

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 具通信功能之車用功率系統晶片--子計畫四：多功能車用 功率積體電路(3/3) 研究成果報告(完整版)

計畫類別：整合型  
計畫編號：NSC 99-2220-E-009-025-  
執行期間：99年08月01日至100年07月31日  
執行單位：國立交通大學電機與控制工程學系(所)

計畫主持人：蘇朝琴  
共同主持人：陳鴻祺  
計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：林群育  
碩士班研究生-兼任助理人員：吳哲璋  
碩士班研究生-兼任助理人員：陳昶志  
碩士班研究生-兼任助理人員：許耿嘉  
博士班研究生-兼任助理人員：林庭佑

公開資訊：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，2年後可公開查詢

中華民國 100年10月31日

中文摘要： 近幾年由於汽車電子技術已有長足的發展，各種電子週邊設備也成爲了汽車的基本功能，這樣的條件下也表示著汽車內部有超過數百條以上長短不一的導線。隨著能源政策及環保意識的推動，全電動方式的電動車已是未來趨勢，而電子設備的使用更達 80% 以上，使得導線總長度更可能超過 1000 公尺以上，從這些問題可發現汽車內部通訊的整合能減少複雜度且降低成本。

本子計劃提出一個使用於汽車上之泛用型功率驅動電路，經由電力線通訊系統傳輸，它可以根據子計畫二的指令提供多樣化的電壓或電流的驅動曲線(Voltage/Current Driving Profile)。主要的目的與挑戰在於以單一電壓(12V)提供多樣化汽車電器所需之驅動功率且利用汽車唯一電力線來達到通訊的功能。本計劃預計採用 0.25um 高壓製程進行電路的設計、製作、與量測。初步以提供 2A 的電流爲目標驗證可行性。

電力線通信系統及可程式功率積體電路是本計畫的二個特點。其工作機制在於利用汽車內部必定具備的電力線傳送訊號到一個可程式的功率積體電路，根據所接受的指令，產生所需要的驅動信號，來驅動被控制的元件。舉凡車用燈具所需的閃爍頻率或亮暗程度、馬達驅動的電流大小與驅動曲線、或電子組件的直流電壓，均可以由此電路提供。如此則能大大的簡化所需之零件、減少線路複雜度並降低所需零件的成本，達到環保與節能的功效。

本計劃所產出的可程式功率驅動積體電路預計可以達到以下之輸出，一、電壓可程式的直流電源以提供電子組件電源，二、頻率、電壓可程式的交流信號以控制燈具的閃爍與亮度，三、功率曲線可程式之馬達驅動電流以驅動馬達。俱備了以上三種功能，多數的汽車電器裝備將可以由此一積體電路驅動。

英文摘要： Development of Automotive electronics technology in recent years. The electronic devices has become the basic of car. With the internal path more than several hundred of the wires. Today, the energy policy and promote environmental is very important. The new one like BEV or HEV car use more than 80% of the electronic devices, making the total length more then 1,000 meters. A combination of power line and communication decrease the complexity of the communication network and make cost down.

This project proposes an universal power driving circuit for automobile applications. It can produce the desired voltage or current driving profile, according to the command. The main purpose is to provide multiple driving needs from a single DC power source. This project will use 0.25um technology to design, manufacture, and measure the chip. The tentative goal is to provide 2A of driving current for the feasibility study purposes.

The distinguishing feature is the programmability and power line

communication. According to the command by the power line network, it can produce the driving signal to driver the driven devices. Not only the flickering frequency and brightness of the light but also the motor driving power profile can be provided by the circuit. As a result, the cost of the device can be reduced significantly.

The proposed programmable power driving circuit is able to produce the following outputs. The first one is the voltage programmable DC power source for electronic equipment, The second one is frequency and voltage programmable for light control. The third one is the power driving profile programmable motor driver. With the above three functions, the majority of the electrical parts in automobile can be driven by this circuitry.

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

具通信功能之車用功率系統晶片一

子計畫四：多功能車用功率積體電路

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 97-2220-E-009 -050 -

執行期間：97 年 8 月 1 日 至 100 年 7 月 31 日

執行機構及系所：交通大學電控所

計畫主持人：蘇朝琴

共同主持人：陳鴻祺

計畫參與人員：林庭佑、林群育、許耿嘉、吳哲瑋、陳昶志

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 100 年 10 月 28 日

# 目錄

目錄 .....	i
研究計畫中文摘要 .....	ii
研究計畫英文摘要 .....	iii
一、前言 .....	1
二、研究目的 .....	2
三、文獻探討 .....	3
四、研究方法 .....	4
4.1 可程式車用功率積體電路設計 .....	4
4.2 數位直流-直流降壓電路設計 .....	6
4.3 誤差類比數位轉換器 .....	7
4.4 數位正比積分微分補償器 .....	8
4.5 二階 $\Sigma\Delta$ 雜訊整型數位脈波寬度調變電路 .....	9
4.6 LED 及馬達設計 .....	10
4.7 模擬結果 .....	10
4.8 FPGA 驗證結果 .....	13
五、結果與討論 .....	17
參考文獻 .....	18
國科會補助專題研究計畫成果報告自評表 .....	19
國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表 .....	20

# 研究計畫中文摘要

## 具通信功能之車用功率系統晶片一 子計畫四：多功能車用功率積體電路

近幾年由於汽車電子技術已有長足的發展，各種電子週邊設備也成為了汽車的基本功能，這樣的條件下也表示著汽車內部有超過數百條以上長短不一的導線。隨著能源政策及環保意識的推動，全電動方式的電動車已是未來趨勢，而電子設備的使用更達 80% 以上，使得導線總長度更可能超過 1000 公尺以上，從這些問題可發現汽車內部通訊的整合能減少複雜度且降低成本。

本子計畫提出一個使用於汽車上之泛用型功率驅動電路，經由電力線通訊系統傳輸，它可以根據子計畫二的指令提供多樣化的電壓或電流的驅動曲線(Voltage/Current Driving Profile)。主要的目的與挑戰在於以單一電壓(12V)提供多樣化汽車電器所需之驅動功率且利用汽車唯一電力線來達到通訊的功能。本計畫預計採用 0.25um 高壓製程進行電路的設計、製作、與量測。初步以提供 2A 的電流為目標驗證可行性。

電力線通信系統及可程式功率積體電路是本計畫的二個特點。其工作機制在於利用汽車內部必定具備的電力線傳送訊號到一個可程式的功率積體電路，根據所接受的指令，產生所需要的驅動信號，來驅動被控制的元件。舉凡車用燈具所需的閃爍頻率或亮暗程度、馬達驅動的電流大小與驅動曲線、或電子組件的直流電壓，均可以由此電路提供。如此則能大大的簡化所需之零件、減少線路複雜度並降低所需零件的成本，達到環保與節能的功效。

本計畫所產出的可程式功率驅動積體電路預計可以達到以下之輸出，一、電壓可程式的直流電源以提供電子組件電源，二、頻率、電壓可程式的交流信號以控制燈具的閃爍與亮度，三、功率曲線可程式之馬達驅動電流以驅動馬達。俱備了以上三種功能，多數的汽車電器裝備將可以由此一積體電路驅動。

關鍵詞：功率積體電路、系統晶片、車用電子、馬達驅動、直流電壓轉換

# 研究計畫英文摘要

## **Automobile Power System IC With Communication Subproject 4 : Multi-function Automobile Power IC**

Development of Automotive electronics technology in recent years. The electronic devices has become the basic of car. With the internal path more than several hundred of the wires. Today, the energy policy and promote environmental is very important. The new one like BEV or HEV car use more than 80% of the electronic devices, making the total length more then 1,000 meters. A combination of power line and communication decrease the complexity of the communication network and make cost down.

This project proposes an universal power driving circuit for automobile applications. It can produce the desired voltage or current driving profile, according to the command. The main purpose is to provide multiple driving needs from a single DC power source. This project will use 0.25um technology to design, manufacture, and measure the chip. The tentative goal is to provide 2A of driving current for the feasibility study purposes.

The distinguishing feature is the programmability and power line communication. According to the command by the power line network, it can produce the driving signal to driver the driven devices. Not only the flickering frequency and brightness of the light but also the motor driving power profile can be provided by the circuit. As a result, the cost of the device can be reduced significantly.

The proposed programmable power driving circuit is able to produce the following outputs. The first one is the voltage programmable DC power source for electronic equipment, The second one is frequency and voltage programmable for light control. The third one is the power driving profile programmable motor driver. With the above three functions, the majority of the electrical parts in automobile can be driven by this circuitry.

Key Words: Power IC, SoC, Automobile Electronics, Motor Driver, DC Converter

# 一、前言

由於科技的進步，汽車的結構日益複雜，越來越多的電子產品被使用在汽車上面。複雜的如 DVD 影像播放器、GPS 導航系統、汽車前後防撞雷達、恆溫獨立空調等等，簡單的如 LED 尾燈、迎賓車門燈、電動天窗、電動窗、電動座椅等等，都可以看到電的影子。平價的車子，電子所佔的汽車成本比重約為 15~25%，而高級車可以佔到超過 50%的汽車成本。這顯示汽車電子的重要性逐年攀升。

更有甚之全球的石油供給量越來越吃緊，預估在 2050 年將耗盡所有的石油，能源危機的不僅不會疏解，反而會越來越重。油電混合車只是過渡時期的產品，氫燃料車又還不成熟，未來的車可能還是比較可能採用全電動方式。如之前在美國加州發表的 Tesla 就是一台全電動的跑車，售價十萬美元，其中的馬達與電源總成由台灣製作。到了電動車的年代，電器設備的使用就會更高，將會達 80%以上。

下圖所示為一個電相關的基本系統，每一個開關、燈具、驅動點，都有一條特定的導線或匯流排，將指令由開關處傳送至儀表板，然後再將動作指令傳到受驅動點。據統計汽車的總共有超過 300 條以上長短不一的導線，複雜的高級轎車甚至有超過 500 條的導線，總長度超過 1000 公尺。以電動窗為例，它就有一條線拉到電動窗的開關處，將開關的指令傳至儀表板後方，再把指令由另一條專線傳至該電動窗，方向燈與車頭燈亦有相同的機制。這些來來回回的線路，使得汽車的繞線非常的複雜。不僅造成維修的困難，也是可靠度一個非常大的威脅。



圖1. 汽車電系統示意圖

下圖所示為汽車電路線的示意圖，實際的複雜度遠超過此一圖示。複雜的繞線，除了提高生產成本與增加維修困難外，也嚴重的影響汽車的可靠度。統計資料顯示，多數的汽車故障與電路系統相關。此一觀察引發了本計畫的構想。

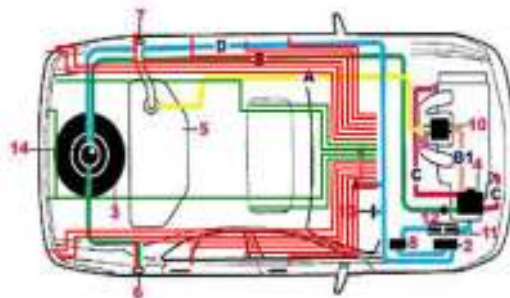


圖2. 汽車電路導線佈局示意圖



本計畫提出一個汽車專用的電源線通訊技術，並結合可程式的功率積體電路，根據所接受的指令，產生所需要的驅動信號，來驅動被控制的元件。以燈具控制而言，方向燈、煞車燈、車內燈、倒車燈、緊急燈等，均有不同亮度與閃爍頻率的需求，LED 與傳統燈泡亦有不同之驅動電壓與模式。以馬達驅動而言，自動車窗馬達、電動座椅、天窗馬達、天線馬達、甚至汽車驅動馬達等，亦有不同的驅動能力與模式。本計畫提出的汽車功率 SoC，能夠經由電源線來傳送指令，並且根據所接收到的指令，調整輸出的電壓電流大小、閃爍頻率、甚至到馬達驅動的電壓電流曲線 (Voltage/Current Profile)。如此，多數的車上電器裝備，都可使用此一晶片進行驅動，而汽車也只會有一條電源線，更有甚之，此電源線為單一條串聯線，不需要向傳統的平行佈線方式。如此則能大大的減少佈線的使用，也能夠提昇汽車的可靠度，降低汽車的生產成本。下圖所示為一個利用本技術所產出的汽車佈線示意圖。

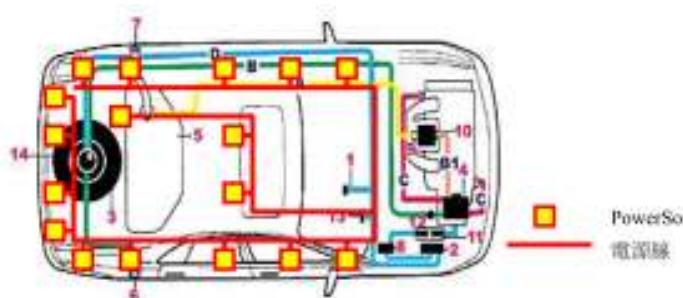


圖3. 本計畫之汽車電路導線佈局示意圖

## 二、研究目的

基本上汽車上的電源有三大用途：

- 提供燈具照明電源：包含頭燈、車內燈、方向燈、剎車燈等。此一電源可以是穩定的直流電源，或者是不同閃爍頻率或不同亮度的電源信號。
- 提供馬達驅動電源：包括電動窗、電動天線、後視鏡、電動座椅等馬達驅動電源，其各有不同的驅動能力與驅動模式。
- 提供電器設備直流電源：包括 AM/FM、CD/DVD、GPS、或是車用的其他電氣設備如眾多的感測元件與微處理器，它們通常透過 DC/DC 轉換器提供穩定的直流電源 3V/5V/9V。

燈具照明可以依不同的用途與時機，會有不同的亮度與閃爍的頻率。以閃爍頻率而言，方向燈、臨時停車、與緊急信號的閃爍頻率會有所不同。以亮度而言，白天、晚上的燈光亮度亦必須有所調整，以適應當時的整體環境。目前的作法都是以多個單一功能的燈具，來實現多重功能。例如煞車燈、尾燈、方向燈、倒車燈等都是獨立的燈具，雖然可能放在同一個盒箱內。

馬達驅動的使用隨著汽車配備的增加也越來越多，從早期的電動窗、天窗，天線，到現在的電動座椅、車門、行李箱門、加油孔的開啟甚至關閉都已經透過馬達為之。到了油電混合甚至全電動車，連車輪都由馬達帶動。傳統上，馬達的驅動都有各自的驅動電路，以因應各自的驅動模式與驅動能力。如此造成相當多的重複配置。

電器設備的直流電源供應多數由一顆 DC-DC Converter 將 12V 降壓至 3V/5V/9V，提供電子設備所需之電源，由於汽車上使用的感測元件與控制點越來越多，先進汽車可能有 50 個以上的控制點，所需要的功率電子元件也成比例的增多。由於電子產品所需的電源電壓會因年代與

技術有所差異，因此功率電子的使用也相當的多樣化。

結合 Power IC 與 Power Line Communication (PLC) 的系統晶片，以提供汽車所需的電源管理、功率驅動與相關周邊的資料傳輸。透過電源線整合所有資料傳輸與功率驅動。可大幅簡化汽車內部設計的複雜度並降低製作成本，是必要且合適的技術。因此本整合型計劃的主要目的在提出一種可靠的通信技術，使用車輛上的電池電源線傳輸控制信號，並整合各式電子控制系統，成為具有智慧型功能的單一晶片，藉以控制車輛內部的各式設備的操作，包括馬達電動窗、車座椅、Air Bag、ABS 系統、自動偵測系統、各式燈具、音響等設備，減少車輛不必要的配線，節省成本，降低耗能及系統面積，達到環保節能的要求。

### 三、文獻探討

電器設備的直流電源供應多數由一顆 DC-DC Converter 將 12V 降壓至 3V/5V/9V，提供電子設備所需之電源，由於汽車上使用的感測元件與控制點越來越多，先進汽車可能有 50 個以上的控制點，所需要的功率電子元件也成比例的增多。由於電子產品所需的電源電壓會因年代與技術有所差異，因此功率電子的使用也相當的多樣化。

基本上，利用 PWM 為基礎的 DC/DC Converter 基本電路，可以分為下面幾種類型：

- Buck Converter
- Boost Converter
- Buck-Boost Converter
- CUK Converter
- Fly Back Converter
- Forward Converter

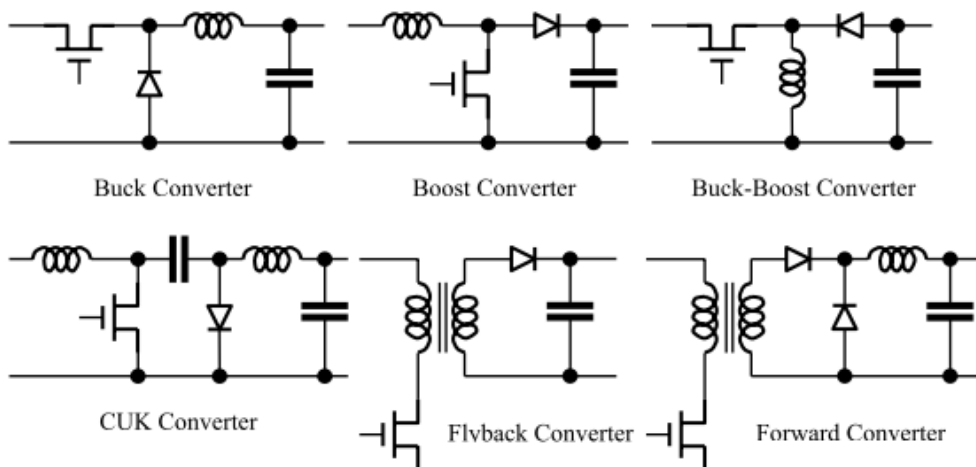


圖4. DC/DC Converter 分類

其中以 Buck Converter 為最基本的形式，其 Voltage Ratio 亦最為線性。Boost Converter 提供大於 1 的 Voltage Ratio，Buck-Boost Converter 則結合 Buck 與 Boost 的兩種特性，提供所有可能的 Voltage Ratio，他的缺點則在於非線性的 Voltage Ratio。Voltage Ratio 為 PWM Duty Cycle 與輸出電壓的關係。以 Buck Converter 為例， $VoltageRatio = DutyCycle * V_s$ ，因此為線性的關係。

CUT Converter 與 Buck-Boost 相似，可以提供大於一與小於一的 Voltage Ratio。但是在轉換的時候沒有脈衝電流，減少功耗也降低電路的耐壓需求。Flyback 與 Forward Converter 則提供隔

離的電源，可以有效隔離來自電源端的雜訊。

若就汽車環境而言，多數的電壓屬於降壓模式，亦即 Voltage Ratio 小於一，而地線往往利用車輛的金屬車架。因此，Buck Converter 是比較適用的一種 Converter。

而馬達控制部份，下圖所示為三種基本型式，最簡的基本型如右圖所示，它有馬達驅動所會產生的所有問題與缺點。第二種形式展現於中間，當 PWM 信號處於 OFF 的階段，可以利用切換下面的開關，達到 Power Regeneration 的功能，回收電能達到節能的目的。第三種形式展現於右邊，是目前較常使用的驅動電路，除了 Power Regeneration 外，他還能夠作 Soft Switching，消除單一開關切換所會帶來的 Pulse Current (類似 CMOS Inverter 的 Short Circuit Current)。除了節能外，並有降低元件的損耗，減少電磁干擾等等的優點。

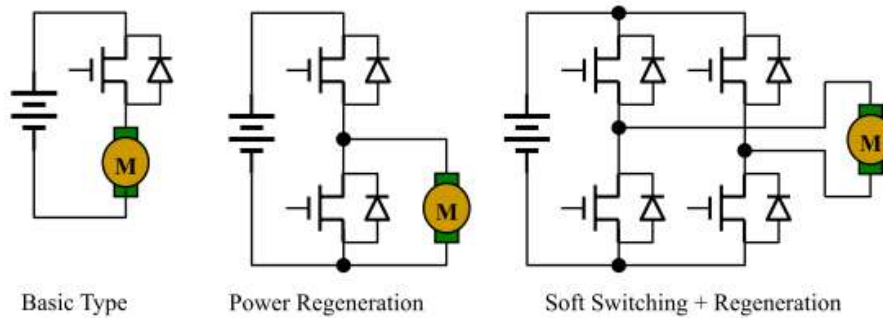


圖5. 多功能汽車功率驅動電路示意圖

## 四、研究方法

### 4.1 可程式車用功率積體電路設計

在這邊可以看到電源線上面會有許多的驅動晶片，而每顆驅動晶片內部的方塊圖如下圖 6 所示包含了解碼、拴鎖，以及控制電路。車用電子電源線通訊顧名思義則是訊號是由電源上傳遞，在這邊傳送的訊號為每次 32 位元。每顆晶片在電源線上都它有自己的位址，所以每次收到資料時都必須做一次解碼的動作，觀察是否要動作。圖中可看到驅動晶片的輸出有四組訊號，每一組訊號分別給 P 及 N 型的功率電晶體來推動馬達，LED 或降壓電路如圖 6 所示。

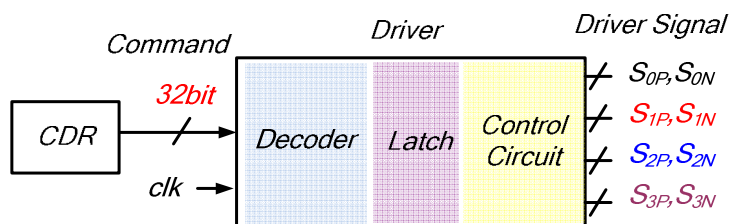


圖6. 可程式化車用功率積體電路示意圖

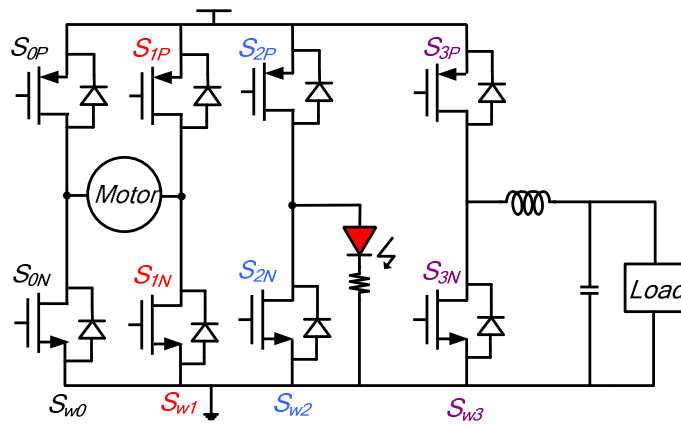


圖7. 四組開關推動馬達、LED 及降壓電路

如圖 7 所示這邊定義每一組開關由 P 及 N 型功率電晶體所組成，如圖 7 所示共有四組的開關。在可程式化車用功率積體電路晶片如圖 6 所示有 32 位元的輸入、一時脈以及四組的輸出訊號，而每組的輸出訊號分別給一組開關，也就是 P 及 N 型的功率電晶體。在整個計畫裡面我們希望能藉由 32 位元的輸入指令，使得每一組的輸出訊號可以達到控制馬達、LED 及降壓電路。表 1 所示為驅動晶片的輸入指令共 32 位元，這邊分別來解釋這 32 位元的功能

表1. 32位元控制指令及功能說明

Command	Number of Bit	Symbol	Function
Address	b24~b31	a0~a7	select chip
Reset	b23	r	reset switch
Mode	b22	m	close or open loop
Switch	b20~b21	s0~s1	select switch
PMOS	b18~b19	P0~P1	00=off, 01=on, 10=control, 11=control_bar
NMOS	b16~b17	N0~N1	00=off, 01=on, 10=control, 11=control_bar
Frequency	b13~b15	f0~f2	000=24kHz, 001=190Hz 010=6hz, 011=3Hz 100=1.5Hz, 101=0.75Hz
On_time	b8~b12	t0~t4	on time control
Data	b0~b7	d0~d7	PWM control

每一顆驅動晶片上面會有四組的輸出訊號，每一組輸出訊號皆可控制馬達、LED 及降壓電路 [1, 2] 如下圖 8 所示。在這邊可觀察到馬達、LED 及降壓電路它們都是經由脈波寬度調變來調整轉速、亮度及輸出電壓大小。在此計劃中採用是  $\Sigma\Delta$  數位脈波寬度調變電路如圖 9 所示來當作可程式車用功率積體電路裡面的數位脈波寬度調變的電路，在此系統應用當中有幾個優點，第一它是由多位元的  $\Sigma\Delta$  調變電路加上一低解析度的數位脈波寬度調變的電路，故具有高速及低功率及的優點。第二則是可以使馬達、LED 及降壓電路共同使用。

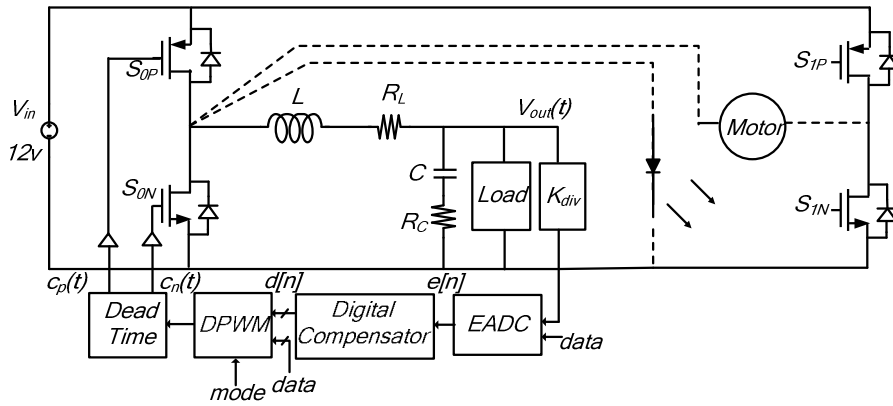


圖8. 整合馬達、LED 及降壓電路

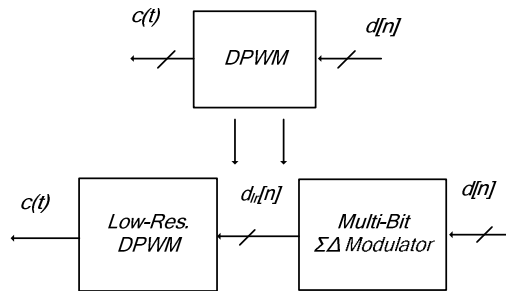


圖9. 數位脈波寬度調變電路採用  $\Sigma\Delta$  調變

#### 4.2 數位直流-直流降壓電路設計

整個數位降壓電路如圖 10 所示，它是由功率區塊、誤差類比數位轉換器、數位補償器、 $\Sigma\Delta$  數位脈波寬度調變電路及死區時間(Dead Time)所組成。我們先制定整個數位降壓電路的規格如表 2 所示，在車用電子裡面所蓄電池提供的電壓為 12V，故輸入  $V_{in}$  為 12V，而輸出電壓  $V_{out}(t)$  為較常用到的 1.5~9V，抽載的電流定在 0~2A。在車用電子裡面系統切換頻率大概為 100~500kHz，配合 FPGA 板子所提供的最高時脈除頻下來，其切換頻率  $FSW$  為 390.625kHz。這邊輸出的漣波大小設計在小於 1.5 V 的 6%，故  $\Delta V_o$  大約為 100mV。式子(1)所示，故誤差類比數位轉換器的  $\Delta V_q$  經由編碼為 58.6 mV， $\Delta V_q$  則是類比數位轉換器的最低位元解析度， $K_{div}$  則是輸出的衰減器， $\Delta V_{out}$  則是輸出上能容忍的漣波大小。接下來則是決定數位脈波寬度調變的解析度，為了避免輸出有 LCO，由式子(2)可以知道，通常設計都小於 3~6 倍， $\Delta d$  為數位脈波寬度調變的解析度，故這邊設計數位脈波寬度調變的解析度為 9 位元。

$$\Delta V_q \geq K_{div} g \Delta V_{vout} \quad (1)$$

$$\Delta d g_{in} g_{div} < \Delta V_q \quad (2)$$

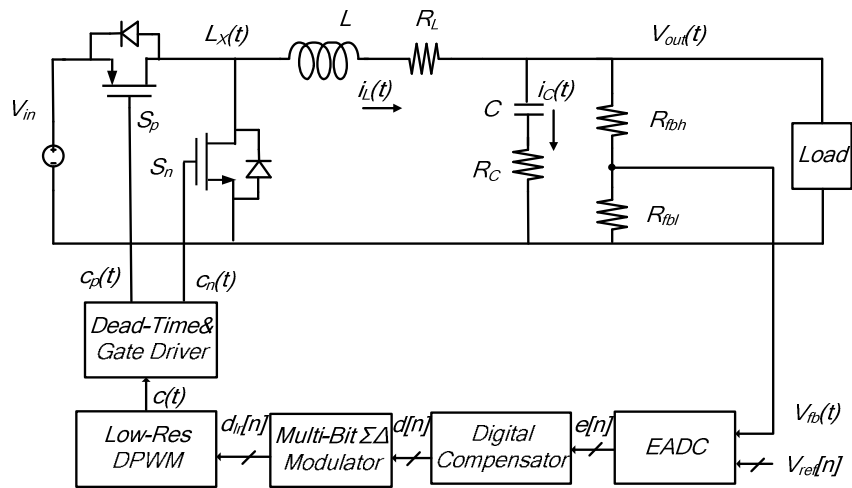


圖10. 直流-直流降壓電路系統方塊圖

表2. 數位降壓電路的規格如表所示

Parameter	Symbol	Value	Units
Input voltage	$V_{in}$	12	V
Output voltage	$V_{out}$	1.5~9	V
Load current	$I_{load}$	0~2	A
Switch frequency	$F_{sw}$	390.625	kHz
Output voltage ripple	$\Delta V_o$	100	mV
EADC quantization step	$\Delta V_q$	58.6	mV
DPWM resolution	$N_{DPWM}$	9	bits
Inductor	L	22	$\mu H$
Capacitor	C	22	$\mu H$
ESR	$R_C$	200	$m\Omega$
DCR	$R_L$	180	$m\Omega$
Zero frequency	$f_{ESR}$	36	kHz
Double pole frequency	$f_o$	7.234	kHz
Attenuation	$f_{div}$	1/2.4	

### 4.3 誤差類比數位轉換器

在此論文誤差類比數位轉換器基於窗型類比數位轉換器(Window ADC)[3-5]的概念，在數位直流-直流降壓電路有三個很大的優點，第一優點由於它的作法如下圖 11 (a)所示誤差值  $e[n]$  經由編碼過後將會限制在  $-4 \sim +4$  之間故後一級的數位補償器可以減少很大的面積成本及計算的功率消耗。第二優點則是在數位直流-直流降壓電路可以省去緩啟動電路，窗型類比數位轉換器在電路剛啟動時誤差量  $e[n]$  為  $+4$  經由數位補償器之後所產生的脈波寬度則是慢慢增大其功能等效於緩啟動。第三優點則是可以減少切換頻率雜訊對系統的影響，在這邊將每一誤差的量化  $\Delta V_q$  設計不等距離如下圖 11(b)及表所示，當取樣到有切換頻率雜訊時，誤差可以由之前的非常大到現在的  $-1$  或  $+1$ ，在數位補償器來說對雜訊的敏感度降低了。

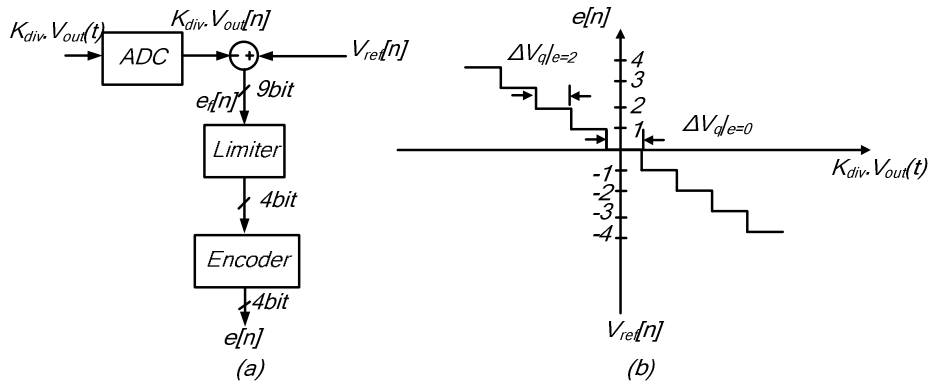


圖 11. (a) 誤差類比數位轉換器編碼 (b) 誤差類比數位轉換器輸入與輸出對應圖

#### 4.4 數位正比積分微分補償器

設計數位正比積分微分補償器[6-9]上，可知數位降壓電路系統裡之數位補償器在整體系統裡的功能等同於類比的補償器。圖 12 為降壓電路各個區塊的轉移函式。下式(3)所示  $T(s)$  為降壓電路系統的開迴路轉移函式， $K_{div}$  為衰減器的增益， $K_{ead}$  為類比數位轉換器的增益， $K_{dpwm}$  為數位脈波寬度調變器的增益， $G_{vc}(s)$  為功率區塊得轉移函式。一開始設計先將各個區塊連續時間的轉移函式導出來，接下來加入連續時間補償器電路設計，最後再將連續時間的補償器電路  $G_c(s)$  經由  $s$  平面轉到  $z$  平面上得到離散時間的補償器電路  $G_c(z)$ 。

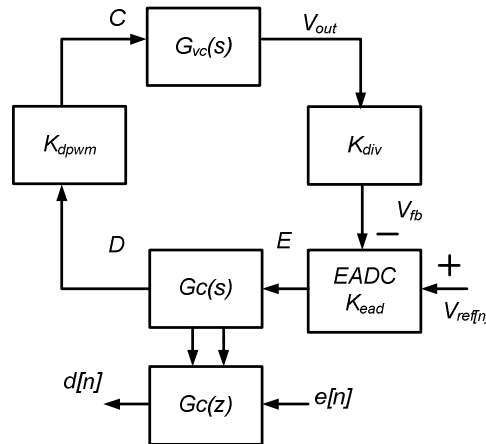


圖 12. 降壓電路系統轉移函式圖

$$T(s) = G_{vc}(s) \cdot K_{div} \cdot K_{ead} \cdot G_c(s) \cdot K_{dpwm} \quad (3)$$

$$G_{vc}(s) = V_{in} \frac{1 + sCR_c}{1 + s[CR_{Load}(R_L + R_C) + L] / R_{Load} + s^2 LC} \quad (4)$$

$$G_c(s) = \frac{D(s)}{E(s)} = k_c \frac{(1 + \frac{s}{\omega_{z1}})(1 + \frac{s}{\omega_{z2}})}{s} \quad (5)$$

當連續的補償轉移函式  $G_c(s)$  設計出來之後，接下來將  $s$  平面映射到  $z$  平面上。在數位的控制系統或數位訊號處理的書上提到可以使用雙線性轉移(Bilinear Transform)及尤拉規則(Eular's Rule)達到  $z$  平面上轉移函式。這邊使用雙線性轉移如下式(6)所示為  $s$  平面映射到  $z$  平面上， $T_d$  為取樣時間，在  $z$  平面的單位圓內等同於是  $s$  平面的左半平面。接下來將式子(6)帶入  $G_c(s)$  得到  $G_c(z)$  如下式(7)所示，最後將  $G_c(z)$  反  $z$  轉換得到式子(8)。

$$s = \frac{2}{T_d} \left( \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) \quad (6)$$

$$G_c(z) = \frac{D(z)}{E(z)} = \frac{a+bz^{-1}+cz^{-2}}{1-z^{-1}} \quad (7)$$

$$d[n] = d[n-1] + a e[n] + b e[n-1] + c e[n-2] \quad (8)$$

當設計出直接形式(Direct Form)如式子，接下來就是將它實現為電路，這邊我們採用查表法(Look Up Table)如下圖 13 所示所謂的查表法則是說表格裡面已經儲存了所有輸入會發生的可能性，每一輸入值將會對應到一個輸出值，舉例來說如圖所示裡面的 LUT A 表格裡面所包含地資訊為  $a.e[n]$ ，整個系統的設計當中，由於前一級我們是採用窗型類比數位轉換器，所以我們的誤差訊號  $e[n]$  是介於  $-4 \sim +4$  之間，使用查表法我們的輸入只有九種狀態，查表裡面所需的面積即可大大的減少。

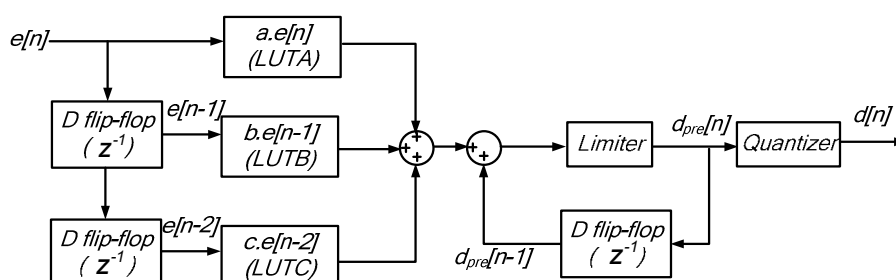


圖 13. 正比積分微分補償器基於查表法

#### 4.5 二階 $\Sigma\Delta$ 雜訊整形數位脈波寬度調變電路

$\Sigma\Delta$  數位脈波寬度調變電路[3, 4, 10-12]在最近幾年已被發表，如下圖 14 所示為二階誤差回授  $\Sigma\Delta$  雜訊整形迴路數位脈波寬度調變，它是由  $\Sigma\Delta$  雜訊整形迴路及一低解析度數位脈波寬度調變電路連接到切換轉換器，低解度的數位脈波調變電路可能會造成輸出 LCO 的問題，可以經由前一級的  $\Sigma\Delta$  雜訊整形迴路在多個週期改變  $d[n]$ ，使它的平均等於高解析度的  $d[n]$ 。一階的  $\Sigma\Delta$  雜訊整形迴路所造成的輸出低頻諧波可經由二階的  $\Sigma\Delta$  雜訊整形迴路來降低。二階的  $\Sigma\Delta$  雜訊整形迴路架構以被提出運用在類比數位轉換轉換器等電路，其架構不同於一階的  $\Sigma\Delta$  雜訊整形迴路在於回授的路徑多了一級的延遲電路、乘二電路及減法器。加了這些電路主要想要將  $e[n]$  如下式(9)週期性的訊號打斷，使它成為近似亂數的訊號，這樣在頻譜上所看到的  $E(z)$  才會近似於白雜訊。

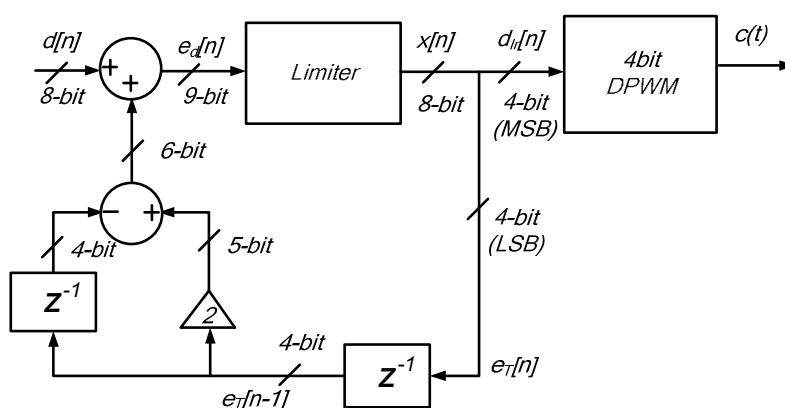


圖 14. 二階誤差回授  $\Sigma\Delta$  雜訊整形迴路數位脈波寬度調變



$$e_r[n] = \frac{(n+1)(n+2)}{2} g_k g_{vd} g_u[n+2] \quad (9)$$

#### 4.6 LED 及馬達設計

如下圖 15 所示為操作 LED 的基本原理，LED 最主要是則是亮度的控制，這邊可以知道 LED 為電流控制的元件，當流過電流越大 LED 的亮度則會越亮，故可使用脈波寬度調變達到亮度、閃爍頻率及亮度時間控制。圖 18 (a)及圖 18 (b)分別為使用 P 及 N 功率晶體來驅動 LED，這此論文當中採用圖 18 (c)，我們可以經由控制指令達到圖 18 (a)及圖 18 (b)的效果。

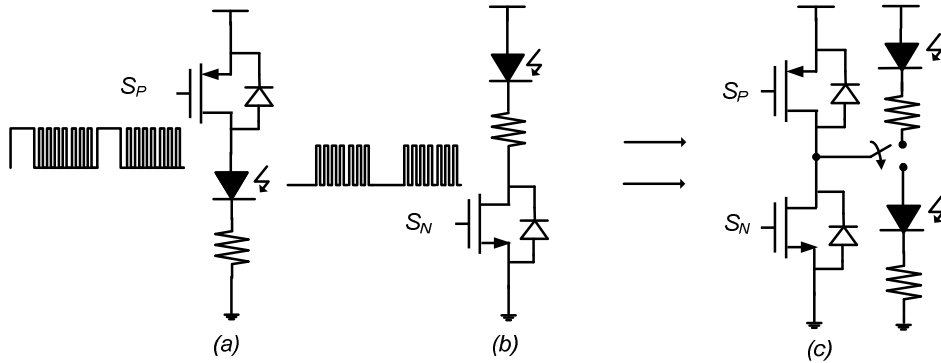


圖15. LED 操作電路圖

驅動馬達[13]的轉速是取決於它上面的跨壓大小。我們可以使用 H 橋模式下圖 16 所示來達到正反轉及停止，由於馬達是電壓控制，我們亦可使用脈波寬度調變來調整馬達上的跨壓，進而達到轉速的控制。

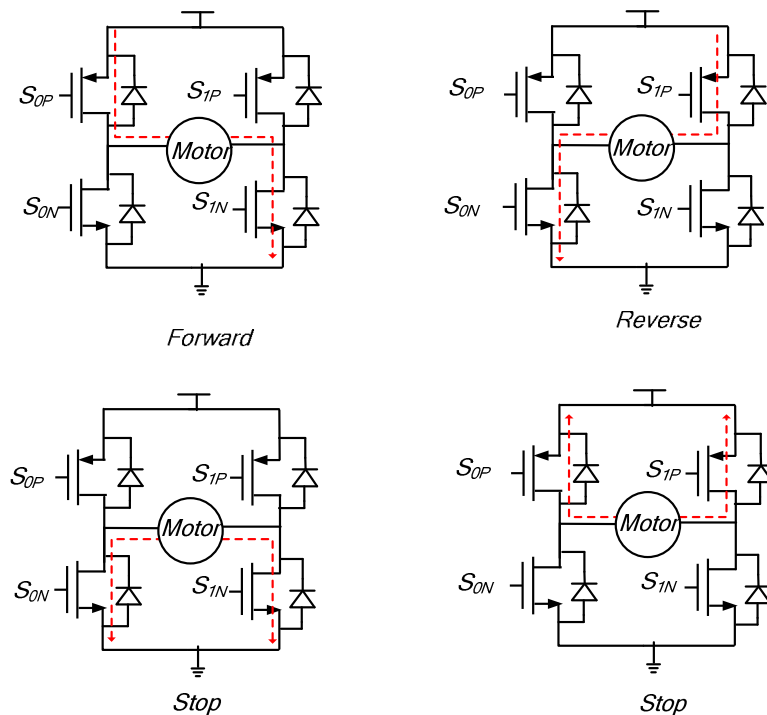


圖16. H 橋驅動馬達

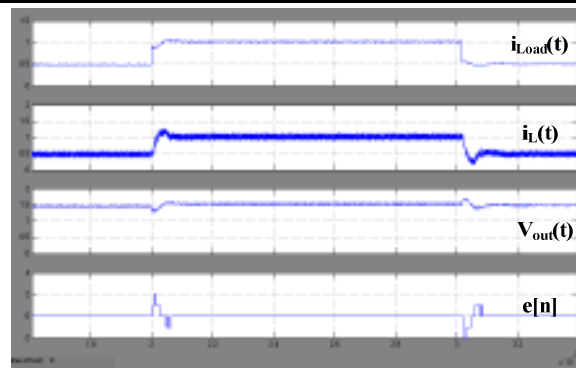
#### 4.7 模擬結果

本計劃中使用 Matlab 裡面的 Simulink[14, 15]來建立數位降壓電路的模型並且模擬系統鎖定動

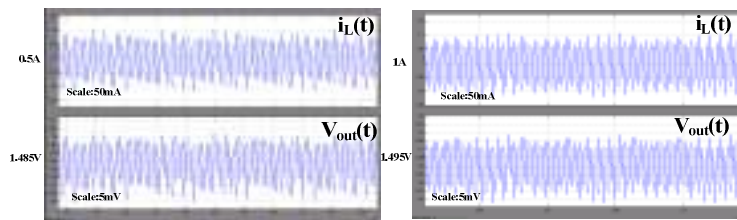
作。模擬驗證數位降壓電路在二階的  $\Sigma\Delta$  雜訊整形迴路數位脈波寬度調變輸入  $V_{in}$  為 12V，觀察負載變化之下的輸出鎖定電壓以及輸出電壓峰對峰值的大小。如表 3 所示為二階  $\Sigma\Delta$  雜訊整形迴路數位脈波寬度調變數位降壓電路輸出電壓鎖定在 1.5V~9V 性能表現，模擬如圖 17~20 所示。表格的參數模擬值包含有輸出的漣波大小  $\Delta V_{out}$ 、負載由 500mA 到 1A 抽載時所造成輸出過衝電壓  $V_{over}$ 、過衝回復時間  $T_{over\_r}$ 、負載由 1A 到 500mA 抽載時所造成輸出下衝電壓  $V_{under}$ 、下衝回復時間  $T_{under\_r}$ 。

表3. 二階 $\Sigma\Delta$ 降壓電路負載變化下輸出電壓性能表現

Parameter	symbol	1.5V	3V	5V	9V
Output voltage	$\Delta V_{out}$	45mV	60mV	80mV	60mV
Overshoot voltage	$V_{over}$	160mV	180mV	200mV	200mV
Overshoot recovery time	$T_{over\_r}$	80 $\mu s$	100 $\mu s$	120 $\mu s$	130 $\mu s$
Undershoot voltage	$V_{under}$	180mV	180mV	200mV	200mV
Undershoot recovery time	$T_{under\_r}$	70 $\mu s$	70 $\mu s$	100 $\mu s$	140 $\mu s$



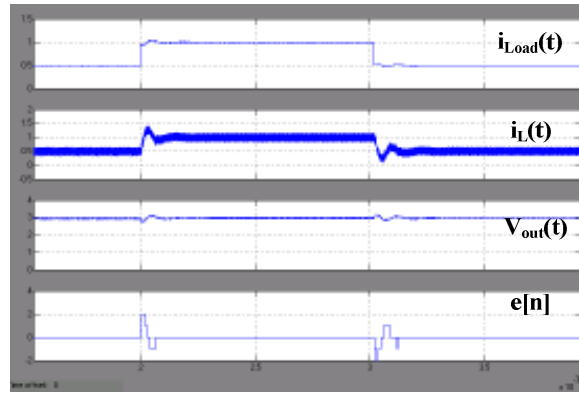
(a)



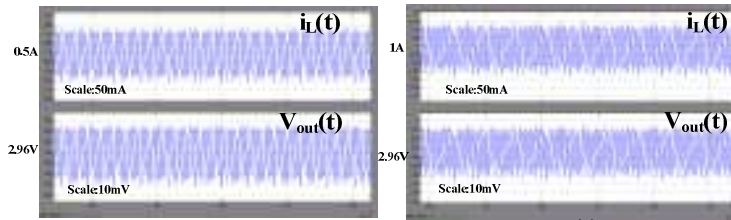
(b)

(c)

圖17. 二階  $\Sigma\Delta$  負載抽載輸出電壓 1.5V 模擬圖 (a)輸出負載  $i_{load}(t)$ 、電感電流  $i_L(t)$ 、輸出電壓  $V_{out}(t)$  及誤差值  $e[n]$  (b)負載 500mA 時  $i_L(t)$ 及  $V_{out}(t)$  (c)負載 1A 時  $i_L(t)$ 及  $V_{out}(t)$



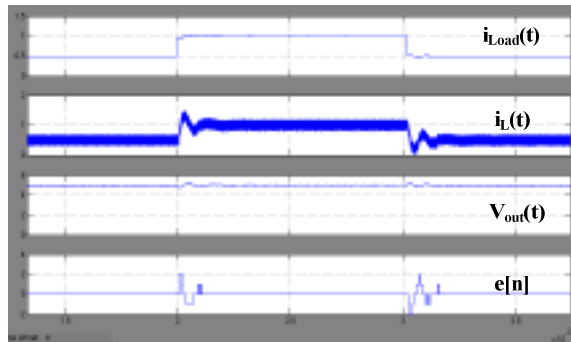
(a)



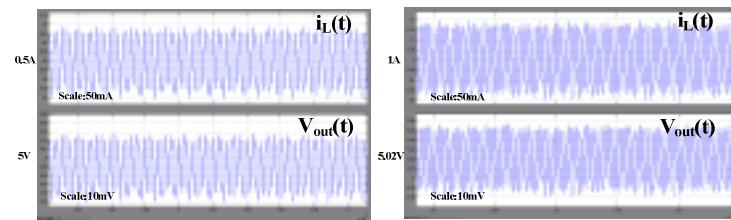
(b)

(c)

圖18. 二階  $\Sigma\Delta$  負載抽載輸出電壓 3V 模擬圖 (a)輸出負載  $i_{load}(t)$ 、電感電流  $i_L(t)$ 、輸出電壓  $V_{out}(t)$  及誤差值  $e[n]$  (b)負載 500mA 時  $i_L(t)$ 及  $V_{out}(t)$  (c)負載 1A 時  $i_L(t)$ 及  $V_{out}(t)$



(a)



(b)

(c)

圖19. 二階  $\Sigma\Delta$  負載抽載輸出電壓 5V 模擬圖 (a)輸出負載  $i_{load}(t)$ 、電感電流  $i_L(t)$ 、輸出電壓  $V_{out}(t)$  及誤差值  $e[n]$  (b)負載 500mA 時  $i_L(t)$ 及  $V_{out}(t)$  (c)負載 1A 時  $i_L(t)$ 及  $V_{out}(t)$

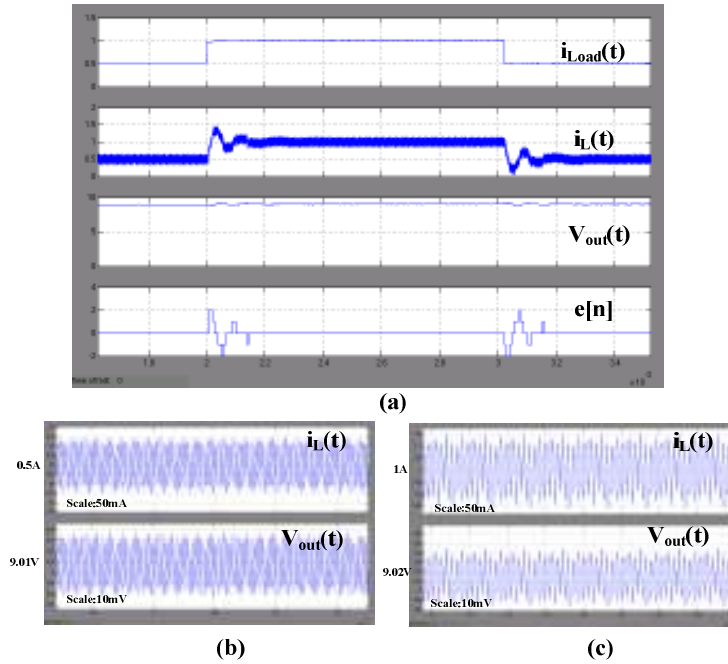


圖20. 二階  $\Sigma\Delta$  負載抽載輸出電壓 9V 模擬圖 (a)輸出負載  $i_{load}(t)$ 、電感電流  $i_L(t)$ 、輸出電壓  $V_{out}(t)$  及誤差值  $e[n]$  (b)負載 500mA 時  $i_L(t)$ 及  $V_{out}(t)$  (c)負載 1A 時  $i_L(t)$ 及  $V_{out}(t)$

#### 4.8 FPGA 驗證結果

整體車用電子的測試環境及硬體方塊圖如下圖 21 所示由控制開關、傳輸端(TX)、車用電源線、接收端 (RX)、可程式車用功率積體電路、馬達、LED 及直流-直流降壓電路，實際測試環境及硬體架構圖如圖 22 所示。在這邊的可程式車用功率積體電路及接收端 (RX) 的電路是寫入在 FPGA Spartan 3E 裡面，傳輸端(TX)的電路則是在 FPGA Spartan 3A 裡面，電源線上的電源則是 12V，訊號經由電源線由傳輸端傳送到接收端。為了方便測試電路，原本控制指令為 32 位元，這邊我們利用控制開關其中的 5 位元配合查表法列出 32 種狀態來測試電路如表 4 所示。

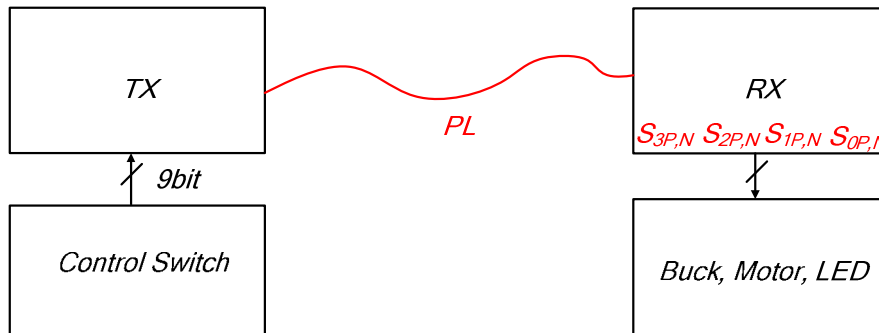


圖21. 車用電子電源線通訊及可程式車用功率積體電路示意圖

實際測試環境及硬體架構圖如圖 22 所示。在這邊的可程式車用功率積體電路及接收端的電路是寫入在 FPGA Spartan 3E 裡面，傳輸端的電路則是在 FPGA Spartan 3A 裡面，電源線上的電源則是 12V，訊號經由電源線由傳輸端傳送到接收端。

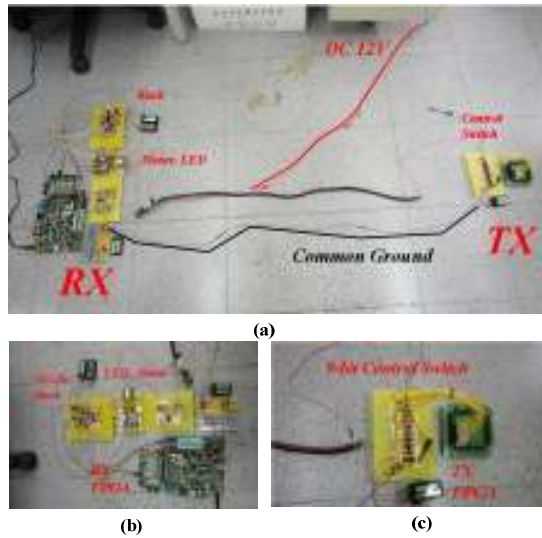


圖22. 實際測試環境及硬體架構圖

如下圖 23 所示為直流-直流降壓電路圖，FPGA 所輸出的訊號為 3V 脈波寬度調變經由電壓準位移器 ICL7667(Level Shifter)升為 12V 來推動 P 型的功率晶體 IRF9Z34N 及 N 型的功率晶體 IRFZ34N，在功率區塊的電感採用的是功率電感 SCD0504 可承受 1A 的電流，直流電阻(DCR)為 180 m 歐姆。輸出電容採用的是 Vishay Sprague 的鉭值電容，輸出電容的等效串聯電容(ESR)大約為 200m 歐姆。經由每一週期充放電輸出電壓經由衰減器和一單位增益緩衝器 AD711 到類比數位轉換器 ADC0820CCN，最後類比數位轉換器輸出再接回 FPGA 的輸入。下圖 24(a)為直流-直流降壓電路的硬體部分，圖 24(b)為馬達及 LED 的硬體。

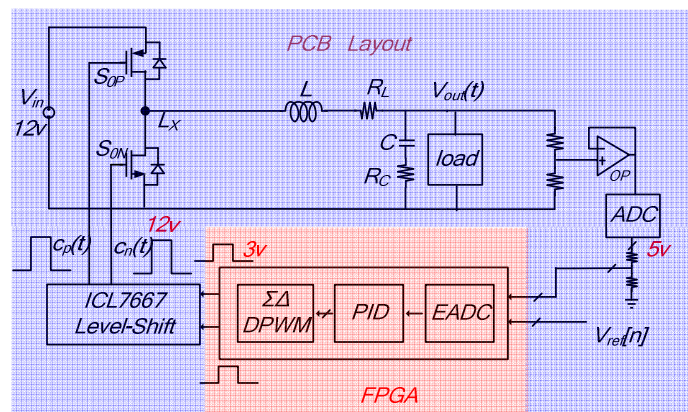


圖23. 直流-直流降壓印刷電路板子元件佈局圖



圖24. (a)直流-直流降壓印刷電路板子實際圖(b)馬達及 LED 印刷電路板子實際圖

表 4 所示為輸入電壓 12V，輸出電壓在不同的負載下所觀察的性能表現。圖 25 所示為無負載輸出電壓鎖在 1.5~9V，圖 26 所示為負載狀態下輸出電壓鎖在 1.5~9V。

表4. 輸出電壓在不同的負載的性能表現

$V_{out}$	1.5V	3V	5V	9V
$\Delta V_{out}$ (no load)	48mV	65mV	80mV	65mV
$\Delta V_{out}$ (load)	48mV (500mA)	65mV (600mA)	80mV (500mA)	65mV (600mA)

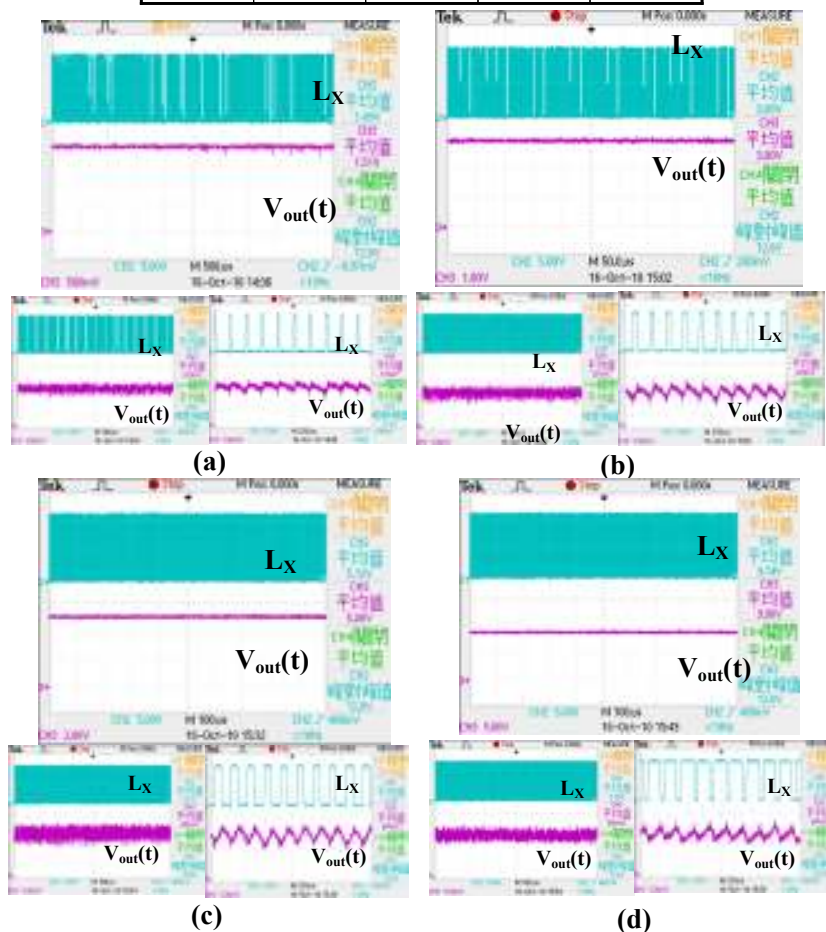


圖25. 無負載輸出(a)1.5V (b)3V (c) 5V (d)9V



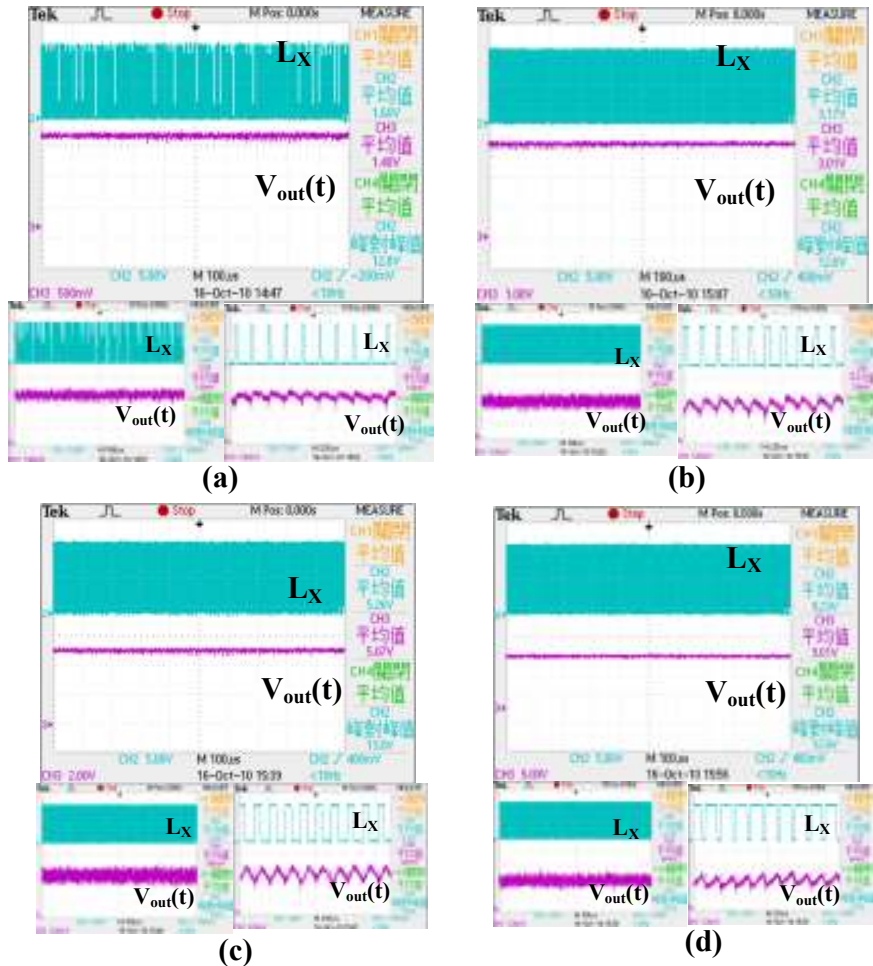


圖26. 負載狀態下輸出(a)1.5V (b)3V (c) 5V (d)9V

如下圖 27 所示為馬達轉速的驗證，我們利用表給控制訊號，馬達操作頻率為 24kHz，由於電壓準位移器為反向，下圖所測的波形為 FPGA 的輸出訊號還沒經過電壓準位移器，因此可看到  $S_{2P}$  為低電壓， $S_{2N}$  為脈波調變。圖 27(a)為轉速 20%，(b)為轉速 50%，(c)為轉速 80%。

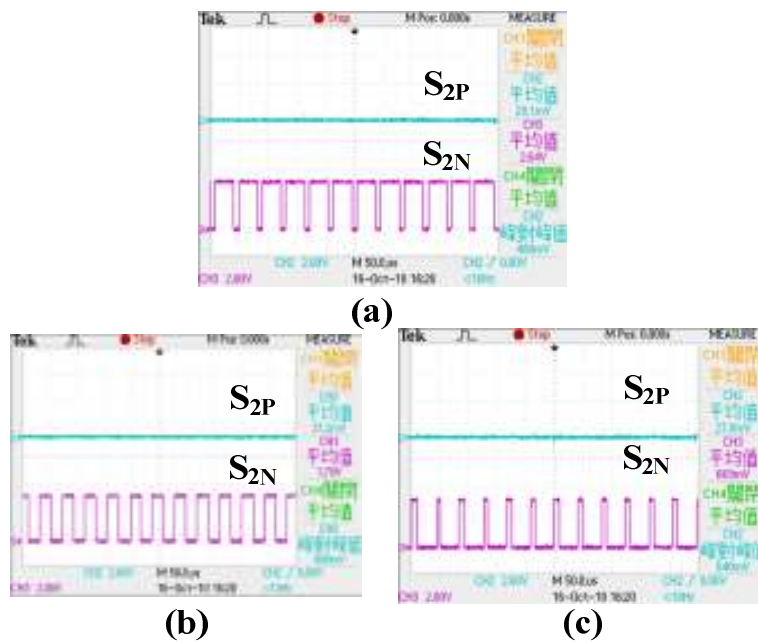


圖27. 馬達轉速

圖 28 所示為 LED 亮度時間的調控，這邊設定頻率為 0.75Hz，亮度為 50%，圖 28(a)為亮度時間 20%，(b)為亮度時間 50%，(c)為亮度時間 80%。

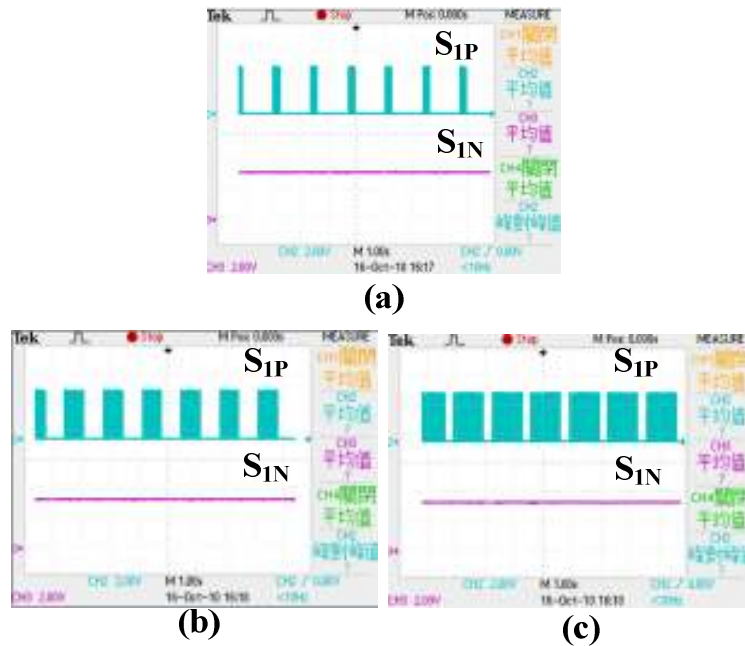


圖28. LED 亮度時間的調控

## 五、結果與討論

在本計劃中提出了可程式車用功率積體電路，晶片的控制訊號經由電源線傳送共有 32 位元，裡面包含了有晶片位址、清除開關訊號、系統開閉迴路選擇、開關選擇、PN 功率晶體動作、頻率、亮度時間、控制馬達轉速、LED 亮度及降壓電路的控制。由於功率驅動晶片共有 4 組的輸出控制訊號，每一組分別為控制 P 功率晶體及 N 功率晶體。這邊希望每一組的控制訊號皆能控制馬達、LED 及降壓電路，在分別控制馬達、LED 及降壓電路可了解到它們有共通的電路則是數位脈波寬度調變。在此論文採用的則是二階的  $\Sigma\Delta$  雜訊整形迴路數位脈波寬度調變電路，在前面章節有提到它的許多優點，分別為低功率消耗、可操作在高速、在這邊最主要是能將馬達、LED 及降壓電路結合在一起，節省多餘的面積及功率消耗。

最後使用 FPGA 來驗證整體系統的可行性，Spartan 3A 及 Spartan 3E 來當作車用電子電源線通訊的接收端及傳輸端，電源線則是傳送指令進而達到降壓電路輸出電壓鎖定、控制馬達的轉速控制及 LED 的亮度調控、閃爍頻率及亮度時間的調控。



## 參考文獻

- [1] C. Basso, *Switch-mode power supplies*, 2008.
- [2] D. M. R.W.Erickson, *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd ed.: Kluwer Academic, Inc, 2001.
- [3] P.-K. Leong, "Design of Sigma-Delta DPWM Controller for 1MHz DC-DC Switch-Mode Power Supplies," NCKU, Taiwan, 2009-01-10
- [4] Z. Lukic, *et al.*, "Multi-bit sigma-delta PWM Digital Controller IC for DC-DC Converters Operating at Switching Frequencies Beyond 10 MHz," *IEEE Transactions on Power Electronics*, , vol. 22, pp. 1693-1707, 2007.
- [5] B. J. Patella, *et al.*, "High-frequency digital PWM controller IC for DC-DC converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*,, vol. 18, pp. 438-446, 2003.
- [6] R. Dorf, *Modern control systems*, 1998.
- [7] A. Oppenheim, *Discrete-time signal processing*, 2010.
- [8] C. Phillips, *Digital control system analysis and design*, 1990.
- [9] A. Prodic and D. Maksimovic, "Design of a digital PID regulator based on look-up tables for control of high-frequency DC-DC converters," in *IEEE on Power Electronics*,, 2002, pp. 18-22.
- [10] D. K. Johns, Martin, *Analog integrated circuit design*, 1997.
- [11] R. Schreier, *Understanding delta-sigma data converters*, 2005.
- [12] W. Chou and R. M. Gray, "Dithering and its effects on sigma-delta and multistage sigma-delta modulation," *IEEE Transactions on Information Theory*,, vol. 37, pp. 500-513, 1991.
- [13] N. Mohan, *Power electronics: converters, applications, and design, third edition*, 2003.
- [14] L. Chi-Wai, *et al.*, "An integrated GUI design tool for digitally controlled switching DC-DC converter," in *ICCCAS 2008. International Conference on Communications, Circuits and Systems*,, 2008, pp. 1324-1327.
- [15] A. Prodic and D. Maksimovic, "Mixed-signal simulation of digitally controlled switching converters," in *IEEE Computers in Power Electronics*, , 2002, pp. 100-105.

## 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：成果驗證符合預期目標

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 撰寫中 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）

**車輛 PLC 通訊及可程式驅動控制系統：**實現車輛通信電子設備驅動晶片低面積、低功率、低電壓、低價格、高可靠度及環保節能省碳的目的

**車輛電源線傳送控制信號：**取代了傳統舊式使用配電盤連接控制電纜線技術，大量的減少廢電線、廢電纜的生產製造，直接降低對空氣及環境對地球所造成的污染

**車用電子控制技術：**未來的汽車在維修檢測上更便利、省時，縮短工作時效

# 國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期：100 年 10 月 28 日

<p><b>國科會補助計畫</b></p>	<p>計畫名稱：多功能車用功率積體電路                  計畫主持人：蘇朝琴                  計畫編號：NSC 99-2220-E-009-050- 領域：車用電子</p>		
<p><b>研發成果名稱</b></p>	<p>(中文) 多功能車用功率積體電路                  (英文) Multi-function Automobile Power IC</p>		
<p><b>成果歸屬機構</b></p>	<p>國立交通大學</p>	<p><b>發明人 (創作人)</b></p>	<p>學生:林庭佑、曾煜輝                  教授:蘇朝琴 教授</p>
<p><b>技術說明</b></p>	<p>我們於計劃中使用 LIN 協議的主從架構。並透過直接序列擴頻(DSSS)調製技術的收發器設計來防止噪聲對控制信號的影響。其編碼是由可用於 802.11 無線擴頻序列信號控制數據的 11 位巴克碼組成。而具有 3 個時脈的時脈資料恢復電路(CDR)，包含三個階段，它將跟踪發射機(TX)和接收器(RX)之間的頻率錯誤。最後由 32 位的串列信號至後端控制電路，控制 PWM 的執行情況。全系統實現一個原型車電力線通訊網絡包含本計畫電路和 FPGA 進行電路驗證。</p> <p>Our concern is to use LIN protocol architecture of master and slave. The transceiver design with Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) modulation technology be used to prevent the influence of noise on control signal. With encode the signal of control data by 11-bit Barker code, which also can be used to 802.11 wireless spread spectrum sequence. The early and late phase of the clock data recovery circuit which has three phases, that it will tracking frequency error between the transmitter (TX) and receiver (RX). By the 32-bit serial signal and back-end control circuit, implementation of transmission and PWM control. A prototype vehicle power line communication network realized and verified by FPGA and the proposed circuit.</p>		
<p><b>產業別</b></p>	<p>車用電子</p>		
<p><b>技術/產品應用範圍</b></p>	<p>車用電子</p>		
<p><b>技術移轉可行性及預期效益</b></p>	<p>SOC 系統晶片設計技術：全系統消耗功率低於數個微瓦，達到環保減碳之要求                  車輛電源線傳送控制信號：取代了傳統舊式使用配電盤連接控制電纜線技術，大量的減少廢電線、廢電纜的生產製造，直接降低對空氣及環境對地球所造成的污染                  車用電子控制技術：維修檢測上更便利、省時，縮短工作時效</p>		

註：本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。

# 國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2011/10/28

國科會補助計畫	計畫名稱: 子計畫四: 多功能車用功率積體電路(3/3)
	計畫主持人: 蘇朝琴
	計畫編號: 99-2220-E-009-025- 學門領域: 晶片科技計畫--整合型學術研究計畫
無研發成果推廣資料	

99 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：蘇朝琴		計畫編號：99-2220-E-009-025-					
計畫名稱：具通信功能之車用功率系統晶片--子計畫四：多功能車用功率積體電路(3/3)							
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	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	1	100%	件	本案目前有二項專利撰寫中。
		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	4	4	100%	人次	
		博士生	1	1	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	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	4	5	80%		
		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）

本計畫目前撰寫中之專利共計二件。

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）

車輛 PLC 通訊及可程式驅動控制系統：實現車輛通信電子設備驅動晶片低面積、低功率、低電壓、低價格、高可靠度及環保節能省碳的目的。

車輛電源線傳送控制信號：取代了傳統舊式使用配電盤連接控制電纜線技術，大量的減少廢電線、廢電纜的生產製造，直接降低對空氣及環境對地球所造成的污染。

車用電子控制技術：未來的汽車在維修檢測上更便利、省時，縮短工作時效。