

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

子計畫七：利用自航模型的潛艦系統鑑定(2/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC92-2611-E-002-013-

執行期間：92年08月01日至93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：郭振華

共同主持人：邱逢琛

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93年6月1日

行政院國家科學委員會專題研究計畫期中成果報告

利用自航模型的潛艦系統鑑定

Submarine System Identification Using a Free-Running Model

計畫編號：NSC 92-2611-E-002-013

執行期限：92年8月1日至93年7月31日

主持人：郭振華

國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系

一、中文摘要

本子計畫之目的在於建立潛艦自航模型系統並進行系統鑑定試驗，以掌握潛艦相關流體動力係數及其操縱性能，並作為與序號 2-1 及 3-1 子計畫研究結果比較驗證之依據。主要研究課題為：1. 規劃並建立潛艦自航模型試驗分析系統 2. 利用自航模型進行系統鑑定相關之系列操縱試驗分析及各項運動操控性能測試，並與序號 2-1 子計畫潛艦之自推數值模擬結果、以及 3-1 子計畫之拘束模型試驗分析結果進行相互驗證。3. 建立潛艦模型自航器之設計方法與自航實驗驗證。經由本子計畫之執行，預期不僅可協助驗證潛艦操縱運動數學模式，建立數值模擬之能力，且可達成建立潛艦操縱性能與操控系統物理模擬能力之目標。此報告為第二年期之期中報告，重點為建立最佳之實驗輸入設計方法，以求得準確的流體動力係數。

關鍵詞：潛艦、系統鑑定、自航模型、自航器

Abstract -- The purpose of this sub-project 3-2 is to design a free-running model testing system for submarine system identification. Main effort is on the hardware construction,

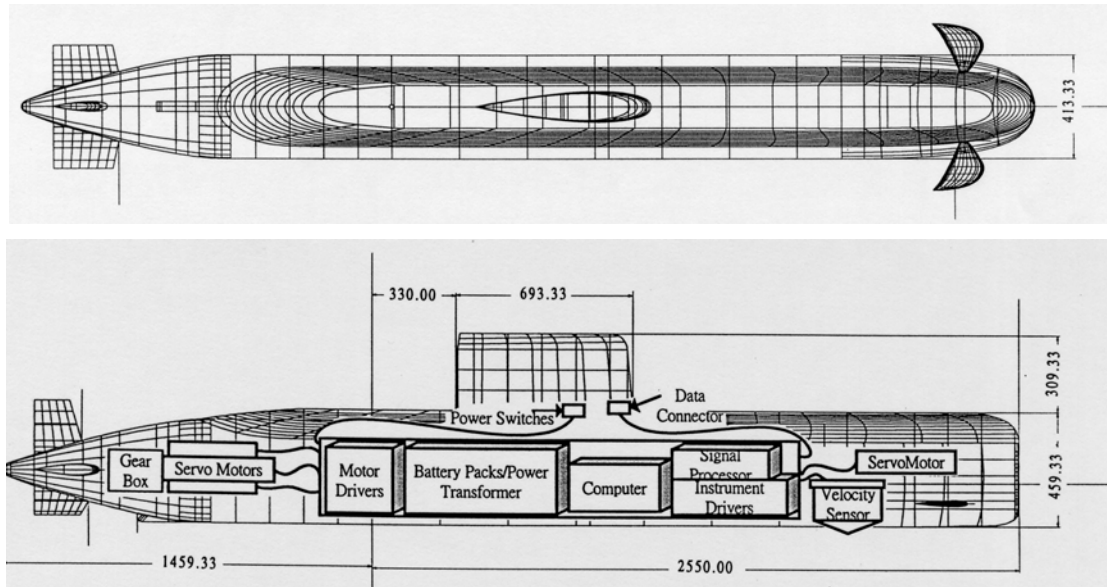
and identification method development. The identified hydrodynamic coefficients will be compared with those obtained by the subprojects 2-1 and 3-1 to verify the effectiveness of the method. Three main topics are studied,

- (a) Design and construction of a free-running model testing system for the study of submarine motion.
- (b) Design of a series of free-running model tests for the determination of the submarine hydrodynamic coefficients.
- (c) Design of an autopilot system for the control of submarine motion

We work cooperatively with sub-project 2-1, and 3-1, to identify proper structure of submarine motion equations for maneuvering analysis. Hydrodynamic coefficients are identified on-line using the free-running model testing system. Other contributions of this sub-project are on the build-up of numerical and physical simulation capabilities for submarine motion. This report is the midterm report of the second-year period.

Keywords: submarines, system

identification, autopilot.



圖一 自航模型外形及內部配置（單位：mm）

二、預定執行內容

建立潛艦數學模式：與子計畫 3-1 共同建立潛艦之六自由度數學模式，先變換其形式為狀態空間方程式，加入系統及量測雜訊，並初步挑選數學模式中對系統響應影響微小之流體動力係數，將其項目自數學模式中移除。

1. 建立系統鑑定程式：本計畫應用延伸式卡爾曼濾波器(EKF：Extended Kalman Filter)為系統鑑定程式架構 [1-10]，在此 EKF 架構下，各流體動力係數及測試環境中之水流干擾皆被視為系統狀態，可在運算流程中加以估測，唯需注意流體動力係數之可識別性，因此在識別實驗中，需考慮數據前處理、相容性檢驗、以及測試路徑之設計。
2. 設計供系統鑑定之測試運動模式：為提昇參數鑑定之正確性，本計畫所規

劃之測試系統需配合適當的測試運動模式，以激發相對應的流體動力係數之效應。本計畫需設計一系列之測試運動模式，分別量測主要的線性及非線性流體動力係數。

3. 與自推模擬、拘束模型實驗所求得之結果相互驗證。

三、主要成果

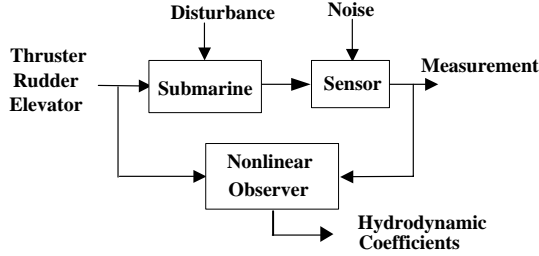
3.1 實驗系統規劃

1. 試驗系統規劃：由總計畫及子計畫 2-1 取得潛艦外形數據，及螺旋槳設計資訊，正在建立自航模型系統、系統鑑定之實驗程序。
2. 建立自航模型之外型、操控系統：外型及支架製作、控制面及致動機構設計及製作。

圖一所示是自航模型的外型及

內部配置。目前進度為進行各子系統製作及組裝。

3.2 流體動力係數估測



圖二 使用估測器估測流體動力係數之架構

潛艦的流體動力係數可以分成以下三類：

1. 線性阻尼係數 (Linear damping coefficient)
2. 線性慣性力係數 (Linear inertial force coefficient)
3. 非線性阻尼係數 (Nonlinear damping coefficient)

其中，線性阻尼係數是影響載具的操控性最大的因素，這些係數通常利用數值分析的方法或者是藉由經驗公式來估算，其中利用平面運動機構試驗量測分析系統 (Planar Motion Mechanism) [11] 是最常用來量測此係數的方法。另外也可以利用設計觀測器的方法來估算流體動力係數，本報告利用 EKF 為估測器，其架構如圖二所示。估測器數學模型中六個自由度的運動方程式如下：

$$\text{Surge} : m[\dot{u} - vr + wq + z_G(pr + \dot{q})] = X$$

$$\text{Sway} : m[\dot{v} + ur - wp + z_G(qr - \dot{p})] = Y$$

$$\text{Heave} : m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2)] = Z$$

Roll :

$$I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + I_{xy}(pr - \dot{q}) - I_{yz}(q^2 - r^2) - I_{xz}(pq + \dot{r}) - mz_G(\dot{v} + ur - wp) = K$$

Pitch :

$$I_y \dot{q} + (I_x - I_z)qr - I_{xy}(qr + \dot{p}) + I_{yz}(pq - \dot{r}) + I_{xz}(p^2 - r^2) + mz_G(\dot{u} - vr + wq) = M$$

Yaw :

$$I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - I_{xy}(p^2 - q^2) - I_{yz}(pr + \dot{q}) + I_{xz}(qr - \dot{p}) = N$$

其中 u 、 v 、 w 是縱移 (Surge)、起伏 (Heave) 與橫移 (Sway) 的速度， p 、 q 、 r 是縱搖 (Pitch)、橫擺 (Yaw) 與橫搖 (Roll) 的角速度。 X 、 Y 、 Z 、 K 、 M 、 N 表示相對於 x 軸、 y 軸和 z 軸合力和力矩。為了估測流體動力係數，這些係數可視為另一附加之個狀態空間 [12,13]，在非線性的估測器中包含了潛艦六個自由度的運動方程式以及為線性阻尼係數所增加的狀態。結果得到下面狀態空間方程式：

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} = [M]^{-1} \begin{bmatrix} X' + X_m \\ Y' + Y_m \\ Z' + Z_m \\ K' + K_m \\ M' + M_m \\ N' + N_m \\ p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta \\ q \cos \phi - r \sin \phi \\ (q \sin \phi + r \cos \phi) \sec \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

其中 ψ 、 θ 和 φ 是分別對橫搖(Roll)、縱搖(Pitch)和橫擺(Yaw)的角度， M 是慣性矩陣，包含載具附加質量產生的慣性力及慣性矩，其中只有數個較大的量與潛艦的幾何形狀和加速度有關，其餘數值均很小或為零， ξ 是外加的狀態空間，包含流體動力係數的關係式， X_m 、 Y_m 、 Z_m 、 K_m 、 M_m 、 N_m 代表潛艦的慣性力和慣性力矩， X' 、 Y' 、 Z' 、 K' 、 M' 、 N' 代表潛艦所受到的外力和力矩。我們要估測的流體動力係數是對潛艦動態性能最具影響的線性阻尼係數，這些係數總共有十七個，分別是來自於潛艦運動六個自由度運動方程式中的其中五個，只有縱移(Surge)運動方程式沒有線性阻尼係數，這十七個係數分別是 M_q 、 $M_{\delta s}$ 、 M_w 、 N_r 、 $N_{\delta r}$ 、 N_v 、 N_p 、 $Z_{\delta s}$ 、 Z_q 、 Z_w 、 $Y_{\delta r}$ 、 Y_r 、 Y_v 、 Y_p 、 K_p 、 K_r 和 K_v ，其中 M_q 、 $M_{\delta s}$ 及 M_w 是與縱搖(Pitch)運動有關， N_r 、 $N_{\delta r}$ 、 N_v 及 N_p 是與橫擺(Yaw)運動有關， $Z_{\delta s}$ 、 Z_q 及 Z_w 是與起伏(Heave)運動有關， $Y_{\delta r}$ 、 Y_r 、 Y_v 及 Y_p 是與橫移(Sway)運動有關， K_p 、 K_r 及 K_v 是與橫搖(Roll)運動有關。

3.3 最佳輸入設計

參數估測的目的是要求所辨識

的參數之期望值與真實值之間的偏差為最小，兩者間的協方差也為最小。由於用於估測的輸入訊號必須滿足持續震盪(persistently exciting)的特性，以確保參數可辨識性及辨識之準確度。本計畫藉由計算參數不確定性，配合輸入命令的即時規劃，結合 EKF 估測器架構，發展潛艦的即時輸入設計方法，此方法可以計算出每一個參數的不確定性，找出一組最佳的輸入，以降低參數與真實值之間的偏差。

以最佳化理論所推得的條件方程式轉換成兩點邊界值問題，目的是要最小化 J 找出最合適的輸入值 $u^*(t)$ 。系統動態及代價函數分別表示為：

$$\dot{x} = F_A x_A + G_A u$$

$$J = \frac{1}{2} \int_0^T \left[-x_A^T H_A^T R_A^{-1} H_A x_A + \mu \left(u^T u - \frac{E}{T} \right) \right] dt$$

其中各變數定義如下：

$$x_A^T \equiv \left[x, W_1 \frac{\partial x}{\partial \theta_1}, \dots, W_p \frac{\partial x}{\partial \theta_p} \right]$$

$$G_A^T \equiv \left[G, W_1 \frac{\partial G}{\partial \theta_1}, \dots, W_p \frac{\partial G}{\partial \theta_p} \right]$$

$$F_A \equiv \begin{bmatrix} F & 0 & \dots & 0 \\ W_1 \frac{\partial F}{\partial \theta_1} & F & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_p \frac{\partial F}{\partial \theta_p} & 0 & \dots & F \end{bmatrix}$$

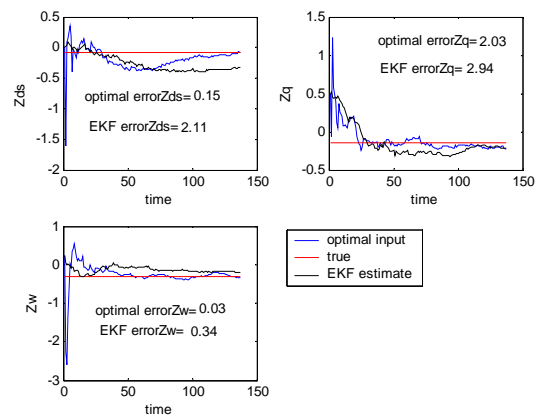
$$H_A \equiv \begin{bmatrix} 0 & H & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & H & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & H \end{bmatrix}$$

$$R_A \equiv \begin{bmatrix} R & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & R \end{bmatrix}$$

上式中，狀態向量是由潛艦系統狀態向量 x ，加上狀態對各係數 $\theta_i, i=1, \dots, p$ 之靈敏度。代價函數 J 由系統狀態，以及輸入 u 所組成。 E 為最大輸入能量。 F, G , 及 H 則分別為潛艦動態方程式之狀態轉換矩陣、輸入矩陣、及量測矩陣。 R 為雜訊強度、 $W_i, i=1, \dots, p$ 為各靈敏度之權重。

由於潛艦自航模型配備有速度量測儀器，其所量測的是潛艦的速度，所以得到的量測矩陣為 $y = [u \ v \ w \ p \ q \ r \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ ，雜訊含在速度量測值中。目前自航模型尚未組裝完成，因此在此篇報告中我們使用模擬的速度量測數值。模擬載具在垂直面的運動。假設初始速度為每秒 1.8 公尺，並根據最佳控制輸入，操縱升降舵角。圖三所示為估測出的流體動力係數與真實的流體動力係數之數值比較。圖中顯示最佳輸入與任意輸入下，流體動力係數之估測表現。在 **heave** 方向之係數，使用最佳輸入之系統鑑定皆可達到較準確之估測結果，因此模擬結果可以證明所設計的非線性估測器及最佳輸入方法是可行的。

惟本計畫所使用的輸入設計之計算量與估測之流體動力係數數目有關，當係數數目增加時，矩陣之圍數同時增加。如何減少需估測之係數數目，以節省計算時間，使其較適於在線上操作，是未來研究的重點。



圖三、起伏(heave)係數估測結果

四、結語

本報告為第二年度之期中報告。目前之進度為：1.在實驗系統規劃方面，正在建立自航模型之外型、操控系統、外形及支架製作組裝、控制面及致動機構設計及製作組裝，並著手規劃自航模型系統及系統鑑定之實驗程序。2. 在流體動力係數估測方面，已建立非線性估測器為主之估測架構，正進行最佳輸入設計之研究，以增進參數估測之準確度。

五、參考文獻

1. P. Mandel, "Ship Maneuvering and Control," in *Principles of Naval Architecture*, (Edited by J. P. Comstock), SNAME, 1967.
2. P. Eykhoff, *System Identification – Parameter and State Estimation*, John Wiley & Sons, 1974.
3. G. C. Goodwin & R. L. Payne, *Dynamic System Identification – Experimental Design and Data Analysis*, Academic Press, 1977.
4. L. Ljung, T. Soderstrom, *Theory and Practice of Recursive Identification*, MIT Press, 1983.
5. G. C. Goodwin, K. S. Sin, *Adaptive Filtering and Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.
6. J. P. Norton, *An Introduction to Identification*, Academic Press, 1986.
7. L. Ljung, *System Identification – Theory for the Users*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987.
8. T. Soderstrom, P. Stocia, *System Identification*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
9. J.-N. Juang, *Applied System Identification*, PTR Prentice-Hall, 1994.
10. Special Issues on Trends in System Identification, *Automatica*, Vol. 31, No. 12, pp. 1698-1883, 1995.
11. R. E. D. Bishop, R. K. Burcher, W. G. Price, "Linear Analysis of Planar Motion Mechanism Data," *J. of Ship Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 242-251, 1974.
12. A. Goodman, "Experimental Techniques and Methods of Analysis Used in Submerged Body Research," *Proc. of the Third Symp. on Naval Hydromechanics*, Office of Naval Research, 1960.
13. M. A. Abkowiz, "Measurement of Hydrodynamics Characteristic from Ship Maneuvering Trials by System Identification," *SNAME Transactions*, Vol. 88, pp. 283-318, 1980.