

船舶錨系多體運動學模擬與實驗分析研究

柯德亞 曾瑋展 蔡順峯^{1*}

國立臺灣海洋大學 輪機工程學系

關鍵詞：錨系設備、錨唇、錨爪、多體運動學

摘要

錨系設備為船舶在海上下錨停航時所需之裝置設備，由錨、錨鍊、錨鏈筒、錨機、錨唇等組成的一個系統。船舶建造根據法規與艙型須搭配設計錨唇形狀以達到收放錨動作順暢。本文針對某特定船艙設計，利用多體動力學模擬軟體 Ansys Motion® 分析整體錨系設備裝配與收放運動狀態，用以確認新制錨、錨鍊、錨唇貼合狀況。研究結果顯示，收放錨系設備之運動與真實實驗情況相吻合，可替代傳統製作木模需進行模擬拉錨過程，具有節省成本、減少工期及便於修改設計優點。

前言

在船舶操作中，錨具是確保船舶安全的關鍵設備，主要用於船舶在不依靠碼頭或浮筒停泊時固定位置。隨著時間的發展，船錨的設計也經歷了從石碇、木爪石碇到帶杆木錨、鐵錨的演變。自從鐵錨被發明以來，由於原材料的獲取和鍛造技術的限制，其普及速度並不快。直到明代，這些問題才得到了有效解決，從而開始逐漸替代舊式碇鏈，成為海上航行不可或缺的標準設備。過去，商船在錨具的製造上大多依賴於手工打造木錨模型，並進行多次實驗以確定錨具的可靠性，這一過程不僅耗時而且勞力密集。而現今，多家製造商和造船企業已經開始利用 3D 模擬軟體進行設計，通過模擬錨鏈各部件的運動，來確認整套錨系統的適用性，大節省了製作和測試過程中的時間與成本。

錨系統，也被稱為錨設備，它由錨、錨鍊、固定裝置、錨鏈筒、錨機、錨唇等部件組成。其性能和特點取決於它在船上的配置、錨的數量與重量、錨索的長度和直徑，以及錨機的型號和錨鏈筒的結構。一個合理設計的錨系對船舶航行的安全至關重要，因此整個設計和生產過程需要船主和船級社的密切監督。當前，造船業仍然在很大程度上依賴於設計師的經驗來設計錨鏈筒和錨唇的尺寸與形狀，並根據木模進行的拉錨試驗結果進行調整，以達到理想效果。每次設計調整後都需重製木模，這一過程耗費了大量的時間、人力和物力資源。其中，錨唇的設計尤為挑戰，由於其形狀特殊、外形大多為

自由曲面，使得參數化建模變得更加困難。對於不同類型的船舶，錨唇的設計方案也不一樣，甚至同一條船可能有多種錨唇設計方案。因此，解決錨系統的優化選擇與錨唇結構優化設計是船舶製造企業面臨的一個迫切問題。

船舶的錨系動作是一個極其複雜的過程，在確保航行安全方面扮演著關鍵角色。如果錨鏈筒和錨唇的設計與錨系選擇不匹配，可能會導致錨在完全拉緊前出現異常情況，帶來不利影響。採用電腦繪圖技術可以確定錨鏈筒位置和錨唇形狀，從而取代實體拉錨試驗，這對節省成本具有顯著效益。提高錨系選型優化和錨唇結構設計效率是當前錨系設計面臨的重要課題。此研究分析船舶錨系在生產和設計過程中的現存問題，通過電腦軟體輔助設計和分析。利用電腦軟體繪圖技術，以一艘 9,800 噸級客船錨系為例，建立其三維幾何模型，對其船錨和錨唇的貼合狀態進行運動模擬試驗研究，並根據電腦模擬的結果進行錨系設計調整，以此來代替製作木模的拉錨試驗方法。

錨系模型建立

在當今船舶工業中，錨系統作為確保船舶在拋錨停泊過程中安全可靠的關鍵設備，其設計和優化越來越受到重視。本研究旨在建立一種高效的錨系設計模擬分析方法，目的在解決傳統錨系設計中存在的諸多問題。

1. 錨系幾何外型建立：

錨系統包括錨、錨鏈、錨鏈筒、錨台、錨唇、掣鏈器、錨機等一系列固定裝置。傳統上，船舶的錨系設計依據母船的船型和尺寸進行，透過製造木模並執行拉錨試驗來確定錨系配置。這一流程不僅耗時耗力，還可能因木模製作及修改延長造船周期。本研究透過電腦繪圖軟體依照船舶設計圖繪製其船殼外型、甲板機械、錨唇、錨鍊管、導輪及船錨等，及優勢在於結果分析後，若船錨與錨唇之貼合狀況不符預期、或是有調整甲板機械布置等需求，僅需要透過繪圖軟體重新調整幾何外型或相關布置，進而減少設計上之時間和人力的成本。本研究採用之錨鍊系統及船殼外型如下所示：

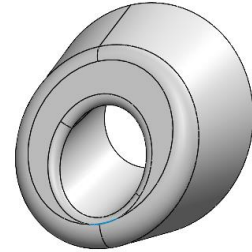


圖 3. 錨唇

1.1 模型內各部件：

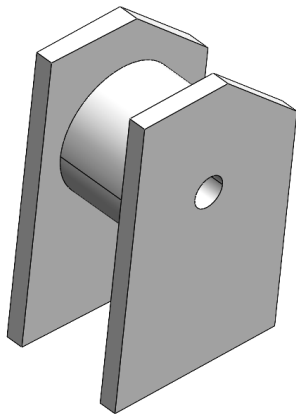


圖 1. 錨鍊導輪

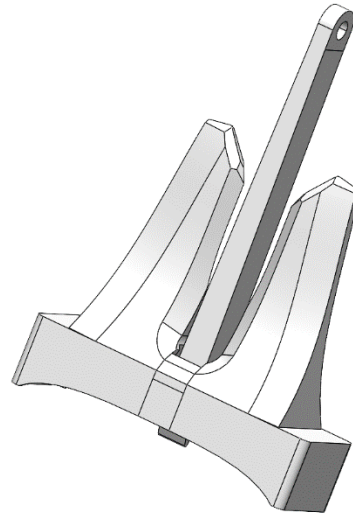


圖 4. 船錨

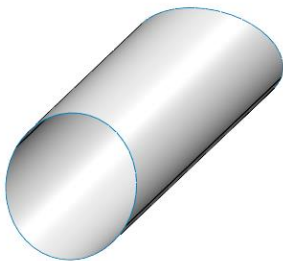


圖 2. 錨鍊管

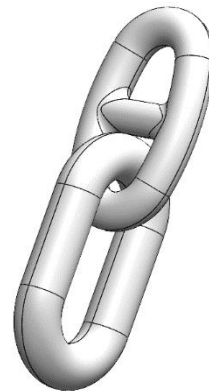


圖 5. 錨鍊

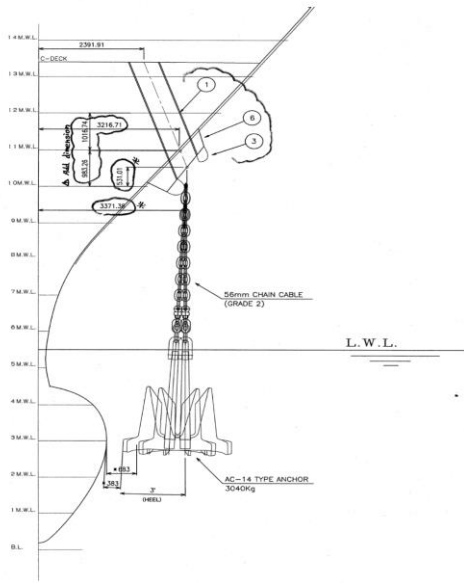


圖 6.設計之平面圖

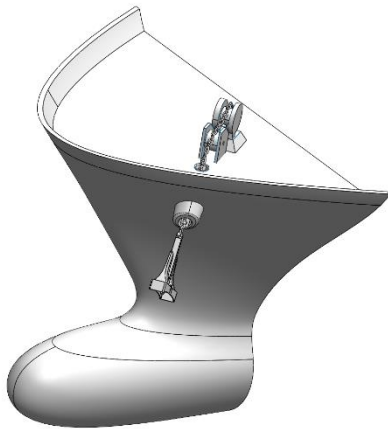


圖 7.三維裝配圖

多體動力學模型

1.初始分析

初始分析藉由運動引起的相對位置、角度和約束條件等初始條件來了解運動體的排列情形，透過運動體之間的運動學關係來計算物體的初始速度。初始分析中將分析過程拆分為位置分析、速度分析、加速度分析等三種類型，其控制方程如下所示：

1.1.位置分析:

$$M\Delta q + \varphi\Phi_q^T\lambda = 0 \quad (1)$$

$$\Phi(q) = 0 \quad (2)$$

式中 q 和 Δq 分別代表物體的位置及其在 Newton Raphson 迭代中的變化量， M 為物體的質量矩陣， Φ 為約束方程式， λ 為拉格朗日因子。

1.2.速度分析:

$$\Phi_{qD}\dot{q}_D = -\Phi_t \quad (3)$$

$$\dot{q}_I = \dot{q}_x \quad (4)$$

其中 \dot{q}_D 、 \dot{q}_I 和 \dot{q}_x 分別代表運動體的從屬座標、獨立座標和初始速度， Φ_{qD} 和 Φ_t 分別為從屬座標和時間項之偏導數。

1.3.加速度分析:

$$M\ddot{q} - Q + \Phi_q^T\lambda = 0 \quad (5)$$

$$\Phi(\ddot{q}) = 0 \quad (6)$$

其中 \ddot{q} 、 Q 分別為物體的加速度及接觸力。

2.動態分析

動態分析用於計算物體和受力之非線性行為，包含材料非線性、幾何非線性或由接觸或變形引起之負載。方程式中考慮了慣性、阻尼、彈簧及約束力，並採用隱式積分方法進行計算，其公式如下：

$$M\ddot{q} - Q + \Phi_q^T\lambda = 0 \quad (7)$$

$$\Phi(q) = 0 \quad (8)$$

$$q_{i+1} = q_i + \Delta t^2 \left\{ \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{q}_i + \beta \ddot{q}_{i+1} \right\} \quad (9)$$

$$\dot{q}_{i+1} = \dot{q}_i + \Delta t \{ (1 - \gamma) \dot{q}_i + \gamma \dot{q}_{i+1} \} \quad (10)$$

其中 β 、 γ 為紐馬克積分參數。

3.接觸方法

接觸方法在多體動力學分析中，對於模擬結果的精準性及穩定性影響極大，其定義了兩個實體之間的接觸法向力、摩擦力及兩個面的幾何約束力。本研究採用面接觸偵測方法，其對物體分別建立搜尋框，在將搜尋框分割為數個子框，兩物體之間子框相互接觸時，在進行局部搜尋，以建立物體表面之接觸點，其概念圖如下所示：

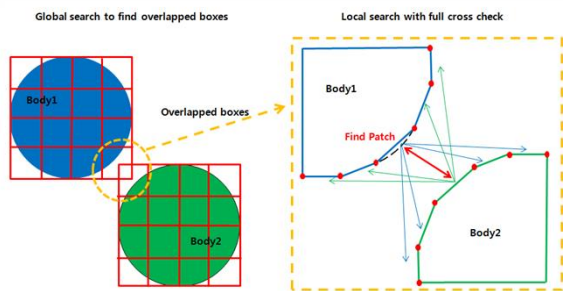


圖8.接觸方法原理
錨機收放過程與模擬方法分析

1. 收錨運動

船舶收錨運動是一個涉及將船舶拋投的錨收回的複雜過程。本研究分析了收錨過程中的關鍵步驟，旨在提高收錨效率並確保船舶安全。收錨運動主要包含以下四個核心步驟：

1.1 錨機啟動

收錨指令發出後，船員將啟動錨機。錨機的驅動力主要來源於電力或液壓系統。錨機的啟動是收錨過程的首要步驟，為接下來的操作奠定了基礎。

1.2 鏈輪驅動

錨機將動力傳遞給鏈輪（亦稱窩輪），促使其旋轉。鏈輪的設計獨特，能有效抓取並引導錨鏈。通過利用彈簧除合夾或半圓鎖具等機制，保障錨鏈在鏈輪齒間順利進出，確保錨鏈穩定地被拉向船體。

1.3 錨鏈拉取

在鏈輪旋轉過程中，錨鏈被逐步提拉。此階段，持續監控錨鏈狀態和拉取速度至關重要，以避免錨鏈糾纏或斷裂等潛在風險，確保操作的平穩進行。

1.4 收錨完成

錨完全提起標誌著收錨過程的結束。此時，立即採取預防錨鏈滑動的措施顯得尤為重要。通常，通過鎖鏈器或液壓裝置確保錨鏈固定，防止錨鏈反滑，避免錨意外下落，確保船舶安全。

2. 模擬方法分析

若依照實際錨機收放方法，需透過旋轉鍊輪帶動錨鍊完成收放動作，其過程中除了涉及建模的複雜性也增加物體間接觸方法之計算量。因此本文以恆定之收錨速度來替代鍊輪之轉動速度，簡化建模之耗費時間及減少計算量，其模擬設計方法如下所示：

2.1.Fixed

本文不考慮船體受到水面造成之晃動影響，僅分析其錨唇設計之幾何外型是否有效與船錨達到安全貼合，以及球形艙之設計，在釋放過程中錨鍊是否會有撞擊船殼之風險。因此針對甲板機械、錨鍊管、錨唇及船體等添加固定約束，假定其為不晃動之情形。

2.2.Translate

透過恆定收錨速度取代其鍊輪轉動速度，針對尾端錨鍊添加恆定速度使其作動來完成收錨行為，本研究假定之恆定速度為 150mm/sec。

2.3.Contact

針對物體間的接觸方法，採用表面接觸，並定義其鋼度、阻尼和摩擦係數等，使其接近真實收錨做動情形。

3. 結果分析

3.1 初始狀態穩定分析

為了避免分析過程中，受到物體初始位置影響，產生不合理之作用力發生，因此透過對拉動錨鍊、甲板機械及船體設定固定約束，僅受到重力作用下，使模型的初始狀態達到穩定平衡情況，以便作為後須收錨模擬分析之初始條件，其圖如下圖 9 所示：



圖 9.初始穩定狀態

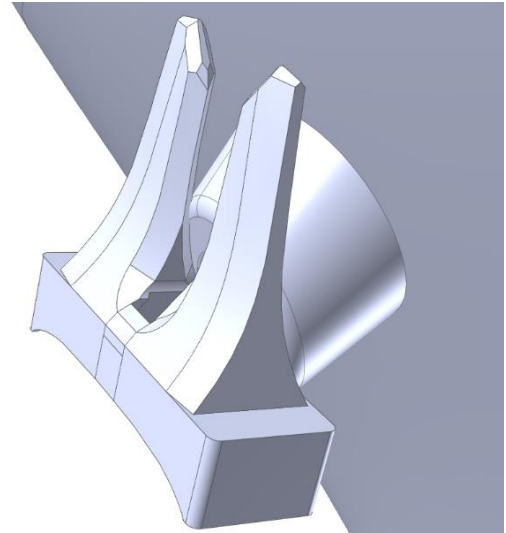


圖 11.錨耳貼合情形

3.2 錨鍊收錨分析

錨系統達到穩定平衡後，取消拉動錨鍊的固定約束，並以 Translate 約束對其定義，150mm/sec 的恆定速度，進行拉錨動作，其收錨動作完成情形如下圖 10 所示，其中船錨錨耳部分與錨唇達到良好貼合作用，如圖 11 所示，船錨底座部分也與錨唇達成良好貼合，如圖 12 所示，兩側錨耳與錨座皆與錨唇達成接觸，滿足一般錨系設計上所需之三點接觸的安全性要求，同時量測出當收錨作動完成時，船錨與船殼的最近距離約為 55.65mm。

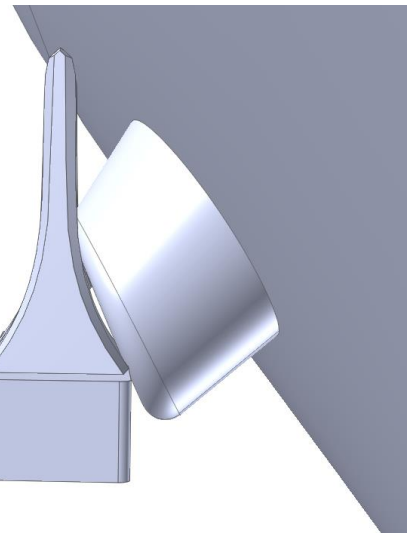


圖 12.錨座貼合情形

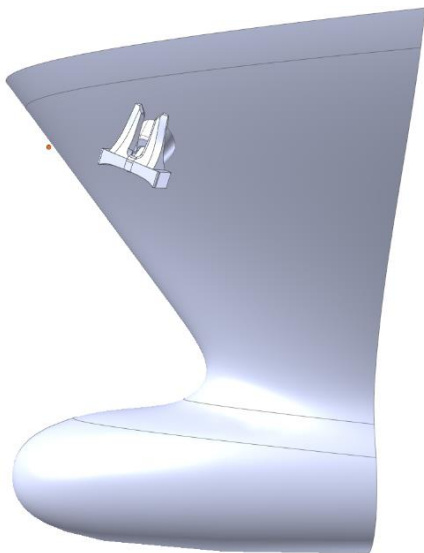


圖 10.收錨作動完成

3.3 錨鍊釋放分析

錨鍊收錨作動完成後，將其作為初始狀態，並旋轉 9 度，進行錨鍊釋放分析，其釋放過程為自由釋放形式，僅受到重力作用。其目的在於模擬在劇烈海況下，船體收到波浪作用，造成搖晃情形發生，在假設船體晃動最大角為 9 度情形下，進行下錨動作，船錨是否會有撞擊船殼之危險性發生，其初始狀態圖如圖 13 所示，其船錨釋放置約水線位置如圖 14 所示，同時監測其釋放過程與船殼的最近距離，如圖 15 所示，其最近距離約為 103.54mm。

結論

本研究說明了傳統錨系設計的工作流程及其存在之關鍵問題，包含木模修改之時間人力成本等因素。因此透過提出電腦模擬分析方法，目的在於減少傳統木模實驗所耗費之時間人力成本，同時驗證電腦模擬分析錨鍊收放之可行性。本文透過對現有之 9800 噸客船作為分析對象，以其錨系設計進行建模分析，其模擬結果在收錨作動過程中，達成良好的 3 點接觸貼合情形，與實船情況符合，證明透過多體動力學模擬技術進行錨系設計分析具可靠性，且透過電腦模擬分析，除了具有修改錨系設計上的便利性之外，可以更加精準的分析設計上所需之安全距離餘裕，以便優化錨系設計之安全性。

未來展望

本研究在模擬方法上僅探討鋼體動力學之分析問題，考量在錨系設計上，除了在錨鍊收放過程中船錨與錨唇是否達到理想貼合外，對於甲板機械及錨系系統相關設備其結構損害影響也是設計考量因素之一。在現有的電腦模擬方法上，已存在鋼體和彈性體耦合之分析。在後續研究上，將結合鋼體和彈性體之計算方法，將重要部件之結構受損也考量其中，以便達成錨系設計方法之最佳化。

參考文獻

1. 劉志強、王明強、邱小虎、朱永梅基於 UG 二次開發的船舶錨系優化設計與拉錨試驗模擬分析(2006).
2. 劉志強針對可裝 5000 車之滾裝船進行拉錨電腦類比試驗與錨唇生產設計(2011)
3. 陳甯、吳尚華針對 DWT 49,000 噸成品油輪的錨鍊筒在物理狀態下的拉錨試驗.(2013)
4. Dopico, D., Luaces, A., Saura, M. *et al.* "Simulating the anchor lifting maneuver of ships using contact detection techniques and continuous contact force models," *Multi-body Syst Dyn*, Vol. 46, pp.147-179 (2019).
5. Zou, Y., Shen, C., Xi, X., "Numerical Simulations on the Motions of Anchored Capesize Ships," *Journal of Navigation*, Vol.65, pp145-458(2012).
6. Lin, Hang., Zhu, Youyan., Yang, Jianyu., and Wen, Zhi- jie., "Anchor Stress and Deformation of the Bolted Joint under Shearing," *Advances in Civil Engineering*, (20

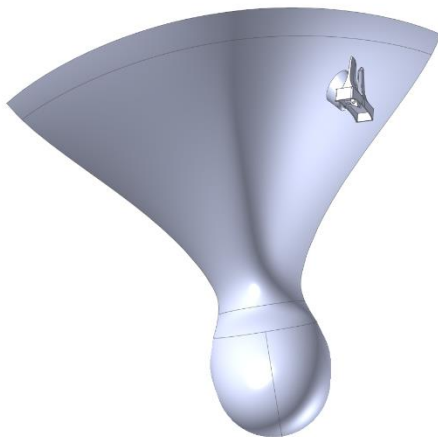


圖 13.錨鍊釋放初始狀態

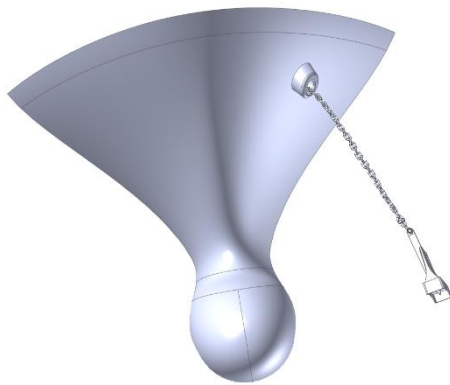


圖 14.錨鍊釋放至約水線位置

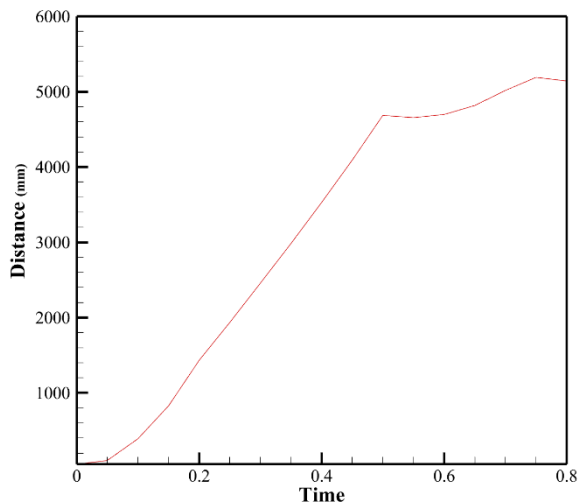


圖 15.船錨與船殼最近量測距離