

岸肩橋式起重機工作排程之研究¹

QUAY CRANE SCHEDULING AT CONTAINER TERMINAL

盧華安 Hua-An Lu²

林正偉 Cheng-Wei Lin³

(94 年 8 月 17 日收稿，94 年 12 月 20 日第一次修改，95 年 4 月 21 日
第二次修改，95 年 8 月 10 日定稿)

摘要

岸肩橋式起重機為貨櫃在港裝卸之主要機具，扮演貨櫃流程中樞角色，除具備港灣與貨櫃棧埠界面功能外，亦是貨櫃碼頭裝卸效率重要指標之一。通常貨櫃碼頭均配置多部橋式起重機以利相互支援，但在進行排程規劃時，除需安排各自於各船之作業時窗外，仍要考慮相互禁止跨越，以及同一船舶需由相鄰機具服務之限制。本研究據此建構一極小極大化作業工時之戰術性排程模式，並將其轉換為混合整數規劃問題。經運用商用套裝軟體 OPL 進行業者提供實際營運資料之求解分析，顯示部署於中間席位之橋式起重機較能發揮相互支援之特性，與實務單位日常指派橋式起重機之概念相符。進一步透過敏感性分析發現，欲達成平均各部橋式起重機作業工時之目標，靠泊船席的安排則為關鍵因素。

關鍵詞： 岸肩橋式起重機；戰術性排程；極小極大化；混合整數規劃

-
1. 本研究承國科會補助研究經費 (NSC 94-2416-H-019-002)，謹申謝忱。
 2. 國立臺灣海洋大學航運管理學系副教授 (聯絡地址：202 基隆市中正區北寧路 2 號臺灣海洋大學航運管理學系；電話：02-24622192 轉 3431；E-mail：halu@mail.ntou.edu.tw)。
 3. 國立臺灣海洋大學航運管理學系碩士。

ABSTRACT

Quay crane is the main equipment to play the core role of loading and unloading containers in seaport terminal. Besides it possesses the interface function between waterside and stevedoring systems, the performance of quay cranes is naturally one of the most important indexes for assessing the efficiency of a container terminal. The problem of quay crane scheduling not only considers the arrangement of service time windows, but also needs to avoid crossing each other and to assign neighbored cranes for a vessel. Following to these physical limitations, we formulated a tactical crane scheduling model with a min-max objective function of working times for all concerned cranes. It can be transferred into a mixed integer programming model. We applied it to a real-world case from the studied company and solved by the commercial optimization software OPL. Test results show as same as the practical concept that cranes deployed in the middle positions can support the task assignment of others. From the sensitivity analysis, we found that the berth allocation for each concerned vessel is a critical factor to reach the target of averaging working times for all cranes.

Key Words: *Quay crane; Tactical scheduling; Min-max; Mixed integer programming model*

一、前言

隨著貿易全球化之發展，使貨櫃運輸的船噸需求大增，貨櫃船舶大型化趨勢應運而生。為確保貨櫃於港埠運轉過程流暢迅速，除加強基礎設施的改善與投資，如增加船席長度、浚深航道碼頭、添購裝卸搬運機具外，世界各重要貨櫃港埠無不戮力於提升貨櫃裝卸之生產力。岸肩橋式起重機 (quay crane, QC) 為港口營運不可或缺之設備，其扮演貨櫃在港裝卸流程之中樞角色，除具備港灣與貨櫃棧埠界面功能外，其作業效率之發揮亦對整個港口發展影響甚鉅。然而，多部橋式起重機於碼頭上共同作業時，移動範圍除受限於地面所鋪設之鋼軌與供電纜線長度之限制，裝卸活動間相互競爭有限資源所產生的干擾與牽制，亦會導致裝卸效率的降低。因此，如何於執行裝卸活動前，對有限資源做合理的分派與安排，以使整體裝卸過程更為迅速流暢，有效縮短船舶滯港時間，進而提高船席利用率，對於裝卸單位而言，實為必須重視之課題。

根據 Vis 與 Koster^[1] 對港埠作業流程之觀察與研究主題分析，港埠作業之規劃層次分為策略性 (strategic)、戰術性 (tactical) 與作業性 (operational)。策略性規劃之決策範疇，在於決定櫃場配置、裝卸設備的選用等基礎設施之建置，通常這類決策均屬長期規劃。戰術性規劃則是針對港埠作業之例常性活動流程，就其設備效能之發揮進行規劃與評估，不僅可作為策略性評估之基礎，也是作業性參考的重要依據。作業性規劃層次，屬於日常性

且需要立即處理的決策問題，通常需要輔以資訊科技 (information technology, IT) 之協助處理。以往相關研究在處理岸肩橋式起重機排程問題時，多以作業層級之角度著手，Daganzo^[2]、Peterkofsky 與 Daganzo^[3] 建構最小化船舶在港停留時間之混合整數規劃 (mixed integer programming, MIP) 模式，考慮同一時間一個艙位僅能有一部起重機作業、一部起重機在同一時間僅能作業一個艙位、實際作業時間須大於預計工作時間、所有受指派之起重機不得大於其可利用之總數、船舶須完成所有工作才可離港等限制，但未考慮軌道型起重機相互支援之作業限制。Kim 與 Park^[4] 以同一貨櫃群組 (container group) 所堆放之區域為一子工作，同樣採用混合整數規劃方法建構最小化完工時間之模式，考量橋式起重機工作流量守恆、禁止跨越、依工作先行順序、同一艙位之工作不可同時進行等限制。Lim 等人^[5] 則將空間限制之概念加入橋式起重機排程規劃，利用具有權重概念之雙分圖 (bipartite graph) 具體展現問題之特性，並假設船舶被分割為數個艙位，在基本的空間限制下，目標求取在固定時間內最大處理量，並提出禁止跨越 (non-cross)、相鄰限制 (neighborhood) 及工作分割 (job-separation) 三個起重機與艙位相對位置之限制式。作業性之起重機排程均以船舶作業艙位為規劃單位，因此考慮之時間長度較短，規劃特色為短時間內如何分派有限之橋式起重機服務同時在港或即將進港之船舶，此乃因船舶之貨櫃積載計畫 (stowage plan) 在船舶進港前若干時間方能獲知，而此為橋式起重機派工之主要依據。

此外，影響橋式起重機作業之儲區支援工作，如軌道式門型起重機作業、儲位指派等亦有與本文相近之考量，可參考藍武王與高傳凱^[6]、趙時樑與陳春益^[7]、陳春益與趙時樑^[8] 等文獻。

上述橋式起重機排程之文獻皆以船舶艙位為作業單位，從艙位及橋式起重機之指派關係進行處理，因此考量船舶數較少，考量的限制式亦少。本研究旨於針對週期性橋式起重機作業系統排程，進行中長期之戰術性分析，橋式起重機之指派以船舶為單位，並利用數學規劃技巧，建立分析性模式，決策內容包含橋式起重機與船舶之服務對應關係、服務排程順序、起迄時間、工作時間，以及每艘船舶之離港時間。後續章節將先介紹橋式起重機之排程規劃實務，以建立適當之分析模式，再透過實務單位的案例測試說明模式求解之排程結果，並進行重要參數之敏感度分析，最後為結論與建議。

二、岸肩橋式起重機排程規劃實務

橋式起重機扮演貨櫃在港裝卸流程的中樞角色，其排程規劃問題之複雜性，主要來自於直線碼頭上應用多部起重機相互支援服務多艘貨櫃船時，應如何進行適當指派以儘速完成進港船舶的裝卸作業。2.1 節敘述直線碼頭橋式起重機排程特性，2.2 節描述實務單位之排程規劃概念與指派準則。

2.1 直線碼頭多部橋式起重機服務特性

考慮裝卸公司於連續直線碼頭，配置多部橋式起重機，且完全在該公司的掌控下，可彈性調度支援需要服務的船舶。由於橋式起重機同在一軌道系統上，必須遵守以下限制：

1. 依序移動：在直線碼頭同一組軌道上所有起重機，必須在軌道上依序移動，不可相互跨越，更無法離開軌道而運行。若有起重機被指定之服務，須跨越鄰近的起重機所在位置，應經由同一方向依序移動後，方能行進至指定位置，如圖 1 所示。
2. 避免碰撞：意指相鄰的二部橋式起重機，必須保持一定之安全工作距離，不同規格之起重機所要求的安全距離不一，但目的皆在避免相互支援時，干擾鄰近起重機的作業，甚至發生碰撞。
3. 越船橋須將吊臂升起：橋式起重機在作業階段，遇船型較小者，因船橋高度較低，在通過船橋時，不需升起吊臂。但船型較大，乾舷較高，在前伸臂通過船橋時，易產生碰撞危險。因此，應先將吊臂升起，靜待停止後方可移動，通過船橋後再降下吊臂繼續工作。在多船泊靠時，依左舷及右舷泊靠型態不同，橋式起重機於橫移時是否升起吊臂，略有差異。以兩艘船橋置於船艙的船舶為例，泊靠情形會產生表 1 所述情況。
 - (1) 兩船皆以左舷或右舷靠泊，即港區內最常見的同一方向靠泊方式，在起重機相互支援作業時，須將吊臂升起，以通過船橋。實務上，這樣的做法需費時 20 至 30 分鐘。
 - (2) 船舶相對靠泊，橋式起重機連續作業空間較大，升降吊臂之次數可能較少。此種方式有時必須考量港口地理環境與碼頭所在位置。
 - (3) 船艙相對為出現較少的靠泊方式，除需有較寬闊的港池以供迴旋，在作業時較不利橋式起重機跨船席支援。
4. 船舶長度與作業艙位：當裝卸貨櫃都能均勻分散置放船艙下，船舶長度愈長，可指派支援之機具數也就愈多，但主要還是依作業艙位的分佈而定，作業艙位集中，橋式起重機的分派數目即會產生限制；作業艙位分散，易於指派多部起重機同時作業。
5. 電纜繩索長度：橋式起重機除僅能在軌道上行走之外，行走距離最主要受到供電系統設計電纜繩索長度的限制，形成其只有特定之支援範圍，一般多部起重機之配置情形如圖

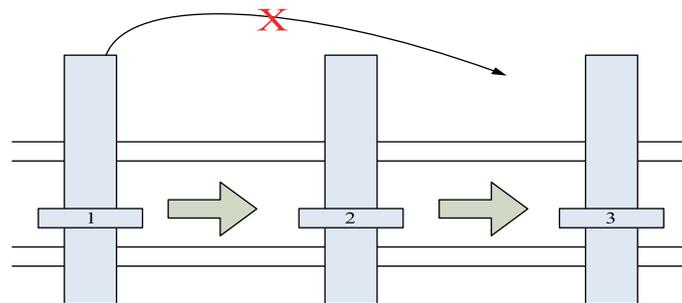
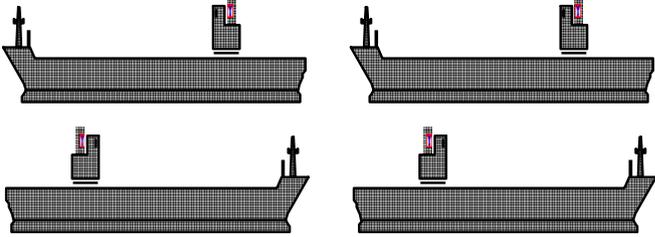
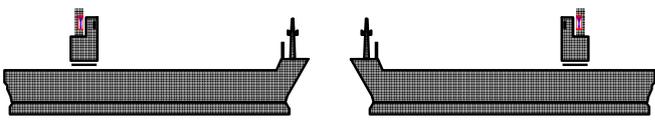
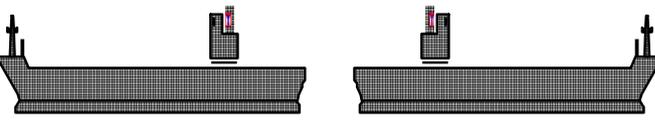


圖 1 依序移動與禁止跨越之限制

表 1 碼頭靠泊型態對橋式起重機相互支援之比較

泊靠型態	圖 示	備 註
同一舷側靠泊		最常見的同方向靠泊方式
不同舷側靠泊		升降吊臂之次數可能較少
		較不利起重機跨船席支援

2 所示。此一特性，也使實務單位傾向指泊中間之船席。

6. 作業效率受拖車支援影響：實務上，岸肩作業常因拖車抵達車道之遲延而中斷，起重機必須等待拖車恢復支援，才能繼續作業。
7. 橋式起重機能力：除了個別之荷重能力外，起重機之效率能力會因機齡、保養、操作情況等因素，而表現出不同的服務品質。機況佳、能力優良者，在不考量其他因素，僅探討本身裝卸效率下，每小時產出較高。

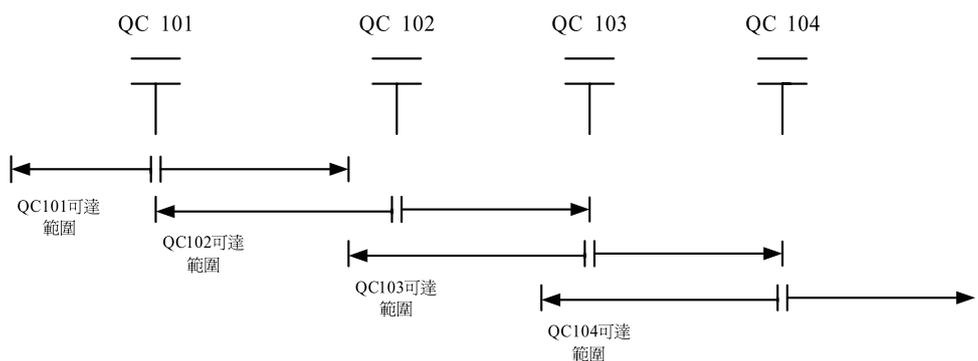


圖 2 機具受電纜長度限制之示意

8. 操作人員之經驗：在操作時，操作人員所處之駕駛台車會因機械慣性而產生一定程度之晃動，要使吊架於貨櫃上正確著位實屬不易，因此，對裝卸效率有絕對的影響力。

整體來看，岸肩橋式起重機工作派遣有基本能量的配合、空間上的限制、支援作業的因應等，均為起重機作業時應該留意的影響因素。但從中長期的角度來看，空間上的限制因素仍是排程規劃必須考慮的關鍵因素。

2.2 實務單位排程概念

本研究以租賃基隆港東岸碼頭，擁有四個席位與七部橋式起重機之 U 公司為例，說明其安排橋式起重機之概念。

1. 公平性原則，若有船舶停靠在席位上就必須指派機具作業。
2. 先依照櫃量及與船公司所簽訂之合約指派橋式起重機數量，一般的概略情形乃是作業量低於 150 櫃，指派 1 部作業，作業量在 150 櫃至 500 櫃，指派 2 部，作業量在 500 櫃至 1000 櫃，可指派 2 至 3 部。
3. 就個別船舶之艙位安排機具方式，乃從作業量最多的艙位開始裝卸，最後階段再進行微調，以使所有艙位能在預定完工時間內完成所有裝卸作業，原則上進港船舶貨櫃積載得宜應可達成，但必要時亦在航商同意下，可指派較多起重機進行趕工。
4. 先進港先服務原則，也就是在不考量靠泊碼頭前之等候、安檢速度及靠泊前置時間等狀況下，先靠港船舶的開工時間，應早於後進港船舶開工時間。
5. 先進港船舶可優先選擇碼頭停靠，優先選擇碼頭的同時，通常也等於優先選擇碼頭上效率較高之機具，或依本身需求挑選荷重較大的橋式起重機。若該公司自行安排船席，則以工作量來安排停靠之船席，將工作量較大的船舶安排在效率較佳之船席，以期儘早完成作業。
6. 受到購置及維修保養成本之影響，儘可能做到橋式起重機作業工時平均。
7. 兩機具之間的時間至少為 1.5 個艙位（約九十呎）的安全距離，預防相互碰撞。而橋式起重機本身也有防撞裝置，觸及第一段安全裝置後，會使橋式起重機減速，碰到第二段則會完全斷除橋式起重機電源。橋式起重機也設置實體之緩衝器，在發生碰撞的同時，可將機具的損害降至最低。
8. 橋式起重機須遵守禁止跨越及避免碰撞之限制。

不論是從定期航商或是碼頭營運者的角度，對於單一船舶而言，整體完工時間的縮短對雙方來說是有絕對的益處。對定期航商而言，在一個港口的完工時間縮短，表示可提早駛離該港口，若該船在靠泊前已產生延遲，則有助於追回船期。對於碼頭營運者而言，在愈短的時間完成裝卸工作，裝卸績效提升，有助於吸引其他船公司前來靠泊裝卸，增加營運業者整體利益。不過就中長期而言，裝卸業者在不影響船期下，較期望盡量讓起重機能平均使用，以維護良好待機狀態，減少故障發生，並進而減少維護成本。

後續章節，將藉由 U 公司之實務排程概念，建構戰術性橋式起重機之排程規劃模式，

並進行深入分析。良好的排程除可提升碼頭作業效率，提高船舶之靠泊艘數，從長期角度而言，也可做為橋式起重機配置數量之規劃參考。

三、模式建構

直線碼頭上之多部橋式起重機，於船邊作業時可相互支援，彈性指派運用，使進港船舶儘速離港。然而，由於其作業特性及限制，如何充分發揮起重機效能，更突顯排程規劃之重要性。本章就橋式起重機之作業特性及服務時間，建構數學模式，探討多部橋式起重機於船邊同時作業之最佳作業順序及移動路徑。

3.1 模式假設與符號定義

從戰術性角度預先規劃多部橋式起重機之船邊裝卸任務，主要目的在於盡量讓各橋式起重機之作業工時平均。除首要考量軌道之物理特性，避免橋式起重機產生相互跨越，移動範圍也僅在供電纜線長度之可及範圍內。再者，船舶須於特定作業時窗內完成裝卸，於預定時間離港。本節先就模式假設提出說明，以利進一步敘述模式內容。

本研究建構之模式主要是決策橋式起重機在服務船舶間之移動，除假設每艘船只接受同一起重機最多一次之服務外，尚有其他假設分述如下：

1. 船席及船舶部分：

- (1) 進港作業船舶數已知，且船舶抵達順序及靠泊席位，已預先安排指定。
- (2) 各船預定抵港時間、預定離港時間、準備開工時間及預計離港時間為已知。
- (3) 進港船舶裝卸作業量為已知，且其裝載平均，可供指定橋式起重機數量分攤工作。
- (4) 各船舶預定最多使用之橋式起重機數量已知。

2. 碼頭橋式起重機部分：

- (1) 部署於直線碼頭之橋式起重機數量為已知，且作業特性相近，如大車行走速度，吊臂升降、捲升速度等，機具狀況處在良好狀態，於規劃期限內均可正常運作。
- (2) 每部橋式起重機之每小時平均作業效率估計，已涵蓋拖車與作業後線之配合。

此外，對於作業性規劃層次之影響因素，如各船舶偶有翻艙之需要、司機換班所需時間、機器故障之修復、各項支援工作之候車與候機和艙蓋板之移動等，本研究暫不考慮。若其中可歸屬於與橋式起重機作業有關者，可將其加進平均作業效率當中考量；若可歸屬於某定期航班之常態性作業狀況，如空櫃載運於上層，在未卸櫃之前可能影響下層重櫃之裝卸，則可藉由裝卸作業量之調整，加以考量。

模式中以 S 表示所有船舶的集合， K 為所有橋式起重機之集合， $|S|$ 與 $|K|$ 則分別表示船舶與橋式起重機之總數。另定義 K_j 為可服務 j 船之所有橋式起重機所成的集合，受纜線長度影響無法服務之橋式起重機不在集合之中； F_j 為 j 船進港前已靠泊過與其相同船

席之船舶所成的集合； $\Omega_{(k,i,j)}$ 為與第 k 部橋式起重機服務 i 船後移動至 j 船會產生衝突指派的橋式起重機移動路徑所成的集合。其他模式中將引用之符號，定義如下：

1. 決策變數：

- m_{ij}^k ：為二元決策變數，若第 k 部橋式起重機完成 i 船之工作後，移動至 j 船進行下一工作，其值為 1，否則為 0；
- w_j^k ：為第 k 部橋式起重機，指派於第 j 艘船服務之總工作時間；
- b_j^k ：為第 k 部橋式起重機，指派於第 j 艘船服務之起始時間；
- e_j^k ：為第 k 部橋式起重機，指派於第 j 艘船服務之結束時間；
- d_j ：為第 j 艘船之離港時間。

2. 參數：

- t_{ij}^k ：第 k 部橋式起重機自 i 船靠泊席位移至 j 船靠泊席位所需之移動時間；
- f_j^k ：為第 k 部橋式起重機服務於第 j 艘船的平均裝卸效率（只／小時）；
- Box_j ：為第 j 艘船所需之作業櫃量；
- D_j^k ：為第 k 部橋式起重機在第 j 艘船之服務時間上限，若該起重機可涵蓋該船之全長，則其值即可以該船之所有櫃量換算，否則以其可涵蓋船舶全長之比率計算；
- ω ：表示每部橋式起重機於被指定服務船舶之至少應作業時間；
- n_j ：為第 j 艘船航商與裝卸公司約定使用橋式起重機數量之上限值；
- ETA_j ：為第 j 艘船之預定抵港時間（expected time of arrival, ETA）；
- I_j ：為第 j 艘船進港至開工之準備時間；
- ETD_j ：為第 j 艘船之預定離港時間（expected time of departure, ETD）；
- O_j ：為第 j 艘船完工至離港之準備時間；
- M ：為一足夠大的數。

3.2 模式內容

在進行橋式起重機排程規劃前，本研究將船席及橋式起重機按同一方向予以編號。以圖 3 為例，橫軸表席位，共有由左至右編號之 Berth 1 至 Berth 3，橋式起重機也隨此方向編號，分別為 QC1 至 QC4，縱軸表時間。而進港船舶以「①」等表示，每艘船舶的長寬即代表所需作業時間及靠泊船席。

模式內容中，以極小化橋式起重機中之最多累積作業工時為目標。本研究將橋式起重機作業工時定義為包含作業時間及移動時間，如式(1)所示。

$$Min. \quad Max_k \left\{ \sum_j w_j^k + \sum_i \sum_{j \neq i} t_{ij}^k m_{ij}^k \right\} \quad (1)$$

在限制式部分，包含下列之約束：

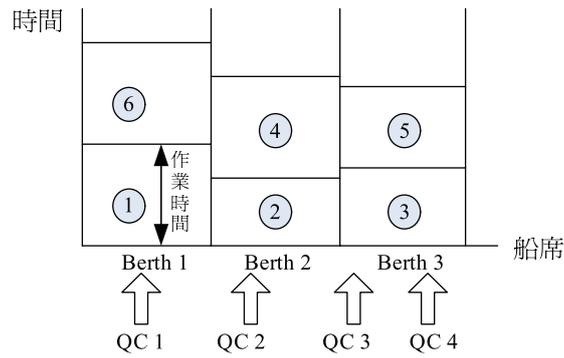


圖 3 船席與橋式起重機編號之例

1. 各橋式起重機服務船舶流量之守恆限制

本研究視每一船舶為一節點 (node)，連結兩節點之節線 (arc) 為移動路徑，同一橋式起重機服務不同席位之兩艘船後，即會產生一次移動及所需移動時間。在各橋式起重機之網路上均設置一起始節點與完成節點，分別編號為 0 與 $|S| + 1$ 。圖 4 以單一橋式起重機為例，描繪流量守恆之概念，在起始節點 (以 0 表示) 之淨流量為 +1 單位之供給，完成節點 (以 t 表示) 之淨流量為 -1 單位的需求，其餘船舶節點淨流量為 0。此一流量守恆限制式，如式 (2) 所示。

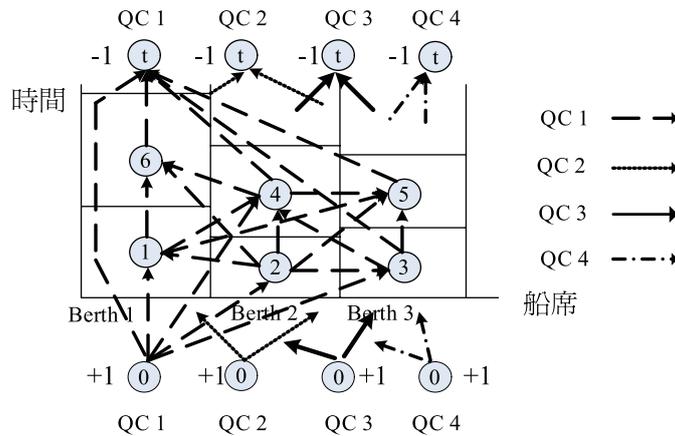


圖 4 流量守恆示意圖

$$\sum_i m_{ji}^k - \sum_i m_{ij}^k = \begin{cases} 1, & j=0 \\ 0, & \text{otherwise} \\ -1, & j=|S|+1 \end{cases} \quad \forall k, j \quad (2)$$

2. 作業時間之定義與每船最少作業時間

作業結束時間與作業開始時間差為定義之裝卸作業時間，如式 (3) 所示。此外，由於橋式起重機在進行裝卸作業前，必須有開工準備時間，過低的作業工時恐造成無謂之時間耗費。因此，訂定每部橋式起重機服務船舶之最少應作業時間限制，避免每次受指派之橋式起重機僅產生微量之作業時間，如式 (4) 所示。在橋式起重機效率許可之情況，使用較少部橋式起重機以供作業，對裝卸公司而言，可將多餘之機具做更有效率之指派；對航商而言，也可省下橋式起重機使用之費用。然而每船最少應作業時間之訂定，不得低於規劃期間最少作業櫃量船舶之所需工時，以免邏輯上產生衝突造成無可行解情況。

$$w_j^k = e_j^k - b_j^k \quad \forall j, k \in \mathbf{K}_j \quad (3)$$

$$w_j^k \geq \varpi \sum_i m_{ij}^k \quad \forall j, k \quad (4)$$

3. 確保完成所有裝卸任務限制

個別船舶不論指派幾部橋式起重機作業，最後加總之作業櫃量必須等於該船所需作業之櫃量，如式 (5) 所示。

$$\sum_{k \in \mathbf{K}_j} f_j^k w_j^k = \text{Box}_j \quad \forall j \quad (5)$$

4. 移動路徑與服務結束時間之對應限制

橋式起重機若指派至某船舶，即表示其必從某一節點移動至目前服務之船舶，所產生的移動路徑，可利用服務結束時間對應之，如式 (6) 及 (7) 所示。該兩限制式將使某橋式起重機移動至某船舶，即產生裝卸作業之服務結束時間；反之，若橋式起重機未移動至該船，則不會產生裝卸作業之服務結束時間。服務結束時間與移動路徑乃為相互約束之限制，若其中一式成立，另一式必為非約束 (unbinding) 限制式。

$$e_j^k \leq M \sum_i m_{ij}^k \quad \forall j, k \quad (6)$$

$$\sum_i m_{ij}^k \leq M e_j^k \quad \forall j, k \quad (7)$$

5. 使用機具數之限制

航商按照船舶服務航線特性估計各港裝卸作業量，進一步安排船期。並就預定進離港時間之考量，與裝卸公司訂定使用橋式起重機之契約。裝卸公司部署於船舶使用之橋式起重機數量，應不超過航商與裝卸公司訂定之使用數量。限制式中只要加總進入各船的起重機移動路徑數，即可計算部署的橋式起重機數量，如式 (8) 所示。

$$\sum_k \sum_i m_{ij}^k \leq n_j \quad \forall j \quad (8)$$

6. 起始作業時間之限制

橋式起重機所服務之船舶若非靠泊同一船席，則起始作業時間需在結束上一船舶裝卸任務，並在下一船舶已於預定時間進港靠泊，且完成開工作業前準備之情況下，移動至下一個將欲執行裝卸任務之船舶，始得於該船開始作業。若橋式起重機服務之前後船舶靠泊於同一船席，除需遵守上述之限制外，更要求前一服務船舶必須離港後，才能繼續執行下一船舶之服務。式 (9) 與 (10) 分別利用橋式起重機移動路徑，建構其滿足服務船舶起工與完工時間之約束；式 (11) 則是橋式起重機連續服務靠泊同一船席之船舶，接續時間與船舶離港時間之關係。

$$b_j^k \geq (ETA_j + I_j) \sum_i m_{ij}^k \quad \forall j, k \in \mathbf{K}_j \quad (9)$$

$$b_j^k + M(1 - m_{ij}^k) \geq e_i^k + t_{ij}^k \quad \forall k, i, j \quad (10)$$

$$b_j^k + M \left(1 - \sum_i m_{ij}^k \right) \geq d_p + I_j \quad \forall j, k \in \mathbf{K}_j, p \in \mathbf{F}_j \quad (11)$$

7. 離港時間之限制

進港船舶在所有服務於該船之橋式起重機結束裝卸作業，並完成離港準備後，始得離港，式 (12) 約束此一限制，式 (13) 則使各船都必須在表訂時間前離港。

$$d_j + M \left(1 - \sum_i m_{ij}^k \right) \geq e_j^k + O_j \quad \forall j, k \in \mathbf{K}_j \quad (12)$$

$$d_j \leq ETD_j \quad \forall j \quad (13)$$

8. 橋式起重機之移動範圍限制

橋式起重機於直線碼頭上之移動範圍，受限於供電纜線長度限制，行走範圍僅能達纜線長度之兩倍（向左延伸及向右延伸），可及席位有限，在兩端盡頭所涵蓋之範圍未必為一完整席位。模式中將每部橋式起重機於每艘船可及範圍程度，轉換為橋式起重機於船舶之可作業時間，計算方式為：船舶作業櫃量 \times 可及範圍比率 \div 該部橋式起重機之作業效率。如此可限制各橋式起重機在各船之作業工時上限，如式 (14) 所示。

$$w_j^k \leq D_j^k \quad \forall j, k \in \mathbf{K}_j \quad (14)$$

9. 橋式起重機移動路徑限制

多部橋式起重機於多艘船舶之間移動支援，須避免相互間發生相互跨越情況。由於各船預計進、離港時間已知，橋式起重機在空間上的順序亦為已知，因此編號較大之橋式起

重機，自編號較大之船席移動至編號較小之船席之移動路徑，可能會與編號較小之橋式起重機，自編號較小船席移動至編號較大船席間，發生交叉互相跨越之情況。以圖 5 為例，QC 1 自 ship1 移動至 ship4 服務，最後停駐於 ship4 所在之席位，QC 2 及 QC 3 欲服務 ship3，由於 ship3 靠泊之席位小於 ship4，其移動路徑與 QC 1 的產生交叉跨越之情況，意即 QC 1 之移動路徑產生，即無法指派 QC 2 及 QC 3 於 ship 3 服務。式(15)針對每一橋式起重機之每一移動路徑，約束與其產生交叉跨越的其他起重機移動路徑，不能同時生成。

$$\sum_{(k',p,q) \in \Omega_{(k,i,j)}} m_{pq}^{k'} \leq M(1 - m_{ij}^k) \quad \forall k, (i, j) \quad (15)$$

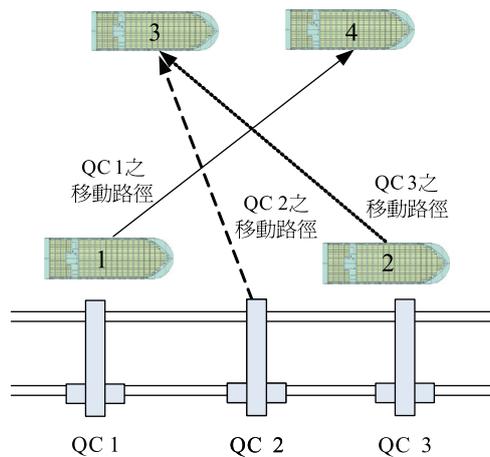


圖 5 禁止跨越示意圖

我們可以進一步分析橋式起重機的可行路徑，在時間空間上的關連上，多部橋式起重機必須同時向同一方向移動，意即所有橋式起重機皆自編號較小之船席向編號較大之船席移動，或自編號較大之船席向編號較小之船席移動。此外，編號較小之橋式起重機自編號較小之船席移動至編號較大之船席，編號較大之橋式起重機自編號較大之船席移動至相同之船席；抑或兩部橋式起重機皆自同一船席移出，編號較小之橋式起重機移至編號較小之船席，編號較大之橋式起重機移動至編號較大之船席，相互之移動路徑均不受干擾。

10. 使用相鄰機具之限制

多部橋式起重機指派於船舶裝卸作業時，理應由相鄰機具服務同一船舶，以圖 6 之 QC1, QC2 及 QC3 為例，若該船僅能指派兩部橋式起重機，應指派 QC1、QC2 或 QC2、QC3。若指派 QC1 與 QC3 進行裝卸，位於中間之 QC2 不做任何使用，QC2 如處於正常待機狀態，此種配置直覺上是較無效率的安排，不但可能阻礙裝卸工作的進行，更縮減了相鄰橋式起重機之可移動範圍；同時，此部橋式起重機更無法於該時段內接受其他指派，閒置情況造成資源之浪費。基於本研究從戰術性角度考慮，應避免此種情形，式 (16) 從編號

較小的起重機開始，判斷間隔一部機具以上的兩兩橋式起重機，若在同一艘船服務時，中間所夾之起重機也都必須服務該船舶。

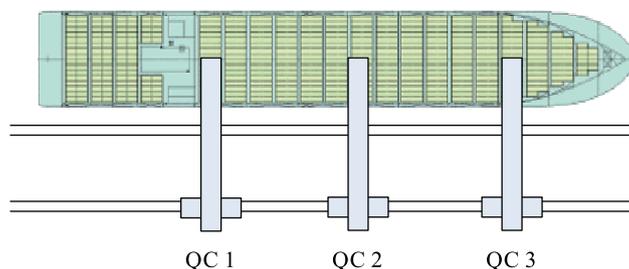


圖 6 使用相鄰機具示意圖

$$\sum_{r=k+1}^{k'-1} \sum_i m_{ij}^r \geq (k'-k-1) + M \left(\sum_i m_{ij}^k + \sum_i m_{ij}^{k'} - 2 \right) \quad \forall j, k=1, \dots, |\mathbf{K}|-2, k'=k+2, \dots, |\mathbf{K}| \quad (16)$$

11. 變數限制

前述模式包含橋式起重機之移動路徑、起始作業及結束作業時間、實際作業時間及船舶離港時間等五項變數。其中，移動路徑即涵蓋是否服務船舶之決策，為 0-1 變數，而其餘變數為時間型態之決策變數，具有非負連續之特性，如式 (17) 所示。

$$m_{ij}^k \in \{0, 1\}; e_j^k, b_j^k, w_j^k, d_j \geq 0 \quad (17)$$

式 (1) 至 (17) 之模式為一極小極大化問題，若令 Z 為所有橋式起重機中最多之累積作業工時，式 (18) 恰可表達 Z 之意涵，同時上述之模式可以混合整數規劃模式 [M] 表達。

$$Z \geq \sum_j w_j^k + \sum_i \sum_{j \neq i} t_{ij}^k m_{ij}^k \quad \forall k \quad (18)$$

[M] *Min.* Z

s.t. (18) and (2) ~ (17)

模式 [M] 可利用求解混合整數規劃模式之演算法進行求解，本研究利用商用最佳化軟體所提供之分枝界限法 (branch-and-bound method) 進行求解測試發現，在實務單位一週案例中之求解效率仍在可接受之範圍，因此後續將以此進行正確解之求算。

四、實證分析

本章以 U 公司 2004 年 11 月份碼頭靠泊及實際作業量等資料進行實證分析，並利用 ILOG 公司之數學規劃軟體 OPL Studio^[9] 進行程式編譯與求解，並使用 INTEL Pentium 4，2.4 GHz CPU，760MB RAM，作業系統為 Microsoft Windows XP 之個人電腦執行案例測試，以驗證模式之正確性及適用性。

4.1 實證案例背景

U 公司於基隆港東岸租用之貨櫃場地屬於狹長型四個席位的直線碼頭，使其易於安排船席及彈性運用岸邊橋式起重機，本小節僅就船席、使用之橋式起重機以及進港船舶資料，分別描述測試之案例：

1. 船席介紹

該業者所經營之貨櫃中心為一直線碼頭，全長共 860 公尺，後線面積約為 7.2 公頃，分為四座席位，平均碼頭縱深為 103 公尺，配有七部橋式起重機。在碼頭長度部分，分別為 240 公尺、220 公尺，以及剩餘兩座為 200 公尺，水深皆在 12 至 13 公尺左右，寬度約為 76 公尺，除 8 號碼頭外，均配置兩部橋式起重機，提供 2500 TEU 以下貨櫃船舶靠泊進行裝卸。七部橋式起重機同在一組軌道，對於橋式起重機之指派需有詳細規劃之必要性，船席相關資料如表 2 所述。

表 2 實例之船席資料

船席編號	長度(公尺)	水深(公尺)	寬度(公尺)	橋式起重機數目	可靠泊貨櫃船級
8	240	-12	76	1	1500 TEU
9	220	-12	76	2	2500 TEU
10	200	-12 ~ -12.5	76	2	2500 TEU
11	200	-13	76	2	2500 TEU

資料來源：裝卸業者提供。

2. 使用橋式起重機之資料

配置於該貨櫃中心之七部岸肩橋式起重機，係由港務局購買，經營業者向港務局承租，並負擔維護保養之責任。主要採用 Mitsubishi 及 Afatek 公司所製造之橋式起重機，額定荷重最大為 50 公噸，最小為 35 公噸，平均約為 40 公噸左右。可承作櫃排 (row) 視前伸距而定，前伸距可達 37 公尺者，可承作櫃排為 13 排，達 45 公尺者，可承做櫃排為 16

排。在後伸距部分，可及範圍皆為 15 公尺，而甲板下可承作櫃層 (tier) 為 8 層，詳細資料整理如表 3 所示。

表 3 實例之橋式起重機規格

橋式起重機 編號	廠牌	荷重 (公噸)	前伸距 (排)	後伸距 (公尺)	甲板下 作業櫃層
1	Mitsubishi	40	37 公尺(13)	15	8
2	Mitsubishi	40	37 公尺(13)	15	8
3	Afatek	40	45 公尺(16)	15	8
4	Afatek	40	45 公尺(16)	15	8
5	Afatek	50	45 公尺(16)	15	8
6	Mitsubishi	35	37 公尺(13)	15	8
7	Afatek	35	45 公尺(16)	15	8

資料來源：裝卸業者提供。

此外，依據實際訪談得知，船舶自靠泊後至開始執行裝卸作業，及完工後準備離港之時間，約為半小時。而橋式起重機於直線碼頭上，各船席相互支援作業，自目前所在席位移動至目標席位，平均而言，移動一個席位約需 30 分鐘左右。在作業效率方面，由於每部橋式起重機於每次作業時，所受到的干擾因素及延遲時間不一，基於中期戰術性規劃考量，採單月平均作業效率，各項數據如表 4 所示。

3. 進港船舶各項資料

本研究乃以定期貨櫃航商泊靠之貨櫃碼頭為主體，由於定期航商在市場上提供固定的航線，並採定期定港泊靠之週班服務 (weekly service)。因此，本研究根據碼頭經營業者之訪談，採一星期實際之裝卸資料，取船舶之船名、進港日期、靠泊碼頭、作業櫃數、預定抵港時間、預定離港時間，以及與裝卸業者訂定契約之使用橋式起重機數量，作為實例測試之參數，如表 5 所示。該星期進港船舶共 23 艘，分別靠泊於 E8 至 E11 四座碼頭，並依約定派予橋式起重機之數量，裝卸業者需在此條件下，於預定離港時間前，完成所需之裝卸作業。

4.2 模式求解結果及分析

利用 4.1 節之參數資料，並將本研究所設計之數學模式轉換為 OPL 程式語言，進行實際案例之求解，求解時間為 68.23 秒。茲將所得結果分為以下三部分加以剖析。

表 4 實例之其他相關數據

橋式起重機 編號	鄰近席位之平均 移動時間(小時)	開工前裝卸準備 時間(小時)	完工後離港準 備時間(小時)	每船最少作業 時間(小時)	作業效率 (櫃數/小時)
1	0.5	0.5	0.5	3	21
2	0.5	0.5	0.5	3	19
3	0.5	0.5	0.5	3	22
4	0.5	0.5	0.5	3	21
5	0.5	0.5	0.5	3	23
6	0.5	0.5	0.5	3	17
7	0.5	0.5	0.5	3	23

資料來源：裝卸業者提供。

表 5 進港船舶資料

日期	船名	碼頭	預定抵港 時間*	預定離港 時間*	作業量 (櫃數)	使用橋式起 重機數量
11/6 (六)	A1	E10	10	17	490	4
	B2	E9	13	21	209	2
	C3	E8	13	32	564	2
11/7 (日)	D4	E9	24.5	39.5	245	1
	E5	E10	32	50	529	2
	F6	E11	32.9	41.5	152	1
	G7	E9	40	58	592	2
	H8	E8	43	58	350	2
11/8 (一)	I9	E10	51	58	319	3
	J10	E9	61.5	77	396	2
11/9 (二)	K11	E8	76	92	497	2
	L12	E10	81.5	87	254	3
	M13	E8	93.5	100	68	1
	N14	E9	89	105	334	2
	O15	E10	93	102	297	2
11/10 (三)	P16	E9	106	123	494	2
	Q17	E10	104	116	475	2
	R18	E8	115	122	239	2

表 5 進港船舶資料 (續)

日期	船名	碼頭	預定抵港時間*	預定離港時間*	作業量(櫃數)	使用橋式起重機數量
11/11 (四)	S19	E8	130	158.5	932	2
	T20	E9	126	139	426	2
	U21	E10	127.5	143	401	2
11/12 (五)	V22	E9	149	161	320	2
	W23	E10	162	172	323	2

註：*表預定抵港時間、預定離港時間已換算為一週 168 小時之計算週時。
資料來源：裝卸業者提供。

1. 移動路徑

由圖 7 及表 6 所示，七部橋式起重機於規劃期間之移動路徑，主要呈現於同一席位移動及相鄰席位間之移動二種型態，且以前者為主。此結果顯示船席於繁忙情況時，橋式起重機能發揮共用碼頭之特性及效益，協助相鄰機具在船舶預定進、離港之緊迫時間內，完成鄰近船席之裝卸作業，縮短船舶在港停留時間。不過，為簡化工作指派以及避免橋式起重機於船席間之移動，而造成移動時間及機具本身等無謂之耗費，移動範圍盡量於同一船席之內，對進港船舶提供有效率之裝卸服務。

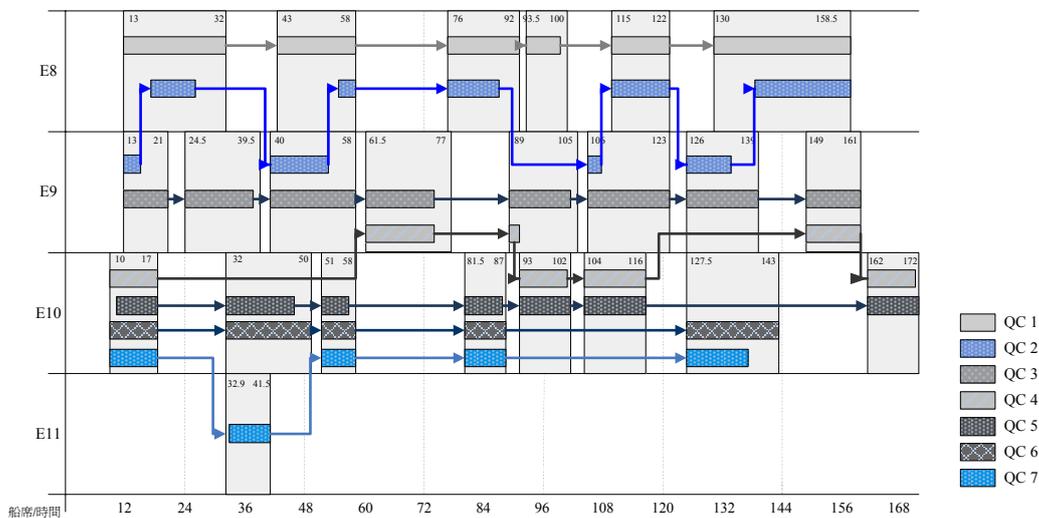


圖 7 模式求解之移動路徑

表 6 模式求解之船舶服務

橋式起重機編號	模式求解之服務船舶順序	服務船舶數
QC1	S→3→8→11→13→18→19→T	6
QC2	S→2→3→7→8→11→16→18→20→19→T	9
QC3	S→2→4→7→10→14→16→20→22→T	8
QC4	S→1→10→14→15→17→22→23→T	7
QC5	S→1→5→9→12→15→17→23→T	7
QC6	S→1→5→9→12→21→T	5
QC7	S→1→6→9→12→21→T	5

2. 平均工時之目標

求解結果顯示，最長作業時間為 QC3 之 86.59 小時，最短的為 QC7 的 29.83 小時，移動次數最多者則為 QC2，共跨船席移動 7 次，其他有兩部移動 2 次，四部保持在同一船席，沒有任何跨船席作業，詳如表 7 所示。而負擔最高作業工時之起重機，則為 QC2 與 QC3 兩部，同為 86.59 小時。進一步分析，位於 E8 及 E9 兩船席之進港船舶，主要由 QC1 至 QC3 之橋式起重機進行作業，而 QC4 受限於可及範圍之限制，僅於 E9 與 E10 碼頭間，針對靠泊占用兩船席之船舶以及少數船舶進行支援作業。剩餘 E10 及 E11 的工作，則由 QC5 至 QC7 負責完成，且作業工時呈現遞減之狀態。對照進港船舶資料，整理各船席作業總量，發現在此規劃期間，席位 E8 總作業量為 2,650 櫃，E9 為 3,016 櫃，E10 為 3,088 櫃，而 E11 為 152 櫃，如圖 8 所示。E8 及 E9 作業量之加總，約為 E10 及 E11 之 1.7 倍。由此可知，工作分佈的不平均，乃是使得 QC1 至 QC3 工作時間，高於 QC4 至 QC7 之主要原因，尤其反映在配置於 E11 碼頭之 QC6 及 QC7，幾乎為兩倍左右之比值。

表 7 橋式起重機作業工時

橋式起重機編號	作業時間(小時)	跨船席移動次數	移動時間(小時)	作業工時(小時)
QC1	83.69	0	0	83.69
QC2	83.09	7	3.5	86.59
QC3	86.59	0	0	86.59
QC4	49.13	2	1.0	50.13
QC5	50.09	0	0	50.09
QC6	48.00	0	0	48.00
QC7	29.83	2	1.0	30.83

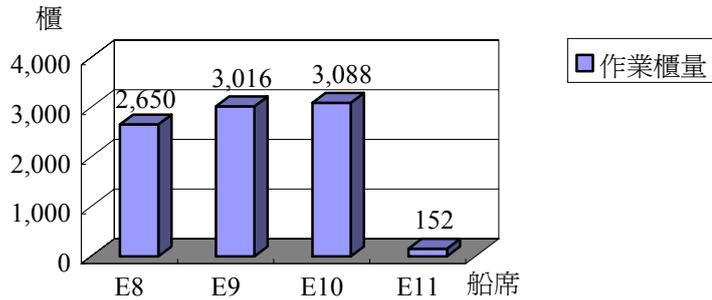


圖 8 每船席之作業總量

3. 單一橋式起重機之起始及結束時間

深入探討每部橋式起重機於每個工作之起始工作時間及結束時間，並對照移動路徑圖 7 可知，作業時間主要有兩種類型，一為實際作業時間在預定進港時間半小時後，直至預定離港時間半小時前，即於可作業時間幾乎完全參與裝卸工作；其次為實際作業時間僅占可作業時間之一部分，茲就兩種作業時間之類型所衍生之三種結果，分別加以討論。

- (1) 全部機具皆為全程參與裝卸之型態：此種情況通常發生在約定使用機具數量為一部，或者預定抵港時間至預定離港時間相當緊湊所造成，如 E9 的 D4 船、E10 的 Q17 船。
- (2) 全部機具有全程參與裝卸及部分參與裝卸之型態：此種情況為求解結果所呈現之主要狀態。探究其原因，主要是在航商所訂之預定進港時間及預定離港時間內，以最少數量之其中一部或多部橋式起重機擔任主要作業之機具，自進港後執行裝卸作業至離港前，剩餘之櫃量由另一部橋式起重機完成，如 E8 的 C3 船、E10 的 U21 船等。
- (3) 全部機具皆為部分參與裝卸之型態：此種情況對於碼頭裝卸業者來說，有相當充裕之時間進行裝卸作業，因此，裝卸業者在不違航商之預定離港時間為前提下，可採取此一戰術性工時分攤的策略，如 E9 的 J10 船、E11 的 F6 船。

對照表 8 之裝卸業者實際營運結果，模式求解之結果並未與之相同。實際營運的最長作業工時為 QC4 之 96.71 小時，高出求解結果 10.12 小時。在移動路徑部分，模式求解之結果，支援鄰近船席之橋式起重機主要發生於 QC2 及 QC4 及 QC7，且以 QC2 擔任支援角色之情況最為明顯。而實際營運之支援情況，分散於多部橋式起重機，如 QC2、QC3、QC4、QC5 及 QC7，幾乎所有資源皆產生了跨船席之移動，不過主要是由 QC4 擔任支援角色。

表 8 實際營運之移動路徑

橋式起重機編號	實際營運之移動路徑	服務船舶數	作業工時(小時)	跨船席移動次數
QC1	S→3→8→11→13→18→19→T	6	74.11	0
QC2	S→3→8→11→14→16→18→19→T	7	76.67	2
QC3	S→2→4→7→12→14→16→20→T	7	63.00	2
QC4	S→1→2→5→7→9→10→12→15→17→20→22→23→T	12	96.71	8
QC5	S→1→5→9→10→12→15→17→21→22→23→T	10	85.39	4
QC6	S→1→9→21→T	3	22.06	0
QC7	S→1→6→T	2	13.76	1

資料來源：裝卸公司提供。

求解結果與實務分派情形之作業工時，可從圖 9 之比較得知。實際營運之工作分派大部分集中在 QC4 與 QC5，其次為 QC1、QC2、QC3，QC6 和 QC7 的使用率最低。其原因除因船席選擇之結果外，從表 3 中之荷重與前伸距可發現，QC5 為七部橋式起重機中性能最佳者，其次為 QC3、QC4 和 QC7，在起重機工作分配上自然倚重性能較佳者，也造成前兩部橋式起重機太多的移動性支援。而 QC7 因受 QC6 之阻隔，以致未能發揮其應有之功能；裝卸公司若欲提升碼頭效能，應可優先考慮將兩者進行對調。模式求解所得結果乃是將所有橋式起重機均視為相同性能者，各部起重機之作業工時因而較為平均。

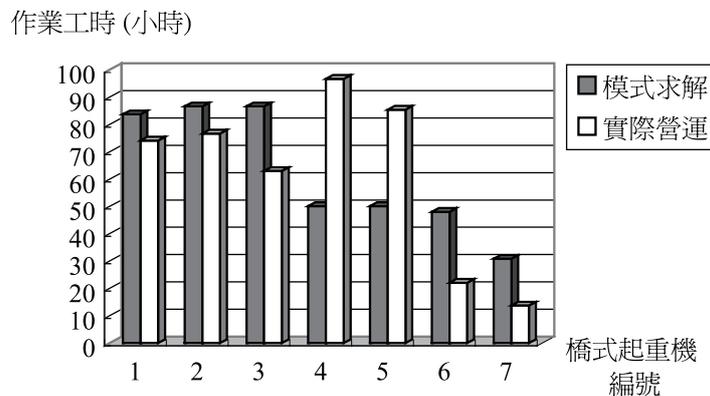


圖 9 模式求解結果與實際作業工時之比較

五、敏感性分析

本節針對橋式起重機服務每船至少應作業時間的改變、提升整體裝卸效率、平均各船席之作業櫃量及依橋式起重機可及範圍比率分配各船席之作業櫃量等參數與情境，分別解析對求解結果之影響。

(一) 橋式起重機在每船至少應作業時間 (ω) 的改變

利用每次累加 0.5 小時之方式，使橋式起重機在每船至少應作業時間自 0.5 小時累加至 3 小時，求解結果如表 9，並將其繪於圖 10。比較增加 ω 對於作業工時的改變，結果發現 QC1、QC2、QC3 在增加 ω 後，對作業工時的影響幾乎是微乎其微，表示此三部橋式起重機服務指派結果，已無法透過相互支援或其他第四部橋式起重機之支援，而降低最多作業工時。其次，QC4 至 QC7 隨每船至少應作業時間之增加，反映於作業工時不斷的波動，表示在工作分配不均勻之情況下，未達最適利用之橋式起重機，作業工時易受 ω 之影響。再者，不論 ω 如何變動，QC6 或 QC7 之作業工時幾乎都在最低的位置，更加突顯 E11 碼頭靠泊艘數過少，作業量遠低於其他碼頭的事實。

(二) 整體裝卸效率的提升

橋式起重機作業效率的提升，可視為每小時作業櫃數的增加，藉由每次提升 5% 之效率至 25%，觀察其對求解結果之影響。表 10 顯示增加裝卸效率百分比對各橋式起重機作業工時的影響，從中可發現，裝卸效率提升改變了橋式起重機工作分配，且由於橋式起重機於每船作業時間之計算方式，為總裝卸櫃量除以橋式起重機之每小時作業效率，因此橋

表 9 橋式起重機在每船不同之至少作業時間下的作業工時

單位：小時

橋式起重機 編號	每船至少應作業時間 (小時)					
	0.5	1	1.5	2	2.5	3
QC1	83.74	83.74	83.74	83.74	83.74	83.69
QC2	86.57	86.57	86.57	86.57	86.57	86.59
QC3	86.57	86.57	86.57	86.57	86.57	86.59
QC4	65.51	66.70	63.73	43.25	63.64	50.13
QC5	42.09	50.09	40.20	56.93	46.36	50.09
QC6	33.54	25.94	29.24	51.64	30.26	48.00
QC7	35.93	32.00	41.71	28.03	35.78	30.83

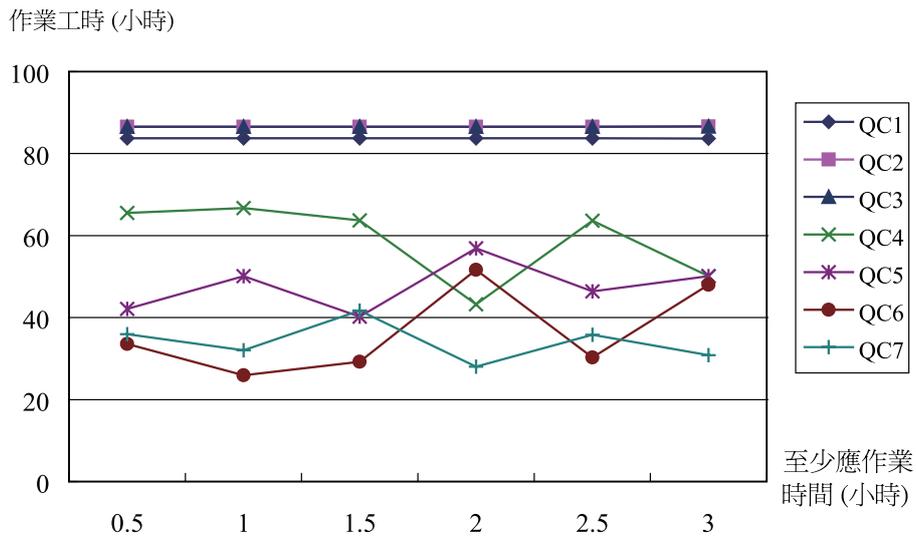


圖 10 各至少應作業時間對作業工時之影響

式起重機於每小時作業櫃量增加，不但有助於降低橋式起重機之作業工時，整體而言，更能縮短七部橋式起重機作業時間的差距，詳如圖 11 之示意。

圖 12 進一步整理裝卸效率提升後，在不影響各船之表訂進、離港時間下，對使用橋式起重機數量的影響，圖中顯示，增加橋式起重機裝卸效率 15%，使用六部橋式起重機即可完成所有裝卸作業；效率提升 30%，則僅需五部橋式起重機；當效率增加 200%，此一規劃期間即可調整為指派四部橋式起重機。顯然，效率愈高，需使用機具數量愈少，當使用橋式起重機數量每減少一部時，必須增加相當幅度之橋式起重機作業效率，推斷此現象導因於橋式起重機可及範圍之限制。第四部橋式起重機於席位 E11 之可及範圍僅達 30%，

表 10 增加裝卸效率百分比之橋式起重機作業工時

單位：小時

橋式起重機 編號	效率增加百分比					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
QC1	83.69	81.71	78.98	74.14	70.27	67.41
QC2	86.59	81.71	79.22	74.14	70.27	67.41
QC3	86.59	81.71	79.22	74.14	70.27	67.41
QC4	50.13	77.31	42.17	48.38	44.04	67.41
QC5	50.09	46.33	44.43	54.31	70.27	35.86
QC6	48.00	22.50	40.94	26.23	24.78	25.79
QC7	30.83	21.00	31.50	26.82	13.78	19.49

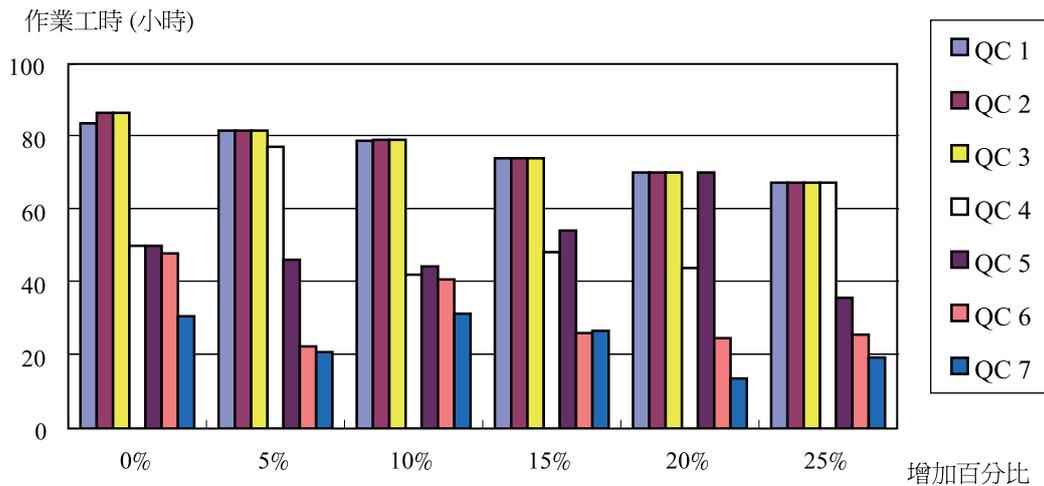


圖 11 提升裝卸效率對平均作業工時之影響

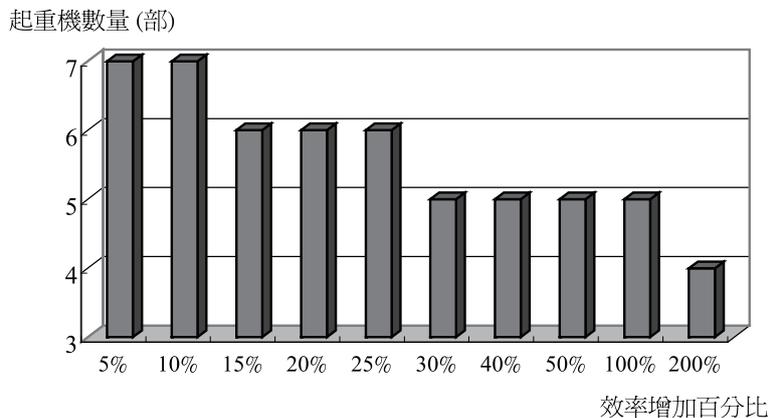


圖 12 提升裝卸效率後對橋式起重機使用數量之影響

依本研究將可及範圍轉換為作業時間之原則來看，作業時間其實有限，因此若要將使用機具數量降至四部，必須相對增加相當幅度之作業效率，使第四部橋式起重機可完成最後一席位 E11 之作業量，並與其餘橋式起重機加速完成其可及範圍之工作。

(三) 平均各船席之作業櫃量

由前一小節得知，QC 作業工時之差異，初步判斷導因於船席指派的不均等。因此，在不更動船舶預定進、離港時間窗之前提下，對此部分做一假設性之情境微調，依平均每船席櫃量之原則，安排船舶席位，依序將船舶 B2、船舶 G7、船舶 K11、船舶 Q17 及船舶 W23 移往作業櫃量較少之 E11 席位，使四個席位之作業櫃量趨於平均。而最後五艘船均

移動船席後之情境，其貨櫃作業量情形如圖 13 所示。

圖 14 比較依序移動五艘船舶之五種情境下，對於整體橋式起重機作業工時之影響。結果發現，當各席位之作業櫃量趨近於平均時，前三部橋式起重機之作業工時會逐漸下降；相對的，QC6 及 QC7 之作業工時隨著作業量之增加而呈現上升之趨勢。雖然最長作業工時之橋式起重機因作業量平均而下降，但仍無法達到整體橋式起重機作業工時平均之最終目標，除因受限於供電纜線可及長度之限制外，橋式起重機服務範圍之明顯分野實已非常明確，QC1 至 QC3 主要負責席位 E8 及 E9 之作業，QC4 至 QC7 則為席位 E10 及 E11 之船舶提供裝卸服務。因此，如欲達成平均整體工時之目標，應盡量依橋式起重機可及範圍比率，分配各船席之作業櫃量。

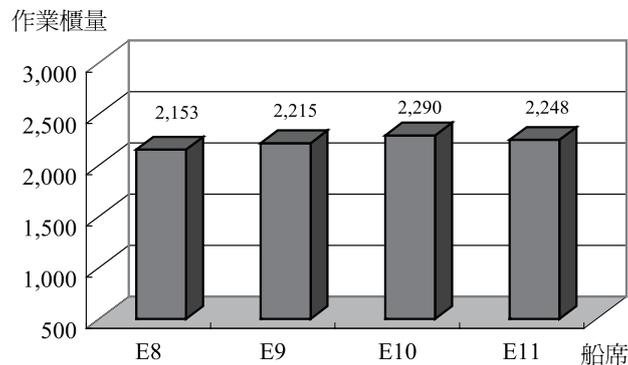


圖 13 移動五艘船舶後各席位之作業櫃量

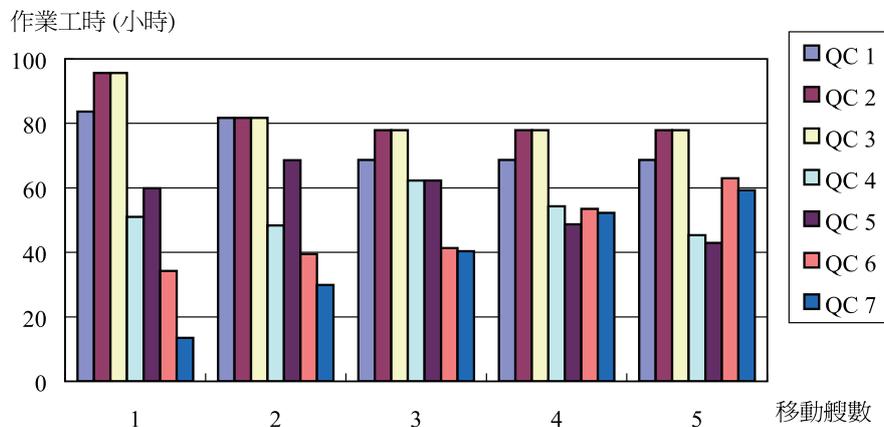


圖 14 各席位作業量改變對平均工時之影響

(四) 依橋式起重機可及範圍比率分配各船席之作業櫃量

同樣的，在不更動船舶之預定進、離港時間窗前提下，依橋式起重機可及範圍比率分

配嘗試將船舶 B2、船舶 G7、船舶 K11、船舶 N14 及船舶 T20 依序移至席位 E11，使席位 E8 與 E9 作業櫃量最後占整體作業櫃量之 42.8%，而席位 E10 與 E11 作業櫃量比率為 57.2%，並比較各船席櫃量趨於上述比率之情境時，對於整體橋式起重機作業工時之影響。如圖 15 所示，最長作業工時依上述情境逐漸減少，七部橋式起重機之作業工時也隨著櫃量分配之比率，愈趨向於平均化。再深入將最後情境之各船席作業櫃量分配情況與實際營運狀況對照，如圖 16，發現若能將席位 E8 及 E9 之作業量部分移至 E11，對於改善橋式起重機之間作業工時不平均之狀況有相當顯著之功效。

(五) 小結

在本章節中，主要利用裝卸業者所提供之碼頭配置部署資料進行實證分析，求解結果發現，在移動路徑部分，橋式起重機應儘量於同一船席內對進港船舶提供裝卸服務，以免跨船席移動次數過多，造成移動時間及機具本身之耗費。再者，受限於橋式起重機移動限

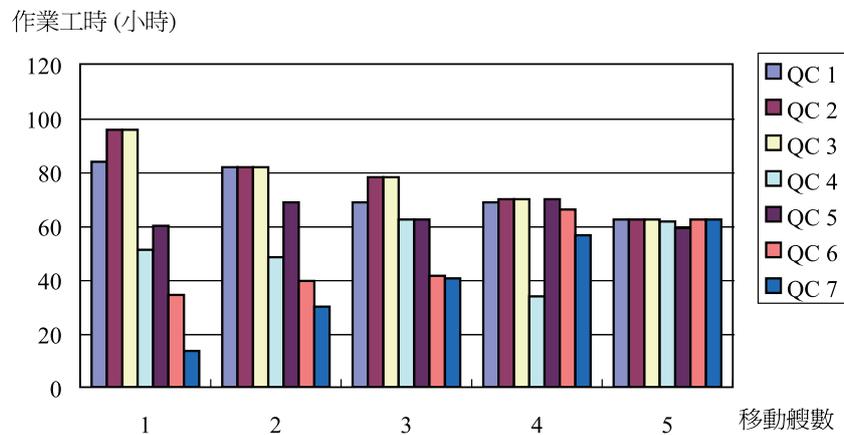


圖 15 依橋式起重機可及範圍比率分配各船席之作業櫃量對平均工時之影響

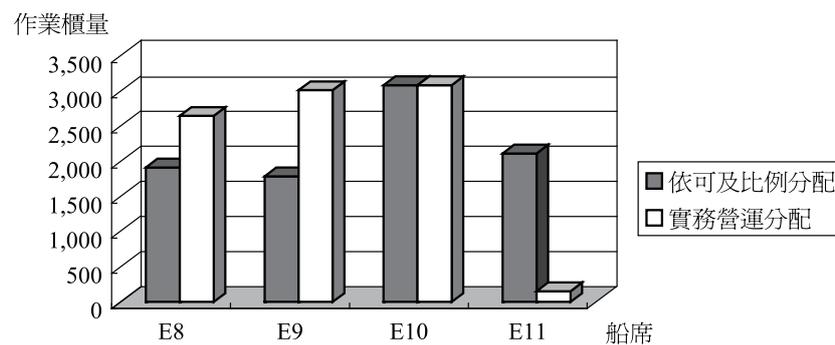


圖 16 各船席作業櫃量分配結果對照實際營運情況

制，每部橋式起重機服務範圍有限，從指泊結果可知，每船席所需作業櫃量分佈不一，乃造成橋式起重機作業工時之差異。而就船舶所有服務之橋式起重機使用狀況，可分為全程參與裝卸工作、部分參與裝卸工作及兩者之組合。

再利用敏感性分析深入探討不同參數與情境對於作業工時之影響，獲知：

1. 已達最大利用之橋式起重機，面對每船至少應作業時間改變，作業工時幾乎不受影響。
2. 作業效率之提升，有助於降低橋式起重機作業工時，並縮短相對差距。在特定規劃期間內，當橋式起重機作業效率增加至一定幅度，即可利用較少數量之橋式起重機來完成所有進港船舶裝卸任務，但減少使用之橋式起重機數量愈多，效率增加幅度需愈大。
3. 平均各船席作業櫃量，雖可降低最長之作業工時，但仍無法平均橋式起重機之作業工時，其原因乃因橋式起重機服務範圍之限制，若依橋式起重機可及範圍比率分配各船席之作業櫃量，則可有效改善上述之情形。

六、結論與建議

本研究針對直線碼頭之橋式起重機排程規劃，藉由貨櫃碼頭裝卸實務之深入了解，輔以國內外相關研究，彙整出問題特性，並據此概念建構數學規劃模式。之後以裝卸業者所提供之實際營運資料，利用商用最佳化軟體 OPL Studio 進行模式求解，評估模式之求解品質及求解效率。謹就研究成果歸納結論與建議，分述如後。

6.1 結論

1. 本研究針對直線碼頭之橋式起重機系統特性做一深入分析，了解實務單位最適化作業型態，以作為作業性層面之規劃參考，確實達成本研究之研究目的。
2. 配置於直線碼頭之多部橋式起重機，移動僅限於同一軌道系統，考量其排程特性，需注意依序移動、避免碰撞、使用相鄰機具服務、越船橋須將吊臂升起、船舶長度與作業艙位、供電纜線長度、拖車支援、橋式起重機能力及操作人員經驗等事項，其中，橋式起重機之供電纜線長度乃實際移動之可及範圍。
3. 以往探討橋式起重機排程規劃，多以單一船舶之艙位作為作業單位，處理問題方式及考量層面偏向作業性層級規劃。本研究以戰術性層級，進行多部橋式起重機於直線碼頭之路徑規劃，以船舶為作業單位，以達成裝卸公司對橋式起重機使用之中程規劃目的。
4. 席位繁忙時，位於中間席位之橋式起重機能發揮共用碼頭之特性，相互支援，使得作業有效率，船舶能儘速離港，且相互支援之範圍，以左右相鄰席位為主，不超過一個以上之席位；不過，依求解結果顯示，最佳化之指派應儘量使橋式起重機於同一船席作業，減少船席間之移動，對進港船舶提供有效率之裝卸服務，以避免產生如移動時間，機具耗用等不必要之浪費，此點結論與實務單位對橋式起重機指派之概念相符。

5. 從敏感性分析中發現，橋式起重機作業效率的提升，可使整體橋式起重機之作業工時下降；平均分配席位上之作業櫃量，則可有效縮短最長作業工時橋式起重機與最短作業工時橋式起重機之差距；若欲達成平均各部橋式起重機作業工時之目標，最有效之方式則為檢視橋式起重機於各船席之可及範圍，依此比率安排靠泊船席，分配各船席之作業櫃量，即可使整體橋式起重機之作業工時達成平均化之理想。

6.2 建議

1. 本研究建構之模式配合實務單位之考量，以追求多部橋式機作業工時平均化為目標，後續研究應可考慮從其他方向進行探討，如橋式機之最少移動、最短裝卸時間或作業橋式機數量最少等，以提供實務單位另一層面之思考。
2. 有鑑於本研究之問題複雜程度較高，以致於求解時間需用一分半鐘左右，雖已屬相當有效率之求解時間，但未來仍可針對求解演算法作進一步設計。
3. 本研究試圖探究貨櫃碼頭裝卸作業機具調派之課題，並研析相關作業之程序與內涵，據以利用定性與定量方法加以探討。但從文獻回顧可知，橋式起重機排程之研究領域，國內外學者涉及尚少，因此在處理問題時必須作許多研究假設，建議後續研究可試圖放寬研究限制，加入橋式起重機故障時間、候車時間、候櫃時間、艙蓋時間等干擾因素，或將拖車支援規劃一併加入探討，以求能更貼近實務問題。
4. 橋式起重機之工作排程與船席指泊結果息息相關，在第五節敏感度分析中之諸多參數的變化，均與船席指派結果密不可分，建議後續研究可將兩者合併探討。
5. 本研究利用 OPL studio 作為模式輸入準備及模式求解之軟體，但若能藉由其他工具(如 Visual Basic)，以圖形化之介面，作為模式結果輸出展示之用，定能讓使用者更快速的了解，而縮短決策時間。

參考文獻

1. Vis, I. F. A. and Koster, R., "Transshipment of Containers at a Container Terminal: An Overview", *European Journal of Operational Research*, Vol. 147, 2003, pp. 1-16.
2. Daganzo, C. F., "The Crane Scheduling Problem", *Transportation Research Part B*, Vol. 23, No. 3, 1989, pp. 159-176.
3. Peterkofsky, R. I. and Daganzo, C. F., "A Branch and Bound Solution Method for the Crane Scheduling Problem", *Transportation Research Part B*, Vol. 24, No. 3, 1990, pp. 159-172.
4. Kim, K. H. and Park, Y. M., "A Crane Scheduling Method for Port Container Terminals", *European Journal of Operational Research*, Vol. 156, 2004, pp. 752-768.
5. Lim, A., Rodrigues, B., Xiao, F., and Zhu, Y., "Crane Scheduling Using Tabu Search", *Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*,

2002, pp. 144-153.

6. 藍武王、高傳凱，「貨櫃儲存場儲位指派模式建構與求解」，**運輸學刊**，第十四卷，第四期，民國九十一年，頁 99-117。
7. 趙時樑、陳春益，「港區貨櫃場多部軌道型門式起重機移動路徑之研究」，**運輸計劃季刊**，第三十二卷，第四期，民國九十二年，頁 681-714。
8. 陳春益、趙時樑，「貨櫃碼頭出口儲區門型起重機小車取櫃問題之研究」，**運輸計劃季刊**，第三十三卷，第三期，民國九十三年，頁 449-470。
9. ILOG OPL Studio 3.5 Reference Manual, ILOG , Inc., 2001.