

# 某船舶汽轮机进汽管噪声分析及改型应用

宋少雷<sup>1</sup>, 李殿玺<sup>2</sup>, 刘统章<sup>2</sup>, 杨 纵<sup>2</sup>

(1. 海装沈阳局, 黑龙江 哈尔滨 150078; 2. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

**摘要:**针对某新型汽轮机运行时进汽管路噪声大的问题,本研究根据进汽管蒸汽流动特性开展了几何结构优化设计,采用数值计算与试验验证的方法对进汽管原方案和改型方案进行了流动与噪声分析,并得到了现场噪声实测支撑。计算与试验结果表明:原方案等径直角三通输送流体时交接处会产生较强的低速漩涡,产生噪声约101.3 dB;改型方案异径135°非标三通在交接处低速漩涡消失,噪声下降约50 dB,进汽管整体压力损失下降50%,噪声功率是原方案的1.5%,噪声下降约6 dB,实现降低蒸汽管道噪声的效果。

**关键词:**汽轮机;噪声分析;声学模拟

中图分类号:TK221

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.05.020

[引用本文格式]宋少雷,李殿玺,刘统章,等.某船舶汽轮机进汽管噪声分析及改型应用[J].热能动力工程,2025,40(5):177-182. SONG Shaolei, LI Dianxi, LIU Tongzhang, et al. Analysis of noise in steam inlet pipe and modified application of a ship steam turbine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(5):177-182.

## Analysis of Noise in Steam Inlet Pipe and Modified Application of AShip Steam Turbine

SONG Shaolei<sup>1</sup>, LI Dianxi<sup>2</sup>, LIU Tongzhang<sup>2</sup>, YANG Zong<sup>2</sup>

(1. Military Representative Bureau of Naval Armament Department in Shenyang, Harbin, China, Post Code: 150078;  
2. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

**Abstract:** In order to solve the problems of large noise in steam inlet pipe of a new type of steam turbine during operating, optimization design of geometric structure based on steam flow characteristics in the inlet pipe was carried out. Numerical calculation and experimental verification methods were used to conduct flow analysis and noise analysis on the original and modification schemes for the inlet pipe, and on-site noise measurement support was obtained. The calculation result and experimental result indicate that in the original scheme, strong low-speed vortices will be generated at the junction of the tee with equal diameter and right angle when transporting fluid, resulting in noise of about 101.3 dB. Low-speed vortices disappear at the junction of the non-standard tee with modified different diameters and the 135° angle, reducing the noise by about 50 dB. The overall pressure loss of inlet pipe is decreased by 50%, the noise power is 1.5% of the original scheme, reducing the noise by about 6 dB, realizing the effect of reducing steam pipe noise.

**Key words:** steam turbine, analysis of noise, acoustics simulation

引 言

汽轮机是船舶舱室中利用高速蒸汽进行热功转换的关键设备,蒸汽的气动噪声对舱室环境有重要影响。

气体流动特性是产生噪声的重要因素<sup>[1-4]</sup>。欧阳华、刘加利、陆晓柳等人<sup>[5-7]</sup>研究表明可以通过改善结构流动特性来降低气动噪声,汽轮机蒸汽流动特性的结构设计是降低运行噪声关键。对于一般汽轮机,进汽时气流通过阀门的速度变化剧烈,流动复杂,因此蒸汽流动噪声问题的研究主要集中在进汽阀门噪声方面。陈瑶池、陈珉芮等人<sup>[8-9]</sup>以分体式蒸汽温度压力调节阀为对象,采用实验与数值模拟相结合的方法,分别对调节阀的压力调节部件和温度调节部件的气动噪声特性及相应的降噪方法进行了研究,指出流道内阀门出口处的湍动能和声功率级最大,是蒸汽流动噪声的主要声源。王文辉等人<sup>[10]</sup>和马乔裕<sup>[11]</sup>,研究了不同形式阀门汽流流动特性与气动噪声问题,指出了阀门的进汽噪声与蒸汽流动的相关性,研究结果也验证了这一结论。

常规汽轮机蒸汽流动噪声问题的研究对象以进汽阀门为主,其它针对管道内的噪声分析局限于某一个直管段或弯管,缺乏针对复杂蒸汽管道整体噪声分析研究的内容。

本研究基于一种具备逆向旋转功能的新型汽轮机设计方案,设计了逆向旋转进汽管路。以该进汽管路为研究对象,对其开展气动噪声的数值分析,并进一步提出改进方案,开展验证试验。以数值分析与试验相结合的方式,研究蒸汽管道的气动噪声特性与改型优化方法。

1 计算方法及模型

1.1 几何模型与边界条件

图 1 为汽轮机进汽管原方案模型与边界条件,进汽管主要由弯头、直段、三通、大小头构成,从锅炉来的蒸汽流经弯头、直管段到达三通,经三通分流后,进入汽轮机的两个进汽口。边界设置如图 1 所示,一个进口边界,两个压力出口边界。其中进口边界设置为质量流量、总温、湍流强度、湍流长度;压力出口 1 和压力出口 2 设置为静压、静温、湍流强度、

湍流粘性比。

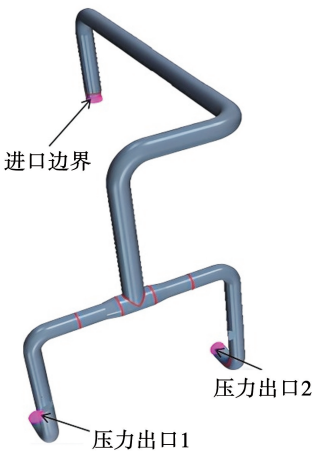


图 1 汽轮机进气管原方案模型及数值边界类型  
Fig. 1 Geometric model and numerical boundary type of original scheme for the steam turbine inlet pipeline

1.2 网格的适应性确定

针对稳态流动下的噪声模拟计算,几何模型网格划分要适应人耳捕捉噪声的需要。人耳听力频率范围为 20 ~ 20 000 Hz,频率敏感范围 1 000 ~ 3 000 Hz。首先以较粗网格进行稳态流动分析,然后激活宽带噪声源模型及其 Proud-man 模型,并以进气管网格截频函数分布图判断网格的适应性。按该原则进行网格划分,获得进气管的中截面的网格截频函数分布图如图 2 所示。由图 2 可知,噪声源频率达到 5.3 kHz,已包含了人耳听力的敏感范围,满足噪声模拟的要求。

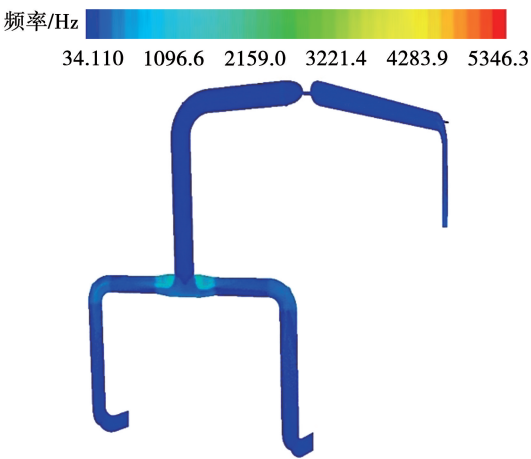


图 2 网格截频函数分布  
Fig. 2 Grid truncation function distribution

1.3 流动分析模型

流动分析采用三维、稳态、雷诺平均 N - S 方程数学模型,可压缩真实气体 ( IAPWS-IF97 ) 耦合流动,  $K - \Omega$  湍流模型,该模型在流动计算领域得到了长期检验与广泛应用<sup>[12-16]</sup>,可以满足工程应用需要。

1.4 噪声分析模型

由于流动噪声具有瞬态性,一般对流动噪声多要用瞬态分析方法,但该方法计算量远大于稳态分析方法,在实际工程上受到很大的限制。稳态分析方法能够确定流动声源的位置和近似功率,可满足大多数的工程设计需求。因此,本研究采用三维稳态模型进行管道流动的噪声分析,以获得管道内流动噪声源的分布,为改型提供指导。

管道内噪声分析属近场噪声预测,选用宽带噪声源模型计算主要噪声源的位置及强度。宽带噪声源模型拥有给定范围内能量连续分布的频谱,因此本文选择 Proudman 模型计算进汽管内噪声分布。

2 计算结果及分析

2.1 流动结果分析

通过  $k - \Omega$  湍流模型流动分析以及 Proudman 模型噪声分析,得到了进汽管内蒸汽流场分布和噪声源分布结果。

图 3 为进汽管内蒸汽流动分析结果,表明蒸汽在进汽管的流动特性。由图 3 可见,在三通区域流动严重不均,进汽管三通根部出现低速漩涡区和低速滞止区,进汽流在低速漩涡和滞止区之间分支成两股高速气流,向两侧壁面底部冲击,蒸汽在壁面底部以较高速度进入两侧管路。三通区域的流动产生了较强漩涡损失,对下游管道的流动不利。

2.2 噪声结果分析

图 4 为进汽管噪声源分析结果,表明蒸汽流动过程中产生的气动噪声源分布特性。由图 4 可见,在三通的进汽管根部低、高速区域的交界区域出现强噪声,最大 101.3 dB,并逐步向两侧支管递减。

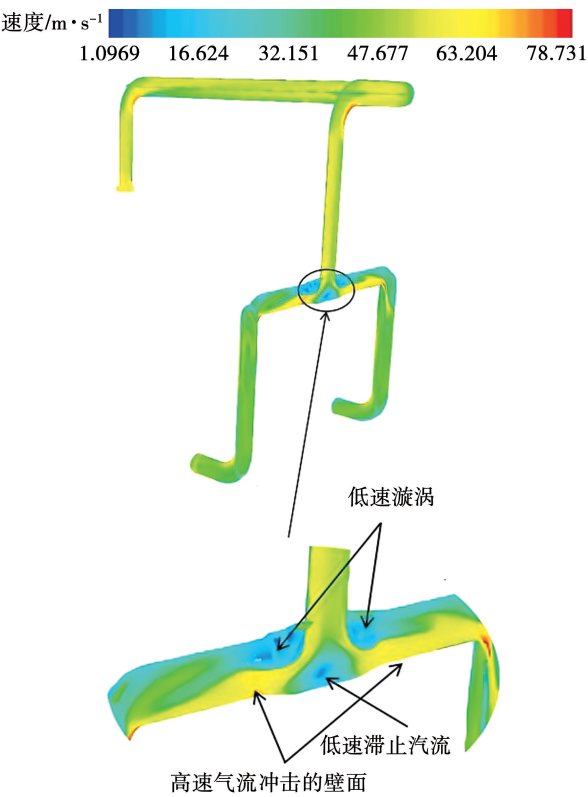


图 3 蒸汽流场分布

Fig. 3 Flow field distribution

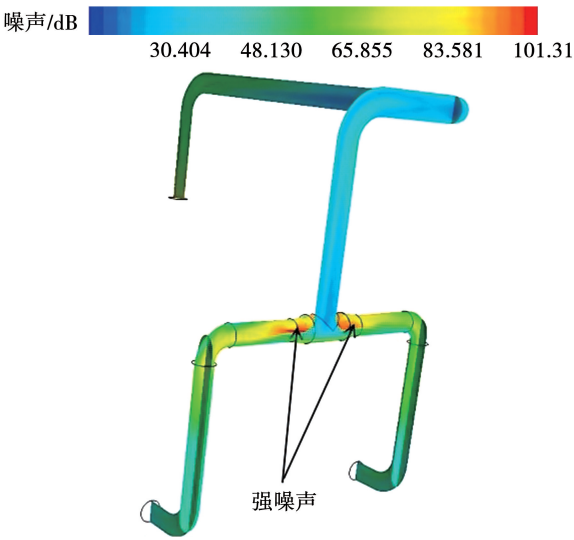


图 4 噪声源分布

Fig. 4 Noise source distribution

经 1:1 实物运行现场实测,在进口及三通根部位置有较强噪声,实测数值相对于图 4 计算结果略大,但噪声源部位基本一致。考虑背景噪声及误差因素,该噪声分析能反映实际情况。

3 改型方案与结果对比

基于上述分析结果,考虑气动噪声与蒸汽流动特性的相关性,改型方案以改善强噪声区域流动特性,降低进汽管内蒸汽流动不均匀性、消除流动漩涡为原则进行改型设计。

3.1 改型方案

根据原几何结构的流动分析与噪声源分析,发现三通区域流动不均匀性与噪声源相关。因此采用减小三通处两出汽管夹角的方式,改善三通根部位蒸汽流动特征,降低流动不均匀性,改型模型如图 5 所示。

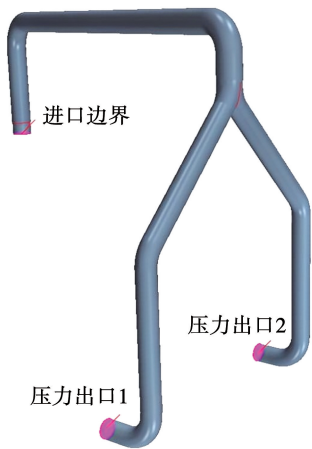


图 5 汽轮机进汽管改型模型及数值边界类型  
Fig. 5 Modified model and numerical boundary type of steam turbine inlet pipe

根据文献[ 17 – 18 ]对不同夹角 T 型三通流通特性的研究,改型方案采用异径 135 度非标三通。进口总管直径 273,两路异径管直径为总管 80%,并以原方案的网格划分设置进行改型方案的网格划分。

3.2 改型后流动结果分析

图 6 为改型后进汽管内蒸汽流动分析结果,表明蒸汽在改型进汽管的流动特性。由图 6 可见,气流在弯头进口处加速,分别流入两侧支管,两支管受进口气流冲击导致减速,但原方案三通区域的无明显滞止区。左侧支管速度偏高是上游水平管方位向左偏转所致。左、右支管速度场比较均匀,未产生原方案的明显漩涡。

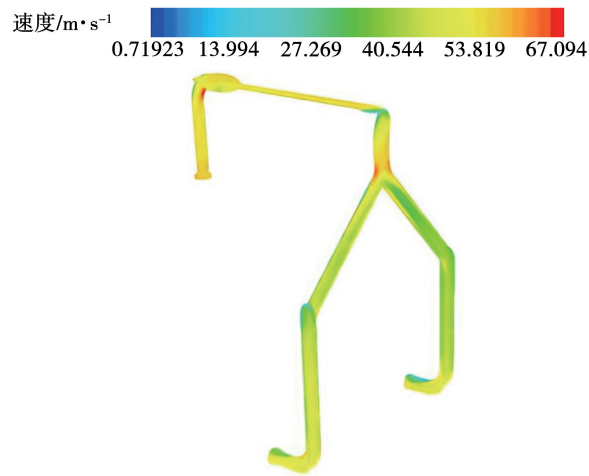


图 6 改型方案流场分布  
Fig. 6 Flow field distribution in optimization scheme

3.3 改型后噪声结果分析

图 7 为改型后进汽管噪声源分析结果,表明蒸汽流动过程中产生的气动噪声源分布特性。由图 7 可见,该方案噪声水平总体较低,最高噪声位置不明显。噪声较高部分发生在进口部分,约 94 dB,该位置噪声较高是由进口设计所致,与本方案的进气管结构关系不大,且噪声呈逐步减弱趋势。三通的左右支管起始部分噪声明显降低,约 50 dB。与原方案相比,高噪声只在进口一处,消除了三通区的噪声。

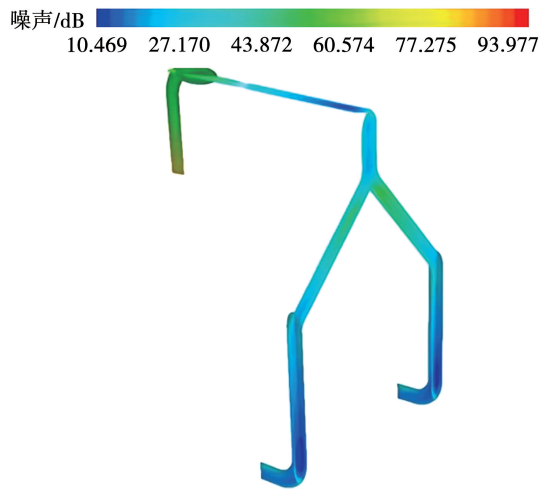


图 7 改型方案噪声分布  
Fig. 7 Noise source distribution in optimization scheme

3.4 结果对比

表 1 为原方案与改型方案结果对比,表中 1,2 分别对应压力出口 1 和压力出口 2。



表 1 原方案与改型方案结果对比

Tab.1 Result comparison between original scheme and optimization scheme

| 计算对比                       | 原方案                     | 改型方案                    |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 压力损失系数 1                   | 1.001 662               | 0.434 156               |
| 压力损失系数 2                   | 1.056 301               | 0.518 601               |
| 出口平均速度 1/m·s <sup>-1</sup> | 43.0                    | 43.2                    |
| 出口平均速度 2/m·s <sup>-1</sup> | 41.0                    | 40.0                    |
| 噪声功率/W                     | 3.72 × 10 <sup>-5</sup> | 5.45 × 10 <sup>-7</sup> |
| 进出口压降/Pa                   | 35 037.2                | 15 898.7                |

由表 1 可知,改型方案损失系数是原方案的 50%,噪声功率是原方案的 1.5%,气动及噪声特性改进效果明显,是性能优良的进汽管结构方案。

依据数值计算结果,按改型方案完成实物制造和换装,改型进汽管实物如图 8 所示。



图 7 改型进汽管实物图

Fig.7 Real image of modified inlet pipeline

进汽管实物试验以汽轮机整机试验形式开展,采用多点、多次的方法进行数据采集完成。在汽轮机周围 1 m 处均匀设置 8 个噪声测点,布置 AWA5636 噪声测试仪,在额定工况稳定运行 30 min 后,测量记录每个测点噪声。空气噪声参照标准 GJB4058<sup>[19]</sup>,对每个测点按倍频程中心频率测试声压级谱和 A 计权总值,各点额定工况噪声数据处理后结果基本一致。根据整机额定工况稳定运行条件下噪声测试结果分析,进汽管改型方案整机的噪声最大降低了 6 dB。

4 结 论

通过进汽管噪声分析及改进过程,结论如下:

(1) 传统等径直角三通用作分流部件输送流体,会在交接处产生较强的低速漩涡,流动损失大,

噪声约 101.3 dB。改型冷液涡消失,整体噪声最大位置约 94 dB。

(2) 本文改型方案的进汽管具有优良的气动、噪声特性,其损失比原方案低 50%,噪声功率是原方案的 1.5%。经数值分析,原三通位置噪声最大降低约 50 dB,经试验整机噪声最大降低约 6 dB,降低噪声效果明显。

(3) 进汽管的噪声分析方法可行,计算结果能反映实际情况,具有可信性。

参考文献:

[1] PROUDMAN I. The generation of noise by isotropic turbulence [J]. Proceedings of the Royal Society A,1952,214(1116):119 – 132.

[2] CURLE N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound[J]. Proceedings of The Royal Society A,1955,231(1187): 505 – 514.

[3] GOLDSTEIN M,ROSENBAUM B. Effect of anisotropic turbulence on aerodynamic noise[J]. Acoustical Society of America Journal, 1973,54(3):630 – 645.

[4] LIGHTHILL M J. On sound generated aerodynamically. I. General theory[J]. Proceedings of the Royal Society A,1952,211(1107): 564 – 587.

[5] 欧阳华,田 杰,吴亚东,等. 基于涡声理论的低速轴流风机气动噪声研究[J]. 工程热物理学报,2009,30(5):765 – 768.

OUYANG Hua,TIAN Jie,WU Yadong, et al. Research on aerodynamic noise source of low-speed axial fans based on vortex-sound theory[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 200930(5): 765 – 768.

[6] 刘加利. 高速列车气动噪声的理论研究与数值模拟[D]. 成都:西南交通大学,2009.

LIU Jiali. Theoretical research and numerical simulation of aerodynamic noise in high-speed trains[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2009.

[7] 陆晓柳. CRH380A 型高速列车气动噪声数值模拟研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.

LU Xiaoliu. Numerical analysis of aerodynamic noise of CRH380A highspeed trains [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[8] 陈瑶池,陈立龙,陈卫平,等. 蒸汽温度调节喷嘴气动噪声特性与降噪技术研究与应用[J]. 阀门,2023(6):699 – 714.

CEN Yaochi,CHEN Lilong,CHEN Weiping, et al. Research and application of aerodynamic noise characteristics and noise reduction technology for steam temperature regulating nozzles [J]. Valve Magazine,2023(6):699 – 714.

[9] 陈珉芮. 蒸汽温度压力调节阀气动噪声特性与降噪技术研究 [D]. 杭州:浙江大学,2021.

CHEN Minrui. The investigation on aerodynamic noise of the steam temperature and pressure regulating valve and the technology of noise reduction [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

[10] 王文辉,王 冠,寇琳媛,等. 基于 CFD 的蒸汽调节阀流量特性分析及数值噪声模拟 [C]//中国力学学会产学研工作委员会,中国仿真学会 CAE 仿真专业委员会. 第 18 届中国 CAE 工程分析技术年会暨第 4 届中国数字仿真论坛论文集, 2022:5.

WANG Wenhui, WANG Guan, KOU Linyuan, et al. Analysis of flow characteristics and numerical noise simulation of steam regulating valves based on CFD [C]//The Industry University Research Working Committee of the Chinese Society of Mechanics and the CAE Simulation Professional Committee of the Chinese Simulation Societys Proceedings of the 18th China CAE Engineering Analysis Technology Annual Conference and the 4th China Digital Simulation Forum, Ningxia University, 2022:5.

[11] 马乔裕. V 型蒸汽流量调节阀噪声特性分析及降噪方法研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2022.

MA Qiaoyu. Numerical study on the noise characteristics and noise control methods of a V-ball control valve [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.

[12] 车淑琴,马俐康,杜云鹏,等. 基于  $k-\omega$  湍流模型的某云爆弹亚音速下二次引信气动特性研究 [J]. 科技创新与应用, 2023,13(27):15-19.

CHE Shuqin, MA Likang, DU Yunpeng, et al. Research on aerodynamic characteristics of a subsonic secondary fuze based on  $k-\omega$  turbulence model [J]. Technology Innovation and Application, 2023,13(27):15-19.

[13] 夏军勇,黎宇辉. 基于 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型的山楂片热风干燥数值模拟 [J]. 包装与食品机械,2023,41(6):82-87.

XIA Junyong, LI Yuhui. Numerical simulation of hawthorn slice drying by hot air based on Realizable  $k-\varepsilon$  turbulence model [J]. Packaging and Food Machinery, 2023,41(6):82-87.

[14] 王亚龙,朱潇潇. 基于圆柱绕流分析  $k-\varepsilon$  和  $k-w$  湍流模型的差异 [J]. 机电产品开发与创新,2022,35(2):13-16.

WANG Yalong, ZHU Xiaoxiao. Analysis of the difference between  $k-\varepsilon$  and  $k-w$  turbulence models based on the flow around a cylinder [J]. Development and Innovation of machinery and Electrical Product, 2022,35(2):13-16.

[15] 贺德幸,王孝东,刘 杰,等. 基于 SST  $k-\omega$  湍流模型的提升竖井活塞风效应研究 [J]. 有色金属工程, 2022, 12(8):149-158.

HE Dexing, WANG Xiaodong, LIU Jie, et al. Study on piston wind effect of lifting shaft based on SST  $k-\omega$  turbulence model [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022,12(8):149-158.

[16] 谢 凯,Laith K. Abbas,陈东阳,等. 翼型非定常来流下复合运动动态失速仿真 [J]. 哈尔滨工程大学学报,2019,40(5):865-871.

XIE Kai, ABBAS K, CHEN Dongyang, et al. Numerical simulation on dynamic stall of a complex motion of airfoil under unsteady freestream velocity [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019,40(5):865-871.

[17] 孟 康,程 永,肖 玲,等. 不同夹角 T 型三通流动特性的数值研究 [J]. 黑龙江科技信息,2010,14(1):30-31.

MENG Kang, CHENG Yong, XIAO Ling, et al. Numerical study on flow characteristics of T-shaped tees with different angles [J]. Heilongjiang Science and Technology Innovation, 2010, 14(1):30-31.

[18] 徐茜荣. 不同夹角 T 型三通阻力特性分析及降阻优化研究 [D]. 济南:山东建筑大学,2022.

XU Xirong. Analysis of resistance characteristics and optimization of drag reduction for t-shaped tees with different angles [D]. Jinan: Jianzhu University, 2022.

[19] GJB4058-2000. 船设备噪声、振动、测量方法 [S]. 国防科学技术工业委员会,2000-06-15.

GJB4058-2000 Niose and Vibration measure ment methods for e-quipment of ships [S]. COSTINF, 2000-06-15.

(姜雪梅 编辑)