

# 逢甲大學學生報告 ePaper

## 恆溫蓮蓬頭溫度監控系統設計 Design of a Temperature Sensor for a Thermostatic Showerhead

作者：洪于晴

系級：自動控制學系

學號：D1322193

開課老師：黃清輝

課程名稱：感測與量度工程

開課系所：自動控制學系

開課學年度：114 學年度 第二學期



## 中文摘要

本專題以「恆溫蓮蓬頭之溫度感測器設計」為主題，研究動機來自家庭淋浴時因其他水龍頭同時開啟，導致冷水壓力下降，使蓮蓬頭出水溫度突然升高，而造成使用不適與燙傷風險，為提升家庭衛浴使用安全，本專題聚焦於出水溫度的即時量測與顯示，並不討論冷、熱水比例控制。系統主要量測範圍設定為  $30^{\circ}\text{C}$  ~  $50^{\circ}\text{C}$ ，感測器耐受範圍約為  $0^{\circ}\text{C}$  ~  $80^{\circ}\text{C}$ ，解析度目標為  $0.1^{\circ}\text{C}$ ，準確度目標為  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  ~  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

在感測器選型方面，本專題比較 Pt100、AD590 與 NTC 熱敏電阻後，選用  $10\text{k}\Omega$  NTC 防水熱敏電阻探頭，原因為其靈敏度高、反應速度快、成本低，且容易取得防水封裝形式，適合蓮蓬頭潮濕與水流噴濺環境。轉換電路採用分壓式電阻對電壓轉換電路，並以  $5\text{V}$  作為參考電壓，搭配  $5.6\text{k}\Omega$  精密固定電阻，使  $30^{\circ}\text{C}$  ~  $50^{\circ}\text{C}$  範圍內輸出電壓約由  $2.05\text{V}$  上升至  $3.05\text{V}$ ，平均靈敏度約為  $50\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 。為避免後級電路影響分壓輸出，系統選用 LM358 作為電壓隨耦器，進行阻抗轉換與訊號緩衝。

指示電路方面，本專題規劃以 ADC 讀取 LM358 緩衝後的電壓訊號，再透過程式換算成溫度並顯示於 LCD、OLED 或其他顯示元件，同時可加入 LED 或蜂鳴器作為過熱提醒。為提高量測穩定性，電路設計中加入  $0.1\mu\text{F}$  旁路電容、RC 低通濾波、導線防水與屏蔽處理，以降低電源雜訊、長導線干擾與潮濕環境造成的誤差。最後，本專題提出調校步驟與採購建議，透過多點溫度校正、電壓量測與查表修正，使系統能更準確地顯示蓮蓬頭出水溫度，達到安全、防燙與即時監測的設計目標。

**關鍵字：**恆溫蓮蓬頭、NTC 熱敏電阻、溫度感測器、分壓電路、LM358、溫度量測、浴室安全

## Abstract

This project focuses on the design of a temperature sensing system for a thermostatic showerhead. The motivation comes from a common household situation in which the shower water temperature suddenly increases when another faucet is turned on, causing a drop in cold water pressure and changing the original hot and cold water mixing ratio. Such a sudden temperature rise may cause discomfort or even increase the risk of scalding. Therefore, this project aims to develop a sensing unit that can measure and display the shower outlet water temperature in real time. The scope of this project is limited to temperature measurement and indication, and does not include the control of the hot and cold water mixing mechanism.

The main measurement range of the system is set from 30°C to 50°C, which is close to the normal showering temperature range. The sensor tolerance range is approximately 0°C to 80°C, with a target resolution of 0.1°C and an accuracy target of  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  to  $\pm 1^\circ\text{C}$ . After comparing Pt100, AD590, and NTC thermistors, a 10k $\Omega$  waterproof NTC thermistor probe is selected because of its high sensitivity, fast response, low cost, and availability in waterproof packaging suitable for humid bathroom environments.

The conversion circuit adopts a voltage divider structure using a 5V reference voltage and a 5.6k $\Omega$  precision resistor. Within the 30°C to 50°C range, the output voltage is estimated to increase from approximately 2.05V to 3.05V, with an average sensitivity of about 50mV/°C. An LM358 operational amplifier is used as a voltage follower to provide impedance conversion and signal buffering. The buffered voltage signal can then be read by an ADC and converted into temperature data for display on an LCD, OLED, or other display module. In addition, an LED or buzzer can be added as an overheating warning device. To improve measurement stability, bypass capacitors,

RC low-pass filtering, waterproof wiring, shielding, and calibration procedures are also included. Through multi-point temperature calibration and table-based correction, the system can provide a safer and more reliable shower water temperature monitoring function.

Keyword:

Thermostatic showerhead, NTC thermistor, temperature sensor, voltage divider circuit, LM358, temperature measurement, bathroom safety



# 目 錄

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 中文摘要 .....              | 1  |
| ABSTRACT .....          | 2  |
| 目 錄 .....               | 4  |
| 圖目錄 .....               | 6  |
| 表目錄 .....               | 7  |
| 第一章 企劃委託與研究動機 .....     | 8  |
| 1.1 研究動機.....           | 8  |
| 第二章 決定使用哪種感測器 .....     | 10 |
| 2.1 感測器選用條件.....        | 10 |
| 2.2 比較感測器跟選用 .....      | 10 |
| 第三章 決定選用哪種轉換電路 .....    | 12 |
| 3.1 轉換電路需求分析.....       | 12 |
| 3.2 各種轉換電路比較.....       | 12 |
| 3.3 本專題選用之轉換電路 .....    | 14 |
| 第四章 決定電源電壓和參考電壓 .....   | 16 |
| 4.1 電源架構與電源電壓選擇 .....   | 16 |
| 4.1.1 電源架構與電源電壓選擇 ..... | 16 |
| 4.2 參考電壓選擇 .....        | 17 |
| 第五章 要用哪一顆 OP AMP .....  | 19 |
| 5.1 OP AMP 選用需求.....    | 19 |
| 5.2 候選 OP AMP 比較.....   | 19 |

|      |                     |    |
|------|---------------------|----|
| 5.3  | 本專題選用之 OP AMP ..... | 20 |
| 第六章  | 轉換電路的設計 .....       | 22 |
| 6.1  | 轉換電路架構.....         | 22 |
| 6.2  | 輸出電壓與電流檢查.....      | 22 |
| 6.2  | 本章設計結果.....         | 23 |
| 第七章  | 放大器的設計 .....        | 25 |
| 7.1  | 放大器設計需求.....        | 25 |
| 7.2  | 電壓隨耦器設計 .....       | 25 |
| 第八章  | 指示電路的設計 .....       | 26 |
| 8.1  | 指示電路需求.....         | 26 |
| 8.2  | 指示電路設計.....         | 26 |
| 第九章  | 雜訊消除及預防 .....       | 28 |
| 9.1  | 雜訊來源分析.....         | 28 |
| 9.2  | 雜訊消除電路設計 .....      | 28 |
| 第十章  | 調校步驟 .....          | 30 |
| 10.1 | 調校目的與準備 .....       | 30 |
| 10.2 | 調校流程 .....          | 30 |
| 10.3 | 調校流程 .....          | 31 |
| 第十一章 | 採購建議 .....          | 33 |
| 11.1 | 採購建議 .....          | 33 |
| 參考文獻 | .....               | 35 |

## 圖目錄

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 圖 1. 10k $\Omega$ NTC 防水熱敏電阻探頭 ..... | 11 |
| 圖 2. 分壓電路.....                       | 14 |



## 表目錄

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 表 1. 溫度感測器需求評估表.....       | 9  |
| 表 2. 轉換電路比較.....           | 13 |
| 表 3. 參考電壓表.....            | 18 |
| 表 4. OP AMP 選用條件表 .....    | 19 |
| 表 5. 為候選 OP AMP 比較表。 ..... | 20 |
| 表 6. 轉換電路輸出估算表.....        | 23 |
| 表 7. 轉換電路設計結果表.....        | 24 |
| 表 8. 指示電路需求表.....          | 26 |
| 表 9. 雜訊來源分析表.....          | 28 |
| 表 10. 調校設備表.....           | 30 |
| 表 11. 調校誤差檢查表.....         | 31 |
| 表 12. 採購建議表.....           | 33 |



# 第一章 企劃委託與研究動機

## 1.1 研究動機

本專題之研究動機來自家庭中的真實使用經驗。本人曾觀察到，家中爸爸洗澡時，若媽媽同時開啟其他水龍頭，冷水側供水壓力會瞬間降低，使原本已調整好的冷、熱水混合比例產生變化，造成淋浴出水溫度突然升高。此現象不僅會造成使用者不適，也可能增加燙傷風險；熱水造成的燙傷與水溫及接觸時間有直接關係，當水溫升高時，人體皮膚可承受的時間會明顯縮短，因此淋浴出水溫度的即時量測具有安全上的必要性。

本專題聚焦於「恆溫蓮蓬頭之溫度感測器設計」，主要目的並非討論後端閥體如何控制冷、熱水比例，而是先建立一套可用於淋浴環境的溫度量測單元。此感測單元需能偵測蓮蓬頭出水溫度，並將溫度變化轉換為穩定、可判讀的電訊號，作為後續顯示、警示或其他安全判斷的基礎。依據溫度量測系統的設計概念，完整的感測架構應包含溫度感測器、轉換電路、放大器、指示電路、參考電壓與電源供應等部分，而在進入電路設計之前，必須先明確定義量測需求與感測器規格。

針對蓮蓬頭出水溫度量測，本專題初步設定感測器的量測範圍為  $0^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ ，其中  $30^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$  為主要觀察區域，因為此區間最接近日常淋浴使用溫度，也最能反映使用者是否感到過冷、適溫或過熱，解析度方面，為了讓溫度變化能被清楚觀察，感測器輸出至少應能分辨  $0.1^{\circ}\text{C}$  的變化；準確度則以  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}\sim \pm 1^{\circ}\text{C}$  作為設計目標，需要注意的是，解析度並不等於準確度，解析度只代表儀器能分辨的最小變化量，而準確度則代表量測值與真實值之間的差異，因此後續仍需透過調校程序修正誤差。

由於淋浴時的水溫可能因其他用水點開啟而快速變化，感測器也必須具備足夠的動態反應能力。若感測器反應太慢，即使最終量測值正確，也無法即時

反映瞬間升溫的危險。因此本專題希望感測器具有較短的熱反應時間，並能在水溫快速變動時即時輸出變化訊號。除此之外，蓮蓬頭屬於高濕度、直接接觸水流的使用環境，感測器外殼與導線接點必須具備防水、防潮與耐腐蝕能力。防水規格可參考 IEC 60529 的 IP 防護等級概念，該標準以 IP 代碼分類外殼對固體與液體侵入的防護能力；若感測器安裝於出水口附近，應選用防水探頭或至少具備適合水流噴濺與潮濕環境的封裝設計。

因此，本專題在第一章節可將需求歸納為：設計一個適用於家庭蓮蓬頭的出水溫度感測單元，能在潮濕與水流環境中穩定量測溫度，具備足夠的量測範圍、解析度、準確度與反應速度，並能將水溫變化轉換成後續電路可處理的電訊號。此需求將作為下一節選擇感測器種類的依據，例如比較 Pt100、NTC 熱敏電阻、AD590 或其他溫度感測元件時，即可從量測範圍、線性度、靈敏度、反應時間、防水封裝、成本與調校難易度等條件進行判斷。Pt100 具有較佳的線性、穩定性與準確度，但成本較高；NTC 熱敏電阻靈敏度高且價格低，但非線性較明顯並需注意自熱與補償問題，這些都將成為第二章感測器選型時的重要比較依據。

表 1. 溫度感測器需求評估表

| 項目      | 本專題需求              |
|---------|--------------------|
| 量測對象    | 蓮蓬頭出水溫度            |
| 主要量測範圍  | 30°C~50°C          |
| 感測器耐受範圍 | 約 0°C~80°C         |
| 解析度     | 0.1°C              |
| 準確度目標   | ±0.5°C~±1°C        |
| 反應速度    | 需能快速反映瞬間升溫         |
| 使用環境    | 潮濕、水流噴濺、可能長時間接觸水氣  |
| 防水需求    | 防水探頭、密封導線、耐腐蝕外殼    |
| 後續用途    | 提供顯示、警示或安全判斷用的溫度訊號 |

## 第二章 決定使用哪種感測器

### 2.1 感測器選用條件

依據前一節所設定之需求，本專題的量測對象為蓮蓬頭出水溫度，主要觀察範圍集中在日常淋浴常見的  $30^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，感測器本身則需至少能承受  $0^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$  的水溫變化。由於淋浴水溫若突然升高，可能在短時間內造成使用者不適甚至燙傷，因此感測器除了要能測量溫度外，也必須具備足夠的反應速度，使水溫變化能被即時反映。美國消費品安全委員會 CPSC 指出，家用熱水若溫度過高會增加燙傷風險，例如  $150^{\circ}\text{F}$  約  $65.6^{\circ}\text{C}$  的水可能在 2 秒造成三度燙傷， $140^{\circ}\text{F}$  約  $60^{\circ}\text{C}$  的水約 6 秒也可能造成燙傷，因此 CPSC 建議住宅熱水器可設定於  $120^{\circ}\text{F}$  約  $49^{\circ}\text{C}$ ，以降低多數熱水燙傷風險。

在本專題的感測器選型階段，需優先考慮量測範圍、解析度、準確度、靈敏度、線性度、反應時間、防水封裝、耐腐蝕性、成本與後續轉換電路設計難易度。由於蓮蓬頭屬於潮濕且可能直接受水流衝擊的環境，感測器不能只考慮電氣特性，還必須考慮探頭是否具備防水封裝、導線接點是否能防潮絕緣，以及外殼材料是否能長時間接觸自來水而不易腐蝕。因此，本專題所選的溫度感測器應以「可防水、反應快、適合  $30^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$  區間量測、成本合理、容易和轉換電路搭配」作為主要判斷依據。

### 2.2 比較感測器跟選用

本專題初步比較 Pt100 白金感溫電阻、AD590 感溫 IC、NTC 熱敏電阻三種感測器，Pt100 屬於電阻式溫度檢測器，具有正溫度係數，線性度與穩定性較佳，適合精密量測場合；但其價格較高，且電阻變化量較小，若要得到穩定且精確的訊號，通常需要較完整的定電流源、放大器與引線補償設計，Pt100 具有較高準確性與安定性，但引線電阻會造成量測誤差，因此接線方式與補償方法需要特別處理。

AD590 是電流輸出型溫度感測 IC，其輸出電流與絕對溫度成正比，AD590

具有  $1\ \mu\text{A/K}$  的線性電流輸出、 $-55^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$  的溫度範圍，以及  $4\text{V}\sim30\text{V}$  的工作電壓範圍，這種元件的優點是輸出特性接近線性，後續可以透過精密電阻將電流轉換成電壓；但若要安裝在蓮蓬頭出水位置，仍需額外做防水封裝，而封裝方式可能影響熱反應速度，因此在本專題中不是最簡便的選擇。

NTC 熱敏電阻屬於負溫度係數感測元件，溫度升高時電阻下降。其主要優點是靈敏度高、體積小、價格低、反應快，而且市面上容易取得已封裝完成的防水探頭。NTC 熱敏電阻的溫度係數約為  $-3\%/^{\circ}\text{C}\sim-5\%/^{\circ}\text{C}$ ，相較於鉑基感測器約  $0.385\%/^{\circ}\text{C}$  的變化量，NTC 對溫度變化更敏感。不過，NTC 的電阻與溫度關係並非線性，因此後續必須透過校正、查表、曲線擬合或限制在主要使用區間內進行補償，以降低非線性誤差。此外，使用 NTC 時也需注意自熱與熱跑脫問題，應避免讓過大電流流過感測器。

綜合比較後，本專題選用 **10k $\Omega$  NTC 防水熱敏電阻探頭**作為蓮蓬頭出水溫度感測器。選擇原因如下：1. 蓮蓬頭主要量測範圍集中在  $30^{\circ}\text{C}\sim50^{\circ}\text{C}$ ，屬於較窄的中低溫區間，NTC 的非線性可透過校正方式修正；2. NTC 靈敏度高，能明顯反映水溫小幅變化，有助於達成  $0.1^{\circ}\text{C}$  解析度的需求；3. NTC 探頭體積小、熱容量低，適合偵測水流溫度的快速變化；4. 防水型 NTC 探頭容易取得，常見形式包含不鏽鋼外殼或環氧樹脂封裝，較符合蓮蓬頭潮濕與水流噴濺環境；5. NTC 成本較低，適合家庭衛浴設備之實作與後續量測電路設計。



圖 1. 10k $\Omega$  NTC 防水熱敏電阻探頭

## 第三章 決定選用哪種轉換電路

### 3.1 轉換電路需求分析

本專題已選定 **10k $\Omega$  NTC 防水熱敏電阻探頭**作為蓮蓬頭出水溫度感測器。由於NTC熱敏電阻屬於電阻式感測元件，溫度改變時會造成其本身電阻值改變，因此必須透過轉換電路，將電阻變化轉換成可量測、可放大、可顯示的電壓訊號。感測元件若只是產生電阻變化，後續電路無法直接判斷溫度大小，因此「電阻對電壓轉換」是本專題溫度感測器設計中的重要步驟。

常見的電阻對電壓轉換方式包含分壓法、電阻電橋法、定電流法、有源電橋法與頻率改變法。分壓法是將感測電阻與固定電阻串聯，利用穩定參考電壓產生分壓輸出；電阻電橋法則利用惠斯登電橋平衡關係，把電阻變化轉換成橋式輸出電壓；定電流法是使固定電流流過感測電阻，使輸出電壓與電阻值成正比；有源電橋法則在電橋或轉換電路中加入 OP Amp，以改善歸零、放大與穩定性問題。

由於本專題的量測範圍主要集中在 **30°C~50°C**，屬於較窄的家庭淋浴使用區間，因此轉換電路不一定需要非常複雜，但必須具備穩定、容易調校、低自熱、低成本與可搭配後續放大電路等特性，NTC 熱敏電阻本身具有非線性，通常需要透過查表、曲線方程式或硬體線性化方式修正，因此本專題在選擇轉換電路時，除了考慮輸出電壓大小，也必須考慮後續是否容易進行校正與補償。

### 3.2 各種轉換電路比較

首先**分壓法**是最簡單的電阻對電壓轉換方法，其基本概念是將 NTC 熱敏電阻與固定電阻串聯，並加上一組穩定參考電壓，取兩者中間節點作為輸出，分壓法的優點是電路簡單、成本低、元件少，且固定電阻本身也能限制流經 NTC 的電流，降低自熱風險。分壓法是一種把電阻轉換成電壓的簡便方法，但一定會引起非線性誤差，只是程度不同；固定電阻越小，靈敏度越高但線性誤差越大，固

定電阻越大，線性誤差較小但靈敏度也會降低。

其次，**電阻電橋法**具有歸零調整的優點，適合用於偵測微小電阻變化，電橋平衡時輸出電壓可調為 0V，當感測器阻值改變時，電橋輸出會產生差動電壓，再送入差值放大器處理。這種方法的優點是可抵消部分共模雜訊，也適合精密量測；但缺點是電路較複雜，且 NTC 本身電阻變化量大、非線性明顯，若直接使用電橋仍需額外進行線性修正。

第三，**定電流法**可以使輸出電壓與感測電阻呈現較直接的關係，其基本式為：

$$V(T) = I \times R_{NTC}(T)$$

若電流 I 固定，輸出電壓會隨 NTC 電阻值改變而改變。定電流法的優點是轉換關係清楚，但缺點是需要穩定的定電流源，且 NTC 電阻值在低溫時可能較大，若電流設計不當，輸出電壓範圍會過大；在高溫時阻值變小，輸出變化量又可能不足，此外 NTC 需要避免因電流或電壓激發造成自熱，否則會使感測器電阻下降，造成量測溫度偏高。

第四，**有源電橋法**是在傳統電橋或轉換架構中加入 OP Amp，能改善歸零、放大與雜訊問題，較適合需要較高穩定度或較完整類比補償的量測系統，不過，本專題主要是家庭蓮蓬頭出水溫度量測，量測範圍集中在 30°C~50°C，且已選用靈敏度較高的 NTC 熱敏電阻，因此若一開始就使用有源電橋，電路複雜度與調整難度會提高，不利於實作。

綜合比較如下：

表 2. 轉換電路比較

| 轉換電路  | 優點                 | 缺點               | 是否適合本專題     |
|-------|--------------------|------------------|-------------|
| 分壓法   | 電路簡單、成本低、容易實作      | 會產生非線性誤差         | 適合，後續可用校正補償 |
| 電阻電橋法 | 可歸零、適合差動放大、抗共模雜訊較佳 | 電路較複雜，NTC 仍需線性修正 | 可用，但本專題不優先  |
| 定電流法  | 電壓與電阻關係直接          | 需穩定電流源，需注意自熱     | 可用，但設計較複雜   |
| 有源電橋法 | 可改善歸零、放大與          | 元件較多、調整較困        | 較適合高精度系     |

|       |                |          |        |
|-------|----------------|----------|--------|
|       | 穩定性            | 難        | 統      |
| 頻率改變法 | 可直接與數位系統<br>搭配 | 電路與計算較複雜 | 本專題不採用 |

### 3.3 本專題選用之轉換電路

本專題選用分壓式電阻對電壓轉換電路，其主要原因是 NTC 熱敏電阻本身阻值變化明顯，不需要使用過於複雜的橋式電路即可得到足夠的電壓變化；同時，分壓法元件少、成本低、容易防水隔離，也較適合家庭衛浴設備的感測器實作。雖然分壓法會造成非線性誤差，但本專題主要量測區間集中於 30°C~50°C，可透過校正曲線、查表或後續線性補償降低誤差。

本專題採用下列接法：

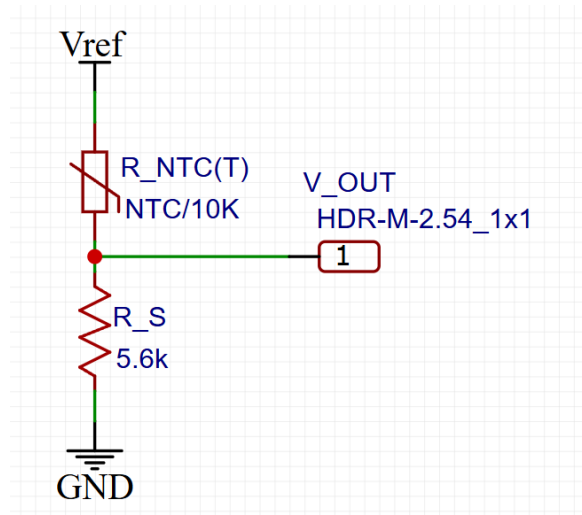


圖 2. 分壓電路

其中  $R_{NTC}(T)$  為 NTC 熱敏電阻阻值， $R_s$  為固定分壓電阻， $V_{out}$  為轉換後的溫度電壓訊號。此接法的輸出電壓為  $V_{out} = V_{ref} \times \frac{R_s}{R_{NTC}(T) + R_s}$ ，由於 NTC 的特性是溫度升高時阻值下降，因此當水溫升高時， $R_{NTC}(T)$  變小，使  $V_{out}$  升高，也就是說，此轉換電路可得到「溫度越高，輸出電壓越高」的結果，較方便後續進行顯示、警示或判斷。

本專題選用分壓式電阻對電壓轉換電路，其主要原因是 NTC 熱敏電阻本身阻值變化明顯，不需要使用過於複雜的橋式電路即可得到足夠的電壓變化；同時分壓法元件少、成本低、容易防水隔離，也較適合家庭衛浴設備的感測器實作。

雖然分壓法會造成非線性誤差，但本專題主要量測區間集中於  $30^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，可透過校正曲線、查表或後續線性補償降低誤差。



## 第四章 決定電源電壓和參考電壓

### 4.1 電源架構與電源電壓選擇

本專題的感測器採用 10k $\Omega$  NTC 防水熱敏電阻，轉換電路則採用分壓式電阻對電壓轉換電路。由於此電路的輸出電壓皆為正電壓，且輸出範圍約落在 2V~3V 之間，因此不需要使用正負雙電源。為了降低電路複雜度並提高使用安全性，本專題選用單電源+5V 作為主要供應電壓。

蓮蓬頭屬於潮濕且可能接觸水氣的使用環境，因此電源設計必須避免市電直接進入感測端。本專題規劃採用低壓直流電源供應，例如電池模組，或經隔離式電源轉換後的 5V 直流電源。此電源提供 NTC 分壓電路、後續放大器、濾波電路或顯示電路使用。若後續使用 OP Amp，也應選擇可在單電源 5V 下工作的型號，以避免額外產生負電源。

#### 4.1.1 電源架構與電源電壓選擇

由於本專題的溫度感測器預計安裝於蓮蓬頭出水端附近，該位置長時間處於潮濕、水流噴濺以及人體接觸的環境，因此電源來源必須特別考慮安全性。雖然家庭中最容易取得的電源為 110V 交流市電，但若直接將 110V 引入蓮蓬頭本體或出水端附近，一旦發生絕緣破損、漏電或防水失效，將可能造成觸電危險。因此，本專題不採用 110V 直接進入蓮蓬頭的供電方式，而是將市電與感測端分離處理。

在實作階段，本專題可優先採用電池模組、USB 5V 或行動電源作為供電來源，使整個感測電路只工作在低壓直流狀態下。若未來需要長時間固定安裝，則可由 110V 交流電經過外部隔離式 AC-DC 電源供應器轉換為 5V 直流電，再將 5V 低壓電源送至感測電路。此時 AC-DC 電源供應器應放置於浴室外、乾燥區域或具防水保護的電控盒內，蓮蓬頭附近僅保留 5V 低壓直流電。

此設計概念與浴室用電安全原則相符。浴室環境因水氣與人體接觸而具有較高觸電風險，因此一般市電插座與電源設備會受到安裝位置限制；在靠近水源的高風險區域，通常較適合使用具隔離保護的低電壓設備。相關浴室用電安全說明也指出，低電壓設備需由安全特低電壓來源供應，且一般插座不應設置於靠近浴缸或淋浴區的高風險位置。

因此，本專題的電源架構可表示為：

**110VAC→外部隔離式 AC-DC 電源供應器→5VDC→溫度感測電路**

在此架構中，110V 交流電只存在於外部電源轉換端，蓮蓬頭附近不直接配置市電，只保留 5V 低壓直流電，如此可兼顧感測電路供電穩定性與潮濕環境下的使用安全性。

## 4.2 參考電壓選擇

分壓式轉換電路的輸出電壓會直接受到參考電壓 $V_{ref}$ 影響，因此參考電壓必須穩定，在感測元件的轉換電路中常會用到定電壓源或定電流源，而且希望這些電壓源或電流源必須非常穩定；若直接將電源電壓作為參考電壓，可能會受到雜訊或突波影響，造成量測誤差。

本專題決定設定：

$$V_{CC} = +5V$$

$$V_{ref} = +5V$$

也就是使用穩定後的 5V 作為分壓電路的參考電壓。選擇 5V 的原因如下：

1. **與常見微控制器及顯示電路相容：**Arduino、部分 ADC 模組與顯示電路常使用 5V 電源，後續若需要讀取或顯示溫度，5V 系統較容易搭配。
2. **可得到足夠大的輸出電壓變：**若 $V_{ref}$ 較高，分壓輸出變化量也會變大，有利於提高後續判讀的解析度。
3. **低壓供電較安全：**感測器安裝於潮濕環境，使用 5V 低壓直流電源比高壓電源更適合。

4. 電路實作容易：5V 穩壓 IC、USB 電源與行動電源都容易取得，適合本專題實作。

### 4.3 固定分壓電阻選擇

本專題的主要量測區間為  $30^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，中心溫度約為  $40^{\circ}\text{C}$ 。為了讓分壓電路在主要量測範圍內具有較佳靈敏度，固定分壓電阻  $R_s$  不直接選用  $10\text{k}\Omega$ ，而是選擇接近 NTC 在中心溫度附近的阻值。

以常見  $10\text{k}\Omega$ 、B 值約 3950K 的 NTC 熱敏電阻估算，其在  $40^{\circ}\text{C}$  附近的阻值約為  $5.3\text{k}\Omega$ ，因此本專題選用標準阻值：

$$R_s = 5.6\text{k}\Omega$$

此電阻建議使用 1% 以下精密金屬膜電阻，以降低電阻誤差對溫度量測結果的影響。

### 4.4 分壓輸出電壓估算

表 3. 參考電壓表

| 溫度                   | NTC 估算阻值              | 分壓輸出電壓           |
|----------------------|-----------------------|------------------|
| $30^{\circ}\text{C}$ | 約 $8.0\text{k}\Omega$ | 約 $2.05\text{V}$ |
| $35^{\circ}\text{C}$ | 約 $6.5\text{k}\Omega$ | 約 $2.31\text{V}$ |
| $40^{\circ}\text{C}$ | 約 $5.3\text{k}\Omega$ | 約 $2.57\text{V}$ |
| $45^{\circ}\text{C}$ | 約 $4.3\text{k}\Omega$ | 約 $2.82\text{V}$ |
| $50^{\circ}\text{C}$ | 約 $3.6\text{k}\Omega$ | 約 $3.05\text{V}$ |

由表中可看出，在  $30^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$  的主要淋浴溫度範圍內，輸出電壓大約由  $2.05\text{V}$  上升至  $3.05\text{V}$ ，總變化量約為  $1\text{V}$ 。換算後，平均靈敏度約為：

$$\frac{3.05\text{V} - 2.05\text{V}}{50^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}} = 0.05\text{V}/^{\circ}\text{C} = 50\text{mV}/^{\circ}\text{C}$$

若以  $0.1^{\circ}\text{C}$  為解析度需求，則  $0.1^{\circ}\text{C}$  約對應：

$$50\text{mV}/^{\circ}\text{C} \times 0.1^{\circ}\text{C} = 5\text{mV}$$

因此，此電路在主要量測區間內具有足夠明顯的電壓變化，能支援後續放大、濾波或指示電路設計。

## 第五章 要用哪一顆 OP Amp

### 5.1 OP Amp 選用需求

本專題前面已決定採用 **10kΩ NTC 防水熱敏電阻探頭**，並以分壓式電阻對電壓轉換電路將溫度變化轉換為電壓訊號。依照前一章估算，在  $30^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$  的主要量測範圍內，分壓輸出約為 **2.05V~3.05V**，平均靈敏度約為 **50mV/°C**，因此本專題所需的 OP Amp 不需要進行非常大的放大，主要功能是作為**電壓緩衝器、訊號隔離、濾波電路或後續放大電路的前級**，避免後級電路影響 NTC 分壓輸出。在感測電路中，OP Amp 的選用會直接影響量測穩定性與準確度。此外溫度量測電路中也建議 OP Amp 選用低偏壓電流、低抵補電壓的產品，並且各 IC 的電源腳應加上 0.1μF 旁路電容，以降低電源干擾與高頻雜訊。由於本專題採用 **+5V 單電源**，因此 OP Amp 必須能在 5V 單電源下正常工作，若選用需要  $\pm 12\text{V}$  或  $\pm 15\text{V}$  雙電源的傳統 OP Amp，將會使電源架構變複雜，也不符合蓮蓬頭低壓安全供電的設計方向，因此本專題的 OP Amp 選用條件如下：

表 4. OP Amp 選用條件表

| 選用條件          | 說明                     |
|---------------|------------------------|
| 單電源 5V 可工作    | 配合本專題 +5V 低壓供電         |
| 輸入範圍需涵蓋 2V~3V | 分壓輸出主要落在此範圍            |
| 輸出範圍需涵蓋 2V~3V | 可正確輸出水溫訊號              |
| 高輸入阻抗         | 避免拉低 NTC 分壓電壓          |
| 低輸入偏壓電流       | 降低分壓節點被 OP Amp 載入造成的誤差 |
| 低輸入抵補電壓       | 降低溫度換算誤差               |
| 低溫度漂移         | 避免浴室環境溫度變化造成輸出偏移       |
| 低功耗           | 適合電池或 USB 供電           |
| 容易取得          | 方便實作與後續維修              |

### 5.2 候選 OP Amp 比較

本專題初步比較 LM358、TL081/TL082、LM741 三種常見 OP Amp。由於本專題已決定採用 **+5V 單電源**，且 NTC 分壓輸出約為 **2.05V~3.05V**，因此 OP

Amp 必須能在 5V 單電源下正常工作，並且輸入、輸出範圍需涵蓋 2V~3V 的訊號範圍。

**LM358** 是常見的雙 OP Amp，具有價格低、容易取得、可單電源使用等優點。LM358 系列可使用 **3V~36V** 供電，輸入共模範圍可包含接地端，適合單電源低壓訊號處理。因此可符合本專題需求。

**TL081/TL082** 屬於 JFET 輸入型 OP Amp，具有高輸入阻抗、低輸入偏壓電流等優點，適合處理高阻抗訊號。不過 TL081/TL082 較常用於較高電壓或雙電源系統，若用於本專題的+5V 單電源架構，輸入與輸出工作範圍較不容易掌握，因此本專題不優先選用。

**LM741** 是傳統常見 OP Amp，但通常較適合使用 $\pm 12V$  或 $\pm 15V$  雙電源。若將 LM741 用於本專題，會使電源設計變得複雜，也不符合蓮蓬頭低壓安全供電的方向，因此不採用。

表 5. 為候選 OP Amp 比較表。

| OP Amp      | 優點                        | 缺點                | 適用性 |
|-------------|---------------------------|-------------------|-----|
| LM358       | 可 5V 單電源、便宜、容易取得、雙 OP Amp | 不是完整 rail-to-rail | 適合  |
| TL081/TL082 | 輸入阻抗高、偏壓電流小               | 較適合較高電壓或雙電源使用     | 不優先 |
| LM741       | 常見、基礎教學常用                 | 多使用雙電源，不適合本專題低壓架構 | 不   |

### 5.3 本專題選用之 OP Amp

綜合比較後，本專題選用 **LM358** 作為溫度感測電路的 OP Amp。選用原因如下：

1. **符合+5V 單電源設計：** 本專題已決定感測電路使用+5V 低壓直流電源，LM358 可在單電源下工作，不需要額外產生負電源，可降低電路複雜度。
2. **可處理本專題的輸入與輸出範圍：** NTC 分壓輸出約為 2.05V~3.05V，LM358 在 5V 供電下可涵蓋此範圍，足以作為溫度訊號的緩衝與前級處理。
3. **雙 OP Amp 方便後續擴充：** LM358 內部有兩組 OP Amp，其中一組可作為電

壓隨耦器，另一組可預留給後續濾波、放大或指示電路使用。

4. **取得容易、成本低：** LM358 是常見元件，價格低且容易購買，適合本專題實作與後續維修。

本專題中，LM358 的第一組 OP Amp 將先設計為**電壓隨耦器**，其主要目的不是放大電壓，而是進行阻抗轉換，使 NTC 分壓電路不容易受到後級電路影響。其關係為：

$$V_{\text{buffer}} = V_{\text{out}}$$

也就是輸出電壓大小不改變，但可提高訊號穩定性與後級驅動能力。因此，本章決定使用 **LM358** 作為本專題溫度感測電路的 OP Amp。



## 第六章 轉換電路的設計

### 6.1 轉換電路架構

本專題已決定使用 **10kΩ NTC 防水熱敏電阻探頭** 作為溫度感測器，並採用 **分壓式電阻對電壓轉換電路** 作為主要轉換方式。由於 NTC 的特性是溫度升高時電阻下降，因此本專題將 NTC 接在分壓電路上臂，固定電阻  $R_s$  接地，如此可使水溫升高時，輸出電壓  $V_{out}$  也跟著升高，方便後續顯示與判斷。

本專題轉換電路架構如下：

$$+5V \rightarrow R_{NTC}(T) \rightarrow V_{out} \rightarrow R_s \rightarrow GND$$

其中  $R_{NTC}(T)$  為 NTC 熱敏電阻隨溫度變化的阻值， $R_s$  為固定分壓電阻， $V_{out}$  為轉換後的溫度電壓訊號，分壓輸出公式為  $V_{out} = V_{ref} \times \frac{R_s}{R_{NTC}(T) + R_s}$ 。

本專題設定：

$$V_{ref} = 5V$$

$$R_s = 5.6k\Omega$$

因此，當蓮蓬頭出水溫度改變時，NTC 阻值會跟著改變，並透過分壓電路轉換成電壓變化，此電壓再送入 LM358 的電壓隨耦器，使後級電路不會影響前級 NTC 分壓結果。

整體訊號流程可表示為：

NTC 溫度感測器 → 分壓轉換電路 → LM358 電壓隨耦器  
→ 後續濾波、放大或指示電路

### 6.2 輸出電壓與電流檢查

依照前面所選用的 10kΩ、B 值約 3950K 的 NTC 熱敏電阻，在 30°C~50°C 的主要量測範圍內，其阻值會由約 8.0kΩ 下降至約 3.6kΩ。搭配 5.6kΩ 固定分壓電阻後，可得到下表結果。

表 6. 轉換電路輸出估算表

| 溫度   | NTC 估算阻值 | 分壓輸出電壓  |
|------|----------|---------|
| 30°C | 約 8.0kΩ  | 約 2.05V |
| 35°C | 約 6.5kΩ  | 約 2.31V |
| 40°C | 約 5.3kΩ  | 約 2.57V |
| 45°C | 約 4.3kΩ  | 約 2.82V |
| 50°C | 約 3.6kΩ  | 約 3.05V |

由表中可知，在本專題主要觀察的 30°C~50°C 範圍內，輸出電壓約由 2.05V 上升至 3.05V，總變化量約為 1V。因此每 1°C 平均約有：

$$\frac{3.05V - 2.05V}{50^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}} = 50\text{mV}/^{\circ}\text{C}$$

若解析度目標為 0.1°C，則 0.1°C 約對應：

$$50\text{mV}/^{\circ}\text{C} \times 0.1^{\circ}\text{C} = 5\text{mV}$$

此電壓變化量已足夠讓後續電路進行判讀，此外，為避免 NTC 因電流過大產生自熱，也需檢查分壓電流，以 40°C 為例：

$$R_{\text{NTC}} \approx 5.3\text{k}\Omega$$

$$R_s = 5.6\text{k}\Omega$$

$$R_{\text{total}} = 5.3\text{k}\Omega + 5.6\text{k}\Omega = 10.9\text{k}\Omega$$

$$I = \frac{5V}{10.9\text{k}\Omega} \approx 0.459\text{mA}$$

NTC 消耗功率約為：

$$P = I^2 R = (0.459\text{mA})^2 \times 5.3\text{k}\Omega \approx 1.1\text{mW}$$

此功率不大，可降低 NTC 自熱造成的量測誤差，因此本轉換電路在輸出電壓變化量與自熱控制上，皆符合本專題需求。

## 6.2 本章設計結果

本章完成 NTC 溫度感測器之轉換電路設計，最後採用 5V 參考電壓、10kΩ

NTC 防水熱敏電阻、 $5.6\text{k}\Omega$  精密固定電阻，組成分壓式電阻對電壓轉換電路，並將輸出送入 LM358 電壓隨耦器作為緩衝。

表 7. 轉換電路設計結果表

| 項目     | 設計內容                              |
|--------|-----------------------------------|
| 感測器    | $10\text{k}\Omega$ NTC 防水熱敏電阻     |
| 轉換方式   | 分壓式電阻對電壓轉換                        |
| 參考電壓   | 5V                                |
| 固定分壓電阻 | $5.6\text{k}\Omega$ 精密金屬膜電阻       |
| 主要輸出範圍 | 約 $2.05\text{V}\sim 3.05\text{V}$ |
| 平均靈敏度  | 約 $50\text{mV}/^{\circ}\text{C}$  |
| 緩衝電路   | LM358 電壓隨耦器                       |
| 設計重點   | 低自熱、輸出趨勢明確、適合後續放大與指示              |

因此本專題的轉換電路能將蓮蓬頭出水溫度變化轉換為可判讀的電壓訊號。當水溫升高時，NTC 阻值下降，使  $V_{\text{out}}$  上升；當水溫降低時，NTC 阻值上升，使  $V_{\text{out}}$  下降，此特性符合後續溫度顯示、警示與調校需求。



## 第七章 放大器的設計

### 7.1 放大器設計需求

本專題前級轉換電路已將蓮蓬頭出水溫度轉換為電壓訊號。在  $30^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$  的主要量測範圍內，分壓輸出約為  $2.05\text{V}\sim 3.05\text{V}$ ，平均靈敏度約為  $50\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 。若以  $0.1^{\circ}\text{C}$  為解析度需求，則  $0.1^{\circ}\text{C}$  約對應  $5\text{mV}$  的電壓變化，因此前級訊號已具有足夠的變化量，不需要再做高倍率放大，本專題當中放大器的主要目的不是提高電壓倍率，而是進行阻抗轉換與訊號緩衝。若 NTC 分壓輸出直接接到後續指示電路或 ADC 輸入，可能因後級輸入阻抗不足而拉低分壓電壓，造成量測誤差，因此本專題使用 LM358 作為電壓隨耦器，使前級 NTC 分壓電路與後級電路隔離。

### 7.2 電壓隨耦器設計

本專題使用 LM358 的其中一組 OP Amp 作為電壓隨耦器。其接法為將 NTC 分壓輸出  $V_{\text{out}}$  接至 LM358 的非反相輸入端，並將輸出端直接回授到反相輸入端。此時放大倍率為 1 倍，輸出電壓等於輸入電壓。

$$A_v = 1$$

$$V_{\text{buffer}} = V_{\text{out}}$$

因此當 NTC 分壓輸出為  $2.05\text{V}\sim 3.05\text{V}$  時，經過 LM358 電壓隨耦器後，輸出仍約為：

$$V_{\text{buffer}} = 2.05\text{V} \sim 3.05\text{V}$$

雖然電壓大小沒有被放大，但電壓隨耦器具有高輸入阻抗與低輸出阻抗的特性，可避免後級電路影響前級分壓結果，並提高訊號驅動能力。第五章已決定使用 LM358，其中一組 OP Amp 作為電壓隨耦器，另一組可預留給後續濾波、放大或指示電路使用。

## 第八章 指示電路的設計

### 8.1 指示電路需求

本專題前級電路已將蓮蓬頭出水溫度轉換為電壓訊號，並經由 LM358 電壓隨耦器進行緩衝。依前面設計結果，在  $30^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$  的主要量測範圍內，輸出電壓約為  $2.05\text{V}\sim 3.05\text{V}$ ，平均靈敏度約為  $50\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 。因此，指示電路的主要任務是將此電壓訊號轉換成使用者容易判讀的溫度資訊，而不是進行水溫控制，由於本專題應用在蓮蓬頭出水溫度量測，指示電路需符合以下需求：

表 8. 指示電路需求表

| 項目    | 設計需求                              |
|-------|-----------------------------------|
| 輸入訊號  | LM358 緩衝後電壓 $V_{\text{buffer}}$   |
| 輸入範圍  | 約 $2.05\text{V}\sim 3.05\text{V}$ |
| 指示內容  | 顯示目前水溫                            |
| 顯示單位  | $^{\circ}\text{C}$                |
| 解析度目標 | $0.1^{\circ}\text{C}$             |
| 警示需求  | 溫度過高時可亮燈或蜂鳴提醒                     |
| 使用環境  | 潮濕環境，顯示與電路需防水隔離                   |
| 電源    | +5V 低壓直流電                         |

考量到本專題採用 +5V 單電源，且輸出電壓範圍適合一般微控制器讀取，因此本專題的指示方式採用 **ADC 類比數位轉換加上數位顯示**。也就是將 LM358 輸出的  $V_{\text{buffer}}$  接入微控制器的 ADC 輸入腳位，再經由程式換算成溫度，最後以 LCD、OLED 或七段顯示器顯示目前水溫。

### 8.2 指示電路設計

本專題指示電路可由三個部分組成：ADC 讀取電路、溫度換算程式、顯示與警示電路，其訊號流程如下：

$V_{\text{buffer}} \rightarrow \text{ADC 輸入} \rightarrow \text{溫度換算} \rightarrow \text{顯示器/警示燈}$

其中  $V_{\text{buffer}}$  為前級 LM358 電壓隨耦器輸出，若使用 5V 作為 ADC 參考電壓，且 ADC 解析度為 10 bit，則 ADC 每一格代表的電壓約為：

$$\frac{5V}{1023} \approx 4.89mV$$

前面已計算本專題平均靈敏度約為：

$$50mV/^{\circ}C$$

因此 ADC 每一格約對應的溫度變化為：

$$\frac{4.89mV}{50mV/^{\circ}C} \approx 0.098^{\circ}C$$

此結果接近  $0.1^{\circ}C$ ，符合本專題設定的解析度需求。需要注意的是，這裡的  $0.1^{\circ}C$  是顯示解析度，實際準確度仍會受到 NTC 誤差、分壓電阻誤差、參考電壓穩定性與調校結果影響，在初步顯示換算上，可先採用  $30^{\circ}C \sim 50^{\circ}C$  區間的近似線性關係。由於  $30^{\circ}C$  時輸出約為  $2.05V$ ， $50^{\circ}C$  時輸出約為  $3.05V$ ，因此可得到：

$$T \approx 30 + \frac{V_{buffer} - 2.05}{0.05}$$

其中  $T$  為估算溫度，單位為  $^{\circ}C$ ，此方法適合本專題主要淋浴溫度範圍內的初步顯示，若要提高準確度，後續可改用查表法，將  $30^{\circ}C$ 、 $35^{\circ}C$ 、 $40^{\circ}C$ 、 $45^{\circ}C$ 、 $50^{\circ}C$  等校正點建立成對照表，再由程式進行內插換算。

顯示方面，本專題可使用 LCD 或 OLED 顯示目前水溫，例如：

$$WaterTemp = 40.0^{\circ}C$$

警示方面，指示電路可加入 LED 或蜂鳴器作為提醒。例如當水溫低於  $37^{\circ}C$  時顯示偏冷， $37^{\circ}C \sim 42^{\circ}C$  顯示正常， $42^{\circ}C \sim 45^{\circ}C$  顯示偏熱，超過  $45^{\circ}C$  時亮紅燈或蜂鳴器提醒使用者，此警示只作為使用者提醒，不控制冷熱水比例。

# 第九章 雜訊消除及預防

## 9.1 雜訊來源分析

本專題的溫度感測器安裝於蓮蓬頭出水端附近，感測器與主電路之間可能需要使用較長導線連接。當導線較長時，容易受到外界電磁干擾、電源雜訊或高頻突波影響，使原本代表水溫的電壓訊號產生跳動。量測電路中常會因待測物與量測系統距離較遠，必須使用引線連接感測器，而長引線可能感應不必要的雜訊，尤其是高頻或突波干擾，因此需要針對線性電路進行雜訊預防與頻率補償。本專題可能遇到的雜訊來源可分為以下幾類：

表 9. 雜訊來源分析表

| 雜訊來源   | 可能影響                    | 預防方向           |
|--------|-------------------------|----------------|
| 感測器長導線 | 感應外部雜訊，使 $V_{out}$ 跳動   | 縮短線長、使用雙絞線或屏蔽線 |
| 電源雜訊   | 造成 $V_{ref}$ 不穩，使分壓輸出漂移 | 穩壓、旁路電容、濾波     |
| 高頻突波   | 造成 OP Amp 或 ADC 讀值瞬間跳動  | 加入低通濾波與旁路電容    |
| 接地不良   | 造成基準點不穩，溫度換算誤差          | 採用共地與星狀接地      |
| 潮濕環境   | 導線或接點漏電、接觸不良            | 防水封裝、絕緣處理、接點密封 |

其中最需要注意的是感測器導線雜訊與電源雜訊，由於本專題使用 NTC 分壓法，輸出電壓會直接受到 $V_{ref}$ 影響，若 5V 參考電壓不穩定，溫度顯示也會跟著漂移，因此雜訊預防不只是在訊號線加濾波，也必須同時處理電源端與接地端。

## 9.2 雜訊消除電路設計

本專題在雜訊消除上，主要採用電源旁路、訊號低通濾波、電壓隨耦器隔離、導線與接地處理四種方式。

1. 於 LM358 的電源端加入 0.1 $\mu$ F 旁路電容，此電容應盡量靠近 LM358 的 VCC 與 GND 腳位，用來降低電源端的高頻干擾。

2. 在 NTC 分壓輸出端加入簡單 RC 低通濾波器，由於水溫變化相對較慢，不屬於高速訊號，因此可以濾除不必要的高頻雜訊，本專題可在  $V_{out}$  輸出端串接小電阻  $R_f$ ，並在 LM358 輸入端對地並聯電容  $C_f$ ，形成低通濾波器，其截止頻率為：

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C_f}$$

例如選用：

$$R_f = 1k\Omega$$

$$C_f = 0.1\mu F$$

則：

$$f_c = \frac{1}{2\pi \times 1k\Omega \times 0.1\mu F} \approx 1.59kHz$$

此截止頻率足以保留水溫變化訊號，同時減少高頻干擾，若實際測試時 ADC 讀值仍有跳動，可將  $C_f$  增加至  $1\mu F$ ，使濾波效果更明顯，但反應速度會稍微變慢。3. 使用 LM358 電壓隨耦器作為前後級隔離，前章已設計 LM358 為電壓隨耦器，其放大倍率為 1，但具有高輸入阻抗與較低輸出阻抗，可避免後級 ADC 或指示電路影響 NTC 分壓輸出，為避免負載效應，理想電壓放大器需要高輸入阻抗，而電壓隨耦器可作為阻抗轉換使用。4. 感測器導線應採用縮短線長、雙絞線、屏蔽線與防水接頭等方式，若感測器探頭與電路板距離較遠，NTC 兩條線可採用雙絞線降低外部感應雜訊；若環境干擾較大，則使用屏蔽線，並將屏蔽層單端接地，避免形成接地迴路，所有接點應使用熱縮套管、防水接頭或矽膠封裝，避免水氣造成漏電與接觸不良。

## 第十章 調校步驟

### 10.1 調校目的與準備

本專題使用 10k $\Omega$  NTC 防水熱敏電阻作為蓮蓬頭出水溫度感測器，並透過分壓電路、LM358 電壓隨耦器與 ADC 指示電路將水溫轉換為可顯示的溫度值，由於 NTC 本身具有非線性，且實際量測結果會受到 NTC 誤差、固定電阻誤差、參考電壓穩定度、OP Amp 偏移電壓及 ADC 解析度影響，因此完成電路設計後，必須進行調校，使顯示溫度接近實際水溫。

調校時需準備以下設備：

表 10. 調校設備表

| 項目         | 用途                                      |
|------------|-----------------------------------------|
| 標準溫度計      | 作為實際水溫參考值                               |
| 可調溫水源或恆溫水槽 | 產生不同測試溫度                                |
| 三用電表       | 量測 $V_{out}$ 、 $V_{buffer}$ 、 $V_{ref}$ |
| 本專題感測電路    | 進行實際量測                                  |
| 顯示器或序列監控視窗 | 觀察 ADC 讀值與換算溫度                          |
| 紀錄表        | 記錄溫度、電壓與誤差                              |

本專題主要量測範圍為 30°C~50°C，因此調校點可選擇 30°C、35°C、40°C、45°C、50°C。其中 40°C 可作為中心校正點，30°C 與 50°C 則可用來確認低溫端與高溫端的誤差。

### 10.2 調校流程

本專題調校流程如下：

1. **確認電源與參考電壓：**先接上 +5V 電源，使用三用電表量測  $V_{CC}$  與  $V_{ref}$ ，確認電壓接近 5V 且不明顯跳動。若參考電壓不穩定，會使分壓輸出跟著漂移，因此需先排除電源不穩或接地不良問題。

2. **確認感測器與分壓輸出：**將 NTC 防水探頭放入接近 40°C 的水中，等待讀值穩定後，量測分壓輸出  $V_{out}$ ，依前面估算，40°C 時輸出約為 2.57V，若量測值偏差過大，需檢查 NTC 規格、固定電阻  $R_s$ 、接線方向與焊接狀況。
3. **確認 LM358 電壓隨耦器輸出：**量測 LM358 輸出端  $V_{buffer}$ ，理論上  $V_{buffer} = V_{out}$ ，若  $V_{buffer}$  與  $V_{out}$  差異很大，表示 OP Amp 接線、供電、回授或輸入端可能有問題。
4. **建立溫度與電壓對照表：**將探頭依序放入 30°C、35°C、40°C、45°C、50°C 的水中，每一點等待數值穩定後，記錄標準溫度計溫度、 $V_{buffer}$ 、ADC 讀值與顯示溫度。
5. **修正溫度換算公式：**初步換算可使用前面建立的近似線性公式：

$$T \approx 30 + \frac{V_{buffer} - 2.05}{0.05}$$

若實測結果與標準溫度計有差異，則依實測資料修正 30°C 與 50°C 對應的電壓值。例如實測 30°C 時為  $V_{30}$ ，50°C 時為  $V_{50}$ ，則可改用：

$$T \approx 30 + \frac{V_{buffer} - V_{30}}{V_{50} - V_{30}} \times 20$$

若要進一步提高準確度，可使用查表法，將 30°C、35°C、40°C、45°C、50°C 的實測資料建立成校正表，再由程式進行內插換算。

6. **設定過熱警示點：**完成溫度顯示調校後，設定警示溫度，例如水溫超過 45°C 時，LED 亮起或蜂鳴器動作，此步驟需實際將探頭放入接近 45°C 的水中測試，確認警示能在設定溫度附近啟動。

### 10.3 調校流程

完成調校後，需確認本專題是否符合原先設定的需求。若在 30°C~50°C 範圍內，各測試點的顯示誤差可控制在  $\pm 0.5^\circ\text{C} \sim \pm 1^\circ\text{C}$  以內，即可視為符合本專題的準確度目標。若誤差超過目標，應依下列方向檢查：

表 11. 調校誤差檢查表

| 問題現象 | 可能原因 | 修正方式 |
|------|------|------|
|------|------|------|

|                              |               |                     |
|------------------------------|---------------|---------------------|
| 所有溫度都偏高或偏低                   | 換算公式偏移、參考電壓不準 | 修正公式或重新量測 $V_{ref}$ |
| 低溫準確但高溫誤差大                   | NTC 非線性影響     | 改用查表法或多點校正          |
| 讀值一直跳動                       | 電源雜訊、導線干擾     | 檢查旁路電容、RC 濾波、接地     |
| 反應太慢                         | 濾波電容過大或探頭熱反應慢 | 降低濾波電容或更換探頭位置       |
| $V_{out}$ 與 $V_{buffer}$ 差異大 | LM358 接線或回授錯誤 | 檢查 OP Amp 接線        |
| 水溫升高但顯示下降                    | NTC 與固定電阻接法相反 | 檢查分壓電路接法            |

因此本專題的調校方式以**多點溫度校正**為主，先確認 5V 參考電壓與分壓輸出正常，再量測 30°C~50°C 各校正點的電壓與顯示值，最後透過修正公式或查表法降低誤差，完成調校後，感測器即可較準確地顯示蓮蓬頭出水溫度，並在水溫過高時提供警示。



# 第十一章 採購建議

## 11.1 採購建議

本專題之採購重點應以「安全、容易取得、符合前述電路設計、方便實作與調校」為原則。由於本專題的感測器會使用於蓮蓬頭附近，環境具有潮濕、水流噴濺與人體接觸等特性，因此採購時不應只考慮價格，也必須確認元件是否適合低壓、安全、防水與穩定量測需求。依照前面章節已決定的設計，本專題主要採用 **10k $\Omega$  NTC 防水熱敏電阻**、**5.6k $\Omega$  精密電阻**、**LM358 OP Amp**、**5V 低壓電源**、**ADC 顯示電路與防水外殼** 作為主要零件。

表 12. 採購建議表

| 類別     | 建議採購品項                                       | 建議規格                                               | 採購理由                                                  |
|--------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 溫度感測器  | 10k $\Omega$ NTC 防水熱敏電阻探頭                    | 10k $\Omega$ 25 $^{\circ}$ C、B 值約 3950K、防水不鏽鋼或環氧封裝 | 作為蓮蓬頭出水溫度感測元件，需具備防水與快速反應能力                            |
| 分壓電阻   | 5.6k $\Omega$ 精密金屬膜電阻                        | 1%以下誤差，建議選低溫度係數                                    | 與 NTC 組成分壓電路，使 30 $^{\circ}$ C~50 $^{\circ}$ C 有較佳靈敏度 |
| OP Amp | LM358                                        | 雙 OP Amp、可單電源 5V 使用                                | 作為電壓隨耦器，避免後級電路影響 NTC 分壓輸出                             |
| 濾波元件   | 0.1 $\mu$ F 陶瓷電容、1 $\mu$ F 電容、1k $\Omega$ 電阻 | 電容耐壓需高於 5V，電阻 1%佳                                  | 用於電源旁路與 RC 低通濾波，降低雜訊                                  |
| 電源     | USB 5V、行動電源或隔離式 AC-DC 5V 電源                  | 低壓直流 5V，避免 110V 直接進入蓮蓬頭端                           | 提高浴室潮濕環境下的用電安全                                        |
| 顯示電路   | Arduino、ADC 模組、LCD 或 OLED 顯示器                | ADC 至少 10 bit，顯示器可顯示溫度數值                           | 將類比電壓轉成溫度並顯示                                          |
| 警示元件   | LED、蜂鳴器                                      | 5V 可驅動                                             | 水溫過高時提供提醒                                             |

|      |                  |          |                       |
|------|------------------|----------|-----------------------|
| 防水材料 | 防水盒、熱縮套管、防水接頭、矽膠 | 適合潮濕環境   | 保護電路與接點，避免水氣造成漏電或接觸不良 |
| 導線   | 雙絞線或屏蔽線          | 適合低壓訊號傳輸 | 降低感測器長導線造成的雜訊干擾       |
| 測試工具 | 三用電表、標準溫度計       | 可量測電壓與水溫 | 用於調校與驗證電路是否正常         |

採購時應優先購買 **防水型 NTC 探頭**，因為感測器會直接影響量測反應速度與準確度。若探頭防水不良，水氣進入後可能造成阻值異常、接觸不良或漏電問題，因此不建議使用裸露式熱敏電阻直接接觸水流。分壓電阻則建議選用精密金屬膜電阻，避免電阻誤差過大造成溫度換算偏差。

OP Amp 可選用 **LM358 DIP 封裝**，較方便麵包板測試與焊接實作。由於本專題主要使用 LM358 作為電壓隨耦器，不需要高倍率放大，因此 LM358 已足以符合本專題需求。電源部分則建議實作階段先使用 USB 5V 或行動電源，避免一開始就處理 110V 市電；若未來要做成固定安裝版本，再使用外部隔離式 AC-DC 5V 電源供應器，並將市電轉換端放置於乾燥安全位置，本專題的採購策略應以「先完成低壓安全雛形，再考慮外殼整合與長期使用」為原則。初期可先採購 NTC 防水探頭、LM358、5.6k $\Omega$  精密電阻、電容、Arduino 與顯示器完成電路測試；後期再加入防水盒、防水接頭與警示元件，使整體系統更接近實際蓮蓬頭溫度感測器的應用需求。

## 參考文獻

- [1] 盧明智、盧鵬任。《感測器應用與線路分析》。修訂二版。全華圖書，  
2008。ISBN：9789572162903

