

# 鋼纜索力檢測 設備—爬索車 的研發及應用

關鍵詞 (Key Words)：爬索車 (Climbing Robot)、鋼索橋 (Steel Cable Bridge)、鋼纜模態檢測 (Steel Cable Modal Measurement)、橋梁監測 (Bridge Monitoring)

中華顧問工程司／設施技術中心／主任／蔡欣局 (Tsai, Hsin-Chu) ❶

中華顧問工程司／設施技術中心／工程師／林晉德 (Lin, Chin-Te) ❶

中華顧問工程司／設施技術中心／正工程師／張育彰 (Chang, Yu-Chang) ❶

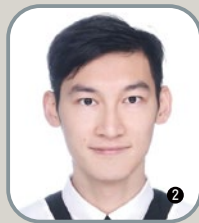
大同大學／機械與材料工程學系／助理教授／林晨光 (Lin, Chen-Kuang) ❶

大同大學／機械與材料工程學系／碩士／吳宗翰 (Wu, Tsung-Han) ❶



## 摘要

台灣近年因南方澳大橋崩塌事件，使政府部門更加重視對橋梁的維護管理作業，尤其現代因應造型美學與工法的精進，鋼索橋梁(斜張橋、脊背橋、鋼索拱橋)被廣泛的使用，鋼纜在其中就扮演了重要的角色。為了能更有效的對鋼纜進行檢測及監測，爬索車的研發是為了取代人力於高空作業的職災風險，並提升工作效率，免除舉高車作業之交通管制對用路人的影響等。本案開發爬索車的功能與國外常見爬索車的功能，如鋼纜套管外觀檢視或磁通量量測內部瑕疵有所不同，其目標係為了可搭載三軸向速度計(或加速度計)，並爬升至指定位置後進行夾擠鎖固，再進行三軸向速度計自動水平校正的功能，且能以多台爬索車同步安裝於鋼纜，以提供鋼纜模態振形及索力量測。經多次現地測試，包含國道4號聯絡道路斜張橋及金門大橋的實際操作，鋼纜模態分析結果與傳統量測方式進行比對，二者的成果相當一致。



## Steel cable force measurement equipment— Development and application of climbing robot

### Abstract

Due to the collapse of the Nan-Fang-Ao Bridge in Taiwan, the government have paid more attention on the bridge's maintenance management. Nowadays, the improvement of aesthetics and construction methods, suspension bridges (such as cable-stayed bridges, extra-dosed bridge, and cable arch bridges) have been widely used. The steel cable become an important roles in bridges' design. In order to detect and to monitor the steel cables more effectively, the cable climbing robot has been developed which is to replace the occupational accident risk of manpower in high-altitude operations, to improve work efficiency, and to avoid the impact of traffic. The climbing robot developed in this project is different from the existing climbing robot, such as the appearance inspection or the magnetic flux measurement of steel cable. Moreover, the climbing robot has equipped with a tri-axis speedometer (accelerometer) that can climb to the specified position, lock there. and level adjustment automatically. It can be installed on the steel cable synchronously with multiple climbing robots to measure the mode shape and the tension of the steel cable. After several field tests, such as the National Freeway No. 4 cable-stayed bridges and the Kinmen Bridge, the cable modal analysis results are quite consistent that compared with the traditional measurement methods.

## 壹、前言

近年新落成的橋梁常使用「鋼索」形式進行建造，如鋼索拱橋、斜張橋、脊背橋等。鋼索橋與傳統的橋梁相比，優點是除了美觀，也能有效加大跨距減少落墩量，進而達到減少阻礙河道與線形拱度精準控制等優點。臺灣因處於環太平洋地震帶，更為颱風密集區，地震加上颱風侵襲，大幅減損了公路設備的使用年限，對於維護用路安全而言，橋梁的養護成為重點。細數臺灣橋梁中，拱橋、脊背橋與斜張橋等形式都依賴鋼索的張力提供橋面板強度，若鋼索因劣化造成有效截面積減少、預力損失等情形，將有產生崩塌的風險，因此對於鋼索的索力、套管、錨頭夾片等檢測便顯得極其重要。

回顧以往鋼索橋梁在進行橋梁檢測及監測作業時，鋼索檢(監)測作業皆須於高空進行目視或儀器設備的安裝，往往需出動大型高空作業車，頂著河海口因為地形或天候造成的強風下進行目視檢測，不僅危險且只能憑藉鋼索外觀進行辨識，若要深入鋼纜內部檢測，則需花費更多人力與時間，不僅作業難度及人員職災風



圖1 現地使用舉高車與爬索車作業之明顯對比

險高，經費也將會隨之大幅調升。為提升橋梁鋼纜檢測及監測作業的速度，提升作業人員作業安全與降低交通衝擊，機器輔助人力的構思便浮出檯面。

鋼纜索力是常見被用來檢視橋梁或鋼纜本身有無異常的重要物理變化參數之一，國內近年來常使用微振法來進行鋼纜索力的量測，該法常見需於鋼纜上裝設數個感測器同步進行多點量測，並搭配陳建州教授等人[2-3]提出的等效簡支拉力梁法計算索力。本文將介紹本團隊開發之爬索車如何搭載感測器，進行鋼纜振動模態及索力量測，取代傳統使用高空作業車人力裝設感測器的方式，提出一套更安全且高效率的量測方式。經實驗室多次的測試與改良，以及現場實際橋梁的驗證，也證實使用爬索車測得的數據與分析結果，與傳統採人力及夾具安裝感測器測得的結果相當一致。

## 貳、鋼纜模態及索力量測方式

本團隊進行鋼纜模態振形分析係採用國立雲林科技大學營建工程系 陳建州教授等人所提出之「等效簡支拉力梁法」解算鋼纜特性，透過5顆三軸向速度計(或加速度計)，於事先規劃好之點位布設於鋼纜上進行微振動量測(如圖2)，接著將量測取得的振動歷時訊號進行傅立葉轉換取得頻譜後，挑選該根鋼纜各階模態頻率進行正弦函數擬合振形，以得到鋼纜之有效振動長度，進而代入公式計算鋼纜索力，上述鋼纜索力分析步驟公式如下。

$$T = \frac{4(\rho A)L^2 f_n^2}{n^2} - \frac{n^2 EI \pi^2}{L^2} \quad (2-1)$$

$$\phi(x) = A \sin \frac{n\pi(x-x_0)}{L} \quad (2-2)$$

將式(2-1)改寫為，

$$T = \alpha_n - EI\beta_n \quad (2-3)$$

$$\alpha_n = \frac{4(\rho A)L^2 f_n^2}{n^2} \quad (2-4)$$

$$\beta_n = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \quad (2-5)$$

最後統整出式(2-6)，

$$T = \frac{\sum \alpha_i \sum \beta_i^2 - \sum \alpha_i \beta_i \sum \beta_i}{N \sum \beta_i^2 - (\sum \beta_i)^2} \quad (2-6)$$

\* N為使用計算的模態總數。

$\rho$ ：單位長度質量

$f_n$ ：第n階頻率

A：鋼纜斷面積

n：模態階次

L：鋼纜長度

EI：撓曲剛度



圖2 五顆感測計於鋼纜布設實景

## 參、爬索車設計與開發

為配合金門大橋通車前使用該爬索車執行索力量測，本次開發整合「機械結構、機電控制、程式設計」等技術，以符合金門大橋鋼纜套管尺寸之規格進行研製，使爬索車具備足夠的爬升能力，承載一組三軸向速度計攀爬橋梁現地不同角度之鋼纜，不僅可輕易使用平板遠端操控，使其爬升至指定位置進行鎖固動作，還可自動調整速度計水平校正的能力，以貼近傳統人工鎖固夾具的量測方式，其設計圖如圖3所示。除此之外，本團隊於第一部爬索車搭載

四支遠端傳輸功能的攝影模組，以利爬升過程中可一併檢視鋼纜套管各角度的狀態(如圖4)。

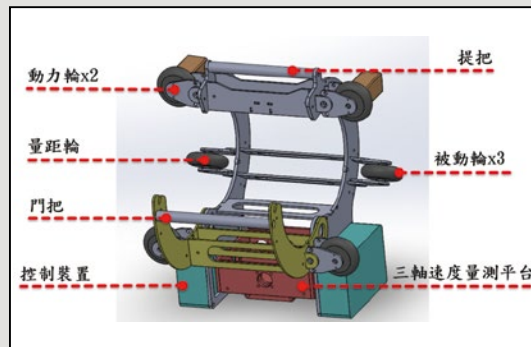


圖3 爬索車設計圖

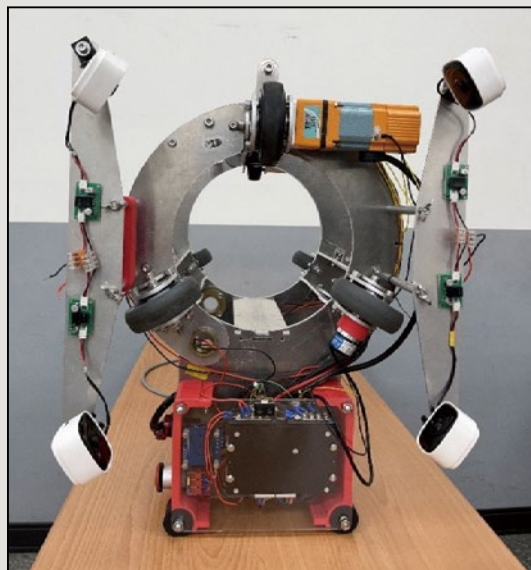


圖4 爬索車成品

本爬索車所使用的驅動方式為兩組膠輪直接驅動，另於兩相應120度角的輪組為輔助移動輪，而驅動輪亦扮演夾緊鎖固的角色，其於鋼纜上爬升至定位後，兩驅動輪會向鋼纜中心方向夾緊，如圖5所示。而後進行速度計水平校正，速度計平台係固定於兩個垂直90度驅動軸，透過自動控制系統使兩軸同時達到水平狀態。整部機器的電力來源是使用可更換式電池安裝於機身上，其可提供至少3次以上的完整作業需求，依金門大橋現地測試經驗，爬升30m-80m長之鋼纜次數高達6次，機器皆尚存電力，顯示整部機器作業所耗電功率相當微小。

如遇到於半空中沒電或是故障等情況，爬索車有設計一緊急保險裝置，可採人工方式解除鎖固，並透過鋼線拉回地面，以達到全面的安全考量。

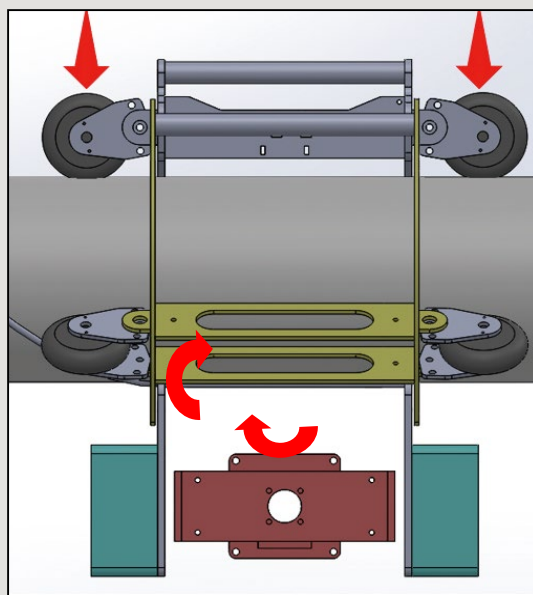


圖5 爬索車鎖固及速度計水平校正示意圖

## 肆、現地測試與數據分析

### 一、國道四號豐潭段斜張橋測試（單顆速度計量測）

爬索車開發階段，本團隊多次前往國道四號豐潭段斜張橋進行測試，該橋鋼纜外套管尺寸與金門大橋鋼纜套管尺寸相同，是台灣本島最適合的測試場域，可降低開發期間往返金門

交通次數，提升本案研究效率。圖6為本團隊於111年7月於國道四號豐潭段進行爬索車搭載三軸向速度計與傳統夾具鎖固速度計的比較試驗，將兩種量測方式同時固定於同一束鋼纜，並同步進行自然振動量測；過程中也測試爬索車之爬升能力，以確保後續於金門大橋可順利爬升最大傾斜角度(約25度)之斜張鋼纜。



圖6 爬索車於國道四號豐潭段斜張橋現地測試照

現場測試時，微振動量測系統係以1kHz取樣率進行數據擷取，量測時間長度為15分鐘，取得的振動訊號經快速傅立葉轉換(FFT)後之頻譜比對發現，爬索車上速度計訊號的頻譜與傳統夾具鎖固的速度計訊號頻譜分布非常相似，如圖7上圖所示。再透過各模態的微觀圖形可以看到兩種量測方式所得到的頻率相當一致(如表1)，僅能量有些微差異(如表2)，這對頻率判讀上並無影響，然是否會影響鋼纜識別的振態及有效振動長度，將於下節進一步探討說明。

表1 頻率比較表(單位：Hz)

	第一階	第二階	第三階	第四階
傳統夾具	1.144	2.277	3.439	4.528
爬索車	1.144	2.277	3.439	4.528

表2 能量比較表(單位： $10^{-3}mm/s$ )

	第一階	第二階	第三階	第四階
傳統夾具(f1x)	45.761	95.806	45.695	35.105
爬索車(f2x)	33.155	71.317	31.207	29.014
差值(f2x-f1x)	-12.606	-24.489	-14.488	-6.091

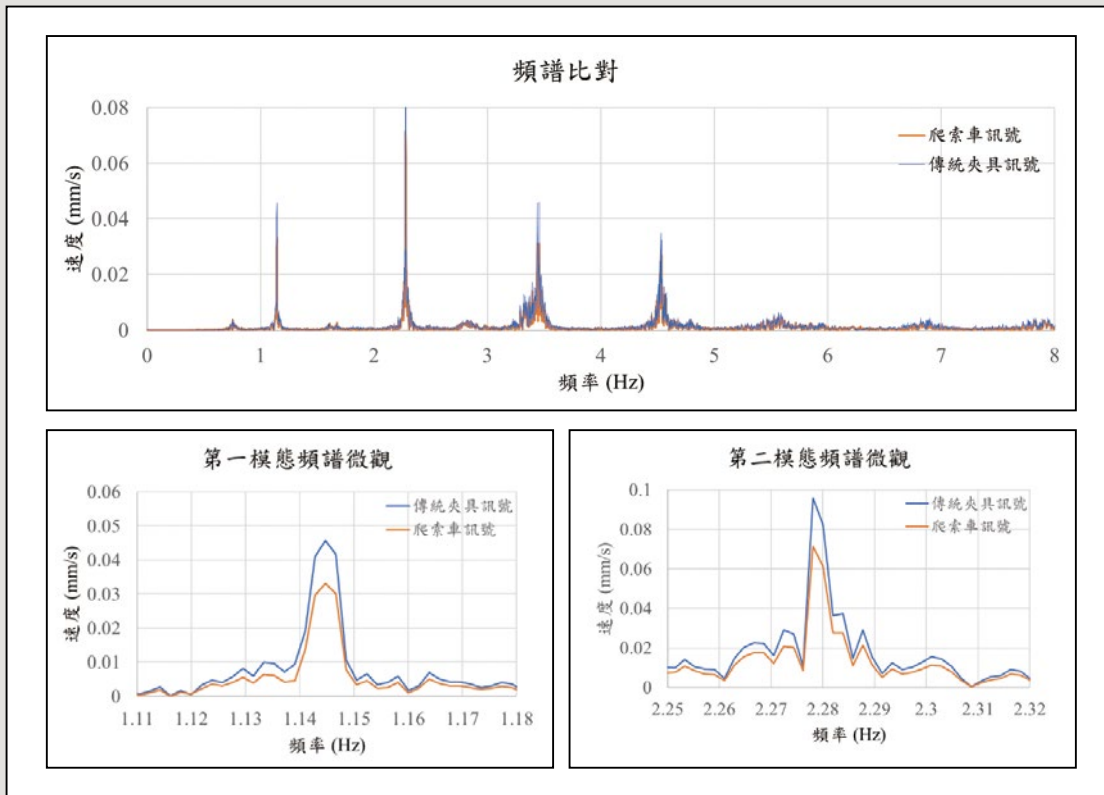


圖7 爬索車與傳統夾具振動訊號頻譜比對

## 二、金門大橋測試 (5顆速度計量測)

本試驗於金門大橋進行單束鋼纜5顆速度計同步量測作業，目的在於擬合鋼纜各階模態的振形，以取得鋼纜的有效振動長度。此次試驗與國道四號斜張橋不同處在於並非傳統夾具鎖固與爬索車同時量測，而是以相同間距配置於鋼纜個別量測，如圖8所示。現場分別針對最長、中及最短三束鋼纜進行測試，為避免篇幅過大，本文僅針對最長鋼纜量測結果進行說明。長鋼纜之設計長度約92.2m，感測器分別配置於距離防水罩端點起1m、3m、5.5m、74.5m、76.5m，共5個位置；微振動量測系統

同樣以1kHz取樣率進行數據擷取，量測時間長度為15分鐘，取得的振動訊號經模態分析比對後發現，兩量測方式分析的各模態頻率值差異皆在小數點下第二位，如表3所示，此誤差因為不同時間點量測，可能受環境溫度及不同外在因素等影響。而鋼纜有效振動長度，各階模態擬合振型都可求得一個有效振動長度值，本試驗取前5階模態的有效振動長度平均值作為該束鋼纜之有效振動長度值，分析結果顯示傳統夾具擬合結果為80.593公尺，爬索車擬合結果為81.000公尺，兩者相差0.5%。初步分析結果顯示使用爬索車測得的數據與分析結果，與傳統採人力及夾具安裝感測器測得的結果相當一致。

表3 各階模態頻率比較表 (單位：Hz)

	第一階	第二階	第三階	第四階	第五階
傳統夾具... (1)	1.528	3.069	4.524	5.961	7.502
爬索車... (2)	1.537	3.075	4.562	6.019	7.486
差值(2)-(1)	0.009	0.006	0.038	0.058	-0.016



圖8 爬索車於金門大橋現地測試照

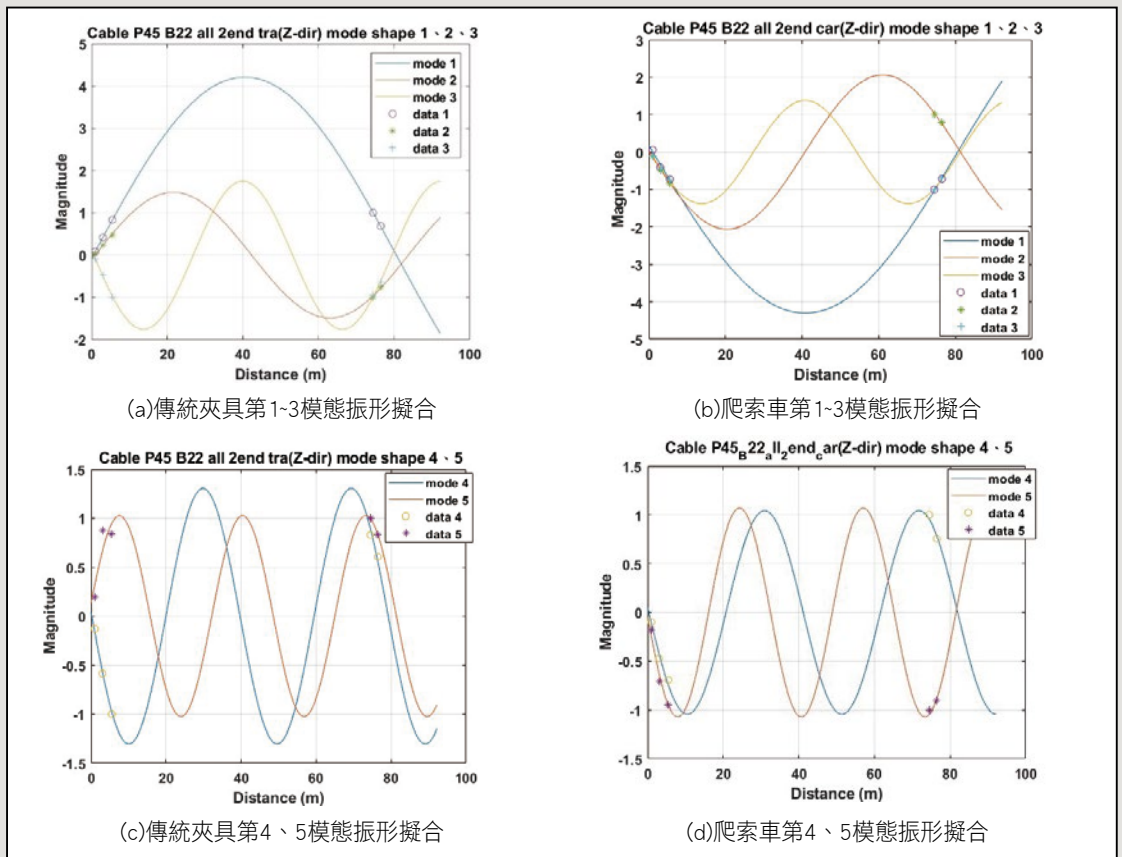


圖9 模態振形擬合

## 結語

近年因南方澳大橋的崩塌事件，引發國人及政府單位對於橋梁健康監測及檢測的重視。台灣的百川地形造就了大量的橋梁誕生，又因應現代對於結構造型美觀的需求，懸索橋梁更是被廣泛的應用。為加速鋼索檢測及監測作業的進行，能以自動化進行檢測的作業，且具有安全性與精密性的爬索車研製勢在必行，預期也將成為世界各國橋梁檢測發展趨勢。就現況而言，國內目前尚未有正式量產的爬索車產品問世，中華顧問工程司本於技術研發與推廣應用使命，積極與大同大學機械與材料工程學系密切合作，目前產出的第一代爬索車已具備鋼纜爬升、鎖固、感測器水平校正及即時影像傳輸紀錄等功能，但礙於時程緊迫的情況下，目前爬索車適用鋼纜規格是以金門大橋鋼纜HDPE套管外徑所打造，仍無法適用所有尺寸的鋼纜。

現行研製的爬索車，經由幾次的現地測試，爬索車用於鋼纜模態試驗的結果與人力搭乘舉高車於高空鎖固夾具的方式進行比較，其結果不論是鋼纜振動頻率的判讀，或是有效振動長度的擬合等，發現二者並無顯著的差異，代表爬索車於現地操作的穩定度及對於量測精度的影響皆相當優異。

本團隊將持續精進爬索車的研發，提升爬升能力、攝影性能、軟硬體穩定性及續航力等功能，使其可應用於各種尺寸及角度較陡的鋼纜。未來爬索車亦能延伸改良應用至不同設施結構之檢測作業，如離岸風機柱體檢測。透過使用自動化爬升機器進行高空作業，均可大幅降低人員長時間於高空工作的風險，進而提升維護管理作業之工作效率及人員生命安全。

## 誌謝

本文係財團法人中華顧問工程司「橋梁鋼纜等檢測設備開發與推廣(爬索車研製)」研究案之部分成果，作者由衷感謝高速公路局第二新建工程處的支持與協助，得以現場測試順利完成，在此一併申謝。

## 參考文獻

1. 國家運輸安全調查委員會，南方澳大橋斷裂重大公路事故事實資料報告(2020)。
2. 陳建州、吳文華，「以微振法精確量測斜張鋼纜索力之關鍵技術」，第八屆(2013)公共工程非破壞檢測技術研討會論文集，台南，(2013)。
3. 柯翊珮，「多點微振量測索力估算法採用不同量測佈設之準確性差異分析與適用性探討」，碩士論文，國立雲林科技大學營建工程系，雲林(2022)。
4. K. H. Cho, Y. H. Jin, H. M. Kim, H. Moon, J. C. Koo, and H. R. Choi, "Multifunctional Robotic Crawler for Inspection of Suspension Bridge Hanger Cables: Mechanism Design and Performance Validation," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 22, no. 1, pp. 236-246(2017)
5. A. Baghani, M. N. Ahmadabadi, and A. Harati, "Kinematics modeling of a wheel-based pole climbing robot (ut-pcr)," in Proceedings of the 2005 IEEE international Conference on Robotics and Automation, pp. 2099-2104(2005)