“十五五”水电调度，从流域统筹到容量优先

——访中国工程院院士王浩

■本报记者 苏南

院士访谈录

按照《新型能源体系建设“十五五”规划》与《新型电力系统建设“十五五”规划》预计，2030年常规水电装机约4.1亿千瓦、抽水蓄能约1.6亿千瓦。水电定位从传统的电量供应，转向为新型电力系统容量支撑与流域级多能融合的调度中枢。特别是金沙江下游至三峡、葛洲坝6座巨型梯级清洁能源走廊，已实现151座水库的物理联合调度，这意味着我国水电从单库开发迈入流域统筹。

机遇背后是层层考题，跨省调度的交叉如何算清？如何守住动态调度的安全底线？水电的容量价值如何在市场机制中真正兑现？围绕水电发展热点问题，《中国能源报》记者专访了中国工程院院士王浩。



从“电量供给”转向“容量调节优先”

中国能源报：“十五五”水电从“电量供给”转向“容量调节优先”，这一定位转变背后，考核和规划逻辑发生了哪些变化？

王浩：如何充分发挥水库的调节能力，是历史赋予水电行业的新使命。这不是不再重视“电量供给”，而是在保障清洁电量供给的基础上，更加突出水电的容量支撑和灵活调节价值。相应地，考核要从主要关注发电量、利用小时数，转向更加注重可靠容量、调节能力和新能源消纳贡献。

规划层面，也要从以单一水电站开发和发电效益为主，转向流域统筹、区域协同和电力系统优化。实现这一转变有四条路径：一是强化政策引导和制度创新，完善体现水电容量和调节价值的市场机制；二是突破核心技术瓶颈，提升水电灵活调节和智能运管能力；三是加强数据共享，推动“水风光储”协同运行；四是深化电价、融资和市场机制改革，激发行业活力。

中国能源报：“水风光储”一体化开发是未来的主要方向吗？

王浩：“水风光储”多能互补是新型能源体系建设的大方向。风电、光电具有间歇性与波动性，大规模并网需水电灵活调节予以支撑。与化学储能、压缩空气储能通常实现2至6小时的短时储能相比，水电的储能优势显著。在科学调度与优化运行下，水库储能时长可达2—3天，适宜实现跨季节储能。

水库储能有几个创新路径：“卧式抽水蓄能”概念，即在现有水库装上可逆式机组或大泵，与附近新找的上库下库组成新型抽蓄电站，把水库从单纯蓄水转化为“蓄水加水能”；还可以把梯级水库各库互为上下库，利用梯级电站群做成抽水蓄能电站群。

另一个方向是盘活东南区域中小水电资源。浙江、福建、广东等省拥有数千座中小水库，可为这些小水库加装电站功能，再以虚拟电厂模式实现统一对外供电，可聚合形成“半个三峡”量级的供电能力，借助软件盘活中小水电上网难、电价竞争力弱的困境。国家水网建成后，水网与电网、水运网与供水网可交叉融合，并与算力中心协同发展，创造出更复杂丰富的AI应用场景。

跨区域调度要算“明白账”

中国能源报：长江6座巨型梯级水电站连同各支流百余座水库，已实现世界领先的物理联合调度。结合您原创的“效率、公平、公益”三次博弈理论，最需要破解哪一层难题？

王浩：需要破解的，是第二层“公平”——跨区域外部性的归因、核算与补偿，并在此基础上向第三层“公益”贯通。

三次博弈的第一层“效率”，也就是“在给定来水和约束下把总效益做到最大”，这在工程上已有成熟的优化手段。真正的短板在第二层：上游多蓄一方水，下游谁受益、谁受损，省与省之间、坝上与坝下之间，这笔交叉外部性的账还没有统一、可检验、可复核的算法。过去靠行政协调和专家权重，权重一变结论就变，是一本“糊涂账”。第三层“公益”，即水库群对防洪减灾、生态健康、能源安全这些全流域公共价值的贡献。目前更是只有定性表述，没有进入调度裁决。所以当前的攻坚方向，是把“效率—公平—公益”这条链真正打通，让流域统筹从“物理联合”升级为“判据联合”。

中国能源报：跨省调度时，上下游权责与风险分担如何界定？您有什么具体建议？

王浩：跨省、跨区域的权责与风险分担，可以归纳为三句话：谁施加外部性谁记账，谁受益谁补偿，谁受损谁受偿。权责边界不再按行政区划笼统划分，而按外部性的物理传递路径界定。上游的调度行为在下游哪个断面产生多大影响，用模型算清楚，权责就落到哪里。风险分担则要把预报不确定性显式摆上台面：正常预报误差范围内的偏差，由各方按事先约定的比例共担，并设“容错带”；超出“容错带”的重大偏差，通过洪水保险、流域补偿基金和再调度修正三道机制吸收。这样既保护主动作为的一方不被“秋后算账”，也防止把风险单方转嫁给下游。

建议做四件事。一是建账，以6库和主要支流为对象，建立跨省交叉外部性账簿，用支付矩阵刻画“谁的行为影响谁、沿什么物理路径传递”，做到无重复、无遗漏。二是定责，把每一方的贡献和损害公平分摊到具体责任人，替代“拍脑袋”的权重。三是立规，把公平层的“低损害带”和公益层的公共价值裁决，写进联合调度方案和跨省协议，使补偿不再一事一议。四是支撑，依托流域数字孪生和一体化预报调度平台，让这本账可实时更新、可审计追溯。

中国能源报：遇到枯水年，上下游用水争议如何化解？

王浩：枯水年的上下游争议，本质是“缺水的损失怎么分”。我主张四步：先用“货币化—指数化”双轨度量，把水量、电量、供水保证率、生态基流放到同一本账上，消除“各说各话”；再按公平和公益准则确立保障序，生活用水和生态基流优先，生产和发电按效率准则排后，这个顺序事先议定、不临时争议；然后用Shapley值把枯水年的总缺水损失公平分摊到各用水主体，谁多占谁补足；最后靠制度兜底，预置触发式协商规则，当预报来水低于设定频率就自动启动分配程序和补偿机制，并探索跨年度“水量银行”和流域补偿基金，以丰补枯。2022年长江大旱期间，靠统筹上游水库群应急补水、与下游逐一协调，56个枯水日既守住了供水和灌溉，又避开了生态敏感时段，说明这条路走得通，下一步是把它从“应急协调”变成“规则内置”。

“活”的调度须建立在“死”的底线上

中国能源报：在厄尔尼诺现象频发的背景下，水库动态调度的安全底线靠什么保障？

王浩：洪水兼有灾害、资源、生态三重属性，对应调度账簿上的三笔账：灾害要控住，资源要用好，生态要保住。三次博弈正是按这个逻辑分工：效率博弈把洪水的资源属性变现，公平博弈防止一个目标的收益建立在对另一个目标的过度伤害上，公益博弈为防洪减灾和生态健康这些公共价值兜底。问题的关键，是这个“活”的调度必须建立在“死”的底线之上。

安全底线靠四道闸保障。第一道是物理红线。设计洪水、校核洪水、汛限水位、大坝与库区安全，这些是不可博弈的硬约束，所有优化只在红线内的可行域里进行，红线一寸不让。第二道是不确定性的显式管理。厄尔尼诺等极端气候下，预报误差不是可以忽略的小量，必须把它概率化计入决策——动态汛限水位的浮动，严格限定在预报置信区间和批准的幅度之内，预报越不确定，留的安全裕度越大。第三道是容错与回退。借鉴公平层“低损害带”的思想，任何动态调度方案都必须落在可承受的损失带内，一旦滚动预报显示可能越界，立即触发预泄、错峰等回退动作，宁可放弃部分蓄水效益。第四道是制度底线。调度权限、会商程序、应急响应和责任追究必须清晰，技术再先进，也不能替代制度上的守门人。概括成一句话就是，底线不靠某一个模型或某一次预报，而靠“红线—裕度—容错—问责”这套层层设防的体系。

中国能源报：科学上如何平衡防洪安全、适度蓄水、水资源利用和生态需求？

王浩：让三层博弈各司其职。防洪安全由红线和公平层共同把守，拥有最高优先级，任何增加防洪风险的收益都要在外部性账上现形并被否决；适度蓄水和水资源利用交给效率层，在安全和公平约束内把洪水资源化做到最优，比如汛末抓住最后一场洪水科学蓄水；生态需求由公益层兜底，实践中可通过精细的人造洪峰过程塑造，下游四大家鱼自然繁殖规模已达到历史较高水平，证明防洪、发电与生态并不是非此即彼的“零和博弈”，在遵守红线、相互妥协的基础上完全可以实现人水和谐。

中国能源报：AI已应用于枢纽智慧监测、智慧建造、水库调度等场景。在巨型水库群这样的高风险工程里，AI的能力边界在哪里？

王浩：AI带来的不仅是水利管理效率的提升，更可能从根本上改变水利管理和科技创新的方式。过去水利水电发展主要依靠一代代工作者积累数据、知识、模型和经验，现在大语言模型、智能体等技术能把这些知识经验转化为可调用、可推理、可迭代的智能能力，使我们分析复杂问题、认识流域规律、优化工程调度的能力实现新跃升。

更重要的是，AI还能作为新的科研工具，帮助我们发现未知规律、提出新的科学假设，推动水利水电科技走向人机协同探索、持续学习、自主创新的新范式。这里必须指出，AI并非无所不能，面对极端事件和超出已有认知的复杂情景，其分析结果仍存在不确定性。对巨型水库群这样的高风险工程，必须坚持机理约束、结果验证和人工把关，既发挥AI的推理创新优势，也确保关键决策安全可控。

广告

“六网”协同赋新能 电表记好“水账本”

■欧阳逸雪 陈湛

清晨6时，天色微亮，广东省湛江市雷州市菠萝种植户陈伯按下机井开关，井水顺着管道汩汩流入干裂的田垄。他未必知晓，远在几十公里之外的南方电网广东湛江供电局供电服务中心大屏上，这口机井的取水“水账本”便依托电力数据自动生成：累计用电1千瓦时，折算取水量约2立方米。

不用专门安装水表，依靠电表数据就能折算抽水量，这套“以电折水”新模式正在雷州半岛落地实践，依托水网与新型电网协同联动，水电之间信息系统互通，为地下水精细化治理开辟出新路径，未来能源布局也将随之会发生变化。





图①为南方电网广东湛江雷州供电局南兴供电所党员服务队来到农田抽水出水口，查看灌溉出水情况，用心守护稻田“活水”，护航粮食生产。

图②为南方电网广东湛江雷州供电局南兴供电所党员服务队现场检查“以电折水”电表及配套电力线路，保障计量装置稳定运行，助力农业节水节电。

■“看‘油耗’算‘里程’”：电表“读懂”抽水量

“简单说，就是看‘油耗’算‘里程’。”南方电网广东湛江供电局市场营销部计量专责李狄形象地解释，“水泵抽水和汽车烧油是一个道理——耗电量和抽水量之间存在稳定的换算关系。我们配合水利部门预先测算出每口井的‘水电转换系数’，之后只要读取电表数据，就能推算出取水量。”

为何选择通过电表核算取水量？关键在于农业机井点多面广、分布零散，逐井配套安装水表，初期投入大，后续运维更难，田间水质常含泥沙杂质，水表易堵塞、磨损甚至损坏，导致计量失准，巡检维修频繁，基层负担较重。相比之下，电表覆盖面广，用电数据每日自动采集上传，计量稳定、连续、时效性强，落地成本更低。

可以说，以电表数据折算取水量，既避开了水表在田间“装不起、用不久、管不好”的短板，又盘活了现有电力计量资源，节约资源配置、提升计量效率和数据价值，也为水电数据跨部门共享、机井取水精细化管控提供了可靠的数据底座。

田间一项计量方式的创新变通，正是“六网”协同来促进经济高质量发展在基层的生动实践。

水电协同，就是水网与新型电网的一次有力握手。借助电力数据这把“钥匙”，便可打开水资源精细化管理的大门。

用多少电，就能测算出抽了多少水。在广东省水利厅指导下，广东电网积极推进相关试点工作。结合广东省农业灌溉机井大多集中在湛江的地域实际，当地落地“以电折水”计量模式，目前湛江全市已有2461口农灌机井纳入该模式计量管理，水电协同的第一步，便是摸清每一口机井的实际工况。

■给机井做“全身体检”：算准专属水电换算系数

雷州半岛的机井，一口一个“脾气”：有的井深80米，有的深200米；有的专职浇地，有的农业生活用水“一肩挑”；有的水泵功率大、出水猛，有的则细水长流。井况千差万别，换算“标尺”岂能“一刀切”？

“相当于先给每口井做一次‘体检’，把井深、水泵功率、下泵深度这些关键参数摸清，形成标准测算公式。”李狄介绍。为了找到尽可能多的“代表”，广东在湛江建成195眼样本井，覆盖高标准农田、农垦农场、村集体、村民等多权属地块，种植菠萝、香蕉、辣椒、甘蔗等多作物，兼顾纯灌溉、农业混用、农业生活混用等多种情形。“样本足够全，系数才足够准。”

看似只是装几块电表、采几组数据，实则费时费力。“设备安装那阵子，供电所员工跑遍了田间地头，一口井往往要反复调试安装计量装置好几回。”南方电网广东湛江供电局供电服务中心计量运行专责陈桂力回忆。

“体检”之后，还要“复诊”。系统建立以系数阈值约束为核心的异常数据识别机制，剔除电量、水量异常数据，再用线性回归、多日滑动平均等方法消除短期波动。“把‘噪音’滤掉，留下的才是真实规律，我们联动广东智慧水利平台，让每一度电都有‘水账’可依。”陈桂力补充。

■数字管家上岗：助力超采区“摘帽”管好地下水资源

目前，这套“以电折水”成果已应用于湛江硇洲岛地下水超采区约900眼机井，涉及年取水量650万立方米，覆盖灌溉面积3.2万亩。当地还探索以变压器为单元建立水电关联档案，搭建起覆盖31个变压器、55口机井的监测网络，可推算区域年灌溉取水量916万立方米，覆盖灌溉面积16.5万亩。依托这套水电协同管控模式，硇洲岛成功退出地下水超采区，扭转了地下水常态化超采的局面。

这些数据的价值，在于协同和共享。“依托水电联动机制，用水、用电数据实现跨部门共享。”南方电网广东电网市场营销部电能计量科专责吴敏介绍，一旦监测到某口机井取水量超出许可范围，管理部门可联动用电管控手段约束取水行为，相当于为地下水配上一位“电水协同小管家”，为落实水资源“总量控制、定额管理”提供有力抓手。

这些“水—电”数据还将反哺农业生产：旱田改水田、高标准农田建设、灌溉管网设计，“哪里用水多、什么时候用水急，数据一目了然，为科学决策提供支撑”。

“过去电力、水利分线开展工作，数据各管一段。”湛江市水利部门农水农电科一级科员蒋英正深有感触，“如今跨部门数据实现互通共享，小小的电表，成为水资源测算与管控的有力工具。”

从雷州半岛的田间机井，到跨部门互联互通的数字平台，一只电表搭建起水网与电网协同联动的感知触角。下一步，广东电网将持续发挥电网广覆盖、连接各行各业的资源优势，夯实数字底座，深化水网与新型电网协同实践，持续探索“六网”协同落地路径。



图③为南方电网广东湛江雷州供电局南兴供电所党员服务队走进田间稻田，实地摸排灌溉用电情况，细致了解农户水稻种植用水、用电需求，保障农田灌溉可靠供电。