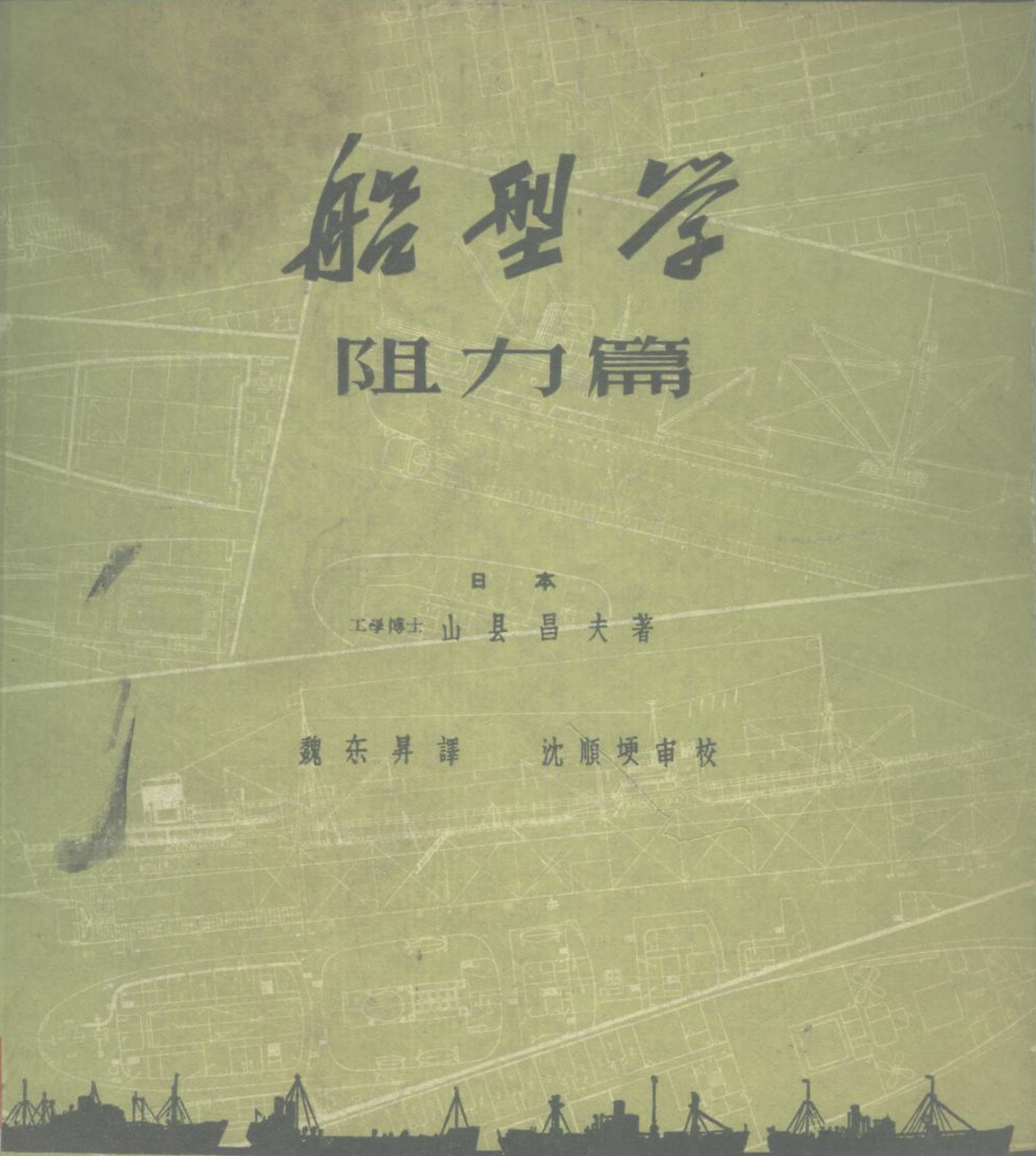




船型学

阻力篇

日 本

工学博士 山县昌夫 著

魏东昇 译 沈顺埂 审校



人民交通出版社

U661.1
S21

船型学

阻力篇

日 本

工学博士 山县昌夫 著

魏东昇 译 沈顺坝 审校

人民交通出版社

本書系根据日本天然社1952年11月出版的山县昌夫博士所著“船型学抵抗篇”第三版一書譯出。大部份材料是著者在日本逄信省船模試驗池时的經驗，內容分六章：第一章討論船型学与船模試驗池的一般关系，第二章討論船舶航行时船体所受的各种阻力，第三章由船型学的观点討論船体的尺度与形狀，第四章討論阻力計算的方法，并举出实际的計算例子，第五章討論波浪对于阻力的影响，第六章討論水深及水寬对于阻力的影响。

本書可供造船工程师和从事船舶試驗工作人員参考。

船 型 学

阻力篇

日 本

工学博士 山县昌夫著

本書根据日本天然社1953年日文版本譯出

魏東昇譯 沈順源审校

人 民 交 通 出 版 社 出 版

(北京安定門外和平里)

(北京市書刊出版業營業許可証出字第〇〇六号)

新 华 書 店 发 行

公私合营慈成印刷工厂印刷

1958年4月北京第一版 1958年4月北京第一次印刷

开本：787×1092 1/32 印張：8 1/2張

全書：196,000字 印数：1—700册

統一書号：15044.6088-京

定价：(11) 2.00元

目 錄

譯者序.....	2
第一章 船型學與船模試驗池.....	3
第二章 阻力的種類.....	9
I. 水阻力.....	9
1. 摩擦阻力.....	10
2. 興波阻力.....	17
II. 空氣阻力.....	21
第三章 船體尺度及形狀.....	25
I. 船體的主要尺度.....	25
1. 長度.....	25
2. 寬度.....	28
3. 滿載吃水.....	31
II. 船體形狀.....	32
1. 方形係數.....	33
2. 稜形係數.....	34
3. 艏截面的肥瘠係數及形狀.....	37
4. 豎稜形係數.....	38
5. 浮心的位置.....	39
6. 平行中體的長度.....	42
III. 船型實例.....	42

IV. 特殊船型.....	42
1. 球船首船型.....	43
2. 馬雅船型.....	56
3. 約克維奇船型.....	58
4. 弧式船型.....	58
5. 重光船型.....	58
V. 船體附部.....	59
1. 舳龍骨.....	59
2. 船尾柱.....	60
3. 舵.....	60
4. 尾軸轆.....	61
5. 尾軸架及推進器軸.....	62
第四章 阻力計算.....	64
I. 摩擦阻力的計算.....	64
II. 興波阻力的計算.....	65
III. 阻力計算的實例.....	102
第五章 波浪對於阻力的影響.....	118
第六章 水深及水寬對阻力的影響.....	123
I. 水深對阻力的影響.....	123
II. 水寬對阻力的影響.....	127

譯 者 序

近年來日本造船工業突飛猛進，具有一定的技術水平。根據英國雷氏船級社的統計，1956 年日本造船噸位已凌駕英國和北愛爾蘭，躍居世界第一位。日本運輸省估計，1957 年日本造船工業將更發達，僅輸出船舶即將達二百萬噸以上。另外，從日本近年來出版的造船書籍看，亦有許多值得我們借鑑的地方。

山縣昌夫博士所著“船型學”共分阻力、推進及迴轉等三篇。本書是根據阻力篇第三版翻譯的，內容以實驗的結果為基礎，可供造船工作者參考。

山縣昌夫博士是日本造船界的權威，對造船學術貢獻很多，本書大部份材料是他在日本遞信省船模試驗池的實際經驗，非常切合實用。

譯者深感學識淺陋，且在課餘工閒譯出，疏失處在所難免，切望讀者指正。

第一章 船型學與船模試驗池

船舶航行時最大的支出經費自然是推進機器等所消耗的燃料費。而且燃料消費量的減少，不僅航運業者受到利益，作為國家重要資源的燃料，也達到了節約的目的。還有，各種機器在相同的情形下，所需燃料的減少意味着所需馬力的減少；由是機器、燃料艙等的體積及重量自然隨着減少，因此減輕了航運業者的固定投資、即造船費用；特別在商船上，最重要的條件是增大載貨量。具備如此良好條件的經濟的優秀船舶或適於航運的船，當初在激烈的國際競爭下即佔優勢地位，壓倒其他船舶而擴張航權，在國際借貸關係上會對本國有過極大貢獻。有關降低船舶的燃料費用問題的研究大概可分為：（1）船體、推進器及舵的形狀；（2）推進機器等；（3）燃料。根據所給予的各種條件，設計最適合的船體之形狀，使所受水及空氣的阻力儘可能限制在最少程度下，用最大效率的推進器推進船舶。若正確的採用適當形狀的舵用於船體的推進及迴轉，則推進機器所需馬力可以達到最小限度；如果採用效率最優良的機器所產生相適應的馬力，則燃料消耗量當然可以降低；特別有效地使用低價的燃料，燃料費用當然可以降低。研究這些問題，第一就是對於船體、推進器、舵等的形狀的研究，因為是屬於船舶流體力學研究範圍以內，著者因而稱之為“船型學”。

以理論流體力學現在發展的程度，根據純理論所給予的一定條件來決定阻力最小的船體及效率最佳的推進器的形狀，這是應該的，而具有某種一定形狀的船體或推進器還不能正確決定其阻力、效率及推力，對於舵也完全一樣；所以對這方面的研究很多是在理論與實驗相互結合下進行的。而且現在的情形是不得不把實驗作為主要的、理論作為從屬的。然而實際上如果把實船的形狀作各種改變，並改裝各種推進器或舵進行實驗，則由於時間及經費等的限制，幾乎是不能做到的，而且可以預料對於這種實驗的測定是非常困難的。於是製造船體、推進器及舵等的模型，在室內長大的人工水池內、即在船模試驗池內進行實驗，將其結果用適當的方

法換算，以代替實船的試驗。通常把在這種試驗池內的模型試驗稱為船模試驗或水池試驗。能够在較短的時間內，很經濟的進行船體、推進器及舵等的實驗研究。船模試驗對船型學的進步和發展，不論過去和現在都起了很大的作用；如把試驗池稱為船型學之母決非過言，相信將來在這方面試驗池的利用會越來越增加。本書是以著者過去十餘年在船舶試驗所時所積累的經驗為基礎，主要以商船為對象，從實驗的研究方面來分析船型學，供造船廠等處在實際設計一般商船的船體、推進器及舵等的尺寸及形狀時作為參考。

水池試驗是1870年間威廉·傅汝德在其住宅的戶外建造一長91.4公尺、水深約3公尺的小型試驗池，開始拖引船模測定其阻力；此後水池試驗的價值被大家所公認，因而世界上的主要海軍國家、航運國家都競相建造試驗池；同時各種測量儀器也有顯著的進步，在最初僅是測量船模阻力，此後應用到推進器的模型試驗，進一步用推進器模型推進船模，作與實船情形完全相同的各種試驗，因而使船模自航試驗終於成為可能，除作其他如船體的搖擺、穩性、迴轉等方面的試驗外，並可進行與各方面相關的流體力學的基礎研究。再則隨着飛機的發展，很多利用試驗池研究飛機的機身及水上飛機的浮舟等。至於專為水上飛機試驗用的所謂高速試驗池也多被建設。

關於船模試驗的設備及試驗方法等，因為著者曾在另一書①內已經詳細的作了說明，而這方面的資料在國內外發表的也很多，本篇內僅將其概要略加敘述。圖1所示為備有近代各種設備的船模試驗池總布置圖的一個例子，並將各種試驗池的尺度等概括的列舉在表1內。圖2是這個船模試驗池的照片，從圖中可以了解船模試驗池的情形，聚積淡水處的橫截面為普通矩形的長大水池；大型的水池長

① 原書後附參考文獻200條，在文中有關處，用括弧依次註出，因該參考文獻的書名或文章名，係英、日等文，與本書的關係不很大，故刪去未排入本書——編者。

200~350 公尺，寬 8~16 公尺，水深 4~8 公尺，近來都用鋼筋混凝土建造，在水池兩側的壁上敷設

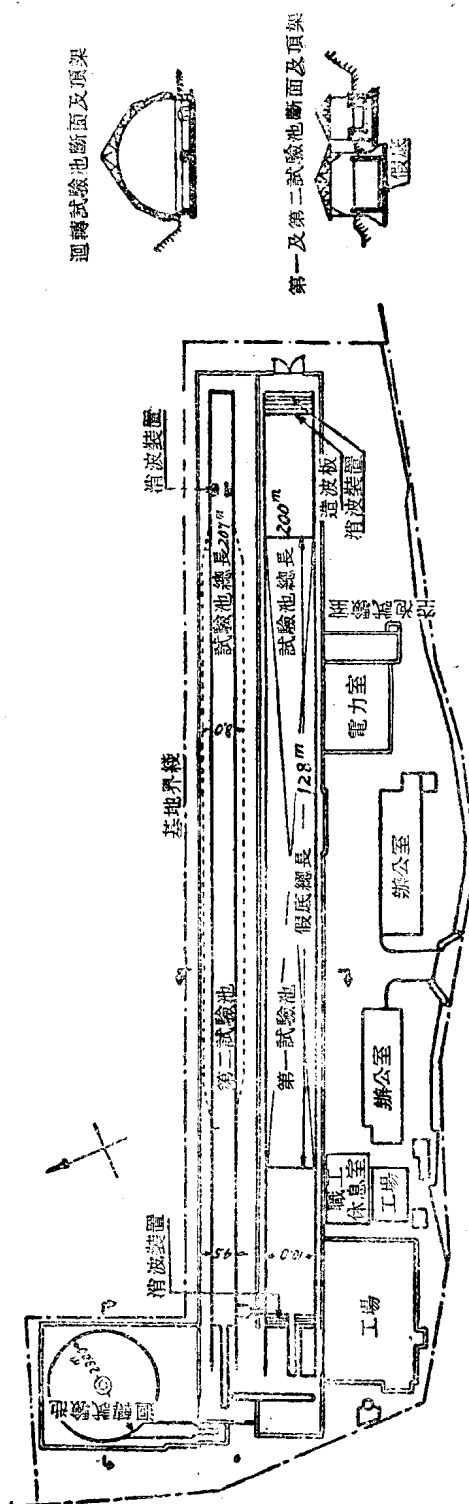


圖 1 船模試驗池總佈置圖

鋼軌，圖 3 所示的照片是用電力拖動、以任意的絕對速度在水面上行動的船模拖車。拖車普通用鋼製造，但爲了減輕重量也有使用輕金屬的，其最高速度普通爲 6~20 公尺/秒。在大型試驗池內常採用長 5~7 公尺的船模，木製的很少，通常多用石蠟燒製，如圖 4 所示爲使用船模切削機正確做成所需要的形狀。推進器模型通常用金屬製成，而船體附屬物的模型如舵等普通是木製的。船模可以在試驗池內用拖車以一定的速度拖動，圖 5 所示是裝於拖車上的阻力測力儀，可以測量船模阻力。至於船模的自航試驗是在船模內裝置電動機，用來轉動推進器，使船模可用本身的動力在試驗池內航行，如圖 6 所示在船模內所裝自航試驗用推進器測力儀可自動記錄推進器的推力及轉矩。圖 7 爲裝備了圖 6 所示的另一型式的推進器測力儀的單螺旋推進器船模將艙部切去一邊的照片。圖 8 所示爲裝在拖車上的測力儀，可用來測量推進器單獨的性能，該測力儀上裝備了一般爲魚形水雷所採用的二級逆轉推進器。在試驗池內還裝置造波設備，如圖 9 所示，在試驗池內利用這種設備可以產生任意形狀及速度的縮尺大洋波，有關於船體及推進器等在波浪中的各種試驗有了可能。又試驗船體搖擺及穩性用的拖車與前述的拖車不同，如圖 10 所示爲沒有動力裝置的移動式架橋安裝在拖車軌道上的情形，在試驗池上移動並可以固定在任意的位置上，在架橋下面使船模與試驗池長度的方向成直角漂浮着；與進行這種試驗的同時，利用假底升降用電動機，使假底可以升降。又作爲船在淺海、河川等淺水航行的船模試驗，如圖 1 所示，在試驗池底部裝設經常沉沒的堅牢假底，必要時應將此假底升高到任意的位置，得到所需要的水深。又爲了進行在河川等水道航行船舶的船模試驗，有一種使水池內的水可以流動的特殊試驗池。

水上飛機等試驗用的高速試驗池的設備，與前述船舶用的試驗池的設備大同小異；但由於飛機的速度較船舶高的多，須採用極長的試驗池，使模型拖車能够達到高速度的運轉。但因為這種試驗池實驗的對象爲飛機，所以它的寬度不大。

除船模試驗池外，尚有如圖 1 與表 1 以及圖 11、12 的空泡試驗筒與迴轉試驗池等；前者以推進器空泡現象的實驗研究爲主，而後者以舵及船的迴轉實驗研究爲主。

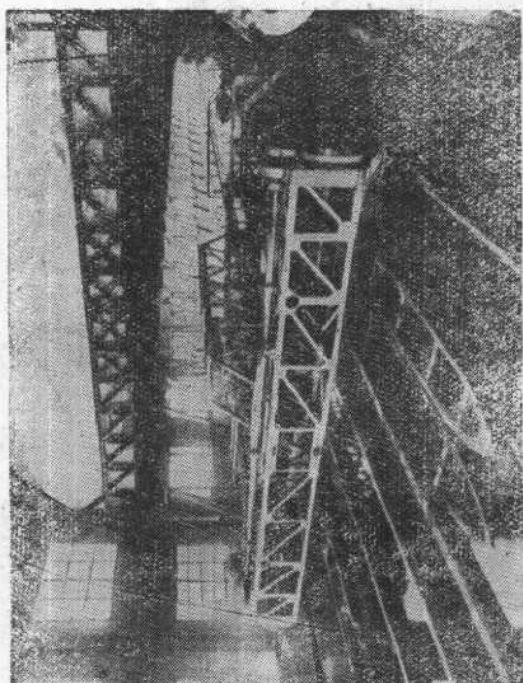


圖 3 船模拖車

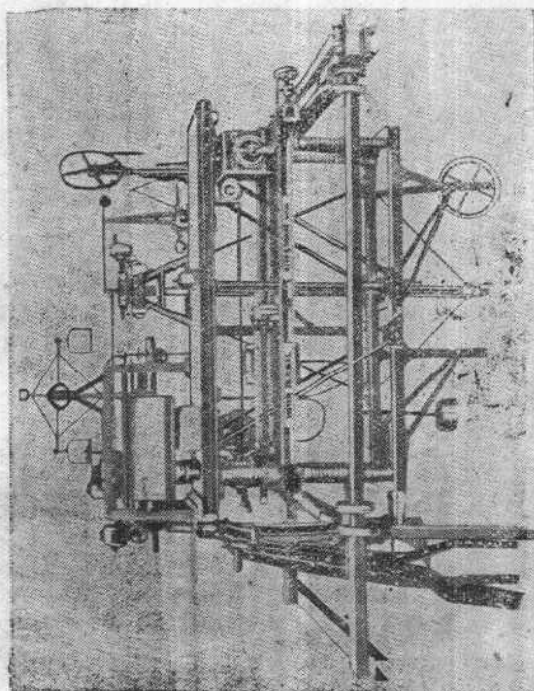


圖 4 阻力測力儀

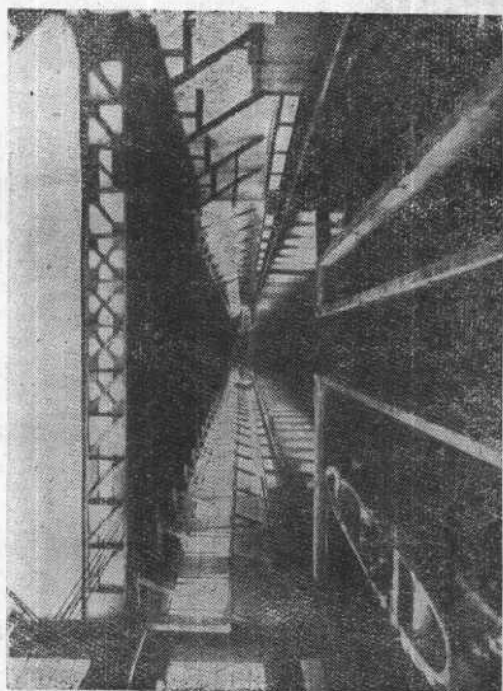


圖 2 船模試驗池

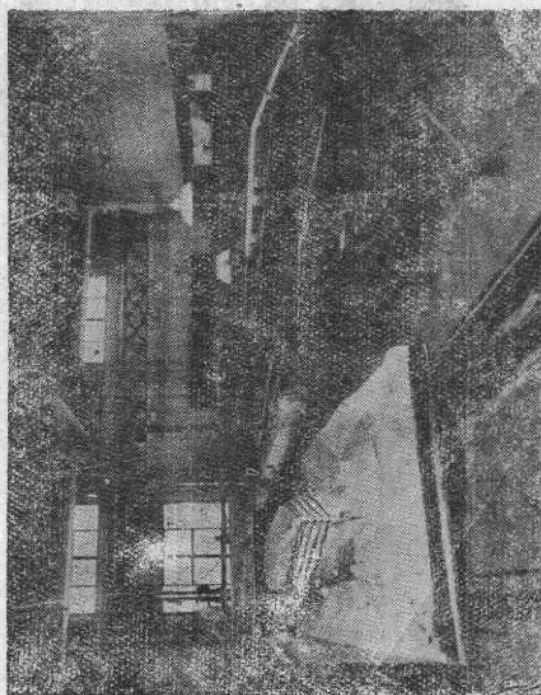


圖 4 船模切割機

圖 6 自航試驗用推
進器測力儀

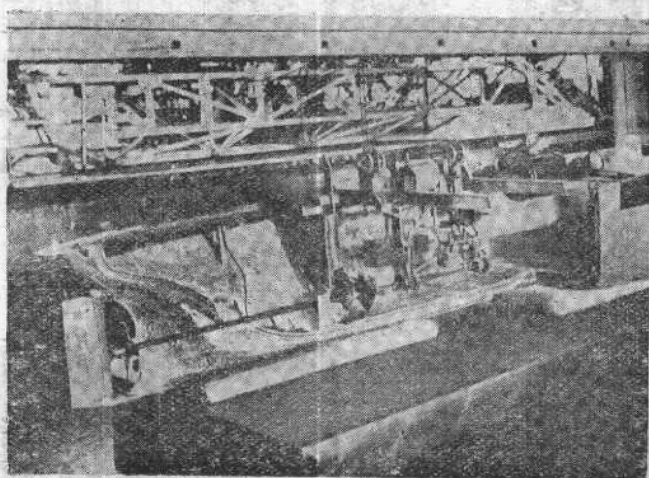
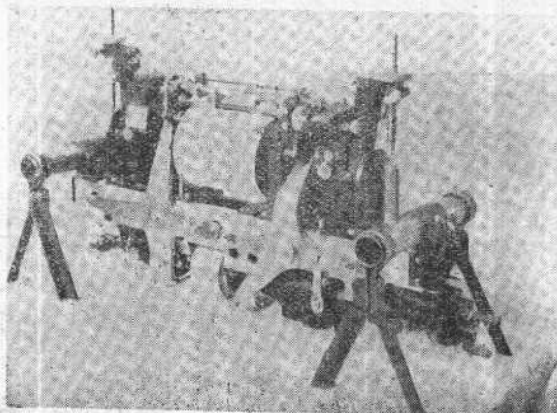


圖 7 裝於單螺旋槳船
模的自動試驗用
推進器測力儀

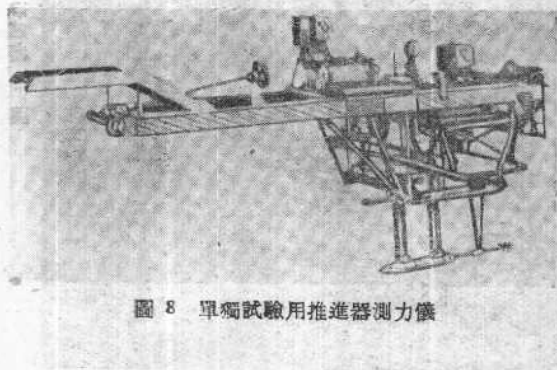


圖 8 單獨試驗用推進器測力儀

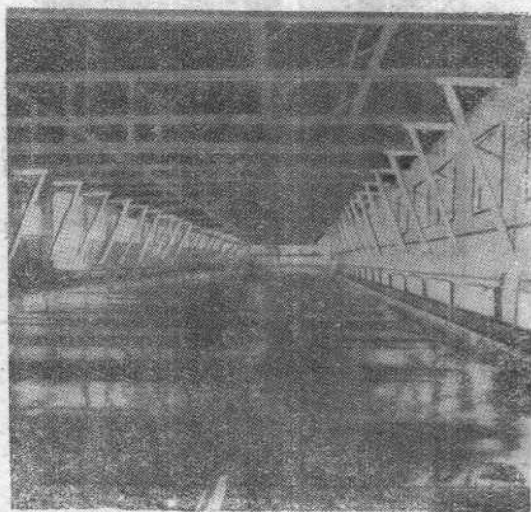


圖 9 試驗池內造波裝置引起的波

試驗池的各種設備

表 1

船 模 試 驗 池						
試驗池名稱	試驗池的尺寸(公尺)			拖 車		
	池 長	池 寬	水 深	軌 寬 (公尺)	最大速度 (公尺/秒)	運轉用動力 (瓩)
第 1 試驗池	200.0	10.0	6.0 (兩端為 5.35)	10.4	8	4× 8.8
第 2 試驗池	207.0	8.0 (兩端為 4.5)	4.15 (兩端為 2.40)	5.0	12	4× 10.0

備考：第 1 試驗池中部 128 公尺裝置假底

空 池 試 驗 筒						
型 式	試驗筒的尺寸			水 量 (噸)	最大水速 (公尺/秒)	送流用動力 (瓩)
	上下回路水平 中心線間的垂直 距離(公尺)	左右回路垂直 中心線間的水平 距離(公尺)	測量處的橫截面 積(平方公尺)			
直立環狀型	5.00	6.50	0.2256	17.5	10	1×40.0

試驗池的尺寸(公尺)				迴 轉 車		
圓 形 部 分		矩 形 部 分		軌道中心線所形成 的圓的直徑(公尺)	軌道中心線上的最 大速度(公尺/秒)	運轉用動力 (瓩)
直 徑	水 深	池 寬	水 深			
23.0	2.0	3.0 (一端為 1.2)	2.0	23.5	10	2×4.0

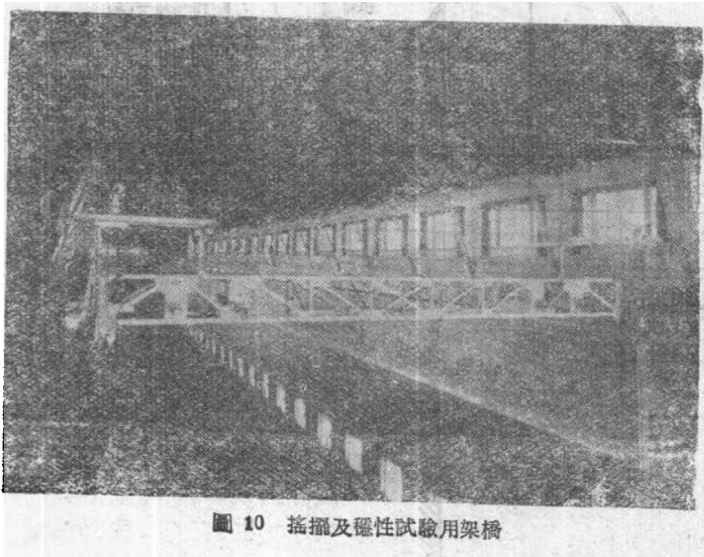


圖 10 搖擺及穩性試驗用架橋

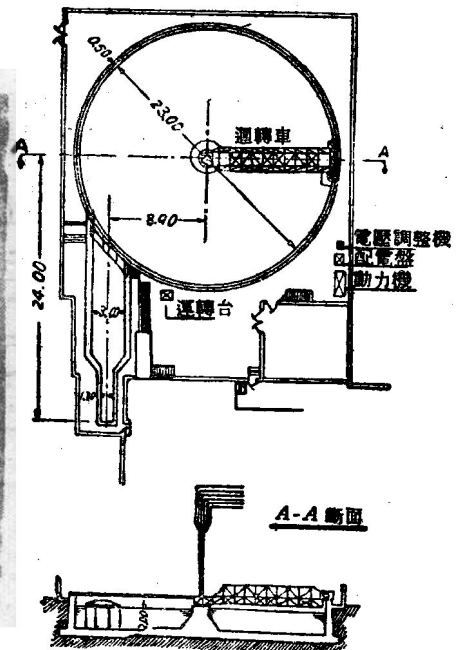


圖 12 迴轉試驗池

第二章 阻力的種類

船舶所受的阻力與飛機、汽車及火車等不同，因為它是在兩種流體內行動，即船體的一部分是在水內，而另一部分却在空氣內，當船體用某種速度前進時，一定要受到水和空氣兩者的阻力，而且由於船體前進時在水面上引起波浪，所以船體受水的阻力與物體在一種流體內運動時所受的阻力相比較，其性質顯然是不同的；特別是在高速度情況下，興波現象更為顯著，相差更甚。這種情形，空氣的密度不過約為水密度的 $1/800$ ，所以空氣受波的影響等沒有考慮的必要。又如潛入水中的潛水艇，即使艇體全部在水中完全不受空氣的阻力，但若離開水面不大深，隨着潛水艇的運動在水面上仍然出現波浪，水的阻力與一般船舶一樣，由於水的自由表面的存在而受重力的影響。在此可以看出船體受水的阻力的特性。又德川博士等把球、紡錘及類似這些的各式各樣的形體進行實驗，闡明由於距水面的深度而產生了阻力的改變。

1. 水阻力

船除了逆着強風航行的情形外，船體所受阻力大部分是由於水的作用而生的，因此在船型學內討論船體形狀時，自然對水面以下的形狀應較水面以上的形狀特別重視。

某一定形狀的船以一定的速度航行時，所受水的阻力可以依照動力學相似定律的理論用下式表示之：

$$\frac{R}{\frac{1}{2} \rho L^3 V^2} = f \left(\frac{VL}{\nu}, \frac{L}{K}, \frac{V}{\sqrt{Lg}} \right) \dots \dots (1)$$

式中 R 為水阻力， L 及 V 各為船的長度及速度， ρ 及 ν 各為水的密度及動粘性係數， K 為與水接觸的船體表面的凸出部分的平均高度， g 為重力加速度， f 為函數。水的 ρ 及 ν 依水溫而變，將淡水及海水的這些關係分別表示在圖 13 及 14，並把橫坐標軸取作水溫。(1) 式右邊函數 f 內第一項無因次的值稱為雷諾數，以水的粘性為基礎，第二項無因次的值稱為滑數，以表面粗度為基礎，第三項無

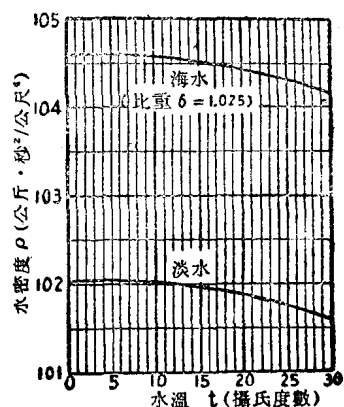


圖 13 水的密度

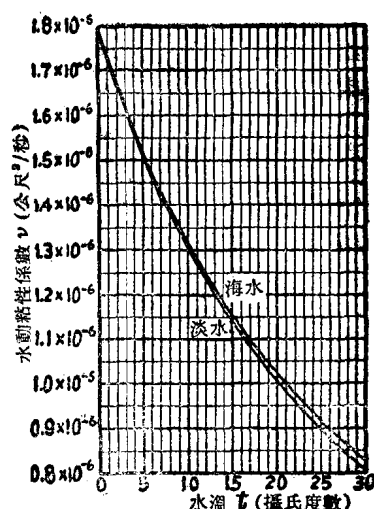


圖 14 水的動粘性係數

因次的值稱為傅汝德數；由於水的自由表面的存在以水的重量為基礎，第一項並含有第二項的雷諾數的相似定律，第三項依據傅汝德的相似定律。以現在理論流體力學發展的程度還不可能用純理論計算任意形狀的船體的 f 函數，而且因為水的粘性及表面粗度與水的重量之間是依照不同的相似定律給予物體阻力的，所以 (1) 式祇能滿足於完全動力學相似的模型試驗，而根據試驗的結果要求出實船的水阻力和研究船體形狀是否優良是不可能的。因此假定用水的粘性及表面粗度為基礎的阻力，與用水

的重量為基礎的阻力可以分開，則(1)式可改變成下式：

$$\frac{R}{\frac{1}{2}\rho L^3 V^2} = f_1 \left(\frac{VL}{\nu}, \frac{L}{K} \right) + f_2 \left(\frac{V}{\sqrt{Lg}} \right) \dots\dots (2)$$

根據上式，水阻力分為雷諾的相似定律的摩擦阻力及傅汝德的相似定律的興波阻力，若令 R_f 為摩擦阻力， R_w 為興波阻力，則(2)式可改寫成下式：

$$\frac{R_f}{\frac{1}{2}\rho L^3 V^2} = f_1 \left(\frac{VL}{\nu}, \frac{L}{K} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{R_w}{\frac{1}{2}\rho L^3 V^2} = f_2 \left(\frac{V}{\sqrt{Lg}} \right) \dots\dots\dots (4)$$

普通研究船體所受水的阻力時，除將其分為上述的摩擦阻力及興波阻力外，一般也考慮了漩渦阻力；但是這種阻力的意義很不明確，例如雖在摩擦阻力中，物體周圍的水流，除完全為層流者外，而且還包含着由於水的漩渦現象所產生的阻力。特別是在物體表面粗糙的情形下，“粗流”非常顯著。然而通常把沉於極深的水中的平板在與板面成直角的方向以一定速度前進時所受的阻力，即不考慮平板側面為層流和其壓力的增高，板的背面成渦狀運動而其壓力降低，由於這些壓力差而產生的阻力稱之為漩渦阻力。換句話說，漩渦阻力是具有流體力學的不連續的形狀的物體在水中以一定速度前進時引起漩渦現象所發生的阻力。船體在水面以下的部分，由於船尾柱的水平截面為矩形，裝設平板舵、舳龍骨的裝置位置不適當，雙螺旋槳船的尾軸轆或尾軸架的形狀及安裝的位置不適當等情形，水作漩渦運動因而發生漩渦阻力，但是近來建造的船舶，尤其是鋼船，不必說水面以下船體的形狀，即舵、舳龍骨、尾軸架等船體附屬部份的形狀也是儘量使其流線型化這些水面下的船體附屬部份安裝位置，經過慎重的考慮，漩渦阻力已經減少到極少，因而與其他二種阻力相比較，將其忽略也無多大妨礙。但是絕不可把漩渦阻力作這樣狹義的解釋，因為沉沒於深水中的任意形狀的物體以一定速度前進時，其周圍的水流不完全是勢流，物體後部發生渦流，從物體表面分離，如果把作用於其表面各點上水的壓力在物體前進的方向積分則不為0，而具有阻止物體前進的某一值，所以也有將此作為漩渦阻力的廣泛

定義。再則這種阻力稱為形狀阻力，或排水阻力。富廷格製造了兩個相同的水面以下船體的模型，使模型的背面相合，沉到很深的試驗池中，以一定的速度拖動，測量其阻力，此阻力為模型所受摩擦阻力與漩渦阻力的和的兩倍。但如後段所述，這種情形的摩擦阻力是相當於船模的濕面狀態、面積以及水線處船模長度的矩形平板的摩擦阻力。又戴維遜在試驗池內用極低的速度，也就是使在幾乎不發生興波現象的速度下測得的船模阻力為摩擦阻力與漩渦阻力之和。若根據配林、洛達等的實驗結果，則像這樣定義的漩渦阻力的值約為平板的摩擦阻力的10%~15%，在實驗範圍內看不出由於船體的形狀有何顯著的差別。漩渦阻力不論作狹義的解釋或廣義的解釋時，是和摩擦阻力相同，都是基於水的粘性，依據雷諾相似定律，但是通常因為在某種雷諾數以上時，其值大概與速度的平方成比例，所以為了實際上便利起見，將其作為興波阻力的一部份來考慮的。因此在本書內不單獨考慮漩渦阻力，而是看做興波阻力的一部分。

1. 摩擦阻力

船體所受水的摩擦阻力通常佔總阻力的極大部分，對於低速的貨船等達水阻力的80%，因而在討論船的阻力時是非常重要的。使用(3)式計算船體的摩擦阻力是有困難的，因為對任意的曲面依照理論或由直接實驗方法來求函數 f_1 都很困難。現在還沒有任何人可以肯定說已經完成了關於作用於曲面摩擦阻力的理論研究，也是事實。祇有肯普曾經把“漢堡”號等船體中部附近水面以下的外板的一部分建造成特殊可動的形式，這是一個直接測量作用於外板的切線力，即摩擦阻力的實例。間接測量摩擦阻力的方法是在船體表面穿成許多小孔，用壓力儀連接起來，用來測量航行中作用於船體表面的水壓，把船前進方向的分壓力積分後是為船體的形狀阻力；就是在計算普通船的興波阻力時，把它從測定的水阻力內除去，則可以求得摩擦阻力。這樣的實驗有富爾曼關於飛艇模型在風洞內的實驗，橫田、山本、重光、研野等人關於實船在波濤很大的河川的敞水內的實驗，以及盧德、埃格特等關於船模在試驗池內進行的實驗。但是這些實驗是測量作用於某種特殊的飛艇或船體作用於曲面的摩擦阻力的實驗，根據這個結果不可能計算出作用於任意曲

面上的摩擦阻力。

維廉·傅汝德假定作用於船體的摩擦阻力等於具有與船體濕面狀態（即粗度）、面積以及水線處船體的長度等相同的矩形平板的摩擦阻力，開始建造試驗池，把各種尺寸的矩形平板，在其長度方向，用各種速度來拖動測出摩擦阻力，然後根據試驗結果，作出平板摩擦阻力的實驗公式，進一步把長度適當的考慮延長到實船的範圍內；依照這些公式，作為計算作用於船模及實船的摩擦阻力，於1873年把長 52.58 公尺、寬 10.11 公尺的“灰犬”號由排水量 3,150 噸的“敏捷”號在海上拖動測量其阻力，由測出的阻力內除去空氣阻力，來求出水阻力，特別再用 1/16 的船模在試驗池內測量水阻力，將前面所說的假定條件由實驗公式所算出的平板阻力內除去，而求出船模的興波阻力，用（4）式換算實船的興波阻力，加上用實驗公式算出實船的平板摩擦阻力求出實船的水阻力。由上述計算所得出的水阻力與實船測得的水阻力大略相同的事實，在實驗上證明了前述的假定近似的成立。因而船體所受的摩擦阻力可用矩形平板的摩擦阻力代替。根據上述方法從試驗池內測量的船模阻力來求出實船的水阻力的方法稱為傅汝德船模試驗法，即使現在也把它作為試驗池內的船模試驗基礎。就這意義說，傅汝德也可稱為船型學之父。比傅汝德的試驗約遲 10 年，雅洛也在海上拖引長 30.48 公尺、寬 3.81 公尺、排水量約 40 噸的水雷艇，得到與傅汝德大略相同的結果；特別在近年內平賀博士把長 70.71 公尺、寬 6.55 公尺、排水量 374 噸的“夕立”號驅逐艦，長 35 公尺、寬 7 公尺、排水量 360 噸的拖船及為這個實驗特別制作的長 23.57 公尺、寬 0.16 公尺、排水量 3.4 噸的板船分別拖引，如果把這個實驗結果代替傅汝德矩形平板的摩擦阻力計算公式，使用平賀博士根據試驗池所作實驗結果作成的實驗公式，則證明了用傅汝德法由船模試驗可以正確地計算實船的阻力。總之，傅汝德法可以說對船模試驗是極為簡便的方法，雖然此後也有發表試驗的方法，但均不實用。

因為船體縱向的中截面水線以下的形狀不是完整的矩形，為了把這種形狀相似的各種形狀的平板的摩擦阻力與矩形平板的摩擦阻力作比較，格伯斯、出淵博士等曾進行實驗，根據試驗的結果，可以知道兩者之差極微。再則從歷來發表的資料可以知

道，外面形狀是曲面的船體和矩形平板之間的摩擦阻力的差別，根據各方面分析研究的結果，其差異很小的。近年來有關於這種文獻能列舉的是阿姆茲伯爾格、霍爾恩、范·拉米倫等的論文。關於霍爾恩的研究結果將於第六章研究水深對於阻力的影響時說明。作為試驗池的實際問題，使這些比較微小的誤差包括在興波阻力中，由此所造成的對於計算實船水阻力的誤差極少，將其忽視也毫無妨礙。

關於矩形平板的摩擦阻力，作實驗及理論研究的人都很多，在這方面的文獻不勝枚舉。但是現在還有很多試驗池內常用的摩擦阻力的算式還是應用下列阿·依·傅汝德的古典的實驗式：

$$R_f = \sigma \lambda \left\{ 1 + 0.0043 (15 - t) \right\} S V^{1.825} \dots (5)$$

式中 R_f 為摩擦阻力（公斤）， σ 為水的比重， t 為水的溫度（攝氏）， S 為濕面積（平方公尺）， V 為速度（公尺/秒）， λ 為隨船體長度及表面粗度而變的摩擦係數。傅汝德根據前述“灰犬”號及其船模實驗的結果，（5）式中 S 的值採取船體的實際濕面積，即採取考慮了船體表面在船長方向彎曲的表面積，發表了由船模換算實船的水阻力與實際情形非常一致，歷來在有關船型學中一般（5）式中的 S 均採取這樣的表面積。這也應考慮到船體周圍水流速度較沿平板的水流速度大；而且因為作用於彎曲面切線方向摩擦阻力中船體橫向分力是左右舷平衡的，所以就這意義說，只考慮了船體長度方向的彎曲的表面積，在理論方面當然是不合理的；同時計算三個方向彎曲的表面積非常複雜，難以絕對正確求得，而且由於是否考慮船體表面在船長方向的彎曲面積的差不過是一百分數，著者以前計算 S 未考慮這方面，其後 1933 年在海牙及 1935 年在巴黎召開的國際船模試驗所所長會議上議決不考慮這方面。因為國際性的決定，所以本書以靜止狀態下船體水線下的平均圍長與船長的積確定 S 。對於外板表面極清潔的實船及石蠟製成的船模（5）式中的 λ 的值如表 2 所示，隨着船長的增加，最初減少急劇，以後則逐漸的減少緩慢。但是實用上可以使用下列簡式：

$$\lambda = 0.1392 + \frac{0.258}{2.68 + L} \dots \dots \dots (6)$$

式中 L 為船的長度（公尺）國際船模試驗所所長會議議決應為水線處船體的長度，但貨船等載貨情形

傅汝德的摩擦係數 λ

表 2

船 長 (公尺)	λ	船 長 (公尺)	λ	船 長 (公尺)	λ	船 長 (公尺)	λ
1.50	0.2017	6.25	0.1679	45.00	0.1451	180.00	0.1397
1.75	0.1984	6.50	0.1671	50.00	0.1446	190.00	0.1394
2.00	0.1955	6.75	0.1664	55.00	0.1442	200.00	0.1392
2.25	0.1928	7.00	0.1658	60.00	0.1439	210.00	0.1389
2.50	0.1902	7.25	0.1651	65.00	0.1436	220.00	0.1387
2.75	0.1879	7.50	0.1645	70.00	0.1434	230.00	0.1385
3.00	0.1857	7.75	0.1640	75.00	0.1431	240.00	0.1383
3.25	0.1836	8.00	0.1634	80.00	0.1429	250.00	0.1380
3.50	0.1817	8.25	0.1629	85.00	0.1427	260.00	0.1378
3.75	0.1799	8.50	0.1624	90.00	0.1425	270.00	0.1377
4.00	0.1782	8.75	0.1619	95.00	0.1423	280.00	0.1375
4.25	0.1766	9.00	0.1614	100.00	0.1421	290.00	0.1373
4.50	0.1752	10.00	0.1595	110.00	0.1417	300.00	0.1372
4.75	0.1739	15.00	0.1539	120.00	0.1414	310.00	0.1371
5.00	0.1727	20.00	0.1507	130.00	0.1411	320.00	0.1369
5.25	0.1716	25.00	0.1488	140.00	0.1408	330.00	0.1368
5.50	0.1706	30.00	0.1474	150.00	0.1405	340.00	0.1367
5.75	0.1696	35.00	0.1464	160.00	0.1402	350.00	0.1366
6.00	0.1687	40.00	0.1457	170.00	0.1399		

不一樣，應取不同的長度，實際應用很繁雜，通常多取滿載水線的長度，或垂線間的長度，由此而生的誤差除極其小的船模外，不甚顯著。再則，搜集歷來發表的關於矩形平板的摩擦阻力的許多實驗結果，加以整理，作出比較研究的文獻，有上野教授、拉肯比等的論文。

由於近年流體力學的迅速發展，平板摩擦阻力的理論研究有顯著的進步。這些研究主要是把水在圓管內以一定的速度流動時圓管內壁所受的摩擦阻力的研究為基礎。卡門論稱除了水流是完全的層流外，一般地不能將摩擦阻力用(5)式速度的指數法則表示，並指出其冪指數的值對於亂流是隨雷諾數的增加而增加。

現在把(3)式改寫如下：

$$\frac{R_f}{\frac{1}{2} \rho S V^2} = c_f \dots \dots \dots (7)$$

c_f 為以雷諾數及滑數為函數的摩擦阻力係數。

如果把平板表面作為理想的光滑面來研究，則 c_f 自然僅為雷諾數的函數。對於雷諾數較小而平板周圍的水流為層流狀態者，布拉休斯得到如下的算式：

$$c_f = 1.327 \left(\frac{VL}{\nu} \right)^{-1/2} \dots \dots \dots (8)$$

即摩擦阻力與速度的 1.5 次方成比例。普蘭德及休利鄧格得出雷諾數增加時平板後部漸漸開始發生亂流的摩擦阻力係數的算式如下：

$$c_f = 0.455 \left(\log \frac{VL}{\nu} \right)^{-2.58} - 1,700 \left(\frac{VL}{\nu} \right)^{-1} \dots (9)$$

此式中的 1,700 的係數是隨平板前緣附近水流狀態等而變的係數。其次，雷諾數再增加，平板周圍的水流全部成為亂流，普蘭德及休利鄧格對這種情況得到摩擦阻力係數的算式如下：

$$c_f = 0.455 \left(\log \frac{VL}{\nu} \right)^{-2.58} \dots \dots \dots (10)$$

這樣，平板表面在理想滑面的情形下的摩擦阻力，根據(8)(9)及(10)式作為雷諾數的函數，可以用(7)式計算。為了將此計算值與實驗值比較，於圖 15 內橫坐標取雷諾數，縱坐標取摩擦阻力係數，同時用前式計算所得的曲線，並把布拉休斯、魏池爾斯貝格爾、格伯斯、肯普等對於光滑平板測量的值相比較，大體上兩種值可說是一致的。再者，魏池爾斯貝格爾的測量值不論是低的雷諾數均略近於(10)式算出的 c_f ，這個實驗使用的平板前

緣不是尖的而是圓的，主要使水流自平板前緣起成為亂流。

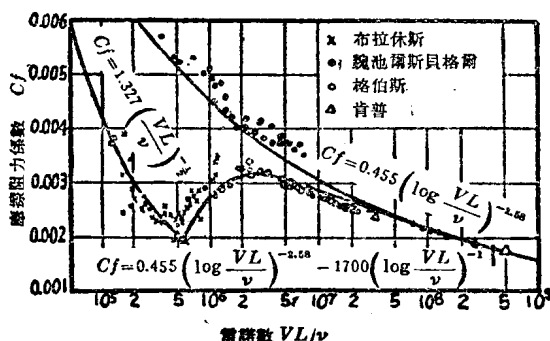


圖 15 隨雷諾數而變的光滑面平板的摩擦阻力係數

從圖 15 可以看出，光滑平板在靜水中前進時，適應於層流狀態的 (8) 式 $\frac{VL}{\nu}$ 約在 5×10^5 以下，而 $\frac{VL}{\nu}$ 的值對於亂流狀態的 (10) 式則約超過 10^6 ，在兩者中間的變流狀態可用 (9) 式。但如後段的說明，船模在靜水中前進時，對於層流、變流及亂流的臨界雷諾數的值較平板為低，所以用傅汝德的模型試驗法把船模的摩擦阻力換算平板的摩擦阻力，如果使用 (8) ~ (10) 式作為摩擦阻力的算式時應特別注意。

因為船體外板表面雖然極為清潔，但是和理想的光滑面尚不符合，因而表面粗糙的矩形平板所受摩擦阻力，就應當考慮 (3) 式中滑數 L/K 來求出的摩擦阻力。普蘭德及休利鄧格把尼苦拉茲的粗糙表面圓管內的水流研究的結果作為理論基礎得到粗糙面板的摩擦阻力。在物體表面與亂流層之間存在着極薄的層流限界層，其厚度隨着雷諾數的增加而減少，並沿着板長漸漸增加。雷諾數極小而粗面凸起部份全部在層流限界層內時，表面粗度的影響則很小，在流體力學上來講可以看做光滑面，所以摩擦阻力是和光滑平板相同。如果雷諾數增加，對於一定粗糙度的平板，在板之前面附近其粗面凸起的一部分，從層流限界層內凸出，則引起漩渦而損失能量，因之增加了摩擦阻力。這種現象稱為變流界。如果雷諾數再漸漸的增加，則這種現象逐漸的波及到板的後面，同時板的粗面凸起部份，從板的前端附近開始逐漸的全部由層流限界層內凸出，而水流從變流界完全變為亂流。如果雷諾數極大，則板的周圍完全成為亂流，摩擦阻力係數與雷諾數無關成

為一定值，摩擦阻力與速度的平方成比例。將普蘭德及休利鄧格計算所得各種不同粗度的粗糙面平板的摩擦阻力係數，表示在雷諾數的對數的基線上，如圖 16 所示。嚴格的說，如果把這種結果作為計

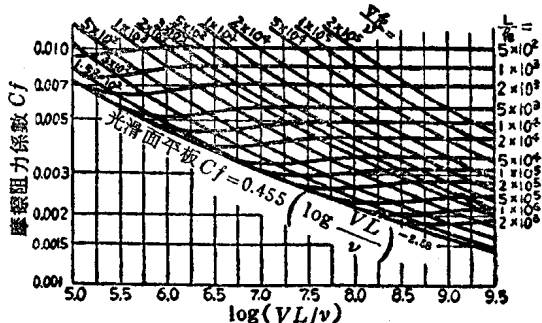


圖 16 隨雷諾數而變的粗糙面平板的摩擦阻力係數

算的根據，僅在和尼苦拉茲的圓管實驗粗面相同的情況下是正確的。尼苦拉茲的實驗管面上採用四種大小的砂粒，即 K 為 0.01 公分、0.02 公分、0.04 公分及 0.08 公分的砂粒，每一平方公分約貼着 4,600、1,130、590 及 150 粒。當粗糙面的性質與這個不同時，也就是凸起的形狀及密度不同時，則圖 16 的結果不能適用。例如修爾茲古爾諾作了與上述相同的計算。當表面雖然貼了砂粒但並不完全是粗糙面，將比較的近於船體外板的表面。因為船體表面的粗糙度極不規則，如果採用尼苦拉茲砂粒的粗面 K 的值作為砂粒的大小，這種簡單的方法難以決定 K 的值，而雷諾數較高，摩擦阻力係數與雷諾數無關或為一定值時，這個值和對於同一值的尼苦拉茲的一定摩擦阻力係數的 L/K ，作為船體表面不規則的粗面的滑數、即對應滑數，則得如圖 17 所示的結果。在圖中應特別注意的是變流界沒有像圖 16 的摩擦阻力隨速度的 2 以上的幕指數變化，而是時常達不到 2 的幕指數變化的。

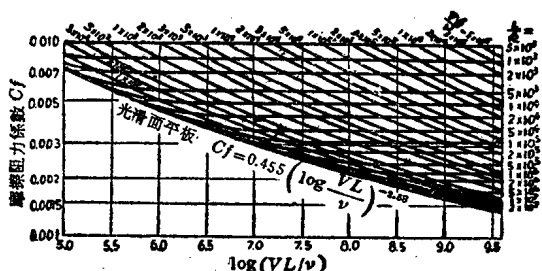


圖 17 隨雷諾數而變的中等程度的粗糙面平板的摩擦阻力係數

當使用圖 16 求出作用於實船外板表面的摩擦阻力時，應當採用何種凸起的平均高度。關於這個問題，1937 年在柏林召開的國際船模試驗所所長會議上研究和討論了魏特布利特的提議，確定了平均值的結論，對於競賽艇、高速艇、水雷艇為 0.1 公厘；高速沿海航行船、巡洋艦、戰鬥艦為 0.15 公厘；郵船、高速客船、工作良好的一般商船為 0.2 公厘；工作不甚好的一般商船、拖網漁船為 0.25 公厘。並且又作如下的決議：在乾船塢內把船體外板新漆後，每一星期應把上述 K 的值一律加算相當的值，溫水為 0.02 公厘，冷水為 0.01 公厘。

肯普在試驗池內把鋼製箱形船的表面粗度依照表 3 所示的情形作種種改變而測量摩擦阻力，同時在“漢堡”號及“卜萊門”號上實際測得作用於外板一部份的摩擦阻力，以及根據傅汝德所試驗的“灰犬”號、平賀博士所試驗的拖船與“夕立”號的結果所求出的摩擦阻力，把這些數據全部表示在圖 18 中，橫坐標為雷諾數的對數，而摩擦阻力係數的形狀如圖內所示，進一步再和普蘭德及休利鄧格的計算值作比較。如表中所示，用砂粒裝飾成表面粗糙的箱形船，以其摩擦阻力的測定值，來反算普蘭德及休利鄧格的 K 的近似值不是不可能；但是從五隻實船的測量的摩擦阻力反算 K 的近似值是困難的。換句話說，如外板是清潔的表面，除接頭部分外，對於一般平緩無角的波狀粗面的摩擦阻力係數，在這個實驗範圍內，即使雷諾數極大時，也是與雷諾數

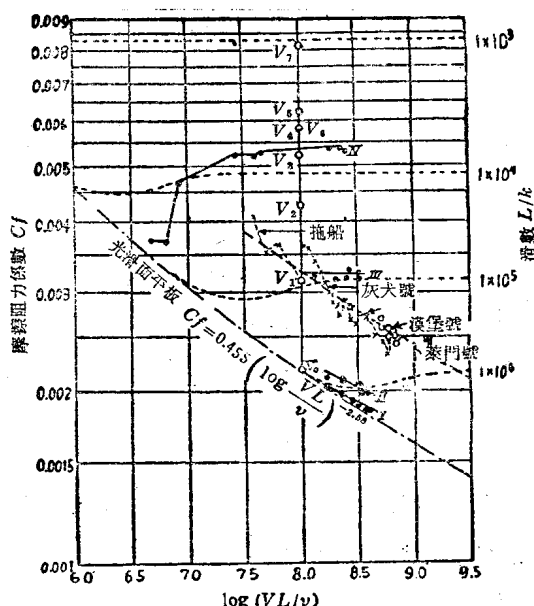


圖 18 箱形船及其他船舶的摩擦阻力係數
有關的。就是摩擦阻力不與速度的平方成比例。
對於這樣的粗面的摩擦阻力還不能根據理論求得，肯普發表：

$$c_f = 0.455 \left(\log \frac{VL}{\nu} \right)^{-2.68} + c_k \quad \dots\dots (11)$$

對於普蘭德及休利鄧格等的粗糙平板計算結果不適用，而對光滑面平板的摩擦阻力係數，在適應其表面粗糙程度下，僅增加一定值 c_k 。即根據圖 18 所示結果，當 $\log(VL/\nu)$ 為 8~9 的範圍內實船的 c_k

箱形船測量的摩擦阻力 表 3

符號	箱形船的長度 L (公尺)	表面的狀態	雷諾數 $\frac{VL}{\nu}$ (10^8)	摩擦阻力係數 $c_f (10^{-3})$	反算求 K (公厘)
I	67	船底油漆二次.....	1.66~3.95	2.05~1.86	0.05
II	67	在 I 之表面每隔 5 公尺附有 10 公厘高的一段.....	1.66~3.68	2.13~2.00	
III	77	塗以直徑 1.25 公厘的砂粒，密度 100%.....	1.31~3.30	3.17~3.33	0.9
IV	71	塗以直徑 3.66 公厘的砂粒，密度 46%.....	0.0465~2.59	3.70~5.41	10
V ₀	21	船底油漆二次.....	約 1	約 2.2	
V ₁	21	用直徑 0.5 公厘的砂粒仿造銹面.....	約 1	約 3.2	0.2
V ₂	21	塗以直徑 3.66 公厘的砂粒，密度 5%.....	約 1	約 4.3	1.1
V ₃	21	塗以直徑 3.66 公厘的砂粒，密度 25%.....	約 1	約 5.3	3
V ₄	21	塗以直徑 3.66 公厘的砂粒，密度 46%.....	約 1	約 5.8	5
V ₅	21	塗以直徑 3.66 公厘的砂粒，密度 75%.....	約 1	約 6.3	7
V ₆	21	塗以直徑 3.66 公厘的砂粒，密度 100%.....	約 1	約 5.8	5
V ₇	21	放於海中八星期附着貝殼等.....	約 1	約 8.2	20

① 密度是把砂粒看做球形計算的。