

具有超電容平衡機制的高功率鋰鐵電池組之電路板模組開發

陳聖／華夏技術學院 電機系 副教授 · 陳治臻／華夏技術學院 資訊管理系 副教授

本研究係針對裝置的能量來源為鋰鐵電池且為高功率能量需求者為討論標的，由於單只鋰鐵電池之輸出電壓約為3.3~3.7伏特左右，因此若裝置是要使用在高電壓需求之情況時，勢必要採取多只電池串聯(電池組)之模式來達成，且有時還需要輔以並聯之方式來提昇供電電流。若所欲驅動之裝置所需之電壓為48伏特，故必需串聯16只的鋰鐵電池來達成提供足夠的電力。又由於電池在技術上的限制與生產過程中的差異，使得在實際應用時，出現在電池之間的特性差異會有逐步擴大之現象。如何建立有效的平衡模式來彌補前述電池間特性的差異是一項非常重要的工作；其對於電池壽命延長與電池效率提高有相當之助益。本研究係利用超級電容與電池組做並聯接續位置的切換來達成電池之間的平衡，使得串聯連結的電池組中的電池能夠以主動式平衡技巧來進行充電。在高功率鋰鐵電池組中導入超級電容平衡機制的構想係先經由軟體模擬驗證其可行性－利用Simulink的軟體來將超級電容平衡電路以切換電阻的模式做等效推導，並進行後續之模擬。在完成模擬驗證程序後，方才進行實作與檢測作業。由模擬與實際測試得到的結果說明了超級電容和鋰離子電池具有互補的特點；超級電容不僅吸收大量的湧浪電力，使得鋰電池的負擔減輕，且在平衡方面扮演了重要的角色。模擬與實驗結果顯示，本方法確實能夠實現均衡的目標，並具有高的應用價值。

關鍵字：鋰鐵電池、超級電容、平衡

1. 前言

在日常生活中常見的消費電子產品；諸如：數位相機、MP3、筆記型電腦、行動電話等，其電力的來源大多是以小型二次電池為主；這些具有充電功能的電池大致可分為鎳鎘、鎳氫、鋰離子等類型，其中鎳鎘可充電電池(Ni-Cd Rechargeable Battery)有重量大、儲電量小、污染性強、具有記憶效應的缺點。又鎳氫可充電電池(Ni-Mh Rechargeable Battery)與鎳鎘可充電電池相比較，其有儲電量高、無污染、耐過充與過放電、內阻低、放電深度大、記憶效應不明顯的特點。另鋰離子電池(Li-Ion Battery)與鎳氫可充電電池相比較，其有重量較輕(約輕30~40%)、能量比較高(約高60%)、自我放電小、無記憶效應、循環壽命長、較環保的特點。

近年來由於鋰離子二次電池在正負極材料、製程等方面不斷的獲得改善，使得其可運用的範圍擴展到筆記型電腦(10.8或11.1伏等)、電動腳踏車(24伏)、電動機車(48伏)、機器人(48伏)等裝置之電源。又單只的鋰電池的輸出電壓約在3.3V

~3.7V之間，筆記型電腦的電源可採用3只鋰離子電池串聯組合、電動腳踏車的電源可採用8只鋰離子電池串聯搭配多組並聯做合成、電動機車或機器人可採用16只鋰離子電池串聯搭配多組並聯做合成。若是應用至大眾運輸工具的電源系統時，甚且可能需要上百只以上的鋰離子電池進行串並聯，來達到馬達驅動所必需的高電壓高電流電力。

為了使裝置能夠獲得所需的電源電壓值，將鋰離子電池採用串聯方式組合成電池組。但由於電池組中的各電池在材料、製程等方面未必完全一致，使得電池組中的各只電池內部之等效電阻、電容不盡相同。在電池組充電過程中，當其中的部份鋰電池已達額定電壓值時，即將充電電路切離，勢必會造成部份鋰電池儲存電量不足的現象。但若繼續進行充電動作至每只電池電壓均達額定值，則必定又會造成一些電池過度充電的現象，而使電池的極板之氣泡情況加劇，造成溫度上升，產生安全上之風險，並會降低電池之使用壽命。反之，當鋰電池組在放電模式時，其中

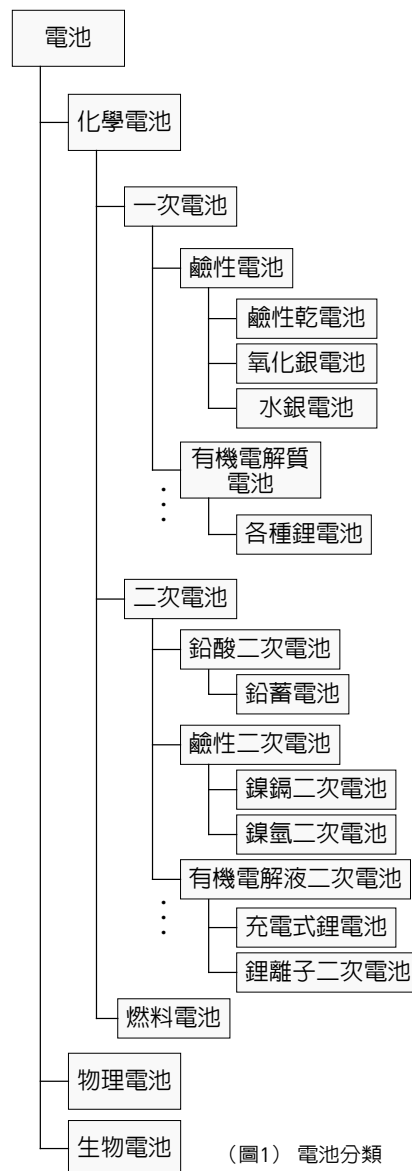
的部份鋰電池已達其下限電壓值，若立即停止放電作業，會造成電池蓄積電能未能充分運用的情況，但若繼續進行放電動作至各只電池電壓均達下限電壓值，則必定會造成一些電池過度放電的現象，造成鋰電池電極板之化學侵蝕加劇，使電池老化加速，並降低有效的充放電次數。綜合言之，電池每進行一次充放電的動作，其內阻就會增加，即所謂的「老化」，若電池組中的電池有過充或過放的情形，則老化速度就會更快；當電池內阻增加會引發充電無法充飽且增加充電所需時間、放電容量減少與效率降低等現象；在電池組中已老化的那只電池，由於內阻變大造成電壓無法充飽，若又再度放電必然會造成過放的現象，造成更加老化。這些情況可視為晶體晶格受損，致使鋰電子可以活動的數量減少，造成電池所能儲存的電量會隨晶格的損壞情況而下降。因此在實務應用上，對於串聯使用中的鋰電池能夠達到充放電平衡控制是一項很重要的工作。

2. 材料與方法

儲能元件被廣泛的運用在各類家電設備、手持式裝置、交通工具等產品。狹義的儲能元件包括有一、二次電池，廣義的儲能元件則泛指所有具備儲能功能的元件，亦包括具有暫時性儲能功能的電容、電感等元件。

為了達成對串聯鋰離子之電池組使用壽命的延長，提高鋰離子電池的平衡是一項非常重要的工作。欲達到平衡的目標，有被動和主動的二種方法被提出；其中利用超級電容器的切換模式係屬於主動的方法，雖然超級電容器與鋰離子電池做結合，會造成能量密度的降低，但由於超級電容器具有良好的高功率密度，使得其對於需求為高電壓且變動頻繁的裝置(如：機器人系統)是很有效的，使得電力管理的效能獲得提升，裝置的工作時間可以被延長。下述先針對電池分類、超級電容器做簡要之介紹，再就平衡的方法做說明。

圖1所示為電池的分類；依據電能產生的方式，電池可以被分為「化學電池」、「物理電池」、「生物電池」等三大類。其中的化學電池是利用化學反應來取得電能、物理電池是利用物理性變化來取得電能、生物電池是利用生物化學反應來取得電能。又在化學電池中的一次電池是電能使用完後就不能再使用的電池。二次電池是在電能使用完以後經由充電又可以重複使用的電池，這種電池是先以物質的化學反應取得電能，再以相反方式由外界給與電能後，將其恢復成原來的狀態。燃料電池是供應氧氣與氫氣後可取得電能的電池。



(圖1) 電池分類

在PDA、筆記型電腦等行動裝置均配備有其專屬的電池組，早期這類裝置是採用「鎳鎘電池」或「鎳氫電池」，目前則是以重量輕、容量大且無記憶效應的鋰離子二次電池組為主流。

鋰離子二次電池是由正極、負極和電解質三個部分所組成。電極材料都是可以嵌入與脫嵌的鋰離子。其中正極材料可以被選擇的有很多種，目前的主流產品大多是採用鋰鐵磷酸鹽。在表1所示為不同的正極材料之平均輸出電壓與能量密度，其中鋰鐵磷酸鹽(LiFePO₄)平均輸出電壓為3.3 V、能量密度達170 mAh/g為四種正極材料中最高者。

(表1) 正極材料之平均輸出電壓與能量密度

正極材料	平均輸出電壓	能量密度
LiMn ₂ O ₄	4.0 V	100 mAh/g
Li ₂ FePO ₄ F	3.6 V	115 mAh/g
LiCoO ₂	3.7 V	140 mAh/g
LiFePO ₄	3.3 V	170 mAh/g

在正極材料為 LiFePO_4 時，其正極的反應為當進行充電時鋰離子產生脫嵌的動作、進行放電時鋰離子產生嵌入的動作。其負極的反應為當進行放電時鋰離子產生脫插的動作、進行充電時鋰離子產生嵌入的動作。又負極材料大多是採用石墨。表 2 a所示為正極反應之方程式，表 2 b所示為負極反應之方程式。

(表2a) 正極反應

正極反應	
充電	$\text{LiFePO}_4 \rightarrow \text{Li}_{1-x}\text{FePO}_4 + x\text{Li}^+ + xe^-$
放電	$\text{Li}_{1-x}\text{FePO}_4 + x\text{Li}^+ + xe^- \rightarrow \text{LiFePO}_4$

(表2b) 負極反應

負極反應	
充電	$x\text{Li}^+ + xe^- + 6\text{C} \rightarrow \text{Li}_x\text{C}_6$
放電	$\text{Li}_x\text{C}_6 \rightarrow x\text{Li}^+ + xe^- + 6\text{C}$

在電解質溶液分成溶質及溶劑二個部份；其中溶質部份常採用鋰鹽，諸如高氯酸鋰(LiClO_4)、六氟磷酸鋰(LiPF_6)、四氟硼酸鋰(LiBF_4)等。在溶劑部份常採用有機溶劑，諸如乙醚、乙烯碳酸酯、丙烯碳酸酯、二乙基碳酸酯等。

鋰離子二次電池的標稱電壓(Normal Voltage)可達3.6伏特，其在充放電方面可以重覆達500次以上，且其不會像「鋰鎳電池」或「鎳氫電池」在重覆淺充電後出現放電容量變小的「記憶效應」，亦即其可以保持完整的電池容量。又由於鋰離子二次電池的放電電壓在 $-20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 的環境溫度中均能夠保持穩定，而穩定的放電電壓能夠延長裝置的運作時間與設備安全。

針對一般常見的電池專有名詞之意義解說呈現如表3，以便對二次電池的特性能夠有更深入的認識瞭解。

超電容(Super-Capacitor)有別於傳統的介電電容器(Dielectric Capacitor)元件，係以多孔性物質或電活性材料來儲存能量的電容器元件。類似於充電電池，但比傳統的充電電池具有更高的比功率與比電容，並且有很高的循環壽命與穩定性，其比功率可達到每公斤千瓦數量級以上，循環壽命在萬次以上。在2005年超電容全球市場規模約1.9億美元，據業者估計在2011年可成長至5.6億美元。超級電容器已被應用在電動車及消費性電子方面，本研究即是將超級電容器應用設計於鋰離子電池組的平衡電路，欲使電池能夠達到最大效能及壽命，必需做到在串聯使用中的電池能夠在平衡的狀況下進行充放電作業。

超電容是介於二次電池與電容器之間的產品，其係透過部份的物理儲能與部份的化學儲能架構，使得其功率密度與能量密度是介於二次電池與電容器之間，但其可使用的年限卻遠大於二

(表3) 電池之專有名詞

專有名詞	意義解說
標稱電壓 (Nominal Voltage)	電池平均電壓值(非電池充電或放電截止時的電壓)。如：鋰離子3.7伏、鎳氫1.2伏。
標稱容量 (Nominal Capacity)	電池的容量；以Ah(Ampere-hours)或Wh(Watt-hours)為單位。
能量密度 (Energy Density)	電池在單位質量或單位體積可釋放出的能量(Wh/Kg或Wh/L)。
功率密度 (Power Density)	電池在單位質量下可釋放出的功率(W/Kg)。
C-率 (C-rate)	電池充放電的電流以電容量表示。如：電池容量為5.2Ah，若使用1C放電，即是以5.2A放電、1hr放完。
自放電率 (Self-Discharge)	電池在非使用的情況下，因內部化學反應所造成容量的減少(%/月)。電池因內部的阻抗及電路／保護電路等都會造成電池自放電。
過充電 (Over Charge)	電池充電超過本身額定容量，使得電壓值達到電池的過充截止條件。
過放電 (Over Discharge)	電池過度釋放能量，使得電壓值達到電池的過低截止電壓。

次電池，故超電容是兼具具有二次電池與電容器特性的儲能架構。二次電池係以電化學的反應來儲能，所以其具有高能量密度的特性，但充放電的速度慢，亦即功率密度較低。電容器因為可以快速的充放電，所以其具有高功率密度的特性，但是物理儲能的效果較差，亦即能量密度較低。

超電容可以應用在暫態備援電源與高功率脈衝線路方面；在暫態備援電源的角色主要是在電源發生關閉或故障時，擔任暫時性的供電任務，甚且可直接利用超電容入替二次電池。在高功率脈衝的實務方面，大多是使用在混合式電源系統，亦即該系統是將二次電池與超電容做結合，由於超電容可以瞬間做充放電，在該瞬間的充放動作恰可扮演做為電池的輔助角色，其可增加二次電池的使用年限。

超電容的選擇應視應用情況而定，包括有電容值與ESR值的選定。如果超電容是應用在：

- (1) 暫態備援電源，則應特別重視電容值的選定；若在備援時間為T內，
 - a. 持續提供給負載的電流值為I，
 - b. 線路的工作電壓由 V_i (原來電源在斷電前的正常工作電壓)降低至 V_f (在發生斷電後，線路維持正常運作所必需的最小電壓) 則

$$(1/2) \cdot (V_i - V_f) \cdot I \cdot T = (1/2) \cdot C \cdot V_i^2 - (1/2) \cdot C \cdot V_f^2$$
 推得電容值選定

$$C = (I \cdot T) / (V_i + V_f)$$

(2) 高功率脈衝線路，則應特別重視ESR值的選定；若在高脈衝期間T內，

- a. 提供給負載的瞬間電流值為I，
- b. 線路的工作電壓由 V_i 降低至 V_f ，

其中 $(V_i + V_f)$ 不可超過線路容許的最大壓降則

$$(V_i + V_f) = I \cdot ESR + I \cdot (T/C)$$

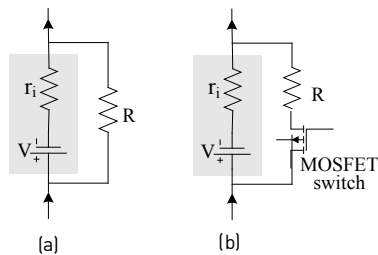
= 內阻產生的壓降 + 電容本身的壓降推得電容值選定

$$C = (I \cdot T) / [(V_i - V_f) - I \cdot ESR]$$

單一鋰離子電池的平衡問題可以被等效成電壓平衡的問題，而平衡電路類別又可以歸類為被動平衡方法與主動平衡方法二種。茲分別說明如下：

(1) 被動平衡方法

圖2(a)所示為採用電阻的被動平衡方法，若單一鋰離子電池內部的電壓是 V ， r_i 是其內部電阻，外側並聯一電阻 R ，在電池放電時的消耗能量是與電池電壓的平方成比例。當串聯的各只電池在不平衡的狀態時，電壓值較高的電池將比電壓值較低的電池消耗更多的能量，雖然這種方法是最廉價與最簡單的平衡法，但能量消耗會導致電阻上的散熱問題。當電池組是由多只電池串聯組成時，熱量散逸的情況尤需注意。縱使電池組中各串聯電池的電壓達已到平衡，各電池仍會對電阻 R 做放電動作，導致提供予裝置的效率 η 會變得很差。圖2(b)所示在被動平衡電路的外側電阻 R 處再串接一MOSFET開關，其可視需求來決定與外側電阻 R 的導通或關閉。如果達到平衡狀態，所有的MOSFET截止，所以其效率較圖2(a)為高。



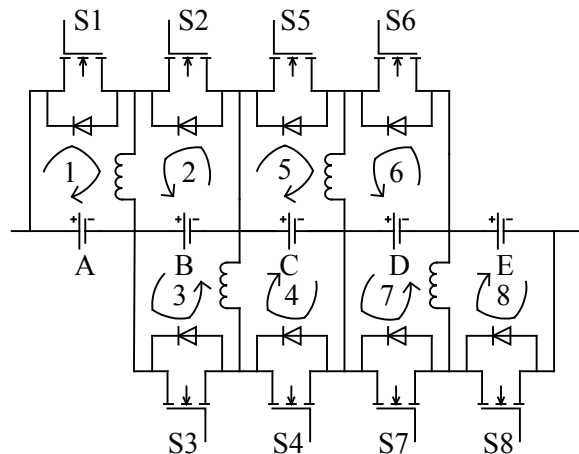
(圖2) 被動平衡法

(2) 主動平衡方法

為了要改善因導入平衡電路而使效率降低的情況，本研究將能量儲存元件(電感與電容)應用於電池串聯平衡設計，圖三所示為使用電感來代替電阻，儲存在電感中的磁能是一個平衡操作的介質，在串聯鋰電池組的充電與放電之不平衡現象，以由單晶片89C51所提供的輸出控制信號來獲得改善。本研究係以4只串聯鋰電池為基準，來開發製作電感器開關平衡模組，再將該模組4組做連接形成對電池組(16只電池單元)的串聯平衡控制;驅動馬達的機器人為目標的試驗研究。這

證明了平衡電路包括：在電池串聯充電時可避免超過臨限電壓值與增加充電能量，另外，在放電過程中也能夠有效防止電壓過量的下降，對電池的使用壽命也會較長。

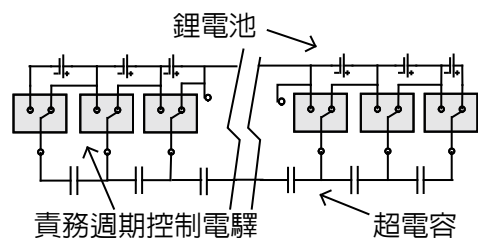
如圖3所示，若在鋰離子電池組中的電池E之電壓是全部電池中最低者，選定具有高電壓的電池A，要將電能經由電感平衡電路傳輸至電池E。當觸發信號被加至 S_1 ，電池A的電流將依圖中所示的迴路1的方式流過電感，當 S_1 被截止後，儲存在 L_1 的磁場能量會轉變成電場，電流將依圖中所示的迴路2的方式流過與 S_2 並聯之飛輪二極體，將能量轉移給電池B。電路的觸發動作之順序依序為 $S_1 \rightarrow S_3 \rightarrow S_5 \rightarrow S_7$ ，電池E將可獲得電能。若在鋰離子電池組中的電池A之電壓是全部電池中最低者，選定具有高電壓的電池E，要將電能經由電感平衡電路傳輸至電池A。亦即改變觸發序列為 $S_8 \rightarrow S_6 \rightarrow S_4 \rightarrow S_2$ ，則電池E會將電能傳送至電池A。



(圖3) 主動平衡方法

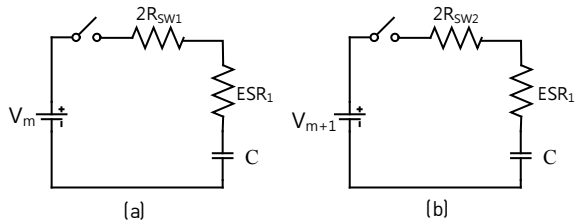
前述提及的實現電池平衡的方式，包括有利用外加電阻散逸的被動平衡方法或是導入電感的主動平衡方法，在方法理論和原型測試是正確的，惟若要使用在重責週期的裝置上，諸如機器人系統是有所不足的。

本研究提出如圖4所示的另一種控制策略 - 在相鄰二只電池佈置一超電容，藉由超電容的切換技巧，來進行電池電能的移轉。本平衡方式的實施具有簡單、價廉、體積小的特點，且在充電及放電狀態時均可正常的工作。



(圖4) 超電容平衡方式

圖5所示為相鄰的任二只鋰離子電池與所配置對應的超電容的等效電路。超電容平衡電路在任一時刻只會與其中的一只鋰離子電池相連接，亦即超電容平衡電路會交互的與所屬的二只鋰離子電池做連接。在圖五(a)為第m只鋰離子電池的等效電路，圖五(b)為第m+1只鋰離子電池的等效電路；其中 R_{SW} 為繼電器接點電阻、ESR為電容的等效串聯電阻。又超電容與鋰離子電池的連接係透過繼電器的a、b接點來完成。



(圖5) 超電容平衡的等效電路

在圖5(a)中，若超電容C的端電壓為 V_m ，其所儲存的電荷 Q_m 為

$$Q_m = C V_m$$

又第m只鋰離子電池與第m+1只鋰離子電池切換的頻率為 f_{sw} ，則在每一次由第m只鋰離子電池切換至第m+1只鋰離子電池的移轉電流I為

$$I = C(V_m - V_{m+1}) f_{sw}$$

由第m只鋰離子電池切換至第m+1只鋰離子電池，電荷移轉的行為可以利用等效電阻R來表示。R值與電容C值及操作頻率f值有關；其中C值介於 μf 與f之間、f值取決於繼電器的工作頻率(低於25Hz)。則

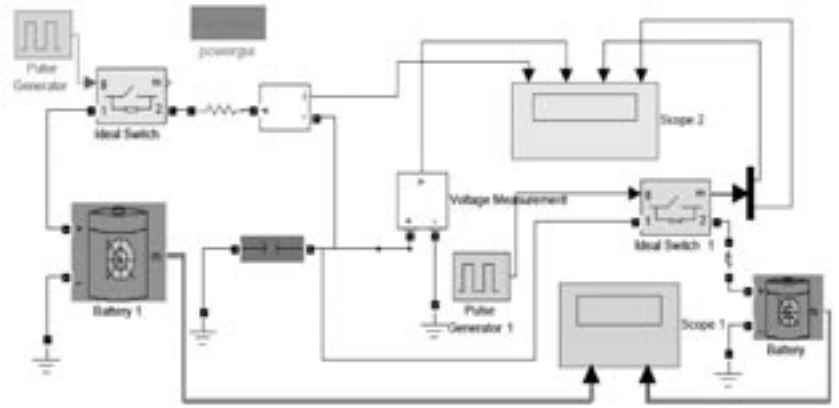
$$R_{sw} = (V_m - V_{m+1}) / I \\ = 1 / f_{sw} C$$

又若繼電器的接點導通，其電阻值 R_{on} 為變動值，其與控制信號的責務週期(若為D)有關，則

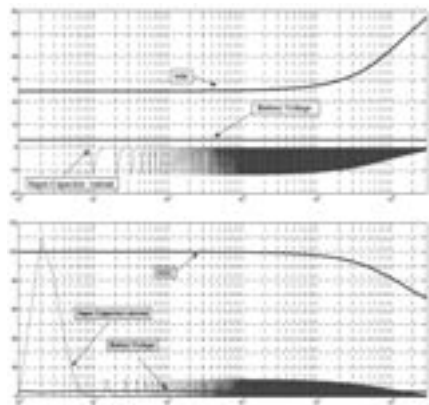
$$R_{sw} = 1 / f_{sw} C + 2R_{on} / D$$

3. 結果與討論

本研究在軟體模擬部分係採適用於動態系統與嵌入式系統的多領域模擬，及以模型設計工具為基礎的Simulink軟體，其提供了一個互動式的圖形化環境，對於各種的時變系統，諸如通訊、控制、信號處理等進行設計、模擬、執行與測試。圖6所示為利用Simulink對電池的切換狀態做模擬，圖7所示為電壓、電流響應的模擬結果；其中繼電器的參數受到操作頻率與責務週期的影響，電能藉由超電容在相鄰二只電池間移轉。



(圖6) 利用Simulink模擬電池狀態的切換



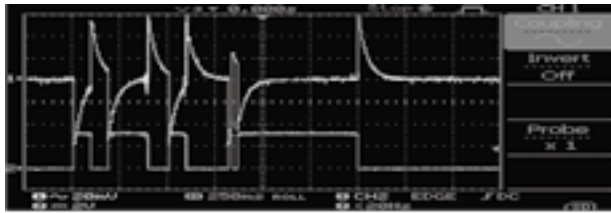
(圖7) 模擬電壓、電流響應

(初態：SOC=25% V=3.3V & SOC=100% V=3.3V)

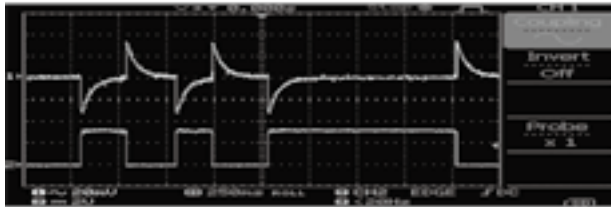


(圖8) 導入超電容控制的電路板

本研究在超電容平衡系統實作部份係由磷酸鋰鐵電池串聯之電池組、超電容切換單元、可編程控制器PIC 18F23K20、光耦合繼電器板組成。其中磷酸鋰鐵電池的標稱電壓為3.3伏，並選定四只電池串聯成為基本模組(電壓值為12伏)，若將基本模組做二(四)串可形成24(48)伏的輸出，提供裝置(如機器人)使用。圖8所示為開發完成的已導入超電容控制的16只磷酸鋰鐵電池串聯(四組基本模組串聯)的電池組的電路板。

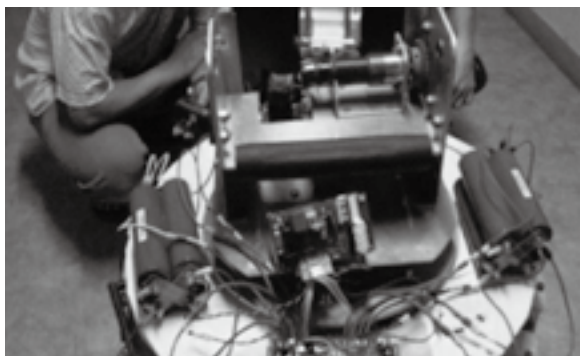


(a)



(b)

(圖9) 負載波形



(圖10) 機器人應用實例

圖9所示為系統對於負載有脈衝電壓的產生時的波形；圖9(a)為只有電池組的情況、圖9(b)為有導入超電容平衡電路的情況，顯見後者對於有突變情況產生時之反應效果較佳。

圖10所示為應用於機器人的實例，電路板屬於雙層形式，上層為可以控制16只串聯磷酸鋰鐵電池的PIC控制器，下層為超電容控制輸出。

4. 結論

電池平衡對於電源需求為高功率的裝置而言是極為重要的，建立有效的平衡模式來彌補電池間特性的差異，本研究介紹被動平衡法與主動平衡法，並利用超級電容與電池組做並聯接續位置的切換來達成電池之間的平衡，對於電池壽命延長與電池效率提高有相當之助益。本研究係先完成軟體模擬，驗證無誤後，再進行電路板的實作驗證。實作驗證可以達到既定之目標。

參考文獻

1. M.F.M. Elias, K.M. Nor, A.K. Arof, "Design of Smart Charger for Series Lithium-Ion Batteries," IEEE PEDS, pp. 1485-1490, 2005.
2. S.W. Moore, P.J. Schneider, "A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems," Society of Automotive Engineers, Inc., 2001.
3. Jian Cao, Nigel Schofield, and Ali Emadi, "Battery Balancing Methods: A Comprehensive Review," IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), September 3-5, 2008.
4. K. Nishijima, H. Sakamoto, K. Harada, "Balanced Charging of Series Connected Battery Cells", INTELEC' 98, October 4-8, 1998, San Francisco, California, USA.
5. Xuezhe Wei, Bing Zhu, "The Research of Vehicle Power Li-ion Battery Pack Balancing Method," The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI' 2009), pp. 498-502, September 3-5, 2008.
6. Andrew F. Burke, "Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Li-ion Battery Pack Balancing Method," Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 4, April 2007.
7. C. S. Moo, Y. C. Hsieh and I. S. Tsai "Charge equalization for series-connected batteries," in Proc. Power Conversion Conference, vol. 3, 2002, pp. 1138-1143.
8. Y.S. Lee and M.W. Cheng, "Intelligent control battery equalization for series connected lithium-ion battery strings," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 52, no. 5, Oct. 2005, pp. 1297-1307.
9. S. Chen, C. K. Wang, and H.P. Huang, "Intelligent Cell-balance Algorithm with Pseudo-series Connected Battery on the Security Robot," The 6th Taiwan Power Electronics Conference & Exhibition (TPECE 2007), Sep. 7th, 2007.
10. C. Pascual, P. T. Krein, "Switched capacitor system for automatic series battery equalization," in Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf, 1997, pp. 848-854.