

電腦圖形處理器散熱器之熱傳分析

Thermal Analysis for Computer GPU Heat Sinks

吳邦彥

Bang-Yenn Wu

德霖技術學院機械工程系助理教授

Assistant Professor

Department of Mechanical Engineering

De-Lin Institute of Technology

摘要

21世紀的今天，電腦已經成為生活必需品。隨著製造技術的進度，電腦運算速度提升，電子元件的功率和發熱量也相對提高，電子產品散熱器成了電腦中不可或缺的零組件。本研究利用ANSYS軟體就志航科技公司圖形處理器散熱器VH13使用於Nvidia Quadro 600顯示卡進行熱傳分析。分析結果顯示，在自然對流情況下，不考慮輻射效應，最高溫達710.96°C，將造成顯卡燒毀。在強制對流情況下，考慮輻射效應，最高溫可降至200°C左右。

關鍵字：散熱器、圖形處理器、ANSYS

壹、前言

21世紀的今天，電腦已經成為生活必需品。隨著製造技術的進度，電腦運算速度大幅度提升，其的功率和發熱量也相對明顯提高。電子產品散熱器，包含：中央處理器(CPU)散熱器、圖形處理器(GPU)散熱器、北橋晶片散熱器等，成了電腦中不可或缺的零組件。市場上的散熱器種類繁多，包含有：低階的純鋁鰭片，中階的純銅、鋁鰭塞銅式、鋁鰭壓鑄銅式、熱管式，以及更高階水冷、油冷、半導體制冷、壓縮機制冷、幹冰制冷、液氮制冷、液氮制冷等等。散熱方式則有被動散熱、主動散熱、及主動制冷散熱等。

目前市面上最常見的為風冷式散熱器，風冷散熱器被公認是所有散熱器中性價比(CP值)最高的一種散熱器。一套完整的風冷散熱器應該是由散熱片、風扇和扣具三部分組成，純鋁散熱片是目前使用率最高的散熱片之一。鋁是地球上含量最高的金屬，成本低和熱容(thermal capacity)低是其主要特點。雖然吸收熱量較慢，但放熱較快。當散熱片數越多、底部拋光越好，散熱效果就越好。因為銅熱傳導係數為401w/m-k，比鋁的226w/m-k提高了將近1倍，純銅散熱片的散熱效果比純鋁散熱器好。但銅密度8.96 g/cm³比鋁的2.70 g/cm³提高了3倍多，所以相同散熱面積下，銅的散熱器重量較鋁散熱器重很多。但是由於銅具有良好的韌性，因此製造上要比鋁容易得多，散熱片的密度也可以比鋁做得更高，散熱面積也相應更大，這些可以彌補其熱容高

所導致散熱慢與重量過重的缺點。但純銅的成本要比鋁高很多，直接導致純銅散熱器的價格較高。

GPU 散熱器的工作原理是 GPU 散熱片與 GPU 表面直接接觸，GPU 表面的熱量通過熱傳導傳遞給 GPU 散熱片，然後通過自然對流與熱輻射將 GPU 散熱片表面的熱量帶走。而機箱內空氣的流動也是通過熱對流將 GPU 散熱片周圍空氣的熱量帶走，帶到機箱外。同時，所有溫度高的部分將會對周圍溫度低的部分發生熱輻射。

貳、理論分析

基本熱量傳遞(heat transfer)的三種形式分別為：

- 熱傳導(conduction)。主要是藉著固體物質或靜止液體進行熱交換。當碰觸熱的物件，網狀結構的震動與粒子的撞擊理論兩種機制可用來解釋熱的傳導。固體傳導是結合這兩種機制，而靜止的液體的傳導主要是靠分子撞擊來進行[1]。熱傳導遵循傅立葉定理(Fourier's Law)，

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

其中， q 為熱傳量， k 為熱傳導係數(heat conduction coefficient)， $\frac{dT}{dx}$ 是距離 Δx 表面上的溫度梯度(temperature gradient)。在熱傳導式子中，正值表示熱流從表面往系統內流動，而負值則是熱流離開系統。

- 熱對流(convection)。是利用液體流動來達到熱傳遞。在基本的對流中，熱源加熱流體表面周圍，而且其他流體如風等將熱帶走，冷流因此取代熱流。自然對流的液體流動是由暖流本身產生，流體密度隨著流體加熱而降低，因為熱流比冷流輕，暖流包圍著熱流，並且被冷流取代，於是產生流體流動[1]。利用牛頓冷卻定律(Newton Cooling Law)來描述熱對流，

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

式中 h 為對流熱傳係數(convection heat transfer coefficient)， A 是熱傳系統表面面積， T_s 為表面溫度及 T_∞ 為室溫或流體溫度。空氣的自然熱對流係數大約於 $1 \sim 25 \text{ W/m}^2\text{-K}$ ，而液體的熱自然對流係數約為 $100 \sim 1000 \text{ W/m}^2\text{-K}$ [2]。氣流狀態之強制熱對流係數約為 $50 \sim 250 \text{ W/m}^2\text{-K}$ ，而液流狀態之強制熱對流係數約為 $100 \sim 10,000 \text{ W/m}^2\text{-K}$ [1]。

- 熱輻射(radiation)。主要是利用電磁輻射傳遞熱量。當光子在 0K ($-273 \text{ }^\circ\text{C}$)以上作光速運動，光子撞擊其他物質而產生熱。熱輻射可利用史蒂芬-波茲曼定律(Stefan-Boltzmann Law)來計算，

$$q = \delta\sigma A_1 F_{12}(T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

其中 A 是表面面積， T 是物體溫度， σ 是史蒂芬-波茲曼常數($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)， δ 為輻射放射率。底標1與2代表表面1與表面2。

熱分析的穩態熱傳(steady-state heat transfer)，代表系統的淨熱傳量為 0。就是說，傳入系統的熱傳量加上系統自己所產生的熱量等於流出系統的熱傳量。以數學式表示為，

$$q_{in} + q_{gen} - q_{out} = 0 \quad (4)$$

底標 in 代表傳入系統，gen 代表系統產生，out 代表傳出系統。當系統滿足方程式(4)，則系統達到穩態。在穩態熱傳分析中，任一節點的溫度不隨著時間變化。穩態熱力分析的能量平衡方程

式可以寫成，

$$Q = \Delta E = 0 \quad (5)$$

以矩陣形式表示為，

$$[K(T)]\{T\} = \{Q(T)\} \quad (6)$$

其中[K]為傳導矩陣，包含熱傳導係數、熱對流係數、熱輻射率(emissivity)和形狀因素(shape factor)，{T}為節點(node)溫度向量，{Q}為節點熱傳量，包含了系統產生的熱量。

叁、ANSYS 分析

ANSYS 分析基本步驟為：[3]

1. 建立有限元模型，設置材料特性。
2. 添加熱負荷與邊界條件。
3. 定義接觸區域。
4. 定義網格控制並劃分網格。
5. 對問題進行求解。
6. 進行結果評估與分析。

本研究利用ANSYS Workbench中mechanical模組進行熱分析(thermal analysis)，此模組有其限制。一般而言，在基本熱傳分析中，熱傳導是熱分析之基礎，所有的熱傳元素皆提供熱傳導之分析，但對於加入熱對流或熱輻射之物理性質考量時，便需有額外有限元素模型之建立技巧。由於ANSYS並不提供在同一元素同時存在熱通量(heat flux)及熱對流(heat convection)做為邊界條件之作用，因此對於解決此種分析問題時便需利用表面作用元素(surface effect element)，以便協助處理熱對流時的情形。此外，利用ANSYS基本熱傳模組處理熱對流分析時，必須了解物體表面之對流熱傳係數(convection heat transfer coefficient)，這一係數在ANSYS之熱分析模組並無法計算得知，ANSYS只能將它當成邊界條件之一輸入。因此熱對流係數之獲得必須在熱分析前完成，否則便須透過計算流體力學之分析模式(如ANSYSSlotra11)來完成分析。一般而言，自然對流熱傳係數為Prnadt1與Grashof數的函數，滿足方程式 $Nu = c(Gr Pr)^n$ ，在層流(laminar flow)情況下 $n=0.33$ ，在紊流(turbulent flow)情況下 $n= 0.25$ 。強制對流之對流熱傳係數則為Prnadt1與雷諾數(Reynolds)的函數，可以寫成 $Nu=f(Re, Pr)$ 。本研究不計算對流熱傳係數，只將它當成邊界條件之一輸入。另外，在考量到熱輻射之影響時，ANSYS提供了數種有限元素模型建立方式，以解決不同程度的熱輻射分析。最簡單的是做點對點之間的輻射傳遞，亦可利用表面作用元素(surface effect element)作表面與點之間的輻射傳遞；最常用的是利用輻射矩陣法(Radiation Matrix method)來處理面與面之間的輻射問題。本分析使用ANSYS/Mechanical模組，其熱輻射使用輻射矩陣法來處理面與面之間的輻射問題 [1]。ANSYS 熱輻射的分析限制僅能分析屬於表面發射之問題，對於穿透式的物體輻射ANSYS 無法分析。

肆、問題分析

志航科技公司VH13顯示卡的散熱片如圖1所示[5]，長度單位為mm。其底面積為 $37.65\text{mm} \times$

37.65mm，厚2.55mm。鰭片數目共27 組，高30.2mm，寬3.5mm，厚度0.38mm。詳細尺寸如圖2 所示。散熱片材料為銅合金(copper alloy)，其熱傳導係數為401W/m·°C。散熱片底部完全貼在 Nvidia Quadro 600顯示卡上，Nvidia Quadro 600顯示卡熱傳設計功率(TDP)為40W[6、7]，顯卡核心面積(die size)為116mm² [8]。環境溫度為22 °C。

本研究使用參數科技公司(PTC)之3D 繪圖軟體 Creo 2.0 繪製散熱器。散熱器立體圖如圖1 所示，散熱器工程圖如圖2所示。

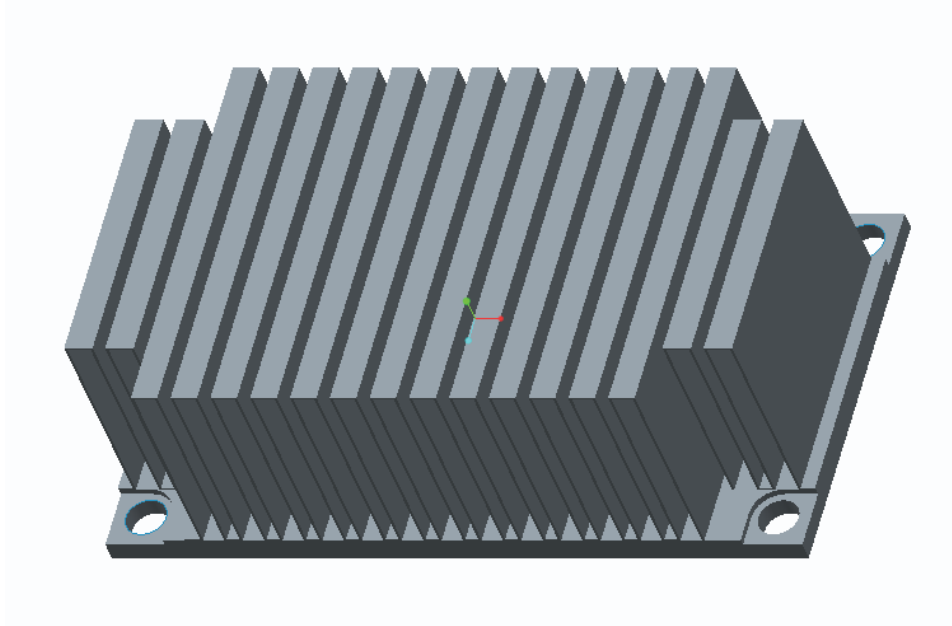


圖1 顯示卡的散熱片(Creo 2.0繪製)

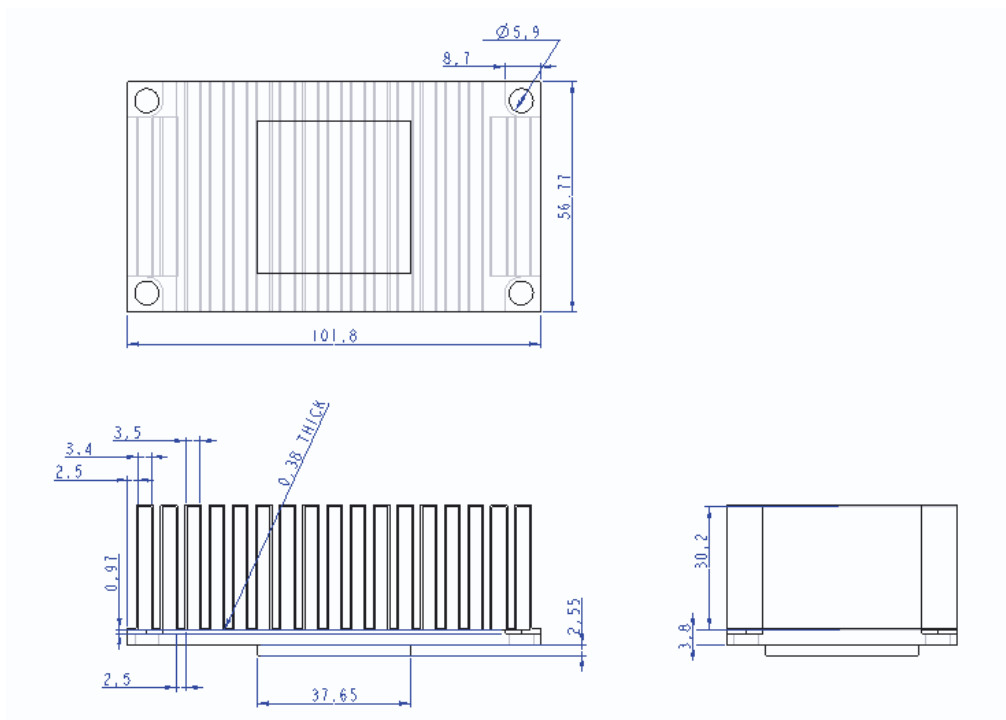


圖2 顯示卡的散熱片詳細尺寸(Creo 2.0繪製)

利用ANSYS Workbench 14.0版本進行分析，分析之計畫概要(Project Schematic)如圖3所示。

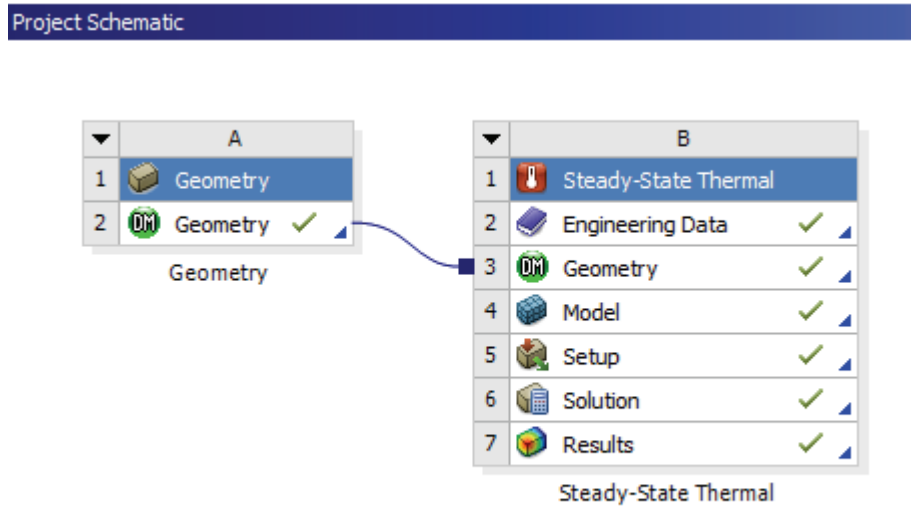


圖3 ANSYS分析計畫概要

本分析之測試條件如表1所示。本分析之熱輻射只針對環境輻射，不存在面與面之間熱輻射，所以形狀因素F值設為1。ANSYS設定的熱通量只能施加在面上，單位為能量除以時間再除以面積(energy/time/area)。本分析以Nvidia Quadro 600顯示卡作分析，其熱傳設計功率(TDP)為40W，核心面積為116mm²，所以ANSYS所設定邊界條件之熱通量(heat flux)為0.34483 W/mm²。前四個測試條件(case1至case4)保持輻射放射率為0.4，對流熱傳係數分別為5*10⁻⁵、5*10⁻⁴、5*10⁻³、5*10⁻² W/mm²·°C。case 1可視為自然對流，case2至case4則為強制對流。此四個測試條件可測試對流熱傳係數對散熱器整體性能之影響。Case5至case8之測試條件則改成對流熱傳係數固定為5*10⁻⁵ W/mm²·°C，輻射放射率分為0.3、0.2、0.1與不考慮熱輻射($\delta=0$)。所以比較case1與case5至case8，可觀察熱輻射對散熱器性能之影響。

表 1 測試條件

Case	h (W/mm ² ·°C)	δ	Tamb (°C)
1	5e-5	0.4	22
2	5e-4	0.4	22
3	5e-3	0.4	22
4	5e-2	0.4	22
5	5e-5	0.3	22
6	5e-5	0.2	22
7	5e-5	0.1	22
8	5e-5	0	22

Case 1 分析結果，散熱器最高溫度分布圖如圖 4 所示。

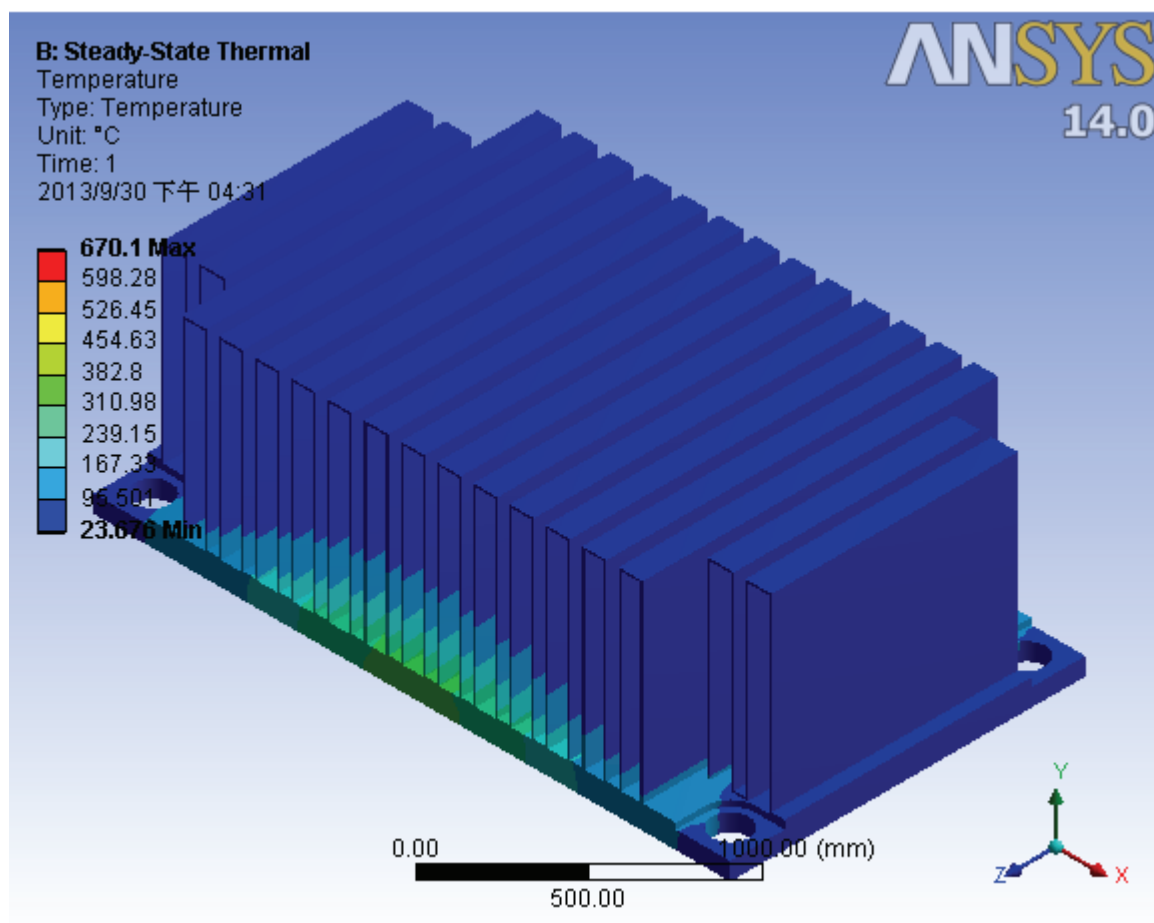


圖 4 Case 1 分析結果之溫度分布圖

伍、結果與討論

利用 ANSYS Workbench 14.0 的 Mechanical 模組進行穩態熱分析(Steady-State Thermal)。網格劃分設定為：中級(Medium)的關聯中心(Relevance Center)、中級的平滑度(Smoothing)、快速的過度(Transition)，粗造(corase) 的跨距角度中心(Span Angle Center)，及最小邊界長度(Minimum Edge Length)為 4.8260mm。進行網格劃分，劃分所得網格共有 137,793 點(node)，結構元素(element)有 69,058 個。網格分布如圖 5 所示。求解選項設定為溫度(Temperature)與總熱流量(Total Heat Flux)。分析結果如表 2 所示。

散熱器最高溫發生於與圖形處理器接觸位置中央部位，增加對流熱傳係數，導致散熱器最高溫下降。當對流熱傳係數由自然對流之 5×10^{-5} 增加至強制對流之 $5 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2\text{-K}$ 時，散熱器最高溫很明顯產生急速下降。結果如圖 6 所示。

不考慮輻射效應時，散熱器最高溫為 710.96°C 。增加輻射效應，散熱器最高溫下降。當輻射放射率升高至 0.4 時，散熱器最高溫下降至 670°C 。輻射效應對散熱器最高溫影響不明顯。結果如圖 7 所示。

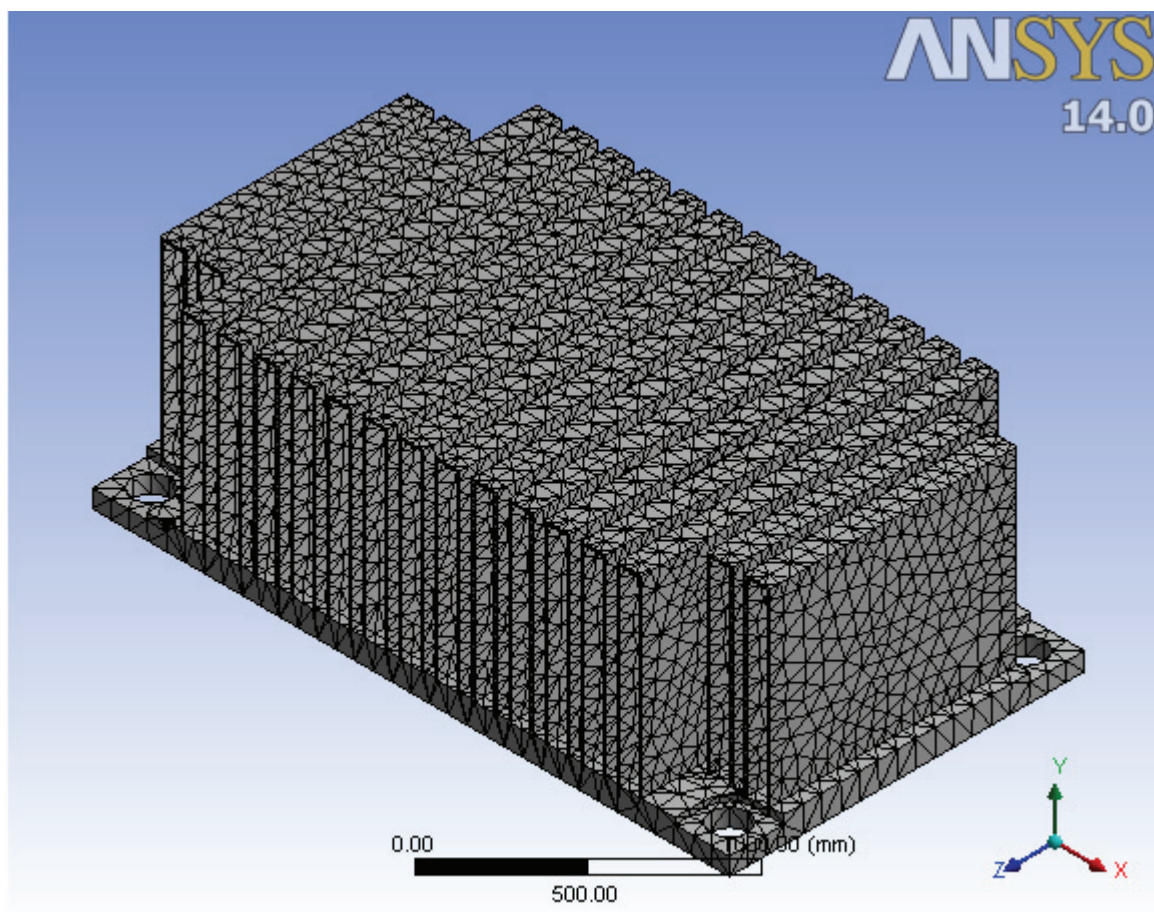


圖 5 網格分布圖

表 2 分析結果

Case	Maximum Temperature (°C)	Maximum Total heat Flux (W/mm ²)
1	670.1	0.96769
2	349.48	0.87959
3	199.95	0.47628
4	163.38	0.61372
5	678.75	0.97305
6	688.31	0.97876
7	698.97	0.98485
8	710.96	0.9914

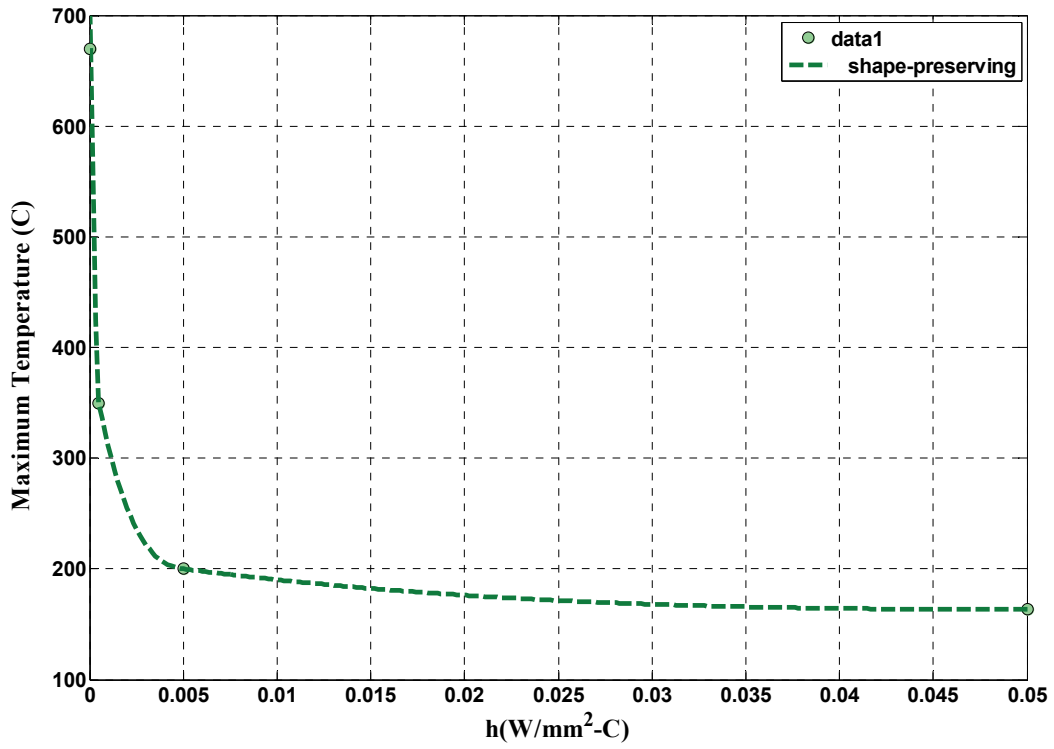


圖 6 對流熱傳係數對散熱器最高溫度之影響

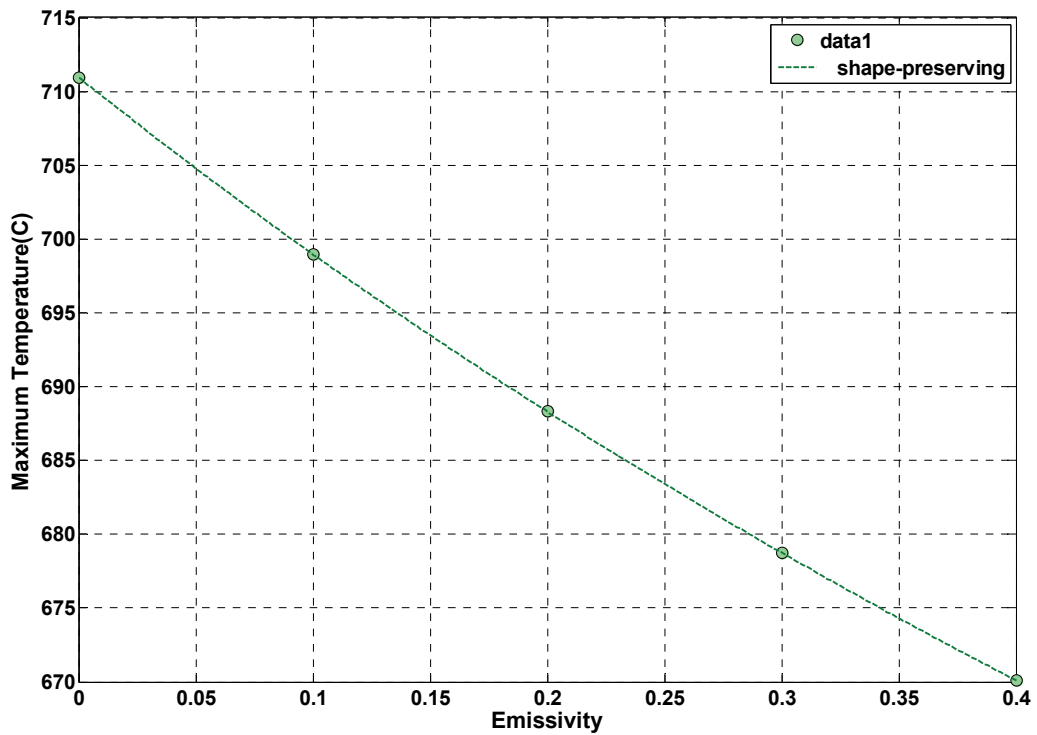


圖 7 輻射放射率對散熱器最高溫度之影響

陸、結論

1. 將 VH13 散熱器使用於 Nvidia Quadro 600 顯示卡。
 - 在自然對流情況下，最高溫達 700°C 以上，將造成顯卡燒毀。
 - 在強制對流情況下，最高溫可降至 200°C 左右。
2. VH13 散熱器不適用於 Nvidia Quadro 600 顯示卡之散熱。
3. 對流熱傳係數增加，散熱器最高溫下降。
4. 對流熱傳由自然對流改為強制對流時，散熱器最高溫很明顯產生急速下降。
5. 增加熱輻射效應，散熱器最高溫下降。
6. 熱輻射效應對散熱器最高溫影響不明顯。
7. 在強制對流強況下，熱輻射效應可以忽略不計。

符號說明

Nu=Nusselt number 定義 $Nu=hD/k$ 對流與傳導之比

Re=Reynolds number 定義 $Re=Du\rho/\mu=Du/\nu$ 分子力與黏滯力之比

Pr=Prandtl number 定義 $Pr=C_p\rho\mu/k=\nu/\alpha$ 分子擴散與熱擴散之比

Gr=Grashof number 定義 $Gr=g\rho^2L^3\Delta t/\mu^2$ 浮力與黏滯力之比

c=常數

C_p =比熱，J/kg-K

E=內能，W

g=重力加速度常數，9.81 m/s²

h=對流熱傳係數 (Coefficient of the convective heat transfer)，W/m²-K

k=傳導熱傳係數(thermal conductivity)，W/m-K

L、D=特徵長度，m

q=熱傳量，W

u=速度，m/s

t=時間，s

ρ =密度，kg/m³

α = 熱擴散率(thermal diffusivity)，m²/s

μ =流體黏性(viscosity)，m²/s

ν =流體動黏性(dynamic viscosity)，Pa-s

δ =放射率(emissivity)

參考文獻

[1] 陸軍軍官學校資料

<http://content.sp.npu.edu.tw/teacher/changhc/DocLib2/5%E7%86%B1%E5%82%B3%E5%B0%8E.pdf>

[2] 達梭公司資料

http://help.solidworks.com/2011/chinese/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection_Topics/Convection_Heat_Coefficient.htm?format=P

[3] 凌桂龙、丁金滨、温正编着 (2011)。ANSYS Workbench 13.0 从入门到精通。北京市：清华大学出版社。

[4] 正修科技大學機械系資料

<http://me.csu.edu.tw/swl/ansys/ch14/ch14.pdf>

[5] 志航科技公司

<http://www.zhi-hang.com/Main.html>

[6] 維基百科

http://en.wikipedia.org/wiki/Nvidia_Quadro

[7] PNY Technologies Europe 公司資料

http://www.pny.eu/data/sitedynamic/File/Quadro/Datasheets/Quadro600_by_PNY_Datasheet.pdf

[8] Techpowerup 公司資料

<http://www.techpowerup.com/gpudb/1318/quadro-600.html>

Abstract

Computer is a necessity in 21 Century. The higher computer performance conducts the high power dissipation of computer components. Therefore, the heat sinks are the essential parts for each computer components. This research carried out an analysis for VH13 heat sink, manufactured by ZHI-HANG Technology, used for cooling a GPU, Nvidia Quadro 600. The analysis is performed by ANSYS software. The results show that the maximum temperature reaches 710.96°C and will cause the break out of GPU for natural convection case without radiation effect. The maximum temperature will reduce to 200°C if the forced convection and radiation heat transfer are concluded.

Keywords : heat sink 、 GPU 、 ANSYS