



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107808237 A

(43)申请公布日 2018.03.16

(21)申请号 201710939063.7

(22)申请日 2017.09.30

(71)申请人 河海大学

地址 210098 江苏省南京市鼓楼区西康路1号

(72)发明人 陈娟 钟平安 徐斌 张宇
闫海滨 李映辉

(74)专利代理机构 南京苏高专利商标事务所
(普通合伙) 32204

代理人 柏尚春

(51)Int.Cl.

G06Q 10/06(2012.01)

G06Q 50/06(2012.01)

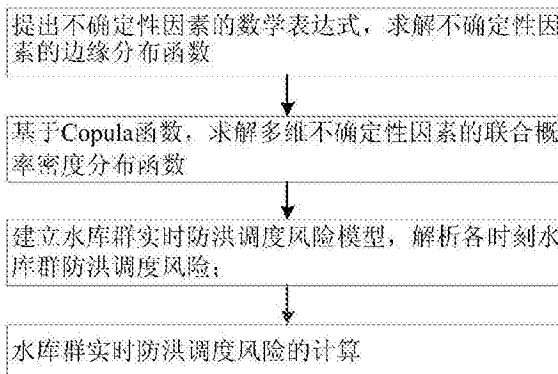
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54)发明名称

一种并联水库群实时防洪风险解析计算方法

(57)摘要

本发明公开了一种并联水库群实时防洪风险解析计算方法,所述方法包括以下步骤:(1)建立不确定性因素的数学表达式,得出不确定性因素的边缘分布函数;(2)基于Copula函数,求解多维不确定性因素的联合概率密度分布函数;(3)建立水库群实时防洪调度风险模型,解析各时刻水库群防洪调度风险;(4)水库群实时防洪调度风险的计算。本发明考虑了不确定性因素之间的相关性对水库群实时防洪调度风险的影响,求得了各时刻水库群实时防洪调度风险的解析计算公式,计算效率高、易于实现,具有较强的通用性。



1. 一种并联水库群实时防洪风险解析计算方法,其特征在於:包括以下步骤:

- (1) 建立不确定性因素的数学表达式,求解不确定性因素的边缘分布函数;
- (2) 基于Copula函数,求解多维不确定性因素的联合概率密度分布函数;
- (3) 建立水库群实时防洪调度风险模型,解析各时刻水库群防洪调度风险;
- (4) 水库群实时防洪调度风险的计算。

2. 根据权利要求1所述的一种并联水库群实时防洪风险解析计算方法,其特征在於:步骤(1)中所述不确定性因素包含水库群入库流量、水库群出库流量和区间洪水预报的不确定性。

3. 根据权利要求1所述的一种并联水库群实时防洪风险解析计算方法,其特征在於:所述步骤(2)包括如下步骤:

(2.1) 定义 $H(q_1(t), q_2(t), q_3(t))$ 为水库1的出流随机过程、水库2出流随机过程、和区间洪水出流随机过程的联合概率分布函数,计算公式如下:

$$H(q_1(t), q_2(t), q_3(t)) = C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) \quad (1)$$

式中, $q_1(t)$ 为t时刻水库1的出库流量随机过程; $q_2(t)$ 为t时刻水库2的出库流量随机过程; $q_3(t)$ 为t时刻下游防洪控制断面的区间洪水随机过程; $F(q_1(t))$ 、 $F(q_2(t))$ 、 $F(q_3(t))$ 分别为不确定性因素-水库1的出流随机过程 $q_1(t)$ 、水库2出流随机过程 $q_2(t)$ 、和区间洪水随机过程 $q_3(t)$ 的边缘分布函数; C 为Copula函数;

(2.2) 定义 $h(q_1(t), q_2(t), q_3(t))$ 为水库1的出流随机过程、水库2出流随机过程、和区间洪水随机过程的联合概率密度函数,计算公式如下:

$$\begin{aligned} h(q_1(t), q_2(t), q_3(t)) &= \frac{\partial C^3(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t)))}{\partial F(q_1(t)) \partial F(q_2(t)) \partial F(q_3(t))} \prod_{i=1}^3 f(q_i(t)) \\ &= c(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) \prod_{i=1}^3 f(q_i(t)) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $f(q_i(t))$ 为不确定性因素 $q_i(t)$, $i=1, 2, 3$ 的概率密度函数, $c(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t)))$ 为Copula函数 $C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t)))$ 的概率密度函数。

4. 根据权利要求1所述的一种并联水库群实时防洪风险解析计算方法,其特征在於:步骤(2)所述的Copula函数包括3种计算公式,表达式如下:

Gumbel-Hougaard Copula:

$$C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) = \exp\left\{-\left[(-\ln F(q_1(t)))^{\alpha(t)} + (-\ln F(q_2(t)))^{\alpha(t)} + (-\ln F(q_3(t)))^{\alpha(t)}\right]^{1/\alpha(t)}\right\}, \alpha(t) \in [1, \infty)$$

Frank Copula:

$$C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) = \frac{1}{\alpha(t)} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\alpha(t)F(q_1(t))} - 1)(e^{-\alpha(t)F(q_2(t))} - 1)(e^{-\alpha(t)F(q_3(t))} - 1)}{(e^{-\alpha(t)} - 1)^3} \right], \alpha(t) \neq 0 \quad (3)$$

Clayton Copula:

$$C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) = [F(q_1(t))^{-\alpha(t)} + F(q_2(t))^{-\alpha(t)} + F(q_3(t))^{-\alpha(t)} - 3]^{-1/\alpha(t)}, \alpha(t) \in (0, \infty)$$

其中, $\alpha(t)$ 为Copula函数的参数。

5. 根据权利要求1所述的一种并联水库群实时防洪风险解析计算方法,其特征在於:所述步骤(3)具体步骤如下:

定义水库群实时防洪调度风险Risk(t)为t时刻公共防洪点组合流量过程超过防洪控

制断面安全流量阈值的概率,通过Copula函数连接步骤(1)中的不确定性因素,得到水库群实时防洪调度风险Risk(t)的计算公式为:

$$\begin{aligned}
 Risk(t) &= P[Q(t) > Q_c(t)] = P[q_1(t) + q_2(t) + q_3(t) > Q_c(t)] \\
 &= \iiint_{\Omega_0} h(q_1(t), q_2(t), q_3(t)) dq_1(t) dq_2(t) dq_3(t) \\
 &= C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) \Big|_{\Omega_1}
 \end{aligned} \tag{4}$$

式中,Risk(t)表示t时刻水库群系统实时防洪调度风险;Q(t)表示t时刻公共防洪点的组合流量过程;Q_c(t)表示t时刻防洪控制断面的安全流量阈值,可取公共防洪点的安全泄量; $\Omega_0 = \{q_1(t) + q_2(t) + q_3(t) > Q_c(t)\}$, Ω_1 为相应于 Ω_0 的积分转换区间。

6. 根据权利要求1所述的一种并联水库群实时防洪风险解析计算方法,其特征在于:所述步骤(4)包括如下步骤:

(4.1) 获取水库群的运行数据和实时预报入库流量均值过程及误差分布、区间洪水预报均值过程及误差分布;

(4.2) 根据水库防洪调度规则进行水库调洪演算,计算水库出库流量随机过程;

(4.3) 选择Copula函数作为不确定性因素-水库1的出流随机过程 $q_1(t)$ 、水库2出流随机过程 $q_2(t)$ 、和区间洪水随机过程 $q_3(t)$ 的联合概率分布函数。

(4.4) 根据选择的Copula函数,计算各时刻水库群实时防洪调度风险。

一种并联水库群实时防洪风险解析计算方法

技术领域

[0001] 本发明属于水库防洪调度风险评估,具体涉及一种并联水库群实时防洪风险解析计算方法。

背景技术

[0002] 水库群实时防洪调度是流域防洪减灾的重要技术手段之一,可以通过较小的投入来提高防洪工程的效益。但是现有的水库群实时防洪调度的过程中,存在很多的不确定性因素,包括水库群入库流量过程的不确定、水库群出流过程的不确定、区间洪水预报过程的不确定性,这些不确定性因素导致了下游公共防洪点组合流量过程的不确定,给防洪决策带来了一定的影响,并且具有一定的风险。因此,水库群实时防洪调度风险评估具有重要的学术意义与实用价值,其主要目标是对水库群防洪调度过程的不确定性因素及其给水库群防洪调度结果带来的风险进行定性的分析和定量的计算。

[0003] 目前,现有的水库群实时防洪调度风险评估方法主要存在以下不足:(1)难以获取多维不确定性因素的联合概率密度分布函数;(2)随机模拟的方法计算水库群实时防洪调度风险,计算效率不高、通用性不够,对于不同的系统需要重新建模。

发明内容

[0004] 发明目的:针对上述现有技术的不足,本发明提供一种并联水库群实时防洪风险解析计算方法,评估并联水库群实时防洪解析中不确定因素造成的风险问题。

[0005] 技术方案:一种并联水库群实时防洪风险解析计算方法,包括以下步骤:

[0006] (1) 建立不确定性因素的数学表达式,求解不确定性因素的边缘分布函数;

[0007] (2) 基于Copula函数,求解多维不确定性因素的联合概率密度分布函数;

[0008] (3) 建立水库群实时防洪调度风险模型,解析各时刻水库群防洪调度风险;

[0009] (4) 水库群实时防洪调度风险的计算。

[0010] 进一步的,步骤(1)中所述不确定性因素包含水库群入库流量、水库群出库流量和区间洪水预报的不确定性。

[0011] 进一步的,所述步骤(2)包括如下步骤:

[0012] (2.1) 定义 $H(q_1(t), q_2(t), q_3(t))$ 为水库1的出流随机过程、水库2出流随机过程、和区间洪水出流随机过程的联合概率分布函数,计算公式如下:

[0013] $H(q_1(t), q_2(t), q_3(t)) = C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t)))$ (1)

[0014] 式中, $q_1(t)$ 为t时刻水库1的出库流量随机过程; $q_2(t)$ 为t时刻水库2的出库流量随机过程; $q_3(t)$ 为t时刻下游防洪控制断面的区间洪水随机过程; $F(q_1(t))$ 、 $F(q_2(t))$ 、 $F(q_3(t))$ 分别为不确定性因素-水库1的出流随机过程 $q_1(t)$ 、水库2出流随机过程 $q_2(t)$ 、和区间洪水随机过程 $q_3(t)$ 的边缘分布函数; C 为Copula函数;

[0015] (2.2) 定义 $h(q_1(t), q_2(t), q_3(t))$ 为水库1的出流随机过程、水库2出流随机过程、和区间洪水随机过程的联合概率密度函数,计算公式如下:

$$\begin{aligned}
 [0016] \quad h(q_1(t), q_2(t), q_3(t)) &= \frac{\partial C^3(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t)))}{\partial F(q_1(t)) \partial F(q_2(t)) \partial F(q_3(t))} \prod_{i=1}^3 f(q_i(t)) \\
 &= c(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) \prod_{i=1}^3 f(q_i(t))
 \end{aligned} \quad (2)$$

[0017] 式中, $f(q_i(t))$ 为不确定性因素 $q_i(t)$, $i=1, 2, 3$ 的概率密度函数, $c(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t)))$ 为 Copula 函数 $C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t)))$ 的概率密度函数。

[0018] 更进一步的, 步骤 (2) 所述的 Copula 函数包括 3 种计算公式, 表达式如下:

Gumbel-Hougaard Copula:

$$C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) = \exp\left\{-\left[-\ln F(q_1(t))^{\alpha(t)} + (-\ln F(q_2(t)))^{\alpha(t)} + (-\ln F(q_3(t)))^{\alpha(t)}\right]^{1/\alpha(t)}\right\}, \alpha(t) \in [1, \infty)$$

Frank Copula:

$$[0019] \quad C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) = \frac{1}{\alpha(t)} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\alpha(t)F(q_1(t))} - 1)(e^{-\alpha(t)F(q_2(t))} - 1)(e^{-\alpha(t)F(q_3(t))} - 1)}{(e^{-\alpha(t)} - 1)^3} \right], \alpha(t) \neq 0 \quad (3)$$

Clayton Copula:

$$C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) = [F(q_1(t))^{-\alpha(t)} + F(q_2(t))^{-\alpha(t)} + F(q_3(t))^{-\alpha(t)} - 3]^{-1/\alpha(t)}, \alpha(t) \in (0, \infty)$$

[0020] 其中, $\alpha(t)$ 为 Copula 函数的参数;

[0021] 进一步的, 所述步骤 (3) 具体步骤如下:

[0022] 定义水库群实时防洪调度风险 $Risk(t)$ 为 t 时刻公共防洪点组合流量过程超过防洪控制断面安全流量阈值的概率, 通过 Copula 函数连接步骤 (1) 中的不确定性因素, 得到水库群实时防洪调度风险 $Risk(t)$ 的计算公式为:

$$\begin{aligned}
 [0023] \quad Risk(t) &= P[Q(t) > Q_c(t)] = P[q_1(t) + q_2(t) + q_3(t) > Q_c(t)] \\
 &= \iiint_{\Omega_0} h(q_1(t), q_2(t), q_3(t)) dq_1(t) dq_2(t) dq_3(t) \\
 &= C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) \Big|_{\Omega_0}
 \end{aligned} \quad (4)$$

[0024] 式中, $Risk(t)$ 表示 t 时刻水库群系统实时防洪调度风险; $Q(t)$ 表示 t 时刻公共防洪点的组合流量过程; $Q_c(t)$ 表示 t 时刻防洪控制断面的安全流量阈值, 可取公共防洪点的安全泄量; $\Omega_0 = \{q_1(t) + q_2(t) + q_3(t) > Q_c(t)\}$, Ω_1 为相应于 Ω_0 的积分转换区间。

[0025] 进一步的, 所述步骤 (4) 包括如下步骤:

[0026] (4.1) 获取水库群的运行数据和实时预报入库流量均值过程及误差分布、区间洪水预报均值过程及误差分布;

[0027] (4.2) 根据水库防洪调度规则进行水库调洪演算, 计算水库出库流量随机过程;

[0028] (4.3) 选择 Copula 函数作为不确定性因素-水库 1 的出流随机过程 $q_1(t)$ 、水库 2 出流随机过程 $q_2(t)$ 、和区间洪水随机过程 $q_3(t)$ 的联合概率分布函数。

[0029] (4.4) 根据选择的 Copula 函数, 计算各时刻水库群实时防洪调度风险。

[0030] 有益效果: 本发明相比现有技术, 其显著效果在于: 1、考虑了不确定性因素之间的相关性对水库群实时防洪调度风险的影响, 水库群实时防洪调度风险评估方法考虑因素更加全面; 2、通过 Copula 函数建立了各时刻水库群实时防洪调度风险的解析计算公式; 3、解析计算方法计算效率高、易于实现, 具有较强的通用性。

附图说明

- [0031] 图1为本发明方法的流程图；
 [0032] 图2为本发明并联水库群系统示意图；
 [0033] 图3为本发明计算步骤流程示意图。

具体实施方式

[0034] 为了进一步的阐述本发明公开的技术方案,下面结合说明书附图和具体实施例做详细的说明。

[0035] 本发明综合考虑了水库群入库流量过程的不确定、水库群出流过程的不确定、区间洪水预报过程的不确定性,考虑了不确定性因素之间的相关性,通过Copula函数理论建立了以上不确定性因素的联合概率密度分布函数,提出了水库群实时防洪调度风险的定义并求得了各时刻水库群实时防洪调度风险的解析计算公式。

[0036] 如图1所示,一种并联水库群实时防洪风险解析计算方法,包括以下步骤:

[0037] 步骤1:提出不确定性因素的数学表达式,求解不确定性因素的边缘分布函数:

[0038] (1.1) 定义 $Q_i(t)$ 为t时刻水库i的入库流量随机过程,计算公式如下:

$$[0039] \quad Q_i(t) = \bar{Q}_i(t) + \xi_i(t), \quad i=1,2 \quad (5)$$

[0040] 其中, $\bar{Q}_i(t)$ 为t时刻水库i的入库流量随机过程的均值; $\xi_i(t)$ 为t时刻水库i的入库流量预报误差, $\xi_i(t)$ 服从正态分布,即 $\xi_i(t) \sim N(0, \sigma_{\xi_i}^2(t))$;分布参数 $\sigma_{\xi_i}^2(t)$ 为水库i的入库流量预报误差的均方差,其可以由水文预报模型获得。则t时刻水库i的入库流量随机过程 $q_i(t)$ 也服从正态分布,即 $Q_i(t) \sim N(\bar{Q}_i(t), \sigma_{\xi_i}^2(t))$ 。

[0041] 然后,定义 $q_3(t)$ 为t时刻下游防洪控制断面的区间洪水随机过程,计算公式如下:

$$[0042] \quad q_3(t) = \bar{q}_3(t) + \xi_3(t) \quad (6)$$

[0043] 其中, $\bar{q}_3(t)$ 为t时刻区间洪水随机过程的均值,即确定性水文预报结果; $\xi_3(t)$ 为t时刻区间洪水预报误差, $\xi_3(t)$ 服从正态分布,即 $\xi_3(t) \sim N(0, \sigma_{\xi_3}^2(t))$;分布参数 $\sigma_{\xi_3}^2(t)$ 为区间洪水预报误差的均方差,其可以由水文预报模型获得。则t时刻下游防洪控制断面的区间洪水随机过程 $q_3(t)$ 也服从正态分布,即

$$[0044] \quad q_3(t) \sim N(\bar{q}_3(t), \sigma_{\xi_3}^2(t))。$$

[0045] (1.2) 定义 $q_i(t)$ 为t时刻水库i的出库流量随机过程,计算公式如下:

$$[0046] \quad q_i(t) = \bar{q}_i(t) + \eta_i(t), \quad i=1,2 \quad (7)$$

[0047] 其中, $\bar{q}_i(t)$ 为t时刻水库i的出库流量随机过程的均值; $\eta_i(t)$ 为t时刻水库i的出库流量误差, $\eta_i(t)$ 服从正态分布,即 $\eta_i(t) \sim N(0, \sigma_{\eta_i}^2(t))$ 。则t时刻水库i的出库流量随机过程 $q_i(t)$ 也服从正态分布,即 $q_i(t) \sim N(\bar{q}_i(t), \sigma_{\eta_i}^2(t))$ 。分布参数 $\sigma_{\eta_i}^2(t)$ 为水库i的出库流量误差的均方差,计算步骤如下:

[0048] 1) 按照水库i的入库流量随机过程($Q_i(t) \sim N(\bar{Q}_i(t), \sigma_{\xi_i}^2(t)), i=1,2, t=1 \text{ to } T$)和区间洪水随机过程($q_3(t) \sim N(\bar{q}_3(t), \sigma_{\xi_3}^2(t)), t=1 \text{ to } T$)的分布,这里优选拉丁超立方抽样生成M组

入库流量过程的样本 ($Q^j(t)$, $j=1,2; j=1 \text{ to } M; t=1 \text{ to } T$) 和区间洪水过程的样本 ($q_s^j(t)$, $j=1 \text{ to } M, t=1 \text{ to } T$);

[0049] 2) 根据水库 i 的防洪调度规则, 通过水量平衡原理进行水库调洪演算, 计算得到水库 i 的出库流量过程样本 ($q_i^j(t)$, $i=1,2; j=1 \text{ to } M; t=1 \text{ to } T$);

[0050] 3) 根据水库 i 的出库流量过程样本拟合各时刻水库 i 出库流量随机过程的分布 ($q_i(t) \sim N(\bar{q}_i(t), \sigma_{\eta_i}^2(t))$):

$$\begin{aligned} \bar{q}_i(t) &= \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M q_i^j(t); t=1 \text{ to } T \\ \sigma_{\eta_i}(t) &= \sqrt{\sum_{j=1}^M \frac{1}{M} (q_i^j(t) - \bar{q}_i(t))^2}; t=1 \text{ to } T \end{aligned} \quad (8)$$

[0052] 步骤2: 基于Copula函数, 求解多维不确定性因素的联合概率密度分布函数:

[0053] 定义 $H(q_1(t), q_2(t), q_3(t))$ 为不确定性因素-水库1的出流随机过程 $q_1(t)$ 、水库2出流随机过程 $q_2(t)$ 、和区间洪水随机过程 $q_3(t)$ 的联合概率分布函数, 根据Copula函数理论, 采用以下公式计算:

$$H(q_1(t), q_2(t), q_3(t)) = C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) \quad (9)$$

[0055] 其中, $F(q_1(t))$ 、 $F(q_2(t))$ 、 $F(q_3(t))$ 分别为不确定性因素水库1的出流随机过程 $q_1(t)$ 、水库2出流随机过程 $q_2(t)$ 、和区间洪水随机过程 $q_3(t)$ 的边缘分布函数, C 为Copula函数。

[0056] 本实例中采用的Copula函数包含以下3种:

Gumbel-Huggard Copula:

$$C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) = \exp\left\{-\left[(-\ln F(q_1(t)))^{\alpha(t)} + (-\ln F(q_2(t)))^{\alpha(t)} + (-\ln F(q_3(t)))^{\alpha(t)}\right]^{1/\alpha(t)}\right\}, \alpha(t) \in [1, \infty)$$

Frank Copula:

$$C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) = \frac{1}{\alpha(t)} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\alpha(t)F(q_1(t))} - 1)(e^{-\alpha(t)F(q_2(t))} - 1)(e^{-\alpha(t)F(q_3(t))} - 1)}{(e^{-\alpha(t)} - 1)^3} \right], \alpha(t) \neq 0 \quad (10)$$

Clayton Copula:

$$C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) = [F(q_1(t))^{-\alpha(t)} + F(q_2(t))^{-\alpha(t)} + F(q_3(t))^{-\alpha(t)} - 3]^{-1/\alpha(t)}, \alpha(t) \in (0, \infty)$$

[0058] 其中, $\alpha(t)$ 为Copula函数的参数, 本实施例优选采用极大似然法进行Copula函数的参数估计。

[0059] 对式(9)两边求偏导, 得到不确定性因素-水库1的出流随机过程 $q_1(t)$ 、水库2出流随机过程 $q_2(t)$ 、和区间洪水随机过程 $q_3(t)$ 的联合概率密度函数如下:

$$\begin{aligned} h(q_1(t), q_2(t), q_3(t)) &= \frac{\partial C^3(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t)))}{\partial F(q_1(t)) \partial F(q_2(t)) \partial F(q_3(t))} \prod_{i=1}^3 f(q_i(t)) \\ &= c(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) \prod_{i=1}^3 f(q_i(t)) \end{aligned} \quad (11)$$

[0061] 其中, $f(q_i(t))$ 为不确定性因素 $q_i(t)$, $i=1,2,3$ 的概率密度函数;

[0062] $h(q_1(t), q_2(t), q_3(t))$ 为不确定性因素水库1的出流随机过程 $q_1(t)$ 、水库2出流随

机过程 $q_2(t)$ 、和区间洪水随机过程 $q_3(t)$ 的联合概率密度函数；

[0063] $c(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t)))$ 为Copula函数 $C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t)))$ 的概率密度函数。

[0064] 本实施例中采用K-S检验方法分别进行式(10)中三种Copula函数的检验,筛选不确定性因素的备用Copula函数,然后本实施例中采用OLS准则进行备用Copula函数的拟合优度评价,从而选出拟合度最好的Copula函数作为不确定性因素的联合概率分布,其中各Copula函数的OLS值采用以下公式计算:

$$[0065] \quad OLS = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \{F_2[q_1^j(t), q_2^j(t), q_3^j(t)] - F_1[q_1^j(t), q_2^j(t), q_3^j(t)]\}^2} \quad (12)$$

[0066] 其中, $F_1(q_1^j(t), q_2^j(t), q_3^j(t))$ 为不确定性因素-水库1的出流随机过程 $q_1(t)$ 、水库2出流随机过程 $q_2(t)$ 、和区间洪水随机过程 $q_3(t)$ 的经验累积概率值; $F_2(q_1^j(t), q_2^j(t), q_3^j(t))$ 为不确定性因素-水库1的出流随机过程 $q_1(t)$ 、水库2出流随机过程 $q_2(t)$ 、和区间洪水随机过程 $q_3(t)$ 的理论累积概率值。

[0067] 步骤3,建立水库群实时防洪调度风险模型,解析各时刻水库群防洪调度风险。

[0068] 定义水库群实时防洪调度风险为公共防洪点组合流量过程超过防洪控制断面安全流量阈值的概率 $Risk(t)$,表示t时刻有 $Risk(t)$ 的概率公共防洪点组合流量过程会超过防洪控制断面安全流量阈值,为决策者提供风险决策的风险信息。将式(11)代入式(1),整理得各时刻水库群实时防洪调度风险 $Risk(t)$ 的解析计算公式:

$$\begin{aligned}
 [0069] \quad Risk(t) &= P[Q(t) > Q_c(t)] = P[q_1(t) + q_2(t) + q_3(t) > Q_c(t)] \\
 &= \iiint_{\Omega_0} h(q_1(t), q_2(t), q_3(t)) dq_1(t) dq_2(t) dq_3(t) \\
 &= \iiint_{\Omega_0} \frac{\partial C^3(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t)))}{\partial F(q_1(t)) \partial F(q_2(t)) \partial F(q_3(t))} \prod_{i=1}^3 f(q_i(t)) dq_1(t) dq_2(t) dq_3(t) \quad (13) \\
 &= \iiint_{\Omega_1} c(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) dF(q_1(t)) dF(q_2(t)) dF(q_3(t)) \\
 &= C(F(q_1(t)), F(q_2(t)), F(q_3(t))) \Big|_{\Omega_1}
 \end{aligned}$$

[0070] 其中, $Q_c(t)$ 表示t时刻防洪控制断面的安全流量阈值,可取公共防洪点的安全泄量; $\Omega_0 = \{q_1(t) + q_2(t) + q_3(t) > Q_c(t)\}$, Ω_1 为相应于 Ω_0 的积分转换区间。

[0071] 步骤4,水库群实时防洪调度风险的计算。

[0072] 进行水库群实时防洪调度风险模型的应用,本实施例采用递推算法计算得到各时刻水库群实时防洪调度风险,算法的流程如附图3所示,主要包括以下求解步骤:

[0073] (1) 获取水库群的运行数据,包括水库的防洪调度规则,水位库容曲线、泄流能力曲线、起调水位、设计洪水位、校核洪水位以及水库坝顶高程等特征值;

[0074] (2) 获取水库群的实时预报入库流量均值过程 $\bar{Q}_i(t)$, $i=1,2$ 、区间洪水预报均值过程 $\bar{q}_3(t)$ 、入库流量预报误差 $\xi_i(t)$, $i=1,2$ 、区间洪水预报误差 $\xi_3(t)$;

[0075] (3) 按照水库群的入库流量随机过程和区间洪水随机过程的分布,本实施例中采用拉丁超立方抽样生成M组入库流量过程的样本 $(Q_i^j(t), j=1,2; j=1 \text{ to } M; t=1 \text{ to } T)$ 和

区间洪水过程的样本($q_j^i(t)$, $j=1$ to M , $t=1$ to T);

[0076] (4) 根据水库*i*的防洪调度规则,通过水量平衡原理进行水库调洪演算,计算得到水库*i*的出库流量过程样本($q_i^j(t)$, $i=1,2$; $j=1$ to M ; $t=1$ to T);

[0077] (5) 根据公式(8),计算水库*i*出库流量随机过程的分布参数 $\bar{q}_i(t)$ 和 $\sigma_{q_i}(t)$;

[0078] (6) 选择备用Copula函数,并进行K-S检验;

[0079] (7) 根据公式(12)计算此Copula函数的OLS值,比较各备用Copula函数的OLS值,选择OLS值最小的Copula函数作为不确定性因素-水库1的出流随机过程 $q_1(t)$ 、水库2出流随机过程 $q_2(t)$ 、和区间洪水随机过程 $q_3(t)$ 的联合概率分布函数;

[0080] (8) 根据选择的Copula函数和公式(13),设置公共防洪点安全流量阈值 $Q_c(t)$,计算各时刻水库群实时防洪调度风险。

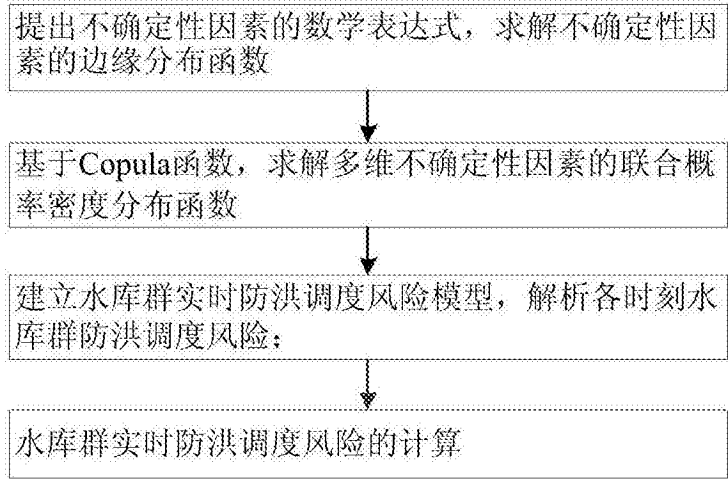


图1

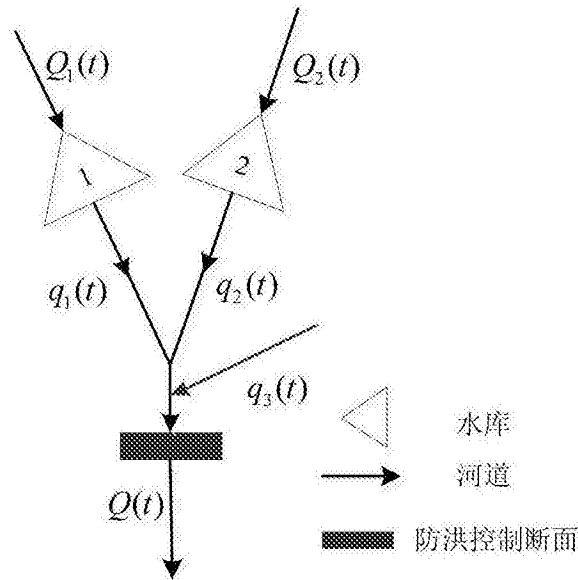


图2

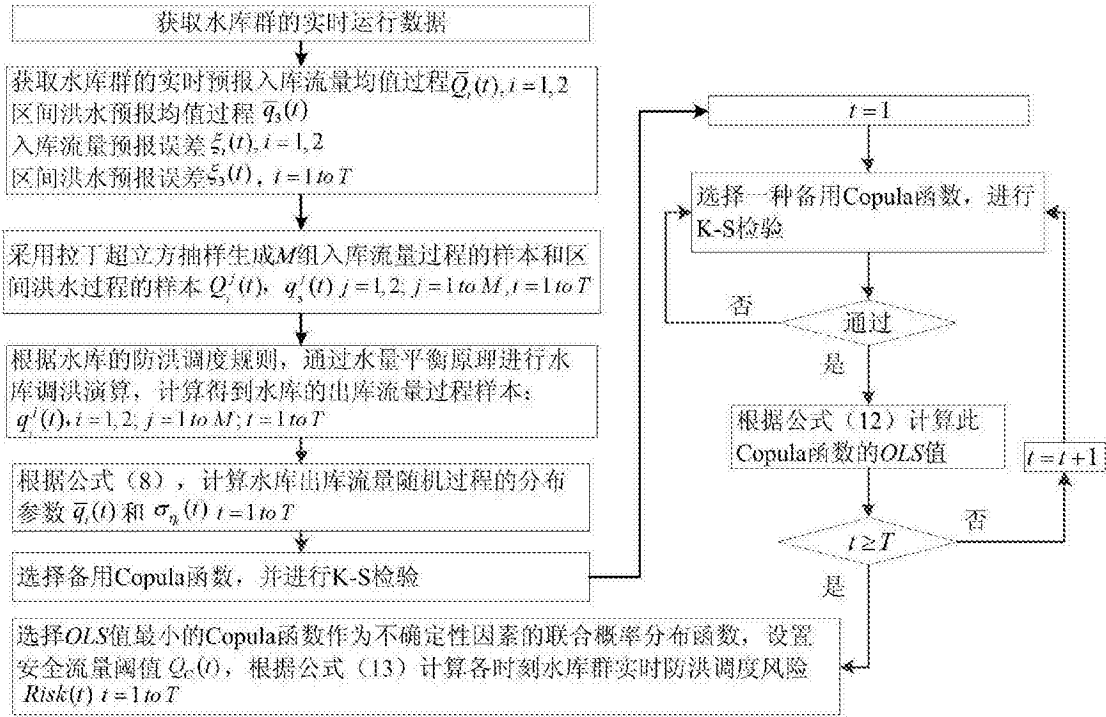


图3