

87.532

XJX

船舶构造力学

辛一心著

科技卫生出版社

內 容 提 要

本書應用材料力學理論來闡述船舶結構問題，對船體縱結構強度，船體鋼板及其支架，橫結構強度，船體振動問題都作了詳細的分析和說明。內容着重理論，但亦收集一些資料，對解決船舶結構設計問題有很大的幫助。

船 船 構 造 力 學

著 者 辛 一 心

*

科 技 衛 生 出 版 社 出 版

(上海南京西路2004號)

上海市書刊出版業營業許可証出093號

上海市印刷五廠印刷 新華書店上海發行所總經售

*

統 一 書 號 : 15119 · 783

開本 850×1168 1/32 · 印張 11 · 字數 270,000

1958年10月第1版

1958年10月第1次印刷 · 印數 1—1,500

定 價 : (10) 1.80 元

序 言

船舶結構是各種結構中最複雜的一種。雖在現階段科學的發展過程中，還不可能單純依靠理論來決定每一構件的尺度，可是爲了增進強度，減輕船身重量，一般趨勢，已擯棄單純運用經驗；相反的，是根據理論來指導改進的方向。故近年來各國驗船機構所新頒佈的鋼船規範，更符合於理論所推演的要求，有些部份把規範用理論能誘導的公式來表示；僅僅用某些經驗係數與實際相適應。

理論研討的結果，還必須通過試驗和實踐的證明，方能付諸實用。船舶強度，無論船身整體或局部結構，近年來通過試驗所獲得的資料，較以前豐富得多。同時，由於應變檢標的採用，使船體每一部份所遭遇的應力，在航行中經常記錄，成爲可能。因此，對船舶構造的強度，可以更進一步加以瞭解和分析，從而充實理論，把船舶構造的科學逐步地向前推進。

所以在新時代的船舶結構設計者，要有充份的理論基礎，結合實際經驗，才能得到效能較高的設計，才能不斷改進構造方法。決不是抱着規範，全憑經驗，墨守成規，認爲一成不變，便能做好設計的。提到這樣高度來看，則一九四八年中國造船工程學會所出版的“船體強度”，已不足以配合客觀上形勢發展的要求。因此，本書在理論上加以適當的擴充；在個別問題上，加以更詳細的分析和說明。更重要的是參考了一些蘇聯書籍和資料，將蘇聯材料規格，蘇聯鋼船規範的主要規定和蘇聯電焊標準算法，蘇聯船舶中工字形桁梁剖面的設計等加入。並聯系到中國鋼船規範草案中某些規定和長江船的強度。因爲基本上是材料力學應用於船舶結構的引

伸,故名之曰“船舶構造力學”。

本書中所涉及的一些理論,很多是屬於彈性力學、光彈性學、彈性穩度和結構學的範圍,不可能也不需要一一加以誘導。可是在個別問題上,如鋼板的彎曲和皺折,和力矩分佈法,有瞭解其理論淵源的必要;使在實際運用中,能有更清晰的概念。故在盡量避免用繁複算學的原則下,予以適當的誘導和解釋。事實上這些問題,連同應變檢標原理,圓筒皺折,各種集中應力,薄壳扭轉和薄膜比喻等,最好能在另一課程中如高等材料力學或彈性力學作較概括而簡明的有系統的學習,則對於船舶構造的理論基礎,可更充實,對於解決實際問題和進一步鑽研與改進,都會起很大作用的。

由於近年來輪機轉速的提高,船體振動問題,已成為船舶結構設計中不可分割的部份。振動頻率的計算,也成為船舶設計中的經常工作。所以本書的最後一章,把在現階段科學發展中的一些關於船體振動的成就,作了有系統的敘述。同時也包括了增加虛重量的資料和一些近似公式與試驗結果,可以作為實際工作中有力的考證。船體振動的一章中,沒有包括工程振動力學的基本原理,因為是假定對於振動力學已有基礎後來學習這一章的。

本書內容,足供一年每周四小時講授之用。假使僅有一學期每周三小時或四小時的講授時間,則必須加以適當精簡,部份內容可改到高等材料力學和振動力學中去。

習題供一般練習和討論提綱之用。最後還附公制,英制對照表,和蘇聯標準的各種型鋼,作為練習和實際工作中的參考。

本書於寫稿和校印的過程中,都缺乏很詳細和精密的核對;已發現的錯誤,列入書末勘誤表。其他缺點和錯誤,必然還是很多的,尚希讀者多多指正!

辛 一 心

於上海交通大學造船系, 1954年1月

目 錄

序 言.....	1
第一章 船體縱結構強度.....	1
第一節 船體強度概述.....	1
第二節 縱結構強度.....	2
第三節 重量曲線.....	4
第四節 浮力曲線.....	9
第五節 負荷曲線和逐步 積分.....	11
第六節 剪力和彎曲力矩.....	14
第七節 船體剖面模數.....	21
第八節 許用應力.....	27
第九節 標準縱結構強度.....	35
第十節 和縱結構強度有 關的幾個問題.....	39
第十一節 船身運動和波浪 性質的影響.....	53
第十二節 船的撓曲.....	63
第十三節 “狼”號及其他試 驗.....	70
第十四節 船體應力的測量.....	77
第十五節 彎曲後所產生的 剪力和應力綫圖.....	83
第二章 船體鋼板及其支架.....	89
第一節 鋼板的彎曲.....	89
第二節 鋼板的皺折.....	94
第三節 鋼板受垂直於板 面的壓力後所產 生的彎曲.....	110
第四節 鋼板的彎曲實驗 和在船舶設計中 的應用.....	120
第五節 艙壁強度.....	128
第六節 甲板及梁.....	141
第三章 橫結構強度.....	153
第一節 橫結構強度.....	153
第二節 近似算法.....	158
第三節 力矩分佈法.....	163
第四節 潛水艇橫結構強 度.....	170
第五節 商船橫結構近似 算法和標準橫結 構強度.....	181
第六節 橫結構和縱結構 間的關係.....	184
第四章 船體結構中幾個特殊問題.....	187

第一節	鉚釘接合.....	187	第四節	焊接強度.....	213
第二節	集中應力.....	196	第五節	桁樑剖面的設計	223
第三節	造船用鋁合金...	206			
第五章	船體振動.....	241			
第一節	桿的橫向振動...	242		校正因素.....	277
第二節	振動能.....	248	第九節	近似計算公式...	278
第三節	增加的虛重量...	254	第十節	橫向振動.....	282
第四節	積分計算法.....	259	第十一節	扭轉振動.....	286
第五節	剪力校正因素...	256	第十二節	激動力、振幅及	
第六節	能量計算法.....	272		阻尼.....	303
第七節	截面旋轉校正因		第十三節	船舶振動的原因	
	素.....	274		及預防.....	310
第八節	結構剖面模數的				
習 題.....					313
附錄一	公制英制對照表	330			
附錄二	各種剖面	332			

第一章 船體縱結構強度

第一節 船體強度概述

船體結構的強弱，完全看他內部所受應力和應變而定。通常各種船舶結構所受的應力，有以下幾種：

(1) 因船身縱彎而產生的應力，影響船的縱結構強度，是船舶設計中重要問題之一。所謂縱結構，是船體中前後相連接的各種構件，如龍骨、立龍筋、船壳板、甲板、內底板、雙層底的緣板等。由於在船身各部的重量和浮力的分佈不一致，這種縱結構中產生彎曲力矩；在巨浪中，彎曲力矩也就很大。假使縱結構強度不夠，船舶頗有被巨浪打成兩段的可能。

(2) 因船身橫結構的彎曲而產生的應力，影響船的橫結構強度。所謂橫結構，是船體中前後不相連接而在橫剖面上相連接的各種構件，如肋骨、肋板、甲板下橫梁、支柱等。由於船中的載重和周圍的水壓力，橫結構中也受到彎曲力矩。假使橫結構強度不夠，船身也易於變形。橫結構強度在潛水艇中特別重要，因為在潛水時周圍所受的水壓力很大，空靠橫結構來支持。

(3) 因船身和波浪前進的方向相傾斜而產生的扭應力，影響船的扭力強度。事實上船身和一中空的長管相仿，假使甲板上開有較大的艙口，扭應力可能很嚴重。

(4) 船體中局部所受到的應力，影響船的局部強度。局部所受應力包括鋼板中產生皺折時的應力，各部分集中應力，鋼板受橫壓力後所產生的應力，集中性的巨大載重如炮位、鋼甲、主機、鍋爐

等所產生的應力以及船體中任何部分所受到的特殊應力。這些應力。雖是局部的，可是間接影響到全船結構的強度。

船體結構是很複雜的，並且運動在各種不同情況的水流和風浪之中，每一構件的應力，不可能計算得很精確。所以一切船體強度的計算，都是在某種假定情況下，用同一辦法來計算；使算出的結果，可用以比較各船的強度；再用經驗來判斷有無斷裂的危險。換言之，一切強度計算，是相對的，而非絕對的；算出的應力，也不是船舶所確受的應力；而是一種數字，可以與其他船舶相比較。

世界上各國所公認的各種商船建造規範，都大同小異，是全世界建造航海商船的經驗總結。經過多年的應用修正和補充，有足夠的條件，可以信任的。事實上這些規範的演變，由純經驗主義的初胎而逐步加以修改，已漸合理論的推演。規範所不能適用的船舶，如軍艦、內河船等；一般的都用可靠的基準船作為設計新船的藍本；可是在沒有相當的基準船時，如設計巨型輪瑪麗皇后號（“Queen Mary”），可以根據理論的推算，結合實際經驗，也能得出很好的結構佈置。

本書主要是說明船體強度的原理，並不準備把規範作詳細的解釋。瞭解原理之後，必然能瞭解規範的蘊義。引用到材料力學和彈性理論的地方，不再詳細誘導來源，讀者可參閱各有關書籍。

第二節 縱結構強度

計算船體縱結構強度，都假定船身好似一橫梁；橫梁上的負荷，是浮力和重量的差額。這種差額，無論在靜水或波浪中，都是存在的。由於這種負荷，就產生彎曲力矩和彎曲應力。

圖 1 表示一方船浮於波面，浮力分佈曲線是 b ，船體和裝載的重量分佈曲線是 w ，所以負荷等於 $(b-w)$ ；負荷分佈曲線是 L ；這三種曲線 b 、 w 、 L 的垂直座標都是單位長度內的浮力、重力和負荷。船的浮力和重量必相等，所以 b 和 w 兩曲線下的面積必相等。

根據材料力學原理，把負荷曲綫施行積分，可得剪力曲綫 F ，

或

$$F = \int_0^x (b - w) dx。$$

由於 w 和 b 兩曲綫下的面積相等，所以 F 曲綫在船的兩端必等於零。再將 F 曲綫施行積分，可得彎曲力矩曲綫 M ，或

$$M = \int_0^x F dx。$$

M 在船的兩端也必是零， M 的最高點相當於 $F = 0$ ， M 曲綫的反曲點相當於 $L = 0$ 或 F 的最高點。

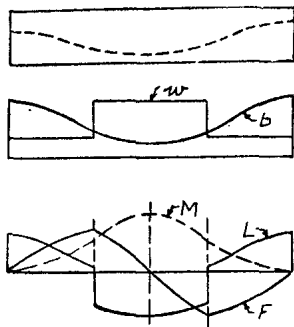


圖 1

事實上各種船舶的 w 曲綫，決不是光順的曲綫；由於船舶各艙內的載重不同， w 曲綫必然是斷續高低不同的綫。同時 L 和 F 也不可能是光順的曲綫。這裏不過是說明彎曲力矩計算的方法而已，彎曲力矩假使可照上法求得，彎曲應力可照材料力學中公式求得。

可是計算彎曲力矩，與水波的波長波高，和船中載重的分佈情形，息息相關。要使各船所算出的數字，可以互相比較，必須假定一標準波浪和標準的船舶情況。這些標準的假定情況如下：

(1) 船身暫時平衡於深水坦谷水波上，波長等於船的兩柱間長度 (L)，波高是波長的 $1/20$ ；

(2) 船身無橫傾，浮力等於船的總重，浮心在船的重心之下；

(3) 爲求得最大可能的彎曲力矩，也就是船的最嚴重情況，規定以下兩標準情況：

(A) 中拱：中拱的意義，是使船兩端重而中部輕；水波的波峯在船身中央，波谷在首尾兩垂綫處，大部浮力集中在船中部。這種情況所引起的船身彎曲，是中部拱起而兩端下垂。至於船中的裝載情形，若煤艙在兩端，就假定是裝滿的；若煤艙在船中部，就假定

是空艙。貨艙全部都裝滿均質貨物。所有一切船用物料、淡水、壓艙、食品等，都假定藏於船的兩端。

(B) 中垂；中垂的意義，是使船中部重而兩端輕；水波的波峯在首尾兩垂綫處，波谷在船身中央，大部浮力集中在船的兩端。這種情況所引起的船身彎曲，是中部下垂而兩端上彎。至於船中的裝載情形，假設煤艙在兩端，就假定是空艙；假設煤艙在船中部，就假定是裝滿的。貨艙全部都裝滿均質貨物，所有一切船用物料、淡水、壓艙、食品等，都假定藏於船的中部。

中拱所生的應力，在船的上部甲板是拉力，下部龍骨是壓力，中垂所生的應力適相反，上部是壓力，下部是拉力。

第三節 重量曲線

重量曲綫即是圖 1 中的 w 曲綫，也是全船重量包括船身及一切裝載的重量，沿船長的分佈曲綫。這種曲綫的橫座標是船長，垂直座標是單位長度中的重量(公噸/公尺或噸/呎)；曲綫下的面積等於全船重量；這面積的重心縱位置，等於全船重量的重心縱位置。

通常船的重量可分為固定重量和變動重量兩大類，固定重量包括以下各項：

(1) 船身重量，是船體中各部縱橫結構、首尾鑄件鍛件、各種局部結構、隔壁、上層建築和底邊龍骨等的總重量。

(2) 木工及裝備重量，是船體木工、船室木工、水泥、油漆、瓷磚、艙面鉗工件、艙面鍛件、管系、銅工、救生設備、艙面機械、桅、吊桿和各種屬具如錨、錨鏈、鋼索、棕繩、器皿等的重量。

(3) 機器重量，是船內的推進主機、輔機、鍋爐、地軸、推進器、電機、冷藏機、鍋爐和凝水櫃中水等的重量。

(4) 防護重量是軍艦中由於防護敵人的攻擊而裝置的船邊厚鋼甲、主甲板厚鋼甲、炮塔周圍厚鋼甲、堡壘兩端的厚鋼甲隔壁指揮塔鋼甲，避彈鋼板、以及水綫下防魚雷的縱向厚隔壁的重量。

(5) 軍備重量是軍艦中所裝的主力炮、次級炮及其炮塔、各種小炮、高射炮、機鎗、步鎗和魚雷、魚雷管、水雷、炮彈、彈藥、子彈、炸彈、深水炸彈等的重量。有時軍備重量中還包括飛機、飛機架、飛機吊桿、及飛機用油和必要配備的重量，或是在軍備重量外，另列飛機配備重量一項。

以上各項重量，第(4)、(5)兩項專用於軍艦；(1)、(2)、(3)三項則軍艦和商船都適用。第(5)項軍備重量，不全部是固定重量；彈、藥、步鎗、魚雷、水雷等是變動重量，於作戰消耗後重量是要變動的。

變動重量包括：(1)載貨重量，(2)燃料及潤滑油重量；(3)壓艙重量；(4)儲用物料和食物的重量；(5)船員及其隨帶物件的重量；(6)旅客及其行李的重量；(7)郵件重量；(8)淡水和鍋爐給水等重量。

計算船舶的重量分佈曲綫時，主要的是分別整體性和局部性兩種重量。整體性的重量是從船首到船尾都有的結構重量，主要是縱通甲板以下（連縱通甲板在內）的縱橫結構、船壳板、船底板、內底板、甲板、緣板、肋板、肋骨、橫梁、肘板、龍骨板、立龍筋、邊龍筋、縱桁等的重量。這種整體性的重量，可擇定代表性的肋骨間距十餘個，把每個肋骨間距中的這些整體性重量逐件詳細算出，除以各該間距的長度（公尺），即得單位長度或每公尺的整體性結構重量。把單位長度的整體性結構重量，作為垂直座標，船身長度的作為橫座標，可繪成這一類的結構重量分佈的曲綫。

在整體性結構重量曲綫之上，必須先加以船身結構中的各局部性的重量，如縱橫隔壁、機爐底座、軸隧、上層建築、首尾材、舵等。一般的都可假定在各該件所佔的長度內，重量是平均分佈的。把每件重量，除以所佔長度，就算出各該件在單位長度內的重量。加於整體性結構重量曲綫之上，也就是在各該件所佔長度內，繪一平行於該曲綫的綫。

這裏必須說明橫隔壁重量的分佈辦法。由於這種重量，分佈於極短的長度內；假使同樣計算他的單位長度內重量，必得極大數字；重量曲線在橫隔壁處必將突出很高，在製圖和施行積分時將發生極大困難。為了避免這種困難，可以假定每一橫隔壁的重量，平均分佈於半公尺或一公尺之間；這樣所得的最後計算結果，仍可保持實用上的精確性。

經過以上各步計算，可以把船身重量的分佈曲線，全部繪成。

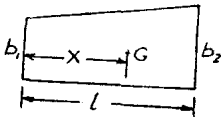


圖 2

至於木工和裝備重量，通常也可假定平均分佈於全船長度。

其他各項重量，如機器重量、防護重量、軍備重量、載貨、壓艙、淡水等等重量；都是局部性的；都可以假定分佈於其所佔

的長度以內。分佈的情形，可假定是一梯形如圖 2；

令 $A =$ 梯形的面積 $=$ 該項局部重量； $l =$ 梯形的長度 $=$ 局部重量所佔長度； $b_1, b_2 =$ 梯形兩端的高度； $x =$ 梯形的重心和 b_1 邊間的距離，則

$$b_1 = \frac{2A}{l} \left(2 - \frac{3x}{l} \right), \quad b_2 = \frac{2A}{l} \left(\frac{3x}{l} - 1 \right)。$$

梯形重心的縱位置，應和該項局部重量的重心縱位置相符合。

至於裝貨重量的分佈，可以根據容量曲線，毋需再用梯形來表示，比較更為精確。

在以上所述繪製重量曲線的各階段計算，以船身重量的分佈，計算最為繁複。必須把每一構件重量算出，耗時既多，且事實上不易得到很正確的結果，在實際應用中，極不相宜。一般實際算法，都用近似法。即假定縱通甲板以下的船身結構重量，或是連同木工及裝備重量可用比較簡單的幾何圖形來表示；即可使計算簡化，且發生差誤的機會也可減少；最後所得的結果，可以符合實際所需精確性的要求。通常所用的近似法，有以下幾種：

(1) 假定縱通甲板以下的船身重量(或連同木工及裝備重量)分佈圖形是拋物綫和長方形如圖 3; 拋物綫在長方形之上。這種分佈圖形, 對於沒有平行中體的船型, 最為適宜。長方形的面積, 和拋物綫下面積相等, 若 $W =$ 縱通甲板下船身重量(或連同木工及裝備), 則長方形面積 = 拋物綫面積 = $W/2$; 長方形的高度 $a = W/2L$, 拋物綫的最高度 $b = W/1.33L$, L 是兩柱間長度。

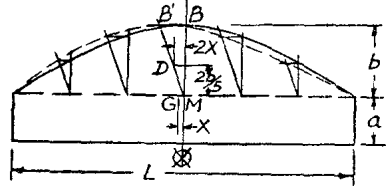


圖 3

假使縱通甲板下船身重量的重心不在船的中央, 而在中央後 x 尺處; 必須應用拋物綫變移辦法, 使拋物綫下的面積重心能移後 $2x$ 尺, 變移辦法如下:

拋物綫下面積重心的高度是 $\frac{2}{3}b$, 就在這高度向後量 $2x$ 尺, 得 D 點如圖 3; 把 M 和 D 連以直綫, 再從 B 點繪一水平綫, 相交得 B' 點。 B' 點就是變移後的最高點。其餘各垂綫的底點, 都可繪成和 MB' 綫相平行的傾斜綫; 再從各垂綫和拋物綫的交點繪水平綫, 與傾斜綫相交的各點就是變移後拋物綫的軌跡。圖中虛曲綫就是變移後的拋物綫, 其下面積的重心在船中央後 $2x$ 尺處; 所以全部圖形

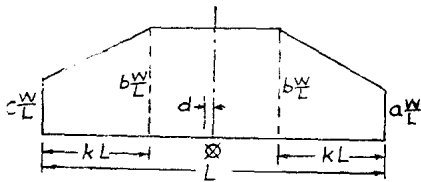


圖 4

的重心在船中央後 x 尺處。

(2) 假定縱通甲板以下的船身(或連同木工及裝備)重量分佈如圖 4 所示的直綫圖形。這種直綫圖形, 對於一般有平行中體的貨船最為適宜。令 $W =$ 縱通甲板以下的船身(或連同木工及裝備)重量; $L =$ 兩柱間長度, 圖中 a, b, c, k 等係數和重心與中央距離 d 約如表 1:

表 1

船 類	k	a	b	c	d
較瘦商船型	0.333	0.567	1.195	0.653	0.0052L
較肥商船型	0.333	0.596	1.174	0.706	0.0017L
較肥的大湖中貨船型	0.250	0.572	1.125	0.676	0.0054L
軍 艦	0.333	0.280	1.400	0.420	

表 1 中的數字,僅可作為參考。在任何船舶的個別情況下,表 1 的數字不能直接應用。假使某商船的縱通甲板下重量(連同木工及裝備)的重心在船中央後 d 尺,可根據表 1 中的一般情況,假定 $k = \frac{1}{3}, b = 1.2$, 則可得 $c - a = \frac{108}{7} \times \frac{d}{L}, a + c = 1.2$, 可將 a 和 c 值解出。或可假定 $k = 0.3$, 中部 $0.4L$ 長的一段長方形面積等於 $W/2$, 其餘 $W/2$ 分佈在兩端的梯形中。 a 和 c 的數值,也可根據整個重心的位置而加以確定。

(3) 假定縱通甲板下的船身(或連同木工及裝備)重量(W)分佈圖形的浮力曲線和梯形所湊合如圖 5, $\frac{2}{3}W$ 依照船於靜水中 $L \cdot W \cdot L$ 下的浮力曲線分配,而 $\frac{1}{3}W$ 依照梯形分佈;變動梯形兩端的高度,可以調整全部圖形的重心縱位置,使與實際重心縱位置相符合。這種分佈法,應用於軍艦,較為相宜。兩端可能較實際情況為重,中部則較輕。所以用以計算中拱時的彎曲力矩,可能偏於過大;而用以計算中垂時彎曲力矩,則可能偏於過小。

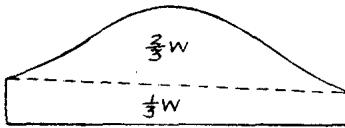


圖 5

一般船舶於設計時必須將各項重量和重心位置算出,所以在計算結構強度時,各項重量的數值都已知道。縱通甲板下船身和木工及裝備重量,還可照下式約估:

$$W = K \cdot L \cdot B \cdot D \text{ (公制)}, \quad \text{或} \quad W = K' \frac{LBD}{150} \text{ (英制)},$$

其中 L 是船長; B 是船寬; D 是船深; K 和 K' 是係數如表 2;

表 2

船 類	主要尺度(公尺)	K(公噸/公尺 ³)	K'(噸/呎 ³)
近海船	51.6×8.85×3.97 (169'×29'×13')	0.247	0.700
小型貨船	91.6×13.1×8.24 (300'×43'×27')	0.182	0.515
大型貨船	137.3×17.07×10.7 (450'×56'×35')	0.151	0.427
小型客船	76.25×11.6×4.88 (250'×38'×16')	0.232	0.658
客貨船	146.4×18.0×11.3 (480'×59'×37')	0.192	0.543
遠洋客船	207.4×22.9×16.5 (680'×75'×54')	0.210	0.594

第四節 浮力曲線

求船的浮力曲線，不論在中拱或中垂情況，都假定船舶暫時平衡於坦谷水波的波面上。坦谷水波的長度，和船的兩柱間長度(L)相等；波高(h)等於波長的二十分之一，($h = L/20$)；這種坦谷水波，稱為標準水波，用以計算結構強度；使各船所算出的強度數字，可相比較。根據坦谷水波方程式 $x = \frac{L}{2\pi}\theta - \frac{h}{2}\sin\theta$ ， $y = \frac{h}{2}(1 - \cos\theta)$ ，可得波峯到波谷一段中從波峯向下量到各處波面的距離 y 如表 3：

表 3

$x\sqrt{\frac{L}{20}}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
y/h	0	0.034	0.128	0.266	0.421	0.577	0.720	0.839	0.927	0.982	1.0

船舶要平衡於波面上，必須滿足以下兩條件：

- (a) 在波面下的排水量，必須等於全船重量。
- (b) 在波面下的浮心，必須在全船重心之下；或是浮心縱位置，須與重心縱位置相同。

求波面下的浮力曲線，可應用以下各步驟：

(1) 在透明紙或描圖臘紙上繪製坦谷曲線；其波長與船長相等，波高等於 $1/20$ 波長；所用的比例尺，和船體剖面相同。

(2) 把這繪有坦谷曲線的透明紙，蓋於有龐勤氏曲線的船體縱剖面圖上，使波峯和波谷，在其應有的位置。在中垂情形，波谷與船中央垂綫相合；在中拱情形，波峯與船中央垂綫相合。波面的水平中綫，置於與 $L.W.L.$ 相平行處。

(3) 第一步近似位置，可假定波面水平中綫在龍骨上的高度，中拱時等於靜水 $L.W.L.$ 吃水的 $5/6$ ，中垂時為 $6/5$ 。

(4) 從龐勤氏曲線上，可量得各垂綫處波面下各橫剖面的面積。用辛氏定律，可算得波面下的排水量 (Δ_1) 和浮心位置 (B_1)。

(5) 令 $\Delta_0 =$ 全船重量，或在靜水中的排水量，若 $\Delta_0 > \Delta_1$ ，同時 B_1 點在全船重心 G 點後 k 呎，則該船不能在假定的位置平衡，而必須下沉少許並產生縱傾。其下沉和縱傾的數量，可約計如下：

$$\text{下沉 } S = \frac{\Delta_0 - \Delta_1}{(T.P.I.)_{L.W.L.}} \quad \text{或公制 } S_{cm} = \frac{\Delta_0 - \Delta_1}{(T_{cm})_{L.W.L.}};$$

$$\text{縱傾值 } t = \frac{K\Delta_0}{(M_{CTI''})_{L.W.L.}} \quad \text{或公制 } t_{cm} = \frac{K\Delta_0}{(M_{1cm})_{L.W.L.}},$$

二式中 $(T.P.I.)_{LWL}$ 和 $(M_{CTI''})_{LWL}$ 都是在靜水時的數值，可從靜水船性曲線中找到，嚴格的說，應當用波面的數值，但目前尚無法求得，祇可用靜水中的數值，來計算 S 和 t 的近似值。

(6) 於是把波面水平中綫向上移動 S ，並使其傾斜，船可得縱傾 t 。

(7) 再從龐勤氏曲線，計算移動位置後的排水量和浮心位置，得 Δ_2 和 B_2 ；若 B_2 和 B_1 間的縱距離為 K_1 ，從 Δ_2 與 Δ_1 的差數和 S 值，可算出波面的 T. P. I. 近似值是 $\left(\frac{\Delta_2 - \Delta_1}{S}\right)$ ；同樣波面的 $M_{CTI''}$ 近似值是 $\frac{K_1\Delta_2}{t}$ ；利用這波面的 T.P.I. 和 $M_{CTI''}$ ，可再計算該船應再下沉或上浮以及縱傾的數值。

(8) 再移動位置，計算排水量和浮心位置。這種計算步驟繼續施行幾次，（一般的三次就已足夠）直至最後求得的排水量等於 Δ_0 ，浮心和重心在同一垂綫上為止。

(9) 這樣所得船的位置，就是平衡於波面上的位置。從龐勤氏曲綫，可以量得波面下各垂綫處的橫剖面積。令 A = 船的橫剖面（平方公尺），在該剖面處一公尺長度內的體積 A 是立方公尺，浮力等於 $1.025A$ 公噸/公尺（海水）或 $1.0A$ 公噸/公尺（淡水）。在英制， A 用平方呎，每一呎長度內的浮力是 $\frac{A}{35}$ 噸/呎（海水）或 $\frac{A}{36}$ 噸/呎（淡水）。把這些單位長度的浮力作為垂直座標，繪於船長度上，即得在波面上的浮力曲綫。這曲綫下的面積，等於船的排水量 Δ_0 ；面積重心的縱位置，即代表浮心的縱位置。

第五節 負荷曲綫和逐步積分

把重量曲綫和浮力曲綫相減，就可得負荷曲綫 (L) 如圖 6；負荷曲綫部分是正值，部分是負值；正負兩部分的面積相等，故負荷曲綫下的總面積等於零。把負荷曲綫施行積分，得剪力曲綫 (S)；再把剪力曲綫施行積分，得彎曲力矩曲綫 (M)。最大彎曲力矩 M_{max} 在剪力等於零處。船兩端的剪力和彎曲力矩都是零。一般的船舶中，受最大彎曲力矩的剖面，都靠近船中央；受最大剪力的剖面；約距船的兩端 $L/4$ 。

施行積分的辦法，可用面積儀或用積分儀可更便捷。積分儀的原理如下。

圖 7 中 y_0 是已知曲綫，現在要找 y_0 的一次、

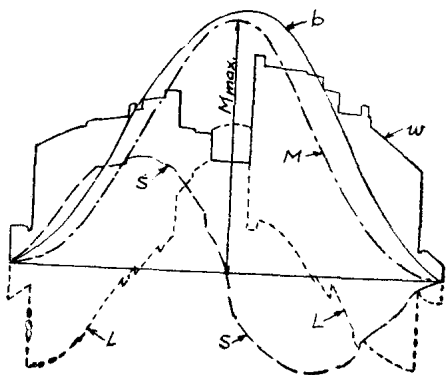


圖 6