

基於模糊邏輯的增程式混合動力機車能量管理系統

陳昭雄^{1*} 姚筌翔¹ 陳鍾賢² 林聖哲² 林克衛¹

¹大葉大學機械與自動化工程學系

515006 彰化縣大村鄉學府路 168 號

²金屬工業研究發展中心

407273 台中市西屯區工業區三十七路 25 號

*chao@mail.dyu.edu.tw

摘要

本文發展一智慧型能量管理系統以應用於增程式混合動力機車。首先設計機車的混合動力系統，包括引擎發電機、磷酸鋰鐵電池和驅動馬達，並且推導這些動力元件的數學模型。利用模糊邏輯整合實驗數據資訊和專家口語化的經驗以設計模糊規則庫，此模糊系統依據機車行車的功率需求和電池的殘電量（State of Charge, SOC）狀態協調引擎發電機和電池的功率輸出，以滿足機車行車的功率需求，解決傳統能量管理系統模式下，電池充放電過劇和引擎發電機發電變化太大的問題。以 Matlab 軟體平台撰寫機車行駛的模擬程式，在歐盟 ECE40 行車型態和路面坡度下，比較定功率發電、功率跟隨發電和本文智慧型能量管理系統三種不同方法的優劣，從模擬結果可以驗證本文所提方法的優越性。

關鍵詞：增程式機車，混合動力，能量管理，模糊邏輯系統

Energy-Management System of Range-Extender Hybrid Motorcycle Based on Fuzzy Logic

CHAIO-SHIUNG CHEN^{*1}, CYUAN-SIANG YAO¹, CHUNG-HSIEN CHEN², SHENG-CHE LIN² and KE-WEI LIN¹

¹*Department of Mechanical and Automation Engineering, Da-Yeh University*

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

²*Metal Industries Research & Development Centre*

No. 25, 37 Rd., Industrial Area, Taichung, Taiwan, 407273, R.O.C.

*chao@mail.dyu.edu.tw

ABSTRACT

This paper explores the feasibility of installing an intelligent energy-management system unto a range-extender hybrid motorcycle. Firstly, the hybrid powertrain system of the motorcycle is designed, including the engine generator, lithium iron phosphate battery, and the drive motor. Mathematical models of these power components are thus obtained. Secondly, experimental data and expert knowledge are integrated in line with fuzzy logic to design a fuzzy rule base. This fuzzy system coordinates the power output of the engine generator and the battery based on the motorcycle's power



demand and the battery's state of charge (SOC) to meet the power requirements of the motorcycle. It addresses issues such as excessive battery charge-discharge and significant fluctuations in engine generator output observed in traditional energy management system modes. Thirdly, a simulation program for motorcycle travel is developed using the Matlab software platform. The simulations are conducted under the European Union's ECE40 driving cycle and road gradient to compare with each other the performance of three different methods: constant power generation, power tracking generation, and the proposed intelligent energy management system. Last, the simulation results validate the superiority of the method proposed in this paper.

Key Words: range-extended electric motorcycle, hybrid power, energy management, fuzzy logic system

一、前言

近年來，歐美日等先進國家開展了電動車輛的研發和推廣，以電力取代石油，將電動車作為主要代步工具。機車在亞洲地區尤其是台灣和東南亞地區是很多上班族的交通工具，當地政府也極力推廣電動機車取代傳統的燃油機車。但是電動機車在續航力、馬達效率、供電環境等仍存在許多問題。而增程式混合動力機車由於有搭載增程裝置能夠增加行駛里程，在電池耗盡之後仍可以靠增程裝置繼續提供動力，減少對充電設施的依賴以提高機車的便利性和競爭力。也能透過增程裝置提供額外的輸出動力，增加電動機車的爬坡能力及加速性。增程式電動機車有幾種不同能量管理的方法，像是定功率（Thermostat）發電方法是以發電機發電效率最高的固定操作點來對機車電池進行充電，而功率跟隨（Power Follower）方法根據機車在行駛時所需要的功率來進行發電，達到用多少電發多少電的概念。但以上兩種能量管理方法都有各自的缺點，像是定功率發電方法由於當增程發電系統啟動時發電機都是處於最佳的發電點，導致電池系統一直處於深度充放電狀態，容易造成電池系統的損壞。功率跟隨發電方法則是跟隨車輛功率需求來做輸出動力，在行駛過程中引擎輸出功率變化量大時，會導致發電效率降低和功率輸出延遲的問題。因此，急需發展出新的能量管理策略能夠更加有效率和普及的應用於增程式機車。

Paganelli 等人 [15, 16] 針對並聯式油電混合動力車（Hybrid Electric Vehicle, HEV）使用等效消耗最小化策略（Equivalent Consumption Minimization Strategy, ECMS）進行能源管理。首先計算實際燃油與電能等效於燃油的成本函式，進行即時最佳化，以得到最佳動力分配方式，並利用非線性懲罰函數（Penalty Function）來維持電池 SOC，模擬結果顯示燃油消耗量有 17.5% 的改善。Liu 與 Peng [12, 13] 在研究中針對 Toyota Prius 的豐田混合動力系統（Toyota Hybrid

System, THS）進行了分析，並建立模型以比較隨機動態規劃方法（Stochastic Dynamic Programming, SDP）和 ECMS 兩種能源管理策略的效果。研究以 SDP 求得最佳油耗作為基準，結果顯示 SDP 和 ECMS 都可以達到較佳的燃油經濟性並適合實際應用於實際車輛上。Musardo 等人 [14] 則提出了一適應性等效油耗最小策（Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy, AECMS）用於混合動力車系統。使用了等效因子將電池 SOC 變化轉換為等效的燃油消耗量。並且根據目前的駕駛模式，結合全球定位系統（Global Positioning System, GPS）預測未來 100 秒的行駛模式，進行等效因子的最佳化，以定時更新控制策略的參數。另外，在油電混和動力車的控制策略中延長電池的使用壽命也是一項非常重要的研究方向。Hochgraf 等人 [7] 與 Anderson 等人 [4] 以電池的殘電量多寡作為增程式發電控制系統作動的標準點。此控制策略是當發電系統啟動時，發電機必須在發電效率最高的運作點下以固定功率來進行發電，以提供對電池系統充電以及車輛行駛需求所需的電力供給。在 Barsali 等人 [5] 與李喬婷 [1] 和鄭文傑 [10] 的研究中，以車輛需求功率為發電量的主要依據。為了取得燃油效率和電池壽命之間的最佳平衡，基於規則控制策略（Rule based）的特點在特定情況下採用不同的控制方法，例如在 SOC 低於一定規範數值時使用定功率發電，在平常時使用功率跟隨作為發電方式，從而維持電池的健康狀態。Liu 和 Liu [11] 研究以駕駛環境鑑別的基礎上，發展插電式混合式電動車最佳的能量管理策略，此策略同時具有在線控制和離線化的優點，適合於實時應用。Chen 等人 [6] 研究通過逆向差速器以整合分配內燃機的動力，設計了三種不同動力控制模式，測試結果顯示與傳統內燃機車相比，燃料消耗減少了 41.1%，產生的廢氣排放減少了 58.6%。

智慧型系統包含了類神經網路系統以及模糊邏輯系統



等，近年來被廣泛的應用在工業界，智慧型控制系統具有學習能力，並且能夠處理複雜且不容易分析的資訊，能夠在不確定性及不精確的結構下提供合理的運算。Rimpas 等人 [17] 利用模糊邏輯系統處理車輛行駛各種不同輸入條件和輸出功率間的關係，從而延長電池的壽命，Liang 等人 [10] 提出了一種基於模糊邏輯的先進能量管理策略，以分配功率來提高 HEV 的燃油經濟性和混合儲能係統 (Hybrid Energy Storage System, HESS) 的續航能力。Yahia 等人 [19] 使用了基於模糊邏輯策略的 PI 控制器，通過不同的 SOC 狀態和加速度輸入，達到最佳得能量控制策略。Li 等人 [9] 提出一種用於電動汽車 HESS 的模糊邏輯閾值控制策略，利用擬譜法 (Pseudo-spectral method) 得到最優控制策略。Wu 等人 [18] 提出了一種自適應能量管理策略，利用 Pontryagin's 最小化原理設計發電機、電池等的最佳能量分配。Larsson 等人 [8] 利用動態規劃算法來解決混和動力汽車的能量管理問題。Liu 等人 [11] 提出了基於駕駛條件識別的插電式混合動力汽車 (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)，根據獲取的駕駛信息選擇合適的能量管理策略，以最小化目標參數。席利賀等人 [2] 提出了一種利用動態規劃改進算法去設計增程式電動汽車的能量管理系統，分配增程器起停狀態、電池狀態與馬達需求功率間的規則。

本文主要發展一智慧型增程式電動機車的能量管理系統，首先收集各種有關增程機車發電控制策略的文獻進行分析與比較，統整出各種發電控制策略的優缺點。並提出一套關於智慧型模糊控制的發電控制策略，解決定功率發電充電電流過大會造成電池損壞，以及功率追蹤發電輸出功率變化量大造成耗油量增加及發電效率降低之問題。以模糊控制作為智慧型策略控制方式，並以 MATLAB 軟體進行模擬分析，驗證此控制策略的可行性。

二、混和動力機車系統架構和設計

(一) 系統架構

本文增程式混合動力電動機車的驅動系統架構如圖 1 所示，硬體部分包括永磁式無刷馬達、增程引擎發電機、磷酸鋰鐵電池、電池充電器等，各個單元的規格和功能分別敘述如下：

1. 永磁式無刷馬達：增程式混和動力機車所使用的馬達是 48V 永磁式無刷馬達，功率輸出為 5KW/4500RPM、最大功率 5kW、最大轉速為 8000 rpm、額扭力輸出為

16.8Nm，如圖 2 所示。

2. 增程引擎：增程式引擎是 125 cc 的 4 行程水冷引擎，轉速在 3000-6000 rpm，此引擎的最佳制動比油耗 (Brake Specific Fuel Consumption, BSFC) 約 250 (g/kW.hr) 在 3000 rpm。引擎外觀如圖 3。
3. 發電機：額定發電功率為 24V/80A 的發電機，額定轉速為 5000rpm，轉速範圍為 1000~19000rpm，最大輸出功率 6kw，利用 DC/DC 升壓至 48V 系統，然後控制其發電的電流，以滿足騎乘的需求，同時確保電池充電的可靠性，如圖 4 所示。

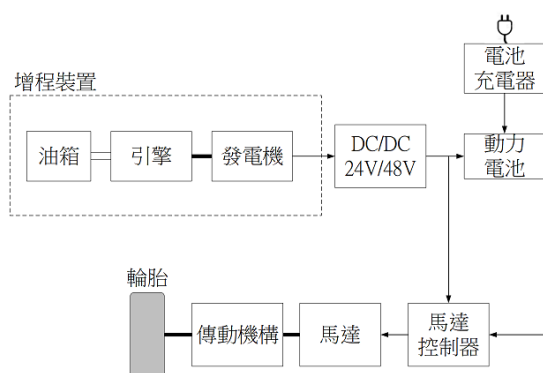


圖 1. 增程機車驅動系統架構圖



圖 2. 48V 永磁式無刷馬達



圖 3. 增程引擎



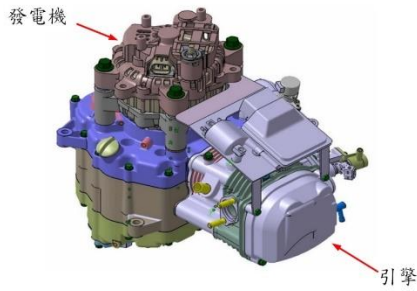


圖 4. 引擎發電機外觀



圖 5. 磷酸鋰鐵電池

4. 磷酸鋰鐵電池：鋰鐵電池是電芯為 32700 的磷酸鋰鐵電池，並使用了 16 串 5 並的排列方式，額定容量為 31.5Ah 等同於 1.6kw，額定電壓為 51.2V，如圖 5 所示。
5. 電池充電器：型號 KP900F-60L，輸出電壓為 60V 電流為 15A，輸入電壓為 110V，輸出功率為 900W，效率為 85-88%。

(二) 混和動力系統設計

增程式混合動力系統的規格皆是以歐盟 ECE40 行車型態來做測試計算，如圖 6 所示。ECE40 行車型態行駛一次的距離為 975 公尺，行駛時間約為 186 秒，而要計算達成 30 公里之功率需求，則需先算出完整一次 ECE40 行車型態所需要的能耗，再乘以 31 次即可。

1. 增程引擎發電機設計

為了符合 ECE40 行車型態的道路行駛需求，經模擬結果可以得知 ECE40 行車型態的最大需求功率約為 3kw，因此，本文選擇使用 124.9 ml 4 行程的水冷引擎，發電最大輸出功率為 6kw，最佳效率為 3kw/3000RPM，最佳制動比油耗為 250g/kw.h，足以負荷 ECE40 行車型態的功率需求。以下為引擎部件設計：

- (1) 引擎平衡配重：引擎平衡配重設計包括活塞、連桿、曲軸、平衡軸，規格如表 1 所示，機構圖如圖 7 所示。而曲軸及雙平衡軸設計如圖 8，搖撼力和搖撼力矩的分析

結果如表 2，此設計能確認一次慣性力可完全平衡。

- (2) 引擎起動馬達：引擎起動馬達為永磁式直流馬達，輸入電壓為 12V，輸出功率為 0.5kw。而起動馬達機構如圖 9 所示。
- (3) 引擎發電機平台：引擎發電機的平台設計如圖 10 所示，此平台用來測試引擎發電機各種性能。發電機發電功

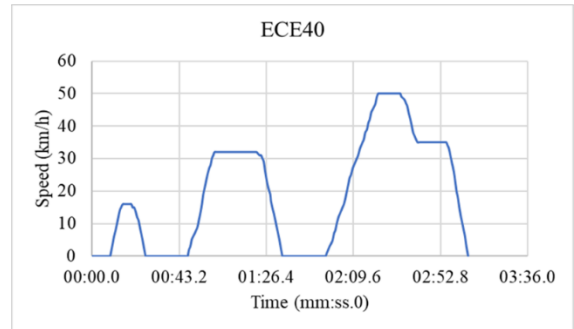


圖 6. ECE40 行車型態

表 1. 活塞/連桿/曲軸配重/平衡軸參數表

	曲軸
連桿重	113.686g
連桿長	98.6mm
連桿中心跟大端	30.588mm
活塞銷	22.576g
活塞重	78.8g
刮油環&C 夾	6.13g
曲軸銷重量	186.156g
大端軸承重量	25.97g
往復運動重量 r	142.77mm
衝程半徑	31.8mm

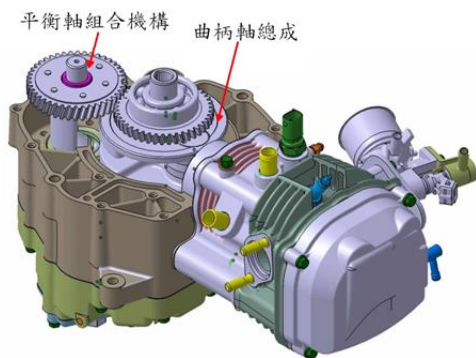


圖 7. 引擎平衡配重機構

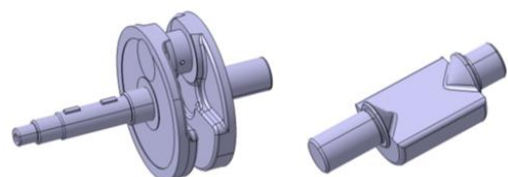


圖 8. 曲軸及平衡軸



表 2. 搖擺力和搖擺力矩分析結果表

	曲軸	平衡軸
曲軸質量	1812.62g	349.14g
曲軸重心半徑	1.694mm	6.259mm
等校配重	70.42g	68.72g
平衡率	49.3%	48.1%

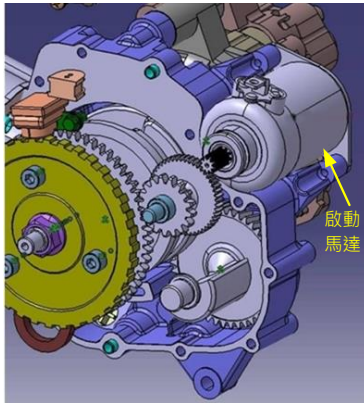


圖 9. 起動馬達機構

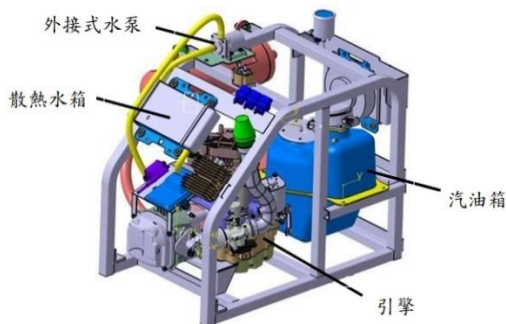


圖 10. 增程引擎發電機平台

率為 24V/80A，最大輸出功率 6kw。增程引擎發電機的實體圖如圖 11 所示。而電力輸送系統如圖 12 所示。增程機車的電力輸送包括 12V、24V 和 48V 迴路。引擎發電機發出來的 24V 經 DC/DC 轉換成 48V，然後供給馬達驅動器和鋰電池充電。而鋰電池 48V 電壓經 DC/DC 降壓轉成 12V 和 24V 分別供給機車的車燈系統、起動馬達和車控電腦（ECU）使用。

2. 馬達驅動系統平台

馬達驅動系統平台如圖 13 所示，此平台利用渦電流負載機施給馬達負載，來測試馬達各種性能。馬達為 48V 的永磁式 DC 無刷馬達，功率輸出為 5kw/4500RPM，扭力為 10.5N.m。本增程式混合動力機車的馬達驅動系統平台是由磷酸鋰鐵電池、馬達控制器、馬達、儀表、油門把手所搭建

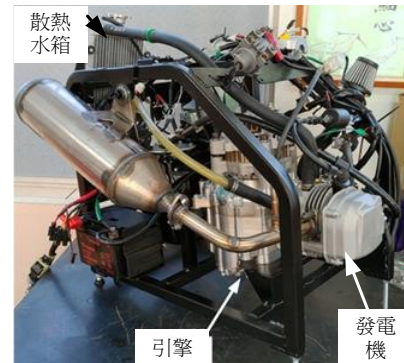


圖 11. 增程引擎發電機

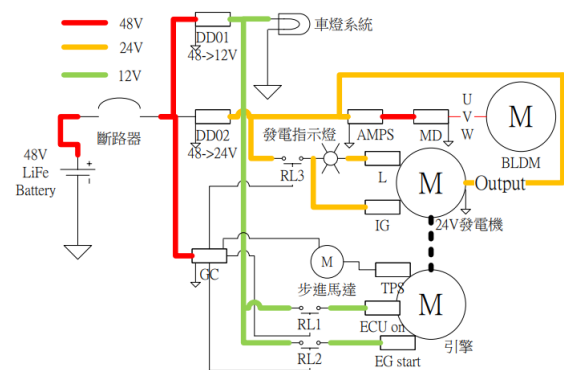


圖 12. 發電機混合電力系統圖

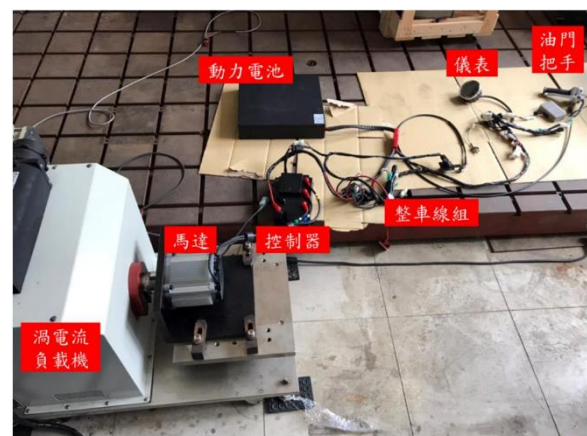


圖 13. 馬達驅動系統平台

而成，由磷酸鋰鐵電池供給電源。馬達控制器將直流電轉換成三相電壓 U、V、W 驅動馬達。圖 14 為馬達的傳動系統圖，減速齒輪箱齒輪比 N_g 為 14/55，而皮帶輪外徑比 N_b 為 21/49，機車輪胎選用規格 90/90-10，外徑 D 為 0.3952m。當馬達最大轉速 8000RPM 時，可以計算出機車的最大速度如下：



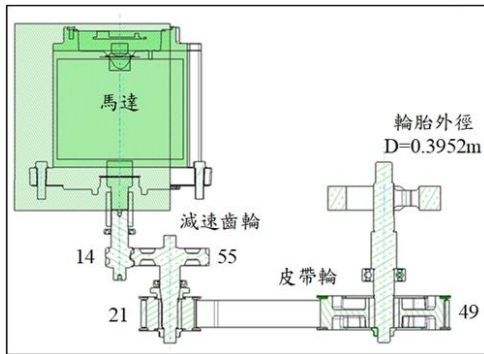


圖 14. 馬達的傳動系統

$$\begin{aligned}
 \text{機車速度}(km/h) &= \text{馬達轉速}(RPM) \times 60 \times \frac{\pi D}{1000} \times N_g \times N_b \\
 &= 8000(RPM) \times 60 \times \frac{0.3952\pi}{1000} \times \frac{14}{55} \times \frac{21}{49} \\
 &= 71(km/h)
 \end{aligned} \tag{1}$$

而當馬達在最低轉速 500RPM 時，可以計算出機車的最大推力如下：

$$\begin{aligned}
 \text{機車推力}(N) &= \text{馬達扭力}(N.m) \times \frac{1}{N_g} \times \frac{1}{N_b} \times \frac{2}{D} \times \eta_g \times \eta_b \\
 &= 16.5 \times \frac{55}{14} \times \frac{49}{21} \times \frac{2}{0.3952} \times 0.95 \times 0.9 \\
 &= 654.4(N)
 \end{aligned} \tag{2}$$

其中 $\eta_g = 0.95$ 為齒輪箱效率， $\eta_b = 0.9$ 為皮帶輪效率。此設計可以讓增程機車極速達 70 (km/hr) 以上，而負重 80 (kg) 可爬上30 (%)之斜坡。

3. 鋰電池系統

本文選用磷酸鋰鐵電池當作機車的主要電力來源，其功率 5.8 KW、額定容量為 31.5Ah、額定電壓 51.2V、電芯型號 32700-6300mAh 的 16 串 5 並磷酸鋰鐵電池組。另外，可以使用標準的壁裝電源插座充電器幫電池充電，此充電器規格為型號 KP900F-60L，輸出電壓為 60V 電流為 15A，輸入電壓為 110V，輸出功率為 900W，效率為 85-88%。此充電器特點為有過充保護，在電池充滿電後自動關閉。防止電池因充電而爆炸，大大提高充電過程的安全性。

三、混合動力系統種類和能量管理系統介紹

(一) 混合動力系統種類

目前常見的混合動力系統的種類，包括串聯式混合動力、並聯式混合動力和混合式混合動力系統，詳細說明如下：

1. 串聯式混合動力系統

串聯式混合動力系統是一種利用內燃機作為發電機，供給電力給電池充電和驅動電動馬達，以電動馬達作為推動車輪的唯一動力來源，如圖 15 所示。這種系統可以增加電池的行走里程，因此被稱為增程型電動系統；而其構造上動力輸出的流程完全是一直線，所以又稱為串聯式油電混合系統。由於系統所需的電池及電動馬達的功率較大，因此成本較高。

2. 並聯式混合動力系統

並聯式混合動力系統結合了內燃機和電動馬達，各自透過機械傳動系統將其動力傳遞給車輪，並且內燃機和電動馬達的動力在機械傳動系統之前是分開且獨立的，如圖 16 所示。並聯式混合動力設計採用內燃機作為主要動力源，電動馬達作為輔助動力系統，兩者透過機械傳動系統耦合，由控制器控制協調。此系統的優點是內燃機可以空轉，提高燃油效率並減少啟動時的損失。電動馬達可以與內燃機一起工作，以在需要時增加馬力。由於此設計採用的電池和電動馬達容量小、功率小，重量更輕，減少了機車的負載。

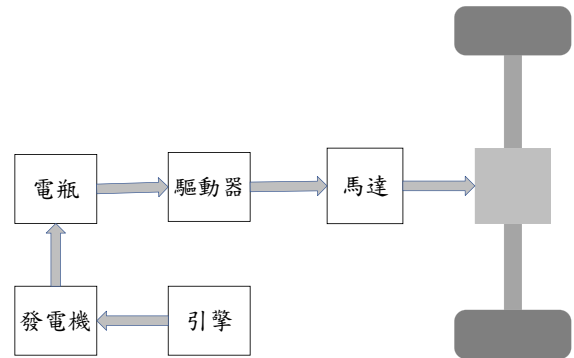


圖 15. 串聯式混合動力系統

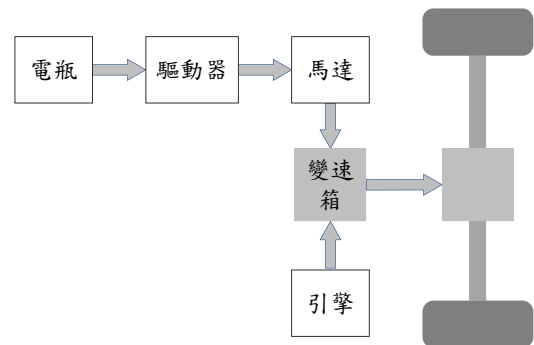


圖 16. 並聯式混合動力系統



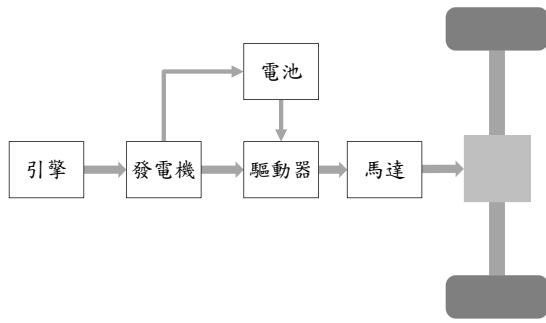


圖 17. 混合式的混合動力系統

3. 混合式的混合動力系統架構

本文的混合動力機車採用此種架構，此種架構是一種高效能的混合動力系統，結合了並聯式和串聯式的功能和特性，如圖 17 所示。它擁有一個內燃機和一台電動馬達，可以根據路況選擇使用電動馬達、引擎發電機或混合模式。這種混合動力系統可以在起步或低速時使用電動模式，從而提高效率並節省燃料。而當需要時，內燃機可以驅動發電機向電池充電或直接向電動馬達供電。在加速或爬坡時，引擎發電機和電池可以同時供電給電動馬達動，增加額外馬力。

(二) 混合動力能量管理介紹

增程式混合動力系統是一種結合了內燃機和電動機的動力系統，需要對能量進行管理，以實現高效的能源利用。傳統較常用的策略分別為定功率發電的發電方法以及功率跟隨的發電控制方法。分別敘述如下。

1. 定功率發電

在串聯式混合動力車的能量管理系統中，Hochgraf 等人 [7] 研究了一種基於定功率發電的控制策略，該系統以引擎發電機定轉速在最佳效率點發電，該策略旨在確保引擎發電機的最優能量效率和低燃料消耗率，同時確保車輛的最佳效能和安全性。以定功率發電方式的增程發電系統對電池系統壽命會有一些不良的影響，當增程發電系統啟動時，電流不見得是電池系統適合的充電電流。這可能導致電池系統無法有效地接收和儲存電能。而當增程發電系統關閉時，車輛的全數功率需求都要由電池系統負擔，這可能導致電池系統需輸出的電流變化過大，過高的電流輸出可能對電池系統造成損害，也會降低電池壽命。

2. 功率跟隨發電

是以當下車輛所需多少功率來作為引擎發電機發電的主要依據，但是行駛在實際的道路上，車輛所需的功率變化率是浮動範圍非常大的。此劇烈的功率需求變動會導致引擎

發電機需要快速改變其動力輸出大小。當引擎發電機輸出功率變化太大時就會導致引擎會沒有辦法達到最佳燃油效率，使得整個增程式發電系統的發電效率變差。Barsali 等人 [5] 基於車輛的行駛所需的能量使用模型預測控制 (Model Predictive Control) 方法來實現，該控制策略考慮了駕駛行為和路徑資訊，以及電池、馬達和引擎發電機的效率和能力限制。通過電池充電和引擎發電機控制，該控制策略可以調節引擎的轉速和燃料消耗，從而最小化總體燃料消耗。另外，在鄭文傑 [3] 和李喬婷 [1] 的研究裡所提到的控制策略不只使用了功率跟隨的控制概念，另外也將電池系統的 SOC 加入，做為即時監視並修正車輛的發電功率。其中控制發電功率的式子如下：

$$P_{output} = P_{throttle\ demand} + P_{SOC_corr} \quad (3)$$

$$P_{SOC_corr} = P_{byt_chg} \times \left(\frac{SOC_{up} + SOC_{low} - SOC}{2} \right) \quad (4)$$

其中 P_{output} 為引擎電機的輸出功率， $P_{throttle\ demand}$ 為駕駛踩下加速踏板所需的能量需求， P_{SOC_corr} 為基於電池的 SOC 狀態回授所計算出來的調整值，用於增減電池的輸出功率， P_{byt_chg} 為電池最大充電功率， SOC_{up} 、 SOC_{low} 和 SOC 分別表示預設的電池 SOC 上限、下限和當前的電池 SOC 值。透過 P_{SOC_corr} 的回授調整，可以使電池的 SOC 盡量回復到上限和下限之間的平均值，以實現對蓄電池的有效管理。

四、智慧型能量管理系統

本章節針對增程式機車發展一智慧型的能量管理系統，透過機車實際行駛所需要的功率，同時考量電池現有的 SOC 和引擎發電機發電的效率，而計算出引擎發電機 BP 時所要的發電量，達到機車能量充份有效率的運用。引擎發電機能保持在較佳的運作效率，而電池維持在適當的充放電和穩定的 SOC。本章節首先針對增程機車的各個單元建立數學模型，而後以模糊系統設計智慧型能量管理系統。

(一) 增程式混合動力機車系統建模

增程式機車系統的建模包括機車車身動態、電池、引擎發電機和馬達等，分別說明如下：

1. 機車車身動態建模

為了評量增程式機車的能量管理策略，機車車身的動態建模



如圖 18 所示。機車輸出的扭力需要克服道路的負載才能順利行駛，這些負載包括滾動摩擦阻力、空氣動力阻力、斜坡阻力和加速阻力。機車的驅動方程式如下：[18]

$$P_m = V(m \frac{dv}{dt} + mg \sin \alpha + mg\mu_f \cos \alpha + \frac{1}{2} C_D A_D \rho V^2) \quad (5)$$

其中 P_m 為驅動機車所需的功率、 m 為機車質量、 g 是重力加速度、 μ_f 為滾動摩擦係數、 α 為坡度角、 C_D 為風阻係數、 A_D 為機車迎面面積、 ρ 為空氣密度、 V 為車速。由於摩托車不像是汽車，前投影面積為固定面積，摩托車會因為騎士的身材造成前投影面積大小以及形狀有所差異，進而影響到風阻係數，因此將滾動摩擦阻力和風阻力簡化成與重量相關之關係，如下所示：

$$mg\mu_f \cos \alpha + \frac{1}{2} C_D A_D \rho V^2 \cong A(m_0) + B(m_0)V^2 \quad (6)$$

其中 $A(m_0)$ 為摩擦阻力、 $B(m_0)$ 為風阻力、 m_0 為車輛負載重。一般可以簡化成下式表示：

$$A(m_0) = 0.088m_0(N) \quad (7)$$

$$B(m_0) = 0.000015m_0 + 0.02 \left(\frac{N}{(km/h)^2} \right) \quad (8)$$

本文機車淨重 $120kg$ ，加上負載重量 $80kg$ ，因此， $m_0 = 200kg$ 、 $A(m_0) = 0.088 \times 200 = 17.6(N)$ 、 $B(m_0) = 0.000015 \times 200 + 0.02 = 0.023(N/(km/h)^2)$ ，將 $A(m_0)$ 跟 $B(m_0)$ 代回(6)式得到機車行駛阻力如下：

$$F = A(m_0) + B(m_0)V^2 = 17.6 + 0.023 \times V^2(N) \quad (9)$$

2. 電池建模

本文增程式混合動力機車所使用的電池建模是 R_{int} 的電池模型 [17]，是由一個電壓源以及一個串聯的電阻所組成的等效電路，如圖 19 所示。此電池模型計算複雜程度不高，但精度足夠支持建模模擬運算，根據基爾霍夫電壓定律 (Kirchhoff's)，此電池模型的功率可以表示為：

$$P_b = (E_b \times I_b) - I_b R_b \quad (10)$$

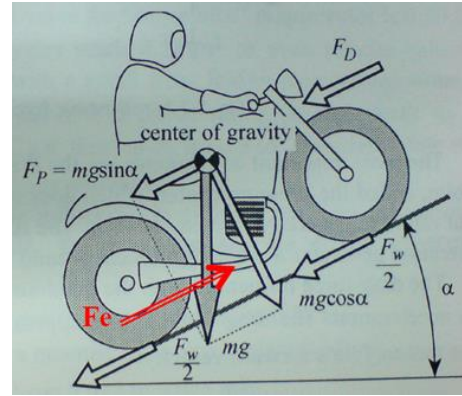


圖 18. 機車直線物理模型

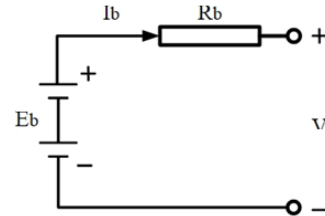


圖 19. 電池模型

其中 P_b 為電池的輸出功率、 I_b 為電池的輸出電流、 E_b 為電池的電動勢、 R_b 為電池的內阻。電池的額定電壓為 $51.2V$ ，其額定容量為 $31.5Ah$ 。電池模型的電流可以表示為

$$I_b = \frac{E_b - \sqrt{E_b^2 - 4000R_b P_b}}{2R_b} \quad (11)$$

而電池 SOC 的充放電狀態為：

$$\frac{dSOC}{dt} = \frac{I_b(t)}{3600Q_b} \quad (12)$$

其中 Q_b 是電池的容量。

3. 引擎發電機建模

由於引擎發電機與機車驅動輪之間沒有直接的機械傳動機構，引擎可以不受機車行駛的限制運作在最佳的操作點，以獲得在不同輸出功率下的低油耗率。本文根據油耗數據來建立 BSFC 的曲線圖如圖 20，引擎的建模可以利用此圖以擬合法 (Data Fitting) 和查找表 (Look-up Table) 方式獲得。在系統模擬時可以減少電腦的計算負擔，計算出引擎的輸出功率、扭力、轉速和油耗。另外，也可以根據此數據圖，在每個引擎輸出功率等高線上的最小油耗點連接起來，



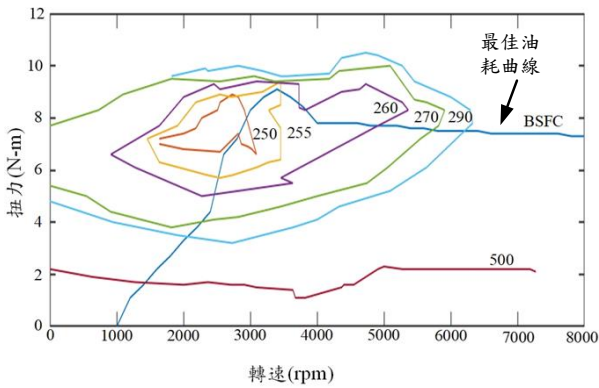


圖 20. 引擎 BSFC 油耗曲線及最佳油耗曲線圖

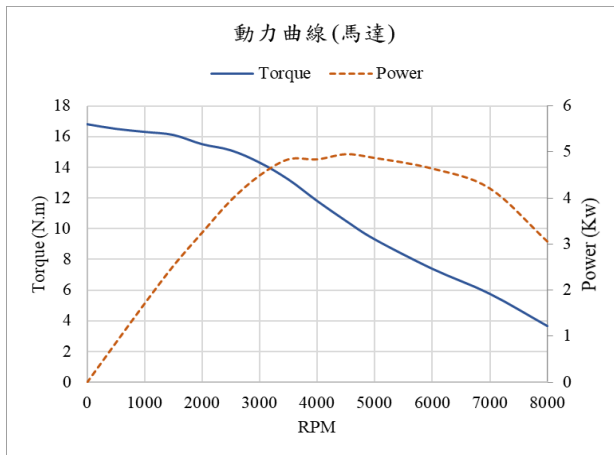


圖 21. 馬達扭力及功率輸出動力曲線圖

就能以此數據圖定義出最佳油耗曲線圖，可依照不同的輸出功率需求，透過此最佳油耗曲線來得到相對應的引擎轉速及輸出扭力的位置點。

4. 馬達建模

本文所使用的機車驅動馬達為 DC 無刷馬達，額定功率為 5kw，馬達建模部分也是依據馬達所實驗出來的動力曲線圖，如圖 21，透過擬合法和查找表所計算出馬達的輸出功率、扭力和轉速。

(二) 智慧型能量管理介紹與設計

增程式機車有引擎發電機和電池兩個動力來源，引擎發電機的輸出可以直接供電給機車馬達，也可以對電池充電。機車在路上行駛所需要的功率主要的還是由電池提供，增程引擎角色式在補充電池輸出功率的不足，或是對電池充電滿足所要的 SOC，讓機車可以增程，到達可以充電的地方。增程式機車的能量管理系統必須根據機車行駛所需的功率，決策出引擎發電機和電池間的輸出分配，機車功率需求低時，引擎發電機發出來多餘的電可以對電池充電，而機車功率需

求高時，引擎發電機和電池必須同時對機車馬達功率輸出。能量管理系統在做功率輸出分配時，必須考量引擎發電機功率輸出延遲的問題，瞬間變動太大的功率輸出要求，引擎發電機將跟不上。另外，也要考量電池充放電不能過劇，不然會損害電池的使用壽命。因此，能量管理系統是一種複雜的決策機制，無法使用數學模型方式明確規範。本文利用模糊系統來設計增程式混合動力機車的能量管理系統，模糊系統可以將現有的實驗資料和口語化的專家經驗融入系統中，讓增程系統的效率提高，且電池也不會過劇的充放電，能延長電池的壽命，而引擎發電機也可以操作在較佳的效率點。解決傳統能量管理系統太依賴數學模型和數據決策的問題。

本文假設電池放電時功率為正，充電時功率為負，則增程式機車行駛所需的功率 P_m 、引擎發電機輸出的功率 P_{re} 和電池功率 P_{ba} 關係式如下：

$$P_m = P_{re} + P_{ba} \quad (13)$$

本文所設計模糊邏輯系統的輸入為電池的 SOC 和機車的功率需求 P_m ，而輸出為電池所輸出的功率 P_{ba} 。首先在電池 SOC 以及 P_m 的字集上分別設計輸入的模糊集合，如圖 22 和圖 23 所示，以等間隔的方式分別在電池 SOC 取 7 個模糊集合以及在 P_m 上取 6 個模糊集合，另外模糊集合的口語化名稱為 ON、TW、TH、FO、FI、SI 和 SE，相對的歸屬函數皆取三角形。而在電池輸出功率 P_{ba} 上也是以等間隔的方式設計 13 個輸出的模糊集合，如圖 24 所示，口語化名稱分別為 NLS、NVS、NSM、NMD、NLM、NBG、ZE、PBG、PLM、PMD、PSM、PVS 和 PLS，輸出的歸屬函數取單點方式 (Singleton)。根據兩輸入的模糊集合，可以設計模糊規則如下：

$$R^j : \text{IF } SOC \text{ is } A_1^j \text{ and } P_m \text{ is } A_2^j, \text{ Then } P_{ba} \text{ is } B^j \quad (14)$$

其中 A_1^j 為第 j 條模糊規則下 SOC 上的模糊集合， A_2^j 為 P_m 上的模糊集合和 B^j 為 P_{ba} 上的輸出模糊集合。完整的模糊規則庫共有 $6 * 7 = 42$ 條模糊規則，所設計的模糊規則庫如圖 25 所示。當機車在道路上行駛，駕駛瞬間的能量需求為 $P_m(t)$ ，在衡量電池及時的 $SOC(t)$ ，將 $P_m(t)$ 和 $SOC(t)$ 輸入模糊系統。假設使用單值的模糊化、乘的模糊推論和中



心平均法的解模糊化，模糊系統的輸出為電池的輸出功率如下：

$$P_{ba}(t) = \frac{\sum_{j=1}^{42} \bar{y}^j \mu_{A_1^j}(SOC(t)) \mu_{A_2^j}(P_m(t))}{\sum_{j=1}^{42} \mu_{A_1^j}(SOC(t)) \mu_{A_2^j}(P_m(t))} \quad (15)$$

五、模擬與結果

本章節針對增程式機車，利用本文所開發的智慧型能量管理系統進行各種路況的模擬。機車機身動態、電池、引擎發電機和馬達的建模如 4.1 節所描述。機車機身動態的參數

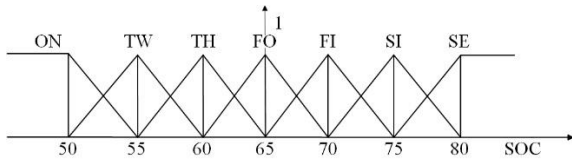


圖 22. 電池 SOC 的模糊集合

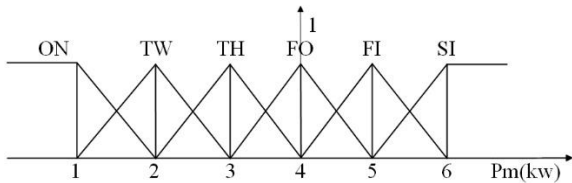


圖 23. 機車所需功率的模糊集合

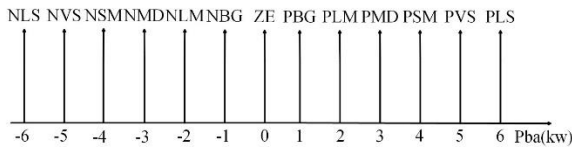


圖 24. 輸出的模糊集合

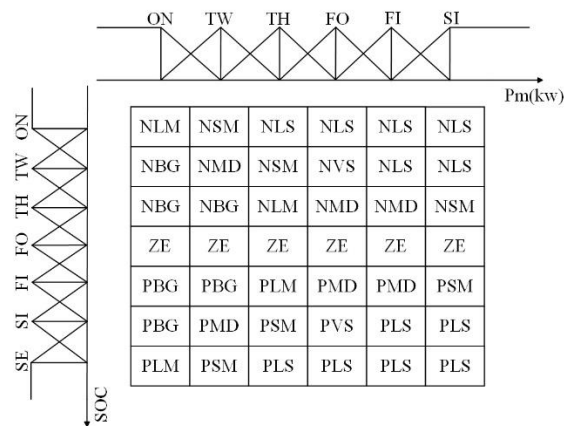


圖 25. 模糊規則庫

為機車負載重量 $m_0 = 200kg$ (機車淨重 $120kg$ + 負重 $80kg$)、路阻摩擦力 $A(m_0) = 0.088 * m_0 (N)$ 、風阻 $B(m_0) = 0.000015 * m_0 + 0.02 (N / (km/h^2))$ 。電池的參數為開路電壓 $V_{oc} = 53V$ 、內阻 $R_b = 0.12$ 歐姆、電池容量最大輸出功率 $5.8kw$ 、 $Q_b = 1.6kwh$ 。驅動馬達的參數為最大功率 $5kW$ 、齒輪比 $14/55$ 、皮帶輪外徑比為 $21/49$ 、齒輪箱效率 0.95 、皮帶輪效率 0.9 。引擎發電機的輸出功率與最佳油耗的關係圖如圖 26 所示。引擎發電機最小發電功率 $P_{re-min} = 1kw$ 、最大發電功率為 $P_{re-max} = 6kw$ ，而最佳效率在 $3200rpm$ ，最佳功率 $P_{re-optimal} = 3kw$ ，BSFC 約為 $250g/kw \cdot h$ 。機車行駛時，希望電池的 SOC 維持在 $SOC_{-max} = 80$ 和 $SOC_{-min} = 50$ 之間，SOC 大於 80 電池需在放電狀態，而 SOC 小於 50 時，電池需充電。

續航里程能耗測試是以歐盟 ECE40 規範的行車型態來測試，此行車型態一個循環時間為 186 秒，行駛距離為 975 公尺。模擬路面坡度為 $\alpha = 5\%$ 時，執行三種不同的能量管理策略：定功率發電、功率跟隨發電和本文所提智慧型能量管理系統，並且比較其優劣。定功率發電的流程圖如圖 27 所示，動力跟隨發電的流程圖如圖 28 所示，智慧型能量管理系統的流程圖如圖 29 所示。

(一) 純電模式模擬

純電模式的模擬為機車只依靠電池供電的行車模擬，行車型態為在 ECE40 中進行 31 次總共里程 30.2km 和 5828 秒的模擬。模擬結果如圖 30 所示，分別為車輛所需功率、電池功率輸出、SOC 和充放電電流。由圖中可知在經過 31 次的 ECE40 行車型態總共 5828 秒的測試過程中，本文的增程式混合動力機車若以純電池供電模式來進行時電池最大輸出功率為 $2.8kw$ ，SOC 會從 100% 降至 55%。最大輸出電流為 60A，足夠供應機車行駛能量的需求。

(二) 三種不同能量管理策略的模擬

針對前述三種不同能量管理策略的模擬，並且比較其結

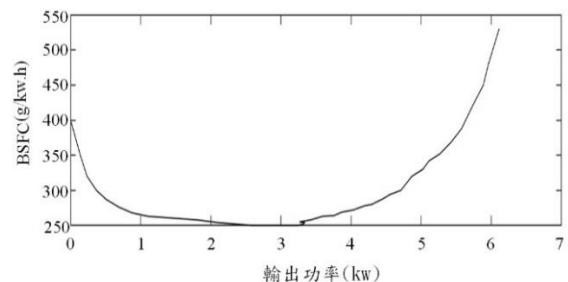


圖 26. 引擎發電機輸出功率與油耗關係圖



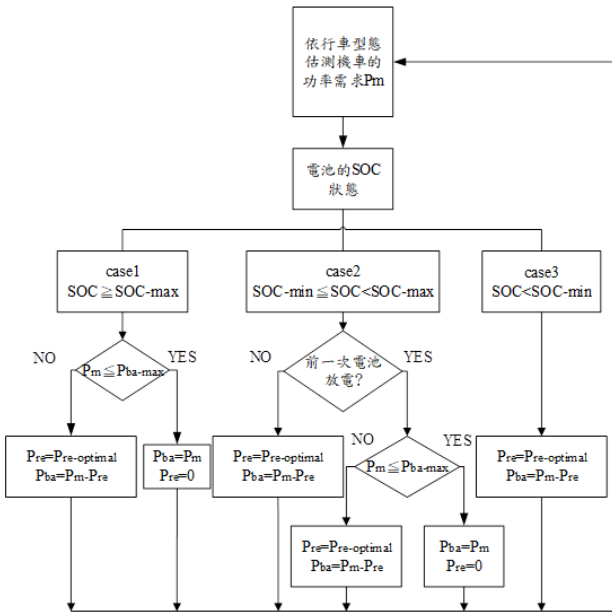


圖 27. 定功率發電的流程圖

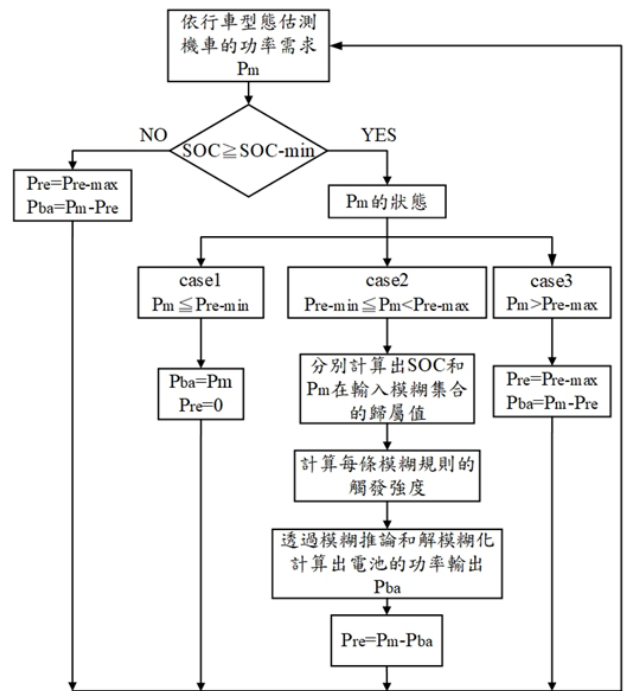


圖 29. 智慧型能量管理系統的流程圖

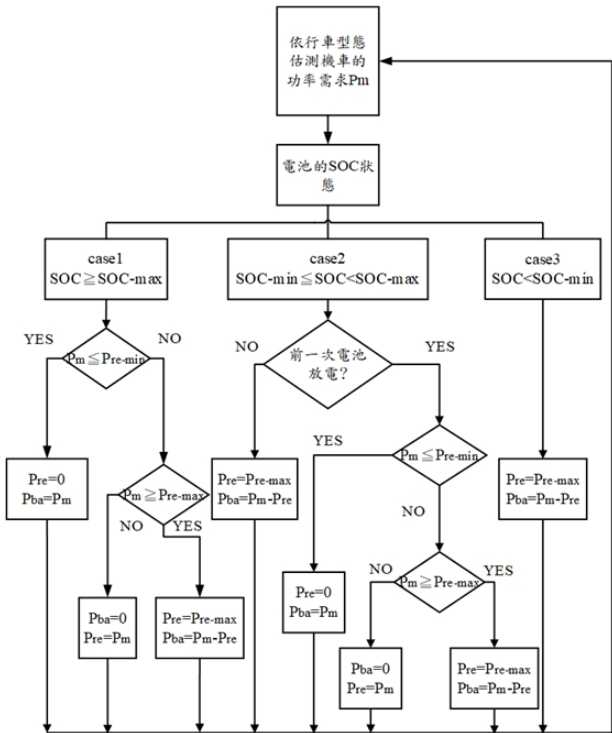


圖 28. 功率跟隨發電的流程圖

果。路況也依 ECE40 行車型態進行，路面路況傾斜 5% 角度以 ECE40 行車型態模擬 300 次，總行走時間為 15.7 小時，慧型能量管理模式進行模擬，三種能量管理模式的模擬結果分別如圖 31、圖 32 和圖 33。每一種模擬結果都顯示出 (a)

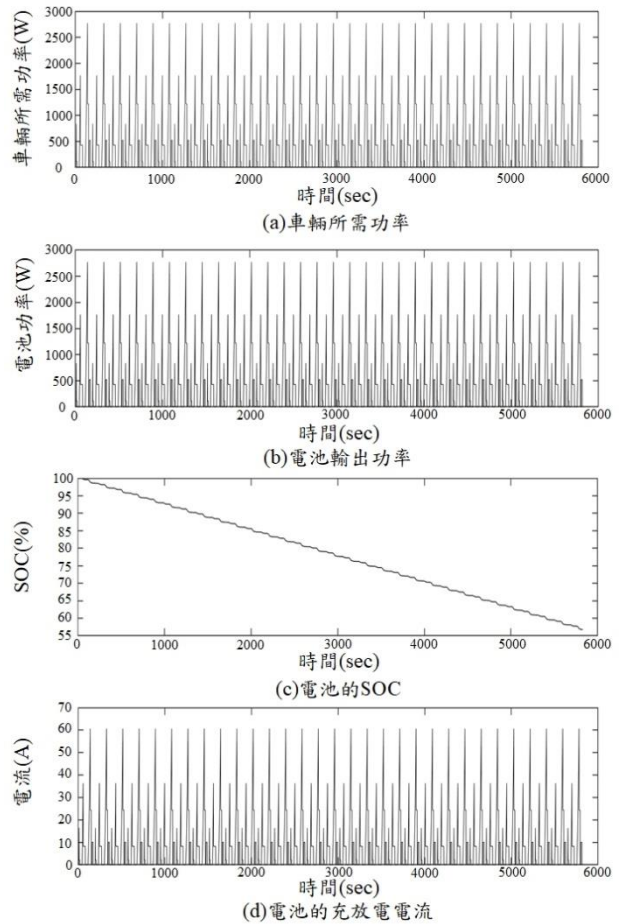


圖 30. 純電模式下的模擬結果



車輛行駛所需功率、(b) 行駛里程、(c) 引擎發電機輸出功率、(d) 電池輸出功率、(e) 電池的充放電電流、(f) 引擎發電機的耗油量、(g) BSFC 和 (h) 電池的 SOC 等八個圖形以做比較。從圖 31 (a)、圖 32 (a) 和圖 33 (a) 中可以看到此行車型態下，機車所行駛距離為 298km。分別以定功率發電、功率跟隨發電和智 5.8kw 和引擎發電機的最大功率 6kw。但是大於引擎發電機的最佳發電功率 3kw。因此，當以定功率模式發電時，機車行駛功率需求在 4.3kw 時，引擎發電機不能單獨供給機車電力，需輔以電池放電補足所缺電力。從圖 31 (c) 和 31 (d) 中可看出，在定功率發電模式下，引擎發電機和電池的充放電非常頻繁。圖 31 (e) 電池充放電電流變動劇烈，放電電流約 108A 而充電電流約 50A。從圖 31 (h) 中看出電池的 SOC 在 50 到 80 之間週期性變動。行駛最終電池 SOC 剩下 78，而引擎發電機的總油耗約 4000g。在功率跟隨模式下，從圖 32 (c) 和 32 (d) 中可以看出機車行駛所需的功率大多由引擎發電機所提供，而在機車行駛所需功率小於 1kW 時低於引擎發電機最低的發電功率，才由電池放電提供機車行駛功率需求。

由圖 32 (h)，電池的 SOC 在 50 和 80 之間緩慢變化。圖 32 (e) 中電池充放電的電流變動很小。但引擎發電機的輸出功率隨著機車行駛需求變化非常的劇烈，如圖 32 (c) 所示。行駛最終電池 SOC 剩下 74，而引擎發電機總油耗為 4000g。而本文智慧型能量管理模式，由圖 33 (c) 和 33 (d) 中可看出引擎發電機和電池協調式的分擔機車行駛所需的功率，因此，兩者的功率輸出皆非常平穩，圖 33 (e) 中看出電池充放電電流介於-8A 至 20A 之間。圖 33 (h) 中看出電池的 SOC 維持在穩定的 65 上下。行駛最終電池的 SOC 剩下 65，而引擎發電機的總油耗為 3500g。本文所發展的智慧型能量管理系統在耗能效率、電池充放電的平穩度和引擎發電機的發電效率，在三個能量管理模式比較下，皆有較優越的表現。可以改善定功率發電模式電池充放電過劇的問題，同時也解決功率跟隨模式下引擎發電機功率輸出變動太大的問題。

六、結論

本文發展智慧型能量管理系統應用於增程式混合動力機車，設計引擎發電機的最大輸出功率為 6kw，最佳輸出功率 3kw/3200rpm，BSFC 為 250g/kw.h。而鋰電池的容量為

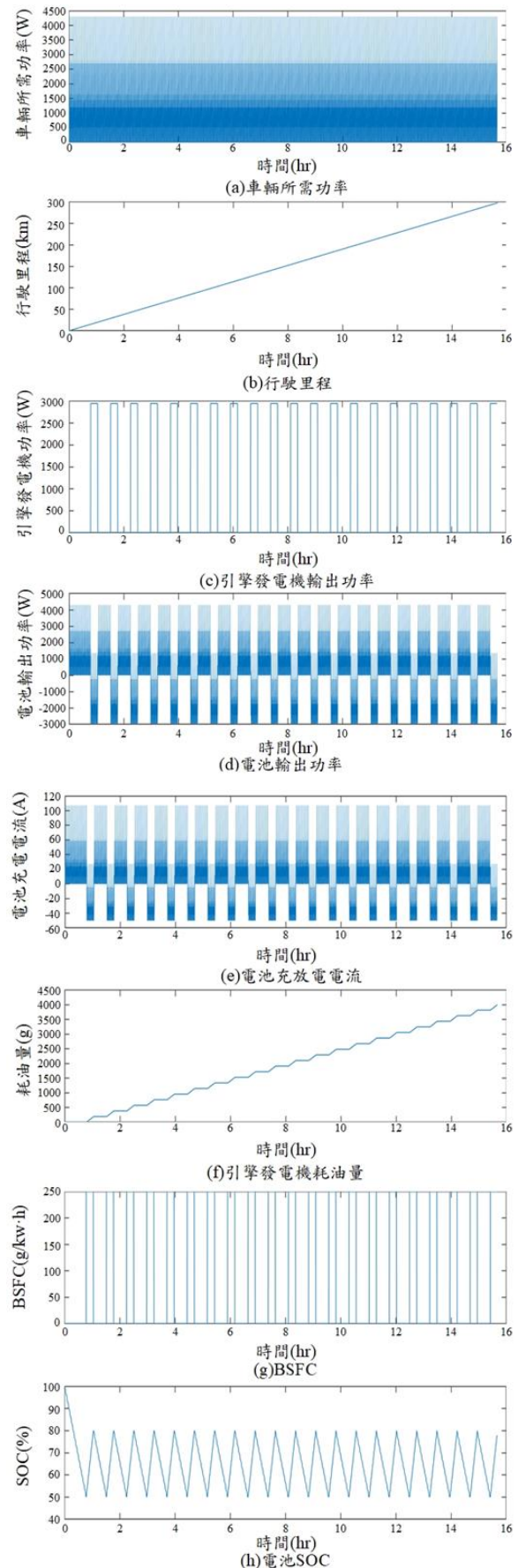


圖 31. 路面坡度 5%，定功率發電模擬結果



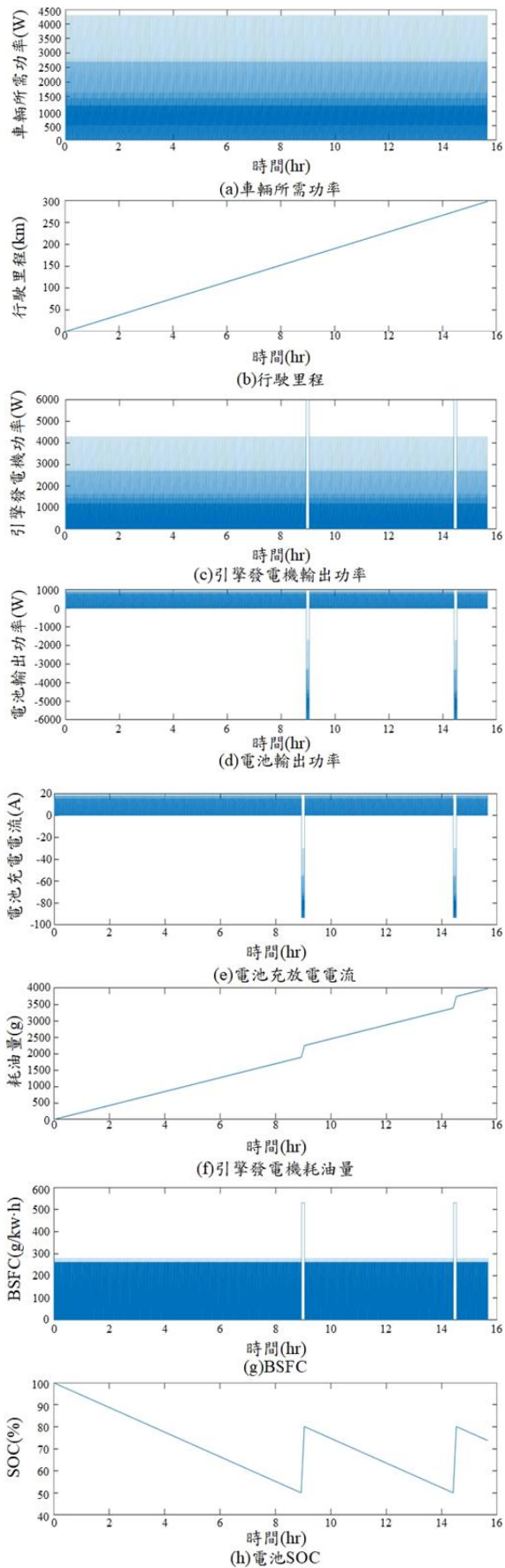


圖 32. 路面坡度 5%，功率跟隨發電模擬結果

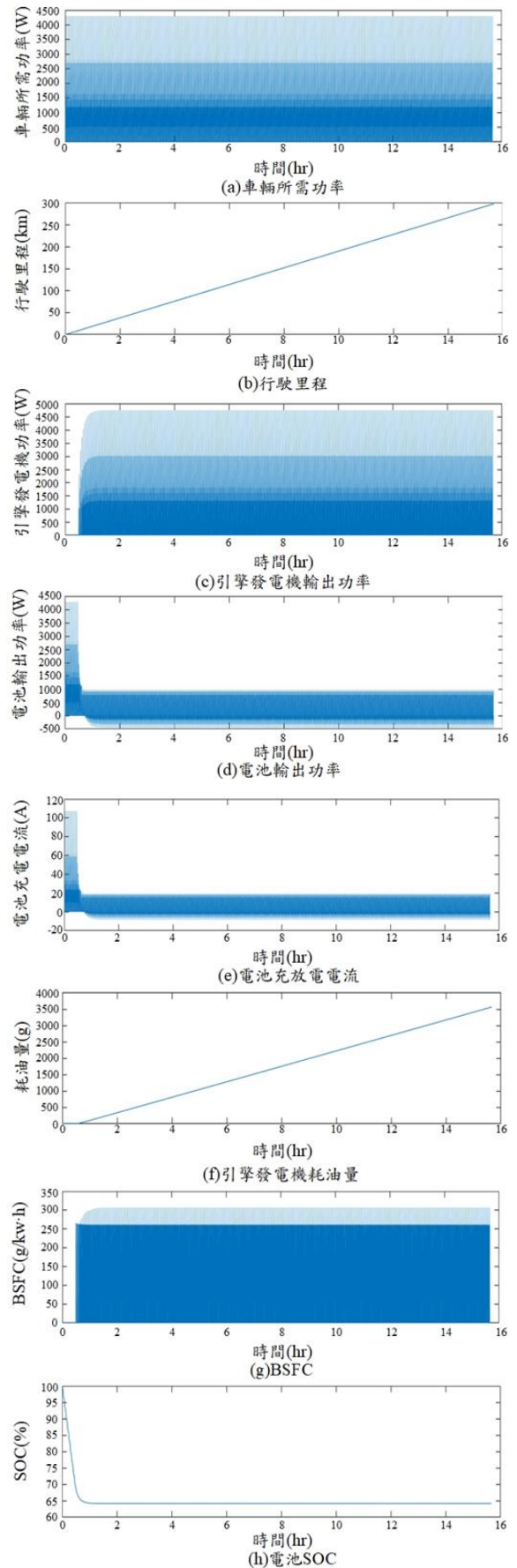


圖 33. 路面坡度 5%，智慧型能量管理模式模擬結果



1.6kwh、額定電壓 51.2V、額定輸出電流 6.3A。驅動馬達為 DC 無刷馬達，輸出功率 5kw/4500rpm、扭力 10.5N.m。設計模糊邏輯系統整合實驗數據資訊和專家經驗於智慧型能量管理系統。利用 Matlab 軟體平台撰寫能量管理的模擬程式，以 ECE40 的行車型態，模擬定功率發電、功率跟隨發電和本文智慧型能量管理系統的機車行駛狀態，並且比較三種方法的優劣。在機車總行駛里程 298km 和 15.67hr 的行車行狀態下，本文所發展的智慧型能量管理系統皆有較佳的能量管理表現。可以改善傳統定功率發電模式的電池充放電過劇，影響電池壽命的問題。也解決功率跟隨模式下，引擎發電機發電功率變化太大，造成功率輸出延遲的問題。

誌謝

本研究誠摯感謝金屬工業研究發展中心委託計畫提供相關經費支援(氫能移動載具計畫: 700 bar 高壓氣瓶非破壞性音洩技術與閥體環境性能可靠性相關性研究)，使得本研究得以順利進行，謹此致謝。

參考文獻

1. 李喬婷 (民95)，複合電動車輛能量管理，國立台灣大學機械工程學系碩士論文。
2. 席利賀、張欣、耿聰、薛奇成 (民107)，基於動態規劃算法的增程式電動汽車能量管理策略優化，交通運輸工程學報，18(3)，148-156。
3. 鄭文傑 (民102)，串聯式油電混和動力車能量管理策略之研究，國立台灣大學機械工程學系碩士論文。
4. Anderson, C. and E. Pettit (1995) The effects of APU characteristics on the design of hybrid control strategies for hybrid electric vehicles. *SAE 950493*, 65-71.
5. Barsali, S., C. Miulli and A. Possenti (2004) A control strategy to minimize fuel consumption of series hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(1), 187-195.
6. Chen, P. T., D. J. Shen, C. J. Yang and K. D. Huang (2019) Development of a hybrid electric motorcycle that accords energy efficiency and controllability via an inverse differential gear and power mode switching control. *Applied Sciences*, 9(9), 1787-1797.
7. Hochgraf, C., M. Ryan and H. Wiegman (1996) Engine control strategy for a series hybrid electric vehicle incorporating load-leveling and computer controlled energy management. *SAE 960230*, 11-24.
8. Larsson, V., L. Johannesson and B. Egardt (2015) Analytic solutions to the dynamic programming subproblem in hybrid vehicle energy management. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(4), 1458-1467.
9. Li, J. Q. Z. Fu and X. Jin (2017) Rule based energy management strategy for a battery/ultra-capacitor hybrid energy storage system optimized by pseudospectral method. *Energy Procedia*, 105, 2705-2711.
10. Liang, J. J., J. Zhang, X. Zhang, S. Yuan and C. Yin (2013) Energy management strategy for a parallel hybrid electric vehicle equipped with a battery/ultra-capacitor hybrid energy storage system. *Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering*, 14(8) 535-553.
11. Liu, C. N. Liu and Y. Liu (2022) Energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles based on driving condition recognition: A review. *Electronics*, 11(3), 342-352.
12. Liu, J. and H. Peng (2006) Control optimization for a power-split hybrid vehicle. Proceedings of the American Control Conference, art. no. 1655400, 466-471.
13. Liu, J. and H. Peng (2008) Modeling and control of a power-split hybrid vehicle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 16 (6), 1242-1251.
14. Musardo, C., G. Rizzoni and B. Staccia (2005) ECMS: An adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference, art. no. 1582424, 1816-1823.
15. Paganelli, G., M. Tateno, A. Brahma, G. Rizzoni and Y. Guezennec (2001) Control development for a hybrid-electric sport-utility vehicle: Strategy, implementation and field test results. Proceedings of the American Control Conference 6, 5064-5069.
16. Paganelli, G., S. Delprat, T. M. Guerra, J. Rimaux and J. J. Santin (2002) Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains. IEEE Vehicular Technology Conference 4, 2076-2081.
17. Rimpas, D. T., S. D. Kaminaris, I. Aldarrajji, D. T. Piromalis, G. G. Vokas, P. G. Papageorgas and G. G. Tsaramirsis (2022), Energy management and storage systems on electric vehicles: A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*, 61, 813-819.



18. Wu, X., Y. Gu and M. Xu (2020) Adaptive energy management strategy for extended-range electric vehicle based on micro-trip identification. *IEEE Access*, 8, 176555-176564.
19. Yahia, I., C. B. Salah and M. F. Mimouni (2016) Optimal contribution of energy management of electric vehicles. *Journal of Electrical Systems*, 12 (4), 12-16.

收件：112.07.28 修正：112.08.08 接受：112.08.21

