



電動車時代： 機會、挑戰與展望

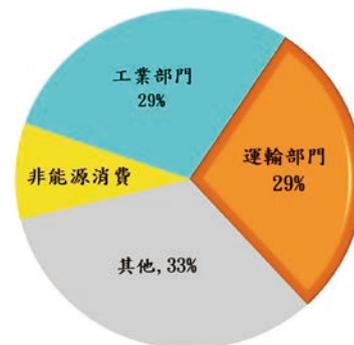
謝依芸／國立臺灣大學土木工程學系電腦輔助工程組 助理教授

全球暖化造成的極端氣候現象日益加劇，提高了人們的環保意識，也推動了移動零排放的電動車聲勢與銷量。近年來，電動載具的市場正快速的成長：2020年，全球電動車保有量已超過一千萬輛；儘管受到新冠肺炎疫情的衝擊，電動車銷售量仍達到每年三百萬輛，市占率約4.6%。現今不論是經濟性或是便利性皆有利於傳統燃油車的持續發展，因此政府的引領及決策對於運輸電動化轉型扮演著至關重要的角色。相比於燃油車，電動車能提供多項潛在社會效益，包含提升運輸能源效率、保障國家能源安全、對抗氣候變遷、改善空氣品質與促進經濟發展等。然而，電動車要被廣泛採用與普及化目前仍存在著重大阻礙，包括購買價格、行駛里程焦慮和充電方便性。本文針對電動車目前面臨的機遇、挑戰與未來展望進行回顧與概述；文章旨在提供基於科學研究為基礎的指南資訊，幫助讀者與產業轉型的利害關係人了解未來電動化世代的關鍵面向。

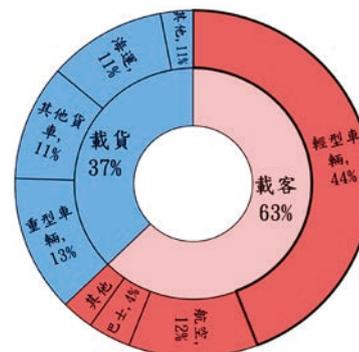
關鍵詞：電動車、能源轉型、電池材料資源、技術經濟分析

前言

隨著全球人口的膨脹、經濟收入的增加與都市化的進展，人類對機動化程度的需求提升和對能源的需求達到了前所未有的水平；交通運輸部門約占世界能源消耗總量的29%（圖1(a)），而載客運輸（尤其是輕型車輛）占交通能耗的絕大部分（圖1(b)）^[1]。由於全球交通能源消耗主要來自於汽油和柴油兩種石油燃料（汽油主要用於載客運輸，而柴油主要用於載貨運輸），使逐日增長的運輸需求與車輛使用量對環境造成負面衝擊。燃燒汽柴油的車輛在行駛中會產生二氧化碳和其他會進一步生成懸浮微粒和臭氧的化學物質；二氧化碳為溫室氣體，將導致全球暖化與氣候變遷，而運輸部門現今約占全球二氧化碳排放量的四分之一；懸浮微粒與臭氧則會導致都市空氣污染問題，對當地人體健康造成傷害，車輛的廢棄排放在世界的各大城市（如北京、新德里、巴黎、墨西哥城等）被認定為造成空污的主要原因。為實現巴黎氣候協議之目標（即將全球平均氣溫升幅，在本世紀末之前控制在與工業化前相比攝氏2度的範圍



(a) 全球能源消耗按部門分



(b) 運輸能源消耗按模式分

圖1 2017年 global (a) 各部門能源消耗比例與 (b) 運輸部門內的細項組成

內，以減少氣候變遷的風險和危害）與創造永續的宜居城市，世界各國政府推動各項減排行動，而交通運輸系統的能源轉型成為必須經歷的過程。

當今全球政府推進運輸能源之綠色轉型的手段為引導高能耗高排放的傳統內燃引擎汽車逐步退出市場，並同步鼓勵發展低油耗低排放的先進車輛動力技術及替代燃料。

(1) 近年來，各區域對傳統燃油汽車退出市場的規劃與新能源為綠色運輸工具的使用之風氣不斷提高，加速了全球對電動車佈局與發展的腳步。自 2016 年開始，越來越多的國家、省和州政府已相繼製定了全面禁售燃油車的時間表（大多數目標集中在輕型車，尤其是乘用車），以達到其碳排放和空氣品質之目標。表 1 列出了各地政府宣佈新銷售乘用車輛電動化之目標與年分^[2]：十多個國家（主要是歐洲國家）提出了在 2025 及 2040 年之間禁售燃油車的時間表，其中又以挪威的目標最為雄心勃勃，目標是在 2025 年全面銷售零排放車型電動車輛。

(2) 依照動力系統（或動力來源）之不同，市場上常見的車輛大致可分為四種類型：傳統內燃引擎車（Internal Combustion Engine Vehicle, ICEV）、油電混合車（Hybrid Electric Vehicle, HEV）、插電式油電混和車（Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV）和純電動車（Pure Battery Electric Vehicle, BEV）。中短期內要降低運輸部門對石油的依賴以及減少機動車輛的排放，較有效的方法為內燃機引擎搭配混

合動力系統與車輛節能技術；中長期來看，發展新能源汽車（即電動載具）是必須且至關重要的。

隨著永續運輸發展的意識抬頭，新能源汽車成為全球性的熱門議題。電動車（Electric Vehicles, EV；包含 PHEV 和 BEV）被認為是能取代傳統燃油引擎的一低碳道路交通工具。近十年電動車銷售強勁成長，2020 年整體車市雖然受新冠肺炎疫情影響，但全球電動車銷售份額卻持續增長至 4.6%（等同於 300 萬輛/年）；截至 2020 年底，全球電動車保有量已超過 1,000 萬輛（市占率約 1%）。值得注意的是，歐洲在 2020 年首次在電動車銷售數量方面超越中國，以單年 140 萬輛新註冊電動車的成績位居世界第一，中國則是以單年 120 萬輛緊追在後，全球的銷售市場仍然不成比例地集中在少數幾個地區，如圖 2 所示。以電動車普及率來看，挪威依舊遙遙領先他國，在 2020 年銷售份額達到 75%，較 2019 年增長約三分之一^[3]。

表 1 國家 / 省 / 州級政府宣告之燃油乘用車退出時間表

國家 / 省 / 州	禁止銷售燃油車之目標年分	國家 / 省 / 州	禁止銷售燃油車之目標年分
挪威	2025	蘇格蘭（英國）	2032
瑞典	2030	英國	2035
丹麥	2030	加州（美國）	2035
荷蘭	2030	加拿大	2040
愛爾蘭	2030	法國	2040
冰島	2030	西班牙	2040
斯洛維尼亞	2030	新加坡	2040
海南（中國）	2030	哥斯大黎加	2050

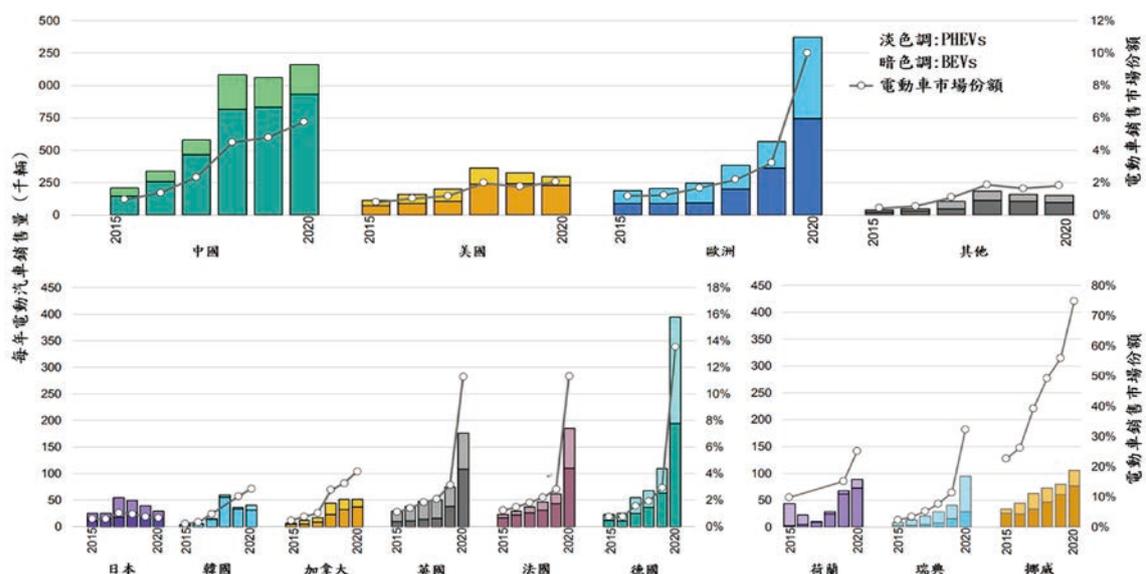


圖 2 2015 ~ 2020 年全球電動汽車銷售和市場份額；圖改編自國際能源署^[3]

車輛電動化具有多項優勢且能為社會帶來多面向的效益，包含改善道路運輸能源效率（EV 的能源轉換效率高達 80%，遠高於 ICEV 的 12% ~ 30% [4]）、減少國家的石油進口量以提升國家能源安全性、對抗全球氣候變遷（如伴隨低碳電力系統更能發揮其減碳效益）、改善城市空氣品質、新產業發展與促進經濟成長。儘管車輛電動化提供了巨大的潛在效益，但當今的電動車尚未被廣泛採用，其普及化仍受到科技、社會和經濟上多方面的障礙，包括較高的車輛成本、較低的行駛里程、較長的充電時間以及對充電基礎設施的需求。除此之外，民眾對於從內燃機引擎轉型過渡至電動車的未來存在著巨大的不確定性，進而降低了消費者對電動車的接受度。本文針對電動車目前面臨的機遇、挑戰與未來展望進行回顧與概述，以供讀者與利益相關方（包括政府和私人企業）決策參考。

電動車產業發展之挑戰與機會

電動車（電池）售價高

電動車的售價主要因為電池的高製造成本，使其相較同規格的傳統燃油車價錢高上許多；而高購買價格被認為是當今電動車普及化的最大阻礙 [5]。一台電池容量為 60 千瓦時（續航力約 380 公里）的電動車 Chevrolet Bolt 電池組約占總成本的三分之一 [6]。電池組（battery pack）是由多個單電池（cell）串聯或並聯所組成。2017 年的電池組價格約為 200 ~ 300 美元 / 千瓦時；美國能源局製定了在 2022 年低碳運輸的電池組價格目標價為 125 美元 / 千瓦時 [7]，也表明了大幅度的降低電池價格是使電動汽車具有經濟吸引力的必要條件。高價格的電池組被認為是當今電動車製造商獲利能力的一大障礙；根據研究指出，在電池組價格降至 100 美元 / 千瓦時之前，若沒有政府補貼或是政策執行，電動車製造商將無法真正的獲利，達成商業化 [8]。

現今電動車的生產與銷售主要是由各國政府的政策所推動，常見的相關財政激勵措施包含購車補助、免稅和稅收抵免，以降低電動車的前期購置成本。在美國，購買電動汽車有資格獲得最高 7,500 美元的聯邦稅收抵免（額度取決於電池容量和車輛總重額定值）。在歐洲，法國和挪威是電動車獎勵措施最多的國家 [9]；挪威政府更是自 1990 年代起，持續對電動車購置提供

補貼（如免徵 25% 的增值稅），使其穩居全球新能源汽車普及率龍頭之地位。在中國，政府為解決國內的空氣污染問題，並欲在新能源技術領域保持競爭力，從 2014 年以來一直為本土電動車產業提供大量補貼；原預計在 2020 年底要完全取消補貼 [10]，但因 2019 年國內電動車銷量首次出現負成長，加上疫情衝擊，補貼政策延遲至 2022 年底，以提振新能源汽車市場 [11]。除了各種財政戰略之外，中國近年推出的「雙積分政策」將促進汽車節能與新能源車之協調發展，且專家預期此管理辦法將大幅增加電動車的銷售與電池產量。根據學習曲線理論 [12]，隨著累計產量的增長，製造技術與效率提升，規模經濟的產生將會使每千瓦時的電池生產成本成指數性下降。然而現實生活中，電池價格不會如同傳統的學習曲線所指示：隨產量增加，電池成本無止盡地降低。相反的，電池的價格除了取決於製造成本，也受材料成本所影響；現今電動車電池市占率最高的鎳錳鈷三元鋰電池（Lithium nickel manganese cobalt oxide, NMC）所使用的原物料 — 昂貴的鋰（Lithium; Li）、鎳（Nickel; Ni）和鈷（Cobalt; Co）金屬元素 — 最終將限制電池組生產成本下降的速度，並為電池的最終價格設定了下限值（或底價）。

Hsieh *et al.* 於 2019 年提出二階段學習曲線，將電池成本依照供應鏈架構劃分為兩個獨立階段（圖 3）。第一階段：材料製造商向礦產公司購買礦物原料並合成製造為電池的活性材料；第二階段：電池組製造商購買活性材料，製成單電池並組裝為電池組。在第一階段，礦物原料成本將做為活性材料的價格下限，第二階段則以活性材料成本做為電池組的價格下限，透過分別在兩階段設定下限，藉此解決傳統學習曲線的不足 [13]。

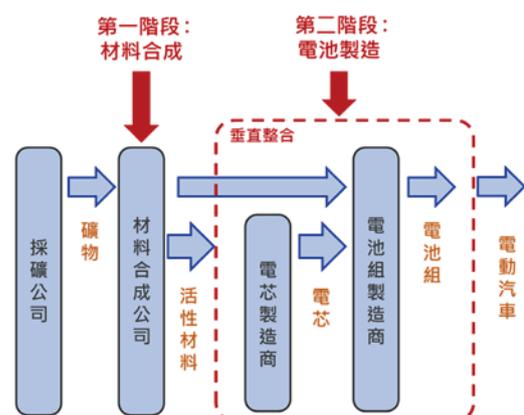


圖 3 電動汽車電池供應鏈架構；圖改編自 Hsieh *et al.* [13]

NMC 電池因為原材料包含鈷金屬，而全世界近 60% 的鈷供應量來自剛果民主共和國；此意味剛果國的社會政治不穩定，將導致全球鈷供應中斷的可能性，因此其市場價格波動幅度較大。目前整個新能源產業正積極研發將鋰電池的正極材料朝向能量密度更高、鈷含量更低的高鎳三元材料發展，以進而降低對鈷金屬的依賴性以及提高電動車的續航力；三元鋰電池的三相圖與各元素分別代表的電池組特性如圖 4 所表示。

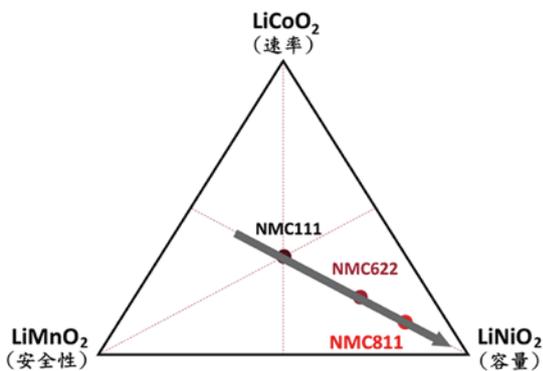


圖 4 鎳錳鈷三元鋰電池的三相圖；其中的數字表示 鎳、錳、鈷的莫耳比例

二階段學習曲線模型研究指出活性材料成本最終將會影響鎳錳鈷鋰電池組價格的下限，使 100 美元 / 千瓦時的價格目標即使到 2030 年仍不太可能實現，除非礦物原料的價格持平在 2016 年的水準 (圖 5)。然而，隨著需求和供應的不斷增加，未來鈷的穩定價格仍存在很大的不確定性。2030 年全球新電動車銷售對鈷的需求預估將約達到 2016 年全球鈷總產量的 80%。考慮到 2017 年全球鈷需求中只有 15% 用於新能源車電池，

未來因車輛電動化造成的鋰電池需求量的快速增長可能導致關鍵原物料的價格上漲。因此，汽車製造商為了避免原材料的短缺和價格波動，需要轉向對鈷依賴性較低的電池材料 [13]。

車用電池關鍵原料的潛在資源供應緊缺

隨著電動車的崛起，全球運輸部門對鋰電池的需求不斷增長，促使新能源產業開始擔憂未來電池關鍵原材料的供應是否會出現緊缺現象。圖 6(a) 表示了電池關鍵原料在不同年度 (2005 年、2010 年和 2015 年) 的儲量 (以每年開採產量做標準化後)，與其在最大生產國完成的開採比例之比較。圖 6(a) 中鋰、鈷、天然石墨 (Natural Graphite) 的箭頭方向表示時間的推進 (錳和鎳的時間趨勢沒有方向性)；縱軸 (y 軸) 被稱為靜態損耗指數 (Static Depletion Index)，對於所有被分析的原料，該數值皆大於 30 年。對於市場更大、更成熟、更多元化的鎳和錳，靜態損耗指數會較低，平均約 45 年。沿圖 6(a) 的橫軸 (x 軸) 往左 (或較小數值) 表示這些原料的供應在地理上更加多樣化。隨著時間的推移，可以觀察出鈷金屬的供應來源越來越集中，當今最大的鈷生產國 (即剛果共和國) 已貢獻超過 50% 的全球產量；天然石墨的供應來源更為集中，全球超過 65% 的產量集中在單一國家 (即中國)。根據 2015 年的產量，圖 6(b) 繪製了各關鍵原料在前三大產量國的集中度；資源地理集中性被認為是一潛在因素導致關鍵原料因某生產大國的政府政策或社會政治不穩定而導致全球供應短缺與中斷。透過對鋰電池關鍵原料供應鏈的追跡與產量潛能的推估，大多數的

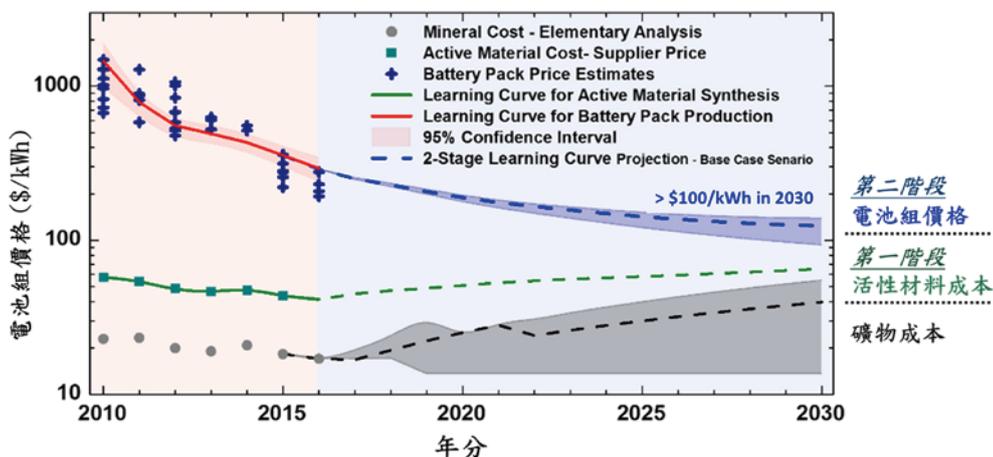
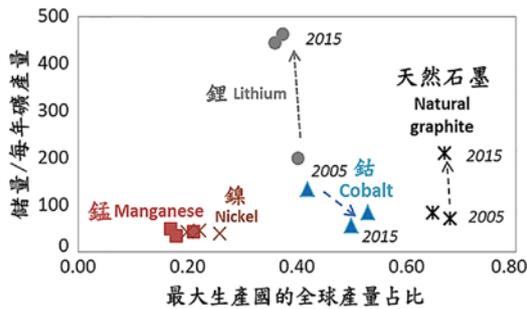
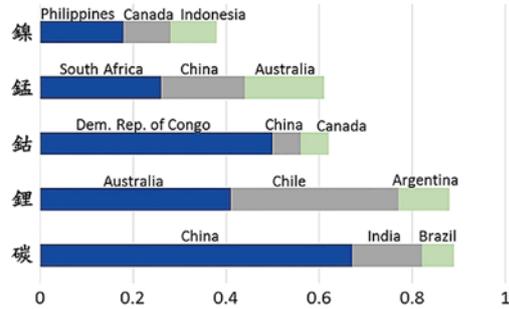


圖 5 鎳錳鈷三元鋰電池組過去和未來預測的價格趨勢；圖改編自 Hsieh et al. [13]



(a) 靜態損耗指數的歷史趨勢



(b) 前三大生產國的產量占比

圖 6 鎳、錳、鈷、鋰和天然石墨資源的資源使用狀況 (圖改編自 Olivetti et al. [14])

原料，包括鋰、鎳、錳和天然石墨，短期內都將會有足夠的供給來滿足預期成長的鋰電池需求。然而鈷的供應卻存在著緊缺風險，這風險主要來自於鈷產能的地域性集中度：鈷礦產量集中在政治不穩定的剛果民主共和國，而鈷的精煉加工能量則主要集中在中國 [14]。

電動車輛的續航力與充電時間

電動車普及的另一個障礙是潛在的購買者對電動車在充電之間行駛的距離（稱為里程焦慮）和電動車充電所需的時間之擔憂。「里程焦慮」(Range Anxiety) 是指駕駛電動車者因擔心電池剩餘的電量或續航無法使車輛順利抵達目的地或充電站，所產生的內心焦慮與不安情緒。里程焦慮之所以會產生的根本原因之一是續航里程不長；確實，如圖 7 所表示，在電動車剛開始發展的時候（即 2010 ~ 2015 年），因受電池技術限制，電動車續航里程基本上只有一兩百公里，僅能

作為城市內代步使用。然而，在 2017 年之後，隨著電池技術的發展，電動車續航里程出現了大進步；近年來主流的電動車續航力已達到 350 公里以上，甚至部分車型續航里程更突破 500 公里；這樣的續航力即使會受城市車況與空調使用而下降，但也已足夠完成城市與城市之間的旅行，也就是說里程焦慮對現今的電動車型已經大為緩解。

即便如此，駕駛電動車者在長途旅行產生里程焦慮的根本原因，除了車輛續航里程不長之外，更重要的是充電的不方便性。表 2 整理出電動車充電的主要三種級別：(1) 一級充電（家用標準的 120 伏插頭）：充電速度非常慢，大約需 20 到 40 個小時，才可將電池充滿；(2) 二級充電（240 伏特）：一般能在一小時內能提供約 40 公里的續航力，將電池容量充滿的時間約需 8 小時，在家裡，二級充電可以使用與乾衣機或電烤箱相同的插座類型；(3) 三級直流快速充電：通常僅需 30 分鐘

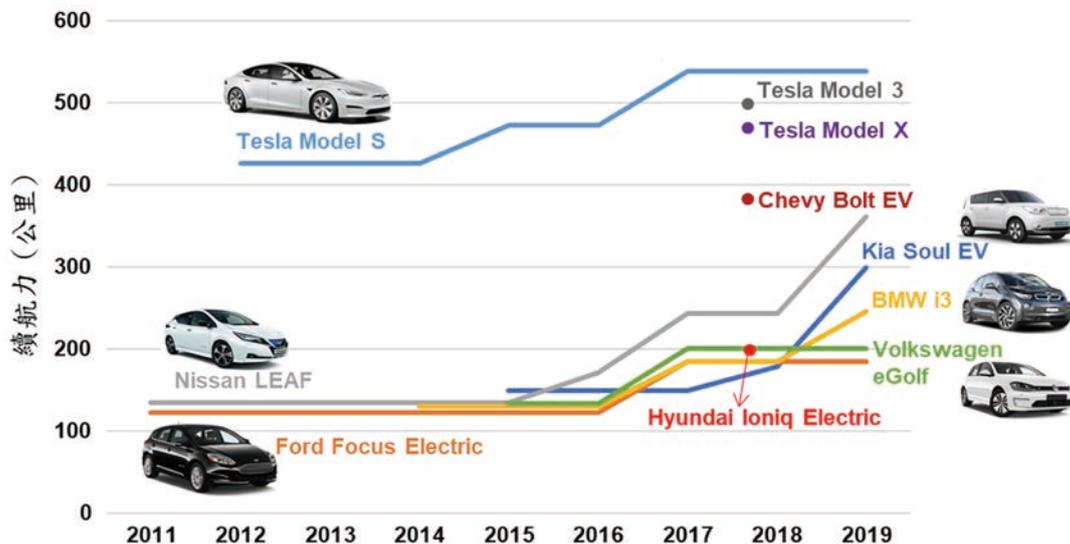


圖 7 電動車電池續航里程的演進

表 2 電動車充電的主要三種級別之比較

級別	一級充電(家用)	二級充電(慢充)	三級直流充電(快充)
充電速度	1.4-1.9 kW	3.7-19.2 (7 kW 最常見)	> 22 kW (50 kW最常見)
里程補給速度	~ 8 公里/時	~ 40 公里/時	電池容量的80%/半小時

即可將電池容量充滿 60% ~ 80%，即每十分鐘最快便能增加 100 公里左右的續航里程。然而如要將電池電量完全充滿，直流快充的充電級別也需要至少一個小時，這與燃油車加油只需五到十分鐘相比，還是相差甚遠，使充電速度仍是當今電動車普及的一大障礙。不僅如此，充電站基礎建設的缺乏更加劇了電動車相對較低的行駛里程和較長的充電時間所引起的里程焦慮。如果充電站密度不足，電動車的續航里程無論再長，電池電量也會有耗盡的時候。燃油車之所以不會產生里程焦慮，其根本原因就在於加油站數量眾多且加油速度很快。

要解決電動車里程焦慮的阻礙，一方面必須解決能源補給問題：首要的是完善充電設施的布局，以解決目前充電站數量不足和過於集中的問題；其次則是在確保安全性的前提之下，提升充電的速度以降低目前較長的充電時間。一方面則是可以透過加大電池容量，使電動車本身具備更長的續航力；然而電池容量的增加常會伴隨著電動車製造成本的增加與售價的提升，這是消費者較無法接受的。除了上述兩項技術面的解決方法之外，另一方面非科技面向的管道則是消費者教育：對於私人乘用車來說，在能進行家用充電（無論一級或二級）甚至目的地充電（如賣場、百貨公司、遊樂場、公司等常配有二級充電）的情況之下，現今的充電設備與電池技術其實是足以滿足大多日子每天所需的里程數。以台灣為例，根據統計，自用小客車平均每次開車行駛里程約 36 公里 [15]，這是一級充電五小時（更何況是下班回家停一整晚能補給的里程數）或二級充電一小時即能夠補足的續航里程。

換電模式應用在商用客車的經濟性

對於（多元）計程車車隊來說，電動車較長的充電時間尤其是一個問題，因為儘量避免或減少車輛閒置的時間對於他們的利潤最大化至關重要，也因此現今的商用車隊在沒有任何外力（如政府法規）之下，大多會繼續使用燃油車，而非電動車輛。這種偏好的後果並非微不足道：與私人乘用車輛相比，計程車由於行駛距離更遠（根據統計，台灣全體計程車每天平均行駛里程為約 140 公里 [16]），即消耗更多化石燃料，使其對空氣污

染的貢獻（不成比例地）較大。即便使用快速充電，現今的充電速度還是無法與燃油車加油相比，且快充被認為會縮短電池的壽命，這些問題導致目前商用客車對電動化轉型的意願很低。相反的，換電模式（Battery Swapping）可能會是一個可解決目前充電難題的選項；換電的機制如圖 8 所表示。電池交換技術可以將耗盡的電池在五分鐘內更換成滿電的電池，這是任何快充或是超級充電皆無法達到的速度與效率。在 2017 年，全球最大的換電站網絡系統在中國北京開始運營：北汽新能源汽車聯合各方，成立蔚藍生態聯盟，且在政府的支持下，將換電服務進行商業化 [17]；目前的換電模式主要針對計程車運營車輛，未來隨著電池交換站的配套基礎設施日趨成熟，北汽新能源規劃將換電服務拓展至共享汽車、網約車，最終至私人乘用車市場。

儘管電動車提供多面向的社會利益，但充電時間對應的高機會成本仍是目前商用運營車輛電動化的障礙。為了提高電動計程車車隊的經濟性，Hsieh *et al.* 以北京計程車產業為案例，提出了一技術經濟分析框架，計算了各種充電系統的商業模式（即結合充電方式與計程車



(a) 示意圖



(b) 實際運作圖

圖 8 電動車換電模式（圖取自 Wang [18]）

運營的商業模式之生態系統)的成本競爭力^[19]；可行的生態系統如圖9所示且如下所描述。充電方式包含了二級充電(慢充)、三級充電(快充)和換電；運營的商業模式包含了傳統的二級充電策略、二級充電搭配額外電動車的購置(即透過購買額外的電動車輛，使車隊擁有足夠充滿電且隨時可以被使用的多餘車輛來避免二級充電產生的長時間閒置；當電動計程車電量不足時，駕駛司機可以前往充電站換成另一台充滿電的車輛；此策略使雙班計程車能持續在道路上行駛並產生收入)、傳統的三級充電策略、三級充電搭配額外電動車的購置，和換電模式。以中國充電設備的固定成本來說，二級充電(慢充)一組大約一千美金、三級充電(快充)一組大約兩萬美金、電池交換站(換電站)一座大約一百萬美金。因為需要大約三十組的電池組儲備，導致換電站的前期投資成本相比快速充電站要高上許多；高建設成本使換電站的普及化更為困難。然而在考慮充電系統可提供的充電服務次數(依充電所需的時間不同而不同)之後，研究指出在每提供一公里的續航里程基礎上(圖10)：(1) 儘管換電站需要更高的前期投資成本來滿足其電池儲備的需求，但因為換電站能比二級或三級充電器

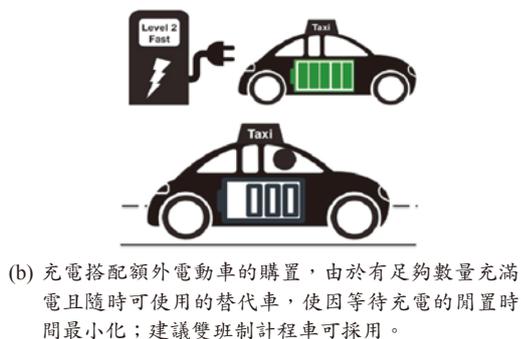


圖9 電動計程車車隊可行的充電策略之商業模式

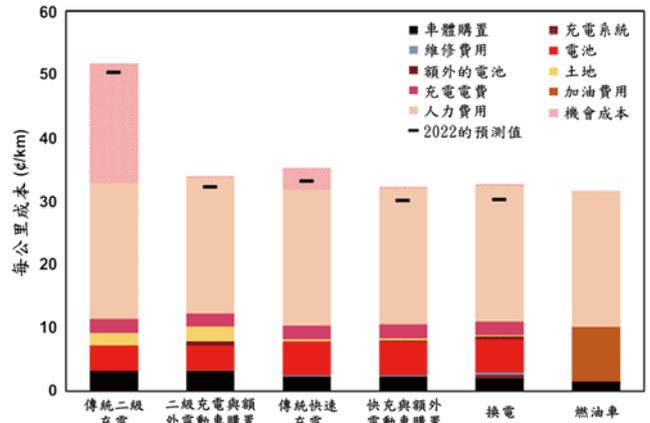


圖10 中國北京雙班計程車在不同充電商業模式與加油方案下每公里的成本細分；為了滿足市場消費者需求，雙班制的電動計程車如果依賴傳統充電，則需要購置額外車輛，否則有些車輛會因為需要充電而被迫停止使用。圖改編自 Hsieh *et al.* ^[19]

提供更多電動車輛充電的服務，使換電模式屬於成本效益高的運營方式；(2) 購置額外電動車提高了雙班制計程車電動化的經濟可行性：儘管這種策略會帶來更高的投資成本，但有助於避免充電相關的高機會成本，進而顯著提高整體生態系統的經濟效能。迄今為止，燃油計程車在經濟上對車隊運營商更為有利，但隨著電池科技變得更加成熟，這相對的成本優勢將會發生逆轉。研究預測在2022年，選擇適當的充電系統與商業模式之電動計程車車隊將可以實現與燃油車隊的成本平價；對於雙班制的運營車隊，仰賴快速充電搭配額外車輛的購置或是電池交換技術皆能以較具成本經濟性地方式完成電動化轉型。

總結與展望

全球對使用傳統內燃機車輛造成的環境負面影響認知日益增長，加強了各國政府對電動車推行的力度。截至2020年底，全球公路上已有1000萬輛電動車。儘管全球汽車銷量因新冠肺炎疫情的衝擊而下滑(全球汽車銷量下降了16%)，但當年度的電動車登記數卻年增長了41%，電動汽車銷量約為300萬輛(銷售份額為4.6%)。歐洲也在這年，首次超越中國成為全球最大的電動車銷售市場。現今的情勢，不論是經濟性或是便利性皆有利於傳統燃油車的持續發展，因此政府的引領及決策對於運輸交通系統的能源轉型至關重要。電動車能在疫情爆發、全球經濟活動放緩的時期依舊維持其銷售力道的主要原因為：

1. 政府強制性規定：燃油經濟性標準 (Corporate Average Fuel Economy, CAFÉ) 規範全年銷售新車油耗均值、零排放汽車 (Zero Emission Vehicle, ZEV) 計劃要求汽車製造商每年需生產一定數量的零排放汽車、近幾年中國實施的乘用車企業平均燃料消耗量與新能源汽車積分並行管理辦法 (簡稱雙積分政策，借鑒了美國的 CAFE 標準和加州的 ZEV 法規)，和中國一些大城市 (如上海、北京、廣州、天津和杭州) 實施的汽車保有量控制政策，將電動車之購買排除在限牌之外，使當地對電動載具的需求遠大於國內其他區域。除此之外，已有十多個國家宣布在 2025 及 2040 年之間開始禁止銷售燃油車。
2. 財政激勵措施：一些歐洲國家 (如德國、法國、西班牙和英國) 新增購買激勵措施一包含購車補助、免稅和稅收抵免；中國新能源車補貼延後退場。
3. 全球電動汽車型數量增加，且電池成本持續下降。

現今全球的電動車推廣主要是由中國所主導：從 2008 年開始，中國已成為全球最大的汽車市場，銷售量超過美國與日本兩國之總和；國內城市嚴重的空氣污染、溫室氣體的大量排放，以及國家對石油進口的依賴性 (原油對外依賴度已達 70%)，促使中國政府發布多款政策推廣新能源汽車，包含電動車購置補助、雙積分政策，與大城市的內燃機車牌發放限制等。中國在電池技術和電動汽車生產處於全世界領先之地位；產業優勢除了有龐大的國內消費市場支撐外，其關鍵零組件的生產也是未來主導產業走向的重要力量。目前看來，中國極有可能會繼續帶領全球未來電動車的發展。電動載具是否將能成為主要的零排放運輸選擇，有待時間證明，但可以確定的是如果沒有中國政府對電動車產業推行的一系列政策，全球的電動化轉型發展將會更加緩慢。

從低碳與環保的角度來分析電動化轉型：電動車避免了來自化石燃料燃燒所產生的二氧化碳和空氣污染物之直接廢氣排放，卻可能會因為發電上游階段的排放而導致車輛能源轉型造成更多全生命週期排放的現象。在電動車的全生命週期裡，最大的排放源來自於行駛上的用電，因此發電結構是仰賴化石燃料、還是以再生能源為主，會決定電動車是否比燃油車還低碳與環保。從能源開採、生產、運輸、儲存、分配以及汽車使用等之過程的能耗和排放具有明顯的地域性，受不同地區的資源、能源來源和技術等條件制約。在中國，燃煤發電一

直是國家的電力供應支柱，因此汽車電動化能對抗氣候變遷之效益並不明顯：2017 年的中國，每公里電動車的平均二氧化碳全生命週期排放量約為傳統內燃機汽車排放量的 71%，相較於美國此比值為 55%，這意味著車輛電動化在美國會有較大的減碳效益。政府在推行車輛電動化的同時，不應該只是強調直接廢氣排放或都會區空氣污染之改善，也應當將其他如上游發電廠以及電動車電池製造的廢氣排放納入政策評估的考量之內，以進一步更加瞭解替代燃料車輛對氣候變遷和空氣品質相對於傳統內燃機的好處。電動車在製造過程與充電所需的電力生產中仍會產生碳排放，但其能源效率的提高確保了車輛電動化可帶來明確的國家能源安全效益。儘管如此，電動車要被廣泛採用與接受目前仍然存在著重大阻礙，包括價格、行駛里程焦慮和充電方便性；相關的轉型挑戰已在本文詳細探討，接下來針對可能發展的對策與未來展望進行討論。

電動車的前期購買價格較燃油車來的高是目前其普及化最主要的障礙之一，高售價的主要原因來自於當今電池組的高製造成本。儘管電池組成本在過去十年內從超過 1,000 美元 / 千瓦時下降到 200 美元 / 千瓦時，在沒有任何財政補助的情形下，緊湊型純電動車 (鎳錳鈷鋰電池且行駛里程為 350 公里) 的價格仍比同規格燃油車高出約 50% ~ 60%。即使隨著產量增加與製造效率提高，電池組的成本會持續下降，但搭載鎳錳鈷三元鋰電池的乘用電動車售價很有可能到 2030 年前仍會繼續高於燃油車 (即電池組價格仍高於 100 美元 / 千瓦時)。目前商業化的鋰電池正極材料除了鎳錳鈷 (NMC)，尚包含鋰鈷氧化物 (LCO)、磷酸鋰鐵 (LFP)、錳酸鋰 (LMO) 及鋰鎳鈷鋁氧化物 (NCA) 等。不使用鈷金屬元素的電池製造成本較低，故其電池組價格很可能較早能降低至 100 美元 / 千瓦時以下，但目前的技術與市場正朝向能量密度高且鈷含量低的高鎳三元材料電池發展，以解決續航力與鈷金屬元素的成本問題。因此在可遇見的未來，NMC 電池將持續主導電動車的電池市場。這意味著，電動乘用車除非能繼續獲得政府政策的大力支持 (包含高燃油稅、購置補貼、強制規範與命令)，否則不太可能在 2030 年前因達到與燃油車的購置成本平價而主導全世界的汽車市場。因此，我們除了需穩定電池關鍵原材料的供應之外，更必須加速在電池化學方面的研發與創新，以進一步降低電池組的底價。

雖然電池動力系統的製造成本高於內燃機，但電動車的車輛運行成本通常較低。前期購買價格並不能全面反映消費者的總持有成本（Total cost of ownership, TCO）；電動車有很大的潛力可以節省燃料和維護費用。消費者總持有成本是指在汽車擁有期間發生的成本，包括車輛購買成本、燃油成本和非燃油運營與維護成本；當地的稅率、補貼、法規限制會大大改變消費者的擁有成本。相較於美國和台灣，許多國家徵收很高的燃油稅使燃油車的加油成本變得很高：美國 0.92 美元 / 升、台灣 1.06 美元 / 升、中國 1.15 美元 / 升、德國 1.8 美元 / 升、挪威 2.11 美元 / 升、香港 2.55 美元 / 升。這將會導致，隨著電池成本的持續降低，在沒有補貼的情況下，未來電動車將有可能在高燃油稅的國家中與內燃車相比具有 TCO 競爭力。然而，TCO 只是影響消費者購買決定諸多因素的其中一項；電動車產業還必須克服其他障礙，以實現電動載具的大規模普及。政府應給予足夠的激勵措施以支持早期電動車市場之部屬，也應當加強相關產業間的溝通與協調，使電動車推廣力道更加有效。

在消費電子和電動車需求不斷增長的推動下，全球鋰電池市場之需求大幅增加，進一步加劇了對原物料短缺的擔憂。除了擴大生產能力和減少使用稀有金屬在電池的含量之外，此潛在供應風險也可以透過電池回收加以改善。但相比於鋰電池的發展，電池回收產業的發展卻落後許多。過去十幾年的鋰電池大多用於可攜式電子產品，絕大多數的電池與裝有鋰電池的設備一同被丟棄（很少電池被回收利用）。全球車輛電動化將帶動在未來的三十年內，汽車行業成為汰換電池中增長最快的來源類別；相關的環保法規和有限的電池關鍵金屬材料將會推進全球鋰電池回收市場的建立，而一項具有經濟效益、低成本且可商業化的回收技術是現今我們迫切需要發展的。當電動車電池衰退至原先能量密度的 70% ~ 80% 以下時，除了直接丟棄或被回收之外，它們可以再被使用於第二生命（Second-life）應用，如電網級儲能。第二生命應用可以延長電動車電池組的使用壽命；延長的壽命長取決於其應用領域：從區域調節電網服務的六年到電動車快速充電相關基礎設施建設應用的三十年。然而，即使可推行第二生命應用，電動車汰換下來的電池最終也必須被回收或妥善處理。政府應當協助整體相關產業鏈的串聯，從汽車製造商、電池生產商、二

手車經銷商到報廢處理公司，使汰換下來的電池不再是有毒有害的廢棄物，而是成為循環經濟的一部分。在接下來的十年，鋰電池回收仍將會是一個全球性的挑戰——在科技、經濟和政策面向皆具困難性的課題。

參考文獻

1. International Energy Agency, (2019). Key World Energy Statistics 2019.
2. Cui, H., Hall, D., and Lutsey, N., (2020). Update on the global transition to electric vehicles through 2019. International Council on Clean Transportation: Beijing, China 15.
3. International Energy Agency, (2020). Global EV Outlook 2020. IEA, Paris.
4. U.S. Department of Energy, (2020). All-Electric Vehicles [WWW Document]. URL <http://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml> (accessed 2.28.20).
5. Singer, M.R., (2017). The Barriers to Acceptance of Plug-in Electric Vehicles: 2017 Update. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
6. Hummel, P., Lesne, D., Radlinger, J., Golbaz, C., Langan, C., Takahashi, K., Mulholland, D., Stott, A., Haire, G., and Mittermaier, M., (2017). UBS Evidence Lab Electric Car Teardown—Disruption Ahead. UBS report, Basel.
7. Chu, S., Cui, Y., and Liu, N., (2017). The path towards sustainable energy. Nature materials 16, 16-22.
8. Knupfer, S.M., Hensley, R., Hertzke, P., and Schaufuss, P., (2017). Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability. McKinsey.
9. European Alternative Fuels Observatory, (2018). Compare the Market - Electric Vehicle Incentives across Europe [WWW Document]. URL <https://www.comparethemarket.com/car-insurance/content/electric-vehicle-incentives/> (accessed 2.29.20).
10. Zhang, X., Liang, Y., Yu, E., Rao, R., and Xie, J., (2017). Review of electric vehicle policies in China: Content summary and effect analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews 70, 698-714. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.250>
11. 財政部、工信部、科技部、發改委（2020），關於進一步完善新能源汽車推廣應用財政補貼政策的通知。
12. Nykvist, B., Nilsson, M., (2015). Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. nature climate change 5, 329.
13. Hsieh, I.-Y.L., Pan, M.S., Chiang, Y.-M., and Green, W.H., (2019). Learning only buys you so much: practical limits on battery price reduction. Applied Energy 239, 218-224. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.138>
14. Olivetti, E.A., Ceder, G., Gaustad, G.G., and Fu, X., (2017). Lithium-ion battery supply chain considerations: analysis of potential bottlenecks in critical metals. Joule 1, 229-243.
15. 交通部統計處（2019），108 年自用小客車使用狀況調查報告。
16. 交通部統計處（2016），104 年計程車營運狀況調查結果統計表（全體計程車）。
17. 新華網（2017），北汽新能源發布「擎天柱計劃」，五年內建 3000 座光儲換電站 - 新華網 [WWW Document]. URL http://www.xinhuanet.com/auto/2017-11/06/c_1121909993.htm (accessed 7.5.21).
18. Wang, T., (2020). EV battery-swapping finds new life in China [WWW Document]. URL <https://news.cgtn.com/news/2020-08-16/EV-battery-swapping-finds-new-life-in-China-SWZQhFZoEE/index.html> (accessed 7.5.21).
19. Hsieh, I.-Y.L., Nunes, A., Pan, M.S., and Green, W.H., (2020). Recharging systems and business operations to improve the economics of electrified taxi fleets. Sustainable Cities and Society 57, 102119. 