

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222168

# 沙坪二级水电站河道型水库超短期水量平衡计算

汪广明<sup>1</sup>,高翔<sup>2</sup>,王孝群<sup>3,4</sup>,张钰彬<sup>3,4</sup>,龙岩<sup>3,4</sup>,王超<sup>5</sup>,何滔<sup>1</sup>,高宏雨<sup>3,4</sup>

- (1. 国能大渡河沙坪发电有限公司, 四川 乐山 614300; 2. 广州珠科院工程勘察设计有限公司, 广东 广州 510610;  
3. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 4. 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038;  
5. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 河道型水库超短期水量平衡模拟是支持水库运行的关键,但计算结果产生锯齿状震荡,通过延长模拟时间尺度,确认计算误差是由坝前水位波动所致。在引起坝前水位波动的各因素中,以负荷变化量为例,修正了由于负荷变化量所导致的水量平衡计算误差。提出了基于一维水动力的河道型水库超短期水量平衡算法,该算法建立河道—库区—一维水动力模型,推求库区平均水位代替坝前水位精确计算出库容,从而消除了由于坝前水位波动引起的锯齿状误差。计算结果表明,修正负荷变化量的影响后,可有效提高模拟精度,基于一维水动力的河道型水库超短期水量平衡算法已消除了锯齿状误差,模拟精度较高。

**关键词:** 超短期水量平衡; 沙坪二级水电站; 负荷变化量; 一维水动力

中图分类号: TV68

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)09-0023-05

## 1 概况

大渡河沙坪二级水电站于2018年9月7日实现全投,上邻枕头坝一级水电站,下接龚嘴水电站。电站死水位550 m,正常蓄水位554 m,调节库容 $585 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,水库回水距离约12 km,为典型的河道型水库<sup>[1-2]</sup>。受枕头坝一级水电站下泄流量无规律变化、自身调节库容小、负荷约束等多重因素影响,库区水位在短时间内就会发生剧烈变动,水量平衡模拟时间尺度太长已不能满足电站计算需求<sup>[3-4]</sup>。鉴此,本文在深入分析超短期水量平衡锯齿状误差的基础上,构建了一种基于一维水动力的河道型水库超短期水量平衡算法,建立了河道—库区—一维水动力模型,利用库区各断面水位计算得到平均水位代替坝前水位代入超短期水量平衡计算出库流量,并与监测入库流量对比分析。计算结果表明,该算法能有效消除锯齿状误差,更可准确计算入库流量,模拟精度较高。

## 2 超短期水库水量平衡计算及误差分析

### 2.1 水量平衡方法

在一定时段内,入库流量与出库流量之差等于水库的需水变量<sup>[5]</sup>。水库的水量平衡表达式为:

$$W_r + W_q = W_p + W_a + W_i + W_e + W_d + W_y + \Delta W \quad (1)$$

式中, $W_r$ 为时段内水库的入库水量; $W_q$ 为时段内控制站至坝前的区间产流量; $W_p$ 为时段内机组发电用水水量; $W_a$ 为时段内水库弃水(溢流)水量; $W_i$ 为机组停机备用时的漏水量; $W_e$ 为时段内水库蒸发损失水量; $W_d$ 为时段内坝体渗漏损失水量; $W_y$ 为时段内水库鱼道过流流量; $\Delta W$ 为时段内水库蓄水变量。

水库水量平衡中各个水量因子,可根据现有监测数据计算得出。调用机组NHQ曲线计算出机组发电流量,调用闸门开度泄流曲线计算弃水水量,调用水库库容曲线计算获得库容差流量(虚拟流量)。在超短期水量平衡计算时,不考虑蒸发量、渗漏量。

沙坪二级电站距离上一级枕头坝电站距离较近,区间汇流面积较小,且时长较短,选择非汛期无降雨时段进行计算,不考虑区间汇流<sup>[6]</sup>。因此可直接采用枕头坝下泄流量作为沙坪二级电站监

收稿日期: 2022-10-17,修回日期: 2022-11-18

基金项目: 河北省自然科学基金—创新研究群体项目(E2020402074)

作者简介: 汪广明(1993-),男,研究方向为电力信息化、水电监控与通信,E-mail: gmwangsc@163.com

通讯作者: 王超(1989-),男,博士、高级工程师,研究方向为水库优化调度,E-mail: 435630821@qq.com

测入库流量,与沙坪二级电站通过水量平衡计算得到的入库流量作为对比。

由水量平衡可知,推测的入库流量  $V_1$  的计算公式为:

$$V_1 = \frac{W_p + W_a + W_i + W_e + W_d + \Delta W}{\Delta t} \quad (2)$$

式中,  $\Delta t$  为水量平衡的计算时段。

采用纳什效率系数  $E$  查看结果的稳定性:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_0^i - V_1^i)}{\sum_{i=1}^n (V_0^i - \bar{V}_0)} \quad (3)$$

式中,  $V_0^i$  为时段  $t$  时的监测入库流量;  $V_1^i$  为时段  $t$  时的水量平衡推测入库流量;  $\bar{V}_0$  为监测的入库流量的平均值。

纳什效率系数  $E$  取值为负无穷至 1,  $E$  接近 1 表示模式质量好,模型可信度高;  $E$  接近 0, 表示模拟结果接近观测值的平均值水平,即总体结果可信,但过程模拟误差大;  $E$  远远小于 0, 则模型不可信。此处认为当  $E > 0.9$  时,水量平衡模拟计算精度达到要求,其结果可作为其他模型或决策的基础<sup>[7]</sup>。

## 2.2 水量平衡计算结果

使用 2019 年 1 月 31 日 23:55:00 至 2019 年 2 月 11 日 0:00:00 沙坪实测数据进行水量平衡计算,最后求得入库流量。与监测入库流量值相比,计算所得纳什效率系数为 0.756,计算数据见图 1。结果表明,计算得到的入库流量相比于监测入库流量,总体趋势相同,但在某些时刻存在锯齿状震荡,并与监测值相差较大,相差最大时刻流量差值已经超过 1 000  $\text{m}^3/\text{s}$ ,且在某些时刻存在负值。探求锯齿状误差产生的原因并消除误差,是超短期水量平衡研究的主要难点。

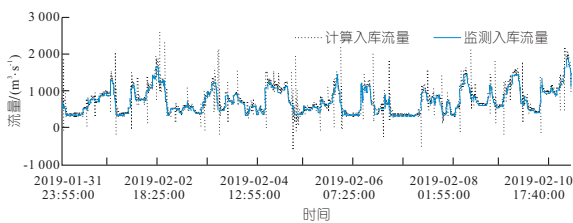


图 1 水量平衡计算结果

Fig. 1 Water balance calculation results

## 3 超短期水库水量平衡原因探究

沙坪二级水电站投产时间较短,全站机组 NHQ 曲线、水库水位库容曲线等数据由试验或实测所得,且在实际生产过程中进行了校验与调整,不会出现较大偏差,能保证计算的准确性和精

度。在数据监测方面,用于监测的仪器运行时间不长,且若存在监测误差,则不会只在某些时段误差极大而在大部分时段准确。若为偶然误差,以坝前水位监测为例,在 5 min 之内,若误差在 0.01 m 以内,计算造成的流量误差约 43 ~ 50  $\text{m}^3/\text{s}$ ,相比于实际流量误差极小,因此锯齿状突起并非由监测误差引起<sup>[8]</sup>。

沙坪二级水电站库区狭长,水位监测点设立在坝前,没有条件在整个库区段设立水位监测点,在超短期水量平衡计算中根据监测水位按静库容曲线查算的水库库容,实际上假定了水库库面为平面,坝前水位平稳不存在波动,能代表水库平均水位,且水库涨落为水平涨落,这与实际情况差距较大,可初步判断是由于坝前水位波动造成了超短期水量平衡的锯齿状误差<sup>[9-10]</sup>。

### 3.1 坝前水位波动对水量平衡精度影响

为验证是否是由于坝前水位波动引起的水量平衡计算误差,考虑将水量平衡计算时间尺度逐步延长,若是由于坝前水位所引起的流量误差,随着时间尺度的加长,则计算水量也较大,此时坝前水位变化所影响的库容水量有限,水量因子  $\Delta W$  所占比例将逐渐减小。达到一定时间尺度后,水量因子  $\Delta W$  可省略,此时应不会出现锯齿状突起,水量平衡模拟精度可达到较高值。

使用 2019 年 1 月 31 日 23:55:00 ~ 2 月 5 日 0:00:00 沙坪实测数据分别进行时间尺度为 5、15、30 min 及 1、3 h 的水量平衡计算,使用 2019 年 2 月 1 日 0:00:00 ~ 4 月 2 日 0:00:00 沙坪实测数据进行时间尺度为 12 h 的水量平衡计算。各时段计算结果见图 2,相对应的纳什效率系数见图 3。

随着水量平衡计算时间尺度的延长,计算入库流量与监测入库流量锯齿状误差的差值逐渐减小,然而范围在逐步加大后减小。纳什效率系数先减小后增大,最后时间步长为 12 h 的水量平衡计算纳什效率系数为 0.989,此时水量平衡模型计算精度较高。

由此可见,当计算时间尺度较长时,水量平衡精度较高,此时水量平衡计算数据误差较小,说明在超短期水量平衡计算过程中所出现的锯齿状突起很有可能是由于坝前水位波动,无法作为水库平均水位,此时查询的静库容曲线无法代表实际库容,从而造成水量平衡误差。

如图 4(a) 所示,水量平衡计算入库流量与监测入库流量差值较大的时刻水位变化值也较大,而流量差值较小的时刻水位变化值也较小,两者

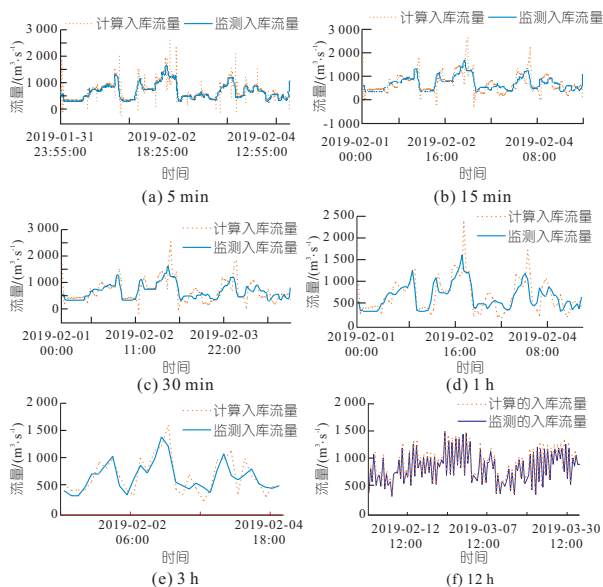


图 2 不同时间尺度下的水量平衡计算入库流量与监测入库流量对比

Fig. 2 Comparison of calculated and monitored inflow of water balance at different time scales

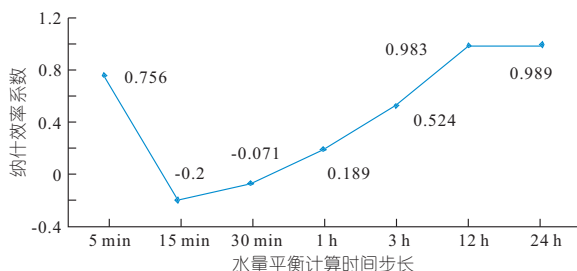


图 3 不同时间长度下水量平衡纳什效率系数

Fig. 3 Nash efficiency coefficient of water balance at different time lengths

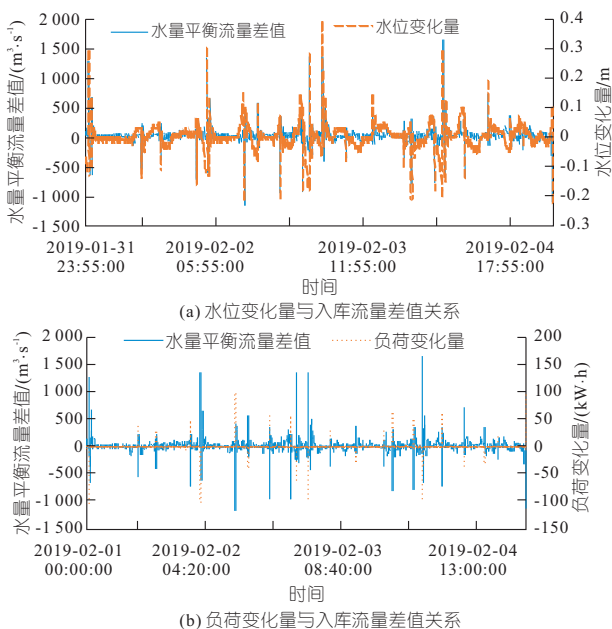


图 4 水位、负荷变化量与入库流量差值关系

Fig. 4 Relationship between water level variation, load variation and inflow flow

吻合度极高,说明水量平衡计算过程中的锯齿状突起就是由于坝上水位波动引起,坝上水位不能代表水库平均水位。由图 4(a)可知,当水位波动在 0.1 m 以上,便会出现锯齿状突起,当水位波动达到 0.3 m 时,水量平衡计算的流量误差能达到 1 500 m<sup>3</sup>/s 以上。

### 3.2 负荷变化对水量平衡精度影响

为探究影响坝前水位波动各因素对超短期水量平衡计算精度的影响过程,以负荷变化量为例,计算每个时刻的负荷变化量、计算入库流量与监测入库流量的差值,见图 4(b)。由图 4(b)可知,当负荷变化较大时,相应时刻水量平衡入库流量差值同样较大,但并非每个水量平衡入库流量差值大的时刻负荷变化量都较大。结合图 4(a)可知,某时刻的坝前水位变化较大时,所对应时刻的负荷变化不一定较大。而当负荷变化较大时总会引起坝前水位变化,从而使得水量平衡计算时出现锯齿状突起。

为计算负荷变化量对于水量平衡计算精度的直接影响,收集非汛期 3 个月(2019 年 1 月 1 日 0:0:00~4 月 20 日 0:00:00)的负荷变化量,并计算水量平衡,得到计算入库流量与监测流量差值,见图 5。如图 5 所示,负荷变化与水量平衡存在  $y = -14.063x + 25.554$  的线性关系,但这种线性关系并不严格。将拟合的线性关系代入水量平衡计算中,通过时段内负荷变化量求得入库流量差值,将差值代入计算得到的入库流量中,得到经过修正的入库流量,并将计算入库流量、修正后入库流量、监测入库流量绘制成图 6。

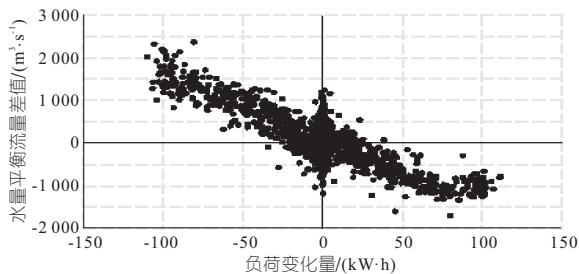


图 5 负荷变化量与水量平衡差值拟合图

Fig. 5 Fitting diagram of difference between load variation and water balance

计算的入库流量纳什效率系数为 0.702,修正后的入库流量纳什效率系数为 0.890。由图 6 可知,修正后的入库流量比未经过修正的计算入库流量,大部分锯齿状突起均经过了修正,但仍存在一些突起未能修正至正确的入库流量,且另一些突起未能进行修正。修正后的入库流量纳什效率系数大幅提高,从 0.756 提高至 0.890。分析

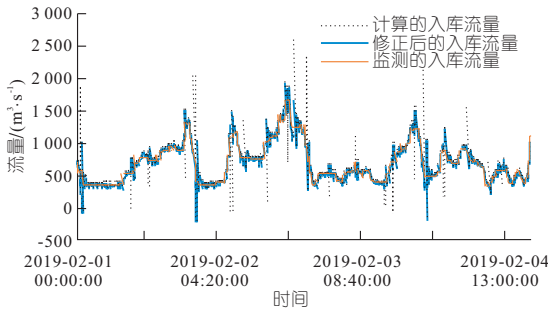


图 6 修正后的入库流量对比图

Fig. 6 Revised inbound flow comparison chart

可知,在某些时刻,若坝前水位受下泄流量变化量影响较大,经过负荷变化量—入库流量差值拟合曲线修正后,效果较好,若坝前水位受其他因素影响较大,则不能修正至正确值或未修正。坝前水位各影响因素呈现出复杂性、非线性、不确定性等特点,若用此方法消除剩余部分的锯齿状误差,不但需确认坝前水位所有影响因素,且需计算这些因素与水量平衡计算误差间准确的非线性关系,计算难度极大。

## 4 基于一维水动力超短期水量平衡计算

利用沙坪二级水电站及其上游枕头坝水电站之间实测断面资料,结合一维水动力水流演进方法,模拟出所有断面水位及其流量,并根据库区断面水位计算出库平均水位,使用平均水位代替坝前水位进行超短期水量平衡计算。

### 4.1 河道一维水动力模型构建

河道一维水流运动的基本控制方程为圣维南方程组。本模型采用收敛速度快、稳定性好的 Preissmann 四点带权隐式差分格式离散圣维南方程组。模型计算起始点为枕头坝坝下至沙坪坝前,中间无支流,选择枕头坝水电站下泄流量及沙坪坝前水位作为一维水动力外边界条件,断面采用实测资料,少数缺失断面进行插值,使用枕头坝下游水位数据对曼宁糙率系数进行校验调整。

### 4.2 计算库区平均水位

一维水动力模型中使用的河道断面资料纵剖面见图 7。如图 7 所示,经实地勘察,并与计算得到的各断面水位进行验算,确定 sec<sub>25</sub>~sec<sub>40</sub> 部分河道为库区段。在计算平均水位过程中,为避免某些偶然因素对某个断面的影响,在采用 sec<sub>25</sub>~sec<sub>40</sub> 断面进行平均水位计算时,除去各断面中最高水位和最低水位,计算其余断面平

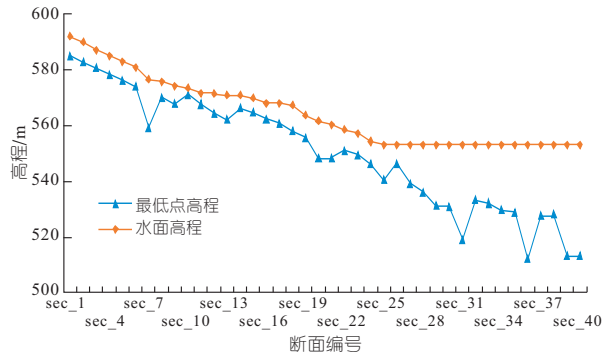


图 7 河道纵断面示意图

Fig. 7 Schematic diagram of longitudinal section of river

均值即为该时段内库区平均水位。

### 4.3 基于一维水动力超短期水量平衡计算结果

将使用平均水位计算超短期水量平衡的方法记做 MCSWBM,将使用坝前水位计算超短期水量平衡的方法记做 WBM。经过计算,WBM 的纳什效率系数为 0.756,而 MCSWBM 的纳什效率系数为 0.955,结果见图 8。由图 8 可知,MCSWBM 计算的入库流量曲线已经不存在突起,成功解决了 WBM 计算结果中出现的锯齿状突起问题。计算结果接近监测值,纳什效率系数达到了 0.955,具有极高准确度,可为水库调度、水库数据检测、水库实时运行决策等方面提供数据支持。

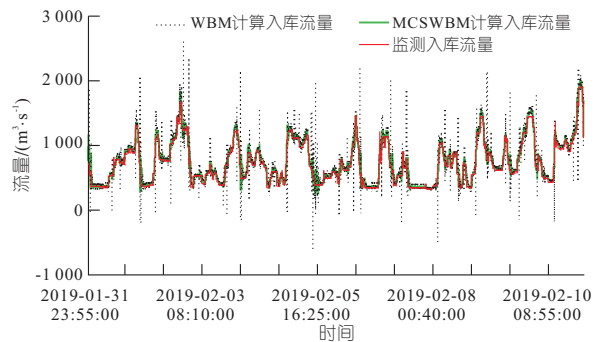


图 8 基于一维水动力超短期水量平衡计算结果

Fig. 8 Calculation results of ultra-short-term water balance based on one-dimensional hydrodynamic force

## 5 结论

a. 将传统水量平衡模型所采用的长时间段更改为超短期,针对水量平衡计算结果中出现的锯齿状突起误差,以负荷变化量为例,揭示坝前水位波动对水量平衡的影响过程,并消除了由于负荷变化量引起的误差。为提高模拟精度,消除所有锯齿状误差,引入一维水动力,计算出库区水位平均值代替坝前水位代入超短期水量平衡计算入库流量,与监测流量相比,不存在锯齿状误差,纳

什效率系数达到 0.955,精度较高。

**b.** 本文采用的超短期水量平衡计算方法简便、可靠、精度较大,对系统其他数据依赖度较低,适用于回水区较长的河道型水库。与传统水量平衡计算时间长度为长时间不同,本文将水量平衡计算时间长度优化至超短期,检验现有监测数据精度与可靠性的同时,也初步探究径流演进规律,为实时优化调度及其他水库运行计算提供了理论基础和数据支持。

**c.** 由于水库正式投入时间不长,部分资料暂时未能完善,未精确计算水量平衡中蒸发量、渗漏损失、鱼道水量等较小流量,并选择未降雨时段以忽略区间来水,资料完善后可进一步提高水量平衡精度。同时,本文仅对河道型水库计算的超短期水量平衡进行分析,针对湖泊型水库,可采用二维水动力模型或增加水位监测点的方式计算出水库平均水位,尚需深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 王孝群,汪文元,龙岩,等.沙坪二级水电站负荷自由调整权对水位控制的作用分析[J].海河水利,2021(3):92-97.
- [2] 汪文元,王孝群,张佳杰,等.沙坪二级水电站闸门

动作频繁原因分析[J].海河水利,2021(3):101-104,124.

- [3] 沈延青,靳少波,白钰.黄河上游唐乃亥水文站与龙羊峡水电站水量不平衡原因分析[J].电网与清洁能源,2014,30(1):117-119,123.
- [4] 唐海华,丁杰.河道型水库动库容问题初探[J].水电与抽水蓄能,2009,33(5):75-78.
- [5] 冯小冲,王银堂,胡庆芳.三参数月水量平衡模型在丹江口水库控制流域的应用[J].水利水电科技进步,2010,30(3):5-7,11.
- [6] 郭爽,龙岩,王孝群,等.沙坪二级水电站短期水位预测与实时调控策略[J].水电能源科学,2022,40(8):83-87.
- [7] 唐鸣,雷晓辉,龙岩,等.基于长短时记忆网络(LSTM)的南水北调中线水位预测[J].中国农村水利水电,2020(10):189-193.
- [8] 杨金标,舒凯,张后来,等.水库水量平衡计算中消除水位跳变影响的过滤算法[J].人民长江,2019,50(8):98-102.
- [9] 张俊,闵要武,陈新国.三峡水库动库容特性分析[J].人民长江,2011,42(6):90-93.
- [10] 芦云峰,谭德宝,梁东业.一种三峡水库动态库容快速准确计算方法(英文)[J].长江科学院院报,2010,27(1):80-85.

## Calculation of Ultra-short-term Water Balance for Channel Reservoir of Shaping Secondary Hydropower Station

WANG Guang-ming<sup>1</sup>, GAO Xiang<sup>2</sup>, WANG Xiao-qun<sup>3,4</sup>, ZHANG Yu-bin<sup>3,4</sup>,  
LONG Yan<sup>3,4</sup>, WANG Chao<sup>5</sup>, HE Tao<sup>1</sup>, GAO Hong-yu<sup>3,4</sup>

(1. CHN ENERGY Dadu River Shaping Power Generation Co., Ltd., Leshan 614300, China;

2. Guangzhou Zhukeyuan Engineering Survey and Design Co., Ltd., Chuangzhou 510610, China;

3. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

4. Key Laboratory of Intelligent Water Resources of Hebei Province, Handan 056038, China;

5. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The ultra-short-term reservoir water balance simulation of channel-type reservoirs is the key to the operation of the reservoir, but the results easily appear sawtooth oscillation. The calculation error is due to the fluctuation of the water level in front of the dam by extending the simulation time scale. Among the factors that cause the fluctuation of the water level in front of the dam, taking the load change as an example, the calculation error of water balance caused by the load change was corrected. An ultra-short-term water balance method for channel-type reservoirs was put forward based on one-dimensional hydrodynamics. The method established a one-dimensional hydrodynamic model of the river-reservoir area, and procured the accurate storage capacity by calculating the average water level instead of the water level in front of the dam, thereby eliminating the jagged error. The calculation results show that the simulation accuracy can be effectively improved after eliminating the influence of load changes. The ultra-short-term water balance method for channel-type reservoirs based on one-dimensional hydrodynamics can eliminate the sawtooth error and achieve high simulation accuracy.

**Key words:** ultra-short-term water balance; Shaping II Hydropower Station; load change; one-dimensional hydrodynamics