

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中精簡報告

## 子計畫六：潛艦運動之數學模式及拘束模型試驗分析(1/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC91-2611-E-002-023-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系暨研究所

計畫主持人：邱逢琛

共同主持人：郭振華

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 92 年 5 月 7 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫期中報告

## 潛艦運動之數學模式及拘束模型試驗分析(1/3)

### Mathematic Model for Submarine Maneuvering Motions and Captive Model Tests (1/3)

計畫編號: NSC91-2611-E-002-023

執行期限: 91年8月1日至92年7月31日

主持人: 邱逢琛 台灣大學工程科學及海洋工程學系

共同主持人: 郭振華 台灣大學工程科學及海洋工程學系

計畫參與人員: 張敦理 台灣大學工程科學及海洋工程學系

刁文川 台灣大學工程科學及海洋工程學系

#### 一、中文摘要

本子計畫第一期主要工作內容在於潛艦操縱運動數學模式之建構與程式開發以及拘束試驗用的潛艦模型內部機架及FRP外殼之規劃與製作。現階段，潛艦操縱運動數學模式已建構完成，目前正在進程式撰寫及流體動力係數估算。而拘束模型初步規劃亦已大致完成，目前正與廠商洽談細部設計與製作相關細節。

**關鍵詞:** 潛艦、數學模式、拘束模型、模型試驗。

#### Abstract

In the 1<sup>st</sup> year, this sub-project is aimed to derive a mathematical model for submarine simulation by following the similar method of Japan's MMG model for surface ship as well as to develop the simulation program. Besides, the frame and fairing of the captive model for testing the hydrodynamic coefficients has also to be completed in this year. At the moment, the mathematical model for submarine simulation has been derived and the computer program is still under programming. On the captive model, the preliminary planning has been completed and the details of design and production are discussed with the maker.

**Keywords:** Submarine、Mathematic model、Captive model、Model Test。

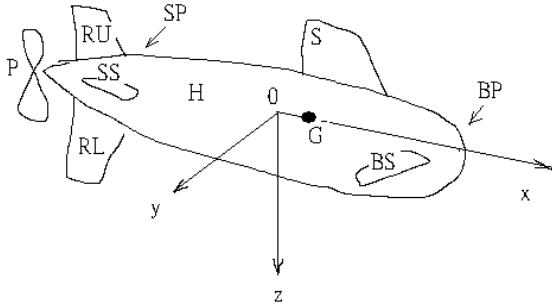
#### 二、前言

『潛艦關鍵性技術之基礎研究』整合型計畫的第三分項—操縱控制技術，包含本子計畫(3-1)及另一子計畫 3-2:利用自航模型的潛艦系統鑑定。『操縱控制技術』分項計畫之目標在於建立潛艦操縱運動之數值模擬及試驗分析能力。亦即研發出能精確掌握包含帆罩、艙艙翼、舵且螺槳作動下的潛艦操縱性能理論分析方法，及建立運動操縱控制器設計方法，並實際建構自航模型進行試驗驗證，期以建立潛艦操縱、控制與模擬相關的設計與解析能力。其中，本子計畫的目標在於建立包含帆罩、艙艙翼，舵且螺槳作動下的潛艦操縱運動之數學模式，及其相關流體動力係數之拘束模型試驗分析方法，以掌握潛艦操縱性能。此外並可與序號 2-1 子計畫潛艦之自推數值模擬及 CFD 流體動力計算互為驗證，以及與 3-2 子計畫之潛艦自航模型系統鑑定互為驗證。

本子計畫第一期主要工作內容有：(1)潛艦操縱運動數學模式之建構 (2)相關流體動力係數經驗式或資料庫之蒐集與整理 (3)潛艦操縱運動模擬程式之撰寫與初步計算 (4)拘束試驗用的潛艦模型之規劃設計 (5)潛艦拘束模型內部機架及 FRP 外殼製作

### 三、潛艦操縱運動數學模式建構

#### 3.1 座標系及符號定義



圖一 座標系

本研究採用之座標系如圖一所示，潛艦固定右手直角座標系  $O-xyz$ ， $x$  軸向前， $z$  軸向下。整體質量  $m$ ，整體浮力  $B$ ，整體質心  $G$  之座標  $(x_G, y_G, z_G)$ ，全體浮心  $C_B$  之座標  $(x_B, y_B, z_B)$ 。帆罩(S)、上舵(RU)、下舵(RL)、右艏翼(BS)、左艏翼(BP)、右艉翼(SS)、左艉翼(SP)等三維翼的氣動力中心座標分別為：

$$(x_c^S, y_c^S, z_c^S), (x_c^{RU}, y_c^{RU}, z_c^{RU}), (x_c^{RL}, y_c^{RL}, z_c^{RL}), (x_c^{SS}, y_c^{BS}, z_c^{BS}), (x_c^{BP}, y_c^{BP}, z_c^{BP}), (x_c^{SS}, y_c^{SS}, z_c^{SS}), (x_c^{SP}, y_c^{SP}, z_c^{SP})。$$

但令  $y_c^S = y_c^{RU} = y_c^{RL} = 0$ 。螺槳面之  $x$  座標為： $x_P$ 。潛艦固定座標系描述的運動速度向量為： $\{u, v, w, p, q, r\}$ 。潛艦固定座標系相對於空間固定座標系的尤拉角為： $(\theta, \phi, \psi)$ 。攻角  $\alpha$ ： $x$  軸相對於航速  $U$  ( $U^2 = u^2 + v^2 + w^2$ ) 在  $x-y$  平面投影的夾角，以艏仰為正。偏角  $\beta$ ：航速  $U$  ( $U^2 = u^2 + v^2 + w^2$ ) 與  $x-z$  平面的夾角，以艏偏右舷，產生  $+y$  向升力為正。

舵角  $\delta$ ：以產生  $+y$  向 (向右) 升力為正，即左舵為正。翼角  $\delta_s$ ：以產生  $-z$  向 (向上) 升力為正。

#### 3.2 數學模式建構基本原則

傳統之數學模式[1]是將包含艦體、帆罩、控制翼、舵及螺槳之潛艦視為一整體予以描述其運動數學模式，其缺點在於不易明確掌握各基本元件之間的相互作用效應，任何之一如有變動皆影響運動數學模式對整體之適用，因此本研究將嘗試依循日本在船舶操縱運動方面所建構的 MMG 數學模式[2]之基本方式建構潛艦操縱運動數學模式。亦即數學模式將由不包含帆罩在內的艦體、帆罩、艏艉翼、上下、舵及螺槳等個別元件的基本性能以及彼此間的相互影響效應所構成，並盡可能使其物理意義明確。

本研究的推導是考慮潛艦為一細長體，但前後左右上下皆不必然對稱，利

用 Kirchhoff's equation 推導得其六自由度運動方程式如下：

### 3.3 縱移運動

x 向運動方程式可表示如下式：

$$m[\dot{u} - vr + qw - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = X_F \quad (1-1)$$

上式左邊為潛艦整體慣性力，右邊則為其他各元件包含相互影響的流體力

$$X_F = X_H + X_S + X_{RU} + X_{RL} + X_{BS} + X_{BP} + X_{SP} + X_{SS} + X_P + X_{WB} \quad (1-2)$$

各流體力又包含動量變化相關項(M)及黏性項(V)，分別如下：

$$X_{H(M)} = -m_x^H \dot{u} - m_z^H qw + m_y^H vr + m_z^H r_x q^2 + m_y^H r_x r^2 - m_y^H r_z pr - m_z^H r_y pq \quad (1-3)$$

$$X_{H(V)} = X_0^H(u) + X_{vv}^H v^2 + X_{ww}^H w^2 \quad (1-4)$$

$$X_{S(M)} = -m_x^S (\dot{u} + \dot{q} z_c^S) + m_y^S (v + 2rx_c^S - 2pz_c^S)r \quad (1-5)$$

$$X_{S(V)} = X_0^S(u) + X_{vv}^S (v + rx_c^S - pz_c^S)^2 \quad (1-6)$$

$$X_{RU(M)} = -m_x^{RU} (\dot{u} + \dot{q} z_c^{RU}) + m_y^{RU} (v + 2rx_c^{RU} - 2pz_c^{RU})r \quad (1-7)$$

$$X_{RU(V)} = X_0^{RU}(u_c^{RU}) - (1 - t_R) F_N^{RU} \sin u_{RU} + X_{vv}^{RU} (v + rx_c^{RU} - pz_c^{RU})^2 \quad (1-8)$$

$$X_{RL(M)} = -m_x^{RL} (\dot{u} + \dot{q} z_c^{RL}) + m_y^{RL} (v + 2rx_c^{RL} - 2pz_c^{RL})r \quad (1-9)$$

$$X_{RL(V)} = X_0^{RL}(u_c^{RL}) - (1 - t_R) F_N^{RL} \sin u_{RL} + X_{vv}^{RL} (v + rx_c^{RL} - pz_c^{RL})^2 \quad (1-10)$$

$$X_{BS(M)} = -m_x^{BS} (\dot{u} + \dot{q} z_c^{BS} - \dot{r} y_c^{BS}) - m_z^{BS} (w - 2qx_c^{BS} + 2py_c^{BS})q \quad (1-11)$$

$$X_{BS(V)} = X_0^{BS}(u_c^{BS}) - (1 - t_B) F_N^{BS} \sin u_{BS} + X_{ww}^{BS} (w + py_c^{BS} - qx_c^{BS})^2 \quad (1-12)$$

$$X_{BP(M)} = -m_x^{BP} (\dot{u} + \dot{q} z_c^{BP} - \dot{r} y_c^{BP}) - m_z^{BP} (w - 2qx_c^{BP} + 2py_c^{BP})q \quad (1-13)$$

$$X_{BP(V)} = X_0^{BP}(u_c^{BP}) - (1 - t_B) F_N^{BP} \sin u_{BP} + X_{ww}^{BP} (w + py_c^{BP} - qx_c^{BP})^2 \quad (1-14)$$

$$X_{SS(M)} = -m_x^{SS}(\dot{u} + \dot{q}z_c^{SS} - \dot{r}y_c^{SS}) - m_z^{SS}(w - 2qx_c^{SS} + 2py_c^{SS})q \quad (1-15)$$

$$X_{SS(V)} = X_0^{SS}(u_c^{SS}) - (1-t_S)F_N^{SS} \sin u_{SS} + X_{ww}^{SS}(w + py_c^{SS} - qx_c^{SS})^2 \quad (1-16)$$

$$X_{SP(M)} = -m_x^{SP}(\dot{u} + \dot{q}z_c^{SP} - \dot{r}y_c^{SP}) - m_z^{SP}(w - 2qx_c^{SP} + 2py_c^{SP})q \quad (1-17)$$

$$X_{SP(V)} = X_0^{SP}(u_c^{SP}) - (1-t_S)F_N^{SP} \sin u_{SP} + X_{ww}^{SP}(w + py_c^{SP} - qx_c^{SP})^2 \quad (1-18)$$

$$X_{WB} = -(W - B) \sin \theta \quad (1-19)$$

### 3.4 側移運動

y 向運動方程式可表示如下式：

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_G(p^2 + r^2) + x_G(pq + \dot{r}) + z_G(qr - \dot{p})] = Y_F \quad (2-1)$$

$$Y_F = Y_H + Y_S + Y_{RU} + Y_{RL} + Y_{WB} \quad (2-2)$$

$$Y_{H(M)} = -m_y^H \dot{v} - m_x^H ur + m_z^H pw + m_y^H r_z \dot{p} - m_y^H r_x \dot{r} - m_z^H r_x pq + m_z^H r_y p^2 \quad (2-3)$$

$$Y_{H(V)} = Y_0^H(u) + Y_{vv}^H v^2 + Y_{ww}^H w^2 \quad (2-4)$$

$$Y_{S(M)} = -m_y^S(\dot{v} + 2\dot{r}x_c^S - 2\dot{p}z_c^S) - m_x^S(u + qz_c^S)r \quad (2-5)$$

$$Y_{S(V)} = F_N^S \quad (2-6)$$

$$Y_{RU(M)} = -m_y^{RU}(\dot{v} + 2\dot{r}x_c^{RU} - 2\dot{p}z_c^{RU}) - m_x^{RU}(u + qz_c^{RU})r \quad (2-7)$$

$$Y_{RU(V)} = (1 + a_H^{RU})F_N^{RU} \cos u_{RU} \quad (2-8)$$

$$Y_{RL(M)} = -m_y^{RL}(\dot{v} + 2\dot{r}x_c^{RL} - 2\dot{p}z_c^{RL}) - m_x^{RL}(u + qz_c^{RL})r \quad (2-9)$$

$$Y_{RL(V)} = (1 + a_H^{RL})F_N^{RL} \cos u_{RL} \quad (2-10)$$

$$Y_{WB} = (W - B) \cos \theta \sin W \quad (2-11)$$

### 3.5 起伏運動

z 向運動方程式可表示如下式：

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] = Z_F \quad (3-1)$$

$$Z_F = Z_H + Z_{BS} + Z_{BP} + Z_{SP} + Z_{SS} + Z_{WB} \quad (3-2)$$

$$Z_{H(M)} = -m_z^H \dot{w} - m_y^H pv + m_x^H qu + m_y^H r_z p^2 - m_y^H r_x pr + m_z^H r_x \dot{q} - m_z^H r_y \dot{p} \quad (3-3)$$

$$Z_{H(V)} = Z_0^H(u) + Z_{vv}^H v^2 + Z_{ww}^H w^2 \quad (3-4)$$

$$Z_{BP(M)} = -m_z^{BP} (\dot{w} - 2\dot{q}x_c^{BP} + 2\dot{p}y_c^{BP}) - m_x^{BP} (u + qz_c^{BP} - ry_c^{BP})q \quad (3-5)$$

$$Z_{BP(V)} = -(1 + a_H^{BP})F_N^{BP} \cos u_{BP} \quad (3-6)$$

$$Z_{BS(M)} = -m_z^{BS} (\dot{w} - 2\dot{q}x_c^{BS} + 2\dot{p}y_c^{BS}) - m_x^{BS} (u + qz_c^{BS} - ry_c^{BS})q \quad (3-7)$$

$$Z_{BS(V)} = -(1 + a_H^{BS})F_N^{BS} \cos u_{BS} \quad (3-8)$$

$$Z_{SP(M)} = -m_z^{SP} (\dot{w} - 2\dot{q}x_c^{SP} + 2\dot{p}y_c^{SP}) - m_x^{SP} (u + qz_c^{SP} - ry_c^{SP})q \quad (3-9)$$

$$Z_{SP(V)} = -(1 + a_H^{SP})F_N^{SP} \cos u_{SP} \quad (3-10)$$

$$Z_{SS(M)} = -m_z^{SS} (\dot{w} - 2\dot{q}x_c^{SS} + 2\dot{p}y_c^{SS}) - m_x^{SS} (u + qz_c^{SS} - ry_c^{SS})q \quad (3-11)$$

$$Z_{SS(V)} = -(1 + a_H^{SS})F_N^{SS} \cos u_{SS} \quad (3-12)$$

$$Z_{WB} = (W - B) \cos \mu \cos W \quad (3-13)$$

同樣，可推導得橫搖、縱搖及平擺等旋轉運動方程式如下述形式。

### 3.6 旋轉運動

繞 x 軸之旋轉運動方程式可表示如下式：

$$I_{xx} \dot{p} - (I_{zz} - I_{yy})qr - I_{xz}(\dot{r} + pq) + I_{xy}(pr - \dot{q}) + I_{yz}(r^2 - q^2) + m y_G (\dot{w} + vp - uq) \quad (4-1)$$

$$- m z_G (\dot{v} + ur - wp) = K_F$$

$$K_F = K_H + K_S + K_{RU} + K_{RL} + K_{BS} + K_{BP} + K_{SP} + K_{SS} + K_P + K_{WB} \quad (4-2)$$

繞 y 軸之旋轉運動方程式可表示如下式：

$$\begin{aligned}
& I_{yy}\dot{q} - (I_{zz} - I_{xx})pr - I_{yz}(\dot{r} - pq) - I_{xy}(\dot{p} + qr) \\
& + I_{xz}(p^2 - r^2) - mx_G(\dot{w} + vp - uq) \\
& + mz_G(\dot{u} - vr + wq) = M_F
\end{aligned} \quad (5-1)$$

$$\begin{aligned}
M_F = & M_H + M_S + M_{RU} + M_{RL} + M_{BS} + M_{BP} \\
& + M_{SP} + M_{SS} + M_P + M_{WB}
\end{aligned} \quad (5-2)$$

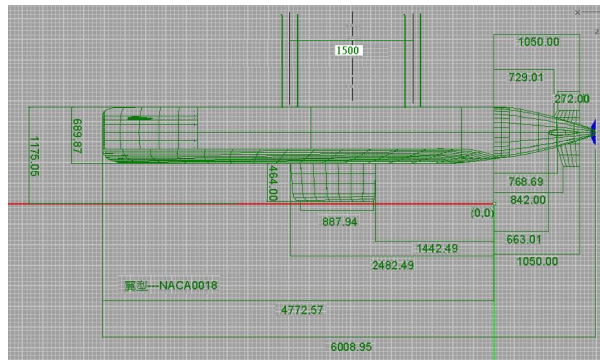
繞 z 軸之旋轉運動方程式可表示如下式：

$$\begin{aligned}
& I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - I_{xz}(\dot{p} - qr) - I_{yz}(\dot{q} + pr) \\
& - I_{xy}(p^2 - q^2) + mx_G(\dot{v} + ur + wp) \\
& - my_G(\dot{u} - vr + wq) = N_F
\end{aligned} \quad (6-1)$$

$$\begin{aligned}
N_F = & N_H + N_S + N_{RU} + N_{RL} + N_{BS} \\
& + N_{BP} + N_{SP} + N_{SS} + N_P + N_{WB}
\end{aligned} \quad (6-2)$$

#### 四、拘束模型試驗用潛艦模型規劃設計

本研究以模型內徑應能容納外徑 30 cm 的六向動力計之條件下的最小尺寸為考量，擇定模型縮尺比例：1/15 的仿 209-1400 潛艦。模型全長：400.60 cm，外徑：41.33 cm，含帆罩全深：78.34 cm。模型上下顛倒，以避開雙支架與帆罩之衝突或干擾入流如圖二所示。



此外，考慮螺槳及艏艉翼角等驅動裝置之配置，拘束模型須具備承載該等裝置的足夠強度，因此採用內部機架外附 FRP 外殼的方式，且艏艉翼、舵及帆罩等皆為可拆裝之附件，以便試驗量測其效應。

#### 五、期中進度彙整報告

潛艦操縱運動數學模式已如上述建構完成，程式撰寫及流體動力係數估算目前仍在進行中。而拘束模型預定分兩期建構完成，本期以內部機架及 FRP 外殼製作完成為目標，而螺槳驅動系統改裝、螺槳模型製作及實驗等則於第二期計畫中進行。拘束模型初步規劃已如前述大致完成，目前正與廠商洽談細部設計與製作相關細節。

此外，基於潛艦數學模式建構對於後續控制器研發，乃至於潛艦模擬器發展等之關鍵性，實有必要審慎為之，確保妥適，因此特擬邀請參與主持日本 MMG 操船數學模式建構的東京大學藤野正隆教授來台客座一年，自八月起參與第二期計畫，協助潛艦數學模式驗證與諮商工作。

#### 參考文獻

1. Morton Gertler and Grant R. Hagen "Standard Equations of Motion for Submarine Simulation", NSRDC Rept. SR0090101, 1967

2.“船之操縱性能之推定”，日本造船學會誌，第 668 號，1986