

非接觸式電路板短路檢測雛型系統設計

Prototype System Design of the Non-Contact Detection in Short-Circuits of PCB

陳建宏、張吉進、黃國政、廖泰杉、黃吉宏

Chien-Hung Chen, Jyi-Jinn Chang, Kuo-Cheng Huang, Tai-Shan Liao, Chi-Hung Hwang

印刷電路板 (printed circuit board, PCB) 的發明可以說是 20 世紀最重要的發展之一，印刷電路板主要的功能是将設計的電子迴路使用導電材質連接，並將電子元件的功能整合一起。相對的，印刷電路板製作過程中，電路板走線的正確性也變得相當重要，常見的問題就是兩條不應該連接一起的線路因製程過程錯誤或人為焊接的疏失而造成短路，進而使電子產品工作不正常或電源燒毀。本研究提出透過電流流經路徑所產生的電磁訊號變化，設計一個電磁感應量測系統，並整合 X-Y 自動定位平台來達到自動化量測，實驗證明在印刷電路板上使用電磁感測方式，可以有效地顯示出電路短路的區域。

The short-circuit phenomenon is one common error in the operation of electronic circuit. Short-circuit will cause the electrical components damage and the incorrect function in PCB. In general, the detection of short-circuit is performed by using the electrode probe to contact each pad in single PCB or the probe card in mass production of PCD. Due to the fast development of circuit layout, the size of IC with pads is getting smaller; therefore, it is much difficult to detect short-circuit in PCB by the pads-contact inspection. This paper presents a method to detect short-circuit area in PCB without the use of electrode probe, which employs the electromagnetic signals to sense and identify the change of electromagnetic induced by short-circuit.

一、前言

20 世紀初是科技發展的重要時代，其中迫使電子業快速成長的主要技術為印刷電路板 (printed circuit board, PCB) 的發明。1913 年 Arthur Berry 發明了此技術，並獲得了英國及美國專利，其已被廣泛使用在各種的電子產品中。印刷電路板主要的功能是将設計的電子迴路使用導電材質連接，並將電

子元件的功能整合一起。如今，印刷電路板相關的技術已經被改良運用在各種類型，例如：印刷電路板的材料、圖案、蝕刻及製程等，相對於其他技術印刷電路板上技術製程比起其他替代方案既便宜又可靠。

然而，許多的文章及專利已經指出印刷電路板的品質取決於製作上的精確度，檢測印刷電路板製作品質最常見的方法之一是利用電路板熱反應。當

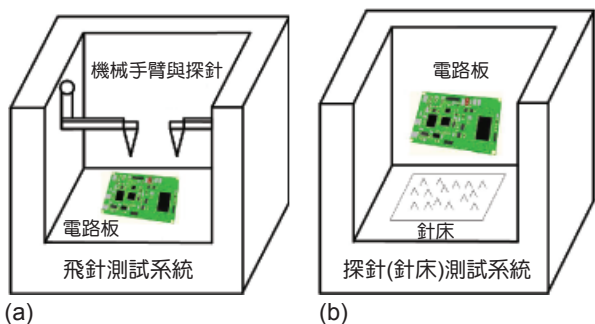


圖 1. 市面現行的檢測方式：(a) 飛針測試，(b) 針床測試。

電子元件常態工作溫度值為趨於穩定時。印刷電路板若出現電壓電源短路情形，會因流經電流增大使其消耗功率上升 ($P = I^2R$) 而導致電路溫度增加，此現象可以被熱影像系統或熱探測器感測所量測。熱影像系統內部影像感測器成本相當高，且取得不易，而在多層的印刷電路板上要使用熱影像技術檢測短路則會相對的困難，故在業界實務上，最普通的測試方法是使用飛針測試 (flying probe) 系統和探針卡 (probe card) 測試系統。

飛針測試系統是使用兩個機械手臂並在前端結合量測探針，透過電腦系統載入電路圖資並轉換成相對座標位置，再移動機械手臂去探測各個線段的起點與終點，藉以了解短路與斷路情形，其示意圖如圖 1(a) 所示。然而，在印刷電路板上的檢測空間將會受限於機械手臂的工作範圍。也因此被檢測的印刷電路板需符合機台最大工作範圍；另一種檢測方式則是透過探針卡做全電路測試，檢測方需設計與製作符合電路板上所有測試點之探針卡，再透過壓合的方式讓探針與電路點接觸，讓測試系統一次性地全點測試。通常探針卡也被稱為針床，如圖 1(b) 所示，此測試方式比飛針測試法快，但因成本考量，較適合於量產型印刷電路板檢測。然而因目前探針卡皆為手工製作，也因此漸漸無法適用於現今積體電路 (IC) 的極小接觸腳位。

為了建立一套檢測方式，並可以解決上述現行方案的主要兩個問題「檢測區域」、「接觸點太小」，我們在此提出了一量測方案，透過電磁感測方式，透過電流產生電磁的原理，檢測電路的短路與開路情形，除了可以不被接觸腳位所限制之外，

經由測試探頭的設計，也可解決工作區域範圍的問題。

下文將介紹非接觸式電路板短路檢測系統量測原理與其物理模型，並在下一章節實驗驗證其可行性，最後介紹整體系統的架構組成。

二、系統設計原理

量測原理與感測器物理模型的部分我們將量測原理分成兩部分：電磁訊號端與量測感應端。

1. 電磁訊號端物理模型

本文提出的量測方法基本原理是透過電磁感應，因此在運用此方式做應用時需要先了解整個量測機制，包含了無線感應的可行性、感應的限制性以及待測物與實際感應的關係性。我們從法拉第定律 (Faraday's law) 設計模型，圖 2(a) 為基礎的電流產生磁場的關係，圖 2(b) 為感應探頭量測磁場的示意圖，在電路短路的情況下，電流將只流過的短路部分的長度範圍，如圖 2(a) 所示並產生電場 E 或磁場 B 區域。磁場的強度將隨根據導線的長度和位置，並可由畢歐沙瓦定律 (Biot-Savart law) 描述

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_L \frac{dl \times r'}{r^2} \quad (1)$$

其中， L 為導線長度的總和， dl 為電流的向量， μ_0 為磁性的常數， r 為 dl 與電場計算的距離， r' 為 r 單位矩陣向量。公式 (1) 中表示出電流 I 與磁場 B 或電場 E 成正比，與距離 r 成反比，其電磁感應如圖 2(b) 所示。

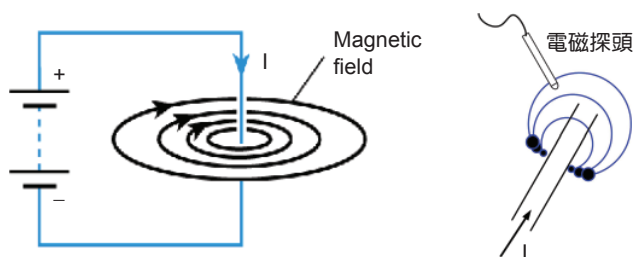


圖 2. (a) 電流與磁場的關係圖；(b) 感測器與磁場的關係圖。

電流流經的路徑將會產生電場，在任何有限長度的直線磁通密度，其總磁通量可以分割成好幾部分，再用疊加得到總磁通量密度。其式子則為

$$B = \int dB \quad (2)$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{Idl \times r}{R^3} \right) \quad (3)$$

磁場總量的示意圖如圖 3 所示，有限線段電流 I 流過區域所產生在 P 點的磁場，其總量為不同角度 θ 與距離 a 的總合量，可推導整理成數學式 (4)：

$$B = \frac{\mu_0 I(t)}{4\pi a(\cos \theta_2 + \cos \theta_1)} a_{\Phi} \quad (4)$$

此部分則為電磁產生源的物理模型。

2. 量測感應端物理模型

要達到無線量測的機制其很重要的元件為「電感」，電感的線圈構造可以感應到磁場的能量並產生相對應的電壓或電流，此時就可讓後續系統量測與分析用。要了解磁場與電的相對關係，可由畢歐沙瓦定律推導出，其在量測點磁通量通過的情形 (magnetic flux)，延續公式 (4) 後加入了迴路面積 πr^2 與角度 α 推導出如公式 (5)：

$$\Phi_B = \frac{\mu_0 I(t) r^2 \cos \alpha}{4a(\cos \theta_2 + \cos \theta_1)} \quad (5)$$

其電感的線圈數會影響磁通量的關係式透過法拉第定律導出，其式子為公式 (6)， N 為圈數：

$$\varepsilon = INd \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (6)$$

再導入公式 (5) 即可為

$$\varepsilon = \frac{N \frac{\mu_0 I(t) r^2 \cos \alpha}{4a(\cos \theta_2 + \cos \theta_1)} (dI(t))}{dt} \quad (7)$$

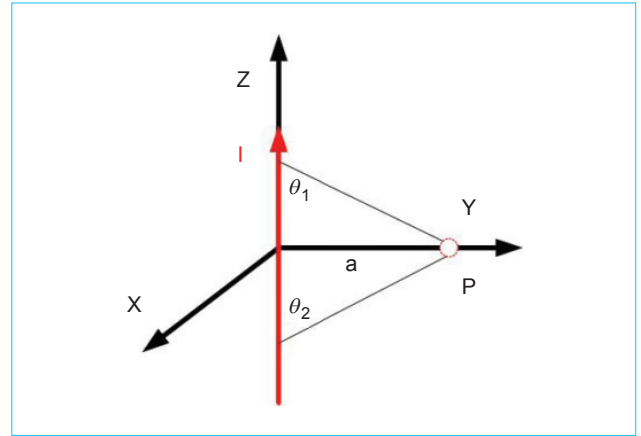


圖 3. 磁場總量示意圖。

最後可以導出輸入與輸出關係式 (8)：

$$\frac{i(t)}{I(t)} = N \frac{\mu_0 r^2 \cos \alpha}{4aL(\cos \theta_2 + \cos \theta_1)} \quad (8)$$

其中，相關參數 n 為電感線圈圈數 (number of turns in inductor)、 μ_0 為電磁係數 (permeability of free space)、 r 為電感線圈半徑 (radius of the coil in the inductor)、 a 為感測器間距 (distance from probe to wire)、 L 為電感數值 (inductance of probe)、 θ_1 與 θ_2 為電磁角度 (angles probe makes with the wire)、 α 為感測器角度 (angle the probe is to the wire (angle the flux passes through the probe))。

三、量測系統架構

在此次提出的量測方案中，我們將其細分成幾個區塊，包括使用者操作介面 (user interface)、訊號輸出與輸入至感測器的資料擷取介面 (DAQ system)、控制掃描位置的四軸馬達區塊 (motor unit) 以及最重要的感測器區塊 (sensor unit)，如圖 4 所示。以下將會各部分做說明。

1. 使用者操作介面開發與設計

使用者介面是使用者與機器的最好溝通橋樑，有效的顯示資訊給使用者了解與有系統地讓初次使用者就可快速上手都是相當關鍵的設計概念。綜觀

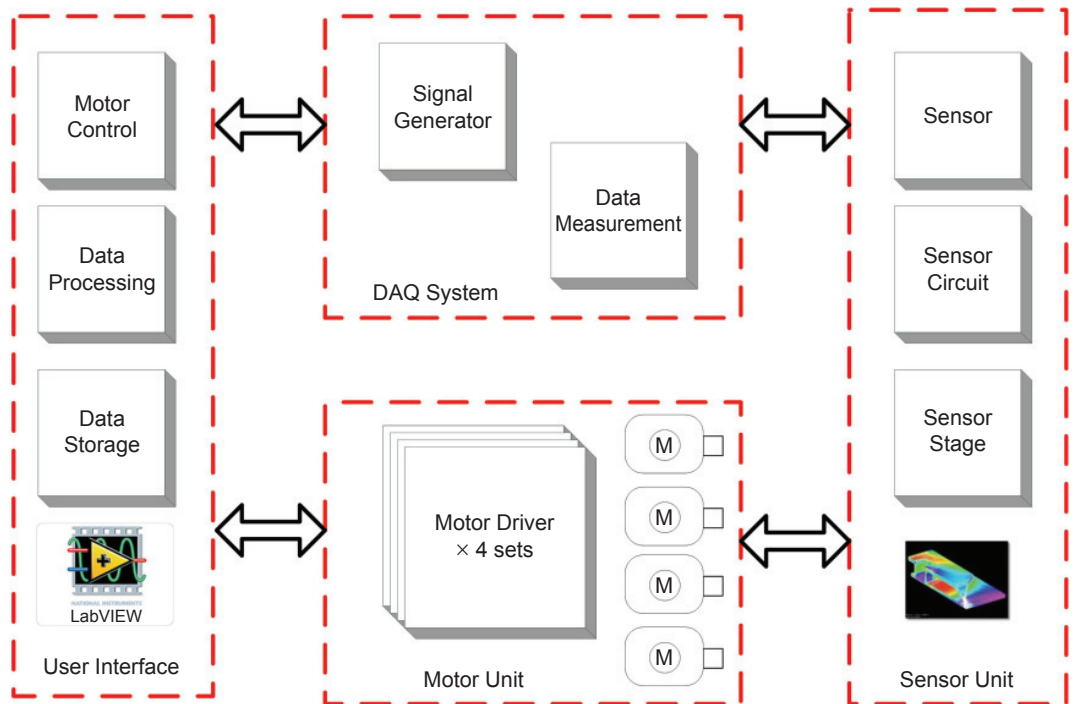


圖 4. 系統區塊與其功能示意圖。

現行的許多軟體，很多介面設計的會讓使用者無法一次了解要如何使用該軟體，或是太多功能按鈕而不知從何下手。本文在此使用者操作介面當中特別注意此問題，並將操作介面設計成一般使用者版本與工程使用者版本，如圖 5(a)、(b) 所示，藉以將功能設計分離出。另外也透過 LabVIEW 圖形化設計的優點，可將使用者介面與圖形直接結合，讓使用者一目了然的方式，直觀的操作量測系統。

一般使用者版與工程使用者版最大的不同在於：一般使用者版介面設計只需要讓使用者透過基本簡單的設定與按鈕就可以得到想要的資訊，因此我們在一般使用者版減少了馬達設定 (motor setting)、資料擷取設定 (DAQ setting) 等操作，如圖 5(b)，後續介紹將以工程使用者版為主。在使用者介面設計部分主要有三項功能，分別為馬達控制、資料分析與資料儲存。

(1) 馬達控制

非接觸式電路板短路檢測系統中設計了掃描位置控制，系統中有四組步進馬達控制 X 方向、Y 方向、Z 方向與旋轉角度，如圖 6 所示，其四個馬達的控制物件皆為感測器，提供使用者調整到不同

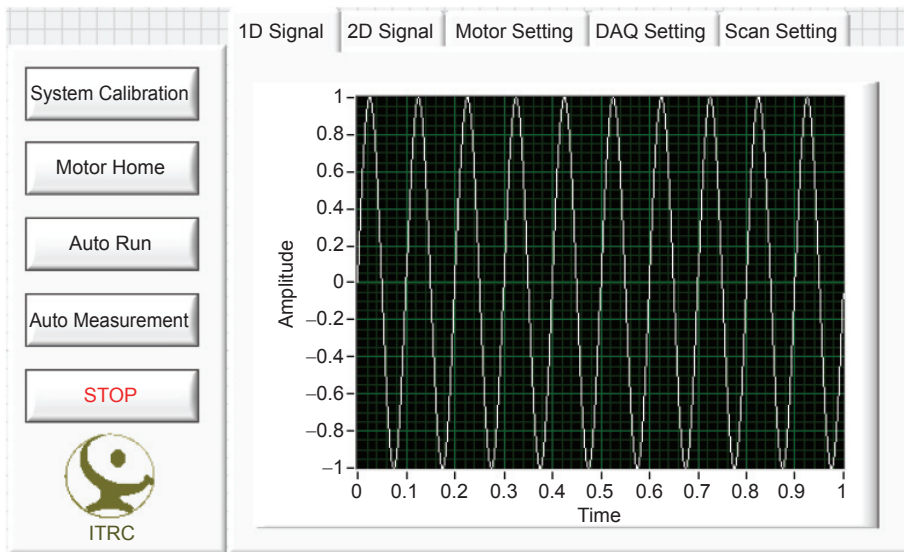
量測點移動與進行量測。

由於使用者操作需要相當直觀，因此我們利用了 LabVIEW 圖形化設計的優點，整合圖片、控制物件與顯示物件在一起，設計讓使用者可以更容易地了解操作方式，如圖 7 所示。我們直接將 XYZ 平台的簡圖放置在控制面板上，並讓控制輸入可以直接修改使用者想達到的位置。

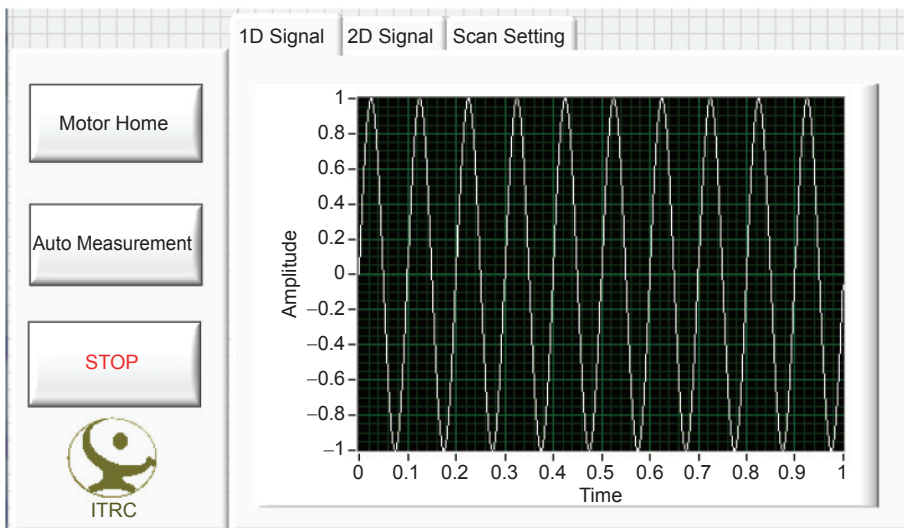
使用者除了自行設定各軸位置之外，在此另外設計了自動掃描機制，可以更方便讓使用者透過軟體，設定掃描距離、間距，自動完成電路板的檢測。設定介面如圖 8 所示，我們將一模擬的電路板整合到使用者介面，並讓使用者直接定義出掃描電路板的長寬距離，另一設定值為 X 軸與 Y 軸的掃描間距，掃描間距會影響整體的量測時間與量測的解析度，此部分也可由使用者決定。

(2) 資料分析

非接觸式電路板短路檢測系統需要提供一個主動訊號源，輸入至待測電路板中，再透過感測器量測感應的訊號。如圖 9 所示，而主動訊號的參數設定可以由使用者自行調整頻率與振幅，另外也可以讓使用者選擇感測器的型態，讓系統自行計算適合



(a)



(b)

圖 5. 使用者介面，(a) 工程使用者版，(b) 一般使用者版。

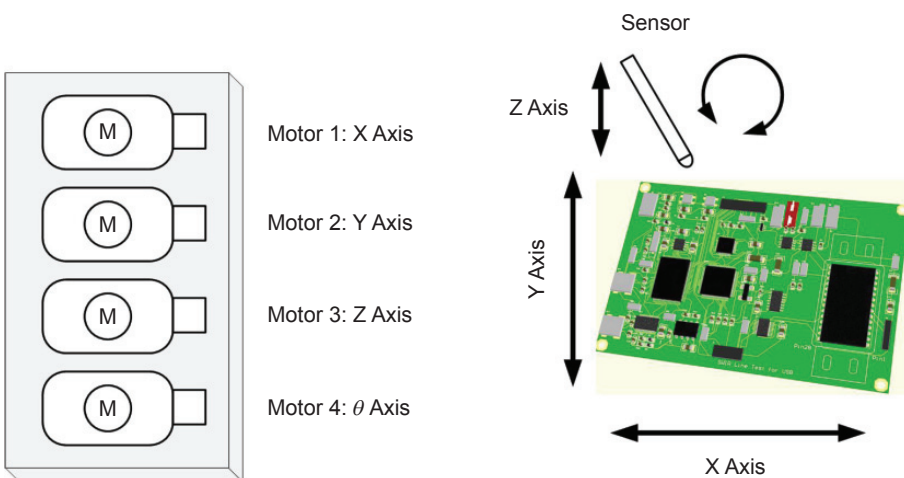


圖 6. 馬達控制配置示意圖。

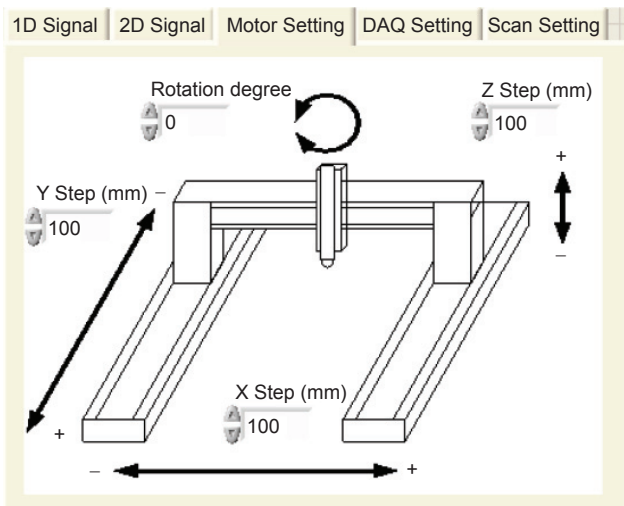


圖 7. 馬達控制人機介面。

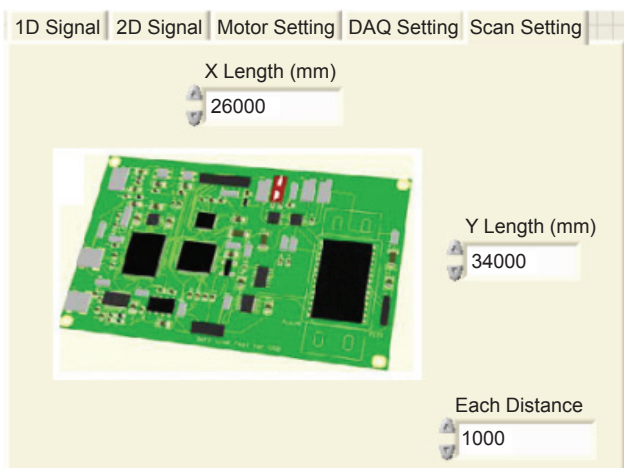


圖 8. 自動掃描設定人機介面。

的頻率與振幅。我們將感測資料透過分析並用二維的方式呈現，如圖 10 所示，可以讓使用者清楚得知相對待測電路板的電流分布位置，量測分析的原理將於感測器章節介紹。

(3) 資料儲存

資料儲存是虛擬儀控軟體的重要部分之一，不外乎將分析資料儲存以便後續使用，快速有效率的儲存方式與格式相對的很重要。本文使用 TDMS (technical data management streaming) 的儲存格式，TDMS 為美商國家儀器股份有限公司 (National

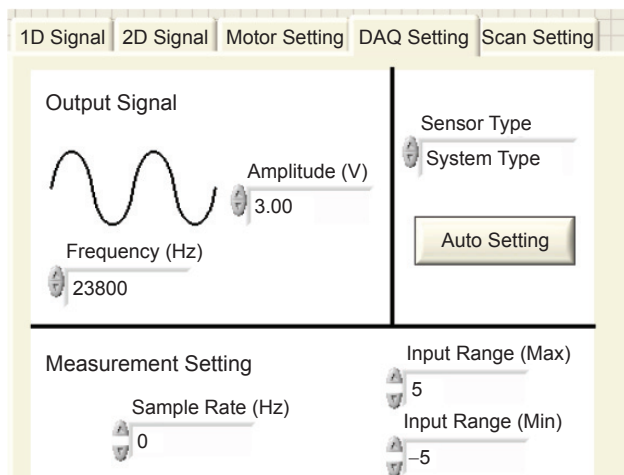


圖 9. 資料分析參數設定。

Instruments, NI) 自行定義的檔案格式，它的優點是能夠讓使用者自行定義訊號的屬性，以及採用二進位的方式來加快存取的速度。在實際測試當中，在 Windows XP 下 P4 3.0G 的 CPU 與 8 顆架 RAID0 的磁碟陣列，資料流理論值為 385 MB/s，TDMS 實測的速度為 372 MB/s。除了速度快之外，檔案與其他軟體的支援性更為重要，TDMS 可以與最常用的 Excel 與 Matlab 所互通，這相對給了很多後續運用的空間。圖 11 為 TDMS 資料結構。檔案格式前半段為屬性的資訊，包含了檔名通道組名、通道名，與資料片段 (segment) 的資訊，此資訊為資料實際儲存在硬體裡的指標，使用者尋找檔案時即可透過此資訊快速找到要找的檔案。

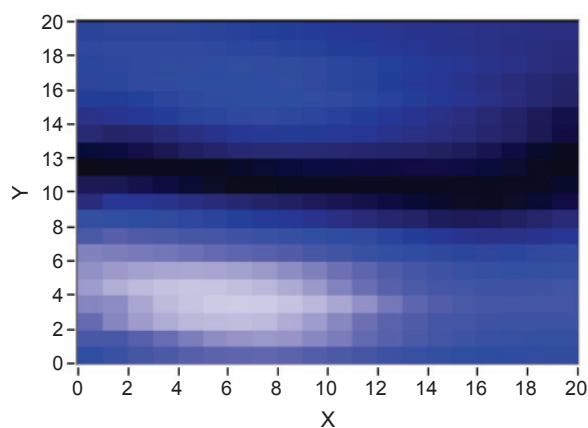


圖 10. 二維分析資料呈現。

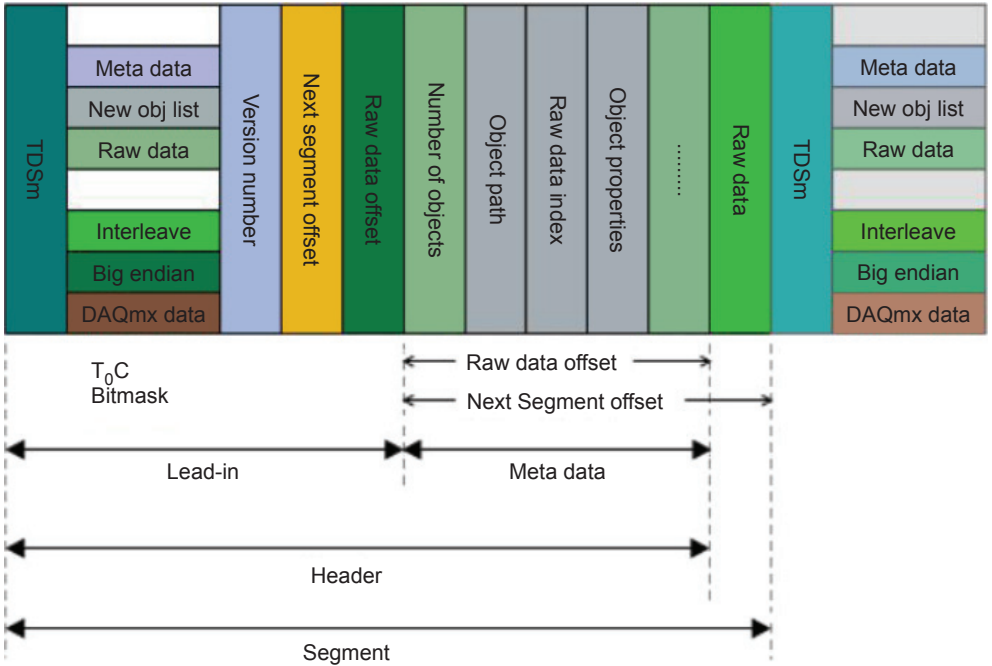


圖 11. TDMS 資料結構，其檔頭部分有詳細的資料細部資訊，更可運用在大型資料的整合上。

2. 資料擷取系統單元

在資料擷取系統單元部分，我們使用了一個 NI DAQ X 系列的多功能資訊擷取器，主要為提供一個穩定的訊號源，並流經電路系統後透過感測器再將產生的訊號讀取回系統。如圖 12 所示，我們取用了 NI USB-6356 做為資料產生 (analog output) 與收集部分 (analog input)，爾後透過軟體 LabVIEW 分析處理。

3. 馬達裝置單元

在馬達控制部分，本次系統使用了四軸的步進

馬達，其中包含了 X、Y、Z 與 θ ，我們此系統的 X、Y、Z 行程分別為 $200 \times 200 \times 50 \text{ mm}^3$ 。如圖 13 所示，其中使用 PCI-7354 做為馬達控制卡與其接線盒，並整合至系統內部空間。

在電路板設計中，電路走線不可能只有同一方向，PCB Layout 會照著電子元件擺放的位置而有所改變，因此系統中加入了一個可以中空旋轉馬達，目的是為了讓感測器可以量測不同方向的資料。如圖 14 所示，電路上紅色的線為電路走線路徑，透過旋轉的方式達到不同走線的量測效果。

4. 感測器單元

感測器元件為本次系統的最主要重點之一，其設計為透過 R-L-C 電路整合而成。如圖 15 所示，我們設計了兩款不同型式，一款為安裝在 XYZ 平台上使用，如圖 15 左所示，另一款為可以提供使用者手持式方式操作，圖 15 右所示。

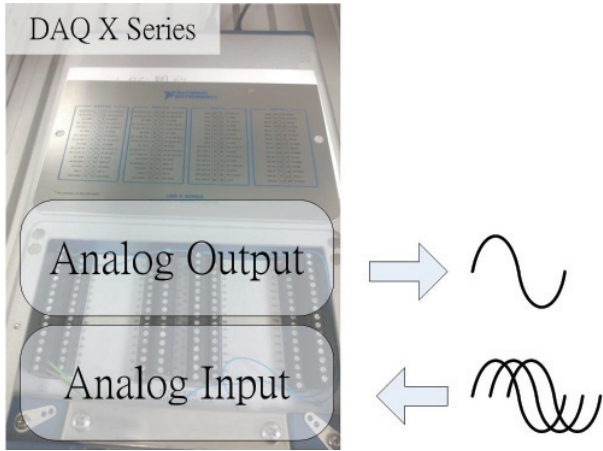
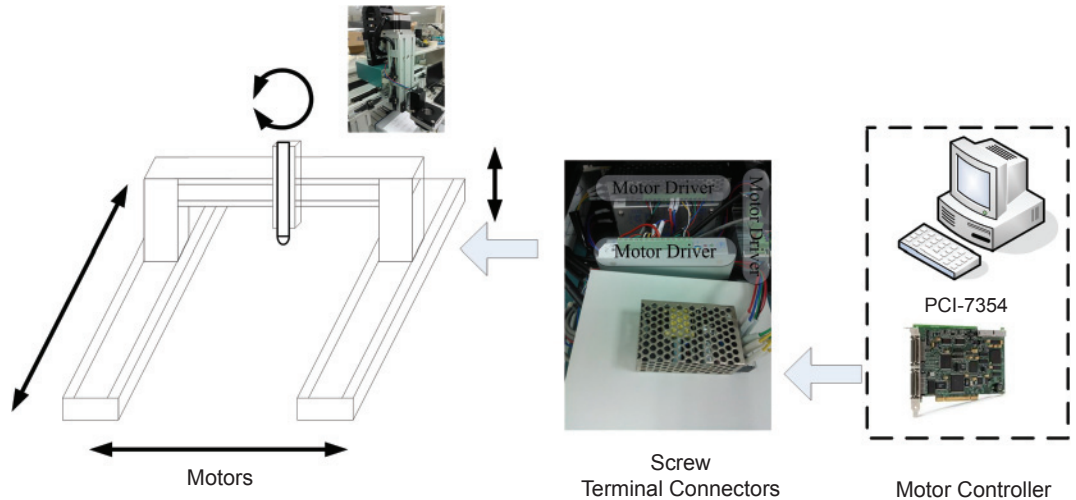


圖 12. DAQ 模組示意圖。

四、非接觸式電路板短路檢測系統架構與組成

本節介紹非接觸式電路板短路檢測系統量測原理與其物理模型，並實驗驗證其可行性，最後介紹整體系統的架構組成。

圖 13. 馬達控制與示意圖。



透過此文電磁感應原理架設一套量測原型機，其系統架構圖如圖 16 所示，主要分為兩大區塊，包含了電磁感應平台與量測控制分析系統。在電磁感應平台上設備了 XYZ 與 θ 角度的移動平台，以提供印刷電路板位置移動，整個 XYZ 平台的工作範圍是 $200 \times 200 \times 50 \text{ mm}^3$ 。實驗中，量取經由電磁感應探頭所感應的訊號，操作者可讓使用者輸入待測電路板尺寸大小，並經由轉換後控制 XYZ 平台移動路徑，藉以達到全電路板的電磁分布量測；另外也分析從電磁感應探頭所量測到的訊號，並以 2 維方式於螢幕上呈現，量測儀器是使用多功能資料擷取器，NI USB-6536 (National Instrument, NI) 與圖形化設計介面 LabVIEW 做設計。

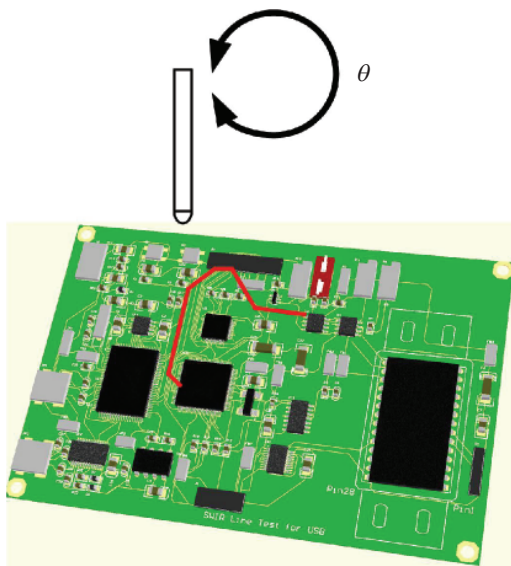


圖 14. 馬達控制 θ 角度示意圖。

五、系統量測與測試

1. 實驗測試

首先測試電磁感應探頭是否可以感應線路電流所產生的磁場，使用訊號產生器產生一電流迴路，並使用電磁感應探頭去測試接近此電流迴路，測試結果圖如圖 17(a) 與 (b) 所示，在圖 17(a) 並無電流迴路的情況下，示波器並無感應到任何資訊，如圖 17(b) 下，所產生一電流迴路，此時在示波器上可以明顯看到一訊號透過電磁感應探頭而量測到，透過此實驗簡單驗證出電磁感應探頭對電磁感應的可行性。

我們再設計實驗，測試推導的物理模型是否與實際量測相近。其中我們選用的相關參數： L 為 $100 \mu\text{h}$ 、 N 為 70、 r 為 2.9 mm，感測器參數則是 C 為 4700 pF、 ω 為 480 kHz、 α 為 0° ，輸入電壓 (input voltage) 為 1 V 到 10 V。

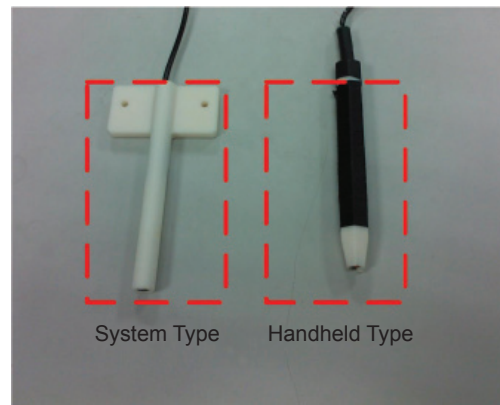


圖 15. 感測器組件。

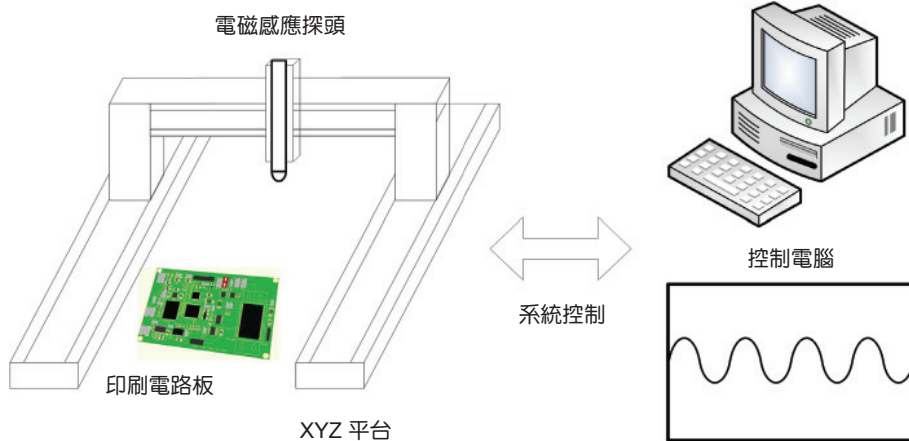
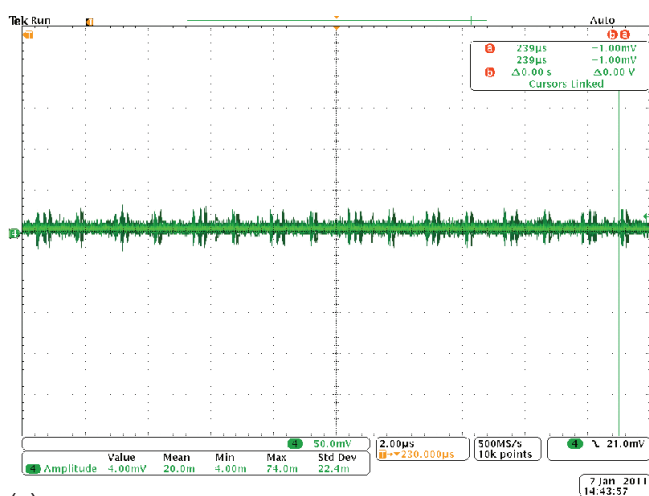
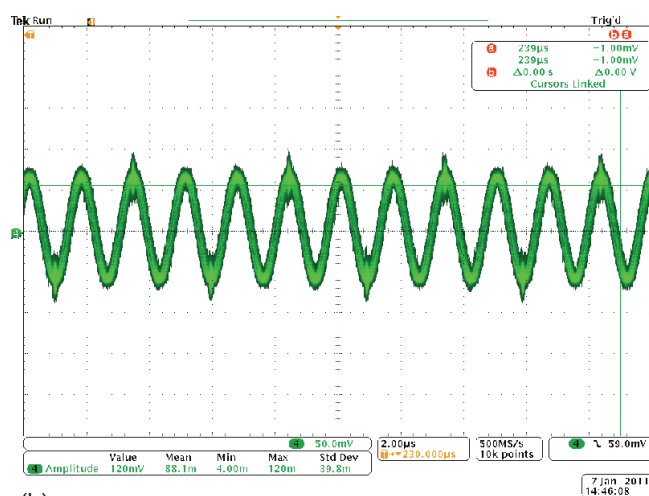


圖 16. 系統架構圖。



(a)



(b)

圖 17. (a) 無產生電流迴路之量測情形；(b) 電流迴路之量測。

表 1 中所看到的是輸入電壓從 1 V 到 10 V，透過感測器量取其訊號值與其輸入比值最後我們量到其總比值為 0.156，我們在將參數套入上述推導的公式中，並求出計算的比值為 0.127，兩個數值的誤差量為 18%。

透過上述的實驗可以發現，輸入電壓與量測電壓的變化約為 0.15 到 0.17 左右，但是經由推導公式計算後發現，其量測與計算有一定誤差量。預估此誤差量的來源可能為感測器部分，在公式中推導主要是假設感測器為「點」，然而在實驗面我們無法取得只有一個點的元件製作感測器；相對的如果感測器無法是以「點」的方式量測，其訊號的來源就有可能從很多地方感應，而造成量測數據上與理論上的誤差。

表 1. 實驗測試數據。

Input Voltage	Measured Voltage	Ratio Voltage
1	0.131	0.131
2	0.275	0.136
3	0.436	0.145
4	0.594	0.148
5	0.771	0.154
6	0.957	0.159
7	1.14	0.162
8	1.35	0.168
9	1.58	0.175
10	1.78	0.178
Average Ratio of Measurement		0.156
Average Ratio of Calculation		0.127
Error (%)		18

表 2. 實驗測試數據。

Height (mm)	Voltage Measured	Measured Ratio	Voltage Calculated	Voltage Ratio	Error
1	2.67	0.267	3.198	0.319	0.194
2	1.7	0.17	1.598	0.159	0.064
3	1.19	0.119	1.064	0.106	0.109
4	0.77	0.077	0.796	0.079	0.025
5	0.495	0.0495	0.636	0.063	0.272
6	0.43	0.043	0.528	0.052	0.209
7	0.4	0.04	0.451	0.045	0.125
8	0.37	0.037	0.393	0.039	0.054
9	0.3	0.03	0.348	0.034	0.133
10	0.3	0.03	0.312	0.031	0.033

我們另外在設計一個實驗測試量測的效率。我們改變量測時電路板與感測器的高度，並比較量測與計算的數值差異。其測試結果與測試圖如表 2 與圖 18 所示。其測試得到的結果於同上一個實驗，其量測值與計算值皆有約 10%–20% 左右的誤差，雖然有此誤差，不過對實驗上已經夠用了。

我們接著將電磁感應探頭整合至 XYZ 平台上，並透過 DAQ 系統來實現電磁感應功能，經由前一段的實驗測試後，我們取待測的電路板，如圖 19 進行實體測試，電路框區域為預設之電路短路的區域，藉以與實際量測的結果做比對，其中，電路板大小約為 $100 \times 150 \text{ mm}^2$ 。

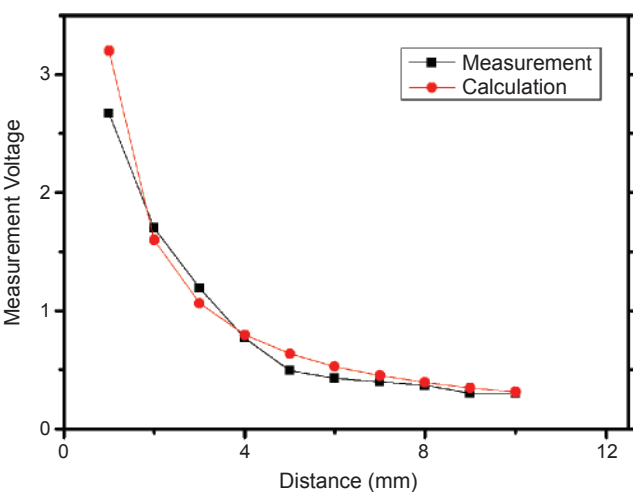


圖 18. 距離與量測關係，紅線為理論計算值，黑線為實際量值。

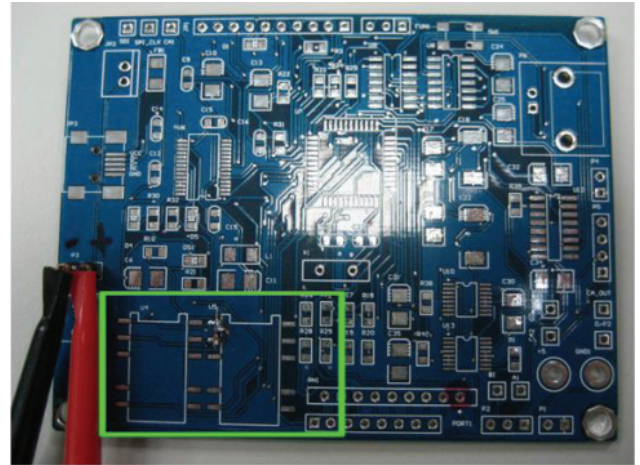


圖 19. 待測電路板，框區為電路短路區域。

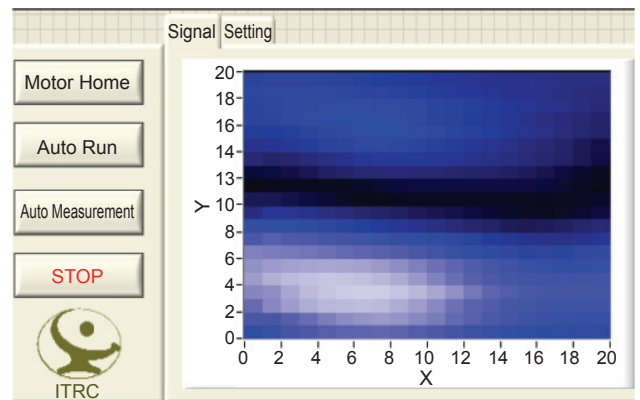


圖 20. 實測軟體與實驗電磁強度圖。

最後，我們將電路板置於 XYZ 平台上，實驗中電磁感應探頭距離電路板高度為固定 5 mm，此電路板掃描的範圍為 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ ，掃描解析度每資料點距離為 5 mm。圖 20 為電磁感應量測後的強度分布圖。

電磁感應的強度分布圖中可以發現，在圖中的左下部分呈現較強的電磁反應，其他部分相對的比較低的強度反應，此現象正好符合圖 19 左下框的短路區位置。最後我們設計的非接觸式電路板短路檢測系統如圖 21 所示。

2. 軟體設計部分

圖 22 為系統軟體設計的 Hierarchy 架構，其中我們使用到了 LabVIEW 內部子函數 VI 與自行設計的子 VI，一起架構出量測系統的軟體。如透過

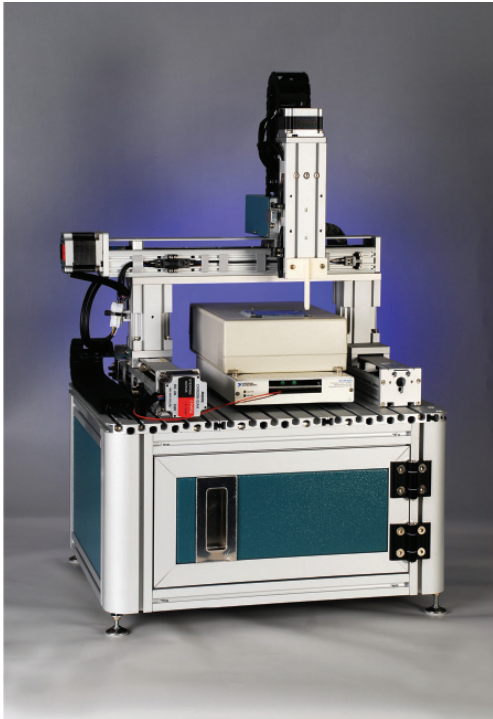


圖 21. 非接觸式電路板短路檢測系統成品圖。

子 VI 的設計，可以讓程式有系統的收斂，而不會產生程式發散。

圖 23 為軟體程式設計圖，程式架構主要由有限狀態機構成，並將主要的控制修改參數，用事件觸發的方式來設計，讓系統初始化過後，降低整體系統的處理效能，直到有新事件才開始作動。如圖 24 軟體狀態設計圖，系統初使化後，讓程式進如閒置狀態，已降低系統的資源消耗，如使用者有新的命令下達，才跳至作動區塊，執行結束後再回到閒置狀態以等待下一個命令。

3. 操作方式

在操作方式當中，我們提供了兩種方式，分別為自動化量測與手動量測。如圖 25(a) 所示為自動化量測方式，其為將待測電路板置於量測平台上，讓 XYZ 移動平台自行掃描取得資訊；另一方式圖 25(b) 為手動量測法，其為讓使用者自行手持量測探棒自行量測，依使用者的量測路徑取得資訊。

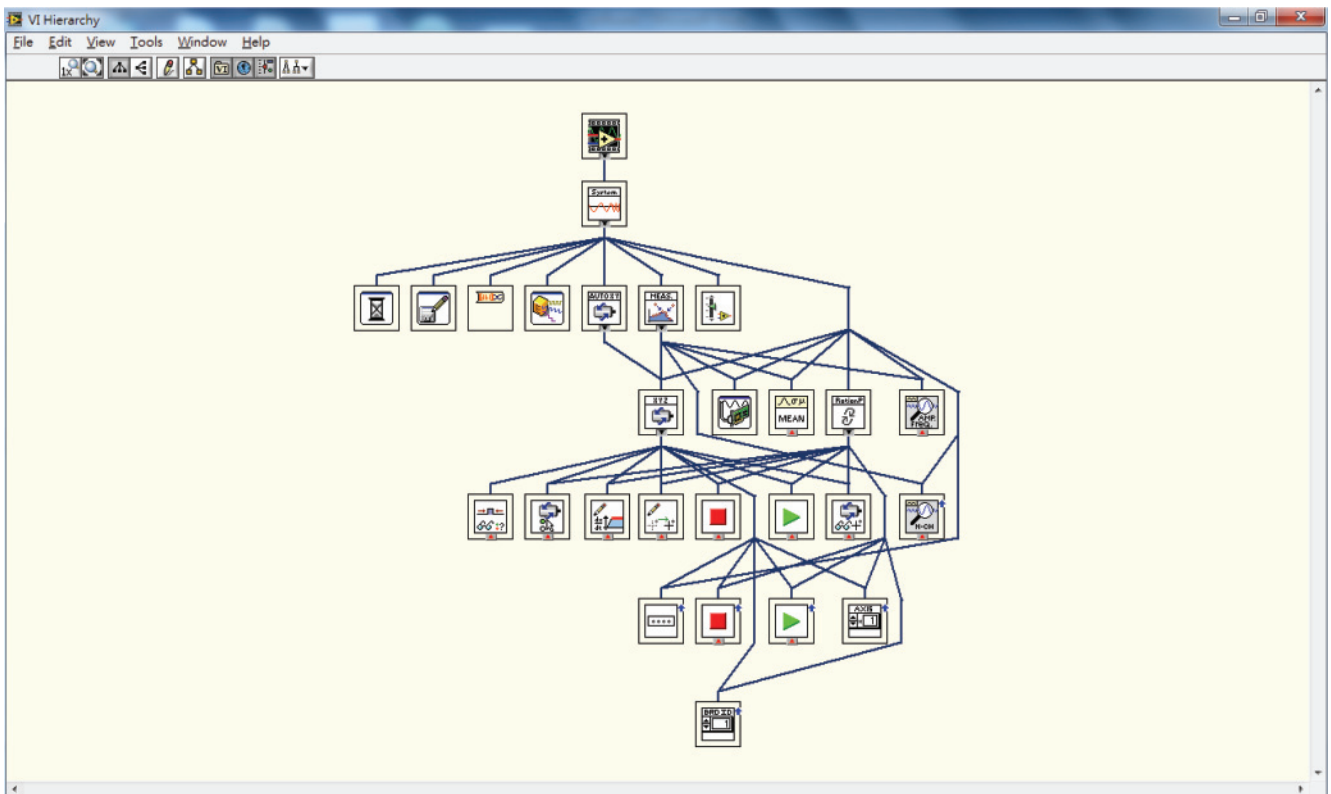


圖 22. 軟體設計 VI Hierarchy。

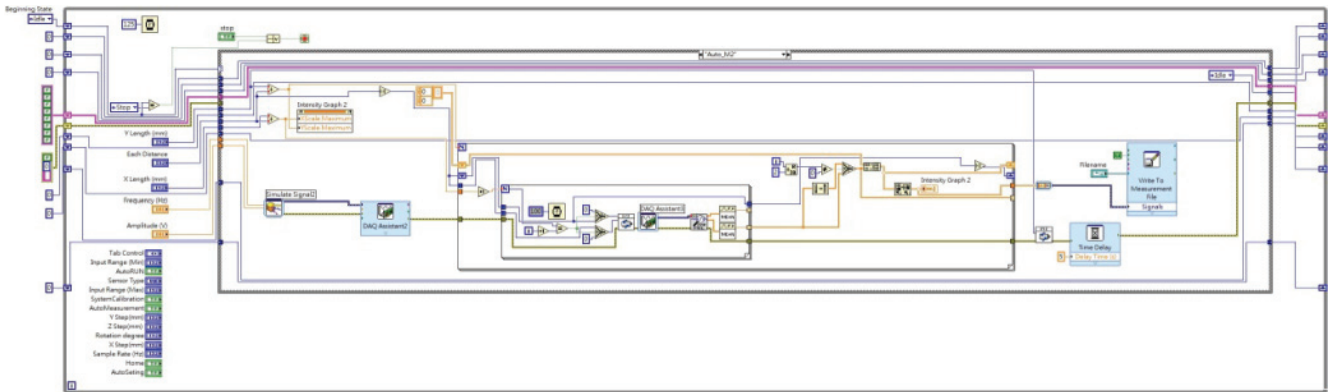


圖 23. 軟體設計圖。

六、結論與建議

此次設計為應用於印刷電路板 (PCB) 的短路檢測上，在業界的檢測上已漸漸的遇上兩項主要問題，其一為積體電路 (IC) 的尺寸設計得愈來愈小，而相對的 IC 接觸點也越來越小，造成需要更細小與精確的探針系統，其二為 PCB 電路板體積大於量測機台的工作範圍，造成量測機台限制了受測的 PCB 體積。對此問題我們提出了一套解決方案，其透過電磁感測方式，透過電流產生電磁的原理，再經由電磁感應探頭去量測電磁量，藉由檢測出電路的短路與開路情形，除了可以不被接觸腳位所限制之外，經由測試探頭設計成可攜式型式，也可解決工作區域範圍的問題。

在設計當中透過理論推導、實驗、設計到最後的樣品機完成，發揮了 NI 軟體與硬體最大的特色「快速整合與驗證」，我們將數學理論基礎快速的架設起系統並進行量測與驗證，並最大部分的時間花在校正與微調上，也讓我們更多新想法加速的實現。

參考文獻

1. B. Arthur, Process and mechanism for the production of electric heaters, U.S. Patent 1,256,599, Feb. 19 (1918).
2. A. S. M. Hassan, V. K. Agarwal, B. Nadeau-Dostie, and J. Rajski, *IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, **11**, 1278 (1992).
3. Soiferman, and Jacob, Contactless test method for testing printed

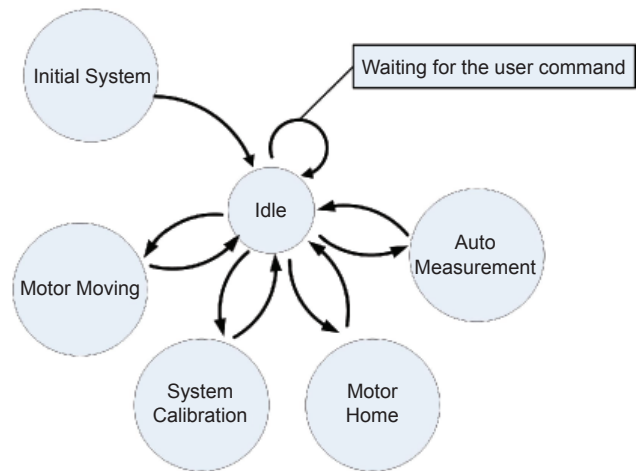
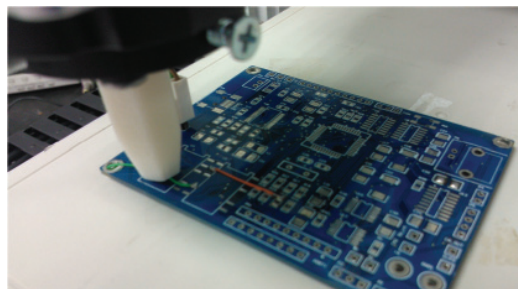


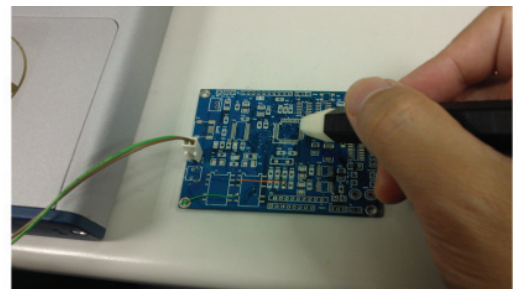
圖 24. 軟體狀態設計圖。

圖 25.

- (a) 自動式量測法；
 (b) 手動式量測法。



(a)



(b)

circuit boards, U.S. Patent 5,218,294, June 8 (1993).

4. T. C. David, M. H. John, E. Mc. John, J. P. Ronald, and Ed O. Schlotzhauer, Capacitively-coupled test probe, U.S. Patent 5,274,336, Dec. 8 (1993).
5. C.-C. Lee, and W.-Y. Chen, *Proceedings of the 5th International Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference*, Oct. 20-22; Taipei, Taiwan (2010).
6. B.-T. Wang, F.-X. Hsu, X.-W. Liang, C.-H. Hung, Y.-S. Lai, C.-L. Yeh, and Y.-C. Lee, *Proceedings of the 4th International Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference*, Oct. 21-23; Taipei, Taiwan (2009).
7. B.-T. Wang, Y.-C. Lee, Y.-S. Lai, C.-L. Yeh, and Y.-C. Lee, *Proceedings of the 6th International Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference*, Oct. 19-21; Taipei, Taiwan (2011).
8. F. R. Leta, F. F. Feliciano, *Proceedings of the 15th International Signals and Image Processing Conference*, June 25-28; Bratislava, Slovak (2008).
9. S. H. Oguz, and L. Onural, *Proceedings of the 15th International Robotics and Automation Conference*, Apr. 9-11; California, USA (1991).
10. P. Radev, and M. Shirvaikar, *Proceedings of the Thirty-Eighth Southeastern Symposium on System Theory*, March 5-7; Cookeville, Tennessee (2006).
11. J. G. Kang, Adaptive PCB testing system employing rearrangeable test probes U.S. Patent 6,118,288, Sep. 12 (2000).



陳建宏先生為國立成功大學醫學工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。

Chien-Hung Chen received his M.S. in biomedical engineering from National Cheng Kung University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



張吉進先生為國立台灣科技大學電機學士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Jyi-Jinn Chang received his B.S. in electronic engineering from National Taiwan University of Science and Technology. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



黃國政先生為國立台灣大學機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員兼任組長。

Kuo-Cheng Huang received his Ph.D. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently a researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



廖泰杉先生為中原大學電子工程博士，現任財團法人國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員。

Tai-Shan Liao received his Ph.D. in electronic engineering from Chung Yuan Christian University. He is currently a researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



黃吉宏先生為國立清華大學動力機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員兼副主任。

Chi-Hung Hwang received his Ph.D. in power mechanical engineering from National Tsing Hua University. He is currently a researcher and deputy director general at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.