

# 雜散電流之分析 (Stray Current Analysis)

樊其芬

## 一、緒論：

地下腐蝕 (underground corrosion)，是一種電化過程，在化學上說，是一種金屬在那裏發生氧化作用，希望讀者對電化作用的普通原理及氧化作用有所瞭解，我們使用局部之電化學電池，及二種金屬的電偶，談到雜散電流分析，這是往自然世界走到人類世界的步驟。

由於討論之方法，我們將限於有流電，不常用於電力工業的交流電，而是頻率為 25 Hz 至 60 Hz 的電流。也含有例外的情況，如將交流電變為直流電，偶然的或有目的產生有流電。

我們將雜散電流定義為直流電流流往地下路徑，該路徑附近的結構物有可測得之影響，它不是某預定線路中的一部份。

## 二、雜散電流的來源：

1. 大地是一個良導體：爲了要瞭解如何去控制雜散電流，首先要知道雜散電流在地下腐蝕情況。大地是一個非常大的電解質媒介體，內有各種不同的金屬結構體浸沒其中，互相聯結，大地的泥土中含有水份，會使各種可溶的鹽類解離，而成一個電解質的導體，以電導的單位 (mho/cm) 量之，或者更普通說是電阻 (ohm/cm) 的例

數。天然的泥土，依其所含之可電解物之量及含水多少，其電阻之值由近海水而至千萬倍之 ohm/cm，當我們考慮到雜散電流時，可想到泥土之電阻愈低，雜散電流的影響愈嚴重。

由電阻數即可證明在大地中一個金屬結構物是比大地爲更好的導體，甚至比海水還好，銅及鐵之電阻比  $10^{-6}$  ohm-cm 小 10 倍，而鉛的電阻約爲  $10^{-6}$  ohm-cm 之 22 倍，故極易瞭解，假設電流在土地中流動，產生一電位差時，若有一金屬導體橫越其中，這個金屬導體就易獲得一部份電流。所以管道及電纜可成爲在大地環境中雜散電流的主要導體的來源。

2. 大地中電位梯度：如何使雜散電流積聚在地下金屬構造物再進入大地呢？任何電路必須在二點間有電位差，才能使電流流動。同時必有一電路，即是必有一電流之來源及同一電流之回路。電流之大小，依電的性質，與電位及電阻有關。流過任一結構物之電流量，與二點間的平行電路的電阻成反比。和一般電路中有平行電阻是一樣的。一個大地中之金屬電極對周圍之環境若爲正，則必放出電流於大地。反之，任何物祇要對大地是陰極，必由大地中附近的金屬結構物取得電流。圖一表示這種情形。我們主要能找出這些電路中正及負的成份。

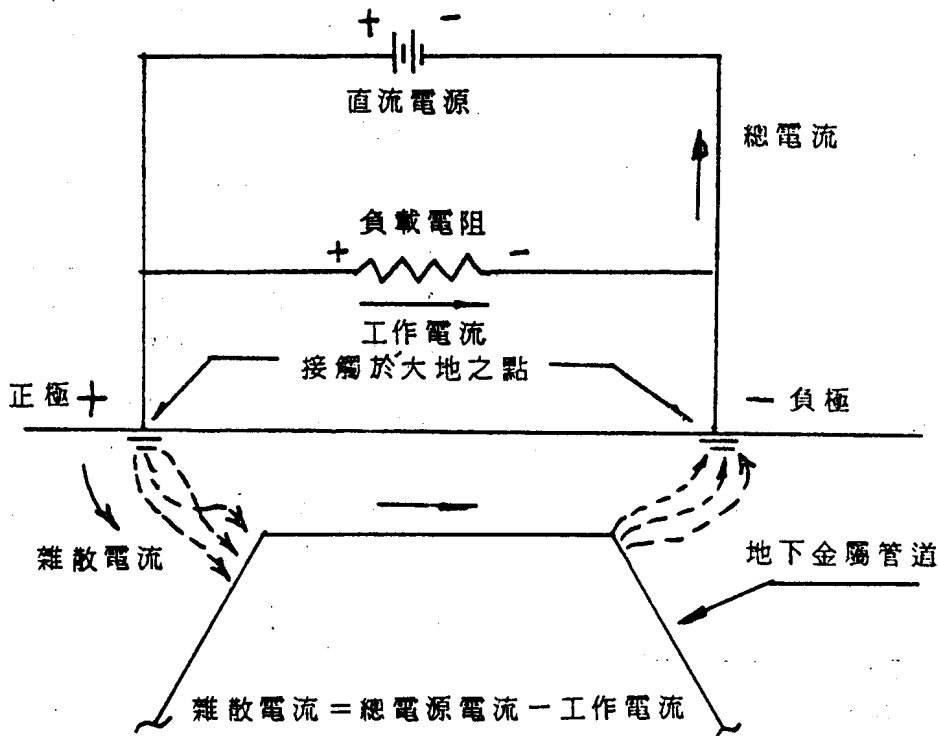


圖 1 有數點接觸於大地，產生雜散電流的直流回路。

3. 動態的雜散電流來源：最明顯的雜散電流來源，是直流電曳引系統 (traction system)。事實上，過去與現在電車系統都是用直流電，此外市區交流快速道或高速公路也用一樣的電力，是經過第三軌道，或在電車的上部電線。這些雜散電流因車輛的負載與運行而有所不同，故命名為動態雜散電流。另有一些開礦工作是利用直流電源的有軌電車。以及工廠用起重機及依負載的特性而設計的直流電，而非普通所用的交流電。

以上各種例子有一個共同情形，即使用車輛在軌道上滑行，或他種設備與地面接觸，滑行軌道正常是用負電迴流以供給曳引機，至於正電係由第三軌道或上空吊線供給之，因為軌道是導電體，沿軌道上所產生的電壓降與電流，及軌道之線路電阻成正比例，數學上以歐姆定律  $E=I \times R$  表示之，故如電車或高速火車遠離供給電力的變電所，欲使其運行，則電流要經過一段長的軌道系統才能返回電源。因軌道回路之電阻與軌道之長度成正比，如果

電流流動之量大，則有比較大的電壓降。

典型用有流電曳引車系統上，軌道電阻最佳狀況約 0.004 ohm/每千呎。對高速線路而言，如用設備來曳引電車，每車用電約需 500 到 1,000 安培。普通的電車約需要 200 到 300 安培作為起動電流。如果軌道在良好及健全狀況下，在遠處的電車仍然會產生大的電壓降，一個 300 安培負載與變電所距離一哩產生 6 伏特的電壓降，沿軌道行動時，一定和大地有正與負接觸的區域。因為大地與內部結構物皆形成平行線路，遠處的電車與變電所之間亦會產生電壓降，亦必然有一定量之電流流經這些線路，如軌道狀況欠佳，或有節頭斷裂，及嚴重腐蝕的橫切面，自然會有較高的電阻，這樣會導致較多電流流經地下路徑。實際上，市區電車系統中已知由主站發出的總電量有 50~60% 會經過地下管道及電纜流回，可能幾千安培的電流在流動。圖二即說明曳引系統產生雜散電流的實例。

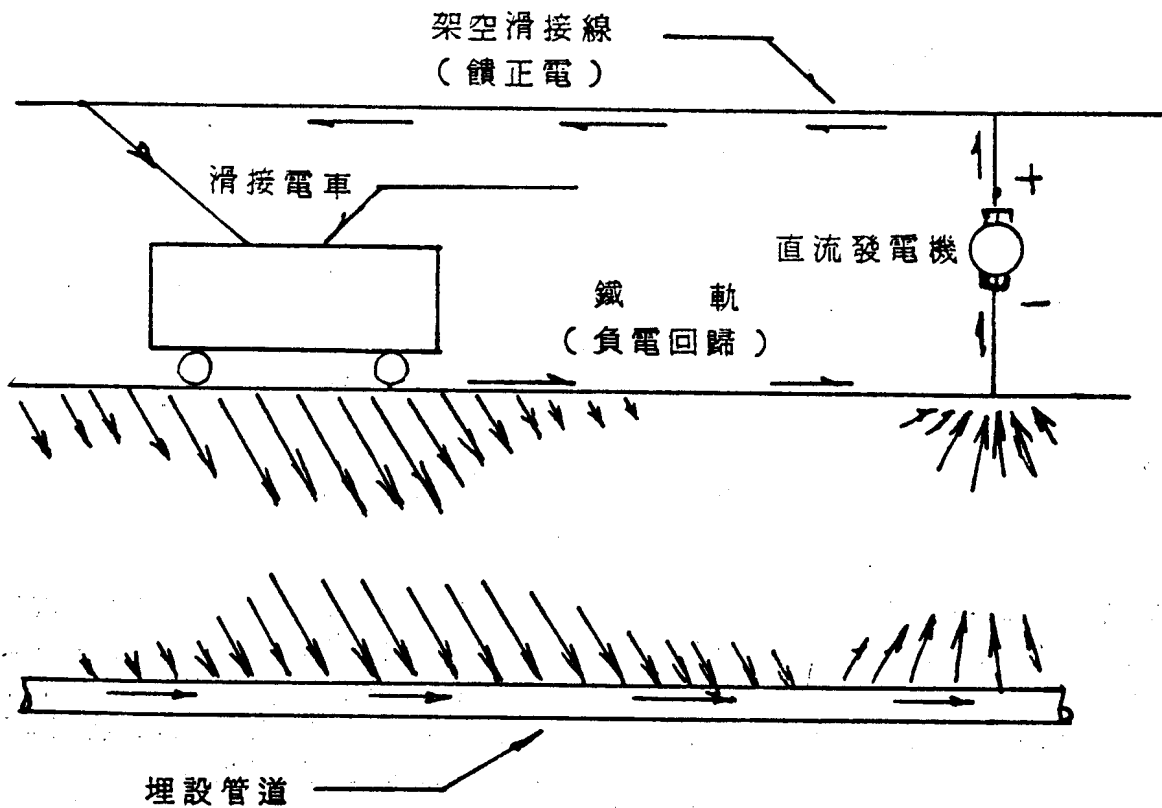


圖 2 市內電車系統產生直流雜散電流之代表例

除了曳引系統外，尚有電焊工業使用有流電，如有一被焊接之構造物是極廣大的，當主焊接機中心部份接地，而焊接工作在很遠點進行，而構造物是與大地連結，必有些部份與環境成正電，而其他部位為負電，會在電流流入大地之正點進行腐蝕作用。這樣在低電阻區域會特別嚴重，因在那裏泥土中包含有污染物，管道及具有壓力的容器亦會造成部份電流的回路。

4. 靜態雜散電流的來源：主要靜態雜散電流的來源是

陰極防蝕系統 (Cathodic Protection)，陰極防蝕是將直流電導入地下，以控制埋在地下建築物免於腐蝕，陽極是電流的來源，有鎂鋅鋁等金屬作犧牲陽極或者用碳，高矽鐵的電極接於整流器的正端，負端接於被保護物，使被保護物免於腐蝕。本文不是討論陰極防蝕系統的設計及其要求，只談及雜散電流的來源。圖三說明一個陰極防蝕系統可能引起雜散電流問題。

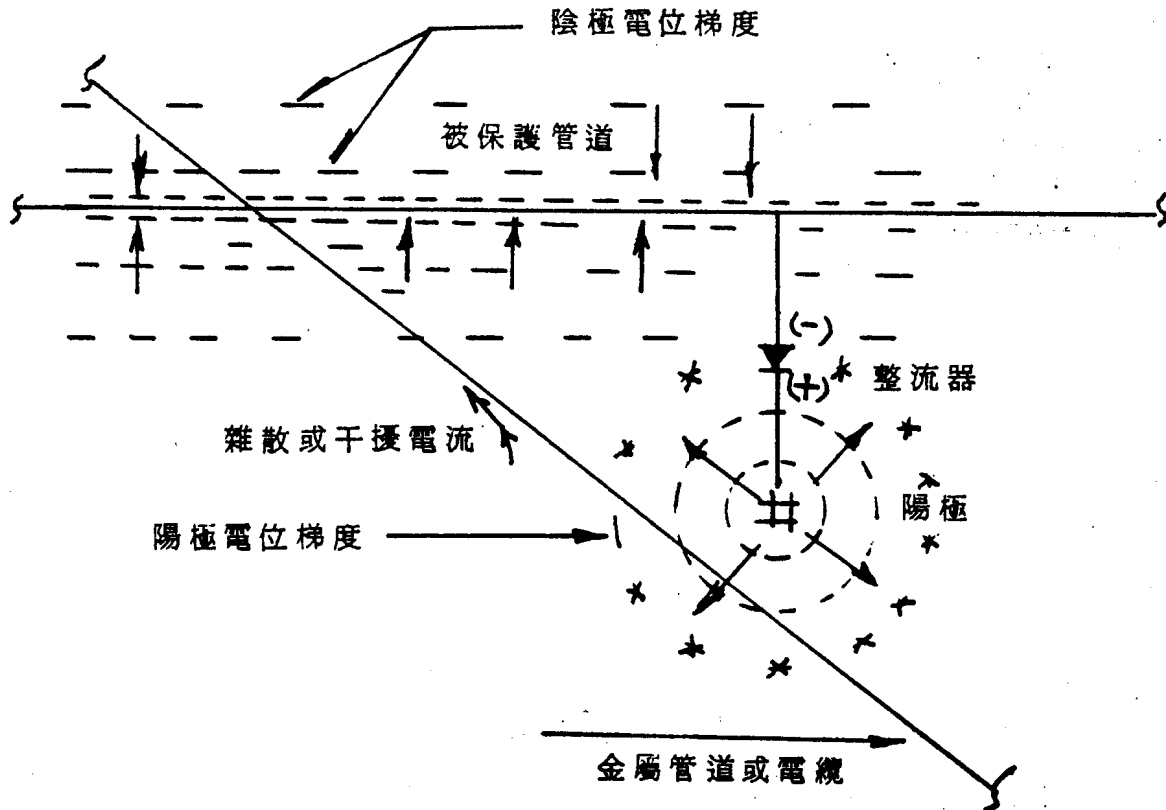


圖3 由陰極防蝕系統所產生之雜散電流

5. 交流電的電源：一般電力公司交流電傳導及分配電並無顯著腐蝕作用。實際上，當電被引入地中，如直流電路一樣，任二點隨時會有瞬間電位差存在，依極性變化，電流來回流動，在電路中有一整流了，二點間會產生雜散直流電。

在鄉村地區，有比較長程的電線輸送電流產生交流電

位差常達到20~30伏特，一個管道雖然已加入陰極防蝕電流，事實上，也可能變為交流電的一部份電路。我們常常觀察到會有若干伏特交流電位差存在於管道與陰極防蝕的陽極之間。因為整流器電橋如圖四，會將管道與陽極之間的雜散交流半波整流成雜散電流。

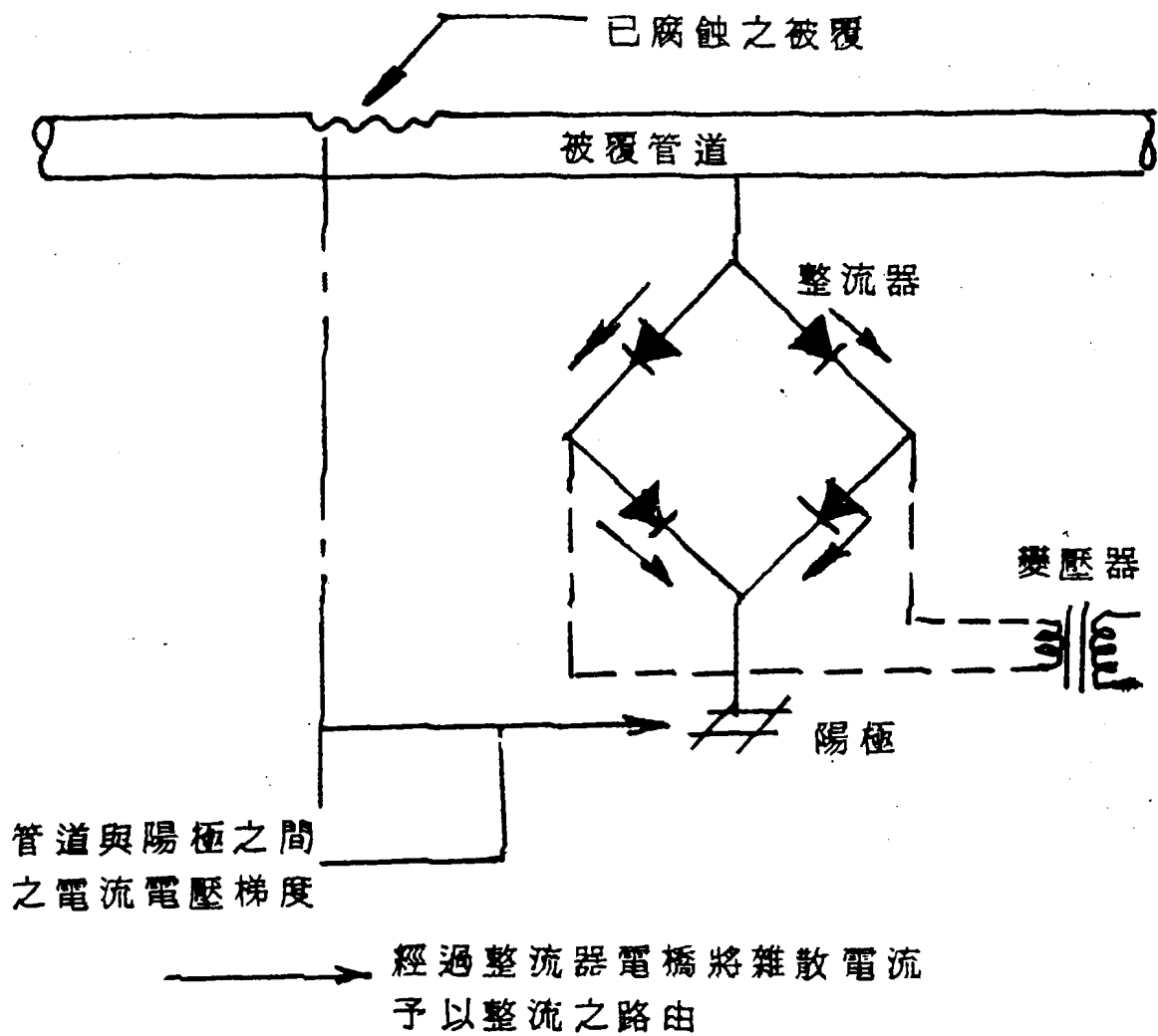


圖 4 雜散交流電所產生之直流雜散電流

6. 直流電之輸送：另一種雜散電流之來源是用高伏特之直流電以地球作為回歸導體，使電流通至地下供公共設備用。

7. 自然來源：另一種不能控制的雜散電流是存在於地球本身，這種地磁電流是由於地球磁場的擾亂及太陽黑子

的活動而產生。這種地球的電流，在綿長的數百哩電力傳輸線上亦能看到。雖然這些電流在瞬間電流密度可能很大，但不時常發生，亦不會發生腐蝕問題。圖五，說明由於太陽黑子活動產生的雜散電流之例。

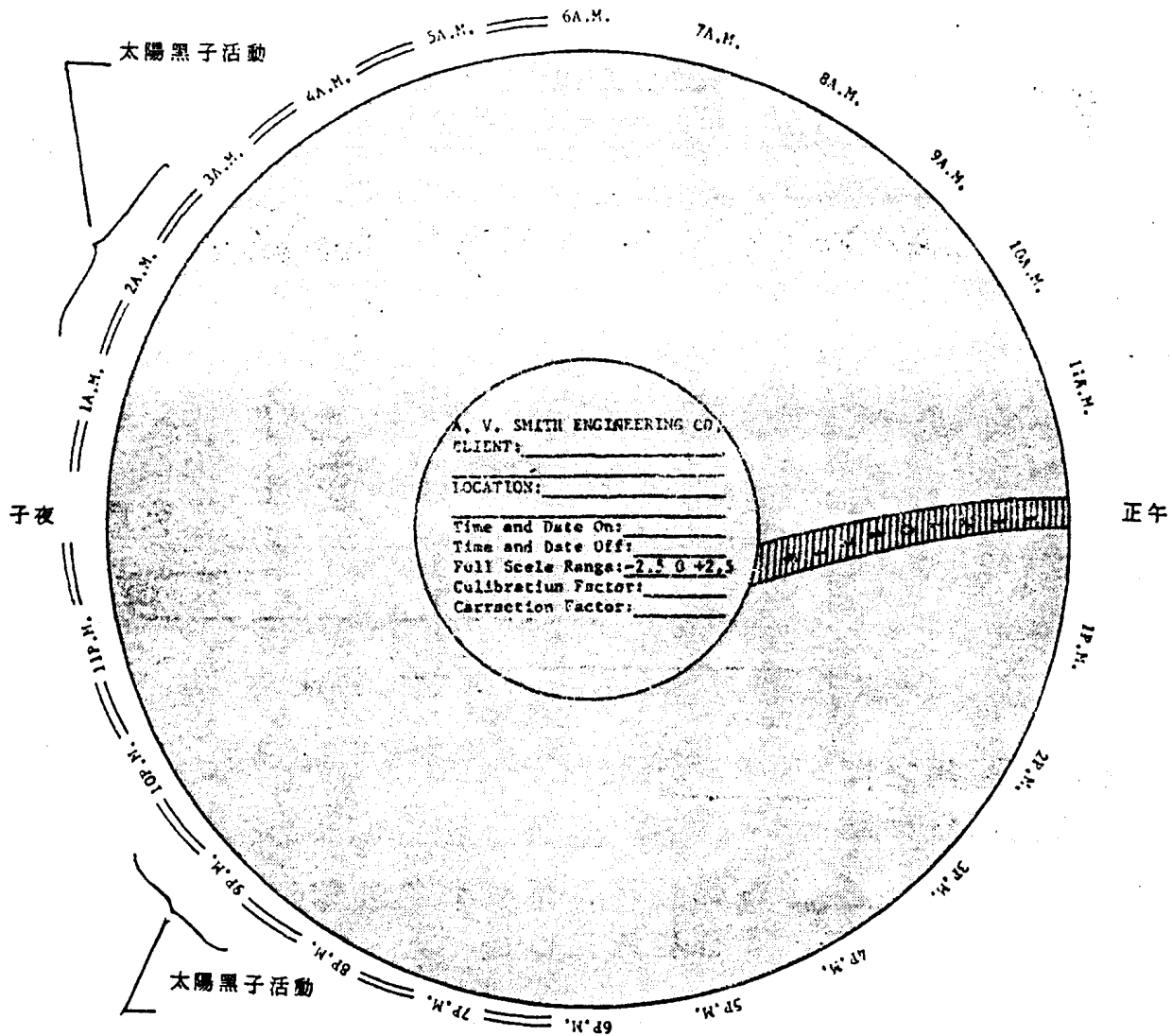


圖5 由於太陽黑子活動產生的雜散電流之例。

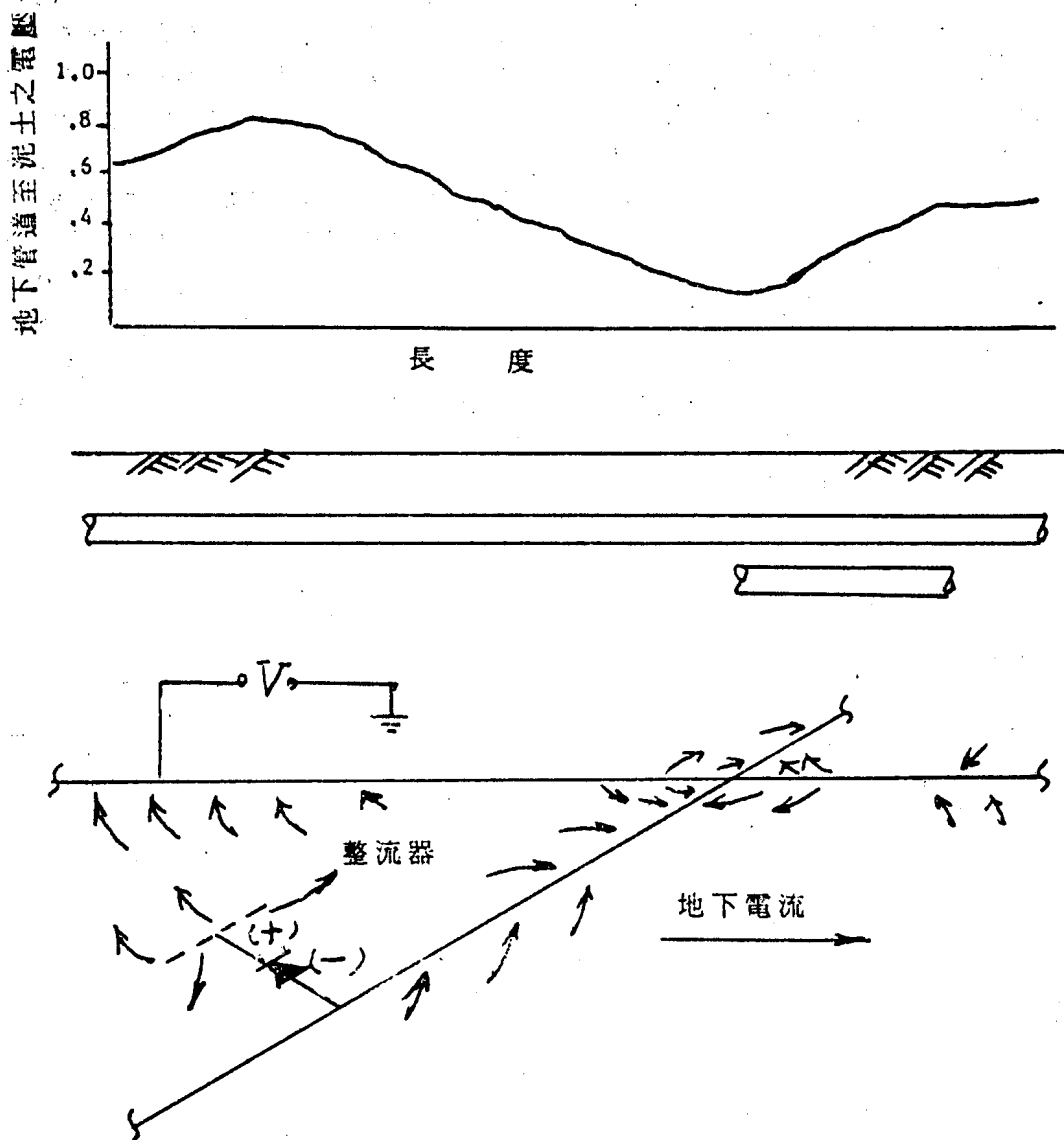
### 三、雜散電流之檢查：

由前述例子，可知雜散電流分佈甚廣，因之防蝕工程首先要考慮雜散電流的來源，就能了解它是靜態或是動態。舉例說明：任何一種曳引系統均含有三種動的狀況。(1) 起動進行，或靠站等導致負載之改變。(2) 相對電源位置改變，即進行中車輛與變電所相距之遠近而產生。(3) 由於極防蝕系統而產生的雜散電流，防蝕工程師對地下構造要非常了解，有關於這些電流的來源，以及如何檢查並加以控制。

1. 動態的雜散電流：檢查動態的雜散電流的存在比較簡單。我們只要觀察一個構造物的電位（相對於參考電極是否隨時在變動，電流亦可以毫伏特電壓降來測量，但

是要找出電流變化之來源，這是有困難，並且有挑戰性的經驗。

2. 靜態的雜散電流：靜態的雜散電流可用表面電位差觀察及測量管道與泥土中的電位，檢查其中有無電流存在。但是雜散電流存在，也會使腐蝕技術人員產生錯誤的判斷。如一個管道上某些腐蝕的區域量出電位，是以參考電極為對極測得，帶有負電性，而在不腐蝕的區域會產生更正的電位，如有一個雜散電流流向管道，會使泥土比管道更正，而使管道與泥土的界面電位較低，這是一個錯誤的腐蝕區域指示，相反在一個雜散電流流出管道的區域才是正的腐蝕區域。圖六表示靜態雜散電流如何影響管道與泥土之電壓。



圖六 靜態雜散電流影響管道與泥土電壓

#### 四、雜散電流的控制：

1. 來源的控制：雜散電流如何走入地下，而影響一個金屬結構物，是一個比較直接的觀念。因這種問題，含有平行電路，只需要瞭解電流經過一個平行電阻網路的分佈情形。實際上控制雜散電流頗有困難，因為所處理的是非常小的電阻，可能最有效的方法控制雜散電流產生腐蝕作用，是將流入地下的電流弄得最小，如在捷運系統中及含有軌道流返或地下流返系統中，最好的防禦法是要確定軌道是建築在良好的沙石軌道上，或用絕緣的枕木。最近在貴城地下延長線的經驗中也顯示這一個因素很重要，使用

絕緣軌即裝置橡皮墊以分開軌道與地下隧道的混凝土，最初裝入墊子所用電阻不够高，不足以阻止往軌道流出的電流，結果是整個軌道與地下的電阻每千呎為  $0.3\text{ohm}$ ，後來換另一種適當電阻的墊子，結果改變了軌道與地下的電阻增加了三位數的量，為每千呎約  $300\text{ohms}$ ，如此使用適當物隔絕軌道與地下，如此就可克服極大的雜散電流問題。

同樣的，如在設備方面，應用一個絕緣的電回路或正電路，就可避免雜散電流問題，這樣電流永不會達到地下。如要焊接必須注意確定所用焊接的電極與地面互相接近，可不必顧及電阻問題，不會有太大的電壓降存在。

當設計陰極防蝕系統時，防蝕工程師一定要考慮到建築物的位置，有一個絕緣良好的管道或電纜系統，只要用一極小電流作陰極防蝕，則受干擾電流的影響就會減少了。事實上，大部份可以忽略，如果絕緣不好就成為附近結構物雜散電流的來源，在這樣情形中，必須採用緩和結節 (Mitigation bond) (關於緩和結節以後再討論) 來控制干擾的影響。一定要陰極防蝕系統的公司與其他鄰近的建築公司互相合作作干擾試驗。

2. 捷運系統的動態雜散電流：工程上對雜散電流問題的解決方法，不論是由捷運系統產生的電流或其他工業上來源，都是相當複雜的。這些雜散電流的問題，都會包含有一種以上電流的來源。一般捷運系統並不由一個變電所來操縱，可能由很多變電所同時供給有許多不同線路。這種捷運系統會動用數千安培的電流，在數千哩外的地下結

構物亦會觀察到。

最初，我們必需決定在自己結構物上雜散電流的來源及排流或消失的地方，通常我們只能利用安裝在管線上或電纜外套上的測試裝置來檢查結構物上的電流流動情形，祇要同時測量電流在線路上二點間流動情形，就可以決定電流在此二點間流動是否增加，在測試裝置的線路上將結構物作為電路的分路，測量其間的千分伏特 (mV) 的電位，就可以記錄所獲得的電流流動情形，由此 mV 電壓降就可得到電流在一個結構物的此點到那點的確實電流流動量，沿着管線或電纜上用無線電通訊，作跳躍式的檢查，就可得到一個電流分佈圖，在那些點電流量最大，又往那一點電流減少，並指出結構物上電流的損失。圖七為其一例。

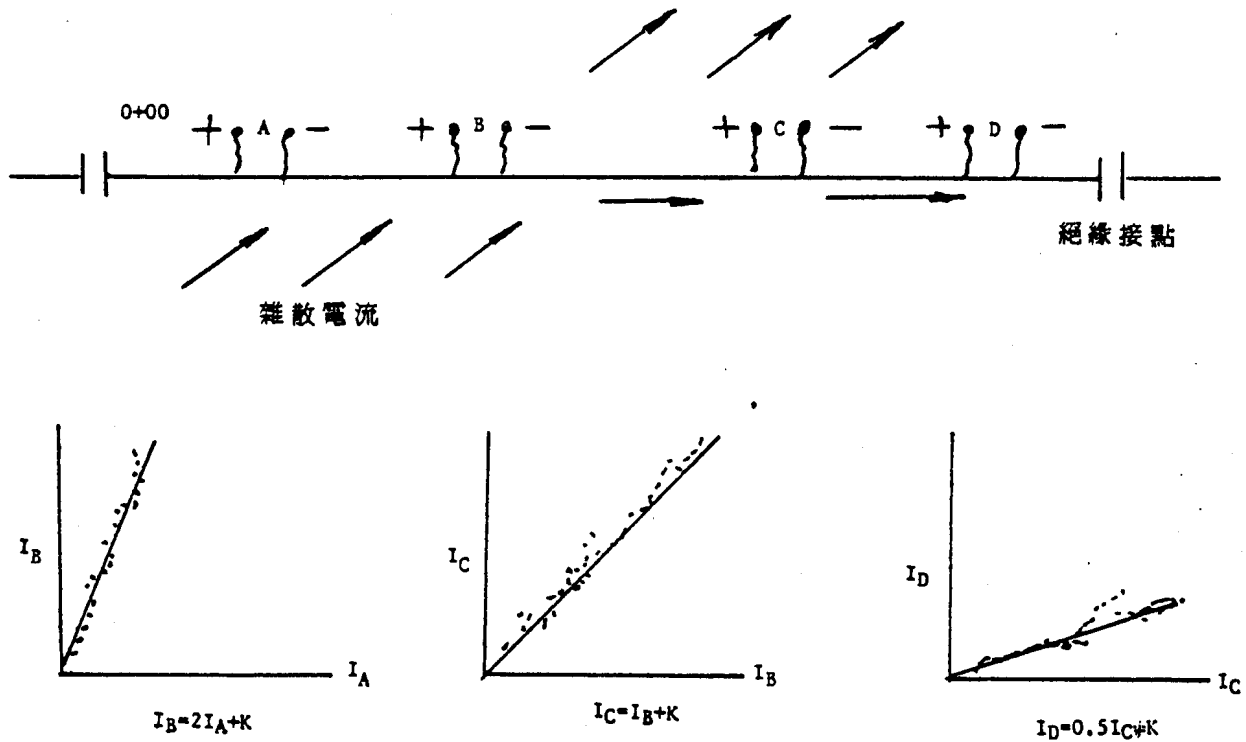
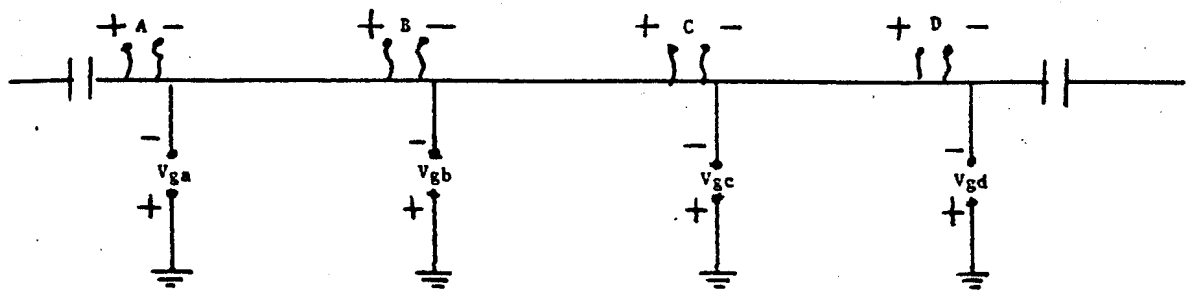


圖 7 某地下管道之電流側面圖

3. 緩和結節：以上實驗的目的，不但能減少結構物上雜散電流，而且尚需控制排流區域，即不要使電流在管道上流失，如有一個排流槽 (sink)，即如電車系統中電流要流入變電所可設計一個金屬結節，經過這個結節，電流可返回運輸系統或電力源。第八圖是一個單結節問題的計算，需先建立一個控制雜散電流的準則。設結構物的電位為  $V_{g_2}$  (相對於地“2”) 的活動狀況，與電流流入“1”的電位  $E_1$  間的相互關係。其關係可繪  $V_{g_2}$  對  $E_1$  之線表示之，見圖九之公式 1。線之斜率為  $\beta$ ，表示某處結構物對

其所影響之結構物電位 (公式 2) 之比。我們要建立的準則是結構物的電位要保持常數，其值為  $\alpha$  (此常數對地而言)，當流過結節“1”之電流有改變時，而電位  $\alpha$  要保持常數，表示在第九圖方程式 3， $I_1$  代表流過結節的電流， $R_{2,1}$  是由於電流  $I_1$  引起在“2”的偶合電壓，除以  $I_1$  可得到電阻值，即  $R_{2,1}$  是測“1”電流變化  $\Delta I_1$ ，同時決定“2”點電壓變化  $\Delta V_{g_2}$ ，所以  $R_{2,1} = \Delta V_{g_2} \div \Delta I_1$  得  $R_{2,1}$  的值是在  $E_1$  地方串聯一個電池及安培計，由於電流變化測得  $V_{g_2}$  變化。



地中電位  $V_g$  高於  $\oplus$  管道上之電位

地中電位  $V_g$  低於  $\ominus$  於管道電位

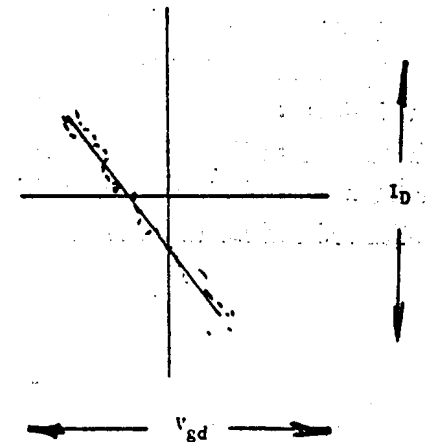
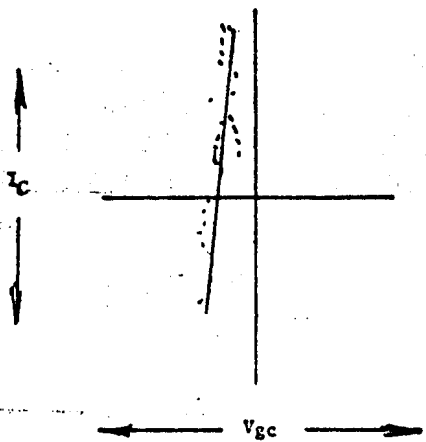
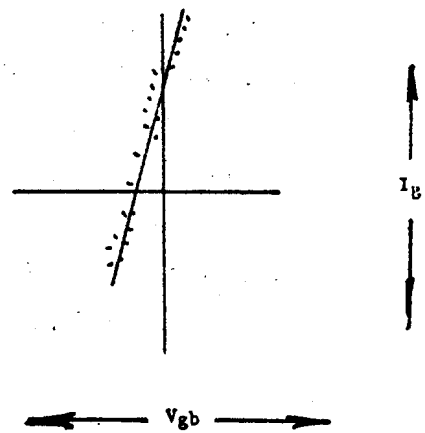
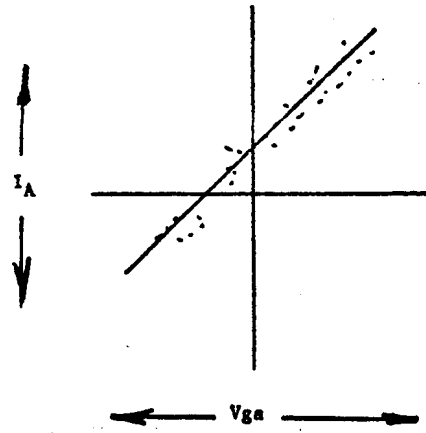
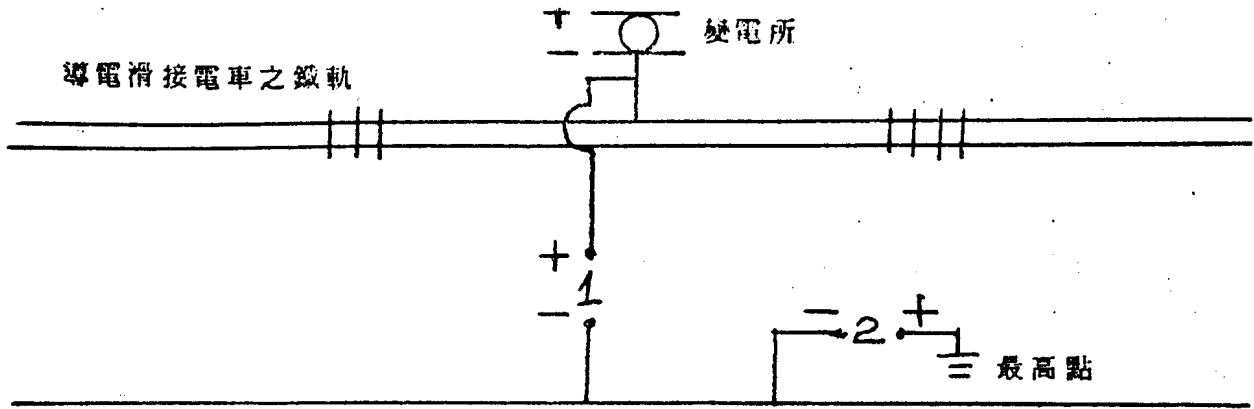


圖 8 管道上之電流流量對管道與大地間電壓之關係

我們必須在端點“1”加入一個結節電阻 (bond resistance)，如此在任何指定  $E_1$  值，都可流過一個正確的  $I_1$  值，電流流過結節也按 ohm's Law，其數學式可見於圖九中方程式 4。祇要在指定的端點上引入電流量得每安培電流可產生之伏特變化，就可由聯合方程式 3 及

4 解得結節電阻  $B_1$  的值，這種解法是假定無雜散電流下結構物間無電位差，假定真存有電位差，可以在一定時間內記錄而決定該電位差伏特數，並將該值加入第九圖中方程式 4 中  $E_1$ 。





1.  $V_{g,2} = BE_1 + d$
2.  $B = \Delta V_{g,2} / \Delta E_1$ ,  $d = \text{常數}$
3.  $V_{g,2} = BE_1 + I_1 R_{2,1} + d$  當  $R_{2,1} = \Delta V_{g,2} / \Delta I_1$   
 令  $V_{g,2}$  保持為常數  $d$
4.  $I_1 = -E_1 / (R_{1,1} + B_1)$  其中  $R_{1,1} = \frac{\Delta E_1}{\Delta I_1}$   
 $B_1$  為應計算之結節電阻
5. 當  $V_{g,2}$  保持常數，由(3)、(4)解得  $B_1$

$$B_1 = \frac{R_{2,1}}{B} - R_{1,1}$$

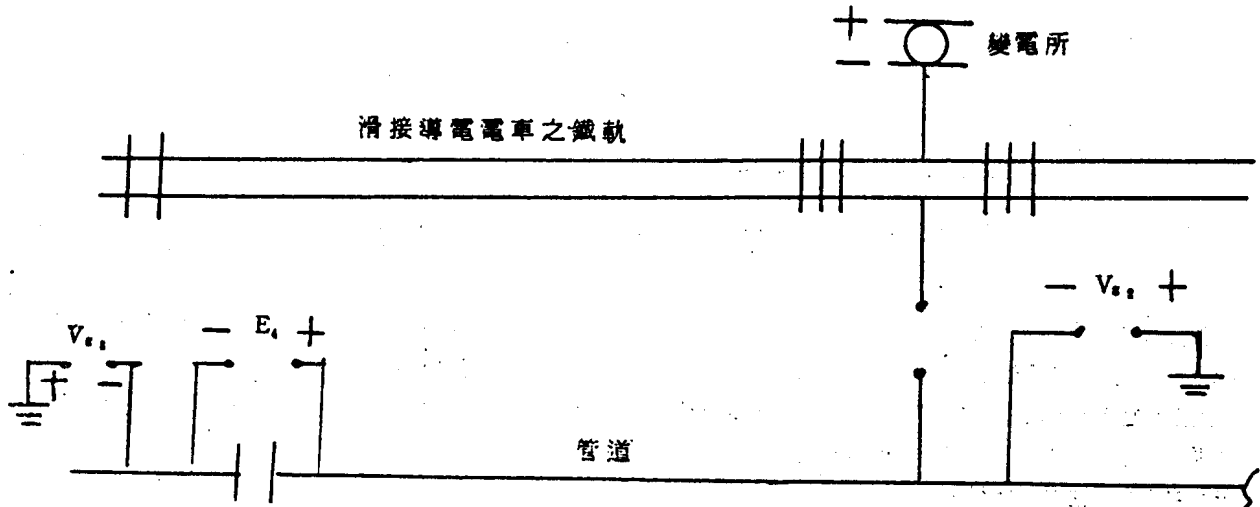
圖9 單一結節問題之解

在只有一個雜散電流源之簡單情形，可用試誤法 (Trial and error solution) 就可以解。若要避免因結節聯結產生腐蝕問題而發生電位變化，在結節處插入可攜帶有適當電流量的可變電阻，緩慢減少電阻值，同時觀察管道到泥土的電位。當管道到泥土間的電位停止變化，就可得到結節電阻的正確數值。

4. 逆電流開關及阻絕裝置 (Revers Current and Blocking devies)：在含有許多電車系統的雜散電流時，常有電位逆轉情形，因此常在電路中插入一個電解開關或矽二極體 (an electrolysis switch or silicon diode)，阻止電流往變電所回到管道，這種裝置會產生前進電

流的電阻，故必須考慮加在結節的計算中，逆電流及阻絕裝置的製造及特性都很複雜，在此不再敘述。

5. 多元結節 (Multi-Bond) 問題：解含有雜散電流的複雜方程式時，必需考慮更多的端點及結節，如前所述，如有一絕緣連結點是管道的一部份，同時在絕緣體上有腐蝕情形時，就必須用該結節點來解決這些問題。多結節問題的解法，是和單結節問題類似，除非我們必須引進更多的端點外，解多元結節與單元結節類似，這個準則的建立與圖九一樣。圖十表示解析二處結節問題之綱要，然而這種解決對多個雜散電流源，會產生很大誤差。

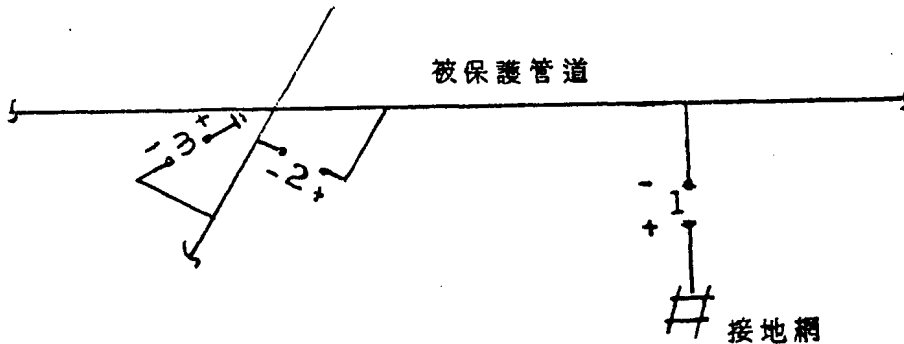


1.  $V_{g2} = B_{2,1} E_1 + d_2$
2.  $V_{g3} = B_{3,4} E + d_3$
3.  $E_4 = B_{4,1} E_1 + d_4$   
 令  $V_g = d_2$  (常數)  
 $V_g = d_3$  (常數)
4.  $V_{g2} = d_2 = B_{2,1} E_1 + I_1 R_{2,1} + I_4 R_{2,4} + d_2$
5.  $V_{g3} = d_3 = B_{3,4} E_4 + I_1 R_{3,1} + I_4 R_{3,4} + d_3$   
 其中  $R_{2,4} = \Delta V_{G2} / \Delta I_4$   
 $R_{3,1} = \Delta V_{G3} / \Delta I_1$   
 $R_{3,4} = \Delta V_{G3} / \Delta I_4$
6.  $I_1 = -(E_1 + I_4 R_{1,4}) / (B_1 + R_{1,1})$   
 其中  $R_{4,1} = \Delta E_4 / \Delta I_1$   
 $R_{1,4} = \Delta E_1 / \Delta I_4$   
 $R_{4,4} = \Delta E_4 / \Delta I_4$

圖10 解析兩處結節問題之綱要

6. 由陰極防蝕系統來的靜態雜散電流及干擾：以上談過陰極防蝕系統也是雜散電流的來源，解決雜散電流及干擾問題，實際上是相同的，所不同的是爲了要獲得資料，我們可完全中斷陰極防蝕電流，在這種情形下整流器上每

安培的伏特變化或陰極防蝕電流可替代在動態電流分析中的  $\beta$  值。圖十一中有一個結節干擾問題的解答，在某些狀況下，我們常需在結構物間取一個定電位來考慮作爲部份的結節解答，這就是方程式中  $E_g$  值。



$V_{g3}' =$  常數 (在保護電流  $I_1$  發生作用以前之平均值)

$E_2' =$  常數 (被保護管道極化以後之平均值)

令  $V_{g3} =$  常數  $V_{g3}'$

1.  $V_{g3} = I_1 R_{3,1} + I_2 R_{3,2} + V_{g3}'$   
 其中  $R_{3,1} = \Delta V_{G3} / \Delta I_1$   
 $R_{3,2} = \Delta V_{G3} / \Delta I_2$
2.  $I_2 = -(E_2 + I_1 R_{2,1}) / (R_{2,2} + B_2)$   
 其中  $R_{2,1} = \Delta E_2 / \Delta I_1$   
 $R_{2,2} = \Delta E_2 / \Delta I_2$
3. 如果  $E_2$  爲負值  

$$B_2 = \frac{R_{2,1} R_{3,2}}{R_{3,1}} - R_{2,2}$$

圖11 陰極陰蝕系統之干擾的單一結節解答

電車系統中的動態雜散電流的解答亦相似，在網路中往一點到另一點干擾的效應可用多元結節法來處理，也可能在陰極防蝕之管道上設定一特別電位作為參考，並考慮干擾結節的不利影響。這些多元結節的解法可能非常複雜，由其所得的資料解出之值，却非常缺乏普遍性。一般上說，結節問題包含三個或更多時解法就會不正確，因為在現場受到得不着正確數值的許多限制。常常希望首先解析數個有臨界情況的結節裝設。然後按照已經裝好的結節繼續解其餘少數結節。如此可以在一些主要結節上加以調整。

7.另一種控制方法：雜散電流問題，有時找不到有效排去雜散電流之單一排流槽以校正之。目前市面上有一些整流器裝置出售，可用它的電子電路測結構物對地或對另一結構物電位之變化。使用此控制電位之整流器，可抵消有腐蝕作用的雜散電流。顯然此種控制方法，本身亦會有雜散電流流入地中，其情形與前述陰極防蝕情形相似。當電性絕緣良好或被覆良好之結構物遭受滑接導電之電車電流或與其相類似之動態雜散電流所腐蝕，其所需抵消腐蝕

雜散電流效果的電流量，也許並不十分具有意義。在此情況下，使用上述控制電位的整流器連同適當安排之陽極系統，可得極有效的控制及維護被影響的結構物，使其全無腐蝕。其設計要點為安置整流感測元件，須於管道比地更呈負性時會令整流器之輸出增加。即感測元件必需置有流失雜散電流傾向之相關位置。

從前都利用雜散電流作為控制大地腐蝕地下結構物之指標。因在那時候，都市捷運系統有大量雜散電流而且電車系統處處有結節之結構物。利用此等電流形成之「陰極防護」據說可以防護一切設施之腐蝕。否則泥土因素之影響會比雜散電流更大。此種使用雜散電流過度保護之結果，有利點亦有害處，尤其是對於某種不暢通電流之管道系統，其雜散電流可產生之反效果甚大。現在結構物上使用雜散電流作為陰極防蝕目的，並非適宜它不過延伸反效果達於遠方地區，比無該排流系統時所影響之區域更寬廣更遙遠而已。因此必須避免雜散曳引系統電流作為陰極防蝕之目的。

作者：任職於臺北工專副教授