

物聯網裝置之電源管理設計

Power Management Design Trade-offs for IoT Devices

溫穗安

黃士桐

陳峻志

佟興无

Shui-An Wen, Shih-Tung Huang, JC Chen, Shing-Wu Tung

中文摘要

功耗一直是電子裝置重要指標規格之一，低功耗成為設計物聯網裝置的基本要求。將有限的電力資源發揮最高效率，可從硬體電路設計多樣電源管理技術，例如，電源閘控(power gating)技術、時脈閘控(clock gating)技術等；搭配應用程式靈活運用硬體電路提供之電源管理策略，以及慎選低功耗高效能直流電源降壓模組等多方面一起努力。本篇文章主要內容是介紹低功耗藍牙BLEIoT開發板的設計規劃，並搭配溫度感知器偵測環境溫度做為應用實例，藉由此一感測器整合平台進行功耗實驗，驗證應用程式優化對於電池續航力所產生的影響，進而探討低功耗物聯網裝置的電源管理設計趨勢。

Abstract

Power consumption is always an important specification index for electronic devices. And low power consumption is the basic requirement for designing IoT devices. To maximize the efficiency of limited electric resources, various power management technologies can be applied to hardware designs, such as power gating, clock gating, power management policies provided by hardware with application programs, and carefully choosing step-down DC-DC convertors with low power consumption and high efficiency. This paper introduces the design and planning of a Bluetooth Low Energy (BLE) sensor integration platform, the BLEIoT development board, to which a temperature sensor is attached, to detect the ambient temperature as an application scenario. A series of power consumption experiments are applied to verify the effects of application program optimization to battery life, and the power management design trend of low power IoT devices is discussed as well.

關鍵詞(Key Words)

物聯網 (Internet of Things ; IoT)

低功耗藍牙 (Bluetooth Low Energy ; BLE)

功率能效 (Power Efficiency)

電池壽命 (Battery Life)

感測器整合平台 (Sensor Integration Platform)

1 · 前言

近幾年來，由於通訊技術的發展與電機電子工程及資訊科技的演進造就了物聯網

(Internet of Things, IoT)的時代。快速發展的電子科技，衍生出各種智慧型通訊裝置，大幅改變人們對智慧手持裝置之使用習慣；使用無線網路、平板電腦、智慧型手機、行動APPs等，生活周遭中的裝置能藉由通訊網路得知彼此的狀態並交換訊息，人們透過智慧手持裝置即時掌握物件最新狀態與做適當之處理，為人們帶來了許多方便。

電子裝置功耗一直是個很重要的設計指標，如今物聯網與穿戴式裝置火紅之際，其重要性更甚以往！行動聯網裝置常採用電池作為其電力供應來源，尤其對其體積要求輕薄短小，電池的容量更為受限，裝置之功率消耗與電源系統效能(Efficiency)亦是一重要議題。使用最少的電能若能夠完成既定的功能，這也表示電池的使用時間能夠儘可能延長。達成系統低功耗的設計，必須從應用軟體開發技巧、核心晶片電源管理機制與高轉換效率電源轉換模組等多方面共同努力，避免電池能量之虛耗，以取得系統效能與功耗之間的最佳化。因此，我們設計一低功耗藍牙感測器整合平台(Sensor Integration Platform)—BLEIoT開發板，並選擇搭配溫度感知器偵測環境溫度做為應用情境，藉由此開發板實驗分析、探索物聯網裝置的待機續航力、功率消耗與電源模組設計規劃。

本篇文章章節安排如下，第二章介紹低功耗藍牙感測器整合平台—BLEIoT開發板之架構設計；第三章則是應用情境說明與功耗實驗結果；第四章說明應用於低功耗裝置之直流降壓電源模組設計取舍；最後，結語會在第五章做說明。

2 · BLEIoT感測器整合平台

本章將介紹低功耗藍牙BLEIoT感測器整合平台(以下簡稱為BLEIoT)的設計規劃，並以搭配溫度感知器偵測環境溫度做為應用情境，藉由此一開發板進行實驗，探討低功耗物聯網裝置的電源管理設計趨勢。

2.1 BLEIoT設計規劃

本文所提出的 BLEIoT 系統架構如圖1與

圖2所示。為縮短BLEIoT的開發時程，本文參考多家開放硬體平台設計專案^[1-4]，同時考量到軟體、硬體技術資源的支援與開放程度，本文選擇以Nordic Semiconductor^[5] BLE硬體平台方案作為設計參考。BLEIoT的核心為BLE系統模組「MDBT40 nano (BT4.1 Module)藍牙模組」^[6]，其主要組成元件包括一個位於AHB匯流排之32位元處理器(ARM Cortex-M0)^[7]、16Kb隨機存取記憶體(Random Access Memory)、256Kb非揮發性記憶體(Non-Volatile Memory, NVM)、嵌入式2.4GHz收發器支援藍牙無線傳輸通訊協定之系統單晶片「nRF51822 SoC」^[8]；並配備20組GPIO、UART、SPI、I²C等週邊電路，可連接多種感測器(如：溫度、濕度等等)。BLEIoT還包括一個ANALOG DEVICES的高靈敏度溫度感測晶片「ADT7420」^[9]，藉由此晶片偵測環境溫度，透過藍牙無線傳輸介面，在遠端的智慧手持裝置可接收感測器偵測到的環境溫度讀數，如圖3所示。BLEIoT開發板已規劃將可用的GPIO接腳全數延伸至板邊，以便外接實驗所需的其他電子電路、元件或模組，例如：蜂鳴器、UART電路、I²C 感測器模組等等。電源供應若使用常見的鈕扣電池(例如：CR2302、CR2016等等)可直接推動系統運作；而鋰離子(Li-ion)充電電池則須經過一直流降壓電路，將輸出電壓由最大值4.2V降至藍牙模組最高工作電壓3.6V以下，才可做為BLEIoT開發板的電源。

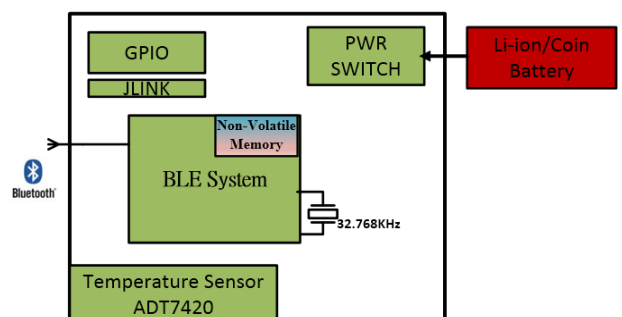


圖 1 BLEIoT系統架構圖

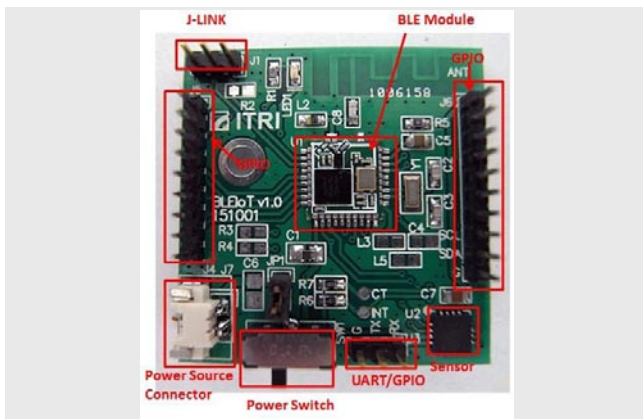


圖 2 BLEIoT感測器整合平台正面照片



圖 3 BLEIoT運作截圖

2.2 多重操作電壓管理架構

伴隨著半導體製程技術的進步，晶片電路設計上應包含功率管理單元 (Power Management Unit) 以降低系統晶片整體功率消耗，常用的電源管理技術包括(1)動態調整各個子系統之電壓電源、(2)動態調整各個子系統之操作頻率、(3)電源閘控(power gating)、(4)時脈閘控(clock gating)等多種技術^[10,11]，以避免不必要的能量消耗，因此可延長電池使用的時間。接下來的章節，將簡介Nordic nRF51822^[8]晶片多重電壓電源的設計架構與應用機制。

2.2.1 DCDC電源模式

如圖4所示，晶片內部經過多組LDO電路，將來自晶片外的電源輸入電壓轉換成提供給晶片內部各功能模組之操作電壓。藉由韌體程式設定，針對不同應用情境可動態啟閉LDO電

路，以達到優化晶片功耗的目的。必須注意的是，BLEIoT開發板若設定在DCDC電源模式下，無線傳輸(Radio)模組運作期間的操作電壓是經過一直流降壓電路(Step-Down DC-DC convertor)降壓後之電壓值，藉此降低無線傳輸模組峰值電流(peak current)。

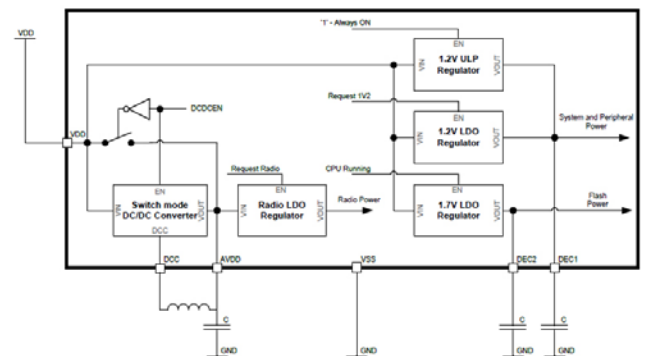


圖 4 DCDC電源模式電源區塊示意圖^[8]

2.2.2 LDO電源模式

BLEIoT開發板若設定在LDO電源模式下，如圖5所示，其與DCDC電源模式差異在於此模式下提供無線傳輸模組電源之LDO模組輸入電壓是直接來自於晶片外電源電壓(VDD)。

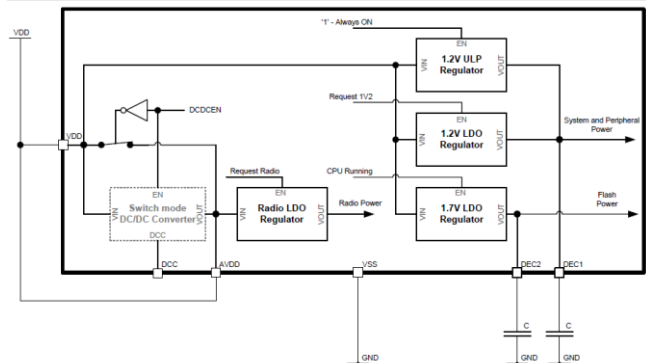


圖 5 LDO電源模式電源區塊示意圖^[8]

2.2.3 不同電壓電源模式應用時機

BLEIoT電源若使用電壓介於3.3V ~ 2.0V的鈕扣電池(coin cell)，使用DCDC電源模式，BLE晶片內部供應無線傳輸模組的操作電壓會先經過一DC-DC converter降壓，目的是拉近LDO模組輸出入電壓差異，進而降低無線傳輸

模組運作時的整體功耗。因DCDC電源模式最低操作電壓規範是2.1V，為了爭取鈕扣電池輸出電壓在2.1V ~ 1.8V範圍仍可使BLE運作之機會，可利用BLE晶片內建的ADC偵測VDD電壓值，當該數值接近於2.1V時，使用軟體切換為LDO電源模式，因LDO電源模式最低操作電壓規範是1.8V，藉此延長同一鈕扣電池可使用之時間。

BLEIoT電源若是使用電壓介於4.2V ~ 2.0V的鋰離子充電電池(Li-ion re-chargeable battery)，必須先經過另一外部直流降壓模組後，才能做為BLE晶片操作電壓電源，以符合BLE晶片最高操作電壓3.6V的規範。若是降壓模組的輸出電壓為1.8V，且BLEIoT開發板設定為LDO電源模式，則BLE晶片的無線傳輸模組是操作在最低電壓，且BLE晶片除了無線傳輸模組以外的其他功能模組之操作電壓也是在最低電壓，同時可關閉BLE晶片內部DC-DC converter電路，即可省下此部分的靜態與動態功耗。整體而言，如此的規劃會是功耗最低之運作模式！因此外部降壓模組的選擇對降低系統整體功耗具有關鍵性角色，在第4章會有進一步的說明。

3 · BLEIoT功耗評估

在這個章節中，我們以BLEIoT為實驗載具，在此平台上執行環境溫度偵測實驗。3.1小節實作功率消耗實驗；3.2小節分析BLE模組不同操作電壓之設定對於功耗之影響。

3.1 韌體程式優化對功耗之影響

BLEIoT內建一個溫度感測晶片「ADT7420」^[9]，核心晶片透過I²C介面存取ADT7420所偵測到之環境溫度數值，再透過藍牙無線傳輸介面，在遠端的智慧手持裝置可接收感測器偵測到的環境溫度讀數。本文環境溫度偵測實驗的應用情境規劃為：當智慧手持裝置與BLEIoT裝置建立連線後，每隔60秒鐘自動更新溫度數值乙次。以下提出兩種韌體程式，藉此說明韌體程式優化對於BLEIoT裝置功耗之影響。

3.1.1 韌體程式A

圖6為韌體A之程式流程圖，主要步驟包括：(1)BLE無線傳輸模組初始化設定；(2)啟動I²C模組；(3)每隔60秒存取ADT7420最新一筆溫度數值。BLEIoT裝置一旦開始供電，ADT7420一直處於active狀態。

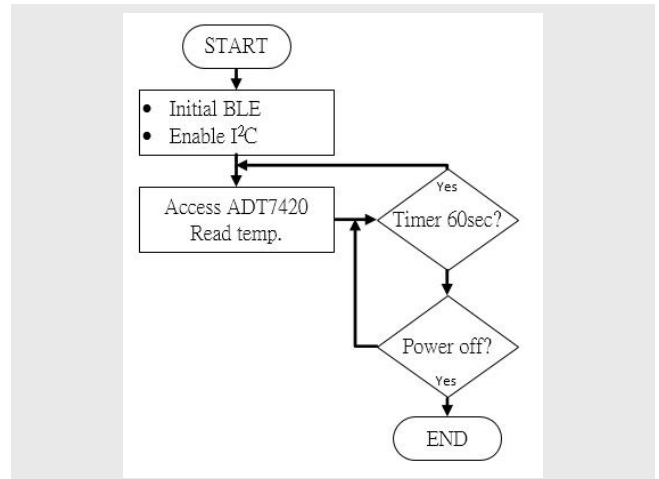


圖 6 韌體A流程示意圖

3.1.2 韌體程式B

ADT7420提供one-shot模式，在需要偵測環境溫度時才啟動溫度感測器運作，其它時間則進入shutdown模式，以避免電力之虛耗。圖7為韌體B之程式流程圖，主要步驟包括：(1)BLE無線傳輸模組初始化設定；(2)啟動I²C模組；(3)設定ADT7420進入one-shot模式；(4)關閉I²C模組；(5)每隔60秒，啟動I²C模組、啟動ADT7420偵測一筆溫度數值、關閉I²C模組與ADT7420進入shutdown模式。

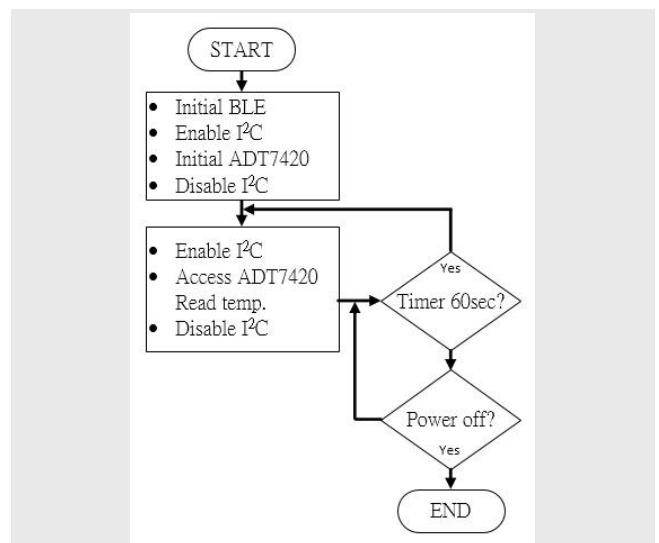


圖 7 韌體B流程示意圖

計算連線時間的平均電流值(I_{Avg})，可以由公式(1)^[12]表示，其中 t_{Conn} 是連線時間， t_{Awake} 是存取溫度感測器的溫度數值花費之時間， I_{Awake} 是存取溫度感測器的溫度數值時之系統平均電流， $I_{Standby}$ 是未存取溫度感測器之溫度數值時之系統平均電流。以「是德科技」(KEYSIGHT TECHNOLOGIES) N6705B DC Power Analyzer量測BLEIoT執行韌體程式A、B的功率消耗分析資料，如表1所示。由公式(1)計算出韌體程式A平均電流約為281.39 μ A、韌體程式B平均電流約為78.52 μ A；再以上述平均電流值由公式(2)^[12]分別估算額定電容量(Battery Capacity)是220mAh的CR2032電池之電池壽命(Battery Life)，如表2所示。

韌體程式A、B的差異在於，韌體程式B在達成溫度感測的目標之餘，會依照功能需求動態啟閉I²C之模組，雖然會略微增加存取溫度數值所花費之時間(t_{Awake})，卻可以大幅降低未存取溫度數值時之系統平均電流($I_{Standby}$)，避免多餘能量的消耗。兩者相較，韌體程式B之電池使用的時間為韌體程式A之約3.6倍，即延長約260%。

$$I_{Avg} = \frac{(t_{Conn}-t_{Awake}) \cdot I_{Standby} + (t_{Awake} \cdot I_{Awake})}{t_{Conn}} \quad (A) \quad (1)$$

$$Battery\ Life = \frac{Battery\ Capacity}{I_{Avg}} \quad (HRs) \quad (2)$$

表 1 BLEIoT功耗數據

Power Analysis	韌體程式A	韌體程式B
t_{Conn}	60.0(sec)	60.0(sec)
t_{Awake}	0.8(sec)	1.0(sec)
$I_{Standby}$	233.099 μ A	16.949 μ A
I_{Awake}	3.848mA	3.711mA

表 2 推估BLEIoT電池壽命

BLEIoT 感測器整合平台	平均電流 $I_{Avg}(\mu A)$	電池壽命 Battery Life(HRs)
韌體程式A	281.39	782
韌體程式B	78.52	2802

3.2 BLEIoT功耗分析

根據不同的應用情境與操作狀態，本小節進一步分析BLEIoT的低功耗運作能力。BLEIoT無線傳輸模組之輸出功率設定為0dbm與低速

傳輸模式，在直線目視距離5米、3V電壓電源的條件下，表3分別紀錄BLEIoT在LDO與DCDC電源模式下不同傳輸模式的平均與峰值電流數據。DCDC電源模式下，無線傳輸(Radio)模組運作期間的操作電壓是經過一DC-DC convertor降壓後之電壓值，因此峰值電流比LDO電源模式可降低25%。兩種電源模式平均功耗皆低於20 μ A。

表 3 BLEIoT平台基礎聯網功耗數據

Mode	Advertising Ave. Current (μA)	Connection Ave. Current (μA)	Peak Current (mA)
LDO	18.169	13.827	15.96
DCDC	15.675	12.634	11.95

4．外部電壓電源模組之選擇

本章節將針對BLEIoT之低功耗特性，分析LDO降壓電路與DC-DC convertor降壓電路的優缺點。

4.1 LDO降壓模組

低壓差線性穩壓器(LDO)，可從較高的輸入電壓轉換成較低輸出電壓，其線路簡單且成本不高，適用於低電流和輸入、輸出電壓差較小的應用情境。當BLEIoT以鋰離子充電電池作為電壓電源，可選用TI LP38502-ADJ (Low Dropout Linear Regulator)^[13]將充電電池電壓由4.0V降壓為1.8V。以3.1小節所規劃之BLEIoT環境溫度偵測情境為範例，表4整理出TI LP38502 LDO轉換效率實驗數據。由實驗結果得知：要維持BLEIoT低功耗之特性，若選用LDO實現直流降壓功能，其電能轉換效率將只有約2.88%！在低功耗應用情境上，LDO並非實現直流降壓電路的首選技術。

表 4 LDO效能實驗數據

輸入功率	4.0V/1.30mA · 5.2mW
輸出功率	1.8V/0.084mA · 0.15mW
損耗功率	5.05mW
LDO效能	2.88%

4.2 DC-DC Convertor降壓模組

晶片大廠，例如德州儀器 (Texas

Instruments)^[14]、凌力爾特 (Linear Technology)^[15]、ANALOG DEVICES^[16]，皆有數十種直流降壓晶片，除了從輸入、輸出電壓規格、最大輸出電流值、靜態功率消耗等指標做為考量因素之外，還要針對應用需求慎選 step-down DC-DC converter。底下例舉兩款 step-down DC-DC converter 來說明應用於 BLEIoT 開發板時需注意的事項。

4.2.1 TI tps65023 直流降壓晶片

DC-DC 直流降壓晶片的轉換效能受晶片的輸入/輸出電壓值與輸出電流值所影響。圖8是 TI tps65023^[17]之效能分析資料，舉例來說，當 tps65023 的輸入電壓為 4.2V、輸出電壓/電流值為 1.8V/0.08mA 時，tps65023 的轉換效能推估約低於 60%。

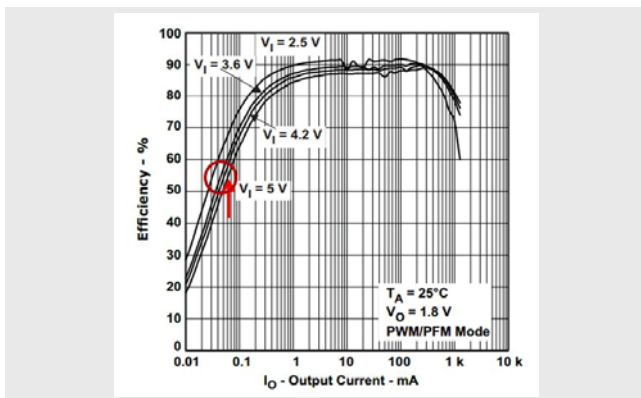


圖 8 TI tps65023 輸出電流對應效能分析圖^[17]

4.2.2 TI tps62736 直流降壓晶片

圖9是 TI tps62736^[18]之效能分析資料，當 tps62736 的輸入電壓為 4.2V、輸出電壓/電流值為 1.8V/0.08mA 時，tps62736 的轉換效能推估約高於 85%。

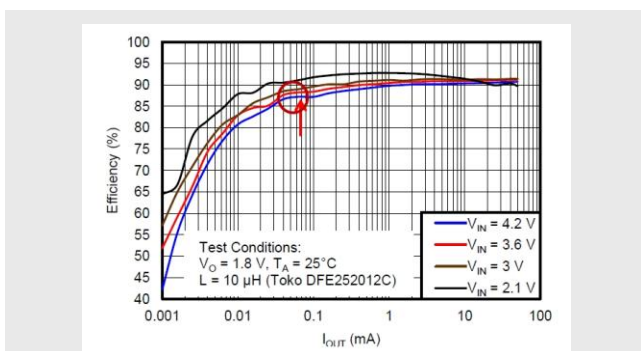


圖 9 TI tps62736 輸出電流對應效能分析圖^[18]

依據 3.1 章節 BLEIoT 應用於環境溫度感測情境，平均功耗約落在 0.08mA 區間，針對此應用情境，選擇低輸出電流有高轉換效能之 step-down DC-DC converter，方能避免充電電池的能量虛耗於 DC-DC converter 晶片上。

5. 結語

本篇文章介紹低功耗藍牙 BLEIoT 感測器整合平台，並以溫度感知器偵測環境溫度做為應用實例，據此整合平台實驗應用程式優化對於電池續航力所產生的影響。實驗結果顯示在達成既定功能規格的大原則之下，藉由動態啟閉非必要功能區塊的電壓電源與操作頻率等功耗優化程式開發技巧，可大幅降低 72% 系統功率消耗，避免了多餘能量之消耗，亦即延長 2.6 倍電池使用時間；本文亦說明低功耗系統應用必須慎選低功耗高效能之直流降壓電源模組，避免電力虛耗於電壓轉換模組上。

參考文獻

- [1] The BeagleBone Black website. [Online]. Available : <http://beagleboard.org/black>
- [2] The Raspberry Pi website. [Online]. Available : <http://www.raspberrypi.org/>
- [3] The Cubieboard website. [Online]. Available : <http://cubieboard.org/>
- [4] The Cubietruck website. [Online]. Available : <http://cubieboard.org/tag/cubietruck/>
- [5] The Nordic Semiconductor website. [Online]. Available : <https://www.nordicsemi.com/eng/Products/Bluetooth-Smart-Bluetooth-low-energy>
- [6] MDBT40 nano (BT4.1 Module) 藍牙模組資料，[Online]. Available : <http://www.raytac.com/products.php?subid=16>
- [7] The ARM website. [Online]. Available <http://www.arm.com/>
- [8] Nordic nRF51822 藍牙低功耗和 2.4GHz 系

統晶片資料，[Online]. Available :
https://www.nordicsemi.com/chi/node_176/Bluetooth-R/nRF51822

- [9] ANALOG DEVICES Temperature Sensor Chip·ADT7420資料，[Online]. Available :
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADT7420.pdf?ref=ASC-PR-478>
- [10] H.L Lin, S.A Wen, P.H. Huang, C.C. Chen, “Efficient Design & Implementation of Low Power Embedded System,” VLSI DESIGN/CAD SYMPOSIUM, 2012.
- [11] K. Flautner et al. “A Combined Hardware-Software Approach for Low-Power SoCs: Applying Adaptive Voltage Scaling and Intelligent Energy Management Software.”
- [12] Measuring Bluetooth® Smart Power Consumption, [Online]. Available :
<http://www.ti.com/lit/an/swra478/swra478.pdf>
- [13] Low Dropout Linear Regulator LP38502-ADJ datasheet, [Online]. Available :
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lp38500-adj.pdf>
- [14] The Texas Instruments website. [Online]. Available <http://www.ti.com/>
- [15] The Linear Technology website. [Online]. Available <http://www.linear.com/>
- [16] The ANALOG DEVICES website. [Online]. Available <http://www.analog.com/>
- [17] TI tps65023 datasheet, [Online]. Available :
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps65023.pdf>
- [18] TI tps62736 datasheet, [Online]. Available :
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps62736.pdf>

作者簡介

溫穗安



現任職於工研院資通所嵌入式系統硬體技術部技術副理。畢業於中原大學資訊工程研究所，研究領域為數位晶片設計與系統晶片設計。

[E-mail: shuianwen@itri.org.tw](mailto:shuianwen@itri.org.tw)

黃士桐



現任職於工研院資通所嵌入式系統硬體技術部副工程師。國立中山大學資訊工程研究所碩士，專長為電路擬真器(In-circuit Emulator)軟硬體設計。

[E-mail: sthuang@itri.org.tw](mailto:sthuang@itri.org.tw)

陳峻志



現任職於工研院資通所嵌入式系統硬體技術部專案副理。專長於系統規劃與分析。

佟興无



現任職於工研院資通所嵌入式系統與晶片技術組技術副組長，兼任嵌入式系統硬體技術部經理。國立交通大學資訊工程研究所碩士，專長為微處理器設計、系統晶片驗證與計算機架構。

[E-mail: swtung@itri.org.tw](mailto:swtung@itri.org.tw)