

电厂循环水系统过渡过程数值计算

吴时强 吴修锋 王 勇 赵建钧

(南京水利科学研究院 江苏 南京 210029)

摘要 针对火电厂循环水系统特点,建立了一维圣维南方程的电厂循环水系统过渡过程数值模型,并结合福州江阴电厂一期工程循环水系统进行了过渡过程数值计算,分析和评价了水泵突然断电时阀门制动和阀门关闭两种工况下系统的安全性,提出了预防水锤事故发生的措施。

关键词 循环水系统 过渡过程 数值计算 江阴电厂

中图分类号 :TM621 文献标识码 :A 文章编号 :1006-764X(2005)S2-0001-04

国家电力公司福州江阴电厂位于福建省福清市江阴半岛南部滨海,厂址距福清市约 30 km,距福州市约 85 km。电厂一期拟建装机容量为 2×600 MW 的机组,机组采用直流供水方案,直接取用江阴半岛附近海水。2 台机组共用 1 个取水头部、1 根 D4800 盾构引水隧道,每台机组配 2 台循环水泵。电厂循环水系统由进水口、引水隧道、盾构工作井、前池、泵站、供水管道、凝汽器、排水管道和虹吸井等组成^[1]。

江阴电厂机组工程引水隧漫长 2 004 m,压力管道长约 1 000 m。在泵站管道系统中,如果水流速度由于某种原因突然改变(如水泵开启或关闭瞬间),将引起水流动量的急剧变化,管道水流会产生水锤现象,使管道中的压力产生急剧变化,水锤压力如作用在管道、阀门上,会导致水泵、阀门或管道破坏。水泵机组容量越大、管道越长、扬程越高,水锤问题就越突出。为了防止水锤事故的发生,确保系统安全,开展水锤问题的数学模型研究有着非常重要的现实意义。

本文结合江阴电厂循环水系统建立了基于圣维南方程的循环水系统过渡过程数值模型,针对其布置方案,分析水泵断电情况下引水系统的水力特性,为工程设计提供科学依据。

1 过渡过程数值计算方法

1.1 基本方程

电厂循环水系统的水流运动可以用一维圣维南方程来描述^[2,3],其基本方程为

$$g \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\lambda}{2d} v |v| = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial s} + v \sin \theta + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial s} = 0 \quad (2)$$

式中: H 为循环水系统管道的压力水头, m; v 为循环水系统管道内水流速, m/s; d 为循环水系统管道直径, m; a 为水击波传播速度, m/s; θ 为引水管道与水平面夹角(°); s 为管道沿程长度, m; t 为时间, s; g 为重力加速度。

式(1)和式(2)属于一阶拟线性双曲型偏微分方程组,可以采用特征线法求解。在计算时,将式(1)和式(2)沿特征线转换为常微分方程,然后可用有限差分法求解该常微分方程,获得管道内水力特征值。

1.2 边界条件

循环系统边界主要包括进出水口、叉管连结点、水泵、凝汽器、工作井和前池等边界,各边界的处理方法如下:①进出水口边界,可以假设外海水位不受引水系统水流影响,利用特征线方程求得边界水力特征值。②叉管连结点边界,利用节点流量守恒方程以及各管特征线方程联立求解,得到水力特征值。系统中工作井和前池边界可按照水电站引水系统中调压井的处理方法类似处理。③水泵边界方程由水流控制方程、水泵工作水头方程、蝶阀开度过程描述方程及力矩平衡方程等组成。泵特性曲线采用 SUTER 方法处理,联立求解水泵边界方程组,可求得流量、压力以及水泵转速等特征值。④凝汽器由 2 个水箱和细管簇组成,如图 1 所示。在水锤计算中,可以将细管簇用一当量管来代替^[4],并按照管道对其进行计算。

作者简介:吴时强(1964—),男,浙江诸暨人,教授级高级工程师,博士,从事电厂冷却水数值模拟研究。

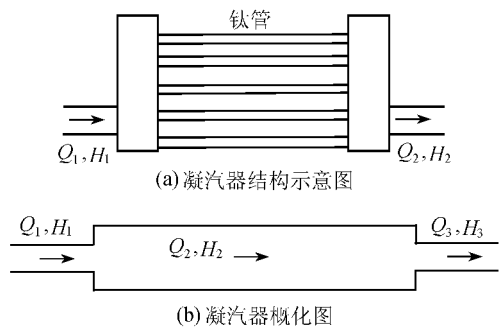


图1 凝汽器边界处理

2 计算结果分析

过渡过程计算考虑了外海潮位为设计低潮位、设计高潮位、平均潮位、97%低潮位、1%高潮位和0.1%高潮位6种水文条件以及水泵在断电情况下发生制动和蝶阀分段关闭两种水泵运行工况,计算结果分析如下。

2.1 蝶阀制动工况

水泵断电、蝶阀制动情况下,循环水系统管道沿程最大压力值均出现在引水系统进口处,最小压力均出现在凝汽器出口处。图2为设计低潮位条件、4台泵断电情况下阀后压力头变化过程。由图可见,阀后压力水头受阻力作用随时间衰减并逐渐趋于稳定。图3为循环水系统压力水头包络线分布,表明水泵后管道最小压力均低于管线高程,产生负压现象。

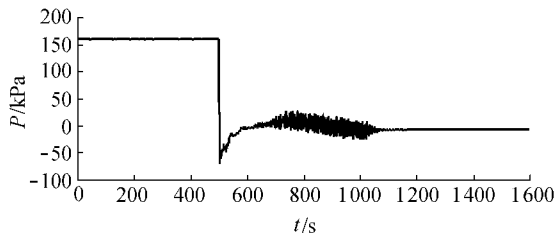


图2 阀后压力变化过程(设计低潮位、4台泵断电、阀门制动工况)

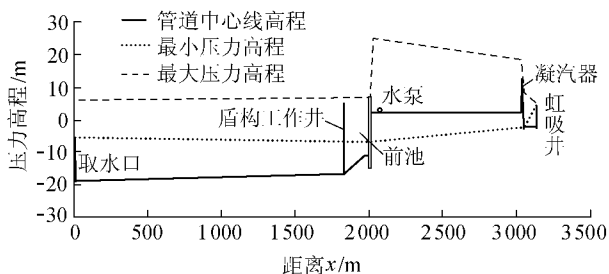


图3 循环水系统压力水头包络线

各种水文条件下,凝汽器内也均有负压存在,其最小压力出现在断电后发生倒流瞬时,最小压力发生在97%低潮位、4台泵断电情况。当1台泵断电时,凝汽器内的负压均比2台泵断电情况时高,其负压值低于汽化压力。

图4为1号机组凝汽器内的压力变化过程,最

小压力出现在断电初始阶段,随后在经过短时间的压力变化后即恢复正常。需要指出的是,一般情况下,当凝汽器出口负压低于当地汽化压力时,管道内的水体会发生汽化,使水柱不连续,当压力升高、汽泡溃灭时,会产生强大的冲击波,对管道造成破坏。由图5可以看出,凝汽器内出现的瞬间大负压可能会引起凝汽器出口水体汽化,从而影响机组的安全运行。因此,在工程运行中应尽量避免设计低潮位、4台水泵同时断电和阀门制动工况的发生。

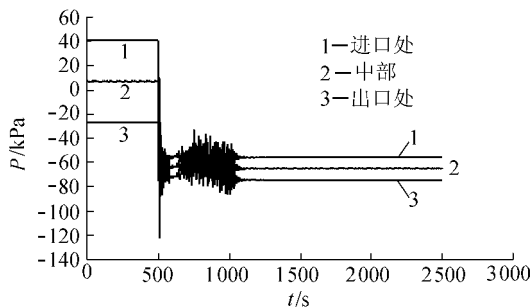


图4 1号机组凝汽器不同部位压力变化过程(设计低潮位、4台泵断电、阀门制动工况)

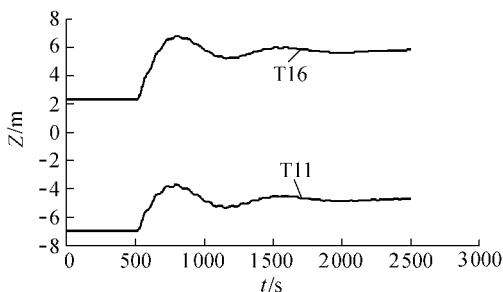


图5 工作井水位波动变化过程

工作井最高水位为6.82m,高于工作井的顶高程5.40m,此时会发生短时间的溢顶现象,需要强化工作井周边的排水措施;最低水位为-6.97m,高于工作井与管道交界处的顶高程-9.60m,不会产生吸气现象。图5为97%低潮位(T11)和0.1%高潮位(T16)条件下工作井水位变化过程,工作井水位波动不大,且随时间的衰减较快。

前池最高水位为6.80m,最低水位为-4.56m,高于水泵运行的最低水位-9.45m,均能保证水泵的正常运行。前池水位波动过程与工作井水位的波动规律基本一致。

图6为97%低潮位情况下水泵转速的变化过程,在1号泵和2号泵同时断电的瞬间,水泵转速迅速发生逆向运转,并很快趋于平稳。在1号泵断电情况、2号泵正常运行(T11)下,2号水泵的转速略有增大,而1号水泵则会出现负转速。在阀门制动情况下,受逆向水流的作用,水泵逆向转速较大,最高达-463 r/min。

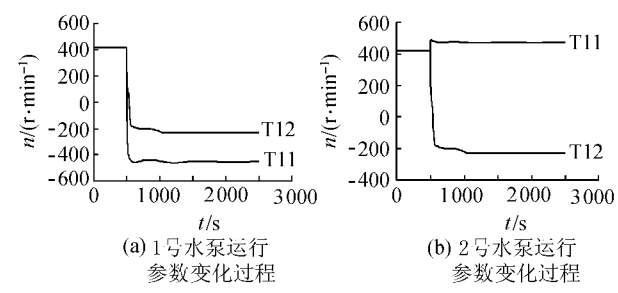


图6 97%低潮位情况下水泵转速变化过程

2.2 蝶阀关闭工况

2.2.1 蝶阀关闭规律的优化

蝶阀关闭曲线规律引起循环水系统压力的变化十分明显,为了减少事故发生时阀门关闭产生的水锤压力,往往需要在允许范围内对蝶阀关闭规律进行优化。

按照水泵厂家提供的资料,蝶阀液压缓闭止回快关角度为 $70^{\circ} \pm 8^{\circ}$,时间为 $2.5 \sim 20\text{ s}$,慢关角度为 $20 \pm 8^{\circ}$,时间为 $6 \sim 60\text{ s}$ 。计算时,按照快关 80%、慢关 20% 两段关闭规律进行优化。选择平均潮位、4 台泵断电情况作为蝶阀关闭规律的优化条件,比较了 10 种不同关闭规律(表 1)。图 7 为 10 种关闭情况下各控制参数的特征值,可见,总关闭时间越短,各控制参数特征值的变化量越大,对引水系统安全性的影响也越大;在总关闭时间相同的情况下,快关时间越短,各控制变量特征值的变化越小,引水系统也越安全。经综合比较,最终选择总关闭时间 70 s、快关 10 s、慢关 60 s 作为蝶阀优化关闭规律(图 7(d))。

表 1 蝶阀关闭规律优化结果

序号	关闭规律/s			序号	关闭规律/s		
	总时间	快关时间	慢关时间		总时间	快关时间	慢关时间
1	20	10	10	6	60	10	50
2	30	10	20	7	60	20	40
3	40	20	20	8	70	10	60
4	50	20	30	9	70	15	55
5	60	5	55	10	80	20	60

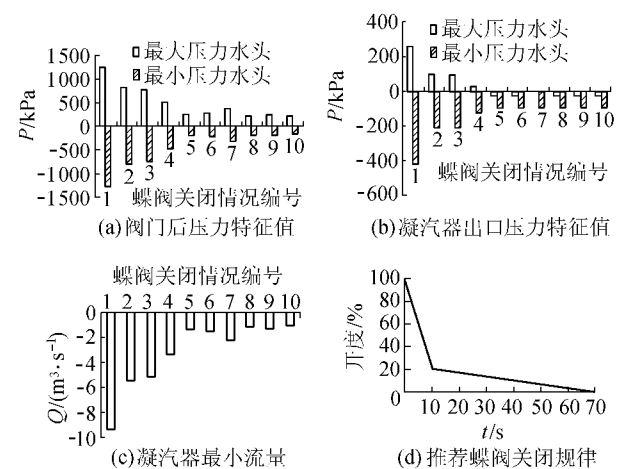


图 7 阀门关闭规律优化结果

2.2.2 循环水系统计算结果

从整个循环水系统压力特征统计值的计算结果看,在蝶阀关闭的情况下,最高压力和最低压力的控制点均在阀门后部(图 8)。图 9 给出了设计低潮位条件、4 台泵断电、阀门关闭工况下阀门后压力变化过程,表明阀门后压力水头受阻力作用随时间的增加衰减很快,并逐渐趋于稳定。

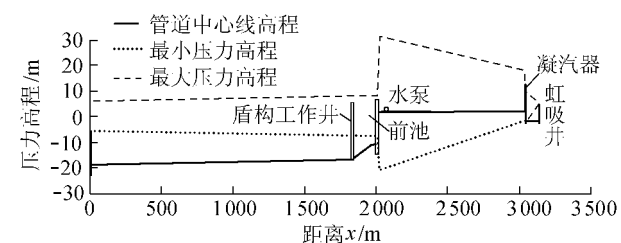


图 8 循环水系统压力水头包络线分布

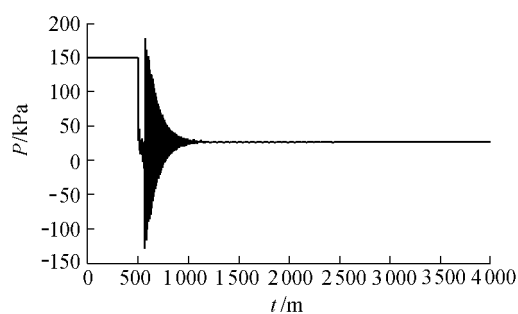


图 9 阀后压力变化过程(设计低潮位、4 台泵断电、阀门关闭工况)

在水泵断电、阀门关闭的情况下,凝汽器内均出现负压现象,其中最小压力出现在断电后阀门完全关闭瞬时,最小压力发生在 97% 低潮位、4 台泵断电的情况,为 -135.9 kPa ,1 台泵断电时凝汽器内的负压均比 2 台泵断电情况下高,负压值低于汽化压力。凝汽器内出现的瞬间大负压可能会引起凝汽器出口水体汽化,影响机组的安全运行。因此,在实际运行时,要尽量避免低潮位运行、4 台水泵同时断电、阀门制动情况的发生。

在水泵断电、阀门关闭的情况下,工作井内最高水位为 7.96 m ,高于工作井的顶高程,会发生短时间的溢顶现象,需加强周边排水措施;最低水位为 -6.91 m ,高于工作井与管道交界处的顶高程,不会发生吸气现象。对于前池,最高水位为 8.10 m ,高于泵房的地面高程,会造成短时间的溢流现象,需在其附近设置必要的排水措施,前池最低水位为 -7.10 m ,高于水泵运行的最低水位,能够保证水泵正常运行。

在阀门关闭情况下,单泵断电时的逆向转速较大,为 -362 r/min ,发生在设计低潮位情况。在水位较高时,逆向转速相对较小,且 2 台泵同时断电时产生的逆向转速比 1 台泵断电、1 台泵正常运行时产生的逆向转速小。

分析水泵断电、阀门分段关闭运行工况下的计算结果可见,循环水系统的最高压力和最低压力以及凝汽器出口处的最小压力均发生在 0.1% 高潮位、4 台水泵同时断电分段关闭的情况。凝汽器内的瞬时负压会超过汽化压力,危及机组的安全运行,在实际运行时应尽量避免该运行工况。工作井、前池的最高水位均会超过设置顶高程,会产生溢流现象,需要在其周围采取一定的排水措施。

2.3 外海波浪对循环水系统压力的影响

前面的计算分析中均没有考虑水位的变化,实际上,由于江阴电厂取水口布置在兴化湾,水位难免会受到外海波浪的影响。这里就水位变化对压力的影响进行定性分析,为方便起见,选择平均潮位、4 台泵断电、蝶阀关闭工况来说明波浪变化的影响。

江阴电厂取水口处的最大波高为 5.50 m,波周期为 6.3 s^[5],以此构造取水口处水位围绕平均潮位的波动变化过程线。图 10 为在波浪作用下工作井和前池的水位波动变化及阀门后和凝汽器出口处的压力水头变化过程。分析可见,取水口处波浪变化对循环水系统水位和压力的影响很微弱,在计算时可以忽略不计。

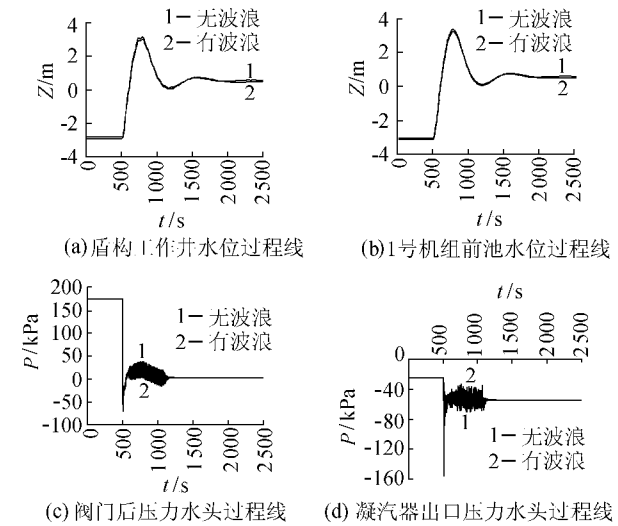


图 10 波浪对循环系统各控制参量的影响

2.4 减小水锤影响的措施研究

从水泵突然断电、阀门制动和水泵突然断电、阀门关闭两种情况下的计算结果分析,电厂循环水系统的设计方案基本上是合理的。当 4 台水泵同时断电时,在凝汽器进、出口处会出现小于汽化压力的负压,虽然该负压出现的时间极短(仅有几秒钟),但还是有可能导致输水管道内的水流中断,影响机组正常运行。在 2 台水泵断电运行时,凝汽器压力基本上高于汽化压力,可以保证机组安全运行。因此,在实际运行时应尽量避免 4 台水泵同时断电情况的发生。

3 结 语

本文所建立的电厂循环水系统过渡过程数值模型可以较好地分析不同运行工况下系统水力特征值,为系统的布置及安全运行提供了科学依据。结合江阴电厂循环水系统,从水泵突然断电阀门制动和水泵突然断电阀门关闭两种工况下的计算结果分析,江阴电厂循环水系统的设计方案基本上是合理的,但也存在凝汽器瞬间压力偏低、危及机组安全运行等现象。同时在高潮位情况下,工作井、前池最高水位超过了设置顶高程,会产生溢流现象,因此需要在其周围采取一定的排水措施。

参考文献:

[1] 吴时强,吴修锋,王勇,等. 国电福州江阴电厂一期 2 × 600 MW 机组工程循环水系统过渡过程数值计算报告[R]. 南京水利科学研究院, 2004.
[2] 吴时强,胡去劣. 气垫式调压室过渡过程模拟的若干问题探讨[J]. 水利学报, 2000(7): 25-32.
[3] 吴时强,丁道扬. 调压井阻抗对水电站引水系统小扰动稳定性影响研究[J]. 水利学报, 1997(8): 22-29.
[4] 王学芳,叶宏开,汤荣铭,等. 工业管道中的水锤[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
[5] 李孟国. 兴化湾水文泥沙特征分析[J]. 水道港口, 2001(4): 156-159.

(收稿日期 2005-09-09 编辑 高建群)

南水北调工程东线济平干渠通水成功

2005 年 12 月底,南水北调东线工程中的济平干渠全线建成,于 29 日开闸放水,31 日凌晨波涛汹涌的东平湖水经由济平干渠奔波 90 km 进入了济南附近的小清河,至此,南水北调首个建成项目——济平干渠通水获得全面成功。南水北调工程是迄今为止世界上最大的调水工程,2002 年底开工的济平干渠则是南水北调首批开工、首个建成的项目。这项工程自山东东平湖出湖闸至济南市西部的小清河源头睦里庄闸,全长 90 km,途经泰安市的东平、济南市的平阴、长清、槐荫 4 个县区,工程总投资 13.6 亿元。济平干渠的建成通水,可以在长江水未调来之前,先期调引东平湖水和大汶河水,向济南市区及沿途供水,以缓解济南市的供水危机。

(本刊编辑部供稿)