

准调压室在火电厂供水系统中的应用

王念慎¹, 史青玉², 郑大琼¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 河北西柏坡发电有限责任公司, 河北 石家庄 050400)

摘要 介绍一种造价低、效果好的防护水锤的新措施——准调压室, 它兼有调压室和通气阀二者的功用, 具有体积小、结构简单、适应性强的特点. 已在若干火电厂供水系统中成功地应用了准调压室方案(如深圳 DB 电厂), 有的电厂已安全运行多年(如山西 HQ 电厂). 为方便设计者应用该技术, 给出了数学模型, 提供了使用准调压室的判据、确定位置的方法和计算其尺寸的途径.

关键词 准调压室; 水力坡降线; 非常水锤; 负压; 水柱弥合

中图分类号: TK284.7 文献标识码: B 文章编号: 1006-764X(2005)S2-0005-04

在一定的条件下, 为防止输水系统发生水锤事故就需要设置调压设施, 一般来讲, 这种有压输水系统中最有效的调压设施就是调压室. 在泵站输水系统中, 为了有效地降低水锤压力, 调压室应设置在尽量靠近水泵的地方. 但是, 在扬程较高的输水系统中, 在靠近水泵的地方设置调压室则其高度就很可观了, 这样的常规调压室体积庞大, 造价昂贵, 不适宜用于火电厂泵站输水系统.

多年来笔者在有关方面的配合下, 成功地在若干火电厂供水系统中采用了“准调压室”方案, 有的电厂已安全运行多年, 这种准调压室具有体积小、结构简单、适应性强的特点.

1 工作原理与使用条件

有时会遇到这样一些工程, 它们的输水管线中间拱起, 形成特殊的一类. 图 1 是某工程补给水管线纵断面图, 由图中可看到有些地段的水力坡降线与管线非常接近. 这样的工程在进行瞬变流计算(水锤计算)时可以发现, 管线中负压非常严重, 特别是管线与水力坡降线接近的地方, 在某些情况下即使设置超大型通气阀也不能解决问题. 主要的原因是这些局部最高点很接近水力坡降线, 正常运行时压力就已很低, 一旦水泵失电, 管线内压力迅速下降. 这些接近水力坡降线的局部最高点首当其冲, 最先出现负压. 因为它们的高程较高, 压力下降很快, 通气阀补气的速度跟不上, 导致管线内压力太低, 部分水体汽化, 很容易由此引发“非常水锤”.^[1]

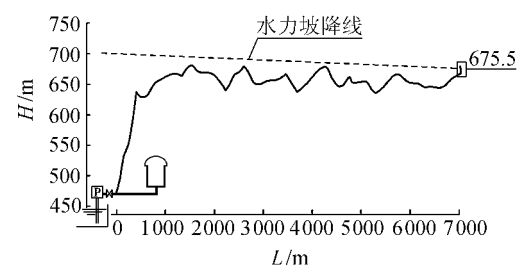


图 1 某电厂补给水系统管线纵断面和水力坡降线

“准调压室”就设置在管线上最接近水力坡降线的局部最高点, 它是一段垂直焊接在输水管上的等径钢管(见图 2), 有条件的话, 尽量粗一点, 如果要细些也可以, 由计算确定. 这个“准调压室”既能起调压室的作用, 又能起通气阀的作用. 在正常运行及断电停泵初期, 它起调压室的作用, 可以向输水系统管道补水或吸收输系统的水; 在断电停泵后期调压室内水已排完, 于是这个准调压室变成了一个巨大的通气阀, 空气可从这个调压室进出主输水管道, 减缓管道内的负压.

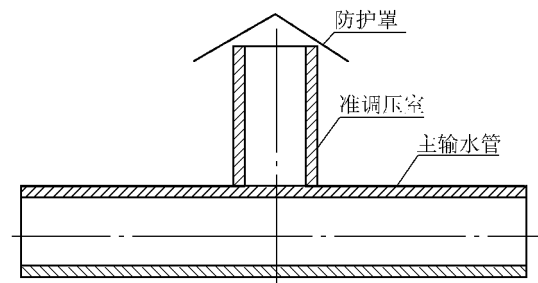


图 2 准调压室结构示意图

断电停泵引起的瞬变过程中系统内压力波动最

作者简介: 王念慎(1945—), 男, 江苏苏州人, 教授级高级工程师, 硕士, 从事水工水力学研究.

激烈的是断电停泵初期,上面提到了,在断电停泵初期,准调压室起的是调压室的功能。在诸多可以选择的调压措施中,调压室是最有效遏制压力波动的手段。由美国土木工程学会编撰的《水电工程规划设计土木工程导则》^[2]认为,调压室的基本作用是缩短水泵(或水轮机)与其最近一个自由水面间的距离。采用准调压室后在断电停泵的瞬变计算中,准调压室内水位在与主输水管连接的接口以上时是调压室功能。根据这个导则^[2]的理论,参与瞬变过程的管长就只有泵房到准调压室这段距离了,水锤压力的强度是与参与瞬变过程的管长有关的,管道越长,强度越大。由此可以看到设置准调压室以后就可以减小水锤压力的强度,而且调压室有强烈的衰减压力波动的功能,所以在有条件设置准调压室的工程,尽量推荐这种调压措施。

对于电厂直流冷却水系统来讲,凝汽器是负压运行的,一般情况下负压都低于 -49 kPa (-5.0 m 水柱)。在水泵断电停泵后,系统内压力将迅速下降,这个压力下降的冲击很容易使凝汽器的压力低到汽化的程度^[3]。如果设置了准调压室,将可缓解这个下降过程,对凝汽器有保护作用。CS 电厂江边泵房到凝汽器有 2.5 km ,中间有一段管线地势较高,在这里设置了一个准调压室,既缓解了系统的水锤压力,又保护了凝汽器。

准调压室的优点 ①结构简单,简单到只是一个“三通”而已;②运行安全可靠,没有活动的机械零件,不会发生磨损、锈蚀、堵塞等问题;③反应快,只要接口处压力有变化,调压室马上可以作出反应,通气阀就不是如此了,从出现负压到打开阀门总得有个滞后反应时间。

几点注意事项 ①从输水管线的纵断面来看,准调压室应该设在管线与水力坡降线最接近的地方,这样的准调压室钢管比较短。如果管线与水力坡降线较远,也可以设置准调压室,只是钢管较长,成本高些;②设准调压室的地点离水泵房越近效果越好;③准调压室的直径越粗越好;④如果输送介质是海水,要注意防腐问题;⑤尽量不要在水泵运行时调节准调压室到输水系统出口之间的调节阀门,以防上游压力升高,导致水从调压室溢出,或引起水锤事故;⑥准调压室的顶部高程根据管线内流速最大的那个工况在当地的测压管水头高程再加上起停水泵时调压室内的上涌值来确定,这个上涌值与准调压室到电厂集水池的距离、输水速度等参数有关。

2 两个边界条件的数学模型

在参与运行时,准调压室可能处于两种不同的

状态:其一是当调压室的水位在调压室与主输水管连接口以上,这时是处于调压室状态,适用常规调压室数学模型;其二是调压室的水位在调压室与主输水管连接口以下,有一部分空气从准调压室进入了主输水管,这时准调压室相当于一个大型的通气阀,适用通气阀数学模型。所以,计算程序中每一步都要判断上一时段末主输水管内是否还有空气以及当前水位与连接口的相对关系,以此来确定准调压室所处的状态并调用相应边界条件的子程序。以下简单介绍这两种边界条件的数学模型,具体理论可参见文献[4]。

2.1 常规调压室

调压室是一种结构简单的调压设施。通常情况下是一个竖直放置的柱状构筑物,下部开口与主输水管连接。一旦管道中压力降低,调压室迅速向主输水管补水。当主输水管压力上升时,管道里的水经过进出口进入调压室,这样就能避免管道内的压力下降太大,也可以防止压力上升太高。

调压室进出口处的水锤方程可写为

$$c^+ \quad h_{pi,n+1} = C_{pi} - B_i q_{i,n+1} \quad (1)$$

$$c^- \quad h_{pi+1,l} = C_{mi+1} + B_{i+1} q_{i+1,l} \quad (2)$$

在通常情况下忽略调压室进出口处水头损失,则有能量守恒方程:

$$h_{pi,n+1} = h_{pi+1,l} = h_p \quad (3)$$

考虑进出口处流量平衡,连续方程为

$$q_{i,n+1} = q_{i+1,l} + q_{sp} \quad (4)$$

设流进调压室的流量为正,调压室内水位与进出调压室流量、调压室进口压力的关系组成调压室波动方程:

$$h_p = h_{sp} + K q_{sp} |q_{sp}| \quad (5)$$

利用式(1)~(5)可整理得关于 q_{sp} 的一元二次方程:

$$q_{sp} |q_{sp}| + \frac{E - \beta}{K} q_{sp} + \frac{1}{K} (y + z_s - \alpha + E q_s) = 0 \quad (6)$$

求解此方程可得进出调压室的流量 q_{sp} 。

2.2 通气阀

在边界条件的推导中,认为通气阀在运行时是等温过程,作如下的假设:①空气等熵地流入流出通气阀;②管道内的空气遵守等温规律;③进到管道内的空气滞留在阀附近,当管道内压力升高时可以排出;④进入管道内空气的体积与水体相比是很小的。

流经阀口的空气质量流量取决于管道外大气压强 P_0 和绝对温度 T_0 以及管内的绝对温度 T 和绝对压强 P ,在经过时段 t 后管道里空气的质量是

$$M_{pa} = M_a + \frac{dM_a}{dt} \Delta t \quad (7)$$

式中: M_a 为时段初管道内空气质量; M_{pa} 时段末管道内空气质量。

管道内气体体积应满足连续方程

$$\begin{aligned} V_{pair} = V_{air} + 0.5\Delta t[(Q_{pi+1,l} + Q_{i+1,l}) - \\ (Q_{pi,n+1} + Q_{i,n+1})] = \\ V_{air} + 0.5\Delta t Q_R[(q_{pi+1,l} + q_{i+1,l}) - \\ (q_{pi,n+1} + q_{i,n+1})] \end{aligned} \quad (8)$$

根据假设条件, 状态过程符合克拉珀龙方程

$$PV = nRT \quad (9)$$

由此可得管道内气体等温过程中的动态平衡方程式:

$$\left(M_a + \frac{dM_a}{dt} \Delta t\right) RT = P \left[C_{air} + 0.5\Delta t Q_R \left(\frac{P}{\gamma H_R} + \right. \right. \\ \left. \left. z - h_b \right) \left(\frac{1}{B_1} + \frac{1}{B_{i+1}} \right) \right] \quad (10)$$

其中 P 是管道内下一时段的压力, 该方程可以变换为一个一元二次方程来求解, 也可以用牛顿-拉甫生法求解。

式(10)中的 dM_a/dt 需根据气体动力学原理求得, 经一系列推导及简化可得单位时间内质量的变化(具体推导过程见文献[4]):

$$\begin{aligned} \frac{dM_a}{dt} = AV_2 \frac{\gamma_2}{g} = A \frac{\gamma_1}{g} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}} \\ \sqrt{2g \frac{P_1}{\gamma_1} \cdot \frac{K}{K-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1-\frac{1}{k}} \right]} = \\ A \sqrt{2P_1 \rho_1 \frac{K}{K-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1+\frac{1}{k}} \right]} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: A 为排气孔面积。在排气情况下, 当 $\frac{P_2}{P_1} > 0.53$ 时, 质量流表达式为

$$\frac{dM_a}{dt} = A \sqrt{7.0 \rho_1 P_1 \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{2}{7}} - 1 \right]} \quad (12)$$

当 $\frac{P_2}{P_1} < 0.53$ 时,

$$\frac{dM_a}{dt} = -C_{out} A_{out} \frac{0.686 P_1}{\sqrt{RT_a}} \quad (13)$$

用同样的方法可以推导出进气情况下当 $\frac{P_1}{P_2} > 0.53$ 时, 表达式为

$$\frac{dM_a}{dt} = A \sqrt{7.0 \rho_2 P_2 \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{10}{7}} - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{12}{7}} \right]} \quad (14)$$

当 $\frac{P_1}{P_2} < 0.53$ 时,

$$\frac{dM_a}{dt} = C_{in} A_{in} \frac{0.686 P_2}{\sqrt{RT_a}} \quad (15)$$

式中: C_{in}, C_{out} 分别为通气阀的进、出流量系数; A_{in}, A_{out} 分别为通气阀的进、出口面积。

当程序运行时, 需先判断管道内是否存在空气, 如有空气, 则按上述通气阀边界条件运算, 当管道内压力大于大气压时, 向外排气; 当压力小于大气压时, 向内吸气。

3 工程实例

现介绍 2 个典型的工程实例: 西北的 HQ 电厂补给水、东南的 DB 电厂直流循环水。

3.1 HQ 电厂

HQ 电厂装机 4×600 MW, 湿冷机组正常运行时需水量为 $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 水源地距电厂约 10 km, 敷设 2 根 DN900 钢管, 泵房内设 4 台升压水泵, 3 用 1 备, 即 3 泵 2 管运行。事故(或检修)情况下, 1 根管输水, 输水量(60%)为 $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$, 即 2 泵 1 管运行。

图 3 是补给水系统纵断面和水力坡降线, 图上还标出了通气阀和气压式调压室的位置。由于该厂管道距离长、高差大, 沿线地形起伏多, 需跨沟越壑, 所以在管线上局部最高点都设置了通气阀。但是不恒定流计算发现由于地形特殊, 在桩号为 $6+000$ m 附近的纸房沟前后还是有非常严重的水锤隐患, 有可能发生“非常水锤”, 图 4 是管线沿程最高最低压力包络线。发生“非常水锤”的主要原因是地形变化太激烈, 设置的通气阀通气量不足。在这种情况下, 推荐采用准调压室代替该处原有的通气阀, 这样就可以平稳过渡了(水泵出口最大水锤压力为 1.61 MPa)。图 5 是设置准调压室后管线沿程最高最低压力包络线。该过程采用准调压室方案后已安全运行了 2 年。

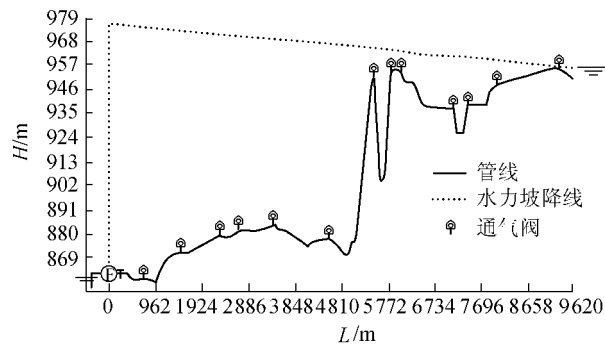


图 3 HQ 电厂补给水管线纵断面和水力坡降线

3.2 DB 电厂

3.2.1 工程概况

DB 电厂一期安装 3×350 MW 燃气-蒸汽联合循环发电机组, 二期工程再安装 3×350 MW 联合循环

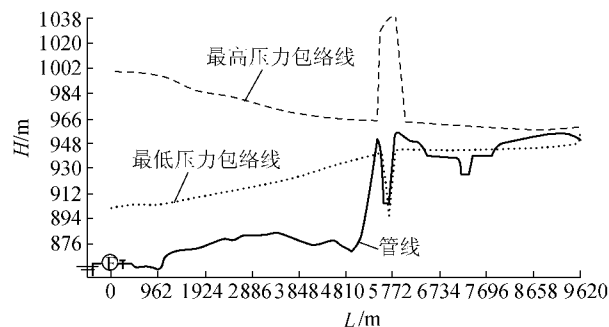


图 4 HQ 电厂补水管线最高最低压力包络线

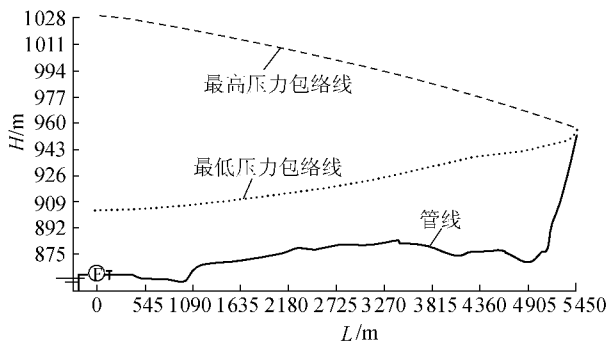


图 5 HQ 电厂准调压室方案补水管线最高最低压力包络线

机组,并留有三期扩建的条件。电厂的循环冷却水系统采用海水直流供水系统,取排水口均设在海边。冷却水系统工艺流程为:大鹏湾海水→前池→净水间→循环水泵房→压力管→凝汽器及辅机冷却器→排水沟→虹吸井→排水沟→排水口→大鹏湾。

电厂一期工程循环供水系统采用双母管制,3套联合循环发电机组配3台循环水泵,2条循环水压力管道(管径 DN2200),3个虹吸井和1条钢筋混凝土自流排水沟。循环水管道之间设联络管,循环水回水沟之间也设有联络沟。

循环水泵额定流量:3台并联运行时每台泵为 $7.05 \text{ m}^3/\text{s}$,扬程为 23 m。水泵出口拟安装液压控制缓闭止回蝶阀。

第一期工程的循环水管道采用钢套筒钢筋混凝土管,干管管径为 DN2200,进凝汽器的支管为钢管,管径为 DN1200。图 6 是供水纵断面图,图上分别标

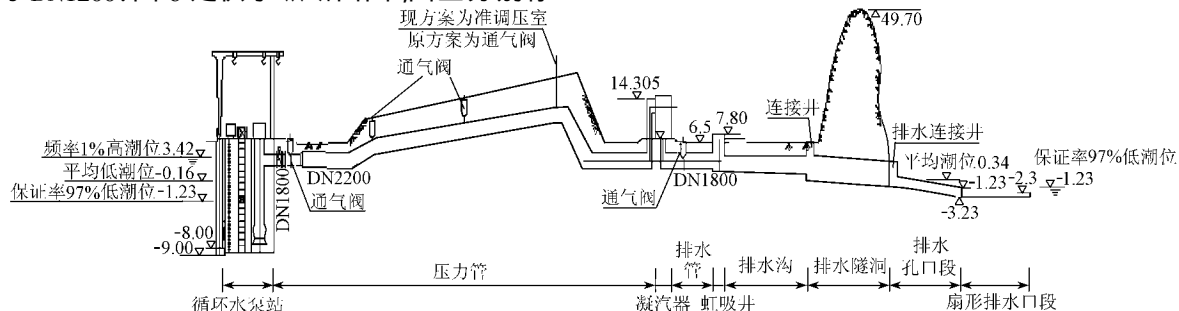


图 6 DB 电厂供水纵断面图(准调压室方案)

注了原调压方案和准调压室调压方案。

本工程的特点:①循环冷却水管道出泵房后根据地形条件敷设,有高差 9 m 的驼峰,即泵房和电厂的场地标高都比较低,而管道中途敷设标高则比较高;②本工程的发电机组有调峰任务,水泵及系统起、停频繁。

3.2.2 方案比较

原方案计划在管线上爬坡段设置 3 组口径为 DN200 的通气阀,如果通气量不够,则将顶端通气阀的口径从 DN200 加大到 DN500。由于这 800 多 m 是一路上坡,排气的主要任务都落到顶端的通气阀上,这样安排是不尽合理的,设备资源没有得到充分利用。瞬变流计算结果表明,在凝汽器出口的负压达到发生汽化的程度。图 7 是该工况最高最低压力包络线。为了使本工况引水管线的爬坡段有一个良好的出气口,建议将最高端的一组通气阀撤去,取而代之的是一根竖直放置的圆管,称之为“准调压室”方案。坡道中间两处各装一个通气阀就可以了(不装也行)。图 8 是准调压室方案最高最低压力包络线。

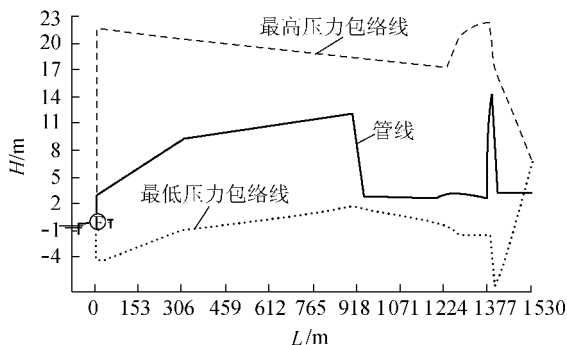


图 7 DB 电厂原方案最高最低压力包络线

比较图 7 和图 8 可以看出准调压室方案的水锤压力明显缓和些,图 9 和图 10 分别是原方案和准调压室方案凝汽器出口压力波动过程线,准调压室方案凝汽器出口压力波动的幅值显然小于原方案。

不用超大型口径通气阀的原因:因为本工程有调峰任务,启闭频繁,在启动阶段母管内的空气大部分由顶端阀排出,即使改成 DN500 口径的超大型排

(下转第 26 页)

为1.665 元/m³(净残值取 4% ,折旧年限取 10 a)。

另一个典型工程为青岛流亭机场污水回用工程。青岛流亭机场采用以 MBR 为主体的工艺处理排放污水,而且较传统的 MBR 工艺增设了缺氧段,处理量为 2 700 m³/d。1 a 多的运行表明,该系统运行稳定,维护费用低,出水水质优良^[10]。该工程的总投资为 730 万元,处理费为 0.78 元/m³。

4 结 语

膜生物反应器是一种新型的高效生物反应器,其良好的出水水质、简单的流程、紧凑的设备日益受到水处理行业的青睐。混凝-MBR 组合工艺应用到电厂生活污水处理,在理论上和技术上是可行的,其出水 COD 质量浓度小于 25 mg/L,NH₃-N 质量浓度小于 1.5 mg/L,BOD₅ 质量浓度小于 10 mg/L,浊度小于 0.3 NTU,SS 质量浓度约为 0 mg/L,处理水回用于冲灰补水 and 循环水补水,还可以回用于厂区的绿化用水和道路冲洗水,具有良好的环境效益和社会效益。

参考文献:

[1] 宋珊卿.动力设备水处理手册[M].第 2 版.北京:中国电

力出版社,1997:705-734.

[2] 李亚峰,苏永渤,朱龙,等.高浓度洗煤废水治理方法的研究[J].环境保护科学,1997,23(4):11-14.

[3] 李风亭,陈辅君,杜锡荣,等.混凝剂聚合硫酸铁反应机理的探讨[J].给水排水,1994,18(8):39-41.

[4] 苏锦明,刘军,傅金祥,等.温度对 PAC-MBR 组合工艺的研究[J].工业安全与环保,2004,30(10):1-4.

[5] 魏源送,樊耀波,郑祥.国外膜生物反应器在污水处理中的研究进展[J].工业水处理,2003,23(1):1-5.

[6] 苏锦明.一体式膜(帘式膜)生物反应器膜污染控制试验研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2005.

[7] 傅金祥,苏锦明,徐薇,等.PAC 对 IMBR 的净水效果和膜污染的影响效果[J].沈阳建筑工程学院学报:自然科学版,2004,20(2):143-146.

[8] 苏锦明,周晴.新型专利一体化 M-CASS 设备:中国,ZL-ZI200420030055.4[P].2004-12-01.

[9] 苏锦明,周晴,傅金祥,等.新型一体化 M-CASS 设备的研制与开发[J].工业用水与废水,2004,35(3):32-36.

[10] 张捍民,张兴文,刘毅慧,等.中水回用工程的 MBR 系统设计[J].给水排水,2002,28(11):65-67.

[11] 李彦斌,朱高雄,张亮,等.MBR 工艺处理机场污水并回用[J].中国给水排水,2005,21(1):91-92.

(收稿日期:2005-09-20 编辑:骆超)

(上接第 8 页)

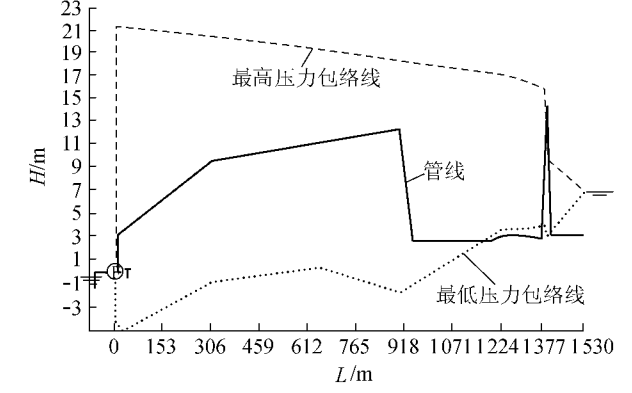


图 8 DB 电厂准调压室方案最高最低压力包络线

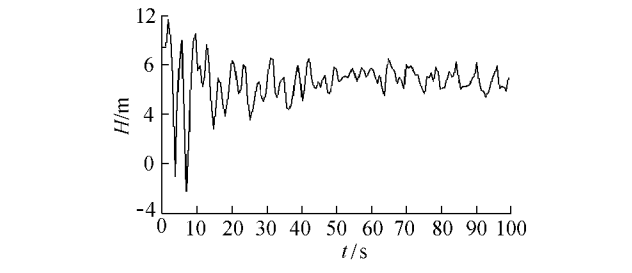


图 9 原方案凝汽器出口压力波动过程线

气阀,也要推迟十几分钟完成启动过渡,这对于承担调峰任务的燃气电站来讲是不能接受的。采用准调压室方案,没有排气延迟的问题。此外,要注意到这类超大型排气阀在排完空气关闭排气口时可能会产生二次水锤,一定要采取防护措施,这样又要增加设备。

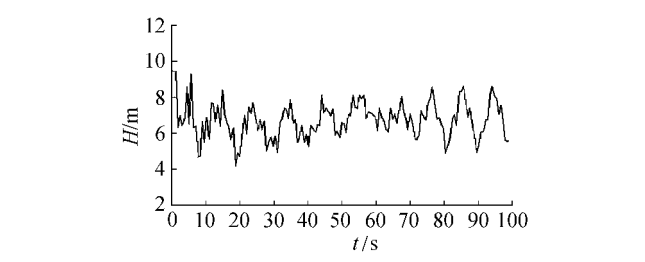


图 10 准调压室方案凝汽器出口压力波动过程线

千万牢记慎用超大型口径排气阀。

4 结 语

准调压室体积小、结构简单、反应快、运行可靠,兼有调压室和通气阀二者的功用,能有效地遏制输水系统的负压,值得在有条件使用的地方大力推广应用。

参考文献:

[1] 郑大琼,王念慎.“非常水锤”的发生条件及预防措施[J].中国电力,2001(11):33-35.

[2] America Society of Civil Engineers. Civil Engineering guidelines for planning and designing hydroelectric developments volume 2 waterway[S]. New York: ASCE,1989:6—53-54.

[3] 郑大琼,任钟淳,王念慎.为防止水锤现象火电厂循环水系统设计的改进[J].电力建设,2003(7):18-24.

[4] 王念慎,任钟淳.双向通气阀在输水系统水力过渡过程计算中的数学模型[J].中国电力,1993(11):64-67.

(收稿日期:2005-09-29 编辑:熊水斌)