



勞工安全衛生研究報告

微壓差訊號產生方法與應用探討

**Generation and Application of
Low Differential Pressure Signals**



微壓差訊號產生方法與應用探討
IOSH98-H305

行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所



行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所

行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所

微壓差訊號產生方法與應用探討

Generation and Application of Low Differential Pressure Signals

行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所

微壓差訊號產生方法與應用探討

Generation and Application of Low Differential Pressure Signals

研究主持人：王順志

計畫主辦單位：行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所

研究期間：中華民國 98 年 02 月 01 日至 98 年 12 月 30 日

行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所
中華民國 99 年 02 月

摘要

微壓差計價格低廉、用途廣泛，是工業通風設備、各種精密科技製程設備的重要監測元件，可用於連續監測並反饋特定空間、通風導管斷面、機台內部相對於指定參考狀態的微小氣壓差異，具體應用案例包括監測有機溶劑作業氣罩包圍體的負壓、監測醫院手術房各附屬空間的氣壓梯度、監測半導體無塵室的正壓等。微壓差計容易受損，其性能深受環境氣壓變動影響，大約每隔 6 個月，或遭逢強烈颱風等氣壓劇烈變動的意外事故後，已安裝使用的微壓差計就必須實施校正。在過去，微壓差計校正方法被視為技術機密，不但相關研究文獻極少，國內有能力校正微壓差計的專業機構也不多，為此校正服務不易取得且費用偏高，事業單位為了節省經營成本，因而傾向於延長使用未定期校正的微壓差計，使工業通風設備的性能監測數據不能正確反映設備實際性能。

由於微壓差計準確與否對工業通風設備監測結果的正確性有重要意義，本計畫以 0-1500Pa 的常用微壓差訊號為標的，成功發展出低成本的微壓差計校正方法，並配合前述校正方法，設計製造「結構簡單、價格低廉、能產生穩定正負微壓差訊號」的微壓差訊號產生裝置。除此之外，本計畫也推導出前述校正方法與裝置的原理，並於國內外研討會發表多篇論文，最後將研發完成的微壓差訊號產生裝置實際應用於全國數個醫院的負壓隔離區，以印證本計畫研究結果的工業應用潛力。

關鍵詞：微壓差、校正、工業通風

Abstract

Differential Pressure Transmitter (DPT) stands for a wide category of inexpensive, multi-purposed industrial ventilation sensors used to monitor and feed back pressure difference of air across target space and reference space. For example, a DPT can be deployed to monitor negative pressurization inside an exhaust hood enclosure to control emission of airborne volatile organic compounds. In another example, a DPT can be installed inside a hospital operation room to make sure it is positively pressurized. While a DPT is often an inexpensive and fragile sensor, performance of a DPT can be deteriorated by accidental overload of pressure signals, such as a violent typhoon. To maintain accuracy of a constant-working DPT sensor, calibration should be done at least 2 times per year. Scientific papers and technical reports associated with methods for DPT calibration could rarely be seen in past decades, since they were kept secret by government to make sure technological predominance over competing countries. In consequence of that, there are only several local professional organizations giving reliable DPT calibration, and this fact explains why calibration charge of a DPT is so expensive and inconvenient to procure. To minimize maintenance cost of industrial ventilation facilities, users of DPTs tend to prolong calibration period, resulting low accuracy and poor performance of an average DPT.

Performance of DPTs is important for reliable monitoring result of an industrial ventilation facility. In this project, a new on-site calibration method for DPTs has been developed within the range 0-1500Pa, as well as an easy-to-make, inexpensive device, by which stable differential pressure signals can be produced. Verification experiments for hospital negatively pressurized isolation wards have been conducted to demonstrate the potential of future industrial applications, and the results have been interpreted as several scientific conference papers.

Key Words: low differential pressure, calibration, industrial ventilation.

目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
目錄.....	iii
圖目錄.....	v
表目錄.....	vii
第一章 計畫概述.....	1
第一節 本計畫簡介.....	1
第二節 計畫緣起.....	1
第三節 計畫目的.....	2
第四節 計畫架構與工作項目.....	3
第二章 技術回顧.....	5
第一節 本章重點提要.....	5
第二節 微壓差計應用簡介與分類.....	5
第三節 水柱型微壓差計量測原理比較.....	10
第四節 儀表型微壓差計量測原理比較.....	14
第五節 微壓差計校正原理與現況.....	16
第六節 以微壓差訊號產生器為基礎的校正方案.....	19
第三章 微壓差訊號產生器工作原理.....	21
第一節 本章重點提要.....	21
第二節 單腔式微壓差訊號產生器之原理.....	21
第三節 單腔式微壓差訊號產生器之特性實驗.....	24
第四節 雙腔式微壓差訊號產生器的工作原理.....	29
第五節 本章總結.....	38
第四章 輔助物理量的估計.....	39
第一節 本章重點說明.....	39
第二節 重力加速度的精密計算.....	39

第三節 大氣溫度、壓力與密度變動的影響模型.....	41
第四節 純水密度的精密計算.....	44
第五章 微壓差訊號的品質改良.....	47
第一節 前言.....	47
第二節 右水箱垂直位移調整機構的改良.....	47
第三節 考慮器材對環境氣溫變動的容忍能力.....	52
第四節 改良案例.....	54
第六章 結論.....	56
誌謝.....	57
參考文獻.....	58
附錄一 單腔式微壓差訊號產生器之建議應用方案.....	59
附錄二 雙腔式微壓差訊號產生器之建議應用方案.....	61

圖目錄

圖 1	微壓差計用於導管風量量測之安裝使用案例	7
圖 2	微壓差計分類概要	7
圖 3	常見的儀表型微壓差計（左：類比機械式，右：數位電子式）	7
圖 4	微壓差傳送器於本所的研發應用案例：排氣櫃開口風速控制系統	8
圖 5	U 形水柱計量測原理示意圖	9
圖 6	本所研發的線性可變傾角水柱計（用於量測蝴蝶風門靜壓損失）	9
圖 7	某廠牌虎克水柱計之量測原理示意	10
圖 8	具訊號過載自動保護功能的非線性傾斜水柱計	10
圖 9	普通 U 形水柱計之量測原理	12
圖 10	普通傾斜式水柱計之量測原理	12
圖 11	不等斷面 U 形水柱計之量測原理	13
圖 12	具過載保護功能的非線性傾斜水柱計量測原理	14
圖 13	機械式微壓差計核心元件工作原理舉例	15
圖 14	電子式微壓差計核心元件工作原理舉例	15
圖 15	以比較法實施微壓差計次級校正之並聯方式	16
圖 16	氣囊式與薄膜式微壓差訊號產生器原理舉例	17
圖 17	單腔式微壓差訊號產生器之原理	22
圖 18	單腔式微壓差訊號產生器最惡劣條件實作案例	24
圖 19	小型單腔式微壓差訊號產生器性能測試結果	28
圖 20	小型單腔式微壓差訊號產生器於 18 分鐘內的典型訊號波動	28
圖 21	利用小型單腔式微壓差訊號產生器實施微壓差計二次校正	29
圖 22	雙腔式微壓差訊號產生器原理	30
圖 23	雙腔式微壓差訊號產生器實驗器材組成	34
圖 24	雙腔式微壓差訊號產生器測試數據(眾數)與理論值對照	36
圖 25	雙腔式微壓差訊號產生器 1000 筆訊號（18 分鐘）實測統計結果	37
圖 26	由嘉義氣象站的天候觀測數據觀察氣壓與氣溫的變動趨勢	42
圖 27	由 3 座氣象站的長期天候觀測數據演算的大氣溫壓函數	43
圖 28	最早期使用剪形升降台與鋼尺製作的垂直位移調整機構	47

圖 29 利用 UNICE 06VTS-1M 垂直式移動平臺為垂直位移調整機構	48
圖 30 本計畫自行設計之新型垂直位移調整機構	49
圖 31 本所自行研發之新型垂直位移調整機構細部照片	51
圖 32 嘉義冬季晴天典型的 24 小時氣溫、氣壓、相對溼度變化	53
圖 33 本節改良實例版雙腔式微壓訊號產生器運作實況	54
圖 34 雙腔式微壓訊號產生器典型的訊號輸出實況	55

表目錄

表 1 小型單腔式微壓差訊號產生器性能測試結果	18
表 2 小型單腔式微壓差訊號產生器性能測試結果	27
表 3 三個參數之間的關係與儀器讀值允許誤差	34
表 4 微壓差訊號實驗數據與理論值對照結果	35
表 5 水密度與溫度的關係	45
表 6 純水密度速查表（適用溫度範圍 10-35°C）	46

第一章 計畫概述

第一節 本計畫簡介

微壓差計的工業用途廣泛，在臺灣地區的安裝使用數量有逐年遞增的趨勢。微壓差計能解讀皮托管動壓訊號、解讀風量量測元件的壓差訊號、量測呼吸道傳染隔離病房的負壓、量測燒燙傷病房與手術室的正壓，近年來更大量安裝於生技醫療、半導體與電子產業廠房的各種精密製程設備，或由工廠採購手持式微壓差量測儀器，以便隨時量測目的空間與參考空間之間的微小氣壓差異。

微壓差計的構造精密脆弱，性能容易受瞬間環境氣壓波動（例如颱風）或不當使用習慣的影響，故須適時實施校正。然而微壓差計的量測範圍極小，可信賴的微壓差計校正服務不易取得（須長時間排隊接受校正並負擔高額的校正服務費），自拆卸送檢到重新安裝使用的過程中容易使微壓差計碰損或降低性能，使安裝使用微壓差計的事業單位深感困擾。

為了解決問題，本計畫以 0-1500Pa 的微壓差訊號為標的，成功研發一套結構簡單、製造容易、價格低廉、操作簡便的微壓差訊號產生器，能在一般室內環境使用。為了完善技術配套措施，本計畫也針對前述的微壓差訊號產生器規劃了一種微壓差計標準校正方法，可由經過訓練的技術人員攜帶器材至工作場所實施快速的現場校正。除此之外，本計畫於執行期間發表了 1 篇國際研討會論文、3 篇國內研討會論文，由於研究成果數量較多，直到本文件出版之前仍在整理中，預期將配合專利申請與技術手冊出版期程，於民國 99-103 年陸續發表。

第二節 計畫緣起

許多工業通風實驗儀器必須搭配微壓差計一起使用，才能得到擬測定的物理

量。本計畫研究人員於 97 年進行此類工業通風實驗時，偶然發現利用托理切利原理製作的剛性容器，只要將定量的水注入其中，就可暫時充當微壓差訊號產生器使用。爲了確認微壓差訊號的品質，研究人員依物理學、熱力學、流體力學原理，推導了一組微壓差數值理論預測公式，然後再進行長時間的初步觀測實驗，以了解理論公式預測的微壓差數值能否與實驗數據相互吻合，並觀察微壓差訊號是否能維持穩定。

前述的實驗結果尚稱良好。研究人員發現在 0-1000Pa 的範圍內，可由手動調整剛性容器水位的方式產生與預期數值接近的微壓差訊號，且在 18 分鐘（每秒取讀值 1 次，連續取 1000 筆讀值）的時間範圍內，微壓差訊號的變動範圍均在 $\pm 3\text{Pa}$ 以內。此外，長時間觀測蒐集所得的微壓差訊號模數值、平均值、理論值三者幾乎完全相同。這樣的結果說明了兩件事：

1. 我們有機會設計某種簡單容器，用以產生與理論推導結果相符的微壓差訊號。
2. 由於前述微壓差訊號的模數值、平均值、理論值相同，且訊號的大小始終在極小的範圍內反覆波動，我們可以合理推測這種微壓差訊號的出現既穩定且呈常態分佈，有機會利用這樣的器材作爲微壓差計的性能比對工具或校正工具。

雖然 $\pm 3\text{Pa}$ 的訊號變動範圍仍顯粗糙，但前述的先驅研究已具有相當的工業應用潛力。爲了吸引學者提供改善意見，研究人員於 97 年底參加中國機械工程學會第 25 屆全國學術研討會，以口頭報告論文的形式發表先驅研究成果[1]，並將與會專業人士回饋的意見融入整理，成爲本計畫的主要內容。

第三節 計畫目的

「穩定且可預測壓力大小」的微壓差訊號產生技術一向是執行工業通風相關實驗必備的基本技術。無論在實驗前檢查微壓差量測儀器的性能，或在技術研發過程中針對特定通風控制回路作性能模擬測試，都需要穩定可靠的微壓差訊號產生器作爲輔助工具。爲此，本計畫設定的第一個目的是研發至少一種成本低廉、性能可靠的微壓差訊號產生器，並提出微壓差訊號的預測公式，以供後續研究使用。

爲了解決國內微壓差計校正費用偏高且校正等候時間冗長的問題，本計畫設定的第二個目的是建立能搭配前述微壓差訊號產生器的低成本校正技術，讓已經安裝使用微壓差計（或微壓差傳送器）的國內事業單位建立自主校正能力，以確保包括工業通風設備在內的相關製程設備始終在嚴密且精確的監測下正常運轉，實現保障勞工呼吸健康、提高工業產品生產效率、確保生產環境品質等對我國產業有利的多重目的。

第四節 計畫架構與工作項目

本計畫以循序漸進的架構，完成了「由國人自行研發的、精確度合理的、便宜且容易建立的、可由事業單位自己執行的」微壓差計校正方法，並提出伴隨此方法的校正裝置設計方案，解決國內微壓差計校正費用偏高、校正服務不易取得的普遍問題。以下依執行順序簡介本計畫相關工作項目。

1. 蒐集資訊：採購國內外工業通風、微壓量測、儀器學、統計學等相關技術文獻，訪問公立儀器校正實驗室，瞭解目前國內微壓差計校正技術水準、校正方法原理與校正費用收取方式。
2. 理論推導：檢討過去的微壓差計量測原理與校正技術，推導微壓差訊號產生器的原理，建立數學模型，並提出若干微壓差訊號產生器的設計雛型。
3. 儀器整合：檢討各種設計雛型之應用原理與實驗需求，選定並校正相關儀器與感測器，隨後進口或就地訂製必要且製備耗時的關鍵零組件，以加速實驗準備速度。
4. 器材發包：完成各種微壓差訊號產生器的細部設計，將設計圖發包交由廠商製作實體模型，作為實驗裝置的一部分。
5. 實驗準備：組裝實驗裝置，採購耗材與小工具，聯繫設有負壓隔離區與微壓差計的醫院，約定現場測試作業時間。
6. 校正實驗：於實驗室中對微壓差訊號產生器的特性曲線與訊號精確度進行實驗分析，並嘗試建立標準校正方法。
7. 現場測試：依照與各醫院約定的作業時間，前往負壓隔離區，進行微壓差計校正器

材的現場測試，以了解微壓差訊號產生器的性能缺陷，並作細部修改。

8. 成果呈現：將細部修改完成的微壓差訊號產生器與其標準校正方法整理為成套的微壓差計校正解決方案。研究過程中隨時隨地整理既有成果，由本計畫研究人員參加各種研討會發表論文以徵求各界的反映與意見。
9. 後續工作：本計畫完成後，預期可於 99 年提出 1 項專利申請，完成本計畫期末報告與技術手冊，並陸續發表相關論文，深入推廣本計畫之研究成果。

第二章 技術回顧

第一節 本章重點提要

校正微壓差計之前，首先得認識各種微壓差計的特色。本章提供技術方面的基礎，以文字搭配圖片、照片與公式推導，說明微壓差計的功能與分類，並針對每一個微壓差計分類作深入的解說與剖析，最後說明國內微壓差計校正技術的現況。

第二節 微壓差計應用簡介與分類

隨著工業自動化與職業安全衛生科技的發展腳步，近十年來國內各行各業對微壓差計的需求與應用範圍顯著增加，已成為不可小覷的儀器與感測元件。無論作為工業通風量測儀器的微壓差計，或作為通風設備感測元件的微壓差傳送器，市售單價都已降低到各行業均能負擔的程度（新台幣數千元到數萬元不等）。換言之，或許過去的微壓差計曾經是「昂貴特殊元件」，但如今已成了普及的工業用品。微壓差計的廣義用途是監測特定空間相對於參考空間的氣壓差異為主，常見應用案例說明如下。

1. 相對負壓空間：應用於餐廳廚房、吸菸室、呼吸道傳染隔離病房、有機溶劑污染製程包圍體等，用以控制排風機的抽氣風量，維持室內負壓，確保異味物質或對健康有害的物質不至於對外逸散。安裝於此的微壓差計常用量測範圍約 0-20Pa。
2. 相對正壓空間：應用於半導體無塵室、配藥室、生技製程室、手術室等，用以控制潔淨空氣供應設備，維持室內正壓，確保室內空氣的潔淨度。安裝於此的微壓差計常用量測範圍約 0-50Pa。
3. 分級氣壓控制：應用於生物實驗室、原子實驗室、負壓隔離區等，用以監測一群相互比鄰之空間相對氣壓，確保各空間的相對氣流方向符合預期。安裝於此的微壓差計常用量測範圍約 0-100Pa。
4. 壓力損失監測：應用於高效能空氣（HEPA）濾網、被動型風量計，用以監測壓力

損失，以便預測濾網殘存壽命、了解濾網是否破損，或間接計算風量。安裝於此的微壓差計常用量測範圍約 100-1500Pa。

由於前述的風量量測用途於近兩年來有明顯的技術改善，故就導管風量量測的用法補充說明如圖 1。舉凡噴嘴(nozzle)、孔口板(orifice plate)、文氏管(Venturi)、皮托管(Pitot tube)、層流元件(Laminar flow element)等被動型風量計，都是先以微壓差計量測此類風量計出入口間的氣壓差異 ΔP ，然後將 ΔP 換算為導管風量。令 k 為個別風量計的特性常數，令 ρ 為導管氣體密度，則導管風量 Q 可表示如下。

$$\Delta P = k\rho Q^2 \quad (1)$$

對於一個特性常數 k 為已知的風量計而言，若能精密決定 ρ 並精確量測 ΔP ，則由上式可以精密地決定導管風量。關於這方面的技術，王順志等人[2]於 2008 年針對 0-100°C 的氣溫範圍提出精密濕空氣密度計算方法，因此日後只須應用精確的微壓差計量出 ΔP ，就可實現精確的空氣風量量測。一般而言，用於風量量測的微壓差計常用量測範圍約 100-1500Pa，讀值解析度的需求為 0.1Pa。

微壓差計的市售商品分類如圖 2 所示，可概分為儀表型（附有數位液晶螢幕或足以辨認讀值大小的類比指針）與水柱型兩大類，但無論是哪一類的微壓差計，都設有正壓（+）與負壓（-）管端，以便連接氣壓訊號軟管。使用時，只須以軟管將正壓與負壓管端分別以軟管連接到 2 個不同的空間，即可量測兩個空間之間的氣壓差異。

儀表型微壓差計（low differential pressure manometer）可分為機械式與電子式等兩個分類，分別舉例如圖 3。前述的電子式微壓差計，若其量測結果並非以儀表顯示量測結果，而是將量測結果輸出為比例電流、比例電壓或低階數位訊號，則稱為微壓差傳送器（low differential pressure transducer）。

在此補充說明微壓差傳送器的訊號輸出格式：若把微壓差傳送器當做普通工業用感測器，則需搭配符合中央控制系統規格的「類比→數位轉換器」，此時微壓差傳送器輸出的比例直流訊號為通用的 4-20 毫安培電流或 0-10 伏特電壓；若把微壓差傳送器當作獨立運轉的遠距微壓差監測站，則依中央控制系統通訊規格，可選用具有遠距數據傳送功能（如 RS-232C、RS-485 等通用規格）的微壓差傳送器。

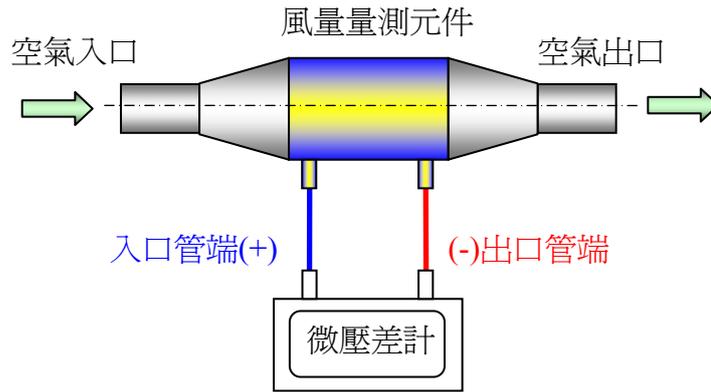


圖1 微壓差計用於導管風量量測之安裝使用案例

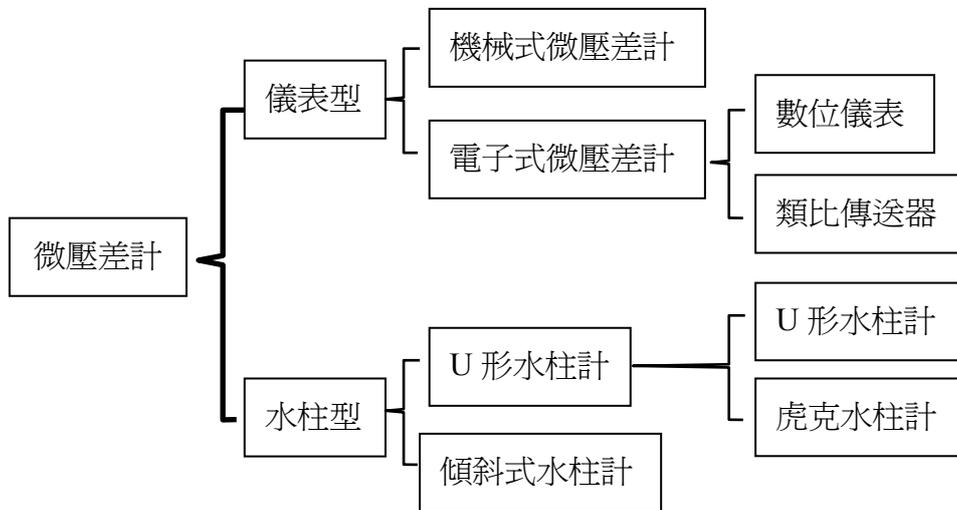


圖2 微壓差計分類概要



圖3 常見的儀表型微壓差計（左：類比機械式，右：數位電子式）

微壓差傳送器不同於微壓差計，大多安裝於化學、電子、生技、製藥等科技事業的通風控制設備，以便連續監測「設備內部與週遭環境之氣壓差異」。以本所研發的排氣櫃開口風速控制系統（圖 4）為例，當排氣櫃正常運轉時，下游風管之氣壓低於週遭環境之氣壓，利用 Huba 694 微壓差傳送器可連續將這個微壓差訊號轉換為比例直流訊號，經 FX0N-3A 類比／數位轉換器傳送到 FX2N-32MR 控制器作邏輯判斷，最終達成穩定排氣櫃開口流入風速、維護操作者呼吸健康的目的。

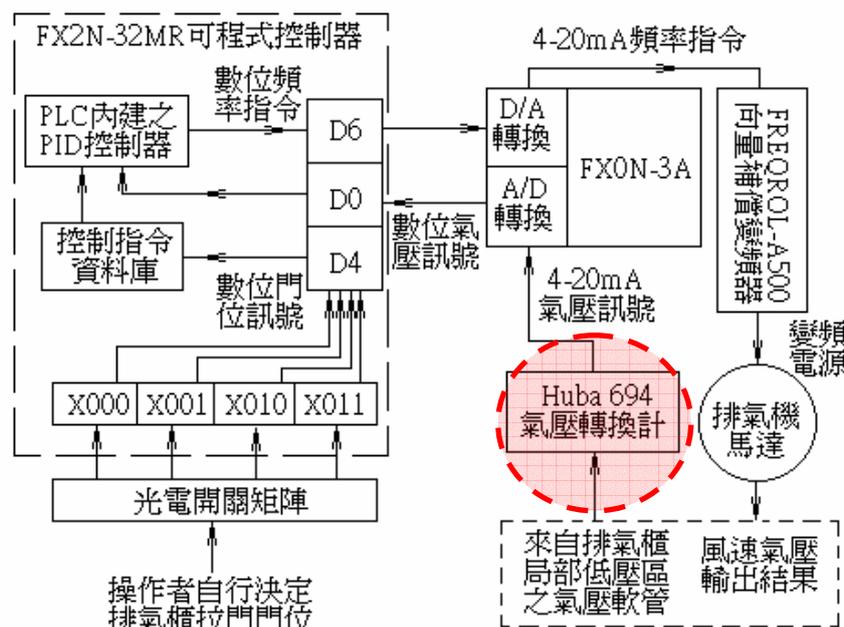


圖4 微壓差傳送器於本所的研發應用案例：排氣櫃開口風速控制系統

水柱型微壓差計沒有數位儀表或類比指針，其原理如圖 5 所示，係由使用者目視判讀 U 形管左右兩端液面高程差異，或判讀後再換算為微壓差數值。水柱型微壓差計可分為 U 形水柱計（圖 5）與傾斜式水柱計（圖 6）等兩個分類。U 形水柱計若使用精密的螺旋測微計（micrometer）來量測左右兩端液面高程差異，則成為高精密度的虎克水柱計（hook gage，圖 7）。至於傾斜式水柱計，則依傾斜水柱的移動路徑，分為線性傾斜水柱計（圖 6）與非線性傾斜水柱計（圖 8）。

水柱型微壓差計的第一個共同特色，是採用目視判讀（或先判讀再換算）微壓差數值，使用者必須接受一定的教育訓練，才能正確判讀微壓差數值，故水柱型微壓差計鮮少製成微壓差傳送器。除了虎克水柱計之外，所有的水柱型微壓差計都不容易

判讀 10Pa (1mmAq) 以下的訊號，因此大多數水柱型微壓差計不能用於精密量測。

至於配有精密螺旋測微計的虎克水柱計，雖然在理想狀況下可量測僅 0.02Pa 大小的微壓差訊號，但使用者本身必須擁有豐富的操作經驗，且每取得 1 筆數據（包括操作與換算在內）都要耗費不少時間（約 3-5 分鐘），因此虎克水柱計只適用於大小固定不變的微壓差訊號，不適用於會隨著時間上下波動的微壓差訊號。

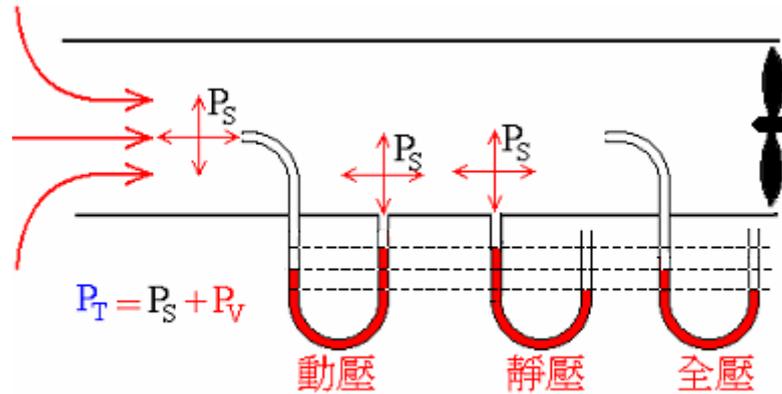


圖5 U 形水柱計量測原理示意圖

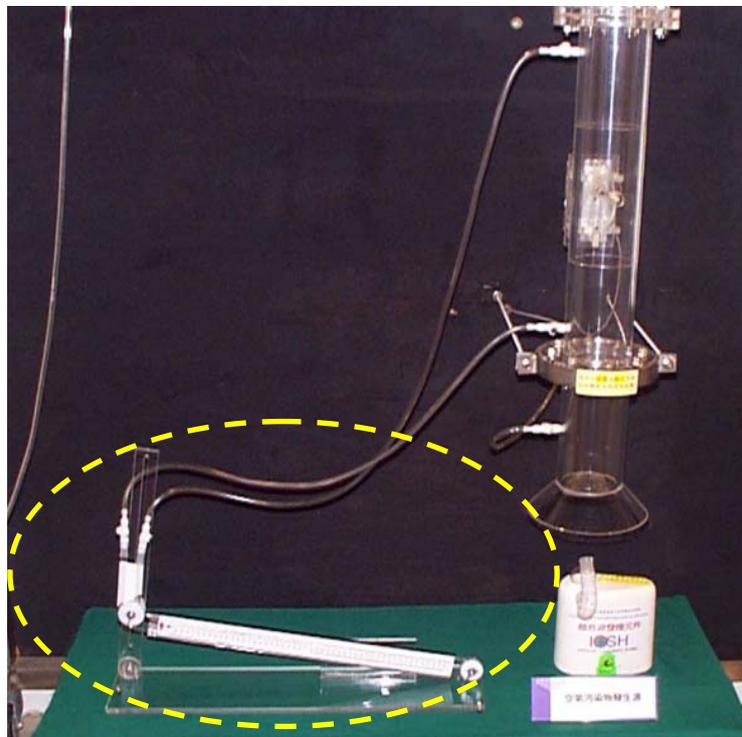


圖6 本所研發的線性可變傾角水柱計（用於量測蝴蝶風門靜壓損失）

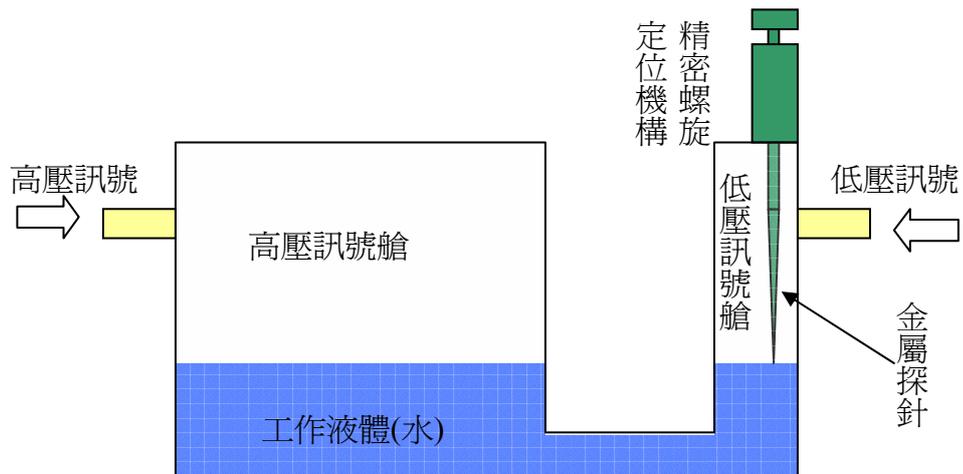


圖7 某廠牌虎克水柱計之量測原理示意



圖8 具訊號過載自動保護功能的非線性傾斜水柱計

第三節 水柱型微壓差計量測原理比較

對於兩個指定空間之間的氣壓差異量測，早期大多使用便宜、耐用且幾乎不需要維護的 U 型水柱計，其構造與量測原理請參考圖 5。U 型水柱計的使用方法是直接

目視判讀同一組 U 形水柱計左、右兩端水柱之間的液面高程差，這樣的量測精度相當有限：由於水對不同材質的管壁材料有不同的接觸角（contact angle），目視判讀結果易受干擾，因此水柱計的合理最小刻劃約為 2mm，相當於微壓差訊號解析度 2mmAq 或 20Pa 左右，顯然無法用以目視判讀大小僅數個 Pa 的微小氣壓差異。除了虎克水柱計之外，大部分 U 型水柱計的合理量測範圍落在 200-5000Pa（20-500mmAq）之間，過大則因水柱過高而不易判讀，過小則難以精確判讀。至於比 200Pa 更小的微壓差訊號（例如負壓隔離病房內外 8-15Pa 左右的微壓差），則通常不使用水柱計。

前述目視判讀結果過於粗糙的問題，可利用傾斜式水柱計來改善，但改善幅度有限。1960 年以後市面上出現了虎克水柱計（Hook gage），其原理類似 U 形水柱計（詳圖 7），但不採用目視判讀方式，而是利用手動精密螺旋定位機構（螺旋測微計，micrometer）與金屬探針來量測液面高程：先在工作液體裏溶入少量促進導電的雜質，然後操作螺旋測微計來微調金屬探針的垂直位置，使針尖從工作液體的液面上方緩緩下降，直到能微微接觸液面的地步，此時儀器內建的電氣迴路利用工作液體與金屬探針為導體而導通一具微電流表，微電流表的指針隨即開始不規則晃動（因為金屬探針有接近一半的機率與液面直接接觸，另一半的機率則因液面微弱至極的微小晃動而脫離水面），使用者因而獲悉液面高程。

利用前述原理，虎克水柱計的使用者能精密測定液面的高程變化，並據以換算高、低壓訊號端之間的氣壓差異。若在理想的環境中依照謹慎的步驟操作虎克水柱計，則對微壓差訊號的解析度可達 0.01Pa。然而因為以下緣故，虎克水柱計在市面上並不常見。

1. 冗長費時：每量測一次需費時 3-5 分鐘左右，操作程序太耗時。每次測定液面高程後，都要針對液溫變化查表修正，才能取得精確的微壓差讀值。
2. 訊號限制：此儀器只能量測固定不變的微壓差訊號，不能忍受訊號波動。
3. 人為誤差：操作者須事先接受教育訓練，量測前必須確保虎克水柱計擺放姿態已調整到完全垂直於地面的地步；除此之外，操作過程不能出現任何失誤，否則量測結果將出現難以預期的人為誤差。這是虎克水柱計的最大缺點。虎克水柱計的特性稍後還會有說明。

以下推導普通 U 形水柱計的微壓差測量原理。如圖 9 所示，令 ρ 為填充於普通 U 形水柱計內的工作液體密度（單位為 kg/m^3 ），令 g 為重力加速度（單位為 m/sec^2 ），令 h 為普通 U 形水柱計左右兩端的液面高程差異（單位為 m ），則依靜壓平衡原理，普通 U 形水柱計左右兩端的微壓差 ΔP_U （單位為 Pa ）可表示如下。

$$\Delta P_U = \rho g h \quad (2)$$

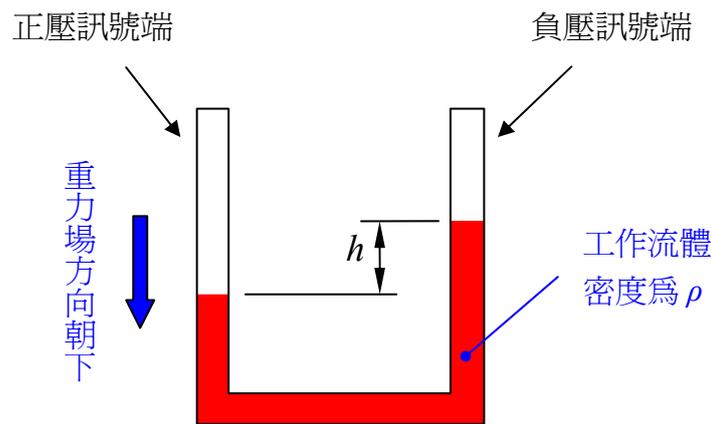


圖9 普通 U 形水柱計之量測原理

如圖 10 所示，若將普通 U 形水柱計傾斜，使地面與水柱計主軸之間夾著一個固定的角度 θ ，則成為「普通傾斜式水柱計」，其左右兩端的微壓差 ΔP_{OB} （單位為 Pa ）可表示如下。

$$\Delta P_{OB} = \rho g h_1 = \rho g h \sin \theta \quad (3)$$

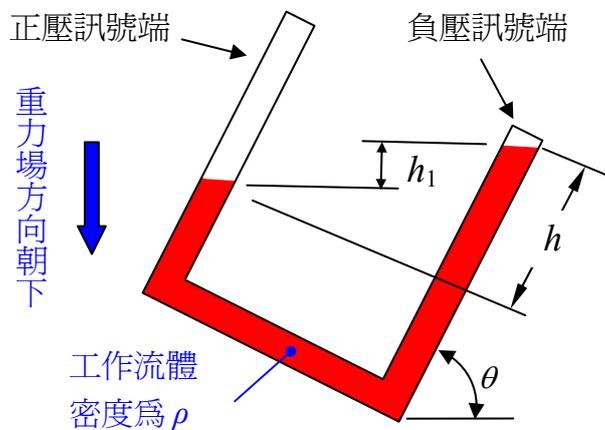


圖10 普通傾斜式水柱計之量測原理

比較上面這 2 個方程式，可發現傾斜角 $\theta = 30^\circ$ 時有 $\Delta P_U = 2\Delta P_{OB}$ 的特性。換言之，當地面與水柱計主軸的夾角為 30 度時，普通傾斜式水柱計對微壓差訊號的解析能力比普通 U 形水柱計足足提高了 1 倍之多。通常傾斜角不會小於 10 度，以免因為水柱液面橫跨太大的距離而導致判讀困難。

普通 U 形水柱計承受微壓差訊號的作用時，左右管端的液面位移有以下特色：左管端液面下降的距離，會恰好與右管端液面上升的距離完全相等。然而若碰到左右管端的氣壓差異過大的情形，容納於 U 形管內的工作液體會從右管端的頂部擠出去，使 U 形管失去效用。為了避免這種問題發生，某些 U 形管產品刻意改變了左右兩端的管斷面積。如圖 11 所示，刻意使 U 形管左端管路的斷面積 A_1 大於右端管路的斷面積為 A_2 ，則當左管端液面下降距離為 1 時，右管端液面上升距離卻是 A_1/A_2 ，這樣一來即使發生壓差過大的情形，也不至於使管內的工作液體瞬間全部流失。

此種左右兩端斷面積不同的設計還有個好處，那就是 A_1 遠大於 A_2 時，由於左管端液面的下降距離遠小於右管端，因此可以忽略左管端液面的下降距離，使用者只需判讀右管端液面的上升距離，即可讀出左右管端壓差的近似值。若不願意忽略左管端液面下降距離導致的誤差時，也可令右管端的垂直距離刻度放大 A_1/A_2 倍，這樣一來就能正確判讀壓差的大小。

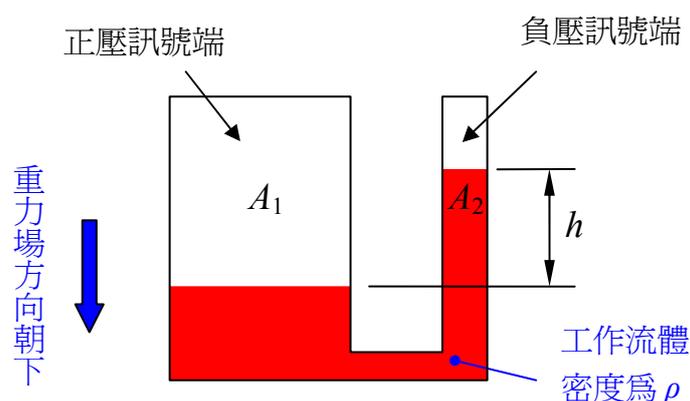


圖11 不等斷面 U 形水柱計之量測原理

若 U 形管左右兩端的氣壓差異可能因為意外的劇烈波動而失效時，可以改用如圖 12 所示的「非線性傾斜水柱計」，以防止微壓差訊號瞬間過載。圖 12 的 U 形管看

起來已經不像是 U 形管，其右管端係由「線性段、過渡段、過載保護段」等 3 個管段連接而成。線性段的用途如同普通傾斜式水柱計，具有放大微壓差訊號、方便使用者判讀的好處，故正常情況下的微壓差大小應使右管端液面落在線性段的中央；過載保護段的用途如同普通 U 形水柱計，當微壓差訊號瞬間過載時，右管端液面會突破線性段、過渡段而來到過載保護段，此時過載保護段能發揮防止工作液體溢出右管端的作用；過渡段的形狀是個圓弧，其用途為緩衝連接前述的線性段與過載保護段：當微壓差瞬間過載而使右管端液面突然從線性段躍升進入過載保護段時，緩衝段能發揮防止工作液體在右管內因噴濺而產生氣泡的問題。比較圖 8 與圖 12，可發現線性段、緩衝段與過載保護段的微壓差刻度間距都不一樣。若忽略左管端液面的下降距離，則過載保護段的微壓差刻度不需調整，線性段刻度間距需作等比例放大，過渡段刻度間距需作非等比例放大。

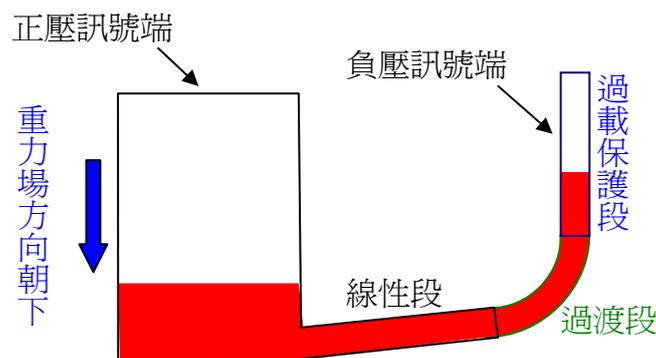


圖12 具過載保護功能的非線性傾斜水柱計量測原理

第四節 儀表型微壓差計量測原理比較

如本章第一節的圖 2 所示，儀表型微壓差計可分為電子式與機械式等兩個分類。以下比較說明它們的量測原理。如圖 13 所示，機械式微壓差計的核心感測器大多數採用質地柔軟且能耐受覆變應力的矽橡膠（silicone rubber）製成薄皮氣囊，氣囊中央安裝磁力元件，當正壓端之氣壓大於負壓端之氣壓時，氣囊遭到壓縮並帶動磁力元件向右移動，此時位於感測器外部的電磁感應驅動元件感測到磁力元件的微小位移，將此位移訊號放大後，可驅動儀表指針，讓使用者在儀表盤面上直接讀出微壓差數值。

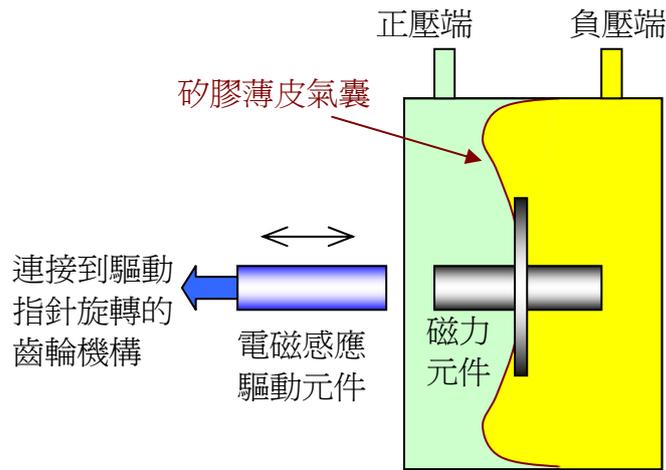


圖13 機械式微壓差計核心元件工作原理舉例

由前面的說明可發現機械式微壓差計必定仰賴某種程度的位移，而位移的產生無非依賴機械功（例如氣囊膨脹、壓縮），故各種機械式微壓差計的核心元件都大同小異，頂多是在氣囊的設計上有所變化（形狀、膜厚與材質）。

相較於機械式微壓差計，電子式微壓差計的核心元件種類較豐富多變，需要的機械功也微乎其微。圖 14舉例說明了一種電子式微壓差計的核心元件原理：兩個氣壓訊號分別由正壓端與負壓端進入此元件，元件中央有一封閉界面，界面上的薄膜是雙面鍍金屬（作為抗震強化材料與電極）的石英電容器（capacitor）。若正壓端的氣壓大於負壓端的氣壓，則此氣壓差異產生向右的淨力，使石英電容器彎曲受力（左面承受壓應力，右面承受拉應力）而改變電容量，此時可由外接的電子電路讀出電容量的變化，並轉為微壓差數值。

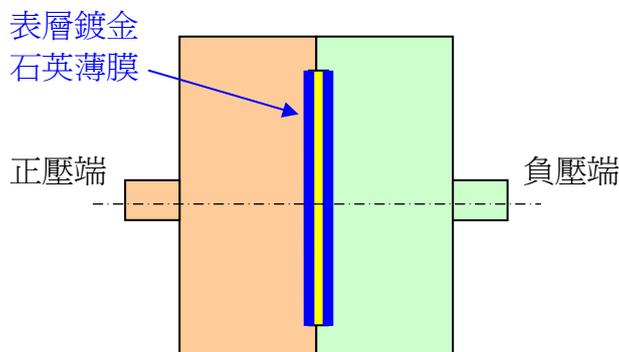


圖14 電子式微壓差計核心元件工作原理舉例

電子式微壓差計的核心元件種類繁多，其原理除了量測薄膜電容器的改變量，也可以量測薄膜電阻的改變量，或植入壓電晶體（Piezoelectric crystal），以感測微壓差訊號的大小。然而無論是由哪一種核心元件取得壓差訊號，最後都會比例放大為直流電流訊號或電壓訊號，以便由電表或電子監控裝置讀取。

第五節 微壓差計校正原理與現況

微壓差計的次級校正方法通常採用比較法，也就是先讓微壓差計的「標準件、待校正件」依圖 15所示的方式並聯，然後產生一個大小未知的微壓差訊號，讓標準件與待校正件同時量測這個微壓差訊號，最後依待校正件與標準件之間的讀值差異作細部調校（具體的調校方式依個別微壓差計廠牌型號而定）。如果想要進行微壓差計的原級校正，就必須擁有標準微壓差訊號產生源，以便省略標準件，直接對待校正件實施調校。

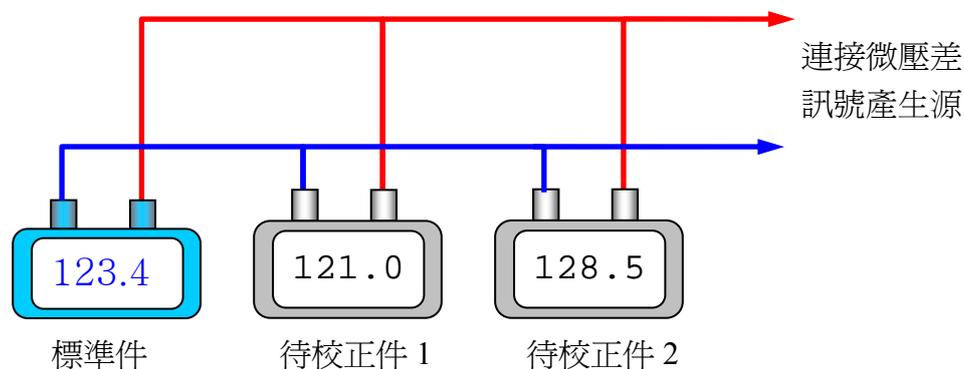


圖15 以比較法實施微壓差計次級校正之並聯方式

前述的標準微壓差訊號產生源必須能產生「穩定、微小且重現性高」的壓差訊號，這樣的技術往往被視為業務機密，相關研究文獻很難取得。如圖 16所示為德國某儀器校正實驗室的微壓差訊號產生方法，其中左小圖的柔軟氣囊可能由矽膠製成，上方放置固定質量的砝碼時，由於氣囊受到壓迫，囊內氣體壓力因而微微增加；右小圖的剛性氣室可能為杯狀金屬開口容器，杯內設有微微預壓凸出的金屬彈性薄膜，當砝

碼放置於薄膜中心時，薄膜因受壓而向下產生彈性變形，使剛性氣室內的空氣間接受壓而產生微小的正壓訊號。無論是氣囊或薄膜，其變形量必須足以產生指定範圍的微壓差訊號，但變形量又不宜過大，以免砝碼質量大小與微壓差訊號大小呈現非線性關係。採用圖 16所示兩種方法的共同問題在於：(1)如何在指定微壓差範圍內選擇最適用的薄膜或氣囊材料；(2)如何建立砝碼質量與微壓差訊號大小之間的關係式。關於這 2 個問題的解決方案，儀器校正機構通常不會公開說明細節，如此一來使用者只能盲目信賴儀器校正機構或代理商的校正能力。

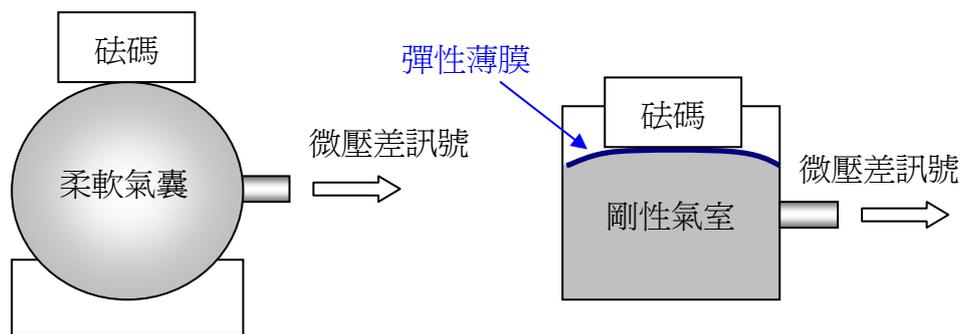


圖16 氣囊式與薄膜式微壓差訊號產生器原理舉例

除了以上的微壓差訊號產生方式之外，在某些高科技研究單位裏，可能還存在其他更理想或更新奇[3]的微壓差訊號產生技術，但缺乏詳細資料可供參考。

微壓差計與微壓差傳送器在臺灣地區的數量概估超過 4 萬具，但定期送往代理商或地區實驗室進行校正的數量卻遠少於現有數量。目前只有少數校正實驗室有能力建立具公信力的微壓差計精密校正技術，而且與微壓差計校正技術有關的研究文獻十分罕見，這樣的困境導致校正技術掌握於少數機構手中，使事業單位定期校正微壓差計所需的費用居高不下。

本計畫成功製作了 2 種簡易微壓差訊號產生器，並利用「標準訊號方法」與「比較法」，分別草擬微壓差計的原級 (primary) 與次級 (secondary) 校正方案，期能以降低或免除絕大部分校正費用為誘因，吸引事業單位確實定期校正微壓差計，使事業單位能透過準確的微壓差計監測包括通風設備在內的工業設備性能。整理微壓差計的種類、應用限制與校正方法如表 1。

表1 小型單腔式微壓差訊號產生器性能測試結果

微壓差計分類		訊號輸出方式		常用量測範圍	應用場合簡介	
儀 表 型	機械式微壓差計	氣囊式	目視判讀指針刻度	2Pa-20MPa	安裝於各種高低壓設備，作為永久固定的設備附件。無需電力即可長時間運轉。	
		薄膜數位型	電晶體式	直接顯示數值	1Pa-21MPa	安裝於各種自動化設備，用以偵測設備內外氣壓差異；安裝於建築物牆面，用以偵測室內外氣壓差異。
			電容式	直接顯示數值		
	電阻式	直接顯示數值				
	電子式	傳送器	類比電壓式	直流 0-10V 電壓	安裝於各種需遠距監控氣壓差異數據的化工設備、無塵室、手術室、負壓病房、燒燙傷病房等。	
			類比電流式	直流 4-20mA 電流 直流 0-20mA 電流		
		U 形	等斷面	目視判讀液面高度差		安裝於需要人工監控氣壓差異，但不需精密量測結果，出點小問題也不要緊的場合，例如排氣機入口等。
			不等斷面	目視判讀液面高度差		
	水 柱 型	U 形 水柱計	手動目視型	目視針尖並自行記憶 螺旋測微計轉動角度	只能量測靜態的、高穩定性的氣壓差異訊號，這是它們的唯一用途。任何可能出現訊號大小變動的量測場合都不適合。	
			微電流表型	目視微電流表並記憶 螺旋測微計轉動角度		
虎克計		直接顯示數值	0.01-3000Pa			
傾斜式 水柱計	變傾角	自動型	直接顯示數值	100-5000Pa	安裝於人工監控氣壓差異，但不需精密量測結果，出問題也不要緊的場合，如排氣機入口等。	
		線性	目視判讀液面高度差 與傾斜角度			
		非線性	目視判讀液面所在位 置對應之刻度		容易發生巨大氣壓突波，必須保護水柱計性能正常的工作場合，例如負壓病房。	

第六節 以微壓差訊號產生器為基礎的校正方案

本計畫為微壓差計提供了原級校正方案與次級校正方案，兩種方案的內容都是以微壓差訊號產生器為核心。茲說明初步構想如下。

1. 原級校正方案

- (1) 校正對象：假設校正對象為市面上用途較廣、數量較多的電子式微壓差計，其量測範圍為 0-100Pa，解析度 0.1Pa，量測誤差為 $\pm(0.1\text{Pa}+1\%\text{讀值})$ 。
- (2) 校正範圍：10-100Pa，至少校正 6 點（10、20、40、60、80、100Pa）。
- (3) 校正環境：為設有空調設備的近似恆溫實驗室，氣溫變動幅度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。
- (4) 訊號來源：使用能產生 0-1500Pa 微壓差訊號（訊號變動量 $\pm 0.1\text{Pa}$ ），且訊號延續能力至少達 180 秒（三分鐘）的微壓差訊號產生器。配合此微壓差訊號產生器，須有足以準確預期微壓差訊號大小的預測公式。
- (5) 校正準備：將待校正件之正、負微壓訊號管端與微壓差訊號產生器之訊號輸出端連結。在無壓差訊號的情況下，將待校正件之讀值強制歸零。若待校正件可同時量測正、負微壓差訊號，則由正值側朝向負值側歸零。
- (6) 開始校正：操作微壓差訊號產生器，產生由預測公式決定的微壓差訊號，由待校正件以每隔 1 秒紀錄一筆的速度連續紀錄 100 筆讀值。
- (7) 統計分析：已紀錄的 100 筆讀值若滿足以下條件，則為 1 個點的成功校正，否則廢棄此校正結果並立即檢討原因。
 - (A) 待校正件讀值=眾數=平均值=中位值。
 - (B) 最大值與最小值之差不大於 0.6Pa，且待校正件讀值落在這兩者之間。
 - (C) 以待校正件讀值為對稱中心，所有讀值之分佈型態為近似常態分布。
- (8) 校正結果：以預測公式之計算結果為標準值，標準值與待校正件讀值之間的差異為待修正量。回到步驟(5)，繼續校正，直到 6 個點全部校正完成。

2. 次級校正方案

- (1) 校正對象：假設校正對象為市面上用途較廣、數量較多的電子式微壓差計，其量測範圍為 0-500Pa，解析度 1Pa，量測誤差為 $\pm(1\text{Pa}+1\%\text{讀值})$ 。
- (2) 校正範圍：50-500Pa，至少校正 6 點（50、100、200、300、400、500Pa）。
- (3) 校正環境：為通風良好、室內最大風速不高於 0.3m/sec，且陽光無法直射（或穿透窗戶間接直射）校正位置的普通室內環境。
- (4) 訊號來源：使用能產生 0-1500Pa 微壓差訊號（訊號變動量 $\pm 0.3\text{Pa}$ ），且訊號延續能力至少達 180 秒（三分鐘）的微壓差訊號產生器。配合此微壓差訊號產生器，須有足以準確預期微壓差訊號大小的預測公式。
- (5) 校正準備：將標準件與待校正件之正、負微壓訊號管端並聯，然後與微壓差訊號產生器之訊號輸出端連結。在無壓差訊號的情況下，將標準件與待校正件之讀值都強制歸零。
- (6) 開始校正：操作微壓差訊號產生器，產生由預測公式決定的微壓差訊號，由標準件、待校正件各以每隔 1 秒紀錄一筆的速度連續紀錄 100 筆讀值；紀錄時須同時押下標準件、待校正件的紀錄按鈕，使兩者的讀值紀錄時間同步。
- (7) 統計分析：已紀錄的 100 筆讀值若滿足以下條件，則為 1 個點的成功校正，否則廢棄此校正結果並立即檢討原因。
 - (D) 標準件與待校正件的量測結果都滿足「讀值=眾數=平均值=中位值」的條件。標準件與待校正件的量測結果若有不同，是正常的。若標準件滿足以上條件，但待校正件不滿足以上條件，則待校正件已損壞。
 - (E) 標準件與待校正件的量測結果都滿足「最大值與最小值之差不大於 0.6Pa」，且滿足「眾數落在最大值與最小值之間」的條件。若標準件滿足以上條件，但待校正件不滿足以上條件，則待校正件已損壞。
 - (F) 標準件與待校正件的量測結果，讀值之分佈型態均為近似常態分布。
- (8) 校正結果：以標準件之眾數為標準值，標準值與待校正件讀值之間的差異為待修正量。回到步驟(5)，繼續校正，直到 6 個點全部校正完成。

第三章 微壓差訊號產生器工作原理

第一節 本章重點提要

爲了比較待校正微壓差計與標準微壓差計的讀值，必須研發能產生穩定微壓差訊號的技術方法，也就是必須設法提供一種微壓差訊號輸出工具，滿足「讀值穩定、上下變動幅度小、讀值與理論預測公式值吻合、量測結果不受環境影響」等條件，以滿足本計畫需求。本章的具體內容是一份研發紀錄，除了從頭推導微壓訊號理論預測公式，並依熱力學、流體靜力學進行分析，設法解決或規避相關工程問題，使可能影響微壓差訊號品質的因素減到最少。

第二節 單腔式微壓差訊號產生器之原理

本所研發之單腔式微壓差訊號產生器原理如圖 17所示，爲利用托里切利定理製作的微壓差訊號產生器。爲了便於理解起見，先依序說明製作與使用方式如下。

1. 利用隔熱性良好的剛性材料製作一口大直徑的密閉隔熱剛性水箱，於水箱頂面鑽第一個孔並安裝通氣閥，以便隨時放洩水箱內的氣體壓力，或用於調整水位；於水箱頂面鑽第二個孔並安裝管接頭，連接一段透明矽膠軟管，並使這段透明軟管的另一端接在微壓差計的正壓端；於水箱底部鑽第三個孔並安裝管接頭，連接通往透明小管底部的透明矽膠軟管。
2. 利用透明壓克力材料製作一段上端開放、下端封閉的小直徑圓管，作爲圖 17所示的「透明小管」。透明小管底部安裝管接頭，並使來自水箱底部的透明矽膠軟管與透明小管的底部相互連通。
3. 選用一組能讓使用者自由調整垂直位移的機構夾持透明小管；確認透明小管的管軸線與地面垂直；確認水箱的底面與地面平行。
4. 開啓通氣閥，由右方的透明小管上端注入適量工作液體（建議使用水），此時工作

液體會沿著「透明小管底部→透明矽膠軟管→水箱底部」的路徑連續流入水箱內，並將原本存在於水箱內的多餘空氣自通氣閥擠出去。

5. 以滴管微調水量並消除氣泡後，將整個系統靜置數分鐘，俟左右兩方的液面完全平衡，再將通氣閥慢慢關閉，此時水箱的氣壓與環境氣壓概略相同。
6. 操作垂直位移調整機構以產生微壓差訊號：若將透明小管的高程調降，則水箱內的氣體將略微膨脹，使水箱氣壓略低於環境氣壓，此時從微壓差計上將讀出負的讀值；反之若將透明小管舉升，則水箱內的氣體將略微壓縮，使水箱內部氣壓高於環境氣壓，此時從微壓差計上將讀出正的讀值。

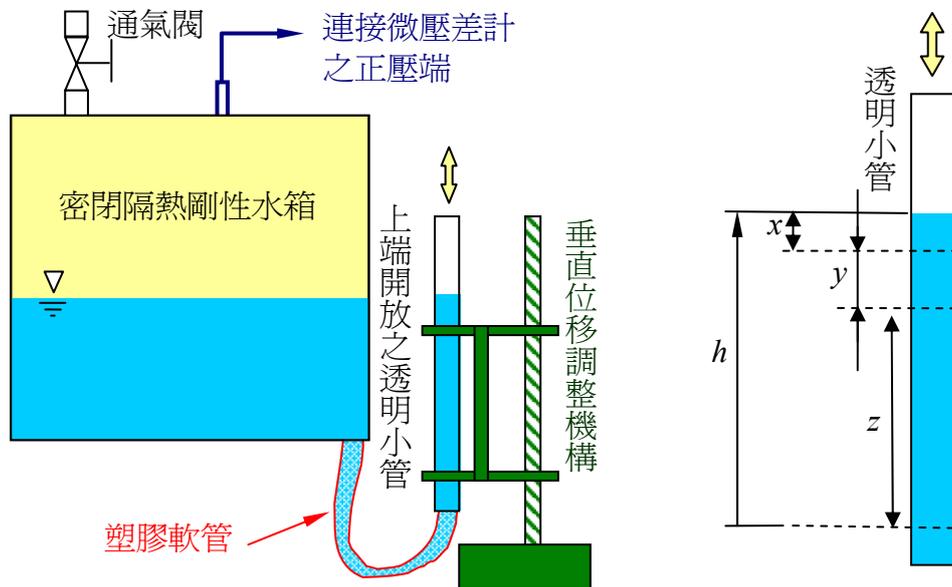


圖17 單腔式微壓差訊號產生器之原理

以下推導單腔式微壓差訊號產生器之微壓差訊號 ΔP 。「透明小管」與「密封隔熱剛性水箱」的液面變化關係說明如圖 17 右方小圖：假設空氣為可壓縮的理想氣體，假設工作液體為不可壓縮流體，操作人員若利用垂直位移調整機構將透明小管舉升 h 距離，則因左右液面高程不同，透明小管內的工作液體傾向於自動流入水箱，使水箱內的氣體受到壓縮；若水箱液面於平衡過程中上升 x 距離，且透明小管的液面下降 z 距離以呼應流入水箱的工作液體體積，則待液面變化穩定後，水箱液面與透明小管液

面之間的高程差異只剩下 y ，且可將 y 、 x 、 z 的關係表示如下。

$$y = h - x - z \quad (4)$$

令水箱截面積為 A_L ，令透明小管截面積為 A_R ，由於水箱液面上升造成的氣體壓縮量 $-\Delta V$ 恰好與自透明小管流入水箱的工作液體體積相同，故 x 與 z 之間的相依關係可表示如下。

$$-\Delta V = xA_L = zA_R \quad (5)$$

令水箱氣體壓縮前的絕對壓力（相當於環境氣壓）為 P_0 ，令水箱氣體壓縮後的絕對壓力為 P_1 ，則壓縮前後水箱氣壓的改變量（就是微壓差訊號）為 $\Delta P = P_1 - P_0$ 。由於水箱內的空氣實際壓縮量十分微小，且有足夠的時間讓氣體吸熱，故水箱內的氣體膨脹可假設為熱力學的等溫過程（isothermal process）。令水箱內部液面上方的空氣體積為 V ，由適用於理想氣體的波以耳定律為起點，可推導得以下關係[1][4]。

$$\Delta V \cong -P_0 V P^{-2} \Delta P \quad (6)$$

本計畫指定的最大微壓差訊號 1.5kPa 僅為環境氣壓（約 101kPa）的百分之一左右，且環境氣壓的變化不大，故於上式可令 $P \cong P_0$ 以簡化分析過程。將(5)式代入(6)式並令 $P \cong P_0$ ，可得以下關係。

$$z \cong V \Delta P / (A_R P_0) \quad (7)$$

$$x \cong V \Delta P / (A_L P_0) \quad (8)$$

將(7)式與(8)式代回(4)式，可解出 y 如(9)式。

$$y = h - x - z \cong h - \frac{V \Delta P}{A_L A_R P_0} (A_L + A_R) \quad (9)$$

令工作液體的密度為 ρ ，令環境的重力加速度為 g ，利用液面重新平衡後水箱與透明小管液面高程差為 y 的特性，可得氣壓平衡關係如下。

$$\Delta P = P_1 - P_0 = \rho g y \quad (10)$$

將(9)式代入(10)式，解出微壓差訊號 ΔP 與透明小管舉升距離 h 的關係式如下。

$$\Delta P \cong h \left[\frac{1}{\rho g} + \frac{V(A_L + A_R)}{A_L A_R P_0} \right] \quad (11)$$

利用(11)式，可藉著設定透明小管舉升距離 h 的方式，來預測微壓差訊號 ΔP 的大小。若令水箱截面積 A_L 與透明小管截面積 A_R 相等，則(11)式可進一步簡化如下。

$$\Delta P \cong h \left(\frac{1}{\rho g} + \frac{2V}{AP_0} \right) \quad (12)$$

第三節 單腔式微壓差訊號產生器之特性實驗

單腔式微壓差訊號產生器可製成性能穩定的重型實驗設備，也可以製成結構輕巧可隨身攜帶的小型校正輔助工具，適合搭配標準微壓差計一起進行微壓差計的次級校正。為了驗證性能，本計畫實依照可能存在的最惡劣條件，臨時搭造一個實作案例如圖 18，並就最容易出錯的 0-100Pa 範圍實施性能測試，詳細過程與結果說明如下。

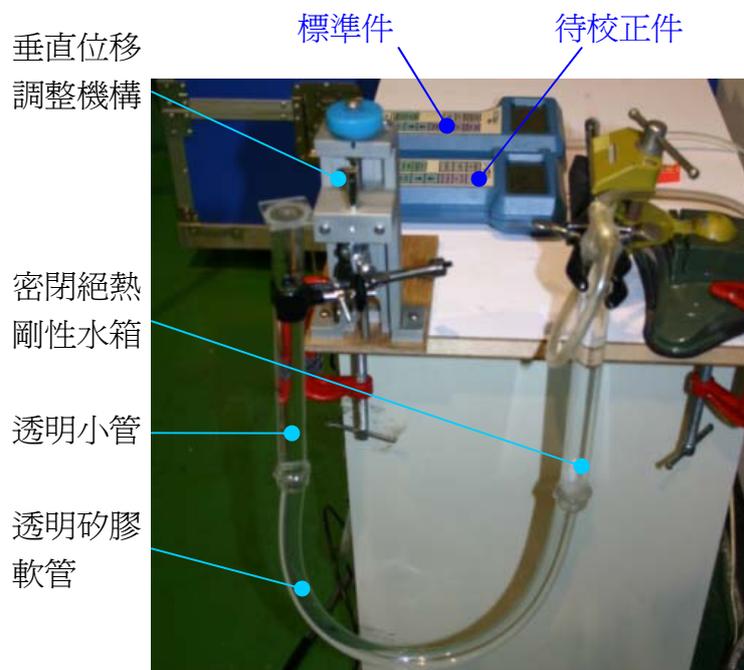


圖18 單腔式微壓差訊號產生器最惡劣條件實作案例

在實驗儀器準備方面，利用甫經原廠校正的 TSI-8075 數位式微壓差計為標準件，其讀值解析度為 0.1Pa，讀值誤差 $\pm(1\% \text{讀值} + 1\text{Pa})$ ；利用校正有效期已屆滿的 TSI-8385 數位式壓差計與熱線式風速計兩用儀器為待校正件，其解析度為 1Pa，讀值誤差同樣是 $\pm(1\% \text{讀值} + 1\text{Pa})$ ；利用仍在校正有效期限內的 TESTO-511 大氣絕對壓力計監測環境氣壓，其解析度為 1hPa，讀值誤差為 $\pm 1\text{hPa}$ 。

在單腔式微壓差訊號產生器的模型製作方面，係以可隨身攜帶的小工具為目標，利用彰嘉企業社製造、螺桿每旋轉一圈進給距離為 1mm 的垂直位移調整機構握持內徑 11mm 的透明小管；利用內徑同樣為 11mm、氣體初始體積（含延伸至微壓差計的 1.2m 長 Tygon 塑膠軟管氣積） V 僅 34.3ml 的壓克力透明管為密閉絕熱剛性水箱；使用蒸餾水為工作液體；環境氣壓實測值 1012hPa（實驗前的環境氣壓實測值）。將以上數據代入(12)式，計算結果如下。

$$\rho \equiv 1000 \text{kg} / \text{m}^3 \quad g \equiv 9.79 \text{m} / \text{sec}^2 \quad V \equiv 3.43 \times 10^{-5} \text{m}^3 \quad P_0 \equiv 1.012 \times 10^5 \text{Pa}$$

$$A = A_L = A_R = \frac{\pi}{4} (11 \times 10^{-3} \text{m})^2 = 9.50 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

$$\Delta P = h / \left(\frac{1}{\rho g} + \frac{2V}{AP_0} \right) = h / \left(\frac{1}{1000 \times 9.79} + \frac{2 \times 3.43 \times 10^{-5}}{9.50 \times 10^{-5} \times 1.012 \times 10^5} \right) = 9150h$$

請注意上面的計算過程已限定透明小管舉升距離 h 的單位為 m，但實際上我們只需要至多 11mm 的舉升距離就可得到至少 100Pa 的訊號，因此再令 $h' = 1000h$ ，使新的舉升距離 h' 單位變成 mm，整理得以下微壓差訊號理論預測公式。

$$\Delta P \cong 9.15h' \tag{13}$$

換言之，若使用如圖 18 的器材為單腔式微壓差訊號產生器，則由此器材產生的微壓差訊號 ΔP （單位為 Pa）與透明小管舉升距離 h' （單位 mm）之間，理論上會有 9.15 倍的比例關係。

在本節第一段指出圖 18 的單腔式微壓差訊號產生器是「條件惡劣」的案例，這是因為器材體型很小，水箱氣積、容水量也都很小，容易受環境氣溫、氣壓變化影響；在本節第一段同時也提到 0-100Pa 是容易出錯的微壓差訊號範圍，這是因為微壓

差訊號愈小，就愈容易受環境干擾與與人為操作的影響。舉例來說，操作者若是用手持續碰觸此器材的壓克力材質透明小管或水箱，則因手的溫度高於系統的溫度，此時相當於用手對系統輸入熱，微壓差訊號會在數秒內出現超過 0.1Pa 大小的訊號波動，非常敏感。

接下來我們對這個條件惡劣的單腔式微壓差訊號產生器模型進行了性能測試，結果如表 2 與圖 19，實驗程序說明如下：確認整個實驗過程中，環境氣溫始終維持於 $26.5 \pm 1^\circ\text{C}$ 的範圍；系統注入定量蒸餾水為工作液體之後，關閉通氣閥，將全部實驗器材與量測儀器一同靜置於環境中 2 小時；隨後覆核計算水箱氣積（含延伸至微壓差計的塑膠軟管氣積），並啟動標準件微壓差計，然後將微壓差計讀值歸零（視此時的透明小管液面高程 h 為零）；接下來如表 2 的順序，利用垂直位移調整機構將透明小管分段逐步舉升，並以儀器內建功能紀錄微壓差訊號數值的變化，直到 $h = 10.5\text{mm}$ 為止。在每一段舉升動作完成時，先靜待 3 分鐘使液面平衡，然後設定標準件微壓差計以每秒 1 筆的頻率記錄微壓差讀值，直到讀滿 1000 筆（約 18 分鐘）為止。

對照表 2 與圖 19，可發現理論預測公式的計算結果大體上能與實驗結果吻合，使用者可利用單腔式微壓差訊號產生器作為次級校正的比對用微壓差訊號源，不過問題並非就這樣完全解決了。以圖 18 的單腔式微壓差訊號產生器為例，補充說明單腔式微壓差訊號產生器的特性如下。

1. 輕巧價廉：水箱與透明小管由相同直徑的透明壓克力製作，製作成本極低，全部零組件總重量不到 3 公斤。
2. 訊號品質易受環境干擾：由圖 17 可發現整個裝置只有透明小管上端與環境空氣接觸，水箱空氣的絕對壓力深受環境氣溫、氣壓變化影響。舉例來說，將器材任意放置於無空調的室內環境，並設定 $h = 11.5\text{mm}$ （理論微壓差訊號為 105Pa），則於 18 分鐘內的訊號波動情形可舉例呈現如圖 20。由圖中微壓差訊號的時變軌跡，可發現上下波動幅度達 1.8Pa。當然，若將時間縮短到 1 分鐘，則訊號波動尚稱和緩。
3. 建議用途：此器材的微壓差訊號易受環境干擾而隨時間和緩地上下波動，故其適當的角色僅為普通微壓差訊號產生源，可充當二次校正的輔助工具，方便使用者比較「標準件」與「待校正件」的讀值差異。舉例來說，若將圖 17 的通氣閥微微開

啓，則於微壓差訊號產生後，將因水箱內部空氣持續洩漏而使微壓差訊號遞降。圖 21 顯示了前述的訊號遞降過程：標示為粗實線的標準件（解析度 0.1Pa），與標示為黑點的待校正件（解析度 1Pa，其變化趨勢標示為虛線），兩者的讀值變化趨勢有顯然的差異。對資深校正人員而言，有了圖 21，不但能快速完成校正工作，且能向客戶清楚說明微壓差計於校正前後的性能改善幅度。

表2 小型單腔式微壓差訊號產生器性能測試結果

透明小管 舉升距離 h(mm)	理論 微壓差 (Pa)	標準件 平均值 (Pa)	標準件 模數值 (Pa)
1.25	11.4	10.1	9.2
2.50	22.9	21.1	21.1
3.50	32.0	31.0	31.0
4.25	38.9	38.4	38.0
5.75	52.6	52.9	53.0
6.50	59.5	61.3	61.4
7.50	68.6	69.8	69.8
9.00	82.4	82.7	82.7
9.25	84.6	87.1	86.8
10.5	96.1	95.4	96.0

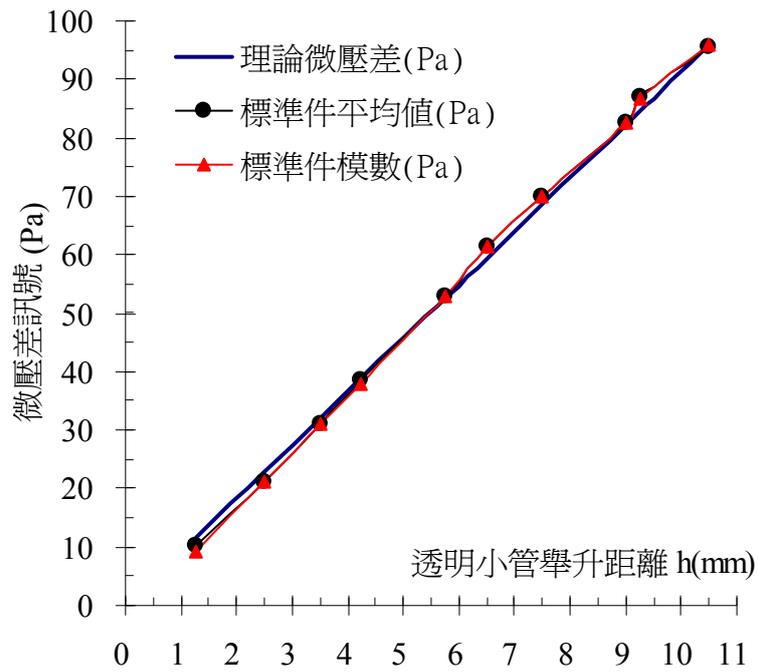


圖19 小型單腔式微壓差訊號產生器性能測試結果

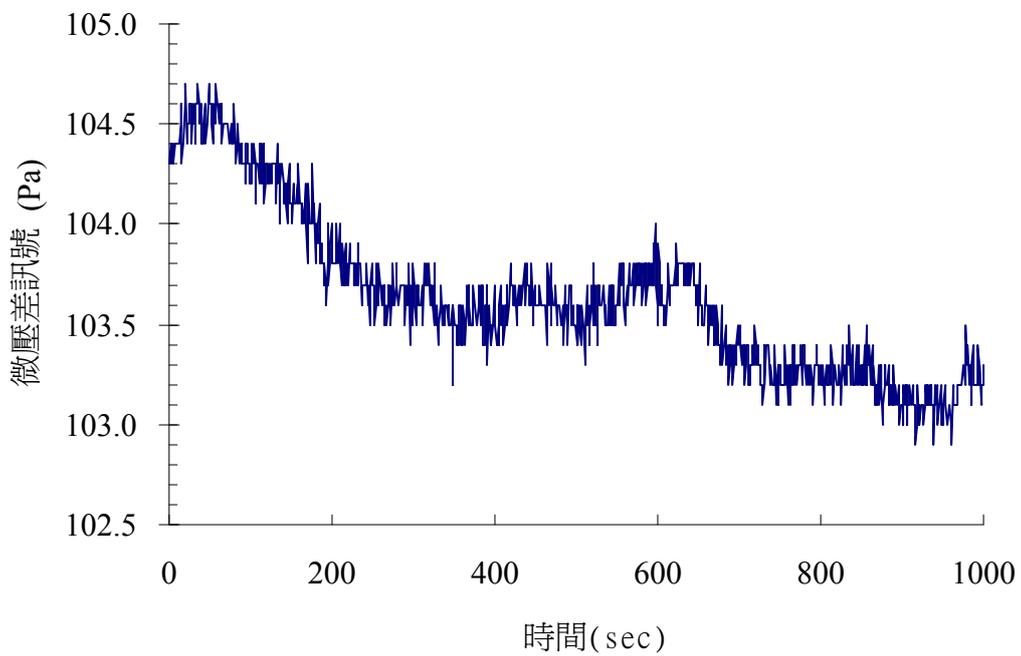


圖20 小型單腔式微壓差訊號產生器於 18 分鐘內的典型訊號波動

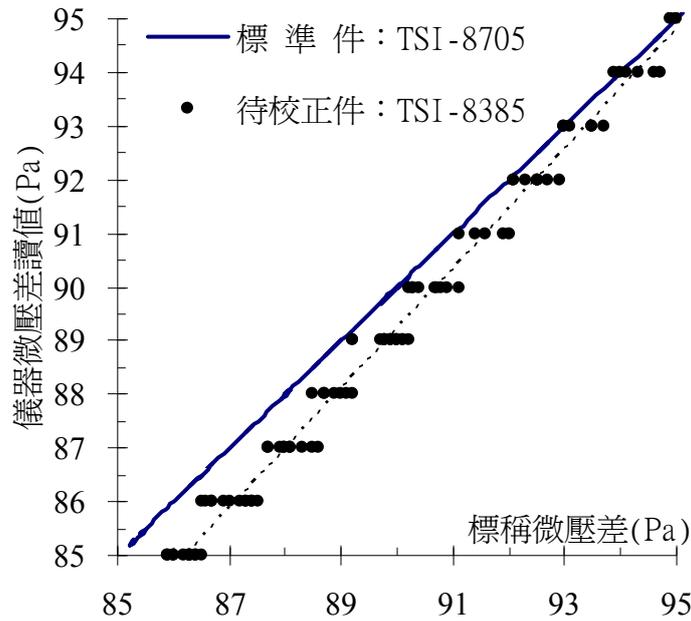


圖21 利用小型單腔式微壓差訊號產生器實施微壓差計二次校正

第四節 雙腔式微壓差訊號產生器的工作原理

由上一節得知單腔式微壓差訊號產生器的「透明小管」上端係與環境空氣直接接觸，雖然這樣的設計能方便使用者隨時以滴管添加工作液體，但也容易因揮發而減少工作液體。除此之外，我們由上一節的討論，可發現微壓差訊號產生器需盡量與環境隔絕，以避免微壓差訊號受環境干擾。本節提出的雙腔式微壓差訊號產生器繼承了單腔式微壓差訊號產生器的結構，但在各方面都作了修正，詳細說明如下。

雙腔式微壓差訊號產生器之原理說明如圖 22，具體的器材組裝方式如圖 23。圖 22所示的左、右水箱於底部以透明塑膠軟管連通；左、右水箱的截面積分別為 A_L 與 A_R ；右水箱下方設有定位解析度為 0.01mm 的垂直位移調整機構，最多可將右水箱舉升 110mm。使用前，先開啓左、右水箱的黃銅釋放閥，使 2 個水箱與環境大氣連通，隨後注入定量工作液體（純水）並微調垂直位移調整機構，使左、右水箱液面上方的

空氣體積分別為 V_L 與 V_R 。接著將圖 22 所示的 2 個微壓差訊號管端分別以透明軟管並聯於微壓差計的待校正件與標準件（圖 22 未繪出，請參考圖 15），最後靜置整個系統使左、右水箱的液面達到靜平衡狀態。

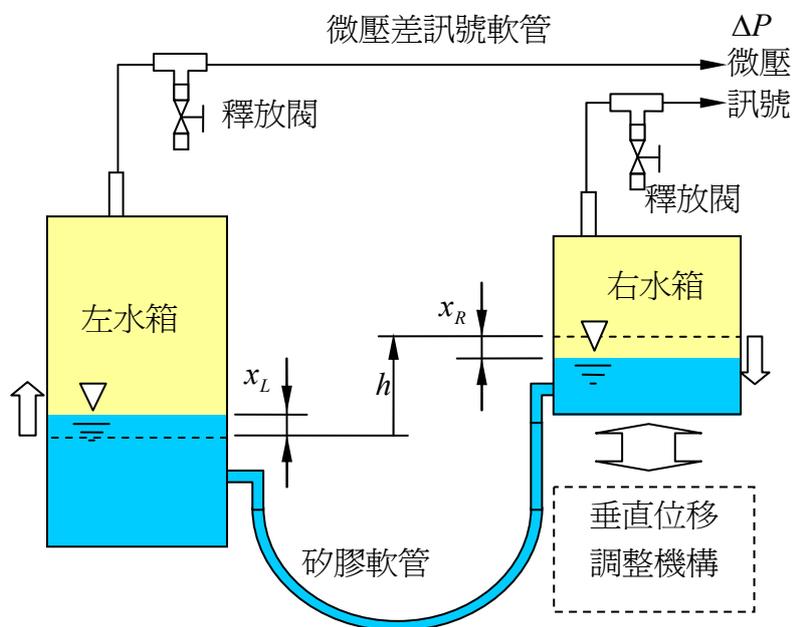


圖22 雙腔式微壓差訊號產生器原理

關閉圖 22 所示左、右水箱的黃銅釋放閥，使水箱內的空氣與水與週遭環境隔絕。操作垂直位移調整機構將右水箱舉升 h 距離，此時因為右水箱液面高於左水箱液面，右水箱氣體將被迫膨脹（氣壓降低）而使液面高度下降 x_R 距離，同時左水箱的氣體則被迫壓縮（氣壓升高）使液面上升 x_L 距離，於是系統重新進入靜平衡狀態（ x_R 與 x_L 都遠小於 h ）。此時左、右水箱之間的氣壓差異即為微壓差訊號 ΔP ，由連接在兩個水箱頂面的微壓差訊號軟管傳送到微壓差計。

以下推導雙腔式微壓差訊號產生器的理論公式，以描述右水箱垂直舉升 h 距離與微壓差訊號 ΔP 的關係。令環境氣壓為 P_0 ，已知右水箱垂直舉生距離為 h ，由於左、右兩個水箱內空氣體積的脹縮趨勢相反，故假設左水箱空氣體積改變量為 $-\Delta V_L = x_L A_L$ （收縮），右水箱空氣體積改變量為 $-\Delta V_R = x_R A_R$ （膨脹）。若將工作液體視為密度 ρ_w 不變的液體，則由質量不滅定律，必存在以下關係。

$$\Delta V_R - \Delta V_L = 0 \Rightarrow A_R x_R = A_L x_L \quad (14)$$

視空氣為理想氣體，令 P 為密閉系統的空氣絕對壓力，令 V 為密閉系統的空氣體積，由波以耳定律（Boyle's Law），此密閉系統的空氣歷經等溫過程的空氣體積變化關係可表示如下[4]。

$$(PV)_T = C \Rightarrow \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T = -CP^{-2} = -VP^{-1} \quad (15)$$

在環境氣溫不變的前提下，於右水箱垂直舉升的過程中，右水箱內的空氣發生輕微的等溫膨脹，左水箱內的空氣則發生輕微的等溫壓縮，但無論如何，左、右水箱內空氣的體積變化量都十分微小，故可將上式簡化如下。

$$\Delta V \cong -VP^{-1}\Delta P \quad (16)$$

令左、右水箱於新平衡狀態下的絕對壓力分別為 P_L 與 P_R ；令左、右水箱內的空氣絕對壓力變化量分別為 $\Delta P_L = P_L - P_0$ 以及 $\Delta P_R = P_R - P_0$ ，則由上式可得以下關係。

$$\frac{\Delta V_L}{V_L} \cong -\frac{\Delta P_L}{P_0} \quad \frac{\Delta V_R}{V_R} \cong -\frac{\Delta P_R}{P_0} \quad (17)$$

令液面重新平衡後的左、右水箱氣壓差異（就是微壓差訊號）為 $\Delta P = P_L - P_R$ ，令環境重力加速度為 g ，定義水箱截面積比 $\eta_A \equiv A_L / A_R$ ，則可得到新平衡狀態下的左、右水箱氣壓關係如下。

$$\Delta P = P_L - P_R = \rho_w g(h - x_L - x_R) = \rho_w g[h - x_L(1 + \eta_A)] \quad (18)$$

假設 x_L 為已知數據，將(14)式代入(17)式，並針對 x_L 作整理，可得以下關係。

$$\Delta P \cong \frac{(V_R + V_L)A_L x_L P_0}{(V_L - A_L x_L)(V_R + A_L x_L)} \quad (19)$$

由於(18)式呈現左、右水箱的壓力平衡關係，而(19)式呈現左、右水箱的空氣質量平衡關係，這兩個方程式是相互獨立的，因此可利用試誤法將各已知參數與自行假設的 h 數值代入(18)式與(19)式聯立求解 x_L 與微壓差訊號 ΔP 。

依前述的方式解出 x_L 與 ΔP 後，可再利用(14)式到(17)式依序解出 x_L 、 P_L 與 P_R ，並以數值方法歸納 ΔP 與 h 的關係。爲了簡化前述繁瑣的計算過程，也可以將左、右水箱製成外形尺寸相同的水箱，此時存在 $V = V_R = V_L$ 、 $x = x_R = x_L$ 、 $A = A_R = A_L$ 、 $\eta_A \equiv A_L / A_R = 1$ 等關係，於是(18)式與(19)式便分別簡化如下。

$$\Delta P = \rho_w g(h - 2x) \quad (20)$$

$$\Delta P \cong \frac{2V Ax P_0}{V^2 - (Ax)^2} \quad (21)$$

當然也可以把上面這兩個方程式合併，結果如下。

$$\Delta P \cong \frac{V A P_0 (h - \frac{\Delta P}{\rho_w g})}{V^2 - [\frac{A}{2} (h - \frac{\Delta P}{\rho_w g})]^2} \quad (22)$$

若直接使用(22)式求解 ΔP ，則在已知 h 的情況下，要作多次疊代才能得到 ΔP ，但我們可以先將(20)式與(21)式合併消去 ΔP ，接著展開方程式求解 x ，最後再解 ΔP 。首先定義水箱氣柱高度 $L \equiv V / A$ ，代入(20)式與(21)式，然後推導以下。

$$\begin{aligned} \rho_w g(h - 2x) &\cong \frac{2V A P_0 x}{V^2 - (Ax)^2} = \frac{2P_0(x/L)}{1 - (x/L)^2} \\ \Rightarrow x^3 - \frac{h}{2}x^2 - L(L + \frac{P_0}{\rho_w g})x + \frac{hL^2}{2} &\cong 0 \end{aligned}$$

推導到這裏，我們得到以 x 爲變數的一元三次方程式。由基礎數學我們知道一元三次方程式至少會有一個實根，由物理事實我們知道 ΔP 與 h 之間存在「一對一」的對應關係，因此實根就是我們要的答案。定義空氣的壓縮性參數 $\beta \equiv L + P_0 / (\rho_w g)$ ，求解方程式實根，再代回(21)式，即可解出 ΔP 與 h 的函數關係如下。

$$\beta \equiv L + \frac{P_0}{\rho_w g} \Rightarrow x \cong \frac{L}{h} (\sqrt{\beta^2 + h^2} - \beta) \quad (23)$$

$$\Delta P = \rho_w g(h - 2x) \cong \rho_w g [h - \frac{2L}{h} (\sqrt{\beta^2 + h^2} - \beta)] \quad (24)$$

由(23)式與(24)式可發現空氣壓縮性的影響：若不考慮空氣的壓縮性參數 β ，則(24)式可直接表示為 $\Delta P \cong \rho_w gh$ 。爲了讓事業單位更容易利用本計畫的研究成果，計算過程必須再簡化。考慮右水箱垂直升程 h 極小的情況，將(24)式的 $\sqrt{\beta^2 + h^2}$ 項針對 $h = 0$ 作泰勒展開式（Taylor's series），得以下結果。

$$f(h) \equiv \sqrt{\beta^2 + h^2} \Rightarrow f'(h) = \frac{1}{2\sqrt{\beta^2 + h^2}} \Rightarrow f''(h) = \frac{-1}{4(\beta^2 + h^2)^{1.5}}$$

$$f(h)_{h \rightarrow 0} = f(0) + f'(0)h + \frac{1}{2}f''(0)h^2 + \dots = \beta + \frac{h}{2\beta} + \frac{h^2}{8\beta^3} + \dots$$

若將二階的泰勒展開式代回(24)式，可得二階的 ΔP 近似方程式如(25)式。

$$\Delta P \cong \rho_w g \left[h - \frac{L}{\beta} \left(1 + \frac{h}{4\beta^2} \right) \right] \quad (25)$$

若將一階的最簡單泰勒展開式代回(24)式，可得一階的 ΔP 近似方程式如(26)式。請注意(26)式只能用在右水箱垂直升程 h 極小的情況，否則將出現可觀的偏差。

$$\Delta P \cong \rho_w g \left[h - \frac{L}{\sqrt{L + P_0 / (\rho_w g)}} \right] \quad (26)$$

本計畫也針對雙腔式微壓差訊號產生器實施初步的性能測試實驗[5]。此次實驗使用 TSI-5825 微壓差計爲標準微壓差計，其解析度 0.1Pa，允許誤差爲 $\pm(1\text{Pa}+1\%\text{讀值})$ ；於此儀器設定讀值取樣間隔爲 1 秒，設定連續取樣 240 筆（約 4 分鐘）。

在器材製作方面，設定左水箱 $A_L = 2.688 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ 、 $V_L = 4.408 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ，右水箱 $A_R = 1.963 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 、 $V_R = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ ，截面積比 $\eta_A = 13.69$ ，工作液體爲純水。製作結果如圖 23。

根據 1967 年由美軍修正提出的國際重力公式（International Gravity Formula，簡稱 GRS67）再加計海拔高度修正量，可將重力加速度 g 表示爲緯度 ψ （單位爲度）、海拔高度 h_a （單位爲 m ）的函數如下。

$$g = 9.780327 \cdot \frac{1 + 0.00193185138639 \sin^2 \psi}{\sqrt{1 - 0.00669437999013 \sin^2 \psi}} - 3.086 \times 10^{-6} h_a \quad (27)$$

本次實驗地點位於緯度 $\psi = 25.05^\circ$ 、海拔高度 $h_a = 49m$ 之處，利用(27)式計算結果得 $g = 9.790m/sec^2$ 。將以上各項參數代入(18)式與(19)式聯立求解右水箱垂直升程 h 、左水箱液面上升距離 x_L 與微壓差訊號 ΔP ，疊代計算結果如表 3。

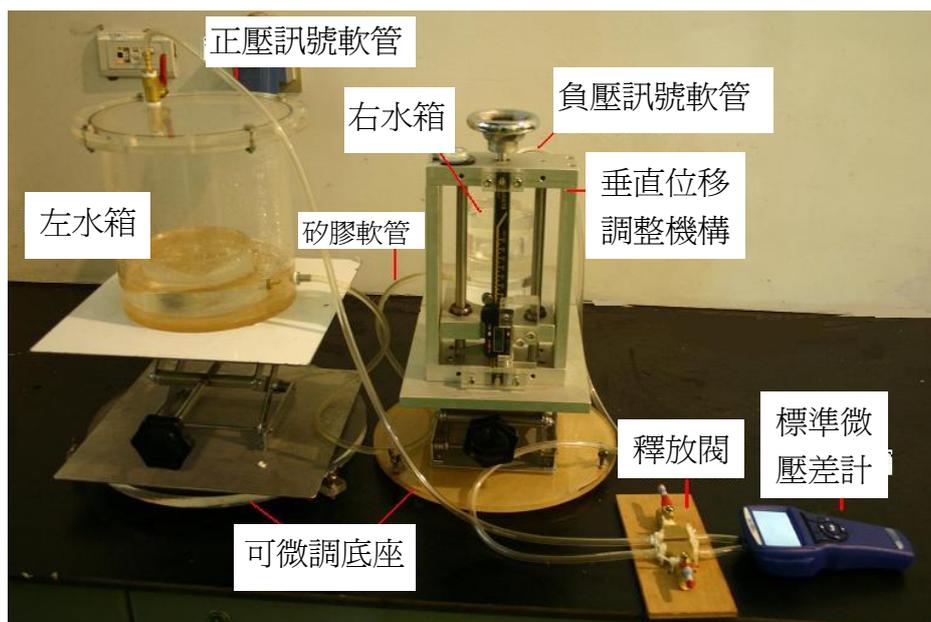


圖23 雙腔式微壓差訊號產生器實驗器材組成

表3 三個參數之間的關係與儀器讀值允許誤差

h (mm)	$x_L \times 10^{-4}$ (mm)	理論微壓 差 ΔP (Pa)	儀器讀值允 許誤差(Pa)
2.00	3.48154	19.5	± 1.2
4.00	6.96439	39.1	± 1.4
6.00	10.4485	58.6	± 1.6
8.00	13.9340	78.1	± 1.8
10.0	17.4208	97.6	± 2.0
100.0	175.696	976.4	± 10.8

註 1：理論微壓之計算方法詳(18)式與(19)式。

註 2：儀器讀值允許誤差為 $\pm(1Pa+1\%讀值)$ 。

將表 3列出的右水箱垂直升程 h (單位為 mm) 與理論微壓差 ΔP (單位為 Pa) 以 Microsoft EXCEL 軟體內建功能作數值迴歸，得理論微壓差 ΔP 與 h 之關係如(28)式，利用此方程式可快速計算 ΔP 。

$$\Delta P = 9.764h \quad (28)$$

雙腔式微壓差訊號產生器的測試程序說明如下：自 0Pa 到 1000Pa，依刻意安排的非整數的預期數值（配合檢驗系統的定位精確度）產生微壓差訊號，且每次訊號產生後，必靜置系統 30 秒，使系統進入新的平衡狀態；隨後以 1 秒鐘的間隔，連續讀取 240 筆微壓差訊號讀值。記錄前述微壓差訊號讀值的最大值、最小值、平均值與眾數（出現頻率最高之微壓訊號讀值）。測試數據整理如表 4，其中 0-100Pa 的微壓訊號太小，故另外放大顯示如圖 24。請注意表 4左欄顯示的 h 數據，係刻意設定為偏離整數，以檢驗雙腔式微壓差訊號產生器的定位精確度。

表4 微壓差訊號實驗數據與理論值對照結果

h (mm)	理論微 壓(Pa)	240 筆標準微壓差計讀值(Pa)				
		眾數	最大	最小	變量	平均
0.00	0.0	-0.1	0.1	-0.3	0.4	-0.1
2.04	19.9	19.9	20.1	19.7	0.4	19.9
4.09	39.9	39.6	39.8	39.4	0.4	39.6
6.13	59.9	59.7	60.0	59.5	0.5	59.7
8.17	79.8	79.8	80.0	79.6	0.4	79.8
10.21	99.7	100.2	100.4	100.0	0.4	100.2
102.7	1002.8	1000.7	1000.9	1000.5	0.4	1000.7

註 1：理論微壓係由(28)式計算。

註 2：變量為最大值與最小值之差。

由表 4「變量」欄發現標準微壓差計讀值的最大、最小值之差至多只有 0.5Pa，且針對不同大小的微壓差訊號，微壓差計讀值的「平均值」與「眾數」大小均為一致，這說明了微壓差訊號讀值的最大變動範圍是「眾數 \pm 0.25Pa」，由此可見這個雙腔式微壓差訊號產生器能產生極為穩定的微壓差訊號。

除此之外，表 3「理論微壓」欄係依(28)式計算，與「眾數」欄所示的實驗數據幾乎完全一致：於 0-1000Pa 範圍內，眾數相較於理論微壓之最大偏差僅 0.8%；於 0-100Pa 範圍內，眾數相較於理論微壓之最大偏差僅 0.5Pa。這樣的結果說明我們可以利用(18)式與(19)式，以設定右水箱垂直升程 h 的方式來預測微壓差訊號 ΔP 的大小。

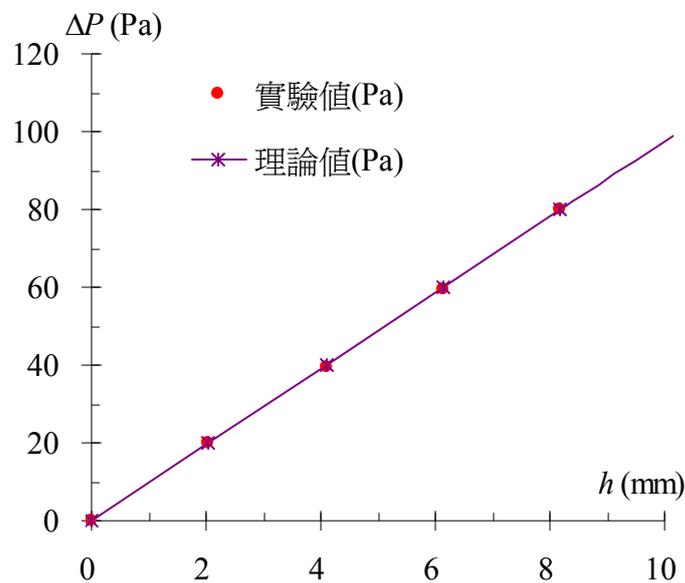


圖24 雙腔式微壓差訊號產生器測試數據(眾數)與理論值對照

在上述的雙腔式微壓差訊號產生器特性測試中，微壓差訊號的穩定輸出並非只能維持 240 秒（每秒 1 筆，連續紀錄 240 筆），其穩定輸出效果至少可以維持 15 分鐘，且在大部分實驗中可以維持達 30 分鐘。對於只需要 100 秒穩定微壓差訊號的單點原級校正而言，這樣的穩定性已經完全足夠了。

圖 25以 100Pa 為例展示了微壓差訊號的品質：此次實驗使用「解析度 0.1Pa、容許誤差 \pm (0.1Pa+1%讀值)」的某廠牌微壓差計為標準件與數據紀錄器，由圖 25上方小圖的 1000 秒（16.7 分鐘）訊號分布情形可初步研判微壓差訊號始終在 99.8-

100.3Pa 之間波動，且可明顯看出平均值落在 100.1Pa 的位置。前述的這種現象，意味著微壓差訊號的大小隨著時間呈常態分布，而圖 25 下方小圖的統計結果也充分證實了這樣的看法。此外需要特別向本文件讀者強調的是：雖然此儀器的讀值平均值落在 100.1Pa 而非 100.0Pa，但這絕非異常。由於儀器容許誤差是 $\pm(0.1\text{Pa}+1\%\text{讀值})$ ，而儀器的讀值偏移量並非常數，而是隨著特定氣溫、氣壓、溼度、感測器殘存壽命等條件而有些微的變動，因此只要讀值始終都落在 98.9-101.1Pa 的範圍內，就是符合此儀器應有精確度的正常量測結果。

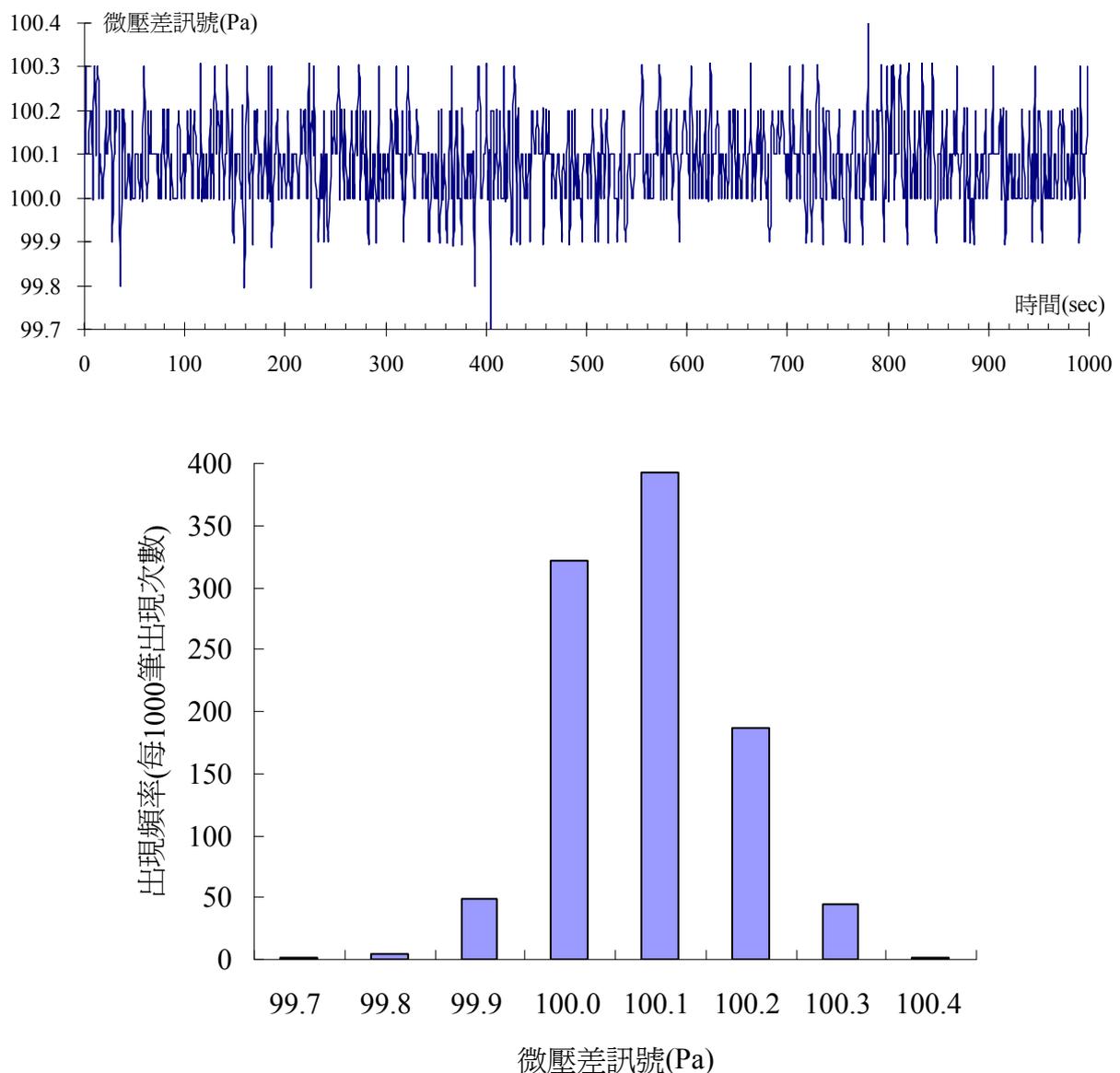


圖25 雙腔式微壓差訊號產生器 1000 筆訊號（18 分鐘）實測統計結果

第五節 本章總結

對照本章的理論推導過程與測試結果，可發現圖 22與圖 23所示的雙腔式微壓差訊號產生器能快速產生相對準確的微壓差訊號，使用者只須接受簡易的教育訓練，就能在無需使用標準微壓差計的情況下，以設定右水箱垂直升程 h 的方式來產生準確、穩定的微壓差訊號 ΔP 。有了這種有利的工具，使用者可據以實施工業用微壓差計的次級校正（需搭配標準微壓差計），或對低精密度的微壓差計逕行原級校正。

本章選用的標準微壓差計精密度有限，其解析度只達到 0.1Pa ，讀值允許誤差為 $\pm(1\text{Pa}+1\%\text{讀值})$ ，在後續的章節中會依照若干修正方案，搭配精密度更高的儀器作長時間的微壓差訊號追蹤，以獲得最佳的設計方案。關於環境參數（大氣壓力、空氣相對溼度、環境氣溫）的變動對微壓差訊號品質的影響，以及校正結果之總不確定度，在後續章節中也會再作討論。

第四章 輔助物理量的估計

第一節 本章重點說明

於第三章的公式過程中，有許多輔助物理量不斷出現。這些物理量，例如地球表面的重力加速度 g ，雖然在各種工程用書之中視為常數，但若應用於精密場合，則必須以各種方式進行修正，否則將發生計算精度不匹配的問題。本章依照本計畫的需求，就各物理量或物理模型進行背景資料的蒐集與整理，使後續的推導與評估更具有公信力。本章的每一個單元都是獨立的，排列方式則依解決問題的順序。

本計畫大部分的實驗與測試都在北緯 25.051257° 、海拔高度 49m 的半開放性實驗室內進行，此實驗室之特徵為設有大型鐵捲門，能使室內外空氣自由交換，因此在後續的討論中，除特別指明的案例之外，本計畫的所有研究成果都可延伸適用於承受日夜氣溫與氣壓變化的一般半開放環境，並非僅適用於有空調設備的特定室內環境。

第二節 重力加速度的精密計算

本計畫的實驗室位於北緯 25.051257° 、海拔高度 49m 之處，此處的重力加速度與標準地表重力加速度 ($9.80665\text{m}/\text{sec}^2$) 不同，其中的差異已大到足以影響本計畫預期目標的地步，不能不作修正。

關於地表緯度為 ψ 之處的標準重力加速度 g_ψ ，中央氣象局印行的技術手冊「地震百問」第一章第 5 節[6]提供了如下的計算公式（其單位為 cm/sec^2 ）。

$$g_\psi = 978.03185(1 + 0.005278895 \sin^2 \psi + 0.000023462 \sin^4 \psi) \quad (29)$$

上式可能是由資深氣象學者提出的經驗公式，其來源我們先不討論。除了以上公式可以精確計算重力加速度之外，參閱舊版的氣象技術手冊，可找到國際重力公式（International Gravity Formula）於 1967 年的修正版（簡稱 GRS67）如下。

$$g_\psi = 9.780327[1 + 5.3024 \times 10^{-3} \sin^2 \psi - 5.8 \times 10^{-6} \sin^2(2\psi)] \quad (30)$$

(29)式與(30)式雖然不同，但計算結果非常接近，對本計畫而言，使用(29)式或(30)式都滿足計算精度的要求。繼 GRS67 之後，美軍配合全球衛星定位系統（GPS）的發展，於 1984 年提出世界測地系統（World Geodetic System，簡稱 WGS-84），其中的重力加速度公式如下。

$$g = 9.780327 \cdot \frac{1 + 0.00193185138639 \sin^2 \psi}{\sqrt{1 - 0.00669437999013 \sin^2 \psi}} \quad (31)$$

在不考量本計畫實驗地點海拔高度（將海拔高度視為零）的情況下，將本計畫實驗地點緯度 $\psi = 25.051257^\circ$ 套用於前述 3 個公式，重力加速度的計算結果均為 9.7896 m/sec^2 。此數據精密度高於本計畫需求，因此無論使用以上哪一個公式來計算重力加速度，對本計畫而言並無影響。

關於在「非海平面高度」的重力加速度，最顯著的修正因子是海拔高度 h_a 。由一般地理資料可查得萬有引力常數約為 $G = 6.673 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{sec}^2$ ，地球的質量約為 $M = 5.974 \times 10^{24} \text{ kg}$ ，地球平均半徑約為 $R = 6.371 \times 10^6 \text{ m}$ ，由重力加速度的基本定義，可推導海拔高度對重力加速度的影響量 Δg （單位為 m/sec^2 ）如下。

$$\begin{aligned} \frac{dg}{dR} &= \frac{d}{dR} (GMR^{-2}) = -2GMR^{-3} \\ \Rightarrow \Delta g &\cong -2GMR^{-3} \Delta R = -3.086 \times 10^{-6} \Delta R \end{aligned}$$

若將海拔高度 ΔR 對重力加速度的修正量 $-3.086 \times 10^{-6} \Delta R$ 加入前述 3 個公式，並套用本計畫實驗地點之海拔高度 42m，可得修正後重力加速度為 9.7895 m/sec^2 。由於此數據之精密度高於本計畫需求，為匹配其他數據的精確度，本計畫實驗地點之重力加速度一律標示為 9.790 m/sec^2 。本計畫若須於其他實驗地點工作，則依最新的 WGS-84 系統重力加速度公式加計海拔高度修正量，整理得以下標準計算公式。

$$g = 9.780327 \cdot \frac{1 + 0.00193185138639 \sin^2 \psi}{\sqrt{1 - 0.00669437999013 \sin^2 \psi}} - 3.086 \times 10^{-6} h_a \quad (32)$$

第三節 大氣溫度、壓力與密度變動的影響模型

早在 1834 年，法國物理學家 Benoît Paul Émile Clapeyron[7]就提出了理想氣體狀態方程式 (Equation of State)，可將理想狀態下的氣體絕對壓力 P (單位 Pa)、絕對溫度 T (單位 K)、密度 ρ (單位 kg/m^3) 之間的關係，由一個特定比例的常數 R (稱為氣體常數，單位 $J/mol \cdot K$) 聯繫起來。

$$P = \rho RT \quad (33)$$

在過去 170 餘年之間，研究者對於大氣的成分、組成比例等物理特性愈來愈熟悉，不斷修正理想氣體狀態方程式，使我們能藉著精密量測大氣壓力、氣溫、相對溼度的方式來決定濕空氣的密度。在各種濕空氣計算方法中，王順志等人[2]於 2008 年整理提出一種較簡便的方法，令 ϕ 為相對溼度 (無因次)，令 P_{sv} 為水的飽和蒸氣壓 (單位 Pa)，可在 $0-50^\circ C$ 的氣溫範圍內快速取得精密的濕空氣密度。本計畫大氣密度的計算統一使用以下公式。為求簡便起見，命名為「IOSH-2008 公式」。

$$\rho = \frac{P - 0.378043\phi P_{sv}}{287.048T} \quad (34)$$

對於飽和濕空氣 (相對溼度為 100%) 的特例，此方程式可簡化如下。

$$\rho = \frac{P - 0.378043P_{sv}}{287.048T} \quad (35)$$

由於水的飽和蒸氣壓為濕空氣絕對溫度 T 的函數，因此近地面的大氣，於白天被地面加熱並吸收地表濕氣，夜裏則對高空輻射散熱並將多餘的濕氣凝結為露水，再加上晴雨等短暫天候變化，看起來似乎大氣的物理性質變化是完全摸不著頭緒的。然而為了確保實驗品質，本計畫研究人員長期監看臺北與基隆氣象站的氣象測候數據，發現環境大氣的氣壓與氣溫隨時間變動的趨勢似乎有以下特性：「大氣壓力升高時，氣溫就降低；大氣壓力降低時，氣溫就升高。」

為了弄清楚是否真的有這樣的關係，研究人員先從中央氣象局網站擷取阿里山氣象站於 98 年 10 月 9 日至 11 月 8 日的逐時氣象測候數據，然後整理呈現如圖 26。若不理會圖 26 各氣象數據的顏色與符號種類，則圖 26 看起來似乎是一團概略呈「右

上—左下」趨勢的雜亂數據，但若將相對溼度也考慮在內，然後使用 IOSH-2008 公式計算濕空氣密度，則可發現在密度不變的條件下，氣壓上升時，氣溫的確隨之降低。此重要發現的具體意義是：在相同的密度條件下，大氣壓力與大氣溫度的變化是相依的，因此在任意的大氣條件下，只須監測短時間內氣溫隨時間的變化率，就可以換算為氣壓隨時間的變化率。

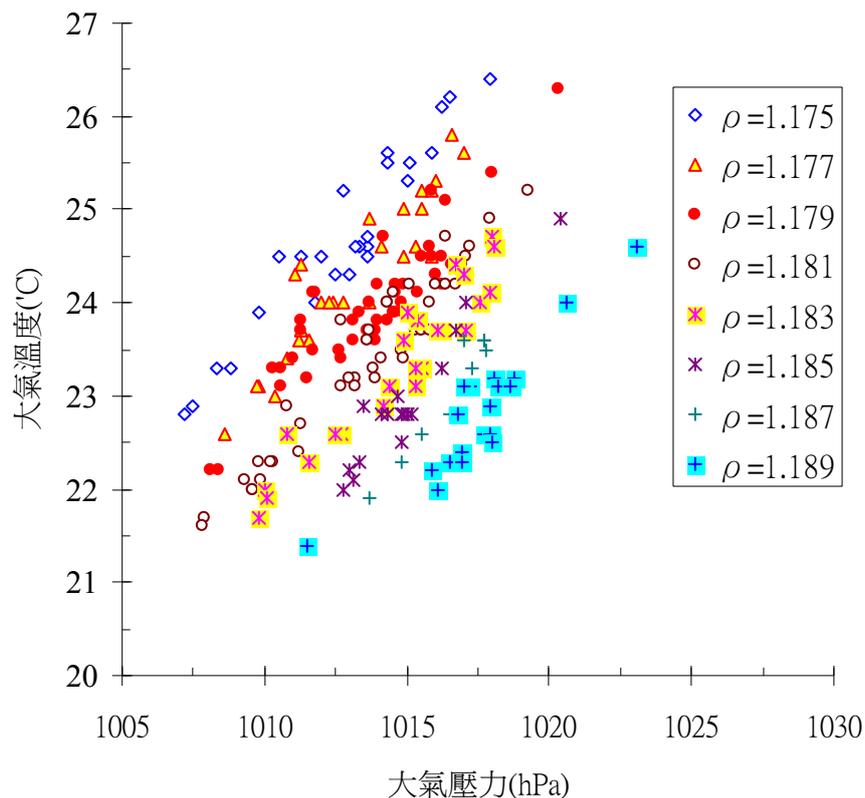


圖26 由嘉義氣象站的天候觀測數據觀察氣壓與氣溫的變動趨勢

根據以上發現，研究人員繼續針對嘉義氣象站（低海拔地區）、日月潭氣象站（中海拔地區）、阿里山氣象站（高海拔地區），蒐集 30 日範圍內的逐時氣象數據，並以大氣密度 ρ 為自變數，以大氣壓力 P 與絕對溫度 T 之比為因變數，彙整得如圖 27 的關係。圖 27 的右上角線段、中央線段、左下角線段分別代表嘉義、日月潭、阿里山等氣象站的逐時氣象數據，紅色直線則為全部數據的數值迴歸結果 ($R^2 > 0.9997$)。前述的氣象數據落在「大氣壓力 759-1031hPa、大氣溫度 3-31°C、相對溼度 38-100%」的範圍內，且包括晴、多雲、陰、雨、霧等不同型態的天氣。由

圖 27可發現無論氣象站設在哪裏，無論氣象數據在何種天候下測得，都會滿足紅色的迴歸線。由數值迴歸結果可發現以下關係。

$$P = 289.12\rho T \tag{36}$$

其中 P 為大氣壓力（單位 Pa ）
 ρ 為大氣密度（單位 kg/m^3 ）
 T 為大氣絕對溫度（單位 K ）

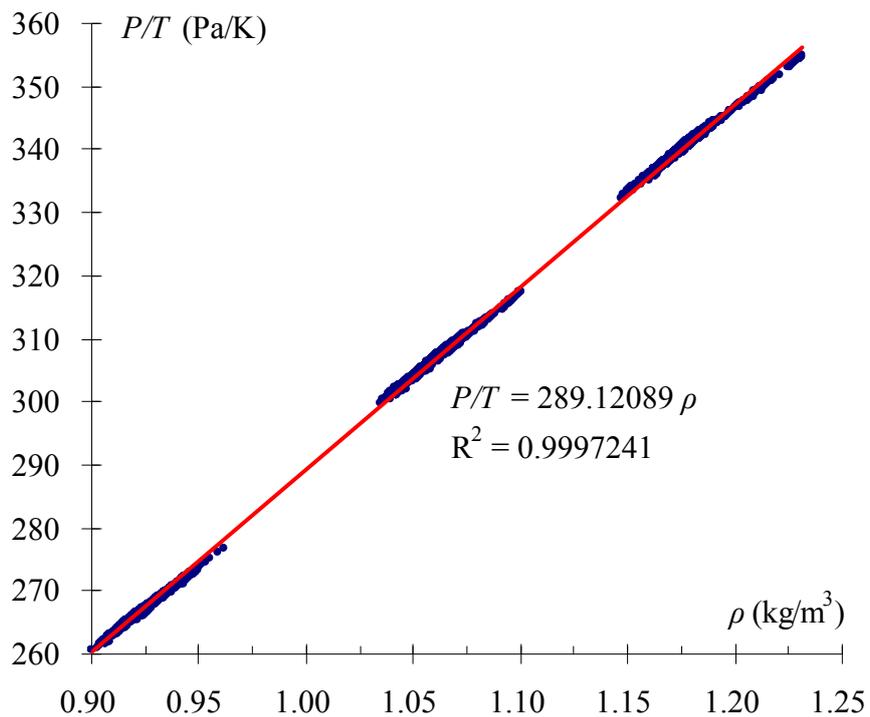


圖27 由 3 座氣象站的長期天候觀測數據演算的大氣溫壓函數

由於理想氣體狀態方程式通常定義為 $P = \rho RT$ ，比較(36)式與理想氣體狀態方程式，可發現(36)式的常數 289.12 相當於氣體常數 R 。然而近地面大氣基本上是乾空氣與水蒸氣的混合物（就是濕空氣），因此 $R = 289.12$ （單位 $J/kg \cdot K$ ）相當於近地面濕空氣的長時間平均氣體常數。

於作業場所就近實施微壓差計的現場校正時，可利用(36)式來預測雙腔式微壓差訊號產生器的 1 小時訊號變動趨勢，應用步驟說明如後續章節。

第四節 純水密度的精密計算

填充於雙腔式微壓差訊號產生器左、右水箱內的工作液體，以純水為綜合物理性質最佳、最容易取得、價格最低的純物質。本文件所稱的純水，特指由市售逆滲透飲水機製備之常溫飲用水（電阻不低於 $1M\Omega$ ）。使用純水為工作液體有以下優點。

1. 無毒，無爆炸風險，為安全的工作液體。
2. 黏性低，於右水箱舉升後，可於數秒內達到新的液面平衡狀態。舉反例來說，若使用油性工作液體，則因其黏性較高，於右水箱舉升後，需數分鐘（矽油）至數小時（汽車機油）不等的時間，才能達到新的液面平衡狀態。
3. 揮發性有限，即使環境氣溫有微小變動，也不至於嚴重影響微壓差訊號的穩定度。舉例而言，若使用乙醇或甲苯等高揮發性物質為工作液體，雖然有黏性低、易達到新液面平衡狀態的優點，但環境氣溫只要稍有改變，微壓差訊號就發生顯著波動。
4. 幾乎隨時隨地都可由飲用水供應設備取得，也可使用市售瓶裝蒸餾水，工作人員不必事先製備儲存。

純水的密度評估方法，當然是以查表取得精密實驗數據[8]為最佳的方法，但在接近一大氣壓的環境中，液態水的密度可視為溫度的函數，因此有許多方便的函數可供使用。目前用以計算液態水密度的近似公式，以某廠商開發的 DIPPR105 函數最有名，該函數適用於 $0-100^{\circ}\text{C}$ 範圍的版本可表示如下。

$$\rho_w = \frac{0.14395}{0.0112 \left[1 + \left(1 - \frac{T}{649.727} \right)^{0.05107} \right]} \quad (37)$$

其中 ρ_w 為純水密度 (kg/m^3)
 T 為絕對溫度 (K)

雖然 DIPPR105 函數可應用於較大溫度範圍的液態水密度計算，但在接近室溫的範圍 ($0-40^{\circ}\text{C}$) 精確度卻稍嫌不足。由水力技術手冊[9]提供的較精確近似函數如下。

$$\rho_w = 1000 \left[1 - \frac{(t + 288.9414)(t - 3.9863)^2}{508929.2(t + 68.12963)} \right] \quad (38)$$

以查表所得之數據為基礎，本計畫另採多項式的形式建立了另一個近似函數如(39)式。前述的三種近似函數於接近室溫的範圍（0-40°C）計算結果比較如表 5。比較表 5所列的數據，可發現本計畫提供的(39)式計算結果最貼合查表所得數據。為了方便推廣本計畫成果，特別依(39)式與常用校正環境氣溫範圍（10-35°C）準備了一份便利的純水密度速查表如表 6，只需一個步驟就可找到答案：「從溫度欄找出低於但最接近於目標溫度的數字，右欄即是純水密度。」

$$\rho_w = -1.4074 \times 10^{-7} t^4 + 4.3869 \times 10^{-5} t^3 - 7.6704 \times 10^{-3} t^2 + 5.4437 \times 10^{-2} t + 999.86 \quad (39)$$

表5 水密度與溫度的關係

溫度 (°C)	純水密度(kg/m ³)			
	查表	本計畫 近似函數	DIPPR105 近似函數	水利手冊 近似函數
40	992.2	992.2	989.3	992.3
30	995.7	995.7	995.8	995.7
25	997.0	997.1	998.9	997.1
22	997.8	997.8	1000.8	997.8
20	998.2	998.2	1002.1	998.2
15	999.1	999.1	1005.2	999.1
10	999.7	999.7	1008.3	999.7
4	1000.0	1000.0	1011.9	1000.0
0	999.8	999.9	1014.3	999.9

表6 純水密度速查表（適用溫度範圍 10-35°C）

氣溫 (°C)	密度 (kg/m ³)	氣溫 (°C)	密度 (kg/m ³)	氣溫 (°C)	密度 (kg/m ³)
10.0	999.7	22.2	997.7	29.8	995.7
10.4	999.6	22.6	997.6	30.1	995.6
11.4	999.5	23.0	997.5	30.4	995.5
12.3	999.4	23.5	997.4	30.7	995.4
13.2	999.3	23.9	997.3	31.1	995.3
13.9	999.2	24.3	997.2	31.4	995.2
14.7	999.1	24.7	997.1	31.7	995.1
15.3	999.0	25.1	997.0	32.0	995.0
16.0	998.9	25.5	996.9	32.3	994.9
16.6	998.8	25.9	996.8	32.6	994.8
17.2	998.7	26.2	996.7	32.9	994.7
17.8	998.6	26.6	996.6	33.2	994.6
18.3	998.5	27.0	996.5	33.5	994.5
18.8	998.4	27.3	996.4	33.8	994.4
19.4	998.3	27.7	996.3	34.1	994.3
19.9	998.2	28.0	996.2	34.4	994.2
20.3	998.1	28.4	996.1	34.7	994.1
20.8	998.0	28.7	996.0	35.0	994.0
21.3	997.9	29.1	995.9	35.3	993.9
21.7	997.8	29.4	995.8	35.6	993.8

備註：以查詢 24.0°C 水密度為例，從溫度欄找到小於但最接近於此溫度的表列溫度為 23.9°C，由右欄直接讀出對應的純水密度為 997.3kg/m³。

第五章 微壓差訊號的品質改良

第一節 前言

取得精密且成本極低的微壓差訊號，是實現事業單位自行校正微壓差計的技術關鍵；有了低成本的自行校正能力，目前臺灣地區實際安裝應用於各行各業工業通風設備上的數萬具微壓差計與微壓差傳送器，才能在「事業單位無須負擔高額校正費用」的經濟優勢下，確保它們發揮應有的監測效能，確保包括工業通風設備在內的相關製程設備正常運轉，達到保護勞工呼吸健康、確保環境空氣清淨度、提高半導體產品良率、提高藥物產品品質等多重目的。本章以「能預期微壓差訊號變化」為目標，檢討影響雙腔式微壓差訊號產生器性能的各项因素。

第二節 右水箱垂直位移調整機構的改良

本計畫初期測試用的右水箱位移調整機構如圖 28所示，係以廉價的剪形升降台舉升右水箱，然後以黏貼在固定物上的普通鋼尺來確認右水箱垂直位移。

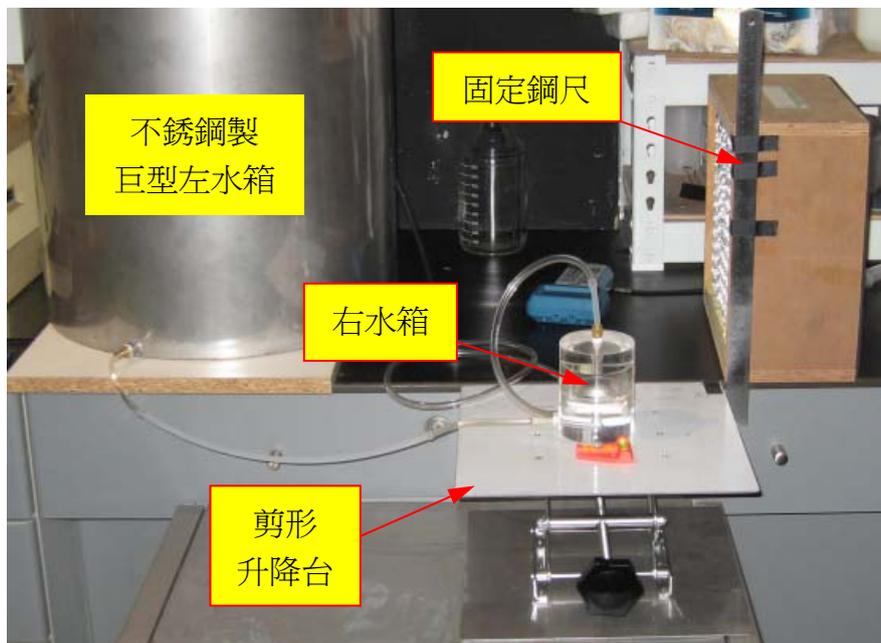


圖28 最早期使用剪形升降台與鋼尺製作的垂直位移調整機構

圖 28 的定位方法十分粗糙簡陋，配合實施的實驗範圍落在 500-1500Pa 左右。此機構雖然簡陋，但成功產生了能維持至少 1000 秒（訊號波動幅度 $\pm 0.3\text{Pa}$ ）的穩定微壓差訊號。在不斷的嘗試摸索中，我們發現以下特性。

1. 在條件完全相同的半開放性實驗環境裏，只要室外大氣溫度（同時也是工作液體溫度）不高於 15°C ，無論晴雨，都能在 0-1500Pa 的範圍裏產生波動幅度 $\pm 0.3\text{Pa}$ 、延續 1000 秒以上的穩定微壓差訊號；若氣溫高於 25°C ，則微壓差訊號有較大波動。
2. 左水箱內的工作液體種類對微壓差訊號的穩定度有顯著影響。若使用酒精等高揮發性液體為工作液體，則微壓差訊號上下波動猛烈，易受環境氣溫變動影響；若使用機油等低揮發性、高黏度液體，則微壓差訊號大小會呈現連續不斷的低速震盪。
3. 左、右兩個水箱的尺寸與形狀必須完全相同，才能抵抗環境氣溫變化，在更長的時間範圍裏（例如 1 小時）維持微壓差訊號的穩定輸出；若左、右兩個水箱的大小差異過大，則只有在環境氣溫穩定不變時，才能維持微壓差訊號的穩定。

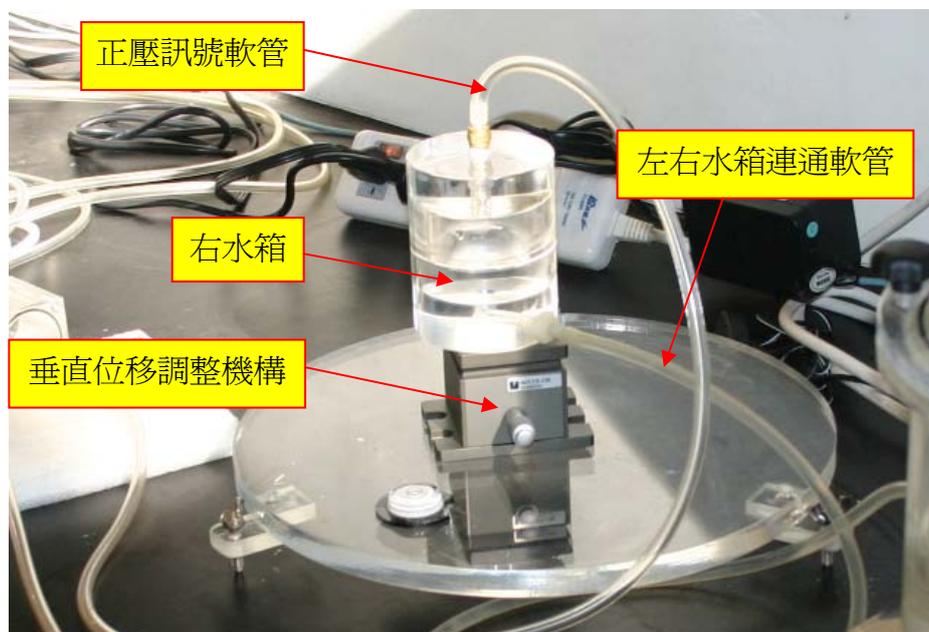


圖29 利用 Unice 06VTS-1M 垂直式移動平臺為垂直位移調整機構

由圖 28 所示的初期器材獲得的經驗總結，研究人員稍後直接選用市售的國產 Unice 06VTS-1M 垂直式移動平臺（如圖 29 所示）作為右水箱垂直位移調整機構。此

器材為光學實驗常用的零組件，大多用來調整對正兩光學透鏡的光軸。此器材使用螺旋測微計（micrometer）作為垂直位移調整機構，最大垂直位移為 5mm，定位解析度為 0.01mm，相當於大約 0.1Pa 的微壓差訊號解析度。對本計畫而言，此器材可用以產生 0-50Pa 的微壓差訊號。實測結果性能良好，但本計畫的目的是要產生 0-1500Pa 的微壓差訊號，因此必需另外準備能產生約 0-150mm 的垂直位移，且定位解析度同樣為 0.01mm 的右水箱垂直位移調整機構。

基於以上兩種實驗器材的設計經驗，本計畫自行研發製作了如圖 30所示之新型右水箱垂直位移調整機構（細部設計呈現於次頁圖 31）。此新型器材以手握持手輪的曲柄，轉動手輪時會帶動滾珠導螺桿轉動，然後再由滾珠導螺桿帶動右水箱承載平台上下移動。此新型器材的垂直位移定位顯示裝置為一具解析度 0.01mm 的數位游標卡尺。使用方法非常簡單：將右水箱放置於承載平台上，接著解除橘色升程定位器的扣緊狀態，操作曲柄手輪帶動承載平台上下，由游標卡尺的液晶螢幕確認右水箱的實際升程是否符合預期，最後再將橘色升程定位器重新扣緊即可。



圖30 本計畫自行設計之新型垂直位移調整機構

此新型器材原擬製作為自動化的動力機械，但綜合考量後仍製作為手動機構的型式，主要原因是為了推廣本計畫的研究成果，降低右水箱垂直位移調整機構的製作成本。此新型器材的微壓差訊號設計解析度設定為 0.1Pa，恰好吻合數位游標卡尺的

定位解析度（0.01mm），且製造此器材的工作母機加工精密度恰好能滿足這樣的設計搭配。注意：如欲產生更精細的微壓差訊號，則無可避免必須全面提高所有的製作工藝水準，此時將導致製造成本嚴重偏高，因而偏離普及本計畫研究成果的初衷。

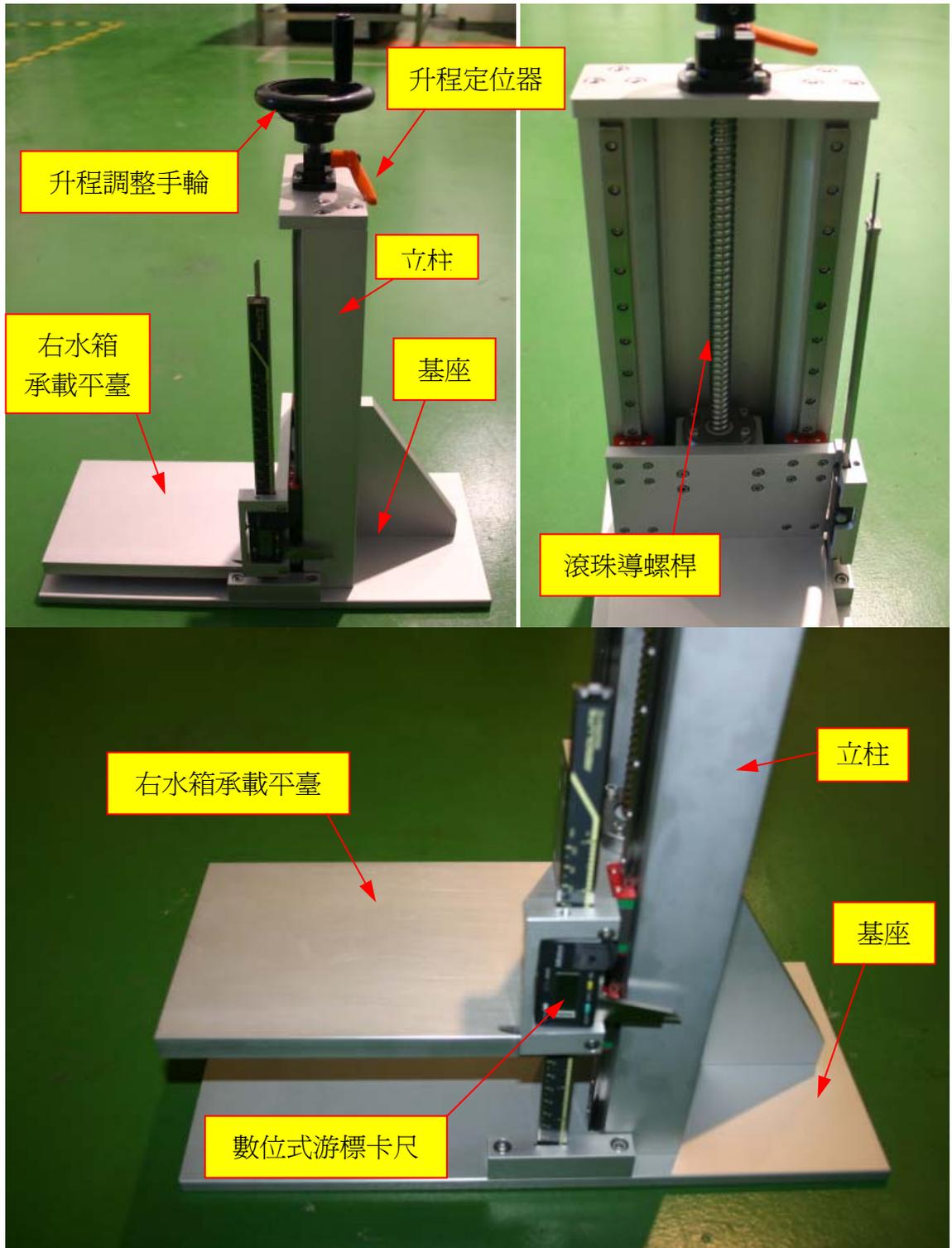


圖31 本所自行研發之新型垂直位移調整機構細部照片

第三節 考慮器材對環境氣溫變動的容忍能力

由(23)式與(24)式，我們知道雙腔式微壓差訊號產生器的微壓差訊號 ΔP 可由右水箱垂直升程 h 決定，但由(16)式的推導過程，我們也知道這樣的說法是基於「環境氣溫不變」的假設。換言之，如果環境氣溫發生了變動，那麼(23)式與(24)式就不能準確地決定微壓差訊號 ΔP 的大小，此時 ΔP 的大小會隨著環境氣溫的變動而上下波動。爲了這個緣故，搭配雙腔式微壓差訊號產生器實施的微壓差計原級校正方法，於每一個校正點產生微壓差訊號用以校正的時間不能太長。

由長期的實驗觀測結果，我們建議這段時間最好爲 200 秒以內，換句話說，當雙腔式微壓差訊號產生器開始輸出微壓差訊號後，使用者必須於 200 秒內完成這個點的校正，否則就須重行校正。

前述的 200 秒時間是如何決定的呢？主要是基於天候觀察。以臺灣地區日夜氣溫變化最大的嘉義地區爲例，於冬季天氣晴朗時，日夜溫差可達最嚴重的程度。中央氣象局嘉義氣象站典型的冬季晴天日天候變化監測資料呈現如圖 32（數據自中央氣象局網站下載），從日出到正午之間的 6 小時之內，氣溫攀升達 9.3°C ；若單純以氣溫爬升率來看，於 8-10 時之間，每上升 1°C 氣溫所需的時間只需要 24 分鐘。這麼嚴重的氣溫變動已足以使 ΔP 的大小發生不可接受的波動。

除此之外，上一節的討論中敘述了左、右水箱若非完全相同的元件時，則 ΔP 波動相對較明顯的現象，爲此我們修正雙腔式微壓差訊號產生器的使用規範如下。

1. 左水箱與右水箱必須爲完全相同的元件，且須具有相當的隔熱能力。考量器材體積不宜太大，且新型右水箱垂直位移調整機構之承載重量有限，建議使用以下規格的壓克力圓管制作兩具水箱：內徑 180mm，內部高度 200mm，管壁厚度與上下圓形蓋板之厚度至少 10mm。
2. 爲了使水箱內空氣密度維持穩定，指定使用純水爲工作液體，並安裝超音波霧化器，於使用前強迫水箱內的空氣變成飽和濕空氣。
3. 規定每一點校正實施時間最長爲 200 秒，且須於訊號輸出後盡快完成校正。

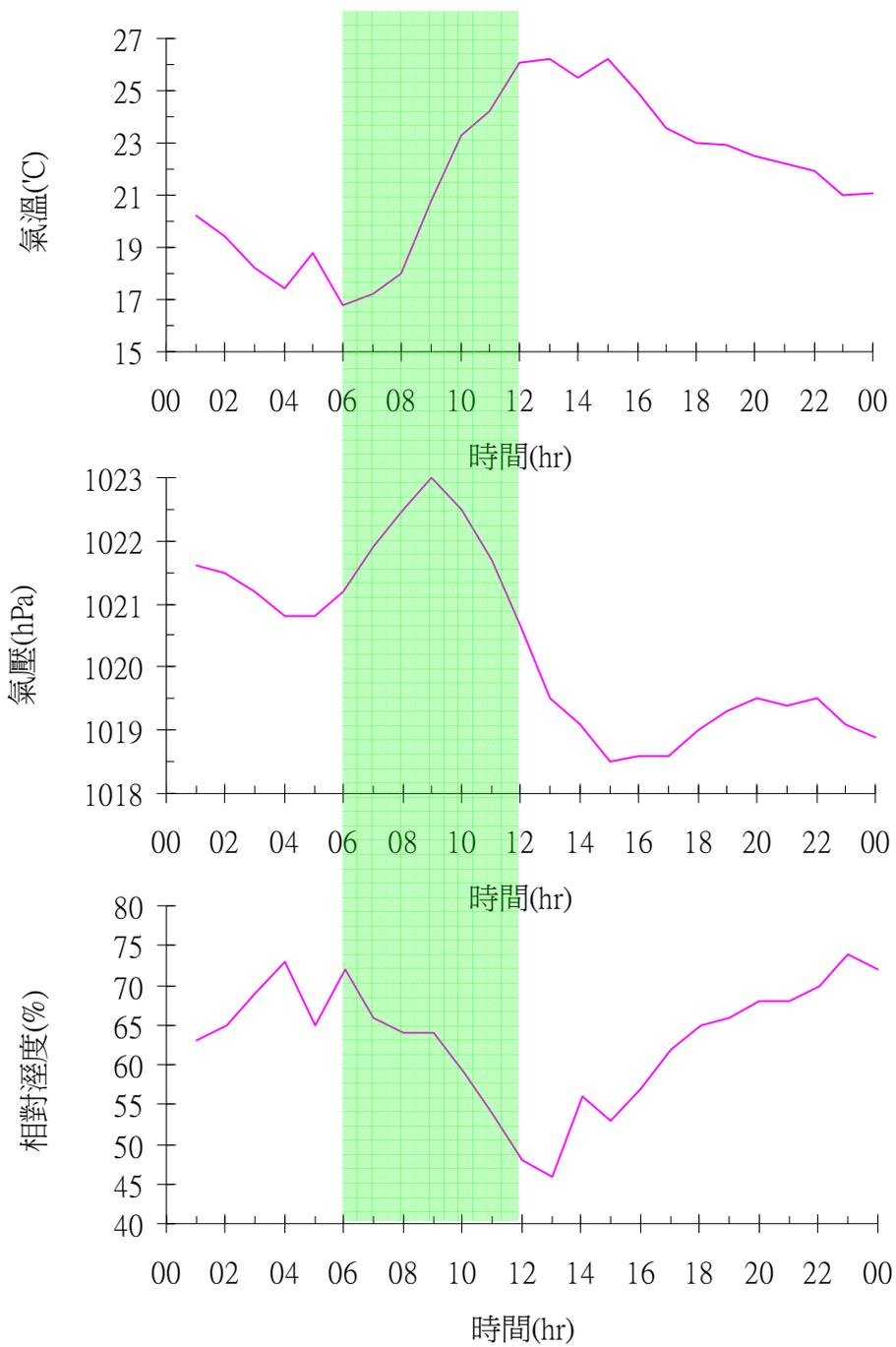


圖32 嘉義冬季晴天典型的 24 小時氣溫、氣壓、相對溼度變化

第四節 改良案例

以下示範一個運用本章技術改良措施的具體案例：選用圖 30所示的新型垂直位移調整機構，以純水為工作液體，令水箱內徑 180mm、內部高度 200mm，水深 100mm，使用前以超音波水霧震盪器將左、右水箱內的純水強迫霧化 5 秒鐘（強迫水箱內的空氣飽和）。改善結果如圖 34，可產生穩定的微壓差訊號，且訊號品質遠遠超過圖 25的舊設計。

以 RMP-4 精密微壓差計為假想的待校正件，執行原級測試校正的結果，在 100 秒的延續時間裏，微壓差訊號的變動量不到 0.02Pa；在 240 秒的延續時間裏，變動量不到 0.05Pa；在 1000 秒的延續時間裏，微壓差訊號的變動量不到 0.2Pa，已足夠應付原級校正所需。



圖33 本節改良實例版雙腔式微壓訊號產生器運作實況

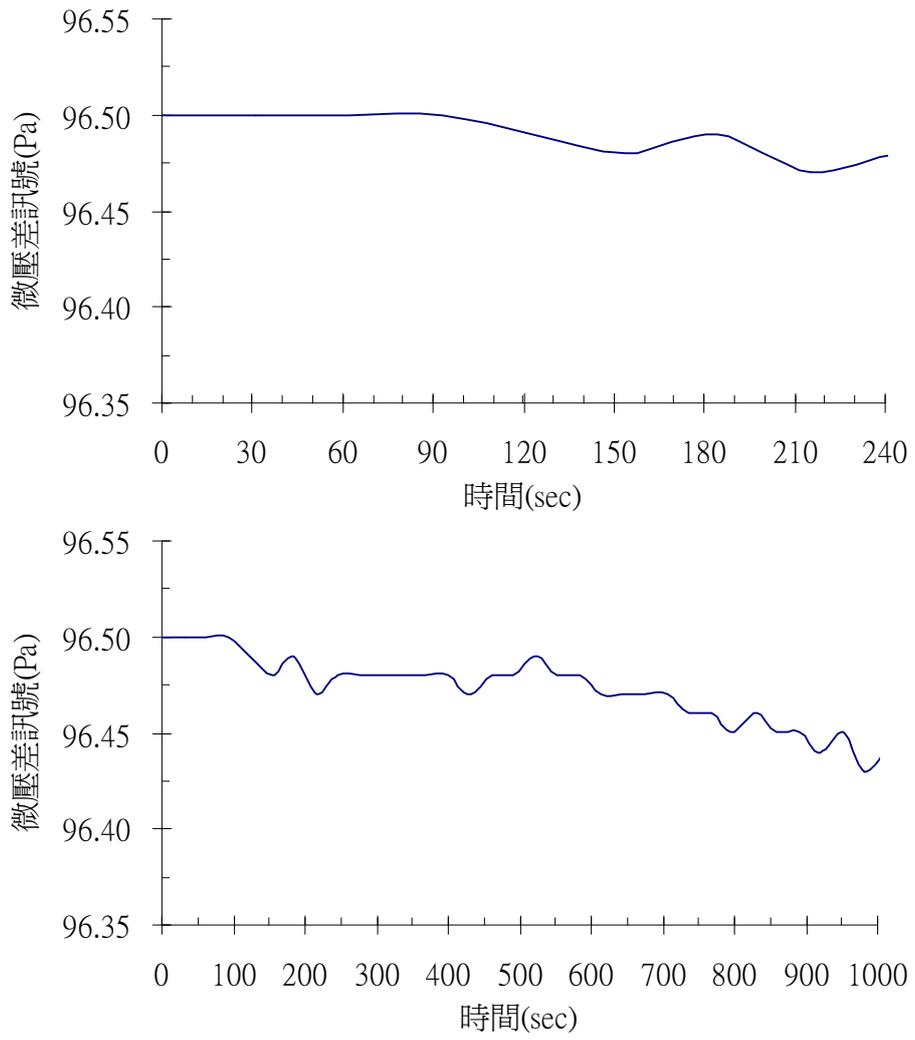


圖34 雙腔式微壓訊號產生器典型的訊號輸出實況

第六章 結論

本計畫成功研發了「單腔式微壓差訊號產生器」與「雙腔式微壓差訊號產生器」，並提出搭配這兩套新設備的應用建議方案（附件一與附件二）。事業單位利用本計畫的研發成果，於派員接受適當教育訓練後，就有機會建立原級校正能力，得以自行校正解析度 1Pa 或 0.1Pa 的大多數微壓差計，並因此顯著減輕經濟負擔，不必再擔憂校正微壓差計所需的費用過高。

事業單位有了準確的微壓差計，有助於確實監測包括工業通風設備在內的設備性能，其中包括氣罩的抽氣能力、通風導管的風量大小、排氣導管的靜壓大小、室內作業場所的負壓或正壓等，使工作場所的空氣品質獲得更多保障，同時也使製程設備的性能更可靠。

前述的單腔式微壓差訊號產生器，以「訊號足夠穩定、結構輕巧、造價低廉、攜帶方便、操作簡單、無需保養」等諸多優點，深獲研究人員好評，適用於解析度 1Pa 或 2Pa 的微壓差計，目前已投入本所每年定期實施的微壓差計次級校正工作，同時也圓滿完成台灣南部、東部三所醫院的微壓差計免費校正服務。

前述的雙腔式微壓差訊號產生器，擁有「訊號高度穩定且可由公式預測其大小、結構簡單、造價低廉、保養容易」等優點，對於解析度達 0.1Pa 的精密微壓差計原級校正工作而言，是成本最低的可靠解決方案。

本計畫執行期間已發表 2 篇國內研討會論文[1][5]，並發表 1 篇國際研討會論文[10]；由於累積的實驗數據較多，預計自 99 年起可再發表若干研究結果。我們期待於 99 年將所有數據（含不確定度分析等未能明確登載於本文件之關鍵性能數據與設計詳圖）完成整理並提出專利申請後，藉由訓練活動，逐漸將國內的微壓差計校正服務轉入自主校正階段，鼓勵事業單位定期確認微壓差計的量測品質，讓通風設備與製程設備的氣壓差異監測結果更為準確，提高產品良率與品質穩定度，同時也使勞工的呼吸健康獲得更多保障。

誌謝

本研究計畫除本所研究人員勞工衛生組長張振平博士、副研究員王順志、助理研究員邱振邦、研究助理陳柏良、暑期實習生中國醫藥大學吳嘉曜同學之外，特別感謝本所顧問葉文裕先生、長榮大學陳友剛教授、戴聿彤教授、聖約翰科技大學吳順治教授多方面的指導與督促，使本計畫得以順利完成，謹此敬致萬分謝意。

參考文獻

- [1]王順志、邱振邦、張振平：微壓差訊號產生器之研發與校正應用。CSME25-13，中國機械工程學會第 25 屆全國學術研討會，2008 年 11 月 21-22 日，彰化。
- [2]王順志、張振平：0-100°C 濕空氣密度計算方式之探討。勞工安全衛生研究季刊 2008；16(4)：401-414。
- [3]Peters RD. Whirling Catheter Method to Calibrate Low Pressure Sensors. Technical Report 2000. <http://physics.mercer.edu/petepag/catheter.html>.
- [4]陳呈芳，熱力學概論（SI 版），麥格羅•希爾國際出版公司，2006。
- [5]王順志，邱振邦，陳柏良：雙腔式微壓差訊號產生器之特性。OF1-06，工業衛生暨環境職業醫學學術研討會，2009 年 4 月 25-26 日，台中。
- [6]交通部中央氣象局，地震百問，第 4 頁。交通部中央氣象局印行；2008。
- [7]Charles Scribners & Sons Publishing. Concise Dictionary of Scientific Biography, 2nd Edition. New York: Charles Scribner's Sons. 2000.
- [8]Lide DR. CRC Handbook of Chemistry and Physics 70th Edn. Boca Raton, 1990.
- [9]Maidment DR, editor. Handbook of Hydrology. New York: McGraw-Hill; 1993.
- [10]Wang SC, Chang CP. A New Method and Device Thereof for Calibration of Low Differential Pressure Manometers at the Range 0-1500Pa. Ventilation 2009: OCT 18-21, Zurich, Switzerland, 2009.

附錄一 單腔式微壓差訊號產生器之建議應用方案

1. 器材製作：單腔式微壓差訊號產生器之製作參考本文件第三章第二節。
2. 校正對象：假設校正對象為市面上用途較廣、數量較多的電子式微壓差計，其量測範圍為 0-500Pa，解析度 1Pa，量測誤差為 $\pm(1\text{Pa}+1\%\text{讀值})$ 。
3. 校正範圍：50-500Pa，至少校正 6 點（50、100、200、300、400、500Pa）。
4. 校正環境：為通風良好、室內瞬間最大風速不高於 0.3m/sec，且陽光無法直射（或穿透窗戶間接直射）校正位置的普通室內環境。
5. 器材準備：以圖 30、圖 31所示之垂直位移調整機構舉升透明小管。將垂直位移調整機構舉與密閉絕熱剛性水箱一起放置於平坦的工作桌面，以水平儀校正透明小管及密閉絕熱剛性水箱的安裝姿態。
6. 校正準備：參考圖 15，將標準件與待校正件之正、負微壓訊號管端並聯，然後與微壓差訊號產生器之訊號輸出端連結。在無壓差訊號的情況下，將標準件與待校正件之讀值都強制歸零。
7. 開始校正：操作微壓差訊號產生器，產生由(11)式預測的微壓差訊號，由標準件、待校正件各以每隔 1 秒紀錄一筆的速度連續紀錄 100 筆讀值；紀錄時須同時押下標準件、待校正件的紀錄按鈕，使兩者的讀值紀錄時間同步。
8. 統計分析：已紀錄的 100 筆讀值若滿足以下條件，則為 1 個點的成功校正，否則廢棄此校正結果並立即檢討原因。
 - (1) 標準件與待校正件的量測結果都滿足「讀值=眾數=平均值=中位值」的條件。標準件與待校正件的量測結果若有不同，是正常的。若標準件滿足以上條件，但待校正件不滿足以上條件，則待校正件已損壞。
 - (2) 標準件與待校正件的量測結果都滿足「最大值與最小值之差不大於 0.6Pa」，且滿足「眾數落在最大值與最小值之間」的條件。若標準件滿足以上條件，但待校正件不滿足以上條件，則待校正件已損壞。

(3) 標準件與待校正件的量測結果，讀值之分佈型態均為近似常態分布。

9. 校正結果：以標準件之眾數為標準值，標準值與待校正件讀值之間的差異為待修正量。回到步驟(5)，繼續校正，直到 6 個點全部校正完成。

附錄二 雙腔式微壓差訊號產生器之建議應用方案

1. 器材製作：雙腔式微壓差訊號產生器之設計製作方式請參考本文件第三章第四節、第四章、第五章，具體案例請參考第五章第四節。
2. 校正對象：假設校正對象為較精密的準儀器級電子式微壓差計，其量測範圍為 0-100Pa，解析度 0.1Pa，量測誤差為 $\pm(0.1\text{Pa}+1\%\text{讀值})$ 。
3. 校正範圍：10-100Pa，至少校正 6 點（10、20、40、60、80、100Pa）。
4. 校正環境：為設有空調設備的半密閉式恆溫實驗室，校正位置（工作桌面）之每小時氣溫變動幅度不大於 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。
5. 器材準備：以圖 30、圖 31所示之垂直位移調整機構舉升右水箱。將垂直位移調整機構舉與左水箱一起放置於平坦的工作桌面，以水平儀校正左、右水箱的安裝姿態，以及垂直位移調整機構的底座安裝姿態。
6. 校正準備：將待校正件之正、負微壓訊號管端與雙腔式微壓差訊號產生器之正、負訊號輸出端連結。在無壓差訊號的情況下，將待校正件之讀值強制歸零。若待校正件可同時量測正、負微壓差訊號，則由正值側朝向負值側歸零。
7. 開始校正：操作雙腔式微壓差訊號產生器，產生由(23)式與(24)式（或日後對這兩個理論公式的修正版）預測的微壓差訊號，令待校正件以每隔 1 秒紀錄一筆的速度連續紀錄 100 筆讀值。注意(23)式與(24)式之計算需使用第四章第二節對重力加速度之修正公式，以及第四章第四節對純水密度之修正公式。
8. 統計分析：已紀錄的 100 筆讀值若滿足以下條件，則為 1 個點的成功校正，否則廢棄此校正結果並立即檢討原因。
 - (1) 待校正件的量測結果滿足「公式預測值=讀值=眾數=平均值=中位值」的條件。若待校正件不滿足以上條件，則須送修後再校正。
 - (2) 待校正件的量測結果滿足「最大值與最小值之差不大於 0.6Pa」，且滿足「眾數落在最大值與最小值之間」的條件。若待校正件滿足了第(1)個條件，但卻不滿足本條件，則雙腔式微壓差訊號產生器可能故障或訊號管路發生洩漏。

(3) 待校正件的量測結果，讀值之分佈型態均為近似常態分布。

9. 校正結果：以預測公式之計算結果為標準值，標準值與待校正件讀值之間的差異為待修正量。操作右水箱垂直位移調整裝置，將右水箱垂直位移先降到-3mm 的位置，再緩慢向上舉升到原點。回到步驟 7 繼續校正，直到 6 個點全部校正完成。

微壓差訊號產生方法與應用探討

著者：王順志

出版機關：行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所

221 台北縣汐止市橫科路 407 巷 99 號

電話：02-26607600 <http://www.iosh.gov.tw/>

出版年月：中華民國 99 年 2 月

版（刷）次：1 版 1 刷

定價：100 元

展售處：

五南文化廣場

台中市中區中山路 6 號

電話：04-22260330

國家書店松江門市

台北市松江路 209 號 1 樓

電話：02-25180207

本書同時登載於本所網站之「出版中心」，網址為

http://www.iosh.gov.tw/Book/Report_Publish.aspx

- 本所保留所有權利。欲利用本書全部或部分內容者，須徵求行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所同意或書面授權。

【版權所有，翻印必究】

GPN: 1009900760