

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2021 年 10 月 7 日 (07.10.2021)



(10) 国际公布号
WO 2021/196552 A1

(51) 国际专利分类号:
G06Q 10/04 (2012.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2020/119824

(22) 国际申请日: 2020 年 10 月 6 日 (06.10.2020)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

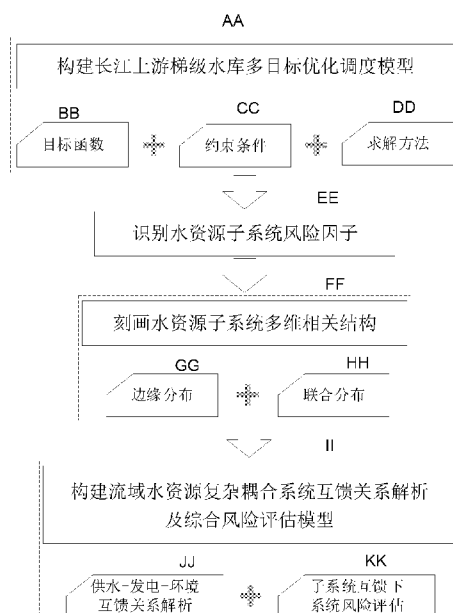
(30) 优先权:
202010232888.7 2020年3月28日 (28.03.2020) CN

(71) 申请人: 华中科技大学(HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号, Hubei 430074 (CN)。

(72) 发明人: 周建中(ZHOU, Jianzhong); 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号华中科技大学, Hubei 430074 (CN)。 仇红亚(QIU, Hongya); 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号华中科技大学, Hubei 430074 (CN)。 陈璐(CHEN, Lu); 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号华中科技大学, Hubei 430074 (CN)。 张勇传(ZHANG, Yongchuan); 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号华中科技大学, Hubei 430074 (CN)。 何中政(HE, Zhongzheng); 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号华中科技大学, Hubei 430074 (CN)。 贾本军(JIA, Benjun); 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号华中科技大学, Hubei 430074 (CN)。 王权森(WANG, Quansen); 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号华中科技大学, Hubei 430074 (CN)。

(54) **Title:** CASCADE RESERVOIR RISK ASSESSMENT METHOD AND SYSTEM BASED ON MUTUAL FEEDBACK RELATIONSHIP ANALYSIS

(54) 发明名称: 一种基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法及系统



AA Construct a multi-objective optimal dispatching model of a cascade reservoir in the upper reaches of the Yangtze River

BB Objective function

CC Constraint condition

DD Solving method

EE Identify risk factors of water resource subsystems

FF Depict multi-dimensional related structures of the water resource subsystems

GG Edge distribution

HH Joint distribution

II Construct a mutual feedback relationship analysis and comprehensive risk assessment model for a basin water resource complex coupling system

JJ Water supply-power generation-environment mutual feedback relationship analysis

KK System risk assessment under mutual feedback of the subsystems

图 1

(57) **Abstract:** Provided are a cascade reservoir risk assessment method and system based on mutual feedback relationship analysis, which belong to the field of complex water resource system risk analysis. The method comprises: establishing a multi-objective optimal dispatching model of a cascade reservoir by taking the maximum water supply capacity outside of a watercourse in a reservoir upstream section, the maximum hydroelectric generation capacity of a hydropower station corresponding to the reservoir, and the minimum ecological flow variation degree in a watercourse in a reservoir downstream section as objectives, and by taking a water balance

(74) 代理人: 武汉华之喻知识产权代理有限公司 (WUHAN HUAZHIYU INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO., LTD.); 中国湖北省武汉市东湖高新区佳园路2号高科大厦7028, Hubei 430074 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

constraint and a boundary constraint as constraint conditions; solving the model to obtain a non-inferior solution set, selecting a plurality of solutions from the set, and respectively calculating risk factors of three subsystems in the cascade reservoir; for each subsystem, establishing edge distribution of the risk factors, and respectively constructing multi-dimensional spatial and temporal joint distribution of multi-dimensional risk factors of the cascade reservoir in a water supply period and a flood period; and according to the joint distribution, establishing a comprehensive risk assessment model of the cascade reservoir by using conditional entropy. According to the method, the comprehensive risk of a water resource system under the action of mutual feedback covariance of water supply-power generation-environment can be quantitatively assessed.

(57) 摘要: 一种基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法及系统, 属于复杂水资源系统风险分析领域, 包括: 以水库上游区间河道外供水量最大、水库对应水电站水力发电量最大以及水库下游区间河道内生态流量变异程度最小为目标, 以水量平衡约束和边界约束为约束条件, 建立梯级水库的多目标优化调度模型; 求解模型得到非劣解集, 并从中选取多个解, 分别计算梯级水库中三个子系统的风险因子; 对于每一个子系统, 建立风险因子的边缘分布, 并分别构建供水期和汛期梯级水库的多维风险因子的多维时空联合分布; 根据联合分布, 利用条件熵建立梯级水库的综合风险评估模型。该方法能够定量评估供水-发电-环境互馈协变作用下水资源系统的综合风险。

一种基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法及系统

技术领域

本发明属于复杂水资源系统风险分析领域，更具体地，涉及一种基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法及系统。

背景技术

梯级水库（例如长江上游梯级水库）调度过程中供水、发电、环境等目标既非完全竞争也非完全协同，呈现多维耦合互馈特性，这些耦合互馈关系的演化过程不仅极为复杂，而且还表现出高维、非线性、时变、不确定和强耦合等特性，使人们很难精确和有效地描述其动力学行为，一方面造成水资源的配置和利用效率低下，另一方面增加了流域水资源系统风险。

目前，针对复杂水资源耦合互馈系统方面的实质性研究原理和方法较少，已有研究如“长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究 I：模型原理及求解”考虑水库群调度中发电与供水、生态等目标协调性，但分析局限于定性解析，且未涉及多个目标协同竞争关系下水资源系统风险评估研究。

总的来说，现有技术存在难以定量刻画水资源耦合系统供水-发电-环境互馈协变关系以及定量评估互馈协变作用下水资源系统综合风险的难题。

发明内容

针对现有技术的缺陷和改进需求，本发明提供了一种基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法及系统，其目的在于，定量评估供水-发电-环境互馈协变作用下水资源系统的综合风险。

为实现上述目的，按照本发明的一个方面，提供了一种基于互馈关系

解析的梯级水库风险评估方法，包括如下步骤：

(1) 以水库上游区间河道外供水量最大、水库对应水电站水力发电量最大以及水库下游区间河道内生态流量变异程度最小为目标，以水量平衡约束和边界约束为约束条件，建立梯级水库的多目标优化调度模型；

(2) 求解多目标优化调度模型，得到非劣解集，并从中选取 N 个解，利用每一个解中的参数分别计算梯级水库中供水子系统、发电子系统和环境子系统的风险因子；

风险因子用于表征子系统的风险水平；

(3) 对于每一个子系统，以每一个解所对应的风险因子为样本点，建立对应子系统的风险因子的边缘分布，并根据三个子系统的风险因子的边缘分布，分别构建供水期和汛期梯级水库的多维风险因子的多维时空联合分布；

(4) 根据多维时空联合分布，利用条件熵建立梯级水库的综合风险评估模型，用于定量评估供水子系统、发电子系统和环境子系统互馈协变作用下的梯级水库的综合风险；

其中，N 为正整数。

本发明针对复杂水资源耦合互馈系统，游梯级水库多目标优化调度模型，从多个调度参数中识别提取表征水资源各子系统的风险因子，并构建三个子系统的风险因子多维时空联合分布，采用条件熵建立流域水资源复杂耦合系统互馈关系解析及综合风险评估模型，能够定量评估互馈协变关系下水资源系统综合风险，为流域供水-发电-环境耦合互馈水资源系统径流适应性利用提供科学指导，促进水资源系统优化配置。

进一步地，步骤 (4) 中，所建立的综合风险评估模型为：

$$E(U_1|U_2=u_2, U_3=u_3)=\int_{u_1(0)}^1 \frac{c(u_1, u_2, u_3)}{c(u_2, u_3)} \log\left(\frac{c(u_1, u_2, u_3)}{c(u_2, u_3)} f(F^{-1}(u_1))\right) du_1 ;$$

其中， U_1 、 U_2 和 U_3 分别表示第一子系统、第二子系统和第三子系统的

保证率， u_1 、 u_2 和 u_3 分别表示保证率 U_1 、 U_2 和 U_3 所对应的变量； $E(U_1|U_2=u_2, U_3=u_3)$ 表示第二系统和第三系统的保证率分别为 u_2 和 u_3 的情况下，第一子系统的保证率达到 u_1 以上的条件熵，用于表征第一子系统的风险； X_1 、 X_2 和 X_3 分别表示第一子系统、第二子系统和第三子系统的保证率， x_1 、 x_2 和 x_3 分别表示风险因子 X_1 、 X_2 和 X_3 所对应的变量； $u_i = F(x_i)$ ， $F(x_i)$ 表示第 i 子系统的风险因子的边缘分布， $F^{-1}(u_1)$ 表示第一子系统的风险因子的边缘分布的反函数， $f()$ 表示概率密度函数； $F(x_i, x_j)$ 表示第 i 子系统和第 j 子系统的风险因子的联合分布， $F(x_1, x_2, x_3)$ 表示三个子系统的风险因子的联合分布； $c(u_i, u_j) = \frac{\partial C(u_i, u_j)}{\partial u_i \partial u_j}$ ， $C(u_i, u_j) = F(x_i, x_j)$ 表示第 i 子系统和第 j 子系统的保证率的联合分布； $c(u_1, u_2, u_3) = \frac{\partial C(u_1, u_2, u_3)}{\partial u_1 \partial u_2 \partial u_3}$ ， $C(u_1, u_2, u_3) = F(x_1, x_2, x_3)$ 表示三个子系统的保证率的联合分布；第一子系统、第二子系统和第三子系统分别表示梯级水库中的三个子系统； $u_1(0)$ 表示随机变量取值小于0的概率； $i, j \in \{1, 2, 3\}$ ，且 $i \neq j$ 。

条件熵是随机变量不确定性的度量，本发明采用上述模型计算条件熵，能够反映某两个子系统一定风险水平下，另一子系统的风险水平。

进一步地，梯级水库中，供电子系统的风险因子为梯级水库上游区间河道外供水流量，发电子系统的风险因子为梯级水库对应水电站的水力发电量，环境子系统的风险因子为梯级水库下游区间河道内生态流量变异系数。

进一步地，步骤（2）中，求解多目标优化调度模型，所采用的求解方法为非支配排序遗传算法（NSGA-II）；使用非支配排序遗传算法 NSGA-II 求解多目标优化调度模型，能够降低求解复杂度，有效提高计算速度。

进一步地，步骤（3）中，根据三个子系统的风险因子的边缘分布，分

别构建供水期和汛期梯级水库的多维风险因子的多维时空联合分布，所采用的联合分布函数为 Copula 函数；利用 Copula 函数构建联合分布灵活，且计算简单。

进一步地，本发明所提供的基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法，还包括：

根据梯级水库处于供水期还是汛期，确定相应的综合风险评估模型后，利用综合风险评估模型，根据梯级水库中两个子系统的风险水平，评估其余子系统的风险水平。

进一步地，本发明所提供的基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法，还包括：

利用相关系数分别计算梯级水库的三个子系统中，每两个子系统之间的相关程度的量化值。

本发明利用相关性系数分别计算每两个子系统之间的相关程度的量化值，能够定量刻画水资源耦合互馈系统（即梯级水库）供水-发电-环境互馈协变关系。

进一步地，本发明所提供的基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法，还包括：对于任意两个子系统，根据它们之间的相关程度的量化值所属的区间，判断这两个子系统之间的相关水平。

本发明根据两个子系统间相关程度量化值所属的区间，判断其相关水平，能够实现相关性的等级划分，更为直观清晰地反映子系统间的相关性。

按照本发明的另一个方面，提供了一种基于互馈关系解析的梯级水库风险评估系统，包括：多目标优化调度模型建立模块、风险因子获取模块、联合分布建立模块以及综合风险评估模型建立模块；

多目标优化调度模型建立模块，用于以水库上游区间河道外供水量最大、水库对应水电站水力发电量最大以及水库下游区间河道内生态流量变异程度最小为目标，以水量平衡约束和边界约束为约束条件，建立梯级水

库的多目标优化调度模型；

风险因子获取模块，用于求解多目标优化调度模型，得到非劣解集，并从中选取 N 个解，利用每一个解中的参数分别计算梯级水库中供水子系统、发电子系统和环境子系统的风险因子；风险因子用于表征子系统的风险水平；

联合分布建立模块，用于对于每一个子系统，以每一个解所对应的风险因子为样本点，建立对应子系统的风险因子的边缘分布，并根据三个子系统的风险因子的边缘分布，分别构建供水期和汛期梯级水库的多维风险因子的多维时空联合分布；

综合风险评估模型建立模块，用于根据多维时空联合分布，利用条件熵建立梯级水库的综合风险评估模型，用于定量评估供水子系统、发电子系统和环境子系统互馈协变作用下的梯级水库的综合风险；

其中， N 为正整数。

进一步地，本发明所提供的基于互馈关系解析的梯级水库风险评估系统，还包括：风险评估模块；

风险评估模块，用于根据梯级水库处于供水期还是汛期，确定相应的综合风险评估模型后，利用综合风险评估模型，根据梯级水库中两个子系统的风险水平，评估其余子系统的风险水平。

总体而言，通过本发明所构思的以上技术方案，能够取得以下有益效果：

(1) 本发明针对复杂水资源耦合互馈系统，游梯级水库多目标优化调度模型，从多个调度参数中识别提取表征水资源各子系统的风险因子，并构建三个子系统的风险因子多维时空联合分布，采用条件熵建立流域水资源复杂耦合系统互馈关系解析及综合风险评估模型，能够定量评估互馈协变关系下水资源系统综合风险，为流域供水-发电-环境耦合互馈水资源系统径流适应性利用提供科学指导，促进水资源系统优化配置。

(2) 本发明利用相关性系数分别计算每两个子系统之间的相关程度的量化值，能够定量刻画水资源耦合互馈系统（即梯级水库）供水-发电-环境互馈协变关系。

附图说明

图 1 为本发明实施例提供的基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法示意图；

图 2 为本发明实施例提供的长江上游梯级水库调度过程中三峡水库条件熵示意图；其中，（a）为供水期供水的条件熵，（b）为汛期供水的条件熵。

具体实施方式

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。此外，下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

在本发明中，本发明及附图中的术语“第一”、“第二”等（如果存在）是用于区别类似的对象，而不必用于描述特定的顺序或先后次序。

为定量评估供水-发电-环境互馈协变作用下水资源系统的综合风险，本发明提供的基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法，如图 1 所示，包括如下步骤：

(1) 以水库上游区间河道外供水量最大、水库对应水电站水力发电量最大以及水库下游区间河道内生态流量变异程度最小为目标，以水量平衡约束和边界约束为约束条件，建立梯级水库的多目标优化调度模型；

可选地，在建立多目标优化调度模型时，调度参数包括：供水流量、

水库每个时刻的发电量，水库每个时刻的下泄流量；

(2) 求解多目标优化调度模型，得到非劣解集，并从中选取 N 个解，利用每一个解中的参数分别计算梯级水库中供水子系统、发电子系统和环境子系统的风险因子；风险因子用于表征子系统的风险水平；

可选地，步骤 (2) 中，求解多目标优化调度模型，所采用的求解方法为非支配排序遗传算法 (NSGA-II)；使用非支配排序遗传算法 NSGA-II 求解多目标优化调度模型，能够降低求解复杂度，有效提高计算速度；应当说明的是，此处仅为本发明的一种优选实施方式，不应理解为对本发明的唯一限定，其他多目标调度模型求解方法同样可以适用于本发明；

在本实施例中，梯级水库中，供电子系统的风险因子为梯级水库上游区间河道外供水流量，具体为年尺度下的平均供水流量；

发电子系统的风险因子为梯级水库对应水电站的水力发电量，具体为年尺度下的各时段发电量的总和；

环境子系统的风险因子为梯级水库下游区间河道内生态流量变异系数，具体为水库下泄流量与自然流量的差值与自然流量的比值；

(3) 对于每一个子系统，以每一个解所对应的风险因子为样本点，建立对应子系统的风险因子的边缘分布，并根据三个子系统的风险因子的边缘分布，分别构建供水期和汛期梯级水库的多维风险因子的多维时空联合分布；

建立子系统的风险因子的边缘分布时，利用水文统计学常用的分布函数对样本点进行拟合，并检验筛选不同风险因子的适应性分布函数即可，风险因子的边缘分布可以刻画水资源系统各子系统随机分布规律；

可选地，步骤 (3) 中，根据三个子系统的风险因子的边缘分布，分别构建供水期和汛期梯级水库的多维风险因子的多维时空联合分布，所采用的联合分布函数为 Copula 函数；利用 Copula 函数构建联合分布灵活，且计算简单；同样地，此处描述仅为本发明的一种优选实施方式，不应理解为

对本发明的唯一限定，其他联合分布函数同样可以适用于本发明；

(4) 根据多维时空联合分布，利用条件熵建立梯级水库的综合风险评估模型，用于定量评估供水子系统、发电子系统和环境子系统互馈协变作用下的梯级水库的综合风险；

其中，N 为正整数；其具体取值可根据实际的计算速度、拟合精度等要求设定，在本实施例中，N=100。

在本实施例中，步骤（4）中，所建立的综合风险评估模型具体为：

$$E(U_1|U_2=u_2, U_3=u_3) = \int_{u_1(0)}^1 \frac{c(u_1, u_2, u_3)}{c(u_2, u_3)} \log\left(\frac{c(u_1, u_2, u_3)}{c(u_2, u_3)} f(F^{-1}(u_1))\right) du_1 ;$$

其中， U_1 、 U_2 和 U_3 分别表示第一子系统、第二子系统和第三子系统的保证率， u_1 、 u_2 和 u_3 分别表示保证率 U_1 、 U_2 和 U_3 所对应的变量； $E(U_1|U_2=u_2, U_3=u_3)$ 表示第二系统和第三系统的保证率分别为 u_2 和 u_3 的情况下，第一子系统的保证率达到 u_1 以上的条件熵，用于表征第一子系统的风险； X_1 、 X_2 和 X_3 分别表示第一子系统、第二子系统和第三子系统的保证率， x_1 、 x_2 和 x_3 分别表示风险因子 X_1 、 X_2 和 X_3 所对应的变量； $u_i = F(x_i)$ ， $F(x_i)$ 表示第 i 子系统的风险因子的边缘分布， $F^{-1}(u_i)$ 表示第一子系统的风险因子的边缘分布的反函数， $f()$ 表示概率密度函数； $F(x_i, x_j)$ 表示第 i 子系统和第 j 子系统的风险因子的联合分布， $F(x_1, x_2, x_3)$ 表示三个子系统的风险因子的联合分布； $c(u_i, u_j) = \frac{\partial C(u_i, u_j)}{\partial u_i \partial u_j}$ ， $C(u_i, u_j) = F(x_i, x_j)$ 表示第 i 子系统和第 j 子系统的保证率的联合分布； $c(u_1, u_2, u_3) = \frac{\partial C(u_1, u_2, u_3)}{\partial u_1 \partial u_2 \partial u_3}$ ， $C(u_1, u_2, u_3) = F(x_1, x_2, x_3)$ 表示三个子系统的保证率的联合分布；第一子系统、第二子系统和第三子系统分别表示梯级水库中的三个子系统； $u_1(0)$ 表示随机变量取值小于0的概率； $i, j \in \{1, 2, 3\}$ ，且 $i \neq j$ ；基于 x_i 和 u_i 之间的关系，

上述综合风险评估模型亦可表示为如下形式：

$$\begin{aligned}
 H(X_1 | X_2 = x_2, X_3 = x_3) &= \int_0^\infty f(x_1 | x_2, x_3) \log f(x_1, x_2, x_3) dx_1 \\
 &= \int_0^\infty \frac{f(x_1, x_2, x_3)}{f(x_2, x_3)} \log \frac{f(x_1, x_2, x_3)}{f(x_2, x_3)} dx \\
 &= \int_{u_1(0)}^1 \frac{c(u_1, u_2, u_3)}{c(u_2, u_3)} \log \left(\frac{c(u_1, u_2, u_3)}{c(u_2, u_3)} f(F^{-1}(u_1)) \right) du_1 \\
 &= E(U_1 | U_2 = u_2, U_3 = u_3)
 \end{aligned}$$

；

条件熵是随机变量不确定性的度量，本发明采用上述模型计算条件熵，能够反映某两个子系统一定风险水平下，另一子系统的风险水平。

上述基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法，针对复杂水资源耦合互馈系统，游梯级水库多目标优化调度模型，从多个调度参数中识别提取表征水资源各子系统的风险因子，并构建三个子系统的风险因子多维时空联合分布，采用条件熵建立流域水资源复杂耦合系统互馈关系解析及综合风险评估模型，能够定量评估互馈协变关系下水资源系统综合风险，为流域供水-发电-环境耦合互馈水资源系统径流适应性利用提供科学指导，促进水资源系统优化配置。

为了利用所建立的综合风险评估模型定量评估互馈协变关系下水资源系统综合风险，上述基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法，还包括：

根据梯级水库处于供水期还是汛期，确定相应的综合风险评估模型后，利用综合风险评估模型，根据梯级水库中两个子系统的风险水平，评估其余子系统的风险水平。

为了进一步定量刻画水资源耦合互馈系统供水-发电-环境互馈协变关系，上述基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法，还可包括：

利用相关系数分别计算梯级水库的三个子系统中，每两个子系统之间的相关程度的量化值；具体采用的相关系数可以是皮尔逊相关系数、斯皮

尔曼相关性系数、肯德尔相关性系数等；

在获得每两个子系统之间的相关程度的量化值的基础上，对于任意两个子系统，还可以根据它们之间的相关程度的量化值所属的区间，判断这两个子系统之间的相关水平；例如，分别计算梯级水库供水-发电、发电-环境、环境-供水皮尔逊相关系数，皮尔逊相关系数绝对值在 0~0.3 区间，表现为低度相关；在 0.3~0.7 区间，表现为中度相关；在 0.7~1.0 区间，表现为高度相关。

本发明还提供了一种基于互馈关系解析的梯级水库风险评估系统，包括：多目标优化调度模型建立模块、风险因子获取模块、联合分布建立模块以及综合风险评估模型建立模块；

多目标优化调度模型建立模块，用于以水库上游区间河道外供水量最大、水库对应水电站水力发电量最大以及水库下游区间河道内生态流量变异程度最小为目标，以水量平衡约束和边界约束为约束条件，建立梯级水库的多目标优化调度模型；

风险因子获取模块，用于求解多目标优化调度模型，得到非劣解集，并从中选取 N 个解，利用每一个解中的参数分别计算梯级水库中供水子系统、发电子系统和环境子系统的风险因子；风险因子用于表征子系统的风险水平；

联合分布建立模块，用于对于每一个子系统，以每一个解所对应的风险因子为样本点，建立对应子系统的风险因子的边缘分布，并根据三个子系统的风险因子的边缘分布，分别构建供水期和汛期梯级水库的多维风险因子的多维时空联合分布；

综合风险评估模型建立模块，用于根据多维时空联合分布，利用条件熵建立梯级水库的综合风险评估模型，用于定量评估供水子系统、发电子系统和环境子系统互馈协变作用下的梯级水库的综合风险；

其中，N 为正整数；

上述基于互馈关系解析的梯级水库风险评估系统，进一步可以包括风险评估模块；

风险评估模块，用于根据梯级水库处于供水期还是汛期，确定相应的综合风险评估模型后，利用综合风险评估模型，根据梯级水库中两个子系统的风险水平，评估其余子系统的风险水平；

在本发明实施例中，各模块的具体实施方式可参考上述方法实施例中的描述，在此将不再复述。

应用实例

以长江上游溪洛渡-向家坝-三峡梯级水库为研究对象，建立供水目标为水库上游区间河道外供水量最大，发电目标为水库对应水电站水力发电量最大，环境目标为水库下游区间河道内生态流量变异程度最小的梯级水库多目标优化调度模型，采用非支配排序遗传算法 NSGA-II 求解模型，从多个调度参数中识别提取表征水资源供水、发电、环境子系统的风险因子，分别用 W 、 E 、 ε 表示。

表 1 梯级水库供水、发电、环境相关关系

水库	时期	指标	W	E	ε
溪洛渡	供水期	W	1	-0.26	-0.22
		E	-0.26	1	0.54
		ε	-0.22	0.54	1
	汛期	W	1	-0.14	-0.22
		E	-0.14	1	0.6
		ε	-0.22	0.6	1
向家坝	供水期	W	1	-0.28	-0.23
		E	-0.28	1	0.55
		ε	-0.23	0.55	1
	汛期	W	1	-0.16	-0.22
		E	-0.16	1	0.61
		ε	-0.22	0.61	1
三峡	供水期	W	1	-0.21	-0.24
		E	-0.21	1	0.71
		ε	-0.24	0.71	1
	汛期	W	1	-0.3	-0.45
		E	-0.3	1	0.95
		ε	-0.45	0.95	1

采用皮尔逊相关系数对流域水资源各子系统进行相关性解析，如表1所示。由表1可知，无论时间上，还是空间上供水流量与发电量呈现较弱负相关性，供水流量与生态流量变异系数也呈现较弱负相关性，而发电量和生态流量变异系数呈现较强正相关性。从物理成因解释，上游供水量增大，即取水量增大，导致能够用于发电的流量会相应减小，因此，供水和发电在任何时期都是负相关，呈现负相关关系。发电量和生态流量变异系数呈现正相关态势，原因在于无论是供水期还是汛期，水轮机下泄流量增大会带来发电量的增加，导致自然径流改变系数增加，因此二者呈现正相关，存在相互促进关系。

以第一子系统、第二子系统和第三子系统分别对应表示梯级水库中的供水子系统、供电子系统以及环境子系统，利用上述基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法所建立的综合风险评估模型计算三峡供水期和汛期供水条件熵，结果如图2和表2所示。以优先保障水库上游供水量为例展开研究，设置发电保证率 $u_2=0.1, 0.2, \dots, 0.9$ 和环境保证率 $u_3=0.05, 0.1, \dots, 0.95$ ，推求随环境保证率变化时供水条件熵 $E(U_1|U_2=u_2, U_3=u_3)$ ，熵值越小表明供水风险越小。供水期和汛期结果如图2所示。

供水期，从图2中的(a)可知，当环境保证率 u_3 在 $[0.2, 0.8]$ 变化时，可通过水库控泄使发电保证率 u_2 满足 $E_c(U_1|U_2=u_2, U_3=u_3)$ 最小为0.0011，意味着水库上游供水风险最小时，电站发电量和下游区间河流自然径流改变系数存在多组解，如表2所示。由表2可知，当供水风险最小时，环境保证率 u_3 随发电保证率 u_2 升高而降低，表明供水期发电和环境呈竞争关系，且当发电和环境保证率同时处于较低或较高水平时，供水风险较大。为保障水资源系统风险最小，可适当增加供水风险以提高发电和环境保证率，如图2中的(a)所示，供水条件熵为0.017时，发电和环境保证率可同时达到(0.80, 0.70)。汛期分析方法与供水期类似，如图2中的(b)所示，汛期供水风险

$E(U_1|U_2=u_2, U_3=u_3)$ 最小时, 环境保证率 u_3 变化区间为 $[0.15, 0.85]$, 环境保证率 u_3 随发电保证率 u_2 升高而升高, 表明汛期发电和环境呈协同关系。表2给出了发电保证率 u_2 和环境保证率 u_3 多种组合。当 $E(U_1|U_2=u_2, U_3=u_3)=0.064$ 时, 发电和环境均能维持在较高的保证率水平 $(0.90, 0.85)$, 此时系统水资源利用率较高且风险最小。由此可见, 无论供水期还是汛期在优先保障供水的情况下, 水资源系统均可维持在较低风险水平。

表2三峡供水-发电-环境系统条件熵及保证率组合

时期	供水 条件熵 最小值	发电 保证率 u_2	环境 保证率 u_3	时期	供水 条件熵 最小值	发电 保证率 u_2	环境 保证率 u_3
供水期	0.0011	0.10	0.80	汛期	0.064	0.90	0.85
		0.30	0.60			0.80	0.70
		0.60	0.45			0.50	0.50
		0.70	0.35			0.30	0.35
		0.90	0.20			0.20	0.15

本领域的技术人员容易理解, 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已, 并不用以限制本发明, 凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等, 均应包含在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求

1、一种基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法，其特征在于，包括如下步骤：

(1) 以水库上游区间河道外供水量最大、水库对应水电站水力发电量最大以及水库下游区间河道内生态流量变异程度最小为目标，以水量平衡约束和边界约束为约束条件，建立梯级水库的多目标优化调度模型；

(2) 求解所述多目标优化调度模型，得到非劣解集，并从中选取 N 个解，利用每一个解中的参数分别计算所述梯级水库中供水子系统、发电子系统和环境子系统的风险因子；

风险因子用于表征子系统的风险水平；

(3) 对于每一个子系统，以每一个解所对应的风险因子为样本点，建立对应子系统的风险因子的边缘分布，并根据三个子系统的风险因子的边缘分布，分别构建供水期和汛期所述梯级水库的多维风险因子的多维时空联合分布；

(4) 根据所述多维时空联合分布，利用条件熵建立所述梯级水库的综合风险评估模型，用于定量评估供水子系统、发电子系统和环境子系统互馈协变作用下的梯级水库的综合风险；

其中，N 为正整数。

2、如权利要求 1 所述基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法，其特征在于，所述步骤 (4) 中，所建立的所述综合风险评估模型为：

$$E(U_1|U_2=u_2, U_3=u_3)=\int_{u_1(0)}^1 \frac{c(u_1, u_2, u_3)}{c(u_2, u_3)} \log\left(\frac{c(u_1, u_2, u_3)}{c(u_2, u_3)} f(F^{-1}(u_1))\right) du_1 ;$$

其中， U_1 、 U_2 和 U_3 分别表示第一子系统、第二子系统和第三子系统的保证率， u_1 、 u_2 和 u_3 分别表示保证率 U_1 、 U_2 和 U_3 所对应的变量；

$E(U_1|U_2=u_2, U_3=u_3)$ 表示第二系统和第三系统的保证率分别为 u_2 和 u_3 的情

况下, 第一子系统的保证率达到 u_1 以上的条件熵, 用于表征第一子系统的风险; X_1 、 X_2 和 X_3 分别表示第一子系统、第二子系统和第三子系统的保证率, x_1 、 x_2 和 x_3 分别表示风险因子 X_1 、 X_2 和 X_3 所对应的变量; $u_i = F(x_i)$, $F(x_i)$ 表示第 i 子系统的风险因子的边缘分布, $F^{-1}(u_1)$ 表示第一子系统的风险因子的边缘分布的反函数, $f()$ 表示概率密度函数; $F(x_i, x_j)$ 表示第 i 子系统和第 j 子系统的风险因子的联合分布, $F(x_1, x_2, x_3)$ 表示三个子系统的风险因子的联合分布; $c(u_i, u_j) = \frac{\partial C(u_i, u_j)}{\partial u_i \partial u_j}$, $C(u_i, u_j) = F(x_i, x_j)$ 表示第 i 子系统和第 j 子系统的保证率的联合分布; $c(u_1, u_2, u_3) = \frac{\partial C(u_1, u_2, u_3)}{\partial u_1 \partial u_2 \partial u_3}$, $C(u_1, u_2, u_3) = F(x_1, x_2, x_3)$ 表示三个子系统的保证率的联合分布; 第一子系统、第二子系统和第三子系统分别表示梯级水库中的三个子系统; $i, j \in \{1, 2, 3\}$, 且 $i \neq j$ 。

3、如权利要求1所述的基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法, 其特征在于, 所述梯级水库中, 供电子系统的风险因子为所述梯级水库上游区间河道外供水流量, 发电子系统的风险因子为所述梯级水库对应水电站的水力发电量, 环境子系统的风险因子为所述梯级水库下游区间河道内生态流量变异系数。

4、如权利要求1所述的基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法, 其特征在于, 所述步骤(2)中, 求解所述多目标优化调度模型, 所采用的求解方法为非支配排序遗传算法。

5、如权利要求1所述的基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法, 其特征在于, 所述步骤(3)中, 根据三个子系统的风险因子的边缘分布, 分别构建供水期和汛期所述梯级水库的多维风险因子的多维时空联合分布, 所采用的联合分布函数为Copula函数。

6、如权利要求 1-5 任一项所述的基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法，其特征在于，还包括：

根据梯级水库处于供水期还是汛期，确定相应的综合风险评估模型后，利用所述综合风险评估模型，根据所述梯级水库中两个子系统的风险水平，评估其余子系统的风险水平。

7、如权利要求 1-5 任一项所述的基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法，其特征在于，还包括：

利用相关系数分别计算所述梯级水库的三个子系统中，每两个子系统之间的相关程度的量化值。

8、如权利要求 7 所述的基于互馈关系解析的梯级水库风险评估方法，其特征在于，还包括：对于任意两个子系统，根据它们之间的相关程度的量化值所属的区间，判断这两个子系统之间的相关水平。

9、一种基于互馈关系解析的梯级水库风险评估系统，其特征在于，包括：多目标优化调度模型建立模块、风险因子获取模块、联合分布建立模块以及综合风险评估模型建立模块；

所述多目标优化调度模型建立模块，用于以水库上游区间河道外供水量最大、水库对应水电站水力发电量最大以及水库下游区间河道内生态流量变异程度最小为目标，以水量平衡约束和边界约束为约束条件，建立梯级水库的多目标优化调度模型；

所述风险因子获取模块，用于求解所述多目标优化调度模型，得到非劣解集，并从中选取 N 个解，利用每一个解中的参数分别计算所述梯级水库中供水子系统、发电子系统和环境子系统的风险因子；风险因子用于表征子系统的风险水平；

所述联合分布建立模块，用于对于每一个子系统，以每一个解所对应的风险因子为样本点，建立对应子系统的风险因子的边缘分布，并根据三个子系统的风险因子的边缘分布，分别构建供水期和汛期所述梯级水库的

多维风险因子的多维时空联合分布；

所述综合风险评估模型建立模块，用于根据所述多维时空联合分布，利用条件熵建立所述梯级水库的综合风险评估模型，用于定量评估供水子系统、发电子系统和环境子系统互馈协变作用下的梯级水库的综合风险；

其中，N 为正整数。

10、如权利要求 9 所述的基于互馈关系解析的梯级水库风险评估系统，其特征在于，还包括：风险评估模块；

所述风险评估模块，用于根据梯级水库处于供水期还是汛期，确定相应的综合风险评估模型后，利用所述综合风险评估模型，根据所述梯级水库中两个子系统的风险水平，评估其余子系统的风险水平。

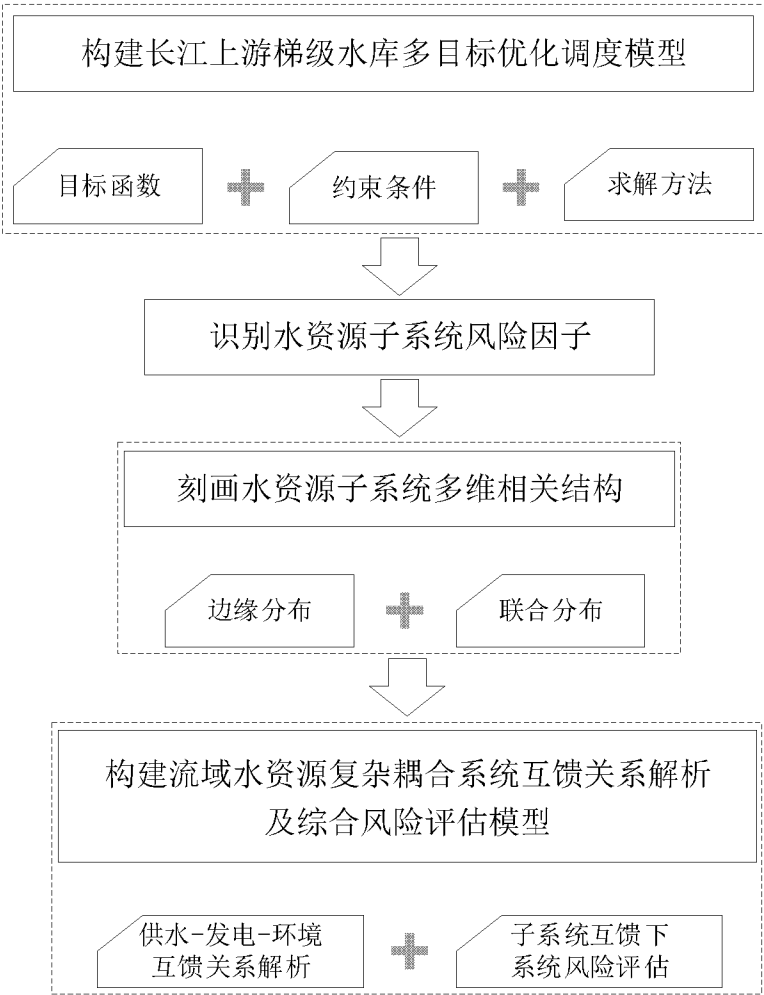
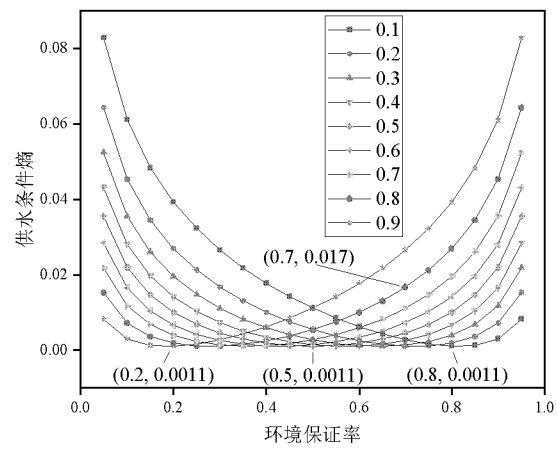
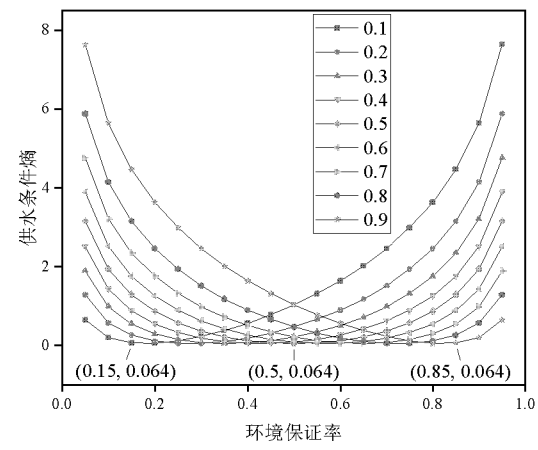


图 1



(a)



(b)

图 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/119824

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06Q 10/04(2012.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06Q

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI, EPODOC, CNKI, CNPAT: 水库, 梯级, 多目标, 风险, 调度, 环境, 供水, reservoir, ladder, multiobjective, risk, dispatch, environment, water, supply

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 111461421 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 28 July 2020 (2020-07-28) claims 1-10	1-10
X	李克飞 (LI, Kefei). "水库调度多目标决策与风险分析方法研究 (Study on Methods of Multi-objective Decision Making and Risk Analysis in Reservoir Operation)" 中国博士学位论文全文数据库 (工程技术II辑) (Master's Dissertation of South China University of Technology, Engineering Science & Technology II), No. 11, 15 November 2013 (2013-11-15), pp. 64-97	1, 3-10
A	CN 110322123 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 11 October 2019 (2019-10-11) entire document	1-10
A	CN 108695902 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 23 October 2018 (2018-10-23) entire document	1-10
A	US 2019354873 A1 (PESCARMONA, Lucas) 21 November 2019 (2019-11-21) entire document	1-10



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

14 December 2020

Date of mailing of the international search report

06 January 2021

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/119824

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	111461421	A	28 July 2020	None			
CN	110322123	A	11 October 2019	None			
CN	108695902	A	23 October 2018	None			
US	2019354873	A1	21 November 2019	BR	102019003180	A2	10 September 2019
				AR	109623	A1	09 January 2019
				CO	2018010363	A1	30 September 2019
				JP	2019194424	A	07 November 2019
				EP	3534187	A2	04 September 2019
				MX	2018004740	A	18 October 2019

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/119824

A. 主题的分类 G06Q 10/04 (2012.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类		
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) G06Q 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) WPI, EP0DOC, CNKI, CNPAT: 水库, 梯级, 多目标, 风险, 调度, 环境, 供水, reservoir, ladder, multiobjective, risk, dispatch, environment, water, supply		
C. 相关文件		
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 111461421 A (华中科技大学) 2020年 7月 28日 (2020 - 07 - 28) 权利要求1-10	1-10
X	李克飞. “水库调度多目标决策与风险分析方法研究” 中国博士学位论文全文数据库 (工程科技II辑), 第11期, 2013年 11月 15日 (2013 - 11 - 15), 第64-97页	1, 3-10
A	CN 110322123 A (华中科技大学) 2019年 10月 11日 (2019 - 10 - 11) 全文	1-10
A	CN 108695902 A (华中科技大学) 2018年 10月 23日 (2018 - 10 - 23) 全文	1-10
A	US 2019354873 A1 (PESCARMONA, Lucas) 2019年 11月 21日 (2019 - 11 - 21) 全文	1-10
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。		
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件		
国际检索实际完成的日期 2020年 12月 14日		国际检索报告邮寄日期 2021年 1月 6日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		受权官员 胡平 电话号码 86-(10)-53961335

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/119824

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	111461421	A	2020年 7月 28日	无			
CN	110322123	A	2019年 10月 11日	无			
CN	108695902	A	2018年 10月 23日	无			
US	2019354873	A1	2019年 11月 21日	BR	102019003180	A2	2019年 9月 10日
				AR	109623	A1	2019年 1月 9日
				CO	2018010363	A1	2019年 9月 30日
				JP	2019194424	A	2019年 11月 7日
				EP	3534187	A2	2019年 9月 4日
				MX	2018004740	A	2019年 10月 18日