

熱工實驗

淡江大學機械與機電工程學系

編制

目錄

1. 風扇性能曲線風洞測試.....	1
2. IC 熱阻抗自然對流.....	17
3. 熱傳導與對流及液、氣熱傳導.....	29
4. CPU Cooler 熱阻抗量測裝置.....	48
5. 熱傳風洞實驗.....	54
6. 蒸氣吸收式冷凍循環實驗.....	61

1. 風扇性能曲線風洞測試

一. 實驗目的

風洞測試機具及其相關量測規範應用於電子散熱與模組組裝至今已相當成熟，除了流場流況觀測與熱傳測試之外，最為廣泛被利用之強制對流散熱裝置更是隨處可見的風扇模組。隨著高科技產業的急遽發展，風扇因應更多不同使用條件的要求而需要被更嚴苛的測試環境加以規範，進而設計並生產出卓越的散熱機制，以提昇產品的可靠度與未來的研發能量。

風扇一般的設計要點主要為葉片的曲面設計與驅動模組，除了尺寸與功率的規範之外，其所搭配出之產品必須接受包含噪音測試，風量測試，轉速測試，靜壓測試，耐用度評估等，才能達成不同的使用要求。於本實驗中，希望藉由風洞量測概念，經由學員實際操作進而了解現今產業界如何量測風扇之性能曲線；性能曲線亦即靜壓-風量(P-Q)曲線，最後彙整各項實驗參數與數據，加以評估比較。

二. 風扇P-Q 特性定義

依照風扇P-Q 曲線來看，以三個物理值來描述它：

1. P_{max} (最大靜壓)：當通過噴嘴的風量為0時，在PL5腔室容積狀態下，該風扇能產生的最大靜壓值。

2. Q_{\max} (最大流量)：為噴嘴入口與出口二端壓差為 0 時的流率，為該風扇所能產生的最大流率。

3. P-Q值：當噴嘴入口與出口二端的壓差與當時狀態流率Q的對應值。

其特性關係如圖示例子：

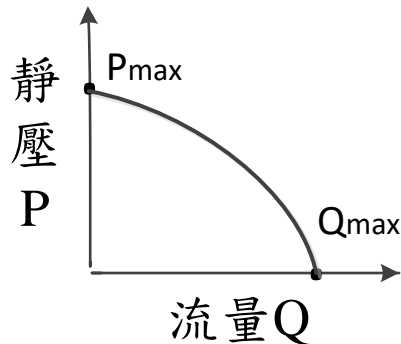


圖 1.1 風扇壓力與流量關係 (風扇特性曲線)

因此在風扇P-Q測試量測時，我們依照該特性因素，分為三個階段去量測風扇的P-Q特性。又以直流風扇而言，目前的風扇驅動方式，以定電壓及PWM二種模式為主。

何謂鼓風機或風扇的阻抗:空氣由沒有提供動力的組件或系統的入風口進入，出風口流出。空氣流動時，氣流在其流動路徑會遇上系統內部零件的阻擾，其阻抗會限制空氣自由流通，造成風壓的損失，此損失因風量而變化，在空氣流量Q的狀態下，組件或系統的入風口與出風口形成壓力差，該壓力P與流量Q的對應係，即為組件或系統的空气流量阻抗特性，其特性關係如圖示例子。

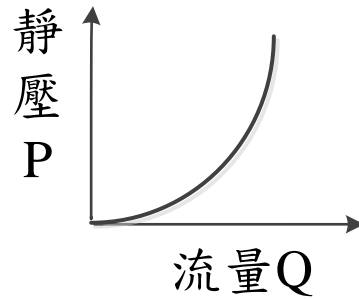


圖 1.2 元件阻抗與流量關係(系統特性曲線)

系統特性曲線與風扇特性曲線的交點，稱為系統操作工作點，該工作點即風扇之最佳運作點。在工作點，風扇特性曲線之變化斜率為最小，而系統特性曲線之變化率為最低，此時風扇靜壓效率(風量*風壓/耗電)為最佳。有時候為了能減小系統阻抗，甚至選擇使用尺寸較小的風扇，也可以獲得相同的風壓。

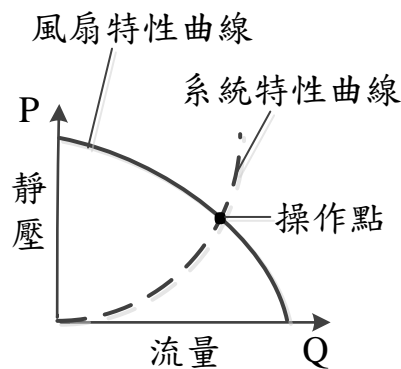


圖 1.3 風扇性能曲線與系統阻抗關係

設計時應考慮項目：

1. 保持空氣流動盡量不受阻擾，入風口與出風口保持暢通。
2. 引導氣流垂直通過系統，以確保氣流順暢而提升冷卻效率。
3. 如需加裝空氣濾網，應考慮其增加的空氣流動阻力。

三.實驗機台

本實驗所使用的風洞機台名稱為LW-9015全自動AMCA210風洞。

LW-9015RSAN為一種風量及壓力量測裝置(Air Flow Rate &Pressure Measurement Apparatus)。LW-9015RSAN風量及壓力量測裝置是依據美國AMCA210-99規範，由鼓風機把空氣流過設計好的噴嘴，在噴嘴(nozzle)二端形成壓差，由該壓力差計算出空氣流量。在噴嘴的上游，靜壓腔室用來量測靜壓，因此得到風扇特性曲線及系統特性曲線資料。為了得到精確流量值，這個裝置共有5組噴嘴，各分別量測不同區段的流量值，總量測流量範圍 2.4~250 CFM(ft³ min)，操作過程由電腦命令狀態，且自動擷取資料。

機台的功能則為：

1. 風扇或風扇組P-Q特性量測。(A mode)
2. 零件、組件或系統阻抗P-Q特性量測。(B mode)
3. 標準流量產生，配合加熱模組或熱傳風洞做T-Q(溫度-流量)或R-Q(風扇轉速-流量)量測。(C mode)

各項裝置簡介：

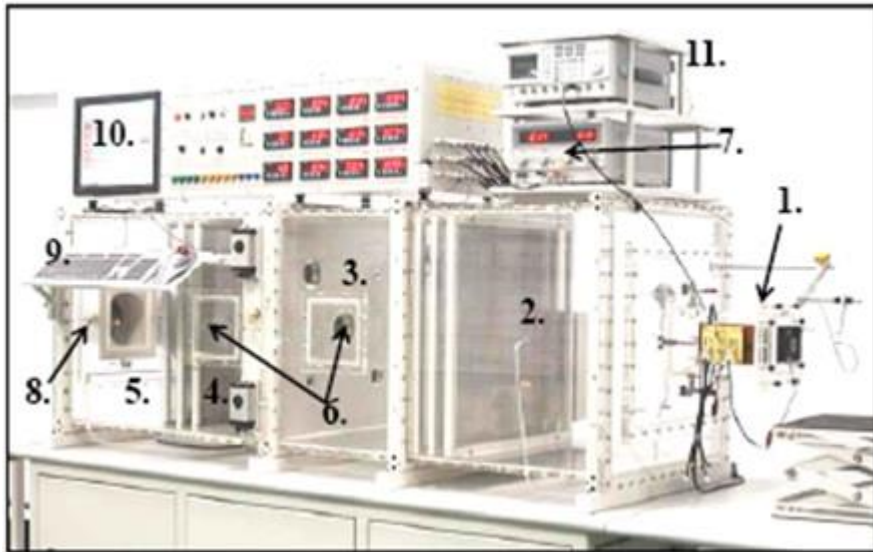


圖 1.4 機台主體照片

- 1.前安裝板與風扇測試區。
- 2.位置PL.7與靜壓管Ps7。
- 3.位置PL.5與靜壓管Ps5。
- 4.位置PL.6及壓力管，與位置PL.5的壓力差為 ΔP 。
- 5.位置PL.8，總壓力為Pt8。
- 6.手孔，用來清潔細金屬網或更換噴嘴蓋等用途；量測時，必須要蓋緊，使用扳手鎖緊。
- 7.測試風扇用的Power Supply DC30V \times 3A。
- 8.後安裝板。
- 9.PC用鍵盤。
- 10.監控用LCD螢幕。
- 11.PWM用脈波訊號產生器GFG-3015。

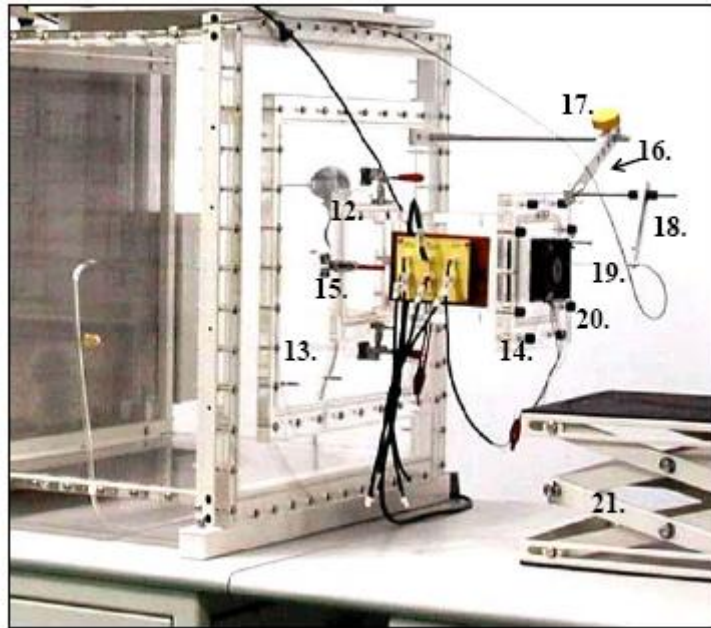


圖 1.5 前安裝板與風扇測試區

12.前安裝板，最大的開孔尺寸為36cm×43cm，可以用來安裝大型試驗件，做阻抗測試用。

13.前中間安裝板，最大的開孔尺寸為14cm×14cm，一般用來安裝測試用風扇或比較小型試件做阻抗。

14.試驗件安裝板，依測試件需求形狀來開孔測試。

15.扣鉗，夾持力55Kg/件。

16.雙肘支持架，用來架設轉速測定器。

17.鎖緊螺。

18.高低調整螺。

19.光纖感測器，其端面與被測物保持2~5mm。

20.測試風扇。

21. 30cm×35cm升降台，用來置放待測物，如系統或組件。

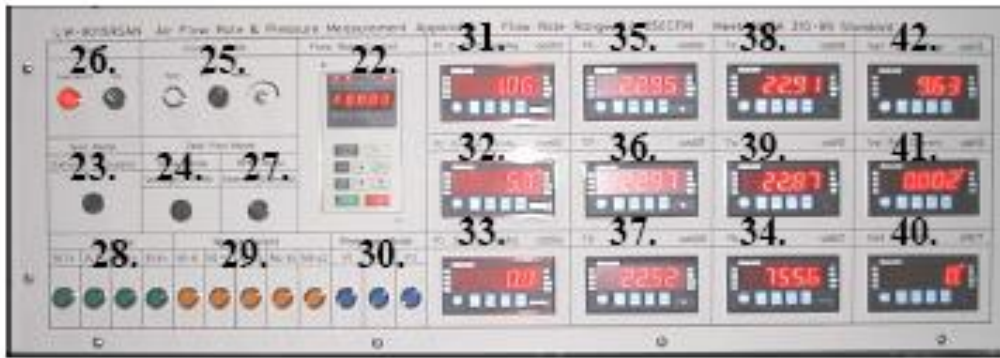


圖 1.6 量測儀錶

22.變頻控制操作盤：開機時Stop鍵及燈號會亮，操作執行前要先按RUN鍵，RUN燈號會亮，為待機狀態。

23.吸氣或吹氣選擇模式開關。

24.電腦或手動選擇模式開關。手動模式時，Ps mode、Nozzle Select及Pressure mode按鍵可由手動操作，PC模式時由PC控制。

25.手動控制風速流量。

26.全系統電源開關。

27.測試風扇轉速訊號來源，由風扇內部來選在Initial，由外部光纖來選擇External。

28.Ps mode：壓力軸壓力來源邏輯選擇鈕。

29.Nozzle Select：手動模式時，用手動操作。

30.Pressure mode：未開啟開關時，對應量錶上的顯示值未有意義。

31.P1壓力量測，壓力範圍0~12.7mmAq，用來量測位置PL7的壓力Ps7。

32.P2壓力量測，壓力範圍0~254mmAq，用來量測位置PL7的壓力Ps7。

33.P3壓力量測單元，壓力範圍0~127.0mmAq，用來量測 ΔP 。

34.大氣壓力量測值450~825mmHg。

35.T5(在PL.5位置的腔室溫度)溫度量測0~50°C。

36.T7(在PL.7位置的腔室溫度)溫度量測0~50°C。

37.T8(在PL.8位置的腔室溫度)溫度量測0~50°C。

38.Td(乾球溫度)溫度量測0~50°C。

39.Tw(濕球溫度)溫度量測0~50°C。

40.測試物轉速量測，0~20000rpm。與光纖感測器連線操作。

41.A1，測試風扇用電流訊號。

42.V1，測試風扇用電壓訊號。

注意事項：

1.本項裝置，除了輔助風機為轉動性組件，有使用壽命外，其它的零組件為半永久性壽命。為維持產品的精確性，保持清潔，尤其金屬細網，有它的必要性。

2.試驗段材料為壓克力製造，請使用一般玻璃清潔劑擦拭，不要使用溶劑。

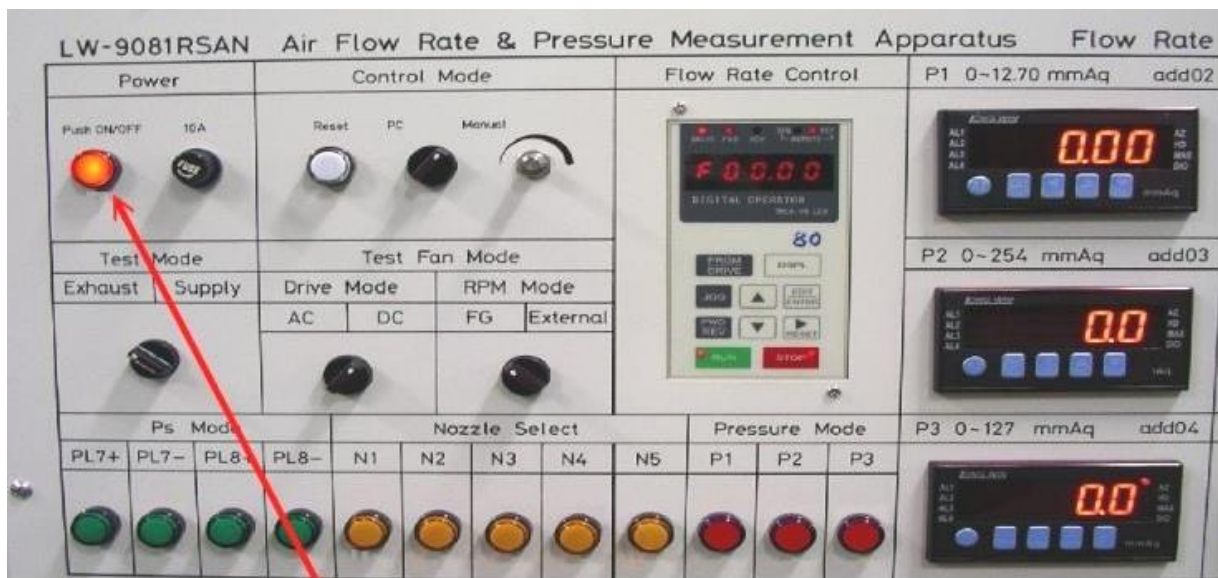
3.輔助風機內不得吸入異物，以免造成風機損壞。

4.經常要開啟與關閉的手孔及試件安裝螺牙孔，應保持良好的施力操作，避免過負荷，損壞結構體。

四.實驗操作

LW-9015RSAN 系列產品為電腦化全自動控制、資料擷取及資料整理的機型，正常都是在電腦模式狀態下使用，並且人機介面關係均以關聯邏輯式結構構成，因此，只要依畫面顯示及指示操作，即可達到正確測試結果。

1. 確認全系統相關連線完成正確。
2. 被測試物風扇或阻抗物安裝於必要的位置上。
3. 相關電源確認無誤，將機器相關開關打開，9015RSAN 主機裝置建議於暖機15分鐘以上，使相關儀錶狀況穩定。



① Power ON. (Push ON/OFF button)

圖 1.7 電源開關

4. 在控制主機箱上，將控制模式選在 ”PC” 選項上。

② Check Control Mode at PC position

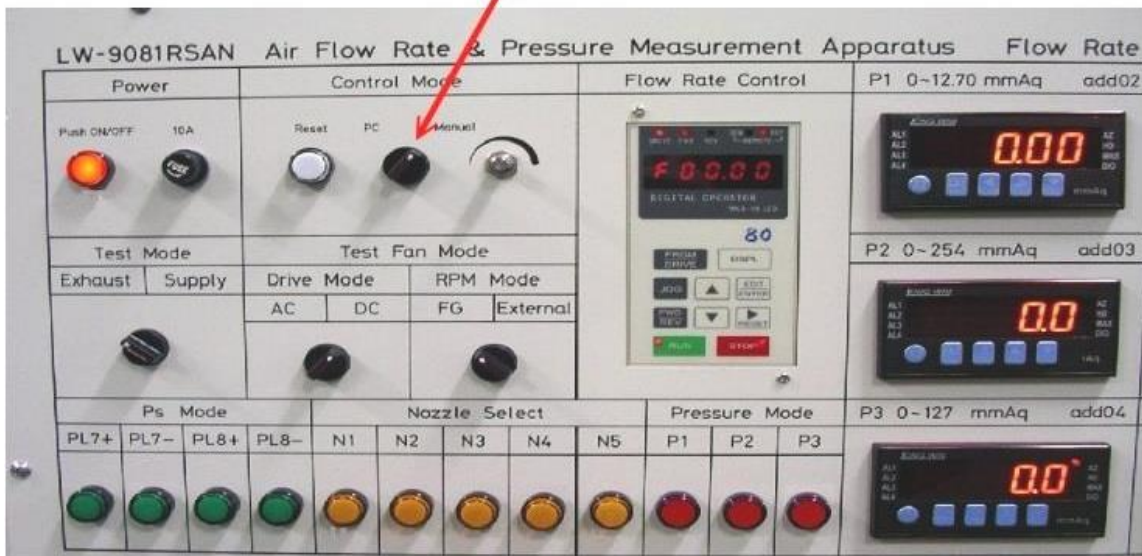


圖 1.8 控制模式

5. 選擇使用的機型LW-9015，進入下一頁。

Software click Next

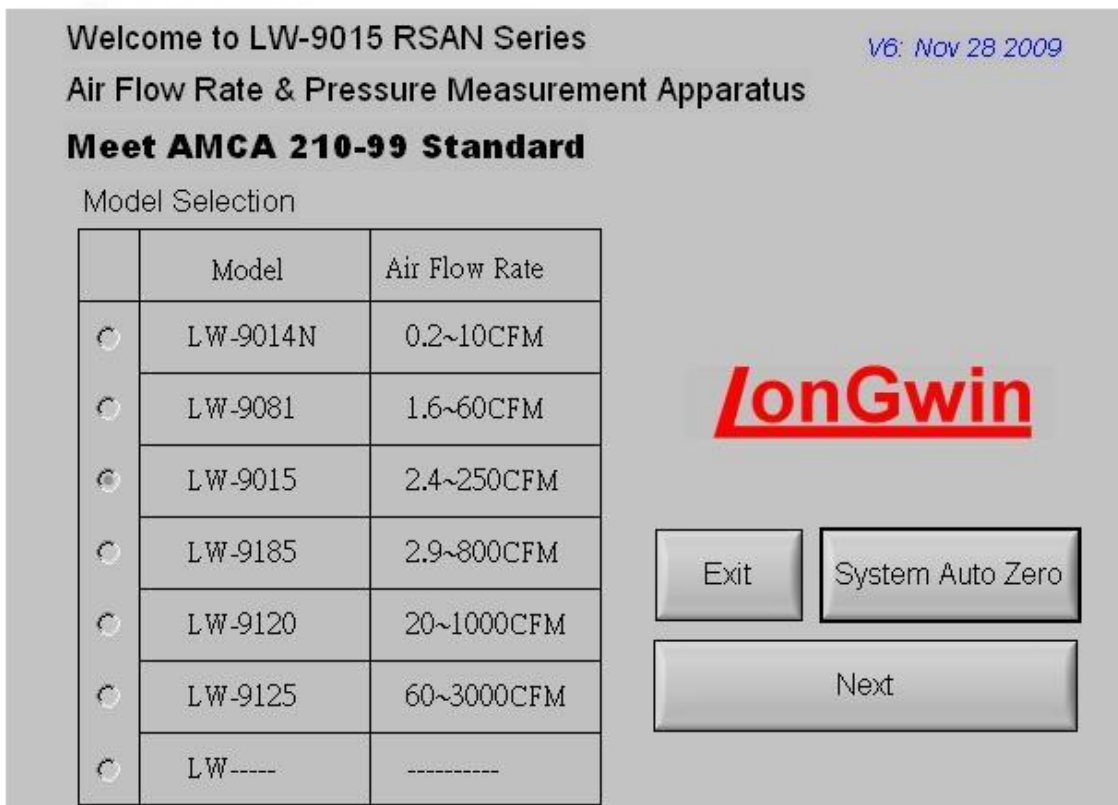


圖 1.9 機型選擇畫面

6. 測試項目選擇：

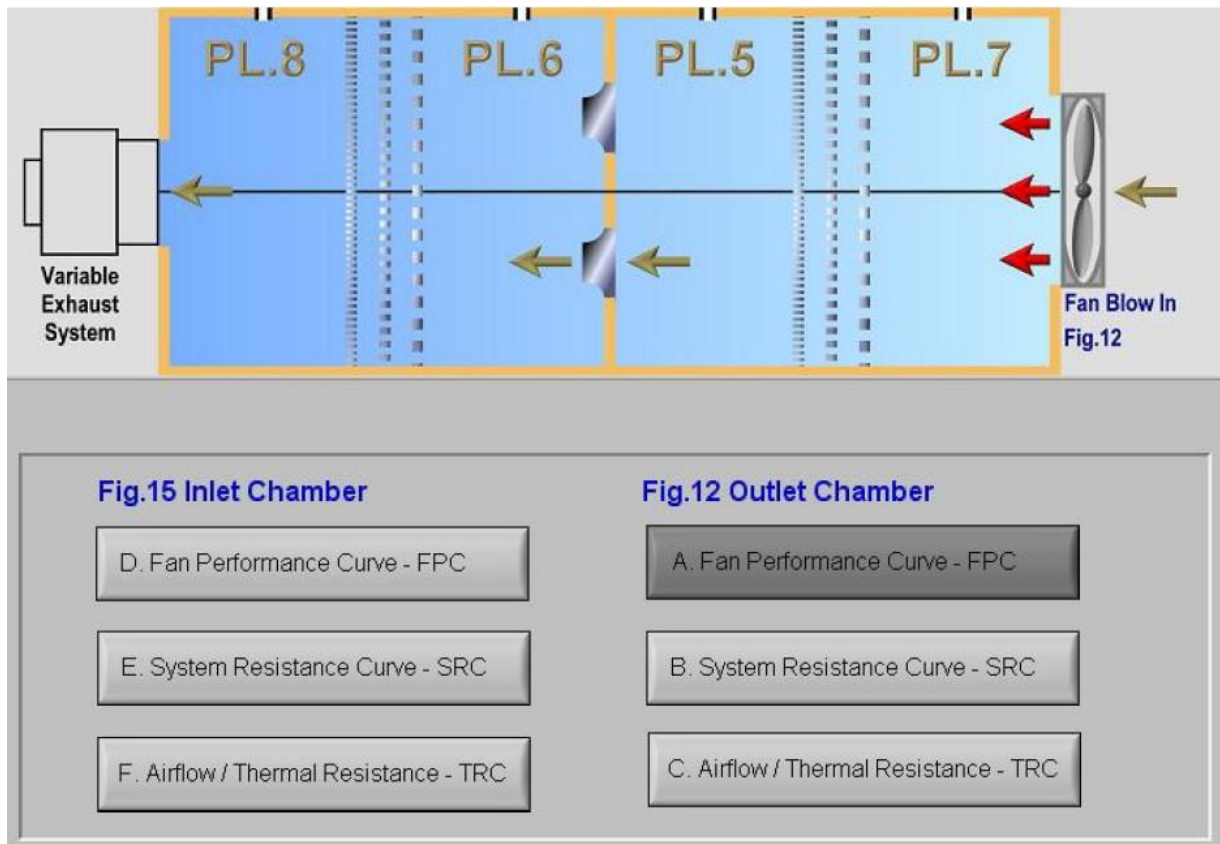


圖 1.10 測試項目選擇畫面

人機畫面模擬實機的相對應配備位置，主要在提示測試的項目，測試項目分為3類：風扇性能測試、系統元件阻抗測試、額定流量提供。依需要點選測試項目，相關測試條件將自動完成設定。點選項目後，進入下一頁。

風扇或陣列風扇測試命令設定頁：

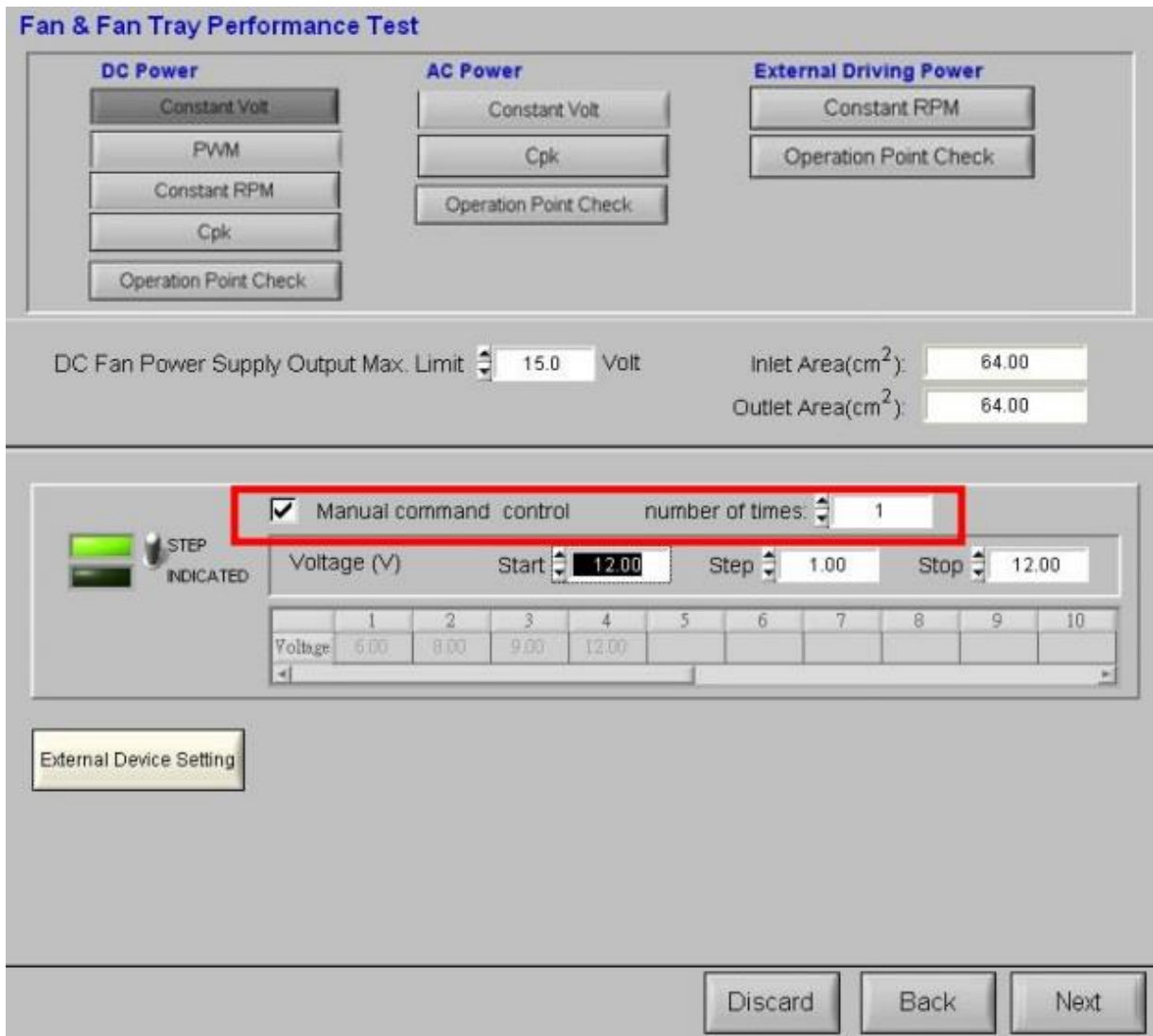


圖 1.11 風扇或陣列風扇測試命令設定畫面

7.1 當進入測試命令設定畫面，參數設定或變更後，必須點選該測試項目之選擇鈕，以確認檔案名稱資訊為最後設定資訊，否則檔案名稱仍為上一次參數資訊。例如，定電壓模式，電壓參數設定完成後，再按一次Constant Volt 按鈕。 PWM 模式、定轉速模式依此類推。

7.2 電壓設定：

Command 為電腦控制電源供應器之輸出電壓，Output 為電源供應器實際輸出電壓。

7.3 風扇測試模式分為三種：

A. 定電壓模式。B. PWM 模式。C. 定轉速模式。

A. 定電壓模式：Step Mode 及 Indicated Mode2 種輸出方式。

A.1 Step Mode：有 Start、Step 及 Stop 三個設定值。使輸出電壓按 Step 步階方式輸出電壓命令，其中 Step 值必須大於0。

A.2 Indicated Mode：直接寫入欲執行的電壓命令值。輸出命令與供給被測風扇電壓值的關係：輸出命令DC0~10V，其依使用電源供應器的不同而有不同輸出。

例1：GPS-3030DD 電源供應器，在Master 狀態下人工調整，設定最大電壓值(15V)為Output 設定當中的電壓最大值（15V）。設定完成後，將電源供應器設定在Slave 模式下，則命令列之電壓值，即為GPS-3030DD電源供應器輸出的電壓值。

注意：由Slave 轉換為Master 狀態時，電壓旋鈕要先轉到最小值的死點，以防止過高電壓燒毀測試物。

B. PWM 模式：是指風扇在某固定電壓狀態下，以不同的頻率及duty cycle 來控制其轉速，因此在這個模式下由人工對直流電源供應器調整，提供測試風扇一個預設定的電壓值。由電腦對脈波產生器做頻率及duty cycle 的控制輸出duty cycle 範圍為20~80%。PWM 命令輸出模式分為Step及指定二種模式，依實際狀況設定之。執行時，先以頻率為固定值，duty cycle 為變數值，

做循環測試，其總執行次數為頻率設定數 × duty cycle 的設定數。

C.定轉速模式：設定被測風扇定轉速的執行值，因為轉速不容易為固定值，因此應予以適當的允許裕度，做為回授決定參數。

8. 主執行畫面：

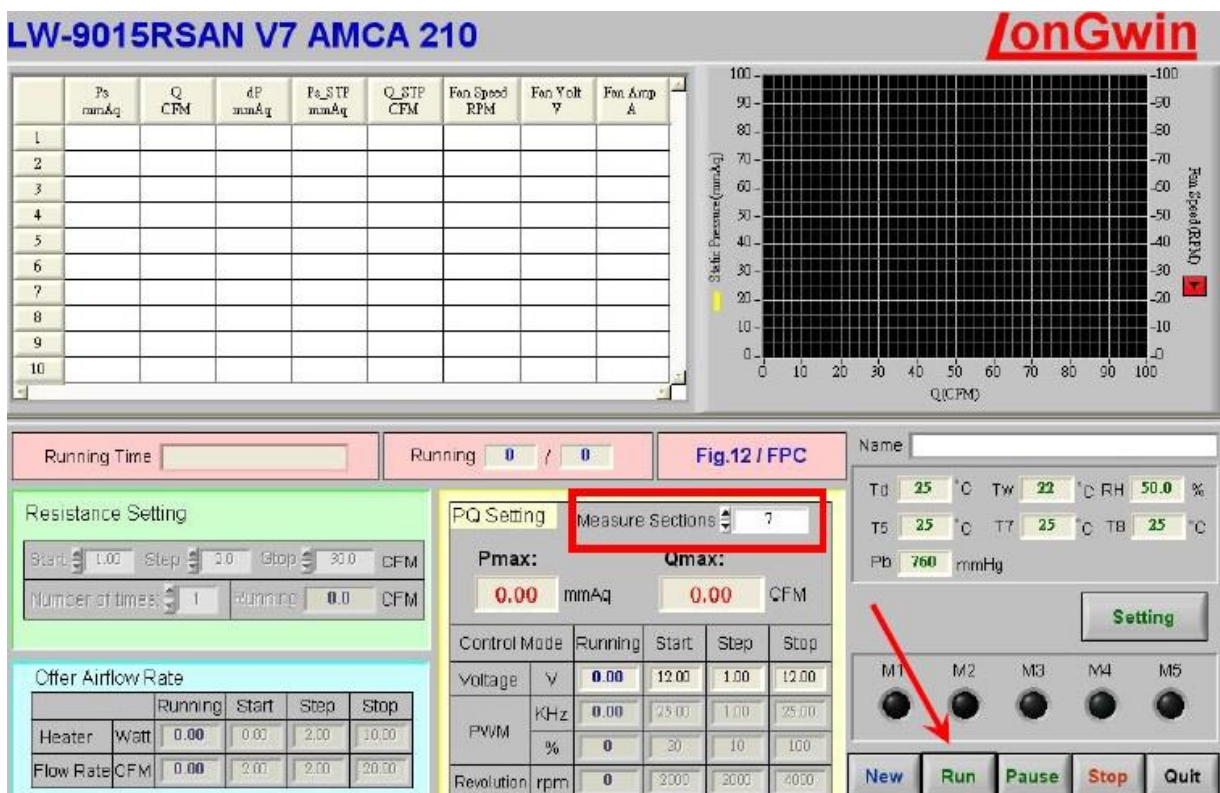


圖 1.12 執行主畫面

8.1 在進入這個畫面的同時，基本參數Td、Tw、T5、T7、T8、Pb 都可被量測，若量測狀態有異常，將提示使用預設值，一般我們都是接受的。

8.2 在電腦模式控制狀態下，P-Q、Pmax、Qmax、Impedance、Air flow rate 欄位功能是不使用的。

8.3 在RUN前，先進入Setting 對執行狀態做設定，按Setting 鍵後，會出現

二組選擇畫面。

8.4 當設定完成後，按 RUN 將自動執行。

8.5 執行中程式，按 Stop 停止鍵，將要等待該執行步驟結束後，才能解除執行。

8.6 Quit 離開主畫面。

8.7 Back 將回到測試項目選擇畫面。

五.數據紀錄與問題討論

1. 如何判定風扇性能曲線與系統阻抗曲線之最佳工作點。

2. 承問題1，由P-Q 曲線圖解釋最佳工作點有何特性。

3. 將系統阻抗曲線及風扇性能曲線繪至於同一張圖，使用Excel插入圖表

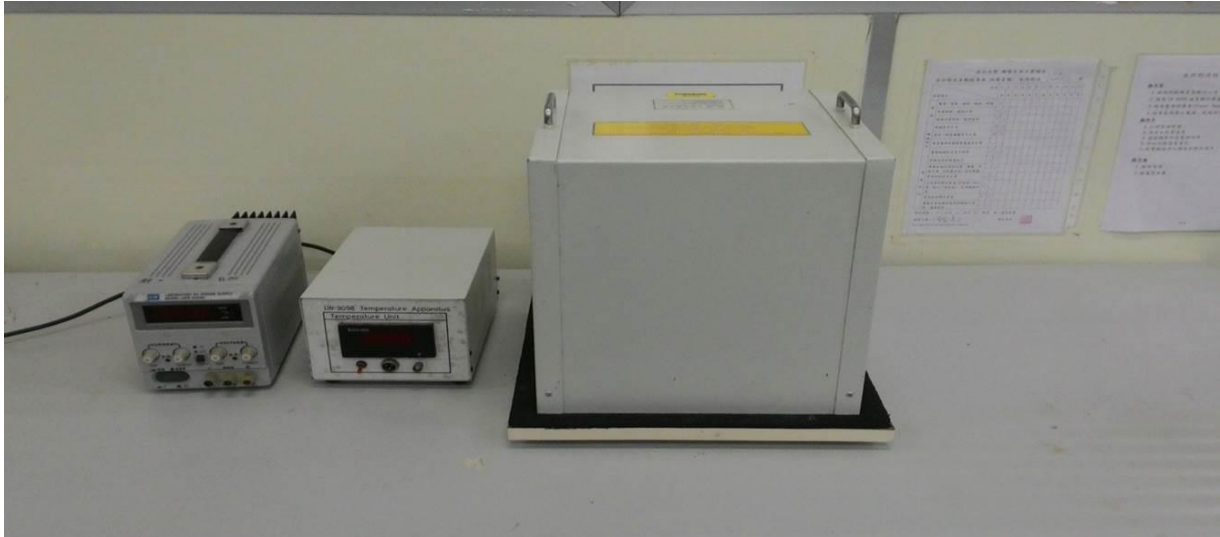
X-Y散佈圖繪出P-Q曲線。

4. 200字心得感想。

風扇性能曲線								
	Ps		ΔP	Q	Re	Speed	Voltage	Current
	mmAq	inAq	mmAq	CFM		RPM	Volt	Amp
1.								
2.								
3.								
4.								
5.								
6.								
系統阻抗曲線								
1.								
2.								
3.								
4.								
5.								
6.								
風扇性能曲線					合併比較:			
系統阻抗曲線								

1. Natural Convection Apparatus

2. IC 熱阻抗自然對流



本項裝置符合 EIA/JEDEC Standard

EIA/JES D 51-2

Integrated Circuits Thermal Test Method

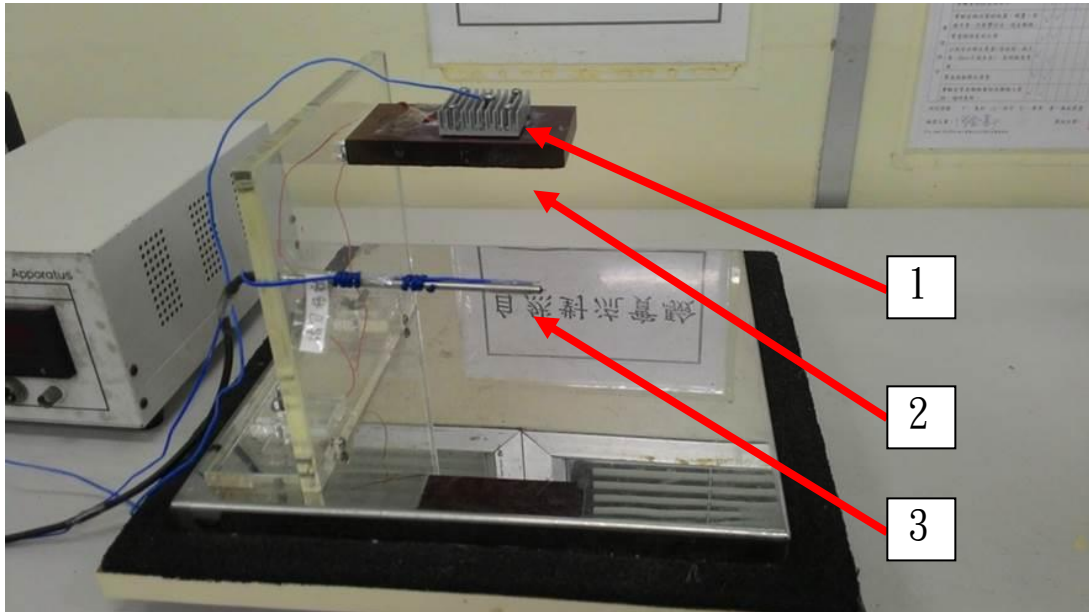
Environment Conditions – Natural Convection Apparatus

- 腔室內尺寸：305 × 305 × 305 mm
- 內部六平面為全鏡面結構
- 溫度量測感測器：PT-100 精度 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$

1 散熱緒片。

2 電木板。

3 溫度感測器。



4 隔熱罩。



1 Introduction

1.1 Purpose

The purpose of this document is to outline the environmental conditions necessary to ensure accuracy and repeatability for a standard junction-to ambient (θ_{JA}) thermal resistance measurement in natural convection. The intent of θ_{JA} measurements is solely for a thermal performance comparison of one package to another in a standardized environment. This methodology is not meant to and will not predict the performance of a package in an application-specific environment.

1.2 Scope

The environmental conditions described in this document will apply only to natural convection θ_{JA} measurements. These environmental conditions are pertinent to surface-mount packages mounted on a standard test board.

Further discussion of the board design is found in document LOW THERMAL CONDUCTIVITY TEST BOARD FOR LEADED SURFACE –MOUNT PACKAGES among others. The board will be placed in a horizontal (package up) position in an enclosure that prevents extraneous air currents and allows only natural convection generated by the package under test.

1.3 Rationale

It is very important to have well-defined, well-documented test conditions to satisfy the industry requirements of accuracy and repeatability. The environmental conditions have significant impact on the test results and must be tightly controlled. Comparison of data sheets between different vendors or packages have very little meaning unless the thermal data was collected under identical conditions. For these reasons it is imperative that the environmental conditions are well defined.

1.4 References

SEMI Test Method #G38-87, Still and Forced Air Junction-To-Ambient Thermal Resistance Measurements of integrated Circuit Packages

SEMI Test Method #42-87, Thermal Test Board Standardization for Measuring Junction-To-Ambient Thermal Resistance of Semiconductor Packages

SEMI Test Method #43-87, Junction-To-Case Thermal Resistance Measurements of Molded Plastic Packages

JEDEC JCB-95-28 , methodology for the Thermal Measurement of Component Packages (Single Semiconductor Devices)

JEDEC JCB-95-29 , Integrated Circuit Thermal Measurement Method –Electrical Test Method (Single Semiconductor Devices)

JEDEC JCB-95-40 , Low Thermal Conductivity Test Board for Leaded Surface Mount Packages

1.5 Definitions

Refer to the ANNEX in this document for definitions of terminology and symbols applicable to this document only , Refer to document INTEGRATED CIRCUIT THERMAL MEASUREMENT METHOD-ELECTRICAL METHOD for an additional list of terminology and symbols pertinent to this document.

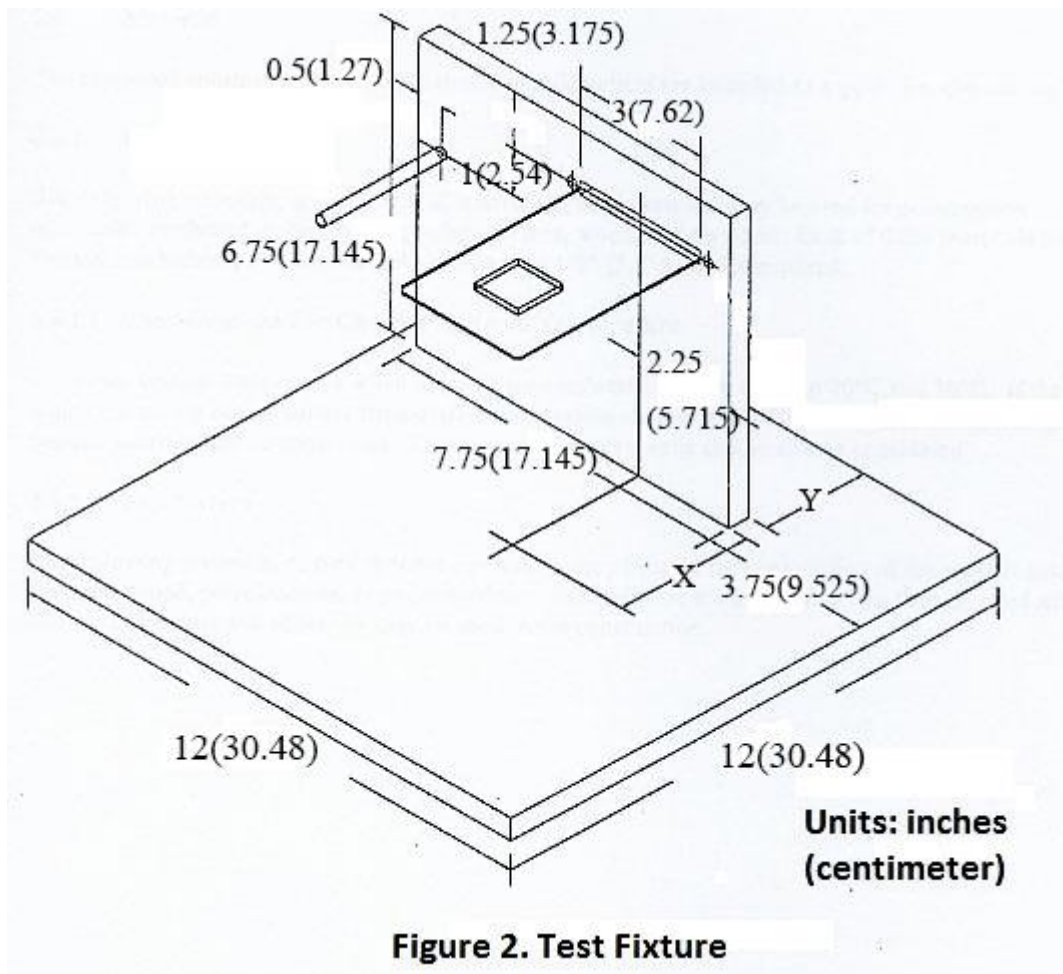
2 Environmental conditions for natural convection measurements

The following conditions clearly detail all aspects necessary to construct a test fixture. Refer to figure 1 and 2.

2.1 Test enclosure assembly

The enclosure shall be a box with an inside dimension of 1 $ft.^3$ ($0.0283 m^3$). All seams should be thoroughly sealed to ensure no airflow through the enclosure. A list of potential construction materials is detailed in 2.6. The box material shall be a low conductance material.

NOTE— For high power devices , dissipating >3 watts , increasing the size of the box should be considered if the ambient temperature during the test (ΔT_j). Any dimensional changes in the box size must be reported in the data and labeled as non-standard.



2.4 Thermocouple

The wire diameter shall be no larger than AWG size 30. Placement of thermocouple shall be 1”(2.54 cm) below the bottom plane of the test board (PCB) and 1”(2.54 cm) from the side wall. Refer to figure 2. The accuracy of the thermocouple and associated measuring system shall be 1° C or better.

2.5 Test board

See Document LOW THERMAL CONDUCTIVITY TEST BOARD FOR LEADED SURFACE-MOUNT PACKAGES.

2.6 Material

The suggested construction materials listed in this document are intended as a guideline and are not all-inclusive.

2.6.1 Enclosure (box)

The following materials, or their thermal equivalent, have been and may be used for

construction of the enclosure : cardboard , polycarbonate , polypropylene , wood , and plywood. Each of these materials has a low thermal conductance. Minimum wall thickness of $\frac{1}{8}$ " (3.175mm) is required.

2.6.1.1 Considerations For Changes In Room Temperature

The room ambient temperature when the tests are conducted shall be between 20°C and 30°C . If the room in which the testing occurs suffers from drastic temperature changes ($> \pm 3^\circ\text{C}$) , then placement of a larger box over the test enclosure should be considered. Thicker test enclosure walls should also be considered.

2.6.2 Test Fixture

The following materials , or their thermal equivalent , may be used for construction of the support structure: plywood , wood , polycarbonate , or polypropylene. Each of these materials has a low thermal conductance. Common fasteners and adhesives may be used in the construction.

3 Thermal measurement procedure and methodology

This section details the steps necessary to perform a thermal resistance measurement in a natural convection(still air)environment. The following equations describe the measured and calculated parameters required for making a thermal measurement.

The junction-to-ambient thermal resistance is determined from equation1:

$$\theta_{JA} = \frac{(T_J - T_A)}{P_H}$$

where θ_{JA} = thermal resistance from junction-to-ambient($^\circ\text{C}/\text{W}$)

T_J = junction temperature when the device has achieved a steady-state after application of P_H ($^\circ\text{C}$)

T_A = ambient temperature ($^\circ\text{C}$)

P_H =power dissipation that produced change in junction temperature (W)

As described in the document , INTEGRATED CIRCUIT THERMAL MEASUREMENT METHOD-ELECTRICAL TEST METHOD , a temperature-sensitive parameter (TSP) is used to sense the change in temperature of the junction operating area due to the application of electrical power to the device. In equation terms , $\Delta T_J = (\Delta TSP \times K)$

where ΔTSP =change in the TSP caused by the application of P_H

K =K factor is the ratio of junction temperature change to temperature-sensitive parameter change in units of $^\circ\text{C}/\text{mV}$; usually applicable to semiconductor devices using a forward bias temperature sensitive parameter.

The junction-to-ambient thermal resistance can then be described by equation 3:

$$\theta_{JA} = ((T_{AO} + \Delta TSP \times K) - T_{ASS}) / P_H$$

(3)

where T_{AO} = Initial ambient air temperature before heating power is applied.

T_{ASS} = Final ambient air temperature when steady-state has been reached.

Applying the change in the ambient temperature to the equation will provide data correction to achieve an absolute θ_{JA} value.

3.1 Device mounting

Mount the device to be tested on the appropriate test board. Reference Test Board Specification , LOW THERMAL CONDUCTIVITY TEST BOARD FOR LEADED SURFACE-MOUNT PACKAGES for board design , mounting , and wiring details.

3.2 K factor calibration

Prior to making actual thermal measurement the junction or other temperature-sensitive parameters must be empirically calibrated. Reference 3.3 of document , INTEGRATED CIRCUIT THERMAL MEASUREMENT METHOD-ELECTRICAL METHOD , for the procedure to determine the K Factor value. Record the K Factor value.

3.3 Test start-up and initial equilibrium verification

Place the test device in the natural convection chamber and apply measurement current for the temperature-sensitive device , (e.g. , diode metal resistor , etc.). Prior to recording the initial conditions at the beginning of the thermal test , verify that the enclosure environment has reached a state of equilibrium.

To verify that stabilization has occurred , wait an initial 5 minutes minimum , then record the TSP , wait an additional 5 minutes and record a 2nd TSP. If ΔT_j as determined by the TSP measurement is less than or equal to 0.2°C , then equilibrium has occurred. If equilibrium has not occurred then continue for an additional 5 minutes. Equilibrium of the TSP has occurred if $(\Delta TSP \times K) \leq 0.2^\circ\text{C}$.

After equilibrium has been reached record the values for TSP and the initial ambient temperature T_{AO} .

3.4 Power level selection and applying power

The power levels at which devices are tested should be governed by actual use conditions. The minimum recommended junction temperature rise for testing is 20°C The typical junction temperature rise during testing is between 30 and 60°C , which is the normal range of use of most devices. Hence , the following guidelines are recommended:

Power	θ_{JA} Range
0.5 watt	$\theta_{JA} > 100^{\circ}\text{C}/\text{W}$
0.75 watt	$60 < \theta_{JA} < 100^{\circ}\text{C}/\text{W}$
1 watt	$30 < \theta_{JA} < 60^{\circ}\text{C}/\text{W}$
2 watt	$20 < \theta_{JA} < 30^{\circ}\text{C}/\text{W}$
3 watt	$15 < \theta_{JA} < 20^{\circ}\text{C}/\text{W}$

After selecting the appropriate power level , apply the heating voltage (V_H) and the heating current (I_H) to the device.

NOTE— At higher power the convective air can become unstable.

3.5 Verification of thermal steady-state and test completion

For the test measurement to be completed , verification that thermal steady-state has been reached shall be done before the final θ_{JA} reading can be taken. For a discussion on determining steady-state conditions , refer to 3.6 of INTEGRATED CIRCUIT THERMAL MEASUREMENT METHOD-ELECTRICAL METHOD.

After a steady-state has been reached , record the values for the TSP , the heater voltage (V_H) , the heater current (I_H) , the time required to reach equilibrium (t_{ASS}) , and the final ambient temperature at the end of the test T_{ASS} .

4 Thermal characterization parameter - Ψ_{JT} junction-to-top center of package (Optional Procedure)

The thermal characterization parameter , Ψ_{JT} is proportional to the temperature difference between the top center of the package and the junction temperature. Hence , it is a useful value for an engineer verifying device temperatures in an actual environment. By measuring the package temperature of the device , the junction temperature can be estimated if the thermal characterization parameter has been measured under similar conditions.

The use of Ψ_{JT} should not be confused with θ_{JC} which is the thermal resistance from the device junction to the external surface of the package or case nearest the die attachment as the case is held at a constant temperature. The use and reporting of the case temperature during the junction to ambient thermal resistance test is optional.

The measurement may be made using a temperature transducer such as a thermocouple , flouroptic , sensor , or infrared sensor.

4.1 Thermocouple placement location

The thermocouple bead shall be attached to the package at the geometric center of the top surface. The position must be reported. In all cases , along with the measurement data.

4.2 Package thermocouple application

CAUTION: Usefulness of this measurement is dependent on the procedure.

Application of the thermocouple is critical to ensure proper thermal contact to the package and to ensure that the θ_{JA} measurement is not disturbed. Determination of the package surface temperature, of a low conductance package body, requires that the following factors be considered:

- 4.2.1 The thermocouple wire and bead shall touch the surface of the package.
- 4.2.2 Best practice for attaching the wire and thermocouple bead is the use of a minimal amount of thermally conducting epoxy. The distance across the epoxy bead shall not exceed .1” (2.54 mm) in any direction.
- 4.2.3 The thermocouple wire shall be routed next to the package body down to the board and along the board. This reduces cooling of the thermocouple junction by heat flowing along the wire.
- 4.2.4 Thermocouple wire size shall be small such that heat loss along the wire does not cause anomalous low readings. Recommended maximum thermocouple sizes is 36 gauge. For type T thermocouples, 40 gauge is preferred.

4.3 Procedure

The junction temperature and package temperatures are determined at the steady-state condition in the θ_{JA} measurement as specified above. The junction-to-top center of package thermal characterization parameter, Ψ_{JT} , is calculated using the following equation:

$$\theta_{JA} = \frac{(T_J - T_A)}{P_H} \quad (4)$$

where Ψ_{JT} = thermal characterization parameter from device junction to the top center of the package

T_{ASS} = the junction temperature at steady-state.

T_{TSS} = the package (top surface) temperature, at steady-state, measured by the thermocouple. Infrared sensor, or flouroptic sensor.

The relationship between the junction-to-ambient thermal resistance, θ_{JA} , and the junction –to-top center of package thermal characterization parameter, Ψ_{JT} , is described by equation 5:

$$\theta_{JA} = \Psi_{JT} + \Psi_{TA} \quad (5)$$

where Ψ_{TA} = thermal characterization parameter from top surface of the package-to-air (°C/W)

The package-to-air thermal characterization, Ψ_{TA} , is based on the steady-state ambient air temperature as shown here:

$$\Psi_{JA} = \frac{(T_{TSS} - T_{ASS})}{P_H} \quad (6)$$

the thermal characterization parameters , Ψ_{JT} and Ψ_{TA} have the units °C/W but are mathematical constructs rather than thermal resistances because not all of the heating power flows through the exposed case surface. It is not necessary to report Ψ_{TA} because it can be determined from the relationship between θ_{JA} and Ψ_{JT} , Also , Ψ_{TA} is very dependent on the application-specific environment.

4 Test conditions to be reported

The conditions listed in table 1 , which are pertinent to the natural- convection thermal measurement , must be reported when publishing measurement results.

Measurement Area	Condition Parameter(s)	Data Parameter(s)
Electrical	V_H (V) I_H (A) t_{Hss} (s) I_M (ma) K(°C/mV)	ΔV_F (V) ΔT_J (°C) P_H (W) θ_{JA} (°C/W)
Environmental	Test board orientation Enclosure (box) Size T_{Ao} (°C) T_{ASS} (°C)	
Package Surface Measurement (Optional Method)	T_{T0} (°C) T_{TSS} (°C) measurement method Thermocouple wire gauge # (AWG) Thermocouple type(T , J , orK) Thermocouple location Attachment method	Ψ_{JT} (°C/W)

Table 1— Thermal measurement test conditions data parameter summary.

ANNEX A (informative)

1.A Definitions

Ψ_{JT} - The thermal characterization parameter to report the difference between junction

temperature and the temperature at the top dead center of the outside surface of the component package , divided by the power applied to the component.

Ψ_{TA} - The thermal characterization parameter from the top surface of the package to surrounding natural convection (still-air) ambient.

T_A - Ambient temperature.

T_{A0} - Initial ambient air temperature before heating power is applied.

T_{Ass} - Final ambient air temperature after heating power is applied and steady-state has been reached.

T_{T0} - Initial package (top surface) temperature before heating power is applied.

T_{Tss} - Final package (top surface) temperature after heating power is applied and steady-state has been reached.

For all other DEFINITIONS not listed here refer to Annex A-1 through A-4 of document INTEGRATED CIRCUIT THERMAL MEASUREMENT METHOD – ELECTRICAL METHOD

實驗數據紀錄與結果

▲ 電壓 V			
▲ 電流 I			
輸入功率 P_H			
▲ 接點溫度 (T_j)			
▲ 環境溫度 (T_A)			
熱阻 (θ_{JA})			

3. 熱傳導與對流及液、氣熱傳導

A 熱傳導與對流實驗

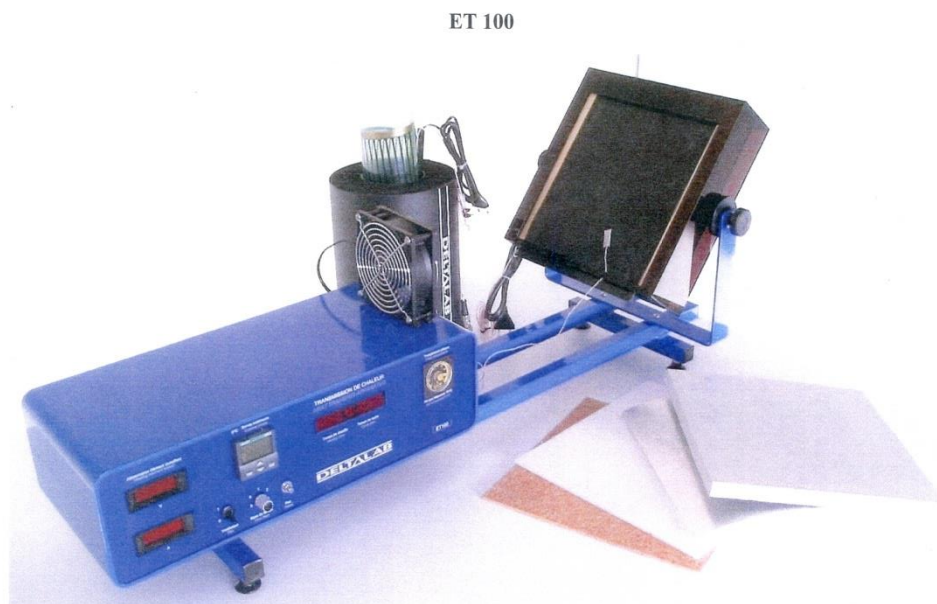


圖 4.1 ET 100 熱傳遞實驗儀器

一、 實驗目的

ET 100 熱傳遞實驗儀器可研究熱傳遞的三種模式：傳導、對流及輻射，依據不同材質的待測物，求出各種模式之溫度與熱傳導的關係，增加學生實驗、邏輯與計算能力。

二、 實驗原理

A. 本實驗經由表面的感測器，使加熱板維持於所選定的溫度，加熱板電阻是經過特殊材質塗裝，使加熱板表面溫度分佈平均、低熱慣量。待測試片厚 x ，其熱傳導係數為 k ，平板兩面溫度分布為 T_1 與 T_2 ，且 $T_1 > T_2$ ，即可

得熱通量 Q_x 。

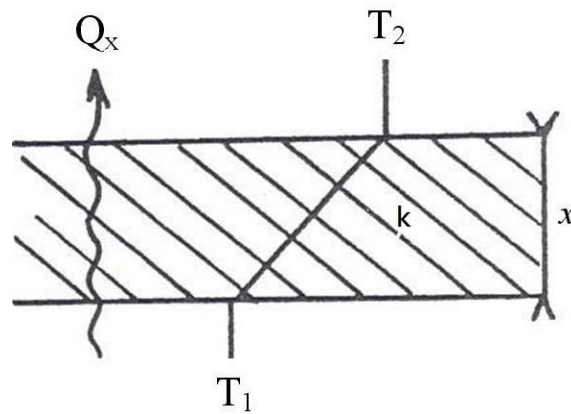


圖 4.2 待測物與加熱方向模擬示意圖

$$Q_x = \frac{q_{xin}}{A} = k \frac{T_1 - T_2}{x} \quad (W/m^2)$$

q_{xin} : 輸入功率 (W)

k : 熱傳遞係數 ($W/m \cdot K$)

A : 截面積 (m^2)

x : 試片厚度 (m)

T_1 : 加熱溫度 (K)

T_2 : 試件表面溫度 (K)

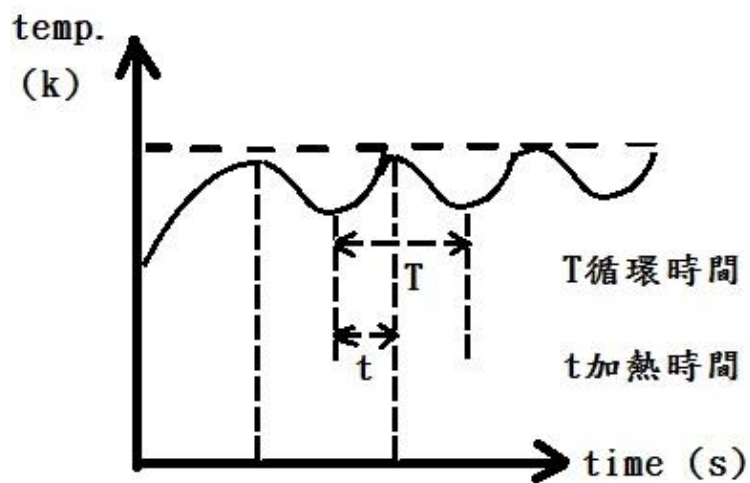


圖 4.3 加熱板 T_1 溫度隨加熱時間變化示意圖

加熱板輸出功率 $q_{xin} = I \cdot V$ ， α 功率損失 $= \frac{t}{T} * q_{xin}$ ，

t ：加熱時間(s)

T ：循環時間(s)

則熱傳遞係數

$$k = \frac{q_{xin} * x}{(T_1 - T_2) * A}$$

B. 強制對流即是流體藉由風扇、風等外加因素，迫使流體流動。實驗以熱傳導作為熱源，並給予風速 U ，計算出熱對流係數 \bar{h} 。平行流又可分層流與紊流兩種；層流是流速較小，穩定流動，流體分層互不混合；紊流是流速較大，流場亂不可辨。計算熱通量前需藉由 Reynold Number 得知當時狀態下流體為層流或是紊流，層流 $Re_L < 5 \times 10^5$ ，紊流 $Re_L > 5 \times 10^5$ 。不同流動方式 Nusselt Number 也相對不同。

(1) $Q = \bar{h}L(T_s - T_\infty)$ 熱對流通量(W/m)

T_s 試件表面溫度(s); T_∞ 流體溫度(s); L 試件表面長度(m)

(2) $Re_L = \frac{u_\infty \cdot L}{\nu}$ Reynold Number

u_∞ 風速(m/s); $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 流體運動黏度(m^2/s); μ 流體黏度

(kg/ms); ρ 流體密度(kg/m^3)

(3) $\overline{Nu}_L = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3}$ 層流 Nusselt Number

$Pr = \frac{\gamma}{\alpha}$ 普朗特數(Prandtl)

γ 運動黏滯係數； α 熱擴散係數

$\overline{Nu}_L = 0.036 Pr^{1/3} (Re_L^{0.8} - 23200)$ 紊流 Nusselt Number

(4) $\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k}{L}$ 熱對流係數($W/m^2 \cdot K$)

三、儀器介紹

1. 機台

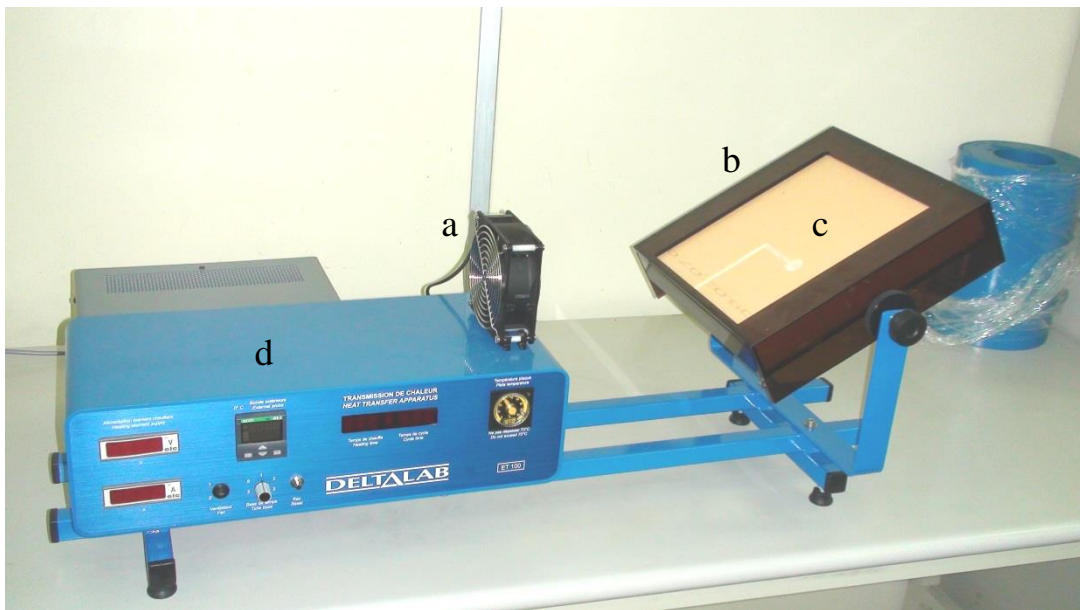


圖 4.4 熱傳遞實驗儀器元件

風扇型號：4715MS-23T-B5A

風扇轉速：2600Rpm

風扇外徑：119mm*119 mm

風扇內徑：38mm

Air Flow：88.2CFM

$$\text{風速 } u_{\infty} (m/s) = \frac{\text{風流量 } (m^3/s)}{\text{風扇面積 } (m^2)}$$

b. 上蓋

c. 絕緣板

d. 控制面板

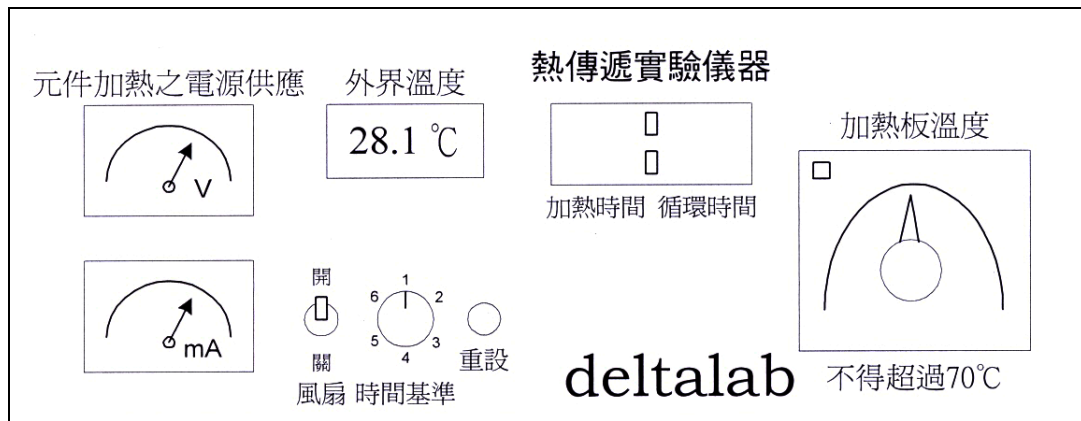


圖 4.5 前控制面板配置圖

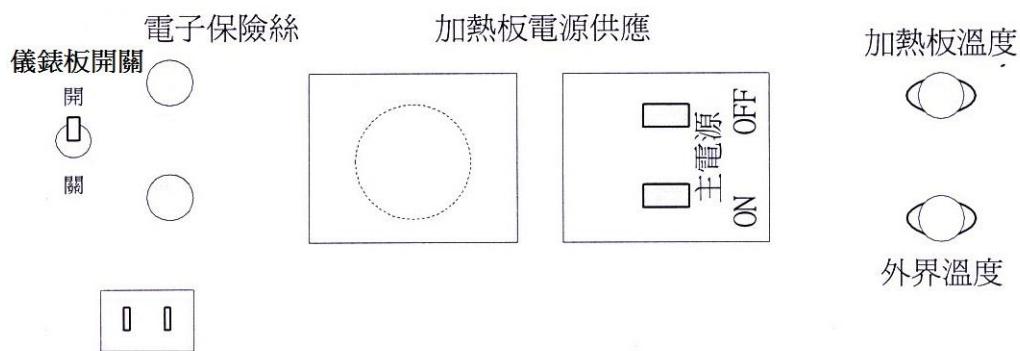


圖 4.6 後控制面板配置圖

四、 實驗步驟

安裝設備：

1. 風扇裝置於實驗架左方
2. 調整試驗架置水平位置
3. 移開上蓋，安裝加熱片於絕緣板上
4. 於加熱片上方放置試片並記錄試片厚度並放置上蓋
5. 檢查儀器各元件是否連接
 - a. 電源
 - b. 加熱片
 - c. 風扇
 - d. 溫度感測器

6. 溫度感測器放置於試片上方並固定

操作步驟：

1. 後控制面板打開儀表板開關及加熱板電源供應開關
2. 旋轉加熱片溫度控制器欲量測溫度
3. 等待紅燈熄滅時，按下重設鍵並紀錄溫度、電流與電壓
4. 紀錄加熱時間與循環時間(任一數超過 99.9 需增加時間基準旋鈕，並再次按下重設鍵)
5. 計算熱傳係數、熱傳率、功率損失、熱對流係數等

五、問題與討論

1. 根據風扇規格，求算風速 u_{∞} 。
2. 請說明功率損失 α 的意義。
3. 請繪出特徵長度 L 與待測平台的旋轉角度的關係。

六、實驗數據

1. 材質：

實驗項目	熱傳導	強制對流	熱傳導	強制對流
加熱板溫度 T_1				
厚度 x				
電壓 V				
電流 I				
輸入功率 W				
試件表面溫度 T_2				
加熱時間 t				
循環時間 T				
熱傳導係數 $W/m\cdot k$		X		X
流體溫度 T_∞	X		X	
Reynold Number				
Nusselt Number				
熱對流係數 \bar{h}				

2. 材質：

實驗項目	熱傳導	強制對流	熱傳導	強制對流
加熱板溫度 T_1				
厚度 x				
電壓 V				
電流 I				
輸入功率 W				
試件表面溫度 T_2				
加熱時間 t				
循環時間 T				
熱傳導係數 $W/m\cdot k$		X		X
流體溫度 T_∞	X		X	
Reynold Number				
Nusselt Number				
熱對流係數 \bar{h}				

B 液體、氣體熱傳導

一.實驗目的：使學生了解液體、氣體的熱傳導情形，並求算熱傳導係數。

二.符號：

Table 4.1 Symbol and Units

Symbol	Definition	Units
A or A_S	Cross-sectional area (A) or surface area (A_S)	m^2
D or D_m	Diameter or Mid Point Diameter	m
h h_c h_r	Heat transfer coefficients Overall (h), convection (h_c) and radiation (h_r).	$W.m^{-2}K$
P	Perimeter	m
r	Radius	m
Δr	Radial Gap	
L	Length or thickness	m
x	A length	m
Q	Heat Quantity	J
\dot{Q}	Heat energy transferred for a unit time (heat transfer rate)	$J.s^{-1}$ or W
T T_a T_l T_x ΔT T_{ave}	Temperatures: Ambient (T_a) At a given position (T_l) At any given point along a length (T_x) Difference in (ΔT) Average temperature	K (or $^{\circ}C$ where shown)
k	Thermal Conductivity	$W.m^{-1}K^{-1}$
σ	Stefan Boltzmann Constant	$5.67 \times 10^{-8} W.m^{-2}K$
F	Shape factor for the bar or rod and its surroundings	1
ξ	Emissivity value of the bar or rod surface	0.95

三.實驗儀器介紹：

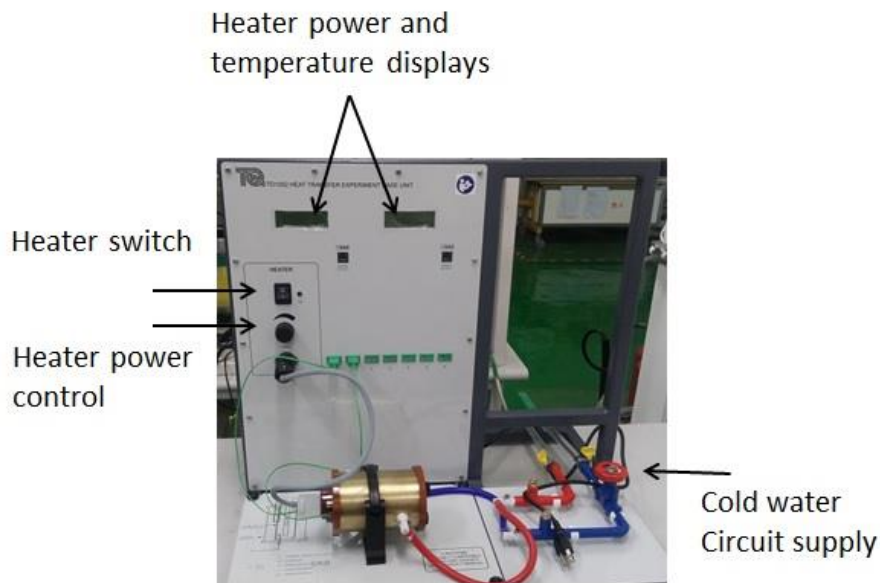


Figure 4. 1 The Base Unit, and an Optional Experiment

Base Unit

Item	Details
Nett Dimensions	650mm long × 480mm front to back × 590mm high
Nett Weight	24kg
Electrical Supply	Single phase 50Hz to 60Hz 100V AC to 120V AC at 5A or 220V AC to 240V AC at 5A
Fuse	Main incoming socket: 20mm 6.3A Ceramic Type F Output for VDAS-F Interface: 20mm, 3.15A ceramic Type T
Cold water supply and waste needed	Clean cold water supply at between 5°C and 15°C. Standard drinking water waste. Note: If your mains water supply is warm(above about 15°C), consider using a water chiller to supply the cold water for this equipment. If you use water above room temperature, you may not reach thermal equilibrium in your tests.
Thermocouple inputs	7 off type K with a resolution of 0.1°C. Accuracy: +/- 0.3°C.
Heater output and display	Maximum power approximately 100W Resolution 0.1W



Figure 4. 2 The Conductivity of Liquids and Gasses Experiment

Optional Experiments

Experiments	Details
Conductivity of Liquids and Gasses Experiment (TD1002D)	<p>Nett dimensions: 430mm wide × 280mm front to back × 150mm high and 6kg. Cylinder length: 0.1m Nominal radial gap(accurate value written on equipment): 0.285mm Nominal surface area: 0.0126m² Recommended liquid and gasses: dry air, castor oil, carbon dioxide. Note: You may use water, but its conductivity is too high for meaningful results with this equipment. Note: The TD1002d equipment is made of brass, aluminium, tufnol, nylon and nickel-plated parts. For safety reasons and to avoid damage to the equipment, only use test fluids that will not damage or react with the materials used to make the TD1002d. TecQuipment do not supply and cannot be held responsible for the test fluids that you use.</p>

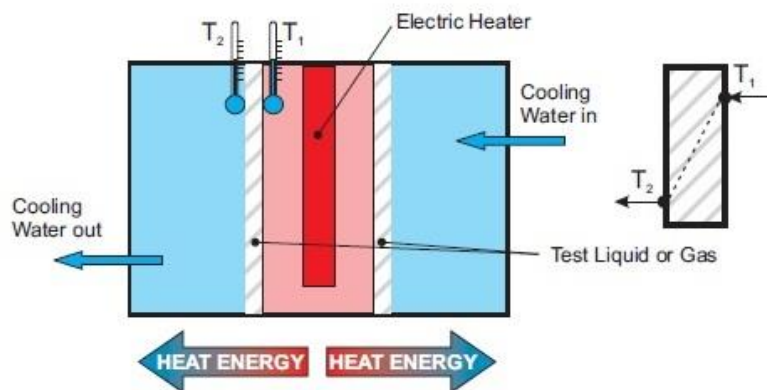


Figure 4. 3 How the Conductivity of Liquids and

Thermal Conductivity (k) of Common Materials

Some materials are better heat conductors than others; their material has an effect on the rate of heat transfer. This effect is its thermal conductivity(k). It is a measure of how quickly heat energy travels along a unit length of material of a unit cross-sectional area.

Table 4.2 Thermal Conductivity of a Select of Materials at Room Temperature

	Material (at 298 K)(24.85°C)	Typical Thermal Conductivity (k) $W.m^{-1}K^{-1}$
Metals	Aluminium (pure)	205 to 237
	Aluminium (grade 6082)	170
	Brass (type CZ121)	123
	Brass (63% copper)	125
	Brass (70% copper)	109 to 121
	Copper (pure)	353 to 386
	Copper (type C101)	388
	Mild Steel	50
	Stainless Steel	16
Gas	Air	0.026
	Carbon Dioxide	0.0146
	Hydrogen	0.172
Others	Asbestos	0.28
	Castor Oil	0.18
	Glass	0.8
	Water	0.6
	Wood (softwood to hardwood)	0.07 to 0.2

Thermal Conductivity of air against °C

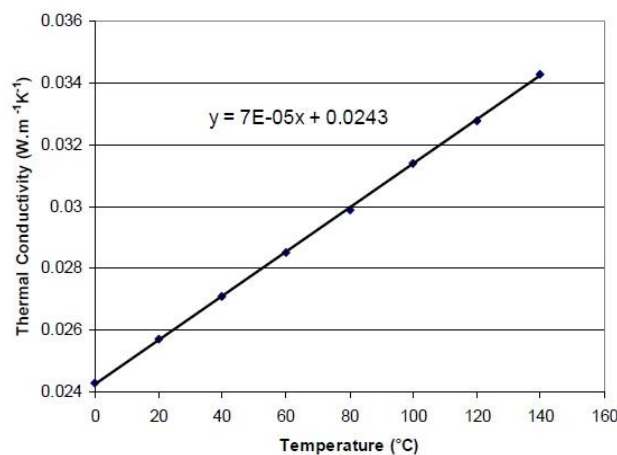


Figure 4. 4 Thermal Conductivity of Air

Thermal Conductivity of Liquids and Gasses

The conductivity of liquids and gasses experiment passes heats through the wall of a cylinder of the test liquid or gas. As the wall is nominally the same thickness all around the cylinder, the equipment assumes that the heat energy passes through it uniformly and the temperature change is uniform all round. Insulation stops heat loss at the cylinder ends, therefore, the equipment only needs to measure the temperature change across one piece of the wall-between the two measurement points T_1 and T_2 . The wall has a thickness equal to the difference in radius(Δr) between the inner and outer radii of the cylinder. Then you can multiply this by the total surface area to calculate the conductivity of the liquid or gas that fills it.

$$k = \frac{\dot{Q} \Delta r}{A_s \Delta T}$$

The surface area of the cylinder of the test fluid is not its outside or inside area. It is its mid-point area. Also, for reference, the main temperature of the test fluid is calculated mathematically as the mean of T_1 and T_2 .

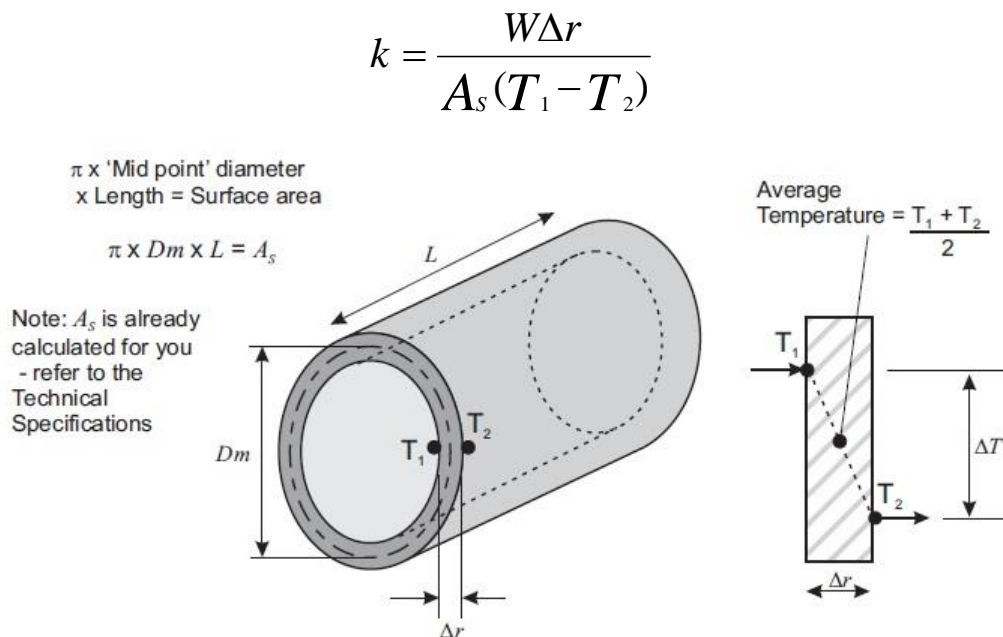


Figure 4. 5 The Cylinder of Test Fluid

四.實驗步驟：

1. 檢查機台電源是否確實關閉。
2. 打開水源閥門，確定水流穩定。
3. 將待測流體(水)注入針筒，放置在右側的流體注入口，另一個空瓶針筒放置在左側的流體出口，將待測流體(水)注入腔室直至左側針筒持續出水，在移開兩隻針筒時需按壓住接口。
4. 接上 110V 電源插座，先開啟左側電源開關，再開啟正面的加熱器開關。
5. 加熱器輸出瓦數優先從 80W 開始實驗，直到溫度不在變化時，紀錄 T_1 和 T_2 的溫度。接著下修輸出功率分別為 60W、40W 和 20W，完成後將加熱器 power 旋鈕關至最小，再關閉加熱器開關。
6. 將待測流體(水)依據第 3 點方式重複操作數次，再依據第 5 點完成氣態(空氣)實驗，並記錄輸入功率 P 、溫度 T_1 、溫度 T_2 。
7. 實驗完畢後，先將加熱器 power 旋鈕關至最小，再關閉加熱器開關，最後關閉左側電源開關及 2 個進水閥，並移除 110V 電源插座。

To clean the experiment

1. Connect the pipes (supplied) into the self-sealing connections at the end caps. Empty out as much gas or liquid as possible.
2. Find some clean cloth and put it around the experiment to catch any spills.
3. Unscrew the thumbscrews at the front end cap.

4. Carefully push out the core from the front(or pull from the back).
5. Use cloths to thoroughly clean the core and the inside of the unit, then refit the core.

Caution: Take care when cleaning the core. Do not drop it or damage the seals or its wires.



Figure 4. 6 To Clean the Experiment

Adding a fluid to the experiment

The small connectors at end of the unit are self-sealing, so they will only open when you insert the small pipes(supplied). Insert the pipes to the connectors at each end. TecQuipment supply two syringes that fit to the pipes to help you inject fluid into the unit and reduce spillage.

Fill one of the syringes (supplied) with your chosen fluid, then connect to one of the pipes (it doesn't matter which way around you fill the unit). Connect the second syringe to the other pipe.



Figure 4. 7 Using the Syringes to add Fluid

Slowly push in the plunger of the syringe until you see fluid coming out the other pipe and into the other syringe. Disconnect both pipes and clean up any spills.

If you use a gas, you may need to create an adaptor to fit one of the short pipes. Remember to fit the second short pipe to open the other connector and allow the gas to force out the trapped air from the radial gap.

Warning: When filling the unit, make sure it does not become pressurized.

The fluid you use must be safe for use with the parts of the unit. Never use toxic, volatile or highly flammable fluids, noting the maximum operating temperature. Use readily available insert fluids. Contact TecQuipment if in doubt.

五.注意事項：

1. 只有液體跟氣體可供實驗。
2. 更換實驗待測物時，須先將管路內清除乾淨。
3. 加熱器的加熱能量最高值為 90W。
4. 熱電偶量測溫度不可高於 80°C。

六.實驗數據:

Conductivity of Liquids and Liquids and Gasses Experiment

Procedure 1- Calibration Using Air:

- 1、 Use an accurate thermometer to check the local ambient air temperature for reference.
- 2、 Open the water outlet valve to start the water flowing, then switch on the heater and set to 90Watts power.
- 3、 Wait for the temperatures to stabilize and then record T₁ and T₂.
- 4、 Repeat the test at heater powers in decreasing steps of 10W.
- 5、 Switch off the heater and water supply.
- 6、 Find the average temperature across the radial gap in °C.
- 7、 Use the average temperature to find the given value of thermal conductivity from the chart of **Thermal Conductivity of air** (Figure 4.4).
You can use the chart directly, or use the equation printed on the chart and mathematically calculate the value.
- 8、 Now calculate the power using a rearranged equation.

$$W = \frac{kA_s(T_1 - T_2)}{\Delta r}$$

- 9、 Subtract this calculated power from the heater power to find the loss in the equipment.
- 10、 Plot a chart of power loss (vertical axis)in Watts against temperature different (T₁-T₂) in °C. If necessary, extend the line of your chart so that it covers the range 10°C to 80°C.
- 11、 This is your calibration chart that allows for power losses in the equipment.

Table 4. 3 Blank Results Table For Calibration Procedure

CALIBRATION WITH AIR Ambient Temperature:							
Heater Power (W)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	Average Temperature (T ₁ +T ₂)/2 (°C)	T ₁ -T ₂ (°C)	Calculated k for air	Calculated Power (W)	Power Loss (W)

Calibration Chart Using Air

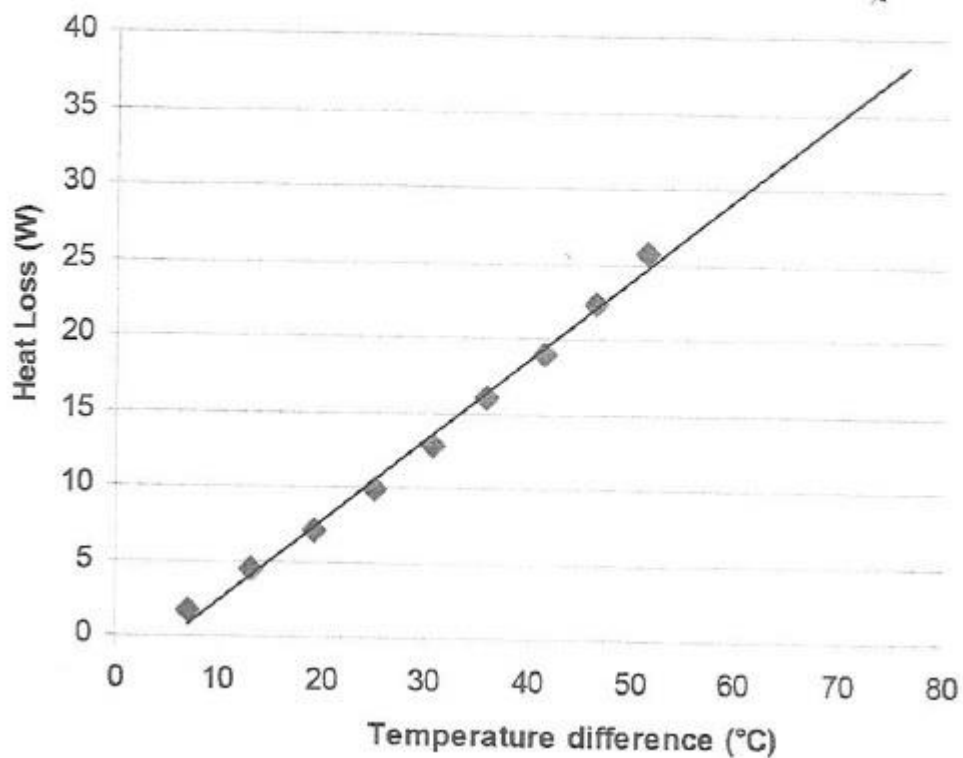


Figure 4. 8 溫度差及熱損失曲線

Procedure 2-Testing Liquids and Gasses:

- 1、 Set up your experiment as in procedure 1.
- 2、 Add your chosen test fluid as show in **Cleaning and Adding a Fluid to the**

Conductivity of Liquids and Gasses Experiment.

- 3 ‧ Create a blank results table, similar to Table 4. 4.
- 4 ‧ Use an accurate thermometer to check the local ambient air temperature for reference. Note the actual radial gap as written on the experiment.
- 5 ‧ Open the water outlet valve to start the water flowing, then switch on the heater and carefully adjust the heater power until the temperature difference is around 10 degrees.
- 6 ‧ Wait for the temperatures to stabilize and then record T₁ and T₂.
- 7 ‧ Repeat the test for at least one more heater power at a higher level, but not so high that T₁ becomes greater than 80°C.

Note: If T₁ reaches greater than 80°C the heater circuit may switch off the heater supply and will affect your experiment. Your choice of test fluid limits the maximum heater power of your experiment, as their conductivity affects how much heater power is needed to raise the temperature of T₁.

- 8 ‧ Switch off the heater and water supply.

Results Analysis

Find the temperature difference (T₁-T₂) and use your calibration chart to find the power loss for this temperature difference.

Subtract the power loss from the heater power to find the corrected power.

Use equation to find the calculated value for k.

$$k = \frac{W\Delta r}{A_s(T_1 - T_2)}$$

Compare the calculated values of k with your textbook value of k for your fluid at room temperature and calculate the error in percentage.

What do you notice about the error?

What do you notice about the calibration chart?

Table 4. 4 Blank Results Table For

Test Fluid: Ambient Temperature: Radial Gap: Typical textbook value of k at room temperature:								
Heater Power (W)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₁ -T ₂ (°C)	Average Temperature (T ₁ +T ₂)/2 (°C)	Power Loss from Calibration chart (W)	Corrected Power (W)	Calculated k	% Error

七.問題討論:

1. 以文字說明 As (Surface area)是怎麼定義的?實際的接觸面積是多少?
2. 根據實驗數據求算空氣的熱傳導係數與理論值相差多少百分比?

$$|(\text{實驗量測值}-\text{理論值})| / \text{理論值} * 100\%$$

5. CPU Cooler 熱阻抗量測裝置

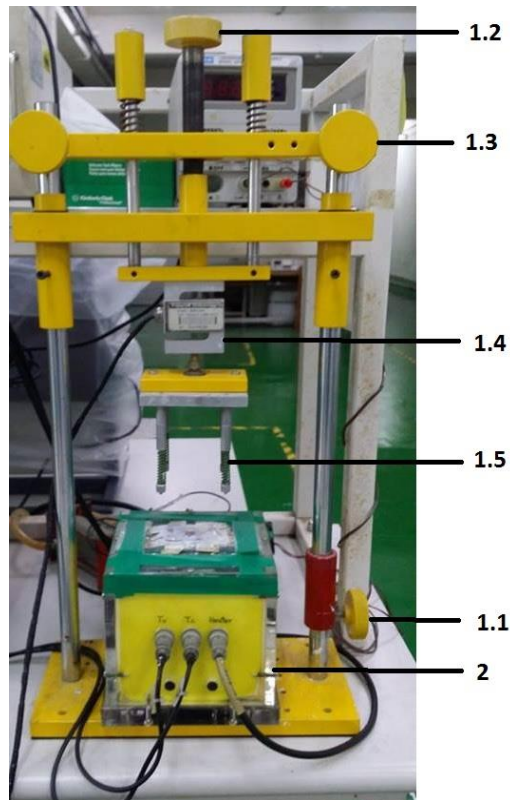


圖 5.1 機台外觀

1. 壓力設定台:用來對被測試物做接觸壓力的設定，壓力範圍 0-100kgf，加壓時不得突震加載。過負載 150%時，會造成 Load Cell 損壞。

1.1 微調定位鈕:用來調節施力桿與被測物的間距

1.2 旋鈕:在施加壓力前，固定上固定座的旋鈕

1.3 施壓力調節扭:順時針旋轉施加壓力，反轉釋放壓力

1.4 量力機構:複合表面量力裝置，量力範圍 0-100kgf

1.5 施力桿:前端套入被測物風扇的邊角孔內

2. 熱通量裝置

3. 被測物

3.1 被測物風扇

3.2 被測物散熱器

4. 量測裝置

4.1 壓力顯示裝置 P，按 AZ 畫面歸零，循環操作及顯示

OP-DCV，DC0-10V 對應 0-100kgf

4.2 Ta，被測物風扇入口溫度值

OP-DCV，DC0-10V 對應 0-200°C

4.3 Tu，熱通量裝置 meter bar 上端溫度值

OP-DCV，DC0-10V 對應 0-200°C

4.4 Tl，熱通量裝置 meter bar 下端溫度值

OP-DCV，DC0-10V 對應 0-200°C

4.5 CH4:#4 腳:press load

CH1:#1 腳:Ta

CH2:#2 腳:Tu

CH3:#3 腳:Tl

Com:#9 腳:com

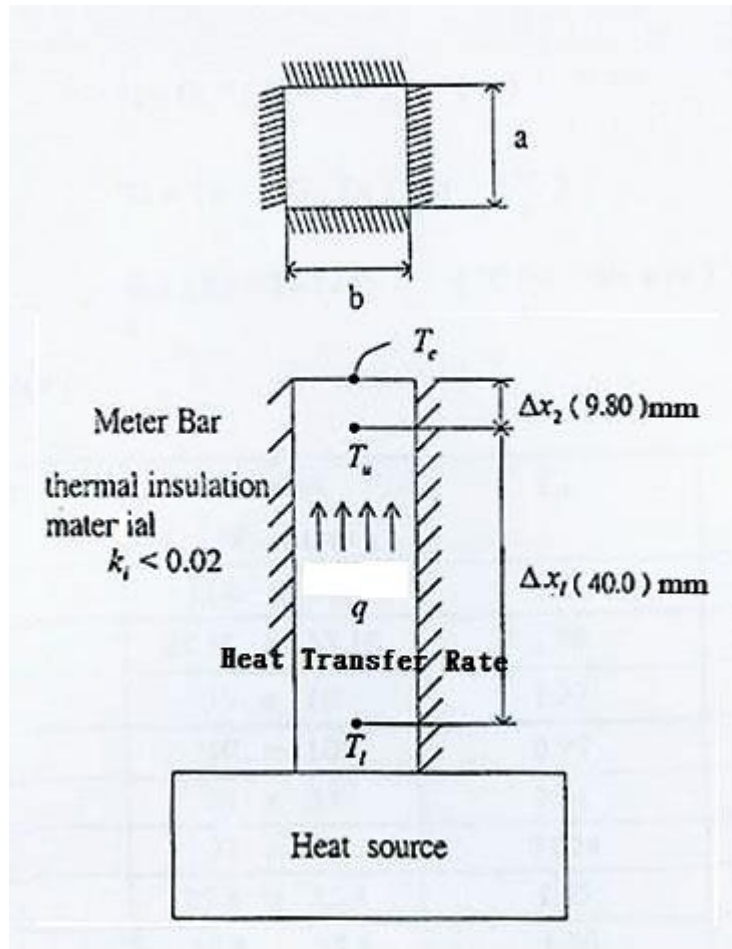


圖 5.2 9035 Heat Flux Power 結構及原理

$$q = k_m \cdot A \cdot \frac{\Delta T_1}{\Delta X_1} = k_m \cdot A \cdot \frac{\Delta T_2}{\Delta X_2}$$

$$\Rightarrow \frac{T_1 - T_u}{\Delta X_1} = \frac{T_u - T_c}{\Delta X_2}$$

$$\Rightarrow T_c = T_u - \frac{T_1 - T_u}{\frac{\Delta X_1}{\Delta X_2}} \quad (C_2 = \frac{\Delta X_1}{\Delta X_2})$$

$$\Rightarrow T_c = T_u - \frac{T_1 - T_u}{C_2}$$

thermal conductivity of meter bar $k_m = 385 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

$$A = a \times b$$

$$C_1 = k \cdot A \cdot \frac{1}{\Delta X_1}$$

3. die diameter

本實驗機台為 Model J

Model	Die area L*W (mm)	C ₁ (w/°C)	C ₂
A	11.6X9.6	1.41	15
B	27.18X27.18	1.78	14
C	10X10	1.27	15
CL	10X10	0.95	4
D	31X31	2.32	14
DL	31X31	2.024	8
E	25.4X25.4	1.55	14
EL	25.4X25.4	1.36	8
F	13.1X9.1	1.53	15
FL	13.1X9.1	1.147	4
H	13.97X13.97	1.878	4.0816
J	10X10	0.9625	4.0816

2. 最大輸出功率: DC30V×3A

3. 溫度量測輸出:

3.1 T_l, T-type T_c 標準輸出端子

3.2 T_u, T-type T_c 標準輸出端子

4. T_c-die 上表面溫度計算式:

$$T_c = T_u - (T_l - T_u) / C_2 \quad (^\circ\text{C})$$

5. 熱傳導率 計算式:

$$q = C1 \times (Tl - Tu) \quad (w)$$

6. 熱阻 Thermal Resistance 計算式:

$$R = (Tc - Ta) / q \quad (^\circ C/w)$$

7. 內部保護溫度 200°C 過載會導致停機，必須等降溫後重新啟動

8. 使用方式:

8.1 die 上表面擦乾淨，並輕塗一層散熱膏

8.2 待測物約略的重心位置，平放於 die 正上方

8.3 由壓台均勻施壓於待測物上方，並加壓到預定值

8.4 Tl 及 Tu 的溫度端與溫度量測裝置連線完成

8.5 輸入電源端與電源供應器端連線完成

8.6 輸入電功率加熱約 40 分鐘，達到穩態時紀錄 Tl、Tu 及 Ta 溫度

8.7 計算 Tc、q 及 R 值

8.8 當待測物散熱能力不良時，系統內的溫度到達 200°C 時，會自動保護切斷輸入電源，此時溫度會停止上升甚至下降，並非量測有誤。

9. 問題與討論

9.1 如何減少固體間熱傳導的熱阻堆積?(列出兩項)

9.2 實驗參數 C1、C2 代表的意義為何?目的是?

9.3 Die 上表面溫度(Tc)是根據何種原因求得的?

實驗數據紀錄與結果

Die 的規格	截面積	C1	C2	截面積	C1	C2
▲ 電壓 V						
▲ 電流 I						
輸入功率						
▲ 施加荷重的壓力						
▲ 被測風扇入口溫度值 Ta						
▲ 熱通量裝置 meter bar 上端溫度值 Tu						
▲ 熱通量裝置 meter bar 下端溫度值 Tl						
Die 上表面溫度 Tc						
熱傳導率 q						
熱阻 R						

6. 熱傳風洞實驗

一.實驗目的:

熱傳風洞試驗的目的是了解 LW-9016 熱傳風洞試驗裝置的結構與操作，將電源供應器提供固定功率對散熱鰭片不斷加熱，風洞吹出的風帶走散熱鰭的熱量，測量不同形式的散熱鰭片在風速與空間比關係下的熱阻抗值。

二.實驗器材和設備:

1.LW-9016 熱傳風洞試驗機

2.不同形式散熱鰭片

3.不同截面積之有效流道

4.直流電源供應器

三.實驗儀器介紹說明:

1.LW-9016 熱傳風洞

(1)試驗段:100(寬)×100(高)×800(長)mm 可安裝不同截面積有效流道，用來改變空間百分比關係

(2)風速:20cm/sec to 500cm/sec

(3)溫度:最高限制為攝氏 80 度

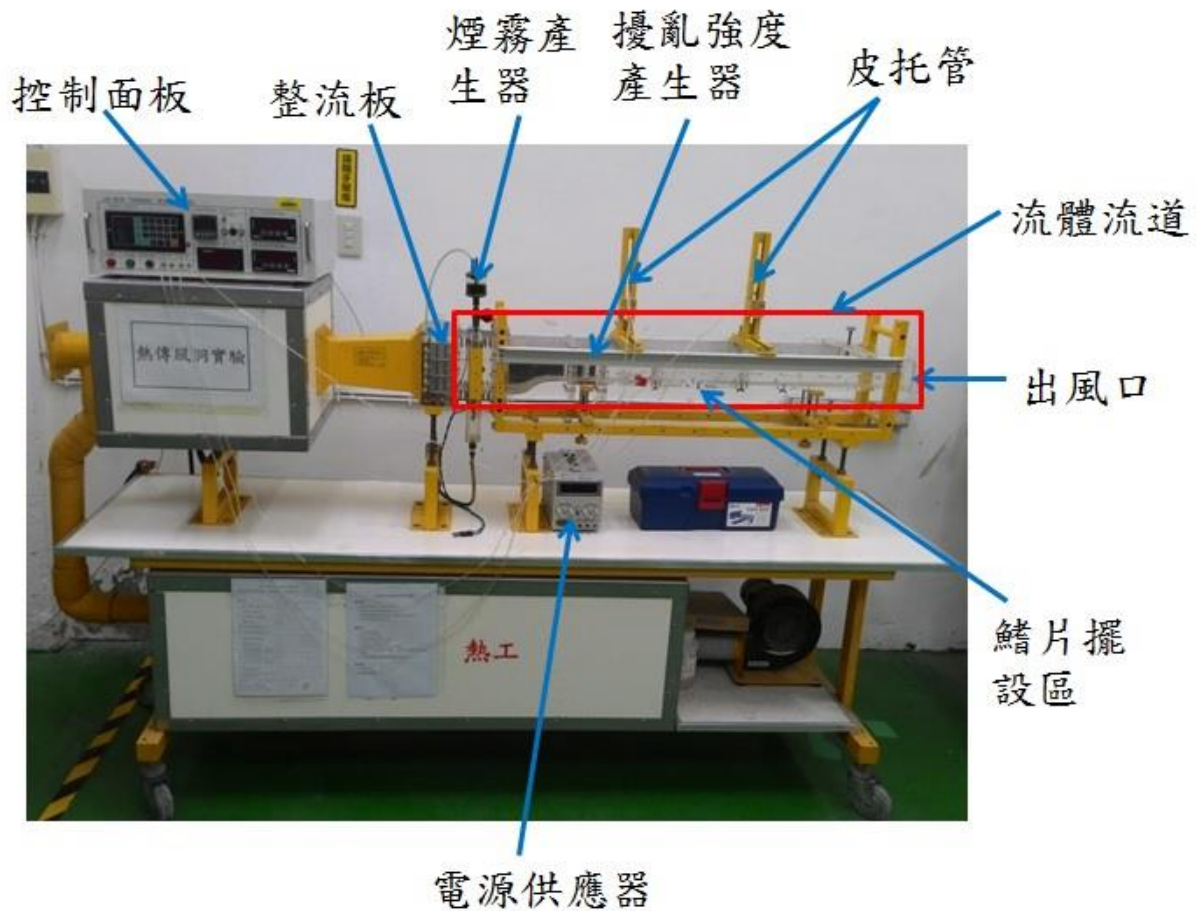


圖 6 1 熱傳風洞實驗儀器

2. 加熱器和壓克力板

(1) 加熱器內部阻抗 2.5

(2) 使用直流電源供應器 DC30V、3A

(3) 最大輸出功率： $P = I^2 R$

3. 皮托管測量風速並計算通過之流量，上流靜壓由壁面量測 $Q = U \times A$

4. 擾亂強度產生器以增加風的亂度，加強散熱效果。



圖 6 2 擾亂強度產生器

5.煙霧產生器:觀察風為層流或紊流

(1)輸油用 pump

(2)使用油為白蠟油

四.實驗原理:

熱傳風洞的實驗原理是將加熱器對散熱鰭片不斷加熱，而由風洞送出風來帶走熱量，當熱在對流時散熱鰭片和流體溫度會形成一種熱阻抗稱為 R

$$R = \frac{\Delta T_c}{Q}$$

R：散熱器熱阻抗值

ΔT_c ：散熱片接觸面與外界空氣的溫度差

Q：輸入加熱功率， $P = I^2 R$ (熱損失忽略不計)

$$q = \bar{h} \times A \times \Delta t$$

q：對流時的散熱效率 W

A：散熱鰭片有效散熱面積 m

Δt : 散熱器鰭片出入風口溫度差 K

\bar{h} : 平均對流傳導係數

這個關係式原先是由英國科學家 Issac Newton 在 1701 年所提出，當作是對流熱傳一個很基本的定義，計算對流熱傳導係數是很困難的，因為對流是很複雜的自然現象，因此 \bar{h} : 所採用的是一種平均值。

實驗最後要計算上下游風速時，假設流體在理想狀態下的能量損失可忽略不計，則可以利用伯努利定律 (Bernouli Theorem)

$$p + \rho gh + \frac{\rho V^2}{2} = const$$

p : 壓力

ρ : 流體之質量密度

g : 地表之重力加速度

h : 高度

V : 斷面平均速度

$Const$ 常數

假設流體經過散熱鰭片前的狀態為 1，通過散熱鰭片後的狀態為 2，將伯努利定理根據時間狀態之前後改寫為方程式(6.1)

$$p_1 + \rho_1 g h_1 + \frac{\rho_1 V_1^2}{2} = p_2 + \rho_2 g h_2 + \frac{\rho_2 V_2^2}{2} \quad (6.1)$$

由於流體於同一水平高度，故 ρgh 可以忽略不計。

單位時間內流入風的重量等於流出去風的重量，即為方程式(6.2)，

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (6.2)$$

解聯立方程式(6.1)、(6.2)求得 V_1 ， V_2 。

流體通過散熱鰭片所吸收的熱量

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T$$

由查表得知上、下游流體的 C_p ，再取兩者 C_p 的平均值， ΔT 為上下流體溫差，而 \dot{m} 為單位時間內流體通過質量。

$$\dot{m} = \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \right) \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right) A$$

五. 實驗步驟:

1. 實驗前預先量測試驗段及有效流道截面積大小
2. 將有效流道安裝於試驗段上
3. 將待測散熱鰭片安裝在有效流道於試驗段上
4. 接妥 220V 風洞插座及 110V 電源供應器插座，再打開風洞電源並設定風速運轉頻率。
5. 散熱鰭片上加熱接點連接電源供應器，調整電壓及電流，當熱溫度到達穩定狀態後(約略 25 分鐘)，紀錄後求得輸入功率。

- 6.測量散熱鰭片的接觸溫度，紀錄後求熱阻抗值。
- 7.測量散熱器上、下游風的溫度，參照控制面板讀值壓力 P1 及 P2，求上、下游風速，並計算散熱量。
- 8.更換不同形式的散熱鰭片，重複步驟 1-7
- 9.改變風量頻率讀數，重複步驟 1-7

六.注意事項:

- 1.為減少輸入功率的熱損失在加熱器下方可加裝熱泡棉隔熱
- 2.關機時應先將加熱器電源關閉，再關閉風速控制
- 3.不使用時加熱器不得空機加熱，以避免降低加熱器壽命和發生危險
- 4.安裝散熱器於試驗段時，應避免用力過度損壞試驗段
- 5.小心使用實驗器材，避免造成實驗器材損害

七.問題與討論

- 1.由散熱鰭片外觀是否可判斷散熱器的散熱效能?如何判定?
- 2.有效流道為何使用壓克力，而不使用玻璃之原因?

實驗數據紀錄和結果

風量頻率讀數				
電壓				
電流				
輸入功率				
散熱器形式	A:fin mm ²	B:fin mm ²	A:fin mm ²	B:fin mm ²
接觸面溫度				
熱抗阻值 R(C/W)				
上游溫度				
上游空氣密度				
下游溫度				
下游空氣密度				
上游壓力(mmHg)				
下游壓力(mmHg)				
上游風速 V1				
下游風速 V2				
單位時間通過的流 體質量 \dot{m}				
散熱量 Q (J)				

7. 蒸氣吸收式冷凍循環實驗

一、 實驗目的

利用水-氨混和液連續吸熱與散熱的熱力學過程，由水溫的變化量得知系統的冷凍能力與性能係數。

二、 實驗原理

吸收式系統由蒸發器、吸收器、發生器、冷凝器四個元件組成。本實驗使用兩種工作流體（氨為冷媒、水為吸收劑），冷媒的循環：冷凝器→蒸發器→吸收器→發生器→冷凝器，而吸收劑的循環剛好相反。

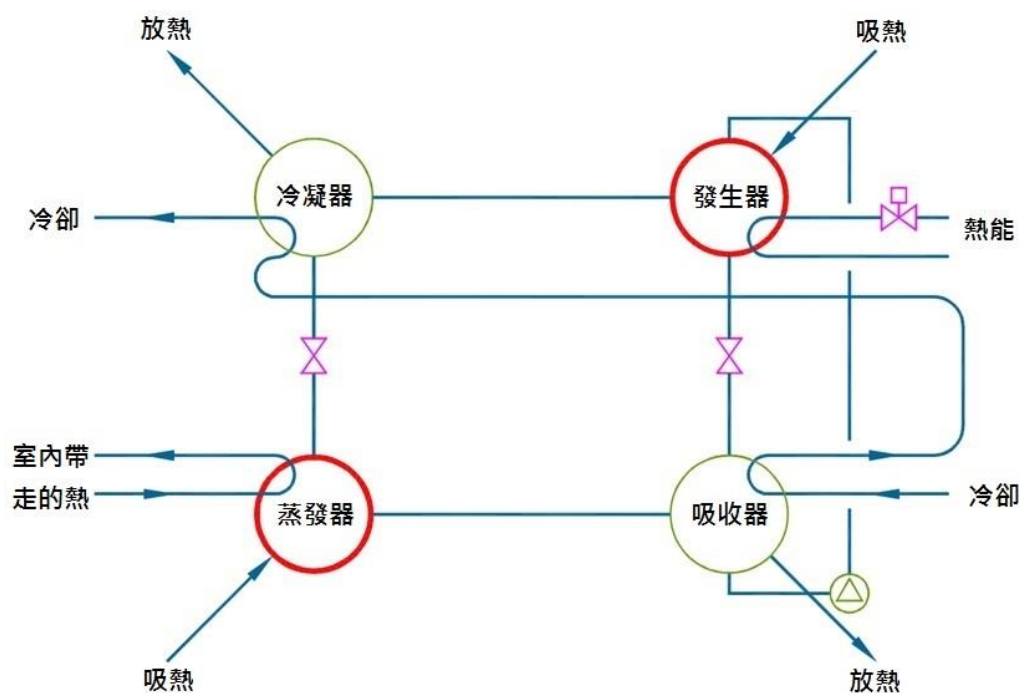


圖 7.1 吸收式冷凍循環簡圖

吸收式冷凍循環系統以熱源為驅動，熱源可由工業廢熱或太陽能取得，能解決電源不足的問題，又能充分利用不同能源的特性，達到節約能源的目的。本實驗儀器之加熱源可選擇使用瓦斯、太陽能及電源插座，水-氨混和

液加熱後，因為氨的沸點遠低於水，水-氨混和液加熱會先分離出高溫之氨氣。當氨氣充滿冷凝器時，冷凝器的散熱鰭片進行放熱，使氨氣凝結成液態氨，液態氨的功能如同冷媒。常溫下液態氨會吸收環境的熱量，所以液態氨到達蒸發器（冷凍室中較粗的黑色直管）吸收壓克力箱內部的熱量，並氣化成氨氣。在吸收器的氨氣逐漸的降溫，並與濃度較稀的水-氨混和液混和，水-氨混和液最後集中於集液器，再次進入加熱區達成循環。

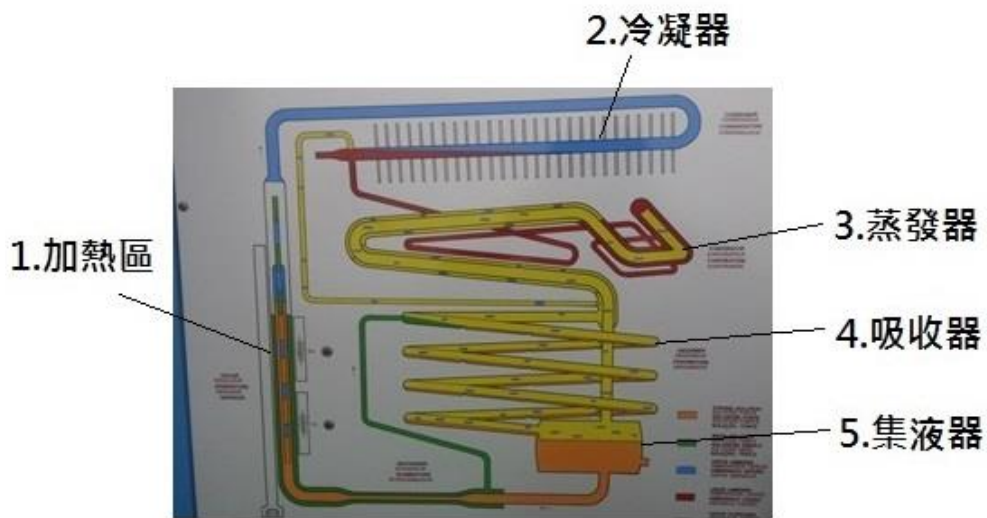


圖 7.2 蒸氣吸收式冷凍循環實驗模擬示意圖

三、儀器介紹

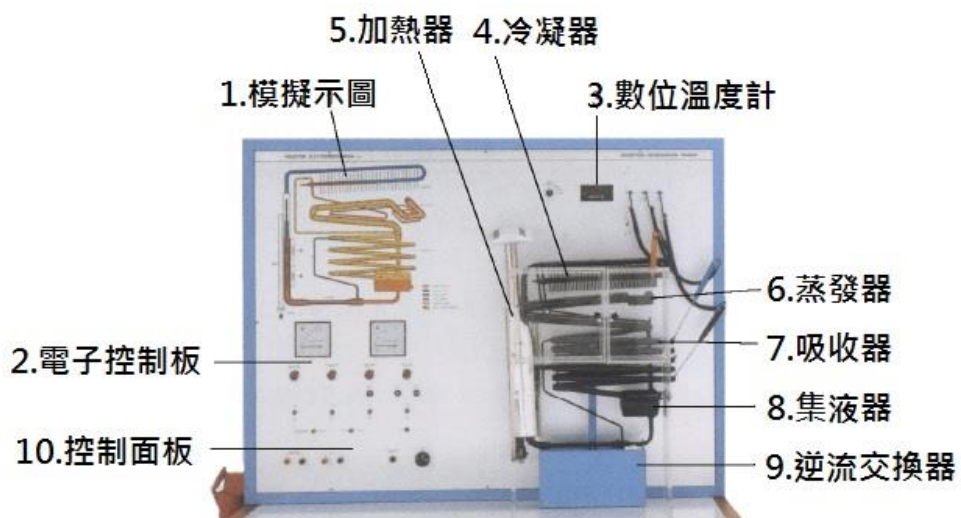


圖 7.3 蒸氣吸收式冷凍循環實驗儀器

由於水-氨混合物具有強烈的腐蝕性，需使用抗腐蝕材料，以及完全的密閉空間。因此訓練器不含觀測內部流體的功能、無法觀察流體的相轉換，或知道初始混合物的組成。不包含測量操作壓力的設備，系統無法像壓縮冷凍機進行液體的填入或排出。

設備的材質由高矽含量的矽鐵合金所構成，能避免腐蝕並提供更高的安全性，避免因高溫產生的內部過大壓力導致損害。因此，液壓迴路不使用含有鋁或銅的材質。

本設備必須置放於遠離熱源處，不可暴露於陽光下，以獲得理想的系統操作環境。假如吸收器的溫度太高，蒸汽不能被微弱的混合物所吸收，系統將停止產生致冷物。

正常情況下，致冷器使用 220V 交流電或 12V 直流電的電源供應器，此外也可以使用太陽能板來供電，電源供應器和太陽能板的特性將於下列段落描述。

冷凍循環、蒸發器所吸收的致冷物 (frigory/h)、系統效率，以及主要元件的熱平衡，可由系統溫度、 $P-1/T$ 與 NH_3 對數圖來決定。要決定上述數值，需進行下列操作：

1. 量測蒸發器、發電機、冷凝器與吸收器的溫度 (量測混合物 (strong/weak mixture) 溫度)。
2. 繪製冷凍循環於 $P-1/T$ 與 NH_3 對數圖，決定混何物 (strong/weak mixture) 的 NH_3 百分率。
3. 計算系統中循環、產生 $1kgNH_3$ 的強混合 (strong mixture) 的量值。
4. 使用訓練器的溫度讀數，決定經過發電機的強混合的每小時流率。
5. 計算熱平衡與效益。

訓練器的液壓迴路內部體積為固定，根據氣體定律，操作壓力將變動，並且

受冷卻水的溫度以及發電機操作溫度影響。在操作過程中，在測量點 No 7 注意避免超過 140°C，使得水無法蒸發，這將使內部壓力顯著增加，其發電機溫度運作超過 80°C 時，將產生致冷效果。

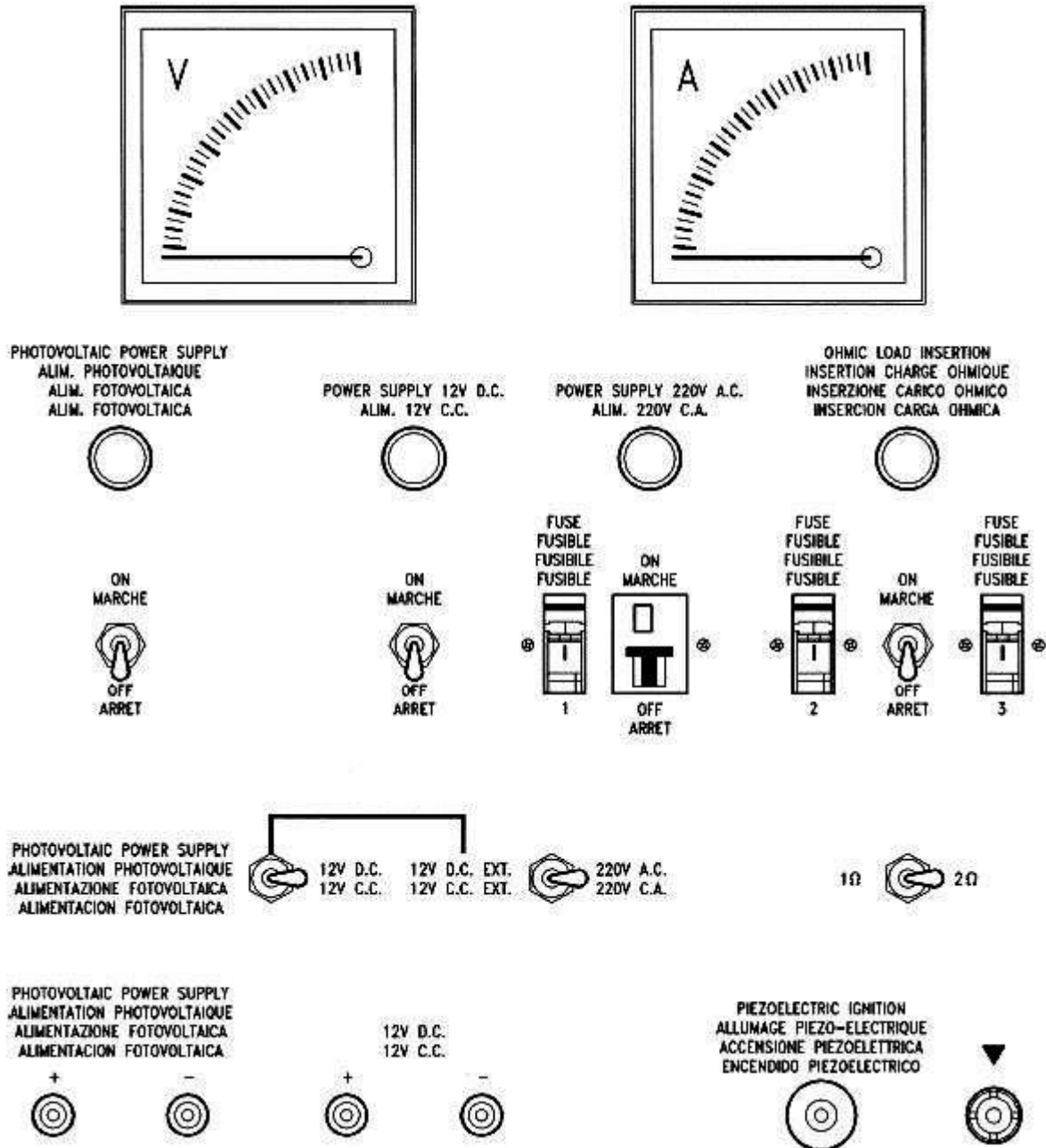


圖 7.4 控制面板與不同電源供應、光電電池的连接插槽

四、實驗步驟

1. 打開『蒸氣吸收式冷凍循環系統』之總電源開關。

2. 氨氣產生器加熱：
 - a. 打開瓦斯桶閥門(瓦斯筒在機台右下方櫃子中)。
 - b. 將瓦斯控制調扭下壓並轉至 min，此時下壓調扭(不要將手放開)，並連續按點火開關兩次以點燃瓦斯，點燃之後即可放手；若點不燃，可多試幾次。
3. 打開電熱器開關，選擇 2Ω 的加熱器，以低功率電熱器配合瓦斯進行加熱。
4. 當氨氣產生器 G 溫度到達 90°C 之後，即可關閉瓦斯加熱器，僅以電熱器加熱，等到氨氣產生器 G 溫度不再變動，且冷凍循環各點溫度值較為穩定之後，即可進行以下之實驗量測：
 - a. 系統冷凍能力之測定：以水量杯裝水(水溫及水的質量預先量好)，並以水量杯包圍繞蒸發器(冷凍室中較粗的黑色直管)。
 - b. 每隔 5 分鐘量取 No.1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 等各點溫度一次，加以記錄，並算出各點溫度之平均值。
 - c. 30 分鐘後取下水袋，倒入容器中量測出冷水之水溫。
5. 選擇 1Ω 的加熱器，以高功率進行加熱，並重覆步驟 4 之實驗。

五、 實驗數據

1. 將所得到的各點平均溫度填入表一之中，並計算出此一吸收式冷凍循環之性能係數。
2. 假設氨以飽合液體狀態進入蒸發器，而離開蒸發器時為飽和蒸氣狀態，請由其溫度以及壓力，利用圖 7.5 查出氨蒸發所吸收的潛熱($\Delta h_{5-6} = h_6 - h_5$)。並由表一所得到的冷凍能力 \dot{Q}_e ，推算出氨之質量流率 $\dot{m}_5 (\dot{Q}_e = \dot{m}_5 \times \Delta h_{5-6})$

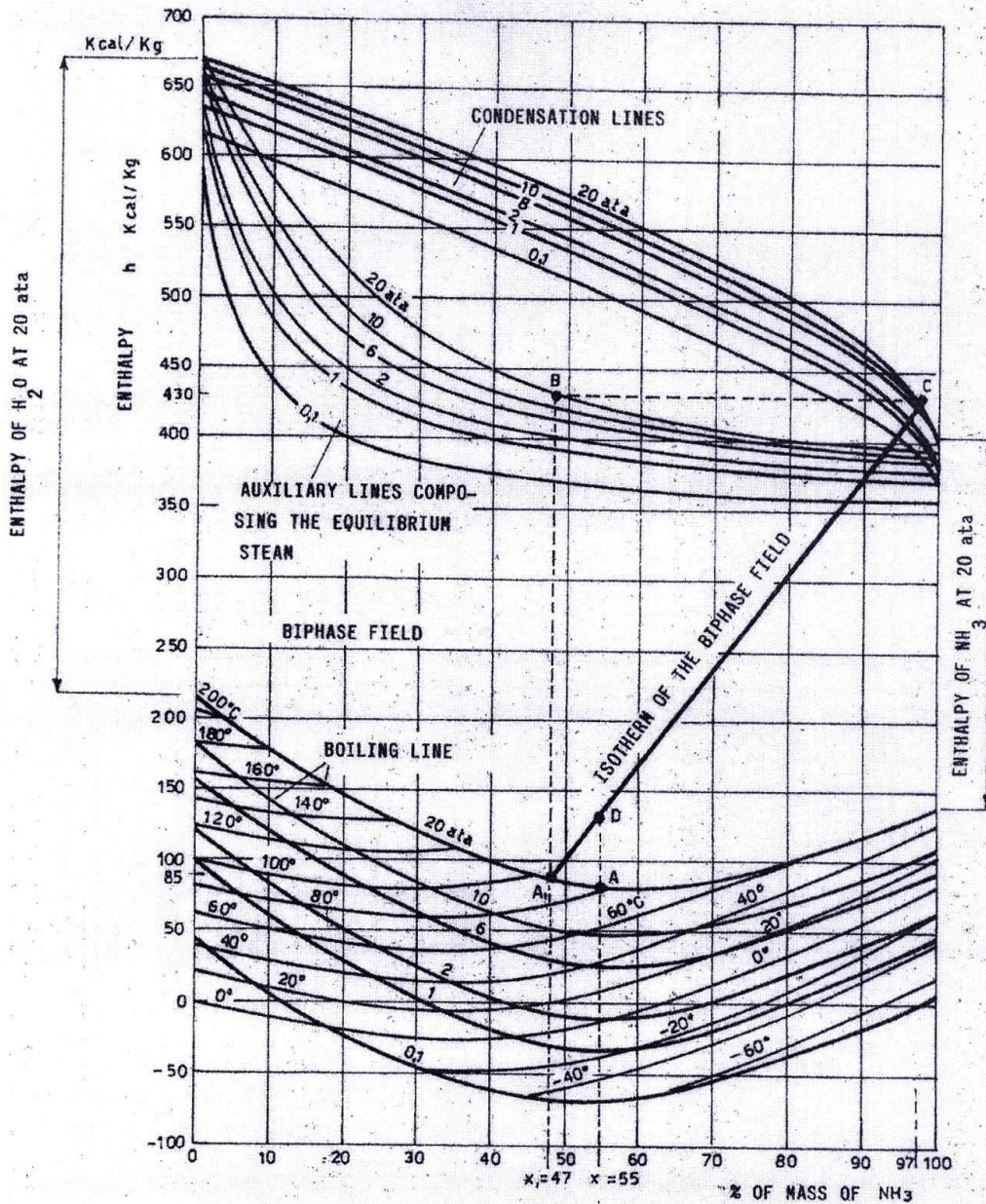


圖 7.5 Enthalpy-vs-percent composition diagram of ammonia-water mixtures

3. 利用 No.2、No.7 之溫度及壓力(10.2bar)，由圖五查出低濃度氨水中 NH_3 之質量分率(mass fraction) x_2 ，以及由產生器上方流出的氨蒸氣中， NH_3 之質量分率 x_7 。
4. 由純氨之質量流率 \dot{m}_5 推算產生器上方流出的氨蒸氣(其中含有少量的水

蒸氣)之質量流率 \dot{m}_7 (註： $\dot{m}_7 = \dot{m}_5/x_7$)。

5. 利用產生器處之質量守恆以及熱交換器 1 處之能量守恆關係，可以寫出下列三式：

a. $\dot{m}_1 x_1 = \dot{m}_2 x_2 + \dot{m}_5 \dots \dots \dots$ NH_3 之質量守恆

b. $\dot{m}_1 = \dot{m}_5 + \dot{m}_2 \dots \dots \dots$ 混合物之質量守恆

c. $\dot{m}_1 C_1(T_1 - T_4) = \dot{m}_2 C_2(T_2 - T_3) \dots \dots \dots$ 能量守恆

假設低濃度氨水與高濃度氨水之比熱相同($C_1=C_2$)，且流回產生器之高濃度氨水 No.1 為飽和狀態，請由 a、b、c 三個聯立方程式及圖五，利用試誤法 (trial and error) 推算出流回產生器之高濃度氨水的溫度 T_1 即質量流率 \dot{m}_1 。

六、 注意事項

為了保護使用者的安全與設備操作，使用電子設備時，必須遵循一些規則，特別是需遵守下列事項：

1. 大氣溫度： 0 ~ 45 °C
2. 相對溼度：20 ~ 80 %
3. 避免溫度或溼度的快速轉變
4. 電源纜線與系統本體，必須使用在或遠離沒有灰塵、濕氣、高溫、具有輻射發熱物體、產生強磁場物體及液體或腐蝕物質的場所。
5. 電源供應：110 AC
6. 避免同時以瓦斯和電能來加熱
7. 不用時請關閉瓦斯源，以防洩漏
8. 不論使用瓦斯或電能加熱，在 burner 出口之溫度，請勿超過 110°C，否則請關閉 burner
9. 通電時請將 FUSE 開至 1 位置才能有保護作用

實驗參數 \ 加熱條件	1. 低加熱功率 (2Ω)	2. 高加熱功率 (1Ω)
水量杯中水之總質量 (g)		
水溫下降度數 (°C)		
水所吸收之熱量 (Joul)= $\dot{m}C_p(T_1 - T_2)$		
水之吸熱時間 (Sec)		
系統之冷凍能力 \dot{Q}_e (W)		
電加熱器之電壓 (V)		
電加熱器之電流 (A)		
電加熱器之加熱功率 P (W)		
吸收式冷凍系統之 COP(%)= \dot{Q}_e / P		
No.1 之溫度 (°C)		
No.2 之溫度 (°C)		
No.3 之溫度 (°C)		
No.4 之溫度 (°C)		
No.5 之溫度 (°C)		
No.6 之溫度 (°C)		
No.7 之溫度 (°C)		
No.8 之溫度 (°C)		

TABLE A-15

Properties of air at 1 atm pressure

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Density, $\rho, \text{kg/m}^3$	Specific Heat, $C_p, \text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$	Thermal Conductivity, $k, \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$	Thermal Diffusivity, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Dynamic Viscosity, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Kinematic Viscosity, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Prandtl Number, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

TABLE A-9

Properties of saturated water

Temp., <i>T</i> °C	Saturation Pressure, <i>P</i> _{sat} kPa	Density, <i>ρ</i> kg/m ³		Enthalpy of Vapori- zation, <i>h</i> _g kJ/kg	Specific Heat, <i>C</i> _p J/kg · °C		Thermal Conductivity, <i>k</i> W/m · °C		Dynamic Viscosity, <i>μ</i> kg/m · s		Prandtl Number, <i>Pr</i>		Volume Expansion Coefficient, <i>β</i> 1/K
		Liquid	Vapor		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2501	4217	1854	0.561	0.0171	1.792 × 10 ⁻³	0.922 × 10 ⁻⁵	13.5	1.00	-0.068 × 10 ⁻³
5	0.8721	999.9	0.0068	2490	4205	1857	0.571	0.0173	1.519 × 10 ⁻³	0.934 × 10 ⁻⁵	11.2	1.00	0.015 × 10 ⁻³
10	1.2276	999.7	0.0094	2478	4194	1862	0.580	0.0176	1.307 × 10 ⁻³	0.946 × 10 ⁻⁵	9.45	1.00	0.733 × 10 ⁻³
15	1.7051	999.1	0.0128	2466	4186	1863	0.589	0.0179	1.138 × 10 ⁻³	0.959 × 10 ⁻⁵	8.09	1.00	0.138 × 10 ⁻³
20	2.339	998.0	0.0173	2454	4182	1867	0.598	0.0182	1.002 × 10 ⁻³	0.973 × 10 ⁻⁵	7.01	1.00	0.195 × 10 ⁻³
25	3.169	997.0	0.0231	2442	4180	1870	0.607	0.0186	0.891 × 10 ⁻³	0.987 × 10 ⁻⁵	6.14	1.00	0.247 × 10 ⁻³
30	4.246	996.0	0.0304	2431	4178	1875	0.615	0.0189	0.798 × 10 ⁻³	1.001 × 10 ⁻⁵	5.42	1.00	0.294 × 10 ⁻³
35	5.628	994.0	0.0397	2419	4178	1880	0.623	0.0192	0.720 × 10 ⁻³	1.016 × 10 ⁻⁵	4.83	1.00	0.337 × 10 ⁻³
40	7.384	992.1	0.0512	2407	4179	1885	0.631	0.0196	0.653 × 10 ⁻³	1.031 × 10 ⁻⁵	4.32	1.00	0.377 × 10 ⁻³
45	9.593	990.1	0.0655	2395	4180	1892	0.637	0.0200	0.596 × 10 ⁻³	1.046 × 10 ⁻⁵	3.91	1.00	0.415 × 10 ⁻³
50	12.35	988.1	0.0831	2383	4181	1900	0.644	0.0204	0.547 × 10 ⁻³	1.062 × 10 ⁻⁵	3.55	1.00	0.451 × 10 ⁻³
55	15.76	985.2	0.1045	2371	4183	1908	0.649	0.0208	0.504 × 10 ⁻³	1.077 × 10 ⁻⁵	3.25	1.00	0.484 × 10 ⁻³
60	19.94	983.3	0.1304	2359	4185	1916	0.654	0.0212	0.467 × 10 ⁻³	1.093 × 10 ⁻⁵	2.99	1.00	0.517 × 10 ⁻³
65	25.03	980.4	0.1614	2346	4187	1926	0.659	0.0216	0.433 × 10 ⁻³	1.110 × 10 ⁻⁵	2.75	1.00	0.548 × 10 ⁻³
70	31.19	977.5	0.1983	2334	4190	1936	0.663	0.0221	0.404 × 10 ⁻³	1.126 × 10 ⁻⁵	2.55	1.00	0.578 × 10 ⁻³
75	38.58	974.7	0.2421	2321	4193	1948	0.667	0.0225	0.378 × 10 ⁻³	1.142 × 10 ⁻⁵	2.38	1.00	0.607 × 10 ⁻³
80	47.39	971.8	0.2935	2309	4197	1962	0.670	0.0230	0.355 × 10 ⁻³	1.159 × 10 ⁻⁵	2.22	1.00	0.653 × 10 ⁻³
85	57.83	968.1	0.3536	2296	4201	1977	0.673	0.0235	0.333 × 10 ⁻³	1.176 × 10 ⁻⁵	2.08	1.00	0.670 × 10 ⁻³
90	70.14	965.3	0.4235	2283	4206	1993	0.675	0.0240	0.315 × 10 ⁻³	1.193 × 10 ⁻⁵	1.96	1.00	0.702 × 10 ⁻³
95	84.55	961.5	0.5045	2270	4212	2010	0.677	0.0246	0.297 × 10 ⁻³	1.210 × 10 ⁻⁵	1.85	1.00	0.716 × 10 ⁻³
100	101.33	957.9	0.5978	2257	4217	2029	0.679	0.0251	0.282 × 10 ⁻³	1.227 × 10 ⁻⁵	1.75	1.00	0.750 × 10 ⁻³
110	143.27	950.6	0.8263	2230	4229	2071	0.682	0.0262	0.255 × 10 ⁻³	1.261 × 10 ⁻⁵	1.58	1.00	0.798 × 10 ⁻³
120	198.53	943.4	1.121	2203	4244	2120	0.683	0.0275	0.232 × 10 ⁻³	1.296 × 10 ⁻⁵	1.44	1.00	0.858 × 10 ⁻³
130	270.1	934.6	1.496	2174	4263	2177	0.684	0.0288	0.213 × 10 ⁻³	1.330 × 10 ⁻⁵	1.33	1.01	0.913 × 10 ⁻³
140	361.3	921.7	1.965	2145	4286	2244	0.683	0.0301	0.197 × 10 ⁻³	1.365 × 10 ⁻⁵	1.24	1.02	0.970 × 10 ⁻³
150	475.8	916.6	2.546	2114	4311	2314	0.682	0.0316	0.183 × 10 ⁻³	1.399 × 10 ⁻⁵	1.16	1.02	1.025 × 10 ⁻³
160	617.8	907.4	3.256	2083	4340	2420	0.680	0.0331	0.170 × 10 ⁻³	1.434 × 10 ⁻⁵	1.09	1.05	1.145 × 10 ⁻³
170	791.7	897.7	4.119	2050	4370	2490	0.677	0.0347	0.160 × 10 ⁻³	1.468 × 10 ⁻⁵	1.03	1.05	1.178 × 10 ⁻³
180	1002.1	887.3	5.153	2015	4410	2590	0.673	0.0364	0.150 × 10 ⁻³	1.502 × 10 ⁻⁵	0.983	1.07	1.210 × 10 ⁻³
190	1254.4	876.4	6.388	1979	4460	2710	0.669	0.0382	0.142 × 10 ⁻³	1.537 × 10 ⁻⁵	0.947	1.09	1.280 × 10 ⁻³
200	1553.8	864.3	7.852	1941	4500	2840	0.663	0.0401	0.134 × 10 ⁻³	1.571 × 10 ⁻⁵	0.910	1.11	1.350 × 10 ⁻³
220	2318	840.3	11.60	1859	4610	3110	0.650	0.0442	0.122 × 10 ⁻³	1.641 × 10 ⁻⁵	0.865	1.15	1.520 × 10 ⁻³
240	3344	813.7	16.73	1767	4760	3520	0.632	0.0487	0.111 × 10 ⁻³	1.712 × 10 ⁻⁵	0.836	1.24	1.720 × 10 ⁻³
260	4688	783.7	23.69	1663	4970	4070	0.609	0.0540	0.102 × 10 ⁻³	1.788 × 10 ⁻⁵	0.832	1.35	2.000 × 10 ⁻³
280	6412	750.8	33.15	1544	5280	4835	0.581	0.0605	0.094 × 10 ⁻³	1.870 × 10 ⁻⁵	0.854	1.49	2.380 × 10 ⁻³
300	8581	713.8	46.15	1405	5750	5980	0.548	0.0695	0.086 × 10 ⁻³	1.965 × 10 ⁻⁵	0.902	1.69	2.950 × 10 ⁻³
320	11,274	667.1	64.57	1239	6540	7900	0.509	0.0836	0.078 × 10 ⁻³	2.084 × 10 ⁻⁵	1.00	1.97	—
340	14,586	610.5	92.62	1028	8240	11,870	0.469	0.110	0.070 × 10 ⁻³	2.255 × 10 ⁻⁵	1.23	2.43	—
360	18,651	528.3	144.0	720	14,690	25,800	0.427	0.178	0.060 × 10 ⁻³	2.571 × 10 ⁻⁵	2.06	3.73	—
374.14	22,090	317.0	317.0	0	∞	∞	∞	∞	0.043 × 10 ⁻³	4.313 × 10 ⁻⁵	—	—	—

Note 1: Kinematic viscosity ν and thermal diffusivity α can be calculated from their definitions, $\nu = \mu/\rho$ and $\alpha = k/\rho C_p = \nu/Pr$. The temperatures 0.01°C, 100°C, and 374.14°C are the triple-, boiling-, and critical-point temperatures of water, respectively. The properties listed above (except the vapor density) can