

以返馳式電路架構為基礎之可規劃電容放電式點火系統研製

蔡政道

國立勤益科技大學
電機工程系

E-mail: cttasai@ncut.edu.tw

蘇志超

國立勤益科技大學
電子工程系

E-mail: jc07@ms34.hinet.net

林正乾

國立勤益科技大學
電機工程系

E-mail: mutilin@ncut.edu.tw

摘要

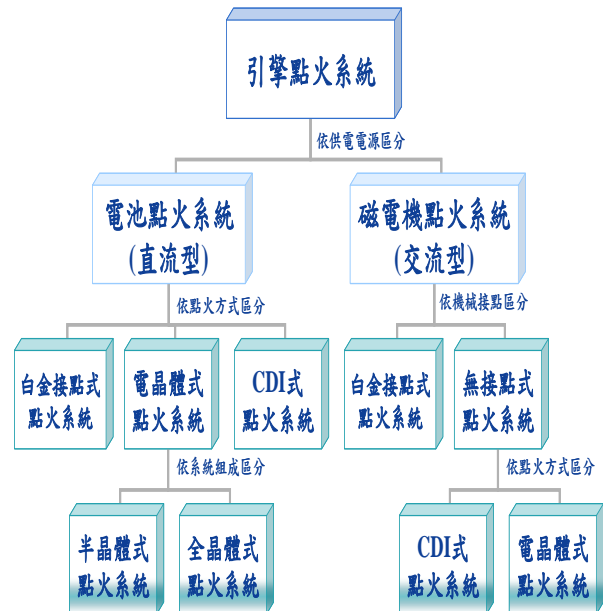
本文主要針對油電複合動力機車之引擎點火系統進行研製。由於複合動力機車是以引擎做為在高速行駛期間的主要動力來源，因在引擎啟動與運轉時，需要一個點火系統來點燃汽缸內的可燃混合氣，並產生壓力去推動汽缸內活塞向下運動並驅動曲軸旋轉，所以點火系統在機車引擎中有著十分重要的角色。火星塞點火能量必須要足夠大，否則點火能量太小，就不能點燃汽缸內的混合氣，引擎也無法正常運行。另外正確的點火時間或點火角度更是關鍵，因為它是影響引擎性能的最重要參數之一，點火的過早或過遲都會直接影響到引擎的經濟性和動力性。因此本文針對複合動力機車之點火系統提出一種以返馳式電路架構搭配單晶片控制之電容放電式點火系統，可以有效提供火星塞足夠的能量及正確的點火角度，大幅降低火星塞點火失敗率。

關鍵詞：油電複合動力機車，可燃混合氣，返馳式電路，單晶片，火星塞。

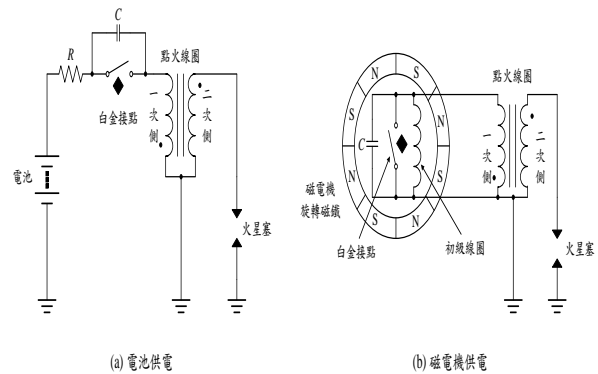
1. 前言

影響引擎性能的主要因素是充分的壓縮壓力、適當混合比的混合氣和火星塞適時強烈的火花。在引擎動作上，沒有火花點燃混合氣，就不能燃燒。由於這個特點，引擎可以根據運轉狀態，適時地點火燃燒。為了使引擎汽缸內獲得點火的火花，必須裝用產生電火花的裝置，與此相關裝置就是點火系統。

一般引擎點火系統可分為電池供電點火系統與磁電機供電點火系統兩大類，而前者又稱為直流型點火系統，後者亦稱之為交流型點火系統。另外，從點火方式的不同來分類，則有白金接點式點火、電晶體式點火和電容放電式點火。若從機械接點開關的角度來看，則點火系統又分成接點式和無接點式兩種，如圖一所示。圖二(a)所示為電池供電之白金接點式點火電路，係利用機械式白金接點和電容，以斷續點火線圈之初級線圈電流，讓次級線圈誘生出高壓電，以供火星塞使用。當白金接點閉合(on)時，電流流經點火線圈之初級線圈，將能量儲存於初級線圈。當白金接點開啟(off)時，



圖一、點火系統的種類。

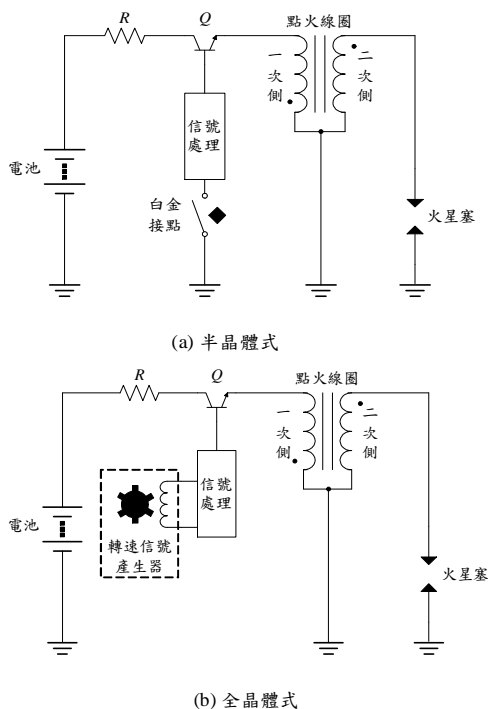


圖二、白金接點式點火電路。

點火線圈之一次側電流中斷，初級線圈所儲存之能量，因磁通的變化而誘生感應電動勢，這些所感應之電動勢將透過點火線圈轉移到二次側，使得二次側產生極高的感應電動勢，供給火星塞使用，以產生跳火現象。另外，磁電機供電之白金接點式點火電路，如圖二(b)所示，其動作原理與電池供電之白金接點式點火電路相同。所不同的是磁電機供電點火電路，其本身藉由磁電機產生交流電流供給點火線圈的初級線圈，當電流達最大值的瞬間，白金接點開啟(off)，一次側電流因中斷而讓二次側誘生高壓電。

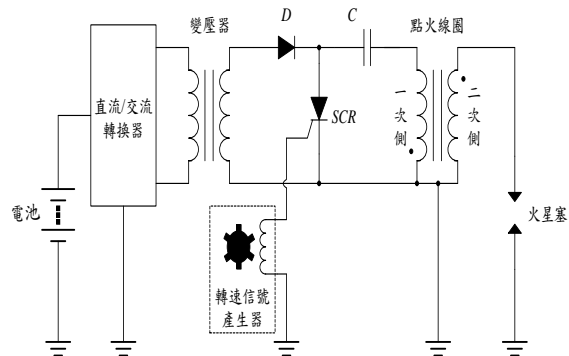
由於白金接點式點火電路是直接利用白金接點開關來斷續點火線圈的一次側電流，容易產生接

點火花，消耗部份電磁能，難以獲得較理想的高壓點。因此，電晶體式點火電路應運而生，其乃利用電晶體的開關作用，以斷續點火線圈的一次側電流。在電晶體的控制上，若利用白金接點開關来控制電晶體式點火電路，在此稱之為半晶體式點火電路[1]-[2]。圖三(a)所示為電池供電半晶體式點火電路，其利用電晶體來斷續點火線圈一次側電流，讓白金接點只承受極小的控制信號電流，不致於產生接點火花，較易獲得穩定的高壓電。但使用白金接點開關所引起的困擾仍然存在，例如接點污損、磨耗，及運轉中點火間隔不穩定等現象。除了利用白金接點控制電晶體外，尚可利用轉速信號產生器提供一個點火信號来控制電晶體導通或截止。此種不採用機械式白金接點開關的點火電路，稱為無接點式點火電路，在此又稱之為全晶體式點火電路[2]。圖三(b)所示為電池供電全晶體式點火電路，因沒有任何機械接觸部份，無開關接點的困擾，所以具有故障率低、免保養之優點。



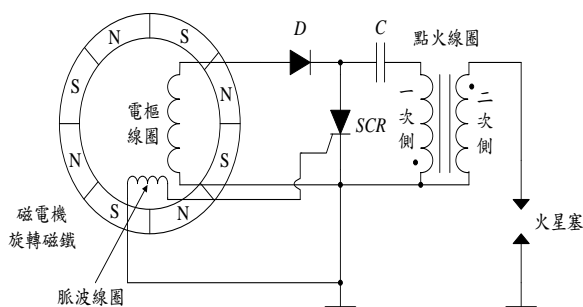
圖三、電池供電之電晶體式點火電路。

圖四所示為電池供電之電容放電式點火電路，其動作主要是由電池供電經直流/交流轉換器可得交流電，透過變壓器轉換成約200~300V的交流電，再經由半波整流二極體D對電容C充電。當需要點火時，轉速信號產生器將送出一個開極驅動信號讓矽控整流器(Silicon Controlled Rectifier: SCR)導通，而當矽控整流器SCR導通之後，充滿能量的電容將經由點火線圈的初級線圈瞬間放電，此放電能量將使點火線圈之二次側誘生出高壓電。



圖四、電池供電之電容放電式點火電路。

若電容放電式點火電路其電源不採用電池供電，則可直接利用磁電機所產生之200~300V的交流電，一樣經由半波整流二極體D對電容C充電。在需要點火期間，同樣利用脈波線圈提供開極信號，使矽控整流器SCR導通，讓已充滿能量的電容C瞬間經由點火線圈的初級線圈放電，使得二次側誘生出高壓電，如圖五所示。



圖五、磁電機供電之電容放電式點火電路。

由於磁電機供電之無接點電容放電式點火電路的開發，農機和機車引擎等廣泛的使用，其有效減少白金接點開關所產生的困擾，尤其是農機引擎在不使用期間，很容易因白金接點生鏽而造成啟動困難的現象。因此，無接點電容放電式點火電路之優點如下：

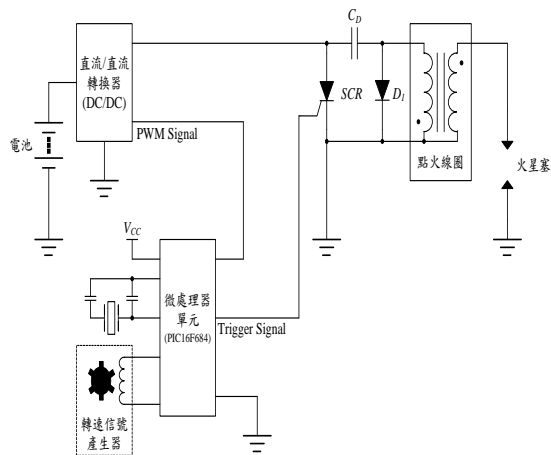
- (1) 不會因白金接點開關的問題而產生困擾。
- (2) 點火正時、點火間隔穩定。
- (3) 無磨耗部份，經久耐用，不會因引擎轉速變動而造成點火時期不穩定的現象。
- (4) 提升對火星塞耐污染的跳火性能優越。

最後，因無接點電容放電式點火電路性能優越，且可靠度高，已經取代有接點式點火電路，廣泛應用在各類機車引擎上。目前的產品不是以蓄電池輸入直流12V的電源就是由磁電機交流供電的電源，但在本文研究的油電複合動力機車的點火電路中，需要的是直流48V的輸入電源，由於尚未有廠商製造此種規格的點火電路。因此，本文將研製一個以蓄電池組，其提供電壓為48V之無接點電容放電式點火系統。此點火系統搭配單晶片之程式控制，可以提供足夠的能量及正確點火角度，使火星塞降低其點火失敗率。

2. 電容放電式點火系統架構分析

一般傳統電池供電電容放電式點火電路，如圖四所示，其通常都是由直流/交流轉換器、變壓器、整流二極體、放電電容和矽控整流器所構成的，此類型之點火電路通常輸出電壓不穩定，導致引擎在低速時，輸出電壓較高，供給火星塞之能量太過充裕，造成能量浪費；而在高速時，輸出電壓反而變小，能量供給火星塞又會有所不足，甚至有時會造成高速時，火星塞無法點燃汽缸內的混合氣，使引擎無法正常工作。以及其點火時間無法於電路本身自行規劃，則是需要適度的調整點火提前機構，讓應用上更為繁雜。因此，本章將依據上述這些問題，對電池供電電容放電式點火電路加以改善，為了符合本文所研究的複合動力機車之電源系統，將設計成輸入電壓 V_{in} 為直流48 V的系統，未來亦可改為輸入電壓 V_{in} 為直流12 V的系統，應用於傳統的機車引擎上，也可以附加其他功能，將可降低引擎之油耗。

本文提出一種具可規劃點火時間之電容放電式點火電路，藉由車內的電池及點火線圈供給電源及信號，用以控制引擎的動作，圖六所示為所提出之整體點火系統的架構圖，包含了直流/直流轉換器、放電電容、矽控整流器、轉速信號產生器、點火線圈、火星塞和微處理器等。藉由微處理器的應用，以讓本章所提出之點火系統可進一步規劃點火時間，增加了整個點火系統應用上的優勢[3]-[5]。而內部之直流/直流轉換器，採用返馳式電源轉換器應用於電容放電式點火電路上，以減少傳統上使用變壓器的缺點[6]-[9]，以及不因高、低速而造成輸出電壓 V_o 不穩定的情形，皆可供給火星塞足夠的能量使用，減少火星塞點火失敗率。



圖六、本章所提出之整體電容放電式點火系統架構。

在圖七中，是以返馳式轉換器架構提供電能給電容放電式之點火系統，主要是對放電電容 C_D 充電，儲存點火所需之能量。當需要點火時，轉速信號產生器將送出信號至微處理器，這時微處理器將提供一個開極驅動信號讓矽控整流器 SCR 導通，而

在矽控整流器 SCR 導通之後，充滿能量之放電電容 C_D 將經由點火線圈的初級線圈瞬間放電，此放電能量將使點火線圈之二次側誘生出高壓電，提供火星塞使用。當電路操作在點火時可分成以下4個模式，其等效電路及相關元件之電壓、電流波形如圖八與圖九所示。

模式1 [$t_0 \leq t < t_1$]：

當功率開關 M_1 在 t_0 導通時，輸入電源經由變壓器 T_1 將能量儲存於激磁感 L_m ，二極體 D_2 為截止狀態，此時 C_s 所儲存的能量經由電阻 R_s 釋放，其等效電路如圖八(a)所示。

模式2 [$t_1 \leq t < t_2$]：

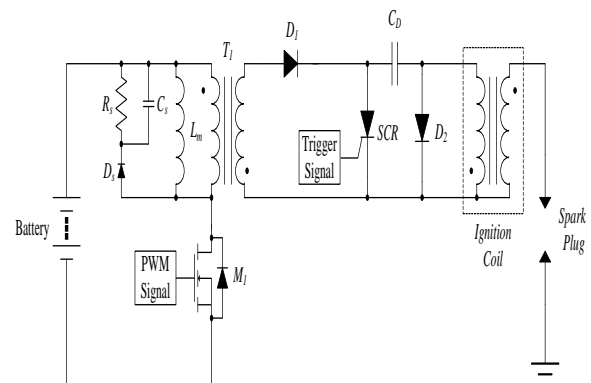
當功率開關 M_1 在 t_1 截止時，激磁感上的能量經由變壓器 T_1 釋放至二次側，迫使二極體 D_2 導通對放電電容 C_D 充電，將能量儲存於放電電容 C_D 上，此時，變壓器 T_1 之一次側漏感能量會經由二極體 D_s 對電容 C_s 充電，以吸收開關 M_1 截止時所造成 di/dt 或 dv/dt 之能量，減少突波，以及分散開關 M_1 之熱源，其等效電路如圖八(b)所示。另外，放電電容 C_D 於 t_3 充至所需之電壓，這時過壓保護電路會動作，關閉開關 M_1 之驅動信號 $V_{GS,M1}$ ，當電壓下降，開關 M_1 之驅動信號 $V_{GS,M1}$ 再度送出，以使放電電容 C_D 能維持在一定的電壓，等待點火時機。

模式3 [$t_4 \leq t < t_5$]：

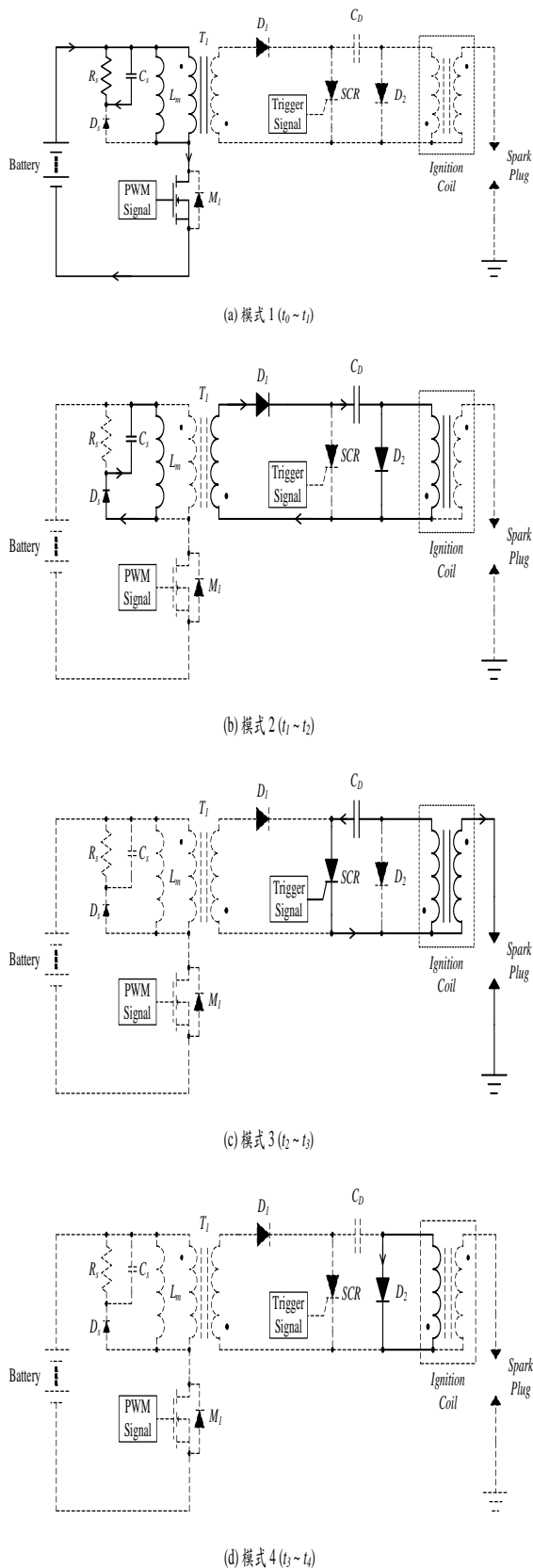
當微處理器在 t_4 時，送出觸發信號 $V_{trigger,SCR}$ 時同時會將開關 M_1 之驅動信號 $V_{GS,M1}$ 關閉，且觸發信號 $V_{trigger,SCR}$ 將使矽控整流器 SCR 導通，其等效電路如圖八(c)所示。此時充滿能量之放電電容 C_D 將經由點火線圈的初級線圈瞬間放電，放電能量將使點火線圈之二次側誘生出高壓電，讓火星塞產生跳火的現象。

模式4 [$t_5 \leq t < t_6$]：

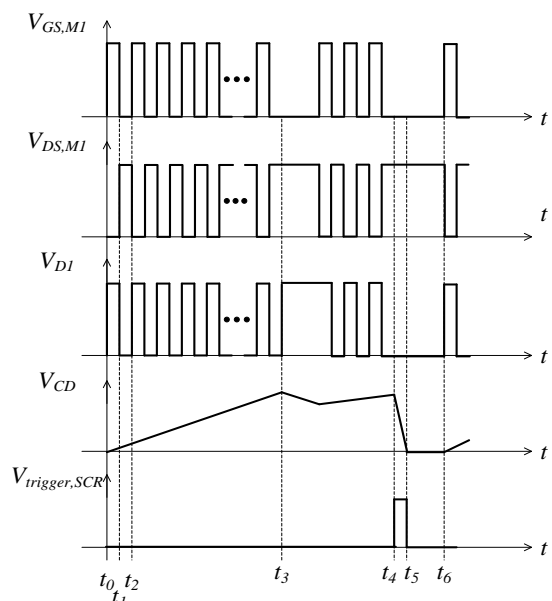
當放電電容 C_D 在 t_5 能量放完時，此時點火線圈的一次側電流要連續，迫使二極體 D_2 導通，其等效電路如圖八(d)所示。



圖七、返馳式轉換器結合電容放電式之點火電路架構。



圖八、返馳式轉換器結合電容放電式點火電路之等效電路。



圖九、返馳式轉換器結合電容放電式點火電路之主要元件電壓波形。

3. 硬體電路設計與軟體程式規劃

根據所提出之返馳式轉換器結合電容放電式點火電路，分別詳細說明其硬體電路之設計步驟和軟體程式流程規劃。並將所得之數據，實際製作一個返馳式轉換器架構結合電容放電式點火系統，並實際應用於油電複合動力機車上，以驗證其可行性。

3.1 硬體電路設計

所研製之引擎點火系統中的直流/直流電源轉換，考量其成本、穩定度和可靠度的問題，以及一般點火系統它的功率需求通常不需要很大。因此，採用返馳式轉換器結合RCD緩衝器來做點火系統上的源供應器，其具有單一個功率開關的電路架構，使得驅動電路容易設計。RCD緩衝器所使用的元件均為被動式元件，故電路設計上較為簡單，並沒有主動式緩衝器的複雜特性。在轉換器的控制方式則採用電壓回授控制電路，以確保輸出電壓的穩定。其整體點火系統設計上大致可分成7個步驟分別說明如下：

步驟一：放電電容之充電時間

因油電複合動力機車中的引擎在正常運轉時，其轉速約為1000 RPM ~ 10000 RPM左右，經由換算可得頻率範圍為16 Hz ~ 166 Hz，即週期為62.5 ms ~ 6 ms。由此可知，點火電路設計上必須在6 ms這段時間內，將放電電容 C_D 充至所需之能量。為了確保能在6 ms時間內，將放電電容充至所需的能量。因此，本章之點火電路設計在0.8 ms的時間即就把放電電容 C_D 充至所需之能量，以供火星塞使用。

步驟二：激磁電感值之決定

在返馳式轉換器中之激磁電感值的決定是根據放電電容 C_D 所需之能量來設計其電感值，對於

放電電容 C_D 所需能量為

$$\begin{aligned} W_{C_D} &= \frac{1}{2} C_D V_o^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 1\mu \times 200^2 = 20000\mu J \end{aligned} \quad (1)$$

而返馳式轉換器之切換頻率為50 kHz，週期即為20 μ s，為了使放電電容 C_D 在0.8 ms充至所需之能量，則需充40週期。因此，每週期需以500 μ J對放電電容 C_D 充電，所以激磁電感值可由下式求得

$$\begin{aligned} W_L &= \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \times L \times 2.5^2 \\ &= 500\mu J \Rightarrow L \geq 160\mu H \end{aligned} \quad (2)$$

在(2)式中，電流 I 設計以2.5 A對激磁感儲能。在設計當中，激磁電感值可得160 μ H，而在使用上通常選用略大於計算值，所研製之點火電路選用200 μ H。

步驟三：功率開關之決定

在功率開關決定上，與一般返馳式轉換器之設計原理相同，當主動開關 M_1 截止時，二極體 D_1 會導通，所以跨在開關 M_1 之 V_{DS} 上的電壓為

$$V_{DS} = V_{in} + \frac{1}{N} V_o \quad (3)$$

此即為開關 M_1 必須承受的電壓應力。而其電流 i_{DS} 則等於一次側激磁感的尖峰電流，可推導出為

$$i_{DS} = \frac{N(I_o + I_{OB})}{(1-D)} = \frac{N I_o}{(1-D)} + \frac{V_o}{2NL_m} (1-D) T_s \quad (4)$$

而輸出二極體 D_1 之耐壓為

$$V_D = NV_{in} + V_o \quad (5)$$

其耐流則為

$$i_D = \frac{I_o + I_{OB}}{1-D} = \frac{I_o}{(1-D)} + \frac{V_o}{2N^2 L_m} (1-D) T_s \quad (6)$$

同樣地在選擇功率開關元件時，會選擇比所計算出來之理想耐壓、耐流高25%~50%的額定值。步驟四：放電電容之決定

在點火系統應用上，其放電電容之材料通常為紙質電容。本文所採用之放電電容為目前傳統上電容放電式點火電路所用的元，如圖十所示為所使用之放電電容實體圖。



圖十、放電電容實體圖。

步驟五：放電迴路元件之選用

在放電電容之放電迴路上，需要有一個可控半導體開關，以控制其放電時的路徑，而在這個可控半導體開關應用上，通常可為矽控整流器(SCR)、功率開關(Power MOSFET)和絕緣閘雙極電晶體(IGBT)等。所設計之點火電路為了降低成本，則選

用SCR，其價格上與Power MOSFET約差10倍左右，雖控制上Power MOSFET較SCR來的容易，但從成本方面考量，則不得不選用SCR當做控制放電路徑的元件。

步驟六：RCD緩衝器之設計

在RCD緩衝器中，電阻 R 的阻值一般選在數拾歐姆，而電容 C 則選在6~10倍之功率開關寄生電容 C_{ds} 的容值。 RC 時間常數必須小於 $1/2 t_{on}$ (t_{on} 為開關 M_1 導通時間)，以確保 C 上之電荷在每週期能放，如此才能發揮緩衝器的功能。選擇上主要的考量為效率和限流。當 C 愈大時， V_{DS} 上升的速率就降低，使得開關切換損失可以降低，不過卻增加了 C_{VDS2} 之損耗；至於二極體 D 的選擇，主要考量為速度和電流額定，大約在2 A額定以內及50 ns以內的逆向恢復時間。RCD緩衝器一般搭配轉換器之切換頻率為100 kHz和功率額定200 W以內使用，其主要的目的仍然在分散開關的熱源，提升其可靠度和延長壽命。本文所用之RCD緩衝器每週期消耗的能量為

$$W_d = CV_{DS}^2 + \frac{V_{DS}^2}{R} \cdot (1-D) T_s \quad (7)$$

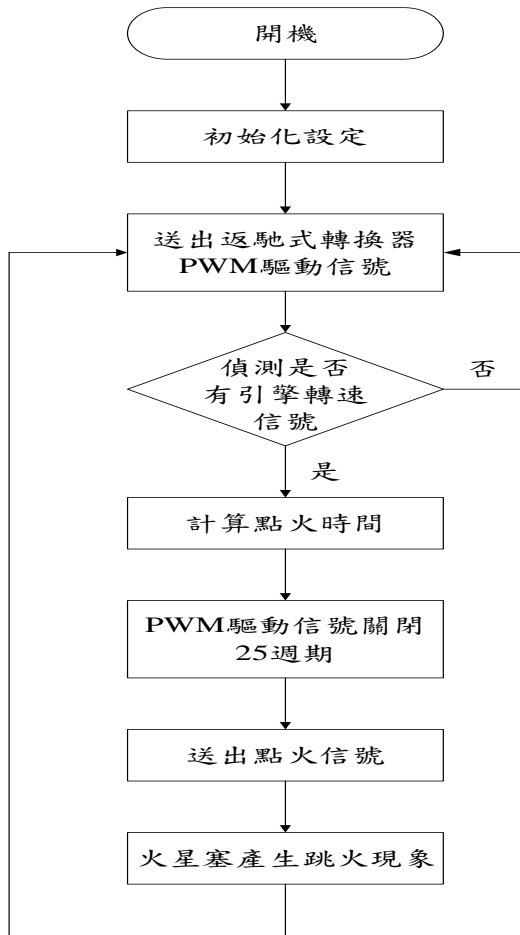
步驟七：點火線圈及火星塞之選用

在選用點火線圈及火星塞方面，所研製之電路選擇現今傳統機車既成的元件。而在點火線圈構造上，通常與高壓導線和火星塞帽製成一體，俗稱『高壓包』，以及其點火線圈之匝數比為1:100。

3.2 軟體程式規劃

所研製的點火電路藉由微處理器的應用，讓點火時間達到可規劃調整之功能，以使點火時間更準確。本章之系統控制以Microchip公司所推出的8-bit微處理器PIC16F684作為核心控制單元，配合其輸入/輸出埠、內建之計時/計數器、類比/數位轉換器和脈波寬度調變產生器，實現所有系統動作流程控制。

圖十一為所研製電路之點火系統軟體程式流程圖，當系統開機後，首先微處理器會進行內部暫存器之初始化設定以及變數宣告，其中初始化設定包含了設定控制器的I/O模組、A/D模組及PWM模組狀態。經過初始化設定後，隨即送出PWM驅動信號，以驅動返馳式轉換器之功率開關 M_1 ，進而使返馳式轉換器開始動作。此時，系統若仍未收到引擎轉速的信號，系統會一直保持於直流/直流電源轉換器之動作，對放電電容 C_D 持續充電，以儲存能量。當系統收到引擎轉速信號後，進入點火時間之計算，經計算完後，隨即送出點火信號之命令，以觸發矽控整流器SCR導通，讓放電電容 C_D 瞬間對點火線圈之一次側放電，這時放電能量將使點火線圈之二次側誘生出高壓電，讓火星塞產生跳火的現象，以點燃引擎汽缸內的混合氣，使引擎正常動作。此外，當點火信號命令送出時，為了使矽控整流器SCR完全截止，即將PWM驅動信號關閉25週期，以讓SCR能完全截止的狀態，避免發生返馳式轉換器之二次側短路，導致電源轉換器之毀損。



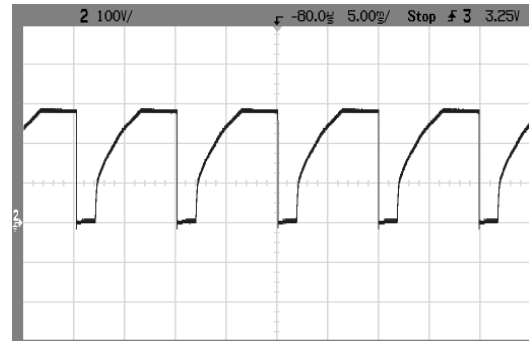
圖十一、所研製電路之點火系統軟體程式流程圖。

4. 實測結果

本節將根據上述之理論分析與設計，實際製作一個返馳式轉換器結合電容放電式之點火電路，做性能之測試，並實際應用於油電複合動力機車之引擎點火系統上，以驗證其可行性。整體系統和電路之架構之點火系統的電氣規格如下：

- 輸入電壓：36 ~ 58 V_{DC}
- 輸出電壓：200 V_{DC}
- 輸出最大電流：0.2 A
- 操作頻率：50 kHz
- 引擎轉速：1000 RPM ~ 10000 RPM

圖十二所示為放電電容 C_D 於點火時的電壓 V_{CD} 波形。圖十三和圖十四分別為返馳式轉換器對放電電容 C_D 充電時之開關 M_1 和輸出二極體 D_1 的電壓波形，在充電過程中，因放電電容 C_D 初始能量很低，一開始則以大電流充電，使轉換器工作於CCM模式，當放電電容 C_D 漸漸充至所需之能量，轉換器變成工作於DCM模式。圖十五為放電電容於不同引擎轉速下點火時之電壓 V_{CD} 波形，從圖十五中可看出，本文所研製之點火電路不管引擎轉速為何，皆可正常工作，使引擎持續運轉。圖十六為火星塞在不同引擎轉速時的跳火現象，轉速愈高火花強度愈強。



(V_D : 100 V/div ; Time : 5ms/div)

圖十二、輸出二極體 D_1 對放電電容 C_D 充電時之電壓 V_D 波形。



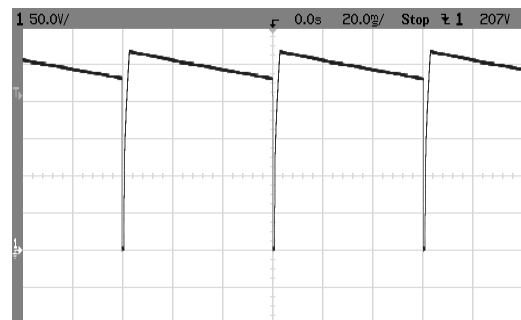
(V_D : 50 V/div ; Time : 10μs/div)

圖十三、功率開關 M_1 對放電電容 C_D 充電時之電壓波形。



(V_{CD} : 100 V/div ; Time : 10 μs/div)

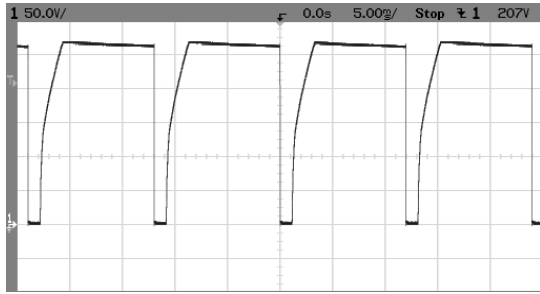
圖十四、二極體 D_1 對放電電容 C_D 充電時之電壓波形。



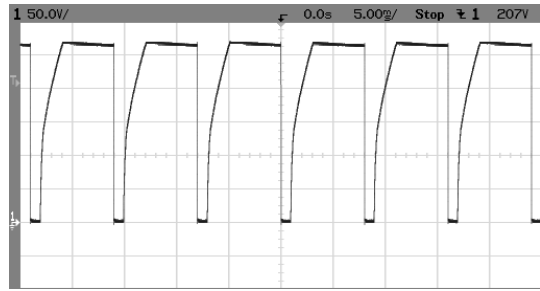
(V_{CD} : 50 V/div ; Time : 20 ms/div)

(a)轉速1000RPM

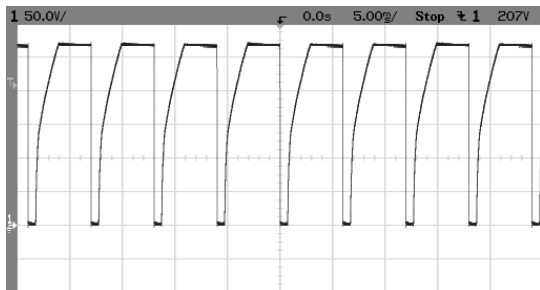
圖十五、放電電容於不同引擎轉速下點火時之電壓波形。



(V_{CD} : 50 V/div ; Time : 5 ms/div)
(b)轉速5000RPM

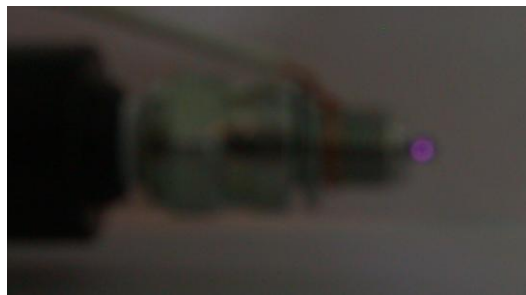


(V_{CD} : 50 V/div ; Time : 5 ms/div)
(c)轉速7500RPM



(V_{CD} : 50 V/div ; Time : 5 ms/div)
(d)轉速10000RPM

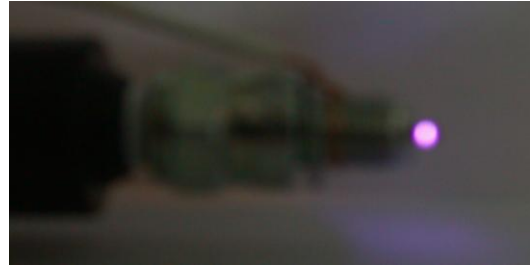
圖十五、續。



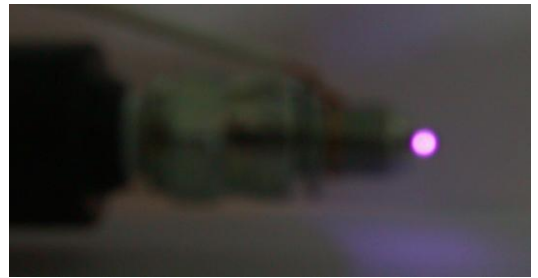
(a)轉速 1000 RPM



(b)轉速 5000 RPM



(c)轉速 7500 RPM



(d)轉速 10000 RPM

圖十六、火星塞在不同引擎轉速時的跳火現象。

5. 結論

綜合上述之各實驗結果，證實本文所提出之返馳式轉換器結合電容放電式點火電路，其應用直流/直流轉換器之原理，配合電容放電式點火方式，使輸出電壓 V_o 。不論引擎轉速如何皆可穩定輸出，且穩定對放電電容供給所需之能量，解決傳統上電池供電之電容放電式點火電路，因引擎的高低轉速所造成放電電容能量不穩定的問題。另外，搭配使用微處理器來處理其點火信號之命令，讓整個點火系統更具有可規劃點火時間之功能，以及可附加其它功能，以降低引擎之油耗及減少污染。

參考文獻

- [1]黃樹林，現代汽車電子點火裝置，正工出版社，1991。
- [2]中國摩托車網，<http://www.mtuo.com>。
- [3]U-CAR 汽車教室網，<http://classroom.ucar.com.tw>
- [4]DENSO 公司資訊網，<http://www.denso.com.tw>
- [5]NGK 公司資訊網，<http://www.ngk.com.tw>
- [6]梁適安，交換式電源供給器之理論與實務設計，全華圖書，1995。
- [7]C. J. Tseng and C. L. Chen, "A Passive Lossless Snubber Cell for Nonisolated PWM DC/DC Converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 45, Issue: 4, Aug.1998, pp.593-601.
- [8]張俊評，同步降壓型直流對直流轉換器效率改善之研究，逢甲大學電子工程研究所碩士論文，2005。
- [9]江成忠，具同步整流之返馳式轉換器，中原大學電機工程學系碩士論文，2006。