



# 全線無架空線輕軌系統之營運特性

高雄市政府捷運工程局總工程司 / 施嫩嫩  
高雄市政府捷運工程局系統工程科股長 / 廖俊榮  
高雄市政府捷運工程局綜合規劃科副工程司 / 黃世明

## 摘要

高雄環狀輕軌建設，提昇高雄地區民眾使用大眾運輸習慣，使紅、橘兩線捷運系統充分發揮效益，強化大眾運輸系統整體路網及接駁運輸服務，促進市區整體都市發展，配合台鐵高雄港站及臨港線沿線鐵路用地跨區更新計畫，建構完整市區交通網絡。

高雄環狀輕軌平均站間距離約 614 公尺，主要行駛人口集中核心區，採平面興建，平均營運速率約 17-20 公里 / 小時；在高齡化時代的到來，無障礙空間需求殷切需求下，參考國際趨勢，引進現代化、友善、便利、100% 低地板車輛、車輛地板與月台同高、車廂內平順無階梯，提供無障礙乘車空間，方便年長者、孕婦、小孩及行動不便乘客上下車之輕軌運具。

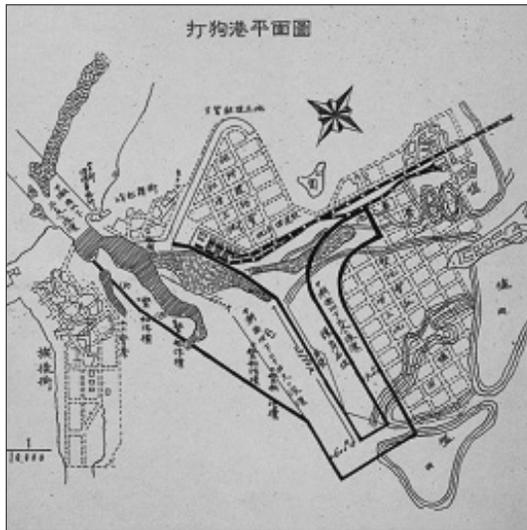
高雄環狀輕軌系統建置，採用 100% 低地板車廂、無架空線供電系統、優先號誌系

統、節能減碳等作為，掌握符合目前輕軌硬體發展的世界潮流趨勢，以充分發揮輕軌系統的優勢。

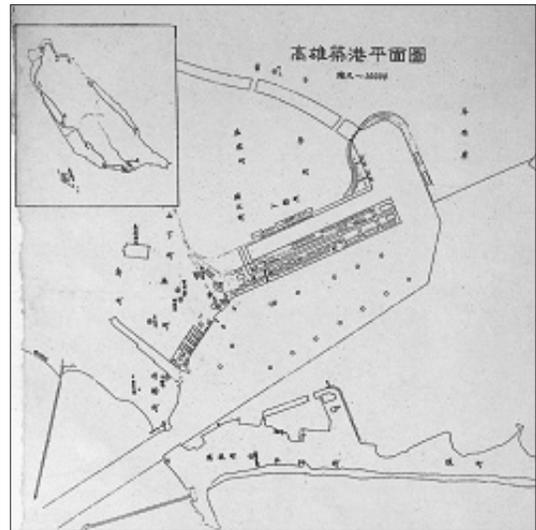
自我供電系統 (Acumulador de Carga Rápida, ACR 系統) 為裝設在列車上之裝置，該系統包括 2 組電力儲存模組箱，可使輕軌列車增加 2 項功能：增加再生電力、使列車行駛於無架空線路段。

每一候車站均設置一套設備模組 - 快速充電電源供應系統 (SCSE)，於列車抵達車站時，對列車之車載儲能系統充電，並於列車離站時停止通電，俾列車利用超級電容所儲存之能量從一車站駛往下一車站，無須傳統的架空線。

智慧能源管理系統，因為全程無架空線，僅靠列車停站時間充電，有限的電力容量，必須做最佳化的使用。依照列車到站距離、監控電能存量，調節車上電力負載如空調設



高雄港平面圖，1912 年



高雄港平面圖，1912 年

資料來源：高雄港紀事，高雄市立中正文化中心，民國 85 年

圖 1 西元 1912 與 1938 年間之高雄市臨港線鐵路

備等，進行智慧管理能源。

高雄輕軌為平面、開放式之捷運系統，由司機員目視駕駛，雖規劃路口優先號誌，然道路交通狀況瞬息萬變，行駛時仍須隨時注意用路人、汽機車的交通行為，因平面道路狀況因素，對輕軌營運是大挑戰。

友善、親和、便利的高雄環狀輕軌，塑造城市新印象，為都市移動的地標，改造都市空間，一個讓都市居民不分年齡層都可以出得了門的運具，一個親近「人」的交通工具，「綠色運具－高雄輕軌」啟動人與都市的對話，漫遊高雄，感動最深。

## 一、前言

西元 1898 年，台灣總督府鐵道部開始鋪

設打狗（今之鼓山南區）至台南、打狗至九曲堂間之鐵路工程以及打狗哨船頭間的輕便鐵，開始了台灣鐵路西部幹線的高雄支線，從此打狗逐漸蛻變成高雄大都會區，成為台灣南部第一座現代化都會。

1900 年 12 月 29 日，打狗驛（高雄驛、現高雄港站）通車，1930 年從哈瑪星延伸至鹽埕區及苓雅寮，為現今的臨港西線，如圖 1 所示。

1941 年，為配合高雄 40 萬人口之都市計畫目標，於大港莊新建現代化鋼筋水泥之新式車站－今之高雄車站，同時新築鐵路環繞市區，此即現今之高雄第一臨港線東段路線，至此形成環繞高雄市主要中心區之臨港線鐵路，如圖 2 所示。





一直以來，隨著小汽車無限制發展，對都市地區所帶來之空氣污染、交通壅塞、環境惡化等問題，迫使重新思考發展軌道運輸系統對都市環境的重要性。

藉著臨港線鐵路之貨運功能逐漸式微，臨港線鐵路廊帶改以輕軌運輸系統，一方面去除現有圍籬所導致空間之阻隔及景觀之破壞，一方面促進沿線地區都市再發展。

綠色運具「輕軌」，具有快速、舒適、無污染、低噪音、能源消耗少等特性，結合高雄臨港輕軌釋出之路廊，成為都市移動地標，創造人與都市間對話，為漫遊都市街景、啟動新生活的首選。

## 二、無架空線輕軌系統之介紹

輕軌系統之牽引動力集電方式一般採用傳統架空線傳輸方式，架空電線之電力傳輸方式可確保電力供應不中斷。電力線佈設必須距離地面至少 5.1 公尺以上之淨高，方不致對一般車輛或行人產生安全上之疑慮。而用來支撐架空電線之電桿柱，其間距一般介於 40 ~ 50 公尺。為提供輕軌車輛安全、有效率及連續不斷的運轉，電車線系統必須安裝維護簡易，且適合本地氣候條件如高溫、潮溼、地震、颱風及多雨等。然而，高雄環狀輕軌若採用架空電車線系統須考量鐵電桿與配件防蝕問題，尤其在水岸輕軌路段更須考量鹽害。配件與非鐵金屬之接觸點，應防止不同金屬之電蝕作用。

輕軌系統之設計，除考量安全耐用外，尚須注意造型美觀及避免對當地景觀環境衝

擊。高雄環狀輕軌為保留水岸段亞洲新灣區完整天際線以及顧及景觀環境，保留自大順一路 / 自由路至大順路二路 / 九如路全長約 3 km 長中央分隔島所種植之路樹（雨豆樹），引進創新集電技術作為高雄環狀輕軌捷運供電的系統架構。

國際上輕軌系統電聯車製造廠商約十幾家，惟投入無架空線供電系統研發製造廠商計有法國 Alstom Transport、義大利 Ansaldo-Breda、德國 Siemens、西班牙 CAF、加拿大 Bombardier 等，評估高雄環狀輕軌是否採用無架空線供電技術時，曾於 100 年 12 月 14、15 兩天邀請上述廠商介紹無架空線供電系統。亦於 101 年委請「高雄環狀輕軌捷運建設」基本設計顧問台灣世曦工程顧問股份有限公司提出牽引動力集電方式分析報告，從技術、營運、可用性及成本的角度，蒐集輕軌工程經驗審議各項技術，確認相關的替代集供電技術，可適用於高雄環狀輕軌建設計畫。

基本上，無架空線供電系統型式，分為兩大類，(1) 連續供電系統：用嵌埋式第三軌的技術連續提供列車行駛的電力，(2) 非連續供電系統：於車上設置能源儲存裝置以提供列車行駛的電力。

各家系統型式概述如下：

### (一) 法國 Alstom

Alstom 公司研發之地面三軌供電方式稱為 APS，為將兩條金屬片嵌在一長條絕緣片上（稱為供電軌），平整鋪設於兩條鋼軌間，當列車行駛至該供電軌區域時，經由列車號

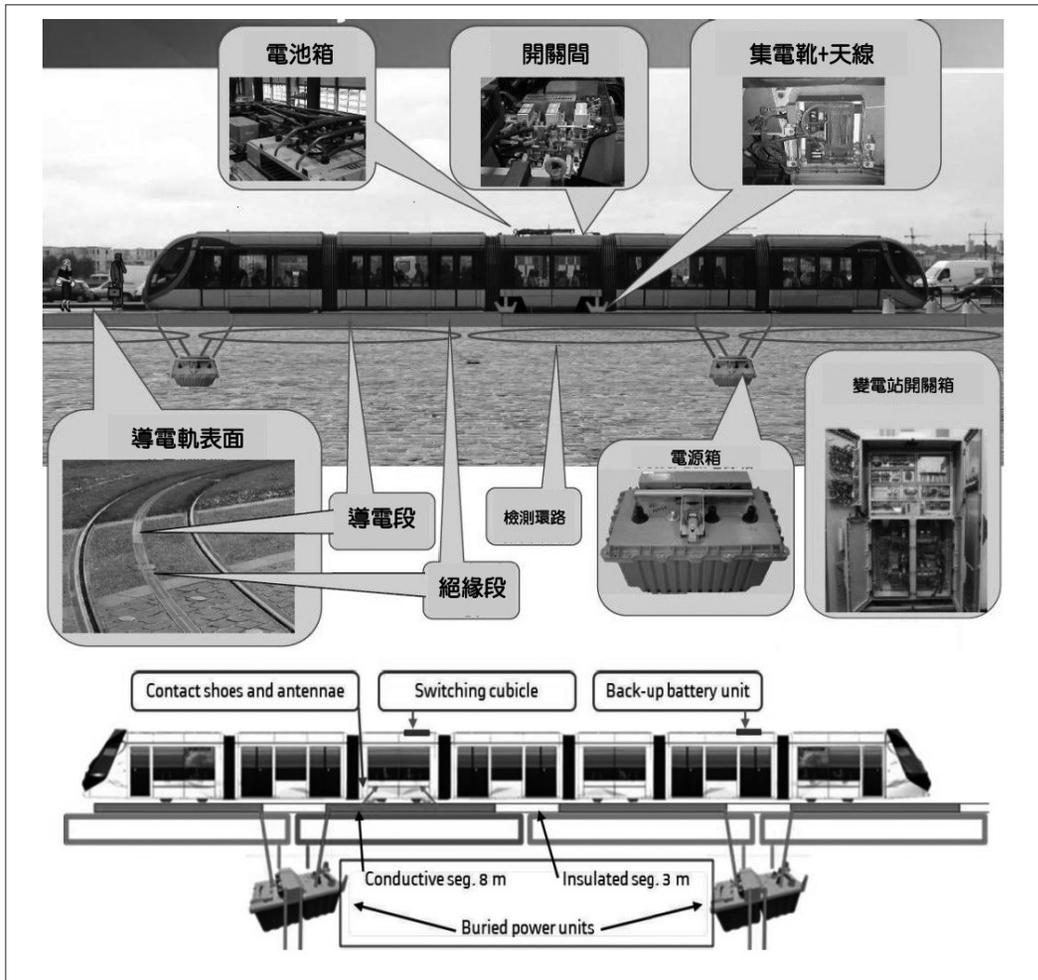


圖 3 APS 系統供電原理

誌感應線圈偵測並傳遞訊號給該區段的供電軌，此時列車下方的供電軌依訊號指示提供 750 伏特直流電源，而其他區段的供電軌則未帶電。為了避免供電系統故障導致列車喪失動力，列車上亦安裝備用電池，可供列車行駛 50 公尺距離的故障路段。

2000 年 APS 最先安裝在法國波爾多 (Bordeaux) 路面電車，除了波爾多之外，於

2011 年通車之法國 Reims 與 Angers 輕軌，以及 2013 年通車之法國 Tours 輕軌，其中部分路段亦採用 APS 無架空線供電系統。APS 無架空線技術為具有實際商業運轉實績中，行駛里程最多的供電技術。2014 年 11 月通車的杜拜輕軌系統，則是第一條全線採用 APS 無架空線供電技術的輕軌系統，APS 系統供電原理，如圖 3 所示。

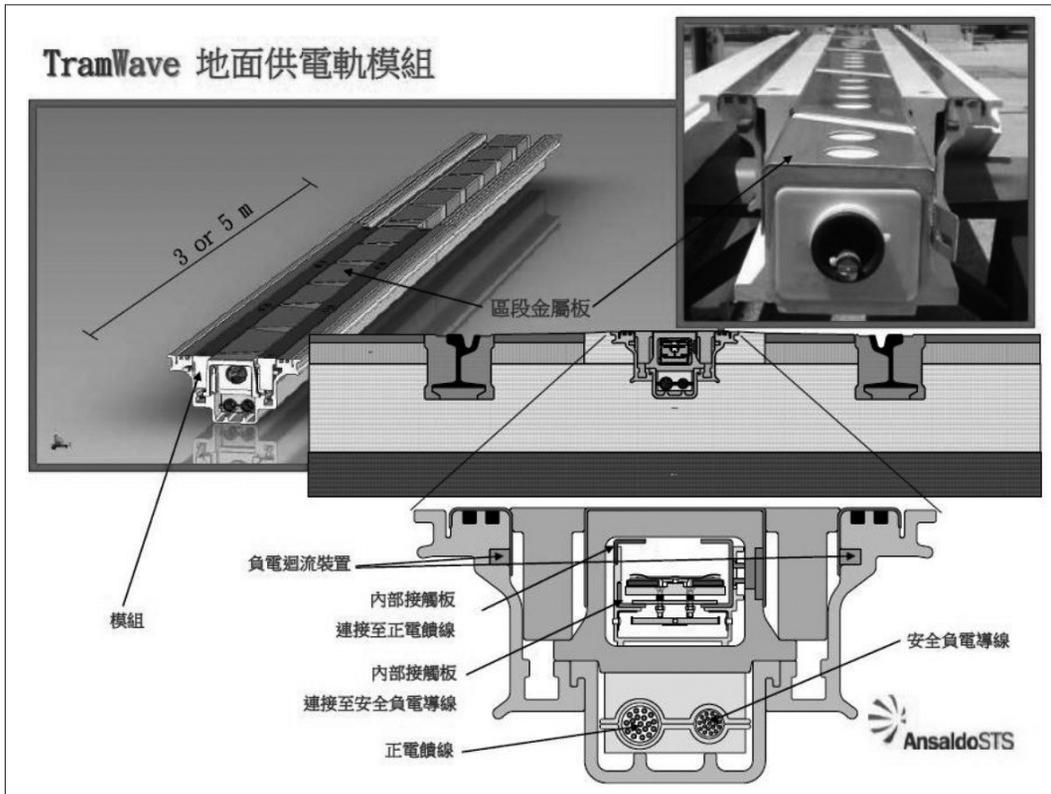


圖 4 TramWave 系統導電軌圖示

Alstom 公司亦積極發展超級電容供電技術，2009 年 STEEM 於巴黎 T3 線測試取得驗證，目前法國 Nice 輕軌系統採用此系統技術。

### (二) 義大利 Ansaldo STS

Ansaldo 無架空線技術稱為 TramWave(創威供電系統)，係一接觸型激磁地面供電系統，地面供電軌是由連續的模組串接而成，每個模組依序排列數個 50cm 長之金屬板，各區段彼此隔離，僅當列車轉向架位於區段正上方時才會導電。

Ansaldo 公司 2011 年在義大利那不勒斯(Naples)裝有 600 公尺的測試軌道，其加減

速性能與一般電車線供電的系統無異，Tram Wave 系統導電軌圖示，如圖 4 所示。

### (三) 加拿大 Bombardier

Bombardier 無架空線技術為 PRIMOVE (連續式感應供電系統)。該系統為一非接觸型電源供應轉換系統，利用感應原理，將變電設備鐵心、一次側與二次側線圈拆分，分裝於兩條鋼軌間與車上，當列車車底覆蓋軌道上的一次感應線圈時，經確認訊號無誤時，才能與車上二次感應線圈產生激磁，提供列車動力，電車牽引電力感應如圖 5 所示，Primove 系統供電架構，如圖 6 所示。

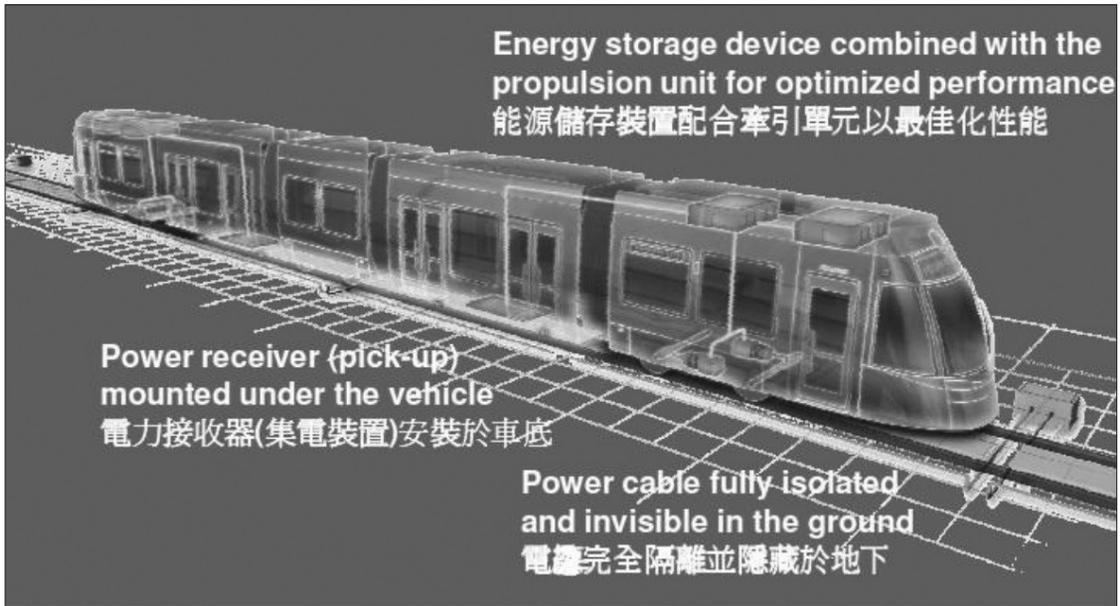


圖 5 電車牽引電力感應

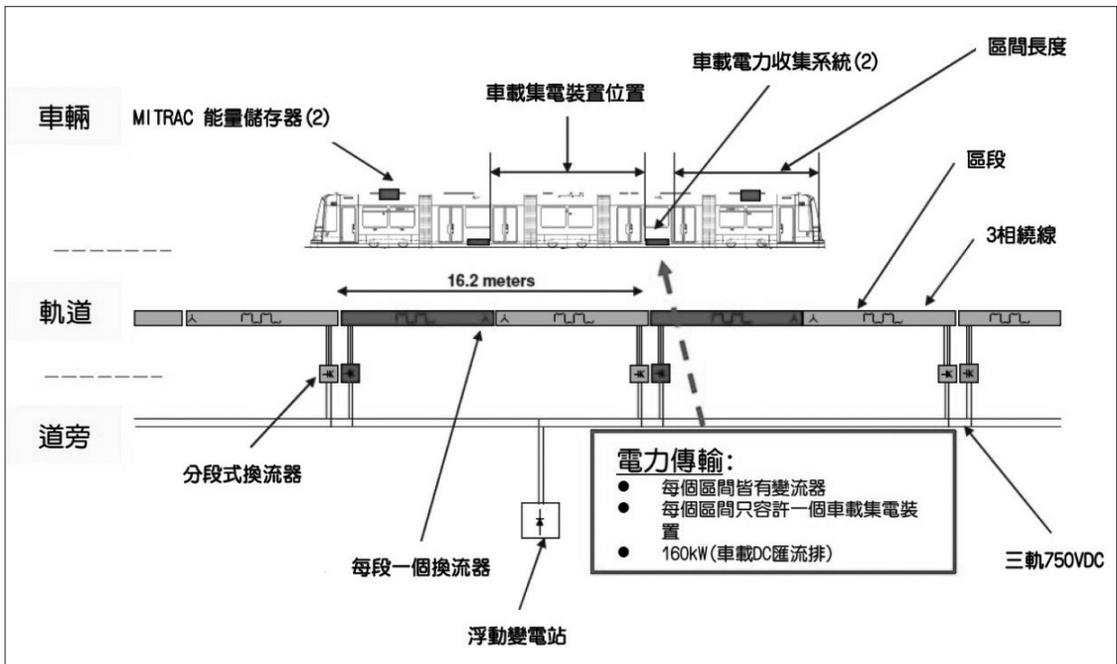


圖 6 Primove 系統供電架構

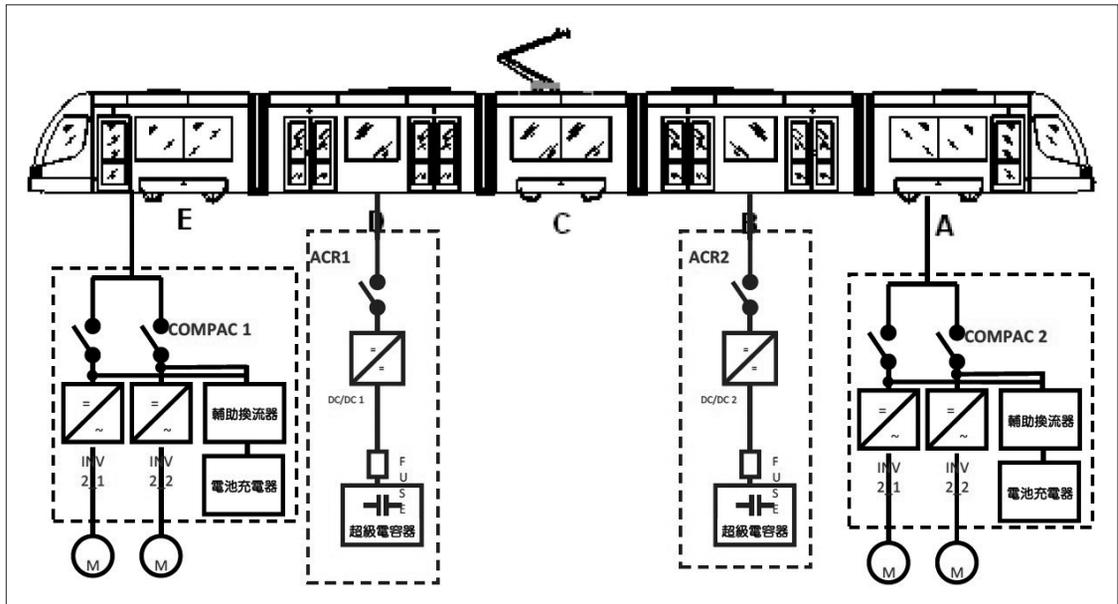


圖 7 ACR 系統供電原理

2010 年 Bombardier 在德國奧德斯堡 (Augsburg) 安裝 800 公尺長的測試路段，利用 Primove 供電技術提供電車動力，惟截至目前為止，仍無商業運轉的實績。

除此之外，Bombardier 亦投入較小容量超級電容研發 MITRAC，搭配 Primove 系統，作為系統失效時之備援電力。

#### (四) 西班牙 CAF

CAF 公司發展快速充電蓄電系統稱為 ACR，ACR 是一種以超級電容為基礎的車載能量儲存系統，每個 ACR 模組配置有超級電容及電池。這套系統可以對煞車產生的所有多餘能量進行重新利用，配備 ACR 系統的輕軌車在出發前需要將系統充滿電，牽引動力及輔助系統的電力都由 ACR 提供。當列車煞車時產生的動能可對安裝在車頂的 ACR 模塊

進行充電，ACR 系統供電原理，如圖 7 所示。

該系統於 2011 年應用於西班牙 Seville 的輕軌系統試驗。2013 年正式於 Zaragoza 輕軌系統部分路段運用。

#### (五) 德國 Siemens

西門子研發無架空線系統 "Non Visual Catenary (NVC) System" 是利用車上裝置 Sitras HES 混合式能量儲存系統 (結合超級電容與鎳氫蓄電池)，該能源系統可將煞車能源有效儲存再利用，可節省 30% 的能源消耗，Avenio 系統供電原理，如圖 8 所示。

本系統 2010 年於葡萄牙 Lisbon 測試，卡達 Doha 採用本技術建置全線無架空線輕軌系統，惟截至目前為止，尚無通車訊息。

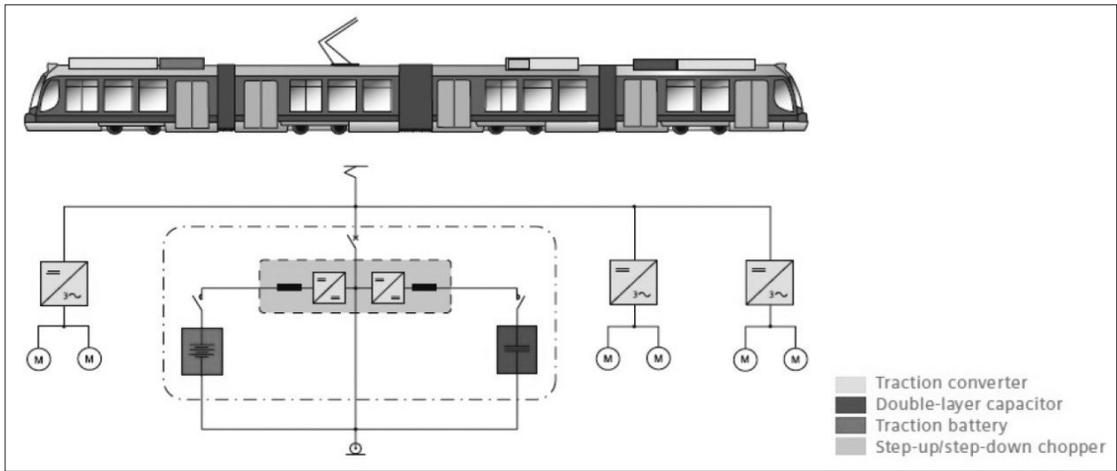


圖 8 Avenio 系統供電原理

#### (六) 採用何種無架空線方式營運

究竟採用何種無架空線方式營運，除涉及建造、營運及維修等成本外，亦涉及營運安全、系統可靠度、完工時程與未來路線相容性等因素。目前無架空線技術以車上裝置超級電容與蓄電池設備或地面三軌供電兩種方式均可適合高雄環狀輕軌優先路段採用之無架空線車輛供電技術。

在引進創新技術時，須評估可能發生最大風險是否能被管控。存在的風險，基本上可由四大類面向（安全性、可負擔性、可靠性、永續性）來評量。

##### 1. 安全性 Safe

- 安全 Safety

##### 2. 可負擔性 Affordable

- 建置成本 Capital Cost
- 營運維修成本 O&M Cost

##### 3. 可靠性 Reliable

- 營運實績 Proven Reliability
- 性能限度 Performance

##### 4. 永續性 Sustainable

- 專利技術 Proprietary
- 再生能源 Regenerative
- 發展成長性 Evolution

技術上，無架空線供電技術的選擇，與路線線形特性與限制條件具有強烈依賴性，包括幾何坡度、專有路權擁有優先等級等。正確選擇何種無架空線供電技術，主要關鍵考量因素在於，最大無架空線行駛路段長度，若以車載儲能系統與地面連續供電系統來作比較，前者系統技術受限更大。同樣地，若採用共享路權，預期將會增加輕軌列車行駛時間，這對於車載儲能系統亦是相當不利的。另外，列車行駛太大的坡度（超過 7%），不論採用何種無架空線供電技術均是一種艱困的挑戰。



若採用涉及特定專有技術之無架空線供電系統，將影響未來營運維修成本。地面連續供電系統，因安全考量，列車行駛佔據的路段才會通電，此一原則能確保現場的電源軌絕不會被行人所接觸，但使用特殊編碼與列車偵測技術，無庸置疑係為特定專利技術。另，雖然車載儲能系統市場技術較為普遍，相同地，考量月台候車乘客安全，充電電力來源，通常亦被要求在列車進站停妥時，車站充電軌才會送電，每家廠商仍有其獨特的設計，專利技術問題依舊無法避免。

就系統相容性、建造成本、可靠度、維修、施工時程及對環境影響等因素考量，似乎以車上裝置超級電容混合電池裝置較適合高雄環狀輕軌優先路段採用之無架空線供電方式。然而，高雄環狀輕軌統包工程第一階段招標，採開放態度，只要廠商提出之技術方案，(1) 該無架空線技術具有營運實績，或(2) 該無架空線技術已在既有營運線上通過系統綜合測試，經相關營運單位認證，或(3) 該無架空線技術需經具公信力之驗證單位提出證明文件建議該技術符合安全規定或建議該技術已達載客營運之條件，均可採用納入評比。

### 三、高雄之無架空線輕軌系統

高雄環狀輕軌系統建置，採用 100% 低地板車輛、無架空線供電系統、優先號誌系統、節能減碳等作為，掌握符合目前輕軌硬體發展的世界潮流趨勢，以充分發揮輕軌系統的優勢。

舊式輕軌車輛為高地板設計，月台高度

約 100 公分，乘客須踩階梯上月台進入車廂，上下車極不方便。如今技術進步，改變輕軌車輛地板的結構設計，由高地板演變為 70% 低地板，到今日 100% 低地板。100% 低地板車廂內平順無階梯，方便推嬰兒車乘客或行動不便乘客使用，創造友善、幸福城市，提升城市形象。高雄環狀輕軌車輛全車採用 100% 低地板設計，車內地板距離路面高度僅 35 公分，乘客可以從月台直接上車。

輕軌列車推進動力來源主要係電力，一般傳統架空線在安全上或景觀上造成疑慮，近年來輕軌技術發展日新月異，已發展採用無架空線方式供電設計，如前文所述，有地面軌連續供電方式或車載儲能設備超級電容於車站充電方式。為維護都市景觀，維持海洋都市廣闊碧藍天空，高雄環狀輕軌系統採無架空線方式提供電力予車輛行駛。

高雄環狀輕軌第一階段工程於 102 年 1 月順利完成評選，車輛由西班牙廠商 CAF 公司承造，屬 CAF 所發展 URBOS 3 系列低地板車輛，目前使用於全球各大都市。URBOS 3 採用車載儲能設備超級電容 + 電池無架空線技術，可搭配車輛使用再生煞車來回收電力供後續車輛行駛動力，在西班牙城市具實際營運實績，高雄則為亞洲第一條引進全線採無架空線供電之輕軌系統。

平面建造型式之高雄環狀輕軌系統，採隔離路權之 B 型路權型態，於交叉路口採用優先號誌通行，並整合平面道路交通號誌，讓輕軌車優先穿越路口，使其行駛不受其他地面交通干擾。交叉路口除提供輕軌優先外，同時設置警告燈號、警告音響、列車接近偵



測裝置，預先淨空路口，透過有效的號誌設計，降低輕軌系統引進後對路口的交通衝擊。

高雄環狀輕軌除高架路段外，皆為嵌埋式植草軌道，輕軌路廊範圍內，除了路口外，都會鋪上透水的綠草地，較現有汽車行駛的柏油路面，更具環保、節能、減碳，與降低都市熱島效應的效益。

軌道工程採用彈性包覆材，將鋼軌兩側及底部進行支承及包覆，對於噪音及振動有良好的抑制效果（約可降低 8-12dBv）減少對沿線居民的影響。

高雄環狀輕軌系統為節能減碳綠色運輸系統，尤以引進全線無架空線供電系統、超級電容車載儲能技術，不僅全國首見，亞洲第一，更是領先世界各大城市輕軌系統，為一創新技術。概述如下：

#### （一）達成無架空線技術所需設備

自我供電系統（ACR 系統）為裝設在列車上之裝置。該系統包括 2 組電力儲存模組箱，可使傳統輕軌車輛增加 2 項功能：

- 可增加再生電力，因該系統可在煞車操作時回收並儲存列車之動能，如此可大幅提升車輛之能源效率，因煞車時動能轉換儲存之電力稍後可再被使用。
- 使列車能行駛於無架空線路段，此項功能可減少對市中心或古蹟區的視覺衝擊，並可使用於無法裝設架空線之區域。

自我供電系統之設計目的，能應付環狀輕軌路線中無架空線之路段，高雄環狀輕軌

所使用之設備包括 2 個 ACR 箱，每個箱包含數串超級電容模組及 1 套電池模組。

每列車 5 車廂的輕軌電車自我供電系統有 2 個 ACR 箱。使用於每個 ACR 設備中的儲能模組，基本上由兩個區塊組成，如圖 9 所示：

- 一個由數個超級電容串及電池構成的儲能模組。
- 一個 DC/DC 裝置和相關的電子控制裝置。

ACR 上所使用之儲能模組由超級電容及電池構成，如圖 10 所示。儲能模組依照超級電容及電池技術進行設計，用於高雄環狀輕軌之系統最大特色為，超級電容所儲存之容量（4.1kwh/ 模組箱）比其他類似系統高出很多（以 2012 年招標當時而言）。因此該系統可提供極高之動力能力，亦即具備更高之無架空線行駛性能，以及更強之煞車動能回收能力。

超級電容技術目前正在蓬勃發展，並使用於許多應用中。較之其他類似儲能系統（全使用電池），超級電容可提供更高之能量儲存密度以及特別強大之操作功率，讓車輛的行駛性能未因採用無架空線技術而有所折扣。

在無架空線供電區域，ACR 設備可以供應列車運行所需要的能量，由於 ACR 系統與集電弓為並聯，ACR 設備在有或無架空線運行時都有能力回收煞車能量。

超級電容器 / 電池模組無直接與架空線連接；因此，需設置 DC/DC 轉換器以控制超

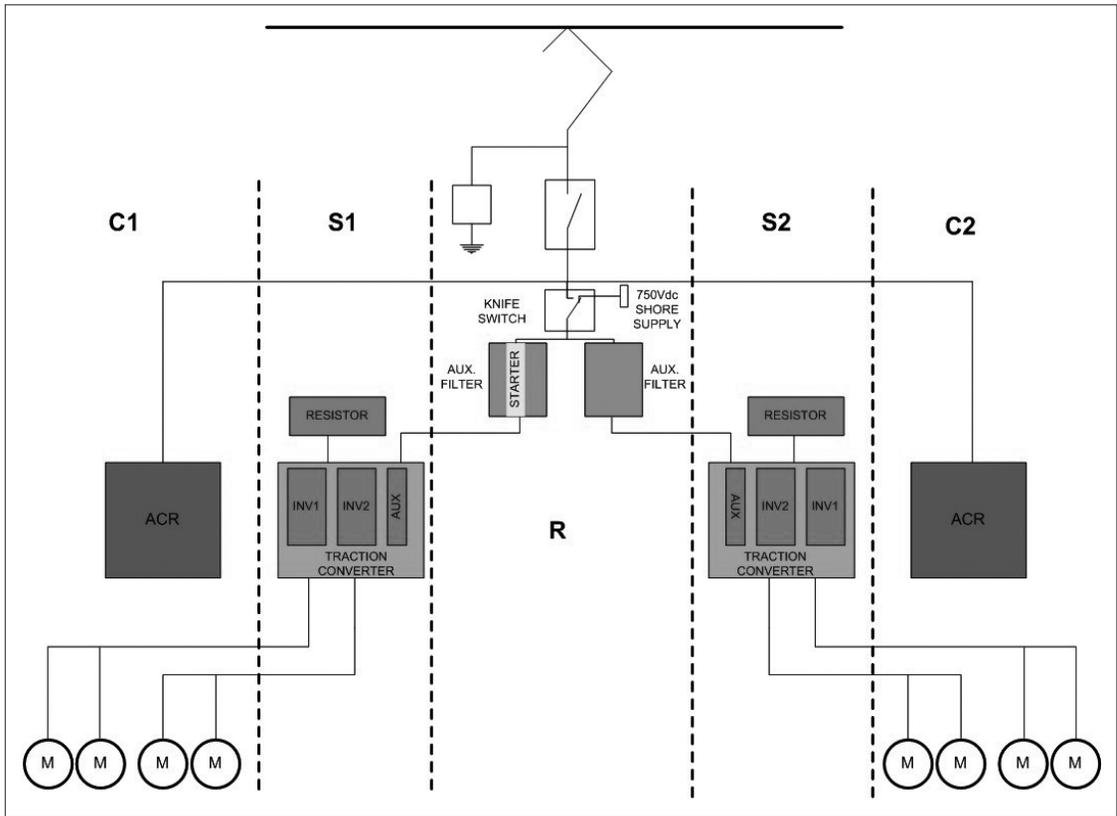


圖 9 列車電力架構圖

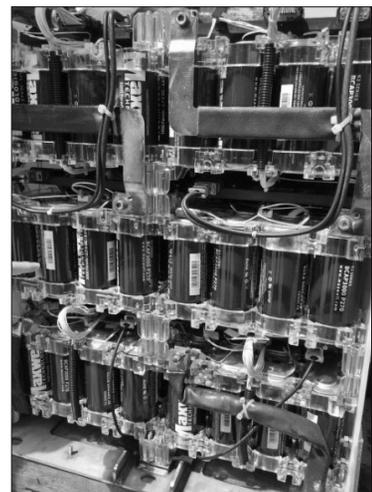
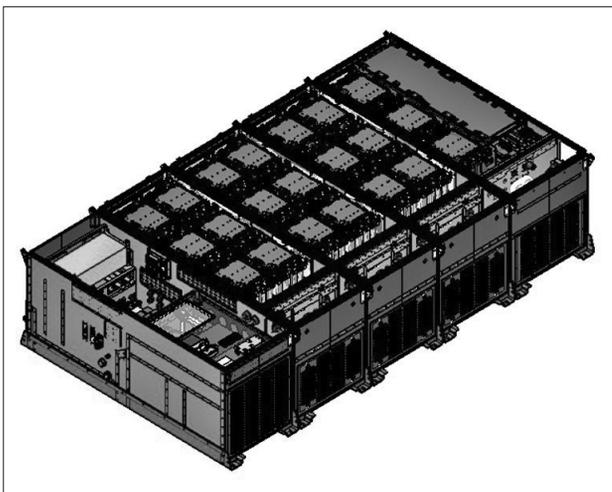


圖 10 ACR 超級電容及電池之儲能模組

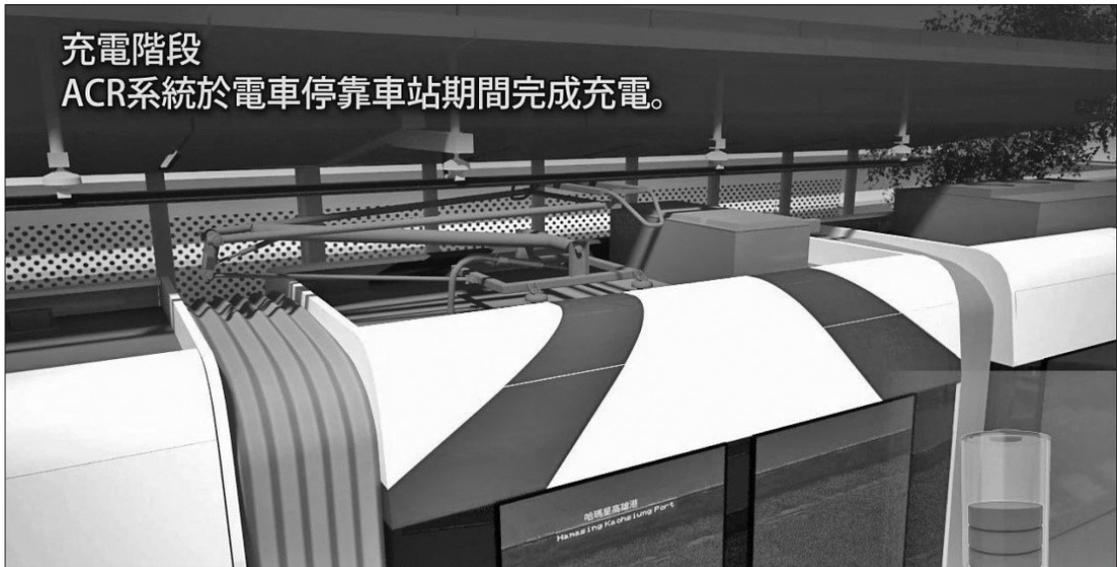


圖 11 利用列車停靠車站期間完成充電

級電容器中的能量流量，為一個雙向轉換器，即可以回收能量並且執行充電運作，再將電力供應給列車。

為保證最大的效率和性能，ACR 系統係從 ACR 控制單元利用先進之控制演算法進行管控，因此，在節能路段的無架空線運作期間，來自輔助變流器和牽引設備的需求情況下，可以保證與電力供應設備間之完美協調，也就是搭配智慧能源管理系統，以達到節能效果。

#### ● 超級電容器

超級電容器允許以供應軌道系統牽引設備所需的極高瞬間功率需求。在雙層電氣化學結構電容器的超級電容器 (EDLC, 雙層電氣化學結構電容器) 中，雙層電極使電容組件之容量可增加至現今其他電流技術所無法達到的值。這些裝置的能量密度與容量較電解液電容器的能力密度和容量高出數千倍。

由於這些裝置在能量儲存期間，沒有任何化學反應，所有的程序純屬物理性。其機制可完全逆轉，並且可以加載卸載百萬次。

#### ● 電池組

ACR 系統中的電池組是基於 NiMH 的技術，其特色為具備大能量容量，適合作為備援電力。由於其大容量特性結合超級電容器的高功率特性，使每個應用方案得以達到最佳能量 / 功率比率。

#### (二) 快速充電電源模組設計

每一候車站均設置一套設備模組 - 快速充電電源供應系統 (SCSE)，可在列車抵達車站時，使充電區通電，以便對列車之車載儲能系統 (超級電容所組成之自我電源供應系統 ACR) 充電，並於列車離站時停止通電，俾利列車利用超級電容所儲存之能量從一車站駛往下一車站，無須傳統的架空線，如圖 11 所示。



為確保安全，此項送電 / 停止送電之操作，係依據安全完整性等級 (Safety Integrity Level) SIL 2 發展。

此 SCSE 操作模式為靜態模式，列車在停止狀態下升起及降下集電弓。快速充電電源供應系統包含於車站一條鋁製導電軌，裝設高度為 3.85 公尺，該導電軌之通電與斷電，係由高流量充電控制器 (CCS) 自動控制饋電。

快速充電電源供應系統依據下列操作程序於各車站對無架空線之營運車輛供應電力：

1. 列車駛入車站充電區定位點 (位於導電軌下方)。
2. 列車自動升起集電弓，並與導電軌接觸。
3. 裝在列車頂上之編碼訊息發送器 (TMC) 透過集電弓發出編碼訊息傳給鎖碼訊息解碼器 (AMC)。
4. 鎖碼訊息解碼器 (AMC) 裝置解碼後傳給高流量充電控制器 (CCS) 裝置。
5. CCS 裝置檢查 TMC 訊息與 Wheel Evaluator 訊號比對是否正確 (安全狀態)。正確時，CCS 裝置送出「送電要求」給電流接觸器。
6. 電流接觸器開啟導電軌成為帶電，從而啟動充電程序。
7. 列車充電結束時，駕駛員按下關門指令，集電弓開始降弓。
8. 列車駛離車站，車輪駛過車輪偵測器 (Wheel Sensor)，送出列車離站訊息。
9. CCS 裝置收到列車駛離車站訊息，對電流接觸器送出「關機請求」。
10. 電流接觸器使電路開路，導電軌關閉電源，完成整個斷電程序。

以上快速充電電源供應系統 (SCSE)，為統包商 CAF 針對高雄環狀輕軌工程第一階段專案特性，開發設置的一套獨有系統，具高度專利技術性。

### (三) 智慧能源管理系統

在無架空線系統中，電力煞車期間，牽引馬達所產生的能量被儲存在 ACR 系統中供後續使用。

在牽引和巡行階段期間，列車由 ACR 系統饋電，在煞車期間，牽引馬達所產生的能量又被儲存在 ACR 系統中，如圖 12 所示，係因系統設計使用超級電容技術，利用超級電容快速充電的特性，讓系統擁有極高的能量回收率。

ACR 模組可回收 27% ~ 32% 的能量，扣掉 ACR 設備的重量影響多耗能 5%，約可節省 22% ~ 27% 的能源，整體而言，雖然裝置 ACR 設備多花了一些建置成本，但以節能與降低營運成本的角度而言，是一種既環保且經濟的有效作法。

ACR 系統容量與架構依照旅程需求 (無架空線站間距離長度) 來設計決定。每一列車 2 組 ACR 模組，每一 ACR 模組 4.1kwh，充一次電可行駛 1.4 公里以上。若將每次無架空線行駛所需消耗的電力記錄，呈現自然分配曲線，可用系統設計容量的決定，盡可能極大化涵蓋所有的旅次，不足的例外，以預防或備援矯正措施來彌補，達到硬體重量之最適化，如圖 13 所示。

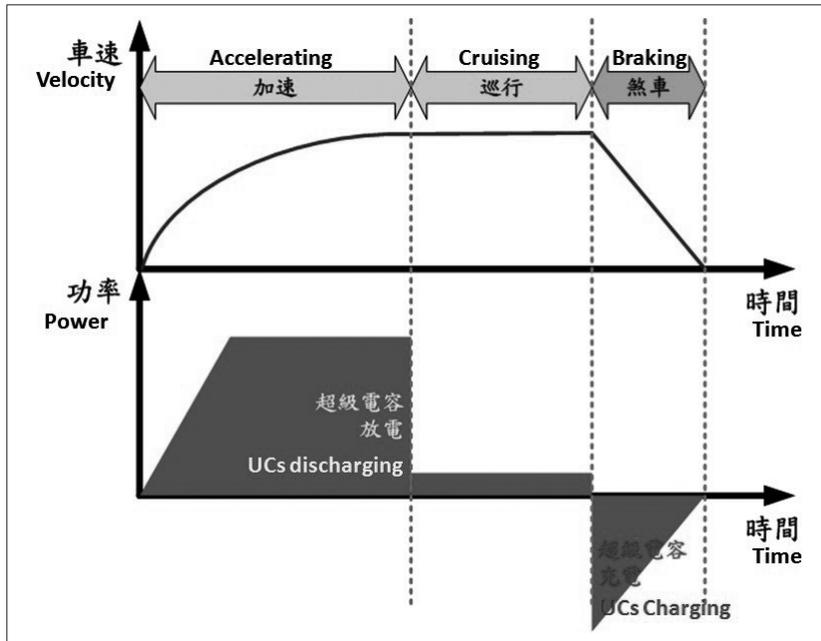


圖 12 列車減速回收煞車電力

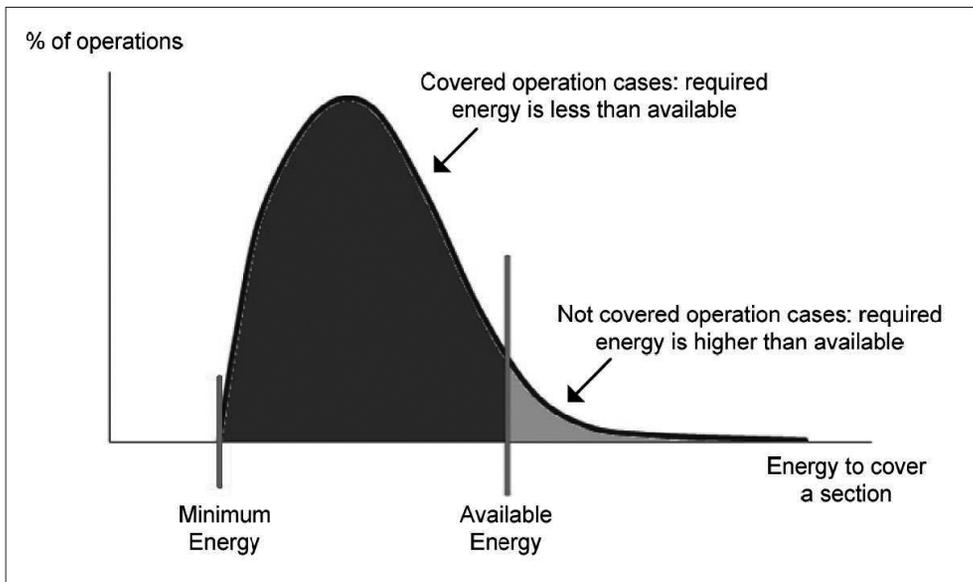


圖 13 能量使用之機率分佈曲線

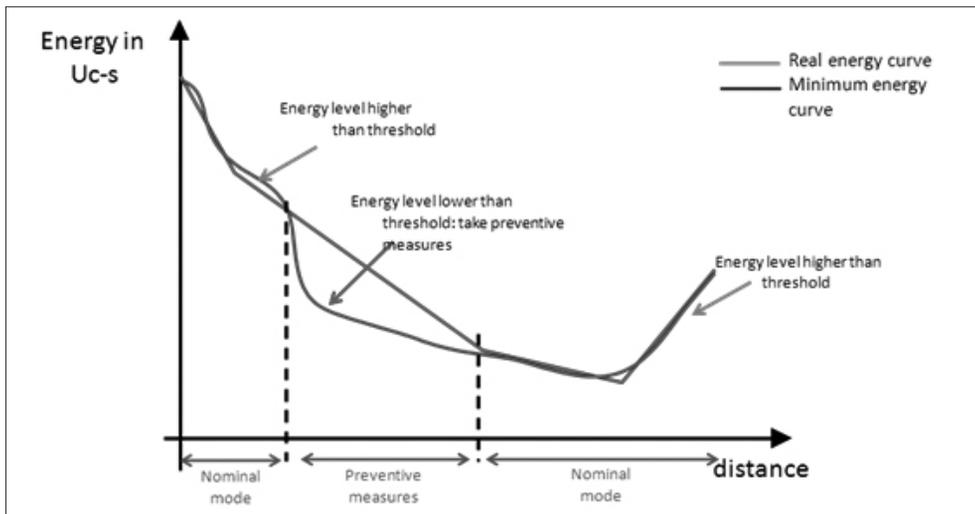


圖 14 車輛行駛到站距離與電能存量變化示意圖

以廠商於西班牙 Seville 實際量測顯示，1 個 ACR 4.1 kwh，在無架空線站間 (約 483m) 絕大部分消耗 0.8 ~ 1.9 kwh 完成行駛，包含不預期的停等。

因全程無架空線，只靠進入車站停站時間充電，有限的電力容量，必須做最佳化的使用，依照 (1) 車輛到站距離，與 (2) 監控電能存量，來調節車上電力負載如空調設備等，進行智慧管理能源。

為將可用能源程度水準盡可能提升，必須採用幾種措施與管理模式。於是將能源管理分為下列三種管理模式層次，如圖 14 所示：

1. 正常模式：即正常行駛速度、及空調運轉下，提供乘客舒適的搭乘條件。
2. 預防模式：即在不減損列車行駛性能下，預防性降低能源的使用情形，例如降低空調設備的運轉，以增加列車行至下一個充

電站之機率。

3. 救援模式：即降低列車行駛性能，關閉客車廂空調系統，車輛以慢速運行駛離正線或啟動備援電池電力，進入下一車站充電。

#### 四、高雄環狀輕軌營運

##### (一) 計畫說明

為提昇高雄地區民眾使用大眾運輸習慣，使紅、橘兩線捷運系統充分發揮效益，強化大眾運輸系統整體路網及接駁運輸服務，以及基於市區整體都市發展，配合台鐵高雄站及臨港線沿線鐵路用地跨區更新計畫，將高雄市區既有台鐵臨港線鐵路，規劃成輕軌路線，並配合高鐵、台鐵、公車等轉運站與轉乘設施規劃，建構完整市區交通網路。

高雄環狀輕軌路線貫穿市區 7 個行政區域，連結高密度住商中心、醫療、文教、商業購物中心、多功能經貿園區、亞洲新灣區、

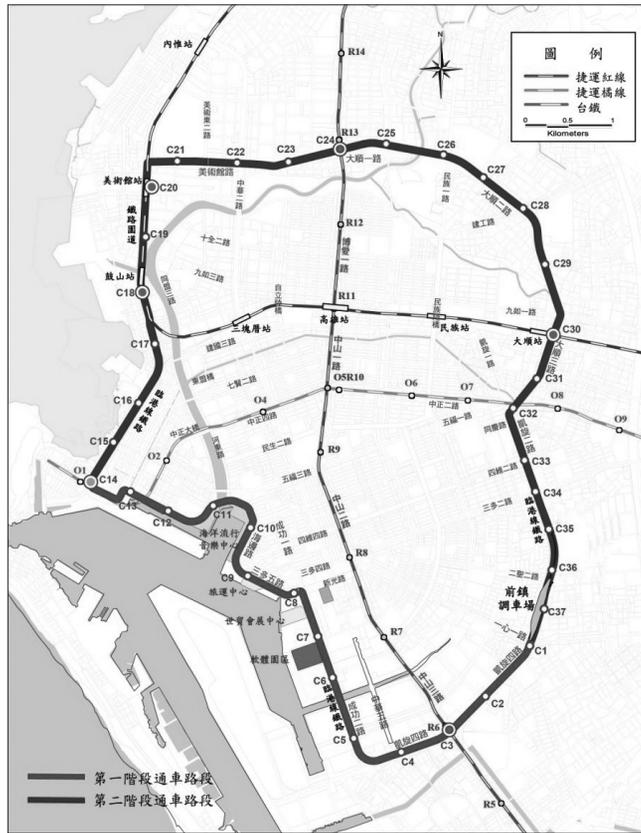


圖 15 高雄環狀輕軌路線示意圖

駁二藝術特區、哈瑪星、愛河、壽山、柴山、美術館園區等，是一條通勤兼具觀光路線。

亞洲新灣區內重大建設，包括高雄軟體科學園區、中鋼總部、高雄展覽館、高雄市立圖書館總館、高雄港埠旅運中心、海洋文化及流行音樂中心等，輕軌進入亞洲新灣區內，串連高雄多元化的港灣建築，打造兼具港都特色與交通便利的高雄新核心。這項計畫的完成，將開創大高雄城市軌道運輸服務新里程碑，並有效吸引會展、流行音樂、文創、觀光等新興產業進駐，帶動都市整體發

展，經濟成長。

本建設計畫行政院 101 年 11 月 26 日核定同意興建，總經費 165.37 億元，路線自凱旋二路旁台鐵臨港線路廊往南佈設至凱旋四路後，右轉進入成功二路西側台鐵路廊續往北行，至新光路口，進入高雄港區腹地，沿海邊路、第三船渠旁計畫道路、蓬萊路、臨海新路、西臨港線鐵路廊帶、美術館路、大順一～三路後，再銜接凱旋二路，形成一環狀路線，全長 22.1 公里，設置 37 座候車站，一座機廠，採平面型式設置，如圖 15 所示。



環狀輕軌平均站間距離約為 614 公尺，主要行駛人口集中都會區內，採平面興建，平均營運速率約 17 ~ 20 公里 / 小時；在近年人口結構逐漸老化，無障礙空間需求更形重要下，參考歐洲德法等先進國家，引進現代化友善、便利之 100% 低地板車輛，車輛地板距軌道面僅約 35 公分並與月台高度同高，車廂內平順無階梯，提供無障礙乘車空間，方便老人、孕婦、小孩及行動不便乘客上下車。

## (二) 法規修訂

### 1. 大眾捷運法修訂

配合輕軌運輸系統具有因地制宜特性，可以混合使用專用、隔離及共用等路權等型式，因其功能與捷運系統相當，交通部於 102 年 5 月修訂「大眾捷運法」，以符合平面輕軌特性。

本次大捷法修訂(第 3 條)，依大眾捷運系統使用路權型態，重新定義為完全獨立專用路權及非完全獨立專用路權二類，並增列非完全獨立專用路權者，其共用車道路線長度，以不超過全部路線長度四分之一為限，以及為提高非完全獨立專用路權大眾捷運系統之準點率，以及考量路口行車安全、行人與車行交通狀況、路口號誌等因素下，增列須設置優先通行或聲光號誌。

另為明定共用車道路線維護責任之歸屬，明確規範非完全獨立專用路權之大眾捷運系統地面路線之設置標準、規劃、管理養護及費用分擔原則(大眾捷運法第 24-1 條)。

大眾捷運法第三條所稱非完全獨立專用

路權之大眾捷運系統以下文章簡稱為平面輕軌系統。

### 2. 道路交通法規修訂

鑑於平面輕軌系統行經路段與現行行駛道路之各類用路人共用道路情形，為明確輕軌列車及汽、機車駕駛人行駛或行人使用共用道路時應遵守或禁止之行車秩序規定，爰將道路交通安全規則、道路交通管理處罰條例，以及違反道路管理事件統一裁罰基準及處理細則等法令配合檢討修正，並已於 104 年 8 月 15 日公佈實施，法令修訂簡述如下，相關法規修訂彙整如表 1 所示。

#### (1) 道路交通安全規則

- 增訂駕駛輕軌列車司機員應持有小型車以上職業駕駛執照(第 61 條之 1)。
- 增訂汽車、慢車行駛於輕軌共用車道時(C 型路權)，聞或見輕軌列車臨近警號時，應即依規定變換車道，禮讓其優先通行，並不得在後跟隨迫近。(第 94 條、第 126 條)
- 增訂汽車、慢車及行人通過輕軌共用通行之交岔路口應注意遵守之行車秩序規範。(第 104 條之 1、第 130 條之 1 及第 135 條之 1)
- 為確保維護輕軌之營運效率與安全，增列汽車在輕軌共用通行之交岔路口不得倒車之規定。(第 110 條)

#### (2) 道路交通管理處罰條例

- 增訂汽車、慢車駕駛人聞或見輕軌列車之聲號或燈光，不依規定避讓或在後跟隨迫近之處罰規定，汽車處以 600 至 1800 元罰鍰，慢車處以 300 至 600 元罰



表 1 道路交通法規修訂彙整表

項次	法規名稱	修訂條文
1	道路交通安全規則	修正條文第 3 條、第 45 條、第 50 條、第 61 條之一、第 74 條、第 76 條第 94 條、第 110 條、第 104 條之 1、第 126 條、第 130 條之 1 及第 135 條之 1
2	道路交通管理處罰條例	修正條文第 45 條、第 50 條、第 50 條之一、第 63 條、第 74 條
3	違反道路交通管理事件統一裁罰基準及處理細則	修正條文第 7 條之 2、第 7 條之 3、第 8 條之 1、第 45 條、第 50 條、第 53 條之 1、第 63 條、第 74 條、第 76 條、第 80 條
4	道路交通駕駛人違規記點及汽車違規紀錄作業處理要點	修正條文第 8 條之 1
5	高雄市妨礙交通車輛處理自治條例	修正條文第 85 條之 5
6	道路交通事故處理辦法	修正條文第 3 條
7	道路交通安全講習辦法	修正條文第 8 條之 1

本計畫整理

鍰。(第 45 條、第 74 條)

- 增訂汽車駕駛人在輕軌共用通行交岔路口上倒車之處罰規定(600 至 1200 元罰鍰)。(第 50 條)
- 增訂汽車駕駛人在輕軌共用通行交岔路口違規闖紅燈及紅燈右轉之處罰規定，以及記予違規點數三點，闖紅燈處以 3600 至 10,800 元罰鍰，紅燈右轉處以 1200 至 3600 元罰鍰。(第 53 條之 1，63 條)

### (三) 初、履勘

輕軌運輸系統屬大眾捷運法規範非完全獨立專用路權，營運前依照「大眾捷運系統履勘作業要點」辦理初履勘作業。

對平面輕軌而言，「大眾捷運系統履勘作業要點」所訂之可用度及妥善率目標，是大挑戰。

1. 作業要點規定系統可用度

- (1)需達 99% 以上。
- (2)系統或列車延誤超過 90 秒之異常事件或事故，就必須列入紀錄。
- (3)5 分鐘以上事件不得超過 2 件。
- (4)系統可用度

$$= \left( \frac{\text{系統試運轉時間} - \text{系統延誤影響時間}}{\text{系統試運轉時間}} \right)$$

2. 作業要點規定系統妥善率

- (1)須達 90% 以上。
- (2)平均列車妥善率 = 平均每日(尖峰)可用車組數 / 平均每日全車隊車組數。

高雄輕軌為一平面型式，有別於封閉型式捷運系統，輕軌由司機員目視駕駛，雖規劃路口優先號誌，然道路交通狀況瞬息萬變，行駛時仍須隨時注意用路人、汽機車的交通行為，因平面道路狀況因素，列車延誤超過 90 秒機率大，對輕軌進行系統穩定性測試，是大挑戰。



表 2 環狀輕軌運量累計圖表



另在實施系統穩定性測試時，亦發現備用列車多寡影響測試時系統妥善率能否達到 90%。

高雄環狀輕軌 101 年規劃車隊規模時，考量道路交通狀況，班距設計以 6 分鐘發車密度，以免干擾橫向道路交通，備用列車數亦參照封閉型式捷運系統，採尖峰所需列車數 10%，故第一階段尖峰 7.5 分鐘班距，車隊規模為 9 列車 (8 車上線，1 備用車)，全線營運時尖峰 6 分鐘下，車隊規模為 24 列車 (21 車上線，3 備用車)。

考量平面輕軌特性，高雄環狀輕軌第一階段系統穩定性測試，採 6 列車上線、3 列車備用、班距 15 分鐘之營運模式，通過初、履勘測試。

#### (四) 輕軌營運

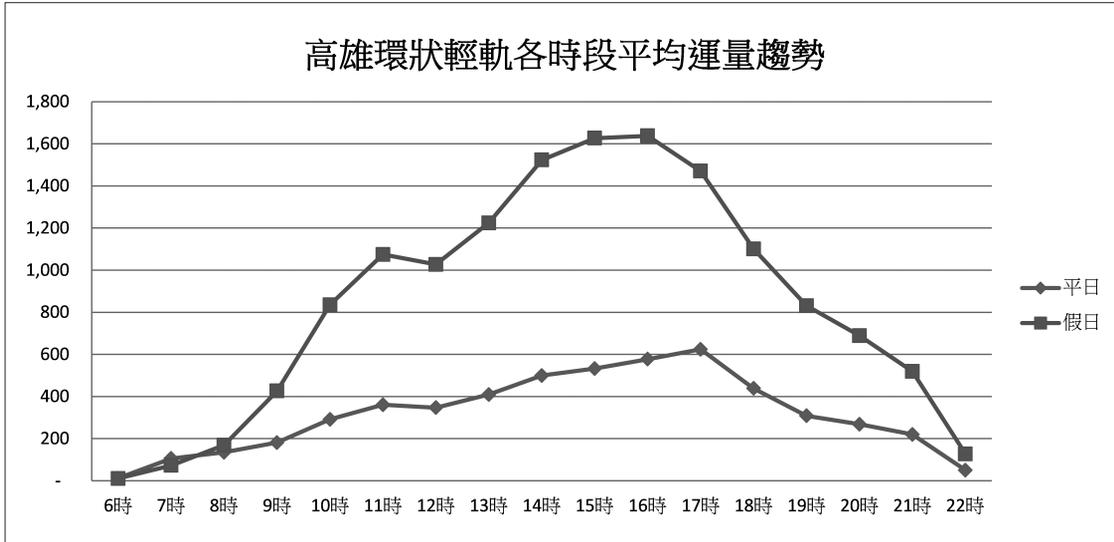
高雄環狀輕軌 104 年 10 月 16 日部分路段先行通車營運，讓民眾熟悉新型運具運作模式，由籬仔內站 (C1) 至凱旋中華站 (C4)，106 年 10 月 1 日第一階段 8.7 公里 14 座候車站正式全線通車營運。

輕軌營運迄今 (107 年 5 月)，搭乘人數已累積達 500 萬人次，如表 2 所示，營運時段由早上 7 點至晚上 10 點，班距 15 分鐘，從開始每天 800 人次，至今約 7,000 人次，單日最多搭乘人數達 3 萬人次。

統計民眾搭乘特性，無論平日、假日乘坐高峰集中在中午至下午 6 點時段，如表 3 所示，顯示目前營運路段，對通勤族尚無法有效吸引搭乘，仍以觀光旅遊為主，待服務範圍擴大後，才能兼具發揮運輸服務及觀光旅遊。另一方面藉由時運量分析，作為日後營運機



表 3 高雄環狀輕軌各時段平均運量趨勢



構遇大型活動列車調度規劃之參考依據，如每年 12 月份舉辦大氣球遊行活動、跨年等。

輕軌收費系統屬開放型式，民眾搭乘可於月台售票機購票，或持電子票證票卡於月台上或列車上刷卡，無封閉式捷運系統閘門設計，初期查票以補票為主，不處以票價五十倍之違約金(大眾捷運法第 49 條)，畢竟輕軌在國外近 200 年歷史，民眾對輕軌運行模式習以為常，生活作息早已習慣，然高雄輕軌是台灣第一條、為新型運具，須給予民眾時間了解這新運具的營運模式。

統計 106 年 11 月正式收費後，一開始補票率 15.35% 至今(107)年 5 月下降至 2%，如表 4 所示，顯示民眾漸習慣輕軌收費模式。

國內 4 家電子票證公司票卡(一卡通、悠遊卡、有錢卡、愛金卡)均可於高雄環狀

輕軌上使用，統計民眾搭乘方式，約 84% 持電子票證搭乘、14% 於月台售票機購買單程票，2% 為團體購票(10 人以上搭乘)，如表 5 所示。

### 五、結論與建議

為避免道路壅塞，減少平面車流，留給城市乾淨少污染的空氣，復以民眾保留都市天際線意識的抬頭，伴隨科技的演變，超級電容技術的興起，無架空線輕軌系統是為城市大眾運具的另一選項。

配合都市結構改變，民眾旅運需求增加，軌道運輸為未來發展趨勢，高雄整合既有鐵路資源，引進低成本、短工期、高效益之輕軌系統，同時整合捷運系統，構成具規模之軌道路網，有益於高雄都會區整體大眾運輸系統之發展。



表 4 高雄環狀輕軌補票率統計表

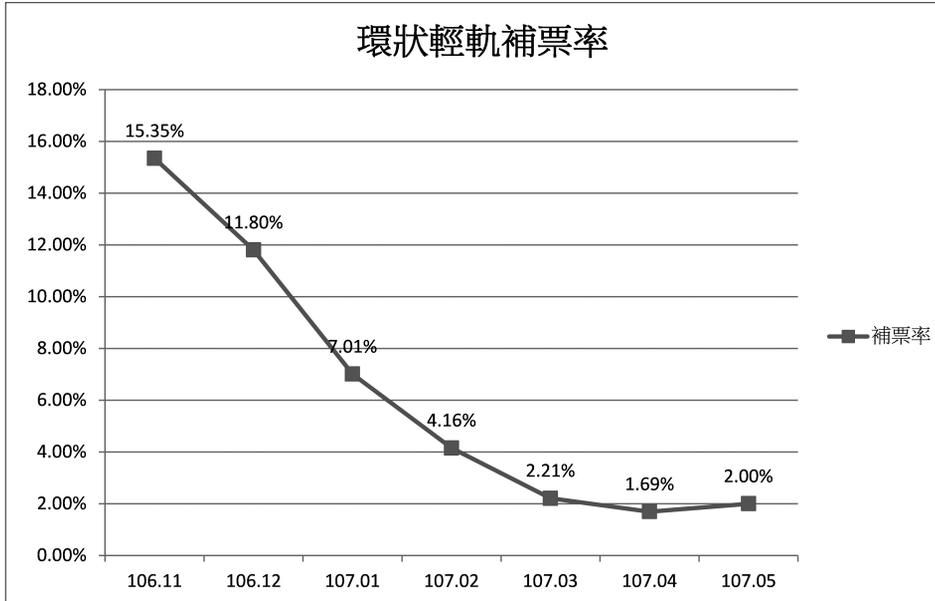
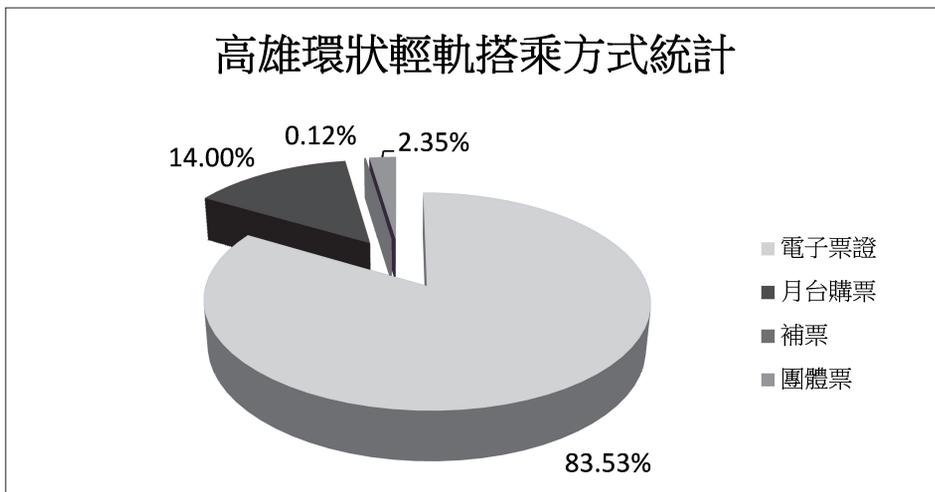


表 5 高雄環狀輕軌搭乘方式統計表



高雄環狀輕軌 C1(籬仔內站)～C14(哈瑪星站)已通車營運，尤以引進全線無架空線供電系統，超級電容車載儲能技術，不僅全國首見，亞洲第一，更是領先世界各大城

市輕軌系統之一創新技術。惟高雄環狀輕軌路線，自規劃至營運，於實務過程，仍有下列建議，提供各界參考：



- (一) 大眾捷運法、道路交通標誌標線號誌設置規則、道路交通安全規則、大眾捷運系統履勘作業要點等，雖配合輕軌予以修法，但仍以封閉型之捷運系統觀念為出發點，致開放型之輕軌系統於營運上仍有其掣肘難行之處。建議國內已有高雄輕軌實際營運之經驗，滾動檢討相關法令規範，必更臻周全。
- (二) 多元之大眾運輸工具係互補而非相斥，建議應充分整合成完善的運輸網絡，以提供民眾多重選項，建構民眾搭乘大眾運具的環境及習性。
- (三) 參考國際估列輕軌車隊時，有鑑於輕軌採平面型式，路口為 C 型共用路權，均採取高備用列車數以因應營運所需，建議國內各都會輕軌系統規劃估算輕軌列車數時，宜考量輕軌特性，妥為評估核列。
- (四) 輕軌為平面道路運具之一環，以其具載運量大之特性，賦予道路行使優先權，但仍應與平面交通相容，建議營運機構對司機員之教育，適時加入尊重道路不同使用者之訓練。
- (五) 民眾守法態度之建立，有待「3E」－教育 (Education)、工程 (Engineering)、執法 (Enforcement) 三途徑；建議教育從學校開始並回饋至家庭；工程應規劃周延並兼顧人性化，使用路人配合並減少違規行為；執法應切實並提高違規之成本，以減少違規行為，各權責單位並應適時辦理，以全方位地建立民眾守法習慣。◆

#### 參考文獻

1. 高雄市政府捷運工程局，臨港線發展為輕軌捷運之規劃報告，2001年3月。
2. 「高雄環狀輕軌捷運建設」基本設計，台灣世曦工程顧問股份有限公司，牽引動力集電方式分析報告，2012.6.12
3. 「高雄環狀輕軌捷運建設統包工程第一階段」，車輛系統設計技術文件，西班牙卡夫股份有限公司，2014.6.24