

鋼結構之鋼纜檢測技術

彭朋畿¹, 陳立昌²

1 中龍鋼鐵公司 冶金技術處 課長

1 中龍鋼鐵公司 冶金技術處 工程師

摘要

鋼纜具備強度高、重量輕及穩定承受靜動態負載能力之優點，因此廣泛應用於各工程領域。鋼纜在使用過程中會逐漸發生腐蝕、磨耗及斷絲(裂)等情形，因此有效之鋼纜檢查策略已被工程業界重視。本文提供鋼纜之非破壞檢測技術，其利用鋼纜缺陷造成磁通量之改變，以作為評估鋼纜缺陷之依據，預期將可有效協助工程人員評定鋼纜之品質。

關鍵詞：鋼纜、磁通量

1. 前言

鋼纜是工程中常見之一種撓性重要構件，其具有強度高、重量輕、彈性好及承受靜態與動態負載能力的優點，故在礦井、運輸、建築、交通等方面廣泛受到運用，例如吊橋、吊車、捲揚機、升降機、斜張橋等。但如同其他機械構件，鋼纜在使用過程中亦會逐漸磨耗、鏽蝕，甚至造成斷絲至斷裂等情形¹。因此為了確保鋼纜有效且安全的運作，提供適當的檢測機制是需要的程序。

國內對於鋼纜產品的試驗方式，主要依據中國國家標準 CNS 941 的規範，包括拉斷、扭轉、捲解、鍍鋅量等試驗以及外觀、直徑測定等方式²。但過去對於現場已運行一段時間的鋼纜，除破壞性的拉斷負載測試外，目前只能依外觀目視、直徑量測(游標卡尺)和使用期限去汰換鋼纜，以確保機器或設備運作正常。然目視與直徑等量測方式相當耗費人力與時間，同時依時限所更換的鋼纜常有磨耗甚少，但卻仍保有足夠拉伸強度的案例，因此上述情形將造成資源上的浪費。

行政院勞委會勞工安全衛生法之勞工安全衛生設施規則第 99 條規定：雇主不得以下列任何一種情況之吊掛之鋼索作為起重升降機具之吊掛用具，包括：1. 鋼索一撚間有百分之十以上素線截斷者。2. 直徑減少達公稱直徑百分之七以上者。3. 有顯著變形或腐蝕者。4. 已扭結者。另礦場安全法之礦場安全法施行細則第 55 條：使用捲揚機設備時，應依下列規定辦理：鋼索因腐蝕、磨耗、疲勞或斷線，致其原有安全率減至百分之八十以下或其直徑磨耗至標稱直徑百分之九十以下時，應停止使用。上述為國內法規對營運中鋼索之要求與限制，因此使用中(in service)鋼纜非破壞檢測技術的需求日益殷切，故相關技術亦不斷精進與發展。

目前研究探討的鋼纜非破壞檢測方法，包括超音波、渦電流、放射線、光學及電磁檢測法等，其中除了電磁檢測法外，大都有檢測信號易受干擾、檢測結果不易紀錄、檢測限制較大、設備花費龐大等不利因素，故目前多以電磁檢測法較為廣泛使用³。綜上所述，本文將提供電磁檢測法之磁通漏檢測技術，以提供工程人員參考。

2. 檢測原理

2.1 基本原理

磁性(Magnetism)是指某一些金屬有吸引其他鐵或鋼的特性。材料磁性分為順磁性材料(Paramagnetic Material)、抗磁性材料(Diamagnetic Material)及鐵磁性材料(Ferromagnetic Material)。一般鐵磁性材料若材料在外部磁場的作用下得而磁化後，即使外部磁場消失，依然能保持其磁化的狀態而具有磁性。例如鐵、鈷、鎳及其合金，其導磁係數遠大於 1。

在磁性物質或載流導體周圍的空間中，其影響所及處稱為磁場。處於磁場中的磁性物質或電流，會因為磁場的作用而感受到磁力。而磁場是一種向量場，在空間裡的任意位置都具有方向和大小，故稱為向量磁場。

磁漏是磁力線在材料內行進中，受到干擾而進出物體表面的一種現象。由於每種材料都有其飽和磁通密度，即單位面積內所允許通過的最大磁力線數量。所以若所施加的磁場強度大於缺陷處所允許通過的磁力線數量時，多餘的磁力線將會溢出材料表面，故造成磁漏現象。常用之鋼纜電磁檢測法及鋼結構設備磁粒檢測法，多利用此原理執行相關品質檢測。

2.1 磁粒檢測法

磁粒檢測是將磁粒適當地施用於經過磁化工件之表面，以檢測該工件表面或次表面的瑕疵。由於須將工件適當地磁化方能實施，因此磁粒檢測只適用於鐵磁性材料之工件(如碳鋼等)，同時其方法操作簡便且後清理容易，故廣泛應用於鋼結構及設備表面。尤其重要設備營運中產生之疲勞裂縫，磁力檢測是一般最有效之檢測方式。

磁粒檢測之原理為當工件表面上有瑕疵或缺陷，則瑕疵處之截面積減少，而受磁化工件之磁力線會尋求最低磁阻路徑，故磁力線將自行扭曲變形，同時多餘磁力線因受排擠而跳出工件表面形成磁漏現象。此磁漏現象將導致成對磁極的形成而吸引磁粒。故檢測員可檢視磁粒之聚集執行適當評估，此即為磁粒檢測之基本原理與方式。

磁粒檢測法通常分為四個主要步驟：1.前清理：檢驗前，銲道表面需充分清潔乾淨，不得有鬆脫之銹皮、油汙或其它雜質。2.磁化：使用磁軛設備對銲道施加適當方向和強度的磁場。3.施加磁粒：將磁粒均勻散佈於銲道表面。4.判讀：觀察磁粒分佈情況，並予以判別及評估。

2.2 電磁檢測法

一般鐵磁性物質在施加磁場後會暫時保有磁性，磁性的大小藉由磁通量的多寡來表示(磁通量即磁力線之總數)。由法拉第定律(2.1)中可知，當線圈的磁通量變化時，會在線圈上產生感應電動勢(電壓)，其大小等於通過此線圈之磁通量的時間變化率⁴。故隨檢測進行時，鋼纜上的磁通量變化能被相對應的感測元件所量測記錄，即可進行即時檢監測，並由電腦做訊號處理與輸出，最後可評估與判釋。

$$\varepsilon = -\frac{N\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.1)$$

其中

ε ：電動勢，單位為伏特。

Φ ：通過單線圈的之磁通量變化，單位為韋伯。

t：時間，單位為秒。

霍爾效應(hall effect)是指當固體導體放置在一個磁場內且有電流通過時，導體內的電荷載子受到勞倫斯力(Lorentz force)而偏向一邊，因而產生電壓之現象。鋼纜之磁通漏檢測技術是利用霍爾效應探頭，在磁場中量測電壓，其電壓公式為：

$$V = -\frac{RIB}{b} \cos\theta$$

(2.2)

其中

R：霍爾效應係數。

I：電流，單位為安培。

B：磁通密度，單位為韋伯/m²。

θ ：磁場與平面法線方向的夾角。

b：晶體厚度，單位為 m。

2.3 鋼纜檢測設備

美國材料與試驗協會(ASTM)說明由電磁檢測法所發展衍生之儀器設備，其主要有下列三種，包括交流電磁設備、直流與永久磁鐵設備及磁通漏檢測設備⁵。如下列所示：

2.3.1 交流電磁檢測設備(AC Electromagnetic Instrument)

交流電磁檢測設備是以變壓器原理(transformer principle)所製造而成，其中主副線圈環繞在相當於鐵芯的鋼纜上(如圖 1 所示)，主線圈通過低頻交流電，一般為 10~30Hz，任何磁性的變化都會藉由電壓的大小和相位變化被副線圈所量測。交流電磁檢測設備需要在較低的磁場強度下作業，故鋼纜在檢測前必須先完全退磁，此儀器用於檢測金屬截面積之變化。

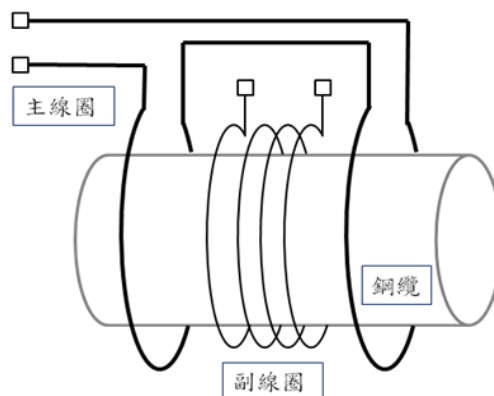


圖 1 交流電磁檢測設備示意圖

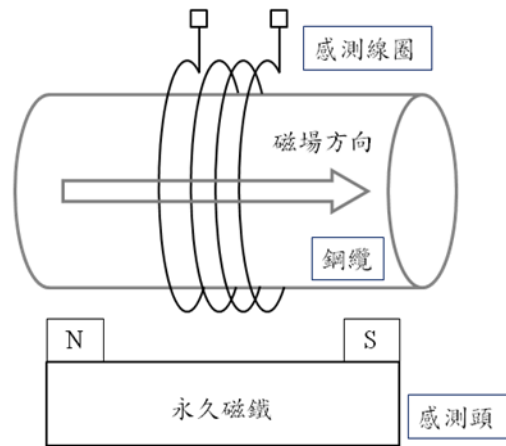


圖 2 直流與永久磁鐵檢測設備示意圖

2.3.2 直流與永久磁鐵檢測設備(Direct Current and Permanent Magnet Instrument)

直流與永久磁鐵檢測設備藉由感測頭(sensor head)或線圈提供一個穩定磁場，當鋼纜通過磁場被磁化後，沿軸向之總磁通量能被霍爾感測器、感測線圈或其它可量測絕對磁場或穩定磁場之變化的元件(如圖 2 所示)。在磁化迴路影響範圍內，所得到的電壓信號正比於鋼纜的體積或金屬截面積的改變量，此儀器亦用於檢測金屬截面積變化(LMA, loss of metallic cross-section area)。金屬截面積損耗為沿著檢測鋼纜的材料損失量之相對值，該值透過比較鋼纜上的檢測點與最大金屬截面積之基準點比較而得知。

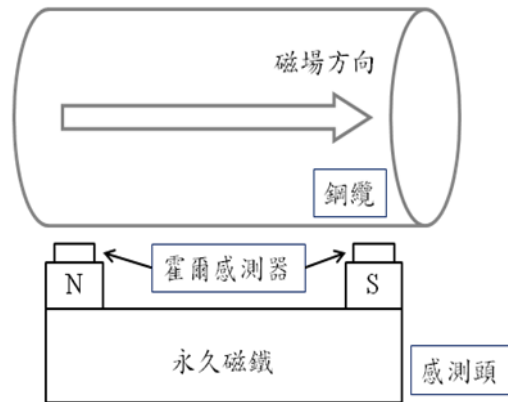


圖 3 磁通漏檢測設備示意圖

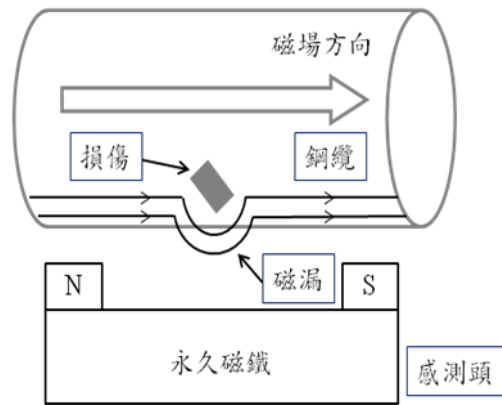


圖 4 局部損傷造成磁漏示意圖

2.3.3 磁通漏檢測設備(Magnetic Flux Leakage Instrument)

磁通漏檢測設備其檢測方式類似於直流與永磁儀器，藉由感測頭或線圈提供一個穩定磁場，當鋼纜通過磁場被磁化後，鋼纜間斷所造成的磁漏，能被霍爾感測器、感測線圈或其它適當儀器得到(如圖 3 所示)。這種儀器用於量測鋼纜上的間斷(discontinuity)，諸如斷絲、磨損、腐蝕、凹陷或其他導致鋼纜在物理性上完整性降低之局部損傷(LF, local flaw)。但儀器無法告知損傷處精確數量的資訊，僅能得知該處有斷絲、內部腐蝕或磨損的存在。

3. 檢測試驗

3.1 試驗方式

本文依據美國材料與試驗協會規範(ASTM E1571-06)及 INTROS 鋼纜檢測器操作手冊內容⁶，針對一存在人工缺陷之鋼纜進行檢測。檢測流程如下：

3.1.1 檢測前準備

- (1)量測鋼纜直徑。
- (2)依直徑選擇磁頭(magnetic head)、感測器(sensor unit)與耐磨環(linear)，並組合之。
- (3)連接操控器(basic unit)與電腦。

3.1.2 校正與設定

- (1)設定鋼纜直徑。
- (2)設定 LMA 值作為校正。
- (3)設定 LF 監測值(threshold value)。

3.1.3 鋼纜缺陷檢測試驗

- (1) 選擇一 6xFi(29) IWRC (填充型 6 股 29 絲鋼纜芯)，Z 撚，標稱直徑 18mm 之鋼纜。全長約 4m，並於約 2m 與 2.5m 處以砂輪機分別製作缺陷深度 2.5mm(圖 5)及缺陷深度 6.55mm (圖 5 6)之人工缺陷。
- (2)確保鋼纜能在磁力座裡順利移動後，並均勻上磁(使鋼纜磁飽和)。
- (3)記錄檢測訊號，並傳輸到電腦做分析與輸出。



圖 5 鋼纜之人工缺陷(缺陷深度 2.5mm)



圖 6 鋼纜之人工缺陷(缺陷深度 6.55mm)

3.2 檢測試驗設備

本文採用 INTROS 鋼纜檢測器，並依照檢測鋼纜直徑選擇組件，各組件規格為：磁頭 MH20-40，感測器 SU20-40。耐磨環的選擇上，為避免過於密合，使斷絲對設備造成的損傷，故選用較大直徑 LS25-30。相關規格如表一所示。

表一 試驗設備規格

可檢測的鋼纜直徑範圍	6~64 mm
檢測鋼纜的速度	0~2 m/s
LMA 在 0~20%的量測精確度(Precision)	1 %
LMA 在 20~30%的量測精確度	3 %
LMA 值的量測範圍	0~30 %
LMA 值變化量的靈敏度限制(Sensitivity limit)	0.5 %
斷絲的靈敏度限制	20/D %
溫度範圍	-10~50°C

3.3 試驗結果

由表二可知，本方法在定性的檢測上有良好的訊號反應(可確認缺陷位置)，但 INTROS 鋼纜檢測器的解析長度(averaging length)限制為 250mm，對於不到 10mm 的局部缺陷會有較明顯之誤差，因此本試驗若需定量精確量測斷絲數量，仍須適當比較方可得知。圖 7 為 LMA 訊號圖，圖 8 為 LF 訊號圖。

表二 試驗結果

	缺陷深度	LMA	LF
人工缺陷一	2.50mm	2.1%	22.7mv
人工缺陷二	6.55mm	8.2%	98.8mv

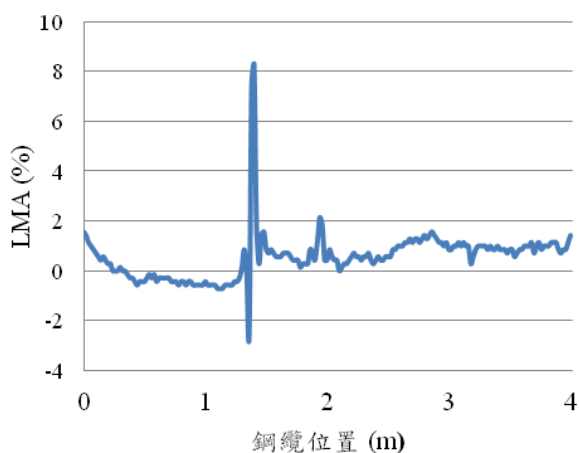


圖 7 LMA 訊號圖

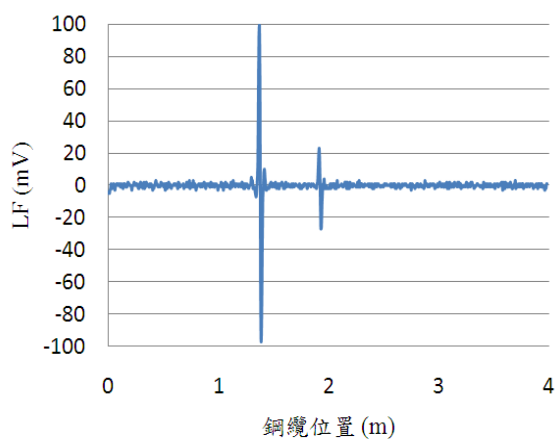


圖 8 LF 訊號圖

3.4 現場試驗

3.4.1 檢測工件

選擇某廠 55 噸主吊及 15 噸副吊天車鋼纜進行檢測，受限鋼纜檢測器的大小及有效固定檢測器，選擇在 3F 東側欄杆邊安裝檢測器，再降下天車對鋼纜進行檢測(如圖 9 所示)。由於檢測位置之幾何限制與天車構造，故本案例檢測長度無法涵蓋整條全部鋼纜。

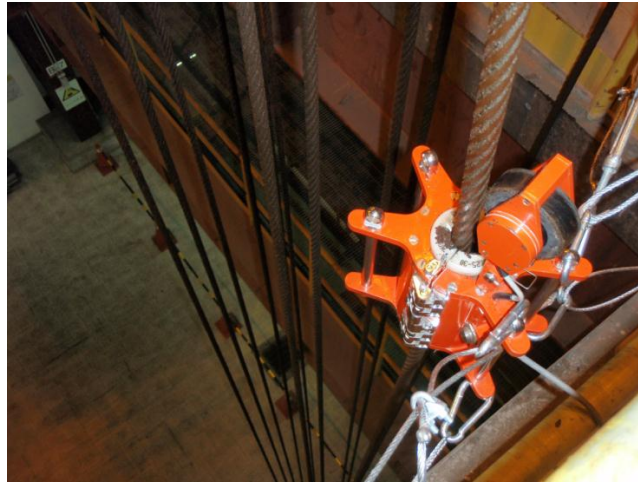


圖 9 天車鋼纜之檢測

所檢測的天車鋼纜組成為 6x $\text{Fi}(29)$ IWRC (填充型 6 股 29 絲鋼纜芯)，Z 撚，標稱直徑 20mm。主吊長度 296m，抽檢約 159.1m(佔主吊鋼纜長 53.75%)；副吊 110m，抽檢約 39.3m(佔副吊鋼纜長 35.73%)。

3.4.2 檢測結果

副吊因使用頻率較少且幾何位置上不易使鋼纜受磨耗，故選擇其較為清潔完好之線段做為校正參考標準。經檢測 LMA 均未超過 5%，但其中位於主吊西北側的鋼纜線段，檢測長度約 32.3m，發現 3.6%的 LMA 訊號(如圖 10 所示)，相當於約 1.82%的直徑縮減，但實際目視外觀並未發現明顯異常。因此檢測技術之互相搭配是提高準確度之當然趨勢，故建議可用磁通漏檢測技術先行掃描檢測，再用目視檢測法或游標卡尺等工具作再確認之工作。

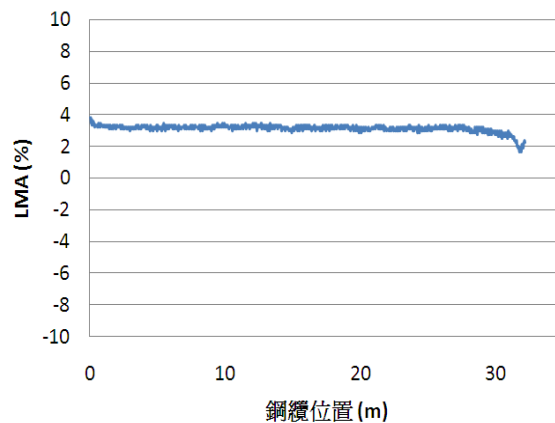


圖 10 LMA 訊號圖

4. 結論

鋼纜在使用過程中會逐漸發生腐蝕、磨耗及斷絲(裂)等情形，因此有效之鋼纜檢查策略已被工程業界所重視。本文提供鋼纜之非破壞磁通漏檢測技術，其利用鋼纜缺陷所造成磁通量之改變，以作為間接評估鋼纜缺陷之依據。

經實際驗證本設備在定性的檢測上有良好的表現(可確認瑕疵或缺陷之位置)，但在定量上對斷絲數量的檢出仍需進一步研究。故本文建議本方法可快速篩選鋼纜之瑕疵或缺陷，但發現訊號較異常處，應再用傳統目視檢測法追蹤及確認(如使用游標卡尺等輔助工具)，以提高本方法之準確度。

參考文獻

1. 武新軍、康宜華、盧文祥、楊叔子，鋼絲繩磨損檢測裝置的研究，機械月刊，第二十四卷第五期(1998)，320~324。
2. 中國國家標準 CNS 鋼纜，總號 941，類號 G3011，經濟部中央標準局(1985)。
3. 曹印妮、張東來、徐殿國，鋼絲繩定量無損檢測現狀，無損檢測，第二十七卷第二期(2005)，91-95。
4. 余坤城、林文宏、董寶鴻，渦電流檢測法(初級)，中華民國非破壞檢測協會(1993)，20。
5. American Society for Testing and Materials. “Standard Practice for Electromagnetic Examination of Ferromagnetic Steel Wire Rope,” Annual Book of Standards, ASTM E-1571-06 (2006).
5. INTROS Steel Wire Rope Flaw Detector Operation Manual V7.5.3E, INTRON Plus Ltd. (2007).