**船舶操纵性研究综述**

王慧，马丹萍

(中国船舶科学研究中心，无锡，214082, Email: tgwlwanghui@163.com)

**摘要：**船舶作为海上交通运输和贸易主要载体，已经成为世界经济流通不可或缺的纽带，船舶操纵性能对于船舶安全航行有着重要的意义。本文针对近些年国内外有关船舶操纵性水动力、操纵性预报以及评价的研究成果进行整理并简要介绍。最后对目前操纵性研究存在的问题进行简要分析和说明，以供参考。

**关键词：**船舶操纵性；水动力；操纵性预报；操纵性评价

1引言

按照IMO的有关规定要求，船舶在设计初期阶段就应该对其操纵性能进行计算、预报和评估，以保证建成船舶操纵性合格，最大程度避免操纵性缺陷问题。船舶操纵性是船舶重要的航行性能之一，无论是低空、水面或水下航行器，运动过程中的船体控制都是极为重要的，它与船舶安全性和经济性有着密切联系，同时也是船舶安全运营的重要前提。船舶操纵性的研究内容主要集中在航向、航速及位置的保持和改变，船体、桨、舵以及外界环境影响的联合作用决定了船舶的运动姿态及稳态。对于航行中的船舶，通过对船舶运动中的船桨舵联合水动力分析可以对船体受力进行有效的定性或定量计算分析，进而对船舶操纵性进行预测和评价。近些年，随着船舶种类和功能的升级发展，理论基础的完善和计算机应用技术的功能强化，船舶在波浪中的复杂运动问题、水下航行体的空间耦合运动操纵性分析等逐渐成为操纵性研究的热点，受到各国科研人员的重视和研究。

由上述可知，无论是水面船舶还是水下潜器，船舶操纵性能研究都是十分重要的，而在船舶水动力性能研究中，操纵性能还有很大的探索空间，也是最有潜力的研究方向之一。由于各国对于水下航行器资料封锁，以及潜器运动姿态和水动力分析的复杂性，水下航行器操纵性能研究仍有诸多问题亟待解决。本文对近些年有关船舶操纵性的文献进行了整理，对目前国内外在水动力性能、操纵性预报以及操纵性能评价等方面的研究进行介绍，以供参考。

2船舶运动模型发展

船舶操纵性的分析是以运动方程为基础的，因此，船舶运动方程及模型推导是研究船舶操纵性的第一步。水面船舶与水下航行器的运动姿态有着较大的不同，各国对于水面及水下航行器运动模型的研究为船舶操纵性发展奠定了基础。

2.1水面船舶运动方程

水面船舶已有上千年的发展历史，而对于船舶在水面运动的系统描述却在近世纪才得以发展。上世纪50年代Nomoto从控制的角度出发，将船舶的运动状态化简为舵角和航向之间的响应关系，精简的运动模型为船舶航行的自动化奠定了基础，但是对于运动过程的分析仅局限于舵角和航向的直接联系。60年代，美国学者Abkowitz M.A.[1]提出一种操纵性非线性方程，将船舶看做一个受力整体而不考虑船体、桨、舵之间的相互干扰，并以匀速运动作为船舶运动的平衡点，将整个水动力（惯性水动力和粘性水动力）按照泰勒级数展开，是比较完整的理论计算模型。另一方面，展开后的方程中水动力项较多，且多数不具有鲜明的物理意义，而大多数操纵性研究都涉及到船体、桨、舵的单独分析，所以整体模型因其在实际应用中计算较为复杂且不利于设计过程独立分析和资料累计而受到局限。70年代，日本拖曳水池委员会成立的船舶操纵运动数学模型研究小组（Ship Manoeuvring Mathematical Model Group）[2-4]提出了船舶运动分离模型（MMG），该模型分别以船体、桨、舵的单独水动力性能作为基础，并以简洁的耦合系数表示三者的相互影响，可以直观地表示作用于船体上的流体水动力。同时，由于每一项水动力具有明确的物理意义，各个水动力即可利用试验求解，很好地处理了船模试验与实船之间的相关问题，对于船体、桨以及舵的水动力特性及耦合作用研究有着重要的意义。

2.2水下潜器运动方程

与水面舰艇不同，水下潜器的运动是三维的多姿态空间运动，同时潜器的空间运动常常伴随严重的非线性，且水平面和垂直面运动的强耦合作用也使得潜器的运动分析更为复杂，这也成为潜器运动描述的难题。近些年随着各国对海洋军事的战略需求，各国在海洋军事装备的研发也突飞猛进，以潜艇为代表的水下潜器逐步朝着大型、高速、低噪声、高度自动化的方向发展，这对于潜器的运动分析也提出了更高的要求。1965年，美国海军舰艇研究和发展中心首次发表了潜艇标准运动方程[5] 。1967年美国泰勒海军舰船研究中心（DTNSRDC）的Gertler.M和Hagen.G.R等人[6] 对原方程进行了改进，以运动参数的Taylor级数展开到二阶项的形式来表达水动力系数，提出了潜艇六自由度方程，并以此进行潜器操纵运动的预报和评估，补充了大机动运动有效范围为攻角90°的极限情况，使得方程能够作用于包括常规操纵和大倾角大机动时的六自由度下的运动响应和轨迹。1975年Feldman.J[7] 对上述方程进行了修订，很好的改进了潜艇稳定性、操纵性以及控制的预报精度。改进后的方程预报与实艇资料有很好的相关度。针对改进方程，DTNSRDC还发表了修正的潜艇标准运动方程[8]。除了上述模型之外，其他一些国家也都拥有自己的潜艇数学模型，如挪威Fossen[9]基于牛顿-欧拉和拉格朗日公式建立的矢量水下航行器运动方程，原西德IKL（吕贝克工程公司）的潜艇运动数学模型[10]、Captain James.L[11]、埃德加.罗密欧[12]的六自由度运动方程等，但这些模型大多是由DTNSRDC发表的二组方程式改进和补充而成的。

3船体操纵性水动力特性

传统的用来获取水动力导数的手段主要有数据库或回归公式法、拘束船模试验法、理论与数值计算法以及系统辨识等。数据库及回归公式法在船舶行业有着悠久的应用历史，通过大量船舶资料的搜集整理而建立的数据库可以反应出某类或某些特定船型的总体性能，通过与历史船型数据的对比可以获得现有船型的水动力性能。但针对新型船舶的水动力特性只能与相近船型比对内插得到，该方法只能得到相近似的船舶特性，准确度较差；拘束模型试验在船舶设计和性能分析中都有着广泛的应用，利用拖曳试验、悬臂试验以及平面运动机构试验（PMM）等可以得到作用于船体上的相关水动力导数，船模试验数据作为验证数据具有较好的可信度，广泛应用于数值模拟的结果验证。但是模型试验周期较长且经费需求较大，同时模型与实体之间的尺度效应对于实验结果的影响依然有待验证；计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）是近年迅速发展成型的较为火热的一门流体计算模拟技术，因其信息量大、周期短、经费需求较低且能直观模拟和反应流体性能等优点已经在很多领域投入使用，目前在船舶领域有着广泛应用。但是，计算机模拟结果的真实性和准确性需要由大量实船或模型试验加以验证。

3.1国外研究进展

近些年国外对于船舶水动力的研究成果颇多。Dubbioso[13]在其文章中对不同尺度双舵双桨船舶的水动力特性进行了分析描述，并将模型试验数据与RANS数值模拟结果进行了对比说明。Shigunov[14]等人对5艘集装箱船模在不同海况下紧急操纵时所受的拖力进行了数值模拟，并对船体所受拖力进行了预报。尺度效应在船模试验中一直存在且难以预测，Quadvlieg和Tonelli[15]利用系统参数法对KVLCC2船型进行研究，通过数值模拟方法成功量化计算出了船舶操纵中的超越角以及战术直径的尺度效应的误差数量级，可以很大程度上减小船模试验误差，提高实验数据的准确度。Jacquin E [16-17]采用南特中央理工学院开发的求解器计算了KVLCC2M船舶的斜航、首摇运动时所受的纵向水动力和首摇力矩。荷兰航海研究所MARIN研究人员ToxopeauS.L [18-19]采用MARIN内部求解器PARNASSOS，基于粘性流方法对某一艘裸船体操纵的水动力导数进行计算，但是并未考虑自由面兴波的影响以及船体—舵或者船体—螺旋桨的相互干扰，同时采用细长体方法使用试验和粘性流计算了线性操纵水动力导数。

水下航行体在水下微速潜浮、水下倒车、应急上浮以及事故挽回过程中，其运动状态和参数变化与正常机动时有很大的不同，这些都是大角度的空间运动，航行体不同方向上的运动有明显的耦合作用，因此其大攻角机动时的水动力特性较为复杂，也一直都是水下操纵性水动力的研究热点[20]。模型试验对于研究船舶水动力特性有着非常重要的作用。国外在固定角度的水动力和力矩测试方面已经很成熟，并逐渐从单一参数的攻角或漂角操纵性水动力试验转向运动参数耦合状态下的水动力测量Kenneth[21]。法国国家航天研究院（ONERA）的FARCY[22]利用大攻角飞行器操纵性数值计算法分析水下航行器运动，ONERA进行了大攻角的风洞模型试验，测量出大攻角情形下的水动力和力矩，并研究了大攻角状态下漂角对横滚力矩的影响。Whitflid[23]利用维吉尼亚技术风洞实验室开发的动态测量装置DyPPiR完成了DARPA2模型试验，在一定的攻角和漂角范围内进行定常和非定常水动力试验模型，通过一系列不同攻角、漂角（-26°＜α，β≤26°）的非定常试验获得了大量数据。数值模拟技术在水下航行器水动力研究中也有着广泛的应用。美国泰勒水池成立了规模庞大的DARPA SUBOFF研究课题组[24-25]，首要目的是为CFD模拟技术提供有效的对比试验数据库，从而更好的分析和评估CFD技术的设计处理问题。同时，泰勒水池也对SUBOFF模型进行了大量的模型试验，提供了有效的速度、压力、摩擦力、雷诺应力等大量水动力流场数据，为数值计算研究人员提供了可靠的数据交流平台。Atkins[26]利用数值模拟的手段研究了俯仰角在-16°到16°之间的三个不同状态下的垂直面操纵性水动力，并指出CFD在水下航行体设计过程中的辅助优势。

3.2国内研究进展

船模试验水动力测量对于船体水动力测量方面有着重要的作用，目前仍旧在很多国家广泛应用。国内在水面船舶水动力特性的研究方面也进行了大量工作。在ITTC的大力推动下，各国都在积极开展标模试验数据的收集工作。针对ITTC推荐的KCS船型，上海交通大学[27] 基于细长体理论对KCS船型在浅水中的操纵性水动力进行了计算，利用经验公式进行了验证比较，但并未进行试验数据对比。中国船舶科学研究中心[28] 进行了悬臂水池的半约束船模操纵性试验，为典型KCS船型数值模拟提供了有效的基准试验数据。李东荔 [29]等利用最小二乘法对船模试验得到的线性水动力及水动力矩拟合得出水动力系数，数值计算结果与理论计算值吻合，表明此法可用于复杂水动力导数计算。水下潜器操纵性及运动稳定性以潜艇和鱼雷外形平台为主。中国船舶科学研究中心[30] 基于风洞和悬臂水池操纵试验对扁平型水下航行器的水动力特性进行了研究，提出扁平水下航行器可以采用潜艇六自由度标准方程框架，但其垂直面垂向力系数较大，耦合作用及非线性较显著。其垂直面动稳定性的裕度很大;尾升降舵的速度升率较高,在高航速下造纵倾能力很强;水平面不稳定性系数相对较小,回转直径相对较大;空间藕合运动效应显著。庞永杰[31] 等人通过对无桨和带桨全附体潜艇模型的拘束模型试验，拟合得出潜艇无因次线性水动力系数，对比结果证实螺旋桨的存在对潜艇操纵性水动力的的影响。王波[32] 等通过对某鱼雷型水下机器人进行水动力模型试验得到潜器阻力曲线，绘制出了水平斜航和垂直斜航受力随攻角和漂角变化的曲线并将其回归成与漂角或攻角相关的表达式，得到了与操纵性能相关的主要水动力系数。

系统辨识是自动控制学科重要的分支，并被成功利用到船体水动力辨识中。国内近些年在这方面也有一定的研究，哈尔滨工程大学刘建成[33]等利用极大似然法对水下机器人的水动力系数进行了辨识，最终通过仿真结果验证了其可靠性。系统辨识在水下航行器水动力研究中也有所应用，朱怡[34] 在研究了水下潜器操纵性与水动力系数关系的基础上，提出了水动力系数敏感性指数指标，对原式进行简化，并利用卡尔曼滤波器对一阶水动力进行参数辨识。马岭和崔维城[35]等对载人潜水器水平面动力学模型的系统辨识进行了研究，基于最小二乘法，以收缩映射遗传算法为辨识方法，进行了载人潜水器水动力系数的系统辨识，从而获得水平面动力学系统数学模型。

数值模拟及CFD技术是近些年出现的较为先进的计算手段，在航空航天以及船舶行业都有着广泛的应用。大连海事大学[36]廉静静采用CFD数值计算方法分别对DTMB5414舰船、KCS船型以及“育鲲”轮进行了数值模拟及实船数据对比，对KVLCC2M船模进行了斜航粘性流场的数值模拟得到了较为准确船舶水动力导数。杨路春[37]等利用CFD技术和动网格技术对小振幅的平面运动试验进行数值模拟，成功求解了SUBOFF主艇体的水动力导数，通过与混合分步法计算得到的附加质量进行比较，验证了此法求解水动力系数的可行性。李冬荔[38] 利用Fluent的UDF功能，采用动网格技术及其后处理系统，对粘性流场中的船舶水动力进行数值模拟，基于最小二乘法的曲线拟合得到了船舶操纵性水动力导数，结果表明纯横荡运动和纯首摇运动的水动力与运动无因次频率呈现较好的线性关系，间接验证了所提出的计算方法适用于复杂船舶运动的水动力导数计算。刘祖源[39] 等对水下航行体近海底运动水平面及垂直面水动力特性进行研究模拟，结果表明近海底运动航行使潜艇机动性减弱而运动性增强。王庆云[40] 等人对系列舵翼SUBOFF潜艇完成了阻力性能模拟并通过三角网格的面元法计算程序求得附加质量，进而得到水动力导数，为潜艇舵翼设计布局提供了参考依据。

无论是水面还是水下航行器，水动力测量对于运动模型的确立以及后续预报都有很大的影响，目前主流测量方法比如船模试验、计算流体力学及数值模拟已广泛应用于水动力测量中，且新的技术方法还在陆续出现，计算精度也在不断提高。

4操纵性预报

为确保安全高效的航运市场，世界各国都在积极应对船舶研发面临的各种问题。在新船设计初期，通常只需要确定船体、桨及舵的主要参数，并利用这些参数对船舶操纵性能进行预报，以确定操纵性能优劣。目前，国际上用于船舶操纵性预报的方法主要有数据库法、船模试验法、数学模型仿真以及基于CFD技术的数值模拟。如上章所述，通过对船舶水动力特性的分析和计算，建立符合实际工况的船舶运动模型，即可利用计算机技术对船舶运动进行预报和演示，相比与传统的理论计算和船模试验，数值模拟技术更直观的反应出船舶运动中各种姿态，甚至可以发现物理运动的新现象，目前已经成为船舶操纵性预报的主要手段。

静水中船舶操纵性问题已有较多的研究结果，且在实际工程要求均满足误差范围。大连海事大学张显库[41]等基于SPSS软件的分析和统计功能，采用多项回归法对59艘船舶（包括渔船等中、小型船舶）的K、T指数资料进行统计分析，最终回归出更具普遍性的估算公式，通过增加船舶种类和数量得出的新回归公式可以更好的预测各种常见船舶的操纵性指数。武汉理工大学罗薇[42]等采用Visual C++与实船资料库结合开发的计算机仿真程序，采用分离模型（MMG），计算过程中考虑船舶后半部分的水线面系数、 菱形系数及操左右舵时不同整流系数对其水动力系数的影响 , 从而获得较以前更为满意的船舶操纵预报结果。上海交通大学[43]吴召华等利用Fluent软件，运用一种便捷描述的体积力模型代替螺旋桨作用，从而较为完整的预报了船舶定常回转运动，证明了其在工程应用的价值。随着科技发展，研究人员一直都在积极探索更加准确的新方法。唐晓光[44]、张建[45]等将神经网络方法运用在船舶操纵性研究中，通过建立神经网络模型对静水中船舶操纵性能进行预报，通过与数值仿真预报结果的对比验证了神经网络预报的优越性，同时也提出在神经网络应用中可能会陷入局部最优解以及学习网络建模参数的选取难题，这两方面需要进一步研究探索，使神经网络应用更加精简便捷。

相较于静水中的操纵性预报，波浪中船舶操纵性由于涉及到波浪环境力的影响一直是操纵性水动力研究的难点。上海交通大学朱冬健[46] 等基于统一理论，考虑横荡、纵荡及艏摇平面三自由度操纵和横摇的耦合，按照MMG方程建立了四自由度模型，采用耦合模型叠加波浪力的方式预报了船舶在波浪中的操纵性，并通过试验数据验证了其准确性。中国船舶科学研究中心[47] 沈定安等建立了考虑横摇的四自由度操纵运动模型，船体、桨、舵水动力采用相近船试验结果或估算公式；船体 、桨、舵相互干扰系数依据该船 、桨、舵要素及其在船尾布置情况, 并参照国内外试验结果选用；附加质量主要采用元良试验结果。并认为回转漂移的主因是波浪侧向漂移力，回转横摇是由波浪扰动力矩引起的。计算中还考虑了波阻增加。最后利用此模型对某工程船在静水中和波浪中的Z形运动和回转运动进行预报，并通过自航模试验进行验证，结果表明计算和实验结果比较吻合，证明文中所提供的方法可以用于静水和波浪中船舶运动的预报。哈尔滨工程大学吉春正[48]通过对风浪流中滑行艇操纵性的研究，建立了兼顾操纵性、耐波性及动稳性的船舶六自由度MMG运动分离方程，并分别研究了船舶在风、浪、流等外界环境干扰下的船舶操纵性，预报了船舶在静水中以及在风浪流外界干扰下的运动情况，并通过与模型试验数据对比验证了预报运动的准确性。

水下操纵性数值预报的目的主要是建立辅助操纵性设计与虚拟评估的精确预报技术，目前，现有的数值预报方法已经较为成功的应用于常规船舶水动力性能预报，但水下航行器大幅度机动时的水动力数值计算仍需进一步探索。中国船舶科学研究中心[49]潘子英等应用七参数线型模型、采用均匀设计试验方法，设计了一个系列28条潜艇主体类水滴型模型，通过数值模型试验和回归分析，提出了潜艇主体操纵性水动力的估算公式，通过与试验结果对比证实了其在工程应用中的可靠性。海军工程大学[50]沈建森等基于Matlab/Simulink的计算机仿真功能，利用矢量化建模的方法建立了六自由度数学模型，仿真结果表明了此方法的可行性。华中科技大学[51]冯雷等对于装有旋转装置的水下航行体（如潜艇）等进行了操纵性研究，在潜艇六自由度的基础上结合旋转装置陀螺力数学方程，得出考虑陀螺效应的运动方程，通过Matlab数值仿真发现在一定条件下旋转装置的陀螺效应对于潜艇运动的影响是不可忽略的。华中科技大学[52]杨玉伟针对潜艇大机动时的水动力特性进行了研究，通过研究螺旋桨负荷变化对潜艇水动力的影响以及大机动耦合运动时水动力特性，建立了考虑潜艇大机动非线性力作用的数学模型，更适用于潜艇大机动的数学仿真计算。武汉理工大学[53]王安学、刘晓静以标准潜艇运动方程为基础，利用Visual C++设计开发了水下航行体运动预报系统，数值模拟结果显示其具有较好的可行性，能够较为全面地对水下航行体的空间运动进行预报。

5操纵性评价

5.1操纵性评价的意义

船舶的操纵运动是一个较为复杂的过程，船舶在运动过程中除了要受到推动设备驱动外，还要受到风、浪、流等各类外界环境的影响。对于潜艇等空间耦合运动复杂的航行体，评价标准的建立也是较为复杂的。到目前为止对于操纵性的衡量主要有：直线稳定性、回转性、纠向性、初始回转性、应舵性、车舵效应、航向改变性、制动性、停车性、低速航行性、倒车性等，可以针对不同侧重点进行有效评判。操纵性的衡量指标有稳定性指标T、回转性指标K等几十种，由此可以看出操纵性评价是一个极为复杂的过程，因此，对于操纵性的评价还需进一步的研究。有了合理的操纵性预报技术以及操纵性评价衡准，就可以在船舶设计阶段对设计方案进行有效的衡量评判，保证船舶操纵性达到要求。同样也可以对现有船舶进行评价，发现不足，采取有效的措施来提高船舶操纵性。

通常来说，船舶操纵性可从回转性、航向稳定性以及航向机动性这三个方面研究。目前用来衡量船舶操纵性的指标主要分为两大类：一类是“直接判据”，例如旋回实验中的旋回圈直径、战术直径，Z型试验中的超越角滞后时间，停车试验中的最短停船距离等。另一类是“间接判据”，比如旋回性指数K、追随性指数T以及舵效P等。直接判据可以有效直观地看出操纵性与操纵运动优劣的关系，间接判据可以有针对性地对船舶运动某一特性进行判断。事实上，船舶操纵性评价除了与船舶本身性能有关外，还与外界气象、海况以及操船者技能等多方面有关，所以在操纵性综合评价中均应适当考虑这些因素作用，使得评价结果与实船航行更为吻合。

5.3船舶操纵性评价方法

由以上内容可知船舶操纵性的评价复杂繁琐，而且多个指标之间存在一定的制约甚至矛盾关系，而船舶操纵性能优劣与否不能只由一个或几个指标简单说明，是多目标因素的综合问题。考虑到船舶操纵性评价的复杂性，人们逐渐尝试用模糊数学方法对操纵性进行评判，目前已经有不少成果。周军[54]等人利用多级模糊评判的方法，选取对低速变质量水下航行器操纵性影响较为显著地性能指标建立了评价因素集，采用岭型分布隶属度函数计算了评判因素集评判矩阵，运用模糊层次法确定了各评价因素集的权重集，通过模糊运算得到了操纵性模糊评判结果，操作简单，具有较高的可靠性。天津大学[55]边东东利用模糊综合评价的理论与方法构建了评价AUV整体操纵性能的三级评价体系，分别从稳定性和机动性两个角度综合权衡水动力特性，分别对两种AUV方案操纵性进行了评价对比。张涛[56]等人采用熵权法—模糊集建立了操纵性综合评价体系，采用模糊综合评价方法和离差最大化法验证了其有效性，阐述了熵权法—模糊集不仅在理论上具有优越性，在实际应用中具有可靠性，更适用于操纵性综合评价。集美大学[57-58]熊云峰等人对船舶操纵性灰关联分析法进行了较为深入的研究，通过将加权的灰关联分析法分别与层次分析以及逼近理想解法的结合使用，充分发挥了两种方法的优点，将定性和定量分析有机结合起来，通过加权处理较为全面的考虑了各方因素的影响，很好的处理了多指标综合评价的问题。海军工程大学[59]屈俊飞等人将离差最大化法应用到船舶操纵性中，引入加权向量和规范化决策矩阵，从而建立完整的船舶操纵性综合评价体系，将选取的两个船模的回转角速度、相对回转直径、初转期、第一超越角以及第二超越角作为评价指标对其操纵性进行分析，最终结果与船模K、T、P指数相对应，验证了其在操纵性综合评价中的可行性。

6结论

（1）船舶运动模型的建立是研究船舶操纵性能非常重要的环节，随着船体外形的多样化以及船舶功能强化，船舶运动模型也一直在根据实际需求改进，但目前的运动模型往往只能近似描述船体运动，与船体实际运动轨迹还有一定的误差。同时，传统的运动模型只适用于特定船体或工况，在复杂环境描述时需要不断改进。例如船舶在波浪中的运动描述、特殊船体运动描述、潜艇大机动时的空间姿态描述等都需要进一步研究，以推导适用面广、描述贴切的运动模型。

（2）水动力导数的计算精度对于运动模型建立有着至关重要的意义。模型试验在船舶设计及性能评估方面有着广泛地应用，但目前对于试验数据的不确定度测量仍然难以实现，试验数据需要更加精确的数学方法进行确定性分析。针对尺度效应的研究还处于起步阶段，显然，对于实验数据与实船操纵的匹配仍然需要进一步探索，以减少实验数据在实船应用时的误差影响。同时在数值模拟中的参数设置以及湍流模型的选用、拘束模型自由度控制等问题还存在很多争议，需要进一步探讨和研究[60]。

（3）随着船舶吨位的增大，船舶密度的提高，船舶事故也与日俱增，船舶的操纵性能评价也得到了各国科研人员的重视，ITTC等国际会议也明确地将操纵性研究及评价作为首要任务，目的在于通过有效的理论推导及数值模拟研究，在船舶设计初期优选出操纵性优良的设计方案，从根本上对船舶操纵性进行优化设计。科研人员致力于建立一套能够精确评价船舶操纵性的综合评判系统，解决船舶设计初期对船舶操纵性能有效设计难题以及对已有船舶操纵性合理评估问题。

**参考文献**

[1] Abkowitz M. A. Lectures on ship hydrodynamics steering and manoeuvability[R]. Hydro and Aerodynamics Laboratory. Report No.Hy-5. Denmark, 1964.

[2] 小瀬邦治、貴島勝郎: MMG報告-Ⅳ拘束操縦性試験の方法および試験装置[J], 日本造船学会誌, 第579号, pp.404-413. 1977.

[3] 井上正祐、貴島勝郎、森山文雄, トリム時の船体操縦微係数の推定[J]. 西部造船会々報, 第55号（1978）, pp.127-139.

[4] 田中進, 大きな斜航角を伴う船の操縦流体力に関する研究[M]. 1996.

[5] 陈厚泰. 潜艇操纵性[M]. 国防工业出版社，1981.6.

[6] Gertler. M and G. Hagen. Standard Equations of Motion for Submarine Simulation. Naval Ship Research and Development Center Report 2510. June 1967, AD653861.

[7] Feldman. J. State-of-the-Art for Predicting the Hydrodynamic Characteristics of Submarines. Proceedings of the Symposium on Control Theory and Naval Application, U. S-Naval Postgraduate School, Monteray, California, 15-17 July 1975.

[8] The DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motion for Performing Computer Simulation． AD—A071804．

[9] Fossen T I. Nonlinear Modeling and Control of Underwater Vehicles[D]. Trondheim: Norwegian Institute of Technology. 1991.

[10] Von Dr-lng. f. Abels, lngenieurkontor Lubeck. Dreidimensionales BewegungsverbellanVon U. Booten und dessen Simulation. (德)sonderdruck aus Jahrburch der Schiff bauteehnischen Gesellschaft 73, Band 1979. 41～47.

[11] Captain James L Movoy, USN. Prediction of A Submarine’s Trajectory by An Approximate Solution to Its Equation of Motion. Naval Engineers Journal, August 1979. 14～22.

[12] 埃得加. 罗密欧. 六个自由度水面舰船和潜艇运动方程的数学模型和计算机解. AD749063, 潜艇译文集(第六集). 30～63.

[13] Dubbioso, G., Mauro, S., Ortolani,F., Martelli, M., Nataletti,M., Villa, D. and Viviani, M., 2015, ”Experimental and Numerical Investigation of Asymmetrical Behaviour of Rudder/Propeller for Twin Screw Ships”, MARSIM2015,Newcastle, UK, 15pp.

[14] Shigunov. V. and Schellin, T. E., 2015, ”Tow Forces for Emergency Towing of Container ships” , Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.137, October 2015, 8pp.

[15] Quadvlieg, F. and Tonelli, R., 2015,”Scale Effects on Free Running Model Tests”, MARSIM2015, Newcastle, UK, 12pp.

[16] Jacquin E., Guillerm P.-E., Drouet A. Perdon P., Alessandrini B. Ship maneuvers simulation using free-surface RANS solver[C]. Proceeding of the 7th International Conference on Hydrodynamics, Ischia, Italy, October, 2006.

[17] Jacquin E., Guillerm P.-E., Drouet A. Perdon P. Simulation of unsteady ship maneuvering using free-surface RANS solvers[C]. The 26th symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, Italy, September, 2006.

[18] Toxopeus. S.L., Calculation of hydrodynamic maneuvering coefficients using viscous-flow calculation[C]. Proceedings of 7th International Conference on Hydrodynamic, Ischia, Italy. October, 2006.

[19] Toxopeus. S.L., Validation of Slender-body method for prediction of linear maneuvering coefficients using experiments and viscous-flow calculation[C]. Proceedings of 7th International Conference on Hydrodynamic, Ischia, Italy. October, 2006.

[20] 赵桥生, 杜茉, 王英杰, 方田. 国外水下操纵性数值计算及试验技术新进展[C]. 中国造船工程学会船舶力学学术委员会第八次全体会议. 2014.

[21] Kenneth Granlund. Steady and Unsteady Maneuvering Forces and Moments on Slender Bodies[D]. Doctor’s thesis. The Virginia Polytechnic Institute and State University. 2009 .

[22] Dominique. FARCY. Maneuverability of submarines[C]. Warship’99: Naval Submarine 6. London, 1999．

[23] Cindy C. Whitfield. Steady and Unsteady Force and Moment Data on a DARPA2 Submarine[M], Master’s thesis. The Virginia Polytechnic Institute and State University. 1999．

[24] S.E. Kim, S.H.Rhee. High-Incidence and Dynamics Pitch-Up Maneuvering Characteristics of a Prolate Spheroid--CFD Validation. Fluent lnc. European, 2005.

[25] Roddy, Robert F. Investigation of the stability and control characteristics of several configurations of the DARPA SUBOFF model from captive model experiments[R]. Washington D.C. David Taylor Research Center, 1990.

[26] Atkins, Cmaath, MIMA. The application of computational fluid dynamics to the hydrodynamic design of submarines[C]. Warship’99: Naval Submarine 6. London, 1999.

[27] 马兴磊, 邹早建. KCS船型浅水操纵性水动力计算. 船海工程[J]. Vol.37, No.3. 2008. 6.

[28] 赵桥生, 吴宝山, 杜茉, 方田. 船舶半约束模操纵性试验研究[C]. 船舶水动力学学术会议. 2015.

[29] 李冬荔, 王彪, 杨亮. 船舶操纵线性水动力导数计算方法研究. 中北大学学报[J], 2008, Vol.29, No.6. 2008.

[30] 张华, 吴宝山, 潘子英. 扁平水下航行器操纵性水动力特性研究[C]. 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.

[31] 庞永杰, 王庆云, 李伟坡, 王健. 螺旋桨及其运行对潜艇操纵性水动力影响的模型试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报. Vol.38, No.1, Jan.2017.

[32] 王波, 苏玉民, 蔡昊鹏, 秦再白. 鱼雷型水下机器人水动力试验研究[J]. 船舶工程. Vol.30, Supplement, 2008.

[33] 刘建成, 刘学敏, 徐玉如. 极大似然法在水下机器人系统辨识中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2001, 22(5).

[34] 朱怡. 水下潜器水动力模型简化及参数辨识研究[D]. 哈尔滨工程大学， 2007.

[35] 马岭, 崔维城. 载人潜水器水平面动力学模型系统辨识[J]. 中国造船, 2006, 47(2).

[36] 廉静静. 三维数值水池及船舶操纵性水动力数值计算[D]. 大连海事大学, 2013.

[37] 杨路春, 庞永杰, 黄利华, 张安平. 潜艇PMM试验的CFD仿真技术研究[J]. 舰船科学技术. Vol.31, No.12, Dec.2009.

[38] 李冬荔. 粘性流场中船舶操纵水动力导数计算. 哈尔滨工程大学学报[J]. Vol.31, No.4, Apr. 2010.

[39] 刘祖源, 程细得, 何汉保, 许建. 水下航行体近海底运动操纵性研究[J]. 中国舰船研究. Vol.1, No.2, Apr.2006.

[40] 王庆云, 庞永杰, 李伟波, 廖欢欢. 系列舵翼潜艇水动力系数数值计算及试验研究[J]. 舰船科学技术. Vol.37, No.11, Nov.2015.

[41] 张显库, 李元奎. 船舶操纵性指数预报研究[J]. 中国航海. Vol.32, No.1, Mar.2009.

[42] 罗薇, 边晓丽, 邹早建. 船舶设计初始阶段的操纵性预报[J]. 中国造船. Vol.45, Special, Dec.2004.

[43] 吴召华, 陈作钢, 代焱, 邓德衡. 基于体积力法的船舶回转运动水动力数值研究[J]. 中国舰船研究. Vol.8, No.4, Aug.2013.

[44] 唐晓光. 船舶操纵预报的神经网络方法[D]. 武汉理工大学, 2002.

[45] 张建. 船舶操纵性预报及评价[D]. 大连理工大学, 2008.

[46] 朱冬健, 马宁, 顾解忡, 等. 波浪中船舶操纵性数值预报及自航模验证[J]. 中国舰船研究, 2015, 10（1）:76-82, 96. ZHU Dongjian, MA Ning, GU Xiechong, et al. Numerical prediction and free-running model validation of ship maneuvering in waves[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10（1）: 76-82, 96.

[47] 沈定安, 马向能, 孙芦忠, 罗荣彪. 波浪中船舶操纵性预报[J]. 船舶力学. Vol.4, No.4, Aug.2000.

[48] 吉春正. 风浪流环境中滑行艇操纵性研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2007.

[49] 潘子英, 吴宝山, 沈泓萃. CFD在潜艇操纵性水动力工程预报中应用研究[J]. 船舶力学. Vol.8, No.5, Oct.2004.

[50] 沈建森, 朱书平, 周徐昌. 基于Matlab/Simulink的水下航行器建模与仿真[J]. 兵工自动化. 2012-02, 31（2）.

[51] 冯雷, 唐国元, 黄道敏, 肖国林. 计及陀螺效应的潜艇动力学仿真实现方法[J]. 舰船科学技术. Vol.34, No.6, Jun.2012.

[52] 杨玉伟. 潜艇大机动操纵性研究[D]. 华中科技大学, 2004.

[53] 王安学, 刘晓静. 水下航行体空间操纵性预报研究[J]. 航海工程. Vol.40, No.1, Feb.2011.

[54] 周军, 张严. 低速变质量水下航行器操纵性的多级模糊综合评判[J]. 鱼雷技术. Vol.24, No.1, Feb.2016.

[55] 边东东. 水下航行器操纵性模糊综合评价[D]. 天津大学, 2012.

[56] 张涛, 毕毅. 基于熵权法和模糊集的船舶操纵性综合评价研究[J]. 中国舰船研究. Vol.8, No.3, Jun.2013.

[57] 熊云峰, 毛悠菲. 船舶操纵性能的灰关联综合评价研究[J]. 船舶. No.4, August.2005.

[58] 熊云峰, 陈章兰, 袁红莉. 船舶操纵性评价的灰关联分析和逼近理想解法[J]. 中国航海. Vol.36, No.3, Sep.2013.

[59] 屈俊飞, 毕毅. 基于离差最大化方法的船舶操纵性综合评价[J]. 中国舰船研究. Vol.7, No.5, Oct.2012.

[60] Proceedings of 18th ITTC-VolumeⅠ[C]. 28th International Towing Tank Conference. China Sip Scientific Research Center, Wuxi, China, September.17-22, 2017.