

## 以史特林引擎進行發電性能研究

吳妍庭、林朱亞葳、朱力民\*

### 摘要

本研究希望透過結合  $\gamma$  型史特林引擎和發電機，來模擬使用地熱溫泉為熱源，山泉水為冷端的溫差發電。使用電池爐模擬溫泉當熱端，冰柱加自來水模擬山泉水冷端，最後在使用自製的三合一 Arduino WIFI 遠端工作站收集溫度、轉速、電壓、電流等數據並將其傳到實驗室的電腦，再使用 excel 製作出圖表，可更清楚知道實驗的數據變化。最後再討論如何更換設備能得到更好的發電功率，讓史特林引擎實現可以用地熱溫泉為熱源，山泉水為冷端的溫差發電，亦可拿來當做教學設備。

**關鍵字:** 溫差發電、溫泉地熱、發電機、史特林引擎、Arduino

---

吳妍庭，國立臺東大學 綠色與資訊科技學士學位學程大學生與校友。 [angel890608@gmail.com](mailto:angel890608@gmail.com)

林朱亞葳，國立臺東大學 綠色與資訊科技學士學位學程大學生與校友。 [Aa0980339784@gmail.com](mailto:Aa0980339784@gmail.com)

朱力民(通訊作者)，國立臺東大學 綠色與資訊科技學士學位學程教授。 Email: [lmchu@nttu.edu.tw](mailto:lmchu@nttu.edu.tw)

## Research on power generation performance of Stirling engine

Yan-Ting Wu、Ya-Wei Lin Zhu、Li-Ming Chu\*

### Abstract

This study hopes to simulate the use the temperature difference of geothermal hot springs as the heat source and mountain spring water as the cold sink to generate electricity by combining the  $\gamma$ -type Stirling engine and the generator. Use the battery furnace to simulate the hot spring as the hot source, add tap water to simulate the cold sink as the mountain spring water. Finally, use the self-made three-in-one Arduino WIFI remote workstation to collect temperature, speed, voltage, current, and other data and transmit them to the computer in the laboratory, and then use excel to make a chart, which can better understand the data changes of the experiment. Finally, we will discuss how to replace the equipment to obtain better power generation, so that the Stirling engine can use the temperature difference of geothermal hot springs as heat sources and mountain spring water as cold sink to generate electricity. It can also be used as teaching equipment.

**Keywords:** Temperature difference power generation、Geothermal Hot Spring、Generator、Stirling Engine、Arduino

---

Yan-Ting Wu, undergraduate student and alumni, Interdisciplinary Program of Green and Information Technology, National Taitung University. E-mail: [a88446250@gmail.com](mailto:a88446250@gmail.com)

Ya-Wei Lin Zhu, undergraduate student and alumni, Interdisciplinary Program of Green and Information Technology, National Taitung University. E-mail: [a88446250@gmail.com](mailto:a88446250@gmail.com)

Li-Ming Chu (Corresponding Author), Professor, Interdisciplinary Program of Green and Information Technology, National Taitung University. E-mail: [lmchu@nttu.edu.tw](mailto:lmchu@nttu.edu.tw)

## 壹、前言

全球因過度使用化石能源產生大量二氧化碳造成溫室效應，也導致嚴重的氣候變遷問題，因此開發綠色能源是目前的當務之急。許多的科學家就紛紛的尋找能代替化石的能源，例如像太陽能、風力能、水力能、海洋能等這一些都是屬於能重複使用的再生能源。

Robert Stirling 於 1816 年發明出史特林引擎(Stirling engine)，他想要以此取代當時需藉爆炸產生高溫高壓動力的蒸氣機，使人們有較安全的工作環境，史特林引擎是一種封閉循環活塞式熱機，屬於外燃引擎。與內燃機相比，史特林引擎效率高，較安靜，維修需求較低，可接受多種能產生熱量的熱源，最近因能源成本上漲，能源短缺和全球暖化的環境問題，致使史特林引擎越來越受重視。

本研究希望透過結合  $\gamma$  型史特林引擎和發電機，來模擬使用地熱溫泉為熱源，山泉水為冷端的溫差發電。使用電池爐模擬溫泉當熱端，冰柱加自來水模擬山泉水冷端，最後在使用自製的三合一 Arduino WIFI 遠端工作站收集溫度、轉速、電壓、電流等數據並將其傳到實驗室的電腦，探討在不同的溫差下的發電效率。



圖 1. 本研究所使用  $\gamma$  式史特林引擎

## 貳、文獻回顧

史特林引擎根據活塞和移氣器的配置可分為三種類型，分別是  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  型，而每一種史特林引擎都有其適合的工作條件。其主要工作原理是利用封閉工作氣體受熱膨脹及冷卻收縮的基本原理做功，即工作氣體利用溫差來吸收和釋放熱能，進而推動引擎內部活塞帶動曲柄軸具扭力轉動，形成機械能。因此，具有穩定的外部熱源和外部冷端所形成的溫度差，就可以維持引擎內部工作氣體的反覆膨脹與收縮，從而獲得機械系統的往復運動將熱能轉化為機械能。

有許多研究針對史特林引擎的性能進行量測，也有許多研究針對史特林引擎的流場進行分析[1-7]，上述研究也提出了一些改善，史特林引擎可接受多種能產生熱量的熱源，而使用地熱溫泉為熱源，山泉水為冷端的例子並未發表，因此本研究希望透過結合 $\gamma$ 型史特林引擎和發電機，來模擬使用地熱溫泉為熱源，山泉水為冷端的溫差發電。使用電池爐模擬溫泉當熱端，冰柱加自來水模擬山泉水冷端，最後在使用自製的三合一 Arduino WIFI 遠端工作站收集溫度、轉速、電壓、電流等數據並將其傳到實驗室的電腦，探討在不同的溫差下的發電效率。之後再將史特林引擎移至溫泉地熱區進行發電研究。

## 參、研究方法

### 一、理論分析

在史特靈的內部會有一個較小的移氣器，當我們在底部加熱，並在頂端座冷水循環時，先施予一個力讓移氣器上移，史特靈內的氣體會被擠到底部，然後又因被加熱壓力變大，使氣體膨脹活塞被推出；當移氣器下移，氣體被擠到冷端，因為溫度降低壓力變小，使氣體縮收活塞被拉入。於是只要有足夠的溫差就可以讓活塞進行往復運動。

要讓移氣器上下移動也需要另一樣很重要的東西，要將他和曲軸連結，當曲軸旋轉時移氣器就會被上下帶動。活塞的往復運動可以轉換為動力輸出，當我們在曲軸上再加一根連桿時，便會讓活塞的收縮運動換為曲軸的旋轉運動。連接移氣器的曲軸與連接活塞的曲軸會呈固定的角度差一般是 90 度。

當移氣器在最頂點的位置時，底部加熱空間最大，此時所產生的壓力也最大，當移氣器在最底點的位置時，頂部冷卻空間最大，此時所產生的壓力也最小，如把動力活塞的曲柄連接到曲軸水平位置最遠的地方時可產生最大的扭力，此時可看到連接到移氣器的曲軸部位與連接到動力活塞的曲軸部位呈 90 度的角度差。由於利用氣體的熱漲冷縮使活塞往復運動沒辦法讓曲軸旋轉一整圈。因此我們必須得加上一個有旋轉慣性的設備，即“飛輪”，才能達成連續的運轉。

史特靈引擎的優缺點所述: 1.熱源多樣化：因為使用外部熱源，所以只要是能夠產生熱，使史特靈引擎有溫差，皆可用來做為推動的能源，並不會僅限於可燃燒的燃料。2.低污染：由於史特靈引擎外部熱源與工作氣體是分開的，因此沒有燃燒廢棄物堆積於內部的問題。3.噪音低：史特靈引擎屬於封閉式外燃機，並無氣缸內的燃燒爆炸及進、排氣行程，因此整體噪音比較小。4.構造簡單：比起其他引擎，它的構造很簡單，不需要閥門，也沒有化油器，因此不只搬運方便，也不需太大的設置場地。5.預熱時間長：史特林引擎為外燃引擎，它的熱能透過汽缸壁傳給工作流體的過程需要較長的時間，不能像汽油引擎一樣，一發動就能立刻產生動力。6.馬力有限：跟其他馬力相同的內燃機比較，因為不能將燃料混在工作流體中直接快速把熱傳給工作流體，所以外燃的史特林引擎熱能必須透過汽缸壁才能傳給工作流體。7.耐高溫材料價格昂貴：外界的熱能必須透過汽缸壁才能傳到史特林引擎內部，所以製作史特林引擎的材料必須耐得住高溫，又不致於減低材料的強度或者迅速老化，並且還要有很高的導熱率，但這些材料的價格普遍昂貴，導致製作成本高。

## 二、實驗設備與方法

本實驗使用史特林引擎、直流電燈泡、溫槍、埋入式雙金屬溫度計、記憶式四視窗溫度計、低電流交直流鉤錶、光電/接觸兩用轉速計、萬用電錶、三合一 WIFE 遠端工作站、抽水馬達與水桶、三相整流器、水泥電阻、發電機馬達、傳動皮帶、鋁飛輪、LED 燈泡、LED 燈泡串、鱗片與鐵盆、變壓器等儀器設備，實驗設備如圖 2-20 所示。

先將史特靈引擎放在電磁爐上加熱一段時間，再將水桶的水加入冰柱讓水溫維持在 20 幾度，把連接馬達的水管插入水缸邊的閘門上，然後把水循環調整到可以穩定的狀態。拿出三合一 WI-FI 工作站，將霍爾磁場感測器的線接上，然後分別在冷端和熱端固定測量溫度的線，分別在輸入的孔用鱈魚夾接上馬達，輸出的孔用鱈魚夾接上負載，像是 LED 燈泡，這樣形成一個迴圈就可以透過工作站裡面的模組測出電流和電壓，最後會透過工作站裡的 WI-FI 版將資料傳回設定好的電腦。

一切準備就緒後我們會先施予飛輪一個力，開始運轉後會帶動中間的曲軸，由於曲軸上連接著移氣器的連桿，所以當移氣器因加熱和冷卻間的壓力大小變化而上下移動時，就會帶動活塞運動，連帶帶動後面的飛輪也一起轉動。我們在後飛輪放上皮帶，讓他將轉動所得到的動力傳輸給下方的馬達，馬達再轉換出提供 LED 燈所需要的能量。

測量轉速方面我們分別使用光電／接觸兩用轉速計和霍爾磁場感測器，光電轉速計將反光貼紙貼在飛輪上，每當飛輪轉一圈，轉速器發射出的紅外線經固定在飛輪上的反光貼紙反射後，經過處理而測得到轉速數據。接觸轉速計將尖端靠在史特靈的軸上，跟著他一起轉，然後數據經過儀器內部的電子分析換算。最後霍爾磁場感測器是透過將強力磁鐵固定在史特靈的飛輪上，每當飛輪轉一圈經過霍爾磁場感測器時，可將換算後的資料經由自製的收集數據盒內的 Wifi 版傳回電腦。實驗程序如圖 21-27 所示。

最後我們會將傳到電腦裡的數據抓入 Excel 裡分析出我們需要的圖表，然後再依實驗結果決定下次的實驗內容。



圖 2. 電池爐

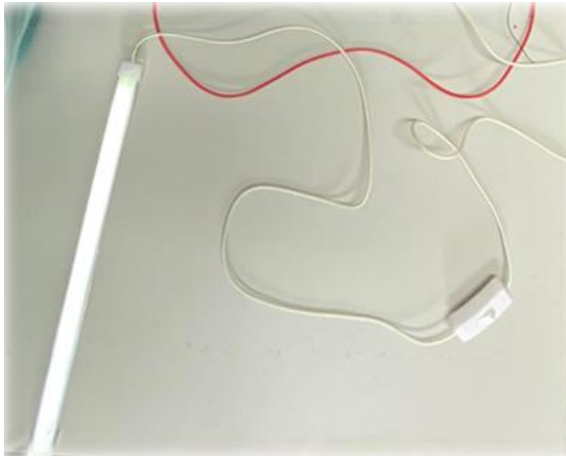


圖 3. 直流電燈泡



圖 4. 溫槍



圖 5. 埋入式雙金屬溫度計



圖 6. 記憶式四視窗溫度計



圖 7. 低電流交直流鉤錶



圖 8. 光電/接觸兩用轉速計





圖 9. 萬用電錶



圖 10. 發電機



圖 11. 三合一 WIFE 遠端工作站



圖 12. 抽水馬達與水桶

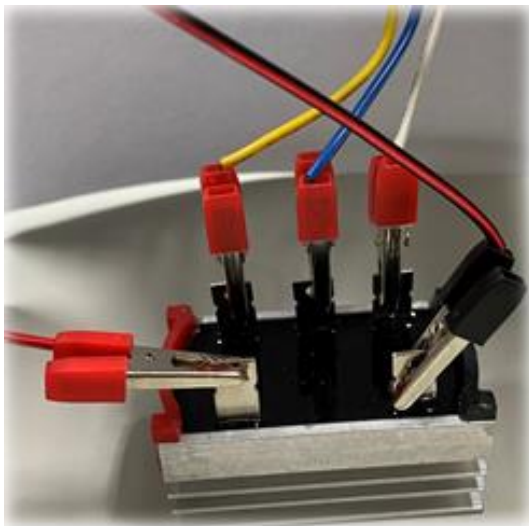


圖 13. 三相整流器

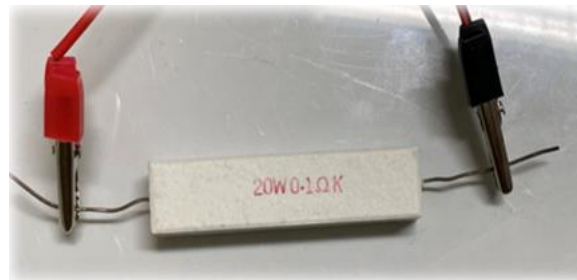


圖 14. 水泥電阻



圖 15. 傳動皮帶



圖 16. 鋁飛輪



圖 17. LED 燈泡



圖 18. LED 燈泡串



圖 19. 鍍片與鐵盆



圖 20. 變壓器



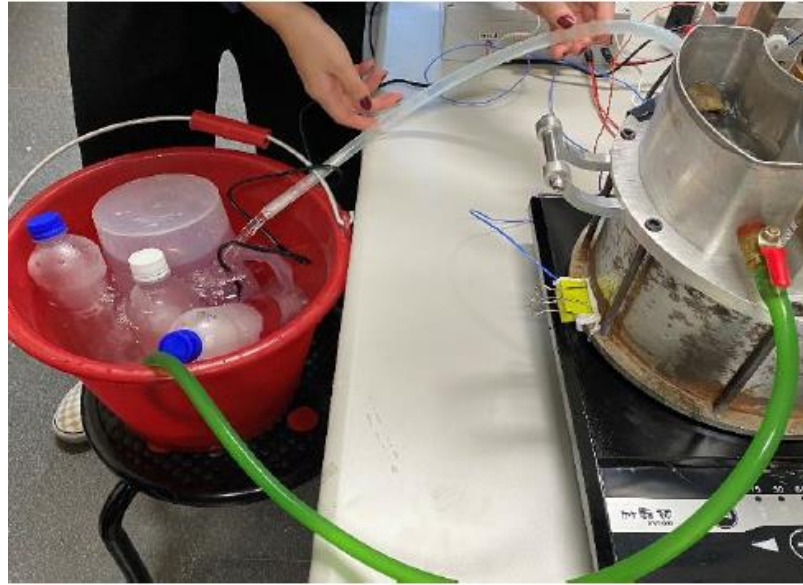


圖 21. 冷水模擬溪水連接冷端

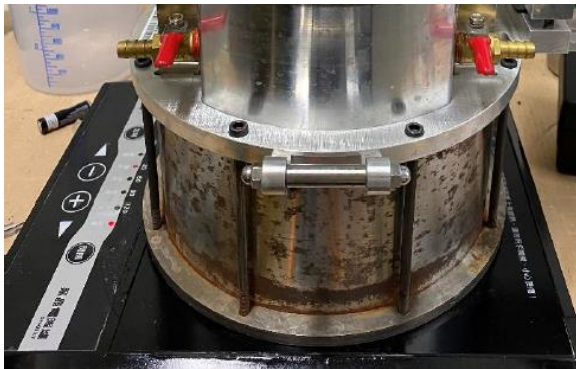


圖 22. 加熱底部模擬溫泉的熱端

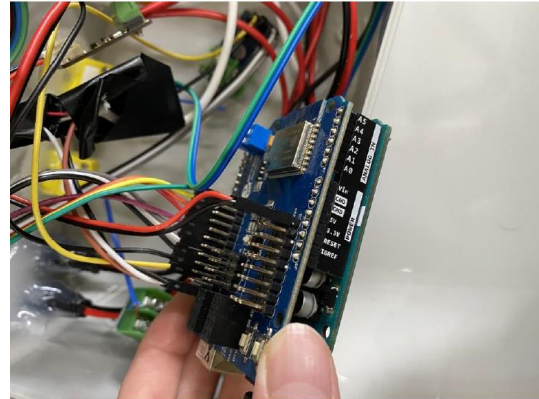


圖 23. 工作站內部晶片

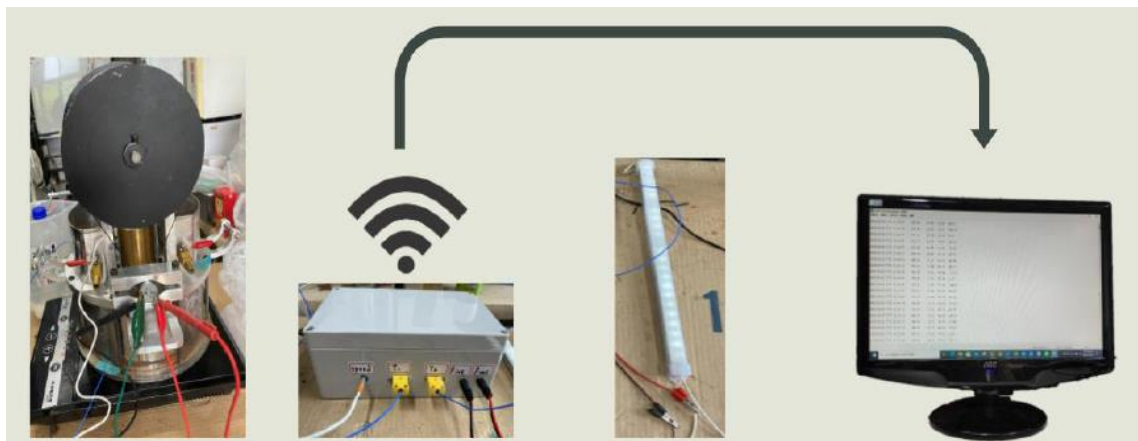


圖 24. 實驗大致流程

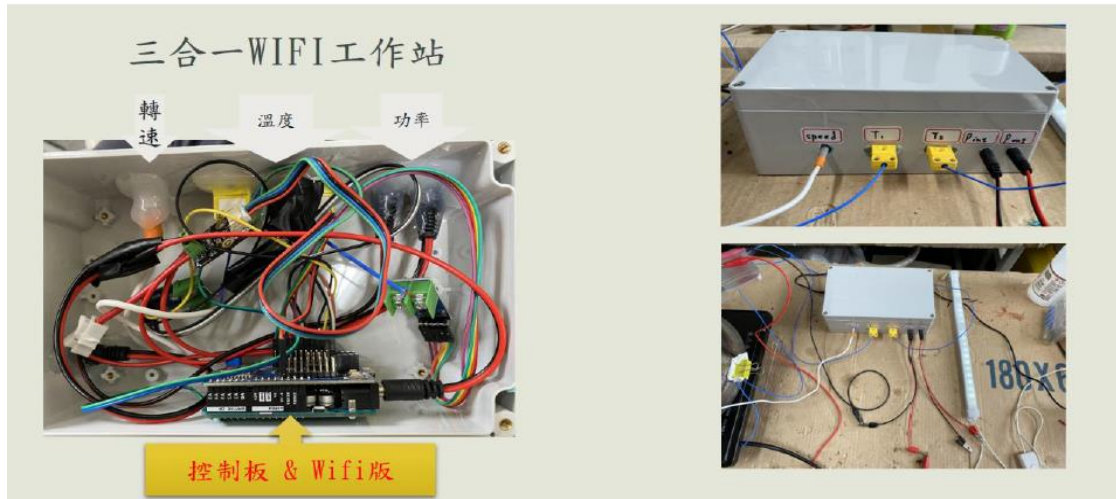


圖 25. 三合一 WIFI 工作站

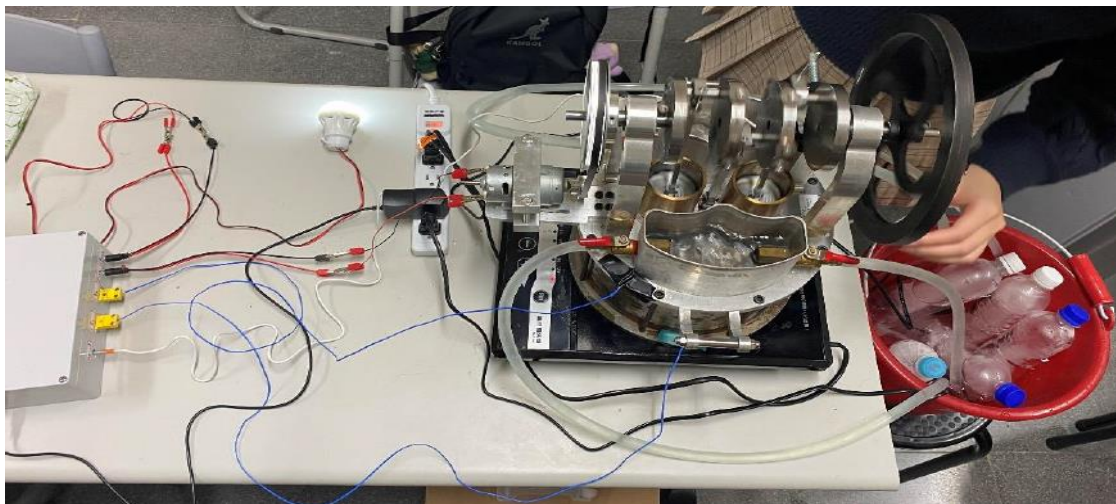


圖 26. 整體架構

光電/接觸兩用轉速計	光電/接觸兩用轉速計	霍爾磁場感測器
將反光貼紙貼在飛輪上，每當飛輪轉一圈，轉速器發射出的紅外線經固定在飛輪上的反光貼紙反射後，經過處理而測得到轉速數據。	將尖端靠在史特林的軸上，跟著他一起轉，然後數據經過儀器內部的電子分析換算。	將強力磁鐵固定在史特林的飛輪上，每當飛輪轉一圈經過霍爾磁場感測器時，可將換算後的資料經由自製收集數據盒內的Wifi版傳回電腦。
<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 相比於接觸式較不需要技術，較容易測到數據</li> <li>◆ 當飛輪掉漆，所測到的數據準確度下降</li> <li>◆ 手動測數據的資料收集有限</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 需要一定技術能讓尖端一直跟著轉軸旋轉測數據</li> <li>◆ 手動測數據的資料收集有限</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 能自動收集到很多筆數據</li> <li>◆ 內部零件較精細容易因為使用過度燒壞，有時也會接觸不良</li> </ul>

圖 27. 光電/接觸轉速計與霍爾磁場感測器比較圖

### 肆、結果與討論

由三合一 WIFI 工作站測量出電流電壓後，可藉由電流(I)\*電壓(V)得到功率(P)，再藉由功率除以角速度( $T=P/\omega$ )即可得到扭力。

圖 28 與圖 29 是第一次做實驗測的數據，因為沒有使用抽水馬達做水循環，只是在兩邊的水缸加入冰水，所以隨著時間的增加，溫度也在慢慢地上升。轉速也是緩慢上升後趨於平穩，後面是因為將電磁爐關掉所以熱端溫度下降，冷端溫度也慢慢上升，所以轉速也開始下降。

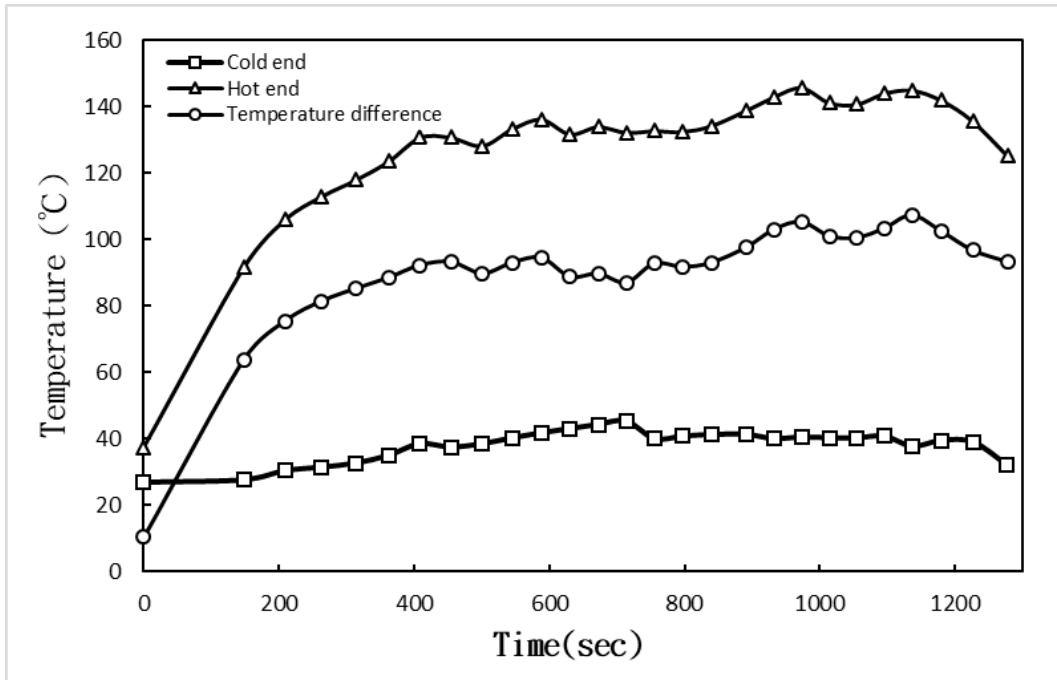


圖 28. 溫度隨時間的變化圖

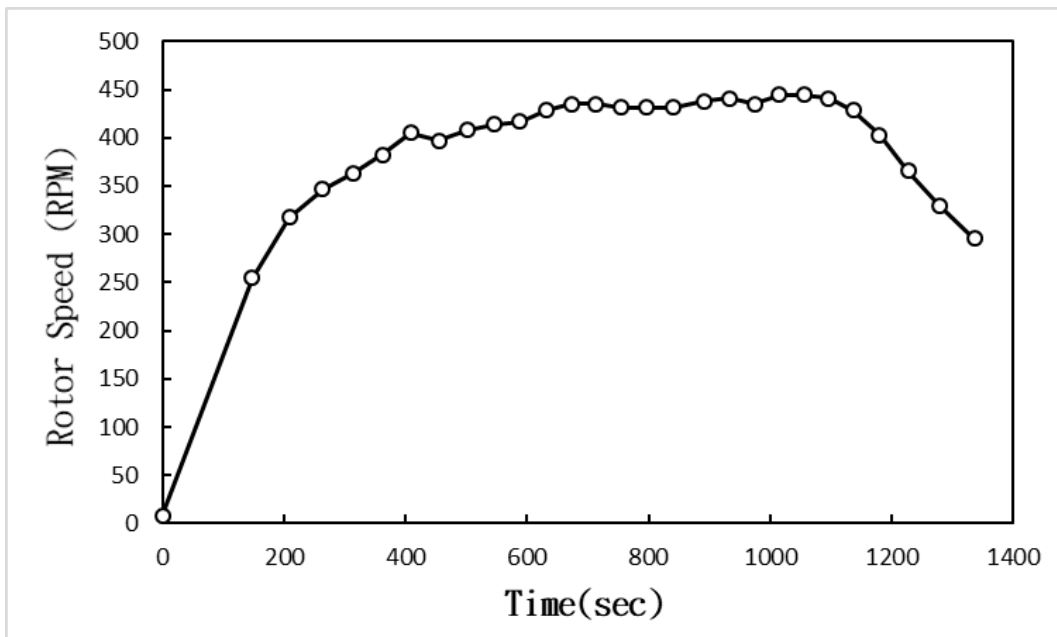


圖 29. 發電機轉速隨時間的變化圖

圖 30 是使用水泥電阻的實驗數據，從溫度上我們看不出差別，因為水泥電阻不會影響溫度。因為使用兩個抽水馬達抽水冷水會流動，所以溫度平緩穩定上升不大。圖上熱端會急劇下降是因為我們把電磁爐關掉。

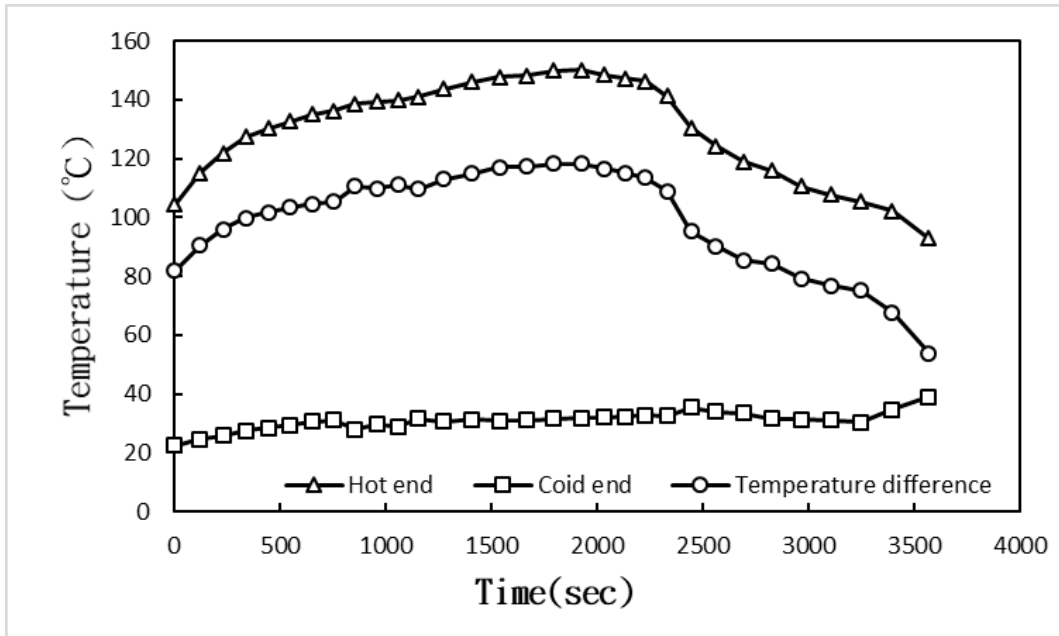


圖 30. 溫度隨時間的變化圖(水泥電阻)

圖 31 是使用 0.1 歐姆的水泥電阻當做負載所量測出發電機轉速隨時間的變化圖。加入負載後發電機轉速下降，圖 32 是使用 600 歐姆的水泥電阻當做負載所量測出發電機轉速隨時間的變化圖。加入負載後發電機轉速下降，電阻越小，發電機轉速下降越顯著。

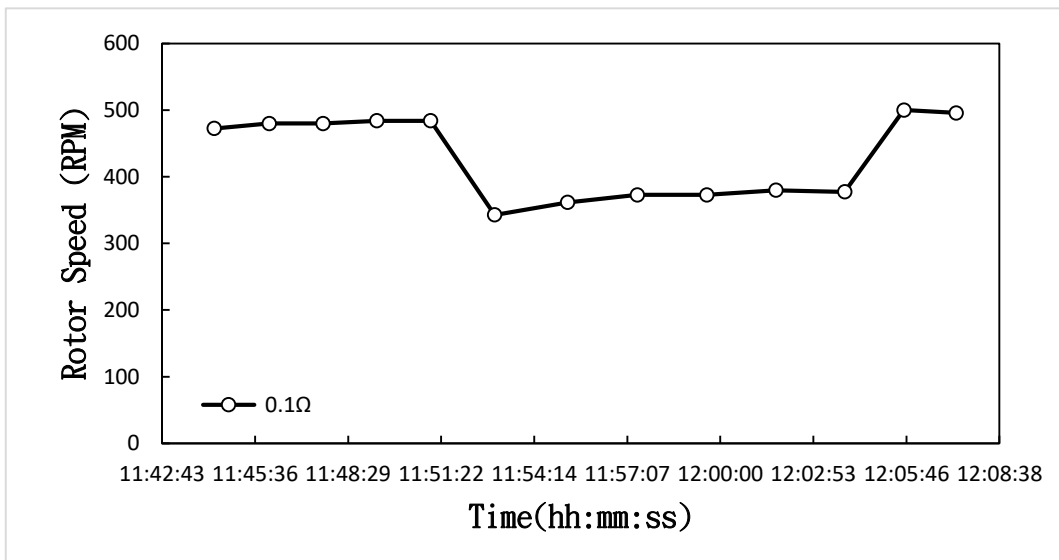


圖 31. 發電機轉速隨時間的變化圖(0.1Ω)



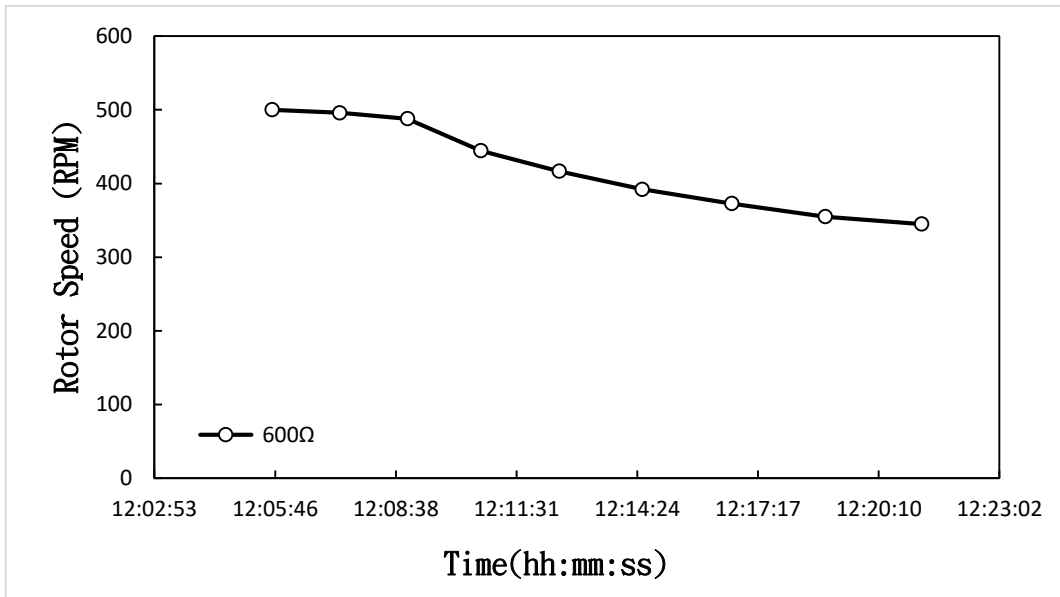


圖 32. 發電機轉速隨時間的變化圖(600Ω)

圖 33 是使用 0.1 歐姆的水泥電阻當做負載並使用三相整流器，所量測出發電電壓隨時間的變化圖。加入負載後發電電壓下降，圖 34 是使用 600 歐姆的水泥電阻當做負載並使用三相整流器，所量測出發電電壓隨時間的變化圖。加入負載後發電電壓下降，電阻越小，發電電壓下降越顯著。

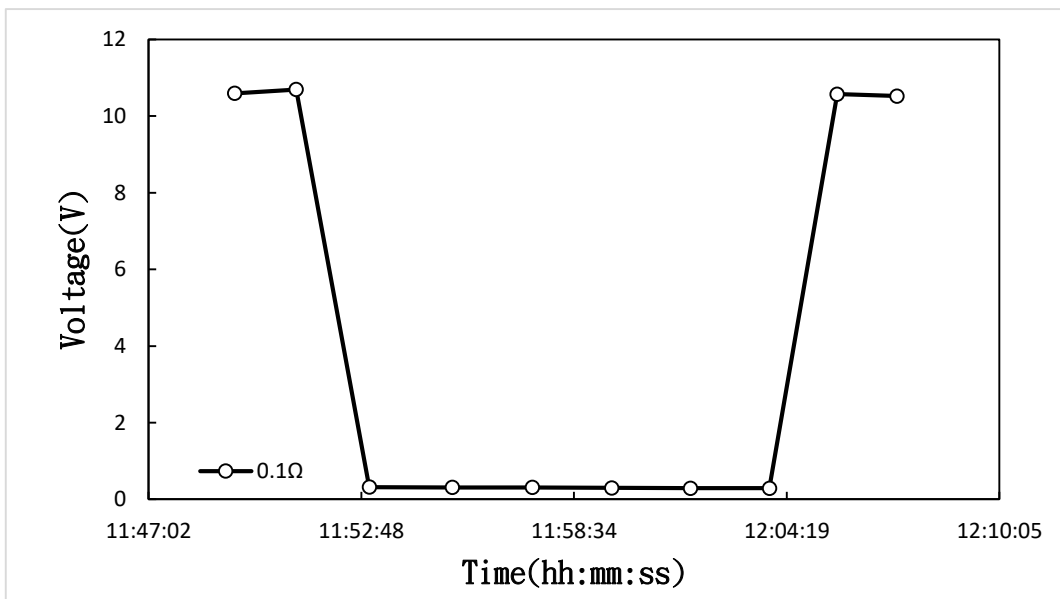


圖 33. 發電電壓隨時間的變化圖(0.1Ω)

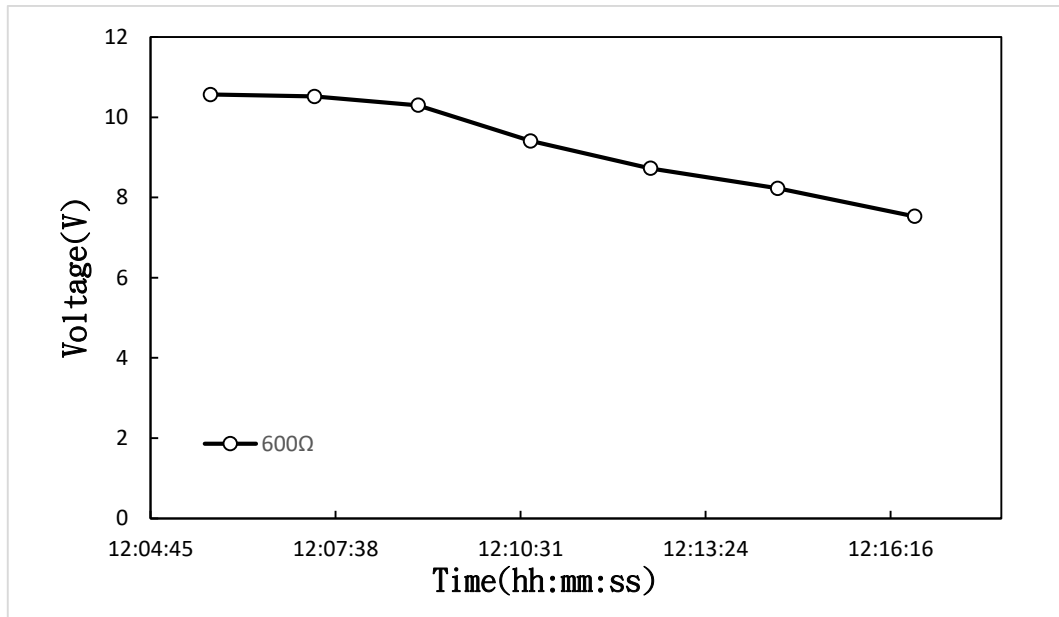


圖 34. 發電電壓隨時間的變化圖(600Ω)

圖 35 是使用 0.1 歐姆的水泥電阻當做負載並使用三相整流器，所量測出發電電流隨時間的變化圖。加入負載後發電電流上升，圖 36 是使用 600 歐姆的水泥電阻當做負載並使用三相整流器，所量測出發電電流隨時間的變化圖。加入負載後發電電流上升，電阻越小，發電電流上升越顯著。

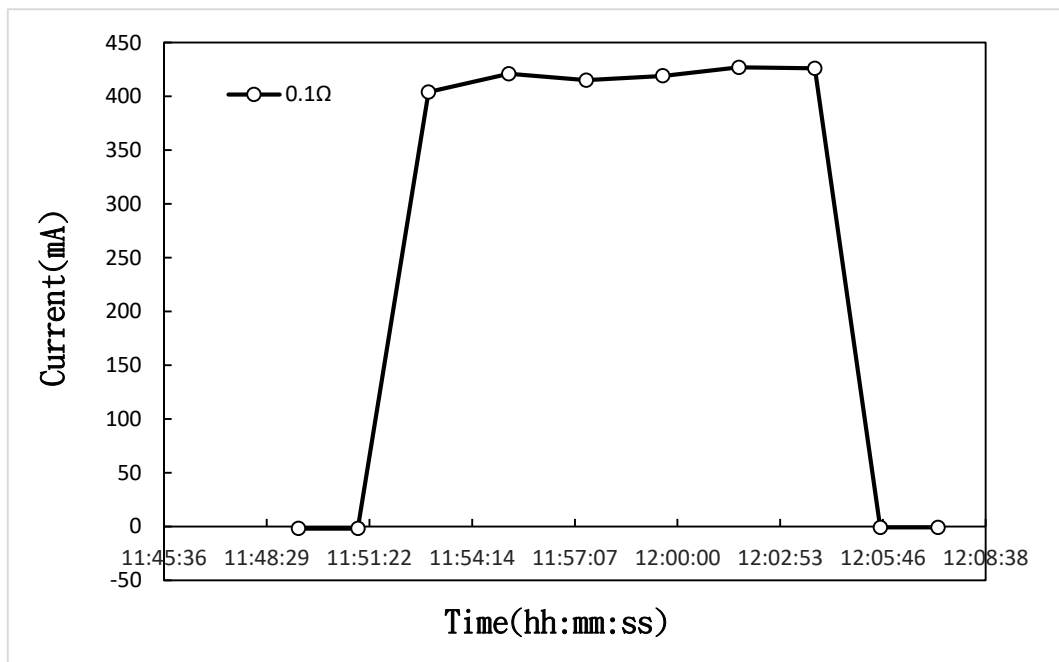


圖 35. 發電電流隨時間的變化圖(0.1Ω)

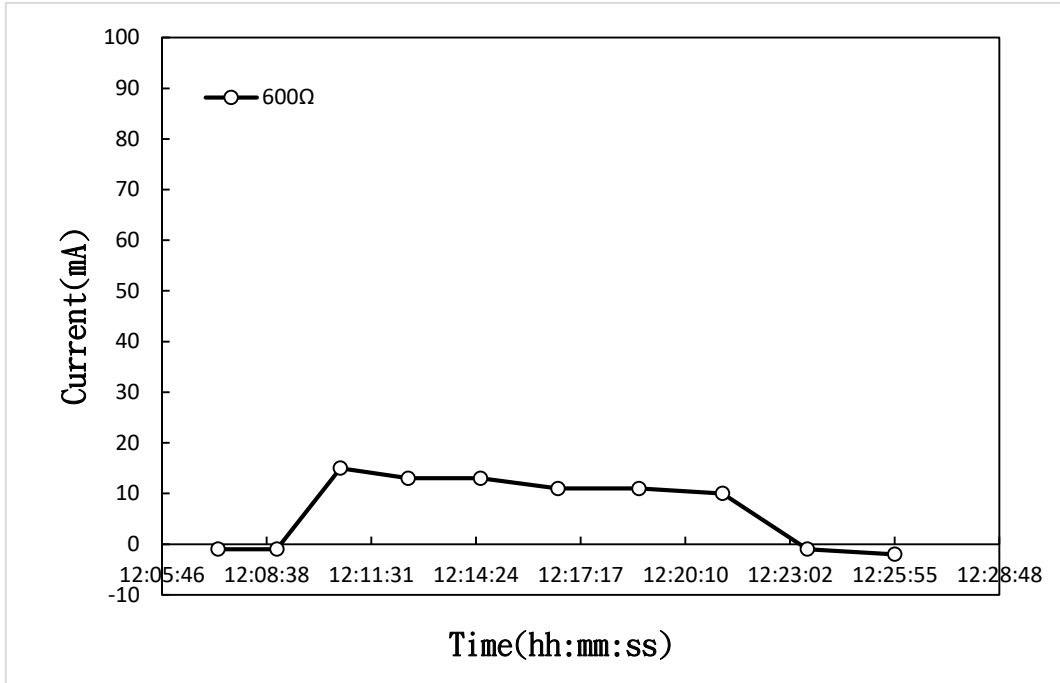


圖 36. 發電電流隨時間的變化圖(600Ω)

圖 37 是使用 0.1 歐姆的水泥電阻當做負載並使用三相整流器，所量測出發電功率隨時間的變化圖。加入負載後發電功率上升，圖 38 是使用 600 歐姆的水泥電阻當做負載並使用三相整流器，所量測出發電功率隨時間的變化圖。加入負載後發電功率上升，電阻越小，發電功率上升越顯著。

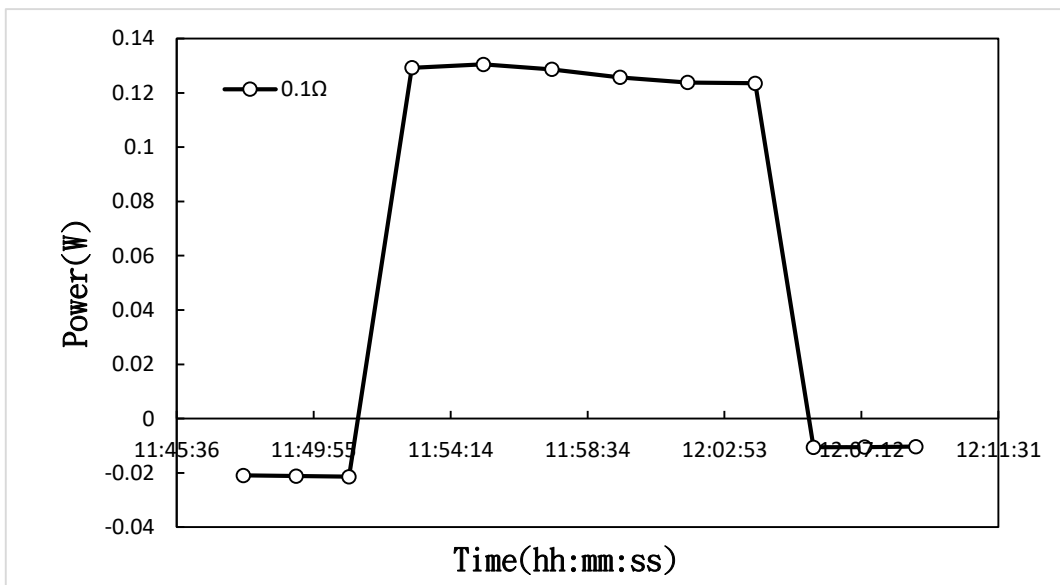


圖 37. 發電功率隨時間的變化圖(0.1Ω)

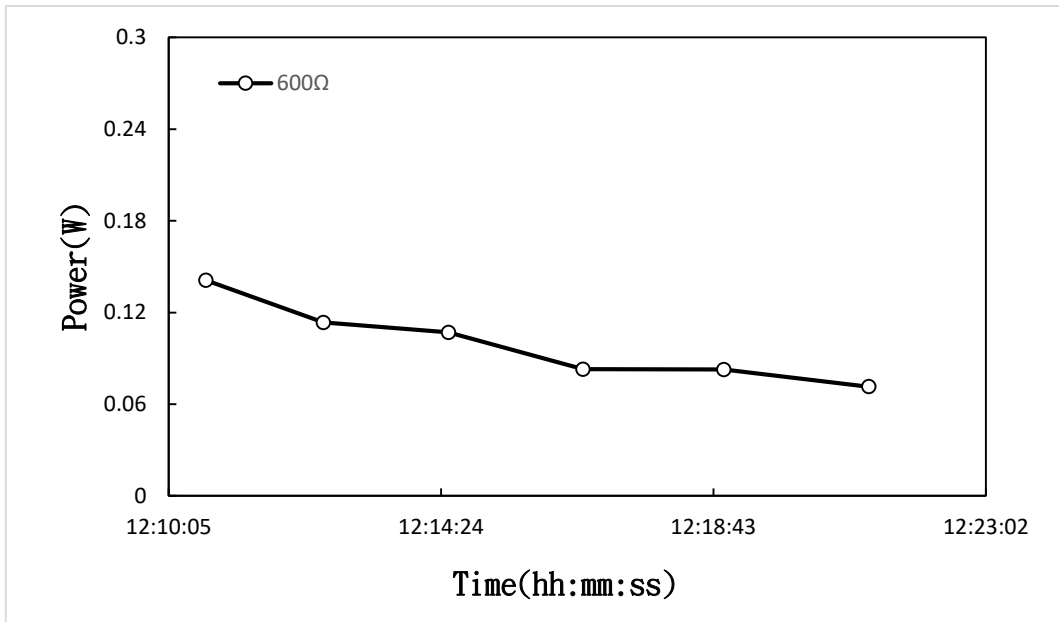


圖 38. 發電功率隨時間的變化圖(600Ω)

圖 39 是使用 0.1 歐姆的水泥電阻當做負載並使用三相整流器，所計算出發電機扭力隨時間的變化圖。加入負載後發電機扭力上升，圖 40 是使用 600 歐姆的水泥電阻當做負載並使用三相整流器，所計算出發電機扭力隨時間的變化圖。加入負載後發電機扭力上升，電阻越小，發電機扭力上升越顯著。

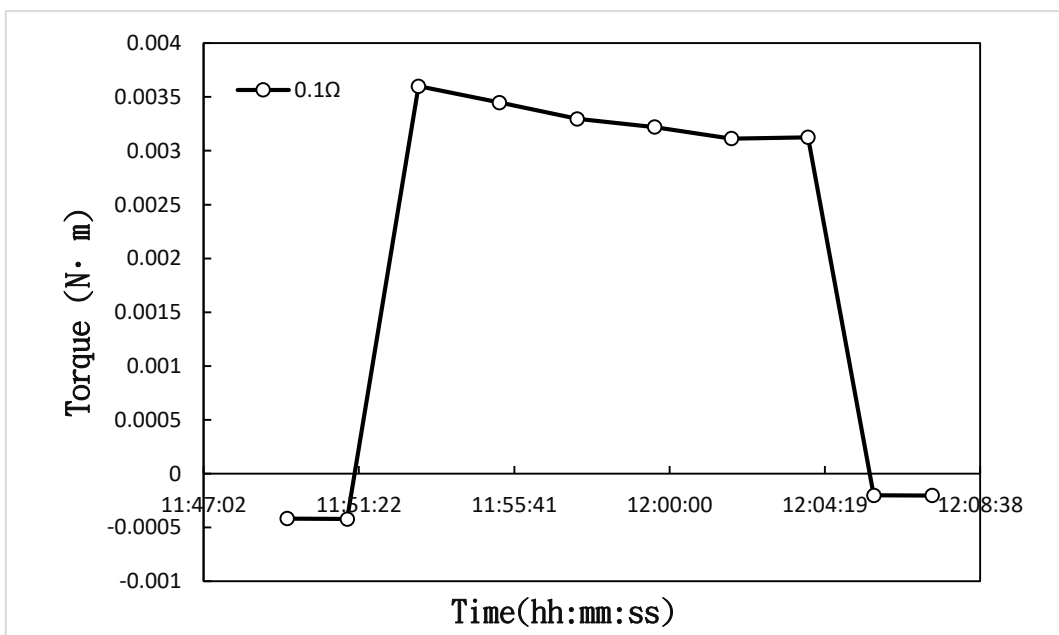


圖 39. 發電機扭力隨時間的變化圖(0.1Ω)



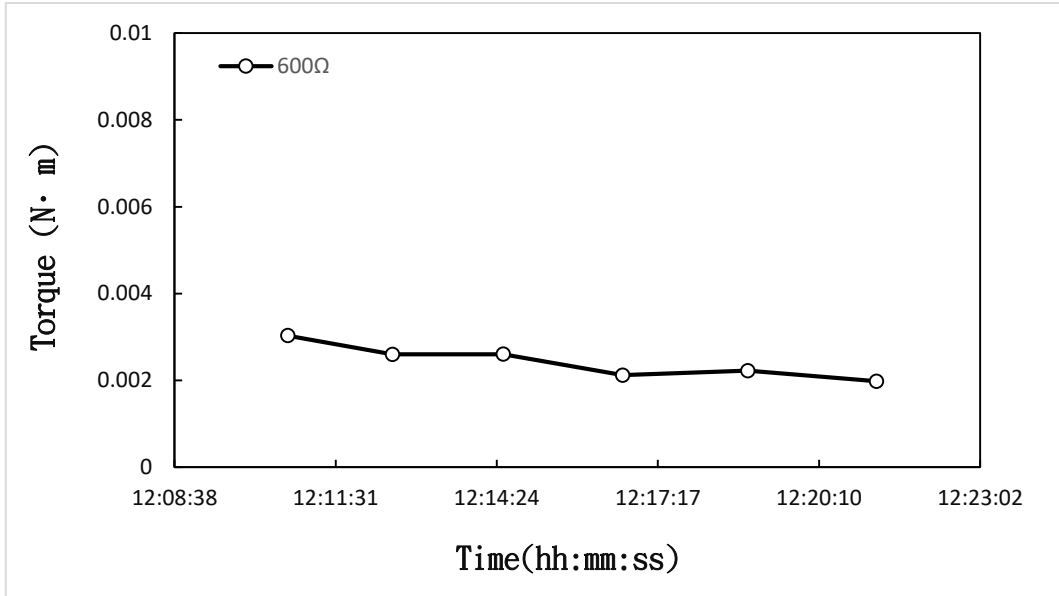


圖 40. 發電機扭力隨時間的變化圖(600Ω)

圖 41 是更換了發電機之後溫度隨時間的變化數據，這次的冷熱端溫度控制得很平穩，我們的溫差維持在 100 度以上，驅動 LED 燈。

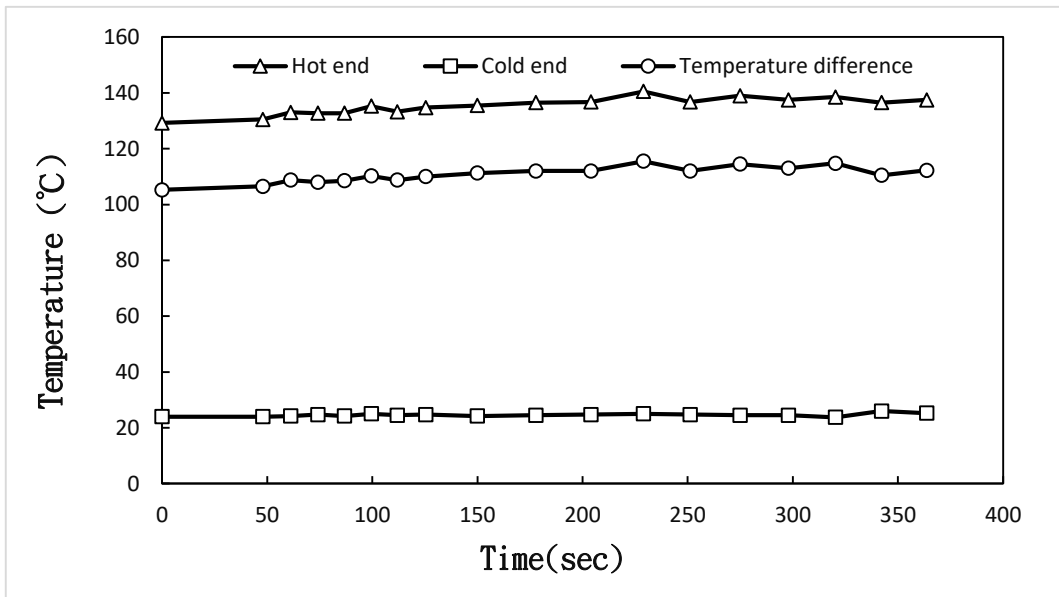


圖 41. 溫度隨時間的變化圖(新馬達)

圖 42 是更換了發電機之後發電機轉速隨時間的變化數據，這次因為溫差很平穩，所以得到的轉速也很穩定，約在 160RPM 上下。

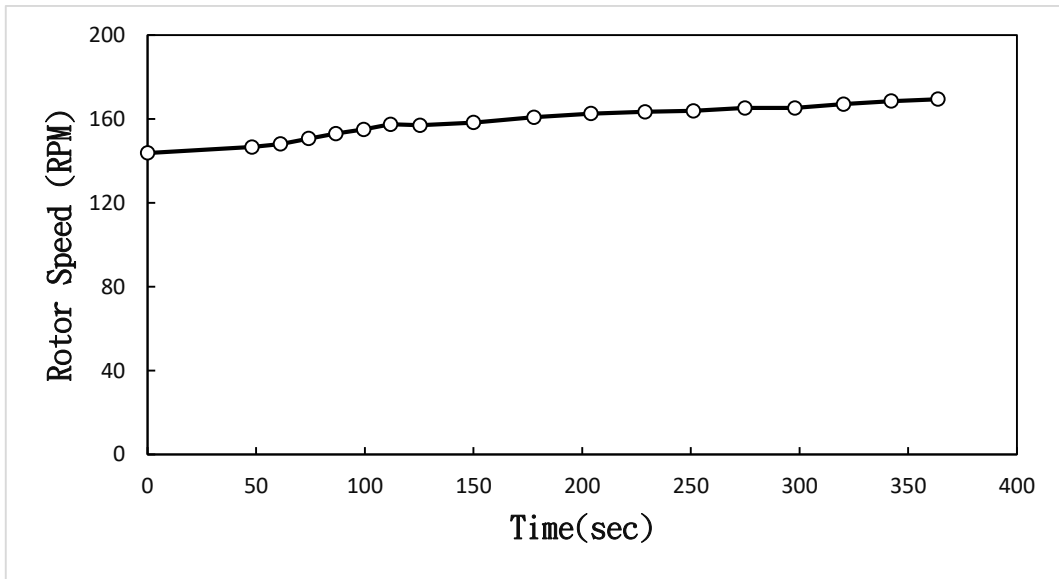


圖 42. 發電機轉速隨時間的變化圖(新發電機)

圖 43 是更換了發電機之後發電電壓隨時間的變化數據，這次因為更換規格功率較大的發電機，所以我們的電壓都在 10.6V 以上。

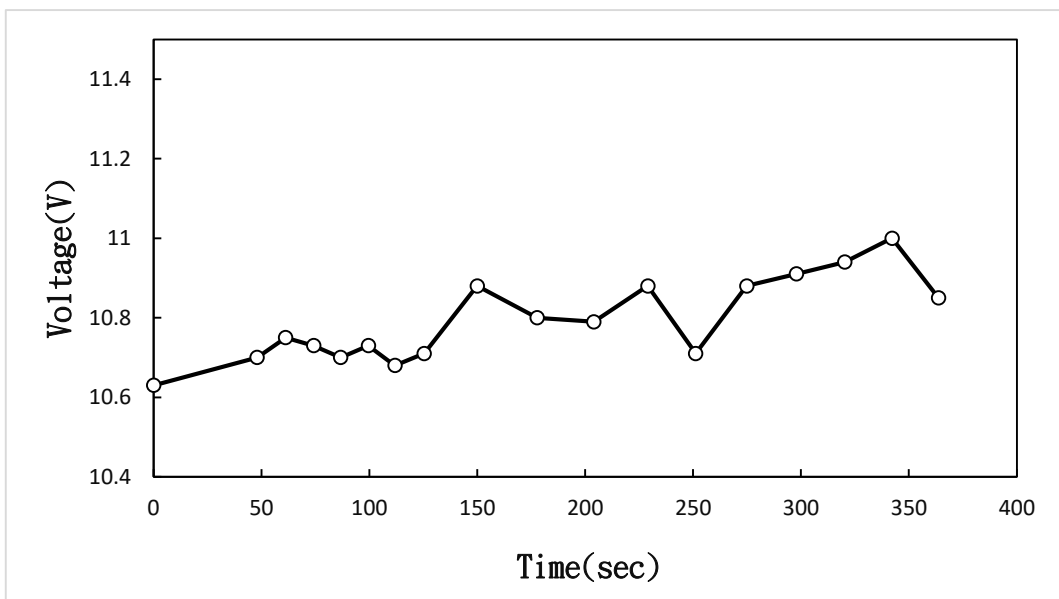


圖 43. 發電電壓隨時間的變化圖(新發電機)

圖 44 是更換了發電機之後發電電流隨時間的變化數據，這次因為更換規格功率較大的發電機，所以我們的電流從 50mA 上升到接近 80mA。

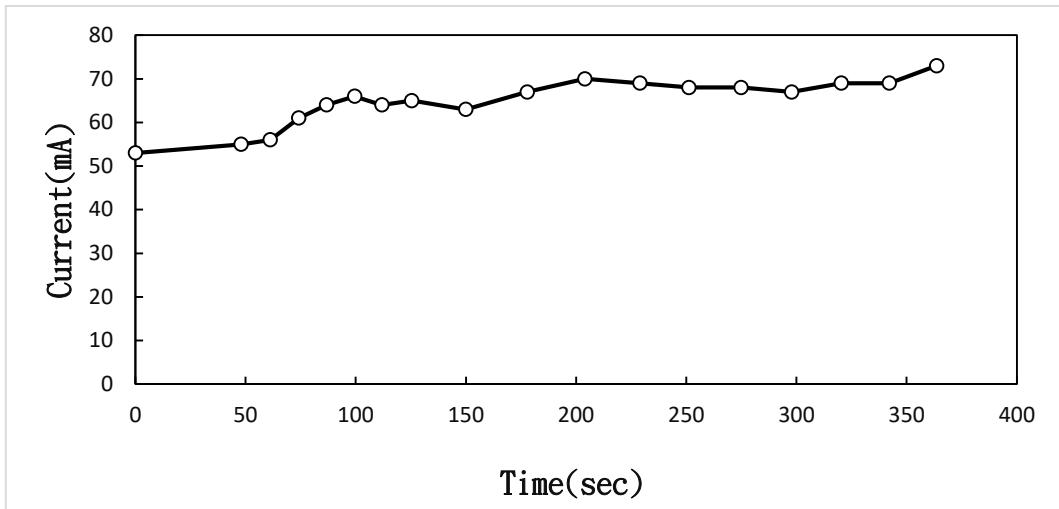


圖 44. 發電電流隨時間的變化圖(新發電機)

圖 45 是更換了發電機之後發電功率隨時間的變化數據，這次因為更換規格功率較大的發電機，所以我們的發電功率最高可至 0.8 W。

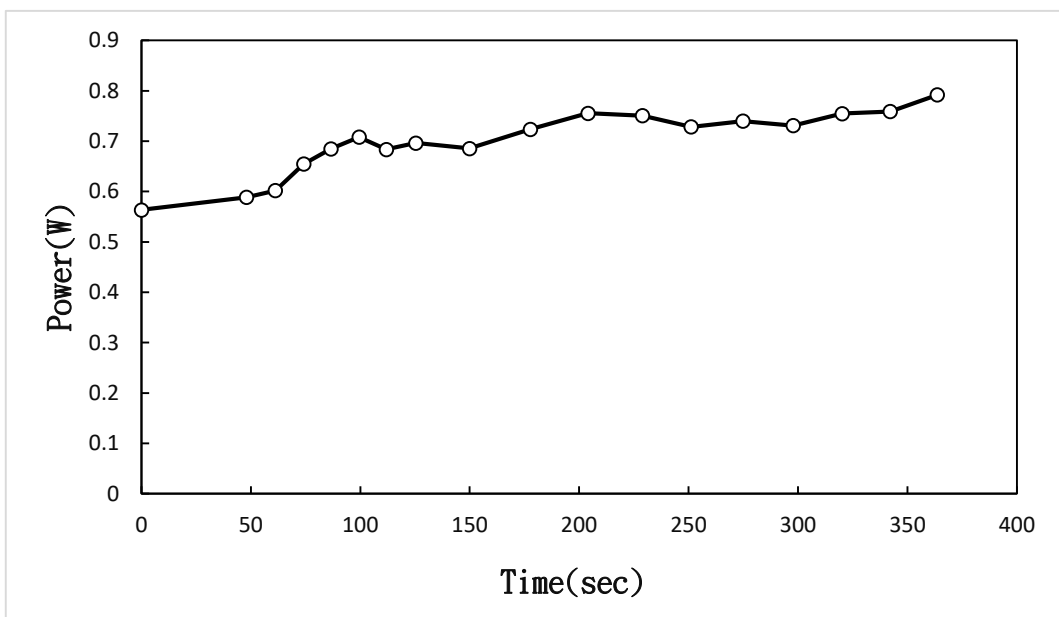


圖 45. 發電機功率隨時間的變化圖(新發電機)

完成利用電磁爐作為熱源模擬溫泉提供 130 °C 熱端，以抽水馬達作為水循環動力來源模擬溪水提供約 20 °C 冷端降溫，使用 Arduino 將感測器所得數據收集整合，經實驗結果可以得到冷熱端達平衡後溫差約 100 °C，引擎轉速約為 140-180 RPM，扭力約為 0.04 N·m，發電功率約為 0.6-0.8 W，達到驅動 LED 燈的要求。

## 伍、結論

本研究希望透過結合  $\gamma$  型史特林引擎和發電機，來模擬使用地熱溫泉為熱源，山泉水為冷端的溫差發電。使用電池爐模擬溫泉當熱端，冰柱加自來水模擬山泉水冷端，最後在使用自製的三合一 Arduino WIFI 遠端工作站收集溫度、轉速、電壓、電流等數

據並將其傳到實驗室的電腦，再使用 excel 製作出圖表，可更清楚知道實驗的數據變化。最後再討論如何更換設備能得到更好的發電功率，讓史特林引擎實現可以使用地熱溫泉為熱源，山泉水為冷端的溫差發電，亦可拿來當做教學設備。完成利用電磁爐作為熱源模擬溫泉提供 130 °C 熱端，以抽水馬達作為水循環動力來源模擬溪水提供約 20 °C 冷端降溫，使用 Arduino 將感測器所得數據收集整合，經實驗結果可以得到冷熱端達平衡後溫差約 100 °C，引擎轉速約為 140-180 RPM，扭力約為 0.04 N•m，發電功率約為 0.6-0.8 W，達到驅動 LED 燈的要求。

### 參考文獻

- 張漢生，能源教具- $\gamma$  型史特林引擎之設計製作與研究，朝陽科技大學碩士論文，(2014)。
- 張裕峰，中溫差加壓式  $\gamma$  型史特林引擎特性之研究，崑山科技大學碩士論文，(2015)。
- 張勝凱，小型中溫差  $\gamma$  型史特林引擎之研究，崑山科技大學碩士論文，(2017)。
- 皮昆田，史特林引擎鰭片紋路熱傳增益分析，國立成功大學碩士論文，(2020)。
- 陳其宏，應用基因演算法於固態氧化物燃料電池複合史特林引擎系統功率最佳化與性能分析，國立成功大學碩士論文，(2021)。
- 毛傑渝，使用 PIV 研究  $\gamma$  型史特林引擎流場現象，國立成功大學碩士論文，(2022)。
- 蘇柏豪，應用田口法於  $\gamma$  型史特靈引擎之設計參數優化研究，國立成功大學碩士論文，(2022)。