

國家科學及技術委員會補助
大專學生研究計畫研究成果報告

計 畫
： 考量碳稅開徵及碳排放量之訂單生產排程問題
名 稱

報 告 類 別 ： 成果報告
執行計畫學生： 邱寶樟
學生計畫編號： NSTC 112-2813-C-033-043-E
研 究 期 間 ： 112年07月01日至113年02月29日止，計8個月
指 導 教 授 ： 陳平舜

處 理 方 式 ： 本計畫可公開查詢

執 行 單 位 ： 中原大學工業與系統工程學系

中 華 民 國 113年02月29日

摘要

本研究探討封裝測試廠在考量碳稅開徵及碳排放量的情況下，透過考量生產排程在製造過程中電力消耗所產生的碳排放量作為研究動機。藉由搜集碳稅、碳排放量與封裝測試排程相關文獻進行探討後，利用數學規劃建立符合封裝測試廠生產線排程之數學規劃模型，並將製程中衍生的碳排結合現行擬訂之碳稅費用轉換為額外的支出成本。本研究使用數學規劃軟體計算之最佳生產線排程規劃，協助封裝測試廠達成最小化訂單生產總成本的生產規劃。

本研究透過情境分析在面對碳費和碳交易政策時，由於額外增加碳權成本至生產成本中，所以更能促使企業投資提升生產效率套件，有效降低碳排放量。儘管於碳交易模型中，封裝測試廠能夠過購買碳權實現碳中和，但是兩種模型皆未以投資減碳設備的手段減少碳排放量。因此，本研究以碳交易模型執行敏感度分析，數值分析結果顯示，僅調整碳定價或排放限額其中一項因素，似乎難以達到政府期望的淨零排放目標。本研究結果顯示，政府在制定碳費政策時，不僅需要確保碳定價能夠促進減排意願，同時也應謹慎評估碳排放上限。甚至需提供企業在執行減碳投資時適當的補助或激勵措施，以促進企業更積極參與減碳行動。

關鍵字：碳稅、碳排放量、訂單生產排程、封裝測試排程、數學規劃模型

目錄

摘要.....	i
目錄.....	ii
圖目錄.....	iii
表目錄.....	iv
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究問題.....	3
第二章 文獻探討.....	5
2.1 碳稅、碳排放量.....	5
2.2 封裝測試排程.....	6
2.3 小結.....	7
第三章 研究方法.....	8
3.1 研究步驟.....	8
3.2 研究假設.....	9
3.3 數學式.....	10
3.3.1 符號定義.....	10
3.3.2 目標式.....	11
3.3.3 限制式.....	12
3.4 小模型範例介紹.....	14
第四章 研究結果與討論.....	17
4.1 範例介紹.....	17
4.2 封裝測試與碳排成本.....	17
4.3 求解結果及分析.....	19
4.4 模型規模分析.....	20
4.5 穩定度分析.....	21
4.6 情境分析.....	22
4.7 敏感度分析.....	23
4.7.1 碳定價之敏感度分析.....	23
4.7.2 碳排放上限之敏感度分析.....	23
4.7.3 碳定價極值之敏感度分析.....	24
第五章 結論與未來方向.....	26
5.1 結論.....	26
5.2 未來方向.....	26
參考文獻.....	27

圖目錄

圖 1、2012 年 1 月至 2023 年 4 月各部門電力消費佔比.....	2
圖 2、2012 年 1 月至 2023 年 4 月工業部門電力消費佔比.....	2
圖 3、IC 封裝測試流程.....	4
圖 4、本研究之研究架構流程圖.....	8
圖 5、Gurobi Optimizer 數學規劃軟體求解流程圖	9
圖 6、小模型 Gurobi 求解結果	15
圖 7、小模型訂單生產排程結果.....	16
圖 8、Gurobi 求解結果	19
圖 9、不同訂單規模下的限制式與變數數量.....	20
圖 10、不同訂單規模下的模型求解時間.....	20
圖 11、不同規模下的模型求解時間.....	21
圖 12、中模型穩定度測試.....	22
圖 13、碳定價之敏感度分析.....	23
圖 14、碳排放上限之敏感度分析.....	24
圖 15、碳定價極值之敏感度分析.....	24
圖 16、碳成本的變化.....	25

表目錄

表 1、不同減碳制度之比較.....	1
表 2、日月光歷年能源使用情況.....	3
表 3、碳稅與碳排放量文獻整理.....	5
表 4、封裝測試排程文獻整理.....	6
表 5、數學符號說明.....	10
表 6、小模型規模設定.....	14
表 7、小模型參數設定.....	14
表 8、小模型訂單資料表.....	15
表 9、小模型訂單資料表(續上表).....	15
表 10、小模型求解結果.....	15
表 11、小模型訂單生產排程.....	16
表 12、訂單資訊分佈.....	17
表 13、A 公司歷年營業毛利率.....	18
表 14、臺灣歷年電力碳排放係數.....	18
表 15、例題之標號設定.....	19
表 16、例題之參數設定.....	19
表 17、模型求解結果.....	19
表 18、問題規模分類表.....	21
表 19、比對三種模型之求解結果.....	22

第一章 緒論

1.1 研究動機

攸關環境保護的國際條約數目眾多，其中各國針對溫室氣體排放量之約束條款更是不計其數，每個國家都會依照個別現狀實施管制；但條約內的詳細規則都是在遵循著以下幾條較為重要的國際協定為前提再行微幅修改。1992 年《聯合國氣候變遷綱要公約》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)通過，奠定往後全球在面對氣候變遷時有正式的依循規範基礎；並於 1997 年的《京都議定書》宣示要將大氣內的溫室氣體含量穩定在適當水準；而 2015 年《巴黎協定》更進一步呼籲將全球升溫幅度控制在工業革命前平均值的攝氏 2 度內。由上述的條約演進歷程可以發現，其規範內容逐漸變得更加具體與嚴格；但是上述之氣候綱要公約卻都缺乏執行的強制力，因此各國在因應此議題時的積極度相差甚大，導致實際成效經常與原先計畫目標有所出入。

2022 年歐盟通過《碳邊境調整機制》(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)為首個針對碳排放量問題徵收關稅的條約，目標為促使歐盟境外的企業在產品製造過程中降低碳排放，期望透過碳稅制度讓企業在避免衍生額外的成本支出下主動積極應對氣候變遷的議題。2023 年 1 月 10 日，臺灣國內也通過《氣候變遷因應法》取代《溫室氣體減量及管理法》，宣布將於隔年起分階段徵收碳費(Carbon Fee)並正在研擬相關碳稅規範。雖然目前的執行手段為實施碳費，但是國內對於碳管制的方式仍有爭論，因此企業之生產方針該如何應對政策即為一門課題(劉育璋，2022)，常見的減碳制度如表 1 所示。

行政院環境保護署於 2020 年 7 月委託倫敦政經學院(The London School of Economics and Political Science, LSEPS)進行研究，目的為針對我國經濟與溫室氣體排放擬定國內碳費徵收的適當價格。此研究結果建議價格應從每公噸二氧化碳當量(tCO₂e) 10 美元起逐漸提升，且至 2030 年應增加為每公噸 98 美元(Burke et al., 2020)。

表 1、不同減碳制度之比較

減碳政策	機制說明	主要國家
碳費	根據每噸碳排支付固定之金額	臺灣
碳稅	根據每噸碳排支付對應稅率之金額	瑞典
碳交易	碳排放量設有上限；但是可透過購買碳權避免支付超額排放之罰金或藉由販售碳權藉此獲利	歐盟
碳排放限額	碳排放量設有固定且不容超過的上限	

根據經濟部能源局從 2012 年 1 月至 2023 年 4 月統計之電力消費情形，可發現工業用電量占比皆為歷年最多的部門，並且圖 1 顯示至 2021 年其占比已成長

至 56.1%(經濟部能源局，2023)；進一步分析工業部門能源消費的情形，則可發現電子產品製造業歷年用電量占比如圖 2 所示不斷攀升(經濟部能源局，2023)。而造成此現象的主因為半導體相關產業近十年來在國內不斷的擴大設廠提升產能，此結果也導致半導體產業和其他類別的產業相比，必需承擔較多的溫室氣體排放量。臺灣的產業結構以製造業為主，其中半導體產業更是影響著國內經濟發展的重點，所以該產業在面對碳稅開徵的議題時更應該即時應變。

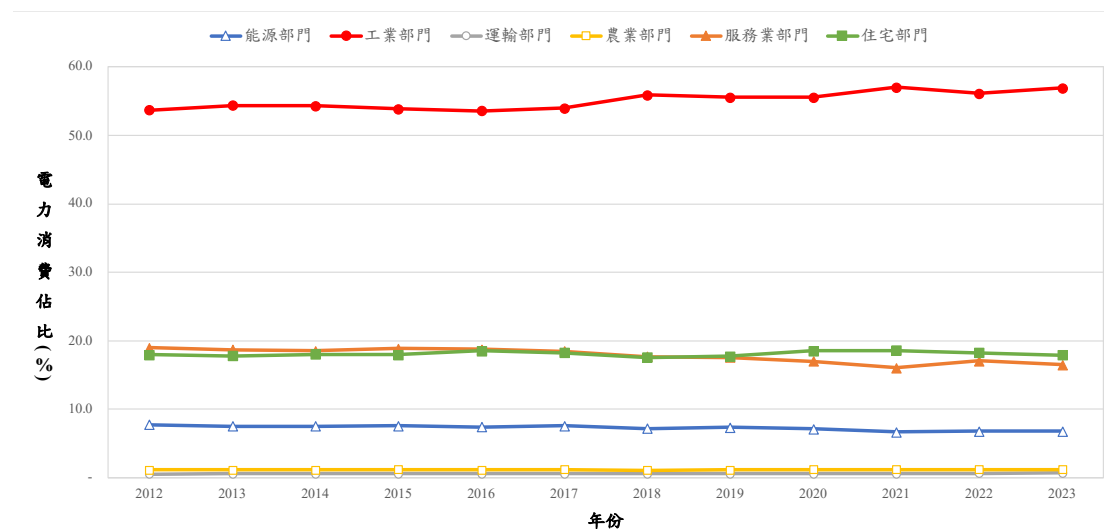


圖 1、2012 年 1 月至 2023 年 4 月各部門電力消費佔比

資料來源：能源統計專區；經濟部能源局(2023/05)

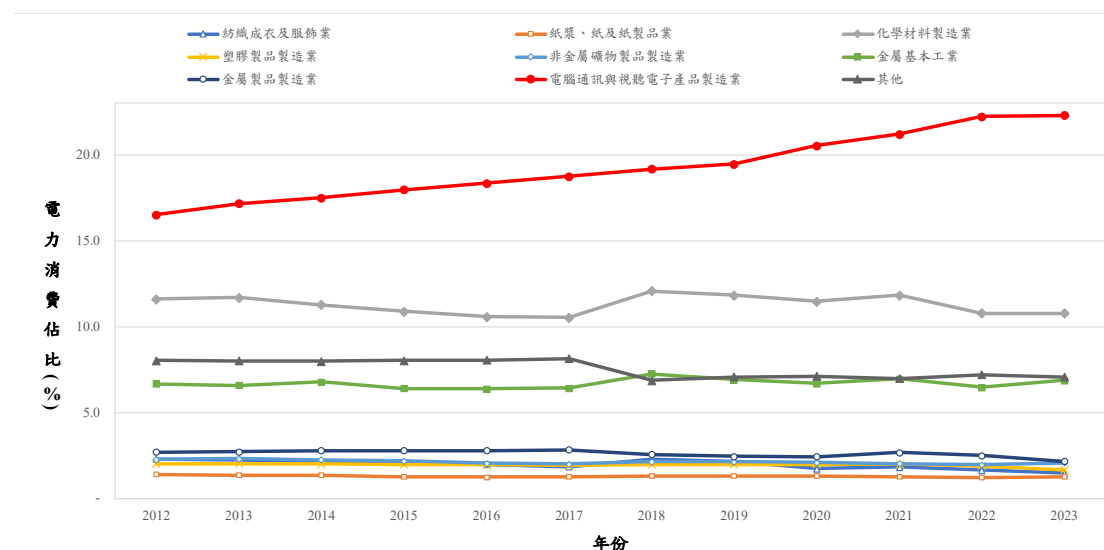


圖 2、2012 年 1 月至 2023 年 4 月工業部門電力消費佔比

資料來源：能源統計專區；經濟部能源局(2023/05)

根據工研院產科國際所 IEK(2022)統計，臺灣半導體產業在 2021 年產值達新臺幣 40,820 億元，其中封裝測試產值則達到新臺幣 4,354 億元。自 2014 年以來，臺灣在全球專業封裝測試代工的市佔將近五成(楊啟鑫，2021)，顯示出國際市場對其具有高度仰賴性；然而，此產業在具備高度經濟價值的同時，其溫室氣

體排放量卻也相當可觀。以日月光控股(2022)公布 2021 年度之營收與溫室氣體排放為例：合併營收約為新台幣 5,700 億，而攸關生產製造(範疇一與二)的碳排放量約為 170 萬 tCO₂e。假設以政府起初訂定之碳費價格(10 美元/tCO₂e)為例，則須額外支出 1,700 萬美元(約 5.1 億新臺幣)營業成本，相當於損失約 0.09%之營收；若以 98 美元/tCO₂e 進行計算，則須支付 1.666 億美元(約 49.98 億新臺幣)，損失約 0.9%營收。因此，本研究對半導體封裝測試廠進行深入討論，因為要是企業能以更佳之生產規劃應對，即可在碳稅上減少支出可觀的費用。

1.2 研究問題

半導體製造業在生產時會使用到大量能源，所以如何利用和處理資源即成為企業不容忽視的問題(簡禎富，2022)。雖然，多數廠商已導入綠色製程技術當作解決手段，但是電力問題卻始終是能源使用中最難克服的環節。根據表 2 日月光控股(2022)公布之環境數據，2021 年直接排放(範疇一)及間接排放(範疇二)所產生的碳排為 1,702,640 tCO₂e。而整體電力使用量為 4,285,115 千度電(MWh)，其中非再生電力共消耗 3,255,018 MWh，約占整體電力使用的 75%。

半導體製程設備的用電量龐大，因此，已經有許多半導體公司，例如：台積電、美光、日月光等企業，陸續增加投入綠電的使用與節能設備的投資，期望能降低過度依靠外購之非再生電力能源；但在再生能源的發電效率限制下，此舉的改善幅度並不如預期理想。由於臺灣的供電結構以燃煤發電與天然氣發電等非再生能源為大宗，若企業對電力資源上具有高度需求，也將連帶導致其生產必須負擔較多碳排放量。大致上工業部門產業之碳排放量來源為電力消耗，因此，多數企業認為透過節能即可實現減碳目標(高琦幃，2015)。

表 2、日月光歷年能源使用情況

項目	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
再生電力(MWh)	397,766	512,067	706,105	1,030,137
非再生電力(MWh)	2,732,384	3,076,829	3,194,810	3,255,018
直接排放(tCO ₂ e)	99,504	98,880	93,996	90,591
間接排放(tCO ₂ e)	1,735,097	1,695,223	1,658,606	1,612,049

資料來源：2021 永續報告書；日月光控股(2022)

訂單生產排程(Order Production Scheduling)是依照客戶提出之訂單需求，考量工廠當前的產線機台配置情況、物料存貨與產品加工時間等，擬定後續的製造計畫以實現最大利益的生產。透過改善訂單生產排程規劃能達到降低機台閒置時間，以減少電力消耗；或是提升整體的生產效率，讓產能可有效增加、縮短訂單交期的等候時間。若是訂單生產排程規劃不良，則會讓生產出現瓶頸(Bottleneck)，增加多餘整備時間等降低生產效率之情況發生。

而根據吳嘉祐(2022)與溫婉菁(2022)考量生產排程依製程中的機台數量、加工順序等條件，則可再細分為以下幾種類別：

- 單機排程(Single Machine Scheduling)
製程中只有一台機台，且所有工件會依序被指配至該機台上進行加工。
- 平行機排程(Parallel Machine Scheduling)
製程中包含多台機台，而根據同一道製程中不同機台間的加工時間或加工速率，可再區分為等效平行機台(Identical Parallel Machines)與非等效平行機台(Non-Identical Parallel Machines)。
- 流程型排程(Flow Shop Scheduling)
每個工件都必須遵循相同且固定的製程依序進行加工。
- 零工型排程(Job Shop Scheduling)
各工件之間彼此的加工順序與製程數目不一定相同，但是每個工件都必須遵循各自的固定製程依序進行加工。
- 彈性流程型排程(Flexible Flow Shop Scheduling)
同道製程中包含多台機台，每個工件必須遵循相同且固定的製程依序進行加工。
- 彈性零工型排程(Flexible Job Shop Scheduling)
同道製程中包含多台機台，各工件之間彼此的加工順序與製程數目不一定相同，但每個工件必須遵循各自的固定製程依序進行加工。

IC 封裝測試(IC Packaging and Testing)屬於多階段、多機台、多筆訂單之製程，製造過程依序為以下步驟：晶圓切割(Wafer Saw)、晶粒黏貼(Die Bond)、鐳線(Wire Bond)、壓模封膠(Mold)、蓋印(Marking)、電鍍(Plating)、成型(Forming)、檢驗(Inspection)，如圖 3 所示。每個生產階段所需之加工時間不盡相同，像是鐳線與壓模封膠的製程即為整體 IC 封裝測試中的瓶頸站，因為該步驟之生產時間與其他階段相比皆較為耗時，所以，需投入較多的設備數量及成本改善瓶頸狀況(鄭郁蓓，2011；溫婉菁，2022)。因此，若是生產規劃(Production Planning)不完善或機台配置數量不足，皆可能會導致製程容易出現瓶頸，從而對產能造成損失與額外的電力消耗。故本研究針對封裝測試廠於製造時使用的電力能源納為考量因素，對該部分碳排因碳稅開徵所衍生的額外成本進行研究，期望透過生產排程的改善達到符合最佳生產利益之規劃。

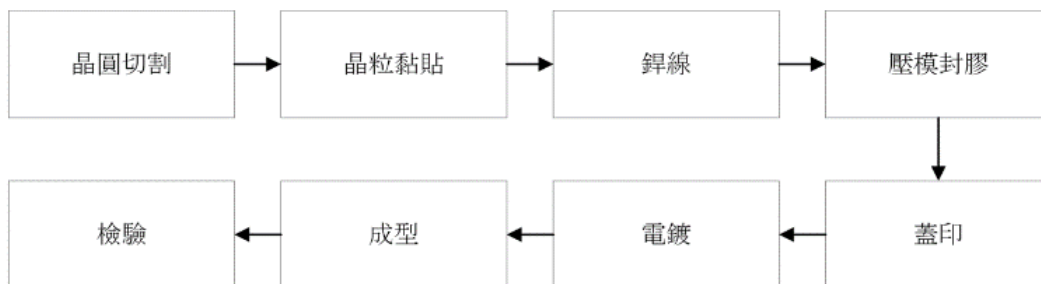


圖 3、IC 封裝測試流程

第二章 文獻探討

本章節針對研究問題做文獻回顧，於 2.1 節對碳稅、碳排放量相關文獻進行探討，而 2.2 節則回顧半導體封裝測試排程相關文獻，並於 2.3 節針對上述文獻統整出小結。

2.1 碳稅、碳排放量

高琦幃(2015)文獻中，以政府針對碳排放量進行總量管制為前提，為企業建立減碳投資的決策模型，該研究目的以達到總成本最小之減碳投資為目標。其考量包括：產能上限、碳市場價格趨勢與政府規定之企業碳排放量、生產設備的投資層級等因素。而建構之數學模型是依照溫室氣體盤查碳排放之計算方式，並將碳排放轉為生產成本。最後，該研究使用動態規劃順序法對模型進行求解，得出最有利於企業投資之決策分析。

蘇柏境(2020)探討針織鞋產業在考量碳稅與碳權成本下之生產決策模型，並結合作業成本制(Activity-Based Costing, ABC)與限制理論(Theory of Constraints, TOC)，在不同情況下建構對應之數學規劃模型，該研究再利用 LINGO 數學軟體針對利潤最大化進行求解。其碳稅模型分為兩種：不連續型累進稅率與連續型累進稅率。最後，該研究分別對企業端與政府端得出結論：以企業端的角度，政府若採取連續型累進稅率時，公司之碳稅負擔會較小；而以政府端的觀點，若要更有效的達到降低碳排放量，減少碳排上限會比增加碳稅稅率更為顯著。

劉育瑋(2022)針對一獨佔製造商在不同減碳政策下，擬定新品與再製品之最佳生產與定價模型。其減碳政策可分為以下三類：碳稅制、強制碳排放額制、和碳交易制。依據不同情況設置條件式與限制式，建構對應之數學規劃模型。最後，該研究透過 Excel 的 GRG Nonlinear 運算功能求出最有利於生產製造商之最佳解，其研究結果也給予立法者在規劃碳排放量管理時做參考。碳稅與碳排放量之相關文獻所研究的碳政策與減碳方法，經彙整後於表 3 所示。

表 3、碳稅與碳排放量文獻整理

作者 (年份)	碳稅	碳排放限額	碳交易	投資生產設備	求解軟體
高琦幃 (2015)		⊙	⊙	⊙	MATLAB
蘇柏境 (2020)	⊙		⊙		LINGO
劉育瑋 (2022)	⊙	⊙	⊙		Excel
本研究	⊙	⊙	⊙	⊙	Gurobi

2.2 封裝測試排程

鄭郁蓓(2011)對積體電路(Integrated Circuit, IC)封測廠的鉅線製程進行分析，因為此階段產出效率最低且人員利用率不佳。其研究目的為降低此階段人員配置之人事成本，並達到生產最大化之目標。此研究先於個案公司現場進行觀測，利用動作分析簡化與改善作業人員之作業流程，將紀錄資料加以彙整後，根據等候線理論調整設定參數，並以電腦模擬軟體 eM-Plant 9.0 建構符合現場情況之模型，求出較佳之個案公司人機比之決策。

林蔚廷(2014)針對發光二極體(Light Emitting Diode, LED)封裝測試利用 DBR (Drum-Buffer-Rope)限制驅導式與不同派工法進行生產排程探討，目的為使系統的效益最大化。此研究由系統之限制著手，找出瓶頸站後，再推導出緩衝時間與投料節奏。最後，該研究以 eM-Plant 9.0 建構出較符合現況之模型，得出生命週期較長、更符合實際情況、更快速之系統。

李聖斌(2016)分析個案公司小型記憶卡(Micro-SD)封裝測試的生產線瓶頸站問題，此研究針對不同情況建構相應之數學規劃模型求解。首先，在滿足客戶訂單之最低下限需求量和最高上限需求量下，針對設備實際生產時間與生產利潤進行評估；該研究再加入有限的資本支出作考量，求出瓶頸站排程最佳化的資源規劃與設備配置。最後，該研究利用 LINGO 數學軟體求出其生產規劃之最佳解。

溫婉菁(2022)針對半導體封裝廠前段製程排程的數學規劃模型加入多項績效指標、訂單權重等級進行探討。其研究目的為透過加入 VIP 客戶權重與最小化平均加權總完工時間、最小化加權延遲時間、最小化加權延遲偏差率等指標，使生產排程的數學規劃能更貼近實務生產排程會面臨的情況。最後，該研究利用 IBM ILOG CPLEX 數學規劃軟體求得最佳解。封裝測試排程之相關文獻的研究方法與目標，經彙整後於表 4 所示。

表 4、封裝測試排程文獻整理

作者 (年份)	系統模擬	數學規劃	研究目標	使用軟體
鄭郁蓓 (2011)	⊙		較適人員配置數、較適產出效率	eM-Plant 9.0
林蔚廷 (2014)	⊙		平均訂單延遲最大化、 平均訂單流程時間最小化	eM-Plant 9.0
李聖斌 (2016)		⊙	最大化產能與利潤之產品組合、 有限資本支出之機器購置分配	LINGO
溫婉菁 (2022)		⊙	最小化平均加權總完工時間、 最小化加權延遲時間、 最小化加權延遲偏差率	IBM ILOG CPLEX
本研究		⊙	最小化總生產成本	Gurobi

2.3 小結

臺灣的半導體產業發展蓬勃，也造就許多學者著手研究有關封裝測試的排程問題(李聖斌，2016；溫婉菁，2022)。這類研究皆針對各自情況建立符合實務生產情況的模型進行探討，而研究手段則可分為兩種：分別為利用系統模擬(鄭郁蓓，2011；林蔚廷，2014)或是數學規劃(李聖斌，2016；溫婉菁，2022)進行求解。而在執行數學規劃(Mathematical Programming)時會考量三個要素：目標函數(Objective Function)、決策變數(Decision Variables)、和限制條件(Constraints)，且為符合實務的生產情況是在有限資源的情況下進行，所以，數學規劃模型中會以一個目標式和多個限制式的方式以滿足實際條件(李聖斌，2016)。

然而，碳稅議題在近年來更加受到各國重視(台灣半導體產業協會，2022)，且《溫室氣體減量及管理法》於2023年1月正式通過；但是在上述文獻回顧中，與半導體封裝測試排程有關之研究(鄭郁蓓，2011；溫婉菁，2022)卻缺乏結合其生產過程中所產生的碳稅、碳排放量議題做進一步的探討。因此，本研究之目的是透過封裝測試廠在生產排程規劃中，將其碳排放所導致之成本要素納入考量，建構合適的數學規劃模型，以達到最小化總生產成本之訂單生產排程。

第三章 研究方法

本研究考量之封裝測試廠的製程階段以溫婉菁(2022)研究為參考範本，溫婉菁(2022)研究彈性流程式生產(Flexible Flow Shop)與等效平行機台(Identical Parallel Machines)，並將客戶訂單權重設為其數學規劃的目標式。本研究考慮政府在碳稅開徵的情況下，於建立數學規劃模型時加入碳稅及碳排放量等要素，為封裝測試廠達成最小化總生產成本之生產規劃。

3.1 研究步驟

本研究之研究架構流程如圖 4 所示，首先，定義研究背景與分析問題，再針對現行訂單生產排程與碳稅、碳排放量之議題進行相關文獻探討，確定研究目的與方向。本研究再利用數學規劃建構其生產排程的數學規劃模型，並將製程中使用電力所衍生的碳排放量，結合現行政府擬訂之碳稅費用，轉換為額外的支出成本。最後，本研究透過數學規劃軟體計算最佳生產線排程規劃，協助封裝測試廠作出符合最佳生產利益之生產計畫。若得出之結果不合實務現況生產排程邏輯，則重新回到建構數學規劃模型步驟，針對數學規劃模型進行修正與檢驗。

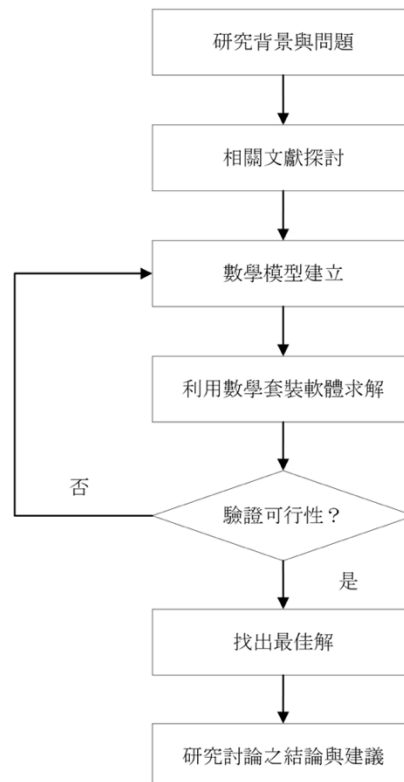


圖 4、本研究之研究架構流程圖

本研究使用的數學規劃軟體為 Gurobi Optimizer，其求解過程如圖 5 所示。首先以 Python 程式讀入 Excel 中紀錄之封裝測試廠資料，再利用 Python 程式建

立符合 Gurobi 數學規劃軟體語法之數學規劃模型進行求解。在檢驗 Gurobi 數學規劃軟體所求得之結果後，最終，再透過 Python 程式將最佳解輸出至 Excel 中，提供封裝測試廠參考在考量碳稅開徵及碳排量下的訂單生產排程規劃。

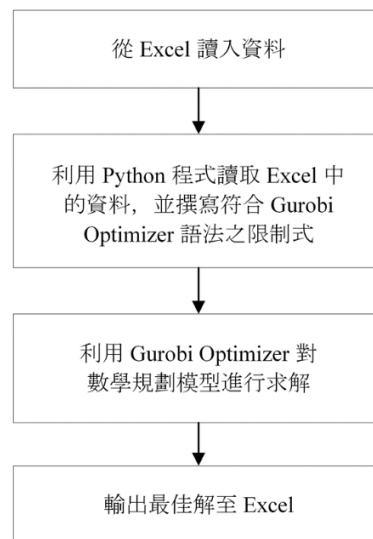


圖 5、Gurobi Optimizer 數學規劃軟體求解流程圖

3.2 研究假設

本研究藉由分析封裝測試廠在電力資源利用方面的相關數據，規劃符合實務生產情況之數學規劃模型後，再將政府開徵碳稅與限制碳排放量等政策納入考量設置對應之限制式，讓封裝測試廠可參考該模型結果，擬定符合最佳生產利益之生產排程規劃。其結果可作為公司在考量是否該直接承擔需要支付的碳稅金額，或改以降低產能、投資提升生產效率或是更換節能設備套件等手段，降低成本支出。本研究的相關假設如下：

1. 已知各工單的生產資訊(Production Information)包括：訂單生產數量、加工時間、加工成本、設置轉換時間、設置轉換成本、交期時間、延遲交貨成本、製程數、機台數、設備耗電量、和碳排放係數。
2. 各製程中的機台皆正常運作，不考慮設備故障、生產良率(Yield Rate)和重工(Rework)等狀況。
3. 訂單的生產方式為流程式生產，且每道製程的設備皆為生產速率一致的等效平行機台。
4. 投資設備的決策分別為提升生產效率及節省能源兩種。
5. 封裝測試廠須依照其生產衍生的碳排放量支付碳稅。若碳排放量若超過政府所設定的上限，可用超額的碳權進行碳交易；反之，若碳排放量低於政府所設定的上限，則能透過交易碳權獲取利潤。

3.3 數學式

本研究之數學規劃模型屬於混合整數線性規劃(Mixed Integer Linear Programming, MILP)問題。本節將依序介紹模型中的符號定義、目標式、限制式與決策變數。

3.3.1 符號定義

本研究數學規劃模型所使用的各項符號如表 5 所統整：

表 5、數學符號說明

符號	說明
i	訂單代碼， $i = 1, 2, \dots, I$
j	製程代碼， $j = 1, 2, \dots, J$
k	機台代碼， $k = 1, 2, \dots, K$
參數	說明
W_i	訂單 i 的權重
Q_i	訂單 i 的生產數量
D_i	訂單 i 約定的交期時間
V_{ijk}	訂單 i 在製程 j 機台 k 的加工速率
E_{ijk}	訂單 i 在製程 j 機台 k 的節能效率
P_{ijk}	訂單 i 在製程 j 機台 k 的加工時間
S_{ijk}	訂單 i 在製程 j 機台 k 的設置轉換時間
PC_i	訂單 i 的加工成本
SC_i	訂單 i 的設置轉換成本
KW_{jk}	製程 j 機台 k 的耗電量
α	違交期的每單位時間之懲罰金額
β_j	提升生產速率設備的投資金額
δ_j	提升節能效率設備的投資金額
CF	碳排放量超額罰金
CP	碳交易價格
CEF	碳排放係數
GCE	政府制定的碳排放量上限
$\hat{\phi}_{jk}$	提升機器的生產速率
ε	提升機器的節能效率
M	正數之極大值
決策變數	說明
pm_{ij}	訂單 i 在製程 j 的加工開始時間
pt_{ijk}	訂單 i 在製程 j 機台 k 的加工開始時間
sm_{ij}	訂單 i 在製程 j 的設置轉換開始時間

st_{ijk}	訂單 i 在製程 j 機台 k 的設置轉換開始時間
f_{ij}	訂單 i 在製程 j 的完工時間
c_i	訂單 i 的完工時間
ept_{ijk}	訂單 i 在製程 j 機台 k 的加工時間
ec_{ijk}	訂單 i 在製程 j 機台 k 的用電量
em_{ijk}	訂單 i 在製程 j 機台 k 的碳排放量
cce	生產的總碳排放量
w	生產所衍生的總碳排放量是否超過政府設定的碳排放量上限，若超過碳排放量上限，則 w 為 1；反之，則 w 為 0。
x_{ijk}	訂單 i 是否在製程 j 的機台 k 加工，若是，則 x_{ijk} 為 1；反之，則為 0。
$y_{i_1 i_2 jk}$	訂單 i_1 與訂單 i_2 是否都在製程 j 機台 k 進行加工，若是，則 $y_{i_1 i_2 jk}$ 為 1；反之，則為 0。
$z_{i_1 i_2 jk}$	訂單 i_1 在訂單 i_2 的前項加工是否都在製程 j 機台 k 進行加工，若是，則 $z_{i_1 i_2 jk}$ 為 1；反之，則為 0。
φ_{jk}	製程 j 的機台 k 是否有投資套件提升生產速率，若有，則 φ_{jk} 為 1；反之，則為 0。
η_{jk}	製程 j 的機台 k 是否有投資套件提升節能效率，若有，則 η_{jk} 為 1；反之，則為 0。

3.3.2 目標式

目標式(式 1)為考量碳稅開徵及碳排放量下建構最小化總生產與碳排成本模型之總成本，其所涵蓋之項目依序為：訂單的生產成本(式 2)、訂單的設置轉換成本(式 3)、訂單的延遲達交處罰成本(式 4)、碳交易成本(式 5 和式 6)、和投資成本(式 7 和式 8)。其中，式(5)為碳交易成本，當生產的碳排放量超過政府上限，則會購買超過排放額度之碳權。式(6)為碳交易成本，當生產的碳排放量未超過政府上限，則會售出多餘碳權藉此獲利。式(7)為提升設備生產速率之投資成本。式(8)為提升設備節能效率之投資成本。

而式(9)用來計算購買的碳權額度，式(10)用來計算售出的碳權額度，式(11)用來計算訂單 i 在製程 j 的機台 k 所需之生產時間，式(12)用來計算訂單 i 在製程 j 的機台 k 所需之用電量。

$$\text{Min } Z = TC_1 + TC_2 + TC_3 + TC_4 - TC_5 + TC_6 + TC_7 \quad (1)$$

$$TC_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (PC_{ijk} \times Q_i \times x_{ijk}) \quad (2)$$

$$TC_2 = \sum_{\substack{i=1 \\ i_1 \neq i_2}}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (SC_{ijk} \times z_{i_1 i_2 jk}) \quad (3)$$

$$TC_3 = \alpha \sum_{i=1}^I W_i \times (c_i - D_i) \quad (4)$$

$$TC_4 = CP \times BCC \times w \quad (5)$$

$$TC_5 = CP \times SCC \times (1 - w) \quad (6)$$

$$TC_6 = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (\beta_j \times \varphi_{jk}) \quad (7)$$

$$TC_7 = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (\delta_j \times \eta_{jk}) \quad (8)$$

$$BCC = cce - GCE \quad (9)$$

$$SCC = GCE - cce \quad (10)$$

$$P_{ijk} = \frac{Q_i}{V_{ijk} \times \hat{\varphi}} \times \varphi + \frac{Q_i}{V_{ijk}} \times (1 - \varphi_{jk}) \quad \forall i, j, k \quad (11)$$

$$E_{ijk} = KW_j \times \varepsilon \times \eta_{jk} + KW_j \times (1 - \eta_{jk}) \quad \forall i, j, k \quad (12)$$

3.3.3 限制式

式(13)至式(22)為引用溫婉菁(2022)建立的訂單生產排程限制式，其中式(13)表示訂單 i 在最後的一道製程 J 的完工時間。式(14)表示各訂單 i 在製程 j 中的完工時間。式(15)表示各訂單 i 在製程 j 中的加工開始時間。式(16)表示各訂單 i 在製程 j 的機台 k 中只能被加工一次。式(17)表示若訂單 i 在製程 j 機台 k 加工時的設置轉換開始時間。式(18)表示若訂單 i 在製程 j 機台 k 加工時的加工開始時間。式(19.1)至(19.3)說明任意兩張訂單 i_1 與訂單 i_2 都在製程 j 機台 k 進行加工時的情況。式(20)表示有一個或沒有前項訂單 i 在製程 j 機台 k 進行加工。式(21)表示有一個或沒有後項訂單 i 在製程 j 機台 k 進行加工。式(22)表示訂單在同道製程的同一機台生產時的設置轉換開始時間。

本研究新增式(23)至(37)，其中，式(23)表示訂單 i 在製程 j 的機台 k 中加工的用電時間。式(24)表示訂單 i 在製程 j 機台 k 加工的用電量。式(25)表示訂單 i 在製程 j 機台 k 加工的碳排放量。式(26)為生產的總碳排放量。式(27)與(28)為判斷生產的總碳排放量是否超過政府的規定上限。式(29)與(30)表示若製程 j 的其中一個機台 k 有投資設備以提升生產效率，則此製程中的其餘機台也會進行投資。式(31)與(32)表示若製程 j 的其中一個機台 k 有投資設備以提升節能效率，則此製程中的其餘機台也會進行投資。式(33)表示訂單 i 的完工時間與交期時間相減需大於或等於零。式(34)至(36)表示這些決策變數均為非負數。式(37)至(39)則為本研究之二元決策變數。

$$c_i \geq f_{ij} \quad \forall i \quad (13)$$

$$f_{ij} \geq pm_{ij} + \sum_{k=1}^K (P_{ijk} \times x_{ijk}) \quad \forall i, j \quad (14)$$

$$pm_{ij} \geq sm_{ij} + \sum_{k=1}^K (S_{ijk} \times x_{ijk}) \quad \forall i, j \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ijk} = 1 \quad \forall i, j \quad (16)$$

$$sm_{ij} - M(1 - x_{ijk}) \leq st_{ijk} \quad \forall i, j, k \quad (17)$$

$$pt_{ijk} = pm_{ij} \times x_{ijk} \quad \forall i, j, k \quad (18)$$

$$y_{i_1 i_2 jk} \leq 0.5 \times (x_{i_1 jk} + x_{i_2 jk}) \quad \forall (i_1, i_2) \in i, i_1 \neq i_2, \forall j, k \quad (19.1)$$

$$0.5 \times (x_{i_1 jk} + x_{i_2 jk}) \leq y_{i_1 i_2 jk} + 0.5 \quad \forall (i_1, i_2) \in i, i_1 \neq i_2, \forall j, k \quad (19.2)$$

$$z_{i_1 i_2 jk} + z_{i_2 i_1 jk} = y_{i_1 i_2 jk} \quad \forall (i_1, i_2) \in i, i_1 \neq i_2, \forall j, k \quad (19.3)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K z_{i_1 i_2 jk} \leq \sum_{k=1}^K x_{i_1 jk} \quad \forall (i_1, i_2) \in i, i_1 \neq i_2, \forall j \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K z_{i_2 i_1 jk} \leq \sum_{k=1}^K x_{i_1 jk} \quad \forall (i_1, i_2) \in i, i_1 \neq i_2, \forall j \quad (21)$$

$$pt_{i_1 jk} + P_{i_1 jk} \times z_{i_1 i_2 jk} - M(1 - z_{i_1 i_2 jk}) \leq sm_{i_2 j} \quad (22)$$

$$\forall (i_1, i_2) \in i, i_1 \neq i_2, \forall j, k$$

$$ept_{ijk} \geq \frac{P_{ijk} + S_{ijk}}{60} \times x_{ijk} \quad \forall i, j, k \quad (23)$$

$$ec_{ijk} \geq E_{ijk} \times ept_{ijk} \quad \forall i, j, k \quad (24)$$

$$em_{ijk} \geq CEF \times ec_{ijk} \quad \forall i, j, k \quad (25)$$

$$cce \geq \sum_i^I \sum_j^J \sum_K^K em_{ijk} \quad (26)$$

$$cce \leq GCE + M \times w \quad (27)$$

$$cce \geq GCE + M \times (w - 1) \quad (28)$$

$$\varphi_{j,k+1} \geq \varphi_{jk} \quad \forall j, k \quad (29)$$

$$\varphi_{j,k} \geq \varphi_{j,k+1} \quad \forall j, k \quad (30)$$

$$\eta_{j,k+1} \geq \eta_{jk} \quad \forall j, k \quad (31)$$

$$\eta_{j,k} \geq \eta_{j,k+1} \quad \forall j, k \quad (32)$$

$$c_i - D_i \geq 0 \quad \forall i \quad (33)$$

$$c_i \geq 0 \quad \forall i \quad (34)$$

$$f_{ij}, sm_{ij}, pm_{ij}, \varphi_{jk} \geq 0 \quad \forall j, k \quad (35)$$

$$x_{ijk}, y_{i_1 i_2 jk}, z_{i_1 i_2 jk}, st_{ijk}, pt_{ijk}, ec_{ijk}, em_{ijk} \geq 0 \quad \forall (i_1, i_2) \in i, i_1 \neq i_2, \forall j, k \quad (36)$$

$$w \in \{0, 1\} \quad (37)$$

$$\varphi_{jk}, \eta_{jk} \in \{0, 1\} \quad \forall j, k \quad (38)$$

$$x_{ijk}, y_{i_1 i_2 jk}, z_{i_1 i_2 jk}, w, \varphi_{jk} \in \{0, 1\} \quad \forall (i_1, i_2) \in i, i_1 \neq i_2, \forall j, k \quad (39)$$

3.4 小模型範例介紹

本節依循前述 3.3 節中介紹的混合整數規劃數學模型，配合表 6 和表 7 建立三筆訂單、兩道製程、且每道製程中皆有兩台等效平行機台之小規模模型，以便驗證排程與求解結果之合理性與正確性；而三筆訂單各自的生產資訊則透過 Python 找出合適的機率分佈後，再以該分佈隨機產生數值進行設置，其結果如表 8 和表 9 所示。

表 6、小模型規模設定

訂單數	製程數	每道製程的機台數
3	2	2

表 7、小模型參數設定

參數	數值設定	參數	數值設定
CEF	4	α	100
GCE	500	β_{jk}	2,000,000
CP	300	δ_{jk}	7,000,000
KW_{jk}	2	$\hat{\varphi}_{jk}$	1.5
M	1,000,000	ε	0.8

表 8、小模型訂單資料表

訂單	權重	產量	Die Bond		Wire Bond	
			設置時間 (min)	加工時間 (UPM)	設置時間 (min)	加工時間 (UPM)
1	5	43,162	50	25	50	45
2	8	55,478	50	35	30	60
3	2	41,275	40	26	50	47

註：UPM (Unit Per Minutes)為每分鐘生產數量

表 9、小模型訂單資料表(續上表)

訂單	交期時間 (min)	Die Bond		Wire Bond	
		設置成本 (NTD)	加工成本 (NTD)	設置成本 (NTD)	加工成本 (NTD)
1	2,786	60	299	76	381
2	2,590	59	296	52	260
3	4,195	17	84	65	326

透過 Gurobi 求解後可得出圖 6 的求解訊息，顯示共產生 183 個變數與 143 條限制式，並僅需花費 0.04 秒即可找到最佳解，其最小化總成本為 77,292,789 元新臺幣且訂單達交率為 100%，詳細的各項成本如表 10 中所統整。在碳排放係數設定為 4 的情況下，以式(25)計算每道製程的機台用電量後，將其藉由式(26)進行加總，即得出此生產排程的總碳排放量為 1,080 噸。由於此情境下兩種投資設備套件的決策皆不符合成本效益，因此在政府允許的碳排限額為 500 噸的狀況下，以式(9)即可計算出該封裝測試廠會從碳交易市場購買 580 噸的碳權。

```
Optimal solution found (tolerance 1.00e-04)
Best objective 7.729278900000e+07, best bound 7.729278900000e+07, gap 0.0000%
Optimal solution found!
Number of variables: 183
Number of constraints: 143
Objective value: 77292789.0
cce: 1080.0
Runtime: 0.04 sec
```

圖 6、小模型 Gurobi 求解結果

表 10、小模型求解結果

成本類別	求解結果(新臺幣)	佔總成本之百分比(%)
生產成本	77,118,678	99.7747
設置轉換成本	111	0.0001
延遲達交處罰成本	0	0
碳交易成本	174,000	0.2251
投資生產效率套件	0	0
投資節能效率套件	0	0

於表 11 統整各站別的生產排程結果後，以圖 7 視覺化呈現小模型的排程狀況，進一步分析可得知生產順序確實有依照訂單權重高的優先指派至機台上進行加工。因此，Die Bond 站的機台會分別先執行訂單 1 與訂單 2 的加工作業，而訂單 3 則會接續被指派至此道製程中較早完成的機台進行加工；而進行完 Die Bond 站加工的訂單 1 與訂單 2 則會立即進行 Wire Bond 站執行後續的加工作業。惟訂單 3 此時正在進行 Die Bond 製程的加工，待完成後才會被指派至 Wire Bond 站空閒的機台，所以，過程中會存在許多閒置時間(Idle Time)。此外，三筆訂單在此生產排程下也並未發生延遲交貨的狀況。

表 11、小模型訂單生產排程

訂單	Die Bond		Wire Bond		總完工時間 (min)
	開始設置 (min)	開始加工 (min)	開始設置 (min)	開始加工 (min)	
1	1	51	1,777	1,827	2,786
2	0	50	1,636	1,666	2,590
3	1,640	1,680	3,267	3,317	4,195

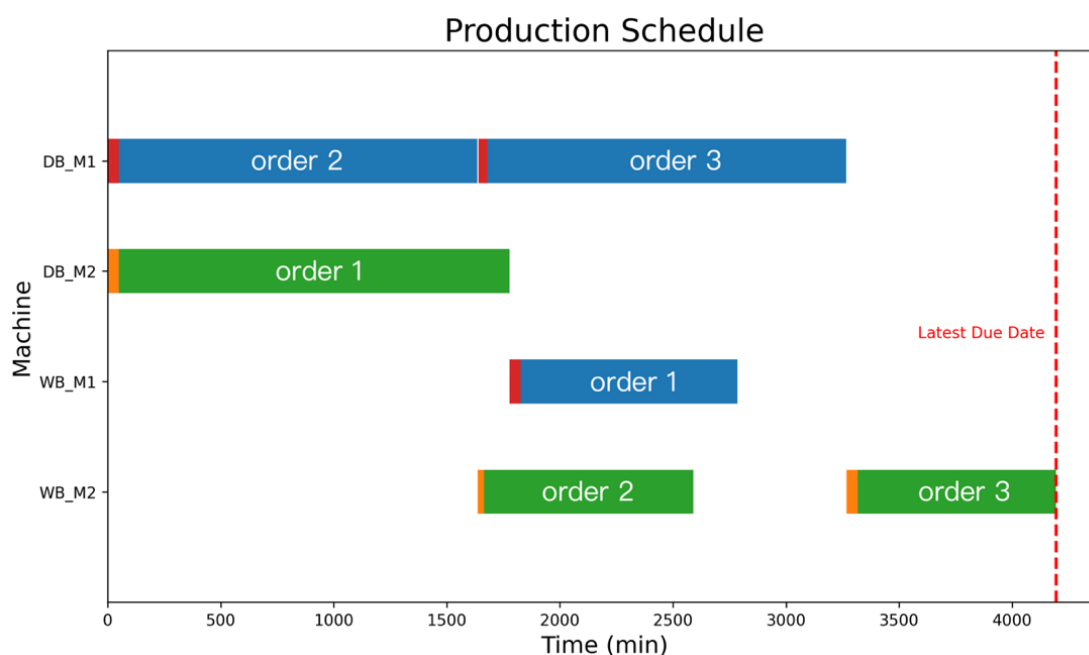


圖 7、小模型訂單生產排程結果

第四章 研究結果與討論

本研究使用的電腦規格 CPU 為 Intel Core i5-1035G1、GPU 為 Intel UHD Graphics、記憶體 4.00 GB、作業環境 Windows 11 家用版；並且以 PyCharm 作為整合式開發環境(Integrated Development Environment, IDE)配合 Python 語法撰寫符合 Gurobi Optimizer 10.0.3 版的目標式與限制式求解最佳化結果。

4.1 範例介紹

因封裝測試廠的各項生產數據屬於公司機密難以對外公開，故本研究各項參數透過參考期刊論文、政府公開資訊或新聞報導等相關資訊進行探討與設定。訂單資訊係經由分析溫婉菁(2022)論文中封裝測試廠 100 張訂單的生產狀況，經由資料擬合(Data fitting)並剔除離群值後，本研究以 Python 產生符合該機率分佈的數值，再利用 K-S 檢定(Kolmogorov-Smirnov Test)此數值分佈是否通過 p -value 為 0.05 的假設檢定；各項數據的機率分佈狀況如表 12 所示。

表 12、訂單資訊分佈

類別名稱		機率分佈
訂單產量		np.random.int(1944, 66649)
訂單權重		np.random.int(1, 10)
交期時間(min)		np.random.int(4320, 15200)
Die Bond	設置時間(min)	np.random.choice([40, 50, 60], [0.1, 0.8, 0.1])
	生產時間(UPM)	gamma.rvs(1.23, 0.73, 18.86)
Wire Bond	設置時間(min)	np.random.choice([40, 50, 60], [0.1, 0.8, 0.1])
	生產時間(UPM)	gamma.rvs(1.60, 2.07, 25.26)

資料來源：溫婉菁(2022)

4.2 封裝測試與碳排成本

本研究封裝測試的生產成本以 Apple iPhone 15 Pro Max 為例，根據尹慧中(2023)報導此機種所搭載使用的 A17 Pro 晶片成本約為 130 美元；且根據每日頭條(2016)所述，在產量巨大的生產狀況下晶片的封裝成本約佔硬體的 5%至 25% 左右，故本研究將封裝測試費用的下限與上限分別設為 6.5 美元與 32.5 美元。

接著透過表 13 由公開資訊觀測站(2023)所得之營業數據，分析 A 公司封裝測試廠近五年的毛利率平均為 17.57%，故得出封裝測試的生產成本約佔整體測試費用的 82.43%。因此，一片晶圓的封裝成本下限與上限則為 5.365 美元與 26.8 美元。最後，則透過臺灣銀行(2023/11/29)公布美金兌換臺幣之匯率得出成本介於 168 新臺幣至 837 元新臺幣。

表 13、A 公司歷年營業毛利率

年份	營業收入淨額 (百萬元新臺幣)	營業成本 (百萬元新臺幣)	營業毛利 (百萬元新臺幣)	毛利率 (%)
2018	371,092	309,929	61,613	16.48
2019	413,182	348,871	646,310	15.56
2020	476,978	398,994	77,984	16.35
2021	569,997	459,628	110,368	19.36
2022	670,872	535,942	134,930	20.11
	平均			17.57

資料來源：公開資訊觀測站(2023/11/24)

阮怡婷(2024)報導當前環境部擬允許 2.5 萬噸的二氧化碳免徵額度，若超過此上限則需按照超額量乘上收費費率繳交碳費。故本研究中封裝測試廠的碳排放量上限計算方式，根據此限額除以機台總數量得出每台機台的年排放量上限；再依工單的完工時間，進一步計算製造過程中的允許額度，最終根據求解模型規模所使用的機台總數量得出碳排上限，將此數值設定為 1.89 噸二氧化碳。

表 14 為臺灣歷年的電力碳排放係數，由於經濟部能源局(2023)碳排放係數的計算公式於 2022 年有進行修正，從而本研究碳排放係數為符合碳稅開徵後的計算方式，遂以該年度公布的 0.495 kgCO₂e/kWh 經單位換算為 0.000495 tCO₂e/kWh 作為數值設定。此外，為考量臺灣碳稅開徵對於企業的初步影響，故最終將碳定價的金額根據 Burke et al. (2020)研究建議定為每公噸二氧化碳 300 元新臺幣。

表 14、臺灣歷年電力碳排放係數

年份	2018	2019	2020	2021	2022
電力排放係數 (kgCO ₂ e/kWh)	0.533	0.509	0.502	0.509	0.495

資料來源：經濟部能源局(2023)

本研究之機台用電量參考 TPT Wire Bonder (2023)進行設定，Die bond 站及 Wire bond 站所參考的機台型號為 HB75 和 HB100，其每小時的用電量則分別為 1.3 和 2.4 千瓦；根據此數值並配合表 14 的電力排放係數即可得出機台每小時的碳排放量。

依陳映璇(2023)報導，因工廠中各式設備都仰賴馬達驅動運作，所以該零件也是決定設備耗電與否的關鍵要素，許多企業會優先考量替換馬達以改善節能效率。本研究透過找尋不同規格的馬達，作為其改善生產效率或提升節能等級的投資套件。據其報導所述，有個案公司曾透過更換 124 個馬達實現年省 154 萬元新臺幣的成本支出，且僅耗時 3 年即回本，故推算出每個馬達約需 37,258 元新臺幣的投資成本。

4.3 求解結果及分析

本研究以 30 筆訂單、兩道製程(Die bond 製程和 Wire bond 製程)分別各有 15 與 20 台機台的環境為基準，建立出可投資生產效率與節能套件之基本模型，後續則以此作為基礎加入不同碳稅制度進行分析，表 15 和表 16 則是其餘的參數設定。圖 8 為此模型經由 Gurobi 求解後得出之相關訊息，僅需 59.25 秒即可求得最小化總生產成本為 298,293,882 元新臺幣。

表 15、例題之標號設定

訂單數	製程數	Die bond 機台數	Wire bond 機台數
30	2	15	20

表 16、例題之參數設定

參數	數值	參數	數值
CEF	0.000495	β_{jk}	24,012
KW_{jk}	1.3, 2.4	δ_{jk}	37,258
M	1,000,000	$\hat{\phi}_{jk}$	1.1
α	84	ε	0.7

```
Optimal solution found (tolerance 1.00e-02)
Best objective 2.982938816790e+08, best bound 2.961744929683e+08, gap 0.7105%
Optimal solution found!
Number of variables: 80730
Number of constraints: 93817
Objective value: 298293882.0
cce: 32.91
Runtime: 59.25 sec
```

圖 8、Gurobi 求解結果

表 17、模型求解結果

成本類別	求解結果(新臺幣)	佔總成本之百分比(%)
生產成本	266,981,941	89.503
設置轉換成本	2,926	0.001
延遲達交處罰成本	31,020,871	10.399
投資生產效率套件	288,144	0.097
投資節能效率套件	0	0

各成本詳細的支出與佔比統整於表 17，在此碳排放係數設定為 0.000495 的狀況下，配合式(25)計算機台在每道製程的用電量後，將此值帶入式(26)中即可得出的總碳排放量為 32.91 噸；雖然透過投資生產效率套件減少生產時間，或是投資節能套件兩者都能實現減碳目的，可是由於投資後的獲利仍遠低於投資成本。因此，無法誘使企業積極執行減碳行動。然而，由於延遲達交處罰成本為總生產成本中次多的成本項目，所以，該封裝測試廠為改善此情況共投資 288,144 元新

臺幣提升 Die bond 製程的生產效率，讓總完工時間從原先的 35,529.79 分鐘縮短至 30,358.79 分鐘，節省 6,847,102 元新臺幣的延遲達交處罰成本。

4.4 模型規模分析

本小節透過 4.3 節之參數設定兩道製程，且 Die bond 和 Wire bond 製程分別各有 25 台與 30 台機台為基準，藉由調整訂單數進行模型的規模分析。圖 9 為訂單規模從 5 筆逐漸增加至 50 筆後，模型的限制式與變數數量之變化，其結果呈現指數型成長；且當訂單數目超過 25 筆後，其增加之情況變得更為顯著。圖 10 則為不同訂單規模下，模型所需的求解時間變化，在增加限制式數量的狀況下，會令求得可行解之範圍變得更為侷限，所需的求解時間也會逐漸遞增。

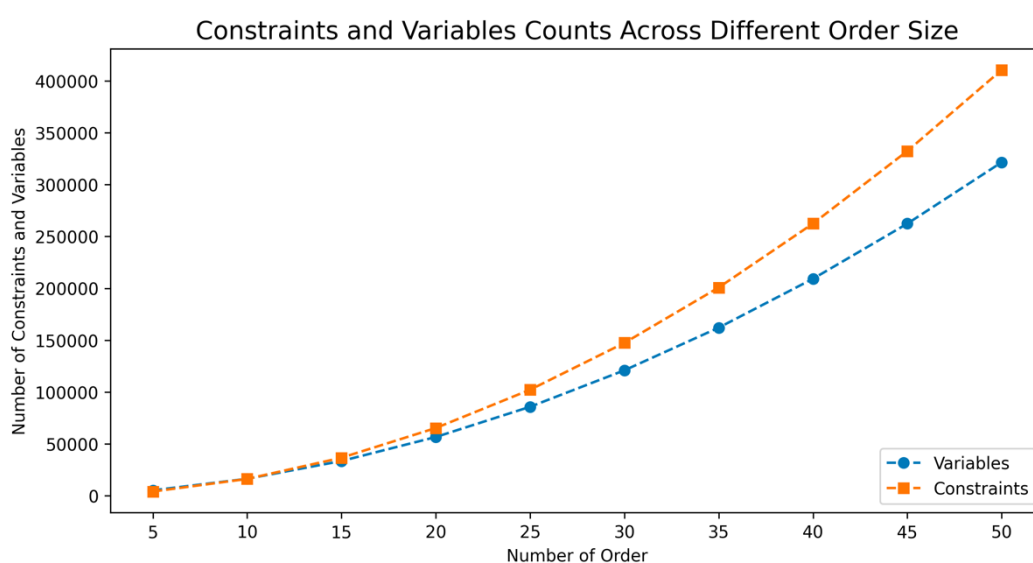


圖 9、不同訂單規模下的限制式與變數數量

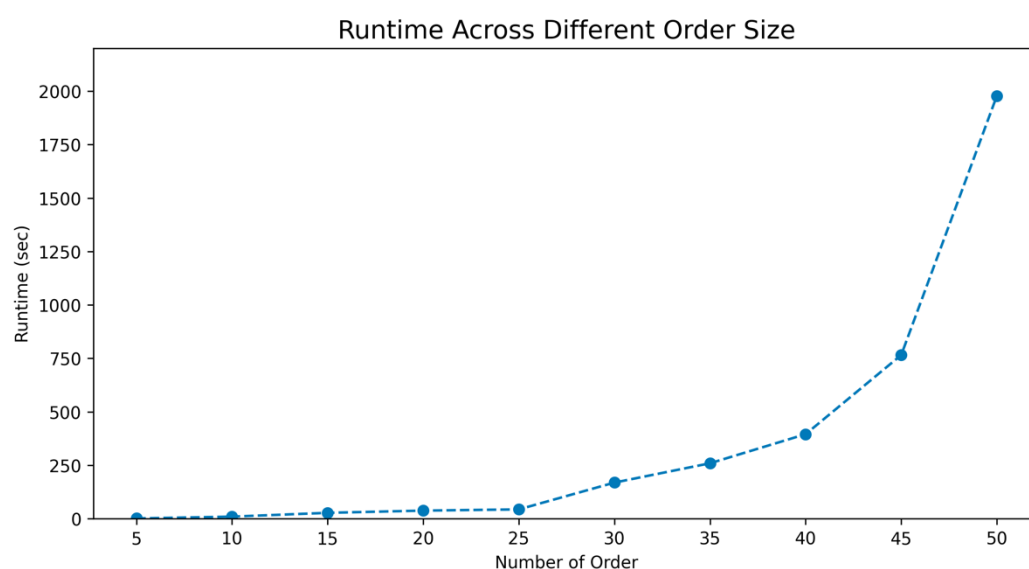


圖 10、不同訂單規模下的模型求解時間

表 18、問題規模分類表

模型規模	訂單/DB 機台/WB 機台	變數數量	限制式數量	平均求解時間 (sec)
小	(10, 5, 7)	3,898	3,652	335.6
中	(30, 15, 20)	80,730	93,957	315.6
大	(50, 25, 33)	353,642	432,942	890.6

此外，為避免數學規劃軟體在求解大規模問題時易發生不易收斂的狀況，所以本研究針對兩道製程的情況下，藉由改變訂單數和各班製程機台數，區分出表 18 三種規模的模型大小，探討其變數與限制式數量以及求解時間之差異。圖 11 顯示各模型經十次實驗後求解時間的變化，可以發現大模型求解時間相較小模型和中模型更為耗時，本研究為求於每次測試都能在短時間內即完成收斂，並取得最佳解的前提下，同時讓模型具有一定的規模大小，故後續皆以中模型的訂單與機台數執行相關的實驗分析和探討。

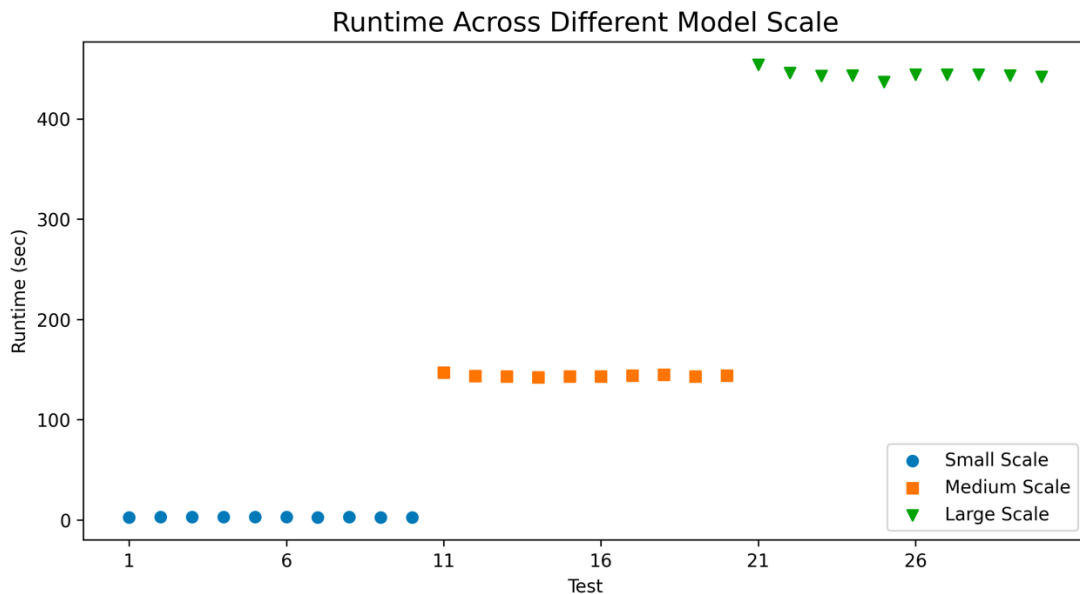


圖 11、不同規模下的模型求解時間

4.5 穩定度分析

本小節透過 4.3 節所述之參數設定，並利用 4.1 節的訂單資訊機率分佈，透過 Python 以亂數產生 10 筆不同生產數量的資料集，執行碳交易模型的穩定度分析(Robustness Analysis)。且每筆資料皆經過十次子測試並取其平均值，確保其所需的執行時間處於穩定。

10 筆資料各自的執行時間如圖 12 所示，最快和最慢的求解時間分別為 43.50 與 99.58 秒、標準差為則 16.90 秒，平均僅需 61.19 秒即可求得該筆數據之最佳解，顯示該模型能夠穩定且有效的在不同情境下求得最佳解。

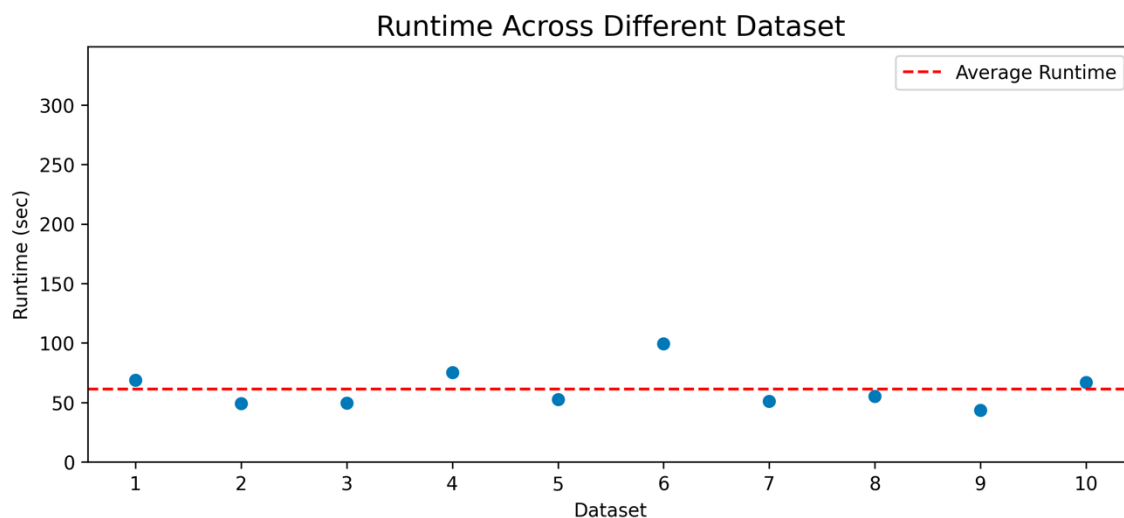


圖 12、中模型穩定度測試

4.6 情境分析

為探討碳稅政策對訂單生產排程之影響，本節以 4.3 節的基本模型，依照機台總數量將碳排放上限設為 1.89 噸，而碳定價則為每噸 300 元新臺幣，分別建構出碳費與碳交易模型，並比對基礎模型與另外兩種碳稅模型的求解結果。三種模型各自的成本經求解後統整於表 19，比對後可發現，碳費跟碳交易模型由於在生產成本額外新增碳權成本，因此，更加促使企業投資提升生產效率套件，以此降低碳排放量達到最小化總生產成本之目的。

碳費模型與碳交易模型兩者之差異為：碳費模型中，企業須按照其碳排放量以政府訂定出固定的碳定價支付費用，而政府則將此收益專款專用於補貼在其他企業執行減碳作為的負擔；然而，在碳交易模型中，若碳排超過排放上限才需購買碳權，而且若碳排低於上限，則可售出碳權。所以，在此情況下企業能更靈活的做出決策應對碳政策。因此，本研究後續的碳稅政策係以碳交易模型進行相關之分析與探討。

表 19、比對三種模型之求解結果

模型名稱	基礎模型	碳費模型	碳交易模型
生產成本	266,981,941	266,981,941	266,981,941
設置轉換成本	2,926	2,600	3,069
延遲達交處罰成本	31,020,871	31,009,408	30,775,273
碳權成本	0	738	171
投資生產效率套件	288,144	840,420	840,420
投資節能效率套件	0	0	0

4.7 敏感度分析

4.7.1 碳定價之敏感度分析

碳交易的成本變化如圖 13 所示，隨著碳定價從每噸 300 元新臺幣逐步提升至每噸 3,000 元左右，儘管企業在購入碳權實現碳中和的成本不斷增加，但並未改善碳排放量。究其原因為購入碳權所需的支出，仍遠低於投資節能套件之成本；此外，鑑於當前政府所制定的碳定價，企業經減碳作為後再售出多額碳權，仍難以抵銷投資節能套件的成本，因此，無法誘使企業積極實現自主減碳的行動。

此結果凸顯出碳定價的改變對於改善碳排放量仍有局限性。本研究認為若要更有效的達成淨零排放，政府可針對企業在投資節能設備時給予適當的補助措施，在提升企業減碳意願的同時，也減輕投資成本造成的負擔。

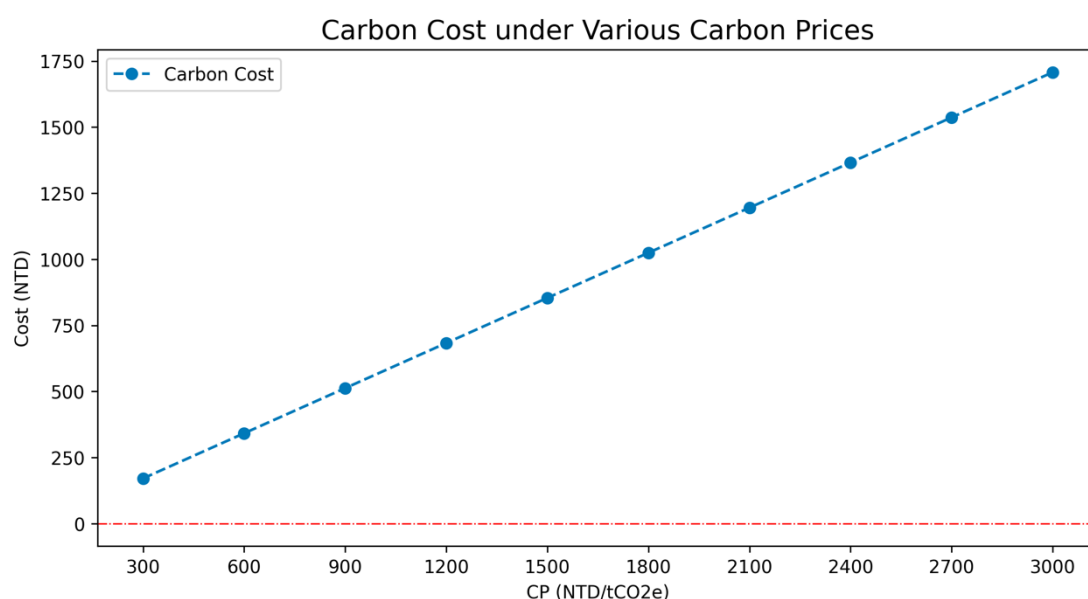


圖 13、碳定價之敏感度分析

4.7.2 碳排放上限之敏感度分析

此小節以 4.3 節的排放量上限為基準，透過改變碳排放量上限，探討公司執行碳交易時的決策變化。圖 14 中呈現當碳排上限為 2.46 噸時為購入或售出碳權的轉折點，因為此時的碳排放量正好與其限額相等。隨著逐漸放寬排放上限，企業得以將多餘的碳權售出，所以，碳交易成本則因而減少，兩者呈現負相關性。

投資節能套件於 Die bond 和 Wire bond 之成本分別為 558,870 與 745,160 元新臺幣；然而，由於碳定價過低，企業執行減碳投資後，難以藉由售出多餘碳權降低總成本，所以，在此情況下並無誘因驅使企業積極投入減碳行動。

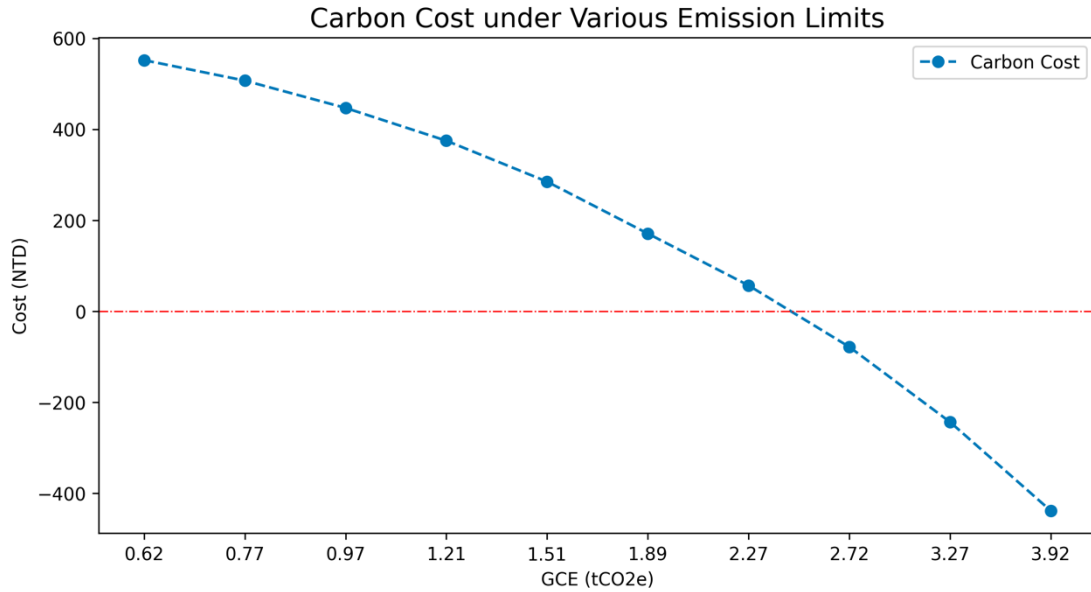


圖 14、碳排放上限之敏感度分析

4.7.3 碳定價極值之敏感度分析

依 World Bank (2023) 公布各國碳定價中，全球規模最大的歐盟排放交易體系 (European Union Emission Trading Scheme, EU ETS) 碳定價為每噸 109 美元 (約 3,395 元新臺幣)；且 Burke et al. (2020) 研究建議，臺灣的碳定價應增加至每噸 98 美元左右 (約 3,052 元新臺幣)。因此，本小節將碳定價設為每噸 3,000 元新臺幣，進行碳定價的最壞情況分析 (Worst-Case Analysis)，探討在此狀況下若政府逐漸減少碳排上限，企業是否會更積極的投資節能設備套件，達到淨零排放或降低碳排成本之作為。

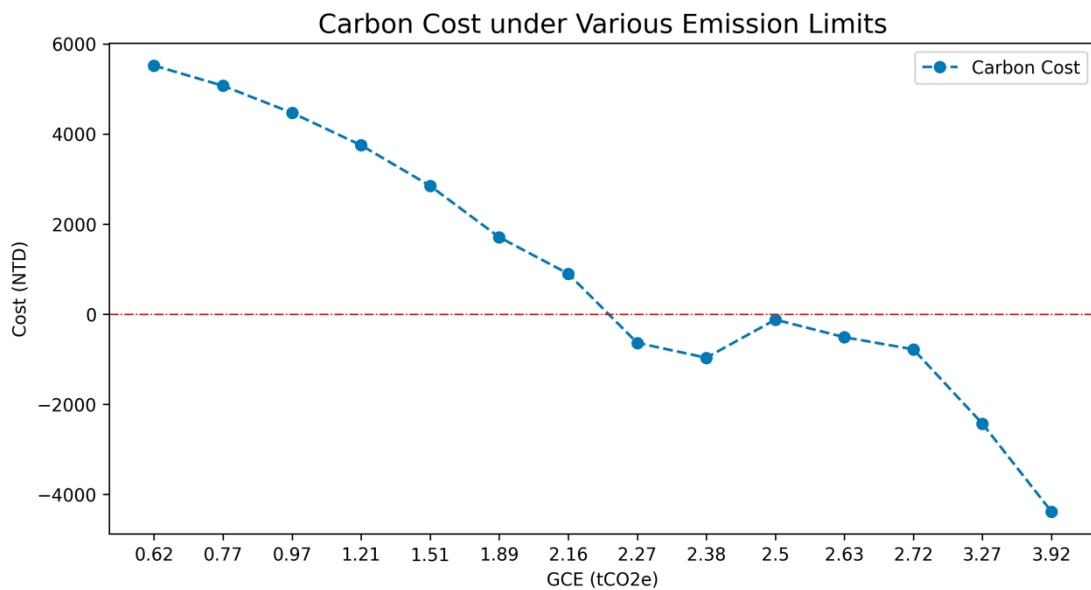


圖 15、碳定價極值之敏感度分析

在此情況下碳交易成本的變化情況如圖 15 所示，與 4.7.2 小節的圖 14 進行比較後可發現，在此狀況下當碳排上限為 2.27 噸時，碳交易成本即開始呈現獲利的趨勢。究其原因為此時企業有投資節能效率套件於 Die bond 站的製程設備，得以讓生產的碳排放量由原先的 2.46 噸降低至 2.06 噸，並售出多餘的碳權獲取 638 元的利潤，以避免需支出 568 元購買碳權。

圖 16 則進一步探討碳交易發生的轉折點與投資節能套件的趨勢，得出碳排上限為 2.27 噸與 2.38 噸時皆有投資節能套件；此外，當上限為 2.38 噸時為執行碳交易的最佳情況。然而，儘管在高昂的碳定價並減少碳排上限的情形下，理應能誘使企業積極的採取減碳措施，再透過售出剩餘碳權賺取額外的獲利。但在投資套件成本較購入碳權更為負擔的狀況下，此舉並不會有效的降低總成本。因此，若政府制定政策時未擬訂出適當的碳定價與排放額度，恐將難以實現降低整體企業溫室氣體排放的目標。

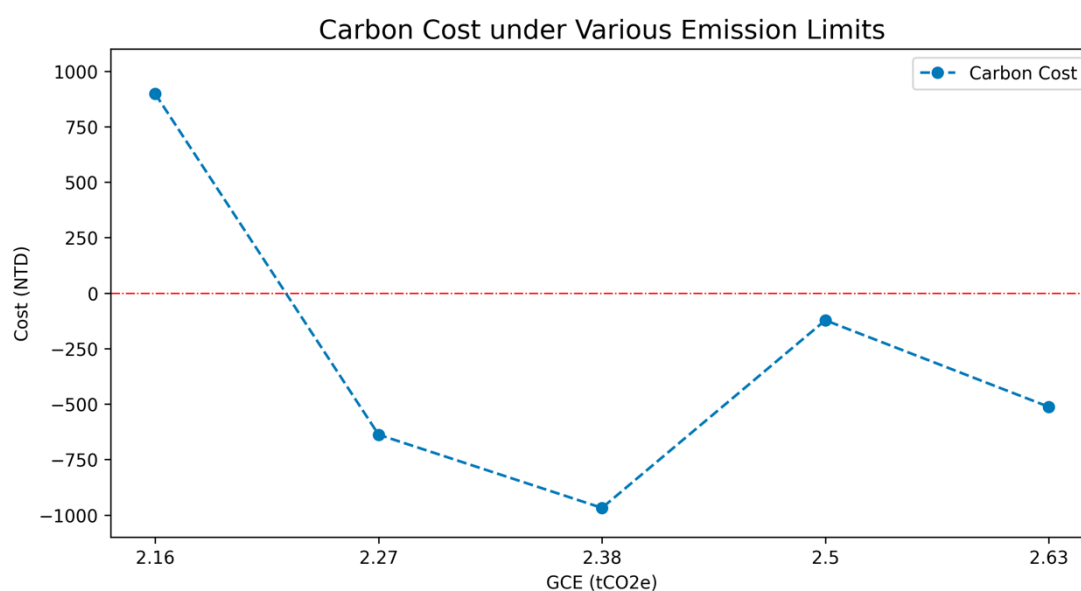


圖 16、碳成本的變化

第五章 結論與未來方向

5.1 結論

本研究探討碳稅開徵及碳排放量對訂單生產排程之影響，以最小化總生產成本為目標，並將碳交易、投資節能或提升生產效率套件納入考量，建立混合整數規劃數學模型，最後，本研究透過 Python 引入 Gurobi 數學規劃軟體協助求得最佳解。透過 4.3 節的實驗結果可得知，封裝測試廠在考量碳交易與碳排放量下，會選擇購買碳權實現碳中和，而並未透過主動、積極的投資減碳設備，達到降低碳排放量的成效。因為當前所設定的碳定價尚未對整體營運成本造成過多衝擊，所以，於碳交易市場中購入碳權遠比投資減碳作為更具有經濟效益。

根據數值分析結果顯示，若僅調整碳定價或排放限額的其中一項因素，似乎皆難以實現政府期望的淨零排放目標。因此，若政府在實際開徵碳費時的碳定價未制訂足夠高昂，且碳費的免徵排放上限條件過於寬鬆，則可能構成臺灣在邁向淨零碳排上的潛在風險。因為若企業過度仰賴於碳交易中購入碳權，而不積極實施自主碳排措施，未來在面臨國外更嚴格的环境法規時，可能需支付鉅額罰款或其他法律制裁。因此，政府在擬定碳費政策的過程中，不僅需要確保碳定價金額能足夠刺激減排意願，同時也需謹慎評估和調整免徵的排放上限；甚至應提供企業在執行減碳投資時適當的補助或激勵措施，以促進企業更積極參與減碳行動。

5.2 未來方向

本研究以最小化總生產成本為目標，探討碳稅開徵及碳排放量對訂單生產排程之影響，但是於用電量的計算上因只考慮到兩站製程的機台瓦數，與現狀相比會較為低估個案公司實際的用電量與碳排放量。

此外，由於政府在碳稅政策上仍不斷在與各方專家學者討論、草擬規範，所以尚未有明確擬定的完整規章作為參考。因此，未來可依上述的研究建議對模型進行適當調整，以符合最終碳稅開徵後的實際狀況。

參考文獻

- Burke, J., Taschini, L., Evans, S., Gulrajani, K., & Tam, A. (2020, December 15). Carbon pricing options for Taiwan. Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment.
- TPT Wire Bonder. Retrieved November 2023, from <https://www.tpt-wirebonder.com>.
- World Bank. (2023). State and Trends of Carbon Pricing 2023. <http://hdl.handle.net/10986/39796>.
- 工業技術研究院，2022，2021 年第四季台灣 IC 產業回顧與展望，產業焦點研究報告，https://ieknet.iek.org.tw/iekrpt/rpt_more.aspx?rpt_idno=790524196。
- 日月光控股，2021 永續報告書，頁 13、83-84、151，<https://www.aseglobal.com/ch/csr-download/>。
- 尹慧中，2023，拆解 iPhone 15 Pro Max 估台積電 3 奈米晶片成本增 27%，經濟日報，<https://money.udn.com/money/story/5612/7523737>。
- 台灣半導體產業協會，2022，TSIA 第 102 期簡訊電子書，2022 年 10 月號。
- 行政院環境保護署，2022，中華民國溫室氣體排放清冊報告，頁 4-46。
- 每日頭條，2016，一枚晶片的實際成本是多少？，<https://kknews.cc/zh-tw/tech/nlxp5.html>。
- 李聖斌，2016，半導體封裝測試廠最佳產品組合探討－以記憶卡產品為例，國立中正大學企業管理研究所碩士論文。
- 吳嘉祐，2022，應用數學規劃求解案例彈性零工型工廠排程問題，中原大學工業與系統工程研究所碩士論文。
- 阮怡婷，2024，碳稅擬免徵萬噸排放、推小廠減碳，環團擔憂政策減碳力度減弱、將少收 60 億，天下雜誌，<https://csr.cw.com.tw/article/43501>。
- 林蔚廷，2014，LED 封裝測試廠之排程探討一個案研究，中華大學工業管理研究所碩士論文。
- 高琦幃，2015，總量管制與排放交易政策下之環境投資和生產計畫擬定決策，中原大學工業與系統工程研究所碩士論文。
- 陳映璇，2023，一顆「工業心臟」苦撐 20 年！東元專治高耗能馬達，換新再戰有哪些撇步？，數位時代，<https://www.bnext.com.tw/article/75954/teco-ie4-motors?>。
- 溫婉菁，2022，以數學規劃求解半導體封裝廠前段製程排程問題之研究，中原大學工業與系統工程研究所碩士論文。
- 楊啟鑫，2021，全球晶片異質整合封裝發展趨勢分析，工業技術研究院產業科技國際策略發展所。
- 經濟部能源局，2023，111 年度電力排碳係數，https://www.moeaboe.gov.tw/ecw/populace/content/ContentDesc.aspx?menu_id=23142。
- 經濟部能源局，能源統計專區，https://www.esist.org.tw/publication/monthly_detail?

Id=12618ab72d。

鄭郁蓓，2011，IC 封測廠的鐸線製程之生產效率分析－以 A 公司為例，高苑科技大學經營管理研究所碩士論文。

臺灣銀行，2023，牌告匯率，<https://rate.bot.com.tw/xrt?Lang=zh-TW>。

劉育璋，2022，三種碳稅制下廠商產品最佳生產與定價策略，國立臺灣大學管理學院商學研究所碩士論文。

簡禎富，2022，大數據分析和 AI 智慧製造技術推動永續與循環經濟之實證案例，TSIA 第 101 期簡訊電子書，2022 年 7 月號，頁 02-05。

蘇柏境，2020，作業成本制度下探討碳稅及碳權成本對企業獲利之影響，國立中央大學企業管理研究所碩士論文。