

12-13-2019

## Comparative Study on Resistance Modeling Method in Yacht Simulator

Xiaochen Li

*Key Laboratory of Marine Simulation & Control for Ministry of Transportation, Dalian 116000, China;*

Yin Yong

*Key Laboratory of Marine Simulation & Control for Ministry of Transportation, Dalian 116000, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Comparative Study on Resistance Modeling Method in Yacht Simulator

### Abstract

**Abstract:** In order to solve the problem that the existing resistance modeling method of yacht has poor universality and the calculation accuracy is not high, approximate resistance modeling methods of high speed craft are analyzed and summarized. *The actual yacht model is simplified into a prismatic hull.* “ЦАГИ” method and SIT method are reproduced and the simulation results are compared with model test. The application of resistance approximate modeling in the yacht simulator is discussed. The results reveal that the resistance is in good agreement with the experimental value, and the SIT method with simplified hull form is more widely applicable than the “ЦАГИ” method. *The SIT method with simplified hull form has good universality, which can be used for resistance calculation of multiple yachts and meet the requirements of the yacht simulator for resistance calculation.*

### Keywords

yacht simulator, approximate method, resistance calculation, simplified hull

### Recommended Citation

Li Xiaochen, Yin Yong. Comparative Study on Resistance Modeling Method in Yacht Simulator[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(12): 2664-2670.

## 游艇模拟器中阻力建模方法对比研究

李笑晨, 尹勇

(大连海事大学航海动态仿真和控制交通部重点实验室, 辽宁 大连 116000)

**摘要:** 为解决游艇模拟器中现有船舶阻力建模方法普适性较差, 计算精度不高的问题。对现有高速艇阻力近似建模方法进行分析与总结, 将实际游艇模型简化成棱柱形船体, 复现查洁法和 SIT 法并与模型试验数据进行比对, 探讨阻力近似建模方法在游艇模拟器中的应用。试验表明简化后的模型与 SIT 法结合的方法比查洁法适用范围更广泛, 求解的阻力与试验值吻合度良好。该方法具有良好的普适性, 能解决多种艇型的阻力计算, 基本满足游艇模拟器对船舶阻力的仿真需求。

**关键词:** 游艇模拟器; 近似方法; 阻力计算; 简化船型

中图分类号: U674.91 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 12-2664-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0302

## Comparative Study on Resistance Modeling Method in Yacht Simulator

Li Xiaochen, Yin Yong

(Key Laboratory of Marine Simulation &amp; Control for Ministry of Transportation, Dalian 116000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the existing resistance modeling method of yacht has poor universality and the calculation accuracy is not high, approximate resistance modeling methods of high speed craft are analyzed and summarized. The actual yacht model is simplified into a prismatic hull. "ЦАГИ" method and SIT method are reproduced and the simulation results are compared with model test. The application of resistance approximate modeling in the yacht simulator is discussed. The results reveal that the resistance is in good agreement with the experimental value, and the SIT method with simplified hull form is more widely applicable than the "ЦАГИ" method. The SIT method with simplified hull form has good universality, which can be used for resistance calculation of multiple yachts and meet the requirements of the yacht simulator for resistance calculation.

**Keywords:** yacht simulator; approximate method; resistance calculation; simplified hull

## 引言

随着游艇产业的快速发展, 游艇驾驶员的需求日益提高。由于海上环境的复杂性与危险性, 游艇驾驶员需要具备扎实的业务水平与随机应变的处

置能力<sup>[1]</sup>。此外, 主管机关对游艇驾驶员的资格认证标准也愈加完善与严格。因此, 游艇驾驶员需要经过充分并系统的培训才能持证上岗。目前, 从事游艇驾驶培训的机构大多采用实艇培训的方法训练驾驶员, 该方法存在经费成本高、训练效率低、过程风险大等问题, 而通过模拟器培训方式可有效解决上述问题。此外, 船舶操纵模拟器在海员培训领域的成功应用也证明了游艇模拟器培训的可行性。

游艇模拟器是船舶操纵模拟器的一种扩充, 故



收稿日期: 2019-05-17 修回日期: 2019-07-11;  
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金  
(3132019011), 极地水域航行船舶操纵仿真关键技术  
(3132019306);

作者简介: 李笑晨(1990-), 男, 河南洛阳, 博士生, 研究方向为船舶运动建模、航海模拟器。

<http://www.china-simulation.com>

• 2664 •

物理真实感、行为真实感和环境真实感的船舶操纵模拟器三要素研究是游艇模拟器的关键技术。其中物理真实感和环境真实感属于模拟器之间的通用技术,可直接借鉴并应用至游艇模拟器。而由于游艇特殊的运动特性,游艇的运动数学模型与普通排水型船舶并不相同,尤其在阻力建模方法上存在较大差异。因此,游艇模拟器研究的重点和难点在于行为真实感。游艇由其水动力特性,在船舶分类中一般属于单体高速滑艇,其阻力具有以下特点:船舶低速航行时,阻力比普通排水型船舶稍高,二者阻力的形成因素相同,阻力变化趋势相似,随船速的增加而增大。当船舶进入高速时,普通排水型船舶阻力成因不变,阻力仍随船速增加而增大,滑艇在高速时进入滑行状态,阻力构成发生变化,其浮力忽略不计,船舶重力由水动力提供,船舶阻力趋于稳定,随航速增加几乎不发生变化。国内外学者对滑艇的阻力性能做了大量研究<sup>[2]</sup>。早期滑艇阻力预报多采用系列模型试验资料进行估算,较为常见的系列模型包含:系列 62 (美国系列 62 和荷兰系列 62)、系列 65 和美国海军学院系列等。随后有模型试验方法和半经验半理论方法进行阻力预报,前者采用船模在试验水池中进行一系列试验的方法进行阻力预报,后者采用棱柱形滑艇平板理论结合经验修正的方法进行阻力预报。上述方法均属于阻力的近似建模方法。现在,由于计算机性能的迅猛提升和理论计算的飞速发展,计算流体力学方法成为滑艇阻力预报的主要方法。

由于游艇模拟器对算法的效率要求非常高,需要进行实时解算,所以本文重点对近似建模方法进行对比研究,而计算流体力学方法普遍需要较好的计算设备和较长计算时间,本文暂不对其进行讨论。借鉴排水型船舶建模中的箱型体假设,本文将游艇几何模型做棱柱形假设,复现了查洁法和 SIT 法,对比仿真结果与模型试验结果,并将两种方法加入游艇模拟器进行测试。结果表明两种方法计算精度基本满足游艇模拟器阻力建模需求,从船型适用范围和相关研究内容考虑,SIT 法更适合游艇模

拟器应用及后续研究。

## 1 阻力建模方法研究

游艇的阻力近似建模方法可分为 3 种:

### (1) 系列图谱法

该类方法以模型试验为基础,由试验者打造一系列相似的船舶模型并进行相关实验,根据试验数据回归出阻力计算图谱。系列图谱法是一种计算结果受模型几何形状影响非常大的方法,船舶模型与试验模型越匹配,计算结果越准确,普适性较差,因此具有很大的局限性,不能满足模拟器对多种艇型进行计算的算法要求。

### (2) 模型试验法

模型试验法是精度最高的阻力计算方法,同时也是成本最高的方法,每一艘船型都需要建造相应的实体模型,并在试验水池中进行阻力实验,根据试验结果计算游艇阻力。该方法消耗巨大的人力、物力,违背了采用游艇模拟器训练驾驶员的降低成本原则,因此该方法并不适合作为模拟器中的阻力计算方法。

### (3) 半理论半经验方法

这种方法一般以平板滑艇理论为基础,结合模型试验数据对计算公式进行经验系数修正,该方法兼具理论研究基础与模型试验数据,计算结果虽不及模型试验法精确,却能够适用于大多数艇型,从而降低试验成本,可以较好的兼顾计算精度与计算成本。因此该方法对工程应用较为友好。

基于游艇模拟器对阻力计算成本和计算方法普适性的要求,半理论半经验方法是最适合游艇模拟器阻力研究的方法。半理论半经验方法中应用最为广泛的是苏联中央流体动力研究中心的查洁法与美国 Stevens 实验室的 SIT 方法。

图 1 是游艇运动建模中常用的局部坐标系:坐标原点  $O$  为游艇重心; $X$  轴指向船艏; $Y$  轴指向右舷; $Z$  轴垂直  $XY$  平面指向上。

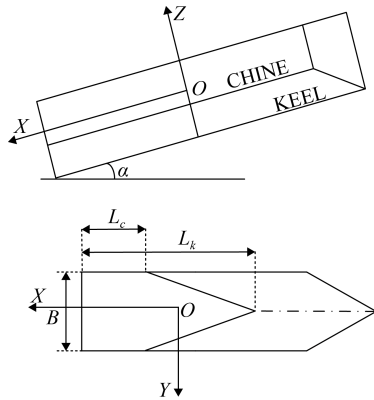


图1 游艇局部坐标系  
Fig. 1 Local coordinate system of yacht

## 1.1 查洁法

查洁法是由苏联中央流体动力研究中心提出的一种方法<sup>[5]</sup>, 在1940年发表的棱柱形艇的升力和力矩方程基础上, 采用大展弦比有限宽度滑行面薄翼模型计算船舶浸湿面积、纵倾角等参数, 然后根据经验进行修正, 从而得到较为准确阻力结果的方法。近些年来, 随着计算流体力学的迅猛发展等一些因素, 查洁法的发展基本停滞不前。

查洁法中, 游艇高速运动时船舶重力与动浮力和静浮力之和相等, 即

$$\Delta = L + L_0 = \frac{\pi\alpha}{2(1+2\lambda)}\rho V^2 S + \rho g b l^3 \left( \frac{l_0}{l} - 0.5 \right) \alpha \quad (1)$$

式中:  $\Delta$  为船舶排水量;  $L$  为动浮力;  $L_0$  为静浮力;  $\alpha$  为船舶纵倾角;  $\rho$  为海水密度;  $V$  为游艇速度;  $S$  为浸湿面积;  $\lambda$  为浸湿长宽比;  $b$  为船宽;  $l$  为船长;  $l_0$  为船体与静水面交线至船尾距离。将式(1)无因次化并做经验修正可得式(2)

$$\frac{C_b}{\alpha} = \frac{0.7\pi\lambda}{1+1.4\lambda} + \frac{\lambda-0.4}{\lambda+0.4} \cdot \frac{\lambda^2}{F_B^2} \quad (2)$$

式中:  $C_b$  为升力系数;  $F_B$  为船宽傅氏数。

按照薄翼比拟, 船舶动压力中心位于距离船艏  $0.75l$  处, 由查洁法经验数据修正可知, 动压力中心位于距船艏  $0.75l + 0.08(\lambda^{0.865}/\sqrt{F_B})l$  处, 船舶静浮力中心作用于容积中心处, 此时可得出船舶静浮力对船艏力矩

$$M_{P0} = \frac{1}{2} \rho g b l^3 \alpha \frac{\lambda - 0.8}{3\lambda + 1.2} \quad (3)$$

将式(3)无因次化可得

$$m_{\Delta} = \frac{\frac{0.7\pi\lambda}{1+1.4\lambda} \left( 0.75 + 0.08 \frac{\lambda^{0.865}}{\sqrt{F_B}} \right) + \frac{\lambda - 0.8}{3\lambda + 1.2} \times \frac{\lambda^2}{F_B^2}}{\frac{0.7\pi}{1+1.4\lambda} + \frac{\lambda - 0.4}{\lambda + 0.4} \times \frac{\lambda^2}{F_B^2}} \quad (4)$$

式中:  $m_{\Delta}$  为重心纵向位置系数  $m_{\Delta} = l_G/b$ ;  $l_G$  为船舶重心至船艏距离。

采用牛顿法求解式(2)、(4)可得  $\alpha$  和  $\lambda$ , 再对其进行斜升角修正

$$\lambda_{\beta} = \lambda^{0.8} \frac{1}{\cos \beta} (1 - 0.29(\sin \beta)^{0.28}) \left( 1 + 1.35(\sin \beta)^{0.44} \times \frac{m_{\Delta}}{F_B} \right)$$

$$\alpha_{\beta} = \alpha + \frac{0.15(\sin \beta)^{0.8}}{F_B^{0.3}} \times \frac{1 - 0.17\sqrt{\lambda_{\beta} \cos \beta}}{\sqrt{\lambda_{\beta} \cos \beta}} \quad (5)$$

式中:  $\beta$  为游艇斜升角。

由修正后的  $\alpha_{\beta}$  和  $\lambda_{\beta}$  可以计算游艇的浸湿面积、浸湿长度以及雷诺数

$$S = \lambda_{\beta} b^2$$

$$I = \lambda_{\beta} b$$

$$Rn = V \cdot I / \nu \quad (6)$$

式中:  $I$  为浸湿长度;  $Rn$  为雷诺数;  $\nu$  为黏性系数。

游艇总阻力可有式(7)计算

$$R_t = \Delta \tan \alpha_{\beta} + \frac{1}{2} (C_f + \Delta C_f) \rho V^2 S \quad (7)$$

其中,

$$C_f = \frac{0.075}{(\lg Rn - 2)^2}, \Delta C_f = 0.4 \times 10^{-3} \quad (8)$$

## 1.2 SIT 方法

SIT 方法是由美国 Stevens 工学院实验室通过一系列滑行平板的试验数据整理发表<sup>[6]</sup>。自1964年 Savitsky 提出该方法至今, 众多欧美学者围绕该方法开展相关研究, 包括滑行艇的阻力研究, 斜升运动研究以及海豚运动研究等, SIT 方法是滑行艇相关研究的主要近似方法<sup>[7]</sup>。

SIT 方法表示平板滑行面的升力系数为

$$C_{L0} = \alpha_{deg}^{1.1} (0.012\lambda^{0.5} + 0.0055\lambda^{2.5}/F_B^2) \quad (9)$$

式中:  $C_{L0}$  为斜升角为 0 时的升力系数, 当平板底

部变为斜升角不为 0 时, 经验修正后的升力系数为

$$C_{L\beta} = C_{L0} - 0.0065\beta C_{L0}^{0.6} \quad (10)$$

$$\text{式中: } C_{L\beta} = \frac{\Delta}{\frac{1}{2}\rho V^2 b^2}。$$

在游艇进入滑行阶段时, 滑行面中心的位置可表示为:

$$\frac{l_G}{l} = K\lambda^n \quad (11)$$

$$\text{式中: } K = \frac{0.84 + 0.015\beta}{\alpha^m}; \quad m = 0.125 + 0.0042\beta;$$

$$n = -0.05 - 0.01\beta。$$

在计算过程中, 首先由式(10)迭代法求解出升力系数  $C_{L0}$ , 然后选取一系列的纵倾角  $\alpha$ , 计算对应角度下升力系数与  $\alpha$  的比值, 带入式(9)后迭代法求解与  $\alpha$  对应的  $\lambda$ 。同理计算  $m, n$  以及与  $\alpha$  对应的  $K$  值, 进而解算出各纵倾角下对应的压力作用点, 根据已知游艇重心位置, 就可得到该运动状态下的  $\alpha$  和  $\lambda$ 。

SIT 法总阻力计算公式与查洁法相似

$$R_t = \Delta \tan \alpha + \frac{1}{2}(C_f + \Delta C_f) \rho V^2 S_\beta \quad (12)$$

$$\text{式中: } S_\beta = \lambda b^2 / \cos \alpha。$$

## 2 游艇几何模型简化

箱型体假设是船舶运动数学模型中的一种常用的简化方法。该方法通过将船舶假设成箱型体, 简化船舶建模难度, 降低模型运算量并保证一定的仿真精度。由于箱型体假设能够兼顾仿真速度与精度的特点, 该方法在工程应用方面有着良好的效果。

本文借鉴箱型体假设理论, 结合游艇自身特点, 将游艇几何形状假设为棱柱形, 从而简化游艇几何模型的数学表达, 降低了运动模型的建模难度。同时, 由于半理论半经验方法是基于平板滑行理论和棱柱形模型试验修正研究, 棱柱形船型既扩展了半理论半经验方法的应用范围, 又增强了阻力计算的理论依据。游艇几何模型简化的前后对见图 2。

游艇几何模型简化的关键在于选取恰当的参数, 棱柱形简化需要 3 个参数: 船舶长度、船舶宽

度和斜升角。不同艇型的参数又可以具体细化为: 船舶总长、船舶水线面长、船舶最大宽度、折角线最大宽度、船舳宽度, 船舶平均宽度、船舳斜升角和平均斜升角等。简化后的艇形应和原艇形相似度最高, 可通过组合试验的方法确定最优的参数, 进而得到最精确的计算结果。

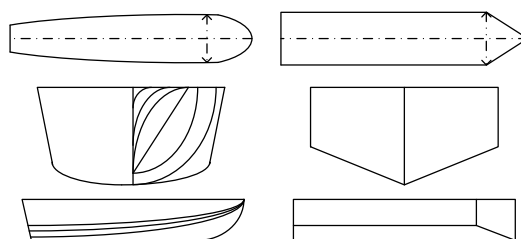


图 2 游艇几何模型简化对比

Fig. 2 Comparison between yacht model and simplified model

## 3 数值仿真试验

为了对比上述两种算法的计算精度和普适性, 本文选择形状具有较大差别的五艘模型进行试验, 哈尔滨工程大学<sup>[12]</sup>和国立首尔大学<sup>[13]</sup>的相关学者曾对这些模型进行过水池试验, 试验结果可为本文提供对比数据。模型主体特征参数由表 1 可见。

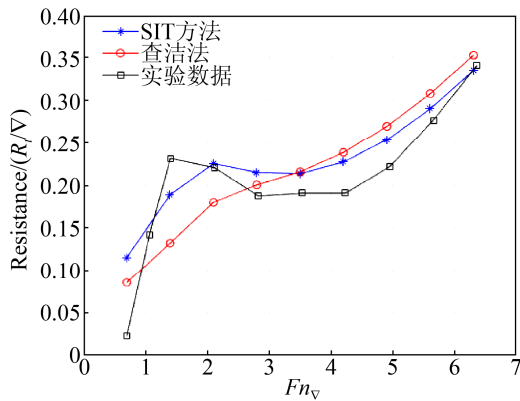
表 1 模型主尺度

Tab. 1 Main dimensions of models

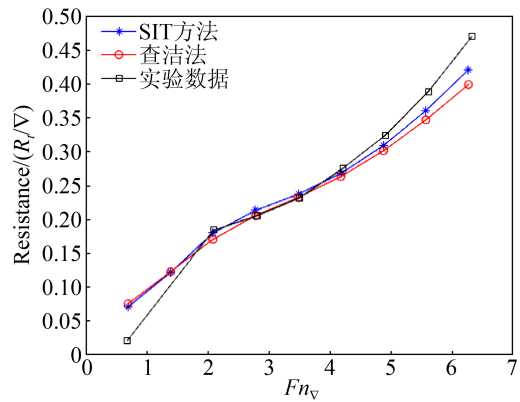
参数	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5
模型长度/m	0.927	1.092	1.123	2.2	2.2
模型水线长/m	0.796	1.026	1.072	\	\
船宽/m	0.308	0.308	0.292	0.73	0.73
折角线船宽/m	\	\	\	0.43	0.43
吃水/m	0.080	0.087	0.072	0.125	0.125
船舶重量/kg	9.103	9.467	9.467	55.8	55.8
重心距船艏位置/m	0.42	0.42	0.42	0.75	0.79
船舶斜升角/deg	20	17	20	\	\
船舳斜升角/deg	23	30	22	13.6	13.6
船艏斜升角/deg	32	80	75	\	\

由表 1 可知, 依据船型特点可将模型可分为两类。前三艘模型为同一类型, 该类模型船宽固定不变, 斜升角由船艏至船舳逐渐变化, 三艘模型之间的船长、船宽、吃水等参数各不相同。本文选择模型的水线长度与船舳位置的斜升角作为简化棱柱

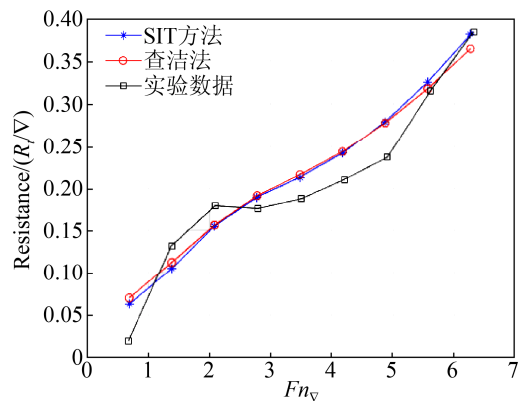
形船体的参数,讨论了阻力算法对不同船型的适用性。后两艘模型为同一类,该类模型斜升角大小固定不变,船舶宽度自船舷至折角线逐渐变化,两模型之间船舶参数完全一致,船舶载态不同,重心至船艏位置不同。本文选择最大折角线处宽度作为简化棱柱形船体的参数,讨论阻力算法对不同船舶载态的适用性。本文计算不同航速下的船舶阻力,仿真结果如图3所示。



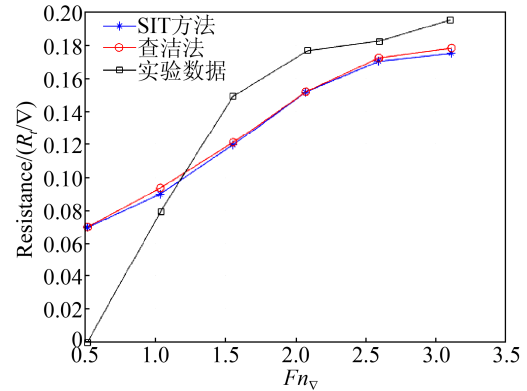
(a) 模型1阻力计算对比结果



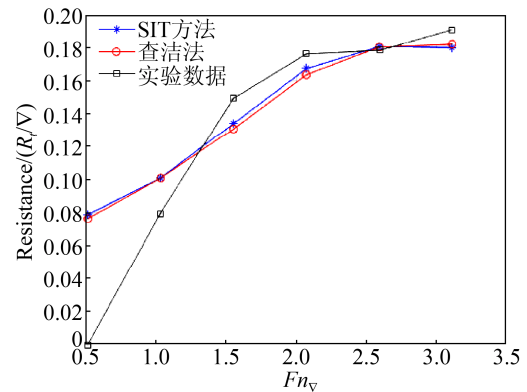
(b) 模型2阻力计算对比结果



(c) 模型3阻力计算对比结果



(d) 模型4阻力计算对比结果



(e) 模型5阻力计算对比结果

图3 阻力计算对比结果

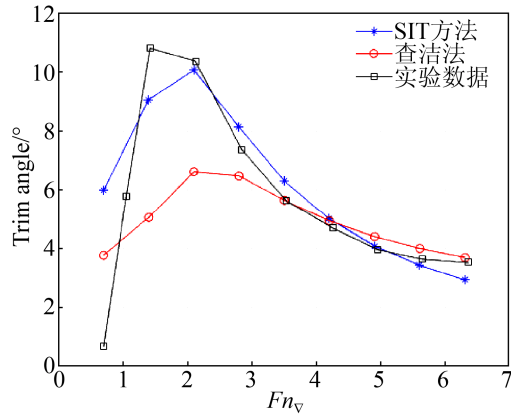
Fig. 3 Comparison of resistance results

图3为5组模型分别采用2种近似建模方法计算所得阻力值与水池试验结果对比图。由图3可知:近似建模方法计算所得阻力值变化趋势与水池试验结果变化趋势一致,不同模型的计算精度有所差别,该误差由船型差别造成;近似建模方法可应用于不同船舶载态,计算结果与试验结果较为吻合。当模型处于低速航行状态时,两种近似建模方法计算结果误差均较大;当模型处于中速航行状态时,模型进入预滑行状态,两种近似方法计算结果相近,基本与试验结果吻合;当模型处于高航速状态时,模型进入滑行状态,两种方法计算结果准确,SIT法计算结果略优于查洁法。

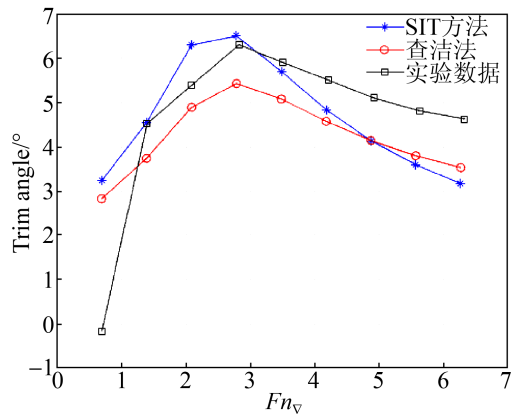
两种近似方法在求解阻力的同时,还可以计算游艇的航行静水纵倾角。图4为前3条模型分别采用两种近似算法所得纵倾角与水池试验结果对比图。由图可知,近似算法所得纵倾角变化趋势与试



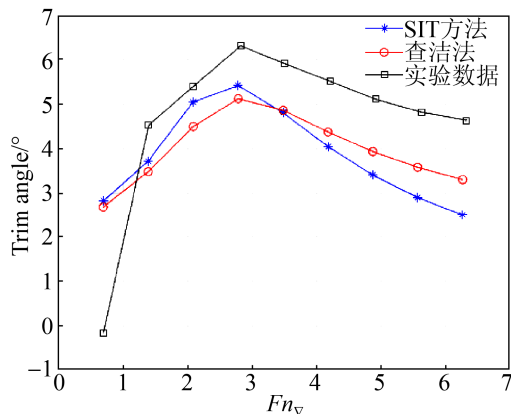
验值变化趋势一致, 计算精度受船型影响较大。纵倾角仿真结果与阻力仿真结果相似, 计算精度随着航速的增加而提高。查洁法计算结果普遍低于试验值, 计算精度略高于 SIT 法。



(a) 模型 1 纵倾角计算对比结果



(b) 模型 2 纵倾角计算对比结果



(c) 模型 3 纵倾角计算对比结果

图 4 纵倾角计算对比结果

Fig. 4 Comparison of trim angle

本文将两种阻力建模方法加入游艇模拟器中进行测试, 图 5 为六自由度平台的游艇模拟器, 由六自由度液压平台, 游艇操作系统和视景系统构成。图 6 为作者在游艇模拟器环境中进行算法测试。测试结果与仿真结果一致, 两种方法计算效率良好, 船舶仿真航速与姿态能够实时反馈, 数值准确, 证明近似方法在游艇模拟器中应用是可行的。



图 5 六自由度游艇模拟器

Fig. 5 Six degrees of freedom yacht simulator



图 6 建模方法在游艇模拟器中测试

Fig. 6 Modeling method tested in the yacht simulator

## 4 试验结果分析

本文通过对两种滑艇阻力近似算法的对比研究与仿真试验得到以下结论:

国内外学者对 SIT 法的研究内容多于查洁法, 与 SIT 法结合的高速艇运动研究内容丰富, 模型试验数据较多, 相关研究内容可为游艇模拟器的后续研究提供更多参考, 研究背景上 SIT 法优于查洁法。

仿真结果表明游艇几何模型的棱柱形假设具有可行性, 阻力计算结果与试验值基本一致, 该假设使得近似建模方法具有一定的普适性, 有利于游



艇模拟器应用。

近似方法在低速域的计算精度有待提高,在高速域的计算精度能够满足游艇模拟器的要求,SIT法的阻力计算精度高于查洁法,查洁法的纵倾角计算精度由于SIT法,近似建模方法存在提升空间。

近似方法计算效率良好,可在模拟器中进行应用,计算速度与仿真效果基本满足游艇模拟器的要求<sup>[14]</sup>。

## 5 结论

综上所述,两种阻力近似建模方法仿真精度相似,均有可提升空间,SIT法在研究内容和模型试验数据方面具有优势,可为后续游艇模拟器相关研究提供参考。采用棱柱形假设的SIT阻力建模方法基本满足游艇模拟器要求,提高了游艇运动数学模型的精确度,具有一定的工程应用意义。

## 参考文献:

- [1] 朱珉虎. 游艇概论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2012: 20-25.  
Zhu Minhu. Introduction to Yacht[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press. 2012: 20-25.
- [2] 董文才, 郭日修. 滑行艇阻力研究进展[J]. 船舶力学, 2000, 4(4): 68-81.  
Dong Wencai, Guo Rixiu. State of the Art of Prediction on Resistance of Planing Crafts[J]. Journal of Ship Mechanics, 2000, 4(4): 68-81.
- [3] 宋磊. 深V型高速艇阻力性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.  
Song Lei. Resistance Study of Deep-V ship[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [4] 吴攀. 游艇的阻力预报以及动力系统的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.  
Wu Pan. Research on the Prediction of the Resistance of Yachts and the Power System[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [5] 董祖舜. 快艇动力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1991: 30-52.  
Dong Zushun. High Speed Craft Dynamics[M]. Wuhan: Huazhong University of Technology Press. 1991: 30-52.
- [6] Savitsky D. Hydrodynamic design of planing hulls[J]. Mar Technol SNAME (S0025-3316), 1964, 1(1): 71-95.
- [7] Tarafder M S, Saaki A R. Computation of resistance of high speed planing craft using Savitsky's theory[C]// 12<sup>th</sup> International Conference on Mechanical Engineering (ICME), Indonesia, Mataram: Trans Tech Publications Ltd, 2017: 1-10.
- [8] Faltinsen O M. Hydrodynamics of high-speed marine vehicles[M]. United States of America, New York: Cambridge University Press, 2006: 342-389.
- [9] 孙霄峰, 尹勇, 周宏宇, 等. 游艇模拟器中游艇运动模型研究[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(9): 2085-2089.  
Sun Xiaofeng, Yin Yong, Zhou Hongyu, et al. Research on mathematical model of yacht in yacht simulator[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 2085-2089.
- [10] Zhao R, Faltinsen O M, Haslum H A. A simplified nonlinear analysis of a high-speed planing craft in calm water[C]// Proceedings, 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Fast Sea Transportation. Sydney, Australia: NTIS, 1997: 431-438.
- [11] Begovic E, Bertorello C. Resistance assessment of warped hullform[J]. Ocean Engineering (S0029-8018), 2012, 56(4): 28-42.
- [12] Sun H, Huang D, Zou J, et al. Research on the resistance test of trimaran planing hulls[C]// International Conference on Remote Sensing. China, Nanjing: IEEE, 2011: 6257-6259.
- [13] Kim D J, Kim S Y, You Y J, et al. Design of high-speed planing hulls for the improvement of resistance and seakeeping performance[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering (S2092-6782), 2013, 5(1): 161-177.
- [14] 李笑晨, 尹勇, 周宏宇, 等. 正横规则波中游艇操纵运动仿真[J]. 大连海事大学学报, 2017, 43(3): 1-6.  
Li Xiaochen, Yin Yong, Zhou Honyu, et al. Maneuvering simulation of yacht in regular beam waves[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2017, 43(3): 1-6.
- [15] 金一丞, 尹勇. 航海模拟器[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 11-30.  
Jin Yicheng, Yin Yong. Maritime Simulator[M]. Beijing: Science Press. 2013: 11-30.