

中央處理器散熱程序之模擬與控制

吳慶國 陳奇中*

逢甲大學化學工程學系

*E-mail: ctchen@fcu.edu.tw

摘要

本文將以有限元素法探討中央處理器與散熱片之熱交換程序，並且進一步引入控制器來作模擬控制。在控制的策略上，吾人採用單點控制的方式，先將其程序近似成一個一階掛時延(FOPTD)的模式，並且採用 Model-based 的架構，藉此操控此偏微分(PDE)動態型式的系統。而在控制器方面，吾人選用了控制力輸出有限制之單神經元控制器，此控制器具有自調諧的能力，可依系統輸出誤差自動調節控制力，具有不依賴完美模式的智慧功能。由模擬的結果顯示，單神經元控制器的表現比傳統開關切換與 PI 控制器優異，且控制力穩定，著實增強了中央處理器散熱裝置的性能與功效。

1. 前言

隨著電子科技的發展及積體電路的進步，中央處理器(Center processing unit ; CPU)的效能相對提高，文獻中[1-2]指出了 21 世紀近十年來積體電路的成長趨勢，尤其隨著 CPU 的 clock speed、switching speed 和 transistor density 的增加，晶片體積的小型化，CPU 單位體積所發出的熱量越來越多，過熱的現象容易造成設備的運作不穩定或是壽命縮短，因此為維持其正常的工作狀態，熱交換的散熱動作也就相當的重要。一般而言，熱交換的形式可分為三種，分別為輻射、傳導與對流，而在 CPU 散熱的設計上通常針對了傳導和對流的方式而設計。在傳導設計方面，大部份是在熱源的上方加裝一散熱片以幫助積體電路或是 CPU 消散運作時所產生的熱，其通常將 CPU

上產生的熱能傳導至散熱片上消散熱量，以提高工作效能。但由於 CPU 的速度愈來愈快，導致單純只靠散熱片已經不足以滿足散熱要求。改進的方式是加裝風扇，藉以提供高速氣流通過散熱片，以強制對流的方式來使熱能更快的消散。

近年來，許多學者也針對了 CPU 散熱處理的問題作了許多方面的研究。在分析方面，Chang 等人[3] 用計算流體力學(Computational Fluid Dynamics ; CFD)來分析並設計如何用最小的風扇氣流和散熱片尺寸來達到最佳的散熱效率。Copeland [4] 用解析方程式來分析理想與真實的散熱片之管流動態行為，並發現適當的散熱片厚度能夠有效的降低對流阻抗，而且增加散熱片高度同樣也能降低對流阻抗。在散熱片的形狀設計方面，Mansuria 和 Kamath [5] 用數值和實驗的方法來研究三種不同形狀

的散熱片(平板狀、柱狀、和輻射狀)的散熱情形,其中得到柱狀的散熱片的熱傳效率比平板狀和輻射狀良好的結論。而在散熱片設計最佳化方面,Culham 和 Muzychka [6] 提出了一個散熱片的最佳化技術,其中藉由改變散熱片之厚度、高度、個數和散熱片之間間隔,來讓散熱片的效能達到最好。Loh 等人 [7] 測試出在同樣的散熱片厚度和散熱片體積下,最佳的散熱片高度的值。而 William 等人 [8] 更以電腦輔助設計(CAD)中的有限元素分析軟體來從事最佳化散熱片的設計,藉由分析的方式找出最佳的散熱片大小、質量、形狀和冷卻氣體之壓降。

然而,在 CPU 散熱控制方面卻鮮有學者針對這個方面作一相關的研究。為解決 CPU 散熱控制問題,本文先模擬了 CPU 散熱片的散熱情形,並進一步地將控制的理論引入 CPU 散熱操控上,藉由控制風扇的轉速來改變空氣通過散熱片的流率,進而改變 CPU 散熱片之熱傳係數,而使得 CPU 的散熱情形保持穩定的狀態,且不會造成風扇一直持續在高的轉速造成零件加速老化,也避免了傳統開關控制對元件造成之損耗。在控制的策略上,我們採用單點控制,即在散熱片上埋設一個感測器,來控制此點的溫度,藉以降低 CPU 運轉時所造成之高溫。在控制系統設計方面,首先吾人將此程序近似成 FOPTD 的模式,結合 Model-based 的架構,藉此來操控此 PDEs 型式之系統程序。在控制器的部份,吾人採用本研究室所研發的單神經元控制器(SNC)[9]來進行線上直接式適應控制,其結構不但簡單易懂,且穩定性又得以確保。這是因為 SNC 不依賴完美系統模式來設計,僅需透過誤差訊號的輸入,來自適應調整內部參數以達合適的參數值,進而使系統輸出快速到達設定點,在應用上相當方便,且具智慧能力。為了驗證本文所提方法的有效性及其可行性,在模擬測試中將與傳統的開關切換與 PI 控制器作一比較。

2. 系統描述與分析

2.1 中央處理器之結構

CPU 及散熱片的模型如圖 1 所示

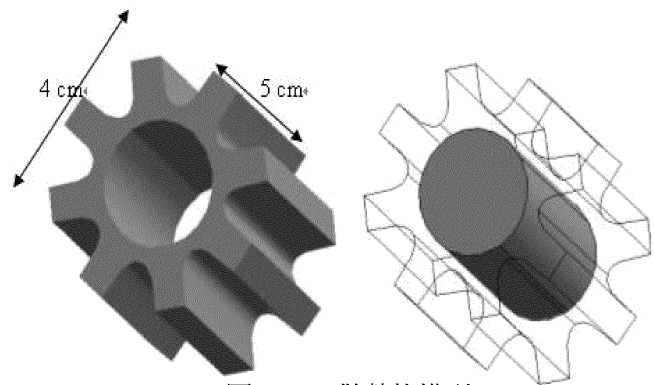


圖 1 CPU 散熱片模型

模型中間的 CPU 為圓柱型的半導體,外圍被鋁製的散熱片包圍住, CPU 固定產生熱能,相當於從 CPU 運作中消散的熱能,經由外圍的散熱片將熱能傳導而出,再經由強制對流來把熱能消散。通常熱散片的設計傾向於儘量加大其本身的總表面積,以使其有更多面積與空氣接觸,增加熱交換的機會,並且為了增加通過散熱片的空氣對流效率,裝置一個適當且有效率的風扇是必要的。此外,為了方便系統的模擬,我們可以將圖 1 中的 CPU 取其截面,並擷取一部份來作模擬,如圖 2 所示,如此一來可以縮短系統模擬的時間,又不失其正確性。

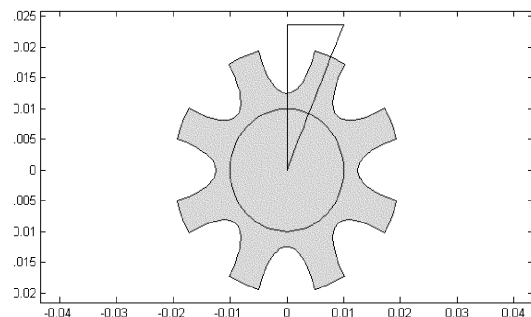


圖 2 CPU 散熱片截面

2.2 散熱程序之動態方程式

描述系統中熱傳情況主要的兩個方程式如下：

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (1)$$

$$n \cdot (k \nabla T) = q + h(T_{\text{inf}} - T) \quad (2)$$

此系統最主要的兩個熱交換方式為傳導和對流，即將 CPU 發熱之熱能先傳導至散熱片，再由對流的方式將其熱能發散。式(1)為一熱傳導方程式，為描述 CPU 和散熱片中的熱傳導情形，其中 ρ 為材質之密度、 C 為熱容、 k 為熱傳係數、 Q 則為 CPU 運作時所產生的單位體積熱能。式(1)等號左邊第一項代表熱能的累積項，而左邊第二項為沿熱流動方向的溫度變化量。本文考慮鋁製的散熱片，因為鋁的成本廉價而且有良好的機械特性可供製造成散熱片。

此 CPU 散熱程序之邊界環境可視為 Neumann 型式，其向外的熱通量 $n \cdot (k \nabla(T))$ 可寫成式(2)，其中 n 為熱通量之垂直單位向量。式子右邊第二項可由牛頓冷卻定律(Newton's law of cooling)說明，當物體和環境溫度有差異時，藉由自然或是強制對流產生熱對流的情形，而 q 則為向內之熱通量， h 為熱對流係數、 T_{inf} 為環境溫度。當風扇運作時，造成了空氣的流動使得通過散熱片的空氣流率增加，於是熱對流係數就會增加，相對地熱交換情形也會變好。本文不考慮輻射的熱傳型式，因其影響微小，所以予以忽略。我們可以將上述的所提的系統的方程式及邊界條件的方程式以圖 3 來表示。此外，矽與鋁的物質特性和 CPU 散熱片所需相關參數分別見表 1 和表 2。

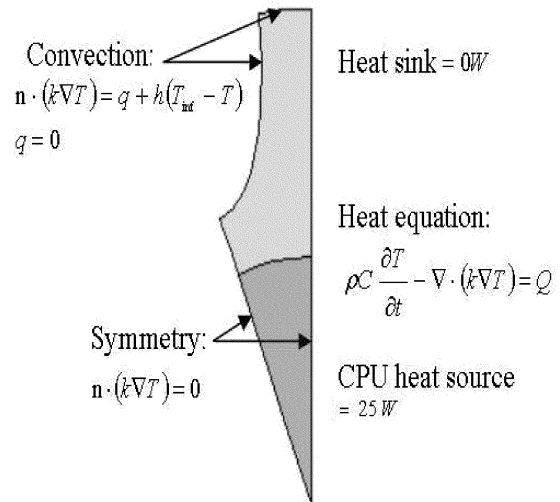


圖 3 系統方程式

材料物理性質	鋁	矽
Heat capacity, C	905 J/kg·K	705.5 J/kg·K
Density, ρ	2707 kg/m ³	2330 kg/m ³
Conductivity, k	232 W/m·K	63 W/m·K

表 1 物質特性

變數名稱	數值	描述
heff	400	當風扇全開時之熱對流係數 $(\frac{W}{m^2 \cdot K})$
	10	當風扇關閉時之熱對流係數 $(\frac{W}{m^2 \cdot K})$
T _{inf}	25	散熱片周圍空氣之溫度(°C)
volume	1.57×10 ⁻⁵	CPU 體積(m ³)
power	25	CPU 所產生之熱(W)

表 2 系統相關係數

2.3 中央處理器散熱程序之現象模擬

2.3.1 風扇關閉時之散熱程序模擬

在此節中，吾人將模擬 CPU 散熱程序在風扇關閉下，單純只有自然對流下，CPU 散熱片之溫度分佈情形。從圖中可以看出，在時間 100 秒時，CPU 中心的地方為溫度最高的地方，而散熱片的外圍則是溫度最低的地方，熱能藉著傳導的方式由內向外傳播。另外從圖 5-7 也可得到時間在 1000 秒，3000 秒和 6000 秒時，CPU 熱散片中心至外圍，即 1 → 4 → 5 → 7 處，節點的溫度變化情形。圖 5-7 中，橫軸座標 0 表示為中心點，在 0.01 處，溫度曲線有一折點，原因在於此處乃介於散熱片與 CPU 之間，因其材質不同，熱傳導係數不同，所以會造成溫度曲線在此處有轉折之現象。

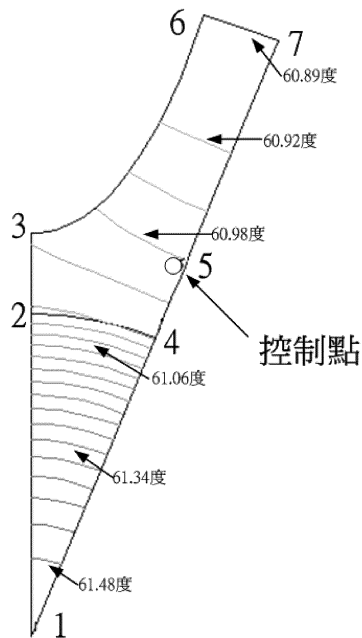


圖 4 CPU 散熱片溫度分佈圖

此外，在此單純只有自然對流的情況下，CPU 散熱片控制點溫度變化情況可見圖 8，由圖中可知，當 CPU 在運作時，不斷的產生熱

能，如果只有散熱片而沒有風扇的輔助時，CPU 就會發生過熱的情形，尤其當時間為 6000 秒時，控制點位置之溫度已到達 295 度，其將造成 CPU 不穩定及壽命縮短。

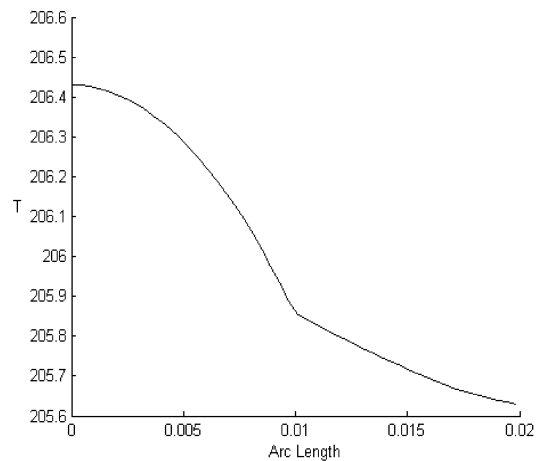


圖 5 時間在 1000 秒時，CPU 中心至散熱片外圍溫度變化圖

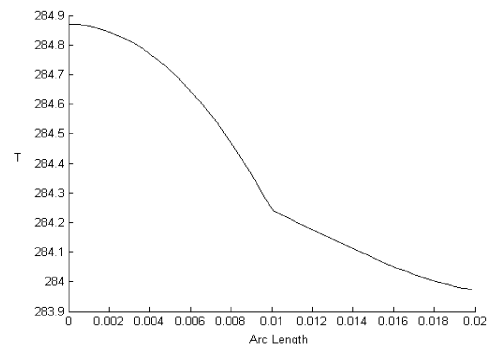


圖 6 時間在 3000 秒時，CPU 中心至散熱片外圍溫度變化圖

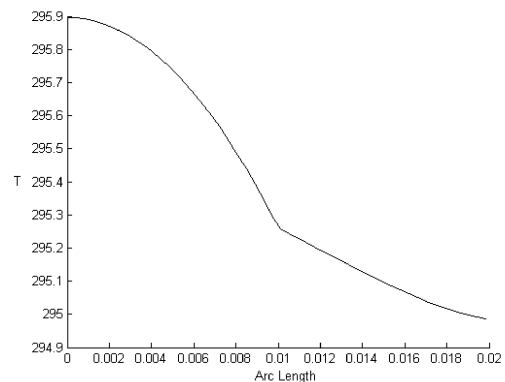


圖 7 時間在 6000 秒時，CPU 中心至散熱片外圍溫度變化圖

2.3.2 風扇開啓時之散熱程序模擬

由上一小節得知，若程序無風扇運作時，CPU 的溫度會過熱，所以加裝一風扇是必要的。接下來吾人將模擬在風扇開啓的狀態下，即存在強制對流情況，環境參數如室溫或是熱對流係數(風扇開度)改變時的溫度的變化。在圖 9 中，假設散熱程序控制點穩定的保持在四十度，在時間 1000 秒時風扇開度由 18% 變化至 70%，以至全開時，即熱對流係數由 182 分別改變至 82、282 和 400 時，溫度明顯的發生變化。從圖 9 中也可得知，當熱對流係數昇高時，即風扇轉速加大，熱交換的效率也隨之昇高，導致 CPU 溫度下降。此外在圖 10 中，當室溫改變時，我們也可清楚的看出控制點位置溫度發生變化偏離的情形。

由以上的模擬結果可知，為使 CPU 散熱程序能夠正常運作，合適地控制風扇的轉速是必要的，因為操作環境中有許多變因會發生不預期的變化，這會造成 CPU 的操作溫度發生變異，而使性能變差，甚至造成 CPU 的效能無法完全發揮，因此為了讓 CPU 能夠正常平穩運作，我們將在下一節引入控制策略來控制此 CPU 散熱程序，使其維持一個合適的操作溫度，藉以保持 CPU 散熱程序之效能。

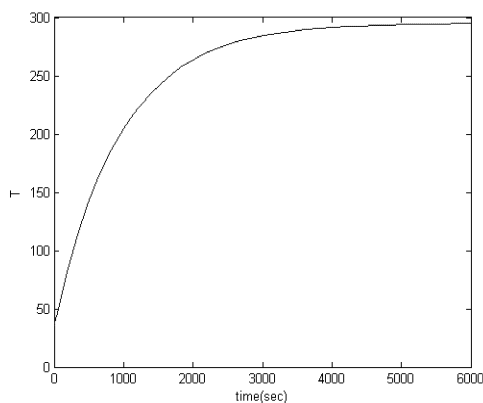


圖 8 無風扇時 CPU 控制點位置溫度變化圖

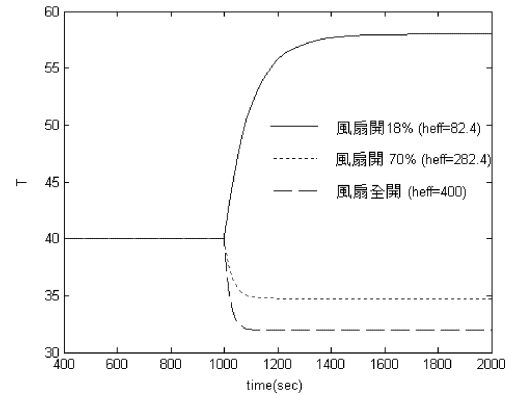


圖 9 風扇開度改變對 CPU 控制點位置溫度變化圖

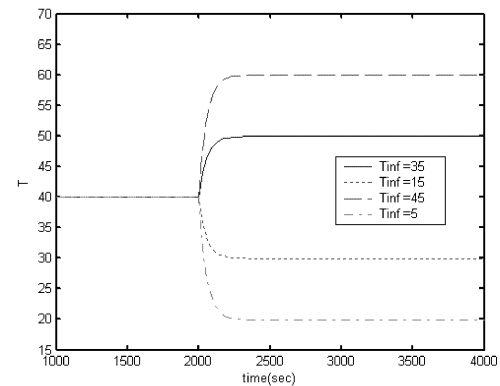


圖 10 室溫改變之 CPU 控制點位置溫度變化圖

3. 控制策略與控制器架構

3.1 控制策略與架構

為了讓 CPU 運作正常及增加其使用壽命，裝置風扇加以消散熱量是必要的。在本節中，吾人將導入本研究室所發展之單神經元控制器(SNC)於 CPU 散熱裝置之控制上。因為此中央處理器散熱程序是屬 PDEs 的型式，為簡化起見吾人採用單點控制的方式，在散熱片上埋設一個感測器，以便於控制那一點的溫度，間接操控 CPU 溫度。首先，我們先在操作點上作一個開迴路測試，吾人先將散熱程序調整在 40 度穩態，而後再給一個熱對流係數的步階輸入(即風扇開度變化)，再由溫度的變化

圖，以反應曲線法求出此散熱程序之一階掛時延的模式，如圖 11 所示，以求出此程序之 FOPTD 的模式，然後利用所求出之系統模式，架構一 Model-based 的控制架構，如圖 12 所示，來控制此散熱程序。

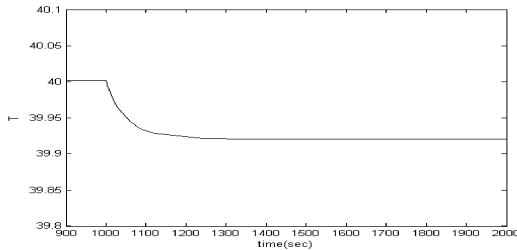


圖 11 開迴路測試

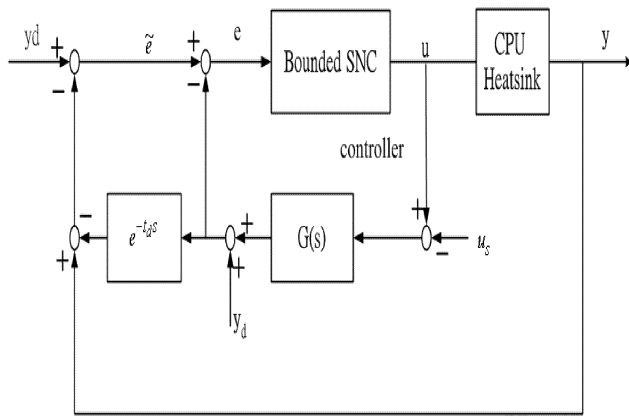


圖 12 SNC 控制器架構

3.2 控制器型式與參數演算法

本文所採用之單神經元控制器(SNC)其型式如下[9]:

$$u(t) = \frac{1}{2} \left[(1 + \tilde{u}(t)) u_{\max} + (1 - \tilde{u}(t)) u_{\min} \right] \quad (3)$$

其中， $\tilde{u}(t)$ 可表示為

$$\tilde{u}(t) = \frac{1 - \exp[-b(e(t) - \theta)]}{1 + \exp[-b(e(t) - \theta)]} \quad (4)$$

在式(4)中， $e(t) \equiv y_d(t) - y(t)$ 為設定點和實際系統輸出的誤差， b 為控制器的增益因子，亦即斜率，而 θ 為門閾值。 $\tilde{u}(t)$ 的值依函數特

性會保持在 1 與-1 之間，相對地就可保證控制力的輸出範圍在 $u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}$ ，因而可控制風扇於全開及全關之間。為使控制器自動找到合適控制力，藉以保持無穩態偏差之控制性能，Chen 和 Peng [9] 基於目標函數為

$$E(t) = \frac{1}{2} e^2(t) \text{ 之最小化，推導以下之參數演算法} \quad (5)$$

$$\dot{\theta}(t) = -\eta b e(t) (1 - \tilde{u}(t)) (1 + \tilde{u}(t)) \text{sign} \left(\frac{\partial y}{\partial u} \right)$$

而此演算法的目的地就是藉由更新控制器參數來不斷地縮小目標函數，也就是說藉由增加或減少門閾值 θ 來縮小 $E(t)$ ，以達無穩態誤差的控制性能。演算法中， η 代表學習速率，其大小決定系統收斂速度的大小，相對地也會影響系統輸出的平滑或是震盪，而 $\text{Sign} \left(\frac{\partial y}{\partial u} \right)$ 可視系統為正向應答或是負向應答來取值為 1 或是-1。參數演算法之推導及穩定性探討，請詳見[9]。

4. 模擬與討論

在控制模擬時，吾人須先裝設一個感測器，而感測器位置的選擇影響了感測器與 CPU 中心點溫度差異的大小。當感測器的位置離 CPU 較遠時，CPU 的溫度與感測器的溫度差距較大，有可能會使 CPU 的溫度過高，所以感測器位置之選擇愈靠近 CPU 為佳，可以儘量讓感測器之量測的溫度接近 CPU 的溫度。於是吾人便將感測器位置設置在圖 4 中節點 5 之處，以便於監測 CPU 散熱片之溫度，並且將其資訊傳回至控制器來作控制。在風扇方面，我們設定風扇關閉時，環境的熱對流係數為 10，當風扇全開時，環境的熱對流係數為 400。我們將以 SNC 來控制風扇轉速的大小，藉由控制轉速的大小來調整通過散熱片的氣

流量，以達到間接調整熱對流係數的大小，來完成散熱片的控制。由開迴路測之中，我們可求出此散熱程序之一階掛時延的模式為

$$\frac{-0.08}{51.7s+1}e^{-0.1s}$$

，如此我們可進一步給予 SNC 的參數初始值，我們選用 $(b, \theta) = (-3, 0)$ ，學習速率 $\eta = 0.5$ 。由系統模式得知此系統為負向應答，所以設 $\frac{\partial y}{\partial u} = -1$ ，同時控制器輸出

的上限設定為 400，下限設定為 10。此外，我們更將單神經元控制器直接控制此散熱程序，藉此測試 SNC 在不需模式的架構下的直接控制能力，而參數選取部份與上相同。另一方面，吾人亦將進行將 SNC 與傳統開關切換控制器與 PI 控制器之測試比較。而在 PI 控制方面參數的選定方面，由於一階掛時延的模式已經求出，吾人使用 Ciancone 和 Marlin [10] 之 Ciancone Tuning 法來求得 PI 控制器參數 $K_c = -36.3$ ， $T_i = 42.65$ ，如此就可進行下列之模擬。

4.1 設定點追蹤

一開始假設 CPU 的溫度初始值為 35 度，由之前的開迴路測試得知，若系統不加以控制，則溫度將快速上昇，使 CPU 過熱。因此，吾人擬控制 CPU 控制點位置之溫度在 40 度上。由圖 13 中可以看出，傳統的開關切換控制器，單純地只有以下開和關的兩個動作，

$$heff = \begin{cases} 10, & T < 39 \\ 400, & T > 41 \end{cases}$$

，即風扇全開時和風扇關閉，其取決於 CPU 的溫度，當 CPU 的溫度比設定溫度大於一度時，切換控制器就會打開風扇開始作用，足夠的氣流通過散熱片使得散熱片的溫度降低；當 CPU 的溫度再度低設定溫度一度時，切換控制器就會關閉風扇。由圖 13 可知此種的控制效能並不理想，導致控制器一直切換風扇的開關，其將造成風扇的快速磨

損，而且控制效果亦產生震盪的現象。而 PI 控制器效能亦存在不小的超越量，應答速度亦較緩慢。相對的，由於 SNC 會根據誤差而輸出適當的控制力，當溫度追蹤在設定點時，沒有過大的超越量，也沒有太多的震盪，並且 SNC 的控制力保持相當的穩定效果，明顯地比 PI 控制器優異，且不會像傳統開關切換控制器一般，控制力一直在切換，在能源上來說也比較節能，且可避免設備損耗。

4.2 干擾消除

假設時間在 300 秒時，當室溫突然從 25 度昇溫至 31.25 度，從圖 14 中，可以清楚的看出溫度發生變化時，SNC 控制器迅速的將干擾消除，將 CPU 溫度穩定的操作在設定點上，跟 PI 控制器相比明顯的優異。在控制力方面，也很平穩地達到新的輸出位置上。

另外，假設時間在 300 秒時，CPU 產生的熱能也突然發生變化，從原本的 25W 變成 32.5W。由圖 15 可知 SNC 因具有自我調諧的能力，所以可以輕易地將溫度拉回至設定點。然而我們可進一步觀察在 SNC 控制器下 CPU 其它節點位置的溫度變化情形，由圖 16 中，吾人可看出各端點的溫度變化，吾人藉由控制節點 5 的溫度，進而保持其它節點的溫度。圖中，當節點 5 的溫度穩定時，其它節點的溫度相對的也保持穩定的狀態。而從圖 17 中更可以看出當系統有干擾進入時，SNC 能適度地改變參數值 θ ，來消除干擾讓系統無穩態誤差，以保持系統的穩定。最後由圖 13、圖 14 和圖 15 可看出，單神經元控制器直接控制的能力與在 Model-based 架構下之 SNC 之控制能力相當，也顯示出單神經元控制器不依賴完美系統模式來設計也能有不錯的性能表現。

5. 結論

本研究探討了中央處理器散熱程序之熱傳行為，並利用單點控制和 Model-based 單神經元控制器成功地控制了此 PDEs 形式的系統。由模擬結果得知，本文所使用之 SNC 控制策略的控制性能，確實比傳統切換控制和 PI 控制器來得優越，相信此控制系統必能推廣至其他以偏微分方程式所描述之系統的控制上。

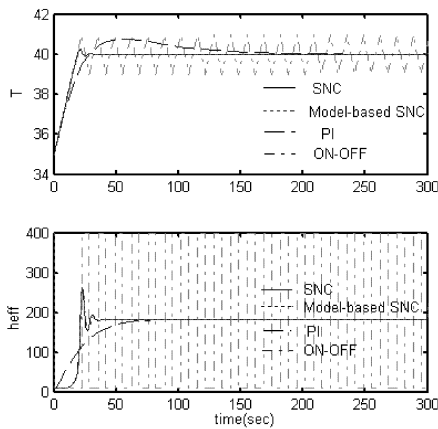


圖 13 設定點改變圖

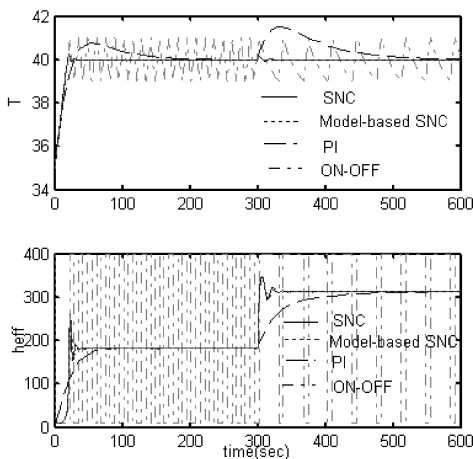


圖 14 時間在 300 秒，室溫發生變異之 CPU 散熱片溫度變化圖

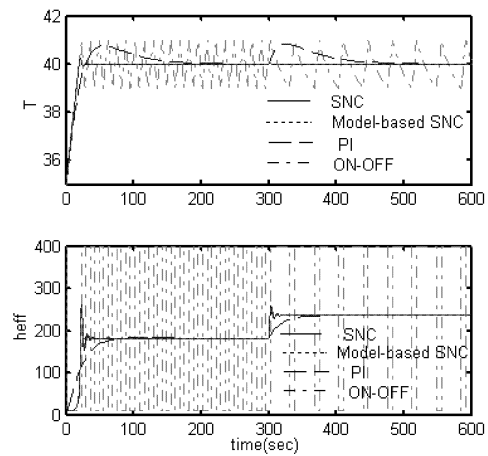


圖 15 時間在 300 秒，熱源發生變異之 CPU 散熱片溫度變化圖

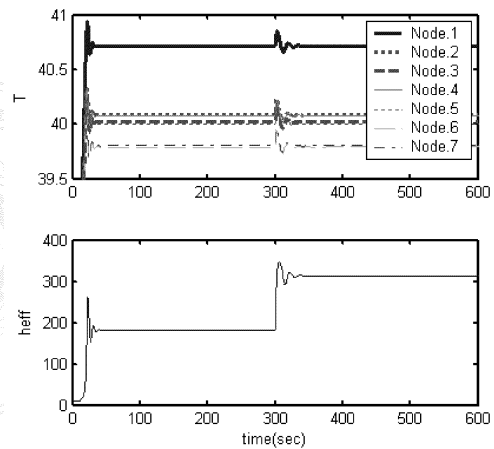


圖 16 時間在 300 秒，室溫發生變異之 CPU 散熱片各端點溫度變化圖

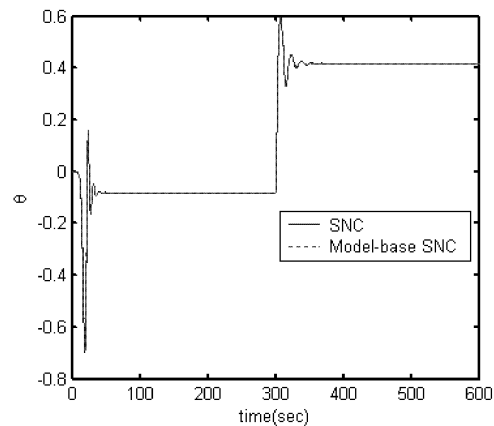


圖 17 時間在 300 秒，熱源發生變異之 θ 變化圖

參考文獻

- [1] Coben, A. B., "Thermal packaging for the 21st century: Challenges and options," in Proc. 5th Thermic-International Workshop Thermal Investigations of IC's and systems, Rome, Italy, 1999
- [2] Ben, M. A. and A. B. Coben, "Heat sink optimization for maximum performance and minimum mass," in Proc. Interpak'99 Conf., Maui, HI, 1999
- [3] Chang, J. Y., C. W. Yu, and R. L. Webb, "Identification of minimum air flow design for a desktop computer using CFD modeling," Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. VOL.1, pp. 23-26, 2000
- [4] Copeland, D., "Thermal Design Tradeoffs for Ducted Heat Sinks With Dedicated Fans", proc. Of Int. Electronic Packaging Technical Conf., IPACK2001-15795, 2001
- [5] Mansuria, M. S. and V. Kamath, "Design Optimization of a High Performance Heat Sink / Fan Assembly", Proc. Of ASM, VOL 292, pp. 95-103, 1994
- [6] Culham, J. R. and Y. S. Muzychka, "Optimization of Plate Fin Heat Sinks Using Entropy Generation Minimization", IEEE Trans. On Comp. And Packag. Tech., VOL. 24, pp. 159-165, 2001
- [7] Loh, C. K., D. Nelson, and D. J. Chou, "Optimization of Heat Sink Design and Fan Selection in Portable Electronics Environment", March 22, 2002
- [8] William, B. K. and A. B. Coben, "Optimal Numerical Design of Forced Convection Heat Sinks", IEEE Trans. On Comp. And Packag. Tech., VOL. 27, 2001
- [9] Chen, C. T. and S. T. Peng, "Learning control of process systems with hard input constraints", Journal of Process Control, pp. 151-160, 1999
- [10] Ciancone, R. and T. Marlin, "Tune Controllers to Meet Plant Objectives," Control, 5, 50-57, 1992