

# 基于数值模拟的超疏水材料减阻性能研究

张宇姣, 董力群, 张亚军, 庄俭

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

**摘要:** 目的 为了研究超疏水材料的减阻性能, 提出一种准确可靠的数值模拟研究方法。方法 建立超疏水船舶的三维模型, 对考虑自由液面时船舶的黏性绕流进行数值模拟。由于表面接触角是评定材料疏水性的一个重要参数, 通过改变表面接触角研究相应阻力值的变化, 并采用理论计算、数值模拟以及实验研究三者相结合的方法, 验证该模型及方法在超疏水材料减阻性能研究方面的准确性。结果 随着表面接触角的增大船舶行驶时所受的阻力减小。船体采用超疏水材料的阻力比采用亲水性材料的阻力减少了 41%, 比采用一般疏水性材料的阻力减少了 24%。模拟中得出的船舶模型阻力大小与理论计算以及实验结果基本吻合, 误差分别在 4.6% 和 8% 以内。结论 通过船舶模型研究超疏水材料的减阻性能, 提出了一种基于数值模拟的有效研究方法, 为超疏水材料其他方面的性能研究提供了一定指导。

**关键词:** 超疏水材料; 减阻性能; 船舶模型; 接触角; Fluent

中图分类号: O647 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)11-0173-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.11.027

## Drag-reducing Property of Super-hydrophobic Material Based on Numerical Simulation

ZHANG Yu-jiao, DONG Li-qun, ZHANG Ya-jun, ZHUANG Jian

(College of Mechanic and Electronic Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the drag-reducing property of super-hydrophobic material to propose an accurate and reliable numerical simulation method. A 3-D model of ship made of super-hydrophobic material was built for the numerical simulation of viscous flow around the ship in considering free surface. Because the contact angle was an important parameter to evaluate super-hydrophobic property of the material, the change in corresponding resistance values was studied by changing the surface contact angle. The accuracy of study on drag-reducing property of super-hydrophobic material was verified with such model and method by integrating theoretical calculation, numerical simulation and experimental study. With the increase in surface contact angle, the resistance applied on the ship was reduced. The resistance of ship made of super-hydrophobic material was reduced by 41% compared to that made of hydrophilic material and by 24% as to the ship made of general hydrophobic

收稿日期: 2016-04-02; 修订日期: 2016-08-23

Received: 2016-04-02; Revised: 2016-08-23

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助 (51203010)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51203010)

作者简介: 张宇姣 (1991—), 女, 在读研究生, 研究方向为微纳制造技术

Biography: ZHANG Yu-jiao(1991—), Female, Graduate student, Research focus: micro-nano manufacturing technology.

通讯作者: 庄俭 (1975—), 女, 博士, 副教授, 从事机械加工原理及应用研究等。

Corresponding author: ZHUANG Jian(1975—), Female, Associate Professor, Doctor, Research focus: mechanical processing principle and application.

material. The amount of resistance of ship model obtained in the simulation was basically consistent with theoretical calculation and experiment results and the errors were respectively within 4.6% and 8%. Through the study on the drag-reducing property of super-hydrophobic material based on the ship model, an effective research method is proposed based on numerical simulation to provide certain guidance for researches on other properties of super-hydrophobic material.

**KEY WORDS:** super-hydrophobic material; drag-reducing property; ship model; contact angle; Fluent

超疏水材料是指表面修饰有典型微纳结构,具有较低表面能的材料<sup>[1]</sup>。超疏水表面材料具有自清洁<sup>[2]</sup>、防腐蚀<sup>[3]</sup>、表面减阻<sup>[4]</sup>和防结冰<sup>[5]</sup>等优良性能,被广泛应用于工业、农业以及国防等方面。最早由 Barthlott 和 Neinhuis 提出自然界中的荷叶就是典型的超疏水表面,该发现引发了科技工作人员探索材料超疏水性的极大兴趣。超疏水表面的减阻特性是一项最大的潜在应用价值所在<sup>[6-8]</sup>, Watanabe 等人<sup>[9]</sup>首先提出了将疏水表面应用于流体减阻的研究,在具有超疏水内壁的圆管流体实验研究中得到了 14%的减阻率。Ou 等人<sup>[10]</sup>利用化学反应的方法在硅片表面制造具有微柱结构的超疏水表面,通过实验得出该超疏水表面可以达到 30%~40%的减阻效果。

计算流体力学(CFD)数值模拟的方法作为实验研究的辅助手段,该方法能够获得较详细的流场信息,因此人们更多地将数值模拟的方法应用到超疏水表面的结构设计和减阻性能研究中。Zhao 等<sup>[11]</sup>利用数值模拟的方法建立了具有微观结构的超疏水表面模型,研究在不同流动条件下该模型表面的减阻效果。结果发现,当雷诺数较低时,表面最大减阻效果可达 8.76%,而当雷诺数较高时,最大减阻效果只有 2.63%。Kim 等<sup>[12]</sup>采用直接数值模拟方法(DNS)对材料表面的超疏水性能展开了研究,通过改变边界滑移方向研究湍流条件下边界滑移对流体减阻的影响。

本文主要研究超疏水材料应用于船舶表面对行驶阻力的影响。应用 Fluent 软件,建立船舶的三维模型,通过改变船体材料的表面接触角分析疏水性能与行驶阻力间的关系,并与船模水池实验结果对照,验证了该模拟方法应用于船舶减阻研究的可行性。

## 1 含自由液面的船舶数值模拟

### 1.1 船体及流域模型的建立

根据实验中采用的船模形状以及尺寸建立船舶

模型,船舶侧壁形状近似三角形,船底与侧壁有圆滑的过渡,这些设计能够减少船舶行驶中所受的阻力。由于船体及流域均为左右对称结构,经简化后的半船模型如图 1 所示。利用前处理器 Gambit 建立船舶模型,船模尺寸为 32.5 cm×5.5 cm×4.5 cm,根据实验中船舶吃水深度设置水线高度为 2.2 cm。

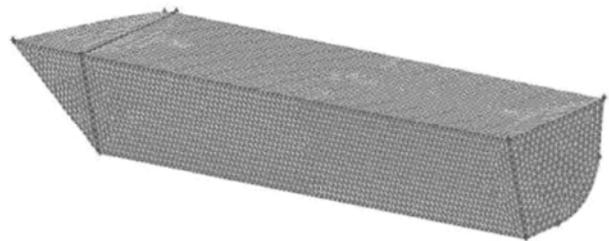
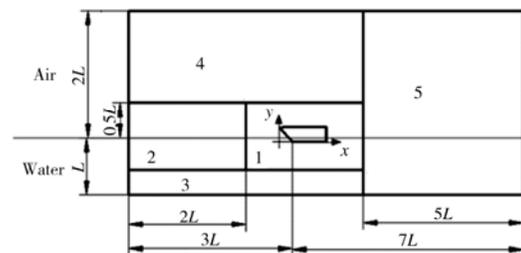
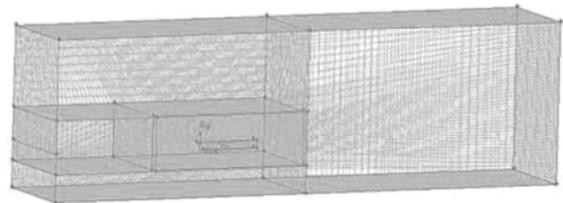


图 1 半船模型  
Fig.1 Starboard of shipmodel

在模拟中需要建立半船模型所处的计算控制域,计算控制域分为上下两个部分,上部分控制域流过的流体是空气,下部分控制域流过的流体是水。为实现既保证模拟精度又节约计算时间的要求,将流域分为 5 个区域,每个流域尺寸大小如图 2 所示:船舶前方和后方流域分别为 3 倍船长和 5



a 计算流域的设计图



b 计算流域的三维结构

图 2 小船计算流域示意

Fig.2 Thecomputational domain of the viscous flow field: a) the size of computational domain; b) 3D model of the computational domain

倍船长，水线下水深为 1 倍船长，水线上流域为两倍船长高，此外船宽方向距船体中纵剖面为两倍船长。经网格无关性计算后，设置流域 1—5 的网格尺寸大小分别为 1、2、3、3、5 cm，网格数量为 19.46 万。将船体设置为壁面 (wall)，将流域左侧设置为空气速度入口和水流速度入口 (velocity-inlet)，右侧设置为自由出流 (outflow)。

### 1.2 求解设定与模拟结果

采用三维单精度求解器，首先进行网格的处理及模型尺寸比例的设定，采用分离式求解器非稳态求解，用 VOF 模型对自由液面进行捕捉，将空气设置为第一相，水设置为第二相。通过自由液面的船舶行驶流场的雷诺数为  $10^6$ ，属于高雷诺数充分发展的湍流模型，因此选用工程上常用的标准  $k-\epsilon$  湍流模型，运行环境考虑重力的影响。选用 PISO

算法进行压力和速度耦合，对压力采用 PRESTO!，离散动量插值采用二阶迎风格式，其他均用一阶迎风格式。在船舶行驶过程中近似认为水和空气的流速相同，根据实验中测得的船舶速度，设置水和空气的流速均为 5 m/s。另外，在本模拟中忽略温度对船舶阻力的影响。采用非稳态计算方法，设置迭代步长为  $10^{-4}$  s，收敛精度为  $10^{-5}$ ，以保证模拟结果的精确性。

模拟中自由表面的变化是随时间趋于稳定的过程，船舶中纵表面的水气分布变化如图 3 所示。开始时，水流有沿船艏向上飞溅的现象，船尾的水面也有较大的波动，随着计算时间的增长，自由面渐渐趋于平稳，流动趋于稳定。同样，由模拟得出小船所受的摩擦阻力如图 4 所示，在计算初期有较大的波动，随着模拟时间的增加，阻力最后稳定在 0.25 N。

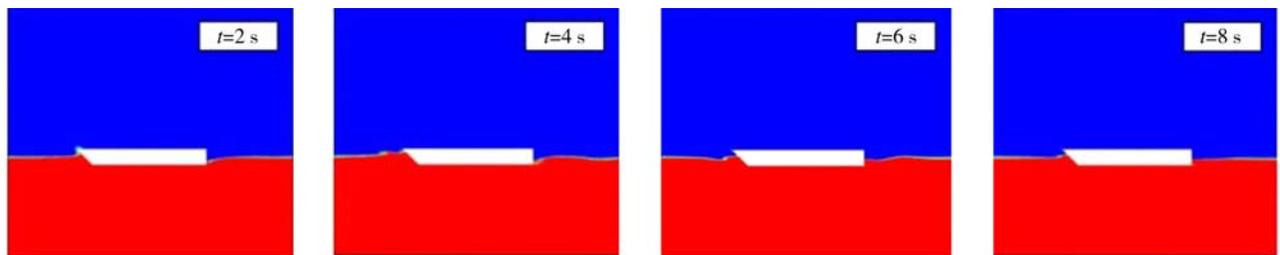


图 3 液面逐渐平稳的过程  
Fig.3 Vapor-liquid interface trends to be stable

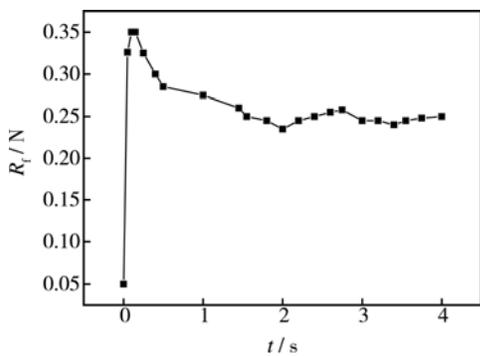


图 4 小船所受摩擦阻力随时间的变化曲线  
Fig.4 The slope of the value of friction drag versus time

### 1.3 理论计算及比较

在理论计算中，一般将小船受到的摩擦阻力近似于等长、等面积的平板的摩擦阻力，根据 1957ITTC 经验公式估算船舶受到的摩擦阻力：

$$R_f = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_f \quad (1)$$

$$C_f = \frac{0.075}{(\lg Re - 2)^2} \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (3)$$

式中： $\rho$ 、 $\mu$  分别为流体的密度和黏度； $L$  和  $S$  分别为船长和湿面积； $v$  为小船的行驶速度； $C_f$  为小船摩擦阻力系数。经计算可得， $C_f=0.007$ ， $R_f=0.262$  N。由上可知，模拟得出的摩擦阻力与理论计算得出的摩擦阻力的误差为 4.6%，误差较小且在合理的范围内，因此可以用以上的模型以及模拟方法估算小船所受的阻力。

在以上的模拟中，壁面接触角为默认值  $90^\circ$ ，由于壁面接触角是反应材料疏水性能的参数，因此可以通过在模拟中改变接触角的大小模拟不同疏水性能的小船在行驶过程中所受阻力的大小。

## 2 船体材料疏水性能对阻力的影响

### 2.1 表面润湿性理论

浸润性是固体表面的重要特征之一，它由表面

的化学组成和微观形貌共同决定。当液滴附着在固体表面时，液滴表面与固体表面在固体、液体与气体三相交界线处的夹角  $\theta$ ，称为接触角  $\theta$  (Contact angle, CA)，如图 5 所示。根据材料表面浸润性，可将材料分为亲水性材料和疏水性材料，当  $\theta < 90^\circ$  时，表明表面的润湿性较强，此时的表面称为亲水表面；当  $90^\circ < \theta < 150^\circ$  时，表示表面的润湿性不强，液滴将呈球状，此时的表面称为疏水表面；当接触角  $\theta > 150^\circ$  时，该材料表面则具有超疏水性。

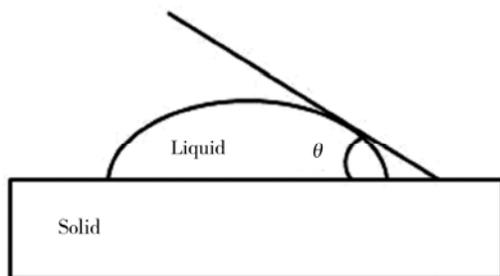


图 5 表面接触角示意

Fig.5 The schematic illustration of surface contact angle

由于固体表面均具有一定的粗糙度，当表面存在微结构时，液滴与壁面之间还存有空气，这种情况近似为如图 6 所示的 Cassie 模型，也称为气垫模型，空气滞留在表面的凹陷处，水无法渗透到凹槽内<sup>[13]</sup>。此时壁面接触角的大小可以由数学表达式得出：

$$\cos \theta = \varphi(\cos \theta + 1) - 1 \tag{1}$$

式中： $\cos \theta$  为实际壁面的接触角； $\cos \theta$  为液-固部分的接触角； $\varphi$  为液体占接触表面的面积分数。从式 (4) 可以看出，通过减小液固接触面的面积分数，可以获得较大的壁面接触角，即可以通过增加表面的粗糙程度，增大微结构中截留气体所占的比重，达到材料表面疏水性的要求。

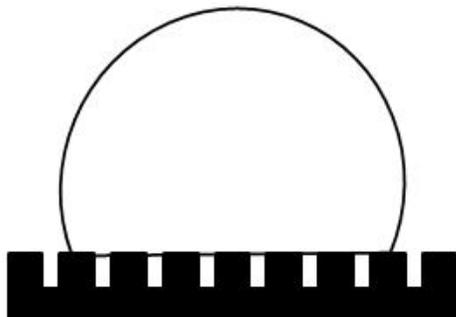


图 6 Cassie 模型示意

Fig.6 The schematic illustration of Cassie model

## 2.2 船舶阻力数值模拟

基于表面润湿性理论，采用上述船舶粘性绕

流数值模拟的模型以及方法，通过改变流体和壁面接触角的大小模拟小船的疏水性能，待流场稳定后提取船舶所受的摩擦阻力进行分析比较。模拟中在  $20^\circ \sim 160^\circ$  范围内逐渐增大接触角，模拟船体材料为亲水性、疏水性和超疏水性时的流场情况。提取分析船体材料在相应壁面接触角的条件下，船舶在运行过程中所受的摩擦阻力大小，结果如图 7 所示。

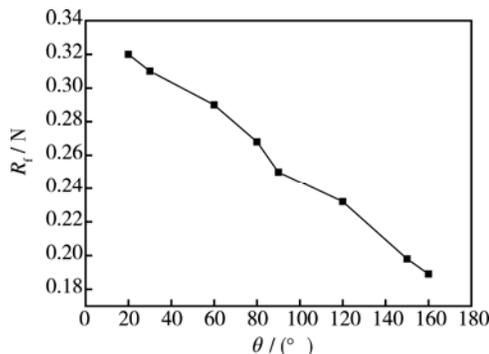


图 7 摩擦阻力随接触角的变化关系

Fig.7 Effect of surface contact angle on the friction resistance

随着表面接触角的增大，船舶所受的摩擦阻力呈明显的下降趋势。船体采用超疏水材料的阻力比采用亲水性材料减少了 41%，比采用一般疏水性材料减少了 24%。这是由于水滴与超疏水材料表面有较大的接触角，由于水的表面张力作用使水滴在这种粗糙表面的形状接近于球形，有一些空气会被“关到”水与固体表面之间，导致水珠大部分与空气接触，与固体直接接触面积反而大大减小。因此小船所受的摩擦阻力也随之减小。

## 3 船模水池实验及对比分析

### 3.1 实验简介

对小船进行表面修饰，首先在船体外包裹厚度为 0.03 mm 的铜箔，然后将其浸泡在质量浓度为 2 mg/mL 的  $\text{HAuCl}_4$  水溶液中 30 min，使其表面形成具有微纳结构的粗糙表面。最后将小船和盛有 1 mL 十二硫醇溶液的烧杯放置在温度为  $30^\circ\text{C}$  的烤炉中烘烤 12 h，目的是利用化学表面沉积的方法使船体材料具有较低的表面能，提高其疏水性能。在扫描式电子显微镜下可以观察到，经过处理后的船体表面布满了三维微纳结构，具有较大的表面粗糙度<sup>[14-16]</sup>，见图 8—9。

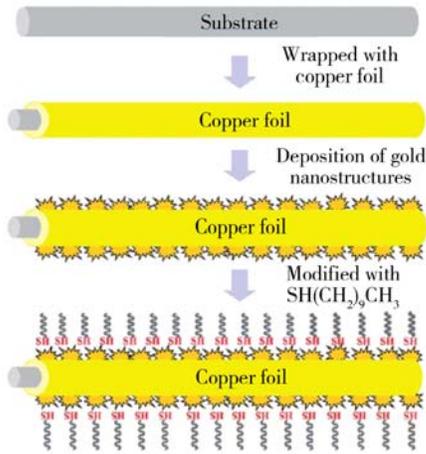


图 8 船体表面修饰示意

Fig.8 The process of surface modification of the ship

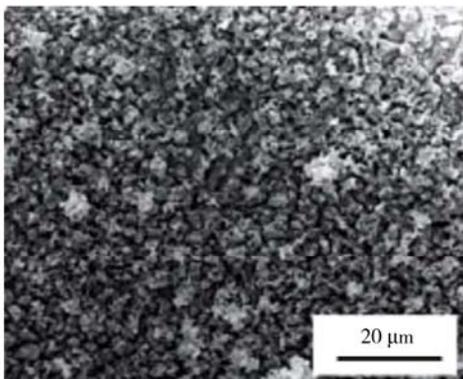


图 9 经修饰后的船体表面 SEM 图

Fig.9 SEM image of the treated ship surface

测量未经处理的小船与表面修饰的小船的表面接触角，结果分别为  $82.5^\circ$  与  $159.7^\circ$ ，因此经过处理的船体属于超疏水表面的范畴。通过水池船模对照实验研究超疏水小船的减阻性能。图 10a 和 b 分别为普通小船和超疏水小船，由于超疏水小船表面有铜箔，因此船体颜色由银灰色变成了红褐色。



图 10 小船模型及水池实验

Fig.10 The images of the ship model and sailing experiment: a) the model of untreated ship, b) the model of super-hydrophobic ship, c) sailing experiment

将两艘小船同时从起点处释放，使用尼龙绳作为导向使其沿着各自的流道基本保持直线行驶，最终超疏水小船领先普通小船 1.4 m 先到达终点，如图 10c 所示。通过计算可得，实验中普通小船和超疏水小船的平均速度分别为 0.33 m/s 与 0.46 m/s。

在表面修饰过程中，船体在 2 mg/mL 的  $\text{HAuCl}_4$  水溶液中的浸泡时间不同，船体表面的粗糙度也不同，从而可以得到不同的表面接触角。在实验中还得到了表面接触角为  $122.3^\circ$  和  $149.5^\circ$  的小船，分别对其进行水池实验测得平均速度为 0.375 m/s 和 0.4 m/s。

### 3.2 船舶所受的阻力计算

由于根据 1957ITTC 经验公式计算所得的摩擦阻力为没有考虑壁面接触角时的阻力，因此可以通过分析实验中船舶的受力情况间接计算船舶所受的阻力。由于小船在行驶方向上所受的力主要为螺旋桨对小船的推力和水对小船的阻力。小船在水中的运行过程可以近似为匀速运动，因此小船所受到的总阻力等于推力  $R_t=T$ 。由于螺旋桨在船尾运转，还将导致附近速度-压力场变化，使水流速度增大，从而损失了一部分螺旋桨推力，因此需要考虑推力减额分数  $t$ 。

$$T = K_T \rho n^2 D^4 (1-t) \tag{5}$$

式中： $n$  为螺旋桨的转速， $n=400$  r/min； $D$  为螺旋桨的直径， $D=12$  mm；减额分数  $t=0.14$ ； $K_T$  为小船的淌水特性，为进速系数  $J$  的二次多项式，但无具体的公式表示，只能通过图谱查得，因此  $K_T$  与速度正相关。其中由上式可根据不同疏水性小船的平均速度计算得出相对应的阻力大小。

### 3.3 实验与模拟的结果对比

以实验中小船的不同速度和接触角为条件分别进行数值模拟计算,得到相对应小船在行驶过程中所受的总阻力。将模拟和实验所得的结果对比分析,结果如表1和图11所示。通过模拟与实验结果对照可以得出,经模拟计算所得的船体摩擦阻力曲线与实验所得的阻力曲线趋势基本一致,均为随着接触角的增大,摩擦阻力呈减小的趋势,并且当材料满足超疏水条件(即 $\theta > 150^\circ$ )时,摩擦阻力呈急剧减小的趋势。通过实验和模拟得出的阻力大小基本吻合,误差小于8%,因此可以利用该模型研究超疏水小船的减阻性能。分析误差造成的原因主要有:1)虽然船舶模型与实际船体形状大致相同,但是存在一定细节上的不同,并且在实际水池实验中的空气与水流速存在一定差异性,在模拟中省略未作考虑;2)在水池实验中存在使用尼龙绳控制小船行驶方向所导致的额外摩擦阻力;3)通过经验公式计算水池实验中小船所受的阻力存在一定的误差性。

表1 模拟与实验结果对照表  
Tab.1 Comparison of experiment and simulation

接触角/ $^\circ$	速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	模拟得出的阻力/N	实验得出的阻力/N	误差/%
82.5	0.33	0.626	0.656	4.6
122.3	0.375	0.59	0.625	5.6
149.5	0.4	0.57	0.607	6.1
159.7	0.46	0.518	0.56	7.5

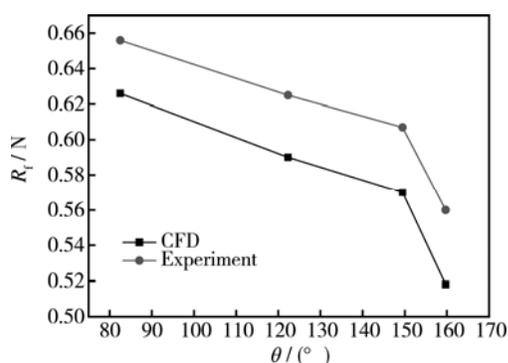


图11 模拟与实验结果对照分析

Fig.11 Comparison of experiment and simulation

## 4 结语

1)利用小船模型研究超疏水材料的减阻性能,

基于表面润湿性理论基础,通过在模拟中改变接触角大小的方法分析比较亲水性、一般疏水性和超疏水材料的船体在运动中所受摩擦阻力的大小,并将模拟结果与实验结果对比分析,验证了该模型用于超疏水材料减阻性能研究的可行性。

2)通过理论计算、数值模拟和实验相结合的研究方法,证实了在数值模拟中所建立小船模型和采用的模拟方法的正确性,验证了该模型用于船舶阻力分析预报的可行性。

3)通过数值模拟和实验的方法对超疏水小船所受的摩擦阻力大小分析比较,得出超疏水小船相对于普通小船具有优良的减阻性能,为超疏水材料表面减阻性能的研究提供了一定的方法。

### 参考文献:

- [1] LIU K, JIANG L. Metallic Surfaces with Special Wettability[J]. *Nanoscale*, 2011, 3: 825—838.
- [2] KOBAYASHI M, TERAYAMA Y, YAMAGUCHI H, et al. Wettability and Antifouling Behavior on the Surface of Super-hydrophilic Polymer Brushes[J]. *Langmuir*, 2012, 28(18): 7212—7222.
- [3] GRIGNARD B, VAILLANT A, CONINCK J. Electrospinning of a Functional Perfluorinated Block Copolymer as a Powerful Route for Imparting Super-hydrophobicity and Corrosion Resistance to Aluminum Substrates[J]. *Langmuir*, 2011, 27: 335—342.
- [4] BHUSHAN B, JUNG Y C. Natural and Biomimetic Artificial Surfaces for Super-hydrophobicity, Self-cleaning, Low Adhesion, and Drag Reduction[J]. *Progress in Materials Science*, 2011, 56 (1): 100—108.
- [5] MISHCHENKO L, HATTON B, BAHADUR V, et al. Design of Ice-free Nanostructured Surfaces Based on Repulsion of Impacting Water Droplets[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(12): 7699—7707.
- [6] ZHU J, HSU C M, YU Z F, et al. Nanodome Solar Cells with Efficient Light Management and Self-cleaning[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(6): 1979—1984.
- [7] BOINOVICH L, EMELYANENKO A. Principles of Design of Super-hydrophobic Coatings by Deposition from Dispersions[J]. *Langmuir*, 2009, 25(5): 2907—2912.
- [8] WANG J N, SHAO R Q, ZHANG Y L, et al. Bio-inspired Graphene Surfaces with Super-hydrophobicity and Iridescence[J]. *Chemistry*, 2012, 7(2): 301—304.
- [9] WATANABE K, YANUAR, UDAGAWA H. Drag Reduction of Newtonian Fluid in a Circular Pipe with a Highly Water-repellent Wall[J]. *Journal of Fluid Mechanics*,

- 1999, 381: 225—238.
- [10] OU J, PEROT B, ROTHSTEIN J P. Laminar Drag Reduction in Micro-channels Using Ultra-hydrophobic Surfaces[J]. *Physics of Fluids*, 2004, 16(12): 4635—4643.
- [11] ZHAO Jia-peng, SHI Xiu-hua, HOU Zhi-min, et al. Liquid Slip over Super-hydrophobic Surface and Its Application in Drag Reduction[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2009, 13(3): 325—330.
- [12] MIN T, KIM J. Effects of Hydrophobic Surface on Skin Friction Drag[J]. *Phys Fluids*, 2004, 16(7): 55—58.
- [13] YUAN Zhi-qing, WANG Xian, BING Ji-ping, et al. A Novel Fabrication of a Super-hydrophobic Surface with Highly Similar Hierarchical Structure of the Lotus Leaf on a Copper Sheet[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 285, 205—210.
- [14] DONG H Y, CHENG M J, SHI F, et al. Extraordinary Drag-reducing Effect of a Super-hydrophobic Coating on a Macroscopic Model Ship at High Speed[J]. *J Mater-ChemA*, 2013, 1(19): 5886—5891.
- [15] CHENG M J, SONG M M, SHI F, et al. Surface Adhesive Forces: A Metric Describing the Drag-reducing Effects of Super-hydrophobic Coatings[J]. *Small*, 2014, 11(14): 1665—1671.
- [16] CHENG M J, ZHANG S S, SHI F, et al. Improving the Durability of a Drag-Reducing Nanocoating by Enhancing Its Mechanical Stability[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(7): 336—354.