

熱電式冷卻系統之性能改善及應用研究

王輔仁 許守平 林國堅 吳志雄 陳志明

國立勤益技術學院 冷凍空調系

摘要

熱電式冷卻系統因具有構造簡單且尺寸小、操作溫度範圍廣、不使用冷媒及壓縮機、低噪音、低耗電功率和可靠性高等特點，可以實際應用在有重量與體積限制之小空間且有極高排熱量的領域，且更具有可攜帶性及環保(不使用冷媒)之獨特優點。本文首先將應用商業化之電腦模擬分析程式，對熱電晶片進行熱傳模擬分析，並且探討影響系統性能之各種重要參數，作為系統改善分析之重要參考。隨後，針對目前既有多種熱電冷卻之商業化機組進行性能測試與量測，藉由實驗所得資料，尋求性能改善設計之可行方式，並著手製作不同應用功能之熱電冷卻系統，作為系統性能改善比較之重要依據與驗證理論模擬之參考。由模擬與實驗結果可知，熱電式冷卻系統之性能除與熱電晶片本身之性能有關外，也嚴重地受熱端散熱效果及冷熱端之隔離保溫效果影響，而據此所開發之熱電式可攜式血液檢體冷卻器及溫控系统，不僅對熱電冷卻系統之性能有顯著提升外，在實務上亦極俱應用之潛力及價值。

關鍵詞：熱電模組、性能改善

一、前言

隨工業技術的精進，各式各樣的電子產品已逐漸朝向輕薄、高功能、低耗電量和高頻化之趨勢發展。相對地，其裝置及元件的發熱密度(單位體積所散發出之熱量)也隨之增加，使得電子產品過熱問題日益嚴重，造成產品可靠度降低及壽命減少，故對新一代的電子設備散熱而言，所需要的是具備有高熱傳導率、低膨脹係數與低密度的熱管理(Thermal management)材料。熱電模組(Thermoelectric module)是利用在電子半導體與其他相關的工業所發展出來的微細精密製造技術所製成，具有構造簡單且尺寸小，操作溫度範圍廣，低功率和可靠性高之種種特點，可實際應用在有重量與體積限制之空間且有極高排熱量的領域，更具有可攜式(Portable)之獨特優點。

一般熱電晶片的研究焦點，大都集中於熱電晶片材料的制冷效果，亦即優值係數(Figure of merit, Z)，而較少對既有的熱電冷卻系統之性能進行改善，而本研究之目標是先透過電腦模擬軟體瞭解熱電晶片之性能參數，再針對目前一些既有熱電晶片進行性能測試，並對熱電冷卻系統進行性能改善設計。此外，對於目前一些既有的熱電產品，亦進行量測及設計改善，希望藉由在實驗中所獲得的熱電晶片性能測試數據結果，對目前既有的熱電產品進行性能分析，先找出其造成效能不高之原因，再尋求熱電產品的性能最佳化狀態之改善設計，並將製作不同熱電冷卻應用產

品並評估其應用之可行性。

熱電模組是利用皮爾特效應及電半導體所發展出來的微細精密製造技術所製成,由於其構造簡單且尺寸小,操作溫度範圍廣,故極適合運用於電子元件冷卻應用〔1〕。熱電材料的進步,對熱電式冷卻系統之性能提昇有決定性的影響,Nolas〔2〕和 Fleurial〔3〕分別就對熱電材料的製程進行了相當多的研究,希望藉由各種不同材質組合而成的熱電模組,來達成改善熱電晶片性能之目的,但其成效卻相當有限,主要是受半導體材料先天上的限制〔4〕。

熱電材料之原理探討在文獻〔5,13,14〕中有詳細論述,然而,國內之研究文獻則較少見,文獻〔6〕,將熱電晶片應用於除濕櫃,並且探討冷端散熱片冷能熱傳現象對熱電系統性能之影響有深入探討,此外,Huang〔7〕等人則利用了外部電路控制的方式,設計出了一套精密且控制良好之熱電式冷卻測試系統,將可以用來量測熱電式系統之性能係數(Coefficient of Performance,COP)。而本文獻〔8〕中也廣泛地描述了目前中國大陸在半導體熱電晶片之發展及各種相關應用技術,極俱參考價值。

在熱電冷卻系統模擬部份,Min[9]等人建立了熱電模組之改善理論模式(Improved theoretical model)來探討熱電元件對系統COP及冷卻能力之影響,發現接觸熱阻(contact resistance)將是一重要之決定因素。Vian[10]則利用了熱網路(Thermal network)類比之電腦模式來模擬熱電除溼機(dehumidifier),隨後並以製作熱電除溼機實驗來驗證理論之結果,應證熱電模組在除溼機方面應用之潛力甚大。

在熱電應用方面,Watanabe[17]詳述了熱電冷卻應用在日本民生工業之種類與市場需求,並說明在手提式野餐箱(Picnic box)、冰箱及除溼機之應用特點甚多。此外,熱電式冷卻系統目前也已廣泛的應用於生物科技及醫療科學方面,在日本〔12〕已有甚多商業化之醫療用熱電冷卻商品。而在熱電冰箱的應用上 Sofrata[11]則詳述了不同的散熱系統,包括自然對流及強制對流,單風扇及多風扇系統對熱電冷凍之影響,並藉此改善熱電冷凍系統之整體性能。

二、熱電理論分析

(一)、熱電現象

在物理現象中,導體或半導體中的電荷載子除了能夠傳遞電荷之外也可以傳遞熱,而熱能和電能之間可以互相轉換之效應稱之為熱電現象(Thermoelectric Phenomenon)。主要的熱電效應有以下兩種,詳述如后:

(1) 席貝克效應 (Seebeck Effect)

1821年德國科學家湯瑪斯·席貝克(Thomas J. Seebeck)發現當兩種不同性質的金屬連接在一起而形成閉合迴路(closed loop),當兩接點之間溫度分佈不均勻時,則在此迴路中將產生感應電動勢,而使兩接點之間產生電位差,此變化就稱為熱電效應(Thermoelectric effect)或席貝克效應(Seebeck effect)。換言之,席貝克效應就是將熱能轉換成電能〔13-14〕,圖1為Seebeck效應示意圖。

(2) 皮爾特效應 (Peltier effect)

1834 年法國科學家皮爾特發現，電流通過兩種不同的金屬導線之接合點時，在接合點處會因電流流動方向之不同而產生放熱或吸熱之現象，謂之為皮爾特效應。圖 2 所示為 Peltier 效應示意圖，因 N 型半導體材料具有多餘電子，故有負溫差電動勢；P 型半導體材料因電子不足，故有正溫差電動勢。當電流從 P 型半導體穿過節點至 N 型半導體時，N 型半導體中的自由電子則通過節點到達 P 型半導體，當自由電子通過節點時將吸收能量而使溫度降低。總而言之，皮爾特效應就是將電能轉換成熱能。

(二)、半導體熱電材料

由於熱電效應是利用熱電材料將溫度差轉換成電位差，所以熱電材料的種類對熱電效應有直接之影響 [1-5]。為了得到理想的熱電效應，熱電冷卻用的半導體材料須具備以下一些特性：

1. 具有較高優值係數(Figure of merit, Z)，使熱電冷卻器獲較大制冷係數。

而優值係數 Z 值之定義如下：

$$Z = \frac{a^2}{kR} = \frac{a^2}{k} \cdot \frac{1}{R}$$

其中， Z ：優值係數(10^{-3} /K) a ：溫差電動率(μ V/K)

s ：電導係數($1/\Omega \cdot \text{cm}$) R ：電阻率($\Omega \cdot \text{cm}$)

2. 具有耐熱、耐衝擊、耐壓的機械性能。
3. 具有一定的可焊性，可實現元件之間的電路連結。

優值係數 Z 值較高的熱電材料會有較好之熱電效應，會產生較大的電位差，相對地製冷效率亦提高。而熱電材料的優值係數 Z ，通常是由溫差電動率係數(a)、電導係數(s)、熱傳導係數(k)決定。所以，我們對於熱電材料的特性要求可得到下列結論：

1. 為產生大制冷效能，溫差電動率(a)要相當高。
2. 電阻率(R)要低，否則電阻產生的熱，可能超過製冷效能。
3. 要維持冷熱端之間有一個大的溫差，導熱係數(k)要低。

(三)、熱電制冷的相關計算與公式 [8]

- (1) 工作電流

$$I = \frac{(V - a\Delta T)}{R} \quad (1)$$

- (2) 工作電壓

$$V = IR + a\Delta T \quad (2)$$

- (3) 消耗功率

$$W = IV = I^2 R + aI\Delta T \quad (3)$$

- (4) 冷卻能力

$$Q_0 = aIT_c - \frac{I^2 R}{2} - k\Delta T \quad (4)$$

- (5) 性能係數

$$COP = \frac{Q_0}{W} \quad (5)$$

(6) 散熱量

$$Q = Q_0 + W = aIT_H + \frac{I^2 R}{2} - k\Delta T \quad (6)$$

其中, COP : 性能係數

T_C : 冷端的絕對溫度(K)

T_H : 熱端的絕對溫度(K)

a : 溫差電動勢(μ V/k)

k : 熱傳導係數(W/cm*K)

(四)、熱電晶片之優缺點與實際運用

熱電制冷具有體積小、重量輕(適用於較小空間)、高可靠性、溫度響應好、制冷速度快的優點,尤其制冷晶片本身不需運動元件,無振動噪音的問題。再加上目前國人對環保意識的重視,制冷晶片不需使用冷媒制冷,對環境無任何污染的特點,更是受到肯定。

此外,熱電晶片可使用於局部冷卻和精密的溫度控制,對於某些需要精密作業的工作環境來說是非常合適的,且熱電晶片的操作相當方便,尤其具有可攜帶性之獨特優點,且只需要提供直流電壓就可動作,更可以簡單藉由改變電流方向,而產生制冷或加熱的效果,可以說是一種多功能的元件。當然制冷晶片亦有其缺點存在,因為其制冷效率不佳(COP值約介於0.1和0.6之間),且冷凍能力小,無法應用在大型空調場合,只能侷限於小型的空間。

在應用方面,因熱電晶片具有前述之尺寸小,操作溫度範圍廣,低功率和可靠性高等優點。所以,目前熱電晶片已在國防、工業、醫療、商業、日常生活等領域中得到廣泛應用。表1所列皆為熱電晶片在現行市面上之應用〔8, 15〕。

三、熱電模組電腦模擬軟體介紹

本文使用的是 MELCOR 公司的熱電晶片分析軟體, TDS(Thermoelectric Design Selection) 軟體, 此電腦軟體為知名熱電模組製造商 MELCOR 公司所研發〔16〕, 它可以提供不同型式熱負荷的估算值, 並藉由冷卻空間尺寸、保溫材料、環境溫度及冷卻溫要求度等簡單輸入, 即可選取熱電晶片規格, 並提供該熱電晶片的規格及性能曲線圖〔16〕。

圖3為熱電冷卻器電腦模擬軟體之輸入表單, 此電腦模擬軟體的輸入步驟包括:

(1)輸入冷卻需求(Cooling Requirements)

(2)輸入操作點(Select Operation Point)

(3)熱端散熱至環境溫度之熱阻(Sink to Ambient Thermal Resistance) 估算熱端至環境間之熱阻。

經由上述步驟(1) (3)之輸入, 電腦程式將提供多款熱電晶片供使用者選用, 並將提供熱電晶片選取後詳細之設計圖面及重要參數相關數據(如電壓 電流 輸入功率及對冷端溫度的影響)。

圖4為熱負荷工作表單(Power Dissipation Worksheet), 此工作表單主要輸入數值如下:

(1)選擇冷卻負荷的型式(Select Configuration)

此軟體提供四種不同的冷卻負荷選擇型式讓設計者使用，包括：

1. 空間冷卻無發熱負載 (Volume cooling with passive load)。
2. 空間冷卻且有發熱負載 (Volume cooling with active load)。
3. 裝置冷卻有保溫 (Device cooling with insulation)。
4. 裝置冷卻無保溫 (Device cooling without insulation)。

(2)輸入冷卻空間之大小(Container Dimensions)

(3)輸入空間冷卻要求(Cooling Requirements)

包括設計之環境溫度(T_a)、箱內溫度(T_i)及箱內發熱量(Active Load)。

(4)輸入箱體之保溫性質

包括保溫材料之厚度(t)及保溫材料的熱傳導係數(Thermal Conductivity)等。

(5) 計算總熱負荷需求(Requirement for Heat from Cold Side)

經上述基本操作輸入及選取設計後，可進入熱電冷卻器分析(Thermoelectric Cooler Analysis)之工作表單，重要熱電設計之參數及程式模擬結果，皆可在此作簡要之輸出，包括熱電晶片的冷端溫度(T_c)、熱端溫度(T_h)、冷卻負載(Q_c)、系統之 COP、操作最高之 COP 及總散熱量(Q_h)等重要數據，如圖 5 所示。

四、熱電性能測試實驗與恆溫器開發

進行熱電冷卻系統性能改善設計之前，須先了解熱電晶片本身的性能，再利用實驗測試所得之結果，尋求性能的最佳化改善。為了有效控制環境溫濕度中，增加實驗準確性。我們先行製作了保溫性能測試箱，以期能使環境溫度維持在固定的溫溼度，圖 6 為熱電晶片測試之示意圖。

首先，先將熱電晶片冷端置於性能測試箱內，熱端與散熱片連接，散熱片外部加裝風扇幫助熱端散熱。為了增加熱電晶片熱端與散熱片的結合度和降低接觸熱阻(Contact esistance)，在兩者之間塗上散熱膏。然後，用一台直流電源供應器(DC power supply)針對熱電晶片輸入各種不同的電壓。此外，在冷端表面亦以 0.5K 之熱電阻(Thermal Resistance) 貼於表面，提供可調整之負載，再使用一台直流電源供應器通入直流電流，藉由調整直流電流來調整負載，做為箱內提供熱負載模擬，由於冷端之箱體以 PE 保溫材絕熱，可假設箱體內之熱負荷不受外界溫度之影響，當箱體溫度達穩定時，由能量守恆知，晶片產生之冷卻效果與電熱絲之發熱量相同，再由熱電晶片冷端及熱端上的熱電阻量測出溫度的變化。

為瞭解熱端散熱效果對熱電晶片冷卻性能之影響，實驗中使用不同的散熱片(小散熱片為 Fin A、大散熱片為 Fin B)及風扇(小風扇為 Fan A、大風扇為 Fan B)。在利用測試箱量測了熱電晶片的性能後，圖 7(a)熱電晶片熱端之性能曲線圖，而圖 7(b)為熱電晶片冷端之性能曲線圖。由圖 7(a)及圖 7(b)可以得知當熱電晶片熱端的散熱能力越強時，熱電晶片的制冷能力就會越好。但由實驗結果中可知熱電晶片的制冷能力有一定的限制範圍，當輸入的電壓越大時相對冷端溫度也越低，但降到某一溫度時，其溫度不但不會再降低，反而會有升高的趨勢，乃此由於熱端未加風扇無法散熱所致。由這兩個性能曲線圖中，可知熱電晶片制冷能力與熱端的散熱能力息息相關的。透過對熱電晶片的性能測試分析，可以有效利用實驗結果進行熱電冷卻系統性能改善。

血液在人體中，是不可缺少的物質。而血液的品質，更是與血液保存的溫度有密切的關係 [12]。因此，透過開發熱電式冷卻之血液恆溫器，並搭配恆溫控制電路，使血液之溫度保持冷卻在恆溫，有效地維持血液品質。圖 8 為熱電冷卻之血液恆溫器示意圖，是由熱電晶片、散熱片、散熱風扇與鋁質試管插槽所構成。熱電晶片通以直流電壓，一段時間後，把血液檢體試管置入鋁質插孔中，即可將溫度降至適合血液保存之溫度；而熱電晶片熱端所產生的熱量，則經由散熱片及風扇把熱量移除。如圖 9 所示，可以知道試管插槽內之水，從水溫 24.8 降至 5 需要約 50 分鐘的時間。其中，為了瞭解不同試管插槽內之冷卻溫度均勻性，使用了 2 點式溫度紀錄器；由於 sensor1 與 sensor2 擺置於不同試管插孔之量測溫度極為相近，可知溫度均勻性極佳。

由於熱電式冷卻系統之制冷效率並不高，而且對於某些製程冷卻之溫度(如前述之電氣控制箱或血液恆溫器)之控制極為重要，因此溫度控制系統電路之設計不僅可以滿足環境控制需求，更可以達到節省電能之目的。因此，針對熱電式冷卻系統之溫度控制原理作為基礎製作一溫度控制電路，如圖 10 的電路圖所示，使用熱敏電阻感測溫度，並將溫度訊號轉成電壓訊號，將訊號送到電路圖之中的兩個運算放大器 (Operation Amplifier, OPA)，搭配兩個可變電阻 R_1 、 R_2 使用。將電路圖中的 OPA 比較其輸入的電壓訊號 V_1 、 V_2 和熱敏電阻所感測的電壓訊號用 OPA 做比較，OPA 就會依輸入電壓訊號的改變而輸出高電位 (High) 和低電位 (Low)。使用兩組 OPA 來控制，是為了可以做出溫度上下限的控制，而兩組 OPA 所輸出的 High 和 Low 再送到由 NAND 邏輯閘 (Logic gate) 所組成的磁滯正反器，用來延遲系統對溫度的變化。並使用繼電器作為電路與系統的橋樑，使系統可隨電路開與關。

五、結論

本文應用商業化之電腦模擬分析程式，模擬熱電冷卻系統負荷需求，並對熱電晶片進行性能模擬分析，經由模擬與實驗結果可知，熱電式冷卻系統之性能除了與熱電晶片本身之性能有關外，也嚴重地受熱端散熱效果及冷熱端之隔離保溫效果影響，尤其以前者影響最大。而針對熱電式血液檢體冷卻器系統進行開發之部分，已能有效縮短血液檢體冷卻器到達冷卻溫度之時間，並製作出恆溫電路控制系統，有效控制熱電式血液檢體冷卻器之溫度，並達到恆溫及節能之目標。

六、參考文獻

- [1] R.E. Simons and R.C. Chu, Application of Thermoelectric Cooling to Electronic Equipment: A Review and Analysis, Sixteenth IEEE SEMI - THERM Symposium, 2000, pp. 1 - 9.
- [2] G.S. Nolas, G.A. Slack, J.L. Cohn and S.B. Schujman, The Next Generation of Thermoelectric Materials, Proceeding of the 17th International Conference on Thermoelectrics, 1998, pp. 294 - 297.
- [3] J.P. Fleurial, A. Borshchevsky, T. Caillat, and R. Ewell, New Materials and Devices for Thermoelectric Application, Applied Thermal Engineering, Vol.22, 2002, pp. 407-422.
- [4] D.D.L Chung, Composites Get Smart, Material Today, Vol. 5, 2002, pp. 30 - 35.

- [5] J.G. Stockholm, Current State of Peliter Cooling , Proceeding of the 16th International Conference On Thermoelectrics , 1997, pp. 37 - 46.
- [6] 陳思源 , 熱電除濕之冷凝分析與性能改善 , 國立成功大學 , 機械工程系碩士論文 , 1999 .
- [7] B.J. Huang, C.J. Chin, and C.L. Duang, A Design of Thermoelectric cooler, International Journal of Refrigeration, Vol.23, 2000, pp. 208 - 218 .
- [8] 徐? 勝 , 半導體制冷與應用技術 , 上海交通大學出版社 , 1992
- [9] G.Min and D.M.Rowe, Improve Model for Calculating the Coefficient of Performance of a Politer Module, Energy Conversion and Management, Vol.41,2000, pp. 163 - 171.
- [10] J.G. Vian, D.Astrain and M.Dominguez, Numerical Modelling and a Design of a Thermoelectric Dehumidifier, Applied Thermal Engineering, Vol.22, 2002,pp. 407 - 422.
- [11] H.Sofrata, Heat Rejection Alternatives for Thermoelectric Refrigerators, Engergy Conversion and Management, Vol. 37,1996, pp. 269 - 280.
- [12] 琉球大學醫學部, [http : //www.hosp.u-ryukyu.ac.jp](http://www.hosp.u-ryukyu.ac.jp)
- [13] H.J. Goldsmid, Electronic Refrigeration, Pion Limited, 1986.
- [14] GS. Nolas, J. Sharp and H.J. Goldsmid, Thermoelectrics - Basic Principles and New Materials Development, Spring-Verlag, 2001.
- [15] <http://business.net.tw/tande/>
- [16] Handbook of Thermoelectrics, MELCOR Inc.,2001
- [17] W. Watanabe, Thermoelectric Strategy for Consumer Application, Proceeding of the 17th International Conference on Thermoelectrics, 1998, pp. 486-490

七、圖表

表 1 熱電晶片在現行市面上之應用

應用領域	產品應用
軍事航空方面	衛星、夜視裝備冷卻、導彈制導、光纖通訊、人員衣服冷卻、航空電子設備、環境分析電子元件恒? 等
醫療生化方面	露點儀、冰點儀、低溫毛毯、手提式藥櫃、血液分析儀(Blood Analyzer)、冷熱敷療器(Therapy Water Pad) 等
電子及光電方面	電腦CPU、雷射發光頭(Laser Diode Cooler)、微處理器冷? 等
科學實驗方面	自動調溫器、雷射冷卻裝置、切片機、遠程溫度控制器 等
工業量測方面	熱量計、分光光度計、精密溫度控制、? 外線校準源、電腦微處理機和參數控制 等
民生消費方面	冰水機、冷飲杯、小功率發電機、除濕機(Dehumidifier)、手提式冰箱、機車安全帽冷卻器、配電箱冷卻器 等

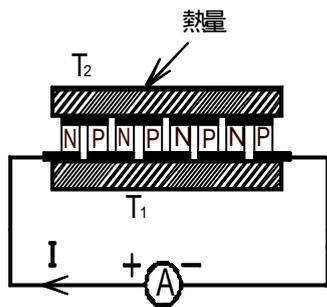


圖 1 Seebeck 效應示意圖

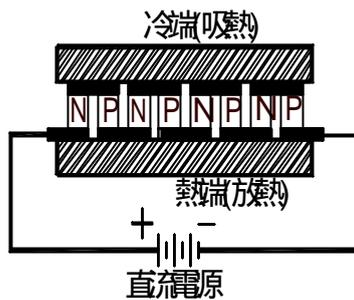


圖 2 Peltier 效應示意圖

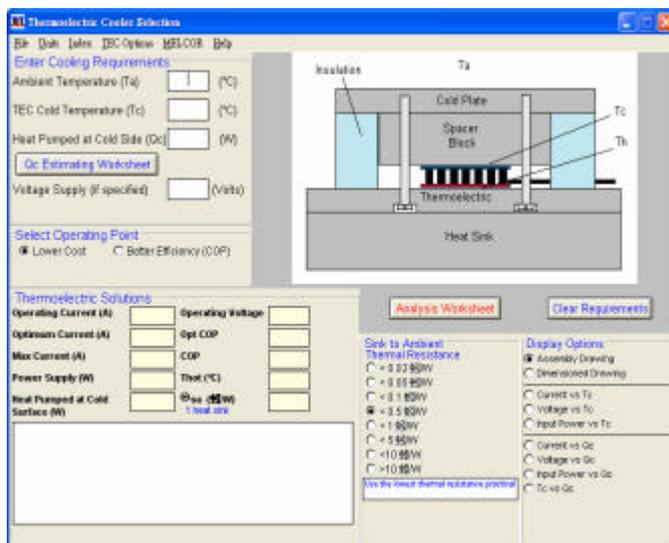


圖 3 熱電冷卻器電腦模擬軟體之輸入表單

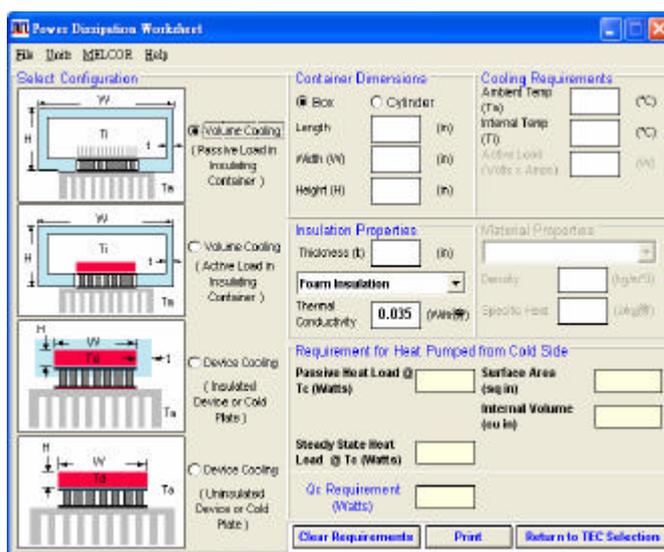


圖 4 熱電電腦模擬軟體之輸入表單

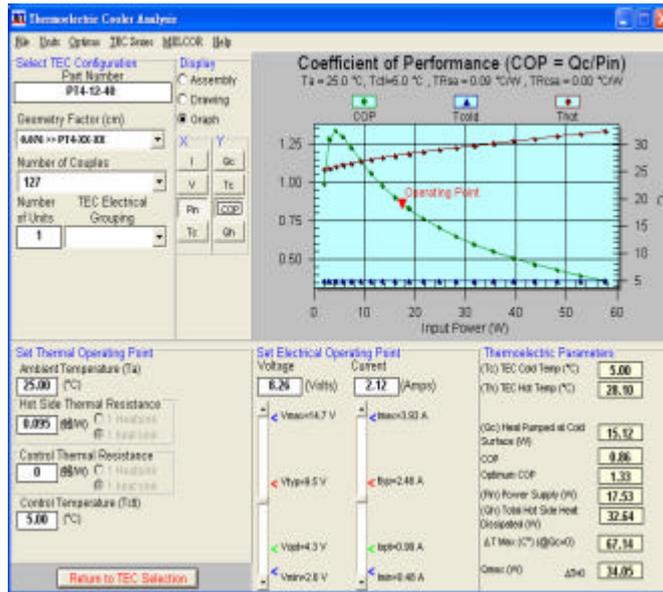


圖 5 熱電冷卻器分析之工作表單

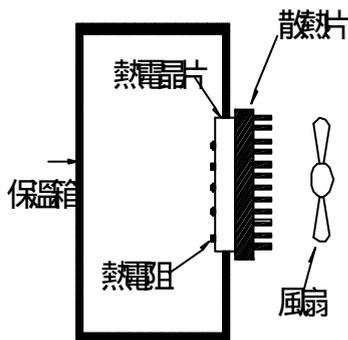


圖 6 熱電晶片性能測試示意圖

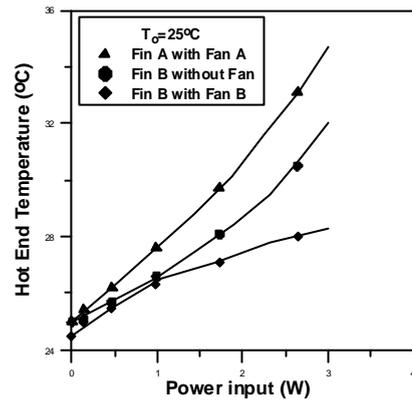


圖 7(a) 熱電晶片熱端之性能曲線圖

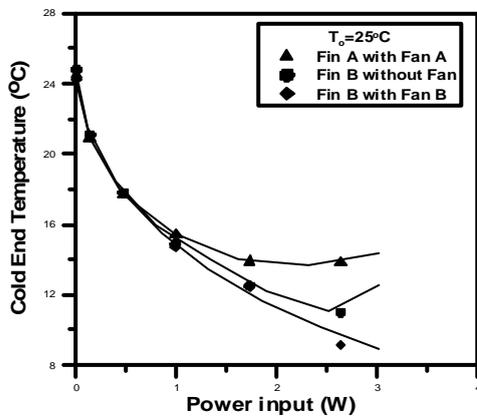


圖 7(b) 熱電晶片冷端之性能曲線圖

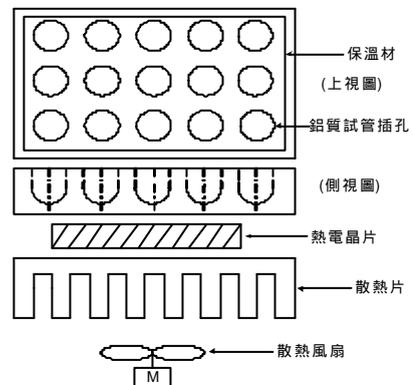


圖 8 血液恆溫器示意圖

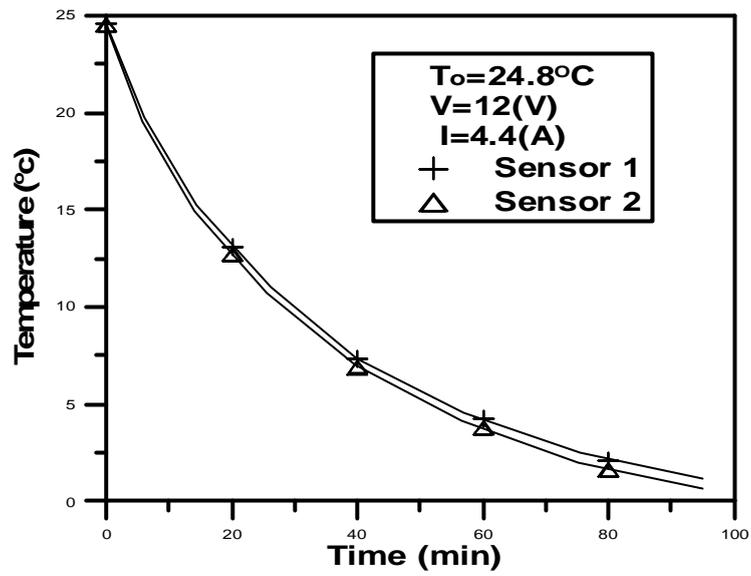


圖 9 血液恆溫器測試曲線圖

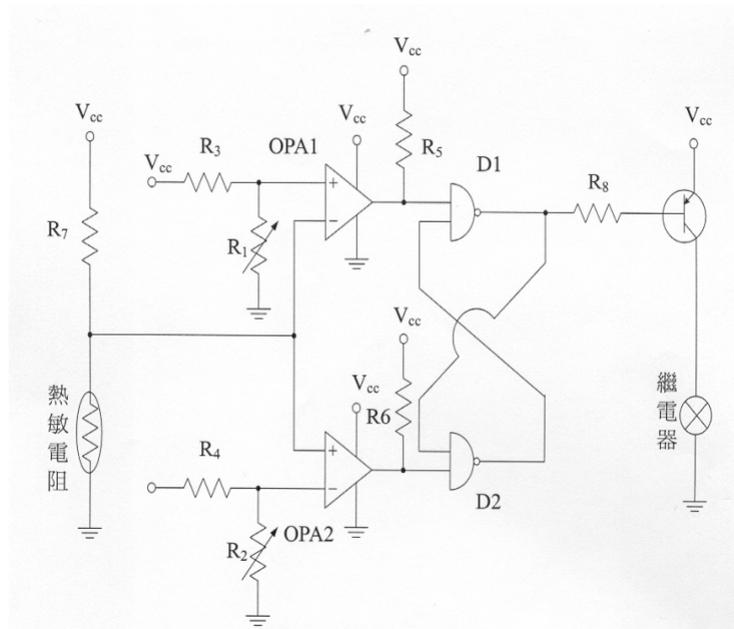


圖 10 恆溫控制電路