

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.14.1001



基于正交设计的灯泡贯流式机组 关闭规律优化

陈云良, 徐永, 杜敏, 杨华

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室、水利水电学院, 四川 成都 610065)



陈云良

摘要: 建立以转速升高、导叶前水压力以及轴向水推力组成的过渡过程目标函数, 选取了相应的权重系数。采用适于多因素、多水平的正交设计算法进行机组关闭规律寻优。给定导叶第一段关闭时间, 以第二段关闭时间、分段点开度和桨叶关闭时间为因子, 每个因子取4水平进行正交设计计算。研究表明: 最佳导叶、桨叶关闭规律下, 转速升高、导叶前水压力、轴向水推力以及尾水管进口压力等过渡过程品质较优化前有明显的改善。桨叶缓慢关闭能减小引水管中水击压力以及尾水管进口的真空度, 可显著降低机组转速升高及轴向反推力。通过正交设计算法可以寻求较佳的关闭规律, 使灯泡贯流式机组在甩负荷时获得较好的过渡过程, 对保障电站安全稳定运行具有指导意义。

关键词: 灯泡贯流式机组; 甩负荷; 过渡过程; 关闭规律; 正交设计算法

中图分类号: TH311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2015)04-0322-05

陈云良, 徐永, 杜敏, 等. 基于正交设计的灯泡贯流式机组关闭规律优化[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(4): 322-326.

Chen Yunliang, Xu Yong, Du Min, et al. Optimal design of close law for bulb tubular type turbine based on orthogonal design[J].

Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME), 2015, 33(4): 322-326. (in Chinese)

Optimal design of close law for bulb tubular type turbine based on orthogonal design

Chen Yunliang, Xu Yong, Du Min, Yang Hua

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: The power station of bulb tubular type turbine is characteristic of low head and large discharge. The transient quality of unit is impacted greatly by the close law of gates and blades during the large fluctuation after load rejection. The objective function for the transient composed of the unit's rotate speed rise, the water pressure at the gates' front and the axial hydraulic thrust was established and corresponding weight coefficients were determined. The orthogonal design calculation suitable for multi-factor and multi-level was adopted to optimize the close law of unit. Specifying the first time of gates close, the second time, the inflection point of gates close and the close time of blades were appointed as factors. The orthogonal design calculation was implemented with four levels adopted for every factor. The results show that the transient quality such as the rotate speed rise, the water pressure at the gates' front, the axial hydraulic thrust and the water pressure at the draft tubes' inlet, are improved significantly under the optimal close law of gates and blades. The water hammer pressure in penstock and the

收稿日期: 2014-12-25; 网络出版时间: 2015-04-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20150422.1028.012.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51109149, 51209155, 51309172)

作者简介: 陈云良(1976—), 男, 云南巍山人, 副教授(liangyunchen@163.com), 主要从事水利水电工程研究。

徐永(1984—), 男, 江西上饶人, 讲师(通信作者, yongxu@scu.edu.cn), 主要从事水利水电工程研究。

vacuum degree at the draft tubes' inlet can be decreased in the case of blades closed slowly. The rotate speed rise of unit and the axial backward thrust can be notably reduced. A better close law can be obtained by the orthogonal design calculation so that the better transient of bulb tubular type turbine after load rejection would occur. It can provide guidance of ensuring safety and stable operation of power station.

Key words: bulb tubular type turbine; load rejection; transient; close law; orthogonal design calculation

灯泡贯流式机组适用于低水头、大流量的水电站,具有机组结构紧凑、工程量少、建设周期短的优势,是开发低水头水力资源的较好方式^[1-3]。近年来,灯泡贯流式水电站的发展很快,机组特性的研究不断深入。王正伟等^[4]通过数值模拟分析了双向灯泡贯流式水轮机多工况运行的水力特性。刘延泽等^[5]采用三维湍流模型分析了重力场对灯泡贯流式水轮机流场和水力性能的影响。钱忠东等^[6]采用大涡模拟法对全流道非定常湍流进行数值模拟,分析了灯泡贯流式水轮机的压力脉动特征。

根据电站运行的实际情况,在水力过渡过程中容易发生事故,因此,灯泡贯流式机组水力过渡过程的研究对电站安全运行具有重要意义^[7]。沙锡林^[8]指出灯泡贯流式电站的水力过渡过程研究必须将水力、机械两种过渡过程结合起来进行分析。常近时^[9]建立了适用于贯流式水轮机过渡过程的基本力特性的解析表达式。刘延泽等^[10]采用基于内特性解析理论的数值计算方法对灯泡贯流式水轮机装置甩负荷过渡过程进行研究和计算。夏林生等^[11]对灯泡式水轮机飞逸过程进行全流道三维数值模拟,得到了过渡过程参数及机组内部流态的演变规律。陈云良等^[12]对灯泡贯流式电站甩负荷后机组及下游河道开展联合计算,实现了水力过渡过程研究中将水力与机械、有压流与无压流统一分析。

灯泡贯流式机组的布置方式多为卧轴布置,这就使得推力轴承及其止推支座的设计主要决定于轴向水推力的大小。如能通过水力过渡过程分析,降低正反向水推力,则不仅可以减小推力轴承及其止推支座的尺寸,而且还可以节省机组及工程投资。在灯泡贯流式机组甩负荷大波动过渡过程中,导叶和桨叶的运动已失去协联关系,两者的关闭规律对机组转速升高、导叶前水压力、轴向水推力以及尾水管进口压力等有较大的影响。因此,要使灯泡贯流式机组过渡过程的品质较佳,有必要采用优化方法来寻求较佳的导叶、桨叶关闭规律。

文中以某灯泡贯流式电站的实际工程布置为基础,采用适于多因素、多水平的正交设计计算法

进行机组关闭规律寻优^[13]。

1 数学模型

1.1 压力管道非恒定流

对有压管道中一维瞬变流的运动方程和连续方程采用特征线法可推导出正、负特征方程^[14]为

$$C^+ : H_p = C_p - BQ_p, \quad (1)$$

$$C^- : H_p = C_m + BQ_p, \quad (2)$$

式中: H_p, Q_p 分别为管段第*i*节点在*t*时刻的压头和流量; B 取决于管道特性; C_p, C_m 可由*t*- Δt 时刻第*i*-1节点和第*i*+1节点的压头和流量求得,对*t*时刻是已知量。

1.2 灯泡贯流式机组边界方程

根据机组特性及上下游边界条件可解出水轮机流量为

$$Q_p = \frac{-C_v B + \sqrt{C_v^2 B^2 + 2C_v \beta_s (C_{p1} - C_{m2})}}{\beta_s}, \quad (3)$$

式中: $\beta_s = 1 - 2C_v(\beta_{s1} - \beta_{s2})$,其中, $\beta_{s1} = \frac{1}{2gA_1^2}$, $\beta_{s2} = \frac{1}{2gA_2^2}$; D_1, Q_1' 分别为水轮机的转轮直径、单位流量; A_1, A_2 分别为引水管出口和尾水管进口的断面面积; $C_v = \frac{(Q_1' D_1^2)^2}{2}$; $B = B_1 + B_2$,其中, B_1, B_2 分别为引水管和尾水管的管道特性。

由机组的运动方程可推导出

$$n_{t+\Delta t} = n_t + \frac{375}{GD^2} \frac{M_{t+\Delta t} + M_t}{2} \Delta t, \quad (4)$$

式中: $n_t, n_{t+\Delta t}, M_t, M_{t+\Delta t}$ 分别为*t, t*+ Δt 时刻的转速和动力矩; GD^2 为机组的转动惯量,包括发电机、水轮机以及水体附加转动惯量。

在过渡过程中,灯泡贯流式水轮机的导叶与桨叶已失去协联关系,可利用不同桨叶角度的定桨特性曲线,根据已知的桨叶角度,插值求得对应的单位流量 Q_1' 、单位力矩 M_1' 和单位轴向力 P_1' 的特性。

1.3 过渡过程目标函数

过渡过程关闭规律优选的目标函数定义为转速升

高、导叶前水压力以及轴向水推力组成的函数,即

$$V = K_n \beta + K_h \xi + K_p P + W, \quad (5)$$

式中: K_n 为转速升高权重系数; K_h 为导叶前水压力升高权重系数; K_p 为轴向反推力权重系数; W 为惩罚函数, 当尾水管进口压力降低超过允许值时, 或转速升高或导叶前水压力升高或轴向反推力超过允许值时, W 为一大数, 否则为零; $\beta = \frac{n_{\max} - n_0}{n_r}$, 其中, n_{\max} 为过渡过程中最大转速; n_0 为过渡过程前转速; n_r 为额定转速; $\xi = \frac{H_{\max} - H_0}{H_r}$, 其中, H_{\max} 为过渡过程中导叶前最大水压力; H_0 为过渡过程前导叶前水压力; H_r 为过渡过程前水轮机的水头; P 为相对最大轴向反推力, $P = \frac{P_{\max}}{P_0}$, 其中, P_{\max} 为过渡过程中最大轴向反推力; P_0 为过渡过程前轴向推力。

针对灯泡贯流式机组的转动惯量 GD^2 较小、引水管道较短的特点, 选用转速升高权重系数 K_n 为 1.0, 导叶前水压力升高权重系数 K_h 为 0.5。当过渡过程中轴向最大反推力大于过渡过程前轴向推力时, 轴向反推力权重系数 K_p 为 0.5, 否则为零。

1.4 正交设计法

运用正交设计法, 研究 5 个因素对过渡过程的影响。导叶关闭规律按两段直线关闭, 桨叶关闭规律为一段直线关闭。定义: T_{S1} 为导叶以第一段关闭速度由全开关至全闭所需要的时间; T_{S2} 为导叶以第二段关闭速度由全开关至全闭所需要的时间; Y_d 为分段点的导叶开度; T_z 为桨叶由全开关至全闭所需要的时间。

在给定导叶第一段关闭时间的情况下, 以第二

段关闭时间、分段点开度和桨叶关闭时间为因子, 每个因子取 4 水平, 进行正交设计计算。因为上述因子均是独立的, 故可采用 5 因子 4 水平的正交表。按正交表应计算出 16 个不同因子水平组合时的过渡过程, 并计算出目标函数。对计算结果进行各因子水平影响的分析, 即可求得参数的最佳组合。

2 计算成果及分析

算例基本资料: 水轮机型号 GZTF07 - WP - 580, 设计水头 7.8 m, 最大水头 12.18 m, 额定流量 263.0 m³/s, 额定功率 18.557 MW, 额定转速 85.7 r/min, 发电机转动惯量 15 840 KN · m², 水轮机转动惯量 3 488.6 KN · m²。

优化计算过程导叶第一段关闭时间 T_{S1} 给出 3 水平, 分别取 5, 8, 10 s。先对各水平作参数的最佳组合, 再分设计水头和最大水头 2 种情况优选出导叶第一段关闭时间 T_{S1} 的水平数, 最后再综合得出最佳的关闭规律。设计水头时甩满负荷关闭规律优化计算成果见表 1, 2, 受篇幅限制仅给出设计水头下导叶第一段关闭时间为 5 s 时的计算表。

根据表 2 可以得出设计水头下导叶第一段关闭时间为 5 s 的优化关闭规律。同理可分别得出导叶第一段关闭时间为 8, 10 s 的优化关闭规律, 按此关闭规律下的过渡过程计算结果, 如表 3 所示, $H_{w, \min}$ 为尾水管进口最小压力。因此, 优选设计水头下甩满负荷的优化关闭规律为: $T_{S1} = 10$ s, $T_{S2} = 30$ s, $Y_d = 0.7$, $T_z = 80$ s。

综合最大水头下甩满负荷的优化结果, 确定最佳关闭规律为 $T_{S1} = 8$ s, $T_{S2} = 24$ s, $Y_d = 0.6$, $T_z = 60$ s。

表 1 设计水头甩负荷时的正交设计表
Tab. 1 Orthogonal design table for load rejection at rated head

序号	T_{S1}/s	T_{S2}/s	Y_d	T_z/s	β	ξ	P	V
1	5	10	0.4	30	0.427	0.604	0.840	0.729
2	5	10	0.5	40	0.421	0.572	0.669	0.706
3	5	10	0.6	45	0.418	0.528	0.620	0.682
4	5	10	0.7	50	0.398	0.410	0.662	0.602
5	5	15	0.4	40	0.421	0.592	0.815	0.717
6	5	15	0.5	30	0.427	0.575	0.526	0.715
7	5	15	0.6	50	0.417	0.532	0.403	0.683
8	5	15	0.7	45	0.397	0.408	0.392	0.601
9	5	20	0.4	45	0.418	0.590	0.816	0.713
10	5	20	0.5	50	0.417	0.569	0.530	0.701
11	5	20	0.6	30	0.427	0.506	0.393	0.680
12	5	20	0.7	40	0.398	0.409	0.332	0.603
13	5	25	0.4	50	0.417	0.586	0.817	0.710
14	5	25	0.5	45	0.418	0.572	0.534	0.704
15	5	25	0.6	40	0.421	0.522	0.439	0.681
16	5	25	0.7	30	0.406	0.408	0.419	0.610

表2 导叶第一段关闭时间为5 s时的正交设计计算结果
Tab.2 Orthogonal design calculation at the first stage time 5 s of gates close

水平数	T_{S2}/s	$V(T_{S2})$	Y_d	$V(Y_d)$	T_z/s	$V(T_z)$
1	10	0.680	0.4	0.717	30	0.684
2	15	0.679	0.5	0.707	40	0.677
3	20	0.674	0.6	0.682	45	0.675
4	25	0.676	0.7	0.604	50	0.674

表3 设计水头下优化关闭规律及过渡过程计算成果
Tab.3 Optimal close law and transient calculation at rated head

序号	T_{S1}/s	T_{S2}/s	Y_d	T_z/s	β	ξ	P	V	$H_{w,min}/m$
1	5	20	0.7	50	0.393	0.407	0.323	0.597	2.82
2	8	24	0.7	60	0.371	0.332	0.301	0.537	4.16
3	10	30	0.7	80	0.349	0.297	0.282	0.498	4.63

表4分别列出了机组关闭规律优化前后的计算结果, $P_{z,max}$ 为过渡过程中最大轴向正推力. 可以看出, 最佳关闭规律下的过渡过程的品质较关闭规律优化前的过渡过程品质有了明显的改善, 这说明通过正交设计计算法可以寻求最佳的导叶和桨叶关闭规律, 使机组在甩负荷时获得较好的过渡过程.

优化设计还表明, 桨叶的关闭规律对灯泡贯流式水轮机甩负荷的过渡过程有显著的影响. 桨叶关闭速度太快, 过渡过程的品质较差, 因此要防止桨叶关闭过快. 相反, 桨叶缓慢关闭可显著降低引水管中水击压力以及尾水管进口的真空度, 同时还可显著降低机组的转速及轴向反推力.

表4 机组关闭规律优化前后比较
Tab.4 Comparison of unit close law before and after optimization

	β		H_{max}/m		$P_{z,max}/kN$		P_{max}/kN		$H_{w,min}/m$	
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
设计水头	0.421	0.372	20.69	19.03	850.788	816.596	-547.636	-216.138	0.44	3.39
最大水头	0.258	0.244	20.20	17.70	644.935	644.935	-337.628	-244.836	-1.96	2.62

3 结 论

1) 以某灯泡贯流式电站的实际工程布置为基础, 建立了以转速升高、导叶前水压力以及轴向水推力组成的过渡过程目标函数.

2) 采用适于多因素、多水平的正交设计计算法, 可以寻求较佳的关闭规律, 使灯泡贯流式机组在甩负荷时获得较好的过渡过程品质.

3) 对机组甩负荷关闭规律的优化设计, 可为研究灯泡贯流式机组水力过渡过程提供参考.

参考文献 (References)

- [1] 宋厚彬, 李伟力, 杨逢瑜. 轴径向支架安放角对灯泡贯流式水轮发电机通风结构的影响[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2013, 34(3): 281-286.
Song Houbin, Li Weili, Yang Fengyu. Placement angle effect of axial and radial stent on ventilation structure in bulb tubular turbine [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2013, 34(3): 281-286. (in Chinese)
- [2] 郑源, 李玲玉, 周大庆, 等. 微水头灯泡贯流式水轮机支撑及导叶联合设计[J]. 华中科技大学学报: 自然

科学版, 2014, 42(9): 128-132.

Zheng Yuan, Li Lingyu, Zhou Daqing, et al. Joint design of supports and guide vanes in micro head bulb turbine [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(9): 128-132. (in Chinese)

- [3] 黄中良, 赵显忠, 程云山. 特大型灯泡贯流式机组机电安装技术难点[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(1): 72-75.

Huang Zhongliang, Zhao Xianzhong, Cheng Yunshan. Technical difficulties of installation of mechanical and electrical equipment for large scale bulb tubular turbine units [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(1): 72-75. (in Chinese)

- [4] 王正伟, 杨校生, 肖业祥. 新型双向潮汐发电水轮机性能优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(5): 417-421.

Wang Zhengwei, Yang Xiaosheng, Xiao Yexiang. Hydraulic performance optimization of bidirectional tidal power turbine [J]. Journal Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(5): 417-421. (in Chinese)

- [5] 刘延泽, 常近时. 重力场对灯泡贯流式水轮机流场分析及水力性能评估的影响[J]. 水利学报, 2008, 39

- (1): 96 - 102.
- Liu Yanze, Chang Jinshi. Influence of gravity on flow field analysis and hydraulic performance evaluation of bulb turbine [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1): 96 - 102. (in Chinese)
- [6] 钱忠东,魏巍,冯晓波. 灯泡贯流式水轮机全流道压力脉动数值模拟[J]. 水力发电学报, 2014, 33(4): 242 - 249.
- Qian Zhongdong, Wei Wei, Feng Xiaobo. Numerical simulation of pressure pulsation in the whole flow passage of bulb turbine [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(4): 242 - 249. (in Chinese)
- [7] 王辉斌,莫剑,田海平,等. 灯泡贯流式水轮发电机组优化运行试验研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(6): 211 - 216.
- Wang Huibin, Mo Jian, Tian Haiping, et al. Experimental study of combined condition optimization in bulb-type hydro generating set [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6): 211 - 216. (in Chinese)
- [8] 沙锡林. 贯流式水电站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1980.
- [9] 常近时. 贯流式水轮机基本力特性的解析表达式[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(6): 71 - 73.
- Chang Jinshi. Analytical expressions of basic force characteristics of bulb hydraulic turbines [J]. Journal of China Agricultural University, 1996, 1(6): 71 - 73. (in Chinese)
- [10] 刘延泽,常近时. 灯泡贯流式水轮机装置甩负荷过渡过程基于内特性解析理论的数值计算方法[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(1): 89 - 93.
- Liu Yanze, Chang Jinshi. Numerical method based on internal character for load rejection transient calculation of a bulb turbine installation [J]. Journal of China Agricultural University, 2008, 13(1): 89 - 93. (in Chinese)
- [11] 夏林生,程永光,张晓曦,等. 灯泡式水轮机飞逸过渡过程3维CFD模拟[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2014, 46(5): 35 - 41.
- Xia Linsheng, Cheng Yongguang, Zhang Xiaoxi, et al. 3D CFD simulation of the runaway transients of bulb turbine [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2014, 46(5): 35 - 41. (in Chinese)
- [12] 陈云良,伍超,鞠小明,等. 灯泡贯流式电站机组及下游河道的水力过渡过程计算[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2004, 36(3): 28 - 31.
- Chen Yunliang, Wu Chao, Ju Xiaoming, et al. Calculation of transients flow in units and downstream channel for power station of bulb tubular type turbine [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2004, 36(3): 28 - 31. (in Chinese)
- [13] 苏沛兰,廖华胜. 基于正交设计的掺气坎体型设计数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展, 2011, 26(2): 217 - 227.
- Su Peilan, Liao Huasheng. Investigation of numerical simulation for aerator shape based on orthogonal design [J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(2): 217 - 227. (in Chinese)
- [14] Wylie E B, Streeter V L. Fluid Transients[M]. New York: Mc Graw - Hill Book Company, 1978.

(责任编辑 朱漪云)

—————
 (上接第321页)

- [11] 李仁民,刘松玉,方磊,等. 采用随机生长四参数生成法构造黏土微观结构[J]. 浙江大学学报:工学版, 2010, 44(10):1897 - 1901.
- Li Renmin, Liu Songyu, Fang Lei, et al. Micro-structure of clay generated by quartet structure generation set [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2010,44(10): 1897 - 1901. (in Chinese)
- [12] Qian Y H, Humières D D', Lallemand P. Lattice BGK models for navier-stokes equation[J]. Europhysics Letters, 1992,17(6): 479 - 484.
- [13] Guo Z L, Zheng C G, Shi B C. Non-equilibrium extrapolation method for velocity and pressure boundary conditions in the lattice Boltzmann method [J]. Chinese Phys,2002,11(4): 366 - 374.
- [14] Zou Q, He X. On pressure and velocity boundary conditions for lattice Boltzmann BGK model[J]. Physics of Fluids,1997,9(6):1591 - 1598.

(责任编辑 朱漪云)