

捷運噪音及減噪相關管制與技術深耕

鄭國雄¹ 陳誠源²

摘要

捷運系統具備快速、便捷、舒適等優點，為近代低碳載具的代表作之一，惟其存在的噪音若未適切妥處，一旦演變成噪音公害，將成為沿線居民揮之不去的夢魘。臺北市政府捷運工程局形塑三階段路網圖中，目前第二階段執行路線如環狀線（第一階段）、萬大—中和—樹林線（第一期工程），以及第三階段規劃中路線，無可避免需採取50m以下小轉彎半徑和5%以上大坡度，這些路線若採用了鋼軌鋼輪系統，未來營運將會面臨嚴厲考驗。為此，本局在99年針對日本、德國及義大利之車輪製造商與國外捷運系統，採用減振車輪設計之情形與降低噪音之成效，派員出國考察了解，俾便現行契約的執行及未來路線相關契約的修訂。本文將從貫穿捷運噪音與環保法規，探討各項主動與被動減噪措施，在兼顧環保與經濟的原則下，試圖提出較佳減噪方案。

關鍵詞：噪音標準、滾動噪音、尖銳噪音、彈性車輪、阻尼車輪

DORTS' Application of Advanced Technology to MRT Noise Control

Kuo-Hsiung Cheng¹ Chung-Yuan Chen²

Abstract

Featuring rapidity, convenience, and comfort the MRT system is a typical modern form of low-carbon transportation. However, if the noise generated by passing trains is not managed well, it can easily become environmental pollution, and could be a recurring nightmare for residents living along the routes. On the Taipei MRT network, routes currently under construction such as the Circular line Phase I, Wanda-Zhonghe-Shulin line Phase I, and other planned routes, trains will inevitably need to take sharp curves with a radius of less than 50 m and negotiate steep grades with an incline of more than 5%.

Should the steel rail/wheel mode be adopted for the abovementioned routes, serious criticism and complaints against train noise would certainly arise upon the commencement of commercial service. In 2010 DORTS sent a study group to visit wheel manufacturers and MRT systems in Japan, Germany, and Italy with the hope of collecting valuable reference material for the contracts currently being implemented and amending related contracts for future routes. This article aims to propose appropriate noise reduction solutions based on the applicable noise regulations and explore various active and passive noise reduction measures when consideration is given to both environmental protection and economic concerns.

Keywords: noise criteria, rolling noise, squeal noise, resilient wheel, damped wheel

¹ 臺北市政府捷運工程局副局長

khcheng@trts.dorts.gov.tw

² 臺北市政府捷運工程局土木建築設計處課長

cychen@trts.dorts.gov.tw

一、前言

捷運系統具備快速、便捷、舒適等優點，為近代低碳載具的代表作之一，惟其存在的噪音若未適切妥處，一旦演變成噪音公害，將成為沿線居民揮之不去的夢魘。民國85捷運木柵線、86年捷運淡水線相繼通車，開啟臺北都會區交通新紀元，同時也考驗環保與捷運之間，相互在對立中各自努力發展與深耕的年代，共同期許以縮短政府與民眾在噪音議題上的鴻溝。其後，十多年來陸續通車的捷運路線均在地面以下，前述噪音問題未再進一步發酵，但地下段振動問題則逐漸浮上檯面。雖然，環保署迄今遲未針對振動或振動衍生的結構噪音訂定管制標準，但本局在與民眾長期互動的基礎下，經由99年蘆洲線通車驗證結果，浮動式道床軌道應足以處理捷運行駛所產生的振動對鄰近建物的影響。後續捷運在噪音振動領域的發展上，將專注於電聯車行駛之噪音處理，可預期所面對的問題，將更為嚴苛。

在捷運規劃之前，都市往往早已成型，為牽就於現地發展，首先面臨到道路寬度不足與接續道路轉折過巨，為避免拆除或穿越鄰近建物，迫使捷運路線採取小彎道、急曲線、陡坡、小號道岔、頻剎車等不利條件進行規劃設計，所衍生出的噪音問題，亟需減噪技術的強化。臺北市政府捷運工程局（以下簡稱本局）形塑三階段路網圖中，目前第二階段執行路線如環狀線（第一階段）、萬大—中和—樹林線（第一期工程），以及第三階段規劃中路線，無可避免需採取50m以下小轉彎半徑和5%以上大坡度，這些路線若採用了鋼軌鋼輪系統，未來營運將會面臨嚴厲考驗。因此，捷運規劃建設階段須妥為因應處理，避免衍生造成環境公害，積發民怨。

環保署在99年1月21日頒布『陸上運輸系統管制標準』，針對捷運行駛的噪音作完整的規範，彌補之前『環境音量標準』的不足，同時呼應外界殷切的要求，新增最大音量之管制標準。惟民眾心中衡量的標準，即不是環保署所訂的噪音管制標準，亦非工程界引用的設計準則，民眾一旦能明顯分辨出捷運行駛的聲音，就直覺認定捷運噪音太大，而提出陳情或表達不滿。面對此種強烈主觀意識的標準，惟有在符合環保法規的前提下，逐步提升減噪措施，讓民眾充分感受到系統進步與改善的誠意。

民眾環保意識高漲的今天，國內公共工程環評審查日趨嚴謹。國內過去由海洋大學許榮均教授針對捷運、台鐵、和高鐵有關軌道振動與噪音方面進行相當完整的研究。本局在99年針對日本、德國及義大利之車輪製造商與國外捷運系統，採用減振車輪設計之情形與降低噪音之成效，派員出國考察了解，俾便現行契約的執行及未來路線相關契約的修訂。本文將從貫穿捷運噪音與環保法規，探討各項主動與被動減噪措施，在兼顧環保與經濟的原則下，試圖提出較佳減噪方案。

二、捷運噪音

行銷是最佳政策管理的平台，成功行銷的思維在於以顧客導向。負面用辭的捷運噪音，代表著顧客存有不滿意度，問題是顧客是誰？不滿意是什麼？

乘客搭乘捷運，抱怨車廂噪音太大；沿線居民，為捷運行駛產生的噪音感到不滿；駕駛員執勤期間，無法忍受駕駛室高分貝的環境。不同的顧客，關注的捷運噪音項目並不相同，所採取的有效減噪措施亦互異。在探討減噪措施之前，有必要對捷運噪音源予以分類說明。另外，後續探討的減噪措施，幾乎是因應列車行駛產生的輪軌噪音而發展，因此，了解輪軌

噪音產生的機構，是構思減噪方案或擬定減噪措施所不可或缺的。

(一) 捷運噪音源

1. 車輛設備

電聯車車載設備在運轉時均會發生噪音，其中較可能構成顧客抱怨的音源，包括馬達、冷卻系統、空壓機等。各種設備均為複雜之電機機構，查捷運機電系統廠商在設計階段進行噪音分析時，預估各項設備在近距離的最大噪音位準節錄如下：

- (1) 空調和空壓機為80dB(A)。
- (2) 電控設備為86dB(A)。
- (3) 馬達在低速運行為86dB(A)、減速齒輪為80dB(A)。
- (4) 馬達在高速運轉為103dB(A)、減速齒輪為97dB(A)。

駕駛員或乘客在車廂內近距離與前述各項設備相處，駕駛員抱怨駕駛室為高分貝工作場所，乘客抱怨車廂內噪音太大，無疑是反應系統仍有改善空間。

2. 輪軌噪音

電聯車行駛產生的噪音除其設備的固有音源外，當列車車速提高時，該部分音量也會隨之增加；惟因列車運行衍生的輪軌噪音位準極速上升，往往高於設備噪音，而使輪軌噪音成為主控音源；尤其是驅動馬達靜音性能的提升及設備噪音防治的強化，將使得輪軌噪音成為捷運噪音防制的重點。（圖1A、1B）【Remington, 1979】
【FTA, 1995】

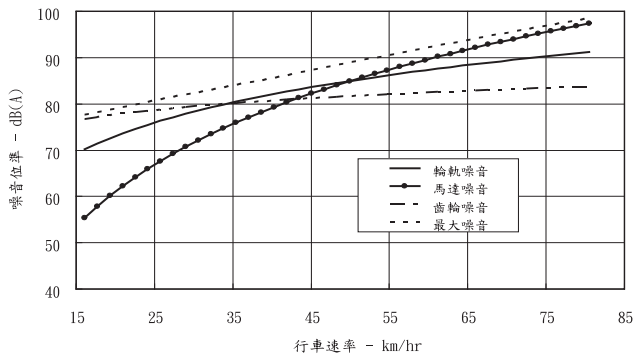


圖1A 道碴道床噪音位準與車速之關係
【輪軌狀況良好、普通接頭、非靜音馬達】

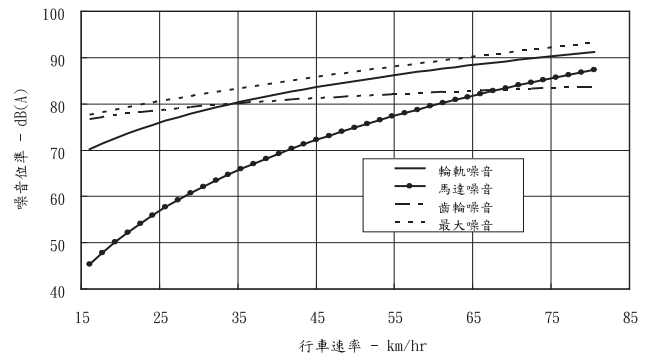


圖1B 無道碴道床噪音位準與車速之關係
【輪軌狀況良好、CWR、靜音馬達】

輪軌噪音起因於電聯車運行在軌道上，車輪與鋼軌彼此接觸振動，引發輪軌介面之週期性振動，造成車輪、鋼軌、扣件及軌道承托系統產生輻射噪音。理想情況，車輪與鋼軌不接觸，就無輪軌噪音；務實是期望輪軌接觸面平順，俾便將輪軌噪音降至最低，但往往是輪軌接觸面的不平順、鋼軌的不連續、或輪軌不正常的接觸行為等，而使得輪軌噪音成為亟需改善的音源。茲將輪軌噪音歸類為四項，分項說明如下。

(1) 滾動噪音 (Rolling noise)

不考慮車輪或鋼軌表面缺陷不平，例如鋼軌接頭或車輪扁疤 (Wheel flat) 等情況下，列車在直線上行駛所產生的噪音稱為滾動噪音【Remington, 1988】。滾動噪音主要是由於車輪或鋼軌表面粗糙度所造成，平直段滾動噪音主要頻率範圍在250~2000Hz。

波狀磨耗是指車輪或鋼軌表面出現相當規律且連續性的明波峰與暗波谷的現象，此種嚴重性的表面不平順，將使滾動噪音位準大幅增加。一旦鋼軌出現波狀磨耗，其將成為主控音源。另波狀磨耗為不可回復性，即使利用鋼軌研磨予以消

除，一段時間後，波狀磨耗仍會重覆發生。

(2) 尖銳噪音 (Squeal noise)

列車行經彎道時，轉向架前導之內側車輪，會在鋼軌踏頂產生黏著與滑行 (Stick-slip) 交替之週期性橫向振盪，並激發車輪面外運動 (Out-of-plane motion) 共振現象，進而輻射產生高頻尖銳噪音。尖銳噪音主要頻率範圍在1000~5000Hz，也是人耳最敏感的頻率範圍，其音量甚至比滾動噪音大20dB(A)。

文獻記載，經由實際觀察與記錄，尖銳噪音通常發生在半徑小於100倍轉向架固定軸距的彎道處【Rudd, 1976】。惟以都會區捷運系統的特性，此一條件若要滿足，勢必造成路線大量穿越建物之上方或下方，因此，自1970年代開始，尖銳噪音機構的建立及其相關減噪措施，一直在持續發展中。

(3) 輪緣摩擦噪音 (Flanging noise)

輪緣摩擦噪音是當列車行經彎道時，彎道外側車輪輪緣與鋼軌摩擦而產生之噪音。輪緣摩擦噪音主要頻率範圍在5000Hz以上。

(4) 撞擊噪音 (Impact noise)

衝擊噪音主要是由於鋼軌接頭、軌距線不連續性 (如道岔、橫渡線) 或車輪扁疤造成車輪對鋼軌產生垂直的衝擊，導致輪軌受強制性振動而輻射噪音。由於衝擊近似剛體運動行為，主要發生頻率很低，約在50~250Hz。

(二) 輪軌噪音機構

理論或數值分析預測輪軌噪音所引用的各種機構模態 (Models) 如雙音源模態 (TWINS) 等，並不在本文探討範圍。這裡所謂輪軌噪音機構，是指輪軌接觸行為時，車輪如何運動？鋼軌如何運動？由於輪軌各自運動的結果，週遭空氣受到擾動，因而輻射噪音。經由了解輪軌噪音機構，俾便後續減噪措施之探討。

(1) 車輪

列車在鋼軌上運行，車輪輻射噪音的行為包括垂向運動、縱向滾動、縱向滑行、縱向蠕滑 (creepage)、橫向滑行、橫向蠕滑及輪緣磨擦等。車輪呈中空圓形近似平板形狀，內圓與車軸固鎖，外圓與鋼軌接觸，為降低轉向架之簧下質量，車輪質量需適當減少，衍生輪腹 (web) 成為車輪厚度最小處。

A. 垂向運動、縱向滾動、縱向滑行及縱向蠕滑：車輛運動行為基本上以面內運動 (In-plane motion) 為主。由於面內運動的彎曲勁度相當高，行為近似剛體運動，不易造成高幅射噪音。

B. 橫向滑行及橫向蠕滑：車輛運動行為基本上以面外運動為主，一般是以節圓型 (Nodal circles) 與節徑型 (Nodal diameters) 來描述。節圓型是指不動點呈同心圓排列的數量，節徑型是指不動點呈徑向排列的數量。一旦節圓型與節徑型的數量和越大，代表車輪面扭曲越厲害，其共振頻率越高；當節圓型與節徑型的數量和接近於0，代表車輪面近似剛體運動，其共振頻率越低。一般橫向滑行較易形成節圓型，而橫向蠕滑較易形成節徑型。車輪面外運動易使車輪受彎變形，擾動週遭空氣，因而形成高輻射噪音。臺北捷運系統高運量車輛之車輪直徑為850mm，符合UIC 512之規定，目前國內已有針對單一車輪的振動模態分析與量測數據進行比對【Shyu, etc., 2002】【王栢村、李英傑，民93】，國外文獻亦有記載不同車輪直徑或車輪組的振動模態分析結果【Thompson, etc.,

2000】【Périard, 1998】。

- C. 輪緣磨擦：若兩接觸面光滑（磨擦係數低），不易因磨擦而發出聲音；如果接觸表面粗糙度不一，則可耳聞物體磨擦產生的尖銳聲音。人耳聽到物體發出聲音，一定是物體擾動週遭空氣所引起，因此，輪緣磨擦之所以發生尖銳聲音，基本上仍是接觸表面粗糙度，而引起車輪面外運動為主。

(2) 鋼軌

列車在鋼軌上運行，鋼軌輻射噪音的行為包括垂向運動、橫向彎曲（包括對水平軸橫向彎曲與對垂直軸橫向彎曲）與磨擦振動等。

- A. 垂向運動：鋼軌視同剛體運動，其共振頻率受鋼軌墊片或基板的垂向勁度影響。當垂向勁度高時，輪軌振動傳至軌道承託系統的振動量高，軌道減振效果不佳，相對地，鋼軌振幅小，幅射噪音頻率高；反之，當垂向勁度低時，輪軌振動傳至軌道承託系統的振動量小，軌道減振效果佳，相對地，鋼軌振幅大，幅射噪音頻率低。臺北捷運系統高運量軌道是使用彈性基板，列車行駛之鋼軌垂向共振頻率介於40~50Hz之間。

- B. 橫向彎曲：鋼軌易受彎變形，而輻射噪音。因軌道垂向勁度與扣件的存在，會影響該項彎曲變形，而形成所謂Pinned-pinned mode。臺北捷運系統高運量軌道使用UIC 60鋼軌，扣件間距為75cm，鋼軌橫向彎曲對垂直軸與對水平軸的第1振動模態分別為333Hz與731Hz、第2振動模態分別為1107Hz與2100Hz【Shyu, etc., 2002】。由於輪軌作用力主要來自垂向負荷，因此，對水平軸橫向彎曲的第1、2振動模態731Hz、2100Hz，將是鋼軌輻射噪音的主控頻率。

- C. 磨擦振動：如前述輪緣磨擦，肇因於輪軌接觸表面粗糙度，引起鋼軌橫向彎曲振動輻射噪音。

(三) 噪音與行車速率

在擬定減噪措施，需先確定峰值頻率及其噪音來源，以免事倍功半，甚至出現不具任何成效的窘境。顧客對捷運噪音抱怨的主控音源未必相同，主控音源亦會隨行車速率而改變。以捷運最大行車速率80km/hr為例，當車速倍增時，齒輪、輪軌與馬達噪音分別增加3dB(A)、9dB(A)與18dB(A)，最大音量則增加10dB(A)，若採靜音馬達，最大音量約增加7.5dB(A)【Remington, 1979】。列車低速行駛時，齒輪噪音為主控音源，當速率提高時，會轉移至輪軌噪音或馬達噪音，一旦高速行駛時，馬達噪音將成為主控音源。

(四) 音源與受體距離

噪音可視同音源的能量向外傳播，聲音將隨傳播距離而衰減，當頻率越高時，衰減速率越快；頻率越低時，衰減速率越慢。因此，受體（如駕駛員、乘客、沿線居民等顧客）與噪音音源的距離不同，所顯現的主控音源未必相同，此將影響減噪措施的選用，及受體主觀認定減噪措施的成效。運行中的捷運列車可視為線音源處理，距離倍增，噪音衰減3~6dB(A)，分析時常取中間值4.5dB(A)估算。假設聲音在空氣中的傳播速率是固定，且聲波每振動一週期所損耗的能量比率亦相同，則在討論不同頻率的噪音隨距離衰減的特性，可將頻率比照能量處理，因此，頻率倍增，在相同傳播距離下，高頻比低頻將多衰減3dB(A)。

三、捷運噪音管制標準

捷運噪音管制標準包含有四個面向，分別為環保署所頒布的『陸上運輸系統管制標

準』、捷運車輛的噪音標準、土建軌道的減噪期望值與顧客需求等。其中，前者為法規，必須遵守；中間兩項為工程設計準則，由系統自行明訂在設計規範，提供設計者依循；最後一項為顧客主觀認定，欠缺衡量標準，但經由結合民意代表與輿論的力量，往往超越法規成為主控標準。

(一) 陸上運輸系統管制標準

係由環保署在99年1月21日頒布，針對捷運行駛的噪音作完整的規範，彌補之前『環境音量標準』的不足，同時呼應外界殷切的要求，新增最大音量之管制標準。『陸上運輸系統管制標準』第八條明訂大眾捷運系統噪音管制標準如表1所示。

表1 大眾捷運系統噪音管制標準

管制區	時段與音量	小時均能音量 ($L_{eq, 1h}$)			平均最大音量 ($L_{max, mean, 1h}$)
		早、晚	日間	夜間	
第一類、第二類		65	70	60	80
第三類、第四類		70	75	65	85

相較於85年1月31日頒行之『環境音量標準』，其間差異說明如下：

1. 每列車通過測量地點，視為一噪音事件，以噪音事件明確訂定小時均能音量與平均最大音量之公式。
2. 明確定義噪音事件的起迄時間或歷時時間。
3. 明確定義背景音量。
4. 採慢特性量測噪音。
5. 排除在室內進行噪音量測。
6. 測量時間允許由陳情人指定時段進行連續量測，不限定採24小時連續普測。

(二) 捷運車輛的噪音標準

本局規設施作的系統概分為高運量與中運量，並分別對其車外噪音、車內噪音、駕駛室噪音訂定不同的噪音標準，如表2A、2B、3A與3B。其中，車內噪音與駕駛室噪音，尚無法規規範；至於車外噪音，將引用作為土建軌道噪音評估之音源，經由土建軌道減噪措施的投入，以確保系統營運產生的噪音符合表1環保法規要求。

表2A 車外噪音（高運量系統）—dB(A)

條件	淡水線	新店南港中和線	板橋線	新莊蘆洲線	信義松山線
地面段、列車停止	69	69	69	66	66
地面段、列車運行	86	86	86	84	84

表2B 車外噪音（中運量系統）—dB(A)

條件	內湖線	環狀線	臺中捷運
高架段、列車停止	70	70	70
高架段、運行速率16km/hr	70	70	70
高架段、運行速率70km/hr	75	75	75

表3A 車內噪音（高運量系統）—dB(A)

條件	淡水線	新店南港中和線	板橋線	新莊蘆洲線	信義松山線
隧道內、列車停止	73	73	73	72	72
隧道內、運行速率80km/hr	85	85	85	84	84
高架段、列車停止	72	72	72	71	71

條件	淡水線	新店南港中和線	板橋線	新莊蘆洲線	信義松山線
高架段、運行速率80km/hr	78	78	78	77	77
駕駛室(8小時均能音量)	—	—	75	74	74

表3B 車內噪音(中運量系統) -dB(A)

條件	內湖線	環狀線	臺中捷運
高架段、列車停止	73	71	71
隧道段、列車停止	74	72	—
高架段、運行速率16km/hr	75	73	73
隧道段、運行速率16km/hr	82	80	—
高架段、運行速率70km/hr	78	76	74
隧道段、運行速率70km/hr	85	83	—

(三) 土建軌道的減噪期望值

土建軌道提供的減噪措施，一般均為被動式，且為系統最後一道的減噪措施。在考量未來營運後，系統會逐漸劣化，土建軌道的減噪期望值，總會比法規標準再低3~5分貝設計，俾便預留改善之餘裕及延長改善週期。

(四) 顧客需求

沿線民眾對噪音的感受與可接受度因人而異，絕大部分民眾將噪音法規視為彼此共同遵守的主臬，但仍有少數對噪音較為敏感的民眾，一旦能明顯分辨出捷運行駛的聲音，就直覺認定噪音太大，而要求改善。面對類似此種異於法規要求，在考量工程與經濟可行性下，系統仍會儘可能滿足顧客需求。例如：高運量部分地下段，捷運公司排定的磨軌週期縮短至3週，以因應顧客抱怨振動與振動衍生的二次噪音對居住品質的影響；新蘆線為徹底解決地下穿越建物路段的噪音振動問題，滿足顧客無感振動與無感噪音的特殊期許，因而系統引進浮動式道床軌道。

四、減噪措施

一般討論減噪措施都將焦點放在硬體改善，茲將其歸納為主動減噪措施與被動減噪措施。

(一) 主動減噪措施

捷運噪音可區分成車輛設備噪音、車輪輻射音與鋼軌輻射音等三大區塊。在經濟與工程可行的前提下，降低音源的噪音位準，是捷運減噪措施中最直接且有效的方案。主動減噪措施主要針對音源進行改善，茲將主動減噪措施彙整如圖2。其中車輛設備之減噪及減噪車輪相關減振設計特性、安全性及後續營運維修事宜，文獻已有詳細闡述【鄭國雄等，民99】【蘇培坤，民99】。

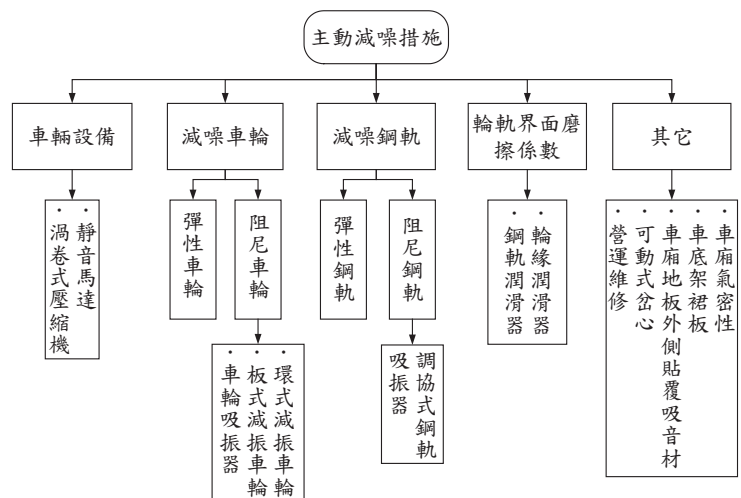


圖2 主動減噪措施

1. 車輛設備

馬達齒輪箱及電控設備噪音是車輛重要的噪音源，為降低該部分的噪音位準，捷

運系統有改採馬達直接驅動方式，或採用質輕的永久磁鐵馬達，以減少傳動軸和減速齒輪箱產生之噪音。另外，馬達的噪音多來自於本身的冷卻系統，若採全密閉型馬達，將可有效降低馬達噪音。

捷運車輛另一噪音源為壓縮機設備，若由旋轉式（Rotary type）壓縮機改為渦卷式（Scroll type）壓縮機，振動量將降至1/10，頻率在200~500Hz範圍的噪音位準約可減少6~8dB(A)。

2. 減噪車輪

減噪車輪可概分成彈性車輪（Resilient wheel）與阻尼車輪（Damped wheel）兩種。

彈性車輪是一種組合式車輪，主要基本結構為輪箍（Tyre）、橡膠彈性元件及中央輪腹板組合而成。由於輪箍與輪腹中間插入橡膠彈性元件，無疑是在傳統車輪之簧下質量中再增加一組彈簧，具有直接降低輪軌振動值，改善直線段滾動噪音、車內噪音等功能；尤其是列車行經轉彎段時，因車輪面外運動受橡膠彈性元件的緩衝，車輪橫向滑行及橫向蠕滑的行為產生的尖銳噪音將大幅減少。從學理角度及減噪發展過程，彈性車輪無疑是相當理想的減噪車輪，惟其價格約為一般車輪的2倍，且橡膠材質有受熱化問題，尤其是煞車引起之車輪溫度上升需予以克服。不幸地是，1998年6月3日德國高速鐵路ICE-1型車輛在Eschede出軌造成近190人的傷亡，事故調查結果指向彈性車輪疲勞破壞所致。雖然，歐洲國家之街車系統仍普遍使用彈性車輪，惟德國高速鐵路已完全禁用，日本已不再使用彈性車輪，至於新加坡、香港及羅馬等新建捷運系統亦捨棄彈性車輪。

阻尼車輪主要設計原理為增加車輪之阻尼，利用阻尼吸收車輪因輪軌振動所分配之振動能量，並將該能量轉換成熱能，藉以降低車輪輻射噪音，但其不具有降低輪軌振動源的功能。依據阻尼設計方式，阻尼車輪可分成環式減振車輪（Wheel with damped ring）、板式減振車輪（Wheel with constrained plate）與車輪吸振器（Wheel vibration absorber or Wheel damper）等三種。

1980年代紐約市運輸局（NYCTA）曾就5種阻尼車輪進行為期17個月的量測評估計畫，是迄今文獻中記載系統營運機構進行之最完整的驗證計畫，表4為其道旁噪音量測結果。【Nelson, 1987】

表4 阻尼車輪道旁噪音量結果

車輪型式	新車輪 dB(A)		運轉17個月後之車輪 dB(A)	
	平均最大音量	最大音量範圍	平均最大音量	最大音量範圍
一般車輪（直徑860mm）	88	80~104	—	97~100
Soundcoast環式減振車輪 （包覆橡膠之不鏽鋼環）	82	79~82	84	78~86
Soundcoast板式減振車輪	82	80~83	83.5	82~86
Sumitomo環式減振車輪 （三明治環）	80	77~81	81	78~84
Krupp車輪吸振器	81	79~82	—	—
Generic環式減振車輪 （不鏽鋼環）	83	82~84	—	—

註：路線最小半徑75公尺，行車速率14~19km/hr，噪音量測點距離軌道中心線7.5公尺，軌道兩側均設置麥克風。

查表4數據，一般新車輪行駛在同一轉彎段之最大噪音範圍由80dB(A)變動至104dB(A)，此可驗證尖銳噪音在沒有特定原因下會突然消失，惟一旦出現尖銳噪音，最大噪音將增加達20dB(A)；不過舊車輪（17個月後）行經轉彎段，並無此現象，尖銳噪音一直存在著。由表4數據亦可驗證，阻尼車輪對尖銳噪音具有11~22dB(A)的減噪效果。

依香港地鐵使用案例，環式減振車輪之減噪效果如表5，減振車輪可降低彎道噪音約7.4dB(A)、直線段滾動噪音約3.3dB(A)【鄭國雄等，民100】。查表4與表5之數據，兩者減振車輪的效果差異不大，惟一般車輪的道旁噪音總量則相差近10dB(A)，可見香港在近20年的發展中已大幅改善道旁噪音，具體措施包括車底架裙板、車廂地板與裙板靠音源側貼覆吸音材、近軌隔音牆、道床與走道側牆貼覆吸音材等。

表5 香港地鐵使用環式減振車輪之減噪效果

項目	彎道段		直線段	
	總量	3150Hz頻帶	總量	500Hz頻帶
行車速率—km/hr	20		60	
一般車輪—dB(A)	90.3	81.2	84.9	76.2
減振車輪—dB(A)	82.9	60.1	81.5	73.7
減振效果—dB(A)	7.4	21.1	3.3	2.5

註：減振車輪之減振環由Ghh-Valdunes公司提供。

比較不同材質之減振環，其中以三明治環之減振車輪在降噪功能上最佳，相對成本亦較高。目前三明治環之減振車輪普遍使用於日本關西地區捷運車輛，而臺中捷運烏日文心北屯線預計將使用此類減振車輪，以因應契約對噪音防制的需求。

3. 減噪鋼軌

為降低車輪幅射音，而有減噪車輪的發展，如彈性車輪與阻尼車輪等；同樣地，為處理鋼軌幅射噪音，亦有相對應的減噪鋼軌，如彈性鋼軌與阻尼鋼軌等。所謂彈性鋼軌，就是在鋼軌底下提供適當彈性支承，以緩和輪軌接觸振動，降低經由結構傳遞的二次噪音；但因鋼軌振幅大，反而增加鋼軌幅射噪音。

鋼軌腹部的斷面較小，易因振動幅射聲音，阻尼鋼軌是在鋼軌腹部兩側貼覆高阻尼材料，必要時輔以束制層鋼板，採連續或離散配置，俾有效阻止軌腹的振動，降低鋼軌幅射噪音。此外，部分型式之阻尼鋼軌會衍生鋼軌共振頻率的調高，亦可加速距離衰減及道旁隔音牆的減噪效果，其又稱為調諧式鋼軌吸振器（Tuned rail vibration absorber or Tuned rail damper）。道旁最大音量約可降低5.4dB(A)【Thompson, 2006】。海洋大學許榮均教授曾在2003年接受臺北捷運公司委託，在捷運淡水線新北投支線進行調諧式鋼軌吸振器的量測驗證，實測鋼軌振動（參考值為 10^{-5} m/sec²）至少可減少10dB以上，惟因調諧式鋼軌吸振器不利於鋼軌維修檢視，致計畫未再持續進行。

4. 輪軌界面摩擦係數

輪緣磨擦噪音與尖銳噪音通常發生在彎道處，其中尖銳噪音不具規律性，會在特定彎道不定時發生，實驗證明尖銳噪音與界面粘滯係數（Adhesion coefficient）有強烈關係【Hsu, etc., 2007】，故在特定彎道局部降低輪軌接觸面之摩擦係數，應可有效改善尖銳噪音與磨擦噪音之發生。常見輪軌界面摩擦係數調整措施有輪緣潤滑器與鋼

軌潤滑器，前者用於降低輪緣磨擦噪音，後者用於改善尖銳噪音。

(1) 輪緣潤滑器

列車行經彎道，車輪輪緣會與外側鋼軌摩擦產生噪音，倘利用車載輪緣潤滑器可調整輪軌界面摩擦係數，以降低輪緣噪音。惟輪緣潤滑器對尖銳噪音並無改善功能，且可能造成車輪空轉、煞車及道床污染等問題，潤滑器啟動時機應妥為考量。

臺北捷運公司曾就車載輪緣潤滑器進行最佳化調整，初期為擇定數量列車全時段打開輪緣潤滑器，其後修正為間歇性打開輪緣潤滑器，最後採用循彎式輪緣潤滑器，以離心力大小控制作動與否，俾便有效控制油漬污染道床，亦可降低道旁噪音約1dB(A)。

(2) 鋼軌潤滑器

傳統鋼軌潤滑器使用潤滑油易污染道床，因而有改用水基液體物質（Water-based liquid material）之潤滑液體。當列車通過彎道前，安裝於道旁之鋼軌潤滑器自動噴灑潤滑液體於鋼軌踏面，在水分蒸發後，會在鋼軌踏面將形成一層薄膜，可調整輪軌界面之摩擦係數。由國外使用的案例，僅使用輪緣潤滑器，無法有效降低彎道噪音，若再加入鋼軌潤滑器後，鋼軌振動（參考值為 μ in/sec）約可降低6.3~22.8dB。惟臺北捷運公司曾擇一半徑210公尺隧道段試安裝鋼軌潤滑器，經實測車內噪音的改善效果並不理想。

臺中捷運烏日文心北屯線機電系統廠商，預定在平面段及高架段轉彎半徑小於200m處，安裝道旁灑水器（Sprinkler），以降低彎道噪音即為類似之設計。

5. 其它

(1) 車廂氣密性

影響車內噪音的重要因素之一為車廂氣密性，由於近音源的噪音位準超過100dB(A)，一旦車廂氣密性設計不佳，車內音響品質就難改善。捷運車廂氣密性的改善不外車門與車間走道等位置。

目前臺北捷運車廂所使用的車門均為滑動式（Sliding），當車門關閉時，車門與車廂之間仍有空隙，無法有效隔離外界聲音傳入車內，甚至不時有出現車內最大噪音超過90dB(A)之情事。最理想之車門設計為滑動嵌入式車門（Plug doors）【陳昭延、莊元亨，民95】，可有效改善車門氣密性不佳的問題。

臺北捷運除了文湖線以外，其餘各線列車均有設計車間走道，以方便乘客進出車廂、調節車廂人潮及緊急逃生之用。車間走道的存在無疑是車內噪音難以克服的盲點，或許較可行的方案是在車間走道鄰近區域貼覆吸音材，俾使入侵的聲音不致於再多重反射，影響車內其餘位置的音響品質。

(2) 車底架裙板

車底架裙板設計一般用於架空線供電系統，由於車載設備一般置於車廂地板以下，若能將車身鋼板往下延伸，形成所謂車底架裙板或簡稱車裙，內緣再貼覆吸音材，配合道旁近軌隔音牆的設計，將可減少設備噪音及輪軌噪音的多重反射行為，有利於車內噪音的降低，亦可改善環境噪音。惟缺點除前述供電系統適應性問題外，車裙亦會影響車輛底盤維修作業及通風散熱。

車裙搭配近軌隔音牆的設計，以香港鐵路有限公司運用最為落實。臺北捷運囿於導電軌供電系統，不僅車輪位置有集電靴伸出無法用車裙遮蔽影響效果外，

車裙與導電軌在小半徑曲線上會有衝突現象，故難以納入考量。

(3) 車廂地板外側貼覆吸音材

臺北捷運高運量車廂地板是由底層不銹鋼底板、厚5cm之玻璃纖維或礦物羊毛防火棉、中間層為2cm厚之金屬面板、最上層為2~3mm厚之防滑橡膠披覆所組成，地板呈連續，無凹陷、間隙或不必要之孔洞【陳昭延等，民95】。惟列車行駛時，車內仍可明顯聽到由地板傳入之噪音，若車廂地板外側貼覆吸音材，將有助於車內噪音改善，同時降低多重反射音量，亦可略為改善環境噪音。香港地鐵與紐約地鐵均有改善案例。

(4) 可動式岔心

道岔或菱形岔心存在有軌距線不連線之有害空間，當車輪行經該處時，會產生衝擊噪音。臺北捷運從新莊線開始已有部分道岔採用浮動式道床軌道，而環狀線業將可動式岔心納入設計考量，俾主動消除有害空間。

(5) 營運維修

營運單位定期對車輛與軌道進行養護維修，是確保系統噪音在可接受範圍的不二法門，相關工作包括車輪車削、軌道檢測、鋼軌研磨等。此外，在短期無法改善噪音且又具急迫性案件，營運單位往往會考量採行調降營運速率的方案。

(二) 被動減噪措施

被動減噪措施主要是針對傳播路徑與受體位置之噪音改善，常見措施為隔音牆及吸音材等。

1. 隔音牆

隔音牆是由隔音和吸音材料組成之結構，用來遮斷或延長音源的傳播路徑。當音源至受體之間由於隔音牆的介入，導致聲音傳播路徑改變愈大，插入損失IL (Insertion loss) 愈高，隔音牆之減噪效果愈佳。隔音牆常為系統必備之減噪措施，減噪效果易於預測，惟成本高，對景觀視覺的衝擊大，高架段將防礙逃生救援工作。

捷運沿線若為高樓林立之環境，隔音牆被迫加高以增加IL或甚至使用全罩式設計，其成本將大幅增加。以環狀線為例，若在特定噪音敏感路段（如醫院、高樓住宅），局部採用主動減噪措施，應可降低對隔音牆的依賴。

捷運淡水線在民權西路出土段加設全罩式隔音牆，小時均能音量可大幅降低達25dB(A)；其餘路段設置高度約1.6M之圓弧型隔音牆內襯吸音材，最大音量亦可降低8dB(A)以上。

2. 軌面及牆面鋪設吸音材

輪軌噪音主要分布在100Hz~5000Hz，單純阻抗形之隔音牆對噪音防治效果不佳，尤其是噪音會在牆面、道床與車體間來回反射，不僅降低減噪效果，甚至出現噪音加成作用；此外，無道碴道床軌道的噪音亦會比道碴道床軌道高出4~5dB(A)。若採用牆面噴佈吸音材料，配合軌道鋪設吸音材料，應有一定的減噪效果。惟軌道上鋪設吸音材料，多以多孔質材料組成之輕質混凝土塊，或玻璃纖維板組成，容易積累髒物，久而影響效果，設計時需妥為考量。

3. 橋下噪音問題與消音箱

橋梁振動之輻射噪音與橋梁底面受其他交通音源反射之噪音，對鄰近低樓層有較大影響。在橋梁底面安裝吸音天棚或懸掛空間吸音箱，可取得一定之降噪效果。本局文湖線西湖站已有此案例。

五、較佳減噪措施

噪音問題就好比是捷運系統的「阿基里斯的腳跟」(Achilles' heel)【Thompson, 2006】，應予以正視，而非一味逃避。前述各項減噪措施，若單獨評估，對特定頻帶的效果似乎相當好，惟實測驗證道旁總量噪音時，往往落差很大。原因在於設備、車輪與鋼軌具有不同主控頻率的音源，彼此相互加成且替補取代主控音源，造成道旁總量噪音降低有限。因此，較佳的減噪措施是針對數個主要特定尖峰頻帶，引用多樣主動減噪措施，再佐以土建軌道的主被動減噪措施，俾便有效降低道旁總量噪音及車內噪音。

(一) 沿線噪音

臺北捷運高運量系統在振動方面的主控頻率相當明確，道碴道床軌道為63.5Hz、無道碴道床軌道為40Hz與50Hz、浮動式道床軌道為15Hz。但是在噪音方面則較難掌控，大致可區分為兩大區塊，1000Hz以下以鋼軌幅射音為主，2000Hz以上以車輪幅射音為主(圖3A、3B)。如前所述，鋼軌對水平軸橫向彎曲的第2振動模態為2100Hz，車輪面外運動主要振動模態為436Hz與1104Hz【Shyu, etc., 2002】，因此，仍需依據個案之主控頻率檢討減噪對象，才能有效降低噪音總量。

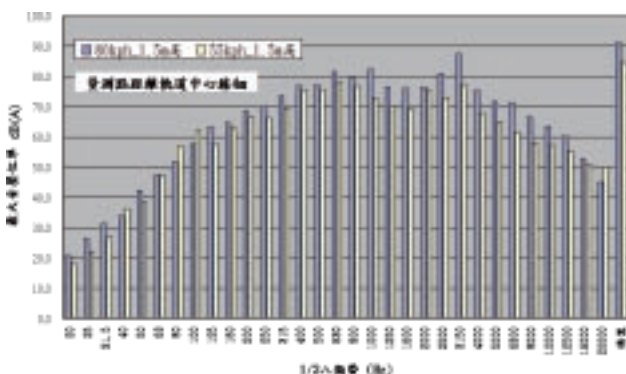


圖3A 捷運淡水線平面段噪音頻譜圖

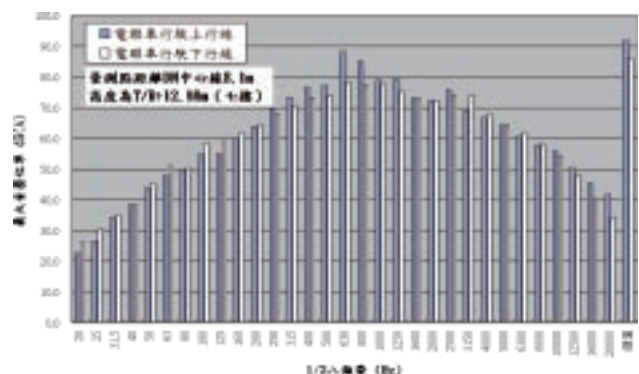


圖3B 捷運淡水線高架段噪音頻譜圖

捷運減噪工作的初級目的是將電聯車行駛的噪音降至環保法規標準以下，最終目的則是滿足顧客對噪音的要求，其間涉及車輛、軌道與土建等面向的協同作業，惟有互信配合，才能使減噪工作具有成效。表1為法規所訂之捷運噪音管制標準，其中包括小時均能音量與平均最大音量，一般係以小時均能音量為主控因素。茲引用Peters公式【Nelson, 1997】，以捷運淡水線與環狀線之系統特性為例，將法規之小時均能音量(L_{eq})轉換成最大音量(L_{max})如表6，其中，受體距離軌道中心線15公尺處，環狀線行車速率為70km/hr、列車長度68m、班距90sec，淡水線行車速率為80km/hr、列車長度141m、班距120sec。

表6 小時均能音量與最大音量之轉換

Leq dB(A)	淡水線 dB(A)				環狀線 dB(A)			
	Lmax	修正最大音量	音源	改善值	Lmax	修正最大音量	音源	改善值
60	69	66	89	23	70	67	78	11
65	74	71	89	18	75	72	78	6
70	79	76	89	13	80	77	78	1
75	84	81	89	8	85	82	78	—

註1：Lmax已考量上下行列車交會增加3dB(A)。

註2：修正最大音量係指道旁最大音量同時考量空傳噪音與結構噪音的合成效果而將Lmax減3dB(A)。

註3：音源已考量輪軌磨耗餘裕增加音源3dB(A)。

註4：改善值為音源與修正最大音量之差值。

環狀線音源的最大音量比起淡水線減少11dB(A)，似乎土建結構在被動減噪措施的壓力緩和不少，但因環狀線電聯車的空調系統採用「一體頂置式」設計【陳昭延，民99】，對於高樓層受體將是毫無遮蔽且未受管制的音源，另外輪軌噪音的反射音未妥為處理，亦將加劇高樓層受體的噪音位準。由於高樓層受體不易受地面交通或人為噪音的影響，背景噪音較低，捷運噪音若經距離衰減作用仍然超過背景噪音或與背景噪音相當時，高樓層受體將會明顯感受到捷運行駛的噪音。惟理論預測與實際會有落差，而且陸上運輸系統管制標準已排除在室內進行噪音量測，未來高樓層受體如何進行噪音量測，遇案由環保單位認定。

(二) 車內噪音

車內噪音出現問題，常見於地下段。以環狀線（第一階段）或臺中捷運烏日文心北屯線為例，除小部分為地下段外，其餘路線均為高架段或平面段，由於列車未來是在開放空間行駛，車內噪音對乘客影響不大。反而是臺北捷運高運量系統除淡水線外，絕大部分路線均在地下段，車內噪音問題一直存在。捷運公司採行的措施包括車輪切削、鋼軌研磨與降速等，未來寄望公司在系統重置時，能強化車內噪音的改善，俾便貼近顧客需求。

六、結論與建議

- (一) 捷運噪音及減噪技術的研究，在車輛方面宜在車載設備之減音、車廂之防音、轉向架及車輪等各子系統之振動分析，以及適切之減噪降振措施等方面著手。
- (二) 輪軌噪音起因於輪軌接觸振動，進而產生輻射噪音。然而輪軌噪音中，究竟是車輪或鋼軌是主控音源，會隨採行的減噪措施而改變，實很難明顯區分。因此，在捷運噪音的防治上，任何減噪措施的投入，應掌控該措施處理的特定頻帶，監測系統噪音頻譜中主控頻率的改變以及總量噪音的影響等，方能更有效改善捷運噪音。
- (三) 軌道運輸之減噪研究涵蓋車輛、軌道及土建結構等三大領域，惟國內在系統性整合之研究較少，宜參考國外相關研究作為借鏡，以提升國內軌道運輸減噪技術及研發腳步，並整合產官學之能量，結合系統營運單位的資源，就減噪材料及複合材料之材質、壽年、強度、抗環境腐蝕／溫度、形狀及結構、減噪能力等，建立完整的資料庫，以落實技術本土化。
- (四) 在捷運噪音處理面向上，設計準則、環保法規與顧客需求等，彼此欠缺有效連結鍵，尤其是當設計準則與顧客需求對立時，環保法規常失去應有的調和作用。是環保法規的條文太寬鬆？是顧客要求的標準太嚴苛？環保法規為下限值，顧客需求無止境，其代表者設計準則將無限上綱。捷運系統一旦營運，相對也壓縮其後續改善提昇的空間，任何非系統新建之初已投入的減噪措施，都將衝擊系統營運與成本支付。環保法規訂定是如此，捷運音源標準的訂定何嘗不是如此。

參考文獻

1. 王栢村、李英傑 (民93) 「軌道車輪聲音輻射與振動特性之關連性探討」, 中華民國音響學會第十七屆學述研討會論文集, 高苑技術學院, 189-196
2. 陳昭延、莊元亨 (民95) 「電聯車造型與內裝設計」, 捷運技術半年刊, 第35期, 49-58, 臺北市政府捷運工程局。
3. 陳昭延 (民99) 「捷運環狀線電聯車概念設計架構簡介」, 捷運技術半年刊, 第43期, 9-22, 臺北市政府捷運工程局。
4. 鄭國雄、劉秋樑、蘇培坤、蕭錫唐、鄭香孟 (民99) 「運用於捷運系統車輛與軌道所涉及之輪軌互制、減噪及相關技術考察」之考察報告, 臺北市政府捷運工程局。
5. 蘇培坤 (民99) 「捷運鋼軌鋼輪系統車輛之減噪車輪及相關技術介紹」, 捷運技術半年刊, 第43期, 69-96, 臺北市政府捷運工程局。
6. 鄭國雄、蘇培坤 (民100) 「捷運噪音及減噪相關技術介紹」, 台灣軌道工程學會100年年會手冊, 70-103, 台灣軌道工程學會。
7. Federal Railroad Administration (FRA) (1998), "High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment", U.S. Department of Transportation, Final Report.
8. Federal Transit Administration (FTA) (1995), "Transit Noise and Vibration Impact Assessment", U.S. Department of Transportation, Final Report.
9. Hsu, S.S., Huang, Z., Iwnicki, S.D., Thompson, D.J., Jones, C.J.C., Xie, G. and Allen, P.D. (2007), "Experimental and theoretical investigation of railway wheel squeal", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F Journal of Rail and Rapid Transit, 221F, (1), 59-73.
10. Nelson, Paul (1987), "Transportation Noise Reference Book", Butterworths.
11. Nelson, James T. (1997), "Wheel/Rail Noise Control Manual", Transit Cooperative Research Program, TCRP REPORT 23.
12. Périard, F. (1998), "Wheel-Rail Noise Generation: Curve Squealing by Trams," Technische Universiteit Delft.
13. Remington, P. J. and Wittig, L. E. (1979), "Retrofit Noise Control and Rapid Transit Cars", Journal of Sound and Vibration, 66(3), 419-441.
14. Remington, P. J. (1988), "Wheel/Rail Noise: What do we know? What don't we know? Where do we go from here?", Journal of Sound and Vibration, 120(2), 203-226.
15. Rudd, M. J. (1976), "Wheel/Rail Noise – Part II: Wheel Squeal", Journal of Sound and Vibration, 46(3), 381-394.
16. Shyu, Rong-Juin, Wang, Wei-Huei and Cheng, Chieh-Yuan (2002), "The Comparison Between Predicted and Measured Noise Emitted by Wheel-Rail Interaction from Taipei Railway Transit System", 2002年臺北國際捷運研討會, 臺北市政府捷運工程局。
17. Thompson, D. J. and Jones, C. J. C. (2000), "A Review of The Modelling of Wheel/Rail Noise Generation", Journal of Sound and Vibration, 231(3), 519-536
18. Thompson, D. J. and Gautier, P. E. (2006), "A Review of Research into Wheel/Rail Rolling Noise Reduction", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 220(4), 385-408..