



勞工安全衛生研究報告

罩式風量計校正方法之探討 A Study on Calibration Methods for Air Flow Capture Hoods

罩式風量計校正方法之探討



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

ISBN:97898603-2201-9



GPN:1010100790
定價:100元

行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所

罩式風量計校正方法之探討

A Study on Calibration Methods for Air Flow Capture Hoods

行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所

罩式風量計校正方法之探討

A Study on Calibration Methods for Air Flow Capture Hoods

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 100 年 05 月 01 日至 100 年 12 月 31 日

行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所
中華民國 101 年 03 月

摘要

隨著空調產業製品規格的統一趨勢，室內空調進、排氣口的型號尺寸也逐漸統一，進、排氣風量的量測隨之簡化。罩式風量計於廿世紀後期首先出現於歐美地區，是空調業者、室內空氣品質諮詢機構常用的直讀式風量量測儀器，主要用途是在同一棟建築物內，快速量測同一套空調系統設置於各室內工作場所的進、排氣口風量，以便進行平衡計算，在滿足工作人員需要的前提下達到節約空調電費的目的。自廿世紀末至今，罩式風量計廠牌機種大量增加，使用罩式風量計變成一種趨勢，國內空調技術與環測專業機構也逐漸引入罩式風量計，應用於不同的通風量測場合。

雖然罩式風量計的發明時間很晚，但普及速度太快，各國至今均無標準校正方法。雖然罩式風量計的生產廠商都聲稱已採用可追溯至國家標準的產品校正方法，但由於校正比對方法缺乏共識，各廠商對於具體的校正作法也不願公開，因此準確度如何仍是個問題。目前國內的罩式風量計，除了送請國外原廠校正之外，也有國內儀器代理業者自稱有能力校正，但不就校正方法提供任何說明。本所自 92 年起經常使用罩式風量計，深知罩式風量計使用簡便、用途廣泛的優點，但為確保量測結果的精確度起見，必須確認罩式風量計性能足堪使用。

本計畫就罩式風量計的校正方法作深入實驗與研究。除了從頭推導相關公式、蒐集相關文獻，並將本所兩套老舊的通風實驗設備，更新改造為罩式風量計的可用校正比對設備，使本所具備自行校正罩式風量計的技術能力。除此之外，由於研究過程中必須運用若干基礎的工業通風量測技術，因此包括風速測定、皮托管風速量測、層流板風量量測、微壓差量測、濕空氣密度與黏度之決定等，也一併檢討。

關鍵詞：罩式風量計、校正、量測

Abstract

In late 20th century, industry of Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) reached to the consensus on standardization of indoor HVAC terminal components. To embody the standardization of square supply air grilles (conditioned air inlets) and return air grilles (room air outlets), number of types/sizes has been reducing in the past 30 years, and now there are less than 5 popular types/sizes only. While there are only several sizes of the square air grilles, air flow capture hoods (AFCHs) become popular for measurement of airflow rates on the air grilles, because the capture envelope of AFCHs can be easily changed to meet different sizes of air grilles. With the aid of AFCHs, HVAC engineers can greatly simplify the balancing process for each room in a building.

Compared with other industrial ventilation instruments, AFCH is such a new instrument that there is yet any standard in any country for reliable calibration. Though most of the manufactures of AFCHs declare that they have developed their own NIST-traceable methods to give good calibration for their products, the Taiwan IOSH decided to launch this project to make sure all AFCHs used in IOSH-related actions as well as the airflow rate measurements obtained in these actions will be reliable enough.

In this project, we carefully reviewed details for calibration of AFCHs. Component techniques needed for this macroscopic purpose, such as determination of humid air viscosity / density, measurement of duct dynamic pressure, very low differential pressure, Pitot's tube velocimetry, airflow measurement with Laminar Flow Elements (LFEs), have been reviewed, too. We also modified and reconstructed some facilities to establish an AFCH calibration laboratory.

Key Words: Air capture hood, calibration, measurement.

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 背景資訊.....	1
第二節 簡介罩式風量計.....	3
第三節 罩式風量計到底準不準？.....	4
第四節 目的.....	6
第五節 工作項目.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第二章 濕空氣的動力黏度.....	8
第一節 物質相變態概要.....	8
第二節 相、鍵結與狀態特性概要.....	9
第三節 氣體的動力黏度定義.....	11
第四節 乾空氣與濕空氣的黏度.....	12
第五節 濕空氣動力黏度修正公式.....	15
第三章 風速計比對用風洞之改造.....	20
第一節 背景說明.....	20
第二節 風速計校正比對方式簡介.....	20
第三節 本所低風速風洞改造前狀況簡介.....	21
第四節 低風速風洞改造方式.....	23
第五節 改造後的風洞運用方式.....	24
第四章 罩式風量計專用校驗設備之建造.....	35
第一節 背景說明.....	35
第二節 罩式風量計專用校驗設備設計概念.....	35

第三節 設備完成結果簡介	37
第四節 設備使用標準程序	錯誤! 尚未定義書籤。
第五章 結論	50
誌謝	52
參考文獻	53
附錄一：罩式風量計專用校驗設備建議作業程序	54
附錄二：風速計比對用風洞建議作業程序	56

圖目錄

圖 1 氣壓 1000 或 1020HPA、相對溼度 40-80%的濕空氣密度	2
圖 2 某罩式風量計的風罩外觀與儀表鍵盤（廠牌符號已塗銷）	3
圖 3 精密與正確的概念示意圖	5
圖 4 重現性佳但不精密案例（左）與重現性不佳但較精密案例（右）	6
圖 5 二氧化碳（左）與水（右）的相變態特性	8
圖 6 黏滯效應：空氣分子愈接近薄板表面，流動速度愈低	11
圖 7 空氣與水的氣態混合物黏度	15
圖 8 由 KUMAR 方法計算一大氣壓環境的濕空氣動力黏度	18
圖 9 吸氣式開迴路風洞：L 形本體結構	26
圖 10 吸氣式開迴路風洞：空氣吸入口外觀	27
圖 11 吸氣式開迴路風洞：自右起分別為束縮段、測試段與後整流段	27
圖 12 吸氣式開迴路風洞：前整流段至後整流段特寫	28
圖 13 吸氣式開迴路風洞：自左起分為後整流段、風機段、90 度轉彎段	28
圖 14 吸氣式開迴路風洞：90 度轉彎段特寫（內設 1/4 圓弧導流片）	29
圖 15 吸氣式開迴路風洞：風洞出口段特寫（右方為出口）	29
圖 16 吸氣式開迴路風洞：出口修改前之斷面形狀	30
圖 17 吸氣式開迴路風洞：出口修改前外觀（自戶外拍攝）	30
圖 18 吸氣式開迴路風洞：出口修改前底部傾斜突出部位特寫	31
圖 19 吸氣式開迴路風洞：出口整平修改設計概念	31
圖 20 拆除多餘的整流片，修平風洞出口底部的傾斜突出部位	32
圖 21 風洞出口多孔板安裝方式設計概念	32
圖 22 風洞出口整流用壓克力「多孔魚眼板」實際安裝情形	33
圖 23 風洞出口多孔魚眼板邊緣以雙層黑色氣密襯條密封	33
圖 24 罩式風量計風洞校驗方法想像圖（適用於出風口）	34
圖 25 罩式風量計風洞校驗方法想像圖（適用於排氣口）	34
圖 26 核心元件或感測器校驗方法想像圖（視為普通風速計）	34
圖 27 罩式風量計專用校驗設備平面佈置圖（未依比例繪製）	40
圖 28 設備外觀：右為可調整開口面積的吸氣入口凸緣）	41
圖 29 方形凸緣排氣口（開口尺寸由壓克力板決定）	41

圖 30 自右起分別為阻力網、蜂巢結構、HEPA 濾網段、束縮段.....	42
圖 31 皮托管測試段（右）與層流板風量計（左）特寫.....	42
圖 32 忙碌的研究人員正在覆核皮托管於監測段中的插入深度與安裝姿態.....	43
圖 33 皮托管監測段尺寸略圖.....	43
圖 34 研究人員於實驗進行前覆核皮托管的姿態角.....	44
圖 35 層流風量計之外觀（左）與多重環形層流板結構（右）.....	44
圖 36 離心風機入口束縮段與撓性接頭特寫（以矽膠封閉孔隙）.....	45
圖 37 控制離心排氣機轉數的可程式變頻器.....	45
圖 38 校正風洞的離心排氣機與出口擴張段.....	46
圖 39 校正風洞的出口部分外觀特寫.....	46
圖 40 校正風洞的出口擴張段、濾網與蜂巢段、與附凸緣出風口.....	47
圖 41 校正風洞的出風口蜂巢結構與阻力網特寫.....	47
圖 42 皮托管測試段圓心部位的動壓分布.....	48
圖 43 皮托管測試段圓心部位的風速分布.....	48
圖 44 皮托管測試段圓心部位的動壓標準差分布.....	49
圖 45 對應皮托管測試段實驗量得的層流板風量計壓損.....	49

表目錄

表 1 由 KUMAR 公式計算的濕空氣動力黏度數據.....	19
---------------------------------	----

第一章 計畫概述

第一節 前言

製程或勞務工作的產物，可能改變工作場所的空氣組成，因此在勞工作業場所進行風量量測時，不但要考慮雜質（氣體、蒸氣或氣膠）於空氣中的組成比例，要補償因為氣壓、溫度、相對溼度變動造成的誤差，還要注意腐蝕性氣體、粉塵微粒對儀器探頭造成的材質腐蝕與性能劣化等影響，因此於勞工作業場所進行風量量測時，量測結果的精確度往往受到量測人員專業素質、輔助儀器是否足夠、操作是否正確、補償修正選項是否正確考慮等多種因素影響，不容易得到理想的量測結果。若實施風量量測的場所位於空調辦公室，則由於種種背景條件的差異，風量的量測困難度會明顯降低。舉例說明如下。

1. 溫溼度變化範圍小：凡是供人員辦公或接待賓客的室內空調場所，其氣溫與相對溼度必接近於人體舒適範圍，通常維持在 50-70%之間，最高不會超過 80%。
2. 環境氣壓幾乎不變：台灣地區大部分辦公室設於低海拔地區，地勢偏高之處人跡罕至，因此大部分勞工作業場所不存在異常氣壓問題。除了風速偏高的離島、颱風來襲的特殊情況，以及特殊氣壓作業場所，環境氣壓維持在 1000-1020hPa 之間。
3. 空氣清淨度較高：大多數商辦大樓的辦公室空調系統具有「依二氧化碳濃度自動調整外氣流入比例」以及空氣循環過濾的功能，因此空氣品質較穩定。

基於前述背景，辦公室空氣自動具備「溫溼度宜人、氣壓正常、清淨度佳、空氣中有害物濃度低、空氣密度變動範圍較小且近似為氣溫函數」等理想特性，此時用於量測風量的儀器，也就隨之簡化。

本計畫的主要研究對象「罩式風量計」就是預期使用於空調辦公室、學校教室、生物實驗室、半導體業無塵室等空氣品質較佳的勞工作業場所，針對方形進氣口或排氣口特別設計的直讀式風量量測儀器。由於此風量計目前並無國際校正規範，本計畫的主要研究目的，就是設法建立相關校驗設備與方法。

第二節 適用罩式風量計的環境空氣特性

利用王順志等人[1]提出的濕空氣密度計算方法，以氣溫 20-30°C、相對溼度 40-80%、氣壓 1000 或 1020hPa 為條件，可得如圖 1所示的結果：基本上濕空氣密度是以氣壓、氣溫為主要變數的函數，對相對溼度的敏感性則較低。若令「環境氣壓」為風量量測儀器的可手動輸入參數，且於儀器內部建立氣溫補償電路，則相對溼度造成的濕空氣密度變化約±0.37%左右。對於允許誤差動輒超過 3%讀值的直讀式風量量測儀器而言，此變化小到幾乎可以忽略。

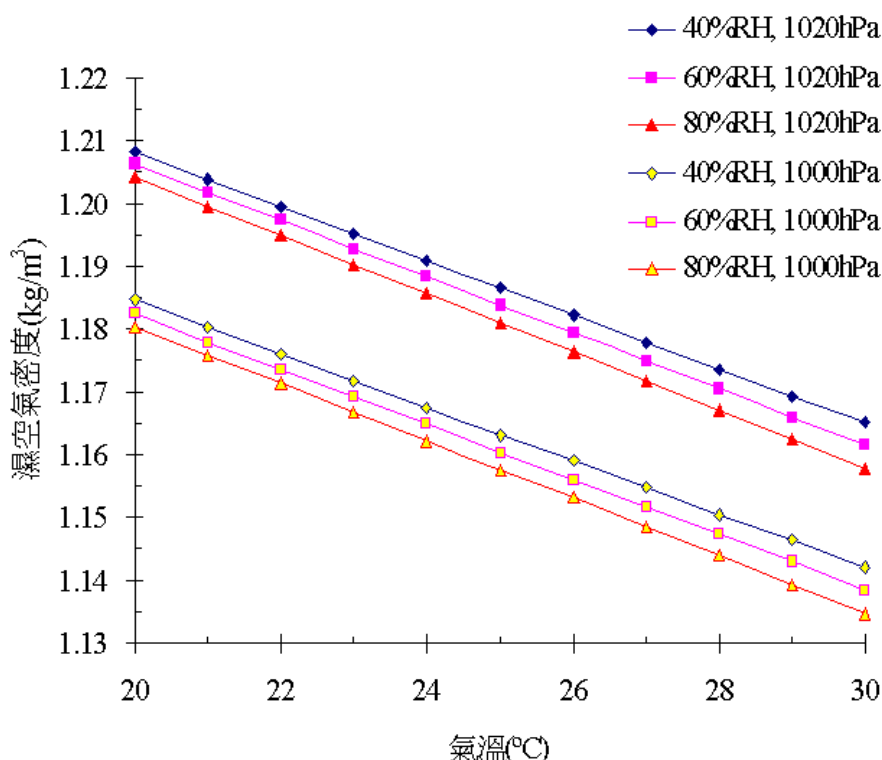


圖1 氣壓 1000 或 1020hPa、相對溼度 40-80%的濕空氣密度

由以上討論，我們得知針對空調辦公室等空氣品質較佳的勞工作業場所而言，在權衡量測精確度與儀器構造的複雜度之後，直讀式風量計常有以下特色。

1. 儀器內建可由使用者手動輸入修改的大氣壓力參數，以方便使用者引述當地氣象站發布的氣壓觀測數據，或利用使用者自行攜帶的大氣壓力計所量得的數據，於開始量測之前以手動方式輸入儀器，使儀器能自動修正風量數據。

- 儀器的總電路設有氣溫補償電路。若儀器內部沒有氣溫補償電路，則使用者必須先紀錄儀器顯示的數據，然後利用當地氣象站發布的氣溫觀測數據，或由使用者自行攜帶的溫度計量得的數據，搭配儀器的原理，以手動補償的方式修改風量數據。

第三節 簡介罩式風量計與其典型用途



圖2 某罩式風量計的風罩外觀與儀表鍵盤（廠牌符號已塗銷）

圖 2所示為某廠牌罩式風量計產品，其外觀、量測原理、操作方式與大多數市售罩式風量計相似，係採用熱線式感測器來量測風量。由於儀器內建電子溫度計與環境氣壓設定選項，因此可自動修正風量數據。照片中，頂在天花板上的黑色漏斗狀物體稱為風罩或風量斗，常由黑色纖維布製成，其下端為圓形開口，上端為正方形罩口，與安裝在天花板上的 2 呎見方通風開口尺寸吻合。使用者手動輸入環境氣壓後，由照片上的 LCD 螢幕可發現此儀器能自動顯示真實風量及風向。

風罩（或風量斗）內部由可拆卸的骨架支撐，以穩定維持風罩外形。罩口尺寸通常為「1 呎見方、2 呎見方、1 呎×2 呎」等，以適應各種常用的建築物通風口。空調業者利用罩式風量計，可依照空調技師所作設計，逐一調整各辦公室空間的通風量與換氣率，據以決定各樓層的通風換氣流路。其運用方式舉例說明如下。

- 廁所通常作為樓層的通風換氣流路終點，流入廁所的空氣直接排出戶外。換言之，由罩式風量計量得的單一樓層各進氣口總風量，必高於各排氣口總風量，且兩者之

間的風量差異稱爲此樓層的「設計換氣風量」。

2. 容納多數基層勞工的大辦公室或生產車間，由於人員出入頻繁，通常刻意不關門，且將這些空間安排爲通風流路起點。爲滿足人員通風需求，此類空間的進氣風量必高於排氣風量，或刻意不設排氣口，使多餘的空氣自動流出空間，然後沿著走廊流到廁所，以補足廁所的排氣需求。利用罩式風量計量測辦公室進氣口風量，再統計經常在辦公室工作的勞工人數，即可得知勞工的通風需求是否獲得滿足。
3. 一般企業的會議室通常與辦公室設於同一樓層，且出於保密的目的，使用時必須關門。會議室單位面積容納的人數較多，換氣率需求也較高。在關門情況下，利用罩式風量計量測會議室進氣風量，再核對會議室座位數，即可得知開會人員的通風需求是否獲得滿足；利用罩式風量計量測排氣風量，再與進氣風量比較，兩者必須相同或十分接近，否則將使會議室變成相對正壓（或負壓）空間，會議室門的啓閉將發生困難。

第四節 罩式風量計的精確度名詞簡介

商辦大樓或醫院病房，每逢年度空調設施的維護時節，可看到技術人員舉著罩式風量計和無線電對講機到處穿梭，由此可知國內罩式風量計的使用已十分普遍。有趣的是，雖然各國民間空調業者已將罩式風量計視爲必備工具，但至今沒有一個國家或學術組織提出此類儀器的校正標準。

換句話說，「罩式風量計到底準不準」這個問題，直到本計畫開始前，只能單方面相信生產廠商的校正能力。針對罩式風量計量測工作，可概略提出以下的名詞。

1. 真風量（true value, actual airflow）：流入或流出特定通風口的風量大小正確數值稱爲真風量。此數值實際上可能無法得到，因爲任何量測方法都有其不確定度。
2. 準確度（accuracy）：同一人使用同一具風量計，對同一個通風口反覆進行數次量測後，平均測得風量與平均真風量間的差異。舉例而言，對於一個穩定不變的真風量而言，若反覆多次量測所得的平均值與真風量相近，則稱此量測結果的準確度高（如圖 3 左起第二、四小圖）。

3. 精密度 (Precision)：風量計在相同的量測條件下，以相同的量測方法，對同一個通風口反覆進行數次量測後，測量結果落點的密集程度。舉例而言，對於一個風量穩定不變的通風口，若以相同方法反覆進行多次量測，每次量得的結果都落在極狹窄的範圍內（如圖 3 右半部兩個小圖），則稱此量測結果的精密度高。
4. 重復性 (Repeatability)：同一人使用同一部風量計，對同一個通風口反覆進行數次量測後，風量量測值的變異性。舉例而言，對於一個風量穩定不變的通風口，若由同一人手持同一部風量計反覆進行數次量測，所得結果分布在極狹窄的範圍內（如圖 3 右半部兩個小圖），則稱此量測結果的重復性高。
5. 再現性 (Reproducibility)：不同人員使用同一部風量計，輪流對同一個通風口進行量測後，所獲得的（由不同人員量得的）量測結果的變異性。
6. 量測變異性 (Gauge Repeatability and Reproducibility, GR&R)：即重復性與再現性之整體表現，可據以評估整體的風量量測能力。

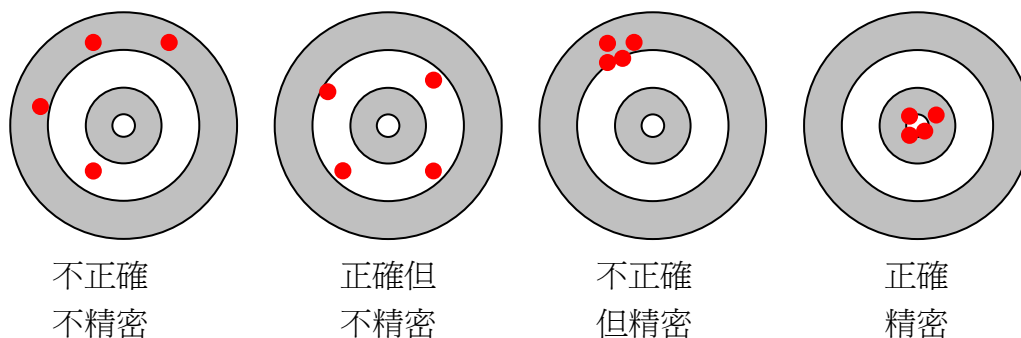


圖3 精密與正確的概念示意圖

精密度 (precision) 與重現性 (repeatability) 有時容易發生混淆，特以圖 4 舉例簡單比較如下。若發現同一部儀器的量測結果如左小圖呈常態分佈，則稱這部儀器的量測重現性佳，可惜其數據大小分佈幅度太寬，因此不精密；反之若發現量測結果如右小圖，其數據分布重現性不佳，但數據大小分佈幅度相對狹窄，因此較精密。

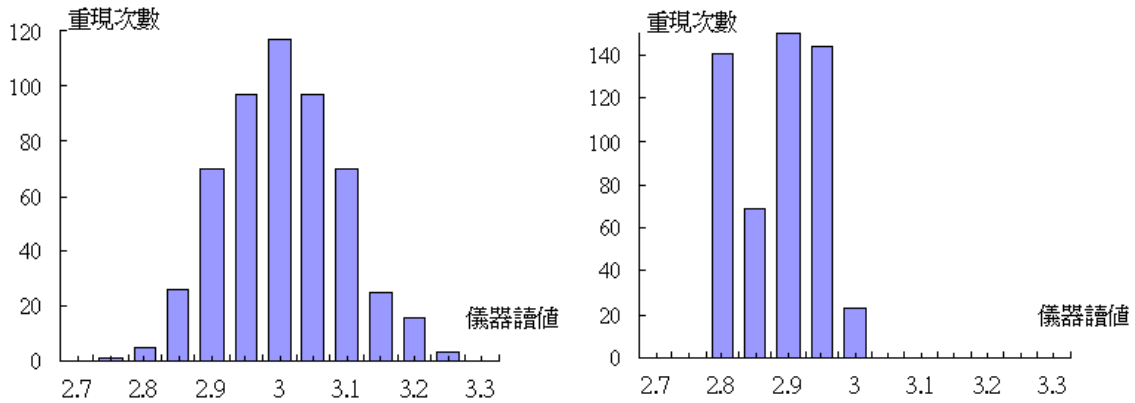


圖4 重現性佳但不精密案例（左）與重現性不佳但較精密案例（右）

第五節 罩式風量計的用途與精確度需求

罩式風量計的主要用戶是通風、空調或環測業者，其次是機關、學校、醫院的工務部門，最常見的用途是「平衡各通風口的風量」，以及「進行驗收測試」。此類工作常需在同一樓層、同一套通風空調系統範圍內工作數小時到數日不等，因此我們可以再提出以下補充說法。

1. 若在同一樓層、同一套通風空調系統範圍內作業，且各室內空間的溫溼度都差不多，則罩式風量計可以精密平衡各進排氣口的「風量比例」。注意此時的使用目的側重於精密度，只需平衡各通風口的風量相對比例即可，個別通風口的精確風量數值，則非量測重點。
2. 若須在短時間內跨越數個樓層，或對不同的通風空調系統進行量測，或各室內空間的溫溼度存在顯著的差異，則儀器操作人員必須有足夠的專業能力，且儀器本身的重現性（repeatability）必須良好，否則可能出現量測失敗的情況。

倘若同一部罩式風量計的空間量測範圍不限於一個樓層，而是跨越數個樓層、數棟建築物，甚至全面延伸到各種室內勞工作業場所，則罩式風量計的量測精確度，就可能出現大問題。本計畫的目的，就是為了因應並試圖解決此類問題。

第六節 本計畫的目的與工作

本計畫的主要目的，是利用本所現有兩套老舊的通風實驗設備為基礎，在花費

最少的前提下，改造為能滿足罩式風量計校驗比對用途的新設備，並盡力運用各種設計巧思，時使其具有多重用途，以滿足日後的研究所需；本計畫的次要目的，是設法提出對應於前述兩套設備的標準作業程序，以實現罩式風量計校驗比對目的。具體的三項工作說明如下。

1. 蒐集並比較相關文獻，回顧流體的基本物理性質，搭配本所已提出的精密濕空氣密度計算方法[1]，繼續延伸發展「精密濕空氣動力黏度」計算方法。此部分的工作成果除了應用於本計畫，還可延伸利用在所有需要空氣動力黏度的通風設計場合，例如計算導管空氣摩擦損失等，用途十分廣泛。本計畫最後選定 Kumar 氏[15]的濕空氣動力黏度計算方法，其計算結果雖與早期（1973 年以前）的學者研究數據不同，但與 2000 年以後的精密碟片震盪實驗結果十分吻合，且計算方法出乎意料的簡單，詳情請參考第二章。
2. 改造本所現有低速風洞，使其成為具備風速計比對能力的穩定風洞，並發展相應的使用程序。此項工作極為繁瑣且費力費時，本計畫執行此工作時遭遇多次失敗，直到計畫即將結束前，才獲得勉強能為研究人員接受的改造成果。由於工作內容與歷次設計變遷過程或許有值得各界借鏡之處，因此詳細說明如第三章。
3. 改造、組裝本所現有的舊導管元件、空氣過濾耗材備品、老舊不堪用的風量計，使其成為具備罩式風量計直接校驗比對能力的方便設備，並發展相應的使用程序。本計畫執行此工作時，為吸取前述風洞改造工作的失敗教訓，投入大量時間於設計階段，最後一次施工完成。詳細設計概念與施工成果如第四章，本計畫在此項工作完成後，已獲得基本的罩式風量計校驗能力，惟仍需與國外已設有此類校正實驗室的專家（儀器廠商）再三確認，才能向公眾推出，故僅於附錄中概略說明校驗方法。

第二章 濕空氣的動力黏度

第一節 物質相變態概要

物質由無數微小的原子或分子組成。在絕對零度的環境下，所有物質凝結為固體，此時分子靜止不動，除了固相（solid phase）之外，週遭環境中不存在液相與氣相，只有虛無的真空。由於週遭環境中不存在任何物質，當然也不存在環境氣壓。

假設有一個原本內部溫度為絕對零度、體積可依人為意願改變的密封容器（容器形狀如活塞缸或針筒等），於密封容器內放置一塊固態純物質，並將熱連續輸入容器內部，則將發生一系列變化，綜合顯示如圖 5。

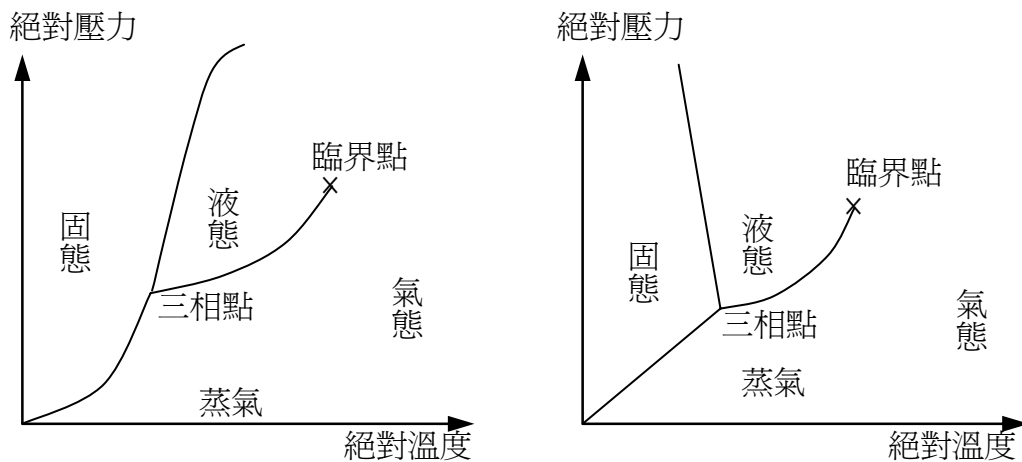


圖5 二氧化碳（左）與水（右）的相變態特性

1. 首先此物質的表面釋放些微的物質，形成微量氣體，充斥於原本為真空的容器內，隨之發生微弱的環境氣壓。雖然此時溫度可能僅略高於絕對零度，但物質溫度一旦高於絕對零度，就開始以輻射方式向周遭散熱。容器內的固相物質與微量的氣相物質共同形成新系統。
2. 若維持容器壓力不變，並使新系統獲得固定功率的輸入熱，則新系統將歷經「加壓加熱」過程，最後平衡於某個溫度與壓力（此時加熱功率與系統散熱功率相等）。若平衡時溫度高於對應環境氣壓的熔解（melting）溫度，則將形成液相系統；若平衡時溫度高於對應於環境氣壓的沸騰（boiling）或昇華（sublimation）溫度，則

將形成氣相系統；若平衡時溫度恰好落在對應於環境氣壓的沸騰、昇華或三相共存溫度，則將形成「氣－固」、「液－固」或「氣－液－固」的混存系統。

固態物質受熱使溫度上升，到達熔化溫度時，固相逐漸轉變為液相，轉變過程中的密度改變不大，此相變態過程稱為熔化；液態物質溫度上升達到沸騰溫度時，高密度的液相逐漸轉為低密度的氣相，此相變態過程稱為沸騰；同理，高密度的固相逐漸轉為低密度的氣相時，此相變態過程稱為昇華。由圖 5 可發現熔化、沸騰溫度並非常數，而是壓力的函數。在加熱過程中改變容器的體積，可操縱容器內氣體壓力，從而影響物質的相變態。

第二節 相、鍵結與狀態特性概要

由純物質組成的固態物質，理論上原子或分子間必須依特定幾何規則（晶格）整齊排列。原子或分子之所以能依晶格規則排列，是因為相鄰原子或分子之間有吸引力強大的鍵結（bonding）。

常用的固體材料，即使號稱是純物質，大多仍含有高熔點雜質。含高熔點雜質的物質自液態冷卻時，由於雜質率先凝結為固相核心，引導其他液態物質依附於固相核心成長為晶體，因此最後得到的固體材料是由無數個雜亂排列的微小晶體組成。微小的晶體之間存在邊界（稱為晶界），當固體承受外力時，鍵結力最弱的晶界會率先發生永久性滑移，使固體破裂或永久變形。組成固態物質的分子或原子，受熱時主要以原地振動的方式儲存及傳遞能量，這種能量傳遞的方式稱為熱傳導。

當固態物質歷經等壓加熱過程，使原子或分子的原地振動劇烈到足以打斷固相鍵結的地步時，物質就開始熔化或昇華。液相分子的鍵結較弱，不同分子間可輕易滑動，但其鍵結仍有相當的強度，因此仍能單獨形成液相。液相分子以振動、流動（稱為熱對流）的方式儲存及傳遞能量。

當環境壓力低於臨界點壓力時，歷經等壓加熱過程的液相物質，其分子間的鍵結為維持液相的主要因素，必須發生沸騰，才能打斷液相鍵結，使各分子單獨存在而形成氣體。當環境壓力高於臨界點壓力時，環境壓力的影響力高過分子間的液相鍵結，此時熔化的分子群主要是因為受到壓力而聚集成群，而非受到液相鍵結的拘束。

就物質的黏度而言，當環境壓力低於臨界壓力時，只要溫度落在沸騰溫度與熔化溫度之間，則個別物質的液相黏度變化不大；當環境壓力高於臨界壓力時，個別物質熔化後的黏度可隨著溫度高低變化而有顯著改變，這是因為成相的主導因素不再是液相鍵結，而是環境壓力所致。

至於氣態分子，因為分子間的斥力大於吸引力，因此呈現自由擴散特性；換句話說，除非刻意施加壓力，否則同一種氣體物質不會聚合在一起，而是傾向於向四面八方擴散，直到所有氣態物質均勻混合為止。

想像一種液態物質，在環境壓力低於臨界點壓力的條件下歷經等壓加熱過程，使液態物質完全轉變為氣態物質：當沸騰過程結束時，物質的相稱為「飽和蒸氣」，沸騰過程的溫度稱為「對應於環境壓力的飽和溫度」，此時氣態分子間的平均距離較短，分子間吸引力對氣體的物理特性具顯著影響力，且無論是哪一種物質的飽和蒸氣，其物理性質都與空氣顯然不同；當溫度繼續上升到介於飽和溫度與臨界點溫度之間的某個溫度時，物質的相稱為「過熱蒸氣」或「真實氣體」，此時氣態分子間平均距離稍微拉長，分子間的吸引力對氣體的物理特性影響力減弱；在環境壓力低於臨界點壓力的條件下，物質溫度上升到遠高於臨界點溫度的某個溫度時，由於氣態分子之間的平均距離拉得很長，分子間的吸引力對氣體的物理特性影響力已幾乎可忽略，此時物質的相接近於「理想氣體」。

舉例而言，空氣的主要成分為氮、氧（佔 99.03%體積），但這兩種物質的臨界點溫度都遠低於日常環境氣溫，臨界點壓力都遠高於環境氣壓，因此空氣的物理性質接近於理想氣體。

氣態分子能以振動、直線運動、碰撞等方式儲存能量。在本節之前已說明過，在等壓條件下，液相物質的黏性主要由液相鍵結主導。一個特定形狀的固體，若要迫開圍繞在固體週遭的液體而發生運動，則須不停地打斷液相鍵結，此時為了使固體發生運動須消耗的能量較高，或稱液體的黏度較高；同樣的，若要迫開圍繞在固體週遭的理想氣體而發生運動，則只須「撞擊」週遭氣體即可，此時為了使固體發生運動須消耗的能量較低，或稱氣體的黏度較低。

若以臨界點為基準，低壓、高溫的氣態物質，無論其成分為純物質或混合物，

其黏度主要都是受到溫度影響。若氣態物質的物理性質接近於理想氣體，則由下一節的沙澤藍（Sutherland）公式，可發現理想氣體的黏度僅為溫度的函數。

第三節 氣體的動力黏度定義

如圖 6 所示，假設物體為一個位置與姿態固定、厚度無限薄的板片，且使空氣自遠方以均勻速度 V_∞ 掠過薄板，則因空氣分子與薄板表面碰撞貼附的緣故，氣體分子愈接近薄板，其運動受限的情形就愈嚴重，因此愈靠近薄板表面，氣體流速愈低。

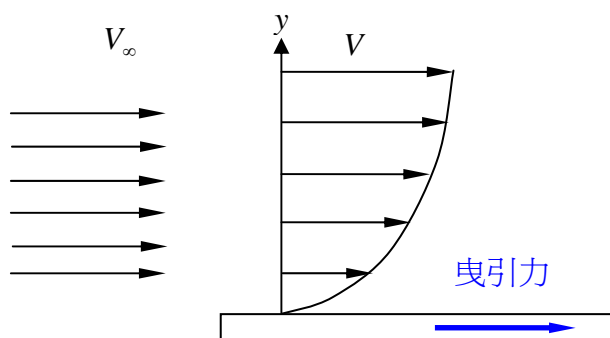


圖6 黏滯效應：空氣分子愈接近薄板表面，流動速度愈低

圖 6 的物理現象稱為「黏滯效應」，而用於評估空氣黏滯效應的傳統參數，稱為動力黏度（dynamic viscosity） μ 。在圖 6 的薄板上，由於黏滯效應而使單位面積承受的曳引力稱為剪應力 τ ，其定義如下。注意：滿足以下方程式的氣體或液體，均稱為牛頓流體（Newtonian fluid）。

$$\tau = \mu \frac{\partial V}{\partial y} \quad (1)$$

剪應力 τ 的常用單位為 N/m^2 或 Pa ，空氣流速的常用單位為 m/sec ，垂直距離 y 的常用單位為 m ，動力黏度 μ 的常用單位為 $N \cdot sec/m^2$ ，也可以依照各國的習慣定義方式改寫成 $Pa \cdot sec$ 、 $kg \cdot sec^{-1} \cdot m^{-1}$ 。於 ASTM 等國外規範中，動力黏度也常用 Poise（中文譯為泊，單位代號為 P），或其百分之一單位 cP，以下是單位轉換關係。

$$\begin{aligned}
 1\text{P} &\equiv 1\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1} = 0.1\text{Pa} \cdot \text{sec} \\
 1\text{cP} &\equiv 10^{-2}\text{P} = 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{sec}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

在某些運算場合，常用氣體動力黏度除以氣體密度 μ/ρ 為參數，故另定義氣體的運動黏度（kinematic viscosity） $\nu \equiv \mu/\rho$ ，其常用單位為 m^2/sec 。於慣用英制的國家，運動黏度 ν 也常用 Stoke（單位代號為 St），或其百分之一單位 cSt，以下是單位轉換關係。

$$\begin{aligned}
 1\text{St} &\equiv 1\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1} = 10^{-4}\text{m}^2/\text{sec} \\
 1\text{cSt} &\equiv 1\text{mm}^2 \cdot \text{sec}^{-1} = 10^{-2}\text{St} = 10^{-6}\text{m}^2/\text{sec}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

由前一節的討論，已知道氣體必須受到壓力才會形成單獨的相。在地球表面，氣壓來源就是地心引力，且由地心引力聚合的混合氣體稱為大氣。最接近地表、混合最均勻的大氣氣層，稱為對流層。從地表到對流層頂之間的高度範圍內，空氣因為劇烈的垂直攪動（由太陽輻射與晴雨天候造成），除了水氣成分經常改變之外，其餘的空氣成分，在對流層內幾乎處處均勻，因此環境空氣才會有各種固定的物理量可言，包若本章最感興趣的動力黏度。

第四節 乾空氣與濕空氣的黏度

乾空氣是對流層內大氣排除雜質、污染物與水分後，所得的潔淨乾燥氣相混合物，由氮、氧、二氧化碳、氮氧化物、氫、氫等多種純物質組成。大氣中的水蒸氣含量深受天候影響，其組成比例並非固定，且常溫、常壓條件下的氣態水蒸氣物理性質近似於真實氣體（理由已於本章第二節詳細討論）而非理想氣體。排除水分後，乾空氣物理性質十分穩定，且近似於理想氣體，因此早期（18-19 世紀）的空氣物理性質研究，絕大多數都是以乾空氣為對象。

有關乾空氣的黏度理論，最初由沙澤藍（Sutherland[2]）於 1893 年發表理想氣體黏度與分子間作用力的理論，說明理想氣體的動力黏度僅為溫度的函數，並提出以下適用於理想氣體的黏度計算公式，稱為沙澤藍公式。

$$\mu \cong \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \quad (4)$$

上式的 μ 為動力黏度（單位 $Pa \cdot s$ ）， T_0 為已知的參考溫度（單位 K ）， μ_0 為對應於 T_0 的已知參考動力黏度， C 則為一個與氣體種類、參考溫度大小有關的常數，稱為沙澤藍常數（Sutherland's constant），其單位與溫度相同。乾空氣常用的參考溫度為 $T_0 = 291.15K$ ，對應參考溫度的動力黏度為 $\mu_0 = 182.7 \times 10^{-7} N \cdot sec/m^2$ ，沙澤藍常數為 $C = 120K$ 。

由於沙澤藍公式引用的理論係基於理想氣體的假設，故若氣體種類不變，則沙澤藍公式僅為溫度的函數。換言之，若氣體的物理性質與理想氣體不同，則需要作若干修正。舉例而言，在台灣地區，環境空氣均為含大量水分的濕空氣，而濕空氣是由乾空氣和水蒸氣組成的氣態混合物，由於水蒸氣的物理性質應定義為「真實氣體」，因此嚴格來說，濕空氣並非理想氣體。王順志等人[1]對此已作詳細的討論，並提出適用於環境濕空氣的精密度計算公式。

沙澤藍繼理想氣體黏度公式之後，又提出「數種理想氣體混合物」的黏度擬合公式[3]，Thiesen 等人[4]則以沙澤藍的研究為基礎，配合實驗進行更詳細的氣體黏度擬合（不限為理想氣體），提出計算「單一種類氣體」與「多種氣體混合物」的黏度擬合公式。可惜的是，在濕空氣黏度實驗方法獲得改良後，學者們陸續發現前述的擬合公式精確度不高。

此後較實用的氣體混合物黏度擬合方法，係以 1949 年 Buddenberg 等人[5]的研究為基礎，針對不同的氣體成分，提出多元氣態混合物的黏度擬合公式。假設某氣態混合物 m 係由 1、2 兩種成分氣體組成，兩種成分氣體於混合物中所佔的體積比例（莫耳組成比例）分別為 x_1 、 x_2 ，兩種成分氣體的黏度分別為 μ_1 、 μ_2 ，兩種成分氣體的密度分別為 ρ_1 、 ρ_2 ，則氣態混合物的黏度 μ_m 可由 Buddenberg 等人[5]提出的擬合公式計算如下。

$$\mu_m = \frac{\mu_1}{1 + \frac{x_2}{x_1} \frac{1.385\mu_1}{D_{12}\rho_1}} + \frac{\mu_2}{1 + \frac{x_1}{x_2} \frac{1.385\mu_2}{D_{12}\rho_2}} \quad (5)$$

對於上式之中的計算參數 1.385，Wilke 有不同意見，並於 1950 年另依氣體的動能理論，提出氣態混合物的一般化黏度擬合公式[6]。為了驗證此公式的合理性，Kestin 等人[7]在較大的溫度與氣壓範圍內，以震盪碟片方法（oscillating disk method）進行濕空氣黏度實驗，以檢驗 Wilke 擬合公式的適用性，隨後於 1967 年提出常溫常壓範圍附近的詳細濕空氣黏度量測數據[8]。1967 年美國航太總署（NASA）在尋求簡易的濕空氣黏度計算公式時[9]，係以 Kestin 的實驗數據為主要依據。

蘇聯學者 Studnikov 氏[10]在 1970 年利用 Kestin 的實驗數據（氣溫 20-75°C、氣壓 1-7atm）為對照資料，提出便捷易用的濕空氣黏度 μ_m 擬合公式如下，並指出此公式能應用於氣溫 20-150°C 的範圍。

$$\mu_m = (x_a\mu_a + x_v\mu_v) \left[1 + \frac{x_v(1-x_v)}{2.75} \right] \quad (6)$$

其中

x_a 、 x_v 為乾空氣與水的莫耳組成比例（mole fraction）

μ_a 、 μ_v 為乾空氣與水的動力黏度（dynamic viscosity）

我們依照 Studnikov 氏的研究結果，重繪乾空氣與水的氣態混合物動力黏度特性圖如圖 7。請注意此圖的原始應用目的是為「水蒸汽渦輪發電機」而製作的，因此呈現的莫耳含水百分比範圍從 0%（完全由乾空氣組成，不含水）到 100%（完全由水蒸氣組成，不含空氣）都有，請注意圖下方的弧狀曲線為飽和濕空氣線。

由圖 7 可發現從 0-50°C 範圍內，環境空氣相對溼度（Relative Humidity，簡稱 RH）即使達到飽和（RH=100%），濕空氣的莫耳含水百分比也不會超過 15%，但氣溫若超過 50°C，則空氣對水蒸氣的溶解度隨氣溫而遽增。例如在 75°C 的氣溫下，濕空氣的莫耳含水百分比最高可達 39.0%；氣溫達 99°C（接近於水的沸點）時，濕空氣莫耳含水百分比最高可達 98.2%之譜（引用王順志等人[1]的公式）。

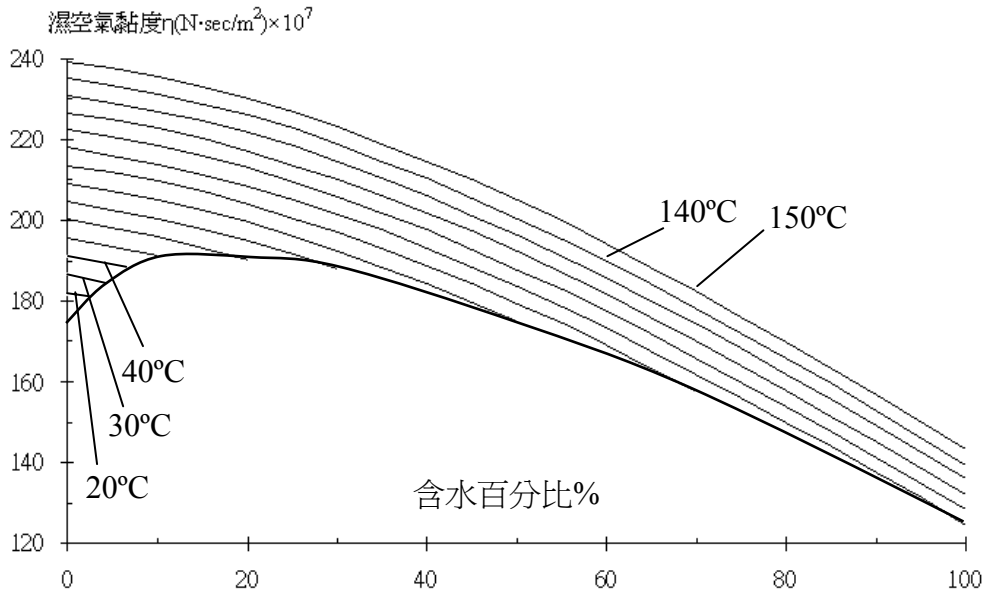


圖7 空氣與水的氣態混合物黏度

由圖 7左方 20,30,40°C 的三條短線，可看出接近常溫範圍的濕空氣等溫動力黏度曲線的斜度很有限，這意味著以下的事實：由於常溫飽和濕空氣的莫耳含水百分比有限（2.4-7.5%），因此相對溼度對常溫環境濕空氣的動力黏度影響也有限。舉例來說，在一大氣壓、氣溫 30°C 的條件下，乾空氣（RH=0%）與飽和濕空氣（RH=100%）的動力黏度，兩者相差僅 1%左右；若氣溫降低到 20°C，則此差異僅為有 0.3%。

由前幾節的討論，我們得知氣相物質、液相物質、超流體的不同物理特性，同時也得知氣相物質黏度的由來；由本節的討論，我們進一步發現在室溫環境中，濕空氣的動力黏度與乾空氣十分接近，這樣的結果意味著更簡易的環境濕空氣黏度方法，具體內容於下一節討論。

第五節 濕空氣動力黏度修正公式

雖然 Mason 等人[11]對極性氣體混合物（Polar-gas mixtures）的動力黏度有更詳細的計算擬合公式，但經過美國太空總署委託研究人員[9]的比較，發現蘇聯學者 Studnikov 的修正公式雖然較直觀而缺乏理論依據，但他的公式卻意外地簡潔，可用於預測高溫濕空氣（空氣與水蒸氣混合物，渦輪機的過熱水蒸氣）的動力黏度。

由本章第一節到第四節的討論，我們得知乾空氣因為具有物理特性接近理想氣體的優勢，其動力黏度僅為溫度的函數，可直接套用簡便易用的沙澤藍公式，或引用某些化學工程手冊（例如 Perry's Handbook[12]）提供的公式，因此乾空氣的動力黏度取得不是問題；至於水蒸氣，由於其物理特性與理想氣體有相當的差距，因此其動力黏度不能單由溫度決定，而是水蒸氣分壓與溫度的函數，因此水蒸氣動力黏度的取得比較困難。

關於水蒸氣的動力黏度，早期的研究[13]大多是針對燃煤火力發電的需要，以高溫高壓的過熱水蒸氣為研究對象，直到 2005 年，Teske 等人[14]才由室溫水蒸氣量測實驗提出精密的水蒸氣黏度數據，印度的 Kumar[15]則據以在 2008 年的電子期刊 Qpedia 發表最新的經驗公式如下，其方法簡單且足夠精確。

$$\mu_m = \frac{\sum_{i=1}^2 x_i \mu_i}{\sum_{j=1}^2 x_j \phi_{ij}} \quad (7)$$

其中 μ_m, μ_1, μ_2 ：濕空氣、乾空氣、水蒸氣的動力黏度，單位 $N \cdot \text{sec} / m^2$
 x_1, x_2 ：乾空氣、水蒸氣的莫耳組成比例，無因次
 ϕ_{ij} ：乾空氣與水蒸氣的相關係數

由上式的數學形式，可發現此種擬合方法是以 Buddenberg 等人[5]的研究為基礎，再與最新的實驗數據擬合而得，其中乾空氣、水蒸氣的莫耳組成比例 x_1 、 x_2 可由濕空氣理想氣體公式取得。

$$\begin{aligned} x_1 &= (P - \phi P_{sv}) / P \\ x_2 &= 1 - x_1 \end{aligned} \quad (8)$$

上式的 P_{sv} 為對應於氣溫的飽和水蒸氣分壓， P 為濕空氣總壓， ϕ 為相對溼度。 P_{sv} 的擬合公式已由美國 ASHRAE 提出[16]如下。

$$\ln P_{sv} = k_1 / T + k_2 + k_3 T + k_4 T^2 + k_5 T^3 + k_6 \ln T \dots\dots\dots (9)$$

其中 P_{sv} 為水的飽和蒸汽壓，單位 Pa

T 為濕空氣的絕對溫度，單位 K

$$\begin{aligned}
k_1 &= -5800.2206 \\
k_2 &= 1.3914993 \\
k_3 &= -4.8640239 \times 10^{-2} \\
k_4 &= 4.1764768 \times 10^{-5} \\
k_5 &= -1.4452093 \times 10^{-8} \\
k_6 &= 6.5459673
\end{aligned}$$

關於乾空氣、水蒸氣的動力黏度 μ_1 與 μ_2 ，Kumar 以沙澤藍公式為基礎，在較窄的溫度範圍內重新擬合數據，簡化為更方便計算的形式，其單位仍為 $N \cdot \text{sec}/m^2$ 。

$$\begin{aligned}
\mu_1 &= 1.761 \times 10^{-5} (T/273)^{0.666} \\
\mu_2 &= 1.12 \times 10^{-5} (T/350)^{1.15}
\end{aligned} \tag{10}$$

上式的 T 為絕對溫度，單位為 K 。至於水蒸氣與乾空氣的相關係數 ϕ_{ij} ，其計算方法與 Buddenberg 等人[5]的研究相同。

$$\phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j}\right)^{-0.5} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j}\right)^{0.5} \left(\frac{M_j}{M_i}\right)^{0.25}\right]^2 \tag{11}$$

其中 $M_1 = 28.97$ 為乾空氣的分子量

$M_2 = 18.015$ 為水蒸氣的分子量

$$\phi_{11} = \phi_{22} = 1$$

$$\phi_{12} = 0.218924(1 + 0.888017\sqrt{\mu_1/\mu_2})^2$$

$$\phi_{21} = 0.277619(1 + 1.126104\sqrt{\mu_2/\mu_1})^2$$

本計畫人員依照 Kumar 提出的方法，以一大氣壓（101325Pa）為環境氣壓，重新計算並繪製 0-100°C 空氣動力黏度與相對溼度的關係如圖 8，其中橫軸為氣溫，縱軸為動力黏度（單位 poise 或 $N \cdot \text{sec}/m^2$ ）。由此圖可發現濕空氣的動力黏度變化範圍確實不大，即使是在 100°C 的高溫環境，乾空氣與飽和濕空氣（此時佔據空間的物質其實是 100%的飽和水蒸氣）動力黏度差異也不會超過 45%；至於 25°C 的常溫環境，則由於空氣溶解水蒸氣的能力不佳，此時乾空氣與飽和濕空氣的動力黏度差異不過 1.74%而已。

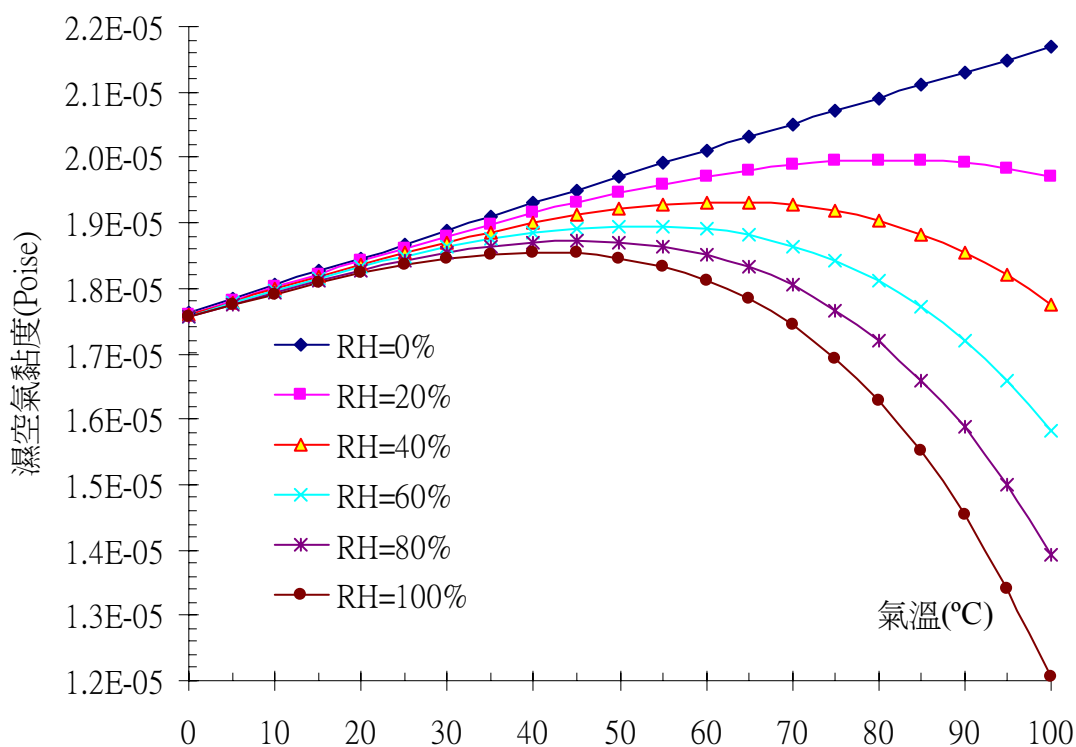


圖8 由 Kumar 方法計算一大氣壓環境的濕空氣動力黏度

由於本計畫評估濕空氣動力黏度的目的是為了在接近室溫、常壓的環境下，取得能精密濕空氣動力黏度，以作為修正層流板風量計實驗數據之用，因此在衡量計算精密程度後，決定採用 Kumar 公式，並將計算範圍限定於 0-50°C、氣壓接近 1 大氣壓的環境。至於如此作法的不確定度，由於水蒸氣的新實驗數據才剛出現[14]，能匹配新水蒸氣黏度數據的濕空氣動力黏度研究極少，因此暫時無法評估不確定度。以下列出由 Kumar 公式計算的濕空氣動力黏度數據，留待日後的學者據以評估 Kumar 公式的不確定度。

表1 由 Kumar 公式計算的濕空氣動力黏度數據

氣溫 (°C)	濕空氣相對溼度 (%) 與動力黏度 ($N \cdot \text{sec}/m^2$)					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
0	176.2	176.0	175.9	175.8	175.7	175.5
5	178.3	178.1	177.9	177.8	177.6	177.4
10	180.4	180.2	179.9	179.7	179.4	179.2
15	182.5	182.2	181.8	181.5	181.1	180.8
20	184.7	184.2	183.7	183.2	182.7	182.2
25	186.7	186.1	185.4	184.8	184.1	183.5
30	188.8	188.0	187.1	186.2	185.4	184.5
35	190.9	189.7	188.6	187.4	186.3	185.2
40	193.0	191.4	189.9	188.4	187.0	185.5
45	195.0	193.0	191.1	189.2	187.2	185.3
50	197.0	194.5	192.0	189.6	187.1	184.6
55	199.1	195.9	192.7	189.6	186.4	183.3
60	201.1	197.1	193.1	189.1	185.2	181.2
65	203.1	198.1	193.1	188.1	183.2	178.3
70	205.1	198.8	192.7	186.5	180.4	174.4
75	207.1	199.4	191.8	184.2	176.7	169.3
80	209.0	199.6	190.3	181.1	172.0	162.9
85	211.0	199.6	188.3	177.1	166.0	155.1
90	213.0	199.1	185.5	172.0	158.7	145.5
95	214.9	198.3	182.0	165.8	149.8	134.1
100	216.8	197.0	177.5	158.2	139.2	120.5

第三章 風速計比對用風洞之改造

第一節 背景說明

既然尚無罩式風量計國際校正標準，自然也不會有符合國際標準的罩式風量計校正設施或校正實驗室。然而隨著罩式風量計市場佔有率的提升，罩式風量計的總數與利用率逐年增加，已顯著排擠其他種類風量評估技術（孔口板、噴嘴、文氏管、層流板風量計等必須安裝高耗能元件的傳統方法）的生存空間，因此出現罩式風量計國際校正標準只是早晚的事。為保留日後與國外校正實驗室互評業務品質的餘地，本計畫建造了兩種校正比對設備。

1. 風速計比對用風洞：可有多種校正作法，共同特徵是「把待測件放入風洞」。
 - (1) 單獨校正風速感測器：摘出罩式風量計的風速感測器，視其為風速計測棒，單獨對風速感測器進行風速比對或校正。
 - (2) 校正環形核心量測元件：摘出罩式風量計的環形核心量測元件，對此核心量測元件進行性能比對或校正。
 - (3) 校正整部罩式風量計：採用標準尺寸罩體，將整部罩式風量計放入風洞進行性能比對或校正。此種作法會牽涉到更複雜的細部設計，暫不詳細討論。
2. 罩式風量計比對風洞：將罩式風量計的漏斗狀罩口，直接貼附於此設備的排氣口凸緣，或出風口凸緣，直接讀出罩式風量計的風量讀值，並與本設備所屬的標準層流板風量計讀值作比對。

本章的主要內容是說明前述第一套設備「風速計比對用風洞」的設計概念、中途失敗原因，以及品質尚可接受的最後改造結果。

第二節 風速計校正比對方式簡介

各國高等風速計校正實驗室相互比較業務水準時，通常採用「風速校正用標準皮托管」作為標準件，讓這個標準件在各國高級校正實驗室之間傳遞使用，最後再集合會參加校正比對工作的所有實驗室，一齊拿出校正報告來相互比較，即可得知各國

校正實驗室的業務水準。

前述標準件實際上是一支不銹鋼皮托管，具有尺寸小（易搬運）、剛性高（不易碰損變形）、重現性良好等特色，雖然其性能刻意安排為不理想，但如果各國校正實驗室輪流對同一支標準件作校正，且假設各實驗室業務水準相同，則理論上應該得到內容相近的校正報告。

引用同樣概念，若有一種罩式風量計的「標準元件」，則亦可容許不同實驗室相互比較風量計校正業務的水準。對應標準件的特性，罩式風量計的國際標準校正可能出現以下兩種方式，分別對應兩種校正比對設備。

1. 內測比對方法：取風量計的整體或部分關鍵元件，以特定方式架設在均勻風場中，以數個已知風速為基礎進行性能比對。此類方法適合進行風量計的出廠品管，方法簡單、所需時間短，且對常規校正作業的技術要求不高，可由一般人士進行，但僅適用於同一種型號的罩式風量計。
2. 外測比對方法：將罩式風量計完整組裝後，使罩口貼附於某個風量已知的抽氣（或吹氣）開口，並與罩式風量計的讀值作比對。此類方法較耗時費力，僅能由專業技術人員進行，但適合不同廠牌型式的個別校驗。

爲了滿足內測比對方法的需求，首先必須有一個性能穩定、測試斷面積足夠大的風洞，足以容納整部罩式風量計或部分核心元件。幸運的是，目前市售尺寸較大的罩式風量計，其環形核心元件的直徑通常不大於 33cm，放大 3 倍後，大體上需要具有「直徑 1m 或斷面 1m×1m」的風洞測試段。本所既有的老舊低速風洞，恰好勉強滿足這個需求，可作為供改造的原型設施。

第三節 本所低風速風洞改造前狀況簡介

本所低風速風洞原有設計（竣工圖）如圖 9 所示，是一個臥式、L 型、吸氣式、開迴路的風洞，使用時配合 1/10 到 1/5 的等比例縮小模型（氣罩模型、勞工人體模型等），可模擬不同雷諾數的環境側風。

低速風洞的吸氣入口位於室內，如圖 10 所示，是一個斷面尺寸 2m×2m、邊緣圓

滑的空氣入口。空氣流入風洞吸氣入口後，首先流經前整流段。前整流段包括 8 道細金屬網、7 道蜂巢板，能使氣流轉為斷面風速分布均勻穩定的低速氣束。離開前整流段的低速氣束，接著流入圖 11 右方、圖 12 左方所示的束縮段。

束縮段的主要功能是加速氣流，使斷面 $2\text{m}\times 2\text{m}$ 的前整流段出口漸縮到 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 的測試段入口，同時也使風速提高為原來的 4 倍。束縮段的曲廓外形是由 2 條一元二次多項式的曲線銜接在一起，且曲線銜接處即是整條曲廓的反曲點（inflection point）。此種曲廓設計的目的在追求最大程度的氣流平穩，使空氣在流動斷面縮小、流速加快的過程中，不至於因為四週壁面上的空氣邊界層（boundary layer）剝離而使氣束紊亂。

束縮段下游出口銜接斷面尺寸 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 、軸向長度 2m、由透明壓克力厚板搭建的測試段，所有風洞實驗都在測試段內進行。倘若日後「內測方法」成為主流，則拆除罩體後的風量計核心量測元件，將以懸吊、底部支持等方式，固定安裝於標準測試架上，以便安排不同的測試段風速，對罩式風量計進行性能比對。

測試段的下游與後整流段銜接，其結構與前整流段相同，包括 6 道細金屬網、5 道蜂巢板，其目的在隔絕下游風機對測試段風速均勻度的不良影響，使測試段內的氣流自首至尾都保持平穩。後整流段的下游銜接圓柱狀的風機段。如圖 13 所示，風機段下方設有 4 個可調整氣壓的囊狀支撐氣墊，風機段內部安裝 2 部轉數、轉向、風量都不同的變頻風機。依經驗妥為調整氣墊的氣囊壓力，並善加利用 2 部風機轉向相反的特性，則可顯著減少風機段震動對測試段的不良影響。由於這樣的使用經驗，包含太多的操作變數，很難直接複製到每一個實驗室，因此本文件不多作討論。

風機段下游為 90 度轉彎段，如圖 13、圖 14 所示，除了將風洞斷面尺寸恢復為 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 之外，90 度轉彎段內部設有 1 組導流葉片，使氣流平滑轉向，減少斷面風速不均的問題。氣流轉彎後進入如圖 15 所示的風洞出口段。出口段設計為多個管段銜接的樣式，其目的在容許日後的設計修改，例如插入風量量測元件、活性碳濾網等。如圖 16、圖 17、圖 18 所示，原本風洞出口與戶外連接的部位，其底部是向上傾斜突出的坡狀（目的為適應既有建築物窗台高度），雖然已以縱、橫各 10 片可調整角度的整流板來整理出口氣流，但仍無法有效抑制紊流。本計畫低風速風洞改造前的核心問

題在此：因為風洞出口底部不平整而造成的出口紊流現象，其不良影響沿著風洞管道向上游逆向傳播，最終影響到測試段的風束品質。

第四節 低風速風洞改造方式

爲了提高測試段的氣流紊亂度，使測試段的氣流分布均勻平穩，必須進行局部改建。設計概念如圖 19，改善項目、改善設計方式、改善效果逐一說明如下。

1. 整平風洞出口底部：切除多餘的窗台底部鋼筋混凝土結構，拆除 20 片整流板新增平直的不銹鋼底板，將風洞出口底部的突出部位整平，以巧工修飾整平整個風洞出口段的內表面，最後在風洞出口段內部塗裝調和了極細矽砂粉的保護漆，使風洞出口段形成一個表面粗糙度均勻、斷面形狀平整的正方形斷面管。完工後，同時配合修改戶外側風洞鐵捲門高度，使鐵捲門有效防止風雨侵害。修改結果如圖 20。
2. 於戶外側的風洞排氣出口加裝如圖 21 所示的多孔板支持方框，其斷面尺寸與風洞出口相同；隨後再設計不同款式的多孔板，安裝於方框上。本計畫對於多孔板的設計，作了許多的嘗試，發現以下結果。
 - (1) 將多孔板設計爲多孔不銹鋼薄板（面積 $1.05\text{m}\times 1.05\text{m}$ ，厚度 2mm），發現重量大、不易安裝，且以螺栓固定薄鋼板後，鋼板因爲材料的彈性而發生自然挫屈，使安裝後鋼板表面凹凸不平。除此之外，多孔不銹鋼薄板雖然能使測試段的斷面風速平均值的分布特性變得更均勻，但無論如何調整圓孔分布方式（孔徑 5-15mm、孔間距 10-30mm），都無法將測試段紊流度降低到可接受的地步，且遭遇戶外 5m/sec 以上陣風的干擾時，測試段風速品質無法接受。
 - (2) 將多孔板變更爲多孔厚壓克力板（面積 $1.05\text{m}\times 1.05\text{m}$ ，厚度 5-15mm），重量較輕、剛性較佳、較易安裝，且安裝後無板面挫屈不平的問題。壓克力板愈厚、孔徑愈小（孔徑縮小時，孔的數量隨之增加，維持孔徑=2 倍間距的關係），則測試段的紊流度愈低。

麻煩的是，使用厚壓克力板雖然提高了測試段的風速穩定度，且較能抵抗戶外陣風的負面干擾，但也造成極大的壓力損失，風洞測試段的運轉最高風速受到

限制，因此必須繼續修改。

- (3) 將多孔板繼續修改為如圖 22、圖 23 所示的 20mm 厚多孔壓克力魚眼板，終於解決所有的問題。反覆測試結果顯示：改造後的低速風洞，測試段能穩定操作於 0.5-4m/sec（風速解析度 0.01m/sec，波動範圍 ± 0.01 m/s）；在 0.2-0.5m/sec 範圍內，若允許 ± 0.02 m/s 的波動，則在戶外近似無風、氣溫與氣壓變化平穩的天候下能穩定運轉；在 0.40-0.45m/sec 範圍內，若允許 ± 0.03 m/s 的風速波動，則在戶外近似無風、氣溫與氣壓變化平穩的天候下，亦能穩定運轉。

20mm 厚壓克力多孔板的魚眼孔，其 45 度導角側位於風洞內部，使風洞出口段內部的空氣以壓力損失極低的理想條件流入魚眼孔，經 10mm 長的加速坡道提升風速為原來的 4 倍，自戶外側高速噴出，故抵抗戶外陣風的能力較佳。

第五節 改造後的風洞運用方式

室內天花板大型出風口以 2 呎見方的規格最普遍，吹出風量通常為 5m³/min（折合風速約 0.2m/sec，例如低噪音的辦公場所）到 20.1m³/min（折合風速約 0.9m/sec，例如包含污染製程的室內工作場所）。倘若天花板出風口的吹出風速高於 1.0m/sec，則須檢討出風口吹出空氣的溫度，否則可能因勞工身體散熱過度而影響健康（勞工安全衛生設施規則第 311 條第 2 項）。

本計畫低速風洞的穩定運轉操作範圍為 0.5-4.0m/sec。若將整部罩式風量計放入風洞，並以 2 呎見方的罩口迎風，則對應風量為 11.1-89.2m³/min；若以直徑約 0.33m 的核心環形量測件迎風，則對應風量為 2.57-20.5m³/min。當然，直接把整部罩式風量計放入風洞中，必須搭配噴射板（ejector plate）等設計，此處說的只是概念。

本計畫低速風洞的最低可運轉風速為 0.2m/sec。如前所述，若以 2 呎見方的罩口迎風，則對應風量為 4.45m³/min；若以環形元件迎風，則對應風量為 1.03m³/min。

如圖 24 圖所示，如欲校驗罩式風量計對天花板出風口的風量量測能力，可利用日後任何一種國際規範指定的標準支撐機構（例如上一段所說的噴射板），將受測的罩式風量計以水平姿態架設，使漏斗狀方形開口迎向風洞氣流。同理，如圖 25 所示，如欲校驗罩式風量計對天花板排氣口的風量量測能力，可將受測的罩式風量計以水平

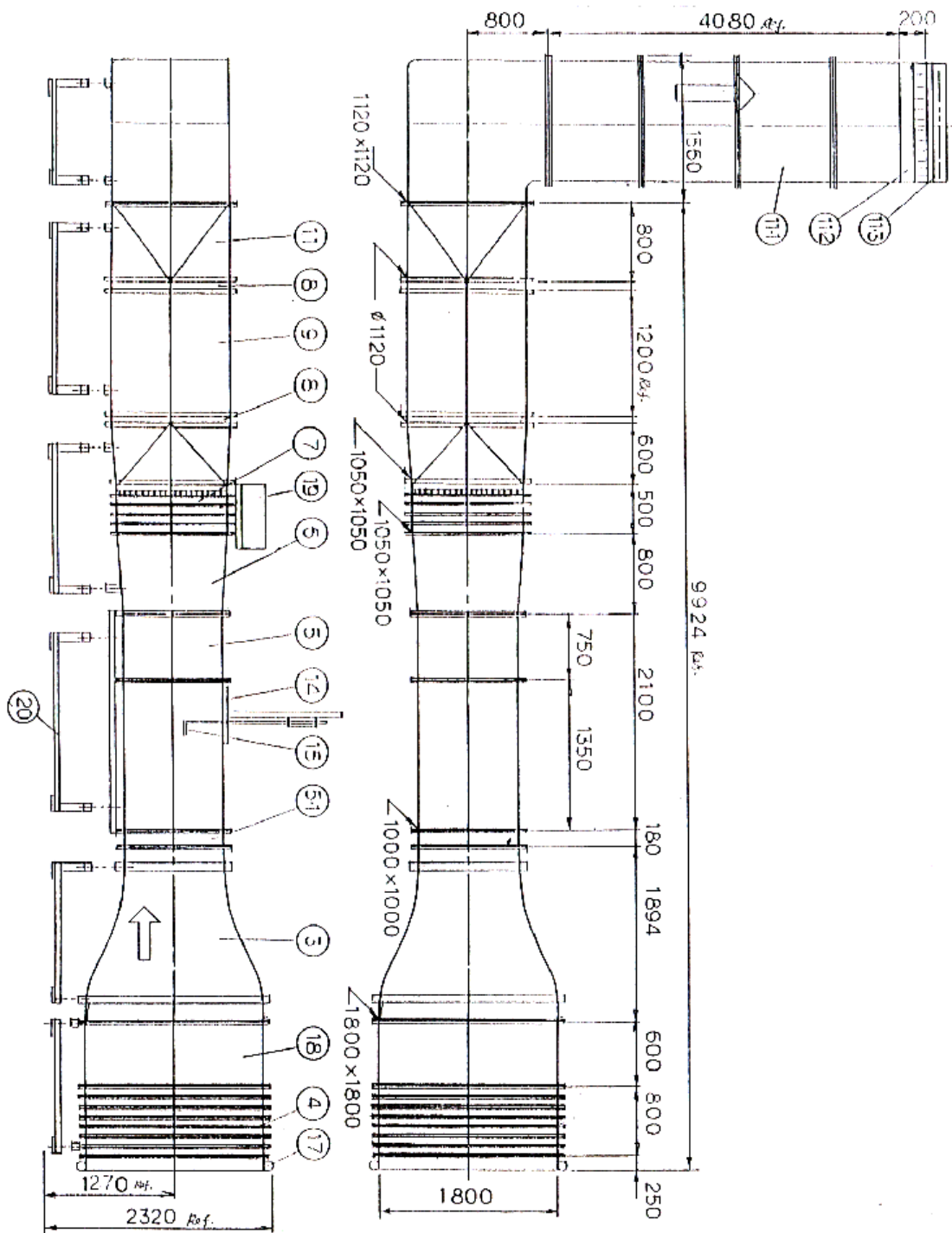
姿態架設，使核心環形量測件迎向風洞氣流。

如圖 26所示，如欲單獨校驗罩式風量計的感測器，可利用日後任何一種國際規範指定的標準支撐機構，將受測的感測器架設於風洞斷面中心，並使感測器的迎風面環形量測件迎向風洞氣流。

再次強調：若直接把整部罩式風量計放入風洞中作測試，由於風量計體型態龐大，會徹底毀掉測試段內原有的均勻氣流，因此這樣做的前提，是必須搭配特殊的細部設計，例如加裝能將測試段斷面再次收縮的噴射板（ejector plate），否則將造成嚴重的量測誤差。

表2 以低風速風洞校驗罩式風量計之預期操作條件

測試段預期風速(m/sec)		戶外天候條件	通過罩式風量計之風量(m ³ /min)	
平均風速	變動範圍		開口出風量	開口排氣量
0.2-0.5	±0.02	近似無風且空氣品質穩定	4.45-11.1	1.03-2.57
0.5-4.0	±0.01	氣溫、氣壓與相對溼度變化平穩	11.1-89.2	2.57-20.5
0.40-0.45	±0.03	近似無風且空氣品質穩定	不建議採用	不建議採用



20	支撐桁架組
19	控制桁架
18	喉流段組
17	前引風室組
15	定流轉型管
14	V2及V2二次平台組
11.3	不銹鋼柱門
11.2	水平及垂直百葉窗組
11.1	排風管組
11	圓錐方風管組
9	風扇組
8	喉室桁架組
7	後整流罩或直段組
6	支撐段組
5.1	空氣產生器組
5	試驗段組
4	前整流段組
3	集流段組
項次	名稱

圖9 吸氣式開迴路風洞：L形本體結構



圖10 吸氣式開迴路風洞：空氣吸入口外觀



圖11 吸氣式開迴路風洞：自右起分別為束縮段、測試段與後整流段



圖12 吸氣式開迴路風洞：前整流段至後整流段特寫

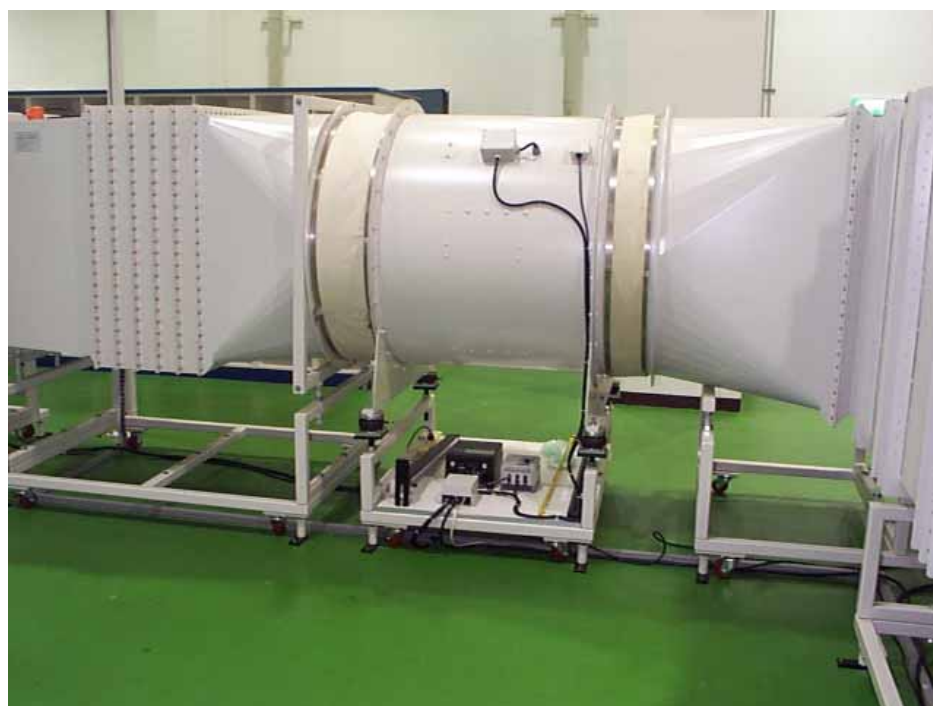


圖13 吸氣式開迴路風洞：自左起分爲後整流段、風機段、90度轉彎段



圖14 吸氣式開迴路風洞：90度轉彎段特寫（內設 1/4 圓弧導流片）



圖15 吸氣式開迴路風洞：風洞出口段特寫（右方為出口）

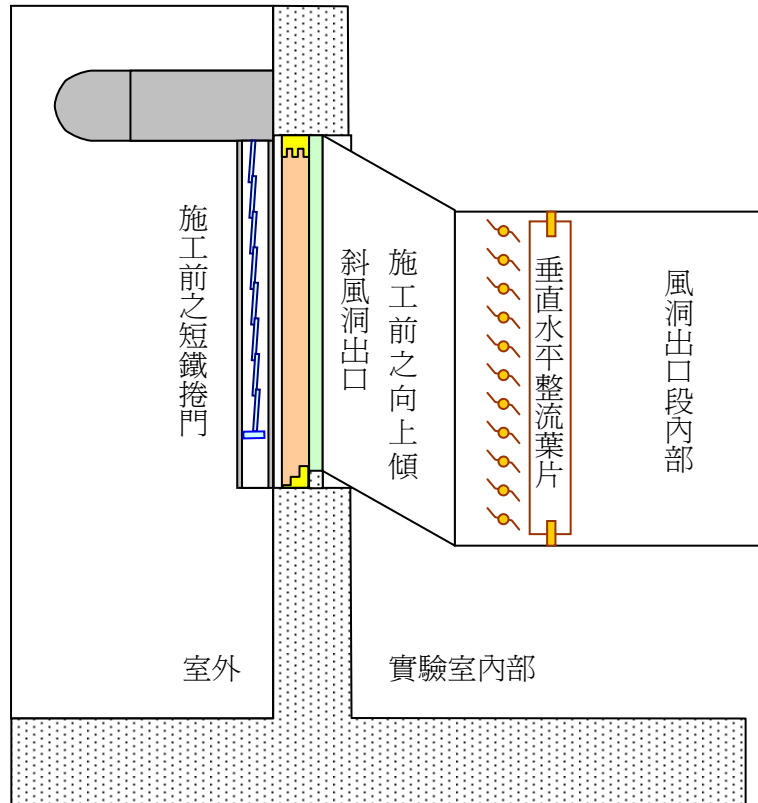


圖16 吸氣式開迴路風洞：出口修改前之斷面形狀



圖17 吸氣式開迴路風洞：出口修改前外觀（自戶外拍攝）



圖18 吸氣式開迴路風洞：出口修改前底部傾斜突出部位特寫

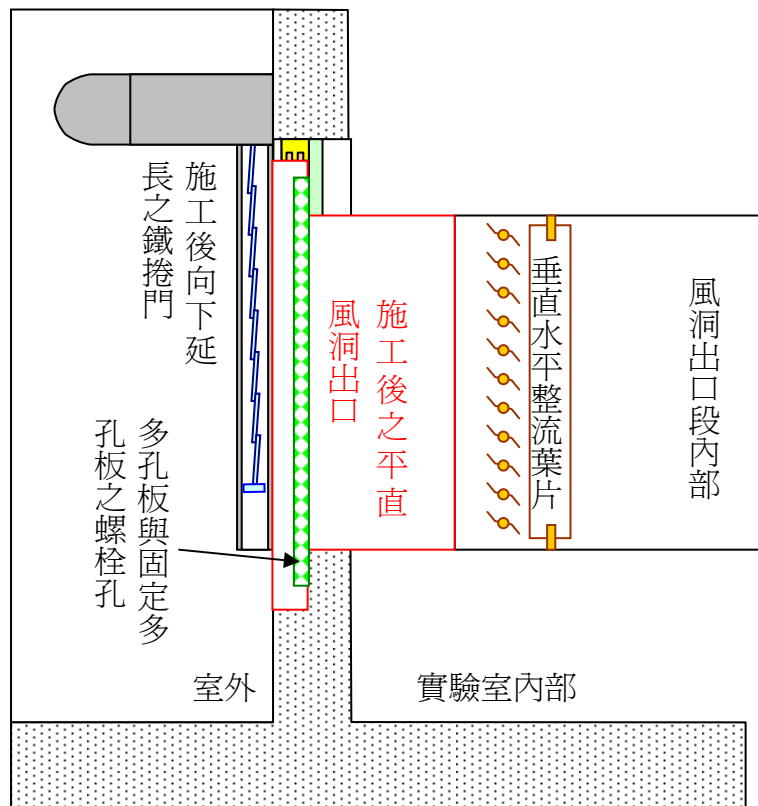


圖19 吸氣式開迴路風洞：出口整平修改設計概念



圖20 拆除多餘的整流片，修平風洞出口底部的傾斜突出部位

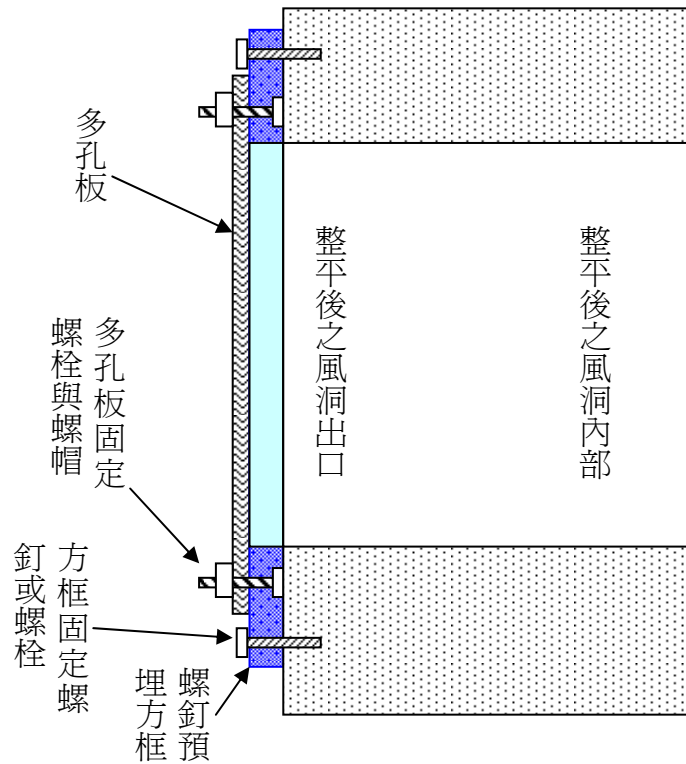


圖21 風洞出口多孔板安裝方式設計概念

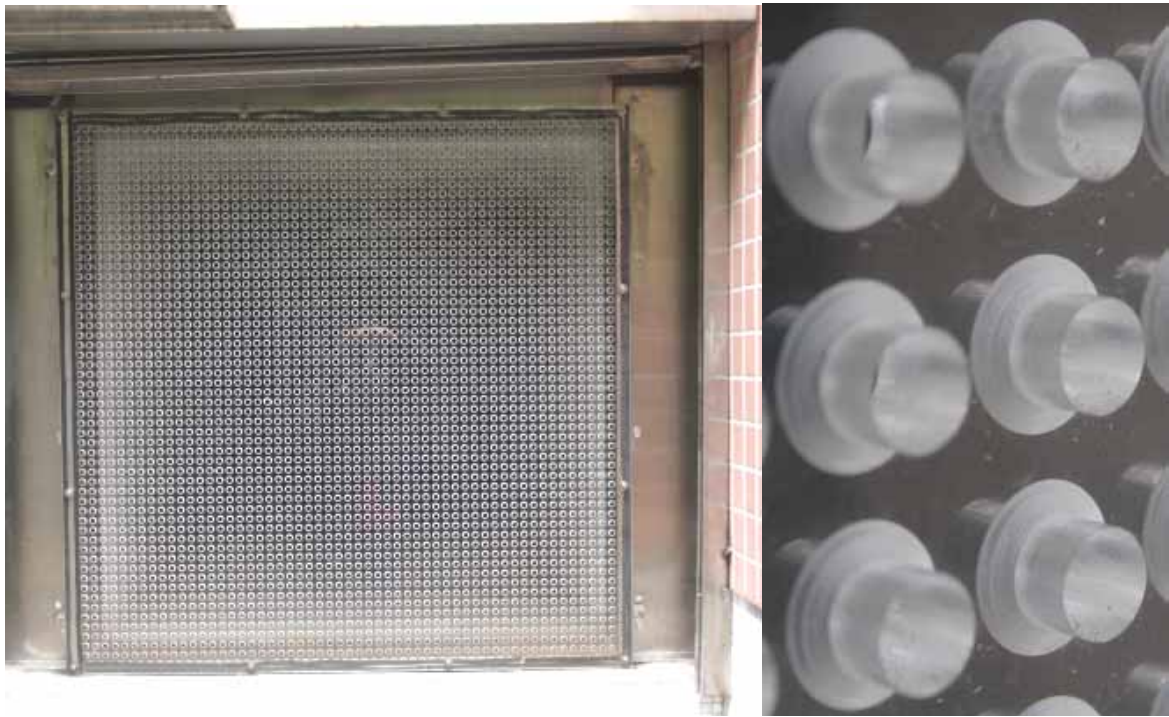


圖22 風洞出口整流用壓克力「多孔魚眼板」實際安裝情形

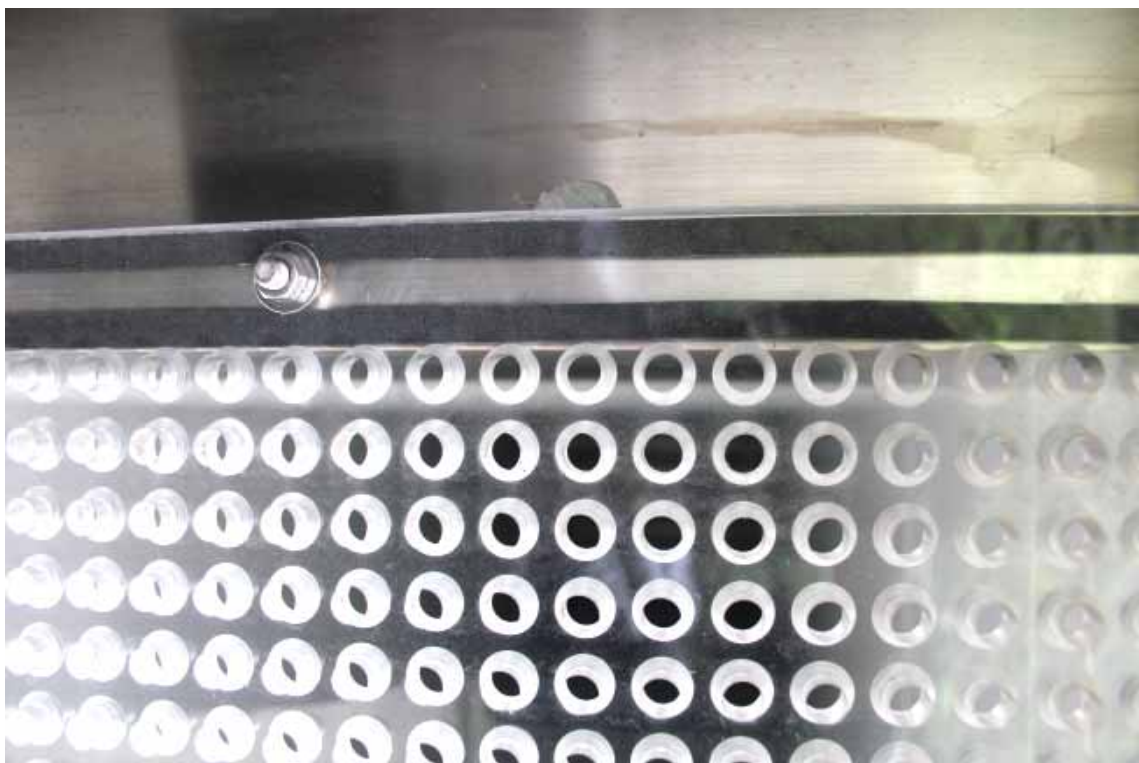


圖23 風洞出口多孔魚眼板邊緣以雙層黑色氣密襪條密封

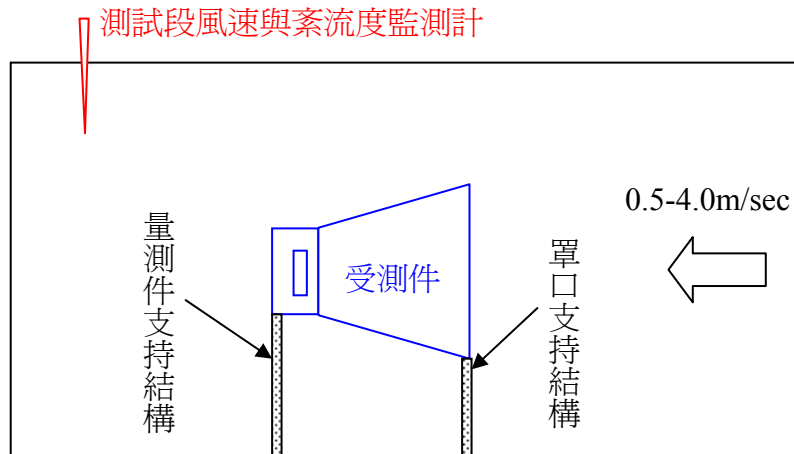


圖24 罩式風量計風洞校驗方法想像圖（適用於出風口，不含細部設計）

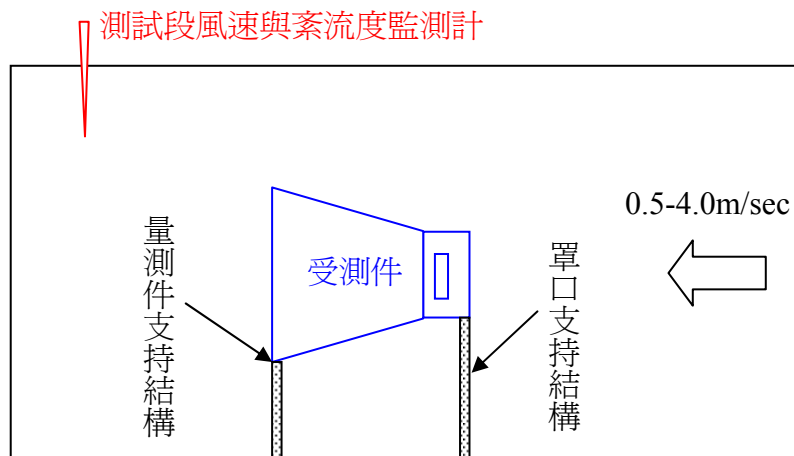


圖25 罩式風量計風洞校驗方法想像圖（適用於排氣口，不含細部設計）

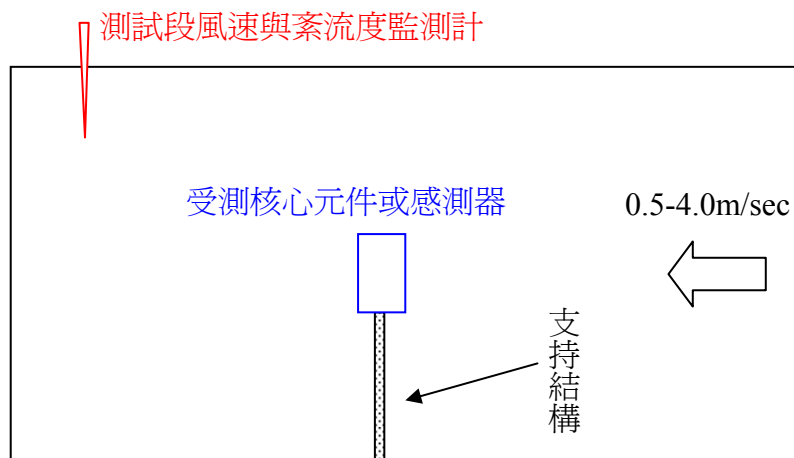


圖26 核心元件或感測器校驗方法想像圖（視為普通風速計，不含細部設計）

第四章 罩式風量計專用校驗設備之建造

第一節 背景說明

前一章介紹的風速計比對用風洞，其設計概念是針對日後國際規範指定將「整部罩式風量計、或移除罩體後的環形核心量測元件、或單獨拆下的感測器」架設於風洞中接受校驗的可能作法。然而罩式風量計的體型畢竟相對龐大，因此日後國際規範也可能改為利用風量已知的標準開口（出風口或排氣口），由罩式風量計覆蓋這樣的標準開口，然後比對標準風量值與罩式風量計的讀值，以達校驗的目的。

目前市面上的罩式風量計商品，約有半數型號僅具「量測出風量」的功能，其餘的商品則能雙向量測開口的出風量或排氣量。為配合這類的趨勢，本計畫設計並建造了罩式風量計專用的校驗設備。這個校驗設備具有附大型平面凸緣的出風口、排氣口各 1 個，可供罩式風量計的方形罩口貼附，據以比對已知風量數值與罩式風量計的讀值。本章的內容，就是說明此設備如何設計，並說明建造結果。

第二節 罩式風量計專用校驗設備設計概念

本計畫為減少研究成本，係利用既有即將報廢的各種實驗設施與耗材，綜合整修為適合本計畫需要的校驗設備。設計概念說明如圖 27，主要設計概念如下。

1. 空氣入口：環境空氣流入此設備的開口處，於開口週遭附設大尺寸的方形平面凸緣。若將這個空氣入口模擬為天花板的排氣口，則可供罩式風量計的漏斗狀罩口貼附，進行排氣風量的讀值比對。
2. 蜂巢整流段：上游 90%的部分是中空的箱形結構，下游端由 2 層阻力網夾著 1 層 6mm 邊長蜂巢結構，用於整流。
3. HEPA 濾網段：由兩片端板、拉力螺栓、容許流量 $32\text{m}^3/\text{min}$ 的 HEPA 濾網箱構成。空氣經 HEPA 濾網過濾後，除了將空氣中的懸浮微粒移除，且有益於孤立風量量測儀器，以阻隔外部氣流的干擾。

4. 濾網下游束縮段：經 HEPA 濾網過濾的空氣，在本段隨著斷面積的縮減而加速。由於理想的束縮段曲廓意味著較高施工費用，本計畫為節省經費，直接利用普通鍍金作法，將 0.57m 見方的 HEPA 濾網下游正方形斷面，縮減為直徑 0.26m 的圓斷面，使管斷面平均風速提高 6.12 倍。此束縮段半錐角 17.5°（全展開角 35°），這個角度權衡於設備佔地面積與氣流穩定度之間，其下游搭配長度足夠的「風量計上游穩流段」，使風量量測位置的氣流能變得足夠平穩。
5. 風量計上游穩流段：為內徑 0.26m 的普通圓斷面直鋼管，總長 2.50m（為管直徑的 9.6 倍），但實際上拆分為兩段，以方便維護檢修。本段設置目的是「最大程度削減風速不均的問題」，使管斷面氣流分布模式等同於「完全發展的高速紊流」。
6. 皮托管測試段：本段可架設皮托管（監測管斷面風速分布之用），或熱式風速計的測棒（用於校驗比對熱式風速計測棒，以及作為不同風速計的性能比對之用）。
皮托管的設置目的，是檢查管斷面風速的分佈狀況。本計畫建造的罩式風量計專用校驗設備，經由皮托管的實驗結果，發現在低風量條件下，管斷面風速分布極為均勻，且皮托管的存在，對於管斷面的風速分布對稱性的影響可以忽略；但在高風量條件下（皮托管實際量到的動壓高於 40Pa 時），管斷面風速分布開始出現不可忽視的不均勻現象，所幸比對 90 度垂直方向的皮托管插入量測實驗後，發現影響管斷面風速分布不對稱的主要因素為皮托管的插入深度，至於因為管斷面幾何形狀不完美造成的風速分布不對稱因素，則可以忽略。
關於熱式風速計的校驗比對，本設備最高可產生 28.6m³/min 的穩定風量，相當於管斷面平均風速 8.98m/sec，已足夠作為一般環境量測用風速計的校正比對用途（常用量測範圍為 0.5-5.0m/sec），且因管斷面氣流極為平穩（通過同一個空間點的風速，其大小隨著時間上下波動的劇烈程度），校驗效果較理想。
7. 層流板風量計段：使用 Meriam LFE Z50MH10-10 層流板風量計為本計畫的標準風量計，使用前已送請可追溯至美國 NIST 國家標準的風量計實驗室實施 8 點風量校驗，並取得風量修正公式。此風量計的最大可量測風量為 286381pm。
8. 風量計下游穩流段：為內徑 0.26m 的普通圓斷面直管，總長 1.50m（為管直徑的 5.8 倍），設置目的是配合風量計上游穩流段，提高通過風量計的風速均勻度。

9. 風機入口束縮段：此束縮段的半錐角設計為 10° （全展開角 20° ）。由於束縮段下游銜接離心排氣機，不得不用較小的半錐角，以免逆向影響上游的層流板風量計，造成管斷面風速分佈不穩定的問題。
10. 風機入口撓性接頭：為兼顧管路斷面幾何形狀的剛性（不因管內外壓差而被壓扁或變形）、可撓性（隔斷來自風機的震動，避免造成上游管道共振），以及封閉作業的便利，採用經鋼絲強化管壁的塑膠薄膜管，並搭配物理性質相近的中性矽膠、不銹鋼束帶，將撓性接頭兩端徹底封閉，以防止氣體洩漏。
11. 離心排氣機：為後傾輪葉離心式排氣機，搭配 220VAC 交流感應馬達，額定功率 3.7kW。供應交流 60Hz 電源時，排氣機極限壓損 500mmAq（4900Pa，零風量），極限風量 $50\text{m}^3/\text{min}$ （無壓損）。具體的運轉點由實際的系統總壓損與變頻器供應的電源頻率決定。
12. 出口擴張段：本段上游是噪音與震動來源（離心排氣機），下游則為具強烈阻尼（damping）作用的高級濾網，因此本段只需發揮銜接並擴大管路斷面積的作用節可，為此大膽地使用半錐角 22.5° （全展開角 45° ）。
13. 出口濾網與蜂巢整流段：依序安裝高級濾網、阻力網、6mm 邊長蜂巢結構、阻力網、2 呎（0.67m）的直管段、出口凸緣。若將空氣出口模擬為天花板出風口，則可供罩式風量計的漏斗狀罩口貼附，進行讀值比對。

第三節 設備完成結果簡介

建造完成的罩式風量計專用校驗設備，其外觀如圖 28，為佔地 $7.3\text{m}\times 2.3\text{m}$ ，高度 1.6m 的大型可拆卸設施。空氣自圖 29 的方形凸緣排氣口流入（具體的開口大小，由透明壓克力板上的開口決定），經阻力網、蜂巢結構整流後，流入圖 30 所示的 HEPA 濾網與束縮段，最後進入上穩流段。

管內氣流經過長達管徑 9 倍的上穩流段整理為完全發展的圓管紊流，然後依序流經圖 31 所示的皮托管測試段與層流風量計。皮托管測試段由皮托管定位器（圖 32 右上方黑色且附有尺寸刻度的機構）、皮托管、內徑 0.26m 的中空短圓管組成，細部尺寸如圖 33。圖 32、圖 34 顯示研究人員正依本計畫技術顧問鍾基強教授的指導，逐

一確認凸緣氣密襯墊的螺栓扭力，並以電子角度規與定位工具覆核皮托管的姿態角、圓管的插入深度、皮托管於管內的三維方向。

爲了避免皮托管的存在影響管內氣流的風速分布對稱性，本計畫僅在本設備的測試驗證階段才使用皮托管。初期設備驗證工作完成後，除非有特殊用途（例如用於校驗熱式風速計的測棒），否則在平常的罩式風量計校正比對工作中，可將皮托管與圖 32、圖 31所示的黑色定位器拆除，使皮托管測試段恢復爲普通圓斷面短管。

層流板風量計的外觀如圖 31左方，爲附有兩個小形壓力訊號輸出口的銀白色粗短管。拆開凸緣螺栓後，可由開口觀察層流板風量計的斷面如圖 35。乍看之下，層流板出口面（圖 35左）看起來像一個不透氣的管段底部，但若作局部放大，並仔細觀察這個底部，則可發現這是由一層又一層同心圓狀的波浪板相互擠壓靠攏，組成一個精密的透氣結構（圖 35右）。

管內氣流通過層流風量計與下游的穩流段，到達圖 36所示的風機入口束縮段、撓性接頭、離心排氣機。此處的束縮段是爲了配合排氣機入口尺寸而設計，但選用很小的半錐角，以避免因氣流紊亂而逆向波及上游的量測穩定性。撓性接頭使用螺旋鋼絲強化的塑膠薄膜管，且安排「鋼絲螺紋方向」與「排氣機輪葉旋選方向」一致，使管內氣流儘可能順暢。圖中白色的中性填縫矽膠（俗稱矽利康）係搭配材質選用，以提高異質間的附著力。

離心排氣機的轉數由可程式變頻器（圖 37）控制。本設備安裝了兩部濾網箱，隨著使用時間的延長而逐漸發生阻塞，造成系統總管路壓損的改變，但這樣的阻塞過程，所需的時間長短與空氣中的粉塵濃度有關。若以一般環境空氣爲過濾對象，則通常在一週（5 日）內，不會有可量測（ $>1\text{Pa}$ ）的壓損變遷。爲此，若使用變頻器來控制運轉條件，則在 1 個工作天（8 小時）的範圍內，系統運轉條件可視爲恆定不變。

離心排氣機出口擴張段如圖 38所示，爲長度極短、擴張角度陡峭的管件；由於下游還設有濾網、蜂巢結構等整流元件，因此不至於因爲擴張角度陡峭而造成問題。氣流最下游的管段外觀如圖 39、圖 40所示，包括出口濾網、蜂巢整流結構、阻力網與中空的出風管道，自出風口凸緣可觀察到金屬阻力網、蜂巢整流結構，高級濾網則位於畫面中兩者的正後方。

爲了驗證管斷面風速分布狀況，並評估皮托管對管流的干涉作用，研究人員以「訊號取樣間隔 2 秒、每筆數據取樣 300 次、測試後監測環境氣壓與溫溼度」的方式，由深到淺逐漸改變皮托管的插入深度（由最深的 $x=-10\text{cm}$ 到最淺的 $x=10\text{cm}$ ，皮托管移動行程共 20cm ，其中 $x=0$ 代表皮托管位於斷面圓心），最後量得以管斷面中心爲圓心、直徑 20cm 範圍內的動壓分布如圖 42，並根據實驗時的空氣條件換算濕空氣密度，據以計算實際風速如圖 43。

雖然圖 42、圖 43 量得的管動壓、管風速斷面分布關係具有相當好的對稱性，但若放大圖形仔細觀察，仍可發現有些微不對稱。稍後我們發現皮托管插入深度 x 不同時，對管流的干涉程度也不同，對管斷面風速的對稱性造成不可忽視的影響。

爲進一步說明皮托管對管流的干涉作用，請看圖 44 與圖 45。圖 44 顯示的是動壓實驗數據的標準差分布狀況，其中位於管斷面中心部位（ $x=-4\text{cm}$ 到 $x=4\text{cm}$ ）的標準差是最小的，這是因爲此處受管壁摩擦的效應影響最少的緣故。在 $x=-10\text{cm}$ ，也就是皮托管插入深度達「管斷面半徑 $13\text{cm}+10\text{cm}=23\text{cm}$ 」時，標準差最大；至於另一邊對應的 $x=10\text{cm}$ 位置，也就是皮托管插入深度僅「管斷面半徑 $13\text{cm}-10\text{cm}=3\text{cm}$ 」時，標準差卻相對地小。同樣的情形存在於整個量測範圍內，而且，即使將皮托管定位器拆下，從原量測方向轉 90 度，依然會量到同樣的特性，只是數據大小不會完全相同而已。

爲了進一步驗證「皮托管插入深度愈深，對管流的干涉作用愈大」，研究人員另以自層流板風量計量得的壓損 ΔP_{LFE} 覆核如圖 45。注意皮托管插入深度改變時，離心排氣機的電源頻率不變，實驗開始前、完成後的環境濕空氣密度變化極微，但由圖 45 卻發現以層流板風量計量得的壓損 ΔP_{LFE} ，卻能隨著皮托管插入深度而變。即使將皮托管定位器拆下，從原量測方向轉 90 度，依然量到同樣的特性，只是細部數據大小不會完全相同而已。

本計畫最後驗證並評估了皮托管插入深度對風量量測的影響，所得結果對於本計畫成果的運用方式整理如附錄。本計畫於完成兩套可用於罩式風量計校驗比對用途的設備後，又進行了詳細的性能實驗與罩式風量計比對實驗。由於事關罩式風量計校正比對標準方法的建立，不便將實驗數據與結果呈現於本文件，僅能簡介兩套設備的使用標準程序如附錄 1 與附錄 2，敬供國內外各實驗室參考。

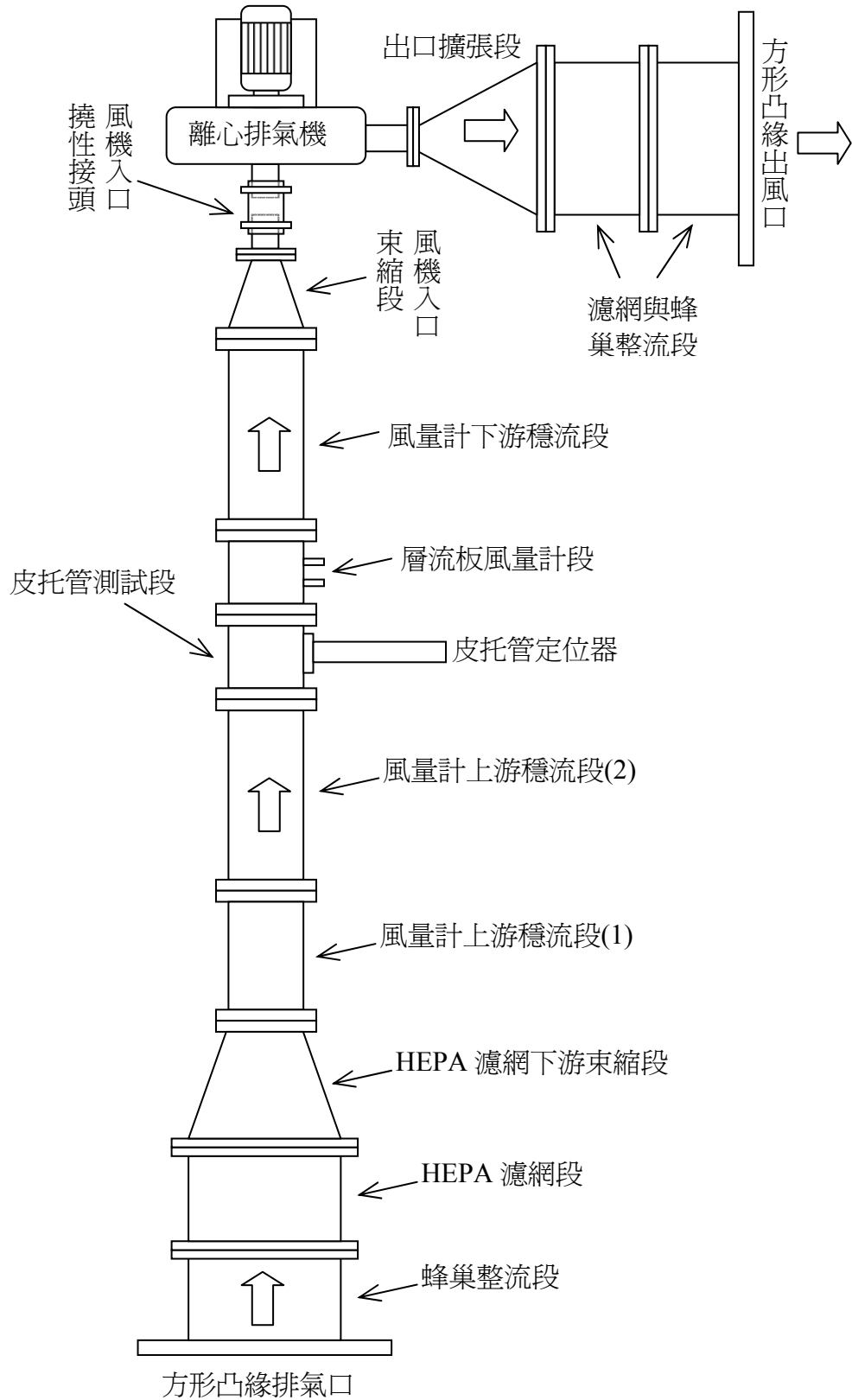


圖27 單式風量計專用校驗設備平面佈置圖（未依比例繪製）



供各種規格的罩式風量計貼
附的排氣口方形凸緣

圖28 設備外觀：右為可調整開口面積的吸氣入口凸緣)

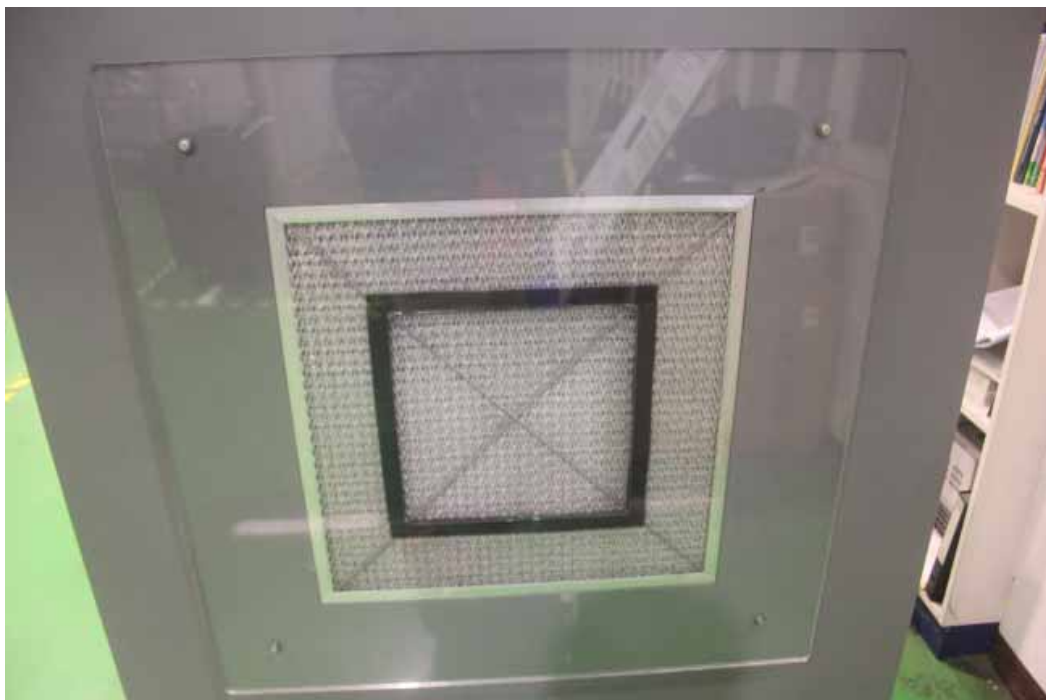


圖29 方形凸緣排氣口（開口尺寸由壓克力板決定）



圖30 自右起分別為阻力網、蜂巢結構、HEPA 濾網段、束縮段

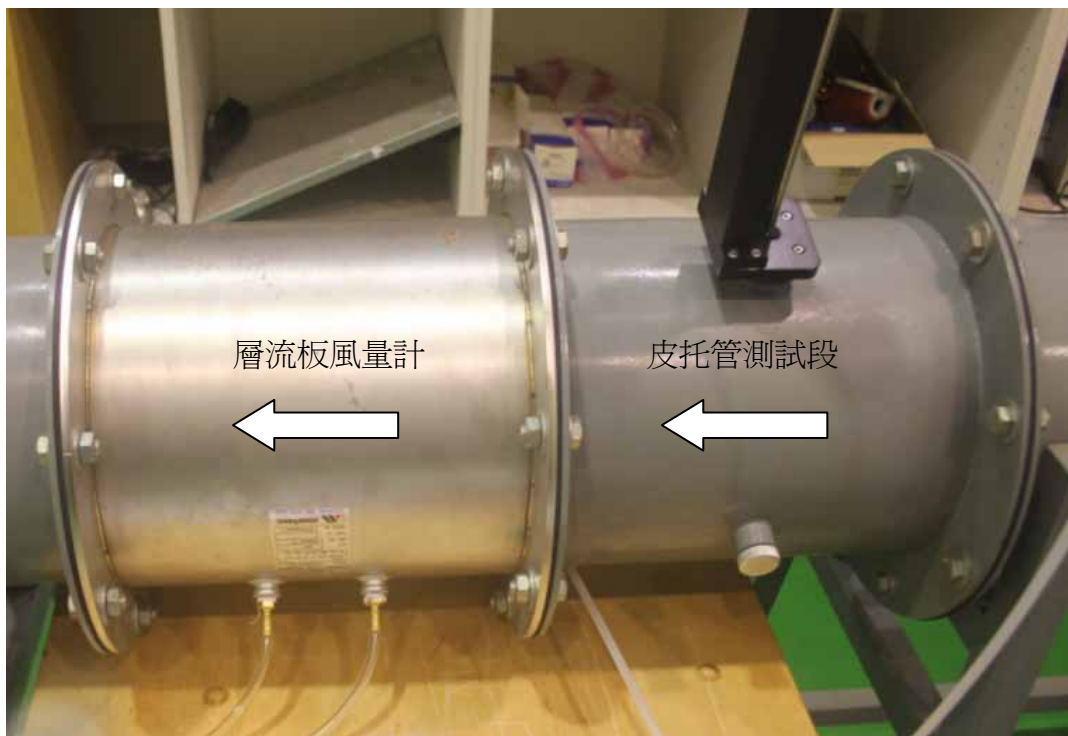


圖31皮托管測試段（右）與層流板風量計（左）特寫



圖32 忙碌的研究人員正在覆核皮托管於監測段中的插入深度與安裝姿態

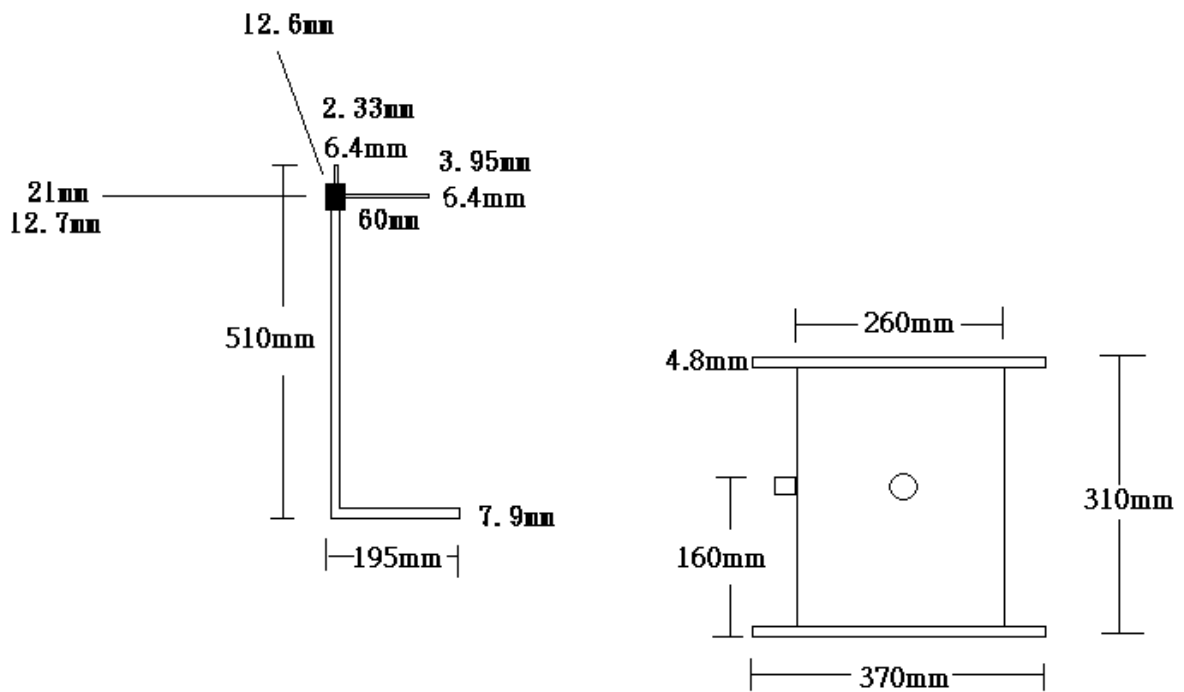


圖33 皮托管監測段尺寸略圖



圖34 研究人員於實驗進行前覆核皮托管的姿態角

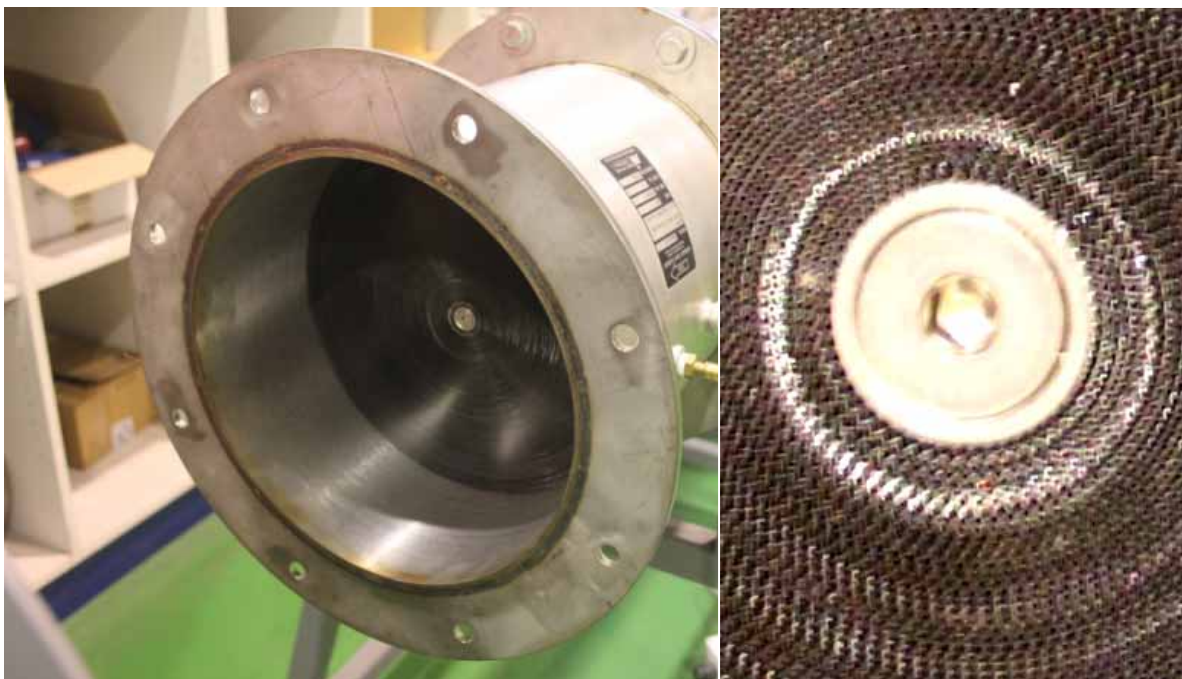


圖35 層流風量計之外觀（左）與多重環形層流板結構（右）

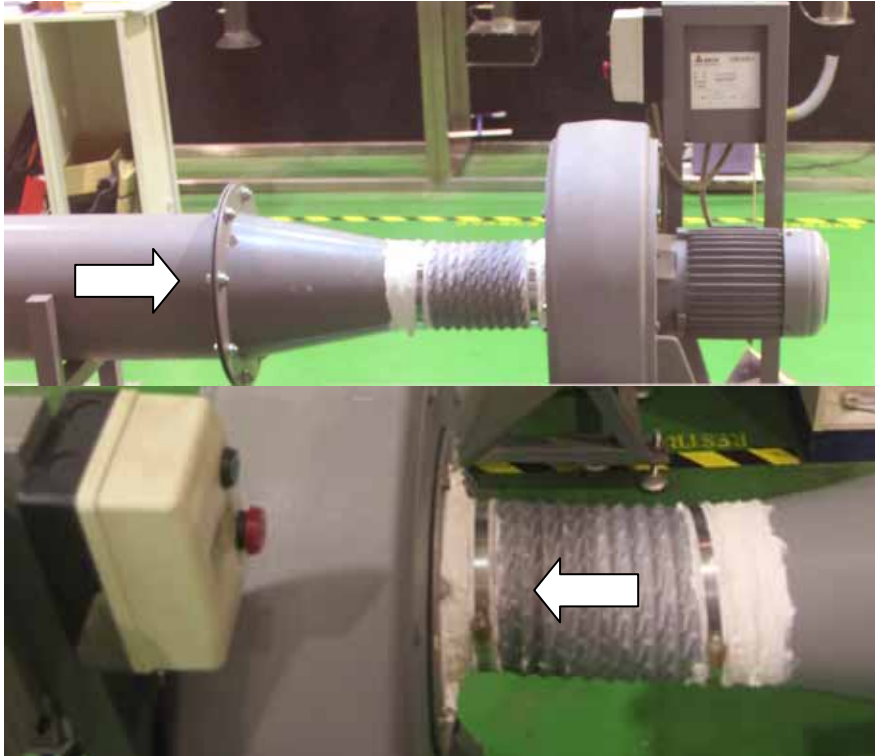


圖36 離心風機入口束縮段與撓性接頭特寫（以矽膠封閉孔隙）



圖37 控制離心排氣機轉數的可程式變頻器



圖38 校正風洞的離心排氣機與出口擴張段



圖39 校正風洞的出口部分外觀特寫

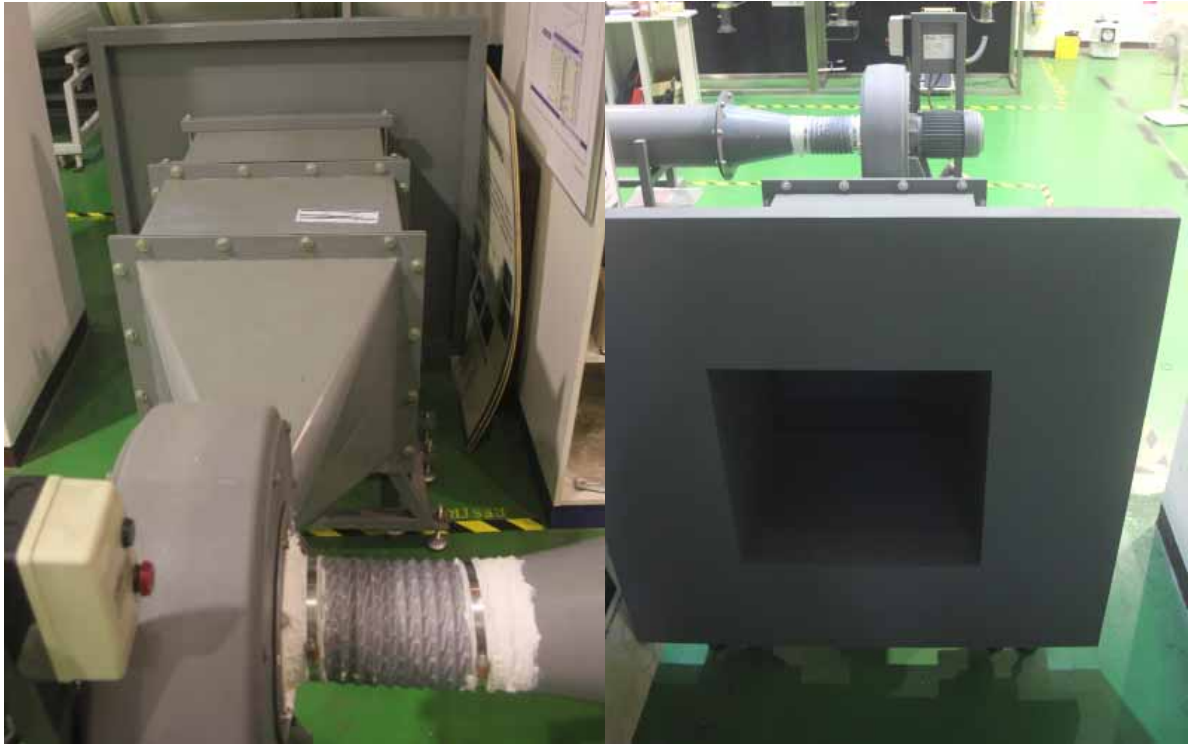


圖40 校正風洞的出口擴張段、濾網與蜂巢段、與附凸緣出風口



圖41 校正風洞的出風口蜂巢結構與阻力網特寫

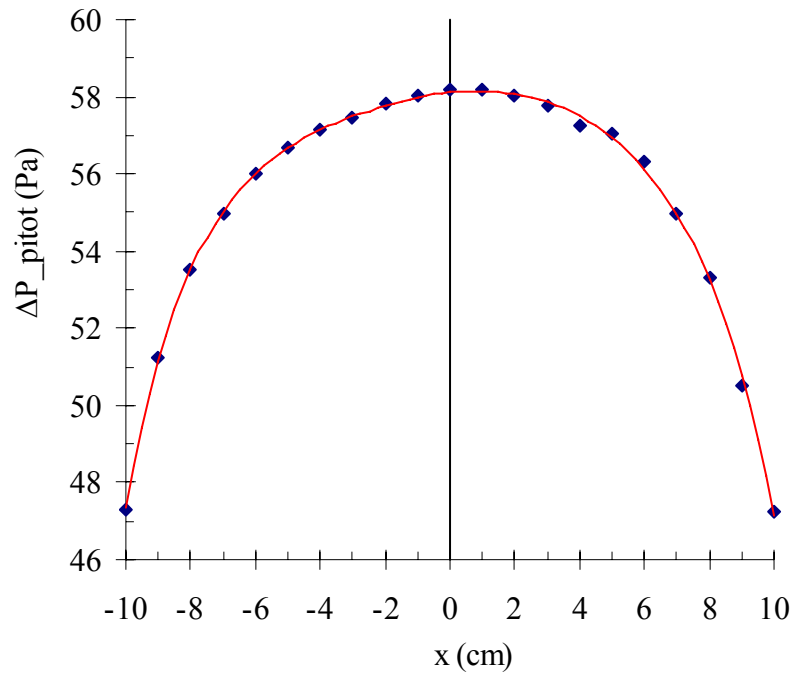


圖42 皮托管測試段圓心部位的動壓分布

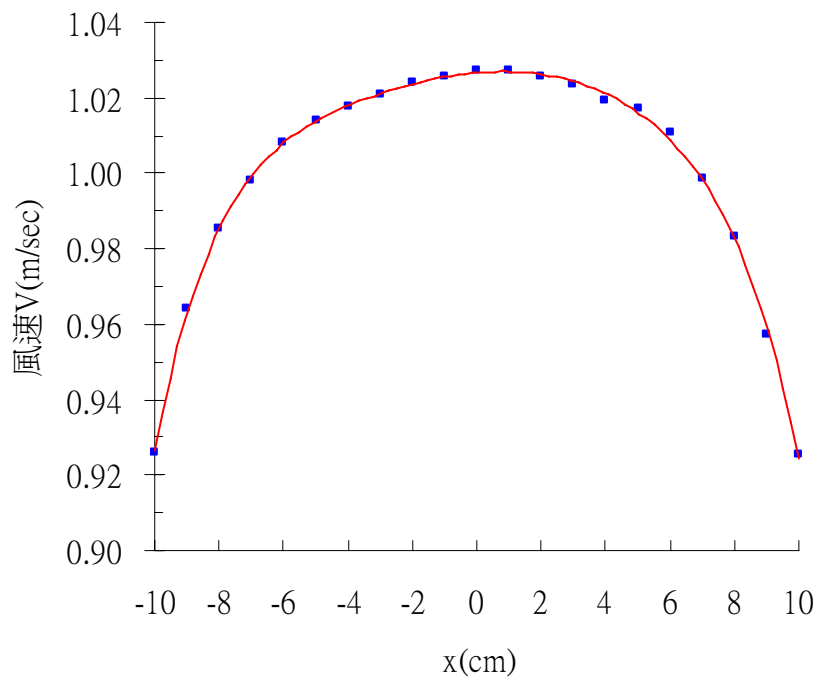


圖43 皮托管測試段圓心部位的風速分布

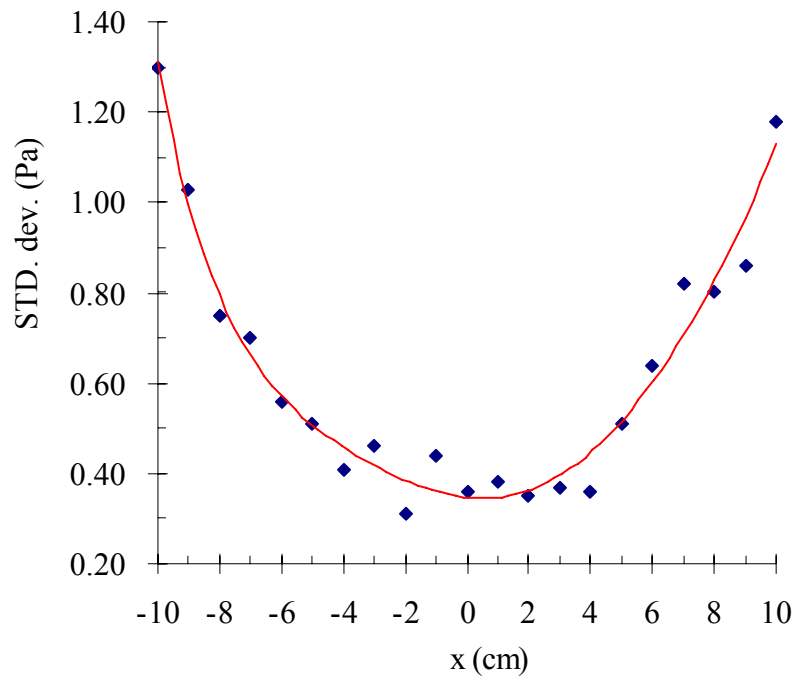


圖44 皮托管測試段圓心部位的動壓標準差分布

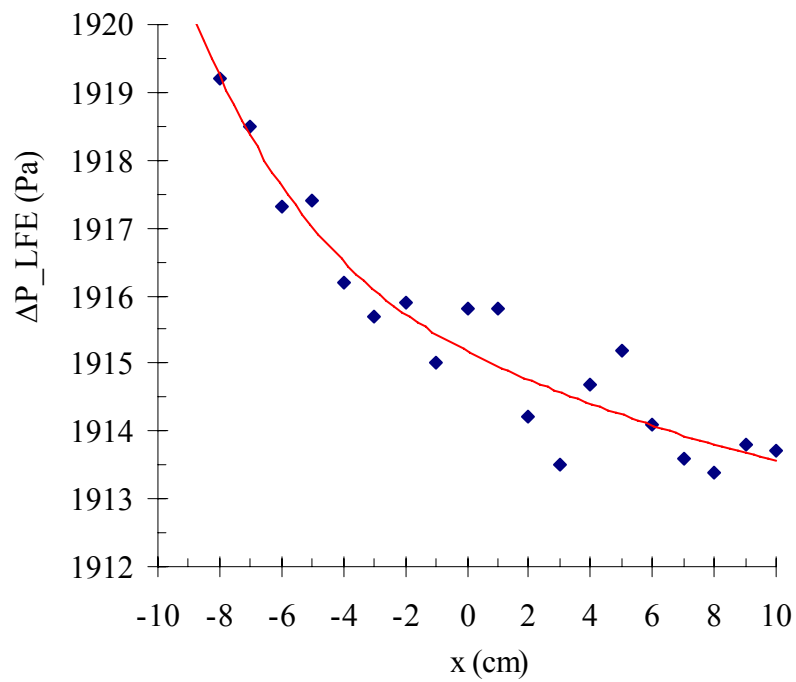


圖45 對應皮托管測試段實驗量得的層流板風量計壓損

第五章 結論

本計畫完成「罩式風量計專用校驗設備」以及「風速計比對用風洞」的設計、改造、測試、作業程序建立工作，使罩式風量計的校驗方法具多種選擇。首先說明本計畫的執行成果。

1. 改造完成罩式風量計專用校驗設備：本設備設有模擬出風口與排氣口的附方形凸緣開口各 1 個，可分別用於模擬天花板出風口與回風口，方便進行罩式風量計的快速校驗。在 $0.2-28\text{m}^3/\text{min}$ 的風量範圍內，預期進行 5 點校驗只需半小時即可完成。除了以上用途之外，此設備平時亦可作為小型（直徑 8mm 以下）熱式風速計測棒的性能校驗比對用途，以提升公帑利用效率。
2. 改造完成風速計比對用風洞：本設備具有極大（ $1\text{m}\times 1\text{m}$ ）的測試段斷面，在低風速域（ $0.5-4.0\text{m}/\text{sec}$ ）有良好的運轉穩定性。若將罩式風量計的環形核心量測元件或風速感測器獨立拆下，則可將此量測元件或感測器安裝於風洞中，視同一般風速計進行性能比對。除了以上用途之外，此設備平時亦可作為不同種類風速計（皮托管、迴轉式、熱線式、熱球式）的性能校驗比對用途，以提升公帑利用效率。
3. 完成兩套設備的標準作業程序：本計畫除了完成硬體設備的研發改造，同時配合建立了各自的標準作業程序（詳附錄），可用於校驗比對罩式風量計、風速計性能。

以下說明由本計畫執行成果未來可能衍生的校驗比對用途與相應的原則性建議，但實際作業時，所需的校驗比對作業程序及校驗作業品質的認定，須另邀學者專家作深入討論（因為目前除了本計畫之外，國內並無罩式風量計的校驗設備），並與未來國內成立的其他校正實驗室進行定期的作業品質交流、互評。

1. 本計畫的「風速計比對用風洞」可視需要作為本所目前使用的各種風速計校驗比對用途，以減輕儀器維護費用的負擔。
2. 本計畫的「風速計比對用風洞」可配合未來的罩式風量計校驗國際標準，深入進行細部修改，以配合進行罩式風量計環狀核心量測元件的校驗比對工作，並與其他國內外校正實驗室進行作業品質互評等活動。

3. 本計畫的「罩式風量計專用校驗設備」可搭配附錄所列的標準作業程序，立即使用於本所各罩式風量計的校驗作業，但由於目前國內尚無可資互評的實驗室，因此設備核心元件「層流板風量計」須每年送請可追溯至美國 NIST 國家標準的實驗室進行校驗，以確保作業品質。
4. 在本計畫執行期間，發現不同廠牌的電子式罩式風量計，其性能可在短短數月內發生嚴重的漂移。建議將此類全電子式儀器的校驗週期設定為「每年兩次」。至於以類似皮托管的原理製作機械式風速感測器的罩式風量計，則因壓差、氣溫、相對溼度的感測器仍為電子式，因此建議將此類儀器的校驗週期設定為「每年一次」。
5. 在本計畫執行期間，以直徑僅 7.9mm 的皮托管插入內徑 260mm 的皮托管測試段，雖然尺寸比例已達 $260/7.9=33$ 倍（通常建議比例為 30 倍以上），但仍發現量測精確度略受皮托管插入深度的影響，因此對於任何「以皮托管插入導管斷面進行量測」的實驗方法，均建議採取「自對向管壁開始量起，朝管斷面中心計算移動距離，且量測作業最遠到管斷面中心為止」的量測原則。配合 CNS 或 EN 等規範對圓形管斷面的平均風速量測位置取樣原則，自管斷面的「上、下、左、右」四個方向的壁面向管斷面中心量測，以取得量測方法的一致性。

誌謝

本計畫執行期間，除計畫主持人王順志副研究員、本所勞工衛生組研發替代役人員邱振邦先生全程參與之外，承蒙聖約翰科技大學吳順治教授、雲林科技大學鍾基強、長榮大學陳友剛教授等學者專家，不吝惠賜指導與提示，使本計畫得以順利完成，謹此敬表謝忱。

參考文獻

- [1] 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。
- [2] Sutherland W. The viscosity of gases and molecular force. *Phil. Mag.* 1893; 36(223): 507-31.
- [3] Sutherland W. *Phil. Mag.* 1895; 40: 421.
- [4] Thiesen M. *Verhandl. deut. physik. Ges.* 1902; 4:348.
- [5] Buddenberg JW, Wilke CR. Calculation of Gas Mixture Viscosities. *Ind. Eng. Chem.* 1949; 41(7): 1345-7.
- [6] Wilke CR. A Viscosity Equation for Gas Mixtures. *J Chem. phys.* 1950; 18(4): 517-9.
- [7] Kestin J, Whitelaw JH. The Viscosity of Dry and Humid Air. *Int J Heat Mass Transfer.* 1964; 7: 1245-55.
- [8] Kestin J, Whitelaw JH. *Fundamentals.* 1967;3(5).
- [9] Richards DR, Florschuetz LW. Forced Convection Heat Transfer to Air/Water Vapor Mixtures. NASA Contractor Report 3769. 1967:62-7.
- [10] Studnikov EL. The Viscosity of Moist Air. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal.* 1970; 19(2): 338-40.
- [11] Mason E, Monchick L. Transfer Properties of Polar-Gas Mixtures. *J Chem. Phys.* 1962; 36(10): 2746-56.
- [12] Green DW, Perry RH. *Perry's Chemical Engineers' Handbook* 8 ed. New York: McGraw Hill; 2008. p.2-421-6.
- [13] Kestin J, Wang HE. The Viscosity of Superheated Steam Up to 270°C. *Physica.* 1960; 26:575-84.
- [14] Teske V, Vogel E, Bich E. Viscosity Measurements on Water Vapor and Their Evaluation. *J. Chem. Eng. Data.* 2005; 50:2082-7.
- [15] Kumar A. Estimating the Effect of Moist Air on Natural Convection Heat Transfer in Electronics Cooling. *Qpedia Therm. eMag.* 2008. 11:10-6.
- [16] American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (US). Section 6.6-6.7. In: *ASHRAE Handbook-Fundamentals, SI Edition.* The society 2001.

附錄一：罩式風量計專用校驗設備建議作業程序

本附錄文件用於說明如何使用勞工安全衛生研究所自行研發建造的罩式風量計專用校驗設備，以進行罩式風量計的校驗作業。

1. 不得使用的情況：以下情況發生時，不得使用本設備。
 - (1) 空氣異常：發生沙塵暴或空氣污染事件時。
 - (2) 氣象異常：晝夜溫差超過 20°C，或高、低氣壓過境，或強烈的鋒面過境，或落雷、暴風雨等異常天氣（容易造成氣壓、氣溫、相對溼度劇烈變動）。
2. 重新啓用作業程序：適用於設備長期放置不用後，重新啓用前的恢復作業。
 - (1) 移除排氣口、出風口的保護用遮蔽物，並以無油壓縮空氣清潔開口。
 - (2) 檢查設備電源設施，確認無漏電疑慮，確認變頻器性能正常。
 - (3) 啓動設備運轉於額定電源頻率（48Hz），每 10 分鐘監測自層流板風量計讀出的壓損（單位 Pa）、層流風量計入口絕對壓力（單位 hPa）、溫度（單位 °C）、相對溼度（單位%），直到確認設備進入穩定運轉狀態。
 - (4) 檢查皮托管是否可用，將皮托管插入定位器與本設備的皮托管測試段，以「自對向管壁開始量起，朝管斷面中心計算移動距離，且量測作業最遠到管斷面中心為止」的量測原則，自管斷面的「上、下、左、右」四個方向壁面起，朝管斷面中心量測風速分佈狀況。取樣位置與取樣點數，均依 CNS 量測圓斷面導管平均風速的規範。
 - (5) 比較皮托管評估的風量，是否與層流板風量計的讀值修正結果一致。
3. 風量計校正作業程序：本程序用於校驗罩式風量計。
 - (1) 將預期校驗的風量範圍分為若干點（風量狀態），依照層流板風量計的特性，概略設定對應的離心排氣機電源頻率。
 - (2) 架設組裝罩式風量計，命兩位作業助手準備。
 - (3) 以第一個作業頻率設定變頻器連續運轉離心排氣機 10 分鐘，使設備運轉狀態

穩定。量測層流板風量計入口絕對壓力、溫度、相對溼度，依層流板風量計校正報告計算風量修正參數。

- (4) 令兩位助手手持罩式風量計，將罩口正確貼合於本設備的出風口（或排氣口），並使直讀式螢幕對著助手。兩位助手握持罩式風量計時，不可使罩式風量計的任何開口受到遮蔽。
- (5) 令助手設定罩式風量計的量測模式為真實風量，隨即啓動積分平均量測功能（如果有的話）；此時同步開始取樣量測層流板風量計的壓損，兩者的取樣時間間隔須相同（1-3 秒），取樣點數均為 300 筆。
- (6) 以軟體下載罩式風量計、層流板風量計讀出的數據，其中層流板風量計的數據必須以校正報告提供的修正公式與參數進行修正換算。
- (7) 分別檢視來自兩部風量計的各 300 筆數據，這些數據的統計分佈必須呈現為常態分佈模式。分別計算其模數與標準差，整理為各點的校正數據。
- (8) 回到步驟(3)，但將電源頻率設定為下一個頻率，直到校驗作業完成。
- (9) 若校正比對結果均滿足預設的條件，則作業完成。

4. 附熱式風速計校驗建議方法

- (1) 設備穩定運轉後，量測取得層流板風量計上游的氣壓、氣溫、相對溼度，以本所提供的濕空氣密度計算方法求得濕空氣密度。
- (2) 以皮托管量測、換算，取得管斷面中心的風速。
- (3) 以熱式風速計測棒取代皮托管，於管斷面中心讀出風速數據。取樣時間間隔均為 1-3 秒（可選擇任一數字，但此數字須固定不變），取樣點數為 300 筆。
- (4) 確認 300 筆熱式風速數據呈統計學上的常態分佈，計算模數、標準差。
- (5) 與皮托管量得的數據相互比較，若數據均落入預設的規範標準，則視同完成 1 個點的風速校驗。

附錄二：風速計比對用風洞建議作業程序

本附錄文件用於說明如何使用勞工安全衛生研究所自行研發建造的風速計比對用風洞，以進行罩式風量計核心量測元件、一般風速計的校驗比對作業。

1. 不得使用的情況：以下情況發生時，不得使用本設備。
 - (1) 空氣異常：發生沙塵暴或空氣污染事件時。
 - (2) 氣象異常：晝夜溫差超過 20°C，或高、低氣壓過境，或強烈的鋒面過境，或落雷、暴風雨等異常天氣（容易造成氣壓、氣溫、相對溼度劇烈變動）。
2. 重新啓用作業程序：適用於設備長期放置不用後，重新啓用前的恢復作業。
 - (1) 開啓風洞戶外開口，檢查風洞室內入口、戶外出口是否正常，以無油、無水的乾燥壓縮空氣清潔這兩個開口。
 - (2) 檢查設備電源設施，確認無漏電疑慮，確認變頻器性能正常。
 - (3) 啓動設備運轉於額定電源頻率（大型風機 48Hz，小型風機 0Hz），每 10 分鐘監測測試段的絕對壓力（單位 hPa）、溫度（單位 °C）、相對溼度（單位 %），直到確認設備進入穩定運轉狀態。
 - (4) 以預設的定位機構握持皮托管，自測試段上方逐漸插入此皮托管，逐步掃描整個風洞測試段的動壓分佈均勻度。若動壓數據分佈足夠均勻，則進一步換算為風洞測試段風速分佈。
3. 風量計核心元件或風速計校正作業程序：本程序用於校驗罩式風量計的環形核心元件、核心風速感測器，或各種風速計。
 - (1) 以 2 部預設的定位機構，分別握持皮托管與待測件，使兩者均位於風洞測試段斷的斷面中心高度。
 - (2) 橫向推開待測件，將皮托管移動到風洞測試段斷的斷面對稱中心，並量測該點風速，隨後以兩支雷射筆交叉定位皮托管尖端位置。
 - (3) 橫向推開皮托管，將待測件移動到風洞測試段斷的斷面對稱中心，核對待測件

的感測器是否對應在兩支雷射筆交叉定位的位置（原皮托管尖端位置）。讀取待測件的儀表讀值。

- (4) 依皮托管與待測件的原理，分別計算風速數據。分別檢視來自兩者的數據，這些數據的統計分佈必須呈現為常態分佈模式。分別計算其模數與標準差。
- (5) 若校正比對結果均滿足預設的條件，則可視為完成 1 個點的校正作業。

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

罩式風量計校正方法之探討 / 王順志研究主持, -- 1版, --
- 新北市 : 勞委會勞安所, 民101.03
面 ; 公分
ISBN 978-986-03-2201-9(平裝)

1. 空調設備

446.73

101006713

罩式風量計校正方法之探討

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
22143 新北市汐止區橫科路 407 巷 99 號
電話：02-26607600 <http://www.iosh.gov.tw/>

出版年月：中華民國 101 年 03 月

版(刷)次：1 版 1 刷

定價：100 元

展售處：

五南文化廣場
台中市區中山路 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】

ISBN: 978-986-03-2201-9

GPN: 1010100790