

# 中華民國第 56 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

高級中等學校組 工程學科(一)科

佳作

052306

車輛廢氣排放發電系統之研究

學校名稱：國立民雄高級農工職業學校

作者：  職三 鄧瑞騰  職二 劉廷倫  職二 鄭景元	指導老師：  楊家勝  王瓊祥
---	-----------------------------

關鍵詞：能源再生、排氣發電機

## 摘 要

本研究目的為針對汽車引擎排放廢氣能量損失浪費，建置一個二階段雙渦輪發電系統的裝置，並透過排氣管徑的改變、渦輪功率研究、提升傳動裝置的效能及控制排氣通道回壓降低燃油消耗量的影響，探尋最高效率能量轉換的設計。雙渦輪發電機系統在排氣管路中改裝成為大小渦輪的裝置，利用引擎轉速作適時的改變排氣通道，有效將引擎排放氣體能源再生之裝置。實驗結果顯示，在最不影響引擎燃油消耗量下，讓低引擎轉速小渦輪發電機，能夠在微量排氣能量下電能輸出反應良好；高引擎轉速時，大渦輪發電機增加高排氣能量之充電能量。進一步發現，二階段雙渦輪發電機系統能夠抑制引擎排放廢氣的噪音，也可取代消音器的功能。

## 壹、研究動機

現代人生活非常倚賴手機，最困擾的是手機突然沒電，所以常想利用通勤時充電，加上普遍都會在汽車加裝 GPS 衛星導航、行車紀錄器等電子裝置，都是造成車輛額外增加的電力消耗。車輛發電機的負擔增大，引擎的負載也相對加重，燃料消耗量也會隨著增加。雖然，現今推出汽車都主打低油耗及節能裝置，像是煞車時電力回生裝置或停車熄火裝置技術都已經廣泛應用於車輛上，引擎效率也不斷精進，但車輛引擎仍有 40% 的能量從排氣系統損失。所以，從排氣系統損失能量引起我們探討廢氣排放發電裝置的動機，並考量到不同引擎運轉負載狀態，探討廢氣能量轉換的功能，發展一個能夠讓內燃機引擎排放氣體轉化為可再利用的能源系統。

## 貳、研究目的

本研究主要是探討汽車引擎排放氣體渦輪發電裝置的表現效能，具體言，擬達到下列目的：

- 一、探討引擎轉速對渦輪轉動效率之研究
- 二、探討引擎排氣管口徑對渦輪轉動能力之研究
- 三、探討引擎低轉速時渦輪效能提升方法之研究
- 四、探討排氣背壓對引擎燃油消耗量影響之研究
- 五、探討不同排氣能量對二階段廢氣排放發電系統變換能量裝置之研究。

## 參、研究設備及器材

### 一、研究設備

(一)TOYOTA CAMRY 實驗引擎	(二)TOYOTA CAMRY 汽車	(三)汽車診斷儀器
(四)手提電腦	(五)示波器	(六)電流鉤錶
(七)轉速計	(八)噪音計	(九)數位式氣壓計
(十)紅外線溫度計	(十一)數位式三用電儀	(十二)8051 應用軟體
(十三)3D 列印機	(十四)虎鉗	(十五)鑽床
(十六)車床	(十七)CNC 銑床	(十八)氬鐳機
(十九)CO <sub>2</sub> 電鐳機		

## 二、研究器材

(一)渦輪增壓器	(二)麵包板	(三)電子元件
(四)5W 無刷發電機	(五)10W 無刷發電機	(六)真空控制閥門
(七)整流二極體	(八)真空單向閥	(九)電線及鱷魚夾
(十)繼電器	(十一)非石棉墊片	(十二)6mm 鐵板
(十三)鋁條	(十四)不銹鋼管	(十五)3D 列印齒輪
(十六)焊錫	(十七)電烙鐵	

## 肆、研究過程或方法

### 一、研究流程

本研究流程如圖 1 所示，經過相關資料蒐集與分析後，逐一加工及調整設備，並經過不斷地測試與修正實驗，根據結果討論，完成整個研究過程。

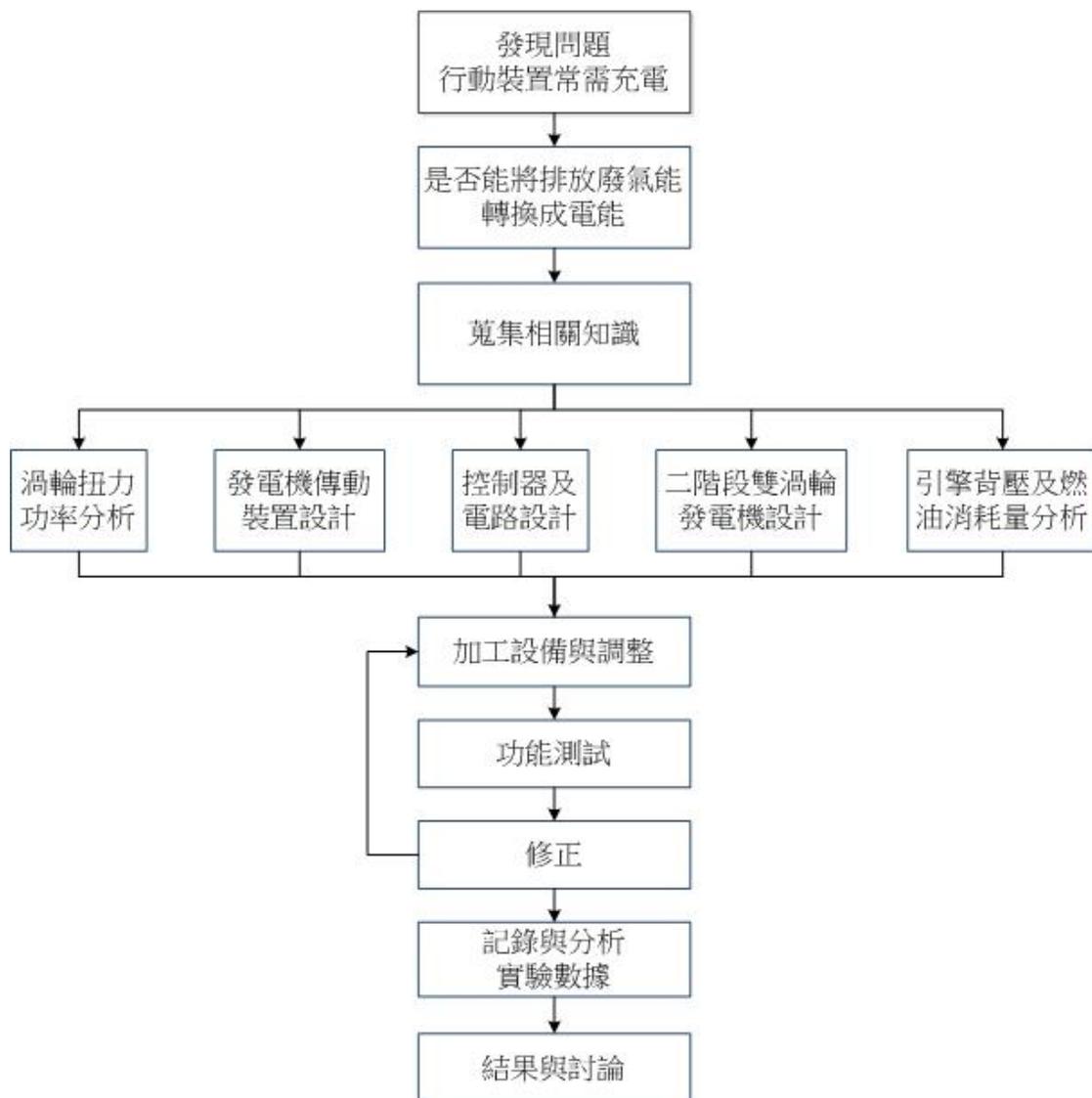


圖 1 研究流程圖

## 二、文獻探討

### (一)車輛廢熱回收應用研究

內燃機引擎是利用燃料的熱量轉換為有效的功，其熱效率即為實際出力與輸入燃料熱量之百分比。其餘未轉換為功的熱量則屬於熱損失。為減少熱損失，有些引擎會另外利用增壓器或再生器以提高熱之利用。圖 2 顯示汽車燃料燃燒後的熱效率及其他熱損失的分布比例，可知引擎的燃燒熱能應用效率上，由排氣廢熱能量損失的比例高達 40%，因此開發廢熱回收裝置系統很有其研究必要性。

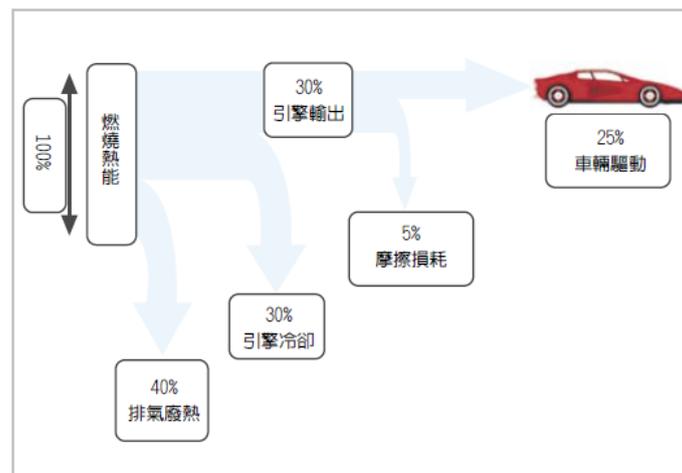


圖 2 車輛能源分布

#### 1. 熱電廢熱回收技術

熱電廢熱回收技術是利用熱電發電（Thermoelectric Generator）原理，即稱為席貝克效應（Seebeck Effect）。其發電是指利用兩種不同金屬構成閉合迴路，當兩接觸面有溫差時，兩材料的迴路中將會產生電流，如圖 3 所示。

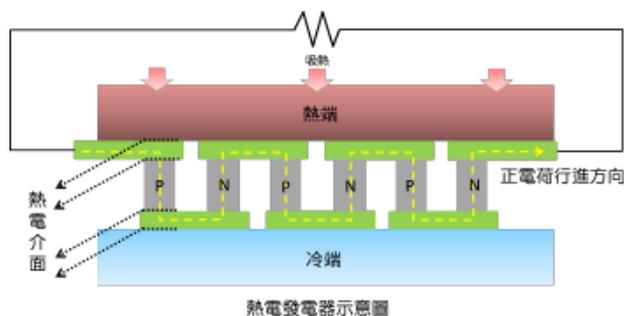


圖 3 熱電發電器示意圖

車輛熱電廢熱回收應用是將熱電材料置於排氣管路中，以引擎排放廢氣的熱能當作熱源，直接將熱能轉化為電能，轉換過程中，無需化學反應或是流體介質，在發電過程中具有無噪音、無磨損、移動方便、體積小等優點。將電熱材料整合應用於汽車電熱發電機控制模組時（如圖 4 所示），因汽車廢氣速度快，溫度範圍廣（300~600℃），電

熱材料需具備耐高溫材料特性以能於高溫下穩定作用，製作成本大為提高，加上傳統電源管理系統未針對熱電收集作最佳化規劃，汽車熱電廢熱應用較為困難。此外，汽車安裝熱電系統會產生背壓，亦需同時考量背壓提升過高會造成引擎排氣不順暢而影響動力性能。

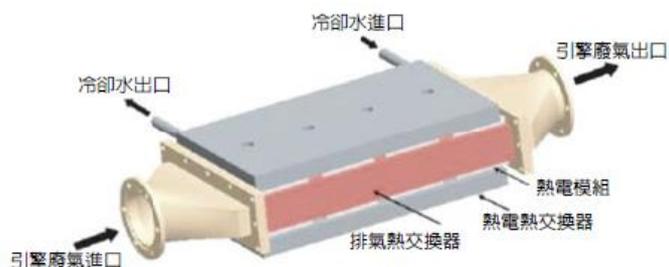


圖 4 車輛電熱材料排氣廢熱回收發電模組

## 2. 機械式複合渦輪系統

歐洲汽車製造廠 SCANIA 在 2001 年時發展一具 12 缸 470 匹馬力的柴油引擎，並在柴油引擎廢氣排放系統上加裝一個能量再生的裝置，稱為機械複合渦輪系統 (Mechanical turbo compounding)。這個系統主要功用是將經過渦輪增壓器之後的剩餘廢氣能量，再推動一個動力渦輪，並由一組齒輪聯結裝置，將作用在動力渦輪的廢氣能轉換成機械能後，再傳送到引擎曲軸上，提升引擎動力輸出，如圖 5 所示。這個機械複合渦輪系統是應用複雜的能量轉換裝置來傳遞機械能，需設計複雜機械聯結裝置進行能量傳遞，也需要較大空間裝置，會增加車輛額外的重量及製造的費用。

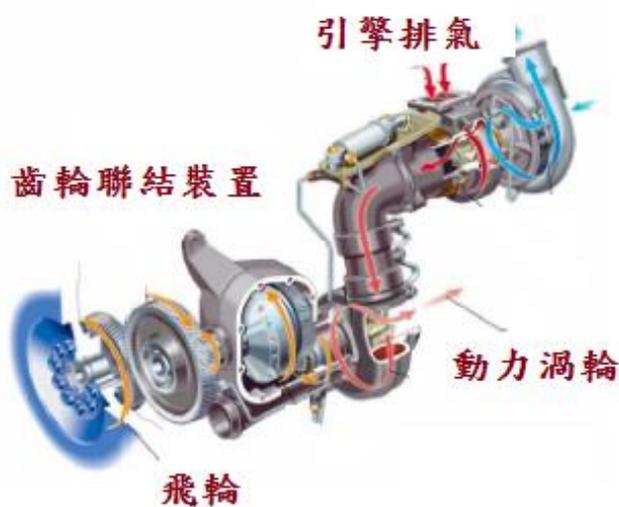


圖 5 機械式排氣能量再生裝置

### 3.排氣發電機

楊成宗與王之政編著之「汽車增壓器」一書上曾提到關於車輛引擎排放廢氣能量推動發電機產生電力研究，該發電機是利用一顆 6V/3W 的腳踏車頭燈專用發電機及自製的發電機葉片，並設計一個連接管引導引擎排放廢氣來推動發電機的葉片。實驗結果顯示發電機可以產生電力供應腳踏車頭燈，但未進一步探討相關排氣發電機運轉性能及實用性之機構。

#### (二)排氣渦輪發電機

##### 1.引擎排氣能量

排氣渦輪發電機的渦輪葉片是由可用的廢氣能量驅動，理想可用的廢氣能量如圖 6 所示，其包含汽缸中的膨脹氣體在排氣門開啟後，高壓排氣吹出能量，從點 1（排氣門開啟）至點 2（包圍壓力）曲線下的面積（1-2-3 所圍面積），以及活塞在排氣行程中所排除的殘留廢氣能量（3-4-5-6）所圍面積。

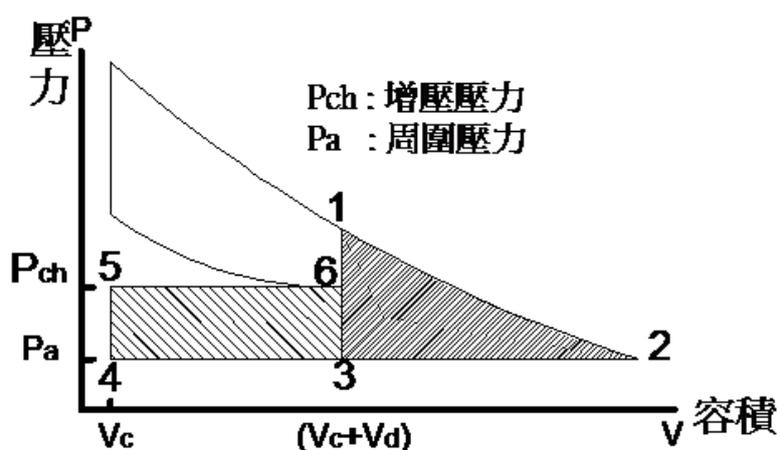


圖 6 等容循環 / 壓力-容積圖 (排氣能量)

##### 2.渦輪機功率

渦輪發電機的概念是將內燃機引擎排出之氣體的動能和熱能作能源形式改變，其轉換方式則是透過渦輪增壓器的排氣渦輪聯結一個發電機進行能源再生。

$$P = \dot{m} \cdot \eta_t \cdot C_p \cdot T_{in} \left[ 1 - \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \cdot \eta_m \quad (\text{公式 1})$$

$\dot{m}$  : 排氣流量

$P_{out}$  : 渦輪出口壓力

$\eta_t$  : 渦輪效率

$P_{in}$  : 渦輪入口壓力

$C_p$  : 常壓下的比熱

$\eta_m$  : 傳輸效率

$T_{in}$  : 渦輪進氣溫度

由公式 1 可瞭解從渦輪軸產生功的關鍵變量是內燃機引擎的排氣流量、渦輪進入的溫度  $T_{in}$  和渦輪入口端的壓力  $P_{in}$ 。當內燃機引擎在一個適當運轉狀態下，渦輪發電機是有潛在能力從排氣能量中的溫度與排氣流量裡做能量的轉換產生電能。

### 三、製作過程

#### (一)引擎運轉特性分析

為進行車輛排氣渦輪發電機的研究，首先從實習課程使用的汽油引擎中，選用一部 TOYOTA CAMRY 排氣量 2000C.C.的架上引擎做為排氣能量的來源。為瞭解車輛在道路行駛引擎排放廢氣能量狀態，另選用與架上引擎同款之 CAMRY 實車行駛於高速公路和一般道路，並連接車上診斷電腦同步記錄引擎運轉時的各項數據。

圖 7、圖 8 顯示實車駕駛時車速和引擎轉速關係，當車輛在市區行駛速度在時速 20~60 公里時，大部份的引擎轉速每分鐘低於 2500 rpm；當車輛行駛在高速公路維持時速 70~100 公里時，引擎轉速約在 2000~2700 rpm 左右。依據實車駕駛轉速表現，本實驗排氣渦輪發電機產生作用的引擎轉速設定轉速區域約在 1000~3500 rpm。



圖 7 車輛市區行駛車速和引擎轉速關係圖

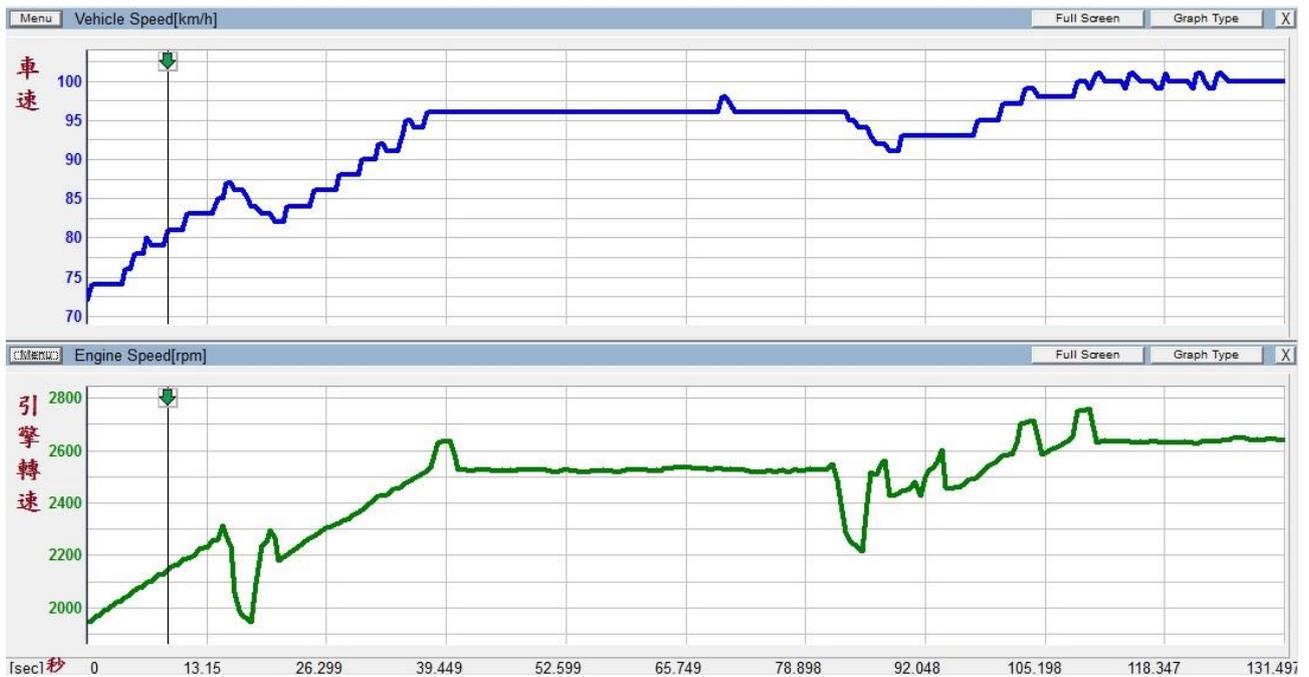


圖 8 車輛高速公路行駛車速和引擎轉速關係圖

## (二)引擎排氣管位置的選擇

引擎排氣溫度高低會因排氣管位置而不同，距離引擎愈近，排氣溫度愈高，此外，排氣管彎曲的地方也會有高溫現象產生。要裝置一個排氣渦輪發電機，需避開高溫危險區，考量合適的操作溫度。因此，先以紅外線溫度槍測試引擎排氣管的表面溫度，瞭解不同位置的溫度變化情形，圖 9 顯示量測的 5 個位置點，圖 10 則為各位置點所量測溫度變化。本實驗排氣渦輪發電機放置位置避開溫度較高區，放置於引擎排氣管消音器前（圖 9 中的 2 號位置）。



圖 9 架上引擎排氣管

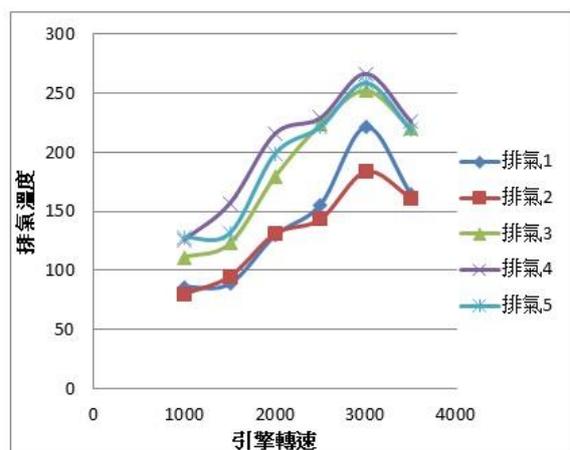


圖 10 排氣管位置溫度變化

### (三)渦輪增壓器 A/R 值

本實驗使用 2 個渦輪增壓器，其排氣渦輪進氣口標示不同的 A/R 值，分別是 0.49 及 0.30。圖 11 為 A/R 值計算說明，越大 A/R 值的渦輪在引擎低轉速的增壓就越慢。反之，越小 A/R 值的渦輪，低轉速增壓快，但高轉速時排氣背壓過高，會增加高轉速時氣體流動的阻力。首先，測量引擎排氣管口徑，將渦輪增壓器之壓縮輪端的壓縮輪葉取下，另一端的排氣渦輪端則保留原狀。將渦輪機連接引擎排氣管，測試無負載狀況下，排氣管口徑與 A/R 值對渦輪機的運轉能力。

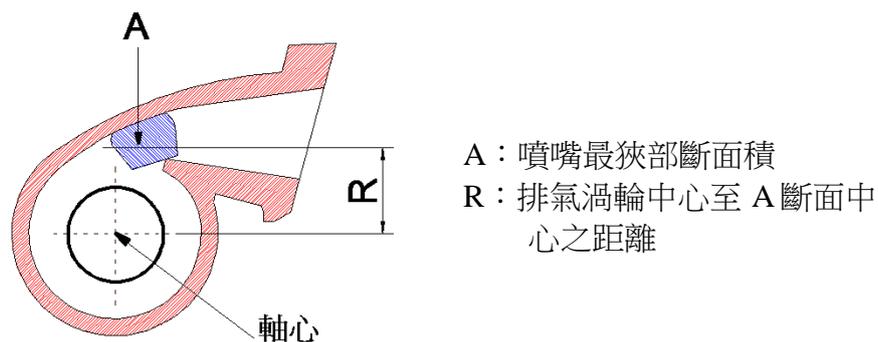


圖 11 排氣渦輪 A/R 值

### (四)渦輪機無負載測試

以本實驗採用架上引擎的排氣管消音器前段的排氣管口徑 40 mm 為預設值，分別測試兩種不同 A/R 值對渦輪的轉速影響，如表 1 所示。

表 1 A/R 值與渦輪轉速(rpm)比較

引擎轉速 rpm	A/R 0.49	A/R 0.30
	排氣管口徑 40mm (渦輪轉速)	排氣管口徑 40mm (渦輪轉速)
1000	7851	1310
1500	8390	3252
2000	10182	4012
2500	12428	8807
3000	18330	16803

以同排氣口徑對不同 A/R 值做比較，可發現排氣管口徑大小需要與渦輪機的 A/R 值做匹配以找出較佳轉動性能。由表 1 可知，0.49 A/R 值的渦輪使用 40mm 口徑的排氣管會有較好的轉動性能。為找出適合渦輪 0.30 A/R 值的排氣管口徑，假設三種不同尺寸的排氣管，分為 20mm、30mm 與 40mm。將三種尺寸分別接上渦輪，測試其渦輪軸的無負

載轉速，如表 2 所示，結果顯示 A/R 值 0.30 的渦輪使用 30mm 口徑的排氣管會有較好的轉動性能。

表 2 不同排氣口徑與渦輪轉速(rpm)比較

引擎轉速 rpm	A/R 0.30		
	排氣管口徑 30mm	排氣管口徑 40mm	排氣管口徑 20mm
1000	8512	1310	2856
1500	12103	3252	6553
2000	18103	4012	16787
2500	24475	8807	21390
3000	29522	16803	27565

從表 2 的數據來看，排氣管口徑變化對渦輪機的運轉性能也具有影響能力。對不同 A/R 值的渦輪機轉動能力有明顯的差異。在低轉速時低排氣流量應用小渦輪的特性，而中高轉速則採用大渦輪，以降低排氣阻力。

#### (五)渦輪機功率測試

排氣渦輪發電機是以渦輪機轉動的力矩來帶動發電機，而發電機功率會影響渦輪轉動時的能力，當渦輪機轉動的力矩無法克服發電機轉動扭力，渦輪機會停滯不動。因此要將渦輪機與發電機的功率做適當的匹配，就需要研究渦輪機能產生的功率，才能讓渦輪機與發電機連結後產生最大輸出效能。所以，先研究排氣渦輪機在引擎排放廢氣的推力下，能夠產生多少的功率。一般引擎計算輸出功率的方法，是將引擎聯結一部發電機，應用引擎轉動發電機產生的電壓與電流，透公式  $P = I \cdot E$  求得引擎的功率。但學校並無功率計的設備。因此要計算渦輪機功率則需由功率公式（公式 2）來推估。

$$P = T \cdot \omega$$

$$= \frac{T \times 2\pi N}{60} \quad \text{P 是功率、T 是扭力、N 渦輪轉速} \quad \text{----- (公式 2)}$$

$$T = F \cdot r \quad \text{F 是力、r 是作用半徑}$$

由功率的計算式子得知，要計算出渦輪的功率可由渦輪轉速和扭力。渦輪轉速的數據則使用光學感應式轉數計來偵測，而扭力大小則應用彈簧秤來量測渦輪軸受到多大的拉力，如圖 12 所示。



圖 12 彈簧秤量測渦輪軸壓力

從兩個渦輪功率來看，小渦輪在引擎轉速 3000 轉以下，產生的功率較大；而大渦輪在 3500 轉的高引擎轉速區域，會有較大的功率產生，如表 3 所示。因此，將兩個渦輪結合在同一個系統裡，可以產生互補的作用，使引擎在不同轉速所排放出的廢氣可以在大功率的狀態下運轉。

表 3 渦輪功率與引擎轉速比較表

引擎轉速 rpm	小渦輪功率 P	大渦輪功率 P
1500	0.557383	0.568604
2000	1.925097	0.78863
2500	3.483935	1.323561
3000	4.820352	3.37183405
3500	7.079904533	8.431793

#### (六)發電機

本研究考量發電機功率對排氣渦輪機的負載影響，選用 5W 與 10W 兩個無刷發電機。發電機的功率越大，所需的轉動扭力也越大，相對的採用小功率發電機，轉動發電機所需的扭力較小。因此，在小 A/R 值的渦輪上採用小功率的無刷發電機，藉以提高引擎在低轉速區域時的渦輪轉動效能，並提升微量排放廢氣之再生能量轉換效率。本實驗將小 A/R 值的渦輪結合一個 5W 的無刷發電機，而大 A/R 值的渦輪結合一個 10W 的無刷發電機，如圖 13 所示。

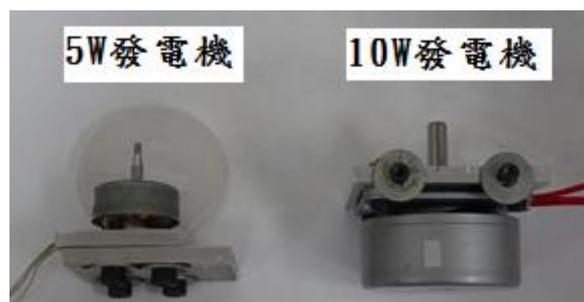


圖 13 5W 發電機與 10W 發電機

## (七)渦輪發電機傳動裝置

渦輪與發電機的傳動裝置需考量聯結固定的穩定性，以避免運轉時的偏擺造成能量傳遞效率上的損失，更嚴重則會造成發電機損壞。本研究的渦輪是報廢車取得，其渦輪軸在運轉時會有些微的晃動，故應用齒輪將渦輪與發電機做聯結傳動，透過兩齒輪接合間隙，容許運轉時渦輪軸偏轉一樣可以咬合傳動。

齒輪是利用 3D 列印機器列印，使用較為耐熱的 ABS 材料，如圖 14 所示。齒輪設計不同的齒數比做變換，可以傳達不同的輸出扭力，我們使用 T15/35 齒、T20/30 齒與 T25/25 齒及 T35/15 齒交叉變換齒輪做測試，如圖 15 及圖 16 所示，試驗結果發現渦輪裝置 T15 齒與發電機 T35 齒的齒輪比搭配，可以讓渦輪在低轉速時有較大的驅動扭力，提高發電機的運轉效率。



圖 14 3D 列印齒輪

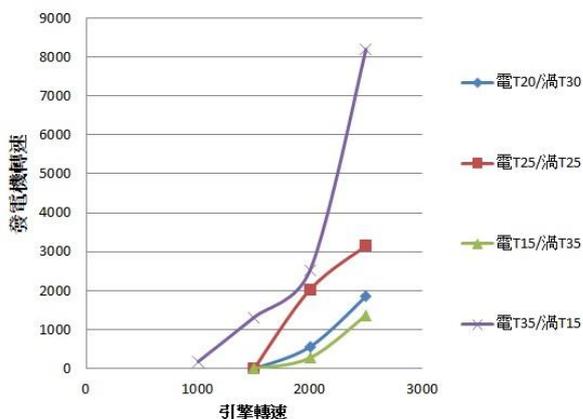


圖 15 齒輪比與發電機轉速比較圖(小渦輪)

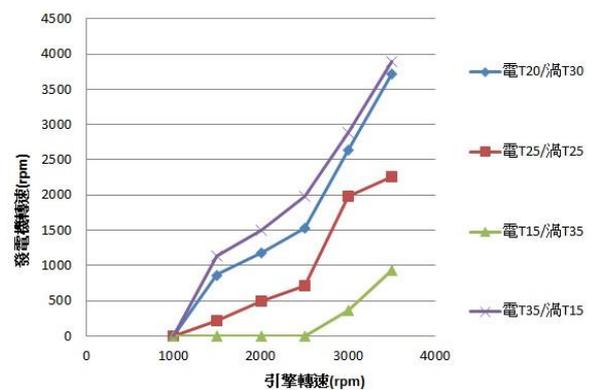


圖 16 齒輪比與發電機轉速比較圖(大渦輪)

## (八)二階段雙渦輪發電機概念

車輛引擎排放廢氣能量是隨各種行駛狀況不斷的變化，採用單渦輪發電機是無法將排氣量能量做適時的轉換。應用大小渦輪對不同排氣能量反應的特性，發展出二階段渦輪發電機的概念，如圖 17 所示。

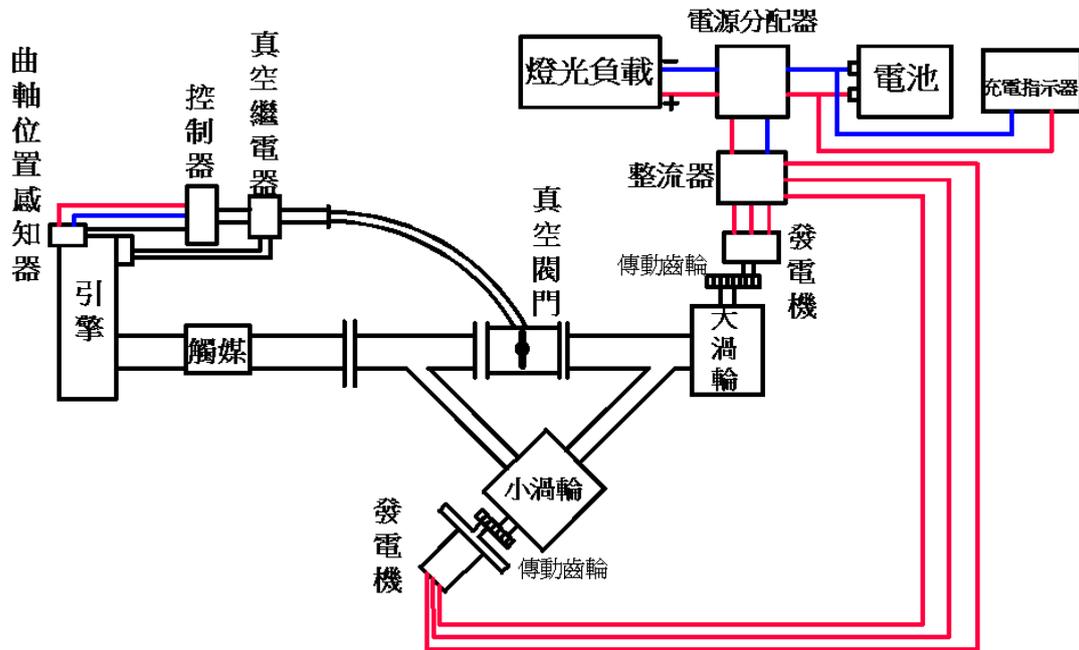


圖 17 二階段渦輪發電機概念圖

## (九)排氣管道設計與製作

### 1. 排氣管道設計

首先，量測兩個渦輪的尺寸，並以研究實驗測試的管路口徑為依據。同時，需考量排氣管的管道設計應避免管路彎曲，以減少排氣阻力產生，並能配合實驗用架上引擎的空間做快速拆裝，讓裝置能靈活變化於實驗。利用 Solidworks 電腦繪圖設計排氣管路的型式，如圖 18 所示。

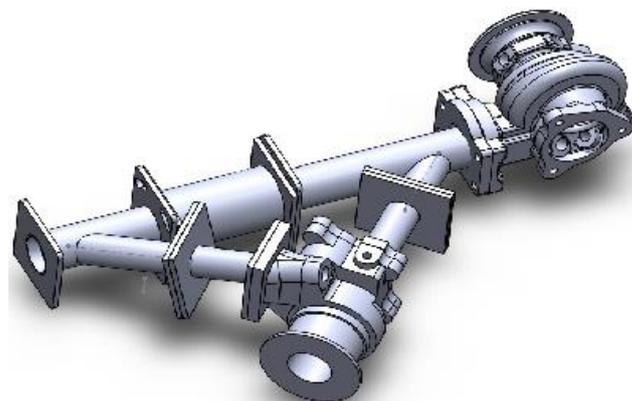


圖 18 排氣管路型式

## 2.排氣管接頭加工

為使管路組裝上可以靈活變化角度，需要製作排氣管路的接頭，可以快速進行拆裝與組合。先利用電腦輔助製造軟體 Mastercam 畫出所要加工的圖形，並指定刀具路徑後，進行各項切削進刀參數的設定，然後轉成 NC 碼。將電腦繪圖設計出所需要的尺寸進行 CNC 機械加工。如圖 19 至圖 21 所示。



圖 19 CNC 銑床

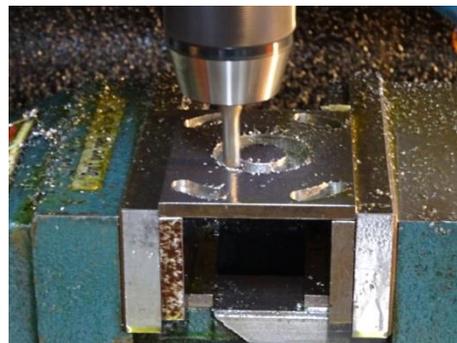


圖 20 銑床銑削



圖 21 排氣管接頭加工成果

## 3.排氣管路焊接

排氣管的材質是使用不銹鋼，採用氬焊機來焊接，如圖 22 所示。



圖 22 排氣管接頭焊接

## 4. 排氣管組裝

各段排氣管焊接完後，將其組合連接，如圖 23 及圖 24 所示。



圖 23 雙渦輪發電機組裝 1



圖 24 雙渦輪發電機組裝 2

## (十一) 感知器、作動器與電路的設計

### 1. 曲軸位置感知器

本研究利用一個霍爾 IC 偵測引擎的轉速，此裝置是在引擎的曲軸皮帶盤上固定一個磁鐵，且調整磁鐵與霍爾 IC 適當的感應距離，讓磁鐵每次迴轉時都可以與霍爾 IC 感應一次，如圖 25 所示。

這個霍爾 IC 共有三條接線，一條為電源線，一條為搭鐵線，一條為訊號電壓，如圖 26 所示。當轉子旋轉時會產生磁力線，使霍爾感知器內部產生出 0V 和 5V 的方波訊號。當曲軸轉速越快，產生的方波數越多，頻率越高。本系統是應用自製的曲軸位置感知器，將引擎運轉的頻率訊號傳送至 8051 的控制面板，作為系統控制的依據。霍爾 IC 感應的頻率訊號傳送至 89C52 控制面板，進行引擎轉速的運算，如圖 27 所示。



圖 25 霍爾 IC 與磁鐵位置圖

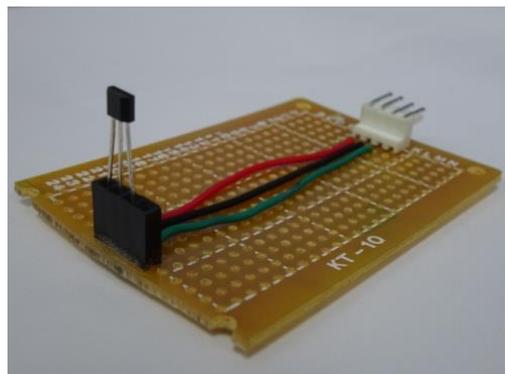


圖 26 霍爾 IC 線路圖

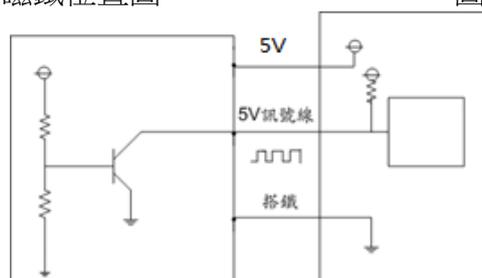


圖 27 霍爾 IC 訊號輸出圖

## 2.繼電器

使用繼電器實現以小電壓控制大電壓設備，並能減少電能在過長的電路傳送中造成的耗損。89C52 微電腦控制器輸出 5V 的電壓，而真空電磁閥是應用 12V 的電源。因此，需使用繼電器來達到電壓的轉換。圖 28 為本實驗所採用繼電器，使控制器的 5V 電壓控制繼電器接通，將 12V 的電壓送到真空電磁閥。



圖 28 繼電器

## 3.真空膜片控制閥門與真空電磁閥

控制閥門主要是引導排氣管氣體流通方向的重要元件，而閥門的啟閉是靠真空膜片的作動，需要真空吸力作為動力源。在車輛引擎系統裡，常見使用進氣歧管中的真空源。因此外接一個真空管路當作真空膜片閥門的真空源。閥門平時是緊閉的，適當時間需要開啟旁通閥門，利用引擎進氣歧管的真空將膜片閥門打開，如圖 29 及圖 30。



圖 29 真空膜片閥門



圖 30 真空電磁閥

系統所應用的真空電磁閥是應用汽車的冷氣真空控制電磁閥。當電磁閥導通時，讓引擎進氣歧管的真空可以用來吸引排氣旁通閥門的真空膜片，使旁通閥門打開。當電磁閥電源切斷時，閥門的真空通道即被截止，除了歧管真空無法吸引旁通閥門的真空膜片外，電磁閥也同時打開大氣閥門，讓旁通真空膜片裡的真空可以排除，使旁通閥門回位。

## (十二)電源輸出設計

車輛引擎在運轉時會因應路況及駕駛習慣而不斷變動引擎轉速，造成排氣能量也是不斷在變化。變化的排氣能量會使渦輪發電機產生不同的電量輸出，而不穩定的電量是無法供給車輛燈光負載。所以，渦輪發電機產生交流電後，需通過整流器將交流電整流成為直流電，直流電連接充電電池將電能儲存與並聯連接一個負載輸出。充電電池在充

電狀態需測量充電電壓來判斷，本研究設計一個充電指示器，當發電機產生的電壓高於電池電壓時，讓 LED 燈路導通，方便顯示充電的狀態，如圖 31 所示。

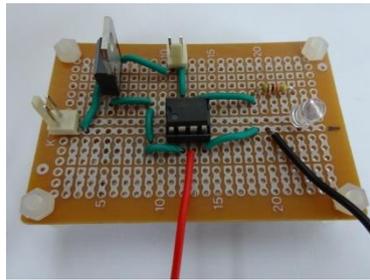


圖 31 充電指示器

### (十三)油門控制器

本實驗採用架上引擎，其油門是一個仿真的油門踏板，在實驗過程中需要穩定控制引擎的轉速。應用人工操作的方式是無法長時間穩定的控制在固定引擎轉速。因此，自行設計油門控制器以微調引擎的轉速，讓實驗時的轉速條件可以在穩定狀態下進行，減少實驗產生的誤差，如圖 32 所示。



圖 32 油門控制器

### (十四)控制程式設計

#### 1. 控制程式設計

控制器需要一個 5V 的電源，在引擎是使用 12V 的電瓶的電源，因此控制器應用這個電源，設計一個降壓電路來進行降壓，如圖 33 所示。

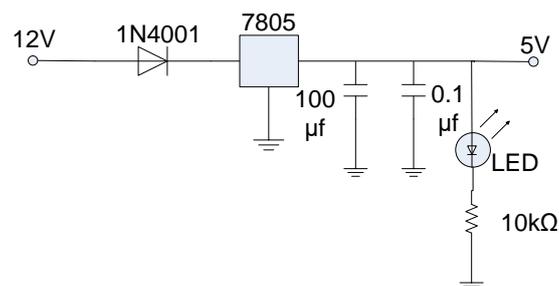


圖 33 降壓電路設計

89C52 上第 9 號腳接上  $0.1 \mu\text{F}$ 、 $10\text{k}\Omega$  與小型按鈕開關，作為開機重置 (power reset) 或手動重置功用。第 18 腳與第 19 腳接上  $12\text{MHz}$  的石英晶體與兩顆  $30 \text{ pF}$  的電容器，使 IC 內部振盪 I 電路產生時鐘波，作為 CPU 執行的基本時脈。第 21 腳為訊號控制電路使用繼電器與電晶體作為開關，利用曲軸位置感知器傳來的訊號決定接通或切斷  $12\text{V}$  的電壓源。使用一個共陽型七段顯示器，由光二極體 (Light Emitting Diode ; LED) 組合而成，同步顯示引擎轉速。其控制線路圖如圖 34 所示，製作成品如圖 35 所示。

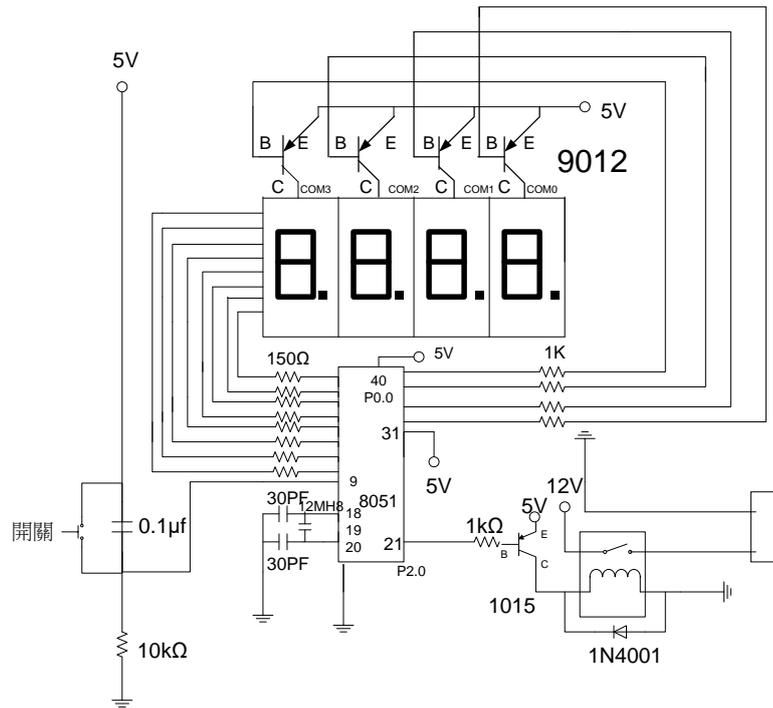


圖 34 89C52 晶片控制線路圖

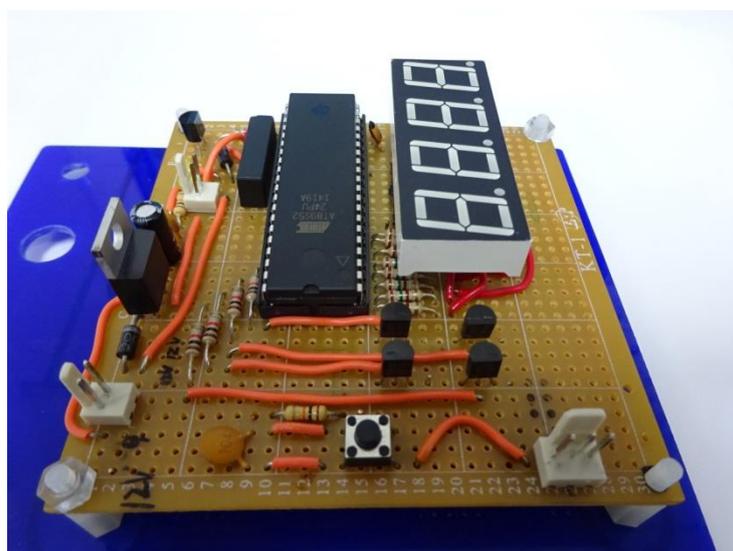


圖 35 8051 控制器

## 2. 控制程式編寫

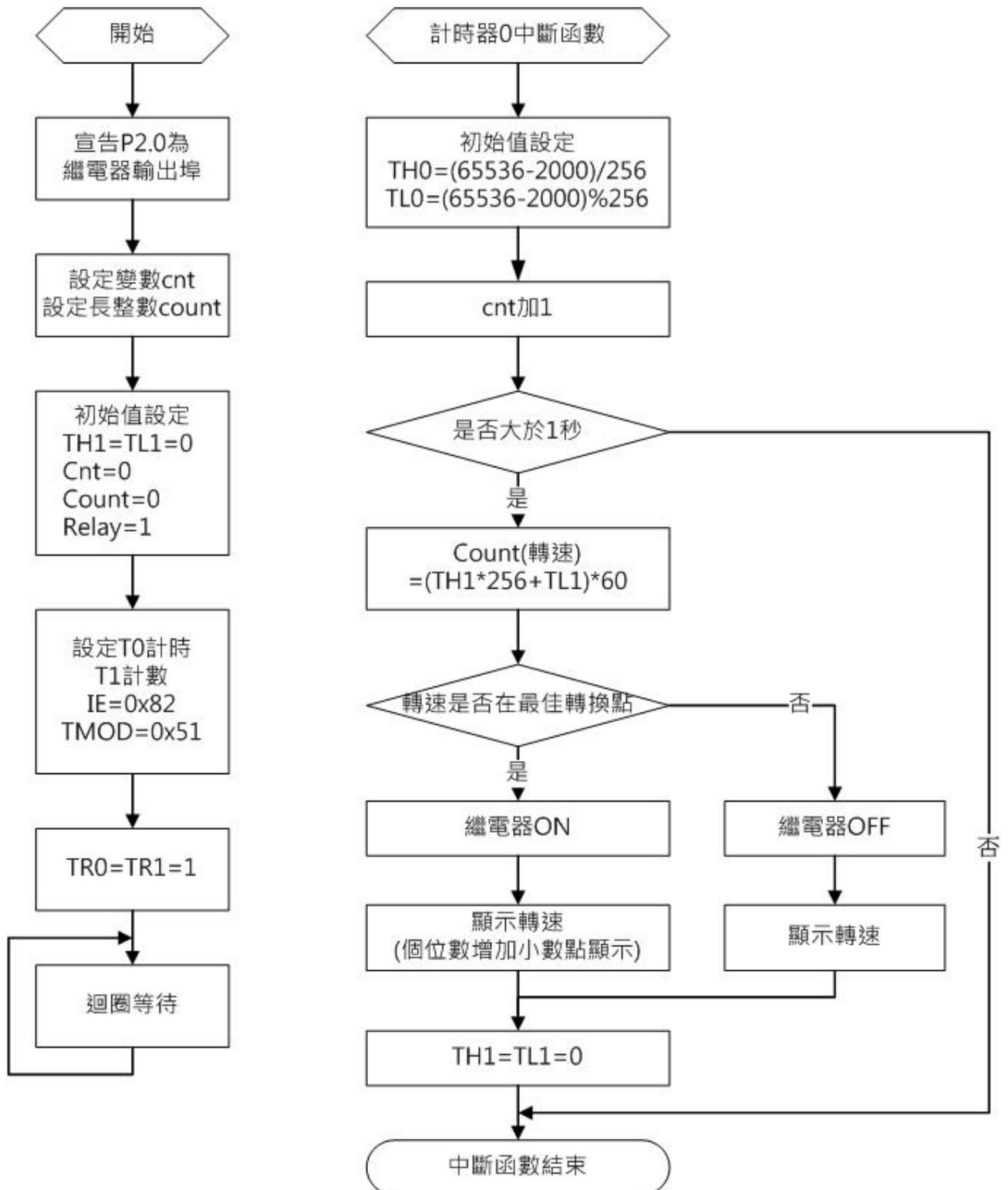


圖 36 控制程式邏輯流程圖

## 3. 控制閥作動時機參數設定

二階段雙渦輪發電機最主要使用一大一小功率的渦輪發電機，因應引擎不同轉速產生不同的排氣量，當排氣能量大時由大功率發電機作用，而引擎在低速運轉時，使用小

功率發電機。當引擎在中低轉速時排氣能量較低，應用小渦輪在低排氣量時的快速轉動特性，讓發電機較容易達到產生電力的轉速。如引擎轉速增加至高轉速時，引擎排氣能量持續增加，適時變換氣體排放管路，讓氣體直接通往大渦輪發電機，小渦輪發電機自行停止運轉。提升渦輪發電機在引擎各轉速區域的範圍，使排氣能量再生的效率提高。小渦輪發電機或大渦輪發電機的作動，則由一個真空膜片控制閥門來控制，閥門開啟時機則依據實驗渦輪發電機的功率及引擎轉速特性曲線圖，如圖 37 所示。

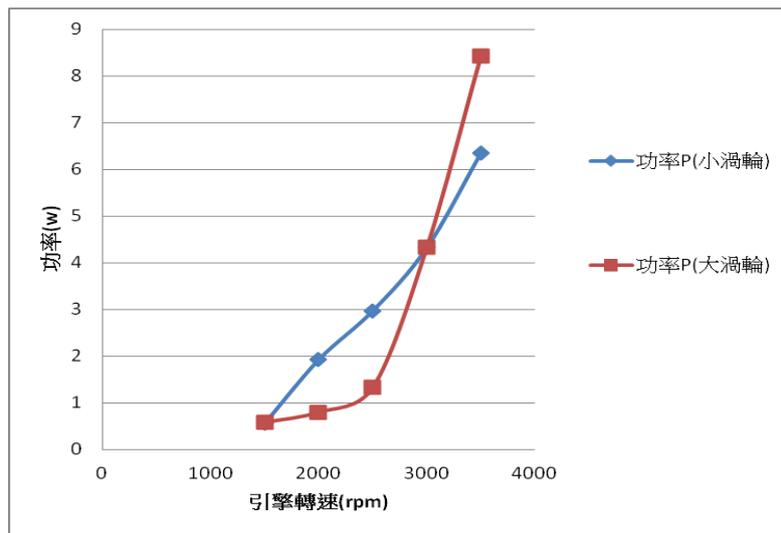


圖 37 大渦輪與小渦輪功率比較

由圖 37 得知，引擎轉速在 2000~3000 rpm 範圍內，小渦輪功率輸出較大。當引擎轉速在 3000 rpm 以上時，大渦輪功率輸出明顯增大。根據此性能曲線圖，當排氣能量在中高轉速區域時，控制器作動將引擎排放氣體的能量作用在大渦輪發電機。以此渦輪功率數據為引擎轉速設定假設的範圍，當低引擎轉速時，排氣旁通閥在關閉狀態，排氣能量通過小渦輪發電機。當引擎轉速達高轉速運轉，排氣旁通閥門開啟，排氣能量則直接通往大渦輪發電機，小渦輪發電機即停止作用。

#### (十五)引擎性能影響分析

車輛廢氣排放發電系統是以達到能源再生為主要目標，同時須考量引擎運轉是否會因系統產生更多能源的損耗。本研究系統的運作必須依賴大量的排氣能量，雖然提升排氣管的壓力可以讓排氣發電系統獲得更大的排氣能量，然而增加多大的排氣背壓會明顯的造成引擎運轉效率的降低。因此，引擎性能影響的程度從排氣背壓和燃油消耗量來探討。

## 1. 排氣背壓

渦輪發電機的運轉能力是靠排氣管內壓力大小來決定。要提升渦輪發電機的運轉效率，就必需適當的設計排氣管的尺寸，適度的增加排氣管內的排氣管壓力。增加排氣管的壓力，則引擎運轉時進氣和排氣的通暢就降低，影響的是引擎運轉時的熱效率。當排氣的回壓增加時，引擎效率就會降低，進而造成較高的燃油消耗。因此在裝置渦輪發電機系統時，需考量排氣背壓的變化情形。應用電子壓力計來偵測系統裝置所造成的背壓，本研究偵測消音器前端及渦輪發電機系統前端，如圖 38、圖 39 所示。



圖 38 消音器背壓測量



圖 39 渦輪發電機背壓測量

圖 40 為壓力計偵測排氣背壓與引擎轉速的關係，可以觀察背壓的變化情形，小渦輪的排氣管徑較小及壓力計安裝位置距離小渦輪較近，其排氣背壓明顯隨轉速增加而增大，排氣管裡的排氣背壓影響較顯著。而大渦輪的排氣管徑較大及壓力計安裝位置距大渦輪發電機較遠，偵測到排氣管裡背壓也相對較小。雖然小渦輪產生的背壓在安裝位置是有明顯的背壓產生。但背壓反應到引擎排氣門出口端位置時，其影響力已相對減低。因此，整體渦輪發電機系統裝置在排氣系統的中後端位置的背壓是否會明顯影響引擎功率的損失，則需進一步從引擎燃油消耗量來驗證。

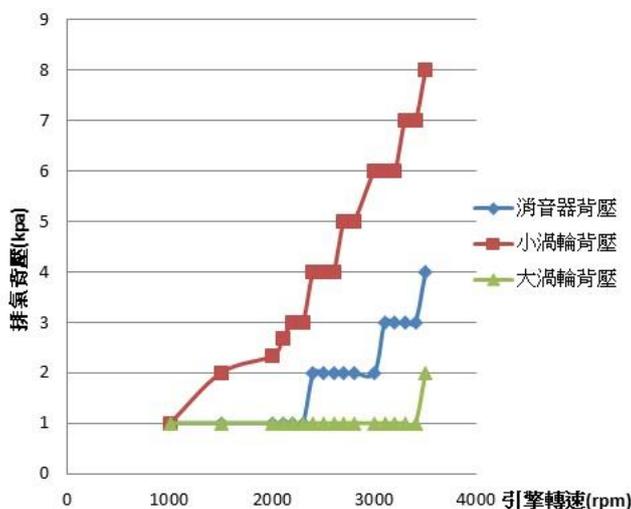


圖 40 排氣背壓與引擎轉速關係圖

## 2. 燃油消耗

排氣管的阻力增減是影響引擎性能的重要因素。當引擎轉速增加時，排氣管排氣阻力明顯增加，造成汽缸吸排氣的損失並影響到引擎容積效率，導致引擎馬力的降低。當排氣系統的背壓增高時，排氣的阻力增加引擎的制動平均有效壓力就會降低，結果造成制動馬力減少。公式(3)顯示制動平均有效壓力與馬力的關係。

$$\text{B.H.P} = \frac{P \cdot S \cdot A \cdot N \cdot C}{K} \quad \text{公式(3)}$$

P：為制動平均有效壓力(lb/in<sup>2</sup>)或(kg/cm<sup>2</sup>)。

S：為行程(in)或(cm)。

A：為汽缸面積(in<sup>2</sup>)或(cm<sup>2</sup>)。

N：為每分鐘的動力次數，四行程 R.P.M/2，二行程用R.P.M計算。

C：為汽缸數目

K：為一常數

公式(4)為燃料消耗率的公式，其是燃油消耗重量與輸出馬力的關係。

$$\text{燃料消耗率} = \frac{\text{每小時燃燒重量}}{\text{輸出馬力}} \quad \text{公式(4)}$$

因此，本研究將排氣背壓變化的參數與燃油消耗量的關係做進一步的實驗，於引擎轉速 1000~3500 rpm 的範圍內進行測試。將每個轉速運轉引擎 10 分鐘，分別測試三次消音器與渦輪發電機裝置於排氣系統時的燃油消耗量。取其平均值，同時分析數據的差異性。

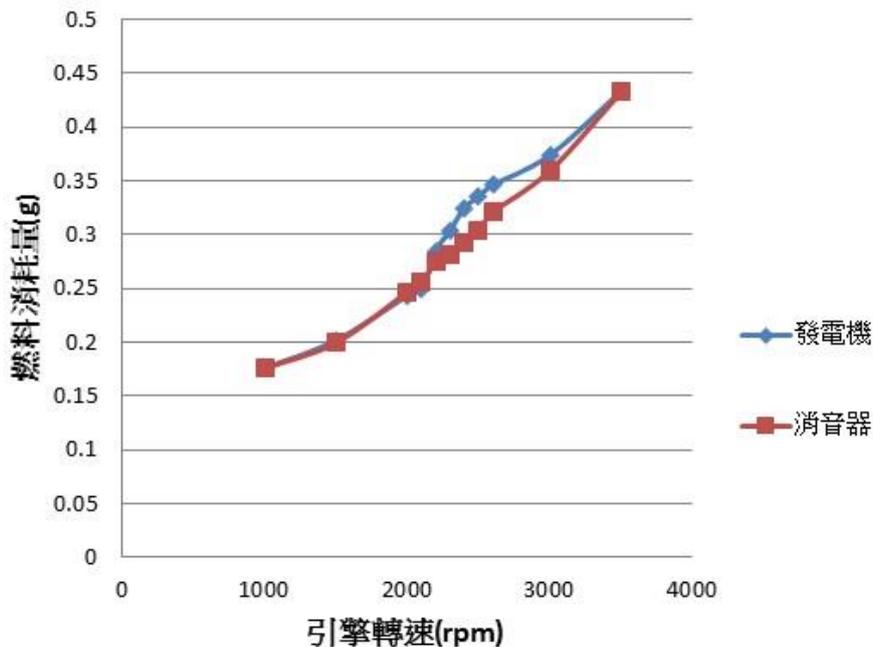


圖 41 燃料消耗量與引擎轉速關係

圖 41 所示為發電機與消音器的燃料消耗量比較。發電機系統設定大渦輪作動時機為引擎轉速 3000 rpm，大渦輪在引擎轉速 3000 rpm 時，排氣發電系統排氣背壓為 1kpa，消音器的背壓為 2kpa，燃油消耗量約增加 3.9%。小渦輪在轉速 2100 rpm 時，排氣發電系統排氣背壓為 2.7kpa，消音器的背壓為 1kpa，燃油消耗量無明顯的增加。當轉速升高至 2200 rpm 時，排氣背壓為 3kpa，消音器的背壓為 1kpa，燃油消耗量增加約為 3%。轉速升高至 2400 rpm 時，排氣背壓升高至 4kpa，消音器的背壓為 2kpa，燃油消耗量增加至 11%。小渦輪在引擎轉速達到 2400 rpm 時，排氣背壓已經明顯造成燃料消耗增加。

在設計車輛廢氣排放發電系統，除了提高發電機的發電能力外，也需要進一步考量引擎燃油消耗量增減。從排氣背壓、燃油消耗量與發電機輸出率的數據考量下，訂定一個能夠達到能源再生並且在不增加引擎負擔的引擎轉速值。由前面的燃油消耗量實驗結果，我們將本研究設定控制閥作動參數為引擎達到 2400 rpm 時，控閥門打開，引擎排放氣體直接通往大渦輪，降低排氣管內的排氣背壓，以減少排氣的燃油消耗量的增加。

## 伍、研究結果

車輛引擎廢氣排放發電系統在完成製作後，測試系統運作狀況及觀察旁通閥門作動情形，檢查系統是否正常運作以及穩定度。當系統運作正常後，聯結量測儀器測量電流與電壓，同時記錄資料，並計算發電機輸出功率。接著，模擬排氣渦輪發電機系統控制閥門於關閉狀態時，小渦輪發電機輸出功率。旁通閥門在全程開啟狀態下，大渦輪發電機作用時發電機輸出功率。最後，比較兩個渦輪的輸出的差異性，找出二階段雙渦輪發電機最佳的控制機制。

### 一、小渦輪發電機輸出功率

排氣控制閥開啟或關閉，會引導排氣能量到大渦輪或小渦輪發電機，讓微能量或高能量的排氣能量做適度的能量轉換。當控制閥設定在關閉模式，使排氣能量強制通往小渦輪發電機，微量的排氣能量經由小功率的渦輪發電機。應用不同的引擎轉速量測小渦輪發電機的輸出功率，如圖 42 所示。

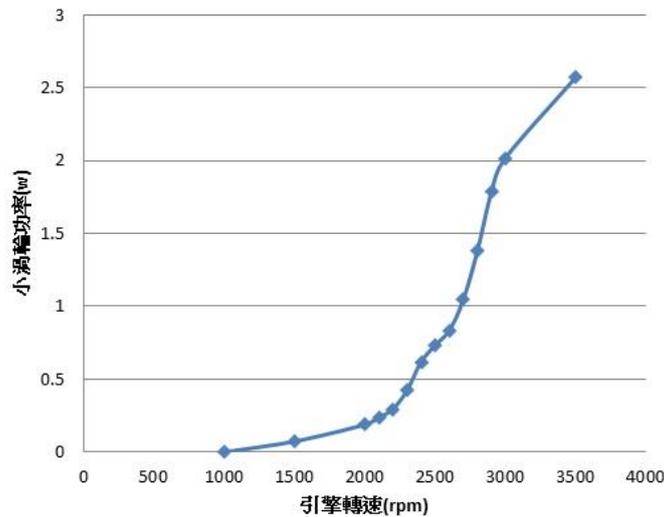


圖 42 控制閥關閉時小渦輪發電機功率

## 二、大渦輪發電機輸出功率

要測試大渦輪發電機在不同引擎轉速區域的輸出功率，設定控制閥門為常開狀態。此時，排氣能量將會直接推動大渦輪發電機，小渦輪發電機則停止運轉，如圖 43 所示。當引擎轉速在 1000 至 2900 rpm 範圍，發電機輸出功率在 1.3W 左右，但引擎轉速超過 3000 至 3500 rpm 時，功率由 2.2W 快速提升至 6.2W 左右，功率顯著的升高。

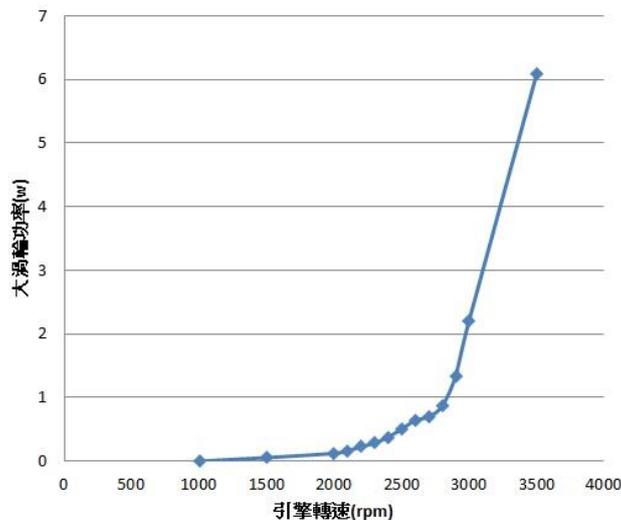


圖 43 控制閥常開時大渦輪發電機功率

## 三、大渦輪與小渦輪發電機功率差異

觀察圖 44 中大、小渦輪發電機的輸出功率比較，我們發現如果單獨使用小渦輪發電機，當引擎轉速在 2000~2900 rpm 的區域時，小渦輪的功率較大渦輪發電機的輸出功率比高約有 23~38% 左右。引擎在低於 2900 rpm 時，小渦輪發電機能有較高的排氣能量的轉換效率。但轉速超過 3000 rpm，大渦輪發電機的輸出功率迅速的提升，3000 rpm 轉速大渦輪約大 8%，當轉速達到 3500 rpm 時，大渦輪功率大於小渦輪約 57%。因此，適時的切換大、小渦輪，使能量的轉換效率更顯著的提升。

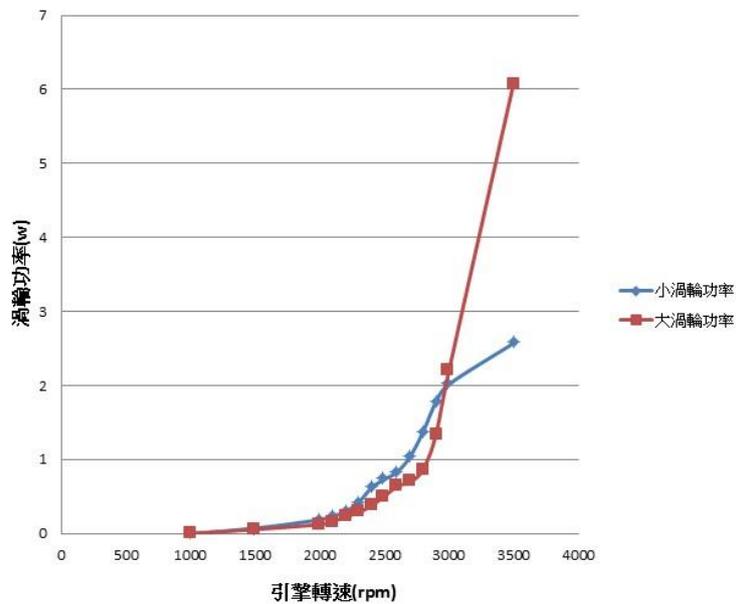


圖 44 大、小渦輪發電機功率

#### 四、二階段渦輪發電機功率輸出

二階段渦輪發電機系統中，大渦輪和小渦輪的作動是由控制閥門的開啟與否來決定。圖 45 所示為引擎在 1000~3500 rpm 運轉下發電機的輸出功率。當引擎在低速時運轉，排氣管的排氣能量經由小渦輪發電機，讓低排氣能量讓小渦輪發電機在低引擎轉速區域下輸出電能。當引擎轉速超過 2400 rpm 時，控制閥門開啟，減少排氣背壓對引擎效能的影響，高速運轉下的引擎排氣能量直接流通到大渦輪發電機。

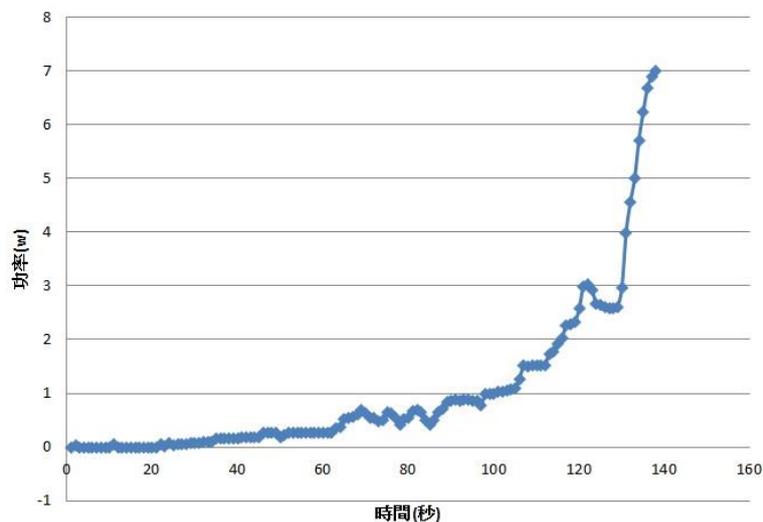


圖 45 兩階段發電機系統功率輸出

#### 五、控制閥作動時機對功率影響分析

排氣控制閥門的作動除了決定大渦輪或小渦輪的作動時機外，更能適時的減少排氣管路內的壓力。本研究將引擎運轉 2000 至 3000 rpm 範圍內，分別測試控制閥門作動轉速在 2400 rpm 與 2650 rpm。如圖 46 所示，綠色趨勢線為 2400 rpm 作動轉速，橘色為 2650 rpm 作動轉

速。比較兩種顏色的分佈圖，可以進一步的瞭解兩條趨勢線在低轉速區域與高轉速區域的功率輸出情況。另外，以引擎轉速 2650 rpm 為控制轉速，當引擎運轉在 2400~2650 rpm 的範圍內，發電機功率輸出有些微的增加。因此從實際控制閥作動時機對功率影響分析，可以更明確的瞭解最佳的控制參數的設定，除了能保持低引擎轉速的較高功率輸出外，還能維持較低的燃油消耗量。

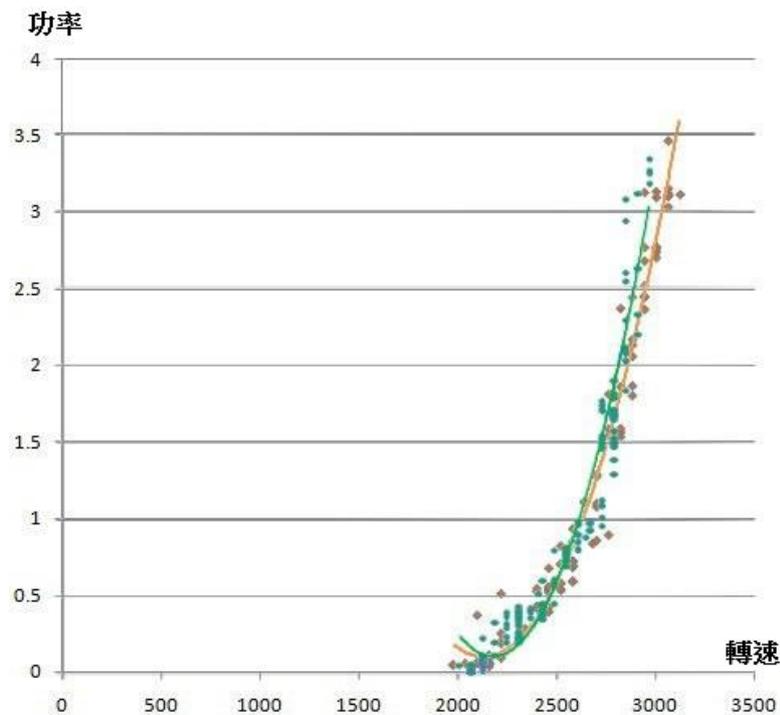


圖 46 控制閥作動轉速對功率影響

## 六、排氣噪音分析

車輛引擎運轉過程中，排氣管路中排放廢氣產生的高壓脈衝噪音是非常擾人。通常在排氣管尾端設計一個消音器裝置，來消除排氣噪音。本實驗將車輛上之消音器拆除，並安裝二階段雙渦輪發電機，發現在測試引擎時，雖然無裝置消音器，但排氣管路的噪音極小並未因而增加。為更明白噪音的差異，使用噪音計來檢測音量的大小。噪音實驗應用三種不同的情況，分別為裝置消音器與二階段雙渦輪發電機系統，並依據不同的轉速量測噪音變化，如圖 47 所示。

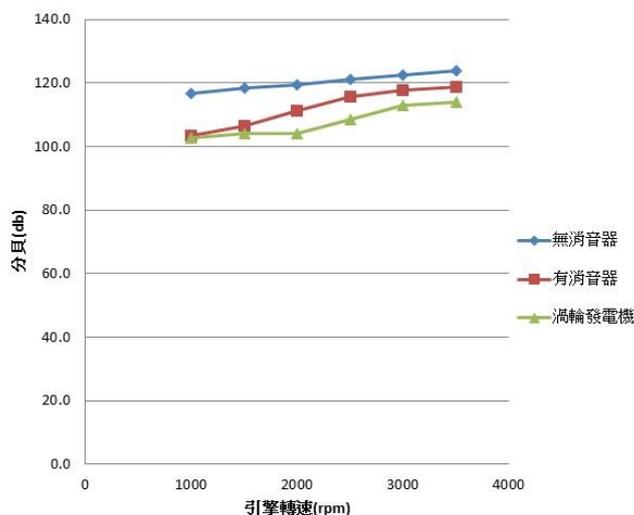


圖 47 有無消音器及渦輪發電機音量分貝比較圖

從實驗結果發現，應用二階段雙渦輪發電機可以讓車輛引擎排氣噪音減少。引擎轉速 1000 rpm 以下，雙渦輪發電機系統與排氣消音器的噪音值無明顯的差異。然而，引擎轉速在 1500 rpm 至 3500 rpm 高引擎轉速時，渦輪發電機系統比消音器產生的噪音值低約 2~7%。探究其原因，是因裝置排氣渦輪發電機，在此引擎運轉時，排氣噪音由兩個渦輪共同吸收。當引擎運轉從 1000 至 3500 rpm 的轉速範圍內，排氣能量傳遞到渦輪發電機系統，由系統管路結構與渦輪發電機共同吸收高壓脈衝的噪音。因此，渦輪發電機能夠有效的抑制引擎排氣時產生的噪音。

## 陸、討論

1. 進行車輛廢氣排放發電系統研究時，首先遇到的困難是尋找實驗用的渦輪不易，儘管近年來使用渦輪增壓引擎漸增，但報廢車輛的車齡大多十幾年以上，過去不普遍的情形下，要從報廢車上找到一個較正常的渦輪相當不易。本實驗使用渦輪的軸承間隙造成轉軸偏擺和漏油的情形不是很大，屬於尚可接受的範圍裡。

2. 引擎轉速與廢氣排氣流量的控制是有相當的關係，此次使用的架上引擎是應用在汽車維修上，並非實驗研究專用的引擎，透過設計的油門踏板調整器，讓引擎的轉速能夠達到運轉。因此，經常需要反覆的操作來求得實驗數據。

3. 渦輪機與發電機的聯結傳動裝置是需要重量輕且強度大的材料，但無法找到堅固又輕量化的金屬材質，本實驗利用 3D 列印機器列印齒輪，使用較為耐熱的 ABS 材料。

4. 二階段雙渦輪發電機系統需設計一個適合排氣渦輪專用之發電機，以提高能量再生之效率。進一步思考如何提高低排氣能量的驅動性能與結合消音器功能的裝置，可作為未來進一步突破的項目。

## 柒、結論

節能減碳意識抬頭下，如何將車輛引擎排放廢氣能量再利用，是一個值得探索的系統開發研究。本研究建置的二階段雙渦輪發電機系統，考量系統設備體積需能整合到車輛底盤，將原車輛上的消音器拆除，卻透過雙渦輪的運作達到更好的降低噪音效果，兼具車體美觀與減噪效果。在實際發電效能分析上，模擬車輛正常駕駛的引擎轉速表現，透過排氣管徑的變化探索渦輪的反應能力、引擎排氣背壓與燃油消耗影響及小渦輪對低排氣流量高能量轉換效能特性，經過實驗設計應用一組控制閥門，啟動控制於引擎轉速 2400 rpm，適時切換大小渦輪發電機運作機制，減少小渦輪發電機系統對引擎排氣背壓的影響，抑制燃油消耗量的增加。當引擎轉速超過 2400rpm 以上時，排氣管路適時轉換至大渦輪發電機，提升高排氣能量的廢氣能量的轉換率，並減少引擎在中高轉速時的排氣阻力增加，提高引擎在高排氣流量的順暢。同時改善傳統引擎排氣系統上因固定的排氣管路設計，造成引擎高速時產生較高的排氣背壓，進而影響引擎高速運轉的性能。

本研究採用的大小渦輪的變化運作機制，除了能將廢氣能量轉換為電能外，也能適時調整排氣管路的背壓，提高引擎的性能。因此，本研究車輛引擎排放廢氣發電系統，確實有其建置之必要性與實用性。

## 捌、參考資料

- 林克衛（2006）·電熱材料在汽車廢熱回收的應用·*車輛研測專刊*，**2006-09**，26-27
- 林柏村編著（2007）·*機件原理I*·台南市：復文圖書。
- 林盈琮與賴威良編著（2011）·*機械力學I*·新北市中和市：新文京。
- 陳文慶、吳心穎、蔡正樑、高文雅編著（2011）·*專題製作*·台南市：復文圖書。
- 陳永昌編著（1991）·*汽車引擎*·台北市：新科技書局。
- 陳海清編著（2011）·*機械力學II*·新北市：全華圖書。
- 黃振東、徐振庭（2013）·熱電材料·*科學發展月刊*，**486**，48-53。
- 黃靖雄（2002）·*現代汽車引擎*·臺北市：全華科技圖書。
- 楊成宗、王之政編著（2000）·*汽車增壓器*·臺北市：全華科技圖書。
- 溫宗修（2009）·*風力發電機之混合式最大功率追蹤法*（未出版的碩士論文）·臺北市：大同大學電機工程研究所。
- 趙楠楠（2012）·*發動機排氣系統優化設計及應用分析*（未出版的碩士論文）·武漢市：武漢理工大學汽車工程學院。
- 劉崇富譯（2003）·*汽車學(一)：汽車引擎*（10版）·臺北市：美商麥格羅希爾。
- 蔡欣正編著（1999）·*汽車引擎的理論與技術*·台北市：全華科技圖書。
- 簡名硯（2011）·*小型水平軸式風力發電系統之研製*（未出版的碩士論文）·臺北市：大同大學航空太空工程學系。

## 【評語】 052306

1. 本作品利用汽車廢氣推動渦輪發電，並同時可減少排氣的噪音。
2. 作者成功地利用實習引擎、自行設計的管路構件、整流及配電電路證明想法的可行性。
3. 對於低轉速及高轉速狀況，個別設計小渦輪小瓦數發電機及大渦輪大瓦數發電機，雖說是個不錯的解決方案，但還是造成管路和系統過於複雜，單一渦輪設計配上較好的發電機設計是有機會簡化設計。