

Relationship between Water and Energy for Cascade Hydropower Stations in Upper Reaches of the Yangtze River

Wenting Gong, Pan Liu*

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei
Email: *liupan@whu.edu.cn

Received: Dec. 18th, 2019; accepted: Dec. 31st, 2019; published: Jan. 7th, 2020

Abstract

Hydropower stations convert water energy into electricity. The estimation of hydropower generation of power stations and water resources of basins from each other can be directly implemented in a simple way, which provides a basis for water-energy conversion. The 21 large-scale cascade hydropower stations in upper reaches of the Yangtze River were selected as the case study, and the conventional and deterministic optimization operations were used to simulate reservoir operation, and then the water-energy conversion relationship was established. The results show that: 1) the linear relationship between the outflow and power generation is significant for a single hydropower station; 2) there is a linear relationship between the total water resources of the basin and the total power generation of the cascade hydropower stations and 3) the water energy relationship has a better goodness of fitting when the installed capacity is used as the weight. The proposed method provides a new way to estimate the amount of water resources based on power generation, and to estimate the power generation from water resources.

Keywords

Water-Energy Conversion Relationship, Reservoir Operation, Cascade Reservoir Group

长江上游梯级水电站群的水能宏观关系研究

龚文婷, 刘攀*

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉
Email: *liupan@whu.edu.cn

收稿日期: 2019年12月18日; 录用日期: 2019年12月31日; 发布日期: 2020年1月7日

作者简介: 龚文婷(1995-), 女, 湖北宜昌人, 硕士, 主要研究方向: 水库调度。
*通讯作者。

摘要

水电站可将水能资源转化为电能。揭示宏观的水能关系，可直接实现流域内电站的发电量与水资源量的相互估算，为简单、快捷实现水-能相互转化提供依据。选取长江上游21座大型梯级水电站群为研究对象，分别采用常规调度和确定性优化调度方式，得到模拟调度结果，由此建立了年尺度的水-能转化关系。研究发现：1) 各水电站的出库流量与其发电量线性关系显著；2) 流域总水资源量与梯级水电站群总发电量也存在线性关系；3) 以各水电站总装机容量作为权重，水能关系拟合效果更佳。提出的方法为依据发电量估计水资源量或依据水资源量估算发电量提供了新途径。

关键词

水-能转化关系，水库调度，梯级水电站群

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着环境保护和生态文明建设的稳步推进，清洁能源已逐渐取代传统能源，成为能源发展建设中的重点[1]。水能成本低、获取方式便捷，已成为清洁能源的重要组成部分，而水库调度是提高水资源利用高效的重要手段[2]。提高水能利用率的途径主要有：①充分利用天然径流量，减少弃水，在保证防洪安全的前提下增加发电流量。例如，贾东旭等从优化原理出发，充分利用天然径流量，以减少弃水[3]；②充分提高水库的水头，减少水头损失。如刘心愿等以三峡水库为例，在保证防洪安全的前提下提出提前蓄水方案，以充分减少水头损失，既确保防洪安全又可发挥兴利效益[4]；③减少机电设备中的能量损失[5]。如姚磊等提出水轮发电机增容改造技术，以提高水轮机的水能利用率[6]。

上述研究以提高水能转化的效率为目的，缺乏水量与电能的宏观关系。若能建立宏观各水电站乃至整个流域的水-能转化关系，则可实现流域各水电站的发电量与水资源量的相互估算，为描述水-能纽带关系提供简单快捷的途径[7]。

2. 研究方法

2.1. 水-能关系构建

2.1.1. 单个水电站

在水电站的中长期调度中，水力发电通常采用如下公式进行计算：

$$E = N \cdot t = k \cdot q \cdot h \cdot t \quad (1)$$

式中： E 代表电站所发电能， N 为电站出力， t 为时间长度， k 为水电站的综合出力系数， q 代表发电流量， h 代表净水头。

假设不考虑弃水，出库流量等于发电流量。现对上述公式在 (q_0, h_0) 处进行泰勒展开，简化为如下线性关系[8]：

$$E = k(q_0 \cdot h_0 + h_0(q - q_0) + q_0(h - h_0) + HOT) \cdot t \quad (2)$$

式中： HOT 为高阶项，可忽略不计。

$$E = k(h_0q + q_0h - q_0h_0) \cdot t \quad (3)$$

在年尺度上，尽管在年内水头会有一定幅度的变化，但多年平均水头 h 变化不大，可计为常数，现今 $a = k \cdot h_0$ ， $b = k \cdot q_0 \cdot h - q_0 \cdot h_0$ 则：

$$E = (a \cdot q + b) \cdot t \quad (4)$$

式中： a 、 b 均为与各水电站特性相关的参数，参数 a 为水电站电能转化效率，参数 b 为公式线性化时的截距。

2.1.2. 梯级水电站

基于水电站群的聚合原理，可将流域所有水电站聚合为一个虚拟的水电站[9]。对各电站出力进行累加，并与流域出口流量建立关系，即可推求出适用于整个流域的水 - 能转化关系：

$$E_{\text{总}} = N_{\text{总}} \cdot t = (A \cdot Q + B) \cdot t \quad (5)$$

式中： $N_{\text{总}}$ 为流域各水电站出力之和， A 为流域总的水能转化效率， B 为公式线性化时对应的截距， Q 为流域水资源总量。

以上式为基础，统计各电站发电总量，可反推求流域的出库流量，并以此作流域水资源量。

2.2. 梯级水电站群调度模型

为将上述水能关系的具体化，现采用常规调度和确定性优化调度两种调度方式，对梯级水电站群进行模拟调度，建立流域各水电站出力和出库流量的水 - 能转化关系。

在常规调度中，各水电站可按常规调度图或者简化运行策略进行调度，并综合考虑部分水电站的调度规程要求。

2.2.1. 目标函数

以调度周期内梯级电站的发电量最大为目标，建立梯级水电站群联合发电优化调度模型，目标函数为：

$$E = \max \sum_{k=1}^M E_i \quad (6)$$

式中： k 为水电站编号， M 为水电站个数。

2.2.2. 约束条件

在进行调度时，不论是常规调度还是优化调度，均要考虑以下约束条件：

1) 水量平衡约束：

$$V_{i+1,j} = V_{i,j} + (I_{i,j} - Q_{i,j}) \cdot t \quad (7)$$

式中： i 为时段数， j 为水电站数， $V_{i,j}$ 即为第 j 个水电站在第 i 个时段的库容， $I_{i,j}$ 和 $Q_{i,j}$ 分别为水电站的入库流量和出库流量。

2) 水电站库容约束：

$$VL_{i,j} \leq V_{i,j} \leq VU_{i,j} \quad (8)$$

式中： $VL_{i,j}$ 和 $VU_{i,j}$ 分别为水电站库容的上下限。

3) 水电站出库流量约束：

$$QL_{i,j} \leq Q_{i,j} \leq QU_{i,j} \quad (9)$$

式中： $QL_{i,j}$ 和 $QU_{i,j}$ 分别为水电站出库流量的上下限。

4) 水电站出力约束:

$$PL_{i,j} \leq P_{i,j} \leq PU_{i,j} \quad (10)$$

式中: $PL_{i,j}$ 和 $PU_{i,j}$ 分别为水电站出力的上下限。

5) 非负约束及其他约束。

2.2.3. 模型求解

在优化调度中, 由于上下游梯级水电站间往往具有复杂的水力、电力联系[10]。因此, 梯级水电站的联合调度是一个多约束、高维、动态的非线性问题[11], 考虑到水电站群优化变量较多, 为避免维数灾问题[12], 选取 DPSA (动态规划逐次逼近法) 作为优化算法, 计算梯级水电站群的优化调度结果。

3. 案例分析

3.1. 长江上游梯级水电站群调度

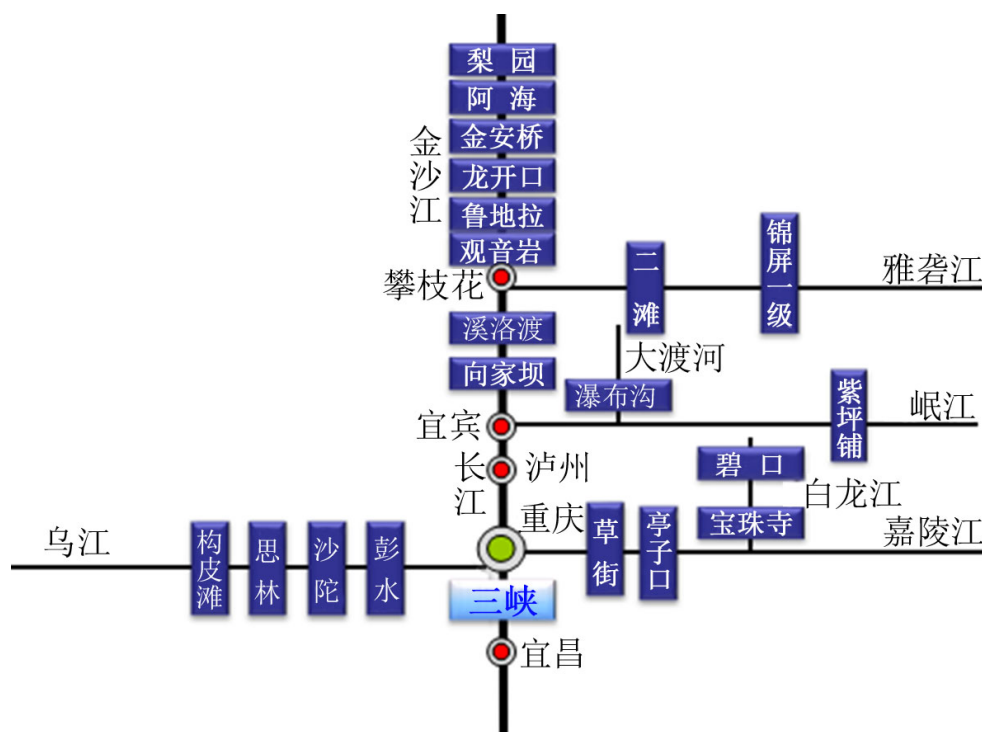


Figure 1. Overview of hydropower stations in the upper reaches of the Yangtze River

图 1. 长江上游水电站群概况

长江上游有着丰富的水力资源[13], 流域内气候温和湿润, 雨量丰沛, 已经建立了一大批梯级水电站群。这些水电站库容大, 调节能力好, 发电量巨大[14]。根据长江上游的水系构成, 可大致分为金沙江干流水系、雅砻江水系、岷江水系、嘉陵江水系、乌江水系等五大板块。本研究选取了五大水系中的 21 座梯级水电站作为研究对象, 总库容达到了 1026.5 亿 m^3 , 各水库分布情况如图 1 所示。

选取 1957~2012 年为计算时段, 以旬为计算时段长进行常规调度和优化调度, 调度结果如表 1 所示。其中设计值为 21 座水电站年设计发电量的累加值。以该设计值为基准, 常规调度的发电增长率为 40.9%, 优化调度较常规调度的发电增长率为 7.6%。调度结果表明: 由于考虑了不同水库间联合调度时的径流补偿, 常规调度及优化调度的效益大幅度提升, 但常规调度和优化调度方式的差异不大(相差 7.9%)。

Table 1. The results of cascade hydropower station group

表 1. 梯级水电站群调度结果

| 调度方式 | 多年平均发电量(亿 kWh) | 发电增长率(%) |
|------|----------------|----------|
| 设计值 | 2207.3 | |
| 常规调度 | 3109.7 | 40.9 |
| 优化调度 | 3356.0 | 7.9 |

3.2. 推求水 - 能转化关系

3.2.1. 单个水电站

1) 以水定电

现以三峡水电站为例, 根据常规调度结果及优化调度结果, 统计年均发电出力 and 年均流量, 以 1957~1986 年作为率定期, 建立水 - 能转化关系。为检验上述水 - 能关系, 选取 1987~2012 年作为检验期, 以三峡水电站年出库流量为输入计算年发电量, 结果如表 2 所示。经观察, 不论采取常规调度还是优化调度, 对应的水 - 能关系线性相关性均较强, 与式(4)的分析结果相符。

Table 2. The power generation and water resources fitting results of the Three Gorges hydropower station

表 2. 三峡水电站发电量及水资源量拟合结果

| 时期 | 调度方式 | 根据出库流量推求发电量 | | | 根据发电量推求出库流量 | | |
|-----|------|-------------------|---------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| | | 调度模拟电量 (亿 kWh) | 水能关系拟合电量 (亿 kWh) | 出库流量拟合误差 (%) | 调度模拟水资源量 (亿 m ³) | 水能关系拟合出库水量 (亿 m ³) | 电量拟合误差 (%) |
| 率定期 | 常规调度 | 901.64 | 902.07 | 0.01 | 4311.27 | 4311.38 | 0.05 |
| | 优化调度 | 937.99 | 938.01 | -0.01 | 4321.60 | 4321.54 | 0.01 |
| 检验期 | 常规调度 | 896.05 | 874.79 | 0.02 | 4109.98 | 4110.74 | -2.37 |
| | 优化调度 | 911.06 | 909.05 | 0.69 | 4152.38 | 4181.01 | -0.22 |

表 3 列出了上游 21 座水电站在不同的调度方式下的特性参数 a 、 b , 结果表明: 除金安桥等个别电站外, 大部分水电站均能建立相关性较强的线性水 - 能关系。

Table 3. The water-energy relationship fitting results of a single hydropower station

表 3. 单个水电站水 - 能关系拟合结果

| 水电站 | 常规调度 | | | 优化调度 | | |
|-----|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | a | b | R^2 | a | b | R^2 |
| 梨园 | 0.02 | 81.06 | 0.6633 | -0.01 | 111.36 | 0.0200 |
| 阿海 | 0.03 | 54.77 | 0.7728 | 0.03 | 54.55 | 0.7810 |
| 金安桥 | -0.01 | 124.66 | 0.0973 | -0.01 | 112.91 | 0.0012 |
| 龙开口 | 0.02 | 50.70 | 0.7338 | -0.01 | 75.28 | 0.0455 |
| 鲁地拉 | 0.02 | 64.13 | 0.6895 | 0.02 | 63.92 | 0.6988 |
| 观音岩 | 0.03 | 90.52 | 0.5831 | 0.03 | 86.53 | 0.6190 |
| 溪洛渡 | 0.03 | 500.82 | 0.1624 | 0.16 | 48.55 | 0.9924 |

Continued

| | | | | | | |
|-----|------|--------|--------|------|--------|--------|
| 向家坝 | 0.02 | 227.20 | 0.6262 | 0.08 | 32.15 | 0.9978 |
| 锦屏 | 0.05 | 130.12 | 0.7013 | 0.06 | 98.70 | 0.7446 |
| 二滩 | 0.04 | 126.28 | 0.6978 | 0.06 | 95.91 | 0.7548 |
| 紫坪铺 | 0.12 | -23.57 | 0.5501 | 0.01 | 10.51 | 0.1878 |
| 瀑布沟 | 0.09 | 54.91 | 0.8963 | 0.14 | 2.15 | 0.9817 |
| 碧口 | 0.03 | 7.71 | 0.8575 | 0.03 | 6.53 | 0.8786 |
| 宝珠寺 | 0.07 | 2.62 | 0.9374 | 0.08 | -0.33 | 0.9848 |
| 亭子口 | 0.04 | 12.02 | 0.8411 | 0.06 | 1.46 | 0.9836 |
| 草街 | 0.01 | 19.32 | 0.5600 | 0.01 | 20.09 | 0.5311 |
| 构皮滩 | 0.13 | 9.13 | 0.8309 | 0.14 | 5.44 | 0.9750 |
| 思林 | 0.04 | 11.89 | 0.8507 | 0.05 | 6.47 | 0.9344 |
| 沙陀 | 0.03 | 15.90 | 0.7366 | 0.04 | 14.61 | 0.7697 |
| 彭水 | 0.03 | 28.73 | 0.7868 | 0.05 | 11.95 | 0.9268 |
| 三峡 | 0.05 | 362.62 | 0.8338 | 0.06 | 252.68 | 0.8652 |

2) 以电定水

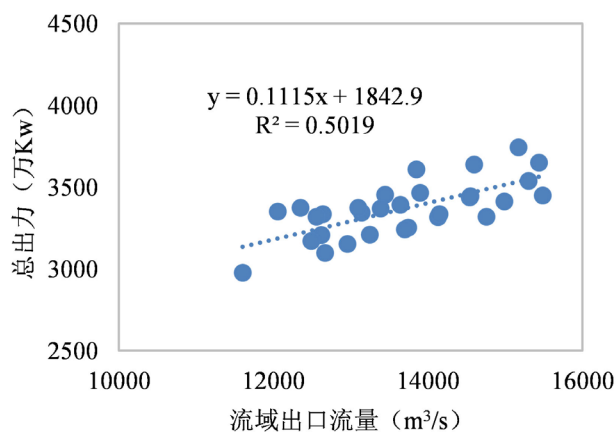
为估计单库水资源量，以三峡水电站为例，建立能 - 水关系。为检验上述能 - 水关系，以三峡水电站出力为计算依据，推求三峡水库的水资源量。计算结果如表 2 所示。结果表明，单库的能 - 水关系拟合误差可控制在 1% 左右，拟和效果较好。因此，可根据单个水电站发电量推求单库水资源量。

3.2.2. 梯级水电站

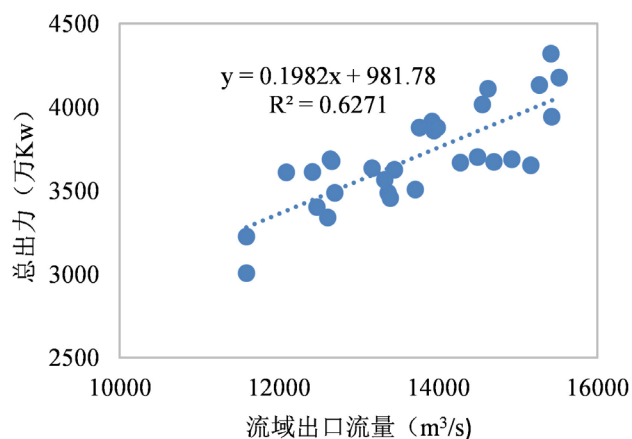
1) 直接拟合

1、以水定电

现以 1957~1986 年作为率定期，将水电站出力进行累加，并以三峡水电站出库流量作为流域出口流量，建立水 - 能关系，如图 2 所示。为检验上述水 - 能关系，选取 1987~2012 年作为检验期，以三峡水电站出库流量为计算依据，代入上述水 - 能关系计算公式中，推求整个流域拟合的年发电量，计算结果如表 4 所示。



(a) 常规调度水 - 能关系



(b) 优化调度水 - 能关系

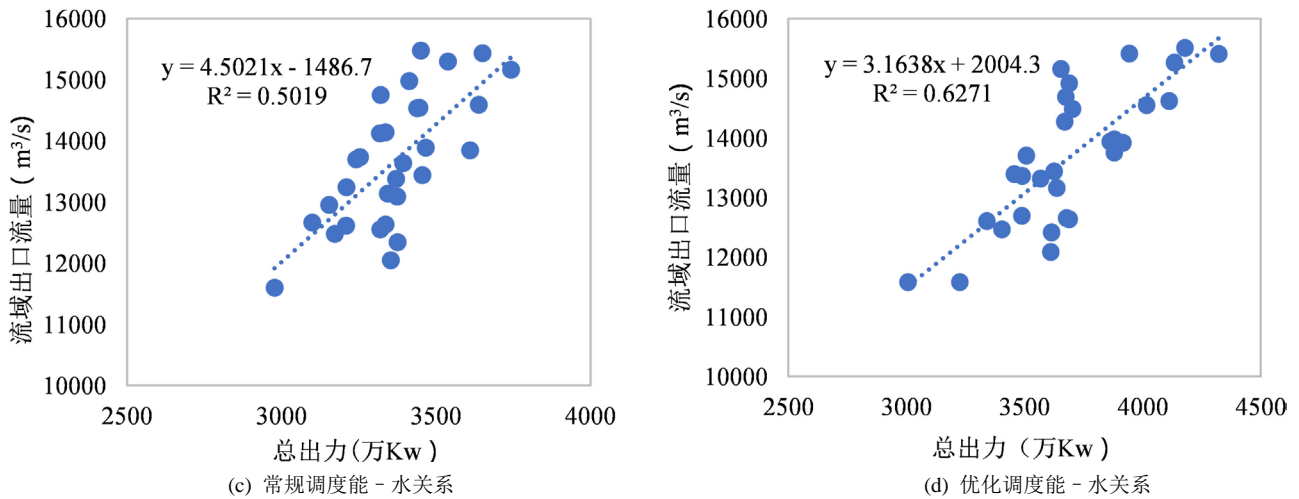


Figure 2. The energy-water relationship calibration results of the hydropower station group

图 2. 水电站群的水 - 能关系率定结果

Table 4. The power generation and water resources fitting result of the hydropower station group

表 4. 水电站群发电量及水资源量拟合结果

| 时期 | 调度方式 | 根据出库流量推求发电量 | | | 根据发电量推求水资源量 | | |
|-----|------|-------------------|---------------------|---------------|--------------------|----------------------|-----------------|
| | | 调度模拟电量 (亿 kWh) | 水能关系拟合电量 (亿 kWh) | 电量拟合误差 (%) | 调度模拟水资源量 (亿 m³) | 水能关系拟合水资源量 (亿 m³) | 水资源量拟合误差 (%) |
| 率定期 | 常规调度 | 2949.33 | 2949.68 | 0.01 | 4311.27 | 4311.19 | -0.01 |
| | 优化调度 | 3239.39 | 3239.32 | -0.01 | 4321.60 | 4321.64 | 0.01 |
| 检验期 | 常规调度 | 2910.07 | 2887.33 | -0.78 | 4109.98 | 4247.56 | 3.35 |
| | 优化调度 | 3246.44 | 3146.15 | -3.09 | 4152.38 | 4329.67 | 4.27 |

上述结果表明，整个流域的发电量与流域的出库流量同样能建立较强的线性水 - 能关系。在率定期及检验期拟合发电量与调度发电量存在一定的误差，但误差可控制在 4% 左右，说明该水 - 能关系公式拟合效果较好，可用于流域电量估算。

2、以电定水

为估计流域水资源量，建立能 - 水关系，如图 2 所示。为检验该关系，以 21 座水电站总出力为计算依据，代入拟合能 - 水关系计算公式中，推求整个流域的水资源量，计算结果如表 4 所示。

上述结果表明，整个流域出口流量与流域水电站发电量同样能建立较强的线性能 - 水转化关系。在率定期及检验期拟合水资源量与调度模拟水资源量存在一定的误差，但误差可控制在 5% 以内，说明该能 - 水转化公式拟合效果较好，可根据水电站群发电量推求流域水资源量。

2) 权重拟合

由于电站规模越大，水能转化效率越高，为加强水 - 能关系的拟合效果，以各水电站的装机容量大小代表各电站的权重，将各水电站出力加权求和并与流域出口水电站流量建立联系，拟合结果如图 3 所示。结果表明，相对于直接累加，考虑加权后的水 - 能转化关系拟合效果更好。

4. 结论及展望

本研究选取长江上游 21 座大型梯级水电站群为研究对象，采用常规调度和确定性优化调度方式，由此建立了宏观的水 - 能转化关系，可直接实现流域内电站的发电量与水资源量的相互估算，主要结论如下：

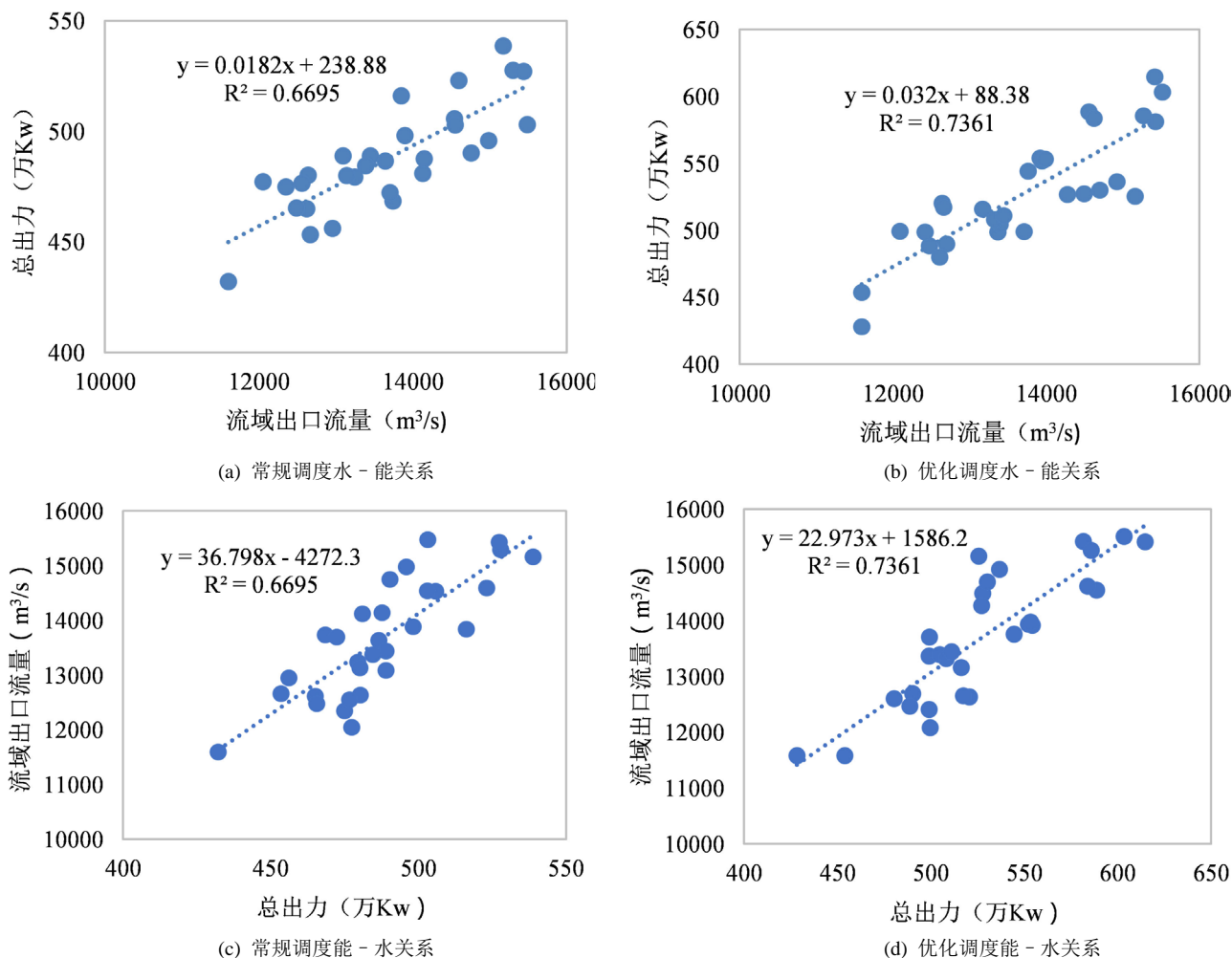


Figure 3. The weighted water-energy relationship calibration results of the hydropower station group

图 3. 水电站群的加权率定结果

1) 推求单个水电站的特性参数，建立适用于各水电站的水 - 能转化关系；
 2) 基于聚合思想，可构建各水电站电量累加值与流域水资源总量的宏观年尺度水 - 能转化关系；以各电站装机容量作为权重，推求的水 - 能转化关系拟合效果更佳。

3) 以水 - 能转化关系为基础，可通过流域实际发电量推求流域水资源量。

本研究还存在一些不足，可在以下几个方面进一步展开：

1) 部分水库单库的拟合效果不佳，应进一步分析原因并考虑其他优选的拟合方式。

2) 可以考虑更多的水库权重确定方式，并加以比较，以确定最佳的权重确定方法，综合考虑流域内各水电站的影响。

参考文献

[1] MING, B., LIU, P., GUO, S., et al. Optimizing utility-scale photovoltaic power generation for integration into a hydropower reservoir by incorporating long- and short-term operational decisions. *Applied Energy*, 2017, 204: 432-445. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.046>

[2] 陈进. 长江流域水资源调控与水库群调度[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 2-8.
 CHEN Jin. Regulation of water resources and operation of reservoir group in the Yangtze River basin. *Journal of Hydraulic*

- Engineering, 2018, 49(1): 2-8. (in Chinese)
- [3] FAN, J.-L., et al. Relationship between energy production and water resource utilization: A panel data analysis of 31 provinces in China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 167: 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.167>
- [4] 贾东旭. 提高水电站水库水能利用率的方法[J]. 水电自动化与大坝监测, 2002, 26(2): 54-58, 64.
JIA Dongxu. Method of improving water power utilization rate and hydropower stations. *Hydropower Automation and Dam Monitoring*, 2002, 26(2): 54-58, 64. (in Chinese)
- [5] 刘心愿, 郭生练, 刘攀, 李响. 考虑综合利用要求的三峡水库提前蓄水方案[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 851-856.
LIU Xinyuan, GUO Shenglian, LIU Pan and LI Xiang. Scheme of impounding in advance for the Three Gorges Reservoir by considering the comprehensive utilization benefits. *Advances in Water Science*, 2009, 20(6): 851-856. (in Chinese)
- [6] 姚磊. 水轮发电机增容改造技术对水轮机提高水能利用率的影响[J]. 电力系统装备, 2017(11): 77, 135.
YAO Lei. Influence of hydraulic turbine generator capacity increasing technology on hydraulic energy utilization rate of hydraulic turbine. *Electric System*, 2017(11): 77, 135. (in Chinese)
- [7] TSOLAS, S. D., KARIM, M. N. and HASAN, M. M. F. Optimization of water-energy nexus: A network representation-based graphical approach. *Applied Energy*, 2018, 224: 230-250. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.094>
- [8] JU-HWAN, Y. Maximization of hydropower generation through the application of a linear programming model. *Journal of Hydrology*, 2009, 376(1-2): 182-187. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.026>
- [9] 陈西臻, 刘攀, 何素明, 张旺, 李泽君, 张靖文. 基于聚合-分解的并联水库群防洪优化调度研究[J]. 水资源研究, 2015(4): 23-31.
CHEN Xizhen, LIU Pan, HE Suming, ZHANG Wang, LI Zejun and ZHANG Jinwen. Optimization of parallel reservoirs for flood control based on the aggregation-decomposition method. *Journal of Water Resources Research*, 2015(4): 23-31. (in Chinese) <https://doi.org/10.12677/JWRR.2015.41003>
- [10] 马立亚, 雷晓辉, 蒋云钟, 王浩. 基于 DPSA 的梯级水库群优化调度[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(2): 140-145.
MA Liya, LEI Xiaohui, JIANG Yunzhong and WANG Hao. Optimal operation of cascade reservoirs based on DPSA. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2012, 10(2): 140-145. (in Chinese)
- [11] 李克飞, 武见, 董滇红, 王林威. 基于 DPSA 的水库优化调度方案研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(10): 128-130.
LI Kefei, WU Jian, DONG Dianhong and WANG Linwei. Research on reservoir optimization scheduling scheme based on DPSA. *Yellow River*, 2015, 37(10): 128-130. (in Chinese)
- [12] 郭生练, 陈炯宏, 刘攀. 水库群联合优化调度研究进展与展望[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 496-503.
GUO Shenglian, CHEN Jionghong, LIU Pan. State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 496-503. (in Chinese)
- [13] 刘丹雅. 三峡及长江上游水库群水资源综合利用调度研究[J]. 人民长江, 2010, 41(15): 5-9.
LIU Danya. Study on water resources comprehensive utilization scheduling of the Three Gorges and the upper reaches of the Yangtze River. *Yangtze River*, 2010, 41(15): 5-9. (in Chinese)
- [14] 丁毅, 傅巧萍. 长江上游梯级水库群蓄水方式初步研究[J]. 人民长江, 2013, 44(10): 72-75.
DING Yi, FU Qiaoping. Preliminary study on water storage method of cascade reservoirs in the upper reaches of the Yangtze River. *Yangtze River*, 2013, 44(10): 72-75. (in Chinese).