

考量彈性到達時段與成本差異下船席 等候定價模式之研究¹

A STUDY ON THE BERTH QUEUING PRICING MODEL UNDER THE CONDITION OF FLEXIBLE ARRIVAL TIME AND COST DIFFERENCE

孫珮元 Pey-Yuan Sun ²

賴禎秀 Chen-Hsiu Laih ³

(108 年 10 月 1 日收稿，108 年 12 月 16 日第 1 次修改，109 年 3 月 22 日定稿)

摘 要

船席等候定價模式係透過以價制量的觀點，以收費來分散船舶密集的抵達狀態，進而舒緩船舶等候現象。在既有文獻之模式中，假設船舶之排隊等候時間成本均相同，且船舶報到時間為精準時刻。但該假設與海運實務現況下船舶因不同性質其排隊等候時間成本有所差異，以及船舶報到時間存在緩衝彈性時段有所不同。有鑑於此，本研究考量不同性質船舶對應不同的排隊等候時間成本，以及將船舶的固定報到時刻放寬為彈性到達時段下，重新建構船席等候定價模式。本模式首先計算出收費實施前之船舶均衡成本，據此推導出零等候彈性收費架構與階梯式彈性收費架構，最後以高雄港相關統計資料編寫程式進行數值分析，以模擬上述收費架構實施後之排隊等候消除效果。

關鍵詞：船席等候定價；均衡成本；零等候彈性收費；階梯式彈性收費

-
1. 本文為科技部補助計畫（計畫編號：MOST107-2410-H-019-014-）部分研究成果，特此致謝。
 2. 國立臺灣海洋大學商船學系博士後研究員。
 3. 國立臺灣海洋大學商船學系教授；本文通訊作者（聯絡地址：20224 基隆市中正區北寧路 2 號 海洋大學商船學系；電話：02-24622192；E-mail：chlaih@mail.ntou.edu.tw）。

ABSTRACT

The berth queuing pricing model is used to disperse the ship's over-intensive arrival status, and consequently relieve the ship queuing phenomenon. In the existing model, the value of the queuing time cost of the ship is the same, and the ship registration time requirement is the precise time spot. However, in the maritime practice status, the queuing time cost of the ship varies due to different types of properties, and the ship registration time also has a buffer flexible period. In view of this, this study considers the difference in the queuing time cost of ships, and relaxes the ship registration time to be a time period to reconstruct the berth queuing pricing model. This improved model first calculates the equilibrium cost of the ship before implementing the toll, then we can derive the optimal time-varying flexible toll scheme and step flexible toll scheme. Finally, using the relevant statistics of Kaohsiung Port to write a program for a numerical analysis of the effects of the above toll schemes on ship queuing reduction.

Key Words: Berth queuing pricing model; Equilibrium cost; Optimal time-varying flexible toll; Step flexible toll

一、前 言

龐大的海運貿易，使船舶繁密地往返於各大洋間，船舶排隊等候進入船席之現象亦時有所聞。根據 Cargo Smart 近年來之統計資料顯示，上海港在尖峰期間需等候約 18 至 60 小時方可進港靠泊。這樣的等候情況，造成了船期準點率下降，影響航商在營運上的信用，亦降低了港務當局的營運效率。探究其等候原因，係因港埠船席容量有限，使得過於密集到達的船舶無法進入船席，而產生排隊等候情況。針對上述的船席等候現象，上海港將大型船舶轉靠至洋山深水港，以舒緩船舶等候問題，然而過於密集抵達之船舶的排隊等候現象依舊存在。港口雖能以增加容量之方式來舒緩等候現象，然而卻存在著需龐大資金挹注方能建設，以及施工過程曠日廢時之隱憂。

有鑑於此，除透過「增加供給」來舒緩船舶排隊等候現象外，部分學者亦提出「分散需求：以價制量」的論點，探討以收費來分散船舶過於密集的抵達狀態，進而舒緩船舶排隊等候現象。透過使用者付費的概念，增加收入的港埠單位，可將盈收投入工程建設，或實施鄰近港口差別費率，以吸引船舶轉靠來舒緩船舶等候問題。此觀點自道路領域發想，進而衍生至海運範疇，船席等候定價模式，即針對港埠因需求量（船舶抵達數量）大於容量（碼頭船席數量）的等候現象問題進行探討，建構出單階段至多階段之收費架構，以消除不同輕重程度下的船舶排隊等候現象。

目前文獻中既有的船席等候定價模式，考量所有船舶的排隊等候時間成本均相同，以及船舶在外港錨區的報到時間為單一時刻；然而在海運實務現況中，所有進港船舶的排隊

等候時間成本，依其船種之不同理應有所差別，且港務管理單位一般皆允許船舶報到時間有一定的彈性範圍，而非單一時刻，此情況與既有模式之假設有所不同。有鑑於此，本研究放寬既有船席等候定價模式中的這兩項假設，探討並建構考量船舶彈性到達時段與成本差異下之船席等候定價模式，以修正與補強既有船席等候定價模式在實務應用上不足之處，使其能更貼切海運的實際運作現況。

本研究內容共分為五節：第二節闡述目前既有道路與船席等候定價模式之相關文獻，做為後續模式建構上之研究基礎；第三節推導考量彈性到達時段與成本差異下之船席等候定價模式；第四節則針對高雄港蒐集相關數據，撰寫程式進行數值分析，以驗證模式架構與分析收費架構對於船舶等候之消除效果；第五節為結論與建議。

二、文獻回顧

排隊等候問題最早起源於道路等候現象，由 Vickrey^[1] 提出瓶頸路段等候定價模式，該篇探討道路車流從順暢轉變成擁擠進至等候的過程，從兩台不同車速車輛接近造成降速累積延遲時間，到多台車輛使道路擁擠，且因道路容量不足，車輛數大於道路容量，導致最終在單一瓶頸路段開始等候問題。此研究以通勤者的出發時刻做為決策變數，考慮通勤者的等候、早到或遲到時間成本，依通勤者總成本最小原則來決定出發時刻，並針對不同規模的道路容量，計算其等候成本。

Amott 等人^[2] 以經濟學驗證在通勤尖峰時段下之道路瓶頸路段等候現象，提出零等候收費架構與單階段收費模式（稱為 ADL 模式）。該研究建立收費前通勤者的均衡成本為排隊等候所造成之等候時間成本，和等候所衍生之時程延滯成本下，推導通勤者之總均衡成本架構，對應產生能夠完全取代等候時間成本之零等候收費架構。零等候收費架構下之收費金額，能完全取代等候時間成本，然而將產生通勤者收費因時變而不固定、收費過於繁複的隱憂。鑒於此問題，該研究提出以單階段等候定價模式，即收取單一且固定金額之收費方式，雖無法完全消除排隊等候時間，卻保有最大社會福利及一定程度之排隊等候消除效果。

另一方面，Laih^[3] 考量單階段收費僅為單一收費之架構，鑒於收費之單一性，而提出階梯式等候定價模式（稱為 Laih 模式）。該模式維持收費取代等候時間成本之觀點，且不額外造成通勤者原成本負擔之均衡成本守恒原則下，計算零等候收費架構內最大單一與數個多邊型之收費面積，藉以消除 50% 以上之等候時間成本，使得收費模式架構之收費選擇性更加多元化，不同於零等候收費架構之時變性，階梯式收費架構仍保有一定程度下收費單純化之狀態。模式同時推導出在 n 階段收費架構下，可消除 $\frac{n}{n+1}$ 比例之等候效果。在 1998 年新加坡實施之電子道路收費架構中，分別在上午 7 點 30 至 8 點，收取新幣 1 元，8 點至 9 點尖峰時段收取新幣 2 元，9 點至 9 點 30 分收取新幣 1 元，恰與該研究中所推導之兩階段收費架構相同。

此外，Laih 模式依循收費金額僅取代等候時間成本之概念，在均衡成本守恆原則下，計算並歸納出單階段至 n 階段收費架構下各收費時刻轉換點、均衡成本、通勤者出發率的規律性，且透過規律性與均衡成本不變的原則，可預先了解收費實施前後，願意付費與不願意付費通勤者人數，以及收費實施前後改變通勤行為之通勤者人數比例，提供政策實施者掌握通勤者行為變化之參考^[4]。

另一方面，鑑於階梯式等候定價模式，需建立在供方（決策實施單位）與需方（通勤者）整體成本最小的情況下，方能達到最大效益，賴禎秀^[5]考量在雙方總成本最小的情況下，求得階梯式等候定價模式之最佳階段數，做為政策執行者實施上之判斷依據。

Lindsey 等人^[6]觀察到新加坡在尖峰時段，通勤者會於收費結束前（或是收費由高轉低時）刻意剎車停等，待收費變低或結束後方進入瓶頸路段。此現象造成路肩擁擠之不經濟效益，故提出 Braking 模式：透過取消遲到部分時段之收費，來舒緩刻意剎車行為。該研究亦將 ADL 模式由單階段衍生至階梯式等候定價模式。同時比較上述 3 種等候定價模式（即 ADL、Braking 與 Laih 模式）之通勤者社會大小或均衡成本高低。

上述模式中討論排隊等候定價模式成本為相同之通勤者，而 Vincent 與 van den Berg^[7]則討論 3 類異質通勤者之等候定價模式問題，特別是探討收費後之福利所得分配效果。該文探討 Laih、ADL 以及 Breaking 等 3 種單階段收費模式下，異質性會影響上述 3 種模式實施單階段收費後之福利所得。Laih 模式對於異質通勤者之單階段收費標準，介於未收費均衡成本以及零等候最佳收費之間，且收費後之福利所得分配效果單純而明確。其它兩種模式對於異質通勤者之單階段收費標準則非如此，且福利所得分配效果較為複雜，其中 Breaking 模式在單階段收費實施後，對於時間價值較低且無法遲到的通勤者之福利所得分配效果較為不利。

等候現象之發生存在於各種運輸環境中，海運範疇中存在運河、港埠與櫃場等多種等候現象。以運河為例，Laih 與 Sun^[8]以等候定價模式取代巴拿馬運河之現行預約通過系統為假設，推導擴建水道下巴拿馬運河等候最佳收費模式。收費實施後可有效分散船舶抵達率，進而達成消除運河入口前排隊等候時間。最後針對運河實務運作進行調查，蒐集成本函數中有關於等候、早到與遲到之單位時間成本數據，模擬運河擴建後之零等候收費架構，以及收費實施後之船舶到港分散結果。

另一方面，Laih 等人^[9]亦建構蘇伊士運河之等候定價模式，且蒐集成本函數中各參數之單位時間成本，模擬蘇伊士運河之零等候最佳收費，以及收費實施後之船舶到港分散結果。根據等候收費實施前、後均衡成本不變的原則，收費實施後可有效分散船舶抵達率，以消除船舶在運河入口前錨區之總排隊等候時間。

除運河等候現象外，Laih 等人^[10]將港埠所發生之船席等候現象，建構船席等候定價模式。模式導出收費實施前、後之貨櫃船到港率分散結果及到港時刻移動軌跡。當貨櫃船抵達外港錨區等候進港所產生的等候時間成本，以收費取代時間的概念從而構建船席等候收費架構。分析收費行為改變船舶之出發時刻，進而有效分散船舶到港時刻以減少等候時間。收費架構使航商可適當地調整其出發時刻，達成紓解港口等候情況。透過等候收費金

額完全取代等候時間成本之原則，及等候收費實施前後均衡成本不變特性，建構零等候最佳收費及 n 階段等候收費架構。並分析推導 n 階段等候收費實施前後船舶到港率分散率，及到港時刻變動軌跡。該研究提供了貨櫃船在 n 階段等候收費實施前後之到港率分散結果及到港時刻變動軌跡^[11]。

港口除貨櫃船種外，尚有其他船種靠泊，因此散裝船之最佳單階段等候收費結構應因而生，該研究分析散裝船於等候收費制度實施前後抵達港口之行為過程、均衡抵達率及抵達錨區時刻之移動軌跡，並證明散裝船在最佳單階段收費實施後，可藉由收取等候費用，來減少等候之情況且分散其抵達時刻^[12]。

另一方面，不同於道路瓶頸路段原始假設為單一瓶頸狀態，港埠存在複數船舶抵達欲進入複數船席之狀態，因此針對散裝船建構複數船席之最佳 n 階段等候定價理論，推導其均衡成本、均衡抵達率及抵達錨區時刻移動軌跡，並分析最佳單階段等候模式之規律性，最後藉由數值分析驗證複數船席下散裝船之等候收費模式，提供港口決策管理者作為政策實施的參考依據，舒緩船舶排隊等候問題^[13]。

船舶排隊等候進入港埠船席時，總來船數量與碼頭裝卸時間，將影響所有船舶總排隊等候時間長度，林晏如^[14]依據貨櫃船與散裝船之營運特性，考量船舶特性與碼頭作業下，建構定期抵達之貨櫃船排隊等候收費模式，以及隨機抵達之散裝船排隊等候收費模式，推導並預測於收費實施前後船舶之分布與移動軌跡。另一方面考量港埠中機具裝卸與拖船數，亦將影響船舶總排隊等候時間長度，吳瑾麟^[15]配合不定期船營運之特性及港內引水作業狀態，建構異質貨種下不定期船外港錨區等候定價模式，以船席機具數量及機具裝卸速率，計算不同貨種不定期船之裝卸貨作業時間模式，並根據港內所提供之拖船數量有所限制下，進行最佳化搭配建構排隊等候時間長度模式，以計算不定期船之均衡總成本，推導排隊等候收費架構，最後以高雄港進行數值分析。

鑒於不定期船隨機抵達產生不同作業時間，謝佳璇^[16]假設不定期船隨機抵達港口型態呈現卜式分配，藉由卜式分配計算期待來船艘次。又因不定期船陸續抵達港口時，船與船抵達間隔將影響船舶總排隊等候時間長度，該研究以指數分配計算來船間隔時間長度，並將其修正內容，應用於改良船舶總排隊等候時間長度之計算結果。該研究推導出零等候及最佳單階段等候收費架構，並且分析等候收費實施前後不定期船之到港行為模式變化。Sun 等人^[17]接續並考量不定期船之目的地港抵達型態，以及實務上不定期船之船席屬共用之前提下，推導出不定期船席等候定價模式。研究結合信賴區間修正港口預期每日來船數量範圍，且計算船舶陸續抵達情況下的來船間隔，以及共用船席之可能性，以更加符合港埠之排隊等候現況。接著透過均衡成本守恆概念，將等候時間成本轉換為收費金額，推導出總收費金額完全取代總等候時間成本之零等候最佳收費架構，並進一步探討收費實施前、後，船舶到港時刻之移動軌跡。

目前既有之等候定價相關文獻可窺見，排隊等候定價模式已有一定之研究基礎，且應用自道路至海運範疇。然而在目前文獻下之船席等候定價模式，其假設條件絕大多數僅考量船舶為相同之排隊等候時間成本，以及船舶報到時間要求為單一時刻。此狀態與目前現

況有所落差，即不同性質之船舶應有不同之排隊等候時間成本，以及船舶報到時段為彈性範圍時段而非單一時刻。基於此因素，本研究放寬目前既有相關文獻之假設，建構考量彈性到達時段與成本差異下船席等候之定價模式，以補強既有船席等候定價模式架構及假設上不足之處。

三、模式建構

模式依船舶抵達型態建構船舶成本函數，接著依船舶進港之船席靠泊情況，計算總船舶排隊等候時間長度公式，透過船舶等候時間斜率與等候時間長度公式，求出時刻值解，據此可導出收費實施前之船舶均衡成本，以了解船舶在尚未實施收費前，其抵達時刻與對應等候時間成本之關係，進而以收費取代等候時間成本之概念，計算零等候彈性收費架構與階梯式彈性收費架構。

據此，本研究假設內容如下：

1. 船舶等候過程所產生之成本，僅討論船舶在外港錨區等候時所產生之成本，包含排隊等候時間成本，以及因等候而衍生之時程延滯成本（如：早到、遲到時間成本），其餘成本則暫不考慮。
2. 該目的港之容量已滿，即港埠內船席已滿。
3. 船舶有著不同性質，將船舶分為早到、準時與遲到 3 個不同群組，其排隊時間成本之價值與時程延滯成本亦不同。
4. 考慮進港之公平性，船舶進入港埠船席的順序為先到先服務。

3.1 收費實施前船舶均衡成本

船舶抵達外港錨區後即開始排隊等候準備進入港埠內之船席，依船舶抵達型態可分為 3 種，即：早到時段、準時時段與遲到時段，如 (1) 至 (3) 式所示。

早到時段

$$t_q \leq t + T_Q(t) < t_s^* \quad (1)$$

準時時段

$$\tilde{t}_s + T_Q(\tilde{t}_s) = t_s^* \quad (2)$$

$$\tilde{t}_e + T_Q(\tilde{t}_e) = t_e^* \quad (3)$$

遲到時段

$$t_q' \geq t + T_Q(t) > t_e^* \quad (4)$$

其中 t_q 為船舶等候開始時刻，而 t_q' 則為結束等候時刻， t 為船舶抵達錨區時刻， $T_Q(t)$ 則為船舶等候時間長度，在既有文獻中船席等候定價模式在報到時段假設為單一時刻 (t^*)，然而港口報到實際仍允許一段彈性緩衝時段，故本次研究放寬假設，將 t_s^* 與 t_e^* 設為一段彈性報到時段；另一方面 $\tilde{t}_s$ 與 $\tilde{t}_e$ 則對應為在此時段間抵達錨區之船舶，在錨區排隊等候一段時間 ($T_Q(\tilde{t}_s)$ 與 $T_Q(\tilde{t}_e)$) 後，即能在準時時段完成報到。上述 3 種抵達型態，可繪製如圖 1 所示。

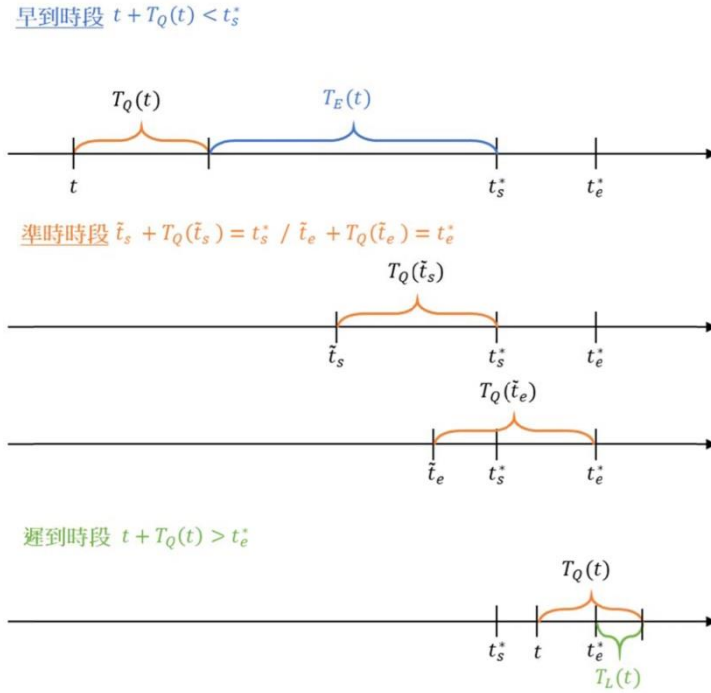


圖 1 船舶抵達型態圖

建立船舶抵達型態後，根據假設 1，吾人可據此建構出收費實施前之船舶成本函數如下：

早到時段

$$\begin{aligned} C(t) &= \alpha_1 \cdot T_Q(t) + \beta_1 \cdot T_E(t) \\ C(t) &= \alpha_1 \cdot T_Q(t) + \beta_1 \cdot [t_s^* - (t + T_Q(t))] \end{aligned} \quad (5)$$

準時時段

$$C(\tilde{t}_s) = \alpha_2 \cdot T_Q(\tilde{t}_s) \quad C(\tilde{t}_s) = \alpha_2 \cdot (\tilde{t}_s^* - \tilde{t}_s) \quad (6)$$

$$C(\tilde{t}_e) = \alpha_2 \cdot T_Q(\tilde{t}_e) \quad C(\tilde{t}_e) = \alpha_2 \cdot (\tilde{t}_e^* - \tilde{t}_e) \quad (7)$$

遲到時段

$$\begin{aligned} C(t) &= \alpha_3 \cdot T_Q(t) + \gamma_3 \cdot T_L(t) \\ C(t) &= \alpha_3 \cdot T_Q(t) + \gamma_3 \cdot (t + T_Q(t) - t_e^*) \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $C(t)$ 為收費實施前之船舶成本函數， α_1 為早到時段下之船舶排隊等候時間成本， α_2 為準時時段下之船舶排隊等候時間成本，而 α_3 為遲到時段下之船舶排隊等候時間成本。依抵達形態不同，一般而言準時抵達者願意支付最高之等候成本以避免早到或遲到之風險，故依抵達形態性質下， $\alpha_2 > \alpha_1 > \alpha_3$ ； β_1 則為早到時段下之船舶早到時間成本， γ_3 為遲到時段下之船舶遲到時間成本。

成本均衡旨在經濟學中該使用者滿意其抵達時刻 (t) 下所對應之成本 ($C(t)$)，而不再調整抵達時刻 (即不在變動其成本)。在此情況下，船舶抵達時刻所對應之成本將不會調整亦不在變動，即 $\frac{dC(t)}{dt} = 0$ 。由此可在成本均衡前提下，得出圖 2 之 3 種抵達型態下，船舶抵達時刻 (t) 與其等候時段長度 ($T_Q(t)$) 斜率關係，如 (9) 至 (12) 式。

早到時段

$$\begin{aligned} C(t) &= \alpha_1 \cdot T_Q(t) + \beta_1 \cdot [t_s^* - (t + T_Q(t))] \\ \frac{dC(t)}{dt} = 0 &\Rightarrow \frac{dT_Q(t)}{dt} (\alpha_1 - \beta_1) = \beta_1 \Rightarrow \frac{dT_Q(t)}{dt} = \frac{\beta_1}{\alpha_1 - \beta_1} \end{aligned} \quad (9)$$

準時時段

$$C(\tilde{t}_s) = \alpha_2 \cdot (\tilde{t}_s^* - \tilde{t}_s) \quad (10)$$

$$C(\tilde{t}_e) = \alpha_2 \cdot (\tilde{t}_e^* - \tilde{t}_e) \quad (11)$$

為水平線

遲到時段

$$C(t) = \alpha_3 \cdot T_Q(t) + \gamma_3 \cdot [t + T_Q(t) - t_e^*]$$

$$\frac{dC(t)}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{dT_Q(t)}{dt}(\alpha_3 + \gamma_3) = -\gamma_3 \Rightarrow \frac{dT_Q(t)}{dt} = \frac{-\gamma_3}{\alpha_3 + \gamma_3} \quad (12)$$

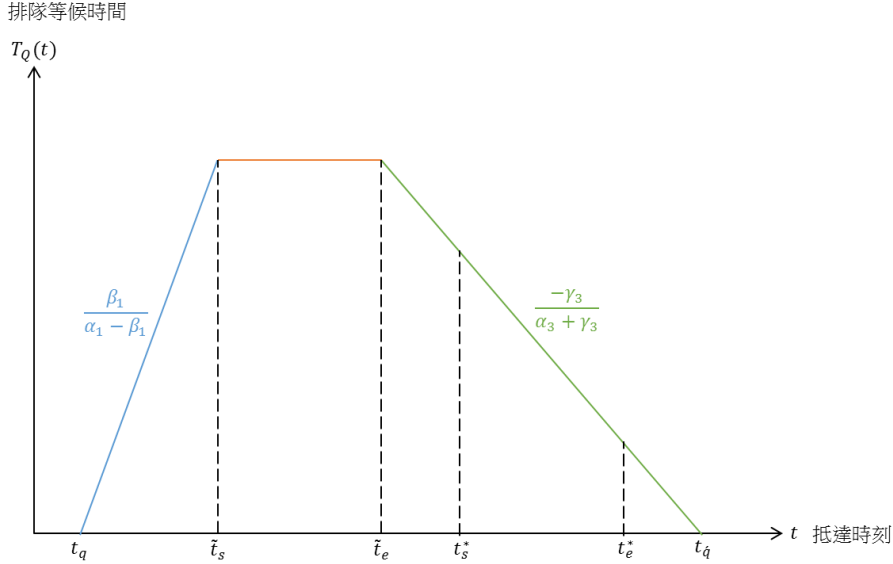


圖 2 船舶抵達時刻與其等候時間長度關係圖

透過圖 2 吾人可知船舶抵達時刻與等候時間長度之關係，然對於等候起迄時刻與準時抵達時刻解（即 t_q 、 t_q' 、 $\tilde{t}_s$ 與 $\tilde{t}_e$ ）尚無法確定。欲求解各時刻值解，圖 2 中僅可得到 3 個方程式，尚欠缺船舶總排隊等候時間長度關係式（即 $t_q - t_q$ ）。模式中考量來船數量之估計、來船間隔對整體時段之影響，以及船席共用可增進使用效率下，建構船舶總排隊等候時間長度之公式^[17]。

假設港口每日來船艘數之機率服從卜式分配，則船舶每日抵達錨區艘數之機率可表示如(13)式：

$$P(\mu_i(j)) = \frac{\lambda_i^{\mu_i(j)} \cdot e^{-\lambda_i}}{\mu_i(j)!} \quad \begin{matrix} i = A, B, C \\ j = 1.2.3...n \end{matrix} \quad (13)$$

因不同種類之船舶與其對應的來船艘數有所不同，式中 i 代表船舶的船舶種類，如：散裝船、雜貨船等等。而 $P(\mu_i(j))$ 為抵達 $\mu_i(j)$ 艘船舶之機率， λ_i 為每日平均來船數。因計算來船數量會隨著小數點位數增加而船數正向增加，造成預估船舶來船艘數有所誤差，進而影響總船舶排隊等候時間長度。有鑑於此，為求港口每日預期來船艘數範圍，以切合港埠實務與排隊等候時間長度情況下，研究透過信賴區間求解出較合理之來船數範圍，如(14)式：

$$\left[\lambda_i \pm \sqrt{\frac{\sigma_i^2}{a \cdot X_i}} \right] = [\mu_i^L, \mu_i^U]$$

$$\mu_i(j) = \mu_i^U + (j-1)$$

$$j = 1.2.3 \dots n$$

$$n = \mu_i^U - \mu_i^L + 1$$

$$i = A.B.C \dots$$
(14)

(14) 式中， μ_i^U 與 μ_i^L 分別代表不同種類船舶的來船數量之上下限， $\mu_i(j)$ 中的 j 為所計算後之數值範圍， α 為假定之信賴區間值， X_i 為不同種類之船舶的年來船總數， σ_i 為不同種類之船舶的每日船舶來船數之變異數，藉由信賴區間計算出較符合港埠實際來船艘數之範圍，以避免因來數艘數高估或低估，造成影響排隊等候時間長度之情況。

另外船舶與船舶在陸續抵達時會產生間隔時間，此間隔時間亦會影響船舶總排隊等候時間長度。過去相關文獻中，將來船艘數依船席數量分組，分別計算分組之排隊等候時間長度，及其相對應之來船機率後進行加總。然而船舶在陸續抵達港口情況下，每艘船舶間的間隔時間若以分組計算其等候時間長度，因與陸續抵達之等候時間上有所不同，進而高估船舶總排隊等候時間。故模式以指數分配計算船舶的來船間隔時間，將其納入計算排隊等候時間長度，如 (15) 式：

$$f(T_i > h_i) = \int_{h_i}^{\infty} \frac{1}{b} e^{-\frac{T_i}{b}} dT = e^{-\frac{h_i}{b}} = C$$
(15)

上式可整理成 $h_i(j) = \frac{-24}{\mu_i(j)} \cdot \ln(C)$ ，其中 C 為指數函數機率值，即有多少機率船舶將在間隔 h 小時後抵達。另一方面，碼頭船席為增進其使用效率，部分種類之船舶可共用其他種類之船舶船席進行裝卸，但因裝卸貨物性質與船舶是否自有機具之限制，亦使船舶總排隊等候時間長度之估計有所影響。為了使港內船席使用更有效率，(16) 式考量上述條件，重新分配不同船舶種類的船席數量，以增進港口營運的效率，更貼近實況下之外港錨區船舶等候時間。

$$S_i'(j) = \frac{\mu_i(j)}{\sum_i \sum_j \mu_i(j)} \cdot \sum_i \sum_j S_i(j)$$

$$\theta = \frac{\mu_i(j) \cdot AT_i}{M_i \cdot V_i}$$
(16)

將上述 (13) 至 (16) 式進行整理，則收費實施前之船席之船舶總排隊等候時間長度 (Ψ) 如下 (17) 式所示：

$$\Psi = t_{q'i} - t_{qi} = \sum_i \sum_j \left\{ \left[\frac{\mu_i(j)}{S_i'(j)} \right] \cdot \theta - \mu_i(j) \cdot h_i(j) \right\} \cdot P(\mu_i(j))$$

$$\left[\frac{\mu_i(j)}{S_i'(j)} \right] - \left[\frac{\mu_i(j) \times h_i(j)}{\theta} + 1 \right] \geq 0 \quad (17)$$

其中 $S_i(j)$ 代表船舶可使用之共用船席數， $S_i(j)'$ 代表重新分配後的船席數量， $\frac{\mu_i(j)}{\sum_i \sum_j \mu_i(j)}$ 為重新分配之比例， θ 為船舶的平均裝卸時間長度， AT_i 代表船舶的平均裝載量， M_i 代表船舶可使用之裝卸機具數， V_i 代表船舶裝卸機具之裝卸速率。

透過 (17) 式可得知船舶總排隊等候時間長度方程式 ($t_q - t_q$)，則可將圖 2 之船席等候定價模式之 4 個時刻值 (t_q 、 $\tilde{t}_s$ 、 $\tilde{t}_e$ 與 $t_{q'}$) 之關係式列出如 (18) 式所示，將其求解後可得時刻值解為 (19) 至 (22) 式。

$$\begin{cases} \tilde{t}_s + T_Q(\tilde{t}_s) = t_s^* \\ \tilde{t}_e + T_Q(\tilde{t}_e) = t_e^* \\ t_{q'} - t_q = \Psi \\ \tilde{t}_e - \tilde{t}_s = t_e^* - t_s^* \end{cases} \quad (18)$$

$$t_q = \frac{\alpha_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_e^* + \frac{\alpha_3 \beta_1}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_s^* - \frac{\alpha_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} \cdot \Psi \quad (19)$$

$$t_{q'} = \frac{\alpha_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_e^* + \frac{\alpha_3 \beta_1}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_s^* + \frac{\alpha_3 \beta_1}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} \cdot \Psi \quad (20)$$

$$\tilde{t}_s = \frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_e^* + \frac{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1 - \beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_s^* - \frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} \cdot \Psi \quad (21)$$

$$\tilde{t}_e = \frac{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1 + \beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_e^* - \frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_s^* - \frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} \cdot \Psi \quad (22)$$

將求解結果 (19) 至 (22) 式代回 (5) 至 (8) 式之成本函數後，可計算出考量彈性到達時段與成本差異下，船席等候定價模式在收費實施前之船舶均衡成本，如下 (23) 至 (25) 式。

早到時段

$$\begin{aligned}
 C(t) &= \alpha_1 \cdot T_Q(t) + \beta_1 \cdot [t_s^* - (t + T_Q(t))] \\
 &= (\alpha_1 - \beta_1) \frac{\beta_1}{\alpha_1 - \beta_1} (t - t_q) + \beta_1 \cdot t_s^* - \beta_1 \cdot t \\
 &= \alpha_1 \cdot \left[\frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_s^* - \frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_e^* + \frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} \cdot \Psi \right]
 \end{aligned} \quad (23)$$

準時時段

$$\begin{aligned}
 C(\tilde{t}_s) &= \alpha_2 \cdot (t_s^* - \tilde{t}_s) \\
 &= \alpha_2 \cdot \left[\frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_s^* - \frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_e^* + \frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} \cdot \Psi \right]
 \end{aligned} \quad (24)$$

延遲抵達

$$\begin{aligned}
 C(t) &= \alpha_3 \cdot T_Q(t) + \gamma_3 \cdot [t + T_Q(t) - t_e^*] \\
 &= (\alpha_3 + \gamma_3) T_Q(t) + \gamma_3 \cdot t - \gamma_3 \cdot t_e^* \\
 &= \alpha_3 \cdot \left[\frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_s^* - \frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_e^* + \frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} \cdot \Psi \right]
 \end{aligned} \quad (25)$$

圖 3 為繪製模式船舶抵達時刻與收費實施前船舶均衡成本圖，圖中直線為船舶排隊等候時間成本，點線則為對應之早到或遲到時間成本。

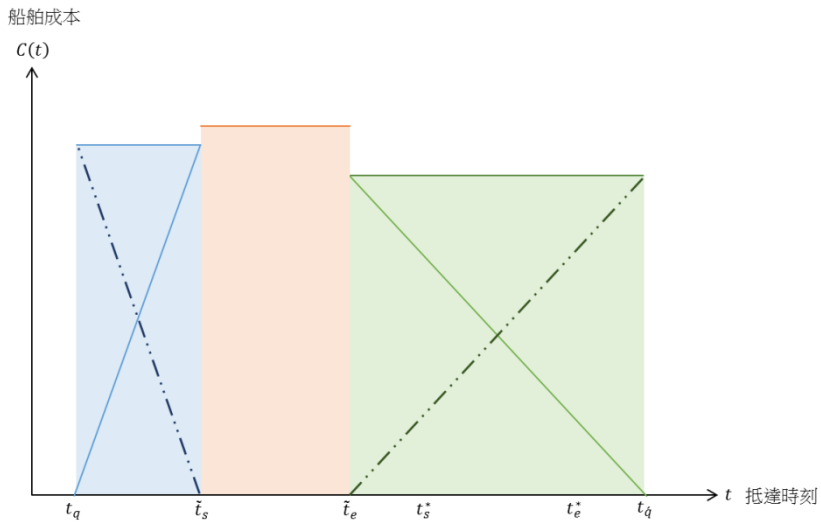


圖 3 船舶抵達時刻與收費實施前船舶均衡成本圖

3.2 零等候彈性收費架構與階梯式彈性收費架構

已知收費實施前之船舶均衡成本後，吾人可進一步透過收費取代排隊等候時間成本之以價制量概念，建構零等候彈性收費架構以及階梯式彈性收費架構。該收費之概念為收費僅取代船舶均衡成本中的排隊等候時間成本，且考量收費之公平性下，收費實施前後對於船舶時程延滯成本並不產生變化。在零等候彈性收費架構下，因收費完全取代船舶之排隊等候時間成本，故船舶將完全可不需等候（即 $T_Q(t) = 0$ ），而在階梯式彈性收費架構中，則按收費比例取代對應比例之排隊等候時間成本，以消除部分之等候現象。

(26) 至 (28) 式分別為模式中早到、準時與遲到時段 3 種型態之零等候彈性收費架構收費金額 $\tau(t)$ ，依其斜率關係可繪製圖 4，圖 4 即為船席等候定價模式下之船舶排隊等候時間成本與零等候彈性收費架構關係。在圖 4 中，因收費實施前之船舶排隊等候時間成本，與零等候彈性收費架構有著相同面積，故可知零等候彈性收費架構下，船舶付費之費用可完全取代等候時間成本，使船舶無需等候。

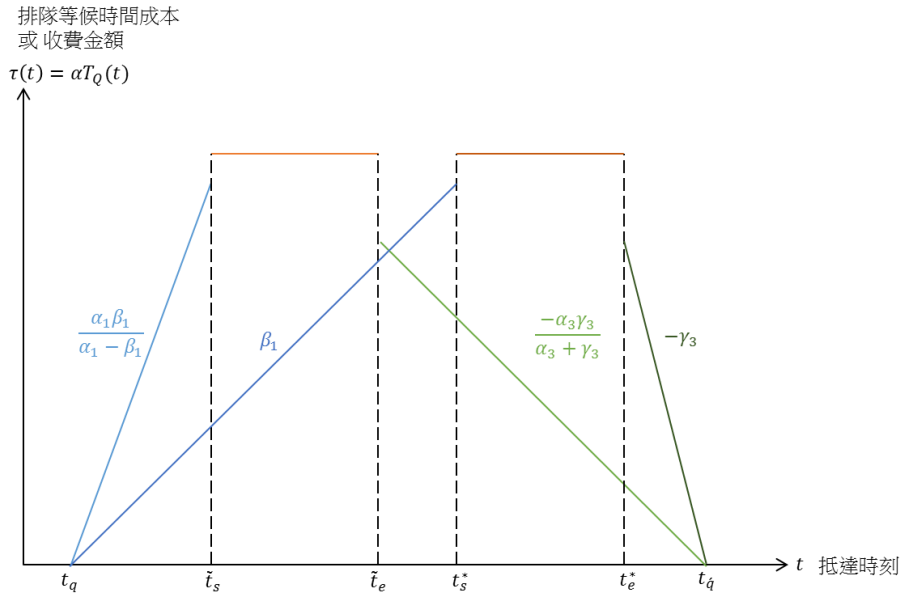


圖 4 收費實施前船舶排隊等候時間成本與零等候彈性收費架構圖

早到時段

$$\tau(t) = C(t) - \beta_1(t_s^* - t) \quad t_q \leq t < t_s^*$$

$$\tau(t) = \alpha_1 \cdot \left[\frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_s^* - \frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_e^* + \frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} \cdot \Psi \right] - \beta_1(t_s^* - t)$$

$$\tau(t) = \beta_1 \cdot t - \frac{\alpha_3 \beta_1^2}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_s^* - \frac{\alpha_1 \beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_e^* + \frac{\alpha_1 \beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} \cdot \Psi \quad (26)$$

準時時段

$$\tau(t) = C(t) \quad t_s^* \leq t \leq t_e^*$$

$$\tau(t) = \alpha_2 \cdot \left[\frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_s^* - \frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_e^* + \frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} \cdot \Psi \right] \quad (27)$$

遲到時段

$$\tau(t) = C(t) - \gamma_3(t - t_e^*) \quad t_e^* < t \leq t_q$$

$$\tau(t) = -\gamma_3 \cdot t + \frac{\alpha_3 \beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_s^* + \frac{\alpha_1 \gamma_3^2}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_e^* + \frac{\alpha_3 \beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} \cdot \Psi \quad (28)$$

前段所推導之零等候彈性收費架構，雖可完全消除船舶排隊等候現象，此船舶無須等候，然其為隨抵達時刻不同而產生不同之收費架構，故收費較為複雜。有鑑於此，階梯式收費架構概念因而產生，該收費架構來自 Laih 模式^[3]所提出之觀點，在零等候收費架構內截取數個內接多邊型，作為單至 n 階段收費依據，其收費目的為消除等價之排隊等候時間成本，來舒緩等量之排隊等候時間，收費雖無法 100%消除船舶排隊等候時間成本，但其收費架構較零等候收費架構簡化，且仍有一定程度之等候消除效果。

階梯式彈性收費架構原理即在零等候彈性收費架構中，截取數個內接多邊型，作為單至 n 階段彈性收費架構之收費依據。如圖 5 所示，內接多邊型內接於零等候彈性收費架構中之最大收費面積，即可消除對應之最多排隊等候時間成本。階梯式彈性收費架構，雖無法如零等候彈性收費架構可完全消除所有船舶之排隊等候時間，但階梯式彈性收費架構提供了較具彈性收費方法以供決策單位參考，以下 1 至 3 小段分別為單階段至三階段收費架構設計概念與計算求解之時刻值。

1. 單階段彈性收費架構

單階段彈性收費架構即在零等候彈性收費架構內，針對不同抵達型態之船舶，分別擷取單一最大收費面積來消除排隊等候時間，其等候消除效果為零等候彈性收費的一半，故單階段彈性收費架構具有 50%之等候消除效果。如圖 6 所示， τ_1^{E1} 、 τ^{o1} 與 τ_1^{L1} ，分別為早到、準時與遲到之單一收費金額，均為收費實施前之船舶均衡成本的一半。而 t^+ 與 t^- 則為收費開始與結束之時刻，依 (19) 至 (22) 式之結果，可計算上述單階段彈性收費架構之收費金額與收費起迄時刻之解；表 1 為整理單階段彈性收費架構之收費金額與各時刻點整理表。

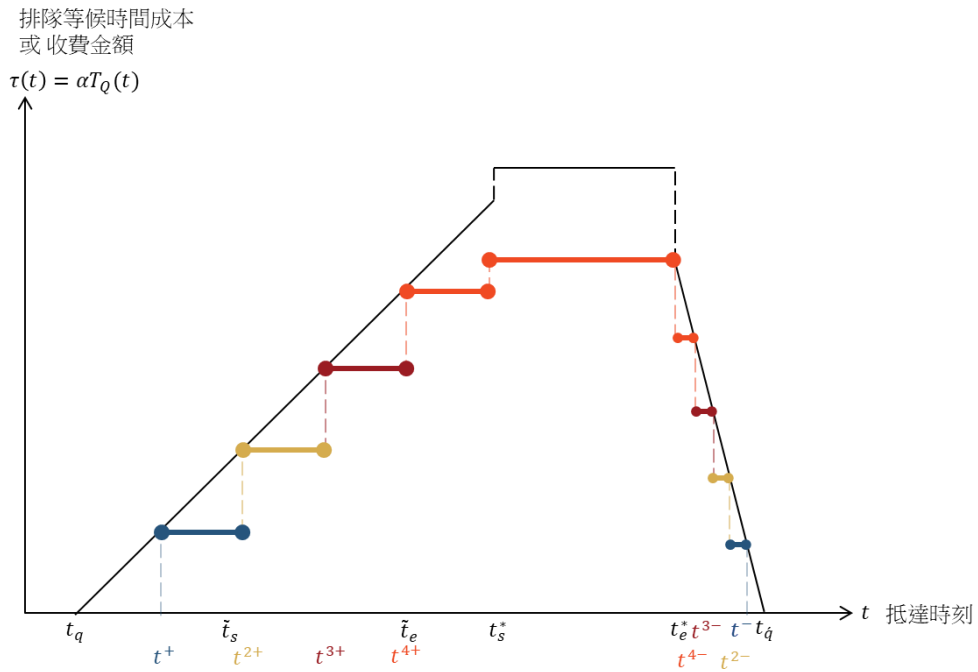


圖 5 階梯式彈性收費架構示意圖

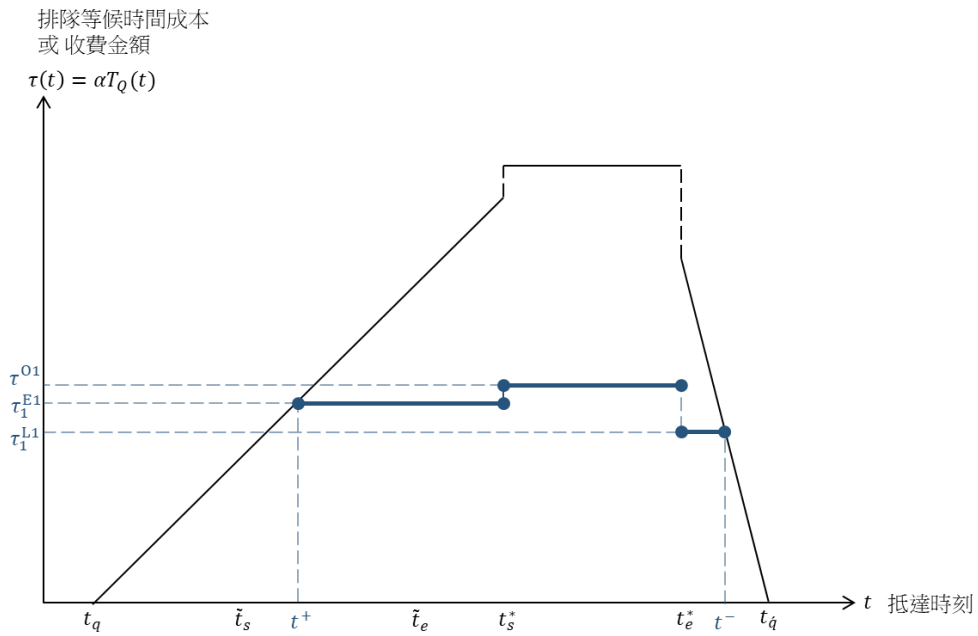


圖 6 單階段彈性收費架構圖

表 1 單階段彈性收費架構下收費金額與收費起迄時刻表

抵達型態	收費金額	收費起訖時刻	等候消除效果
早到時段	$\tau_1^{E1} = \frac{\alpha_1}{2} \cdot \oplus$	$t^+ = \frac{\alpha_1 \gamma_3}{2(\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1)} t_e^* + \frac{2\alpha_3 \beta_1 + \alpha_1 \gamma_3}{2(\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1)} t_s^* - \frac{\alpha_1 \gamma_3}{2(\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1)} \cdot \Psi$	50%
準時時段	$\tau^{o1} = \frac{\alpha_2}{2} \cdot \oplus$	—	
遲到時段	$\tau_1^{L1} = \frac{\alpha_3}{2} \cdot \oplus$	$t^- = \frac{2\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1}{2(\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1)} t_e^* + \frac{\alpha_3 \beta_1}{2(\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1)} t_s^* + \frac{\alpha_3 \beta_1}{2(\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1)} \cdot \Psi$	

$$\oplus = \frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_s^* - \frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} t_e^* + \frac{\beta_1 \gamma_3}{\alpha_1 \gamma_3 + \alpha_3 \beta_1} \cdot \Psi$$

2. 兩階段彈性收費架構

由單階段彈性收費架構概念進一步衍生，兩階段彈性收費架構其等候消除效果，為零等候彈性收費的三分之二，即 66.67%。收費架構為在零等候彈性收費架構內，針對不同抵達型態之船舶，分別擷取兩段收費來消除排隊等候時間。如圖 7 所示，早到與遲到時段收取兩段收費，準時時段維持單一收費，以消除準時時段下三分之二的等候時間成本。 t^+ 與 t^- 為收費開始與結束之時刻， t^{2+} 與 t^{2-} 則為收費由低轉高之轉換時刻；表 2 為模式下兩階段彈性收費架構之收費金額與各時刻點整理表。

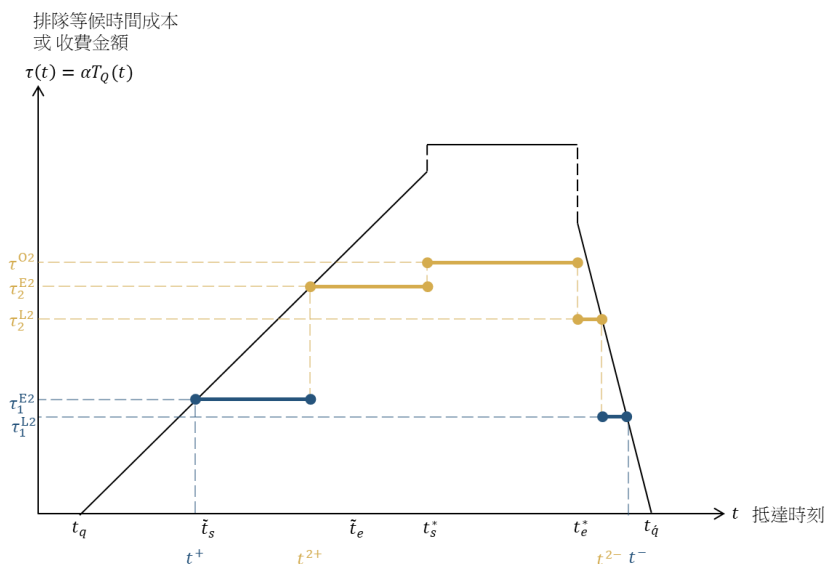


圖 7 兩階段彈性收費架構圖

表 2 兩階段彈性收費架構下收費金額與收費起訖時刻表

抵達型態	收費金額	收費起訖時刻	等候消除效果
早到時段	$\tau_1^{E2} = \frac{\alpha_1}{3} \cdot \oplus$ $\tau_2^{E2} = \frac{2\alpha_1}{3} \cdot \oplus$	$t^+ = \frac{2\alpha_1\gamma_3}{3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_e^* + \frac{3\alpha_3\beta_1 + \alpha_1\gamma_3}{3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_s^* - \frac{2\alpha_1\gamma_3}{3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} \cdot \Psi$ $t^{2+} = \frac{\alpha_1\gamma_3}{3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_e^* + \frac{3\alpha_3\beta_1 + 2\alpha_1\gamma_3}{3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_s^* - \frac{\alpha_1\gamma_3}{3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} \cdot \Psi$	66.67%
準時時段	$\tau^{o2} = \frac{2\alpha_2}{3} \cdot \oplus$	—	
遲到時段	$\tau_1^{L2} = \frac{\alpha_3}{3} \cdot \oplus$ $\tau_2^{L2} = \frac{2\alpha_3}{3} \cdot \oplus$	$t^{2-} = \frac{3\alpha_1\gamma_3 + 2\alpha_3\beta_1}{3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_e^* + \frac{\alpha_3\beta_1}{3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_s^* + \frac{\alpha_3\beta_1}{3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} \cdot \Psi$ $t^- = \frac{3\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1}{3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_e^* + \frac{2\alpha_3\beta_1}{3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_s^* + \frac{2\alpha_3\beta_1}{3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} \cdot \Psi$	

3. 三階段彈性收費架構

同理可知，三階段彈性收費架構其等候消除效果為零等候彈性收費的四分之三，即 75%。收費架構亦為針對零等候彈性收費架構內，不同抵達型態之船舶分別擷取 3 段收費來消除排隊等候時間。如圖 8 所示，早到與遲到時段收取 3 段收費，準時時段維持單一收費以消除準時時段下四分之三的等候時間成本；表 3 為模式下三階段彈性收費架構之收費金額與各時刻點整理表。

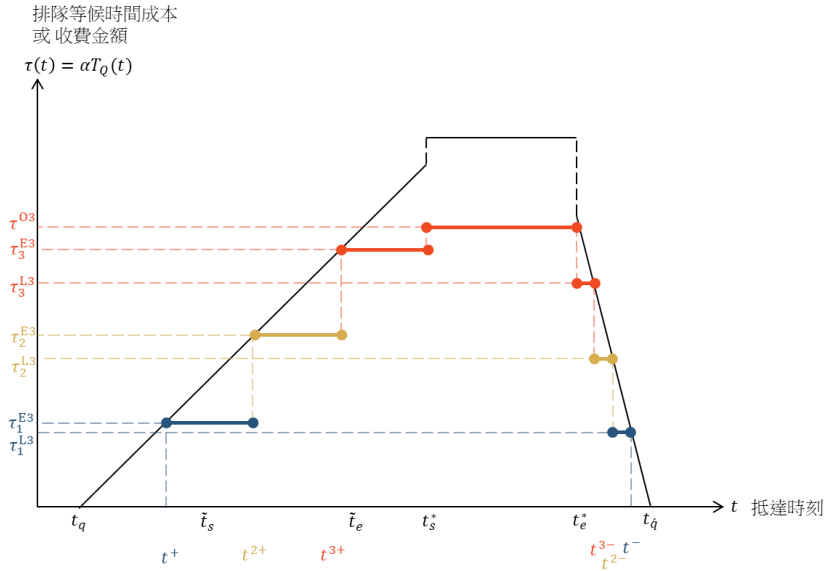


圖 8 三階段彈性收費架構圖

表 3 三階段彈性收費架構下收費金額與收費起訖時刻表

抵達型態	收費金額	收費起訖時刻	等候消除效果
早到時段	$\tau_1^{E3} = \frac{\alpha_1}{4} \cdot \oplus$ $\tau_2^{E3} = \frac{2\alpha_1}{4} \cdot \oplus$ $\tau_3^{E3} = \frac{3\alpha_1}{4} \cdot \oplus$	$t^+ = \frac{3\alpha_1\gamma_3}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_e^* + \frac{4\alpha_3\beta_1 + \alpha_1\gamma_3}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_s^* - \frac{3\alpha_1\gamma_3}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} \cdot \Psi$ $t^{2+} = \frac{2\alpha_1\gamma_3}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_e^* + \frac{4\alpha_3\beta_1 + 2\alpha_1\gamma_3}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_s^* - \frac{2\alpha_1\gamma_3}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} \cdot \Psi$ $t^{3+} = \frac{\alpha_1\gamma_3}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_e^* + \frac{4\alpha_3\beta_1 + 3\alpha_1\gamma_3}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_s^* - \frac{\alpha_1\gamma_3}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} \cdot \Psi$	75%
準時時段	$\tau^{O3} = \frac{3\alpha_2}{4} \cdot \oplus$	—	
遲到時段	$\tau_1^{L3} = \frac{\alpha_3}{4} \cdot \oplus$ $\tau_2^{L3} = \frac{2\alpha_3}{4} \cdot \oplus$ $\tau_3^{L3} = \frac{3\alpha_3}{4} \cdot \oplus$	$t^{3-} = \frac{4\alpha_1\gamma_3 + 3\alpha_3\beta_1}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_e^* + \frac{\alpha_3\beta_1}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_s^* + \frac{\alpha_3\beta_1}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} \cdot \Psi$ $t^{2-} = \frac{4\alpha_1\gamma_3 + 2\alpha_3\beta_1}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_e^* + \frac{2\alpha_3\beta_1}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_s^* + \frac{2\alpha_3\beta_1}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} \cdot \Psi$ $t^- = \frac{4\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_e^* + \frac{3\alpha_3\beta_1}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} t_s^* + \frac{3\alpha_3\beta_1}{4(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\beta_1)} \cdot \Psi$	

綜上所述，模式中加入考量實際船舶報到時間為一段彈性緩衝時段，單階段彈性收費架構為消除 50%船舶排隊等候時間成本，兩階段則消除 66.67%；三階段消除 75%，故推論 n 階段可消除 $n/(n+1)$ 之排隊等候時間成本， n 階段收費時間長度為總排隊等候時間長度之 $\frac{n}{n+1}$ ，隨著收費階段數增加，可消除之等候效果亦會增加，但其邊際效益將逐漸降低。

四、數值分析

高雄港為臺灣目前最大之國際商港，港口貨物貿易量占臺灣總貿易量一半以上，故選以 2018 年臺灣高雄港港務統計資料進行數值分析。2018 年高雄港船舶種類所占比例依序為：貨櫃船、雜貨船、油輪與散裝船，分別為 50.16%、16.89%、16.32%與 8.73%。因貨櫃船屬於租用專用碼頭船席進行裝卸作業，較無共用船席之慮，而油輪裝卸為管道運輸，停靠之船席特殊性較高，與其他船舶共用船席的可能性較低，故本次數值分析選擇以雜貨船與散裝船進行模擬。

2018 年高雄港雜貨船 (A) 與散裝船 (B) 進港艘次分別為 3,002 與 1,551 艘次 ($X_A = 3002, X_B = 1551$)，每日平均來船數為 8.385 與 4.332 艘 ($\lambda_A = 8.385, \lambda_B = 4.332$)，其變異數為 18.11 與 7.686 ($\sigma_A = 18.110, \sigma_B = 7.686$)。平均裝載量分別為 5995.7 與 35018.09 公噸 ($AT_A = 5995.7, AT_B = 35018.09$)，兩種船舶種類可使用之裝卸機具分別為 36 以及 116 具 ($M_A = 36, M_B = 116$)，其裝卸速率分別為每小時 80 與 60 噸 ($V_A = 80, V_B = 60$)，總計共

用船席為 38 座 ($S=38$)，上述相關數據資料整理如表 4 所示。

表 4 高雄港雜貨船與散裝船之統計數據

	雜貨船	散裝船
進港船舶 (艘)	3,002	1,551
每日平均來船數 (艘)	8.385	4.332
變異數	18.11	7.686
平均裝載量 (噸)	5995.7	35018.09
裝卸機具數量 (座)	116	36
裝卸速率 (噸／小時)	60	80
共用船席數 (座)	38	

假設信賴區間值為 0.05 ($\alpha=0.05$)，指數函數機率值為 0.95 ($C=0.95$)，可計算出雜貨船每日預期來船數量為 7 至 10 艘，雜貨船則為 4 至 6 艘。

$$\left[\lambda_A \pm \sqrt{\frac{\sigma_A^2}{a \cdot X_A}} \right] = [\mu_A^L, \mu_A^U] = \left[8.385 \pm \sqrt{\frac{18.11^2}{0.05 \cdot 3002}} \right] = [7, 10]$$

$$\left[\lambda_B \pm \sqrt{\frac{\sigma_B^2}{a \cdot X_B}} \right] = [\mu_B^L, \mu_B^U] = \left[4.332 \pm \sqrt{\frac{7.682^2}{0.05 \cdot 1551}} \right] = [4, 6]$$

因雜貨船有 4 種預期來船數量之可能情況，而散裝船則有 3 種，故總計有 12 種來船數量之可能組合，計算不同可能組合下的船席分配 ($S_i(j)'$) 與船舶抵達間隔時間 ($h_i(j)$) 之組合，可計算求得總排隊等候時間為 14.757 小時 ($\Psi = \max(t_{qi'} - t_{qi}) = 14.757$)。

另一方面，模式中的船舶排隊等候時間成本，為船舶在錨區等候進入港口之固定成本，以雜貨與散裝船營運模式而言，主要為燃油成本與船舶每日租金，燃油成本每日約消耗 28.5 噸，1 小時約 1.1875 噸，2018 年海運用油 (IF308) 平均 452.5 美元/噸，故燃油成本為 537.34 美元／小時。船舶每日租金為依載重噸 (D.W.T) 計算，2018 年輕便型船舶 (約 30,000 噸) 之船舶每日租金平均為 9436.65 美元／天，即 393.19 美元／時，故準時時段下之船舶排隊等候時間成本為 930.53 美元／小時 ($\alpha_2=930.53$)。另一方面，早到與遲到船舶之排隊等候時間成本因略低於準時時段者，故假設分別為 8 成與 5 成之排隊等候時間成本，分別為 744.42 美元／小時與 465.27 美元／小時 ($\alpha_1=744.42$, $\alpha_3=465.27$)。

船舶若提早抵達船席將產生提早抵達成本 (β_1)，此成本為因提早抵達而將貨物暫存於港埠倉儲之存放成本，以及自船邊運送至港埠倉儲的運輸成本。高雄港借用棧租費用計算約 96.12 美元／小時，將貨物從船邊運送至港埠倉儲的運送成本，計算約為 482.60 美元／小時，故船舶早到時間成本為 578.8 美元／小時 ($\beta_1=578.8$)。

若船舶延遲抵達，將影響工廠安全存貨量與出產產品的數量，為確保商譽，工廠往往願意支付較高價格購買原物料以求生產產品之順暢。此外，延遲抵達將影響不定期船的還船時間，以高雄港為例，進口貨物多為煤礦（44.64%）為主，臺灣主要工廠平均每天需約 2948.18 公噸之燃煤，以 2018 年現貨價為 66.69 美元計，其現貨損失成本為 8192.26 美元／小時。另一方面若超過還船時間，使得船東求償每日船舶租金成本為 393.19 美元／小時，故船舶遲到時間成本為 8585.45 美元／小時（ $\gamma_3=8585.45$ ）。綜整上述相關數值，表 5 為模式相關成本數值之整理表。

表 5 高雄港埠實例相關數值整理表

單位	數據
船舶數量	16 艘
船舶總排隊等候時間長度	14.757 小時
排隊等候時間成本	早到：744.72 美元／小時 準時：930.53 美元／小時 遲到：465.27 美元／小時
早到時間成本	578.8 美元／小時
遲到時間成本	8585.45 元／小時
彈性報到時段	06:30 ~ 07:30

根據上述數值配合前節所推導之船席等候定價模式，可透過 Matlab 軟體建立程式進行模擬，程式可計算並製圖收費實施前、零等候彈性收費架構與階梯式彈性收費架構之結果，本次以模擬高雄港三階段彈性收費架構為例，其結果如圖 9 所示，圖中左邊黑色多邊

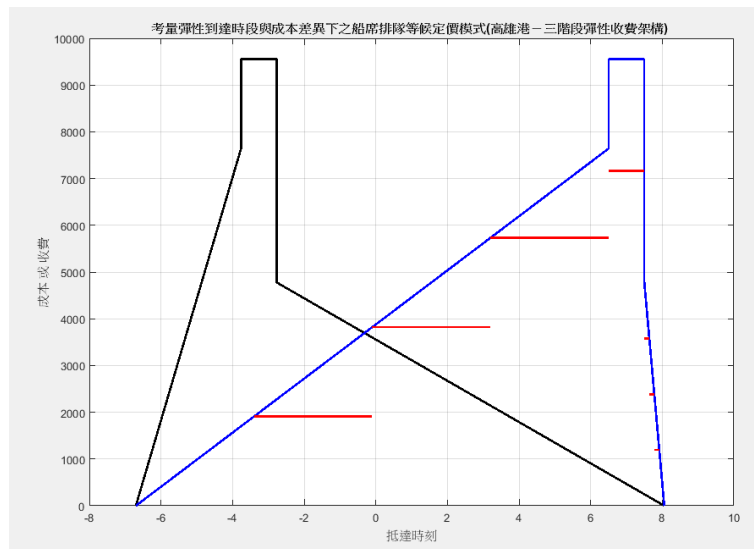


圖 12 三階段彈性收費架構圖(高雄港)

形為收費實施前之船舶排隊等候時間成本，右邊藍色多邊形則為零等候彈性收費架構，紅色線段則為三階段彈性收費架構下之收費金額與收費起訖及轉換時刻；表 6 則為計算後所有時刻值與收費金額之整理表。

表 6 三階段彈性架構下模式之收費金額與收費起訖時刻值（高雄港）

模式各時刻值與收費金額	計算結果	換算時段
等候開始時刻 (t_q)	-6.7008	17:17:57
等候結束時刻 ($t_{q'}$)	8.0562	08:03:22
船舶總排隊等候時間長度 ($t_{q'} - t_q$)	14.757	14:45:25
船舶準時抵時時段 [$\tilde{t}_s, \tilde{t}_e$]	[-3.7638, -2.7638]	20:14:10~21:14:10
彈性報到時段 [t_s^*, t_e^*]	[6.5, 7.5]	6:30~7:30
早到第一階段收費開始時刻 t^+	-3.4006	20:35:58
早到第二階段收費開始時刻 t^{2+}	-0.1004	23:53:59
早到第三階段收費開始時刻 t^{3+}	3.1998	3:11:59
遲到第三階段收費結束時刻 t^{3-}	7.6391	7:38:21
遲到第二階段收費結束時刻 t^{2-}	7.7781	7:46:41
遲到第一階段收費結束時刻 t^-	7.9772	7:58:38
早到第一階段收費金額 τ_1^{E3}	1910.2	
早到第二階段收費金額 τ_2^{E3}	3820.3	
早到第三階段收費金額 τ_3^{E3}	5730.5	
準時收費金額 τ^{O3}	7163.1	
遲到第三階段收費金額 τ_1^{L3}	1193.9	
遲到第二階段收費金額 τ_2^{L3}	2387.7	
遲到第一階段收費金額 τ_3^{L3}	3581.6	
收費對於船舶等候消除效果	75%	

表 7 列出模式在收費實施前、零等候彈性收費下船舶抵達時刻，透過抵達時刻的改變可驗證收費能使船舶分散到達，且船舶在收費架構下將可延後其抵達時刻，亦省下排隊等候時間。在模式中，總船舶排隊等候時段長度為 14 小時 45 分鐘；早到船舶在收費實施前屬於 2 小時 57 分鐘之密集抵達狀態 (17:17~20:14)，在零等候彈性收費架構中，則抵達時

段延長為 13 小時 13 分鐘 (17:17~06:30)；準時時段則由前一天 20:14 至 21:14 延後至隔天 06:30 至 07:30；而原本遲到時段為 10 小時 49 分鐘，在零等候彈性收費架構中將可縮短為 33 分鐘 (由 21:14~08:03 變化為 07:30~08:03)。收費實施前與零等候彈性收費架構之總時段長度相同，由此可知收費僅分散船舶過於密集抵達之效果，舒緩船舶排隊等候現象。

表 7 收費實施前與零等候彈性收費架構下抵達時刻之變化 (高雄港)

抵達型態	收費實施前	零等候彈性收費架構
早到時段	17:17~20:14	17:17~06:30
準時時段	20:14~21:14	06:30~07:30
遲到時段	21:14~08:03	07:30~08:03
總計	14h45m	14h45m

五、結論與建議

本研究主要目的乃是針對既有的船席等候定價模式中，所有船舶的排隊等候時間成本均相同以及船舶在錨區的報到時間為單一時刻之兩項假設，與目前海運實務之現況有所差異，為了修正與補強既有的船席等候定價模式在實務應用上不足之處，使其能更貼切海運的實際運作現況，本研究透過放寬既有船席等候定價模式之假設，考量不同性質船舶之不同排隊等候時間價值，以及船舶報到時間為彈性時段，重新建構船席等候定價模式。

本文首先依不同性質之船舶早到、準時與遲到之抵達型態建構船舶成本函數，接著依船舶進港之船席靠泊情況，建構總船舶排隊等候時間長度公式，據此可順利計算出收費實施前之船舶均衡成本。接著考量以價制量：收費取代等候時間之概念，順利推導出零等候彈性收費架構以及階梯式彈性收費架構。前者之收費架構實施後，可以消除所有船舶的排隊等候時間成本，但因整個排隊等候時段皆需收費的特性，可能導致該收費方式不易被使用者接受之疑慮；後者之收費架構實施後，雖無法消除所有船舶的排隊等候時間成本，但因存在免付費時段以及依時段差別付費的特性，該收費方式可能在實務上較易被使用者接受。

依據本文模式計算結果顯示，在階梯式彈性收費架構中， n 階段將對應 $2n+1$ 個收費金額，收費金額依早到、準時與遲到之到達型態而有所區分；在階梯式收費中準時時段之收費金額最高，早到次之，遲到則最低。此外，收費起迄時刻以及中途轉換收費金額之收費轉換時刻總共為 $2(n+1)$ 個。至於階梯式彈性收費架構所能產生的排隊等候時間消除效果而言，本文模式在單階段彈性收費架構中可消除 50%之排隊等候時間成本，兩階段彈性收費架構則可消除 66.67%之排隊等候時間成本，三階段彈性收費架構可消除 75%排隊等候時間成本。數值分析中透過蒐集 2018 年高雄港相關數據與成本資料進行分析，研究模擬三

階段彈性收費架構下之結果，結果顯示船舶在早到、準時與遲到等 3 種不同性質之群組下，因收費造成船舶延後其抵達時刻的現象，收費實施後除確可舒緩早到時段過於密集抵達之情況外，並可縮短遲到時段之船舶等候時間，進而舒緩船舶在外港錨區的排隊等候現象。

在上述模式中，目前研究僅探討需求方之收費架構，尚未探討供方之投入成本。因收費架構之收費階段數須供（港務單位）需（船東）雙方之成本函數相交點，方為最佳階段數之收費架構，未來若考量兩者之成本函數，可使階梯式收費架構之階段數更貼近實務。此外，研究中對於收費前後船舶個別移動之變化過程亦尚未著墨探討。而研究中假設不同性質分為三群，即早到、準時與遲到狀態，在此情況下，倘若單一早到時段之船舶，尚可研究細分多種不同時間價值之狀態，從而進行推導，將使模式更具有完備之收費架構。

參考文獻

1. Vickrey, W. S., "Congestion Theory and Transport Investment", *American Economic Review*, Vol. 59, Issue 2, 1969, pp. 251-260.
2. Arnott, R., De Palma, A., and Lindsey, R., "Economics of a Bottleneck", *Journal of Urban Economics*, Vol. 27, No. 1, 1990, pp. 111-130.
3. Laih, C. H., "Queueing at a Bottleneck with Single and Multi-Step Tolls", *Transportation Research Part A: Policy & Practice*, Vol. 28, No. 3, 1994, pp. 197-208.
4. Laih, C. H., "Effects of the Optimal Step Toll Scheme on Equilibrium Commuter Behaviour", *Applied Economics*, Vol. 36, No. 1, 2004, pp. 59-81.
5. 賴禎秀，「階梯式擁擠收費體制下最佳收費階段數之研究」，*運輸計劃季刊*，第 30 卷，第 2 期，民國 90 年，頁 253-274。
6. Lindsey, C. R., Van den Berg, V. A., and Verhoef, E. T., "Step Tolling with Bottleneck Queuing Congestion", *Journal of Urban Economics*, Vol. 72, No.1, 2012, pp. 46-59.
7. Vincent, A. C. and van den Berg, V. A. C., "Coarse Tolling with Heterogeneous Preferences", *Transportation Research-Part B*, Vol. 64, No. 1, 2014, pp. 1-23.
8. Laih, C. H. and Sun, P. Y., "The Optimal Toll Scheme for Ships Queuing at the Entrance of Panama Canal", *Maritime Economics and Logistics*, Vol. 16, 2014, pp. 20-32.
9. Laih, C. H., Tsai, Y. C., and Chen, Z. B., "Optimal Non-Queuing Pricing for the Suez Canal", *Maritime Economics and Logistics*, Vol. 17, 2015, pp. 359-370.
10. Laih, C. H., Lin, B., and Chen, K. Y., "Effects of the Optimal Port Queuing Pricing on Arrival Decisions for Container Ships", *Applied Economics*, Vol. 39, 2007, pp. 1855-1865.
11. Laih, C. H. and Chen, K. Y., "Economics on the Optimal N-Step Toll Scheme for a Queuing Port", *Applied Economics*, Vol. 40, 2008, pp. 209-228.
12. Laih, C. H. and Chen, K. Y., "Economics on the Optimal Port Queuing Pricing to Bulk Ships", *Applied Economics*, Vol. 41, 2009, pp. 2817-2825.
13. Laih, C. H. and Sun, P. Y., "Effects of the Optimal N-Step Tolls on Bulk Vessels Queuing for Multiple Berths of a Busy Port", *Transport Policy*, Vol. 28, 2013, pp. 42-50.

14. 林晏如，「定期到達與隨機到達情況下船舶排隊等候定價模式之研究」，國立臺灣海洋大學商船學系碩士論文，民國 101 年。
15. 吳瑾麟，「考慮船舶引水服務及異質貨種條件下不定期船舶席排隊等候定價之研究」，國立臺灣海洋大學商船學系碩士學位論文，民國 102 年。
16. 謝佳璇，「不定期船於外港錨區之隨機到達與等候定價模式之研究」，國立臺灣海洋大學商船學系碩士論文，民國 104 年。
17. Sun, P. Y., Lai, C. H., and Chen, C. L., "Modeling the Optimal Pricing for Nonscheduled Trampers Queuing for Shared-Use Berths at a Busy Port", *International Journal of Transport Economics*, Vol. 43, No. 3, 2016, pp. 361-378.

附錄 符號定義表

t :	船舶抵達錨區時刻
t_q :	船舶等候開始時刻
$t_{q'}$:	船舶結束等候時刻
$C(t)$:	船舶成本函數
$T_Q(t)$:	船舶之等候時間長度
$T_E(t)$:	船舶提早到達之時間長度
$T_L(t)$:	船舶延遲到達之時間長度
λ :	船舶平均每日到達艘次
i :	計算船舶種類範圍
j :	計算船舶計數範圍
$P(\mu(i))$:	船舶到達錨區的機率
$\mu(i)$:	期待來船艘數
μ_u :	卜式分配取 95%信賴區間後之期待來船艘次上限
μ_l :	卜式分配取 95%信賴區間後之期待來船艘次下限
σ_i :	不同種類之船舶的每日船舶來船數之變異數
X_i :	不同種類之船舶的年來船總數
$h(i)$:	指數分配計算之船舶來船間隔時間
C :	指數函數機率值
θ :	船舶的平均裝卸時間長度
AT_i :	船舶平均裝載量
M_i :	船舶可使用裝卸機具數
V_i :	船舶裝卸機具裝卸速率
$S_i(j)$:	船舶共用船席數量

Ψ :	船舶總排隊等候時間長度
TC^e :	船舶均衡成本
$\tau(t)$:	零等候收費架構
t_s^* :	港務管理單位規定之報到時段起點
t_e^* :	港務管理單位規定之報到時段迄點
$\tilde{t}_s$:	船舶能準時完成報到之抵達時段起點
$\tilde{t}_e$:	船舶能準時完成報到之抵達時段迄點
α_1 :	早到型態之船舶排隊等候時間成本
β_1 :	早到型態之船舶早到時間成本
α_2 :	準時型態之船舶排隊等候時間成本
α_3 :	遲到型態之船舶排隊等候時間成本
γ_3 :	遲到型態之船舶遲到時間成本。
t^+, t^{2+}, t^{3+} :	單階段至三階段收費起點
t^-, t^{2-}, t^{3-} :	單階段至三階段收費迄點
τ_{step}^E :	早到時段收費金額
τ_{step}^O :	準時時段收費金額
τ_{step}^L :	遲到時段收費金額

