

2.4 動力整合分配機構

本研究所使用之動力整合分配機構為一逆向差速齒輪，假設此系統為無摩擦、剛體齒輪、無皮帶滑差、順時力矩力量為正，接內燃機端齒輪、接一體式馬達/發電機端齒輪、差速齒輪與行星臂分別如圖 2.4 所示，利用一組逆向差速齒輪作為複合電動系統的動力整合分配機構，分析各齒輪之間運動關係，假設第一斜齒輪固定，當第二斜齒輪轉動時則第三斜齒輪會產生第二斜齒輪一半之轉速的公轉轉速，反之，當第二斜齒輪固定則第一斜齒輪轉動時則第四斜齒輪會產生第一斜齒輪一半之轉速的公轉轉速。

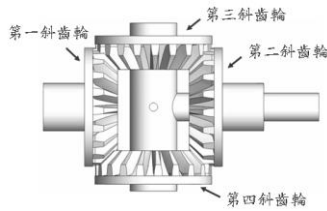


圖 2.4 動力整合分配機示意图

動力整合分配機構中力矩關係經各齒輪間自由體圖分析(如圖 2.5、2.6 所示)後知

$$T_1 = J_1 \alpha_1 + F_{d1} \times r_1 \quad (2.11)$$

$$T_2 = J_2 \alpha_2 + F_{d2} \times r_2 \quad (2.12)$$

$$(F_{d1} - F_{d2}) \times r_d = J_d \alpha_d \quad (2.13)$$

$$F_{ad} \times r_a - T_{eCVT,Load} = J_a \alpha_a \quad (2.14)$$

$$F_{ad} = F_{d1} + F_{d2} \quad (2.15)$$

將以上方程式整理得知第一斜齒輪與第二斜齒輪力矩為

$$T_1 = J_1 \alpha_1 + (J_a \alpha_a + J_d \alpha_d + T_{eCVT,Load}) / 2 \quad (2.16)$$

$$T_2 = J_2 \alpha_2 + (J_a \alpha_a - J_d \alpha_d + T_{eCVT,Load}) / 2 \quad (2.17)$$

推導出的數學方程式建立本系統動力整合分配機構實體機構的動態型。

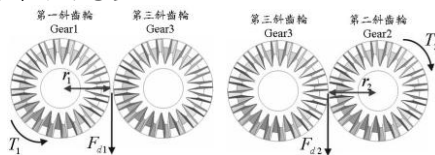


圖 2.5 第一第三與第二第三斜齒輪自由體圖

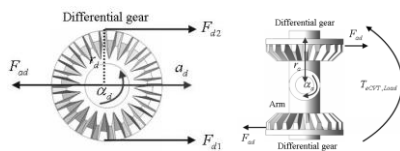


圖 2.6 第三斜齒輪與公轉軸自由體圖

2.5 主動式無段變速系統

本系統中主動式無段變速機構採用行星齒輪式架構，元件包含太陽齒輪、行星架、環齒輪、行星齒輪如圖 2.7 所示，在差速行星齒輪中，太陽輪、行星

架、環齒輪皆可當作輸入軸、輸出軸及控制軸，一共可得到六種排列方式，而本系統採用之接法為環齒輪當輸入軸、行星架當控制軸、太陽齒輪當輸出軸。

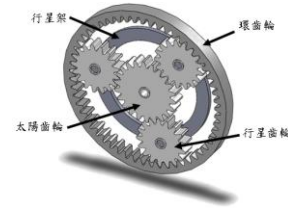


圖 2.7 行星齒輪簡略示意图

為探討機構在運轉過程中的動態特性，本研究針對傳動機構各重要組件推導其運動方程式，了解組件個別的運動情形建立數學模型。無段變速系統內部作用力可分為向心力及切向力，在行星齒輪中因其只作旋轉運動故向心力對質心不產生力矩，在此僅考慮切向之作用力如圖 2.8、2.9 所示，內部各元件運動方程式如下：

$$T_s - 3F_{ps} r_s = J_s \alpha_s \quad (2.18)$$

$$F_{pc} + F_{ps} - F_{pr} = m_p a_p \quad (2.19)$$

$$a_p = (r_p + r_s) \alpha_c \quad (2.20)$$

$$(F_{pr} + F_{ps}) r_p = J_p \alpha_p \quad (2.21)$$

$$T_c - 3F_{pc} (r_p + r_s) = J_c \alpha_c \quad (2.22)$$

$$3F_{pr} r_r - T_L = J_r \alpha_r \quad (2.23)$$

將(2.18)~(2.23)推導之運動方程式結合可以整理而得下列力矩關係式：

$$T_s = I_s \alpha_s - (I_r \alpha_r + T_L) r_s / r_r + 3I_p \alpha_p r_s / r_p \quad (2.24)$$

$$T_c = (I_c + 3m_p (r_p + r_s)^2) \alpha_c + 2(I_r \alpha_r + T_L) (r_p + r_s) / r_r - 3I_p \alpha_p (r_p + r_s) / r_p \quad (2.25)$$

將其推導出的數學方程式建立出本系統 eCVT 實體機構的動態模型。

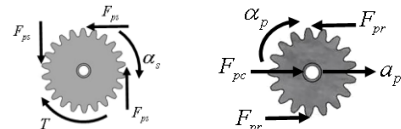


圖 2.8 太陽齒輪與行星齒輪受力圖

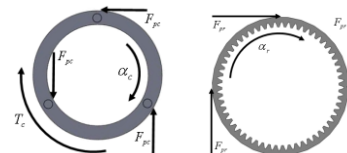


圖 2.9 行星架與環齒輪受力圖

2.6 車輛環境參數輸入模型

為模擬實車測試時所受到之空氣阻力、滾動阻力、爬坡阻力與加速阻力，須輸入車輛相關參數如車重、車輛前投影面積與轉動慣量，以及環境變數如坡度、滾動阻力係數、空氣阻力係數、空氣密度等資料。其中包含車輛移動時由車輪接觸地面而產生路面阻礙輪胎行進的滾動阻力

$$F_r = mg\mu_r \quad (2.26)$$

車輛行駛時遭遇到的空氣阻力包含氣流撞擊車輛正面所產生的阻力以及空氣劃過車身所產生之空氣阻力

$$F_{air} = \frac{1}{2} C_d A \rho V^2 \quad (2.27)$$

在汽車開上斜坡時所受到的爬坡阻力

$$F_s = mg \sin \theta \quad (2.28)$$

汽車在加速時需比等速行駛多輸出更多的加速阻力

$$F_a = (m + m_i) a \quad (2.29)$$

2.7 整車動態模型

整車動態模型依據方程式 2.1~2.29 針對各系統元件所建立的動態模型加以整合，並加入一駕駛者模型控制油門踏板及煞車作為功率需求，可依照不同行車形態作為參考車速輸入至駕駛者模型中，能量管理控制策略將接收駕駛者油門與煞車踏板作為功率需求，回授各動力元件功率、電瓶 SOC 與實際車速判斷行車模式，最後在電腦上模擬能量管理在實際平台測試時的運轉情形，驗證控制策略的完整性。

3. 能量管理控制策略

複合電動車在行駛時有幾種驅動情形，其中包含電動馬達驅動、內燃機驅動及內燃機加電動馬達共同驅動，根據複合電動車作動原理結合 rule-based 的控制概念，設計出本文所採用之能量管理控制策略。整體操作狀況根據動力需求不同配合 SOC 分為四種模式，分別是 Motor Mode、Engine Mode、Dual Mode，如圖 3.1 所示，並在無動力需求時加入 Regenerative Braking 回充電瓶，減少能源損失進而提升整車性能。

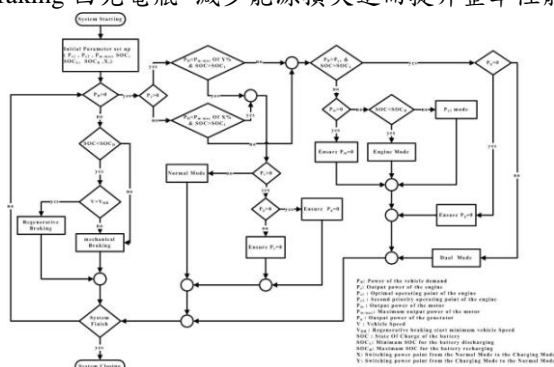


圖 3.1 控制模式基本架構圖

Rule-based 的控制規則是將駕駛者油門訊號轉換成功率需求 P_{req} ，能量管理控制器根據動力需求決定能量分配，在控制器中可分割成四種模式，介紹如下所示：

Motor Mode: 根據電動馬達所能輸出之最大功率與內燃機效率曲線圖決定操作模式切換點，以駕駛者需求功率作為依據，在需求功率未超過電動馬達最大輸出功率切換點基準值時，僅由電動馬達提供動力滿

足車輛動力需求；一旦駕駛者需求功率超過電動馬達最大輸出功率切換點基準值時，模式將切換至內燃機模式，在切換過程中內燃機在最短時間內上升至本系統所制定的操作點，操作點則視 SOC 不同而改變，電動馬達隨內燃機上升啟動由能量管理控制器決定馬達功率輸出大小以配合內燃機在上升至操作點的這段時間滿足車輛動力需求，並使駕駛者盡量注意不到模式切換時因接合兩動力源所造成的短暫震動。

Engine Mode: 內燃機模式主要根據 SOC 判斷，當駕駛者需求為超過電動馬達最大輸出功率切換點基準值而 SOC 亦為可充電範圍時，內燃機模式即啟動，內燃機保持操作點時輸出功率大於車輛動力需求將多餘動力利用發電機吸收並充電至電瓶；一旦駕駛者動力需求超過內燃機最佳操作點輸出功率時，則將一體式馬達/發電機從發電機狀態控制轉變為電動馬達狀態，以滿足高負載時車輛動力需求；內燃機模式也可在低負載 SOC 不足已驅動電動馬達時啟動，利用內燃機處於最省油之操作點將電瓶充電至 SOC 基準值。

Dual Mode: 當駕駛者動力需求超過內燃機最佳操作點輸出功率而 SOC 大於本系統所設定之可使用範圍中最低 SOC 時，則利用電動馬達輔助內燃機以滿足高負載時車輛動力需求。

Regenerative Braking Mode: 當駕駛者踩下煞車踏板動力需求 $P_D < 0$ 時，能量管理控制器判斷系統為減速模式，此模式下內燃機不做動，電動馬達則由車輛慣性力帶動，作為發電機使用。若此時 SOC 已經大於本系統所設定之可使用範圍中最高 SOC 時，則採用一般煞車模式不對車輛進行充電；若 SOC 處於可充電範圍內時則針對當時車速作為煞車模式切換，當時速大於本系統所設定之啟動再生煞車切換基準值時，電動馬達即為再生煞車模式並主動吸收煞車能回充至電瓶；當時速小於本系統所設定之再生煞車切換基準值時，則分配機械煞車與電動馬達所產生之力矩輸出。

4. 結果與討論

本研究利用模擬程式 simulink 所建出的整車動態模型以歐盟規範 NEDC2000 與美國規範 FTP75 行車型態進行能量管理控制策略的測試，在進行模擬之前先將系統狀態初始化，SOC 初始值設定為 60， SOC_{max} 設為 80， SOC_{min} 設為 40，圖 4.1 為 HEV 模擬跟隨 NEDC2000 結果圖，參考車速輸入為實線跟隨 NEDC2000 行車型態，實際車速輸出為虛線跟隨參考車速，顯示出在各個時間點能量管理控制策略所選用的操作模式。

能量管理控制策略中為了避免內燃機一直啟動關閉造成能源浪費，因此設定不同切換點，在一般模式時設定較高切換點而內燃機模式時設定較低操作點，模擬過程中可得知一般模式切換至內燃機模式時時速較內燃機模式切換至一般模式時速高；同時為了

一體式馬達/發電機可有效發揮其特性，在內燃機模式與雙動力模式切換過程亦設定不同切換點，避免電動馬達與發電機切換過於頻繁造成能源無法有效輸出或吸收。

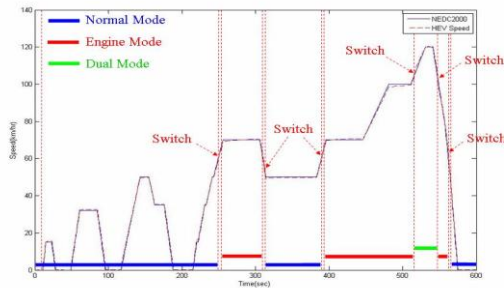


圖 4.1 模擬 HEV 跟隨 NEDC2000 行車型態車速圖

圖 4.2 可清楚看出 HEV 模擬跟隨 NEDC2000 時各元件輸出轉速圖，由上而下分別為一體式馬達/發電機轉速、內燃機轉速、動力整合分配機構轉速、eCVT 轉速、車輪轉速圖。

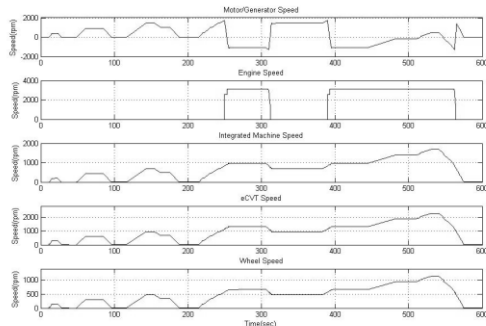


圖 4.2 模擬 HEV 跟隨 NEDC2000 各元件輸出轉速圖

圖 4.3 為模擬 HEV 跟隨 NEDC2000 各元件輸出力矩圖，由上而下分別為一體式馬達/發電機力矩、內燃機力矩、動力整合分配機構力矩、eCVT 力矩、車輪力矩圖。因電動馬達與發電機在本系統中屬於一體式，所受到之負載也相同，當一體式馬達/發電機作電動馬達之用時，輸出力矩即為經動力整合分配機構傳回之外界負載，而作發電機之用時，內燃機輸出動力經動力整合分配機構傳至發電機之負載作為發電機充電之動力來源。

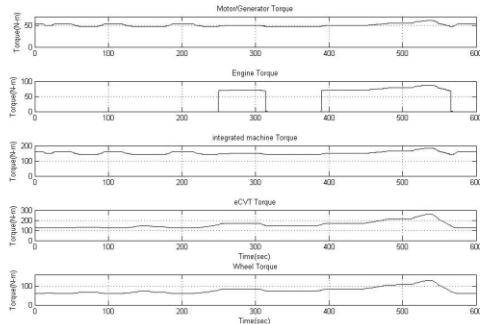


圖 4.3 模擬 HEV 跟隨 NEDC2000 各元件輸出力矩圖

圖 4.4 為模擬 HEV 跟隨 NEDC2000 時內燃機輸出之 BSFC 圖，藍色落點為內燃機之操作區域，轉速利用電子節氣門控制，輸出力矩利用 eCVT 調整輸出至車輪之減速比，使內燃機操作區域可落於最省油範圍，在不影響 HEV 整車性能情況下大幅降低 HEV 油耗；圖 4.5 為模擬 HEV 跟隨 NEDC2000 時，內燃機各項污染物排放圖，其中包含 BSCO、BSCO₂、BSHC、BSNO_x。

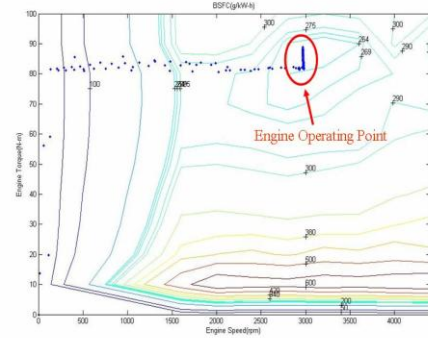


圖 4.4 模擬 HEV 跟隨 NEDC2000 內燃機 BSFC 圖

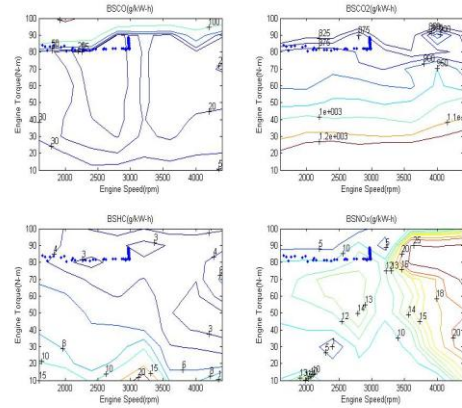


圖 4.5 模擬 HEV 跟隨 NEDC2000 內燃機污染排放圖

圖 4.6 為模擬 HEV 跟隨 NEDC2000 時電瓶輸出之 SOC 圖與電瓶電壓圖，初始 SOC 值設定為 60，除了被註明的內燃機模式外其餘皆為使電瓶 SOC 下降的一般模式與雙動力輸出模式。

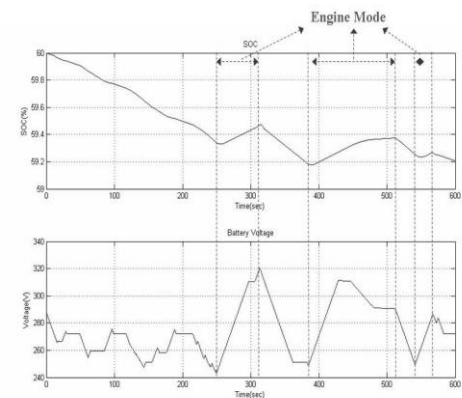


圖 4.6 模擬 HEV 跟隨 NEDC2000 電瓶曲線圖

5. 結論

本系統架構以逆向差速齒輪式動力整合分配機構形成一並聯式複合動力系統，為確認內燃機操作點落於最佳 BSFC 範圍內，能量管理模組控制電動馬達輔助或發電機吸收內燃機的輸出動力以滿足駕駛者動力需求，同時利用 eCVT 調整內燃機因克服各種阻力所改變的輸出力矩，使內燃機維持於最佳運轉區域，可以有效的節省燃油之消耗，不會因為內燃機轉速或是力矩的變動造成不必要的油耗，依據系統元件物理特性分別建立各子系統之動態模型，包含內燃機、電動馬達、發電機、電瓶、動力整合分配機構、eCVT 以及路面阻力等模型。綜合以上模擬與實驗結果，可得到下列幾項結論：

1. 本研究動態模擬針對各元件分析及推導其動態方程式，參數估測盡量取實際元件參數以貼近實際平台量測結果。
2. 電子無段變速機構可將動力整合分配機構受到的負載控制較為平穩以維持內燃機最佳操作點。
3. 本研究之能量管理控制策略考慮到所有可能在行車中遭遇到的狀況建立專屬本系統的能量管理控制策略，並加入動力切換時的接合模式以增加順暢度。
4. 以駕駛者動力需求為依據之控制策略，相較於其它各車廠以速度為依據做模式切換之控制方法，架構需更為嚴謹，也更接近一般車輛的動態行為，模式切換可更接近平順不會有動力銜接不順暢之狀況發生。
5. 由系統模擬程式之模擬結果分析，HEV 與傳統車輛比較可以大幅節省燃油消耗及減少廢氣的排放，並可達較傳統車輛更佳的性能表現。

6. 誌謝

感謝經濟部技術處學界科專計畫 96-EC-17-A-16-S1-051-B 對本研究的支持與補助。

7. 參考文獻

1. R. C. Dorf and R.H. Bishop, *Modern Control Systems*, U.S.A, Pearson prentice hall, 2004, pp. 191-219.
2. G. F. Franklin, J.D. Powell and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamics Systems*, U.S.A., Pearson prentice hall, 2006, pp. 20-44.
3. K. Ogata, *System Dynamics*, U.S.A.: Prentice Hall, 1998, pp. 58-100.
4. 陳愈仁，*直流無刷馬達模型參考模糊位置控制*，碩士論文，私立中原大學電機工程系，中壢，2003。
5. T. L. Chern, J. Chang, and G.K. Chang, "DSPBased Integral Variable Structure Model Following Control for Brushless DC Motor Drivers," *IEEE Transactions on Power*

Electronics, vol. 12, no. 1, 1997, pp. 53-63.

6. 彭梓軒，*應用動態規劃於混合動力機車之設計與分析*，碩士論文，國立台北科技大學車輛工程系，台北，2005。
7. V. H. Johnson and A.A. Pesaran, "Temperature-Dependent Battery Models for High-Power Lithium-Ion Batteries," *NREL Presented at the 17th Annual Electric Vehicle Symposium Montreal*, 2000.
8. R. L. Boylestad and L. Nashelsky, *Introduction to Electricity, Electronics, and Electromagnetics*, U.S.A.: Prentice Hall, 2001, pp.73-131.

Design and Analysis for Energy Management System of Hybrid Electric Vehicle of Inverse Differential Gears Type

K. David Huang, Kei-Lin Kuo, I-An Shih, Ming-Yuan Jeng, Yu-Jia Jhang

Department of Vehicle Engineering,
National Taipei University of Technology
Project No.: 96-EC-17-A-16-S1-051-B

Abstract

This research discussed the energy management control strategy and analysis the performance of hybrid electric system. The specific control strategy will make up an Energy Management Unit (EMU) to determine the distribution of energy in each power unit. Energy management system took the driver command as reference input, used the rule-based control strategy to determine the power distribution among Electric Motor (EM), generator and Internal Combustion Engine (ICE) to keep ICE always operate in the most optimum efficiency area. System used ICE and EM as the power source integrated and combined by inverse differential gear. While the vehicle load changes, the combination of electrical Continuously Variable Transmission (eCVT) will adjust transmission gear ratio for ICE and EM to achieve more stable power output. The computer analysis used Matlab/simulink software to make up a modular system component. According to NEDC2000 pattern analysis and discuss the vehicle dynamic module simulation result.

Keywords: Hybrid Electric System, Control Strategy, Energy Management, Dynamic Simulation.