

# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102155938 A

(43) 申请公布日 2011. 08. 17

(21) 申请号 201110086388. 8

(22) 申请日 2011. 04. 07

(71) 申请人 武汉大学

地址 430072 湖北省武汉市武昌区珞珈山武汉大学

(72) 发明人 刘攀 郭生练

(74) 专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务所(特殊普通合伙) 42222

代理人 张火春

(51) Int. Cl.

G01C 13/00(2006. 01)

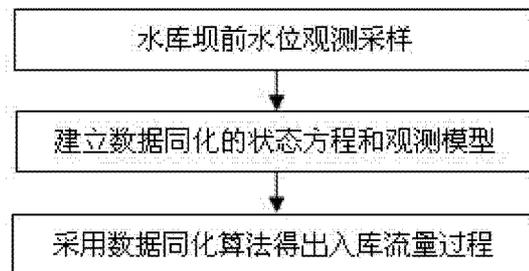
权利要求书 1 页 说明书 5 页 附图 2 页

## (54) 发明名称

一种反推水库入库流量过程的测算方法

## (57) 摘要

本发明公开了一种反推水库入库流量过程的测算方法,包括以下步骤:步骤 1,通过水库坝前水位观测采样获得水库水位和出库流量信息;步骤 2,根据步骤 1 获得的信息建立数据同化的状态模型和观测模型;步骤 3,根据步骤 2 得到的状态模型和观测模型,采用数据同化算法推求水库入库流量过程。本发明方法能够进行水库入库流量的推求的应用,与现有技术相比,本发明方法能保证水库入库流量的光滑,避免流量出现负值等异常数据;方法也可能提供分钟时段步长的入库流量过程,更如实地反映洪峰信息;另外,本发明方法对水库坝上水位计的精度要求降低,节约了水位测站建设管理成本。



1. 一种反推水库入库流量过程的测算方法,其特征在於,包括以下步骤:

步骤 1,通过水库坝前水位观测采样获得水库水位和水库出库流量信息;

步骤 2,根据步骤 1 获得的信息建立数据同化的状态模型和观测模型;

其中,

所述的状态模型为:

$I_i = I_{i-1} + \varepsilon$ 、 $V_i = V_{i-1} + (I_i - O_i - Q_{\text{损}})\Delta t$ ,  $I_i$ 、 $I_{i-1}$  分别为第  $i$ 、 $i-1$  时段的水库入库流量,  $\varepsilon$  为均值为 0 的正态分布误差,  $V_i$ 、 $V_{i-1}$  分别为第  $i$ 、 $i-1$  时段的水库蓄水量,  $O_i$  为第  $i$  时段的水库出库流量,  $Q_{\text{损}}$  为水库的损失流量,  $\Delta t$  为计算时段步长;

所述的观测模型为:  $Z_i = f(V_i) + \gamma$ ,  $Z_i$  为水库观测水位,函数  $f(x)$  表示水位~库容关系,  $\gamma$  为均值为 0 的正态分布误差;

步骤 3,根据步骤 2 得到的状态模型和观测模型,采用数据同化算法推求水库入库流量过程。

2. 根据权利要求 1 所述的反推水库入库流量过程的测算方法,其特征在於:

所述步骤 4 中的数据同化算法为卡尔曼滤波算法。

3. 根据权利要求 1 所述的反推水库入库流量过程的测算方法,其特征在於:

所述步骤 4 中的数据同化算法为粒子滤波算法。

4. 根据权利要求 1 所述的反推水库入库流量过程的测算方法,其特征在於:

所述步骤 4 中的数据同化算法为有约束的数据同化算法。

## 一种反推水库入库流量过程的测算方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及水文测量技术领域,特别是涉及一种反推水库入库流量过程的测算方法。

### 背景技术

[0002] 水库实际入库流量是开展水库水文预报、水库调度等工作的基础性资料。例如,在编制水库水文预报方案时,水库实际入库流量作为已知数据,是水文模型参数率定的“准绳”,也是评价预报方案效率和精度级别的“标尺”,但水库实际入库流量估计中存在的误差给水文预报工作带来了极大难度;在水库调度中,水库入库流量是最基本的输入条件,水库洪水调节演算、水库调度图的编制以及水库调度经济评价等均以水库入库流量资料为基础,因此精准的入库流量资料也是正确开展水库调度的基石。

[0003] 目前水库入库流量主要是采用基于水量平衡方程的反演方法来进行测算,该方法根据水库坝前实测水位和出库流量观测资料,利用水库水量平衡方程

$$I_t = Q_t + \frac{V_{t+1} - V_t}{\Delta t} + Q_{\text{损}}$$

来反推(反演)入库洪水流量,上述公式中:

$\Delta t$  为选取的计算时段步长; $I_t$  为时段内平均入库流量; $Q_t$  为时段  $t$  内的平均出库流量,可采用闸门开度和机组出力等数据计算获得; $V_{t+1}$ 、 $V_t$  为  $t+1$ 、 $t$  时段的水库蓄水量; $Q_{\text{损}}$  为由于蒸发、渗漏等损失的平均流量,根据实际情况  $Q_{\text{损}}$  可取常数或忽略不计。

[0004] 在上述基于水量平衡方程反推入库流量的方法中,计算时段步长  $\Delta t$  的选择,对推求的入库流量过程形状和洪峰均有显著的影响<sup>[1]</sup>: $\Delta t$  选择的过长会使洪水过程线坦化,洪峰变小; $\Delta t$  选择的过短则易使洪水过程线出现锯齿状,甚至出现负值。导致入库流量出现锯齿状“波动”的主要原因如下:

1) 水位观测误差放大效应<sup>[2]</sup>:受目前水位观测技术的限制和风浪的影响,水位观测数据肯定存在一定误差,但当水库库容较大、计算时段较短时,即使微小的误差也足以产生很大的入库流量计算误差。例如三峡水库,在水库水位 170m 处,即使 1cm 的水位观测误差,换算成静库容误差约 9,400,000m<sup>3</sup>,如果计算时段步长取 1h,换算成入库流量则误差可达 2600m<sup>3</sup>/s。这样导致的后果是,对于入库流量过程易出现锯齿状波动,甚至出现负值等不合理现象;

2) 水库存在动库容使得坝前水位代表性不强:例如三峡水库属于典型的河道型水库,上至朱沱、下至宜昌三斗坪坝址,全长 700km,上下游水位落差达 30m,因此库区任何水位站的水位都不能准确反映三峡水库的水位变化过程<sup>[3]</sup>。水库动库容的大小不仅与入流过程有关,而且还与水库出流过程相联系。当水库闸门开启时,坝前水位下降快,形成“漏斗”状;当闸门关闭时,坝前流速为零,坝前水位上翘;

3) 其他误差的影响:包括如水位库容曲线、溢洪道泄流能力曲线以及发电机组出力特

征曲线等水库特征曲线误差,以及如发电机组负荷、泄流闸门开度等实测信息采集误差等。

[0005] 为克服水库入库流量的锯齿状“波动”,传统方法是选择较长的计算时段步长以减小误差放大效应,该方法由于坦化了洪水过程,难以如实反映洪峰等信息。此外,国内外学者还开展了流量过程、水位过程以及库容过程等进行平滑处理方法,以及动库容方法等研究工作。平滑方法存在如下问题<sup>[3-4]</sup>:无法建立水位测量误差与入库流量波动之间的定量关系,存在较大的主观性。而动库容方法需要较多的水位观测站,且不能测算较短时段(如几分钟)的入库流量。

[0006] 文中涉及的参考文献如下:

[1] 郭生练. 水库调度综合自动化系统[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000.

[2] 包为民. 水文预报(第四版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

[3] 王世策, 胡晓勇. 大型水库计算入库流量波动过大问题分析[J]. 安徽水利水电职业技术学院学报, 2010, 10(3): 19-21.

[4] 唐海华, 陈森林, 赵云发, 陈忠贤. 三峡水库入库流量计算方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2008, (4): 26-27.

## 发明内容

[0007] 针对现有技术存在的不足,本发明提出了一种能充分利用观测水位信息、且能避免水库入库流量的锯齿状波动的反推水库入库流量过程的测算方法。

[0008] 为解决上述技术问题,本发明采用如下技术方案:

一种反推水库入库流量过程的测算方法,包括以下步骤:

步骤 1,通过水库坝前水位观测采样获得水库水位和水库出库流量信息;

步骤 2,根据步骤 1 获得的信息建立数据同化的状态模型和观测模型:

其中,

所述的状态模型为:  $I_i = I_{i-1} + \varepsilon$ 、 $V_i = V_{i-1} + (I_i - O_i - Q_{\text{损}})\Delta t$ ,  $I_i$ 、 $I_{i-1}$  分别为第  $i$ 、 $i-1$  时段的水库入库流量,  $\varepsilon$  为均值为 0 的正态分布误差,  $V_i$ 、 $V_{i-1}$  分别为第  $i$ 、 $i-1$  时段的水库蓄水量,  $O_i$  为第  $i$  时段的水库出库流量,  $Q_{\text{损}}$  为水库的损失流量,  $\Delta t$  为计算时段步长;

所述的观测模型为:  $Z_i = f(V_i) + \gamma$ ,  $Z_i$  为水库观测水位,函数  $f(x)$  表示水位~库容关系,  $\gamma$  为均值为 0 的正态分布误差;

步骤 3,根据步骤 2 得到的状态模型和观测模型,采用数据同化算法推求出水库入库流量过程。

[0009] 上述步骤 4 中的数据同化算法为卡尔曼滤波算法或粒子滤波算法。

[0010] 上述步骤 4 中的数据同化算法为有约束的数据同化算法,采用该类算法能避免入库流量出现负值或超出流域物理上界。

本发明利用入库流量过程具有连续性这一性质,可以选取较短的计算时段步长,建立入库流量的状态方程;同时考虑水库坝前实测水位的误差,建立观测方程;基于状态方程和观测方程采用数据同化技术来推求较光滑的入库流量,以得到避免锯齿状波动的水库分

钟级入库流量过程。本发明方法能够进行水库入库流量的推求的应用。

[0011] 与现有技术相比,本发明具有以下优点和有益效果:

- 1) 现有技术一般仅能计算水库每小时的入库流量,而本发明方法可测算水库的每分钟的入库流量及其分布,更能如实地反映洪峰信息;
- 2) 现有技术难以避免水库入库流量的锯齿状波动,本发明方法通过充分考虑入库流量的连续性特征,保证了水库入库流量的光滑;
- 3) 本发明方法对水库坝上水位计的数量和精度要求降低,节约了水位测站建设管理成本;甚至对于浮子式水位计可在不设置水位井的情况下,也能基本满足生产需求;
- 4) 本发明中的数据同化算法可采用有约束的数据同化算法,采用该类算法还能避免入库流量出现负值或超出流域物理上界。

### 附图说明

[0012] 图1为本发明方法的流程图;

图2为采用传统方法和本发明方法测算水库入库流量过程的对比;

图3为采用卡尔曼滤波算法推求水库入库流量过程的流程图。

### 具体实施方式

[0013] 本发明逆传统方法,可以选取较短的计算时段步长(几秒~几分钟)来推求水库入库流量,这样不仅可以充分利用所有观测水位信息,而且可建立入库流量的连续性方程(即本时段入库流量近似等于前一时段入库流量)作为状态方程;同时考虑水库坝前观测水位的误差,建立观测方程;基于状态方程和观测方程采用卡尔曼滤波、粒子滤波等数据同化技术进行状态(入库流量)估计,得到避免锯齿状波动的水库入库流量过程。

[0014] 下面通过实施例,并结合附图,对本发明的技术方案做进一步具体说明。

[0015] 附图1为本发明的反推水库入库流量过程的测算方法的流程图,方法逆传统方法,可以选取较短的计算时段步长(几秒~几分钟)计算,具体包括以下步骤:

步骤1,水库坝前水位观测采样:

采集水库坝前观测水位信息,获得第*i*时段的水位信息 $Z_i$ ;采用采集的机组发电出力数据和机组特征曲线推求水库发电流量;采用采集的闸门开度数据和闸门泄流曲线推求水库的泄洪流量;将发电流量和泄洪流量求和得到第*i*时段水库出库流量数据 $O_i$ ;水库因蒸发泄漏等损失的水量 $Q_{ev}$ 为常数,一般忽略不计。

[0016] 步骤2,根据步骤1获得的信息建立数据同化的状态模型和观测模型:

根据入库流量 $I_i$ 的连续性,建立如下状态方程:

$$I_i = I_{i-1} + \varepsilon \quad (1)$$

$$V_i = V_{i-1} + (I_i - O_i - Q_{ev})\Delta t \quad (2)$$

其中:

$I_i$ 、 $I_{i-1}$ 分别为第*i*、*i-1*时段的水库入库流量;

$\varepsilon$  为均值为 0 的正态分布误差, 方差为  $Q$ ,  $Q$  根据计算时段步长的流域特性进行选取, 一般来说, 计算时段步长越长,  $Q$  取值越大;

$V_i, V_{i-1}$  分别为第  $i, i-1$  时段的水库蓄水量;

$O_i$  为第  $i$  时段的水库出库流量;

$Q_{损}$  为水库的损失水量, 本实施例中将其忽略不计;

$\Delta t$  为计算时段步长,  $\Delta t$  选取的越短越好, 更加有利于充分利用水位信息, 所以本实施例中计算时段步长  $\Delta t$  的选取范围为几秒钟至几分钟。

[0017] 所建立的观测模型如下:

$$Z_i = f(V_i) + \gamma$$

(3)

其中:

$Z_i$  为第  $i$  水库观测水位;

函数  $f(x)$  表示水库的水位~库容关系;

$\gamma$  为均值为 0 的正态分布误差, 方差为  $R$ ,  $R$  根据水位计精度估计进行选取。

[0018] 步骤 3, 根据步骤 2 得到的状态模型和观测模型, 采用数据同化算法推求出水库入库流量过程:

水库入库流量过程可采用卡尔曼滤波算法 (包括其改进算法, 如自适应卡尔曼滤波、集合卡尔曼滤波算法等)、粒子滤波算法等得到, 下面将以卡尔曼滤波算法为例来说明本步骤, 具体如下 (计算流程如图 3):

(1) 给定协方差矩阵  $P_{00}$  初始值、 $Q$ 、 $R$ 、 $V_{00}$ 、 $I_{00}$ , 其中, 本实施例中  $P_{00}$  的初始值取 10;  $Q$  可取平均入库流量的 1~10%;  $R$  取 0.001~0.02;  $V_{00}$  取  $i=0$  时的水库蓄水量;  $I_{00}$  取  $i=0$  时的水库入库流量的估计值;

(2) 按下列公式计算增益值  $k_i$  和协方差  $P_{i-1, i}$ ,  $i$  的初始值取 1:

$$P_{i-1} = P_{i-1} + Q \quad (4)$$

$$k_i = \frac{P_{i-1}}{P_{i-1} + R} \quad (5)$$

$$P_i = P_{i-1}(1 - k_i) \quad (6)$$

(3) 采用公式 (1) 和 (2) 计算  $I_{i-1}$  和  $V_{i-1}$ , 然后采用公式 (7) 和 (8) 分别计算第  $i$  时段的水库入库流量  $I_i$  和水库蓄水量  $V_i$ :

$$I_i = I_{i-1} + k_i(Z_i - f(V_i)) \quad (7)$$

$$V_i = V_{i-1} + k_i(Z_i - f(V_i)) \quad (8)$$

(4) 如果  $i$  小于时段个数, 则令  $i=i+1$ , 重复步骤 (2)~(3), 计算下一时段  $i+1$  的入库流量; 否则结束。

[0019] 本步骤还可以采用有约束的数据同化算法来测算水库的入库流量过程,采用该类算法能避免入库流量出现负值或超出流域物理上界。

[0020] 图 2 所示为采用传统方法和本发明方法测算水库入库流量过程的对比,传统方法受制于误差放大效应,图 2 中传统方法选取的计算时间步长以小时为单位(小时级),难以如实的反应洪峰信息,并需要对得到的入库流量过程采用经验或半经验的主观方法修匀;而本发明方法选取的计算时间步长很短,以分钟为单位(分钟级),除了更能如实反应洪峰信息外,还可客观得到光滑的入库流量过程。

对采用上述发明方法得到的入库流量过程,可转换成其他时段(如小时级)的入库流量过程(如时段内平均),以满足各类生产、科研需求。

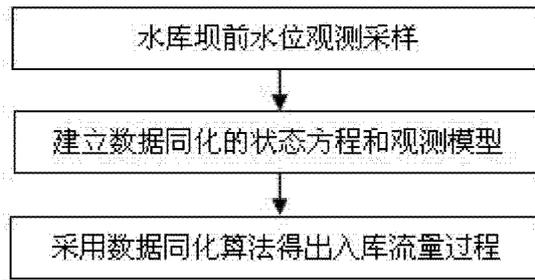


图 1

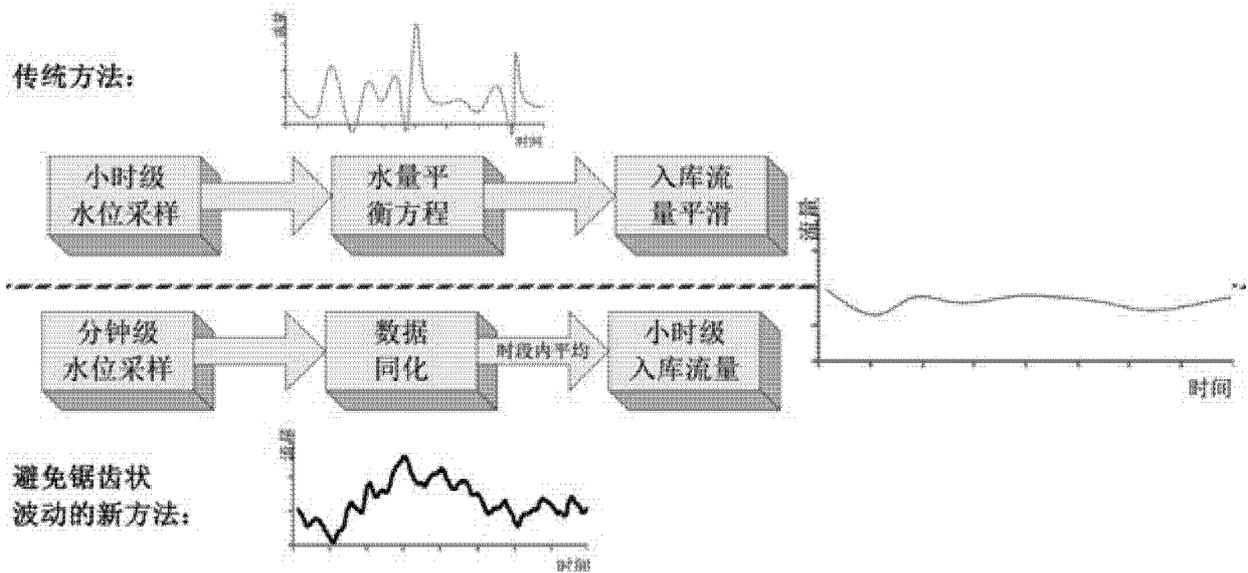


图 2

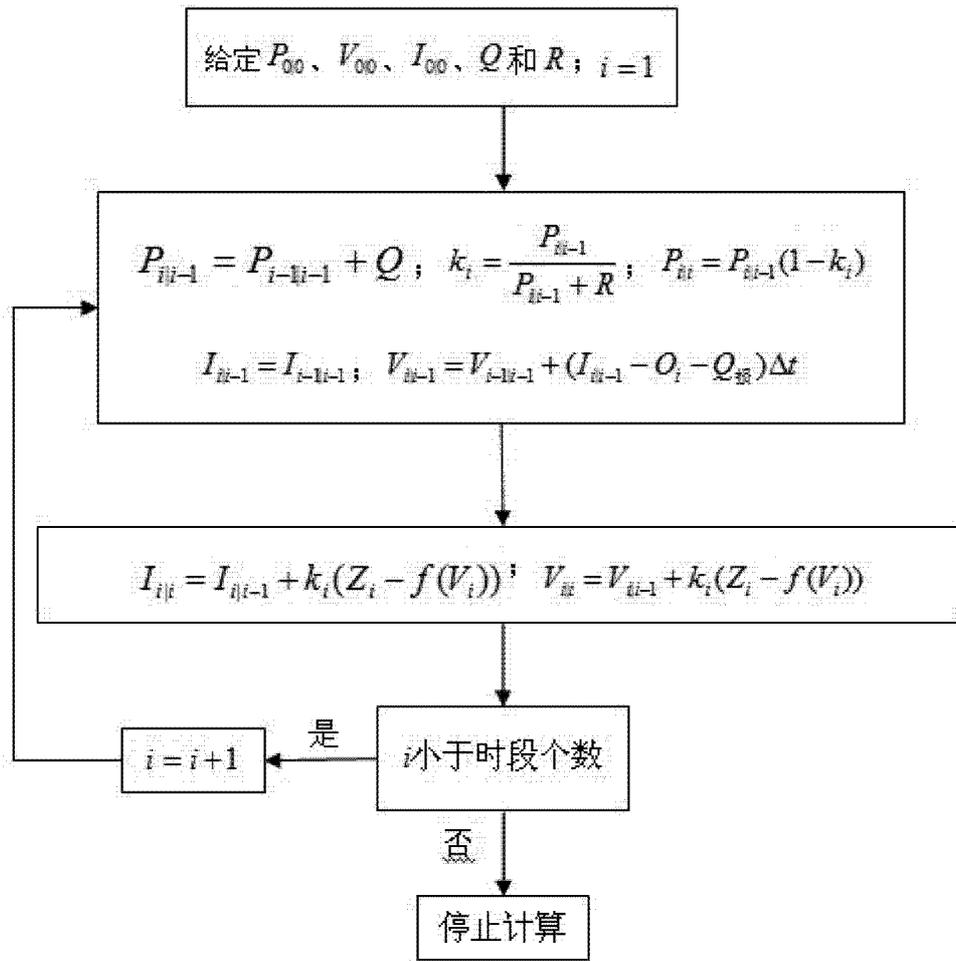


图 3