

槽道式侧推器水动力性能研究进展和展望^{*}

肖智俊, 贺 伟, 黄菀宸, 李子如

(武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 侧推器在从事港口作业、科考、救援和海洋资源开发等具有较高操纵性要求的船舶和海洋平台上具有广泛的应用。本文分别对槽道式侧推器的水动力性能预报方法、螺旋桨设计、槽道口减阻降噪设计、做功能力影响因素、空化噪声和脉动压力、减摇作用以及操纵效能等方面的研究进展进行了回顾; 重点对影响侧推器做功能力的因素进行了梳理, 将其分为槽道口形状、槽道内流场情况、船舶航速与康达效应、槽道及船体形状、侧推器同其他推进器的相互干扰、自由液面和限制水域等几个方面, 并对现有相关研究工作进行了阐述。最后对侧推器水动力性能研究方面需要进一步深化以及可以拓展的方向进行了展望。

关键词: 槽道式侧推器; 水动力性能; 数值模拟; 模型试验; 螺旋桨

中图分类号: U664.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2022) 06-210102-15

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210102

Progress and Prospect of Hydrodynamic Performance for Tunnel Thruster

XIAO Zhi-jun, HE Wei, HUANG Wan-chen, LI Zi-ru

(School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: Transverse thrusters are widely used in ships and offshore platforms with high maneuverability requirements, such as those marine structures with tasks of port operation, scientific research, rescue and marine resources development. The research progress related to the tunnel thruster are reviewed, which include the hydrodynamic performance prediction method, propeller design, resistance and noise reduction design of flow entrance, factors influencing work capability, cavitation, noise, fluctuating pressure, roll reduction and maneuverability effect. The factors influencing the work capability of tunnel thruster are summarized in details and subdivided into tunnel mouth shape, internal flow field, ship speed and Coanda effect, tunnel and hull shape, the hydrodynamic interactions between tunnel thruster and other thrusters, free surface and restricted channel. At last, the further development on the hydrodynamic performance of tunnel thruster are analyzed and prospected.

Key words: Tunnel thruster; Hydrodynamic performance; Numerical simulation; Model test; Propeller

1 引 言

操纵性是船舶的重要性能之一。在相当长的时间里舵都是最常见的船舶操纵性装置,但其操纵效

果(即舵效)与航速关联较大,在中低航速时无法产生足够的舵效以保证船舶应有的操纵性。而另一方面,在船舶航行中不可避免地存在离靠泊、过船闸等航速低却需要较好操纵性的情形,这就引出了一个

^{*} 收稿日期: 2021-02-27; 修订日期: 2021-04-12。

作者简介: 肖智俊, 硕士生, 研究领域为船舶螺旋桨水动力性能。

通讯作者: 李子如, 博士, 副教授, 研究领域为螺旋桨空泡振动噪声。

引用格式: 肖智俊, 贺 伟, 黄菀宸, 等. 槽道式侧推器水动力性能研究进展和展望[J]. 推进技术, 2022, 43(6):210102.
(XIAO Zhi-jun, HE Wei, HUANG Wan-chen, et al. Progress and Prospect of Hydrodynamic Performance for Tunnel Thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(6):210102.)

问题:如何提高船舶在低速甚至零航速下的操纵性?一个简单的方法是使用拖船,但这仍然不是一个理想的解决方案,因为拖船自身也需要在低航速时具有良好的操纵性。于是人们想到可以给船舶安装能够产生横向力的推进器,帮助船舶在低航速没有良好舵效时也能产生足够的转艏力矩。由此操纵推进装置(Maneuvering Propulsion Device)亦即侧推器(Lateral Thruster, Transverse Thruster 或 Side Thruster)^[1-4]应运而生。

时至今日,侧推器的应用已不再只是改善船舶在低速时的操纵性能,安装侧推器的对象也不再局限于需要在低航速下具有良好操纵性的船只。随着人类对海洋的开发愈加深入,从事科考、钻探、救援等需要定位才能作业的船只逐渐走向水深更深的远海大洋,锚泊定位也越来越多地被动力定位所替代,而侧推器正是动力定位系统的重要组成部分^[5]。在探索水下世界时,有大量工作由水下机器人完成,但无论是系缆的ROV(Remote Operated Vehicle)还是无缆的AUV(Autonomous Underwater Vehicle),其姿态调整和位置维持的操作都需要包括侧推器在内的多方向推进器实现^[1]。

尽管侧推器的结构并不算复杂,主要做功部件也仍然是螺旋桨,但其涉及到的研究领域比较分散,其水动力性能的影响因素及变化规律与常规主推螺旋桨相比亦具有特殊性,以主推螺旋桨为对象开展的研究以及相关结论并不能直接类推到侧推器;与此同时,围绕侧推器开展的研究工作以及成果也远不如主推螺旋桨丰富,囿于问题的复杂性以及关注的先后顺序,有诸多在主推螺旋桨领域已发展较为成熟的技术问题(如自由液面的影响、限制水域的影响、尺度效应问题等)在侧推器领域甚至都还没有得到普遍关注。因此,本文主要分析与侧推器水动力性能相关领域的研究进展,首先对船用侧推器的分类、结构形式以及工作原理进行了简介,随后对其水动力性能的研究方法和研究热点两个方面的发展现状进行了综述,最后对本领域需要进一步深化以及可以拓展的方向进行了展望。

2 船用侧推器简介

经过数十年的发展,侧推器已经成为一种种类丰富、结构多样的船用装置。为了更好地明晰综述的对象,首先对侧推器的分类、结构形式以及其工作原理进行简单阐述。

2.1 侧推器的分类

如果以能否提供侧向或横向力为标准来界定一个推进器是否为侧推器,那么可以全回转的吊舱推进器在提供横向力时也可以被认为是侧推器;如根据侧推器的结构形式来区分,则可以将其分为轮缘式侧推器(Rim-Driven Thruster)、可伸缩式侧推器(Retractable Thruster)、U型管道格栅喷流器(Steerable, Internal Duct Thruster 或 Horizontal Shaft Thruster)和槽道式侧推器(Tunnel Thruster)等^[6-10]。这其中槽道式侧推器是目前应用最为广泛的侧推器形式,本文也以其为综述对象,后文中若不加说明则均简称其为侧推器。当侧推器推力确定时,其安装位置越远离船舶漂心则能产生越大的转艏力矩,因此侧推器一般安装于船舶的艏部或艉部,所以根据其在船舶长度方向的安装位置也可分为艏侧推(Bow Thruster)和艉侧推(Stern Thruster)。

2.2 侧推器的结构形式

槽道式侧推器将螺旋桨布置在船体上横向开设的槽道内,相比其他种类的侧推器,这种结构更简单,有利于降低设备成本和方便安装维修,因此被广泛地应用。图1为一个典型的槽道式侧推器的结构示意图,主要结构包括螺旋桨、驱动电机和转向齿轮箱,此外两端的槽道口还布置有阻挡异物流入槽道的格栅。

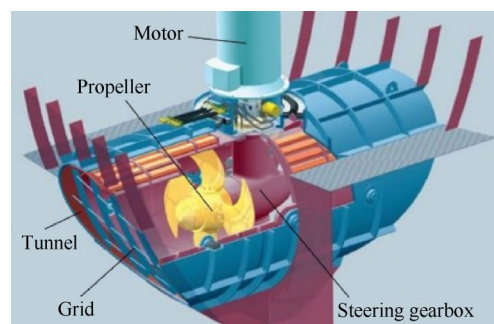


Fig. 1 Typical structure of tunnel thruster^[7]

2.3 侧推器的工作原理

侧推器通过产生横向推力并施加给船体转艏力矩进而实现改善船舶操纵性能的目的。但侧推器产生的推力并不完全由其配备的螺旋桨提供,还有一部分推力被称为“船身推力”或“槽道推力”,是由侧推器工作时船体或槽道产生的,需要注意的是部分研究^[11]中并没有对侧推器产生的总推力和侧推器螺旋桨产生的推力加以明显的区分。

1966年English^[12]分析得出理想情况下侧推器的推力成份由各占50%的螺旋桨推力和船身推力组

成;基于 English 的理论推导结论, Beveridge^[13]调查了多条实船的侧推器推力成份,指出艏侧推器螺旋桨产生的推力占到侧推器总推力的 52%~87%;严周广^[14]与 Yu 等^[15]分别使用 CFD 软件获得了槽道入口和出口处的压力分布云图,进一步揭示了“船身推力”的形成原因,其实质上是螺旋桨的抽吸作用导致槽道入口处极小范围内形成极低压区域(见图 2 中最内侧圆环的蓝绿色区域),进而引起槽道附近区域的船体两侧产生与螺旋桨推力方向一致,且与螺旋桨推力量级相当的压差力。

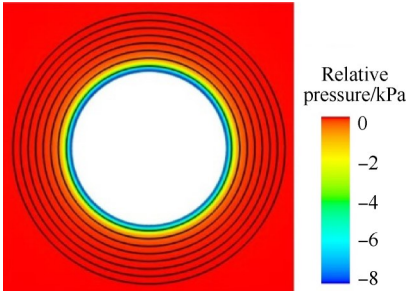


Fig. 2 Pressure distributions around the entrance^[15]

3 研究方法

侧推器水动力性能的研究方法主要有模型试验、理论推导与数值模拟。在对侧推器水动力性能的研究中,研究者们往往会根据需要选择其中的一种或多种方法开展研究。本部分对上述方法在侧推器水动力性能预报方面的应用与发展现状进行简要介绍。

3.1 模型试验

虽然存在不能满足全相似条件、试验时间与经济成本高等各种各样的问题,但模型试验在大多数情况下仍然是最接近真实情况、结果也最为可信的研究方法,在进行数值计算时也需要通过对比模型试验结果来验证数值方法的有效性。

侧推器水动力性能的模型试验研究工作大多基于拖曳水池或循环水槽来开展,通过改变模型的迎流方向,以及拖车速度或水槽流速即可完成不同背景流场下的侧推器推力的测量。需要指出的是,如何同时测量螺旋桨推力和“船身推力”是一个比较棘手的问题。对于涉及空化现象的侧推器试验,一般会选择在空泡水筒中进行。关于侧推器脉动压力的测量,较受推荐的是第 28 届 ITTC 会议报告给出的螺旋桨脉动压力模型试验规程^[16]。

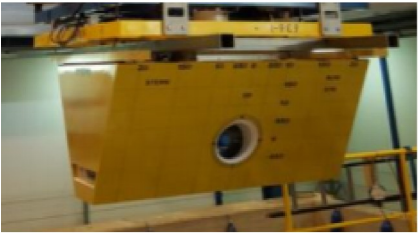
船体作为侧推器槽道几何结构的外向延伸,在

侧推器水动力性能研究中必须考虑其存在,但侧推器和船体在尺度上存在数量级差别,这给模型试验带来了困难。出于对模型尺度和仪器设备量程两方面的考虑,相当多的研究者会选择截断船体仅保留侧推器安装位置附近的船体分段来进行试验,这部分船体也被称为“名义船体”,图 3(a)即为刘杨等^[17]进行模型试验的名义船体。当然,对于那些精确考虑侧推器影响的船模操纵性试验研究而言,仍不得不采用整船模型来进行。

1966 年 Taniguchi 等^[19]完成的模型试验研究在近半个世纪里一直都是最为详细的侧推器试验资料,试验主要在拖曳水池中完成,包括侧推器性能试验和船模操纵性试验两个部分。其中侧推器性能部分共考察了侧推器的螺旋桨转速、盘面比、螺距比、叶梢间隙、槽道长度、槽道端口形状、浅水效应等诸多因素对侧推器推力的影响。由于其试验内容丰富,长期被用于数值计算方法的有效性验证。2018 年荷兰 MARIN 在新型侧推器图谱开发过程中开展了大量模型试验研究^[18],研究过程中也是采用的船体截断模型(图 3(b)),对系列侧推器的推力转矩、脉动压力以及噪声性能进行了测试,但因涉及到商业机密,公开发表的资料比较有限。



(a) Nominal hull^[17]



(b) Ship segment model^[18]

Fig. 3 Ship models in tunnel thruster tests

为了消除船体形状对侧推器水动力性能的影响,陈婷婷等^[20]采用了如图 4 所示立方体形状的“标准槽道”来代替船体,并定义系泊工况下侧推器在此槽道模型中的总推力为“名义推力”。其好处在于:可以用“名义推力”来表征侧推器本身的做功能力;在侧推器装船后,可在“名义推力”基础上,增加反映

槽道形状、船体形状、航速等影响的若干影响系数,进而实现实船侧推力的快速估算。其不足在于:影响侧推器推力大小的诸多因素存在耦合作用,在同时涉及到多个因子时进行简单的计算系数乘法运算是不够严谨的。

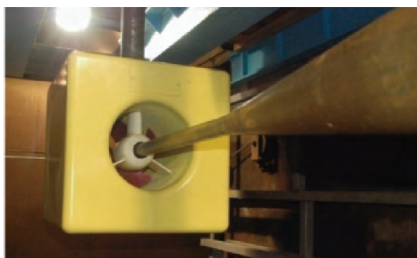


Fig. 4 Cubic “standard tunnel”^[20]

随着流场测试技术水平的提高,通过模型试验得到流场速度分布成为可能。Cozijn等^[21]使用粒子成像测速法(Particle Image Velocimetry, PIV)测量了某穿梭油轮两个艏侧推之间的尾流流场。如文中所述,这样的试验结果可以提高对侧推器间相互作用的物理解,并可为理论推导和数值模拟的相关研究工作提供数据支撑。

至于实船测试,可以认为是1:1的模型试验。这一类研究方法无疑是最为可信的,但同时其成本也是最高的。1980年哈拉特·科恩^[22]为探索侧推器的最佳设计,提出了实船测试中必须测量的参数和对测试船的要求,并在此基础上进行了37次测试,为其所在单位后续的侧推器产品优化和定型奠定了较好的基础。

3.2 理论推导与数值模拟

由于侧推器流动问题的复杂性,在侧推器水动力性能研究中完全采用理论推导方法的工作并不多,且一般仅用于相关规律的定性讨论。English^[12]使用理论推导方法定性分析了理想情况下侧推器的推力成分,并给出了理论上可以避免槽道口处尖角导致流动分离发生的槽道口最佳形状公式。

张璐怡等^[23]建立了侧推器侧向推力的理论计算模型,并通过与模型试验结果的比较,对该计算模型的适用范围进行了讨论:在无因次速度比 ξ ($\xi = \frac{u_0}{u_j}$, 其中 u_0 为来流速度, u_j 为侧推器出口射流速度)介于0.2和0.8时,计算值和试验值吻合良好。

相比较理论推导方法而言,数值模拟方法可以得到更为精确和丰富的计算结果,再加上其成本低廉,因而获得的应用越来越多,现在也成为了侧推器

水动力性能研究最常采用的方法。目前在侧推器水动力性能数值预报方面最常采用的是RANS方法^[3, 15, 24-25],在需要得到流场的时域信息进行流固耦合或流固声耦合计算时也会用到大涡模拟^[26]等方法。

姚志崇等^[1]指出侧推器流动问题数值模拟的难点主要在于:一是解决好低进速乃至零进速时数值模拟收敛性较差的问题;二是要将侧推器特殊流动现象模拟出来,包括桨对槽道内流场的强烈抽吸作用、槽道口处低压部分导致的船身推力、槽道口形状和桨盘面位置等因素对侧推器性能的影响等。文献[24, 27]针对侧推器数值计算易发散的特点,给出了一种增加桨叶表面附加包层以提高网格质量的方法,并对计算域的尺度和边界条件对数值计算的影响进行了研究,给出了侧推器流动问题数值模拟计算域设置的若干建议。

在湍流模型的选择方面,王声森^[28]对Standard $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$, SST $k-\omega$ 和 RSM 这四种最常见的湍流模型在侧推器流动问题数值模拟方面的适用性进行了比较,发现后两种湍流模型对应的计算结果与试验结果均较为吻合,但如从计算成本角度考虑,则建议选取 SST $k-\omega$ 湍流模型。

为了提高计算效率,RANS方法和体积力模型相结合的方法也被多个学者用于侧推器的水动力性能研究。其中,Kinnas等^[29]提出了一种耦合涡格法和RANS方法的非定常流场分析方法,并用于数值预报某轮缘式侧推器的实效伴流和空泡性能,数值计算结果与模型试验结果吻合良好。郁程等^[15]首先基于RANS方法针对某系列侧推器敞水性能进行了数值预报,随后基于系列计算得到的转子负荷分布特征建立了对应的体积力模型^[30],通过结合该体积力模型与RANS方法可实现初步设计阶段船身推力的快速预报;考虑到槽道内螺旋桨和齿轮箱对槽道内的流量的影响,还提出了流量修正系数计算公式以提高预报精度^[7, 30]。此外,Terry^[31]也使用鼓动盘理论讨论了多个艏侧推器之间的水动力干扰。

4 研究领域

与船用主推进器相比,侧推器在结构形式、工作条件、性能指标等方面均存在明显区别,因此围绕侧推器水动力性能的研究工作较多,且研究方向较为繁杂。本部分对现有相关研究工作进行了梳理,将之分为侧推器螺旋桨设计,槽道口减阻降噪设计,侧推器做功能力影响因素,侧推器的空化、噪声和脉动

压力,侧推器减摇作用和侧推器操纵效能共六个部分,并分别对这六部分的研究进展进行阐述。

4.1 侧推器螺旋桨设计

螺旋桨作为产生推力、传递扭矩的设备,是侧推器中最为重要的组成部分。尽管螺旋桨本身已经广泛地应用于船舶主推进装置中,也有着成熟的设计方法和流程,但由于侧推器螺旋桨同主推进螺旋桨应用工况和性能要求的区别,两者的设计目标也有明显不同,因此侧推器螺旋桨的设计也需要进行专门的讨论。

侧推器螺旋桨需要双向工作,因此美国海洋技术协会^[32]建议采用剖面为椭圆形的桨叶以便在“倒车”时获得和“正车”时相同的性能。Carlton^[6]建议采用如图5所示无拱度对称剖面且初始螺距角为零的可调螺距螺旋桨,该螺旋桨因其初始状态的桨叶为平面,因此也被称为“平板桨”(Flat-Plate Blades)。



Fig. 5 HI-SEA tunnel thruster product using “flat plate” blade^[7]

借鉴部分主推进器螺旋桨的设计方法,Ozdemir等^[33]给出了耦合势流方法与粘性方法的侧推器螺旋桨几何设计流程:首先选用无拱度对称型剖面,根据给定的桨叶数、桨直径、转速和功率等信息采用升力线方法确定螺旋桨螺距;根据空化风险确定最小的桨叶面积;采用简单梁理论计算桨叶截面所需厚度,进而得到桨叶的初始几何;然后使用升力面理论和RANS方法对螺旋桨性能进行校核,根据需要对初始几何形状进行若干次迭代调整以获得最终方案。Wilkins^[34]也开展了类似的工作,采用基于升力线和升力面方法的螺旋桨设计程序OpenProp完成了三个侧推器螺旋桨的设计,并分别通过数值模拟和模型试验,检验了该设计程序的可靠性。尽管试验结果同设计性能吻合得不错,但令人遗憾的是,这三个螺旋桨的性能比常见的侧推器螺旋桨低20%左右,Wilkins认为这是由于该程序升力面阶段的几何修正方法不适用于系柱工况所造成,但这一结果并不影响所采

用的流程和方法在侧推器螺旋桨设计中的使用。

郁程^[7]针对侧推器螺旋桨的设计,提出了等效进速和实效伴流的概念,建立了粘、势流结合的转子设计方法,其中的势流部分也是采用的升力线方法。通过设计算例证明了该方法的有效性,并通过模型试验和数值模拟讨论了叶梢卸载和非线性纵倾对脉动压力和噪声的影响。

从工程应用便利性与可靠性的角度来看,如有成熟的侧推器图谱可供选用无疑是最为适宜且方便的。事实上,大部分的侧推器供应商都开发有专用的侧推器螺旋桨图谱^[35-38]。沈海云^[39]以某可调侧推器为例,讨论了图谱法和升力线方法在侧推器螺旋桨设计方面的适用性,结果显示这两种方法设计出的螺旋桨相关参数均能较好地满足设计目标。

侧推器螺旋桨的叶梢靠近槽道壁且主要在低速工况下工作,容易产生空化现象并诱导振动和噪声。Dang等^[18]基于系列侧推器模型试验结果,给出了适当增大螺旋桨侧斜可降低桨叶空泡体积、振动和噪音水平的侧推器螺旋桨设计建议。Sharma^[9]指出应根据侧推器实际使用所需的推力、转船速率等参数来设计螺旋桨。

文献[3,14,40-41]采用模型试验或数值模拟手段,讨论了侧推器设计过程中部分桨叶几何参数对侧推器系柱工况下水动力性能的影响规律。结果表明:(1)盘面比对侧推器水动力性能影响较小。(2)随螺距比的增加,侧推器螺旋桨的推力和转矩均增加;槽道内流速增加,槽道入口处的负压幅值降低,负压区域面积增加,导致船身推力增加;就侧推器工作效率而言,在螺距比小于1时其随螺距比增大而增大,但当螺距比超过1后基本稳定在最大值。(3)侧推器螺旋桨毂径比在从0.3增大到0.6时,侧推器桨叶推力和转矩、船身推力以及侧推器工作效率均呈下降趋势。

4.2 槽道口减阻降噪设计

船舶快速性一向是船舶设计中最为重要的性能指标之一,但是发现船舶安装侧推器后阻力性能会出现不同程度的恶化。找到侧推器导致船身增阻的原因、研究不同因素对船身增阻的影响规律是得到最小增阻设计方案的前提。此外,部分装有侧推器的科考船在航行时也出现了较没有安装侧推器同类型船更大流噪声的现象,严重影响船上水声设备的正常工作和船员的休息,这一问题也需要得到解释和解决。

针对不同船型,汪诚仪^[42]和杨峻凯^[43]分别讨论

了侧推器增阻随傅汝德数变化的规律,三条不同尺度不同航速船舶对应的结果如图6所示,可以看出:方形系数越小、槽道直径船长比越大,则其阻力增幅越大。汪诚仪^[42]认为侧推器导致船身增阻的主要原因是水流对槽道后壁冲击产生的动压力,并提出可以参考平板射流原理对该阻力增值进行估算,即射流对垂直平板的冲击力是 $R = \rho v^2 S$,其中 ρ , v , S 分别为流体密度、射流速度和平板面积。基于该观点,则影响船身增阻大小的主要因素是船舶航速和槽道后壁在水流方向的投影面积,对于高速小方形系数船舶而言,这两项都较大,因而侧推器增阻较低速大方形系数船舶更为明显。杨峻凯^[43]根据其数值模拟结果分析得出:由于槽道进出口后缘阻挡了水流流动,形成高压区,而在槽道前壁处由于船体型线突变产生涡流,导致此区域形成低压区,最终导致船舶剩余阻力显著增加。

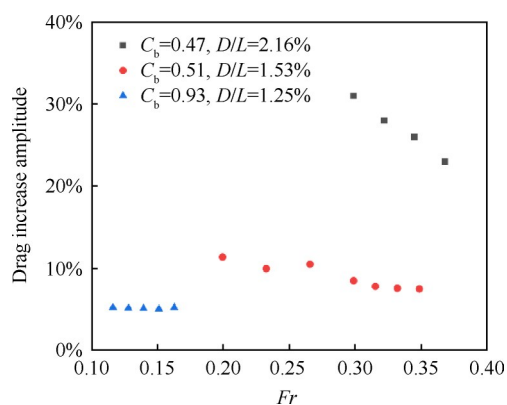


Fig. 6 Relationship between drag increase amplitude and Froude number of different ships (C_b is the block coefficient, D/L is the ratio of tunnel diameter to ship length)

文献[42-43]还都关注到了侧推器桨轴浸深对船舶兴波阻力的影响,研究表明当侧推器桨轴浸深较小时,会因为距离自由液面太近产生兴波阻力,在一定程度上会影响到船身增阻的大小,反之浸深较大时则几乎没有影响。

基于上述结论,汪诚仪^[42]提出在侧推器槽道口后缘开设导流槽以降低槽道后壁受冲击面积的减阻方案,通过模型试验方法确定了最佳导流槽的方向、长度和深度,可以使船身增阻从未开设导流槽时的26%降低到2.3%。更进一步地,汪海瀚等^[44]提出了当船舶装备有两个艏侧推且纵向间距较小无法开设两个导流槽时,可以如图7所示在靠前的艏侧推槽道口前缘增设凸起的导流罩,在靠后的艏侧推槽道口后缘开设导流槽,这样也能有效减阻。另外,在槽道

口处采用倒角或导圆的方式进行过渡也可以有效降低安装侧推器导致的船身增阻。

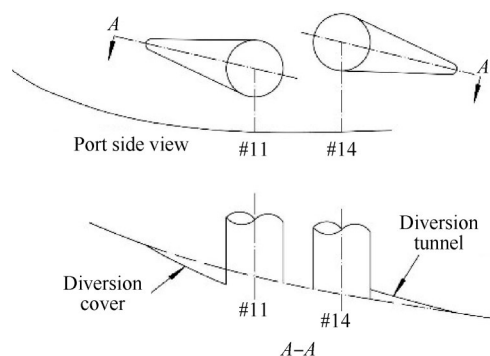


Fig. 7 Diversion tunnel and diversion cover^[44]

侧推器实际使用时容易将水中杂物吸入槽道,轻则影响侧推器做功能力,重则对侧推器造成损伤。为降低水中杂物在侧推器工作时被吸入槽道的可能性,一个简单的方法是在槽道入口处安装格栅。在槽道口设置格栅除了阻隔杂物以外,人们还发现其还具有降低加装侧推器导致船身增阻的潜力。Ban-
iela^[45]指出格栅是通过抑制槽道口涡的发生来减少涡致能量耗散进而降低船身增阻,并推荐了如图8所示的格栅设计;孟阳等^[46]基于数值计算和模型试验,建议将图8所示的格栅旋转约90°使扁形铁条沿流线方向布置能进一步降低增阻。

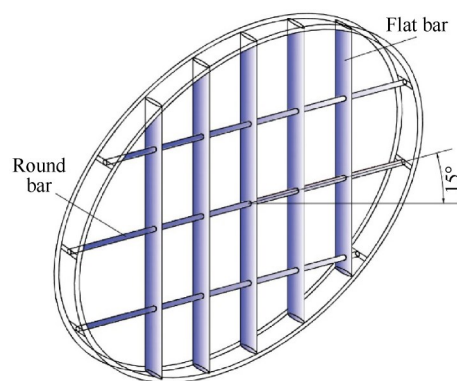


Fig. 8 Protection grid of a tunnel thruster^[45]

为了尽可能地维持船体型线进而控制侧推器增阻,整体式和分片式槽道盖板先后被提出。范井峰^[47]给出了槽道盖板设计的两个原则:在侧推器工作时向外不超过船体外廓,向内不干涉侧推器正常运转;其研究表明安装槽道盖板在减小增阻的同时还可以减小侧推器对水声设备的干扰。杨峻凯^[43]设计了如图9所示的一套在关闭时能够显著降低船身增阻的三片式槽道盖板,数值模拟结果还显示,通过

减薄厚度、设置倒角等手段,三片式盖板开启时的阻力增幅也可控制在较小的范围。

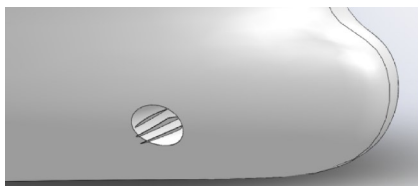


Fig. 9 Three-piece cover design^[43]

总而言之,安装侧推器引起的船身增阻源于槽道对船体型线的破坏导致船舶剩余阻力显著增加,而船舶载况的变化也会改变侧推器桨轴浸进而影响兴波阻力的大小。槽道口处的船体型线、槽道口的处理方式(倒角、导圆、格栅和盖板等)乃至多个槽道之间的干扰都会对船身增阻的大小产生影响^[48]。为了降低船身增阻,相应的减阻措施有增加导流槽或导流罩、开设倒角或导圆、增加格栅或盖板等,考虑到安装成本和减阻效果,设计者可以选择其中的一种技术或几种技术相结合来达到设计目的。当然,这些减阻技术不可避免地也会影响到侧推器的做功能力,具体请见4.3.1部分。

4.3 侧推器做功能力影响因素

侧推器的做功能力主要由其产生侧向推力的来体现。有一些学者将船舶推进中的“推力减额”概念引申到侧推器领域,但需要指出的是侧推器的推力减额(也有研究者称其为“推力减缩”)目前并没有统一的定义。

李齐垚^[11]在研究侧推器推力减额时以系泊工况下螺旋桨达到指定推力时的转速为额定转速,再测得螺旋桨在其他工况下额定转速时产生的推力,将其与指定推力比较得出推力减额系数。刘辉等^[49]在比较背景流场流向变化时的螺旋桨推力减缩情况时指出:尽管背景流场流速没有变化,但速度的轴向分量的大小是不同的,因而应该比较同轴向进速系数下的推力减额情况。魏跃峰等^[50]则将侧推器推力减额定义为船舶直航时,船体和螺旋桨的侧向合力相对无流工况下船体和螺旋桨的侧向合力减小的比值。

这三种推力减额的定义方式各有优劣,第一种定义中以转速标定基准值和测算推力减额的情况比较符合动力定位等自动控制系统的操作逻辑,有利于直接将结果进行工程应用;第二种定义先统一进速系数再计算推力减额分数的方法与船舶主推进的做法更为一致;而第三种定义将船身推力也纳入侧

推器的推力中统筹考虑,则更加契合侧推器的实际情况。

现将影响侧推器做功能力的因素梳理总结并分述如下。

4.3.1 槽道口形状

如前文4.2处所述,为尽可能实现减阻和降噪的目标,工程师和研究者对侧推器槽道口的设计一直在进行研究和创新。

对于在槽道口使用导圆、倒角或喇叭口这一类减阻技术,Beveridge^[13]指出导圆这种光滑过渡只有利于槽道入口处减少流动分离,对槽道出口处推力射流的流动分离反而会产生不利影响;翟树成等^[51]的研究也指出随着导圆半径的增大,槽道入口的截面积增加,进入槽道内的流量也会增加,从而使得槽道入口处的相对进速增加,导致侧推器螺旋桨的推力有所下降;Taniguchi等^[19]建议槽道口导圆半径设置为 $0.1D$ (D 为槽道内径)。Feng等^[52]指出随着槽道口处导圆半径增大,槽道内流场的速度分布将更加均匀,螺旋桨桨叶上的压力分布也变得更加均匀,有利于提高侧推器的效率。

Taniguchi等^[19]测试了格栅条数目对侧推器水动力性能的影响。结果显示:与没有格栅的情况相比,加装格栅会导致螺旋桨推力和转矩的增加,但船身推力会降低,最终使得侧推器总推力基本不变;且随着格栅条数目的增加,船身推力下降的程度逐渐趋于显著。

对于采用了槽道盖板的设计,侧推器在工作时需要打开盖板,而盖板的存 在也会对槽道内流场产生一定的影响,进而影响侧推器的做功能力。吴寅生^[53]指出随着侧推螺旋桨的进速增大,盖板的影响也逐渐变大,盖板边缘使用圆角设计可以降低其阻碍作用,而盖板厚度的增加也会显著降低螺旋桨的侧推力,数值模拟结果显示某海洋科考船加装盖板并开启后会使得侧推器推力下降13%左右。

4.3.2 槽道内流场情况

侧推器的螺旋桨轴线垂直于船舶中纵剖面,且处于狭长槽道内,因此可以把槽道中的流场视作内流场,而将船舶所处流场视作背景流场。内流场情况复杂的主要原因在于:一方面,背景流场的流动会对内流场产生复杂的影响;另一方面,大多数有轴驱动的侧推器几乎都会配备支撑臂和转向齿轮箱,这两者对槽道内流场的干扰又体现为两个方面,其一是部件本身几何的非回转性将会导致流场的不均匀,其二是当推力方向改变时,部件相对螺旋桨的上

下游位置还会出现互换。

为揭示背景流场的变化对槽道内流场的影响,李齐垚^[11]数值研究了船舶在不同流向和流速的背景流场中内流场的流速变化。如图10所示,当背景流场的流速流向变化时,会使槽道内流场的流动情况产生显著区别,进而明显地影响侧推器螺旋桨的推力大小。Feng等^[52]的研究也得出了基本一致的结论。

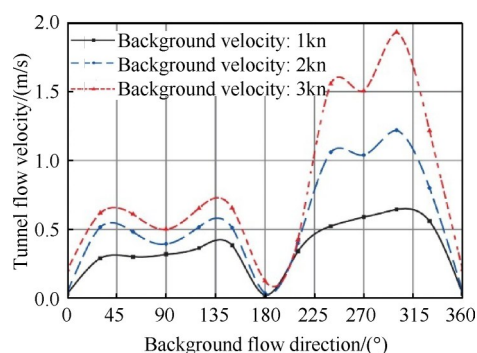


Fig. 10 Tunnel flow velocity with different background flow direction and velocity^[11]

刘辉等^[49]指出为了更合理地比较螺旋桨推力的变化情况,应该以背景流场速度在螺旋桨轴向投影大小进行进速系数的换算并将此作为比较的基准,并指明当齿轮箱位于螺旋桨下游时侧推器的水动力性能更优。

4.3.3 船舶航速与康达效应

船舶航速对侧推器的影响是多方面的。随着航速的提高,槽道入口端的压力分布会受到影响,进而影响到船身推力的大小;而螺旋桨和槽道共同作用产生的射流也会因背景流场的冲击作用向艄部偏转,产生名为“康达效应(Conda Effect)”的吸附作用,使得侧向分力进一步降低。图11是侧推器槽道射流在背景来流作用下的流动情况照片^[54]。多因素共同作用下,最终将会导致侧推器在中高航速下完全失效。

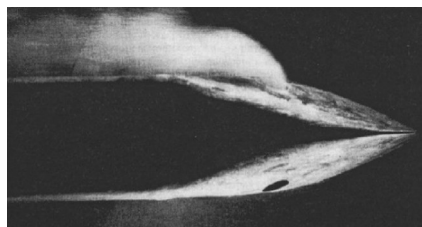


Fig. 11 Coanda effect^[54]

徐周华^[55]对航速提高后康达效应导致侧推器失效的原因进行了解释:当船舶航速提高,侧推器射流会被来流推向后方,进而向船体偏折,这不仅使得推

力的侧向分量减小,还变相“加厚”了射流侧的船体,导致射流侧水阻力增大,除此之外,由于射流速度较高,又被吸附在船体一侧,使得该侧负压增加,船体两侧产生和侧推力相反方向的压差力。这样多种作用合在一起导致侧推器产生的侧推力随着航速的增加而越来越小,直至完全失效。

刘杨等^[17]通过模型试验研究了航速对艄侧推器侧推力的影响,结果如图12所示。不难发现随船舶航速增加,艄侧推器螺旋桨的推力系数 K_{Tp} 以及扭矩系数 K_{Qp} 降幅并不明显,但总推力系数 K_{Ti} 显著下降,再次表明直航时航速变化主要影响的是船身推力。

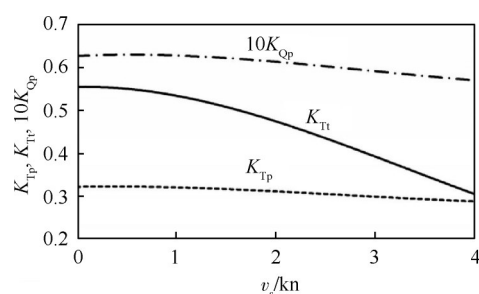


Fig. 12 Relationship between ship ahead speed and tunnel thruster's thrust coefficient and torque coefficient^[17]

为了减少康达效应对侧推器推力的影响,较常见的做法是在侧推器槽道后方开设一个名为“压力平衡导管”的直径较小的槽道,这将使吸附在射流侧的水流能够回到另一侧,减少船体两侧的压差力,最终达到提高侧推器推力的效果^[44-45, 49, 55-57]。

4.3.4 槽道及船体形状

本部分主要关注槽道长度、形状和船舶舷侧夹角这三部分对侧推器推力的影响。

槽道的长度受船型、船舶主尺度、侧推器安装位置等因素影响较大。一般认为槽道长度较小时,不能起到对螺旋桨尾流的整合作用,导致尾流能量损失,而当槽道长度较大时,螺旋桨粘性尾流与槽道内壁摩擦,损失过多的能量,也会造成侧推器效率下降。文献[3, 19, 45]通过数值模拟或模型试验方法研究表明螺旋桨推力几乎不随槽道长度变化,螺旋桨转矩和船身推力则随槽道长度增大而轻微下降,槽道长度为 $2D$ 时推进器效率相对最大,并建议槽道的长度以不超过 $4D$ 为宜。

侧推器槽道形状引起的关注也较多。最为常见的侧推器槽道形状是直筒式,也有一些其它形状的槽道先后被提出。

汪海瀚等^[44]研究指出“K形侧推孔”(如图13所

示)相较于直筒式槽道具有增加推力和转艏力矩、减振降噪等诸多优点。

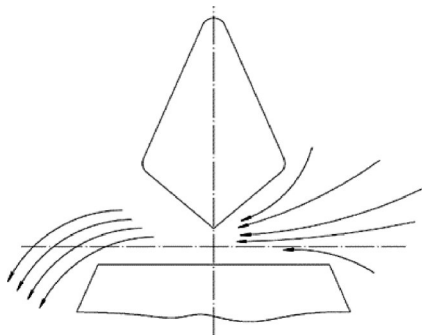


Fig. 13 K-shape tunnel^[44]

Mohan^[58]通过数值模拟对比了直筒式槽道和两端向前弯折 45° 的槽道(如图 14 所示)下侧推器工作时船体左右两舷横向力的大小。结果显示低航速时,弯折的槽道具有明显优势,但随航速增加其船身推力下降更快,当航速增加到 0.4m/s 时,弯折槽道的侧向力已经成为负值,反而不如直筒式槽道。

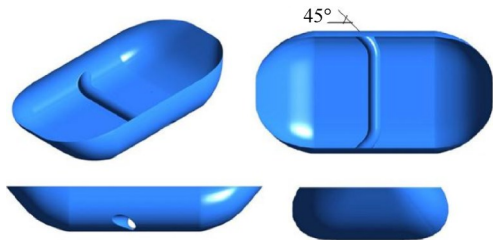


Fig. 14 Hopper wedge with (45°) bent tunnel^[58]

Taniguchi 等^[19]对比了直筒式和图 15 所示的内凹式、外凸式三种槽道形状对侧推器性能的影响,对于螺旋桨推力和转矩而言,内凹式最大,直筒式次之,外凸式最小;对于船身推力而言,尽管直筒式槽道略大,但三种槽道形状并没有明显区别;对于侧推器总效率来说,直筒式槽道相对最高,而外凸式槽道则最低。

文献^[59]针对侧推器槽道过长时推力下降的现

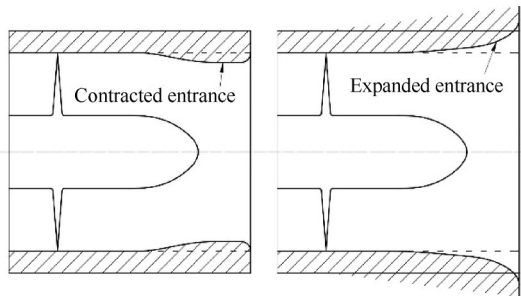
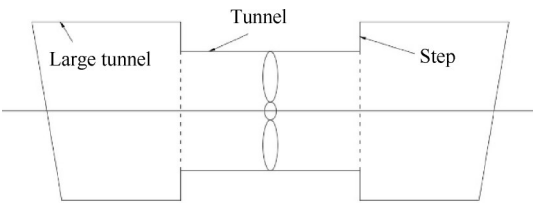
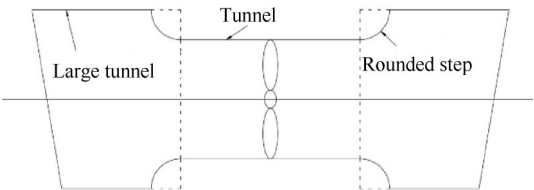


Fig. 15 Tunnel with concave inner-wall (left) and convex inner-wall (right)^[19]

象,提出了如图 16(a)所示的阶梯型槽道方案,并以此为基础通过改变阶梯直径差和连接处的形状,在保持槽道总长度不变的前提下得到了一系列的改型方案。数值模拟的结果显示:图 16(b)所示的圆弧过渡改型可以使侧推器总推力增加 74%,静态品质系数(Static Merit Coefficient)增加 40%,极大地提高了侧推器的性能。



(a) Step-shape tunnel^[59]



(b) Step-shape tunnel with arc transition^[59]

Fig. 16 Tunnel with stepped connection

Tobias^[60]比较了如图 17 所示圆形、扁平型和流线型三种槽道端口截面形状对侧推器推力变化的影响。结果显示在低航速时,流线型截面比圆形截面的推力大 50%,较高航速时也高出 30%,是一种具有潜力的槽道截面形状。

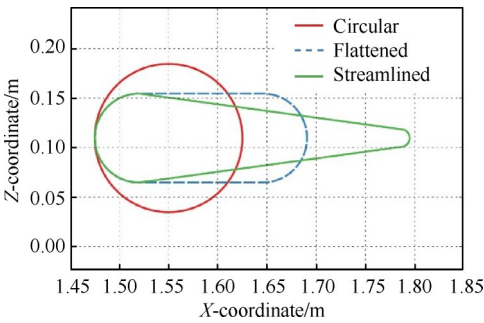


Fig. 17 Three different cross-sectional geometry^[60]

由上可知,通过采用特殊形状的槽道的确可以一定程度上减缓侧推器推力因为槽道长度、航速等因素导致的降低,提高侧推器的水动力性能,但在船舶实际生产制造中也存在着复杂形状加工困难的问题^[61],这也需要更多方向的研究者和工程师们的共同努力。

由于船体型表面为复杂三维曲面,在常安装侧推器的艏艉尤其典型。船体形状的改变对侧推器内

外流场的影响不可忽略,因此在研究槽道几何对侧推器性能的影响时两舷的倾角也是值得重点考虑的因素之一。

Baniela^[45]建议侧推器两端的船体表面最好垂直于槽道轴线,这样可以避免螺旋桨过载。翟树成等^[51]研究了从 $60^\circ \sim 90^\circ$ 内四种不同的舷侧夹角对侧推器性能的影响,其数值模拟结果显示改变舷侧夹角对侧推器水动力性能的影响变化在2%以内,但也表示可能存在其计算模型同工程实际区别导致的误差。姚震球等^[3]研究了舷侧夹角为 60° , 75° 和 90° 时侧推器的性能,结果显示舷侧夹角对侧推器转矩的影响较小,而推力和效率均在 90° 倾角时达到最大,与之相比, 60° 倾角对应的推力和效率则分别下降了9.47%和7.3%;其解释是当舷侧夹角为 90° 时,舷侧面受压有效面积最大且槽道内部流体运动相对更加均匀,螺旋桨负荷比较稳定,当存在倾斜时,槽道壁面较短一侧会因流体流过槽道口尖角产生漩涡形成一个高速低压区,导致流动不均匀进而对螺旋桨造成不利影响。

4.3.5 侧推器与其他推进器的相互干扰

侧推器作为一个推进单元,常会两个或多个同时安装在艏部,也可能会有少数侧推器安装在艉部靠近主推进器的地方。邻近的推进器之间会产生明显的水动力干扰,此时考虑总推力不可简单叠加,必须进行相关的研究以获得相互干扰下的推力变化规律。

侧推器之间相互干扰的情况相对而言比较简单。Terry^[31]详细研究了二维和三维情形下不同槽道间距对槽道入口和出口处流动的影响,发现当两个侧推器靠得足够近时,两个侧推器的射流会合二为一,而当它们间隔变大后流动会产生振荡,发生这一现象的主要原因有两点:一是由于射流会在槽道口处产生流动分离。二是槽道间距的增大使得相邻射流之间内侧尾流逆向流动所形成“再循环区域”^[62]内的不稳定性流动占主导地位。刘辉^[56]采用非定常RANS方法数值研究了两个艏侧推同时工作时的相互干扰问题,结果显示当两个艏侧推同时工作时,螺旋桨推力和转矩的波动幅度几乎达到了单桨工作时波动幅度的两倍。Abramowicz-Gerigk等^[63]使用渡船模型测量了两个艏侧推同时工作时侧推力和流场速度的变化,对比了单个侧推器和两个侧推器工作时流场的区别。这些结果被认为可以很好地为后续数值模拟提供参考。

当侧推器的数量增加到3个时,李齐垚^[11]的数值

模拟结果显示,当艏侧推位置越靠近船艏时其螺旋桨推力下降得越多,靠近舭部的螺旋桨推力下降幅度较小;当三槽道纵向间距从 $1.857D$ 变为 $1.5D$ 时可以发现靠近舭部的螺旋桨推力和转矩变大,中间位置的螺旋桨几乎没有影响,而靠近舭部的螺旋桨推力和转矩都出现下降。因此他认为槽道间距大于 $1.5D$ 时槽道间距大小不再对螺旋桨推力产生明显影响,槽道位置的影响占主要地位。

目前在艏部布置4台侧推器的情况并不多见,但根据图18所示的一艘豪华邮轮模型来看,多艏侧推还涉及到垂向相对位置的变化,这一方面目前还没有见到公开发表的相关研究。

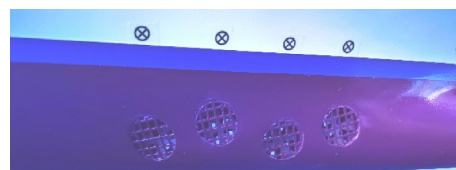


Fig. 18 Liner model with 4 tunnel thrusters

侧推器与主推进器之间的相互干扰问题相较于侧推器之间的干扰问题更为复杂。Sileo等^[64]在挪威海洋技术研究所进行船模试验时,发现当两个吊舱式主推进器和尾鳍上布置的艏侧推同时工作时,随着主推进器的载荷增加,船模的转艏力矩明显降低,而当主推进器不工作时,航速在较低范围内变化和艏侧推器纵向位置的改变都不会对艏侧推推力产生明显影响。他们随后采用数值模拟手段研究了艏侧推和主推进器之间的水动力干扰。结果显示当侧推器工作时,由于一侧的射流会受到主推进器抽吸作用的影响,导致侧推力减小,而两个主推进螺旋桨的推力也不对称,进而导致船舶转艏力矩的下降。

4.3.6 自由液面

在目前已有的侧推器相关研究中,绝大多数都没有考虑自由液面的影响。如同主推进螺旋桨出现“飞车”时会导致转速剧增且伴有强烈振动的现象一样,在吃水较浅时,侧推器也可能距水面较近甚至部分露出水面,进而导致其性能下降甚至恶化。部分研究者已关注到自由液面对侧推器的影响,其研究目标主要有以下两点:其一是确定侧推器不受自由液面影响、能够正常工作的安全浸深;其二是得到侧推器在不同程度露出水面时的推力变化规律,为船舶实际使用提供参考依据。

Lu等^[25]研究了不同桨轴浸深情况下的侧推器推力变化,指出在螺旋桨接近自由液面时会空气吸

入槽道内,而当螺旋桨穿过水面后,其推力会迅速下降。郁程等^[30]借助CFD方法和体积力模型预报了槽道吸气现象,如图19所示,在静水中当桨轴浸深 $H_T = 1.25D$ 时,槽道入口处的水面没有明显凹陷,最大下凹仅有 $0.0425D$;而当桨轴浸深 $H_T = 0.875D$ 时,槽道入口处的水面有明显下凹,且有少量气体被吸入槽道,这种情况应该尽力避免。

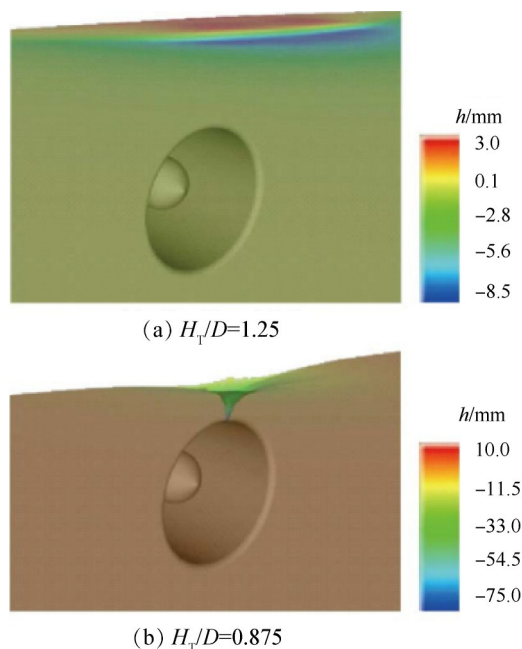


Fig. 19 Tunnel's air suction phenomenon^[30]

对于大型运输船舶而言,轻载吃水状态下侧推器槽道部分露出水面的情况并不少见,此时侧推器的做功能力是否仍维持在需要的水平是船舶驾驶人员高度关注的问题,尽早建立相关的模型或对工程经验进行总结无疑具有重要的意义。

4.3.7 限制水域

尽管侧推器最为广泛的应用场景就是船舶的靠、离泊,但针对港口等具有岸壁、浅水或变水深的限制水域对侧推器水动力性能影响的研究却并不太多。

Taniguchi等^[19]研究了岸壁和浅水条件下艏侧推推力变化,对于船舶中纵剖面同岸壁成一定夹角的情况也进行了讨论。

赵汉星等^[65]针对近岸环境下的侧推器水动力性能进行了数值模拟,给出了侧推器开闭时航速对横向力和转艏力矩的影响变化,结果显示随着航速的提高侧推器推力最终会无法抵消岸壁对船舶的吸引力,主要原因是航速的增加使槽道内流场成为负压区,抑制了侧推器射流,进而导致侧推器推力下降。

邬宾杰^[66]对浅水近岸条件下的侧推器及船舶水动力性能进行了研究,结果显示船舶沿岸壁航行时会被岸壁吸引,并产生船艏向岸壁偏转的现象,开启艏侧推后侧推器推力可以有效抑制岸壁的吸引,但因为艏侧推产生的转艏力矩较大,船舶又会向岸壁偏转。

Abramowicz-Gerigk^[67]指出在靠泊和离泊时,岸壁效应对横荡力和转艏力矩的影响是不同的,而艏侧推产生的横向力和转艏力矩与船舶和岸壁的间距大小有较大关系。Abramowicz-Gerigk等^[68]在研究船舶离靠泊时侧推器对岸壁和河床的射流冲击影响时也对侧推器的推力进行了实船测量和CFD研究。

岸壁效应和浅水效应是侧推器使用中两个常见的不利影响因素,但目前仍缺乏较为普遍的规律。此外,岸壁形状的改变、航行过程中水深的变化等也会对侧推器性能产生影响也有待进一步的研究。

可以看出,影响侧推器做功能力的因素较多,也是广大研究者最为关注的领域,目前大多数的研究仅关注到其中的一个或若干个方面。通盘考虑上述多种因素后总结普适性规律并形成相关的设计经验,对于提升侧推器的水动力性能无疑具有重要的意义,但也是一项极具挑战性的工作。此外,诸如推力减缩、螺旋桨和侧推器的推力系数等相关概念的定义也应当进行统一,减少相关研究成果的阅读障碍和理解歧义。

4.4 侧推器的空化、噪声和脉动压力

由于侧推器螺旋桨的负荷重、叶梢间隙小,因而极易产生空化现象,并伴随振动和噪声等现象,这一方面也引起了较多的关注。

董小倩等^[69]在上海交通大学空泡水筒进行了侧推器脉动压力与噪声的模型试验,研究了脉动压力和噪声随来流速度、桨转速和空泡数的变化规律。结果显示桨转速和来流速度在无空泡时对脉动压力几乎没有影响,但噪声会随转速提高而增加;由于桨盘面上游有齿轮箱阻碍流动,脉动压力在桨盘面上游和桨盘面处较大,而在下游较小;计入空泡影响后,随着空泡数的降低,空化更为显著,桨盘面处的脉动压力也逐渐增大;在桨盘面处的脉动压力1~5阶叶频均有贡献,而在桨盘面上下游脉动压力则以1倍叶频为主。沈冠之等^[26]使用计算流体力学、计算结构力学和计算声学软件对海辅船的艏侧推流激振动噪声进行了探索,结果显示其噪声的主要频率为螺旋桨叶频和倍叶频。

针对侧推器螺旋桨较普通螺旋桨更为严重的空

化和结构振动问题,Yu等^[70]在空泡水筒中对比了平板桨和叶梢卸载桨产生的脉动压力特性和激振力水平。无论空化发生与否,螺旋桨在叶梢附近的槽道壁上引起的脉动压力都很强烈,对于平板桨而言,空化发生时的脉动压力是未发生空化时的2~3倍,而对于叶梢卸载桨,由于叶梢处的涡流强度降低,这种差异变得非常小。另一点值得注意的是,在未发生空化时,平板桨引起的脉动压力略小于叶梢卸载桨引起的。这一发现对于降低侧推器螺旋桨所产生的脉动压力有着较为重要的价值。

为了实现侧推器的结构减振优化设计,刘辉等^[71]通过求解非定常RANS方程对侧推器槽道内流场进行了数值模拟,结果显示压力脉动比较剧烈的区域主要集中在桨盘面处,来流方向的变化对侧推器脉动压力的影响比较明显。

为了缓解侧推器引起的舱内振动噪声问题,陈智同等^[72]针对侧推器的不同结构部件,分别采用双层槽道、填充吸声材料、加装蝶形弹簧及隔音罩等技术进行了静音设计,并进行了静音设计后的侧推器和原始侧推器振动和噪声试验对比,结果显示采用静音设计后壳体振动降为原始设计的40%,噪声降低了6.7dB,确实有效降低了侧推器的振动和噪声水平。张春宇^[73]研究了侧推器的噪声特性,认为影响侧推器振动噪声的主要因素是槽道结构与形状、螺旋桨盘面比、桨叶数和叶梢间隙,并以某平台工作船为对象进行了声学预报,确认在动力定位工况下侧推器螺旋桨是最大噪声源。在此基础上对该船的部分舱室的噪声量级进行了预报,提出了“盒中盒”结构的降噪方法,并使用新型复合地板敷料,模拟结果显示此方法能够有效降低侧推器导致的舱室噪声。

4.5 侧推器减摇作用

侧推器的减摇作用是一个极少被关注的领域,根据减摇的思路可以将其分为主动减摇和被动减摇两种。其中主动减摇是指通过降低槽道或侧推器安装高度,利用侧推器螺旋桨工作产生的回复力矩,使船舶尽快恢复到正浮状态。由于槽道式侧推器的布置限制,这种减摇方式仅适用于船舶横摇运动的减轻。而被动减摇指的是装备有槽道盖板的侧推器,通过打开盖板在一定程度上实现类似于减摇鳍的功能,这种减摇方式理论上对纵摇、横摇和垂荡都有一定的效果。

杨峻凯^[43]采用数值模拟手段研究了其设计的槽道盖板打开后对船舶纵摇和垂荡性能的影响,但由于其设计时充分考虑了盖板开启对船舶阻力性能的

影响,盖板伸出舷外部分的面积较小,无法产生足够的回复力矩,减摇效果并不理想。

Rudaa等^[74-75]受直叶式推进器主动减摇的启发,研究了船舶艏侧推和尾部全回转式吊舱推进器的联合减摇效果。模型试验和数值计算的结果显示两者配合的主动减摇能使船舶横摇阻尼比增大一倍以上,可以有效地减小中等海况下的船舶横摇,其减摇效果几乎可以与专门的减摇装置相媲美。

有关侧推器减摇作用的研究还处于较为初期的阶段,但现有的研究成果已经显示侧推器主动减摇这一技术具有实用价值,也值得更加深入的研究。

4.6 侧推器操纵效能

作为辅助提高船舶操纵性能的装置,侧推器的操纵效能研究也一直都是相关领域研究者们关注的重点。这一方面的研究除了少量的船模试验外,主要是通过数值手段来开展:具体的思路是基于MMG分离建模思想建立船舶运动方程,求解后则可进行侧推器的操纵效能分析。其余传统的操纵运动求解的区别则是在方程中增加反映侧推器作用力的项。中国船舶科学研究中心的沈定安等^[76]和大连海事大学的洪碧光教授指导的多位研究生^[2,77-79]等进行了相关研究。他们通过对船舶各部分的性能和相互干扰进行建模和求解,进而对操纵效能的相关指标进行了比较研究。当然,这些运动方程中增加的侧推器相关项仍需结合前述侧推器水动力性能研究来加以确定。

陈伟民等^[80]研究了全回转吊舱式推进器和艏侧推配合下的船舶特殊操纵,给出了船舶完成纯横移、原地调头和侧斜平移运动的操纵方式。沈定安等^[76]通过求解船舶运动方程证明了对于所研究的12300t滚装船,借助双桨、双舵和艏侧推的联合操纵是可以实施纯横移的,且操舵有利于提高纯横移的速度。

刘春生等^[2]通过MATLAB仿真了无风无流时船舶低航速下进行掉头和横移的操作,其模拟结果显示:只要能够适当控制船舶航速、合理运用侧推器和舵就可以在船舶离泊时完成掉头操纵,在靠泊时完成横移操纵。

藤野正隆等^[81]对船舶的艏侧推和艉侧推操纵效能进行的船模试验研究显示,同艏侧推推力会随航速提高而迅速下降相反,艉侧推的推力会随着航速提高而明显增大,甚至可达零航速时侧推力的数倍。仅仅改变侧推器的安装位置就能极大改善侧推器在中高航速性能,这样令人兴奋的研究结果似乎并没有得到更多研究者的关注,不免有些遗憾。

5 展望

综上所述,经过多年的发展,侧推器水动力性能方面的研究成果已较为丰富,工程应用也日趋成熟。但如曹瑞飞等^[82]所述,长期以来人们对侧推器的认识局限于在靠、离泊和限制水域中机动的工况中使用,侧推器的使用场景是否可以拓展,其性能如何进一步提升,仍是值得所有相关从业人员思考的问题。

笔者结合研究现状以及对船舶行业发展的思考,认为以下研究方向也值得重点关注:

(1)在船舶大型化还在不断深入的情况下,侧推器的尺寸也会相应地越来越大,如同主推进螺旋桨需要考虑尺度效应一样,侧推器尺度效应的研究很可能也会逐渐变得不可或缺。

(2)随着电力推进技术的发展,采用无轴轮缘推进器的呼声越来越高。无轴推进技术应用到侧推器上面应该来说是极其合适的,也是最有希望尽快获得大量应用的。此外,对于特殊的应用场景,侧推器中采用对转桨、串列桨等方式一定会带来水动力收益,但这些方面的研究工作几乎都还是一片空白。

(3)现有的侧推器研究几乎全部以单体船的应用为前提,但双体船、三体船、水翼船等特殊船型也同样对低航速下的操纵性能有要求,针对侧推器在这些船型上的应用研究也是值得开展的。

(4)随着长江经济带战略和以国内大循环为主体的新发展格局的提出,内河航运的重要性不断凸显,相应地,浅吃水和浅水深工况下的侧推器水动力性能、甚至表面桨侧推器的研究也有必要尽快开展。

(5)侧推器已然成为船舶动力定位系统中不可缺少的一部分,研究海洋风、浪、流等环境载荷作用下的侧推器性能对于自动控制系统的设计和优化显然也是必要的。

(6)北极航线的开通不再遥不可及,同时极地科考也日趋频繁、深入,这两者都需要冰区船舶的助力,可以在“槽道口格栅不适用于冰区”^[45,83]的研究基础上进一步开展冰区环境下的侧推器水动力性能研究与设计开发。

(7)总布置设计是船舶设计中的重要组成部分,尽管崔冬权^[84]对侧推器的总布置小结过三点要求,但如何把侧推器的水动力性能研究成果融入船舶总布置设计中仍然是一个需要深入探究的方向。

(8)船舶的全生命周期设计是船舶设计的发展方向,侧推器作为船舶上重要的操纵性设备,如何将侧推器设计融入船舶全生命周期设计也需要船舶专

业所有同仁的共同努力。

参考文献

- [1] 姚志崇,曹庆明.槽道桨水动力性能数值分析[C].杭州:2008年船舶水动力学学术会议暨中国船舶学术界进入ITTC30周年纪念会,2008.
- [2] 刘春生,洪碧光,滕英祥,等.侧推器协助船舶靠离泊操纵的数学模型[J].大连海事大学学报,2007,33(1):29-32.
- [3] 姚震球,严周广.侧向推进器水动力性能数值分析与验证(英文)[J].船舶力学,2012,16(3):236-245.
- [4] Pehrsson L, Mende R. Design, Model Testing and Application of Controllable Pitch Bow Thrusters[J]. *Journal of the American Society for Naval Engineers*, 1961, 73(4): 787-796.
- [5] 张 峥.某型救生船的流体动力性能和动力定位能力评估[J].船舶,2007,18(3):19-23.
- [6] Carlton J. Marine Propellers and Propulsion [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018.
- [7] 郁 程.侧推器水动力性能与设计方法研究[D].上海:上海交通大学,2017.
- [8] 朱光华.海洋多用途拖船侧推装置的应用[J].造船技术,1995(11):24-28.
- [9] Sharma R. Computer-Aided Design of Bow Thrusters for Marine Vehicles [J]. *Marine Engineering*, 2006, 86: 33-41.
- [10] Thrusters T W G. Horizontal Shaft Thrusters [EB/OL]. <http://www.teesgillthrusters.com/products/horizontal-shaft-units>. 2021-01-01/2021-02-22.
- [11] 李齐垚.侧推装置推力减额研究[J].船舶,2014,25(4):6-16.
- [12] English J W. Further Considerations in the Design of Lateral Thrust Units [J]. *International Shipbuilding Progress*, 1966, 13(137): 14-28.
- [13] Beveridge J L. Design and Performance of Bow Thrusters [J]. *Marine Technology*, 1972, 9(4): 439-453.
- [14] 严周广.基于CFD的船用侧推器水动力性能研究[D].镇江:江苏科技大学,2012.
- [15] Yu C, Yang C. Study of Tunnel Thruster Performance and Flow by Quasi-Steady Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University(Science)*, 2016, 21(6): 662-671.
- [16] Quality Systems Group of 28th ITTC. Cavitation Induced Pressure Fluctuations Model Scale Experiments [C]. Wuxi: Proc. of the 28th International Towing Tank Conference, 2017.
- [17] 刘 杨,冯 君,胡世良,等.航速、横流对艏侧推侧向力的影响[J].江苏科技信息,2019,36(32):38-43.
- [18] Dang J, Ligtelijn D. Development of Tunnel Thruster Se-

- ries Propellers for Low Noise and Vibration[C]. Rome: Sixth International Symposium on Marine Propulsors Smp' 19, 2019.
- [19] Taniguchi K, Watanabe K, Kasai H. Investigations into Fundamental Characteristics and Operating Performances of Side Thruster[R]. Tokyo: Mitsubishi Heavy Industries Ltd, Mitsubishi Technical Bulletin No.35, 1966.
- [20] 陈婷婷, 窦增明. 可调螺距侧向推进器推力测量方法[J]. 船舶, 2017, 28(5): 61-64.
- [21] Cozijn J, Hallmann R. Thruster-Interaction Effects on a DP Shuttle Tanker-Wake Flow Measurements of the Main Propeller and Bow Tunnel Thrusters[C]. San Francisco: ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, 2014.
- [22] 哈拉特·科恩. 侧推装置工况分析[J]. 国外舰船技术(特辅机电设备类), 1981(10): 12-15.
- [23] 张路怡, 徐玉如. 关于来流对槽道推进器流体动力性能影响的研究[J]. 海洋工程, 1995, 13(1): 13-19.
- [24] 刘震宇, 郁程, 杨晨俊. 侧推器CFD计算初步研究[C]. 西安: 2013年船舶水动力学学术会议, 2013.
- [25] Lu P, Wang S. CFD Simulation of Propeller and Tunnel Thruster Performance[C]. San Francisco: ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE 2014, 2014.
- [26] 沈冠之, 吴静萍, 董勇, 等. 船侧推流激振动噪声的数值模拟探索[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(5): 891-895.
- [27] 郁程, 杨晨俊. 基于MRF模型的侧推器水动力性能数值模拟研究[C]. 西安: 2013年船舶水动力学学术会议, 2013.
- [28] 王声森. 基于CFD的某船对转桨侧推器的性能预测[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.
- [29] Kinnas S A, Chang S H, He L, et al. Performance Prediction of a Cavitating RIM Driven Tunnel Thruster[C]. Trondheim: The 1st International Symposium on Marine Propulsors Smp'09, 2009: 435-442.
- [30] 郁程, 董小倩, 杨晨俊. 侧推器体积力模型及其应用[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(3): 291-296.
- [31] Terry S. A Study of the Hydrodynamic Interactions Between Bow Thrusters[R]. Delft: Delft University of Technology & Damen Shipyards Group, 2015.
- [32] Deter D. Principal Aspects of Thruster Selection[C]. Houston: Marine Technology Society Dynamic Positioning Conference, 1997.
- [33] Ozdemir Y H, Bayraktar S, Yilmaz T, et al. Determining Optimum Geometry for a Bow Thruster Propeller[C]. Naples: 8th Symposium on High Speed Marine Vehicles, 2008.
- [34] Wilkins J R. Propeller Design Optimization for Tunnel Bow Thrusters in the Bollard Pull Condition[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [35] サイドスラスト. 船用機械[EB/OL]. <https://www.khi.co.jp/mobility/marine/machinery/side.html>, 2021-02-19.
- [36] 苏州船用动力系统股份有限公司[EB/OL]. <http://www.szsxmm.com/>, 2021-02-19.
- [37] Administrator W. Brunvoll-Precision Is Our Passion[EB/OL]. <https://www.brunvoll.no/>, 2021-02-19.
- [38] Wärtsilä Transverse Thrusters [EB/OL]. <https://www.wartsila.com/marine/build/propulsors-and-gears/thrusters/wartsila-transverse-thrusters>, 2021-02-19.
- [39] 沈海云. 可调侧推器设计与水动力性能仿真研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [40] Yu C, Yang C. Investigation of Tunnel Thruster Performance and Flow by Quasi-Steady and Unsteady RANS Simulations[C]. Rome: VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, 2015.
- [41] 沈国鉴, 沈行龙. 轴向圆筒内对称叶剖面螺旋桨系列的模型试验研究[J]. 中国造船, 1982(2): 22-30.
- [42] 汪诚仪. 船首侧推孔阻力增值估算和导流槽降阻[J]. 船舶工程, 1986(4): 7-11.
- [43] 杨峻凯. 54000DWT散货船船侧推护盖的设计及水动力性能模拟研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
- [44] 汪海瀚, 汪诚仪. 侧推器的初步设计[J]. 船舶, 1996, 7(3): 15-25.
- [45] Baniela S I. The Performance of a Tunnel Bow Thruster with Slow Speed Ahead: A Revisited Issue[J]. The Journal of Navigation, 2009, 62(4): 631-642.
- [46] 孟阳, 詹明珠, 吴琼, 等. 船侧推孔格栅数值设计分析[C]. 广州: 第六届全国船舶与海洋工程CFD会议, 2020.
- [47] 范井峰. 侧推器对测量船水动力噪声的影响和改善方法研究[J]. 船舶设计通讯, 2015(S2): 8-11.
- [48] Krasilnikov V, Sileo L, Steinsvik K. Numerical Investigation into Scale Effect on the Performance Characteristics of Twin-Screw Offshore Vessels[C]. Espoo: Proceedings of the Fifth International Symposium on Marine Propulsors, 2017.
- [49] 刘辉, 代焱, 冯榆坤, 等. 船舶侧推器推力减缩试验与数值计算研究[J]. 中国造船, 2017, 58(4): 1-13.
- [50] 魏跃峰, 詹明珠, 孟阳, 等. 球鼻艏船型船侧推器推力减缩数值模拟[C]. 广州: 第六届全国船舶与海洋工程CFD会议, 2020.
- [51] 翟树成, 曹庆明. 侧推器槽道参数数值模拟研究[C]. 哈尔滨: 2015年船舶水动力学学术会议, 2015.
- [52] Feng Y, Chen Z, Dai Y, et al. An Experimental and Numerical Investigation on Hydrodynamic Characteristics of the Bow Thruster[J]. Ocean Engineering, 2020, 209(10).
- [53] 吴寅生. 海洋科学考察船侧推筒体封盖水力载荷及封盖对侧推力的影响研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学,

- 2012.
- [54] Karlikov V P, Sholomovich G I. Some Features of Body-Flow Interaction in the Presence of Transverse Jets [J]. *Fluid Dynamics*, 1998, 33(3): 313-317.
- [55] 徐周华. 船舶首侧推器适用的船速域[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2002(1): 116-119.
- [56] 刘 辉. 多艏侧推器水动力性能试验和数值仿真研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [57] Nienhuis U. Analysis of Thruster Effectivity for Dynamic Positioning and Low Speed Manoeuvring [D]. *Delft: Delft University of Technology*, 1992.
- [58] Mohan A. Numerical Analysis of Bow Tunnel Thruster Performance [D]. *Delft: Delft University of Technology*, 2017.
- [59] Brizzolara S, Brizzolara E B. Long Tunnel Configurations for High Efficiency Thrusters [C]. *Espoo: Fifth International Symposium on Marine Propulsors Smp'17*, 2017.
- [60] Tobias S. Changing the Cross-Sectional Geometry of a Bow Tunnel Thruster: Effects on the Performance of the Thruster at Slow Forward Motion Using Computational Fluid Dynamics [D]. *Delft: Delft University of Technology*, 2015.
- [61] 许卫峰. 侧推器导管与外板过渡板的放样优化[J]. 广船科技, 2015, 35(3): 26-28.
- [62] Villiermaux E, Hopfinger E. Periodically Arranged Co-Flowing Jets [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1994, 263: 63-92.
- [63] Abramowicz-Gerigk T, Gerigk M K. Experimental Study on the Selected Aspects of Bow Thruster Generated Flow Field at Ship Zero-Speed Conditions [J]. *Ocean Engineering*, 2020.
- [64] Sileo L, Steen S. Numerical Investigation of the Interaction Between a Stern Tunnel Thruster and Two Ducted Main Propellers [C]. *Trondheim: The 1st International Symposium on Marine Propulsors Smp'09*, 2009: 22-24.
- [65] 赵汉星, 王化明, 郭宾杰, 等. 近岸环境下船舶侧推器的水动力性能数值分析[J]. 船海工程, 2015, 44(1): 64-67.
- [66] 郭宾杰. 限制水域中船舶侧推器水动力数值计算研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2015.
- [67] Abramowicz-Gerigk T. Experimental Study on the Hydrodynamic Forces Induced by a Twin-Propeller Ferry During Berthing [J]. *Ocean Engineering*, 2008, 35(3): 323-332.
- [68] Abramowicz-Gerigk T, Burciu Z, Górski W, et al. Full Scale Measurements of Pressure Field Induced on the Quay Wall by Bow Thrusters-Indirect Method for Seabed Velocities Monitoring [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 162: 150-160.
- [69] 董小倩, 郁 程, 杨晨俊. 侧推器脉动压力及噪声的试验研究[J]. 中国造船, 2017, 58(3): 1-13.
- [70] Yu C, Dong X, Yang C, et al. Effects of Blade Loading Distribution on the Cavitation and Excitation Forces of a Tunnel Thruster [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University(Science)*, 2019, 24(2): 158-167.
- [71] 刘 辉, 冯榆坤, 陈作钢, 等. 船舶艏侧推器脉动压力数值计算[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(3): 294-299.
- [72] 陈智同, 赵广伟, 郝 璇, 等. 侧向推进器的静音设计及试验验证[J]. 江苏船舶, 2017, 34(3): 25-27.
- [73] 张春宇. 侧推影响下的船舶舱室噪声预报与控制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- [74] Rudaa S E, Steen S, Hassani V. Use of Tunnel and Azimuthing Thrusters for Roll Damping of Ships [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(23): 546-551.
- [75] Rudaa S E. Use of Tunnel Thrusters and Azimuthing Thrusters for Roll Damping of Ships [D]. *Trondheim: Norwegian University of Science and Technology*, 2016.
- [76] 沈定安, 马向能, 毛海斌. 大型船舶侧推器操纵效能计算[J]. 船舶力学, 2004(2): 34-41.
- [77] 刘春生. 侧推器协助船舶操纵的仿真研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
- [78] 闫长健. 艏侧推器操纵效能仿真研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [79] 王远渊. 大型集装箱船侧推器和舵转向效果比较[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [80] 陈伟民, 倪士龙. 全方位推进器与首侧推器综合作用对船舶操纵性能的影响[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2005, 28(1): 11-14.
- [81] 藤野正隆, 猿田俊彦, 伊田力. 关于侧推器效能的实验研究[J]. 国外舰船技术(特辅机电设备类), 1979(6): 1-10.
- [82] 曹瑞飞, 沈冠丰. 侧推器在舰船操纵中的应用[J]. 航海科技动态, 2001(2): 25-27.
- [83] Brix Jochim E. Manoeuvring Technical Manual [M]. *Hamburg: Seehafen-Verlag*, 1993.
- [84] 崔冬权. 轴隧式侧推器推力计算及总布置的初步探讨[J]. 江苏船舶, 2012, 29(4): 17-18.

(编辑:梅 瑛)