

实船性能试验手册

〔苏〕И.В. 吉尔斯等著

国防工业出版社

实 船 性 能 试 验 手 册

[苏]И.В.吉尔斯 等著

郭琪英 鄒明川 俞湘三 译校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书对实船性能试验作了系统的论述；讨论了各种测试方法，介绍了测试用的仪表，并对合理地组织试验和分析试验结果提出了各种建议。

本书可供造船和航运部门的科技人员、工艺人员，以及高等院校有关专业的师生参考使用。

ИСПЫТАНИЯ МОРЕХОДНЫХ КАЧЕСТВ СУДОВ

Справочник

И. В. Гирс

А. А. Русецкий

Ю. А. Непцветаев

Издательство «Судостроение» Ленинград 1977

*

实船性能试验手册

[苏] И. В. 吉尔斯 等著

郭琪英 邬明川 俞湘三 译校

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 7¹/₂ 185千字

1982年7月第一版 1982年7月第一次印刷 印数：0,001—1,200册

统一书号：15034·2315 定价：0.96元

作者的话

船舶的建造通常要经过专门的实船试验才能宣告完成。实船试验的目的是为了测定船舶的航行性能，并对船舶设计单位和船厂所作的设计计算和向订货方提出的保证加以评价。实船试验也是有关船舶实际航行性能资料的主要来源。但是，实船试验并非在任何时间都能进行得合理而又足够精确，因此可能会白白浪费人力、物力和时间。出现这种情况在很大程度上是由于对实船试验的意义认识不足，以及缺乏有关如何来合理处理试验结果的新的参考资料。

在本手册中，作者对系统地论述排水型船舶实船性能试验的几种基本方法作了初次尝试，介绍了试验所使用的测试仪表，对合理地组织试验和分析试验结果提出了各种建议。

本手册只讨论船舶原理中的航行性能问题，但不包括船舶浮性和不沉性，因为这些性能按习惯是用计算方法来确定的。对于用实验的方法确定船舶稳性的论述仅限于简单的倾斜试验方法，对这方面的全面论述，可参见《船舶静力学和动力学手册》第一册（C. H. 勃拉哥维申斯基、A. H. 霍洛季林，列宁格勒造船工业出版社，1975年）。有关非排水型船舶航行性能的试验研究方法目前还没有定型，所以本手册不予讨论。本手册也不涉及船体强度的实船试验问题，因为这个问题在Ю. Л. 别略克所著的《船体强度的试验研究》（列宁格勒造船工业出版社，1964年）一书中已有论述。

在编写本书的过程中参阅了苏联和其它国家的许多资料。

这个第二版本是经过大量的改编和补充后写成的。在改编过程中，考虑了近几年来苏联和其它国家出版的有关航行试验方

法规定的各种标准。由于测验技术上的进展，所以对测试仪表这部分内容修改得最多，其中有关航行试验仪器的几节是重新编写的，有关试验结果的分析 and 消除外界条件影响的方法部分内容也作了相当大的改动。

本书各章节的编写者是：序言——И. В. 吉尔斯 和 Ю. А. 涅茨维塔耶夫；§ 1 ~ § 7——И. В. 吉尔斯；§ 8 ~ § 10——Ф. Л. 斯莫特里茨基；§ 12 ~ § 17 和第二章——А. А. 鲁谢茨基；§ 11——И. В. 吉尔斯和 А. А. 鲁谢茨基；第三~四章——Ю. А. 涅茨维塔耶夫；§ 29——Ю. А. 涅茨维塔耶夫 和 Ф. Л. 斯莫特里茨基。

序 言

单纯采用以船模试验和理论计算为基础的研究方法，还不足以全面评价所设计船舶的航行性能，因为所必需的数据还不够齐全。所以，不管这些方法多么完善，作为船舶航行性能资料来源的实船试验依然保留着它的作用。

“航行性能”这一术语一般是指漂浮在水面上的弹性体——船舶所固有的各种性能的总和，诸如：浮性、稳性、不沉性、强度、快速性、操纵性和耐波性。其中“耐波性”这个术语只包括那些对船在波浪上航行来说影响大的性能，这些性能取决于船的摇摆，船在波浪上的性能（主要是上浪和飞溅）以及船对海上航行的总的适应性。

船舶航行性能实船试验主要可分为如下几种：推进性能试验（测速试验、拖曳阻力试验和拖力试验）、机动性能试验和耐波性能试验。

通过测速试验可得出自航船舶在静水中的几种航速：主机全功率状态的最大航速以及以逐步增大螺旋桨转速为标志的几种中间功率状态的航速。所以测速试验又叫作分级测速试验（指逐步增加螺旋桨转速）。为了消除浅水对船舶阻力的影响，测速试验一般应在深水中进行。如果需要研究浅水阻力，那么测速试验可在不同水深中进行。

拖曳阻力试验通常带有研究性质，其目的是为了直接测定船在实际条件下的阻力。

拖力试验是为了测量船舶原地系泊或拖带拖驳时在不同的推进器转速下的拖钩拉力。拖钩拉力可用联结在缆索或拖索上的测力计测量。拖网渔船、拖船、破冰船和某些其它船舶一般都要进

行这种试验。

机动性能试验的目的是为了确定在不同操舵角情况下最大航速和各种中间航速时的船舶回转性能，判断船的航向稳定性和确定船停车逆转制动时的惯性滑行时间和距离。通过试验还可以弄清一系列对检验船舶机动性能很有意义的其它要素。

耐波性试验是为了测定和判断船在有风和浪的情况下的航行性能。耐波性研究占有重要的地位，因为耐波性对船在波浪上的运行性能的总的评价有很大的影响。这些试验应在不同风力、不同浪级、不同航速和不同遭遇浪向下进行。

不是任何一艘新造的船舶或经过大修的船舶都要作上述所有各项试验。一般是批量船中的首制船（尤其是新型船）应当按照扩大的试验大纲进行试验，而批量船只作一般的试验。

用实船试验的方法来确定和判断船舶的航行性能，是在测量大量数据的基础上进行的。其中最重要的测量项目是：船的航速、动力装置的各种参数、回转直径和操舵角、船在波浪上摇摆时的角位移和线位移及其摇摆周期等。

进行这些测量同测量任何物理量一样，由于人的感觉器官和测量仪器不够完善，不可避免地会发生误差。所以要客观地判断船舶的航行性能，必须对测量误差有正确的概念，并采取一切可能的措施来减小这些误差。

由误差理论可知，测量误差可分为三类：过失误差，系统误差和随机误差。

属于过失误差一类的是指测量仪器示度判读上的误差和计算误差，以及仪器使用不当或使用了没有校正好的仪表和工具以及偶然的外界条件影响所造成的误差。在测量结果中应当消除这类误差。

属于系统误差一类的是指由一种或几种已知原因并在某些方面按一定规律形成的误差。如果支配系统误差的规律是已知的，那么这种误差可作为测量值的修正值来计算和对待。对船舶航行

性能的实船试验来讲，由试验条件和处理试验结果的方法所引起的系统误差是其特有的误差。例如测量航速时，水流和水底地形以及船体水下部分附生物的影响等等。

随机误差是指对比重复测量同一个量（这个量在整个测量过程中始终不变）的结果时所出现的误差。随机误差没有明显的规律性。其特点是，这种误差不论是正值还是负值都是随机的。大部分的随机误差是与判读仪表刻度时不可避免地要采用内插法、仪表需要调整、以及决定单次测量结果时的各种偶然因素有关。在实船试验过程中，随机误差在进行各种测量和计算时都会出现。随机误差的估算及其消除方法在概率论的误差理论中有专门讨论。

本手册某些章节引用了误差理论的某些结论，供分析实船试验结果时使用。这些结论均以具体建议的形式给出，而不加详细的推导，因为这些结论可在很多的概率论专著中得到解答。

在分析耐波性试验结果时，概率论应用得比较广泛，因为海浪的不规则性使得不仅是随机误差，而且所研究的表征船在波浪上航行性能的各种物理量的本身也都带有随机性，所以，只能用统计方法来描述。

目 录

作者的话	V
序言	VII
第一章 船舶的推进性能试验	1
§ 1 船舶测速试验的任务	1
§ 2 船舶和仪表在测速试验前的准备	2
§ 3 船舶排水量的确定	6
§ 4 测定航速的方法——测速线	8
§ 5 测速试验时船在测速线上的往返次数	17
§ 6 船舶测速试验的方式和条件	20
§ 7 测量船速用的无线电设备	27
§ 8 艏轴转速的测量	34
§ 9 艏轴功率的测量	36
§ 10 螺旋桨推力的测量	60
§ 11 处理船舶航速试验结果时消除流、风影响的方法	64
§ 12 船舶测速试验结果的分析	74
§ 13 装有可调螺距螺旋桨船舶的试航特点	86
§ 14 船舶的拖曳阻力试验	89
§ 15 船舶的拖力试验	99
§ 16 航行试验中对螺旋桨和船体附体的目测检查和摄影	102
§ 17 船体上水流结构的研究	105
第二章 船舶机动性试验	109
§ 18 船舶机动性试验的任务及其准备工作	109
§ 19 机动性试验时记录船舶运动航迹的方法	114
§ 20 船速、螺旋桨桨轴转速和回转倾角的测量	121
§ 21 船舶操纵性试验	125
§ 22 舵杆上扭矩的测量	131
§ 23 船舶倒向性能试验	134
§ 24 主动式操纵装置效率的测定	140

第三章 船舶耐波性试验	143
§ 25 船舶耐波性试验的任务和组织	143
§ 26 浪级和风级的确定	150
§ 27 测量海浪的仪器	156
§ 28 船舶耐波性的评价	168
§ 29 耐波性试验的测试仪表	176
§ 30 装有减摇装置的船舶的试验特点	186
第四章 船舶耐波性试验结果的分析方法	194
§ 31 波浪和船舶摇荡统计特征的确定	194
§ 32 船舶摇荡和波浪记录的相关分析和谱分析	209
§ 33 波浪和摇荡的统计特征和谱特征之间的关系	215
参考文献	223

第一章 船舶的推进性能试验

§ 1 船舶测速试验的任务

推进性能试验很少全面地进行，一般只做船舶的测速试验，即测定船在各种主机工况下的航速。

测速试验总是包括在工厂交货试航和国家试验的范围之内。试验程序及其范围一般由试验大纲规定，试验大纲由船舶设计部门编制，并取得建造厂和订货方同意。有时，测速试验带有研究性质，这样的试验，其范围由专门的试验大纲规定。

凡新造的船舶，以及在改装中对原来设计作了重大修改的改装船舶都要作测速试验。新型批量船的首制船一般要按扩大的试验大纲进行试验。

船舶测速试验可以和其它的试验（如动力装置的工况试验）结合起来进行。

对测速试验资料进行加工处理后，应当获得如下数据：

船在无强风的静水中，在正常排水量以及各种规定载荷的整个航速变化范围内，螺旋桨转速与航速的关系；

在主机额定功率情况下船舶的实际最大航速值；

在主机各种规定工况下船的航速值；

螺旋桨轴上的功率和螺旋桨推力与转速的关系。

根据测速试验的数据可以确定实际达到的结果与设计计算吻合的程度，并可为提高计算方法的精度积累资料。此外，在测速试验过程中还可解决与船舶以后运行有关的许多局部性的实际问题：对测程仪进行校正，并绘制船舶在各种运行条件下的航速曲线图。

为了确保这些问题得到解决,苏联、美国、英国和其它一些国家都制定了试航标准,对试验程序和规则作了规定,见参考文献〔98〕、〔101〕、〔104〕、〔105〕。第十一和第十二届国际水池会议也提出了有关船舶测速试验的标准细则。

在上述文件中规定了对试验的船舶准备要求,试验的条件和程序,以及对试验水域和水文气象等条件的要求。

在试验过程中要测定一系列表征船舶航行性能及其动力装置工况的量值。当前,正在设法尽可能对一切所需的量值(包括动力装置热工参数在内)进行同时测量。试验标准所提出的正是这样的试验方法。

§ 2 船舶和仪表在测速试验前的准备

在船舶测速试验前的各种准备工作中,首先应将动力装置作好必要的准备,使它能在各种规定的工况(包括全功率工况)下工作。此外,必须清除船体水下部分的附生物,并涂好油漆。只有在满足了这一要求的情况下,才可以将测速试验的结果与船舶快速性计算相比较,因为这一比较通常是以船舶具有新涂油漆的光滑的船体、主机以全功率工作为条件的。

在里海、黑海和远东海区,夏季和秋季船底附生物生长特别严重,所以船舶的出坞时间应当这样考虑,即要求测速试验在船出坞之后不迟于5~10昼夜内进行。在冬季,附生物的生长能力较弱,上述期限可延长到1~2星期。

在波罗的海和巴伦支海,从出坞到开始试验的时间间隔可增加到35~40昼夜,但是试验前的进坞还是必需的。世界各国现行的试航规范中规定上述期限为1~2星期。

如果从船体涂油漆到试验这一段时间大大超出上述期限,那末船就应当重新进坞,再次进行拷铲和油漆。

船进坞后,除了除锈和油漆之外,还必须检查船体上所有附体(包括艏轴支架、轴包架、舵、艉龙骨、导流罩)的情况,并

消除所发现的缺陷。如技术上有可能的话，则应将所有有缺陷的船体附体的外形矫正到完全符合其原来设计的几何特性和尺度。

凡不能纠正的偏离附体原设计的尺寸和要素应当记录在案。

螺旋桨的几何要素应与出厂证明书和设计图纸的数据相核对。

螺旋桨的几何要素和螺距可在测量台上检验，也可以用固定的或轻便的螺距规检验。在后一种情况下，最好将要检验的螺旋桨从艉轴上拆下，安放在车间或船坞附近的场地上。

应当消除螺旋桨的缺陷，铲净桨叶表面，修平叶缘。

在船体除锈并涂上油漆，消除螺旋桨缺陷之后，最好绘出船体和螺旋桨表面几个最富有代表性地方的粗糙度轮廓图。

英国造船学会^[88]建议用专门的仪器，即表面光度仪来测量船壳板的不平度及其粗糙度，以测定和判断船体水下部分涂过油漆后的粗糙度，见图1。日本的试航规范中也有关于测量实际粗糙度的建议^[104]。

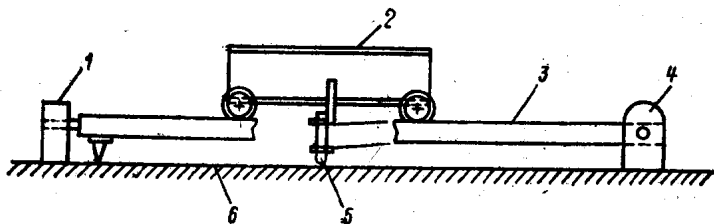


图1 表面光度仪示意图

表面光度仪由一根用磁铁1和4固定在船壳板6上的单轨3组成。拖架2可沿单轨3滑动。拖架装有一个搁在船壳板上的量隙规5和自动记录仪，后者用来记录量隙规的移动情况，即船壳板的表面形状。表面光度仪的重量和外形尺寸都不大，只要一个人就能操作。

目前虽然有几种结构型式的表面光度仪，但其原理都与上述相似。

建议对两舷壳板各选 20 处，并在底部壳板选 10 处测绘其粗糙度轮廓图。轮廓图应当在船坞内或在船台上直接测绘。也可以对上述各处复制分析粗糙度的体型来代替轮廓图，然后，根据体型进行测定。船壳板上测量粗糙度的位置分布情况大致如图 2 所示。

对海洋运输船舶，各测量点处粗糙度的算术平均值不应超过 200 微米（测量结果须按最小二乘法处理）。对船体距艏约 $1/3L$ 以内处的粗糙度要求应严格些，而其余部分（包括船尾区）的粗糙度允许稍高，但要考虑到不超

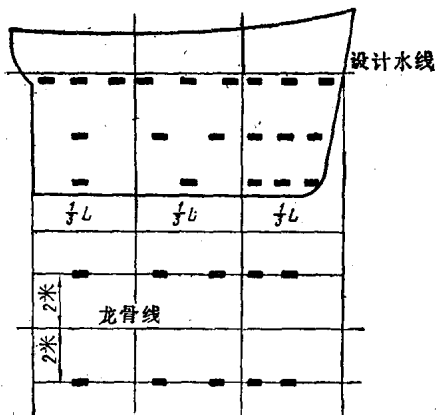


图 2 船体上测量粗糙度位置的大致分布情况

过上述平均值。之所以提出这样的要求，是因为边界层的厚度是从艏部向艉部逐渐增大的，所以船体艏部的粗糙度可能会突出层流底层之上，给船造成附加阻力。而在艉部，由于边界层的厚度增大，同样高低的粗糙度将完全埋在层流底层之下。

船在坞内时，应当检查是否有吃水标记及其完好情况。如果标记已经被碰掉或做得不醒目，就应当重做。这时要特别注意正确地测绘标记和安装有吃水数字的横条，使其与图纸完全一致。如对测绘吃水标记的正确性有怀疑，则必须对其安装情况进行检查。

对船体水下部分，附体和螺旋桨，以及吃水标记的检查结果和消除所发现缺陷的说明应编成专门记录或报告归入试航组的案卷。

进行测速试验时采用如下一些仪表和设备：

秒表和电动接触计时器；

转速表，机械式转速表和脉冲式自记转速表等；

扭力仪和自记式扭力仪，

推力计，

油量和油量桶，指示马力测量器，

风速计和自记式风速计，温度计。

为了最大限度地减小测速试验时的仪表误差，在试验前后都要校验测试仪器。第一次和第二次校验仪器和设备中所发现的仪表误差，不得超出仪表出厂证明书中所规定的值。否则，用这些仪表所作的测量应予重做。

应特别注意秒表的工作精度，因为它是计时的主要仪表。秒表和其它仪表一样，应具有有关单位发给的检验证。但是对秒表来说，尽管有这样的检验证，在每次试验前仍须进行检验。在检验时，要检查秒表的外部，走动时间，并确定其走时修正值或误差。修正值和误差均不应超出检验证中规定的范围。

与其它具有字盘和指针的仪表一样，在检查秒表的外部时，必须检验指针安装的正确性及其在转轴上安装的牢固性。秒表壳体和指针应无损伤，指针起动、停走和退回零位的按钮工作应当可靠。一摁控制按钮，指针应能立即回到字盘的零位，其最大误差不得大于 0.1 秒。

秒表上一次发条后，其连续工作时间应超过试验时进行测量所需的时间，即不应少于 2.5~5 小时。

在检验秒表时，气温应接近于进行试验时的气温。特别要注意的是秒表不应当在轮机或电缆磁场或电场范围内放置和使用，否则会使仪表的零件磁化，从而严重地影响走时的匀稳性。

检验秒表走时精度时最好将它与船上的天文钟相校核，或者与试验前作过检验的，其误差为每走 30 分钟不大于 0.1 秒，因而符合于每昼夜 5 秒误差要求的其它钟表或秒表进行核对。

根据航行规则，秒表的误差应根据天文钟按 4 分钟，7 分钟和 10 分钟的时间间隔测出，且每一时间间隔至少应重复测定两次。

秒表的误差可按式计算：

$$\Delta_r = \Delta T = \Delta_m \quad (1.1)$$

式中：

ΔT ——用天文钟测定的时间间隔；

Δ_m ——在规定时间间隔内秒表的平均读数。

如果秒表在 4 分钟、7 分钟和 10 分钟的时间间隔内，其误差相应地小于 ± 0.3 、 ± 0.5 和 ± 0.7 秒，那么此秒表可以在各种试验时（包括测速试验）使用，而不需作任何修正。如误差较大，则应作相应的修正。测定的数据应填写成报告，归入试航组的案卷。

任何机器在稳定和非稳定工作状态下工作时的转速可以用各种型式的转速表测定。包括在脉冲式自记转速表内的电动接触计时器或发条式计时器，以及天文钟也要根据上述要求预先进行校验[●]。在临近试验之前应当确定燃油的比重并分析其发热量，这方面的数据不仅对确定动力装置的功率，而且对确定所研究状态下的耗油量都是需要的。

§ 3 船舶排水量的确定

为了掌握不同试验时刻的排水量，例如每一种测速试验状态的船舶排水量，应当在试验开始前和结束后根据船舶吃力标记测定船的吃水，再按横剖面面积曲线（邦戎曲线）算出排水量。与此同时，在试验期间还应不断地统计各种可变载荷，首先是燃油和水的装载和消耗。其方法是测量液柜内的液位，而在某些情况下还可用量表测定燃油的消耗。对可变载荷耗量的统计建议从试验前测量吃水标记开始，并在整个试验过程中一直进行这种统计，直到最后一次测量吃水为止。根据由此所得的关于可变载荷消耗的数据可以确定船舶的重量排水量。

● 有关推力计和扭力计的校验问题将在 § 9 和 § 10 中讨论。——原注

应当将按重量负荷计算的排水量与按横剖面面积曲线所得的排水量加以比较，两者相差不应超过 1 %。

船的吃水通常是在港内或锚地用舢板或机动艇按实际水线的吃水标记测定。同时应当使用预先准备好的、刻度以厘米为单位的测杆或普通的折尺测量。艏部、船舯和艉部吃水标记处的计算吃水均须取左右两舷测量值的算术平均值。

用上述方法确定吃水时，测量精度主要与波浪情况有关，即使在最好的条件下（在隐蔽的锚地内，又没有风等等）也是会有波浪的，譬如遇到快艇和拖船从旁边驶过等。

吃水标记的制作误差也会影响确定船舶排水量的精度。一般在制作吃水标记时，考虑了船体尺度偏离设计和放样数据的所有偏差。所以误差中由吃水标记制作不准确造成的部分通常是很小的，一般认为每一个间隔 200 毫米的吃水标记在船体上的位置误差为 ± 0.5 毫米。对于一艘吃水约 5 米的船，这样的标记将有 16~20 个。因此，当各种最不利的情况凑在一起时，总的绝对误差可能达 8~10 毫米。对于中等尺度的船（长度略大于 100 米），在计算其排水量时，与这一误差相对应的排水量偏差是 10~15 吨。这在总排水量为数千吨时，对试验结果不会有明显的影响。

用测杆或折尺测量船的吃水，其实际测量精度在 ± 2 厘米范围内。这相当于 100 米长的船在排水量上有 $\pm 20 \sim 30$ 吨的出入，即误差略小于 1 % 排水量。对于排水量较大的船，这个误差将更小。在开始按测定的吃水计算重量排水量之前，应当取不同水深处的水样，并确定其密度和温度。

现代的大型运输船的艏艉尖舱内通常装有与舷外水联通的有刻度的玻璃管，可以借助它来确定艏艉端的吃水，而不需再动用水上工具去按吃水标记测量吃水。但是即便在这样的情况下，仍需直接测量船中部的吃水。

用普通的测杆来测量液柜中的燃油消耗和油位，其精度是很低的，并与船的横倾和航行纵倾有很大的关系。