

引用格式: 刘建军, 张侨禹. 大流量高压差给水再循环系统的节流孔板设计与仿真验证 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(增刊 1): 127-130, 137.

LIU J J, ZHANG Q Y. Design and simulation verification of throttle orifice plate for large flow and high-pressure differential feedwater recirculation system [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(Supp 1): 127-130, 137.

大流量高压差给水再循环系统的 节流孔板设计与仿真验证



扫码阅读全文

刘建军*, 张侨禹

中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

摘要: [目的] 为了解决舰船蒸汽动力系统大流量高压差给水再循环管路因空化和汽蚀而导致的管路腐蚀及振动等问题, 提出多级节流孔板设计方案。[方法] 根据多级节流孔板几何级数递减的设计规则, 选取孔板级数、计算孔板孔径并校核孔板厚度。以某船给水再循环管路作为设计对象, 开展实船严苛工况下的 Mixture 多相流模型数值仿真。[结果] 仿真结果表明: 采用 2 片和 1 片节流孔板时, 发生了不同程度的空化及汽蚀; 采用 3 片节流孔板时, 给水再循环管路基本不会发生空化和汽蚀现象。[结论] 该研究成果可为实船给水再循环管路中节流孔板后的管路汽蚀损坏问题整改提供参考。

关键词: 节流孔板; 空化; 给水再循环; 船舶蒸汽动力装置

中图分类号: U664.81

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02054

Design and simulation verification of throttle orifice plate for large flow and high-pressure differential feedwater recirculation system

LIU Jianjun*, ZHANG Qiaoyu

China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: [Objectives] In order to solve the problems of pipeline corrosion and vibration caused by cavitation in large flow and high-pressure differential feedwater recirculation pipelines of marine steam power system, a design scheme for multi-stage throttle orifice plates is proposed. [Methods] According to the design rule of the decreasing geometric series of multi-stage throttle orifice plates, the selection of orifice series, calculation of orifice diameter and verification of orifice thickness are carried out. Taking the feedwater recirculation pipeline of a ship as the design object, the numerical simulation of a Mixture multiphase flow model is carried out under the severe working conditions of a real ship. [Results] The simulation results show that when two or one throttle orifice plates are used, cavitation occurs to varying degrees in the feed water recirculation pipeline, but when three throttle orifice plates are used, cavitation will not occur. [Conclusions] The results of this study can provide references for the rectification of pipeline cavitation damage behind throttle orifice plates in the feedwater recirculation pipelines of real ships.

Key words: throttle orifice plate; cavitation; feedwater recirculation; marine steam power plant

0 引言

空化是一种因流体动力学作用而在液体内部或液固交界面上发生的液体及其蒸汽的相变过程与现象^[1], 可以分为初生空化、片空化、云空化、超空化^[2]这 4 个发展阶段, 其中片空化和云空化一般统称为附着型空化, 其演变规律非常复杂,

在工程实践中也最为常见^[3]。船舶大流量给水旁通节流孔板之后的空化现象即属于附着型空化, 其对工程管路的破坏性较大, 因此具有重要的研究价值。

目前, 国内学者针对船用多级泵、复合式离心泵和高压调节阀的水力特性及汽蚀性能开展了广泛的研究工作^[4-6], 并在规避泵叶轮汽蚀方面

收稿日期: 2020-08-01

修回日期: 2021-01-30

网络首发时间: 2022-01-05 11:18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5183000112)

作者简介: 刘建军, 男, 1985 年生, 硕士, 高级工程师

*通信作者: 刘建军

取得了一定成果;同时,初步分析了船用给水管路多级孔板^[7]及船舶核动力装置一回路^[8]小破口时的空化问题,但鲜有大功率船舶蒸汽动力系统大流量高压差工况下多级节流孔板的研究成果。

因此,针对舰船蒸汽动力系统大流量高压差给水再循环管路在长时间运行过程中出现的汽蚀损坏现象,本文拟开展多级节流孔板设计,并采用数值模拟方法来验证其适用性,用以为实船工程整改及优化设计提供参考。

1 给水再循环系统

对于蒸汽动力舰船给水系统而言,将除氧器中热力除氧之后的凝水通过离心给水泵送入主锅炉或蒸汽发生器,是实现动力系统闭式循环的一个重要环节。当实船进行工况切换时,主锅炉或蒸汽发生器的给水需求量变化非常大,为了满足总体机动性要求,需要通过给水再循环管路(图1)来减小工况切换对给水系统的冲击。当舰船在驶离码头、预防台风、狭窄水道航行等极端情况下,需要保持高机动性的待命状态,此时,桨轴系统基本没有功率输出,主锅炉或蒸汽发生器的给水需求量将大幅降低,故离心给水泵的全部流量均需经节流孔板降压之后,才能通过再循环管路回到除氧器。

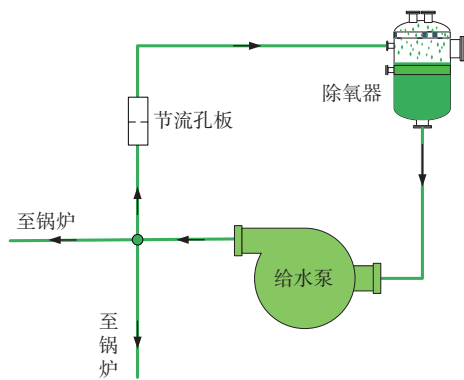


图1 给水再循环系统的原理图

Fig. 1 Diagram of feedwater recirculation system

2 多级节流孔板设计

对于大流量/大压降给水再循环管道,一般需设置多级节流孔板来逐步节流降压,使每级节流孔板之后的流体局部压力高于饱和给水的饱和压力,以避免饱和和给水发生空化或汽蚀,从而缓解给水再循环管道的腐蚀、振动及噪声问题。多级节流孔板的主要设计工作即在确定流体温度、流量及压差的边界条件下,进行孔板级数的选取、

孔板孔径的计算以及孔板厚度的校核^[9]。

2.1 孔板级数的选取

当给水通过节流孔板时,假设节流孔板降压之后的给水压力等于高温给水的饱和压力,则给水发生空化的节流孔板前后压降临界值(即阻塞压差^[10])为

$$\Delta P_s = F_1^2 (P_{in} - F_f P_w) \quad (1)$$

式中: ΔP_s 为阻塞压差, MPa; F_1 为压力恢复系数,此处取 0.9; P_{in} 为进口压力, MPa; P_w 为给水设计温度下的饱和压力, MPa; F_f 为临界压力比系数,并由式(2)计算。

$$F_f = 0.96 - 0.28 \sqrt{\frac{P_w}{P_c}} \quad (2)$$

式中, P_c 为水的热力学临界压力,此处取值为 22.064 MPa。

在确保节流孔板前后压降小于阻塞压差的条件下,每级孔板的节流压降 ΔP 应按照几何级数递减^[5],即

$$\Delta P_{总} = \Delta P_{1级} + \Delta P_{2级} + \Delta P_{3级} + \dots + \Delta P_{n级} \quad (3)$$

$$\Delta P_{1级} = 2\Delta P_{2级} = 4\Delta P_{3级} = \dots = 2^{n-1} \Delta P_{n级} \quad (4)$$

式中: $\Delta P_{总}$ 为节流孔板的前后总压差, MPa; $\Delta P_{1级}$, $\Delta P_{2级}$, $\Delta P_{3级}$, $\dots$, $\Delta P_{n级}$ 分别为第 1 级, 第 2 级, $\dots$, 第 n 级节流孔板的前后压差, MPa; n 为孔板级数。

2.2 孔板孔径的计算

根据 DL/T 5054-2016《火力发电厂汽管道设计技术规定》的要求^[11], 节流孔板孔径的计算公式为

$$D_k = \sqrt{\frac{421.6G}{\sqrt{\rho\Delta P}}} \quad (5)$$

式中: D_k 为节流孔板的孔径, mm; G 为流量, t/h; ρ 为流体密度, kg/m³。

2.3 孔板厚度的校核

节流孔板厚度的校核公式为

$$\delta = \mu d_i \sqrt{\frac{p}{[\sigma]'\varphi}} \quad (6)$$

式中: δ 为孔板厚度, mm; μ 和 φ 均为节流孔板的结构系数, 分别取值 0.6 和 0.85; d_i 为管道内径, mm; p 为设计压力, MPa; $[\sigma]'$ 为设计温度 t 条件下的管材许用应力, MPa。

2.4 多级孔板的计算

以某船的给水再循环管路作为设计对象, 其设计校核过程如下:

1) 输入参数为: 某严酷特殊工况下离心给水泵的给水再循环流量为 195 t/h, 给水温度为 105 ℃, 给水密度为 954.74 kg/m³, 给水进口压力为 8.61 MPa, 出口背压为 0.13 MPa, 孔板实际节流压降为 8.48 MPa。按照式(1)计算的阻塞压降为 6.88 MPa, 远小于孔板实际压降, 因此当给水通过孔板时将发生空化现象。

2) 按照孔板级数的设计准则, 其级数修正为 3 级。

3) 当确定各级节流孔板压差之后, 利用式(5)计算每级孔板的孔径, 并按照式(6)校核节流孔板的厚度。

该船给水再循环管路的迭代计算数据如表 1 所示。

表 1 节流孔板的设计数据			
Table 1 Design data for throttle orifice plate			
设计参数	孔板级数		
	第1级	第2级	第3级
设计压力 p /MPa	10	10	10
内径 d_i /mm	90	90	90
许用应力 $[\sigma]'$ /MPa	153	153	153
级前压力/MPa	8.61	3.76	1.34
级后压力/MPa	3.76	1.34	0.13
级压差 ΔP /MPa	4.84	2.42	1.22
饱和压力 P_w /MPa	0.12	0.12	0.12
临界压力比系数 F_f	0.94	0.94	0.94
阻塞压差 ΔP_s /MPa	6.88	2.95	2.61
$\Delta P < \Delta P_s$	是	是	是
孔板孔径 D_k /mm	35	41	49
孔板厚度 δ /mm	15	15	15

3 多级节流孔板的数值模拟验证

3.1 研究模型

某船给水再循环管路及多级节流孔板的模型如图 2 所示, 其管路内径为 90 mm, 管路长度为 7 668 mm, 每级孔板的厚度及孔径数据如表 1 所示。该模型共含 1.06×10⁶ 个单元, 根据网格敏感性分析结果, 其网格精度满足数值模拟要求。

3.2 数值计算

假定该船给水再循环管路和多级节流孔板的

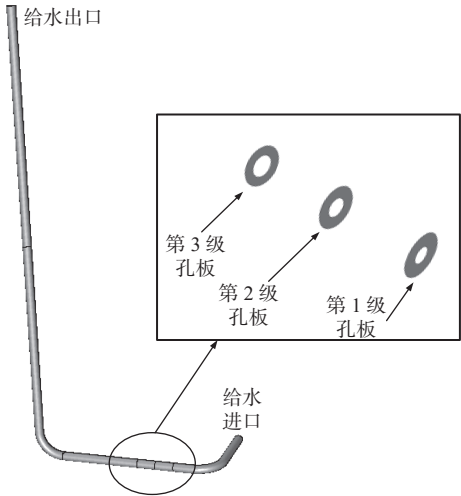


图 2 节流孔板的网格模型
Fig. 2 Grid model of throttle orifice plate

流场为等温不可压缩。本节将采用 Mixture 多相流模型进行计算, 其稳态时的流场及温度场质量守恒方程、能量守恒方程、动量守恒方程和湍流控制方程的描述形式详见文献 [12]。

为了准确体现给水再循管路节流孔板的空化现象, 基于实船最严苛的运行工况, 本文分别对 1 片、2 片及 3 片节流孔板的流场和空化进行了数值模拟, 其饱和水体积分数分布结果分别如图 3~图 5 所示。

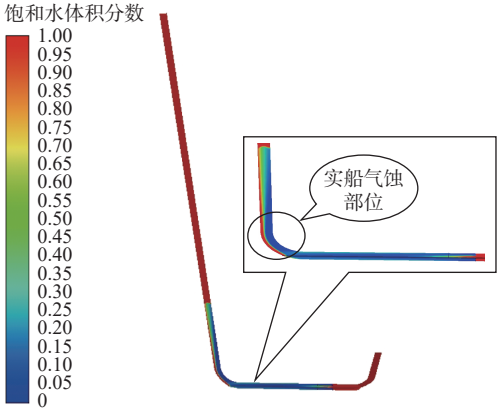


图 3 1 片节流孔板的饱和水体积分数分布
Fig. 3 Volume fraction distribution of saturated water for one throttle orifice plate

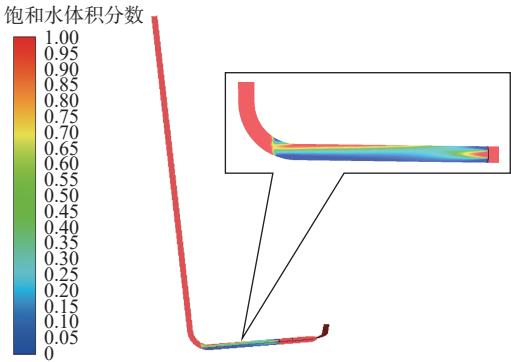


图 4 2 片节流孔板的饱和水体积分数分布
Fig. 4 Volume fraction distribution of saturated water for two throttle orifice plates

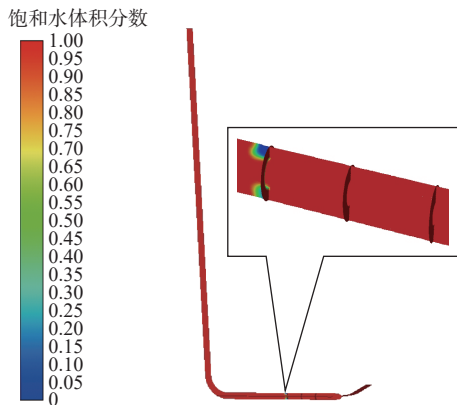


图5 3片节流孔板的饱和水体积分数分布

Fig. 5 Volume fraction distribution of saturated water for three throttle orifice plates

3.3 结果分析

当舰船驶离码头、航行于狭窄水道时,其动力系统需要保持高度的机动性,这是给水再循环系统最严苛的运行工况。由于实船主机舱室的空间狭小,对于管路布置方案而言,节流孔板之后难以设置足够长的直管段。在实船应用中,当给水再循环管路运行一段时间之后,节流孔板后的第1个转弯处经常发生管路穿孔破损现象,从而导致通过节流孔板的流场难以稳定发展。从图3可以看出:当给水再循环管路设置1片节流孔板时,给水通过节流孔板后出现了大面积的空化现象,在空化之后,汽水混合物将体积膨胀、流速增加;当给水经过给水再循环管路的转弯处时,由于流动阻力的增加,部分靠近管路外侧的水蒸气将液化成液态水,从而形成汽蚀现象,并逐渐将管路内表面剥蚀。上述仿真结果与实船现象保持了高度一致性。

当给水再循环管路设置2片节流孔板时,从图4可以看出:2片节流孔板之间没有出现空化现象;然而,第2片节流孔板后出现了较严重的空化现象,但比图3所示仿真结果有所改善;在第2片节流孔板之后的第1个转弯处,空化后的汽水混合物基本全部液化为液态水,即在管路转弯前端也发生了汽蚀现象。

当给水再循环管路设置3片节流孔板时,从图5可以看出:第1片和第2片节流孔板之间、第2片和第3片节流孔板之间均未发生汽蚀现象,仅第3片节流孔板之后的涡流区域发生了轻微的空化及汽蚀现象。由此可见,通过设置多级节流孔板可以解决大流量高压差给水再循环管路的汽蚀损坏问题。

4 结 语

针对舰船蒸汽动力系统给水再循环管路长期

运行过程中单片节流孔板后转弯管路的空化及汽蚀问题,根据流体阻塞压差的理论计算方法,按照多级节流孔板几何级数递减的设计规则,本文进行了大流量高压差给水再循环管路节流孔板的优化设计,明确了孔板的级数、孔径和厚度参数。Mixture多相流模型数值仿真结果表明,相较于2片和1片节流孔板,3片节流孔板可以明显改善再循环管路的给水空化及汽蚀现象。然而,节流孔板级数的变化将引起给水再循环系统给水流量的变化,其空化及汽蚀特性也将随之改变,故后续还需进一步开展试验研究。

参考文献:

- [1] 高远,黄彪,吴钦,等.绕水翼空化流动及振动特性的实验研究[J].力学学报,2015,47(6):1009-1016.
GAO Y, HUANG B, WU Q, et al. Experimental investigation of the vibration characteristics of hydrofoil in cavitating flow[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(6): 1009-1016 (in Chinese).
- [2] 季斌,程怀玉,黄彪,等.空化水动力学非常特性研究进展及展望[J].力学进展,2019,49(1):428-479.
JI B, CHENG H Y, HUANG B, et al. Research progresses and prospects of unsteady hydrodynamics characteristics for cavitation[J]. Advances in Mechanics, 2019, 49(1): 428-479 (in Chinese).
- [3] 赵宇,王国玉,黄彪,等.非定常空化流动涡旋运动及其流体动力特性[J].力学学报,2014,46(2):191-200.
ZHAO Y, WANG G Y, HUANG B, et al. Study of turbulent vortex and hydraulic dynamics in transient sheet/cloud cavitating flows[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 46(2): 191-200 (in Chinese).
- [4] 黄书才,穆春玉,杨勤,等.船用多级泵的水力仿真及汽蚀性能优化分析[J].船海工程,2017,46(1):58-61.
HUANG S C, MU C Y, YANG Q, et al. Hydraulic simulation and cavitation performance optimization of a marine multistage pump[J]. Ship & Ocean Engineering, 2017, 46(1): 58-61 (in Chinese).
- [5] 晁文雄,王均儒,王飞,等.复合式离心泵汽蚀特性的数值模拟与试验分析[J].中国空间科学技术,2019,39(3):64-70.
CHAO W X, WANG J R, WANG F, et al. Numerical simulation and experimental analysis for cavitation in composite centrifugal pump[J]. Chinese Space Science and Technology, 2019, 39(3): 64-70 (in Chinese).
- [6] 彭健,何世权.高压调节阀结构改进与汽蚀仿真[J].液流与气动,2019(3):120-125.
PENG J, HE S Q. Structural improvement and cavitation simulation of high pressure regulating valve[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019(3): 120-125 (in Chinese).

(下转第137页)