

参加第十五届国际船模试验池会议 及会后参观访问技术总结

赴第十五届国际船模试验池会议代表团

第六机械
工业部 第七研究院第七〇二研究所

一九七九年四月

参加第十五届国际船模试验池会议 及会后参观访问技术总结

赴第十五届国际船模试验池会议代表团

前 言

第十五届国际船模试验池会议 (ITTC) 于一九七八年九月三日至十日在荷兰召开, 到会的有三十五个国家约二百名代表。我国代表团以“中国造船工程学会”船模水池技术组的名义首次出席了这次会议。代表团成员有中国船舶科学研究中心付所长於省身、推进研究室主任董世汤、耐波性研究室工程师刘楚学, 以及上海船舶设计研究所付总工程师袁随善, 上海交通大学船舶流体力学研究室主任副教授盛振邦和哈尔滨船舶工程学院教授顾懋祥六位同志。

在这届大会上, 各技术委员会(组)对近三年来所属专业状况、存在问题、发展趋势以及建议作了报告。我国代表作了七篇发言。其中: 顾懋祥教授代表发言两篇 (一篇为武汉造船工程学会两会员写的, 另一篇为顾懋祥教授与刘楚学工程师联合执笔的), 袁随善付总工程师一篇, 董世汤付主任二篇, 盛振邦付教授二篇。

会议期间代表们讨论了各技术委员会的技术报告, 同时还讨论了有关各技术委员会的组织调整问题, 确定了各技术委员会的成员。大会最后决定:

1. 在十五届技术委员会的基础上, 将表达与情报委员会改为情报委员会, 冰区航行技术小组升级为技术委员会, 并增设一个快速运行器技术小组。

2. 接纳中国船舶科学研究中心 (六机部七院二所)、上海船舶设计研究所 (六机部七院八所)、上海交通大学三个单位为国际船模试验池会议正式成员, 中国船舶科学研究中心为会议指导团成员, 哈尔滨船舶工程学院顾懋祥教授为下届会议耐波性技术委员会成员。

3. 中文被补加为会议的规定文字。

会议结束后, 我国代表团利用8天时间先后参观访问了荷兰船模试验池 (NSMB)、利普斯 (Lips) 公司、台尔夫特大学 (University of Technology, Delft)、台尔夫特水工研究所 (Delft Hydraulic Laboratory)、R. S. V 船厂 (Ship Yard of Rhine-Scheldt-Verolme Group)、IHC-SMIT 船厂及船舶咨询会 (Naval Council) 等七个单位, 于一九七八年九月二十二日离荷兰回国。国后回, 对在国外期间了解到的一些学术技术问题, 分别作了总结, 现付印出版, 以资交流。

限于我们的水平, 加之时间短促和涉及专业较广, 因此本总结定有不当之处, 甚至会有谬误。请予批评指正。

目 录

阻力委员会.....	1
性能委员会.....	10
空泡委员会.....	19
推进器委员会.....	28
操纵委员会.....	37
耐波委员会.....	49
海洋工程委员会.....	71
表达及情报委员会.....	79
冰区航行技术小组.....	90
NSMB 空泡试验室、降压水池及桨模加工车间参观简介.....	102
与国外学者座谈交流情况简介(推进与空泡部分).....	107
NSMB 操纵性试验室参观简介	
——NSMB的操纵性模拟器.....	119
NSMB 耐波性与海洋工程试验室参观简介.....	122
荷兰 RSV 和 IHC 二造船集团参观简介.....	128
电子计算机在船舶设计和船厂生产设计中使用情况简介.....	132

阻力委员会

自十四届ITTC以来的三年中，有关船舶阻力方面的研究概况大致是：

波型及尾流测量：在一些单位又积累了新的经验，绝大多数水池认为这种测量是很有用的。但目前还未能明显地将总阻力分成与雷诺数 R_n 有关及与傅氏数 F_n 有关的成分。

粘性压阻力：对回转体的研究在理论上有很大发展，但对实际三因次物体研究的进展则十分有限。有少数船模(或重叠船模在风筒中)的界层试验研究报告。

分离及其尺度作用 只做过有限的研究工作。

兴波阻力理论的研究 仍相当活跃地在进行着，最近的发展可见：1976年在日本召开的兴波阻力国际讨论会出版了论文集；1977年在美国召开的第二届国际计算船舶流体力学会议上也有几篇船舶兴波阻力计算的重要文章。

船首现象(Bow Phenomena)、船模实船界层比较、阻塞效应修正以及非常规船阻力研究等方面都进行得很少。

除上述总情况外，对下列问题作一概括介绍。

一、阻力成分及其测量

1. 现有方法的局限性

根据波型测量计算所得的波型阻力总是小于用形状因子 $(1 + K)$ 计算所得的剩余阻力，无论首部有无碎波都是如此。而尾流测量的计算结果又经常出现随 F_n 而变动的现象，这种变动至少可以想像为边界层与尾流及波系之间存在相互影响。原先由兴波(主要与 F_n 有关)所形成的能量损失可能表现为粘性尾流损失的增加，这是因为在碎波的情况下，尾流中自由表面处量得边叶(Sidelobe)，而边叶的范围又是很难估计的，有时甚至与主要的尾流(Main Wake)混杂而无法分开。

从波型及尾流测量算得的 R_w 与 R_v 之总和小于阻力仪测得的总阻力 R_t 。尽管有些报告说这两者是基本一致的，但迄今为止尚无足够的测量报告予以证实，因为即使在应用现代最精确的测试技术的情况下，仍然发现两者并不一致，即 $R_w + R_v < R_t$ 。

这样，就需要重新检验波型测量及尾流测量的分析基础。过去所用的波型分析是就理想流体而言，而尾流分析则是对不兴波的物体而言。因此，就产生了这样的疑问：在对兴波及粘性都很重要的情况下，这种分析方法的可用性究竟如何？

2. 粘性与兴波之间可能存在的相互干扰

船尾处的兴波必然通过尾流区, 因此该处减低了的水流速度(因粘性之故)对波能的传播可能会有明显的影响。但现在还不能正确弄清在船的边界层和伴流中波的产生和传播规律, 而且关于尾流对波型的影响的研究(无论是理论研究或试验研究)也极为有限。

为了研究粘性对波型的影响, Gadd 利用双体船做了一个试验。他首先测量了船首处的波形, 然后在船的前方加上一块平板再次作了测量, 发现加板以后的波高有所减低, 波峰也略有前移。试验结果表明: 由於粘性作用而使 R_w 下降, R_v 增加, 总阻力也有改变。这种看法也为其他一些试验研究所证实。Moreno 对 60 系列 $C_b = 0.6$ 之船模进行试验, 变更船模表面的粗糙度以考察伴流对兴波阻力的影响。尾流测量算得之 R_v 增加了一倍, 而用纵切法所得之波型阻力却大大下降, 例如在 $F_n = 0.28$ 时 R_w 竟下降了 50%。试验研究表明: 在计算船舶兴波阻力的数学模型中, 包括边界层及伴流的影响可能都是很重要的。

Peregrine 对一兴波点在等宽度、等速度伴流区的运动进行了研究, 其计算结果与 Kelvin 波型不同。Landweber 对边界层(BL)及伴流(W)进行考虑后研究兴波阻力。“BL + W”的边界假定为已知函数, 其值与排挤厚度有关。绕“BL + W”的流动可用分布在物体表面的源系 M_0 及边界面的源系 M_1 来表示, 同时满足物体的边界条件 $V_n = 0$ 。如果将“BL + W”的理论推广包括表面影响而能计算的话, 则是很有意义的, 不仅有可能对现有波型测量和尾流测量存在系统误差的原因做出解释, 同时也可对尾流区兴波、波型与尾流之间的关系有较好的了解。

3. 波型及尾流测量的有关经验简介

波型测量已有十五年的历史, 但至今尚无重大突破。据 ITTC 初步统计, 在 24 个水池中, 有 14 个用纵切法, 3 个用横切法, 6 个两种方法都采用, 4 个单位用立体照相记录整个波面形状。使用的船模大小 1~10 米不等, 最高傅氏数为 0.45。测量仪器多半采用电感式或电容式浪高仪, 也有用超声波、光测、人工或伺服机探针的, 各家估计的测量精度大不相同, 平均说来误差为 ± 1 毫米。分析方法用得最多的是 Newman-Sharma 法, 这种方法在理论上要求有无限的池宽。为了克服这个困难, 故可虚假地将水池加宽, 例如把船模偏离水池中心一侧进行试验, 极端情况则把半只船模沿一边池壁运动。测量地点也各不相同, 有人喜欢将浪高仪尽可能靠近船模, 以获得较长的截取长度(Cut Length), 有人则使仪器尽可能远离船模, 以减少所谓 Near Field Effects。

在现有的各种方法中, 都未计及粘性尾流的影响。尽管如此, 大家仍然认为波形测量是一种极为有用的手段, 可借以理解兴波机理, 用於改进船型设计, 有的用於得出对线性兴波理论的半经验修正。

有 18 个水池做过伴流测量, 船模长 1~10 米不等, 最高 R_n 试至 1.6×10^7 。标准的测量方法是用伴流耙或单个毕托管(有一个水池用叶轮仪), 多管测压仪是一种很好的测量仪器。单个毕托管的校验无问题, 多管伴流耙则要考虑 Comb 的影响。气泡、反映慢是尾流测量中普遍存在的问题。测量精度一般是 ± 1 毫米。碎波-艏涡及方尾船后的流动不稳定等情况在尾流测量中都有所反映。测量点在船模后 $\frac{1}{2}L$ 处似最合适, 在该处量得的数据用 Betz、Jones、

Landweber 三种方法计算的阻力大体相同。除毕托管外,有6个单位采用压力传感器进行测量。迄今为止,还没有人能测量或计算尾流中的雷诺应力。

普遍认为:尾流测量也是一种有力的研究手段。有些水池已用于改进船型设计,也有人从尾流测量得出随 F_n 而变化的形状因子,虽然这有可能使船模阻力换算至实船的正确性得以改善,但是这仍然是个尚未肯定而又值得进一步研究的问题。尾流测量极为费时,一个速度往往要跑多次才能量得比较稳定的数值,但其分析工作较为简单。

有12个水池在同一船模上进行过波型和尾流测量,遗憾的是大家所用的船模不同,难以进行比较。尽管各家数据有差异,但总的说来, $R_v + R_w$ 大体较阻力仪直接量得的总阻力 R_t 小5~10%。因此,希望以此来改进传统的傅汝德换算方法,现在看来条件尚不成熟。但这种技术对于定性研究和改进船型设计是极为有用的。

二、边界层及粘性阻力

1. 界层转变

迄今为止对三次船首层流稳定性的计算尚无理论上的计算方法,即使对简单的几何形状,其层流不稳定转化至变流这个基本问题仍需用经验办法来处理。最近的理论研究和试验研究大多集中于对称体,并试图用层流界层稳定理论来预估转变。对于首部较细的物体,用线性稳定理论来预估转变点,与试验比较尚属满意。

界层转变与水池工作有关的是激流器阻力的估算问题。通常假定:船模有无激流装置在高雷诺数时阻力之差即为激流器阻力。但有些船型,即使在 $R_n = 4 \times 10^7$ 时,其界层转变点仍发生在激流器之后,这样就会使激流器的阻力估计过大。

2. 平板紊流界层

1977年Granville推导了一个新的平板摩擦阻力公式,其形式是:

$$C_f = \frac{a}{(\text{Log} R_x - b)^2} + \frac{c}{R_x}$$

式中 $a = 0.0776$, $b = 1.88$, $c = 60$ 。

可以认为,上式是1957 ITTC公式的普遍公式,亦即1957 ITTC不过是上式中 $a = 0.075$ 、 $b = 2$ 、 $c = 0$ 的一个特例罢了。在 $R_n < 5 \times 10^5$ 时,Granville公式与1957 ITTC公式相当符合,而在 R_n 高达 10^8 时,Granville公式与1957 ITTC、Schöenherr公式也颇为一致。因此,1957 ITTC公式也可认为是平板摩擦阻力公式。

3. 船模边界层的试验结果

许多单位对重叠船模在风筒中或对船模在水池中进行试验,船的形状不同,方形系数范

围为0.57~0.85。大多数单位在船模的某些站线处测量三因次速度剖面，有些还用 Preston tube 或小块活动板测量局部阻力。

现有的船模试验资料已足以用于验证计算方法，但遗憾的是大多日本研究者还未写成英文，因而许多数据不易得到。Namimatsu 对 3m、7m、30m 的船模及实船进行过试验，本来可以期望以此来考察计算方法是否可用于估算尺度作用，遗憾的是未给出足够的船型资料，无法进行理论计算。

试验结果的总的情况大体是：量得的尾部压力低于用势流理论算得之数值（大约在5%船长范围内是如此），Sehsah 在丰满的油轮模型上量得的速度剖面（Velocity Profile）与 Coles & Mager Profile families 不同。Namimatsu 几何相似系列组的试验结果表明：实船的界层相对厚度远较模型为薄，但在接近尾部处，所有尺度的船模及实船上都出现脱流，脱流的起点及走向在船模及实船上大体相同，至于脱流的径向相对尺度则模型较实船为大。

4. 三元素流界层计算方法

计算任意形状三元素流界层仍是最困难的问题，尤其在包含流动分离及波浪的情况下更是如此。尽管如此，但近年来还是取得了相当的进展，在十五届ITTC的报告中提到了27种方法（其中有14种方法是微分法，13种是积分法）。遗憾的是大多数现有的计算方法并非完全的三因次方法。有些方法虽然已能比较正确地计算船体大部分区域的界层，但在船尾处由于界层迅速增厚，计算结果与实际很不符合。这是一个很大的欠缺，因为尾部处的流动状态对于螺旋桨设计极为重要。此外，粘性压阻力是不能用一阶理论（First Order Theory）来进行估算的。因此，发展高阶理论是十分必要的。

在 Navier-Stokes 方程中，所有各项都可以用 δ/R 次方来表示量的大小，其中 δ 为界层厚度， R 为表面的局部曲率半径。在一阶理论中，可以把那些属于高阶项的忽略不计，而当界层较厚时， δ/R 不再是小量，其高阶项未必可以忽略，这就是现有许多计算方法在船尾处不能得到正解结果的原因。Nash 等人发展了一个完全的二阶方程，对多余的项进行检查后，发现有三个不同的二阶影响：横向曲率影响、纵向曲率影响和雷诺应力影响。如果与势流相比，则应考虑排挤影响。

5. 其 他

1. 很多学者研究了对称体的边界层，得出了相应的计算方法，许多计算还与实验结果进行了比较。有的说两者相当符合，有的则说不很符合。概括说来，对于细长对称体的计算较为正确，对肥短对称体的计算正确性要差些。在许多情况下，计算所得的阻力偏大5~10%。

2. 有人试图用等价回转体来估计船的粘性阻力。这种方法固然还有一些问题，但比较简便，值得作进一步的研究。

3. 对于均匀分布的粗糙度问题，过去就有所研究，并且也有估算粗糙阻力的公式。但是，像船体表面这样不规则的粗糙度应该如何表达才比较确切，还是一个需要进一步研究的问题。

三、兴波阻力

从兴波阻力的研究现状看来,当前的研究工作主要集中在下列三个方面:

(1) 在线性势流理论方面,一种是加上经验修正使之更正确些,另一种是对非线性影响不严重的情况不加修正而用于研究一些特殊问题。

(2) 在非线性理论方面,分析自由表面的非线性影响或考虑粘性的影响,以改善线性化理论。

(3) 在船型设计方面,应用兴波阻力理论来进行船型设计。

1. 线性势流理论

Kitazawa 测量了 Inuid Model 周围的速度场后发现,用线性理论计算的结果与实测结果只在横向分量上有较大的差别。Tsutsumi 试验研究 Michell 理论的正确范围,对一些数学船模的剩余阻力、波型阻力及计算所得的兴波阻力进行了比较,发现在 $B/L < \frac{1}{15}$ 的条件下,计算结果与试验结果符合得很好。对上述船模加上反对称项后考察线性假定的正确性及首尾兴波的相对情况,得出了修正线性波谱的经验方法,由此可使计算的兴波阻力较为正确。Everest 及 Hogben 采用修正的源分布可使兴波阻力计算结果的正确性得以改善。

用线性理论计算普通排水船的兴波阻力虽然不正确,但这个理论仍然有用。例如 Yeung 用来计算船的纵倾及下沉,Maruo 用来改进船型设计。对于像没有粘性伴流的气垫船的兴波问题和多体船兴波系的干扰问题都可用线性化理论进行研究。

2. 非线性理论及粘性影响

Michell 的窄船理论对于普通船舶说来,其计算结果与实际不符。为了改善这种情况,需要发展非线性理论,作为二阶近似,应包括自由表面及物体表面条件的二阶项。

对于沉深足够的潜体来说,自由表面条件线性化是允许的。但对于浮体来说却出现了困难,即在一线积分项中有这样的情况:当物体表面满足了高阶,而自由表面条件的线性化仍然存在,因而就会出现沿船体表面和未扰动水面交界线上的源或偶的线分布。自从 Brard 强调该线积分项的重要性后引起了很大的争论,特别是受到偏向于数学的研究者的反对。Brard 证明:忽略这一积分项后将导致别的结果,尤其在低速时是如此,因此该项必然应该包括在内。对于椭圆截面垂直支架说来,在低 F_n 数时线积分项对兴波阻力的贡献与支架表面源或偶的贡献属同一量级。

Guillton 建议:实际的流动空间应该转换到由垂直平面和水平平面为边界的简单的参考空间。根据 Guillton 的方法,Noblesse、Dagan 得到非相容(inconsistent)的二阶解,即对物体及自由表面条件都能满足二阶,但场的方程却只满足一阶。由此得到的计算结果较窄船理论为好。

研究粘性流体中的兴波阻力理论有两类近似假定：(1)流场的主要部分是非粘性的，粘性的影响主要在边界层中；(2)流体的运动可近似地看作具有人为的粘性层流，运动方程可被线性化。虽然有人作过尝试，但由于数学上的困难，只限于在简单情况下应用。

3. 在船型设计方面的应用

根据波型测量的数据，结合线性理论以改进船型，是兴波阻力理论在船型设计方面的具体应用之一。Baba 对基本船型及略加修改后的船型分别进行波型测量并比较其差别，推荐了一个改型的实用方法。

采用球首的最初企图是减低船在高速时的兴波阻力，但近来的趋势在低速肥大船上也设计球鼻，而这类船的兴波阻力是很小的。Eckert 及 Sharma 对低速船的球首应用进行研究后发现：球首对波型阻力的改变很小，但却能大大减少船首碎波。Kracht 讨论了球鼻能减少兴波阻力的条件。

用兴波阻力理论来设计像集装箱船那样的高速船肯定是有益的。卞保琦 (Pien) 推荐了一个从兴波阻力理论出发的对高速排水量船的船型设计程序。Maruo 建议了一个从最小兴波阻力理论出发的高速船的设计方法。

近年来发展了一些可以大大降低兴波阻力的特殊船型。半潜船或小水线面船就是其中之一。由于其横稳性很差，实际上只能用于双体或多体船。美国海军研究发展中心自70年以来对双体船有很大的研究计划。对于最佳的双体船型说来，每个半部分船体是左舷与右舷相对称，更详细的情况可见林文钦 (Lin) 与卞保琦发表的资料。

四、委员会的结论和建议

1. 结 论

关于边界层及粘性阻力的研究现状是：

(1) 已有几个计算船体三因次边界层的方法，但这些方法中都引进了“边界层很薄”的近似假定，可称为一阶方法。这种方法对于船尾部分是不适用的，这是因为该处的边界层具有相当大的厚度。高阶影响很重要，不能忽视。

(2) 轴对称体的边界层计算中已包括了一些高阶的影响，并可以算出回转体的粘性压阻力及粘性总阻力。但是，计算所得的总阻力在实用上并非总是正确的。迄今为止，有关粘性阻力与尾部肥瘦程度之间的简单关系仍未求得，无论是理论计算或实验测量都是如此。

(3) 现在已能预估二因次及轴对称流动的分离，并具有合理的正确性。但对三因次分离的理论估算（即使有时引进一些数量上的修正）还不够可靠。

(4) 在船模边界层中已可量出平均流动，但更需要实船的测量结果及其紊流数据，后者对于雷诺应力的高阶理论是很重要的。

(5) 不同类型的规则粗糙度在边界层理论中都可以进行计算。但对于船壳这种不规则的粗糙度的表示仍然缺乏资料。

关于兴波阻力的研究,近年来进展很大。现有的方法在某些情况下可用来对剩余阻力进行实际预估,不久即可在更多的情况下进行实际预估。

至于波形测量及尾流测量,则已成为广泛采用的方法。由此得出的阻力小于实测总阻力约为5~10%。这个差异可能是由于粘性和波浪之间的相互作用所引起的,因此形状因子(由尾流或波形测量所求得)随雷诺数 R_n 和傅氏数 F_r 而变化。

在测试技术方面,激光测速仪对于测量船体周围的水流速度十分有用。

由此可见,无论在粘性或兴波领域,理论已开始起重要作用,它能帮助我们增加对阻力成分的认识,在某些情况下甚至能帮助我们作出正确的估算。可以期望,在这方面将会有更大的进展。理论需要实验来验证,在这方面过去曾做过许多试验,例如船模边界层中平均流的测量等等,但现已公开发表的资料还不够全面,也不具体,尤其船体几何形状更是如此。因此,很难使大家能够据以进行理论计算并与实测数据相比较。在波型数据方面,除数学船型外,对实际船型的资料更为糟糕。因此,需要对不同方形系数 C_B 和长宽比 L/B 的船模进行标准试验,以便进行下列内容测量:(a)总阻力;(b)波型阻力和谐;(c)尾流测量;(d)船体压力;(e)船体表面切应力分布;(f)边界层发展。

如果十五届ITTC接受这个观点,下一届委员会即将选择3~4个合适的船型并邀请其成员组织参加这个项目的研究,尔后由委员会负责收集大家的研究结果并于十六届ITTC的报告中予以发表。

2. 建 议

(1) 对粘性与波浪之间的相互作用应做进一步研究。如果对这一问题有个较好的认识,则可使换算程序有所改进,从阻力成分测量所得的有用资料也将增多。

(2) 各种边界层计算方法应尽可能用于计算已有试验结果的情况,且在报告中予以例证,以便进行比较。

(3) 在新的边界层测量进行后,作者应保证提供足够的情况(如船体几何形状等等),以便该结果能为今后所用。紊流的侧量是很有价值的,尤以靠近尾部处为然。

(4) 作为改进粘性压阻力理论计算的第一步,应该研究对称体计算和实测阻力之间出现差异的原因。

(5) 为了改进船尾三因次厚边界层的计算并能估算粘性压阻力,在三因次边界层方法中应力求包括高阶项。如属可能,也应包括自由表面的影响。

(6) 为了估算尾部(或前部)流动分离时在粘性压阻力中所占的比重,应该继续研究发展一个能够表示伴流分离及与船波相互作用的近似伴流模型。

(7) 应进一步努力获得像船壳这样不规则粗糙度的高度、波长的合适的定义。

(8) 对船首流动的转变、碎波及舳涡的形成等应继续进行试验或理论研究,以便能够估算它们在阻力中所占的比重。

(9) 为了比较各种兴波阻力的计算方法,需要有能够作为标准的试验数据组。现在已经有

了60系列 $C_B = 0.6$ 的部分结果,但是对总阻力、剩余阻力、波型阻力及波型谱来说还需要有更多的数据组。在任何情况下,这种数据组的发表必须附有船型的详细资料,以便能够进行阻力计算。

(10)在没有完整的试验数据的情况下,用各种兴波阻力估算方法尽可能多计算一些船型,并与用形状因子分析所得的剩余阻力进行比较。只有当现时为改进窄船理论而发展的各种方法进行比较之后,才能得出其中那些方法最为有用的结论。

(11)对使用高速电子计算机计算波型及兴波阻力的数值计算法的发展应予鼓励。如有可能,则应采用非线性的物体及自由表面边界条件。其结果不仅为这种方法本身感兴趣,而且能用于判断线性理论及部分线性理论的可用范围。

(12)应该继续发展包括粘性作用在内的船舶兴波阻力理论,以弄清包括雷诺数 R_n 和傅氏数 F_n 在内的尺度作用。

(13)对园截面水筒中绕对称体流动(包括伴流)应该进行理论计算,以便得出有关伴流阻塞修正更为合理的理论。

(14)应继续进行池壁对兴波阻力作用的数值计算工作,以便估价非粘性流对阻塞的作用。

五、讨 论

十五届 ITTC 会议上,阻力委员会提出了七篇书面讨论稿,现概括介绍如下。

1. 瑞典 G.Dyne:1977年我在奥斯陆发表的一篇文章中提到:回转体实物的形状因子大于模型,并以此说明形状因子受 R_n 的影响。最近发现这个结论是不对的,原因是在计算程序中用错了数据,经过纠正以后,所得的结论是:只要不发生分离,雷诺数 R_n 对形状因子 $(1+K)$ 的影响很小。

2. 日本 H.Maruo:介绍用 Coordinate Straining 法可以使低速肥大船的兴波阻力理论计算结果与实测之间有更好的符合程度。

3. 日本 K.Muraoka, N.C.Markatos:介绍用 "Finite Difference Method for 3-dimension Partially - Parabolic Flows" 计算油轮模型尾部的粘性压力,试验与计算之间符合程度良好,认为这个方法可以作为估算粘性压阻力的第一步。

4. 土耳其 K.Kafali:提出水的表面张力对阻力的影响。由于表面张力的作用使在船体边沿的水面提高了 $\Delta h = 4\text{mm}$,如果把这种影响看作是湿面积的增加并进行修正,则其结果会使形状因子 $(1+K)$ 减小。表面张力对阻力的影响对于用小船模进行试验的水池尤其重要。

5. 芬兰 Valter Kostilainen:通过以纵切法及矩阵测量法 (Measurements With Matrix Method) 所得的波型阻力的比较发现:大船模的波型阻力大于小船模,这是波型阻力的尺度作用。为此,曾企图进行实船测量,但未获成功。

粘性阻力与兴波阻力之间的相互影响主要表现为能的形式转换,即波动的能转化为粘

性尾流的能。因此，如果对波型和尾流同时测量以决定总能的损失和阻力，则必需是同一控制面。从现有已知的波型测量方法看来，只有横切法比较合适。

6. 美国 J. W. Hoyt 和 P. R. Kenis: 对31个水池的水质进行了处理，分析了池水中的细菌及微生物的生长情况，然后又进行了阻力试验。发现所有水样都有减阻现象（减少1%~6%），其中有5个水样的减阻超过40%。由此看来，各水池都有生长有机物质导致减阻的可能，这对水池试验结果的可靠性和重复性都有直接影响。水的污浊的情况不能作为水质的判断标准，有些水看上去虽很清爽，但其减阻却很多，而另一些水看上去虽有大量水生物，但有时减阻却不多。总之，水质的研究对于水池是很重要的。

7. 美国 J. W. Hoyt 和 P. R. Kenis: 主要介绍蜡质船模微生物生长的控制问题。由于水生微生物的影响，蜡模在水中贮存后常出现棕色或黑色斑点，这不仅影响了模型的外观，还增加了模型的表面粗糙度，故在试验前需重刮一次以获得光滑表面。这对试验结果的重复性是很有影响的。经过广泛试验，证明在蜡模中加入100ppm 或更多一点的 Zinc Omadine 可有效地防止水生微生物的生长，而且只要遵守操作规程，Zinc Omadine 对人体是无害的。

性能委员会

十五届ITTC性能委员会的工作重点是推荐一个“1978 ITTC 单桨船的性能预估方法”。这个方法实质上就是大家熟知的 ΔC_T 、 ΔW 法。在分析比较了各种 C_F 、 ΔC_F 、 W 、 ΔW 及螺旋桨尺度作用的修正方法以后，推荐了一些计算公式。鉴于分析结果比较离散，因此这个暂行标准分为两个部分：第一部分称为“ITTC标准预估”，第二部分是结合各水池自己所积累的经验修正资料，给出实船航速、转速及马力之间的关系。这个暂行标准已由十五届水池会议通过，要求各成员组织在今后的工作中试行。现简要介绍如下。

一、“ITTC 标准预估”

1. 船模阻力

用1957 ITTC 的 C_F 计算公式计算形状因子 $(1+K)$ ， $(1+K)$ 的决定根据 Prohaska 的建议是：

$$C_T/C_F = (1+K) + C F_n^4 / C_F$$

但委员会认为适当修改成下式后更为合适：

$$C_T/C_F = (1+K) + C F_n^2 / C_F$$

式中 C_T ——船模总阻力系数； C_F ——根据1957 ITTC公式算得之阻力系数， F_n ——傅氏数。式中的 n 、 C 及 K 等应由最小二乘方来决定。

2. 螺旋桨模型敞水试验

试验结果按惯例算成无因次系数或绘制成性征曲线，即 K_T 、 $K_Q \sim J$ 曲线。试验时以 0.75 半径处弦长计算的雷诺数不低于 3.0×10^5 。

3. 船模自航试验

自航试验中量得的推力 T 、扭矩 Q 及转速 n （均相对于某一船模速度 V ）算成下列无因次系数：

$$K_{TM} = T / \rho n^2 D^4, \quad K_{QM} = Q / \rho n^3 D^5$$

用等推力法据 K_{TM} 在模型敞水曲线上读出扭矩及进速系数 K_{QTM} 及 J_{TM} 。於是, 可得模型的伴流分数及相对旋转效率为:

$$W_{TM} = 1 - \frac{J_{TM} D n}{V}$$

$$\eta_{RM} = \frac{K_{QTM}}{K_{QM}}$$

推力减额分数 t 可按式求得:

$$t = \frac{T + F_D - R_C}{T}$$

式中 F_D 为摩擦阻力修正值; R_C 为相应於自航试验水温时的船模阻力。可据下式算得:

$$R_C = \frac{(1+K) C_{FMC} + C_R}{(1+K) C_{FM} + C_R} R_{TM}$$

其中 C_{FM} 为阻力试验水温时的摩擦阻力系数; C_{FMC} 为相当於自航试验水温时的摩擦阻力系数 (都按 1957 ITTC 公式计算); R_{TM} 为阻力试验时量得的船模总阻力; C_R 为剩余阻力系数, 即

$$C_R = C_T - (1+K) C_{FM}$$

4. 实船总阻力

无舦龙骨时的实船总阻力系数为:

$$C_{TS} = (1+K) C_{FS} + C_R + \Delta C_F + C_{AA}$$

式中 K 为形状因子, 由船模阻力试验决定;

C_{FS} 为按 1957 ITTC 公式计算之实船摩擦阻力系数;

C_R 为剩余阻力系数, 由船模试验求得;

ΔC_F 为粗糙度裕度, 由下式决定:

$$\Delta C_F = [105 \left(\frac{K_S}{L_{WL}} \right)^{1/3} - 0.64] \times 10^{-3}$$

其中 K_S 为粗糙度, 可取 $K_S = 150 \times 10^{-6} \text{m}$;

C_{AA} 为空气阻力系数, 按下式决定:

$$C_{AA} = 0.001 - \frac{A_T}{S}$$

其中 A_T 为船体水线以上部分在横剖面的投影面积,

S 为湿面积。

在装有舦龙骨的情况下, 实船的总阻力系数为:

$$C_{TS} = \frac{S + S_{BK}}{S} [(1+K) C_{FS} + \Delta C_F] + C_R + C_{AA}$$

式中 S_{BK} 为舦龙骨的面积。

5. 实船螺旋桨性征

实船螺旋桨的敞水性征按下列方法从模型桨的性征曲线求得:

$$K_{TS} = K_{TM} - \Delta K_T$$

$$K_{QS} = K_{GM} - \Delta K_Q$$

式中
$$\Delta K_T = -\Delta C_D \times 0.3 \times \frac{P}{D} \times \frac{C \cdot Z}{D},$$

$$\Delta K_Q = +\Delta C_D \times 0.25 \times \frac{C \cdot Z}{D}.$$

其中 ΔC_D 是模型与实桨阻力系数之差, 即

$$\Delta C_D = C_{DM} - C_{DS},$$

式中
$$C_{DM} = 2 \left(1 + 2 \frac{t}{c} \right) \left[\frac{0.044}{(R_{nco})^{1/6}} - \frac{5}{(R_{nco})^{2/3}} \right],$$

$$C_{DS} = 2 \left(1 + 2 \frac{t}{c} \right) (1.89 + 1.62 \log \frac{C}{K_P})^{-2.5}$$

其中 C 、 t 、 $\frac{P}{D}$ 、 R_{nco} 分别为0.75半径处桨叶的弦长、最大厚度、螺距比及雷诺数; Z 为桨叶数。

6. 实船伴流分数 W_{TS}

实船伴流分数可据模型伴流分数 W_{TM} 及推力减额分数 t 计算得到:

$$W_{TS} = (t + 0.04) + (W_{TM} - t - 0.04) \frac{(1+K) C_{FS} + \Delta C_F}{(1+K) C_{FM}}$$

其中 0.04 是考虑到舵的影响。

7. ITTC标准预估

假定实船与模型的推力减额分数 t 及相对旋转效率相同。

实桨的负荷可从下式求得:

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{S}{2D^2} \frac{C_{TS}}{(1-t)(1-W_{TS})^2}$$

据上述 K_T/J^2 数值, 可在实桨性能曲线上读得进速系数 J_{TS} 及扭矩系数 K_{QTS} , 据此可以算出实船的下列数据:

——转速
$$n_s = \frac{(1 - W_{TS}) V_s}{J_{TS} D} \quad (\text{rps})$$

——收到马力
$$P_{DS} = 2\pi\rho D^5 n_s^3 \frac{K_{QTS}}{\eta_R} \cdot 10^{-3} \quad (\text{KW})$$

——推力
$$T_s = \frac{K_T}{J^2} J_{TS}^2 \rho D^4 n_s^2 \quad (\text{N})$$

——扭矩
$$Q_s = \frac{K_{QTS}}{\eta_R} \rho D^5 n_s^3 \quad (\text{Nm})$$

——有效马力
$$P_E = C_{TS} \cdot \frac{1}{2} \rho V_s^3 S \cdot 10^{-3} \quad (\text{KW})$$

——总效率
$$\eta_D = P_E / P_{DS}$$

——船身效率 $\eta_H = \frac{1-t}{1-W_{TS}}$

二、结合各水池积累的经验修正资料给出 实船航速、转速及功率之间的关系

十五届ITTC性能委员会在分析许多单位所提供的实际资料时发现, 无论用何种公式所得的 ΔW 与 ΔC_F 数值总是相当离散, 难以得到比较一致的数值。造成这种离散的原因可能是由於各水池的模型试验及实船试航程序不同所致, 因此引入一个所谓结合本单位的修正项 ΔC_{FC} 及 ΔW_C (Individual corrections)。这样, 实际的 ΔC_F 及 ΔW 为:

$$\Delta C_F = (\Delta C_F)_{\text{formula}} + \Delta C_{FC}$$

$$\Delta W = (\Delta W)_{\text{formula}} + \Delta W_C$$

ΔC_{FC} 、 ΔW_C 由各水池根据自己的经验资料来决定。

此外, 有些单位喜欢采用功率因子 C_P 及转速因子 C_n 来表示预估性能和实船试验结果之间的差别修正数, 即

$$C_P = P_{DT}/P_{DS}, \quad C_n = n_T/n_S$$

式中 P_{DT} 、 n_T ——实船试航结果, P_{DS} 、 n_S ——预估数值。

C_P 、 C_n 数值同样由各水池根据自己的经验资料来决定。

因此, 最终的实船试航性能预估可用下列两种办法给出:

1) 应用 C_P — C_n 修正数据

最后给出的实船试航性能预估值为:

$$\text{转速 } n_T = C_n n_S \text{ (rps)}$$

$$\text{功率 } P_{DT} = C_P P_{DS} \text{ (KW)}$$

2) 应用 ΔC_{FC} — ΔW_C 修正数据

实桨的负荷系数为:

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{S}{2D^2} \frac{C_{TS} + \Delta C_{FC}}{(1-t)(1-W_{TS} + \Delta W_C)^2}$$

根据 $\frac{K_T}{J^2}$ 值在实桨性能征曲线上查得 J_{TS} 及 K_{QTS} , 由此可得:

$$\text{转速 } n_T = \frac{(1-W_{TS} + \Delta W_C) V_S}{J_{TS} D} \text{ (rps)}$$

$$\text{收到功率 } P_{DT} = 2\pi\rho D^5 n_T^3 \frac{K_{QTS}}{n_R} 10^{-3} \text{ (KW)}$$

在性能委员会报告的附录中, 介绍了“1978ITTC单桨船性能预估”的电子计算机程序, 此外还附有输入及输出表格等样张, 详见十五届ITTC论文集第一卷第388页。

三、委员会建议

1. 建议ITTC各成员组织用“1978 ITTC单桨船的性能预估方法”进行实船性能的估算。
2. 继续研究下列船型的性能：
 - (1) 方形系数小、功率高的单桨船；
 - (2) 多桨船；
 - (3) 滑艇、水翼艇及表面效应船等高速船。
3. 继续研究推进效率成分及螺旋桨性能的尺度作用。
4. 努力改善实船试航及模型试验结果的质量（即提高正确度），因此必须研究模型试验的新方法。
5. 对目前正在进行的有关船壳粗糙度影响的研究应继续下去。
6. 委员会应开始注意对“营运裕度”（Service Margin）的研究。

四、讨论

十五届 ITTC 会议上性能委员会提出了书面讨论稿七篇，口头发言一个。共有八个发言，现介绍如下：

1. 日本Sudo：日本Akashi 水池Tsuda 等人曾经提出过在自航试验中用低螺距比桨模以提高雷诺数并且认为是有效的。Sudo 发言予以澄清：用低螺距比螺旋桨试验所得的自航要素与通常螺旋桨试验所得者不同，这是由于螺距比相差太大的缘故。因此，在实际上Akashi 水池并不采用低螺距比螺旋桨方法来进行自航试验。

2. 比利时 G. Aertssen 教授：用一长 2 米的船模（方形系数为 0.8）在风筒中进行试验，发现根据 1957 ITTC 公式所得的形状因子（ $1+K$ ）随雷诺数 R_N 而变，例如：

雷诺数 R_N	7×10^5	1×10^7	1.1×10^7	$(1.2-1.4) \times 10^7$
形状因子 $(1+K)$	1.304	1.294	1.279	1.27

并认为：形状因子（ $1+K$ ）随 R_N 而减少的原因是由于流动分离的缘故。

3. 中国盛振邦：根据交大船模试验池的研究结果，提出：

(1) 委员会报告中提到的螺旋桨模型敞水试验最低雷诺数为 2×10^5 ，这个数字过低，建议改为 3×10^5 。

(2) 螺旋桨尺度作用对于船模-实船相关因子的影响会使 ΔC_F 增加， ΔW 减小，但不大。

4. 英国D. I. Moor：1978 ITTC方法并不比1960/1972 ITTC方法正确，在许多问题尚未弄清的情况下不应提出新方法。

5. 西德 G. Collatz：1978 ITTC标准方法只有在阻力、敞水及自航试验都做的情況下方可采用。但是，许多单位常只做自航试验即可预估实船性能，因此建议 ITTC 对此予以考虑。