

臺北捷運軌道電氣測試

陳智誠¹ 龔昶榮²

摘要

軌道工程常被歸類為土木類，從業人員一般亦多屬土木背景，對於所謂的電氣測試部分，常因本身非屬機電科班，故較容易產生疏離感甚或排拒，作者試圖將自身初淺的了解，透過較生活化的說明及簡單的電學觀念來做介紹，然後再適度地導入契約相關規定，相互為用，希望讀者能多少有點收穫，至少不要再有疏離或排拒，知道為什麼要執行電氣測試甚至進一步瞭解現場怎麼做電氣測試、如何規劃電氣測試。

Electrical Testing on Taipei MRT Tracks

Chin-Cheng Chen¹ Chang-Lung Kung²

SUMMARY

The field of Track Engineering is typically categorized under Civil Engineering. As the majority of engineers involved in track engineering come from a civil engineering background instead of being electrical & mechanical engineering graduates, they often tend to have a sense of estrangement or rejection for the electrical testing of MRT tracks. The author intends to give an introduction of electrical testing of MRT tracks through a lifelike and easy-to-understand description. Then supplement further with related contract regulations as an integrated application, with the hope that the article will be helpful to readers so as to eliminate any estrangement or rejection toward electrical testing. On top of that, the article aims to keep the readers well informed as to why electrical testing needs to be executed, how to execute it, and how to plan such testing.

¹ 臺北市政府捷運工程局中區工程處聘用高級規劃師

x2048099@trts.dorts.gov.tw

² 臺北市政府捷運工程局中區工程處軌道工務所正工程司兼主任

xd018012@trts.dorts.gov.tw

一、前言

首先與讀者溝通一個觀念，即鋼軌本身實際上是相當優良的導體！沒錯，若就同一截面積而言，鋼軌材料本身之電阻值或許比一般導線材料（例如銅）高一些，似乎並非良好導體，但若同時考量鋼軌本身截面積（標準UIC 60鋼軌之截面積約達7686平方公厘，而一般家用電線單股蕊線不超過2平方公厘）的優勢（相同材質，電阻與通過之截面積成反比），則實際上鋼軌的電阻值是很小的（即它是極優良之導體），故不管供電系統或號誌系統當然都會善加利用軌條此一優異之附加功能。本文後面將介紹到電氣測試的方法，其中有幾項也是把鋼軌（導電軌）既當做測試標的，同時也是測試時的導線之觀念，來規劃測試電路的（如(1)鋼軌/鋼軌直流電阻、(2)導電軌/導電軌直流電阻、(3)導電軌/鋼軌連續性等測試），所以鋼軌本身是導體（導線）的觀念在本文中是一定要建立的。

話說鐵路運輸工程因應環境保護、經濟等因素及營運、安全的需求，早已邁入動力電氣化及控制自動化時代。以臺北區大眾捷運系統而言（一）動力方面係先將750伏特之直流電力傳導至沿線之導電軌（第三軌）上，後藉由行進中（動態的）動力列車上的集電靴與沿線（靜態的）導電軌滑動接觸，以獲取電力供給列車動力；然後利用鋼軌來作為列車牽引電流負回流之路徑，流回至牽引動力變電站負極端，形成一供電迴路。（二）另外號誌系統亦藉由鋼軌來傳遞訊號（軌道電路，可參考www.ee.yuntech.edu.tw/~g8912712/new_page_3.htm網站，內有生動之動畫及簡易說明）以達到（自動）控制或號誌顯示之目的。由以上（一）、（二）之說明可知，電力供應系統將導電軌作為供電時的導體，而軌條則擔任負回流電之迴路（導體）功能；同樣地號誌控制系統亦利用軌條的導體功能來傳遞訊號。然而導電軌及軌道本身即非單一零件，而係由多重零件所組成一系統之統稱，故不僅在其組成零件之單項施工作業階段，某些單項零件其電氣特性必須先完成測試並確認外（詳附表一），在軌道整體鋪設完成後更必須就整體導電軌系統及軌道系統加以驗證其經過種種安裝及鋪設後之整體品質，是否符合規範要求並滿足機電系統標需求。具體而言，就是經過各單項零件組裝而成之導電軌系統及軌道系統，我們必須加以驗證這些系統是不是仍具有優良導體（導線）之功能，而這些驗證的步驟及方法，就是所謂「軌道電氣測試」。

二、軌道電氣測試概述

至於電氣測試的項目有哪些？我們仍須由電氣測試的目的，也就是要驗證導電軌及軌道是不是優良的導體來做說明：

（一）優良的導體必須具有之條件

1. 導體本身的內電阻值必須要小（即電氣的連續性高），如此才能減少電力及訊號在導體內的傳遞損耗以提升傳遞效率；所以必須對鋼軌及導電軌分別進行a.”鋼軌直流電阻測試”（或稱”鋼軌連續性測試”）、b.”導電軌直流電阻測試”（或稱”導電軌連續性測試”）、c.”導電軌/鋼軌連續性測試”等項測試來驗證其組裝後之整體系統電阻夠低。惟其中C項實際上只在”導電軌直流電阻測試”無法執行時（如1.無相鄰約略平行等長之導電軌、2.導電軌相距太遠需連結之導線過長、3.因隧道段導電軌通常只有一股，無另一導電軌可搭配測試）的替代方案；亦即將鋼軌視為測試時的纜線，在測試區段內將導電軌跟鋼軌連成一測試迴路，然後

將所量得的結果扣除鋼軌連續性電阻後，即為此區段之導電軌連續性電阻。

2. 導體對外界要有很好的絕緣性（即電氣絕緣性要高，就好比電線要有良好的絕緣披覆一樣），這樣電力和訊號才不至於洩漏至外界。故需做a. 軌道對地電阻測試、b. 導電軌對地電阻測試等兩項測試。由於「絕緣」關係到整個捷運系統是否能順利及安全地運轉，臺北捷運系統從設計至施工為了能達到整個軌道系統良好的絕緣目的，花了非常多心力，以目前在建之新蘆線軌道標為例，相關之絕緣措施整理如表一以供參考。

(二) “軌道電路”係利用列車兩側的鋼輪與車軸所形成之導體，當兩鋼輪同時跨越軌道兩條鋼軌時所形成的“短路”（有些系統利用其形成的“通路”）來判定（或顯示）閉塞區間是否被佔據 (occupy)，以掌控列車的確實位置並控管列車的行進，因此為免發生錯誤訊息必須做“鋼軌 / 鋼軌電阻測試”來驗證同一軌道區間內的兩條鋼軌間有良好的絕緣性，。

(三) 護軌不論在供電或號誌控制系統中，皆不作為電路的一部分（即不傳送訊號、亦不傳導電流），然因護軌係依附於運行軌來組裝（如圖1），其中局部區域內運行軌與護軌且共用同一基鈹（如圖2）；故在運行軌與基鈹間、護軌與基鈹間皆各別有鋼軌墊片與基鈹絕緣，且運行軌與彈性扣夾間另施設「彈性扣夾絕緣子」（詳圖2、圖11）以將運行軌與扣件組件及基鈹完全絕緣，但為確認在運行軌上傳導之負迴流電及控制訊號不會經由共用之基鈹洩漏至護軌，再由護軌洩漏至其他地方，所以鋼軌與護軌間之高絕緣性必須加以確認，故“護軌對鋼軌電阻測試”亦必須執行。



圖1 護軌(右軌條)與運行軌(左軌條)

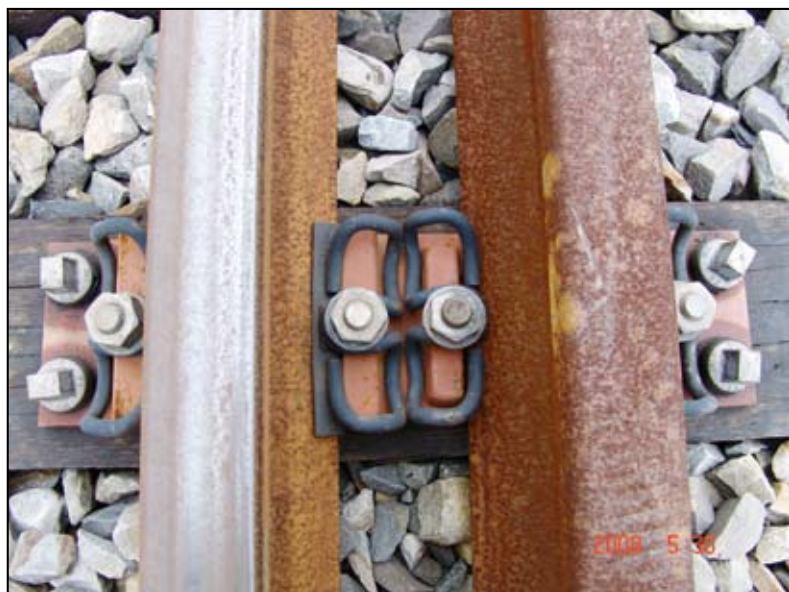


圖2 護軌(右)與運行軌(左)共用基鈹

(四) 綜整電氣測試的項目一般計有：1. 鋼軌直流電阻測試(或稱“鋼軌連續性測試”)、2. 導電軌直流電阻測試(或稱“導電軌連續性測試”)、3. 導電軌/鋼軌連續性測試、4. 鋼軌對地電阻測試、5. 導電軌對地電阻測試、6. 鋼軌 / 鋼軌電阻測試、7. 護軌對鋼軌電阻測試（有護軌時）等7項，而其相關測試之電路圖、規範值及計算式詳如圖21至圖27。

表1 軌道之相關絕緣措施 (以在建之新蘆線軌道標為例)

I. 道碴道床部分				
項次	名稱 (材質)	位置	功能	參考圖號及備註
1.	(鋼軌扣件螺栓及導電軌支座螺栓)預埋件(高分子聚合物)	PC枕上鋼軌扣件螺栓及導電軌支座螺栓之設計鎖固位置	將鋼軌扣件螺栓及導電軌支座螺栓鎖固於其上以與PC枕組合並絕緣	圖3、圖4、圖5
2.	塑膠導角墊片(高分子聚合物, PC枕使用)	PC枕支承座	鋼軌與PC枕間緩衝、絕緣襯墊	圖6、圖8
3.	鋼軌墊片(高密度聚乙烯, PC枕、木枕使用)	PC枕或木枕	鋼軌與PC枕或木枕間緩衝、絕緣襯墊	圖7、圖8
4.	導電軌絕緣礙子(防火強化玻璃聚乙酸酯)→同無道碴道床	導電軌固定裝置與固定托架間 (PC枕、木枕、混凝土基座通用)	絕緣用	圖9、圖10
5.	彈性扣夾絕緣子(塑膠或玻璃纖維強化塑膠)	彈性扣夾與鋼軌間	將彈性扣夾扣鎖力量傳至鋼軌, 且將鋼軌與整個扣件系統絕緣	圖11新蘆線只在有護軌段之主軌上使用, 以將主軌與護軌絕緣
II. 無道碴道床部分 (含浮動式道床)				
項次	名稱 (材料)	位置	功能	參考圖號
1.	(彈性基版螺栓)預埋件(鋼材外覆厚絕緣塗層)	混凝土基座上彈性基版螺栓之設計鎖固位置	將彈性基版螺栓鎖固於其上以與混凝土基座 (或浮動式道床) 組合並具絕緣功能	圖12、圖13、圖5
2.	(導電軌支座螺栓, 與項次I.1相同)預埋件(高分子聚合物)	混凝土基座上導電軌支座螺栓之設計鎖固位置	將導電軌支座螺栓鎖固於其上以與混凝土基座 (或浮動式道床) 組合並具絕緣功能	同圖3、圖4、圖5
3.	彈性基版(鑄鐵外覆橡膠)	鋼軌與混凝土基座 (或浮動式道床) 間	將鋼軌與混凝土基座 (或浮動式道床) 組合並具緩衝、絕緣功能	圖14、圖15、圖16
4.	導電軌絕緣礙子(防火強化玻璃聚乙酸酯)→一般同道碴道床所使用者	導電軌固定裝置與固定托架間 (一般PC枕、木枕、混凝土基座通用)	絕緣用	同圖9、圖10
5.	絕緣扣夾 (高分子聚合物)	混凝土基座(或浮動式道床)之鋼筋交錯組立位置(取代一般鐵絲之束制功能用並具絕緣性)及其他須絕緣之位置 (如同一支箍筋之搭接處)	利用其夾扣之功能取代一般組立鋼筋時使用之鐵線來組立鋼筋, 另因其絕緣性, 配合經設計之鋼筋焊點, 可使組立好之鋼筋籠內各鋼筋只能有單一之電導通(出)路, 讓各混凝土基座形成「雜散電流收集網」之一單元	1. 參考圖17、圖18、圖5。 2. 詳註1。
6.	結合道釘(鋼材外覆絕緣漆, 浮動式道床無此項)	土建標完成之仰拱面與軌道標施作之混凝土基座間的結合	讓仰拱面與混凝土基座間能結合且減低雜散電流往結構物(大地)傳遞機會以避免電氣污染	1. 圖18、圖19、圖20、圖5。 2. 詳註1。

註1：絕緣扣夾與結合道釘應屬「雜散電流收集網」之一環，與一般為驗證軌道電路品質之電氣測試要求雖較不相干，但因該兩材料實具絕緣功能，故並列供參酌，僅此說明。

註2：各絕緣元件另有相關規範之電氣性能，不在本文討論範疇。



圖3 PC枕所使用之鋼軌扣件螺栓及導電軌支座螺栓預埋件



圖4 PC枕鋼軌扣件螺栓及導電軌支座螺栓預埋件於混凝土澆置前鎖固於倒置之鋼模上一景



圖5 無道碴道床澆置前一景 (含：彈性基鈹螺栓預埋件【綠】、導電軌支座螺栓預埋件【白】、結合道釘【紅】)



圖6 塑膠導角墊片 (PC枕)



圖7 鋼軌墊片



圖8 塑膠導角墊片、鋼軌墊片組裝於PC枕上



圖9 導電軌絕緣礙子及剖面



圖10 導電軌、導電軌絕緣礙子、導電軌支架之組合



圖11 彈性扣夾絕緣子



圖12 無道碴道床及浮動式道床彈性基板螺栓預埋件



圖13 研磨前之混凝土基座承載面與彈性基板螺栓預埋件



圖14 彈性基板



圖15 彈性基板剖面(前行標所使用)



圖16 彈性基板組裝在混凝土基座上一景



圖17 (鋼筋)絕緣扣夾



圖18 鋼筋籠與絕緣扣夾、結合道釘



圖19 結合道釘



圖20 結合道釘植筋於土建標完成之仰拱面上

前面所提到的皆係一區段整個系統（鋼軌系統或導電軌系統）完成後所要執行之該區段電氣性功能測試，事實上在完成整個系統組裝前之”單一組件的施工安裝階段”，仍有部分組件安裝前、後須執行之相關電氣性能測試，茲匯整如表2

表2 軌道各系統電氣測試前須完成之相關單項作業電氣檢測頻率及接受標準

I. 鋼軌部分					
項次	檢測項目	接受標準	安裝量測頻率(%)	完工檢測頻率(%)	相關契約條款
1	鋼軌絕緣接頭(鋼軌對鋼軌、鋼軌對螺栓)	$R \geq 10k\Omega$	100	註1.	02460 3.2.4 &02450 3.10.3
2	絕緣軌距版(特殊軌部分)	$R \geq 10k\Omega$	100	註1	02450 3.10.3
II. 導電軌部分					
項次	檢測項目	接受標準	安裝量測頻率(%)	完工檢測頻率(%)	相關契約條款
1	導電軌本體	$R \leq 6.7\mu\Omega/m$		註2.	02461 2.1.4
2	導電軌搭接組件	$R \leq 6.7\mu\Omega/m$	100	隨機	02461 2.2.2
3	導電軌伸縮接頭組件	$R \leq 35\mu\Omega/m$	100	100%	02461 2.3.3
4	導電軌絕緣接頭組件	$R \geq 10M\Omega$	100	(前行標100%)土城線後已不再使用	02461 2.4.5
5	絕緣礙子	$R \geq 10^8\Omega$		隨機	02461 2.6.6 (乾燥時)
III. 無道碴道床混凝土基座(浮動式道版)澆置前須完成之鋼筋電氣檢測頻率及接受標準					
項次	檢測項目	接受標準	安裝量測頻率(%)	完工檢測頻率(%)	相關契約條款
1.	鋼筋和接地系統間之絕緣性	$R \geq 1M\Omega$	每區塊	已澆置無法再檢測	02450 3.10.2 (4)
2.	每段牽引接地系統之連續性	$R \doteq 0\Omega$ (PIG TAIL / 遠區塊)	每(PIG TAIL / 遠區塊)	已澆置無法再檢測	02450 3.10.2 (3)

註1：因鋼軌之鋪設及連結(如連結至特殊軌區)完成後將形成複雜之電氣迴路，致無法再量取單一元件(組件)之電氣阻抗；或因號誌標之訊號電纜及供電標之負迴流電力電纜已經熔接或跨接在鋼軌上構成複雜之軌道電路而無法再單獨量測。

註2：因供電標之供電電纜已經鎖固在導電軌電纜接頭上構成複雜之回路而無法再單獨量測，除非將供電電纜從導電軌電纜接頭拆離。

計算及說明：

- 1.依圖21所示電路，連接各測試設備至運行軌、各測試線與運行軌接觸點應確保良好之連接。
- 2.記錄三用電表及電流鉤表所測得之電壓 V_1 (mV)、 V_2 (mV)及電流 I (A)；受測運行軌之長度 L (m)；與受測運行軌之溫度 T_{rr} (°C)。
- 3.計算受測運行軌之電阻值 $R_{rr} = (V_1 - V_2) / I$ (mΩ)。
- 4.計算運行軌單位長度電阻值 $R_{rr} / km = R_{rr} \times 1000 / (2 \times L)$ (mΩ/km)。
- 5.依運行軌電阻值溫度變化公式 $R_{rr} = 35 \times [1 + 0.005 \times (T_{rr} - 20)]$ ，將規範要求之20°C運行軌電阻值(35 mΩ)換算為 T_{rr} °C時之電阻值。
- 6.確認 T_{rr} °C時之運行軌電阻量測值低於規範要求值。

登錄如次：

$$R \text{ (LENGTH)} = V1 - V2 / \text{AMPS}$$

A (AMPS)	V1 (VOLTS)	V2 (VOLTS)	R (OHMS)	R/KM (OHMS)

溫度補償：鋼軌 $R = 35 \times [(\quad - 20) \times 0.5\% + 1]$

理論值： $R (\quad ^\circ\text{C}) =$

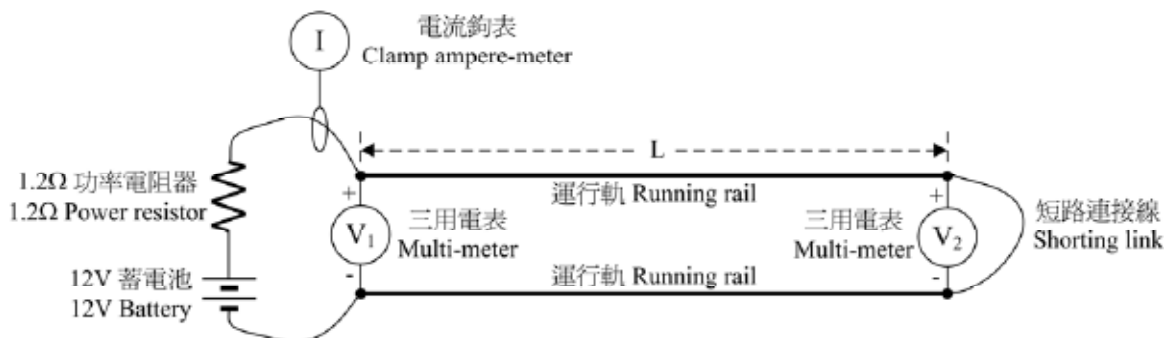


圖21 鋼軌直流電阻測試 (鋼軌連續性測試)

計算及說明：

- 1.依圖22所示電路，進行各測試設備與運行軌之連接。各測試線與運行軌接觸點應確保良好之連接。
- 2.記錄三用電表及電流鉤表所測得之電壓 V (V)及電流 I (A)與受測運行軌之長度 L (m)。
- 3.計算受測運行軌對運行軌之電阻值 $R_{rr-rr} = V / I$ (Ω)。

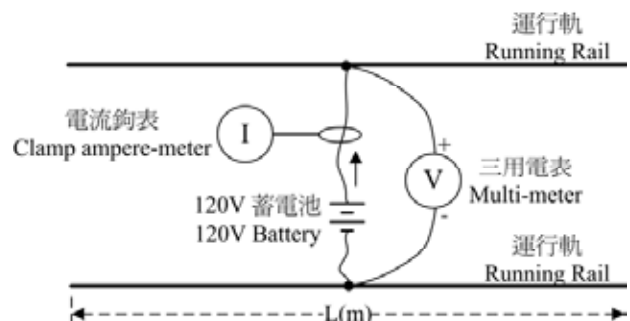


圖22 鋼軌對鋼軌電阻測試

- 4.計算軌道單位長度電阻值 $R_{rr-rr} / km = R_{rr-rr} \times L / 1000$ (mΩ-km)。
- 5.確認運行軌對運行軌電阻量測值高於規範要求：無道碴道床：150 Ω-km；道碴道床：20 Ω-km。

登錄如次：

鋼軌總長：_____m

單位長度對地電阻：_____Ω/m 接地電阻：_____Ω/km

計算及說明：

1. 依圖23所示電路，進行各測試設備與運行軌及等地電位體(牽引接地系統或接地棒)之連接。各測試線與運行軌接觸點應確保良好之連接。
2. 記錄三用電表及電流鉤表所測得之電壓V (V)及電流I (A) 與受測運行軌之長度L (m)。
3. 計算受測軌道對地之電阻值 $R_{rg} = V / I$ (Ω)。
4. 計算軌道單位長度電阻值 $R_{rg} / km = R_{rg} \times L / 1000$ (mΩ-km)。
5. 確認軌道對地電阻量測值高於規範要求：
無道碴道床：150 Ω-km；道碴道床：20 Ω-km。

登錄如次：

鋼軌總長：_____m

單位長度對地電阻：_____Ω/m 接地電阻：_____Ω/km

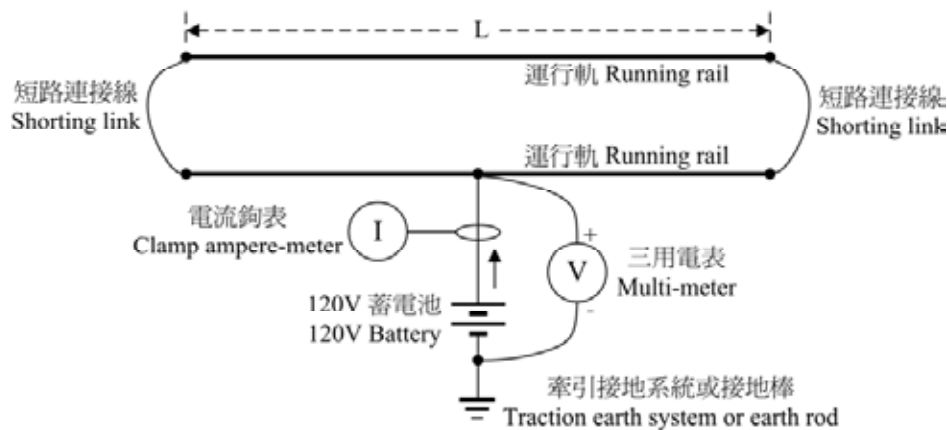


圖23 鋼軌對地電阻測試

計算及說明：

1. 依圖24所示電路，連接各測試設備至導電軌。
2. 記錄三用電表及電流鉤表所測得之電壓 V_1 (mV)、 V_2 (mV)及電流I (A)；受測導電軌之長度L (m)；與受測導電軌之溫度 T_{cr} (°C)。
3. 計算受測導電軌之電阻值 $R_{cr} = (V_1 - V_2) / I$ (mΩ)。
4. 計算導電軌單位長度電阻值 $R_{cr} / km = R_{cr} \times 1000 / (2 \times L)$ (mΩ/km)。
5. 依導電軌電阻值溫度變化公式 $R_{cr} = 7 \times [1 + 0.004 \times (T_{cr} - 20)]$ ，將規範要求之20°C導電軌電阻值(7 mΩ)換算為 T_{cr} °C時之電阻值。
6. 確認 T_{cr} °C時之導電軌電阻量測值低於規範要求值。

登錄如次：

$$R(\text{length}) = V1 - V2 / A$$

A (amps)	V1 (volts)	V2 (volts)	R (ohms)	R/km (ohms)

溫度補償：導電軌 $R = 7 \times [(\text{ } - 20) \times 0.4\% + 1]$

理論值： $R(\text{ } ^\circ\text{C}) = \text{ }$

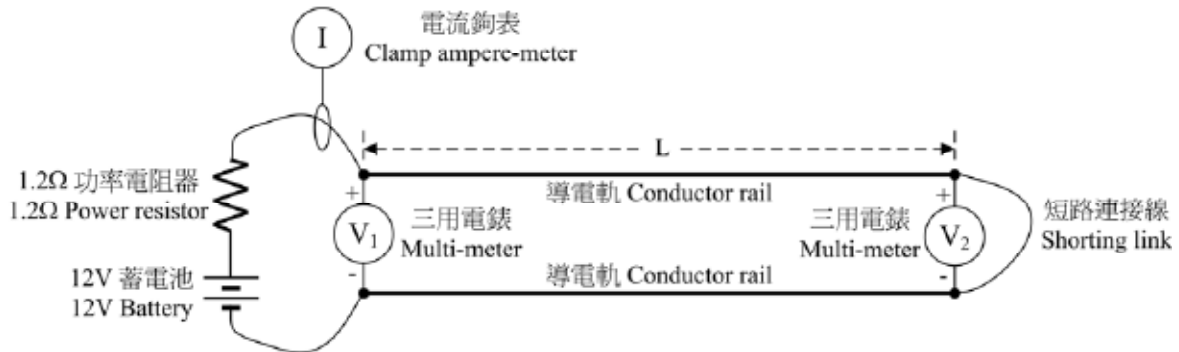


圖24 導電軌對導電軌直流電阻測試（導電軌連續性測試）

計算及說明：

1. 依圖25所示電路，連接各測試設備至導電軌及運行軌。
2. 記錄三用電表及電流鉤表之電壓V1 (mV)、V2 (mV)及電流I (A) 受測運行軌(導電軌)之長度L (m) 與受測導電軌與運行軌之溫度T_{cr} (°C) 與T_{rr} (°C)。
3. 計算受測導電軌 / 運行軌之電阻值 $R_{cr+rr} = (V1 - V2) / I$ (mΩ)。
4. 計算導電軌 / 運行軌單位長度電阻值 $R_{cr+rr} / \text{km} = R_{cr+rr} \times 1000 / (2 \times L)$ (mΩ/km)。
5. 依導電軌及運行軌電阻溫度變化公式 $R_{cr} = 7 \times [1 + 0.004 \times (T_{cr} - 20)]$ 及 $R_{rr} = 35 \times [1 + 0.005 \times (T_{rr} - 20)]$ ，將規範要求之20°C導電軌 / 運行軌電阻值(42 mΩ/km)換算為T_{cr}°C與T_{rr}°C時之電阻值。
6. 確認T_{cr}°C與T_{rr}°C時之導電軌 / 運行軌電阻量測值低於規範要求值。

登錄如次：

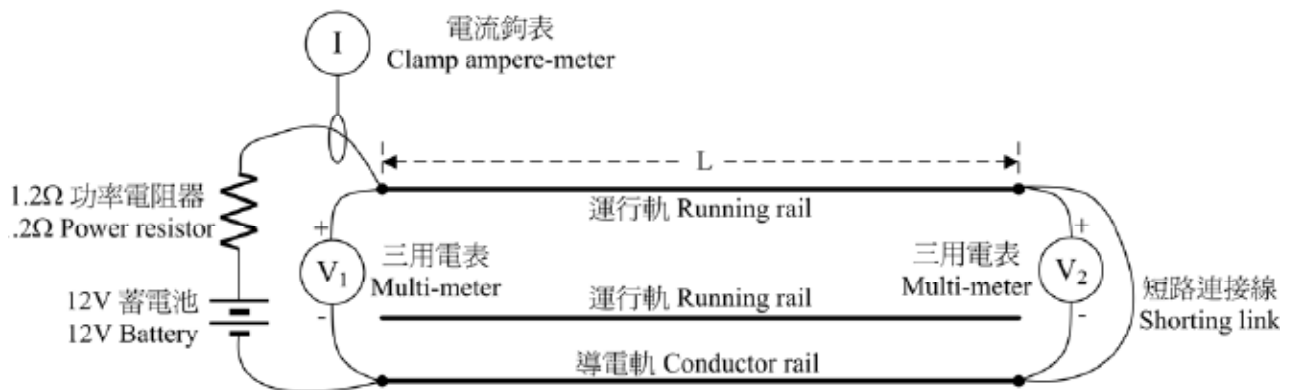


圖25 導電軌對鋼軌之連續性測試（當導電軌對導電軌直流電阻測試無法執行時以此取代，如潛盾隧道區）

$$R (\text{LENGTH}) = V1 - V2 / \text{AMPS}$$

A (AMPS)	V1 (VOLTS)	V2 (VOLTS)	R (OHMS)	R/KM (OHMS)

溫度補償：導電軌 $R = 7 \times [(\text{ } - 20) \times 0.4\% + 1]$

鋼軌 $R = 35 \times [(\text{ } - 20) \times 0.5\% + 1]$

理論值：R (°C) =

計算及說明：

1. 依圖26所示電路，將絕緣測試器(高阻計)之兩條測試接線分別連接至導電軌與牽引接地系統。
2. 將絕緣測試器之測試電壓設定為1000V，通電測試並記錄所測得之電阻值 $R_{cg} (M\Omega)$ 受測導電軌之長度 $L (m)$ 與受測導電軌之溫度 $T_{cr} (^\circ C)$ 。
3. 計算導電軌對地單位長度電阻值 $R_{cg} / m = R_{cg} \times L (M\Omega - m)$ 。
4. 確認導電軌對地電阻量測值高於規範要求：10 $M\Omega - m$ 。

登錄如次：

鋼軌總長：_____ m

單位長度對地電阻：_____ Ω/m 接地電阻：_____ Ω/m

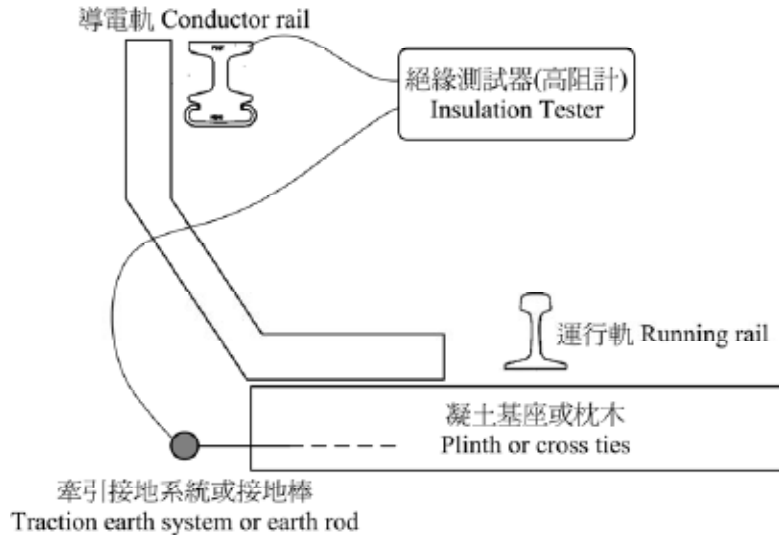


圖26 導電軌對地電阻測試

計算及說明：

1. 依圖27所示電路，進行各測試設備與護軌及運行軌之連接。各測試線與運行軌接觸點應確保良好之連接。
2. 記錄三用電表及電流鉤表所測得之電壓 $V (V)$ 及電流 $I (mA)$ 與受測護軌之長度 $L (m)$ 。
3. 計算受測護軌對運行軌之電阻值 $R_{gr-rr} = V / I (k\Omega)$ 。

4. 計算護軌對運行軌單位長度電阻值

$$R_{gr-rr} / m = R_{gr-rr} \times L \text{ (k}\Omega\text{-m)}。$$

5. 確認護軌及運行軌電阻量測值高於規範要求：150 k Ω -m(即最小電阻每20公尺為7.5仟歐姆)。

登錄如次：

鋼軌總長：_____ m

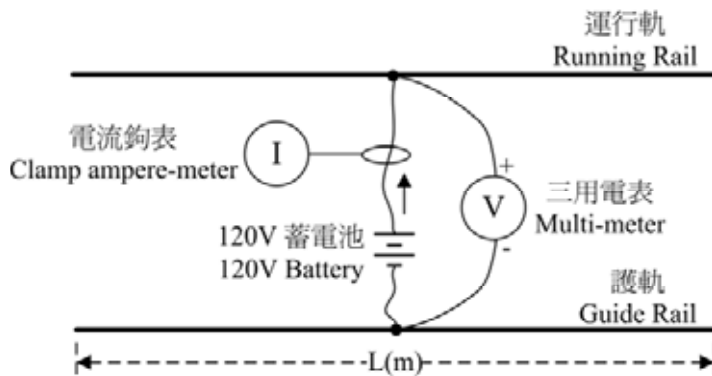
單位長度對地電阻：_____ Ω /m接地電阻：_____ Ω /km

圖27護軌對鋼軌電阻測試

心得分享（一）電路圖部分：

上述圖21至圖27各線路圖，我們不妨回憶一下國中物理電路量測的幾個原則及口訣：安串伏並→即a.量測電流時安培計需與待測線路串聯、b.量測電壓時伏特計(電壓)要並聯，說明如次：

1. 用伏特計量測電壓(V)，需並聯→即伏特計（或三用電錶）的正極（+、一般為紅色）須與線路之正極並接、伏特計（或三用電錶）的負極（-、一般為黑色）須與線路的負極並接。（正接正、負接負）
2. 安培計量測電流(A)，需串聯→即安培計的正極須串接至線路的負極、安培計的負極串接至線路的正極（正接負、負接正）。但目前量測電流常使用據鉤表，只須跨勾要量測電流的線直接讀數即可，不必管正、負極性。
3. 歐姆計直接量測電阻值，一般無正、負極之分。

心得分享（二）計算式部分：

1. 上述圖21至圖27之各算式大概不離基本電學公式 $V=I \times R$
2. 將契約規範值（攝氏20°C時）加上溫度補償運算，得到測試時的理論規範值：

$$\text{導電軌測試時的理論規範值 } R = 7 \times [(T - 20) \times 0.4\% + 1]$$

$$\text{鋼軌測試時的理論規範值 } R = 35 \times [(T - 20) \times 0.5\% + 1]$$

其中V：電壓，單位：伏特 (V) I：電流，單位：安培 (A)

R：電阻，單位：歐姆 (ohm) T：測試時之攝氏溫度

再將實測值與“測試時的理論規範值”比較，是否符合規範要求。

三、軌道電氣測試之規劃

在前面我們介紹了什麼是電氣測試、執行電氣測試的目的、電氣測試項目，也大致瞭解了各電氣測試項目的電路圖及相關計算式，且表二所列之各單項組件安裝前、後該執行的相關電氣性能測試假設也都做過且符合要求，那麼我們是否就可直接到現場做電氣測試了呢？事實上是還不可以，因為實務上軌道電氣測試與解應力作業相似，須將現場已施工完成（或完成相關前置作業）之工區，利用連續長焊鋼軌間之不連續點（如a.每段長焊鋼軌間尚未連接前之連接點、b. I.R.J. 位置、c.特殊軌與一般軌連接前之連接點）來規劃測試區段，分

區段來個別執行後才能再完成相關之鋼軌連結（鋁熱焊或I.R.J.）作業。故於執行軌道電氣測試前，須仔細規劃工區內軌道電氣測試區段並與解應力區段及長焊鋼軌之連結作業相互搭配，同時納入整體規劃考量與管控，且依核定之電氣測試規劃區段、程序來執行電氣測試，以避免非預期之不當焊接後造成無法執行電氣測試或應力解除作業，致須切斷軌條來執行且待完成後再加作鋁熱焊口之狀況發生而影響整體鋼軌組裝品質。因此契約規定廠商在執行電氣測試前必須先將整個工程區分為道碴道床、特殊軌區、無道碴道床等三類，分別提送其電氣測試之程序（即規劃）送工程司核可後方得執行。

(一) 以下係依電氣測試的標的物（鋼軌、導電軌、護軌）來分別說明電氣測試的規劃原則：

1. 鋼軌之電氣測試規劃原則：

- (1) 一般以區域內之不連續點區段為分界點。
- (2) 每段單軌絕緣區域不超過1000公尺(STS 02450 3.10.1)，除此限制外，就業主立場而言，所規劃之測試區域越長，其測試成果越能顯現整體較完整之安裝成果，但因廠商測試不過之風險相對提高及使用儀器之限制，故一般廠商不願作過長之規劃。
- (3) 每一特殊軌區為一區劃（一般而言菱形岔心及各組道岔皆各自獨立為一區劃），特殊軌區因鋼軌及特殊軌元件間複雜之連結、導通，致電路複雜形成許多分流，難以計算等效長度，故只能做鋼軌對地電阻測試。
- (4) 每一鋼軌皆應規劃做對地電阻測試，兩特殊軌間之短軌若因長度過短致無法單獨作為電氣測試區劃時，應盡量併入特殊軌區劃併同測試，如此尚可作鋼軌對地測試。
- (5) I.R.J.兩側鋼軌可依需要以導線跨接成一測試區，合併規劃測試，但跨接之數量有限制。
- (6) 各運行軌應儘可能朝可完成最多測試項目之方向規劃。
- (7) 測試區段之最小及最大長度限制因涉使用儀器精度、可辨識度及專業規劃考量，宜由專業人員檢討審查之。

2. 導電軌之電氣測試規劃原則：導電軌因1.有絕緣礙子與外物絕緣、2.一區一區獨立佈設與鋼軌連續佈設不同等因素，通常只要將導電軌之電纜接頭與供電電纜分離（一般以螺栓鎖固），導電軌即可各自成一獨立區段，故其電氣測試規劃原則比鋼軌部分來得單純：

- (1) 於露天段導電軌儘可能搭配相鄰另一股約略平行等長之導電軌執行「導電軌對導電軌直流電阻測試」，不得已（如1.無相鄰約略平行等長之導電軌、2.導電軌相距太遠需連結之導線過長……）才規劃作「導電軌對鋼軌連續性測試」取代。
- (2) 每一測試區段長度不超過1km。
- (3) 道岔區、道岔與道岔間之短軌區段若導電軌過短則無法測導電軌直流電阻測試、導電軌/鋼軌連續性測試。
- (4) 所有獨立之導電軌string皆須進行導電軌對地電阻測試。
- (5) 測試區段之最小及最大長度限制因涉使用儀器精度、可辨識度及專業規劃考量，宜由專業人員檢討審查之。

3. 護軌之電氣測試規劃原則：

- (1) 每段測試區域不超過1000公尺，一般有護軌之區域皆不長，故無實質上意義。
- (2) 每一段護軌皆須（且只須）對共用基版之該鋼軌做護軌對鋼軌電阻測試。

(二) 依電氣測試項目分類：前述（一）係規劃電氣測試區段之一般原則，表3為新蘆線廠商依電氣測試項目規劃蘆洲機廠內（正線上規劃原則相同，基本上較機廠單純很多）電氣測試區段之實例，供讀者參考。

表3 依電氣測試項目來分類之電氣測試區段規劃原則（蘆洲機廠規劃實例）

項次	測試項目	測試區段規劃原則
1	鋼軌直流電阻測試	(1) 區段長度不超過1km(最短區段長度約30m，最長區段長度約727m)。 (2) 道岔與菱形岔心不測(長度不超過30m，難以測得有效之數據、結構複雜將形成許多分流，無法計算等效長度)。 (3) 道岔與道岔間之短軌區段不測(短軌長度通常為數拾m，甚至短於18m，難以測得有效之數據)。 (4) 每一測試區段內，左軌條或右軌條可單獨具有1-3個I.R.J.、但不可左右軌條同時出現I.R.J.。
2	鋼軌對鋼軌電阻測試	(1) 區段長度不超過1km。 (2) 每一測試區段內，左軌條或右軌條可單獨具有1-3個I.R.J.、但不可左右軌條同時出現I.R.J.。
3	鋼軌對地電阻測試	與項次1之規劃原則相同。
4	導電軌直流電阻測試	(1) 道岔段若導電軌太短則不測（佈設不對稱，僅單側設置導電軌、長度太短，難以測得有效之數據）。 (2) 道岔與道岔間之短軌區段若太短則不測（長度太短，難以測得有效之數據）。 (3) 無約略平行相鄰軌不測（改進行導電軌/運行軌連續性測試）。
5	導電軌/ 鋼軌連續性測試	(1) 區段長度不超過1km。 (2) 已進行導電軌傳導性測試之導電軌string不測。
6	導電軌對地電阻測試	所有獨立之導電軌string皆進行測試。
7	護軌對鋼軌電阻測試	每一段護軌皆須（且只）對共用基鈹之鋼軌測試

四、軌道電氣測試之執行

(一) 電氣測試之環境、條件及注意事項：

1. 溼度過高會影響測試結果，露天區雨天測試宜審慎為之。
2. 測試區段無其它標施工人員、機具、材料、與欲測試之鋼軌或導電軌相連通。
3. 測試區段內，欲測試之鋼軌、導電軌，應與發電機、磁性材料避開3m以上。
4. 測試區段內，界面系統標（供電或號誌..等）之纜線、道旁設備不得與欲測試之鋼軌或導電軌搭接。
5. 測試區段內，應無積水深度超過鋼軌底部或滲水滴漏造成鋼軌面、扣件組件接地或短路之情形。
6. 欲測試區段內之鋼軌與測試區段外之鋼軌間應確實隔絕或絕緣。
7. 欲測試區段內之導電軌與測試區段外之導電軌間應確實隔絕或絕緣。
8. 鋼軌處之道碴頂部不得高於鋼軌底部下方25公厘，依經驗本項條件雖非必然影響測試成

敗，但對測試成果確有影響，尤其在雨天。

9. 接線處須確實研磨拋光，以減低接觸面之電阻。
10. 應確實依核定之電氣測試規劃區域，進行各項測試，測試前並應確實對照現場狀況是否與規劃相符，並確實量測測試標的之長度，各項連續性測試並應量測並記錄軌溫以換算溫度補償後之理論規範值。
11. 每項測試線路連接正確、甚至電線並聯之位置亦須注意，除使用之儀器、線路外無其他可導電物（包含金屬粉屑，如鋼軌切割所產生之金屬粉末）與欲測試之鋼軌或導電軌接觸。
12. 使用經校正之量測儀器，且在執行任何測試項目前，量測儀器應先歸零。
13. 通電測試時，應做好人員管制及防護措施，避免感電。
14. 電氣測試之規劃、管制應與解應力及鋁熱焊之規劃、管制相互配合，並由高階人員專責控管，尤其 (1) 現場不連續點之連結及 (2) 特殊軌與普通軌間之連結，應格外謹慎並再三確認 (1) 已完成必要之前置作業（如解應力、電氣測試）或 (2) 連結後將不致影響後續相關作業（如解應力、電氣測試）後方得以進行現場鋼軌之連結作業，以避免後續需切軌來完成相關作業之情形。

(二) 電氣測試之人力配置及設備：如下表4 提供新蘆線現場各項電氣測試之人力配置及需求設備供參考

表4 新蘆線各項電氣測試之人力配置及需求設備

項次	測試項目	人力配置	需求設備
1.	鋼軌直流電阻測試	電工技師x1、品管x1 技術工x2、工人x1-2	12V鉛酸電池x1(圖28)、電流鉤表x1(圖29)、三用電錶x2(視IRJ數量再增加，圖30)、1.2Ω/1kw功率電阻器(自製、圖31)、導線數條(圖32)、無線對講機數台
2.	鋼軌對鋼軌電阻測試	電工技師x1、品管x1 技術工x2、工人x1-2	12V鉛酸電池10個串聯x1(自製、圖33)三用電錶x1、電流鉤表x1、導線1條、無線對講機數台
3.	鋼軌對地電阻測試	電工技師x1、品管x1 技術工x2、工人x1-2	12V鉛酸電池10個串聯x1 三用電錶x1、電流鉤表x1、導線數條、無線對講機數台
4.	導電軌直流電阻測試	電工技師x1、品管x1 技術工x2、工人x1-2	12V鉛酸電池x1、三用電錶x2、電流鉤表*1、導線數條、1.2Ω/1kw功率電阻器、無線對講機數台
5.	導電軌/ 鋼軌連續性測試	電工技師x1、品管x1 技術工x2、工人x1-2	12V鉛酸電池x1、電流鉤表x1、三用電錶x2(視IRJ數量再增加)、1.2Ω/1kw功率電阻器、導線數條、無線對講機若干台
6.	導電軌對地電阻測試	電工技師x1、品管x1 技術工x2、工人x1-2	1000V等級絕緣測試器或高阻器(圖34)、導線數條、無線對講機數台
7.	護軌對鋼軌電阻測試	電工技師x1、品管x1 技術工x2、工人x1-2	12V鉛酸電池10個串聯x1 三用電錶、電流鉤表x1、導線數條、無線對講機數台



圖28 12V鉛酸電池



圖29 電流鉤表



圖30 三用電錶

圖31 1.2Ω/1kw功率電阻器
(自製) 及三用電錶

圖32 導線

圖33 12V鉛酸電池10個串聯
(自製)

圖34 絕緣測試器(高阻計)



圖35 切軌



圖36 切軌以形成不連續點



圖37 拆除後之軌道電路

圖38 拆除軌道電路以執行電
氣測試

(三) 電氣測試之步驟及程序：

1. 配合現場已完成相關前置作業之區塊執行。
2. 依核可之電氣測試規劃區塊及測試項目進行測試。
3. 至現場並應先確認現場實際之測試標的配置是否與圖說及規劃完全相符，是否有不當之鋼軌聯結。

4. 現場是否完全符合上述電氣測試之環境、條件及注意事項。
5. 依各測試項目，按圖18至圖24之線路圖配置量測電路，一區、一區、來測試。
6. 每項測試完成後，應現場即刻計算確認測試結果，如檢算結果有問題或不合格，應大致不離前述測試環境及條件未符所致，須立即找出問題並排除之且重新測試直至結果符合要求止。以避免事後檢算不合格時，因現場環境及條件已相異（如 (1) 原規劃測試區段之鋼軌已與區段外鋼軌連接【即原不連續點已連接】或 (2) 關連廠商之軌道電路已與軌條相連通……）而致無法進行原規劃之電氣測試，須另行切軌（如圖35、圖36）或將關連廠商已連通（或焊接）之軌道電路拆除（如圖37、圖38）才得以完成相關測試而影響整體軌道施工品質之窘境。

(四) 電器測試現場實測：



圖39 鋼軌直流電阻測試
(測試端)



圖40 鋼軌直流電阻測試
(聯結端)



圖41 鋼軌溫度量測



圖42 鋼軌/鋼軌電阻測試



圖43 鋼軌對地電阻測試
(測試端)



圖44 鋼軌(導電軌)對地電阻測試(接地端)



圖45 導電軌對導電軌直流電阻測試(測試端)



圖46 導電軌對導電軌直流電阻測試(聯結端)



圖47 導電軌/鋼軌連續性測試(測試端)



圖48 導電軌/鋼軌連續性測試
(聯結端)



圖49 導電軌對地電阻測試
(測試端)



圖50 導電軌(鋼軌)對地電阻測試
(接地端)



圖51 護軌對鋼軌電阻測試



圖52 護軌對鋼軌電阻測試之
護軌跨接

五、結語

軌道電氣測試是在軌道完成一區段之安裝後，對該區段之整體軌道系統（含鋼軌及供電軌系統）進行測試，以驗證該區段整體軌道系統之安裝鋪設品質可符合契約規範並滿足機電系統標之需求進而成功地擔當起動力系統及自動控制系統的一環，其對整體捷運之運作及系統安全保障的重要性自不待言。從以上各節所述，軌道電氣測試在實際測試前之相關配套措施、測試環境條件及注意事項相當繁雜，而在實際執行上是有過之而無不及；雖然目前本局在此部份之實務驗證作業，皆透過契約要求交予專業機構執行，但如前所述，軌道電氣測試的規劃、執行若與解應力、鋼軌連結等相關作業之搭配不當或管控不良，均將實際影響整體鋼軌組裝品質、因此建議相關審查及現場監造同仁，仍應對此領域有一定之了解，更企盼本文能發揮拋磚引玉之功用，讓對軌道工程有興趣人士，能彼此多互動多交流，以期軌道相關專業技術在相互切磋中能更加進步。

參考文獻

1. 臺北市政府捷運工程局，《捷運軌道工程實務》，臺北市政府捷運工程局，民國96年10月（第2版）。
2. 臺北市政府捷運工程局機電系統工程處新莊線、蘆洲支線、南港線東延段機電系統、臺北捷運公司車載設備、捷運數位無線電系統、捷運自動收費系統工程CK571,CL701,CE731軌道工程02450-06電氣測試計畫。