

逢甲大學學生報告 ePaper

報告題名：

智慧菇舍環境監控系統設計

**Design of an Environmental Monitoring System for Smart
Mushroom Houses**

作者：郭品箴

系級：自控控制工程學系

學號：D1352931

開課老師：黃清輝

課程名稱：感測與量度工程

開課系所：自動控制工程學系

開課學年：114 學年度 第二學期



中文摘要

本報告旨在針對傳統菇舍受極端氣候影響導致產量下滑、溫濕度管理不易的痛點，設計一套專為高濕環境打造的「智慧菇舍溫度量測與環境監控系統」，以保障香菇各生長階段之最適微氣候環境。主要過程與方法上，系統前端選用具備抗潮濕且高線性度的電流輸出型 AD590 溫度感測器 ($1\mu\text{A} / \text{K}$)，透過精密金屬膜電阻將微安培電流轉換為下地電壓訊號，並搭配 TL431C 基準源扣除 0°C 時的直流零點偏移；後級採用超低溫漂的 OP07CP 精密運算放大器組建 100 倍差動放大器，將 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ 的溫度範圍線性放大為 $0\sim 5\text{V}$ 訊號，最後送入微控制器進行 ADC 取樣、1602 LCD 顯示及繼電器連動；同時整合 RC 低通濾波、雙絞隔離線單端接地及移動平均演算法以全面抑制馬達突波與環境雜訊。研究結果成功實現了以 $100\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 高精度線性輸出的溫控電路，並透過實驗室兩點校正法將誤差控制在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 內；此成果可直接應用於智慧菇舍之排風、水霧降溫閉環控制，亦能延伸推廣至農業溫室多通道量測、AIoT 遠端環控與工業級高濕度環境監測等領域。

關鍵字： 差動放大器、溫度感測器、運算放大器、環境監控系統

Abstract

This study presents the design of an intelligent mushroom house temperature measurement and environmental monitoring system tailored to overcome the vulnerability of traditional mushroom sheds to extreme climate variations, ensuring optimal microclimates across mycelium growth and fruiting stages.

To address the harsh conditions of high humidity and potential line resistance oxidation, a current-output AD590 integrated circuit temperature sensor ($1\mu\text{A} / \text{K}$) encapsulated in a waterproof stainless steel probe is employed. The microampere current signal is converted into a base voltage using a precision ground resistor, followed by a DC offset elimination circuit powered by a high-stability TL431C reference voltage source. An ultra-low-offset operational amplifier (OP07CP) is configured as a differential subtractor amplifier with a gain of 100, linearly mapping the temperature span of 0°C to 50°C to a standard 0V to 5V output ($100\text{mV} / ^{\circ}\text{C}$) for microcontroller ADC acquisition, on-site 1602 LCD indication, and closed-loop relay actuation for ventilation fans and mist cooling systems. Comprehensive anti-interference measures—including a first-order RC low-pass filter ($f_c \approx 159\text{ Hz}$), shielded twisted pair cabling with single-point grounding, power decoupling, and a moving average digital filtering algorithm—are implemented to suppress motor switching surges and spatial electromagnetic interference.

Experimental zero and span calibrations demonstrate an overall system error within $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.

The proposed system provides a robust, low-drift hardware foundation for smart greenhouse microclimate regulation and exhibits significant potential for multi-channel AIoT agricultural expansion.

Keyword : Current-to-Voltage Converter (I-V Converter) 、 Intelligent Mushroom House 、 Operational Amplifier (Op-Amp) 、 Temperature Sensor

目 錄

一、 企劃委託(PROJECT COMMISSION)-----	4
二、 設計步驟及分析(DESIGN STEPS AND ANALYSIS) -----	5
決定使用哪一種溫度感測器-----	5
決定使用哪種轉換電路-----	7
決定電源電壓和參考電壓-----	10
要用哪一顆的 OPAMP-----	12
轉換電路的設計 -----	14
放大器的設計 -----	16
指示電路設計 -----	18
消除雜訊及預防 -----	20
線路說明及分析 -----	22
調校步驟的安排 -----	23
三、 未來展望(FUTURE OUTLOOK) -----	27
四、 結論(CONCLUSION) -----	27
五、 參考文獻(REFERENCES) -----	29

圖 目 錄

圖 1、香菇培養的不同階段合適環境圖	4
圖 2、香菇生長階段圖	5
圖 3、AD590 溫度感測器	6
圖 4、基於 AD590 的精密電阻下地取壓與雙運放信號調理電路.....	9
圖 5、OP07CP 實體及腳位圖	13
圖 6、差動放大器	16

表 目 錄

表格 1、溫控系统功能說明	7
表格 2、電源與電路整合特點	11
表格 3、OP07 運算放大器特性表	13
表格 4、差動放大電路特性表	18
表格 5、指示與環控電路功能	19

企劃委託(Project Commission)

日常生活中，香菇是台灣高價值的經濟作物與常見食材。其栽培模式也是最依賴大自然的一種，近年來由於氣候暖化導致極端氣候事件發生頻度增加，使得以傳統菇寮栽培香菇之業者產量不斷下降，也間接導致香菇價格上漲等問題。為了保障香菇栽培的產量與穩定運作，因此對菇舍環境狀況的即時監控非常重要。當走菌期或出菇期管理不當，或是溫室戶外溫度波動較高時，都有可能使菇舍溫度偏離最適區間，溫度過高會造成菌絲燒死、菇傘開裂，可能導致嚴重損壞甚至農業重大的經濟損失。

我希望藉由這個作業設計一套以積體電路式溫度感測器為核心的「智慧菇舍環境監控系統」，不僅能即時監控菇舍的溫度，還能透過合理的電路設計與訊號處理，提供穩定且準確的監測結果。在設計過程中，我將針對感測器種類、電阻與電流對電壓轉換電路的選擇方式、放大器設計與運算放大器型號進行研究與比對，並考慮不同元件對電源電壓的需求與兼容性。同時，也會加入雜訊消除與抗干擾設計，透過濾波器與適當的佈線技巧來提升系統穩定性。

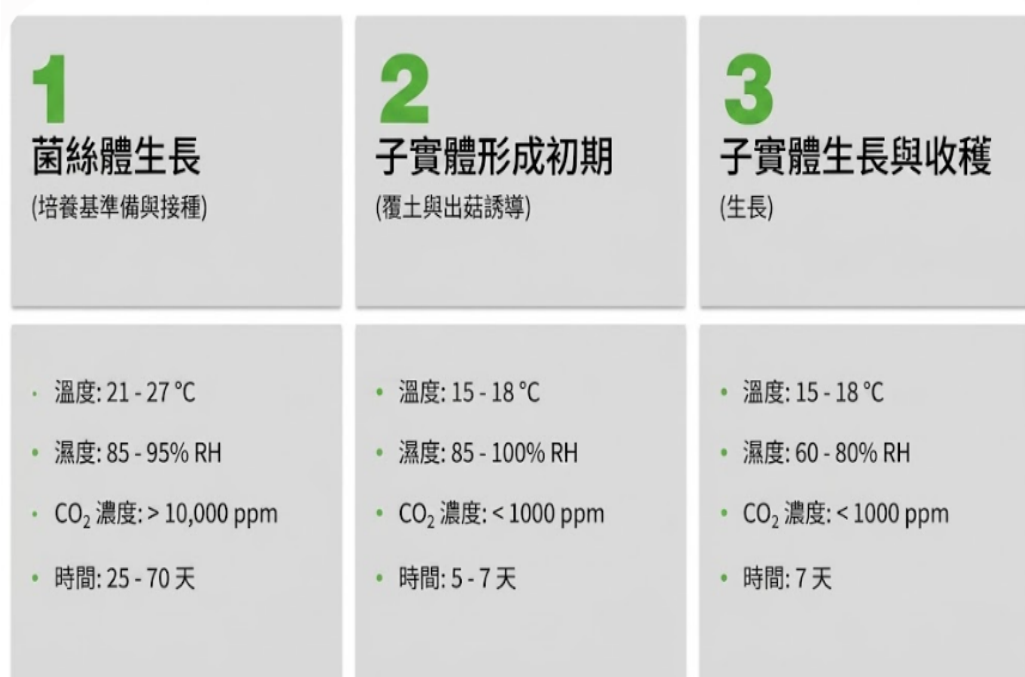


圖 1、香菇培養的不同階段合適環境圖



圖 2、香菇生長階段圖

一、設計步驟及分析(Design Steps and Analysis)

決定使用哪一種溫度感測器

我會選用 AD590 恆流型積體溫度感測器：

1. **極佳的抗潮濕：**AD590 是電流輸出型元件，其輸出電流與絕對溫度成絕對正比。菇舍因長年保持高濕環境，會定時進行水霧噴灑，水分過多會導致傳統 Pt100 等低阻抗電阻式感測器的引線阻抗極易因潮濕氧化而變動。
2. **良好的線性關係：**AD590 的輸出電流與絕對溫度成正比($1\mu\text{A/K}$)，呈現完美的線性變化，這有助於極大地簡化後端電壓轉換與微處理器數據處理的電路設計。

3. **標準化規格與互換性：**AD590 為全球標準化的精密量測晶片，具備雷射修刻技術，可直接搭配標準參考精密電阻進行轉換，易於整合、比對與調校。
4. **適用溫度範圍廣：**AD590 的工作溫度範圍通常涵蓋 -55° 到 $+150^{\circ}$ 。在智慧菇舍面對冬日極寒或夏日曝曬的環境下，依然能穩定運作且維持高精確度。
5. **天生抗雜訊能力極佳：**由於 AD590 在結構上屬於高阻抗電流源輸出，相較於微弱電壓型的熱電偶或易受壓降影響的電阻式感測器，它更不容易受到周邊環境（如菇舍排風扇馬達）的電磁雜訊干擾。
6. **完善的硬體物理防護：**本設計實務上可直接選用具備「不鏽鋼防腐蝕防水探頭封裝」的 AD590，將類比晶片與外界高濕空氣、水霧完全物理隔離，保障系統具備極佳的長期工作壽命。



圖 3、AD590 溫度感測器

AD590 溫度感測器與【智慧菇舍溫度監控】應用之結合:

智慧菇舍在香菇栽培過程中，若未能即時監測並有效控制溫度，將導致走菌失敗或菇體不正常開傘。為了讓菇農能清楚掌握溫室環境變化，並在異常升溫時即時連動灑水與排風，設計一套可靠的溫度監測系統顯得非常重要。

、表格 1、溫控系統功能說明

1. 訊號轉換與放大電路	由於 AD590 輸出為微弱的微安培 (μA) 級電流訊號，系統先透過高精密金屬膜電阻將其轉換為類比電壓訊號，再使用精密差動運算放大器進行零點扣除與放大處理，使輸出電壓範圍精準落在 $0V \sim 5V$ 對應菇舍實際的溫度量測範圍 $0^{\circ}C \sim 50^{\circ}C$ 此電壓訊號即可直接提供給微控制器或 PLC 進行高解析度讀取與判讀。
2. 微控制器即時讀取與處理	透過 Arduino 或智慧環控主機的 ADC 模組讀取放大後的 $0V \sim 5V$ 電壓訊號，再透過公式轉換為實際攝氏溫度數值，並即時顯示於現場 LCD 螢幕上。菇農可清楚了解當下菇舍環境，並設定當溫度超過 $28^{\circ}C$ 時自動驅動繼電器開啟冷卻水霧與排風扇。
3. 系統可靠性與農業環境適應性	考量農業配電系統穩定度，系統加設精密三端穩壓與參考電壓源(如 TL431)提供絕對穩定的工作電壓；搭配 RC 低通濾波電容與屏蔽線，降低來自菇舍大型通風機馬達啟動瞬間所產生的強烈突波與電磁干擾，大幅提升整體運作穩定性。

決定使用哪種轉換電路

選用 I-V (電流轉電壓) 精密電阻下地取壓法和運算放大器來進行信號轉換。

1. 電路最為簡單、易於實現與維護：由於選用電流輸出的 AD590，轉換電路只需讓電流直接流經一顆高精密的金屬膜固定電阻下地，即可把微安培電流轉換成清晰的直流電壓訊號，再配合運算放大器進行級聯放大即可。相較於針對電阻式感測器所設計的

傳統「有源電橋法」或複雜的「定電流源驅動法」，元件更少且結構更直觀。

2. **本質線性度極佳，免除電橋非線性誤差：**傳統電阻電橋法在感測器阻值變化量較大時，其傳遞函數會帶有非線性項。而 AD590 的電流對溫度是絕對線性的，經固定精密電阻下地轉換後的電壓依然保持完美的線性響應，大幅簡化了後端軟體線性化修正的負擔。
3. **生產成本更低，有利於多點擴充：**此架構不需像傳統定電流源法一樣，為了歸零電路而必須額外購買多顆昂貴的定電流 IC 或建立繁瑣的惠斯登電橋平衡網路。所需的元件僅為高精密固定電阻、穩壓參考電壓源（如 TL431）與運算放大器，成本低廉、通用性高，特別適合菇舍多點大面積監控的模組化部署，顯著提升產品競爭力。
4. **易於歸零與增益校正：**分壓與轉換點的直流電位可透過調整後級運算放大器的反相端偏壓，輕鬆實現零點（Offset）扣除；運算放大器的輸出回授端可用多圈精密可變電阻微調，使 **0°C** 對應 0V，**50°C** 對應 5V，具備極佳的調校彈性。
5. **與工業單電源/雙電源系統相容性極佳：**此類比前端轉換電路與後級放大器結構可完美相容於一般的微控制器採樣系統，與車載或嵌入式農業自動化控制箱的相容性極佳。

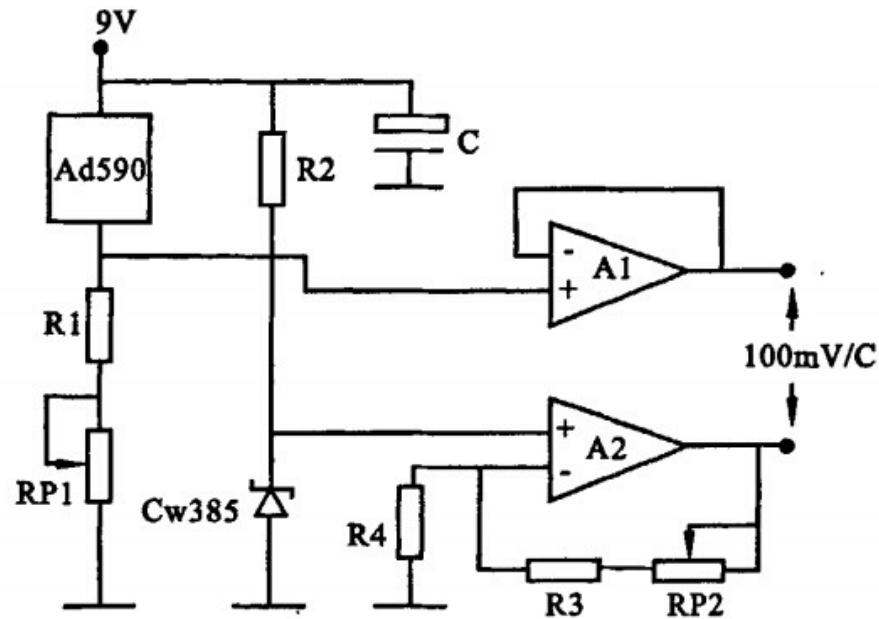


圖 4、基於 AD590 的精密電阻下地取壓與雙運放信號調理電路

電流轉電壓(I-V)精密轉換與【智慧菇舍溫度監控】應用之結合：

在實際農業應用中，溫室內不同位置、菇床不同高度的溫差會直接影響走菌速度。透過將不鏽鋼防水封裝的 AD590 感測器分佈懸掛於菇舍不同跨距的探測點上，可精準反映菇舍內部的立體微氣候熱負荷狀況，並作為冷卻水霧系統的控制依據。

1. **即時環境溫度反映** → I-V 轉換電路結構直觀、元件少，搭配運算放大器可有效將微弱的電流變化調制為強健的電壓訊號，適合長時間高濕度的農業溫室環境運行，並具備良好的抗雜訊能力。
2. **高精度量測與自動化環控整合** → 透過 AD590 的高線性特性與微控制器 ADC 的精確讀取，可將菇舍各點的溫度準確轉換為數位訊號，實現即時現地顯示與多級溫度過熱警報，有助於提升香菇栽培產值。
3. **具備擴充性與現場智慧應用彈性** → 本架構可延伸應用至多通道切換量測、智慧菇舍通風機聯動溫控、農業物聯網 (AIoT) 智慧模組整合（如連接 RS485 / Modbus 總線傳輸），具有良好的擴展潛力與農業實用價值。

決定電源電壓和參考電壓

我會為類比放大電路選用 $\pm 12V$ 雙電源供電，以確保類比前端擁有最高的線性度與最寬廣的動態擺幅。而在微控制器主控板端則採用 $\pm 5V$ 單電源供電進行數位訊號處理。

1. 雙電源 vs 單電源的技術對比

	優點	缺點
雙電源供電 (如 $\pm 12V$)	能讓運放支援真正的零電壓線性輸出，徹底消除死區誤差並大幅擴大動態範圍，且不需建立繁瑣的虛擬接地分壓，在直流放大時線性度極佳。	需要專用的電源變壓器或雙向 DC-DC 電源模組，硬體供電成本較單電源系統略高。
單電源供電 (如 $\pm 5V$)	可與微控制器（如 Arduino Uno 系統）直接共用單一電源，設計精簡，所需電源模組少。	若不設置虛擬接地，運算放大器的零點輸出極易受到軌對軌（Rail-to-Rail）限制，無法輸出真實的 0V，會污染低溫量測的精度。

2. 參考電壓的考慮（Vref）：

- **目的：**為後級減法放大器提供絕對穩定的參考電壓，用以精準扣除 AD590 在 0°C 時所產生的 $0.27315V$ 直流零點偏移（Offset 電位）。
- **選擇建議：**選用課本表 8-2 推薦的 TL431C 高穩定精密參考電壓 IC。其具有超低溫度漂移係數 ($50\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$) 與極低的動態阻抗，能透過分壓 POT 輕鬆設定出符合數學推導的 $0.27315V$ 定電壓，提供長期穩定且低雜訊的參考源。

3. 電源穩壓與雙重濾波設計：

為了讓精密的運算放大器、AD590 轉換電路與 1602 LCD 顯示系統全天候正常工作，電源供電級設計如下：

- **主穩壓器**：使用 LM7812 與 LM7912 三端穩壓 IC，將外部輸入粗電壓穩定降壓至微雜訊的 $\pm 12V$ 提供給運放。

- **雙重電源濾波電容配置**：

低頻濾波：於電源輸入與輸出端跨接 $220\mu F$ 鋁電解電容，用以濾除菇舍大型排風扇馬達啟動瞬間所引起的低頻紊亂與電力線壓降突波（主濾波）。

高頻退耦：在每一顆運算放大器與微處理器的電源引腳旁，就近並聯 $0.1\mu F$ 積層電容，用以高效濾除高頻環境輻射雜訊與電源線的高頻漣波。

穩定電源配置與【智慧菇舍溫度監控】應用之結合：

表格 2、電源與電路整合特點

1. 符合現場配電特性，訊號不失真	透過雙電源供電給類比前端，確保當菇舍降溫至 $0^{\circ}C$ 的極限校正點時，運算放大器能輸出絕對真實且不飽和的 $0.00V$ 類比訊號，提供精準的基底。
2. 搭配精密基準實現完全零點扣除	利用 TL431 穩壓產生的定電壓偏壓作為運放的差動參考點，在硬體電路上直接將 AD590 在冰水混合物下的 Kelvin 直流偏壓扣除，實現溫度訊號的有效線性輸出。
3. 提升整體整合度與微處理器匹配性	前端調理電路輸出的 $0V\sim 5V$ 線性滿幅電壓，能與微控制器（Arduino）的類比輸入範圍（ADC Range）達到 100% 完美匹配，既

	保證了數據採樣的最高解析度，也避免了輸出高電壓損壞數位晶片的風險。
--	-----------------------------------

要用哪一顆的 OPamp

選擇用直流特性最優異的 OP07CP 超低偏移精密運算放大器。

1. 常見適合量測的運算放大器性能比對

LM358A：

分析：屬於大眾通用型單電源運放，價格極低；但其輸入補償（偏移）電壓高達 $3000\mu\text{V}$ ，且其偏移電壓的隨溫漂移（Vos Drift）高達 $20\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 。若用於放大微弱的溫度信號，會隨著菇舍四季溫差產生嚴重的直流數據飄移，導致量測結果完全失真，故不予選用。

OP07CP：

分析：工業級超低偏移運算放大器。其最大輸入補償電壓（Vos）極低，且其隨溫度產生的電壓漂移率僅為 $0.3\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 共模拒斥比（CMRR）超越 120dB。這意味著它能完全抑制空間中的共模干擾，對微弱直流信號的誤差影響最小，是最適合需要長時間穩定且精密的溫度感測前置放大器。

2. 元件選型關鍵考量

超低輸入偏壓電流（Ib）與低失調電壓（Vos）：

OP07 能將晶片本質的非理想直流誤差降至最低，避免微弱信號被放大器自身的噪聲污染。

優異的長期穩定度：

菇舍為全天候 24 小時監控系統，OP07 具有極佳的時變穩定性，能免除頻繁校正的困擾。

良好的內部頻率補償：

OP07 晶片內部補償完善，在高增益下電路極其穩定、不易產生高頻自激震盪，有效提升整體農業環控硬體的可靠性。

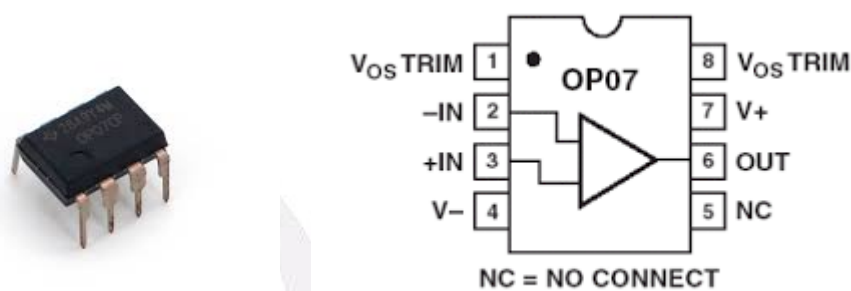


圖 5、OP07CP 實體及腳位圖

編號 OP07CP 精密運放與【智慧菇舍溫度監控】應用之結合：

OP07 的高精度直流特性能有效保護智慧菇舍環境感測器的微弱轉換訊號，確保全天候量測的精準度，使其在現場能長期免維護運轉。

表格 3、OP07 運算放大器特性表

1. 精密阻抗匹配與前置緩衝	OP07 具有高輸入阻抗與極低的輸入偏壓電流（最大僅 7nA 級），能有效避免 I-V 轉換電路輸出信號被放大器負載效應所拉低，保持最原始訊號的準確度。
2. 穩定增益級，簡化硬體調校	簡化硬體調校：利用其近乎零溫飄的特性，在 $\pm 12V$ 工業供電環境下展現完美的線性放大，使硬體在後續的實驗室雙點校正時能呈現完美的直線方程。
3. 卓越的抗噪共模抑制能力	高達 120dB 的 CMRR 能徹底消除來自菇舍內長導線引線所感應的共模環境電磁雜訊，即時放大真實的溫度變異訊號，協助環控系統精確調節，保障栽培作物的生命安全。

轉換電路的設計

將 AD590 隨溫度改變所產生的微弱直流電流變化，完美轉換為與攝氏溫度呈高度線性正比的基礎電壓訊號 V_{in} 。

1. 具體設計方式：

利用一組高精密、低溫度係數 ($\leq 25\text{ppm}/^\circ\text{C}$) 之 $1\text{k}\Omega$ 精密金屬膜固定電阻 $R_{\text{精密}}$ 串接於 AD590 的電流輸出端下地，構成高穩定度電流-電壓 (I-V) 轉換電路。AD590 所流出的恆定電流將在 $1\text{k}\Omega$ 電阻兩端直接抽取出相對應的直流偏置電壓 V_{in} 。

2. 公式詳細分析：

依據 AD590 的物理物理特性方程，其輸出電流與絕對溫度成絕對正比： $I_{out} = 1\mu\text{A}/\text{K}$ 。本系統規劃的目標菇舍量測溫度區間為 $0^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 。首先將攝氏溫度轉換為凱氏絕對溫標 (Kelvin)：

- $0^\circ\text{C} = 273.15\text{ K}$
- $50^\circ\text{C} = 323.15\text{ K}$

當溫度處於低溫與高溫端時，感測器輸出的電流與經由 $1\text{k}\Omega$ 電阻下地所產生的電壓公式如下：

- 在 0°C (絕對零點基準點)時：

$$I_{out}(0^\circ\text{C}) = 273.15\text{ K} \times 1\text{ }\mu\text{A}/\text{K} = 273.15\text{ }\mu\text{A}$$

$$V_{in}(0^\circ\text{C}) = I_{out}(0^\circ\text{C}) \times R_{\text{精密}} = 273.15\text{ }\mu\text{A} \times 1\text{ k}\Omega = 0.27315\text{ V}$$

- 在 50°C (滿刻度高溫點)時：

$$I_{out}(50^{\circ}\text{C}) = 323.15 \text{ K} \times 1 \mu\text{A/K} = 323.15 \mu\text{A}$$

$$V_{in}(50^{\circ}\text{C}) = I_{out}(50^{\circ}\text{C}) \times R_{\text{精密}} = 323.15 \mu\text{A} \times 1 \text{ k}\Omega = 0.32315 \text{ V}$$

隨著菇舍內部環境溫度上升，AD590 流出的電流等比例增加，進而導致分壓點的抽取電壓 V_{in} 呈現高度線性的升高。此時，轉換電路所能獲得的類比電壓有效變化範圍（Signal Span）經數學相減計算為：

$$\Delta V_{in} = V_{in}(50^{\circ}\text{C}) - V_{in}(0^{\circ}\text{C}) = 0.32315 \text{ V} - 0.27315 \text{ V} = 0.05000 \text{ V (即 } 50 \text{ mV)}$$

3. 核心設計要點：

- 阻值精密匹配：

下地電阻必須百分之百選用誤差在 $\pm 0.1\%$ 以下的精密金屬膜電阻，因為該電阻的阻值公差直接決定了前端 I-V 轉換的靈敏度與初始誤差，低溫飄特性可確保溫室高熱時阻值不產生漂移。

- 直流零點偏移的存在：

推導公式顯示，雖然有效電壓變化量（ ΔV_{in} ）為純線性的 50mV，但整體訊號疊加在一個高達 0.27315V 的直流零點偏移電位之上（意即 0°C 時不為 0V），這必須仰賴下一級的減法放大器進行電路硬件偏壓扣除。

前端 I-V 線性轉換與【智慧菇舍溫度監控】應用之結合：

在智慧菇舍溫度監控應用中，將 AD590 探頭的微弱電流變化精密轉換為線性電壓訊號，是實現即時、準確閉環監控的關鍵技術基礎。

1. 即時動態微氣候反應：50mV 的線性電壓輸出能精確地隨著菇舍環境溫度的呼吸進行同步起伏，讓控制主機得以及早判斷溫室熱狀態，快速連動通風風機或發出高溫預警。
2. 提升量測電路本質穩定性：透過金屬膜精密電阻的直接下地轉換，免去了傳統熱敏電阻需要軟體查表與多項式複雜修正的非線性失真，大幅提高整體監測前端系統的軟硬體可靠性。

3. 利於後級一體化整合：轉換出的強健線性直流電壓極利於送入由 OP07 構成的精密差動訊號調節級，為後續高解析度類比數位整合奠定乾淨的基石。

放大器的設計

目標：設計一組 OP07 差動放大電路，負責徹底扣除 0.27315V 的直流零點偏移，並將 50mV 的微弱變化量放大 100 倍，輸出微處理器 ADC 最理想的 0V~5V 線性電壓。

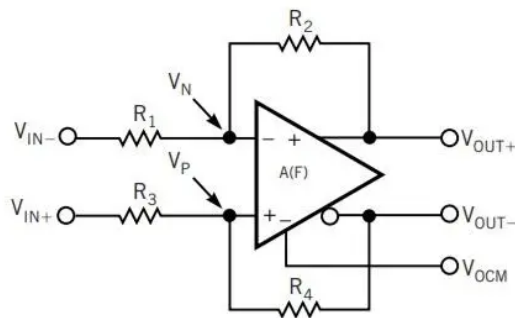


圖 6、差動放大器

1. 放大器增益 (Gain) 與電路傳遞方程推導：

本設計採用標準的反相/非反相運算放大器減法電路架構（差動放大器）。其增益（ A_v ）必須將輸入端的 50mV 有效動態範圍，放大至微控制器滿幅的 5V：

$$A_v = \frac{V_{out_{max}} - V_{out_{min}}}{V_{in_{max}} - V_{in_{min}}} = \frac{5V - 0V}{0.32315V - 0.27315V} = \frac{5}{0.05} = 100(\text{倍})$$

依據運算放大器差動結構的標準傳遞方程：

$$V_{out} = A_v \times (V_{in} - V_{offset})$$

為了實現完美的 100 倍放大與零點消除，電路參數配置如下：

- 增益電阻設定：選定輸入端的兩顆精密對稱電阻 $R_{in1} =$

$R_{in2} = 1k\Omega$ ，而跨接在 OP07 反相端與回授端、以及正

相端下地的精密阻值則設定為 $R_f = R_g = 100\text{ k}\Omega$ 。其電

阻比值精確滿足： $\frac{R_f}{R_g} = \frac{100\text{ k}\Omega}{1\text{ k}\Omega} = 100$ 。

- **零點補償電壓 V_{offset} 的接入**：將差動放大器的反相參考端連接至由 TL431 精密分壓網路所產生的固定直流電壓 $V_{offset} = 0.27315\text{V}$ 。

2. 電路工作狀態驗證：

- 當菇舍環境溫度為 0°C 時：前端轉換電壓 $V_{in} = 0.27315\text{V}$ 。帶入差動傳遞方程：

$$V_{out} = 100 \times (0.27315\text{V} - 0.27315\text{V}) = 100 \times 0\text{V} = 0.00\text{V}$$

- 當菇舍環境溫度為 50°C 時：前端轉換電壓 $V_{in} = 0.32315\text{V}$ 。帶入差動傳遞方程：

$$\begin{aligned} V_{out} &= 100 \times (0.32315\text{V} - 0.27315\text{V}) = 100 \times 0.05\text{V} \\ &= 5.00\text{V} \end{aligned}$$

經由上述精密類比計算，電路完美建立起一條極其精準的斜率直線： $100\text{mV}/^\circ\text{C}$ （即溫度每升高 1°C ，運放輸出端電壓精確遞增 0.1V ）。

3. 工程實務注意事項：

電路中所有阻值必須採用誤差 $\pm 0.1\%$ 、低溫飄（ $\leq 25\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ）的高精密金屬膜電阻。若電阻不對稱（如 $R_f \neq R_g$ ），將會導致共模拒斥比（CMRR）急劇下降，造成零點飄移。此外，OP07 在

$\pm 12V$ 供電下輸出 0V~5V 處於極佳的線性安全工作區，絕不產生信號截止飽和失真。

精密差動放大器與【智慧菇舍溫度監控】應用之結合：

放大器在智慧菇舍環境監控系統中扮演最核心的關鍵橋樑角色，將前端探頭微弱的物理信號放大至適合微控制器 ADC 高解析度讀取的範圍，全面提高數據的可用性與抗干擾度。

表格 4、差動放大電路特性表

1. 增益與零點的完美硬體調節	透過 OP07 差動運放架構，在硬體電路級直接將 50mV 的微弱溫差信號拉伸放大，使其輸出電壓完美符合 0V~5V 工業標準，確保溫度數據能被後端 MCU 的類比腳位百分之百精確捕捉
2. 靈活的可調校彈性	在 R_f 與偏壓路徑上設計多圈精密可變電阻，方便菇舍現場在不同配線長度或感測器晶片微小公差變化時，進行後期的現地微調校正，維持系統的高靈敏度。
3. 穩定性與雜訊擴大之控制	電路設計將增益精確限制在 100 倍，既提供了充足的訊號解析度，又避免了過大的放大增益導致前端雜訊被同步放大而引發電路震盪，在靈敏度與運作穩定性之間取得了完美的工程折衷。

指示電路設計

目標：規劃現地視覺化顯示電路，並整合數位控制核心，建立全自動化的菇舍封閉式閉環環境控制連動響應機制。

1. 現地視覺化資料擷取與顯示

由 OP07 輸出端產生的 0V~5V 線性調節模擬電壓，直接接入微控制器(如內建 ATmega328P 核心的 Arduino Uno 平台)的 10-bit 類比數位轉換器(ADC0 引腳)。

●數據還原算法：10-bit ADC 會將 0V~5V 的連續電壓切分為 0~1023 的數位階梯。微控制器內部的編譯軟體透過精確的直線方程進行溫度還原：

$$\text{溫度數值}(^{\circ}\text{C}) = \frac{\text{ADC讀值}}{1023.0} \times 50.0$$

- 液晶現地指示：**還原後的攝氏溫度數據，會定時驅動傳輸至佈署於菇舍入口控制箱外殼上的 1602 LCD 液晶顯示面板（具備高對比度防霧背光），讓現場巡檢的管理人員一目了然。

2. 指示與控制電路的三大核心架構

- 輸入感測單元：**選用高防護不鏽鋼探頭封裝的 AD590 恆流感測器，確保採集端的環境適應性。
- 訊號處理單元：**包含 I-V 阻抗轉換級、OP07 精密差動放大級與單晶片 ADC 還原級，負責全面增強訊號強度、過濾空間開關雜訊並轉譯數據格式。
- 顯示與警報執行單元：**包含 1602 LCD 顯示器、高亮度工業 LED 指示燈、大分貝蜂鳴器以及多路光耦隔離繼電器（Relay）。

自動化指示電路與【智慧菇舍溫度監控】應用之結合

指示電路在智慧菇舍環境監控系統裡負責將數據轉換成直觀的可視化訊號與自動化控制指令。這種自動化閉環設計不僅能全面節省人工巡檢成本，也確保溫室環境隨時運作於香菇栽培的最佳狀態，有效避免因悶熱或寒凍造成的菌絲受損。

表格 5、指示與環控電路功能

1. 高效信號轉換與即時反映	利用 OP07 差動放大器將微弱的模擬溫度信號轉化為大擺幅電壓，提供給單晶片進行極快速的採樣與邏輯判斷，確保菇舍環控訊號的準確與高速反應。
2. 智慧化多級環控自動化連動	設計適當的單晶片比較器邏輯軟體閾值。當菇舍內部環境溫度高於 28°C （香菇生長高溫上限）時，MCU 控制腳位立即拉至高電位，驅動繼電器閉合以開啟溫室大功率排風扇進行空氣對流，並同步連動高壓水霧加濕噴灑系統進行蒸發降溫；反之，若冬日夜間溫度跌破 15°C 時，微控制器則會自動閃爍現場的紅色 LED 指示燈並驅動蜂鳴器發出低溫警報，提示菇農啟動熱風機保溫。

3. 直觀指示與現場安全性提升	透過綠色（溫度正常）、紅色（過熱或過低溫異常）的燈號警示，以及 LCD 數位溫度顯示，為農場智能化精準溫控提供最完美的現地人機介面，有效避免農業災損並提升系統整體的安全性。
-----------------	--

消除雜訊及預防

目標：針對智慧菇舍多馬達、高水氣的工業級電磁惡劣環境，採取嚴格的軟硬體雙重抗干擾預防消除機制，確保溫度數據的絕對穩定度。

1. 菇舍環境雜訊可能來源分析

- **長距離引線空間耦合干擾：**感測器探頭分佈於寬廣的溫室內，長距離佈線如同接收天線，極易感應空間中的雜訊。
- **高功率電機通斷突波：**排風扇、加濕高壓幫浦等感應性大功率馬達在頻繁啟動與關閉的瞬間，會在交流電力線上誘發高達數百伏特的感應瞬態突波。
- **接地迴路（Ground Loop）干擾：**多個自動化電子子系統（如微控制器與繼電器高壓驅動級）若共用同一個接地點不佳，會產生高頻地迴路雜訊電流，污染微弱的類比地。

2. 精密硬體抗噪與物理防護解決方案

- **類比前端一階 RC 低通濾波器設計：**在精密運算放大器 OP07 的信號輸入引腳端，特別規劃配置了一組由低誤差固定精密電阻 $R_f = 10k\Omega$ 與無極性精密陶瓷電容 $C = 0.1\mu F$ 構成的低通濾波網絡。其硬體截止頻率（Cut-off Frequency）經標準公式推導為：

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times R \times C} = \frac{1}{2 \times 3.14159 \times 10000\Omega \times 10^{-7}}$$

由於菇舍內部溫室溫度的實際物理變化在頻域上屬於極慢速的近直流信號，此濾波器能以 -20dB/dec 的衰減斜率，將

高於 159.15Hz 的所有空間高頻輻射雜訊、無線電射頻 (RFI) 以及馬達換向高頻雜訊徹底濾除，大幅平滑類比電壓。

- **長距離線路物理防護與單端接地技術**：所有自感測現場至控制箱之間的長距離引線，一律強制要求採用具備金屬外層編織銅網防護的工業級**隔離雙絞線 (Shielded Twisted Pair)**。內部雙絞結構能天然抵消空間外部磁場引起的差模干擾，而外部的銅網防護層則在主控制箱端實施「單端接地 (Single-Point Grounding)」匯入系統大地的保護地線，完全避免因兩端接地電位差產生的地迴路電流干擾類比信號地。
- **晶片供電去耦旁路電容配置**：在 OP07 晶片的 $\pm 12V$ 與微控制器的 +5V 電源引腳正下方，就近焊接並聯 **$0.1\mu F$ 陶瓷電容** 與 **$220\mu F$ 鋁電解電容**，用以吸收高頻電源紋波與低頻電網大突波，防止放大器產生不必要的自激震盪。

3. 軟體數位濾波預防算法

在微控制器程式核心中，加入移動平均濾波演算法 (Moving Average Filter)。軟體會連續採樣 16 次溫度讀值並剔除最大與最小值後取算術平均值，從數位端徹底平滑濾除瞬間的突發異常異常值，全面提升菇舍溫控數據的長效可靠性。

雜訊消除與【智慧菇舍溫度監控】應用之結合

由於溫室農業環境常年配置大量馬達、加濕高壓電力干擾源，溫度感測信號若無適當防護極易受到雜訊影響，導致控制器頻繁誤判誤啟動。

- 1. 硬體多級防護，穩定電壓：透過前端 RC 低通硬體濾波器與穩壓旁路去耦電容的雙重配置，抑制高頻開關噪聲，從源頭確保量測數據不跳動。
- 2. 工業級屏蔽與精準接地策略：利用隔離雙絞線與單端接地屏蔽，阻絕馬達運轉發出的強烈電磁波入侵感測脆弱級，防止接地回路產生雜訊干擾。
- 3. 軟硬體協同，確保長效安全：結合硬體電路低通衰減與軟體演算法的平滑處理，過濾一切突發尖峰干擾，使系統能給予香菇生長最穩定、精確且可靠的全天候智慧護航。

線路說明及分析

系統整體功能流程分析

本智慧菇舍溫度量測與控制系統的整體類比前端與數位控制硬體工作流程如下：

a. 物理量採集級：現場環境溫度發生變化，裝設於溫室不鏽鋼防水探頭內的 AD590 積體感測器立即依據 $1\mu\text{A}/^{\circ}\text{C}$ 的物理特性改變其流出的類比直流電流。

b. 前端 I-V 轉換級：AD590 輸出的微弱電流流經高精度 $1\text{k}\Omega$ 下地電阻，利用歐姆定律抽取出與絕對溫度成正比的微弱直流電壓訊號 V_{in} ($0^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 對應 $0.27315\text{V}\sim 0.32315\text{V}$)。

c. 訊號調節放大級： V_{in} 輸入至精密運算放大器 OP07 所構成的 100 倍增益減法放大器，同時利用 TL431C 產生的高穩定偏壓精確扣

除 0.27315V 的直流零點偏移，將訊號線性調制並放大為標準的 0V~5V 滿幅模擬電壓 V_{out} 。

d. 資料採集與執行級： V_{out} 輸出至微控制器的 10-bit ADC 腳位進行數位還原，即時將精準溫度顯示於現場 1602 LCD 面板，並動態運算邏輯以驅動光耦繼電器進行通風風機與冷卻水霧系統的閉環控制。

系統綜合特點分析

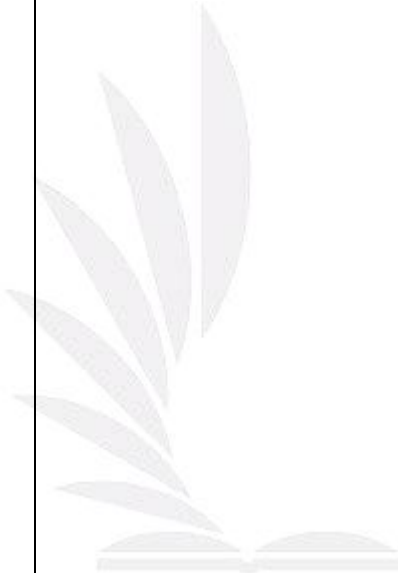
- **超低低功耗與卓越線性度：**全類比前端結構精簡，元件工作於 $\pm 12V$ 核心線性安全區，整體電路功耗極低，且量測線性度趨近於理論完美值，大幅節省系統能耗。
- **硬體調校極其方便：**電壓對應攝氏溫度的斜率與截距設計非常清晰（ $100mV/^{\circ}C$ ），現地維護時僅需微調兩顆精密可變電阻即可快速完成校正。
- **高度智慧化數位擴展潛力：**搭配微控制器數位電路，系統可輕鬆透過軟體擴充多級溫度上下限警報、歷史溫度大數據紀錄功能、智慧除濕連動以及雲端物聯網遠端 APP 監控等高級擴展應用。

調校步驟的安排

調校（校正）的核心工程目的是為了解決精密金屬膜電阻本質的微小元件公差（ $\pm 0.1\%$ ）、運算放大器 OP07 殘存的微量輸入偏移電壓，以及長距離導線的內部阻抗，確保系統能達到百分之百的準確對應。本硬體系統在正式部署到智慧菇舍溫室現場前，必須在實驗室內採取最嚴謹的「工業標準兩點校正法」（Zero and Span Calibration）進行精密的硬體微調校正。

1. 兩點校正法的工程優缺點技術評估

	優點	缺點
--	----	----

工業標準兩點校正法	操作簡單直觀，不需動用動輒數十萬的極端昂貴精密校正儀器即可在實驗室內完成；利用完美的線性方程式關係 $(Y = mX + b)$ ，能用極高效率快速建立並確認輸出電壓與實際待測攝氏溫度之間的斜率與截距；在感測器的標準線性工作區間內，校正後的系統綜合殘存誤差極低，精確度高 	此方法僅適用於本質線性度極佳的感測元件（如本專案選用的 AD590），對於非線性度較大的元件（如熱敏電阻）則無法保證全量程的精度；它只能絕對保證低溫與高溫這「兩個校正基準點」之間的完美準確性，若超出校正範圍外的極端溫區，誤差可能會微幅加大；在校正操作實務中，需要兩個極其精確且恆定的溫度參考標準點，因此對實驗室的標準測量環境控制要求較為嚴格。
------------------	---	--

2. 實驗室精密雙點校正標準操作程序

步驟一、暖機與電路熱平衡

電源啟動後，讓整個類比前端調理電路與微控制器板在通電狀態下暖機 5~15 分鐘，使所有半導體晶片、精密電阻達到完全的內部熱平衡，消除組件剛通電時的瞬態熱漂移。

步驟二、測量與記錄低溫零點數據（0°C 零點校正）

1. 準備標準的「冰水混合物環境」(在保溫杯內使用蒸餾水製成的碎冰與純水緊密混合，在物理大氣壓下能恆定維持在精確的 0.0°C 冰點)。
2. 將具備不鏽鋼防水封裝的 AD590 溫度感測器完全浸入冰水混合物的中心區域，靜置使其達到完全的熱平衡。
3. 使用經認證的高精度四位半數位萬用電表，即時監測運算放大器 OP07 的最終電壓輸出端 (V_{out})。
4. 用螺絲起子微調基底基準偏壓電路上的 VR_2 歸零可變電阻，微幅改變反相端的參考電位，直至數位萬用電表上的電壓讀數精確、穩定地呈現為 0.000 V 止，此數據即作為系統的第一個精準校正點 (Zero Point)。

步驟三、測量與記錄高溫滿度數據 (50°C 滿度校正)

1. 將 AD590 感測器自冰水中移出並快速擦乾，隨後完全放入配置有精密恆溫控制器的「標準實驗室恆溫水槽」中，並將水槽設定在標準的 50.0°C 高溫源環境中，靜置使其溫值達到完全熱平衡。
2. 此時動態觀察四位半數位萬用電表上 OP07 的輸出端電壓。
3. 微調差動放大器回授路徑上、負責控制電路放大倍率 (斜率) 的 VR_3 滿刻度可變電阻，修正阻值比率，直至運算放大器的最終輸出端電壓精確、穩定地呈現為 5.000V 止，此數據即作為系統的第二個精準校正點 (Span Point)。

步驟四、計算、建立校正引導參數

利用上述雙點確立的線性方程進行校正閉環設定，將完美的斜率與零點阻值關係確立下來。將校正參數寫入微控制器或調校硬體的分壓

阻值中，確保系統在設定的菇舍高低溫上下限點時，能百分之百精確切換自動化指示與排風灑水狀態。

步驟五、反覆驗證與現地微調鎖定

由於調整放大器的增益 (VR_3) 會微幅牽動到零點電位，為確保整條量測線性曲線達到完美狀態，上述的步驟二 (0°C 零點微調) 與步驟三 (50°C 滿度微調) 必須反覆交替檢驗與修正 2 至 3 次。直到感測器在冰水中輸出為絕對的 0.00V 、在 50°C 水槽中輸出為絕對的 5.00V 達到完美重合且不需做任何調整為止。最後使用經過國家標準實驗室認證後的二級標準溫度計與我們所設計的智慧菇舍溫度計在現場做多點比對，登錄並確認全量程誤差皆控制在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的高工業精度內，方可鎖定組件並正式上線服役。



二、 未來展望(Future outlook)

本專案目前已完成以 AD590 與 OP07 為核心的高精度溫度前端量測與基礎閉環警報系統。展望未來，系統可朝以下四個方向持續深化與擴充：

1. 多環境參數整合監測：

除了溫度外，香菇生長亦高度依賴相對濕度與 CO_2 濃度。後續可導入高精度濕度感測器與非分散紅外線 (NDIR) CO_2 感測模組，建構更全面的立體微氣候感測陣列。

2. 物聯網 (AIoT) 與雲端遠端管理：

結合 RS-485 (Modbus) 工業匯流排或 Wi-Fi/LoRa 無線傳輸協定，將現地感測數據上傳至雲端平台，實現菇農透過行動裝置進行跨廠區遠端監控、歷史數據趨勢分析與異常即時推播。

3. 先進智慧控制演算法升級：

將傳統繼電器之閾值開關控制，進一步升級為 PID 閉環變頻控制或模糊控制 (Fuzzy Control)，使排風扇與高壓微霧系統能隨溫差平滑調節輸出功率，減少溫濕度震盪並達到節能降耗之效益。

4. 微氣候大數據與邊緣 AI 結合：

藉由累積長期的環控數據，建立最佳栽培溫濕度預測模型；未來更可結合邊緣影像辨識技術，即時判讀菇體開傘成熟度，邁向全面自主化的精緻智慧農業系統。

三、 結論(Conclusion)

透過這次針對智慧農業領域中「智慧菇舍環控系統」所需的溫度量測與調節前端電路設計的思考與撰寫過程，我不只更深刻地複習並掌握了感測器原理與類比放大電路的基本理論，也更能切身技術體會到理論公式在走向工業與農業實際應用場合時，所需縝密考慮的各種實務工程細節。一開始看似極其簡單的環境溫度偵測，其實背後牽涉到極其嚴謹的跨學門知識，像是如何根據高濕痛點選擇對應的感測器物理特性、如何規劃電壓基準源的穩定度、如何從硬體阻絕空間馬達的高頻干擾雜訊，甚至到訊號如何還原與自動化防護指示，都是一個精密系統是否能全天候準確運作的關鍵核心。

在深入思考的工程過程中，我學習到為什麼像 AD590 這樣的電流輸出

型積體溫度感測器，在大面積且充滿噴霧水氣的智慧菇舍環境中，會比傳統的 Pt100 白金電阻或熱敏電阻具備更天然、更強健的工業級優勢。這不僅僅是課本上線性度數據好壞的問題，還深刻包含了遠距離長線傳輸時抗壓降、抗長導線潮濕氧化接觸電阻變動的「本質可靠性」與長期免維護的「壽命問題」。雖然這次是在期末作業中進行全方位的系統模擬、推導與線路分析，但透過親自繪製並推導 I-V 精密轉換電路以及 OP07CP 精密減法差動放大器架構，我更清晰地理解到，如何利用這些基本的類比積體電路，去精密調理、拉伸原本微弱至極的 50mV 溫差訊號，以及偏壓扣除對輸出結果達到滿幅高解析度的重要影響。

尤其是當我將思考維度擴展到工廠、溫室現場可能出現的馬達反向開關突波、接地迴路污染、長線電磁場耦合等干擾問題時，更讓我深刻體會到「工程實務中，細節決定成敗」的真諦。從過去在考卷上單純計算理想運放的公式，到現在必須設身處地思考為什麼要加入 $0.1\mu\text{F}$ 與 $220\mu\text{F}$ 的雙重旁路去耦、為什麼需要精準推導出 159Hz 的硬體 RC 一階低通濾波截止頻率、為何要實施雙絞線隔離網的「單端接地」以阻絕共模雜訊，這一連串的思維轉變與技術淬鍊，讓我對感測技術工程有了更具整體觀的成熟感觸。

這次的期末報告主題與現代精緻科技農業息息相關。香菇是台灣極具經濟價值的作物，而溫室菇舍就像是香菇的心臟，其內部的微氣候狀況會直接決定整批菇床的走菌成敗、外觀品相與最終產值。香菇走菌與出菇時在生理上會隨著溫濕度產生極為細緻的呼吸與生長需求，若無法全天候精準、可靠地掌握其溫度波動，可能導致全場悶棚受熱，造成巨大的農業災損，甚至危害到菇農的生計安全。所以我選擇設計這套即時監測與自動化連動一體化的智慧菇舍溫控系統，以提升現代農業的精準維護效率與生產自動化水準。

整個系統設計、方程式數學推導與兩點校正程序的安排思考過程，讓我徹底理解到「自動控制與精密量測工程」絕不只是理論書本上的冷冰冰計算與元件挑選，更是一個需要不斷緊密契合現場痛點、反覆驗證測試、將細微誤差消除至盡的嚴謹優化路徑。即使作業是在紙上構思整個完備系統而非實際動手焊接，但也讓我在自控系未來的畢業專題實作、甚至是未來投入產業面對實際工業與農業控制現場需要解決問題時，更清楚知道該從哪些宏觀與微觀的類比硬體角度去精準思考、下手並徹底解決問題！

四、 參考文獻(References)

[1] 劉金昌(2017)。物聯控制智動化雲端農場系統之研究-以秀珍菇農場為例〔碩士論文，國立臺中科技大學〕。華藝線上圖書館。

<https://www.airitilibrary.com/Article/Detail?DocID=U0061-1008201722473300>

[2] 林詠勝(2007)。架構於 ZigBee 協定的生物環境無線感測網路監控系統〔碩士論文，國立臺灣大學〕。華藝線上圖書館。

<https://doi.org/10.6342/NTU.2007.03093>

[3] 游明義(2003)。適用於 CMOS 製程之溫度感測器設計與應用〔碩士論文，中原大學〕。華藝線上圖書館。

<https://doi.org/10.6840/cycu200300753>

