

116617
Y 86

352824

船舶性能实验技术

俞湘三 陈泽梁

编

楼连根 迟云鹏



上海交通大学出版社

编 者 的 话

船舶性能实验技术在船舶原理各教科书中都有专门章节进行阐述。但是,由于受到教材内容和篇幅的限制,往往只限于对本学科的实验技术介绍。实践证明,船舶原理各学科之间彼此相关、互为一体。所涉及的实验技术也互相联系。因此,必须较全面地了解船舶性能实验技术,才能比较有效地进行船舶性能实验,获得预期的效果。近年来,由于电子计算技术和测试技术的最新发展及广泛地被应用,船舶性能实验技术已经形成比较完整的体系。它不仅促进了船舶原理各门学科的进一步发展,也正为海洋工程和其他学科所借鉴。比较系统地叙述和总结船舶性能实验技术,是编写本教材的主要宗旨。

按照全国专业教材会议建议,由上海交通大学和大连理工大学共同编写这本《船舶性能实验技术》教材。俞湘三任主编,天津大学苏兴翹主审。

全书共十一章。第一章绪论,第二章船舶试验的相似律,第三章实验误差分析与数据处理,第四章试验水池和试验模型,第九章船模耐波性试验由俞湘三编写。第五章船模快速性试验,第六章螺旋桨模型空泡试验由陈泽梁编写。第八章船模操纵性试验由楼连根编写。第七章三向度伴流场测试技术,第十章实船快速性试验,第十一章实船耐波性与操纵性试验和第五章中之尾流场测量及波形分析法确定波形阻力两节由迟云鹏、孟宪钦、滕叙充、王少新编写。

船舶性能实验技术是一门内容极为广泛的科学。本教科书中不可能列入所有的内容,作者只能就近年来国内外的一些常规试验技术和有关著作、文献,结合船模试验池工作中的经验,力求给以合乎现代水平的叙述。限于作者的知识水平,首次编写内容如

此广泛且实践性强的教材，定有不足之处。欢迎读者提出批评和建议，待修订时改进。

本书可作为船舶工程专业本科的专业教材，也可供船舶性能研究和其他有关专业人员参考。

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 船舶性能实验的意义和途径	1
§ 1-2 船舶性能实验技术的主要内容	2
第二章 船模试验的相似律	3
§ 2-1 概述	3
§ 2-2 定常流动型船模试验的相似准则	4
§ 2-3 不定常流动型船模试验的相似准则	6
§ 2-4 小直径管柱试验的相似准则	7
§ 2-5 考虑到结构强度情况下的相似问题	8
§ 2-6 缆索用于模型试验时的相似准则	9
§ 2-7 其他相似问题	11
第三章 实验误差分析与数据处理	12
§ 3-1 测量误差及其分类	12
§ 3-2 随机误差分布	13
§ 3-3 随机误差的统计特性	16
§ 3-4 系统误差分析	19
§ 3-5 系统误差的减小和消除	22
§ 3-6 粗大误差的防止和消除	23
§ 3-7 测量结果的表示方法	24
§ 3-8 动态测试数据的处理	26
第四章 试验水池和试验模型	29
§ 4-1 试验水池	29
§ 4-2 试验模型	38
§ 4-3 模型试验对水池的要求	42

第五章 船模快速性试验	44
§ 5-1 快速性试验的目的和内容	44
§ 5-2 试验前的模型准备	45
§ 5-3 船模静水阻力试验	49
§ 5-4 试验速度修正	54
§ 5-5 船模阻力试验结果的换算方法	56
§ 5-6 螺旋桨模型的敞水试验	60
§ 5-7 自航试验概述	67
§ 5-8 自航试验方法	70
§ 5-9 船模自航试验结果的分析	73
§ 5-10 实船性能预报	75
§ 5-11 实船试航速度预报及螺旋桨与主机匹配判断	81
§ 5-12 自航试验报告内容	82
§ 5-13 备用螺旋桨的自航试验	83
§ 5-14 尾流场测量(确定粘性阻力)	81
§ 5-15 波形分析法确定波形阻力	90
第六章 螺旋桨模型的空泡试验	98
§ 6-1 螺旋桨空泡试验的目的和内容	98
§ 6-2 螺旋桨模型空泡试验的相似准则	98
§ 6-3 空泡水筒装置	100
§ 6-4 螺旋桨模型的空泡试验	104
§ 6-5 空泡水筒中桨模的其他试验	107
§ 6-6 影响空泡试验结果的各种因素	109
第七章 三维伴流场测试技术	112
§ 7-1 概述	112
§ 7-2 五孔毕托管的基本原理	112
§ 7-3 毕托管及其校验	117
§ 7-4 船后伴流场的测试方法	121
§ 7-5 伴流场测量数据的处理	122
第八章 船模操纵性试验	128

§ 8-1	船舶操纵性试验的目的和内容	128
§ 8-2	船舶操纵运动方程	129
§ 8-3	自由自航船模试验	135
§ 8-4	约束船模试验	148
第九章	船模耐波性试验	170
§ 9-1	船模耐波性试验目的和内容	170
§ 9-2	船模试验中的池壁效应	170
§ 9-3	耐波性试验前的模型准备	172
§ 9-4	耐波性水池的主要设备	175
§ 9-5	规则波上船模试验及实船耐波性预报	182
§ 9-6	不规则波上船模试验	186
§ 9-7	过渡波上船模试验	190
§ 9-8	波浪对航行船舶快速性影响	195
§ 9-9	甲板上浪和砰击的船模试验	200
§ 9-10	横摇阻尼系数和附连质量惯性矩的确定	208
§ 9-11	船舶减摇装置模型试验	211
第十章	实船快速性试验	217
§ 10-1	实船快速性试验条件	217
§ 10-2	实船快速性试验方法	218
§ 10-3	实验试验测试仪表	225
§ 10-4	实船快速性试验结果的分析方法	233
第十一章	实船耐波性与操纵性试验	236
§ 11-1	实船耐波性试验前的准备	236
§ 11-2	实船耐波性试验	239
§ 11-3	耐波性试验的参数测量和数据处理	241
§ 11-4	实船操纵性试验要求	253
§ 11-5	实船操纵性试验内容	254
§ 11-6	实船操纵性试验的主要测试仪表	257
附录 I	水的运动粘性系数 ν 和质量密度 ρ	260
附录 II	风级和浪级表	261

附录Ⅲ 海漫谱	263
参考文献	266

第一章 绪 论

§ 1-1 船舶性能实验的意义和途径

船舶性能实验是研究船舶航行性能的重要方法。船舶性能实验有两种途径；即实船试验和船模试验。前者是用实船在实际环境条件下试验，后者则用物理模型在实验室内进行试验。把这两种方法进行比较，船模试验不受自然环境条件的限制，也无配载的困难，试验内容可以多种多样，且可重复进行。所花的人力、物力、时间都比实船试验要少得多。就科学研究而言，船模试验比实船试验具有更重要的意义。研究新的船型，探讨影响船舶航行性能的各种因素，最有效的途径是进行船模试验。探讨船舶翻沉的原因，通常也是进行船模试验。船舶航行性能各学科的理论发展也离不开船模试验。通过船模试验，可以对船舶在航行中所发生的物理过程获得更深刻的理解。它可以促进理论工作进一步发展，使工程设计中所应用的计算方法不断地完善，提高理论研究和工程设计能力，改进船舶的航行性能。因此，世界上造船工业比较发达的国家，无不重视船模试验池的建设并相应地发展船模试验技术；当然，船模试验不能完全取代实船试验的作用。到目前为止，还不能单纯地用船模试验结果去全面地评价实船的航行性能，这是由于存在种种原因，使船模与实船的试验结果之间出现差异，人们必须从这两种试验结果中找出它们的内在联系，然后才能采用换算方法，用船模试验资料来估算实船的航行性能。所以，实船试验也是研究船舶航行性能中不可缺少的方法。本课程将较系统地介绍通常所采用的船舶性能实验技术，并将着重介绍船模试验技术。所谓“船模试验技术”，它的内容不仅指船模的试验技术本身，就广义而言，它还包括螺旋桨模型试验和其他有关的模型试验技术。

术。

§ 1-2 船舶性能实验技术的主要内容

在实验室中进行模型试验,必须对试验对象和必要的环境条件进行物理模拟,采用科学的测试方法和有效的测试手段进行测量,经过数据处理,对试验结果进行计算和分析,得出所需的结果,这就是船舶试验技术的全部内容。在海上进行实船试验,要受水文和气象条件的制约,所用的测试方法及仪表与实验室中所采用的也不尽相同。一般说来,实船试验技术相对地要复杂一些。

船舶性能实验技术水平取决于造船科学和其他有关科学技术的发展水平。近代,在造船科学发展的早期阶段,1871年弗劳德主持建造了世界上第一座用拖车拖曳的船模试验池。进行了平板和船模试验,提出了计算平板摩擦阻力的经验公式,并作出了实船和船模之间阻力换算的二因次假定。19世纪末和20世纪初,波浪理论、边界层理论和机翼理论的发展,促进了各种阻力成分研究的深化,并为研究船舶在波浪上运动创造了条件。概率论与数理统计、电子计算技术和最新测试技术在造船科学上的应用,使船舶性能实验技术发展到一个新的阶段。

40多年来,随着国民经济的发展,我国的造船科学研究工作也取得了很大的进展。在我国已经陆续建成的不同类型的船池,大大小小的有20余只。进行了大量的船模试验工作,相应地也使我国的船模试验技术得到了发展。与此同时,也积累了不少实船试验资料和经验,为我国造船工业作出了很大的贡献。

本课程将比较系统地介绍船舶航行性能实验技术。因篇幅所限,课程内容不可能包罗万象。在课程中凡涉及到数学、力学、仪器仪表学、电子学等内容,通常都只应用其基本原理和结论,不作详尽的推导。

第二章 船模试验的相似律

§ 2-1 概 述

船模试验是利用物理模型方法,确定船舶性能研究和船舶设计中所要求的有关数据及资料的一种手段。因此,为了能够正确地
从数量上取得所需的资料,必须掌握从模型试验结果换算至实船
相应数据的基本规律。根据流体力学基本理论得知,绕着几何相
似的物体流动的流体。如果在它的各个相对应的点子上的一切特
征量保持比例关系,其速度向量和流动的方向也保持不变的话,则
认为它们是动力相似的。保证动力相似的最重要条件是,除了要
保持实物和模型的几何相似外,尚需保持流体的外边界相似。物体
在液体中的运动和受力是一个比较复杂的问题。要把模型试验结
果换算到几何相似的实船上去,所必须遵循的规律不是一个简单
的比例关系,而是一些确定的相似律。弗劳德于 1871 年创立船模
试验方法时,提出了船舶阻力所遵循的弗劳德准则。随着船模试
验技术的发展,所涉及到的问题日益广泛,促使相似理论进一步发
展。最初阶段,船模试验的目的主要是解决船舶快速性研究中的
问题。它所涉及到的也就是流体力学中的定常流相似问题。从
50 年代开始,由于耐波性的发展,这就必须考虑非定常的流动问
题。60 年代起,近海石油开发所带来的海洋工程研究,提出了流
固耦合的试验技术问题。例如,一个浮式生产系统的模型试验,将
涉及到不定常的波浪、运动、以及系泊系统和立管的载荷确定问
题。解决这类问题,除了要考虑流体动力的相似律外,还需考虑系
泊系统、立管的结构特性等,这就带来了模型与实体的结构特性相
似准则问题。由此可见,船模试验中所遇到的相似问题,既很重
要,又非常复杂。在解决不同类型问题时,会有不同的特殊要求。

船模试验技术是一门实用性很强且发展比较迅速的应用科学,它所包含的相似律问题,也将随其发展而日益深化。

研究物体在液体中流动的相似律,首先必须确知流态。在不同的流态下,作用于流体中物体的流体动力特性不同。因此,必须分析不同的流态,找出在该流动状态下,模型与实体相应的各物理量之间,为要保持动力相似所必须遵循的基本关系式。从目前的船模试验基本内容来看,大致可分为以下几种类型。

(1) 定常流式的。主要包含船模阻力、推进器等试验。

(2) 非定常流式的。包含耐波性及部分操纵性试验等。

(3) 波浪中的强度试验。包含船舶及一些海洋工程浮式生产系统的强度试验。

以上只是大致的划分。实际上还有许多其他形式的试验测量。例如,平面运动机构所进行的系数测量,就不能简单地把它归入那一类,但是它们的模型相似原理是一致的,都可以根据一些基本准则来分析。

§ 2-2 定常流动型船模试验的相似准则

对于船模试验的相似准则的讨论,可以先从定常流动开始。众所周知,水是有粘性的。因存在自由液面,重力也起作用。为了便于讨论起见,假定无重力作用,只有粘性影响。因此,在流体动力方程组(纳维-斯托克斯方程组)里,所出现的表征流体本身特性的参数,只有运动粘性系数 ν 。方程中的未知函数是速度 u 及压力 p 。这种情况下的物体运动,受此一运动方程和相应的边界条件、运动物体的形状和大小以及它的运动速度所制约。假定物体的形状是已知的,它的几何特性可以由一个线尺度来确定,对于船模来说,一般采用船长 L 作为特征长度、航速 u 作为特征速度。任何流动都是由 ν 、 L 、 u 这三个参数来确定的。这些量的量纲是, $\nu[\text{m}^2/\text{s}]$, $L[\text{m}]$, $u[\text{m/s}]$ 。不难证明,由上述三个参数只能构成一个无量纲量,即 uL/ν 。这个组合称为雷诺数,通常用 Re 表示:

$$Re = \frac{uL}{\nu}, \quad (2-1)$$

水的运动粘性系数 ν 和密度 ρ 随温度变化关系见附录 I。

用 L 和 u 来分别度量流场中任一点的长度和速度。引入无量纲量 r/L 和 v/u , 这里 r 和 v 代表另一流场中任一点的长度和速度值。由于唯一的无量纲参数是雷诺数, 显然, 速度分布可由以下形式的函数来表达, 即

$$v = uf_1\left(\frac{r}{L}, Re\right).$$

由此式可看出, 在同一类型的两个不同流动中, 若它们的雷诺数相同, 则 v/u 与 r/L 的函数关系是相同的。只要改变坐标和速度的量度单位, 就可从一个流动得出另一个流动, 我们称这些流动是相似的。同样地, 我们可写出流场中压力 p 分布的表示式。将压力表示为无量纲形式 $p/\rho u^2$, 则此一量为无量纲量 r/L 和雷诺数的函数, 即

$$\frac{p}{\rho u^2} = f_2\left(\frac{r}{L}, Re\right).$$

对于作用在物体上的总合力(即阻力), 如将其用 $\rho u^2 L^2$ 无量纲化后, 将只是雷诺数 Re 的函数, 即

$$F = \rho u^2 L^2 f_3(Re).$$

这里, F 是作用在物体上的总阻力。

若存在自由液面及兴波, 则重力对流体有重要作用。在这种情况下, 流动将由 L, u, ν 和重力加速度 g 四个参数来确定。由这四个参数可以构成两个独立的无量纲量, 这两个无量纲量中, 一个是雷诺数 Re , 另一个是弗劳德数 F_r , 后者可表达为

$$F_r = \frac{u}{\sqrt{gL}}. \quad (2-2)$$

在这种情况下, 只有当 Re 值和 F_r 值都相等时, 两个流动才能保持相似。需要说明的是, 包含在无量纲量中的一些特征量, 需根据实际情况取不同的值。例如, 特征长度 L 既可取船长, 也可取其他的

线尺度值,但所取的值在该流动中将是影响较大的参数。

在“船舶阻力”中,还采用另一个参数 $u/\sqrt{L}$,它被称为速长比。与弗劳德数相比,在分母的根式中略去了重力加速度 g 。

§ 2-3 不定常流动型船模试验的相似准则

不定常流动型的船模试验有两种类型:一种是流体流动的不定常性,例如推进器的试验和应用平面运动机构测量水动力系数的试验;另一种是由于船模本身的不定常运动,例如船模在波浪上的运动试验等。

要描述一个确定型的非定常流的特征,不仅要求有 u 、 L 、 ν 、 ρ 等,还要有表示流动特征的时间间隔 τ 。由流体力学得知,在非定常情况下,必须知道流场随时间的变化率。在某些特定情况下,时间间隔 τ 可以作为这一变化率的表征,例如周期性流动的周期。到目前为止,还只能对周期性的运动给出特征数,这就是所谓的斯特罗哈数,其形式为

$$S = \frac{u\tau}{L} \quad (2-3)$$

现在讨论第二种情况,即船模本身具有非定常运动。从刚体动力学可知,要使船模与实船的运动及动力相似,除了要保持几何相似外,尚需使质量和质量分布也保持相似。不言而喻,两者的重心在物体中的位置也应该相似。实船与船模均浮于水中,水的密度相同,显然,船与船模的质量应与其排水体积成正比,即正比于线尺度的三次方。同理,质量静距及质量惯性矩分别正比于线尺度的四次方和五次方。

现在来观察船舶的运动微分方程。如果取船舶的特征长度为 L ,质量或质量惯性矩为 ρV 和 $\rho V r^2$ 。这里, V 为船的排水体积, r 为惯性半径。用长度 L 进行无因次化后,船舶运动方程式可写成。

$$\rho V r^2 \frac{d\theta}{dt^2} + \rho V \cdot \overline{GM} \cdot \frac{gL}{\tau^2} \theta = F(t) \quad (2-4)$$

式中: τ 为振荡周期; $\overline{GM}$ 为船的横稳性高; θ 为船的摇摆角。

从船舶运动方程式可见,如果两个不同尺度的实船和船模,只要它们之间保持几何相似,质量大小和质量分布相似,并且方程式中的第二项的 gL/τ^2 不变,则其运动将是动力相似的。这样,我们就可得到类似弗劳德数(用于决定周期)的准则,即

$$\tau \propto \sqrt{gL} \propto \sqrt{L} \quad (2-5)$$

这是耐波性试验中用来决定周期的一个重要公式。关于运动的幅值,可以用几何相似的原则来确定。运动中涉及到的流体动力,同样可应用前面所提出的弗劳德数及雷诺数相似准则,而斯特劳哈尔相似准则将为前面给出的周期准则所代替。

§ 2-4 小直径管柱试验的相似准则

由于近代海洋工程的发展,一些近海工程结构的性能及载荷问题,也日益成为船模试验池中的试验内容。这些结构的形式多具有管柱的特点,在决定其流体动力时,也具有独特之处。这种小直径管柱结构的流体动力问题,因涉及管柱后的界层分离而变得十分复杂,特别是在确定波浪作用下的载荷情况更是如此。通常都用经验性的莫里逊公式来进行计算。但公式中的系数,到目前为止,仍需通过模型试验来测定。根据理论分析,在确定波浪作用于这一小直径管柱结构上的力的成分时,还与另一个表征振荡流特征的卡尔潘特数 K 有关。后者定义为振荡流的振幅与物体直径之比,它可写成:

$$K = \frac{u_m \tau}{D} = \frac{A \omega \tau}{D} = \frac{2 \pi A}{D}, \quad (2-6)$$

式中: u_m 为振荡流的速度幅值; τ 为振荡周期; ω 为振荡的频率; A 为振荡流的振幅; D 为小管柱直径。

分析结果表明,当 K 数小于 5 时,粘性引起的分离载荷可以略去。当 K 数大于 10 时,就必须考虑粘性影响。如果在振荡流上再叠加一个均匀流,同样,也必须考虑流的影响。为了考虑不同尺度情况下浪、流(或振荡流与均匀流)同时存在时的相似性,将给出另一个判据,即约化速度 u_R ,它定义为

$$u_R = \frac{u\tau}{D}, \quad (2-7)$$

式中的 u 为均匀流速。

将约化速度 u_R 和 K 数相结合,就可确定相应的流动状态。

§ 2-5 考虑到结构强度情况下的相似问题

在有些船模试验中,涉及到船体结构的强度和刚度问题。例如,波浪中的纵强度测量,船首的拍击强度等。原则上,这一类试验必须同时满足模型与实船几何相似、质量及质量分布相似、结构特性相似。但是在实际模型制作时很难同时满足,必须加以适当简化。下面将根据结构强度理论给出结构相似所必须遵循的相似律。

从材料力学可知,结构上某一断面的拉伸应变 ε 可用下式进行计算:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{A} \quad (2-8)$$

式中: F 是作用在结构断面上的载荷; A 是结构断面的面积; E 是相氏模数。显然,对于实船和船模来说,它们的 ε 值应该相等,即

$$\left(\frac{F}{AE}\right)_s = \left(\frac{F}{AE}\right)_m, \text{ 或 } \frac{F_s}{F_m} = \frac{A_s E_s}{A_m E_m} \quad (2-9)$$

式中的下标“s”和“m”分别表示属于实船和船模的物理量,后文中类似的表达式一般不再注释。从上式可以看出,由于力是与线尺度的三次方成正比,而截面则是二次方关系,所以有

$$\frac{\lambda^3 F_m}{F_m} = \frac{\lambda^2 A_m}{A_m} \frac{E_s}{E_m}, \text{ 即 } \frac{E_s}{E_m} = \lambda, \quad (2-10)$$

$$\frac{A_s E_s}{A_m E_m} = \lambda^3. \quad (2-11)$$

由式(2-10)可以看出, $E_s = \lambda E_m$ 。如果无法做到使模型的相氏模数比实船小 λ 倍, 而是 $E_m = E_s$, 则就需把模型的截面积按几何相似准则减小 λ 倍, 才能保证二者的伸长率 ε 相等。

按同样方法可以推导出断面惯性矩的缩尺关系。由材料力学可知, 断面的偏转角 α 可表达为

$$\alpha = \frac{M}{EI},$$

式中: M 为力矩载荷; I 为结构断面惯性矩。

可以得到下列关系式:

$$\left(\frac{M}{EI}\right)_s = \left(\frac{M}{EI}\right)_m, \text{ 或 } \frac{M_s}{M_m} = \frac{E_s I_s}{E_m I_m}. \quad (2-12)$$

由量纲分析可知, 力矩和断面惯性矩都与线尺度的四次方成比例, 即

$$\frac{E_s I_s}{E_m I_m} = \lambda^4. \quad (2-13)$$

式(2-13)表明, 对于断面惯性矩 I 说来, 当 $E_s = E_m$ 时, 它仍服从几何相似规律, 这与拉伸形变不同。显然, 如果要进行结构的载荷试验, 模型的设计与制作就比较复杂。

进行船体结构动态试验, 除了要考虑结构强度的模拟外, 还应保证其振动自然频率及模态的相似。而振动的自然频率可以由前一节中所提到的与线尺度方根关系来确定。

§ 2-6 缆索用于模型试验时的相似准则

当用缆索进行船模的系泊或拖航试验时, 必须对模型缆索与实用缆索进行模拟。根据相似准则, 缆绳的模型与原型之间必须满

足几何相似、质量相似和弹性相似。

缆索的几何相似主要是长度相似。

缆索的质量相似即缆索单位长度质量 w 的相似。缆索的单位长度质量 w 可用下式表达：

$$w = c_a d^2, \quad (2-14)$$

式中： d 为缆索直径； c_a 为缆索在空气中的质量比例系数。

钢缆 $c_a = 0.0374 \text{ kg/cm}^2/\text{m}$ ；

尼龙缆(3股) $c_a = 0.0068 \text{ kg/cm}^2/\text{m}$ 。

模型缆索单位长度的质量 w_m 为

$$w_m = \frac{c_a d^2}{\lambda^2},$$

式中， λ 是模型与原型的缩尺比。

缆索的弹性相似即缆索的受力-伸长关系的相似。缆索的受力与伸长关系是非线性的，它不遵循虎克定律。为了估算缆索力 T ，通常可采用威尔逊(Wilson)公式计算

$$\frac{T}{d^2} = c_e \left(\frac{\Delta S}{S_0} \right)^n, \quad (2-15)$$

式中的 c_e 是缆索的弹性系数；

钢缆 $c_e = 2.698 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$ ；

尼龙缆 $c_e = 1.530 \times 10^9 \text{ N/cm}^2$ ；

n 为指数：

钢缆 $n = 3/2$ ；

尼龙缆 $n = 3$ ；

S_0 为缆索的初始长度； ΔS 为拉伸长度。

按照式(2-15)计算，可求得原型缆索(p)中的缆索力为

$$T_p = c_e d^2 \left(\frac{\Delta S_p}{S_{0p}} \right)^n$$

不难得到模型缆索(m)中的缆索力为