

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250952

风光电源影响下的清江梯级电站中长期优化调度方式研究

黄远见¹, 覃 晖^{2a,2b}, 涂圣勤¹, 许红断¹, 黄 迪¹, 董 峰¹

(1. 湖北清江水电开发有限责任公司, 湖北 宜昌 430079; 2. 华中科技大学 a. 土木与水利工程学院;
b. 数字流域科学与技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为系统研究风光电源对清江梯级电站中长期优化调度的影响, 建立了清江梯级电站水风光协同调度的多目标优化模型, 采用目标转换与惩罚相结合的方法进行目标函数重构, 并通过逐步优化算法进行求解。实例研究表明, 该模型在保证系统发电量的同时也能使得梯级电站与风光出力过程形成互补; 通过分析互补协调优化效果及梯级电站水位变化情况, 提取了清江梯级水库调度方式变化规律, 即在考虑风光电源后, 应根据来水特征重点调整丰、平水年的蓄泄策略, 以预留出更多库容灵活应对与风光互补需求和发电需求。

关键词: 清江梯级电站; 水风光协调运行; 中长期; 水位

中图分类号: TV697.1⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0222-05

Research on Medium-and Long-term Optimal Scheduling of Qingjiang Cascade Hydropower Stations Under Influence of Wind and Solar Power Generation

HUANG Yuan-jian¹, QIN Hui^{2a,2b}, TU Sheng-qin¹, XU Hong-duan¹, HUANG Di¹, DONG Feng¹

(1. Hubei Qingjiang Hydroelectric Development Co., Ltd., Yichang 430079, China;
2a. School of Civil and Hydraulic Engineering; 2b. Hubei Key Laboratory of Digital Valley Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To systematically investigate the impacts of wind and solar power integration on medium-to-long-term optimal scheduling of the Qingjiang cascade hydropower stations, a multi-objective optimization model for coordinated hydro-wind-solar operation was established. The objective function was reconstructed through objective transformation integrated with penalty mechanisms and solved using the progressive optimization algorithm (POA). Case studies demonstrate that the model simultaneously ensures system power generation while achieving complementary coordination between cascade station operations and renewable power output. Through analysis of complementary coordination effects and reservoir level variations, operational pattern modifications for the Qingjiang cascade reservoirs were extracted: following renewable integration, storage/discharge strategies should be prioritized for adjustment during wet/normal years based on inflow characteristics. This adaptation reserves additional storage capacity to flexibly accommodate complementary coordination requirements with renewables while fulfilling power generation demands.

Key words: Qingjiang cascade hydropower stations; hydro-wind-solar coordination operation; medium-long term; water level

1 引言

随着风、光电源的装机规模快速增长, 清江梯级电站所在的湖北电网正在加速构建以风电、光

伏等可再生能源为主体的新型电力系统。清江梯级电站运行需与风电、光伏波动性电源进行互补调度, 其调度方式将不可避免会受到风、光电源的影响。中长期互补调度是多能互补系统运行优化的重要环节, 其目的在于从宏观层面优化系统整

收稿日期: 2025-05-29, 修回日期: 2025-07-16, 接受日期: 2025-09-24

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3200303); 湖北清江水电开发有限责任公司科研项目(NBZZ202400751); 国家自然科学基金重点项目(52039004)

作者简介: 黄远见(1998-), 男, 硕士, 研究方向为水库群优化调度, E-mail: huangyuanjian0128@163.com

通讯作者: 覃晖(1983-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为水库群多目标优化调度, E-mail: hqin@hust.edu.cn

体效益。与传统水电中长期调度侧重于系统发电效益最大化不同,中长期互补调度需兼顾水电与风光的互补效益^[1],合理利用水文、气象因子的季节性特征^[2],充分发挥不同能源的互补优势,在满足电量支撑能力和可调水量支撑能力的同时,能够提高系统长期性能并降低短期运行风险^[3-4]。如何在保证系统可靠性的同时最大限度地提高互补效益,这需要综合考虑互补系统的结构特点、运行模式及外部环境等多方面因素,采用合理的建模方法和优化算法开展优化调度研究^[5]。水风光多能互补中长期优化调度其本质是考虑风、光电源接入情况下的水库优化调度,充分开发水电的互补发电能力^[6]。为此,本文建立了以清江梯级电站为主体的水风光多目标中长期优化调度模型,利用逐步优化算法进行求解,基于模型求解结果分析了对年际运行情况及典型年运行情况,提出了风光电源影响下的梯级水电中长期调度方式。

2 水风光协调运行中长期优化调度模型构建

2.1 目标函数

(1)发电量最大。第一个目标函数考虑采用计算周期内水风光发电量最大,其表达式为:

$$E = \max \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{j=w,s,h}^I N_{j,i,t} m_t \right) \quad (1)$$

式中, E 为年发电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; t 为第 t 个时间段; T 为计算周期内总时段数; i 为第 i 个电站; n_j 为第 j 类电站总个数; w, s, h 分别为风电场、光伏电站、水电站; $N_{j,i,t}$ 为第 j 类电站中第 i 个电站在第 t 时段的出力, kW ; m_t 为年内第 t 时段的有效运行小时数。

(2)系统最小出力最大化。其表达式为:

$$N_{\text{NP}} = \max \left(\min \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{j=w,s,h} N_{j,i,t} \right) \quad (2)$$

2.2 约束条件

(1)水量平衡约束。计算公式为:

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (I_{i,t} - Q_{i,t} - E_{i,t}) \Delta t \quad (3)$$

式中, $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 分别为 i 电站在 t 、 $t+1$ 时段的初库容; $I_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 分别为 i 电站在 t 时段的入库、出库流量; $E_{i,t}$ 为 i 电站在 t 时段的水库蒸发量; Δt 为计算时段长度。

(2)水位约束。计算公式为:

$$Z_{i,t}^{\min} \leq Z_{i,t} \leq Z_{i,t}^{\max} \quad (4)$$

式中, $Z_{i,t}$ 为 i 电站在 t 时段的水位; $Z_{i,t}^{\max}$ 、 $Z_{i,t}^{\min}$ 分别为 i 电站在 t 时段允许的上、下限水位。

(3)水库下泄流量约束。计算公式为:

$$Q_{i,t}^{\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,t}^{\max} \quad (5)$$

式中, $Q_{i,t}$ 为 i 电站在 t 时段的总下泄流量,由发电流量 $Q_{g,i,t}$ 和弃水流量 $Q_{s,i,t}$ 组成; $Q_{i,t}^{\max}$ 、 $Q_{i,t}^{\min}$ 分别为 i 电站在 t 时段总下泄流量的上、下限。

(4)出力约束。计算公式为:

$$N_{j,i,t}^{\min} \leq N_{j,i,t} \leq N_{j,i,t}^{\max} \quad (6)$$

式中, $N_{j,i,t}$ 为第 j 类电站中 i 电站在 t 时段的发电出力; $N_{j,i,t}^{\max}$ 、 $N_{j,i,t}^{\min}$ 分别为第 j 类电站中 i 电站在 t 时段发电出力的上、下限。

上述约束在处理时均作为刚性约束。

2.3 多目标处理

本文处理多目标求解时采用一种目标转化与惩罚相结合的策略,即将次要的最小出力最大化目标重构为系统运行约束,同时引入动态惩罚机制来处理违反约束的解。具体而言,当系统在某时段的实际出力低于预期最小出力时,通过在主目标函数中叠加一个与差值成比例的惩罚项 ∂ 来降低该解的适应度,从而在优化过程中自然地引导解向满足最小出力要求的方向演化。这种处理方法不仅简化了求解过程,也有效平衡了发电量最大化与出力稳定性这两个目标,使得原本的多目标优化问题转化为一个带有惩罚项的单目标优化问题。经过处理,最终目标函数转化为:

$$E = \max \sum_{t=1}^T f_t m_t \quad (7)$$

其中

$$f_t = \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{j=w,s,h} N_{j,i,t} - \theta_t \partial \left| \alpha - \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{j=w,s,h} N_{j,i,t} \right| \quad (8)$$

$$\theta_t = \begin{cases} 1 & \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{j=w,s,h} N_{j,i,t} < \alpha \\ 0 & \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{j=w,s,h} N_{j,i,t} \geq \alpha \end{cases} \quad (9)$$

式中, θ_t 为状态变量,用于判断该时段出力是否违反既定的最小出力约束,当 θ_t 为 1 时,表明约束被破坏;当 θ_t 为 0 时,表明出力仍在约束范围内; ∂ 为惩罚系数,为经验常数; α 为设定的最大化最小出力值。

3 实例研究

以清江流域水布垭、隔河岩、高坝洲三个水电站为例,表 1 为清江梯级电站基本参数,表 2 为虚拟风光电站基本参数。对数据进行收集、整理,得

表 1 清江梯级电站基本参数
Tab. 1 Basic parameters of the Qingjiang cascade hydropower stations

参数名称	单位	水布垭	隔河岩	高坝洲
正常蓄水位	m	400	200	80
防洪限制水位	m	391.8	192.2	
死水位	m	350	160	78
调节性能		多年调节	年调节	日调节
发电最大引用流量	m ³ /s	1 110.4	1 300.0	866.1
装机容量	MW	1 840(4×460)	1 212	270
保证出力	MW	308.3	241.9	77.4

表 2 虚拟风光电站基本参数
Tab. 2 Basic parameters of the virtual photovoltaic power station

电站类型	电站名称	装机规模/MW
风电场集群	W1	597.1
	W2	1 098.5
	W3	1 664.4
光伏电场集群	P1	1 445.6
	P2	1 218.2
	P3	691.6

到 2008~2023 年共 16 年的旬尺度径流数据及同期流域内虚拟风电光伏电场出力数据^[7],求解算法采用逐步优化算法^[8]。

3.1 年际运行结果分析

模型以历史径流数据(2008~2023 年旬尺度)作为确定性输入,将同期模拟风光出力数据作为边界条件输入优化模型,通过逐步优化算法求解考虑风光互补后的水库调度方案。设置考虑风光及不考虑风光水电单独运行两种优化运行情景进行对比分析。对年际水位分析计算见表 3。由表 3 可知,考虑风光前后水布垭的年末水位、年均水位的变幅分别增加 5.6%、6.7%;隔河岩的年末水位、年均水位的变幅分别增加 18.5%、22.2%。年末水位和年均水位的波动情况加剧说明在考虑风光影响后的水库调度不确定性增加,在考虑来水时还需兼顾考量风光出力特征,梯级水库的调节方式受较大影响。

表 3 水布垭、隔河岩水库年际变化情况

Tab. 3 Interannual variation characteristics of water levels in Shuibuya and Geheyan reservoirs

水库	时期	水位/m						变化率/%
		无风光			考虑风光			
		最大值	最小值	变幅	最大值	最小值	变幅	
水布垭	年末	400.00	368.58	31.42	399.41	366.238	33.172	5.6
	年均	387.50	375.98	11.52	386.75	376.010	10.740	6.7
隔河岩	年末	198.38	182.47	15.91	197.44	184.470	12.970	18.5
	年均	195.03	187.16	7.87	194.23	188.110	6.120	22.2

各库年际变化情况具体见图 1。由图 1(a)、(c)可知,水布垭年末水位与年均水位变化主要表现在连续来水较丰时,考虑风光影响后年末水位消落会明显增加,在年来水量较少时水位变化情

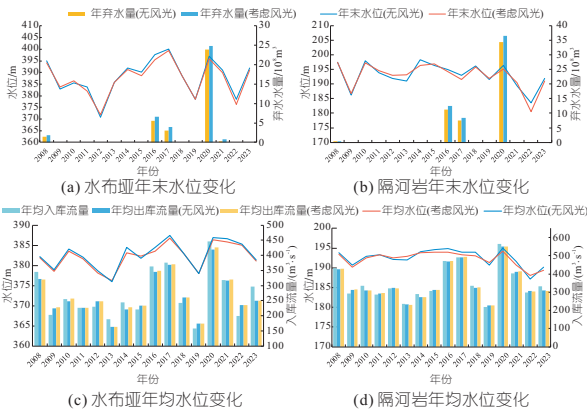


图 1 水布垭、隔河岩水库多年水位变化过程
Fig. 1 Interannual water level fluctuations in Shuibuya and Geheyan reservoirs over multiple years

况较小。由图 1(b)、(d)可知,隔河岩在连续几年来水较丰时,考虑风光后年均与年末水位有所降低,平水年后衔接来水较少年份时两种水位均有所升高。通过图 1(a)、(b)可得到各年弃水变化情况,在来水丰沛年份,考虑风光后水布垭与隔河岩产生的弃水量均有所上升。

综上可知,在水库连续来水较丰时年末水位比不考虑风光时的年末水位更低,即考虑风光出力后不利于水库丰水年蓄水,这是因为来年水库为汛期安全运行在汛前会消落水位腾出防洪库容,在此过程中加大水电出力,而汛前 4~5 月风光出力又较大,不利于与风光出力形成互补。而水库平水年后衔接来水较少年份时在考虑风光电源后表现为有所升高,主要因为来年来水较少,在年初风光出力也较小,水库可通过抬高年末水位增加来年年初的发电量,以便与风光出力形成互补。同样在丰水年汛期风光出力较大,而水库来水丰沛也正是大发阶段,两者会存在一定的竞争,进而挤压水电的出力空间,导致弃水增加。

统计多年运行结果可得各个电站年均发电量情况,具体见表 4。由表 4 可知,在考虑风光后,水布垭与隔河岩年均发电量均有所下降,结合已有分析的考虑风光后在丰水年汛期时弃水增多情况,主要原因是相比不考虑风光出力时,水电在运行过程中需要根据风光出力来调整自身出力,尤

表 4 各水电站年均发电量情况

Tab. 4 Annual average power generation of each hydropower station

水电站	年均发电量/(10 ⁸ kW·h)		降幅/%
	单独运行	考虑风光	
水布垭	36.22	35.96	0.72
隔河岩	28.02	27.78	0.85
高坝洲	9.48	9.48	0
水电站平均值	24.57	24.40	0.66
梯级电站总发电量	73.72	73.22	0.68

其是在汛期水电站来水较多处于大发阶段时,风光综合出力也较大,为确保与风光电源形成互补,会牺牲小部分水电出力,以配合风光出力。

3.2 典型年分析

为进一步分析风光电源对梯级水库的运行影响,选取有代表性典型年进行年内分析。对水文频率进行计算分析得出梯级水库 2016 年为丰水年、2010 年为平水年、2022 年为枯水年,以这三年为典型年进行分析。

为量化优化调度后各个典型年梯级电站对风光出力的互补效果,计算各个电站与风光出力过程之间的皮尔逊相关系数,结果见表 5。由表 5 可知:①单独从各个电站来看,在 3 个典型年内水布垭、隔河岩出力与风电出力之间皮尔逊相关系数均超过了-0.6,较接近-1,即出力曲线的互补性越强,而高坝洲作为日调节水库,且受到隔河岩水库的调节后的影响与风光电源的互补性均不高。除此之外,各个电站与光伏之间的皮尔逊相关系数与-1 值相距较大,这主要是因为风电出力波动性相较于光伏更为剧烈,且多个水电站与风电出力形成的协同效应时更多考虑风光电源联合出力的波动性,与风光联合出力形成互补。②从整体上看,整个梯级水电出力与风光出力的皮尔逊相关系数接近-0.8,说明考虑风光出力后,梯级电站可在中长期角度合理规划,通过合理调整中长期优化调度方式,利用水电出力的灵活性和可控性可有效坦化风光电源出力的波动性,让水电出力与风光出力可取得一个较好的互补效果,有利于维持电力系统的稳定性。

表 5 典型年水电站与风光发电出力之间皮尔逊相关系数值
Tab.5 Pearson correlation of hydropower with wind/solar generation in representative years

电站	典型年	光伏	风电	风光
水布垭电站	丰	-0.218	-0.532	-0.738
	平	-0.224	-0.521	-0.744
	枯	-0.214	-0.557	-0.775
隔河岩电站	丰	-0.237	-0.581	-0.776
	平	-0.254	-0.552	-0.735
	枯	-0.271	-0.568	-0.753
高坝洲电站	丰	-0.104	-0.267	-0.213
	平	-0.126	-0.241	-0.217
	枯	-0.162	-0.306	-0.253
梯级水电	丰	-0.241	-0.591	-0.798
	平	-0.241	-0.586	-0.796
	枯	-0.218	-0.592	-0.797

为更深入探讨风光电源接入对梯级电站调度运行的变化,并分析其对水库蓄泄的影响,进一步绘制了水布垭与隔河岩水位变化图,见图 2。由图 2 可知:①从各个水电站来看,在考虑风光后,

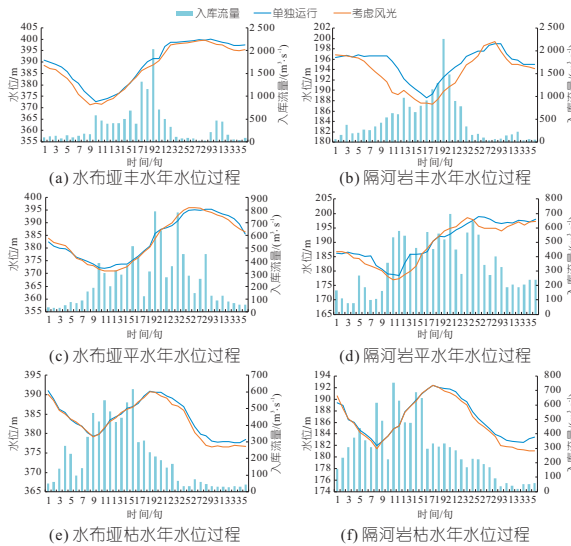


图 2 水布垭、隔河岩水库典型年水位过程

Fig.2 Reservoir water level variations in representative years for Shuibuya and Geheyan

水布垭电站水位运行情况在丰、平水年变化较大,枯水年变化相对较小。主要变化表现在丰水年与平水年汛前水位有所降低,在各个典型年中泄水过程中也存在较大差异,相比考虑风光前,泄水时间有所提前,且水位降幅更大。各个典型年中隔河岩在考虑风光电源后的水位变化情况相较于水布垭更为剧烈,尤其是在丰水年,汛前水位消落深度更大,水位变化的波动性更强。年末水位变化情况则与年平均水位分析情况相似,与年来来水情况有关,如丰水年 2016 年与枯水年 2022 年来年来水量都较为丰沛,因此这两年年末水位相较于不考虑风光影响时更低,而平水年 2010 年来年来水较平,故两者年末水位无较大变化。②从整体上看,在梯级电站考虑风光电源后丰、平水年均呈现较明显的汛前水位提前消落,且消落深度增加的情况,从中长期宏观角度分析其原因主要是在清江流域汛期时风光出力也较大,提前消落并加大消落深度有助于缓解汛前消落压力,可空出较大的库容应对汛 come 来水,减少弃水风险,而在在不考虑风光出力时梯级电站更多是考虑在确保安全运行的情况下将发电电量最大化,因此保持一个较高水位运行。在泄水期考虑风光时水位下降较快,其主要原因是风光出力在该时期出力有所下降,需要梯级水电会增加出力对其进行补偿,与风光电源出力形成互补。③从梯级水库中长期调度宏观角度分析,要使梯级电站较好与风光电源进行互补调度,应重点关注丰水年与汛期,此情况下梯级电站来水丰沛出力较大,又需兼顾防洪安全运行,此时水电灵活性较差,对风光电源波动性的抑制效果较弱。

4 结 论

a. 考虑风光电源后,水库调度不确定性显著提高,但通过模型优化可有效平抑风光出力波动,实现水电与风光互补,为电网提供稳定出力。

b. 在考虑风光电源后,应重点关注丰、平水年的蓄泄策略,汛前水位应考虑提前消落且将消落深度加大,以预留出更多库容灵活应对与风光互补需求和发电需求。

参考文献:

- [1] 井志强, 王义民, 王学斌, 等. 水风光多能互补运行中多主体损益关系分析[J]. 水力发电学报, 2022, 41(11): 56-67. (JING Z Q, WANG Y M, WANG X B, et al. Analysis of multi-entity profit and loss relationship in hydro-windsolar power complementary operation[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2022, 41(11): 56-67. (in Chinese))
 - [2] 吴钰姝, 申建建, 程春田. 融合高精度气象数据的水风光系统长短期嵌套消纳调度方法[J/OL]. 电网技术, 2025: 1-11. (2025-05-09). <https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0056>. (WU Y S, SHEN J J, CHENG C T. Long-term and short-term nesting dispatch method for hydro-wind-photovoltaic system with integrated high-precision meteorological data[J/OL]. Power system technology, 2025: 1-11. (2025-05-09). <https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0056>. (in Chinese))
 - [3] 鲜于虎成, 黄显峰, 张艳青, 等. 考虑短期波动与弃电风险的水光互补系统中长期双层嵌套优化调度[J]. 电工技术学报, 2023, 38(21): 5781-5793. (XIAN YU H C, HUANG X F, ZHANG Y Q, et al. Medium-and long-term double-layer nested optimal scheduling of hydro-PV complementary system considering short-term power fluctuation and curtailment risk[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2023, 38(21): 5781-5793. (in Chinese))
 - [4] ÁVILA L, MINE M R M, KAVISKI E, et al. Evaluation of hydro-wind complementarity in the medium-term planning of electrical power systems by joint simulation of periodic streamflow and wind speed time series: A Brazilian case study[J]. Renewable energy, 2021, 167: 685-699.
 - [5] 冉洪伟, 任琰琰, 吴星烨, 等. 考虑风光不确定性的水库多目标优化调度[J]. 水电能源科学, 2025, 43(7): 213-217. (RAN H W, REN Y Y, WU X Y, et al. Multi-objective optimal scheduling of reservoirs considering wind and photovoltaic uncertainties[J]. Water resources and power, 2025, 43(7): 213-217. (in Chinese))
 - [6] 张振东, 唐海华, 覃晖, 等. 风光水互补系统发电效益-稳定性多目标优化调度[J]. 水利学报, 2022, 53(9): 1073-1082. (ZHANG Z D, TANG H H, QIN H, et al. Benefit-stability multi-objective optimal operation of wind-solar-hydropower hybrid system[J]. Journal of hydraulic engineering, 2022, 53(9): 1073-1082. (in Chinese))
 - [7] 齐帅, 王现勋, 曾坤, 等. 水风光打捆模式下新能源占比对水电机组效率的影响[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(1): 43-50. (QI S, WANG X X, ZENG K, et al. Influence of new energy ratio on hydropower unit efficiency under hydro-wind-solar bundling mode[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(1): 43-50. (in Chinese))
 - [8] 张敬萌, 黄炜斌, 王峰, 等. 大型风光水混合能源互补发电系统的优化调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(12): 181-185, 190. (ZHANG X S, HUANG W B, WANG F, et al. Research on the optimal scheduling of large wind-PV-hydro hybrid energy complementary power generation system[J]. China rural water and hydropower, 2019(12): 181-185, 190. (in Chinese))
- *****
- (上接第 206 页)
- [5] 黄龙, 王雨娇. 氧化铜纳米流体喷雾冷却传热性能实验研究[J]. 低温工程, 2024(3): 56-63. (HUANG L, WANG Y J. Experimental study on influence of spray cooling on heat transfer of copper oxide nano-fluid[J]. Cryogenics, 2024(3): 56-63. (in Chinese))
 - [6] SHEIKHOLESLAMI M, REZAEIANJOUYBARI B, DARZI M, et al. Application of nano-refrigerant for boiling heat transfer enhancement employing an experimental study[J]. International journal of heat & mass transfer, 2019, 141: 974-980.
 - [7] 宋小云. 球形氧化物颗粒的制备及其抗磨减磨性能[D]. 济南: 济南大学, 2014. (SONG X Y. Preparation of Spherical Oxide Particles and Their Anti-Wear Properties[D]. Jinan: University of Jinan, 2014. (in Chinese))
 - [8] 张杨. 水轮发电机组推力轴承散热系统研究综述[J]. 水电站机电技术, 2018, 41(1): 10-14, 71. (ZHANG Y. Overview of research on heat dissipation system of thrust bearing of hydrogenerator unit[J]. Mechanical & electrical technique of hydropower station, 2018, 41(1): 10-14, 71. (in Chinese))
 - [9] 国家能源局. 水轮发电机运行规程: DL/T 751-2001[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014. (National Energy Bureau of the People's Republic of China. Specification of Operation for Hydro-generators: DL/T 751-2001[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014. (in Chinese))