

以虛擬儀器實踐空氣清淨箱之監控技術

姚凱超 蔡富全

國立彰化師範大學 工業教育與技術學系

摘要

由於台灣地區土地狹小，人口居住密度高，在一些半開放的空間中如車站、商店街和機場等，因裝設空調設成本非常高，在人潮多時，空氣污濁濃度遽增，成為病毒傳播的溫床，而市面上的空氣清淨機雖有清淨空氣的功能，但外型單調且無法告知使用者空氣污濁的程度。本研究旨在研發兼具美化環境及淨化空氣的清淨箱，並使空氣清淨箱可以做為植物栽培之展示箱，其技術是利用 LabView 軟體結合溫度感測及二氧化碳感測對周遭環境的空氣污染程度作監測，並附有過濾網過濾髒空氣、美化環境功能，操作介面可手自動控制，並顯示現在溫度、空氣污染程度，介面全中文化，操作簡單容易。能改善周遭環境的空氣品質，減少病毒傳播的機會。

關鍵字：空氣清淨箱、監控技術、虛擬儀器、Labview



Implementation of Monitoring and Control Techniques of Air Cleaner Tank by Virtual Instruments

Kai-chao Yao Fu-quan Cai

Department of Industrial Education and Technology, National Chang-hua University of Education

Abstract

Because of the limited land and high population density in Taiwan, people are unable to stay in an air-conditioned space, such as the train station. When the Air Pollution Index goes high, the crowded space will become a hotbed of virus-spreading. Although air cleaners on the shelf usually have the function of purifying as well as cleaning, they, with their dull appearance, are unable to show the degree of the air pollution.

This subject is aimed to develop air cleaner boxes which are able to beautify the environment and purify the air. With the use of the LabView software, we combine temperature sensor and carbon dioxide sensor to monitor the air pollution degree in the whole environment. Also, the air cleaner box, which is easily operated, can filter the dirty air, beautify the environment, provide the Chinese interface of manual and automatic control, and show the degrees of temperature and air pollution. Besides, the air cleaner tank can improve the air quality in the surroundings by reducing the opportunity of virus dissemination.

Key Words: Air Cleaner Tank, Monitoring and Control Techniques, virtual instruments,
Labview



I. 背景介紹

行政院環保局於全台灣省設立 66 個空氣品質監測站以建立台灣地區空氣品質監測網，各監測站所紀錄資料包括污染物時變濃度及基本氣象資料。依環保署之定義，顆粒物質(Particulate Matter, PM)係指由燃料燃燒及工業生產過程所產生之微粒子通稱，且為近年來台灣地區主要空氣污染物之一。環保署 2001 年公布之空氣污染指標(Pollution Standard Index, PSI)指數中，台灣地區空氣品質惡化主因為 PM 及臭氧。許多環境流行病學研究顯示，空氣污染與人體健康之間存在顯著的相關性，其中又以 PM₁₀(氣動直徑小於或等於 10 μm 之 PM)最受重視，PM₁₀ 將造成氣喘及慢性阻塞性肺部疾病症狀惡化，且不僅與呼吸道症狀惡化及死亡率增加有關，同時也與心臟血管死亡之增加有關。

由於一般人每天約有 70 - 90%時間處於室內，因此對於瞭解 PM 由室外引導至室內，再經由呼吸作用進入肺部而引發之健康危害，為目前相當重要之研究課題。世界各國在 70 年代以後開始針對空氣污染管制而努力，美國環保署於 1977 年頒佈空氣清淨法(Clean Air Act)，世界衛生組織則於 1987 年發表了歐洲空氣品質標準指引。儘管近年來各國不斷努力降低空氣污染物濃度，以改善空氣品質，然而在目前空氣品質下，仍有研究陸續發表指出空氣污染物與健康之相關性。

為考量省能、經濟之優點，台灣地區常以水牆降溫及自然通風來達到室內除熱及溫控目的(Liao and Chiu, 2002)。對於以自然通風方式移除室內污染物亦曾有不少學者研究之，影響自然通風效應之因素為建築物配置、方位及通風開口之控制以達適切通風率及建築物內流場分佈等。前人研究定義之自然通風開口包括(i)窗戶、門、老虎窗及天窗、(ii)太子樓通風、(iii)煙囪及(iv)特殊設計之出入口等。台灣地區最常使用之自然通風開口為窗戶、門及屋頂通風。通風量計算式中，除風速及開口面積外尚考慮開口之有效性，影響開口有效性之因子為風速、開口周圍之粗糙度、風入射角及屋頂斜率等。本研究希望能發展出一套技術 針對一特定空間惡化的空氣品質能有所改善。

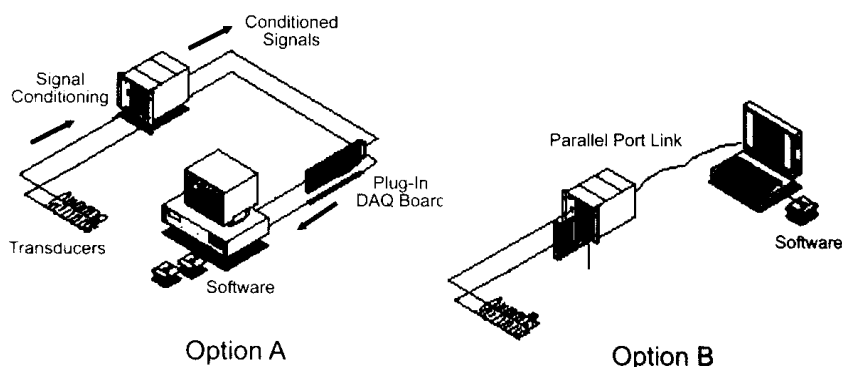
LabView 是一種革命性的圖控程式編輯發展環境，它是以 G 程式編輯語言為基礎來進行資料擷取和控制、資料分析以及資料展現。LabView 讓您擁有功能強大之程式編輯語言的應用彈性，而且使用非常簡便。您可以使用 LabView 控制您的系統，並且利用互動式的圖形人機介面來展現您的成果。LabView 也適用於多種平台，可以搭配 Windows NT/98/3.1、Mac OS、Sun、HP-UX 以及 Concurrent PowerMAX 來使用。您可以從數千個裝置中擷取資料，包括 GPIB、VXI、PXITM、串列裝置、PLC，以及插入式資料擷取(DAQ)介面卡。

LabView 的 DAQ 擷取函式庫，包含可控制 NI(National Instruments)DAQ 介面卡的 VIs。這張卡附有許多功能，例如類比/數位(A/D)轉換、數位/類比(D/A)轉換、數位/輸入輸出(I/O)、及技術或計時等功能。而每一張介面卡皆可提供不同的資料擷取和產生訊號的速度。而 DAQ 介面卡都被設計成為應用介面，可在特定的硬體平台的作業系統之下，所有型號的 DAQ 介面卡及公用，都可以參閱 NI 的目錄。

DAQ 系統的基本任務，就是測量與產生真實世界裡的物理訊號。因此在電腦系統量測物理訊號前，感測器或轉換器必須將物理訊號，轉換成電壓或電流的訊號。通常，DAQ 介面卡可視為整個 DAQ 系統，但 DAQ 介面卡也只能算是整個系統的一部分。不如大多數的儀器，有時候是不能直接將訊號連結到 DAQ 介面卡上。在 DAQ 介面卡轉換訊號成數位資訊前，必先確定訊號無誤時，才能由軟體控制 DAQ 系統-擷取原始資料、分析資料與顯示結果。



II. 相關知識



圖一 資料擷取系統

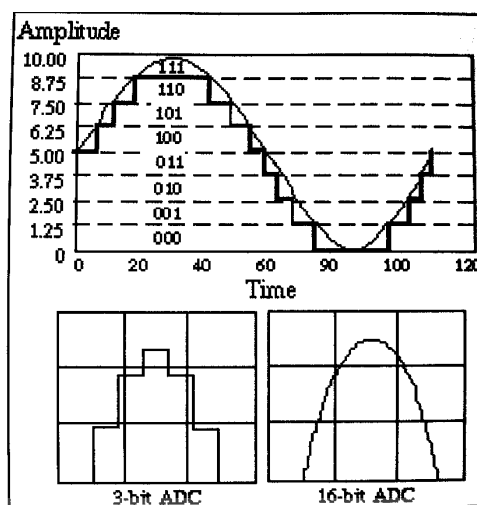
在圖一中，表示為 DAQ 系統的兩大功能。在功能 A 的部分，是將 DAQ 介面卡插在電腦中，此類型的電腦是以桌上型電腦為主，或是以 PCMCIA 插槽的筆記型電腦為主。而在功能 B 的部分，DAQ 介面卡可透過電腦外部建立 DAQ 系統，即使電腦沒有 Plug-in 的插槽。在電腦與 DAQ 模組的溝通方面，亦可透過不同的排線連結，例如使用並列埠或串列埠的方式。以下為幾個專有名詞介紹。

Analog Input 是在使用 DAQ 介面卡測量類比訊號時，必須考慮下列會影響到數位訊號品質的因素種類，如訊號的解析度、範圍、取樣率、正確性和雜訊等因素。

Single Ended 所指的是所有共同接地的參考點。在使用這些輸入點當輸

入訊號則有 High Level(大於 1v)，從訊號源到類比輸入硬體的導線是短的(<15ft)，可讓所有的輸入訊號分享共地參考點。如果訊號無法輸入，對每一個輸入都會有自己的參考點。而 Differential 輸入的方式，也會降低與減少雜訊，因此共模雜訊會被消除掉。

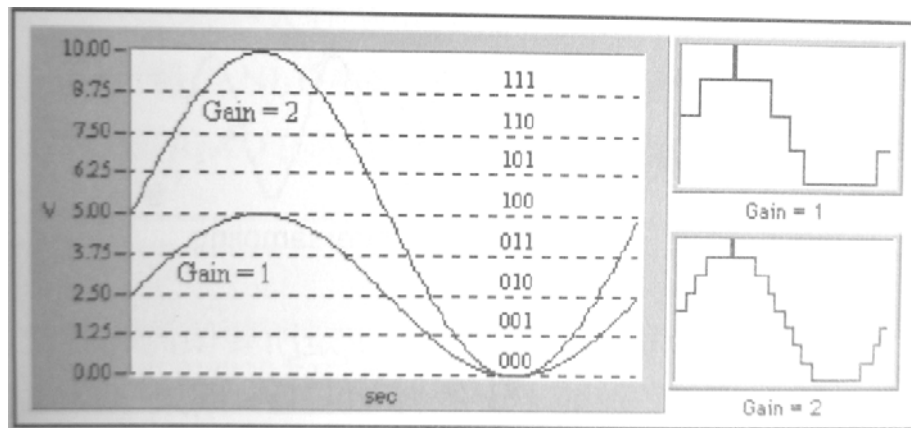
Resolution(解析度)是類比轉換數位的位元數目，可表示成類比訊號。高解析是中斷的範圍被分離的數目，可偵測出在較小的電壓變化。如圖三所示，一個正弦波對應 3-bit ADC 所產生的數位圖像，經由 3-bit 轉換器分解出 2^3 或 8 個片段。再由二進位碼的 000 到 111 之間表示出每個片段。很顯然在數位訊號是無法完全表示出原始訊號，因為在轉換時訊號已經有些損失產生。若能將訊號的解析度提升到 16-bit 時，便可以將類比訊號正確的表示出來。



圖二 正弦波對應 3-bit ADC 圖

Range 代表 ADC 在量化之後，最小和最大電壓的等級，DAQ 介面卡提供選擇的範圍，是在 0 to 10v 或 0 to -10v 之間，所以可配合訊號跟 ADC 的範圍，獲得最好的解析度變化，及測量到正確的訊號。

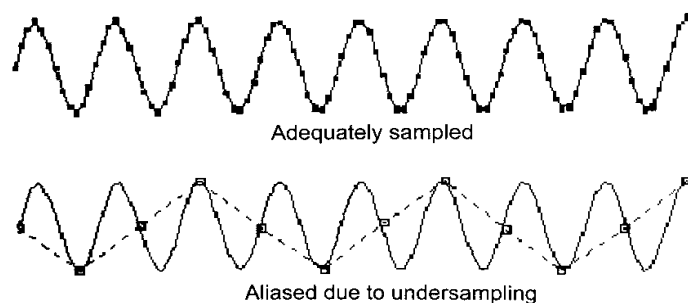
Gain 代表任何訊號的振幅與衰減，顯示訊號數位化之前的訊號增益，可以有效的減少 ADC 輸入的範圍，並允許 ADC 使用在各類型的數位分析上。例如，使用 3-bit ADC 且範圍在 0 到 10v，圖四顯示增益對訊號的影響，訊號會從 0 到 5v 之間波動。若沒有增益作用或增益=1 時，ADC 只使用 8 個片段中的 4 個。將其放大增益為之原來的兩倍，此時 ADC 所使用的 8 個片段，便會將數位表示的更正確。實際上，DAQ 介面卡只提供輸入範圍在 0 到 5v 之間，因為任何訊號若超過 5v 時，在放大兩倍後，會使得輸入對 ADC 大於 10v。



圖三 增益對訊號的影響

在 DAQ 介面卡上的範圍、解析度、和增益變化，可決定輸入電壓最小可偵測的變化範圍。而這個電壓的變化表示數位數值的Least Significant Bit(LSB)，並且它常被稱作為 Code Width。最小可偵測的變化稱作為電壓範圍(Range)/(增益(Gain))*2 resolution in bus)。

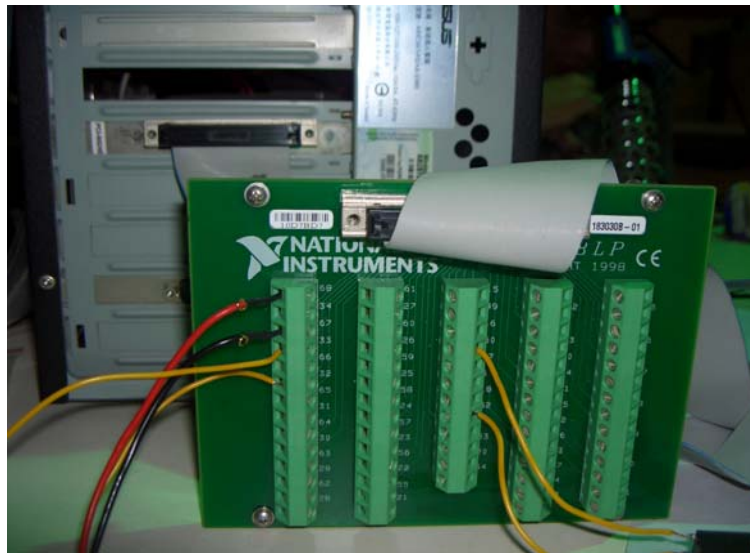
Sampling Rate 決定 A/D 轉換發生的速率。快的取樣率會獲得較多的點，比慢的取樣率在相同時間上對原始訊號比較，可獲得較佳的表現。所有輸入訊號，必須要有足夠的取樣率，才能夠準確地重現類比訊號，取樣的過程太慢，會使類比訊號獲得較差的表現。圖五所示在一組經過適當取樣後的訊號，其採樣後的結果，訊號所呈現的稱作為 Alias，會發生在訊號經由不同頻率採樣的結果。



圖四 訊號採樣結果圖

根據 Nyquist 取樣原理，所取樣的頻率至少是所要偵測的數位訊號頻率的兩倍。例如音頻訊號轉換成電訊號頻率大約為 20kHz，所以 AD 卡的取樣率必須大於 40kHz。在其他方面，溫度轉換器則不需要太高的取樣率，因為溫度換能器，在變化量上不會太快速，所以使用低取樣率的 AQ 卡就能夠擷取溫度的訊號。

圖五及圖六為本專題之 DAQ 卡與電腦連結之圖解說明

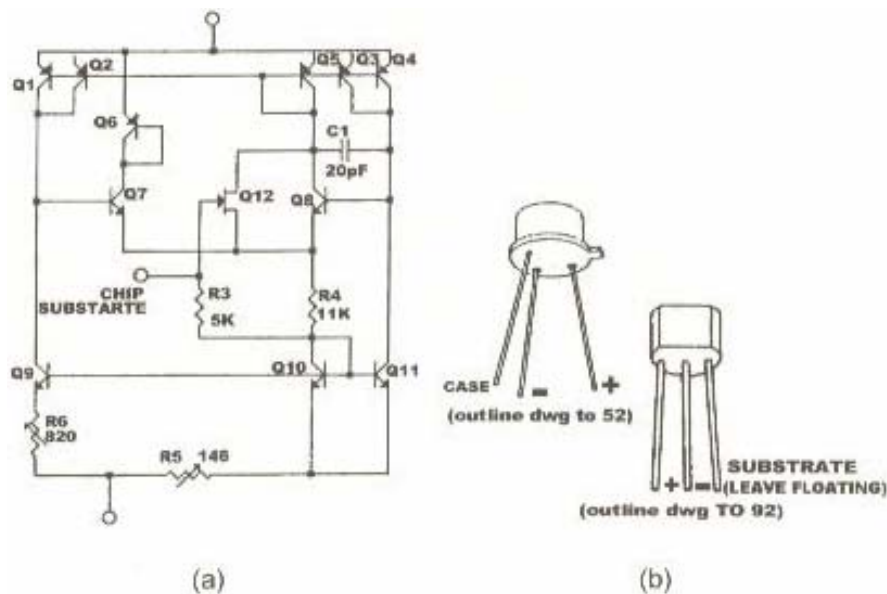


圖五 DAQ 卡與電腦接線圖(DAQ 為主)



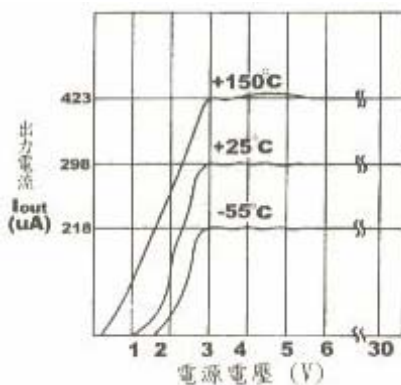
圖六 DAQ 卡與電腦接線圖(電腦接線為主)

AD590 為 Analog Devices 公司出品的一種雙端溫度轉換電流源的單晶 IC。圖七為 AD590 內部的線路結構，及其兩種常用的包裝。



圖七 AD590 電路及包裝圖

AD590 與其它溫度感測器比較，最主要有下列幾點特性：1.線性電流源輸出：其轉換率為 $1\mu\text{A}/^\circ\text{K}$ 。2.有寬廣的測溫範圍： $-55^\circ\text{C}\sim 150^\circ\text{C}$ 。3.體積小：僅有兩端子，配線容易，電壓輸入/電流輸出。4.準確度極高。5.使用的電壓範圍彈性大： $+4\text{v}\sim 30\text{v}$ ，輸出特性不會變化，如圖九所示：

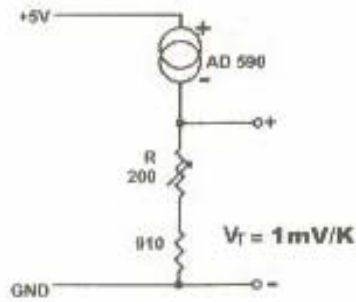


圖八 電源電壓與電流比圖

AD590 有一個準確的線性電流輸出，其轉換率為 $1\mu\text{A}/^\circ\text{K}$ ，容易使用，不需要使用電橋電路，且因其輸出為電流，故可使用很長的導線也不會引起電壓降而產生誤差。同時其輸出電流的大小與溫度有關，而與操作電壓($4\text{v}\sim 30\text{v}$)無關，適於長距離溫度偵測。

由於 AD590 輸出信號為 $1\mu\text{A}/^\circ\text{K}$ 電流，如欲轉換成電壓輸出，只須與 $1\text{K}\Omega$ 之負載電阻串聯即可，由 $V=I*R$ 原理，得到 $1\text{mV}/^\circ\text{K}$ 之電壓輸出。圖九所示，為一常用的 AD590 溫度-電壓轉換電路。由於 $1\text{K}\Omega$ 阻值必須很準確，否則會造成誤差，故可使用 910Ω 固定電阻與 200Ω 半固定電阻串聯成準確的 $1\text{K}\Omega$ 電阻。圖十輸出電壓轉換率為：

$$V_T = I * R = 1\mu\text{A}/^\circ\text{K} * 1\text{K}\Omega = 1\text{mV}/^\circ\text{K}$$

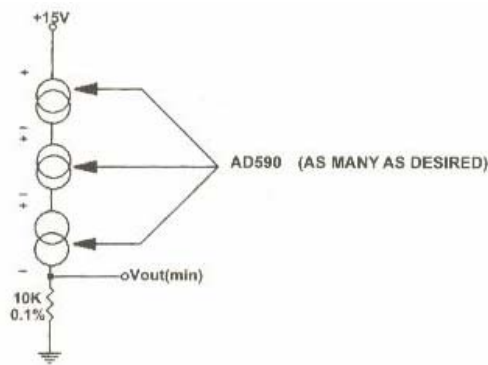


圖九 溫度-電壓轉換電路圖

AD590 可經由適當電路安排。做各種不同功能的溫度測量與控制，下列是幾種 AD590 常使用的電路。

1. 最低溫度測量

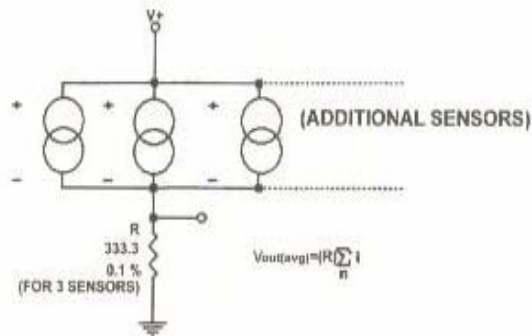
將數個 AD590 安裝在不同的測溫處，而成圖十所示之串聯型式，即可測出各測試溫度中溫度最低者。因各 AD590 的測試溫度不一樣，但因輸出電流受串聯的限制，其迴路電流為測試溫度最低者之電流值，若再經 10KΩ 之負載電阻，可轉換為電壓輸出。



圖十 最低溫度測量圖

2. 平均溫度測量

若將數個 AD590 並聯，如圖十一所示，則通過負載電阻之電流，為各 AD590 輸出電流之和，若選擇的負載電阻為只有一個 AD590 負載電阻的 1/N 倍 (N: AD590 數目)，則在負載電阻所得到電壓即代表其平均溫度。

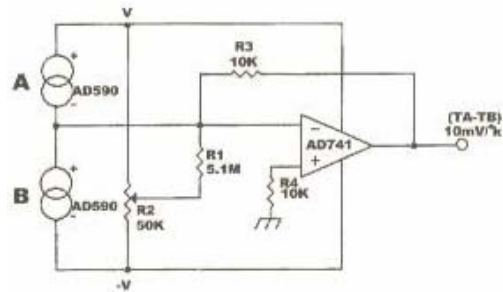


圖十一 最高溫度測量圖



3.溫度差測量

欲測 A 與 B 兩點間之溫度差時，可用兩個 AD590 接成如圖十二所示之電路。A 與 B 之 AD590 電流之差，通過電阻 R3 使得 IC741 之輸出電壓轉換率為 10mV/°C 之溫度差。而可變電阻 R2 主要的功用是調整當 A 與 B 的溫度相同時，IC741 的輸出為 0。

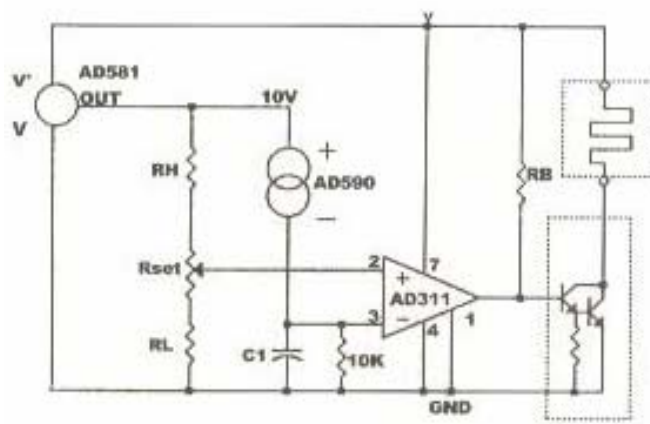


$$\begin{aligned}
 V_0 &= -(I_B - I_A)R_3 \\
 &= -(T_B \times 1\mu A/^\circ K - T_A \times 1\mu A/^\circ K) \times 10K\Omega \\
 &= (T_A - T_B) \times 1\mu A/^\circ K \times 10K\Omega \\
 &= (T_A - T_B) \times 10mV/^\circ K
 \end{aligned}$$

圖十二 溫度差測量圖

4.溫度控制器

圖十三是使用 AD590 做成的可設定溫度控制器。AD581 提供 10v 的參考電壓，與 RH，REST，RL 組成溫度設定電路，改變 REST 可改變 AD311 比較器之非反向輸入端電壓 (V+)。AD590 為溫度感測器，安裝於待測環境中，AD590 電流流經 10KΩ 電阻，產生 10mV/°k 電壓，進入 AD311 比較器反相輸入端 (V-)。當 AD590 測得之溫度電壓低於 REST 設定的溫度電壓數值時，AD311 輸出為高電壓，使電晶體導通，加熱器加熱，使得環境溫度升高，直到 AD590 感應的溫度超過由 REST 設定的溫度，加熱器被關閉，當溫度下降低至設定溫度時，加熱器再被打開。而 C1 的功能是濾除高頻雜訊的干擾。



圖十三 溫度控制器圖

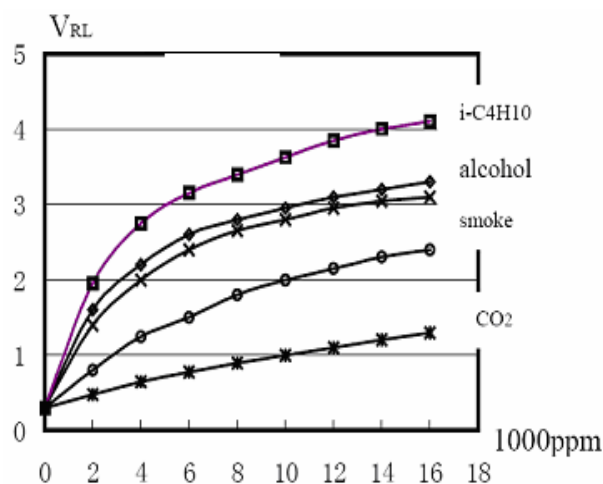
CO₂ 感測器特性如下：(一)特性：1.穩定時間長。2.感測範圍寬廣。(二)應用之範圍：1.家庭、工廠用。2.適用於感測煙味、SO₂、CO₂、異丁烷及酒精…等等。(三)特性如表一。

表一 標準工作規範表

符號	參數名稱	環境條件	備註
V _c	Circuit Voltage	5v	AC 或 DC
V _H	Heating Voltage	5v	AC 或 DC
PL	Load Resistance	可調	Ps
PH	Heater Resistance	33Ω ±5%	Room temp.
RH	Heating Consumption	Less than 800mw	

(四)以下為空氣感測器 HS-135 特性曲線

圖十四為在溫度：20°C、濕度：65%RH、氧氣濃度 21%、RL=5kΩ 的情況下，對酒精、煙、二氧化碳與 i-C₄H₁₀ 之電壓與空氣指數曲線圖。



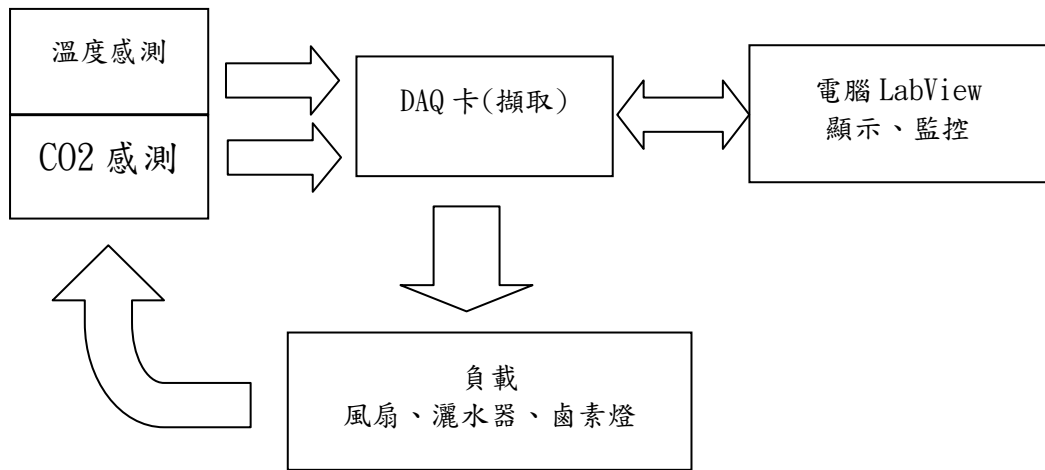
圖十四 電壓、空氣指數曲線圖

III.系統介紹及成果

本研究特色主要是使用 LabView 此軟體來控制我們所想要的動作，在圖十五中，由方塊圖可知動作走向，經由電腦去控制四大部分：風扇運轉、空氣偵測、溫度偵測及燈光控制。從功能方面來看，我們從外在溫度及空氣所偵測到的數值，透過 DAQ 卡去擷取，再傳送到電腦去顯示，如果超過所限定的範圍，則再從電腦透過 DAQ 卡去控制負載來調整，使偵測到的值在指定之範圍內。

圖十五為本技術之動作流程圖，主要為從外在溫度及空氣所偵測到的資料，透過 DAQ 卡去擷取，再傳送到電腦去顯示、監控，如果超過所限定的範圍，則再從電腦透過 DAQ 卡去控制負載來調整，使其偵測之數據在指定範圍內。



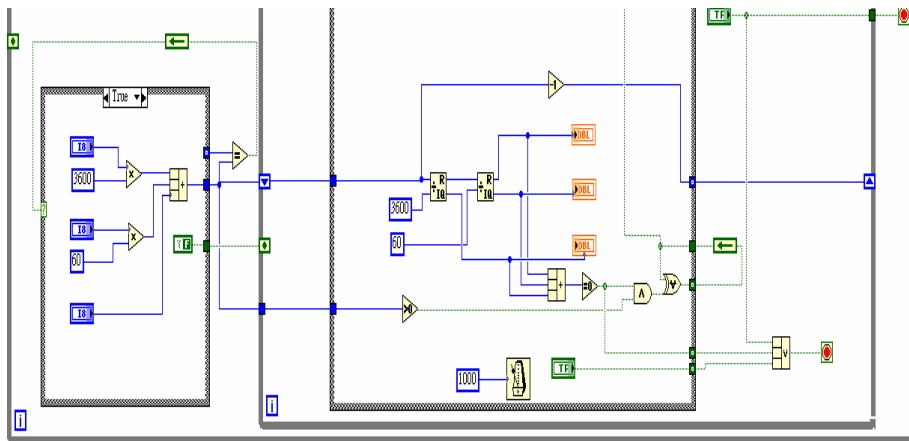


圖十五 產品動作流程圖

本技術研發後，有以下六點特色與功能：一、利用定時自動給水系統來維持清淨箱所需溼度及溫度。二、利用風扇及鹵素燈泡來維持清淨箱所需之溫度。三、利用 LabView 軟體，由電腦給予即時控制。四、預留許多擴充插槽，只要買清淨箱即可擴充。五、有手動模式和自動模式可隨時切換。六、面板可顯示目前空氣污濁程度(二氧化碳)。

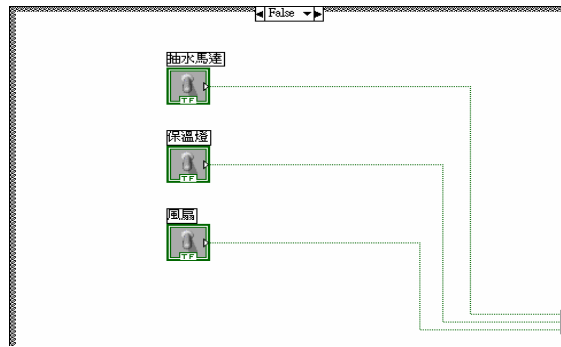
在軟體規劃上可分為：灑水計時、手動控制、資料擷取及電路比較等四個區塊。

一、灑水計時方面，在人機介面輸入每隔多久的時間灑水之後，經由暫存器倒數，並在人機介面顯示剩餘時間，當倒數至零時，啟動抽水幫浦灑水 5 分鐘，以此循環，圖十六為灑水計時程式圖。



圖十六 灑水計時程式圖

二、手動控制面板可以在不受限制條件下進行風扇、抽水幫浦及加溫燈的控制如圖十七所示。



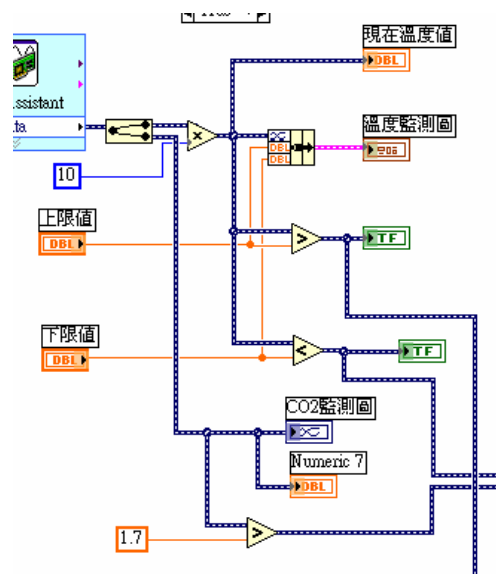
圖十七 手動控制程式圖

三、資料擷取部分是將感測訊號透過 DAQ 卡(PCI-6024E)輸入進電腦，經由 DAQ Assistant 設定通道後，再由 Split Signals 將感測訊號分開後，供後續程式使用，圖十八為資料擷取 DAQ Assistant 函數。



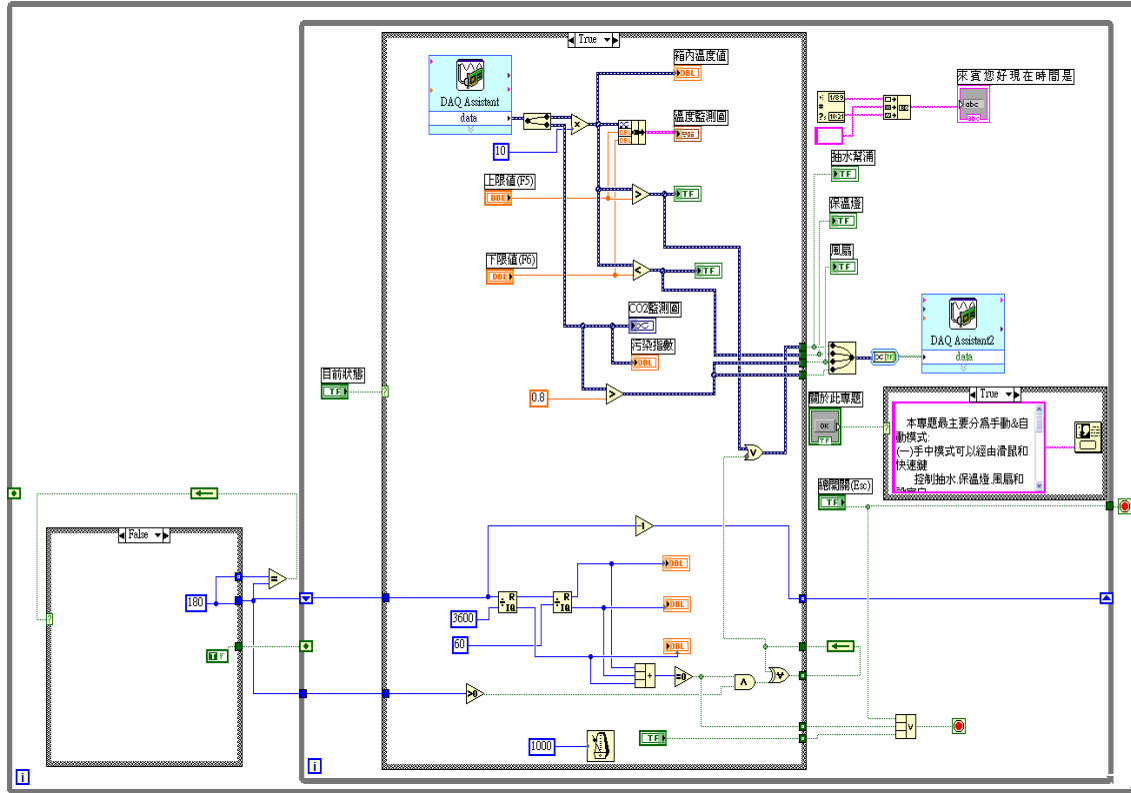
圖十八 資料擷取 DAQ Assistant 函數

四、電路比較主要是將資料擷取到的溫度及 CO2 資料作處理，在溫度方面，當溫度高於人機介面設定值時，灑水幫浦啟動，若溫度低於設定值時，加溫燈即會啟動。而在 CO2 方面，平時 CO2 感測電壓約為 0.4v 左右，當空氣污濁使感測器電壓高於 0.8v 時，風扇會加速運轉，圖十九為資料比較處理程式圖。



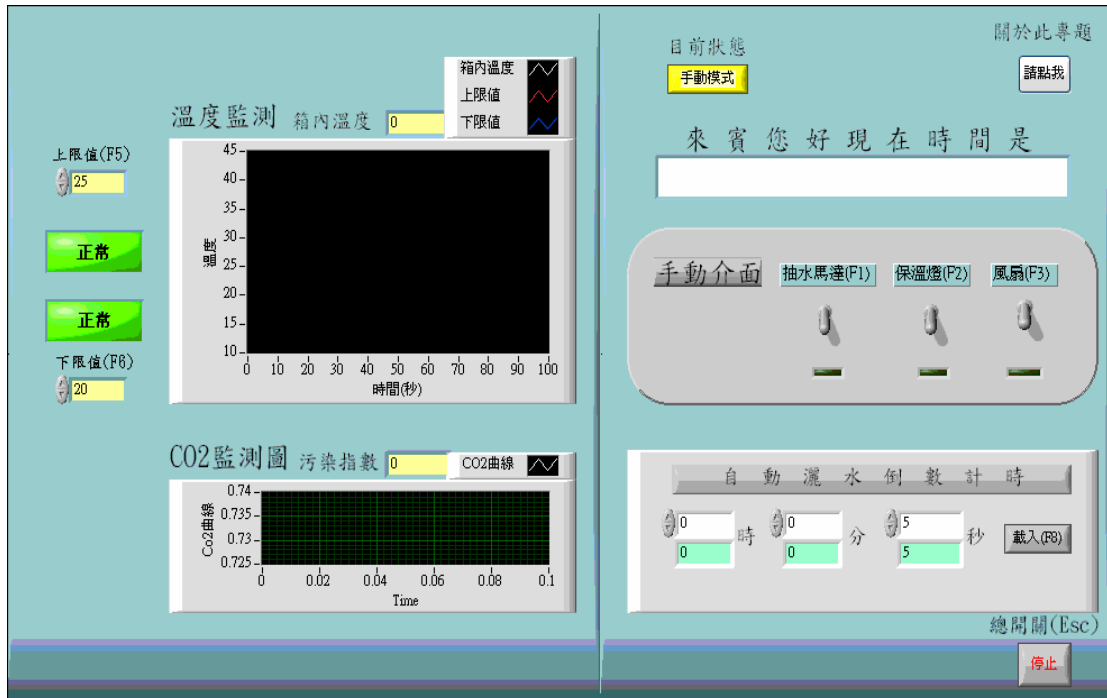
圖十九 資料比較處理程式圖

圖二十為利用 LABVIEW 設計之整體控程式圖。



圖二十 監控程式圖

圖二十一為人機介面配置圖。



圖二十一 人機介面配置圖

在外部電路配置上，因為擷取的資料有送至 DAQ 及從電腦傳至 DAQ，所以表二為 DAQ 卡輸入與輸出接點之分類表，由此可知各接點之接腳。

表二 DAQ 輸入、輸出接點表

	輸入腳	輸出腳
AD590 溫度感測	67、68	
HS-135(CO2 感測)	32、33	
風扇		49
LIGHT(加溫)		17
幫浦		49
共同接地端		50

以下是兩表之實驗結果是針對電路板所做的電路測試，有溫度及空氣之測試，為時間與所感測到之數據之比，如表三及表四所示：

表三 時間與溫度之比表

實際對照 經過時間	AD590(°C)	實際溫度(°C)
1 小時	25.3	24.9
2 小時	25.4	24.8
3 小時	25.4	25.0

表四 時間與空氣指數之比表

感測元件 經過時間	HS-135 Air pollution sensor(V)
1 小時	0.43
2 小時	0.47
3 小時	1.02(以嘴呼氣測試)

圖二十二為產品展示圖。



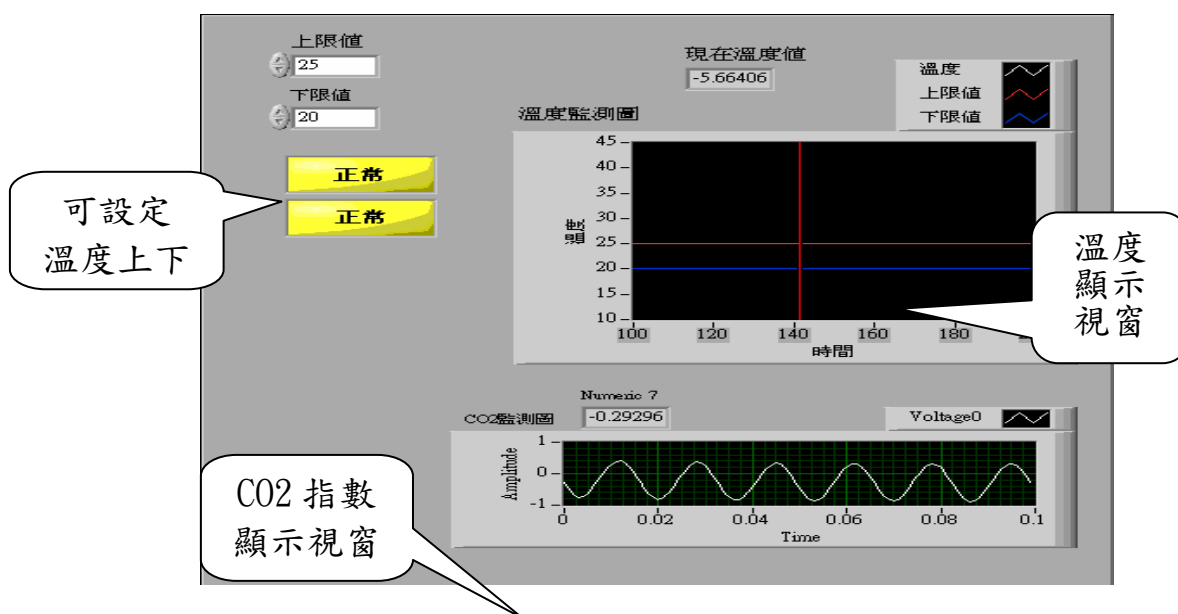


圖二十二 產品展示

IV. 此監控系統之操作說明

一、顯示部分

圖二十三為人機介面及時控監顯示部分，此區可以監控溫度及 CO2 的及時情況。首先可以先設置溫度上下限，一旦偵測到的數值超過預定設定值時，黃燈會變成紅燈顯示。而溫度和空氣指數也即時在顯示視窗顯示出來。



圖二十三 及時控監展示

二、手動控制部分

在這一部份，我們可以藉由圖二十五所知，面板可顯示時間、切換自手動開關和設備開關及抽水設施。

(一)手動開關 ON：

使用者可以隨意打開抽水馬達、保溫燈、風扇，而起動時，會顯示在面板上，燈也會亮起。

(二)手動開關 OFF：

即為自動控制，當數值超過額定值時，保溫燈、風扇自動開啟，面板上只有燈會顯示，面板上的開關不會顯示。

(三)STOP：為全部動作停止。

(四)灑水時間可以設定在何時灑水，設定時間到的時候，即動作。

而預定灑水時間為 5 分鐘。

圖二十四為人機介面手動控制圖。



圖二十四 人機介面手動控制圖

注意事項

本空氣清淨箱之有效範圍為一定大小之空間，並對其周遭的空氣進行改善及偵測。
本空氣清淨箱之標準操作環境為室內及人口出入頻繁的空間。
本空氣清淨箱可因時因地而設定為自動、半自動或人工控制。

V. 結論

本研究之監控技術可以達到下列三點特性：一、能夠即時偵測戶外的空氣污濁程度。二、可利用 LabView 軟體，由電腦給予即時空氣清淨化控制。三、可於清淨箱內種植植物，可以美觀我們的環境，也達到環境保護的作用。本技術使用 LabView 軟體做出人機介面，來控制清淨箱之動作。但在未來，希望能結合各項器材，同步達成空氣清淨的效果，目前市面上也只有單一清淨機或是結合冷氣的負離子效果來達到清淨空氣的效果，此方向可以做為是未來改善此系統之研究目標。



參考文獻

- 陳福春(2004)。感測與轉換器。出版地：高立圖書。
- 惠汝生(2006)。圖控程式應用。出版地：全華圖書。
- 鐘國家、謝勝治(2005)。感測器原理與應用實習。出版地：全華圖書。
- National Instruments LabVIEW 7.1 使用手冊
- 蕭子健, 王智昱, 儲昭偉(2006)。虛擬儀控設計 LabVIEW 7X。
- 惠汝生(2006)。自動量測系統 – LabVIEW, 全華書局。
- National Instrument 軟體使用手冊-Getting Started with LabVIEW。
- National Instrument – DAQ Getting Started Guide。
- 謝勝治, 陳璋琪(2006)。LabVIEW 應用篇: 含自動控制和遠端監控, 全華。
- 惠汝生(2006)。Labview 8.X 圖控程式應用, 全華。
- 劉建昇, 游濬, 張信豪(2006)。數位信號處理-Labview&生醫信號, 宏友圖書。
- 廖炳松(2006)。Labview 介面控制實習, 全華。
- 微電腦自動感測實驗器, KL-620 實驗手冊。出版地：掌宇公司。
- http://bse.nchu.edu.tw/new_page_177.htm：溫室灌溉自動控制。
- <http://agriauto.bime.ntu.edu.tw/agrijournal>：農業自動化。
- <http://chukuang.tacocity.com.tw/index/main.htm>：設備篇。
- <http://agriauto.ame.ntu.edu.tw/Result/agric.htm>：農業自動化。
- <http://www.ni.com/>: National Instruments
- Liao, C.M., Chen, J.S, Chen, J.W. 2000. Dynamic model for predicting dust-borne odour concentrations in ventilated animal housing. Applied Mathematical Modelling 24, 131-145.
- Liao, C.M., Chen, J.W., Huang, M.Y., Chen, J.S., Chang. T.J. 2001. An inhalation dose model for assessing dust-borne VOC-odor exposure from feeding in swine buildings. Transactions of the ASAE 44, 1813-1824.
- Liao, C.M., Chiu, K.H. 2002. Wind tunnel modeling the system performance of alternative evaporative cooling pads in Taiwan region. Building and Environment 37, 177-187.
- Liao, C.M., Huang, M.Y., Chen, J.W., Chang, T.J. 2002. Removal dynamics of airborne road dust in a ventilated airspace. Journal of Environmental Science and Health A 37, 1009-1027.

