

减振与降噪

满足 DNV · GL 水下噪声要求的科考船主推进轴桨设计与选型研究

于 胜¹, 朱林波², 刘亮清²

(1. 中国海洋大学, 山东青岛 266100; 2. 七一一研究所, 上海 200090)

摘 要: 介绍了科考船水下辐射噪声的入级标准, 结合国外典型入级 SILENT-R 的科考船主推进轴桨系统的配置和设计, 深入分析了主推进轴装置的水下噪声源。基于理论研究和经验, 提出了降低水下噪声的主推进轴桨设计和选型方案。该方案应用于某科考船主推进轴桨设计, 其水下噪声顺利通过 DNV · GL 评估。

关键词: 科考船; 主推进轴桨; 水下辐射噪声

中图分类号: TK423.3⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2018)04-0033-06

Design of Fixed Pitch Propeller Propulsion Systems for Ocean Research Vessels Meeting with DNV · GL SILENT Rules

Yu Shen¹, Zhu Linbo², Liu Liangqing²

(1. Ocean University of China, Shandong Qingdao 266100;

2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090)

Abstract: The classification standard of underwater-radiated noise of ocean research vessel is introduced, Based on the study of typical main propulsion shafting and propeller system of research vessel with DNV · GL SILENT-R notation, the noise sources from main propulsion shafting and propeller system are analyzed profoundly. Based on theoretical study and experiences, the design and type selection method of main propulsion shafting and propeller system to reduce underwater noise is put forward, which has been applied on a research vessel and approved by DNV · GL experts.

Key words: research vessel; main propulsion shafting and propeller system; underwater-radiated noise; low noise

0 引 言

随着国家海洋战略的出台, 海洋科考走向深蓝, 甚至拓展至包括冰区覆盖的全球区域, 高端新型的科考船建造应运而生。新型科考船要求能承担海洋资源、海洋生态环境、生物多样性、地球物理化学、水文、大气等多学科海上综合考察和研究任务, 还须配备众多高精度水下探测设备、高端海洋仪器, 设有多学科实验室, 载员多, 对水下噪声、舱室噪声及居住舱室舒适性提出了更高要求。统计资料表明: 船舶的水下辐射噪声约 50% 来源于桨轴系统, 尤其是螺旋桨。因此低噪声主推进轴桨系

统的集成设计和供货尤为重要。通过对主推进轴桨的设计和选型研究, 降低轴桨的水下噪声, 可以满足 DNV SILENT、ICES209 标准和要求, 提升科考船整体性能。

1 主推进轴桨设计与选型分析

1.1 船舶水下辐射噪声标准及入级要求

DNV · GL 是船舶噪声控制领域, 特别是水下噪声控制领域的世界权威船级社和咨询服务机构, 最早开发船舶水下噪声技术规范, 并发布水下噪声系列入级符号 SILENT-A, SILENT-E, SILENT-F, SILENT-S 和 SILENT-R^[1]。DNV · GL 在全球范围

内协助很多科考船满足 ICES 209、SILENT 入级规范等严格的水下噪声要求,如“Samudra Ratnakar”,“Discovery”,“G. O. SARS”,“James Cook”,“Cabo De Hornos”,“RV Investigator”等。

最常见的干扰源是高频率、宽频带的水下噪声,主要来自发生空泡的螺旋桨和推进器辐射噪声。水下噪声会降低水下仪器设备,如回声探测仪、卫星定位系统等的信号采集精度和准确度,缩小工作范围。通过满足 SILENT-A 标准要求可以限制高频率噪声。SILENT-S 更多地针对地震调查船,可以通过控制噪声辐射有效避免对地震资料收集的干扰。地震调查船由于牵引力大,螺旋桨噪声很大,采用 SILENT-S 标准可以确保尽可能降低船在牵引时的噪声,控制低频率区的噪声辐射,提升对地震的分析能力。

另外,对于一些渔业资源调查船,螺旋桨或者机舱机械设备的高噪声会显著影响鱼类的捕获率,如果水下噪声在一些频段过高,而这个频段恰恰是某品种鱼类的敏感频段,那就捕不到这类鱼。而满足 DNV·GL 的 SILENT-F 要求的船舶,噪声排放降低,而且如果该船装备有先进的水力声学探测器,就可避免由于噪声水平过高而被干扰的问题。

SILENT-R 基于 ICES 合作研究报告第 209 号(ICES209)指南编制,目的是在渔业调查中使鱼类对船舶回避反应最小,提高声学仪器的探测质量,并减少科考活动中整船噪声对环境的辐射。ICES209 推荐了渔业调查船在 11 kn 自由航行时的水下辐射噪声曲线(图 1)。DNV·GL 在该曲线基础上,对低频范围进行了修改,以便提高水声仪的探测灵敏度,减少对海洋生物栖息地和生物区的噪声辐射。衡准曲线见图 2。

1.2 入级 SILENT-R 的典型科考船 Investigator 的主推进轴系分析

RV Investigator 科考船是澳大利亚新型静音科考船,由加拿大罗伯特艾伦有限公司和安良科技(加拿大)有限公司以及美国 Alion 公司旗下分公司的合资公司——RALion 公司设计的加强型高端科考船,船上安装了价值高达 1 800 万美元的科研设备。RV Investigator 号科考船具有在任何深度海床绘图,收集 20 km 大气气象资料,利用声呐分析鱼类种类和揭示海平面以下 100 m 海底成分的能力。该船已取代澳大利亚退役的 Southern Surveyor 号政府研究船。

RV Investigator 号船长 93.9 m,总重量为 6 082 t,完全按照 DNV·GL 标准设计建造,是目

前通过 DNV·GL SILENT-R 测试的最大科考船。主推系统为交流推进电机直接驱动 5 叶固定桨。与之相比较的 Southern Surveyor 号船长 66.1 m,总重量为 1 594 t,主推进系统由 Wartsila 柴油机通过主离合、齿轮箱驱动 4 叶可调螺距螺旋桨(图 3)。表 1 总结了这两型船和主推进相关设备降噪措施的关键要点。

RV Investigator 按照 DNV·GL 程序进行了水下辐射噪声的测试,见图 4。11 kn 航速下,噪声低于 ICES209 标准。在高频区域,比标准低 20 dB;在 50~1 000 Hz 的低频区域,依赖于工况的变化,噪声约在 20 dB 范围内变化;噪声水平整体比 Southern Surveyor 低约 20 dB 以上。两船的噪声频谱对比见图 5。

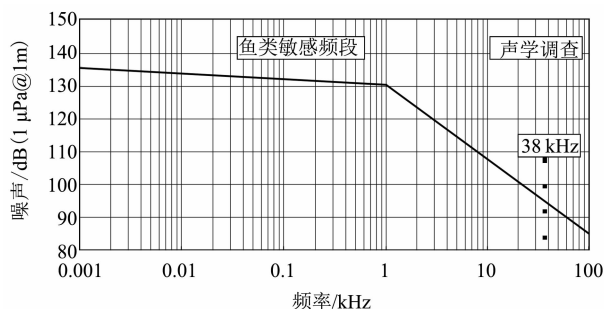


图 1 ICES209 的水下噪声衡准曲线^[2]

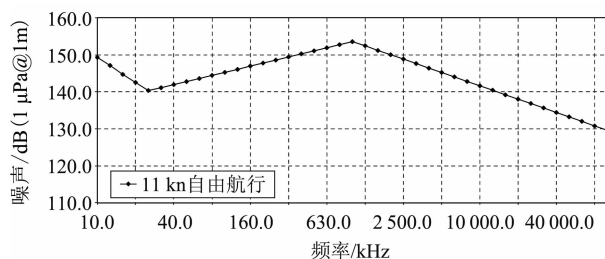


图 2 SILENT-R 的 11 kn 自航工况下的水下噪声衡准曲线

表 1 RV Investigator/Southern Surveyor 船舶降噪措施对比^[3]

设计点	RV Investigator	Southern Surveyor
螺旋桨	双轴桨, 桨径 3.5 m 的 5 叶螺旋桨, Wartsila 提供	单轴系, 4 叶传统设计的可调螺距螺旋桨
推进装置	2 台 Indar AC 2 600 kW 电机, 动力来源于 3 台 Mak 9M25C 柴油发电机组	Wartsila 柴油机通过齿轮箱驱动螺旋桨
隔振措施	Mak 机组采用双层隔振浮筏系统, 交流电机使用隔振块	单层隔振
特涂	船体内底板使用吸声涂料	无



图 3 RV Investigator（左）和 Southern Surveyor（右）螺旋桨设计

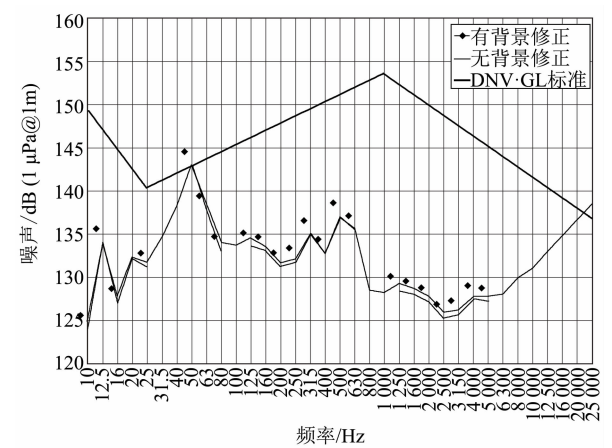


图 4 RV Investigator 水下辐射噪声测试

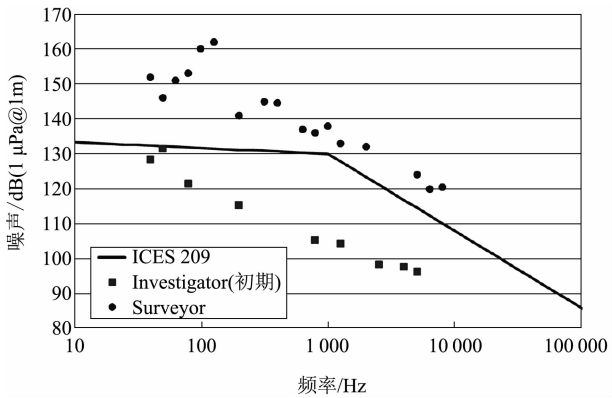


图 5 RV Investigator 和 Southern Surveyor 噪声频谱对比^[3]

1.3 满足水下噪声的主推进轴桨设计与选型

从传统船舶及典型科考船主推进配置出发，对主推进系统振动噪声源、关键设备等多方面进行振动噪声分析，以便对振动噪声源采取相应措施，对轴系传动设备进行减振设计，对螺旋桨进行特殊设计，来确保船舶满足噪声入级规范要求。

1.3.1 主推进轴桨噪声源分析

为了控制主推进轴桨相关设备的噪声，须要对噪声源进行分析，目前能掌握的常见噪声如表 2 所示。

表 2 推进装置常见噪声源的噪声因素

噪声源	频域范围 ^[4]	引起噪声的主要因素
机械设备 (包括机舱内主动力源、推进主机等，推进主机如柴油机、电机；主推进传动装置如齿轮箱或推力轴承，可调桨及伺服机构，传动轴系等)	0 ~ 10 kHz	1) 柴油机回振机构运转不均衡力产生的振动、活塞拍击声等 2) 电机运行中产生的电磁噪声、机械噪声和通风噪声。 3) 齿轮箱齿轮啮合、交变负荷等产生的振动噪声 4) 可调桨调距机构产生的振动噪声，以及可调桨远离最佳设计点因素造成的静音工况下的噪声 5) 传动轴系振动引起的共振等
螺旋桨及船艏 (螺旋桨空泡，螺旋桨和艏部流场相互作用，舵和舵设备等)	0 ~ 100 kHz	1) 螺旋桨和船体之间的间隙较小，桨的脉动压力及水流拍击到船体产生的噪声 2) 螺旋桨运行产生的周期性不均衡力通过艏部轴承传递引起的振动及噪声 3) 螺旋桨几何性产生的鸣音或唱音 4) 螺旋桨各种空泡产生的噪声。由于螺旋桨的沉深、船体尾场不均匀，螺旋运行时产生各种空泡，主要有叶面或叶背上的面片、稍涡、叶根、导边、随边等部位空泡

1.3.1.1 机械设备振动噪声

第一类机械振动噪声主要来源于推进主机（柴油机或电机）、齿轮箱（或推力轴承）、主推进轴系、可调桨及调距机构等，此类机械振动噪声频率一般小于 10 kHz。降低此类噪声的关键在于推进主机选型，也即推进主机应采用本质低噪声型。设备采用减振块，轴系设计避免过大振动，有效避开关键节点的振动频率等也是降低噪声的方式。

因低速推进电机在减振降噪方面有明显优势，低速推进电机直接驱动螺旋桨在国外舰船、科考船等特种船舶上应用广泛。推进电机通过安装隔振块可将 20 ~ 200 Hz 范围内的水下辐射噪声降低 7 dB^[5]。推进主机和轴桨设备尽量使用弹性联轴节，以避免主机和桨轴设备之间发生振动耦合。

由于齿轮箱齿轮啮合及交变负荷复杂，其振动及噪声治理相对复杂，因此建议尽量避免使用齿轮传动装置。图 6 为采用齿轮传动主推的科考船的噪声频谱^[2]。

主推进轴系的振动包含回旋振动、扭转振动、纵向振动等，一些轴系设备须要重点考虑上述振动问题，如艏管轴承须要考虑回旋振动；推力轴承须要考虑纵向振动。轴系的回旋振动、扭振振动、纵向振动的判定标准按照船级社要求：对于回旋振动，重点考虑船舶静音工况内叶片次固有频率应该

避开静音航速下的转速。如果采用静音电机,另外还须要兼顾静音电机相关振动的要求,比如某型号电机要求主推进轴桨系统的固有频率应该在运行转速的 $\pm 25\%$ 范围之外。

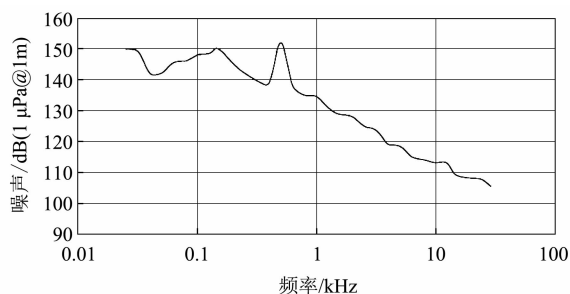


图6 齿轮传动水下辐射噪声图谱^[2]

1.3.1.2 螺旋桨设计和空泡

关于螺旋桨的参数选用及设计,国际海洋考察理事会(ICES)合作研究报告第209号提出的设计原则为:螺旋桨应设计和选择合理参数以降低空泡^[6];并给出了静音螺旋桨的定义:对于方形系数低于0.65的船舶,从设计图上预测的螺旋桨上方船体处脉动压力峰值应低于3 kPa(第1个叶片速率的谐次)和2 kPa(第2个谐次)。静音螺旋桨的设计尤其重要,其中空泡是主要辐射噪声源,可显著增大水下噪声。在正常操作工况下通过优化设计,例如优化螺旋桨载荷,尽可能确保水均匀流入螺旋桨(受船体设计的影响),并优化选择螺旋桨特性参数(例如直径、叶片数量、螺距、桨叶侧斜等)可降低空泡。

主推采用可调桨的船舶在轴转速上有一些可变性,在远离最佳设计螺距的螺距设定处,降低转速(一些设计可以降低至三分之二的轴转速)的操作可导致不利的空泡特性。有较多证据表明:可调桨在螺距和转速改变时,水下辐射噪声水平会大幅提高,特别是螺距突然变化时。图7为装配可调桨的某科考船在模拟围网捕鱼寻迹时,螺距从1.0到0.25变化时,在固定频率下监测到的噪声幅值变化。测得三个不相关频率下噪声的突然改变,100 Hz和1 kHz是鱼类应激反应的相关频率,噪声在100 Hz频率下突然剧烈增加,甚至达到了某些鱼类的听觉阈值。类似的情况在更先进的船舶上也有发生,参见图8,在频段125~250 Hz和频段1~10 kHz下,改变螺距,噪声剧烈变化。

由于螺距不可调,一般而言,对于装配固定桨的科考船,降低船舶航速是一个非常有效地降低水下噪声的措施,特别是当船舶航速低于空泡产生航速时。此类科考船的科考常用航速为8~11 kn,考

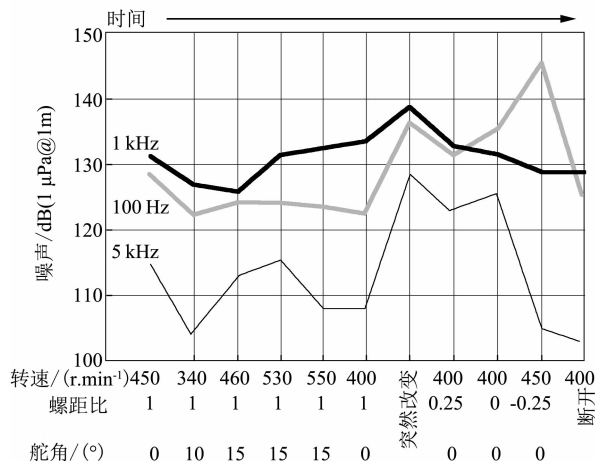


图7 模拟围网捕鱼工况下噪声的突然改变^[2]

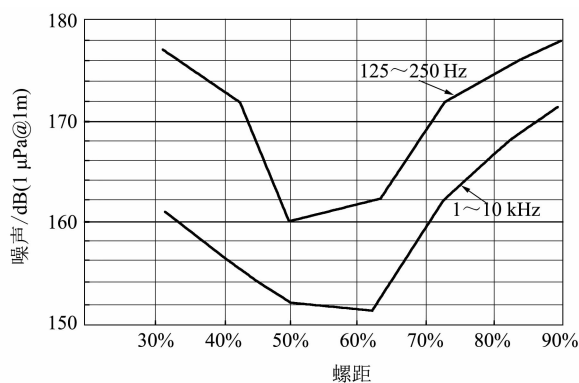


图8 某船在不同频段下可调桨螺距与噪声的变化曲线^[2]

虑到实际情况和理论设计差异,一般空泡初生航速都会大于11 kn,而空泡和螺旋桨叶的负荷密切相关。图9为空泡数(Cavitation number)与推力系数(Thrust coefficient)相关曲线,可见螺旋桨的参数如桨径、转速、桨叶数量、盘面比等,是在非常狭窄的范围内选择的。针对此类船舶通常的标准航速为8~11 kn,设计时主要考虑:叶梢卸载,螺旋桨径尽可能大,转速尽量低,较长的叶片弦长等因素。

螺旋桨空泡产生的噪声在很宽频率范围内对水声设备有干扰,为减小螺旋桨空泡噪声,可采取如下措施:

- (1) 螺旋桨布置保留和船体间足够的间隙;
- (2) 减少螺旋桨的载荷,减少船舶阻力,优化船舶总体参数,优化棱形系数 C_p 曲线及附体等;
- (3) 光顺尾部螺旋桨区域的伴场;
- (4) 使用大侧斜桨;
- (5) 螺旋桨浸没深度较深。

目前为止还不能通过桨的几何特征来精确预测

空泡引起的噪声，要提高螺旋桨所有形式的空泡初生航速，评估螺旋桨空泡至关重要。而评估螺旋桨空泡的主要工具是空泡数-推进负荷系数图（图 9）。图上标识出不同形式的空泡：叶面或叶背上的面片、稍涡、叶根、导边、随边等的相关曲线。CFD 计算并不能替代空泡水筒的模型验证。设计的难度在于获得较宽且深的稍涡空泡“桶”，船舶的运行曲线从“桶”底穿过，以平衡螺旋桨的压力面和吸力面。

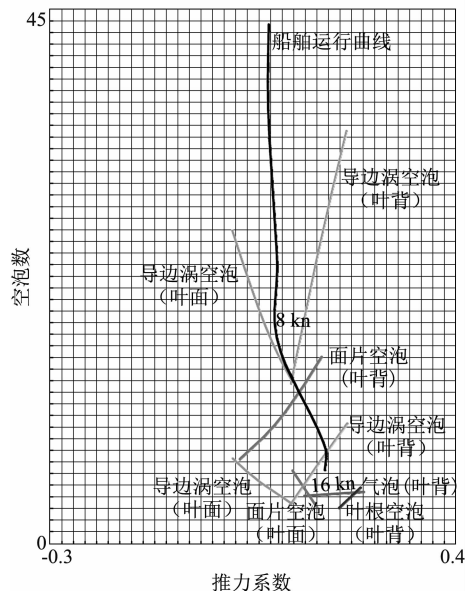


图 9 典型的空泡数与推进负荷系数相关曲线

1.3.2 满足低噪声的主推进型式

主推进的配置形式可以多种多样，典型的主推进型式是：中高速柴油机或电机通过齿轮箱驱动可调桨或定距桨；低速柴油机直接驱动可调桨或定距桨；低速推进电机通过推力轴承直接驱动可调桨或定距桨等。

结合以上的分析以及对国外典型低噪声科考船的调研，新型的科考船主推进系统多采用低速推进电机通过推力轴承直接驱动定距桨的推进型式，可满足 SILENT-R 声寂标准。

2 新型科考船的低噪声主推进轴桨集成设计方案

针对某型入级 DNV · GL SILENT R 的科考船主推进轴桨进行集成设计，应用理论及仿真分析确定水下辐射噪声定量化衡准，见表 3。为满足指标要求，综合考虑该船机舱布置、船体结构等因素，确定低噪声主推进轴桨设计方案如下：1）采用低速静音推进电机；2）采用特殊设计的静音定距桨；3）轴系采用低振动幅值设计。该船主推进设

备主要参数见表 4，主推进布置图见图 10。

表 3 轴桨系统最大水下辐射噪声 单位：dB (1 μPa@1 m)

频率/Hz	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80
噪声	143	141	139	137	134	135	136	137	138	139
频率/Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
噪声	139	140	141	142	143	143	144	145	146	147
频率/Hz	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000	6 300	8 000
噪声	148	146	145	144	142.8	142	140	139	138	137

表 4 某科考船的主推进设备主要参数

主推电机功率/额定转速	约 2 300 kW/156 (r · min ⁻¹)
推力轴承承受的船舶最大推力	约 280 kN
螺旋桨型式	整体式定螺距
螺旋桨直径和叶数	3 300 mm, 5 叶
螺旋桨名义螺距	约 4 125 mm

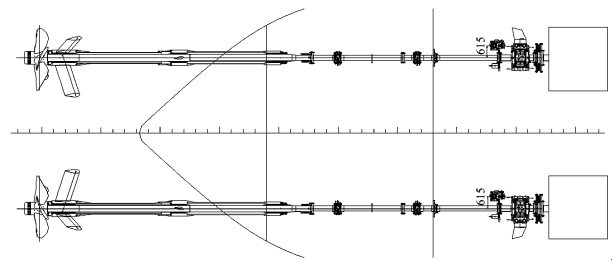


图 10 某科考船主推进布置图

2.1 考虑降噪因素的轴桨设备设计选型和布置

为满足以上设计要求，主要采取如下措施降低机械噪声和振动：

（1）不采用齿轮箱作为变速传动机构，采用低速静音电机，并使用独立的推力轴承承受整船的推力。推力轴承采用自然润滑斜块式推力块。优化机体结构设计以增强推力轴承的纵向刚度。

（2）主推电机和桨轴系之间采用高弹性联轴节，以降低主推电机和桨轴之间振动耦合的发生机率。

（3）优化设计中间轴承和其基座，提高整体支撑刚度。

（4）艏管轴承使用水润滑轴承，选用高分子材料，本质静音型。

（5）优化轴系校中过程，确保校中工艺简单、可靠、可控，方便船厂对中和安装轴桨设备。校中及回旋振动计算模型包括高弹、静音电机转子轴组合件在内的完整轴系。

为降低螺旋桨空泡噪声，及可靠评估螺旋桨噪声，主要采取如下措施：

（1）螺旋桨采用 5 叶设计，直径尽量选择较

大, 兼顾吃水等参数, 桨径定为 3.3 m。

(2) 螺旋桨浸没深度约 3.8 m, 螺旋桨叶梢至船体离桨最近的距离超过 25% 桨径。

(3) 该螺旋桨进行空泡水筒试验, 试验预报结果: 实桨梢涡空泡起始航速 14.8 kn, 叶背片空泡起始航速大于 16 kn, 均大于指标要求的空泡起始航速 8 kn。

2.2 双桨的水下辐射噪声计算预报结果

DNV · GL 双螺旋桨辐射噪声计算预报: 11 kn 双桨运行工况下, 水下辐射噪声计算结果见图 11。从 10 Hz 到 100 kHz 的所有频率范围内, 螺旋桨噪声完全满足 DNV · GL SILENT-R 标准的要求。

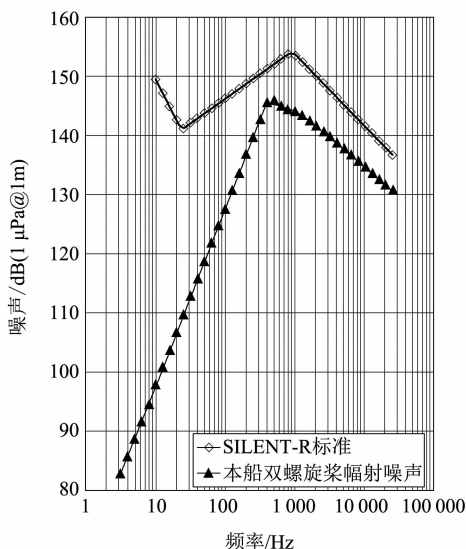


图 11 某科考船 11 kn 航速下双桨辐射噪声计算值曲线

3 结 论

此型科考船水下噪声控制要求较高, 技术难度

大, 主推进装置的设计和选型至关重要, 总结如下:

(1) 主推进装置采用低速推进电机, 通过推力轴承直接驱动定距桨的推进型式, 满足 SILENT-R 声寂标准。

(2) 主推进桨轴须集成设计并优化, 确保设计可靠及系统的整体性能。

(3) 螺旋桨的设计须合理选择螺距等参数, 提高空泡初生航速; 须进行空泡筒试验验证。

(4) 船体尾部流场尽可能均匀; 船体总体参数须优化, 包括轴系在内的船舶附体也须要重点考虑。

参考文献

- [1] DNV · GL. Rules for classification of ships new buildings: Part 6 chapter 24 silent class notation [S]. Norway, 2017.
- [2] MISTON, R B. Underwater noise of research vessels review and recommendations [J]. Institute of Statistical Mathematics, 1995 (2): 3-4.
- [3] KLOSER R, MATTIN T, SHERLOCK M. Characterising the acoustic footprint of Australia's new research vessel RV Investigator [C]. Inter-noise & Noise-con Congress & Conference, Australia; 2014.
- [4] Specialist Committee on Hydrodynamic Noise. Final report and recommendations to the 27th ITTC [R]. Copenhagen: ITTC, 2012.
- [5] 谢志强. 基于数值计算的推进电机水下辐射噪声分析 [J]. 声学技术, 2014 (S1): 116-119.
- [6] CCS. 关于使用“降低商业航运造成的水下噪声对海洋生物不利影响指南”(MEPC.1 Circ.833) 的通告 [R]. (2014-10-28).