

高運量電聯車車體材質及其結構設計

吳銘章¹ 陳虞仁²

摘要

電聯車車體結構除了本身要承受乘客的重量外，還要負擔所有裝置於車輛上的設備重量，因此在進行車體結構設計時就得將所有的負載因素考慮進來。當然首先必需決定所使用之材料為何，然後再對如底架、車頂、左右側壁及前後面板等各主要組件進行設計。當完成初步設計後使用有限元素分析模擬結構受力狀況，是否於應力容許範圍內。接著對首部原型車進行應力測試，並比對測試後之應力與先前模擬所得應力。另為確保車體的水密性，每部量產車於出廠之前均要進行嚴格的水密測試。

本文將就台北捷運高運量電聯車的結構組件、材料、結構強度及車體測試做一說明。使一般大眾對車體結構有進一步的了解，同時也對臺北捷運電聯車更加有信心。

關鍵詞：應力、有限元素、抗撞

The Material and Structure Design of Carbody of MRT Electrical Multiple Units

Ming-Chang Wu Y. Z. Chen

Abstract

The carbody structure of Electrical Multiple Unit vehicles shall be not only capable of withstanding total passenger weight but also the weight of all the equipment installed on the vehicle. During the design stage, the entire load factor for the structure should be considered. First of all, the material of the carbody structure should be decided. Secondly the main structure assembly, such as underframe, roof, sidewall and end-wall will be designed. After the primary design has been completed, Finite Element analysis will be used for simulating stress distribution on the carbody structure, showing whether the assembly's ability to withstand stress is within permissible limits or not. Subsequently, several types of carbody strength tests are performed on a prototype car, and comparisons of the stress values between the test results and Finite Element analysis are carried out. Furthermore, to ensure water-tightness, severe water-tightness tests for every single car will be carried out before delivery.

The content of this article includes the description of the assembly of carbody structures, carbody materials, structure strength and carbody strength tests. The purpose of this article is to provide the public with a better recognition of the design of carbody structure and to increase confidence in Taipei MRT Electrical Multiple Units.

Key Words : stress, finite element, crashworthiness

1. 臺北市政府捷運工程局機電系統設計處副工程司 10879@trts.dorts.gov.tw

2. 臺北市政府捷運工程局機電系統設計處助理工程員 10675@trts.dorts.gov.tw

一、前言

車體結構雖然只是捷運電聯車諸多系統中的一個子系統，卻是必須與其他子系統相互緊密配合的重要子系統，因此車體結構與其他子系統有諸多之介面。

車體底部需連接轉向架才得以正常行駛於軌道上；車體兩側也裝有車門才得以讓乘客進出於車廂與月台間；車體內部需要提供舒適的座椅、立柱、扶手、地板、空調及照明等設備才得以吸引更多乘客搭乘；車體底部尚懸掛許多機電設備如推進馬達、牽引換流器、煞車電阻、空氣壓縮機、空氣儲氣筒、煞車控制單元、輔助靜態換流器、充電器、電瓶及空調冷凝器等才得以成爲一部性能完整的車輛。此外，還有車載通訊設備與車載號誌設備裝置於車輛上，才可使得車輛能更安全的營運。

二、車體結構組成

一般而言，車體結構係由底架（Underframe）、車頂（Roof）、左右側壁（Side Wall）及前後面板（End Wall）等六大部份所組成（如圖 1、2、3、4），茲將各部組件之特性敘述如下：

（一）底架

車體底架係由兩組車端底板（End Underframe）以及多支橫樑（Cross Beam）焊接於車底邊樑而成，是爲車體結構中最堅固之部份；其上設有車廂地板（Car Floor）用以承載旅客重量；而其下方則安裝各項機電設備。此外，在車體發生意外碰撞時，其所產生之挫曲應力或衝擊動能亦藉由底架結構之彈性或塑性變形而加以承受或吸收。

其他尚有多項重要組件分述如下：

1. 防爬器（Anticlimber）：防爬器係焊接於車體底架兩端端樑處。當車輛發生碰撞時，防爬器可使車輛相互密合，避免碰撞車輛相互攀爬。
2. 中樑（Draft Sill）：中樑係爲車體底架端部之結構，用以扣接聯結器並承受聯結器之作用力。
3. 端樑（End Sill）：端樑結構電焊於車體底架端部，介於防爬器結構與中樑結構之間。
4. 承樑（Bolster）：承樑爲主要連接電聯車車體與轉向架之結構，用以承受由車體傳來的各種負荷。
5. 邊樑（Side Sill）：邊樑係焊於車體底架左右兩端，爲一連續性之結構件，用以承受各種垂直負荷及縱向撞擊負荷。

（二）車頂

車體之頂蓋係由車頂邊樑（Cant Rail）、車頂縱樑（Purline）、車頂橫樑（Carline）以及頂板（Roof Sheet）所組成。車頂結構通常用以支撐空調風管、蒸發器（Evaporator）與照明燈具等較輕之設備。因此，其結構強度之設計值較低。車廂頂板大多壓製成浪形斷面（Corrugated Sheet）以增大其撓性剛度 EI 值。

其他尚含有下列之重要組件：

1. 車頂橫樑：橫樑橫跨車頂之左右兩側，支撐車頂板及其他懸掛於車頂之設備。如有必要，可設計成具有弧度的車頂橫樑，以增加美觀。
2. 車頂縱樑：如果車頂懸掛重量甚大之設備，則車頂可考慮焊接縱樑，以增加車頂之結構

強度。

3. 車頂板：車頂板需有足夠之強度以支撐車頂設備，同時讓維修人員安全的在上工作及行走。車頂板必要時可設計成波形浪板，以增加其剛性。
4. 排水槽：車頂兩側應設計有排水槽，將雨水或洗車水排除車外。同時須注意排水不可流入車門機構，或影響乘客進出車門。

(三) 左右側壁

車體之側壁結構具有左右對稱之特性，通常由包含門柱、窗框在內之側架結構（Side Frame）以及側架外板（Side Sheet）所組成。當車體承受垂直負荷時，其側壁部份，除了承受彎曲應力（Bending Stress）外，尚需承受剪切應力（Shear Stress）之作用。

另外有下列三點注意事項：

1. 為考慮車輛整體之外觀，車體之兩側壁結構應有大小一致且數量相同之車門及車窗開口。
2. 上述之車門及車窗之開口不可與車體之整體結構相衝突。
3. 車側之車皮若採不銹鋼或鋁合金材質，可省去塗漆之成本。但如果採一般碳鋼系列之材質，則需表面塗漆以避免受大氣腐蝕。

(四) 前後面板

每一車體結構均有前後兩片面板，但就電聯車而言，除駕駛室（Cab）前端之面板稱為車端面板（Front End Wall）外，其餘各端之面板，統稱為車間面板。車間面板之結構較為簡單，主要係由面板支架及其外板所組成；而車端面板部份，則因其結構強度攸關駕駛員以及乘客安全甚鉅。因此，除了支架與外板之外，尚有抗撞支柱（Collision Post）等補強結構存在。此外，值得一提的是，鋼結構材料因強度大、韌性強、加工不易，致使其車頭造型略於單調缺乏曲線美感。因此，目前以鋼材所製之車體結構，其車頭部份大多加有 FRP 單板（Bonnet）。而此 FRP 單板，除了具有質輕、難燃、易於加工成型等特性之外，更可依業主或設計者之需要，調製成各種亮麗之顏色以及立體之造型，以美化車頭並增進車體美感。

前後面板的設計尚有幾點需要考量：

1. 車輛前後端面板若設計有流線性之造型，一方面可降低車輛行駛之風阻，另一方面可增加外觀之美感。
2. 隧道內若未設計有車輛兩側逃生之走道，則車輛前後端應設計有緊急逃生之通道，其寬度不能防礙殘障輪椅之行動。
3. 車端處需焊有直立式之抗撞支柱與端柱，以保護駕駛員之安全。



圖 1、車體結構組裝



圖 2、車體底架組件焊接



圖 3、電聯車天花板扣接件組裝



圖 4、電聯車地板安裝-鋪設橡膠地板

三、車體結構材料

在軌道車輛中，傳統的客車車體主要由碳鋼製造，其優點是可焊性好，但最大的缺點是腐蝕性嚴重且鋼結構自身重量大。後來，車體結構改選用耐候鋼製造，雖然抗腐蝕性能已有改善，但車體鋼結構的重量仍然很大。近年來，不銹鋼的材料已經普遍使用中，除了解決腐蝕的問題外，重量也減小了。但是如果全面滿足輕量化又抗腐蝕的要求，則鋁合金可考慮作為車體結構材料。

車體材料之選用一般計有下列三種：

(一) 碳鋼車體

此種車體之側架及底架通常由電弧焊（Arc Welding）結合，側架外板則由點焊（Spot Welding）固定於側架上。由於此種材料極易生銹，因此外板之內外側通常需要塗漆以避免銹蝕。一般而言，選用普通鋼材作為車體結構，而耐候鋼材則作為側架外板。此種車體之焊接極為簡易。

(二) 不銹鋼車體

除了車端底架，由於需承受較大之負荷與衝擊力而採高張力鋼材外，其餘部份均選用不銹鋼材料。由於不銹鋼材料之熱傳導係數較一般鋼材低，因此電阻式點焊成為主要製造方法。不銹鋼的防蝕能力極強，因此無需作表面塗漆處理，可省下保養維修費用。低碳系不銹鋼材（含碳量低於 0.03%）之配合使用，可避免電焊過程中鋼材表面產生碳化效應。

(三) 鋁合金車體

鋁合金車體最大的優點在於其車體較輕，可節省能源成本，但對軌道的衝擊負荷也較小。由於其表面硬度較低，因此易遭受破壞及污染，且由於此材料之熔點較低，因此製造時需有較高難度之鋁焊技術。

無論耐候鋼、不銹鋼或是鋁合金材料之車體，都有其各自的優缺點。表 1 列出了這三種材料的部份性能，作為參考。其中符號“◎”表示「很有利」；符號“○”表示「較有利」；符號“□”表示「普通」；符號“×”表示「不利」。

表 1、車體材料性能比較表

| | 耐候鋼 | 不銹鋼 | 鋁合金 |
|---------|-----|-----|-----|
| 車體需要塗漆 | □ | ◎ | ○ |
| 耐腐蝕性 | □ | ◎ | ○ |
| 車體加工難易度 | ◎ | ○ | □ |
| 車體材料費 | ◎ | ○ | × |
| 車體保養費 | × | ◎ | ○ |
| 焊接難易度 | ◎ | ○ | × |
| 車體壽命 | × | ◎ | ○ |
| 車體重量 | × | ○ | ◎ |
| 抗拉強度 | ○ | ◎ | □ |
| 耐火時間 | ◎ | ○ | × |

四、車體設計

正確的車體設計是保障車輛行駛安全的重要一環。一般而言，車體設計之主要工作，計有「結構設計」及「抗撞設計」二大項。

(一) 結構設計

車體的結構設計，可分為「強度設計」以及「剛度設計」兩項：

1. 強度設計

有關車體的強度設計，依據過去的設計經驗，可先建立一個初步的模型構想，然後使用電腦輔助軟體以有限元素法來模擬該模型在各種不同負荷狀況下之受力情形。若其結果確在安全範圍內，則可開始製造原型車 (Proto-type Car)，並對其進行應力測試，以驗證原模型模擬結果的適切性。否則，即需對此車體的結構補強並修正模型，以求測試結果與模擬輸出之數據不致差異過大。如此反覆修正後，才可進行量產車體的工作。

有關車體強度的設計流程如圖5示：

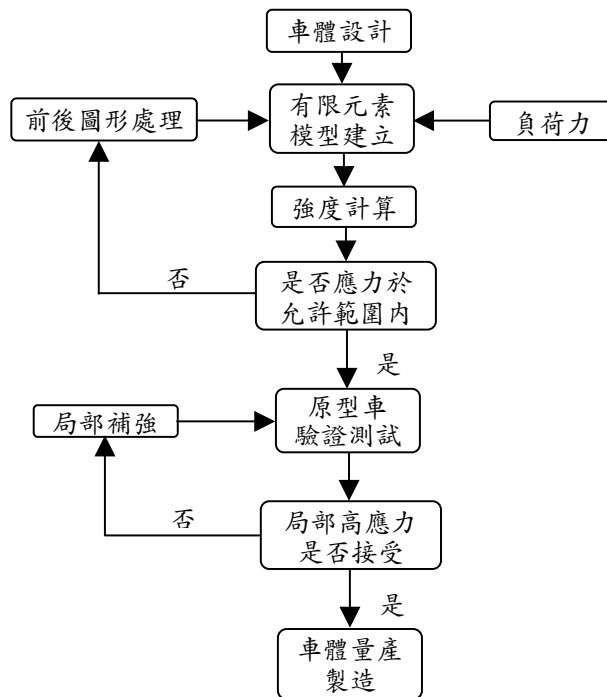


圖 5、車體強度設計流程

2. 剛度設計

剛度設計係車體結構於承受負荷時，將因彎曲力矩（Bending Moment）之作用而向下翹曲。因此，車體的結構設計除了應注意其強度以外，亦應考慮剛性是否足夠，以免在負荷過大時，因車體中央部位之撓曲變形量過大，影響車輛之使用壽命及車體底架設備正常功能。車體之設計應在任何負荷作用下，均能保持向上之拱勢（Camber）。

就車體的結構而言，通常需考量以下的設計：

- (1) 靜態力與挫曲力強度設計：設計車體具有一定的靜態強度與挫曲強度，可保障乘客之安全。
- (2) 動態及撞擊力強度設計：設計車體在營運期間，若受到聯結力或意外之碰撞，車體之結構仍舊保有一定的完整性，可保障乘客之安全。
- (3) 疲勞強度設計：設計車體在營運期間，受到車廂乘客數之變化，車體仍保有一定的疲勞強度，可保障車體的使用壽年。
- (4) 自然振頻設計：規劃車體結構之自然振頻，以避免車輛運行時，車體與轉向架或其他設備產生共振現象，可避免車體結構之破壞。
- (5) 空氣阻力設計：設計車體整體之外型，以減少車輛運行時所產生的空氣阻力，可節省營運能源。

另外，就施加於車體之負荷力而言，其方向及種類通常計有垂直力與縱向力兩種負荷力：

- (1) 垂直負荷力計有車廂乘客產生之負荷力、懸掛於車體設備之負荷力以及當車體被頂起時，由轉向架產生的負荷力。
- (2) 縱向負荷力計有施加在車端之壓縮力、施加在聯結器之壓縮力與張力、施加在緩衝器之壓縮力、施加在抗撞支柱與端柱之壓縮力以及施加在車頂側端之壓縮力。

以臺北捷運高運量電聯車為例，規範明訂下列五種強度設計值，其中W1表示空車設計重量；W2表示車廂座位滿載設計重量；W3表示車廂座位滿載外再含每平方公尺6位站立乘客時之設計重量；W4表示車廂座位滿載外再含每平方公尺7位站立乘客時之設計重量；W5係指結構設計用之設計重量：

- (1) 在W2及W4載重下，車體結構應可承受均勻作用在防爬器中央三分之一區域的1180 kN靜態壓縮力，車體任何結構件的最大應力不得超過材料降伏強度的80%。
- (2) 在W4載重下，車體結構任何結構件之最大應力不得超過材料降伏強度的60%。
- (3) 在W2及W4載重下，車體結構應可承受330 kN垂直負荷（上或下）及880 kN縱向壓縮力同時作用在防爬器中央三分之一區域，車體任何結構件之最大應力不得超過材料之降伏強度。
- (4) W1與W4載重下之車體垂直撓度最大不得相差20 mm。
- (5) 空車頂舉時，車體任何結構件之最大應力不得超過材料降伏強度的80%。

(二) 抗撞設計

車體結構抗撞（Crashworthiness）設計之目的，係當車輛在某一速度下發生碰撞時，其產生之能量，能儘量經由車端的吸能裝置吸收，以免損害車體主結構而傷及車內乘客。

一般而言，車輛的設計可要求在位於車體兩端底架之結構部位加設機械式保險裝置（Mechanical Fuse），並將其挫曲強度（Buckling Strength）設限在車體主結構強度之50%以下，使得車輛發生碰撞時，能藉其塑性變形來吸收碰撞能量，以確保車體主結構之完整。

車體結構之抗撞性，應設計當車輛發生碰撞時，先由聯結器及/或緩衝器之吸能裝置來吸收碰撞時所產生之能量；然後車輛間的防爬器相互密合。最後，過多的能量再經由車體兩端機械式保險裝置吸收（詳如圖 6）。

以臺北捷運高運量電聯車為例，規範明訂了下列碰撞強度設計值：

一列 W4 載重下之六車列車以 25 km/hr 速度碰撞另一列 W1 及 W4 載重且於駐車狀態下之六車列車；車體受損區域應侷限在各車端碰撞點處易於更新之機械式保險裝置。碰撞速度超過 25 km/hr 時，全列車之車端始得進一步潰縮以吸收碰撞能量。

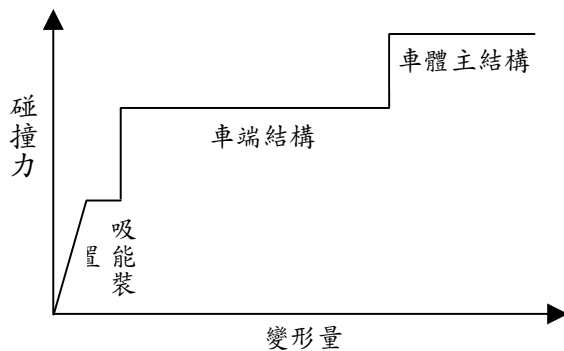


圖 6、車體能量吸收規劃示意圖



圖 7、車體結構強度測試

五、車體測試

當車體完成設計後就必須進行測試，用以驗證設計之正確性，車體測試主要可分為結構強度測試與水密測試兩大類。

(一) 結構強度測試

車體結構強度測試之目的，主要將車體實際所承受之負荷施加於實車上，並藉由應變計（Strain Gauge）、位移計（Displacement Gauge）以及電腦儀器設備，量測車體受力後之應力值及分佈情形，以驗證所設計之車體結構強度是否符合需求（如圖 7）。

結構強度測試包含車體壓縮測試、車體垂直測試與車體頂舉三種。進行測試時，所使用的車體除了要有完整的結構外，車體亦需安裝完整之車底設備或模擬其重量，設備托架及支撐物亦一如量產車般安裝。以下分別說明其測試內容：

1. 車體壓縮測試

測試開始時應將車體加載至相當於 W2 之重量。車體在測試期間由銷子及滾輪支撐。縱向及相當於 W4 的垂直載重應施加於車體上。本項測試主要在驗證車體結構強度符合第四章中所述之五項強度設計值。

2. 車體垂直測試

車體從 W1 逐次加載至 W2、W3 及 W4，並完整記載每一種載重下的應變與撓度，以驗證車體強度符合五項強度設計值。另外並量測於 W5 垂直負荷下之撓度值，以證明車體拱勢（Camber）仍然保持向上。

3. 車體頂舉測試

將所有維修及復軌所可能發生的頂舉情況施加到 W1 的車體上，以驗證車體強度符合五項強度設計值。

(二) 水密測試

本測試主要目的係為檢視車體結構完成焊接後，焊道區域或組件接縫處之水密性 (Watertightness)，避免車輛因發生滲水或滴水之現象而影響到乘客。進行測試時車門與車窗均緊閉且車間走道亦適當密封，然後以環繞在車體四周及車頂上方之噴嘴對車體噴灑水柱，並於水柱持續噴灑之情形下，檢視車內是否有滲水或滴水之現象 (如圖 8、9)。

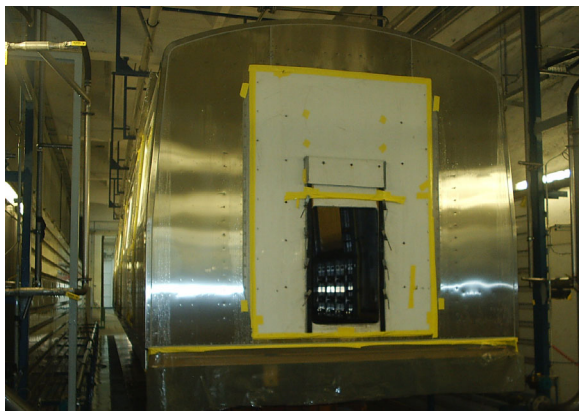


圖 8、車體水密測試 (完成結構焊接後)



圖 9、車體水密測試 (完成組裝後出廠前)

六、結語

臺北捷運電聯車車體結構有 30 年的設計壽命。因此從車體材料的選用、車體結構主要組件的設計、結構強度受力計算、原型車之負荷測試，都是為確保電聯車在使用年限內的安全性。除此之外考量台北本地降雨情形，每部車在出產前均要進行嚴苛的水密檢測，以確保車輛之舒適度。

為促進國內廠商之軌道技術及車輛自製能力，並配合經濟部工業局的工業合作計劃 (ICP)，本局採購電聯車時，均明定至少有部份電聯車要在國內組裝。從早期淡水線電聯車開始有兩列六車列車以「半散件 (SKD)」(Semi Knock Down) 方式於唐榮公司進行組裝外，新店/南港/中和線電聯車同樣以「半散件」方式，由中鋼公司於捷運北投機廠完成 108 輛電聯車組裝工作。而目前正進行中的新莊/蘆洲線電聯車廠商日本川崎重工公司更以「全製裝 (CBU)」(Complete Build Up) 方式將 162 輛電聯車交由臺灣車輛公司進行製造。除此以外，目前已經有國內自製的齒輪箱、空調設備、通訊設備、照明系統、座椅、扶手與窗戶玻璃等設備使用於電聯車上。

由此可知藉由電聯車的組裝已經逐漸提昇我國軌道車輛工業的技術水準，希望藉由本文之說明能讓更多有志於軌道車輛工業不論是個人或是產業界都能加入我國軌道工業行列，加速我國軌道工業技術的進步，有朝一日使我國電聯車製造水準能與其他先進國家一爭長短。

參考文獻

1. 臺北市政府捷運工程局，新莊線/蘆洲支線/南港東延段/新店線小碧潭站/捷運公司 24 列電聯車特別技術規範，民國 93 年 3 月。
2. 臺北市政府捷運工程局，臺北都會區捷運系統工程研討會論文集，民國 82 年。
3. 臺北市政府捷運工程局，臺北都會區大眾捷運系統規劃手冊(2004 版)，民國 94 年 7 月。
4. 臺北市政府捷運工程局，捷運常用詞彙，民國 80 年。
5. 交通部，捷運軌道車輛技術標準規範-高運量鋼軌車輛規劃基準，民國 92 年 5 月。
6. 歐陽成，臺北市政府捷運工程局機電人員訓練授證教材-捷運電聯車，民國 90 年 12 月。