

國立交通大學  
運輸與物流管理學系

碩士論文

智慧型貨櫃碼頭自動引導車運輸路徑的研究  
Research on the transportation path of intelligent  
container terminal automatic guided vehicle

研究生：李辰杰

指導教授：黃明居 教授

中華民國 一零九年 六月

智慧型貨櫃碼頭自動引導車運輸路徑的研究

Research on the transportation path of intelligent container terminal  
automatic guided vehicle

研究生：李辰杰

Student: Lichenjie

指導教授：黃明居

Advisor: Ming Jiu Hwang

國立交通大學  
運輸與物流管理學系  
碩士論文

A Thesis  
Submitted to Department of Transportation and Logistics Management  
College of Management  
National Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master  
in  
Logistics Management

June 2020

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇九年六月

# 智慧型貨櫃碼頭自動引導車運輸路徑的研究

研究生：李辰杰

指導教授：黃明居教授

國立交通大學

國立交通大學運輸與物流管理學系物流管理碩士班

## 摘要

全球貿易的不斷增加一直在推動海洋運輸的需求，而貨櫃運輸作為海運中的主力軍，成為各國間貨物往來的重要橋樑。傳統的貨櫃碼頭在處理如此龐大的貨物量下便顯得捉襟見肘。於是，具有高自動化水準的智慧型貨櫃碼頭的誕生似乎滿足了這種不斷增長的需求，並且能夠較大程度提高港口的作業效率，並降低港口人力資源和排放成本。如何不斷提高貨櫃碼頭的作業效率仍是港口運營最主要的管理主題之一。隨著自動引導車（Automated Guided Vehicle）及其應用不斷發展，如何高效的應用這些設施設備就成為了學者們新的研究方向。

本文以 AGV 為研究對象，模擬其在智慧型貨櫃碼頭的環境下，在配備有岸邊起重機及堆場起重機共同配合作業的條件下開發出一個混合運載模型，旨在縮短貨櫃的運輸時間，提高貨櫃的運輸效率。該混合裝載模式的特點是可選擇同時裝載2個20呎貨櫃或是1個40呎貨櫃，充分利用到了 AGV 的容量，提高了 AGV 的作業效率。

接著，通過選擇中國大陸某智慧型貨櫃碼頭作為實例進行研究。設計了一個16節點的網路，計算出依次處理9個貨櫃（8個20呎，1個40呎）需要時218.548，並在參數敏感度的分析中，在保持 AGV 最大容量增幅50%的情況下，作業總時間的平均增幅不到15%，且逐漸趨緩，表明新模型具有較高的穩定性。最後，依照從實際智慧型貨櫃碼頭中瞭解到的資訊，結合本文新建立之模式，對本文的研究成果進行了總結與評價，指出了對未來研究方向的意見與建議。

**關鍵字：**智慧型貨櫃碼頭、多載荷自動引導車、路徑問題、最佳化模型

# **Research on the transportation path of intelligent container terminal automatic guided vehicle**

Student: Lichenjie

Advisor: Ming Jiu Hwang

Department of Transportation and Logistics  
Management  
National Chiao Tung University

## **ABSTRACT**

The increasing global trade has been promoting the demand of ocean transportation. As the main force in ocean transportation, container transportation has become an important bridge between countries. The traditional container terminal can't handle such a large amount of cargo. Therefore, the birth of intelligent container terminal with high automation level seems to meet this growing demand, and can greatly improve the operation efficiency of the port. How to improve the operation efficiency of container terminal is still one of the most important management themes of port operation. How to use these facilities efficiently has become a new research direction for scholars.

This thesis takes AGV as the research object, simulates it in the environment of intelligent container terminal, and develops a mixed transport model under the condition of the cooperation of shore crane and yard crane, aiming to shorten the transport time of container and improve the transport efficiency of container. The hybrid loading mode can load two 20 foot containers or one 40 foot container at the same time, making full use of the capacity of AGV and improving the efficiency of AGV.

Then, by selecting a smart container terminal in mainland China as an example, a 16 node network was designed, and 218.548 time needed to process 9 containers (8 20 ft, 1 40 ft) in turn was calculated. In the parameter sensitivity analysis, the average increase of total operation time was less than 15% while maintaining the maximum capacity increase of AGV by 50%, and gradually slowed down, indicating that The new model has high stability. Finally, according to the information learned from the actual smart container terminal, combined with the new model established in this paper, the research results of this paper are summarized and evaluated, and the suggestions for the future research direction are pointed out.

**Key words: intelligent container terminal, multi-load AGV, path problem, optimization model**

# 誌謝

時光飛逝，兩年的研究所生活很快地到了尾聲，在這段日子裡，一路上因為 老師同學及家人的陪伴、鼓勵與幫助，才能使我順利完成學業。

首先要感謝我的指導教授，黃明居老師。黃老師在專業領域上給了我極大的幫助，無論是平時開會到最後的論文，使我在海運物流領域更加精進，最感謝黃老師的是在生活上對我的關心，因為我是陸生，雖然之前有過在臺灣交換學習的經歷，但研究所畢竟不同于之前交換學習，在老師的關照與指點下，我很快就融入到交大的學習與生活的氛圍之中。能成為老師的指導學生，是我在研究所中最幸運的事情，真的很感謝老師對我的關愛。

我的家人，謝謝你們，你們始終是我最堅強的後盾，督促我循序漸進地完成論文，父母始終提供我一個衣食無缺的生活環境，使我能無後顧之憂的完成學業。感謝父母對我的栽培與付出，我才能有今日的成就。

感謝交大的所有教職人員，在畢業前的最後一學期，因為 COVID-19的影響，我未能如期赴台，但在他們的努力下，通過網路遠程教學，使我能夠如期的完成學業。雖然中間也發生許多問題，但是在系辦柳姐、鄭姐等同仁的積極幫忙下都順利的解決了，真的很感謝各位的付出。

同樣感謝同 Lab 的同學們，宜庭、品璇、紘宇、佳慧，這兩年內一起參與活動、meeting、口試等等，感謝你們在學習與生活上給予我的幫助。祝福各位在未來都能一帆風順。

最後的最後，再次感謝所有人，因為有你們的幫助，才能如此順遂，謝謝。

李辰杰 謹誌於  
國立交通大學 運輸與物流管理學系  
中華民國 一〇八年 六月

# 目錄

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 中文摘要.....                    | I   |
| ABSTRACT.....                | II  |
| 誌謝.....                      | III |
| 目錄.....                      | V   |
| 圖目錄.....                     | VI  |
| 表目錄.....                     | VII |
| 第一章、緒論.....                  | 1   |
| 1.1 研究背景與目的.....             | 1   |
| 1.2 研究方法.....                | 3   |
| 1.3 研究範圍與限制.....             | 3   |
| 1.4 研究流程與論文架構.....           | 4   |
| 第二章、文獻回顧.....                | 5   |
| 2.1 智慧港口.....                | 5   |
| 2.2 智慧型貨櫃碼頭營運模式.....         | 8   |
| 2.3 應用 AGV 的智慧型貨櫃碼頭常見問題..... | 10  |
| 2.4 求解路徑問題常用解法.....          | 15  |
| 2.5 小結.....                  | 17  |
| 第三章 AGV 運輸模式與數學模型之構建.....    | 18  |
| 3.1 AGV 運輸問題描述.....          | 18  |
| 3.2 模型假設.....                | 21  |
| 3.3 數學模型之構建.....             | 22  |
| 3.3.1 參變數與決策變數之定義.....       | 22  |
| 3.3.2 數學模型.....              | 23  |
| 3.4 簡例測試.....                | 26  |
| 3.4.1 問題說明.....              | 26  |

|                    |    |
|--------------------|----|
| 3.4.2 參數設定.....    | 27 |
| 3.4.3 求解過程與結果..... | 29 |
| 3.4.4 對比分析.....    | 31 |
| 第四章、實證研究.....      | 33 |
| 4.1 問題描述.....      | 33 |
| 4.2 參數設定.....      | 36 |
| 4.3 求解過程與結果.....   | 39 |
| 4.4 敏感度分析.....     | 40 |
| 第五章、結論與建議.....     | 43 |
| 5.1 結論.....        | 43 |
| 5.2 建議.....        | 44 |
| 參考文獻.....          | 45 |

## 圖目錄

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 圖 1.1 文章架構圖.....          | 4  |
| 圖 2.1 智慧港口技術架構 .....      | 7  |
| 圖 2.2 智慧型貨櫃碼頭常見佈局一.....   | 10 |
| 圖 2.3 智慧型貨櫃碼頭常見佈局二.....   | 11 |
| 圖 2.4 智慧型貨櫃碼頭常見佈局三.....   | 11 |
| 圖 3.1 智慧型貨櫃碼頭佈局.....      | 19 |
| 圖 3.2 行駛過程 .....          | 20 |
| 圖 3.3 簡例網路.....           | 26 |
| 圖 3.4 求解流程 .....          | 29 |
| 圖 3.5 簡例求解結果.....         | 30 |
| 圖 3.6 傳統模式求解結果 .....      | 31 |
| 圖 4.1 智慧型碼頭平面分佈圖 .....    | 34 |
| 圖 4.2 實例網路.....           | 35 |
| 圖 4.3 實例求解結果 .....        | 39 |
| 圖 4.4 AGV 容量與總時間關係變化..... | 41 |
| 圖 4.5 AGV 容量與總時間增加比率..... | 42 |

## 表目錄

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 表 3-1 模式對比 .....              | 20 |
| 表 3-2 模型定義的集合 .....           | 22 |
| 表 3-3 模型定義的參數 .....           | 22 |
| 表 3-4 模型定義的變數 .....           | 23 |
| 表 3-5 節點名稱及座標 .....           | 27 |
| 表 3-6 參數 $T_{ab}$ .....       | 27 |
| 表 3-7 起始節點貨櫃儲存量 .....         | 28 |
| 表 3-8 完成節點貨櫃儲存量 .....         | 28 |
| 表 3-9 參數 $d_a$ .....          | 38 |
| 表 3-10 作業總時間 .....            | 31 |
| 表 3-11 傳統模式作業總時間 .....        | 32 |
| 表 3-12 兩種模式對比 .....           | 32 |
| 表 4-1 表4-1 堆場進出表（部分）（日） ..... | 33 |
| 表 4-2 AGV 性能參數表 .....         | 34 |
| 表 4-3 節點名稱及座標 .....           | 35 |
| 表 4-4 參數 $T_{ab}$ .....       | 37 |
| 表 4-5 起始節點貨櫃量 .....           | 38 |
| 表 4-6 完成節點貨櫃量 .....           | 38 |
| 表 4-7 參數參數 $d_a$ .....        | 39 |
| 表 4-8 實例求解結果 .....            | 40 |
| 表 4-9 不同參數求解結果 .....          | 41 |

# 第一章、緒論

## 1.1 研究背景與目的

隨著全球化的不斷深入，世界各國間的貿易往來也在不斷的強化，而超過80%的貨物進出口依然是經由海運，通過貨櫃來回穿梭在世界各地。儼然，貨櫃已經成為了海運中十分重要的載體。於是，貨櫃碼頭便成為實現海陸運輸轉換的關鍵樞紐。隨著船舶的大型化，但港口數量、港口腹地面積又無法大幅度增加的條件下，面臨著港口貨物輸送量的瓶頸問題。而這一問題的原因則是來自於碼頭作業效率的限制，傳統人工作業的效率已經達到了頂峰，無法繼續滿足日益增長的貨物輸送量。為了解決這一問題，港口管理人員將越來越多的自動化機械設備引進港口碼頭的作業中，逐漸替代傳統人工作業，使得作業效率有了顯著的提升，於是，傳統的貨櫃碼頭就慢慢進入到自動化貨櫃碼頭的時代中去。而當下的智慧型貨櫃碼頭，則可以認為是自動化貨櫃碼頭的升級版（劉興鵬，2016）。

智慧型貨櫃碼頭指的是綜合利用互聯網、雲計算、大資料、智慧傳感設備、自動化設施設備等先進技術，對碼頭內的各項作業活動進行協調控制，達到對各類資源要素的最佳使用，實現智慧、高效、快速、便捷的目標（朱連義，2015）。

在20世紀80年代中後期，歐洲就已經出現了智慧型貨櫃碼頭，荷蘭的鹿特丹港就是第一個擁有現代化智慧碼頭的港口，隨後緊接著英國、德國、日本等也紛紛開始建設智慧型碼頭。智慧型貨櫃碼頭發展至今大致可以分為4代：第一代以1993年投入運營的荷蘭鹿特丹港 ECT（Europe Combined Terminals）碼頭為代表；第二代以2002年投入運營的德國漢堡港 CTA（Container Terminal Altenwerder）碼頭為代表；第三代以2008年投入運營的荷蘭鹿特丹港 Euromax 碼頭為代表，而第四代則是中國大陸的廈門遠洋自動化貨櫃碼頭，同樣也是中國大陸的第一個全自動化貨櫃碼頭。

智慧型貨櫃碼頭一定是優於傳統的貨櫃碼頭。但隨著越來越多傳統貨櫃碼頭的升級改造，逐漸過渡向智慧化，在不同的智慧型貨櫃碼頭之間比較優劣就成為了新的問題。而影響智慧型貨櫃碼頭作業效率的原因，除了自動化設備在機械性能上的先天差異外，在後天的設備營運調度管理上的差異才更為關鍵。一般來說，岸邊起重機、堆場起重機與自動引導車（AGV）這三種設備是現在智慧型貨櫃碼頭的基本配備。於是，學者們就針對這三種設備及時下新近出現的自動化設備展開了大量的研究，包括像岸邊起重機與 AGV 聯合調度的研究、AGV 與自動升降車（ALV）共同作業模式的探討等，並取得了較大的成果。但是，對過去學者們的研究進行梳理時我們發現，學者們研究的重點大多都集中在討論多種自動

化設備的集合調度，如岸邊起重機與貨櫃車或 AGV、岸邊起重機與跨運車等，而對單個設備如堆場起重機、AGV 等的運作模式討論較少，特別是與 AGV 運輸模式相關之內容。於是，本文選擇對 AGV 運輸模式進行研究，通過將傳統 AGV 裝載貨櫃的模式進行升級，提出了一種混合運載的 AGV 運輸貨櫃模式。

因此，本文著重在突出新建立之混合運載模式的高效性，通過對比傳統運輸模式與本文新建立混合運輸模式的作業效率，來說明混合運輸模式對於智慧型貨櫃碼頭效率提升的作用。

所以，本文的研究目的可以分為以下幾個方面：

- (1) 探討智慧港口的基本構成、技術支撐、發展歷程等，及智慧型貨櫃碼頭相關之研究現狀。
- (2) 建立一種新型應用自動引導車運輸貨櫃的混合運載模式，通過數學模型呈現，並通過對比傳統運輸模式，表明新模式的優勢。
- (3) 評價並總結新模式與實際情況的差異，提出一些改進建議，為將來進一步研究如何提高應用自動引導車的貨櫃運輸模式之效率提供參考與啟示。

## 1.2 研究方法

本文採用的研究方法是通過數學模式建立模型，通過簡例測試與實例驗證來說明新建立模式之可行性與高效性，並對模型求解結果進行對比與敏感度分析，最後結合貨櫃碼頭實際作業情況，對本模式進行評估，提出改進的意見與建議。

其中，在模型的求解方法上，採用數學規劃求解軟體，利用數學規劃求解軟體中內置的演算法來求解簡例與實例。

## 1.3 研究範圍與限制

本文的主要研究範圍是在智慧型貨櫃碼頭的背景下，研究一種應用自動引導車進行貨櫃運輸的混合搭載運輸模式。研究範圍包括了：

- (1) 智慧港口及智慧型貨櫃碼頭的概況、發展、研究問題與解決方法等相關內容，
- (2) 基於智慧型貨櫃碼頭的環境下，建立應用自動引導車運輸貨櫃的混合運載運輸模式，
- (3) 對新發展模式的範例測試、實例驗證與分析，
- (4) 評估新模式與實際碼頭操作中存在的差異並提出意見與建議，

本文研究所提出之混合運載模式，目前在世界上大多數智慧型貨櫃碼頭實際日常作業中尚無應用之先例，僅在個別智慧型貨櫃碼頭進行初步的測試實驗，所以在沒有相關研究成果基礎可借鑒的情況下，本文研究只能考慮在最基本的條件下開展，因此在研究過程中可能會存在著以下的限制。

- (1) 新建立的模式是基於較為理想的環境條件之下，僅考慮最基本的影響因素，未考慮過多實際中可能存在的影響因素，
- (2) 新建立的模型中僅採用一輛自動引導車進行測試，與實際的碼頭作業中常見情況可能有所區別，
- (3) 新建立的模型中在一次運輸中不允許自動引導車在兩點間重複行駛，同樣與實際的情況有一定的區別。
- (4) 在求解方法上未提出新的求解演算法，在處理大規模問題時效率較低。

## 1.4 研究流程與論文架構

論文的整體架構包括了緒論、文獻回顧、模型建立、實例驗證、結論與建議與參考文獻等部分。

論文總共5個章節，第一章為緒論部分，包含研究背景、研究動機、研究目的、研究範圍與限制、研究方法和文章架構；第二章為文獻回顧部分，主要內容包含與智慧港口、智慧型貨櫃碼頭及應用 AGV 的智慧型貨櫃碼頭常見問題相關的中英文文獻的回顧與評價、路徑問題的常見解決方法、以及最後的小結等內容；第三章為論文的研究內容部分，內容包括研究問題的提出與描述、本文研究問題與過往文獻所研究問題的差異之處、提出新模式之假設，建立數學模型，引用簡例對新模型進行測試，最後進行新舊模式的比對分析；第四章為實例驗證部分，主要內容是對前一章節建立的模型引入實例資料進行測試，並進行敏感度分析；第五章為結論與建議的部分，主要是對本文所建立的混合運輸模式進行總結與評價，並結合在實際貨櫃碼頭中瞭解到的情況，結合本文的貢獻，提出意見與建議。文章末尾部分則是參考文獻。

具體研究流程可參照下圖，

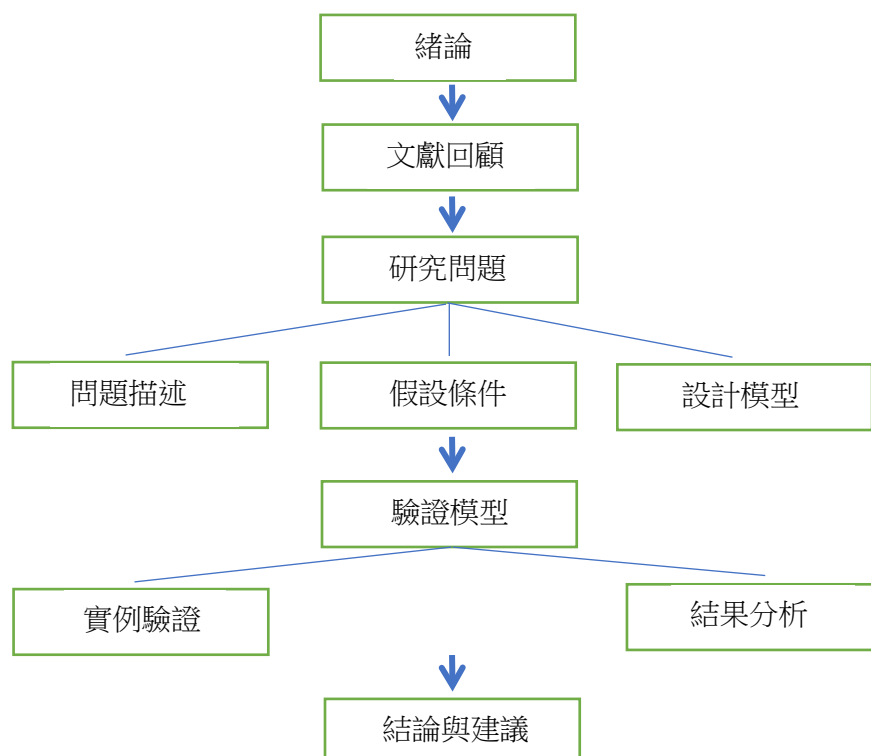


圖 1-1 文章架構圖

## 第二章、文獻回顧

文獻的內容大致可分為三個部分，分別是智慧港口之相關研究、智慧型貨櫃碼頭營運模式之相關研究及應用AGV的智慧型貨櫃碼頭之相關研究，同時對常見的求解方法也進行了介紹。其中AGV相關問題的文獻回顧與本文所研究之課題最為相關，通過對該部分研究內容的梳理，可以發現過往研究主要側重的研究方向，也能發現研究較為不足的部分。最後，我們總結出目前在智慧型貨櫃碼頭領域內幾個主要的研究方向。

### 2.1 智慧港口

智慧港口，是將物聯網技術與人工智慧技術等多項高端智慧技術整合起來，綜合應用於傳統的港口中。實際上，很早之前就有學者提出來，並且也嘗試在港口中進行推廣實踐，但是由於技術條件的限制，早期的智慧港口發展速度極為緩慢，隨著時代與科技的不斷進步，結合新一代的傳感技術、通信技術與人工智慧等，現代的智慧港口已經具備了相當程度之“智慧”。

J.Ngai等人（2008）對1995年至2005年期間與RFID相關的研究文獻進行了分析，並從技術、應用領域及安全問題等方面指出了RFID發展面臨的問題。L.Atzori，A.Iera等人（2010）對物聯網的發展狀況進行了分析，提出了整合多個技術和互相協調基礎上提高通信品質的建議，並且指出資訊發送給特定物件是物聯網最核心的環節。而B.Joshu（2014）在《Effective Java》中對於物流資訊平臺的搭建進行了較為詳盡的描述。Guizhu Lin（2019）在《Construction of smart port supply chain under "Internet +"》中表示，隨著現代化科學資訊技術的不斷發展，為了保證港口的順利運行，將注重加強智慧港口供應鏈的構建工作。並詳細研究“互聯網 +”下智慧港口供應鏈的構建，注重分析互聯網與智慧港口供應鏈之間的關係，為後續研究工作奠定基礎。Hong Li（2020）等人在“Problems and development suggestions on smart port construction in China”中提出，智慧港口的發展需要政府部門強有力的指導和政策支持；智慧港口的發展需要依託港口企業持續創新服務模式，加大新技術的應用；智慧港口的發展需要智力支援。

俞靈（2010）以物聯網與港口公用物流資訊平臺進行互聯為基礎，規劃了港口物聯網的架構和體系，並且提出在電子政務平臺建設、物聯網規劃、港航電子商務平臺中應當充分利用現有資源、保持資料傳輸格式的一致性，從而提高資料的安全性。徐勇軍（2010）在《物聯網在港口物流領域的應用》中指出，智慧港口的服務物件是客戶、港口及相關方，要從改善資訊化建設、加強創新、提高實用性、改善口岸環境和系統開放性等多角度著手。王宇等人（2010）在《物聯網技術在智慧港口中的應用前景》一文中首先介紹了物聯網和

智慧港口的相關概念及關鍵技術，並根據國內外物聯網的研究和發展現狀提出了智慧港口物聯網技術架構，分析了物聯網技術在智慧港口中的應用前景。張全升，龔六堂等（2011）指出基於物聯網的智慧物流模式發展，注釋智慧交通、物流供應鏈管理、電子商務3個方面的有機結合，開放式的物流電子商務模式將是未來物流發展模式的重要類型之一。胥軍、李金等（2011）闡述了智慧物流系統借助物聯網技術實現的基本思路，分析了智慧物流的相關理論和技術，剖析了目前智慧物流系統的應用實例—英國電信和美國沃爾瑪的智慧物流系統，認為物聯網下的智慧物流系統將物流服務的範圍大大拓寬。吳曉劍，王繼祥（2011）研究認為隨著物聯網技術開發與應用的逐步深入，由物聯網技術衍生的相關產業已逐漸形成規模，這充分說明瞭我國的物聯網技術應用的快速發展程度。陳利，袁蓉（2011）等闡述了物聯網技術對智慧物流供應鏈的影響，並提出了一種基於物聯網的智慧物流供應鏈管理的新模式，在該模式下企業可隨時查詢到產品的狀態並決定如何處理該產品。

馬仁洪、陳有文（2012）在《以物聯網技術促進港口智慧化發展》一文中對國內外智慧港口發展現狀進行了分析，同時指出，促進中國港口發展方式轉變、提升港口綜合競爭力、實現港口現代化的重要手段是大力推進在智慧港口發展物聯網技術。唐雅璿等人（2012）在研究中設計了以物聯技術為基礎的港口資訊系統，借助該系統實現了自動堆放和拖車自動卸載。仇豔麗、趙豔芳等人（2012）在《物聯網技術在集裝箱管理中的應用研究》利用GPS、智能標籤、感測器等物聯網技術，將船、裝箱和裝卸吊具等要素整合在一起，實現了集裝箱相關資源一體化和資源資訊化。張岩（2013）對港口運輸過程中物聯網技術的應用情況進行了探索，提出了物聯網技術應用於港口集裝箱運輸管理方面的建議。張麗君（2015）在《現代物流理論》中論述了智慧港口中的智慧物流系統技術，需要利用資料整理和自動化技術提升港口的智慧性，同時把提升系統安全性和有效性為基礎，更好的為客戶提供便捷服務。羅本成、解玉玲（2016）對智慧港口的物流體系結構以及水路運輸策略進行了概述，指出了隨著現代交通和物流網技術的發展，物流體系結構和水路運輸策略也發生了相應的變化。陶德馨（2017）在《智慧港口發展現狀與展望》中提到了全球化趨勢和互聯網+的發展，港口自動化裝箱將會成為未來發展的必然方向。羅本成（2017）在研究中指出，在智慧港口模式下，港口業務開放程度更高，港口生態效益更加顯著，發展更加有序與高效。黃桁（2018）分析指出，碼頭運營的智慧化、港域調度的智慧化和海運物流的協同化實現之後，有利於供應鏈金融的普及與便利化。

劉興鵬、張澍寧（2016）在“智慧港口內涵及其關鍵技術”中對智慧港口的概念、目標和架構三個方面對智慧港口內涵進行詳細闡述。作者首先對智慧港口進行定義，對於充分借助物聯網、雲計算、大資料、智慧傳感設備等新一代資訊技術對港口進行透徹感知、廣

泛互聯以及資訊深度挖掘，實現港口各類資源要素的無縫連接和各功能模組的協同聯動，並最終實現港口智慧、高效、安全、便捷、綠色發展的現代化港口形象。

接著，他們對智慧港口提出了3個目標，分別是對遠端資源的有效掌控、資訊資源的高度共用以及提高港口管理決策水準。在架構上，又把它分為4層，分別是資訊感知層、網路傳輸層、資料層、智慧應用層。如下圖。



資料來源：劉興鵬，張澍寧(2016)。

圖 2-1 智慧港口技術架構

高虹橋、邵文淵（2016）等人在“智慧港口的技術框架”一文中進一步闡述了智慧港口的建設內容和技術框架，並對在智慧港口建設過程中的技術應用進行分析。作者在文中指出，建設智慧港口主要有4個關鍵層面，分別是服務、物流、效率、和智慧，主要的內容就是在港口實現與船公司、鐵路、公路、場站、貨代及倉儲等港口物流服務企業的無縫對接，並實現與海關、海事、及檢驗檢疫等口岸服務單位的資訊一體化，促進港口物流服務的電子化、網路化、無紙化和自動化，進一步加強企業與政府合作處理的效率。

朱連義（2015）等人在“世界自動化貨櫃碼頭發展現狀及啟示”中談到隨著世界貨櫃海運量不斷增長和貨櫃船舶日趨大型化，貨櫃裝卸的穩定高效、節能環保和低成本在降低碼頭人力成本、提高港口通過能力、降低裝卸作業能耗、提升港口品牌形象等方面發揮重要作用，是未來港口發展的必然趨勢。

智慧港口，是一個龐大的概念，裡面包含了眾多的組成部分，因此關於這方面的研究多為介紹性的文獻，從系統性的角度去揭示智慧港口的特點與優勢，同時結合一些新興科技，提出意見與建議。

## 2.2 智慧型貨櫃碼頭營運模式

隨著智慧港口的不斷普及，智慧型貨櫃碼頭的營運管理也受到了不少學者的廣泛關注。目前來說，該領域主要的研究方向有兩類，一是研究多種設施設備的集成優化調度；二是對於單個設施設備的運作模式進行研究。無論是哪一種研究類型，其研究方法大都為通過建立數學模型並設計演算法，再利用一定的資料進行驗證。此外，還有部分學者採用模擬的方法來測試、評價一些現有調度策略和方案，通過實驗結果對未來的研究提出意見與建議。

Steenken、Stahlbock（2004）等人對貨櫃碼頭相關作業環節的操作流程和相關研究文獻做了較為全面的梳理和回顧。泊位作為貨櫃碼頭重要而稀缺的資源，合理的泊位調配計畫對減少船舶在港時間，提高整個貨櫃碼頭的運營效率有著重要的作用。Imai（2001）等人將泊位分配問題劃分為離散泊位分配問題和連續泊位分配問題兩種形式。在離散泊位分配下，整個岸線被劃分為若干個獨立的停泊區域，每個區域在同一時刻只能服務於一艘船舶且任何一艘船舶不可以同時跨越兩個泊位。Kim、Moon（2003）將連續泊位分配問題定義為將整個泊位看做是連續而非間斷的，任何一艘船舶只要岸線滿足停泊條件的限制都可以停泊。而Nishimura（2001）等人討論了離散情況下以靠港船舶停泊時間最小為目標的泊位分配問題。Hansen和Oguz（2003）建立了一個緊湊型的混合整數規劃模型同時討論了靜態泊位分配問題和動態泊位分配問題。Golias（2009）等基於前面提到的停泊策略提出了新的停泊準則，並建立了一個組合多目標模型。Imai（2003）等在對離散靜態泊位分配問題的研究時，針對同一時刻每個泊位僅能為一條船服務的準則建立了該問題的混合整數規劃模型，並採用了基於拉格朗日鬆弛的啟發式演算法對該問題進行求解。Park和Kim（2002）針對現需泊位調度問題建立了混合整數規劃模型，通過將該模型轉變為整數規劃模型，設計了用次梯度優化（sub—gradient optimization）的求解方法。陳俊豪、孫士寅對海港客船的離散泊位問題運用線性規劃中的“運輸問題”和“分配問題”思想建立了單目標的0-1規劃模型，提出了矩陣模型求解演算法並應用在港航管理軟體中，取得不錯的效果。曾慶成、張倩研究了貨櫃碼頭泊位分配的幹擾管理問題，並通過建立泊位分配幹擾管理的模擬模型來對幹擾模擬方案進行評價和優化，設計出基於局部重新調度與禁忌演算法的模擬優化演算法。李強將由於船舶推遲到港而產生的幹擾因素和突發事件而產生的幹擾因素分別加入連續泊位調度模型中，從調整最初調度計畫角度出發構建了兩個基於幹擾管理的模型，並採取人機交互與自我調整遺傳演算法進行求解。

而Daganzo、Peterkofsky（1990）等人提出了最早的岸邊起重機調度之概念。Kim、Park（2004）將有相同目的地或類型的貨櫃箱任務群進行分類，改變岸邊起重機調度的目標函數為決定這些任務群的裝卸順序和岸邊起重機的分配情況。Zhu、Lim（2006）改變過去以泊位為單位確定任務區域的形式將船舶分成若干區域來確定每個岸邊起重機的任務

單位，且規定岸邊起重機只有在該區域完成任務後才可以開始下一區域的作業。Moccia（2006）等加強了Kim和Park的工作，增加了相鄰岸邊起重機之間操作時因安全距離的需要而產生的等待時間的實際約束。Bierwirth、Meisel（2010）基於分支界定演算法求解Kim和Park提出的模型並且取得了不錯的結果。Legato等擴展了Bierwirth、Meisel的工作，在他們之上提出了一個岸邊起重機調度的新模型並包含了岸邊起重機操作過程中的一些實際約束，通過增加下界界定方法和分支策略改進了分支界定演算法。Kim考慮貨櫃碼頭單台堆場起重機在卸載貨櫃時的路徑優化問題，目標是決策堆場起重機在任務區域的路徑問題和每個區域卸載回歸的數量問題。Guo（2011）等為了優化堆場起重機的調度順序，設計了具有多個堆場起重機的動態調度模型，較好的解決了堆場起重機為貨櫃車服務的調度順序問題。Lee（2010）等人在研究中將岸邊起重機的往返操作時間進行了分段分析，具體包括接櫃階段、裝櫃階段、卸櫃階段和最後的交櫃階段，利用公式推導了每個階段的公式和方差數值，最後用模擬的手段驗證了公式的準確性。He（2010）等對堆場起重機調度優化問題運用了基於初始滾動週期的目標規劃法，並設計出啟發式演算法和平行遺傳演算法相結合的方法來求解模型。Cao（2010）等人針對貨櫃車和岸邊起重機的裝載作業過程進行了建模優化的研究，提出了相應的整數規劃模型，針對問題的複雜性設計了Bender's分解演算法求解。韓曉龍研究了貨櫃碼頭裝卸作業中岸邊起重機數量的配置問題，通過建立數量配置網路模型，並設計了相應的最小流演算法。

Zhang（2003）等人研究了貨櫃堆場堆存空間的分配問題，將碼頭內的岸邊起重機、堆場起重機和貨櫃車集中一起考慮，並利用滾動週期的方式來解決該問題。Kaveshgar、Huynh（2015）力求解釋貨櫃碼頭中岸邊起重機、貨櫃車和堆場起重機之間相互作用的特點，考慮到岸邊起重機和貨櫃車操作過程中德和一些實際因素，提出了相應的整數規劃模型。He（2015）等基於提升貨櫃碼頭的服務水準、降低資源消耗為目的，將岸邊起重機、貨櫃車和堆場起重機三大類資源進行集中調度研究，目標是優化計畫週期內所有船舶的停留時間和場內作業所消耗的資源。康海貴、周鵬飛（2006）針對貨櫃碼頭內的岸邊起重機、貨櫃車和堆場起重機，提出在貨櫃船舶裝卸過程中的規劃問題並建立了相應的規劃模型，旨在最優化岸邊起重機等設備的閒置時間與空載率。胡少龍、胡志華（2012）基於全自由度視角將古紮的單個岸邊起重機調度，貨櫃車調度和堆場起重機調度問題做了簡化，提出了岸邊起重機、貨櫃車和堆場起重機的全自由度集成調度的混合整數規劃模型。

這部分的文獻，主要針對貨櫃碼頭上常見的大型設施設備如岸邊起重機、泊位、堆場起重機、貨櫃車等進行研究，研究的方向也集中在對其中兩種或兩種以上設備的、考慮多種影響因素的配合作業模式，針對單獨設施設備運作模式的研究也相對缺乏。

## 2.3 應用 AGV 的智慧型貨櫃碼頭常見問題

智慧型貨櫃碼頭與傳統貨櫃碼頭最顯著的差異就在於是否應用大量自動化作業設備及是否由電腦來控制設備的運行。其中以自動引導車（AGV）最具代表性。當傳統的貨櫃碼頭逐漸步入智慧化時代後，依舊面臨著眾多日常作業上的問題，最核心的目標依然是提高作業效率。

智慧型貨櫃碼頭常見佈局常見的四種類型的佈局如下，

第一種是自動化軌道吊+自動引導車模式，由自動引導車負責貨櫃在岸邊的水準運輸，再由自動化軌道吊負責堆場和輸運貨櫃裝卸。該模式定位於實現貨櫃碼頭的全自動化作業，目前具有代表性的碼頭有ETC、CTA、和Euromax碼頭。其優勢在於自動化程度高，全程幾乎沒有人工作業的參與，效率極高。另一方面，它對自動化設備的可靠性與控制中心的協調性也有極高的要求，一旦某個環節出現問題，很可能導致整個系統停擺。



資料來源：<http://image.baidu.com/search/index?tn=baiduimage&ps=1&ct=201326592&lm=-1&cl=2&nc=1&ie=utf-8&word=%E8%B4%A7%E6%9F%9C%E7%A0%81%E5%A4%B4>（資料時間：2020/4/20）

圖 2-2 智慧型貨櫃碼頭常見佈局一

第二種是帶外伸臂軌道吊加貨櫃卡車模式，在岸邊配置岸橋負責船舶裝卸，由集卡車負責在岸邊和堆場內水準運輸，由帶外伸吊臂的軌道吊負責堆場貨櫃的裝卸。該模式則是定位在實現貨櫃碼頭的半自動化作業，代表的碼頭有香港國際貨櫃碼頭、仁川碼頭和高明碼頭等。該模式實際上是介於傳統貨櫃碼頭與智慧型貨櫃碼頭之間，屬於二者的結合體，特點就是建設成本低，適用於大多數的傳統貨櫃碼頭。缺點是作業效率提升空間有限，人工作業的部分較多，整體自動化水準低。



資料來源：<http://image.baidu.com/search/index?tn=baiduimage&ps=1&ct=201326592&lm=-1&cl=2&nc=1&ie=utf-8&word=%E8%B4%A7%E6%9F%9C%E7%A0%81%E5%A4%B4>（資料時間：2020/4/20）

圖 2-3 智慧型貨櫃碼頭常見佈局二

第三種是自動化軌道吊+跨運車模式，在岸邊配置岸橋負責船舶裝卸，跨運車負責貨櫃岸邊水準運輸，由自動化軌道吊負責堆場和貨櫃輸運和裝卸。該模式的定位較為廣泛，既可以適用於半自動化貨櫃碼頭，又可以為未來半自動化碼頭升級全自動化碼頭預留升級空間，具有代表性的碼頭有維吉尼亞貨櫃碼頭、釜山新貨櫃碼頭和倫敦門戶碼頭等。該模式與上述第二種同屬半自動化貨櫃碼頭，優缺點基本與第二種相同。但它的進步之處在於具有升級改造的空間，可以作為未來全自動化改造的基礎，而這是第二種模式所不具備的。



資料來源：<http://image.baidu.com/search/index?tn=baiduimage&ps=1&ct=201326592&lm=-1&cl=2&nc=1&ie=utf-8&word=%E8%B4%A7%E6%9F%9C%E7%A0%81%E5%A4%B4>（資料時間：2020/4/20）

圖 2-4 智慧型貨櫃碼頭常見佈局三

第四種就是其他模式，除去上述提及的幾種常見的典型模式外，世界上還存在著基於軌道分配系統和立庫式堆場的模式，但是由於技術水準和建設成本等因素，目前仍然處於設計階段。該模式屬於未來發展的目標，對於資金、場地、設備與管理等要求極高，未來只可能有極少數的智慧型貨櫃碼頭能夠應用，但其自動化程度遠超目前現有之作業模式，其對作業效率的提升也是十分巨大。

在智慧型貨櫃碼頭中相關設施設備問題，學者們得到不少頗具價值的研究成果。如 Kim、Bae提出了一種拓展方法求解貨櫃車的分配問題，設置了以最小化岸邊起重機的移動時間及岸邊起重機等待貨櫃車的總閒置時間最小為目標。Bish 結合岸邊起重機操作活動研究了貨櫃碼頭貨櫃車的分配問題，隨後又在此之上繼續研究在一個大型貨櫃碼頭的貨櫃

車車輛路徑規劃問題，旨在減少計畫週期內在港船隻的最小停靠時間問題，並設計了相應的演算法來求解文章中的模型。Hu等人提出了一個新的自動化貨櫃碼頭（ACT）系統，在貨櫃碼頭內利用多層框架之間的橋樑和軌道在碼頭前端至堆場區域運輸貨櫃。

Park 等人（2010）使用基於啟發式和基於本地搜索的即時調度方法，並分析了在運行岸邊起重機（QC）和自動引導車（AGV）時延遲的原因，以更好地提高 QC 利用率並降低成本。Wen 等人（2010）也試圖通過將 QC 的任務分配除以蟻群優化演算法來最小化 QC 之間的幹擾並提高 QC 的利用率，以提高 QC 項目的有效調度。Li 等人。（2016）考慮了 QC 之間的幹擾並確定了 QC 之間的距離，充分考慮了 QC 在即時操作中的加速和減速。後一種研究使用啟發式演算法和滾動時域演算法來提高效率，減少 QC 的等待時間，這是提高集裝箱碼頭輸送量的關鍵。

雖然上述方法僅關注載入或卸載操作模式下的 QC，但我們在本工作中考慮了 QC 載入和卸載的實際埠操作模式。之前僅關注 QC 的研究與自動化終端的實際情況不符，不考慮 AGV 和碼，這不能提高整體運行效率。AGV 的使用最早出現在20世紀50年代，現在有很多關於 AGV 調度方法的研究。Nguyen 和 Kim（2009）討論了基於時間窗約束調度自動升力車（ALV）並分析了 ALV 的數量和緩衝容量。Pap 等人（2011）降低了集裝箱碼頭運營的複雜性，並提出了一個基於卸載模式和集裝箱任務分配的模擬模型的新假設，以最大限度地減少 AGV 的數量。

但是，上述研究人員並未考慮同時調度 QC 和 AGV。當 AGV 在實際操作中等待很長時間時，會出現擁堵和衝突；因此，QC 和 AGV 調度應該一起檢查。目前還沒有關於最優路徑規劃的研究，這大大降低了 AGV 的工作效率。

如前所述，有很多關於 AGV 的研究是獨立的，但他們忽略了 QC 和碼頭對 AGV 的影響。Meersmans、Wagelmans（2006）使用分支定界演算法，目的是最小化完成時間，以解決自動化集裝箱碼頭設備的調度問題，這是 AGV，QC 和堆場起重機（YCs）綜合調度的首次嘗試。Lau、Zhao（2008）使用了多級遺傳演算法（MLGA）通過減少船舶的泊位時間和提高終端的生產率來實現 QC，AGV 和 YCs 的有效調度來解決混合整數規劃模型。Liang 等人（2009）分析了卸載和載入模式以最小化工作時間，以便利用基於詹森規則的啟發式演算法進行調度。該演算法實現了 QC，卡車和 YCs 的集成調度，並且已經證明通過大規模計算是有效的。Wu 等人（2013）提出了具有最小泊位時間的混合整數規劃（MIP）模型，並通過非線性優化了起重機的執行時間混合整數程式（NIMIP）方法減少約束數和計算時間。Skinner 等（2013）把正向的優化基於遺傳演算法的方法，通過比較用於 QC 的，卡車的集成調度的不同的方案，和跨運（SCS），以確定優化的調度方案。

關於 AGV 路徑規劃問題，許多研究都集中在 AGV 的動態調度上，這激發了我們研究的基礎。例如，Nishi 等人（2006）通過建立運輸系統的143個節點來實現 AGV 的動態調度，以選擇 AGV 的最佳路徑，這減少了丟失時間並提高了調度效率。Su 等人（2000）將 AGV

路徑規劃作為 NP 完全非對稱旅行商問題進行了調查，並將最小路徑作為目標。研究人員使用人工神經網路演算法（已知是自組織的基本特徵）來解決 AGV 的路徑規劃。Nishi 等人（2011）通過採用任務分配演算法的上下級別，並將調度作為一個更高級別的問題和路徑規劃作為子問題，將完成任務的延遲時間作為目標最小化。結果為 AGV 調度提供了可行的解決方案，同時避免了路徑規劃的擁塞。Liang 等人（2012）通過網路模型考慮柔性製造系統（FMS）中的 AGV，使用基於隨機金鑰的粒子群演算法實現集成調度和 AGV 路徑規劃（PSO）用於交叉和變異。結果證明該演算法優於傳統遺傳演算法。Miyamoto、Inoue（2016）通過考慮車輛容量限制，機器緩衝等因素實現了 AGV 調度和無衝突路徑規劃，這是一個整數規劃問題，使用本地和隨機搜索方法進行計算。Roy 等人（2016），提出了一種減少路徑規劃中 AGV 擁塞和提高 ACT 吞吐能力的解決方案，採用非線性交通流模型確定 AGV 的適當數量和有效速度。

在這項工作中，我們將上述文獻用於 AGV 的最優路徑選擇和設備集成調度，作為確定進一步優化和提高自動化終端效率的實用解決方案的基礎。

雖然已經發表了大量有關貨櫃車輛調度和存儲問題的裝載和卸載模式的研究，但對 ACT 中 QC，AGV 和 ARMG 的集成調度的研究很少。例如，Zhang 等人（2016）分析了卡車，YC 和所需卡車的行駛距離，並採用了混合中間存儲政策。它們結合了週期性排隊理論模型，最大限度地減少了卡車的行駛距離和 YC 操作，提高了終端的效率。Luo、Wu（2015）基於裝載和卸載模式實現了 AGV 和 YCs 的集成調度，並通過實現交叉和變異的遺傳演算法建立了整數規劃模型；結果證明瞭該演算法的有效性。Zhang 等人（2015）最初優化了每個靠港的船舶，通過考慮裝卸模式以及集裝箱的裝卸順序來減少 QC 的執行時間，然後，他們優化了出口集裝箱的貨物計畫，進一步縮短了 QC 執行時間，這是通過使用雙層遺傳演算法最終證明調度方法的有效性和提高集裝箱碼頭的裝卸效率來實現的。

Hong tao Hu, Xia zhong Chen（2019）等人在“A three-stage decomposition method for the joint vehicle dispatching and storage allocation problem in automated container terminals”中討論了自動化貨櫃碼頭（ACT）中的聯合車輛調度和存儲分配問題。在這個問題中考慮了 ACT 中使用的兩種常用車輛：自動升降車（ALV）和自動導引車（AGV）。針對兩種類型的車輛提出了兩種混合整數線性規劃（MILP）模型，其目的是最小化車輛運行成本。為瞭解決這些模型，作者們基於貪婪搜索開發了一種稱為粒子群優化的三階段分解方法——JVD-SAP，問題包括將自動車輛分配給貨櫃，將貨櫃移至車輛的處理順序，以及存儲卸載貨櫃的存儲空間分配三個部分。最後研究針對 ACT 中的即時 JVD-SAP，研究 AGV 和 ALV 的操作控制。並通過考慮堆場的容量，開發了兩個 MILP 模型。並提出了一種三階段分解方法來解決模型。但作者在該研究中沒有考慮到不確定因素例如時間窗，操作和旅行時間，這些將是我們未來可以關注的方向。集成 AYC 調度和堆疊貨櫃序列的問題是另一個未來的研究方向。

Yong sheng Yang, Mei su Zhong(2018)等人在“An integrated scheduling method for AGV routing in automated container terminals”中提出了一種處理設備協調和 AGV 路由的綜合調度。作者為了最小化完工時間，建立了一個雙層程式設計模型。為解決該模型，我們研究並比較了滾動範圍過程（RHP）和基於擁塞預防規則的雙層遺傳演算法（CPR-BGA）。結果表明，CPR-BGA 演算法對 ACT 中的綜合調度非常有效。在本文中，作者針對 QC，AGV 和 ARMG 的集成調度以及 AGV 的路徑規劃，目的在於最大限度地減少港口船舶的處理時間。該問題分為兩部分：一部分是 AGV 的綜合調度問題，另一部分是 AGV 路徑規劃問題。在解決方法上，作者將啟發式演算法與遺傳演算法相結合，構建了雙層程式設計模型。模型的上層涉及綜合調度，而下層涉及 AGV 的路徑規劃。為了減少或消除自動化終端實際操作中 AGV 擁塞的現象造成的影響，便在演算法中添加了一個規則來防止擁塞，這是一種基於擁塞防禦規則的雙層遺傳演算法。本文主要是對多種作業設備的集合調度進行了優化研究，但缺乏對於單個作業設備的優化研究，例如像 AGV 的運輸模式的優化等。

未來研究的方向可以將其他有效的啟發式演算法應用於問題並將性能與此處提出的 GA 進行比較，看看這些方法是否能夠比 GA 更有效地、獲得更好的結果，從而改進派遣 AGV 和起重機的解決方案，並分配貨櫃的位置。

Radhia Zaghdou 等人在“A Hybrid Method for Assigning Containers to AGVs in Container Terminal”中對貨櫃分配問題進行了研究。這個問題包括三個子問題：路徑問題、分配問題和調度問題。作者在文中提出了一種混合求解方法：基於 Dijkstra 演算法、遺傳演算法（GA）和啟發式方法來選擇每個貨櫃對應的 AGV。對三種方法進行了比較研究，第一種方法是應用遺傳演算法，第二種方法是將 Dijkstra 演算法與遺傳演算法進行混合，第三種方法是將啟發式方法（使用 Dijkstra 演算法的混合方法，遺傳演算法和啟發式方法）添加到第二種方法中。通過數值算例和試驗驗證了本文方法的有效性。作者在文中對三種方法進行了比較驗證並得出了結論。其中精確演算法用於計算最短路徑和混合方法；遺傳演算法、啟發式和 Dijkstra 演算法。結果表明，該混合方法能較好地解決這一問題。

通過大量對自動引導車相關研究的梳理後我們發現，過去的學者集中在對於與 AGV 配合作業的多設備集成調度上情有獨鍾，同時也有將新進出現的自動化設備結合到 AGV 的運作模式中去等等，同時也發現了缺乏例如對於 AGV 單獨運作模式方面的探討。

## 2.4 求解路徑問題常用解法

早期在解決VRP等問題時，因為資料量不大，採用一些簡單的求解最佳化的方法如分支定界法（2003）、動態規劃法、切平面法（2003）等等。又或是直接採用數學規劃的基礎方法，分解為簡單的數學模式進行求解。到了後期，學者們為了進一步提高解決問題的速度，便提出了許多演算法，利用這些演算法，可以極大的提高解決問題的效率，同時在解決大資料量問題的時候也能夠得到較高水準的結果。

目前主流的幾種演算法為基因演算法、模擬退火演算法、禁忌搜索演算法等等，下麵將做簡要的介紹。

### （1） 基因演算法（GA）：

最早由Holland提出，它的一個思路是根據自然界中選擇過程的一種最佳化搜索機制。主要的理論是依據物競天擇、優勝劣汰的自然進化法則，選擇母代具有較好特性的物種，根據一種隨機相互交換母代彼此基因資訊的機制，希望達到產生優異的下一代子女，並且通過重複交配的機制得到適應性最強的物種。基因演算法的求解步驟大致如下，首先設計編碼（染色體個體標記法），並且決定族群的規模，設計適合度函數，決定染色體的適合度評估標準，決定挑選與複製的方法，接著定義交配與交配率及突變與突變率，最後設定終止條件。

### （2） 模擬退火演算法（SA）：

最早由Metropolis等人在1953年蒙地卡羅演算法的基礎上，Kirkpatrick等人最終在1983年所提出，並進行應用。該演算法的原理是基於在打鐵的過程中，鐵匠未來提升鐵的硬度，不斷重複將鐵升溫融化、降低冷卻的過程。應用在求解最佳化的問題上時，當溫度升高時，鐵的組態能自由的變化，對應起來就是能夠搜索較廣區域的解；冷卻時，能量受到限制，鐵只能向穩定的形態進行變化，也就是求解的答案將不斷的收斂。在演算法中，起始溫度、溫度變化規則是主要的組成部分。而最為關鍵的是波茲曼函數，該函數的目的是說明演算法跳出區域的最佳解，當產生一個比現有最佳解差的解時，通過概率和該函數，確定是否需要這個解，在溫度高的時候，接受解的概率大，並擴大搜索範圍，在溫度低的時候，接受較差解的概率降低，使求解的過程不斷收斂。Breedam（1995）使用此方法求解車輛排程之問題，Mousavi and Moghaddam（2103）使用此方法求解多個越庫選址路徑的規劃問題。

### （3） 禁忌搜索演算法（TS）：

由Glover在1986年提出。主要的組成部分有，起始解、搜索臨近解的方式、停止條件、禁忌列表、期望條件。主要的解決步驟是通過起始解來搜索臨近解的方式搜索臨近解。又可以叫做移動到臨近解，再將得到的臨近解儲存在禁忌清單中，當下一次搜索臨近解時就會避開搜索清單中的部分，從未搜索的區域開始搜索，從而得到更好的路徑，通過反復求

解，直到滿足停止條件為止。Nanry and Barnes (2000) 使用此方法求解包含時間窗並且同時收取和派送的混合車輛路徑問題。Angelelli and Speranza (2002) 在求解週期性的車輛路徑問題時也使用了該方法。

#### (4) 人工神經網路：

對生物大腦神經網路的研究，將人腦中的組織結構以及外部資訊處理機制，通過有向圖網路拓撲結構建立起類比大腦的神經系統外部資訊處理及加工機制的數學模型。建立的數學模型整合了資訊的處理和儲存功能，類比神經元傳遞資訊的方式和自我調整的學習方式，較快得到資訊的處理結果，被眾多學科領域廣泛關注。同時，人工神經網路還具備了高度並行結構，對於資訊的處理速度快，並且即時性好；應用範圍廣，除了傳統的數學模型外，許多複雜的非線性系統也能夠很好的被其解決；不僅如此，它還有很強的自我調整能力與容錯能力，通過自我學習，可以強化自身參數，並儲存相關的資訊。雖然人工神經網路具備了諸多優點，但是，其對於信息量要求較大，並且求解速度較慢，精度不佳也是不可忽略的缺陷。

#### (5) 粒子群演算法 (PSO)：

在上個世紀六十年代由Kennedy等人通過觀察鳥群搜尋食物過程中所產生的群智慧行為，產生的一種群智慧優化演算法。該演算法的基本思想是基於鳥群在一定區域內進行搜索食物，食物位址不明，鳥群中每只鳥都在附近搜索食物，離食物距離近的，容易發現食物，在搜索過程中，鳥群中所有個體之間可相互傳遞消息，並向適應度強的個體學習。因此，隨著時間的推移，鳥群逐漸向食物方向聚集，搜索範圍越來越小，從而更容易發現食物，最終整個鳥群都發現食物所在地。該演算法的優勢在於全域優化性能較強，並且沒有過多複雜的參數需要調整，計算效率也較好。國內外眾多學者將該演算法應用於研究解決電力系統、目標函數優化問題、調度問題及車輛路徑問題等。但必須指出的是，粒子群演算法依然存在著精度較低、易發散、不能有效解決離散及組合優化問題，且容易陷入局部最優。

隨著研究水準的不斷進步，除了一些啟發式演算法之外，越來越多的數學規劃求解軟體透過其內置的演算法可以直接求解MILP的問題，例如LINPROG、LPSOLVE、YAMILP、GUROBI、CPLEX等等。這些高效的規劃軟體對一些特定問題可以進行快速的求解，受到了越來越多的學者的關注。

## 2.5 小結

透過對大量相關文獻的整理、回顧與分析，我們總結出過往學者們在研究智慧型貨櫃碼頭相關問題時的一些特點，

- (1) 研究重點集中在對多個碼頭作業的設施設備的綜合調度上，
- (2) 研究方法大都採用透過數學模式建立模型，然後設計演算法，利用數值實驗來測試模型，最後得出結論與建議，
- (3) 關於單獨作業設備運作模式的研究較少，例如自動引導車的運輸模式等，

此外，我們還總結出目前在該領域三個主要研究方向：

- (1) 智慧型貨櫃碼頭作業系統間的集合調度研究

貨櫃碼頭的作業系統是一個整體，裡面包含了多個部分，如船隻的停泊靠港，岸邊起重機的裝卸作業，貨櫃車或 AGV 的水準運輸，堆場起重機的裝卸等等。實際操作中這些部分往往又是單獨進行，因此很多學者在研究時也會將其作為一個獨立的部分進行。但從整體的角度來看，因為木桶效應的存在，個體的最優無法實現整體的最優。因此可以考慮進行整合研究，可以是分塊整合，也可以是整塊整合。而從全域模式下的研究必然和個體模式下的研究存在差異。

- (2) 智慧型貨櫃碼頭創新作業工藝或模式的研究

目前各大港口都在積極發展建設智慧型的貨櫃碼頭，港口的經營業者都在不斷想法設法提高其運作效率，縮短船舶靠港時間，提高港口的貨物輸送量，進而提升港口的競爭力。但是由於港口的規模無法無限制的擴張，設備的投入與維護等需要大量資金的支援，因此經營者們大多數都會選擇從作業流程上來提高港口的效率。最為典型的就是對岸邊起重機、堆場起重機及 AGV 或是貨櫃車等進行優化調度，甚至是創新出一些混合的作業方式，例如岸邊起重機可以同時操作兩個甚至更多的貨櫃來進行裝卸作業；又如混合堆存的策略，即在同一塊堆放區域內同時放置進口貨櫃和出口貨櫃，或是空櫃和重櫃。這些新的嘗試將會是未來研究的一大特點。

- (3) 基於創新操作工藝及作業模式下的集合研究

該部分實際上是前兩部分的整合，也必須在創新工藝與作業流程已經初步具備實踐可能的情況才可以進行。當創新的工藝和流程可以投入實踐後，我們才有可能去考慮提高這些新工藝、流程的效率，甚至可以將傳統的流程與其進行結合，然後再考慮優化，最終又可以創新出一套新的作業流程。

因此，本文結合對過往文獻研究內容的不足之處及目前主要的研究方向，確定了本文的研究問題與內容。

## 第三章 AGV 運輸模式與數學模型之構建

依照目前世界上大部分天然港口的環境條件來看，除了少數擁有極好的自然環境條件的港口可以實現整體自動化外，多數港口依然只能夠實現局部的自動化來實現智慧化的目的。因此，本文的研究採用的碼頭作業模式為自動化軌道吊+自動引導車（AGV），該模式也是目前智慧型貨櫃碼頭最為常見之運營模式。並且諸多學者的研究與發現也都是基於該環境下進行的。

### 3.1 AGV 運輸問題描述

在智慧型貨櫃碼頭逐漸普及後，自動引導車在貨櫃碼頭上產生的作用愈發的重要，於是，便引起研究人員的關注。智慧型貨櫃碼頭相較於傳統貨櫃碼頭的區別主要有兩點：1、具有較高的自動化水準。2、碼頭上的大部分作業由電腦控制設備完成，人工涉入較少。對比傳統貨櫃碼頭來說，利用電腦控制自動化設備進行各項作業，可以較大程度上提高整體作業效率，減少作業中出現的不確定情況。而自動引導車（AGV）就是智慧型貨櫃碼頭中最为典型的自動化設備。

因此，本文的研究問題是在智慧型貨櫃碼頭的背景下，建立一種應用 AGV 運輸貨櫃的混合裝載運輸模式。

AGV 由電腦進行控制，依據規劃好的線路自動運行，突出的特點在於無人駕駛，行駛中各車輛按照電腦既定路線行駛，理論上車輛之間相互影響的概率極小，並且行駛時可保持較為恒定的速度，行駛中也不會偏離路線，這是傳統貨櫃車無法比擬的優勢。AGV 採用的動力分為電動或燃油，最大裝載量為單個40呎貨櫃，少數為單個20呎貨櫃，行駛速度在5m/s~12.5m/s 之間。目前絕大部分的智慧型貨櫃碼頭配備的均為最大可裝載40呎貨櫃的AGV，用以保證最大程度的實用性。

本文模擬的作業流程為貨櫃從船上卸下至放置於堆場，規劃全程採用自動化作業，利用岸邊起重機、AGV和堆場起重機3種常見設備配合實現。下圖表示一般化的智慧型貨櫃碼頭主要頭佈局示意圖。

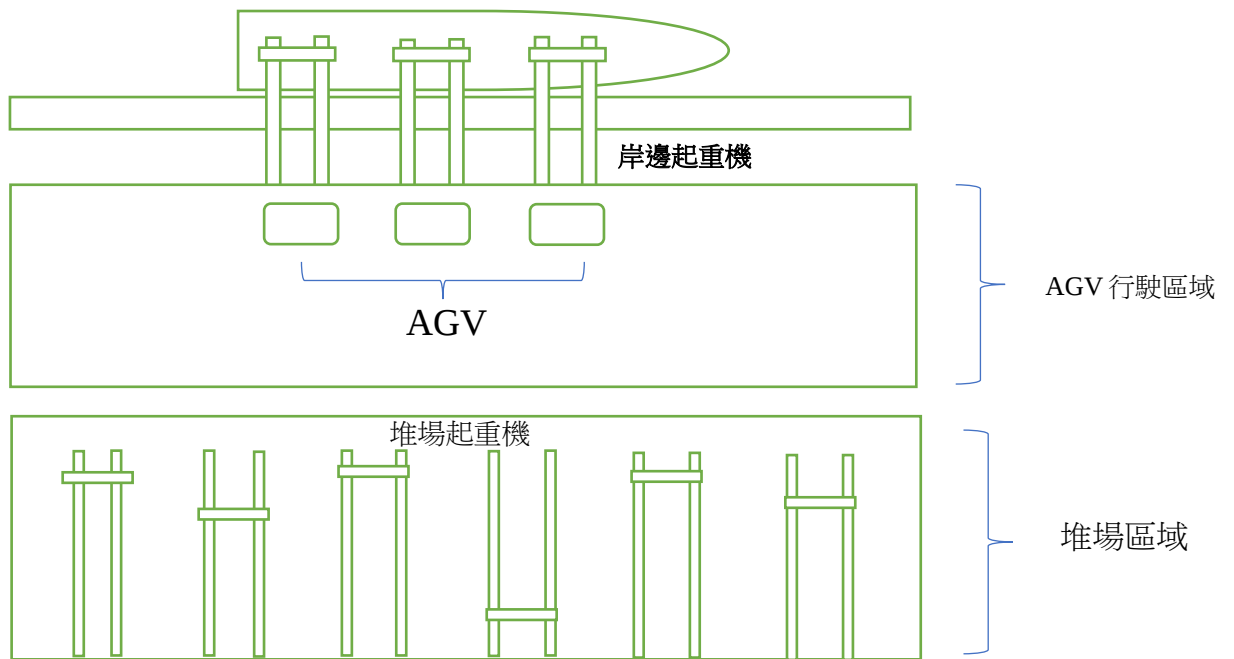


圖 3-1 智慧型貨櫃碼頭佈局

整個作業流程可以表示為當貨櫃船靠岸後，岸邊起重機開始進行卸櫃作業，貨櫃從船上經由岸邊起重機轉移至載具上（AGV或是貨櫃車），載有貨櫃的運輸工具根據指令，沿著港區之間的道路抵達堆場，接著送達指定的堆放區域後，由堆場起重機負責將貨櫃進行堆放，放置完畢後載具返回出發點，不斷重複這一部分的動作，直至船上的貨櫃全部卸下為止。

本文研究問題的關鍵點在於混合裝載模式，在該模式中，改變了在傳統模式下 AGV 只能固定裝載一個貨櫃的設置，而是採用了可以同時裝載2個20呎貨櫃或是一個40呎貨櫃的設定，突破了傳統模式中的“一車一櫃”的情況，有效提高 AGV 容量的利用率，間接提高了 AGV 的運輸效率。

同時，因為 AGV 的裝載方式發生了變化，傳統的運輸模型為了能夠處理混合裝載模式下的 AGV 路徑問題，需要對其進行改進。因為傳統運載模式下執行運輸任務僅需要考慮最短路徑的原則，而採用混合運載方式運輸時，就會在考量最短路徑基礎上增加選擇分配的考慮，因此需要建立一個新的模型來解決。

下表為本文新發展的運輸模式與傳統運輸模式之對比，

表 3-1 模式對比

|        | 傳統運輸模式        | 本文新建立模式         |
|--------|---------------|-----------------|
| 載具     | AGV           | AGV             |
| 載具使用數量 | 較多            | 較少              |
| 載具最大容量 | 單個40呎貨櫃       | 單個40呎貨櫃         |
| 裝載方式   | 1種（單個20呎或40呎） | 2種（2個20呎和單個40呎） |
| 模式原理   | 最短路徑          | 選擇分配、最短路徑       |

在新建立的貨櫃運輸模式下，AGV 的行駛過程可用下圖表示。

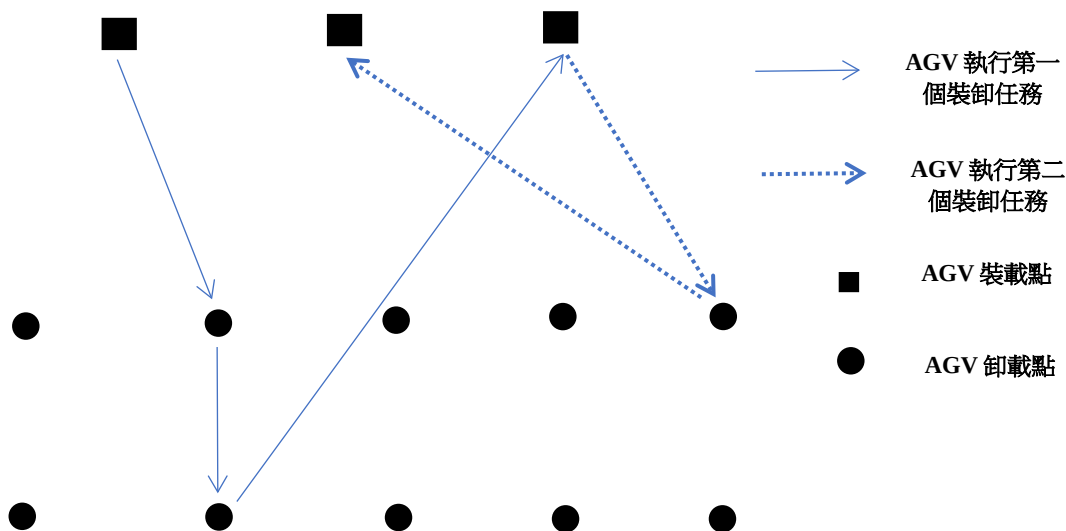


圖 3-2 行駛過程

示意圖以一個網路節點圖的形式反映了貨櫃裝載點（代表實際中貨櫃碼頭中岸邊起重機與 AGV 銜接的位置）與貨櫃卸載點（代表實際貨櫃碼頭中堆場區內某個堆存點的位置）之間 AGV 運行的路徑圖。因為多載荷 AGV 可以執行單個40呎貨櫃的配送任務或者是兩個 20呎貨櫃的配送任務，因此當 AGV 從裝載點出發，至多訪問兩個卸載點後就必須重新返回裝載點，然後才能繼續訪問卸載點，如此循環。特別注意的是，圖中 AGV 的行駛路線代表的僅是 AGV 訪問各點的順序，而不是真實的 AGV 行駛軌迹。但從目前實際的智慧型貨櫃碼頭來看，絕大部分的布局都是較為規則的四邊形，因此示意圖上 AGV 的行駛路線可以認為是無限接近于真實的行駛軌迹。

事實上，混合運載運輸模式在貨櫃車的運輸上早已進行了應用。區別只是在於貨櫃車是由人進行控制，而 AGV 則是由電腦操控的。相較於人工作業，應用電腦控制的 AGV 勢必會在實際操作中取得較為理想的效果。

### 3.2 模型假設

在第一章研究限制小節中曾提到，因為該模式在過去幾乎沒有可供直接參考的研究成果，因此在本文的研究中，模式將會建立在一個較為理想的環境條件下，因此，假設內容如下：

- (1) 假設AGV到達裝卸點，貨櫃一放置或離開AGV時即視為完成裝卸作業，並且不考慮裝載/卸載貨櫃所需要的時間。
- (2) 假設每個裝卸點的裝載/卸載貨櫃量不超過AGV的最大容量（避免AGV在各任務點之間重複行駛的情形）。
- (3) 假設AGV的行駛速度為恒定，不會受到貨櫃重量的影響，同樣不考慮AGV受到續航能力的限制。
- (4) 假設AGV在任意任務點之間存在著允許行駛的路線，並且這些路線中存在著最短的路徑。
- (5) 假設不考慮在AGV行駛路線上出現的意外情況，如車輛的擁堵或是臨時的交通管制等。
- (6) 假設貨櫃的裝卸沒有前後順序的限制。
- (7) 假設以一台多載荷AGV為對象進行研究（模擬在實際作業中單台AGV在續航里程內執行運輸任務）。

值得一提的是，在模型中沒有考慮到裝卸貨櫃所需要的時間，原因主要有兩點，一是智慧型貨櫃碼頭不像傳統貨櫃碼頭，由於裝卸貨櫃都是依靠自動化設備在計算機的控制下完成，裝卸時間固定，並不像人工操作機械裝卸那樣耗時間有較大的波動。二，智慧型貨櫃碼頭的面積通常較大，因此對於AGV作業總時間來說，行駛時間平均占到作業總時間的90%以上，據中國大陸某智慧型貨櫃碼頭相關人員介紹，一般AGV從貨櫃船邊到堆場或是其他堆放點所需要行駛的距離短的大約是幾百米到2公里之內，而最遠甚至需要行駛3-5公里，折算起來假設AGV現在從一個點到另一個點進行貨櫃運輸，行駛時間最少大約也要5min-7min，而AGV停留在裝/卸點的時間通常只有5-8s，所以AGV的裝卸時間只占到行駛時間2%-3%左右，而到後面距離越來越遠，這個比例還會再縮小。因此在模型中是否考慮裝卸時間對於AGV的行駛路徑及作業總時間並無明顯影響。

此外，本模式以一輛多載荷AGV為研究對象，其目的在於盡可能突出對比新模式與傳統模式之差別，尤其是在作業效率上的差別，儘管在實際作業情況會有一定的差異，但是對於此類問題的解決仍具有一定的啟發作用。倘若同時採用多輛AGV進行研究，則在貨櫃運輸過程中影響作業時間的因素就會增加，新建立的模式在作業效率上的優勢可能會被弱化，便無法突出本文模式的優勢。

### 3.3 數學模型之構建

依據本文研究之目的，設計了一個混合整數線性規劃模型（MILP）。在模型中定義了5個集合，分別是：

表 3-2 模型定義的集合

|                       |                   |
|-----------------------|-------------------|
| <b>P：</b>             | <b>裝載點</b>        |
| <b>D：</b>             | <b>卸載點</b>        |
| <b>I：</b>             | <b>P ∪ D</b>      |
| <b>B：</b>             | <b>裝卸任務</b>       |
| <b>I<sup>+</sup>：</b> | <b>I ∪ {S, E}</b> |

在模型中，利用裝載點來表示實際作業中 AGV 與岸邊起重機的作業部分，用卸載點來表示 AGV 在堆場中作業的部分。我們把單個的貨櫃視為一個任務，即運輸一個20呎或40呎的貨櫃為一個任務。為了便於模型的控制，特別設置了虛擬的任務起點與終點。

#### 3.3.1 參變數與決策變數之定義

這部分介紹在模型中定義的參數及變數。首先是參數的部分，下表展示了使用到的全部參數。

表 3-3 模型定義的參數

|                        |                            |
|------------------------|----------------------------|
| <b>P<sub>a</sub></b>   | <b>裝載點座標</b>               |
| <b>D<sub>a</sub></b>   | <b>卸載點座標</b>               |
| <b>T<sub>a,b</sub></b> | <b>AGV 從 a 點到 b 點的執行時間</b> |
| <b>C</b>               | <b>AGV 的最大容量</b>           |
| <b>S：</b>              | <b>虛擬裝卸任務起點</b>            |
| <b>E：</b>              | <b>虛擬裝卸任務終點</b>            |
| <b>d<sub>a</sub></b>   | <b>裝卸點的裝載/卸載量</b>          |

在模型中，定義了一個二維平面坐標系，把裝載點和卸載點用二維座標的形式呈現出來，同時還計算出 AGV 在任意兩點間的執行時間，對於任意兩點間的執行時間，我們採取了任意兩點的絕對位移除以速度的定值。AGV 的最大容量採用目前常見的即為能夠容納40呎貨櫃。

接著是變數部分，其中包含一個決策變數：

表 3-4 模型定義的變數

|           |                              |
|-----------|------------------------------|
| $x_{a,b}$ | 如果 AGV 通過 a 點和 b 點，則等於1，否則為0 |
| $z_a$     | AGV 在 a 點的完成作業的時間            |
| $G$       | AGV 作業花費的總時間                 |
| $C_a$     | 在 a 點完成裝卸後 AGV 的剩餘容量         |

其中定義了一個決策變數， $x_{a,b}$ ，決定了 AGV 行駛的路徑，其他的變數包括了 AGV 作業的總時間以及 AGV 在任務點的作業時間和容量的改變量。

### 3.3.2 數學模型

該部分為本文研究所新建立之多載荷 AGV 運輸路徑的數學模型。模型的目標即為最小化 AGV 的作業總時間：

$$\text{Min} \sum_{a \in I} x_{a,b} \cdot T_{a,b}, b \in I \quad (1)$$

目標式（1）表示最小化 AGV 總的作業時間。

$$\text{s.t. } G = \sum_{a \in I} x_{a,b} \cdot T_{a,b} \geq z_a, \forall a \in I \quad (2)$$

限制式（2）表示作業總時間大於等於任何一個任務完成的時間。

$$z_b + (1 - x_{a,b}) M \geq z_a + T_{a,b}, \forall a, b \in I, a \neq b \quad (3)$$

限制式（3）表示如果 AGV 經過 a 點後再經過 b 點，那麼 AGV 在 b 點完成作業的時間一定大於等於 AGV 在 a 點完成作業的時間加上 a，b 間的行駛時間。

$$\sum_{a \in I} x_{a,b} = \sum_{a \in I} x_{b,a} = 1, \forall b \in I \quad (4)$$

限制式（4）表示任一任務一定有一個起點或是一個終點。

$$x_{a,b} + x_{b,a} \leq 1, \forall a, b \in I, a \neq b \quad (5)$$

限制式（5）表示所有的裝卸任務都只能被執行一次。

$$\sum_{b \in I^+ \setminus S} x_{S,b} = 1 \quad (6)$$

限制式（6）表示虛擬起點只能有一個後繼。

$$\sum_{a \in I^+ \setminus E} x_{a,E} = 1 \quad (7)$$

限制式（7）表示虛擬終點只能有一個前驅。

$$x_{a,b} (C_a + d_b - C_b) = 0, \forall a, b \in I^+ \quad (8)$$

限制式（8）表示如果 AGV 從 a 點完成作業後立刻去 b 點，在 b 點完成任務後的 AGV 容量  $C_b$  等於 AGV 在 a 點時的容量  $C_a$  加上在 b 點時容量變化  $d_b$ 。

$$d_a \leq C_a \leq C, \forall a \in P \quad (9)$$

限制式（9）表示在裝載點的容量變化必須小於等於 AGV 的容量，而 AGV 的容量又要小於等於 AGV 的最大容量。

$$0 \leq C_b \leq C + d_b, \forall b \in D \quad (10)$$

限制式（10）表示在卸載點的 AGV 容量必須大於等於0，同時小於等於 AGV 的最大容量加上在該點的變化量。

$$C_S = C_E = 0 \quad (11)$$

限制式（11）表示在虛擬起點和終點的 AGV 容量為0。

$$x_{a,a} = x_{a,S} = x_{E,a} = 0, \forall a \in I^+ \quad (12)$$

限制式（12）表示任何一個點不能作為自己的前驅或是後繼，並且任何一個點不能在虛擬起點之前和虛擬終點之後。

$$G \geq 0, d_a \geq 0, z_a \geq 0, T_{a,b} \geq 0, \forall a, b \in I^+ \quad (13)$$

$$x_{a,b} \in \{0,1\}, \forall a, b \in I^+ \quad (14)$$

限制（13）、（14）規定了變數的範圍。

$$M = T_{i,j}, i, j \in I \quad (15)$$

限制式15表示無窮大數 M 的取值。

### 3.4 簡例測試

#### 3.4.1 問題說明

本例設計之情境為智慧型貨櫃碼頭，涉及貨櫃運輸之相關設施點（岸邊起重機、堆場起重機、堆場等）在情境中均被視為任務點（裝載點/卸載點）。因本模式與傳統貨櫃運輸配送模式有部分差異，所以在該情境下的貨櫃運輸資料為從實際資料中進行簡化處理後產生。

本簡例隨機設置7個節點，2個虛擬點（包括虛擬起點與虛擬終點），5個任務點（2個裝載點，3個卸載點）。運輸任務數為3個，1個40呎貨櫃和2個20呎貨櫃。在任務中我們不考慮貨櫃除了尺寸外的差異，即相同尺寸的貨櫃視為同樣的貨櫃。下為網路圖。

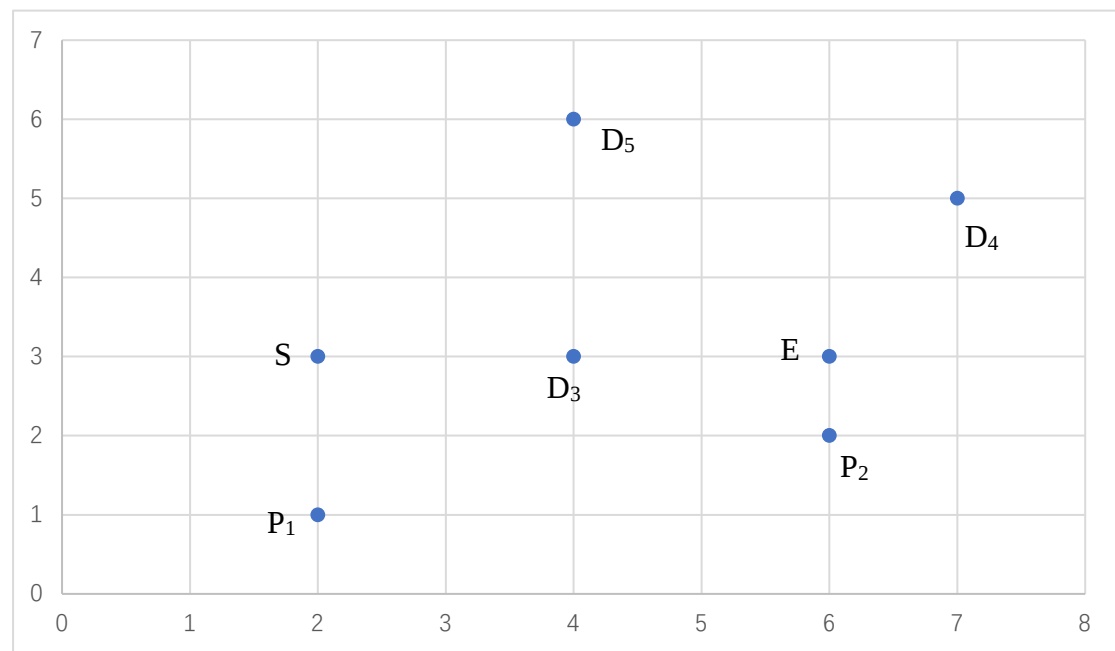


圖 3-3 簡例網路

通過簡例測試，我們可以初步驗證本文提出的混合運載運輸模式的可行性以及對測試結果進行傳統模式與新模式作業效率的對比。

### 3.4.2 參數設定

根據模型所需要的集合及參數，我們根據實際情況並在適當處理後得到了所需的資料。通過下列表格呈現，並適當進行說明。

表 3-5 節點名稱及座標

| 節點 | 名稱        | X座標 | Y座標 |
|----|-----------|-----|-----|
| S  | 虛擬起點      | 2   | 3   |
| 1  | 裝載點 $P_1$ | 2   | 1   |
| 2  | 裝載點 $P_2$ | 6   | 2   |
| 3  | 卸載點 $D_3$ | 4   | 3   |
| 4  | 卸載點 $D_4$ | 7   | 5   |
| 5  | 卸載點 $D_5$ | 4   | 6   |
| E  | 虛擬終點      | 6   | 3   |

根據先前的網路示意圖，確定了網路中各節點的相對位置，通過二維平面座標呈現，便於模型運算求解。

表 3-6 參數 $T_{ab}$

|   | S     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | E     |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| S | 0     | 2     | 4.123 | 2     | 5.385 | 3.605 | 4     |
| 1 | 2     | 0     | 4.123 | 2.828 | 6.403 | 5.385 | 4.472 |
| 2 | 4.123 | 4.123 | 0     | 2.236 | 3.162 | 4.472 | 1     |
| 3 | 2     | 2.828 | 2.236 | 0     | 3.605 | 3     | 2     |
| 4 | 5.385 | 6.403 | 3.162 | 3.605 | 0     | 3.162 | 2.236 |
| 5 | 3.605 | 5.385 | 4.472 | 3     | 3.162 | 0     | 3.605 |
| E | 4     | 4.472 | 1     | 2     | 2.236 | 3.605 | 0     |

各節點之間的AGV的行駛時間是依據各節點二維座標之間距離的絕對值除去我們設定的AGV速度得到的。根據查詢AGV的相關資料，設定AGV的合理行駛速度為5m/s。接下來是各裝卸點的貨櫃變化量，

表3-7 起始節點貨櫃儲存量

| 節點名稱                 | 當前貨櫃儲存量(個) |
|----------------------|------------|
| <b>P<sub>1</sub></b> | 40         |
| <b>P<sub>2</sub></b> | 32         |
| <b>D<sub>3</sub></b> | 24         |
| <b>D<sub>4</sub></b> | 12         |
| <b>D<sub>5</sub></b> | 20         |

表3-8 完成節點貨櫃儲存量

| 節點名稱                 | 當前貨櫃儲存量（個） |
|----------------------|------------|
| <b>P<sub>1</sub></b> | 39         |
| <b>P<sub>2</sub></b> | 30         |
| <b>D<sub>3</sub></b> | 25         |
| <b>D<sub>4</sub></b> | 13         |
| <b>D<sub>5</sub></b> | 21         |

表 3-9 參數d<sub>a</sub>

|          | 名稱                   | 變化量       |
|----------|----------------------|-----------|
| <b>S</b> | 虛擬起點                 | <b>0</b>  |
| <b>1</b> | <b>P<sub>1</sub></b> | <b>2</b>  |
| <b>2</b> | <b>P<sub>2</sub></b> | <b>2</b>  |
| <b>3</b> | <b>D<sub>3</sub></b> | <b>-2</b> |
| <b>4</b> | <b>D<sub>4</sub></b> | <b>-1</b> |
| <b>5</b> | <b>D<sub>5</sub></b> | <b>-1</b> |
| <b>E</b> | 虛擬終點                 | <b>0</b>  |

根據起始各節點貨櫃儲存量與完成各節點貨櫃儲存量資料，計算出節點貨櫃變化量即參數 $T_{ab}$ ，各節點的變化量即為各裝載點/卸載點的裝載/卸載量。我們根據貨櫃的尺寸進行劃分，分別用1、2分別代表20呎貨櫃和40呎貨櫃，多個即依次累加。因為在該模式下研究對象為單台AGV，且每個節點僅允許訪問一次，所以在每個節點的變化量都不會超過單台AGV的最大容量，但這裡不同於節點的容量等於單個AGV的容量。

### 3.4.3 求解過程與結果

本小節利用時下最常用之MILP問題求解規劃軟體GUROBI，對簡例進行求解。

GUROBI 是由美國GUROBI公司開發的新一代大規模數學規劃優化器，在 Decision Tree for Optimization Software 網站舉行的協力廠商優化器評估中，展示出較快的優化速度和精度，成為優化求解器領域的新翹楚。本文中之所以利用該求解器，正是看中其相較於其他常用的求解器具有諸多優勢，包括：

- (1) 採用最新優化技術，充分利用多核處理器優勢，
- (2) 任何版本都支持平行計算，並且計算結果確定而非隨機，
- (3) 提供了方便輕巧的介面，支援 C++, Java, Python, .Net 開發，記憶體消耗少，
- (4) 支持多種平臺，包括 Windows, Linux, Mac OS X，
- (5) 支援 AMPL, GAMS, AIMMS, Tomlab 和 Windows Solver Foundation 建模環境，
- (6) GUROBI 為學校教師和學生提供了免費版本。

利用GUROBI求解過程可以利用下圖來表示：

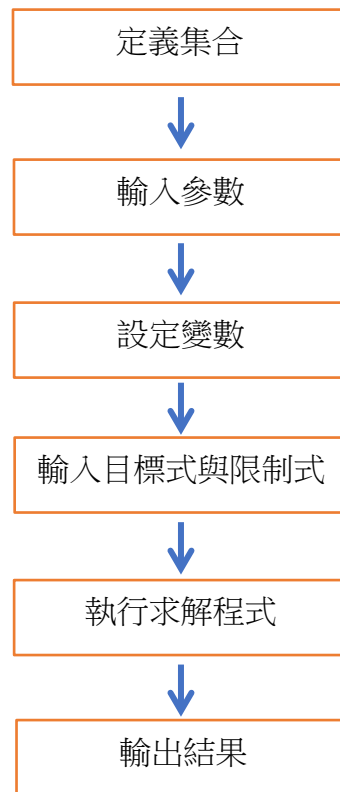


圖 3-4 求解流程

將參變數資料及數學模型按照流程所示依次輸入軟體中，根據電腦的硬體配置及資料量的規模大小，在經過一定時間的運算之後將會得到答案。

我們將GUROBI輸出的結果整理後繪製成圖，得到AGV行駛路徑如下所示。

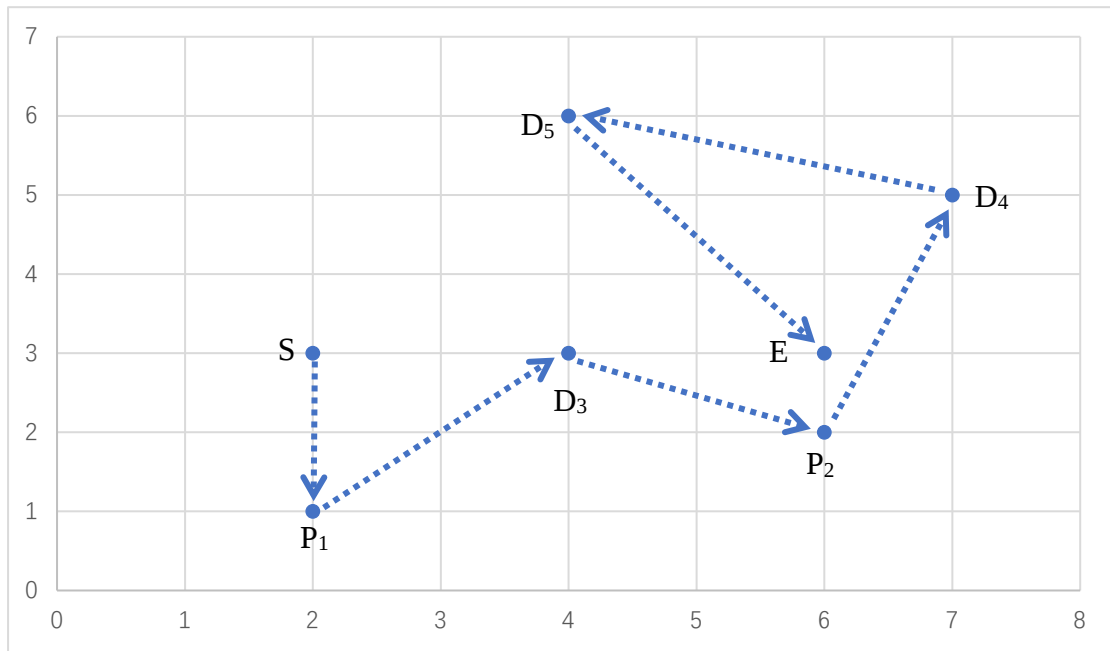


圖 3-5 簡例求解結果

同時將作業總時間整理成表格如下，

表 3-10 作業總時間

|          |                                                                                                   |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AGV行駛路徑  | $S \rightarrow P_1 \rightarrow D_3 \rightarrow P_2 \rightarrow D_4 \rightarrow D_5 \rightarrow E$ |
| AGV作業總時間 | <b>16.9946</b>                                                                                    |

至此，模型的求解結果就全部呈現完畢。

#### 3.4.4 對比分析

本文的核心貢獻是建立一個優於傳統貨櫃運輸模式的混合運載運輸模式。因此，在本小節，將會通過對比的方式，對傳統模式與新建立模式產生之結果進行比較。

在傳統的AGV運輸貨櫃模式中（傳統運輸模式之特點在問題描述小節中已詳細介紹過），採用簡例資料進行測試，得到AGV的運輸路徑如下所示。

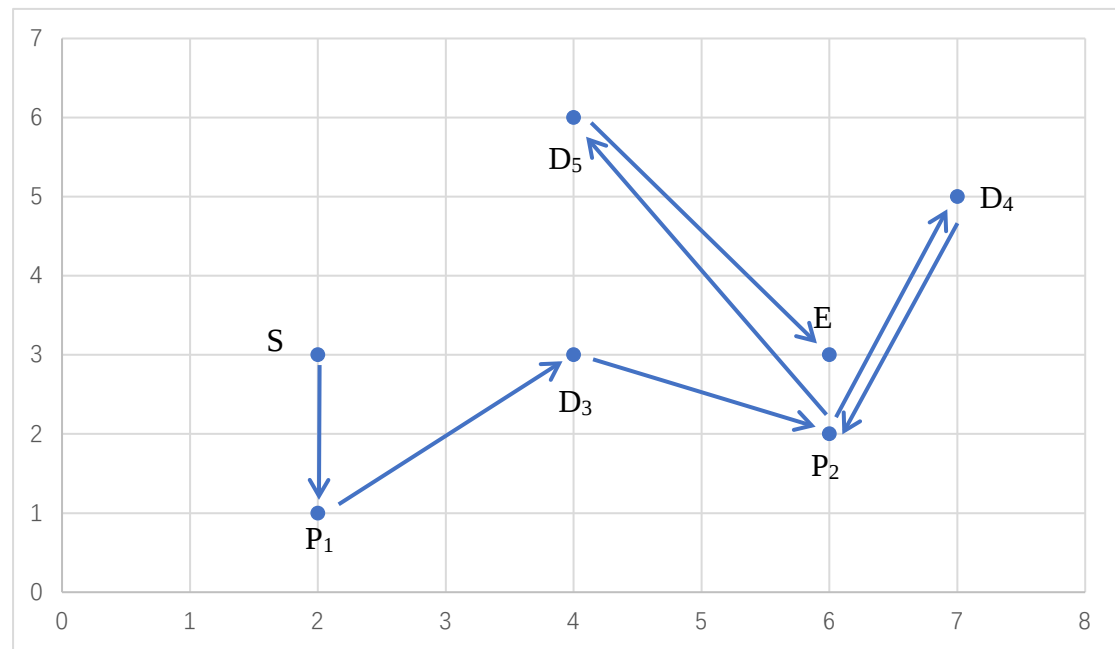


圖 3-6 傳統模式求解結果

同時，計算出的AGV作業總時間如下表：

表 3-11 傳統模式作業總時間

|          |                                                                                                                   |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AGV行駛路徑  | $S \rightarrow P_1 \rightarrow D_3 \rightarrow P_2 \rightarrow D_4 \rightarrow P_2 \rightarrow D_5 \rightarrow E$ |
| AGV作業總時間 | <b>21.4667</b>                                                                                                    |

接著，我們對兩種模式下執行同樣數量的貨櫃配送任務，AGV的行駛路徑與AGV的作業總時間進行對比：

表 3-12 兩種模式對比

|        | AGV行駛路徑                                                                                                           | AGV作業總時間       |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 傳統運輸模式 | $S \rightarrow P_1 \rightarrow D_3 \rightarrow P_2 \rightarrow D_4 \rightarrow P_2 \rightarrow D_5 \rightarrow E$ | <b>21.4667</b> |
| 混合運載模式 | $S \rightarrow P_1 \rightarrow D_3 \rightarrow P_2 \rightarrow D_4 \rightarrow D_5 \rightarrow E$                 | <b>16.9946</b> |

通過簡單的計算可以得知，採用新模式運輸比傳統模式節省了20.83%的作業時間，較大程度的提高了作業效率。

## 第四章、實證研究

本章節的主要的內容是對前章節所建立的新模型進行實例驗證。利用貨櫃碼頭的實際調度資料經過處理後作為實例的資料，運用模型測試並得出結果，最後進行分析。

### 4.1 問題描述

首先是資料來源部分。我們收集到中國大陸某港口智慧型貨櫃碼頭的相關資料，包含基本概況、堆場進出表（日）、碼頭設施平面分佈圖及AGV的性能參數表。

該智慧型貨櫃碼頭是中國大陸首個真正意義上的智慧型貨櫃碼頭，投資成本6.58億人民幣，於2016年年初正式投入使用。碼頭上共設置了3台雙小車岸邊起重機、16台自動化軌道吊、18台AGV以及其他各類自動化裝卸設備，並全部採用電力驅動。具備容納20000TEU級貨櫃船舶的作業能力，設計輸送量為78萬至91萬TEU/年。由於實現了真正意義上的全自動化作業，同時完全採用電力作為各種作業設備的能源，因此，該碼頭在整體作業效率上預計比傳統貨櫃碼頭提高20%-40%，並且能夠比傳統貨櫃碼頭節省能源25%以上，減少碳排放量15%以上。

接著對原始資料進行處理。由於原始資料的記載格式與模型運算所需要的格式存在差異，因此對原始資料進行處理，包括：

1. 堆場進出表（日）：模型的研究對象為單台AGV運輸貨櫃，而原始資料為一天的貨櫃運輸量，因此需要按設備數量進行平均分配。表4-1為獲取到的部分原始資料。

表4-1 堆場進出表（部分）（日）

| 區域 | 進場（20呎/個） | 出場（20呎/個） | 進場（40呎/個） | 出場（40呎/個） |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| A1 | 243       | 166       | 142       | 98        |
| A2 | 164       | 112       | 181       | 109       |
| B1 | 144       | 123       | 97        | 102       |
| B2 | 152       | 121       | 109       | 87        |
| C  | 98        | 46        | 58        | 43        |

資料來源：中國大陸某智慧型貨櫃碼頭。

2. 碼頭設施平面分佈圖：貨櫃碼頭地圖中各節點位置的座標按照合適比例縮放至二維平面坐標系中，圖4-1為碼頭平面圖（因涉及商業機密，故只獲得部分粗略資料）。



資料來源：中國大陸某智慧型貨櫃碼頭。

圖4-1 智慧型碼頭平面分佈圖

3. AGV性能參數表：選取其中部分所需參數，如AGV的行駛速度。表4-2為參數表。

表4-2 AGV性能參數表

| 項目     | 單位  | 數據        |
|--------|-----|-----------|
| 驅動形式   |     | 後輪驅動，電力驅動 |
| 額定載重   | KG  | 40000     |
| 最大行駛速度 | m/s | 10        |
| 最小轉彎半徑 | m   | 12        |
| 停止精度   | m   | ±0.5      |
| 電池容量   | AH  | 60/80     |

資料來源：中國大陸某智慧型貨櫃碼頭。

幾項原始資料經過處理之後，亦可將其作為實例測試之參數資料。

最後，參考求解器的運算性能及電腦硬體，對二維平面座標中的節點進行刪減，刪減至適合模型測試的數量。最終保留了16個節點，作為實例進行測試。16個節點除了虛擬起點和虛擬終點外，還有5個裝載點與9個卸載點。具體網路圖如下所示。

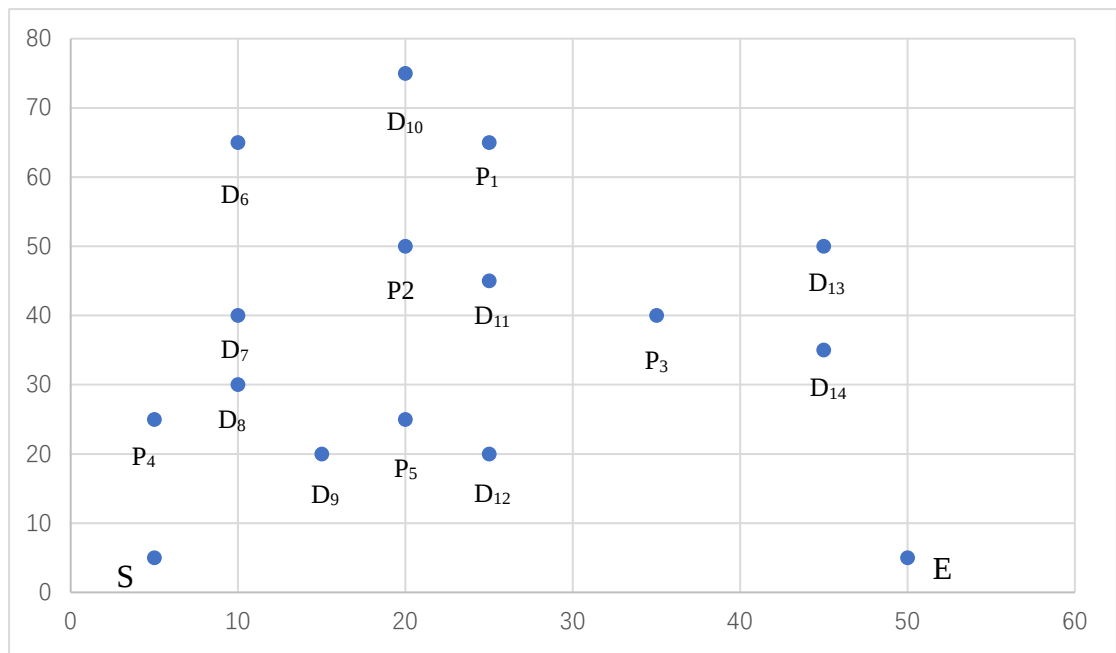


圖 4-2 實例網路

表4-3 節點名稱及座標

|    | 名稱   | 座標        |     | 名稱   | 座標        |
|----|------|-----------|-----|------|-----------|
| S  | 虛擬起點 | ( 5,5 )   | D8  | 卸載點3 | ( 10,30 ) |
| P1 | 裝載點1 | ( 25,65 ) | D9  | 卸載點4 | ( 15,20 ) |
| P2 | 裝載點2 | ( 20,50 ) | D10 | 卸載點5 | ( 20,75 ) |
| P3 | 裝載點3 | ( 35,40 ) | D11 | 卸載點6 | ( 25,45 ) |
| P4 | 裝載點4 | ( 5,25 )  | D12 | 卸載點7 | ( 25,20 ) |
| P5 | 裝載點5 | ( 20,25 ) | D13 | 卸載點8 | ( 45,50 ) |
| D6 | 卸載點1 | ( 10,65 ) | D14 | 卸載點9 | ( 45,35 ) |
| D7 | 卸載點2 | ( 10,40 ) | E   | 虛擬終點 | ( 50,5 )  |

## 4.2 參數設定

依據二維平面座標圖之個節點相對位置，計算出各節點之間AGV的行駛時間。通過查閱AGV的性能參數表，我們獲取到AGV的運行速度，並根據實際情況，設置AGV的合理行駛速率固定為5m/s。並依據模型中的AGV全程為勻速行駛之假設，利用時間等於距離除速度之定義，計算得出下表 $T_{ab}$ 之數值。

表 4-4 參數 Tab

|    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| E  | 45     | 65     | 54.083 | 38.078 | 47.434 | 36.055 | 72.111 | 53.150 | 47.169 | 38.078 | 76.157 | 47.169 | 29.154 | 45.277 | 30.413 | 0      |
| 14 | 50     | 36.055 | 29.154 | 11.180 | 41.231 | 26.925 | 43.011 | 35.355 | 35.355 | 33.541 | 47.169 | 22.360 | 25     | 15     | 0      | 30.413 |
| 13 | 60.207 | 25     | 25     | 14.142 | 47.169 | 35.355 | 35.355 | 36.400 | 40.311 | 28.284 | 32.015 | 11.180 | 36.055 | 0      | 15     | 45.276 |
| 12 | 25     | 45     | 30.413 | 22.360 | 20.615 | 7.071  | 47.434 | 25     | 18.027 | 10     | 25     | 25     | 0      | 36.055 | 25     | 29.154 |
| 11 | 44.721 | 20     | 7.071  | 11.180 | 28.284 | 20.615 | 25     | 15.811 | 25     | 26.925 | 30.413 | 0      | 25     | 11.180 | 22.360 | 47.169 |
| 10 | 71.589 | 11.180 | 25     | 38.078 | 52.201 | 50     | 14.142 | 36.400 | 46.097 | 55.226 | 0      | 30.413 | 25     | 32.015 | 47.169 | 76.157 |
| 9  | 18.027 | 41.231 | 30.413 | 28.284 | 11.180 | 7.071  | 45.276 | 20.615 | 11.180 | 0      | 55.226 | 26.925 | 10     | 28.284 | 33.541 | 38.078 |
| 8  | 25.495 | 38.087 | 22.360 | 26.925 | 7.071  | 11.180 | 35     | 10     | 0      | 11.180 | 46.097 | 25     | 18.027 | 40.311 | 35.355 | 47.169 |
| 7  | 35.355 | 29.154 | 14.142 | 25     | 15.811 | 18.027 | 25     | 0      | 10     | 20.615 | 36.400 | 15.811 | 25     | 36.400 | 35.355 | 53.150 |
| 6  | 60.207 | 15     | 18.027 | 35.355 | 40.311 | 41.231 | 0      | 25     | 35     | 45.276 | 14.142 | 25     | 47.434 | 35.355 | 43.011 | 72.111 |
| 5  | 25     | 40.311 | 25     | 21.213 | 15     | 0      | 41.231 | 18.027 | 11.180 | 7.071  | 50     | 20.615 | 7.071  | 35.355 | 26.925 | 36.055 |
| 4  | 20     | 44.721 | 29.154 | 33.541 | 0      | 15     | 40.311 | 15.811 | 7.071  | 11.180 | 52.201 | 28.284 | 20.615 | 47.169 | 41.231 | 47.434 |
| 3  | 46.097 | 26.925 | 18.027 | 0      | 33.541 | 21.213 | 35.355 | 25     | 26.925 | 28.284 | 38.078 | 11.180 | 22.360 | 14.142 | 11.180 | 38.078 |
| 2  | 47.434 | 15.811 | 0      | 18.027 | 29.154 | 25     | 18.027 | 14.142 | 22.360 | 30.413 | 25     | 7.071  | 30.413 | 25     | 29.154 | 54.083 |
| 1  | 63.245 | 0      | 15.811 | 26.925 | 44.721 | 40.311 | 15     | 29.154 | 38.078 | 41.231 | 11.180 | 20     | 45     | 25     | 36.055 | 65     |
| S  | 0      | 63.245 | 47.434 | 46.097 | 20     | 25     | 60.207 | 35.355 | 25.495 | 18.027 | 71.589 | 44.721 | 25     | 60.207 | 50     | 45     |
| S  | S      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     | E      |

參數 $T_{ab}$ 即為兩兩節點之間AGV所需要的行駛時間，為依照表4-3中各節點座標之間相對距離，按照事先設定好的AGV平均行駛速度，相除得出。

接著，依照堆場進出表（日），選取其中部分儲位，計算出各個儲位的貨櫃變化量，在將其對應到每個節點中去，（因為模型使用一台AGV，因此在處理貨櫃變化量時將總變化量平均分配給所有AGV，得到單台AGV的處理量）。如下表所示。

表4-5 起始節點貨櫃量

| 名稱             | 貨櫃儲存量（個） | 名稱              | 貨櫃儲存量（個） |
|----------------|----------|-----------------|----------|
| P <sub>1</sub> | 24       | D <sub>8</sub>  | 21       |
| P <sub>2</sub> | 16       | D <sub>9</sub>  | 10       |
| P <sub>3</sub> | 32       | D <sub>10</sub> | 20       |
| P <sub>4</sub> | 21       | D <sub>11</sub> | 14       |
| P <sub>5</sub> | 16       | D <sub>12</sub> | 16       |
| D <sub>6</sub> | 8        | D <sub>13</sub> | 11       |
| D <sub>7</sub> | 12       | D <sub>14</sub> | 10       |

表4-6 完成節點貨櫃量

| 名稱             | 貨櫃儲存量（個） | 名稱              | 貨櫃儲存量（個） |
|----------------|----------|-----------------|----------|
| P <sub>1</sub> | 23       | D <sub>8</sub>  | 22       |
| P <sub>2</sub> | 14       | D <sub>9</sub>  | 11       |
| P <sub>3</sub> | 30       | D <sub>10</sub> | 21       |
| P <sub>4</sub> | 19       | D <sub>11</sub> | 15       |
| P <sub>5</sub> | 14       | D <sub>12</sub> | 17       |
| D <sub>6</sub> | 9        | D <sub>13</sub> | 12       |
| D <sub>7</sub> | 13       | D <sub>14</sub> | 11       |

根據起始和完成時節點貨櫃儲存量的差值，計算出節點變化量（參數 $d_a$ ）的各值，如表4-7所示。

表 4-7 參數 $d_a$

|   | 名稱    | 變化量 |    | 名稱       | 變化量 |
|---|-------|-----|----|----------|-----|
| S | 虛擬起點  | 0   | 8  | $D_8$    | -1  |
| 1 | $P_1$ | 2   | 9  | $D_9$    | -1  |
| 2 | $P_2$ | 2   | 10 | $D_{10}$ | -1  |
| 3 | $P_3$ | 2   | 11 | $D_{11}$ | -2  |
| 4 | $P_4$ | 2   | 12 | $D_{12}$ | -1  |
| 5 | $P_5$ | 2   | 13 | $D_{13}$ | -1  |
| 6 | $D_6$ | -1  | 14 | $D_{14}$ | -1  |
| 7 | $D_7$ | -1  | E  | 虛擬終點     | 0   |

各裝卸點的變化量根據前一章模型假設小結，考慮了3種情況，分別是裝卸20尺貨櫃、裝卸40呎貨櫃與無裝卸（虛擬起點與終點），分別用1、2和0來表示容量發生的變化。

### 4.3 求解過程與結果

求解方法及過程與第三章 3.4.3小節相同，在此不再重述。依據GUROBI求解器所得出的結果，將其繪製成下圖。

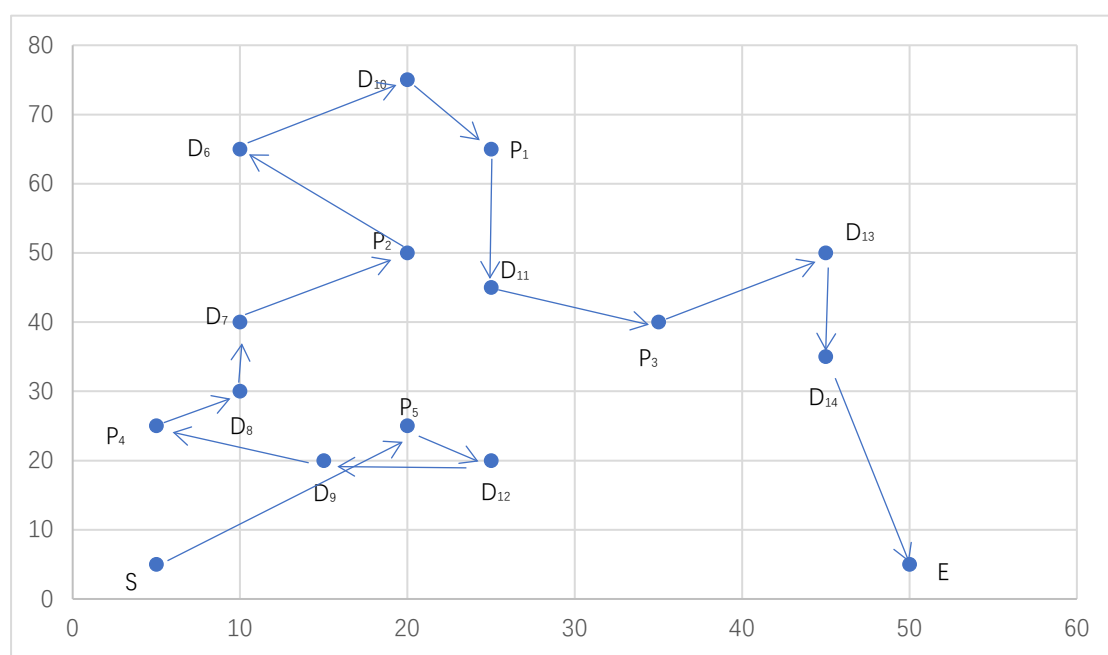


圖 4-3 實例求解結果

同時，根據求解結果，整理得到AGV作業總時間：

表 4-8 實例求解結果

|          |                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AGV行駛路徑  | S→P <sub>5</sub> →D <sub>12</sub> →D <sub>9</sub> →P <sub>4</sub> →D <sub>8</sub> →D <sub>7</sub> →P <sub>2</sub> →D <sub>6</sub> →D <sub>10</sub> →P <sub>1</sub> →D <sub>11</sub> →P <sub>3</sub> →D <sub>13</sub> →D <sub>14</sub> →E |
| AGV作業總時間 | 218.548                                                                                                                                                                                                                                  |

因為在第三章簡例測試的對比分析這一小節中，已經通過對比的方法證明新建立的運輸模式比傳統模式更有效率，因此在實例中就不再重複證明。

## 4.4 敏感度分析

敏感度分析是檢驗一個模型可靠程度的常用方法。因此，在本小節中，利用敏感度分析的方法來說明新模式的可靠性。敏感度分析一般可分為兩種，一種是局部敏感度分析，另一種則是全域敏感度分析。選擇使用哪一種方法主要取決於模型的複雜程度。依據本文模型的特徵，我們選擇了局部敏感度分析對模型進行驗證。

考慮到未來隨著技術的升級，AGV的裝載能力會得到提升，容量也會隨之增加，而對AGV的作業效率會產生影響。因此選擇了模型中AGV容量（C）這一參數，進行敏感度分析，測試容量C與作業總時間G之間的敏感度。在這裏特別說明第三章假設1中提出不考慮裝卸時間的影響。因為在敏感度分析中，參數資料是固定不變的，儘管AGV同時裝載的貨櫃數量增加，但是裝卸任務數並沒有發生變化，變化的是在各點的裝卸時間（實際上在前文中提到過，這個時間相比于行駛時間來說可以說是忽略不計的，另外據瞭解一旦AGV容量大幅擴大，相應的，起重機的作業能力也必然會提高，因此裝卸時間的差异會大幅減小），而總的裝卸時間不會變化，所以在敏感度分析中不考慮裝卸時間的假設並不會對分析結果造成明顯影響。

首先將參數C分別設定為3、4、5、6、7、8，然後分別代入到原來的模型中，依照實例的資料分別進行計算，得出下表。

表 4-9 不同參數求解結果

| 參數C | AGV作業總時間G |
|-----|-----------|
| 3   | 235.027   |
| 4   | 228.848   |
| 5   | 247.100   |
| 6   | 238.425   |
| 7   | 253.351   |
| 8   | 244.048   |

並將其繪製成折線圖，如下所示。其中橫軸表示的是參數C的值，縱軸表示的是作業總時間G的值。

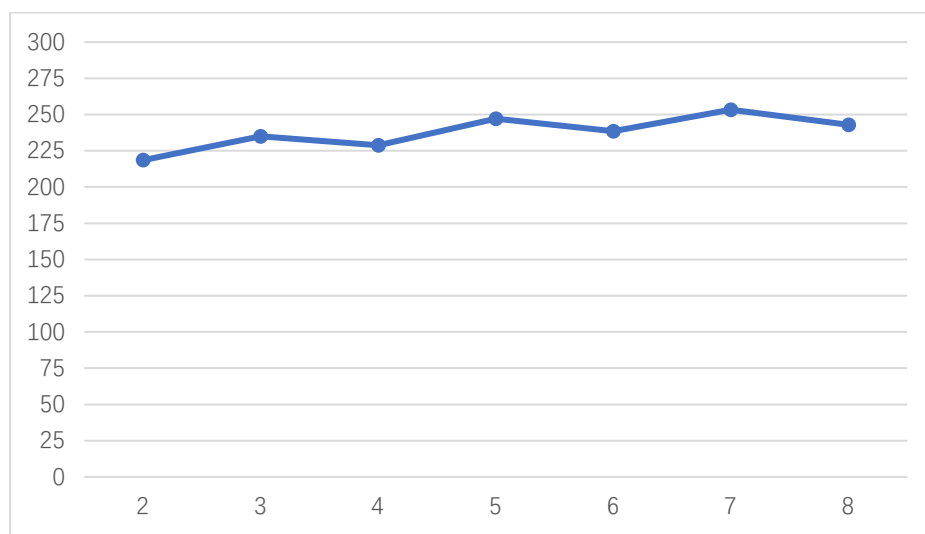


圖 4-4 AGV容量與總時間關係變化

從上圖我們可以發現，當AGV的容量從最初設定的2，增長到最高8的過程中，AGV的作業總時間並沒有發生較大幅度的變化。

下圖為容量變化量與作業總時間變化量的關係圖，其中橫軸代表容量增加的百分比，縱軸為總時間變化百分比。

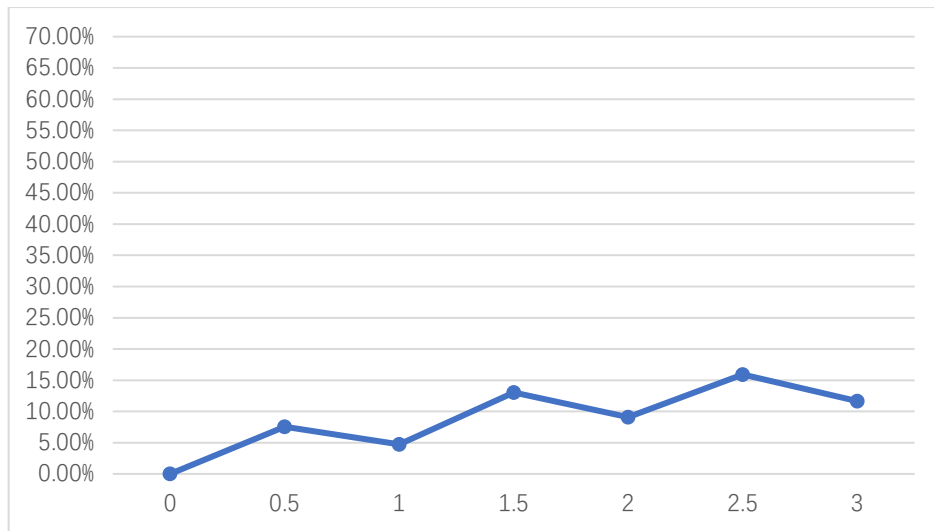


圖 4-5 AGV容量與總時間增加比率

從AGV容量變化量與作業總時間變化量關係圖上也可以看出，隨著容量的大幅增加，相應的作業總時間卻只有較小幅度的增長，說明AGV最大容量的變化對於AGV作業總時間的影響十分有限。表明了該模式具有較高的穩定性，即新模型的敏感度較低。

## 第五章、結論與建議

在本章節，對本文的主要貢獻進行總結，並通過對實際的貨櫃碼頭作業情況的瞭解，對混合運載運輸模式提出適當的改進意見與建議。

### 5.1 結論

本文通過對全球貿易的快速增長而暴露出海運效率的問題，進而衍生出如何進一步提高智慧型貨櫃碼頭作業效率的問題進行探討，選擇了智慧型貨櫃碼頭上常見的作業設備AGV進行研究，通過改進其運載方式，較大程度縮短了AGV的作業總時間，成功實現了AGV作業效率的提升。因此，文本的貢獻大致有以下三點：

- 1、通過大量的文獻回顧，介紹了智慧港口與智慧型貨櫃碼頭的概況與發展，以及目前相關領域的一些主要研究內容，使大家對其能夠更好的瞭解。
- 2、本文所提出的應用AGV的混合運載運輸貨櫃之模式，通過實例的驗證分析，證明其比傳統運輸模式更具效率，成功實現AGV作業效率的提升，對貨櫃碼頭整體作業效率的提升做出了貢獻。
- 3、通過對實際貨櫃碼頭作業情況的瞭解，再結合本文新建立之模式，合理的提出了一些改進的意見與建議，對未來繼續深入研究具有較大啟發意義。

同時，本文還作出以下結論，

- 1、智慧港口和智慧型貨櫃碼頭的出現極大程度上緩解了目前港口作業效率不足的問題。但隨著全球貿易持續增長，未來預計海運的需求量尤其是貨櫃運輸的需求量依然會持續增長，港口碼頭所面臨的挑戰將會更加嚴峻。
- 2、船舶大型化的發展趨勢也對智慧港口與智慧型貨櫃碼頭的發展帶來了新的考驗，是否需要發展出一套專門針對大型船舶的作業模式值得我們去探討。
- 3、智慧型貨櫃碼頭在未來的一段時間內將會是貨櫃碼頭的主要存在方式，隨著科技的不斷進步，越來越多的智慧化自動設施設備將會被納入智慧型貨櫃碼頭的作業系統中去，而學者們對其探討與研究也將會更加的細緻與深入。
- 4、未來，學者對於該領域的探討與研究將會更加注重實務上的可行性，針對港口碼頭不同的定位與自身的特點，提出更加實用的新概念或新模式。

## 5.2 建議

在第四章實證研究的部分，選取了一個具備代表性的智慧型貨櫃碼頭，在後期，對該碼頭進行回訪時，又瞭解到該碼頭正在進行一項實驗，而實驗的對象正式本文所提出的多載荷AGV，實驗的內容與本文所研究之混合運載模式高度相似，因此，通過進一步的瞭解後，在對比本文模式後，得出以下發現，

- 1、該實驗的設置條件與本文模式之假設較為接近，即採用一台多載荷AGV，在一個固定的試驗區域內進行測試。一定程度上證明本文所發展之模式在實務上的可行性。
- 2、實驗初期的設定是每個裝卸點的裝卸量都不超過AGV的最大容量，但在實驗的中後期，目標是要實現AGV能夠在各裝卸點之間重複行駛，即模擬實際中AGV最常見的一種作業情景，表明本文建立之模式在未來具有改進的空間。

另外，從該智慧型貨櫃碼頭的實驗中還瞭解到，在未來，他們預計會採用兩種方案進行對比實驗，一種是將AGV行駛區域劃分成若干塊，每個區域內使用一台多載AGV進行運輸，另一種則是常見的使用多台多載荷AGV進行運輸。相比而言，負責實驗的人表示更希望採用第一種方案，原因就是簡單高效，可以避免多種影響因素干擾AGV的作業，但同時也表示還是會根據實驗結果來做出合適的選擇。因此，針對我們在實務上瞭解到的情況并結合本研究，提出了如下的建議，

- 1、在未來對混合運載模式模型的改進上，可以考慮增加實際中常見的影響因素，以及增加模式中使用的AGV數量，進一步提高模式的實用性。
- 2、可以加入常見的配合作業設備以發展綜合調度之模式，將混合運載模式進一步融入到貨櫃碼頭的作業系統中，更好的實現整體作業效率的提升。
- 3、發展新的啟發式求解演算法，通過啟發式演算法，可以極大提高在處理大規模問題時的運算效率。在實際作業中，需要處理的常常都是較大規模的資料量，有了高效的求解方法，就可以將混合運載模式的優勢最大限度的發揮出來。
- 4、越來越多的大型貨櫃船取代了中小型的貨櫃船進行著海洋運輸，可以針對大型船舶的特點，設計出一套專用的作業設備及作業模式來進一步提高港口碼頭的作業效率。

最後，我們相信，儘管在海運物流領域的問題層出不窮，但隨著科技的不斷進步，各種各樣的難題終究都會迎刃而解。

## 參考文獻

- Ana María Martín-Soberón, Arturo Monfort, Rafael Sapiña, Noemí Monterde, David Calduch(2014). Automation in port container terminals. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 160,195 – 204.
- Bae, H.Y., Choe, R., Park, T., Ryu, K.R., (2011). Comparison of operations of AGVs and ALVs in an automated container terminal. *J. Intell. Manuf.*, 1–14.
- Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., Ronen, D., (2007). Maritime transportation. In: Barnhart, C.L. (Ed.), *Transportation. Handbooks in Operations Research and Management Science. Elsevier, Amsterdam*, pp. 189–284.
- Díaz-Madroño, M., Mula, J., Jiménez, M., & Peidro, D. (2017). A rolling horizon approach for material requirement planning under fuzzy lead times. *International Journal of Production Research*, 55(8), 2197–2211.
- Guizhu Lin. (2019). Construction of smart port supply chain under "Internet +". *Technology and Economic Guide*. 27(33).21.
- Hong Li, Dachen Wang, Ting Liu. (2020). Problems and development suggestions on smart port construction in China. *SYGL*. 42(1). 23-25.
- Hu, H., Lee, B. K., Huang, Y., Lee, L. H., & Chew, E. P. (2013). Performance analysis on transfer platforms in frame bridge based automated container terminals. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013(3), 831–842.
- Hongtao Hu, Xiazhong Chen, Tingsong Wang, Ye Zhang(2019). A three-stage decomposition method for the joint vehicle dispatching and storage allocation problem in automated container terminals. *Computers & Industrial Engineering*,129,90–101.
- Jiabin Luo,Yue Wu,André Bergsten Mendes(2016). Modelling of integrated vehicle scheduling and container storage problems in unloading process at an automated container terminal. *Computers & Industrial Engineering*,94,32–44.
- Jiabin Luo,Yue Wu(2015). Modelling of dual-cycle strategy for container storage and vehicle scheduling problems at automated container terminals. *Transportation Research Part E*,79,49–64.

- Kim, J., Choe, R., Ryu, K.R., (2013). Multi-objective optimization of dispatching strategies for situation-adaptive AGV operation in an automated container terminal. In: Proceedings of the 2013 Research in Adaptive and Convergent Systems, *ACM*, City, pp. 1–6.
- Kim, K.H., Bae, J.W.(2004). A look-ahead dispatching method for automated guided vehicles in automated port container terminals. *Transp. Sci.* 38, 224–234.
- Mishra, A., & Tripathi, A. K. (2015). Complexity of a problem of energy efficient real-time task scheduling on a multicore processor. *Complexity*, 21(1), 259–267.
- Radhia Zaghdoud,Khaled Mesghouni,Simon Collart Dutilleul,Kamel Zidi,Khaled Ghedira(2016). A Hybrid Method for Assigning Containers to AGVs in Container Terminal.*IFAC-PapersOnLine*,49-3,096–103.
- Roy, D., Gupta, A., & Koster, R. B. M. D. (2016). A non-linear traffic flow-based queuing model to estimate container terminal throughput with AGVs. *International Journal of Production Research*, 54(2), 1–21.
- Sadeghian, S. H., Ariffin, M. K. A. M., Tang, S. H., & Ismail, N. (2014). Integrated dispatching model of automated lifting vehicles, quay cranes and yard cranes at automated container terminal. *Applied Mechanics & Materials*, 564, 678–683.
- Yongsheng Yang, Meisu Zhong, Yasser Dessouky, Octavian Postolach (2018). An integrated scheduling method for AGV routing in automated container terminals. *Computers & Industrial Engineering*,126,482–493.
- Yu, M., & Qi, X. (2013). Storage space allocation models for inbound containers in an automatic container terminal. *European Journal of Operational Research*, 226(1),32–45.
- Yang, X., Mi, W., Li, X., An, G., Zhao, N., & Mi, C. (2015). A simulation study on the design of a novel automated container terminal. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(5), 1–11.
- Zhen, L., Shen, T., Wang, S., & Yu, S. (2016). Models on ship scheduling in transshipment hubs with considering bunker cost. *International Journal of Production Economics*, 173,111–121.
- 陳利, 袁蓉, 劉永剛(2016).基於物聯網的智慧物流供應鏈管理研究[J].*商品與品質*(理論研究版), (5):114-117.
- 戴定一(2015).物聯網與智能物流[J].*中國科技投資*(10):43-46.
- 高虹橋, 邵文淵, 劉婷, 謝清霞 (2016) .智慧港口技術框架.*港口科技·智慧港口*,100011,1–6.
- 羅本成, 解玉玲(2016).港口物流的體系結構及物流運作策略淺議[J].*水運研究所*, (1):22-25.
- 黃衍(2018).上海智慧港口建設路徑[J].*港口科技*, (7):7-8,33.

- 薑健(2016).港口物流資訊平臺研究綜述[J].*科技經濟市場*, (9):49-50.
- 劉興鵬, 張澍寧 (2016).智慧港口內涵及其關鍵技術.*世界海運-航運經濟與管理*,247,1-6.
- 仇豔麗, 趙豔芳, 胡金濤(2012).物聯網技術在集裝箱管理中的應用研究[J].*物流工程與管理*,3:106-107.
- 陶德馨(2017).智慧港口發展現狀與展望[J].*港口裝卸*, (1):1-3.
- 唐雅璿, 餘金山(2012).採用物聯網技術的港口資訊化系統[J].*華僑大學學報(自然科學版)*, (03):275-279.
- 吳曉劍, 王繼祥(2015).物聯網技術在物流企業應用現狀與發展前景調研報告[J].*物流技術與應用*, (2):53-59.
- 俞靈(2016).港口口岸物聯網體系結構規劃設想[J].*綜合運輸*, (5):35-38.
- 朱連義, 安國利, 董席亮 (2015).世界自動化集裝箱碼頭發展現狀及啟示.*集裝箱化*,282 (26), 7-10.
- 張岩(2013).港口集裝箱運輸管理中物聯網技術的應用分析[J].*科技傳播*, (24):195-200.
- 張全升, 龔六堂(2016).基於物聯網技術的智慧物流發展模式研究[J].*公路交通科技(應用技術版)*, (4):41-45.
- 趙軼華(2015).基於物聯網的港口散雜貨疏運系統研究[J].*物流工程與管理*,33(5):34-36.