

三维可拓展梯级水电站气象水文预报及调度智能化系统研究

刘 洋^{1*}, 金新峰¹, 尹华政², 唐际政¹, 成良歌¹

¹中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙

²水电水利规划设计总院, 北京

Email: *zny8809@163.com

收稿日期: 2021年7月21日; 录用日期: 2021年8月19日; 发布日期: 2021年8月30日

摘 要

随着电力市场的不断推进, 电站精细化调度势在必行, 梯级水电站对预报、调度等功能需求紧迫, 使得梯级水电站气象水文预报及调度智能化系统平台(Intelligent System Platform For Meteorological And Hydrological Prediction and Dispatching Of Cascade Hydropower Stations, IMFDH)面临时间、空间和功能三个维度扩展需求。本文根据目前已有IMFDH系统灵活性低、可拓展性差的特点, 提出了总体系统设计方案, 从基于规范接口的“即插即用”式平台功能插件实现、多维度数据存储方法、计算空间顺序自动确定、基于“模型云”模型算法拓展等关键技术, 构建了3维度高可扩展性IMFDH系统框架。在多地区的应用表明, 与传统面向特定需求的IMFDH系统平台相比, 本系统在灵活性、伸缩性和可扩展性方面更具优势。

关键词

预报, 调度, 可拓展, 三维度, 系统设计

Research on Intelligent System of Meteorological and Hydrological Forecast and Dispatching of Three-Dimensional Expandable Cascade Hydropower Stations

Yang Liu^{1*}, Xinfeng Jin¹, Huazheng Yin², Jizheng Tang¹, Liangge Cheng¹

¹PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha Hunan

²China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing

作者简介: 刘洋, 出生于 1989 年 10 月, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为水文水资源、水电站水库调度、水信息等。

*通讯作者。

文章引用: 刘洋, 金新峰, 尹华政, 唐际政, 成良歌. 三维可拓展梯级水电站气象水文预报及调度智能化系统研究[J]. 水资源研究, 2021, 10(4): 408-415. DOI: 10.12677/jwrr.2021.104044

Email: *zny8809@163.com

Received: Jul. 21st, 2021; accepted: Aug. 19th, 2021; published: Aug. 30th, 2021

Abstract

With the continuous advancement of the power market, it is imperative for hydropower stations to carry out refined dispatching. Cascade hydropower stations have urgent requirements for forecasting, dispatching and other functions, which makes the intelligent system platform for meteorological and Hydrological Prediction and dispatching of cascade hydropower stations (IMFDH) face time Space and function are three dimensions to expand requirements. According to the characteristics of low flexibility and poor scalability of the existing IMFDH system, this paper puts forward the overall system design scheme, from the implementation of “plug and play” platform function plug-in based on standard interface, multi-dimensional data storage method, automatic determination of computing space sequence, expansion of model algorithm based on “model cloud” and other key technologies. A three-dimensional high scalability IMFDH system framework is constructed. The application in many regions shows that compared with the traditional demand-oriented IMFDH system platform, the system has more advantages in flexibility, scalability and scalability.

Keywords

Forecast, Dispatch, Expandable, Three Dimensional, System Design

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着电力市场的不断推进, 电站精细化调度势在必行[1], 对 IMFDH 系统需求也日益强烈。随着电力市场的推进与电站的精细化调度的不断深入[2], IMFDH 系统功能也不断拓展与改变, IMFDH 系统在时间、空间与功能等 3 个维度表现出高度复杂性和强拓展性需求。近年来有关 IMFDH 系统研究主要集中在预报调度模型[3]、优化算法[4]、求解策略[5] [6]等, 而关于系统架构方面的研究较少。随着国家“十四五”发展规划的落地, 数字化变革已成为信息化发展的主流趋势, IMFDH 系统建设也需要跟上时代的步伐, 利用新技术与预报调度业务相互融合, 提升电站水资源优化配置、促进电站科学调度, 提升水资源集约化利用水平。

可拓展性、重用性与实用性是 IMFDH 系统平台建设的三个重要目标, 无论是最初的面向过程编程, 到后来的面向对象编程, 再到最后的面向服务编程, 其目的都是为了提高软件的重用性、可拓展性与软件的研发效率。传统的 IMFDH 系统平台往往针对气象预报、水文预报、发电调度等独立开发, 各成系统, 各个模块功能相对单一、扩展性与前瞻性相对较差, 受其技术架构、数据架构的影响, 各个模块之间耦合能力差、可拓展能力低, 数据传输与交互相对困难[7]。当研究区域或功能发生改变时, 需要对软件进行重新设计与研发, 极大的限制了 IMFDH 系统平台的自动化与智能化水平。而 CFS [8] [9]、Mike [10]等气象预报、水资源模拟分析软件更多的集中建模与优化求解, 相应的人机交互功能、功能模块拓展相对较弱, 难以满足预报调度一体化、精细化的需求。

本文采用新技术与预报调度业务系统相融合, 提出了一种三维度可拓展 IMFDH 系统平台, 时间、空间与功能拓展性强。

2. 三维度可扩展 IMFDH 系统平台分析

2.1. 时间维

由于降雨时间与空间分布极为不均, IMFDH 系统主要任务是利用长中短期气象预报推演入库流量, 最后充分利用梯级水电站的调蓄能力, 进行梯级水电站群联合优化调度, 从而达到指定目标最优。以发电调度为例: 发电调度根据计算模拟步长可分为月、旬、日、小时、15 分钟、实时等, 从粗略调度到精细化调度, 不同尺度以发电量和电站水位为纽带, 实现不同调度步长嵌套和衔接。然而旱情、暴雨等极端条件往往会使得发电调度的计算模拟步长发生改变, 因此 IMFDH 平台在时间维度上面临着复杂的扩展需求。

2.2. 空间维

梯级水电站上下游之间往往存在着严格的水力联系。上游出库直接影响下游入库, 随着我国水电迅猛发展, 不断有新的电站投产与并网, 使得原有的梯级水电站拓扑频繁发生改变, 不同层级调度机构在使用 IMFDH 系统构建预报调度模型时考虑的目标函数及空间约束也会相应改变。因此水电站群调度系统在空间维度上也面临着复杂的扩展需求。

2.3. 功能维

随着电力市场、节能调度、生态调度的不断深入, IMFDH 系统功能也不断发生改变; 气象预报由以往单平台直接预报逐步转化为多平台、多种气象预报相耦合的气象预报模式; 径流预报由以往采用单一模型逐步转化为多种预报模式相结合的方式; 水库功能由传统的防洪、发电、灌溉等逐步扩展加入航运等功能; 调度方式由以往粗放式调度逐步转化为参考长中短期径流预报的精细化调度; 调度模型由传统的经济目标、安全目标, 加入生态目标, 由单一调度目标转化为多目标调度等; 模拟算法由传统的模拟方法增加了避免“维数灾”启发式算法; 算法实现方式随着商业计算软件的成熟从自主编程逐步引入商业软件等方式。另外 IMFDH 平台管理主体有环保部门、发电企业、防汛部门等, 因此 IMFDH 平台涉及众多目标、众多部门, 输出形式也不断发生改变。

3. 总体解决方案

3.1. 总体设计

三维度可拓展 IMFDH 系统平台必须从功能可拓展性设计、数据库设计、数据交互设计、软件框架设计及实现的关键技术进行扩展研究与设计。与传统的面向特定需求, 功能相对单一、扩展性要求不高的梯级水电站预报、调度平台不同, 随着电力市场与电站精细化调度的不断推进, IMFDH 系统平台功能需求也不断发生改变, 由于其功能模块众多且自动化、智能化程度更高, 因此在设计过程中应保证系统的高度可拓展性。本文从时间、空间和功能三个维度进行扩展的总体解决方案如表 1 所示。

Table 1. Whole design scheme for three-dimensional extensional demands

表 1. 三维可扩展需求总体解决方案

维度	面临的主要问题	解决方案
时间维	计算时间尺度(步长为多日/日/小时/实时等)的扩展	1) 建立统一的对象代码 + 数据标识的数据库表存储结构; 2) 统一不同时间尺度下 IMFDH 平台数据流程和方案制作流程。
空间维	管理机构(环保部门、调度部门、防汛部门等)扩展	建立面向接口的优化调度模型, 适应不同主体的目标需求;
	随着电站的不断投产运行, 梯级电站空间结构, 水力联系发生改变	采用深度优先搜索自动确定上下游电站计算顺序。

Continued

功能维	系统功能(如约束集合、算法、功能模块等)	1) 可扩展 n-tier 体系设计;
	不断扩展	2) 采用“模型云”对系统模型进行统一管理;
		3) 以“平台+插件”模式构建中间件层使得功能模块即插即用, 实现功能模块的任意扩展;
	需进行数据交互的第三方系统不断增加	采用统一的 Rest API 接口方式。

3.2. 可扩展系统框架设计

系统结构体系是软件构建的基础, 结合实际的需求, 选择合适的软件结构可有效的提高系统的灵活性、伸缩性与可扩展性。IMFDH 系统面临着梯级水电站的快速扩展、时间尺度众多、功能需求变化频繁等特点, 适合 n-tier 结构建构。与传统的软件结构相比 n-tier 体系具有以下优点: 1) 代码灵活性强, 需求变更时, 能快速找到相关模块进行修改; 2) 易于维护, 由于代码分层构建, 各个层级完成任务不同, 可直观的看出相关模块的功能; 3) 代码的复用性强, 由于代码分层级设计, 组合对象与继承使用多, 代码复用性强; 4) n-tier 结构包含客户端程序、Web 服务器、插件层、缓存层、数据库层, 各层之间横向扩展极其方便, 相同层级之间高内聚, 不同层级之间功能耦合度低, 影响小, 能较好的满足功能扩展等需求; 5) 中间件层通过标准接口实现的“平台 + 插件”模式将所有逻辑和业务处理分别实现, 新增模块仅实现标准接口即可。n-tier 结构框架、通信方式及扩展方式如图 1 所示。

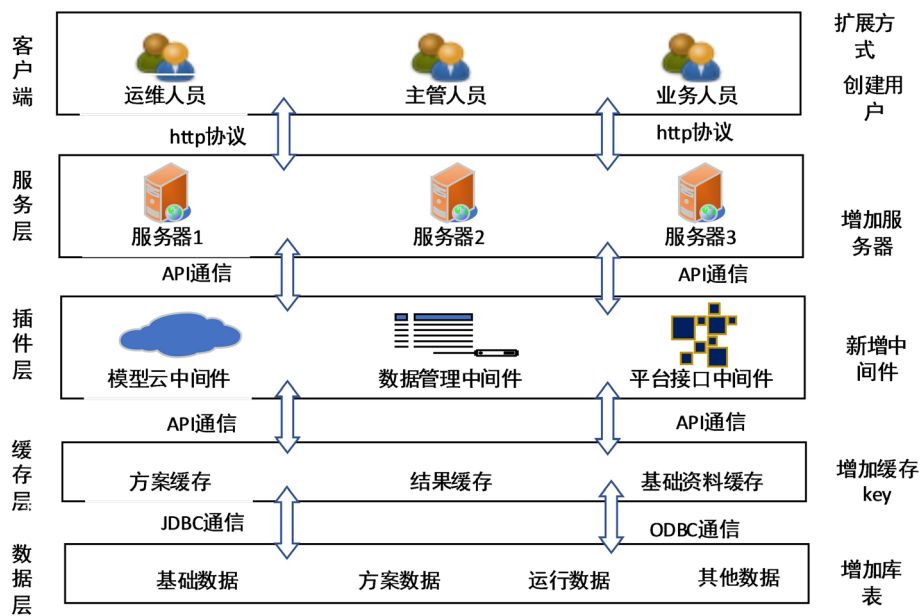


Figure 1. IMFDH system with n-tier architecture

图 1. n-tier 结构体系结构的 IMFDH 系统

4. 技术实现

4.1. 功能插件“即插即用”实现

功能维度扩展是 IMFDH 面临的最复杂扩展需求, 如何快速的在不改变原有框架的基础上, 实现功能的拓展与升级, 是系统功能维度拓展的关键问题。n-tire 结构通过“平台 + 插件”的方式对系统功能进行统一组织与管理。IMFDH 系统平台在系统内部具有完备的信息传递机制, 能实现各个模块信息之间无缝传递, 对于不同

扩展功能进行分类并定义标准接口从而把不同的功能插件有机地集成,有效地协同工作。该设计具有功能插件“即插即用”、模块分布管理、程序异步开发、代码有效保护等优势,被广泛应用于商用软件及专业系统开发。

采用“平台+插件”模式实现IMFDH平台框架如图2所示,平台部分主要包括公共函数库(如日期处理、常用数学计算等)、接口定义调用处理模块(如模型处理、数据处理、业务处理),新的功能模块通过实现接口,以插件配置形式接入系统,目前高级编程语言如C++、C#、.Net、Java等均具备程序动态加载功能,因此所有的插件都能够做到“即插即用”,保证系统在功能维度有着良好的扩展性能。

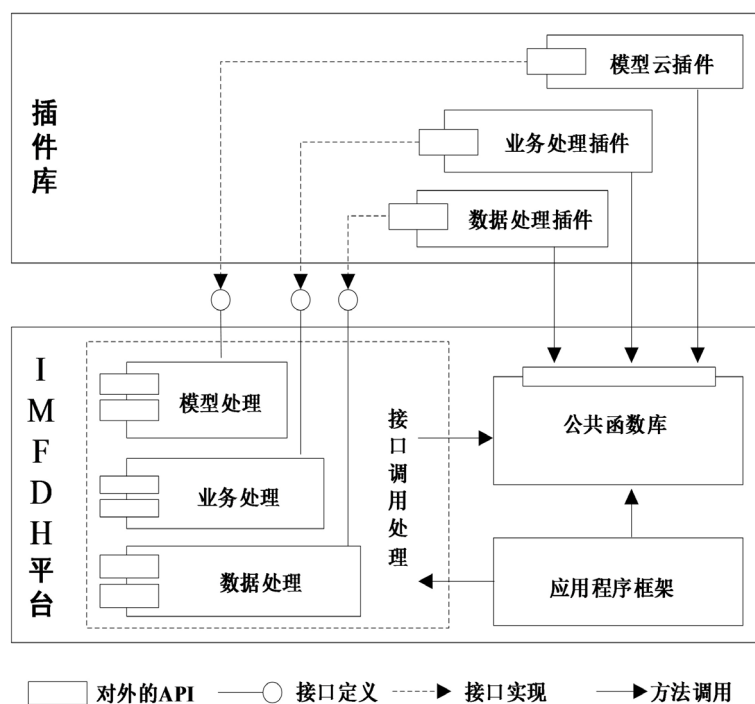


Figure 2. Implementation of IMFDH platform framework in “platform + plug-in” mode

图2. “平台+插件”模式实现IMFDH平台框架

4.2. 计算空间顺序确定

随着我国梯级水电站建设的不断推进,流域梯级水电站规模不断增加,为系统空间维度拓展带来巨大挑战,复杂的空间拓扑结构如何描述与处理面临三个关键问题:1)大规模梯级水电站上下游关系如何确定;2)当梯级水电站发生改变时,梯级水电站上下游拓扑结构如何重组;3)梯级水电站计算顺序如何确定。为了快速描述电站的空间拓扑结构,采用基于多叉树对梯级电站空间结构进行描述,各个节点表示当前的电站信息、下游电站信息、上游节点信息、是否处于干流等,采用变长度数组存储的上游索引集合等,如图3所示。由图3可知,每个电站有一个上游或多个电站,只有一个下游电站。以下游电站为父节点,上游电站为子节点,因此梯级电站可用一颗最下游为根节点的多叉树进行描述。多叉树描述具有灵活的可扩展性,一方面通过索引修改即可实现上下游拓扑关系重组,为新投产电站的接入及任意电站组合的拓扑结构重构提供方便。电站计算顺序是梯级发电调度计算的基础工作,一般人为确定,然而在重新选择电站组合后人为设置计算顺序非常繁琐,而且易出错。本文采用自动遍历的方式对梯级水电站的计算方式进行遍历,自动确定梯级电站计算顺序一般从根节点开始遍历,遍历过程为 $h \rightarrow e \rightarrow d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow g \rightarrow f$,由于根节点为最下游电站,计算顺序取逆序为 $f \rightarrow g \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow h$,与我们习惯设置的“先算上游后算下游,先算支流再算干流”的计算顺序一致。

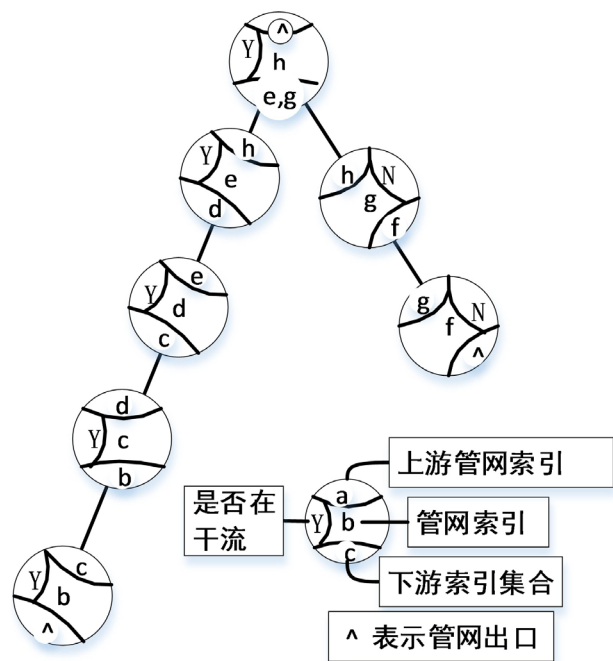


Figure 3. Description of multi tree
图 3. 多叉树描述方式

4.3. 多维度可扩展时序数据存储库表设计

IMFDH 系统使用的数据复杂且种类繁多，既有气象数据、降雨数据、蒸发数据、产汇流数据、水位数据，也有电站相关运行的；既有年、月、日较长时段数据，也有小时、15 分钟实时模拟数据；既有实际运行数据，也有预报发布的方案数据。IMFDH 平台功能的增加，关联数据类型会不断扩展，如生态流量、防汛控泄、河道通航、电力市场相关数据等。对于关系型数据库，如果采用一个字段存储一种数据的方式，库表结构会非常庞大，新增数据类型必须修改库表结构，同时应用程序也要做相应调整，因此这种方式无法满足系统扩展需求。基于实际工程的需要本文设计了一种基于“对象码 + 标识符”描述 IMFDH 系统数据库表结构，用于存储所有类型的数据，包括时序数据与基础数据，如表 2 所示。对象码是通过统一编码的全局唯一编码，可用来表示电站、流域等对象，表示符用来表示生态流量、鱼群种类等不同数据类型的唯一码，如表 3 所示。

Table 2. Table structure of time series database based on “object code + identifier”
表 2. 基于“对象码 + 标识符”的时序数据库表结构

中文名称	字段名	数据类型	主键	备注
对象代码	STCD	字符型	是	电站、机组、流域
数据标识	DEMO	字符型	是	见表 3 描述
数据步长	PTYPE	整型	是	0~15 分钟；1-小时；2-日；3-月；4-年等
时间	DT	日期型	是	
对应数值	VALUE	浮点型	否	

Table 3. Example of data identification description
表 3. 数据标识描述实例

DEMO	意义	单位	小数位
P	降雨量	mm	1
T	汇流时间	s	
Z	坝上水位	m	2
Q	区间入流	m ³ /s	2

基于“对象码 + 标识符”方式的数据库表结构具有如下优势：1) 对于扩展对象及数据类型，通过定义相应的对象代码和数据标识即可存入数据库，并且可存储多种时序的数据；2) 通过构建以对象码、标识符、数据步长为参数的通用函数即可实现对任意时序数据的提取和存储。

4.4. 模型云设计

由于 IMFDH 系统包含模型众多，包含水文预报、水力学、发电调度、防洪调度等有关的模型，为了使得模型与众多模块服务，构建一套基于“云端”的模型服务平台，集成水文、水力学、调度等有与水相关的模型，整合大数据、机器学习等人工智能算法，打造一套集流域水文模拟、防洪预报调度、发电调度、洪水演进等所有服务的模型计算平台，进行统一管理任务、统一调配资源、统一集中计算，为智慧水电等信息化平台提供智能分析决策支撑。模型计算服务以容器云为基础模型运行兼容层为计算核心，网络文件存储作为模型计算数据交换中间件，以 Restful 形式到微服务为计算服务接口为中间件，统一计算接口作为模型云终端，为 IMFDH 系统提供模型计算服务，模型云基本架构见图 4。采用模型云的方式对模型进行统一管理具有以下优势：1) 统一分配计算资源，提高计算效率；2) 各个模型开发在模型云上实现，使得模型开发相对独立，使得模型具有很强的拓展性。

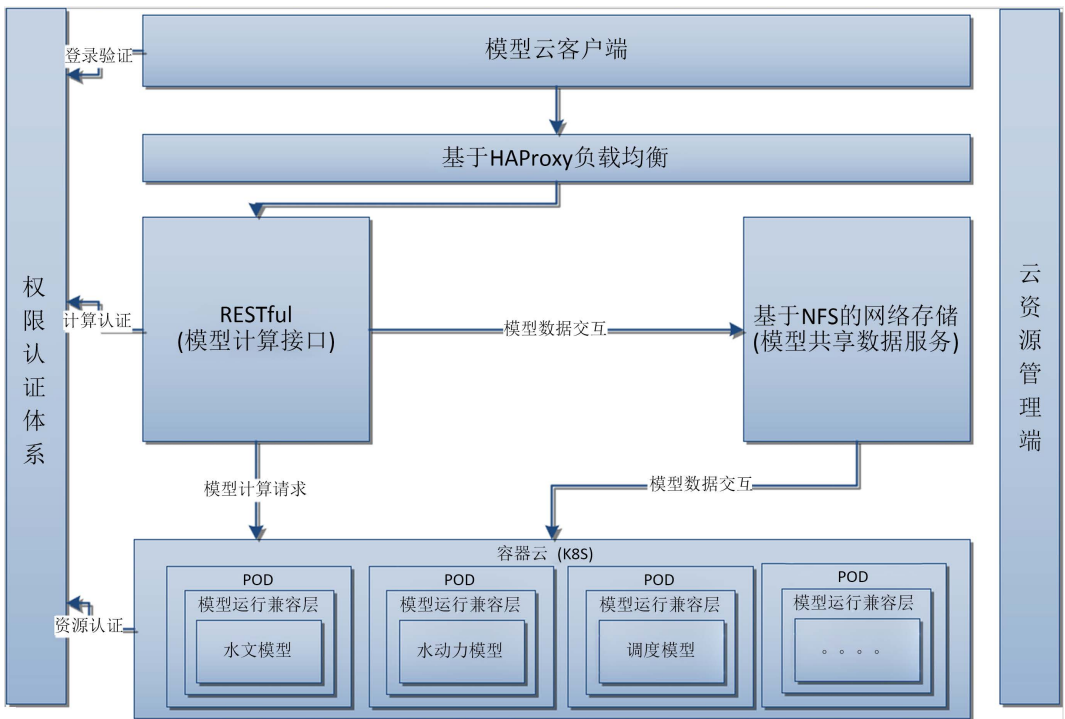


Figure 4. Model computing service architecture
图 4. 模型计算服务架构

5. 应用效果及结论

本文介绍了一种三维度可扩展 IMFDH 建模平台。实现了 IMFDH 平台在时间维度、空间维度、功能维度三个维度的扩展, 并支持二次开发, 已在南欧江等流域进行应用, 并取得了不错效果。极大的提高了 IMFDH 平台的开发效率。

基金项目

特别感谢“水电工程水文气象重大关键技术应用研究课题——水文气象及流域水电开发大数据平台研究设计”提供的资金支持。

参考文献

- [1] 周鑫, 马晓伟, 牛拴保, 等. 西北省间实时平衡电力市场探索[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(15): 166-171.
ZHOU Xin, MA Xiaowei, NIU Shuanbao, et al. Exploration of real-time balanced power market among Northwest Provinces. Power System Automation, 2021, 45(15): 166-171. (in Chinese)
- [2] 曹明良, 李国和, 冯峥, 等. 基于电力系统大数据治理的软件数据平台设计与研究[J]. 计算技术与自动化, 2020, 39(3): 135-139.
CAO Mingliang, LI Guohe, FENG Zheng, et al. Design and research of software data platform based on power system big data governance. Computing Technology and Automation, 2020, 39(3): 135-139. (in Chinese)
- [3] 李凌昊, 邱晓燕, 张楷, 等. 考虑多负荷聚集商参与的系统日前-日内分层优化调度策略[J]. 电力建设, 2019, 40(12): 70-79.
LI Linghao, QIU Xiaoyan, ZHANG Kai, et al. Day ahead day intra day hierarchical optimal dispatching strategy considering the participation of multi load aggregators. Power Construction, 2019, 40(12): 70-79. (in Chinese)
- [4] 曹瑞, 程春田, 申建建, 等. 考虑蓄水期弃水风险的水库长期发电调度方法[J/OL]. 水利学报, 1-11.
<https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20210045>, 2021-08-10.
CAO Rui, CHENG Chuntian, SHEN Jianjian, et al. Reservoir long-term power generation dispatching method considering water abandonment risk during impoundment period. Journal of Water Conservancy, 1-11.
<https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20210045>, 2021-08-10. (in Chinese)
- [5] 纪昌明, 刘源, 王弋, 张验科, 陈平. 耦合整体预报不确定性的水电站短期优化调度模型[J/OL]. 水利学报, 1-10.
<https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20201036>, 2021-08-10.
JI Changming, LIU Yuan, WANG Yi, ZHANG Yanke and CHEN Ping. Short term optimal operation model of hydropower stations coupled with overall forecast uncertainty. Journal of Hydraulic Engineering, 1-10.
<https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20201036>, 2021-08-10. (in Chinese)
- [6] 申建建, 陈光泽, 魏巍, 程春田, 苗树敏, 王亮. 耦合联动分析理论的多调峰指标水电短期调度模型[J/OL]. 水利学报, 1-12. <https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20201079>, 2021-08-10.
SHEN Jianjian, CHEN Guangze, WEI Wei, CHENG Chuntian, MIAO Shumin and WANG Liang. Multi peak shaving index hydropower short-term dispatching model based on coupling linkage analysis theory. Journal of Water Conservancy, 1-12.
<https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20201079>, 2021-08-10. (in Chinese)
- [7] 周威, 李海强, 王颖, 任宇程. 四川省水资源智能调度管理系统设计思考[J]. 四川水利, 2021(S1): 32-34.
ZHOU Wei, LI Haiqiang, WANG Ying and REN Yucheng. Thoughts on the design of Sichuan water resources intelligent dispatching management system. Sichuan Water Resources, 2021(S1): 32-34. (in Chinese)
- [8] 曹璐, 武新宇, 过团挺, 等. 基于 CFS 预报产品的水电站水库预泄决策方法[J]. 水电能源科学, 2016, 34(1): 53-56.
CAO Lu, WU Xinyu, GUO Tuanting, et al. Decision making method for reservoir pre discharge of hydropower station based on CFS prediction products. Hydropower Energy Science, 2016, 34(1): 53-56. (in Chinese)
- [9] 刘甜, 梁忠民, 邱辉, 等. 基于 CFS 的汉江上游梯级水库系统月入库径流预测[J]. 水电能源科学, 2019, 37(8): 14-17+10.
LIU Tian, LIANG Zhongmin, QIU Hui, et al. Monthly inflow runoff prediction of cascade reservoir system in the upper reaches of Hanjiang River based on CFS. Hydropower and Energy Science, 2019, 37(8): 14-17+10. (in Chinese)
- [10] 卢丽, 潘学标, 张立祯. MIKE FLOOD 模型在北京清河流域洪涝模拟中的有效性验证[J/OL]. 水利水电技术(中英文), 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.tv.20210804.1709.002.html>, 2021-08-10.
LU Li, PAN Xuebiao and ZHANG Lizhen. Validation of MIKE FLOOD model in flood simulation of Qinghe River Basin in Beijing. Water Resources and Hydropower Technology (Chinese and English), 1-12.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.tv.20210804.1709.002.html>, 2021-08-10. (in Chinese)