

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221614

洪家渡水电站综合出力系数率定研究

徐 伟¹, 葛 勇¹, 仲 委², 闻 昕²

(1. 贵州乌江水电开发有限责任公司水电站远程集控中心, 贵州 贵阳 550002;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 针对电站综合出力系数随着运行时间的累积、运行工况变化、机组磨损等出现不同程度偏离实际的问题, 分别按平均综合出力系数和分段拟合系数率定综合出力系数, 其中分段拟合根据调度特性分为按水头分段和综合考虑水头、发电流量分段, 并采用精度评价对结果进行复核验证。结合洪家渡电站的历史运行过程, 开展实例研究。结果表明, 与实际结果相比平均系数法相对误差为 2.64%, 按水头分段拟合法为 2.52%, 综合考虑水头和流量的分段拟合法为 0.59%, 可见分段拟合法计算较平均综合出力系数法更贴近实际生产过程, 并且综合考虑水头和发电流量的分段拟合最为精确。

关键词: 综合出力系数; 平均综合出力系数法; 分段拟合法; 水头; 流量

中图分类号: TV737

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0192-05

1 工程概况

洪家渡水电站位于贵州省毕节地区黔西县与织金县交界的乌江支流六冲河下游河段, 下游距六冲河与乌江三岔河的汇合口 42.3 km。电站距贵阳市 154 km, 下游 65 km 处有东风水电站。洪家渡水电站是乌江梯级的“龙头”水电站, 主要任务为发电, 同时兼有库区航运、旅游及供水等综合利用效益。水库具有多年调节性能, 具有“坝高、库大、调节补偿好”的特点, 是系统中调峰、调频和事故备用的主力电源。电站基本参数见表 1。随着电站运行时间的累积, 机组磨损和检修, 以及运行环境和工况的变化, 电站综合出力系数均出现不同程度偏离实际的问题。对此, 已相继展开了

表 1 洪家渡电站基本参数

Tab. 1 Basic parameters of Hongjiadu Hydropower Station

电站参数指标	数值
控制流域面积/km ²	9 900
多年平均流量/(m ³ ·s ⁻¹)	144
正常蓄水位/m	1 140
死水位/m	1 076
总库容/10 ⁸ m ³	49.47
调节库容/10 ⁸ m ³	33.61
装机容量/MW	3×200
多年平均发电量/10 ⁸ kW·h	15.59

研究。如苟露等^[1]提出以水库水位和发电流量(或出力)为主要影响因子, 根据厂内负荷优化分配模型推求出力—水库水位—综合出力系数关系; 薛金怀等^[2]探讨了在水头固定和出力固定两种情况下综合出力系数 K' 的变化规律; 王雨雨等^[3]研究了水电机组的效率与流量、水位之间的关系并建立了综合出力系数的数学模型; 罗鑫燃等^[4]研究表明出力加权聚合法可以有效提高综合出力系数准确率; 刘荣华等^[5]验证了利用综合出力系数和水头的分段函数可以提高综合出力系数的率定精度。鉴此, 本文通过大数据分析和挖掘技术, 对洪家渡电站的综合出力系数进行复核和校准, 通过多方案精度评价和综合比选, 复核电站平均综合出力系数, 并分析综合出力系数和水头、发电流量的函数关系, 旨在为水电站的精细化调度和科学决策提供基础支撑。

2 综合出力系数率定

综合出力系数可反映水电站将势能转换为电能平均效率, 与工程特性、机组性能、运行工况等综合因素相关, 是电站发电量计算的关键指标。电站综合出力系数确定方法通常分为两种: ①第一种是采用水轮机生产厂家提供的机组流量特性

收稿日期: 2022-08-05, 修回日期: 2022-09-07

作者简介: 徐伟(1984-), 男, 工程师, 研究方向为梯级水电站水库调度, E-mail: 1847048238@qq.com

通讯作者: 闻昕(1987-), 男, 教授、硕导, 研究方向为水利水电系统调度运行、水风光储多能互补、智慧水利, E-mail:

njwenxin@163.com

曲线插值计算,该方法一般用于工程规划和建设阶段;②第二种是通过电站实际发电、水头、流量等运行数据对综合出力系数进行拟合和计算,该方法虽然计算过程繁琐,但使用简便、节约时间,且具有较高的精度和可靠性,一般用于电站运行阶段。本文分别采用平均综合出力系数法和分段拟合方法对各电站综合出力系数进行率定。

2.1 平均综合出力系数法

平均综合出力系数法是根据电站的历史调度运行情况,算出各时段的出力系数,再取平均值得到平均综合出力系数,具体步骤如下。

步骤 1 水电站出力计算公式为:

$$N_i = K_i H_i Q_i \quad (1)$$

式中, N_i 为该电站在第 i 个监测时段的出力, MW; K_i 为该电站在第 i 个监测时段的出力系数; H_i 为该电站在第 i 个监测时段的发电水头, m; Q_i 为该电站在第 i 个监测时段的发电流量, m^3/s 。

利用式(1)推算综合出力系数,即:

$$K_i = N_i / (H_i Q_i) \quad (2)$$

步骤 2 利用式(2)推求各电站在各时段的综合出力系数 K_i 。

步骤 3 将各时段出力系数取平均值,即可得到电站的平均综合出力系数 \bar{K} :

$$\bar{K} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i \quad (3)$$

2.2 分段拟合法

平均综合出力系数代表了电站发电效率的平均水平,为了反映不同工况下电站的发电效率,精准计算不同时期的电站发电量,采用分段拟合法建立各电站综合出力系数与水头、发电流量的函数关系。

(1)按水头分段拟合法。该方法将水头作为出力系数的主要影响因素,建立乌江流域各电站出力系数与发电水头之间的分段函数,具体步骤如下。

步骤 1 利用式(2)计算各电站在各时段的综合出力系数 K_i 。

步骤 2 分析不同时段综合出力系数的合理性,剔除明显的异常值和错误值。

步骤 3 以发电水头为横坐标,出力系数为纵坐标,绘制出力系数随水头变化的发电水头 ($H-K$) 关系图,判断出力系数随水头变化的突变点,设定分段区间,见图 1。

步骤 4 在每个分段区间内,确定合适的函数关系对出力系数与发电水头的关系进行拟合,以一次线性函数为例,其通用表达式为:

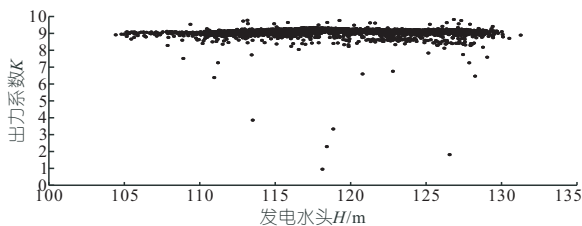


图 1 电站综合出力系数与发电水头关系

Fig. 1 Relationship between comprehensive output coefficient and generating head of the power station

$$K(H) = \begin{cases} a_1 H + a_2 & h_1 \leq H < h_2 \\ a_3 H + a_4 & h_2 \leq H < h_3 \\ \vdots & \end{cases} \quad (4)$$

式中, K 为电站综合出力系数; H 为水头, m; h_i 为分段点的水头值, m; a_i 为待拟合参数。

(2)综合考虑水头和发电流量的分段拟合法。在发电流量较小时,电站综合出力系数分布较为分散,存在部分偏低等异常情况;发电流量较大时,综合出力系数相对稳定、分布较为集中。因此,按照不同的发电流量区间,对电站综合出力系数和水头之间的函数关系进行拟合分析,具体步骤如下。

步骤 1 利用式(2)推求各电站在各时段的综合出力系数 K_i 。

步骤 2 根据乌江流域各电站综合出力系数的分布规律,确定拟合流量区间和分界点,见图 2。

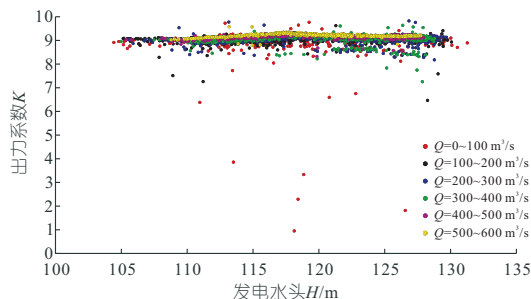


图 2 电站综合出力系数与发电水头和流量关系

Fig. 2 Relationship between comprehensive output coefficient of the power station and generating head and flow

步骤 3 以发电水头为横坐标,出力系数为纵坐标,绘制小流量情况下出力系数随水头变化的 $H-K$ 关系图,判断出力系数随水头变化的突变点,设定分段区间。

步骤 4 以发电水头为横坐标,出力系数为纵坐标,绘制非小流量情况下出力系数随水头变化的 $H-K$ 关系图,判断出力系数随水头变化的突变点,设定分段区间。

步骤 5 在每个发电流量区间内,确定合适的函数关系对出力系数与发电水头的关系进行拟合,通用表达式为:

$$K(H) = \begin{cases} a_1 H + a_2 & h_1 \leq H < h_2 \\ a_3 H + a_4 & h_2 \leq H < h_3 \\ \vdots & \\ a_5 H + a_6 & h_4 \leq H < h_5 \\ a_7 H + a_8 & h_5 \leq H < h_6 \\ \vdots & \end{cases} \quad \begin{matrix} Q \leq Q_0 \\ \\ \\ Q > Q_0 \end{matrix} \quad (5)$$

图 1、2 中个别点很分散,由式(2)可知,当监测的流量或出力有偏差时,计算的系数误差会很大。在电站存在机组启停机时,检测流量或出力不准确,这种情况导致计算的出力系数不合理。

2.3 精度评价

针对提出的经验出力系数、复核后的平均综合出力系数、综合出力系数—水头关系曲线,以及考虑不同流量区间的综合出力系数—水头关系曲线,模拟不同方法下的电站发电量,并与实际发电量进行对比分析,采用相对误差和 Nash 系数两种指标,评价各综合出力系数计算结果的精度。

(1)相对误差 S 为:

$$S = \frac{\left| \sum_{i=1}^n W_i^t - \sum_{i=1}^n W_i^f \right|}{\sum_{i=1}^n W_i^t} \times 100\% \quad (6)$$

式中, W_i^t 为第 i 时段的监测值, $\text{kW} \cdot \text{h}$; W_i^f 为第 i 时段的模拟值, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

(2)Nash 系数 E 为:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (W_o^t - W_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (W_o^t - \bar{W}_o)^2} \quad (7)$$

式中, E 为 Nash 效率系数; W_o^t 为第 t 个观测值; W_m^t 为第 t 个模拟值; \bar{W}_o 为观测值的总平均。

Nash 效率系数的取值为负无穷至 1,系数越接近 1,表示模型的可信度越高;系数接近 0,表示越接近观测值的平均水平,虽然总体可信,但模拟误差大;系数远小于 0 时,表示模型不可信。

3 洪家渡水电站综合出力系数率定

3.1 历史运行数据质量分析

洪家渡水电站 2014 年 1 月至 2021 年 10 月的日数据共 2 861 组,每组包含水库水位、尾水位、发电流量与电站出力等参数。其中发电流量与电站出力异常值 70 个;经计算,综合出力系数异常值 510 个。经筛选后,可用数据共 2 351 组。

3.2 电站调度运行规律分析

综合出力系数反映水电站能量转换的效率,与电站运行工况密切相关。从水头、发电流量、机

组运行情况等方面,对洪家渡水电站 2014 年 1 月至 2021 年 10 月调度运行情况进行分析。

(1)水头变化。洪家渡水电站发电水头分布在 100~160 m 之间,汛期以蓄水为主,枯期以补水为主,规律较稳定,见图 3。

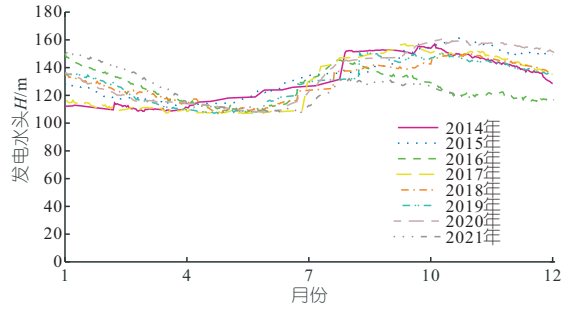


图 3 洪家渡水电站 2014 年 1 月~2021 年 10 月发电水头变化

Fig. 3 Variation of generating head of Hongjiadu Hydropower Station from January 2014 to October 2021

(2)发电流量。洪家渡水电站发电流量分布在 0~500 m^3/s 之间,在汛期较低,枯期较高,见图 4。

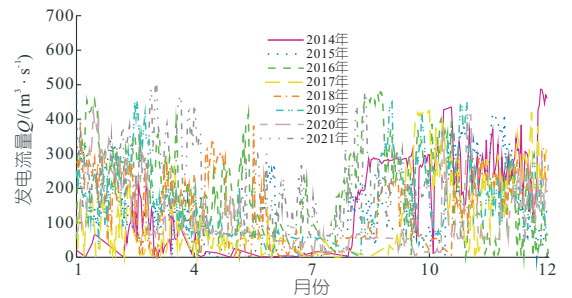


图 4 洪家渡水电站 2014 年 1 月~2021 年 10 月发电流量过程

Fig. 4 Power generation flow process of Hongjiadu Hydropower Station from January 2014 to October 2021

(3)电站出力。洪家渡水电站出力分布在 0~600 MW 之间,其与发电流量具有较高的相关性,总体趋势为夏季发电量较低,秋冬季发电量较高,见图 5。

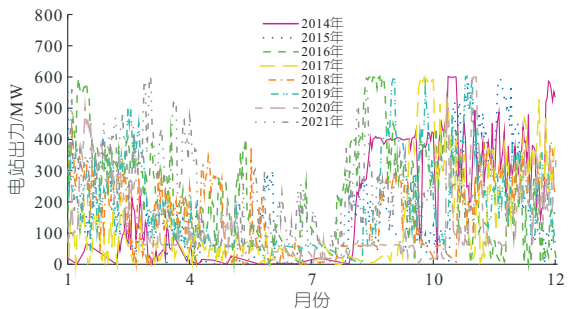


图 5 洪家渡水电站 2014 年 1 月~2021 年 10 月出力过程

3.3 结果分析

根据洪家渡水电站 2014 年 1 月至 2021 年 10 月历史调度运行数据,计算电站多年平均综合出

力系数,采用分段拟合法建立电站出力系数与发电水头、流量的函数关系。在此基础上模拟不同计算方法的发电量,并与实际发电量进行对比,评价各方法的计算精度。

3.3.1 平均综合出力系数法

2014 年 1 月至 2021 年 10 月,洪家渡电站日平均综合出力系数总体分布在 7.0~9.5 之间,平均值为 8.68。根据《水库调度手册(2019 年修编)》,洪家渡电站经验综合出力系数为 8.55。

3.3.2 分段拟合公式法

(1)水头分段拟合法。采用分段拟合公式法建立洪家渡电站综合出力系数与发电水头之间的函数关系。如图 6 所示,以 130 m 为分界点,按照

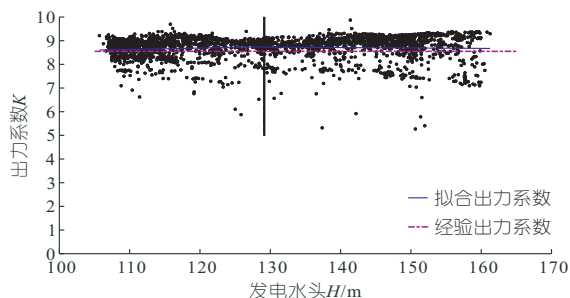


图 6 洪家渡电站 2014 年 1 月至 2021 年 10 月日综合出力系数与水头关系

Fig. 6 Relationship between comprehensive output coefficient and water head of Hongjiadu Hydropower Station from January 2014 to October 2021

两个水头区间分别建立洪家渡电站综合出力系数与水头的函数关系,即:

$$K(H) = \begin{cases} 0.0058H + 7.9906 & H \leq 130 \text{ m} \\ -0.0017H + 8.9525 & H > 130 \text{ m} \end{cases} \quad (8)$$

(2)综合考虑水头和流量的分段拟合法。进一步分析洪家渡电站综合出力系数与水头、发电流量之间的变化关系。如图 7 所示,洪家渡电站发电流量主要分布在 0~500 m³/s,在发电流量小于 100 m³/s 的情况下,综合出力系数明显偏

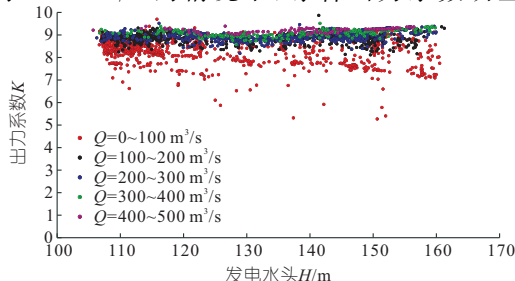


图 7 洪家渡电站 2014 年 1 月至 2021 年 10 月日综合出力系数与水头、发电流量关系图

Fig. 7 Relationship between comprehensive output coefficient and water head and power generation flow of Hongjiadu Hydropower Station from January 2014 to October 2021

低,且较为分散;在发电流量大于 100 m³/s 的情况下,综合出力系数相对集中且分布在较高水平。因此,本文以 100 m³/s 发电流量为分界点,按照流量区间分别建立洪家渡电站综合出力系数和流量间的函数关系。①发电流量小于 100 m³/s。当洪家渡发电流量小于 100 m³/s 时,运行水头通常较低,受不同机组运行组合、低水头小流量运行工况不稳定、监测误差等因素影响,综合出力系数分布较为分散。因此,对该工况的运行数据进行拟合分析,得到洪家渡电站在发电流量小于 100 m³/s 情况下综合出力系数与水头的关系,即:

$$K(H) = -0.0125H + 9.7661 \quad (9)$$

②发电流量大于 100 m³/s。当发电流量大于 100 m³/s 时,洪家渡电站运行工况相对稳定,综合出力系数分布较为集中,且随着水头的增大呈上升趋势,规律特征较为明显。因此,对洪家渡电站的历史运行数据进行拟合分析,得到洪家渡电站在发电流量大于 100 m³/s 情况下综合出力系数与水头的关系,即:

$$K(H) = 0.0029H + 8.5273 \quad (10)$$

③综合考虑水头和流量的率定结果。综合以上结果,得到洪家渡电站综合出力系数与水头和发电流量的函数关系,即:

$$\begin{cases} K(H) = -0.0125H + 9.7661 & Q \leq 100 \text{ m}^3/\text{s} \\ K(H) = 0.0029H + 8.5273 & Q > 100 \text{ m}^3/\text{s} \end{cases} \quad (11)$$

3.3.3 精度评价

经计算,分别得到洪家渡电站的经验综合出力系数、多年平均综合出力系数,并采用两种分段拟合法提出综合出力系数与水头、流量之间的关系曲线。在此基础上,运用这四种方法分别模拟计算洪家渡电站的发电量,并与实际发电量进行对比,评价各方法的计算精度。结果显示,综合考虑水头和流量的分段拟合法精度最高,平均相对误差仅为 0.59%;按水头的分段拟合法次之,相对误差为 2.52%;多年平均出力系数和经验系数计算的结果误差分别为 2.64%、4.13%,见表 2。

表 2 洪家渡电站不同综合出力系数结果精度评价

Tab. 2 Accuracy evaluation of results of different comprehensive output coefficients of Hongjiadu Hydropower Station

计算方法	实际发电量 /10 ⁸ kW·h	模拟发电量 /10 ⁸ kW·h	相对误差 /%	日绝对误差 /10 ⁸ kW·h	Nash 系数 E
经验系数法	113.14	108.46	4.13	0.0024	0.9903
平均系数法	113.14	110.15	2.64	0.0019	0.9940
按水头分段拟合法	113.14	110.28	2.52	0.0019	0.9943
综合考虑水头和流量的分段拟合法	113.14	112.47	0.59	0.0011	0.9981

3.3.4 推荐方案

综上所述,洪家渡电站平均综合出力系数为 8.68,推荐采用综合考虑水头和流量的分段拟合方法,结果见式(11)。

4 结论

通过平均综合出力系数法和分段拟合法分别对综合出力系数进行率定,并进一步分析水头分段拟合法及综合考虑水头和发电流量拟合法计算结果,以确定电站合适的综合出力系数。对洪家渡水电站计算表明,综合考虑水头和发电流量分段拟合方法率定得到的出力系数更符合生产实际。

参考文献:

[1] 苟露,陈森林,胡志鹏. 水电站综合出力系数变化规律及应用研究[J]. 中国农村水利水电,2017(6): 181-183.

[2] 薛金淮. 关于水能计算中 K 值的探讨[J]. 电网与水力发电进展,2008,24(3):27-29.

[3] 王雨雨,王磊之. 基于历史用水效率的龙江水电站优化调度研究[J]. 小水电,2014(5):1-5.

[4] 罗鑫燃,刘攀,温岩,等. 水电站综合出力系数的出力加权聚合法[J]. 水电能源科学,2022,40(1):168-171,162.

[5] 刘荣华,魏加华,李想. 电站枢纽综合出力系数计算及对调度过程模拟的影响[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(1):14-17.

Study on Rate Determination of Comprehensive Output Coefficient of Hongjiadu Hydropower Station

XU Wei¹, GE Yong¹, ZHONG Wei², WEN Xin²

(1. Hydropower Station Remote Centralized Control Center of Guizhou Wujiang Hydropower Development, Guiyang 550002, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In view of the problem that the comprehensive output coefficient of power station deviates from the actual situation in varying degrees with the accumulation of operation time, the change of operating conditions, unit wear, the comprehensive output coefficient was calibrated according to the average comprehensive output coefficient and the piecewise fitting coefficient. The piecewise fitting method was further divided into piecewise fitting according to the water head and piecewise fitting considering the water head and power generation flow in terms of the dispatching characteristics. The results were verified by precision evaluation. Combined with the historical operation process of Hongjiadu Hydropower Station, a case study was carried out. The results show that compared with the actual results, the relative error of the average coefficient method is 2.64%, that of the piecewise fitting method according to the head is 2.52%, and that of the piecewise fitting method considering the head and flow is 0.59%. The piecewise fitting method is closer to the actual production process than the average comprehensive output coefficient method, and the piecewise fitting method considering the head and power flow is the most accurate.

Key words: comprehensive output coefficient; average comprehensive output coefficient method; piecewise fitting method; head; flow

(上接第 191 页)

IWOA Based Algorithm for Solving Optimization Problem of Control Parameters of Hydro-Turbine Speed Control System with Surge Tanks

YANG Jin-dong¹, LI Yang², ZOU Yi-dong³

(1. Yunnan Electric Power Technology Company, Kunming 650000, China;
2. School of Power and Mechanics, Wuhan University, Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to improve the control performance of hydro-turbine speed control system containing surge tanks, this paper proposes a control parameter optimization method based on the improved whale optimization algorithm (IWOA). Firstly, the mathematical model of the turbine speed control system with surge tanks was established. The turbine inlet head-flow transfer function containing the dynamics of surge tanks was established by using the continuity equation and pipe transfer function. And then the turbine speed control system model with surge tanks was formed together with the turbine speed control model. The time integral value of the speed deviation of the turbine in this system was used as the fitness value in the optimization process, and IWOA was used to perform optimization of the PID controller parameters of the study object with the objective of minimizing this fitness. The results show that the IWOA algorithm has the advantages of fast convergence speed and high accuracy, and the optimized PID controller provides better regulation and robustness to various types of disturbances.

Key words: IOWA algorithm; surge tank; hydro-turbine speed control system; control parameters; optimization