶结构的连接形式，这种结构形式使得控制系统的各个节点（控制器、传感器、执行器）易于连接，且尽可能节省连线、便于维护，可以将子系统的处理功能、计算负荷尽可能分散到较小的网络单元中，各子系统互不影响，对多个子系统的控制器进行分布式控制，增强整个系统的鲁棒性和健壮性，不至于单个控制器的故障导致整个系统的瘫痪。深远海养殖平台控制系统作为分布式网络控制系统，通过网络将回路中的传感器、执行器以及控制器相连接，使得控制系统的受控变量和控制变量都以数字量的形式在网络中传递，具有简单、快捷、可靠性高以及容易实现信息资源共享等特点，便于实现网络化、集成化、智能化、分布化。

3.3 深远海养殖平台控制方法

随着现代控制理论的发展与完善，传统的模型驱动控制方法，即依据物理化学机理建立数学模型的控制，越来越难以满足生产过程和生产设备的控制、预报和评价的要求，逐渐衍生出基于采样理论的数据驱动与事件驱动的控制方法。数据驱动控制源于数据驱动思想，利用受控系统的在线和离线数据，实现系统的基于数据的预报、评价、调度、监控、诊断、决策和优化等功能^[50]。事件驱动控制是由不同的事件来驱动信号通信与控制器运算的，不同于固定时间周期性驱动，因此又称异步控制系统或非周期性的驱动，与消息队列传输结构模型一致，可按照事件发生器、事件消费终端和事件服务器设计^[51-52]。事件驱动控制属于非线性控制理论的重要组成部分，具有强力改善非线性控制性能、简化控制系统结构、处理不确定模型与分析强非线性系统的优点，可满足不确定的、离散的非连续事件的控制。

深远海养殖平台控制系统的监控对象涵盖养殖平台、系统设备、养殖鱼群、海洋环境，有丰富的被控对象和应用场景，采用单一的控制方法并不能适用于所有应用场景。对于网络化复杂控制系统，控制模型的选择与设计，应在准确把握和综合分析被控对象和应用场景特点的情况下，有针对性地采用控制模型。鉴于模型驱动、数据驱动和事件

驱动的控制并不能替代、而是相互补充，养殖平台控制系统的控制模型总体建模原则是：1)可建立线性机理模型的，尽可能采用模型驱动控制方法；2)虽可建立机理模型，但模型太复杂、非线性太强、不确定性太大，可采用数据驱动控制或事件驱动控制方法；3)受控对象不能建立机理模型，采用数据驱动或事件驱动控制方法；4)采用经济、安全、稳定、可靠的控制模型。鉴于篇幅限制，基于模型驱动、数据驱动和事件驱动的控制方法在深远海养殖平台控制系统的具体应用不展开论述。

4 深远海养殖平台控制系统框架体系

4.1 深远海养殖云边协同控制系统总体框架

根据智慧渔业的发展目标以及深远海养殖控制系统的基本需求，深远海养殖控制系统被设计为一个分布式网络集散控制系统，实行分布式智能控制模式，其控制方式分为现场设备级、操作站级、中心控制级，分别部署在仪器设备现场、网箱平台集控室、岸基指挥控制中心。深远海养殖平台控制系统，按照分布式智能控制的核心理念，利用计算机技术、控制技术、网络通信、图形图像技术，将传感器、执行器、控制器组成多层结构体系下的冗余备份网络通信系统，通过网络形成闭环回路，在各功能模块化的控制节点或子系统间传递控制和管理信息，结合相应控制策略和方法完成复杂的整体控制功能而形成分布式控制系统，实现管理与控制的分离，实现分布式智能控制，使现场控制层到管理层实现全面的无缝信息集成，实现全系统的资源共享、集成自动化、协调运行。

针对深远海养殖多层冗余控制和全面信息集成的要求，本文设计出基于云边协同的养殖平台控制系统总体框架体系（如图5所示），在云计算的开放架构中引入边缘计算的协同控制技术，在中心云和边缘节点间合理分配数据、资源、服务和安全，以发挥中心云的集中计算能力和边缘节点的分布计算能力。基于云边协同的养殖平台控制系统，充分利用“端-边-网-云”灵活部署的特点，将对实时性要求高、数据处理量小的功能部署在边缘侧，对实时性要求低、数据处理量大、计算处理要求高的功能和服务部署在云端，可实现网箱平台综合监控中心、区域岸基指挥控制中心、产业生态云平台的灵活部署，满足不同深远海养殖模式的需求。

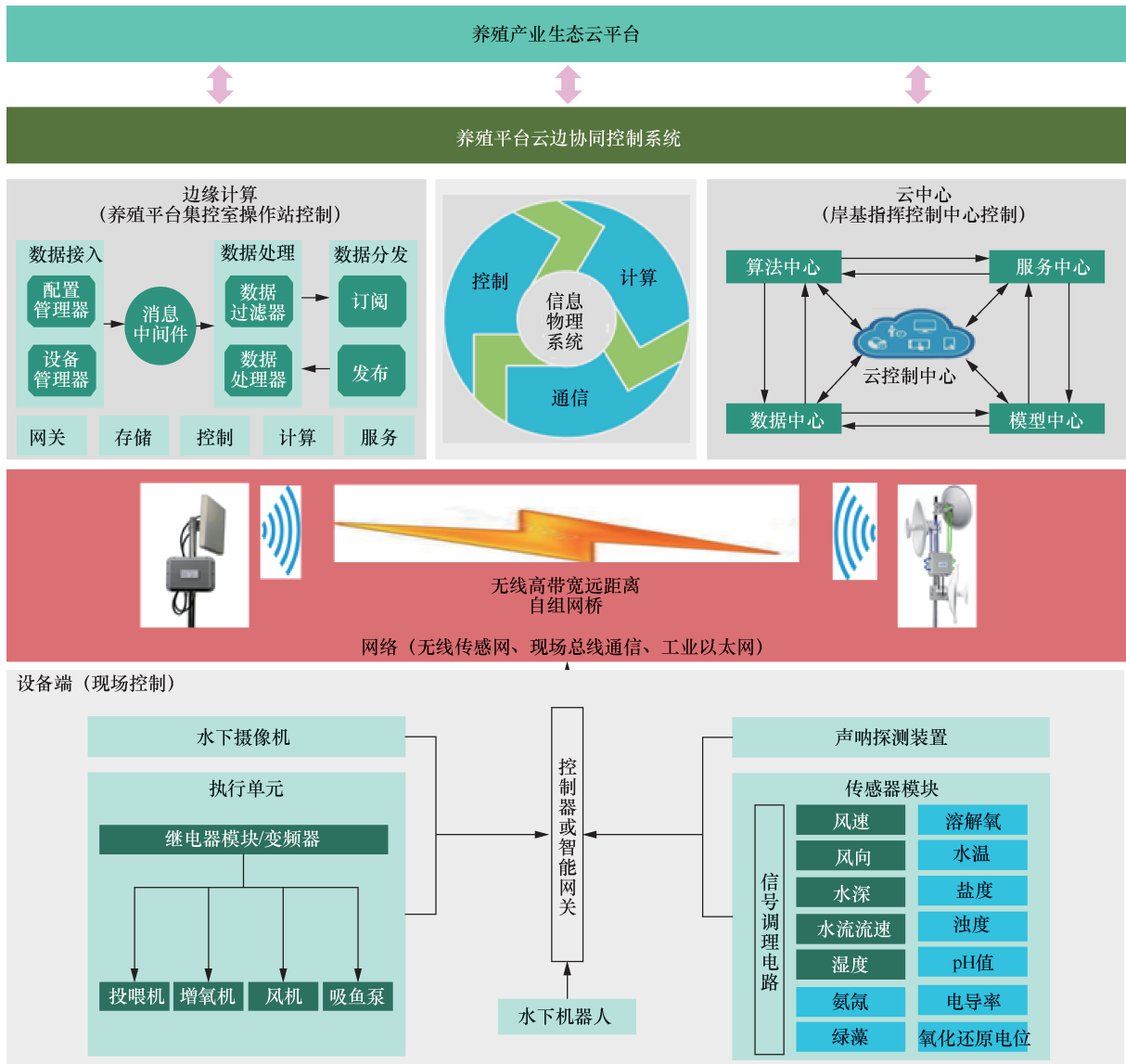


图5 深远海养殖平台云边协同控制系统总体框架体系

深远海养殖控制系统的现场设备控制层，依托分布在网箱平台的现场设备对单个子系统、设备或工艺单体进行手动或自动控制。当系统设备进行设备检修或紧急切断时，采用现场控制方式。现场控制级是分布式网络控制系统的关键部分，直接关系到控制系统的实时性与稳定性，现场控制层由多个控制器通过现场总线连接现场的执行器、传感器和智能网关或远程终端装置（RTU, remote terminal unit）构成，实现养殖平台现场设备的集成互联与控制或传感器数据的采集，达到养殖平台操作变量及设备运行状态数据采集和监视控制的目的。

深远海养殖控制系统的操作站控制层，依托部署在养殖网箱平台集控室的边缘计算节点，通过边

缘节点网络的协作，对养殖平台在运设备状态进行数据采集、监视控制和联锁保护，实现网箱平台本地设备层的传感器、机器人、自动化设备的数据接入，提供数据采集与数据处理服务。边缘节点配置实时数据服务器、历史数据服务器、Web 服务器、视频服务器、通信服务器，通过以太网交换机和路由器组成现场总线以太网，完成控制系统的边缘侧部署。通过边缘节点进行本地数据处理，降低了数据处理和传输时延，从而提高了实时性，进而提高控制系统的精确度。

深远海养殖控制系统的云中心控制层，依托部署在岸基指挥控制中心的云中心节点，通过无线高带宽远距离自组网桥，实现与网箱平台的双向通

信，将边缘侧接入云端，实现大量、分布的传感器、自动化设备以及机器人的数据接入，构建基于养殖模型的渔业养殖大数据平台，实现云端远程的状态监测、设备管理、能源管理、故障诊断、数据可视化、决策支持等服务，形成深远海智能养殖的数据、算法、模型、服务四位一体的云控制中心，增强控制系统的计算与处理能力。养殖平台集控室的控制权限由岸基指挥控制中心配属，经指挥控制中心授权后，才允许具有权限的操作人员通过站控系统或 RTU 对系统设备进行授权范围内的操作。通常情况下，指挥控制中心完成各个养殖平台的监控，当指挥控制中心与养殖平台发生通信链路故障或系统维护检修时，由养殖平台集控室操作站完成对平台系统设备的监视和控制。

养殖产业生态云平台，通过因特网与岸基指挥控制中心的互联互通，完成养殖平台的控制系统与产业公有云对接，构建深远海养殖大数据平台，可实时对深远海养殖渔场、渔业养殖保障支持船、鱼苗培育基地、生产加工基地、物流配送基地、冷链储藏基地的运行状态进行监测控制，对深远海养殖的育苗、养殖、加工、储藏、物流、销售进行全过程的运营管理和决策指挥，建立深远海渔场的全过程智能化养殖方式和陆海联动的运营管理模式，贯通深远海养殖产业价值链，打造深远海智能养殖产业生态。

4.2 深远海养殖平台控制系统功能结构体系

深远海养殖平台所处海域的水深范围为 50~100 m，主要由支撑平台的浮体和立柱提供足够的

浮力，由平台的系泊系统定位于固定海域，平台配置能源动力、消防探测、HVAC、灯光照明等通用系统，配置平台姿态仪、结构应力监测系统、环境监测系统、鱼群密度监测系统、死鱼识别系统、网衣状态监测及防逃逸报警系统等平台、鱼群、网衣的监控系统，配置投喂系统、死鱼处理系统、网衣清洗系统、网衣起绞机、供气补氧等养殖专用系统。为长期抵御恶劣的海洋环境，及时了解养殖平台的状态和养殖情况，需要利用养殖平台的控制系统对平台所处环境及其系统设备进行长期监测和控制，以保证渔业养殖平台的正常生存、安全作业、养殖生产。

深远海养殖平台控制系统，通过设备的集成互联，实现深海渔业养殖平台的姿态、设备、环境、鱼群状态的实时监控，可以远程启停饲料投喂、供气供氧、网衣清洗等关键系统设备，实现远程实时监控、综合数据分析、故障远程诊断、养殖预警预测、统一运维管理，实现深远海养殖的自动化、数字化、网络化、信息化、智能化，达到精细化、精量化、精准化的规模化工业养殖目标。为实现上述目标，满足两级管理三级控制的要求，针对深远海养殖平台控制系统，提出如图 6 所示的功能需求架构。

结合深远海养殖平台控制系统的基本需求和功能需求架构，为揭示养殖平台控制系统及其系统设备间的功能关系，在综合分析养殖平台、通用系统、专用系统、养殖环境、鱼群状态等监控内容的基础上，提出如图 7 所示的深远海养殖平台控制系统的功能结构体系，将控制系统划分为养殖专用设

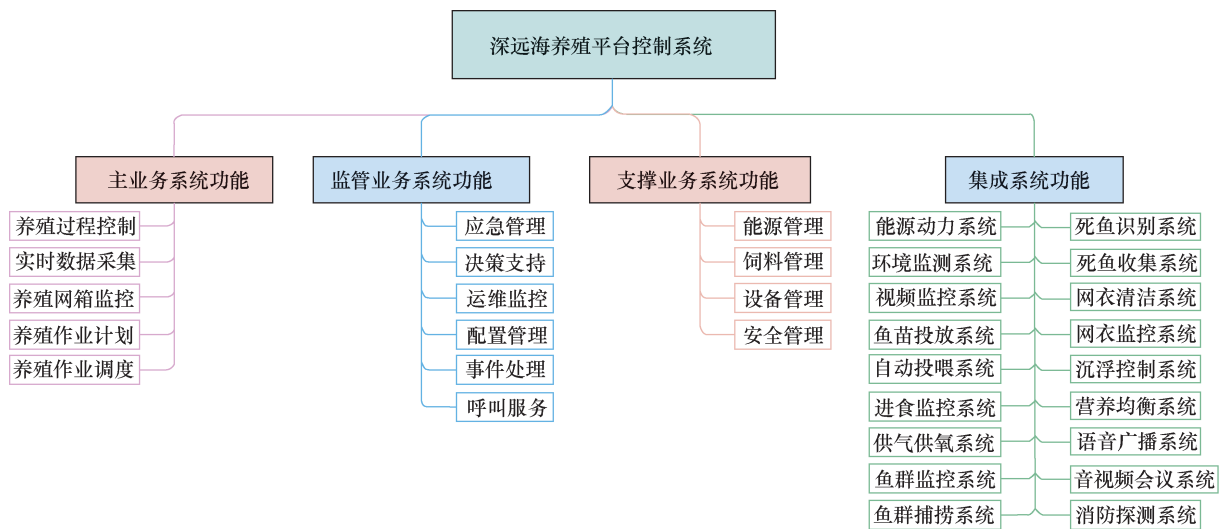


图 6 深远海养殖平台控制系统功能需求架构

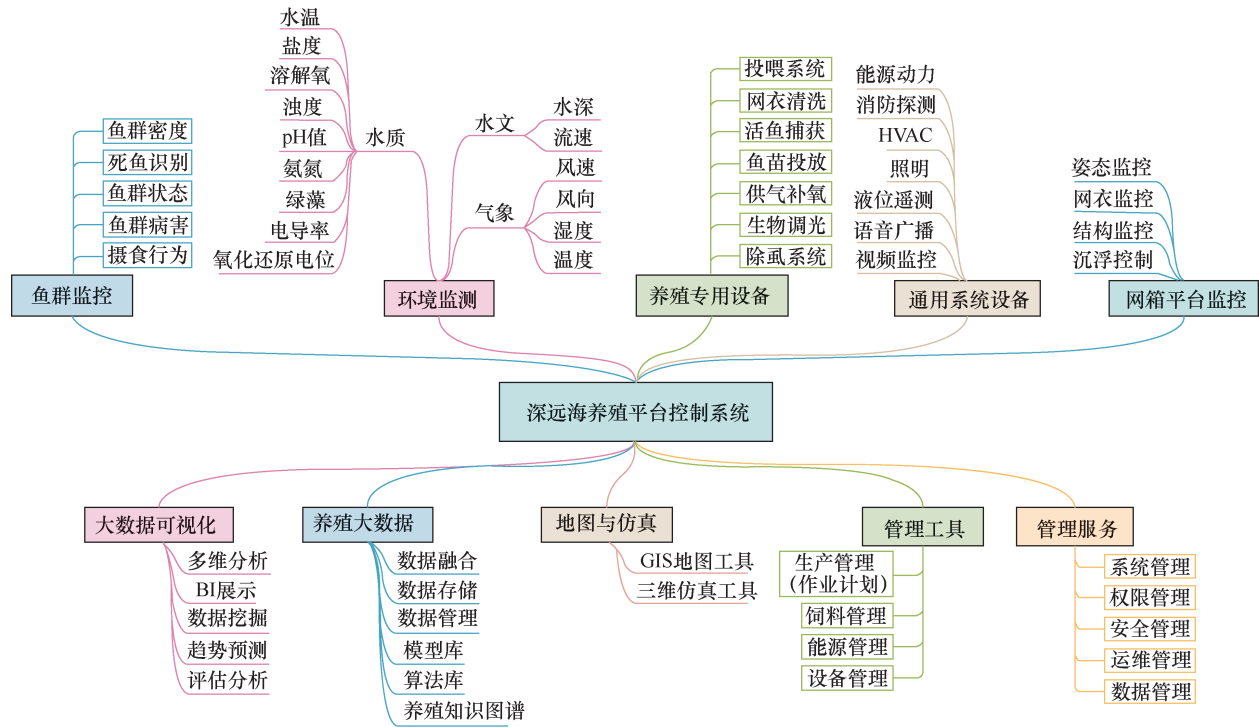


图 7 深远海养殖平台控制系统功能结构体系

备、鱼群监控、环境监测、通用系统设备、仿真管理工具、网箱平台监控、管理服务、地图与大数据可视化、养殖大数据十大功能模块。

4.3 深远海智能养殖云平台开放式架构体系

为打造智慧渔业产业生态，打通深远海养殖的数据链、信息链、资金链、物流链、价值链，有待建立深远海养殖综合信息管理服务云平台，设立深远海养殖的规则和标准，建立高效的服务工具和流程，促进种苗、繁育、饲料、养殖、渔业设施、技术和产品服务、物流、加工、渠道和品牌建设等养殖相关企业和机构的互联网化，整合产业资源，在政府政策指导和监督下建立深远海养殖产业垂直电商平台，进而提升深远海养殖行业的信息化水平，建立完整的交易链条、信用等级、产品品质和安全可追溯机制，推动深远海养殖产业的可持续发展。

基于云边协同的深远海养殖平台控制系统连接着边缘设备和基础设施，是养殖数据的来源，是构建深远海养殖产业生态云平台的基础。为实现智慧渔业产业生态的发展目标，统筹建设深远海养殖云边协同控制系统与综合信息服务平台、产业垂直电商平台，参考工业互联网架构^[53]和信息物理系统架构^[54]，设计出一个面向智慧渔业产业生态的深远海智能养殖云平台开放式架构体系如图 8 所示，

即基于边缘层、IaaS 层、PaaS 层、SaaS 层等核心部分，建立感知层、通信层、控制层、计算层、服务层的 5 层架构体系，建立物理空间和信息空间的实时交互映射关系。在此开放式架构体系下，建立的云控制中心将成为智慧渔业产业生态的基础平台，可实现控制系统、信息服务平台、垂直电商平台的无缝对接，直接扩展行业应用，打通数据流和信息流。

在深远海养殖装备、养殖保障支持船等基础设施建设的基础上，按照深远海养殖渔场智能化的建设需求，依托深远海智能养殖云平台开放式架构体系，综合利用物联网、态势感知、大数据、云平台、边缘计算、人工智能、人机交互、虚拟现实与数字孪生等前沿技术，搭建集状态监控、运营管理、决策指挥、保障服务、远程监控为一体的深远海智能养殖云控制中心。构建的云控制中心，是深海渔业养殖装备和养殖保障支持船的数据监测中心、运营管理中心、决策指挥中心、保障服务中心、远程控制中心，可实时对深远海养殖渔场、渔业养殖保障支持船、鱼苗培育基地、生产加工基地、物流配送基地、冷链储藏基地的运行状态进行监测控制，依托云平台、大数据管理与分析平台对渔业养殖的育苗、养殖、加工、储藏、物流、销售进行全过程的运营管理和决策指挥，结合数据采集、数据融合、

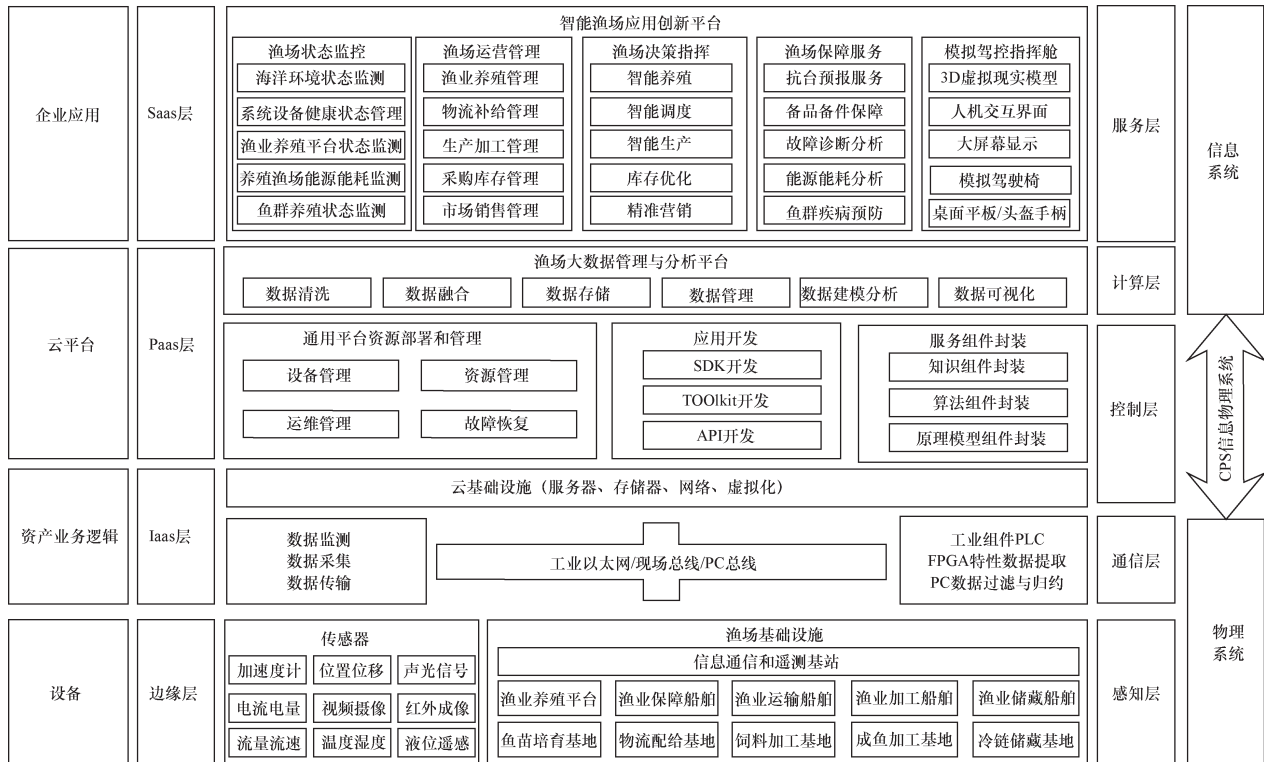


图 8 深远海智能养殖云平台开放式架构体系

数据存储、数据管理、数据分析、数据可视化的大数据分析平台，提供渔场平台的抗台预报、备品备件保障、故障诊断分析、能源能耗分析、鱼群疾病预防、鱼群逃逸预防等保障服务，结合大屏幕显示、桌面平板、头盔手柄、模拟驾驶椅等人机交互界面和虚拟现实系统，实现智能渔场的数据展示与远程驾控指挥，建立深远海渔场的全过程智能化养殖方式和陆海联动的运营管理模式。

5 深远海养殖平台控制系统案例

5.1 深远海养殖平台控制系统开发思路

针对深远海养殖平台的平台姿态、结构应力、能源动力、养殖设备、养殖环境、鱼群状态、外来入侵等状态信息的监视控制、诊断分析、预测预警的需求，建立数据接入、消息中间件、数据处理、数据分发 4 层结构的数据采集系统，按照模块化设计理念、多层冗余备份的思路，基于公开化、标准化的串口、现场总线、工业以太网 3 层网管型汇聚网络通信方案，建立现场智能设备互联通信网络，构建发布/订阅模式的物联网传输模型，实现深远海养殖平台系统设备、传感器、控制器、仪器仪表的集成互联与远程控制，基于 REST 架构约束思想完成 Web 架构体系下的接口设计，实现控制网络和信

息系统的融合，按照 SSM（Spring + SpringMVC + MyBatis）框架开发一套深远海养殖平台控制系统如图 9 所示，满足多种养殖模式的部署要求构建渔业养殖不同专题领域的知识图谱、智能算法库及知识专家系统，实现养殖数据的精准、实时、高效的挖掘分析和决策评估，通过大数据可视化系统为养殖数据建立丰富多样的图表、文字、音视频、模型等展现形式，最终构建起集数据采集、清洗、融合、存储、管理、分析、可视化为一体的渔业养殖大数据平台，建立深远海养殖的数据治理体系。

考虑控制系统云平台的部署要求以及 Java 开发的跨平台、开源资源丰富的优势，本深远海养殖平台控制系统采用基于 Java2E 的 SSMWeb 应用程序开发框架和 LigerUI/EasyUI/VUE 前端开发框架，SSM 框架是标准的 MVC 模式，将整个系统划分为视图层、控制层、业务层、持久层。Spring 负责业务模块的业务逻辑设计，实现业务对象管理；SpringMVC 负责控制层与视图层，控制具体的业务模块流程，同时与前端页面进行交互展示，实现请求的转发与视图管理；MyBatis 负责数据持久层，封装与数据库进行联络的任务，是数据对象的持久化引擎。基于开源和轻量级的 UI 框架，可以快速打造功能强大、易扩展的 Web 应用程序前端界面。

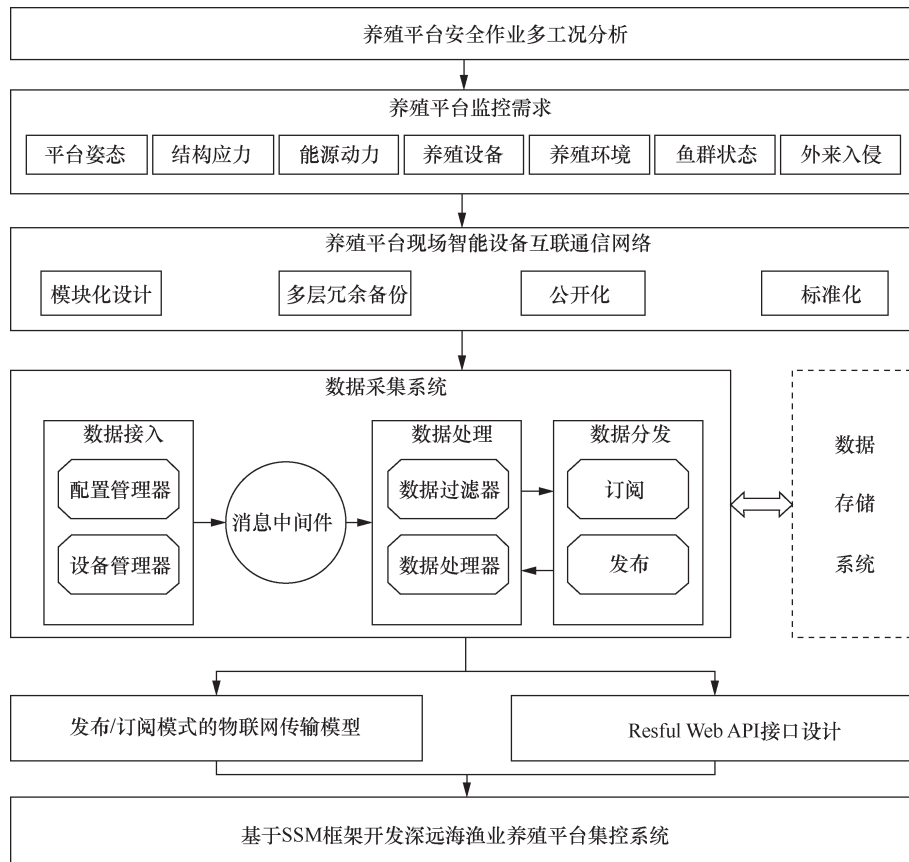


图 9 养殖平台控制系统开发路线

开发过程中利用 Maven 管理项目的全生命周期，包括清除、编译、测试、报告、打包、部署等。

5.2 养殖平台云中心控制层实现

深远海养殖平台云中心控制层部署在岸基指挥控制中心，是深远海养殖平台的控制中枢，对域内的养殖平台进行连续的指挥、控制和管理。中心可向各养殖平台集控室站控系统发出调度指令，由站控系统完成控制与操作功能，中心通过海上无线宽带通信网络实现与养殖平台集控室的资源共享、信息实时采集，并对数据进行集中处理和管理。中心负责搭建集状态监控、运营管理、决策指挥、保障服务、远程作业为一体的综合信息管理平台，提供网箱平台的抗台预报、备品备件保障、故障诊断分析、能源能耗分析、鱼群疾病预防、鱼群逃逸预防等保障服务，实现智能渔场的数据展示与远程操作指挥。中心控制层还搭配其他信息管理系统，完成物资、采购、人事、财务等方面的综合管理和调度。图 10 展示了开发的深远海养殖平台控制系统 Web 程序界面，基于 Three.js 框架实现 Web3D/WebGIS 的可视化展现效果，集成 Highcharts/Echarts 图表库实现数据的可视化与趋势

分析，基于图形化动态交互设计方式，使用户获得更加直接、强烈的体验。

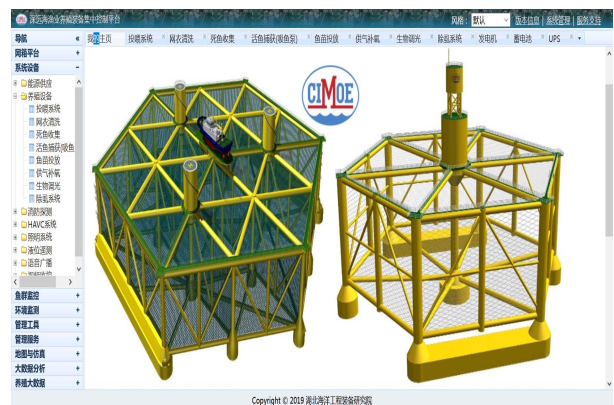


图 10 养殖平台云控制系统 Web 程序

5.3 养殖平台控制系统边缘层实现

深远海养殖平台控制系统边缘层涵盖数据采集、设备控制、边缘智能等功能，由主控制器、电源模块、通信模块、显示屏、传感器单元、执行控制单元、数据处理单元组成，将感知、计算、控制、通信集成封装在一起。传感器单元主要集成温度、湿度、风速、风向、水深、水流流速、溶解氧、水

温、盐度、浊度、pH值、电导率、氧化还原电位、氨氮、绿藻等多物理化学参数传感器；通过主控制器输出的信号驱动执行控制单元完成投喂机、下料机、吸鱼泵、增氧机、风机等渔业养殖专用机电设备的控制和操作；数据处理单元主要执行边缘智能，充分利用近数据源的计算资源^[55-56]完成图像数据的采集与处理等智能任务，有效减小对带宽和云端资源的依赖，从而降低业务响应时延。

图11展示了深远海养殖平台控制系统的边缘智能模块结构组成与典型应用场景。针对计算机视觉与人工智能在深远海养殖平台网衣破损识别^[57]、鱼群密度监测^[58-59]、水下死鱼识别^[60]等典型场景的应用，利用人工智能工具Tensorflow和大数据样本在云端进行深度学习算法模型训练，将训练好的AI模型远程封装到树莓派微处理器和嵌入式Linux系统中，对水下光学和声学图像采集器采集的图像进行目标识别和追踪，将识别追踪的结果反馈到云端系统中，实现了基于云边协同的人工智能技术在养殖平台上的应用，可以实时更新和优化AI模型，降低了图像数据传输对带宽的要求，提高了目标识别的响应速度。

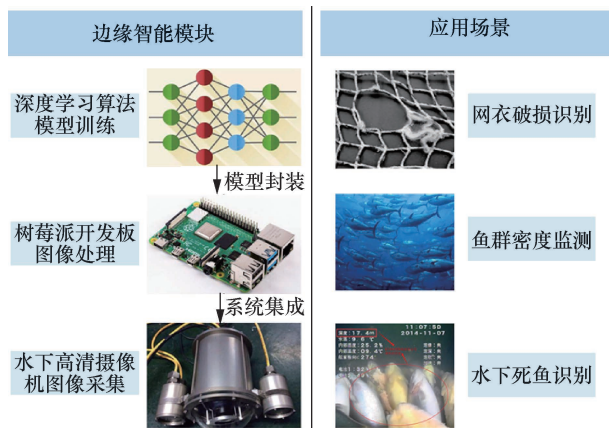


图11 边缘智能模块结构组成与典型应用场景

6 结束语

随着深远海养殖装备的发展，逐渐实现了自动化的养殖设备控制与信息化的养殖过程管控，并正在向养殖装备和养殖过程全生命周期的智能控制与智慧管理迈进，逐渐摆脱了“农耕经济”的思想束缚，使深远海养殖产业展现出可持续工业化集约发展的美好图景。本文以“国家海洋强国战略”驱动下的智慧渔业发展为背景，研究基于云边协同的

深远海养殖平台控制系统，构建深远海养殖控制模式和平台体系，以建立深远海渔场的全过程智能化养殖方式和陆海联动的运营管理模式。

本文针对深远海养殖装备的发展需求，分析了深远海养殖平台控制系统，基于两级管理三层控制的分层结构模型建立深远海养殖平台的分布式智能控制模式，有针对性地将模型驱动、数据驱动、事件驱动的控制方法应用于深远海养殖平台不同的被控对象和场景。以分布式智能控制为核心理念，在云计算的开放架构下引入边缘智能的协同控制技术，探索性地提出“云-网-边-端-智”可灵活部署的深远海养殖平台云边协同控制系统总体框架体系，并衍生出覆盖全产业链的智能养殖云平台开放式架构体系，提出深远海养殖平台控制系统的开发思路、云中心控制和边缘智能的实现方案。试图建立云边协同控制的理论框架和思想体系，以指导深远海养殖装备的生产管控实践，以期最终实现智慧渔业产业生态和绿色可持续发展目标。

深远海养殖平台云边协同控制系统采用面向服务的分布式开放架构体系，融合感知、计算、通信、控制、决策的5层架构体系，便于建立统一的基准、支持设备的模块化插件化、便于统一资源调度与管理，为设备的“即插即用”提供了一个开放、通用、标准的软/硬件环境体系，提高了任务系统的可扩展性、自适应性和高可用性。但作为深远海养殖领域的分布式智能控制系统，需深化人工智能与深远海养殖场景的融合、加强云平台与边缘智能的协同演化、增强边缘智能的自适应性，可以进一步研究和探讨的专题领域具体包括以下方面。

1) 深远海智能养殖知识服务：扩大深远海养殖领域的专题数据库、智能算法库、模型训练集，开展融合边缘智能的养殖数据处理技术研究，构建深远海养殖场景下的水质、水文、气象、鱼类生物等要素相互耦合的知识图谱，构建深远海养殖多源跨领域的知识反演模型，强化人工智能在深远海养殖场景中的应用。

2) 人工智能云边协同进化：开发兼容云平台和边缘智能控制系统的模型与算法，模型与算法的加载、迁移与卸载方法。

3) 新一代融合感知、通信、计算、控制、决策的边缘智能自适应控制系统：开放通用高端的边缘智能控制器，以网络为核心的自适应操作系统，提

供开放式软/硬件环境,兼容现有主流网络协议与硬件模组。

参考文献:

- [1] 刘晃,徐皓,徐琰斐. 深蓝渔业的内涵与特征[J]. 渔业现代化, 2018, 45(5): 1-6.
LIU H, XU H, XU Y F. Connotation and characteristics of deepblue fishery[J]. Fishery Modernization, 2018, 45(5): 1-6.
- [2] 唐启升,丁晓明,刘世禄,等. 我国水产养殖业绿色、可持续发展战略与任务[J]. 中国渔业经济, 2014, 32(1): 6-14.
TANG Q S, DING X M, LIU S L, et al. Strategy and task for green and sustainable development of Chinese aquaculture[J]. Chinese Fisheries Economics, 2014, 32(1): 6-14.
- [3] 郭根喜,陶启友,黄小华,等. 深水网箱养殖装备技术前沿进展[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(5): 44-49.
GUO G X, TAO Q Y, HUANG X H, et al. Progress on frontier of equipment technology for sea-cage aquaculture[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 13(5): 44-49.
- [4] ARVO-TEC OY. robot feeding system[E]. 2016.
- [5] 陈坤鑫,盛松伟,张亚群,等. 海工型渔业养殖网箱技术现状与发展趋势[J]. 新能源进展, 2020, 8(5): 440-446.
CHEN K X, SHENG S W, ZHANG Y Q, et al. Technology status and development trend of ocean engineering aquaculture cage[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2020, 8(5): 440-446.
- [7] 张宇雷,倪琦,刘晃,等. 挪威大西洋鲑鱼工业化养殖现状及对中国的启示[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 310-315.
ZHANG Y L, NI Q, LIU H, et al. Status quo of industrialized aquaculture of Atlantic salmon in Norway and its implications for China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 310-315.
- [8] 孙斌,余雯雯,石建高,等. 渔用高性能网衣材料的研究进展[J]. 渔业现代化, 2020, 47(6): 1-7.
SUN B, YU W W, SHI J G, et al. Research progress of high performance netting materials for fishing[J]. Fishery Modernization, 2020, 47(6): 1-7.
- [9] 王越,张敏,石建高,等. 渔用防污材料的研究进展及其在渔业上的应用[J]. 海洋渔业, 2021, 43(2): 247-256.
WANG Y, ZHANG M, SHI J G, et al. Research progress of anti-fouling materials for fishing and its application in fisheries[J]. Marine Fisheries, 2021, 43(2): 247-256.
- [10] 石建高,余雯雯,赵奎,等. 海水网箱网衣防污技术的研究进展[J]. 水产学报, 2021, 45(3): 472-485.
SHI J G, YU W W, ZHAO K, et al. Progress in research of antifouling technology of offshore cage netting[J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(3): 472-485.
- [11] 黄温赟,鲍旭腾,蔡计强,等. 深远海养殖装备系统方案研究[J]. 渔业现代化, 2018, 45(1): 33-39.
HUANG W Y, BAO X T, CAI J Q, et al. Study on solution of deep-sea aquaculture equipment system[J]. Fishery Modernization, 2018, 45(1): 33-39.
- [12] 崔铭超,金娇辉,黄温赟. 养殖工船系统构建与总体技术探讨[J]. 渔业现代化, 2019, 46(2): 61-66.
CUI M C, JIN J H, HUANG W Y. Discussion about system construction and general technology of aquaculture platform[J]. Fishery Modernization, 2019, 46(2): 61-66.
- [13] 林礼群,王志勇. 工船养殖颗粒饲料气力输送系统参数优化[J]. 船舶工程, 2020, 42(S2): 51-55.
LIN L Q, WANG Z Y. Parameter optimization of feed pneumatic conveying system for aquaculture vessel[J]. Ship Engineering, 2020, 42(S2): 51-55.
- [14] 林焱,王靖. 远海养殖平台的锚泊定位能力分析[J]. 船舶工程, 2020, 42(S2): 19-24.
LIN Y, WANG J. Analysis of anchoring and positioning ability of offshore aquaculture platform[J]. Ship Engineering, 2020, 42(S2): 19-24.
- [15] 孔耀华,陈作钢,谌志新. 舱养式深远海养殖平台的水动力及单点系泊特性[J]. 船舶工程, 2021, 43(4): 6-11.
KONG Y H, CHEN Z G, CHEN Z X. Hydrodynamics and single-point mooring characteristics of deep-sea tank breeding aquaculture platform[J]. Ship Engineering, 2021, 43(4): 6-11.
- [16] 黄小华,王芳芳,刘海阳,等. 系泊和压载方式对半潜式渔场平台动力特性的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 48-53.
HUANG X H, WANG F F, LIU H Y, et al. Effects of mooring systems and ballast status on dynamic behaviors of semi-submersible offshore fish farm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(15): 48-53.
- [17] 孟广玮,张青亮,姜旭阳. 深远海养殖工船船岸一体化系统构建[J]. 船舶工程, 2020, 42(S2): 83-85, 126.
MENG G W, ZHANG Q L, JIANG X Y. Construction of ship-shore integration system in deep ocean aquaculture engineering ship[J]. Ship Engineering, 2020, 42(S2): 83-85, 126.
- [18] 石建高,余雯雯,卢本才,等. 中国深远海网箱的发展现状与展望[J]. 水产学报, 2021, 45(6): 992-1005.
SHI J G, YU W W, LU B C, et al. Development status and prospect of Chinese deep-sea cage[J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(6): 992-1005.
- [19] 石建高,周新基,沈明. 深远海网箱养殖技术[M]. 北京: 海洋出版社, 2019: 1-330.
SHI J G, ZHOU X J, SHEN M. Agriculture technology of deep-offshore cage[M]. Beijing: Ocean Press, 2019: 1-330.
- [20] 徐皓,刘晃,徐琰斐. 我国深远海养殖发展现状与展望[J]. 中国水产, 2021(6): 36-39.
XU H, LIU H, XU Y F. Development status and prospect of Chinese offshore aquaculture[J]. China Fisheries, 2021(6): 36-39.
- [21] 邓炳林. 深远海智能养殖平台最新发展[J]. 中国船检, 2020(2): 32-36.
DENG B L. Recent development of deep-sea smart aquaculture platform[J]. China Ship Survey, 2020(2): 32-36.
- [22] 罗军舟,金嘉晖,宋爱波,等. 云计算: 体系架构与关键技术[J]. 通信学报, 2011, 32(7): 3-21.
LUO J Z, JIN J H, SONG A B, et al. Cloud computing: architecture and key technologies[J]. Journal on Communications, 2011, 32(7): 3-21.
- [23] 夏元清. 云控制系统及其面临的挑战[J]. 自动化学报, 2016, 42(1): 1-12.
XIA Y Q. Cloud control systems and their challenges[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(1): 1-12.
- [24] 白昱阳,黄彦浩,陈思远,等. 云边智能: 电力系统运行控制的边缘计算方法及其应用现状与展望[J]. 自动化学报, 2020, 46(3):

- 397-410.
- BAI Y Y, HUANG Y H, CHEN S Y, et al. Cloud-edge intelligence: status quo and future prospective of edge computing approaches and applications in power system operation and control[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(3): 397-410.
- [25] EDWARD L. Computing foundations and practice for cyber-physical systems: a preliminary report: UCB/EECS-2007-72[R]. University of California at Berkeley, USA, 2007.
- [26] 李洪阳, 魏慕恒, 黄洁, 等. 信息物理系统技术综述[J]. *自动化学报*, 2019, 45(1): 37-50.
- LI H Y, WEI M H, HUANG J, et al. Survey on cyber-physical systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(1): 37-50.
- [27] 王中杰, 谢璐璐. 信息物理融合系统研究综述[J]. *自动化学报*, 2011, 37(10): 1157-1166.
- WANG Z J, XIE L L. Cyber-physical systems: a survey[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(10): 1157-1166.
- [28] 王柏村, 臧冀原, 屈贤明, 等. 基于人-信息-物理系统(HCPS)的新一代智能制造研究[J]. *中国工程科学*, 2018, 20(4): 29-34.
- WANG B C, ZANG J Y, QU X M, et al. Research on new-generation intelligent manufacturing based on human-cyber-physical systems[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(4): 29-34.
- [29] 周济, 周艳红, 王柏村, 等. 面向新一代智能制造的人-信息-物理系统(HCPS)[J]. *工程(英文)*, 2019, 5(4): 71-97.
- ZHOU J, ZHOU Y H, WANG B C, et al. Human-cyber-physical systems(HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing[J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 71-97.
- [30] 景轩, 姚锡凡. 走向社会信息物理生产系统[J]. *自动化学报*, 2019, 45(4): 637-656.
- JING X, YAO X F. Towards social cyber-physical production systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(4): 637-656.
- [31] 王飞跃, 张俊. 物联网: 概念、问题和平台[J]. *自动化学报*, 2017, 43(12): 2061-2070.
- WANG F Y, ZHANG J. Internet of minds: the concept, issues and platforms[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(12): 2061-2070.
- [32] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. *控制与决策*, 2004, 19(5): 485-489, 514.
- WANG F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(5): 485-489, 514.
- [33] 王飞跃. 关于复杂系统研究的计算理论与方法[J]. *中国基础科学*, 2004, 6(5): 3-10.
- WANG F Y. Computational theory and method on complex system[J]. *China Basic Science*, 2004, 6(5): 3-10.
- [34] 王飞跃. 计算实验方法与复杂系统行为分析和决策评估[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(5): 893-897.
- WANG F Y. Computational experiments for behavior analysis and decision evaluation of complex systems[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(5): 893-897.
- [35] 王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统: 关于复杂社会经济系统计算研究的讨论[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2004, 1(4): 25-35.
- WANG F Y. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(4): 25-35.
- [36] 王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法[J]. *自动化学报*, 2013, 39(4): 293-302.
- WANG F Y. Parallel control: a method for data-driven and computational control[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(4): 293-302.
- [37] 侯家琛, 董西松, 熊刚, 等. 平行核电: 迈向智慧核电的智能技术[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(2): 192-201.
- HOU J C, DONG X S, XIONG G, et al. Parallel nuclear power: intelligent technology for smart nuclear power[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(2): 192-201.
- [38] 王飞跃, 孙奇, 江国进, 等. 核能 5.0: 智能时代的核电工业新形态与体系架构[J]. *自动化学报*, 2018, 44(5): 922-934.
- WANG F Y, SUN Q, JIANG G J, et al. Nuclear energy 5.0: new formation and system architecture of nuclear power industry in the new IT era[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(5): 922-934.
- [39] 白天翔, 王帅, 沈震, 等. 平行机器人与平行无人系统: 框架、结构、过程、平台及其应用[J]. *自动化学报*, 2017, 43(2): 161-175.
- BAI T X, WANG S, SHEN Z, et al. Parallel robotics and parallel unmanned systems: framework, structure, process, platform and applications[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(2): 161-175.
- [40] 白天翔, 沈震, 刘雅婷, 等. 平行机器: 一种智能机器的管理与控制框架[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(2): 181-191.
- BAI T X, SHEN Z, LIU Y T, et al. Parallel machine: a framework for the control and management for intelligent machines[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(2): 181-191.
- [41] 吕宣生, 陈圆圆, 金峻臣, 等. 平行交通: 虚实互动的智能交通管理与控制[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(1): 21-33.
- LV Y S, CHEN Y Y, JIN J C, et al. Parallel transportation: virtual-real interaction for intelligent traffic management and control[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(1): 21-33.
- [42] 魏立, 王红, 黄敏, 等. 平行海上油气田: 基于 ACP 的前期开发方案的设计与评估[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(2): 118-124.
- WEI L, WANG H, HUANG M, et al. Parallel offshore oil/gas field: ACP-based front end engineering design and evaluation[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(2): 118-124.
- [43] 康孟珍, 王秀娟, 华净, 等. 平行农业: 迈向智慧农业的智能技术[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(2): 107-117.
- KANG M Z, WANG X J, HUA J, et al. Parallel agriculture: intelligent technology toward smart agriculture[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(2): 107-117.
- [44] 吕宣生, 王飞跃, 张宇, 等. 虚实互动的平行城市: 基本框架、方法与应用[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(3): 311-317.
- LYU Y S, WANG F Y, ZHANG Y, et al. Parallel cities: framework, methodology, and application[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(3): 311-317.
- [45] 张晓东, 许丹丹, 王良, 等. 基于复杂系统理论的平行城市模型架构与计算方法[J]. *指挥与控制学报*, 2021, 7(1): 28-37.
- ZHANG X D, XU D D, WANG L, et al. Model architecture and urban computing for parallel cities based on complex adaptive systems[J]. *Journal of Command and Control*, 2021, 7(1): 28-37.
- [46] LIAN F L. Analysis, design, modeling, and control of networked control systems[D]. Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, USA, 2001.
- [47] LIAN F L, MOYNE J, TILBURY D. Analysis and modeling of networked control systems: MIMO case with multiple time delays[C]//Proceedings of Proceedings of the 2001 American Control Conference. (Cat. No.01CH37148). Piscataway: IEEE Press, 2001: 4306-4312.

- [48] SCATTOLINI R. Architectures for distributed and hierarchical Model Predictive Control - A review[J]. Journal of Process Control, 2009, 19(5): 723-731.
- [49] 邓士普, 王树青. 基于网络的控制系统研究综述[J]. 化工自动化及仪表, 2003, 30(6): 1-5, 10.
DENG S P, WANG S Q. A survey on network-based control systems[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2003, 30(6): 1-5, 10.
- [50] 侯忠生, 许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 650-667.
HOU Z S, XU J X. On data-driven control theory: the state of the art and perspective[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 650-667.
- [51] 邱强杰, 陈众, 俞晓鹏, 等. 基于事件驱动控制理论的风力发电系统建模[J]. 电力科学与工程, 2016, 32(8): 37-42.
QIU Q J, CHEN Z, YU X P, et al. Modeling of wind turbine generator system based on event-driven control theory[J]. Electric Power Science and Engineering, 2016, 32(8): 37-42.
- [52] 邱伯华, 张羽, 魏慕恒. 基于事件驱动的船载智能信息平台架构设计[J]. 科技导报, 2020, 38(21): 83-90.
QIU B H, ZHANG Y, WEI M H. An architecture for event-driven ship intelligent information platform[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(21): 83-90.
- [53] 余晓晖, 刘默, 蒋昕昊, 等. 工业互联网体系架构 2.0[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(12): 2983-2996.
YU X H, LIU M, JIANG X H, et al. Industrial Internet architecture 2.0[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(12): 2983-2996.
- [54] TAN Y, GODDARD S, PÉREZ L C. A prototype architecture for cyber-physical systems[J]. ACM SIGBED Review, 2008, 5(1): 1-2.
- [55] 任姚丹珺, 戚正伟, 管海兵, 等. 工业互联网边缘智能发展现状与前景展望[J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 104-111.
REN Y, QI Z W, GUAN H B, et al. Development and prospect of edge intelligence for industrial Internet[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 104-111.
- [56] 韩青, 高昆仑, 赵婷, 等. 边云协同智能技术在电力领域的应用[J]. 物联网学报, 2021, 5(1): 62-71.
HAN Q, GAO K L, ZHAO T, et al. Application of edge-cloud collaborative intelligence technologies in power grids[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2021, 5(1): 62-71.
- [57] ZHAO Y P, NIU L J, DU H, et al. An adaptive method of damage detection for fishing nets based on image processing technology[J]. Aquacultural Engineering, 2020, 90: 102071.
- [58] 汪梦婷, 袁飞, 程恩. 鱼类目标的密度估计模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(10): 1545-1552.
WANG M T, YUAN F, CHENG E. Density estimation model for fish

objects[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(10): 1545-1552.

- [59] 王金凤, 胡凯, 江帆, 等. 基于改进深度学习模型鱼群密度检测试验研究[J]. 渔业现代化, 2021, 48(2): 77-82.
WANG J F, HU K, JIANG F, et al. Experimental research on fish density detection based on improved deep learning model[J]. Fishery Modernization, 2021, 48(2): 77-82.
- [60] 谢万里, 李宏志, 周辉, 等. 基于迁移学习与卷积神经网络的鱼濒死预警系统研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(2): 186-192.
XIE W L, LI H Z, ZHOU H, et al. Fish dying on the basis of convolution neural network and transfer learning[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(2): 186-192.

[作者简介]



张建波 (1984-), 男, 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)、湖北海洋工程装备研究院有限公司工程师, 主要研究方向为智能系统、智能船舶、智能装备、智能制造、船舶与海洋工程装备、企业信息管理等。

王宇 (1975-), 男, 博士, 湖北海洋工程装备研究院有限公司研究员, 主要研究方向为智能装备、智能制造、船舶与海洋工程装备、企业信息管理等。

聂雪军 (1979-), 男, 博士, 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)、湖北海洋工程装备研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为智能装备、智能制造、企业信息管理等。

吴国庆 (1980-), 男, 湖北海洋工程装备研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为船舶数字化设计与建造、企业信息管理等。

刘久军 (1975-), 男, 湖北海洋工程装备研究院有限公司研究员, 主要研究方向为船舶与海洋工程装备、海洋结构物设计与强度分析等。

严俊 (1958-), 男, 博士, 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)研究员, 主要研究方向为智能装备、智能制造、船舶与海洋工程装备、企业信息管理等。