

鐵路電化的電氣腐蝕與其對策

顏世雄

一、緒 言

臺灣鐵路電氣化已經多年，由於臺鐵所採用方式為交流電化，而對此隣設施產生電蝕機會不多。根據研究結果通常交流電蝕雖較直流電蝕輕微但也會達到約其1~數%左右的腐蝕。因此腐蝕現象若多年進展累積後必對設備、材料有害。臺北市已開始興建地下鐵路，地下雜散電流將更增多。由於地下鐵結構及建造物體均為鋼筋水泥構造，臺北市地下水位又高，污水多，若防蝕處理技術不佳，其電蝕禍害或將超過高雄過港隧道。電鐵路通常以鐵軌做為電車電流的歸路，而歸路電流之一部份洩漏到大地而成為所謂雜散電流，若此雜散電流流入附近地下瓦斯管路、自來水管、通訊線電纜等金屬管路時，將產生電氣腐蝕現象。目前對電鐵路電蝕現象、防蝕對策等，國內國外資料不多見。如要瞭解交流電蝕現象，必須先瞭解直流電蝕現象，本文係參考國外專輯上的文獻，介紹有關電鐵路設備電蝕及防蝕技術。希望本文能廣泛引起各界有關單位對鐵路電氣化後電氣腐蝕問題，並及早制定防範措施以便減少災害發生。

二、腐蝕概念與電蝕發生原理

1. 腐蝕現象分類

雖然要正確分類金屬腐蝕現象相當困難，惟一般採用如圖1所示分類方法，由此可知大別分為有水份的濕蝕，與無水份的乾蝕兩類。乾蝕係由瓦斯等氣體的化學反應引起者，而通常普通見到的腐蝕現象多屬於濕蝕現象。分類

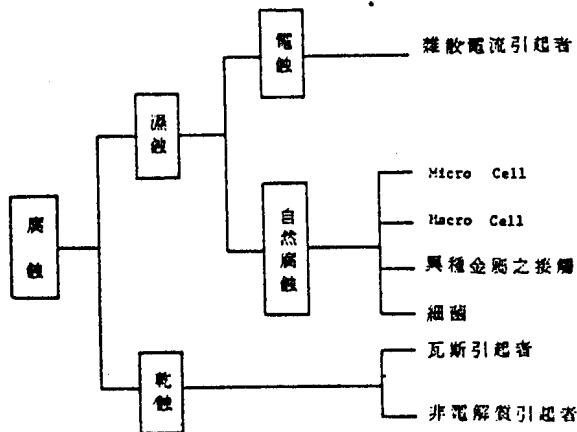


圖1 腐蝕之分類

上，電蝕與自然腐蝕均屬於濕蝕之類，由於腐蝕反應的基本原理係相同的電氣化學反應，故廣義而言，自然腐蝕仍可以包括電蝕之一部份。

大部份電蝕係由如電鐵路鐵軌的洩漏電流及電氣防蝕設備漏出的人為電源所流出雜散電流 (Stray Current) 引起的腐蝕，然而雜散電流有交流與直流兩種電源，若不考慮電流密度極大的特殊條件，通常交流電蝕比直流電蝕輕微多 (約直流電蝕量的1~數%左右)。

地下土壤中的金屬狀態，將依金屬電流的流入，流出方向及其電流量，影響腐蝕情況甚大又不相同。

如圖2所示，將磨光的3片鐵板埋入濕性土壤內，A片為單獨，B與C片間接在直流電源，B接到正極⊕，C接到負極⊖時，A片即發生全面腐蝕而生銹，B片亦產生嚴重的電蝕，惟C片維持原狀，未有生銹現象。

此顯示，A為自然腐蝕，B為電蝕狀態，而C即為電氣防蝕狀態。

2. 電蝕發生原理

如上所述引起電蝕的最大禍主為地下雜散電流，除落雷、漏電等特殊且突發者以外，常時存在者，以電鐵路洩漏電流之影響最大。

電氣化鐵路多如圖3(a)所示採用架空單線式。電車電流係由電鐵路變電所供給，經過電車用輸電線路接到電車的驅動車上動力馬達，再經過鐵軌為歸路回流到電鐵路變電所電源。電車線路為高壓輸電線路 (臺鐵使用交流25KV，日本直流多使用1.5KV)，係以絕緣碼子支持在空中

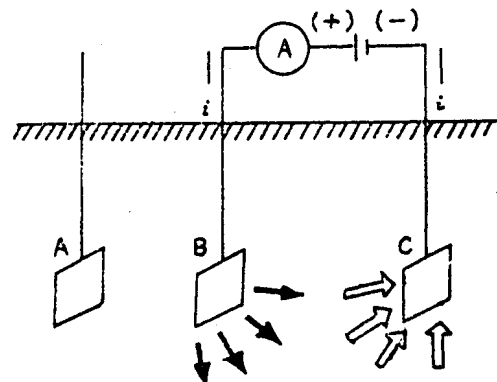
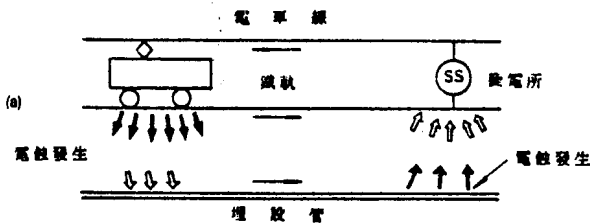


圖2 電蝕與自然腐蝕

表1 腐蝕形態比較表

鐵板 形狀	接線、埋設狀態	電 流 狀 態	結 果	
			表 面 狀 態	作 用
A	單獨埋設地下	無 電 流 (流出、流 入量相等)	全面發生生銹 (緩慢的腐蝕)	自然 腐蝕
B	接直流電源⊕ 埋在地下	流 出	嚴重腐蝕	電蝕
C	接直流電源⊖ 埋在地下	流 入	不生銹，保持 原狀	電氣 防蝕



，洩漏電流不大，但鐵軌係使用枕木等埋設在地面，要確保與大地的良好絕緣，甚為困難，通常有1~10Ω/km左右的鐵軌對大地的洩漏電阻存在。因此，通過鐵軌為歸路的電車線電流的一部份將洩漏分流，進入大地中，若附近有金屬管路物體，即流入該金屬體內，而再流到電鐵變電所附近，直流電流流出時發生電蝕現象。電蝕發生地點多在由金屬物體電流要流出土壤（電解質）之處，及電鐵路電流洩漏出口處。由於電車係一移動的負載（Load），鐵軌的電流洩漏處不固定，因此發生電蝕的地方相當分散，圖3各圖(a)~(d)係電鐵路設備電蝕發生原理概況。

3.電蝕腐蝕量

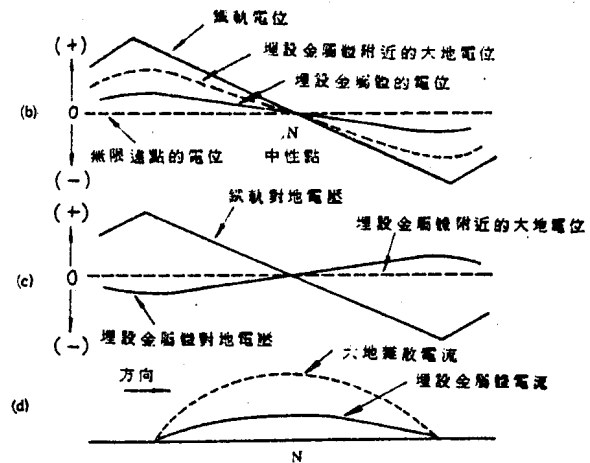


圖3 電蝕發生狀態示意圖

埋設金屬物體的腐蝕量與電流量之間，是根據法拉第律（Farady's Law）成立的，即由金屬體流出一定的電流 i (A)、 t (sec)時，其腐蝕量 W (g) 可如下式表示。

$$W = Kit$$

K 為電化當量比例常數，以1C電流量的電解量 (g/C) 表示，此值 K 依物質具一固定係數。實際電蝕量因各種環境變化因素的影響，通常較理論值為小，惟有時因自然腐蝕量的重疊而變大。表2為通常較常使用的金屬電化當量與電蝕量之關係。惟影響電蝕的因素不只是電流與時間，其他因素如，金屬放置環境，例如土壤品質、水電阻率、pH 值等仍相當重要，故需要注意研判各項因數。

三、埋設管電蝕防止對策

地下埋設金屬管防蝕方法大致可分為被覆、塗裝防蝕、及電氣防蝕兩大類。實際上採用此兩方法併用者較多，以下說明防蝕效果較大的電氣防蝕方法。

表2 電氣化學當量與電蝕量

元 素	電化當量K ($\times 10^{-4}$ g/A.s)	比 重	每1A年電解量	
			重 量 (kg)	體 積 (cm^3)
鋁	0.932	2.71	2.9	1070
鎂	1.260	1.74	4.0	2299
鋅	3.388	7.14	10.7	1499
鐵(二價)	2.894	7.86	9.1	1158
銅(二價)	3.293	8.93	10.4	1165
鉛(二價)	10.737	11.34	33.9	2989

目前常用的電氣防蝕方法有下列四種方式，即為流電陽極方式、外部電源方式、選擇排流方式、強迫排流方式等。

1.流電陽極方式：如圖4所示，被防蝕金屬物體與具有較此體低電位的自然電位金屬體（流電陽極）兩者接成

電氣回路，而利用該兩金屬間的自然電位差做防蝕。自然電位的定義：於電解質溶液中浸漬的金屬所顯示的電位，2種金屬接續於電解質溶液中時，自然電位低的金屬將產生腐蝕，高電位者得防蝕效果。

2.外部電源方式：如圖5所示，被防蝕金屬體，使用外部直流電源由接地電極輸入防蝕電流做防蝕作用。

3.選擇排流方式：使用具有電流流向選擇性能的選擇

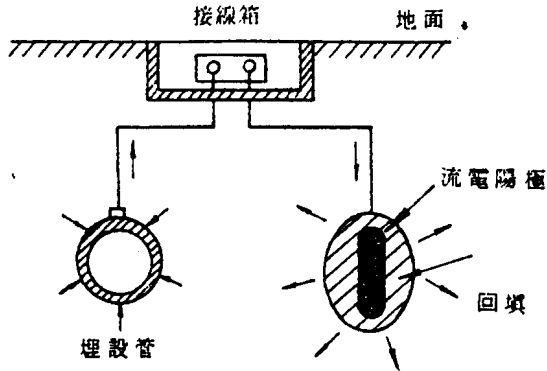


圖4 流電陽極方式

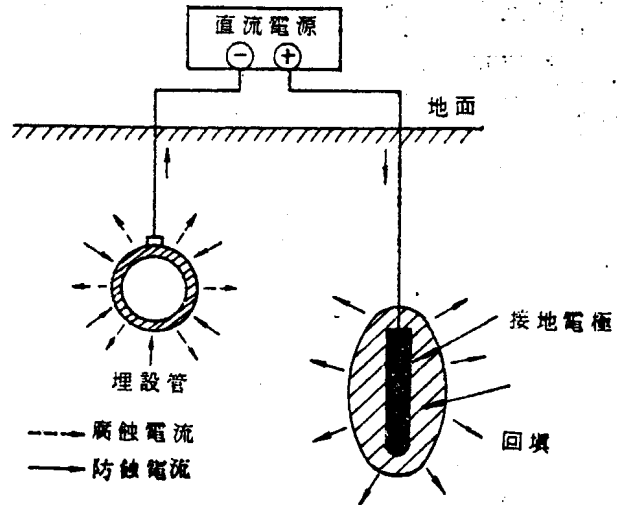


圖5 外部電源方式

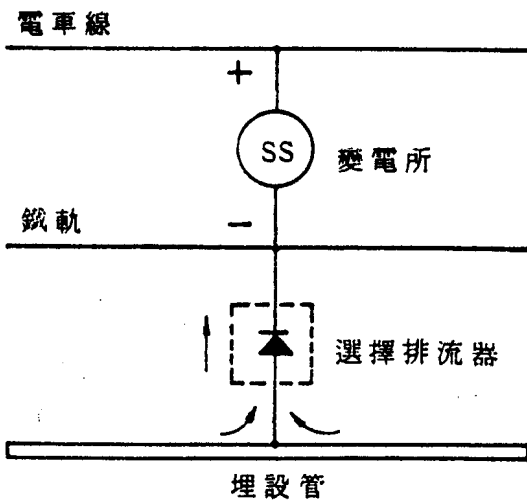


圖6 選擇排流方式

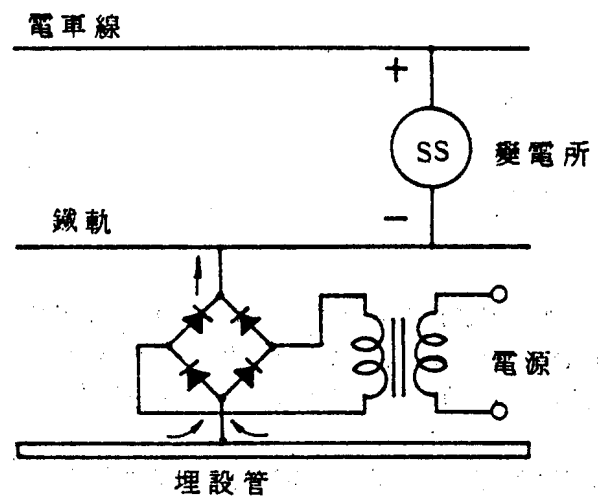


圖7 強制排流方式

題亦愈多，例如由電氣防蝕設施所流出的電流，產生干擾附近埋設金屬管的電蝕。此問題不僅是以腐蝕與防蝕理論能加予解決，須要所有埋設管路機構及企業團體共同協商，研討釐定合理可行的防範辦法。

四、電鐵設備防蝕對策

1.電鐵設備電蝕概況

由於電車用電係一種移動負載 (Load)，因此鐵軌的電蝕通常不集中在一處，而且其洩漏電流值小，故不太

排流器具連接被保護金屬體與鐵軌，以便阻止電流由金屬物體向土壤中流出，而達到防蝕效果。(如圖6)

4.強迫排流方式：使用直流電源(強迫排流器)連接被防蝕金屬物體與電鐵軌間，促進排流以得防蝕效果。(如圖7)

如上所述各種防蝕方式以得失綜合比較結果如表3。

目前電氣防蝕方法的利用愈廣泛且普遍，但相對地間

有問題產生。但若通過隧道內，或地下水多的地區，因漏水、潮濕等原因，使鐵軌接地電阻降低，鐵軌與枕木連結處容易發生電蝕，比較嚴重地區可能不到2~3年需要更換鐵軌及附屬零件，圖8為鐵軌電蝕發生部位概況。

於電車車站通常車庫建屋與鐵軌在基礎部份在電路上是連接在一起的，一般而言，車庫建屋的接地電阻相當低(0.1~0.5%左右)，故有時因鐵軌對地電壓引起相當大的洩漏電流。此洩漏電流不但對車庫基礎，同時也對所接續的各種配管及零件產生廣泛的電蝕；而此現象係因屬

表3 各種電氣防蝕方法比較

項目	流電陽極方式	外部電源方式	選擇排流方式	強迫排流方式
是否要電源	不需要	需要(低壓)	利用電鐵(受場所限制)	需要(低壓)
有效電壓	0.7~0.7V	60V以下	數十V以下,變動大	通常採用定電流方式
維護電費	不需要	需要	不需要	需要
塗裝劣化情況	沒有	有,需要調整	有,視地點要控制	有,需要調整
對其他設施的干擾	沒有	有	需要防範措施	有
維護管理費用	少	高	中等	高
防爆對策	不需要	視情況而需做防爆形	應設在安全地點	應設在安全地點
經濟性	對小設備有利,大設備成本高。	對大設備有利,小設備成本高。	視地點,可以最經濟的利用。	比外部電源方式有利

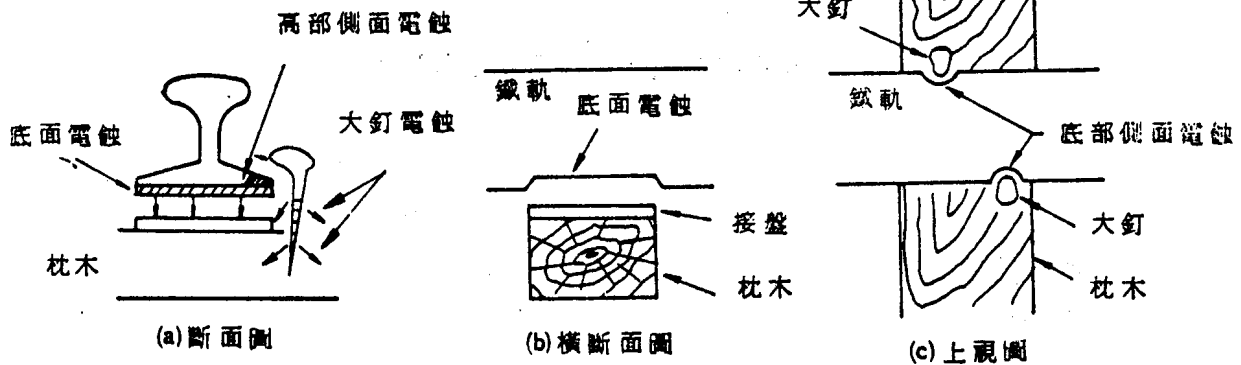


圖8 鐵軌電蝕發生部位圖

於一種鐵軌與低電阻構造物體直接接觸而發生的急激性電蝕，稱為異常電蝕現象。例如在車庫、修車廠內，具潮濕狀態的水泥結構，鋼筋受電蝕時，產生氧化鐵（鐵銹），且此鐵銹的體積將膨脹到原來的鐵的狀態時的兩倍，因此容易使水泥桿發生裂縫。通常鐵銹的膨脹時的張力高達 $330\text{kg}/\text{cm}^2$ ，足夠使一般水泥柱破壞而產生裂縫。水泥一旦發生裂縫，即受水分及污水等之侵入，更促進電蝕的加速進行，而且自然腐蝕亦活躍起來，對鋼筋水泥構造物造成危險。雖然車庫、修車廠之異常電蝕洩漏電流經路相當複雜，根據調查綜合其電流經路去向整理得如圖9所示，可以了解造成電鐵裝置電蝕之概念，並提示防範對策之參考。

2. 異常電蝕防止方法

一般而言，電鐵設備發生電蝕問題嚴重時，也即所產

生的洩漏電流可能相當大，以普通的防蝕方法或無法有效阻止其腐蝕，致其防蝕對策有如下兩種。一為提高局部接地電阻，另一為減少電蝕區間鐵軌對地電壓的平均值。實際上要提高鐵軌洩漏電阻，其實如從費用與效益雙方檢討，大多不合經濟價值，故一般多採用後者之方法，即減低防蝕區間鐵軌對地電壓平均值。為減少鐵軌對地電壓用的設備有兩極斷路器及回歸線自動開閉裝置，由維護檢修之方便及不需要操作等利點，使用後者之回歸線自動開閉裝置多。

3. 回歸線自動開閉裝置

回歸線自動開閉裝置係以矽整流器與保護電路為主體，串聯在電車電流的回歸線路，使電流具有方向性，並有減低防蝕對象區間鐵軌對地電壓平均值的機能。圖10為其內部接線圖；圖11為動作說明圖。例如在車庫、修車廠等

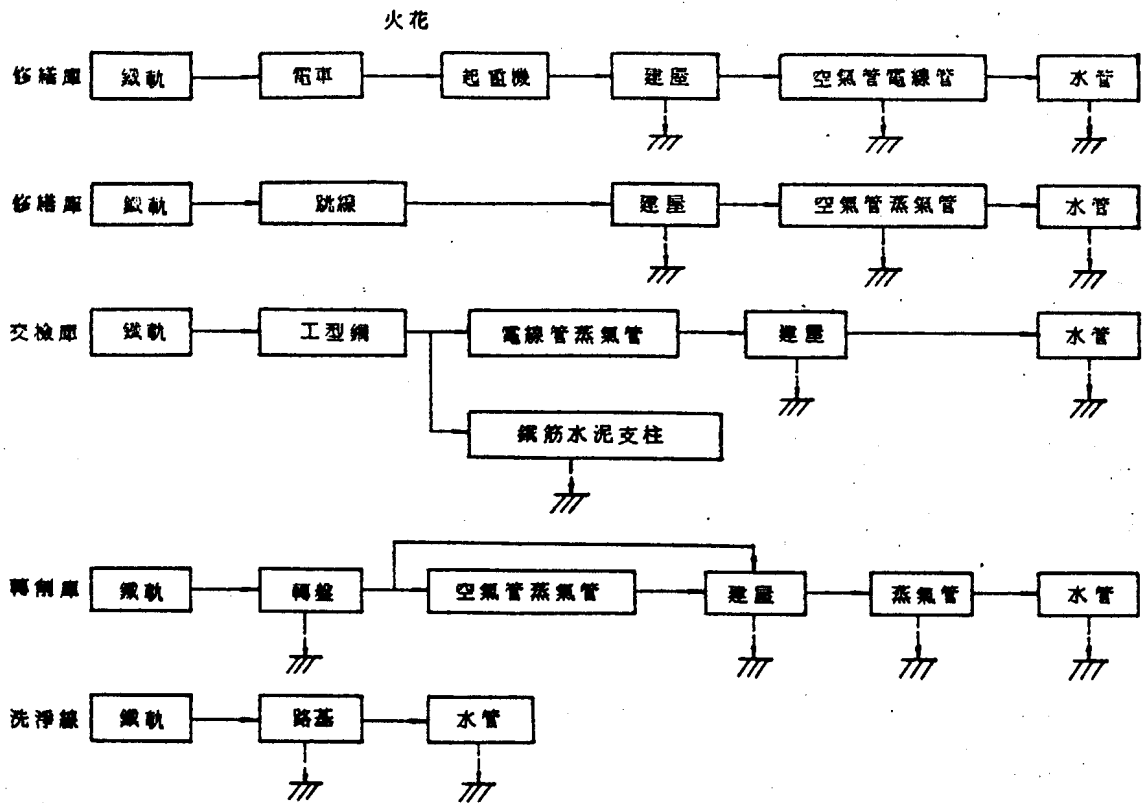


圖9 車庫、修車廠、異常電蝕主要電流經路

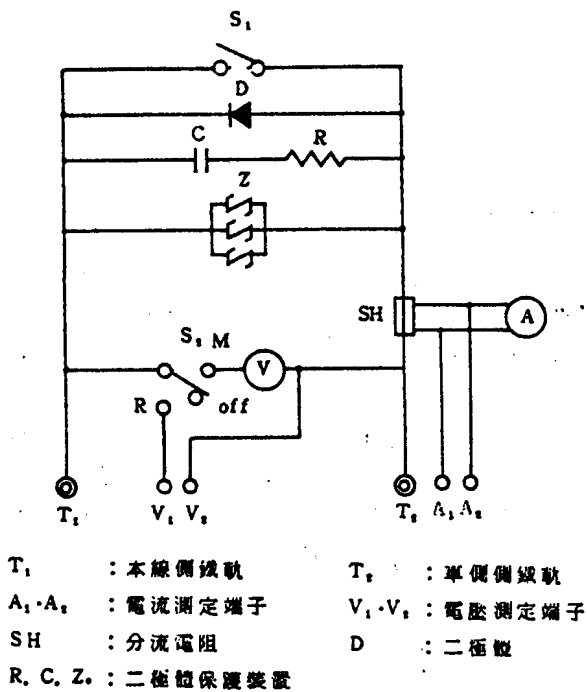


圖10 歸線自動開閉裝置的內部接線圖

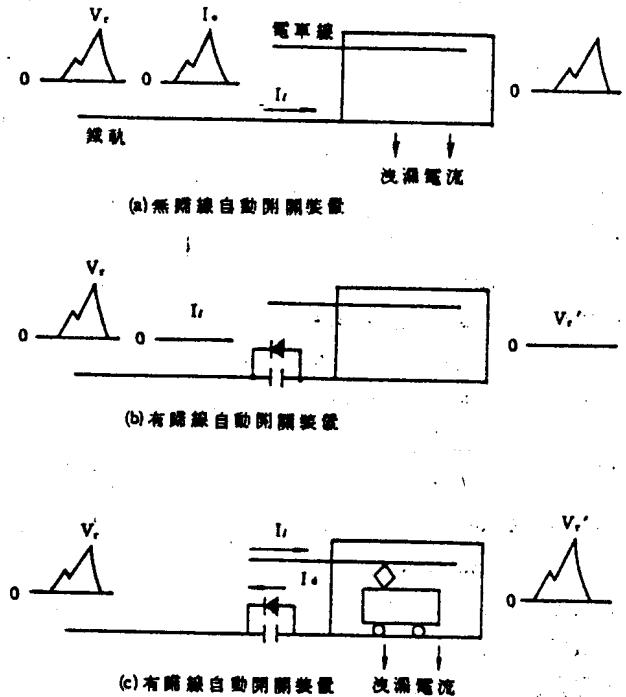


圖11 歸線自動開閉裝置的動作說明圖

的入口處附近安裝回歸線自動開閉器，可以阻止經由鐵軌、車庫外進入車庫內的電流，而在車庫內負載所需運轉電流，即經由本裝置構成回歸線電路。

如未裝此電路，車庫內的鐵軌對地電 V_2 與車庫外的鐵軌對地電壓 V_1 相等，以致在車庫內產生洩漏電流 I_l 。如裝了此裝置，則車庫內無負載電流時，因為 $V_2=0$ ， $I_l=0$ ，也即無洩漏電流。當車庫內有負載電流 I_2 ，而 $V_2 >$

V_1 則經由此裝置產生電流 I_d ，可降低 V_2 值，也即減低車庫內的洩漏電流。此時的洩漏電流防止效率 η 為

$$\eta = (V_{1T} - V_{2T}) / V_{1T}$$

式中： V_{1T} —— V_1 的一天累算值

V_{2T} —— V_2 的一天累算值

對重要地點可採用如圖12的配置做保護電車饋線。

當然這是針對直流電車的措施，如臺鐵的交流電車是

電車饋線

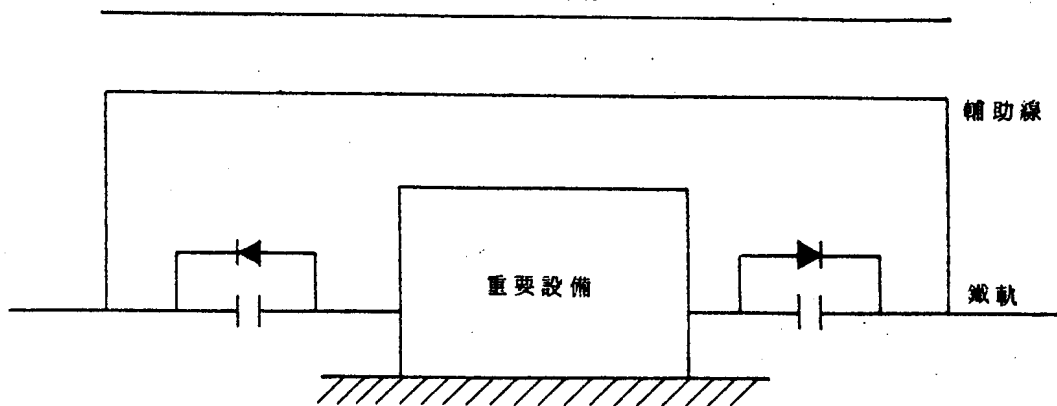


圖12 重要地點的保護

否不必考慮，或需要另外設備來保護。

4. 針對饋線的電蝕防止對策

在目前的以鐵軌為回歸線的饋線系統要絕對阻止洩漏電流是幾乎不可能的，但檢討饋線系統時不難發現饋線系統的各條件對洩漏電流有很大影響。設電車有負載時，洩漏電阻為 $\omega \Omega\text{-km}$ ，而鐵軌電阻為 $r \Omega/\text{km}$ 時，假定兩者都均勻分配時，變電所間距離不大約在 10km 以下時可

以下列近似式計算全洩漏電流 I_l

$$I_l = K \cdot I \cdot r \cdot L^2 / \omega$$

式中： I_l ——全洩漏電流 A

I ——電車負載電流 A

L ——電車至變電所距離 km

K ——關係到鐵軌將地電壓為 0 的位置的常數

由上式可知為減低洩漏電流，則可由 I 、 r 、 L 、 ω 設法改善，則：

(1) 降低負載電流 I

- (a) 饋線電壓升壓
- (b) 採用省電力電車

(2) 降低鐵軌電阻

- (a) 採用較粗鐵軌
- (b) 採用單條長度較長的長軌
- (c) 採用複線
- (d) 加強鐵軌跳線
- (e) 採用與鐵軌並聯的輔助饋線
- (f) 採用由鐵軌至變電所的引入線

(3) 降低距離

- (a) 縮小變電所間距離

(b) 採用再生電力電車，也則止動時成為另一電源變電所

(4) 提高洩漏電阻

- (a) 枕木的整理
- (b) 改善排水
- (c) 提高軌道底部與枕木間的絕緣
- (d) 提高鐵軌固定結構的絕緣

這些措施對直流電車、交流電車均有效，當然交流電車腐蝕情況不嚴重，或不必如此過份保護，但假如將來臺鐵部份地下化之後，對地下部份重要區間尚需要考慮防腐時值得參考。

5. 洩漏及防蝕電流對地磁的干擾

直流電鐵洩漏電流與電蝕障礙的關係早為眾知的現象，惟此項障礙以外，最近發見地下鐵的洩漏電流對地球地磁氣觀測將發生擾亂，因為由於洩漏，而饋線與鐵軌回歸線間的電流差值引起磁場尤其直流磁場，此變化磁場影響地磁觀測的精度，因此在地磁觀測站附近須要注意自然腐蝕現象之防蝕對策，及有效防範對地磁的擾亂現象。

現在到處都有的防蝕電流也會形成直流磁場，也會產生干擾現象的，對此雖尚無進一步研究，但畢竟量多了，必然有影響。

五、電鐵設備電蝕調查概況

日本鐵路電化已有相當久的歷史，且也相當普通，故各方面的調查統計都很多。

根據日本電氣學會，電蝕防止研究委員會之調查報告資料，自1952年至1983年30多年間實地調查電車車輛基地

、電鐵用變電所、修護工廠、車站等地點設備電蝕障害實況，及其防止對策整理如表4所示。由表4統計數字可知，於1983年度調查件數為46件，其中電車佔24件（約52%）、運轉區、電務段及機務段發生11件（約24%）、車廂區2件（約4%）、修護工廠2件（約4%）、變電所2件（約4%）、車站內5件（約11%）。如前節所述，由鐵軌洩漏大地的雜散電流進入地下埋設金屬管後，再由金屬管流出地點發生緩慢性電蝕現象稱為自然電蝕；而鐵軌與埋設金屬物體經由建築物接觸地區，發生急激性電蝕現

象稱為異常電蝕。如此定義而言，表4之電車總站、修車廠等地之電蝕障害實例中，異常電蝕即佔約85%之多，而15%為自然電蝕。於電車輛區約90%屬於異常電蝕，可見異常電蝕比率偏高。就設備類別觀察電蝕障礙時，得知自來水管佔46%，油管、蒸氣管等設備佔27%，軌道支持物等水泥構造物裂縫佔15%，其餘12%為接地線、支線等類。就電蝕防止對策而言，新設軌道絕緣佔15%，配管類加裝絕緣接合（Joint）佔36%，安裝如前項所述回歸線自動開閉裝置佔26%，裝設排流器4%，其他措施為19%。

表4 電鐵設備的電蝕障礙件數與其防範對策（日本1983年度）

調查地點	項目 處數	電蝕				配管類				對策				
		感電	火花	電蝕		配管類		鋼筋 水泥 龜裂	其他	加強絕緣		回歸 自動 開關	排流器	其他
				自然	異常	水管	油、汽 導管			鐵軌	配管			
電車區段	24	3	12	1(1)	12(7)	10	3	2		7	16(1)	10(2)	1	3
電務段	3				2(1)	2	1	1			3			1
機務段	8		6	1	2(1)		2	1		2	3	3	2	
車廂區	2		1	1			1				1	1		1
修車廠	2				(2)					(1)	(1)	1(1)		
變電所	2				2				2					2
車站內	5		4	1					1					5(1)
共	46	3	23	4(1)	18(11)	12	4	3	3	9(1)	23(2)	15(3)	3	12(1)

註：()表示未確定數。

由以上考察分析，可獲知日本1983年電鐵設備電蝕障礙約46件中，約80%事故集中在車輛總站上，而且電蝕發生形態上，異常電蝕佔85%之多，故此實況值得大家有關單位專家注意。就日本電蝕防止對策而言，採用軌道絕緣措施及回歸線自動開閉裝置，即防止洩漏電流流入車庫建築物方式者佔約40%。此措施表示，若考慮鐵軌與建築物等間之低電阻接地構造物之絕緣，並採用有效方法阻止洩漏電流去向，將可以有效防範電鐵設備電蝕障礙。

六、臺灣的電車電流分析

臺灣的電車電流可分為兩部份，則臺電系統對臺鐵系統，臺鐵包括電車的系統。關於後者根據資料顯示臺鐵的負載電流有如圖13所示的大量的高次諧波，但並不表示有直流成份，因此理論上即是有洩漏電流，也對地下管道等不構成威脅。但土質、地下水、管道表面狀態對這些高頻電流也有所影響不明，如何構成如前述的約1~數%的腐蝕也尚待進一步研究。

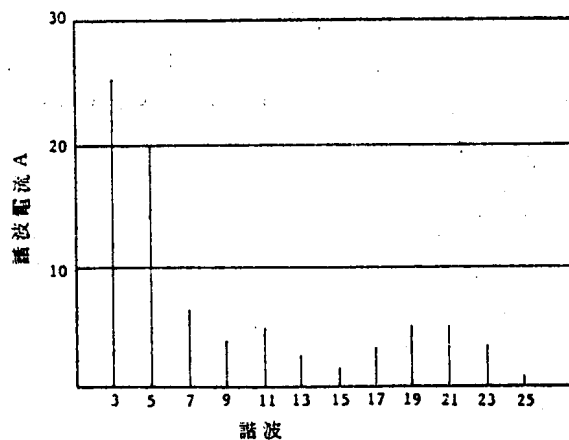
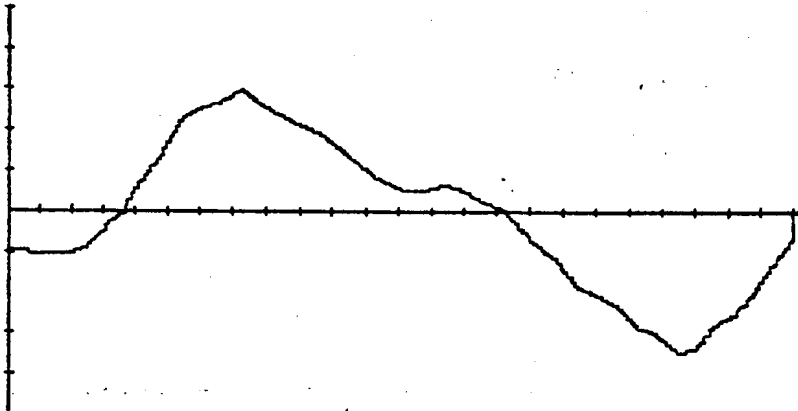


圖13 IEE 發表臺鐵用電頻譜

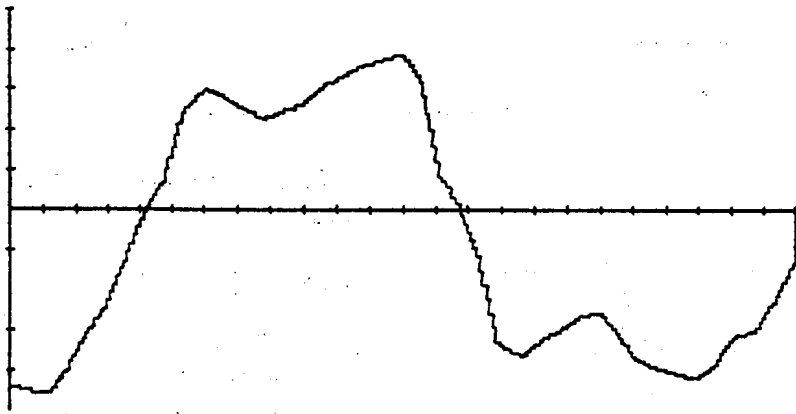
---A PHASE---

(a) ONE PU OF Y AXIS IS:40



---B PHASE---

(b) ONE PU OF Y AXIS IS:40



---C PHASE---

(c) ONE PU OF Y AXIS IS:40

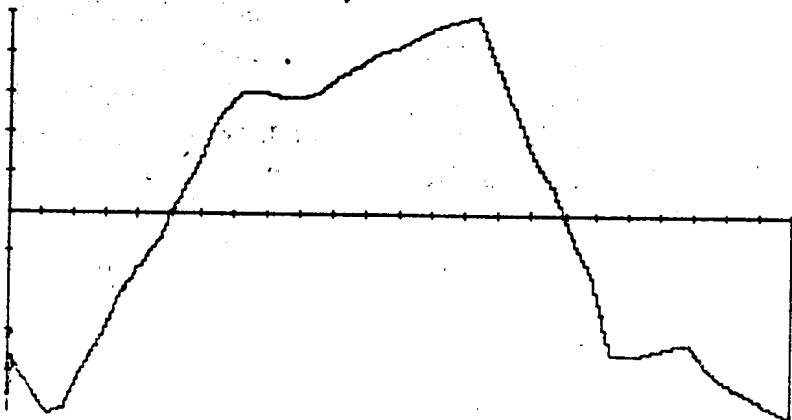


圖14 臺鐵三相電流波形例

臺電系統對臺鐵系統間的負載電流部份，筆者曾在新竹變電所實測多次，有關高次諧波因不含直流成份，不在此提供參考，但測得如圖14(a)~(c)的波形例。因為電車負載時時刻刻有變化，故此為其中一例而已。值得注意者為

經分析結果顯示如圖15有大量的零相序電流成份。如果有大地回歸電路時，零相序電流是令經大地回歸的，此電流值多少？令有何影響尚待今後進一步的測試與研究，在此僅一提供參考而已。

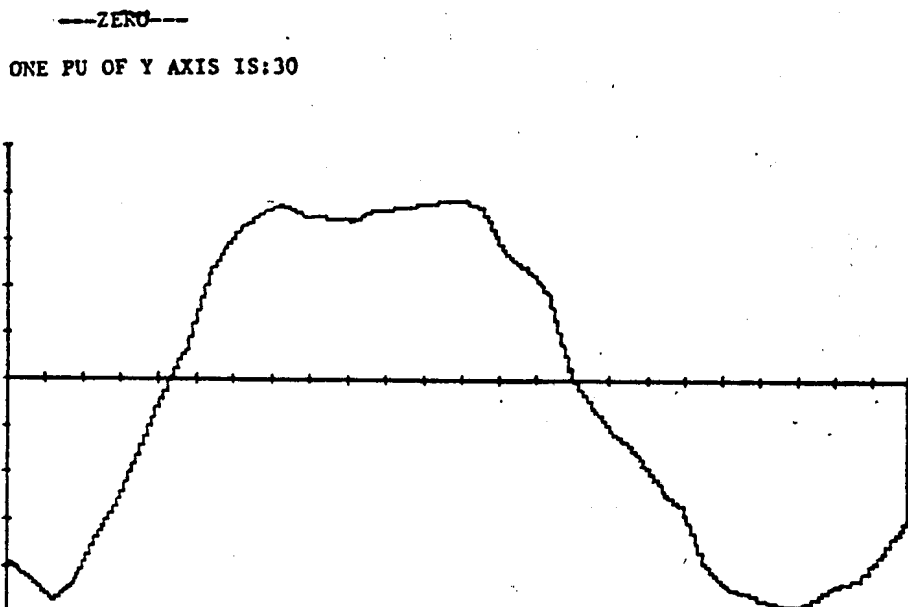


圖15 電車專用饋線的零相序電流

七、結 言

以上參考日本OHM 電氣雜誌發表的資料加以整理編寫有關電鐵設備電氣腐蝕實況與其防蝕對策，可知電鐵設備雜散電流不但對電鐵設備造成急性異常電蝕障礙，並且對其毗隣地下埋設公共用金屬管路物體及電纜等設施產生異常電蝕。根據日本多年來調查及檢討結果，其防範對策為：鐵軌與低電阻接洽構造物（建屋、結構）間，挿裝絕緣接合設備，回歸線自動開閉器等使其絕緣，以阻止電流之流出，如此措施將可以有效防止鐵路電化異常腐蝕現象，故值得做我們的參考與借鏡。

臺灣的鐵路電化雖採用交流電化，因此雖然理論上不會威脅地下鋼鐵構造物的，但國外資料指出還是有達直流電車時的約1~數%。此估算是否正確尚待商榷之外，在像臺北市這樣各種設備密集在鐵路沿線的大都市而言吾人

必須進一步研究交流電腐蝕的真像以及其防範措施以防萬一。

八、參考資料：

- (1) "Electrification of Taiwan main-line railway from Keelung to Kaohsiung" IEE Pro. Vol. 130pt B No. 5。
 - (2) 日本電氣雜誌OHM，1985年2月號，p. 17~24。
 - (3) 日本電氣學會，電蝕防止研究委員會；電蝕、土壤防蝕手冊（1982年）
 - (4) 東京電蝕防止對策委員會；電蝕防止對策手冊（1982年）
 - (5) 日本鐵路技術研究所速報A-84-81。
- 作者：1.臺灣電力公司電力研究所主任。
2.本會理事。