

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 太陽能史特林引擎之有限時間熱力學最大功率之理論與實驗研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 100-2221-E-168-040-  
執行期間：100年08月01日至101年07月31日  
執行單位：崑山科技大學機械工程系

計畫主持人：陳文立

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：沈玟全  
碩士班研究生-兼任助理人員：Saul Avile  
碩士班研究生-兼任助理人員：戴子純

公開資訊：本計畫可公開查詢

中華民國 101 年 08 月 01 日

中文摘要： 我們設計並製造了一台  $\gamma$  型史特林引擎原型機，它具有四項特點：雙動力缸，內建式再生器、氦氣加壓、磁耦合動力傳輸系統。目前的輸出功率在熱端加熱至攝氏 400 度時可達到 100W。另外，我們也研發完成並測試與驗證了史特林引擎模擬程式，本計畫使用數值方法分析這部引擎，找出最佳參數後再進行實際改造原型機以大幅提升其輸出功率與效率。

中文關鍵詞： 史特林引擎，加壓式，數值模擬

英文摘要： We have built a prototype  $\gamma$ -type Stirling engine, which features twin power cylinders, built-in regenerator, helium charge, and magnetic coupling power transmission. Its maximum power output is 100 W at the hot-end temperature of 400 degree centigrade. In the meantime, we have developed, tested and versified a Stirling engine simulation code which is capable of simulating complete cycles of Stirling engines. In this project, we will first use the code to perform engine parameter optimization to obtain optimized geometric and operational parameters of the  $\gamma$ -type Stirling engine, and then we will rebuild the engine according to the optimized parameters. It is expected that the output power and efficiency of the prototype engine will be dramatically improved after it has been optimized.

英文關鍵詞： Stirling engine, pressurized, numerical modelling

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  
 期中進度報告

太陽能史特林引擎之有限時間熱力學最大功率之理論與實驗研究

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 100-2221-E-168-040

執行期間：100年08月01日至101年07月31日

執行機構及系所：崑山科大機械系

計畫主持人：陳文立

共同主持人：

計畫參與人員：沈玟全，戴子純

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本計畫除繳交成果報告外，另須繳交以下出國心得報告：

- 赴國外出差或研習心得報告
- 赴大陸地區出差或研習心得報告
- 出席國際學術會議心得報告
- 國際合作研究計畫國外研究報告

處理方式：除列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查

詢

中 華 民 國 101 年 10 月 01 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 太陽能史特林引擎之有限時間熱力學最大功率之理論與實驗研究

Finite-time thermodynamic analysis and experimental study on the maximum power of a solar Stirling engine

計畫編號：NSC 100-2221-E-168-040

執行期限：100年8月1日至101年7月31日

主持人：陳文立 執行機構及單位名稱：崑山科大機械系

### 一、前言

1816年，英國牧師 Robert Stirling 發明了史特林引擎。就科學的角度而言，史特林引擎是非常了不起的動力機械，不過它的動力/重量比遠小於內燃機引擎，加上它的輸出功率無法迅速調整，因此在 19 與 20 世紀有相當長的時間內它無法與內燃機引擎競爭因而被忽視。然而，史特林引擎具有高熱效率，低維修需求，可以用眾多不同能源驅動，操作安全等優點，因此它在全球石化能源逐漸枯竭與能源短缺的今日又開始受到重視。特別的是，史特林引擎可使用綠色能源如太陽能或生質能驅動使它成為可對抗全球暖化問題的重要方案之一。所以近年來學術界對史特林引擎的研究又開始熱絡起來，以史特林引擎為中心的工業也逐漸形成[1]。有鑑於史特林引擎的高效率，這個兩百年前的發明甚至被 NASA 採用而應用在高科技的外太空探索計畫中[2]。

史特林引擎有很多不同的型式，它們通常依照構造的不同分成三類，即 $\alpha$ ， $\beta$ ，與 $\gamma$ 型。在這三類型之中， $\beta$ 型主要是應用在高溫差(high temperature difference, HTD)機種，也就是引擎的熱端與冷端溫差很大，因此 $\beta$ 型具有較高的熱效率。不過產生如此高的溫差只有靠燃燒石化燃料或裝置複雜的雙軸碟形聚光系統才能達成。此外，高溫差也會產生較高熱輻射損失，在材料內造成較高的熱應力以及需要較昂貴的耐高溫材料來製造史特林引擎。另一方面， $\gamma$ 型史特林引擎主要是應用在中或低溫差(low temperature difference, LTD) 機種，其引擎的熱端與冷端溫差較小，因此對熱源的需求較低，例如使用生質能或單軸拋物面槽形聚光系統即可。再者，由於引擎溫差降低，我們可以用較便宜的材料製造引擎，所以適用在建造較低價位的家用系統。不過低溫差也造成 $\gamma$ 型史特林引擎的熱效率比高溫差的 $\beta$ 型為低。

### 二、研究目的

目前 $\beta$ 型史特林引擎的發展已相當成熟而且已經商業化地用在大型太陽能史特林引擎發電廠中。在這類的發電廠，一部史特林引擎裝置在碟形聚光板的中央，聚光碟的直徑可達10公尺以上，陽光聚焦於史特林引擎的加熱端，其溫度可達攝氏800-900度，而單一部引擎可產生25-50kW的功率。但這樣的系統既龐大又昂貴且佔地很大，只適合沙漠地區的大型發電廠裝設。另一方面，也有公司量產燃燒石化燃料的小型史特林引擎發電機，輸出功率在1-5kW。但真正太陽能家用史特林引擎市場是一塊尚待開發的領域。這是一塊規模極為龐大的市場，成功的機種必須效率高，體積小，價格低廉，耐用度高。在這些條件下，中低溫的 $\gamma$ 型史特林引擎是比較適合的。它的廢熱可以用來加熱熱水以提供家庭熱水使用，因此它有取代現有的家庭太陽能熱水器的市場潛力，值得積極投入研究。我們設計並製造了如圖一的加壓式 $\gamma$ 型史特林引擎，它具有四項特點：雙動力缸，內建式再生器、氮氣加壓、磁偶合動力傳輸系統。目前的輸出功率在熱端加熱至攝氏400度時可達到100W，本計畫使用數值方法分析這部引擎，找出最佳參數後再進行改造以大幅提升其輸出功率。

### 三、文獻探討

在文獻中，對 $\gamma$ 型史特林引擎的研究遠少於對 $\beta$ 型的研究。Cinar and Karabult [3]設計並製造一台掃氣體積(swept volume)只有276 cc的小型 $\gamma$ 型史特林引擎，此引擎使用氦氣為工作流體。當氦氣加壓至4bar且引擎的熱端加熱至1237K時，引擎輸出功率為128.3W。這證明了 $\gamma$ 型史特林引擎在高溫差時仍然有可觀的動力輸出。Parlak, et al. [4]使用熱力分析與擬穩態模型(quasi-steady model)研究一 $\gamma$ 型史特林引擎。擬穩態模型比起傳統的熱力分析可獲得較精確的結果。他們的研究顯示當引擎用氦氣加壓至6.5bar，熱端加熱至873K時，引擎的熱效率可達到25%。Kongtragool and Wongwises [5]製造一部雙動力汽缸與另外一部四動力汽缸低溫差 $\gamma$ 型史特林引擎並量測其輸出功率。在他們的實驗中，熱端由太陽能模擬系統(鹵素燈)加熱並維持在攝氏100度左右，其工作流體為未加壓的空氣。這兩部引擎皆相當巨大，其移氣缸的內徑為60cm，掃氣體積達到40,941cc。但雙動力汽缸的輸出功率與效率分別為11.8W與0.494%，而四動力汽缸的輸出功率與效率分別為32.7W與0.809%。與先前提到的氦氣加壓 $\gamma$ 型史特林引擎相比，這兩部引擎的表現很明顯地遜色許多。作者提到引擎零件加工精密度不高是造成引擎的表現不佳的主因之一，此外，這也說明了使用加壓氦氣為工作流體是提升史特林引擎輸出功率的重要關鍵因素之一。不過我們覺得另一個可能的因素是這兩部引擎的設計參數並未經過最佳化，因此引擎在此實驗的運轉條件下不能達到最大效率。Karabulut, et al. [6]指出許多參數如工作流體的物理與熱力性質，工作流體是否加壓，引擎熱端與冷端的溫差，再生器(regenerator)的效率等對引擎的表現都有決定性的影響。調整某個參數可能改善某方面的表現但同時也會對其他方面帶來負面的效果。例如，若要提高引擎熱端的熱傳係數，我們可以增加熱交換器之管路數量，但增加管路數量會同時增加工作流體的壓力損失與增加死體積(dead volume)，二者皆為影響引擎性能的負面因素，因此管路數量只有一個最佳值可使這個參數對引擎的表現產生最大的貢獻。這說明了參數最佳化對引擎設計的重要性。然而，Cheng and Yu [7]在其論文中提到決定引擎參數(特別是幾何參數)在新的引擎的設計過程是件花費龐大且非常耗時的工作，因此工程師經常仰賴自身經驗或者是粗略的實驗或經驗公式來決定引擎參數，但如此設計出來的引擎很難有最佳的表現。所以他們發展了一個數值模型並將它用在一部菱形機構驅動的 $\beta$ 型史特林引擎。在此模型中，非等溫效應，再生器效率，以及引擎加熱與冷卻端的熱阻等皆列入考慮，而結果顯示此數值模型可找出影響引擎性能的最重要因素。然而，這個數值模型並未將許多實際引擎中的能量損失考慮進來，因此其預測準確度仍有待與實驗的結果比對。

Timoumi et al. [8]的研究顯示實際的史特林引擎效率遠低於理論效率，在實際的史特林引擎中的流體流動與熱傳的過程是非常複雜的流力，熱力與熱傳學現象，若要精確地將引擎最佳化，我們必須對這些複雜的物理現象與引擎循環過程中的能量損失有所了解。Walker [9]列出以下的能量損失：熱交換器內的熱傳導損失，流體流動中的壓力損失，移氣器穿梭運動引起的熱損失，空氣彈簧效應的損失等。Walker進一步直言由於這些損失的物理現象太複雜，許多已發表的理論方法未將這些損失考慮進去，因此太過高估引擎效率。

所以本計畫擬採用 Cheng and Yu [7]的數值方法為基礎再將 Walker [9]所提的能量損失加入考慮後用來分析我們所設計的 $\gamma$ 型史特林引擎原型，目的是利用數值方法找到最佳參數後再依最佳參數數據修改原型引擎並量測其改善程度。

### 四、研究方法

本計畫的原型機屬於加壓式的，整部引擎，包括飛輪與曲軸均密封於一圓柱形的壓力容器內。但壓力容器阻斷了引擎動力直接傳至外界的途徑，所以一般的加壓式史特林引擎配置內建發電機將機械能轉換成電能後再以電線輸出電能。若史特林引擎是用來驅動使用機械能的裝置如風扇，幫浦或壓縮機等，電能必須再經由馬達轉換回機械能。整個過程經過兩次能量轉換而造成巨大的能量損害。即使發電機與馬達的效率皆達到80%，兩次能量轉換損失即達到36%。

為避免能量轉換損失，我們使用了一對磁耦合在引擎動力軸上，如此便可以將機械能直接傳到外界的應用端。磁耦合的轉動會在機殼上引發一些渦電流效應，不過渦電流所損失的能量遠低於能量轉換所損失的能量。圖二為原型機的幾何參數示意圖，在分析上我們將引擎分成三個控制體積：膨脹室，再生器通道與壓縮室。其中膨脹室與壓縮室的壁面也分別當做加熱器(heater)與冷卻器，所以本原型機不使用外部熱交換器。本原型機的加熱器為圍繞著膨脹室的熱傳油套，而冷卻器為圍繞著壓縮室的水套，所以加熱器或冷卻器的熱傳面積不只是熱端或冷端的底板，還包括周圍壁面。

根據圖二，動力活塞與移氣器活塞的位移分別是：

$$Y_p(t) = -r_1 \sin \theta + \sqrt{l_1^2 - r_1^2 \cos^2 \theta} + l_2 \quad (1)$$

$$Y_d(t) = -r_2 \sin \beta + \sqrt{l_3^2 - r_2^2 \cos^2 \beta} + l_4 + l_d \quad (2)$$

其中， $\beta = \theta - \theta_p$ ， $\theta_p$  為動力活塞與移氣器活塞的相位差。膨脹室與壓縮室的體積可分別寫成：

$$V_e(t) = (l_{c1} - Y_d) \pi R_2^2 \quad (3)$$

$$V_c(t) = (Y_d - l_d - l_{c2}) \pi R_2^2 + 2(l_{c2} - Y_p) \pi R_1^2, \quad (4)$$

其中第(4)式中等式右邊第二項乘於 2 代表有兩個動力汽缸。將第(1)與(2)式分別對時間微分可得動力活塞與移氣器活塞的速度如下：

$$v_p(t) = -r_1 \omega \cos \theta + \frac{r_1^2 \omega \cos \theta \sin \theta}{\sqrt{l_1^2 - r_1^2 \cos^2 \theta}} \quad (5)$$

$$v_d(t) = -r_2 \omega \cos \beta + \frac{r_2^2 \omega \cos \beta \sin \beta}{\sqrt{l_3^2 - r_2^2 \cos^2 \beta}} \quad (6)$$

接著，我們引進理想氣體方程式來計算膨脹室與壓縮室的壓力如下：

$$P_e = \frac{m_e RT_e}{V_e}, \quad P_c = \frac{m_c RT_c}{V_c} \quad (7)$$

然後，將熱力學第一定律用在膨脹室，再生器通道與壓縮室可得：

$$\frac{dU_e}{dt} = \dot{Q}_{in,e} - \dot{Q}_{loss} - \dot{W}_{out,e} - \dot{m} \left( h + \frac{v^2}{2} \right)_e \quad (8)$$

$$-\dot{Q}_{in,r} = \dot{m} (h_m - h_{out})_r - \frac{\dot{m}}{2} (v_{in}^2 - v_{out}^2)_r \quad (9)$$

$$\frac{dU_c}{dt} = \dot{Q}_{in,c} + \dot{Q}_{loss} - \dot{W}_{out,c} + \dot{m} \left( h + \frac{v^2}{2} \right)_c \quad (10)$$

其中， $\dot{Q}_{loss}$  代表從膨脹室至壓縮室的熱損失。依照 Timoumi et al. [8]的結論，主要的熱損失包括熱傳導損失與移氣器穿梭熱損失，所以  $\dot{Q}_{loss}$  可表示成：

$$\dot{Q}_{loss} \cong \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{shl} \quad (11)$$

熱傳導損失是因為膨脹室與壓縮室間的溫差造成，主要透過移氣器汽缸壁傳導，可寫成：

$$\dot{Q}_{cond} = k_s \frac{2\pi R_2 t_w (T_H - T_L)}{l_{cond}}, \quad (12)$$

其中， $t$  與  $l_{cond}$  分別為移氣器汽缸壁厚與引擎冷熱端的距離。移氣器穿梭熱損失起因為移氣器活

塞在引擎冷熱端間的往復運動，當移氣器活塞移至熱端時會吸熱，當它移至冷端時放熱。Chang and Baik [10]導出計算穿梭熱損失的公式如下：

$$\dot{Q}_{shut} = \frac{\frac{T_H - T_L}{l_d} \frac{2r_2 \pi R_d}{8} \left( \frac{2}{k_s} \sqrt{\frac{\alpha_f}{2\omega}} + \frac{\delta}{k_s} \right)}{\left( \frac{2}{k_s} \sqrt{\frac{\alpha_f}{2\omega}} \right)^2 + \left( \frac{2}{k_s} \sqrt{\frac{\alpha_f}{2\omega}} + \frac{\delta}{k_s} \right)^2}, \quad (13)$$

其中， $\alpha_f$  為工作流體的熱擴散係數， $k_s$  為移氣器汽缸壁的熱傳導係數。在(8)至(10)中，我們假設流體流出膨脹室之質量流率為正，而質量流率的算法如下。設再生器通道的流動是層流，我們可解出其速度分佈，然後對再生器通道截面積分即可得到質量流率：

$$\begin{aligned} \dot{m} = & -\frac{\rho\pi}{8\mu} \left( \frac{P_e - P_c}{l_d} \right) \left[ R_2^2 - R_d^2 - \frac{(R_2^2 - R_d^2)^2}{\ln(R_2/R_d)} \right] \\ & - \frac{2\pi\rho v_d}{\ln(R_2/R_d)} \left[ \frac{1}{2} (R_2^2 \ln R_2 - R_d^2 \ln R_d) - \frac{1}{4} (R_2^2 - R_d^2) \right] \\ & + \frac{\pi\rho v_d}{\ln(R_2/R_d)} \ln R_2 (R_2^2 - R_d^2) \end{aligned} \quad (14)$$

由於工作流體經由再生器通道進出膨脹室與壓縮室，所以我們需要對流項處理程序(convection scheme)來描述進出膨脹室與壓縮室的流體性質，而最簡單的對流項處理程序為上風法(upwind scheme)：

$$\dot{m} > 0, \left\{ \begin{array}{l} h = h_e, v = v_e; \text{expansion} \\ h_{in} = h_e, h_{out} = h_i, v_{in} = v_e, v_{out} = v_i; \text{regenerative} \\ h = h_i, v = v_i; \text{compression} \end{array} \right\}, \quad (15)$$

$$\dot{m} < 0, \left\{ \begin{array}{l} h = h_j, v = v_j; \text{expansion} \\ h_{in} = h_c, h_{out} = h_j, v_{in} = v_c, v_{out} = v_j; \text{regenerative} \\ h = h_c, v = v_c; \text{compression} \end{array} \right\} \quad (16)$$

其中，下標  $i$  與  $j$  分別代表從再生器通道流入壓縮室與為從再生器通道流入膨脹室的流體。當流體通過再生器通道後，溫度可表示為：

$$\begin{aligned} T_i &= T_e + \varepsilon(T_c - T_e), \dot{m} > 0 \\ T_j &= T_c + \varepsilon(T_e - T_c), \dot{m} < 0 \end{aligned} \quad (17)$$

其中， $\varepsilon$  為再生器的效率係數。考慮流體為理想氣體，其內能與焓可表示成溫度的函數如下：

$$u = c_v T, h = c_p T. \quad (18)$$

而膨脹室與壓縮室的熱傳量可寫成：

$$\dot{Q}_{m,e} = \frac{T_H - T_e}{R_{t1}}, \dot{Q}_{m,c} = \frac{T_L - T_c}{R_{t2}}; \quad (19)$$

其中， $T_H, R_{t1}$  與  $T_L, R_{t2}$  分別為膨脹室與壓縮室的壁面溫度與熱阻。當移氣器活塞進行往復運動時，膨脹室與壓縮室的熱傳面積  $A_{t1}$  與  $A_{t2}$  也會改變，它們可表示為：

$$A_{r1} = \pi R_2^2 + 2\pi R_2(l_{c1} - Y_d), A_{r2} = (\pi R_2^2 - 2\pi R_1^2) + 2\pi R_2(Y_d - l_{c2} - l_d); \quad (20)$$

所以， $R_{r1}$  與  $R_{r2}$  為：

$$R_{r1} = \frac{1}{hA_{r1}}, R_{r2} = \frac{1}{hA_{r2}}, \quad (21)$$

其中， $h$  為膨脹室與壓縮室壁面的熱對流係數。Karabulut et al. [11]建議工作流體是空氣或氦氣時，熱對流係數值為  $447 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  或  $2392 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ 。膨脹室與壓縮室的機械功可以計算如下：

$$\dot{W}_{out,e} = \frac{P_e(V_e^{n+1} - V_e^n)}{\Delta t}, \dot{W}_{out,c} = \frac{P_c(V_c^{n+1} - V_c^n)}{\Delta t}, \quad (22)$$

其中，上標  $n$  代表第  $n$  個時間步進(time step)。將(12)至(22)式代入第(8)與(10)式中，我們可得膨脹室與壓縮室內流體溫度：在膨脹室當  $\dot{m} > 0$  時，

$$T_e^{n+1} = \left(1 - \frac{\Delta t}{\bar{m}_e c_v R_{r1}}\right) T_e^n + \frac{\Delta t}{\bar{m}_e c_v} \left[ \frac{T_H}{R_{r1}} - \frac{\bar{P}_e(V_e^{n+1} - V_e^n)}{\Delta t} - \dot{m} \left( h_e + \frac{v_e^2}{2} \right) - \dot{Q}_{loss} \right] \quad (23)$$

當  $\dot{m} < 0$  時，

$$T_e^{n+1} = \left(1 - \frac{\Delta t}{\bar{m}_e c_v R_{r1}}\right) T_e^n + \frac{\Delta t}{\bar{m}_e c_v} \left[ \frac{T_H}{R_{r1}} - \frac{\bar{P}_e(V_e^{n+1} - V_e^n)}{\Delta t} - \dot{m} \left( h_j + \frac{v_j^2}{2} \right) - \dot{Q}_{loss} \right] \quad (24)$$

以及在壓縮室當  $\dot{m} > 0$  時，

$$T_c^{n+1} = \left(1 - \frac{\Delta t}{\bar{m}_c c_v R_{r2}}\right) T_c^n + \frac{\Delta t}{\bar{m}_c c_v} \left[ \frac{T_L}{R_{r2}} - \frac{\bar{P}_c(V_c^{n+1} - V_c^n)}{\Delta t} + \dot{m} \left( h_i + \frac{v_i^2}{2} \right) + \dot{Q}_{loss} \right] \quad (25)$$

當  $\dot{m} < 0$  時，

$$T_c^{n+1} = \left(1 - \frac{\Delta t}{\bar{m}_c c_v R_{r2}}\right) T_c^n + \frac{\Delta t}{\bar{m}_c c_v} \left[ \frac{T_L}{R_{r2}} - \frac{\bar{P}_c(V_c^{n+1} - V_c^n)}{\Delta t} + \dot{m} \left( h_c + \frac{v_c^2}{2} \right) + \dot{Q}_{loss} \right] \quad (26)$$

其中，上標橫桿代表第  $n$  個與  $n+1$  個時間步進之平均值：

$$\bar{\phi} = \frac{\phi^{n+1} + \phi^n}{2}. \quad (27)$$

在方程式(23-26)中，膨脹室與壓縮室的壁面溫度分別假設為熱端與冷端溫度  $T_H$  與  $T_L$ ，但事實上， $T_H$  與  $T_L$  只是分別包覆膨脹室與壓縮室外壁的熱油與冷卻水的溫度，透過共軛熱傳機制，熱才能傳入或傳出引擎。所以膨脹室內壁溫度會低於  $T_H$ ，而壓縮室的內壁溫度會高於  $T_L$ 。為了將共軛熱傳考慮進來，我們對  $T_H$  與  $T_L$  修正如下：

$$T_{WH} = \frac{\frac{k_s}{t_w} T_H + h T_e}{\frac{k_s}{t_w} + h}, T_{WL} = \frac{\frac{k_s}{t_w} T_L + h T_c}{\frac{k_s}{t_w} + h}. \quad (28)$$

引擎每一循環的功可由以下積分獲得：

$$W_{out} = \int_0^{t_f} P_e dV_e + \int_0^{t_f} P_c dV_c - W_f, \quad (29)$$



其中， $t_f$  表示一個引擎循環終止的時間，而  $W_f$  為引擎的機械摩擦損失。機械摩擦損失的大小與引擎的設計與製造組裝的精密度有關，其中曲軸的精密度最重要，若曲軸中心不準，引擎在運轉時會對培林產生不當的壓力而增加其摩擦損失。機械摩擦損失是無法預測的，只能用實驗方式測量。不過我們可以假設機械摩擦損失在每一引擎循環的大小是固定的，如此我們可計算摩擦損失功率如下：

$$\dot{W}_f = \frac{\omega}{60} W_f, \quad (30)$$

其中， $\omega$  為引擎轉速(rpm)。最後，引擎效率可用以下公式計算：

$$\eta = \frac{W_{out}}{\int_0^{t_f} \dot{Q}_{in,e} dt}. \quad (31)$$

## 五、結果與討論

用實驗方法做參數最佳化分析雖然準確，但是既費時又需龐大經費，所以不太合乎實際。本論文先用數值模擬做參數最佳化分析後再根據模擬的結果修改原型機，然後測試其輸出功率與引擎效率是否有大幅改善。數值模擬程式完成後首先要通過驗證程序以確定其正確性。為了驗證程式的正確性，我們將它用來模擬 Cheng and Yu [7] 中的基本條件  $\beta$  型史特林引擎。在 [7] 中有對其基本條件引擎的體積，溫度，壓力，與熱傳率在史特林引擎循環中的變化有詳細分析。至於基本條件引擎的幾何與運轉參數在 [7] 中已有詳細介紹，於此不再重復。另外，在 [7] 的分析中，熱傳與磨擦損失以及冷熱端的共軛熱傳效應並未列入考慮，所以這些項目在驗證過程中先設為零。圖三為本程式與 [7] 的基本條件(base-line case)  $p-v$  曲線比較圖，我們的結果與 Cheng and Yu 非常接近。另外我們得到引擎功率值為 16.7 W 與 [7] 的 16.75 W 幾乎相同。這證明我們程式的正確性。

本計畫研究的參數包括引擎的幾何參數與運轉條件參數兩大類。幾何參數為：影響汽缸活塞行程的  $r_1$ ，以及再生器效率  $\epsilon$ 。運轉條件參數為：引擎轉速，氬氣起始壓力，與熱端溫度。在固定熱端溫度下，史特林引擎之輸出功率通常隨引擎轉速增加而遞增，但達到一最大值後隨引擎轉速增加而遞減，所以有一最佳轉速存在。在某一熱端溫度下輸出功率與氬氣壓力也有類似關係，並非增加氬氣壓力就可增加輸出功率，所以也有一最佳氬氣壓力存在。因此在某一熱端溫度下找出其對應的最佳轉速與氬氣壓力對引擎運轉效率而言是很重要的資訊。依卡諾原理，冷熱端溫差越大，則引擎效率越高，因此熱端溫度也是影響引擎表現的重要參數。圖四至圖八顯示這些參數對引擎的功率與效率的影響。首先，我們檢視再生器效率的影響。在研究此參數的效應時，我們將  $r_1$ ，起始壓力，引擎轉速以及熱端溫度分別固定為 0.025m, 2bar, 400rpm 以及 700K，而再生器效率從 0.05 變化到 0.5，其結果則顯示於圖四中。由圖四可知引擎功率與效率皆與再生器效率成正比，不過再生器效率對引擎效率的影響較為顯著。其中，當再生器效率從 0.05 增加至 0.5 時，引擎效率卻增加 3 倍。其次，我們檢視  $r_1$  的影響。在研究此參數的效應時，我們將再生器效率，起始壓力，引擎轉速以及熱端溫度分別固定為 0.3, 2bar, 400rpm 以及 700K，而  $r_1$  從 0.02m 變化到 0.4m，其結果則顯示於圖五中。 $r_1$  的增加會直接增加動力缸的容積，也會增加膨脹過程的體積。由圖可看出引擎功率及效率與  $r_1$  幾乎呈線性正比關係，而此參數對引擎功率的影響較明顯。其中，當  $r_1$  從 0.02m 增加至 0.04m 時，引擎功率可增加 2 倍。接著，我們檢視起始壓力的影響。在研究此參數的效應時，我們將再生器效率， $r_1$ ，引擎轉速以及熱端溫度分別固定為 0.3, 0.025m, 400rpm 以及 700K，而起始壓力從 1bar 變化到 5bar，其結果則顯示於圖六中。從圖六可觀察出引擎功率及效率也與起始壓力幾乎呈線性正比關係，然而此參數對引擎功率及效率皆有可觀的影響。再來，我們檢視引擎轉速的影響。在研究此參

數的效應時，我們將再生器效率， $r_1$ ，起始壓力以及熱端溫度分別固定為 0.3，0.025m，2bar 以及 700K，而引擎轉速從 100rpm 變化到 400rpm，其結果則顯示於圖七中。圖七的結果可看出引擎轉速對引擎功率及效率皆有很明顯的影響。其中引擎轉速從 100rpm 增加至 400rpm 時，引擎功率從 40W 增加至 160W，增幅為 4 倍。這似乎是說只要增加引擎轉速即可大幅增加引擎功率，但實際上中低溫的史特林引擎通常有較大的移氣器，加上移氣器內部容納再生器，所以移氣器有相當的質量。如本論文原型機的移氣器其質量依再生器銅絲的多寡在 0.5-0.8kg 之間，所以它是一個沉重的零件。當它在移氣缸內進行高速往復運動時將產生很大的動量變化，而此動量變化將產生不平衡力作用在曲軸上，使曲軸振動。我們發現當引擎轉速到達 400rpm 時就可以觀察到曲軸的振動，因此 400rpm 大約就是原型機長時間安全操作的上限。引擎轉速對引擎效率的影響沒有對功率的影響顯著，當引擎轉速從 100rpm 增加至 400rpm 時，引擎效率從 0.55 增加至 0.79。最後，我們檢視熱端溫度的影響。在研究此參數的效應時，我們將再生器效率， $r_1$ ，起始壓力以及引擎轉速分別固定為 0.3，0.025m，2bar 以及 400rpm，而熱端溫度從 400K 變化到 900K，其結果則顯示於圖八中。依照卡諾原理，引擎的最高效率只是冷熱端溫度的函數：

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (32)$$

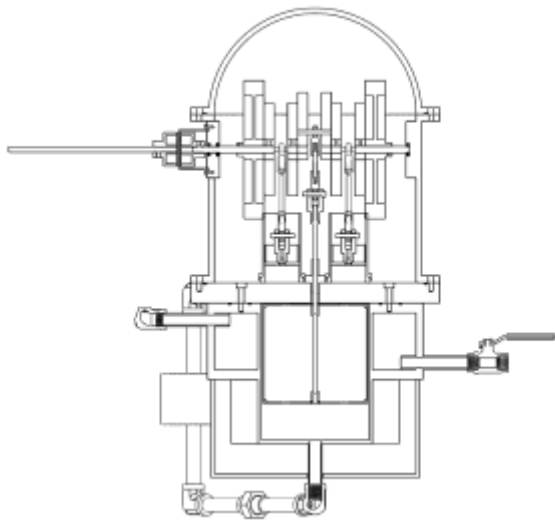
若冷端溫度固定，則引擎的最高效率只與熱端溫度有關，由此可見熱端溫度是決定引擎表現的關鍵運轉參數。由圖八可看出引擎功率與效率皆隨熱端溫度增加而增加，其中引擎效率在低熱端溫度時增幅較快，但在高熱端溫度時增幅減緩，而引擎功率與熱端溫度幾乎呈線性關係。就增加幅度而言，引擎效率與功率在熱端溫度 400K 時分別為 0.0258 與 32W，但熱端溫度為 800K 時皆大幅增為 0.087 與 190W，可見熱端溫度是增加引擎效率與功率極為有效的方式。不過實際上要維持高熱端溫度需要很大的熱量供給，同時引擎材質也必須耐高溫才行，這些都將增加引擎製造與運轉時的困難度。

## 六、參考文獻

1. H. Karabulut, C. Cinar, E. Ozturk, H. S. Yucesu, Torque and power characteristics of a helium charged Stirling engine with a lever controlled displacer driving mechanism, *Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 138-143, 2010.
2. L.G. Thieme, S. Qiu, M.A. White, Technology development for a Stirling radioisotope power system for deep space missions, *IECEC*, 1999.
3. C. Cinar and H. Karabulut, Manufacturing and testing of a gamma type Stirling engine, *Renewable Energy*, Vol. 30, pp. 57-66, 2005.
4. N. Parlak, A. Wanger, M. Elsner, H.S. Soyhan, Thermodynamic analysis of a gamma type Stirling engine in non-ideal adiabatic conditions, *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 266-273, 2009.
5. B. Kongtragool and S. Wongwiset, Performance of low-temperature differential Stirling engines, *Renewable Energy*, Vol. 32, pp. 547-566, 2007.
6. H. Karabulut, F. Aksoy, E. Qzturk, Thermodynamic analysis of a  $\beta$  type Stirling engine with a displacer driving mechanism by means of a lever, *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 202-208, 2009.
7. C.H. Cheng and Y.J. Yu, Numerical model for predicting thermodynamic cycle and thermal efficiency of a beta-type Stirling engine with rhombic-drive mechanism, *Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 2590-2601, 2010.
8. Y. Timoumi, I. Tlili, S.B. Nasrallah, Design and performance optimization of GPU-3 Stirling engines,

Energy, Vol. 33, pp. 1100-1114, 2008.

9. G. Walker, Stirling engines, Oxford, Clarendon Press, 1980.
10. H.M. Chang, J.H. Baik, An exact expression for shuttle heat transfer, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 41, pp. 1535-1542, 1996.
11. H. Karabulut, H.S. Yucesu, C. inar, F. Aksoy, An experimental study on the development of a  $\beta$ -type Stirling engine for low and moderate heat sources, Applied Energy, Vol. 86, pp. 68-73, 2009.

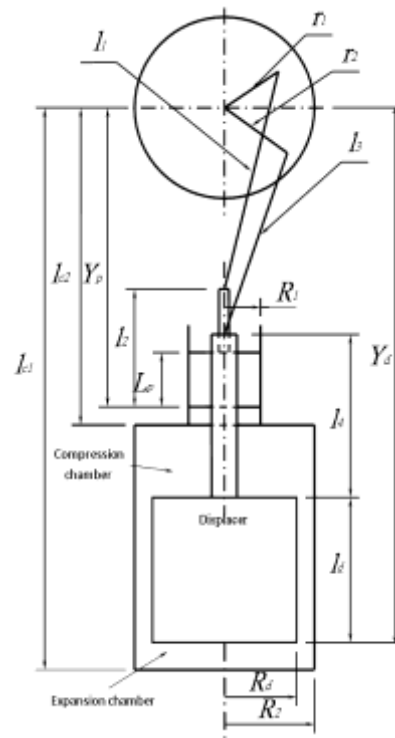


(a) 設計圖

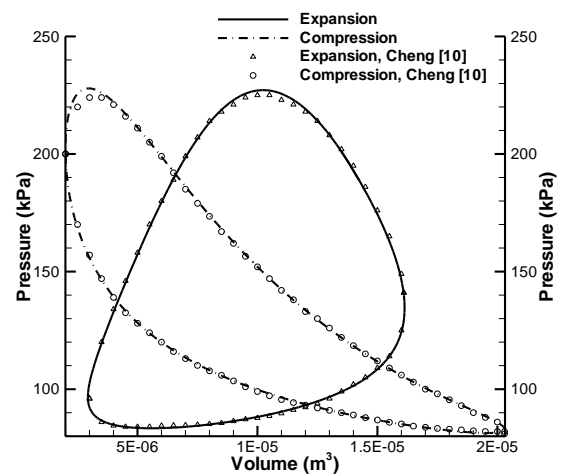


(b) 引擎本體

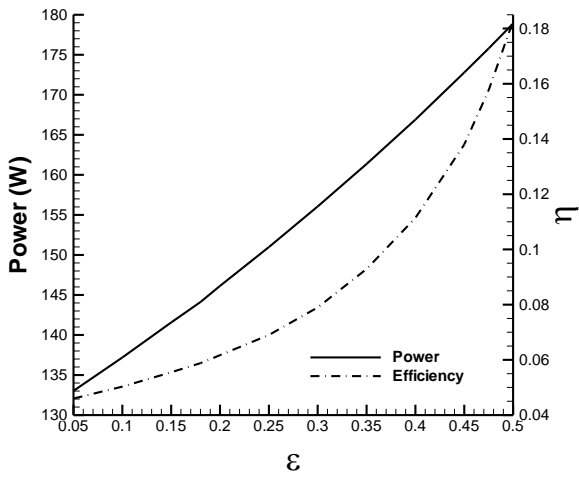
圖一、本計畫所設計與製造的史特林引擎。



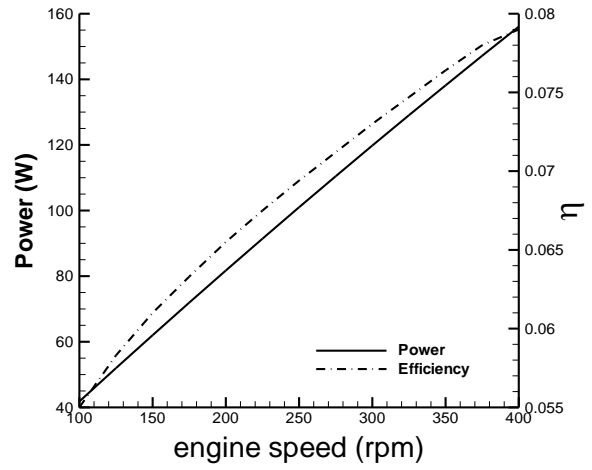
圖二、 $\gamma$  型史特林引擎原型機的幾何參數圖。



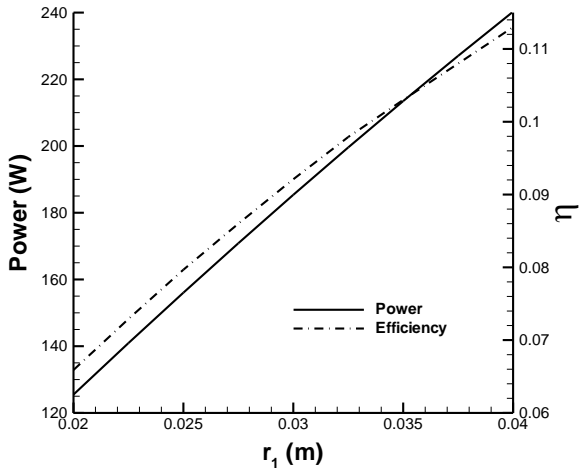
圖三、本程式與[7]中的基本條件引擎  $p$ - $v$  曲線比較圖。



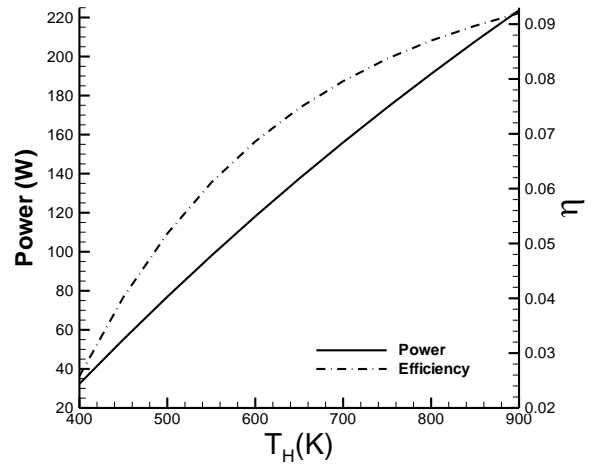
圖四、再生器效率對引擎功率與效率的影響。



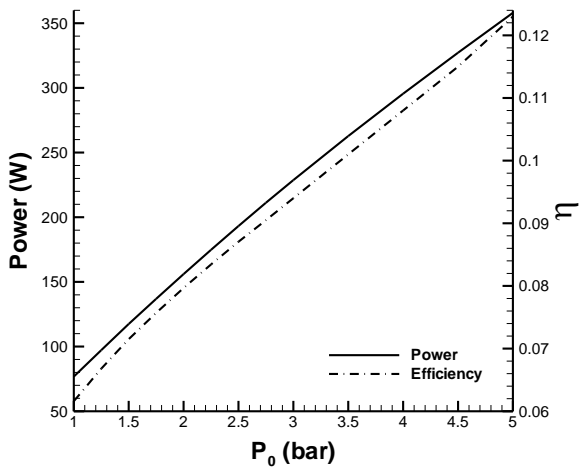
圖七、引擎轉速對引擎功率與效率的影響。



圖五、 $r_1$  對引擎功率與效率的影響。



圖八、熱端溫度對引擎功率與效率的影響。



圖六、起始壓力對引擎功率與效率的影響。

# 國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2012/08/01

國科會補助計畫	計畫名稱: 太陽能史特林引擎之有限時間熱力學最大功率之理論與實驗研究
	計畫主持人: 陳文立
	計畫編號: 100-2221-E-168-040- 學門領域: 能源科技
無研發成果推廣資料	

100 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：陳文立		計畫編號：100-2221-E-168-040-				計畫名稱：太楊能史特林引擎之有限時間熱力學最大功率之理論與實驗研究	
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	1	1	100%		
		研討會論文	1	1	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	1	1	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	3	3	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	1	1	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%	章/本	
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>無</p>
--	----------

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	

# 國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表  未發表之文稿  撰寫中  無

專利： 已獲得  申請中  無

技轉： 已技轉  洽談中  無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本計畫已發表一篇 SCI 論文:Wen-Lih Chen , King-Leung Wong, Li-Wen Po, A numerical analysis on the performance of a pressurized twin power piston gamma-type Stirling engine, Energy Conversion and Management, 62 (2012) 84 - 92. 及申請專利中: 雙動力泵浦. 目前 $\beta$ 型史特林引擎的發展已相當成熟而且已經商業化地用在大型太陽能史特林引擎發電廠中。在這類的發電廠，一部史特林引擎裝置在碟形聚光板的中央，聚光碟的直徑可達 10 公尺以上，陽光聚焦於史特林引擎的加熱端，其溫度可達攝氏 800-900 度，而單一部引擎可產生 25-50kW 的功率。但這樣的系統既龐大又昂貴且佔地很大，只適合沙漠地區的大型發電廠裝設。另一方面，也有公司量產燃燒石化燃料的小型史特林引擎發電機，輸出功率在 1-5kW。但真正太陽能家用史特林引擎市場是一塊尚待開發的領域。這是一塊規模極為龐大的市場，成功的機種必須效率高，體積小，價格低廉，耐用度高。在這些條件下，中低溫的 $\gamma$ 型史特林引擎是比較適合的。它的廢熱可以用來加熱熱水以提供家庭熱水使用，因此它有取代現有的家庭太陽能熱水器的市場潛力，值得積極投入研究。