

樹莓派 5 散熱評估

Raspberry Pi 5 裝在官方外殼（Raspberry Pi Case for Raspberry Pi 5）內、風扇全速、滿載時的 SoC 溫度預估，並比較原廠小散熱片與加大散熱片兩種配置。幾何取自 Raspberry Pi 官方 STEP 與尺寸圖，以空氣、PCB、SoC、散熱片四區耦合熱傳（CHT）計算。

總發熱 **7 W**（SoC 6 W + RP1 1 W） 進風 **25 °C** 風扇 官方外殼風扇，P-Q 曲線

求解器 OpenFOAM v2312 建模 FreeCAD 1.0

摘要

原廠小散熱片的 SoC 為 **81.5 °C**，已超過 **80 °C** 的第一段降頻門檻；換成 **加大散熱片** 後降到 **52.6 °C**（**-28.9 °C**），離降頻門檻有 **27 °C** 裕度。

- 原廠小散熱片只帶走 SoC 熱量的 20%，其餘 76% 從 PCB 散掉，PCB 成了主要散熱路徑，所以溫度偏高。加大散熱片後，74% 的熱改由散熱片帶走。
- 加大散熱片幾乎不增加風扇負載：系統壓降由 7.0 Pa 變成 7.6 Pa，風量只從 1.06 降到 1.03 L/s。
- 與官方實測對照：官方外殼蓋上蓋子、滿載時約 74 °C。本模擬的原廠配置高了約 7.5 °C，屬於偏保守的預估（原因見第 7 節）。

原廠散熱片 SoC

81.5 °C

超過 80 °C 降頻門檻 1.5 °C

加大散熱片 SoC

52.6 °C

裕度 27.4 °C

熱阻 R_{th} (SoC→進風)

9.42 → 4.60

°C/W，降低 51 %

風扇工作點

$\approx 1.05 \text{ L/s}$

7-8 Pa，兩案幾乎相同

仍需實測確認

- SoC 6 W 是估算值，官方未公布 BCM2712 的滿載功耗。溫度對功耗大約是線性：每 $\pm 1 \text{ W}$ ，原廠配置約 $\pm 9^\circ\text{C}$ ，加大配置約 $\pm 4.6^\circ\text{C}$ 。
- 實機風扇由韌體溫控（60 / 67.5 / 75 $^\circ\text{C}$ 三段），本模擬固定全速。

1 · 目的與範圍

要回答的問題

本次回答

- 官方外殼 + 原廠 $12 \times 17 \times 4 \text{ mm}$ 散熱片，滿載時 SoC 會不會超過降頻門檻（80 $^\circ\text{C}$ ）？
- 把散熱片加大到 $29.5 \times 35 \times 8 \text{ mm}$ ，能降多少溫度？會不會增加風扇負載？
- 熱量主要從哪裡散掉：散熱片、PCB，還是直接進空氣？

本次沒有模擬的項目

- 輻射熱傳；外殼外表面對環境的散熱（外殼壁設為絕熱）
- 瞬態：開機升溫過程、負載變化、風扇溫控切換
- RAM、PMIC、USB 控制器等其他元件的發熱（只算 SoC 與 RP1）
- SoC 與散熱片之間導熱墊的熱阻（假設完美接觸）
- 上蓋與外框之間的進風縫隙形狀、線材、灰塵堵塞、HAT 擴充板
- 風扇葉片旋轉造成的渦旋

2 · 模型

幾何與簡化

主板取自 Raspberry Pi 官方 STEP（MIT 授權，2689 個實體），外殼依官方產品簡介的外形尺寸建模（ $98.5 \times 70.3 \times 33 \text{ mm}$ ）。

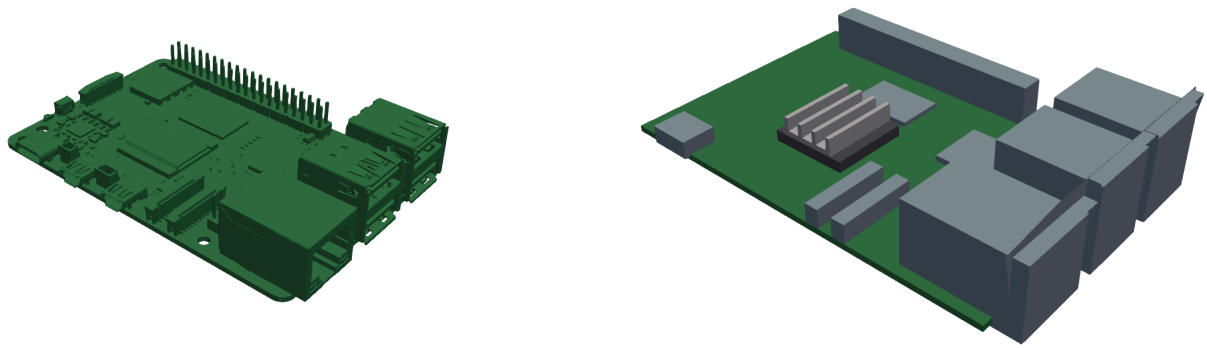


圖 1 原始 CAD（左）與 CFD 簡化模型（右）。保留會影響氣流與導熱的元件：PCB、SoC、RP1、RAM、Ethernet、2 組 USB、GPIO 排針、2 個 MIPI 連接器、USB-C，全部簡化成長方塊（GPIO 40 支針合成一個 9.9 mm 高的方塊）。刪除小型 SMD 元件、螺絲孔、倒角與絲印，這些對流場與散熱的影響很小。

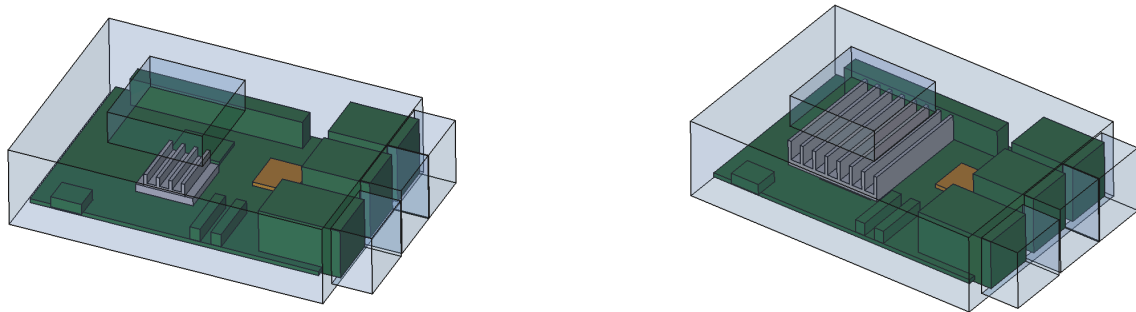


圖 2 兩種配置（左：原廠小散熱片；右：加大散熱片）。藍色半透明為外殼內的空氣空間，上方方形短管是風扇進風口（ 28×28 mm，位於 SoC 正上方，向下吹），右端與兩側的短管是出風開口。

外殼內部空間 $92.5 \times 66 \times 24.5$ mm	PCB 位置 板面離外殼底 5 mm	原廠散熱片 $12 \times 17 \times 4$ mm，4 鰭
加大散熱片 $29.5 \times 35 \times 8$ mm，8 鰭	加大散熱片間隙 距 RAM 1.4、MIPI 1.6 mm	出風：連接器端 Ethernet / USB 周圍 1.5 mm 縫
出風：側面 電源+2×HDMI，各 10×3 mm	出風：通風槽 4 條 12×2 mm（對側低處）	

材料、熱源與介面

零件	材料	k (W/m · K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg · K)
PCB	FR-4 + 多層銅 (等效)	20 (等向)	1900	1100
SoC 封裝	矽晶片 + 封裝 (等效)	60	2330	700
散熱片	鋁 6063	200	2700	900
空氣	理想氣體	—	依溫度	1006

元件	功耗	數字來源	工作模式	建模方式
BCM2712 SoC	6 W	估算 (官方未公布滿載功耗)	4 核滿載	SoC 區域的體積熱源
RP1 I/O 控制器	1 W	估算	I/O 活動中	元件表面加熱 (空氣側)
SoC-散熱片介面	—	官方附自黏導熱墊	—	假設完美接觸 (未建模)

邊界條件與求解器

邊界條件

- **進風溫度 25 °C**：室內常溫。
- **重力 -z**：外殼平放、上蓋朝上。
- **風扇**：P-Q 曲線，由 (0 L/s, 40 Pa) 線性到 (1.32 L/s, 0 Pa)。最大風量 1.32 L/s (2.79 CFM) 取自官方規格；最大靜壓 40 Pa 為假設值，官方未公布。
- **出風口**：大氣壓 (101325 Pa)。
- **外殼壁面**：絕熱、不滑移。
- **海拔**：海平面。

求解設定

- OpenFOAM v2312 `chtMultiRegionSimpleFoam`，穩態，4 區耦合 (air / pcb / soc / hs)。
- 紊流模型 $k-\omega$ SST：風扇出口的噴流撞擊與分離流，用這個模型比較穩。
- 開啟浮力，未算輻射。
- 各 3000 步；8 核平行，原廠配置約 35 分鐘、加大配置約 26 分鐘 (計算時間)。
- 網格 `snappyHexMesh`：基本 2 mm，散熱片與 PCB 表面 0.5 mm，出風縫隙區加密到 0.5 mm。

兩種配置比較

配置	SoC 最高溫度	降頻裕度	R _{th}	散熱片最高	出風溫度	風量	壓降
加大散熱片 29.5×35×8 mm，覆蓋 SoC + RAM	 52.6 °C	+27.4 °C	4.60 °C/W	52.3 °C	30.7 °C	1.03 L/s	7.64 Pa
原廠小散熱片 12×17×4 mm（官方外殼 附）	 81.5 °C	-1.5 °C	9.42 °C/W	81.2 °C	30.6 °C	1.06 L/s	6.96 Pa

長條刻度 0–90 °C。「回推熱量」由出風溫升 × 質量流率 × c_p 計算，應等於總發熱 7 W。 $R_{th} = (\text{SoC 溫度} - \text{進風溫度}) / 6 \text{ W}$ 。降頻裕度 = 80 °C – SoC 溫度，綠色 ≥ 10 °C、黃色 < 10 °C、紅色超過門檻。Raspberry Pi 在 80 °C 開始降頻，85 °C 進一步降頻。

SoC 熱量去向	原廠小散熱片
→ PCB	4.56 W (76 %)
→ 散熱片	1.21 W (20 %)
→ 空氣（SoC 側面）	0.23 W (4 %)

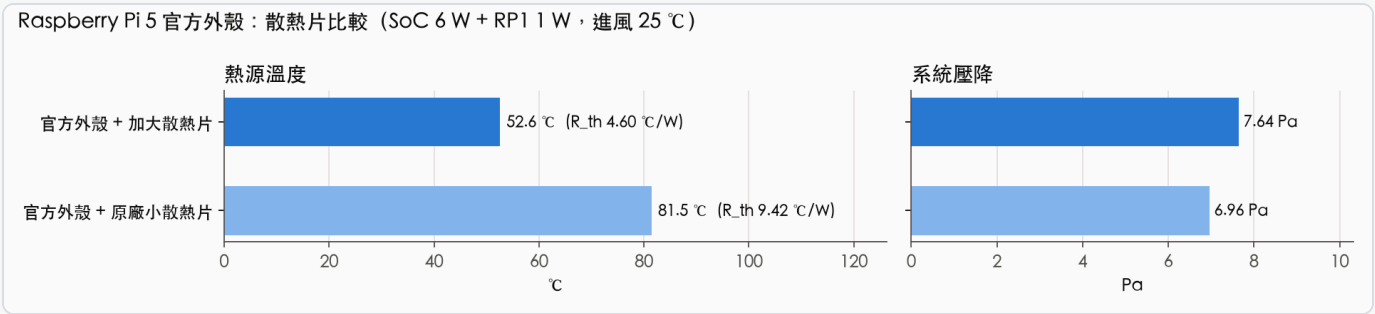
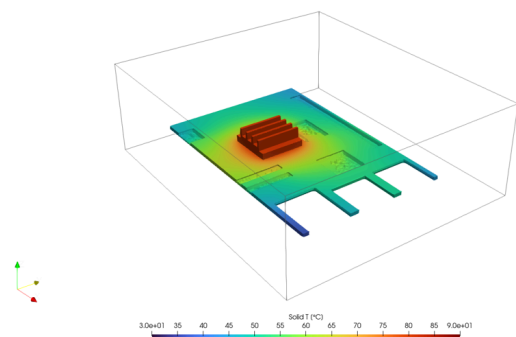


圖 3 SoC 溫度與系統壓降。兩項分開作圖，不共用座標軸。

溫度與流場

左：原廠小散熱片；右：加大散熱片。除圖 8 外，兩格使用相同色階。

官方外殼 + 原廠小散熱片



官方外殼 + 加大散熱片

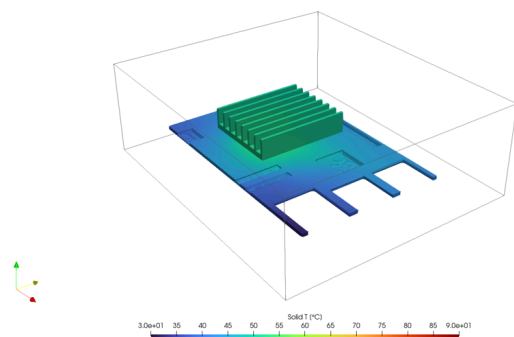
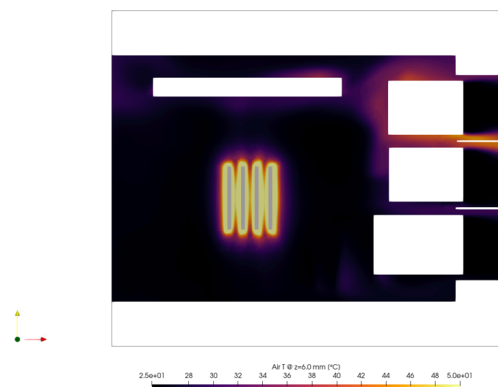


圖 4 固體溫度：PCB + SoC + 散熱片（30–90 °C）。原廠配置的熱點集中在 SoC，熱量以 SoC 為中心往整片 PCB 擴散。加大散熱片後，整片 PCB 降到 40–50 °C。PCB 上的缺口是連接器所在位置，這些元件簡化成擋風方塊，沒有計算導熱。

官方外殼 + 原廠小散熱片



官方外殼 + 加大散熱片

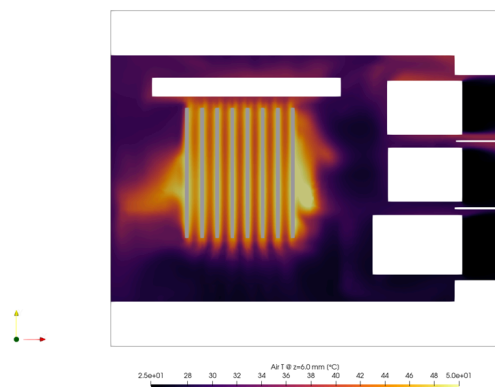
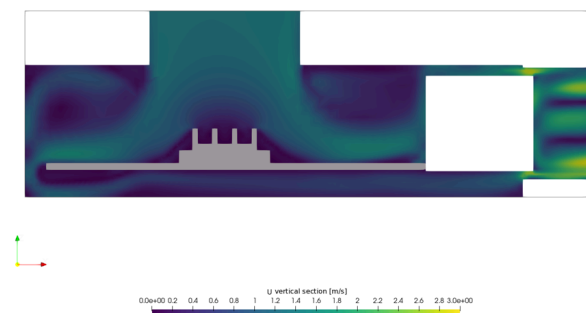


圖 5 鰭片高度 $z = 6\text{ mm}$ 的空氣溫度（25–50 °C）。原廠散熱片的鰭片短，只有周圍一圈薄薄的热空氣。加大散熱片把熱交給更多空氣，鰭片之間的熱空氣從兩側流向 USB 端出風口。

官方外殼 + 原廠小散熱片



官方外殼 + 加大散熱片

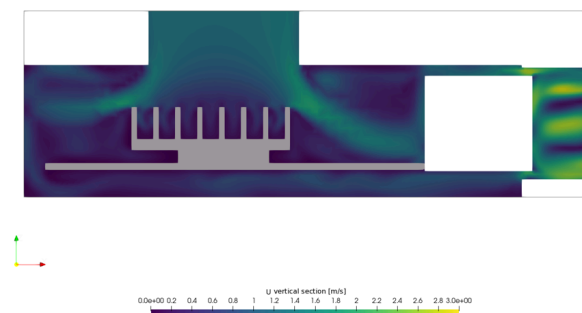
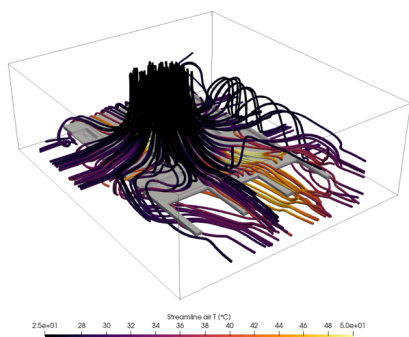


圖 6 通過 SoC 中心的垂直切面風速（0–3 m/s）。風扇氣流向下直吹散熱片，打到板面後往兩側分流，一部分繞到 PCB 下方，最後從 USB 連接器周圍的縫隙高速流出（約 2.5 m/s）。風扇正下方有一個低速區（停滯點）。

官方外殼 + 原廠小散熱片



官方外殼 + 加大散熱片

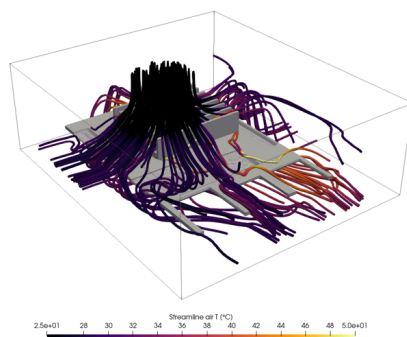
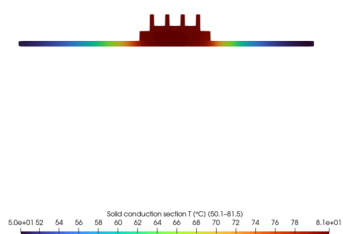


圖 7 流線，以空氣溫度著色。氣流進入外殼後在內部大範圍迴旋，才從連接器端與側面開口離開。

官方外殼 + 原廠小散熱片



官方外殼 + 加大散熱片

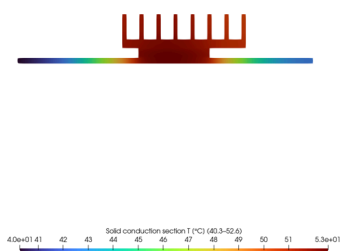


圖 8 通過 SoC 的導熱剖面（各自依資料範圍著色）。原廠配置：SoC 與散熱片約 81 °C，PCB 從 SoC 往外降到 50 °C，溫差大，代表 PCB 正在傳導大量熱。加大配置：整個剖面只差 12 °C，熱量改由散熱片帶走。

7 · 驗證

收斂、網格與實測對照

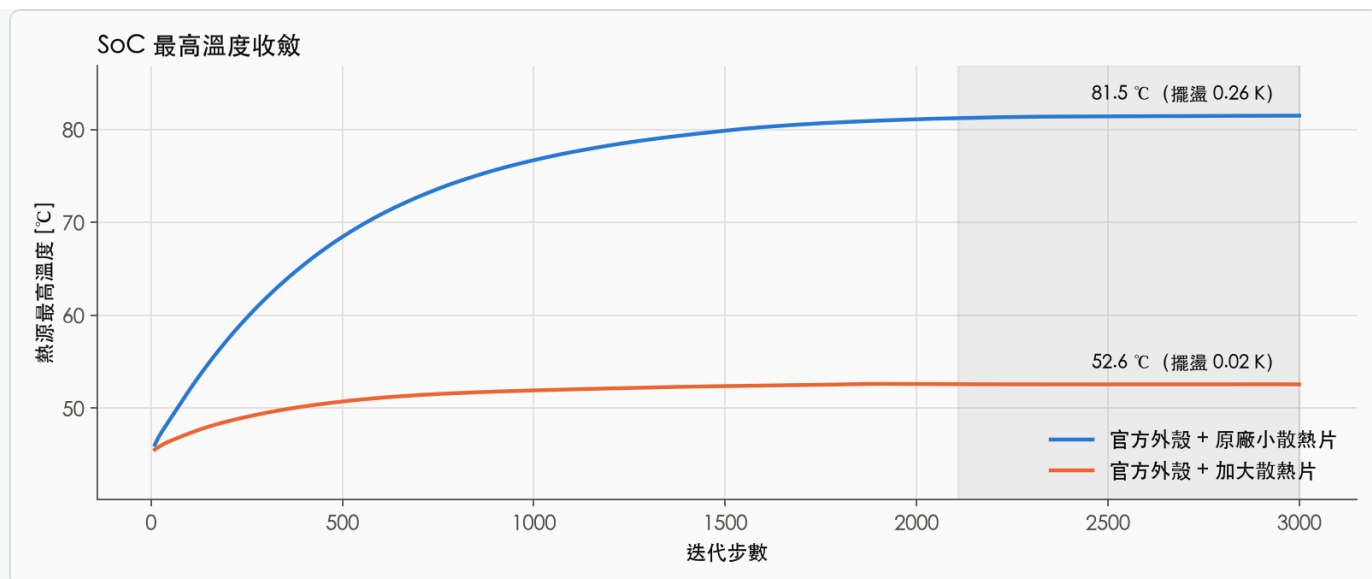


圖 9 SoC 最高溫度收斂。灰底是最後 30 % 的步數。原廠配置在最後 900 步只變化 0.26 K，加大配置只變化 0.02 K。PCB 導熱擴散慢，所以原廠配置需要約 2500 步才穩定。

項目	原廠小散熱片	加大散熱片	判定
網格 cells (air / pcb / soc / hs)	412,217 / 29,448 / 5,780 / 3,264	472,937 / 29,448 / 5,780 / 29,960	—
checkMesh 最大偏斜度 (air)	2.92	3.54	OK (✓)
能量守恆 (出風回推 / 設定)	7.00 / 7.00 W	7.01 / 7.00 W	誤差
收斂擺盪 (最後 30 %)	0.26 K	0.02 K	< 1
網格獨立性測試		未做	列入附錄

與官方實測對照

- 官方外殼蓋上蓋子、滿載：約 **74 °C** (Raspberry Pi 官方測試，冷氣辦公室)。
- 本模擬原廠配置：**81.5 °C**，高 7.5 °C。
- 偏高的可能原因：SoC 6 W 估算偏高；PCB 等效 $k = 20$ 偏低（實際銅層更多）；外殼壁面設為絕熱、沒有算輻射；實機辦公室氣溫可能低於 25 °C。這些因素都會讓模擬偏保守。
- 預估誤差範圍： $\pm 5\text{--}8\text{ °C}$ 。

第一版模型的教訓

- 第一版把 PCB 當絕熱擋板、風扇用固定風量 1 L/s，算出 SoC **239 °C**、壓降 **718 Pa**，明顯不合理。
- 原因：第 5 節的熱量分析顯示，原廠配置有 76 % 的熱從 PCB 散掉，漏掉 PCB 導熱就等於堵住主要散熱路徑。只開連接器縫隙、又強制固定風量，壓降就被放大到 100 倍。
- 第二版（本報告）改為 PCB 導熱、補齊側面與通風槽開口、風扇使用 P-Q 曲線，結果落在實測的合理範圍內。

限制

- SoC 與 RP1 功耗為估算值，每 $\pm 1\text{ W}$ 的 SoC 功耗約對應原廠配置 $\pm 9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、加大配置 $\pm 4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
- 風扇 P-Q 曲線的最大靜壓（40 Pa）是假設值；風扇固定全速，實機由溫控降速。
- PCB 用等向等效導熱係數 $20\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ；實際為面內高、厚度方向低的非等向材料。
- SoC-散熱片之間的導熱墊熱阻未建模。若以約 1 K/W 估計，SoC 約再加 $1\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ （流經散熱片的熱量：原廠 1.2 W 、加大 4.4 W ）。
- 外殼壁面絕熱、未算輻射，結果偏保守。RAM、PMIC 等元件的發熱未計入，這部分會讓結果偏樂觀。
- 未做網格獨立性測試；風扇以均勻進風近似，未計入葉片旋轉。

8 · 建議

設計建議與實測計畫

設計建議

1. **加大散熱片**（本報告方案）：SoC $-28.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，壓降只增加 0.7 Pa ，是效益最高的改法。要注意和 RAM（ 1.4 mm ）、MIPI 連接器（ 1.6 mm ）的間隙，底部要墊絕緣導熱墊。
2. **保留原廠散熱片時**：換成厚度較薄、 k 值較高的導熱墊，並確認 PCB 背面沒有被外殼底部悶住。溫度會落在降頻門檻附近，長時間滿載會降頻。
3. **替代方案**：官方 Active Cooler（官方實測 $62\text{--}63\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）。它高 13.7 mm ，要先確認外殼內部高度與風扇框能容納。

建議實測項目

- SoC：`vcgencmd measure_temp`，以 `stress-ng --cpu 4` 滿載 30 分鐘，記錄穩定值與降頻旗標（`vcgencmd get_throttled`）。
- 熱電偶 T1：散熱片頂面中央。
- 熱電偶 T2：PCB 背面 SoC 正下方。
- 熱電偶 T3：USB 端出風縫隙。
- 熱電偶 T4：外殼外 10 cm 的環境溫度。
- 用 USB 功率計量整板功耗，回推 SoC 的實際功耗，再校正本模型。

9 · 附錄

參數、名詞與參考資料

名詞

CHT	耦合熱傳：空氣流動與固體導熱一起算
R_{th}	熱阻，每 1 W 熱量造成的溫升 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)，越小越好
P-Q 曲線	風扇在不同壓力下能提供的風量
RANS	以時間平均描述紊流的穩態計算方法
降頻	晶片過熱時自動降低時脈以保護自己，效能下降

參考資料

- [Raspberry Pi 5 STEP 模型](#) (MIT 授權)
- [Raspberry Pi Case for Raspberry Pi 5 產品簡介](#)：外形、風量、散熱片尺寸
- [Active Cooler 機構圖](#)
- [Heating and cooling Raspberry Pi 5](#)：降頻溫度、風扇溫控、實測溫度

由 FreeCAD + OpenFOAM v2312 + ParaView 6.1 產生 (cfd-thermal-report skill)。數值為穩態 RANS 預估，用於比較設計方案，不取代實機量測。