

带调压井的长引水隧洞电站水力过渡过程校核分析

方 超

(中交一公局电气化工程有限公司, 北京 100020)

摘 要: 为了实现水电站安全稳定运行, 本文以带调压室的长引水隧洞电站的大波动水力过渡过程为研究对象, 结合电站特点及行业标准要求, 选取可能出现的甩负荷极端工况进行数值模拟计算, 分析了机组在大波动过渡过程中的机组最大转速升高率、配水环管最大压力值及涌浪高度等调节保证指标。大波动过渡过程计算结果表明, 机组在甩负荷工况下, 配水环管最大压力、机组最大转速上升率、最高及最低涌浪水位等参数指标满足行业标准及电站设计要求, 为长引水系统电站的结构及参数设计提供参考。

关键词: 调压室; 长引水隧洞; 大波动过渡过程计算

中图分类号: TK71⁺2

文献标识码: B

文章编号: 1672-5387(2025)05-0009-05

DOI: 10.13599/j.cnki.11-5130.2025.05.003

0 引言

水电站的大波动过渡过程是水力与机械相互影响、相互制约的复杂过渡过程, 也是电站实际工作过程中不可避免的一种特殊运行工况, 电站如果发生事故, 大概率与过渡过程有关, 事故发生时机组甩负荷引起水、机、电剧烈波动, 表现为剧烈的振动、压力脉动及水击现象, 直接影响水电站建设及工程的经济性^[1]。对于长引水系统电站, 长引水管路的水力惯性大, 管路系统内极易出现水击压力及机组转速的剧烈变化等危险运行现象, 威胁电站的稳定运行, 影响机组的寿命^[2]。尤其是一管多机系统, 同一引水系统被多台机组共同使用, 机组间相互干扰大, 对系统的运行稳定性影响也较大, 因此, 对电站水力机组大波动过渡过程研究, 尤其对那些管道较长的引水式电站的研究, 将管道输水系统水力机组转速上升率、最大压力值等调保参数控制在标准范围内, 以实现机组高效、稳定运行^[3]。

本文以某“一管四机”长引水隧洞电站为研究对象, 采用数值模拟方法, 对其引水管道大波动过渡过程进行研究, 为长距离引水隧洞电站输水系统设计提供参考。

1 调压室水力计算分析

1.1 调压室设置条件计算

根据《水利水电工程调压室设计规范》^[4], 调压室的设置条件根据压力水道中的水流惯性时间常数 T_w 确定, 按照下式作初步计算:

$$T_w = \frac{\sum L_i V_i}{g H_p} \geq [T_w] \quad (1)$$

T_w —压力水道中水流惯性时间常数, s;

L_i —压力水道及蜗壳和尾水管(无下游调压室时应包括压力尾水道)各分段的长度, m;

V_i —各分段内相应的流速, m/s;

g —重力加速度, m/s²;

H_p —设计水头;

$[T_w]$ — T_w 的允许值, 一般取 2 s~4 s。

1.2 稳定断面面积计算

调压室的稳定断面面积按托马准则计算并乘以系数决定, 其计算公式如下:

$$A = K A_{th} = K \frac{L A_1}{2g \left(a + \frac{1}{2g} \right) (H_0 - h_{w0} - h_{wm})} \quad (2)$$

收稿日期: 2025-04-01

作者简介: 方 超(1984-), 男, 工程师, 从事水电站机电项目管理工
作。

$$\alpha = \frac{h_{w0}}{v^2} \quad (3)$$

A_{th} —托马临界稳定断面面积, m^2 ;

L —压力引水道长度, m ;

A_1 —压力引水管道断面面积, m^2 ;

H_0 —发电最小静水头, m ;

α —自水库至调压室水头损失系数;

v —压力引水道流速, m/s ;

h_{w0} —压力引水道水头损失, m ;

h_{wm} —压力管道水头损失, m ;

K —系数, 一般取值 1.0~1.1;

A —调压井稳定断面面积, m^2 。

1.3 调压室的涌浪计算

阻抗孔水头损失计算

$$h_c = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q}{\varphi S} \right)^2 \quad (4)$$

h_c —全部流量通过阻抗孔时的水头损失, m ;

φ —阻抗孔流量系数, 取值 0.7;

S —阻抗孔断面面积, m^2 ;

Q —引水流量, m^3/s 。

1.3.1 丢弃全负荷时最高涌浪水位

按正常蓄水位时, 4 台机组满载运行时瞬时丢弃全负荷计算最高涌浪水位。丢弃全负荷时的最高涌波计算:

当 $\lambda' h_{c0} < 1$ 时, 按照下式计算

$$(1 + \lambda' Z_{\max}) - \ln(1 + \lambda' Z_{\max}) = (1 + \lambda' h_{c0}) - \ln(1 + \lambda' h_{c0}) \quad (5)$$

$$\lambda' = \frac{2gA(h_{w0} + h_{c0})}{LA_1 v_0^2} \quad (6)$$

$$m' = \frac{Q}{Q_0} \quad (7)$$

L —压力引水管道长度, m ;

h_{c0} —全部流量通过阻抗孔的水头损失值, m ;

h_{w0} —流量为 Q_0 (丢弃负荷前), 上游库水位与调压室水位差, m ;

v_0 —对应于 Q_0 时压力引水管道的流速, m/s ;

Q —增加负荷前的流量, m^3/s ;

Z_{\max} —丢弃全负荷时的最高涌波水位, m 。

1.3.2 增加负荷时最低涌波

按沉砂池正常蓄水位时, 0 台机组增至 4 台机组全负荷工况时计算最低涌波水位。

$$\frac{Z_{\min}}{h_{w0}} = 1 + \left(\sqrt{0.5\varepsilon - 0.275\sqrt{m'}} + \frac{0.1}{\varepsilon} - 0.9 \right) \times (1 - m') \times \left(1 - \frac{m'}{0.63\varepsilon^{0.62}} \right) \quad (8)$$

$$Z' = \frac{Q_0}{A} \sqrt{\frac{LA}{gA_1}} \quad (9)$$

Z' —压力管道系统的摩阻为零丢弃全负荷时的自由振幅, m ;

Z_{\min} —丢弃全负荷时的最低涌波, m ;

ε —无因次系数, 表示压力水道—调压室系统的特性。

2 大波动过渡过程计算指标

根据电站特点与 NB/T 10878—2021《水力发电厂机电设计规范》^[5] 确定设计准则如下:

(1) 机组最大转速升高率控制值

水电站采用冲击式机组, 机组的最大转速升高率按不高于 30% 控制。

(2) 配水环管最大压力升高率控制值

额定水头为 100~300 m 时, 配水环管最大压力升高率宜小于 30%。水电站正常蓄水位 1 785.04 m , 水轮机安装高程 1 551.35 m , 配水环管最大静水压力为 233.65 mH_2O 。电站额定水头 218.8 m , 配水环管最大压力升高率按 30% 控制, 相应配水环管最大水压力(静压和升压)计算限值宜不大于 304 mH_2O 。

(3) 调压室涌浪

最低涌浪水位控制值应比调压室底板高程至少高 2 m , 最高涌浪水位控制值应比交通廊道最高点高程或顶部起重设备底部高程低至少 1 m 。由于水电站调压室底板高程 1 755.36 m , 顶部高程 1 805 m , 所以调压室最低涌浪水位按不低于 1 757.36 m 控制, 最高涌浪水位按不高于 1 804 m 控制。

3 电站概况介绍

该电站为引水式电站, 引水方式为一管四机, 电站输水系统为压力隧洞引水至厂房。电站装机 4 × 13 MW, 机组为冲击式水轮机, 机组设计额定水头为 218.8 m , 最大水头为 229.02 m , 正常蓄水位为 1 785 m , 水轮发电机组参数见表 1。

根据式 (1) 计算结果, $T_w = 5.18 s \geq [T_w]$, 该电站应设置调压室。电站引水系统由沉砂池、引水隧洞、调压井、压力钢管及尾水渠组成。引水隧洞为近

似马蹄形,内径为 4.0 m,长 3 850 m,调压井后段及压力钢管段长度分别为 207 m、400 m,过流流量为 26 m³/s。引水系统调压井为阻抗式调压井,调压井内径 8.0 m,阻抗孔直径为 3.0 m。

表 1 水轮发电机组参数

参数	数值
水轮机型号	CJT80x-L-200/4X18.5
水轮机出力 /MW	13
机组台数	4
单机额定流量 /m ³ /s	6.5
额定水头 (净)/m	218.8
额定转速 /r/min	300
转轮直径 /m	2.00
GD ² /t·m ²	210
装机高程 /m	1 551.35

4 大波动过渡过程计算工况及计算结果分析

4.1 计算工况

根据电站运行经验,机组运行时最危险的工况是甩负荷工况,可能出现水头、压力、转速瞬时升至最大值等极端情况。根据行业标准及电站特点,本次研究选择了 8 种典型工况进行分析,拟定计算工况如表 2 所示。

表 2 调节保证(大波动过渡过程)计算工况

计算工况	工况说明
正常开启、 关闭工况	D1 上游正常蓄水位 1 785 m,4 台机额定出力同时甩全部负荷,喷嘴、折向器正常关闭
	D2 上游正常蓄水位 1 785 m,4 台机 75% 额定出力同时甩全部负荷,喷嘴、折向器正常关闭
	D3 上游正常蓄水位 1 785 m,4 台机 50% 额定出力同时甩全部负荷,喷嘴、折向器正常关闭
	D4 上游正常蓄水位 1 785 m,4 台机 25% 额定出力同时甩全部负荷,喷嘴、折向器正常关闭
拒动工况	D5 上游正常蓄水位 1 785 m,4 台机额定出力同时甩负荷,喷嘴、折向器拒动,球阀 75 s 关闭
	Z1 上游正常蓄水位 1 785 m,3 台机运行,1 台增至全负荷,在流入调压室流量最大时刻 4 台机同时甩全负荷
组合工况	Z2 上游正常蓄水位 1 785 m,4 台机突增 1/3 负荷,在流入调压室流量最大时刻 4 台机同时甩全负荷
	Z3 上游正常蓄水位 1 785 m,4 台机最大出力同时甩全负荷;在流出调压室流量最大时刻 1 台机由空载增至额定负荷

4.2 计算结果及分析

冲击式机组的流量调节装置有喷针和折向器,水轮厂家建议水电站的折向器关闭时间整定为 2 s,喷针关闭时间整定为 60 s,按照一段直线关闭规律,大波动过渡过程计算结果见表 3。根据表 3 计算结果可知:

(1) 正常开启、关闭及拒动工况中, D1 工况(4 台机额定出力同时甩全部负荷,喷嘴、折向器正

常关闭),机组配水环管压力相对较大,最大值为 251.43 mH₂O;组合工况中, Z2 工况(4 台机突增 1/3 负荷,在流入调压室流量最大时刻 4 台机同时甩全负荷)机组配水环管压力相对较大,最大值为 252.77 mH₂O;综合考虑所有计算工况,配水环管压力最大的工况为组合工况 Z2,最大压力值为 252.77 mH₂O,小于 304 mH₂O 的控制要求。

(2) 正常开启、关闭及拒动工况中, D1 工况(4 台机额定出力同时甩全部负荷,喷嘴、折向器正常关闭),机组最大转速升高率相对较大,最大值为 11.99%;组合工况中, Z2 工况(4 台机突增 1/3 负荷,在流入调压室流量最大时刻 4 台机同时甩全负荷)机组最大转速升高率相对较大,最大值为 15.12%;综合考虑所有计算工况,机组最大转速升高率最大的工况为组合工况 Z2,机组转速最大升高率为 15.12%,小于 30% 的控制要求。

(3) 正常开启、关闭及拒动工况中, D5 工况(4 台机额定出力同时甩负荷,喷针、折向器拒动,球阀 75 s 关闭)调压室最高涌浪水位相对较大,最大值为 1 799.49 m;组合工况中, Z2 工况(4 台机突增 1/3 负荷,在流入调压室流量最大时刻 4 台机同时甩全负荷)调压室最高涌浪水位相对较大,最大值为 1 799.67 m;综合考虑所有计算工况,调压室最高涌浪水位最大的工况是组合工况 Z2,调压室最高涌浪水位为 1 799.67 m,小于检修闸门顶部高程 1 804 m。

(4) 正常开启、关闭及拒动工况中, D5 工况(4 台机额定出力同时甩负荷,喷针、折向器拒动,球阀 75 s 关闭)调压室最低涌浪水位值最小,为 1 774.05 m;组合工况中, Z3 工况(上游正常蓄水位 1 785 m,4 台机最大出力同时甩全负荷;在流出调压室流量最大时刻 1 台机由空载增至额定负荷)调压室最低涌浪水位最小,为 1 771.64 m;综合考虑所有计算工况,调压室最低涌浪水位最小的工况是组合工况 Z3,最低涌浪水位为 1 771.64 m,高于底板高程 1 755.36 m,且裕度较大。

(5) 综合考虑机组最大转速升高率、配水环管最大压力升高率及调压室涌浪 3 个指标,工况 Z2、Z3 为最极端工况,其中 Z2 工况的配水环管末端压力值、最大转速上升率及最高涌浪水位均最大,如图 1、图 2 所示, Z3 工况的调压室最低涌浪水位最小,如图 3 所示。Z2 工况配水环管末端最大压力值 252.77 mH₂O,小于 304 mH₂O 的控制要求;机组

转速最大升高率为 15.12%, 小于 30% 的控制要求; 闸门顶部高程 1 804 m。Z3 工况的最低涌浪水位调压室最高涌浪水位计算值 1 799.67 m, 小于检修 1 771.64 m 高于底板高程 1 755.36 m。

表 3 大波动控制工况下调节保证计算结果

工况	机组	配水环管末端最大压力 /mH ₂ O	极值发生时间 /s	最大转速升高率 $\beta_{max}/\%$	极值发生时间 /s	最高涌浪水位 /m	极值发生时间 /s	最低涌浪 /m	极值发生时间 /s
D1	1号	251.31	97.34	11.98	0.82	1 798.55	96.14	1 774.58	212.84
	2号	251.36	97.32	11.99	0.82				
	3号	251.43	97.42	11.86	0.82				
	4号	251.38	99.54	11.8	0.82				
D2	1号	248.81	90.18	10.8	0.86	1 796.09	84.8	1 776.09	201.52
	2号	248.84	83.54	10.8	0.86				
	3号	248.89	81.42	10.74	0.86				
	4号	248.94	83.54	10.7	0.86				
D3	1号	245.99	83.74	9.2	0.78	1 792.96	75.78	1 778.23	191.1
	2号	246.02	81.54	9.2	0.78				
	3号	246.01	81.54	9.18	0.78				
	4号	245.99	81.56	9.17	0.78				
D4	1号	243.14	73.08	5.97	1.04	1 789.74	67.54	1 780.71	182.7
	2号	243.08	73.08	5.97	1.04				
	3号	243.1	70.94	5.97	1.04				
	4号	243.13	75.28	5.97	1.04				
D5	1号	222.75	0.64	0	0.02	1 799.49	70.28	1 774.05	186.58
	2号	222.38	0.66	0	0.02				
	3号	220.11	0.6	0	0.02				
	4号	220.01	0.02	0	0.02				
Z1	1号	252	234.44	12.39	146.86	1 799.22	240.42	1 774.19	357.22
	2号	252	238.86	12.39	146.86				
	3号	252.03	236.68	12.26	146.86				
	4号	252.04	238.8	0	0.02				
Z2	1号	252.62	203.6	15.12	116.08	1 799.67	209	1 773.93	325.8
	2号	252.68	199.16	15.11	116.08				
	3号	252.77	199.16	14.94	116.08				
	4号	252.63	201.36	14.8	116.08				
Z3	1号	247.29	88.44	11.98	0.82	1 798.1	96.12	1 771.64	218.76
	2号	247.24	92.88	11.99	0.82				
	3号	247.34	60.14	11.86	0.82				
	4号	247.37	60.14	11.8	0.82				

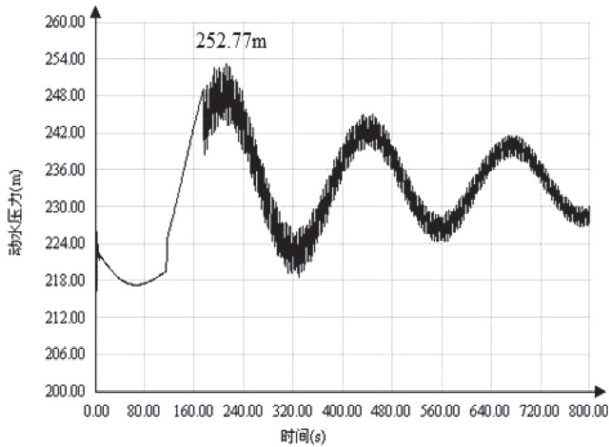


图 1 Z2 工况配水环管末端压力变化过程线

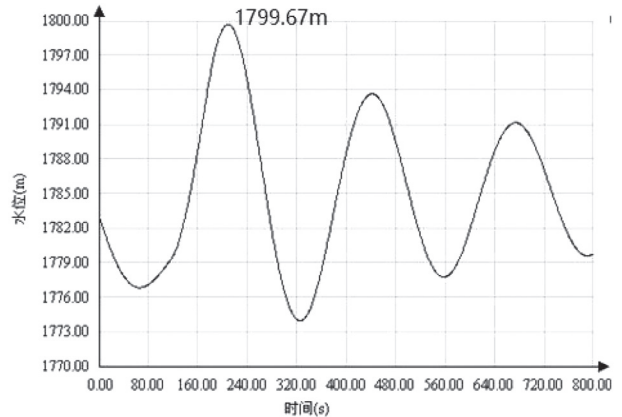


图 2 Z2 工况调压室涌浪水位变化过程线

(下转第 20 页)

安全系数低、不易安装及检修、日常维护难度大,汛期调速器油泵加载间隔缩短、甚至出现桨叶操作油管断裂等问题。

某电厂桨叶反馈装置按照本文提出的技术方法进行改造后,既解决了负荷波动的“顽疾”,又有效降低了机组的振动摆度数据,使机组的运行稳定性大为提高,为该厂远程集控运行建立了良好的基础。从电厂的实际运行情况可以看出,该新型桨叶反馈装置技术改造方法的成功应用,能够解决同类型水轮机桨叶反馈数据不准确、易卡涩、安全系数低的问题,具有积极的推广价值。

4 结语

桨叶反馈装置作为水轮发电机组,特别是导桨叶双调节机组的主要调节液压结构,数据测量的可靠性尤为重要。目前,国内多数的水电厂桨叶反馈装置存在测量不准、实时性不足的问题,对机组的安

全稳定运行带来很大安全隐患。本文介绍了某电厂自主研发的“基于直线位移的水电机组桨叶反馈装置”的设计思路及应用效果,完全可以解决现有问题,可为国内同类型电厂桨叶反馈装置改造提供一定的参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 秦毅,王阳阳,彭东林,等.电感式角位移传感器技术综述[J].仪器仪表学报,2022,43(11):1-14.
- [2] 熊建平,陈燕新,陈梁年.灯泡贯流式水轮机导叶与桨叶协联关系探讨[J].水电站机电技术,2019,42(7):7-12,76.
- [3] 祁英明,刘兴胜,荣红.大型轴流转桨式机组导叶和桨叶协联关系探讨[J].水电站机电技术,2020,43(9):1-4,71.
- [4] 肖启志,李建勇,邓亚.大型灯泡贯流式水轮发电机组负荷波动故障的分析及处理[C]//中电投五凌电力有限公司洪江水电厂.第十八次中国水电设备学术讨论会论文集,2011:149-151.
- [5] 陶永亮.直线位移传感器在注塑机上的应用[J].电子科技,2012,25(10):134-137.

(上接第12页)

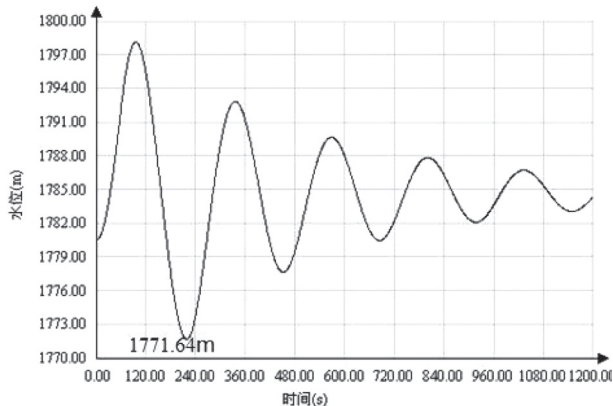


图3 Z3工况调压室涌浪水位变化过程线

5 结论

论文以某超长引水隧洞调压室电站为研究对象,分析了电站运行中可能出现的多种极端工况,并对这些极端工况进行了大波动过渡过程计算,计算结果表明:

(1) 组合工况 Z2 的配水环管最大压力值、机组最大转速上升率及调压室最高涌浪水位的计算值分别为 252.77 mH₂O、15.12%、1 799.67 m 均大于其他工况计算结果,组合工况 Z3 的调压室最低涌浪水位计算值为 1 771.64 m,低于其他工况,所以 Z2、Z3

为最极端工况。

(2) 最极端工况的配水环管最大压力值、机组最大转速上升率、调压室涌浪水位的计算结果均小于标准控制值(配水环管最大压力控制值 304 mH₂O, 机组最大转速上升率控制值 30%, 调压室最高涌浪水位控制值 1 804 m, 调压室最低涌浪水位控制值 1 757.36 m),说明电站调压井设计参数的合理性,为长引水系统电站的设计提供参考。

参考文献:

- [1] 宋方略.有压引水式电站过渡过程仿真[D].北京:华北电力大学,2018.
- [2] 李永兴,肖志怀,陈启卷.超长引水隧洞上下游双调压室电站水力过渡过程计算研究[J].中国农村水利水电,2017(10):131-135.
- [3] 腰贵玲,李浩.长引水系统电站大波动过渡过程研究综述[J].技术与市场,2020,27(9):58-60.
- [4] 能源行业水电勘测设计标准化技术委员会.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.
- [5] 能源行业水电电气设计标准化技术委员会.水力发电厂机电设计规范:NB/T 10878—2021[S].北京:中国水利水电出版社,2021.