

# 任意幾何構型浮體之靜水力與穩度性能的 另類計算方法

郭真祥<sup>1</sup>，林宗岳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>台灣大學工程科學及海洋工程學系，台灣臺北，10617, Email: [kouhish@ntu.edu.tw](mailto:kouhish@ntu.edu.tw)

<sup>2</sup>財團法人中國驗船中心研究處，台灣臺北，10487, Email: [tylin@crclass.org](mailto:tylin@crclass.org)

**摘要：**在船舶與海洋工程的應用領域裡，各種不同樣式的浮動平臺或極具不同幾何外觀的多船體船舶為滿足各自的任務要求而被設計出來，其中很多的產品是將一定數目的次元以任意的方式組合而成的，此乃基於在建構工作中有高度的組合彈性可供運用。由於組合這些次元，一般並非按固定的順序及沿著一定的方向加以安排的，因此在計算這些產品的靜水力性能時，因位置與方向的隨意變化而產生計算處理的麻煩，為了可以更容易且更有彈性的方式執行這些計算，在本文中發展了一種”另類”的計算方法，其中使用的簡單原理為：將表示整個浮體的表面(曲面)經由三角形化的程式(triangulation)分割成眾多微小的三角形，經由對作用於各個三角形平面的壓力作準確積分並加總以得到整體浮力，再與作用於浮體的總重力達成靜力平衡的條件求取浮體最終的平衡姿態，其中包含橫傾與縱搖角度、垂蕩與扶正力臂等參數。最後將該方法應用於一艘三體船的靜水力計算以展示此方法之特點與貢獻，另外亦安置未裝滿水之水艙並以相同三角形離散方法分析自由表面(free surface)效應，以評估在壓載情況下對於整個浮體穩性的影響

**關鍵字：**靜水力曲線；穩度性能；任意幾何造型浮體；三體船；曲面三角形化；自由液面效應

## 1 引言

在船舶的專業中，船形幾何是以三個三個相互垂直方向的投影視圖來表示的：橫剖面曲線圖、水線面曲線圖與縱剖面曲線圖，這些圖個別對應於橫剖面曲線、水線面曲線與縱剖面曲線，由此可建構一個型值表。它是一個通用的格式，用來定義船體幾何與計算分析船舶的靜水力與穩度性能，其中包括面積與體積特性以及如力矩、慣性矩、重心與平衡狀態等靜力特性，於此，需要應用一個數值積分方法來處理此類計算。幾十年來由於電腦技術的快速發展，已有不同的數值積分方法被廣泛應用，例如梯形法或辛普森法，這些方法

可容易在與船舶相關的教科書中找到答案，例如：(Barrass and Derrett<sup>[1]</sup>), (Biran and Pulido<sup>[2]</sup>), (Dudszus and Danckwardt<sup>[3]</sup>), (Kobylinski and Kastner<sup>[4]</sup>), (Lewis<sup>[5]</sup>) and (Rawson and Tupper<sup>[6]</sup>)等，然而這些方法只適用於規則性、沿著縱軸方向平順變化的船形，另外，這種形狀必須以結構良好的格式來表示，表示船形幾何的型值表示可滿足此一要求，然而，此種積分方法的缺點是：體積特性是由面積特性積分而成，而面積又是由曲線特性積分而成，二次積分的運算會因型值表數值解析度的不足而累積錯誤。因此，對於新型與包含突變形狀的海洋結構物而言，例如多船體船型或海洋平臺，會遭遇到難以使用傳統方式處理的困擾。然而，大部份的海洋結構單元都是以單的數學形狀如長方形體、圓柱體、圓球體或錐體建構而成。針對這些幾何元件，整體面積與體積特性的解析解可容易地以加總方式 (Bronshstein et al.<sup>[7]</sup>) 或使用平行軸理論 (Paul<sup>[8]</sup>) 算得，但組成元件若超越簡易得數形狀，則不適合此種處理方式。

即使在決定橫向靜穩度的情況下，前面提到的船舶原理教科書通常都提出了一套將橫傾角度值清楚地區分成小角度與大角度兩個範圍的計算方法，選用此一方法的原因是：基於不同橫傾角所對應的水線面與階梯式變化的橫剖面曲線可能以各種不同的形式相交。若是屬於小的橫傾角範圍，那水線與橫剖面曲線形成的交點會落在垂直邊線上，則橫向穩度與橫傾角間的關係即可以簡單的方式推導，若是屬於大的橫傾角範圍，則準確的結果必須藉助較精準的方程式來計算。此一方法顯示需經由兩個分開步驟的缺點，處理程式上較為麻煩，一些針對任意二維形狀的解析解與利用 MATLAB 的落實 (Wu<sup>[9]</sup>; Duan et al.<sup>[10]</sup>) 曾被完成且可算得精確的結果。然而一種只需使用單一的積分流程處理的通用三維方法對於計算任意幾何構型的靜水力與穩度性能的計算仍是有其必要的。

而另一方面，浮態的決定，對於在某種情境承受外力負荷的浮體需要一個“尋根”的過程。換句話說，此過程式在尋找一水密浮體達到作用力與力矩平衡的位置與漂浮姿態。一般使用矩陣法以計算漂浮狀態 (Zhao & Lin<sup>[11]</sup>; Kopecky<sup>[12]</sup>)，其中在每次疊代程式中，會計算水線面面積、漂心、慣性矩、排水體積以及浮心並填入雅可比 (Jacobian) 矩陣，如此，利用上述傳統方法處理，不僅計算工作的負荷高，而且相關幾何特性也可能遭受不夠準確的結果。

除基於梯度的解法外，另有用於計算船舶浮態的非線性規劃法 (nonlinear programming method) 也曾被建議 (Ma et al.<sup>[13], [14]</sup>)，其中是以整體復原力臂的絕對值為目標函數，並滿足排水量必等於承載重量的邊界條件，藉由優化的數學模型求取的設計參數為吃水，與傳統的矩陣法相較，此法無須在每次疊代過程中曲面的特性，取而代之的是排水體積和浮心偏移，因此可節省相當多的計算工作，但非線性的靜水力性能需要依賴重建網格的技術 (Lee & Lee<sup>[15]</sup>)。另外有學者藉助基因演算法 (Lu et al.<sup>[16], [17]</sup>; Jin et al.<sup>[18]</sup>) 處理此一優化問題，其中將自由漂浮狀態的計算整合成多目標限制的優化問題，而根據船舶自由漂浮的條件，因是基於曲面的數學表示式，無須給予初始疊代的點，只需船舶整體的重量與重心即可，另外，此法直接使用吃水、縱傾角與橫傾角為設計參數，無須計算下沉角度的正切值 (tangent value)，比較其它疊代方法，此法較基於二維方式的表示更為精確。

總之，前面提到有關針對靜水力計算的幾何程式的缺點為：錯誤的型值表的雙重積分以及受限的數學形狀的解析解，前者更減少了決定浮態的性能。而本文的方法是藉由作用於三角形平面上壓力解析解的推導，避免了數值積分且打破了數學形狀的限制，而所建議方法需要的附加付出為：額外的曲面三角化的運算，即相當於曲面網格的準備，且為了較準確表示浮體的三維幾何形狀需要大數目的網格與儲存網格數據資料的記憶體與電子檔案。

## 2 基本理論與方法

### 2. a 曲面三角形化與三角形小板與水線面的交線

在電腦輔助幾何造型的方法中，一個曲面通常是以參數式形式表示 $\vec{r}(u, v)$ ，參數 $u$ 與 $v$ 表示曲面兩個方向，參數值 $0 \leq u \leq 1; 0 \leq v \leq 1$ 形成一標準化單位範圍(Piegl<sup>[19]</sup>, Gallier<sup>[20]</sup>)，等參數曲線( $u$ =常數或 $v$ =常數)可輕易將其中的一個參數維持常數產生。簡單將等參數曲線在 $u$ 與 $v$ 方向交錯繪製，即可產生一結構性網格，藉由聯結網格對角線上的頂點即可完成將曲面三角化結果，如圖 1.所示。如此，可將一個封閉的船殼與艙間的表面三角化，並令表面的法線方向指向外圍的流體。

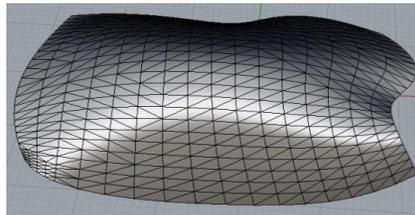


圖 1. 曲面的三角形化

從幾何意義而言，一個在靜水狀態下浮體的水線面以及在一艙間內的自由液面係為一平面與三維封閉曲面的交界面，由於表示船殼的曲面已予三角化，在計算經三角化後的所有三角形平面與水線平面的交線時，會出現如圖 2.所示的相互間的關係，其中在狀況 II 與狀況 III 中會有一條交線，此交線的起點與終點皆落在三角平面的邊線上，因此要求取此交線之端點，只需由水線平面與三角形的邊線求取交點即可，在求得相交直線段的端點如狀況 III 之後，浸入水中的三角形就如同狀況 I 的一種特例，其中有一邊線落在水線平面上；而在狀況 II，浸入水中的部分為一四邊形，它可進一步分割成兩個三角形，個別如同狀況 I。如此，則浸在水中的三角化的船殼曲面可以一系列的三角形平面來表示，而這些浸入水中的三角形平面則進一步擁來解析承受的水靜壓。另 $h$ 表示浸入水中或浮出水面的高度。而圖 2.所顯示的狀況 V 顯示一三角形完全落在水線平面上，此一狀況並不影響壓力的作用，因壓力水頭係為零。

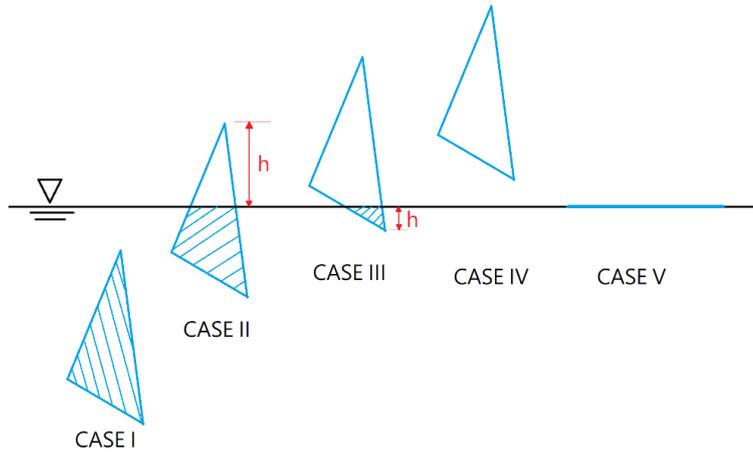


圖 2. 三角形小板與平面(水線面)形成交線可能的情况

經由水線平面與一封閉網格曲面進行交叉(intersection)的運算，得到的是如圖 3.所示的一個或多個多邊形的結果，假設多邊形是由  $N$  個頂點與  $N$  條直線段構成， $x$  與  $y$  分別表示各頂點的座標。面積相關特性包括多邊形包圍的面積、多邊形的形心  $C_x$  與  $C_y$  以及相對於多邊形的形心在  $X$  與  $Y$  方向的慣性矩  $I_x$  與  $I_y$  等依照式(1)-(3)計算，其中有關在  $Y$  方向值的計算是將式(2)中第一個括號裡的  $x$  交換成  $y$  及式(3)中第一個括號裡的  $y$  對換成  $x$ ，這些方程式是從二維三角形(組成多邊形的基本元素)的性質推導出來的。

$$A = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=0}^{N-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \right| \quad (1)$$

$$C_x = \frac{1}{6A} \sum_{i=1}^{N-1} (x_i + x_{i+1}) (x_i y_i - x_{i+1} y_{i+1}) \quad (2)$$

$$I_x = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{N-1} (y_i^2 + y_i y_{i+1} + y_{i+1}^2) (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (3)$$

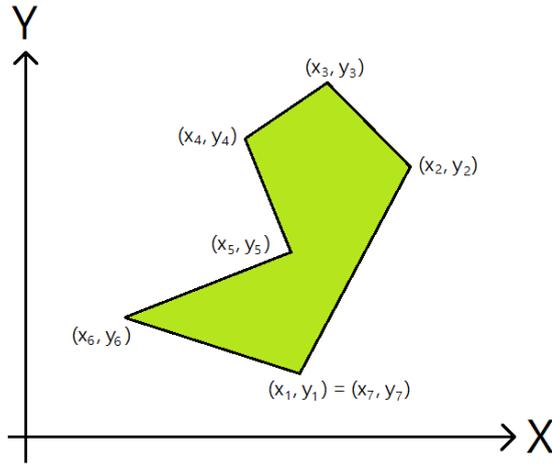


圖 3. 簡單的平面多邊形

## 2. b 作用於浮體靜水力的計算

假設定義浮體表面的曲面離散成  $n$  個三角形小板，若以指標  $j$  標示其中任一小板，則作用於浮體的整體壓力可由所有浸入水中的單一三角形小板  $j$  上的壓力加總算得。在三維空間裡，由三個頂點的位置向量  $\vec{r}_0$ 、 $\vec{r}_1$  及  $\vec{r}_2$  所構成的三角形平面(如圖 4)可以參數式方程式 (4) 定義：

$$\vec{r}(u, v) = \vec{r}_0 + u\vec{r}_1 + v\vec{r}_2 \quad \text{with } 0 \leq u \leq 1 \text{ and } 0 \leq v \leq 1-u \quad (4)$$

式中  $\vec{r}_{01}$  及  $\vec{r}_{02}$  分別為  $\vec{r}_0$  連結至其它兩個頂點的向量：

$$\left. \begin{aligned} \vec{r}_{01} &= \vec{r}_1 - \vec{r}_0 \\ \vec{r}_{02} &= \vec{r}_2 - \vec{r}_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$A = \int_{u=0}^{u=1} \int_{v=0}^{v=1-u} |\vec{r}_u \times \vec{r}_v| du dv \quad (6)$$

其中  $\vec{r}_u$  與  $\vec{r}_v$  表示  $\vec{r}(u, v)$  對參數  $u$  或  $v$  的偏微分，由式(4)可得：

$$\left. \begin{aligned} \vec{r}_u &= \frac{\partial \vec{r}(u, v)}{\partial u} = \vec{r}_{01} \\ \vec{r}_v &= \frac{\partial \vec{r}(u, v)}{\partial v} = \vec{r}_{02} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

三角形平面上任意一點的單位法向量 $\vec{n}$ 為:

$$\vec{n} = \frac{\vec{r}_u \times \vec{r}_v}{|\vec{r}_u \times \vec{r}_v|} = \frac{\vec{r}_{01} \times \vec{r}_{02}}{|\vec{r}_{01} \times \vec{r}_{02}|} \quad (8)$$

由於 $\vec{r}_{01}$ 及 $\vec{r}_{02}$ 兩向量是由三個頂點所決定，當三個頂點給定時，恆唯一常數，因此整個三角形只存在一個唯一的法向量，此一結果合乎空間不共線三點構成一平面的幾何意義。

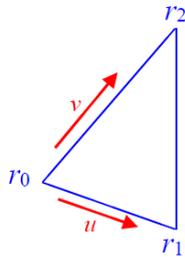


圖 4. 參數式三角形小板的幾何定義

作用於任意點 $\vec{r}$ 的壓力與該點離水平面(水深設定為零)的深度成正比，若水的密度為 $\rho$ ，水頭即為 $\vec{r}$ 在 Z 軸方向的分量，以純量 $r_z$ 表示。將三角形平面上各點壓力對面積作積分可得作用在任一個三角形平面的合力，結果如式(9):

$$\vec{P} = \iint_A [\rho g \cdot r(u, v)]_z \vec{n} dA = \rho g \bar{n} A \int_{u=0}^{u=1} \int_{v=0}^{v=1-u} [r(u, v)]_z du dv \quad (9)$$

將式(9)中的 $r(u, v)$ 函數以式(4)代入，可得如下結果:

$$\vec{P} = \rho g \bar{n} A \left( r_{0z} + \frac{1}{3} r_{01z} + \frac{1}{3} r_{02z} \right) \quad (10)$$

將作用於整個三角形平面的壓力中心點以 $\vec{r}_c$ 表示，則整個三角形的作用力可由該點的壓力值乘上三角形的面積簡單按下式(11)算得:

$$\vec{P} = \rho g \bar{n} A \cdot r_{cz} \quad (11)$$

其中 $r_{cz} = \left( r_{0z} + \frac{1}{3} r_{01z} + \frac{1}{3} r_{02z} \right)$ 即為三角形面積壓力作用中心的深度。 $\vec{P}$ 為一空間向量，與三角形平面法向量平行，取其在 z 軸方向之分量即為浮力。而由作用力向量 $\vec{P}$ 產生的力矩 $\vec{M}$ 可以相同方式加以推導:

$$\begin{aligned}\vec{M} &= \vec{r}(u, v) \times \vec{P} = \rho g \int_{u=0}^{u=1} \int_{v=0}^{v=1-u} \vec{r}(u, v) \times [r(u, v)_z (\vec{r}_{01} \times \vec{r}_{02})] dudv \\ &= 2\rho g A \left\{ \iint (\vec{r}_0 \times \vec{n}) (\vec{r}_0 + \vec{r}_{01}u + \vec{r}_{02}v)_z dudv + \iint (u\vec{r}_{01} \times \vec{n}) (\vec{r}_0 + \vec{r}_{01}u + \vec{r}_{02}v)_z dudv \right. \\ &\quad \left. + \iint (v\vec{r}_{02} \times \vec{n}) (\vec{r}_0 + \vec{r}_{01}u + \vec{r}_{02}v)_z dudv \right\}\end{aligned}\quad (12)$$

將各項分別積分，可得

$$\begin{aligned}\vec{M} &= \rho g A \left[ \left( \vec{r}_0 + \frac{1}{3}\vec{r}_{01} + \frac{1}{3}\vec{r}_{02} \right) r_{0z} + \frac{1}{3} \left( \vec{r}_0 + \frac{1}{3}\vec{r}_{01} + \frac{1}{3}\vec{r}_{02} \right) r_{01z} + \frac{1}{3} \left( \vec{r}_0 + \frac{1}{3}\vec{r}_{01} + \frac{1}{3}\vec{r}_{02} \right) r_{02z} \right. \\ &\quad \left. - \left( \frac{1}{36}\vec{r}_{02} - \frac{1}{18}\vec{r}_{01} \right) r_{01z} - \left( \frac{1}{36}\vec{r}_{01} - \frac{1}{18}\vec{r}_{02} \right) r_{02z} \right] \times \vec{n}\end{aligned}\quad (13)$$

代入壓力中心點向量 $\vec{r}_c$ ，則

$$\vec{M} = \rho g A \left[ \begin{matrix} r_{cz} \\ 0 \\ 0 \end{matrix} + \frac{1}{18} \begin{pmatrix} -r_{01} \\ r_{02} \\ 0 \end{pmatrix} - \frac{1}{18} \begin{pmatrix} 0 \\ r_{01} \\ r_{02} \end{pmatrix} \right] \times \vec{n}\quad (14)$$

利用如圖 5 所示的向量運算完成向量 $\vec{A}$ 和向量 $\vec{B}$ 的定義，如式(15)：

$$\begin{aligned}\vec{A} &= \frac{1}{2} \vec{b}_2 + \vec{r}_{21} = \frac{1}{2} r_{02} \vec{r}_{02} + r_{01} \vec{r}_{01} \\ \vec{B} &= \frac{1}{2} \vec{b}_1 + \vec{r}_{12} = \frac{1}{2} r_{01} \vec{r}_{01} + r_{02} \vec{r}_{02}\end{aligned}\quad (15)$$

再代入式(14)並加以整理可得：

$$\vec{M} = \rho g A \frac{1}{12r_{cz}} (9r_{cz}\vec{r}_c + r_{0z}\vec{r}_0 + r_{01}\vec{r}_1 + r_{02}\vec{r}_2) \times \vec{n}\quad (16)$$

以上為針對單一三角形小板的推導，若整個浮體是由  $m$  個形狀各異的元件組成，而各元件又離散為  $n$  個三角形小板，若進一步以下標  $j$  標示某一元件及以下標  $i$  標示某一三角形小板，則整個浮體的總作用力 $\vec{F}_{total}$ 與總力矩 $\vec{M}_{total}$ 可依照下面式(17)與式(18)予以加總即可：

$$\vec{F}_{total} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \vec{P}_{ij}\quad (17)$$

$$\vec{M}_{total} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \vec{M}_{ij}\quad (18)$$

而浮體所承受的浮力即為 $\vec{F}_{total}$ 沿  $z$  軸方向垂直朝上方的分量，而橫傾力矩與縱傾力矩即為 $\vec{M}_{total}$ 繞縱軸( $x$  軸)與橫軸( $y$  軸)的分量。

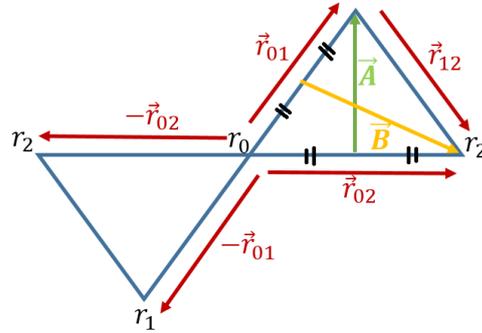


圖 5. 向量 $\vec{A}$ 與 $\vec{B}$ 的定義

## 2.c 靜穩度的計算

為了獲取靜水力性能必須計算靜水力的相關資料，這些資料包括面積、面積形心、面積慣性矩、體積慣性矩、體積形心。這些幾何特性資料皆為吃水的函數，一般以曲線的形式呈現，它們包括有：排水量 $\Delta$ 、縱向漂心  $LCF$  與縱向浮心  $LCB$ 、水線面面積  $A_w$ 、垂向浮心  $VCB$ 、橫向穩心高  $KM_T$  與縱向穩心高  $KM_L$  等，其中排水量是根據阿基米德原理以排開胴體積水的重量按照式(5)計算。而式(19)則用來計算橫向穩心半徑  $BM_T$  與縱向穩心高  $BM_L$ ，其中  $I_x$  與  $I_y$  分別為水線平面的橫向慣性矩與縱向慣性矩如式(3)所定義者。

$$\overline{BM}_T = \frac{I_x}{V}, \quad \overline{BM}_L = \frac{I_y}{V} \quad (19)$$

## 2.d 自由液面效應

為了處理因未裝滿的液或水艙的自由液面效應，兩個問題得先處理：其一為艙間的幾何模型與前面三角化處理船殼曲面的方式是一樣的，只是艙間表面的法向量必須反，如此對於艙間靜水力的計算完全與前述對於浮體的計算步驟一致，除了注入液體的深度與液體本身的密度  $\rho_{in}$  需根據注入當時的情況個別設定以外。其二為當艙間內的液體重量與重心會隨注入液體的量而變化，因此新的平衡狀態必須跟著更新，由於注入液體的重心也會與縱傾角度有關，更新的過程是以反覆運算的方式完成的。其中反覆運算的演算方法是利用 Euler 方法以逐步調整下沈量與俯仰差來達成的，在每一步裡，在給定注入液體體積與俯仰角的條件下，使用二分法求解液面。

當平衡狀態達到時，即加入自由液面的修正。在此過程中，液面的外圍輪廓是利用一傾斜的平面(相當於液面)與艙壁求取兩者的交線。然後再針對以此方式求得的自由液面計算對縱軸(x 軸)的橫向面積慣性矩  $i_y$  與對橫軸(y 軸)的縱向面積慣性矩  $i_x$ ，虛擬的重心位置按照下面式(11)計算，艙間所在的位置會影響整個浮體的重心位置，但自由液面對穩度的修正

只艙內所形成的自由液面形狀有關。

$$G_{vT} = \frac{\rho_i \dot{t}_x}{\rho V}, \quad G_{vL} = \frac{\rho_i \dot{t}_y}{\rho V} \quad (20)$$

### 3 計算實例

#### 3.a 以三體船船形做驗證

本文選取一艘船長為 100m 的高速三體船做為所建立計算方法的驗證實例，驗證的標準是以電腦輔助設計軟件 Rhinoceros 的外掛程式 Orca3D 計算的，檢測的項目包括不同吃水狀況下靜水力性能及設計狀況下的穩度曲線。該船的主要尺寸條列於表 1，該船在設計吃水時，兩個側船體已部分浸水，船體本身重 1400 噸，側船體之基線位於龍骨線上方 2.5m，主船體在尾部船底之形狀唯一楔形體，其中因兩個幾何特性導致其靜水力曲線隨著吃水而出現劇烈變化。船形幾何座標的原點是設定在主船體方形艙的位置，在主船體船中有一水準圓柱形的艙間，如圖 6 所示，此圓柱形艙間之體積為 317m<sup>3</sup>。整個三體船的船殼利用了 7150 個頂點及 11854 個三角形小板加以三角化的。圓柱形艙間(以藍色標示)的三角化是以相同方式處理，使用了 1225 個頂點及 2256 個三角形小板。

表 1. 三體船的主要尺寸

Principal Dimensions						Design Draft	Design Speed
L <sub>OA</sub>	B <sub>OA</sub>	L <sub>WL</sub>	GM	Light Ship Weight	Depth		
102 m	27.5 m	98.7 m	7.2 m	1400 ton	13 m	3.3 m	40 kn

格式化表格

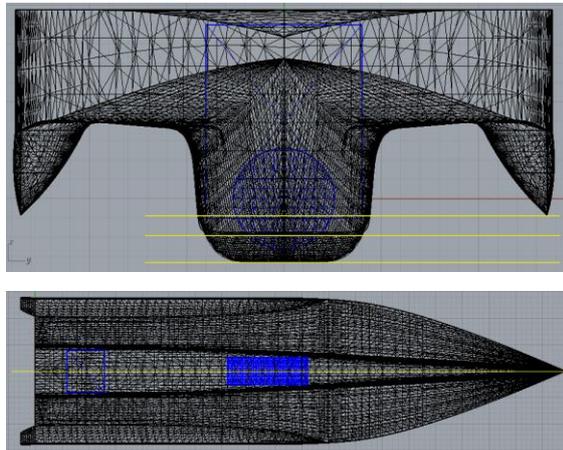


圖 6. 三體船的船形與計算網格

三體船靜水力性能的計算是在無艏艉吃水差的情況進行的，吃水的範圍設定為 0.8m 至 7.0m，間隔為 0.1m，縱向穩心高  $KM_L$ 、水線面面積  $A_w$  及排水體積  $V$  曲線皆以虛線繪圖於圖 7(根據該圖上面的尺標讀取)；另外的四個特性質  $LCF$ 、 $LCB$ 、 $KB$  與  $KM$  則以實線繪圖(根據該圖下面的尺標讀取) 圖中以黑色小方塊符號標示由 Orca3D 軟件計算所得 3 個虛線值，而另 4 個實線值則以黑色打叉符號標示，由圖中可見兩組結果有很好的的一致性。在整個吃水計算範圍內，除了排水量在深吃水狀況下稍微偏高外，誤差皆小於 1%。探究其中原因可能是：Orca3D 是採用將對應各個吃水的水線面面積加以積分的方式，如此作法，易於在計算大吃水的情況累積錯誤；而本文方法則是以解析方式計算作用在浮體表面的壓力，進而算得浮力。

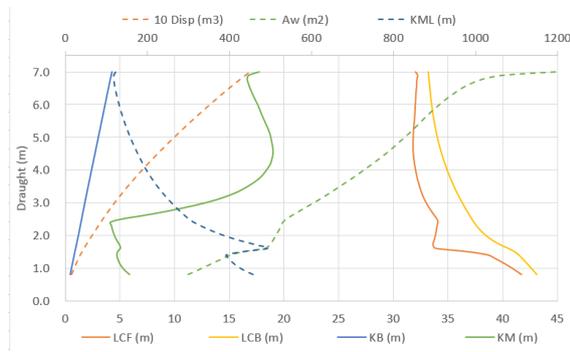


圖 7. 三體船的靜水力曲線

審視三體船的計算結果，可發現在  $KM_L$  曲線於吃水 1.5m 處兩個尖銳的突變點，那是因為這是一個臨界性的吃水，因水線面於該吃水處拆開成兩個輪廓，如圖 8 所示。楔形的艏部面積突然出現且水線面面積急劇地增加。另一個效應是縱向漂心的位置向後移動導致  $LCF$  曲線的彎曲。另一個不平順處是在吃水等於 2.5m 的地方，那是側船體接到水面的深度。由於兩個側船體的水線面橫向偏離船體中線，小的面積亦可產生大的橫向慣性矩。至於橫向穩心高度  $KM$  曲線，在吃水大於 2.5m 以後的值急劇增大並顯示三體船幾穩度大的特性而達到最大值 19m。與體積相關的特性曲線如  $KB$ 、 $LCB$  與  $V$  則相對顯得平順。



圖 7. 三體船在吃水為 1.5m 的水線面

第二個驗證的項目為設計吃水狀況下的靜穩度曲線，初始排水量為 1400 噸， $LCG$  設

定與  $LCB$  相等以為維持艏艉沒有吃水差的浮態，橫傾角度由  $0^\circ$  計算至  $90^\circ$ ，間隔取  $2.5^\circ$ ，在整個計算過程中  $LCG$  維持常數不變，如此船體的浮沈與縱傾會在各個不同的橫傾角度達到平衡。圖 9 比較由本文方法計算的結果(實線與虛線)及由 Orca3D 軟件計算所得的結果(打叉與方形符號)，以  $m$  為單位的扶正力臂繪於左邊的座標軸，而縱傾角度則繪於右邊的座標軸，從圖中可看出本文方法的高準確度：扶正力臂的最大誤差小於  $0.7\%$  及縱傾角的  $1.5\%$  誤差，顯示在高橫傾角的情況誤差較小於 Orca3D 算得的結果，縱傾角是由  $LCG$  與  $LCB$  達到平衡位置時的結果，而後者  $LCB$  體積相關的特性之一，本文方法適用解析方法計算浮力作用力的中心點，沒有透過含有誤差屬性的積分途徑。

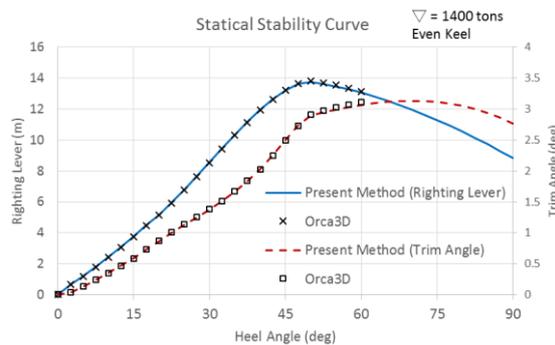


圖 9. 三體船於設計吃水的靜穩度曲線

### 3.a. 壓載狀況的計算

根據無艏艉吃水差情況下的設計規格，將三體船的重心設定在  $(x_G, y_G, z_G) = (35.78m, 0.0m, 7.50m)$ ，此船的空船重量為  $1400 t$ ，將壓載艙裝滿比值設定為  $0.0$ (空艙)到  $1.0$ (滿艙)，比值的間隔設定為  $0.1$ ，基於該壓載艙的容積為已知，艙內液體(水)注入的高度是由給定液體體積反求，再藉由更新液體整體的重心以尋找平衡狀態下的縱傾角度，直到縱傾力矩趨近於零。

圖 10 中顯示縱傾角、下沉量及整體的縱向重心相對於裝載比值間的關係。因該壓載艙位於船艙之前，壓載水會使  $LCG$  向前移動而使船體更往船艙側傾斜，下沉量會隨這壓載量的增量而增加。圖 10 則顯示了  $VCG$ 、 $VCB$ 、 $KM$  及自由液面效應  $KG_v$ ，因壓載艙的位置，壓載水也降低了船的重心，下沉的增量相對提高了垂向浮心的高度，由圖中可看出：最大的自由液面效應發生在裝滿比值約為一半的時候，此時自由液面的面積最大。儘管有效的  $GM_{eff}$  減少了，但一壓載整體的效應卻使  $GM$  增加。

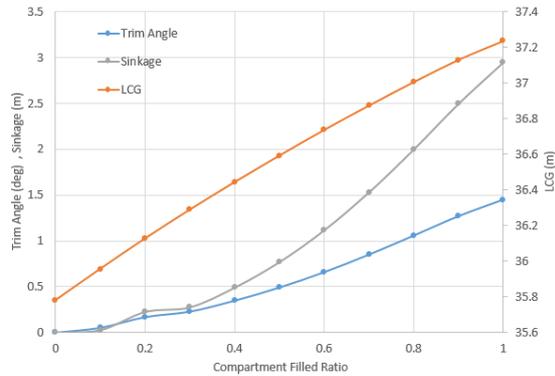


圖 10. 縱向重心  $LCG$ , 俯仰差  $TRIM$ , 下沉量  $SINKAGE$

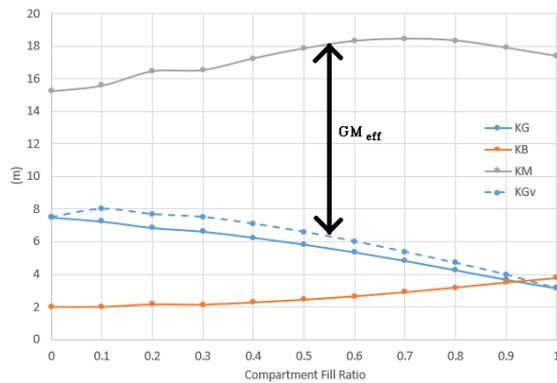


圖 11. 垂向重心  $KG$  與虛擬垂向重心  $VCG$

#### 4 結論

本文提出了一個通用的靜水力方法，其原理為基於作用於三角形(平面)小板靜水壓力計算的解析解，其中只需任意構形的封閉曲面，經三角化後再與不同吃水下的水線面(一平面)求取各吃水對應的交線(水線)，與水線面相關的面積特性以平面多邊形的行適用解析方法加以處理。利用一三體船的船形展示本方法的通用性的特點，並驗證在不同吃水狀況下的靜水力性能以及設計狀況的靜穩度曲線，裝載液體或水的艙間也是以浮體/船體相同幾何建模方式處理，不同的是將原指向艙間外部的法向量改轉成指向內部。壓載艙內液體裝注的量可以裝注的比值加以控制，在艙內的液面及達到平衡條件的俯仰角度利用反覆運算方法求得，最後完成自由液面的修正，由其導致一虛擬重心的提高，因此而減小了穩度的值。

## 參 考 文 獻

- 1 Barrass, C.B., Derrett, D.R., 2006. Ship Stability for Masters and Mates. *Butterworth-Heinemann, 6th edition.*
- 2 Biran, A., Pulido, R. L., 2013. Ship Hydrostatics and Stability. *Butterworth-Heinemann, 2nd edition.*
- 3 Dudzus, A., Danckwardt, E., 1982. Schiffstechnik, Einfuehrung und Grundbegriffe. *VEB Verlag Technik Berlin.*
- 4 Kobylinski, L. K., Kastner, S., 2003. Stability and Safety of Ships, Volume I : Regulation and Operation. *Elsevier Publisher.*
- 5 Lewis, E. V., 1988. Principles of Naval Architecture Volume I - Stability and Strength. *The Society of Naval Architecture and Marine Engineers.*
- 6 Rawson, K.J., Tupper, F.C., 2001. Basic Ship Theory. *Butterworth-Heinemann, 5th edition.*
- 7 Bronshtein, I.N., Semendyayev, K.A., Kirsch, K.A., 1997. Handbook of Mathematics, third ed. Springer-Verlag.
- 8 Paul, Burton, 1979. Kinematics and Dynamics of Planar Machinery. Prentice-Hall.
- 9 Wu, C.F., 2005. Hydrostatic Computation of Ship Based on Matlab. *Journal of Wuhan Institute of Shipbuilding Technology.*
- 10 Duan, M., Zhou, K., Wu, F., 2015. Computation and Drawing for Ship's Hydrostatic Curves Based on Matlab. Jiangsu Science & Technology Information.
- 11 Zhao, X.F., Lin, Y., 1985. A matrix method for solving the floating problem of ships. *Shipbuilding of China.*
- 12 Kopecky, Karen A., 2007. Root-finding methods. Lect. Notes ECO 613/614.
- 13 Ma, K., Zhang, M.X., Ji, Z.S., 2003. The floating state calculation based on nonlinear programming method. *Journal of Dalian University of Technology.*
- 14 Ma, K., Li, Z.Z., Li, H., 2007. A study of the real-time calculation method of ship stability. *Journal of Dalian University of Technology.*
- 15 Lee, K.H., Lee, P.S., 2016. Nonlinear hydrostatic analysis of flexible floating structures. *Applied Ocean Research.*
- 16 Lu, C.H., Lin, Y., Ji, Z.S., 2005. The application of genetic algorithm in the free floating state of ships. *Journal of Shanghai Jiaotong University.*
- 17 Lu, C.H., Lin, Y., Ji, Z.S., 2006. Precise calculation of minimum stability of ship using fuzzy genetic algorithm. *International Journal of Maritime Engineering.*
- 18 Jin, N., Xie, T.H., Tian, H.D., Shen, Y.K., 2007. A improved genetic algorithm in the compute of free floating state of ship. *Navigation of China.*
- 19 Piegl, L. A., Tiller, W., 2013. The NURBS Book. *Monographs in Visual Communication Series. Springer; 2nd edition.*
- 20 Gallier, J., 2000. Curves and Surfaces in Geometric Modeling, Theory and Algorithms. *Morgan Kaufmann*

*Publishers*

## **An Alternative Method for Computing Hydrostatic and Stability Performances of Floating Bodies with Arbitrary Geometrical Configurations**

KOUH Jen-Shiang<sup>1</sup>, LIN Tsung-Yueh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Engineering Science and Ocean Engineering, Taiwan University, Taipei, 10617, Taiwan

<sup>2</sup>Research Department, CR Classification Society, Taipei, 10487, Taiwan

**Abstract** : In the fields of naval architecture and ocean engineering applications, floating platforms or multi-hull vessels with very different geometrical appearance have been designed to meet their mission requirements. Many objects were built by composing a number of sub-objects in an arbitrary way because of the high flexibility available for the construction work. Because the composition of the sub-objects normally didn't arranged along a certain direction in a fixed sequence, it could be sometimes troublesome for computing the hydrostatic data of such objects. In order to facilitate this computation more easily and flexibly, a method has been developed in this paper, which was derived from the simple principles of an exact pressure integration over triangles for getting the total buoyancy force vector and the static equilibrium condition between the buoyancy force and the weight of the floating object. The triangles thereby were generated by triangulation of the surfaces representing a whole floating object. Finally, applications on a high-speed trimaran hull was conducted for demonstrating the merit of this method. The placement of water compartments and free surface effects were further analyzed to evaluate the changing ballast conditions for hydrostatic and transversal stabilities.

**Key words** : Hydrostatic Curves; Stability Performances; Floating Bodies with Arbitrary Geometrical Configuration; Trimaran; Surface Triangulation; Free Surface Effect.