

中國造船工程學會叢刊之二

船體強度

附 水 波

辛 一 心 著

中國造船工程學會印行

民國三十七年十二月

17697

中國造船工程學會叢刊之二

船體強度

附 水 波

辛 一 心 著



中國造船工程學會印行

民國三十七年十二月



序 言

世之言船體強度者，多以各驗船機構之規範為依歸，斤斤於一鋼板一支條之厚薄大小，而忽其整個結構之強弱；或則循舊船之成規，茫然不解其所以然之由；二者均非我造船學者之所尚也。夫船體強度之學，自整個結構以至鋼板，鉚釘，電焊；枝節繁複，倘不挈其綱領，明其原理，實有不勝其繁之苦。且夫材料之性質，與製造之法則，年有改進，即各驗船規範，亦不能包羅萬象，且時有增改；若遇特殊情形，設計者更無所適從！是以不佞教學造船，斤斤於原理之講解，對於船舶之縱橫結構及局部強度，提綱挈領，倘能明其理，析其義，融會而貫通，得心而應手；各驗船規範，即可循此以求其由，更可循此以覓改善與擴充之道。果能輔之以宏富之經驗，則雖無規範可也，雖無舊船之成規亦可也。本書所述大多為平時課室中講解所及，將縱橫結構及局部強度與船用電焊分為四篇，詳其理而略其節；最後附水波理論，以其與船體強度息息相關。固不敢言船體強度之學，已盡於是；讀者果能明析其蘊義，當可推及各設計與驗船諸問題矣。是為序。

辛一心於上海交通大學

卅七年十二月

船體強度目錄



(1) 綜述.....	1
第一篇——縱結構強度	
(2) 縱結構強度概述.....	2
(3) 重量曲綫.....	3
(4) 浮力曲綫及負荷曲綫.....	6
(5) 逐步積分及積分儀.....	8
(6) 剪力及彎曲力矩.....	9
(7) 船體剖面之慣性力矩.....	12
(8) 許用應力.....	18
(9) 傾側後之彎曲應力.....	20
(10) 各種運動及波浪性質之影響.....	20
(11) “狼”號試驗.....	25
(12) 標準縱結構強度.....	28
(13) 船之撓曲.....	30
第二篇——局部強度	
(14) 兩端受壓力之鋼板.....	32
(15) 有效鋼板寬度.....	35
(16) 剪力及其所生皺折.....	36
(17) 板面受橫壓力之鋼板及其支架.....	37
(18) 台格板及其支模.....	43
(19) 鉚釘接合.....	46
(20) 集中應力.....	51
第三篇——橫結構強度	
(21) 橫結構強度算法.....	58
(22) 霍爾脫氏之研討.....	60
(23) 標準橫結構強度.....	61
第四篇——電焊接合	

(24) 船用電焊	63
(25) 電焊之形成	64
(26) 焊接之種類	66
(27) 焊接之強度	72
(28) 焊接之缺點及電焊程序	77
(29) 自動電焊	83
(30) 電焊之檢驗	85
(31) 電焊符號	86
習 題	87
英 漢 名 詞 對 照	91
附 錄——水 波	
(1) 水波之分類	97
(2) 移動水波	97
(3) 坦谷水波	99
(4) 坦谷水波之幾何特性	100
(5) 坦谷水波之物理特性	101
(6) 坦谷水波之能量	105
(7) 分子旋轉	106
(8) 淺水坦谷水波	107
(9) 水波之組合	111
(10) 波羣速	111
(11) 水波與風力	112
(12) 海上水波之測量	113
水 波 習 題	115
水 波 英 漢 名 詞 對 照	116
附 各 種 鋼 條 剖 面 簡 略 要 點 表	

船 體 強 度

(一) 綜 述

船體結構之強弱，胥視船體所受各種應力 (Stress) 而定。通常各種船舶結構所受之應力，不外以下三種：

(1) 因船身縱彎 (Longitudinal Bending) 而發生之應力。是項應力，影響於船之縱結構之強度 (Longitudinal Strength)，為各種船舶設計時最重要而應解決之問題，若縱結構過弱，則船入大海，頗有被巨浪打成兩段之可能。

(2) 因船身橫結構之彎曲而生之應力。所謂橫結構，即船之肋板，(Floor) 肋骨 (Frame) 及台格下之橫樑 (Beam) 等與縱樑不發生直接影響諸結構組件者是。該項橫結構，若過弱則易受水壓及載貨所受之壓力而發生變形。故橫結構之強度 (Transverse Strength) 亦為設計船體結構時所宜加考慮者。但通常船舶之橫結構強度大多均能禦外力之壓撓，故橫結構之強度較諸縱結構強度，似屬次要。

(3) 船體局部所受之應力，如集中性之巨大載重若軍艦中之砲位，鋼甲，發砲時之反作用力，機器、鍋爐等；集中應力 (Stress Concentration)，船首所遇水之動力，以及船體任何部份所受之局部應力。是項應力，直接影響船之局部強度 (Local Strength)，間接影響全船結構之強度。

通常計算船體強度，最重要者為計算其縱彎所生之應力，使其不致超過許用應力 (Allowable Stress) 之值。但船體結構，不如岸上各種建築物之結構，或飛機結構可計算各構件之應力。船體結構，極為繁複，實無法以求得各件間應力。通常均視船隻為一橫樑，以計算其因載重及遇水波時所生之縱彎應力。

於此必須述明任何船體強度計算，均為相對的，而非絕對的。換言之，計算之結果，不過用以比較各船之強度，復以經驗判斷其有無斷裂之危險。若某新船之應力數字，較某安全航行之船舶之應力數字為小或相等，則可判斷新船之強度無虞。否則反是。故算得之數字，不能視為該船確受之應力；而為一種數字，可用以與他船比較而已。

計算所得之數字既僅用作比較，則各種船舶計算之方法必須一律。通常均假定各船受縱彎最嚴重之情形下，用最簡單之橫樑計算方法，求得各船應力之數字。計算方法及假定之情形詳以下各節。惟學者必須注意求得之數字絕非各船確受之應力。

第一篇 縱結構強度

(二) 縱結構強度概述

計算船體之縱強度，假定船爲一橫樑 (Beam)，其上負荷爲垂直力 (Vertical Force) 是項垂直力爲船身及其負載之重量與浮力之差。是項差力，不問在平水或在波浪中，均必存在。惟在波浪中之差力較大，故其所發生之彎曲應力，較靜水中爲大。

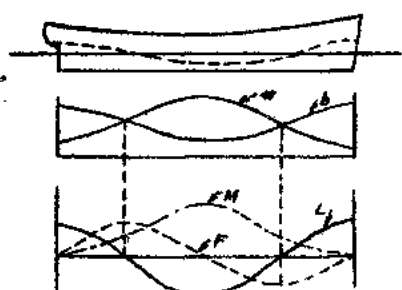


圖 一1

參閱圖 一1，若船體浮於一波面，則其浮力分佈之曲線如 b ；若船體及其負載之重量分佈如曲線 w ，則

$$w - b = \text{負荷 (Load) } L$$

w , b 及 L 三曲線之垂直座標均爲在一單位長度內之重力或浮力或負荷。(Force per foot run)

依照材料力學原理，將負荷曲線施行積分可得剪力 (Shearing force) 曲線 F ，或

$$F = \int_0^x (w - b) dx$$

F 曲線在船之兩端必等於零。因 w 曲線下之面積 (即全船重量) 與 b 曲線下之面積 (即全船浮力) 必相等，故 F 之正面積及負面積兩部份亦必相等。

再將剪力曲線施行積分，可得彎曲力矩 (Bending Moment) 曲線 M ，或

$$M = \int_0^x F dx$$

船之兩端， M 必爲零； M 最大之點與 $F = 0$ 點相符合。 M 曲線之反曲點爲 L 曲線等於零處或 F 曲線最高處。

在實際上各種船舶之 w 曲線，並非光順之曲線，而爲斷續高低之曲線，蓋船舶各部重量，輕重不同，且每有突變之處，而非逐漸變更，故 L 及 F 等曲線均非光順曲線。圖 一1 不過表示大概情形與彎曲力矩計算之方式耳。

通常各種船舶之彎曲力矩最高值約近船之中部，剪力最大值約在距離船首或船尾 $1/4$ 船長處。

彎曲力矩既於圖上可量得，則彎曲力矩所發生之應力可所普通材料力學之公式以計

算之。

計算彎曲力矩，完全為根據 b 及 w 兩曲線。 b 為浮力，與所遇水波之高低大小有關； w 為船重，因船上載重之分配及佈置而異。若各船之強度可以比較，則何種水波與如何載重應有同一之標準，故通常計算船體縱強度時，均根據以下諸公認之假定。

(a) 船身置於一水波上，該水波為深水坦谷波形，其波長與垂間船長相等，(L)，波高為波長之 $1/20$ ，($L/20$)。

(b) 船身平衡於上述水波之上，並無橫傾，浮力等於船之總重，浮心在船之重心之下。

(c) 為使船之載重情形，發生可能最大之彎曲力矩起見，復規定以下兩標準情況：

(1) 中拱 (Hogging)：中拱之意義，即使船兩端重而中輕，水波之波峯在中部，即大部浮力集中於中部，致船之彎曲為中部拱起而兩端下垂。故 (a) 段所述之坦谷水波之波峯在船中部，波谷在船之兩端，(波峯最高點與船中垂綫相符合，波谷最低點與首尾兩垂綫相符合)。

至船之載重則若煤艙在兩端則假定滿艙，若在中部，則假定空艙。貨艙全部滿裝均質貨物 (Homogeneous cargo)。所有一切船藏物料 (Store)，淡水壓艙食品等等均假定藏於船之兩端。

(2) 中垂 (Sagging)：中垂之意義，即使船中重而兩端輕，大部浮力集中於兩端，致船之彎曲為中部下垂而兩端上彎。故 (a) 段所述之坦谷水波之波峯在船兩端，而波谷在船中垂綫處。

船之載重情形為：若煤艙在中部則假定滿艙，在兩端則假定空艙。貨艙全部滿載均質貨物，所有一切船用儲藏物料，淡水，壓艙，食品等等均假定藏於船之中部。

中拱所生之應力，為船之上部為拉力或牽力 (Tension)，下部或龍骨所受為壓力 (Compression)。中垂所生者，則相反，上為壓力，下為拉力。

計算方法之大綱既如上述， w 及 b 等曲線之詳細求法，在以下諸節中詳述之。

(三) 重量曲線 (Curve of Weight)

所謂重量曲線，即圖 1-1 中所示之 w 曲線，亦即全船重量包括船身及所裝載之一切物件之重量，沿船長度之分佈曲線。通常以每呎船長中之全重量噸數表示之。該曲線下之面積應等於全船重量，其面積重點之縱位徑即表示全船重心之縱位置。

通常船之重量有分為固定重量 (Fixed weight) 及變動重量 (Variable weight) 兩種：固定重量中復包括 (1) 船身結構重量 (Hull weight)：如船身全部結構之重量，上台格以上諸台格全部結構之重量，舵，船首尾所裝鑄鐵及鍛鐵部份，桅，吊桿等。(2) 機器重量 (Machinery weight)：如鍋爐、主機、各種副機、附件、舵機、地軸、推進器及水管汽管等。

(3)油漆、水泥、木工及裝修 (Wood and outfit) 及各種器皿等。(4)船具 (Equipment) 如錨、錨鍊、纜繩、鋼索等。(5)軍備重量 (Armament weight): 如裝載之主力砲, 次級砲及其砲塔 (Turret), 各式小砲, 高射砲, 機關槍等, 以及魚雷及魚雷管, 水雷, 及砲彈, 彈藥, 子彈等之重量。(6)防禦重量 (Weight of Protection) 如船邊厚鋼甲, 主台格鋼甲, 砲塔周圍鋼甲, 指揮站及水綫下防魚雷之厚縱鋼板等。第(5)及第(6)兩項僅適用於軍艦, (1)至(4)則商船軍艦均適用。普通在設計時必須將各項重量詳細分列並算出。在計算船體結構之強度時, 則往往有將(1)(3)(4)三項併列者。

變動重量中包括: (1)載貨之重量, (2)燃料之重量, (3)壓艙之重量, (4)備用物料及食物之重量, (5)船員及其隨身物件之重量, (6)旅客及其行李之重量, (7)郵件之重量, (8)淡水及鍋爐給水之重量等。

在上述各種重量中如各項變動重量及機器重量等, 均知其裝置或裝載之地位, 重心及重量等, 可以用梯形法 (詳下) 以分佈其重量, 使與其他位及重心位置相適合。但船身結構重量之分佈, 最難於計算。通常計算船身結構重量之分佈, 有以下兩種方法:

(1) 詳細算法 (Detail calculation): 在全船中, 擇定代表肋骨間距或骨架間距 (Frame spacing) 十餘個, 將每個間距中上台格以下之正式結構各件之重量詳細算出, 除以該間距之長度, 即得單位長度內之結構重量, 故

$$\text{每呎長度內結構重量} = \frac{\text{某間距內結構全重}}{\text{該間距之長度 (呎數)}}$$

在各該間距之中點繪垂綫, 即在各垂綫上用相當比例尺, 將每呎長度內結構重量繪成結構重量曲綫。該曲綫下之面積應等於全船結構之重量。

在正式結構各件重量之外, 必須將局部各件重量加上, 例如隔堵, 機器底座, 軸隧 (Shaft tunnel), 上部結構 (Superstructure) 台格上房間 (Deck house), 舵等。每一件之重量必須算出, 除以各該件所佔之長度, 即得各該件之每呎長度內之重量。將是項每呎長度內重量, 加於上段所述之結構重量曲綫之上, 在各該件所佔之長度內, 繪一平行於該曲綫之綫, 則該曲綫以上之該部份面積, 等於該件之重量。

於此必須說明橫隔堵或橫隔船板 (Transverse Bulkhead) 之重量, 集中於極短之長度內, 若與其他各件同樣求其每呎長度內之重量, 則在隔堵處, 必有極高之垂綫, 使以後計算剪力及彎曲力矩時發生製圖上之困難。從實際經驗, 可假定隔堵之重量平均分佈於一呎或二呎之長度, 則其加於結構重量曲綫上之高度, 不致過高而使製圖發生困難。同時其所得結果, 實際上與確數無二致。

至木工, 裝修, 器皿, 油漆, 水泥, 船具等等, 通常可假定平均分配於全船長度。

上述詳細算法, 手續之繁瑣可以想見, 通常所用者, 均非該法而用另一種實際算法或近似算法, 所獲結果, 不致有多大差別。

(2) 實際算法 (Practical Method) 或近似算法 (Approximate method) : 實際算法假定主台格以下之結構重量之分佈可用一幾何上之圖形以表示之。如此,則可省却計算時之麻煩,而其結果,亦不致發生差誤。通常應用之圖形,有以下幾種:

(a) 拋物綫及長方形: 是項圖形對於船型之無平行中體 (Parallel middle body) 者,最為合用。參閱圖 -2, 拋物綫置於長方形之上。若主台格下之結構重量為 W , 則長方形之



圖 -2

面積為 $\frac{W}{2}$, 拋物綫圖形之面積亦為 $\frac{W}{2}$, 長方形之高度 $a = \frac{W}{2L}$, 拋物綫之高度 $b = \frac{W}{1.333L}$, 若 W 之重心不在船中, 則可將拋物綫圖形稍變移, 使適合於實際上 W 之重心位置。其變移之法為: 若 W 之重心在船中垂綫後 X 呎, 則拋物綫圖形之重心必須移後 $2X$ 呎。在拋物綫中點等 $2/5$ 高度處, 向後量距離 $2X$ 呎, 得 D 點, 於是從 M 經 D 繪一直綫, 再從 B 繪一平行綫, 相交得 B' 點。 B' 點即為變移後之最高點。其餘拋物綫之各垂綫之底點均可繪與 MB' 綫相平行之斜綫, 即得曲綫如圖中虛綫所示, 稱為變移後之拋物綫, 上法亦即稱為拋物綫變移 (Swinging the Parabola)。變移後之拋物綫圖形之重心在中綫之後 $2X$ 呎; 故全圖形 (連長方形在內) 之重心在中綫後 X 呎。

(b) 直綫圖形 (Straight Line Figure) : 參閱圖 -3, 稱為直綫圖形。對於一般貨船有平行中體者最為適合。 W 為主台格下之結構重量, 可假定其沿船長分佈之情形如圖 -3

所示, 圖中 a, b, c, k 諸係數如下表:

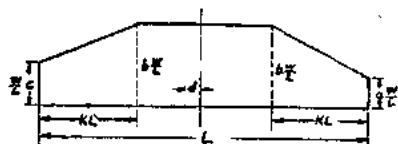


圖 -3

	1	2	3
k	.333	.333	.250
a	.567	.596	.572
b	1.195	1.174	1.125
c	.653	.706	.676

表中 1 代表較瘦之船型, 2 代表較豐滿之船型, 3 代表較豐滿之貨船型, 其相當之重心地位在船中垂綫後 $0.0052L$, $0.0017L$, 及 $0.0054L$ 。

若某船之結構重心, 在船中垂綫後之距離為 d ; 假定 $k = 1/3$, 及 $b = 1.2$, 則可得

$$c - a = \frac{108}{7} \frac{d}{L}, \quad a + c = 1.2, \quad \text{故適當之 } a, c \text{ 均可算出。}$$

亦有用 $k = .3$, 並假定 $\frac{W}{2}$ 集中在中段, $\frac{W}{2}$ 則分配於兩端之梯形者。

(c) 浮力曲綫與梯形所湊合之圖形: 假定 $2/3W$ 依照該船於平水中 L, W, L 之下之浮力曲綫之分配, 而 $1/3W$ 則為一梯形, 梯形兩端之高低, 適使全部圖形之重心縱位置與實際上 W 重心之位置相同。是項用浮力曲綫與梯形所湊合之圖形如圖 -4。若用是項分配法,

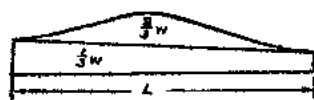


圖 —4

則兩端可能較實際情形為重，而中部則較輕。故於中垂情形時所計算之彎曲力矩可能較小，而中拱時則較大。

(3) 局部或變動重量：於上述近似算法之後，所有主桁格以上之各項結構重量，以及其他局部重量，如機器，軍備等；變動重量如貨物，燃料，淡水，郵件等等均可

依照下法，逐一加於結構曲線之上。

各該項局部重量，均假定分佈於其所佔之長度以內，其分佈之情形，假定為一梯形，其重心之縱位置與該項局部重量之重心縱位置相同。參閱圖 —5
若該梯形之面積為 A ，兩邊高為 b_1 及 b_2 ，其重心 G 距 b_1 邊為 x ，底邊長度為 l ，則

$$b_1 = \frac{2A}{l} \left(2 - \frac{3x}{l} \right)$$

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

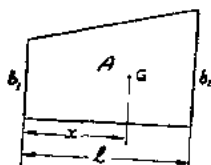


圖 —5

裝貨重量之分佈，若有載量曲線圖 (Capacity Curve) 可作根據，則可不必用梯形以分配其重量，而直接用各艙之載量曲線，較更準確。

(四) 浮力曲線 (Curve of Buoyancy)

及負荷曲線 (Curve of Load)

當求船之浮力曲線時，或為中拱情形，或為中垂情形，均假定該船暫時平衡於波面之上，坦谷水波之波高為其波長之 $1/20$ ，若波長 $= L$ ，波高 $= b$ ，波長與兩垂間船長相等，根據坦谷波形方程式 $x = \frac{L}{2\pi} \theta - \frac{h}{2} \sin \theta$ ， $y = \frac{b}{2} (1 - \cos \theta)$ 可得各垂綫處 y 之值如下表：

x/L_{10}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
y/b	0	.034	.128	.266	.421	.577	.720	.839	.927	.982	1.0

船舶若欲平衡於波面之上，則必須滿足以下兩項條件：

(a) 在波面下之排水量必須等於全船重量。

(b) 在波面下之浮力中心點必須在全船重心之下，或浮心縱位置應與重心縱位置相同。欲求波面之浮力曲線，可應用以下各步驟：

(1) 繪一坦谷曲線，其波長與船長相等，波高為波長之 $1/20$ ，其比例尺應與船體剖面圖之比例尺相同，該項坦谷曲線應繪於透明之紙上。

(2) 將該項坦谷曲線之透明紙蓋於有龍勃曲線 (Bonjean Curve) 之船體縱剖面圖之上。使波谷或波峯與各垂綫相合。波形之軌間中綫置於與 $L.W.L.$ 相平行處。

(3) 第一步近似辦法，可假定於中拱時軌圓中綫在龍骨上之高度等於平水時 L.W.L. 吃水之 $\frac{1}{5}$ ，於中垂時則為 $\frac{1}{5}$ 。

(4) 從龍動曲綫上，可量得於各綫剖面處波面下各橫剖面之面積。於是用新氏定律，計算波面下之排水量及浮心位置 (Δ_1 及 B_1)。

(5) 若全船重量或在平水中 L.W.L. 下之排水量為 Δ_0 ，假定 $\Delta_0 > \Delta_1$ ，同時 B_1 點在全船重心 G 點後 k 呎，則該船不能在假定之位置平衡，而必須下沉少許並發生縱傾。其下沉與縱傾之數量，可以約略計算如下：

$$\text{下沉 (Sinkage) } S = \frac{\Delta_0 - \Delta_1}{(T.P.I.)_{L.W.L.}} \quad \text{縱傾值 (Trim) } t = \frac{k \Delta_0}{(M_{CTI'})_{L.W.L.}}$$

上二式中 $(T.P.I.)_{L.W.L.}$ 及 $(M_{CTI'})_{L.W.L.}$ 為在平水時 L.W.L. 之值，嚴格而言，應用波面之 T.P.I. 及 $M_{CTI'}$ 之值，但不易求得；而 L.W.L. 之值，可從靜水船性曲綫中覓得，用之可得一近似值。

(6) 於是將軌圓中綫向上移動 S ，並將波形曲綫於剖面圖上傾斜，使船之縱傾為 t 。

(7) 再從龍動曲綫，計算移動位置後之排水量及浮心位置，得 Δ_2 及 B_2 ；若 B_2 與 B_1 間距離為 k_1 ，則從 Δ_2 與 Δ_1 之差及 S ，可計算波面 T.P.I. 之近似值為 $\left(\frac{\Delta_2 - \Delta_1}{S}\right)$ ；同樣波面 $M_{CTI'}$ 之近似值將為 $\frac{k_1 \Delta_2}{t}$ ；利用波面之 T.P.I. 及 $M_{CTI'}$ ，可再計算該船應再下沉或上浮及縱傾之數值。然後再移動位置求排水量與浮心。

(8) 上述近似法步驟，繼續施行數次，直至最後求得之排水量等於 Δ_0 ，浮心與 G 在一垂綫上為止。

(9) 最後所得之船之位置，即平衡於波面上之位置，於是從龍動曲綫，量得在波面下各剖面之面積。

設某一橫剖面之面積為 A 方呎，則在該剖面處一呎長船身之體積為 A 立方呎，其浮力為 $A/35$ (噸/每呎長度)；故即在該剖面之垂綫處量 $A/35$ 為垂直座標，同樣於其他垂

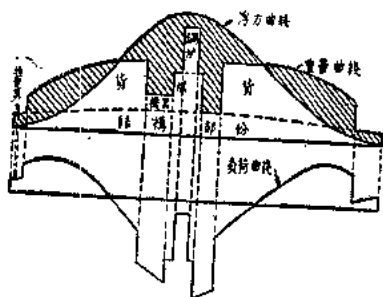


圖 6

綫處獲其 $A/35$ 值，即可連成一曲綫。是項曲綫，即為船身平衡於波面上之浮力曲綫，曲綫下之面積，應等於全船重量或 Δ_0 ；該面積重點應為全船重心 G 之縱位置相同。

於求得重量曲綫及浮力曲綫之後，將重量減各浮力即得負荷。參閱圖 6，上部為重量及浮力兩種曲綫，重量曲綫中包括結構部份及其他各種局部重量之情形，下部負荷曲綫即為重量與浮力兩種曲綫之差。

(五) 逐步積分及積分儀

(a) 逐步積分 (Successive Integrals) : 逐步積分, 爲求一已知曲線或函數之一次, 二次, 三次……之積分。參閱圖 -7, 若 y_0 爲已知曲線, 則 y_1 爲 y_0 之一次積分, 同時 y_1 爲 y_0 曲線下之面積, 或

$$y_1 = \int_0^x y_0 dx$$

將 y_1 亦繪成曲線如圖示, 同樣可得 y_1 之一次積分, 或 y_0 之二次積分 y_2 等……

$$y_2 = \int_0^x y_1 dx, \quad y_3 = \int_0^x y_2 dx$$

茲 $y_1 = \int_0^x y_0 dx = y_0$ 曲線下之面積

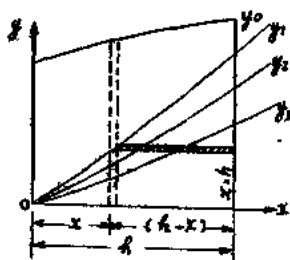


圖 -7

或 $\frac{dy_1}{dx} = y_0, \therefore dy_1 = y_0 dx$

$$y_2 = \int_0^x y_1 dx = y_1 \text{ 曲線下之面積}$$

$$= \int_0^h (h-x) dy_1 = \int_0^h y_0 (h-x) dx$$

= y_0 曲線下之面積對於 $x=h$ 直線之力矩

$$y_3 = \int_0^x y_2 dx = y_2 \text{ 曲線下之面積對於 } x=h \text{ 直線之力矩}$$

$$= \int_0^h dy_1 (h-x) \frac{(h-x)}{2} = \frac{1}{2} \int_0^h y_0 dx (h-x)^2$$

$$= \frac{1}{2} \times y_0 \text{ 曲線下之面積對於 } x=h \text{ 直線之慣性力矩。}$$

由此推論, 可得一通式如下:

$$y_n = \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots (n-1)} \int_0^h y_0 dx (h-x)^{(n-1)}$$

故一次積分爲面積, 二次積分爲力矩, 三次積分與慣性力矩成比例。

(b) 積分儀 (Integragraph) 之原理: 積分儀爲求某一曲線之一次積分曲線之儀器。若將其積分曲線逐一再施行積分, 則可求得一, 二, 三, 等次之積分曲線。

參閱圖 -8, 積分儀有一主軸 LS, 主軸之上端有兩輪行駛於一鐵條之直槽中。垂直於主軸者有表桿 (Scale bar) ML, 其與主軸銜接處亦爲二小輪, 可滑走於主軸之上, 使表桿 ML 可上下移動, 惟始終垂直於主軸。表桿之左端爲一描針 P, 可沿任何曲線描摹, 俾求其一次積分曲線。與表桿在 M 點相連接者有轉桿 (Radial Bar) MSR。轉桿不僅在 M 點及 S 點可轉動, 且可在 S 點移動, 以配合表桿之上下運動。表桿 ML 段之長度爲 n, M 點可以

可以在圖中確定之。

$$\frac{dF}{dx} = W, \quad \therefore F = \int W dx$$

$$\frac{dM}{dx} = F, \quad \therefore M = \int F dx = \iint W dx$$

上兩式為根據材料力學，當可應用於此。若無積分儀，則逐步設法尋覓曲線下之面積，亦可得其積分曲線，惟手續較繁瑣，所耗時間亦長耳。

F 及 **M** 兩曲線之兩端必須與底綫相合，緣船之兩端，必無剪力及彎曲力矩也。於應用積分儀時，若 **F** 或 **M** 曲線最後不與底綫相合，則知底綫之地位有誤或描摹時發生差誤，應即設法改正，至最後一點與底綫相合為止。然通常情形下，不易完全符合，稍有小別，當尚不致使剪力及彎曲力矩之最大值發生多大差誤耳。

通常船舶之最大剪力，在距兩端約 $\frac{1}{4}$ 船之長度處。是項剪力之值約等於該船排水量之 $\frac{1}{6}$ 或 $\frac{1}{5}$ （指商船言，若在軍艦，**F** 約等於 $\Delta/8$ ）。

通常船舶之最大彎曲力矩，約在船之中部。其值與各該船之排水量（ Δ ）與船之長度（**L**）相乘積約成正比，故

$$M = \frac{\Delta L}{C}$$

上式中 **C** 為一係數，約在 20 至 30 之間；普通商船，**C** 值靠近 30；在戰艦，**C** 值約在 26 與 28 之間；在巡洋艦及驅逐艦，則 **C** 值約在 19 與 22 之間。普通在設計船體結構時，若必須預知其所受之彎曲力矩，則均可用上式以估計其約數，**C** 值則宜用一相同型類船隻之數值，則結果可較準確。

福斯特金氏（Foster king）曾有一經驗公式以計算彎曲力矩之最大值，其式如下：

$$L = \text{長度} \quad B = \text{寬度} \quad d = \text{吃水}$$

$$M = \frac{L^2 B d \times .8}{35 \times 36}$$

莫來氏（J. M. Murray, 1947, Trans. Inst. of Eng. & Shipbuilders in Scotland）稱普通船隻於靜水及水波中之彎曲力矩，可用下法以估計之：

（a）靜水中彎曲力矩：

令 W_f = 船中以前重量之力矩

B_f = 船中以前浮力之力矩

W_a = 船中以後重量之力矩

B_a = 船中以後浮力之力矩

則船在靜水中，其船中部面所受之彎曲力矩為 $W_f - B_f = W_a - B_a$ 。

吾人或可用前後之重量平均力矩減前後浮力之平均力矩，其所得之彎曲力矩數值，與以上者相近。

令 M_b = 平均浮力力矩 = $\frac{1}{2} \Delta \times$ 前部及後部 L.C.B. 之平均值

$$= \frac{1}{2} \Delta \times (0.265 C_b + 0.074) L$$

上式中 Δ 為排水量 (噸數), C_b 為排水量係數 (Block coefficient), L 為長數 (呎數)

令 M_w = 平均量力矩 = $\frac{W_f + W_a}{2}$

$$\therefore \text{靜水彎曲力矩} = M_w - M_b = \frac{W_f + W_a}{2} - \frac{\Delta}{2} \times (0.165 C_b + 0.074) L$$

(b) 波浪所生之彎曲力矩 = $b L^3 B \times 10^{-6}$

L 為長度 (呎數), B 為寬度 (呎數), b 為常數, 隨 C_b 而變, 如下表:

C_b	b (中拱)	b (中垂)
0.80	25.0	28.0
0.78	24.25	27.25
0.76	23.55	26.5
0.74	22.85	25.7
0.72	22.10	24.9
0.70	21.35	24.1
0.68	20.65	23.35
0.66	19.90	22.6
0.64	19.20	21.8
0.62	18.45	21.05
0.60	17.75	20.3

將靜水中之彎曲力矩, 與波浪所生之彎曲力矩相加, 即得在波浪中之彎曲力矩。惟須注意者即在靜水中大多為中拱情形。故在波浪上中拱情形為靜水與波浪所生之力矩相加, 而在中垂情形則相減。

例: 某船 455' $\times$ 62.5' $\times$ 40.75' 深 $\times$ 17'-1" 吃水 $\times$ 15,110 噸排水量, $C_b = 0.681$, $W_f = 673,000$, $W_a = 624,490$,

靜水時力矩: $M_w = \frac{M_f + W_a}{2} = 698,740$ 呎噸

$$M_b = \frac{15,110}{2} \times (0.165 \times 0.681 + 0.074) \times 155 = 640,000 \text{ 呎噸}$$

故靜水中拱力矩 = 58,000 呎噸

在波上力矩: 波浪所生中拱力矩 = $20.7 \times 455^3 \times 62.5 \times 10^{-6} = 122,000$ 呎噸

故中拱力矩 = $122,000 + 58,000 = 180,000$ 呎噸

波浪所生中垂力矩 = $23.4 \times 455^3 \times 62.5 \times 10^{-6} = 138,000$ 呎噸

故中垂力矩 = $138,000 - 58,000 = 80,000$ 呎噸