

# 融合水网大模型与机理智能体： 构建自主运行水网新范式

雷晓辉, 陈凯歌

(河北工程大学水利水电学院, 056038, 邯郸)

**摘要:** 国家水网建设正从工程连通和数字化感知转向精细化调控, 数字孪生水利建设也在持续提升预报、预警、预演、预案等业务支撑能力。然而, 从辅助决策转向自主决策和闭环控制, 水网系统需应对气象水文不确定性、水动力过程非线性、工程系统强耦合、调度规程难以结构化表达, 以及跨业务目标难以协同等问题。对此, 本文提出融合水网大模型与机理智能体的自主运行水网架构: 以水网大模型作为认知决策中枢, 以机理智能体作为专业执行单元, 面向防洪调度、水资源配置、输配水控制、生态调控和水环境校核等任务, 完成水文水动力计算、优化调度、控制指令生成和约束校核。认知决策层、专业执行层和反馈校核层通过标准化接口与状态反馈形成闭环协同, 贯通业务需求识别、方案生成、工程控制和运行反馈。本文进一步提出在环测试验证体系和自主运行能力分级判定框架, 为国家水网由辅助决策向自主运行演进提供架构参考。

**关键词:** 自主运行水网; 水网大模型; 机理智能体; 闭环控制; 智能调度; 分层协同; 在环测试

## Integrating a water-network large model with mechanism-based agents: a new paradigm for autonomous water network operations

LEI Xiaohui, CHEN Kaige

(School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** The development of national water networks has entered a stage characterized by refined regulation, moving beyond engineering connectivity and digital perception. Simultaneously, digital twin water conservancy continues to enhance its support for forecasting, early warning, scenario simulation, and contingency planning. However, the transition from decision support to autonomous decision-making and closed-loop control requires water network systems to address several challenges: meteorological and hydrological uncertainty, hydrodynamic nonlinearity, strong coupling among engineering components, difficulty in formalizing operating rules, and coordination across multiple operational objectives. To address these challenges, this paper proposed an autonomous water network operation architecture that integrated a water-network large model with mechanism-based agents. In this architecture, the water-network large model served as the cognitive decision-making hub, while mechanism-based agents acted as professional execution units for tasks such as flood control operation, water resources allocation, water conveyance and distribution control, ecological regulation, and water environment verification. These agents undertook hydrodynamic computation, optimal operation, control command generation, and constraint checking. The cognitive decision-making, professional execution, and feedback verification layers formed a closed-loop coordination through standardized interfaces and state

收稿日期: 2026-03-06

作者简介: 雷晓辉, 正高级工程师, 主要从事水系统调度研究。E-mail: lxh@iwahr.com

基金项目: 国家自然科学基金 (U25A20357)。

feedback, linking business demand recognition, scheme generation, engineering control, and operational feedback. The paper further proposed an X-in-the-loop testing and verification system and a capability grading framework for autonomous operation, providing an architectural reference for the evolution of national water networks from decision support toward autonomous operation.

**Keywords:** autonomously operated water network; water-network large model; mechanism-based agent; closed-loop control; intelligent operation; hierarchical collaboration; X-in-the-loop testing

中图分类号: TV212+TP399 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2026)09-0001-10

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2026.09.001

国家水网是保障水安全、提升水资源统筹调控能力和支撑区域协调发展的基础性工程。随着跨流域调水、流域综合治理、区域水资源配置和城乡供水保障等工程持续推进,国家水网建设正由工程连通和空间布局阶段转向系统运行效能提升阶段。与此同时,数字孪生水利建设推动水网运行管理由状态感知和信息集成,逐步转向情景推演、方案比选和辅助决策。从辅助决策转向自主决策,还需要将调度方案生成、工程约束校核、跨工程协同和执行偏差修正纳入同一闭环。目前,这些环节仍较大程度依赖人工研判。因此,构建贯通认知决策、机理求解和反馈校核的自主运行水网架构,是提升国家水网运行安全性和调控精细化水平的重要方向。

国家水网调度涉及来水预报、水库群联合调度、渠系输配水控制、受水区需水响应和河湖生态过程调节等多个环节。不同环节在时间尺度、控制对象和约束条件上差异明显:防洪调度强调短历时洪水过程中的预泄、拦蓄、削峰和错峰;供水调配关注多水源、多受水区之间的供需平衡和分水边界;输配水控制需要协调闸门、泵站、渠段水位和流量过程;生态调控则要求将生态流量、生态水位和水环境约束前置纳入方案形成过程。现有体系多以“感知、分析、辅助决策”为主,能够支撑调度人员开展情景研判和方案比选,但在多目标耦合场景下,仍难以实现调度意图自动识别、工程约束自动解析、控制方案自动生成和执行偏差滚动修正。随着调度对象增多、运行边界收紧和突发事件响应要求提高,单纯依靠人工研判和离线方案比选将越来越难以支撑高频、多目标和跨区域协同调控需求。因此,国家水网需要发展具备自动任务解析、专业模型调用、方案执行反馈和异常工况修正能力的自主运行体系,使调度过程能够在复杂边界条件下持续形成可执行、可校核、可追溯的闭环方案。

水利领域围绕深度学习、大语言模型、多智能体强化学习和数字孪生反馈控制的研究正在形成交叉发展

趋势。检索增强生成、知识图谱和工具调用等方法提高了专业知识问答、调度规则解析和方案辅助生成能力,强化学习和分布式控制在水资源配置、城市排水控制和泵站优化等场景下能够提升局部系统的自适应调控能力。这些研究分别提高了知识处理、局部控制和仿真反馈能力,但尚未解决跨业务、跨工程对象之间的任务组织和协同执行问题。针对上述不足,本文提出融合水网大模型与机理智能体的分层自主运行水网架构,将业务认知、专业求解和反馈校核分层组织:水网大模型负责把调度规程、监测数据和历史案例转化为结构化任务包,机理智能体负责调用专业模型和控制算法形成可执行方案,数字孪生反应用于驱动任务与方案滚动修正,旨在通过这种分层协同机制为国家水网从辅助决策向自主运行演进提供架构参考。

## 一、面向国家水网核心任务的运行需求

国家水网是由跨流域骨干输配水通道、区域水资源配置网络、城乡供用水系统、河湖生态调控单元等共同组成的复合运行体系。与单一工程调度相比,国家水网运行需要在不同时间尺度上统筹来水演变、需水变化、工程能力、调度规则和生态约束,具有多层级、多目标、强耦合和高不确定性特征。其中,提升水旱灾害防御能力、水资源节约集约利用能力、水资源优化配置能力和河湖生态保护治理能力,是国家水网高质量运行的核心任务。

当前水网运行体系仍面临不同形式的调控瓶颈。水旱灾害防御需要在预报不确定性和有限响应时间内完成水库群、河道、蓄滞洪区及控制断面的协同调度;水资源节约集约利用需要将输水规程、闸泵约束、渠段水位控制和分水口调节要求转化为可执行的实时控制边界;水资源优化配置需要在多水源、多受水区和多目标约束下协调供水优先序、调度边界和工程运行方式;河湖生态保护治理则需要将生态流量、生态水位、水环境容量和重要生境需求前置纳入方案形成过程。这些任务的共同难点在于:业

务目标、调度规则和工程约束之间缺少统一的任务表达方式,跨区域、跨对象调控缺少面向全局目标的协同机制,认知研判与专业求解之间尚未形成稳定衔接。

因此,国家水网自主运行需要建立一种能够连接业务目标、调度规则和工程控制的分层运行机制。该机制首先要把规程文本、监测数据、运行经验和管理要求转化为可计算的任务表达;其次要按照业务对象和时间尺度配置专业求解单元,使防洪调度、输配水控制、资源配置和生态调控等任务能够分别由相应机理智能体承接;最后要依托数字孪生反馈对执行偏差、边界变化和异常工况进行滚动校核。上述要求共同构成融合水网大模型与机理智能体的自主运行水网总体架构(见图1),并为后续认知决策机制、智能体执行机制和工程验证体系设计提供基础。

## 二、水网大模型:面向复杂业务任务的认知决策中枢

### 1. 定位与核心职能

在分层运行架构中,水网大模型承担认知决策层

的任务组织职能。水网大模型运行面对的输入并非单一监测变量,而是由雨水情信息、工程运行状态、调度规程、供需计划、生态管控要求和历史调度案例共同组成的多源异构信息。传统自动控制系统的参考输入通常由人工或固定规则给定,而水网大模型的参考输入生成是一个复杂业务过程,需要从多源信息中识别调度意图,从制度文本和工程规程中抽取可计算约束,并在防洪安全、供水保障、节水控制和生态保护等目标之间进行权衡。

水网大模型不是替代水文预报、水动力仿真、水资源优化和渠系控制等专业计算,而是承担业务理解、规则解析、目标权衡和任务封装等上游职能。其核心作用在于把分散在监测数据、调度规程、管理制度和历史案例中的信息,组织为专业模型和机理智能体可承接的结构化问题表达。由此,大模型输出的重点不是自然语言答案,而是包含任务类型、工程对象、目标函数、约束条件、求解参数和智能体调用序列的任务包。

水网大模型认知决策层的信息处理链包括四个环

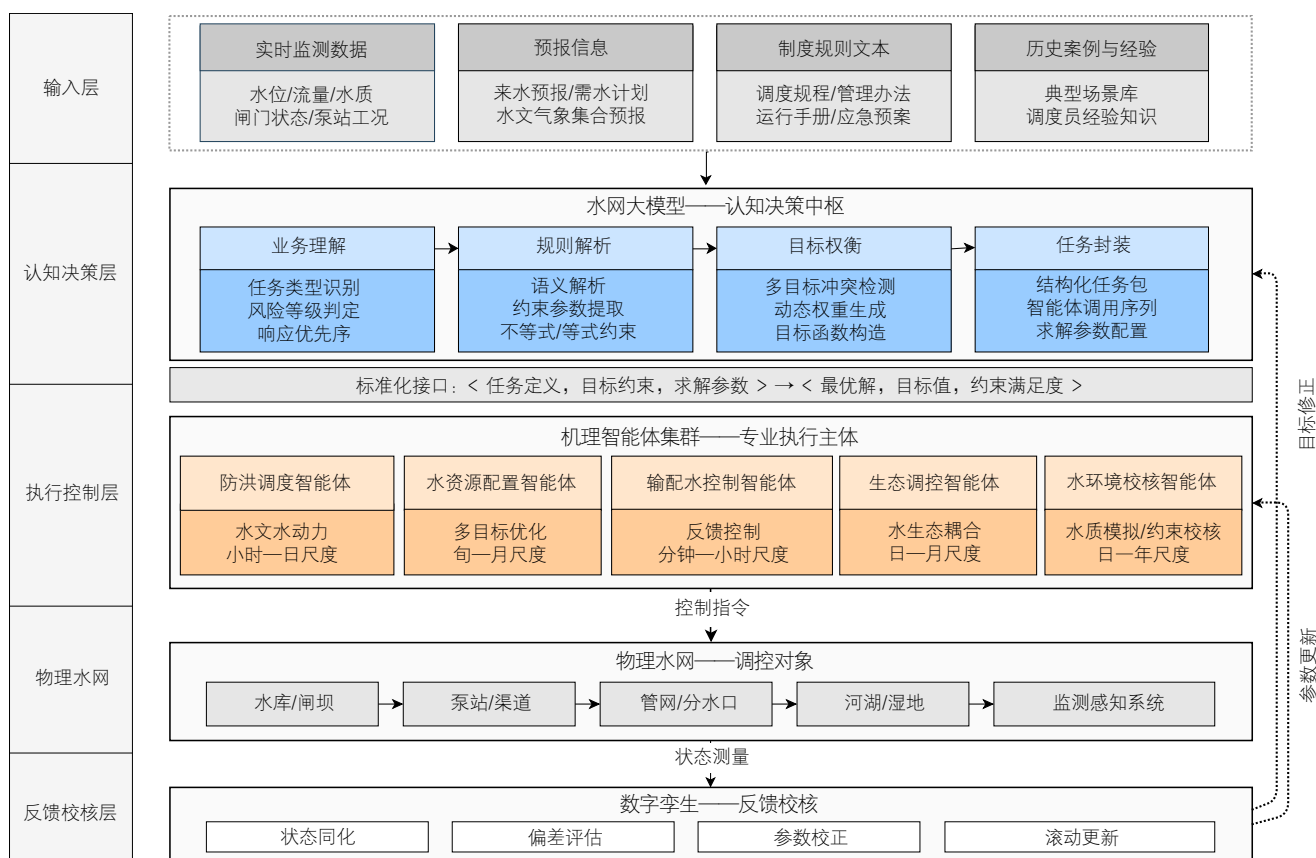


图1 水网大模型与机理智能体融合的自主运行水网总体架构

节(见图2)。业务理解环节从多源异构信息中识别任务类型,判定风险等级、空间范围和响应优先序。规则解析环节从调度规程、工程运行规则和管理制度中提取汛限水位、最小下泄流量、渠段允许水位变幅、闸泵启停条件等参数,并转化为约束条件集合。目标权衡环节在多个目标出现冲突时,依据场景风险等级、工程安全边界和调度优先序生成动态权重。任务封装环节将上述结果整合为结构化任务包,并通过标准化接口传递至相应机理智能体。

## 2. 面向水网四大能力的认知决策机制

水网大模型的四环节信息处理链在不同业务场景下具有不同工作重心。表1对水旱灾害防御、水资源节约集约利用、水资源优化配置和河湖生态保护治理四类任务下的认知决策机制进行对照。

水旱灾害防御场景以小时至日级响应为主,认知决策的重点在于将预报不确定性传递至调度求解过程。水网大模型需要把集合预报、雨洪过程和工程状态转化为情景集合或鲁棒约束,使后续防洪调度智能体能够在水库群、河道和控制断面约束下开展方案求解。

水资源节约集约利用场景以分钟至小时级响应为主,关键在于将调度规程和运行经验转化为可计算的闸泵控制边界。例如,渠段流速安全上限、分水口供水偏差容许范围、闸门启闭条件等运行限制通常散布于规程文本和调度经验中,规则解析环节需要完成从自然语言规则到控制约束的转换。

水资源优化配置场景以旬至月级响应为主,涉及多水源、多受水区和跨流域格局下的供水分配。该场景下,认知决策的重点不是直接求解优化问题,而是为后续多目标鲁棒优化明确配置情景、供水优先序、目标权重和调度边界。

河湖生态保护治理场景的响应尺度跨度较大,可覆盖日至年级过程:生态流量保障、生态水位维持多对应日级调度,水质改善、生境修复和河湖生态响应则往往具有季节性至年级滞后。此类任务需要在方案形成阶段同步考虑生态流量、生态水位、水环境约束和生态响应过程,使生态要求由事后校核前移至方案生成过程。

四类场景共享业务理解、规则解析、目标权衡和任务

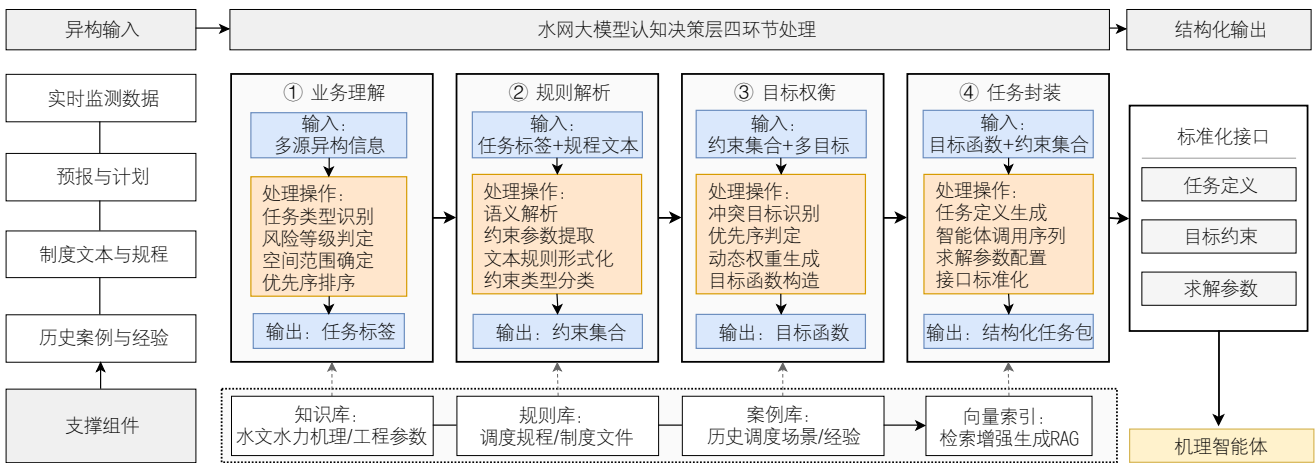


图2 水网大模型认知决策层的信息处理链

表1 水网大模型四环节处理链在不同业务场景下的差异化机制

处理环节	水旱灾害防御	水资源节约集约利用	水资源优化配置	河湖生态保护治理
响应尺度	小时—日级	分钟—小时级	旬—月级	日—年级
业务理解	洪水风险识别	输水工况切换	配置类型判定	生态调度识别
规则解析	调度规程	语义解析与编译	行政分水协议	生态流量映射
目标权衡	防洪/发电	节水/安全	效率/公平	生态/调度
任务封装	防洪调度任务	输配水控制任务	水资源配置任务	生态校核任务
关键挑战	预报不确定性	实时控制约束	多目标耦合	生态约束前置
承接主体	防洪调度智能体	输配水控制智能体	水资源配置智能体	生态调控/水环境校核智能体

封装四个环节,但各环节的工作重心随业务任务而变化。

### 3. 技术实现:知识增强与工具调用

水网大模型采用知识增强与工具调用相结合的实现路线,即将大模型定位为任务理解和信息组织工具,而非水文水动力计算或优化求解器。领域专业知识保留在外部知识库中按需检索,专业计算交由经过验证的机理模型和控制算法完成,大模型负责理解任务、组织信息和封装结果。其推理过程包括知识检索、语义推理和工具调用三个环节(见图3)。

知识检索环节可基于向量数据库、知识图谱或二者结合的方式,从行业知识库中召回与当前任务相关的知识片段。水网知识库不同于通用文本知识库:水文水动力机理多以方程和模型参数形式存在,工程参数多以结构化表格形式存在,调度规程多以自然语言文本形式存在,历史调度案例则包含事件记录、工况描述和处置过程。多源异构知识需要统一索引,并通过向量化表示将文本、参数、图谱节点和工程对象映射到共享语义空间,使大模型在面对具体调度任务时能够跨类型检索相关知识。

语义推理环节利用大模型的上下文理解能力,将检索到的知识片段与实时监测数据、规则文本和案例描述融合,生成结构化中间结果。该过程不直接生成最终控制指令,而是形成任务标签、约束集合、目标函数和任务包。当推理结果与已知物理约束或工程边界冲突时,大模型应依据知识库中的水力学方程、调度规程和工程参数开展校核,并触发再检索或方案调整。物理约束嵌

入机制是水网大模型区别于通用大模型的重要特征,也是其用于水利工程场景的前提。

工具调用环节通过标准化接口将任务包传递至相应机理智能体,并接收求解结果用于评估与修正。工具调用机制使水文水动力仿真、优化求解、控制律计算和约束校核等专业计算由经过验证的专用模型承担,而非由大模型直接生成数值结果。知识增强与工具调用的组合在架构层面实现了认知决策与专业计算的解耦。当调度规程更新时,主要更新知识库;当求解算法升级时,主要替换对应智能体。封闭端到端模型在一般生成任务中具有较强能力,但直接应用于安全攸关的水网基础设施仍面临可解释性、可验证性和可审计性方面的挑战。对高可靠性工程系统而言,分层解耦、机理约束和可追溯调用更便于开展工程验证、责任追踪和安全审查。

## 三、机理智能体:面向专业任务的执行主体

机理智能体是水网大模型下达结构化任务后的专业承接单元。与侧重业务理解和任务组织的水网大模型不同,机理智能体面向具体水利业务对象开展计算、控制和校核,其内部集成水文水动力模型、水资源优化模型、模型预测控制(MPC)方法、反馈控制算法和规则校核机制。机理智能体将认知决策层给出的任务包转化为满足工程边界、调度规程和安全约束的可执行方案。

### 1. 智能体类型与求解机制

针对国家水网水旱灾害防御、水资源节约集约利用、水资源优化配置和河湖生态保护治理等核心任务,

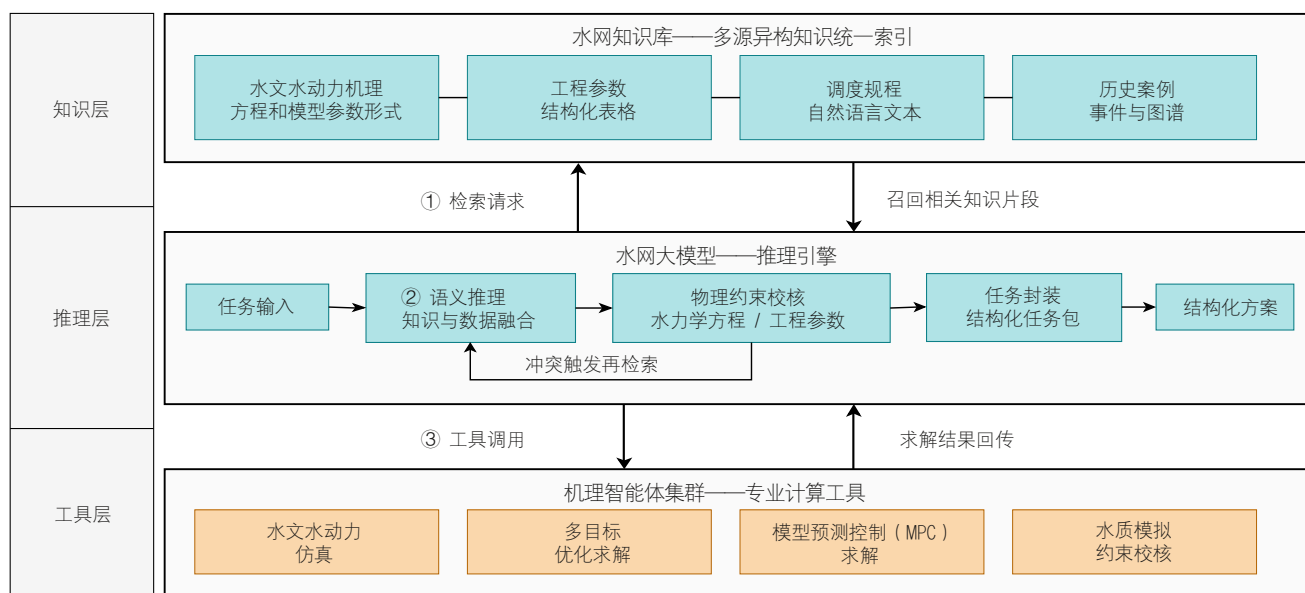


图3 水网大模型知识增强与工具调用推理路径

可将机理智能体划分为防洪调度、水资源配置、输配水控制、生态调控和水环境校核5类(见表2)。各类智能体分别对应不同业务对象、时间尺度和约束条件:防洪调度智能体面向水库群调度,主要调用水文水动力模型和多目标优化计算模块;水资源配置智能体面向多源多区配置,主要调用多目标优化和鲁棒决策方法;输配水控制智能体面向渠系管网调控,主要调用MPC和反馈控制方法;生态调控智能体面向河湖生态调度,主要调用生态需水模型和生态水文过程分析方法;水环境校核智能体面向水质达标校核,主要调用水质模型和污染物迁移转化模型。

5类智能体对应不同业务对象和调控时间尺度,能够避免单一模型同时承接多业务、多尺度任务时,出现求解边界不清和控制职责混杂等问题。各类智能体的内核算法在水利工程调度、水资源系统分析、渠系控制和生态调度等领域已有较多理论积累与工程应用基础,本文架构的重点不在于重新构造各类专业求解器,而在于通过水网大模型的任务组织能力,将既有机理模型、优化算法和控制方法纳入统一协同框架。

## 2. 认知层与执行层的标准化接口

认知决策层与专业执行层之间的接口设计,决定了分层架构能否稳定运行。本文采用“任务定义、目标约束、求解参数”三元组作为标准化接口。任务定义明确业务类型、工程对象、空间范围和时间尺度;目标约束描述目标函数、优先序、工程边界和安全约束;求解参数用于指定模型类型、计算步长、迭代条件、超时阈值和回退策略。机理智能体接收三元组信息后独立求解,并通过同一接口回传调度方案、目标函数值、约束满足度和异常状态。

标准化接口具有三方面工程价值:其一,便于分层测试。认知决策层主要负责定义问题,专业执行层主要负责求解问题,二者边界清晰,可分别开展功能测试、约束测试和异常工况测试。其二,便于稳定性分析。复杂耦合系统被拆分为多个相对独立的专业求解

单元,每个单元的稳定性、收敛性和约束满足情况可单独评估。其三,便于模块替换。当某类智能体的内核算法升级时,只需保持接口约定不变,认知层与其他智能体即可继续运行;当调度规程更新并触发认知层重新生成任务包时,智能体内核也无需整体重构。

接口设计还需要处理求解失败工况。当机理智能体出现可行域为空、数值发散、收敛失败、求解超时或约束冲突等情况时,应通过接口回传失败类型和原因。认知决策层据此调整目标权重、放宽次要约束、缩小工程对象范围或切换求解策略后重新下发任务。该机制避免认知层直接干预智能体内部计算过程,同时使系统在局部求解失败时仍具备继续运行和人工接管的条件。

## 3. 分层协同机制

水网大模型与机理智能体之间通过任务包和状态反馈实现分层协同。水网大模型依据雨水情信息、工程运行状态、调度规程和业务目标,确定调控任务的工程对象、时间尺度、目标函数和约束条件,并形成结构化任务包。机理智能体接收任务包后,调用水文水动力模型、优化调度模型或控制算法开展求解,生成水库出库、闸门开度、泵站工况、分水口流量等调度控制方案。

方案执行过程中,监测系统持续采集水位、流量、水质、闸泵状态和工程边界条件等运行变量,数字孪生平台基于实测数据开展状态同化、参数校正和偏差评估。当执行结果偏离预期方案,或来水、需水、工程状态等边界条件发生变化时,偏差信息反馈至相应机理智能体和水网大模型,机理智能体据此修正求解边界,水网大模型据此调整目标权重、更新约束条件或重新生成任务包。不同业务的修正频率与其运行时间尺度相匹配:闸泵控制和输配水过程采用分钟至小时级更新,水库群调度和生态流量保障采用小时至日级更新,水资源配置和目标权衡采用旬至月级滚动修正。

该协同方式将跨流域、跨工程、跨业务的水网调控

表2 机理智能体类型与求解机制

智能体类型	业务对象	内核方法	时间尺度	主要约束
防洪调度智能体	水库群调度	水文水动力模型、多目标优化	小时—日级	汛限水位、安全泄量、蓄滞洪区
水资源配置智能体	多源多区配置	多目标优化、鲁棒决策	旬—月级	分水规则、保证率、生态底线
输配水控制智能体	渠系管网调控	MPC、反馈控制	分钟—小时级	目标水位、流速上限、设备状态
生态调控智能体	河湖生态调度	生态需水模型、生态水文过程分析	日—月级	断面流量、生态水位、适宜生境
水环境校核智能体	水质达标校核	水质模型、污染物迁移转化模型	日—年級	断面水质、环境容量、排放标准

问题分解为若干与业务对象和时间尺度相匹配的专业任务。各层级通过标准化接口传递必要信息,避免传递完整状态和全部计算细节,同时保留工程调度所需的可解释性和可追溯性。该设计与递阶控制理论中的信息精简原则相一致,可减少层间信息传递负担,并提高系统运行的可测试性和可维护性。

#### 四、典型业务场景下的应用路径

围绕国家水网建设中的水旱灾害防御、水资源优化配置、水资源节约集约利用和河湖生态保护治理等任务,本文将典型业务过程分解为输入识别、任务生成、模型调用、结果输出和反馈校核等环节,以体现水网大模型与机理智能体在不同场景中的协同作用。典型业务场景下的应用路径如图4所示。

在水旱灾害防御场景中,自主运行的难点不在于单次洪水过程计算,而在于气象水文预报不确定条件下的快速研判和滚动修正。系统需要综合雨水情预报、库河工情、防洪调度规程和工程运行边界,由水网大模型识别风险范围、影响对象和防洪目标,将预泄、拦蓄、削峰、错峰等调度要求转化为包含水位、流量、泄量和工程安全约束的任务包。防洪调度智能体在此基础上调用水文预报、水动力演进和水库群调度模型,形成可执行的防洪调度方案。随着实测雨水情和工程响应不断更新,反馈校核层对方案边界进行滚动修正;当预测偏差、工程风险或规程约束超出模型适用范围时,转入

人工复核或人工接管。

在水资源优化配置场景中,核心问题是多水源、多受水区、多目标之间的协调,而不是简单的水量分配。不同区域的需水过程、供水优先序、分水规则和工程输水能力共同约束配置方案。水网大模型需要将来水预测、需水计划和调度规则转化为供需缺口识别、配置优先序判定和水量边界约束等任务,明确哪些目标可优化、哪些规则不可突破。水资源配置智能体据此调用供需平衡模型、多目标优化方法和分水规则校核模块,形成多水源联合配置方案。反馈校核层根据实际来水、受水区响应和供需偏差进行滚动修正,使配置过程在满足规则约束的前提下提高水资源优化配置和节约集约利用能力。

在水资源节约集约利用场景中,难点主要体现在输配水过程的精细控制和运行损失控制。不同渠段水位、闸泵状态、分水口需求和运行安全边界共同约束节水调控方案。水网大模型需要将调度规程、供水计划和工程运行状态转化为分水口供水偏差识别、闸泵调用顺序判定和水位流量控制边界等任务,明确优化目标、控制变量与工程安全约束之间的关系。输配水控制智能体据此调用渠道水力模型、MPC方法、反馈控制算法和指令安全校核模块,生成闸门开度、泵站工况和流量过程等控制结果。反馈校核层根据计划水位、实测水位、分水口供水偏差和设备响应情况进行滚动修正,使输配水过程在满足安全约束的前提下提高水资源节约集约利用水平。

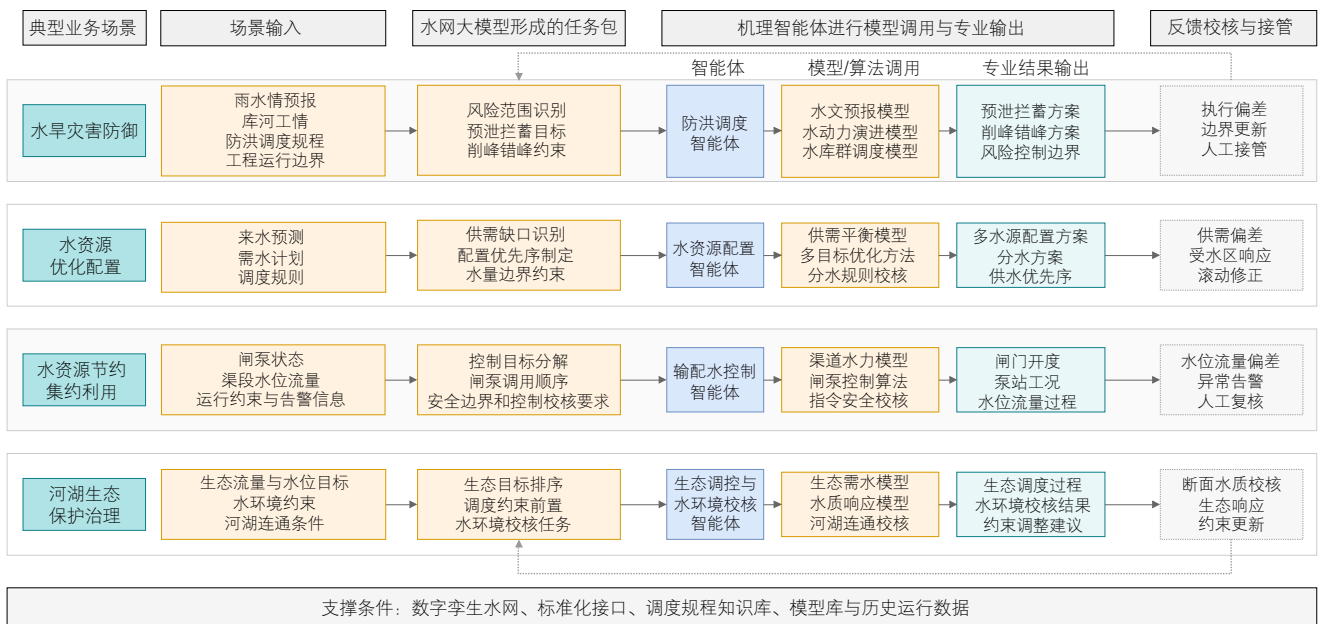


图4 典型业务场景下的自主运行水网应用路径

在河湖生态保护治理场景中,关键在于将生态和水环境约束从事后校核转向方案形成过程中的前置约束。生态流量、生态水位、水环境容量和河湖连通条件往往与供水、防洪、输水等目标同时存在,若仅在方案形成后进行生态校核,容易导致调度方案反复调整。水网大模型需要对生态目标、水环境约束和工程调度边界进行统一解析,将生态调度要求前置纳入任务包。生态调控与水环境校核智能体调用生态需水、水质响应和河湖连通校核模型,形成生态调度过程、水环境校核结果和约束调整建议。反馈校核层根据断面水质、水位流量过程和生态响应情况更新调度约束,使水网运行过程兼顾供水、防洪和生态保护目标。

### 五、分层运行架构的工程验证与能力评价

水网大模型与机理智能体的分层架构应用于实际水网调控系统,需要明确其能力边界、验证流程和准入条件。与一般信息系统不同,自主运行水网直接关联水库调度、闸泵控制、供水安全、生态流量保障和水质达标校核,属于典型安全攸关系统。其工程可用性不能仅依据功能完备性或离线仿真结果判断,还需通过接近实际运行条件的测试体系,对认知决策、专业求解、通信接口、执行设备和人机协同过程进行系统验证。

#### 1. 在环测试验证体系

在环测试为分层运行架构提供由模型到工程现场逐级逼近的验证路径(见图5)。模型在环主要用于检验控制算法、优化模型和机理智能体内核的逻辑正确性、收敛性与约束满足情况;软件在环侧重检验任务解

析、工具调用、智能体代码、求解超时处理和异常恢复机制;硬件在环通过接入PLC、边缘网关、传感器、闸门启闭机和泵站控制设备等真实硬件,评估通信时延、测量噪声、设备故障和控制响应滞后对系统运行效果的影响;人在环则引入调度人员和应急值守人员,检验人工接管、权限切换、方案解释和应急处置机制的有效性。分层运行架构覆盖复杂扰动、极端来水、需水突变、闸泵故障、通信中断、传感器异常和约束冲突等情景。对每一类情景,测试指标应包括方案可执行性、约束满足度、响应时间、回退能力、人工接管时效和运行结果可解释性。通过分层在环测试,可逐步明确系统在不同业务范围、工程对象和扰动强度下的运行边界,为工程准入和能力等级评定提供依据。

#### 2. 运行能力分级框架

本文将水网调控系统的自主运行能力划分为5个等级(见表3)。辅助决策阶段,系统主要提供状态监测、信息汇集和风险提示,调度方案仍由人工形成并执行。方案推荐阶段,系统能够生成候选调度方案,但关键节点仍需人工确认。受控自主阶段,系统能够在单一业务场景内完成方案生成、执行控制和偏差修正,人工在异常情景下介入。跨业务自主阶段,系统能够在多业务、多工程之间开展目标权衡和协同调控,人工参与战略性调整。全局协同自主阶段,系统能够在跨流域、多业务和多时间尺度条件下开展长期滚动调控,人工承担制度修订、监督审查和重大异常处置。

### 六、结论与展望

本文面向国家水网由辅助决策向自主运行演进的

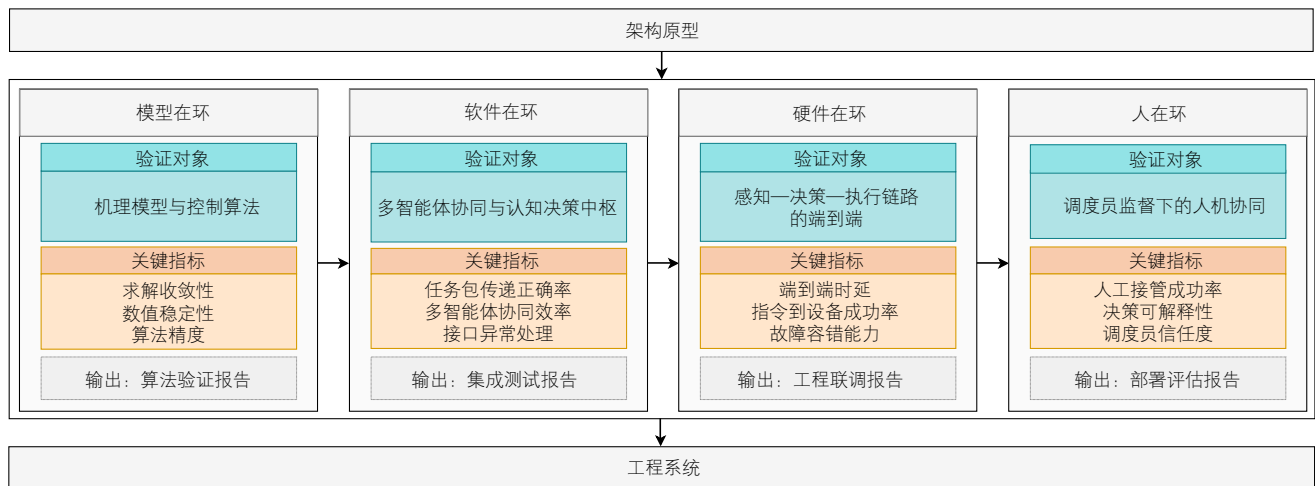


图5 自主运行水网在环测试验证体系

表3 水网自主运行能力分级框架

等级	任务覆盖	决策自主	人工干预	反馈闭环
辅助决策	单业务、单工程	信息支持	全程介入	状态监测
方案推荐	单业务、多工程	候选方案	关键确认	局部闭环
受控自主	单业务全场景	自主执行	异常介入	自动修正
跨业务自主	多业务、多工程	协调权衡	战略介入	多层次修正
全局协同自主	跨流域、多业务、多时间尺度	长期滚动自主	监督介入	全局闭环

需求,提出融合水网大模型与机理智能体的分层自主运行水网架构。该架构通过任务包、标准化接口和状态反馈,将调度规程、工程边界和多业务目标转化为可计算、可执行、可验证的任务链条,既保留专业机理模型和控制算法在工程计算中的主体地位,也增强了复杂业务场景下的任务组织、协同执行和滚动修正能力。提出典型业务场景应用路径、在环测试体系和自主运行能力分级框架,可为水网调控系统能力边界识别、工程准入测试和分级评价提供参考。

后续研究需面向典型流域、跨流域调水工程 and 大型灌区开展原型验证,完善在环测试标准、等级评价指标和人工接管要求。在此基础上,还需进一步明确调度责任边界、运行权限配置和安全审计机制,推动水网大模型与机理智能体融合架构从原型验证走向工程应用。

#### 参考文献:

- [1] 中共中央,国务院.国家水网建设规划纲要[A].2023.
- [2] 轩玮,李博远,汪习文.深入贯彻落实党的十九届六中全会精神 推动新阶段水利规划计划工作高质量发展——访水利部规划计划司司长石春先[J].中国水利,2021(24):1-3.
- [3] 成建国.数字孪生水网建设思路初探[J].中国水利,2022(20):18-22+10.
- [4] 李钟宁,刘洁.数字孪生技术赋能水利工程建设管理路径[J].中国科技信息,2025(18):152-154.
- [5] BHANDARI P, CREIGHTON D, GONG J, et al. Evolution of cyber-physical-human water systems: Challenges and gaps[J]. Technological Forecasting & Social Change, 2023, 191:122540.
- [6] FU G, JIN Y, SUN S, et al. The role of deep learning in urban water management: A critical review[J]. Water Research, 2022, 223:118973.
- [7] WANG J, FU G, SAVIC D. Leveraging large language models for automating water distribution network optimization[J]. Water Research, 2026, 288:124536.
- [8] 林圣德,管华明. AI大模型在水利知识库构建中的应用研究[J].水利规划与设计,2025(12):102-105+131+137.
- [9] WANG L, MA C, FENG X, et al. A survey on large language model based autonomous agents[J]. Frontiers of Computer Science, 2024, 18(6):186345.
- [10] NEGM A, MA X, AGGIDIS G. Deep reinforcement learning challenges and opportunities for urban water systems[J]. Water Research, 2024, 253:121145.
- [11] HUNG F, YANG Y C E. Assessing adaptive irrigation impacts on water scarcity in nonstationary environments: A multi-agent reinforcement learning approach[J]. Water Resources Research, 2021, 57(9):e2020WR029262.
- [12] ZHANG Z, TIAN W, LIAO Z. Towards coordinated and robust real-time control: A decentralized approach for combined sewer overflow and urban flooding reduction based on multi-agent reinforcement learning[J]. Water Research, 2023, 229:119498.
- [13] ADEDEJI K B, HAMAM Y. Cyber-physical systems for water supply network management[J]. Sustainability, 2020, 12(22):9555.
- [14] DENG L, GUO S, YIN J, et al. Multi-objective optimization of water resources allocation in Han River basin (China) integrating efficiency, equity and sustainability[J]. Scientific Reports, 2022, 12:798.
- [15] XU B, SUN Y, HUANG X, et al. Scenario-based multiobjective robust optimization and decision-making framework for optimal operation of a cascade hydropower system under multiple

- uncertainties[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(4): e2021WR030965.
- [16] YU L, WU X, WU S, et al. Multi-objective optimal operation of cascade hydropower plants considering ecological flow under different ecological conditions[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 601: 126599.
- [17] KONG L, QUAN J, YANG Q, et al. Automatic control of the middle route project for South-to-North Water Transfer based on linear model predictive control algorithm[J]. *Water*, 2019, 11(9): 1873.
- [18] VAN OVERLOOP P J, CLEMMENS A J, STRAND R J, et al. Real-time implementation of model predictive control on Maricopa-Stanfield Irrigation and Drainage District's WM Canal[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2010, 136(11): 747-756.
- [19] CASTELLETTI A, FICCHI A, COMINOLA A, et al. Model predictive control of water resources systems: A review and research agenda[J]. *Annual Reviews in Control*, 2023, 55: 442-465.
- [20] LITRICO X, FROMION V. *Modeling and control of hydrosystems*[M]. London: Springer, 2009.
- [21] FENG S, SUN H, YAN X, et al. Dense reinforcement learning for safety validation of autonomous vehicles[J]. *Nature*, 2023, 615(7953): 620-627.
- [22] WU R, WANG R, HAO J, et al. Multiobjective multihydropower reservoir operation optimization with transformer-based deep reinforcement learning[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 632: 130904.
- [23] TIAN W, XIN K, ZHANG Z, et al. Flooding mitigation through safe and trustworthy reinforcement learning[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: 129435.
- [24] PESANTEZ J E, ALGHAMDI F, SABU S, et al. Using a digital twin to explore water infrastructure impacts during the COVID-19 pandemic[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 77: 103520.
- [25] MESAROVIC M D, MACKO D, TAKAHARA Y. *Theory of hierarchical, multilevel systems*[M]. New York: Academic Press, 1970.
- [26] 雷晓辉, 张峥, 苏承国, 等. 自主运行智能水网的在环测试体系[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2025, 23(4): 787-793.
- [27] SOMERS R J, DOUTHWAITE J A, WAGG D J, et al. Digital-twin-based testing for cyber-physical systems: A systematic literature review[J]. *Information and Software Technology*, 2023, 156: 107145.
- [28] 何立新, 史博阳, 张峥, 等. 引调水渠道控制系统硬件在环测试平台设计与实现[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2025, 23(5): 1036-1046.

责任编辑 吕彩霞