

Analysis of Water Hammer in Condensate Extraction System of CPR1000 Nuclear Power Plant

Xiangyong Kong, Cheng Lai, Jinchuan Bai, Yuzi Liu, Zhangnan Xu, Liang Yuan

Suzhou Thermal Research Institute, Shenzhen Guangdong
Email: laicheng@cgnpc.com.cn

Received: Oct. 9th, 2018; accepted: Oct. 23rd, 2018; published: Oct. 30th, 2018

Abstract

For solving the problem of water hammer caused by condensate spray valves closing in the deaerator extraction system of CPR1000 nuclear power plant, the water hammer force is calculated by the time-history analysis method combined with FLOWMASTER one-dimensional fluid software and CEASAR II pipeline stress analysis software. According to the calculation results of water hammer force during condensate spray valve closing, we increase the support in the corresponding position of the valve pipeline to ensure that the strength of the pipeline meets the requirements when the valve is on and off, and at the same time greatly reduce the vibration phenomenon of the pipeline. Then this kind of nuclear power plant pipe water hammer general calculation method has been summed up.

Keywords

Water Hammer, Deaerator Extraction System, Time-History Analysis

CPR1000核电厂凝结水系统管道水锤效应研究

孔祥永, 赖 诚, 白金川, 刘玉紫, 徐樟楠, 袁 亮

苏州热工研究院有限公司, 广东 深圳
Email: laicheng@cgnpc.com.cn

收稿日期: 2018年10月9日; 录用日期: 2018年10月23日; 发布日期: 2018年10月30日

摘 要

针对CPR1000核电厂凝结水抽取系统喷淋阀闭合产生水锤的问题, 利用FLOWMASTER一维流体软件与

CEASAR II管道应力分析软件结合的时程分析方法计算阀门关闭时产生的水锤力。对某核电厂凝结水抽取系统关闭喷淋阀时产生的水锤力进行计算, 根据计算结果在阀门所在管线相应位置增加支架, 保证管线强度在阀门开关时满足要求, 同时大幅降低管线振动现象, 形成该类核电厂管道水锤问题的通用计算方法。

关键词

水锤, 凝结水抽取系统, 时程分析

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

CPR1000 核电厂在启机过程中需要启动汽机旁路系统疏导多余蒸汽, 该系统通过喷淋管喷淋冷却水对蒸汽进行冷却。两路喷淋管均设置了冷却水喷淋阀, 阀门开关时间较短(约 2 s)且阀门前后压差最大可达到 2.5 MPa, 高压差情况下快速开关阀门容易导致严重的水锤问题。该水锤问题需要考虑开关阀时内部水锤力的强度和频率, 判断是否满足管道强度要求, 同时需要考虑支架的布置如何减小管线的振动等方面的问题。

目前国内通过 FLOWMASTER 计算水锤发生时压强变化的技术已相当成熟, 一般的分析方法是通过 FLOWMASTER 计算峰值压力, 以此确认管道强度是否满足要求[1] [2] [3]。同时通过延长开关阀门的时间和改变管道的布置, 达到降低水锤引起的压力波动和抑制管道振动的目的。

本文通过 FLOWMASTER 计算管道振动段受力强度和频率的数值解, 将该数值解作为 CEASAR II 软件的边界条件, 对管线的一次应力和二次应力进行分析计算, 并根据 ASME B31.1-2012 规范中的相关内容对结果进行评估, 分析应力是否满足要求。这种时程分析方法可以高效快捷计算水锤力, 同时保证结果准确性。

2. 水锤力计算模型

2.1. 压力峰值估算模型

水锤是因为阀门快速开闭、泵或汽轮机的快速启停、流体热力状态瞬变等事件的发生, 导致流体局部动量发生变化, 从而引起压力波震荡的现象。保守的压力峰值可以通过直接在管内关联速度变化的求解公式进行估算。最经典的计算压力峰值的模型为 Joukowsky 公式[4]:

$$\Delta P = \rho c \Delta v$$

其中: ΔP 为压力变化量, N/m^2 ; ρ 为液体密度, kg/m^3 ; c 为波传播速度, m/s ; Δv 为流体速度变化, m/s 。

该公式的局限性在于无法准确确定流体的速度变化量, 特别是在现场没有测速度或流量仪表的情况下。普遍的解法是保守估计速度变化量, 代入 Joukowsky 公式后计算保守的压力峰值。这种分析将导致不同程度的保守性, 不利于最优化决策。

2.2. 水锤力的数值解法

水锤力的数值解法是基于流体力学的连续性、动量和能量方程进行求解, 但动量方程和连续性方程

通过实际受力进行改造。

如图 1 所示, 假设流动过程为一维非定常流动时, 在管道中取一长为 Δx 的流体微元, 该微元的横截面积等于管道的横截面积, 根据牛顿第二定律应有:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F}{M} \quad (1)$$

其中 F 为流体所受合力, 流动过程主要受压差力、重力和粘性阻力影响, 其中压差力、重力和粘性力分别为:

$$\text{压差力: } -\frac{\partial p}{\partial x} \Delta x A; \text{ 重力: } -\rho g A \Delta x \sin \alpha; \text{ 粘性阻力: } -\frac{\int \Delta x}{2D} \rho v^2 A$$

流体微团质量实际为连续流体的质量流量, 即: $M = \rho A \Delta x$

将以上变量代入动量方程(1), 可得到流动动量方程为:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \sin \alpha + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{fV^2}{2D} = 0 \quad (2)$$

对于所取微元段流体, 不管它如何运动, 根据质量守恒原理:

$$\frac{d(\rho A \Delta x)}{dt} = 0 \quad (3)$$

式(2)和(3)决定了水力条件下的流体微团运动方程, 引入实际管道对压力波的响应, 即将方程中的压力 P 用压力波传播方程代替, 即可得出水锤条件下的运动-连续性方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} - V \sin \alpha + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

在无传热条件下, 只需要对式(4)进行数值求解, 即可得到相应的压力变化结果[5]。其中 H 为相应压力置换的液柱高度, 而 c 为实际压力波在管内的传播速度。故发生水锤时实际的管道峰值压力将和管内压力波传播速度正向相关。

3. 建模过程

3.1. 一维流体建模过程

使用 FLOWMASTER 对凝结水抽取系统进行建模, 以凝结水泵为动力源及起点, 经过凝结水回路进入蒸汽旁路排放系统, 直至喷淋管下游对空排放, 如图 2 所示[6]。

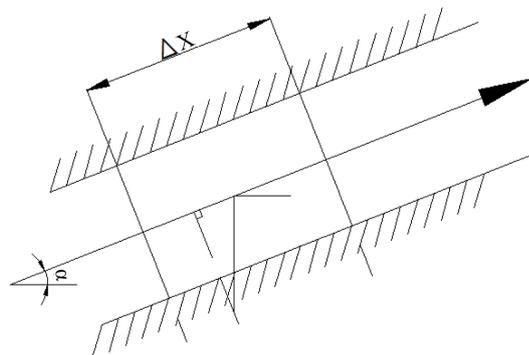


Figure 1. Fluid microcluster motion
图 1. 流体微团运动图

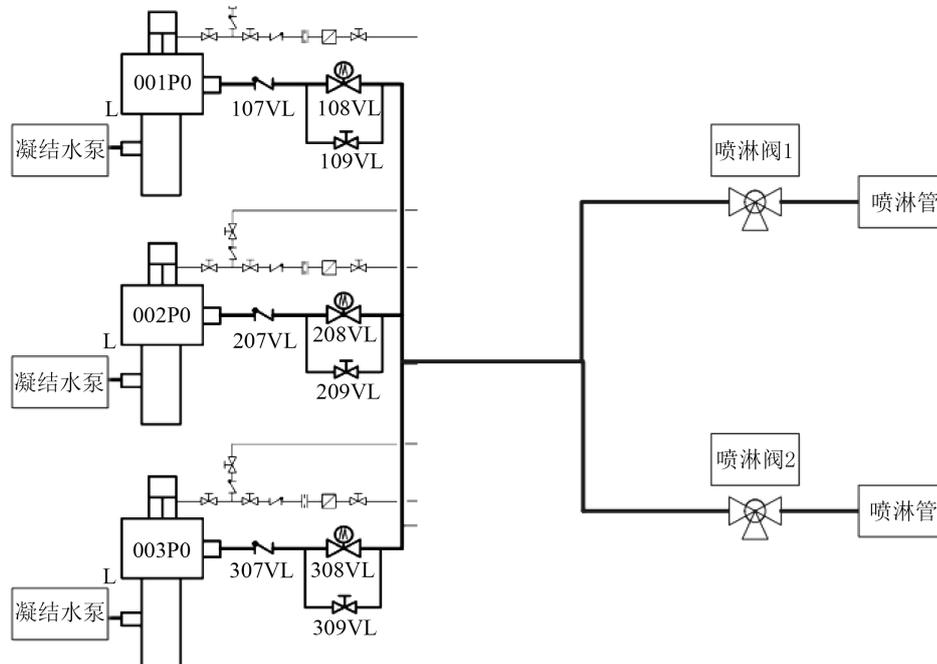


Figure 2. Hydraulic modeling scope
图 2. 建模范围

根据实际图纸使用 FLOWMASTER 软件对图(2)范围进行全尺寸建模, 边界条件设定为凝结水泵额定扬程 2.5 MPa, 选择基于压力的瞬态求解器, 不考虑传热模型, 忽略温度变化对流体物性参数的影响, 流体设为定温。根据时程分析方法, 建模后启动瞬态计算, 输出振动管道两个弯头处的压强, 并根据压强得出两个弯头间的受力不平衡曲线。

3.2. 管道应力建模过程

使用 FLOWMASTER 进行水力载荷计算后, 将输出的结果导入进 CAESAR II 软件中, 根据水锤特性选取受影响的弯头处节点进行加载, 创建时程响应曲线, 并对载荷进行组合计算, 同时对管线的一次应力和二次应力进行分析计算, 模型见图 3 所示。

4. 水力建模结果

建模后启动瞬态计算, 阀门开启和关闭时间均按照 1.5S 进行, 得出喷淋阀处上下游管道不平衡力随时间变化如图 4 和图 5。

阀门上游下游弯头对处存在高频振动, 而下游喷淋管存在较大的峰值受力不平衡。根据瞬态水锤方程, 若阀门瞬间关闭, 管道瞬间增加的不平衡压力为(密度为 993 kg/m^3 , 根据最大流速 4.2 m/s , 波传播速度 1200 m/s 计算):

$$\Delta P_{\max} = \rho c \Delta V = 4.76 \text{ Mpa}$$

考虑关闭时间 1.4 S 后, 对实际振动最大的管线(喷淋阀 2 上游直管)进行周期计算, 直接水锤传播的周期为: $T = 2L/a = 2 \times 12.84/1200 \text{ s} = 0.0214 \text{ s}$, 实际开阀时间 $t = 1.5 \text{ s}$, 则实际该管线承受的最大不平衡压力约为: $\Delta P = \Delta P_{\max} * t/T = 0.073 \text{ Mpa}$ 。

所受的不平衡力为: $F = \Delta P * S = 0.25 \times 0.2^2 \times 3.14 \times 0.073 \times 10^6 \text{ N} = 2300 \text{ N}$ 。该结果假设阀门瞬间关闭的速度变化形成的水锤强度与 1.4 S 关闭阀门的速度变化形成的水锤强度呈线性关系, 仅为近似计

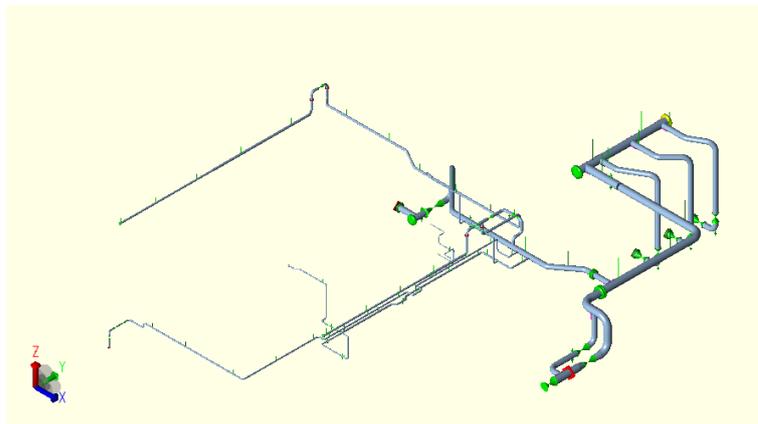


Figure 3. Pipeline modeling scope
图 3. 管道应力计算建模范围

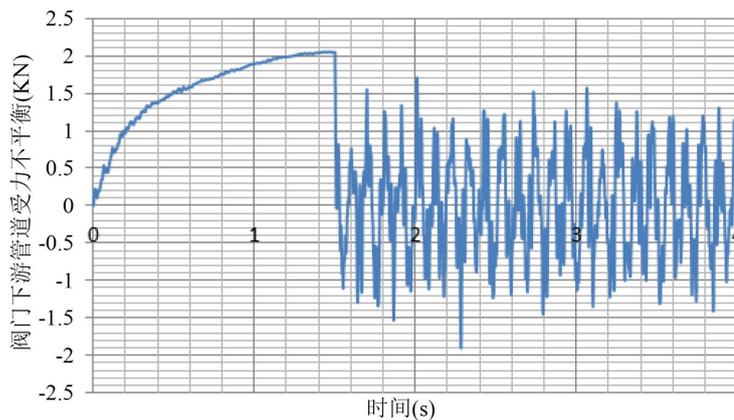


Figure 4. Upstream force unbalance of spray valve
图 4. 喷淋阀上游受力不平衡图谱

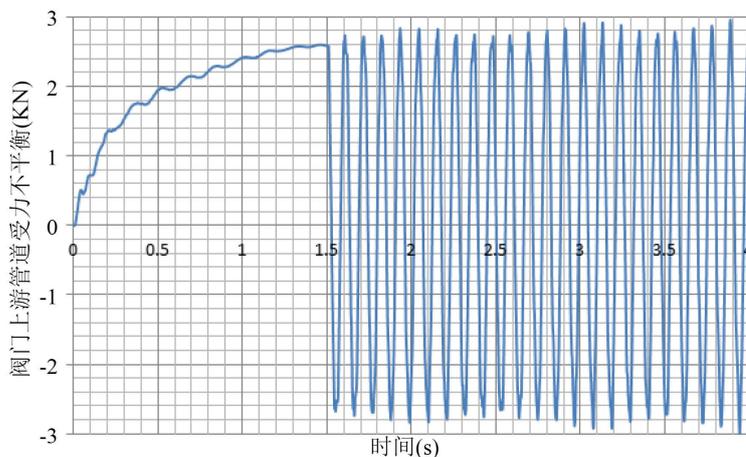


Figure 5. Downstream force unbalance of spray valve
图 5. 喷淋阀下游受力不平衡图谱

算，为佐证软件建模模拟结果。实际计算最大不平衡力约为 3600 N，与瞬态水锤方程假设计算的数量级一致，说明模拟结果的正确性。

5. 管道应力建模结果

建立模型后进行静力分析, 然后通过 DYNAM 模块进行动态分析, 动态分析中的响应谱分析和时程分析都可对水锤响应进行模拟。FLOWMASTER 虽然只能输出各节点的压力, 但通过理论公式可以转化为时程谱, 时程分析在 CAESAR 软件中精确度更高, 但谱分析更加保守, 所以在本文中分别采用时程分析法及频谱分析, 选取保守的结论, 同时也根据水锤简化计算公式进行等效静力计算对比结论。管道模态只取前 10 阶进行展示, 频率结果见表 1 所示, 管道应力结果见表 2 所示。根据管道应力计算, 管道强度满足条件, 但仍需要采取措施抑制管道振动, 保证管道不会因为疲劳损伤导致断裂。

6. 改进方案

由于蒸汽降温速率和液化速率有限制, 喷淋阀的开启时间无法进一步延长, 且即使在水锤条件下应力条件也满足要求, 故改进方案的重点在于抑制管线振动。根据以上原则, 在管道布置不变的情况下, 可以通过增加支架抑制管线振动。根据水锤原理及现场实际情况, 受水锤影响最大位置会出现阀门 1、2 的中间处的长直管段, 增加支架位置如图 6 圈示。

增加支架后, 在静态分析中会出现改变约束类型而导致二次应力增大甚至超标的问题, 此时需要对管线进行重新计算, 使一次应力及二次应力结果满足规范要求(表 3)。

根据水锤响应结果, 提取的具有代表性的三个节点, 三处皆为受水锤影响最大的地方, 如图 7 所示。改进后的效果可由此 3 个点的应力水平判断。从表 4 可直观看出水锤工况下的应力对比情况, 单纯的水锤应力不参与规范应力评定, 但可直观看出改进方案对水锤应力的抑制作用明显。通过改进方案增加支架后, 该电厂凝结水喷淋管道未再次出现振动情况。

Table 1. Pipeline mode graph

表 1. 管道模态

阶数	周期	频率
1	0.291	1.829
2	0.432	2.717
3	0.497	23.121
4	1.093	6.866
5	1.33	7.122
6	1.148	7.21
7	1.19	7.475
8	1.369	8.599
9	1.413	8.879
10	1.522	9.562

Table 2. Pipeline stress result

表 2. 管道应力结果

序号	应力类型	应力值 MPa	许用值 MPa	应力比	结果
1	一次应力	54.53	117.8	0.46	通过
2	二次应力	120.65	269.3	0.45	通过
3	动态应力	68.23	135.5	0.51	通过

7. 结论

本文通过水力学和结构力学软件的瞬态分析功能,建立了核电厂凝结水抽取系统喷淋管的流体和管道应力分析模型。利用 FLOWMASTER 软件模拟得到振动管道两端受力不平衡图谱,为 CEASA II 管道应力建模提供输入条件,计算实际水锤力产生的应力影响和疲劳振动影响。根据受力不平衡的时程图谱分析水锤受力的时程分析方法,可以清晰地计算出水锤力的真实强度和频率,准确判断管道是否存在应力超标的情况,便于高效快速评估电厂管道水锤振动问题,为管道方案改进决策提供准确参考信息。CPR1000 核电厂该类机械式水锤问题,均可以采取时程分析方法进行评估。

参考文献

- [1] 胡晓阳. 基于 Flowmaster 的泵站系统水力过渡过程研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2012.
- [2] 张正楼, 张献娟, 刘玉璐. 基于 Flowmaster 的核电站循环冷却水系统泵出口阀关闭规律优化研究[J]. 给水排水, 2015, 51(2): 121-124.
- [3] 杨勇, 沈良洁. 常规岛给水系统瞬态分析研究[J]. 产业与科技论坛, 2017, 16(18): 49-52.
- [4] 王鑫, 韩伟实. 压水堆核电厂主给水管水道水锤计算及分析[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(S1): 192-197.
- [5] 赵嘉明. 核动力装置一回路水锤研究及仿真计算[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [6] 广东核电培训中心, 编. 900MW 压水堆核电站系统与设备[M]. 北京: 原子能出版社, 2005.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-7111, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: nst@hanspub.org