



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 120069474 B

(45) 授权公告日 2025. 06. 27

(21) 申请号 202510535450.9

郭旭宁 钟平安

(22) 申请日 2025.04.27

(74) 专利代理机构 北京中先生知识产权代理事务
所(普通合伙) 16063

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 120069474 A

专利代理师 吴会敏

(43) 申请公布日 2025.05.30

(51) Int.Cl.

G06Q 10/0631 (2023.01)

G06Q 10/0635 (2023.01)

G06Q 50/06 (2024.01)

G06N 7/01 (2023.01)

(73) 专利权人 河海大学

地址 210098 江苏省南京市鼓楼区西康路1
号专利权人 福州水务水资源开发有限公司
福建省水利水电勘测设计研究院
有限公司
水利部水利水电规划设计总院

(56) 对比文件

CN 118735275 A, 2024.10.01

CN 111695290 A, 2020.09.22

(72) 发明人 陈娟 付茹萍 池大锋 朱振洋
范晓辉 朱光华 谢建清 唐景云
李臻 刘正风 程玉泉 刘为锋

审查员 杨晓东

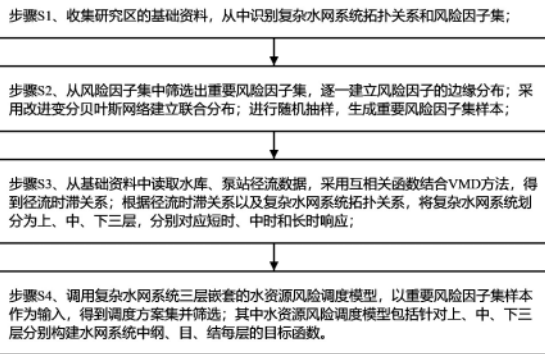
权利要求书3页 说明书15页 附图2页

(54) 发明名称

复杂水网系统水资源风险调度与综合调控
方法

(57) 摘要

本发明提供了一种复杂水网系统水资源风险调度与综合调控方法,步骤如下:识别复杂水网系统拓扑关系和风险因子集;筛选重要风险因子集,采用改进变分贝叶斯网络建立联合分布,进行随机抽样,生成重要风险因子集样本;采用互相关函数结合VMD方法,得到径流时滞关系;根据径流时滞关系以及复杂水网系统拓扑关系,将复杂水网系统划分为上、中、下三层;构建复杂水网系统三层嵌套的水资源风险调度模型,以重要风险因子集样本作为输入,得到调度方案集并筛选。本发明与传统风险调度相比,兼顾全局,明确区域调度侧重点,有效平衡水网系统经济性和安全性,提高调度模型计算效率,为复杂水网系统水资源风险调度提供了有力支持。



1. 复杂水网系统水资源风险调度与综合调控方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤S1、收集研究区的基础资料,从中识别复杂水网系统拓扑关系和风险因子集;

步骤S2、从风险因子集中筛选出重要风险因子集,逐一建立风险因子的边缘分布;采用改进变分贝叶斯网络建立联合分布;进行随机抽样,生成重要风险因子集样本;

步骤S3、从基础资料中读取水库、泵站径流数据,采用互相关函数结合VMD方法,得到径流时滞关系;根据径流时滞关系以及复杂水网系统拓扑关系,将复杂水网系统划分为上、中、下三层,分别对应短时、中时和长时响应;

步骤S4、调用复杂水网系统三层嵌套的水资源风险调度模型,以重要风险因子集样本作为输入,得到调度方案集并筛选;其中水资源风险调度模型包括针对上、中、下三层分别构建水网系统中纲、目、结每层的目标函数;

步骤S3具体为:

基于相邻泵站和水库的径流时滞关系,将时滞步长划分为短时、中时和长时响应三类时间步长,结合三类时间步长将复杂水网系统划分为短时、中时和长时三个时间响应子系统;

基于复杂水网系统拓扑关系,计算相邻泵站和水库的网络复杂度;基于泵站和水库风险因子计算各节点的风险复杂度;结合网络复杂度和风险复杂度,将复杂水网系统划分为高、中、低三个空间风险子系统;

建立每个时间响应子系统与空间风险子系统的映射关系,进行排序,确定相对水资源风险调度的重要程度;基于系统安全性和经济性划为上、中、下三层;

步骤S3中,得到径流时滞关系的方法具体为:

读取包括泵站和水库在内的各节点径流数据,进行预处理,并采用VMD方法分解,结合中心频率法确定IMFs个数,得到最佳IMFs;

分别对相邻节点径流数据的最佳IMFs,依次计算互相关函数,得到相邻节点径流数据IMFs之间的互相关性,将每一对IMFs的互相关函数峰值作为时滞;

计算各IMFs与原始信号的互相关系数,并据此计算每对IMFs的权重,通过加权平均法确定相邻节点间时滞,得到系统各节点间的径流时滞关系。

2. 根据权利要求1所述的复杂水网系统水资源风险调度与综合调控方法,其特征在于,所述步骤S4中,水资源风险调度模型的构建步骤,具体为:

逐一确定上、中、下每层中纲、目、结目标函数及权重,通过对每层加权,分别得到上、中、下层目标函数;

基于每层的调度特性,采用对应的算法计算,从下层往上层,依序计算各层的最优调度方案,并将下层最优调度方案作为中层的边界条件,中层最优调度方案作为上层的边界条件。

3. 根据权利要求1所述的复杂水网系统水资源风险调度与综合调控方法,其特征在于,所述步骤S1进一步为:

步骤S11、确定研究区范围,收集复杂水网系统基本构成及水利工程基础资料;

步骤S12、构建结构化数据,采用知识图谱技术识别复杂水网系统拓扑关系,得到研究区概化的复杂水网系统拓扑关系,所述的拓扑关系包括源汇关系、供需关系、回归关系、隶属关系;

步骤S13、采用专家咨询识别研究区存在的风险因子集。

4. 根据权利要求1所述的复杂水网系统水资源风险调度与综合调控方法,其特征在于,所述步骤S2进一步为:

步骤S21、筛选重要风险因子集;逐一确定重要风险因子集中每个风险因子的最适先验分布;确定重要风险因子集中互相关及独立风险因子;

步骤S22、基于最适先验分布,对互相关的风险因子采用改进变分贝叶斯网络建立联合分布;

步骤S23、对风险因子联合及独立分布,分别采用改进拉丁超立方抽样抽取样本,并整合得到初始风险因子集样本;利用遗传算法优化样本,得到最终风险因子集。

5. 根据权利要求4所述的复杂水网系统水资源风险调度与综合调控方法,其特征在于,所述步骤S22进一步为:

步骤S22a、采用对比学习对重要风险因子集中互相关的风险因子进行特征压缩,提取低维稠密表征;

步骤S22b、基于最适先验分布构建改进变分贝叶斯网络,并以低维稠密表征作为输入,在变分自编码器的隐空间,通过梯度权重分析量化隐变量对风险因子的贡献度;基于贡献度排名对隐变量施加渐进式L1稀疏惩罚,筛选最终隐变量,并读取其后验分布建立联合分布,其中采用Wasserstein距离作为联合分布的差异度量。

6. 根据权利要求4所述的复杂水网系统水资源风险调度与综合调控方法,其特征在于,所述步骤S23进一步为:

步骤S23a、基于风险因子PDF的曲率 $k(x)$,对联合及独立分布分别进行动态分层,区间宽度根据曲率自适应调整,高曲率区域压缩为原宽度 $1/(1+k(x))$,低曲率区域扩宽为 n 倍;

步骤S23b、每个分层通过拉丁超立方生成100%的样本,针对PDF的非尾部区域抽取 $x\%$ 的样本;针对尾部区域,采用重要性抽样得到尾部区域 $(100-x)\%$ 的样本,整合联合及独立分布的抽样,组合成风险因子初始样本;

步骤S23c、将风险因子初始样本作为遗传算法的输入,进行优化,得到最终风险因子集。

7. 根据权利要求1所述的复杂水网系统水资源风险调度与综合调控方法,其特征在于,所述步骤S3进一步为:

步骤S31、读取包括泵站和水库在内的各节点径流数据,进行预处理;采用互相关函数结合VMD方法,计算得到径流时滞关系;

步骤S32、根据相邻泵站和水库的径流时滞关系及复杂水网系统拓扑关系,将整个复杂水网系统划为上、中、下三层;上层具有较短的响应时间且风险较高,采用实时调度;中层具有中等的响应时间且风险适中,采用短期调度;下层具有较长的响应时间且风险较低,采用中长期调度。

8. 根据权利要求1所述的复杂水网系统水资源风险调度与综合调控方法,其特征在于,所述步骤S4中,针对上、中、下三层分别构建水网系统中纲、目、结每层的目标函数,具体为:

上层考虑安全性,纲层以输水线路关键断面最大过水流量最小为目标函数,目层以取水口最大过水流量最小为目标函数,结层以水库群总防洪安全度最大为目标函数;

中层考虑经济性和安全性,纲层以输水线路关键断面最大过水流量最小、区域经济效

益最大为目标函数,目层以取水口最大过水流量最小、区域社会经济总缺水量最小为目标函数,结层以水库群总防洪安全度最大、水库群综合发电效益最大化为目标函数;

下层考虑经济性,纲层以区域经济效益最大为目标函数,目层以区域社会经济总缺水量最小为目标函数,结层以水库群综合发电效益最大化为目标函数。

复杂水网系统水资源风险调度与综合调控方法

技术领域

[0001] 本发明涉及水资源管理与风险调度领域,具体是指复杂水网系统水资源风险调度与综合调控方法。

背景技术

[0002] 随着城市化进程的加快和气候变化的影响,水资源管理与风险调度面临前所未有的挑战。为了解决这一问题,中国近几年竭力推动国家水网建设。

[0003] 水资源风险调度是指在水资源系统运行时考虑水文、气象等预报结果的不确定性以及可能存在的风险,以获得风险效益为目的的调度。水资源风险调度最初采用重现期法、一次二阶距法等定量估计风险的大小;随后针对风险的随机性,采用随机过程、马尔科夫链、蒙特卡洛模拟等方法求解;发展至今,传统优化调度方法(线性/非线性规划、动态规划等)、智能优化算法、随机动态规划等也应用到水资源风险调度中。因此,现有的水资源风险调度方法主要是基于优化算法和随机模拟进行水资源系统的整体模拟及优化求解,以应对水文不确定性、供需矛盾及工程安全风险等。

[0004] 随着水网系统规模的扩大和工程复杂性的增加,传统水资源风险调度方法无法兼顾国家水网“纲、目、结”多层级工程的差异化需求,无法有效应对实际工作中的紧急情况。目前亟待解决的问题包括调度模型分层不科学、调度模型计算效率低、区域调度侧重点不明确、径流时滞关系识别不准确、径流时滞关系考虑不足、风险因子联合分布效果不佳、风险因子集抽样效率不佳以及复杂水网系统拓扑关系识别不足。因此,急需一种能够将复杂水网系统分层优化的水资源风险调度与综合调控方法。

发明内容

[0005] 发明目的,提供一种复杂水网系统水资源风险调度与综合调控方法,以解决现有技术存在的上述问题。

[0006] 技术方案,复杂水网系统水资源风险调度与综合调控方法,包括如下步骤:

[0007] 步骤S1、收集研究区的基础资料;从中识别复杂水网系统拓扑关系和风险因子集;

[0008] 步骤S2、从风险因子集中筛选出重要风险因子集,逐一建立风险因子的边缘分布;采用改进变分贝叶斯网络建立联合分布;进行随机抽样,生成重要风险因子集样本;

[0009] 步骤S3、从基础资料中读取水库、泵站径流数据,采用互相关函数结合VMD方法,得到径流时滞关系;根据径流时滞关系以及复杂水网系统拓扑关系,将复杂水网系统划分为上、中、下三层,分别对应短时、中时和长时响应;

[0010] 步骤S4、调用复杂水网系统三层嵌套的水资源风险调度模型,以重要风险因子集样本作为输入,得到调度方案集并筛选;其中水资源风险调度模型包括针对上、中、下三层分别构建水网系统中纲、目、结每层的目标函数。

[0011] 本发明提出复杂水网系统水资源风险调度与综合调控方法,通过拓扑关系识别、改进变分贝叶斯网络、改进拉丁超立方抽样、径流时滞关系分析以及构建复杂水网系统三

层嵌套的水资源风险调度模型,提供了一种切实可行的复杂水网系统水资源风险调度与综合调控方法,解决目前存在的问题,确保复杂水网系统的可持续发展,为社会经济发展提供坚实的水资源保障。

[0012] 根据本申请的一个方面,所述步骤S4中,水资源风险调度模型的构建步骤,具体为:

[0013] 逐一确定上、中、下每层中纲、目、结目标函数和权重,通过对每层加权,分别得到上、中、下层目标函数;

[0014] 基于每层的调度特性,采用对应的算法计算,从下层往上层,依序计算各层的最优调度方案,并将下层最优调度方案作为中层的边界条件,中层最优调度方案作为上层的边界条件。

[0015] 根据本申请的一个方面,所述步骤S3中,根据径流时滞关系以及复杂水网系统拓扑关系,将复杂水网系统划分为上、中、下三层,具体为:

[0016] 基于相邻泵站和水库的径流时滞关系,将时滞步长划分为短时、中时和长时响应三类时间步长,结合三类时间步长将复杂水网系统划分为短时、中时和长时三个时间响应子系统;

[0017] 基于复杂水网系统拓扑关系,计算相邻泵站和水库的网络复杂度;基于泵站和水库风险因子计算各节点的风险复杂度;结合网络复杂度和风险复杂度,将复杂水网系统划分为高、中、低三个空间风险子系统;

[0018] 建立每个时间响应子系统与空间风险子系统的映射关系,进行排序,确定相对水资源风险调度的重要程度;基于系统安全性和经济性划为上、中、下三层。

[0019] 根据本申请的一个方面,所述步骤S3中,采用互相关函数结合VMD方法,得到径流时滞关系,具体为:

[0020] 读取包括泵站和水库在内的各节点径流数据,进行预处理,并采用VMD方法分解,结合中心频率法确定IMFs个数,得到最佳IMFs;

[0021] 分别对相邻节点径流数据的最佳IMFs,依次计算互相关函数,得到相邻节点径流数据IMFs之间的互相关性,将每一对IMFs的互相关函数峰值作为时滞;

[0022] 计算各IMFs与原始信号的互相关系数,并据此计算每对IMFs的权重,通过加权平均法确定相邻节点间时滞,得到系统各节点间的径流时滞关系。

[0023] 根据本申请的一个方面,所述步骤S1进一步为:

[0024] 步骤S11、确定研究区范围,收集复杂水网系统基本构成及水利工程基础资料;

[0025] 步骤S12、构建结构化数据,采用知识图谱技术识别复杂水网系统拓扑关系,得到研究区概化的复杂水网系统拓扑关系,所述的拓扑关系包括源汇关系、供需关系、回归关系、隶属关系;

[0026] 步骤S13、采用专家咨询识别研究区存在的风险因子集。

[0027] 根据本申请的一个方面,所述步骤S2进一步为:

[0028] 步骤S21、筛选重要风险因子集;逐一确定重要风险因子集中每个风险因子的最适先验分布;确定重要风险因子集中互相关及独立风险因子;

[0029] 步骤S22、基于最适先验分布,对互相关的风险因子采用改进变分贝叶斯网络建立联合分布;

[0030] 步骤S23、对风险因子联合及独立分布,分别采用改进拉丁超立方抽样抽取样本,并整合得到初始风险因子集样本;利用遗传算法优化样本,得到最终风险因子集。

[0031] 根据本申请的一个方面,所述步骤S22进一步为:

[0032] 步骤S22a、采用对比学习对重要风险因子集中互相关的风险因子进行特征压缩,提取低维稠密表征;

[0033] 步骤S22b、基于最适先验分布构建改进变分贝叶斯网络,并以低维稠密表征作为输入,在变分自编码器的隐空间,通过梯度权重分析量化隐变量对风险因子的贡献度;基于贡献度排名对隐变量施加渐进式L1稀疏惩罚,筛选最终隐变量,并读取其后验分布建立联合分布,其中采用Wasserstein距离作为联合分布的差异度量。

[0034] 根据本申请的一个方面,所述步骤S23进一步为:

[0035] 步骤S23a、基于风险因子PDF的曲率 $k(x)$,对联合及独立分布分别进行动态分层,区间宽度根据曲率自适应调整,高曲率区域压缩为原宽度 $1/(1+k(x))$,低曲率区域扩宽为 n 倍;

[0036] 步骤S23b、每个分层通过拉丁超立方生成100%的样本,针对PDF的非尾部区域抽取 $x\%$ 的样本;针对尾部区域,采用重要性抽样得到尾部区域 $(100-x)\%$ 的样本,整合联合及独立分布的抽样,组合成风险因子初始样本;

[0037] 步骤S23c、将风险因子初始样本作为遗传算法的输入,进行优化,得到最终风险因子集。

[0038] 根据本申请的一个方面,所述步骤S3进一步为:

[0039] 步骤S31、读取包括泵站和水库在内的各节点径流数据,进行预处理;采用互相关函数结合VMD方法,计算得到径流时滞关系;

[0040] 步骤S32、根据相邻泵站和水库的径流时滞关系及复杂水网系统拓扑关系,将整个复杂水网系统划为上、中、下三层;上层具有较短的响应时间且风险较高,采用实时调度;中层具有中等的响应时间且风险适中,采用短期调度;下层具有较长的响应时间且风险较低,采用中长期调度。

[0041] 根据本申请的一个方面,所述步骤S4中,针对上、中、下三层分别构建水网系统中纲、目、结每层的目标函数,具体为:

[0042] 上层考虑安全性,纲层以输水线路关键断面最大过水流量最小为目标函数,目层以取水口最大过水流量最小为目标函数,结层以水库群总防洪安全度最大为目标函数;

[0043] 中层考虑经济性和安全性,纲层以输水线路关键断面最大过水流量最小、区域经济效益最大为目标函数,目层以取水口最大过水流量最小、区域社会经济总缺水量最小为目标函数,结层以水库群总防洪安全度最大、水库群综合发电效益最大化为目标函数;

[0044] 下层考虑经济性,纲层以区域经济效益最大为目标函数,目层以区域社会经济总缺水量最小为目标函数,结层以水库群综合发电效益最大化为目标函数。

[0045] 有益效果,本发明提出的通过结构化数据融合知识图谱技术,能够高效解析复杂水网系统的物理连接与动态交互关系,显著提升拓扑关系识别的准确性,且考虑了源汇关系、供需关系等更加全面的拓扑关系,为后续分层优化提供可靠基础。基于改进变分贝叶斯网络构建联合分布,可显著降低风险因子维度冗余,解决容易陷入局部最优、隐变量冗余的问题,为互相关风险因子建立更适合的联合分布。基于改进拉丁超立方抽样,通过动态分层

以及结合重要性抽样,可以有效解决拉丁超立方抽样尾部覆盖不足的问题,确保抽样更均匀,另外通过遗传算法优化样本,获得精度更佳的重要风险因子集样本,确保风险因子更贴近实际复杂工况。采用互相关函数结合VMD方法分析非稳态的径流数据,得到精准的径流时滞关系。根据径流时滞关系以及复杂水网系统拓扑关系,将复杂水网系统划分为上、中、下三层,为后续水资源风险调度模型分层提供科学依据,该分层策略有效解决了传统方法对径流时滞关系考虑不足的问题,且综合考虑了网络复杂度和风险复杂度,应用该分层开展风险调度可有效增强复杂水网系统对突发事件的快速响应能力,同时优化水资源配置。构建的复杂水网系统三层嵌套的水资源风险调度模型,根据不同径流时滞和风险等级划分为上、中、下层,上、中、下层分别对应实时调度、短期调度和中长期调度,且各层考虑纲、目、结的工程特性及差异化需求,分层调度,兼顾全局,明确区域调度侧重点,有效平衡水网系统经济性和安全性,提高调度模型计算效率。

附图说明

- [0046] 图1是本发明的流程图。
- [0047] 图2是本发明步骤S1的流程图。
- [0048] 图3是本发明步骤S2的流程图。
- [0049] 图4是本发明步骤S3的流程图。

具体实施方式

[0050] 如图1至图4所示,提出如下技术方案。根据本申请的一个方面,提供一种复杂水网系统水资源风险调度与综合调控方法,其特征在于,包括如下步骤:

[0051] 步骤S1、收集研究区的基础资料;从中识别复杂水网系统拓扑关系和风险因子集;

[0052] 步骤S2、从风险因子集中筛选出重要风险因子集,逐一建立风险因子的边缘分布;采用改进变分贝叶斯网络建立联合分布;进行随机抽样,生成重要风险因子集样本;

[0053] 步骤S3、从基础资料中读取水库、泵站径流数据,采用互相关函数结合VMD方法,得到径流时滞关系;根据径流时滞关系以及复杂水网系统拓扑关系,将复杂水网系统划分为上、中、下三层,分别对应短时、中时和长时响应;

[0054] 步骤S4、调用复杂水网系统三层嵌套的水资源风险调度模型,以重要风险因子集样本作为输入,得到调度方案集并筛选;其中水资源风险调度模型包括针对上、中、下三层分别构建水网系统中纲、目、结每层的目标函数。

[0055] 在本实施例中,为得到更精确的拓扑关系,本发明通过构建结构化数据,采用知识图谱技术识别复杂水网系统拓扑关系。且本发明考虑了源汇关系、供需关系、回归关系、隶属关系等拓扑关系,因此研究区拓扑关系的识别更加全面,考虑了水网系统内部结构及其相互作用,准确、全面的拓扑关系为后续复杂水网系统的分层提供了可靠的基础。

[0056] 在复杂水网系统的水资源风险调度中,风险因子建立联合分布是风险因子抽样的基础,但传统的贝叶斯网络存在容易陷入局部最优及隐变量冗余的问题,导致联合分布建模精度不足且计算效率低下。针对这一难题,本发明提出改进变分贝叶斯网络,通过对隐变量进行筛选,并采用Wasserstein距离作为联合分布的差异度量,可以有效解决该问题,为互相关风险因子建立更适合的联合分布,并且提高计算效率。

[0057] 传统拉丁超立方抽样存在样本尾部覆盖不足、分布不均匀的缺点,本发明通过改进拉丁超立方抽样,基于概率密度函数(PDF)曲率自适应调整分层,并结合重要性抽样,抽取尾部风险因子样本,显著提升极端事件样本的覆盖率,确保样本更具代表性,为后续风险调度模型提供高质量输入数据。

[0058] 径流数据的非稳态特性导致直接采用互相关函数很难得到精确的径流时滞关系。为解决该问题,本发明提出互相关函数结合VMD方法,通过VMD方法将径流数据分解为多个相对稳定的IMFs,便于后续互相关函数从中获取更多的特征信息,提高识别径流时滞关系的精度。

[0059] 传统风险调度对径流时滞关系的考虑不足,且模型分层不科学,本发明根据径流时滞关系以及复杂水网系统拓扑关系,将复杂水网系统划分为上、中、下三层,充分考虑径流时滞和风险,便于后续分层调度,优化水资源配置,提高水资源管理效率。

[0060] 为明确区域调度侧重点,有效平衡水网系统经济性和安全性,提高调度模型计算效率,本发明构建复杂水网系统三层嵌套的水资源风险调度模型,上、中、下三层分别开展实时调度、短期调度和中长期调度,且每层基于调度特性采用对应的算法计算,并以下一层最优调度方案作为上一层的边界条件,分层调度减少计算量,提高效率,更科学有效面对各区域不同的情况,为复杂水网系统安全运行以及区域经济发展提供了坚实的技术支持。

[0061] 总的来说,本发明针对复杂水网系统水资源风险调度中亟待解决的问题提出了一系列创新性解决方案,为复杂水网系统的科学管理和优化配置提供了可靠的技术支撑。基于知识图谱技术,构建全面、准确的复杂水网拓扑关系;基于改进变分贝叶斯网络,提高计算效率,建立更合适的联合分布;基于改进拉丁超立方抽样,抽取更具代表性的重要风险因子集样本;基于互相关函数结合VMD方法,提高识别径流时滞关系的精度;基于径流时滞关系以及复杂水网系统拓扑关系将复杂水网系统划分为上、中、下三层,在水资源风险调度中充分考虑径流时滞和风险,为后续调度模型分层提供科学依据;构建复杂水网系统三层嵌套的水资源风险调度模型,实现了实时调度、短期调度和中长期调度的有机协同,大幅提升了复杂水网系统风险调度的计算效率,有效平衡经济性和安全性。

[0062] 根据本申请的一个方面,所述步骤S4中,水资源风险调度模型的构建步骤,具体为:

[0063] 逐一确定上、中、下每层中纲、目、结目标函数和权重,通过对每层加权,分别得到上、中、下层目标函数;

[0064] 在本实施例中,为有效平衡主客观因素,确保权重分配的合理性和科学性,为复杂水网系统的水资源风险调度提供可靠的目标函数支持,采用主客观组合赋权法确定权重。

[0065] 将上、中、下每层中纲、目、结目标函数进行标准化处理。采用Delphi Method识别上、中、下每层的纲、目、结目标函数内部的依赖关系。基于Delphi Method结果确定ANP网络结构中的控制层及网络层,确定判断矩阵,并进行一致性检验与修正。根据判断矩阵,构建ANP超矩阵,求解权重。再次采用Delphi Method对权重合理性进行定性评估,通过Kendall协调系数量化专家共识度,评估专家对权重的一致性,在达成专家共识后,输出最终主观权重。通过CRITIC(权重法)及EWM(熵权法)分别计算客观权重,再通过算术平均法得到综合客观权重。

[0066] 计算主客观权重间的Jensen-Shannon散度,量化两者差异,具体公式如下:

[0067] $JSD(\omega_{\text{主观}} || \omega_{\text{客观}}) = 1/2 \cdot D_{KL}(\omega_{\text{主观}} || M) + 1/2 \cdot D_{KL}(\omega_{\text{客观}} || M)$;

[0068] 式中, JSD为Jensen-Shannon散度, D_{KL} 为KL散度, $\omega_{\text{主观}}$ 、 $\omega_{\text{客观}}$ 分别为主观权重以及综合客观权重, M 为主观权重及综合客观权重的算术平均值。

[0069] 将其作为修正因子, 对主客观权重间差异部分进行比例分配, 具体公式如下:

$\omega_{\text{综合}} = \omega_{\text{主观}} + \alpha \cdot JSD \cdot \omega_{\text{客观}}$;

[0070] 式中, $\omega_{\text{综合}}$ 为第j个目标函数的综合权重, $\omega_{\text{主观}}$ 为第j个目标函数的主观权重, $\omega_{\text{客观}}$ 为第j个目标函数的客观权重, JSD为Jensen-Shannon散度, α 为修正系数, 通常取0.5。

[0071] 通过整合比例分配, 得到上、中、下每层中纲、目、结目标函数的权重, 确定上、中、下层目标函数。

[0072] 基于每层的调度特性, 采用对应的算法计算, 从下层往上层, 依序计算各层的最优调度方案, 并将下层最优调度方案作为中层的边界条件, 中层最优调度方案作为上层的边界条件。

[0073] 在本实施例中, 上、中、下每层中纲、目、结目标函数考虑的约束条件具体为:

[0074] (1) 出库泄流约束: $Q_j(t) \geq Q_{\min,j}$; $Q_j(t) \leq Q_{\max,j}$; 式中, $Q_j(t)$ 为第j个水库第t个时段的出库泄流量, $Q_{\min,j}$ 为第j个水库下游最小的下泄流量限制值, $Q_{\max,j}$ 为第j个水库下游河道防汛安全泄量值, j 为水库索引。

[0075] (2) 期初/末水位约束: $Z_j(1) = Z_{j,s}$; $Z_j(T) = Z_{j,e}$; 式中, $Z_j(1)$ 为第j个水库第1个时段的水位, $Z_{j,s}$ 为第j个水库的调度期初起调水位, $Z_j(T)$ 为第j个水库第T个时段的水位, $Z_{j,e}$ 为第j个水库的调度期末水位, j 为水库索引。

[0076] (3) 水库特征水位约束: $Z_{\min,j} \leq Z_j(t) \leq Z_{\max,j}$; 式中, $Z_j(t)$ 、 $Z_{\min,j}$ 、 $Z_{\max,j}$ 分别是第j个水库第t个时段的水位、死水位和正常蓄水位, j 为水库索引。

[0077] (4) 泄流变幅约束: $|Q_j'(t) - Q_j'(t-1)| < \Delta Q_{j,\text{con}}$; 式中, $Q_j'(t)$ 为第j个水库第t个时段出库泄流量, $\Delta Q_{j,\text{con}}$ 为第j个水库相邻时段允许的泄流变幅, j 为水库索引。

[0078] (5) 出力约束: $N_{\min,j} \leq N_j(t) \leq N_{\max,j}$; 式中, $N_j(t)$ 、 $N_{\min,j}$ 、 $N_{\max,j}$ 分别是第j个水库第t个时段的出力、保证出力和装机容量, j 为水库索引。

[0079] (6) 库容约束: $V_j(t) \geq V_{\text{死},j}$; $V_j(t) \leq V_j^{\text{obj}}(t)$;

[0080] 式中, $V_j(t)$ 为第j个水库第t个时段的蓄量, $V_{\text{死},j}$ 为第j个水库的死库容, $V_j^{\text{obj}}(t)$ 为时段t第j个水库的目标蓄水量, 汛期 $V_j^{\text{obj}}(t)$ 等于汛限库容, 非汛期 $V_j^{\text{obj}}(t)$ 等于兴利库容。

[0081] (7) 水库水量平衡约束: $V_j(t) = V_j(t-1) + \text{int}Q_j(t) \Delta t - Q_j'(t) \Delta t - L_j(t)$;

[0082] 式中, $\text{int}Q_j(t)$ 为时段t第j个水库的入库流量, $L_j(t)$ 为时段t第j个水库的水量损失, Δt 为时段差, 其它变量同上, 并注意量纲转化。

[0083] (8) 非负约束: 所有变量均不小于0, 即 $X > 0$ 。

[0084] 考虑上层采用实时调度, 因此模型上层采用蚁群狩猎耦合粒子群优化算法求解; 考虑中层采用短期调度, 因此模型中层采用多目标博弈论优化求解; 考虑下层采用中长期调度, 因此模型下层采用动态规划求解。模型从下层往上层, 依序计算各层的最优调度方案, 并将下层最优调度方案作为中层的边界条件, 中层最优调度方案作为上层的边界条件。

[0085] 模型各层获得调度方案集后, 采用基于NSGA-II结合模糊TOPSIS的综合筛选法, 通过NSGA-II方法进行初步筛选, 计算非支配排序和拥挤度, 筛选出高质量的解集。通过模糊TOPSIS二次筛选对调度方案进行精确排序, 确保筛选结果既符合目标函数的客观特性, 又

能够反映决策者的主观偏好,最终得到上、中、下层最优调度方案。其中模糊距离、模糊相似度计算公式如下:

[0086] $d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m \{d(v_{ij}^+, v_j^+)\}^2}$, $d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m \{d(v_{ij}^-, v_j^-)\}^2}$; 其中:
 v_{ij}^+, v_{ij}^- 为模糊决策矩阵; d_i^+, d_i^- 分别为第 i 个调度方案与模糊正理想解和模糊负理想解的欧氏距离; m 为属性数量; $d(v_{ij}^+, v_j^+)$ 为第 i 个调度方案第 j 个属性与正理想解的欧氏距离; $d(v_{ij}^-, v_j^-)$ 为第 i 个调度方案第 j 个属性与负理想解的欧氏距离; v_{ij}^+ 为第 i 个方案第 j 个属性的模糊评价值; i 为方案索引; j 为属性索引; $C_i = (d_i^-) / (d_i^+ + d_i^-)$; 其中: C_i 为模糊相似度, 其它变量同上。

[0087] 根据本申请的一个方面, 所述步骤 S3 中, 根据径流时滞关系以及复杂水网系统拓扑关系, 将复杂水网系统划分为上、中、下三层, 具体为:

[0088] 基于相邻泵站和水库的径流时滞关系, 将时滞步长划分为短时、中时和长时响应三类时间步长, 结合三类时间步长将复杂水网系统划分为短时、中时和长时三个时间响应子系统;

[0089] 基于复杂水网系统拓扑关系, 计算相邻泵站和水库的网络复杂度; 基于泵站和水库风险因子计算各节点的风险复杂度; 结合网络复杂度和风险复杂度, 将复杂水网系统划分为高、中、低三个空间风险子系统;

[0090] 建立每个时间响应子系统与空间风险子系统的映射关系, 进行排序, 确定相对水资源风险调度的重要程度; 基于系统安全性和经济性划为上、中、下三层。

[0091] 在本实施例中, 为后续水资源风险调度模型科学分层, 根据径流时滞关系和复杂水网系统拓扑关系, 充分考虑径流时滞和风险, 将复杂水网系统科学划分为上、中、下三层。

[0092] 在目前的风险调度模型中, 并未考虑径流时滞关系, 但其本质对于风险调度具有重要的影响。时滞步长越短, 说明来水越急, 可能面临的风险也就越大, 为更科学的开展调度, 本发明将时滞步长划分为短时、中时和长时响应三类时间步长, 所述短时的时滞步长小于等于 1 日, 中时响应的时滞步长大于 1 日小于等于 1 旬, 长时响应的时滞步长大于 1 旬。并结合三类时间步长将复杂水网系统划分为短时、中时和长时三个时间响应子系统。

[0093] 模型分层如果单纯考虑径流时滞关系, 依旧存在不足, 可能导致时滞步长短但风险小的区域浪费资源。由于水网系统网络复杂度越密集, 相关区域可能存在的风险因子越多, 风险等级越大。因此, 本发明基于复杂水网系统拓扑关系计算相邻泵站和水库的网络复杂度, 基于泵站和水库风险因子计算各节点的风险复杂度, 并通过算术平均法结合网络复杂度和风险复杂度量水网风险, 采用 K-means 算法将复杂水网系统划分为高、中、低三个空间风险子系统。

[0094] 网络复杂度计算公式如下: $C_{net}^j = n/N$; 式中, C_{net}^j 为第 j 个节点的网络复杂度, n 为节点直接相关的边, N 为复杂水网系统所有的边数。

[0095] 风险复杂度计算公式如下: $C_{risk}^j = 1/K \cdot \sum_{k=1}^K R_k^j$; 式中, C_{risk}^j 为第 j 个节点风险复杂度, K 为第 j 个节点风险因子种类个数, R_k^j 为第 j 个节点经过归一化的第 k 类风险因子值。

[0096] 通过算术平均法结合网络复杂度和风险复杂度量水网风险, 综合风险具体公式如下: $C^j = 1/2 (C_{net}^j + C_{risk}^j)$ 。

[0097] 建立每个时间响应子系统与空间风险子系统的映射关系, 每个时间响应子系统分别映射为三类空间风险子系统, 形成 9 类映射关系, 并构建时空风险映射矩阵:

[0098] $M=[m_{11}, m_{12}, m_{13}; m_{21}, m_{22}, m_{23}; m_{31}, m_{32}, m_{33}]$; 式中, m_{ij} 为每类映射关系中第 j 个空间风险子系统节点在第 i 个时间响应子系统中总节点的占比, $i=1, 2, 3$, 分别对应短时、中时和长时三个时间响应子系统, $j=1, 2, 3$, 分别对应高、中、低三个空间风险子系统。

[0099] 完成映射关系的建立后, 提取每类映射关系的关键映射特征, 具体公式如下: $T = m_{ij} \cdot (1/k_n^-) \cdot C_n^-$; 其中: T 为关键映射特征; m_{ij} 为映射系数; k_n^- 为第 n 类映射关系的径流时滞均值; C_n^- 为第 n 类映射关系的综合风险均值; n 为映射关系类别索引。

[0100] 基于每类映射关系的关键映射特征, 通过熵权法计算信息熵并赋权, 再通过 TOPSIS 计算贴近度, 并对映射关系从高到低进行排序, 确定每类映射关系相对水资源风险调度的重要程度。

[0101] 在上述排序中, 排序越前说明来水越快风险越大, 如果统一开展风险调度, 可能导致部分资源浪费, 计算量巨大, 因此为后续风险调度科学分层, 有效平衡水网系统经济性和安全性, 提高调度模型计算效率, 本发明基于复杂水网系统的安全性, 将排序前 $a\%$ 划为上层, 基于安全性及经济性将排序前 $a\% \sim b\%$ 划分为中层, 基于经济性将排序后 $(100-a-b)\%$ 划分为下层。

[0102] 根据本申请的一个方面, 所述步骤 S3 中, 采用互相关函数结合 VMD 方法, 得到径流时滞关系, 具体为:

[0103] 读取包括泵站和水库在内的各节点径流数据, 进行预处理, 并采用 VMD 方法分解, 结合中心频率法确定 IMFs 个数, 得到最佳 IMFs;

[0104] 分别对相邻节点径流数据的最佳 IMFs, 依次计算互相关函数, 得到相邻节点径流数据 IMFs 之间的互相关性, 将每一对 IMFs 的互相关函数峰值作为时滞;

[0105] 计算各 IMFs 与原始信号的互相关系数, 并据此计算每对 IMFs 的权重, 通过加权平均法确定相邻节点间时滞, 得到系统各节点间的径流时滞关系。

[0106] 在本实例中, 需要对复杂水网系统泵站和水库在内的各节点径流数据进行预处理, 检查数据完整性, 若存在缺失值, 将缺失值使用插值法填补。使用低通滤波去除数据噪声, 提高数据质量。并将处理过的数据进行标准化处理, 消除量纲影响, 得到最终数据。

[0107] 在对复杂水网系统泵站和水库在内的各节点径流数据的分析中, VMD 技术具有显著优势。径流数据属于非稳态信息, 采用 VMD 技术可将径流数据分解成多个相对稳定的 IMFs 系列分量, 能够更全面的从原始数据中获取特征信息, 为后续识别径流时滞关系提供更丰富的信息支持。其主要借助交替乘子算法、傅里叶变换等完成序列分解, 具体原理如下:

$$\min_{\{u_k\}, \{w_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \int dt [(d(t) + j/\pi t) * u_k(t)] e^{-jw_k t} \right\|_2^2 \right\}; s.t. \sum_{k=1}^K u_k = f;$$

[0108] 式中, $\{u_k\}$ 为变模态分解后的第 k 个 IMFs, $\{w_k\}$ 为变模态分解后的第 k 个中心频率, f 为原始非稳态序列, K 为模态分解的数量, k 为 IMFs 位序的索引, $d(t)$ 为脉冲函数, d 为偏导符号, j 为虚数单位, $*$ 为卷积运算, $e^{-jw_k t}$ 为频域调制项, t 为信号在时域中的自变量, $\| \cdot \|_2^2$ 为 L2 范数的平方。

[0109] 在实际应用中, VMD 的一个关键问题是如何确定合适的 IMFs 分解个数 K , IMFs 个数将显著影响后续能否从原始数据中提取更多有益的信息, 其个数过多或过少可能导致 IMFs 重叠严重, 为避免该情况出现, 本发明基于中心频率法确定最佳 IMFs 个数。VMD 的中心频率是指每个模态函数的平均频率, 它反映了模态的主要振动特性。中心频率可以通过计算每个模态函数的均值或通过峰值检测来获取。通过计算残差平方和 (RSS), 选取使这些误差指

标最小的K值,残差平方和(RSS)计算公式如下: $RSS = \sum_{i=1}^N (y_i - y^*_i)^2$;式中, y_i 为第i个原始提水资料的实际值, y^*_i 为重建信号第i个预测值,N为原始提水资料长度,i为资料序列位数。

[0110] 互相关函数可以描述两个随机离散信号在不同时间延迟下的相似性,其具体定义如下: $R_{xy}[k] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot y[n+k]$;式中, $R_{xy}[k]$ 为k个时滞的互相关函数值, $x[n]$ 、 $y[n]$ 皆为随机离散信号,k为时滞,n为时间序列位数, ∞ 为无穷大符号。

[0111] 本发明将互相关函数与VMD方法结合,对相邻节点径流数据的最佳的IMFs分别依次计算互相关函数,得到相邻节点径流数据IMFs之间的互相关性,进而确定每一对IMFs的时滞。通过互相关系数可以将各IMFs与原始信号的相关性强度量化,相关性越强的IMF,其权重越大,相关性越弱的IMF,其权重越小。

[0112] 互相关系数具体定义如下: $\rho_i = [\sum_{n=1}^N (C_i[n] - C_i^-) \cdot (x[n] - x^-)] / \sqrt{\{[\sum_{n=1}^N (C_i[n] - C_i^-)^2 \cdot (x[n] - x^-)^2]\}}$;其中: ρ_i 为第i个IMFs与原始信号的互相关系数; $C_i[n]$ 为第i个IMFs,即第i个序列的第n个值; C_i^- 为第i个序列的均值; $x[n]$ 为原始序列的第n个值; x^- 为原始序列 $x[n]$ 的均值;N为原始提水资料长度;n为时间序列位数。

[0113] 权重分配计算公式如下: $\omega_i = |\rho_i| / (\sum_{j=1}^K |\rho_j|)$;

[0114] 式中, ω_i 为第i个IMFs的权重, $|\rho_i|$ 为第i个IMFs与原始信号的互相关系数,K为IMFs的总数,j为IMFs位序的索引,另外所有权重需要满足 $\sum_{i=1}^K \omega_i = 1$ 。

[0115] 得到各IMFs相对原始信号的权重后,将IMFs对各自相对原始信号的权重进行算术平均,便可得到IMFs对的权重 ω_j 。在确定每对IMFs的时滞 k_j 和权重 ω_j 后,可通过加权平均法计算整体的时滞 $k_{\text{整体}}$,具体公式如下: $k_{\text{整体}} = \sum_j k_j \cdot \omega_j$;

[0116] 式中, k_j 为第j个IMFs对的时滞, ω_j 为第j个IMFs对的权重,J为IMF对的总数。

[0117] 如图2所示,根据本申请的一个方面,所述步骤S1进一步为:

[0118] 步骤S11、确定研究区范围,收集复杂水网系统基本构成及水利工程基础资料;

[0119] 在本实施例中,所述复杂水网系统基本构成包括河流(干流、支流)、湖泊、水库、泵站、人工水道、输水管道等,所述水利工程基础资料包括水文气象资料、水资源资料、水利基础设施设计参数资料,其中水文气象资料包括泵站、水库径流资料等,水资源资料包括水资源量、水质、水资源利用、水资源供需等,水利基础设施设计参数资料包括水库、灌溉、水电站、防洪等工程的设计参数。

[0120] 上述资料中复杂水网系统基本构成可以从公开数据中获取,但水利工程基础资料由于保密原因,需要从相关水利部门获取。获取复杂水网系统基本构成的目的是为了后续构建结构化数据,采用知识图谱技术识别复杂水网系统拓扑关系。获取水利工程基础资料是为了进一步了解研究区概况,为后续识别径流时滞关系以及构建复杂水网系统三层嵌套的水资源风险调度模型收集资料。

[0121] 步骤S12、构建结构化数据,采用知识图谱技术识别复杂水网系统拓扑关系,得到研究区概化的复杂水网系统拓扑关系,所述的拓扑关系包括源汇关系、供需关系、回归关系、隶属关系;

[0122] 将复杂水网系统中节点定义为水源节点、用户节点、退水节点、调控节点,所述水源节点包括湖泊、水库、河流等,用户节点包括生活用水户、农业灌溉用水户、工业用水户等,退水节点包括污水处理厂、自然回归水体等,调控节点包括泵站、闸门、水厂等;边定义

为两节点之间的关系,即源汇关系、供需关系、回归关系、隶属关系;属性根据节点分类定义,水源节点属性定义为流量、库容等,用户节点属性定义为需水量,退水节点属性定义为退水量,调控节点属性定义为调控量,并将节点、边和属性存储于数据库中,得到结构化数据。

[0123] 将结构化数据中的节点、边和属性数据通过知识抽取、实体对齐转换为知识图谱所需的RDF三元组格式(主语—谓语—宾语),构建本体,使用RDF本体语言完成复杂水网系统的语义化建模;再通过知识推理形成新的知识形态,与原有知识共同经过质量评估,完成知识融合。将最终RDF三元组导入Neo4j图数据库,构建复杂水网系统的知识图谱,识别复杂水网系统拓扑关系,得到研究区概化的复杂水网系统拓扑关系。

[0124] 在本实施例中,RDF三元组可表示为(h,r,t),其中h为头实体,r为关系,t为尾实体,例如三元组(水源节点A,供需关系,用户节点A)为水源节点A向用户节点A供水。

[0125] 知识图谱可以表示为一个有向图,定义如下: $G=(V,b)$;式中, V 为节点集 $\{V_1, V_2, \dots, V_M\}$, M 为节点类型个数,每类节点 V_i 表示一个 N 维谱特征向量, N 为每类节点包含多少节点数; b 为边集 $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$, n 为边的类型个数。

[0126] 基于知识图谱识别拓扑关系需要构建本体,定义如下: $H_x=(V_x, P_x, R_x)$;式中, H_x 为第 x 个本体, V_x 为节点集, P_x 为属性集合, R_x 为关系集合, x 为本体位序的索引。

[0127] 知识图谱技术可以将复杂水网系统中的节点、边和属性数据整合为一个统一的、可推理的知识网络。基于RDF三元组格式,知识图谱能够精准表达复杂水网系统的拓扑关系,如源汇关系、供需关系、回归关系、隶属关系,并通过本体定义明确节点、边和属性的语义,支持动态更新。此外,知识图谱结合图数据库Neo4j,实现高效存储与查询,同时通过知识推理发现隐含关系,为水资源风险调度、风险分析和拓扑关系识别提供全面、动态的支持。可定时更新结构化数据中节点、边和属性数据,更新知识图谱,更新复杂水网系统拓扑关系,实现动态数据与静态拓扑关系的集成。

[0128] 步骤S13、采用专家咨询识别研究区存在的风险因子集。

[0129] 在本实施例中,综合考虑各类可能存在的风险因子,保证风险因素考虑全面,并根据风险环境及风险特征,将复杂水网系统存在的风险因子分为水文风险因子、水力风险因子、技术风险因子三类,以便后续采用专家咨询时更加清晰识别研究区复杂水网系统存在的风险因子。所述水文风险因子包括降雨、水质、洪水、干旱,水力风险因子包括水库的溃坝、坍塌、淤积、管道破裂、排水不畅、水库水位库容曲线误差、水库泄流能力曲线误差等,技术风险因子包括径流预测模型结构、参数、洪水预报误差、河道洪水演进参数误差。

[0130] 如图3所示,根据本申请的一个方面,所述步骤S2进一步为:

[0131] 步骤S21、筛选重要风险因子集;逐一确定重要风险因子集中每个风险因子的最适先验分布;确定重要风险因子集中互相关及独立风险因子;

[0132] 在本实施例中,构建一个合作博弈模型,将已识别的风险因子作为模型博弈参与者;定义系统整体风险水平的收益函数,计算每个风险因子的Shapley值;根据Shapley值的大小对风险因子进行排序,筛选出具有较高Shapley值的风险因子作为重要风险因子集。

[0133] Shapley值的计算公式如下: $\phi_i = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|!(|N|-|S|-1)!}{|N|!} [v(S \cup \{i\}) - v(S)]$;

[0134] 式中, ϕ_i 为第 i 个风险因子的Shapley值, N 为所有风险因子的集合, S 为不包含第 i

个风险因子的子集, $v(S)$ 为子集 S 的收益函数值, $!$ 为阶乘符号。

[0135] 逐一拟合重要风险因子集中每个风险因子的最适先验分布, 采用最大似然估计进行参数估计, 采用 K-S 检验开展拟合优度检验, 基于 R^2 、RMSE 参数确定每个风险因子的最适先验分布, 其中分布线型包括 P-III 分布、正态分布、泊松分布、广义极值分布、威布尔分布、对数正态分布、伽马分布等。

[0136] 构造的似然函数公式如下: $L(\theta|x) = p(x|\theta) = \prod_{i=1}^n p(x_i; \theta)$; 式中, $L(\theta|x)$ 为似然函数, θ 为参数, x 为观测数据集, n 为观测数据集的个数, i 为观测数据集序列的位数, Π 为乘积运算符, $p(x|\theta)$ 为在参数 θ 下分布函数随机抽取到 $x_1, \dots, x_n$ 的概率, 具体公式如下: $p(x|\theta) = \prod_{i=1}^n p(x_i; \theta)$ 。

[0137] 依据 K-S 检验开展拟合优度检验, 判断拟合的分布线型是否合适。首先需要构建 K-S 统计量 D , 具体公式如下: $D = \max |F_n(x) - F_0(x)|$; 式中, D 为 K-S 统计量, $F_0(x)$ 为原分布函数, $F_n(x)$ 为待检验的分布函数, $\max| |$ 为取绝对值的最大值。

[0138] 将 K-S 统计量 D 与 K-S 检验统计量的临界值 $D_{n,\alpha}$ 相比, 当 $D > D_{n,\alpha}$ 时拒绝原假设, 即拟合的分布线型不合适。

[0139] 当确定合适的分布线型后, 可以基于 R^2 、RMSE 参数确定每个风险因子的最适先验分布。

[0140] R^2 计算公式如下: $R^2 = 1 - [\sum_{i=1}^N (y_i^* - y_i)^2] / [\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2]$; 其中: R^2 为决定系数; y_i 为第 i 个原始风险因子值; y_i^* 为第 i 个拟合分布线型的风险因子值; $\bar{y}$ 为原始风险因子平均值; N 为原始风险因子长度; i 为样本索引。

[0141] $RMSE = \sqrt{(1/N) \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - y_i^*)^2}$; 其中: RMSE 为均方根误差; y_i 为第 i 个原始风险因子值; y_i^* 为第 i 个拟合分布线型的风险因子值; N 为原始风险因子长度; n 为样本索引。

[0142] 采用主成分分析确定重要风险因子集中的互相关及独立风险因子。首先将重要风险因子集进行标准化处理, 计算风险因子间相关系数矩阵, 进而对相关系数矩阵计算特征值, 并基于 Kaiser 准则提取 n 个作为主成分。最后计算主成分与原始因子的相关系数, 得到载荷矩阵, 若风险因子载荷绝对值大于 0.5, 则为互相关风险因子; 若小于 0.5, 则为独立风险因子。整合 n 个主成分分析结果得到互相关及独立风险因子。

[0143] 步骤 S22、基于最适先验分布, 对互相关的风险因子采用改进变分贝叶斯网络建立联合分布;

[0144] 步骤 S23、对风险因子联合及独立分布, 分别采用改进拉丁超立方抽样抽取样本, 并整合得到初始风险因子集样本; 利用遗传算法优化样本, 得到最终风险因子集。

[0145] 根据本申请的一个方面, 所述步骤 S22 进一步为:

[0146] 步骤 S22a、采用对比学习对重要风险因子集中互相关的风险因子进行特征压缩, 提取低维稠密表征;

[0147] 为了降低风险因子维度, 又保留风险因子全局特征, 采用对比学习提取低维稠密表征。首先, 将互相关风险因子 X 进行标准化处理, 通过添加高斯噪声构建正样本 $X_{pos1} = X + \xi_1, \xi_1 \sim N(0, \sigma_{pos1}^2 I)$ 、 $X_{pos2} = X + \xi_2, \xi_2 \sim N(0, \sigma_{pos2}^2 I)$, 通过时序逆序构建负样本 $X_{neg} = X[T:1]$, 以 InfoNCE 损失函数作为对比损失函数,

[0148] 对于样本 x_i 计算正样本 x_j 和负样本 $x_k \{k \neq i\}$ 具体公式如下: $L_{InfoNCE} = -\log[\exp$

$(\sin(x_i, x_j)/\tau)/(\exp(\sin(x_i, x_j)/\tau) + \sum_{k=1}^K \exp(\sin(x_i, x_k)/\tau))]$; 其中: L_{InfoNCE} 为对比损失函数; τ 为温度参数; $\sin(x_i, x_j)$ 为样本 x_i 与正样本 x_j 的相似度; $\sin(x_i, x_k)$ 为样本 x_i 与负样本 x_k 的相似度; K 为负样本数量, k 为负样本次序的索引;

[0149] 选择深度残差网络作为编码器, 利用构建的正样本对和负样本以及选定的对比损失函数对编码器进行训练, 以最小化对比损失为目标, 将互相关风险因子映射到低维稠密空间, 得到相应的低维稠密表征 X' 。

[0150] 步骤S22b、基于最适先验分布构建改进变分贝叶斯网络, 并以低维稠密表征作为输入, 在变分自编码器的隐空间, 通过梯度权重分析量化隐变量对风险因子的贡献度; 基于贡献度排名对隐变量施加渐进式L1稀疏惩罚, 筛选最终隐变量, 并读取其后验分布建立联合分布, 其中采用Wasserstein距离作为联合分布的差异度量。

[0151] 在本实施例中, 为解决传统的贝叶斯网络容易陷入局部最优、隐变量冗余, 导致联合分布建模精度不足且计算效率低下的问题, 本发明通过改进变分贝叶斯网络解决该问题。首先, 将低维稠密表征 X' 输入变分自编码器, 基于最适先验分布得到隐变量 x , 其中为避免陷入局部最优, 在改进变分贝叶斯网络中采用Wasserstein距离作为联合分布的差异度量。借助解码器将隐变量映射为重构输出 $x_{\text{recon}}^{(k)} = f_{\theta}^{(k)}(x)$, 其中 $x_{\text{recon}}^{(k)}$ 为隐变量的重构输出, $f_{\theta}^{(k)}(x)$ 表示解码器的第 k 个输出节点, 对应第 k 个风险因子。对每个风险因子计算隐变量的梯度 $g_j^{(k)} = dx_{\text{recon}}^{(k)} / (dx_j)$, 其中 d 为偏导数, x_j 为第 j 个隐变量, 通过算术平均法综合隐变量对风险因子的贡献度 $G_j = \sum_{k=1}^K g_j^{(k)} / K$, 其中 G_j 为第 j 个隐变量对风险因子的贡献度, K 为风险因子总数, k 为风险因子的索引数, 其它变量同上。

[0152] 根据隐变量的贡献度排名施加渐进式L1稀疏惩罚, 动态调整惩罚强度, 使低贡献隐变量逐步被稀疏化, 同时保留高贡献隐变量, 具体原理公式如下: $\lambda_j(t) = \lambda_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot \text{rank}(G_j)) \cdot (1 + \gamma t)$; 式中, $\lambda_j(t)$ 为 t 时刻第 j 个隐变量的惩罚强度, λ_0 为初始惩罚强度, α 为贡献度衰减率, γ 为时间衰减系数, $\text{rank}(G_j)$ 为按 G_j 降序排列的位次。

[0153] 最后, 根据最终隐变量读取其后验分布建立联合分布。

[0154] 根据本申请的一个方面, 所述步骤S23进一步为:

[0155] 步骤S23a、基于风险因子PDF的曲率 $k(x)$, 对联合及独立分布分别进行动态分层, 区间宽度根据曲率自适应调整, 高曲率区域压缩为原宽度 $1/(1+k(x))$, 低曲率区域扩宽为 n 倍;

[0156] 考虑到概率密度函数曲线高曲率处变化剧烈, 需要更细的分层来捕捉变化, 而低曲率区域变化平缓, 分层宽度可扩宽一些, 减少分层, 因此本发明基于风险因子PDF的曲率 $k(x)$, 对联合及独立分布分别进行动态分层。曲率具体计算公式如下: $k(x) = (|f''(x)|) / (1 + (f'(x))^2)^{(3/2)}$; 式中, $k(x)$ 为PDF函数的曲率, $f''(x)$ 为PDF函数一阶导数, $f'(x)$ 为PDF函数二阶导数。

[0157] 在本实施例中, 将曲率函数的梯度变化率纳入判定, 通过K-means聚类算法将曲率值分为高、低两类。对于高曲率区域压缩为原宽度 $1/(1+k(x))$, 低曲率区域扩宽为 n 倍。

[0158] 步骤S23b、每个分层通过拉丁超立方生成100%的样本, 针对PDF的非尾部区域抽取 $x\%$ 的样本; 针对尾部区域, 采用重要性抽样得到尾部区域 $(100-x)\%$ 的样本, 整合联合及独立分布的抽样, 组合成风险因子初始样本;

[0159] 联合及独立分布风险因子基于步骤S23a的动态分层, 通过拉丁超立方生成100%的

样本。基于概率密度函数的曲率,将曲率为 $k(x) < \alpha$ 且非极大点区域定义为尾部区域,其它区域定义为非尾部区域。并针对PDF的非尾部区域抽取 $x\%$ 的样本。

[0160] 为了使样本尾部抽样足够,本发明结合重要性抽样对尾部区域数据抽样。针对尾部区域,采用重要性抽样得到 $(100-x)\%$ 的样本,整合抽样结果,便可得到风险因子初始样本。

[0161] 步骤S23c、将风险因子初始样本作为遗传算法的输入,进行优化,得到最终风险因子集。

[0162] 在本实施例中,采用Wasserstein距离来衡量样本分布与理论分布之间的整体差异,并采用遗传算法使误差最小化。通过计算风险因子初始样本的Wasserstein距离设定阈值,当后续优化的样本分布与理论分布的Wasserstein距离超过阈值,基于罚函数在适应度函数中引入样本数量的惩罚项,减少样本数量。直到当适应度函数的值收敛或达到最大迭代次数时,停止优化,得到最终风险因子集。

[0163] Wasserstein距离计算公式如下: $W(p, q) = \inf_{\gamma \in \Pi(p, q)} E_{x, y \sim \gamma} [|x - y|]$;其中: $W(p, q)$ 为Wasserstein距离; $\Pi(p, q)$ 为分布 p, q 组合所有可能的联合分布集合; $E_{x, y \sim \gamma} [|x - y|]$ 为样本对距离的期望值; p, q 分别为样本和理论概率分布; $\inf$ 表示下确界; γ 为联合分布。

[0164] 如图4所示,根据本申请的一个方面,所述步骤S3进一步为:

[0165] 步骤S31、读取包括泵站和水库在内的各节点径流数据,进行预处理;采用互相关函数结合VMD方法,计算得到径流时滞关系;

[0166] 步骤S32、根据相邻泵站和水库的径流时滞关系及复杂水网系统拓扑关系,将整个复杂水网系统划为上、中、下三层;上层具有较短的响应时间且风险较高,采用实时调度;中层具有中等的响应时间且风险适中,采用短期调度;下层具有较长的响应时间且风险较低,采用中长期调度。

[0167] 传统的水资源风险调度方法通常采用统一的调度策略,难以适应不同响应时间、不同风险的水网子系统,导致调度效率低下、水资源利用不充分。为明确区域调度侧重点在于安全性还是经济性,在本实施例中,通过识别相邻泵站、水库间的径流时滞关系,并结合复杂水网系统拓扑关系量化风险,将复杂水网系统划分为上层、中层、下层,针对不同层次采用相应的调度方案,实现水资源的优化配置和高效调度,显著提升水网系统的运行效率和资源利用率。

[0168] 根据本申请的一个方面,所述步骤S4中,针对上、中、下三层分别构建水网系统中纲、目、结每层的目标函数,具体为:

[0169] 上层考虑安全性,纲层以输水线路关键断面最大过水流量最小为目标函数,目层以取水口最大过水流量最小为目标函数,结层以水库群总防洪安全度最大为目标函数;

[0170] 中层考虑经济性和安全性,纲层以输水线路关键断面最大过水流量最小、区域经济效益最大为目标函数,目层以取水口最大过水流量最小、区域社会经济总缺水量最小为目标函数,结层以水库群总防洪安全度最大、水库群综合发电效益最大化为目标函数;

[0171] 下层考虑经济性,纲层以区域经济效益最大,目层以区域社会经济总缺水量最小为目标函数,结层以水库群综合发电效益最大化为目标函数。

[0172] 在本实施例中,本发明构建复杂水网系统三层嵌套的水资源风险调度模型,上、

中、下三层分别开展实时调度、短期调度和中长期调度,且各层考虑纲、目、结的工程特性及差异化需求,分层调度,兼顾全局,有效平衡水网系统经济性和安全性,提高调度模型计算效率。

[0173] 上层由于复杂水网系统具有较短的响应时间且风险较高,采用实时调度,所以该层考虑复杂水网系统调度的安全性;中层由于复杂水网系统具有中等的响应时间且风险适中,采用短期调度,所以该层考虑复杂水网系统调度的经济性和安全性;下层由于复杂水网系统具有较长的响应时间且风险较低,采用中长期调度,所以该层考虑复杂水网系统调度的经济性。

[0174] 上、中、下层的目标函数通过综合纲、目、结各层级的目标函数的权重所得,具体公式如下: $F = \omega_{\text{纲层级}} F_{\text{纲层级}} + \omega_{\text{目层级}} F_{\text{目层级}} + \omega_{\text{结层级}} F_{\text{结层级}}$;式中, $\omega_{\text{纲层级}}$ 、 $\omega_{\text{目层级}}$ 、 $\omega_{\text{结层级}}$ 分别为纲、目、结各层级的目标函数的权重系数, $F_{\text{纲层级}}$ 、 $F_{\text{目层级}}$ 、 $F_{\text{结层级}}$ 分别为纲、目、结各层级的目标函数。

[0175] 上层的纲、目、结各层级的目标函数如下:

[0176] (1) 纲层级: $F_{\text{纲层级}} = \min[\max_{t \in [1, T]} \{Q(t)\}] = \min[\max_{t \in [1, T]} \{\sum_{j=1}^m Q_j'(t) + Q_{j, \text{区}}(t)\}]$;

[0177] 式中, $F_{\text{纲层级}}$ 为纲层级的目标函数, $Q(t)$ 为输水线路关键断面的流量, $t \in [1, T]$ 为风险调度时段范围, T 为风险调度时段总数, m 为与上层的纲层级输水线路关键断面具有水力联系的水库个数, j 为水库的索引, $Q_j'(t)$ 为第 j 个水库第 t 个时段的经过洪水演算到输水线路关键断面的响应流量, $Q_{j, \text{区}}(t)$ 为第 j 个水库第 t 个时段至输水线路关键断面之间的区间流量。

[0178] (2) 目层级: $F_{\text{目层级}} = \min[\max_{t \in [1, T]} \{Q(t)'\}] = \min[\max_{t \in [1, T]} \{\sum_{j=1}^n Q_j''(t) + Q_{j, \text{区}}'(t)\}]$;

[0179] 式中, $F_{\text{目层级}}$ 为目层级的目标函数, $Q(t)'$ 为取水口的流量, $Q_j''(t)$ 为第 j 个水库第 t 个时段经过洪水演算到取水口的响应流量, $Q_{j, \text{区}}'(t)$ 为第 j 个水库第 t 个时段至取水口的区间流量, n 与取水口有水力联系的水库个数,其它变量同上。

[0180] (3) 结层级: $F_{\text{结层级}} = \min[\max_{t \in [1, T]} \sum_{j=1}^n Z_j(t)]$;式中, $F_{\text{结层级}}$ 为结层级的目标函数, $Z_j(t)$ 为第 j 个水库第 t 个时段的水位, n 为与结层级有水力联系的水库个数,其它变量同上。

[0181] 中层的纲、目、结各层级的目标函数如下:

[0182] 纲层级: $F_{\text{纲层级}, 1} = \min[\max_{t \in [1, T]} \{Q(t)\}] = \min[\max_{t \in [1, T]} \{\sum_{j=1}^m Q_j'(t) + Q_{j, \text{区}}(t)\}]$;

[0183] 式中, $F_{\text{纲层级}, 1}$ 为纲层级的第一个目标函数, m 为与中层的纲层级输水线路关键断面具有水力联系的水库个数,其它变量同上。

[0184] $F_{\text{纲层级}, 2} = \max\{\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (\sum_i^I b_{jk} Q_{ijk t} - \sum_i^I c_{ijk} Q_{ijk t})\}$;式中, $F_{\text{纲层级}, 2}$ 为纲层级的第二个目标函数, b_{jk} 为第 j 分区第 k 个用水部门的供水效益, $Q_{ijk t}$ 为规划水平年第 i 供水水源给第 j 分区第 k 个用水部门第 t 个时段的供水量, c_{ijk} 为第 i 供水水源给第 j 分区第 k 个用水部门的供水费用, J 为分区总数, j 为分区索引, K 为用水部门总数, k 为用水部门索引, I 为水源总数, i 为水源索引,其它变量同上。

[0185] (2) 目层级:

[0186] $F_{\text{目层级}, 1} = \min[\max_{t \in [1, T]} \{Q(t)'\}] = \min[\max_{t \in [1, T]} \{\sum_{j=1}^n Q_j''(t) + Q_{j, \text{区}}'(t)\}]$;式中, $F_{\text{目层级}, 1}$ 为目层级的第一个目标函数,其它变量同上。

[0187] $F_{\text{目层级}, 2} = \min\{\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (D_{kt} - S_{kt})\}$; $S_{kt} = \sum_{i=1}^N S_{ikt} + \sum_{j=1}^M S_{jkt}$;

[0188] 式中, $F_{\text{目层级},2}$ 为目层级的第二个目标函数, K 为社会经济需水区数目, k 为社会经济需水区索引, D_{kt} 为第 t 个时段第 k 个需水区的总社会经济需水量, S_{kt} 为第 t 个时段第 k 个需水区的总社会经济供水量, $S_{kt} \leq D_{kt}$, s_{ikt} 为第 t 个时段第 i 个泵站供给第 k 个需水区的社会经济供水量, N 为与目层级有水力联系的泵站总数, i 为泵站索引, s_{jkt} 为第 t 个时段第 j 个水库供给第 k 个需水区的社会经济供水量, M 为与目层级有水力联系的水库总数, j 为水库索引。

[0189] (3) 结层级:

[0190] $F_{\text{结层级},1} = \min \{ \max_{t \in [1, T]} \sum_{j=1}^N Z_j(t) \}$; 式中, $F_{\text{结层级},1}$ 为结层级的第一个目标函数, 其它变量同上。

[0191] $F_{\text{结层级},2} = \max_{t \in [1, T]} (\sum_j^N \sum_{t=1}^T E_{j,t}) = \max_{t \in [1, T]} (\sum_j^N \sum_{t=1}^T 9.8 \cdot \lambda \cdot \eta \cdot Q_{j,\text{发电}}(t) \cdot \Delta h_{j,t} \cdot \Delta t_{j,t})$;

[0192] 式中, $F_{\text{结层级},2}$ 为结层级的第二个目标函数, $E_{j,t}$ 为第 j 个水库第 t 个时段的发电量, λ 为量纲转化系数, η 为水电站水轮机出力系数, $Q_{j,\text{发电}}(t)$ 为第 j 个水库第 t 个时段流经水轮机的流量, $\Delta h_{j,t}$ 为第 j 个水库第 t 个时段的发电水头, $\Delta t_{j,t}$ 为第 j 个水库第 t 个时段的发电时间, N 为与结层级有水力联系的水库数, 其它变量同上。

[0193] 下层的纲、目、结各层级的目标函数如下:

[0194] (1) 纲层级: $F_{\text{纲层级}} = \max \{ \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (\sum_i I_{b_{jk}} Q_{ijk t} - \sum_i I_{c_{ijk}} Q_{ijk t}) \}$; 式中, 同上。

[0195] (2) 目层级: $F_{\text{目层级}} = \min \{ \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (D_{kt} - S_{kt}) \}$; 式中, 同上。

[0196] (3) 结层级: $F_{\text{结层级}} = \max_{t \in [1, T]} (\sum_j^N \sum_{t=1}^T E_{j,t}) = \max_{t \in [1, T]} (\sum_j^N \sum_{t=1}^T 9.8 \cdot \lambda \cdot \eta \cdot Q_{j,\text{发电}}(t) \cdot \Delta h_{j,t} \cdot \Delta t_{j,t})$; 式中, 同上。

[0197] 以上详细描述了本发明的优选实施方式, 但是, 本发明并不限于上述实施方式中的具体细节, 在本发明的技术构思范围内, 可以对本发明的技术方案进行多种等同变换, 这些等同变换均属于本发明的保护范围。

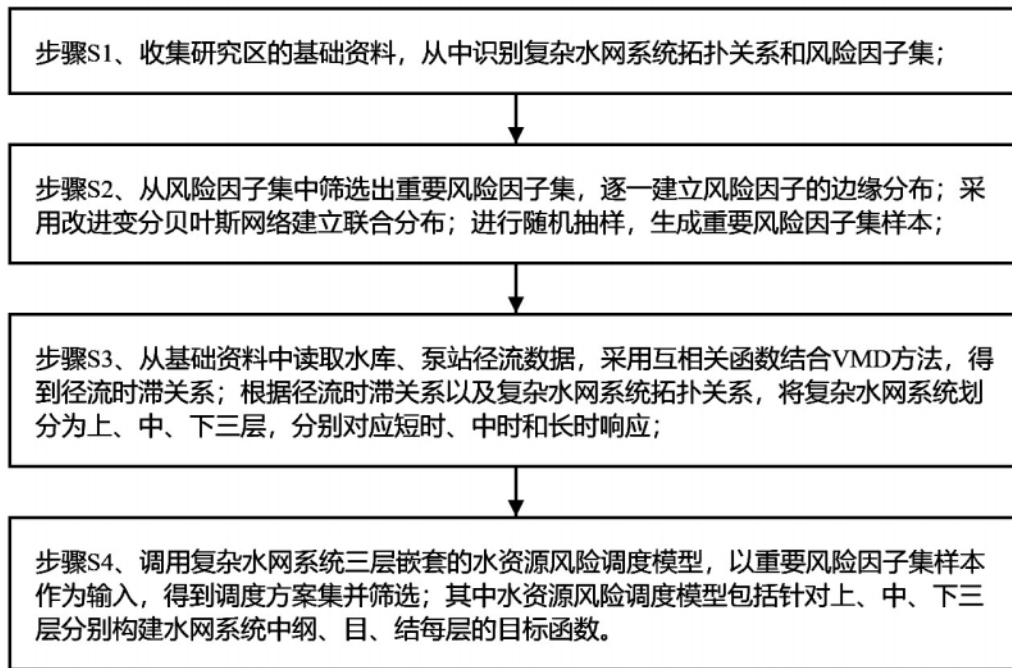


图 1

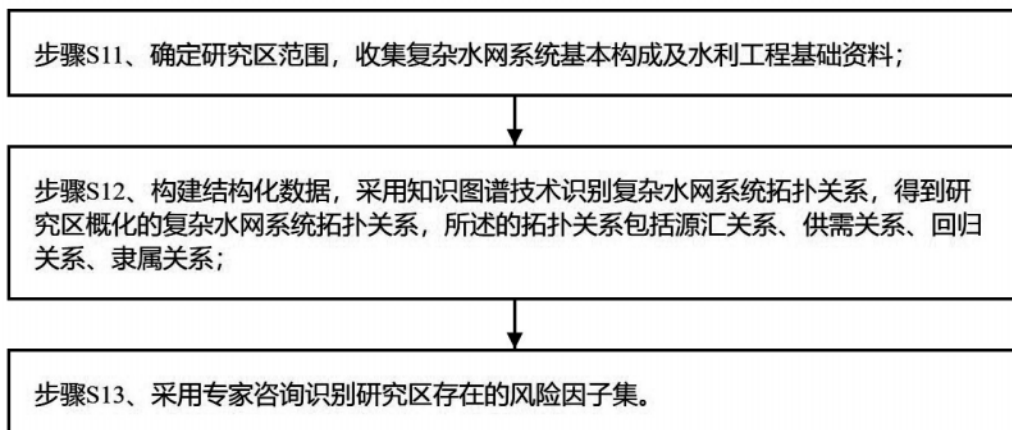


图 2

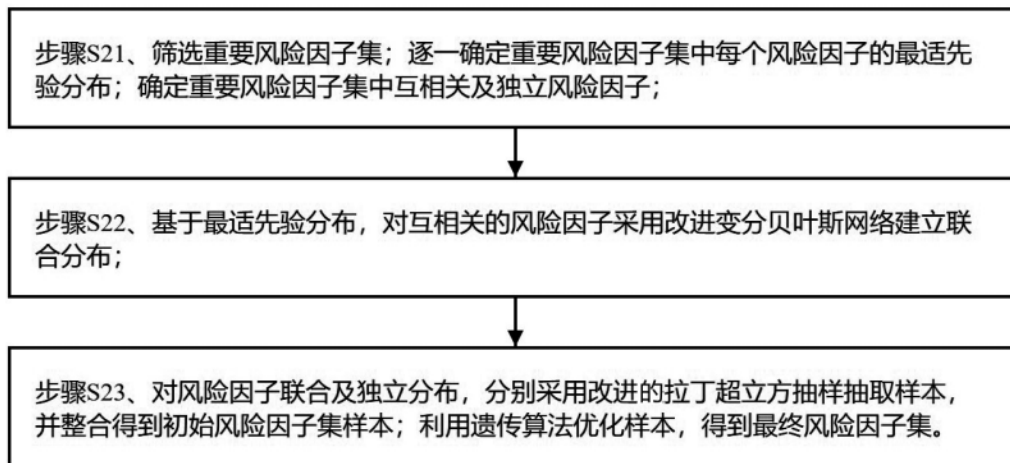


图 3

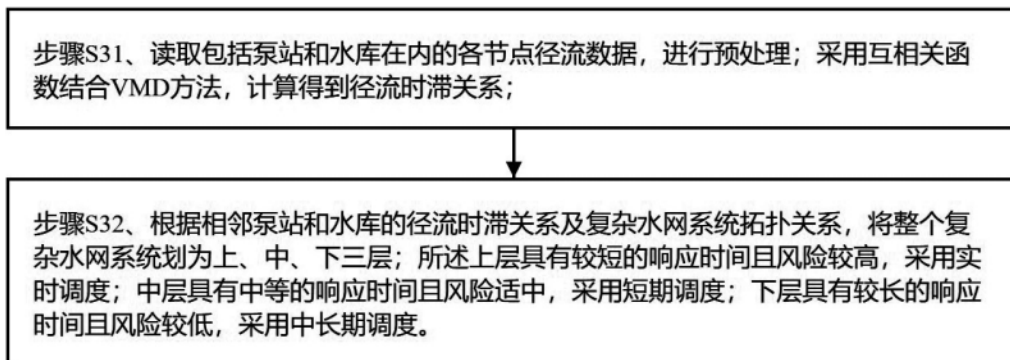


图 4