

採用直接接地、二極體接地及非接地方式之直流鋼軌 系統的雜散電流特性

捷運局第三處第二課副工程師顏坤鴻

摘要：

隨著以直流電為集電方式作為推動電聯車動力來源的大眾捷運系統快速增加，產生了下列三種不同的接地操作模式，即接地的 (grounded)、非接地的 (ungrounded) 及二極體接地的 (diode grounded) 三種架構，每種架構，當使用行車鋼軌作為直流電負回流時，將對系統產生不同程度的雜散電流 (stray current)，本文將針對這些不同架構進行理論及實務上的探討，以及運用在捷運直流供電系統規劃上所須特別注意事項。

關鍵術語：雜散電流、捷運系統、接地系統、非接地系統、二極體接地系統、接觸電位；集電方式、負電回流

ABSTRACT

The rapid increase of D.C. powered transit systems around the world has lead to the emergence of three distinct types of operational modes, i.e. grounded, ungrounded, and diode grounded. Each of these modes results in widely varying amounts of stray current in systems using the running rails for negative return current. This paper discusses the advantages of each operational mode and the possible stray current effects on transit and adjacent utility structures.

簡介：

直流鋼軌捷運系統最早可追溯到 1887 年美國維吉尼亞州里奇蒙 (Richmond) 市，隨後，則在捷運鋼軌、鋼軌扣件、捷運橋樑、隧道、車站、一些地下結構設施以及接地網發現一些因雜散電流帶來的一些腐蝕問題。

實際上，決定直流鋼軌系統雜散電流程度之最大因素與牽引動力變電站的接地方式有很大的關係，其主要的方式由如下三種：

- 直接接地 (solidly grounded)
- 二極體接地 (diode grounded)
- 非接地/高電阻 (ungrounded/high resistance)

每種接地方式有其獨特的優點、缺點以及不同程度之雜散電流特性，以下將針對其雜散電流程度、軌道接觸電位(touch potential)進行探討。

背景說明

在探討不同接地方式之前，必須先了解軌道接觸電位(touch potential)，這也是一般人比較不容易了解的名詞。一般標準的牽引電路係由牽引動力變電站之整流器饋電，其正電端經由第三軌系統(third rail system)或架空線系統(overhead catenary)供給電聯車所需電力，負回流電力則經由電聯車鋼輪、行車鋼軌回到整流器之負電端。(如圖 1)

由於鋼軌之電阻值雖小但不等於 0，於是當電聯車吸取電流時，此電流經由行車鋼軌回到整流器負電端時，在鋼軌上產生電壓降，此電壓降使得行車鋼軌與大地之間產生電位差，如果電聯車體在製造時與鋼軌同電位的話，則當電聯車殼亦將與大地之間存有電位差，這個電位差就是接觸電位(touch potential)，或稱為月台電位(platform potential)，一般來說接觸電位值有時為 0 伏特，在某些情況下，有時可能超過 150 伏特，此時可能必須進行可能的接觸電位箝制措施。

接觸電位之實際大小事實上與牽引動力變電站的接地方式有關，同時，雜散電流產生程度也跟牽引動力變電站的接地方式有關，相關關係表如表 1 所示。

直接接地系統(SOLIDLY GROUNDED SYSTEMS)

典型的直接接地系統如圖 2 所示，其主要特性如下：整流器負電端直接與接地網以金屬導體連接，鋼軌與大地之間則不特意的加以絕緣。於是雜散電流將可不受限地在接地網之間彼此流竄，從軌道中洩漏流經任何可能的地下金屬路徑。

直接接地系統所產生的雜散電流可高達上百或上千安培，一般這種系統亦同時跟很多的地下管線連接、搭接而形成複雜的雜散電流排流網。一些老一輩的腐蝕工程師曾戲稱，如果有一天針對這種直接接地系統，將所有的地下管線、結構物與鋼軌連接的排流搭接體(drainage bonds)移開，則可能電聯車即無法開動，因為回流軌道早已因雜散電流腐蝕而不再維持電氣連續，平常的運轉電流實際上均是經由這些排流搭接體而形成回路。

當對圖 2 進行分析，可以找出直接接地系統中三種主要的雜散電流腐蝕對象。

首先，由於軌道電阻的關係，雜散電流總是在電聯車開離牽引動力變電站時，從

鄰近該牽引動力變電站處以及牽引動力變電站間中點處流出軌道，於是在上述這些地點可以發現軌道、軌道扣件、橋樑及其他結構體將因雜散電流流出而受影響。

其次，因為雜散電流必須回流至動力變電站負電端，於是鄰近牽引動力變電站地點附近之地下金屬管線也容易受到雜散電流的影響。任何在鄰近牽引動力變電站地點附近的金屬結構體若沒裝設排流搭接體，則有很大的可能性成為雜散電流腐蝕的目標。

最後，任何平行捷運路線的地下金屬路徑，如果此路徑中有電氣不連續處，不管是捷運結構體、還是其他結構體，在這些電氣不連續處亦是雜散電流腐蝕的目標。

人們可能會問，直接接地系統有這麼多缺點，為何會考量以此種模式操作。答案是為了提供一個安全的接觸電位，此為 19 世紀年代之觀點，將所有的物件全部連接起來，形成連續的路徑，以讓電流通的觀念，而並未考慮到腐蝕的影響。直接接地系統的接觸電位將接近於零，因為軌道、車輛幾乎接近於大地電位，即使是在故障發生時，接觸電位亦將維持在安全的範圍內。

新近興建的捷運系統均不會考慮上述的直接接地系統，這種系統目前只有規設在機廠區內的維修工廠區，主要目的係為提供安全的接觸電位值，軌道與大地直接以金屬導體連接的，而為了避免對主線或機廠其他軌道造成影響，維修工廠區的軌道與機廠區的其他軌道亦須以軌道絕緣接合片 (IRJ) 隔開。

二極體接地系統 (DIODE GROUNDED SYSTEMS)

典型的二極體接地系統如圖 3 所示。在舊金山的灣區捷運系統 (B. A. R. T.)，可以看到這樣的設計，其主要特點為每一個整流器的負電端係經由一個二極體裝置連接。此種二極體可能可以設定臨界值，如 10V、50V 或高於 50V 以上以允許電流從接地網流回整流器負電端，但阻止牽引電流從負電端流向接地網，同時軌道與大地之間亦施作絕緣措施 (如附圖 3c 之軌道絕緣扣件)。

依文獻記載有關舊金山的經驗來看，二極體接地系統所產生的雜散電流要比直接接地系統來的小。決定雜散電流量的大小主要由鋼軌與大地之間之絕緣程度決定，由於二極體的關係，所有雜散電流的來源均是從軌道洩漏，故只要鋼軌對地保持絕緣良好，不發生軌對地短路的現象，則從軌道流出的電流比起直接接地系統要小很多。

當對圖 3 進行分析以及根據一些文獻報導，可以找出二極體接地系統中也有三種主要的雜散電流腐蝕對象。

最主要的腐蝕對象就是在軌道區中較低軌對地電阻區的鋼軌段以及鋼軌扣件，不管電聯車運行方向、位置、數量為何，因為有一個低電阻的二極體回路存在，負回流鋼軌總是維持雜散電流洩漏的狀態。所以在美國有人觀察，一個本來可以有運轉 35 年壽命的鋼軌，必須因為基座、鋼軌腐蝕而在強度減弱的情況下在 7 年內加以更換。

其次，由於一般二極體接地系統均搭配有截流網之設計，這些截流網可匯集洩漏電流以減低對捷運系統外鄰近設施的影響，但由於截流網係位於軌床下與鋼軌緊臨，故截流網內可能在尖峰密集班次時刻，可能導通數十至上百安培的電流，一些鄰近此截流網的結構鋼筋，如沒有良好的電氣連續措施，亦有可能面臨雜散電流干擾問題，可能發生的地點一般在於隧道區內，緊臨截流網而沒有電氣連續的隧道環片，離截流網越遠，則由於路徑電阻值的加大，雜散電流效應越不明顯，結構鋼筋如有良好的電氣連續措施，則雜散電流腐蝕的效應則能大大地減輕。

最後，就對其他地下管線的雜散電流腐蝕效應來說，比起直接接地系統要小的很多。這是因為不同接地網間的雜散電流流竄行為已被抑制，但必須保持軌道與大地之間之絕緣良好，然而鄰近牽引動力變電站二極體接地網附近的結構物仍然可能有雜散電流腐蝕的問題，必須加以注意。

二極體接地系統是直接接地系統的改良，但從上面的討論來看，可以看出有鋼軌壽命降低等問題，那為何還會設計此種系統？從一些文獻的討論，其答案主要還是接觸電位可降低，以及直流故障的可檢測。就接觸電位可降低這部份，據筆者從直流分析的一些了解，以及從淡水線現場運轉的觀察，採用二極體接地並不必然有接觸電位可降低的效果，因為當二極體導通時，的確可以將接觸電位拉近於接地網之電位，但由於電聯車的運轉，在某些時刻，由於軌對地電位為正，使得二極體並不導通，此時電位也可可能高達 100 伏特，此乃因其他牽引變電站之二極體導通而拉抬了另外不導通二極體的軌道電位。使用二極體接地的主要原因，應該是在直流正電對地故障，可以利用二極體接地所提供電流路徑，以檢測故障，而隨著科技的進步，此功能已能由新近發展出之半導體固態元件如 SCR、GTO、IGBT 等電力電子可控式開關元件取代。

非 接 地 / 高 電 阻 接 地 系 統 (UNGROUNDED/HIGH RESISTANCE GROUNDED SYSTEMS)

典型的非接地系統如圖 4 所示。其主要特點為所有整流器的負電端與系統接地網之間沒有任何的金屬導體連接，所有採用非接地系統的捷運，均對軌道與大地之間之絕緣措施有特別的要求，並且必須保持軌道與大地之間的高度絕緣，排流搭

接體的使用能避免則避免，非在不得以情況之下才使用。

實際上，“非接地”這個術語應該以“高電阻接地”稱之比較適當，也是比較正確的術語。因為就鋼軌來說，個別的鋼軌扣件雖然電阻都非常的高，一般均在 100 百萬歐姆以上，但成千成萬的鋼軌扣件扣在鋼軌上形成並聯的路徑，也可能形成很好的接地。一般而言，一個多路線的捷運系統其總體軌對地(遠地)電阻可能只有 0.5 歐姆。軌對地電阻一般以歐姆 公里表示，新設系統的軌對地電阻通常在 75- 300 歐姆 公里左右。不同的軌道與軌床間之固定方式，例如枕木道碴(ballast construction)及直接固定墊片結構(direct fixation pad construction)其值也會有不同的變化。在一些特殊軌區如叉軌區以及機廠區則是比較難以絕緣的地區。

對高阻抗接地系統來說，只要鋼軌對地保持絕緣良好，不發生軌對地短路的現象，則雜散電流將會非常小。然而軌對地短路的情形有時可能發生諸如鬆脫的鋼軌扣釘與錨定螺栓接觸、軌旁轉撤器推桿與地短路、阻抗搭接器與地短路或 IRJ 短路等等，一般須透過適當的雜散電流監測措施，以察覺上述之情形。由於高阻抗接地系統的雜散電流量很小，故一般並不需要如雜散電流排流搭接體等措施。

與二極體接地系統相比，非接地系統還有另一項特性，對圖 4 進行分析可以發現，隨著電聯車行進的位置改變，鋼軌上雜散電流洩漏方向也有改變，鋼軌上不再永遠是洩漏雜散電流，有時也流入雜散電流，此種變化彷彿是一種低頻的交流電。圖 5 是一個典型非接地系統變電站與大地間電位時變圖，可以看出電位以 0 準位，正負交替地變化。這是與二極體接地完全不同的地方，在圖 3 的二極體接地系統，電流只允許從軌道洩漏；而在非接地系統，軌道有時是洩漏雜散電流有時則是流入雜散電流的一種交流行為，由於這種交流行為，可以預期捷運鋼軌、扣件、搭接或未搭接的結構鋼筋等的腐蝕率將會比較低，當然，前面的說法，並不意味非接地系統就沒有雜散電流腐蝕問題，只不過，與直接接地或二極體接地系統比較起來，非接地系統的雜散電流問題(包括對鄰近結構體的影響)可大大地降低。

非接地系統既然有上述這些優點，人們也許會問，為何還會考慮其他的系統呢？答案還是接觸電位的問題。目前，新的捷運系統在設計時均會進行相關的電腦分析，找出最佳的變電站位置，通常這些分析還可計算出軌對地電位以及可能的雜散電流量，所以接觸電位變成為主要考量的設計因素。而當發生直流故障時或有某一變電站暫時離線，由相鄰變電站轉供的運轉情況時，則接觸電位可能提升到影響人員安全。而隨著科技的發展，高速斷路器的問世，新固態電力電子元件的出現(如 GTO、IGBT、SCR、TRIAC)、軌道絕緣材料改良、月台絕緣措施的改良以及鋼軌電位過電壓保護設備的出現，使得接觸電位的問題已可以獲得適當地

解決，在台北捷運系統中，各月台邊緣所鋪設之花崗岩石板及矽膠即是為了避免月台電位可能引起之感電危險所施作之月台絕緣措施，如圖 6 所示。

非接地系統可以在安全的接觸電位設計值下操作，且從源頭端大大地降低雜散電流的產生。在美國，如華盛頓捷運、紐約捷運、亞特蘭大捷運、聖地牙哥輕軌系統等均是採用非接地的系統，在加拿大多倫多市的捷運系統，亦已有更換直接接地系統為非接地系統的案例。本局的捷運系統，在土城線及後續路網的設計也已朝此方向努力。原有淡水、新店、南板、中和等線，則在加裝若干隔離開關及過電壓保護設備，亦能以非接地系統的方式操作。

另外，由於一般機廠區軌道之絕緣不容易維持，而且有很多的並行路徑，而一般主線軌之軌道電位值較高，機廠區的軌道電位值較低，故將主線軌道與機廠軌道加以隔離，可以避免主線的軌道電位加到機廠區的軌段，避免雜散電流向機廠區，也可以達到增加洩漏電阻值達到抑制雜散電流的效果。此外在主線段上，如有某些地區有較嚴重的雜散電流集中情形時，則將此主線之負軌及正電供應加以分段，也可以達到抑制雜散電流的效果，因為將主線分段以後，由於區段變短，使得整體的軌對地電阻跟著提高，而減低了雜散電流量，因此在規設上，不同路線的捷運其鋼軌必須在正電及負電加以隔開，以避免整體路線過長，而使軌對地電阻值降低。

雜散電流腐蝕監測(Stray-Current Corrosion Monitoring)

一般捷運單位可藉由雜散電流的監視措施來評估所須進行的雜散電流抑制對策，這些監視措施可以很簡單地如目視電纜搭接頭、跨軌連接線的情況，以確保負回流路徑維持在低電阻狀態，或者較仔細地委託一些專業顧問工程師針對特定區域進行雜散電流調查以決定雜散電流的情況。

評估雜散電流活動的最重要的方法是找出鋼軌對地的現況電阻值、捷運結構物的腐蝕電位等，藉由量測鋼軌對地電阻的過程中，可以找出可能發生洩漏的路徑，而捷運結構物的腐蝕電位量測，則可以用來評估結構鋼筋是否有雜散電流腐蝕行為的發生，以作進一步評估改善方案的參考依據。

不過由於相關的監測工作在實行上須耗費相當大的人力以及相關的配合，一般並不常常實施，而只有在某些特定位置一些重複性的腐蝕現象發現後，才會費事地進行，或者定期實施，但實施的頻率，間隔會拉的比較長。

結論

表 3 列出捷運系統雜散電流抑制之各種方法，表 4 列出了各種接地方式的優點及缺點。以目前的科技水準要達到低雜散電流影響及維持對旅客及捷運員工安全的接觸電位並不困難，未來可更容易達成，也是抑制雜散電流的治本方法。

參考資料：

1. "Stray Current Characteristics of Grounded, Ungrounded, and Diode Grounded DC Transit Systems" by K.J. Moody – presented at CORROSION/94, March 1994, Baltimore, Maryland.
2. "DC Transit Rail Isolation Design, Installation and Problem Resolutions on the Baltimore Central Light Rail Line" By William Sidoriak-presented at CORROSION 93 paper No.591.
3. "Solid State Solutions to Stray Current Control Toronto Transit Commission" by Peter Pignatelli, Jr. - presented at 1991 APTA Conference.
4. "A Cookbook for Transit System Stray Current Control" by K.J. Moody-presented at CORROSION/93 paper No.14.
5. "Stray Current Corrosion in Electrified Rail Systems" by Dr. Thomas J. Barlo, Dr. Alan D. Zdunek, Final Report of Infrastructure Technology Institute Library Services Program, the Transportation Library, and the Seeley G. Mudd Library for Science and Engineering, all at Northwestern University May 1995.
6. "Stray-Current Control Through Storage Yard Isolation: The WMATA Experience," by Szeliga, Michael - Paper Number 157, Corrosion/84, New Orleans, LA, NACE, 1984.
7. "Philadelphia - An Old System Revisited" by Pignatelli, Peter and Jameison, James - Paper Number 297, Corrosion/82, Houston, Texas, NACE, 1982.
8. "Stray-Current Control: Metropolitan Atlanta Rapid Transit System" by Merrick Michael - Paper Number 296. Corrosion/82. Houston. Texas. NACE. 1982.
9. "Construction Management of the Baltimore Region Rapid Rail DC Transit System" by Moody, Kenneth - Paper Number 296, Corrosion/82, Houston, Texas, NACE, 1982.
10. "BART Stray Current Prevention" by Todd, Peter - Paper Number 94587,

Corrosion '94, Baltimore, MD, NACE International, 1994.

11. "Stray-Current Corrosion: The Past, Present and Future of Rail Transit Systems," by Szeliga, Michael, Editor, NACE International, Houston, TX 1994
12. "Stray Earth Current Control: Washington DC Metro System" by Shaffer, Ray and Fitzgerald, John H. III - Paper Number 143, Corrosion/80, Chicago, IL, NACE, 1980.

表 1

接地方式之結果

接地方式	接觸電位	雜散電流程度
直接接地	最小	最大
二極體接地	中等(*)	中等
非接地	最高	最小

*於淡水線之觀察經驗，接觸電位值亦不小。

表 2

人體所能承受的電流及電壓

狀況	電阻值
潮溼的手抓物時	500 ohms
裸足/潮溼的月台	100 ohms
人體內部	600 ohms
總電阻	1200 ohms
	電流值
最小有感值	2.2 ma(2.64 volts)
最小明顯臨界值	61.0 ma(73.2 volts)
最大安全值	80.0 ma(96 volts)

假設在 1200 ohms 之電阻值下

表 4

各接地模式的優點及缺點

接地方式	優點	缺點
A. 直接接地	最低接觸電位	高雜散電流量
	初期建設成本低	鋼軌腐蝕
		複雜的排流網
		對結構體影響大
B. 二極體接地	接觸電位值中等	鋼軌腐蝕
		雜散電流量中等
		初期成本高
		維修成本高
		可能對結構體有影響
C. 非接地系統	雜散電流量最小	接觸電位值須注意
	鋼軌腐蝕狀況低	
	維修成本低	
	對結構體影響低	

圖 1、直流鋼軌系統

圖 2、直接接地系統

圖 3、二極體接地系統

圖 4、非接地系統

圖 5、變電站/大地電位圖

