高速滑行艇总体设计中的关键技术分析

蒋昌师1,2，眭爱国1,2，凌伟1,2，何婉宁3

（1.中国船舶科学研究中心，无锡 214082； 2 深海技术科学太湖试验室，无锡 214082； 3 中船奥蓝托无锡软件技术有限公司，无锡 214082）

摘要：高速滑行艇以体积小、航速高、机动灵活等特点，在军事和民用上都有着广泛的应用。高速滑行艇的总体设计涉及众多技术领域，如水动力构型设计、动力匹配设计、结构轻量化设计、任务功能设计等领域，每个技术领域又包含多项关键技术。文章从水动力构型设计和动力匹配设计中涉及的共性关键技术出发，分析了艇型方案论证、数值模拟计算技术、水动力构型设计技术、运动稳定性设计技术、艉附体设计、多工况动力匹配方案设计技术等关键技术难题，并介绍了解决技术问题常用的技术方法及技术路线。

关键词：高速滑行艇总体设计，水动力构型设计，动力匹配设计

0前言

高速滑行艇作为高性能船舶（HPV）的典型代表，具有体积小、航速高、机动灵活、可进行灵活的任务搭载的特点。这种船型设计概念是借助流体（水）动力，使船体吃水减小甚至抬升至水面滑行，从而达到减小阻力和提高耐波性的目的。实船航行证明，采用动力増升减阻技术，可以使高速艇的航行阻力下降20%-30%，在推进动力装置不变的条件下将航速提高15%-25%[1]。高速滑行艇因其独特的船型优点，在军用和民用方面获得广泛应用，可大幅提高公务交通、物资输送、救灾指挥、救护和救灾物资和人员输送方面的能力，具有显著的社会效益和经济效益。





图 1 国内外高速滑行艇

与中低速船的设计相比，高速滑行艇的总体设计具有显著的独特性。中低速船的设计的通常以实现作业功能作为主要目标，水动力构型设计通常要服务于总布置设计，而高速滑行艇作为高性能船舶，其设计主要聚焦于“高水平的综合航海性能”的实现，其中最重要的标志是优良的高速性能和耐波性能，其次是经济性、安全性好，运载能力大，以及环境舒适与形态美观等。因此高速滑行艇的水动力构型设计处在更加突出的地位，统领其他分系统的设计。

高速滑行艇的总体设计涉及众多技术领域，如水动力构型设计、动力匹配设计、结构轻量化设计、任务功能设计等领域，每个技术领域又包含多项关键技术。下文从水动力构型设计和动力匹配设计中涉及的共性关键技术出发，分析了艇型方案论证、数值模拟计算技术、水动力构型设计技术、运动稳定性设计技术、艉附体设计技术、多工况动力匹配方案设计技术等关键技术难题，并介绍了解决技术问题常用的技术方法及技术路线。

1 艇型方案设计论证

高速滑行艇的设计首先应根据船舶任务需求进行船型方案选型论证。高速滑行艇主要有单体深V滑行艇、槽道滑行艇、单M槽道滑行艇与多M槽道滑行艇，前两型在国内实船应用较多，后两型在国外也有实船应用。每种艇型各有其优缺点，适用不同的应用场景。

单体深V滑行艇的阻力性能要优于双体槽道滑行艇，其阻力较相同排水量的双体槽道滑行艇要大，典型兴波特征见图2-3，但槽道船型甲板面积大、超载能力强，大倾角稳性更是明显优于单体滑行艇。目前国内对单体深V滑行艇、槽道滑行艇的水动力性能研究较多，在基本艇型的论证阶段可以采用SIT经验公式[2]（图4）结合CFD仿真计算对单体深V和双体槽道艇型的阻力性能进行评估。

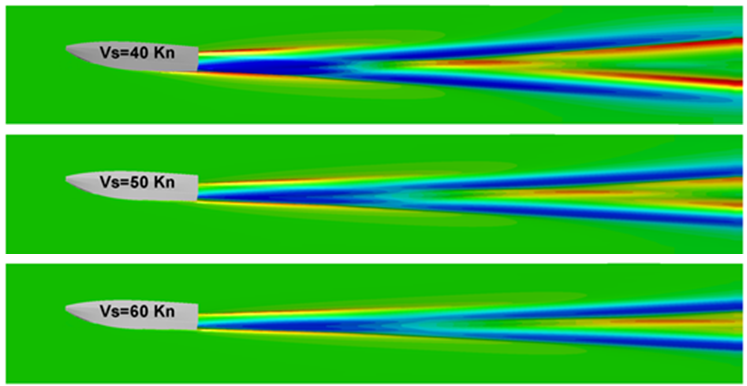


图 2 单体深V滑行艇的兴波特征

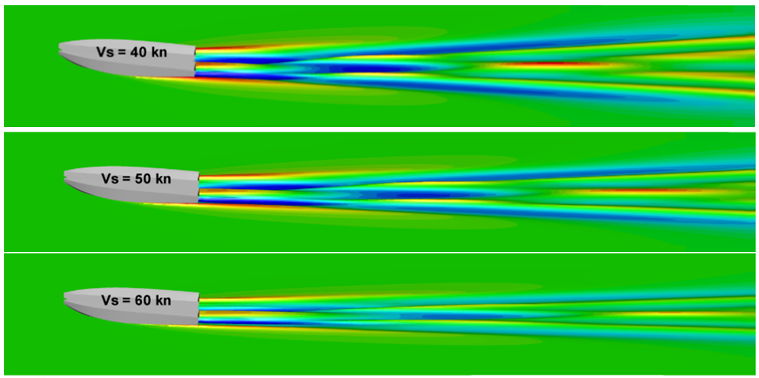


图 3 双体槽道滑行艇的兴波特征

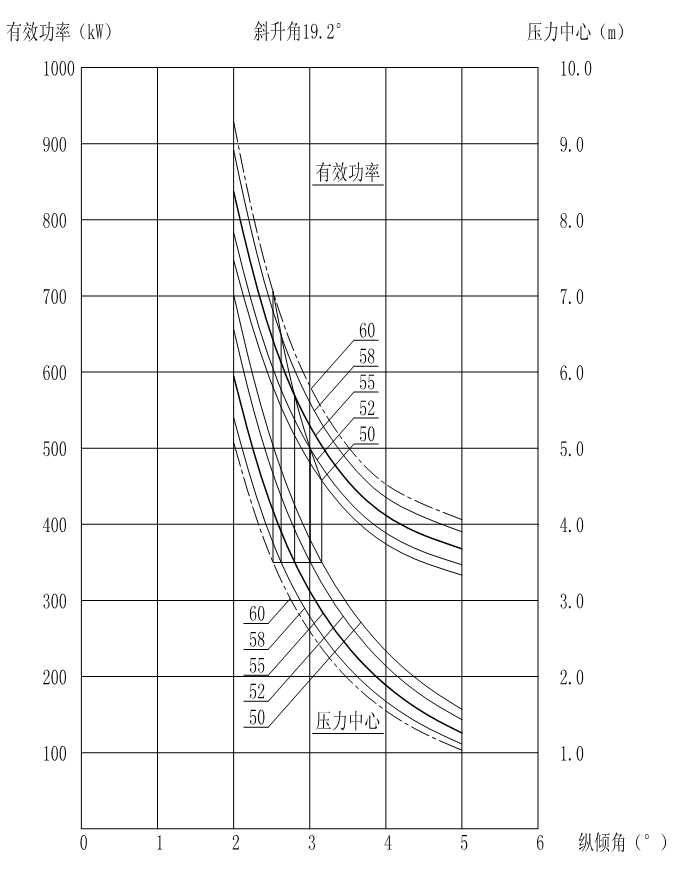


图 4 基于SIT经验公式的有效功率估算

2数值模拟计算技术

高速滑行艇的水动力构型设计，主要考虑快速性及耐波性的实现，因此设计的关键是能够准确快速的评估构型方案的水动力性能。数值模拟技术是高速滑行艇艇型研发中的关键技术，构建合适的数值模拟技术（如图5），能够有效降低研发成本、缩短设计周期，通过对模拟结果的处理能够实现对流动特征的精细解析，从而发现和避免在初期的设计中错误的参数输入。

图 5 高速滑行艇绕流场数值模拟方案的设计

2.1数值计算方法的建立

为了计算滑行过程中的艇体姿态，将运动求解与流场求解耦合起来，建立了高速滑行艇绕流场数值模拟体系，如图6。

图 6 运动求解与流场求解

2.2计算模型的验证

高速滑行艇绕流场数值模拟体系的精度验证，可以采用国外标准模型Taunton系列艇型试验资料[3]作为基准数据对计算方法的精度进行了检验。建立了计算域，并在空间上进行了离散，见图7-8。

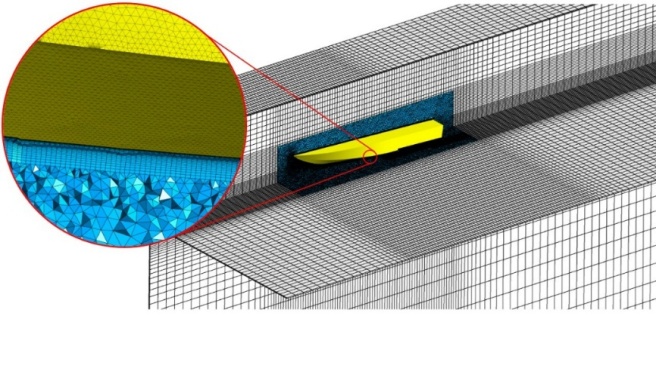
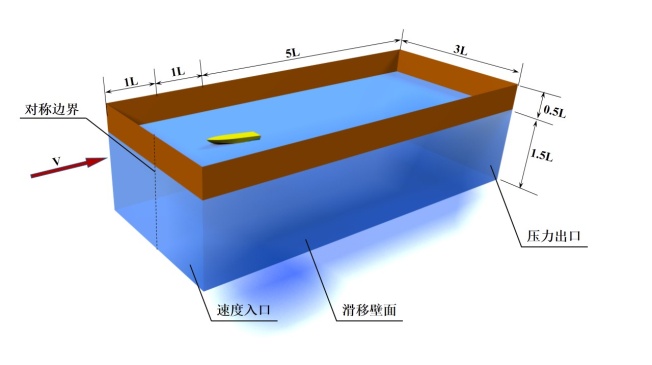


图 7 数值模拟所使用的计算域 图 8 计算域的离散形式

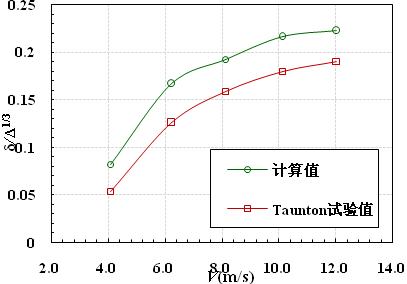
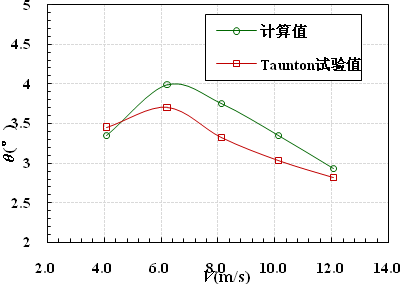
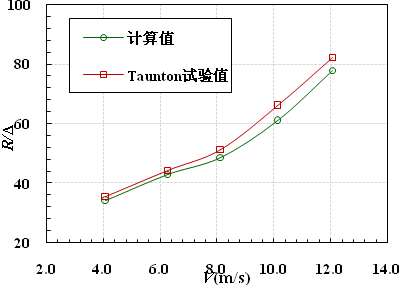


图 9 计算精度的验证（依次为计算阻力、纵倾和升沉）

图9计算结果表明，建立的高速滑行艇绕流场数值模拟体系具有较高的精度，在计算阻力上两者吻合度较高，最大误差小于8%，在航行姿态的计算上的亦能够较好地反映出姿态随航速的变化规律，可用于水动力构型设计的计算及分析。

3水动力构型设计

高速滑行艇的水动力构型设计是艇型研发中的核心问题，船型作为船舶水动力性能的载体，直接关系到快速性及耐波性的优劣，因此船型设计是具有决定性的关键技术领域。虽然利用动力増升减阻技术，可以提高船舶的快速性，要开发出满足航速指标且水动力性能高效的船型，不仅需要关键的技术支撑更需要大量的实践经验积累。

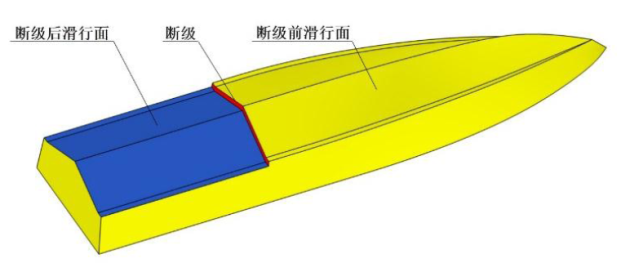


图 10 单体断级滑行艇型

高速滑行艇在航速较高时阻力会过快增长，因此在艇型的设计中通常将艇底滑行面设计成带有横向断级的形式，见图10，并凭借断级后空气穴的产生来降低浸湿面积，进而达到改善高速阻力的目的，下文以带双断级的单体滑行艇水动力构型设计为例简要介绍具体的技术路线。

3.1单体双断级滑行艇构型设计

断级滑行艇的艇底被横向的断级分成前后不连续的滑行面，当航速足够高时，来流会在断级处与艇底脱离，并经过一定距离后再次与断级后滑行面接触，导致断级与再接触点之间无浸湿，因此断级滑行艇在高速航行时的浸湿面积较常规滑行艇有了大幅的降低，相应地其阻力性能则得到了明显的提升，并且随着航速的增加，这种优势也趋于明显，见图11。

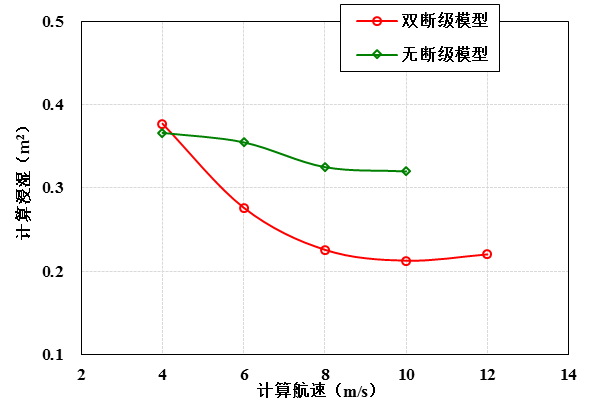
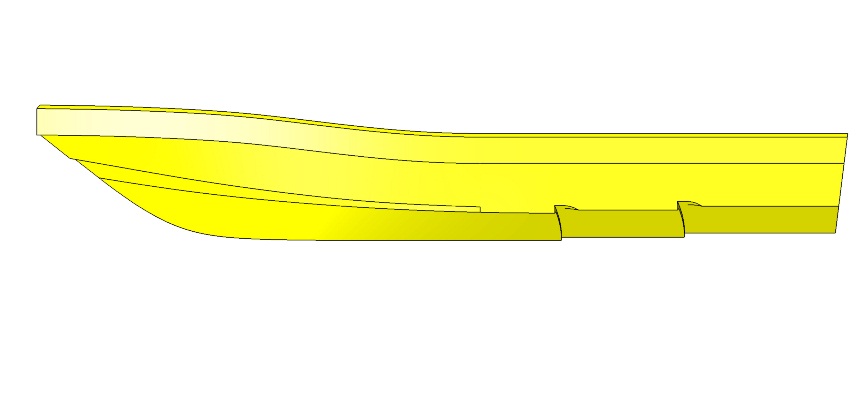


图 11 航行浸湿对比

以单体断级艇的设计为例，为评估双断级构型的减阻效果，如图12设计了双断级和无断级两组艇型方案。图13的对比计算表明，断级方案在进入滑行状态后表现出明显的阻力优势，其最大收益可达18%，图14给出了两组船型方案的兴波特征对比图。



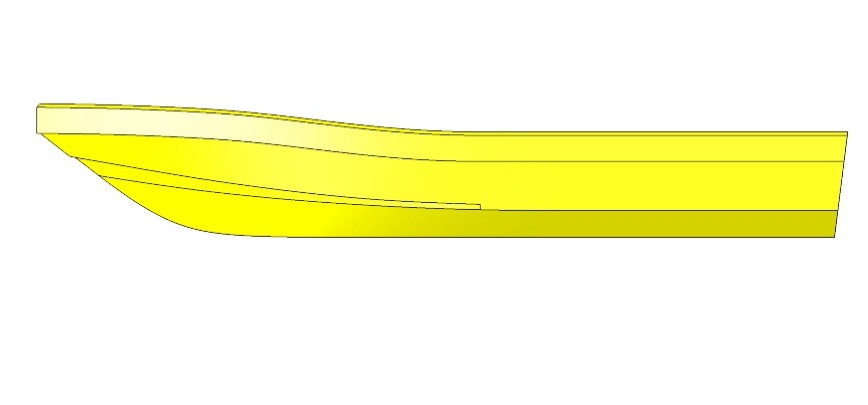


图 12 双断级和无断级方案对照

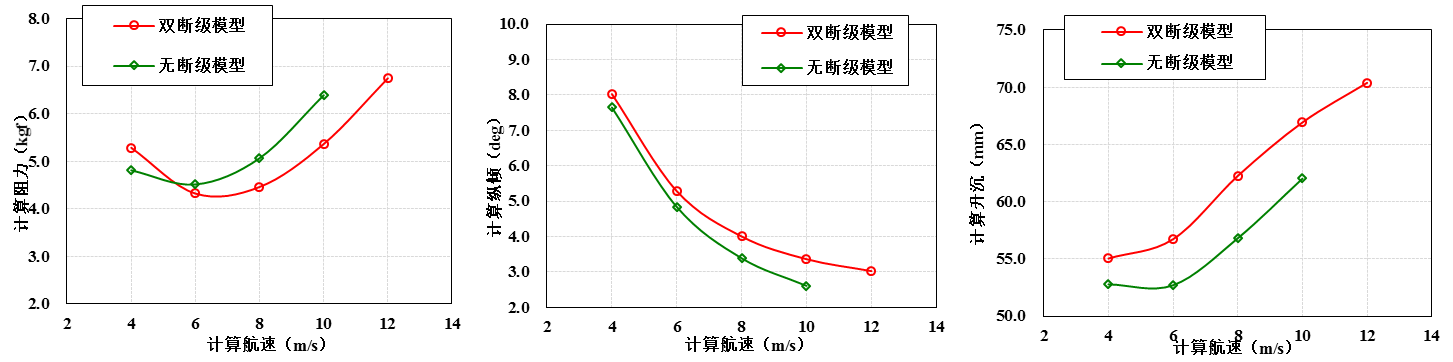
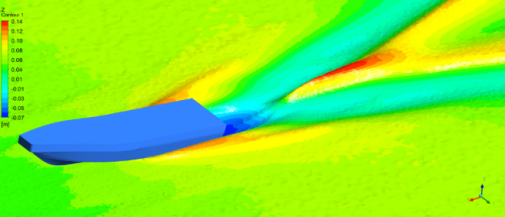
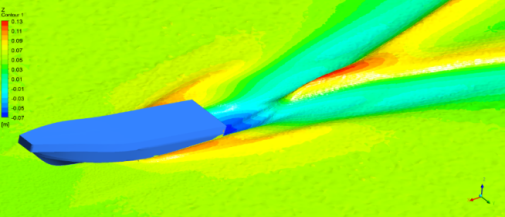
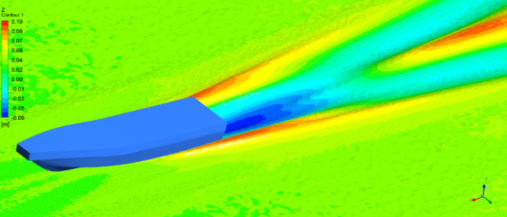
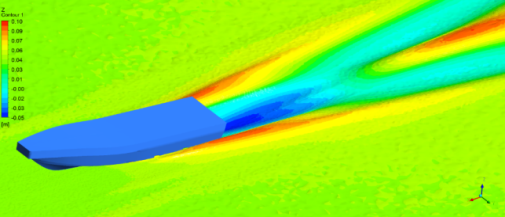


图 13 双断级方案和无断级方案阻力、姿态的对比





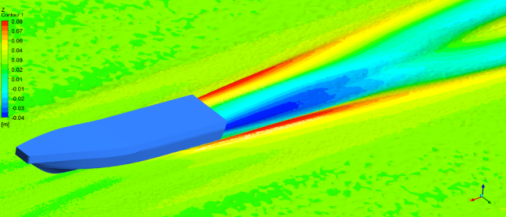
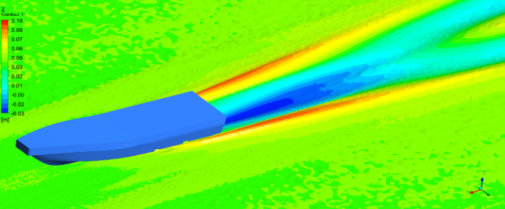


图 14 双断级（左）和无断级艇（右）的兴波特征对比

3.2重心及断级位置对阻力性能影响

为评估重心及断级位置对阻力的影响，开展相关模型试验研究。结果表明，见图15，在相同载重的情况下，随着重心的前移高速时阻力逐渐降低，而越峰阶段（过渡航态）的阻力则有增大的趋势，图16为断级位置不同时的模型试验结果。

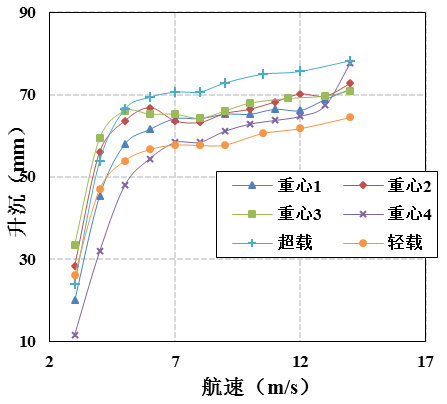
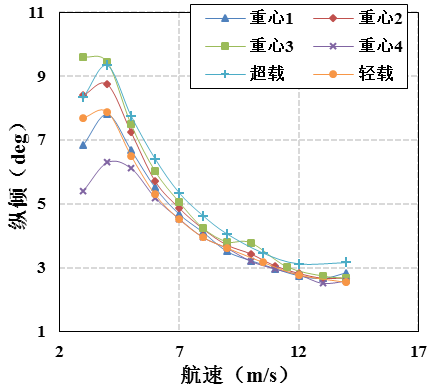
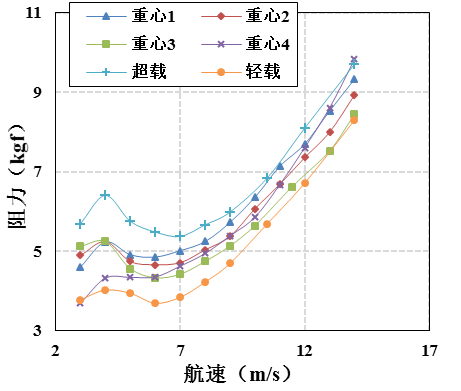


图 15 重心不同时阻力、纵倾、升沉对比

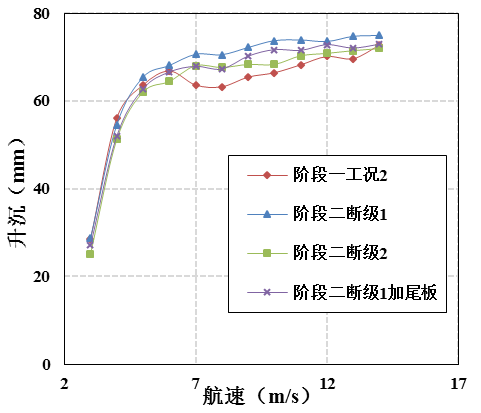
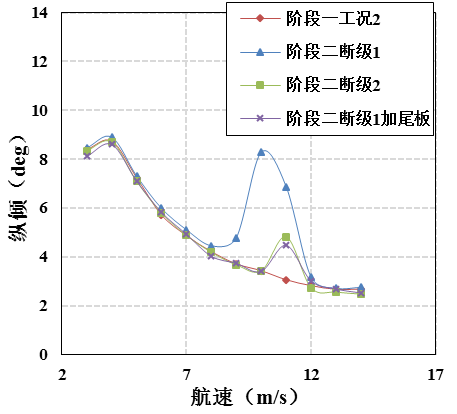
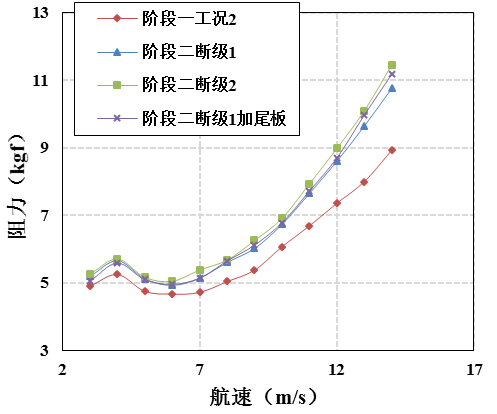


图 16 断级位置不同时阻力、纵倾、升沉对比

3.3运动稳定性

运动稳定性一直都是高速滑行艇设计中所需关注的关键问题，滑行艇在平静水域航行时，当航速增大到一定程度之后艇体会出现运动不稳定的现象，即在受到外界的扰动后，艇体不能够回到原有的平衡状态，而是在平衡位置附近一定范围内周期性振荡。海豚运动则是最为常见的一种纵向运动失稳的情况，当发生海豚运动时艇体外在的动力行为通常表现为纵摇和垂荡的耦合运动（如图17 所示）。研究表明影响海豚运动的因素主要包括航行纵倾、浸湿长度和重心的纵向位置等。



图 17海豚运动特性示意

目前对海豚运动的研究主要集中在海豚运动的预报和抑制措施上，其中，在海豚运动的预报技术上，除通过模型拖曳试验[4]和理论方法[5]来预估实船的纵向稳定性之外，基于试验资料回归的限界线方法是最为常见的海豚运动预报手段，常见的限界线理论主要包括：Day和Haag依据系列变斜升角模型的试验结果提出的用于估算极限纵倾角的海豚运动限界线[6]，以及Clement等人则根据系列62艇型的模型试验结果回归出的计算极限航速的海豚运动限界线[7]。这两种限界线方法都是根据常规尖舭滑行艇的试验数据回归得出的，故使用过程中也要受限于原始试验模型的尺寸特征。而随着CFD技术在滑行艇水动力研究中的应用趋于成熟，利用数值模拟计算艇体的纵向运动不稳定特性亦成为海豚运动预报中的一种重要手段[8]。

3.4船尾附体设计应用

目前用于提高滑行艇快速性，改善耐波性的常用手段，主要是在船艇尾部安装压浪板、阻流板等水动力附属装置。压浪板的历史较早，可追溯到20世纪80年代，阻流板的历史较迟，发源于90年代末。船模及实船试验表明，通过在船尾合理的设计加装压浪板可有效调节船舶航行时的纵倾姿态，实现削峰减阻的目的[9]。阻流板是一种体积更小，安装维护更加方便的节能附体。国内外学者基于模型试验与CFD数值计算对阻流板的水动力性能进行了研究，当阻流板应用在高速滑行艇上时， 船舶的航行姿态可以得大幅度的控制，降低了海豚运动带来的危害[10]。值得注意的是，阻流板的尺寸需合理设计才能达到理想效果[11]，阻流板作用太小不能达到理想的减阻效果，太大则会引发阻力性能恶化以及埋首现象。

图 18 船尾附体削峰减阻效果

以某型设计航速45kn的单体深V滑行艇为例，图18给出船尾设置压浪板前后的阻力对比图，由计算可知，设置压浪板在阻力峰处可减阻9%左右，削峰减阻效果显著。

4 动力匹配设计

要达到高航速，除要求船体阻力性能好之外，动力匹配合理、高效是另一个具有决定性的关键技术。实现高速滑行艇船机桨最佳匹配是一个复杂的过程，也是在工程实施阶段最为关键的一环，直接影响到试航过程中的推进效率以及经济性，同时这也是一项需要多部门协同的综合性技术。高速滑行艇的动力匹配设计主要包括推进系统选型、主机选型和动力匹配方案设计等内容。

4.1推进系统选型

根据船舶推进理论，对于高速快艇可选用全浸式螺旋桨、表面桨、舷内外机、舷外挂机抑或平口喷水推进器，以下对几种推进方式的优缺点进行了比较。

1）舷外挂机推进装置具有安装简便、结构紧凑、单位功率重量轻的有点，但匹配的主机功率收到限制，并且大多为汽油机可能存在安全性问题。

2）舷内外机是发动机位于舷内，驱动器位于舷外，舷外部分的驱动系统能左右转动起到转向作用，同时还能倾斜翘起，在航行中调节纵倾，可匹配较大功率柴油机。这种推进装置，结构紧凑，占用空间少，安全可靠油耗低，操控灵活、维修方便，驱动效率较高。但是这种推进装置存在噪音大、螺旋桨抗空泡能力差的确定，对于航速超过50kn时需谨慎选用。

3）喷水推进方式操纵性和定位性能优异、噪音低，能适应较浅吃水和冲滩作业要求，喷水推进器的抗空泡能力较强，在高速低载荷工况下的推进效率较高，可达到0.60以上。然而喷水推进装置初始造价高，占用空间大，重量亦较大，维修时推进泵叶轮拆装复杂，当航速超过50kn时很少选用。

4）表面桨是一种部分桨叶露出水面进行正常工作的特种螺旋桨，亦可称为半浸桨，它具有无空泡剥蚀、高效率和低附体阻力等优点。由于表面桨可通过液压调节机构在航行过程中调节桨叶浸深，使船——机——桨始终处于最佳匹配状态，使主机功率得到充分发挥。50kn以上的小型快艇，表面桨可能是最佳选择，但在选用时，要考虑到表面桨推进装置一般造价较高，质量较重的问题。

4.2主机选型

主机选型遵循以下基本原则：

1）应采用技术成熟、安全可靠、指标参数稳定、售后服务好、备品备件易购、价格合理的高性能柴油机作为推进主机。

2）功率匹配需满足船舶航速要求，并需考虑到营运几年后主机功率下降及附生物增多而引起阻力增加，为确保船舶航速，选用主机应具有一定的功率储备。

3）尽可能选用启动性好、经济性能好、油耗低、大修期长的柴油机。

4）在满足航速的要求下，尽量选用体积小、功率大、重量轻的柴油机。

在遵循上述原则下，主机选型通常从功率指标、重量指标、尺寸指标、油耗和排放等几个方面进行对比分析加以选择。

4.3动力匹配方案设计

对于航速超过50kn的高速滑行艇，除要求艇体阻力性能好之外，动力匹配合理、高效是另一个具有决定性的关键技术。以柴油机+表面桨的动力匹配方案设计为例，在线型及主机确定之后，动力匹配设计主要是解决表面桨的设计，其难点是要考虑多工况的最佳匹配设计。

高速滑行艇的阻力特性与常规排水型船有所不同，它在由低速到高速的航行过程中，会出现较大的航行姿态（航行纵倾、升沉）变化和明显的阻力峰，阻力峰值处的航行纵倾角甚至达到10°以上，艇体也被抬起，艇体浸湿面积大幅减小。表面桨通过驱动装置固定于艇体尾部，首艇体姿态变化的影响，其在水中的浸深也将发生明显变化，表面桨的工作工况存在较大差异，若单一的考虑高速工况进行桨设计，往往会出现低速工况下主机负荷不足导致桨的重载而无法越过低速阻力峰值；单一考虑低速工况，有可能导致桨轻载在高速状态无法完全吸收主机功率的问题。



图 19多工况表面桨设计方法

为解决上述技术难题，可以采用如图19所示的技术路线，首先采用数值模拟方法研究斜流和浸深比对表面桨水动力特性的影响，由于表面桨工作时，部分桨叶处于液面以下，部分处于空气中，在高速旋转与高速流体动力的作用下，表面桨处于通气状态，会引起自由液面抬升，使得液面浸湿程度增加，这使得表面桨的数值模拟比常规螺旋桨更为复杂，采用重叠网格技术模拟桨的旋转运动，在螺旋桨周围生成高质量的体网格跟随桨叶的运动，而网格拓扑结构保持不变，同时针对重叠网格与背景网格的信息交换，采用不同形式的插值格式进行比较计算，选取精确高效的插值格式；采用高精度几何重构技术模拟不同浸深下桨周围大变形扭曲自由液面，比较计算分析不同浸深对自由面变形程度的影响，并对比不同浸深下的半浸桨水动力特性，分析总结不同浸深对半浸桨水动力性能影响规律；然后利用水池试验研究低空泡数对表面桨水动力性能的影响规律。

对于多工况匹配设计，需考虑低速起滑工况、巡航工况以及高速工况。表面桨布置在艇体尾部由于受舟体姿态影响其状态也有所变化，在低速起滑前，表面桨处于全浸状态，而在巡航状态时处于半浸状态，当航速达到最高时，艇体的重心纵向位置与表面桨水动力中心匹配直接关系到艇体纵向稳定性的保持。因此，首先通过艇体在不同工况下阻力特性、重心位置以及表明桨的工作状态及水动力特性，选取不同工况分别作为设计点，借助现有的表明螺旋桨图谱开展表面桨方案设计及评估，根据表面桨不同浸深下水动力特性开展不同表面桨方案在过峰阻时的功率裕度评估，比较分析其过峰阻的能力与最大航速，优选出性能最佳的方案；最后通过实艇试验分析不足，并进行改进设计。

5 总结

本文介绍了高速滑行艇设计涉及的关键技术，如数值模拟计算技术、水动力构型设计技术、运动稳定性设计技术、多工况动力匹配方案设计技术等，并介绍了解决技术问题常用的技术方法及技术路线，可供相关设计人员参考。

参考文献

[1]赵连恩,谢永和,高性能船舶原理与设计[M]，北京：国防工业出版社，2009.

[2] Schachter R D, Ribeiro H J C, Conceição C A L D. Dynamic equilibrium evaluation for planing hulls with arbitrary geometry and variable deadrise angles – The Virtual Prismatic Hulls Method[J]. Ocean Engineering, 2016, 115:67-92.

[3] Taunton D J, Hudson D A, Shenoi R A. Characteristics of a series of high speed hard chine planing hulls—Part 1: performance in calm water. Int J Small Craft Technol[J]. 2010, 152:55-75.

[4] Katayama T. Experimental Techniques to Assess Dynamic Instability of High-Speed Planing Craft - Nonzero Heel, Bow-Diving, Porpoising and Transverse Porpoising[C].// 6th International Ship Stability Workshop, New York, USA.2002

[5] Milton Martin. Theoretical Determination of Porpoising instability of High-Speed Planing Boats[J].Journal of ship research, 1978, 22(1):32-53.

[6] Celano T (1998) The prediction of porpoising inception for modern planing craft. SNAME Trans 106:269–292

[7] Clement E P, Blount D L. Resistance tests of a systematic series of planing hull form[J] .Trans .SNAME , 1963, 71:63-78.

[8] 凌宏杰, 王志东. 高速滑行艇“海豚运动”现象的实时数值预报方法[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(1):106-110.

[9]刘英和,吴启锐,许晟,等.尾压浪板升力研究及其对WPC耐波性的影响[J].中国造船,2015,(2):56-63.

[10] Maki A, Arai J, Tsutsumoto T et al. Fundamental research on resistance reduction of surface combatants due to stern flap[J]. Journal of Marine Science & Technology,2016,21(2):344-358.

[11]潘柏衡,高霄鹏.尾插板对滑行艇阻力及运动稳定性影响试验分析[J].船海工程,2018,47(1):26-28.

作者简介：蒋昌师，男，1985，高级工程师，主要从事船舶设计工作