梯级水库群联合航运关键问题研究 I: 水陆耦合集散交通系统的概念和框架

钟德钰*, 王永强, 吴保生, 刘可晶, 王光谦

清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084

* E-mail: zhongdy@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2015-05-16; 接受日期: 2015-07-22

国家科技支撑计划(批准号: 2012BAB05B01)资助项目

摘要 随着我国一批大型梯级水利枢纽的兴建与投运, 形成大面积库区深水航道, 为内河航运提供了良好的契机, 也使得沿江沿河地区资源和能源的区位优势将更加明显, 货物运输量急剧增加, 亟需提升货物运输能力. 梯级水库群联合航运这一非工程措施以其投资少、见效快成为首选. 然而, 梯级水利枢纽兴建的同时也截断了航道的连续性, 降低了库区航道的通过能力、利用率及影响范围; 同时, 水库群防洪与发电调度一定程度也制约库区通航能力的提升, 使得梯级水库群联合航运面临一系列挑战. 围绕上述问题, 提出以库区航运为核心驱动的水陆耦合集散交通系统概念, 以水利枢纽作为货物集散的“中心点”, 以库区航道作为集散中心点间的主要“连接线”, 在库区航运驱动下带动陆路货运量增加并运输至周边经济区域形成“辐射面”. 在此基础上, 进一步论述了此框架下所面临的关键科学问题以及解决方案. 相关研究成果可为具有丰富矿产资源和航运潜力的梯级水库群联合航运的规划与实施提供有力的技术支撑.

关键词

梯级水库群
联合航运
水陆耦合
集散交通系统
动态辐射

1 引言

内河航运是水资源合理开发和综合利用的重要内容, 是社会经济发展的主要动力之一. 加快内河航运发展有利于降低社会综合物流成本, 有利于调整优化沿江沿河地区产业布局, 有利于促进区域经济协调发展, 有利于促进节能减排, 具有重要战略意义^[1]. 以金沙江下游为例, 该流域横贯攀西——六盘水金三角核心区, 总面积 17.6 万平方公里, 人口约 2880 万, 自然资源丰富. 其中, 钒钛储量居世界首位,

钒储量占全国的 64%, 钛占 93%, 铁储量居全国第二位; 以铜、铅、锌为主的有色金属预测储量超过 2000 万吨; 大型硫铁矿 110 亿吨, 大型磷矿 76 亿吨; 煤炭预测储量 1500 亿吨, 如图 1 所示. 同时, 该区域内的金沙江及其支流蕴含水能资源 6400 万千瓦. 随着乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝四座大型水电站的陆续开发与投运, 其资源和能源的区位优势将更加明显, 在国民经济发展中的战略地位亦将更为重要. 现阶段, 该区域每年煤炭、铁、磷等资源的货物输出需求在 1 亿吨左右, 其最大制约因素是交通运输.

引用格式: 钟德钰, 王永强, 吴保生, 等. 梯级水库群联合航运关键问题研究 I: 水陆耦合集散交通系统的概念和框架. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 1080–1088
Zhong D Y, Wang Y Q, Wu B S, et al. Research on the operation of cascade reservoirs combined navigation part I: Concept and framework of distributed transport system coupled land and water (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 1080–1088, doi: 10.1360/N092015-00057

现有的交通主要是山区的公路和铁路运输, 包括成昆铁路、内昆、贵昆铁路等, 其合计运力不足 5000 万吨, 运输能力饱和情况下仍无法满足日益增长的运输需求. 运力和保证率的限制势必成为该区域社会经济快速发展的主要瓶颈之一.

目前, 沿江沿河区域交通条件的认知与评价, 存在经济效益、距离成本、时间成本等多种度量方法^[2,3]. 航运相比于公路、铁路等具有运量大、成本低、安全保障系数大等特点, 适合大宗货物和集装箱运输^[4], 交通优势明显, “长江经济带”正是基于长江航运而提出的. 由此, 相关学者提出了流域大交通网络^[5]、综合交通系统等区域交通空间规划方法^[6], 并针对其中的水利枢纽翻坝运输方式、两坝间船舶过闸调度、多种交通方式结合等问题进行了相关研究^[7-9]. 然而, 上述研究多集中在连续性内河航道区域, 或碍航水利设施较少区域, 鲜见有文献从区域宏观视角针对梯级水库群库区航道及其互联陆路交通为整体进行深入优化研究.

因此, 本文针对此类具有航运需求量大、梯级库区航道不连续和水库调节能力强等特点的流域, 从系统整体优化角度为切入点, 基于中心地理论的交通原则模式^[10], 将梯级水库群联合航运所涉及的空

间范畴由梯级水库群库区扩展至周边经济区域, 从而提出以库区航运为驱动的水路-陆路耦合的集散交通系统, 形成“点-线-面”多级框架结构, 并在此基础上进行系统协同优化获得最优状态下的运行方案. 围绕上述思路重点针对水陆耦合集散交通系统的概念、框架、面临的关键科学问题以及解决方案进行了探讨性研究, 总结形成相关梯级水库群联合航运的研究成果, 以便于与国内同行学者进行交流.

本文是流域梯级水库群联合航运研究的总括篇, 后续文章将针对以库区航运为驱动的水陆耦合集散交通系统面临的关键科学问题和解决方案进行一一论述.

2 梯级水库群联合航运面临的机遇与挑战

从航道资源开发角度来看, 我国西部流域航道资源的开发程度低, 航道大多处于天然状态, 河道窄、航深不足、滩险众多等河道自然条件限制了航道等级和通航保障率. 同时, 港口码头少且基础设施普遍较差, 缺少必要的装卸设备和库场设施, 多利用自然岸坡进行装卸作业; 船舶技术状况落后, 标准化和专业化程度低, 运力不足, 货运量小; 运输企业规模

图 1 (网络版彩图)金沙江下游矿产资源分布图

较小, 效益不高。现阶段, 金沙江、乌江、澜沧江等流域一批大型梯级水利枢纽的相继开工建设和投入运行, 很大程度上弱化了其流域自然条件对航道开发的制约。梯级水利枢纽蓄水之后, 将淹没众多碍航滩险, 形成深水库区, 水流流速降低和水面比降降低, 通航条件发生了根本变化, 可使原有航道资源的潜能得到充分释放, 部分河段可从原来的不通航或等外级航道变为通航河段或等级航道。与此同时, 从社会经济发展角度来看, 流域梯级水利枢纽的建设使得资源和能源的区位优势将更加明显, 促进沿江经济社会发展和产业化水平的不断提高, 将为航运发展带来较大的货运需求, 也必然促进航道潜能的开发^[1]。以上因素给内河航运的开发带来了前所未有的机遇, 为缓解沿江沿河经济发展区域货运需求与运力不匹配这一困境提供契机。

然而, 梯级水利枢纽的兴建也带来了一些不利因素, 如水利枢纽截断航道的连续性、水库防洪与发电调度在某些时段破坏库区航道水流条件等。由于受原有“重水电、轻航运”的流域开发思路影响, 有大部分水利枢纽设计时以防洪、发电为主要任务, 未设计通航建筑物或者通航设施通过能力较低, 截断了航道的连续性, 形成了“藕节式”库区航道。如金沙江中下游, 计划修建十几座水电站, 多数没有通航设施, 使得形成的深水库区航道被截断, 水利枢纽碍航情况严重, 如图 2 所示。由此库区航运能力受到抑制, 造成与之配套的翻坝设施、港口码头建设更为滞后; 而与其相联接的陆路交通由于航运量的不足而得不到充分利用。

图 2 水利枢纽对航运影响的两面性

此外, 梯级水库群联合航运优化调度涉及防洪、发电、航运等多项水库调度任务, 汛期防洪降低水库水位缩短库区航道里程, 非汛期发电调峰恶化库区通航水流条件, 也进一步抑制了库区航运能力的发挥。但是, 由于库区航道兼有水库特性, 可进行库容间的补偿调节, 能够通过水库调度保证各时期等级航道的水量与水力条件需求^[12-14]。通过水库运用方式的控制优化通航条件, 可降低防洪、发电对库区航运的影响, 进一步提高库区航运能力, 增加货物运输量, 相比于航道工程整治见效快、成本低, 效益巨大, 是一种行之有效的非工程性措施。虽然, 上述措施对库区航运起到有力的提升作用, 但是, 梯级水库群通航受到水利枢纽的阻碍, 难以贯通, 通过单一的“水-陆-水”翻坝转运方式来贯通短距离库区航道, 不仅对货物形式要求较高又增加了货物水路运输成本, 无法发挥航运潜力, 也无法合理利用库区周边现有的陆路交通。由此可见, 孤立的考虑库区航道通航能力的提升, 可导致库区航道水运与其周边陆路交通无法有效匹配, 降低利用率。因此, 针对具有上述特点的梯级水库群通航问题, 本文提出以库区航运为驱动的水陆耦合集散交通系统及其构建框架, 以充分利用“藕节式”库区深水航道这一交通优势, 扩大其货运能力影响范围, 带动流域周边区域经济发展。

3 水陆耦合集散交通系统的概念及其框架

结合梯级库区航道不连续、水利枢纽通航设施建设滞后的现状, 根据梯级水利枢纽、库区航道、港口码头及其互联陆路交通网络间的空间拓扑结构特征和货物运输的动态关联性, 本文以系统工程理论为基础, 从整体的角度来分析梯级水库群联合航运方式, 提出以库区航运为驱动的水陆耦合集散交通系统。该系统构建的核心思想为“库区航运带动陆运, 水运陆运动态耦合”, 其具体概念如下所述。

水陆耦合集散交通系统是指以水库航运调度为驱动, 以库区航道航运能力为货运运输线, 连接各级水利枢纽周边港口码头, 作为货物集散中心节点; 进而将货物运输辐射面扩展至与中心节点互联的陆地交通枢纽城镇, 作为集散交通网络的子节点; 通过库区航道连接中心节点, 通过陆路交通使货物由中心节点向子节点扩散, 构成以库区航运为驱动的水陆耦合集散交通系统。该系统包含水库群航运调度子

系统、库区航道运输子系统、港口码头货物集散子系统和陆路交通运输子系统, 各子系统间货物运输以库区航运为核心, 扩散至陆路运输; 货物运输量则协同优化动态匹配, 具体结构如图 3 所示。

水陆耦合集散交通系统主要由中心节点、主干线和辐射区域组成。

1) 中心节点. 水利枢纽周边的货物集散中心地, 作为关键空间节点, 是货物运输的源点和中转点;

2) 主干线. 连接各个中心节点的库区航道, 主要货物运输转移的通道和载体;

3) 辐射区域. 由库区航运和陆运耦联交通网络货运能力的辐射区域范围。

水陆耦合集散交通系统将水利枢纽、梯级水库库区航道、港口深水码头及其互联的陆路交通有机融合为一个整体。其优化范畴由梯级水库群库区航道自身扩展至周边的陆路交通网络和经济腹地, 在水利枢纽没有通航设施、通航设施建设滞后或通航设施无法满足需求的情况下, 综合“水-陆”、“水-陆-水”和“水路”等多种运输方式, 可大大提高“藕节式”库区航道货运能力, 增加航运效益, 同时带动陆路运输, 促进区域经济发展, 更加贴近梯级水库群库区航运的工程实际状况。该系统的“中心节点”、“主干线”和“辐射区域”间的拓扑结构示意图如图 4 所示。

在系统中, 水利枢纽周边港口码头联接上下游航道与陆路交通网络, 任一时期的货物运输总量在长时间尺度下服从经济发展规划, 而在中短时间尺度中, 伴随水陆交通路线的衔接, 货物运输需求量呈

图 3 水陆耦合集散交通系统结构图

图 4 (网络版彩图)水陆耦合集散交通系统框架示意图

动态波动状况, 水库群航运调度方式与陆路交通负载随之相应动态变化, 通过航运优化调度及关联陆路运量匹配使系统维持在一个相对稳定的综合效益最优状态, 可以提高库区航道货运能力和利用率, 从而实现货物运输在此类“藕节式”梯级水库群库区航道间的变相贯通, 带动流域周边区域社会经济发展。

水陆耦合集散交通系统是一个具有耗散结构的空经济系统, 不断的作用于区域经济社会。物资以物产资源中心和通航库群为源通过水路和陆路交通向周围区域扩散。根据货运需求及航运调度得到每个源点的初始外运量, 以航运方式运输的货物都在距离资源中心最近的码头装船, 并在距工业中心和航道沿途资源需求点最近的港口码头下船; 航线上的水利枢纽和港口码头节点都作为物资扩散的中心地; 货物下船, 物资在集散中心节点翻坝至下一库区航道, 或者通过陆路交通网络运输以保证物资运输距离最大和运输成本最低为目标, 得到货物的最大消耗半径, 货物在最大消耗半径范围内辐射扩散。水陆耦合集散交通系统的服务扩散范围是航运扩散范围及其互联陆运扩散范围的并集, 经济效益由物资本身价值及在扩散范围内的消费利益构成。

4 水陆耦合集散交通系统面临的关键科学问题

水陆耦合集散交通系统是一个包含梯级水库群航运调度、库区航道水流演进、水陆耦合交通网络动态扩散的复杂大系统, 其面临的关键科学问题主要概括为以下几个方面。

4.1 梯级水库群联合航运与防洪、发电调度间的博弈问题

现阶段, 大型水利枢纽多以防洪、发电为主要调度任务兼顾航运, 水库在不同运行时期, 防洪与发电调度在一定程度上制约了库区通航能力的提高^[15]。

1) 汛期防洪缩短库区航道长度, 降低通航能力。在汛期防洪调度过程中, 为腾空防洪库容, 水位消落至汛限水位, 水库变动回水区则随之呈现原有河道自然状态, 河道水深大幅减小, 易形成碍航点, 缩短航道; 同时库区水深消落, 降低航道通航能力。

2) 非汛期调峰恶化通航水流条件。在水库日发电调峰过程中, 发电负荷的频繁变化引起水库下泄流量的急剧变化产生非恒定流, 导致下游水位日变幅或小时变幅过大恶化两坝间通航水流条件, 使得航道难以满足船舶安全航运要求。

梯级水库群联合航运与防洪、发电间的调度目标存在难以度量、调度时间尺度不统一等问题。与此同时, 梯级水库群防洪与发电也存在同样的竞争与冲突关系。由此可知, 梯级水库群防洪、发电与航运调度之间存在一种博弈关系, 三个调度目标间相互协调、均衡极为困难^[16-18]。因此, 如何确定防洪、发电与航运调度目标间的最优博弈策略, 均衡不同时段梯级水库群联合航运与防洪、发电之间的权重关系, 成为梯级水库群联合航运亟待解决的首要难题。

4.2 过坝运输能力制约库区通航能力的瓶颈问题

梯级水库群库区航道水运基础设施建设薄弱, 不能同步建设通航设施, 破坏了航道的连续性, 在水利枢纽处断航形成“藕节式”库区航道。以长江中上游干流为例, 仅葛洲坝、三峡水利枢纽建设有五级船闸, 向家坝建设有升船机, 而溪洛渡以上河段在建和规划的各级水电站均无通航设施。由此矿产资源不能直接由水路运输至长江中下游地区, 需采用建设转运码头与翻坝公路完成货物在各航道间的运输转移, 实现贯通。现阶段可行的有以下几种货物翻坝转运方式如图 5 所示。

由于管道运输、皮带机传送和修建船闸这些翻坝方式投资成本高、建设周期长, 而且对货运形态有一定要求, 如表 1 所示。因此, 如果可采用多种过坝方式相结合来进行货物的翻坝转运, 短期内主要采用过坝公路和集装箱滚装方式进行公路翻坝, 长期可以根据梯级水库群实际地形以及运送主要货物的形

态来选择表 1 中②~④中的一种或者多种方式进行补充。虽然, 上述方法可以实现将梯级水库群的“藕节式”航道贯通成为连续航道, 但是由于翻坝转运能力往往不能匹配库区航道的货物运输量, 在无过船设施或者翻坝设施运输能力不足的情况下更是如此。如 2014 年三峡船闸年货运能力高达 1.2 亿吨, 却远不能满足长江干流每年 10 多亿吨货运需求量; 金沙江下游向家坝水电站的 2×500 吨升船机, 则远不能满足日益增长的矿产货运需求。由此可见, 通航设施与翻坝运输能力的不足, 已经成为制约库区航道货运能力的主要瓶颈。如何最大化利用“藕节式”库区航道货运能力, 克服库区通航设施和翻坝运输能力低这一难题, 从系统优化角度来提高整体梯级库区航道的利用率, 是梯级水库群联合航运亟需解决的关键难点问题。

4.3 货运需求量、库区水运能力与陆运能力间的动态匹配问题

现有的“藕节式”库区航道只有与周边陆路交通运输网络组成综合交通系统, 才能在库区航道不连续的情况下沿航道及向周边区域输送物资材料, 通过整合交通资源进一步扩大短距离库区航运的影响范围。在水运和陆运集成配合的前提下, 货运需求量、航道通过能力及关联陆路交通网的承载能力, 决定了梯级水库群联合航运对所在经济腹地的辐射影响范围及其产生的航运经济效益。

从水陆耦合集散交通系统的整体规划和优化运行角度来讲, 必须关注两个问题: 1) 在一定货物运输需求结构下, 当前以库区航运为驱动的水陆运输网络能够提供多大的货物运输量; 2) 在能够满足货物运输需求的前提下, 库区航道及其互联陆路交通网络的利用率有多高。从而由上述两个问题延伸为货物运输的需求量、库区水运能力与陆运能力之间的动态匹配问题。

货运需求在宏观时间尺度下符合经济及工商业规划发展规律, 在中短时间尺度下与产量和联合调度相关。而梯级水库联合调度方式发生改变, 库区航道可运载货运量在一定范围内随之变化, 相应的由其带动的陆路货运量也随之变动。其中, 受到不同约束条件限制的货运需求、航道通航能力、港口码头货物吞吐能力、陆路货运能力之间都存在匹配关联性, 该匹配关系伴随库区航道的整治及周边经济发展而

图 5 多种货物翻坝转运方式示意图

表 1 无通航设施的“藕节式”航道贯通方式以及存在的问题

过坝方式	功能缺陷	实施难度	存在问题
①公路翻坝 (水-陆-水)	运输成本较高, 适用于多种类型货物	易	过坝能力难以匹配库区航运能力, 成为制约库区航运能力最大化关键瓶颈
②管道运输 (水-管道-水)	成本高、建设周期长, 适用于煤炭、矿粉等散装货物	难	
③皮带机传送 (水-皮带机-水)	受地形限制、成本高, 适用于块状矿石等散装货物	难	
④修建船闸 (水-陆-水)	成本高、建设周期长, 可增加变动回水区水深, 但仍需翻坝运输	难	

变化并存在尺度效应问题. 在水陆耦合集散交通系统中存在复杂的动态非线性关系并伴有随机性, 具有大系统特征^[19-21]. 由于梯级水库群联合调度的即时性与集散交通系统对输入反应的滞后性, 完成不同时间尺度下货运量的动态匹配极为困难. 其求解过程可视作是在各种时间尺度下对货运需求和实际货运能力、航运和联合调度进行动态匹配的过程. 因此, 货运量动态匹配模型的建立及其高效求解成为水陆耦合集散交通系统优化运行的关键问题.

5 总体优化方案

本文将流域梯级库群联合航运问题的范畴扩展至以库区航运为核心驱动的水陆耦合集散交通系统的优化, 其目的是在保障防洪任务的基础上, 通过协调航运与防洪、发电等调度目标间的关系, 运用有利于库区航运的水库群联合调度方式, 提高库区通航

能力和利用率, 带动周边陆路交通运输, 扩大经济腹地辐射面, 促进社会经济发展. 从数学理论角度分析, 该问题涉及防洪、发电、航运等多项水库调度任务, 同时动态耦合陆路交通网络, 是一类动态非线性的大系统优化问题, 具有多层次、多目标、多阶段、高维数、多约束等特征. 多层次体现在水利枢纽航运调度至库区航道再至周边经济区域, 由“点”及“线”至“面”; 多目标体现在水库群承担的多种调度任务, 航运与防洪、发电目标间的博弈关系; 多阶段体现在随时间推移不同时期水库所承担的调度优化目标与约束变量的阶段性变化及集散交通系统货运量、影响辐射范围的动态变化^[22,23]; 高维度体现在各阶段多重状态变量间的关联耦合使得计算变量数急剧增长^[24-26]; 多约束体现在防洪安全、供水安全、电网安全、电站安全、航运安全以及生态安全等限制.

针对以库区航运为核心驱动的水陆耦合集散交通系统所面临的关键问题, 本文基于大系统分解协

图6 系统总体优化解决方案

调理论，将系统的整体优化分解为水库群航运调度子系统、库区航道运输子系统、港口码头货物集散子系统和陆路交通运输子系统的独立优化，以水陆耦合集散交通系统货运量最大为总体优化目标，以运输货运量为协同变量，建立系统多目标优化模型，运用微分博弈与模式识别等优化方法求解，使得各子系统间的协同变量能够动态匹配，达到均衡最优。

总体解决方案如图6所示，主要由水陆耦合交通系统下的梯级水库群联合优化调度、库区通航水流条件优化，以及库区航道货运能力与陆路交通运输能力间的动态匹配等部分组成。提出一种新的“由水利枢纽节点至库区航线，由库区航线到经济区域辐射面”系统优化研究思路。在空间范围方面，由水利枢纽至库区航道再至经济腹地，“点-线-面”逐层扩展。在优化逻辑方面，由水库均衡优化调度结果提供不同调度目标的权重因子，作为库区通航能力优化的边界条件；由通航能力优化结果提供库区航道最大航运能力，作为流域经济区域动态辐射范围优化的基础条件，“点-线-面”逐级优化。

5 结语

围绕梯级水库群联合航运这一工程和学术前沿问题，分析了梯级水库群联合航运面临的机遇和挑战，系统地提出了以库区航运为核心驱动的水陆耦合集散交通系统概念和框架，并详细论述了该系统所面临的库区航道难以贯通、防洪和发电制约航运、水路与陆路货运量难以匹配等关键科学问题，进而给出基于大系统分解协调理论的总体求解方案。考虑到梯级水库群联合航运的复杂性，针对关键技术难题的模型建立与求解内容将在后续文章中给出深入的阐述。

本文所提水陆耦合集散交通系统可适用于我国的矿产和水能资源丰富地区，如金沙江、雅砻江、澜沧江、大渡河、红水河等梯级水电基地，亦可用于已建成的单库航电枢纽等。由于实测资料和研究范围限制，所研究内容未涉及相关集散交通系统中码头、港口等工程设施的投资分析，有待以后进一步完善。

参考文献

- 1 中华人民共和国国务院. 国务院关于加强长江等内河水运发展的意见. 2011
- 2 Banister D. Transport Planning. New York: Spon Press, 2002
- 3 Tolley R S, Turton B J. Transport Systems, Policy and Planning: A Geographical Approach. London & New York: Routledge, 1995

- 4 Litman T. Developing indicators for comprehensive and sustainable transport planning. *Transport Res Rec*, 2007, 43: 10–15
- 5 Caris A, Limbourg S, Macharis C, et al. Integration of inland waterway transport in the intermodal supply chain: a taxonomy of research challenges. *J Transp Geogr*, 2014, 41: 126–136
- 6 Mihic S, Golusin M, Mihajlovic M. Policy and promotion of sustainable inland waterway transport in Europe – Danube River. *Renew Sust Energ Rev*, 2011, 15: 1801–1809
- 7 Moameni A. Multi-marginal Monge-Kantorovich transport problems: A characterization of solutions. *CR Math*, 2014, 352: 993–998
- 8 Saracoglu H, Deniz C, Kilic A. An investigation on the effects of ship sourced emissions in Izmir Port, Turkey. *Scientific World J*, 2013, 2013: 218324–218324
- 9 Dai B, He Y, Mu F, et al. Development of a traffic noise prediction model on inland waterway of China using the FHWA. *Sci Total Environ*, 2014, 482: 480–485.
- 10 黄以柱. 区域规划学. 北京: 经济科学出版社, 2012
- 11 Li X, Preston J. Assessing the financial and social costs of public transport in differing operating environments and with endogenous demand. *Transport Plan Tech*, 2015, 38: 28–43
- 12 Wang J W, Zhang Y C. Short-term optimal operation of hydropower reservoirs with unit commitment and navigation. *J Water Resour Pl-ASCE*, 2012, 138: 3–12
- 13 Ackermann T, Loucks D P, Schwanenberg D, et al. Real-time modeling for navigation and hydropower in the River Mosel. *J Water Resour Pl-ASCE*, 2000, 126: 298–303
- 14 Fernandez N, Jaimes W, Altamiranda E. Neuro-fuzzy modeling for level prediction for the navigation sector on the Magdalena River (Colombia). *J Hydroinformatics*, 2010, 12: 36–50
- 15 Wang F X, Valeriano O, Sun X G. Near real-time optimization of multi-reservoir during flood season in the Fengman Basin of China. *Water Resour Manag*, 2013, 27: 4315–4335
- 16 Labadie J W. Optimal operation of multireservoir: State of the art review. *J Water Resour Plan Manag*, 2004, 130: 93–111
- 17 Pérez-Díaz J I, Wilhelmi J R, Arévalo L A. Optimal short-term operation schedule of a hydropower plant in a competitive electricity market. *Energ Convers Manage*, 2010, 51: 2955–2966
- 18 Liu X Y, Guo S L, Liu P, et al. Deriving optimal refill rules for multi-purpose reservoir operation. *Water Resour Manag*, 2011, 25: 431–448
- 19 Xu C, Zhang H, Han L, et al. Characteristic monitoring of groundwater-salt transportation and input-output in inland arid irrigation area. *J Environ Biol*, 2014, 35: 1181–1189
- 20 Schweighofer J. The impact of extreme weather and climate change on inland waterway transport. *Nat Hazards*, 2014, 72: 23–40
- 21 Liang D, Zeckoski R W, Wang X. Development of a hydro-environmental model for inland navigational canals. *J Hydroinformatics*, 2014, 16: 572–587
- 22 Fayaed S S, El-Shafie A, Jaafar O. Reservoir-system simulation and optimization techniques. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 2013, 27: 1751–1772
- 23 Nikoo M R, Karimi A, Kerachian R. Optimal long-term operation of reservoir-river systems under hydrologic uncertainties: Application of interval programming. *Water Resour Manag*, 2013, 27: 3865–3883
- 24 Catalão J P S, Pousinho H M I, Mendes V M F. Hydro energy systems management in Portugal: Profit-based evaluation of a mixed-integer nonlinear approach. *Energy*, 2011, 36: 500–507
- 25 Cheng C, Liao S, Tang Z, et al. Comparison of particle swarm optimization and dynamic programming for large scale hydro unit load dispatch. *Energ Convers Manage*, 2009, 50: 3007–3014
- 26 何世伟. 综合运输体系下快捷货运网络运能配置与优化技术. 北京: 科学出版社, 2010

Research on the operation of cascade reservoirs combined navigation part I: Concept and framework of distributed transport system coupled land and water

ZHONG DeYu, WANG YongQiang, WU BaoSheng, LIU KeJing & WANG GuangQian

State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

This paper systematically discusses the research ideas and technical framework of cascade reservoirs combined navigation operation. First, through the comprehensive analysis of the characteristics of cascade reservoir features and navigation channel, the potential of cascade reservoirs combined navigation operation and its key technical problems were pointed out clearly. In response to these difficult issues, a new research idea on the distributed system of water and land transportation was set as the core for solving framework. Then, we focus on the construction strategy of the transport system that was driven by the water and land transport, establish the optimization model cascade reservoirs combined shipping scheduling, and give its solution techniques combined with the model features. The above points form a reliable and systemic solution method for cascade reservoirs combined navigation operation, which can provide effective technical support for schedule planning and implementation of other cascade reservoirs combined navigation.

cascade reservoir, navigation, the coupling of water and land, distributed transport system, dynamic radiation

doi: 10.1360/N092015-00057