

目錄 Contents

節能技術應用於軌道車輛.柳燦煌.鄭建榮.古寶興.黎世俊.黃明聰.葉士宗.王百祿 Energy-saving Technologies for VehiclesLiu,Tsan-huang.Cheng,Chien-jung.Ku,bau-hsing.Li,Shih-chun. Huang,Ming-tsung.Yeh,Shih-tsung.Wang,Pai-lu	1
臺鐵旅客遭受攻擊的風險管理.....孫千山.鍾志成.張開國.吳熙仁 Risk Management of Passenger Assaults for TRA Suen,Chian-Shan.Jong,Jyh-Cherng.Chang,Kai-Kuo.Wu,His-Jen	45
鋁合金應用在軌道車輛.....宋鴻康 The aluminum alloy Application of rail vehicles.....Song,Hong-kang	61
傳統鐵路電車線系統可靠度之研究.....張瑋麟 A Study on Reliability of Ordinary-Speed Railway Overhead Catenary SystemChang,Wei-Lin	68

節能技術應用於軌道車輛

Energy-saving Technologies for Vehicles

柳燦煌 Liu,Tsan-huang¹

鄭建榮 Cheng,Chien-jung²

古寶興 Ku,bau-hsing³

黎世俊 Li,Shih-chun⁴

黃明聰 Huang,Ming-tsung⁵

葉士宗 Yeh,Shih-tsung⁶

王百祿 Wang,Pai-lu⁷

聯絡地址：10041 臺北市北平西路 3 號

Address: No.3,Beiping W.Rd., Zhongzheng Dist., Taipei City 10041,Taiwan
(R.O.C.)

電話(Tel)：(02) 23815226-3146

電子信箱(E-mail)：0752895@railway.gov.tw

摘要

因應石化燃料價格高漲及全球暖化效應，各國政府對二氧化碳(CO₂)排放之法規日益嚴苛。未來軌道車輛產業之發展亦必將朝向車輛節能與零組件產品技術而精進，強調低耗能及低污染排放之車輛，更為車輛製造廠之重要發展方向。

臺鐵局於 101 年 7 月 23 日至 27 日接受日本財團法人海外產業人材育成協會邀請赴日本進行軌道車輛節能技術研修，期間並藉由參訪使用節能技術產品之軌道運營單位等方式，使參與研修人員充分瞭解軌道車輛節能技術之能量及應用。爰日本機車車輛製造已朝環保節能之新技術積極開發，此次除吸取節能化運輸系統成功經驗外，更可將學習所得應用於相關規範擬定、車輛維修基地建置及營業站場照明節能之參考。

¹臺鐵局 機務處 處長

²臺鐵局 機務處 正工程司

³臺鐵局 花蓮機廠 正工程司兼廠長

⁴臺鐵局 機務處 工務員

⁵臺鐵局 臺北機廠 監工員

⁶臺鐵局 電務處 幫工程司

⁷臺鐵局電務處 助理工務員

日本與我國同為島國，受地理環境及天然資源的限制，在環境資源方面的開發成為經濟發展的主要動力，除軌道車輛類產品外，其他日常生活品項之節能應用亦甚為進步，擁有先進的節能技術，能源利用效率處於國際領先水準，故節能技術及經驗已成為其企業之特殊資本。此次研修主要為瞭解及學習日本軌道車輛系統製造廠對於機車車輛之節能發展方向、目標及工法，並探討老舊車輛及站場節能改善之效益。

關鍵字：全球暖化、車輛節能、效益。

Abstract

In response to fossil fuel price hikes and global warming effects, governments of all nations are imposing increasingly harsh regulations on carbon dioxide (CO₂) emissions. In the future, development of the railway vehicle industry will certainly be geared towards sophistication of technology products of energy saving vehicles and components. Vehicles with low energy use and low pollution emissions will also be an important direction of development for vehicle manufacturers.

On July 23 thru 27, 2012, Taiwan Railway Administration (TRA) was invited by the Japanese Foundation of Development of Overseas Industrial Talents Association to attend trainings on energy-saving technologies on railway vehicles in Japan. During this time, participants were able to fully comprehend the power and applications of energy-saving technologies for railway vehicles after visiting railway-operating units that apply the energy-saving technologies. Since Japanese locomotive manufacturing has been actively developing new green, energy-saving technologies, this trip allowed participants to learn of success stories of energy-saving transportation system and apply what they've learned as reference in drafting relevant specifications and energy-saving lighting in vehicle maintenance bases and operating stations.

Japan, like Taiwan, is an island nation and faces limitations in geographical environment and natural resources. Thus, development of environmental resources has become her one major motive for economic development. In addition to products in the category of railway vehicles, application of energy-saving technologies in other daily life commodities is also rather advanced. Japan has advanced energy-saving technologies and leads internationally in efficiency on energy use. Therefore, energy-saving technologies and experiences have become a unique capital for Japanese companies. The objectives of this visit were to understand

and learn of the direction of energy-saving development, goals and methods that the Japanese railway vehicle manufacturers have regarding locomotives, and discuss the benefits of energy-saving improvements on old vehicles and stations.

Keywords: *global warming, energy-saving vehicles, benefits.*

一、前言

溫室效應係由於工業革命以來人類大量使用石化能源，造成大氣中的溫室氣體（greenhouse gases, GHGs）濃度大幅提高，以致氣溫逐漸升高的現象。近年來全球能源價格攀高，在替代能源尚未普及下，欲減緩溫室效應問題，節能是惟一途徑，更是永續發展必要的工作。因應全世界節能減碳潮流，此次研修課程了解日本已商業運轉之軌道產業技術與產品，並導入節能減碳技術及產品之壽命周期成本評估，以深入理解發展性能優良及環保軌道車輛之重要性，期藉此對未來之環境保護貢獻心力。

二、節能環保軌道產業技術

鄰近國家-日本，對於生活上之相關產品，充分應用節能技術，而其軌道產業之機車車輛製造亦朝環保節能之新技術積極開發。我國同為島國，天然資源有限，一切節能產品及技術應用，相對重要。課程中藉由參訪日本軌道運營業者及節能環保產品廠家之機會，了解軌道車輛應用節能產品之作法，及國內推展綠色運輸載具之方向。有關日本軌道車輛運營業者刻正應用之節能產品，略述如下：

2.1. 太陽能發電

太陽光電(photovoltaic,簡稱 PV)是利用半導體固態材料，將光子能量直接轉換為電能，這是目前最為人所熟知的太陽能發電方法。矽晶太陽電池的種類很多，依照材料的不同，可分為矽晶、非晶矽及薄膜太陽電池等。矽是地球上含量第二多的元素，加上矽的能隙適合吸收太陽光主要的光譜強度分佈，這些因素使矽晶太陽電池成為目前使用最廣泛的太陽電池，各型電池簡述如下：

(1) 矽晶太陽電池

商業化的矽晶電池可分為單晶矽與多晶矽二種，實測效率值約在12%~17%左右，是目前太陽能電池市場的主力。

(2) 非晶矽薄膜電池

非晶矽(amorphous silicon)太陽電池是除結晶矽太陽電池外，量產販售最多的電池。但目前它的效率較低，約為10 %~11 %左右，且還有照光衰退問題，因此實際使用效率約只有8 %。

(3) Cu(InGa)Se₂與CdTe薄膜太陽電池

Cu(InGa)Se₂太陽電池於1970年代由貝爾實驗室發展，CIGS薄膜因其高光電轉換效率，被視為具有潛力的低成本太陽電池，其在各類薄膜電池技術中，相對效率較高，目前小面積元件效率已可達19 %，大面積的模組效率可達13 %。

實際參訪日本東芝株式會社於所屬府中工廠，採用其國內6家太陽能電池製造商之產品進行實驗，利用太陽能所產生之電力挹注於廠內行政區及電動車充電使用，以減少石化燃料發電使用量。由於地球的環境問題越來越多，目前節能減碳幾乎可以說是全世界都關注的議題，將來若是能以太陽能取代石化能源為主要能源應用，那將不會面臨能源枯竭的問題，更可以減少排碳量、減輕空氣污染，以及連帶所造成的酸雨、全球暖化等環境上的破壞。

2.2. 永磁式同步電動機(PMSM, Permanent Magnet Synchronous Motor)

永磁式同步電動機(PMSM)，隨著現代電機技術、電力電子技術、微電子技術、永磁材料技術、交流可調變技術及控制技術等快速發展，連帶使得永磁交流伺服技術有著長足的進步。

2.2.1. 永磁式同步電動機(PMSM)之技術驅動程序及發展

永磁式同步電動機較傳統非同步感應電動機 IM(Insynchronous Motor) 具有節能、低維護及低噪音等三大優點，使得永磁交流伺服系統逐漸取代直流伺服系統，尤其是在高精度、高性能要求的伺服驅動領域，成為現代電力伺服驅動系統之一重要發展趨勢。其優點簡述於下：

- (1) 效能高：相較於同馬力之非同步感應電動機，重量減輕約 20 %，空間減少約 20 %，鐵路車輛以日本銀座線為例，於西元 2010 年測試 7 個月後評估，整體動力耗電量減少 12.5 %，再生電力增加 12.5 %，運轉效能相較於傳統非同步電動機約可增加 20 %。
- (2) 低維護：具免清洗、免大修，可降低維護成本。因轉子為永磁式設計，無二次銅損及熱量產生，可採全密閉式設計，將定子與轉子完全與外界密閉隔絕，另定子線圈絕緣採 S200 等級

(耐熱 200 °C)，故定子及轉子並無粉塵或水氣入侵，且更換軸承時並不需拆卸電動機軸，初步評估每只電動機保養時間約 5.5 小時(2 人工)，而每 12 年僅需更換軸承，減低保養維修時間。

- (3) 低噪音：於實驗室環境下，測試單一電動機於轉速 5,000 (rpm) 時，噪音值約為 90 dB(A)，傳統非同步感應馬達約 102 dB(A)，約可降低 12 dB(A)。

永磁式同步電動機 (PMSM) 較其他電動機有更高之輸出效率表現，體積小、重量輕及電路易控制，這些特性使得永磁式同步電動機有廣泛之應用領域，如圖 1 所示。電動機源自 19 世紀發展，迨 20 世紀初期已經實用化，電動機的技術發展階段，如圖 2 所示。

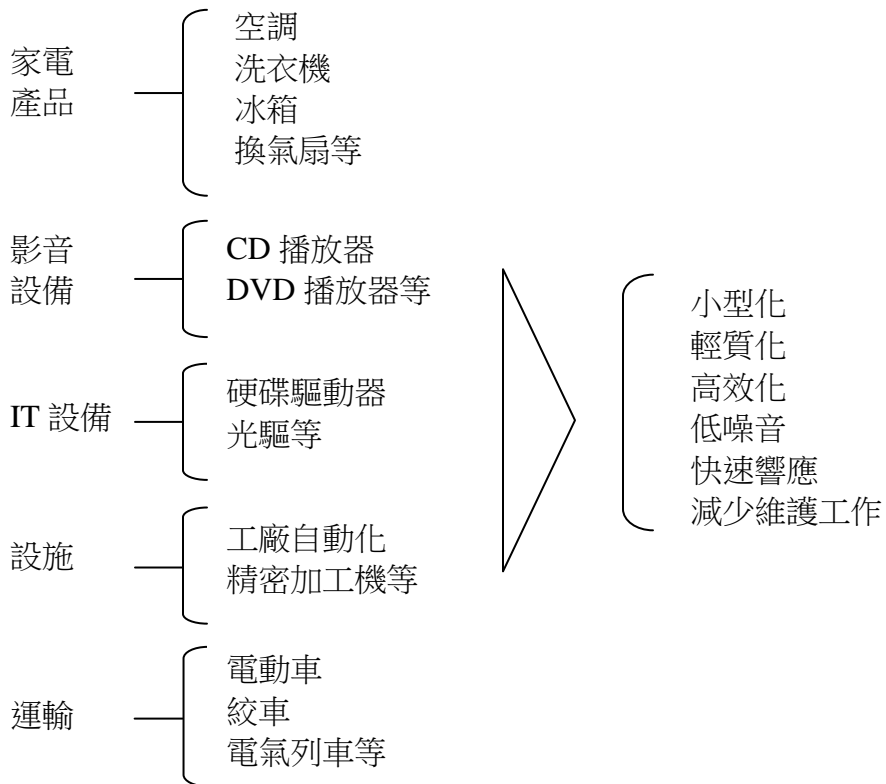


圖 1 永磁式同步電動機應用領域^[3-9]

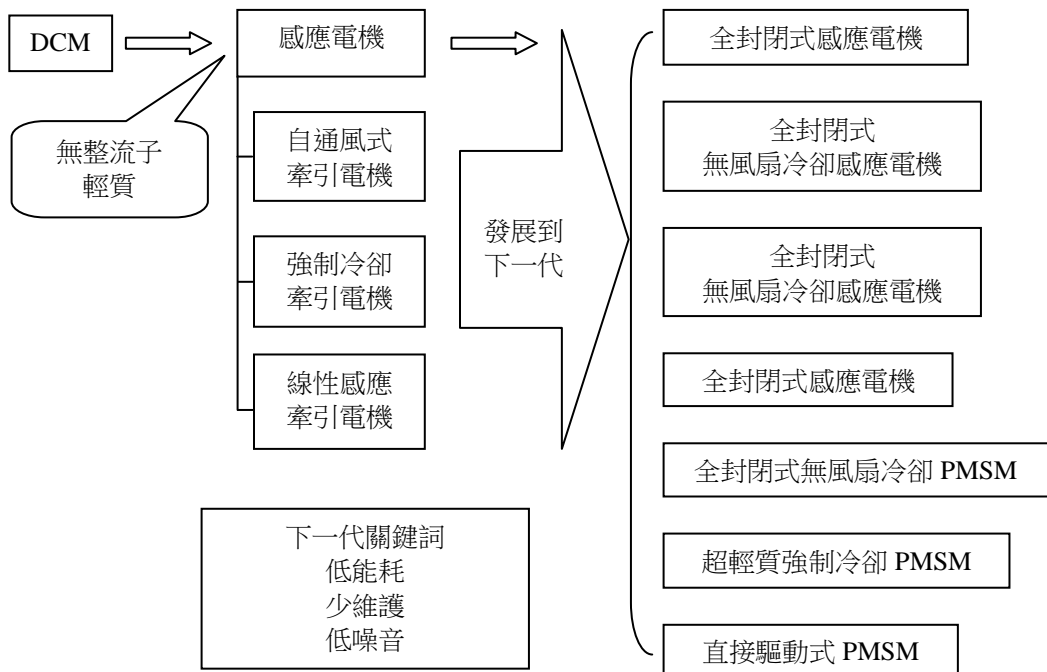


圖 2 電動機的技术發展階段^[3-9]

2.2.2. 永磁式同步電動機(PMSM)發展進程

為因應環保及節能趨勢，日本近年來積極發展永磁式同步電動機（PMSM），相關進程，如圖 3 所示，目前已成功商業運轉於丸之內線、千代線、銀座線及東西線等路線上，因採用同步電動機，其變流器供電系統必須為 1 對 1 方式設計，故使得初期購置成本約增加 20 %。然永磁式同步電動機（PMSM）具有：

- (1) 電動機無電刷及換向器，工作可靠，維護和保養簡單；
- (2) 定子繞組散熱快；
- (3) 慣量小，易提高系統之快速性；
- (4) 適應於高速大力矩工作狀態；
- (5) 相同功率下，體積和重量較小等優點，滿足了傳動領域之發展需求。

基礎研究階段



1992 年

對直接驅動式 PMSM(80kw)進行單獨受控測試



1997 年

對直接驅動式 PMSM(125kw)進行軌道測試



1998 年

在可變軌道上對 PMSM(95kw)進行實車測試

高速列車

2003 年
對 PMSM(360kw)
進行受控測試

2003 年
在試驗車上安裝 PMSM(355kw)



2001 年
155kw
電機軌道
測試

2002 年
在試驗車上安裝
直接驅動全封閉式
PMSM(200kw)

2004 年
對 200kw
電機進行單獨
受控測試

2006 年
在試驗車上安裝大容量
全封閉式 PMSM(270kw)

小型列車



2006 年
直接驅動式 PMSM(200kw)量產

地鐵車



2007 年
基礎試驗型全封閉式
PMSM(120kw)
投入商業營運

2009 年
全封閉式
PMSM(120kw)
量產

2010 年
全封閉式
PMSM(205kw)
量產



機車



2010 年
用於調車機車的全封閉式
PMSM(80kw) 量產

2010 年
主要線路全封閉
PMSM(480kw)樣機投產

圖 3 日本永磁式同步電動機(PMSM)發展歷程^[3-9]

2.2.3. 永磁式同步電動機(PMSM)運轉原理

同步電動機的定子所產生的磁場吸引轉子磁場的異極，由於定子所產生的磁場是以若干速度旋轉，因此轉子會隨著定子磁場的旋轉速度，以相同的速度旋轉，如圖 4、圖 5 所示。

(1) 磁轉矩和磁阻轉矩

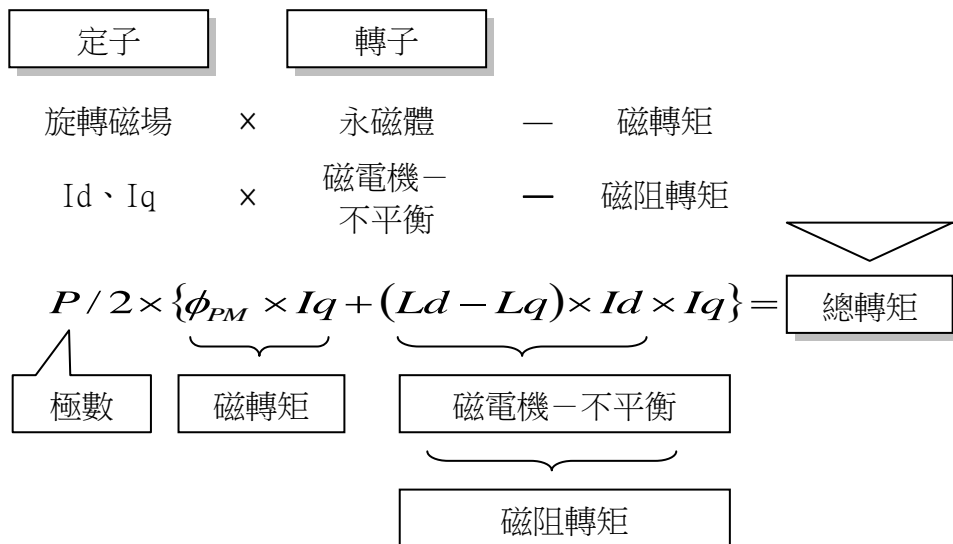


圖 4 永磁式同步電動機運轉原理^[3-9]

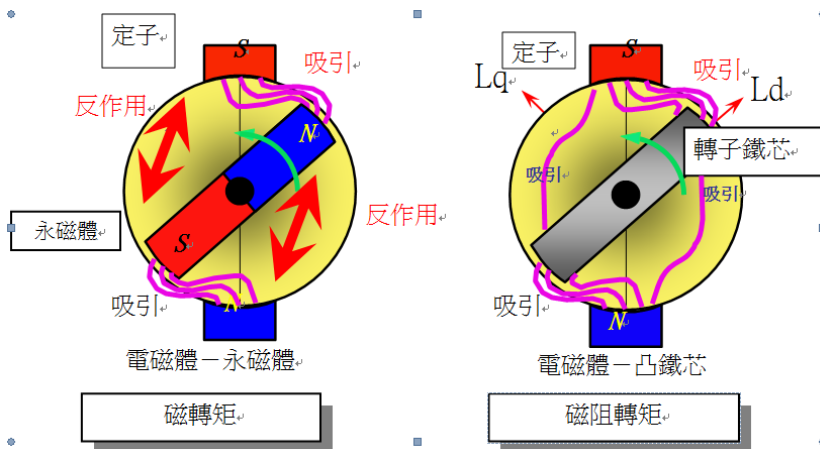
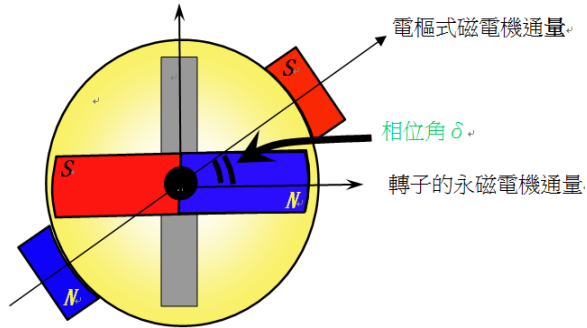


圖 5 永磁體插入轉子鐵芯中同時獲得磁轉矩和磁阻轉矩^[3-9]



- A) 轉子的永磁電機通量與鐵芯方向正交。
- B) 轉子的永磁電機通量與電樞式磁電機通量之間

圖 6 電樞式磁電機通量^[3-9]

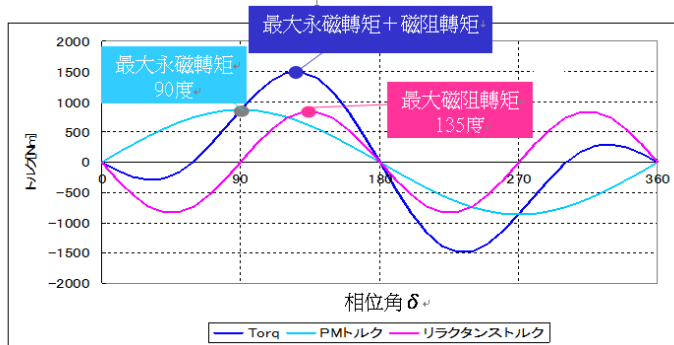


圖 7 相位角 δ 和轉矩^[3-9]

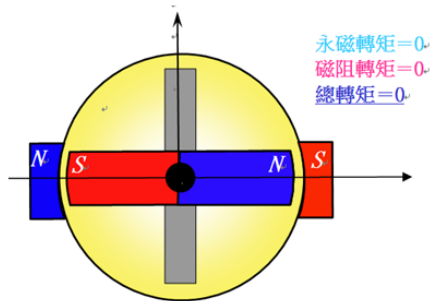
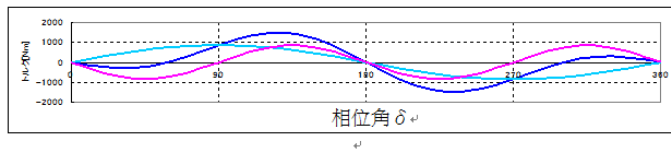


圖 8 相位角 $\delta = 0$ 度^[3-9]

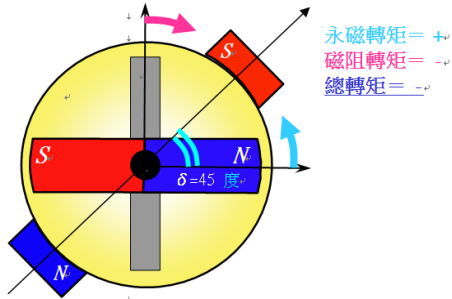
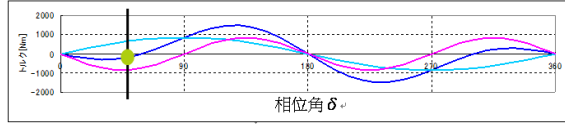


圖9 相位角 $\delta = 45^\circ$ ^[3-9]

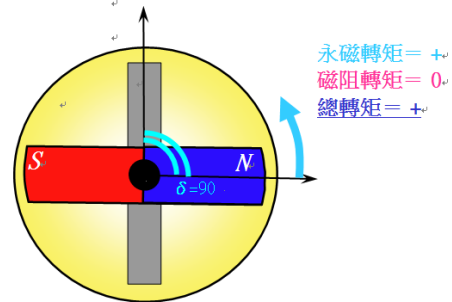
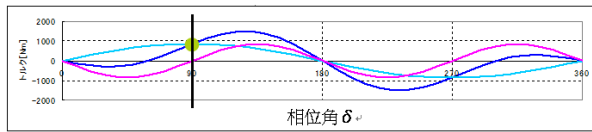
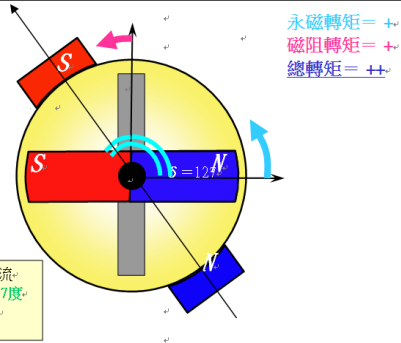
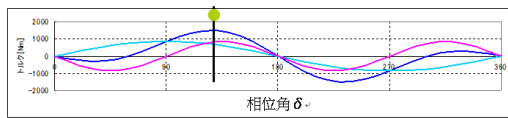


圖10 相位角 $\delta = 90^\circ$ ^[3-9]



牽引逆變器系統進行電流控制使得相位角 $\delta = 127^\circ$ 在最小電流下獲得轉矩。

圖11 相位角 $\delta = 127^\circ$ ^[3-9]

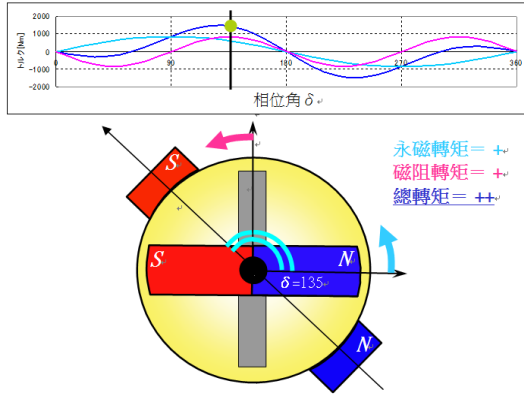


圖 12 相位角 $\delta = 135$ 度^[3-9]

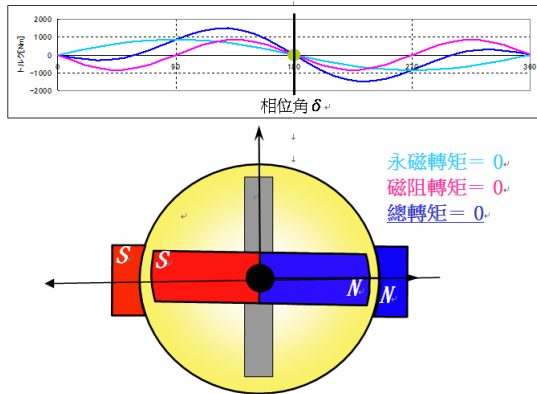


圖 13 相位角 $\delta = 180$ 度^[3-9]

2.2.4. 永磁式同步電動機(PMSM)磁場分析示例

無負載時優化的內置磁石電動機(IPM)結構，如圖14所示。

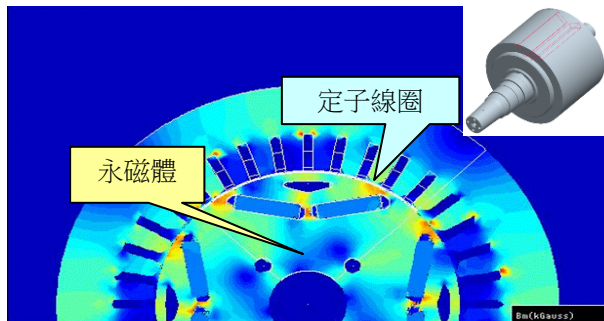


圖 14 磁場分析示例^[3-9]

2.2.5. 一般同步電機與永磁式同步電動機之比較

(1) 效能：

永磁式同步電動機因無初級銅損耗故效能提升5 %，如圖15所示。

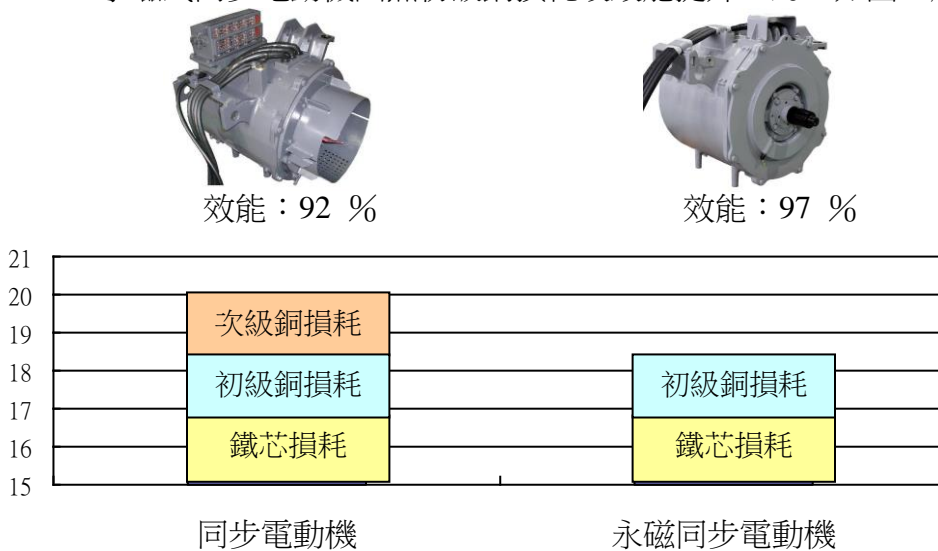


圖 15 效能提昇 5 %^[3-9]

(2) 維護：

A) 因無灰塵／水分侵入，絕緣系統無需內部清洗、使用壽命長具高可靠性，如圖16所示。

- a. 免清洗：永磁式同步電動機無需吹掃轉子或定子。電動機維護計畫，如表1所示。
- b. 免大修：永磁式同步電動機無需為了更換軸承進行拆卸。

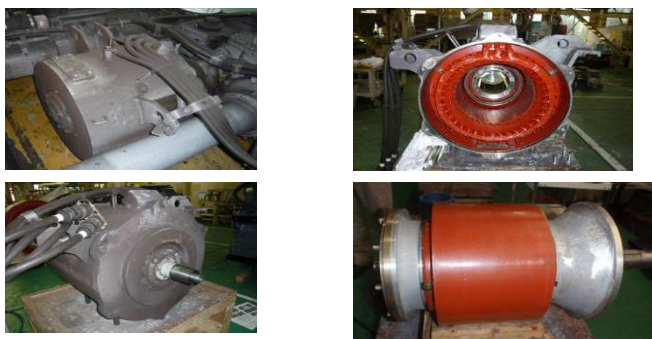


圖16使用3年後外觀及內部^[3-9]

表1電動機維護計畫（示例）

類別 \ 年度	4年	8年	12年	16年	20年	24年
自通風式電機	△	△	△ □	△	△	×
全封閉式 外風扇冷卻電機			□			×

△：轉子拆卸和清洗 □：軸承更換 ×：牽引電機更換

維護計畫取決於路線的狀況、維護工作情況等，因此，應在列車投入營運後根據調查結果最終確定實際維護計畫。

B) 無需拆卸轉子即可更換軸承（油脂潤滑全封閉式電機），如圖17所示。

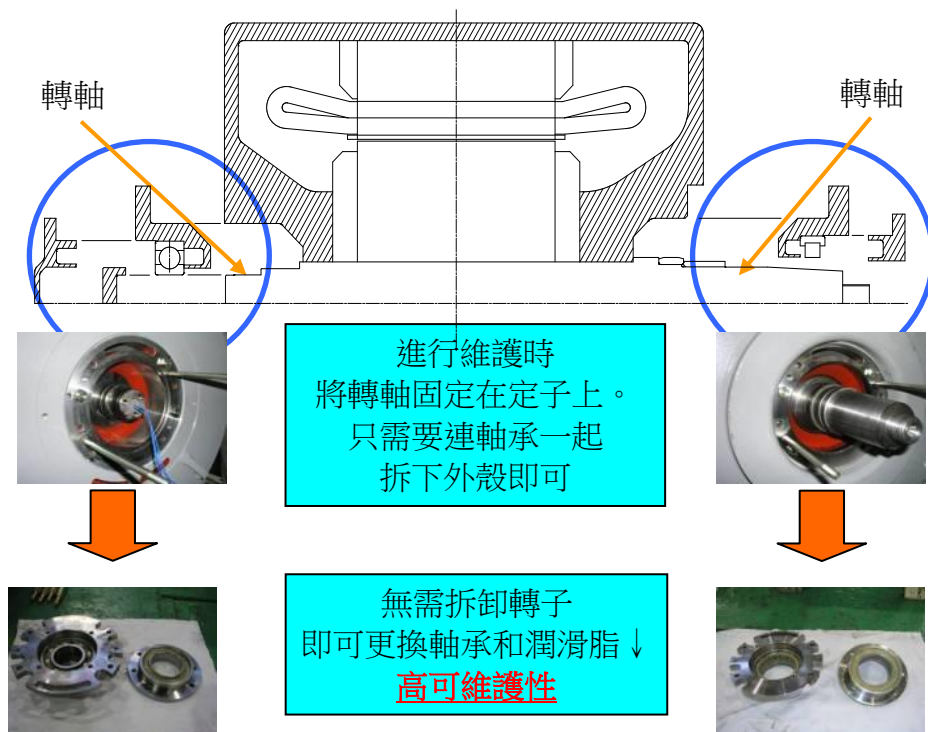


圖17永磁式同步電動機軸承更換示意圖^[3-9]

C) 常規牽引電機的維護

一般牽引電動機需要進行一定維護，每一電動機約維護時間約5.5小時／台，如圖18所示。

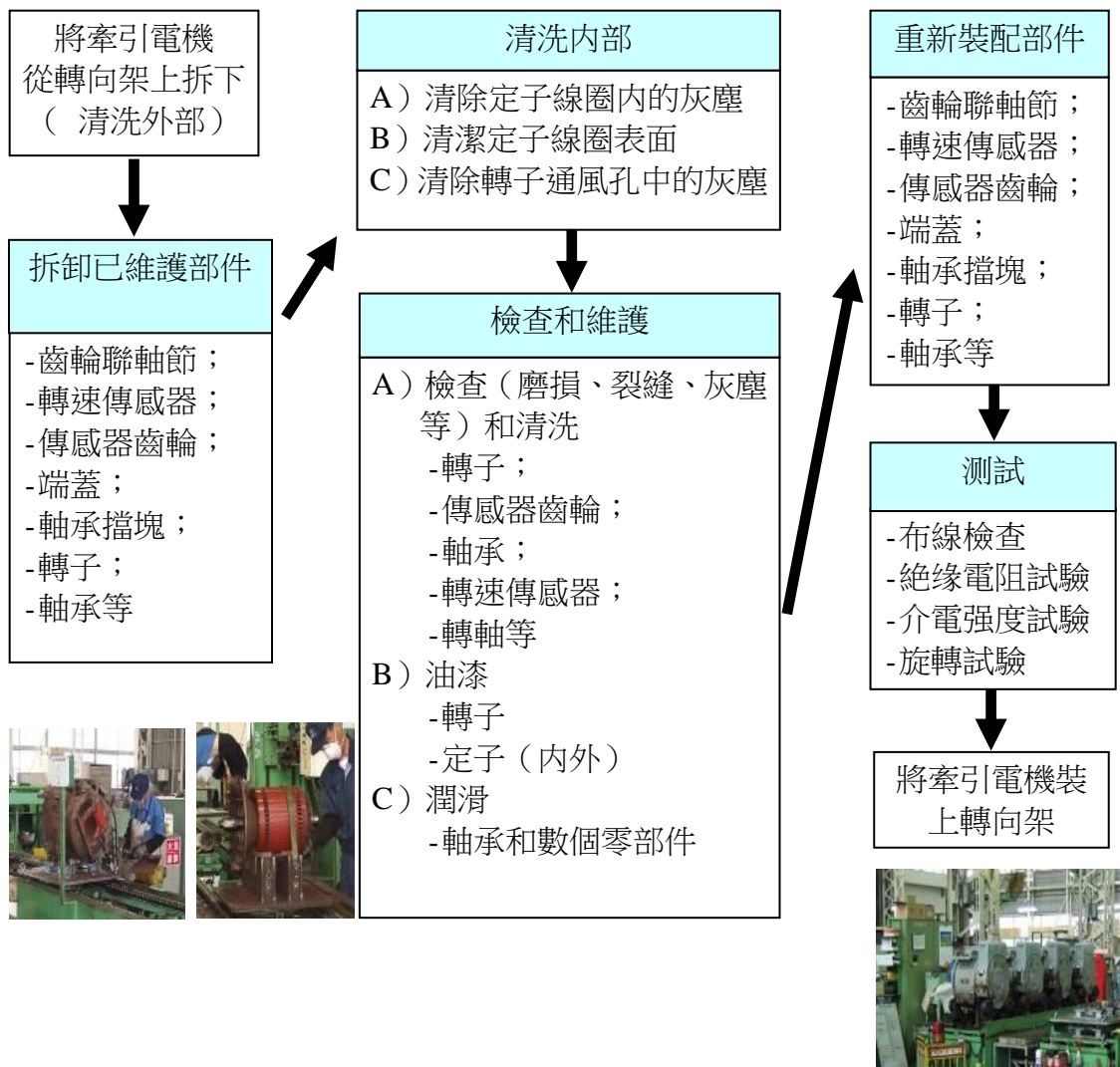


圖18一般牽引電動機維護示意圖^[3-9]

D) 永磁同步牽引電動機的維護

採用全封閉式牽引電機可以省去大量維護工作，每一只電動機維護時間約1.5小時，如圖19所示。

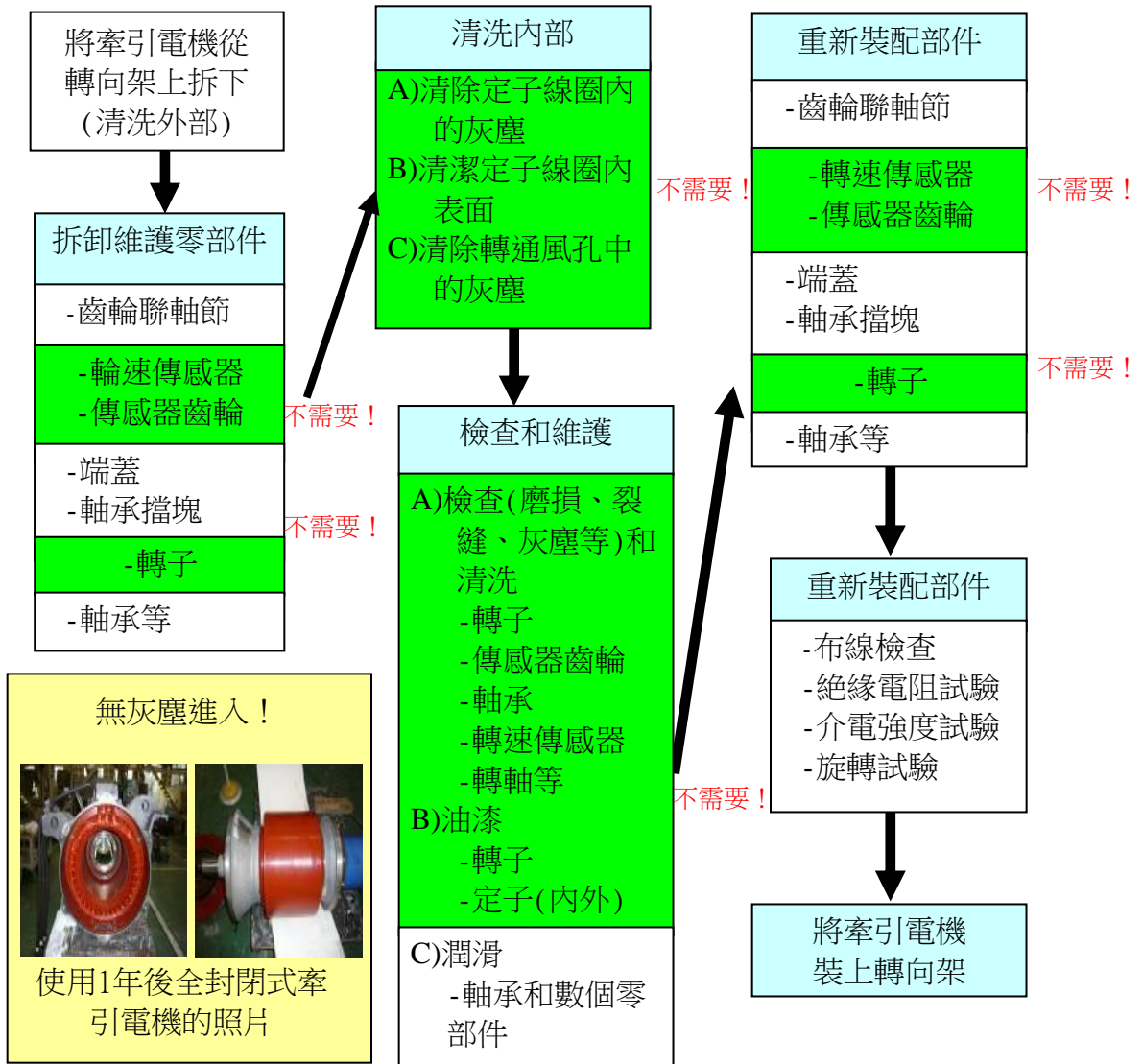


圖19 永磁同步牽引電動機維護示意圖^[3-9]

E) 維護工時的比較，如圖20所示。

	4年	8年	12年	16年	20年	合計
常規牽引電機	△：5.5小時	△：5.5小時	△：5.5小時 □：1.5小時	△：5.5小時	△：5.5小時	29.0小時
永磁式同步電動機(PMSM)	-	-	□：1.5小時	-	-	1.5小時

所需人力：1.5人／每次作業

牽引電機數量：4台／輛機車 ⇒ 16套／車隊

工時比較：PMSM=36工時／車隊，常規牽引電機=696工時／車隊。
安裝PMSM所需的工具／材料基本與常規同步電機相同。

圖20電動機維護工作的比較

F) LCC研究－維護工作

工時比較：PMSM=36工時／車隊，常規牽引電機=696工時／車隊

使用永磁式同步電動機可達節省工時660工時／車隊（整個壽命周期）不僅節省人力成本，而且：

A) 縮短維護引起的停運時間，從而提高可用性。實現維護人員的減少。

B) 噪音：全封閉式無風扇冷卻PMSM可使噪音降低約12dB(A)，如圖21所示。

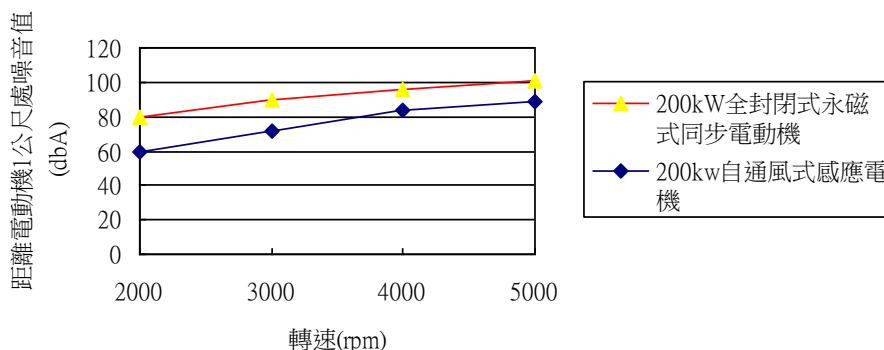


圖21產生噪音比較示例^[3-9]

2.3. 生命週期成本(Life Cycle Cost)的成本降低

生命週期成本 (Life Cycle Cost, 簡稱 LCC) 評估, 經常被用來作為成本評估的主要方式, 利用此架構可以估算出加入或是更換某項新設備時, 整個設備的生命週期中所需要花費金額的多寡, 並與傳統或是老舊設備所計算出來的數值相比, 來評估新設備是否值得投資。

再生能源的使用對於達到環境永續的長遠目標有極大的助益, 但從經濟的角度來看, 由於目前再生能源利用技術未臻成熟, 因此其相關設備的使用在設計方案決策過程, 經常因設備使用效率不佳且期初設備成本較高等問題而甚少被業主採用。生命週期成本(LCC) 評估法, 在選定參數假設條件下, 評估結果顯示: 對於評估結果會產生較大影響的因子包括: (1)設備所在地區及其環境條件。(2)國家對於使用再生能源設備補助的相關政策。(3)未來能源價格上漲率。其中能源價格具有不斷變動之特性, 且未來能源短缺也可能造成能源價格的劇烈波動, 經由敏感度分析過後可確定其對於評估結果影響幅度最大, 在進行評估時必須針對此項因子深入探討。由於生命週期成本評估法基本上是建立在現值(Present-Value)或年值(Annual-Value)的方法假設上, 因此基期與評估年期、稅率、通貨膨脹率、折現率、所得稅率等, 在評估時都採取相同的假設。

我國雖非京都議定書簽約國也無貿易制裁之規定, 但根據 WTO 有關於貿易障礙的規定, 對環保有「除外條款」。即基於環保考慮可對進出口品課徵環保稅。歐盟的環保三指令規定除電器電子產品回收 (101 年 8 月生效) 及禁止有毒物質 (如鉛、鎘及汞) 的使用 (102 年 7 月生效) 之外, 在能源使用方面也要求能源使用產品需滿足生態設計 (EUP) 的要求, 否則可對其進口加以設限。我國政府為因應 1997 年 12 月 11 日京都議定書的發布, 在 87 年 5 月曾召開「全國能源會議」, 並得到多項共識。其中包括下列二點:

- (1) 至 2020 年 CO₂ 減量將比根據過去趨勢情境(Business as usual)減量 24 %至 48 %;
- (2) 至 2020 年為止能源效率 (或能源生產力) 應每年增加 1.2 %。

但到 2003 年為止, 我國 CO₂ 的排放量卻由 1996 年的 1.896 億噸增加到 2.679 億噸, 年成長率為 4.94 %, 7 年間總增幅達 41.3 %。

近年來國內針對溫室氣體減量政策是否應確實落實尚未形成共識, 能源政策何去何從爭議更大。在節約能源及發展再生能源方面國內雖有共識, 唯過去數年兩方面的績效皆不彰, 主要原因是相關能源價格

偏低，這使節能及發展新替代能源皆缺乏的誘因。合理化能源價格政策固是政府為提高能源效率從而降低溫室氣體排放考慮的作法。惟影響社會層面頗大，仍宜待各界充分公開討論並獲某種程度之共識後再加以實施。

2.4. 柴油混合型動力調車機車(HD300 型)

柴油混合型動力調車機車，如圖 22 所示，動力系統主要由：發電模組、蓄電模組及主變換模組三大裝置構成。

研究開發之初即設定三目標：

- (1) 柴油發動機符合 EPA Tier3 標準，目標減少 30 %~40 % 之碳氧化物排放；
- (2) 高效率控制柴油發動機，利用回收再生能源，目標大幅度降低能耗；
- (3) 利用小型柴油發動機及隔音結構，目標降低 10 db(A) 噪音(適於夜間調車)。

機車設備包括下列 5 大裝置：

- (1) 蓄電模組：採用鋰離子電池(LIM30H)為主要動力源，可供應機車所需之最大輸出功率，特性為利用回收再生能源與發動機-發電機進行蓄電。如以高速充電，僅需 20 分鐘即可充滿電力，未來東 X 公司亦並行開發中。
- (2) 發動機：柴油發動機，額定功率 185 Kw(最大 242 Kw)，轉速 1,600 rpm(最大 1,800 rpm)。
- (3) 發電機：三向感應式發電機(不須勵磁裝置)，輸出功率 170 Kw。
- (4) 主電動機：採用具節能、低維護及低噪音之永磁式同步電動機(PMSM)，拆卸簡單，保養容易且因無碳刷裝置並全封閉自冷，發動機內部可保清潔。
- (5) 主變換裝置：包括電磁接觸器、控制單元、輔助電源變頻器及VVVF 變頻器，為一完整的箱體組合。分別控制各主電動機，採自冷方式統一控制主蓄電裝置、發動機-發電機、PMSM 驅動混合動力。

Excellent ECPs of 2011 Diesel Hybrid Shunting Locomotive

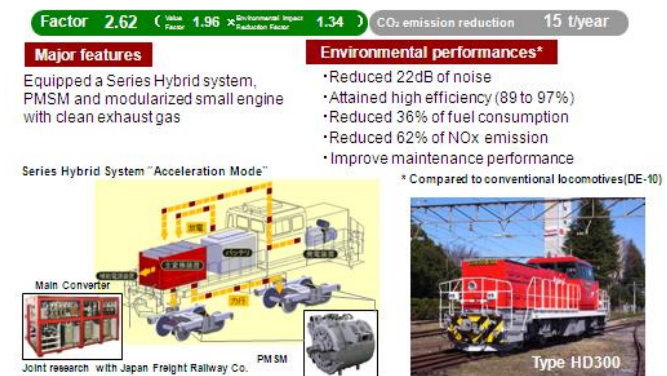


圖 22 柴油混合型動力調車機車簡介^[3-9]

2.4.1. 柴油混合型動力調車機車開發之目的

- (1) 以模組化概念製造機車，期對環保作出貢獻，其目標，如圖 23 所示。

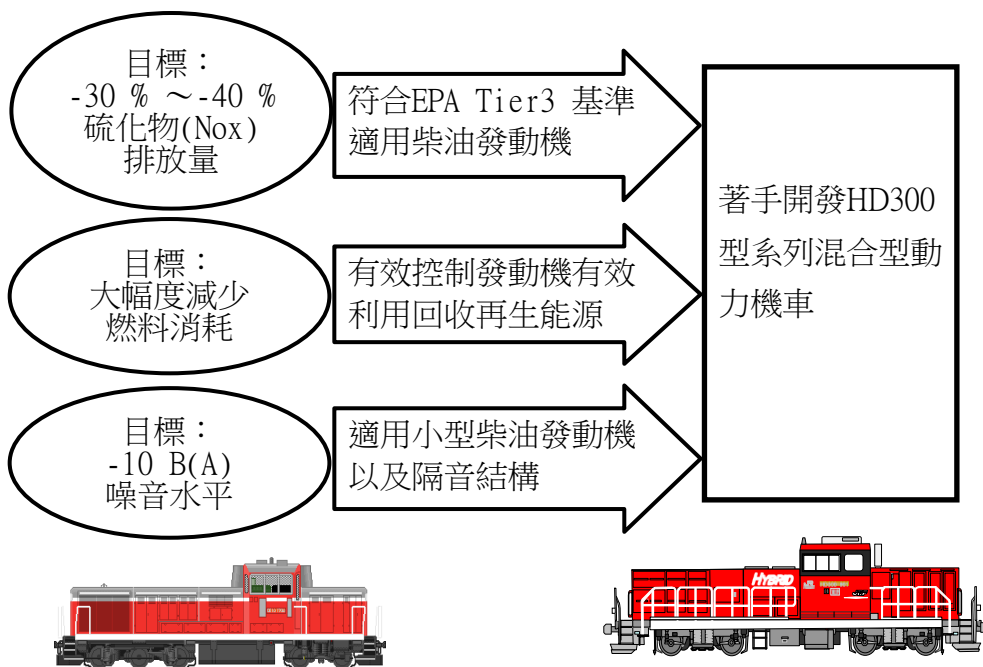


圖 23 混合動力環保機車設計目標^[3-9]

(2) 新(HD300)舊(DE10)型混合動力調車機車環境負荷比較，如圖 24 所示。

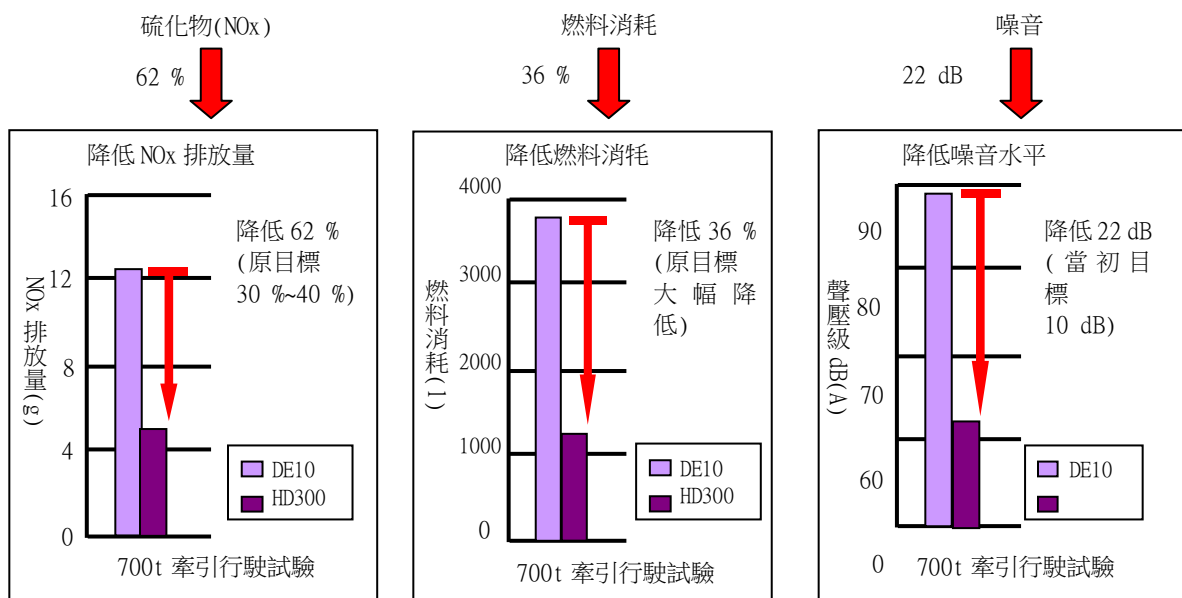


圖 24 新舊型混合動力機車環境負荷比較^[3-9]

2.4.2. 混合動力機車(HD300)裝置的組成

(1) 主要規格，如圖 25 所示。

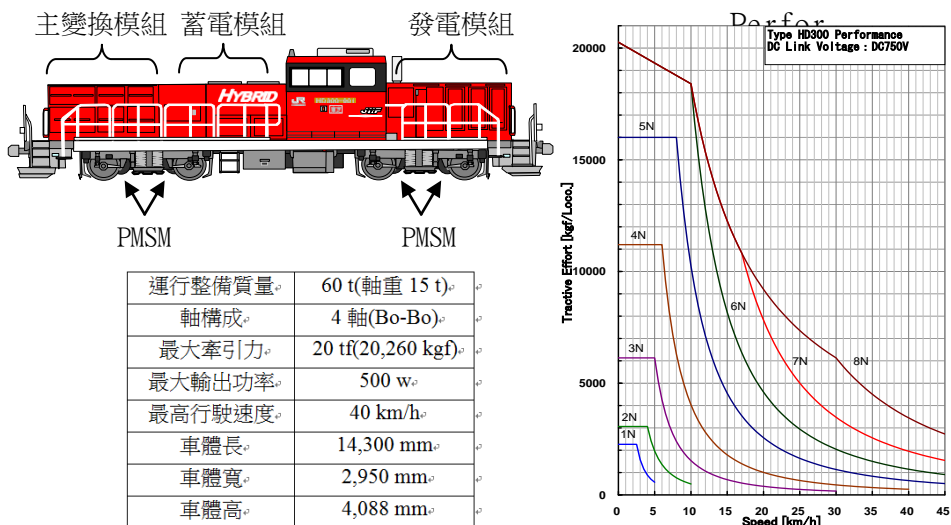


圖 25 混合動力機車(HD300)主要裝置規格^[3-9]

(2) 主回路圖，如圖 26 所示。

- A) 主蓄電裝置：直接連接中間直流鏈，作為機車的主動力源。
- B) 發動機—發電機：輸出三相交流電壓

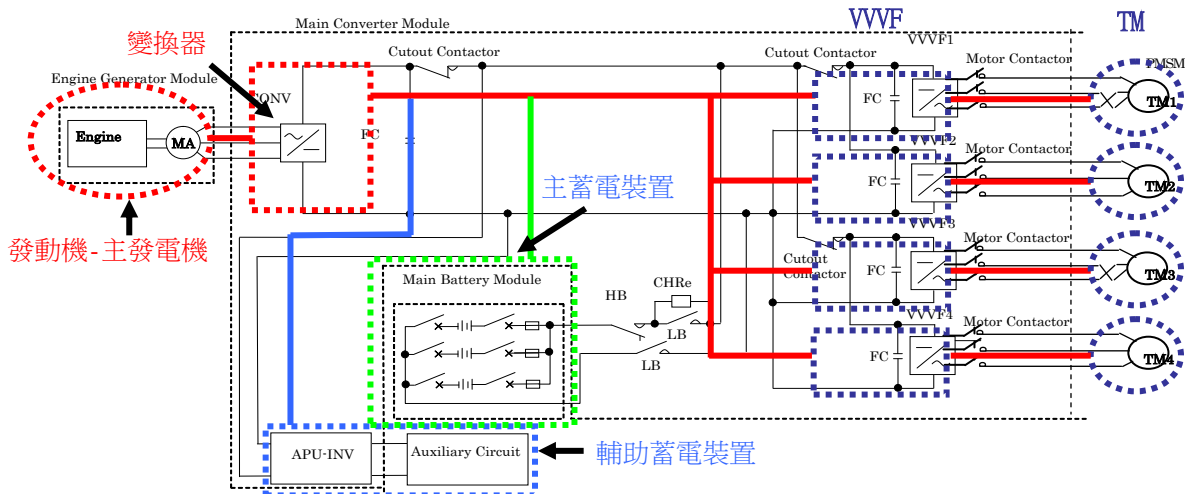


圖 26 混合動力機車主回路圖^[3-9]

(3) 主蓄電裝置，如圖 27 所示。



鋰離子電池 (LIM30H)
公稱電壓：750 V
公稱容量：67 kWh

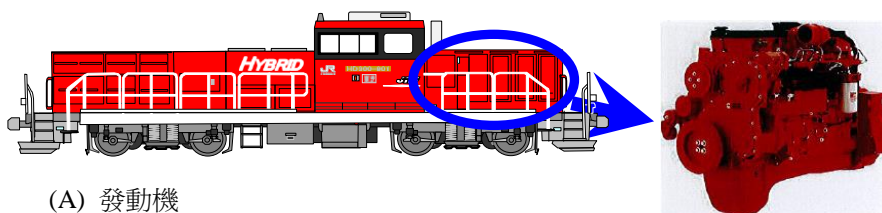


<特性>

- 主動力源
- 可供機車所需的最大輸出功率
- 利用回收再生能源與發動機—發電機進行蓄電
- 20分鐘即可高速充滿電
- 根據所需容量，可在2~5組範圍內進行調整
- 根據將來的需求，可採高性能蓄電裝置

圖 27 混合動力機車主蓄電裝置^[3-9]

(4) 發動機-發電機規格，如圖 28 所示。



- (A) 發動機
 適用柴油發動機。
 額定功率: 185kW (最大242 kW)。
 轉速: 1,600 rpm (最大1,800 rpm)。
- (B) 主發電機
 方式: 三相感應式發電機。
 輸出功率: 170kW (恆定)。
- (EU stage III A/EPA Tier3規格)
 • 小型
 • 感應發電機不需要勵磁裝置

圖 28 發動機-發電機規格^[3-9]

(5) 永磁式同步電動機(PMSM)規格，如圖 29 所示。

方式	永磁同步電動機		
相	3 相		
極數	6 極		
冷卻	全封閉式自冷 (無風扇冷卻)		
額定	時間	連續	1 小時
	輸出功率	62 kw	80 kw
	電壓	440V	
	電流	90A	117A
	rpm	550 rpm	
	頻率	27.5 Hz	
質量	1,246 kg		
最大轉速	1,244 rpm		



永磁式同步電動機

圖 29 永磁式同步電動機(PMSM)規格^[3-9]

(6) 主電氣變換裝置，如圖 30 所示。

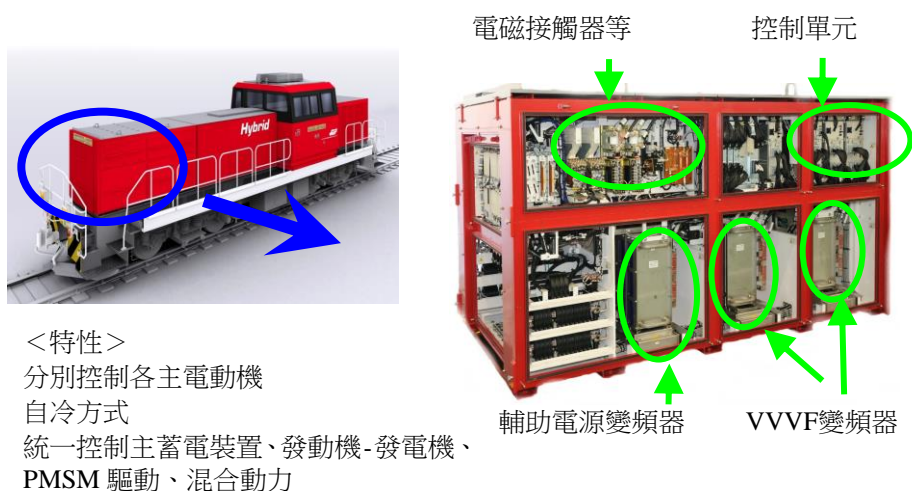


圖 30 主電氣變換裝置^[3-9]

(7) 動力協調系統

主蓄電裝置的電力作為機車的主動力源，最大放電電流：800 A (約 600 kW)，發動機作為輔助動力源以恆定的轉速進行控制，輸出恆定的電力(170 KW)，如圖 31 所示。

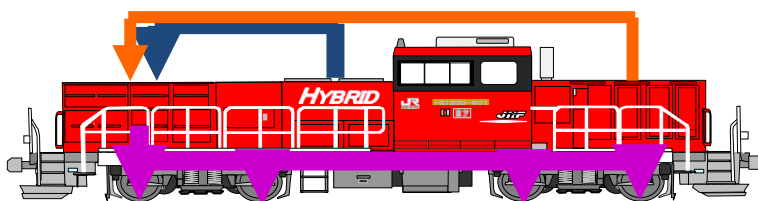


圖 31 主蓄電裝置與發動機—發電機的並列運行控制^[3-9]

柴油混合型動力調車機車(HD300 型)可降低排煙、噪音以及減少燃料消耗之優點，通過 HD300 型的開發，打造混合動力系統的基礎，在此基礎上，不僅可以期待應用於機車技術，還可以應用於其他所有的鐵路車輛。

2.5. LED 照明設備

2.5.1. LED 照明設備概述

(1) 業務和產品分類，如圖 32 所示。

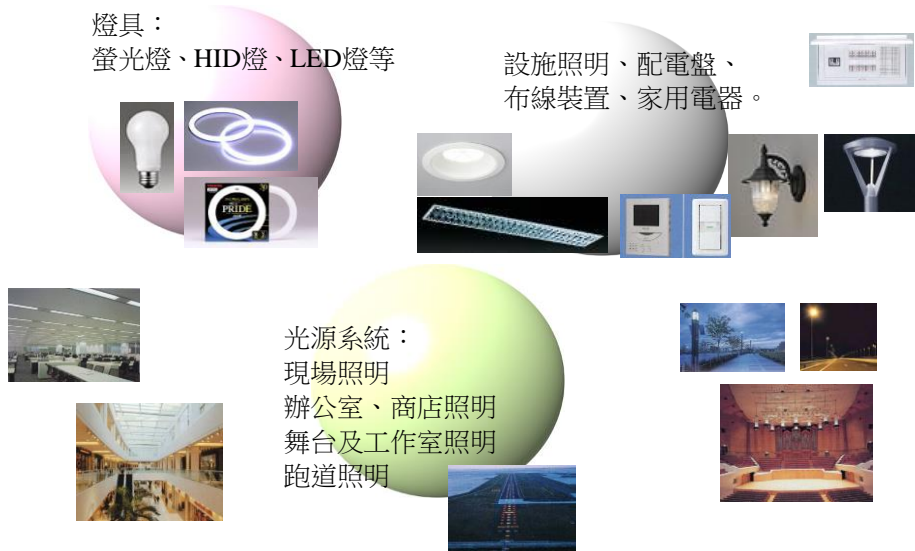


圖 32 業務和產品分類^[3-9]

(2) 白熾燈產業

考慮到二氧化碳排放對環境的危害，日本照明業者致力於推廣高效能的LED照明產品以替代低效的傳統白熾燈，如圖33所示。



圖 33 白熾燈及 LED 燈比較^[3-9]

(3) 全球節能趨勢

世界各國皆計畫停產白熾燈，日本於2010年停止生產白熾燈，每年可減少二氧化碳排放量約50萬噸，如圖34所示。



圖 34 世界各國白熾燈停產計畫^[3-9]

(4) LED 的特點

LED燈具有6大特點，如圖35所示。

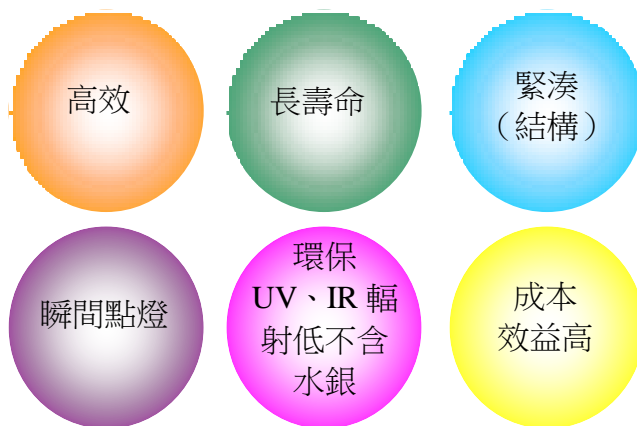


圖35 LED燈6大特點^[3-9]

LED燈的重大效能改進有利於節能和環保，如圖36所示。

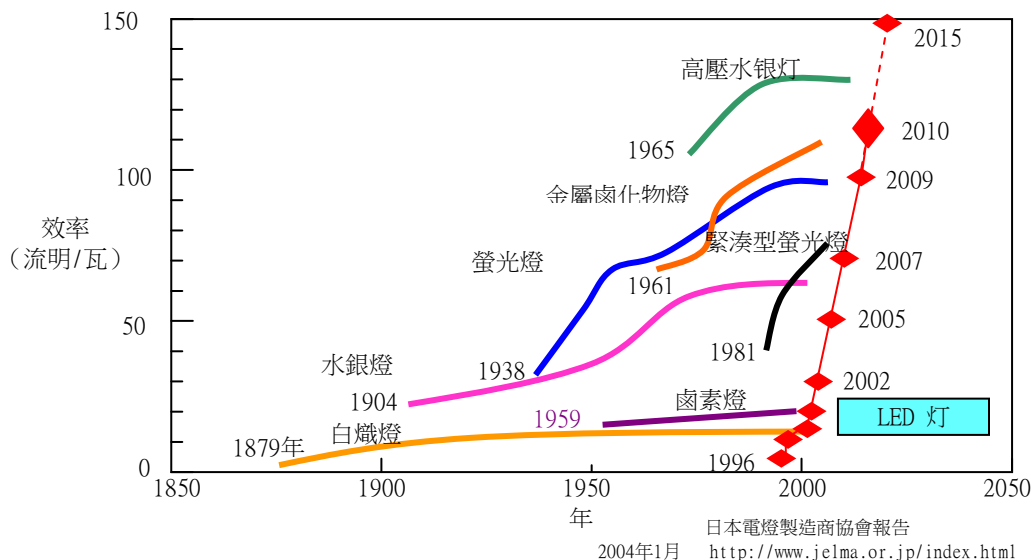


圖 36 LED 燈重大效能改進年度^[3-9]

(5) LED 照明應用，如圖 37 所示。

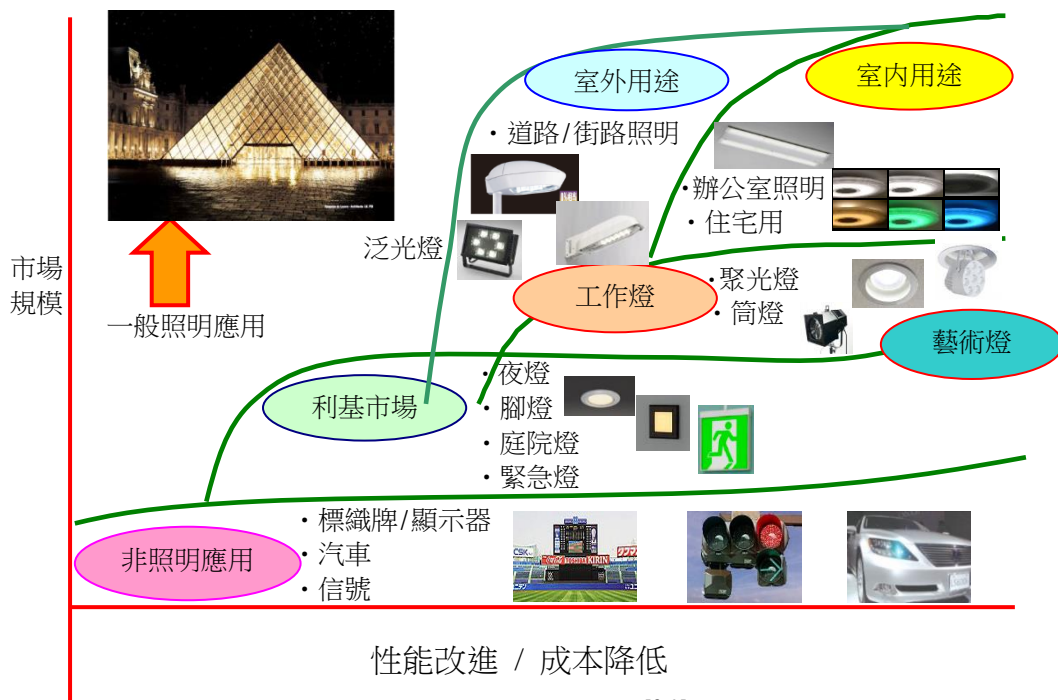


圖37 LED之各項應用^[3-9]

(6) LED 市場預測

總體市場規模仍舊偏小，但將繼續保持強勁增長態勢 2010 年 2015 年 CAGR 增加 52.4 %，如圖 38 所示。

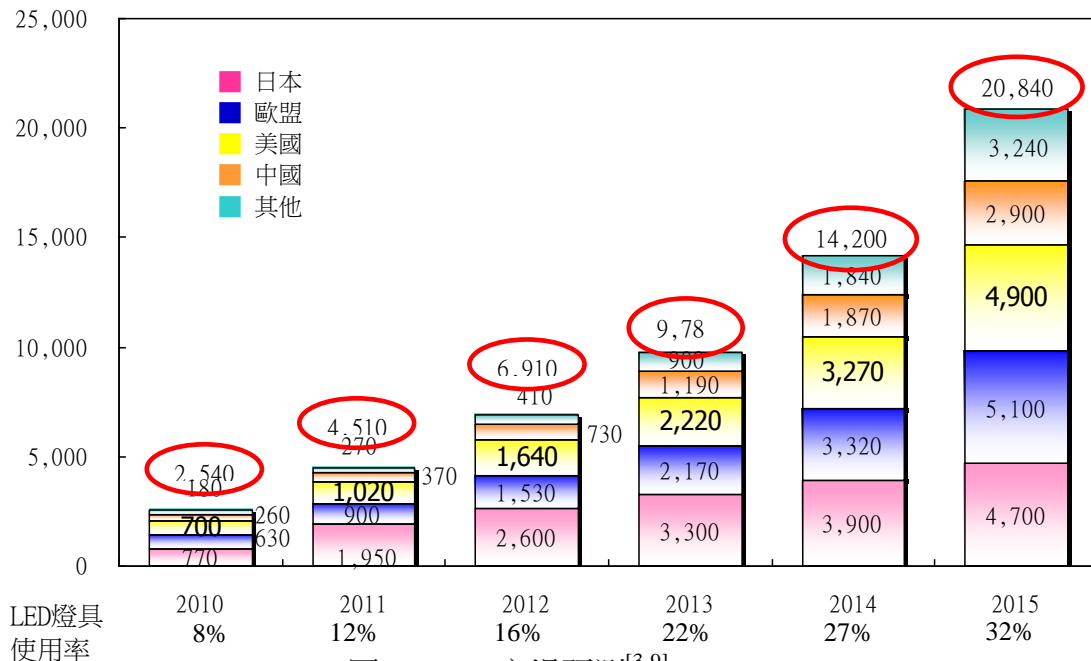


圖 38 LED 市場預測^[3-9]

(7) LED 照明系列產品，如圖 39、40 所示。



圖 39 LED 系列產品^[3-9]



不僅能夠代替當前照明設備，而且 LED 能夠創造照明新價值

圖 40 LED 燈具發展年代^[3-9]

(8) LED 照明設備應用案例，如圖 41 所示。



圖 41 法國羅浮宮 LED 室外照明^[3-9]

2.5.2. 鐵路車輛系統 LED 照明

(1) 鐵路車輛系統照明的概念

LED 照明的核心組件具有節能、照明性更好及使用壽命更長等特點。通過上述核心組件，日本鐵路車輛系統 LED 燈具希冀實現有形及無形兩目標，如表 4 及表 5 所示。

表 4 LED 燈具無形目標

無形目標	
燈光質量	<ul style="list-style-type: none"> 提供無眩光而自然的視覺環境。 陰影自然無顆粒感。
可見度可更高	<ul style="list-style-type: none"> 配光角度範圍更廣。 使得車廂內的監視器、標誌、廣告等更為醒目。
形象整潔 CRI 參數更佳	<ul style="list-style-type: none"> 高對比度白光能夠保持鐵路車輛內部整潔的形象。 顯色性 Ra70 確保了比螢光燈更高的顏色再現性。

表 5 LED 燈具有形目標

有形目標	
重量輕	組件採用鋁材等輕質材料，使燈具布局緊湊、重量輕。
阻燃外殼	採用新開發的 PC 板加防火有機玻璃纖維布材質的外殼。
安裝更為簡單	採用一體化燈具及最少數量的安裝螺釘設計，大幅降低了安裝工作量。

(2) LED 照明無形要素的特點

配光角度範圍更廣，能夠為拱形天花板和監視器上的廣告或標誌提供更佳之照明，如圖 42 所示。



使用 COB 的 LED 照明以及吊環橫樑周邊效果（左側）使用 SMD 的 LED 照明以及吊環橫樑周邊效果（右側）在使用 COB 的 LED 照明燈光下，吊環橫樑上的投影自然且無顆粒感。



安裝在鐵路車輛上之LED燈具

圖 42 LED 照明無形要素的特點^[3-9]

A) 眩光管理技術

由於 LED 會在較小的發光表面上發出大量的光（高亮度），因此有時其會因為眩光而被詬病，如圖 43 所示。



圖 43 COB 模塊提供自然陰影（左圖），而 SMD 模塊提供複雜的交叉陰影（右圖）^[3-9]

B) 平均顯色性（CRI）Ra

顯色性 = 顯示顏色視覺呈現方式的指數，假設日光或白熾燈泡下所看到的顏色視覺效果為 100(最大值) 越接近 100，指數值越大。傳統鐵路車輛照明所用的 Ra 值為 61（根據日本案例得出的值）。

C) LED 照明有形要素的相關特點

a. 重量減少約 20 %

傳統照明設備(含光源)3 千 6 百克，LED 點燈裝置採用集成化設計、使用輕質材料並減少組件數量，為鐵路車輛提供了輕質照明系統解決方案，體積減少約 20 %。

b. 兩點式安裝，具有穩固的抗振性能

使用兩點螺釘固定，通過日本安全標準測試《軌道車輛設備的震動和衝擊測試方法(JIS E 4031)》。由於採了本體、LED 模塊點燈回路一體化的構造，與傳統螢火燈照明設備相比，大大提高了安裝效率，如圖 44 所示。

c. 新材料阻燃外殼

新研製的玻璃纖維布與 PC 板一體化外殼，已通過了針對鐵路車輛部件的燃燒測試。該外殼熔融時不滴落，不破裂，確保了乘客的安全。

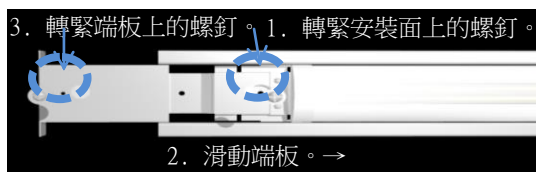
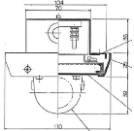
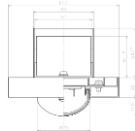
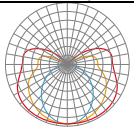
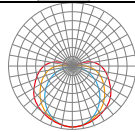


圖44本體兩點螺釘固定方式^[3-9]

d. 傳統燈具的對比，如表6所示。

表6傳統燈具及LED燈具功率對照表^[3-9]

	傳統螢燈燈具(A)	LED 燈具(B) 功率為螢光燈燈具的一半， 感覺到的亮度與螢光燈具相同(B/A))		
		25 W	50.0 %	◎
功率	50 W	25 W	50.0 %	◎
年電費	¥144,540	¥72,270	50.0 %	◎
二氧化碳排放量	2,694 千克	1347 千克	50.0 %	◎
燈具光通量	2,680 流明	1430 流明	53.4 %	◎
效能	53.6 流明/瓦	57.2 流明/瓦	106.7 %	◎
色溫	4200 k	5,000 k		-
平均顯色指數	Ra61	Ra70		○
光源壽命	12,000 小時 約 2.2 年	60,000 小時，約 11.0 年	500.0 %	◎
光源材料	玻璃+防飛濺膜	PC 板+玻璃纖維布		○
燈具橫切面			<ul style="list-style-type: none"> LED 具有更好的光分布特性，能確保水平方向的照明度。 對於拱形天花板，螢光燈照明裝置的照明度更佳。 	◎
配光特性				○

e. 經濟效益研究，如表7及圖45所示。

表7傳統燈具及LED燈具經濟對照表^[3-9]

	傳統螢燈具(A)	LED 燈具(B) (相當於螢光燈燈具功率的 50%) (感覺到的亮度與螢光燈具相同)(B/A)		
		¥43,500	334.6%	×
燈具定價(估算價)	¥13,000	¥43,500	334.6%	×
光源定價	¥500	¥0	0.0%	◎
光源/燈具的壽命	12,000 小時	60,000 小時	500.0%	◎
所安裝燈具數量	24 只	24 只		
日均/年均點燈時間	15 小時/5,475 小時	15 小時/5,475 小時		-
初始成本	¥312,000	¥1,044,000	334.6%	×
光源更換成本	¥6,000	¥0	0.0%	◎
維護成本	¥150,540	¥72,270	48.0%	◎

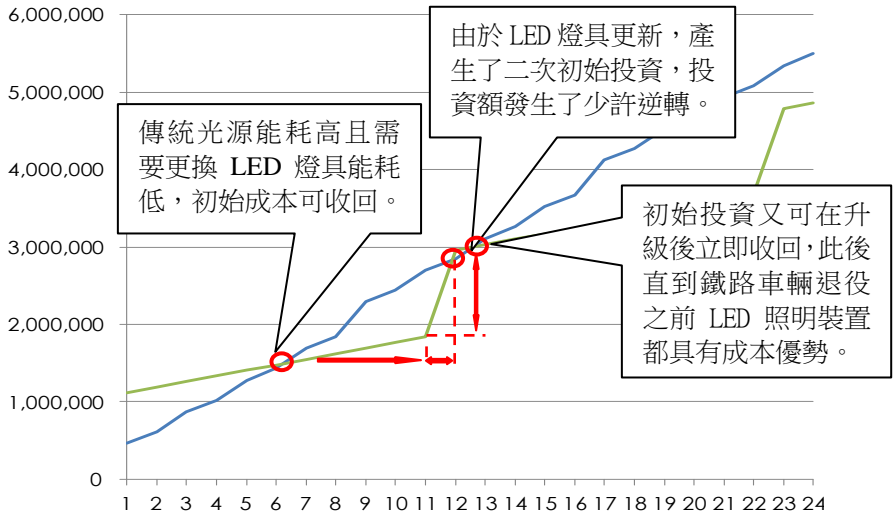


圖45 LED燈具時間及效益比^[3-9]

2.5.2.1.車站大樓的 LED 照明

(1) 設置地點

先進的 LED 照明產品具高光效、高品質、長壽命...等優點，使用範圍可覆蓋各種應用場所，如圖 46 所示。

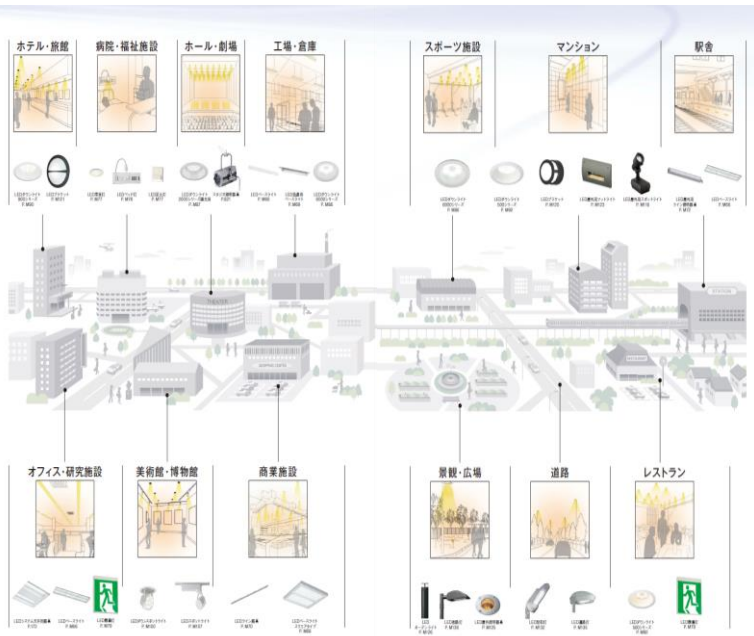


圖 46 LED 燈具應用範圍^[3-9]

車站大樓工程案例，如圖 47 所示。



阪神電氣鐵道
野田站



阪急社
梅田站



仙台地鐵
南北線
廣瀨通站



京濱社
追濱站

圖 47 日本車站 LED 照明工程案例^[3-9]

(2) 站區各區域照明種類規劃，如圖 48 所示。

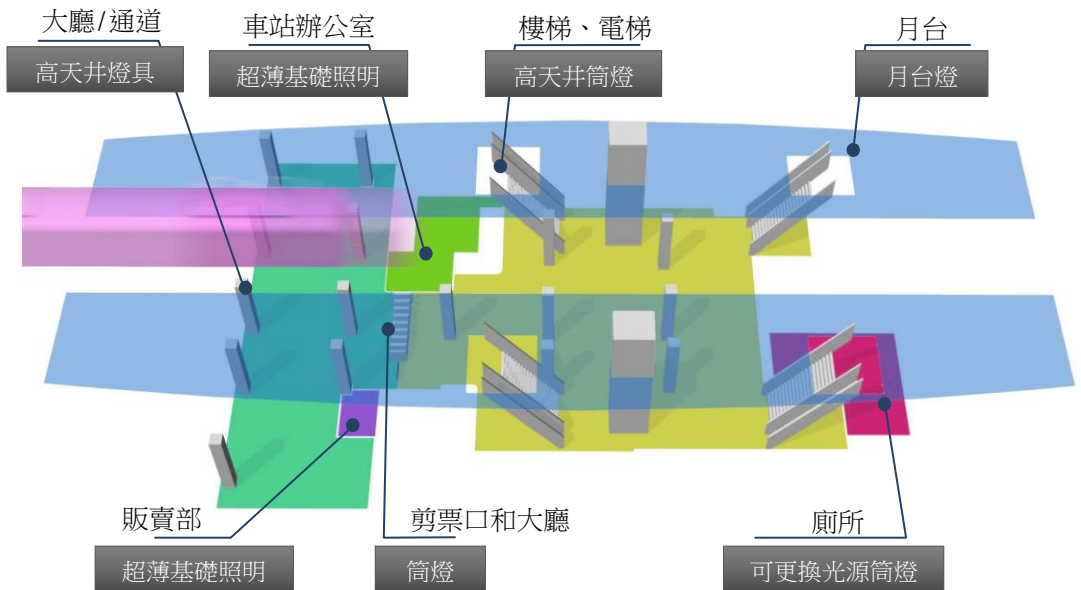


圖 48 車站區域照明規劃^[3-9]

(3) LED 照明系統

初期照度補正功能(Constant Luminous Flux Control)

初期照度補正功能及連續調光的功能，使燈具可保持恆定光通輸出。

不僅僅是使用 LED 光源，所有的燈具設計都以節能為基本設計理念。一般說隨着燈具的使用光通量會降低，但通過增加電源輸入，我們可以使光通量保持在穩定的水平。有了這個功能，整個燈具的光通量，得以容易保持，如圖 49 所示。



圖49初期照度補正^[3-9]

(4) 車站行政辦公室的照明，如圖 50 所示。

與傳統照明燈具相比較，燈具連接時克服了光線的不連續性，大大的改進了照明效果。燈具兩側發光可照亮天花板，使空間整體感覺明亮。



連結時の光の途切れを軽減。

器具の端部に透過性部材を採用し、従来品より光の途切れを軽減しています。



蛍光灯器具連結時
FHT-42307N-PM9



薄形LEDベースライト連結時
LEDT-48101W-LDJ (専用の連結部品使用)
※定格出力形と高出力形を連結した場合も、同等の輝度のため、違和感がありません。

[計算基準]

- 8米x5米/安裝高度3米
- 反射/天花板：70 %、牆壁：50 %
地板：10 %
- 維修率：螢光燈照明0.69、LED照明0.77
- 年照明時間：7 300小时 ●電源：200 V
- 估計電費：22日元/千瓦時（含稅）。
不包括燈具更換工作的勞動費用等

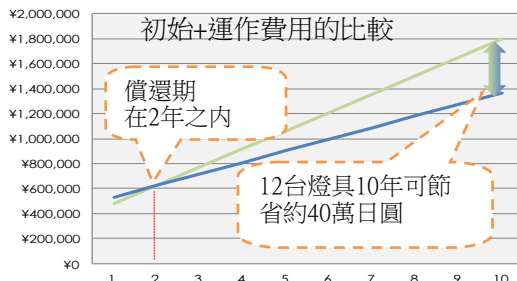


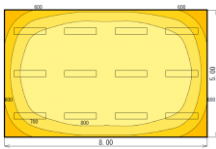
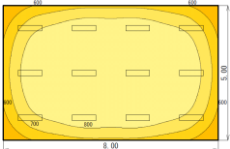


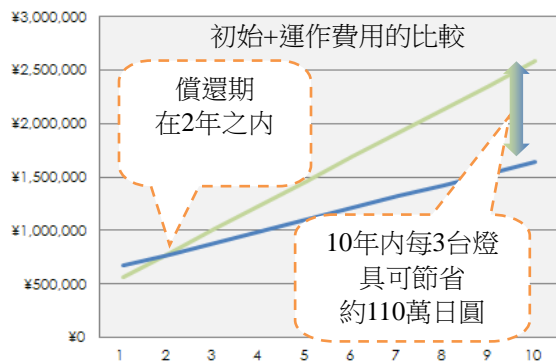
圖 50 行政區域照明基準及效益^[3-9]

表 8 行政區照明經濟效益比較^[3-9]

燈具	Hf32Wx2	LED 超薄吸頂式照明
型號名稱	FHT-42414-PN9	LEDT-48101W-LDJ
		
安裝台數	12	12
照度分布圖		
平均光照度	831 lx	828 lx
耗電量/單元(平均)	65 W	48 W
初始費用	¥336,000	¥441,600
運作費用	¥145,708	¥92,506
初始+運作費用(10年)	¥1,793,080	¥1,366,656

(5) 樓梯和電扶梯的照明

高天井燈(LED)使用壽命可長達 60,000 小時，減少了售後維修，可瞬時點燈且可頻繁開關電燈，照明基準及效益如圖 51 及表 9 所示。



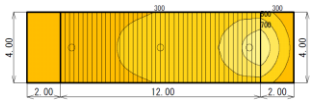
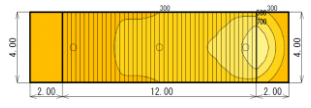


[計算基準]

- 12米x4米 / 安裝高度7米
- 反射 / 天花板：50 % 牆壁：30 % 地板：10 %
- 維修率：HID照明0.53，LED照明0.77
- 年照明時間：7,300小時 ● 電源：200 V
- 估計電費：22日元 / 千瓦時 (含稅)。
不包括燈具更換工作的勞動費用等

圖51梯間照明基準及效益^[3-9]

表9梯間照明經濟效益比較^[3-9]

燈具	HID 高天井灯 400W	LED 高天井燈
型號名稱	SN-4044A(MF400L-J2/BU-P)	LEDJ-20023W-DJ2
		
安裝台數	3	3
照度分布圖		
平均光照度	367 lx	370 lx
耗電量/單元(平均)	415 W	200 W
初始費用	¥340,200	¥558,000
運作費用	¥224,220	¥96,360
初始+運作費用(10年)	¥2,582,395	¥1,521,600

(6) 通道的照明

用於通道照明，利用瞬時點燈的優勢，停電後再啟等時可瞬間點亮，達到節能的目的。高天井筒燈相當於 HID 400 W 高天井燈，消耗功率減少 52 %，減少了售後維修。與傳統 HID 相比較可減少能耗，照明基準及效益如圖 52 所示。

[計算基準]

- 50米x10米/安裝高度9米
- 反射/天花板：50 % 牆壁：30 % 地板：10 %
- 維修率：HID照明 0.47，LED照明0.77
- 年照明時間：7,300小時 ● 電源：200 V
- 估計電費：22日圓/千瓦時（含稅）。
不包括燈具更換工作的勞動費用等

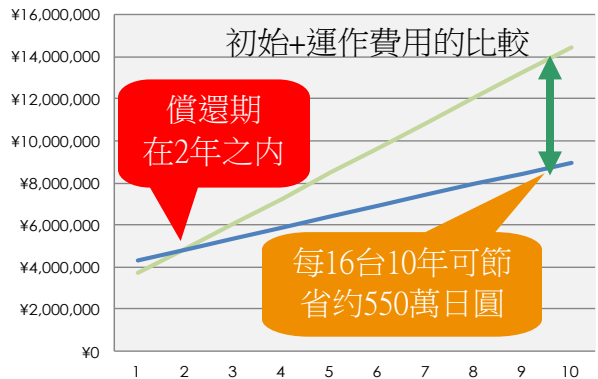


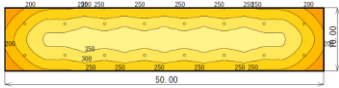
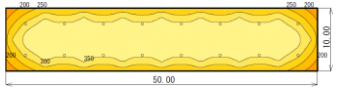


圖52通道照明基準及效益^[3-9]

表10通道照明經濟效益比較^[3-9]

燈具	HID400W 高天井筒燈	LED 高天井筒燈
型號名稱	DD-40188(MF400L-J2/BU-P)	LEDD-20023W-DJ2
		
安裝台數	16	16
照度分布圖		
平均光照度	304 lx	346 lx
耗電量/單元(平均)	415 W	200 W
初始費用	¥2,493,600	¥3,824,000
運作費用	¥1,195,837	¥513,920
初始+運作費用(10年)	¥14,451,973	¥8,963,200

(7) 剪票口和大廳的照明

為剪票口和站內大廳提供高效優質的照明，較低的耗電量節省了運作費用，更長的使用壽命，降低維修頻率及費用，照明基準及效益如圖53及表11所示。

[計算基準]

- 30米x20米/安裝高度4.5米
- 反射/天花板：50 % 牆壁：30 %
地板：10 %
- 維修率：CDM 照明0.61，LED照明0.6
- 年照明時間：7,300小時 ●電源：200 V
- 估計電費：22日圓/千瓦時（含稅）。
不包括燈具更換工作的勞動費用等

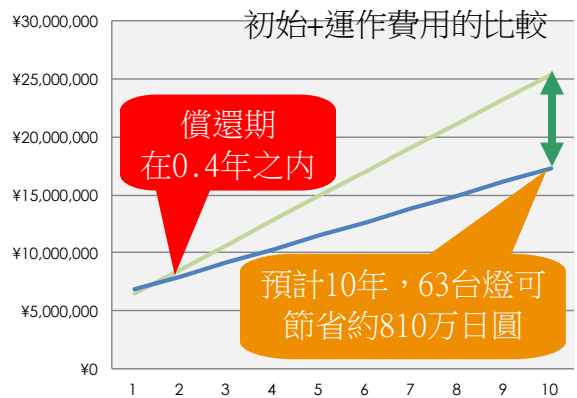


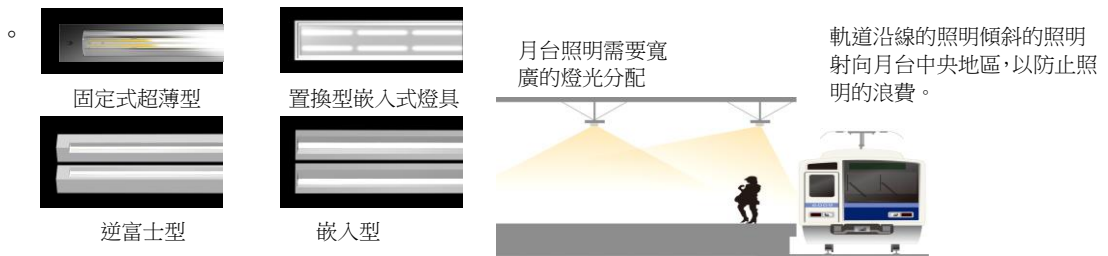
圖53剪票口及大廳照明基準及效益^[3-9]

表11剪票口及大廳照明經濟效益比較^[3-9]

燈具	CDM150W 筒燈	LED 筒燈 9000 系列
型號名稱	DD-15113K-PN9	LEDD-90003W-LD9
		
安裝台數	60 Units	63 Units
照度分布圖		
平均光照度	304 lx	346 lx
耗電量/單元(平均)	415 W	200 W
初始費用	¥2,493,600	¥3,824,000
運作費用	¥1,195,837	¥513,920
初始+運作費用(10年)	¥14,451,973	¥8,963,200

(8) 月台的照明

LED照明提供更佳的照明解決方案，以滿足各車站月台的需要，照明基準及效益如圖54所示。



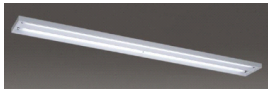
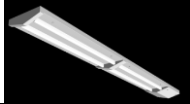
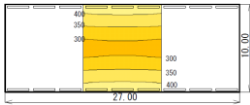
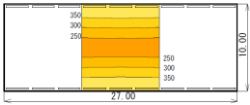
[計算基準]

- 月台長200米，3米行車線/安裝高度5米
- 反射/天花板：50 % 牆壁：30 % 地板：10 %
- 維修率：螢光照明0.7，LED照明0.81
- 年照明時間：7,300小時 ●電源：200 V
- 估計電費：22日元/千瓦時（含稅）。
不包括燈具更換工作的勞動費用等



圖54月台照明基準及效益^[3-9]

表12月台照明經濟效益比較^[3-9]

燈具	FLR110Wx2	LED 月台照明
型號名稱		
		
安裝台數	480	480
照度分布圖		
平均光照度	354 lx	311 lx
耗電量/單元(平均)	225 W	81 W
初始費用	特別訂購	特別訂購
運作費用	¥18,162,400	¥6,244,128
初始+運作費用(10年)	¥181,624,000	¥62,441,280

(9) 洗手間的照明

給人以清潔舒適感的衛生間照明：(a) 光源可更換燈具維修方便；(b) 可根據需求選擇光源：顯色性，照度，照明基準如圖55所示。

[計算基準]

- 7米x4米/安裝高度 2.5米
- 反射/天花板：50 %；牆壁：30 %；地板：10 %
- 維修率：螢光燈照明0.63，LED照明0.6
- 按照明時間：7,300小時 ● 電源：200 V
- 估計電費：22日元/千瓦時（含稅）。
不包括燈具更換工作的勞動費用等

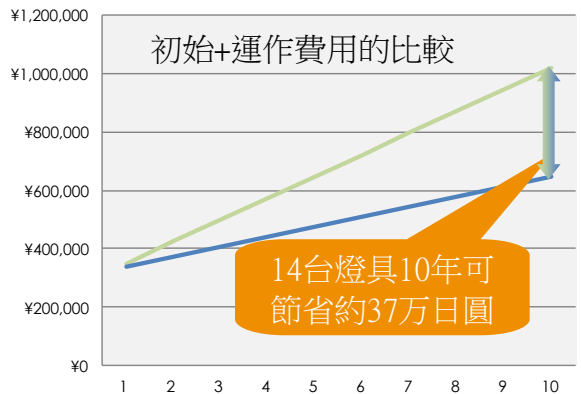


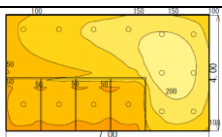
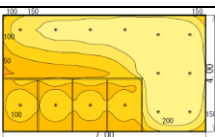


圖55洗手間照明基準及效益^[3-9]

表13洗手間照明經濟效益比較^[3-9]

燈具	FHT24W 筒燈	光引擎 1100 系列 筒燈
型號名稱		
		
安裝台數	14	14
照度分布圖		
平均光照度	124 lx	171 lx
耗電量/單元(平均)	25 W	15.2 W
初始費用	¥274,400	¥305,200
運作費用	¥74,606	¥34,176
初始+運作費用(10 年)	¥1,020,460	¥646,957

2.5.3. 超電力離子電池(SCiB；Super Charge ion Battery)

超電力離子電池(SCiB；Super Charge ion Battery)為日本東 X 株式會社新開發之高功率電池，採用鋰鈦氧化物為負極材料，具有相當穩定的負極介面。使得該電池擁有使用壽命長、電流充放電能力強、安全性高等優點，並無爆炸、燃燒等危險性，均較目前熱門產品磷酸鐵鋰電池更為優異，其中可以 5 分鐘快速將電池充飽到 90 % 以上的性能特點，正可解決電動車長期發展所面臨的充電關鍵問題。

SCiB 採用新穎負極材料，具備高水準之耐熱穩定性、高燃點之電解質，以及防止內部短路與熱度上升之架構。目前 SCiB 產品是以 10 個串聯排列的 4.2 Ah 電池芯、結合電池管理系統的模組形式供應，經過 3,000 次快速充放電後，電量損失不到 10 %；能承受 6,000 次以上之充放電週期。除了電動腳踏車、機車、電動導覽車、搬運車及建築工具等已經使用可充電電池的設備外，SCiB 亦可應用於電力再生設備、緊急電源與風力發電系統等。此外日本業者也計畫開發更高性能的 SCiB 電池芯以因應混合動力汽車及電動汽車的需求。

SCiB 充電電池具備高安全性，有別於一般的鋰鐵電池，採用化學性穩定的氧化鈦與鋰錳等材質製成陽極板，穩定性優異，在碾壓測試下，即便電池內部正/負極間的隔膜破裂造成短路，電池依然無燃燒或爆炸之虞。此外於弱電狀態下的 SCiB 電池，充電 6 分鐘可恢復 80 % 的電力！充

電 15 分鐘可達到滿電狀態，充電效能約為一般電池的 6 倍。壽命方面，經過 6,000 次的充放電後，SCiB 電池仍具備 80 % 以上的電容量，壽命相當長，耐久性可達 10 年以上。

耐低溫為此電池另一特性，最佳工作溫度為 25 °C 以上，相較於 25 °C 狀況下的電容量表現，於 -30 °C 低溫仍具備 80 % 的電容量！雖然 SCiB 電池之電容量並不高，但是從高安全性、長壽命、抗低溫等特性來看，未來極具競爭力。SCiB 是確保很高的安全性的基礎上，經過了 6,000 次的耐久測試而且具有快速充電性能，高功率性能，低溫運行等諸多優秀功能的可充電電池，相關數據，如圖 56 所示。



圖 56 超電力離子電池規格^[3-9]

超電力離子電池(SCiB)的應用：把可充電電池搭載於車輛或地面，如 1.與變電所供給的電力混合使用；2.與柴油機混合使用，如圖 57 所示。

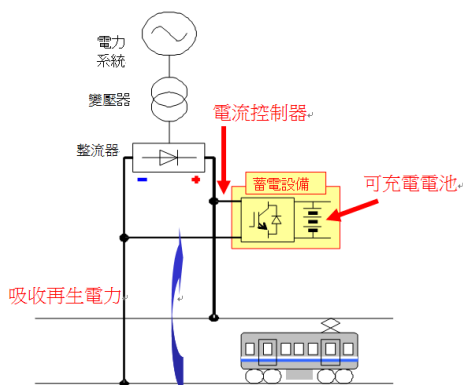


圖 57 超電力離子電池(SCiB)的應用^[3-9]

超電力離子電池(SCiB)性能簡述如下：

2.5.3.1.長壽命性能

超電力離子電池(SCiB)TM 經過 6,000 次的充放電後，仍具備 80 % 以上的容量，如圖 58 所示。

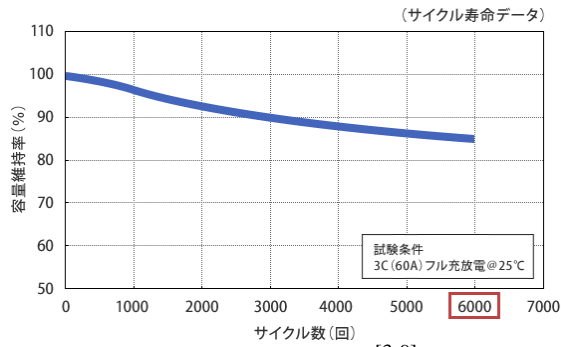


圖 58 充放電容量^[3-9]

2.5.3.2.急速充電性能

超電力離子電池(SCiB)TM 充電 6 分鐘可恢復 80 % 以上的電池容量，如圖 59 所示。

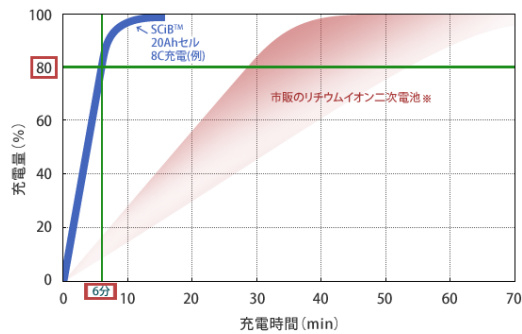


圖 59 急速充電能力^[3-9]

2.5.3.3.低溫動作性能

超電力離子電池(SCiB)TM 於-30 °C 的低溫環境仍具備 80 % 的電容量，如圖 60 所示。

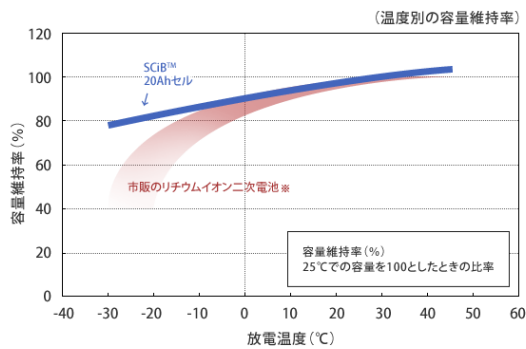


圖 60 低溫電容維持率^[3-9]

三、結語

眾所週知，日本擁有先進之節能技術，其能源利用效率領先國際水準，此次研修之主要內容，一是瞭解和學習日本對軌道車輛之節能方法；二是瞭解及學習日本軌道車輛之節能工作機制。此次研修日程安排緊湊，先後走訪參觀生產及使用節能設備之工廠暨軌道車輛運營單位，了解節能產品應用於軌道車輛之現況及應用產品生命週期對軌道車輛產生之附加價值。

日本的鐵路運輸業處在劇烈的環境變化之中，對節能之要求是重大變化之一，鐵路企業很早以前即開始致力於節能，與其他交通工具相比，鐵路之人均運輸能耗原本就比較低，例如新幹線的人均運輸能耗只有飛機的 1/25。惟鐵路運業者為了提高乘客的乘坐舒適度，加設各項服務設施，但車輛之耗電量亦隨之增加。緣此，車輛製造廠及運營單位積極採用了削減耗電量之技術，例如採用 LED 照明。惟不只是照明，於電動機方面亦實現了高效率化，採用的是比一般感應電動機效率更高之永磁式同步電動機。另採用使用新材料 SiC(碳化硅)製成之功率半導體以驅動電動機，或是作為電池充電時之控制組件或供給電力。與使用 Si(硅)的現行功率半導體相比，使用 SiC 的功率半導體能夠大幅降低電力損耗，並實現零組件小型化之目的。

在車輛之外的領域，車站之耗電量亦為一重大議題，東日本旅客鐵路株式會社於 2010 年度的總銷售額中，車站耗電量占總用電量約 20%，並呈現逐年遞增的趨勢，為了減緩此趨勢，鐵路運營商開始於車站採用光伏發電系統及 LED 照明等，站台和大堂的照明、顯示站名等信息的電子顯示器及乘務員所用監視器的背景光源也採用 LED，而根據情況，控制 LED 照明還可以進一步省電。通過採用照明控制系統，耗電量預計將減少約 50%。照明在整座車站耗電量中所占的比例約為 50%，由此計算，整體耗電量大約可減少 25%。從 SiCB 變頻器和永磁式同步電動機 (PMSM)、蓄電系統、無線供電及 LED 照明等能源部份，以至數位電子看板、位置資訊技術和高速通訊等先進技術開始被導入至鐵路基礎建設，鐵路運業者肩負著必須將下一代能源技術與資通訊技術開花結果的重責大任。

節能環保是軌道車輛的特色，臺鐵局新購城際客車及區間客車導入多項節能技術及設備，例如採最新自動控制再生電軔技術及粉末冶金煞車材料，節省動力能源消耗及提高列車煞車效能，逐步引入綠色環保運輸概念應用於機車車輛製造。因應綠色運輸風潮，整合無碳或公共運輸運具，打造綠色無縫之服務意象，並確保臺鐵永續營運發展。

參考文獻

1. 公務出國報告資訊網(2012)，
<http://report.nat.gov.tw/ReportFront/index.jspx>。
2. 黃得晉(2012)，電動車驅動馬達發展現況，IT IS 產業評析，金屬中心 產業研究組。
3. [https://www.toshiba.com/tic/industrial/rechargeable-battery\(2012\)](https://www.toshiba.com/tic/industrial/rechargeable-battery(2012))。
4. <http://ja.wikipedia.org/wiki/JRHD300> 形ハイブリッド機関車(2012)。
5. 東芝牽引驅動技術(2012)，東芝株式會社。
6. PMSM_supply_record(sent)(CN)(2012)PPT，東芝株式會社。
7. 加藤仁(2012)，柴油混合型動力調車機車 HD300 型之電氣產品，東芝株式會社。
8. 車站大樓的 LED 照明(2012)，東芝株式會社。
9. 鐵路車輛的 LED 照明(2012)，東芝株式會社。
10. 中野車輛區的概要(2012)，東京地下鐵株式會社。

臺鐵旅客遭受攻擊的風險管理

Risk Management of Passenger Assaults for TRA

孫千山 Suen, Chian-Shan¹
鍾志成 Jong, Jyh-Cherng²
張開國 Chang, Kai-Kuo³
吳熙仁 Wu, His-Jen⁴

聯絡地址：11494 台北市內湖區新湖二路 280 號
Address: No. 280, Xinhu 2nd Rd. Neihu Dist., Taipei City 11494, Taiwan

電話(Tel)：(02) 8791-9198

電子信箱(E-mail)：james_suen@sinotech.org.tw

摘要

臺北捷運系統發生乘客蓄意殺人事件後，國人搭乘捷運及鐵路系統的風險意識上升。本研究試圖透過統計及風險管理的技術，來分析旅客搭乘臺鐵系統遭受攻擊的風險水準，研究結果發現，搭乘臺鐵系統在傍晚至凌晨時段(1600~2400)比較容易受到攻擊，受害人以 16~25 歲的女性居多，以受到性騷擾為大宗，並以人潮較少的東部地區以及招呼站為最常發生的地點。經分析後發現，臺鐵旅客遭受攻擊的風險屬於不可容忍的水準。若仿照機場採取嚴格的安檢措施雖可有效降低風險，但對通勤旅客衝擊過大，而裝設錄影監視設備雖不具經濟效益，但可達到嚇阻的效果。根據英國的經驗，若搭配列車長及鐵路警察的走動巡察，可有效提升旅客乘車的安全感。

關鍵詞：旅客遭受攻擊、風險管理、風險評量。

Abstract

After the event of passenger assaults happened in the Taipei Rapid Transit, the risk awareness of taking rapid transit and railway systems were increasing. This study attempts to evaluate the risk level of TRA passenger assaults via the techniques of statistical analysis and risk management. The results show that passenger assaults are more likely to happen between 16:00~24:00. Most of the victims are 16~25-year-old

¹財團法人中興工程顧問社 土木水利及軌道運輸研究中心 軌道運輸組 組長

²財團法人中興工程顧問社 土木水利及軌道運輸研究中心 主任

³交通部交通運輸研究所 運輸安全組 組長

⁴交通部交通運輸研究所 運輸安全組 研究員

females, suffering from sexual harassment in the Eastern Line and at staffless stations. The risk level of TRA passenger assaults falls in the intolerable region. Although enforcing strict security checking at railway stations like airports could effectively reduce the risk of passenger assaults, the impact to commuters are too high. On the other hand, installing CCTV equipments, though not cost-effective, may defer perpetrators from taking actions. According to the experiences of United Kingdom, CCTV together with the patrols of conductors and polices could effectively enhance passengers' senses of safety and security.

Keywords: *Passenger Assaults*、*Risk Management*、*Risk Evaluation*

一、前言

民國 103 年 5 月 21 日下午臺北捷運車廂內發生隨機砍人事件，造成 4 人死亡 20 餘人輕重傷的慘案，引起國內外媒體之關注。此一事件的發生，也喚起民眾對於大眾運輸系統旅客遭受攻擊的風險意識。事實上，這並非國內軌道系統唯一次旅客遭受攻擊的事件，在民國 102 年 4 月 12 日，台灣高鐵列車亦發生有人惡意放置炸彈的事件，所幸炸彈並未引爆，而過去臺鐵也曾有旅客遭受到攻擊的事件，只是死傷的情形不若北捷殺人事件嚴重，社會的關注較少而已。

一般咸認為鐵路是所有大眾運輸系統中相對安全的運具，但列車在兩站之間的運送過程，所有旅客是處於一個封閉的空間，一旦發生攻擊事件，旅客逃生則相對緩慢。早期的恐怖攻擊大多發生在飛機上，但機場的安全管理日趨嚴格，相較之下，鐵路系統的安全管理較為寬鬆，因此近十年來，鐵路系統遭受攻擊的事件飆升，甚至高於航空系統。表 1 是近 40 年來國際間鐵路遭受恐怖攻擊的事件列表，發生地點遍布全球各地，其中次數最多的是俄羅斯及印度，均有六次之多，死亡人數最多的是發生在 2001 年 8 月 10 日安哥拉內戰時，一列火車受反坦克地雷的攻擊導致出軌的武裝攻擊事件，而受傷人數最多的則是發生在 1995 年 3 月 20 日奧姆真理教發動的東京地鐵沙林毒氣事件，導致 6,252 人受傷。

除了恐怖攻擊事件之外，一般性或隨機性的鐵路旅客遭受攻擊事件更是不勝枚舉，大至傷害，小至言語恐嚇皆屬旅客遭受攻擊的範疇。究竟旅客搭乘臺鐵系統遭受攻擊的比例有多高、哪些區域比較容易受到攻擊、風險水準如何、營運機構該採取哪些減緩措施來降低此項危害的風險水準，都是值得探討的課題。本研究希望透過資料的分析與評量，利用風險管理的技術，逐一回答前述問題，除了讓一般旅客了解自身的風險之外，也提供營運機構處置及降低風險的建議，希望能夠提升臺鐵系統之整體安全水準。

表 1 國際上鐵路系統的恐怖攻擊事件

年代	地點	國家	日期	死亡	受傷
1970 年代	桑布羅谷聖貝內代托	義大利	1974 年 8 月 4 日	12	48
	亞歷山大	埃及	1976 年 8 月 14 日	8	51
	莫斯科	蘇聯	1977 年 1 月 8 日	7	37
1980 年代	Dunmurry	英國	1980 年 1 月 17 日	3	5
	博洛尼亞	義大利	1980 年 8 月 2 日	85	大於 200
	-	義大利	1984 年 12 月 23 日	16	大於 200
1990 年代	附近艾斯尤特	埃及	1994 年 2 月 19 日	0	4
	巴庫	阿塞拜疆	1994 年 3 月 19 日	14	49
	巴庫	阿塞拜疆	1994 年 7 月 3 日	13	58
	東京	日本	1995 年 3 月 20 日	13	6,252
	巴黎	法國	1995 年 7 月 25 日	8	80
	帕洛弗迪	美國	1995 年 10 月 9 日	1	78
	巴黎	法國	1996 年 12 月 3 日	2	數十個
2000 年代	馬尼拉	菲律賓	2000 年 12 月 30 日	-	-
	Zenza 和棟多鎮之間	安哥拉	2001 年 8 月 10 日	252	165
	江布爾	印度	2002 年 5 月 13 日	12	80
	拉菲加恩傑	印度	2002 年 9 月 10 日	130	500
	斯塔夫羅波爾邊疆區	俄羅斯	2003 年 9 月 3 日	7	80
	斯塔夫羅波爾邊疆區	俄羅斯	2003 年 12 月 5 日	46	170
	莫斯科	俄羅斯	2004 年 2 月 6 日	41	最多 120
	馬德里	西班牙	2004 年 3 月 11 日	191	2,050
	倫敦	英國	2005 年 7 月 7 日	56	700
	江布爾	印度	2005 年 7 月 28 日	13	50
	孟買	印度	2006 年 7 月 11 日	209	714
	帕尼帕特	印度	2007 年 2 月 18 日	68	50
	科倫坡	斯里蘭卡	2008 年 5 月 26 日	8	72
2010 年代	莫斯科	俄羅斯	2010 年 3 月 29 日	40	102
	西梅迪尼普爾	印度	2010 年 5 月 28 日	145	200+
	達吉斯坦	俄羅斯	2010 年 7 月 23 日	0	0
	達吉斯坦	俄羅斯	2010 年 8 月 15 日	0	0

資料來源：維基百科^[9]及本研究整理

二、臺鐵旅客遭受攻擊的統計分析

參考鐵路警察局所登錄旅客遭受攻擊之分類，主要區分為：殺人、傷害、強盜、搶奪、強制性交、性交猥褻、性騷擾、恐嚇取財；而英國鐵路安全及標準委員會（Rail Safety and Standards Board, RSSB）^[5]則是將旅客遭受攻擊區

分為：謀殺、重傷害、其他傷害、一般攻擊、性侵、性騷擾、怒罵恫嚇。若依此標準，旅客遭受攻擊涵蓋的範圍相當廣泛，不僅僅只有死傷而已。本研究參酌以上的分類方式，將「旅客遭受攻擊」定義為：「同時有受害人與加害人存在，且受害人在鐵路營運單位管轄範圍內遭受加害人攻擊者」，同時並以鐵路警察局登錄之資料為分析對象。

根據鐵路警察局統計資料顯示，2009~2011 年期間鐵路警察局的轄區範圍內，共發生 50 件旅客遭受攻擊事故與事件，並造成 1 死 19 傷。以下分別整理車上/站內旅客遭受攻擊的次數、時間分布、受害人與加害人年齡、性別、攻擊類型、原因與站內受攻擊之車站等級統計資料，茲將其結果整理說明如下，如圖 1~圖 10 所示。

圖 1 顯示過去三年來，車上旅客遭受攻擊的次數有逐漸減少的趨勢，而站內遭受攻擊的次數則先降後升。

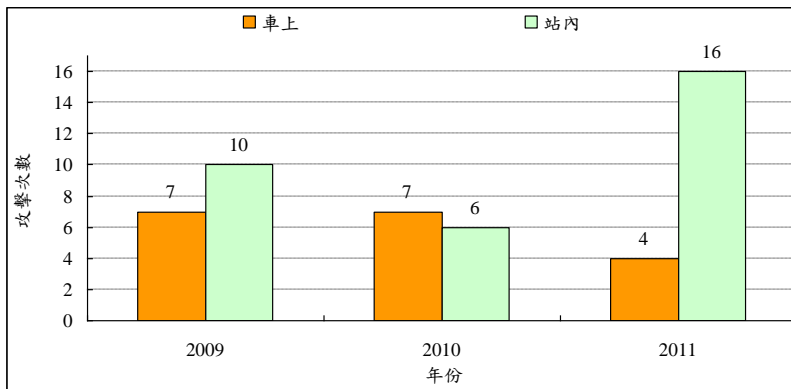


圖 1 臺鐵 2009~2011 年站內/車上旅客遭受攻擊比例

圖 2 說明旅客遭受攻擊的時間範圍多在午後居多，其中又以 16:00~24:00 間的次數高居整天之 50% 以上。

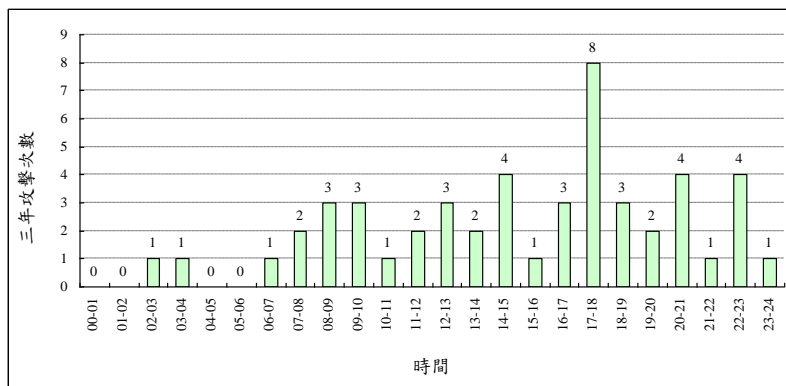


圖 2 臺鐵旅客遭受攻擊的時間分布

圖 3 顯示加害人年齡多分布於 24~44 歲之間，而受害人年齡則分布於 16~25 歲之間。

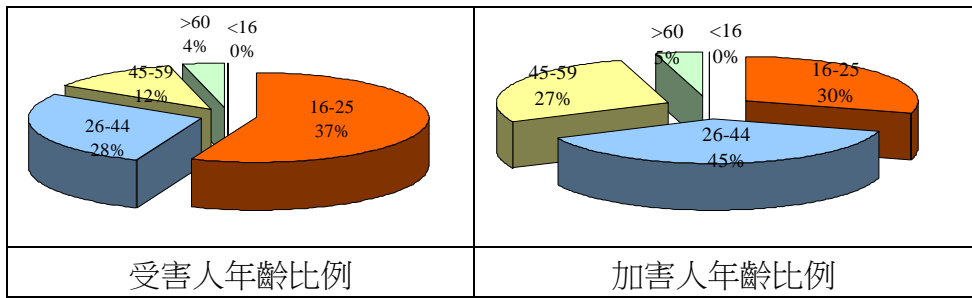


圖 3 臺鐵旅客遭受攻擊之受害人與加害人年齡

圖 4 表示加害人性別以男性為主，而受害人性別則以女性居多。

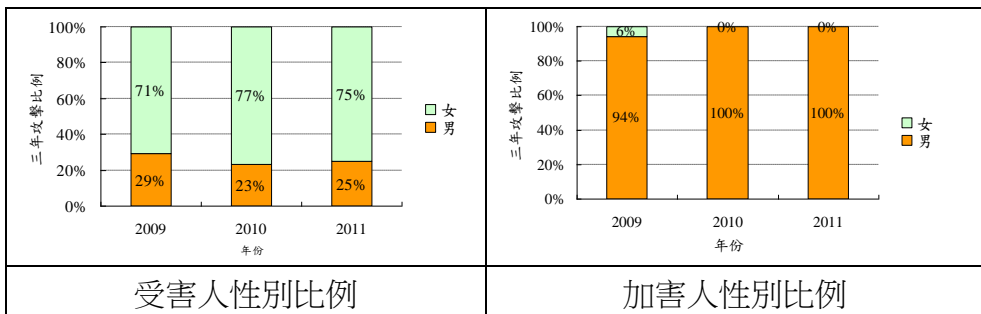


圖 4 臺鐵旅客遭受攻擊之受害人與加害人性別

圖 5 係依據鐵路警察局的攻擊分類，整理出車上旅客以遭受性騷擾為最多、性交猥褻次之，而站內則以性騷擾與傷害為大宗。

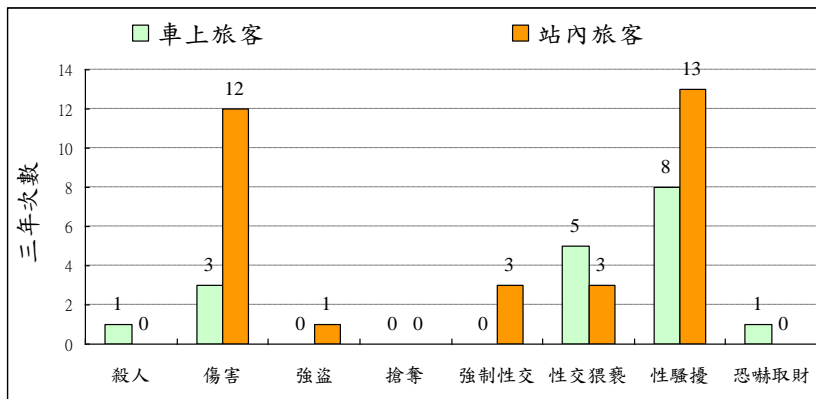


圖 5 臺鐵旅客遭受攻擊之攻擊類型統計

圖 6 再將其攻擊原因進行分析，得出車上攻擊的原因主要為情慾衝動與一時衝動，另站內攻擊的原因則為情慾衝動、口角與不明最多。

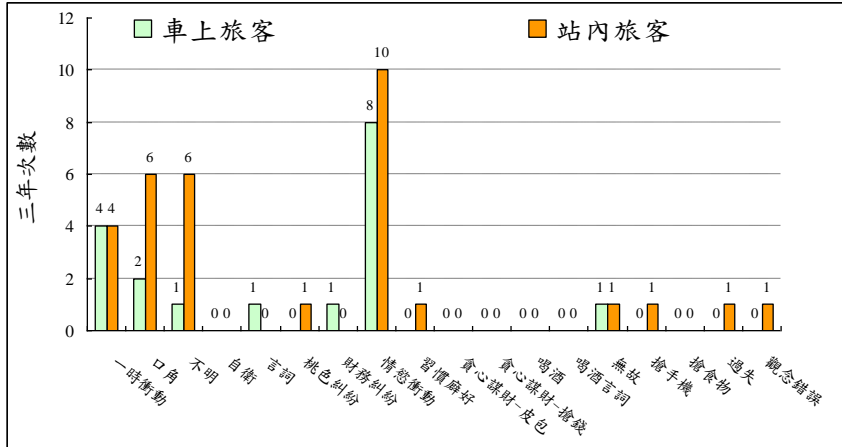


圖 6 臺鐵旅客遭受攻擊之攻擊原因統計

圖 7 係將資料依據行政院經建會都市及住宅發展處所擬訂之「臺灣地區綜合開發計畫」，區分為北（宜.基.北.桃.竹）、中（苗.中.彰.雲.投）、南（嘉.南.高.屏）、東（花.東）四個區域進行統計，結果發現旅客遭受攻擊之次數中，以北部區域最多、南部區域次之。

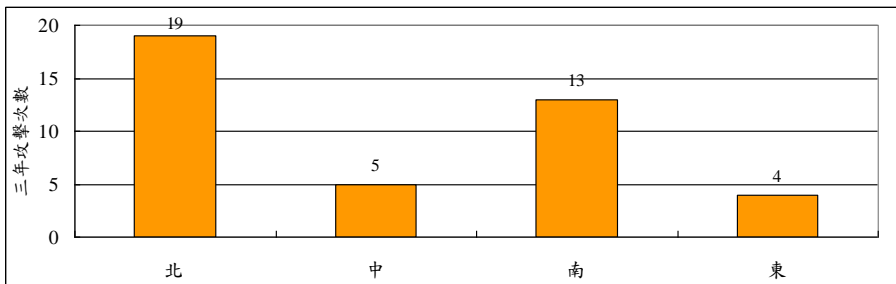


圖 7 臺鐵旅客遭受攻擊次數之區域統計

圖 8 則將上述區域資料納入進出站旅客之曝光量，可得每百萬進出車站旅客之攻擊次數中，以東部區域最多、南部區域次之。

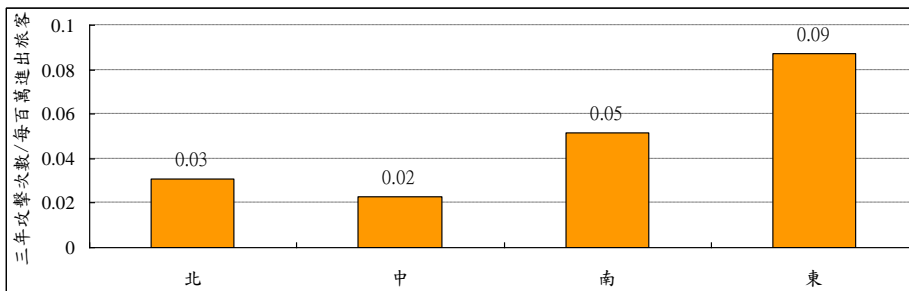


圖 8 臺鐵每百萬旅客遭受攻擊次數之區域統計

圖 9 則統計站內旅客遭受攻擊時所在的車站等級，結果發現旅客遭受攻擊

之次數中，一等站為最常發生的地點、特等站次之。

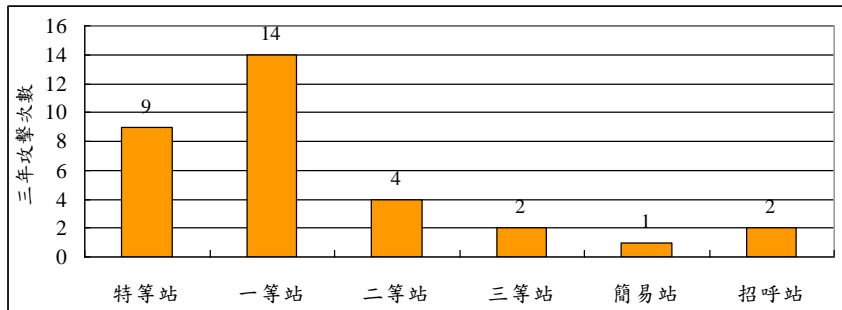


圖 9 臺鐵站內旅客遭受攻擊次數之車站等級統計

圖 10 則將上述車站等級資料納入進出站旅客之曝光量，可得每百萬進出車站旅客之攻擊次數中，以招呼站最多。

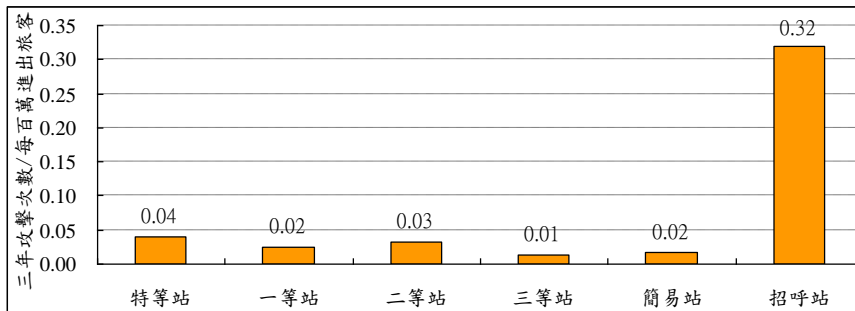


圖 10 臺鐵站內每百萬旅客遭受攻擊次數之車站等級統計

三、臺鐵旅客遭受攻擊的風險分析

根據第二、節的統計分析資料，以及英國鐵路安全及標準委員會(RSSB)曾對員工遭受攻擊所進行的分析^[5.]，本研究採用特性要因圖(魚骨圖)方法說明影響「車上旅客遭受攻擊」與「站內旅客遭受攻擊」兩項危害發生機率的^{因素}，如圖 11 所示，茲將要因說明如下：

1. 站內/車廂環境
主要包含：擁擠度、照明、車站特性(等級)。
2. 加害者本身因素
主要包含：個人特質、犯罪動機、外部影響。
3. 受害者反應
主要包含：知識、修養、持有物、技能、外在環境。
4. 嚇阻與支援因素
主要包含：人員、保安設備、法令。

至於影響危害嚴重度部分，本研究採用事件樹分析法，說明危害發生後三項影響嚴重度關鍵之前後關係，分別是「受害人或其他旅客是否通報」、「員工是否前往處理」、「是否迅速抵達處理」、「是否處理得宜」，如圖 12 所示。以下將研擬質化分析模式來進行風險評估，而風險處理與改善則透過敏感度分析來說明成本效益間之關係。

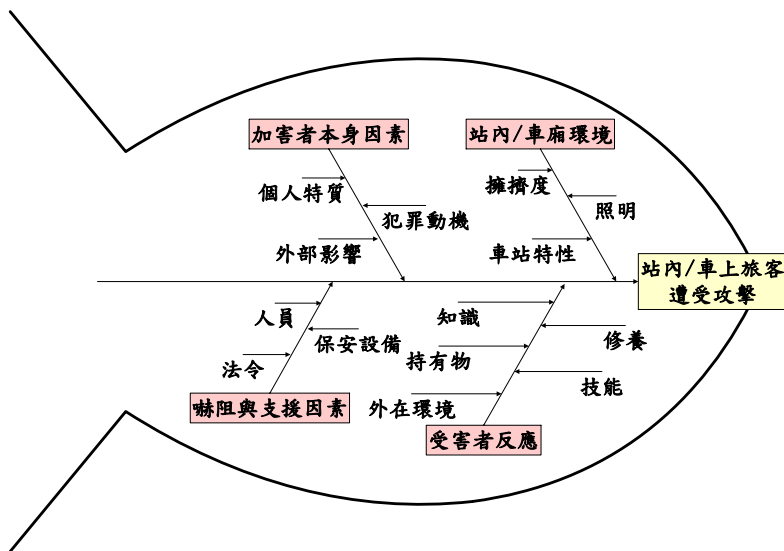


圖 11 影響站內/車上旅客遭受攻擊發生機率之因素

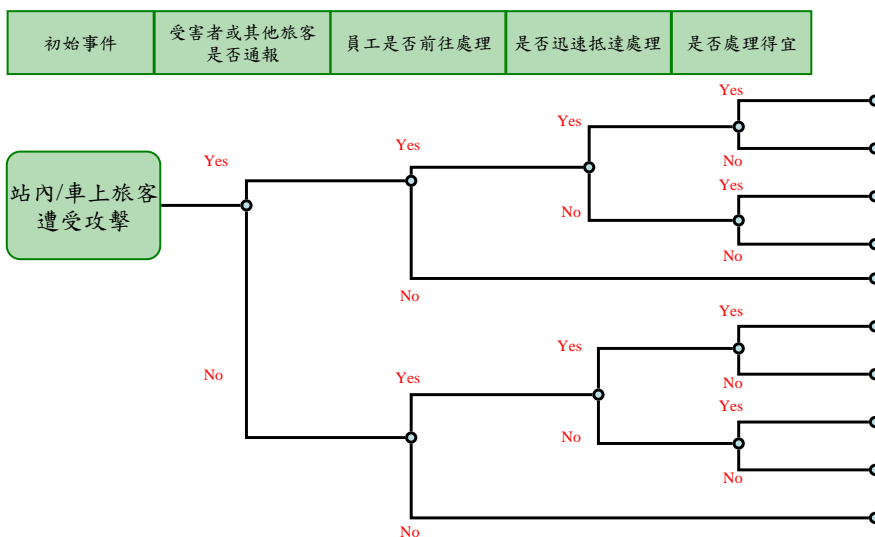


圖 12 影響站內/車上旅客遭受攻擊嚴重度之關鍵

四、臺鐵旅客遭受攻擊的風險評量

根據鐵路警察局統計資料，在車上旅客部分三年共發生 18 件旅客遭受攻擊事件，總計造成 1 死 3 傷，嚴重度為 0.072 等效死亡/次；站內部分三年共發生 32 件旅客遭受攻擊，共造成 0 死 16 傷，嚴重度為 0.05 等效死亡/次，套用臺鐵的非行車風險矩陣，兩個危害的風險等級落在區域 D 之 ALARP(As Low As Reasonably Practicable) ^[1, 1] 區間，屬於可容忍危害，如圖 13 所示。

非常嚴重	C	B	B	A	A
相當嚴重	D	C	B	B	A
嚴重	D	D	C	B	B
輕微	E	D	D	D	B
極輕微	E	E	D	D	C
	幾乎不可能	不太可能	可能	非常可能	幾乎確定

圖 13 臺鐵站內/車上旅客遭受攻擊之風險績效評量（歷史資料）

由於鐵路警察局的資料僅記錄真正有傷亡的情況，心靈創傷部分（如性騷擾之受害者）則是沒有相關的紀錄與描述，因此亦不在上述之分析範圍內。

此外，本研究假設並非所有旅客遭受攻擊事件均會回報給鐵路警察局，根據鐵路安全及標準委員會(RSSB)研究，若將旅客遭受攻擊分為謀殺(Homicide)、重傷害(Serious wounding)、其他傷害(Other wounding)、一般侵犯(Common assault)、性侵害(Rape)、性騷擾(Other sexual)、言語恫嚇(Verbal threat)，各類攻擊事件對應的回報率如表 2 所示。

表 2 英國各類型攻擊事故/事件的回報率

謀殺	重傷害	其他傷害	一般侵犯	性侵害	性騷擾	言語恫嚇
100 %	30±10 %	30±10 %	12±10 %	29±10 %	12±10 %	7±5 %

資料來源：RSSB ^[5, 1]

本研究參考表 2 之回報率來嘗試還原臺鐵站內/車上旅客遭攻擊的次數，考量國情之差異本研究將還原比例採表 2 的上限值，最後推估得出表 3 之還原推估次數。

表 3 還原臺鐵站內/車上旅客遭受攻擊次數推估

	三年實際記錄次數		假設 回報率	三年還原次數推估	
	站內	車上		站內	車上
殺人	0	1	100 %	0.5 ^{註 2}	1
傷害	12	3	40 %	30	7.5
強盜	1	0	40 %	2.5	1.25 ^{註 2}
搶奪	0	0	40 %	1.25 ^{註 2}	1.25 ^{註 2}
強制性交	3	0	40 %	7.5	1.25 ^{註 2}
性交猥褻	3	5	40 %	7.5	12.5
性騷擾	13	8	22 %	59.1	36.4
恐嚇取財	0	1	40 % ^{註 1}	1.25 ^{註 2}	2.5
總計	32	18	-	109.6	63.65

註 1：英國並無記錄此類攻擊，本研究引用英國一般傷害數據。

註 2：雖然 3 年未發生，但假設 6 年將發生 1 次，亦即用三年發生 0.5 次來還原。

由於臺鐵非行車類風險矩陣採值化方式分級，在頻率部分較難客觀判斷是否已落在圖 13 中的「非常可能」區，但若將相同的發生機率與嚴重度套用到臺北捷運與高雄捷運的量化風險矩陣^[6]，則該危害明顯屬於不可接受區，本研究建議風險評量上應保守取嚴重之等級，因此該危害仍應適度採取改善措施為宜。

五、旅客遭受攻擊的風險處理

要降低旅客遭受攻擊的風險，最有效的方式莫過於在車站對進入鐵路系統的旅客進行安全檢查，把攜帶武器或危險物品的旅客排除在外，以免在系統內發生攻擊事件，此種作法基本上跟航空系統的處理方法類似。目前在中國大陸，乘客搭乘鐵路系統必須通過車站的安全檢查才能進到付費區，因此比較不容易發生大規模的恐怖攻擊事件，但付出的代價也不低，除了安全檢查設備的投資之外，安檢的人力負擔也不小，此外，旅客排隊接受安檢的時間成本相當可觀。對於搭乘長途列車的旅客而言，排隊接受安檢的時間或許可以接受，但對於每日通勤的旅客而言，時間成本則是相當高。2014 年北京地鐵安檢升級，乘客排隊通過安檢的時間甚至高達 20~30 分鐘，對於原本嚴峻的通勤狀況更是雪上加霜。

針對減少旅客遭受攻擊的風險，英國鐵路業者亦提出一些建議對策，如表 4 所示。除此之外，英國並針對提升旅客安車上安全感的方法進行問卷調查，

發現有效提昇安全感的方法依功效高低排序分別為：(1)員工車上查票與走動巡察、(2)可通知車長或隨車人員的緊急按鈕、(3)車內 CCTV 監視系統、(4)警察定期/定點巡邏、(5)車長廣播告知列車延誤的原因、(6)列車中間車廂位置設置警衛、(7)確保車廂乾淨且無塗鴉。

表 4 英國鐵路業者減少旅客遭受攻擊之對策

項目	對策
改變政策與流程	<ul style="list-style-type: none"> 立法或修改法令來加強對鐵路營運業者的支持，例如立法讓營運業者有權拒絕嚴重酒醉乘客搭乘，尤其在夜間的時候 授權商家於車站經營時，可要求於特定時段必須經營或派駐人員
技術應用	<ul style="list-style-type: none"> 增設 CCTV 智慧型 CCTV -可發出告警提醒管理者，同時以警音對旅客發出警告 改善設計，減少視線死角以避免蓄意破壞 環境改善-更佳的照明與清潔 增加服務旅客的據點
員工技巧	透過訓練提昇員工安撫旅客與衝突處理技巧
員工支援	<ul style="list-style-type: none"> 在車站/車上配置各種安全維護人員 車上配置男性服務員 特種的運輸警察 設置旅行安全警察
追蹤服務	<ul style="list-style-type: none"> 協助受害人至受害中心安頓 出庭時有完善的警察支援
阻嚇措施	<ul style="list-style-type: none"> 與地方當局共同實施打擊犯罪計畫 向法院要求對累犯實施強制令 入口處增加路網的控制並減少無票旅客 與英國警察聯合執勤
服務品質	<ul style="list-style-type: none"> 受傷乘客的輔導計畫 增設安全區域，且該區域提供保安資訊
釋放精力	<ul style="list-style-type: none"> 鐵路業者透過費用補助方式，使年輕人透過適當活動消耗體力，使避免車站/車上之攻擊

資料來源：RSSB^[3]與本研究整理

在前述的各項措施中，旅客認為最安全的員工車上查票或走動巡查，目前臺鐵列車上均配置有列車長查票及處理旅客的事務，而可通知車長及隨車人員的緊急按鈕，以及車內 CCTV 監視設備，在最新的臺鐵列車上均有裝設，至於

警察定期/定點巡邏也在實施當中，但受限於鐵路警察的人力限制，實不可能大規模的執行。北捷案發生初期，臺北捷運列車上也經常發現有捷運警察或捷運公司的員工巡邏，但人力的負荷相當大，僅能作為短期的措施，實不可能長期施行，畢竟風險的處理，並非不計代價，仍需考慮經濟效益。

錄影監視設備（Close Circuit Television System，以下簡稱 CCTV）在運輸系統的管理與監督上提供許多幫助，故有廣泛的應用。就防範旅客遭受攻擊部分，主要提供兩方面的功效，一是嚇阻加害人，二是提供後續的調查證據。就風險管理來說，目的在提昇事前的預防並減少事發後的嚴重性，因此對照於圖 11 來說，裝設 CCTV 可歸類於「嚇阻與支援因素」中的保安設備，以下以車站內裝設 CCTV 為例，進行成本效益分析。

1.1. 裝設錄影監視設備（CCTV）的效益分析

增設 CCTV 究竟能減少多少比例的攻擊行為尚無定論，包括佈設的密度、位置、旅客實際回報攻擊事件的比例等因素都將影響改善成效。本研究參考英國 RSSB 之研究^[2.1]，保守估計站內 CCTV 可減少旅客遭受攻擊事件/事故約 0~10%，後續透過敏感度分析供決策者了解在這改善範圍的成本效益比。

減少旅客遭受攻擊對財務效益的幫助有限，根據英國 RSSB 之研究^[2.1]，降低旅客在站內遭受攻擊的風險，對營運公司財務來講最大的助益是可提昇民眾對鐵路安全的觀感，進而提昇民眾搭乘的意願，長期來看對營收產生幫助，但此效益實務上難以量化，故本節主要探討經濟效益部分，亦即減少旅客等效死亡所轉換的貨幣價值。

根據表 3 還原後的推估資料，總計 3 年共發生 109.6 次旅客遭受攻擊事件/事故，平均每次造成 0.05 等效死亡，若以改善幅度 0~10%，等效死亡的貨幣價值則依據交通部運研所於交通建設計畫經濟效益評估手冊^[7.1]中之建議值 790 萬來計算，於全部車站增設 CCTV 的效益每年最高可達 144.31 萬元。

1.2. 裝設錄影監視設備（CCTV）的成本分析

根據臺鐵於臺北站裝設 CCTV 的經驗，平均設置一處 CCTV 需 2.5 萬元，每年一處的保養費用約 0.5 萬元，截至 2011 年底臺鐵總計有 223 個客運與客貨運站，假設一個車站增設 10 處，使用壽命為 10 年，至於監控人員的人力成本予以忽略。

在不增聘員工的情形下，裝設 CCTV 對臺鐵最大的負效用在於增加車站人員的工作負擔，且可能遭受破壞而衍生額外的費用。

1.3. 成本效益分析

假設折現率為 3%，物價上漲率為 1.18%，評估年期為 10 年，改善比率為 10%，根據前述的分析結果，可計算出可量化的成本效益分析如表 5，從該表的結果可發現，站內增設 CCTV 的經濟效益僅達 8.46%，另表 6 則為站內增設 CCTV 後尚無法量化的成本與效益。

表 5 增設 CCTV 成本效益分析（可量化部分）

項目	經濟分析
每年減少旅客等效死亡的價值	144.31 萬元
效益淨現值	1,333.56 萬元
223 個車站各增設 10 處費用	5,575 萬元
每年 2,230 處 CCTV 的維修費用	1,115 萬元
成本淨現值	15,878.92 萬元
益本比	8.40 %

表 6 現階段尚無法量化的成本與效益

尚無法量化之成本	尚無法量化之效益
1. 行政處理工作所需之成本 （調閱、管理錄影影像） 2. 設備遭受破壞衍生之費用	1. 提昇旅客的安全感 2. 減少員工、大眾遭受攻擊風險 3. 釐清旅客跌倒、摔入軌道之原因 4. 嚇阻逃票

1.4. 敏感度分析

上述之成效分析係假設等效死亡貨幣價值為 790 萬、改善幅度為 10% 之結果，以下則針對等效死亡貨幣價值與改善幅度進行敏感度分析。

1.4.1. 調整等效死亡貨幣價值

係將等效死亡貨幣改採交通建設計畫經濟效益評估手冊^[7]之上限值 1,474 萬元後所得之成本效益分析結果，可知益本比提升到 15.78%，但仍為偏低之數值。

表 7 死亡貨幣價值採上限值增設 CCTV 成本效益分析

項目	經濟分析
每年減少旅客等效死亡的價值	最高 269.25 萬元
效益淨現值	2488.20 萬元
223 個車站各增設 10 處費用	5,575 萬元
每年 2230 處 CCTV 的維修費用	1,115 萬元
成本淨現值	15,878.92 萬元
益本比	15.67 %

1.4.2. 調整改善幅度

圖 14 為調整改善幅度後所對應之益本比變化，由於改善幅度 10 % 已達上限值，因此可知最高益本比即為表 5 分析中之 8.40 %。

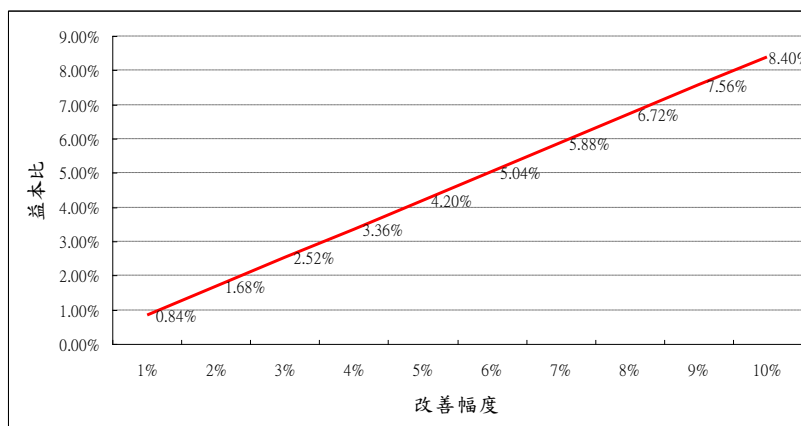


圖 14 調整增設 CCTV 之改善幅度對應之益本比

1.5. 小結

根據本節的成本效益分析結果可得到以下結論：

- (1) 旅客遭受攻擊影響因素大多來自加害人與受害人個人特質與當下反應，增設保安設備僅能達到嚇阻之功能，本研究以 10 % 作為改善幅度的上限。
- (2) 單就減少旅客遭受攻擊的效益來看，無論調高等效死亡貨幣價值或樂觀看待改善幅度（10 %），益本比最高僅達 15.67 %。
- (3) 增設 CCTV 的量化經濟效益部分，除了減少旅客受攻擊所對應的貨幣價值外，也能減少員工與大眾受攻擊的貨幣價值，惟此部份較難量

化，因此並未在本研究中呈現。

- (4) 增設 CCTV 勢必增加員工的工作負擔，尤其臺鐵有許多小站並無站務人員或僅有少數站務人員，此部分亦難以量化，因此也未在本研究呈現。

六、結論與建議

安全向為鐵路系統訴求之重點，要確保安全除了要儘量降低因系統失效導致之事故之外，如何避免旅客在使用鐵路系統的過程中遭受到攻擊也是營運機構所面臨的重要課題，尤其臺北捷運發生殺人事件之後，有很長的一段時間，旅客使用捷運及鐵路系統都會有心理的障礙。

本研究透過風險分析與評量發現，臺鐵旅客遭受攻擊的風險是處於不可接受的水準，如於車站內裝設閉路監視系統(CCTV)，可達到嚇阻的效果，但若加害人不顧個人生死或計畫性的犯案，CCTV 的效果有限，僅能作為後續犯罪調查的依據，因此就經濟效益而言，益本比最高僅 15.67 %。對於減少旅客遭受攻擊的風險，本研究建議如下：

- (1) 除了增設 CCTV 外，應善用警示標語，使裝設 CCTV 的資訊確實傳達以達到嚇阻之功效，但未裝設處不宜張貼標語，避免真的發生旅客遭受攻擊事件/事故後無法提供影像而衝擊臺鐵形象。
- (2) 單從減少的等效死亡貨幣價值來看，各項改善措施的益本比均不高，主要係旅客感受無法量化。建議應調查旅客實際的安全感受，例如於每年臺鐵旅客意象調查中，增加安全感的評估指標，藉以反應改善措施的成效。
- (3) 旅客遭受攻擊部分，目前並未記錄有關心靈受創之傷害，建議鐵路警察局可將此心靈創傷納入記錄的選項中，並參考英國 RSSB 將心靈創傷視為 0.005 等效死亡的作法，找出國內對此創傷之等效死亡值。
- (4) 應用 CCTV 之影像辨識技術^[2,8]，諸如：
 - A. 人像辨識：事前可將嫌犯之相貌存於資料庫中，透過 CCTV 之人像辨識，即早鎖定特定犯罪者並派員加以監控，以避免其犯罪；事後則可透過人像辨識與篩選，找出可能的罪犯，以協助犯罪事件的調查。
 - B. 影像自動報警：若畫面中停滯物體或靜止人像超過一定時間、或者有大量人群同時向某方向奔走之情況，則自動提出警告，以預防可能之危險爆裂物或犯罪事件。
- (5) 推廣搭乘臺鐵守秩序的文化，培養乘客自動自發守法的搭乘習慣，對降低旅客遭受攻擊事件具有潛移默化的功效。

- (6) CCTV 係營運的必要設施，屬運輸成本的一部分，後續增設時可分階段依重要性逐步設置，逐年支出，俾利臺鐵的預算編列。

參考文獻

1. Health & Safety Executive (HSE), Reducing Risks and Protecting People – HSE’s Decision-Making Process, Crown (2001).
2. James Abbott, “Safety/Security Supplement - Sophisticated control keeps urban crowds moving”, Eurotransport, Volume10, Issue1 (2012).
3. Rail Safety and Standards Board (RSSB), Assessing the Cost of Assaults (2004).
4. Rail Safety and Standards Board (RSSB), Fears and Experiences of Assault and Abuse on the Railway (2004).
5. Rail Safety and Standards Board (RSSB), Reducing Assaults on Railway Staff (2002)。
6. 交通部運輸研究所（2012），風險管理應用於鐵路運輸安全之初探－以臺鐵風險分析與評量為例。
7. 交通部運輸研究所（2009），交通建設計畫經濟效益評估。
8. 胡木源、顏景詳（2007），「英國電子偵查－CCTV 在防制犯罪上之運用」，刑事雙月刊。
9. 維基百科全書，List of terrorist incidents involving railway systems，http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_terrorist_incidents_involving_railway_systems（2014.12）。

鋁合金應用在軌道車輛

The aluminum alloy Application of rail vehicles

宋鴻康 Song,Hong-kang¹

地址：22041 新北市板橋區縣民大道二段七號九樓

Address：9F., No.7, Sec. 2, Xianmin Blvd., Banqiao Dist., New Taipei City 22041,
Taiwan (R.O.C.)

電話(Tel)：(02) 80723333

電子信箱(E-mail)：hksung@hsr.gov.tw

摘要

軌道車輛(Rolling Stock)隨著速度的提昇而採取輕量化顯得越來越迫切需要，是以，軌道車輛製造廠為減輕車輛重量所採取措施由早期木造而後鋼皮進而耐候鋼板，近代則採不銹鋼、鋁合金等新型輕量化材料為主。不銹鋼因其密封性較差，一般適於製造時速 160~200 km/h 的準高速列車，而鋁合金材料製造 200 km/h 以上的高速列車有極大之優越性。為因應高速列車的發展，世界各國均在努力開發、製造鋁合金車輛，如德國、義大利、加拿大、日本等先進國家投入運營的鋁合金車體已超過 3 萬餘輛，一些開發中國家也正在集中力量，積極引進技術，開發研製鋁合金車體，並已大量生產和出口。國內台灣高鐵、臺鐵，台北、高雄、桃園機場捷運系統鐵路車廂亦大量應用鋁合金材料。

關鍵字：軌道車輛、鋁合金。

Abstract

The Rolling Stock reducing in weight seems to be more importance since the train speed increase to reduce the weight of rolling stock that can use from the wooden, steel, stainless steel and aluminum etc. Because stainless steel it seals disadvantage only suitable for the pre-high speed train of the speed 160~200 km/h, and the aluminum train make the high-speed train more than 200 km/h of advantage. In order to respond the development of high-speed train, the international is making great effort to develop, make aluminum vehicle, as the advanced countries, such as, Germany, and Italy, Canada and Japan etc. put into the aluminum of carrying the camp bodywork already more than more than 30,000 cars, some developing countries also concentrated strength, actively introduce

¹交通部高速鐵路工程局 正工程司兼科長

a technique, the development aluminum, and with realization mass production and export. Research and application of the rapid transit system rolling stock aluminum in Taiwan high speed railway Taipei, Kaohsiung and Tao-Yuan, airport metro.

Keyword: Rolling Stock、aluminum

一、鋁合金特點及優越性

鋁(Al) 屬於硼族元素，儲量非常豐富，是地殼中第三大豐度的元素，在金屬中居於第一位。純鋁(純度 99.999 %)在退火狀態下抗拉強度值為 45 MPa，延伸率為 60 %。但是，鋁經過冷變形、合金化與熱處理，其強度就會得到顯著提高，抗拉強度可達 500 MPa，相當於合金鋼的強度。而且，鋁的密度只有 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 左右，約為鋼的 1/3，以而大大降低車輛的自重，增加輸送量。同時，由於鋁合金活潑的化學特性，在空氣中表面會形成一層細密的 Al_2O_3 保護膜，在大氣中有很好的防腐能力，比碳鋼車體優良。

鋁合金車體還具有高安全性。鋁合金車體採用擠型材結構，剛度比一般碳鋼車體強，德國高速列車(ICE~3)鋁合金車體曾做過一項實驗，在鋁合金車體前面，以機械外力使車體前部產生 1m 的變形，結果顯示對車內乘客不會產生致命傷害，而普通碳鋼車體是無法做到的。目前大多數軌道先進國家採用鋁合金材質製造車體結構，適合車輛用的鋁合金主要有鋁鎂(Al-Mg,5000 系列)、鋁鎂矽(Al-Mg-Si,6000 系列)及鋁鎂鋅(Al-Mg-Zn,7000 系列)三大系列。鋁合金較碳鋼、不銹鋼具有優良特性，軌道車輛所用的鋁合金的機械性能以及其與碳鋼、不銹鋼性能比較如表 1、表 2 所示。

表 1 軌道車輛常用鋁合金的機械性能

合金狀態	抗拉強度/MPa	屈服極限/MPa	延伸率/%
5083-0	274~352	127~196	16
6N01-T5	≥ 245	≥ 205	8
6005A-T6	≥ 260	≥ 215	8
6063-T5	≥ 157	≥ 108	8
7N01T5	≥ 325	≥ 245	10
7003-T5	≥ 274	≥ 235	10
7020-T6	≥ 340	≥ 270	9a

本研究整理

表 2 碳鋼、不銹鋼、鋁合金性能比較

性能	碳鋼(A3)	不銹鋼	鋁合金
比重 $\gamma/g \cdot cm^3$	7.8	7.8	2.78
抗拉強度 σ_B/MPa	430.0	500.0	400.0
抗拉屈服極限 σ_y/MPa	250.0	210.0	240.0
延伸性/%	17		10
縱向彈性模量 $E/Kg \cdot cm^2$	2.1 x 106	2.0 x 106	7.2 x 105
比強度 σ_B/γ	55.0	64.0	143.0
比強度 σ_y/γ	32.0	27.0	86.0
比剛度 E/γ	2.7 x 105	2.4 x 105	2.5 x 105

本研究整理

綜觀各國高速列車的發展情形，高速鐵路列車車廂使用材料原為普通鋼板已被逐步淘汰，而耐侯鋼亦甚少使用，不銹鋼在美國、日本用得較多，鋁合金在日本和歐洲國家普遍應用，美國主要應用於貨車。可見，鋁合金有更好的使用前景。

二、鋁合金應用現狀

2.1 鋁合金在客車車廂上的應用

20 世紀 80 年代末 90 年代初，隨著高速鐵路的快速發展，鋁擠型技術趨於成熟，再加上銲接技術的不斷改善，鋁合金車體在高速客車上的應用不斷增加。其中日本新幹線 500 系高速車不僅採用了大斷面鋁擠型材結構車體，而且將鋁蜂窩板用於車體側牆及金屬地板結構中，創造出了最為獨特的鋁合金車體結構。鋁合金材料的優越性越來越受到認可，可使用層面也越來越廣泛，在國外的高速列車中應用的鋁合金主要為 5000 系(Al-Mg 系)、6000 系(Al-Mg-Si 系)、7000 系(Al-Zn-Mg 系)鋁合金。

2.2 旅客列車車內設備

主要針對旅客列車，車廂的門窗、座椅、水箱以及裝飾板等都採用鋁合金材料生產製造，在輕軌和捷運系統中應用較為廣泛，車體內部裝飾大部分採用鋁合金材料製造。

2.3 軌道貨車應用

中國大陸鋁合金甚至使用於運煤車廂上，敞車的端側牆板結構採用了鋁合金材料，自重減少了 5 Tons，可增加運煤車輛的高度，可以將每輛車載重增加 5 Tons。依目前大秦鐵路線每列 78 輛編組量計算，每列車可多運煤 390 Tons，而大秦線列車週轉週期為 3 天，每列車年運煤量比非鋁合金

車輛多 47,450 Tons。以運能上分析，鋁合金廠車具有較大的優越性，大秦線年運能目標 2 億噸。

2.4 鋁合金在轉向架上的應用

鐵道車輛正朝向高速化發展，為達到轉向架輕量化的目的，簧下質量是一個很值得關注的課題。簧下質量包括轉向架軸彈簧以下的車輪、車軸、軸箱、齒輪裝置及碟型煞車裝置等。由於這部份輕量化，對軌道、橋樑等地上結構物的衝擊影響亦可減少，進而達到降低軌道養護費用的目的。對進一步減輕震動、降低噪音、提高乘坐舒適度等有良好的效果。減輕簧下質量的方法之一，是進一步使碟型煞車盤輕量化，但由於熱負荷隨著車輛高速化而增大，要減少現有鐵系材料碟型煞車盤很困難。德國高速列車(ICE)採用鋁合金材料製作成碟型煞車盤，與普遍用灰口鑄鐵碟型煞車盤(用於速度至 200 km/h)和球墨鑄鐵碟型煞車盤(用於較高的速度)相比重量減輕 50%。顯然，ICE 電車組中拖車的 16 個碟型煞車盤可減輕重量 800 kg。而對於整車而言，可以節省很大的能源，同時，輕型結構的 ICE 電車組在高速時可減輕負荷，以及減少鋼製走行部的磨損。

為了達到齒輪箱及軸箱的輕量化，也採用鋁合金材料。大陸機車車輛研究所自 1996 年開始進行高強度鋁合金齒輪箱體的研究，先後試製了萬向軸式高速動力車齒輪箱體、200 km/h 動車組動車齒輪箱體、提速機車齒輪箱體、輪對空心軸式高速動力車齒輪箱體、大陸“藍箭”高速動力車齒輪箱體，2001 年開始研製“中華之星”動力車齒輪箱。如今某些已開發國家(日本、法國和德國等)已先後在高速列車上採用鑄造高強度鋁合金齒輪箱。如德國 120 系列機車上採用的高強度 Al-Cu 合金軸箱，可使每台車減少重量約 690 kg；ICE 動力機車採用鋁合金軸箱後，每節車的簧下質量可比球墨鑄鐵軸箱減輕 640 kg。

三、車輛中鋁合金之連接

3.1. 鋁合金銲接性能

鋁合金具有獨特的物理化學性能，在銲接過程中存在一系列的困難和特點。鋁合金車體的組裝多用 MIG 和 TIG 銲接法，填充材料主要用 5356，外板和骨架的組裝採用點銲。依據美國 ALCOTEC 鋁銲接研究所提供的技術資料，並參照德國、日本等國鋁合金車體先選用的銲絲牌號，確定 4043、5356 為鋁合金車體使用的銲接材料。銲接材料選擇匹配原則如表 3 所示。

表 3 銲接材料選擇匹配原則

母材	銲絲	可銲性	接頭強度	延伸率	抗腐蝕性	色差
7005	5183	好	好	良好	好	好
	5356	好	良		好	好
6005A	4043	中	中	良好	好	好
	5356	好	好		中	好

表 3 顯示，對於母材與 7005，5183、5356 銲絲綜合性能好，用 5356 銲接得到的接頭強度比 5183 的稍差，但接頭延伸率較 5183 要好。綜合國外軌道鋁合金車體製造經驗，選擇 5356 銲絲銲接 7005 母材。6005A 的銲接，4043、5356 銲絲得到的接頭綜合性能較好，4043 銲絲工藝性能最好，成型美觀，飛濺少，雖接頭強度低於 5356 銲接所得接頭強度，但 4043 接頭耐大氣腐蝕能力較 5356 好。

一般而言，Al-Mg 合金可銲性好，Al-Mg-Si 系和 Al-Zn-Mg 系有一部分較差，這些合金銲接時，如填充材料選擇得當，在使用上也沒有問題。

3.2. 新型銲接方式

日本日立公司首先採用先進的鋁合金銲接技術的引進是解決問題的一個途徑。銲接技術的引進可以節省車輛零部件鉚釘孔的加工成本和工時。攪拌摩擦銲(Friction Stir Welding,FSW)是一項高效率、低耗能、低製造成本、符合環保要求的固相銲接技術，原理如圖 1 所示。

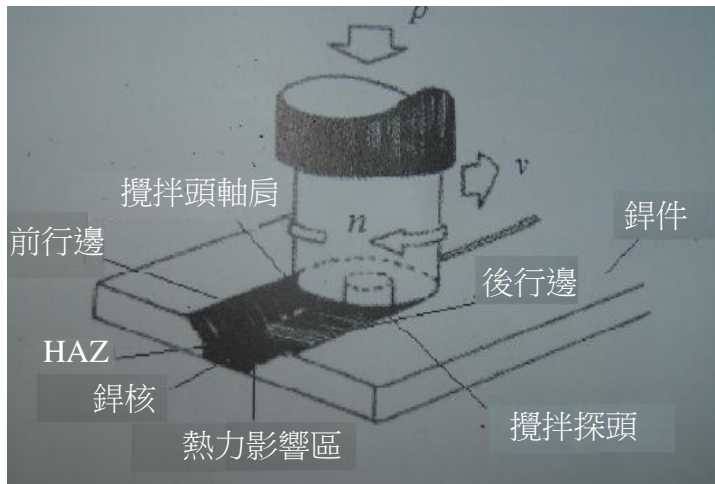


圖 1 攪拌摩擦銲原理

攪拌摩擦銲利用軸肩和攪拌頭與鋁件間的摩擦熱使接合處的金屬塑態化，並在攪拌頭和軸肩的共同牽引、攪動作用下向後流動、填充，形成固相銲縫的過程。顯然，攪拌頭的外型輪廓與轉速、銲接壓力、鋁件移動速

度是關鍵的工藝參數。只要攪拌頭材料的高溫強度和耐磨性足夠，就可以達成塑態化溫度較高的材料間的攪拌摩擦銲接。目前，攪拌摩擦銲已成功應用於鋁、鎂、銅等輕合金板材的連接，在實驗室也完成鈦、鋼材的攪拌摩擦銲接。接頭形式多樣化，適於連接對接、搭接、角接和丁字接頭。與其它銲接方式相比，攪拌摩擦銲具有如下特點：

- (1) 控制參數少，易於實施自動化，銲縫質量一致性高。
- (2) 銲前準備和銲後處理工作很少，降低勞動強度，提高工作效率。
- (3) 銲接溫度相對較低，銲縫區的殘餘應力和殘餘變形顯著減少。
- (4) 採用立式、臥式工裝均可實行銲接。
- (5) 攪拌摩擦銲不產生弧光、毒煙、灰塵、噪音等汙染屬於綠色加工方法。
- (6) 銲件接合面的裝配間隙小於銲件的厚度的 10 % 時，不會影響接頭質量。

由銲接原理可知，攪拌摩擦銲消除了氣孔產生的根源-熔化結晶，解決了鋁及鋁合金熔銲的氣孔問題。鋁及鋁合金攪拌摩擦銲時，在攪拌頭的摩擦輾壓作用下，連接區的塑性金屬發生動態回復與再結晶等冶金過程，細化了銲縫區的組織，使接頭的強度係數大幅提高。

攪拌摩擦銲避免鋁及鋁合金熔銲所產生的缺點，消除了鋁及鋁合金熔銲時元素的揮發問題，改善了難於熔銲的鋁合金的銲接性，如 2000、7000 系列中的難銲鋁合金等，銲後均能獲得無氣孔、裂紋、銲接殘餘應力和變形較小的高品質銲道。

攪拌摩擦銲係以金屬高溫塑態壓銲過程取代金屬熔化結晶的熔銲過程，從而完全免除銲道氣孔和銲接裂紋產生，使鋁合金銲接原本極其困難或不可銲轉變成可銲鋁合金，臺鐵太魯閣號傾斜式列車即採用攪拌摩擦銲，及近年引進的普悠瑪號也採用鋁合金車身。

四、鋁合金應用中的課題

雖然攪拌摩擦銲可以減少或消除鋁合金材料銲接性能的不足，但攪拌摩擦銲仍處在發展階段(日立公司取得獨家專利)，並沒有得到廣泛的應用。同時攪拌摩擦銲的銲接工藝還需注意下列情形：

- (1) 需要施加足夠大的頂鍛壓力和向前驅動力，因而需要由一定剛性的裝置牢固的挾持待銲零件來實現銲接。
- (2) 由於攪拌頭的回抽，銲縫末尾會存在“匙孔”，銲接時需要增加“引銲板及出銲板”。

- (3) 與弧銲方法相比，攪拌摩擦銲缺乏相對的工藝柔性，對工裝設備要求較高，難使用於複雜銲縫的銲接，由於需要施加很大的頂鍛壓力，也無法在機器人等設備上應用。
- (4) 出現銲接缺陷時，為確保接頭的高性能，需要固相銲接方法進行補銲。攪拌摩擦銲發展的緩慢及其侷限性嚴重影響了其在軌道車輛銲接中的應用。

另外，剛性也是一個需要注意的問題。鋁合金材料的彈性模量約為鋼材的1/3，所以用在結構上重量減輕時剛性大致成比例下降，使得鋁合金材料不能用作結構主要承載件。為了彌補鋁合金材料剛性的損失，必須對車輛應用鋁合金生產的部份進行新的結構設計，軌道車輛的結構設計(鋼製)已經有了標準可依據，如果進行新的結構設計，需漫長的摸索設計過程。鋁合金型材的發展可能會解決剛性低的問題，但仍是一重要發展課題。一般而言，不同車體材料各有其優勢，由軌道車輛運營業者依需求訂定。同時為確保旅客安全，運營業者通常於契約規範訂定車體發生意外碰撞時能量吸收條件，並藉由有限元素設計分析、相關驗證測試及水密測試等作業，以確保安全及品質。

參考文獻:

1. 吳銘章，陳虞仁(2006)，高運量電聯車車體材質及其結構設計，捷運技術半年刊。
2. 中國大陸鐵道科學院(2013)。
3. 日本 RTRI Report(2013)。
4. 日立公司技術報導(2007)。
5. 張占嶺(2012)，裝備製造技術，第4期。
6. 王炎金(2011)，鋁合金車體銲接工藝。

傳統鐵路電車線系統可靠度之研究

A Study on Reliability of Ordinary-Speed Railway Overhead Catenary System

張瑋麟 Chang, Wei-Lin¹

地址：10052 臺北市中正區仁愛路一段 50 號
Address：No.50, Sec. 1, Ren'ai Rd., Jhongjheng Dist., Taipei City 10052, Taiwan
(R.O.C.)

電話(Tel)：(02)23492183

電子信箱(E-mail)：mwl@motc.gov.tw

摘要

近年臺鐵西部幹線都會區鐵路捷運化之轉型，路線容量近趨飽和，設備故障所致之營運影響更顯重要，電車線系統可靠度直接影響營運安全與服務品質，故提高電車線系統可靠度是緊迫關鍵的問題。

本研究依歐洲標準 EN50126 之原則，以故障樹分析法對臺鐵西部幹線(含山線與海線)電車線系統進行可靠度定性及定量分析，結果顯示主吊線是電車線系統最薄弱的環節，必須進行改善工作；每百公里之電車線系統平均故障間隔時間(MTBF)約為 198 日，對於系統保養週期訂定提供重要參考。本研究也探討電車線系統維修度、妥善率，闡述 RAMS 之內在關聯性，並提出營運階段可靠度改善方案，如下：採用較高可靠度的組件；採用較易更換、模組化的組件；培養訓練有素且經驗豐富的檢修人員。

關鍵詞：電車線系統、故障樹分析、可靠度、維修度、妥善率。

Abstract

In recent years, the western main lines of Taiwan Railway Administration (TRA) in the metropolitan areas have been rapid transit systematized. At the same time, the capacities of the lines are near saturation. Therefore, the impact from equipment failures on the operation is becoming more significant. The overhead catenary system affects the operational safety and reliability of service quality directly, so the improvement of the overhead catenary system reliability is definitely an

¹交通部 路政司 技術員

important and urgent issue.

In accordance with the principles of the European standard EN50126, both qualitative and quantitative analyses of reliability on the overhead catenary system of the TRA western main lines, including the mountain lines and the coast lines, were conducted with the Fault Tree Analysis. The results show that the main hanging cables are the weakest link in the overhead catenary system, and therefore the improvement work is needed. The mean time between failures (MTBF) of the overhead catenary system per hundred kilometers is about 198 days, which provides an important reference for setting up the system maintenance cycle. In the study, it also explored the overhead catenary system maintainability and availability, and explained the inherent correlation of the RAMS. Meanwhile, it also proposed solutions to improve the reliability of the operational phase as the follows: adopting high reliability components, adopting easier-to-replace and modulated components, and fostering trained and experienced service personnel.

Keywords: *Overhead Catenary System, Fault Tree Analysis, Reliability, Availability, Maintainability.*

一、前言

1.1. 臺鐵電車線系統安全問題

臺灣地區的傳統鐵路系統係由交通部臺灣鐵路管理局(以下簡稱臺鐵局)提供運輸服務，截至 103 年 6 月，臺鐵局電氣化區間營業里程為 859.2 公里；102 年客運人數達 2 億 2,729 萬人次，再創歷年新高。

政府現正戮力建構更加安全、可靠、效率與綠能的運輸環境，並持續推動傳統鐵路高架化、地下化、捷運化等工程。為因應都會區鐵路捷運化需求，將使得路線容量更趨飽和，機電設備使用頻度增加，也將使機電設備故障引起之營運影響更為嚴重。歐洲標準 EN50126 中描述，軌道之可靠度、妥善率、維修度、安全度 (Reliability, Availability, Maintainability and Safety; RAMS) 對帶給消費者之服務品質有明確的影響。服務品質也受到其他攸關安全、功能及性能等特性的影響。軌道系統可靠度不僅是影響服務品質的重要因素之一，更加可靠的服務品質更是備受社會大眾所期望。

臺鐵局近年來發生過數起電車線設備故障事件，影響營運安全及服務品質。電車線系統的可靠度若是不足，將是電氣化鐵路系統中薄弱的環節，現已成為制約電氣化鐵路發展的重要影響因素之一。更重要的是，電車線系統並無備援措施；類似串連系統，一旦發生故障將立即導致營

運中斷，對於服務品質造成嚴重影響，因而提高電車線的可靠度是電氣化鐵路建設面臨的一個緊迫而關鍵的問題。

1.2.研究目的、範圍及方法

本研究選擇以行車密度較高的臺鐵西部幹線(含山線及海線)為範圍，並以臺鐵局 89 年~102 年間電力事故資料作為統計分析之基礎進行研究，探討傳統鐵路電車線系統可靠度。

本研究以故障樹分析法對電車線系統進行定性及定量分析，找到可靠度指標偏低的故障環節。並藉由可靠度工程理論，提出有效的改善措施，將系統故障風險控制在允許的可容忍範圍內，以提高電車線系統可靠度，保證系統的安全運作，增加電氣化鐵路營運的服務品質，並提高營運經濟效益。

二、文獻回顧

2.1.臺鐵電車線系統

臺鐵西部幹線電氣化，北起基隆南至屏東，里程共約 427 公里。其電力供應係由臺電一次變電所(Primary substation)匯流排增設出口端，並架設或埋設 69kV、161kV 輸電線兩迴路，以輸送 69kV 或 161kV 三相 60Hz 交流電至臺鐵變電站，再由站內變壓器降壓為 25kV 兩單相(M 相及 T 相)60Hz 之高壓電，送至電車線以供應電力機車及電聯車所需之動力。概括而言，臺鐵之電車線系統可分為五大部分，即 69kV 或 161kV 輸電線、變電站、25kV 電車線、電力調配與遙控以及電力機車牽引，如圖 1 所示。

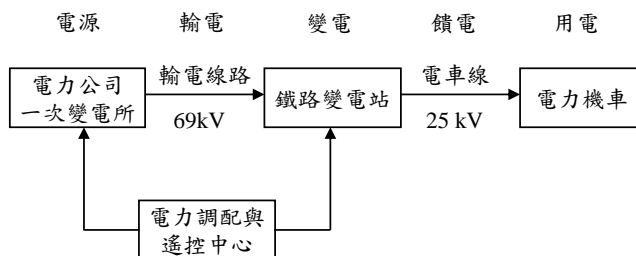


圖1臺鐵電化電力系統

臺鐵局鐵路電氣化建設始於民國 60 年，行政院核定列入國家十大建設，由英商 BICC 公司負責設計及施工，以臺鐵既有路線環境下就地辦理電氣化施工，民國 68 年完成西部幹線鐵路電氣化工程。臺鐵電車線系統包括架空電車線路、饋電線路、回饋線路、警告標誌及保護設備等，如圖 2 所示。

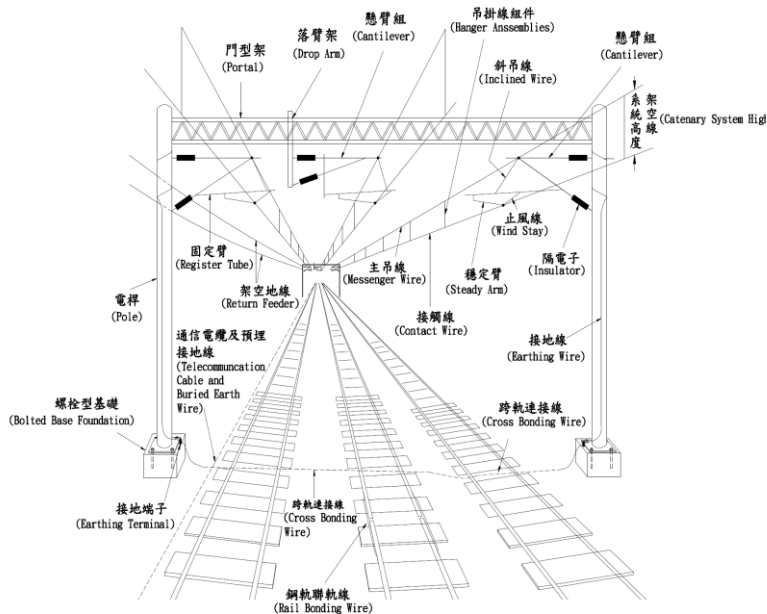


圖 2 電車線系統組成

2.2.可靠度理論

可靠度強調以工程方法來提高系統可靠度，所使用的數學工具為機率及布林代數(Boolean algebra)。使用機率描述的原因，是因為零組件發生故障的可能性充滿不確定性。另一方面，為了找出導致系統發生事故的可能原因及其間之因果關係，因此以布林代數建立各成因之間的關係，配合機率計算，更可進一步得出造成事故之各成因重要性。

2.2.1.故障率

如果一個組件喪失既定的功能後無法修復，稱之為失效或故障。這類組件故障模型的建立是以壽命試驗及故障率(Failure rate)數據為基礎，雖然某些情況下可藉由故障物理建立模型，但非常困難，需要大量的分析研究。

故障率也稱之為故障率函數(Failure rate function)，係指系統或組件工作到某時刻 t 尚未發生故障，在該時刻 t 以後的下一個單位時間內發生故障的機率。故障率函數反映了系統或組件之瞬時故障機率的變化趨勢，通常以 $\lambda(t)$ 表示。

2.2.2.可靠度

一個系統 (System) 可定義為多個次系統 (Subsystem) 與組件 (Components) 的組合，而組件之中則包含不同的零件 (Parts)，而且以一種有組織的方式連結起來，使其能達到特定的功能。因此，若要減少因零組件故障所導致的系統事故，則可從提高零組件之可靠度著手。此外，定期對系統的零組件進行保養、更換，或是多安裝一套備援系統等，都可以降低系統故障機率，增加系統的可靠度。

歐洲標準 EN50126 中將可靠度 (Reliability) 定義為：「一種機率，用以描述產品項目在指定時間間隔及指定條件下，能夠執行被要求功能的機率」。基本上可靠度與故障機率是一體兩面的觀念，系統的故障機率越高，其可靠度便越低，反之亦然。在可靠度工程領域中，通常將一般系統的可靠度定義為：「系統在既定的操作條件下不發生故障之機率」。對於電車線系統而言，其可靠度可表示為：電車線系統及各組件在既定條件下和既定時間內，能正常供電的機率。

系統或組件不能夠完成既定功能即稱為故障，或稱為失效。可靠度一般以機率描述，也可以根據實際需要，用平均故障間隔時間 (Mean Time Between Failures, MTBF)，或平均無故障里程 (例如軌道車輛) 表示。

根據針對大量不同類型零組件故障數據的研究表明，零組件有效壽命期的故障率 $\lambda(t)$ 接近常數，其可靠度 $R(t)$ 呈指數分布，如下式所示：

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

在可靠度理論中，可修復系統或組件之最有可能發生故障的時間，可利用期望值方法求得，所求得之值稱為平均故障間隔時間 (Mean Time Between Failures, MTBF)。若系統或組件的故障率 $\lambda(t)$ 為常數時，則有

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

2.2.3.維修度

維修度 (Maintainability) 係指在既定條件下和既定時間內完成維修的機率，通常用 $M(t)$ 表示。維修度若服從指數分布，則有

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (3)$$

修復率 (Repair rate) 也稱之為修復率函數 (Repair rate function)，是系統或組件在任意時刻 t ，尚未修復的系統或組件在單位時間內被修復的機率，通常以 $\mu(t)$ 表示，如式(3)。若其為常數時，可修復系統或組件之平均修復時間 (Mean Time To Repair, MTTR) 可表示為

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (4)$$

2.2.4.系統網路模型

系統中只要有任何一個組件故障，整個系統就故障，如此一個系統稱之為串聯系統。假設一個系統由 n 個組件串聯組成，各組件可靠度為 $R_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ ，如圖 3 所示。

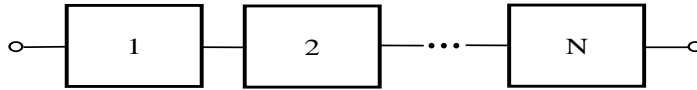


圖 3 串聯系統

n 個串聯元件組成系統，其可靠度 R_s 為

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (5)$$

不可靠度為

$$F_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i) \quad (6)$$

若系統之中，各組件故障率服從指數分布，則

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i t} \quad (7)$$

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-(\sum_{i=1}^n \lambda_i)t} = e^{-\lambda_s t} \quad (8)$$

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (9)$$

隨著科技的進步，系統規模及複雜性日益增加，例如一架波音 747 客機有 4,500,000 個零件。隨著系統複雜性的增加，可靠度迅速下降，當一個元件的可靠度為 0.99999 時，若系統由 10,000 個元件所組成，則系統可靠度只有 0.3679。因此隨著系統複雜性的增加，提高元件的可靠度非常迫切。

2.2.5.可修復系統可靠度

頻率和持續時間法(Frequency and duration technique)是分析電力系統可靠度的基本方法，是將馬可夫過程(Markov process)與電力系統的具體情況相結合的產物，在電力系統可靠度分析中應用得十分廣泛。頻率和持續時間法的主要內容是在平穩狀態下建立起狀態機率、狀態頻率及狀態持續時間的關係。因此，一旦求出系統各狀態的平穩狀態機率，就可以求出狀態頻率及狀態持續時間。

在電力系統可靠度分析中，有三個重要指標，即故障率 λ 、平均修復時間 r ，以及不可用度 U ，其中不可用度 U 為故障率 λ 及平均修復時間 r 之乘積。串連系統之可靠度指標如式(10)至式(12)所示：

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (10)$$

$$r_i = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i r_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (11)$$

$$U_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i \quad (12)$$

2.3.故障樹分析

故障樹分析(Fault tree analysis, FTA)是由美國貝爾電話實驗室工程師 H.A.Watson 於 1961 年發展，以應用於研究故障成因之分析方法。後經美國波音公司、美國國防部、美國太空總署，分別應用於飛機、飛彈及太空船設計上，效果顯著，而目前也廣泛應用於核能電廠及大型石化工廠之安全分析，甚至是電力系統及鐵路供電系統的故障診斷等多個領域，被公認為可靠度分析和系統安全分析的一種簡單、有效的方法。

故障樹分析將系統最不希望發生的故障狀態作為故障分析的目標，把選定的系統故障狀態稱為頂端事件，而後進行分析，找到導致故障狀態的所有可能因素，一直追溯到不需進行分析的因素為止。因此，故障樹實質上就是事件之間的邏輯關係圖，用相應的代表符號和邏輯閘將頂端事件、中間事件和基本事件連結成樹狀圖，該圖形稱為故障樹，以此故障樹對系統的故障情形進行定性分析和定量計算，從而對系統可靠度進行評估。

故障樹分析法將系統最不希望發生的故障狀態作為故障分析的目標，把選定的系統故障狀態稱為頂端事件，而後進行分析，找到導致故障狀態的所有可能因素，一直追溯到不需進行分析的因素為止。

2.3.1.故障樹定性分析

所謂故障樹定性分析就是找出導致頂端事件發生的所有可能故障模式，即求出故障樹的最小分割集合(Minimal cut set, MCS)。假設給定的故障樹頂端事件 T ，由所有集合 B_1, B_2, \dots, B_n 組成，即 $T = \{ \bigcup_{i=1}^n B_i \}$ ，其中 $B_i = \{ x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik} \}$ ，是基本故障事件的集合，當這些基本事件同時發生時，頂端事件才會發生，則稱 B_i 為故障樹的一個最小分割集合。

以工程角度而言，故障樹的最小分割集合表示了系統故障的充分和必要條件，即使在基本故障事件的機率及原始數據不完整的情況下，分析獲得的最小分割集合也能夠顯現出系統可靠度最薄弱的環節。

2.3.2.故障樹定量分析

進行故障樹定量計算時，一般要作以下幾個假設：基本事件彼此之間相互獨立；頂端事件及基本事件只考慮兩種狀態，即正常或故障。在已知故障樹結構函數及基本事件機率的條件下，計算頂端事件發生機率時，涉及機率計算問題。

假設基本事件 $x_i (1 \leq i \leq n)$ 的發生機率為 $P(x_i) (1 \leq i \leq n)$ ，故障樹頂端事件 T 由 x_1, x_2, \dots, x_n 等 n 個事件所串聯組成，即

$$T = x_1 \cup x_2 \cup \dots \cup x_n \quad (13)$$

T 的最小分割集合為 $\{x_1\}, \{x_2\}, \dots, \{x_n\}$ ，則 T 的發生機率為

$$P(T) = 1 - [1 - P(x_1)] \cdot [1 - P(x_2)] \cdots [1 - P(x_n)] \quad (14)$$

2.3.3.重要性測度

由於故障樹各個基本事件對於系統故障的影響程度是不同的，必須發展一些重要性測度方法，重要性測度在於改善系統的設計，確定系統需要實施監測的關鍵組件，及確定系統故障診斷方案等方面具有重要應用。

常用的重要性測度方法有許多種，本研究使用 Birnbaum 重要性測度方法，其方法主要係考量基本事件機率發生變化，對頂端事件的機率所造成的影響程度，以數學式表達如下：

$$I_{X_i}^B = \frac{\partial P(T)}{\partial P(X_i)} \quad (15)$$

式中 $I_{X_i}^B$ ：基本事件 X_i 之 Birnbaum 重要性測度

$P(X_i)$ ：基本事件 X_i 之發生機率

$P(T)$ ：頂端事件 T 之發生機率

三、故障樹分析

3.1. 電車線系統組成

本研究將電車線系統定義為 8 個次系統串聯組成，包括電車線、附加裝置、支持裝置、定位裝置、終端裝置、電桿、電力設備及絕緣裝置，如圖 2 所示。電車線系統可靠度不僅與各組件有關，而且也與各組件間的組合方式和相互匹配有關，因此每個組件失效都會影響電車線系統正常工作。

3.1.1. 架線方式

有鑒於臺鐵所處的特殊情況，如 1,067 mm 窄軌軌距、彎道多且彎曲率大等，故採用「單純懸垂式且接觸線具弛度」之電車線系統，該系統不但構造簡單性能佳，在各系統中最經濟，且可容許列車提高行車速度至 160 km/h。

電車線之架設與普通電力輸配線不同，係由主吊線、吊掛線及接觸線組成，利用支持裝置架設於電桿上。其中，接觸線是電車線主要的組成部分，直接與列車集電弓滑板摩擦接觸，向電力機車提供電能，因此接觸線被要求具有較小的阻抗，並且要有良好的抗磨損性能，及較長的使用壽命。主吊線的作用是透過吊掛線懸掛起接觸線，因此被要求較能夠承受較大的張力，具有一定的抗腐蝕能力，並且當溫度變化時，引起之弛度變化較小。

3.1.2. 支持及定位裝置

站外電車線之支持裝置為簡單型，附有隔電子、支架(懸臂組)、固定桿等。支持裝置包括頂管、斜管、懸臂隔電子及其他支持組件等，其作用係將電車線支承於電桿固定位置上，並利用懸臂隔電子使帶電設備與大地間保持絕緣。

定位裝置是由斜吊線、止風線、固定管、穩定臂及其他定位組件所構成，其作用係根據技術規範要求，對電車線進行橫向定位，以確保列車集電弓不脫離所設定之範圍，因此要求定位裝置必須能夠精確調節，具有較輕的重量，並具有一定程度的抗風穩定性。

3.1.3. 自動平衡裝置

通常每張力長度之電車線兩端分別設置有電車線自動平衡裝置，用以確保電車線保持一定高度，不致因環境溫度變化使電車線過度伸張或緊縮。電車線過度伸張將使弛度增加，致使電力機車集電弓與電車線接觸不完全而產生火花；電車線過度緊縮將致使張力增加而容易發生斷裂。在平

平衡錘重力作用下，能自動調節電車線張力，當溫度上升時，電車線伸張，平衡錘下降；反之，溫度下降時，電車線緊縮，平衡錘上升。

3.2.故障樹建構

故障樹是反映系統故障間因果關係的模型，為了找出電車線系統失效的原因，本研究依據統計期間內共 217 件電車線系統事故資料，歸納出導致電車線系統故障的關鍵失效因素。

電車線系統故障樹建立的基本原則為：只考慮系統關鍵組件，不考慮變電及供電設備；不考慮對系統影響較小的事件，以簡化模型；所有未查明事件均作為基本事件。根據以上原則，電車線系統故障樹如圖 4(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g) (h) (i) (j) 所示。

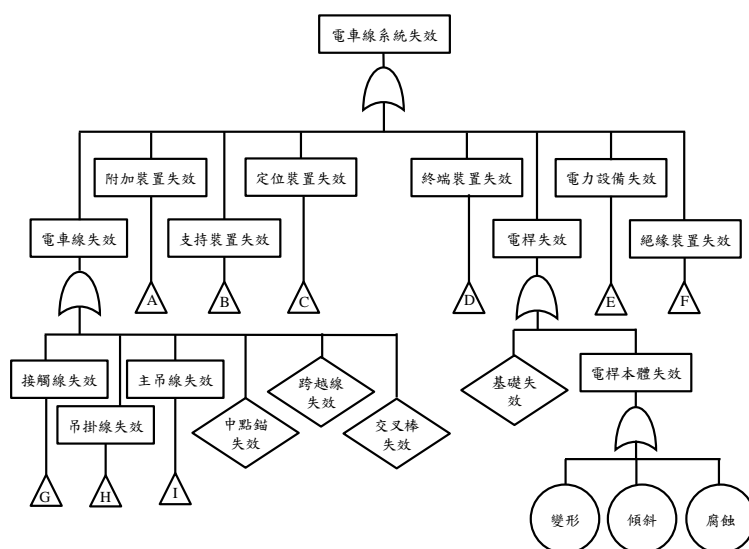


圖 4(a)電車線系統故障樹

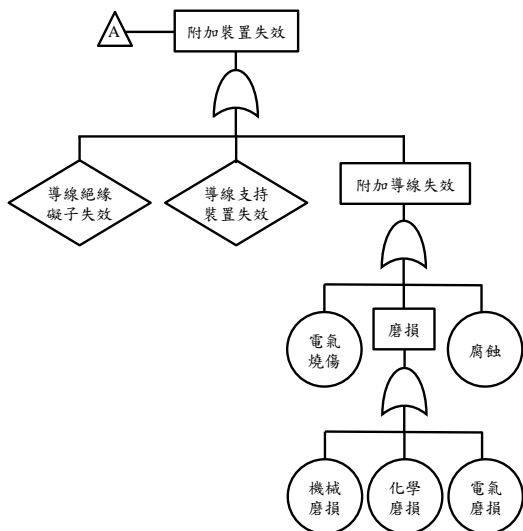


圖 4(b)電車線系統故障樹

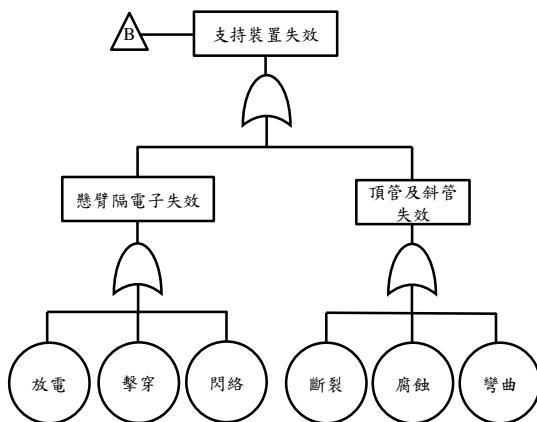


圖 4(c)電車線系統故障樹

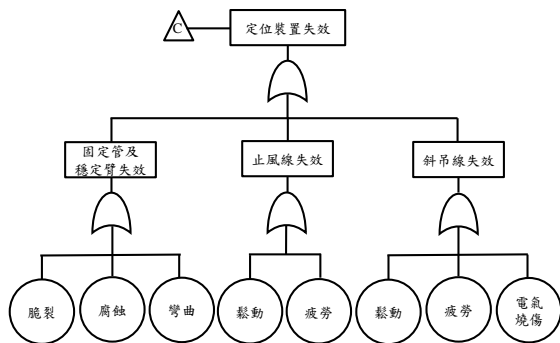


圖 4(d)電車線系統故障樹

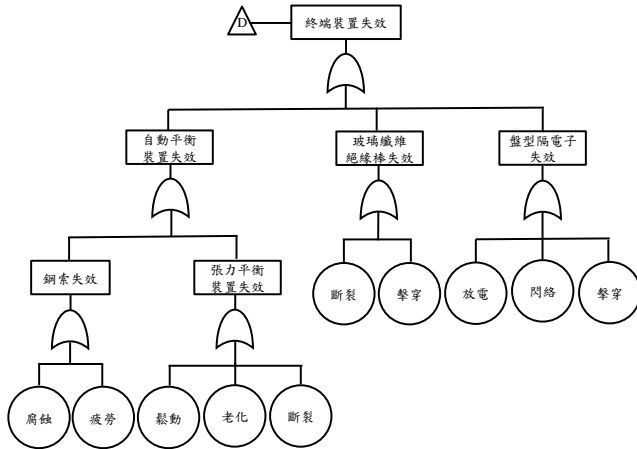


圖 4(e)電車線系統故障樹

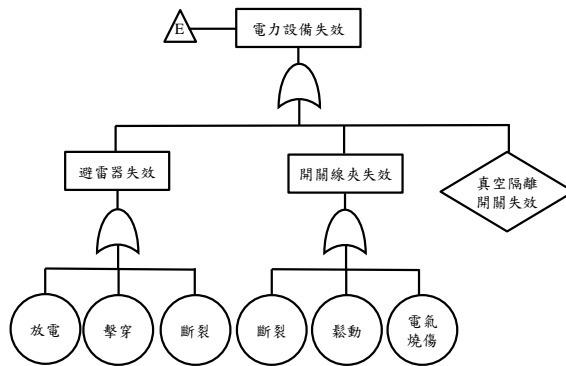


圖 4(f)電車線系統故障樹

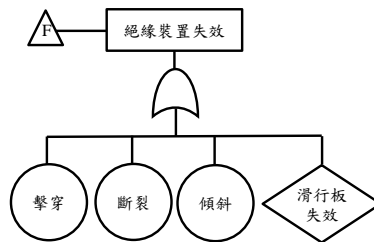


圖 4(g)電車線系統故障樹

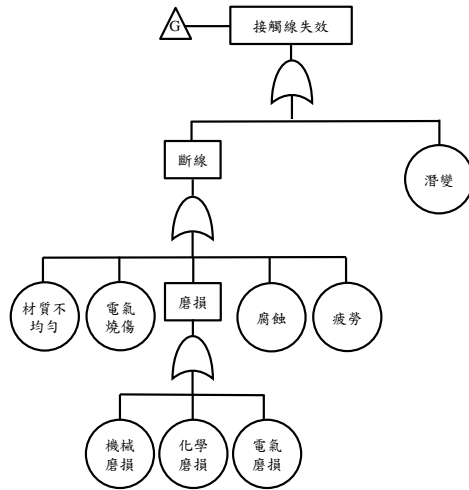


圖 4(h) 電車線系統故障樹

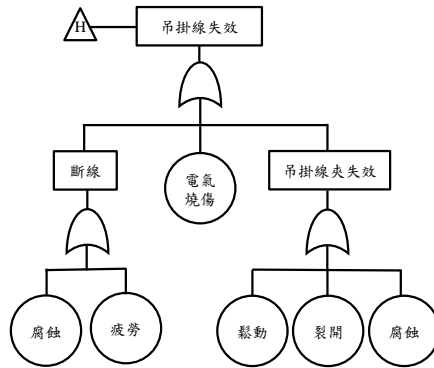


圖 4(i) 電車線系統故障樹

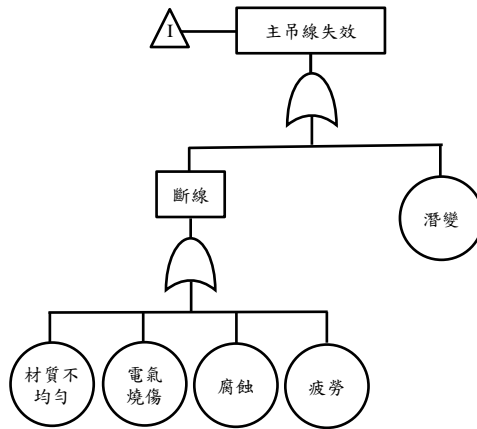


圖 4(j) 電車線系統故障樹

3.3.最小分割集合

故障樹分析的主要目的是找出導致系統故障之各事件間的邏輯關係，即找出故障樹的最小分割集合(Minimal cut set,MCS)。所謂分割集合(Cut set)，是指一群基本事件的集合，而找出最小分割集合的目的，主要在於發現導致頂端事件發生所需之最少基本事件組合，即最小分割集合中任何一個事件不發生時，頂端事件也不會發生。

最小分割集合不僅可進行定性分析，亦可進行定量分析。為了以電車線系統進行定性分析，將電車線系統故障樹之各個基本事件以符號表示，如表 1 所示：

表 1 電車線系統故障基本事件

基本事件	變形	傾斜	腐蝕	電氣燒傷	機械磨損	化學磨損	電氣磨損
符號	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
基本事件	放電	擊穿	閃絡	斷裂	彎曲	脆裂	鬆動
符號	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}
基本事件	疲勞	老化	材質不均勻	潛變	裂開	中點錨失效	跨越線失效
符號	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}
基本事件	交叉棒失效	基礎失效	導線絕緣礙子失效	導線支持裝置失效	真空自動隔離器失效	滑行道失效	
符號	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	

由於電車線系統可視為由電車線、附加裝置、支持裝置、定位裝置、終端裝置、電桿、電力設備及絕緣裝置等次系統邏輯串聯組成，因此電車線系統故障樹的全部最小分割集合可由此 8 個次系統的最小分割集合求得。

依據圖 4 之電車線系統故障樹模型，及表 1 的電車線系統故障基本事件符號，採用 Semandeses 算法求解故障樹的最小分割集合，如下所示：

- (1) 次系統-電車線故障樹之最小分割集合為 $\{x_3\}$ ， $\{x_4\}$ ， $\{x_5\}$ ， $\{x_6\}$ ， $\{x_7\}$ ， $\{x_{14}\}$ ， $\{x_{15}\}$ ， $\{x_{17}\}$ ， $\{x_{18}\}$ ， $\{x_{19}\}$ 。
- (2) 次系統-附加裝置故障樹之最小分割集合為 $\{x_3\}$ ， $\{x_8\}$ ， $\{x_9\}$ ， $\{x_{10}\}$ ， $\{x_{11}\}$ ， $\{x_{12}\}$ 。
- (3) 次系統-支持裝置故障樹之最小分割集合為 $\{x_3\}$ ， $\{x_8\}$ ， $\{x_9\}$ ， $\{x_{10}\}$ ， $\{x_{11}\}$ ， $\{x_{13}\}$ 。
- (4) 次系統-定位裝置故障樹之最小分割集合為 $\{x_3\}$ ， $\{x_4\}$ ， $\{x_{12}\}$ ， $\{x_{13}\}$ ， $\{x_{14}\}$ ， $\{x_{15}\}$ 。

- (5) 次系統-終端裝置故障樹之最小分割集合為 $\{x_3\}, \{x_8\}, \{x_9\}, \{x_{10}\}, \{x_{11}\}, \{x_{14}\}, \{x_{15}\}, \{x_{16}\}$ 。
- (6) 次系統-電桿故障樹之最小分割集合為 $\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_{23}\}$ 。
- (7) 次系統-電力設備故障樹之最小分割集合為 $\{x_4\}, \{x_8\}, \{x_9\}, \{x_{11}\}, \{x_{14}\}, \{x_{26}\}$ 。
- (8) 次系統-絕緣裝置故障樹之最小分割集合為 $\{x_2\}, \{x_9\}, \{x_{11}\}, \{x_{27}\}$ 。

同理，可求出導致電車線系統失效的最小分割集合，如下所示：

$$\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\}, \{x_{10}\}, \{x_{11}\}, \{x_{12}\}, \{x_{13}\}, \{x_{14}\}, \{x_{15}\}, \{x_{16}\}, \{x_{17}\}, \{x_{18}\}, \{x_{19}\}, \{x_{20}\}, \{x_{21}\}, \{x_{22}\}, \{x_{23}\}, \{x_{24}\}, \{x_{25}\}, \{x_{26}\}, \{x_{27}\}$$

電車線系統故障樹的頂端事件結構函數可以表示為：

$$T = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} + x_{19} + x_{20} + x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27} \quad (16)$$

電車線系統故障樹的頂端事件發生機率可以表示為：

$$P(T) = P(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} + x_{19} + x_{20} + x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27}) \quad (17)$$

3.4.定性分析

根據電車線系統故障樹的最小分割集合，將系統失效的原因分類，材質不均勻屬於材料因素導致的失效；磨損、疲勞、變形、鬆動、斷裂、裂開、脆裂、彎曲、傾斜及潛變等，屬於營運使用過程中產生的失效；腐蝕及老化屬於營運環境中產生的失效；電氣燒傷、放電、擊穿及閃絡等，屬於電氣因素導致的失效。

從系統失效原因分析，可得到提高系統可靠度的具體措施，如下所述：

- (1) 採用高強度、耐腐蝕、抗疲勞等材質良好的材料，並且提高電車線組件的安裝技術。例如，採用高抗拉強度、耐磨損、抗疲勞，及材質均勻的接觸線。
- (2) 對於營運使用過程中容易發生失效的組件，應列為重點預防保養項目，並增加巡檢頻率。
- (3) 對於營運使用過程中容易因電氣因素發生失效的組件，應加強避雷措施，並防止雷電等原因造成的短路，選擇使用高品質的絕緣設備。
- (4) 放電、擊穿及閃絡是導致隔電子失效的主要原因，而隔電子失效會直接導致電車線系統失效，要降低這些基本事件的發生，就要根據營運

環境的不同選擇合適的隔電子，此外，還必須定期清洗隔電子。

- (5) 磨損、疲勞、變形、鬆動、斷裂、裂開、脆裂、彎曲、潛變、腐蝕及老化等基本事件與營運環境及使用條件有關，而營運環境無法改變，僅能藉由定期預防保養，選擇高可靠度的組件，並且及時更換已損壞的組件，以降低組件的故障率。

四、可靠度分析

4.1.故障數據統計分析

電車線系統是一個相當複雜的系統，難以針對每一個組件都建立準確的可靠度模型。利用故障樹模型進行電車線系統可靠度分析之前，必須作如下的基本假設：系統各組件的故障率函數 $\lambda(t)$ 服從指數分布，以及各故障事件相互獨立。

基於故障樹分析法進行電車線系統可靠度定量分析，其目的就是當所有導致系統發生故障的因素的機率確定時，求出電車線系統失效的機率，以及其他可靠度定量指標。

本研究以軌道正線每 100 公里範圍為單位，進行電車線系統故障樹據的統計分析。以臺鐵西部幹線(含海線及海線)營業里程共計 511 公里計算，根據本研究對統計期間內，共計 217 件電車線系統事故分析之結果，得出電車線系統各關鍵組件的故障率 λ 、平均故障停電時間 r ，以及修復率 μ 等數據資料，如表 2 所示。

表 2 關鍵組件的故障統計

組件	故障次數	總修復時間 (小時)	故障率 λ (次/年)	平均修復時間 r (小時/次)	修復率 μ (1/小時)
主吊線	97	376.35	0.8217	3.8799	0.2577
接觸線	24	158.55	0.2033	6.6063	0.1514
吊掛線	3	24.85	0.0254	8.2833	0.1207
中點錨	2	7.0667	0.0169	3.5333	0.283
跨越線	1	9.0333	0.0085	9.0333	0.1107
交叉棒	2	5.8333	0.0169	2.9167	0.3429
回流線	1	1.9667	0.0085	1.9667	0.5085
饋電線	2	3.8	0.0169	1.9	0.5263
跳線	7	27.2667	0.0593	3.8952	0.2567
接地連接線	1	3.6167	0.0085	3.6167	0.2765

懸臂隔電子	17	50.8833	0.144	2.9931	0.3341
頂管及斜管	12	46.8333	0.1017	3.9028	0.2562
斜吊線	2	10.75	0.0169	5.375	0.186
止風線	1	9.1833	0.0085	9.1833	0.1089
固定管及穩定	2	4.2833	0.0169	2.1417	0.4669
自動平衡裝置	4	14.4	0.0339	3.6	0.2778
盤型隔電子	2	8.1667	0.0169	4.0833	0.2449
玻璃纖維絕緣	4	15.4833	0.0339	3.8708	0.2583
電桿	12	286.2167	0.1017	23.8514	0.0419
避雷器	3	8.9833	0.0254	2.9944	0.334
開關	6	11.3167	0.0508	1.8861	0.5302
真空隔離開關	1	1.25	0.0085	1.25	0.8
區分絕緣器	6	27.8	0.0508	4.6333	0.2158
中性區間設備	5	12.0167	0.0424	2.4033	0.4161

4.2.系統可靠度分析

利用式(10)、式(11)及式(12)之可修復系統串聯公式，可求得電車線各次系統的故障率 λ 、平均修復時間 r ，以及不可用度 U 等可靠度指標數據，如表 3 所示。

表 3 各次系統的可靠度指標

次系統	故障率 λ (次/年)	平均修復時間 r (小時/次)	平均故障間隔 時間 MTBF(年)	不可用度 U	修復率 μ (1/小時)
電車線	1.0928	4.5092	0.9151	5.6252 E-04	0.2218
附加裝置	0.0932	3.3318	10.7313	3.5442E-05	0.3001
支持裝置	0.2457	3.3695	4.0705	9.4498E-05	0.2968
定位裝置	0.0424	4.8433	23.6088	2.3419E-05	0.2065
終端裝置	0.0847	3.805	11.8044	3.6797E-05	0.2628
電桿	0.1017	23.8514	9.837	2.7679 E-04	0.0419
電力設備	0.0847	2.155	11.8044	2.084E-05	0.464
絕緣裝置	0.0932	4.0833	10.7313	3.8505E-05	0.2449

再次利用式(10)、式(11)及式(12)之可修復系統串聯公式，計算電車線系統之可靠度指標，得到系統之故障率 λ_s 、平均修復時間 r_s ，以及不可用度 U_s ，如下所示：

$$\lambda_s = \lambda_{\text{電車線}} + \lambda_{\text{附加裝置}} + \lambda_{\text{支持裝置}} + \lambda_{\text{定位裝置}} + \lambda_{\text{終端裝置}} + \lambda_{\text{電桿}} + \lambda_{\text{電力設備}} + \lambda_{\text{絕緣裝置}} = 1.838297584 \left(\frac{\text{次}}{100\text{km}} \cdot \text{年} \right) \quad (18)$$

每百公里之電車線系統不可用度 U_s 計算如下：

$$U_s = U_{\text{電車線}} + U_{\text{附加裝置}} + U_{\text{支持裝置}} + U_{\text{定位裝置}} + U_{\text{終端裝置}} + U_{\text{電桿}} + U_{\text{電力設備}} + U_{\text{絕緣裝置}} = 0.001088809 \left(\frac{\text{次}}{100\text{km}} \cdot \text{年} \right) \quad (19)$$

電車線系統平均修復時間 r_s 計算如下：

$$r_s = \left(\frac{U_s}{\lambda_s} \right) * 8760 = 5.188479263 \text{ (小時/次)} \quad (20)$$

本研究假設電車線系統各組件的故障率函數 $\lambda(t)$ 服從指數分布，則每百公里之系統可靠度 $R_s(t)$ 如下所示，其函數圖形如圖 5 所示。

$$R_s(t) = e^{-1.838297584t} \quad (21)$$

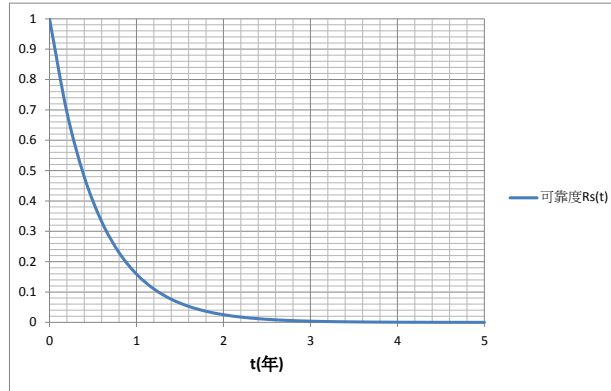


圖 5 系統可靠度函數 $R_s(t)$

每百公里之電車線系統平均故障間隔時間 MTBF 可利用下式計算得出，其值為 0.543981566 年，約相當於 198 日。

$$MTBF = \frac{1}{\lambda_s} = 0.543981566 \text{ (年/100km)} \quad (22)$$

儘管電車線系統平均故障間隔時間 MTBF 無法準確預測系統未來可能發生故障的時間，但卻有助於預防保養工作的安排，對於系統保養週期之訂定提供重要參考。

4.3.重要性測度

重要性測度是故障樹分析的重點，主要目的是確定系統薄弱環節，以用於改進設計方案，或是作為預防保養的重要參考。

依據電車線系統的故障樹模型，可得系統之不可靠度 F_s ，即故障樹之頂端事件之發生機率，表示為：

$$F_s = 1 - (1 - F_{\text{電車線}})(1 - F_{\text{附加裝置}})(1 - F_{\text{支持裝置}})(1 - F_{\text{定位裝置}})(1 - F_{\text{終端裝置}})(1 - F_{\text{電桿}})(1 - F_{\text{電力設備}})(1 - F_{\text{絕緣裝置}}) \quad (23)$$

$$F_{\text{電車線}} = 1 - (1 - F_{\text{主吊線}})(1 - F_{\text{接觸線}})(1 - F_{\text{吊掛線}})(1 - F_{\text{中點鐵}})(1 - F_{\text{跨越線}})(1 - F_{\text{交叉棒}}) \quad (24)$$

$$F_{\text{附加裝置}} = 1 - (1 - F_{\text{回流線}})(1 - F_{\text{饋電線}})(1 - F_{\text{跳線}})(1 - F_{\text{接地連接線}}) \quad (25)$$

$$F_{\text{支持裝置}} = 1 - (1 - F_{\text{懸臂隔電子}})(1 - F_{\text{頂管及斜管}}) \quad (26)$$

$$F_{\text{定位裝置}} = 1 - (1 - F_{\text{斜吊線}})(1 - F_{\text{止風線}})(1 - F_{\text{固定管及穩定臂}}) \quad (27)$$

$$F_{\text{終端裝置}} = 1 - (1 - F_{\text{自動平衡裝置}})(1 - F_{\text{盤型隔電子}})(1 - F_{\text{玻璃纖維絕緣棒}}) \quad (28)$$

$$F_{\text{電力設備}} = 1 - (1 - F_{\text{避雷器}})(1 - F_{\text{開關}})(1 - F_{\text{真空隔離開關}}) \quad (29)$$

$$F_{\text{絕緣裝置}} = 1 - (1 - F_{\text{區分絕緣器}})(1 - F_{\text{中性區間設備}}) \quad (30)$$

為了揭示電車線各次系統、組件之故障率對於電車線系統故障率的影響程度，依據式(15)，可計算得出各組件之 Birnbaum 重要性測度，針對電車線系統各組件進行重要性測度之排序，如表 4 所示。

表 4 電車線系統各組件之重要性測度

排序	組件	Birnbaum 重要性測度
1	主吊線	$e^{-1.006570093t}$
2	接觸線	$e^{-1.634983565t}$
3	懸臂隔電子	$e^{-1.694283488t}$
4	頂管及斜管	$e^{-1.736640575t}$
	電桿	$e^{-1.736640575t}$
5	跳線	$e^{-1.778997662t}$
6	開關	$e^{-1.787469079t}$
	區分絕緣器	$e^{-1.787469079t}$
7	中性區間設備	$e^{-1.795940497t}$
8	自動平衡裝置	$e^{-1.804411914t}$

	玻璃纖維絕緣棒	$e^{-1.804411914t}$
9	吊掛線	$e^{-1.812883332t}$
	避雷器	$e^{-1.812883332t}$
10	中點錨	$e^{-1.821354749t}$
	交叉棒	$e^{-1.821354749t}$
	饋電線	$e^{-1.821354749t}$
	斜吊線	$e^{-1.821354749t}$
	固定管及穩定臂	$e^{-1.821354749t}$
	盤型隔電子	$e^{-1.821354749t}$
11	跨越線	$e^{-1.829826167t}$
	回流線	$e^{-1.829826167t}$
	接地連接線	$e^{-1.829826167t}$
	止風線	$e^{-1.829826167t}$
	真空隔離開關	$e^{-1.829826167t}$

透過對電車線各次系統之可靠度定量分析，從表 3 及表 4 可得知一些重要結論，次系統電車線之故障率最高，是電車線系統最薄弱的環節；電桿故障率雖然不高，但因其故障所引起之平均停電時間最長，對於運輸服務品質影響最為嚴重。次系統電車線包含了主吊線，相對於電車線系統其他組件，有較高的故障發生頻率，因此加強主吊線的改善工作，將是關鍵而緊迫的問題。

4.4. 維修度

維修度指的是系統發生故障後，在短時間內經過維修恢復到正常工作狀態的能力。透過前面章節的分析可以得知，電車線系統結構複雜，故障率較高，為確保良好的營運條件，因此電車線系統的維修度要求也較高，必須在設備發生故障時迅速針對故障部分進行維修，以恢復正常運行。

電車線系統只有故障和正常兩種狀態，其整個生命週期都在這兩個狀態中往復的轉換，而維修就是將故障狀態轉換為工作狀態。若能減緩其故障過程，而加速修復過程，在一定程度上可以提高系統妥善率，因此對於電車線系統進行維修度分析是十分必要的。

對於一個可修復系統而言，一旦發生故障即開始進行維修，維修完成後便回復正常狀態，因此使用「維修」及「修復」來描述可修復系統的二分化狀態。可修復系統最重要的特性就是只要有充分的維修時間，一定可以將系統修復，因此在 $t = \infty$ 時，其修復機率等於 1。當然，即使在有限時間的維修時間之內，也有可能將系統修復，故維修度函數 $M(t)$ 係比照可靠

度函數 $R(t)$ 之定義，利用機率描述。

將 4.2 節所求得之系統平均修復時間 r_s 代入式(4)中，可得 $\mu_s = 0.192734701$ (1/小時)。再將 μ_s 代入式(3)中，可得到電車線系統的維修度 $M_s(t)$ ，如下所示，其函數圖形如圖 6 所示。

$$M_s(t) = 1 - e^{-\mu_s t} = 1 - e^{-0.192734701 t} \quad (31)$$

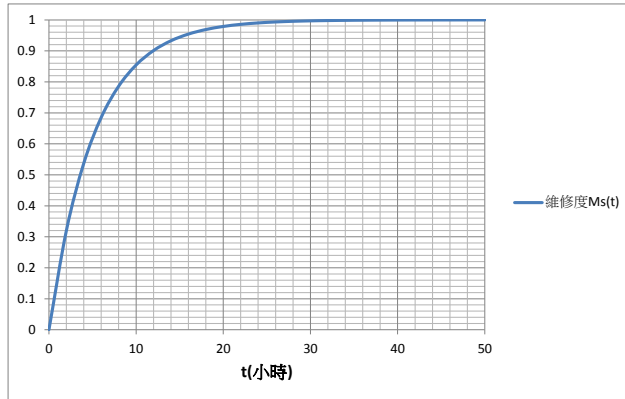


圖6系統維修度函數 $M_s(t)$

4.5.提高系統可靠度的措施

依據本章節對電車線系統可靠度的分析，得知系統可靠度隨著時間的增加而迅速遞減，應藉由可靠度工程理論，提出有效的改善措施，以提高系統可靠度，並且降低因系統失效而導致的營運中斷影響，建議之具體措施如下：

- (1) 採用較高可靠度的組件，將故障發生機率降至最低，確保系統安全。
- (2) 採用較易更換、模組化的組件，在故障發生時，可減少維修時間，即減少營運中斷的情況；採用故障定位裝置，配置先進高效能的維修設備，盡可能地縮短維修所需時間；採用較嚴格的保養策略和先進的檢查設備，在故障發生前及時發現，並且即時處理。
- (3) 培養訓練有素且經驗豐富的檢修人員，能夠縮短設備檢查、維修和更新等過程所需的時間。

五、結論與展望

5.1.結論

近年來，臺鐵西部幹線都會區鐵路捷運化之轉型，更突顯鐵路機電設備可靠度的重要性，電車線系統的可靠度更是直接影響鐵路營運安全。本研究以歐洲標準 EN50126 之原則，針對臺鐵局西部幹線(含山線與海線)的

電車線系統，利用故障樹分析之演繹方法進行可靠度研究，主要獲致結論如下：

- (1) 97~102 年間之電車線系統事故數及平均修復時間，相較於 89~96 年間皆有明顯降低；故障率較高的組件為主吊線、接觸線及懸臂隔電子。
- (2) 以故障樹分析法對系統進行定性分析，將系統失效原因歸納為材料、營運使用、營運環境及電氣等因素所導致。必須採用較高可靠度之零組件，或透過加強保養的手段，提高系統可靠度。
- (3) 以故障樹模型進行系統可靠度定量分析，得出三個可靠度重要指標，故障率 $\lambda_s=1.838297584$ (次/100km·年)；不可用度 $U_s=0.001088809$ (1/100km·年)；平均故障修復時間 $r_s=5.188479263$ (小時/次)。此外，每百公里之電車線系統平均故障間隔時間 MTBF 約相當於 198 日，對於系統保養週期之訂定提供重要參考。
- (4) 主吊線是電車線系統最薄弱的環節，因此加強主吊線的改善工作，將是關鍵而緊迫的問題；電桿故障率雖然不高，但因其故障所需之平均修復時間最長，對於運輸服務品質影響最為嚴重。
- (5) 應藉由有效的改善措施提高系統可靠度，並降低因系統失效而導致的營運中斷影響，建議之具體措施如下：
 - A. 採用較高可靠度的組件。
 - B. 採用較易更換、模組化的組件。
 - C. 培養訓練有素且經驗豐富的檢修人員。

5.2.展望

近年來系統安全是我國軌道技術領域的熱門議題，但研究的內容和方法一般侷限在理論或探索層面，缺乏對於可靠度、維修度及妥善率的定量分析。本研究系統性地對於傳統鐵路電車線系統進行 RAMS 量化分析，闡述 RAMS 之內在關聯性，並提出具體的保養及維修方案。希望本研究對於我國軌道建設之技術及管理層面，能夠有實質之助益。

由於時間及資源的限制，本研究雖系統性地探討了傳統鐵路電車線系統的 RAMS，但電車線系統 RAMS 所涉及的知識層面既深又廣，本研究所提出之觀點或結論難免有偏頗或片面之處，故仍有多議題尚待後人進行更深入的研究，主要有下列各項：

- (1) 實際之電車線系統極為複雜，本研究為簡化問題，從系統故障導致之危害後果影響營運之角度，將系統可靠度模型近似為許多組件串聯組成。未來，可以就系統組件故障之間的串並聯關係，更加考慮

周詳，以接近實際電車線系統。

- (2) 本研究主要分析了傳統鐵電車線系統的可靠度、維修度及妥善率，系統安全度則有待進一步的量化研究。
- (3) 傳統鐵電車線系統的故障數據極為缺乏，且難以取得，建議鐵路營運單位應建構完備的維修管理資訊系統，系統性地進行保養及維修工作，並可為營運階段風險分析提供詳細的數據資料。
- (4) 維修是提高電車線系統可靠度的重要方法，以可靠度為基礎的維修（**Reliability centered maintenance, RCM**）是一種被廣泛接受的維修策略，未來可進一步研究電車線系統所有組件的故障維修數學模型，以對電車線系統進行更精確的可靠度分析。
- (5) 藉由保養及維修提高電車線系統的可靠度，相對的，保養及維修費用勢必增加。保養及維修費用是維修計畫的重要考慮因素之一，其涉及維修材料、人事成本及維修機會成本等層面，並且與市場環境相關，仍有待進一步的研究。

參考文獻

1. 王曉陽(2011)，接觸網可靠性研究，碩士論文，西南交通大學，成都。
2. 王志強(2013)，牽引供電系統接觸網的 RAMS 評估，碩士論文，西南交通大學，成都。
3. 交通部臺灣鐵路管理局電務處(2009)，臺鐵電化路線電力供應概要，臺北：交通部臺灣鐵路管理局。
4. 交通部臺灣鐵路管理局電務處(2001)，電力事故彙篇(89年)。
5. 交通部臺灣鐵路管理局電務處(2002)，電力事故彙篇(90年)。
6. 交通部臺灣鐵路管理局電務處(2003)，電力事故彙篇(91年)。
7. 交通部臺灣鐵路管理局電務處(2004)，電力事故彙篇(92年)。
8. 交通部臺灣鐵路管理局電務處(2005)，電力事故彙篇(93年)。
9. 交通部臺灣鐵路管理局電務處(2008)，電力事故彙篇(96年)。
10. 交通部臺灣鐵路管理局電務處(2009)，電力事故彙篇(97年)。
11. 交通部臺灣鐵路管理局電務處(2010)，電力事故彙篇(98年)。
12. 交通部臺灣鐵路管理局電務處(2011)，電力事故彙篇(99年)。
13. 交通部臺灣鐵路管理局電務處(2012)，電力事故彙篇(100年)。

14. 交通部臺灣鐵路管理局電務處(2013)，電力事故彙篇(101年)。
15. 交通部臺灣鐵路管理局電務處(2014)，電力事故彙篇(102年)。
16. 李雪(2011)，京津城際接觸網可靠性分析及維修管理系統的研究，碩士論文，北京交通大學，北京。
17. 吳俊勇(2013)，高速鐵路供電系統 RAMS 評估理論及其應用，北京：北京交通大學。
18. 陳珂(2013)，高速鐵路接觸網主動維修策略研究，碩士論文，西南交通大學，成都。
19. 郭永基(2002)，可靠性工程原理，北京：北京清華大學。
20. 郭永基(2003)，電力系統可靠性分析，北京：北京清華大學。
21. 戚廣楓(2012)，高速鐵路接觸網安全可靠性及可維修性研究，成都：西南交通大學。
22. 萬毅、鄧斌、李會傑、田志軍、柯堅(2006)，「基於 FTA 的接觸網系統可靠性研究」，鐵道工程學報，第六期，第 55-59 頁。
23. 楊昌裔(2004)，系統安全設計與危害分析，臺北：新文京開發出版股份有限公司。
24. 趙瓊、王思準、尚方寧(2014)，「基於故障樹分析法的接觸網可靠性分析」，鐵道標準設計，第一期，第 105-109 頁。
25. Billinton, R. & Allan, R. N. (1992), Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques (2nd ed.), New York : Plenum press.
26. Billinton, R. & Allan, R. N. (1984), Reliability Evaluation of Power Systems, New York : Plenum press.
27. EN50126. (1999), Railway applications- The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety(RAMS), Brussels : European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC).

約稿

1. 為將軌道運輸寶貴的實務經驗及心得紀錄保存，並提供經驗交換及心得交流的平台，以使各項成果得以具體展現，歡迎國內外軌道界人士、學術研究單位及臺鐵路相關人員踴躍投稿。
2. 本資料刊載未曾在國內外其他刊物發表之實務性論著，並以中文或英文撰寫為主。著重軌道業界各單位於營運時或因應特殊事件之資料及處理經驗，並兼顧研究發展未來領域，將寶貴的實務經驗或心得透過本刊物完整記錄保存及分享。來稿若僅有部分內容曾在國內外研討會議發表亦可接受，惟請註明該部分內容佔原著之比例。內容如屬接受公私機關團體委託研究出版之報告書之全文或一部份或經重新編稿者，惠請提附該委託單位之同意書，並請於文章中加註說明。
3. 來稿請力求精簡，另請提供包括中文與英文摘要各一篇。中、英文摘要除扼要說明主旨、因應作為結果外，並請說明其主要貢獻。
4. 本刊稿件將送請委員評審建議，經查核通過後，即予刊登。
5. 來稿文責由作者自負，且不得侵害他人之著作權，如有涉及抄襲重製或任何侵權情形，悉由作者自負法律責任。
6. 文章定稿刊登前，將請作者先行校對後提送完整稿件及其電腦檔案乙份(請使用 Microsoft Word2003 以上中文版軟體)，以利編輯作業。
7. 所有來稿(函)請逕寄「10041 臺北市中正區北平西路 3 號 5 樓，臺鐵資料編輯委員會」收。電話：(02)2381-5226 轉 3146；傳真：02-23831396；E-mail：0752895@railway.gov.tw。

臺鐵資料季刊撰寫格式

- 格式** 自行打印於 B5(18.2 公分*25.7 公分)，使用 Microsoft Word 軟體編排。上、下邊界 2.54 公分；左、右邊界 1.91 公分。中文字體以新細明體，英文字體以 Times New Roman 為原則。
請於首頁輸入題目、作者姓名、服務單位、職稱、聯絡地址、電話及 E-mail。
- 題目** 中文標題標楷體 18 點字粗體，置中對齊，與前段距離 1 列，與後段距離 0.5 列，單行間距。
英文標題 Times New Roman 16 點字粗體，置中對齊，與前段 0 列、後段距離 0.5 列，單行間距。
- 摘要標題** 標楷體 16 點字粗體，置中對齊，前、後段距離 1 列，單行間距。
- 摘要** 標楷體 12 點字，左右縮排各 2 個字元，第一行縮排 2 個字元。與前、後段距離 0.5 列，左右對齊，單行間距
- 關鍵詞** 中英文關鍵詞 3 至 5 組，中文為標楷體 12 點字，英文為 Times New Roman 12 點字斜體。左右縮排各 2 個字元，第一行縮排 2 個字元。與前、後段距離 0.5 列，左右對齊，單行間距。
- 標題 1** 新細明體 16 點字粗體，前、後段距離 1 列，置中對齊，單行間距，以國字數字編號 【一、二】。
- 標題 2** 新細明體 14 點字粗體，前、後段距離 1 列，左右對齊，單行間距，以數字編號 (【1.1、1.2】)。
- 標題 3** 新細明體 12 點字粗體，前、後段距離 0.75 列，左右對齊，單行間距，以數字編號 (1.1.1、1.1.2)
- 內文** 新細明體 12 點字，第一行縮排 2 個字元，前、後段距離為 0.25 列，左右對齊，單行間距，文中數學公式，請依序予以編號如：(1)、(2))
- 圖表標示** 新細明體 12 點字，置中對齊，圖之說明文字置於圖之下方，表之說明文字置於表之上方，並依序以阿拉伯數字編號 (圖 1、圖 2、表 1、表 2)。
- 文獻引用** 引用資料，註明出處來源，以大引號標註參考文獻項次，12 點字，上標

參考文獻

以中文引述者為限，中文列於前、英文列於後，中文按姓氏筆畫，英文按姓氏字母先後排列，左右對齊，前後段距離 0.5 列，單行間距，第一行凸排 2 個字元。如：

1. 王永剛、李楠 (2007)，「機組原因導致事故徵候的預測研究」，中國民航學院學報，第廿五卷第一期，頁25-28。
2. 交通部統計處 (2006)，民用航空國內客運概況分析，擷取日期：2007年7月27日，網站：
3. 交通部臺灣鐵路管理局 (2007)，工程品質管理手冊。
4. 洪怡君、劉祐興、周榮昌、邱靜淑 (2005)，「高速鐵路接駁運具選擇行為之研究－以臺中烏日站為例」，中華民國運輸學會第二十屆學術論文研討會光碟。
5. Duckham, M. and Worboys, M. (2007), Automated Geographical Information Fusion and Ontology Alignment, In Belussi, A. et al. (Eds.), Spatial Data on the Web: Modeling and Management, New York: Springer, pp. 109-132.
6. FHWA (2006), Safety Applications of Intelligent Transportation Systems in Europe and Japan, FHWA-PL-06-001, Federal Highway Administration, Department of Transportation, Washington, D.C.

臺鐵資料季刊論文授權書

本授權書所授權之論文全文與電子檔，為本人撰寫之

論文。

(以下請擇一勾選)

同意 (立即開放)

同意 (一年後開放)，原因是：

同意 (二年後開放)，原因是：

不同意，原因是：

授與臺鐵資料編輯委員會，基於推動讀者間「資源共享、互惠合作」之理念，於回饋社會與學術研究之目的，得不限地域、時間與次數，以紙本、光碟、網路或其它各種方法收錄、重製、與發行，或再授權他人以各種方法重製與利用。

簽名：

中華民國 年 月 日

備註：

1. 本授權書親筆填寫後（電子檔論文可用電腦打字），請影印裝訂於紙本論文书名頁之次頁，未附本授權書，編輯委員會將不予驗收。
2. 上述同意與不同意之欄位若未勾選，本人同意視同授權立即開放。

臺鐵 資料

季刊 第 351 期

發行人	周永暉
編輯者	臺鐵資料季刊編輯委員會
審查者	臺鐵資料季刊審查委員會
主任委員	周永暉
副主任委員	鹿潔身、何獻霖、鍾清達
總編輯	朱來順
主編	楊安心
編輯	黎世俊
出版者	交通部臺灣鐵路管理局 地址：10041 臺北市北平西路 3 號 電話：02-23899854 網址： http://www.railway.gov.tw
出版日期	中華民國 103 年 12 月
創刊日期	中華民國 52 年 10 月
印刷者	文明文具印刷有限公司 地址：206 基隆市七堵區崇禮街 23 號 電話：02-24566075
展售門市	國家書店松江門市 地址：10485 臺北市松江路 209 號 1 樓 電話：02-25180207 網址： http://www.govbooks.com.tw 五南文化廣場 地址：40042 臺中市區中山路 6 號 電話：TEL：(04)22260330 網址： http://www.wunanbooks.com.tw

電子全文同步登載於臺鐵網站

GPN：2005200020

ISSN：1011-6850

著作財產權人：交通部臺灣鐵路管理局

本書保留所有權利，欲利用部分或全部內容者，須徵求著作財產權人書面同意或授權。
