

高海拔地区大容量机组尾水管进口压力的控制研究

陈建国, 张晓宏, 张俊发

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了使高海拔地区大容量机组水力过渡过程中尾水管进口压力满足规范要求, 选择合理的导叶关闭过程至关重要, 导叶关闭过程是水力过渡过程中解决水电站运行安全问题最经济、最常用的措施之一。结合某高海拔地区大容量机组水电站工程实例, 采用特征线计算方法, 应用过渡过程软件进行仿真计算研究。结果表明: 对于高海拔地区大容量机组水电站, 选择合理的导叶折线关闭规律, 能有效地改善尾水管进口压力, 从而满足按海拔高程修正后的控制标准。研究成果可为规范控制高海拔地区大容量机组水电站水力过渡过程中尾水管的进口压力提供参考。

关键词: 大容量机组; 导叶关闭过程; 尾水管进口压力; 水力过渡过程; 高海拔地区

中图分类号: TV734.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)04-0086-04

Draft pipe inlet pressure control of large capacity generation units in high altitude areas

CHEN Jianguo, ZHANG Xiaohong, ZHANG Junfa

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to meet the specification requirements for the draft pipe inlet pressure, it is crucial to select a rational guide vane closure procedure in the hydraulic transition process of large capacity generation unit in high altitude areas, which is one of the most common and economic measures for the safety operation of the hydropower station. In this paper, taking a hydropower station with large capacity generation unit in a high altitude area as the study object, we adopted characteristic line method to calculate the closure procedures using transition process simulation software. The results show that choosing the appropriate broken-line closure procedure of the guide vane can effectively improve the draft pipe inlet pressure of such hydropower stations, so as to meet the control standard which is revised based on the high altitude. The research plays an important guiding role in the application of specifications to the draft pipe inlet pressure control of hydropower stations with large capacity generation units in high altitude areas.

Key words: large capacity unit; guide vane closure procedure; draft pipe inlet pressure; hydraulic transition process; high altitude area

1 研究背景

在水电站运行过程中, 为了保证水轮机处于高效、安全、经济的运行环境, 很好地控制尾水管进口压力是水电站过渡过程中必须解决的重要问题, 相关规范对尾水管进口真空度最大值也做了严格限制(8 m 水头内)^[1-2]。目前, 关于导叶关闭规律对尾

水管进口压力的影响已有许多研究成果, 例如陈丹等^[3]研究了不同导叶关闭规律与不同尾水调压室进行组合对尾水管真空度的影响。王煜等^[4]、齐学义等^[5]研究表明采用非固定模式导叶关闭规律比固定导叶关闭规律能更有效控制机组压力上升和转速升高。陈玉等^[6]、王煜等^[7]研究了不同导叶关闭规律对水电站流道压力空间分布差异。徐利君

收稿日期: 2019-11-04; 修回日期: 2020-02-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279162)

作者简介: 陈建国(1995-), 男, 甘肃陇西人, 在读硕士研究生, 研究方向为水电站水力过渡过程研究。

通讯作者: 张晓宏(1962-), 男, 陕西西安人, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为水电站水力过渡过程研究。

等^[8]分析了在考虑 S 特性和脉动压力时对不同导叶关闭规律的优化。储善鹏等^[9]、张健等^[10]、蒋玮等^[11]研究了水电站发生相继甩负荷工况时,导叶关闭规律对尾水进口最小压力其的影响。李敏等^[12]研究了导叶“先快后慢”关闭规律对蜗壳末端压力、尾水管真空度和转速升高的影响。但上述研究成果明确涉及到高海拔地区水电站的较少。本文在前人研究的基础上,结合某实际高海拔地区大容量机组水电站工程实例,深入研究了不同导叶关闭规律对高海拔地区大容量机组电站尾水管进口压力的影响,得到了合理的导叶关闭规律,达到了有效控制尾水管进口压力的目的。

2 工程概况

某水电站位于青海省贵德县与贵南县交界的黄河干流上,平均海拔 2 200 m,属于高海拔电站,电站装机容量 4 200 MW,共装机 6 台,单机容量 700 MW,属于大容量机组,主要承担西北电网的调峰和事故备用。

水库上游校核洪水位为 2 457.00 m,设计洪水位为 2 452.00 m,正常蓄水位为 2 452.00 m,死水位为 2 440.00 m,下游设计洪水位为 2 243.94 m,6 台机运行尾水位为 2 240.20 m,3 台机运行尾水位为 2 237.90 m,1 台机运行尾水位为 2 233.40 m,最低运行尾水位为 2 232.40 m。

该水电站机组采用单机单管的输水系统,压力输水管道可分为上水平段(包括渐变段)、上弯段、竖井段、下弯段、下水平段(包括渐缩段)5 个部分,压力输水管内径为 9.5 m,为全地下埋管布置。尾水从每台机尾水管后引至尾水调压室,每 3 台机组共用 1 个尾水调压室,然后共用 1 条尾水隧洞引至下游河道,即尾水系统为“三机一室一洞”布置形式,调压室型式为阻抗式,直径为 27 m,断面面积为 572.555 m²,阻抗孔口直径为 10.5 m。

该水电站引水发电系统水力过渡过程仿真模拟如图 1 所示,其中 J1、J2、J3、J4、J5、J6 为上游水库;J25、J26、J27、J28、J29、J30 为 6 台水轮发电机组;J43、J44 为尾水调压室;J45、J46 为尾水下游。

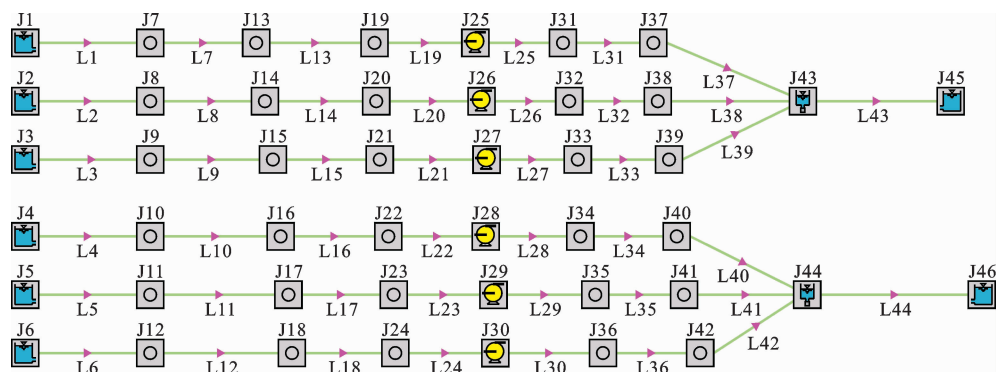


图 1 某水电站引水发电系统水力过渡过程仿真模拟图

3 机组基本参数及控制标准

3.1 机组基本参数

该水电站水轮机基本参数如表 1 所示。

3.2 控制标准

根据我国相关规范^[13]中调节保证计算的规定,结合该水电站的实际情况,机组丢弃负荷时,最大转速的升高率和蜗壳末端最大压力升高率应符合下列标准:

(1)大容量机组最大转速升高率相对值 $\beta_{\max} \leq 45\%$ 。

(2)蜗壳末端允许的最大压力升高率 $\zeta_{\max} \leq 30\%$;蜗壳末端最大压力 $\leq 290\ 9.81\ \text{kPa}$ 。

表 1 水轮机基本参数

参数	数值
额定转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	142.90
额定功率/MW	711.00
额定水头/m	205.00
额定流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	378.00
转轮直径/m	6.90
额定效率/%	94.32
最高效率/%	96.14
单机容量/MW	700.00
最大飞逸转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	255.00
安装高程/m	2220.00
转动惯量/($\text{t} \cdot \text{m}^2$)	131000.00

(3) 根据文献[1], 尾水管进口最大真空度应按海拔高程修正 ($H_v \leq 8 - \frac{V}{900}$), 因此, 尾水管进口最大真空度应小于 $5.53 \times 9.81 \text{ kPa}$ 。

(4) 调压室最高涌浪水位以上的安全超高不宜小于 1.0 m ; 调压室最低涌浪水位与尾水管顶部之间的安全高度不宜小于 1.0 m 。

4 导叶关闭规律的计算结果与分析

4.1 计算工况

根据该水电站的具体运行情况, 拟定了两种典型工况, 用于模拟机组突甩全负荷大波动过渡过程。计算工况见表 2。

表 2 计算工况

工况编号	工况说明
A1	上、下游设计洪水位、3 台机组同时甩额定负荷
A2	3 台机运行尾水位、3 台机组同时甩全负荷

4.2 导叶直线关闭规律计算结果

机组按照直线关闭规律进行分析计算, 以了解有效关闭时间, 机组的最大转速上升率和蜗壳末端最大压力的关系, 这是确定机组折线关闭规律的基础^[14-16]。本次计算有效关闭时间 T_s 取 13s, 14s 和 15s 3 种情况, 导叶直线关闭规律下的计算结果如表 3 所示。

由表 3 可知, 通过延长导叶有效关闭时间, 蜗壳末端最大压力逐渐减小, 而转速最大升高率逐渐升高, 尾水管进口最小压力逐渐增大。在两种典型工况下, 对于 3 种直线关闭规律, 蜗壳末端最大压力皆小于允许值 $290 \times 9.81 \text{ kPa}$; 转速最大升高率皆大于允许值 45%; 在 A2 工况下尾水管进口最小压力皆不满足允许值。因此, 导叶直线关闭规律无法满足该水电站的调节保证计算的要求。

4.3 导叶折线关闭规律计算结果

在直线关闭规律的计算结果基础上, 对 A2 工况下的调节保证计算采用不同的两段折线关闭规律。常见的两段折线关闭规律如图 2 所示^[17-18], 其中, $\alpha_{\max}$ 为导叶的最大开度, α_s 为导叶的拐点开度, T_c 为调速器不动时间, T_{s1} 为拐点时间, T_s 为导叶关闭总时间。按照文献[19]中对折点位置所述, 将 α_s 拟定为 60%, 选取 T_{s1} 为 3.0 和 3.5 s, 计算结果如表 4 所示。

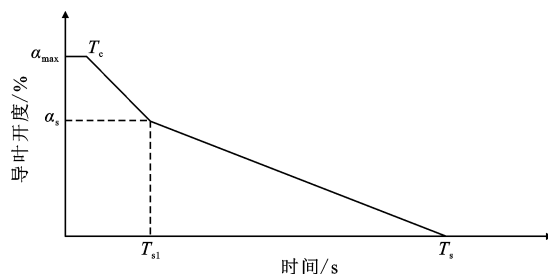


图 2 A2 工况导叶两段折线关闭规律示意图

表 3 导叶直线关闭规律计算结果

关闭时间/s	A1			A2		
	转速最大升高率/%	蜗壳末端最大压力/9.81kPa	尾水管进口最小压力/9.81kPa	转速最大升高率/%	蜗壳末端最大压力/9.81kPa	尾水管进口最小压力/9.81kPa
13	46.67	258.19	-2.82	46.70	251.46	-9.58
14	48.31	256.35	-2.51	48.35	249.62	-9.28
15	49.67	254.92	-1.10	49.96	248.19	-7.86

表 4 A₂ 工况导叶两段折线关闭规律计算结果

导叶序号	T_s/s	拐点开度/%	T_{s1}/s	转速最大升高率/%	尾水管进口最小压力/9.81kPa	调压室最高涌浪水位/m	调压室最低涌浪水位/m
1	16	60	3.0	42.87	-6.07	2248.36	2218.15
2	16	60	3.5	44.26	-6.65	2248.37	2218.13
3	18	60	3.0	44.28	-5.35	2248.32	2218.29
4	18	60	3.5	45.62	-5.59	2248.33	2218.26
5	20	60	3.0	45.66	-5.09	2248.24	2218.51
6	20	60	3.5	46.97	-5.23	2248.26	2218.47

由表4折线关闭规律计算结果可看出:(1)通过改变导叶关闭过程,可以显著改变调节保证计算的结果。按照计算结果,在A2工况下6种导叶关闭过程中,尾水管进口最小压力皆大于 -8×9.81 kPa,但是该水电站属于高海拔地区大容量机组水电站,按照要求,尾水管进口最小压力应大于 -5.53×9.81 kPa。而序号为1、2的导叶关闭过程中的尾水管进口最小压力皆小于 -5.53×9.81 kPa,不满足该水电站的控制标准。(2)序号为4、5、6导叶的关闭过程中,其转速最大升高率均大于45%,也不满足该水电站的控制标准。(3)在A2工况拐点开度和拐点时间不变的条件下,随着导叶关闭总时间的延长,转速最大升高率逐渐升高,尾水管进口最小压力逐渐增大,类似直线关闭规律,A2工况不同关闭总时间的转速变化过程线和尾水管进口压力线如图3(a)、3(b)所示。当机组丢弃负荷时,尾水管进口压力线分别在导叶拐点时间和导叶关闭总时间处发

生突变,即尾水管进口最小压力出现在导叶关闭总时间处,随着导叶关闭总时间的增大,尾水管进口最小压力也在增大,则尾水管进口最小压力受导叶关闭过程的影响显著。(4)在同一工况下,通过改变导叶关闭过程,对调压室涌浪水位的影响甚微,且均满足水电站控制标准,A2工况不同关闭总时间的调压室涌浪水位变化如图3(c)所示。

综上所述,关闭总时间 T_s 取18 s、折点时间 T_{s1} 取3 s、拐点开度取60%这一的导叶运行方式可保证机组转速最大升高率、蜗壳末端最大压力和尾水管进口最小压力均满足要求。

根据文献[17-19]中对导叶关闭规律的研究,本文计算了多种导叶关闭过程,通过改变导叶关闭总时间 T_s 和折点时间 T_{s1} ,控制高海拔地区大容量机组尾水管进口压力,进而选择合理导叶关闭过程,可为以后深入研究高海拔地区大容量机组的尾水管进口压力变化提供参考。

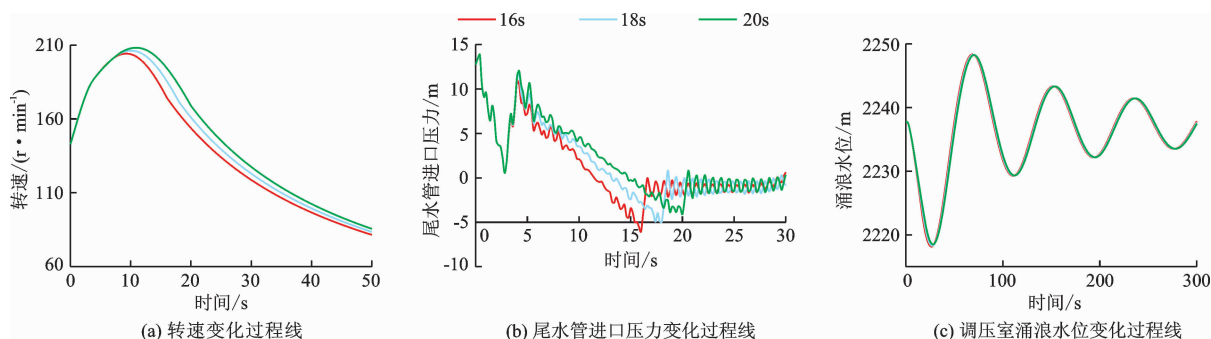


图3 A2工况下导叶不同关闭总时间的转速、尾水管进口压力及调压室涌浪水位变化过程线($T_{s1} = 3$ s)

5 结论

通过对高海拔地区大容量机组水电站工程实例过渡过程的计算与分析,探讨了导叶关闭过程的选择对高海拔地区大容量机组电站尾水管最小压力值的影响。得出以下主要结论:

(1)对于高海拔地区大容量机组水电站工程的过渡过程,控制导叶直线关闭过程无法满足尾水管进口压力值的要求。

(2)高海拔地区大容量机组水电站尾水管进口压力控制可通过优化导叶折线关闭过程来满足。通过优化导叶两段折线关闭过程,可保证蜗壳末端最大压力、机组转速最大升高率和尾水管进口最小压力均满足规范要求。

(3)通过对电站运行多种工况和导叶关闭过程的组合研究表明,合理的导叶运行方式能够有效控

制高海拔地区大容量机组水电站尾水管的进口压力,可改善水电站运行条件。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 水电站调压室设计规范: NB/T 35021 - 2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [2] 刘启钊, 胡明. 水电站: 第四版[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [3] 陈丹, 杨建东. 导叶关闭规律和尾水调压室对尾水管真空度的影响[J]. 水电能源学, 2004(2): 45-48.
- [4] 王煜, 田斌. 对水轮机导叶最优关闭规律的探讨[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2007, 29(2): 113-115+132.
- [5] 齐学义, 周俊, 汪玮华, 等. 水电站调节保证计算中导叶关闭规律探讨[J]. 价值工程, 2012, 31(26): 97-98.
- [6] 陈玉, 张洋, 欧邦虎, 等. 导叶关闭规律对水电站流道压力分布特性影响[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 135-143.

(下转第97页)

- 验证[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(4): 71-73.
- [13] 吴剑疆,茅泽育,王爱民,等. 河道中水内冰演变的数值计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(5): 702-705.
- [14] 王晓玲,张自强,李 涛,等. 引水流量对引水渠道中水内冰演变影响的数值模拟[J]. 水利学报, 2009, 40(11): 1307-1312.
- [15] 李志军,韩 明,秦建敏,等. 冰厚变化的现场监测现状和研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 753-757.
- [16] 赵 新. 大型输水工程冰期输水能力与冰害防治控制研究[D]. 天津:天津大学, 2011.
- [17] 郭春雨,李夏炎,王 帅,等. 冰区航行船舶碎冰阻力预报数值模拟方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(2): 145-150+156.
- [18] 吴素杰,宗全利,郑铁刚,等. 高寒区多口融冰井引水渠道水温变化三维模拟及井群优化布置[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 130-137.
- [19] 于天来,袁正国,黄美兰. 河冰力学术性能试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28(6): 937-940.
- [20] 李抗彬,沈 冰,李智录,等. 基于非恒定水流模拟的灌区明渠水力响应特征分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 107-114.
- [21] 李大冉. 输水工程冰力学模型试验及数值模拟[D]. 天津:天津大学, 2009.
- [22] 黄志刚. 船舶-层冰和船舶-冰山碰撞数值模拟研究[D]. 大连:大连理工大学, 2018.
- [23] 徐国宾,李大冉,黄 焱,等. 南水北调中线输水工程若干冰力学问题试验研究[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 808-815.
- [24] 陈云飞. 冰水二相流输水渠道流冰输移演变机理研究及其应用[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2019.
- [25] 宋 安,范晓雷,史庆增,等. 闸墩冰荷载及过冰能力的模型试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1121-1126+1132.

(上接第89页)

- [7] 王 煜,陈 玉,张 洋,等. 水力过渡过程中坝后式水电站流道压力空间分布特性[J]. 水利水电技术, 2019, 50(7): 105-115.
- [8] 徐利君,杨桀彬,王康生,等. 水轮机导叶关闭规律对蜗壳末端压力的影响[J]. 水电能源科学, 2017, 35(9): 131-134.
- [9] 储善鹏,张 健,陈 胜,等. 机组导叶关闭规律对相继甩工况的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(1): 31-37.
- [10] 张 健,卢伟华,范波芹,等. 输水系统布置对抽水蓄能电站相继甩负荷水力过渡过程影响[J]. 水力发电学报, 2008, 27(5): 158-162.
- [11] 蒋 玮,张 健. 输水洞径对可逆式机组相继甩负荷尾水进口压力影响[J]. 水电能源科学, 2013, 31(10): 159-161+229.
- [12] 李 敏,张 健,俞晓东. 水轮机导叶“先快后慢”关闭规律适用性研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(3): 101-107.
- [13] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水力发电厂机电设计规范: DL/T 5186-2004[S]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- [14] 胡细波,毛先强,张楠林. 水轮机的导叶关闭规律分析及应用[J]. 水电与新能源, 2015(7): 66-68.
- [15] 徐晓燕,张晓宏. 水轮机导叶关闭过程的探讨研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(2): 135-138.
- [16] 王 庆. 水电站过渡过程机组活动导叶关闭规律研究[J]. 水利建设与管理, 2019, 39(8): 18-21.
- [17] 占小涛,张晓宏,张俊发. 水轮机导叶开启和关闭规律探讨[J]. 人民长江, 2017, 48(9): 89-93.
- [18] 刘生国. 浅析水轮机导叶两段关闭规律的选择[J]. 水电能源科学, 2009, 27(4): 173-174.
- [19] 高 全. 南美水电站导叶分段关闭的调节保证计算[J]. 小水电, 2008(5): 21-24.