



逢甲大學學生報告 ePaper

智慧救生船溫度監控系統設計

Smart Lifeboat Temperature Monitoring System Design

作者：徐彩容

系級：自動控制工程學系

學號：D1353164

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

本研究旨在設計一套應用於智慧救生船之溫度控制系統，以解決救生船於執行救援任務時，因動力馬達高速運轉、鋰電池放電及密閉式防水船艙所造成的設備過熱問題，降低因高溫導致設備故障或影響救援效率的風險，提升智慧救生船運行的安全性與可靠性。系統以 Pt100 鉑電阻溫度感測器作為溫度量測元件，配合三線式惠斯同電橋將阻值變化轉換為差動電壓，再利用 AD623 儀表放大器進行訊號放大，使輸出符合微控制器 ADC 的輸入範圍。同時加入 RC 低通濾波、電源退耦、屏蔽線及軟體滑動平均濾波等抗干擾設計，以降低馬達驅動器所產生的電磁雜訊，提高量測穩定性與準確度；並透過微控制器控制 RGB LED 指示燈、蜂鳴器及無線傳輸模組，即時顯示與回傳救生船內部溫度資訊。預期本系統可提供穩定且精確的溫度監測功能，於溫度異常時即時發出警示或啟動保護措施，有效預防設備因過熱而損壞，提升智慧救生船的救援可靠性，並可作為未來智慧水域救援設備溫度監測與控制系統之參考。

關鍵字：

- Pt100
- 溫度控制
- 智慧救生船
- 儀表放大器
- 惠斯同電橋

Abstract

This study aims to design a temperature control system applied to a smart rescue boat to address the overheating issues caused by high-speed operation of the propulsion motor, lithium battery discharge, and the enclosed waterproof cabin during rescue missions. The proposed system is designed to reduce the risk of equipment failure and decreased rescue efficiency caused by excessive temperature, thereby improving the safety and reliability of smart rescue boat operations.

The system adopts a Pt100 platinum resistance temperature sensor as the temperature measurement element. A three-wire Wheatstone bridge circuit is used to convert the resistance variation into a differential voltage signal, which is then amplified by an AD623 instrumentation amplifier to match the input range of the microcontroller's analog-to-digital converter (ADC). In addition, several anti-interference techniques, including RC low-pass filtering, power supply decoupling, shielded cables, and software-based moving average filtering, are implemented to reduce electromagnetic interference generated by the motor driver and improve measurement stability and accuracy.

The microcontroller is further integrated with RGB LED indicators, a buzzer, and a wireless transmission module to provide real-time temperature display and remote monitoring of the internal temperature conditions of the rescue boat. The proposed system is expected to provide stable and accurate temperature monitoring capabilities, enabling immediate warnings or protective actions when abnormal temperature conditions occur. This approach can effectively prevent equipment damage caused by overheating, enhance the reliability of smart rescue boat operations, and serve as a reference for future temperature monitoring and control systems in intelligent water rescue equipment.

Keyword :

- Pt100
- Instrumentation Amplifier (AD623)
- Temperature Control
- Temperature Monitoring
- Smart Lifeboat

目錄

一、主題動機(Theme Motivation).....	6
二、設計步驟及分析(Design Steps and Analysis).....	7
2-1 溫度感測器 R(T)，要用哪一種	7
2-2 電阻對電壓轉換電路，是哪種方法比較好	8
2-3 各項電源電壓的考慮	9
2-4 要用哪一種編號的 OPamp	10
2-5 轉換電路的設計	12
2-6 放大器的設計	15
2-7 指示電路的設計	18
2-8 消除雜訊及預防雜訊干擾	20
2-9 線路說明及分析	23
2-10 調校步驟的安排	25
三、未來展望(Future outlook).....	27
四、結論(Conclusion)	28
參考文獻(References).....	29

圖目錄

圖 1、三線式 Pt100 外形示意圖	8
圖 2、Pt100 與惠斯通電橋搭接示意圖	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3、AD623 接腳定義圖	15



表目錄

表 1、AD623 儀表放大器之關鍵技術特性分析表	11
表 2、智慧救生船溫度控制系統之設計效益	14
表 3、儀表放大器於智慧救生船溫控系統之應用優勢	17
表 4、智慧救生船溫度監測系統功能分析	20
表 5、智慧救生船溫度監測系統之抗干擾設計與可靠性提升	22



一、主題動機(Theme Motivation)

在日常生活與公共安全中，游泳池的溺水救援一直是非常重要且不容忽視的議題。雖然目前多數泳池都配有專業的救生員，但有時候因為現場視線死角、環境雜音或者是反應時間的落差，還是有可能錯失黃金救援時間。為此，我希望設計一艘具備自動推進與救生圈射出功能的「智慧救生船」，只要發生緊急狀況，它就能以最快速度衝向溺水者並精準投遞救生圈。然而，這類救生船為了在第一時間爭取速度，動力馬達和電池組勢必得在短時間內全功率高速運轉，再加上船體為了防水而採用密閉式設計，內部熱氣極難排出，極易導致設備溫度劇烈飆升。如果缺乏有效的監控，一旦馬達過熱燒毀或電池發生起火危機，救生船不僅會當場失去救援能力，更可能在泳池內造成嚴重的二次災害。

希望藉由這次專題作業，設計一套以電阻式溫度感測器（Pt100）為核心的「智慧救生船溫度控制系統」。這套系統不僅能即時監控救生船艙內與動力設備區域的溫度變化，還能透過合理的電路設計與訊號處理，提供穩定且精準的監測結果。在設計與研發的過程中，我將針對 Pt100 感測器的特性、惠斯同電橋轉換電路的選擇方式、以及儀表放大器（如 AD620）的增益設計進行深入的研究與比對。同時，考慮到救生船上的馬達驅動器（PWM）和救生圈射出裝置會產生極大的電磁雜訊，我也會加入硬體低通濾波、線路隔離屏蔽以及軟體移動平均濾波等消除雜訊與防干擾的設計，透過這些技術技巧來大幅提升整體系統的穩定性。

為了讓岸上的救生員能快速了解救生船目前的溫度狀態，系統中也將設計簡單明確的指示電路與無線傳輸機制。在船體上會裝設 RGB LED 燈號來提供直覺的視覺警示，並透過無線模組將溫度數據即時回傳。透過接下來詳細的電路說明、增益計算與分析，以及合理的零點與增益調校測試流程，我希望這個溫度感測系統不僅能成為一個可靠、結構完整的技術實作，也能真正應用在實際的智慧救生船中，讓水上自動化救援設備的運作安全更有保障，確實達到預防設備過熱罷工並守護生命安全的目標。

二、設計步驟及分析(Design Steps and Analysis)

2-1 溫度感測器 R(T)，要用哪一種

感測器選擇 Pt100 鉑電阻溫度計（三線式或四線式導線）

1. 極佳的線性度與高精準：

理由：Pt100 鉑電阻的電阻變化與溫度有完美的線性關係（每上升 1°C ，電阻穩定性增加約 0.385Ω ）[1]。

優勢：相較於非線性的熱敏電阻（NTC），微處理器（MCU）在計算溫度時不需要複雜的查表或對數公式，能提供最精準誤差值極低的溫度數據。

2. 環境適應性與耐用性高：

理由：感測器材質為惰性貴金屬「鉑（白金）」，化學性質及其穩定[1]。

優勢：救生船長期在游泳池的潮濕水上環境運作，Pt100 探頭不易老化、抗腐蝕，能確保系統長期運作的穩定性。

3. 三線式/四線式架構：完全消除導線電阻誤差：

理由：救生船的馬達在船尾，但控制電路板在船身中央，中間的連接導線也會產生電阻。

優勢：採用三線式（或四線式）接法，可以透過補償電路（如惠斯通電橋）互相抵銷導線所帶來的多餘電阻，避免微處理器誤判溫度，確保過熱防護機制的可靠性。

4. 抗雜訊能力佳，適合馬達高干擾環境：

理由：Pt100 屬於低阻抗感測器（阻抗約在 100Ω 到 140Ω 之間），相較於高阻抗的熱敏電阻（動輒幾萬歐姆 $k\Omega$ ），它對空間中的靜電與電磁雜訊（如

馬達產生的高頻干擾) 非常不敏感。

優勢：救生船在衝刺時，動力馬達會產生嚴重電磁雜訊。Pt100 的低阻抗特性，配合三線式（如圖 1 所示）或四線式的平衡電路與差動放大器（如儀表放大器），可以利用「共模抑制 (CMRR)」，把環境中的干擾雜訊直接抵銷掉，確保傳回微處理器的訊號非常乾淨、穩定。



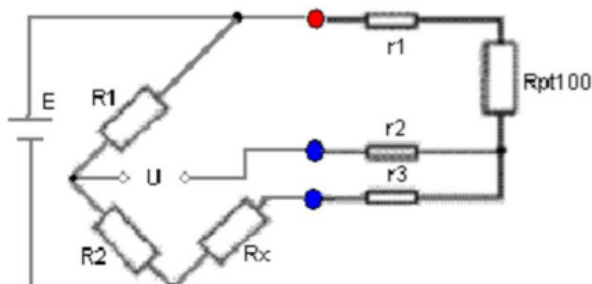
圖 1、三線式 Pt100 外形示意圖

2-2 電阻對電壓轉換電路，是哪種方法比較好

我會選用「三線式惠斯同電橋法 + 儀表放大器 (AD620)」來進行電阻對電壓的轉換。

1. 完美消除導線電阻誤差：

救生船的控制板在船身中央，感測器在船尾馬達，中間連接的導線本身也有電阻值。如圖 2 所示搭配「三線式 Pt100」，導線電阻 r_1 和 r_2 會被分別分配在電橋的左右側。因為兩邊電路對稱，導線電阻產生的壓降會互相抵銷，完全不影響溫度的精準度。



$$\text{当 } R1 \times (R_x + r_2 + r_3) = R2 \times (R_{pt100} + r_2 + r1)$$

电桥平衡， $U=0$

当 R_{pt100} 受温度变化后，电桥不平衡， $U \neq 0$

圖 2、Pt100 與惠斯通電橋搭接示意圖

2. 只放大「變化量」，解析度高：

可以設計讓電橋在基準溫度（如 0°C ）時完全平衡，此時輸出為 0V 。後級的放大器只需要專心放大「因為溫度上升而產生的微小壓差」，能將微處理器（MCU）的類比數位轉換（ADC）解析度發揮到極致。

3. 天生抗雜訊：

電橋輸出的是差動訊號（兩點電壓差），搭配儀表放大器，可以自動扣除救生船動力馬達運轉同時沾染在兩條線上的電子雜訊[2]。

2-3 各項電源電壓的考慮

我會選擇單電源。

1. 電路複雜度與空間佔用（單電源勝）：

雙電源：傳統運算放大器（如 $\mu\text{A}741$ ）通常需要正負雙電源（如 $\pm 12\text{V}$ 或 $\pm 15\text{V}$ ）供電。若要在救生船上實現，必須額外設計負電壓產生電路（如使用電荷泵或隔離式 DC-DC 轉換器），這會增加電路板面積、元件數量及微處理器周邊的複雜度。

單電源：只需一組正電壓（如 $\pm 5\text{V}$ ）與接地（GND）即可運作，電路結構及其精簡，非常適合空間有限的船艙內部布局。

2. 船載設備重量與能耗考量（單電源勝）：

救生船是由電池驅動的移動載具，系統設計的核心原則是「輕量化」與「低功耗」。

雙電源電路在進行正負電壓轉換時，會產生額外的轉換損耗（發熱與耗電），縮短離電池的續航力。

單電源電路直接與主控板（如 Arduino/ESP32）共用電源，能有效節省電能，延長救生船在泳池中的值勤與救援時間。

3. 訊號輸出範圍與元件選擇（各有考量）：

雙電源：

訊號輸出可以跨越正負零點（例如 $-5V \sim +5V$ ），動態範圍大，但對只需要讀取 $0 \sim 5V$ 類比訊號的微處理器 ADC 來說，負電壓反而有燒毀晶片的風險。

單電源：

輸出範圍限制在 $0V$ 到正電源之間。為了避免輸出訊號在接近 $0V$ 或電源電壓時發生飽和截止，本系統後級的儀表放大器將特別選用「軌對軌 (Rail-to-Rail)」晶片（如 AD623 或 INA333），確保單電源下依然能完整輸出 $0 \sim 5V$ 的溫度電壓訊號。

4. 成本與車載/嵌入式系統相容性（單電源勝）：

現代嵌入式系統與車載電子皆以單電源($3.3V$ 、 $5V$ 或 $12V$)為主流標準。選擇單電源不僅與救生船整體的電氣架構相容性最佳，也能大幅降低硬體採購成本。

2-4 要用哪一種編號的 OPamp

我會選擇精密儀表放大器 AD623。

1. 比較較適合選擇的兩個放大器編號：

AD620（經典低雜訊型）：

優點：具備極低的輸入失調電壓與極高的共模抑制比 (CMRR)，非常適合高精度的弱訊號測量，能將雜訊干擾降到最低。

缺點：通常需要雙電源（如 $\pm 5V$ 以上）供電才能達到最佳線性輸出，在救

生船+5V 的環境下輸出擺幅會受到較多限制。

AD623 (單電源軌對軌型)：

優點：專門為單電源系統設計，在+3.3V、+5V 供電下即可完美運作，且具備軌對軌 (Rail-to-Rail) 輸出特性，輸出電壓可完整達到 0~5V，非常適合直接與微控制器 (MCU) 的 ADC 對接。同時它也是標準儀表放大器架構，保有極高的抗雜訊能力[2]。

2. 選擇考量：

低輸入偏壓電流 (I_b) 與低失調電壓 (V_{os}) 以減少量測誤差；必須能在救生船現有的單電源 (+5V) 下穩定操作；輸出電壓擺幅需完美契合 MCU ADC 的輸入範圍 (0~5V)；內部具備良好的頻率補償與高共模抑制比 (CMRR)，在馬達的高干擾環境下不易產生高頻振盪。

3. 精密儀表放大器 AD623 與「智慧救生船溫控」應用之結合：

AD623 的三運放儀表架構能有效保護 Pt100 惠斯通電橋傳回的微弱壓差訊號，確保測量精準度；其原生支援單電源與軌對軌操作，完美契合救生船內部的 +5V 電源環境，大幅簡化硬體架構。同時，其優異的抗共模干擾能力，能及時放大因動力馬達高速運轉所產生的溫度變化訊號，協助主控系統準確監控與調節，保障救生船在水上運行的安全與效能。綜合上述特性，AD623 在此系統中具有良好的應用優勢，其主要關鍵技術特性如表 1 說明[2]。

表 1、AD623 儀表放大器之關鍵技術特性分析表

極高輸入阻抗與差動輸入，適合	AD623 具備極高的輸入阻抗，能有效避免 Pt100 惠斯通電橋的輸出訊號因後級負載效應而產生電壓降。其差動輸入
----------------	---

電橋訊號。	端能精準捕捉電橋因溫度變化產生的毫伏特微弱壓差，非常適合作為前置放大。
單電源與軌對軌特性，方便嵌入式系統整合。	AD623 可在單一 +5V 電源下正常工作，符合救生船內部低功耗環境，不須額外搭建複雜的正負雙電源電路，降低了船載設備的重量與成本。其軌對軌輸出更能確保溫控訊號在 0~5V 之間完整呈現不切頂。
高共模抑制比（CMRR）無懼馬達高頻雜訊	救生船在衝刺救援或射出救生圈時，推進馬達與伺服馬達會產生大量的電磁干擾（EMI）。AD623 擁有高達 90dB 以上的共模抑制比，能自動相減扣除兩條訊號上同時沾染的馬達雜訊，支持即時、動態的溫度偵測，協助主控板快速做出防護反應。

2-5 轉換電路的設計

將 Pt100 感測器的阻值變化（電阻）轉換成線性電壓訊號。

1. 設計方式：

利用三線式 Pt100 鉑電阻與三顆精密固定電阻構成對稱的惠斯通電橋由精密基準電壓源（ $V_{ref} = 2.5V$ ）驅動，其輸出之微弱差動電壓訊號再送入工業級精密儀表放大器（AD623）進行放大。

2. 公式分析：

若電橋供應 $E = V_{ref} = 2.5V$ ，上臂限流電阻 $R_1 = R_2 = 2k\Omega$ ，下臂平衡電阻 $R_3 = 100\Omega$ 。則電橋點兩端輸出節點電壓分別為：

$$V_A = V_{ref} \frac{R_3}{R_1 + R_3}$$

$$V_B = V_{ref} \frac{R_{Pt100}}{R_2 + R_{Pt100}}$$

電橋輸出的差動電壓（即儀表放大器的輸入端電壓）為：

$$V_{in} = V_B - V_A = V_{ref} \left(\frac{R_{Pt100}}{R_2 + R_{Pt100}} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right)$$

隨著救生船艙內動力系統溫度上升， R_{Pt100} 的阻值增加，導致電橋失去平衡，輸出差動電壓 V_{in} 隨之增加[2]。

以 $V_{ref}=2.5V$ 為例，當 Pt100 阻值隨溫度從 $100\Omega(0^\circ C)$ ，漸增到約 138.51Ω ($100^\circ C$) 時，電橋輸出壓差從 0V 線性升高至約 42.87mV。由於上臂選用 $2k\Omega$ 高阻值進行限流，電橋的輸出擺幅對溫度的響應曲線可保持極佳的線性度與合理的靈敏度，且能完美將流經感測器的電流壓低在 1mA 以下，徹底消除元件的自熱誤差。

3. 設計要點：

阻值精密匹配：電橋中的 R_1 、 R_2 、 R_3 必須選用誤差 的金屬皮膜精密電阻。 R_3 的選擇必須和 Pt100 在基準溫度時阻值匹配（如選擇 100Ω ），才能保證系統在 0 時輸出精準歸零。

獨立穩定參考電壓：電橋驅動電壓 V_{ref} 必須使用高穩定度的基準電壓源 IC（如 TL431）提供，與救生船的馬達動力電源完全隔離，避免因動力電池大電流放電造成電壓波動，確保訊號的準確度和重複性。

精密儀表放大器放大：電橋輸出的壓差訊號僅有有毫伏特級（mV），在低溫區間的變化尤為微弱。系統必須透過具備高共模抑制比（CMRR）的儀表放大器（AD623）將訊號線性放大到適合微控制器 ADC 輸入的範圍（0~5V），以提高系統的整體解析度。

硬體與軟體線性化校正：雖然 Pt100 鉑金材質本身的阻值變化具有極佳的線性度，但電橋電路本身仍帶有微小的結構非線性。系統除了在硬體上利用可變電阻微調零點與增益外，亦可於微控制器（MCU）程式中加入分段線性化公式或最小平方法進行修正，使量測結果更貼近真實水溫與船載設備曲線。

4. 轉換為線性電壓訊號與「智慧救生船溫控」應用之結合：

在智慧救生船溫度防護系統中，透過 Pt100 感測器將溫度變化轉換為阻值變化，再利用惠斯通電橋將阻值轉換為線性電壓訊號，是實現即時且精準溫度監測的關鍵。配合精密儀表放大器進行訊號放大與調理，可提供穩定且低雜訊的電壓輸出，方便船載微控制器（MCU）進行數位化處理與溫度保護控制，進而提升救援作業的可靠性，並增進船載鋰電池的運行安全。其設計效益如表 2 所示。

表 2、智慧救生船溫度控制系統設計效益

即時過熱防範與安全救援	線性電壓輸出讓微控制器（MCU）能毫秒級快速判斷馬達與電池的溫度狀態，一旦超出安全門檻，能及早啟動降速保護、開啟船載散熱風扇，或透過無線傳輸模組發出過熱警示。
提升水上高噪環境之量測穩定性	透過獨立 TL431 參考電壓與 AD623 儀表放大器的差動輸入設計，確保溫控訊號能徹底隔絕動力馬達高頻運轉帶來的電磁干擾（EMI），大幅提高整體水上監測系統的可靠性。
利於數位化整合與功能擴充	經過線性放大後的 0~5V 訊號便於與 MCU 的 ADC 直接對接，可直接進入微處理器做後續的邏輯分析、數據記錄或無線岸端通報，實現智慧水上無人救援系統所需

的精密溫控硬體架構。

2-6 放大器的設計

本系統選用工業級精密儀表放大器 AD623（如圖 3 所示）作為核心放大元件。其內部由三個運算放大器構成緊密的差動結構，專門用來將後級電橋輸出的微弱壓差（0~42.87mV）線性放大至微控制器可讀取的標準類比電壓（0~5V）。

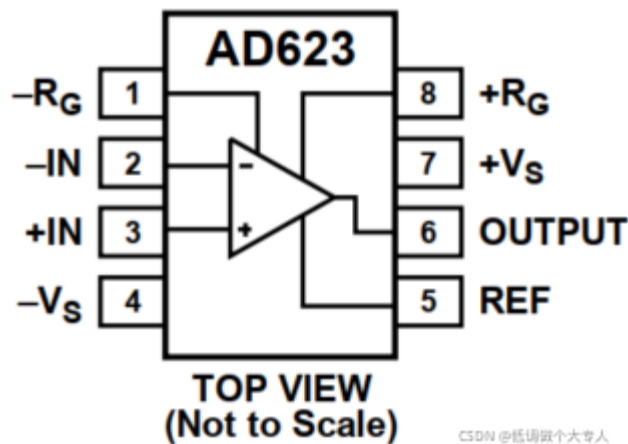


圖 3、AD623 接腳定義圖

1. 設計方式：

AD623 的同相（ $+IN$ ）與反相（ $-IN$ ）輸入端直接跨接於惠斯同電橋的兩個輸出節點（ V_A 與 V_B ）。利用晶片內部已由雷射調校好的精密等值電阻，再於外部 Pin 1 與 Pin 8 之間接上一顆外部增益電阻（ R_g ），即可單獨決定整體的電壓放大倍數（Gain），免除傳統多運放電路需精準匹配多顆外圍電阻的困擾。

2. 腳位與結構分析：

Pin 1（ $-R_G$ ）與 Pin 8（ $+R_G$ ）：增益調節端。本系統在此兩腳位間串接一顆 820Ω 精密固定電阻與一顆 100Ω 的精密可變電阻（VR），用以微調系統總增益至理論值 116.63 倍。

Pin 2 (−IN) 與 Pin 3 (+IN)：差動訊號輸入端。其具備極高的輸入阻抗（達 $10^{10}\Omega$ ），可達到完美的阻抗匹配，確保電橋訊號不因負載效應而衰減。

Pin 4 (−V/GND) 與 Pin 7 (+V_S)：電源輸入端。接至救生船主控板分流出的單電源 +5V 與系統共同接地點 (GND)。

Pin 5 (REF)：參考電壓基準端。由於本系統採單電源供電，此腳位可直接接地 (GND)，使輸出電壓在電橋平衡 (0°C) 時，能完美對齊系統的零電位 (0V)。

Pin 6 (OUTPUT)：訊號輸出端。具備「軌對軌 (Rail-to-Rail)」擺幅特性，輸出之 0~5V 訊號直接饋入微控制器的 ADC 類比輸入腳位。

3. 設計要點：

單電源擺幅限制與軌對軌選擇：傳統運放（如 $\mu A741$ ）在 5V 單電源下，輸出擺幅最多只能達到約 3.8V，且接近 0V 時會發生嚴重截止失真。本系統選擇 AD623，其具備軌對軌輸出特性，能確保輸出電壓在 0.05V~4.95V 之間保持高度線性，完美契合 MCU 的量測範圍。

頻率補償與防震盪設計：由於救生船內的動力馬達在高載運轉時會對電源線產生嚴重的反電動勢與高頻干擾，放大器極易產生自激震盪。本系統除了在 Pin 7 電源端緊貼一顆 0.1 μ F 陶瓷退耦電容外，並在輸出端 Pin 6 串接一只 100 Ω 隔離電阻，以提高電路穩定性、防止放大器震盪。

低輸入失調電壓與低溫飄：AD623 具備極低的輸入失調電壓 ($V_{os} \leq 200\mu V$) 與低溫度漂移特性。即使救生船密閉艙內因馬達全速運轉而導致環境溫度升高，放大器本身的電氣特性依然維持穩定，不會產生「硬體二次熱飄移」的誤差。

4. 精密儀表放大器設計與「智慧救生船溫控」應用之結合：

在智慧救生船的溫控防護系統中，精密放大器的設計是確保整個系統「大腦（微控制器）」能夠正確認識「感測器（Pt100）」訊號的橋樑。透過高抗噪、單電源的 AD623 放大電路，能將細微的溫度變化轉化為高強度、高信噪比的電壓訊號，保障無人救援船在複雜水域執勤時的運作安全與效能，其設計效益如表 3 所示。

表 3、儀表放大器於智慧救生船溫控系統之應用優勢

極高共模抑制比克服水上馬達干擾	救生船在衝刺救援或利用伺服馬達射出救生圈時，PWM 動力驅動器會釋放強烈的電磁雜訊。AD623 的三運放對稱架構具備極高的共模抑制比（CMRR），能將沾染在傳輸線上的高頻共模雜訊自動相減消除，維持訊號的純淨。
高輸入阻抗保護弱訊號，提升量測靈敏度	Pt100 在電橋上產生的毫伏特級電壓變化極易因線路負載而失真。放大器的高輸入阻抗特性，就像在感測端加上了一層電氣保護屏障，在不抽取電橋電流的前提下精準擷取壓差，顯著提升了系統對水溫與動力設備溫度的感測靈敏度。
優異的嵌入式系統適配性與擴充潛力	支援單電源（+5V）與軌對軌輸出設計，讓放大器能完美與 Arduino 或 ESP32 的 ADC 系統無縫對接，免除複雜的正負雙電源架構，降低整體船載設備的功耗與重

	量。這不僅提升了救生船的續航力，也為未來升級「多路溫度並聯監測系統」奠定了穩固的硬體架構基礎。
--	---

2-7 指示電路的設計

1. 類比指示方式之考量：

可使用 $100\mu\text{A}$ 直流指針電表，利用歐姆定律 $I = \frac{V_{OUT}}{R}$ ，將放大器輸出的 $0\sim 5\text{V}$ 電壓透過精密可變電阻（VR）調整對應至電流。將電表的滿刻度（ $100\mu\text{A}$ ）定義為 100°C ，並重新校正面板刻度，即可做為純硬體的直觀溫度顯示表。然而，考量到智慧救生船在水面航行時會受到波浪劇烈晃動，指針動態響應易受機械震動干擾，故本系統僅將其視為實驗室調校時的備用方案。

2. 數位指示方式（本系統採用）：

系統核心選用微控制器（MCU，如 Arduino / ESP32）搭配內建的類比數位轉換器（ADC），將 AD623 輸出的 $0\sim 5\text{V}$ 電壓訊號精確數位化。利用校正後的線性公式將數值換算為真實溫度，並透過 I2C 序列匯流排即時顯示於 LCD1602 液晶顯示器或七段顯示器上。此方式不僅讀數精確，且完全不受水面晃動的影響。

3. 電壓擺幅與量程匹配：

配合前級電路設計，當救生船偵測溫度範圍為 $0^\circ\text{C}\sim 100^\circ\text{C}$ 時，儀表放大器的輸出電壓與微控制器 ADC 的輸入範圍完美匹配為 $0\sim 5\text{V}$ （或 $0\sim 3.3\text{V}$ ），以確保類比數位轉換能發揮最大解析度，避免訊號截止失真。

4. 救生船指示電路的三大組成單元：

本指示電路在架構上由以下三部分緊密組成，各司其職以達成自動化控制

流程：

輸入感測元件：本系統選用工業級 Pt100 鉑熱電阻。相較於汽車常見的低成本 NTC 熱敏電阻（其具備高靈敏度但非線性嚴重、高溫易老化）或熱電偶（訊號極微弱且需要冷端補償），Pt100 在 $0^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ 水溫與馬達溫度的量測區間內，具備極高線性度、高精準度與極佳的環境適應性，最適合密閉防水船艙的嚴苛環境。

訊號處理單元：包含惠斯同電橋電路、AD623 儀表放大器與低通濾波電路。負責將 Pt100 的阻值變化轉為壓差、增強訊號強度、利用高共模抑制比（CMRR）過濾推進馬達的高頻雜訊，並將格式轉換為符合 MCU 讀取的電壓。

顯示與警示元件：包括 I2C LCD1602 顯示器、雙色狀態 LED 燈與主動式蜂鳴器。用來直接反映目前救生船馬達與電池組的熱負荷狀態[3]。

5. 驅動能力與防干擾設計要點：

由於微控制器（MCU）管腳的輸出電流和電壓驅動能力有限（GPIO 限制約 20mA），在設計顯示與警示元件時必須加入適當的硬體隔離：

LED 燈號驅動：必須串聯 330Ω 精密限流電阻，防止過大電流燒毀 MCU 管腳，並確保在日光下具備足夠的視覺辨識度。

蜂鳴器驅動：主動式蜂鳴器耗電較大，若直接由 MCU 驅動會導致供電不穩甚至產生自激震盪。本設計採用 NPN 電晶體（S8050）作為電子開關，由主電源提供大電流驅動，並反向並聯 1N4148 續流二極體，用以消除蜂鳴器線圈關斷瞬間產生的反向突波，確保系統的絕對穩定。

6. 指示電路設計與「智慧救生船溫控」應用之結合：

在智慧救生船溫度防護系統裡，指示電路的設計負責將動力馬達與電池組所收集到的數據，轉換成可視化與可聽化的訊號。透過液晶螢幕、狀態燈號與即時警報音，提醒操作人員與系統本身注意溫度異常情況。這種設計不僅確保救生船在泳池執行救援任務時能處於最佳熱狀態，也有效避免因系統過熱燒毀造成的設備損壞，大幅提升無人載具的水上航行安全，其設計效益如表 4 所示。

表 4、智慧救生船溫度監測系統功能分析

精準溫度反映與邏輯判斷	利用高線性的 Pt100 感測器配合數位化轉換，讓船載微控制器（MCU）能毫秒級判斷馬達與電池的發熱狀態。數據不僅即時顯示於船載 LCD 上，亦可作為 MCU 自動化防護控制（如超溫自動降速、開啟排風扇）的觸發依據。
訊號放大與硬體閾值防護	經由 AD623 精密放大後的純淨電壓訊號，在 MCU 內部與預設的溫度閾值進行數位比較（例如 50°C 為黃色預警，60°C 為紅色危險）。透過硬體驅動電路，精準決定是否觸發指示元件，確保在動力雜訊干擾下不發生誤判。[3]
直觀指示與遠端安全警示延伸	透過清晰的聲光提示（綠燈表示動力系統正常，紅燈閃爍配合蜂鳴器高分貝鳴叫表示超溫危險），引導岸端操作人員及時採取召回檢修或切換省電模式。此硬體架構未來可直接將訊號串接至無線通訊模組，將聲光警報同步推送到岸上遙控器，實現智慧救援系統的核心價值。

2-8 消除雜訊及預防雜訊干擾

1. 智慧救生船之雜訊可能來源：

長距離引線干擾：感測器位於船尾馬達與電池區，訊號線拉長至船身中央的主控板時，等效於一根天線，極易耦合空間中的電磁雜訊。

動力馬達電磁干擾(EMI)：直流推進馬達與轉向伺服馬達在高速運轉與切換時，會產生劇烈的電磁波與高頻雜訊。

電源電壓波動與漣波：推進馬達全速運轉或瞬間啟動時，會向鋰電池抽取大電流，造成電源軌產生劇烈的電壓突波與低頻漣波。

接地迴路干擾 (Ground Loop)：若動力馬達的大電流地迴路與敏感的類比感測地迴路共用路徑不當，會產生雜訊電流，直接倒灌回主控板。

2. 解決方法：

a. 引線防護設計：

連接 Pt100 的三線式延長線全面採用防干擾屏蔽雙絞線。雙絞結構能使空間雜訊同時等量沾染在兩條訊號線上，形成共模雜訊，再利用儀表放大器 (AD623) 的高共模抑制比 (CMRR) 將其完美相減抵消；外層金屬屏蔽網則直接單端接地，阻絕空間輻射。

b. 電源與訊號濾波：

高頻退耦：在 AD623 與微控制器 (MCU) 的 VCC 與 GND 引腳旁緊貼並聯 $0.1\mu\text{A}$ 陶瓷電容，就近將高頻數位雜訊導入地端。

低頻漣波濾波：在電源輸入端並聯 $220\mu\text{F}$ 電解電容，用以緩衝並濾除馬達啟動時造成的低頻突波。

RC 低通濾波：在電橋輸出與放大器輸入端之間串接阻容（RC）低通濾波器，限制硬體頻寬，直接在硬體前端阻絕高頻噪訊。

c. 放大器穩定化設計：

利用 AD623 內部雷射調校的對稱電路與外部單一精密電阻 R_g 設定增益，避免外圍電阻阻值不對稱導致抗噪能力（CMRR）下降；並在輸出端串接百歐姆級隔離電阻，防止長線寄生電容引發放大器高頻自激震盪。

d. 軟體數位濾波演算法：

微控制器（MCU）程式內導入「限幅濾波算法」與「滑動平均濾波算法」。限幅演算法負責剔除因馬達瞬間啟動引發的突發性極端異常值（突波）；滑動平均演算法則透過連續取 10 次採樣值求平均的方式，平滑隨機的白雜訊，確保顯示溫度的數據穩定不跳動。

3. 消除雜訊與「智慧救生船溫控」應用之結合：

由於智慧救生船艙內屬於高度密閉防水空間，在執行泳池救援任務時，馬達高載運轉伴隨的強烈電磁場與電源波動，極易導致溫度量測訊號讀取不穩定或錯誤。透過上述硬體濾除與軟體抗干擾的緊密結合，能大幅提升監測系統的精度與耐用性，確保救生船在最嚴苛的高負載救援狀態下，系統大腦依然能精準掌握動力核心的真實熱狀態，其設計效益如表 5 所示。

表 5、智慧救生船溫度監測系統之抗干擾設計與可靠性提升

高可靠度硬體 濾波與隔離設	在感測器輸出端加入精密 RC 低通濾波器以抑制高頻馬達雜訊，並在電源端配置雙重旁路電容穩定電壓。實務上採取
------------------	---

計	「強弱電空間分離」與「類比地與動力地單點接地」策略，徹底切斷馬達大電流透過接地迴路干擾敏感感測電路的路徑。
三線式屏蔽與共模抑制策略	利用三線式電橋的對稱性自動扣除導線電阻誤差，並搭配屏蔽線材抵禦空間電磁波入侵。訊號進入 AD623 儀表放大器後，利用其物理結構特有的高共模抑制比，將動力雜訊在類比前端直接「硬體相減消除」，維持訊號的高信噪比。利用三線式電橋的對稱性自動扣除導線電阻誤差，並搭配屏蔽線材抵禦空間電磁波入侵。訊號進入 AD623 儀表放大器後，利用其物理結構特有的高共模抑制比，將動力雜訊在類比前端直接「硬體相減消除」，維持訊號的高信噪比。
軟體數據平滑處理與智慧預警	透過微控制器（MCU）內建的數位濾波演算法（如限幅與滑動平均濾波）對感測數據進行平滑化。這能過濾掉因水面拍擊、波動或馬達瞬間抽電所引起的偶發性雜訊，提升溫度讀取的穩定性，協助救生船主控系統做出精準的過熱防護判斷（如降速或警報），有效避免設備受損並提升無人載具的整體安全性。

2-9 線路說明及分析

1. 功能流程：

a. 感測端（溫度對電阻轉換）：

當智慧救生船內部的動力馬達或電池組因高載運轉導致溫度改變時，安裝於該處的 Pt100 鉑熱電阻阻值會隨之發生高度線性的改變（每升高 1°C ，阻值約增加 0.385Ω ）。

b. 電橋端（電阻對微弱壓差轉換）：

Pt100 透過防干擾雙絞屏蔽線連接至內部的「三線式惠斯同電橋」。電橋由 TL431 產生的精密基準電壓 ($V_{\text{ref}} = 2.5\text{V}$) 驅動。當 Pt100 阻值隨溫度上升而偏離平衡點 (100Ω) 時，電橋的左右兩端節點會產生一個毫伏特級 (mV) 的微弱差動壓差訊號 ΔV ($V_{\text{in}} = V_B - V_A$)。

c. 放大端（微弱壓差對標準類比電壓轉換）：

此毫伏特級的壓差訊號 ΔV 輸入至工業級精密儀表放大器 AD623 的同相與反相輸入端。透過 Pin 1 與 Pin 8 之間的外部增益電阻 R_g 網路，將訊號精確放大 116.63 倍，輸出為與溫度成正比的標準線性類比電壓 V_{out} （範圍為 0~5V）。

d. 控制與指示端（類比電壓對數位處理轉換）：

放大的 V_{out} 訊號輸出至船載微控制器的 ADC（類比數位轉換器）腳位。經過微控制器內部的「限幅」與「滑動平均」數位濾波演算法平滑雜訊後，將精確的溫度數值即時顯示於 I2C LCD1602 螢幕上，並作為智慧船隻自動化控制（如超溫減速保護、動態聲光警報）的觸發依據。

2. 特點分析：

整體電路具備低功耗、高抗噪（具備高共模抑制比）、高動態解析度（0~5V 軌對軌輸出）與結構輕量化等特點。電壓對應溫度的線性度極佳，調校方便。搭配船載微控制器數位電路，還能輕鬆擴充「超溫歷史數據紀錄」或「無線傳輸岸端遙控器回傳」等智慧化防護功能。

2-10 調校步驟的安排

1. 零點調校 (Zero Calibration) :

目的在於確保系統在基準溫度 0°C 時，放大器精確輸出 0V 。

步驟一：將三線式 Pt100 感測探頭置於標準的冰水混合物（恆定 0°C ）中靜置 3 分鐘，或在電橋下臂跨接一只 100Ω 的精密標準電阻代替。

步驟二：使用三用電表量測電橋兩端輸出節點 (V_A 與 V_B)，微調電橋下臂的可變電阻，直到電橋兩端壓差 $\Delta V = 0\text{V}$ 。

步驟三：量測精密儀表放大器 AD623 的輸出端 (Pin 6)，確認其電位完美對齊系統零電位 (0V)。

2. 滿量程增益調校 (Span Calibration) :

目的在於調整放大器的放大倍數，使最高監測溫度 100°C 時精確輸出 $+5\text{V}$ 。

步驟一：將 Pt100 感測探頭移至標準沸水（恆定 100°C ）中，或換接一只 138.51Ω 的精密標準電阻。

步驟二：使用三用電表監視 AD623 的輸出端電壓，微調與增益電阻 R_g 串聯的 100Ω 精密可變電阻 (VR)。

步驟三：持續調整，直到 AD623 的輸出電壓精準呈現為 $+5.0\text{V}$ ，完成硬體放大倍數的線性對齊。

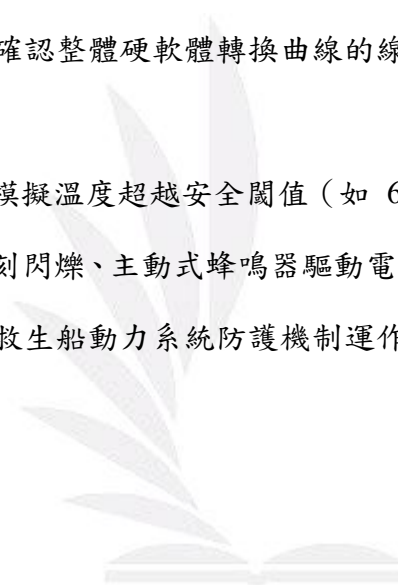
3. 軟體數位化與警報測試 (Digital Validation) :

驗證微控制器讀取數值與周邊指示電路的控制邏輯。

步驟一：將訊號接入微控制器的 ADC 腳位，觀察 I2C LCD1602 液晶螢幕上的溫度顯示值是否與實際水溫相符(驗證軟體滑動平均與限幅濾波演算法)。

步驟二：利用溫水逐度提升溫度，測試並記錄中間點(如 25°C、50°C)的電壓與數位讀數，確認整體硬軟體轉換曲線的線性度。

步驟三：手動調整模擬溫度超越安全閾值(如 60°C)，驗證指示電路中的紅色 LED 是否立刻閃爍、主動式蜂鳴器驅動電路是否正確認動發出高分貝警報，確保智慧救生船動力系統防護機制運作無誤。



三、未來展望(Future outlook)

本研究目前已完成智慧救生船溫度監測與防護系統之設計，透過 Pt100 感測器、惠斯通電橋、AD623 儀表放大器及微控制器（MCU）建立即時溫度監測架構。未來可進一步結合通訊技術、智慧控制與人工智慧分析，使系統由單純的溫度監測功能，發展為具備遠端管理、自主調節及預測維護能力的智慧化熱管理系統。其未來發展方向如下：

- 1.無線遠端監控：**將溫度監測系統結合 Wi-Fi、LoRa 或 4G/5G 通訊技術，即時將馬達與電池溫度傳送至岸邊控制中心或行動裝置，方便遠端監控救生船運作狀況。
- 2.多點溫度感測：**除了監測馬達外，可增加電池組、控制器、驅動電路及電源模組等多個溫度感測點，建立更完整的動力熱管理系統。
- 3.智慧控制整合：**將溫度監測系統與智慧救生船的控制系統整合，依據溫度變化自動調整馬達輸出、散熱裝置或航行模式，提高能源效率與航行安全。
- 4.物聯網應用：**透過雲端平台儲存與分析溫度資料，建立歷史紀錄，方便管理人員進行設備健康管理、遠端監控及維護規劃。
- 5.人工智慧預測：**利用機器學習分析溫度變化趨勢，預測馬達或電池可能發生過熱或故障，提前發出警示，降低設備損壞與任務失敗的風險。

四、結論(Conclusion)

透過這次智慧救生船動力溫控系統的設計，我不僅深入理解了感測器與精密放大電路的架構，更體會到自動控制在實務應用上的細節。一開始看似簡單的溫度偵測，背後其實牽涉到感測器精度、基準電源穩定度、動力雜訊處理，以及數位防護邏輯等多層面的系統整合。

在設計過程中，我學到 Pt100 鉑熱電阻搭配三線式惠斯同電橋，能有效消除導線電阻誤差，比傳統熱敏電阻更適合嚴苛的水上救援環境。透過電路分析，我也更清楚工業級儀表放大器 AD623 的三運放架構，是如何利用高共模抑制比 (CMRR) 精準放大毫伏特級的弱訊號，並透過外部增益電阻 R_g 完美對齊微控制器 ADC 的 0~5V 量測範圍。

特別是在面對救生船內高功率馬達所產生的強烈電磁干擾 (EMI) 時，更讓我體會到細節決定成敗。從過去在課堂上死背公式，到現在能真正站在系統觀點，在硬體端導入 RC 低通濾波、TL431 獨立穩壓、高低頻退耦電容，並在軟體端編寫限幅與滑動平均數位濾波演算法，這種軟硬體整合的思維轉變讓我受益匪淺。

智慧救生船在執行任務時，馬達與電池組就像船隻的心臟。若無法即時掌握溫度變化，極可能導致熱失控而癱瘓在水中央，進而耽誤黃金救援時間。因此，這套具備即時監測、減速保護與動態聲光警報的系統，對無人載具的航行安全具有很高的實務價值。這次的專題歷練，讓我不僅學會了理論計算，更掌握了硬體除錯與系統調校的嚴謹流程，為未來面對自動控制應用奠定了紮實的實戰能力。

參考文獻(References)

- [1] 周玉晟、朱虹雨、陳犇、陳嘉誠、詹耀輝、李孝峰，〈基於模糊控制的光子輻射制冷功率測量系統〉，《光學學報》，第 44 卷，第 2 期，178–187 頁，2024 年。
- [2] 楊禹成、盧洪義、桑豆豆、劉舜、章斌，〈航空發動機矢量噴管無線測控系統設計〉，《Experimental Technology & Management》，第 40 卷，第 2 期，2023 年。
- [3] 林保超、吳秉宸、張舜長，〈輕型電動載具電池管理系統之研究〉，《科學與工程技術期刊》，第 11 卷，第 1 期，2015 年。

