

文章编号:0559-9350(2018)09-1148-10

智能水网工程：驱动中国水治理现代化的引擎

王建华, 赵红莉, 冶运涛

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 将新中国成立以来我国水利发展过程划分为3个阶段, 论证了智能水网工程是驱动我国水治理现代化战略实施的集成性载体。系统解析了现代水网系统的“自然+人工”、“水流+水基”、“生态环境+经济社会”二元化结构, 提出了智能水网系统是由水物理网、水信息网和水管理网耦合组成的复合系统, 具备安全性、可测度性、可控达性、资源优化性和技术先进性的五维智能化表征, 支持和实现水流、信息流和业务流的互联互通。系统探析了近自然的河湖生态治理、水基础设施网络系统规划和复杂条件下大型水工程安全友好建设等水物理网的关键技术, 智能传感与多源立体监测组网、多源水信息融合与挖掘和水信息多尺度预测预报等水信息网的关键技术, 实践驱动的水资源优化配置、复杂水资源系统多目标综合调度和水利工程群非线性耦联智能控制等水管理网的关键技术。最后探讨了国家智能水网工程建设方向。

关键词: 水治理现代化; 智能水网; 综合载体; 智能化表征

中图分类号: TN911; TV21

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20180653

1 引言

水安全保障和水治理现代化问题是国际上普遍关心的全球性问题^[1], 也是我国可持续发展面临的重大战略问题^[2]。我国水资源短缺、旱涝灾害及与水相关的生态-环境问题非常突出, 均可归因于水循环系统演变与调控的失衡造成的^[3]。由自然河湖水系网络和水利基础设施网络构成的水网作为水循环系统的物理载体^[4], 是所有水循环调控行为和措施的客观基础。无论是防洪抗旱减灾, 还是水资源的配置、节约和保护, 抑或是相关管理制度的建设, 均可以统一到“自然-社会”二元水网系统的软硬件体系建设上来^[5]。在信息化浪潮驱动下, 智慧地球、物联网、大数据、云计算、人工智能等相关理念和诸多信息技术纷纷应用于水领域, 衍生出智慧流域^[6]和智能水网^[7]的新概念, 成为水信息、水利工程等学科发展的聚焦领域, 同时也是智慧水利(务)^[8-9]、海绵城市^[10]和智慧环保^[11]等水系统治理实践的理论基础与技术支撑^[8,12]。智能水网作为智慧流域的前沿方向和治水实践的基础设施, 能够统筹水灾害、水资源、水生态、水环境和水工程等治水领域, 是新时代“节水优先、系统治理、空间均衡、两手发力”治水方针实施的集成性抓手^[9]。当前, 我国正在积极开展水利基础设施网络建设, 并将信息化作为实现水治理现代化的重要载体, 同时深化水管理体制机制改革, 这些工作的实施为智能水网工程建设奠定了坚实基础。在新时期治水需求和技术进步驱动下, 智能水网所代表的现代水管理手段已成为全球水管理前沿理念和模式^[13-14], 其建设成为当前各国和相关机构的战略选择。

收稿日期: 2018-05-26; 网络出版日期: 2018-09-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180919.1100.005.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401306, 2017YFC0405804, 2017YFC0405801); 国家杰出青年基金项目(51625904); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项项目(WR0145B272016)

作者简介: 王建华(1972-), 男, 江西上饶人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事流域水循环、水资源和节水型社会建设等研究。E-mail: wjh@iwhr.com

通讯作者: 冶运涛(1983-), 男, 河南许昌人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水信息与智慧流域、流域水循环模拟和水资源遥感研究。E-mail: yeyuntao@iwhr.com

智能水网建设在国内外已取得较大进展,逐渐积累了有益的实践经验。我国各地根据需求而积极建设水网工程,为实现水网工程的智能化升级提供了条件,但目前这些工程大多停留在水系连通和水利信息化的早期阶段^[4,15],主要问题体现在以下几个方面:(1)对智能水网的概念缺乏统一认识,对其系统结构和功能缺乏完整解析;(2)智能水网的发展定位和建设方向尚不明确,智能水网规划建设的理论与实践存在脱节、建设体系不甚健全;(3)水管理制度与软硬件仍不匹配。总结起来,智能水网的建设必要性、系统构成、智能化表征、关键技术体系及建设方向等基本理论问题需要进一步梳理和提炼,回答智能水网的“为什么建”、“是什么”和“怎么建”等问题,以便更好地指导智能水网的研究与实践。

2 智能水网-水治理现代化集成性载体

2.1 新中国水利发展阶段的剖析 新中国成立以来,中国水利随着国情和水情条件的变化不断发展进步,以满足和支撑不同时期国家经济社会发展和改革的现实需求,大致可划分为安全奠基阶段、提标升级阶段和资源生态阶段,每个阶段有着不同的治水思路和标志性事件。

2.1.1 水利发展的安全奠基阶段(1949—1977年) 其间以大力增强防洪、供水和粮食生产能力为核心目标,建设了大量水利工程^[16],初步控制了常遇的洪水灾害,极大地促进了农业生产的发展,为中国水利设施的建设奠定了基础。该阶段可以被认为是新中国水利发展的安全奠基阶段。但是由于建设强度高和时间紧迫,水利建设缺乏有效规划,水利工程设施质量普遍不高。同时重工程建设,轻工程管理,水利呈现粗放式发展^[17]。

2.1.2 水利发展的提标升级阶段(1978—2000年) 其间以保障城乡供水安全和大江大河防洪安全为核心目标,加大了水资源开发利用,提高了城乡和工农业供水能力;实施了大规模的江河整治,建成了较为完善的防洪排涝工程体系^[18]。该阶段可以被认为是新中国水利发展的提标升级阶段。同时,随着工业化、城镇化的推进,用水需求量超出水资源承载力造成的缺水、废污水排放量超过水环境容量导致的水污染、过量取水引发的河湖生态退化和地下水超采,以及城市暴雨呈现增多趋强、下垫面变化和无序开发等多重因素导致的城市内涝等新老水问题并发。

2.1.3 水利发展的资源生态阶段(2001年—) 进入21世纪,水资源可持续利用的理念得到高度重视和广泛普及,治水思路也开始从传统的工程水利向资源水利和生态水利进行转变,这一时期的主要特征是既重视水资源合理开发与高效利用,又强化水生态与水环境保护,水利发展开始进入资源生态阶段。2001年,我国启动了第一个全国节水型社会建设试点工作;我国2011年的中央一号文件明确提出了要实行最严格的水资源管理制度,在以“三条红线”作为控制目标的约束下,使全国用水效率不断提升、用水总量增长速率明显下降和水环境恶化趋势得到遏制,但国家水安全保障形势依然严峻。2014年,习近平总书记提出了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的16字治水方针,确立了水资源、水生态、水环境和水灾害统筹治理的新思路,为我国新时代水利事业的发展提供了全新理念和努力方向,标志着中国水利开始迈入新的发展时期。中国共产党的十九大报告明确提出要“加强水利……等基础设施网络建设”“提升防灾减灾能力”“实施国家节水行动”“加快水污染防治,实施流域环境和近岸海域综合管理”“推进水土流失治理,健全河流湖泊休养生息制度”和“统筹山水林田湖草系统治理,实行最严格的生态环境保护制度”。2018年,我国确立了习近平生态文明思想。从国家发展的指导思想和战略可以看出,生态化、系统化成为新时代水利发展的新标识,为提升水治理体系和治理能力现代化提出了新靶向。

2.2 智能水网是水治理现代化的综合性载体 水网既是水资源赋存和流动的物理载体,又是各类治水活动的基本对象,与交通网、能源网和互联网等并列为影响现代社会人类生活的四大基础设施网络。作为有效支撑区域发展、更好服务国家战略的综合基础设施体系^[13],水网的系统完善与否、运行效率高和功能发挥好坏,直接关系到国计民生和社会发展大局。与交通、电力、通讯等其他基础设施网络系统相比,水网最显著的差距在于其智能化水平不高,主要表现在物理水网建设规划的

系统性与科学性亟待提高、水信息化的碎片化和孤岛效应问题突出、水利设施调度与管理的自动化和智慧化程度不高等。尤其是水网的生态性不足、整体性较弱、协同性不高、劳动密集型建设多等问题已成为水利基础设施网络发展的短板，也是水利现代化建设亟需突破的瓶颈^[8]。

目前，新一轮信息化浪潮正席卷全球，云计算、物联网、大数据、移动互联网、人工智能等新一代信息技术与经济社会深度融合，深刻改变着政府社会管理和公共服务的方式。习近平总书记在中国共产党第十九次代表大会中特别强调要建设网络强国、数字中国、智慧社会，把“智慧社会”作为建设创新型国家的重要内容。前面提及的现代社会四大基础性网络中，通讯网已发展到实现“万物互联”的5G时代；国家电网公司早在2009年就提出全面建设智能电网，已经发展到升级阶段—走向更高层次的深度智能^[19]；交通运输部于2017年年初出台了《推进智慧交通发展行动计划(2017—2020年)》，唯有水网保持着较为传统基础设施的建设和管理模式。因此，亟需顺应时代潮流，落实中央精神，发挥后发优势，大力推进水网的智能化升级，实现传统水利向现代水利的跃迁，构建生态与智能的理念技术深度融合的资源管理和生态环境保护的新型模式，推动水治理现代化的实施。

基于上述时代背景和实践需求，提出将智能水网作为水治理现代化实施的综合性载体。所谓“智能水网”，是指现代人类社会为实现兴水利、除水害及人水和谐的总目标，利用新一代信息技术和智能决策控制技术，将全国江河湖泊水系、水基础设施体系、管理调度体系深度融合的一体化软硬件网络系统^[9]。智能水网工程能将物理基础、信息体系和决策系统三大水利建设标的组件的整合，实现防洪排涝减灾、供水保障、生态维持、环境保护、发电航运和工程运行等水功能的统筹。

智能水网建设的内容主要包括三大部分，即由各类水流传输和调控基础设施组成的水物理网建设、符合智能化技术趋势的水信息化建设、以科学调度指令形成为核心的水管理网建设。其中水物理网建设包括自然河流水系整治、蓄引提水工程建设、供排水设施体系建设，基本可以涵盖水利基础设施建设的内容，而智能化要求在工程建设中既要考虑宏观系统结构与布局的科学性，也要注重单体设计与建设的合理性，体现了现代水利基础设施体系规划与建设的时代要求；水信息网建设涵盖了“自然-社会”二元水循环及其调控信息的采集、传输、处理的整体建设内容，智能化则对于信息采集的可靠性和有效性、现代信息技术的应用等具有相应的要求，形成了现代水利信息化的基本构架；水管理网建设则包括管理决策能力、涉水事务管理体制和制度、机构队伍及其能力等的建设，与现代水利决策与管理体制改革有较好的吻合。

综上，智能水网是驱动水治理现代化的集成载体，能有效承担起引领新时代水利现代化建设的根本任务，是推进水利现代化建设的综合性抓手，通过强化水基础设施网络的互联互通，深化新一代信息技术与水网的融合，提高水资源与工程调度管理效能，加速水治理能力和治理体系的现代化进程，进一步发挥水利对经济社会发展和增进民生福祉的支撑和保障。

3 智能水网工程内涵与特征解析

3.1 现代水网二元化结构 通过对现代水网^[13,20]结构进行分析，现代水网具有二元化结构：(1)由“自然+人工”二元构成，包括自然的江河湖泊水网和人工配/供/排/回用网。前者包括自然水系以及自然水系中建设的水库、闸门、泵站和堤防，还有深浅层地下水；后者包括以人工修建的输排水网络、泵站、闸门、城市供水厂、污水处理厂和用水器具等。(2)包括“水流+水基”二元要件，水流要素包括量、质、流、域^[21]；水基^[22]要素包括河床、湖盆、蓄水层、渠道、管道、岸堤等。(3)具有“生态环境+经济社会”二元功能，生态环境功能指能提供适宜的水文水动力和水环境条件，既让水生动物栖息、水生植物生存，又使水生动植物保持多样性；经济社会服务功能指既能提供适量优质的生活用水，又能以水景观和水文化给人创造美好舒适的生活环境，同时可以为发展产业经济提供支撑。

3.2 水网系统三维内涵 二元物理水网是人类治水实践的物质载体，但水物理网要实现其多元化目标和功能，除了完善的物理网络体系外，还需要信息支持和决策支持，前者需要通过信息网络的传

表1 智能水网-“三网合一”复合系统

类型	单元	内容
水物理网	通道	自然河湖水系、人工输配水渠系管网
	节点	河流水系汇点、水利枢纽、输配水节点
	流	水流
	规则	水动力学规律
水信息网	通道	有线传输通道、无线传输通道
	节点	信息采集点、信息汇聚交换点、管理控制平台
	流	信息流
	规则	数据标准、网络协议、传输协议
水管理网	通道	纵向调度管理体制、横向调度管理体制
	节点	不同层次管理单元与组织机构
	流	业务流
	规则	调度规程、工程运行管理制度

递来实现，后者需要通过管理网络的调控来实现。从网络的通道、节点和流三大构成要件来看，这3个系统具有典型的网络特征(表1)。类比于人体系统，水物理网相当于人体的肌体骨骼系统，水信息网相当于人体的神经系统，水管理网相当于大脑中枢系统，只有神经系统及时客观的感知、中枢系统科学正确的判断、肌体系统灵敏有力的反应，三者协同作用，才能完成内心期望的行为或对外部刺激做出有效反映。因此一个完整的智能水网是上述水物理网、水信息网、水管理网“三网”耦合形成的复合网络系统。

“三网合一”是智能水网高效运作和效益发挥的关键。以水物理网建设统合水利基础设施建设和江河湖泊整治工作，以水信息网统合水资源监控保障能力和信息化决策支持系统建设，以水管理网建设统合水管理决策体系和管理模式建设，并通过三网间的信息指令的交互和传输，实现智能水网的整体功能。水事管理者借助水信息网感知和传输体系的支撑，快速、高效、准确地获取关于水流、自然江河湖库和水工程的实时数据，通过水信息网决策支持系统的强大数据挖掘和模拟分析能力形成决策支持信息；水管理网在水信息网的决策支持和高速能力的辅助下形成调度管理指令并发布；水物理网一方面接收水管理网的指令通过水利工程硬件运行实现水流调度；另一方面，又将当前状态通过信息网监控端反馈给水管理网，以辅助下一周期调度决策形成。

3.3 水网的智能化表征 智能水网的英文为 Smart Water Grid，其智能化表征也可以概括为 SMART，S即安全性(Security)、M即可测度性(Measurability)、A即可控达性(Accessibility)、R即资源优化性(Resource-optimization)、T即技术先进性(Technological-innovation)。

安全性(Security)是智能水网的功能表征，包括防洪安全、供水安全、生态安全和工程安全等，主要体现：(1)高效可靠，即智能水网的软硬件系统在很少或不用人为干预的情况可以迅速恢复到正常运行状态；(2)生态友好，即不仅直接或间接创造出更多的经济效益，而且能提供适宜的环境和资源；(3)经济可行，即三网系统的协同运行使资源得到高效配置、实时调度和效益最大化；(4)社会认可，即能够保障整个社会的水服务是公平的，同时使水灾害潜在威胁降到最低。

可测度性(Measurability)是智能水网的认知表征，主要表现在对水网系统的透彻感知和信息融合。透彻感知有三层含义：(1)感知范围的全面性，既对水循环通量特征因子的反映，又对荷载水流运动的物体实体和周边环境的静态特征和动态趋势的感知；(2)感知的高效性，既体现信息采集和传输的高效率，也体现感知活动的低损耗和可持续性；(3)感知的准确性，即感知活动是对系统状态及未来可能发展方向的真实反映和有效预测。基于透彻感知的信息，信息融合包括三方面的含义：一是对历史水循环变化的复演；二是对现状水循环的实时在线跟踪；三是对未来水循环变化的推演。

可控达性(Accessibility)是智能水网的行为表征，主要表现在对水网系统的科学决策和智能控制。主要体现在以下方面：(1)基础设施的完善，即建立的水工程基础设施和信息基础设施比较完

备,可支持信息-物理设施的双向耦合互动;(2)决策科学及时,即在管理决策中遵循科学规律,减少非科学因素的主观性扰动,又能够使决策成果效益的最优化以及决策形成过程的高效率;(3)指令准确快捷,即生成的调度指令能够快速地传达给相应的人和物;(4)控制智能高效,即水工程控制设备能够高效准确的进行调控。

资源优化(Resource-optimization)是智能水网的效益表征,主要表现在水网系统的功能协同和系统最优化,是指水资源系统是一个开放的、远离平衡态的复杂系统。根据水资源系统的自然、经济和社会属性,水资源系统可由经济子系统、社会子系统和生态环境子系统构成。通过协同水资源系统中经济、社会和生态环境子系统的关系,保持系统之间的动态平衡,使水资源复合系统达到一种整合、综合和内性发展的组合,呈现出水资源高效利用、社会结构合理、经济健康发展和人口适度增长、社会公共福利公平、生态环境状况良好的稳定状况。

技术先进性(Technological-innovation)是智能水网的装备表征,是指信息技术发展和新技术应用带来新变革,以云计算、物联网、大数据、人工智能、移动互联网等为代表的泛在感知、虚拟化资源和知识化处理等新技术形态显著提升行业智能化水平。通过泛在感知,使识别、定位、跟踪、监控和管理更加智能化;通过虚拟化资源,使资源扩展、配置、利用、运行、维护和管理更加便捷化、集约化;通过知识化处理,使管理、决策、评估、监督更有科学依据。这些新技术日益成为水利创新驱动发展的先导力量,也将重塑水利发展模式,促使水利管理发生新的变革。

4 智能水网工程建设的关键技术探析

智能水网是由水物理网、水信息网、水管理网耦合集成、协同互动的“三网合一”复杂巨系统,能支撑水网体系的“规划-设计-建设-运行”高效安全的管理。传统的建设模式是三网分开建设,重工程,轻管理,略生态,导致水网工程“一网多能”的效益没有完全发挥出来。而新时期的水利建设方向,在目标上,要更加重视“空间均衡”,在思路,要更加“系统治理”,在手段上,要突出“生态”和“智慧”技术的应用,因此,亟需构建新的技术体系来支撑智能水网工程建设。鉴于水物理网、水信息网和水管理网的建设技术具有各自特点,探索提出了“3+3+3”的关键技术体系。

4.1 水物理网建设关键技术

4.1.1 近自然的河湖生态治理技术 我国河湖管理面临着水域面积减少、基本功能减弱、生态环境质量下降等问题。围绕上述问题,亟需攻克的技术包括水域岸线保护红线划定、生态护岸构建、水体修复等技术。水域岸线保护红线划定技术研究要按照保障河势稳定、防洪安全、供水安全和河湖生态空间保护的要求,首先划定主体功能区禁止开发区水域,然后根据岸线保护功能重要性评估结果,划定禁止开发区外的其他水域及对应岸线保护红线范围^[23]。生态护岸构建技术研究使护岸除了防止河岸坍塌,还使河水与土壤相互渗透,增强水体自净能力,更要有美好的自然景观效果^[24]。水体修复技术研究是根据生态学和环境学的原理,综合运用水生生物和微生物的方法,研究使污染水体得到改善或恢复所采用的技术;按照治理对象分为河流水动力调控、河道底质改善、河道生态修复和河水强化净化等技术的研究^[25]。

4.1.2 水基础设施网络系统规划技术 水基础设施过去重视单个工程的规划建设,整体性不足、协调能力不强,供水、防洪、生态等综合效益不能充分发挥。围绕上述问题,需要以河湖水系连通为对象,亟需攻克功能与问题识别、规划需求分析、规划方案甄选和规划效果评估等技术^[26]。功能与问题识别技术研究主要剖析河湖水系存在的供水、防洪、生态等问题,分析水系连通变化对河湖服务功能的影响。规划需求分析是综合分析评价连通前后的河湖水系服务功能状况,初步评价河湖水系连通对河湖水系、水循环、社会经济和生态环境的影响效果。规划方案甄选技术研究是研究河湖水系连通工程的功能、范围和规模的合理确定方法,综合评价河湖水系连通前后调出区和调入区的潜在风险。规划效果评估技术研究是分析河湖水系连通的经济社会和生态环境的效应,论证河湖水系连通的工程、经济和技术的合理性。

4.1.3 复杂条件大型水工程安全友好建设技术 我国未来的高坝大库多集中在西部地区，这不仅面临着高海拔、高寒、高地震烈度、高陡边坡等更加恶劣的自然环境，而且作为生态环境最脆弱的地区，环境承载力非常低，给施工建设带来了难题。因此，需要探索应用新材料、新技术、新工艺和新设备，提升工程建设能力^[27]。加强大数据、云计算、BIM(Building Information Model)、“4S”(GNSS/INS/GIS/RS)技术等现代信息技术在水电工程中的应用研究，实现工程设计数字化、可视化、协同化，工程建设管理监控自动化、管理规范化和工程运行管理高效化、智能化，从而使信息的重要生产要素和战略资源的作用得以发挥，使人们能更高效地进行资源优化配置，从而推动水电行业不断升级，提高社会劳动生产率和社会运行效率。在水电工程建设中，需强化高原生态环境保护研究，深入研究高原高坝大库对气候及生态环境的影响及保护措施。

4.2 水信息网建设关键技术

4.2.1 智能传感与多源立体监测组网技术 水信息立体监测面临着在线监测设备无法适用于大江大河和高寒高海拔地区恶劣的自然环境、遥感技术在水利业务应用中仍存在业务化瓶颈、多源传感器资源共享和协同程度不高等问题。需要重点研制接触式和非接触式流量在线监测设备和高寒高海拔水文要素在线监测设备^[28]。研究遥感和地面实测数据相结合的尺度转换、点面数据同化技术^[29]。研究涉水事件自动识别与特征提取的事件划分机制及事件类型划分方法，开展不同类事件引发的感知信息特征研究，建立不同类事件的感知模型，研究基于多种平台、多种传感器信息进行事件自动识别的技术与方法^[30]。研究分析合适的网络结构、异质传感器类型、探测范围、功耗、相邻距离、测量环境、干扰因素等关键参数，分析多功能、多种传输速率的自组织传感器网络的组建模式，研究分布式、大规模异质传感器网络的构建方法^[30]。

4.2.2 多源水信息融合与挖掘技术 多源水信息融合与挖掘存在尺度效应和不确定性等问题，需要重点研究多源降水数据融合、土壤含水量和蒸散发多源数据融合、地下水多源数据融合、社会经济统计数据的空间化和基于多源数据融合的数据挖掘等技术。多源降水数据融合技术研究是建立卫星遥感降雨观测空间尺度降解模型，构建考虑卫星遥感观测和地面站点观测不确定性的多源降雨数据融合方法。土壤含水量和蒸散发多源数据融合与同化研究包括土壤含水量和蒸散发多源数据的尺度转换技术、多源插补融合及基于水文模型的土壤含水量和蒸散发同化。地下水多源数据融合是研究典型区域总储水量变化时空降尺度新算法，实现地下水储量变化高精度反演。社会经济数据空间化技术研究综合运用遥感数据、土地利用/土地覆被数据、NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)数据以及各种地理数据，结合地理信息系统，建立融合多源数据的综合模型。基于多源信息融合的数据挖掘技术^[31]是面向各种业务需求，建立包括基于概率论、模糊推理、人工智能和基于混合等方法的数据挖掘模型。

4.2.3 水信息多尺度预测预报技术 水文节律非稳态增强和不确定性加剧给提高不同尺度降水和人文水资源预测精度带来了难题。需要重点研究短中长期气象预报、水文预报理论与模型、中长期水资源预测、水文水资源预测预报云平台集成等^[32-33]。短中长期气象预报是发展基于模式偏差订正的多模式集成定量降水预报技术，重点突破局地高强度暴雨定量预报技术。水文预报理论与模型研究主要是在发展水利工程群、水保工程群、地下水超采作用下的不同区域的产汇流机理基础上，建立大气水-地表水-土壤水-地下水交互的耦合技术，重点攻克无资料或少资料地区的水文水资源预测预报难题。中长期水资源预报是研究非一致性条件下基于大数据挖掘技术的中长期水资源预测模型。水文水资源预测预报云平台集成研究是基于云虚拟化、分布式计算和软件即服务等技术，研发集数据、算法和模型三层次的云虚拟化业务协同共享平台。

4.3 水管理网建设关键技术

4.3.1 实践驱动的水资源优化配置新技术 大数据技术的发展为催生水资源配置新的研究方向提供了契机。我国新时期的治水方针和国家发展战略致使水资源配置影响因素逐渐增多、决策过程更加复杂，也为创新配置技术提供挑战。结合国家水权制度建设和水资源承载力监测预警机制建设的需

求, 需要重点研究基于准则的水量分配、泛域化水资源综合配置、数据驱动的水资源智能配置等技术。基于准则的水量分配技术研究主要研究水量分配准则的确定方法以及水资源使用权的初始分配和交易技术。泛域化水资源综合配置技术研究是面向负荷均衡、空间均衡和代际均衡, 研究多时空尺度水资源配置方法, 开发水资源协同配置模型。数据驱动的水资源智能配置技术^[34]研究是以大数据技术与水资源配置仿真模型相结合的方式, 研究多源数据条件下的由水资源配置的决策模型、方案评价模型及预案库等构成的水资源智能配置模式。

4.3.2 复杂水资源系统多目标综合调度技术 梯级水库群联合调度面临着在水文气象、调度模式、供需矛盾、电网拓扑结构等多因素作用下如何寻求多目标协同效益最优的难题, 需要攻克梯级水库群的防洪-供水-生态-发电综合调度、联合蓄放水调度及应急调度、多目标调度模型集成等技术^[35]。防洪-供水-生态-发电综合调度技术研究是研究水库群防洪库容优化分配策略, 揭示水库群调度模式与用水需求间的映射关系, 科学合理制定库群防洪、供水、生态、发电调度方案。蓄放水调度及应急调度技术研究是开展流域混联水库群蓄放水规律研究, 制定基于分区控制的水库群汛末联合蓄水方案, 并研究突发水安全事件的精准、实时、快速及协同应急预警调度方式。梯级水库群多目标调度模型集成技术研究是开展以多主体之间竞争博弈关系和嵌套关系为基础的综合调度集成方法与技术研究, 提出混合云架构的水库群智能云服务平台集成技术。

4.3.3 水利工程群非线性耦联智能控制技术 明渠非恒定流输水的水动力学过程具有强耦合、大时滞等非线性控制特点, 导致传统控制算法具有有限的适用性^[36]。非线性是水流、闸/泵站动态调节、渠道水力运行要素相互关联的枢纽, 是控制系统内外协同、进行水力输移机理研究的关键。需将控制算法与渠道运行方式结合, 开展渠道运行方式、控制方式和闸门控制算法的适用性和匹配性研究^[37], 重点在于检验渠道现有运行模式、实现方式和闸门自动控制技术的合理性和控制精度; 研究分段子系统渠道水力特性对控制系统影响的物理机制, 探索合理的渠道运行方式, 并研制闸泵控制器; 改进渠道运行的闸泵群联合控制模式, 开发动态耦合控制模式和控制算法; 研发冰期输水过程控制技术, 制定冰期输水的闸泵群安全调度操作程序; 研究极端、事故条件下的分级、分段控制模式, 研发能够处理常态和应急工况的闸泵群全自动控制平台。

5 国家智能水网工程建设方向浅析

智能水网作为水基础设施和信息技术两大焦点与前沿领域的交集, 被许多国家作为解决区域水问题的重要途径并付诸设施。美国推进了国家水配置网络工程和区域以水信息服务网为主要内容的国家“智能水网”建设。澳大利亚已实施了SEQ“智能水网工程”、维多利亚“智能水网”和宽湾“智能水网”等工程。以色列以全国输水系统为骨干基础, 配套灵敏科学的水资源调配系统和高效集约用水系统形成的国家“智能水网工程”, 极大地改善了以色列的供水状况。韩国已实施“智能水网”项目, 其目标是开发核心技术, 如水资源获取和处理、管道网络、“智能水网”的子网和微型网的建设和综合管理。通过智能水网国际实践的相关经验, 形成了对于智能水网几方面进展的基本认识^[38-39]: (1)智能水网是现代治水实践和现代科学技术的交集, 因此智能水网的实践探索是治水需求和信息化进程并行发展到一定阶段的产物; (2)智能水网是当前国际水行业发展的主流趋势, 这在许多国家的中长期规划和国际大型公司的长远业务发展中有所体现; (3)智能水网的应用正从水资源调配与管理领域向外不断拓展, 逐步演变为现代水务的综合性载体; (4)智能水网是现代信息技术、自动化控制技术与水技术的集成系统, 信息化、自动化、智能化是其共性特征; (5)国际上智能水网的实践目前尚处于具体水问题解决策略层面, 尚未形成有效的顶层设计和系统性的学术成果。

我国长期的水利建设和发展已为智能水网工程的建设奠定了良好基础。国家层面, 努力构建“四纵三横”的水资源配置格局, 实施江河整治和生态保护, 正在组织开展以河湖水系连通和172项重大水利工程的水利基础设施网络建设; 以“金水工程”为龙头, 建设并不断完善国家防汛抗旱指挥系统与平台, 推进国家水资源管理系统建设和国家地下水监测工程建设^[40-41]; 创新水利发展的体制机制,

深入推进最严格的水资源管理制度和河(湖)长制。近年来,山西省、山东省、河南省、云南省和上海市等地也积极开展了智能水网的实践探索。此外,智能电网、智能交通网等其他领域的探索也为智能水网的建设提供了有益借鉴和参考,为推进国家智能水网工程建设提供了良好的基础和环境。

国家智能水网工程即在国家层面践行智能水网建设模式,面向国家水安全保障及水治理现代化现实需求和时代要求,进行顶层设计,开展国家尺度的水物理网、水信息网和水管理网规划建设和系统耦合,强化水网智能化升级。具体建设方向包括:

(1)以空间均衡和高效利用为核心的国家水物理网建设。通过江河湖库治理工程、枢纽调蓄工程和蓄滞洪区的合理布局,降低洪涝灾害潜在风险,增强防洪减灾应急处置的工程能力,形成保障国家防洪安全的物理基础。通过优化水源工程结构,建设人工输配水工程体系,提升区域间水资源互调互济能力和区域内水资源开发利用水平,提升抗旱能力,形成保障社会经济供水安全的物理基础。强化水利工程在规划、设计和建设阶段的生态适应性论证,通过建设生态补水工程、重要生态景观修复工程,降低水资源开发利用对生态系统的破坏程度,恢复水生态系统服务功能,形成保障国家生态安全的物理基础。其中,水物理网智能化升级涉及治水理念、规划方法和工程技术等多个层面,其中理念层面关键要树立人水和谐尊重自然的理念,规划层面要统筹好水资源配置、防汛抗旱减灾、水生态与环境保护等多个目标,工程技术关键要突破安全、绿色、经济建设技术工艺与材料等。

(2)以全面感知和智能辅助决策为核心的国家水信息网建设。建设雨情、水情、工情智能化监测体系,以增强对潜在水安全风险的预测感知能力,从而在预警环节保障水安全。建设智能化二元水循环模拟和水网工程运行仿真系统,以提高水资源调度决策的系统性和针对性,从而在决策环节保障水安全。建设远程化、自动化、智能化的水利工程运行调控系统建设,以支撑精细化水资源管理和调度模式,从而在执行环节保障水安全。其中水信息网的智能化升级要从多业务连通、共建共享的角度出发,围绕水信息从采集、传输、存储、共享和应用的全链条展开,包括水循环立体信息全面精准感知、多源监测智能组网与动态优化、多源水信息融合与同化、水利大数据组织与知识挖掘等。

(3)以科学决策和精准控制为核心的国家水管理网建设。按照民生水利、人水和谐等新时期治水理念的指导,不断完善洪水风险管理、最严格水资源管理、水生态文明和河长制等制度体系,为水资源管理提供顶层制度指导。在水信息网建设的支撑下,不断提升自然-社会二元水循环模拟和预报能力,夯实水资源调度决策的科学基础;研发和应用复杂水资源系统的防洪、供水、灌溉、发电、航运等多目标分析和决策技术。建设水资源调度决策会商平台,提升复杂水系统的调度能力;大力推进水资源系统调度的控制与执行体系建设,保障调度指令精确和及时实施。其中水管理网的智能化升级要从业务协同出发,围绕水业务调度指令的形成、传递、执行的过程来展开,重点突破多尺度水文信息精准预测预报、不同配置目标实时优化与决策、水调控工程设施的精准控制技术,并以涉水业务管理的体制机制改革作为保障。

当前,我国水利事业已步入以生态和智慧为标志的新时代,智能水网工程作为先进治水理念、现代科学技术和系统治理实践的有机结合体,是驱动水治理现代化的核心引擎,应尽快启动和实施“国家智能水网工程”建设,开展顶层设计,出台指导意见,拟定技术路线,建立技术标准,实施技术攻关,选择合适地区开展试点工作,加快传统水网智能化升级,提升国家水安全保障和水治理现代化能力与水平。

致谢:论文撰写过程中得到王浩院士的系统指导,蒋云钟、赵勇、胡鹏、桑学锋、尚毅梓和袁平路提供了素材,孟圆负责修改了英文摘要,在此一并致谢!

参 考 文 献:

- [1] COOK C, BAKKER K . Water security: Emerging debates in policy and academia[R] . Working Paper, Universi-

- ty of British Columbia, Programme on Water Governance, 2010 .
- [2] 夏军, 石卫, 雒新萍, 等. 气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 279-286 .
- [3] 王浩, 贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1219-1226 .
- [4] 匡尚富, 王建华. 建设国家智能水网工程, 提升我国水安全保障能力[J]. 中国水利, 2013(19): 27-31 .
- [5] 王浩, 王建华. 中国水资源与可持续发展[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 352-358 .
- [6] 蒋云钟, 冶运涛, 王浩. 智慧流域及其应用前景[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(6): 1174-1181 .
- [7] “国家智能水网工程框架设计研究”项目组. 水利现代化建设的综合性载体-智能水网[J]. 水利发展研究, 2013(3): 1-5, 24 .
- [8] 水利部参事咨询委员会. 智慧水利现状分析及建设初步设想[J]. 中国水利, 2018(5): 1-4 .
- [9] 孙国庆. 智慧水务关键技术研究及应用[J]. 水利信息化, 2018(1): 46-49 .
- [10] 王浩, 梅超, 刘家宏. 海绵城市系统构建模式[J]. 水利学报, 2017, 48(9): 1009-1014 .
- [11] 刘锐, 詹志明, 谢涛, 等. 我国“智慧环保”的体系建设[J]. 环境保护与循环经济, 2012(10): 9-14 .
- [12] 尚毅梓, 王建华, 陈康宁, 等. 智能水网工程概念辨析及建设思路[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(3): 534-537 .
- [13] LEE S W, SARP S, JEON D J, et al. Smart water grid: the future water management platform[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 55(2): 339-346 .
- [14] HONG J, LEE W, HA Kim J, et al. Smart water grid: desalination water management platform[J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(7): 2845-2854 .
- [15] 蒋任飞, 施晔, 代晓炫, 等. 城市现代水网评价指标体系研究[J]. 人民珠江, 2017, 38(9): 52-55 .
- [16] 陈沸湃. 中国治水几千年, 所有的功业加起来也抵不上毛时代[EB/OL]. (2017-09-02) [2018-05-26]. http://www.sohu.com/a/169146835_99961726.
- [17] 王亚华. 中国宏观国情与水利发展阶段[C]//中国水利学会2012学术年会特邀报告汇编. 北京, 2012 .
- [18] 左其亭. 中国水利发展阶段及未来“水利4.0”战略构想[J]. 水电能源科学, 2015, 33(4): 1-5 .
- [19] 鞠平, 周孝信, 陈维江, 等. “智能电网+”研究综述[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 2-11 .
- [20] 王建华, 秦大庸, 王浩, 等. 泰安市现代水网建设规划[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2011 .
- [21] 王建华, 翟正丽, 桑学锋, 等. 水资源承载力指标体系及评判准则研究[J]. 水利学报, 2017, 48(9): 1023-1029 .
- [22] 刘宁. 水基系统的概念内涵与演进研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 475-481 .
- [23] 王晓红, 张梦然, 史晓新, 等. 水生态保护红线划定技术方法[J]. 中国水利, 2017(16): 11-15 .
- [24] 关春曼, 张桂荣, 程大鹏, 等. 中小河流生态护岸技术发展趋势与热点问题[J]. 水利水电工程学报, 2014(4): 75-81 .
- [25] 刘翔. 城市水环境整治水体修复技术的发展与实践[J]. 给水排水, 2015, 41(5): 1-5 .
- [26] 庞博, 徐宗学. 河湖水系连通战略研究: 关键技术[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(S1): 146-253 .
- [27] 钮新强. 中国水电工程技术创新实践与新挑战[J]. 人民长江, 2015, 46(2): 13-17 .
- [28] 江河湖库水文要素在线监测技术与装备[EB/OL]. (2018-07-06) [2018-07-24]. http://gjkj.mwr.gov.cn/rdz/t/2017kjhy/zdxm/szykf/201712/t20171215_1017604.html
- [29] 李纪人. 与时俱进的水利遥感[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 436-442 .
- [30] 张良培. 空天地一体化对地观测传感网的理论与方法[R]. 武汉: 武汉大学, 2010 .
- [31] 化柏林, 李广建. 大数据环境下多源信息融合的理论与应用探讨[J]. 图书情报工作, 2015, 59(16): 5-10 .
- [32] 杨大文, 徐宗学, 李哲, 等. 水文学研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 36-45 .
- [33] 余钟波, 杨传国. 多尺度水文水资源预报预测预警关键技术及应用研究[J]. 中国环境管理, 2018(1): 103-104 .
- [34] 刘国良, 顾正华, 赵世凯, 等. 基于数据驱动的区域水资源智能配置研究[J]. 水利水电工程学报, 2015(5): 38-45 .
- [35] 仲志余. 长江上游梯级水库群多目标联合调度技术[J]. 中国环境管理, 2017, 9(6): 114-115 .
- [36] SHANG Y Z, ROGERS P, WANG G Q. Design and evaluation of control systems for a real canal [J]. Technologi

cal Sciences, 2012, 55(1): 142-154.

- [37] 吴保生, 尚毅梓, 崔兴华, 等. 渠道自动化控制系统及其运行设计[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 746-755.
- [38] 鲍淑君, 王建华, 刘森, 等. 智能水网国际实践动态及启示[J]. 中国水利, 2012(21): 27-29.
- [39] 王浩, 蒋云钟, 冶运涛, 等. 数字流域关键技术[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2016.
- [40] 蒋云钟, 冶运涛, 王浩. 基于物联网的河湖水系连通水质水量智能调控及应急处置系统研究[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(7): 1895-1903.
- [41] 蒋云钟, 冶运涛, 王浩. 基于物联网理念的流域智能调度技术体系刍议[J]. 水利信息化, 2010(4): 1-5.

Smart water grid project: the engine driving China's water management modernization strategy

WANG Jianhua, ZHAO Hongli, YE Yuntao

*(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,
China Institute of Water Resources & Hydropower Research, Beijing 100038, China)*

Abstract: The paper takes a review of water conservancy development in China in three stages since the founding of the modern China in 1949, and demonstrates that the smart water grid(SWG) project is an integrated carrier driving the implementation of China's water management modernization strategy. After a systemic analysis of the dual structure of current water grid system in China, namely the natural and the artificial, water flow and water basis, the ecological environment and the social-economy, the paper puts forward that SWG is a network amalgam of physical, information and management flow of water, and that SWG is featured by Security, Measurability, Accessibility, Resource-optimization and Technological-innovation, supporting the connectivity of water flow, information flow and business flow. The paper explains the key techniques for constructing a physical network of water that include quasi-nature ecological treatment of rivers and lakes, planning of water infrastructure network, safe and friendly construction of large water engineering under complex conditions; the key techniques for constructing a water information network that include intelligent sensing and multi-source 3D monitoring, multi-source water information integration and data-mining, and multi-scale forecast and prediction; and the key techniques for a water management network that include empirical-based water resources optimized allocation, multi-objective comprehensive scheduling of complex water resources systems, and nonlinear, intelligent control of water engineering project clusters. In its final analysis, the paper proposes the direction of Chinese SWG project construction in the future.

Keywords: water management modernization; smart water grid; integration carrier; smart feature

(责任编辑: 王成丽)