

螺旋桨模型喷气降噪试验与实船效果预报研究

李 亚, 陈奕宏, 孙红星

(中国船舶科学研究中心船舶振动噪声重点实验室, 江苏无锡 214082)

摘要: 螺旋桨若发生空化, 空化就是全船最主要的辐射噪声源。采用喷气降噪技术可以降低螺旋桨的空化噪声。试验证实, 在螺旋桨推力损失不大时, 采用导边喷气、喷气环喷气、组合喷气三种方式都可以使噪声谱级大幅下降。根据喷气孔出口速度的无量纲值相等可以换算出实船喷气量。实船预报表明, 采用喷气后总声级降低 5 dB 以上。

关键词: 螺旋桨; 喷气; 降噪

中图分类号: U664.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2018)-01-0066-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.01.012

Model propeller noise reduction by air injection and full-scale propeller noise prediction

LI Ya, CHEN Yi-hong, SUN Hong-xing

(China Ship Scientific Research Center, National Key Laboratory on Ship Vibration and Noise, Wuxi 214082, Jiangsu, China)

Abstract: Once the cavitation caused by propeller occurs, it will be the strongest noise source. Noise can be reduced by using air injection system. Model experiment results show that injecting air from propeller leading edge, from air ring or from both leading edge and air ring can all reduce the noise, and the effects are all very remarkable. Also, the injected air quantity for full-scale propeller can be calculated according to the demand that the dimensionless air speed at the holes' outlet must be equal. The full-scale propeller noise prediction shows that the total sound pressure level can decrease by more than 5 dB.

Key words: propeller; air injection; noise reduction

0 引 言

随着船舶向大型化和高速化的发展, 螺旋桨单位面积上的负荷越来越重, 桨叶的叶梢线速度越来越高, 使得螺旋桨不可避免地产生“空化”现象, 从而造成螺旋桨水动力下降, 船尾发生振动, 螺旋桨辐射噪声大幅度增加等一系列问题。过去采取了多种方法解决螺旋桨的空泡问题, 如改进螺旋桨桨叶及其切面形状使螺旋桨上负荷分布更加均匀; 采用特殊的桨叶形式(如大侧斜桨)使不均匀流场对螺旋桨性能的影响减弱; 改变船体尾部的线型或加装附体使螺旋桨来流的不均匀性得到改善等^[1]。除此之外, 还有一种措施是喷气屏蔽技术, 即利用喷气降低噪声。

上世纪 60 年代起, 国外率先在舰船上应用喷气降噪技术, 主要通过推进器导边充气与轴包套支架向螺旋桨喷气来减轻空泡剥蚀和降低噪声。到 80

年代, 喷气已成为当时世界上进行反潜技术的重要降噪措施之一。目前, 世界各大军事强国均在部分鱼雷、舰艇上使用了喷气降噪技术, 如美国在“阿利·伯克”级导弹驱逐舰机舱段的舰体外表装设喷气降噪环^[2]; 加拿大在“哈利法克斯”级巡逻护卫舰的螺旋桨上采用通气技术, 并且在机舱水下部分设置二条气环。国内在上世纪也开展了喷气降噪的研究^[3], 1994 年在空泡水筒中开展了前置环翼的喷气试验^[4], 熊鹰等^[5]于 2000 年研究了螺旋桨导边喷气对辐射噪声的影响。王虹斌等^[6]在 2005 年利用喷气环试验研究了水面舰螺旋桨气幕降噪。张文光^[7]等在设有气幕降噪系统的高速护卫艇上开展了气幕降噪实船试验。在组合喷气方面, 2005 年高丽谨^[8]等在雷体进行了壁面和导管多个位置的联合喷气等。在这些试验中喷气均有较好的降噪效果。

螺旋桨导边喷气可以直接在声源部位影响噪声源, 但过去这方面的研究较少, 其中一个重要原因是喷气管道加工难度较大。另外, 一些喷气技术还没有完全掌握: 如导边喷气后对螺旋桨水动力性能的影响、喷气量大小对螺旋桨辐射噪声的影响等问题还需研究; 螺旋桨喷气降噪模型声学效果实船

收稿日期: 2017-02-03; 修回日期: 2017-05-07

作者简介: 李亚(1979—), 男, 江苏徐州人, 博士, 高级工程师, 研究方向为推进器噪声。

通讯作者: 李亚, E-mail: 694339492@qq.com

转化方法也未建立等。为此,本文首先阐述了喷气降噪的基本原理,然后论述了不同喷气方式的喷气降噪试验,并对结果进行分析,最后进行实船降噪预报与分析。

1 喷气降噪基本原理

螺旋桨喷气降噪是一个多种因素作用下的综合结果:气水的二相流体对声有直接衰减,喷气降低螺旋桨的空化噪声,喷气会推迟空泡产生。

由于螺旋桨周围喷气后,可使这些区域范围变成气水的二相流体,因此原水中密度 ρ_0 会发生明显变化,变化后的密度为^[9]

$$\rho_m = (1-\alpha)\rho_0 + \alpha\rho_s \quad (1)$$

式中: α 是二相混合液体中气体的体积浓度,一般 $0 < \alpha < 1$; ρ_s 是气体的密度。由于形成了气水二相流体后的密度发生了变化,因此声速变为 c_m , $c_m < c_0$, (c_0 为原水中声速),特别当喷气后气水二相流中气体足够多时,介质中的声速度 c_m 明显变小^[9],表达式为

$$c_m^2 \approx \frac{\rho_s c_s^2}{\alpha(1-\alpha)\rho_0} \quad (2)$$

式中: c_s 是气体中的声速。

从式(2)可知,由于喷气,使螺旋桨周围介质中的特性阻抗由原来的 $\rho_0 c_0$ 变为 $\rho_m c_m$,从而产生一系列损耗效应,包括与气泡变形运动有关的粘性损耗、气泡与水之间相对运动的粘性损耗及透过气泡壁的热传导和热损耗等。这些损耗效应影响了喷气层中的声传播、声散射和声吸收等特性。对于其中的声散射,由于在高频时需要考虑散射的指向性,所以一般用散射截面 σ_s 表征^[8]

$$\sigma_s = \frac{4\pi a^2}{[(f_R/f)^2 - 1]^2 + \delta^2} \quad (3)$$

其中: a 是气泡半径; f_R 是共振频率; δ 是阻尼因子,包括辐射阻尼、黏性阻尼和热传导阻尼等。最重要的是共振时散射截面的值,它与阻尼因子 δ 有关, $f = f_R$ 时 $\sigma_s = 4\pi a^2 / \delta^2$ 。

螺旋桨的空泡是特别重要的噪声源,随着空泡含气量的增加,崩溃空泡的最小半径增大,则快速崩溃空泡的动能作为势能储存起来的就越多,作为声能辐射出去的就越少,空泡的崩溃噪声就越低^[6]。

喷气还使螺旋桨叶片上空泡溃灭时周围压力变小,溃灭时间延长,致使辐射噪声降低。

这一喷气层又将提供一定的声柔顺,在空泡引起的压力脉动与船底之间起了隔离的作用,使得结

构振动噪声源趋于减弱,因而也可减小艏部的振动和舱室噪声。

综上所述,当螺旋桨叶片上空化现象比较严重时,用喷气的方法可明显降低螺旋桨的空化噪声。

2 螺旋桨模型喷气试验

试验采用的螺旋桨模型的材料为黄铜,桨模直径为 0.19 m,共 5 叶,旋向为左旋。螺旋桨模型试验时的工况为:来流速度 $3.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、转速 $36.6 \text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ 、绝对压力 37.2 kPa 。在这个工况下,没有喷气时,螺旋桨模型叶片出现空泡,且有不稳定空泡存在,这直接增大了螺旋桨的空化噪声。

空泡发生的位置有桨毂部分和导边部分,因此需要设计两路喷气装置,分别为喷气环喷气和桨叶导边喷气^[10]。如图 1 所示,当喷气环喷气时,压缩机中的气体通过流量计控制进入喷气环气管,直接进入喷气环的气腔中,然后从喷气环喷出。旋转桨叶喷气时,压缩机中的气体通过流量计控制进入桨模喷气管,然后进入由骨架密封形成的气腔,气体从轴上的通气孔进入空心轴,再从空心轴另一端的通气孔进入桨毂中气腔,最终喷出。喷气环喷气和螺旋桨导边喷气可以同时进行。

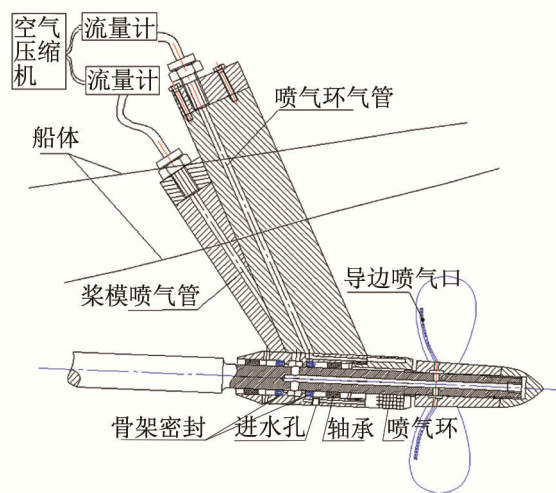


图 1 喷气管路设计示意图

Fig.1 The sketch of the air injection system

在每个桨叶的叶背导边处加工了 17 个喷气孔,沿径向在 $0.40 R \sim 0.80 R$ (R 为螺旋桨半径) 范围内均匀分布,气孔直径为 0.6 mm ;喷气环模型直径为 38.0 mm ,外表面布置 6 圈小孔,每圈均布 41 个,共有 246 个,小孔直径 0.6 mm ,轴向孔间距 2.7 mm 。加工后的实物见图 2,试验工况表见表 1。

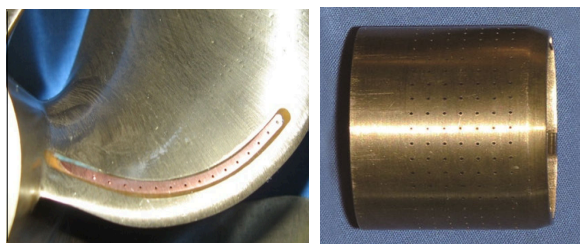


图2 导边喷气孔和喷气环

Fig.2 The injection holes on the leading edge and air ring

表1 试验工况表

Table 1 Working conditions for experiment

喷气类型	喷气方式及喷气量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
无喷气	$Q_d=0$ 、 $Q_r=0$
导边喷气	$Q_d=0.2, 0.3, 0.4$
喷气环喷气	$Q_r=0.2, 0.6, 0.8, 1.2$
组合喷气	$Q_d=0.2$ 、 $Q_r=0.6$ 、 $Q_d=0.3$ 、 $Q_r=0.6$ 、 $Q_d=0.6$ 、 $Q_r=0.8$

注: Q_d 表示导边喷气的喷气量, Q_r 表示喷气环喷气的喷气量, 单位为 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

3 喷气试验结果与分析

试验在某研究所的循环水槽进行。循环水槽试验段的尺寸为 10.5 m (长) $\times 2.2 \text{ m}$ (宽) $\times 2.0 \text{ m}$ (高)。试验段下方设有测声舱, 声舱尺寸为 9.5 m (长) $\times 2.2 \text{ m}$ (宽) $\times 2.0 \text{ m}$ (高), 声舱的四壁和底部均进行了吸声处理。图3为循环水槽试验段照片, 图4为测试声舱内照片, 其中单水听器距桨盘中心 1.85 m 。图5~7分别是不同喷气方式对噪声的影响(由于螺旋桨产生空泡, 试验均满足信噪比要求)。从图5可见, 随着喷气量增大, 整个频段内的噪声下降愈多, 在喷气量为 $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 在中高频部分的噪声谱级已经平均下降约 10 dB 。从图6中可以看出喷气后降噪效果也十分明显, 但随着气量增大, 噪声谱级下降幅度减少, 如气量从 $0.8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 增加到 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 噪声谱级并没有下降多少。从图7可看出, 组合喷气下降噪也十分明显, 例如, 在 $Q_d=0.3$ 、 $Q_r=0.6$ 时, 噪声谱级平均可下降 13 dB 。



图3 大型循环水槽

Fig.3 The large circulation channel

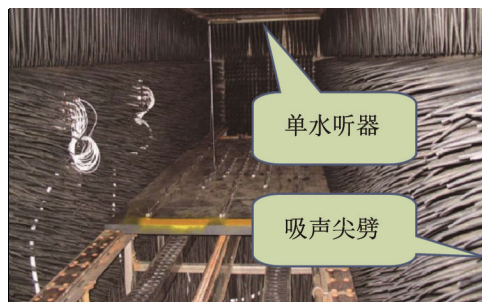


图4 循环水槽试验段下方的水声舱

Fig.4 Underwater acoustic tank below the test section of LCC

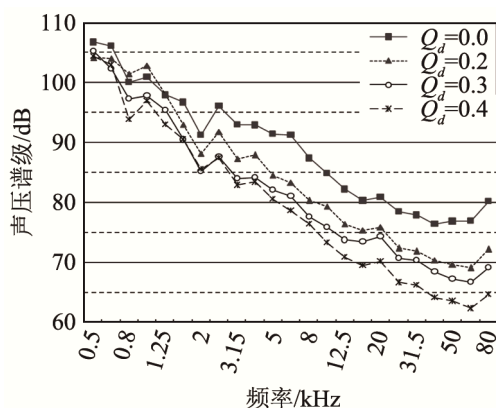


图5 导边喷气对噪声的影响

Fig.5 The effects of injecting air from leading edge on propeller noise

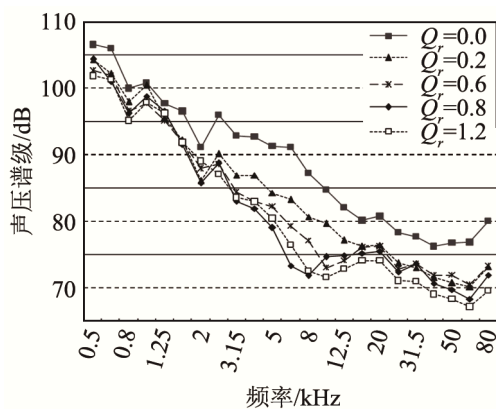


图6 喷气环喷气对噪声的影响

Fig.6 The effects of injecting air from air ring on propeller noise

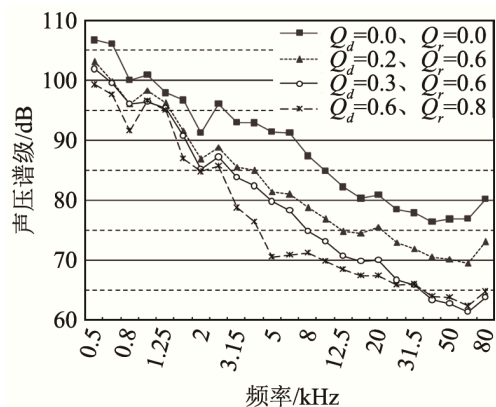


图7 组合喷气对噪声的影响

Fig.7 The effects of simultaneously injecting air from leading edge and air ring on propeller noise

表 2 列举了不同喷气方式与喷气量对总声级和水动力的影响,从表 2 中可见,在喷气量逐步增加的过程中,总声级呈逐步下降的趋势,而推力系数 K_T 呈由缓慢下降到迅速降低的变化趋势。在推力系数 K_T 下降值不超过 5% 的情况下,三种喷气方式下,选择适当气量后均可以降低总声级 5 dB 以上。

表 2 不同喷气方式与喷气量对总声级和水动力影响
(总声级计算频段: 0.5~80 kHz)

Table 2 The effects of injection manner and quality on total noise level and hydrodynamic performance in the frequency band of 0.5~80 kHz

喷气方式与喷气量 ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	总声级(0.5~80 kHz) 降低量/dB	K_T 下降值/%
$Q_d=0.2$	2.8	0.15
$Q_d=0.3$	4.9	0.70
$Q_d=0.4$	5.5	3.10
$Q_r=0.2$	3.6	0.25
$Q_r=0.6$	5.2	0.70
$Q_r=0.6$	5.2	0.70
$Q_r=0.8$	5.0	1.90
$Q_r=1.2$	5.4	5.50
$Q_d=0.2$	5.6	0.70
$Q_r=0.6$	7.0	3.50
$Q_d=0.6$	8.5	25.1
$Q_r=0.8$		

4 螺旋桨喷气降噪模型到实船换算及效果预报

4.1 螺旋桨模型喷气量及噪声换算到实船的方法

模型试验中喷气量换算到实船喷气量时,主要考虑喷气孔出口速度的无量纲值相等^[1],即

$$\frac{Q_s}{A_s \times U_s} = \frac{Q_m}{A_m \times U_m} \quad (4)$$

其中: Q_s 、 Q_m 分别为实船和模型的喷气量; A_s 、 A_m 分别为实船和模型的喷气孔总面积; 对于喷气环喷气, $U_s=V_s$ 、 $U_m=V_m$, 分别为实船和模型的航速; 对于导边喷气, U_s 、 U_m 分别为实船和模型桨叶 0.5 R 处的合成速度。

模型螺旋桨噪声试验结果换算到实桨噪声时,主要考虑以下因素的影响: (1) 模型桨与实桨的缩尺比; (2) 模型桨与实桨试验工况的差异(进速、转速、静压等); (3) 实验室试验段的声场修正,即把水槽内非自由场中测到的结果换算到实桨的自由声场中去; (4) 距离修正,因为测量水听器位置与桨模噪声源的位置之间往往不是 1 m 的距离,为了归一化,需修正到 1 m 距离上。

实桨噪声的声源级按下式进行计算^[12]:

$$L_{SS,f} = L_{SP,m} + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 \quad (5)$$

其中: $L_{SS,f}$ 为实桨噪声声源级(dB); $L_{SP,m}$ 为实验室测量的模型桨噪声级(dB); Δ_1 为由模型桨与实桨的缩尺比确定的修正量(dB); Δ_2 为由模型桨和实桨试验工况确定的修正量(dB); Δ_3 为试验室试验段测量结果换算到自由场的修正量(dB); Δ_4 为距离修正量(dB)。实船换算后的频率范围为 50 Hz~10 kHz。对于中频段,可以根据试验结果换算得到实桨的噪声结果,而其它频率范围内的噪声,本次计算中根据噪声谱特性外推得到。

4.2 螺旋桨喷气降噪的实船预报

对应各航态下螺旋桨噪声的实船预报结果见图 8~10,由图 8~10 可见,喷气后噪声谱级在整个频段内都有降低,其中对螺旋桨的中高频噪声降低更明显。喷气量逐渐增大,噪声谱级也逐渐降低。图 8 中各喷气量下的噪声谱级比不喷气时的噪声谱级平均下降约 8.5 dB; 图 9 中噪声谱级平均下降约 7 dB; 图 10 中噪声谱级平均下降约 10.5 dB。

表 3 中列出了降噪量预报结果及水动力性能的变化情况。由表 3 可见,喷气量逐步增加的过程

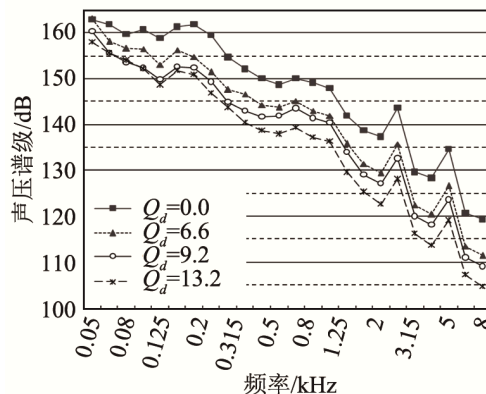


图 8 导边喷气的实桨噪声预报结果

Fig.8 Full-scale propeller noise prediction result for injecting air from leading edge

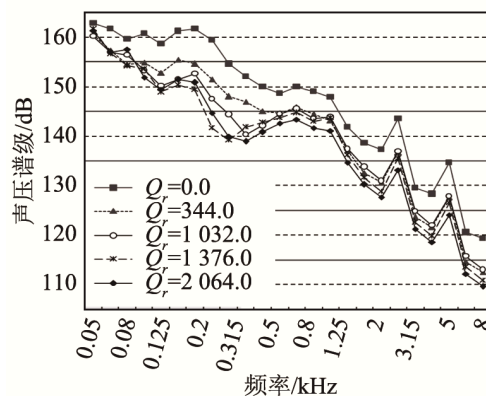


图 9 喷气环喷气的实桨噪声预报结果

Fig.9 Full-scale propeller noise prediction result for injecting air from air ring

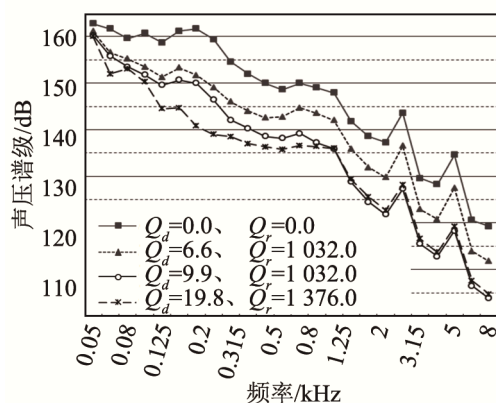


图 10 组合喷气的实桨噪声预报结果

Fig. 10 Full-scale propeller noise prediction result for injecting air from leading edge and air ring simultaneously

中, 总声级逐步下降, 而推力系数 K_T 从缓慢下降到迅速降低。在推力系数 K_T 下降值不超过 5% 的情况下, 三种喷气方式下, 选择适当气量后均可以降低总声级 5 dB 以上。

表 3 降噪量预报结果及水动力性能变化
Table 3 Prediction results of noise reduction and the variations of hydrodynamics

参数名称	数值			
导边喷气量 $Q_d/(m^3 \cdot h^{-1})$	6.6	9.9	13.2	
实船总声级 降低量/dB	5.1	8.0	9.5	
推力系数 K_T 降低量/%	0.15	0.70	3.1	
喷气环喷气量 $Q_r/(m^3 \cdot h^{-1})$	344.0	1 032.0	1 376.0	2 064.0
实船总声级 降低量/dB	5.7	6.7	7.6	7.8
推力系数 K_T 降低量/%	0.25	0.70	1.90	5.50
组合喷气量 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	$(Q_d)=6.6、(Q_r)=1\ 032$ $(Q_d)=9.9、(Q_r)=1\ 032$ $(Q_d)=19.8、(Q_r)=1\ 376$			
实船总声级 降低量/dB	6.7	9.5	11.7	
推力系数 K_T 降低量/%	0.70	3.5	25.1	

5 结 论

通过螺旋桨喷气降噪模型试验以及螺旋桨喷气降噪实船效果预报研究, 得到以下结论:

(1) 模型螺旋桨明显空化时, 喷气可以显著降低测试频段的噪声, 是一种有效的螺旋桨噪声控制方法;

(2) 模型螺旋桨明显空化时, 桨叶导边喷气、喷气环喷气、桨叶导边和喷气环组合喷气的降噪效

果相差不大, 而且都存在一个喷气量范围, 在螺旋桨推力损失较小的情况下, 噪声谱级平均下降量可达到 5~12 dB;

(3) 当实船螺旋桨处于空化状态时, 导边喷气、喷气环喷气及组合喷气三种方式均有较好的降噪效果, 实船总声级可降低 5 dB 以上; 尤其对螺旋桨的中、高频噪声, 三种喷气均有较好的降噪效果;

(4) 从模型桨试验到实船预报的结果表明, 同一航速下, 存在一个最佳的喷气量。工程应用中结合具体要求, 适当选择喷气量, 可以得到水动力性能影响在可接受范围内、降噪效果好的喷气方案。

参 考 文 献

- [1] 钱晓南. 舰船螺旋桨噪声问题[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2006, 10.
QIAN Xiaonan. The problem of propeller noise[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2006.
- [2] 连云港蛇. 美国阿利·伯克级导弹驱逐舰[EB/OL]. 2007-03-30 [2016-07-07]www.baike.com/wiki/美国阿利·伯克级导弹驱逐舰.
- [3] wjl44. 加拿大“哈利法克斯”级护卫舰[EB/OL]. 2008-02-22[2010-12-11]http://www.baike.com/wiki/加拿大“哈利法克斯”级护卫舰.
- [4] 钱德兴. 对转桨前置环翼排气试验[R]. 中国船舶重工集团公司第七〇二研究所科技报告, 1994 年 11 月.
- [5] 熊鹰, 谭廷寿, 钱晓南, 等. 螺旋桨导边充气对其水动力特性和辐射噪声的影响研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2000, 24(4): 379-383.
XIONG Ying, TAN Tingshou, QIAN Xiaonan, et al. Effects of air jet over the leading edge of propeller on its hydrodynamics and radial noise[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2010, 24(4): 379-383.
- [6] 王虹斌, 王芝秋, 张洪雨, 等. 水中气泡幕对噪声的屏蔽效果研究[J]. 中国造船, 2005, 46(1): 44-49.
WANG Hongbin, WANG Zhiqiu, ZHANG Hongyu, et al. Experimental study on noise suppressing of underwater bubble screen[J]. Shipbuilding of China, 2005, 46(1): 44-49.
- [7] 张文光, 赵欣然, 郝云巍, 等. 实艇气幕降噪试验研究[C]. 海军装备论证研究中心. 水下噪声学术论文选集, 北京: 中国造船工程学会, 2005.
ZHANG Wenguang, ZHAO Qiran, HAO Yunwei, et al. Experimental study on noise reduction of air jet over real ship[C]. Naval Equipment Research Center. Selected papers of underwater noise, Beijing: China Shipbuilding Engineering Society, 2005.
- [8] 高丽瑾, 孙红星, 魏以迈. 高速航行体模型尾部喷气降噪的试验研究[R]. 中国船舶重工集团公司第七〇二研究所科技报告, 2005.
- [9] CRIGHTON D G. Bubbles[M]//CRIGHTON D G, DOWLING A P, FLOWCS WILLIAMS J E, et al. Modern Methods in Analytical Acoustics. Springer, 1992.
- [10] 李亚, 王建芳. 喷气环和旋转部件组合喷气装置: 中国, 201410633956. 5[P]. 2016.
- [11] ATLAR M, TAKINACI A C, KORKUT E N. et al. Cavitation tunnel tests for propeller noise of an FRV and comparisons with full-scale measurements[C]// CAV2001: session B8.007: 1-13.
- [12] 朱锡清. 船舶流体动力噪声原理讲义[Z]. 中国船舶重工集团第 702 研究所, 2008.
- [13] MEDWIN H, CLAY C S. Acoustical Oceanography[M]. New York: Wiley, 1997.