

臺灣二〇〇六年國際科學展覽會

科 別：工程學

作 品 名 稱：熱線式渦流流量計

得 獎 獎 項：佳作

學校 / 作者：臺北市立麗山高級中學 張璿文
臺北市立麗山高級中學 林婉茹

作者簡介



我是張璿文（圖左），很榮幸的能夠進入麗山高中就讀，參與專題研究的課程，在這長達一年的時間裡，從無到有，與我的夥伴一起進行科學實驗和研究，所學習到的知識、技能以及待人處世的態度皆受用無窮，在這課業之外的領域裡讓我更充實豐富並且訂定了人生的未來目標。

我是林婉茹（圖右），個性積極認真、實事求是，對於老師交代的功課、未完成的專題研究，都能努力做好。對人文藝術皆有涉獵，喜歡聽歌劇，特別是「悲慘世界」和「歌劇魅影」。喜歡思考，對推理、懸疑小說極感興趣。常運動，接觸各類項目。研究科學則是從小訂定的終身目標。上達天文、下至地理，無一不是具有極大的好奇心。在麗山的三年，希望不只能在課業上有好表現，更希望能在學校，提升更多科學與人文的能力。

摘 要

流量計在實驗室與工業領域裡是重要的儀器，如今已經有數十種依不同物理原理而發展出來的型式，可以配合多變的環境需求與測量條件而使用。然而，各種流量計所適用的範圍備受侷限。本研究主要目的在發展一種熱線式的渦流流量計，供給氣體之流量量測之用。透過自行製作儀器與設備：熱線測速儀(包括探針、探棒及電子處理器)和渦旋產生器(管道中含一三角形截面之鈍體，當流體通過時，在後方尾流產生週期性渦旋逸放)。由於熱線測速儀擁有偵測流體運動時高頻動態變化的能力(約為 20000 Hz 以內)，因此結合熱線測速儀與渦旋產生器，經適當的設計與調校，可以測得在不同流體流速時渦旋產生器的三角截面鈍體後方渦旋逸放的頻率。由於渦旋產生器的截面面積為固定值，因此可以從而計算出流量與渦旋逸放頻率的關係。經由嚴格的校準與驗證步驟，本研究的結果顯示自製的熱線測速儀擁有極佳的渦旋頻率偵測能力，所量測到的校準曲線顯示渦旋產生器的三角形截面柱所產生的渦旋逸放頻率與流量成線性關係。為了降低誤差，建議在 0 ~ 40 CMM 之量測範圍內分成三條方程式來代表不同範圍內的校準曲線，最大誤差僅在 5% 以下。若需使用在不同的流量範圍時，僅需改變渦流產生器和幾何尺寸，以使渦旋逸放頻率適合於熱線測速儀的動態響應範圍即可。倘若商品化之後，可以實際應用於風扇流量

量測、引擎進氣埠流量的測量等等應用。熱線測速儀本身也可作為風速計，適用於各種場合之風速量測。

Abstract

Flow meter is a instrument that is vital to the laboratory as well as the industrial related field. Based on different physical principles, tens of models that work in harmony with the diverse environmental demands and measurement conditions are developed to date. However, the application of varied flow meters is still under severe restriction. The purpose of this study is to develop a hot-wire type of vortex shedding flow meter for the use of flow rate measurement. Through the home-made apparatus and device, the hot-wire anemometer (includes probe, stem and electronic processor) and the vortex generator. (duct that contains triangle's section of the bluff body. When fluid passes through, the wake behind produces periodical vortex shedding.) The ability of hot-wire anemometer when it detects the fluid moving changes of high-frequent movement is within 2000Hz, after appropriate design and adjustment, the combination of hot-wire anemometer and vortex generator may investigate the frequency of different flow rate that generated from the vortex shedding behind the bluff body of triangle section. The section area of vortex generator is constant value, thus it can calculate the relationship of flow rate and the frequency of vortex shedding. By means of strict calibration and test procedure, the results reveal that home-made hot-wire anemometer has excellent ability to detect the frequency of vortex shedding. The calibration curve indicates a linear relationship between the frequency of vortex shedding and flow rate. In order to reduce inaccuracy, it is suggested to classify three formulas to represent the flow rate that ranges from 0 ~ 40 CMM. The greatest inaccuracy is under 5%. When applied to different flow rate range, it only has to change the size of vortex generator only if the response frequency of hot-wire anemometer suit for the range of frequency of vortex generator. After commercialization, it can be applied to measure the flow rate of fans, flow rate of intake valve of engine, etc. Hot-wire anemometer also served as anemometer, which can be applied to wind velocity measurement in any situation.

目 錄

| | |
|---------------------|------|
| 摘要..... | i |
| Abstract..... | iii |
| 目錄..... | iv |
| 符號索引..... | vi |
| 表圖索引..... | viii |
| 第一章 前言..... | 1 |
| 1.1 研究動機..... | 1 |
| 1.2 研究目的..... | 2 |
| 1.3 文獻回顧..... | 2 |
| 1.4 研究目標..... | 8 |
| 第二章 研究構方法與過程..... | 9 |
| 2.1 研究構思與流程..... | 9 |
| 2.1.1 研究構思..... | 9 |
| 2.1.2 流程圖..... | 11 |
| 2.2 研究設備與儀器..... | 12 |
| 2.2.1 研究設備..... | 12 |
| 2.2.1.1 流量計..... | 12 |
| 2.2.1.2 高壓幫浦..... | 12 |
| 2.2.1.3 變頻器..... | 13 |
| 2.2.1.4 資料擷取系統..... | 13 |
| 2.2.1.5 渦流產生器..... | 14 |
| 2.2.2 熱線測速儀..... | 17 |
| 2.3 熱線測速儀的製作..... | 20 |
| 2.3.1 探針..... | 20 |
| 2.3.2 探棒..... | 21 |
| 2.3.3 電子處理器..... | 22 |
| 2.4 渦旋產生器的製作..... | 23 |

| | |
|-------------------------------|----|
| 2.4.1 整流段..... | 23 |
| 2.4.2 測試段..... | 24 |
| 2.5 系統整合..... | 24 |
| 2.5.1 系統結合..... | 24 |
| 2.5.2 熱線式渦流流量計測量範圍的評估..... | 25 |
| 2.6 校準設備與方法..... | 26 |
| 2.6.1 熱線測速儀的校正..... | 26 |
| 2.6.2 流量計的校正..... | 28 |
| 2.7 比較 | 30 |
| 第三章 結果與討論..... | 31 |
| 3.1 熱線測速儀的校正結果..... | 31 |
| 3.2 壓力轉換器的校正結果..... | 31 |
| 3.3 流量計的校正結果..... | 32 |
| 3.4 不同的低通濾波器截止頻率對渦旋逸放的頻率..... | 32 |
| 3.5 熱線式渦流流量計的渦旋逸放頻率與流量關係..... | 33 |
| 3.6 討論..... | 33 |
| 第四章 結論與應用..... | 35 |
| 4.1 結論..... | 35 |
| 4.2 應用..... | 35 |
| 參考文獻..... | 37 |

符號索引

| | |
|------------|-------------------------|
| A | 噴嘴口截面積 |
| d | 三角形鈍體面對流體之截面寬度 |
| D | 渦旋產生器流道之內徑 |
| E | 電壓 |
| f | 渦旋逸放頻率 |
| f_{cut} | 低通濾波器截止頻率 |
| h | U型管量測垂直高度 |
| h_c | 對流熱傳導係數 |
| H | U型管內酒精液面高度 |
| HNO_3 | 硝酸 |
| I | 電流 |
| l | 熱線探針長度 |
| P | 壓力 |
| P_{atm} | 大氣壓力 |
| q | 熱通量 |
| Q | 流量 |
| R | 末電阻 |
| R_0 | 初始電阻 |
| Re | 雷諾數($Re = u d / \nu$) |
| St | 史卓數($St = f d / \nu$) |
| T | 室溫 |
| T_0 | 初始溫度 |
| T_w | 電阻溫度 |
| T_∞ | 流體之溫度 |

| | |
|--------------|-----------|
| u | 流速 |
| ρ_{air} | 空氣密度 |
| ρ_{alc} | 酒精密度 |
| u | 流速 |
| α | 熱線探針溫度係數 |
| θ | U型管斜放角度 |
| τ | 熱線探針反應時間 |
| ϕ | 熱線探針之截面直徑 |

表圖索引

| 表圖編號 | 表圖名稱 | 頁次 |
|--------|------------------------------|----|
| 表 1-1 | 各類流量計之優缺點比..... | 38 |
| 表 2-1 | 離心式高壓幫浦規..... | 39 |
| 表 2-2 | 變頻器規格..... | 40 |
| 表 2-3 | 熱線式渦流流量計測量範圍..... | 41 |
| 表 2-4 | 熱線式渦流流量計與熱線是風速計之比較..... | 42 |
| 圖 1-1 | 孔口板流量計..... | 43 |
| 圖 1-2 | 文氏管流量計..... | 44 |
| 圖 1-3 | 噴流嘴式流量計..... | 45 |
| 圖 1-4 | 皮托管..... | 46 |
| 圖 1-5 | 渦流式流量計..... | 47 |
| 圖 1-6 | 渦輪式流量計..... | 48 |
| 圖 1-7 | 超音波流量計..... | 49 |
| 圖 1-8 | 浮子流量計..... | 50 |
| 圖 1-9 | 熱線式流量計..... | 51 |
| 圖 1-10 | 電磁式流量計..... | 52 |
| 圖 1-11 | 明渠流..... | 53 |
| 圖 2-1 | 流量計構造..... | 54 |
| 圖 2-2 | 高壓幫浦的構造..... | 55 |
| 圖 2-3 | 資料訊息處理流程..... | 56 |
| 圖 2-4 | 類比/數位資料轉換..... | 57 |
| 圖 2-5 | 資料擷取系統..... | 58 |
| 圖 2-6 | 渦旋產生器(vortex generator)..... | 59 |
| 圖 2-7 | 圓柱尾流雷諾數與史卓數的關係..... | 60 |
| 圖 2-8 | 探針構造..... | 61 |
| 圖 2-9 | 探針構造實體圖..... | 62 |
| 圖 2-10 | 測試熱線探針反應頻率的波形與比例..... | 63 |
| 圖 2-11 | 探棒的構造..... | 64 |
| 圖 2-12 | 探棒的構造實體圖..... | 65 |
| 圖 2-13 | 電子處理器內部電子線路簡圖..... | 66 |
| 圖 2-14 | 電子處理器實體圖..... | 67 |

| | | |
|--------|--------------------------|----|
| 圖 2-15 | 渦流流量計校正裝置..... | 68 |
| 圖 2-16 | 渦流產生器尺寸大小示意圖..... | 69 |
| 圖 2-17 | 熱線測速儀校正設備圖..... | 70 |
| 圖 2-18 | 校正壓力轉換器實驗設備圖..... | 71 |
| 圖 2-19 | 流量計校正圖實驗設備圖..... | 72 |
| 圖 2-20 | 進行熱線式渦流流量計與熱線風速計的比較..... | 73 |
| 圖 3-1 | 熱線測速儀流速與電壓的校正曲線..... | 74 |
| 圖 3-2 | 壓力轉換器壓力與電壓的校正曲線..... | 75 |
| 圖 3-3 | 流量計的校正曲線..... | 76 |
| 圖 3-4 | 低通濾波器截止頻率對渦旋逸放頻率的影響..... | 77 |
| 圖 3-5 | 熱線式渦流流量計的渦旋逸放頻率與流量關..... | 78 |

第一章 前言

1.1 研究動機

在許多的領域中，小至家裡的冰箱、冷氣，大至煉油廠、發電廠，大部分的機件都需要藉由流體來運作，而精確地控制流量的大小，便成為了相當重要的課題。測量流量所使用的流量計有許多的種類，諸如：孔口板流量計、文氏管流量計、噴嘴式流量計、皮托管、渦流式流量計、超音波流量計、質量式流量計…等，上述各式流量計都有著不同的優缺點。

渦流流量計早已被工業界所採用，其具有高準確性、高重複性、無轉動元件、低經濟成本等優點，利用渦旋逸放(vortex-shedding)的頻率與流速呈線性的關係，可由所測得的轉換而得流量。現今熱線風速計被應用在許多方面上，諸如風速計、空氣質量感知器、流量傳訊器、空氣流量計等，因其接觸介面極小，靈敏度大為提高，以此作為渦旋逸放頻率之偵測器，可大幅增加測量的精確度，並且適合於各種工業用途，除此之外，熱線風速計原理是藉由電壓換算速度，除了量測的環境(如：環境溫度、濕度、空氣密度)會影響精確度外，外界的雜訊也是影響量測精度的困擾之一，若是以量測頻率的方式推得流量，則不須考慮上述的困擾，且不需校正。因此「熱線式渦流流量計」的構想便是結合兩方面的優點進而改善一般流量計的缺點。

1.2 研究目的

- (一) 發展熱線風速計(hot-wire anemometer)及渦旋產生器(vortex generator)兩個子系統。
- (二) 對兩大系統進行校正以及測試，評估可測量之範圍。
- (三) 根據前兩項的結果發展自製的熱線式渦流流量計，並探討可實際應用之處。

1.3 文獻回顧

測量流體的流量時，可分為兩種狀況，一為管內流(close-channel)、另一則為開口堰(open-channel)。在這裡我們將適用於封閉管道的流量計分為市面上最常見的壓差式以及其他各種流量計來探討。

1.3.1 適用於封閉管道(close-channel flow)之流量計

最常應用於工業上的流量測量儀器為差壓式(differential pressure)流量計，因其具有安裝容易、構造簡單、具伸縮性等因素。差壓式流量計的原理係利用流體流經管子中的限制孔時，因通過的截面積變小，壓力值也隨之降低，然後經過的截面積又恢復到原大小時，壓力亦漸漸回升，利用限制孔上下游的壓差，來量得流量值。一般僅在限制孔上下游端連接 U 型水銀柱壓力計，藉由 U 型管兩端水銀柱高度差便可讀得流量值。

以下為差壓式流量計的種類：

1. 孔口板流量計(orifice plate)，如圖 1-1 所示。

優點：• 價格較低，易於安裝更換，當正確安裝時其準確性大於文氏管及噴嘴式。

缺點：• 比文氏管或噴嘴式產生較大之壓損。

• 不適用於量測含懸浮性固粒的流體，因為固粒會沈積在孔口板的前方。

2. 文氏管流量計(venturi tubes)，如圖 1-2 所示。

優點：• 由於文氏管之斜度構造及出口錐管等原因，使得壓損較小。

• 與孔口板的比較，於相當的管徑與壓差下所測之流量比孔口板式約大 60%。

• 由於形狀的關係，能夠抵抗磨損，且不易使管中雜物附著，故誤差較小。

缺點：• 構造特殊，製造複雜，故價格昂貴。測距改變的彈性較少。

3. 噴流嘴式流量計(nozzle flow meter)，如圖 1-3 所示。

- 優點：
- 壓力損失較孔口板為低。
 - 可測量含懸浮性固粒之流體。
 - 適用於多種流體，且安裝容易。

- 缺點：
- 價格較為昂貴。
 - 限制於中管線使用。

4. 皮托管(pitot tube)，如圖 1-4 所示。

- 優點：
- 構造簡單，安裝迅速不佔空間，若為暫時性使用最為適宜。
 - 精確度更高於文氏管及孔口板流量計，可用以校正其他流量計。

- 缺點：
- 不能測量含固體顆粒或黏滯性大的流體，因管口極易堵塞。

除了差壓式流量計之外，還有許多不同型式量測流量的儀器，包括可變面積式(variable area)、測速式 (velocity)、測力式(force)、水頭面積式(head area)，以下僅介紹幾樣市面上較為普遍的流量計：

1. 渦流式流量計(vortex flow meter)，如圖 1-5 所示。

優點：• 合理的流量比（但須容許高流速與高壓降），無活動組件，對流體產生的阻力較低。

缺點：• 流量低時，產生渦旋的條件不夠以致於無法測到流量，廠商所標示的可測最大流量多在流速高達 80 或 100 m/s 時。

- 震動會造成誤差。
- 正確的安裝對準確性有很大的影響，如墊片凸出到管路內，甚至是焊渣，都與流動性質息息相關。
- 流量計前端需有相當長的直管作為整流段。

2. 渦輪式流量計 (turbine flow meter)，如圖 1-6 所示。

優點：• 在流量比大時仍相當準確。

缺點：• 轉輪磨耗或生垢會影響準確度而需要校正

- 由於軸承必須長時間承受轉輪高速的轉動與產生的高溫，因此流量計的壽命相當有限。

3. 超音波流量計(ultrasonic flow meter)，如圖 1-7 所示。

優點：• 不與流體直接接觸，唯一可以安置於管路外側之流量感測器。

• 流體內音速隨流速變化，利用傳送時間差異來計算流量。

缺點：• 只能用在具備不可壓縮性的液態流體。

• 不同的超音波感測頭所能對應的流體流速有一定的範圍，且管路中的流體必須維持滿管的狀態。

4. 浮子流量計(rotameter)，如圖 1-8 所示。

優點：• 前後不需裝置直管，可用於氣體或液體。

缺點：• 各流體之種類不同，比重、濃稠度、密度、質量不同時會產生不一樣結果，故在進行測量前需分別校正。

• 此種流量計必須直立使用，可能成為限制之點。

• 長時間使用後，會因生鏽或生垢而稍微改變其特性，必須重新進行校正工作

5. 熱線式流量計(hot-wire flow meter)，如圖 1-9 所示。

優點：• 高精準度、對於經過的流體具有相當高頻的反應。

• 可針對流體的一小點作測量。

• 測量範圍廣泛，適用於不同的流體。

- 對所測流體產生最小的干擾。
- 容易使用。

缺點：• 流速並不是直接的測量，而是間接經由測量儀器的熱傳導關係所得。

- 探針的構造相當的脆弱，會受限於流體的強度。
- 來自於儀器的其他影響因素將會造成誤差。

6. 電磁式流量計(magnetic flow meter)，如圖 1-10 所示。

優點：• 測量精度和靈敏度較高，而且壓損極小。

缺點：• 導電率低的介質，如氣體、蒸汽等則不能應用。

- 電磁式流量計造價較高，且信號易受外界磁場干擾，減少了可應用在工業管流測量中的場合。

1.2.2 明渠流(open-channel flow)量測

如圖 1-11 所示，在河流、河床和用管道輸送的流體，並不是完全的流滿，也就是液面脫離固體邊界，這稱為明渠流。這種形式的流體，通常利用擺放一阻礙物在通道裡來測量，或自流體穿越這個阻礙物來量測一些典型易變的結果。大部分是使用水閘門和攔水壩作為阻礙物。

1.4 研究目標

由以上文獻探討可以得知，熱線式的流量計具有高靈敏度且體積小、不易影響到所測流體的優點。不過當流體經過管子時，不可能為一完全的層流，此乃是由於流體間的黏滯性在管壁上會產生邊界層的緣故，而這將會使流體的速度分佈形成拋物線的形式。如要測量此流體之流量，則需針對各點，分別用熱線式風速計來測量，再作積分，才能推知流量。而又如果流體的流速毫無章法可言，則無法利用環積分來計算，而各類流量計之優缺點比較如表 1-1 所示。

由文獻亦可得知，渦流式流量計具有高準確度、低成本的優點。且因為測量的時候，置放的地方有一定的比例，而又要在完全發展流的地方才能量到最為準確之數據，所以相關配置可說是很費工夫。如果我們能結合熱線式與渦流式流量計，利用熱線測量鈍體後渦旋逸放產生之頻率，則可快速的得到其流量。

因此，發展方向是必須製作出一渦旋產生器和所進行測量的熱線風速計。並分別進行校正、評估可測量之範圍。然後將兩物結合，做出整體性的探討及實際應用的方向。

第二章 研究方法與過程

2.1 研究構思與流程

2.1.1 研究構思

熱線風速計最大的優點就是靈敏度極高，對於細微的流體速度變化也能感測出來，因此以此作為出發點，思考是否有什麼技術能夠與之結合，融入熱線的此項優勢。在實驗室過去的研究已有許多利用熱線風速計量測不同鈍體後方渦旋逸放頻率等相關傑出的研究與發展，在以三角柱為鈍體量測渦旋逸放的頻率之探討幾乎已臻健全。現今市面上的流量計有許多種類，包括渦流式流量計和熱線風速計，但是並沒有此兩種的組合，倘若能將兩樣技術的優勢結合在一起，說不定在測量流量的領域會有更佳的效能。整個系統分為兩項次系統，渦旋產生器(vortex generator)和熱線風速計(hot-wire anemometer)。

熱線風速計包含有熱線探針、探棒、電子處理器與數據擷取系統。於前方偵測端的熱線探針，目前市面上已有高品質的商品化套件(如：TSI、DANTEC)，製作非常精細，但一支熱線探針動輒要價數千元，再加上熱線探針上的白金線極細較容易損壞，稍有失誤變會造成浪費，考量到經費的問題，因此學生決定自行製作熱線探針，使用便宜簡單的材料，從探針到探棒甚至是電子處理器皆自行製作，如此不但可以藉由實作的過程親自了解其中的物理，在當儀器設備損壞，

也能快速汰換維修。

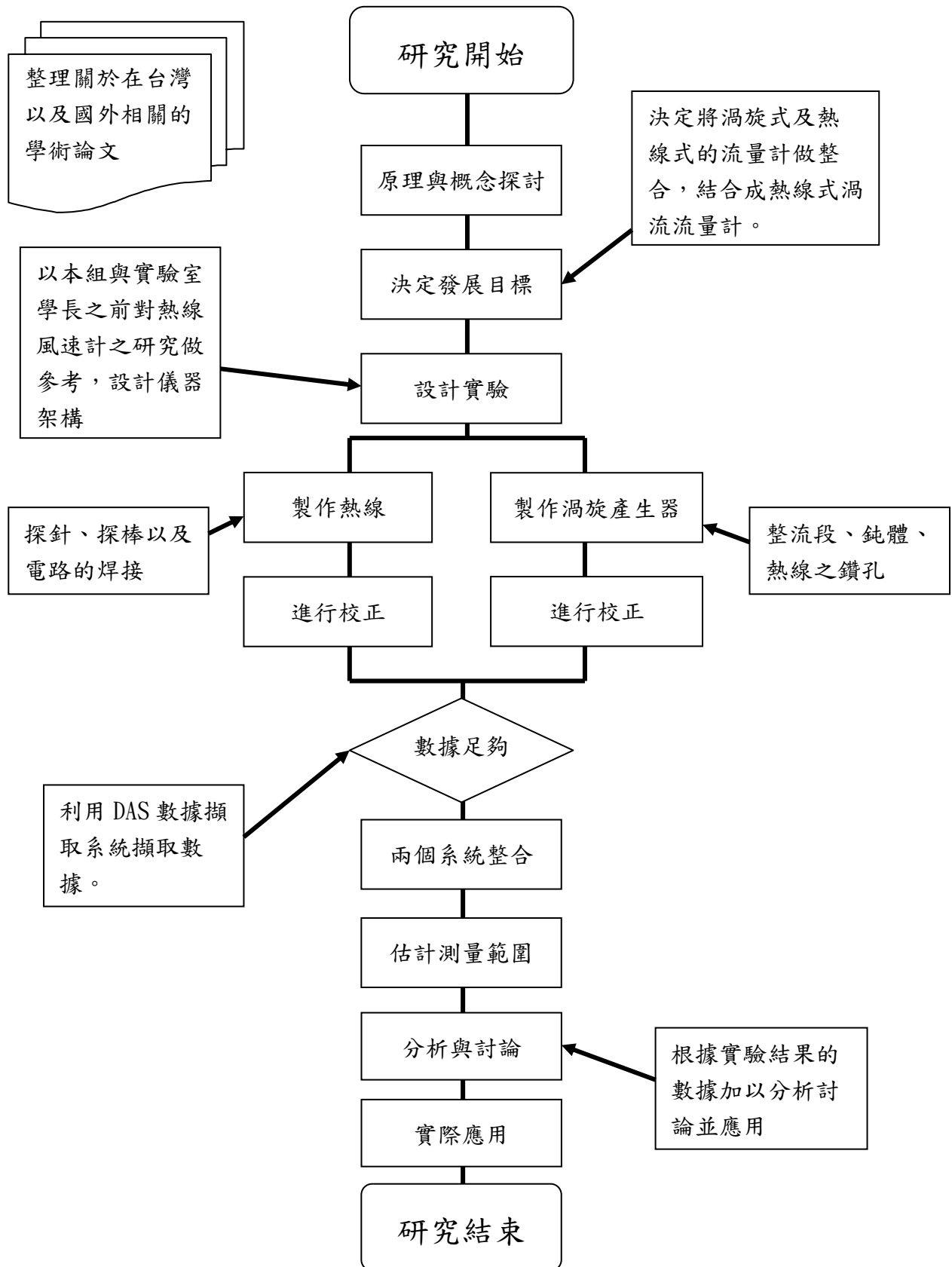
製作好的熱線探針必須經過校正，利用實驗室內的閉迴路風洞以及皮托管(pitot tube)進行。經由數位擷取系統可得電壓與流速成四次方關係式，為一四階曲線。

從探棒尾端連接到電子處理器，此電子處理器的電路包含惠斯登電橋、放大器(OP amplifier)、低通濾波器(low pass filter)、加法器，利用此電子電路裝置將訊號放大，濾掉雜訊，測得電橋兩端的電壓差值輸出。此電路裝置亦是學生自行製作的儀器，體積將會比市面販售的小了許多。

在設備方面，渦旋產生器的製作，首先須確定管子的各部份比例為多少，前半段為濾波段(filter section)和緩衝區(settling section)，濾波段包含有蜂巢狀濾波器(honeycombs)與三層金屬網組成，功用是造成均勻之紊流，而造成渦旋逸放的三角形鈍體置放於後半區，務必對齊圓管直徑的位置，鈍體與管徑的比例最好為 10：1，否則流體亦受到管壁的影響產生渦流的重疊。

兩系統分別完成後，可開始進行渦流流量計的量測，利用實驗室的數據擷取系統，將資料擷取得到渦旋逸放的頻率與流速的關係，經無因次化後，得到雷諾數(Re , Reynolds number)與史卓數(St , Strouhal number)的關係，可預測史卓數將會趨近於一常數。

2.1.2 流程圖



2.2 研究設備與儀器

2.2.1 研究設備

本實驗的研究設備包含有渦旋產生器、流量計、資料擷取系統、高壓幫浦與變頻器，利用這些裝置校正流量與頻率的關係，並可藉由當時的流量推得雷諾數。

2.2.1.1 流量計(flow meter)

此流量計提供高測量精確度以及快速的反應時間，並且可以在 0-250 CFM 的範圍下測試空氣和經過的氣體。如圖 2-1 為流量計的裝置時的示意圖，偵測端是白金電阻溫度感測器(RTD)包覆在玻璃裡，白金絲被焊在強健的陶瓷心棒，以增加強度和穩定性。偵測器包含有兩個偵測項目：速度、溫度，且溫度感測器可以自動校正氣體溫度的變化。

利用此一設備與渦旋產生器可以藉由熱線測速儀量測得到渦旋逸放的頻率與流量之間的關係，但在這之前，必須先行校正此流量計已確定所測得的流量是否正確。

2.2.1.2 高壓幫浦(blower)

高壓幫浦的原理是利用葉輪旋轉、帶動空氣，並沿著葉片做加速運動，如圖 2-2 所示，當這些空氣進入外側氣環之後，利用壓差就可以形成強力的氣流，使氣體迅速穩定的排出。為了持續的供應穩定的流體以進行實驗，所以我們必須要有一能迅速進氣的高壓幫浦，安裝在流量計的後面。即使在渦旋產生器前，

有多層的整流段，但仍需要維持流體一定的穩定。其中，就以抽氣的方式致使流體流動。抽氣優於吹氣的原因在於能夠形成比較低的紊流強度，而吹氣式的就沒有這種優勢。

一般來說，幫浦的形式有軸流式以及離心式兩種。軸流式就像一般的風扇，從一側進氣、另一側排氣；離心式則是利用離心力的原理，將吸入的氣流從旁帶出。比較起來，軸流式能產生較大的壓差，離心式所佔的體積較小。則我們所選用的幫浦為離心式，表 2-1 為其規格。

2.2.1.3 變頻器(inverter)

為了要使高壓幫浦的馬達能提供不同的轉速，便需要變頻器的控制，變頻器就是利用控制電壓頻率的高低不同，來決定馬達的轉速，故當在校正流量計時，藉由高壓幫浦以及變頻器的控制，便可提供系統不同的流量。如表 2-2 為我們所使用的變頻器規格：

2.2.1.4 資料擷取系統(data acquisition system)

資料擷取系統為個人電腦(PC)以及硬體電路之間的橋樑，為一個互相溝通的數據處理介面。其目的是將一般實驗上所量測到連續電流或電壓的訊號，即類比訊號，利用類比對數位轉換器(analog to digital converter)把類比訊號轉換成數位訊號。類比訊號的取樣率(sample rate)越高則訊號越不容易失真，如圖 2-3 所示為其資料訊息處理流程圖。數位訊號也就是電腦的語言模式「0」與「1」，0 代表低電位，通常為 0 伏特；1 則代表高電位，通常為 5 伏特。其中，轉換成數

位訊號的優點有：當數位訊號在傳送中即使有雜訊干擾，它仍然可以把雜訊所造成之干擾減至最低，避免實驗上記錄所造成的誤差，如圖 2-4 所示。且大量且繁雜的資料擷取，需要經由微電腦系統可以快速運算以及容易儲存的能力，才會更利於處理及分析。

在使用熱線風速計量測的實驗中，當從熱線探針量得電壓差之變化時，就會先通過 DAS 的轉換，將原始的類比訊號資料一一擷取取樣。將訊號轉成數位的數據傳輸到電腦裡，並作圖分析或是校正。我們所使用的數據擷取系統是實驗室裡教授自行研發、已具有的設備，如圖 2-5 所示，其 Sample rate 為 330k Hz，而 Record length 則為 32000 samples，對於熱線風速計已相當的足夠。

2.2.1.5 渦旋產生器(vortex generator)

當未經處理過的流體流入管子中時，必定是夾雜許多擾動的紊流(turbulence)，因此需要適當整流的裝置使之成為均勻的層流，如圖 2-6 所示，從第一道蜂巢狀濾波器，再來是三道由大至小不同孔徑的鋼網，各層鋼網之間距須大於 30 倍的網目或 500 倍線徑，以確保流體已被整為一均勻層流。緩衝區在濾波段之後，主要用於過濾軸向及橫向的躁波，並於最終得到擾動衰減後之層流，為使紊流強度降至最低。當一均勻穩定的流體經過鈍體時，因為流體間的黏滯力的影響，導致流體流經鈍體後產生了速度梯度，當速度梯度持續增加，流體流經鈍體始產生分離，當流體分離由於逆向壓力梯度的關係便會在鈍體後方形成渦旋(vortex)，當上游流速持續增加，於鈍體後端尾流區形成週期性的渦

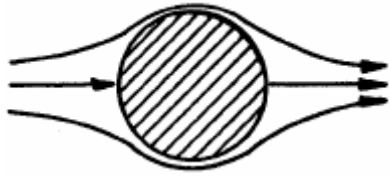
旋，此一現象須在某一特定流速範圍下才會產生，並且輪流交替性地出現在鈍體中心線之兩側。

根據 John H. Lienhard [6] 的文獻，當使用圓柱體(circular cylinder)做為鈍體時，其 Strouhal number/Reynolds number 的關係如圖 2-7 所示。

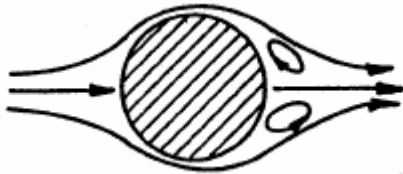
流體約在 $Re = 40$ 時於圓柱體後方分離，並且開始產生成對的渦旋，當雷諾數愈來愈大時，在尾流區形成週期性的渦旋逸放情形，我們的實驗就是在此階段利用熱線測速儀進行頻率與流速關係的測定。雷諾數在 $150 \leq Re < 3 \times 10^5$ ，史卓數會趨近於一常數，在此階段的層流開始不穩，並轉為紊流，但基本上還是保持渦旋逸放的形式。雷諾數繼續增加，此時為一過渡期，無法觀察到渦旋產生的頻率，當 $Re \geq 3.5 \times 10^6$ ，渦旋流逸隨著紊流邊界層的發展再次出現，但是也夾雜著強烈擾動的紊流。

使用圓柱體做為鈍體時，渦旋逸放的產生可以分為以下六種情形：

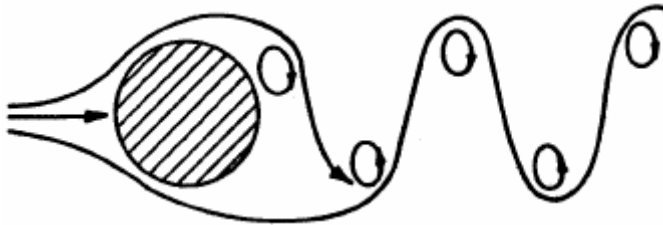
形：



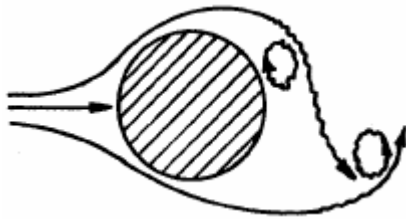
$Re < 5$ 流體順著圓柱體的輪廓而流。



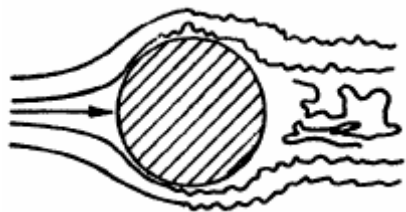
$5 \sim 15 \leq Re < 40$ 從圓柱體的后方分離，並在尾流區產生一對對稱的渦旋。



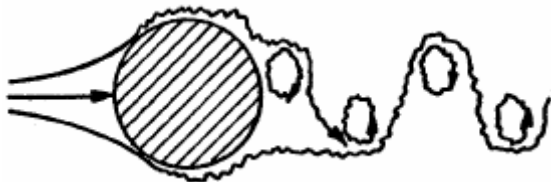
$40 \leq Re < 150$ 尾流區不穩定的向下游流逸，並維持層流的狀態。這稱為層流區(laminar regime)。



$150 \leq Re < 3 \times 10^5$ 層流區開始不穩，並轉為紊流的狀態，但還是保持著凝聚性。此時的邊界層約在 80 度。這稱為次臨界區(subcritical regime)。



$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$ 邊界層變為 140 度，圓柱體的阻力係數則降為 0.3，在此時會觀察不到渦旋產生的頻率。這稱為過渡區(transitional regime)。



$3.5 \times 10^6 \leq Re < \infty$ 夾雜著強烈紊流擾動的規則性，渦旋流逸隨著紊流邊界層的發展再次出現。稱為超臨界區(supercritical regime)。

2.2.2 熱線風速計(hot-wire anemometer)

熱線風速計是目前最廣泛使用在測量即時流速的儀器。它測量的方法，是利用一根輸予穩定功率而發熱的純金屬探針，因為一穩定流動的層流通過時，產生強迫性的熱對流，將熱量帶走，所以使金屬探針的溫度受影響而改變。並利用其溫度的改變會影響電壓的原理，來測量流體的流速。由於熱線具有很高的靈敏度，可以快速地量測即時的环境改變，像對於速度變化小且快的紊流，就是一極佳的測量工具。因此，熱線風速計不管是在工業管線，或是在測量紊流的研究上，已廣泛的被使用。

一個簡單的熱線風速計基本的組成要素，是由探針、探棒以及惠斯登電橋與訊號處理電路所組成。一根精細短小的純金屬探針，其上的金屬絲直徑約為 $5\ \mu\text{m}$ 。又雖然價格昂貴，但因為不易因接觸空氣氧化的優勢，通常都是以白金(Pt)作為材料。電路方面，主要是以惠斯登電橋電路為主體，再依溫度補償以及過濾雜訊的需要，延伸其他的相關電路。

當一根通電並產生熱的純金屬絲，置於穩定流動流體的流場時。會產生對流熱傳遞(convection heat transfer)，由於溫度梯度是決定於流體帶走熱量的速率，因此根據牛頓冷卻定律(Newton's law of cooling)可得到。

$$q = h_c A (T_w - T_\infty) \quad (1)$$

熱傳導速率 q 和總溫度差 $(T_w - T_\infty)$ 以及表面積 A 有關。 h_c 則為對流熱傳導係數。而又根據早期的學者 King 對於熱傳係數與流速的研究，將會呈現以下的關係。

$$h_c = C_0 + C_1 \sqrt{u} \quad C \text{ 為常數} \quad (2)$$

由文獻可得知，白金絲的電阻率、長度、截面積都會隨著溫度發生變化。而當長度及截面積為定值時，溫度和電阻將會呈現線性的關係。如以下公式。

$$R = R_0 [1 + \alpha (T_w - T_0)] \quad (3)$$

其中 R 、 R_r 分別為溫度 $T^\circ\text{C}$ 和 $T_r^\circ\text{C}$ 時的電阻。 α 則為白金絲的溫度係數。當假設供應給金屬絲一個固定的功率時，電流 I 和電阻 R_w 就可以表示為。

$$q = I^2 R_w = I^2 R_0 [1 + \alpha (T_w - T_\infty)] \quad (4)$$

分別將公式(1)、(2)帶入公式(4)裡，結合公式並化簡，就可以得到。

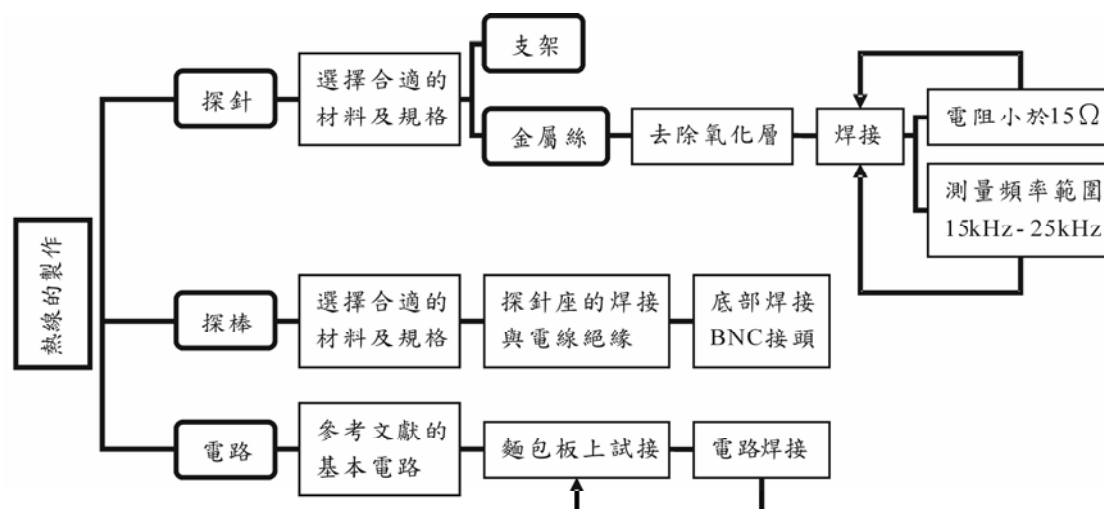
$$I^2 = \frac{A(T_w - T_\infty)(C_0 + C_1\sqrt{u})}{R_0[1 + \alpha(T_w - T_0)]} \quad (5)$$

測量時，假如能使用回授的電路，使得溫度恆定，就可以簡化公式為。

$$I^2 = C_2 + C_3\sqrt{u} \quad (6)$$

從這裡，可以看出：電流的平方，將會與速度開根號成正比。而
又可以根據電壓與電流的關係得到一個結論：電壓的四次方，與速度
成正比。而這個式子所呈現的圖上，電壓和流速將會呈現一個四階曲
線的關係。而熱線風速計基本上就是利用這張圖以及這個原理來測量
流體的流速。

2.3 熱線風速計的製作



熱線風速計(hot-wire anemometer)是一種具有高靈敏度、可快速反應，測量流速的儀器。整個儀器可以分為探針、探棒以及電路三個部份。其製作過程如上圖所示。

2.3.1 探針

探針的功能，主要是能快速感應到所接觸到的流體變化，因此必須反應靈敏及不易受到外力的影響而毀壞。由於白金絲非常脆弱易斷，所以為了方便考量，我們將探針製作成可替換的形式。

探針的組成主要可以分成：作為保護電路的絕緣支架以及感應的金屬絲兩部分。支架的部份是用兩根直徑 0.5 mm 鍍銀的單芯銅線，穿過一般用於熱電偶的具有兩個孔道的陶瓷管，外圍套上不鏽鋼管後再用塑鋼土固定。為了能在測量時不會受到風吹而搖晃不穩，於兩側單芯銅線焊上杜邦接頭，以增加其安置在探棒時的穩定性。

根據文獻指出，白金絲(Pt)以及鎢絲(W)皆可以作為其金屬絲之原料。但由於白金較不容易氧化的特性，所以我們選擇白金做為材料。由於白金絲外圍有一層保護金屬，所以在將白金絲焊接在支架之前，還必須先將白金絲分別浸泡 15 分鐘的 HNO_3 和蘇打水，將外層保護金屬腐蝕並中和其酸性，避免殘留的酸性溶液繼續腐蝕金屬絲，在實驗時造成毀壞。焊接時，最好能將單芯線剪平齊，尤其是每一支探針的高度，因當白金絲的角度不同時，就會影響到其準確度，造成誤差。而且在焊時盡量用點的去焊，如果能一次完成較佳，失敗時，直接重來會比慢慢修還好，圖 2-8、2-9 分別為熱線探針示意圖及實體圖。

一根好的探針它主要必須要達到兩項標準：第一，其電阻值需在 $13\sim 15\Omega$ 的範圍。其電阻值越低，越容易受到流體的影響、其靈敏度越高。第二，反應頻率必須要達到 $15\text{k}\sim 25\text{k Hz}$ 。故在焊接時，就必須特別注意，利用三用電表測量電阻值。並根據連接示波器時所顯示特殊的比例 8：1 的波形推得其反應頻率，如圖 2-10 所示。

2.3.2 探棒

探棒的功能除了固定探針外，亦可在使用時可以輕鬆移動、較為方便，因此在底部連接 BNC 接頭，可以透過後面的 BNC 接頭電線連接電子處理器。拆裝時既簡單又方便。

探棒以不鏽鋼管為主體，管與管之間以塑鋼土相連接，內部則有杜邦接頭作為探針的底座。在電線的連接部分還需要套一層熱縮套避免電線的相互碰觸而造成短路，圖 2-11、2-12 分別為其示意圖及實體圖。

2.3.3 電子處理器

根據文獻資料顯示，熱線電路的主要架構為：惠斯登電橋電路 (Wheatstone bridge)、放大器以及可以濾掉雜訊的濾波器。我們的電路組成大概可以表示為如圖 2-13 所示，圖 2-14 為實體圖。

當 110 伏特的交流電輸入電路時，第一個就必需通過橋式整流器 (bridge rectifier) 以及變壓器整流變壓成 12 伏特的直流電，以供應全部的電路。其中，為了在同一台儀器內能同時有校正以及測量的功能，還另外加入了一系列的電路，其目的是在進行校正時能給予方波以測試熱線探針的反應頻率。

惠斯登電橋的功能是可以精準的測量並校正電阻值，所以可以大幅增加測量的範圍，並且同時增加準確度。惠斯登電橋的四線中，其中有一線為連接探棒的 BNC 接頭，經由以下公式。

$$R_1 \times R_3 = R_2 \times R_4 \quad (7)$$

就可以由惠斯登電橋的兩端利用反向加法放大器電路(summing

amplifier)就可以得到其電壓差值。

當風吹過熱線探針時，熱線探針原本因電流通而產生熱，就會冷卻使得電阻降低，於是需要另外裝置一個回授(feed back)電路，使得熱線探針溫度可以再度回升，因此當風速增加，由於負回饋的電路設計，會使得通過熱線探針的電壓增加，且由於反應的速度非常快，所以溫度的下降和上升幾乎沒有什麼改變，通常一般坊間稱此型的熱線測速儀為定溫型(constant temperature)的熱線測速儀。

由於日常生活的環境中具有許多雜訊，當一個電橋電路通電時，就會像是天線一般，接收到我們不需要的一些雜訊，這些雜訊將會影響到所測量的結果。一般來說，8k Hz 以上的訊號通常為雜訊，因此可以使用兩個低通濾波器過濾掉 8k Hz 以下頻率的雜訊。

2.4 渦旋產生器的製作

整支渦旋產生器外管是由透明壓克力管做成的，在實驗上能較好觀察與調整。整流區各層接合處以壓克力水黏接，再由兩片壓克力環取四個螺絲 90°鑽洞鎖緊。

2.4.1 整流段

渦旋產生器的功能主要是產生渦旋逸放的現象，因此須仔細考量整流區的間隔與材質，在流體進入的第一時間會先經過一段由許多長

度相同的吸管組合成的蜂巢狀濾波器(honeycombs)，以膠水相互黏接，底部需齊平。接著我們採用三層鋼網(screens)，由大孔徑至小孔徑間隔相同，鋼網必須拉平無摺痕，避免影響流體的通過。

2.4.2 測試段

三角形鈍體插於壓克力管中段，鑽孔時所選用的鑽頭必須配合鈍體截面大小，以免太鬆抑或塞不進去，此步驟須小心翼翼，如果固定後稍有偏離會影響實驗結果。熱線探針擺放的位置在鈍體後方，在管壁上鑽一較大的孔可使其左右移動，實驗時即可調整到可量測到訊號最清晰的位置來測量。

2.5 系統整合

2.5.1 系統結合

當熱線風速計與渦旋產生器都製作好之後，可以將兩個次系統結合起來，進行最後一步的實驗，得出頻率與流量的關係，經由無因次化後轉換成雷諾數與史卓數關係，進而評估我們製作的熱線式渦流流量計可測量的範圍與限制。

將分別校正好的渦旋產生器與流量計接合在一起，如圖 2-15 所示，再連接高壓幫浦，使用變頻器調整頻率來控制幫浦轉速，以改變管內的流速。熱線探針插於鈍體後方，連接到電子處理器之 input，

output 接頭由 BNC 線連到快速傅利葉轉換(Fast Fourier Transform)頻譜儀。從此裝置可觀察到當流速改變時，從時域訊號變化經快速傅利葉轉換後之頻域的訊號變化，並且在頻域圖中，當鈍體後開始產生渦旋逸放，頻率是否始終有一峰值，這就是熱線探針偵測到渦旋逸放的頻率。紀錄流量計測得的流量(CFM)與渦旋逸放的頻率(Hz)，畫成圖後應成一次線性關係，以此作為往後發展的依據，只要能得知頻率，即可對應得到流量。

2.5.2 熱線式渦流流量計測量範圍的評估

針對我們所製作的儀器，必須分別對兩個系統，也就是熱線風速計以及渦旋產生器，求出其測量的極限，以便確知儀器是否是可行的；另外，經由知道可測量的範圍，就能更加的了解儀器的應用方向及發展。

當一個三角形鈍體置放於管子中時，管子和三角柱型鈍體的直徑分別表示為 d 和 D 如圖 2-16 所示。

熱線風速計的探針頻率約在 20k Hz 左右。其測量的風速範圍，如果在理想熱線金屬絲未受到損壞的情況下，將可以測量從 0.1 m/s 到 230 m/s 可高達 0.7 馬赫數左右的測量範圍，但如果大於 230 m/s 的話，將會產生震波，對所測量出來的數據造成嚴重的誤差。

渦旋產生器可以產生渦旋逸放情形大致上取決於不同的鈍體形

狀，若以設計流量計的角度來選擇渦旋產生器的鈍體形狀，應是能產生渦旋逸放的雷諾數範圍越大越好，根據學者 John H. Lien hard [6] 對於圓柱體的鈍體所做研究，如圖 2-7 所示。

從這圖 2-7 可以清楚的看到，圓柱體產生渦旋逸放時的雷諾數約在 $40-10^7$ 左右。由於實驗室曾經作過一系列有關三角形鈍體藉由熱線測速儀診測鈍體後方渦旋逸放頻率的研究，可以得知，三角形鈍體較圓柱體容易產生渦旋逸放，且其史卓數隨著雷諾數的增加約固定為 0.182。

經過分析，在不同的三角形鈍體直徑，分別將熱線風速計可測得的速度範圍，帶入史卓數的公式裡。並且由文獻得知頻率為 5-2000Hz。即可得到一個表格，如表 2-3 所示。

經由評估與計算，可以發現熱線式渦流流量計的可量測範圍其實是很寬廣的，這意味著若將此技術商品化之後，此儀器可被應用於大多數的工業應用無虞。

2.6 校準設備與方法

2.6.1 熱線風速計的校正

為了將剛製作好的熱線風速計進行測試，以得知其輸出電壓與流速是否如文獻所提到的，有一個四階曲線的關係，所以，就必須分別對探針、探棒以及電路做校正。整個校正的系統包含了：閉迴路氣動

力風洞(closed loop wind tunnel)、皮托管(pitot tube)、U 型管(U-tube)、電子處理器、濾波器以及數據擷取系統。其連接方式如圖 2-17 所示下：

首先，當校正前，必須先確定探針的電阻小於 15Ω ，而且其波形顯示出的頻率也必須達到 $15\text{ kHz} - 25\text{ kHz}$ 的標準。由於風速計的校正必須製造一穩定且流速已知的流場，所以校正時，要將探針及探棒置入風洞測試段，並連接至電子處理器，output 則是連接到濾波器，再轉接至數據擷取系統。低通濾波器的截止頻率設定在 8 kHz 。當風洞啟動時，分別用熱線風速計以及皮托管測量其流速，並由數據擷取系統擷取熱線風速計的電壓，以及皮托管量得的速度匹配，即可得到一電壓與速度的關係圖。經由四階的曲線嵌合可以得到速度為電壓四階的函數關係，藉此便可從熱線風速計所測的電壓得知其流體流速。

雖然熱線風速計因為其體積小，相較於皮托管，較容易測量紊流或是邊界層。但是熱線風速計的校正卻還是要依靠皮托管來完成校正。皮托管在外管的管壁，與所測量的流體方向垂直，可測量得到靜壓；內管與所測量的流體方向一樣，可測量得到總壓。而總壓為靜壓與動壓之和，故空氣流速可由量出的總壓及靜壓相減得到動壓。

2.6.2 流量計的校正

從上一章可以了解到頻率與流量的關係是整個研究的關鍵點，因

此我們必須先行校正流量計，已確定所測得的流量是否正確。藉由噴嘴量測後可推得理論值之流量，與實際值做比較，以達到校正流量計之目的。

要藉由噴嘴量得流量的方式有兩種，一種是利用 U 形管，另一種則是採用壓力轉換器(pressure transducer)，壓力轉換器為 Validyne Engineering 公司生產的壓電材料，經過 U 形管校正，可從電壓推得壓力，如圖 2-18 為校正壓力轉換器之實驗設備圖，壓力槽(gas tank)是由空氣壓縮機提供，經過穩定壓力器(pressure regulator)前端的針閥(valve)控制流體流量，紀錄壓電材料的電壓(mv/v)及 U-tube 管內酒精高度 $H(mm)$ ，將量測到的電壓值減掉初始電壓得到 ΔE 。接著，壓力 P 可由：

$$p = \rho_{alc}gh \quad (8)$$

此公式換算， ρ_{alc} 為酒精密度 0.797 g/ml ， $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ， h 為 U-tube 量測酒精液面之垂直高度，因擺放斜置 $\theta = 19.5^\circ$ ，必須代入(9)。

$$h = 2 \sin \theta H \quad (9)$$

再將由 H 推出的 P 值減掉第一個值即為 ΔP ，最後求得 ΔE 與 ΔP 之關係式為以下公式所示，如圖 3-2。

$$\Delta P = 26.284\Delta E - 3.2806 \quad (10)$$

求得此關係式後，即可校正流量計了。

如圖 2-19 所示為流量計校正的實驗設備圖，壓力槽之空氣流入流量計，接著再流入到噴嘴(nozzle)，噴嘴底座為整流段，流體經過整流段後再流經噴嘴段，上端出口為大氣壓力，入口側的靜壓孔接到壓力轉換器，可將兩端壓力差轉換成電壓輸出，再根據柏努力定律 (Bernoulli's equation)。

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{air}}} \quad (11)$$

ΔP 是將電壓代入前面求得的關係式(10)後減掉第一個值。此項代入第一式可得到流速值 u ，流量 Q_n 也可順勢導出：

$$Q_n = A \times U \quad (12)$$

A 是噴嘴口的截面積，直徑為 0.0195 m，最後當求得 Q 之理論值。最初紀錄的 Q 為 CFM 單位換算成 CMM 之後，即可得到實際值之流量 ΔQ_n 與 ΔQ_m 的關係式(13)，如圖 3-3 所示。

$$\Delta Q_n = 0.974\Delta Q_m - 0.000584 \quad (13)$$

2.7 比較

一般的流量計在使用之前都會先進行校正，才能避免漂移產生的誤差，熱線式渦流流量計因為是利用熱線來測量渦旋逸放產生的頻率，受到溫度等因素所產生的漂移，並不會影響測量的準確，因此可以不需進行校正，即可測量出流量。另外，當直接使用熱線風速計測量時，需要先量得流體各點的流速，再經過繁複的環積分運算，並乘上截面積，才能取得流量，因此誤差會很大。為了比較熱線風速計以及熱線式渦流流量計在測量上的誤差，因此進行以下的實驗。

實驗共分三個部份，分別用校正過的流量計、熱線風速儀以及熱線式渦流流量計來測量電腦 CPU 裡的小型風扇的流量。首先，先將 CPU 風扇接上 12V 的直流電，並在渦旋產生器中三角形鈍體的前方鑽一個可以用熱線風速計測量的小孔，並且延著管子的半徑 r ，以 2.7mm 的間隔，分別測量 10 個點的流速，如圖 2-20，求得平均流速並乘上截面積，就可以得到流量；熱線式渦流流量計與流量計則是分別帶入圖 3-5 及圖 3-3 中，以已校正過的流量計作標準，分別計算出誤差，製作成表 2-4。

第三章 結果與討論

3.1 熱線風速計的校正結果

如圖 3-1 所示，橫軸為電壓(E)，縱軸為流速 u (m/s)，根據第二章所介紹的 King's Law，當熱線探針經由電子處理器將溫度控制為恆定時，電壓與流速會成四次方正比的關係，經過測試此探針之反應頻率可達到 20k Hz，故當數據擷取系統擷取頻率設定在 20k Hz，進行校正，可從圖中明顯的看出流速與通過熱線探針的電壓的確呈一四階曲線的關係，故從理論的推導再從實驗上的印證，此乃表示學生自製的熱線探針可以正常的運作，就像市面販售的熱線探針一樣，流速與熱線探針電壓的關係如下式所示。

$$u = -0.00988E^4 + 0.404E^3 - 0.264E^2 + 1.39E - 0.108 \quad (14)$$

3.2 壓力轉換器的校正結果

從圖 3-2 中，橫軸為電壓感測器之變化量 ΔE (mv/v)，縱軸為 U 型管所測得壓差 ΔP 。圖 3-2 中顯示出，當電壓越大，所測量的壓差越大。故壓力轉換器所測量到的電壓差與壓力差呈現一個線性的關係，此為校正流量計的前置作業。

3.3 流量計的校正結果

圖 3-3 中顯示，橫軸為流量計所測之流量 ΔQ_m ；縱軸為經由噴嘴入口及出口兩側之壓差所推算出的實際流量 ΔQ_n 。測量之流量係經由 (10) 式之壓力轉換器由電壓差與壓力差之線性函數轉換後，再由 (11) 式可推得噴嘴出口速度即可推得實際流量。經過比對，實際測量的流量與理論值的流量幾乎是完全一樣。因此可知，流量計的誤差很小，確實能用它來進行校正。

3.4 不同的低通濾波器截止頻率對渦旋逸放的頻率的影響

此為渦旋逸放的頻率與所測量的流量之關係圖，橫軸為流量 Q ，縱軸為從 FFT 頻譜儀得到的渦旋逸放頻率 f ，兩者呈現一次線性正比的關係，當流量增加時，頻率也隨之加大。且不管是使用截止頻率 8k Hz 或是 16k Hz 的低通濾波器，圖 3-4 所顯示出的趨勢並沒有太大的差異。

3.5 熱線式渦流流量計的渦旋逸放頻率與流量關係

雖然熱線風速計診測到的渦旋逸放的頻率與流量之關係整體而言有著線性的關係，但若以設計流量計的角度來看，必須還考慮到誤差的問題，因此學生在流量 0~40 CMM 使用了三條不同的方程式來讓誤差降低如圖 3-5 所示，當渦旋逸放頻率 $f < 39.2$ Hz 時，可使用下

式(15)的方程式，故在 5.4 CMM 之前，流量計的誤差將會小於 5.7% 以下，當渦旋逸放頻率 $39.2 < f < 228$ Hz 時，可使用下式(16)的方程式，故在 5.4 ~ 22.8 CMM 之間，流量計的誤差將會小於 1.5% 以下，當渦旋逸放頻率 $228 < f < 400$ Hz 時，可使用下式(17)的方程式，故在 22.8 ~ 40 CMM 之間，流量計的誤差將會小於 0.68% 以下。

再以製作電路的角度來設想上述的方法，學生僅需在電路中增加些許的判斷電路即可。

$$Q = 0.126f + 0.0434 \quad (15)$$

$$Q = 0.0884f + 1.751 \quad (16)$$

$$Q = 0.0981f + 0.603 \quad (17)$$

其中 f 的單位為 Hz， Q 的單位為 CMM。

3.6 討論

在經過一連串的實驗與校正後，可以了解到，我們製作的熱線式渦流流量計，其精確度高，不管是熱線風速計的校正，呈現出平滑的四次方曲線，亦或是壓力轉換器以及流量計的校正，也都表現出線性的關係，另外在最後量測渦旋逸放頻率與流量，其所呈現的趨勢顯示出線性正比關係也與理論推導相符合。由流量與渦旋逸放頻率的線性關係將可以作為流量計的延伸與發展，只要能測得渦旋逸放頻率，即

可以依此關係獲得流量大小，由於量測的機制藉由流體力學特殊的物理現象量測進而推得流量，故其靈敏度與精確度將優於市面所販售的流量計。

參考文獻紀錄渦旋逸放頻率在 5-2000 (Hz)，但實際上學生於實驗時利用變頻器調整流速，礙於高壓幫浦的馬力大小，量測到的最高流量時的渦旋逸放頻率也僅止於約 400 (Hz)，並無法真正知道大於此值之後是否還與流量成正比。

除了實驗方面的探討之外，整個系統還需要講求其體積與便利性，學生在做渦旋逸放頻率與流量的實驗時，會需要用到 FFT 頻譜儀，其體積龐大，不容易搬動，降低了整個實驗的便利性。因此，或許改採用市售的較輕便的數據擷取系統，使用廠商提供的軟體將量測到的數據作快速傅利葉轉換，或是自行編寫程式在求得渦旋逸放頻率後，代入如式 (15) ~ (17) 流量與渦旋逸放頻率呈線性關係的方程式中求得流量，如此一來體積可大幅度減少許多。除此之外，若利用微處理機如 8051 使用快速傅利葉轉換將熱線風速計量得的時域訊號轉換成頻域訊號再代入流量與渦旋逸放頻率之線性關係的方程式中以求得流量，且可在液晶面板的輸出方式便是即時的流量大小，如此不僅縮小了體積與其它手續，且更為方便攜帶。

第四章 結論與應用

4.1 結論

1. 自製高頻率響應之微型熱線風速計進行電壓與流速的測量，於風洞中測試及校準熱線風速計的性能，發現所發展出來的熱線風速計具有如同理論推導的性能曲線，流速與電壓四次方成正比關係，最大響應頻率可達約 2000 Hz，此一自製的熱線風速計包含探針、探棒以及電子處理器。體積輕便、成本低廉，敏度及精確度等相關性能表現不錯，具商業化的潛力。
2. 自行發展的渦旋產生器，使流體分別經過整流段以及測試段後，可在三角形截面鈍體的後方產生週期性的渦旋逸放。
3. 結合熱線風速計與渦旋產生器，成功發展出氣體流量計，經測試結果發現，渦旋逸放產生的頻率會與流體的流量成正比。當利用熱線風速計偵測得渦旋逸放的頻率變化，即可得知流量。
4. 兩系統既可結合使用，也可以獨立分開，利用熱線風速計量測風速進行流速的測量。

4.2 應用

在工業生產的領域上，為了能提高生產的效率以及確保輸出的量，計量是非常重要的一項工作。流量計便是計量工具中的一種。流

量計的應用非常的廣泛，而我們所研發出來的熱線風速計及熱線式渦流流量計可以應用到許多包括流速與流量量測的場合，例如：

1. 風扇流量的測量：一般風扇測試性能的方式。都是依照 AMCA 規範所建立的設備使用噴嘴式的流量計利用壓差來推得流量，但是噴嘴的製作上較為昂貴，所以可以用熱線式渦流流量計取代。
2. 工業通風方面的應用：一般如化學氣櫃的檢驗，或是氣象量測所使用的風速計，一般如購買目前市面上的商用品，不但價格昂貴，保養維修更是所費不貲。
3. 引擎進氣埠的應用：藉由熱線式渦流流量計的即時且高靈敏度的偵測引擎進氣埠的進氣量，提供行車電腦正確的資訊以提供最佳空燃比使得引擎的效率提高。

參考文獻

- [1] Huang, R. F. and Chang, K. T., 2004, "Oscillation frequency in wake of a vee-gutter," *AIAA Journal of Propulsion and Power*, Vol. 20, No. 5, pp. 871-878.
- [2] Huang, R. F., *Measurements in Heat Transfer*, Lecture note, Dept. of Mech. Engr., National Taiwan Univ. Sci. Tech., Taipei, Taiwan, 2000.
- [3] Huang, R. F. and Lin, C. L., 1995, "Vortex-shedding and shear-layer instability of wing at low-Reynolds numbers," *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 8, pp. 1398-1403.
- [4] Bruun, H. H., *Hot-Wire Anemometry: Principles and Signal Analysis*, Oxford Univ. Press, New York, 1995.
- [5] Perry, A. E., *Hot-wire Anemometry*, Oxford Univ. Press, New York, 1982.
- [6] Lienhard, John. H., *Synopsis of Lift, Drag, and Vortex Frequency Data for Rigid circular Cylinders*, Technical Extension Service, Washington, 1966.
- [7] 盧明智、黃敏祥，*OP Amp 應用+實驗模擬*，全華科技股份有限公司，1994。
- [8] 杜鳳琪(譯)，*流體力學(下)*，高立圖書有限公司，民 89。

表 1-1 各類流量計之優缺點比較

| 流量計種類 | 壓差式 | 渦流式 | 浮子式 | 渦輪式 | 超音波 | 熱線式 | 電磁式 | 熱線渦流式 |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|----------|-------|
| 適用流體 | 液體、氣體 | 液體、氣體 | 液體、氣體 | 液體、氣體 | 非導電性液體 | 液體、氣體 | 含固體顆粒的液體 | 液體、氣體 |
| 壓損小 | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | |
| 測量範圍廣 | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| 精確度高 | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ |
| 安裝易 | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | |
| 購買費用低 | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | ✓ |
| 使用壽命長 | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | ✓ |

表 2-1 離心式高壓幫浦機規格

| | |
|--------------------------|------------------------|
| phase | 3 |
| kw | 0.3 |
| V | 200 - 230/380 - 415 |
| A | 1.2/0.7 |
| type | HTB75 - 032 |
| RPM | 2800/3500 |
| MMAQ(MAX) | 200/260 |
| m ³ /min(MAX) | 6.0/7.0 |

表 2-2 變頻器規格

| | |
|----------------|---------------------------------|
| type | M36V2PO3 1.1kva |
| input | 1 ψ , 220V, 50/60Hz |
| output | 3 ψ , 0-220Vac, 0.5 - 60Hz |
| output current | 3A |

表 2-3 熱線式渦流流量計測量範圍

| d (m) | f (Hz) | u (m/s) | Re_d |
|---------|-------------|------------------|-------------|
| 0.002 | 5 ~ 2000 | 0.056 ~ 22.22 | 7 ~ 2963 |
| 0.003 | | 0.083 ~ 33.33 | 17 ~ 6667 |
| 0.005 | | 0.14 ~ 55.56 | 46 ~ 18519 |
| 0.008 | | 0.22 ~ 88.89 | 119 ~ 47407 |
| 0.010 | | 0.28 ~ 111.10 | 186 ~ 74075 |

表 2-4 熱線式渦流流量計與熱線是風速計之比較

| | Hot-wire anemometer | HWAVSFM | Flow meter |
|--------------------|----------------------------|---------------------|-------------------|
| Flow rate | 6.55 (SCFM) | 7.058 (SCFM) | 7.4 (SCFM) |
| Procedure | Complicated | Simple | |
| Reliability | Low | High | |
| Calibration | Yes | No | |
| Error rate | 11.49% | 4.62% | |

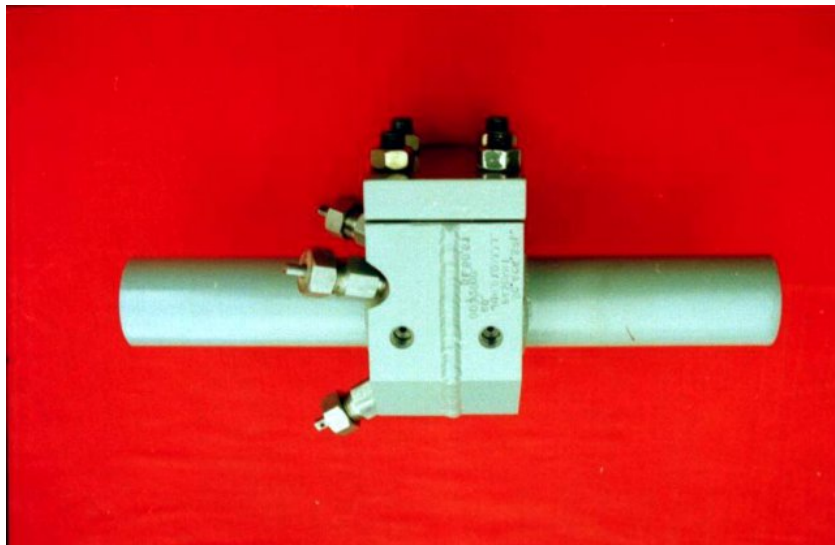
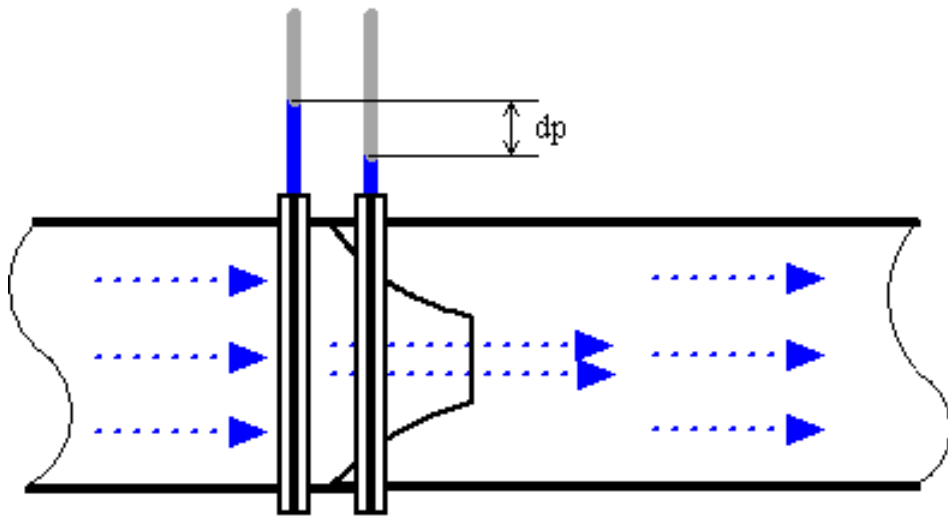


圖 1-1 孔口板流量計



圖 1-2 文氏管流量計



www.EngineeringToolBox.com

圖 1-3 噴流嘴式流量計

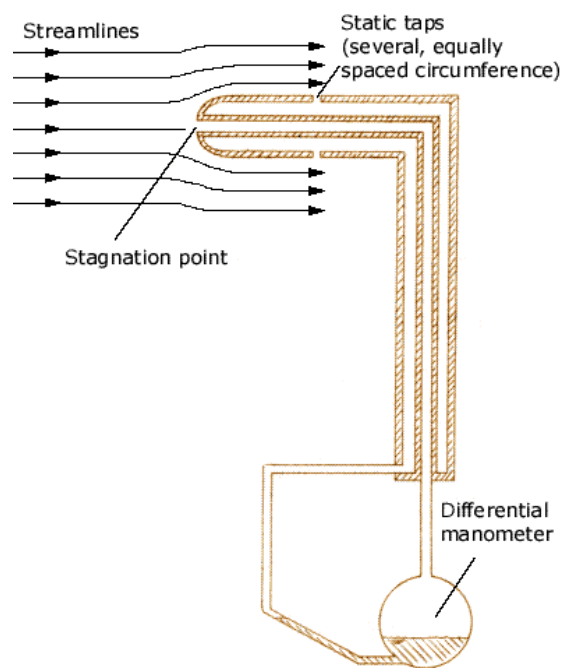


圖 1-4 皮托管



圖 1-5 渦流式流量計

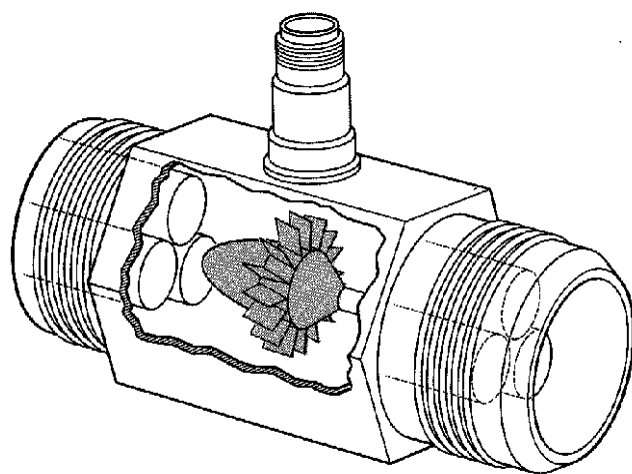


圖 1-6 渦輪式流量計
(From: <http://www.tokyokeiso.com.tw>)



圖 1-7 超音波流量計

(From: <http://www.thermo.com/com/cda/home>)

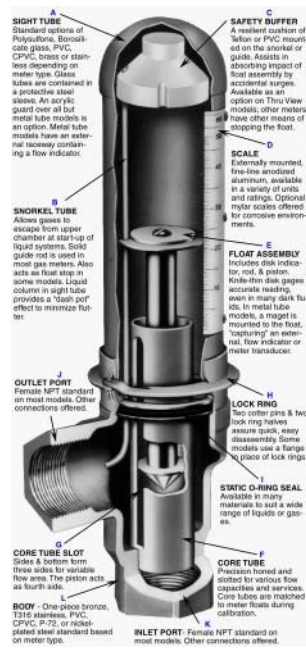


圖 1-8 浮子流量計

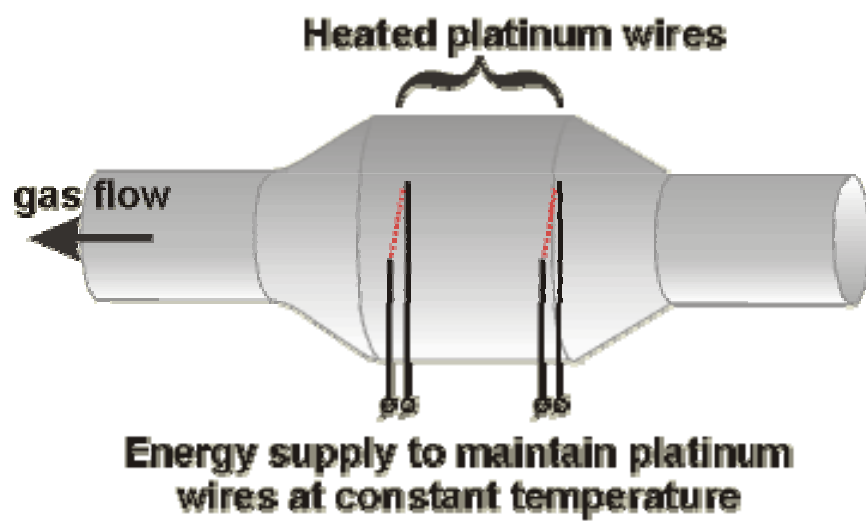


圖 1-9 熱線式流量計



圖 1-10 電磁式流量計

(From: <http://www.twredstar.com>)

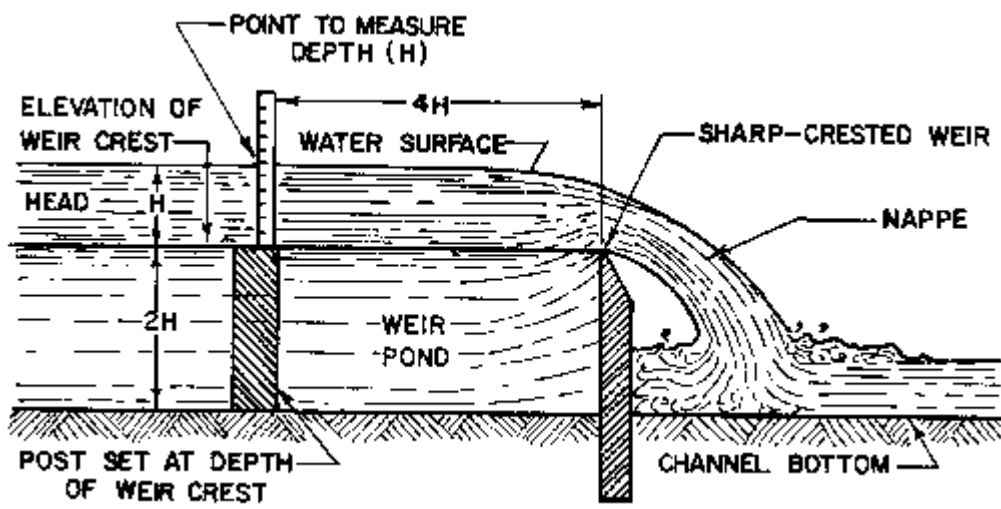


圖 1-11 明渠流

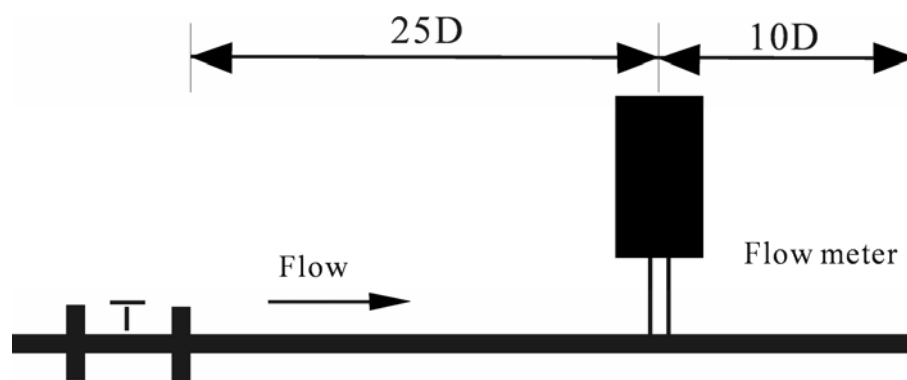


圖 2-1 流量計構造

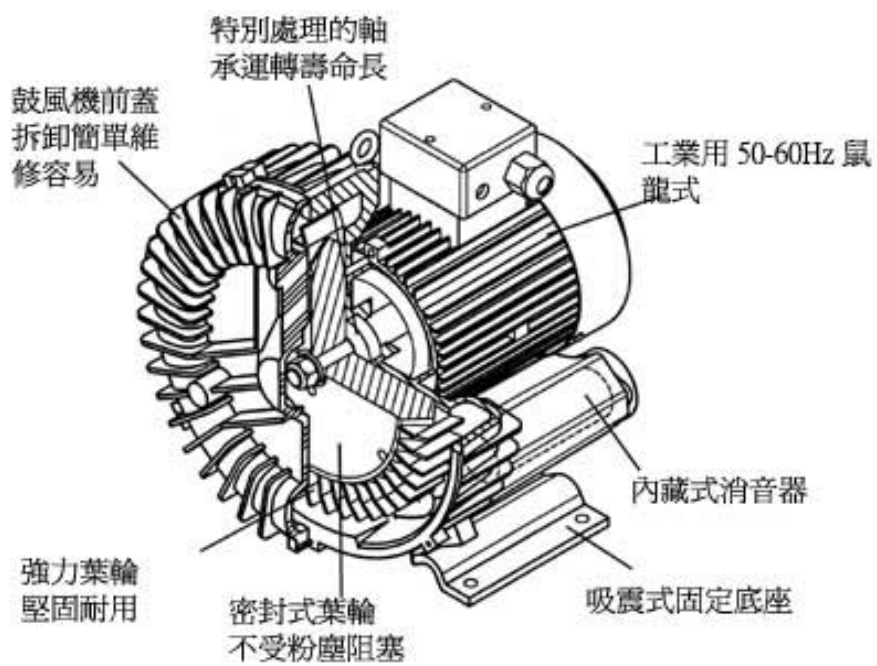


圖 2-2 高壓幫浦的構造



圖 2-3 資料訊息處理流程

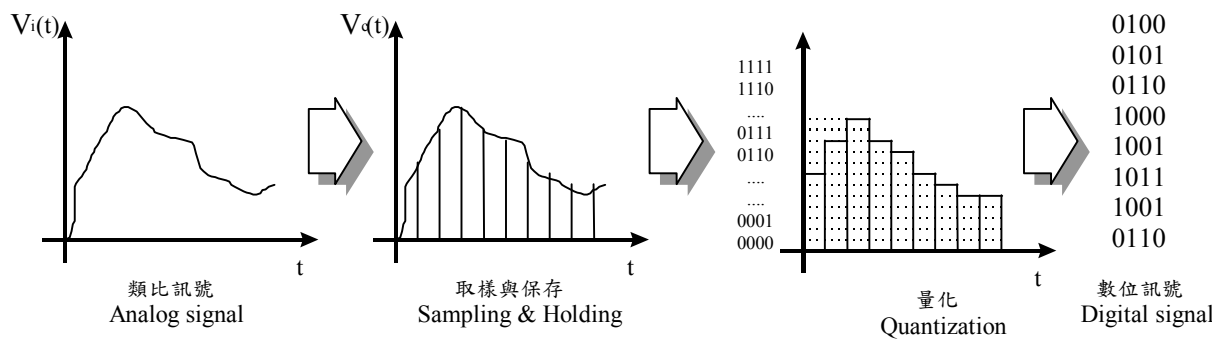


圖 2-4 類比/數位資料轉換

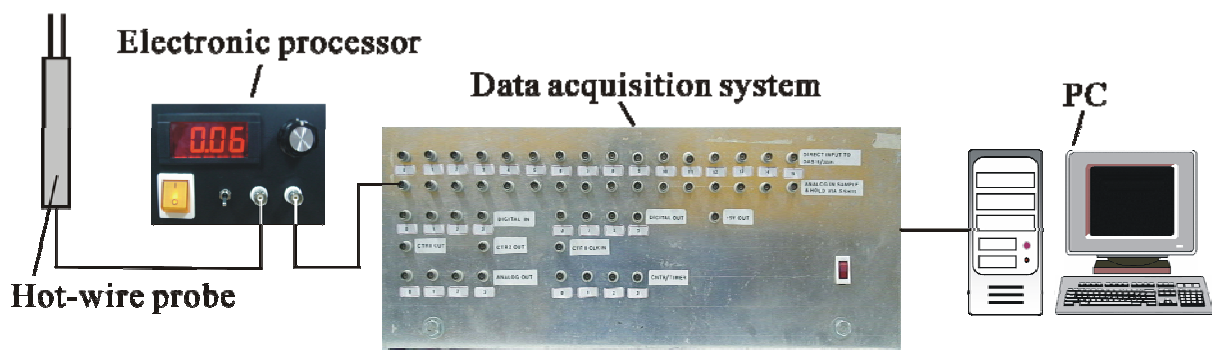


圖 2-5 資料擷取系統

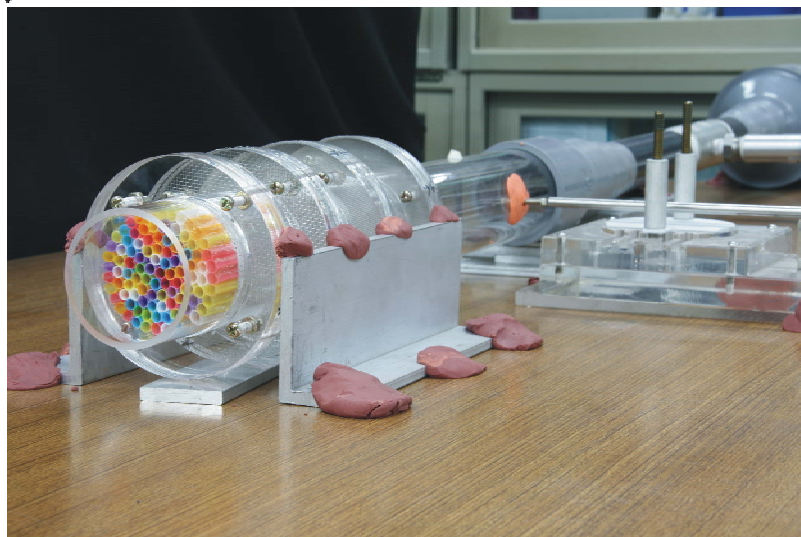
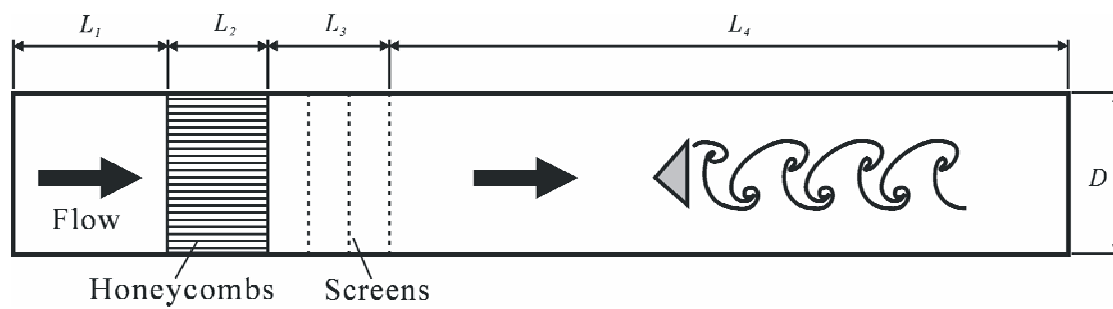


圖 2-6 渦旋產生器(Vortex generator)

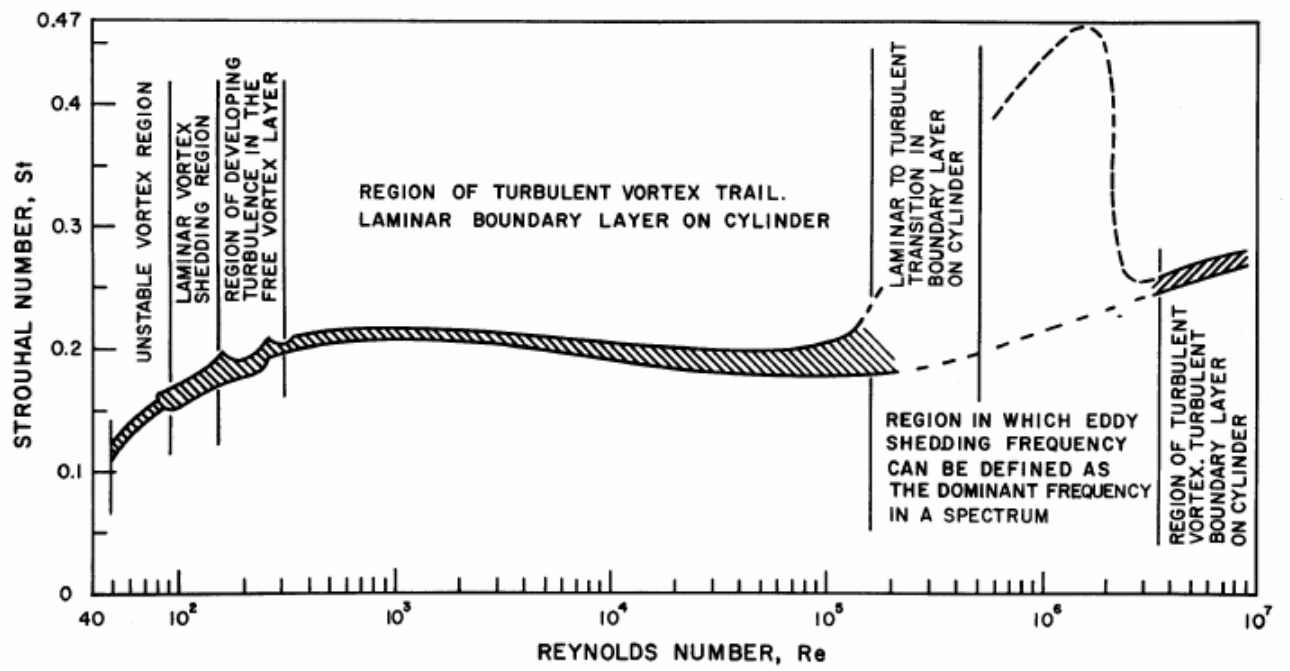


圖 2-7 圓柱尾流雷諾數與史卓數的關係

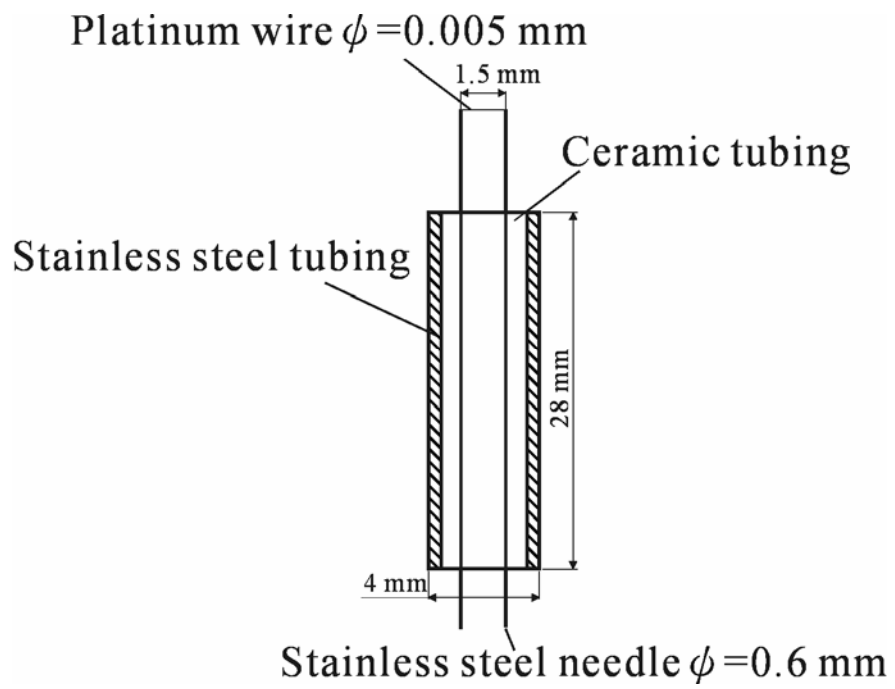


圖 2-8 探針構造

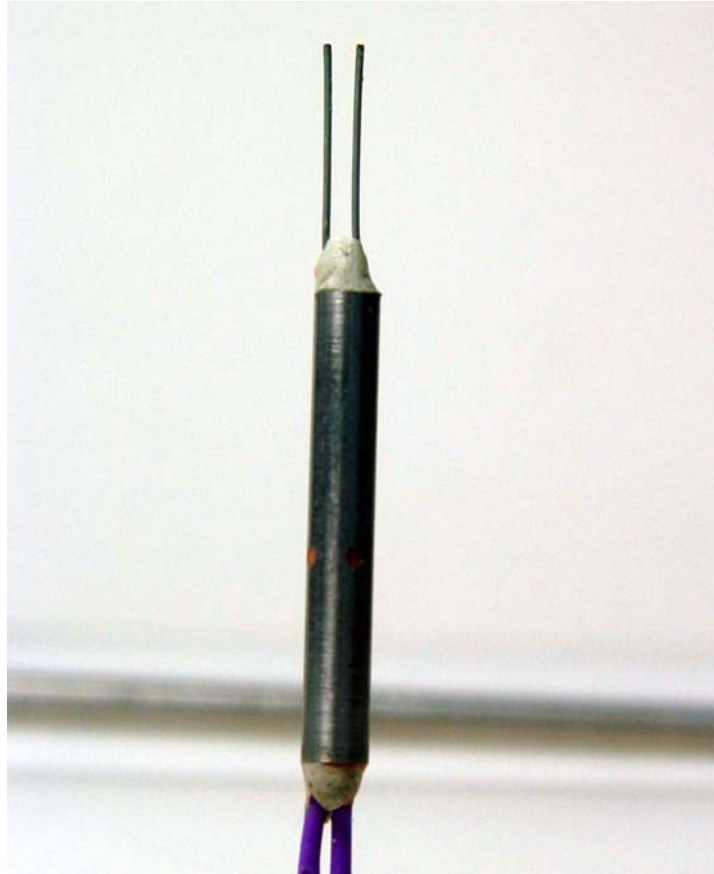


圖 2-9 探針構造實體圖

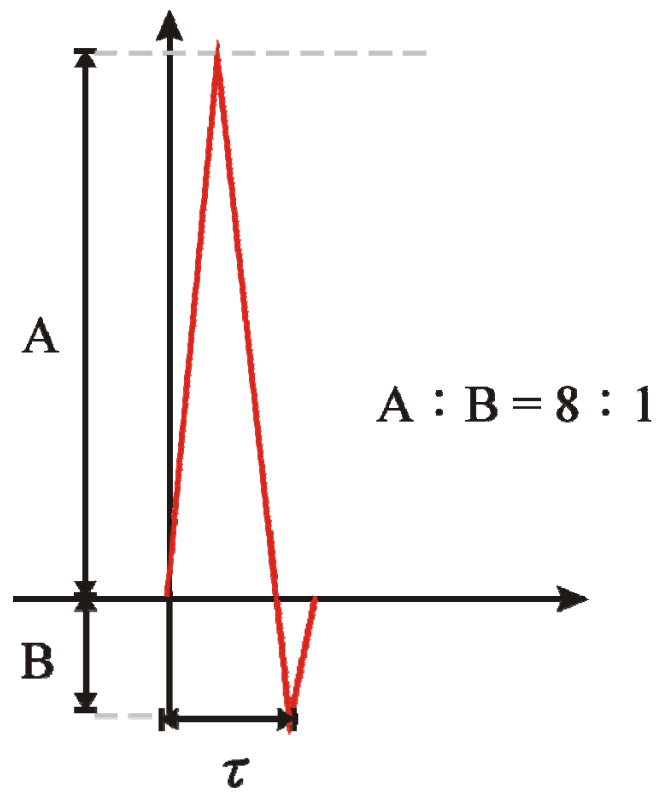


圖 2-10 測試熱線探針反應頻率的波形與比例



圖 2-11 探棒的構造



圖 2-12 探棒的構造實體圖

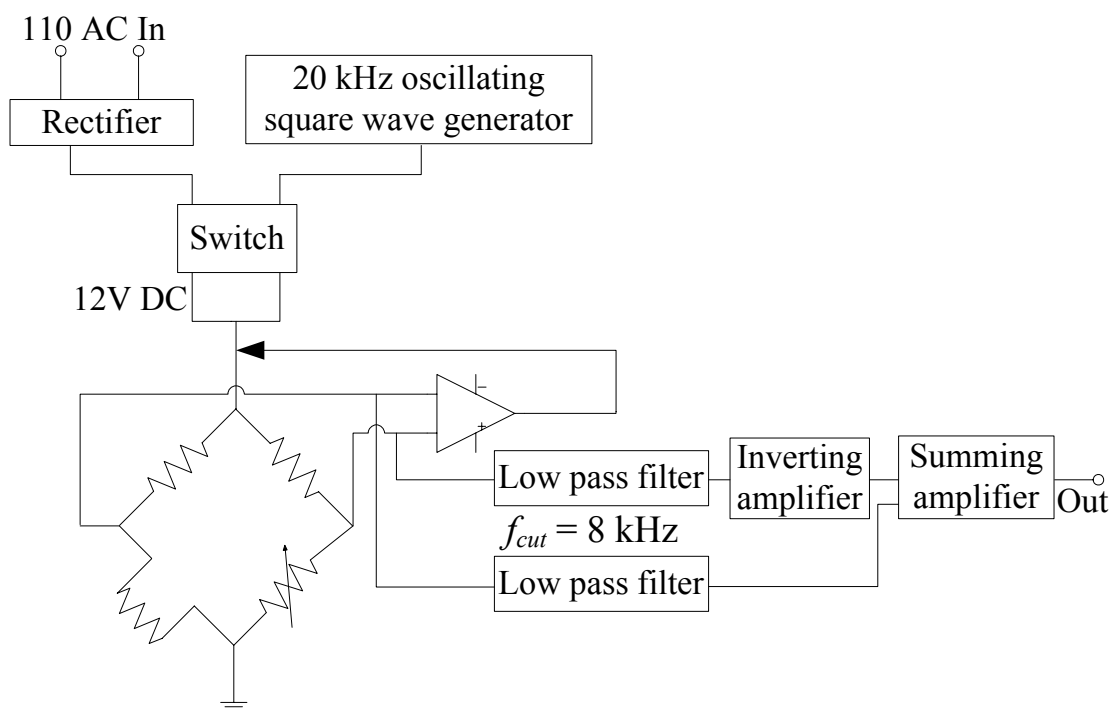


圖 2-13 電子處理器線路簡圖



圖 2-14 電子處理器實體圖

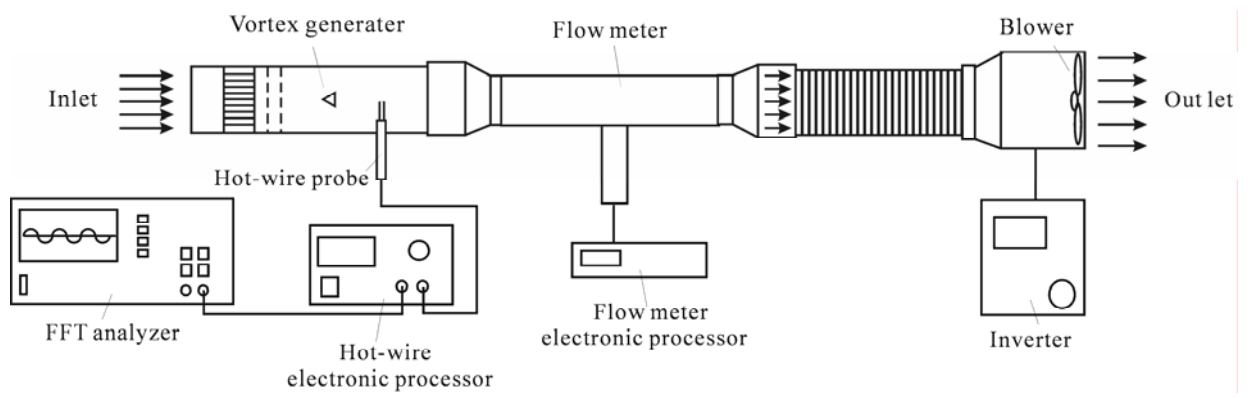


圖 2-15 渦流流量計校正裝置

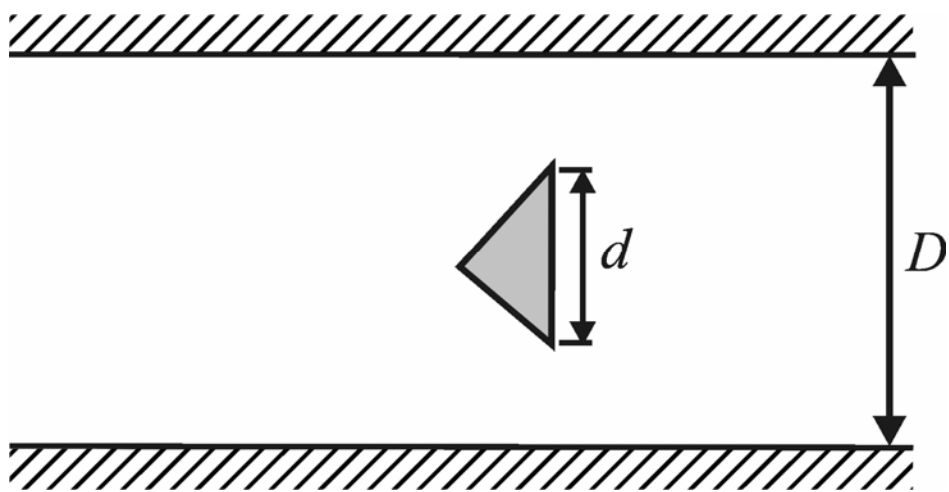


圖 2-16 Vortex generator 尺寸示意圖

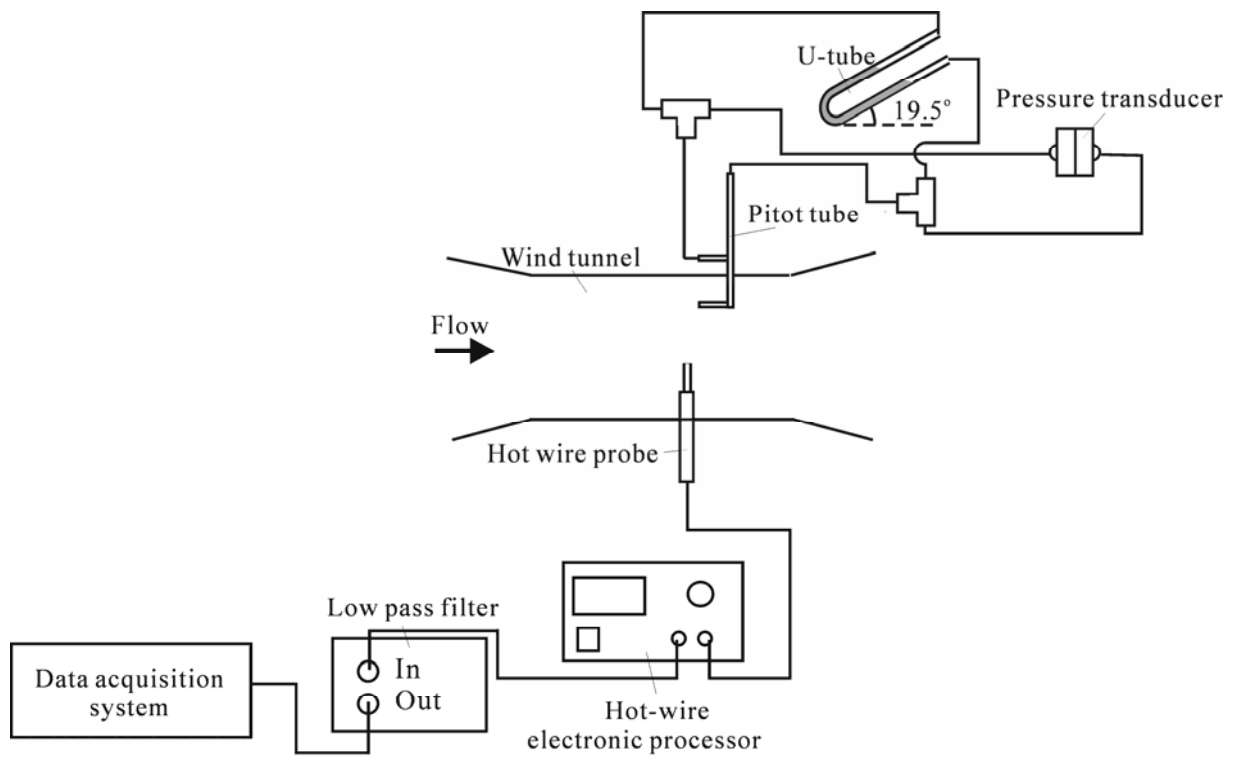


圖 2-17 熱線風速計校正設備圖

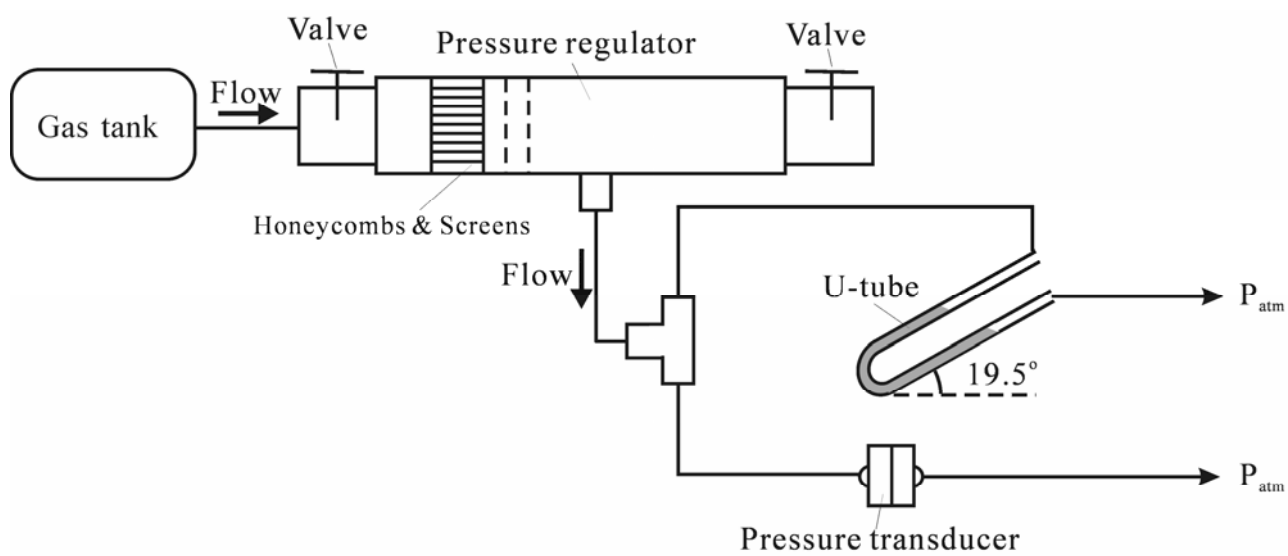


圖 2-18 校正壓力轉換器實驗設備圖

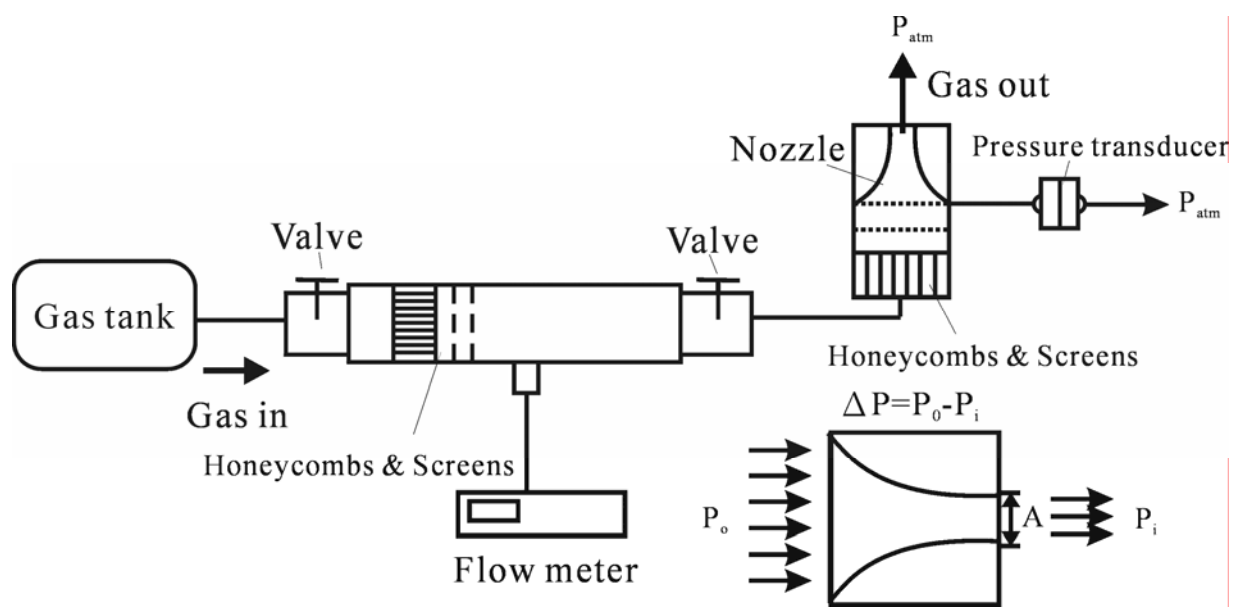


圖 2-19 流量計校正圖實驗設備圖

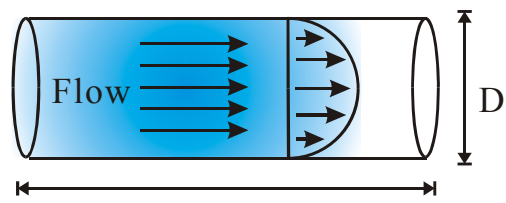


圖 2-20 進行熱線式渦流流量計與熱線風速計的比較

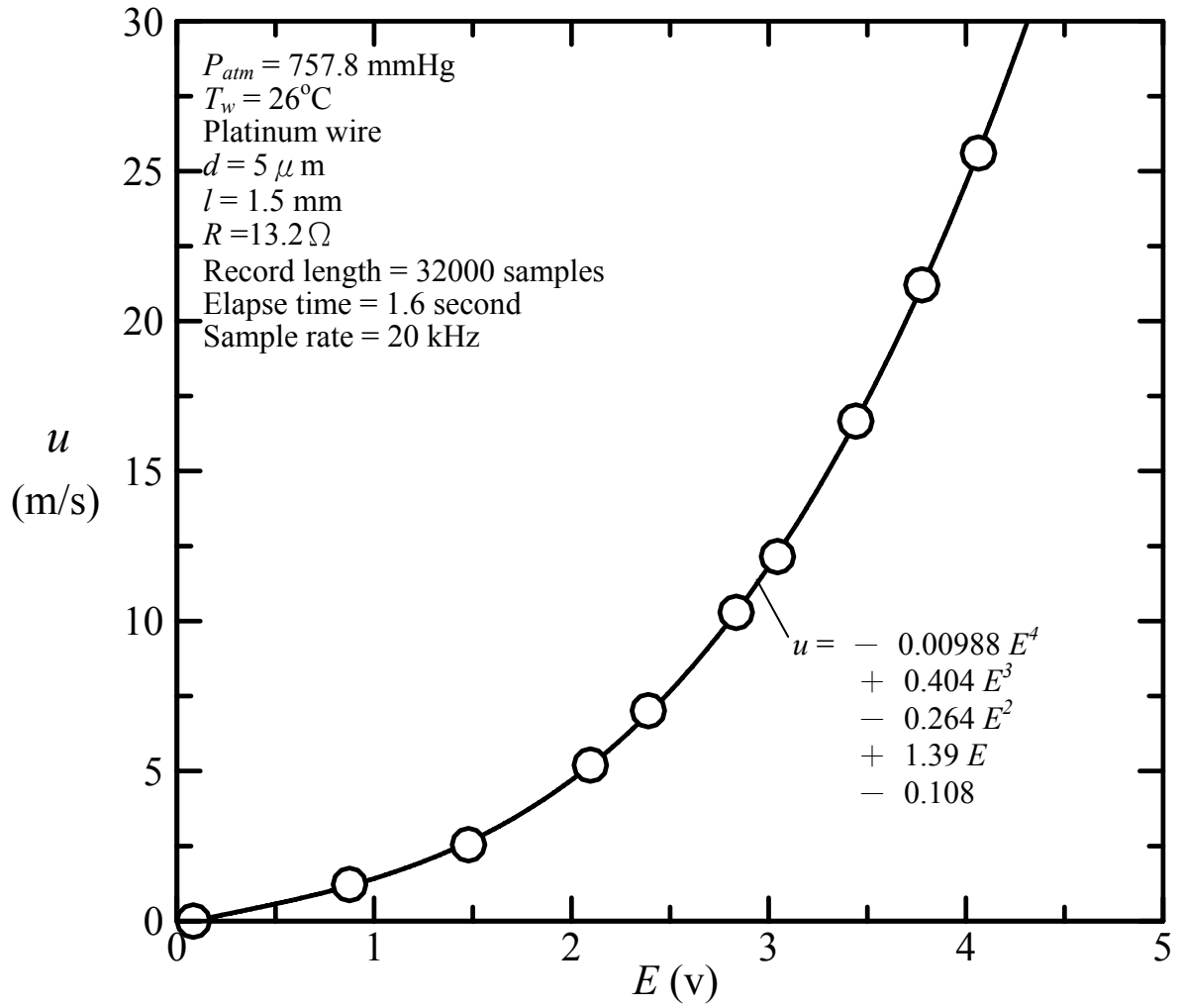


圖 3-1 熱線風速計流速與電壓的校正曲線

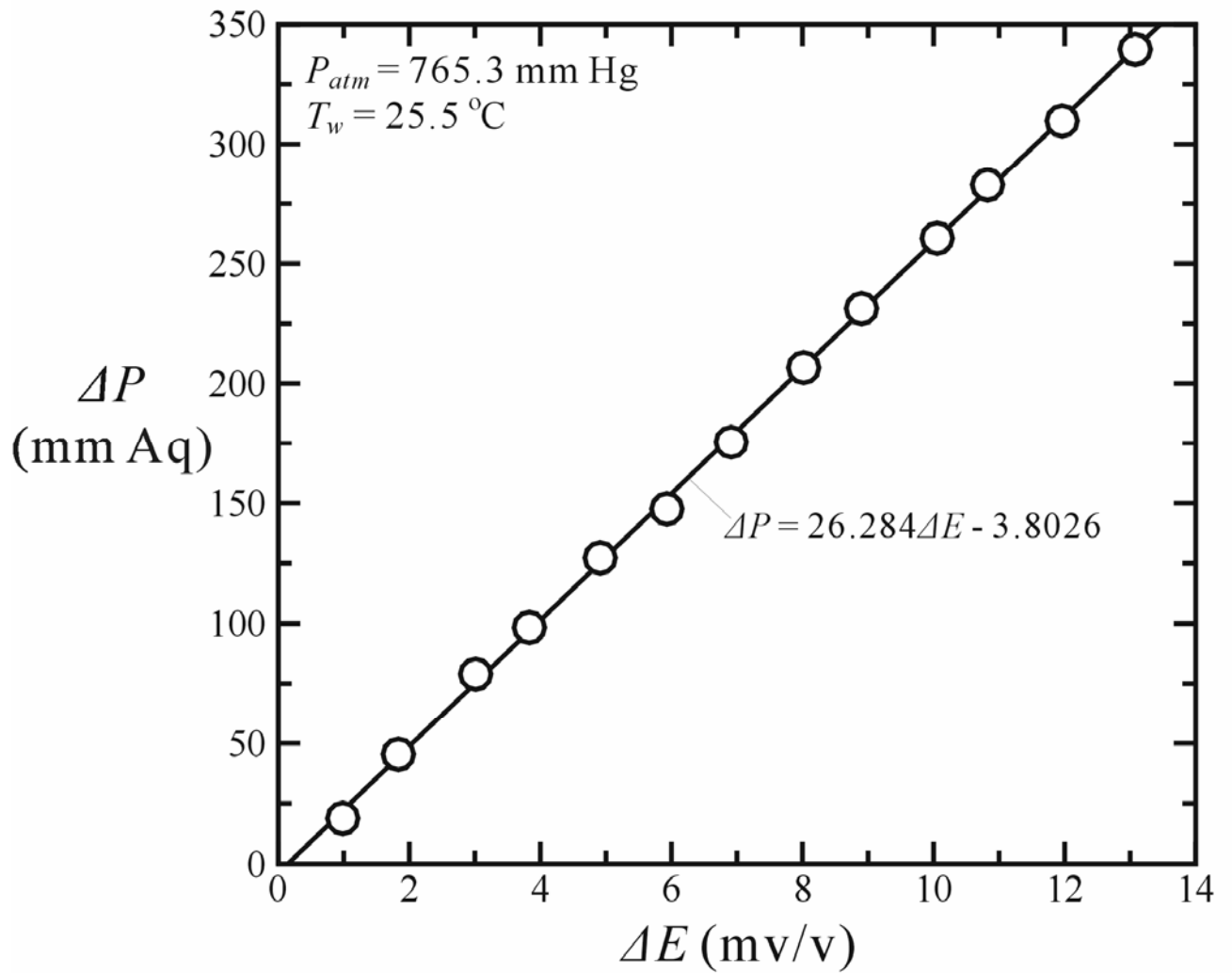


圖 3-2 壓力轉換器壓力與電壓的校正曲線

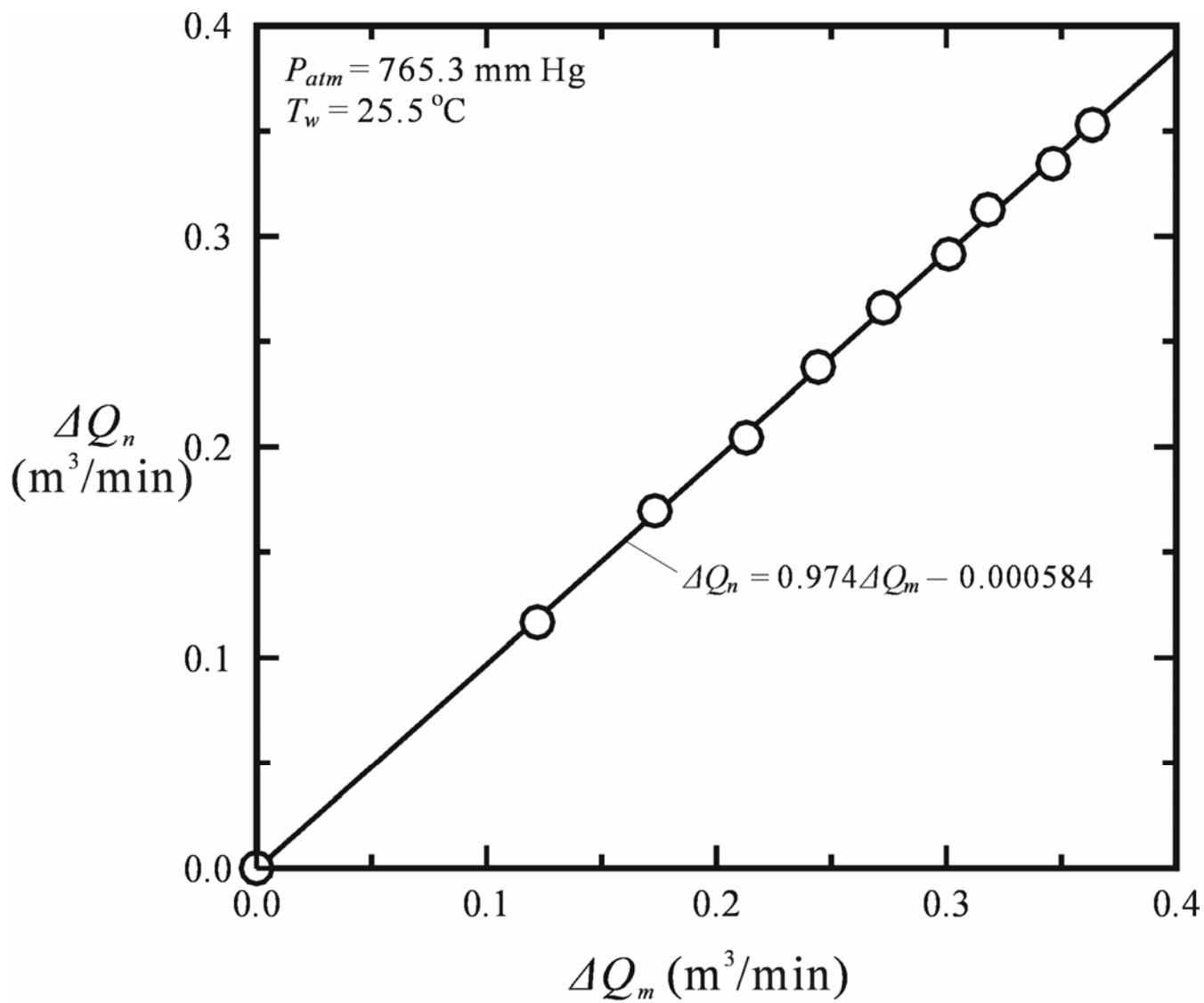


圖 3-3 流量計的校正曲線

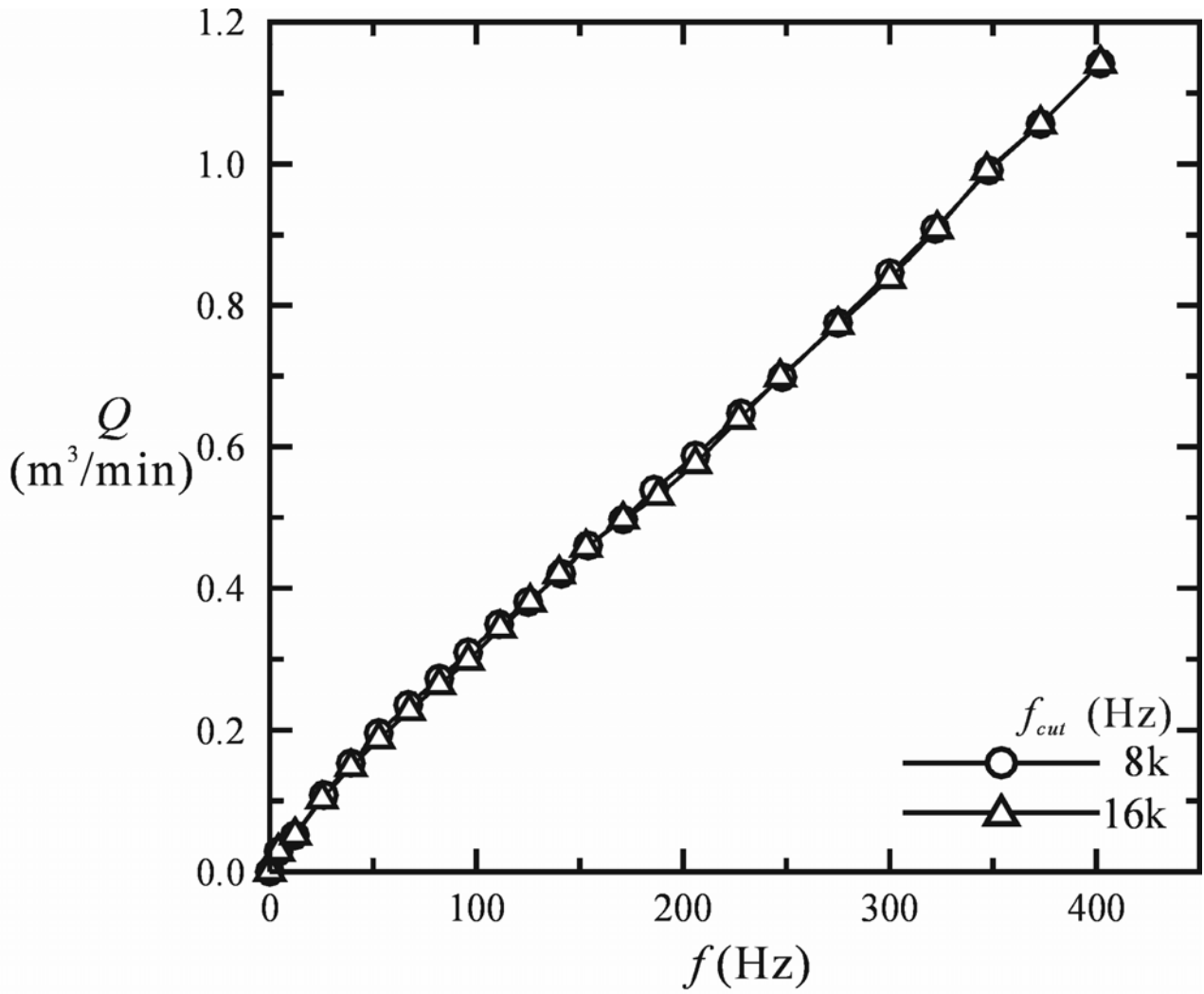


圖 3-4 不同的低通濾波器截止頻率對渦旋逸放頻率的影響

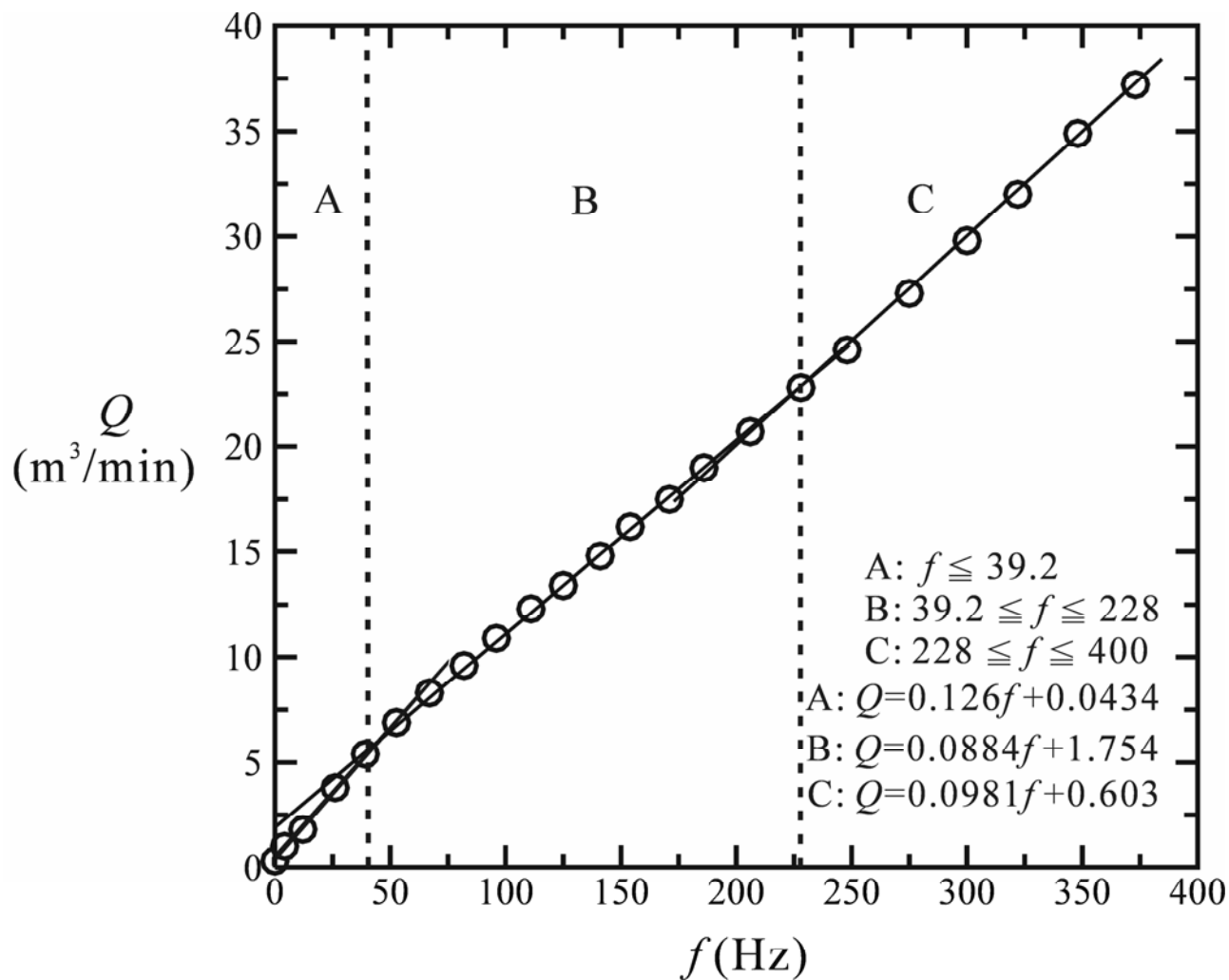


圖 3-5 熱線式渦流流量計的渦旋逸放頻率與流量關係

評語

利用流體會於障礙物背後產生渦旋，而渦旋數(單位時間)與流體速度有密切關連的原理為基礎，配合熱線測速儀的精巧性得以量測流體的速度。本作品在理論上及實驗上都很完整精確，是一佳作。