

無線單相交流電電力監測整合模組開發

葉柏昕¹ 洪育緯² 施倫閔² 蔡渙良^{*2}

¹大葉大學電機工程學系

²大葉大學資訊工程學系

515006 彰化縣大村鄉學府路 168 號

* michael@mail.dyu.edu.tw

摘要

本論文研究「無線交流電電力監測整合模組開發」係參考數位電表及先進讀表基礎建設 (Advanced Metering Infrastructure, AMI) 架構, 運用 ADS1114 類比轉數位轉換器 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 晶片整合電壓、電流感測器開發設計具備積體匯流排 (Inter-Integrated Circuit, I²C) 介面的單相交流電電力監測整合模組, 並結合 TTGO ESP32 WiFi 模組設計開發一組具備提供電氣設備的電壓、電流、功率、電量、功率因子 (Power factor, pf) 及頻率等電氣監測資料的無線交流電電能監測整合模組, 經由 WiFi 接取校園既有 DYU-802.1X WiFi 網路上傳到 ThingSpeak IoT 雲端顯示平台, 提供電器設備管理者電量/電費/故障管理及電器電能使用效率的監測等功能。首先運用 ADS1114 ADC 晶片整合電壓、電流感測器開發設計具 I²C 介面交流電電力監測整合模組, 經由 TTGO ESP32 WiFi 模組內建 MCU 晶片的韌體程式設計, 在 Arduino IDE 整合開發環境開發具備電壓、電流、功率、電量、pf 及頻率等交流電電氣參數監測功能的無線交流電電能監測整合模組; 最後, 整合 0-300 V_{AC}→5 V_{DC} 交流轉直流整流器組成一組無線交流電電能監測模組, 以大葉大學工學院電腦教室 (H708) 總配電箱為實作驗證場域, 經由 DYU-802.1X 上傳到 ThingSpeak IoT 雲端監測平台。本論文創新提出具備 I²C 串列埠通訊介面、高性價比、開源硬體架構的無線交流電電能監測整合模組是本研究的主要創新與創意構想, 對電力能源監控產業應用實務是非常重要的, 經由公開文獻回顧均尚未有相關產品提出, 極具商品化、產業化的價值。

關鍵詞: 無線交流電電能監測模組、I²C 串列通訊介面、ThingSpeak IoT 平台

Wireless Single-Phase AC Power Monitoring Module

PO-HSIN YEH¹, YU-WEI HUNG², LUN-MIN SHIH² and HUAN-LIANG TSAI^{*2}

¹Department of Electrical Engineering, Da-Yeh University

²Department of Computer Science and Information Engineering, Da-Yeh University

No. 168, University Rd., Dacun, Changhua, Taiwan 515006, R.O.C.

* michael@mail.dyu.edu.tw

ABSTRACT

This study presents a wireless single-phase (1 ϕ) alternating current (AC) power-monitoring



module with a digital meter and based on advanced metering infrastructure architecture. The module was run on an Arduino platform with an ADS1114 analog-to-digital converter chip that integrated voltage and current sensors. The developed AC voltage and current sensing module had an inter-integrated circuit (I²C) interface standard and was further combined with a TTGO ESP32 WiFi module for wireless capabilities. The developed wireless AC power-monitoring module can surveil power grids to gather data on voltage, current, power, electricity, power factor (pf), and frequency. The proposed module can enable electrical equipment managers to conveniently monitor electric power, faults, and efficiency. The module was used to monitor a distribution box in a computer classroom at Da-Yeh university, and data on AC parameters were uploaded to ThingSpeak, a cloud-based Internet of Things platform, over WiFi. This wireless AC power-monitoring module with a standard I²C interface is a novel device that could be used in numerous power-monitoring applications.

Key Words : Wireless AC power-monitoring module, I²C serial communication interface, ThingSpeak IoT platform

一、前言

電能的「開源」、「節流」已經是各國政府電力能源規劃的重要方針，我國政府積極開發低碳的燃氣電廠及零碳的太陽光電、離岸風電等太陽能源建置，以期達到備用容量率 15%、備載容量率 10% 的國家電力源能安全政策目標 [5]。同時，節能和需量反應 (Demand response) 措施是提升電能效率的主要方法，電能及能效監測是節電減碳盤點的基本工作，如用電大戶的電力消費資料、用電器具的能源效率資料訊等電能資訊收集及管理、動力設備電氣化和節電輔導診斷，積極推動整體用電效益的提升及產業電動化升級；需量反應是利用離峰時較低用電電價來改變需求端的用電需求，不同於傳統電力系統從供應端調整尖峰備用發電機組的方法，需量反應從需求端來調整電力供應端的輸出來滿足用電，配合智慧電表 (Smart meter) 的安裝，達到削峰補谷的最適化用電負載型態、電費最佳化、穩定供需平衡的目標，進而減緩新設電廠開發壓力或降低限電風險。本論文研究「無線交流電電力監測整合模組開發」的目的係參考數位電表、先進讀表基礎建設 (Advanced Metering Infrastructure, AMI) 架構及經濟部工業局的產品碳足跡生命週期盤查表 [6]，運用 TTGO ESP32 WiFi 模組設計開發電壓、電流整合無線感測模組，提供電氣設備的電壓、電流、功率、電量、功率因數 (Power factor, pf) 及頻率等電氣監測資料，經由大葉大學現有 DYU-802.1X WiFi 校園網路上傳到 ThingSpeak IoT 雲端顯示平台，提供電氣設備管理者電量/電費/故障管理及各式電器電能使用效率的監測等功能。

本論文研究「無線交流電電力監測整合模組開發」係以

ADS1114 ADC 晶片整合 ZMPT101B 電壓感測器、ACS712 電流感測器開發符合積體匯流排 (Inter-Integrated Circuit, I²C) 協定的交流電電壓、電流感測模組，經由 TTGO ESP32 可以提供電壓、電流、功率、電量、功率因子及頻率等電氣參數，經由 TTGO ESP32 WiFi 模組/802.1X 無線通訊網路，上傳到 ThingSpeak IoT 雲端平台，使用者可以經由電腦或行動裝置線上網頁瀏覽或運用 ThingView APP 直接查詢相關電氣參數。回顧近期國內外有關電力監測的物聯網 (IoT) / 智聯網 (AIoT) 系統的研究，我們可發現智慧感知系統有關感測器整合模組研究並不多，Abo-Zahhad [8] 等人運用 ACS712 電流感測器、Arduino Uno 開發板及 XBee 通訊模組開發電力感測節點，將電流資料送到附近的電腦，再運用 NI LabVIEW 軟體開發具有圖形人機介面的能源管理單元 (Energy management unit, EMU)，最後將功率消耗資訊顯示在 ThingSpeak IoT 雲端平台；Galerah 與 Llantos [10] 僅運用 ACS712 電流感測器、DFRduino Uno、SIM800 GPRS 模組將電流資料傳送到 Heroku 平台，電壓等電氣參數資料付之闕如；Oberloier 與 Pearce [14] 二人首創運用 10 kΩ 電位計 (Potentiometer)、CQ2334 電流感測器及 ATTiny 85 微控制器晶片開發具 I²C (Inter-Integrated Circuit) 介面的數位通用能源記錄器 (Digital Universal Energy Logger, DUEL)，Arduino Uno 經由拉升電阻 (Pull-up resistors) 可以同時讀取至少 10 組電壓、電流感測模組；Sookasame 與 Wu [17] 運用交流轉接器 (AC adaptor)、比流器 (Current transformer, CT) 及 Arduino Uno、乙太網路擴展板 (Ethernet shield) 組成感測模組，由乙太網路將電壓、電流、功率及電量傳送並顯示



在線上交易處理 (Online transaction processing, OLTP) 系統，並開發 Android 應用平台提供智慧手機線上瀏覽；Sutisna [18] 等人運用降壓變壓器 (Step-down transformer)、YHDC SCT-013 比流器 (CT) 及 Arduino Uno 整合成感測模組，經 3G 無線通訊網路傳送到自行開發的內部網路 (Intranet)，量測的電壓、電流訊號經商品化的 Kyoritsu KEW 6315、Hioki 328-20 儀表校準，誤差均小於 5%；Ramelan [16] 等人運用 ZMPT101B 電壓感測器、ACS712 電流感測器及 Arduino Uno、RoLa 擴充板整合成無線感測模組，經 RoLa 無線通訊網路傳送到 ThingSpeak IoT 雲端平台；Hasan [11] 等人運用降壓變壓器、ACS712 電流感測器及 Arduino Uno、ESP32 WiFi 整合成無線感測模組，經 WiFi 無線通訊網路傳送到 ThingSpeak IoT 雲端平台。在我們先前的研究中 [13]，一個緊湊且具有足夠可靠性的交流電力監測模組將 ZMPT101B 電壓傳感器和 ACS712-20 電流傳感器與 ATmega328 MCU 集成在一起，用於監測電壓、電流、電功率和電能，以及功率因數 (pf) 的電氣參數；最後的無線監測交流電裝置進一步將自我開發的交流監測模組與 WeMos D1 Mini 模組集成，使用通用非同步收發器 (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART) 通信協議的 Tx/Rx 接口。然而，功率、用電量及功率因數的算法由 ATmega328 MCU 執行，交流頻率的計算在這項工作中未被開發；此外，WeMos D1 Mini 中的 MCU 僅負責數據傳輸，未被有效利用。另一方面，國內研究如賴佳偉與洪敏雄 [4] 在 2012 年使用 ZigBee 開發套件監測電壓、電流以及功率，在 PC 端搭建資料庫以及網頁，收集監測數據並顯示；蔡明章 [7] 在 2013 年使用 ZigBee 量測並傳送電氣參數，在 Beagle Board 上架設 Web Server 與資料庫，儲存電壓、電流、功率及電量等數據，使用 Smart TV Viera Cast 在電視上顯示量測數據；王明志 [1] 在 2014 年使用 PLC 收集量測數據，包含電壓、電流、功率、電量及功率因子，但沒有把收集之電氣資料透過網路傳出；夏傳詠 [3] 在 2017 年使用 MICRHIP PIE24 接收監測模組之電壓、電流及功率，但是沒有將數據儲存，只以藍芽模組傳送數據至手機，並直接將監測數據顯示在手機上；汪佳達 [2] 在 2021 年使用 ZigBee 將集合式智慧電表收集之數據傳送至電腦端的 LabVIEW 圖形化程式，並顯示電壓、電流、功率、電量及功率因子，但沒有將資料儲存。經由學術研究的文獻回顧，我們發現：目前僅有 Oberloier 與 Pearce [14] 運用 ATtiny 85 微控制器晶片整合電壓、電流感測器開發具

I²C 介面的數位通用能源記錄器 (DUEL)，提供多個感測模組整合介面，俾利提升感測資料有效後送的數量；隨著三相電能監測的發展需求，具備 I²C 介面的三相模組可以整合同時經由一組 ESP32 WiFi 模組傳送更適合於低電壓 (Low voltage, LV) 電能產業的電力監測應用。由上述學界及業界的文獻回顧 (如表 1)，本論文有關具備 I²C 介面、802.1X WiFi 網路的無線電能監測模組的開發研究對業界應用實務是非常重要的，極具商品化、產業化的價值。本論文第一章為前言，說明我們的研究動機、目的及相關文獻回顧，藉以比較本報告作品與前面文獻作品的相同點及相異點。第二章為研究方法，首先介紹交流電電力工程學理、感測器及 ADS1114、TTGO ESP32 控制平台的基本原理及運作模式，同時介紹校園 DYU802.1X WiFi 無線通訊網路及 ThingSpeak IoT 平台。第三章為本作品的設計方法及流程，首先運用 Fritzing 進行硬體架構設計及接線，接著運用 Arduino IDE 平台進程式設計，並繪成程式流程圖。第四章為結果與討論，展示的實作成品及量測結果，最後進行結果討論。第五章做一個結論，並陳述我們作品實作心得及收穫。

二、研究方法

本論文研究「無線交流電電力監測整合模組開發」的研究方法係運用 ADS1114 ADC 晶片整合電壓感測器 (Voltage sensor) 和電流感測器 (Current sensor) 來量測電壓、電流等電氣參數，轉成 I²C 串列通訊訊號傳送給 TTGO ESP32 WiFi 模組，參考交流電的功率、電量及功率因子 (Power factor, pf) 公式，運用其內建 Tensilica Xtensa 雙核心 LX6 微處理器 (MCU) 經由韌體程式計算求得功率 (Power)、電量 (Electricity)、功率因子 (Power factor, pf) 頻率等電氣參數，並將電氣參數經校園 DYU-802.1X WiFi 串列埠通訊介面對外傳送。首先在 TTGO ESP32 WiFi 平台、Arduino IDE 整合開發環境來開發電能監測模組，運用 ADS1114 ADC 晶片讀取電壓感測器、電流感測器的數據轉化成 SCL/SDA 電壓、電流、功率、電量、功率因子及頻率等資料，採 I²C 串列通訊介面標準，組合成完整的電能監測模組，架構圖如圖 1 所示。

(一) 單向 110/220 V 交流電基本原理

本論文研究「無線交流電電力監測整合模組開發」的研究方法係運用電壓感測器 (Voltage sensor) 和電流感測器



表 1. 單相交流電電力監測技術文獻回顧比較表

項次 (Items)	電氣參數 (Electrical parameters)						處理器 (Processor)	通訊層 (Communication)	資訊應用層 (information platform)	參考文獻 Reference
	電壓 (V) (Voltage, V)	電流 (A) (Current, A)	功率 (W) (Power, W)	電量 (kWh) (Electricity, kWh)	功因 (pf)	頻率 (Hz) (Frequency, Hz)				
1	×	√ (0-5)	√	×	×	×	Arduino Uno	ZigBee/ Computer	ThingSpeak IoT	Abo-Zahhad et al. (2015)
2	×	√ (0-5)	×	×	×	×	DFRDuino Uno	SIM800 GPRS	Heroku platform	Galera & Liantos (2017)
3	√ (0-300)	√ (0-50)	×	×	×	×	ATTiny 85 chip/ Arduino Uno	DUEL (I ² C)	×	Oberloier & Pearce (2018)
4	√ (0-230)	√ (0-100)	√	√	×	×	Arduino Uno Ethernet sshield	Ethernet	OLTP/ Android Application	Sookasame & Wu (2019)
5	√ (0-240)	√ (0-13)	√	√	√	√	Arduino Uno	3G Lan	Intranet	Sutisna et al. (2019)
6	√ (0-250)	√ (0-20)	√	×	×	×	Arduino Uno/ LoRa Shield	RoLa	ThingSpeak IoT	Ramelan et al. (2020)
7	√ (0-240)	√ (0-20)	×	√	×	×	Arduino Uno/ ESP8266 WiFi	WiFi	ThingSpeak IoT	Hasan et al. (2021)
8	√ (0-250)	√ (0-5/20)	√	√	√	√	WeMos D1 Mini WiFi	WiFi	ThingSpeak IoT	Lin et al. (2022)
9	√ (0-240)	√ (0-20)	√	×	×	×	CC2530	ZigBee	自行架設平台	賴佳璋/洪敏雄 (2012)
10	√ (0-240)	√ (0-20)	√	√	×	×	Beagle Board	ZigBee	Smart TV Viera Cast	蔡明章(2013)
11	√ (0-240)	√ (0-20)	√	√	√	√	PLC(FBs- 10mc)	E-P232-X	×	王明志(2014)
12	√ (0-240)	√ (0-20)	√	×	×	×	Micrhip PIC24F	HL-MD08R-C2 藍芽模組	自行架設平台	夏傳詠(2017)
13	√ (0-240)	√ (0-20)	√	√	√	√	PC	ZigBee	LabVIEW	汪佳達(2021)
14	√ (0-250)	√ (0-5/20)	√	√	√	√	ADS1114 ESP32	DYU-802.1X	ThingSpeak IoT	本論文研究提出

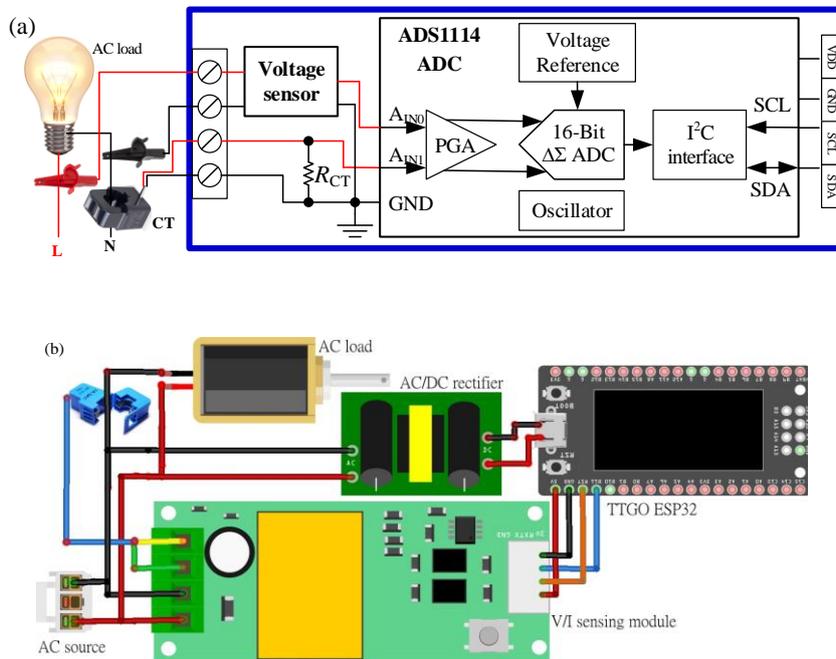


圖 1. 新型交流電無線電能監測模組架構圖：(a)電能監測模組；(b)無線電能監測模組

(Current sensor) 來量測電壓、電流等電氣參數，參考交流電的功率、電量及功率因子 (Power factor, pf) 公式，經由程式計算求得功率 (Power)、電量 (Electricity quantity) 及

功率因子 (Power factor, pf) 等電氣參數。因此，量測的交流電電壓、電流大小可表示成



$$v_{AC}(t) = V_{\max} \cos(\omega t + \theta_v) \quad (1)$$

和

$$i_{AC}(t) = I_{\max} \cos(\omega t + \theta_i) \quad (2)$$

其中 V_{\max} 、 I_{\max} 為電壓、電流的最大值， $\omega = 2\pi f$ ， f 為交流電頻率， θ_v 、 θ_i 為電壓、電流的相位角。相對的功率及平均功率大小為

$$\begin{aligned} p_{AC}(t) &= v_{AC}(t)i_{AC}(t) \\ &= \frac{V_{\max}I_{\max}}{2} [\cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i) + \cos(\theta_v - \theta_i)] \end{aligned} \quad (3)$$

和

$$\begin{aligned} P_{Ave} &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p_{AC}(t) dt \\ &= \frac{V_{\max}I_{\max}}{2} \cos(\theta_v - \theta_i) \end{aligned} \quad (4)$$

已知 $V_{\max} = \sqrt{2}V_{RMS}$ 、 $I_{\max} = \sqrt{2}I_{RMS}$ ，其中 RMS 為交流訊號的均方根（Root mean square, RMS）值，則交流電的平均功率可以表示成

$$P_{Ave} = V_{RMS}I_{RMS} \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (5)$$

接著電量的大小可表示成

$$w_{AC}(t) = \int p_{AC}(t) dt \quad (6)$$

交流電的電力品質可以用功率因子（pf）表示，因為其定義為是一負載所消耗的有效功率與其視在功率（Apparent power）的比值，可以表示成

$$pf = \frac{P}{I_{RMS}V_{RMS}} = \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (7)$$

其中 $I_{RMS}V_{RMS}$ 為視在功率（單位：VA）。最後，交流電力的頻率可以經由計算量測每秒電壓信號的最大振幅次數。由上面推導可以得知，交流電的電氣參數可以經由電壓、電流的量測，進而得到功率、電量、功率因子及頻率的資料。本論文僅運用電壓/電流感測器量測工作電壓及電流大小，相

對應的功率、用電量、pf 及頻率均由程式編程取得，所有電氣參數的取得均經由 I²C 技術的 SCL/SDA 串列通訊介面對外傳送。

（二）電壓、電流感測器原理

本論文首用 ADS1114 ADC 晶片整合電壓感測器、電流感測器，提供交流電的電壓、電流電氣資料的 I²C 串列通訊訊號，如圖 1 (a)；接著，以 TTGO ESP32 內建 Tensilica Xtensa 雙核心 LX6 微處理器（MCU）為核心平台，經程式計算相對應的功率、電量、功率因子（pf）及頻率等電氣參數資料；接著，以 TTGO ESP32 內建 WiFi 單元將電壓、電流、功率、電量、功率因子（pf）及頻率等交流電電氣參數資料經校園 DYU-802.1X 上傳到 ThingSpeak IoT 平台。其中電壓轉換器（Voltage transducer）運用光電偶連原理將初級電路（Primary circuit）高電壓的電壓大小→轉換成光/磁→次級電路（Secondary circuit）的光接收器將光/磁的強度按比例轉換成低電壓的電壓/電流大小，並以利實現量測儀表、保護設備及自動控制設備的標準化、小型化，運用電氣隔離（Galvanic isolation）隔開高電壓系統，實現標準化、小型化量測儀表，確保人員和設備的安全；本論文採用精密微型電壓轉換器 ZMPT101B [15]，輸入電壓：0-300 V_{AC}，輸出電壓：0-5 V_{DC}，精準度：±1 V_{AC}@TAMB=25 °C，電壓感測器電路架構如圖 2 (a) 所示。另一方面，電流感測器係運用初級電路（Primary circuit）高電壓的電流流經銅傳導電路→產生磁場→次級電路（Secondary circuit）的霍爾（Hall IC）將霍爾效應所產生的磁場強度按比例轉換成低電壓的電壓大小；本計畫採用符合業界高準確度、成本效益比佳的 ACS712 電流感測器 [9]，最大輸入電流大小：20 AAC，輸出電壓：0-5 V_{DC}，精準度：±1.5% @TAMB=25 °C，電流感測器電路架構如圖 2 (b) 所示。

（三）微控制平台

本論文採用 TTGO ESP32 模組為微控制器平台，首先接收運用其內建 Tensilica Xtensa 雙核心 LX6 微處理器（MCU）為核心平台，首先運用 ADS1114 ADC 晶片整合電壓感測器、電流感測器，擷取交流電的電壓、電流電氣資料，經由韌體程式設計計算相對應的功率、電量、功率因子（pf）及頻率等電氣參數資料，實作一組具備自動連結校園既由 DYU-802.1X WiFi 網路的無線單相 110/220 V 交流電能監測模組。TTGO ESP32 完全相容 Arduino 開發板，可以在 Arduino IDE 整合開發環境來設計程式及應用韌體開發，具



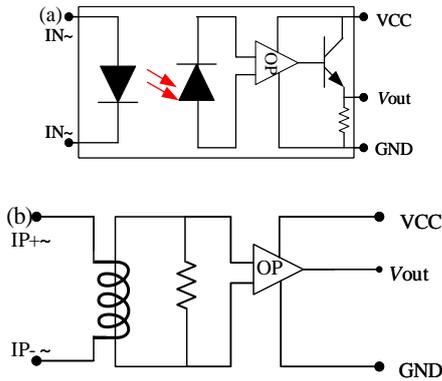


圖 2. 電壓/電流感測器電路架構圖：
(a)電壓感測器; (b)電流感測器

有 WiFi 功能的 Arduino 平台，方便使用 TTGO ESP32 等相關函式庫，接腳包含 GPIO 引腳×13、ADC 接腳×11（輸入範圍 0-3.3 V_{DC}），支援 OTA 無線上傳。

(四) ThingSpeak IoT 平台

ThingSpeak 是一個能透過網路使用 HTTP 和檢索來自物聯網 (IoT) 的數據資訊之網路服務，其中 ThingSpeak 資料庫是由 Mathworks 公司所提供的免費空間，每一個註冊帳號可以免費取得 4 個頻道，頻道可以視為資料庫，每 1 個頻道可提供 8 個自訂欄位，最重要的是它提供非常直覺的圖表製作的功能，可以快速將資料轉換成圖表，且資料傳遞採用最簡單的 http get。該平台可有許多功能，例如：開放式應用程式、即時資料收集、位置數據收集、數據處理、資料視

覺化、設備狀態資訊等；除了儲存資料外，也有提供 React 及 ThingHTTP，如 IFTTT 功能串連其他服務以 LINE Notify 發送通知。

三、設計與實現

(一) 硬體設計

如圖 1 (a) 所示，開發了一種新型的交流電源監測模組，採用 I²C 串列通信協定，由一個 ZMPT101B 電壓感測器、一個 ACS712-20A 電流感測器和一個 8 位元 ATmega328 微控制器 (MCU) 所組成。其中 ZMPT101B 電壓感測器 [17] 是一個電流型電壓感測器，如圖 3 (a) 所示，用於交流電壓讀取，具有高電隔離和足夠的精度；一個限流電阻和一個採樣電阻被設計用來保持輸入和輸出電流的額定比例為 2:2 mA，輸入電流由串聯的限流電阻和並聯的 100 Ω 的採樣電阻來獲取輸出電壓；然後，類比輸出電壓由一個兩級反相的 OP 放大器轉換，其額定電壓為 0-5 V_{DC}。商用的 ACS712 電流感測器 [10] 是一種適用於交流/直流電力的電流感測器，它由一個線性霍爾感測器電路組成，該電路有一個銅質的傳導線圈來產生一個磁場，內置的霍爾 IC 轉換成一個比例電壓，帶有額定電流的 ACS712ELCTR-20A-T 電流感測器的電流感測模組的連接電路設計，如圖 3 (b) 所示。ZMPT101B 電壓感測器和 ACS712 電流感測器的主要技術參數列於表 2。

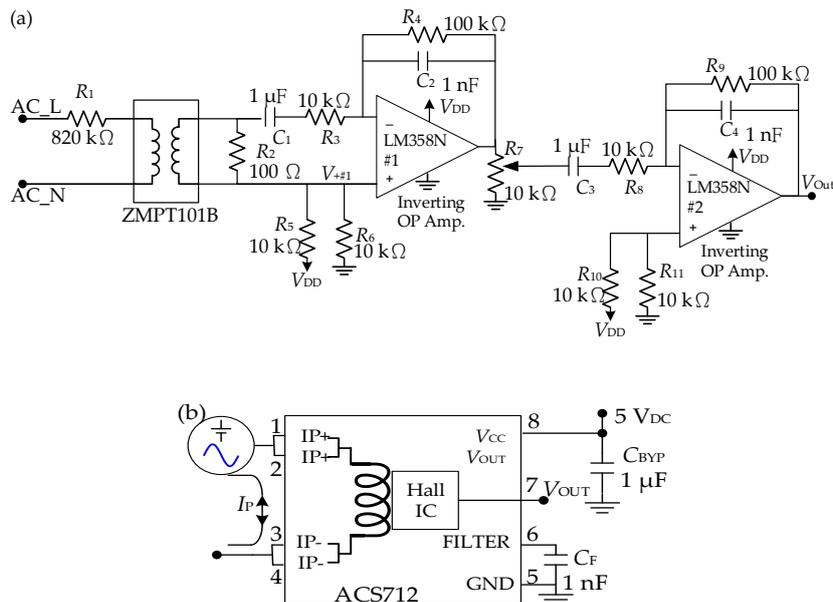


圖 3. 電壓/電流感測器電路方塊圖：(a)電壓感測器; (b)電流感測器



表 2. 電壓和電流感測器的主要技術參數

Sensor type	Main technical parameters				
	Input voltage (V)	Input current (A)	Output voltage (V)	Output current (mA)	Operating temperature (°C)
ZMPT101B voltage sensor	0-1000	0-0.01	0-1	0-10	-40-60
ACS712-20 current sensor	0-720	±30	0-1	0-50	-25-60

ADS1114 ADC 模組是一個內建 2 個通道以上 16 位元類比轉數位轉換器 (Analog-to-Digital Converter, ADC)，具有高精度和低功耗的特點，並具 I²C 標準介面的串列通信協定 [19]。電壓和電流感測器的兩個類比輸出分別由 ADS1114 ADC 晶片的 AIN0 和 AIN1 輸入讀取然後以 I²C 介面協定輸出，具備 I²C 介面相容的交流電壓/電流整合感測模組如圖 1 (a) 所示。經由內建程式計算出功率、電量、功率因子及頻率等相關電氣參數，根據 Nyquist-Shannon 採樣定理，電壓和電流的暫態讀數的採樣頻率應至少比交流電的頻率 (50 或 60 赫茲) 大一倍或相等，在實際應用中，為了提高信號讀數的解析度，建議採用 10 倍的取樣速率；因此，50 Hz 和 60 Hz 交流電力系統的採樣週期分別為 2 ms 和 1.67 ms，即交流監測模組的電壓和電流讀數的採樣週期被程式設計為 1.67 ms，60 Hz 的採樣數為 167。根據上述交流電基礎知識的推導，然後根據電壓和電流的讀數計算出相應的電壓和電流的有效值、暫態功率和平均功率、電能的累計消耗和 pf。此外，交流電的頻率可以通過代碼程式設計找到，單位是每秒的週期。如圖 1 (b) 所示，擷取的暫態電壓和電流讀數經 ADS1114 內建程式計算可得通過 I²C 通信協議被發送到下面的 TTGO ESP32 WiFi 模組。TTGO ESP32 是一個內建 Tensilica Xtensa 雙核心 LX6 微處理器 (MCU) 組成的物聯網微控制器，是 ESP8266 的後繼者，具有集成低成本、低功耗的片上系統 (SoC) 微控制器，集成了 4 MB/16 MB 快閃記憶體和 WiFi 模組 [12]。

(二) 韌體設計

首先，TTGO ESP32 平台是由一個內建 Tensilica Xtensa 雙核心 LX6 微處理器 (MCU) 組成，可在開源的 Arduino IDE 整合式開發環境下進行程式設計，該環境支援 C 和 C++ 語言，並有特定的代碼結構規則。首先，ADS1114 ADC 整合 ZMPT101B 電壓感測器和 ACS712 電流感測器的讀數可以 I²C 串列標準輸出，與 TTGO ESP32 模組都是在 Arduino IDE 環境下開發的。TTGO ESP32 模組內建 MCU 基於上述

交流電基本原理的推導，然後根據電壓和電流的讀數計算出相應的電壓和電流的有效值、暫態和平均功率、電能的累計消耗、pf 和頻率。為了說明 ThingSpeak 物聯網平台中每分鐘的觀察週期，電壓和電流的有效值定義為

$$X_{\text{RMS}}(kT_0) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^2(jT_s)} \quad (8)$$

其中 $X_{\text{RMS}}(kT_0)$ 是電壓或電流的第 k 個有效值， T_0 是 ThingSpeak 物聯網平台的顯示週期 (最快 15 秒顯示一筆資料)， $x(jT_s)$ 是電壓或電流的第 j 個值， T_s 是 TTGO ESP32 LX6 MCU 的取樣週期，對於 60 赫茲來說是 1.67 毫秒，即每秒 600 個樣本 (Sample per second, SPS)，對於 50 赫茲來說是 2 毫秒，即 500 個 SPS， n 是弦波信號的採樣數，對於 60 赫茲來說是 $n=3600$ ，對於 50 赫茲來說是 $n=3000$ 。ADS1114 ADC 內建 16-bit, 860 SPS, Delta-Sigma A/D 轉換器，有了第 k 分鐘的電壓和電流的有效值讀數，第 k 分鐘平均功率 (單位：W) 和累加到 k 分鐘用電量 (單位：kWh，即電量度數) 就可以分別得到

$$P_{\text{Ave}}(kT_0) = V_{\text{RMS}}(kT_0) I_{\text{RMS}}(kT_0) \text{pf} \quad (9)$$

和

$$w_{\text{AC}}(kT_0) = \sum_{k=0}^k \frac{P_{\text{Ave}}(kT_0)}{60 \times 1000} \quad (10)$$

其中讀取電壓、電流出現最大值的時間差去計算電壓、電流間的相位角差，再取 “cos” 函數運算即可得到功率因子 (pf)；用電量單為 kWh，每分鐘所得的功率值 (W) 先除以 1000 轉成 “kW”，再除以 60 即為電量 (kWh)，程式以累加方式即可到用電量值 (kWh)。



在"Additional Boards Manager URLs"欄位中輸入 ESP32 核心的.json 檔,“開發板管理員”的板子選擇“ESP32 Dev Module”板子的版本進行安裝後,在同一個 Arduino IDE 中以相同的編碼配置開發了預期規劃的無線交流電源監控模組的軟體。運用 TTGO ESP32 模組內建 WiFi 單元和校園 DYU-802.1X WiFi 網路,讀取線上電壓、電流、電功率和能量、pf、頻率等所有資料經由 WiFi 無線通訊網路發送到 ThingSpeak 物聯網平台,其中 SSID 和密碼事先經過檢查,隨後在軟體程式中進行編碼。ThingSpeak 物聯網平台是一個開源的物聯網應用程式介面 (Application programming interface, API),它方便地提供了一個物聯網平台,使用應用層超文字傳輸協定 (HyperText Transfer Protocol, HTTP) 和訊息佇列遙測傳輸 (MQ Telemetry Transport, MQTT) 發佈-訂閱網路通訊協定來存儲和檢索感應資料。HTTP 和 MQTT 都通過傳輸控制協議 (Transmission control protocol, TCP) 連接運行,並且都是用戶端-伺服器結構。HTTP 伺服器直接回應用戶端的請求,而 MQTT 允許消息在用戶端和伺服器之間雙向傳遞。HTTP 一次處理一個請求,每次都要進行認證等開銷。ThingSpeak 物聯網平台為物聯網系統提供 HTTP 和 MQTT 連接功能,以將資料從感測器傳輸到後端。MQTT 協議的特點是在用戶端-伺服器和用戶端之間以兩個方向進

行消息傳輸,並將每個包的資料開銷降到最低。擬議的無線交流電監測模組作為用戶端,ThingSpeak 物聯網平台作為伺服器,負責資料存儲和觀察再請求的傳感用戶端。此外,雲端的即時資料流可以通過 ThingView APP 直接視覺化,並通過 MATLAB 軟體進行進一步的匯總、視覺化和分析。無線交流電源監控模組的流程圖如圖 4 所示。

四、結果與討論

本論文研究「無線交流電電力監測整合模組開發」的新型無線交流電源監測模組包含 ZMPT101B 電壓感測器、ACS712 電流感測器、ADS1114 ADC 和 TTGO ESP32 WiFi 模組。實測場域以大葉大學工學院 H708 電腦教室的照明和電腦插座進行了 24 小時連續測量,監測結果經 DYU-802.1X WiFi 網路轉發到 ThingSpeak 物聯網平台。最後,通過點擊 ThingSpeak 物聯網平台上的 "資料導入/匯出" 圖示匯出資料,並在 MATLAB 環境下進行分析。H708 教室的照明和電腦插座 ThingSpeak IoT 平台網頁截圖如圖 5 所示,其中照明用電網址: <https://thingspeak.com/channels/2521976>; 電腦插座網址: <https://thingspeak.com/channels/2527078>。相關過程描述如下。

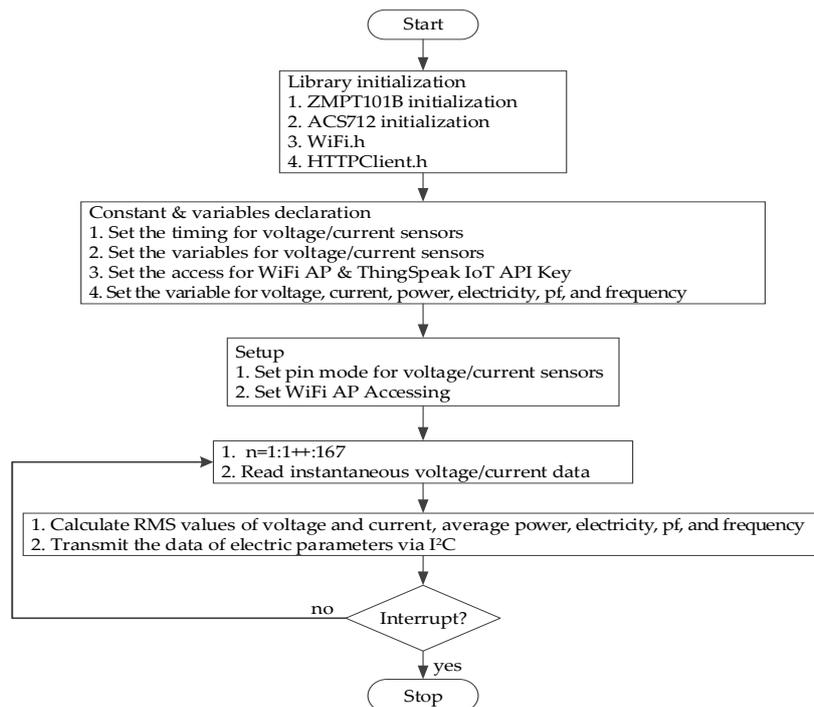


圖 4. 程式流程圖



(a)

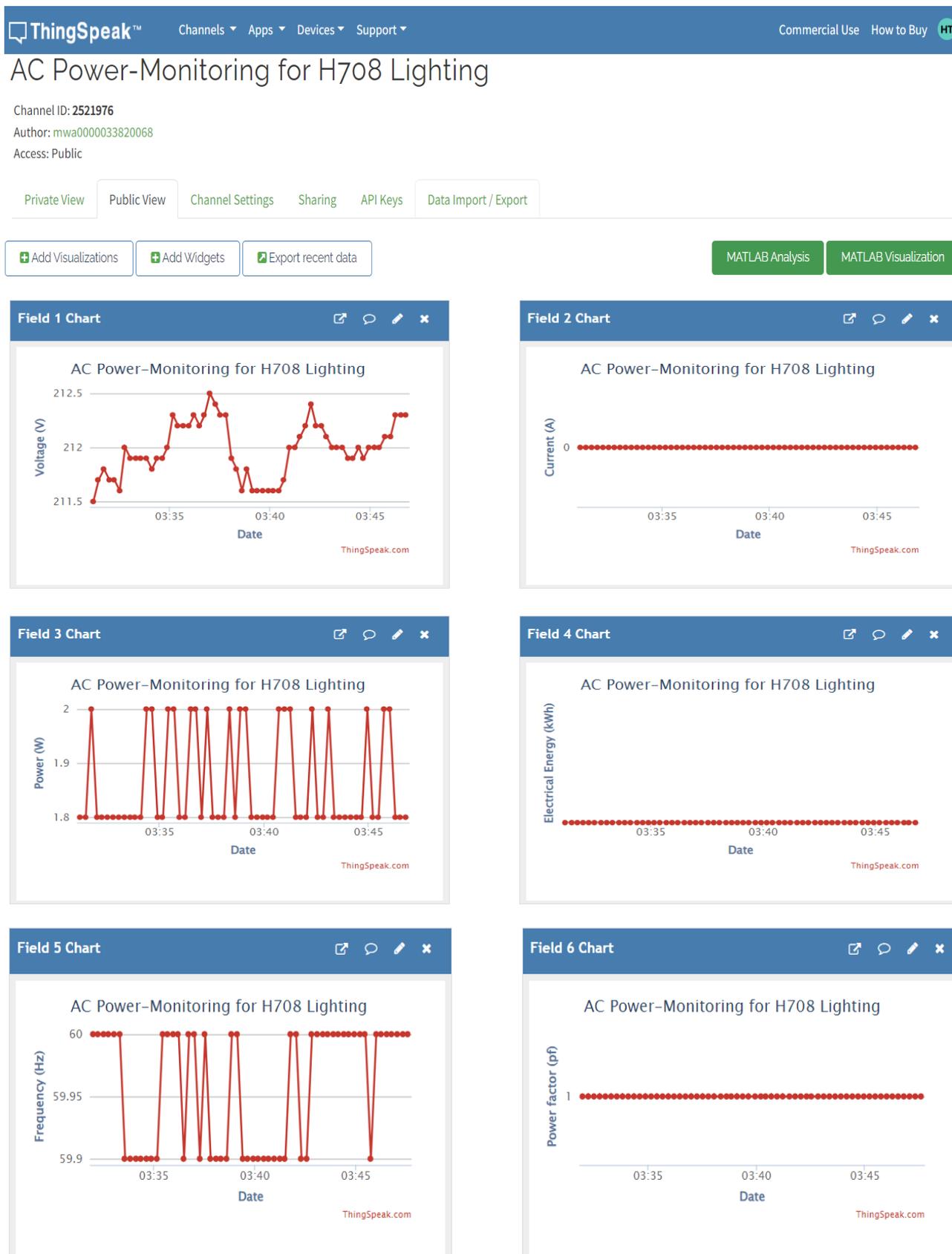


圖 5. H708 電腦教室的照明和電腦插座的 ThingSpeak IoT 平台網頁截圖：(a)照明電器；(b)電腦插座



(b)

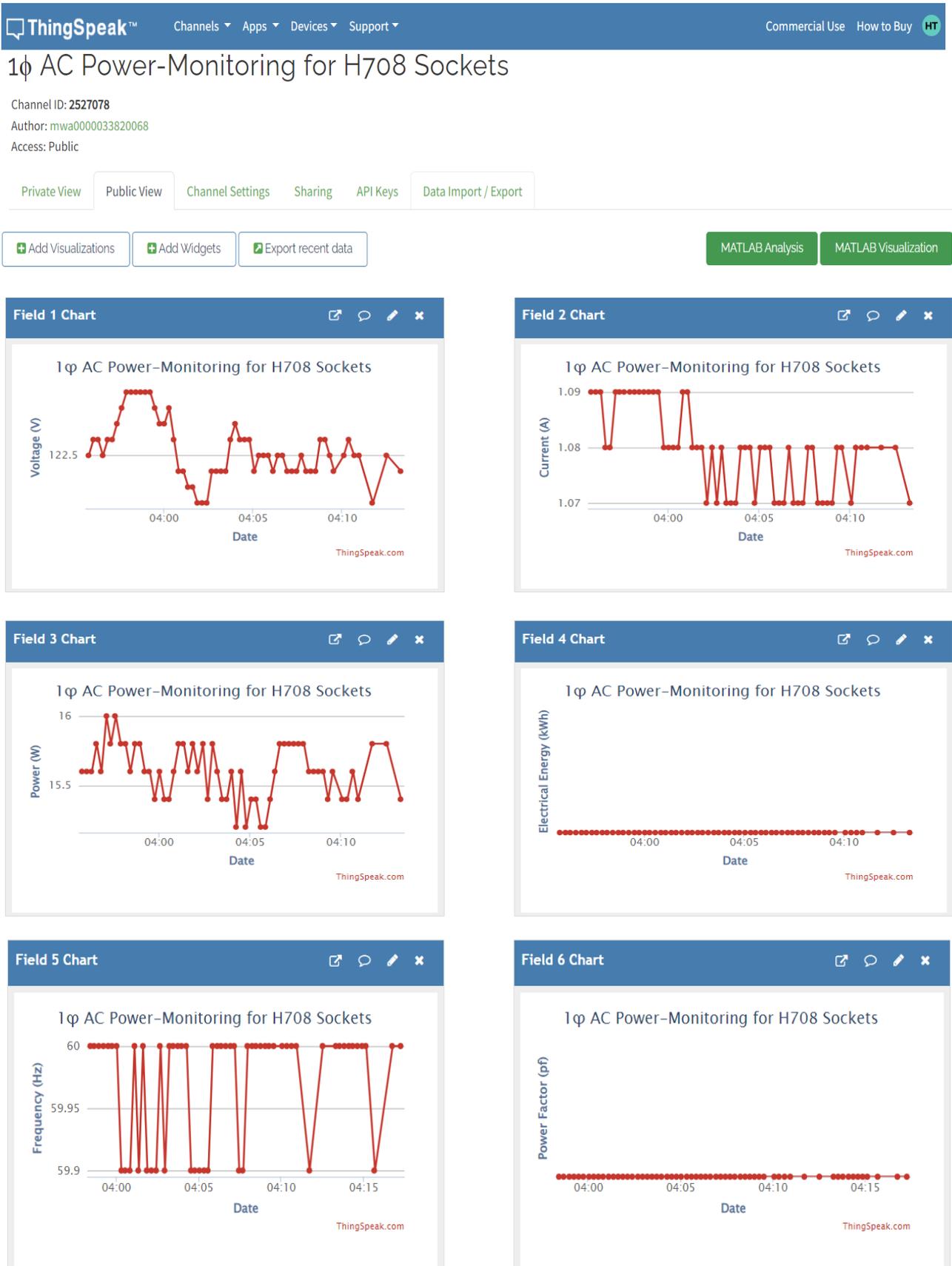


圖 5. (續) H708 電腦教室的照明和電腦插座的 ThingSpeak IoT 平台網頁截圖：(a)照明電器；(b)電腦插座



(一) 照明電能量測結果

本論文研究「無線交流電電力監測整合模組開發」的新型無線交流電源監測模組針對照明用電單相 220 V 交流電的電氣參數在 1 分鐘採樣週期內連續 24 小時測量的觀察結果如圖 6 所示。圖 6 (a) 顯示感應電壓值的變動狀態，一般介於 207-216 V_{AC}，圖中顯示大約 09:10，因應教職員工到校上班、學生到校後，工作電壓通常低於 213 V_{AC} 以下；夜間因電較少、電壓較高，特別的是，18:00 後，教職員工下班、學生離校返回宿舍後，電網上的工作電壓明顯維持在較高位準。一般時間，H708 電腦教室沒有上課，電燈照明沒有使用，如圖 6 (b) 所示，電流為 0 A；上午大約 09:08 時，H708 電腦教室準備開始點燈、準備上課，消耗電流大小大約 3.75 A 上下；中午 12:00 下課，熄燈休息，電流恢復為 0 A。下午課堂開始上課，13:00 前開始點燈，電流立即增加；同時，開啟吊扇增加電壓 220 V 的電流到 3.7 A 上下。對應於電燈照明、吊扇的開啟，相對的功率大小如圖 6 (c) 所示；相對地，H708 電腦教室照明、吊扇的用電量是功率對時間的線性累加，如圖 6 (d) 所示，用電量自 09:10、12:50 呈現線性累加，如圖 6 (d) 所示，用電量自 09:10、12:50 呈現線性增加，並於 12:00、15:55 停止。H708 電腦教室的照明、吊扇的 pf 值及頻率分別如圖 6 (e) 和 6 (f) 所示，顯示照明設備使用時其功率因子均大於 0.70 以上、市電供電頻率 59.8-60 Hz，尚屬穩定。

(二) 電腦插座電能量測結果

為了進一步評估 H708 電腦教室電腦插座的電能資料，本論文所提出的無線交流監測模組直接量測單相 110 V 電腦插座的電氣參數，連續 24 小時的現場測量如圖 7 所示，採樣週期為 1 分鐘。圖 7 (a) 顯示電壓感測資料遠高於一般市電 110 V 標準；目前電器設備的電力輸入最大值為 240 V，尚屬可以接受範圍。圖 7 (b) 顯示，大約 09:08 時，學生進入教室、開啟電腦，電腦插座消耗的電流量明顯上升，大約在 7.8-8.2 A，10:00/11:00 整點下課休息時，電腦會自動進入休眠狀態，用電電流量會明顯下降；相同的電流變化在下午的課程期間也是有相同的響應，如圖 7 (b) 所示。有了電壓、電流值，兩值相乘即可得到相對應的功率，如圖 7 (c) 所示，功率的即時變化均可有效地監測。有了功率，運用其對時間的累加即可得到用電量，圖 7 (d) 顯示上午/下午上課期間其用電量因功率變化而呈現近似線上增加，功率變化造成的

用電量變化可以有效掌握。圖 7 (e) 顯示無線交流電源監測模組計算出的 pf 值大於 0.80 以上，特別的是：上午/下午上課時，電腦用電的功率因子會因為每部電腦的使用狀態而產生變動，惟均大於 0.80 以上。H708 電腦教室的電腦插座的頻率 7 (f) 所示，與前面 6 (f) 照明用電頻率相似，市電供電頻率 59.8-60 Hz，尚屬穩定。

(三) 討論

本論文研究「無線交流電電力監測整合模組開發」的新型無線交流電源監測模組的成本低於 3,000 元。若使用商化的交流電表如 CM3286-1 交流電表來測量單相 110/220VAC 儀器的所有電氣參數，包括電壓、電流、電功率和能量、pf 和頻率，需要二台同時量測才能達到上述 6 組電氣參數同步量測，每台 CM3286-1 交流電表在網上的售價超過 30,000 元。這揭示了本論文所提出的無線交流電能監測模組極具較佳的的成本效益。

另一方面，圖 6 (f) 顯示 H708 電腦教室照明設備的功率因子 (pf) 值達於 0.70 以上，分析目前採用傳統 T8 照明燈管，未來可以換裝成 4 尺 T8/T5 LED 燈管，預估目前 LED 燈照明的 pf 值均高達 0.8 以上，同時目前的價格與同樣式傳統燈管不相上下，值得推薦更新。同時，圖 7 (b) 顯示 H708 電腦教室電腦插座的電流在沒有上課時，尚有 1 A 以上的電流量，評析應為所有電腦主機/螢幕經由插座用電所消耗大約 130 W 上下；因此，電腦教室控制電腦插座的無融絲開關應於課後一併關閉，方能有效阻絕電腦相關設備的無形電耗。本論文研究所提出的新型無線交流電源監測模組結合校園既有 DYU-802.1X WiFi 網路上傳到 ThingSpeak IoT 平台，其具備二項創新特點：(1) 相較於商用的電氣鉤表，其性價比較優；(2) 運用校園 DYU-802.1X WiFi 網路，免除 WiFi 接取器 (AP) 的疊床架屋，大幅降低建置佈署、後續維護成本。

五、結論

(一) 結論

本論文研究「無線交流電電力監測整合模組開發」所提出新型無線交流電源監測模組，係針對單相 110/220 V_{AC} 電器的電壓、電流、功率和電量、功率因數 (Power factor, pf) 和頻率等電氣參數進行現場監測。新型的單相 110/220 V 無線交流電源監測模組包括 ZMPT101B 電壓感測器和 ACS712-20



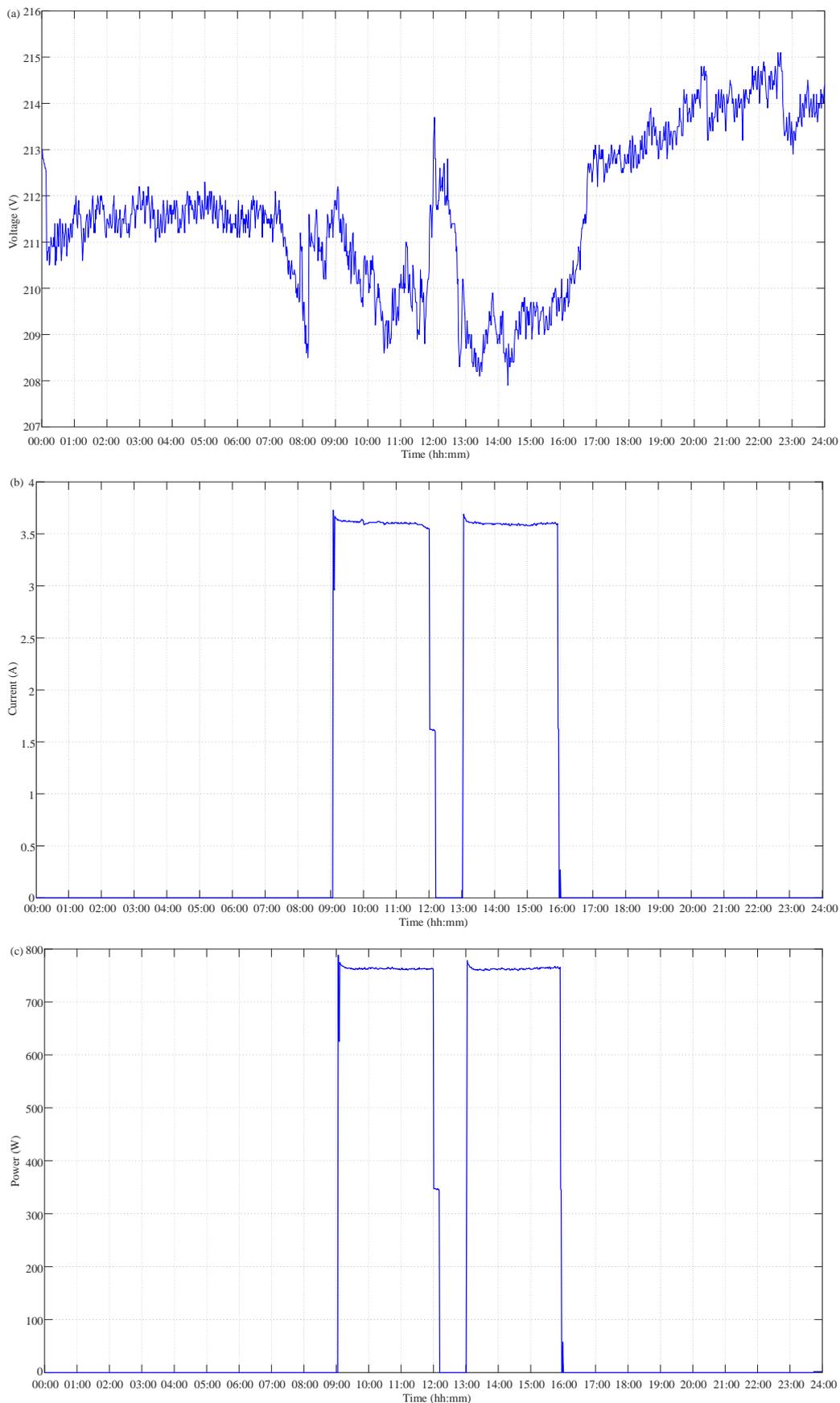


圖 6. H708 電腦教室 24 小時照明用電量測結果曲線圖：(a)電壓；(b)電流；(c)功率；(d)電量；(e)pf；(f)頻率



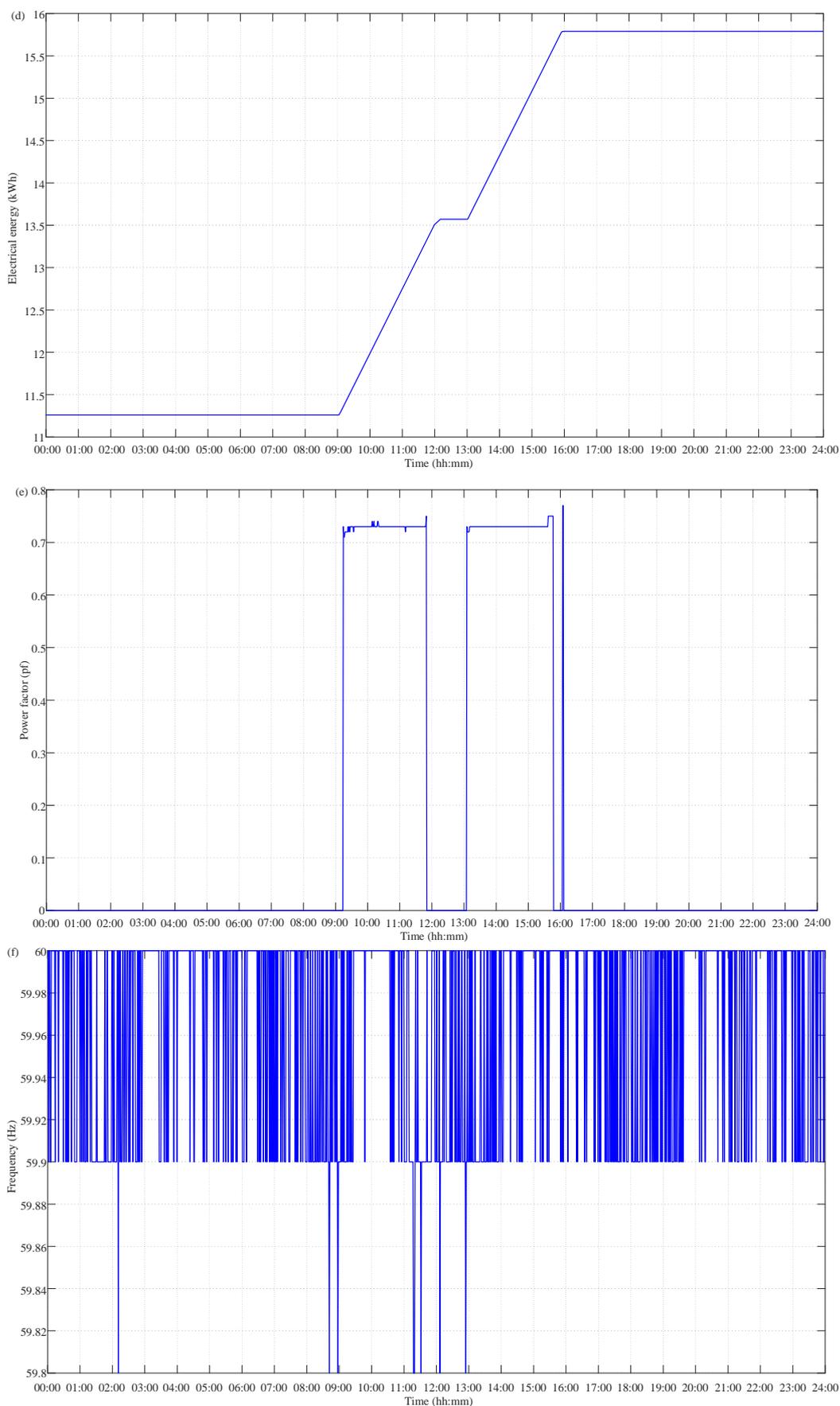


圖 6. (續) H708 電腦教室 24 小時照明用電量測結果曲線圖：(a)電壓；(b)電流；(c)功率；(d)電量；(e)pf；(f)頻率



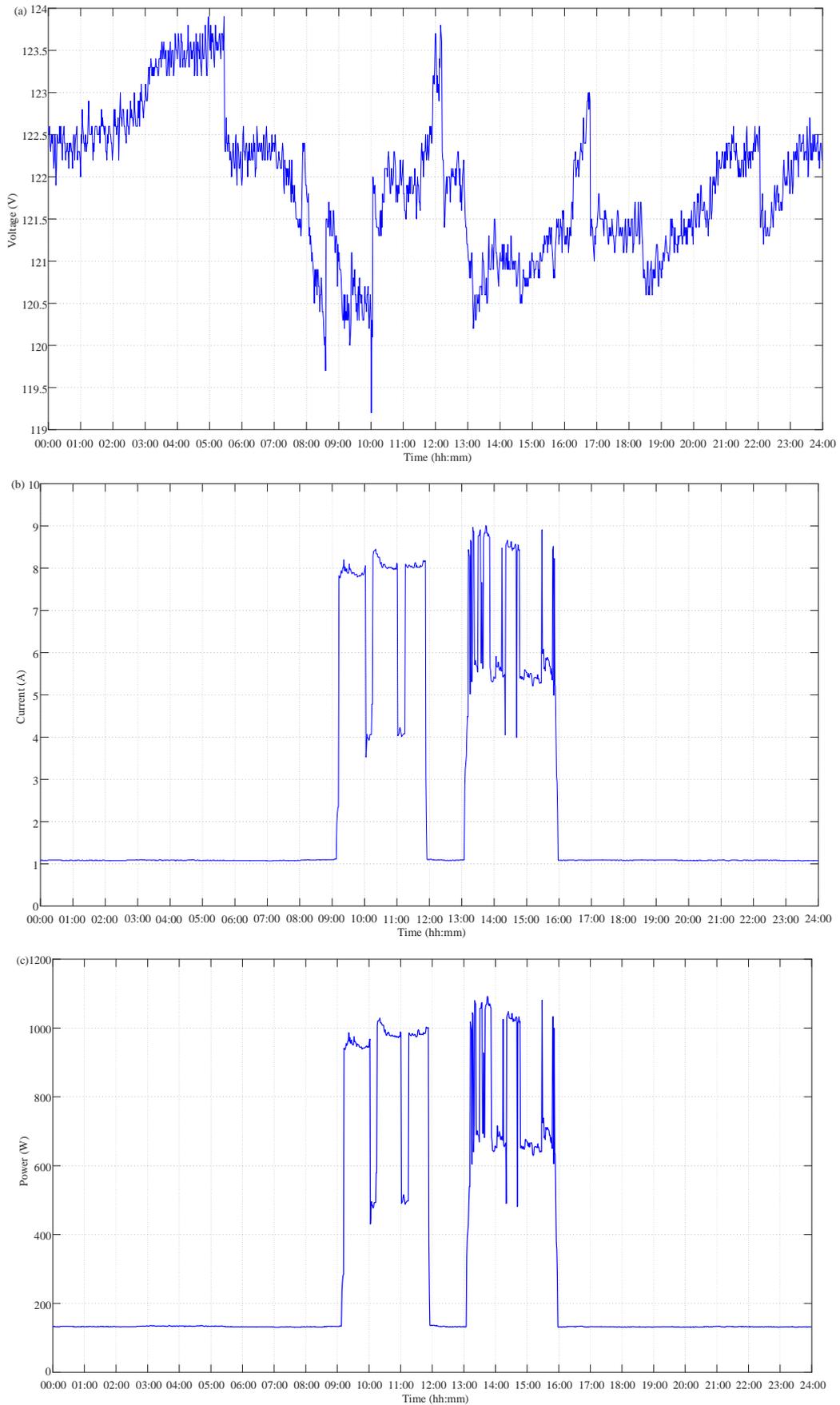


圖 7. H708 電腦教室 24 小時電腦插座用電量測結果曲線圖：(a)電壓；(b)電流；(c)功率；(d)電量；(e)pf；(f)頻率



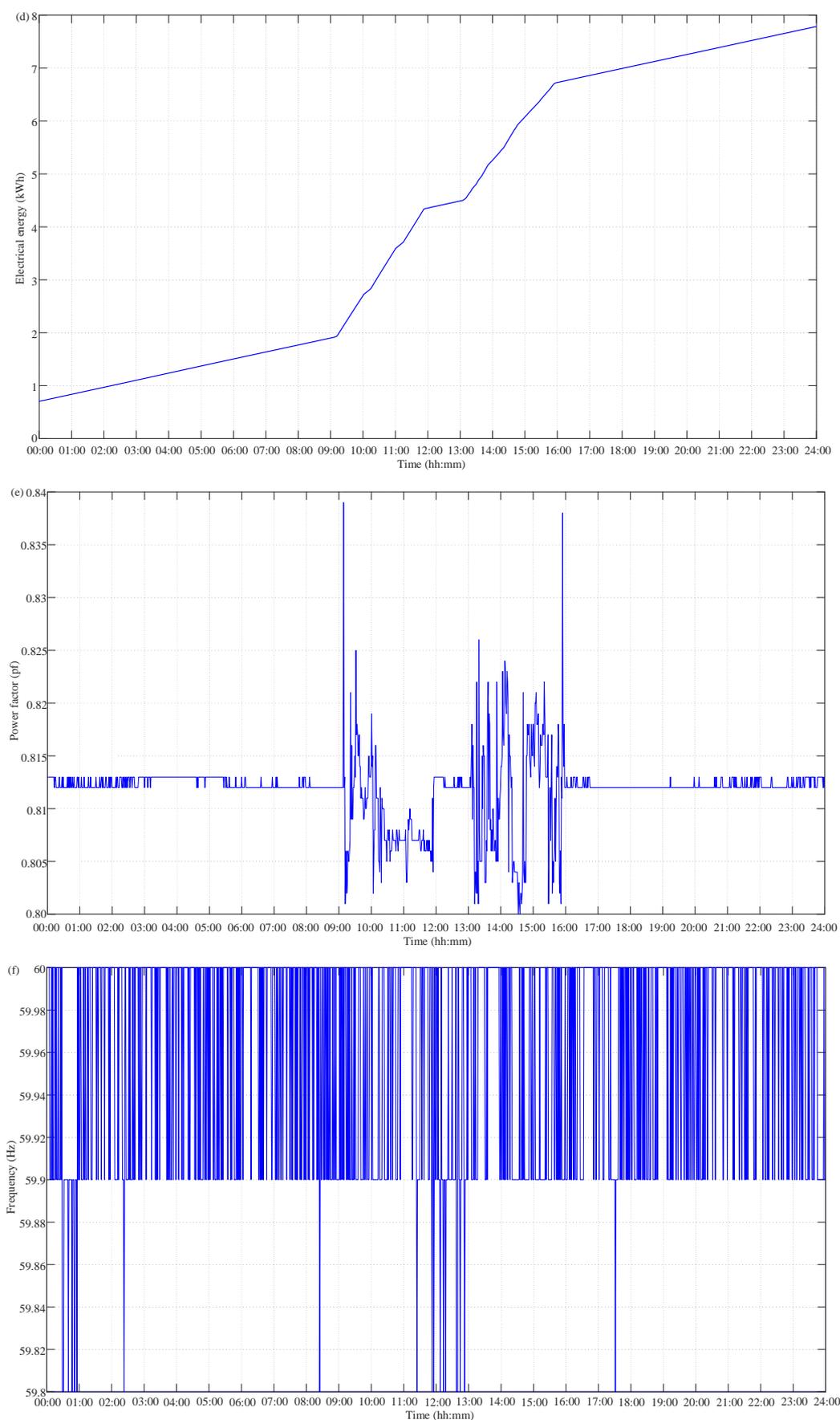


圖 7. (續) H708 電腦教室 24 小時照明用電量測結果曲線圖：(a)電壓；(b)電流；(c)功率；(d)電量；(e)pf；(f)頻率



(Inter-integrated circuit, I²C) 串列通訊介面, 再由 TTGO ESP32 WiFi 模組即可無線傳送電壓、電流用於即時計算相對應的功率和用電量、pf 和頻率等交流電電氣參數。與我們以前的工作以及商業化的數位多功能電表 (Digital multi-meter, DMM) 和交流電功率表相比, 新模組的特點是更加緊湊和經濟。本論文已成功地驗證新型單相 110/220 V 電能監測模組在大葉大學工學院電腦教室 (H708) 場測教室照明用電和電腦插座的用電狀態, 在 ThingSpeak 物聯網平台上提供公開的視覺化顯示 (照明用電: <https://thingspeak.com/channels/2521976>; 電腦插座用電: <https://thingspeak.com/channels/2527078>)。

(二) 未來展望

隨著全球主要市場歐盟、美國分別制定歐盟 Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)、美國清潔競爭法案 (Clean Competition Act, CCA) 等淨零相關的進口規範及國內通過“氣候變遷因應法”, 因應政府及企業環境友善、社會責任、業治理 (Environmental, social, governance, ESG) 永續發展政策, 帶動全球製造業朝向企業價值鏈推動節能減碳排, 依循碳盤查、減碳技術、實際應用三個步驟來朝向淨零碳排目標前進。

參考文獻

1. 王明志 (民 103), 電力能源監控系統之規劃與設計, 國立台北科技大學化學工程研究所碩士論文。
2. 汪佳達 (民 110), 以 LabVIEW 為基礎之電力監控系統研製, 東南科技大學電機工程系碩士論文。
3. 夏傳詠 (民 106), 遠端電力監測系統, 南台科技大學電機工程系碩士論文。
4. 賴佳瑋、洪敏雄 (民 101), 基於雲端運算之無線電力監控系統設計與實作, 2012 彰雲嘉大學校院聯盟學術研討會, 彰化。
5. 經濟部能源局 (2022 年 7 月 22 日), 全國電力資源供需報告, 2024 年 5 月 20 日取自 <https://ws.ndc.gov.tw/001/administrator/10/refile/5653/30018/adb5a614-0e39-46b1-9a22-49075499ac2.pdf>。
6. 經濟部工業局產品環境足跡推動計畫 (2013 年 5 月 21 日), 製造業產品碳足跡生命週期盤查表, 2024 年 5 月 20 日取自 <https://www.idbcfp.org.tw/DownloadDetail.aspx?id=3>。
7. 蔡明韋 (民 101), 家庭能源管理系統平台開發與設計, 國立台北科技大學自動化科技研究所碩士論文。
8. Abo-Zahhad, M., S. M. Ahmed, M. Farrag, M. F. A. Ahmed and A. Ali (2015) Design and implementation of building energy monitoring and management system based on wireless sensor networks. 2015 Tenth International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES), Cairo, Egypt.
9. Allegro (2022) ACS712. Retrieved February 20, 2024, from <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>.
10. Galera, K. M. E. and O. E. Llantos (2017) Mobile web energy monitoring system using DFRduino uno. *Procedia Computer Science*, 127, 706-731.
11. Hasan, M. K., M. M. Ahmed, B. Pandey, H. Gohel, S. Islam, and I. F. Khalid (2021) Internet of things-based smart electricity monitoring and control system using usage data. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021(1), 1-16, Article ID 6544649.
12. LiLyGo, Micro-32 Technical Specification, available online: [https://github.com/LilyGO/TTGO-Micro32-V2.0/blob/master/Datasheet/micro32%202020.3.4\(1\).pdf](https://github.com/LilyGO/TTGO-Micro32-V2.0/blob/master/Datasheet/micro32%202020.3.4(1).pdf).
13. Lin, J.Y., H. L. Tsai and W. H. Lyu (2022) Development of wireless AC power-monitoring module. Proceeding of the 8th IEEE International Conference on Applied System Innovation 2022, Taiwan.
14. Oberloier, S. and J. M. Pearce (2018) Open source low-cost power monitoring system. *HardwareX*, 4(e00044), 1-21.
15. Qingxian Zeming Langxi Electronic(2021) ZMPT101B current-type voltage transformer. Retrieved February 20, 2024, from <http://5nrwrwxhmqqjjik.leadongcdn.com/attachment/kjilKBmoioSRqlkjoipSR7ww7fgzb73m/ZMPT101B-specification.pdf>。
16. Ramelan, A., F. Adriyanto, B. A. C. Hermanu, M. H. Ibrahim, J. S. Saputro and O. Setiawan (2021) IoT based building energy monitoring and controlling system using LoRa modulation and MQTT protocol. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 1096(012069), 1-6.
17. Sookasame, C. and Z. Wu (2019) Real time power consumption monitoring using Arduino. *International Journal of Research and Scientific Innovation*, 5(1), 6-12.
18. Sutisna, I. Usrah, N. Hiron and A. Andang (2019) Power analyzer based arduino-uno validation using Kyoritsu KEW



6315 and Hioki 328-20. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 550(012024).

19. Texas Instruments (2024) ADS111x ultra-small, low-power, I2C-compatible, 860-SPS, 16-bit ADCs with internal reference, oscillator, and programmable comparator datasheet. Retrieved June 20, 2024, from <https://www.ti.com/lit/gpn/ads1114>.

收件：113.05.31 修正：113.06.21 接受：113.08.28

