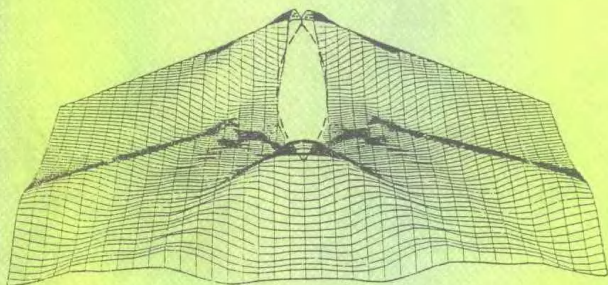


船舶设计中的 CFD 和 CAD

CFD and CAD in
Ship Design



一九九三年六月

667782

海洋技术的发展

第六卷

船舶设计中的CFD和CAD

船舶设计中的CFD和CAD国际讨论会论文集



荷兰瓦格宁根

1990年9月25~26日

格拉芬奥特米森编

前 言

由于计算机硬件性能的提高,近年来计算机应用于船舶水动力学和船舶设计有了迅速发展。

在船舶水动力学领域,研究、发展了不同的预报静水阻力和操纵性能的方法。这些方法从简单的经验方法到十分先进的计算流体力学方法(CFD)。

在船舶设计领域,计算机辅助设计(CAD)的应用主要集中于船舶几何外型的描述和流体静力性能的计算。大量的工作是注意把船舶的绘图系统和支持船舶生产过程的系统(CAM)连接起来。

在船舶设计软件中的整个流体静力计算都是为船舶设计工作者提供船舶优化设计的可能性。

荷兰海运研究所(MARIN)为此及时组织了船舶设计中的CFD和CAD国际讨论会,以便提供一个改变观念的论坛和为CFD和CAD系统的研究者和使用者之间提供一个信息。

本论文集包括下列四部分:

- CAD的发展
- 用户应用CAD和CFD的经验
- CFD的发展
- 未来的发展

MARIN衷心感谢为这次会议的成功召开作出贡献的所有论文作者、分委员会主席、讨论者和参加者。

组织委员会主席

格拉芬奥特米森先生

出版说明

在船舶设计中尽快应用先进的 CFD 和 CAD 技术已受到我国造船界同仁的高度重视。“八五”期间，国家正投资在船舶行业研究和发
展 CFD 和 CAD 系统。

翻译出版的这本论文集介绍了国际上的专家、学者对船舶设计中的 CFD 和 CAD 基本概念的理解和认识，研究、发展和应用的概况，以及 CFD 和 CAD 技术与其它技术，如试验验证技术的关系。

愿本书的面世能为船舶工业的决策部门、咨询部门和研究、设计、教学单位，以及其它行业在开展工作时有一定的参考价值。

本书的出版得到了中国船舶科学研究中心沈泓革高工的大力支持，是他积极组织人员翻译，并承担校对工作。

本书在印刷前，得到了中国船舶科学研究中心谢懋纲高工和叶元培高工等的支持，是他们对本书的全文进行了技术复校。

本书的出版得到了船舶工业总公司及其舰船技术研究院有关部门的支持，得到了中国船舶科学研究中心的支持。

在此向所有关心、支持本书的出版，向为本书的出版作出贡献的同志表示感谢。

由于时间仓促和技术水平的所限，本书中的文字和内容还存有不妥、不准确之处，敬请读者给予指正。

船舶工业总公司舰船总体技术专业组

周网孝

一九九三年四月三十日

目 录

重要论点的追述:

1. 关于船舶设计中CFD与CAD的结合..... Brouce Johnson (1)
 第一部分: CAD的发展
2. CAD方法在荷兰海运研究所的发展..... G.Glijnis (24)
3. 商船的概念设计研究模型.....
 C. 乔治斯库 F. 维伯斯 H. 布恩斯特拉 (52)
4. 偏微分方程在船型几何设计中的应用.....
 M.I.G. 布卢尔 M.J. 威尔逊 (75)
5. 利用三次有理贝齐曲线设计和表达船型.....
 J.S. 郇 S.W. 曹 (85)
6. PROSEL——推进装置选择.....
 J. 克莱恩 沃德和C.C.P.J.M. 兰达 F.J.P.H.G. 费巴司 (103)
 第二部分: 用户应用CAD和CFD的经验
7. 船型表面模拟的实践经验..... 克里斯汀·罗西尔 (119)
8. CFD对气动力设计的影响..... N. Vooigt (125)
9. 船舶水动力综合设计系统的实际应用..... Ilmo Kuutli (136)
 第三部分: CFD的发展
10. 耐波性和波阻计算的自动面元生成.....
 Peter S. Jensen (151)
11. 耐波性理论加入CAD中应用.....
 O. Faltinsen T. Svensen (166)
12. 商船自由表面势流计算.....
 W. 范丹伯格 H.C. 雷佛 H.H. 瓦伦克霍夫 (188)
 第四部分: 未来的发展
13. IDEAS——交互设计、评估和分析系统.....
 N. Salvesen (210)
14. 水下物体性征外形综合设计法和性能分析.....
 D.E. Calkins M.A. Razzaghi (223)
15. 早期设计阶段中设计指导系统的开发.....
 伯特·布拉斯 沃尔 F·史密斯 法洛克·密斯特里 (250)
16. 船舶设计中的水动力性能预报——试验还是计算?.....
 范·奥特默森 (G. Van Oortmerssen) (265)

关于船舶设计中 CFD 与 CAD 的结合

Brouce Johnson

美国海军学院)

会议中心发言

1. 引言

在这次国际会议上,由我来讲演船舶设计中的 CFD 和 CAD,深感荣幸。我既没有编制流程图或 CAD 程序包,也没有对从事这项工作的研究生作指导。我的以下浅见是根据:

(1)若干年前在湍流及连续介质力学方面所取得的研究结果[1]。

(2)近以来,在使用各种 CFD(计算流体力学)及 CAD(计算机辅助设计,主要是船体几何学方面)过程中所取得的经验并认识到因缺少集成设计系统而导致的种种无能为力。近廿年来,在船舶及运载器的流体动力设计过程中已使用了各种确定性的支撑工具,设法提高这些支撑工具的效能已是我工作的中心任务。

引述 1990 年 SNAME 年会上我和他人合作的文章中的部份[2]:

“充分利用和选取库存数据的船型流体动力设计集成系统的优点是显而易见的。一个既已完成了的(即使这一综合还不是充分的)且又极好的例子是由 MARIN(荷兰海运研究所)为东南亚地区设计的 SL7 级高速集装箱船[3]。尽管该船曾做了大量不同球首及尾型方案的模型试验,但仍不能达到预定的设计航速指标,而 MARIN 在不长的时间内,根据他们的库存资料,开发了一种船型。试验表明该船型优于先前的任何一种设计方案,且达到了 33 节这一设计所需的航速。值得注意的是:如果出现了这样的一种情况,即这种航速为 33 节的船舶的球首和尾型,纵然用了以回归库存资料为基础的“第一流水平”的计算方法也几乎没起指导作用时,才广泛地作新船型的模型试验。如果 CFD 能象这次会议上讨论的那样,可综合成 CAE/CAD/CFD/CAM/DEMS 系统,那么可认为此系统对今后解决上述这类问题将更有效”。

“因此,如果船体几何法则、CFD 程序、模型水池试验以及其他的船体形状设计工具能相互有效地联接并且也能和标准化格式的中间数据库联接起来,那将对船舶设计单位更有用。该数据库储存了来自以前种种船舶设计方案的船型及螺旋桨的几何要素资料,同时还储存了与其相应的、根据模型和实船试验得到的流体动力性能资料。使用设计工具的计算机联网系统,造船工程师就可正确、迅速地对其设计方案作流体动力性能的优化或其他具有相近使命要求的船型方案作比较”[2]。

有大量使从初步设计到生产制造的有关制造过程数据(产品定义)电子流动标准化的国际性程序[4]、[5]。这些产品生产周期的各阶段共花去了总成本的 95%左右,所以,即使在投入生产前,仅对设计方案作少许修改时能使这些资料的标准化程度更高些,就能大大地节省成

本, 据估算: 一般占总成本费的5%还不到的概念设计, 会使下阶段中所需费用的40%—60%受到影响, 并且在设计和生产的主要阶段中, 因改变设计所花的费用也会大大地增加〔6〕。

下面我们看一下运载器综合设计系统, 尤其是船型设计时水动力分析的发展史和近期发展情况。就船舶设计过程而言, 水动力分析能成为“相合工程”(Concurrent Engineering)费用的重要组成部份。

2. 运载器集成设计系统的发展

为了减少复杂系统设计过程中的成本和时间, 从而也是为了减少订得生产的环节, 最大规模的尝试之一是IPAD(航空及宇航空间运载器设计集成程序)计划, 该计划为政府和行业部门于1971—1984年期间进行的合作开发项目, 耗资三千万美元, 先由NASA(美国国家航空和宇宙航行局)主办; 后由美国海军主办(Fulton〔7〕); 1976—1984年期间又由美国波音(Boeing)商业飞机公司主办。根据Miller的文章〔8〕:

“就总目的而言, 需要的是这种交互式的计算机辅助工程(CAE)系统: 具有和设计过程相关的、包括制造过程中各接口在内的支撑工程数据的能力。该系统在整个设计阶段及以后的制造过程中, 为管理和工程技术人员服务”〔8〕。

IPAD计划的目的是通过运用包括开发未来的CAD综合系统母型在内的较佳CAD/CAM, 以提高航空和宇航空间运载器的生产能力。

IPAD计划展望了一个四周由共用的相关信息使用(RIM)数据库管理系统构成的球形数据库处理系统(见Blackburn)〔9〕。储存必需的几何资料, 并包括最初的图解法总现的使用说明书在内的(IGES)各种组合方案是来自使用波音公司的CAD/CAM集成信息网络(CIIN)、通用电器之中性数据库(General Electric's Neutral Database)〔10〕以及其他方法〔11〕所取得的经验。Fulton〔7〕作了这样的总结:

“...成功地利用CAD/CAM技术的关键是单一的产品定义数据库, 该数据库还包含了正在构思或建造的产品方案的电子器件说明书。...(但是), 还不适用于商业上的关键数据的使用要求却能用不同厂商的计算机来处理统一的CAD/CAM信息。...(因此)放弃了集成软件系统的原先意图, 因为这是大花钱了, 对NASA而言又是不适宜的, 而且又不是最好地利用了有限的R & D资源”〔7〕。

2.1 船型设计/制造支撑数据库的开发

今天在船舶、飞机和陆上运输工具设计的许多方面都有了大量的设计/制造支撑数据库。它们最频繁的往往是储存以往的概念设计过程细目以在制造过程中使用。这些细目有: 图号、重量估算、平面布置图、部件清单、结构细目以及生产产品或系统所需的其它资料。如果人们认为基本的船舶设计是一个所谓的螺旋形阶段(见Taggart〔12〕中的图3), 那么现有的集成数据库开发工作大量地集中在按合同进行的初步设计过程和细目设计及制造过程输出的接口, 也即集中在CAD/CAM/CIM(计算机辅助设计/计算机辅助制造/计算机集成制造)的连接上。从船舶生产周期来看, 节省成本被认为是

最重要的”。

2.2 专用的船型水动力设计支撑数据库的发展

不少机构都已建立了储存拖曳水池和风洞资料的数据库,以支持船型设计过程各阶段的研究、分析和进展。各机构利用这些由Johnson〔2〕作过讨论的数据库,对种种运载器的性能作比较性的研究,这些运载器的特性都落在它们的数据库范围内,除了新近国际拖曳水池会议(ITTTC)组织内的讨论以外〔13〕,对概念设计中的水动力分析比较阶段及初步设计时的实船性能预估阶段的中间数据库转换标准格式的开发建议还没有进行研究。这不仅可能是由于各船舶设计方案的固有特性所致,而且也可能是由于这样的事实引起的:早期的比较性分析研究仅是大型船舶寿命期成本费的一小部份,并且除了极少数是例外,在船舶设计/制造的下一阶段,不再用到流体动力性能的分析 and 比较。但是,无论什么原因,中间数据库的比较必然受到“硬拷贝”数据转换的限制,这是因为几乎所有的专用的流体动力设计系统,在目前都缺乏对流体动力的数值数据作相互转换的能力。

因此人们并不感到惊奇的是:尚不能用CAE/JAD/CFD/CAM/DBMS集成系统来鉴定已设计好的船舶,虽然该集成系统把有效的计算流体力学(CFD)工具,与含有能容易地检索那些使命要求相近、以前已做过试验的运载器的几何及性能特征信息的数据库直接地联系在一起。

但是令人吃惊的是,尽管飞机工业在EPAD计划期间有了发展,然而显然还没有用上综合的空气动力学设计数据库系统。人们可以预料到:那些飞机的设计和制造合在一起的公司,在专有资料交换的问题上,比起那些仅有单一的设计、试验或建造机构的非一体化的部门来要少,可是因为设计/建造部门往往有产业合伙人和分包合同者,他们的计算环境各不相同,因此在与运载器有关的各种性能的概念设计阶段,出现在性能资料交换上的问题几乎是所有方面的。

2.3 专用的流体动力设计支撑系统

2.3.1 MARIN(荷兰造船研究所)

1983年MARIN在荷兰海军的支持下,开始研究高速舰船概念设计的集成系统,即HOSDES。迄今已开发的最高级的船舶集成设计系统中,HOSDES便是其中之一。

HOSDES包含了CAD(绘图)系统、CADAS(计算机辅助设计分析)模块和HYDDB(水动力设计数据库)能力。有不少文章(Koops〔14〕、Ocman〔15〕、van Oossanen〔16〕、Koops〔17〕、van Oortmeressen〔18〕、Glijni〔19〕、Koops〔20〕)都对含有如下单元的HOSDES系统作了描述。

(1)支撑系统包含有一个系统处理子系统、一个用户界面管理系统(UMIS)、一个与切片算法有关的数据库管理系统(DBMS)“MIMER”和一个设计者指导子系统(“辅助”专家系统)。

(2)应用系统包括了船体几何形状、动力、质量分布、流体静力学、运动、强度、流体力学、持久性和主机配置的软件分析程序的各种计算能力(computational levels)。

现今的HOSDES系统为了把商船包括进去,已作了扩展(成了Glijni〔19〕所

讨论的 MARDES)。我们都期望在这次会议上更多地了解到这方面的东西。

2.3.2 BMT (英国海运技术)

在论及 BRITSHIPS/BRITDES 系统的不少文章 [21]、[22]、[23] 中, 已对 BSRA (英国船舶研究协会) / BMT 所用的各种 CAE/CAD/CAM 软件程序作了评述。BRITSHIP'S 的 CAD/CAM 系统和 BRITDES 系统直接接口。Johnson [2] 对与 BRITDES 连结的 HYDBSTARTER 数据库作了讨论。

2.3.3 其他的水动力设计支撑系统

Johnson [2] 还对论及各种其他的专用的水动力设计支撑系统的许多已发表的文章作了总结; Ames 对以船体光顺程序为基础的典型的个人计算机/工作站作了回顾 [24]。我期望在本次会议上能听到其他一些作者讨论综合水动力设计支撑系统。

2.3.4 综合的“流体数值计算”系统

SAIC 的 Nils Salvesson 预定要讨论 IDEAS, 即在这次会议上要讨论交互的设计、评估和分析系统。IDEAS 目前属于 Annapolis, MD 中的开发项目, 并在 1990 年的 SNAME (美国造船和轮机工程师学会) 年会的“流体数值计算”小型会议上, Fritts [25] 将对此作评述。IDEAS 将把阻力、适航性以及性能评估的各种程序收编在一起, 而这些程序是以方便于使用者的船体几何形状设计程序包 (美国海军学院的舰船设计专业研究生用的就是这种程序包) “FASTSHIP”为依靠的。IDEAS 最终将与 U.S. Navy (美国海军) / U.K. (英国) “军船”型设计数据库 (HDDS) 连结起来 [2]。

也就在 1990 年的 SNAME 年会上, Lars Larsson [26] 将论述由 SSPA (瑞典海运研究中心) / FLOWTECH International, A.B 所研制的 SHIPFLOW 设计支撑系统, 该系统由一整套计算船尾区域内有自由表面势流、边界层以及粘性流状态下的 CFD 工具所组成。(本文的下一章节中将讨论这些问题)。对于与船体几何形状 CAD 系统的结合程度这一问题, 在以前的文献中还没有论及。

3. CFD 在运载器设计中的近况

一般都认为, 飞机和高性能游艇的设计单位是在运载器制造的设计过程中用计算流体力学方法作为重要工具的先驱。为了优化那些取决于运载器流场详细描述的性能, CFD 已经和风洞及拖曳水池的试验合在一起, 较有效地应用了。在本章节中, 将对证明成功地应用 CFD 的事例作一回顾, 这种证明是通过实艇 (机) 的性能试验来给予一定程度的验证的。

3.1 CFD 在航空工业中的应用

最近关于“CFD 在复杂形体上的应用”的有价值的全面的评述, 美国波音公司的 Edward Tinoco [27] 发表了著作。根据他的著作:

“CFD 已和风洞及飞行试验合在一起, 成为空气动力学设计的主要技术。... 今天, 已被认为: 要是不靠 CFD 的研究结果来洞察问题, 飞机或许就不能有效地飞行。... 目前的飞机, 在对共作诸如增加新引擎、天线或探测设备舱等这些更改后, 只要在 CFD 分析的基础上再做些甚至可不作风洞试验, 就可飞行。... 为了对如此复杂形体的设计

有所帮助,工程技术界需要能如实地反映出占统治地位的流动物理现象以及所需的几何形状组合的种种计算工具,同时这些计算工具还要能及时又可靠地给出结果解。这样的要求对任何一种单一的方法来说,是一道困难而且迄今尚是空白的指令。将采集到的可不同程度地满足上述要求的各种CFD工具进行装配已是工业上所采用的方法”〔27〕。

因此, Tinoco对那些什么才是他所谓的“生产工具”作了辨别,所谓“生产工具”是指它的适用范围已被大量地证明为有充分依据的且可由“非熟练”的CFD用户操作。它包含了不少全势流计算法和最多的种种线性网格法。“熟练用户”的计算程序一般要求更复杂的流场网格生成。在巨型计算机上演算且含有以Euler和/或Navier-Stokes方程为基础的多种计算方法。再引用Tinoco的评述:

“对某一特定问题,要选用什么样的流动物理现象表达式,就需要用户对什么样的物理现象是恰当的有一定的概念。...经验表明:建立在线性势流和全势流表达式基础上的各种方法,要比那些已被实践采用的、以Euler或Navier-Stokes方程式为基本的方法有更高的精确度”〔27〕。

新近由波音公司的Goldhammer和Rubber〔28〕发表的另一篇文章提出了这样的观点:虽然流体力学界始终对尽可能精确地模拟流体的流动这一问题感兴趣,但是:

“今天的CFD研究人员对物理观察与数学公式之间的结合或许不是这样地紧密。很多流体力学基本方程的解都是由数学家们和那些设计巨型计算机的计算机科学家们未做的,他们用数值近似法来求解这些方程。...然而,这些解对改进飞机机架设计技术来说,实际上仅仅是提供工程工具的开始”〔28〕。

Jameson〔29〕在1987年第八届AIAA CFD会议上作的中心发言中,也谈到了这方面的问题:

“湍流度的差异竟是如此地大,以致于如不对计算技术作根本性的改进,就不可能实现对湍流的直接模拟。...目前,在模拟粘性流分离方面的进展,虽然也依赖于计算方法的改进,但更依赖于改进湍流模式”〔29〕。

宇宙空间研究及开发顾问小组(AGARD)曾多次举办了有关CFD各方面的专题小组和工作组会议。新近的二次会议概要就运载器设计中应用CFD时的关键问题提出了很好的、反映技术发展水平的见解。AGARD的咨询报告NO.257是一份1988年流体动力小组会议关于CFD计算程序验证的技术评价报告,该小组会议的执行主席之一,

R.G.Bradley就应用于船舶水动力学的“验证性”(Validation和“校准性”(Calibration)作了如下的区分,而且“要得到成熟的CFD能力,需有这四种类型的试验,即:

- (1)用以了解流动物理现象的试验
- (2)用以建立物理模型的试验
- (3)用以校准CFD计算程序的试验
- (4)用以验证CFD计算程序的试验

对于CFD数值解及试验数据的误差范围,都必须小心地定出”〔30〕。

作为CFD验证性的会议虽然宣布了这些,但由Sacher〔30〕给出的评估报告却注意到:现今有的大量的各种计算机程序,即“软件功能”的文章中,至少有50%是属于

于商业性的（在许多空气和流体动力学数值计算方法的会议上存在着这个问题），在 Sacher 的结论中说到：

“在风洞试验时，用于验证计算程序的数据库必须专门设计并小心地执行以外，还应对所有的边界条件作专门说明。……（在这方面）作“外流计算的人力”似乎比作“内流计算”的组织得更好”（30）。

要作这一评论就得涉及甚为合适的试验数据库（没有详细说明的数据格式），尤其是在受外流计算方法支配的涡流验证这一特定情况下。Sacher 指出：内流的验证（尤其在高雷诺数时）缺乏试验数据库，内流情况下的物理现象由大范围粘性剪切层区域及粘性伴流所控制。

AGARD 咨询报告 NO.256（31），是对根据还在发展的计算流体力学作阻力分析和预估的技术发展水平以及由荷兰 J.W.Slooff 所写文章中的结论的评述。在这次会议上，重提一下 Slooff 的几个结论是值得的：

·“用 CFD 来计算复杂形体的阻力绝对值，其精确度和吻合性除非得经过相当长的一段时间，不然是达不到的，这是不用惊奇的，因为网格生成、湍流模式、网格解题以及计算机的速度都尚有难题”。

·“问题的结症所在正是流态分离时不合适的湍流模式和不恰当的网格结构与精细程度连在一起了，即使在二维机翼流情况下，虽不是全部但却是大数目的计算程序对其阻力的估算精度仍约在 5% 以内（‘但起飞后的机翼就不是这样了’）”。

·“典型的 Navier-Stokes 计算程序尚没有把除了二维机翼流以外的阻力预估包括在内，甚至那时所做的这种程序还不见得比对势流作了考虑的那种分区法或与边界层耦合后的那种 Euler 算法好。……就（雷诺平均这一情况下）Navier-Stokes 方法而言，粘性的识别和定量化、诱导阻力及兴波阻力分量迄今仍不清楚，甚至对流场的渐近结构若不引入某些假定，就不可能求解”（31）。

Grumman 公司的 Charles Boppe（32）同意 Slooff 的意见，即对飞机这类形体来说，用 CFD 来预估它的阻力绝对值时，其精确度和吻合性目前尚难达到。但在另一篇有关计算空气动力学设计的文章中（33），Boppe 列举了用 CFD 在解决 X-29 教练机的前掠机翼设计难题以及发展 Gulfstream 喷气式飞机系列中所取得的成功。从尝试性的程序来推测，我们将听到其他一些关于 CFD 编入运载器设计过程中取得成功的事迹。

3.2 CFD 在游艇设计中的应用

1983 年，澳大利亚的挑战者们奇迹般地丧失了美国的优胜杯，这正表明了它是在船舶设计中应用 CFD 历史的里程碑。正如 Van Oossanen（34）和 Slooff（35）所论述的那样，CFD 方法的综合和水池试验相结合从根本上永远改变了高性能游艇的设计方法。荷兰的舰船设计师们和空气动力学的专业人员们为设计“澳大利亚”Ⅱ型艇龙骨上著名的“小翼”（Winglet），开发了值得祝贺的 CFD 工具应用和水池试验。Slooff 和 Oossanen 一下子就成为了“媒人”，并且高风格地把他们的这种新方法介绍给美国人（35）、（34），他们又共同努力，继续果断地对荷兰的那种方法作改进，从而在 1987 年又把优胜杯赢了回来（36）、（37）、（38）、（39）。这种 CFD、水池试

验及性能分析准则的结合应用,已是目前高性能游艇设计的重要部分(例子见 Greeley [40])。

3.3 CFD在船舶设计中的应用

在 Tankey 召开的 18 届 ITTC 关于数值计算技术的效果这一小组讨论会上, Morgan 和 Lin [1] 就 CFD 在船舶设计中的作用这一技术发展水平(到 1987 年为止)作了概述。在那里, Morgan 和 Lin 的结论是:

“通常,人们可以这样说:目前实际上已能适用的大多数结果解都是从不考虑粘性的线性理论推导出来的。...虽然对艏船首和方尾的情况尚需做更多的研究工作,但对细瘦船的兴波阻力预估往往能有可与试验结果相比的精确度。”

“...所有在任一有雷诺数下的粘性流计算中,目前对雷诺(平均)方程的依赖关系要比对完整的 Navier-Stokes 方程的大。因此,必须用几种一般被称之为湍流模拟的技巧来近似流动中的湍流”。

“目前可使用的几种计算工具,对粘性影响较小的问题总可给出较好的结果,例如:船舶运动、兴波阻力和螺旋桨作用的预估”[41]。

各种船舶运动的计算程序一般都以线性切片理论为基础,它们被正式地应用于船舶设计过程中。能相当好地预估船体几何形状明显改变后对中等海况下的船舶运动的影响。但是,人们在选用怎么样的计算程序时,应小心地注意海浪的方向这一特性的规定。由英国“中途岛”(Midway)航空母舰因加装附加外板后引起的严重横摇(Ricketts [42])说明了:所有不同的 CFD 计算程序版本的局限性和功能,必须编号和按目录分类。按照 Ricketts 的意见:

“然而应该说明的是:这些评估假定理论的短峰海浪的能量按余弦平方的规律散布,同时不考虑两种形成方向很不相同的、低频底涌与本地区的风生浪合在一起的、这种经常出现的实际情况”[42]。

现有的计算程序中,看来没有一个对船体几何形状的小量变化是敏感的,而耐波性模型试验对船体几何形状的小量变化也不是那么敏感。在波浪没有破碎时大幅值运动的时域预报,正如 Lin 和 Yue [43] 所评论的那样,仅给出了期望的初步结果,而且到目前为止仍限制于船体形状比较简单情况下的规则波。该方法中的主要进步点是,一个自动生成几何图形的网格重新划分,计算出由于自由表面随时域变化后船体水下部分的几何形状。

破碎的大浪情况下的小艇运动性能预报问题还远远地没有被解决。虽然用势流理论来描述大波陡重力波尚有待于作验证性研究(Dommerath [44]),但更为高级的船舶运动分析法则也尚未充分地被验证,因此在船型设计过程中的贡献不大。验证性问题的一部分是缺少在实测含有方向信息之海况下的合适的实船运动资料(Kjeldsen [45])。我盼望在今后能有含方向信息的海况综合资料(有或没有大浪出现)和船舶运动时域的计算准则,以预报船在实际航区的运动。不论怎样,现在我们只能推测,终将解决该问题的为期已不远(见 4.1 章节)。

另一方面,船体几何形状的少量改变,如球首的外形,对高速船的兴波阻力计算方法似乎是敏感的(Hoyle [46])。这些势流计算方法正在被设计部门所接受,尤其

是正在将其作为一种对入选船型方案作“优劣次序”排列的方法以缩减模型试验的范围。这些方法已适用于方尾船 (Cheng [47])、游艇试验 (见本文的前一章节) 和部分地区适用于某些综合系统 (见下面的 FLOWTECH 讨论)。对于较为细瘦的船舶, 和作近场的势流计算一样, 尤其如果用了合适的自由表面边界条件能迭代地进行这些势流计算时, 那么就可指望对远场的伴流作预报 (Noblesse [48]), 但目前还缺少正确地预估升沉和纵倾的能力。

关于 CFD 对螺旋桨设计的影响, Morgan 和 Lin [41] 认为:

“应用以升力线和升力面理论为基础的螺旋桨设计方法已成为常规螺旋桨设计的惯例。这些方法已导致旨在减少空泡和振动的大侧斜螺旋桨的实用性开发。应用 CFD 来设计在均匀流中运行的螺旋桨也已属惯例。但因这些理论方法仍依赖于和雷诺数无关的升力线的斜率, 故在使用这些方法来对现有的那些有着任意拱度线的螺旋桨性能作预报时, 仍有困难。”

Morgan 和 Lin 还对预报空泡和螺旋桨诱导振动的影响时存在的困难作了讨论, 这是因为这些现象取决于粘性流的作用、船体和桨及伴流的相互作用。

至于未来的 CFD 发展, Morgan 和 Lin 的结论是:

“虽然可在计算机上求解实船雷诺数时的整个 Navier-Stokes 方程, 但宁可花多年功夫来开发 CFD 所需的细节。... 对求解高雷诺数时复杂几何形状的 Navier-Stokes 方程的计算程序的研制进度, 已令人失望地放慢了。... 但若 CFD 的预报结果不能很好地与试验结果相比, 那就总是存在着试验好还是理论好、或两者都好的问题” [41]。

因可选择地来求解整个船体四周的运动粘性方程, Larsson 及其在 SSPA/ FLOWTECH 上的合作者 [26]、[49] 提出建议: 在将流动分为三个区域时, 也要采用 MARIN 的 Hoekstro [50] 的做法及那些类似于 1987 年 AIAA 的 CFD 会议上 [29] 讨论的飞机工业所采用的方法。Larsson 的 SHIPFLOW 方法定义了如下的分离区, 这些分离区限定了在各种计算方法中的相互影响。

区域 I —— 边界层外的势流 (包括自由表面)。

区域 II —— 超过船长、可应用边界层积分法的那部分边界层, 也就是相对于局部曲率半径来说是薄的并且不出现分离的那部分边界层。

区域 III —— 船体尾部和伴流区, 该区域内的流场必须用一定形式的 Navier-Stokes 方程计算。

自 1983 年以来, 这种综合的 CFD 系统已经以不同的形式在不下于 30 个的方案中被使用过。SHIPFLOW [51] 目前尚不能正确地预估具有明显脱流的那些船舶螺旋桨处的来流。然而, 用迭代法来计算自由表面波往往明显地改善了对船舶纵倾和升沉运动的预估。各种 SHIPFLOW 的参考文章都没有详细地讨论 CAD 的接口问题。

4. 经典力学中的数学模拟

4.1 计算的局限性

最近, 我读了一本极有趣的书, 是牛津大学数学教授 Roger Penrose, Rouse

Ball 写的, 名为“*The Emperor's New Mind*”, 按照 Penrose 的观点。

“.....妨碍我们从科学或逻辑的角度去努力钻研‘思想’这个概念的, 正是目前我们缺乏的物理基本定律。”(第4页)

该书回顾了我们对现有物理定律的认识状况, 并就我们在认识物理领域及未来有可能的智能模拟的相应局限性作了讨论。

在评论递归和非递归数学的基础时, Penrose 对现有的经典(牛顿)物理中许多可确定的性质与各种自然现象作了重要的划分, 无论这些自然现象是否具有可计算的性质。也就是说,

“可确定性和可计算性是截然不同的问题”。(第170页)

“.....‘可确定性’的意思是: 一个特定时刻的初始信息完全决定了在其他所有时间里发生作用的情况。”(第214页)

“但是, 有这样一种观念, 即这个自然世界实际上是‘不可计算’的, 产生这种观念的原因是, 在初始信息可以知道的情况下, 准确性总是有限的。”(第173页)

“.....无论我们所知道的系统的初始状态有多么精确(在一定的适当限制范围内), 不确定性将随着时间的推移而增长, 我们的初始信息就可能会变得几乎一点儿用都没有了。在这种情况下, 经典力学基本上是不可预见的。(回忆上面所考虑的‘混沌’的概念)。”(第183页)

“尽管我们不能计算未来发生作用的情况(混沌现象), 但仍可确定它”。(第432页)[52]

于是, Penrose 指出, 不可能有真正的智能, 除非有基本上包括无法计算的成份在内的意识相伴随。因此, 真正的智能(包括判断的形成)都不可能从可计算的意义上得到恰当的模拟。事实上,

“.....关于有法计算的判定并非是算法过程本身!”(第414页)

这个结论对讨论“智能”船舶设计系统的未来方向有着重要的影响。

4.2 CFD 的运动方程

在船舶流体力学中解粘性流动的问题, 似乎主要集中在力图利用某些改型的 Navier—Stokes 方程上, 这样做并没有什么实用效果, 那么, “目前存在的问题中, 那些形式的运动方程具有合理的流体流动状态的模拟呢?”看来, 研究将 Navier—Stokes 方程作为基本运动方程, 要比研究将法向与切向应力作为变形率张量的线性函数这一极特殊的形式多得多。让我们回顾一下应用于一般的连续介质力学尤其是流体力学中牛顿第二定律的各种公式的数学基础。我们可以在下面两篇文章中找到对这个问题的最佳处理, 即, Rutherford Aris 所著的《流体力学的向量、张量及基本方程》[53], Jams Serrin 发表在 *Handbuch der Physik*, Vol. VII/1 中的“经典流体力学的数学原理”[54]。图1是20年前我在教授高等研究生流体力学课程时提出的, 它说明了各种“运动方程”之间的关系。值得注意的是, 从图1的左面到右面, 包含了十年的研究工作。

4.2.1 “流体质点”运动的描述

解各种各样的流体运动的微分方程的目的, 就是要求出与该问题有关的流场。(为

了计算整个流动的特性,如水翼的升力和阻力等等,多数的积分法都用了假定的流场。)为了建立“流体质点”的运动方程,让我们回忆一下连续介质力学的概念(见Shapiro的文章[55]),根据这个概念,流体质点代表一个最小的“物质”体积 δv_m ,它包括如此多的分子,以致可以在统计的意义上作平均,也就是说,密度等于单位体积的质量可用于每个质点。

在用“质点”或“流动点”坐标来描述流体质点的运动时(Lagrangian描述法),一个一定质量的给定质点(在热力学中是一个封闭系统)可由它通过空间随时间而移动的变形轨迹来描述(Aris[53],第83页)。“场”的描写是力图描述相对于一组空间坐标系的运动,在该坐标系中,一个给定的场点时时刻刻由不同的流体质点占据(热力学中控制容积的方法)。牛顿运动定律(1688年)是在“质点”坐标系中用公式表示的,但严格地讲,它只适用于质量中心的运动。Euler(1759年)提出了描述没有切应力情况下的连续介质的运动方程,该方程现在称为欧拉方程(“理想流体”的非粘性流动)。到了1823年Cauchy引入了应力张量的概念,推导出现在称为Cauchy运动方程(1828年)的方程式,该方程无论应力张量 T 是否与流体运动学有关,对任何连续的流体都是适用的。

对于一个物质微团(具有一定的质量,适用于牛顿第二定律)的线性动量方程的基本假定如下:

“存在一个参考系(惯性参考系),在任一时刻,物质微团 v_m 的线性动量的变化率等于作用在该微团上的合力。”即

$$\Sigma F = F_{\text{表面}} + F_{\text{质量}} = D/Dt \left\{ \int_{v_m} \rho v dv_m \right\}$$

这里,

$F_{\text{表面}} = \oint T \cdot n dA =$ 作用在物质微团表面上的表面力之和

$F_{\text{质量}} = \int \rho f dv_m =$ 作用在物质微团上的质量力之和

$T =$ 作用在物质微团上的应力张量

$f =$ 作用在物质微团上的质量力/单位质量矢量(f_j 为分量)

$v =$ 速度矢量(v_j 为分量)

$D/Dt = \partial/\partial t + (v \cdot \nabla) =$ 随体导数

但因为有不可压缩流体的连续性方程 $\text{div } v = 0$ [53], 则

$$D/Dt \int \rho v dv_m = \int \rho DV/Dt dv_m$$

并且由于用了散度定律

$$\oint T \cdot n dA = \int \text{div } T dv_m$$

这样,散度定律(Green)的应用,可以将动量方程的所有项集中到如下的一个单一被积函数中:

$$\int \{ \text{div } T + \rho f - \rho DV/Dt \} dv_m = 0$$

因为物质微团是任选的,所以在流动区域内的积分处处为零,得到了Cauchy运动方程

$$\operatorname{div} T + \rho f - \rho DV/Dt = 0 \quad (1)$$

也可以用笛卡儿张量标号表示成

$$\partial v_j / \partial t + v_i v_{j,i} = f_j + T_{ij,i} / \rho$$

Cauchy 运动方程含有 15 个应变变量, 再加上 4 个基本变量。由于运动方程中含有对流加速度项, 所以它是非线性的。显然, 要直接解这些运动方程就需要添加许多方程来减少应变变量的个数, 第一步, 利用“本构方程”将应力张量 T_{ij} 与速度梯度矢量 $v_{j,i}$ 、热力学压力 P 以某些函数联系起来 ([53] 第 107 页)。通常, 是将速度梯度张量分成对称的和不对称的两个分量, 即

$$v_{j,i} = (v_{j,i} + v_{i,j})/2 - (v_{j,i} - v_{i,j})/2$$

或

$$v_{j,i} = D_{ij}/2 + \Omega_{ij}/2$$

式中的 D_{ij} 定义为对称的变形率张量; Ω_{ij} 为非对称的自旋或旋转张量。(这些规定的符号不是始终一样的, 而系数 $1/2$ 可有可无)。习惯上常用 S_{ij} 来表示应变率 (变形率) 张量而不是用 D_{ij} 。这个问题最早是由 ITTC 的符号和术语小组提出来的 ([56], 值得注意的是, 就所有的评述者而言 (对 Galilean 变换), 变形率张量的符号规定 D 是不变的, 而自旋张量的符号规定 Ω 是不同的。

对于理想流体 (即粘度为零) 来说, 方程 (1) 中没有剪切应力, 且

$$\operatorname{div} T = -\operatorname{grad} P \quad (2)$$

在 1955~1956 年间, Euler 提出了 Euler 运动方程, 它比 Cauchy 的应力定律 (Serrin [54]) 早了 65 年, 其矢量形式为

$$\rho DV/Dt = \rho f - \operatorname{grad} P \quad (3)$$

粘性流的概念是 90 年后由 G.G. Stokes 于 1845 年提出的。Stokes 认为,

“如果在 P 点附近的流体都处于相对稳定的状态, 那么, 流过任意一点 P 时以给定方向作用于平面上的压力与流体在该点 (P) 附近所有方向都存在的压力之间的差异仅取决于 P 点附近流体的瞬时的相对运动, 而且可以排除由任何旋转运动引起的相对运动, 并对上面提到的那种压力差没有影响。” (bold mine [57])

以醒目字体来表示的陈述说明, Stokes 假定的“物质不变性”早在 Noll [58] 把用于连续介质力学中的本构方程这一“客观规律”正式化以前, 对粘性流体的实质下定义的时候就已经是一个基本概念了。Serrin [54] 定义了多种客观存在的“Stokes 流体”, 它们都具有以下的特性:

1. 应力张量 T_{ij} 是变形张量 D_{ij} 及局部热力学状态的一个连续函数, 但与其运动学参量无关。
2. 流体是均匀的。
3. 流体是各向同性的。
4. 没有变形时, 应力就是静力, 即 $T_{ij} = -p\delta_{ij}$

牛顿流体被定义为线性的 Stokes 流体, 它是不可压缩的, 有如下的本构方程 (可压缩流动的本构方程只是比它稍微复杂一些):

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + \mu D_{ij} \quad (4)$$

式中的 μ 是动力粘度。

将方程(1)和(4)联立,可以得到不可压缩流的Navier-Stokes方程

$$\rho Dv/Dt = \rho f - \text{grad } P + \text{div}(\mu D) \quad (5)$$

$$\text{或} \quad \partial v_j / \partial t + v_i v_{j,i} = f_j - \text{grad} P / \rho + (\nu D_{ij})_{,i} \quad (6)$$

因为运动粘度 $\nu = \mu / \rho$ 。

对于运动粘度为常量的不可压缩流体的层流来说, ν 可以作为系数放在对 x_i 导数的外面,

$$\rho Dv/Dt = \rho f - \text{grad} P + \mu \text{div} D \quad (7)$$

只有部分局限在简单几何形状中的层流,才能有方程(7)的精确解,而对无粘性流动,方程(7)就变成Euler方程(3)。

4.2.2 湍流模式

对“Reynold平均的Navier-Stokes方程”的讨论仍可用该方程原来的一般表达式,但字符有变化,时均值上面的一横“—”将被上标“A”代替(前者仅在对方程式作客观表示或者图解方程式中才用的),再加上Lumley[59]1970年在他的文章“Toward a Turbulent Constitutive Relation”中所用到的Reynold应力符号 R_{ij} 。因此,我们定义随时间变化的速度矢量分量为

$$v_j(t) = \bar{v}_j^A + u_j \quad (8)$$

式中 $\bar{v}_j^A$ = 时间平均的局部速度

u_j = 脉动速度

$$R_{ij}^A = -(\rho u_i u_j)^A = -\overline{\rho u_i u_j} \quad (9)$$

因此有

R^A = 由方程(9)给出的时间平均的Reynold应力张量

(由于上面的定义可能会和Hinze[60]及其他人定义的相关系数 $R_{A,B}$ 相混淆,所以在本次讨论会后不会再沿用下去了,但当作者们用他们的个人计算机写文章的时候,要做这些修改工作还需要一段时间。)

RANS方程(Reynold平均Navier-Stokes方程)的推导可以在Hinze[60]、Tennekes和Lumley[61]或其他人的文章中找到,这里就不重复了。Hinze与Tennekes、Lumley都是从Cauchy运动方程(上面的方程(1))着手推导的,同时,为了估算时间平均的影响,将方程(8)定义的各项代入方程(6)。符最终的Reynold应力项 R_{ij}^A (已来自方程(6)的加速度项)与方程(4)联立,就得到了如下的本构方程

$$\tau_{ij} = -P^A \delta_{ij} + \mu D_{ij}^A + R_{ij}^A \quad (10)$$

或 $\tau = -P^A I + \mu D^A + R^A$