

國立臺灣大學工學院機械工程學研究所

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



插電式混合動力電動車之智慧節能巡航控制研究

Research of the Intelligent Eco-Cruise Control for Plug-in
Hybrid Electric Vehicles

許博鈞

Hsu, Bo-Chun

指導教授：李 綱 博士

Advisor: Li, Kang, Ph.D.

中華民國 105 年 8 月

August, 2016



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

插電式混合動力電動車之智慧節能巡航控制研究
Research of the Intelligent Eco-Cruise Control for Plug-in Hybrid
Electric Vehicles

本論文係許博鈞君 (R03522836) 在國立臺灣大學機械工程學系
完成之碩士學位論文，於民國 105 年 8 月 26 日承下列考試委員審查
通過及口試及格，特此證明

口試委員：

李綱

(簽名)

(指導教授)

顏家鈺

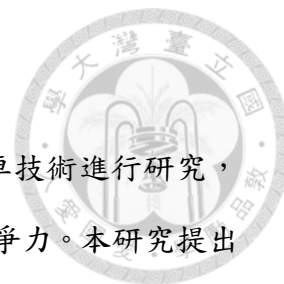
楊士維

系主任

楊耀州

(簽名)

摘要



本論文針對插電式混合動力電動車(PHEV)之智慧節能行車技術進行研究，以期提升插電式混合動力車之行駛效能，藉以增加續航力與競爭力。本研究提出一套以巡航控制為基礎之節能行車控制方法，此方法透過調節傳統定速巡航控制系統之參考車速，以改變 PHEV 動力系統之動態負載，此行車控制系統根據地形變化、道路參數與前方交通動態資訊等調整車速，使動力系統運作於高效區與車輛行駛於安全範圍。本論文所提出之節能行車控制器採用非線性模型預測控制 Nonlinear Model Predictive Control (NMPC)與瞬時功率最小化策略 instantaneous power minimization (IPM)分別進行車速最佳化與馬達系統之動力分配，MiL/ HiL 結果顯示此套節能巡航控制技術可減少 5~10%之行車能耗。

Abstract

An eco-driving system for the plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) to improve the energy economy is presented. This research proposes an eco-cruise controller (eco-CC), it is able to adjust cruising speed by receiving and analyzing terrain information and then furthermore to reduce the consumption of energy. The nonlinear model predictive control technique (NMPC) is used to optimally control vehicle speed and the instantaneous power minimization (IPM) strategy is adopted to deal with the torque distribution of multi-motor system. The research also takes the safety and comfort into consideration. The eco-CC deals with the design of an adaptive cruise control system considering the safety as well as comfort aspects of corner road. At last, this research has been proven with real motors response, these simulations demonstrate that eco-CC improves the total energy cost about 5~10%.



致謝



從拖著行李踏入椰林大道到裝滿兩年的回憶離開，首先感謝我的指導教授李綱老師，啟蒙了我研究規劃中許多想法，在我不知道方向時給予指點方針，讓我能夠順利的完成這篇論文，並總是慷慨地給予實驗室資源使用，也謝謝我的口委顏家鈺教授以及楊士進教授給予指導。

在 IVML 實驗室裡，感謝芳杰、育伸、力瑋、冠任、俊凱、振銳學長們各種提攜與帶領整間實驗室；感謝袁鼎、范峻、阿喜給予方向以及榜樣；謝謝學弟翔文、舜友在我需要幫忙的時候總是義不容辭；恭賀同居的柏富、啟原、耿豪、明軒各種辛酸淚，我們終於要畢業了！預祝大家一帆風順；特別感謝舊數守護神致偉哥還有工綜八樓康學長，在最後的艱難關頭聽我吐苦水打我臉，沒有你們我口試不會順順利利在實驗室生活也會很無趣。

感謝成大航太夥伴們基哥、韋宏、志宗、旻志、暄翔、家聞以及大家，把歡樂從台南帶來台北；感謝從台南來台北一起打拼的夥伴們咪咪、丸子、寶稜、Marc，你們真的很窩心。

感謝小雯的家人們，讓鄉下囡仔來台北的我感受到無比溫暖；謝謝小雯的陪伴，讓我能放心的在學業上並包容我的各種粗心大意，以及提供專業的潤稿，謝謝妳。

最後給我親愛的家人們，爸爸媽媽爺爺奶奶姐姐，給我太多太多的支持與鼓勵，我終於要畢業了，之後換我來照顧你們，我愛你們！

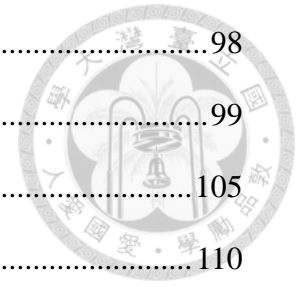
目錄



摘要.....	II
Abstract.....	III
致謝.....	IV
目錄.....	V
圖目錄.....	VIII
表目錄.....	XIV
符號表.....	XV
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 文獻回顧.....	3
1.3 研究貢獻.....	9
第二章 系統架構與模型.....	10
2.1 系統架構.....	10
2.2 系統模型.....	13
2.2.1 引擎模型.....	13
2.2.2 馬達模型.....	15
2.2.3 減速齒輪箱模型.....	16
2.2.4 車輛縱向模型.....	17
第三章 智慧節能駕駛單元控制系統設計.....	19
3.1 插電式混合動力車動力模式.....	20
3.1.1 行車動力模式-引擎模式(ICE mode)	21
3.1.2 行車動力模式-純電模式(EV、RE mode)	21
3.2 節能巡航控制車速最佳化設計.....	22

3.2.1	成本函數.....	23
3.2.2	預測模型.....	24
3.2.3	限制條件.....	27
3.3	模型預測控制.....	28
3.4	最佳化-動態規劃法	30
3.5	適應性巡航控制系統.....	38
3.6	瞬時功率最小化策略.....	39
第四章	模型迴路模擬.....	45
4.1	節能巡航控制.....	45
4.1.1	上坡道路速度調節	46
4.1.2	下坡道路速度調節	53
4.1.3	結合地圖資料-五股楊梅高架橋路段	60
4.1.4	差異分析-權重比較	64
4.1.5	差異分析-不同巡航車速與權重關係	73
4.1.6	差異比較-調節車速區間大小	74
4.2	節能巡航安全與跟車.....	79
4.2.1	安全過彎車速調節.....	79
4.2.2	節能巡航 ECC/適應性巡航 ACC 切換	83
4.2.3	節能巡航跟車.....	87
第五章	硬體迴路模擬.....	90
5.1	馬達動力平台耗能實驗量測.....	90
5.1.1	馬達動力平台.....	90
5.1.2	實驗設備.....	93
5.1.3	TN 轉換	95
5.1.4	馬達效率圖建立.....	96

5.1.5	力矩命令查表建立.....	98
5.1.6	實驗情境-短程	99
5.1.7	實驗情境-20km	105
第六章	結論與未來工作建議.....	110
6.1	結論.....	110
6.2	未來工作建議.....	112
參考文獻	113



圖目錄



圖 1.1、行車模式狀態定義圖[30]	7
圖 1.2、行車模式切換邏輯[30]	7
圖 2.1、EVx5 混合動力系統架構.....	10
圖 2.2、串並式插電混合動力系統架構	11
圖 2.3、智慧化節能行車控制架構圖	12
圖 2.4、引擎模型示意圖	13
圖 2.5、引擎燃油效率圖	14
圖 2.6、馬達模型圖示	15
圖 2.7、車輛縱向動力學模型	17
圖 3.1、EVx5 行車模式.....	20
圖 3.2、引擎模式動力元件	21
圖 3.3、純電模式動力元件	22
圖 3.4、模型預測控制系統架構	28
圖 3.5、最小成本路徑	31
圖 3.6、以距離離散化最佳化問題	31
圖 3.7、模型預測控制與系統	37
圖 3.8、速度曲線	37
圖 3.9、Adaptive Cruise Control System	38
圖 3.10、永磁同步馬達效率圖	40
圖 3.11、感應馬達效率圖	41
圖 3.12、IPM 效率圖	42
圖 3.13、永磁同步馬達分配驅動力	43
圖 3.14、感應馬達分配驅動力	43

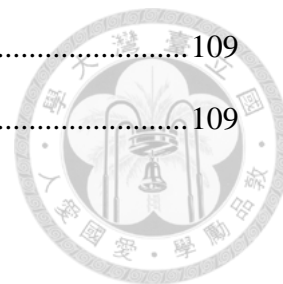
圖 4.1、上坡道路+3%	46
圖 4.2、定速巡航 90km/hr-車速	48
圖 4.3、定速巡航 90km/hr-高度	48
圖 4.4、定速巡航 90km/hr-引擎力矩	48
圖 4.5、節能巡航-車速	49
圖 4.6、節能巡航-高度	49
圖 4.7、節能巡航-力矩	49
圖 4.8、定速巡航-車速	51
圖 4.9、定速巡航-高度	51
圖 4.10、定速巡航操作點	51
圖 4.11、節能巡航-車速	52
圖 4.12、節能巡航-高度	52
圖 4.13、節能巡航操作點	52
圖 4.14、下坡道路-3%	53
圖 4.15、定速巡航-車速	54
圖 4.16、定速巡航-高度	54
圖 4.17、定速巡航-力矩	54
圖 4.18、節能巡航-車速	55
圖 4.19、節能巡航-高度	55
圖 4.20、節能巡航-力矩	55
圖 4.21、定速巡航-車速	56
圖 4.22、定速巡航-高度	56
圖 4.23、定速巡航第一象限操作點	57
圖 4.24、定速巡航第四象限操作點	57
圖 4.25、節能巡航-車速	58

圖 4.26、節能巡航-高度.....	58
圖 4.27、節能巡航第一象限操作點.....	59
圖 4.28、節能巡航第四象限操作點.....	59
圖 4.29、五股楊梅高架橋路段.....	60
圖 4.30、五楊高架道路高度圖.....	61
圖 4.31、五楊路段坡度.....	61
圖 4.32、引擎模式定速巡航車速圖.....	62
圖 4.33、引擎模式節能巡航車速圖.....	62
圖 4.34、純電模式定速巡航車速圖.....	63
圖 4.35、純電模式節能巡航車速圖.....	63
圖 4.36、比較權重高度圖.....	64
圖 4.37、引擎模式 w_0 變化車速影響.....	66
圖 4.38、引擎模式 w_0 能耗比較.....	66
圖 4.39、純電模式 w_0 車速變化.....	67
圖 4.40、純電模式 w_0 能耗變化.....	67
圖 4.41、引擎模式 w_1 車速變化.....	68
圖 4.42、引擎模式 w_1 變化能耗影響.....	68
圖 4.43、純電模式 w_1 車速變化.....	69
圖 4.44、純電模式 w_1 能耗變化.....	69
圖 4.45、引擎模式 w_2 變化車速影響.....	70
圖 4.46、引擎模式 w_2 變化之能耗變化.....	70
圖 4.47、純電模式 w_2 變化之車速影響.....	71
圖 4.48、純電模式 w_2 變化之能耗影響.....	71
圖 4.49、+3%地形圖.....	75
圖 4.50、定速巡航與不同車速變化.....	75

圖 4.51、油耗	75
圖 4.52、地形圖	77
圖 4.53、車速變化圖	77
圖 4.54、能耗變化圖	77
圖 4.55、模擬坡度圖	81
圖 4.56、平面軌跡圖	81
圖 4.57、安全過彎度車速圖	82
圖 4.58、安全過彎側向加速度圖	82
圖 4.59、安全過彎道路中心誤差圖	82
圖 4.60、ACC/ ECC 切換	84
圖 4.61、地形圖	86
圖 4.62、A 車、B 車之車速圖	86
圖 4.63、兩車相對距離	86
圖 4.64、模式切換狀態	86
圖 4.65、節能巡航跟車示意圖	87
圖 4.66、坡度 $\pm 6\%$ 路段	88
圖 4.67、定速跟車車速圖	89
圖 4.68、節能巡航跟車車速	89
圖 5.1、馬達動力平台	91
圖 5.2、模擬架構	92
圖 5.3、透過 PUMA 輸入力矩轉速資料	92
圖 5.4、馬達動力平台與永磁同步馬達	93
圖 5.5、馬達動力平台與感應馬達	93
圖 5.6、三向電流量測與功率分析儀	94
圖 5.7、AVL PUMA 操控平台	94

圖 5.8、永磁同步馬達轉速力矩圖	95
圖 5.9、永磁同步馬達效率圖	96
圖 5.10、感應馬達效率圖	96
圖 5.11、IPM 效率圖	97
圖 5.12、永磁同步馬達驅動力分配	97
圖 5.13、感應馬達驅動力分配	97
圖 5.14、力矩命令查表	98
圖 5.15、情境一坡度圖	99
圖 5.16、定速巡航車速	99
圖 5.17、節能巡航車速	99
圖 5.18、短程定速巡航之永磁同步馬達轉速響應追尋	100
圖 5.19、永磁同步馬達力矩響應追尋	100
圖 5.20、感應馬達轉速響應追尋	101
圖 5.21、感應馬達力矩響應追尋	101
圖 5.22、永磁同步馬達轉速響應追尋	102
圖 5.23、永磁同步馬達力矩追尋響應	102
圖 5.24、感應馬達轉速響應追尋	103
圖 5.25、感應馬達力矩響應追尋	103
圖 5.26、五楊高架橋後半段	105
圖 5.27、永磁同步馬達轉速響應追尋	106
圖 5.28、永磁同步馬達力矩響應追尋	106
圖 5.29、感應馬達轉速響應追尋	107
圖 5.30、感應馬達力矩響應追尋	107
圖 5.31、永磁同步馬達轉速響應追尋	108
圖 5.32、永磁同步馬達力矩響應追尋	108

圖 5.33、感應馬達轉速響應追尋	109
圖 5.34、感應馬達力矩響應追尋	109



表目錄



表格 2-1、混合動力系統	11
表格 2-2、引擎最大力矩限制表	14
表格 2-3、各部件齒輪比	16
表格 4-1、車輛參數	47
表格 4-2、引擎模式-五楊高架	62
表格 4-3、純電模式-五楊高架	63
表格 4-4、引擎模式不同巡航車速之油耗	73
表格 4-5、純電模式不同巡航車速之能耗	73
表格 4-6、油耗結果比較	76
表格 4-7、純電模式能耗比較	78
表格 4-8、側向加速度值與乘客舒適度	80
表格 4-9、A 車參數	85
表格 4-10、B 車參數	85
表格 4-11、A 車資料	88
表格 4-12、B 車資料	88
表格 4-13、節能巡航跟車模擬結果整理	89
表格 5-1、動力平台馬達規格	90
表格 5-2、永磁同步馬達規格表	95
表格 5-3、短距離模擬結果	104
表格 5-4、短距離實驗結果	104
表格 5-5、20km 模擬數據結果	109
表格 5-6、20km 實驗數據結果	109

符號表



V_x 車身縱向行駛速度

m 車身質心重量

g 重力常數

θ 道路坡度角

F_{aero} 風阻

$F_{x,f}$ 前輪對地面縱向作用力

$F_{x,r}$ 後輪對地面縱向作用力

$F_{x,ISG}$ ISG 對地面縱向作用力

$F_{x,TM}$ TM 對地面縱向作用力

$F_{x,eAD}$ eAD 對地面縱向作用力

$F_{x,eng}$ 引擎對地面縱向作用力

R_f 前輪滾動阻力

R_r 後輪滾動阻力

ρ_d 空氣密度

C_d 空氣黏滯係數

A_F 車身前視面積

V_{wind} 車身縱向風速

$F_{z,f}$ 前輪對地面正向作用力

$F_{z,r}$ 後輪對地面正向作用力

h 車身質心對地面高度

l_f 前輪軸至車身質心的水平距離

l_r 後輪軸至車身質心的水平距離

r_{wheel} 有效輪胎半徑

$\omega_{w,f}$ 前輪轉速

$\omega_{w,r}$ 後輪轉速

n_{ISG} ISG 對輪胎的減速比

n_{TM} TM 對輪胎的減速比

n_{eAD} eAD 對輪胎的減速比

n_{eng} 引擎對輪胎的減速比

$T_{w,f}$ 前輪輪軸扭矩

$T_{w,r}$ 後輪輪軸扭矩

T_{ISG} ISG 輸出扭矩

T_{TM} TM 輸出扭矩

T_{eAD} eAD 輸出扭矩

T_{eng} 引擎輸出扭矩

ω_{ISG} ISG 轉速

ω_{TM} TM 轉速

ω_{eAD} eAD 轉速

ω_{eng} 引擎轉速



第一章 緒論



1.1 研究動機

一個國家的工業發展指標以及生活文明可由汽車產業的發展看出端倪，隨著生產線與工業技術的發展，汽車已經和人類生活密不可分，而全球暖化等已成為倡導數十年的議題，影響範圍之廣涉及到各種產業，其中因汽車產業的普及化，使其溫室氣體排放的問題持續受到大家的關注，而隨著全球對於汽車業二氧化碳排放的管制，汽車的能源與環境問題使全球汽車工業正面臨巨大的挑戰，各國政府開始推動自家汽車產業的新能源汽車以及節能技術，以力求改善原本侷限於傳統引擎車中能源使用效率不佳的問題，擴大節能汽車的產業化以及大眾化，藉此，混合動力電動車(Hybrid Electric Vehicle)以及電動車(Electric Vehicle)開始蓬勃的發展。

汽車零排放一直是全球政府推動的目標，然而少了傳統汽車廢棄的排放，換來的是需要其他能源投入以提供電動車所需之電能，在開源之外，節流也是一件不可或缺的重要課題，因此如何提升能源的使用效率越來越受到政府、車廠以及消費者的注重，在電動車上的節能可以從很多方面著手，其中駕駛輔助系統是目前車廠與消費者間最直接的溝通管道。

對於駕駛輔助系統蓬勃的發展，越來越多往常不可能應用在車上的多媒體系統漸漸地實現，近年來車載資通訊(Telematics)的進步，以及各國政府推動智慧運輸系統(Intelligence Transportation System, ITS)，能夠提供給車輛運算單元的資訊越來越廣泛，包括透過衛星定位技術進行與道路與汽車(V2X)間的通訊，以獲得道路相關資料，利用其與車輛運算單元等進行資訊交流，各國紛紛將此投入於安全以及先進車輛控制等應用，但用於節能駕駛方面並不多，本研究便是運用車載資通訊以及智慧運輸系統等道路資訊，進一步以節能為主軸發展節能車輛巡航控

制單元，並同時具有安全以及節能的目標。

電動車的續航力是近幾年來持續處理的問題，而增進續航力的方法有很多方案，其中，若期望透過動力系統中進行調教，將會花很大的一份心力與投入大筆的資金；另一方案為直接增加電池數量以達到增加續航力的目的，但現今電池技術尚未成熟，造價十分昂貴，且定期幾年就必須更換一售價逼近車價的三分之一之電池系統，這將會增加許多額外成本及重量，也會進一步造成車體定價的昂貴，而若以廣設充電站或者電力交換站等作為提供續航力的方案，則必須連帶廣設充電站的停車位，近年來日本對於無線充電技術的投入非常多，故若無線充電技術的充電效率能夠提升且一般充電站能夠提供快速充電等技術，將能夠有效提升民眾對於電動車的接受度。電動車續航力的提升除先前所提到的技術改善外，亦可對其進行節流—減少動力系統耗能，以相對地增加整體續航力。對於節流之切入觀點有許多方法，較直接的方法為直接改善駕駛者之駕駛習慣，近年來國外積極推動節能環保駕駛(Eco-driving)教導駕駛者換檔習慣以及維持平緩之駕駛車速，其中，歐盟於 2010 年啟動 ecoMove 之方案以推廣節能駕駛，期望藉此減少 20% 的二氧化碳排放量，透過改善駕駛者習慣的益處是不需要有太多額外的資金投入便可以達到改善的效果，且民眾接受度也較高，但要完全讓駕駛者了解到何謂節能駕駛並不是一件容易落實的事情，人為駕駛常因為交通狀況、精神不集中等而影響駕駛效能。另一個極端的節能例子便是透過全球大企業目前持續發展的全自動駕駛技術，其除了減少駕駛者操駕失誤之外，亦可以利用最佳化駕駛者行為以達到節能駕駛的目的，但由於全自動駕駛目前仍無法完全受到駕駛者信任且相關法規尚未建立完全，故基於輔助駕駛之自動駕駛技術則先起發展。

定速巡航(Cruise Control, CC)為一具備安全且越來越讓駕駛者接受之車輛自動駕駛控制技術，其啟動後駕駛者無須再踩著油門，車輛即可依照設定之巡航速度行駛，不僅可以減少駕駛者經長途駕駛所致之疲勞程度，且在大部分均勻的時間車速亦提供減少耗油量的功能。適應性巡航控制系統(Adaptive Cruise Control,

ACC)屬於 ITS 中先進車輛控制與安全服務(Advanced Control and Safety Service, AVCSS)為定速巡航(Cruise Control, CC)系統的延伸，相關的研究近年來逐漸受到重視，傳統定速巡航系統會依據駕駛者設定之速度以調節油門深度，進而達到維持定速巡航的目的，但在不同地形上若僅以定速作為主要考量則可能會捨棄了能源效率上的效益，因此，本研究便是於傳統巡航控制上結合道路資訊資料等，發展一節能巡航控制系統，以期在原有基礎上更增進能源效率之效益。

本研究主要目標為根據插電式混合動力車之行車模式，以節能駕駛為主軸發展節能駕駛系統為主要研究，並結合車載資通訊所提供的道路資訊來完成控制器的設計，期望透過道路資料等來達到節能之效益，並將其應用於傳統巡航控制以及適應性巡航控制上，此控制器優點在於可行性高，且針對不同行車模式可迅速設計出對應之控制策略。

本研究針對的車輛為裕隆集團旗下華創公司所研發之插電式混合動力車 EVx5 車型之動力系統架構進行節能駕駛的研究，其根據不同動力架構發展不同之控制器，並應用在巡航控制與適應性巡航控制上。

1.2 文獻回顧

美國環保署(Environmental Protection Agency, EPA)指出影響能耗的因素主要包括道路變化如坡度的改變、交通行駛狀態如行車的速度變化、以及交通號誌的走停，以及駕駛者操駕，如加、減速習慣等，以及車輛因素如動力系統效能與負載重量等…。

節能行車策略

不同行車方式將會影響汽車廢氣的排放量[1]，而節能行車為一種降低燃油消耗、溫室氣體排放之駕駛方式，M. Taniguchi [2]指出緩和的加減速將可有效減少汽車的能耗，成為許多節能行車駕駛的參考；T. Bär 等人[3]提出透過駕駛輔助系統建議駕駛者何時該放開油門讓車子滑行以減少不必要踩油門的時機，又例如

現在 NISSAN 車上已經配備的 Eco-Driving 輔助視窗系統，將車速以及瞬間油耗顯示於抬頭顯示器上，讓駕駛者了解現在的駕駛習慣是否恰當，進而使駕駛者體驗到何謂不當的駕駛方式；在文獻 T. J. Daun [4]等人建立了一間駕駛情境模擬室，用以模擬各種駕駛輔助系統之成效，包括節能駕駛輔助系統(eco-driving assistance system, EDAS)等；C. Vagg [5]認為節能駕駛的發展非常有潛力，其發展一套駕駛輔助系統用以降低駕駛者的加速度油門踩踏以及適當的切換檔位時機以達到節能行車的目的。

目前各國皆積極透過修法以推動再生能源及能源使用效率，歐盟在 2010 年推動了一系列的駕駛訓練相關課程 ECOWILL(ECOdriving-Widespread Implementation for Learner Drivers and Licensed Drivers)，其訂定了包括確保環保駕駛的規範與舉辦環保駕駛培訓課程，並將相關課程納入駕照考試內容，且對於已擁有駕照之駕駛者施以短期課程，期望能藉此類課程有效改善駕駛者們的駕駛習慣並提升燃油效率；B. Beusen 等人[6]利用記錄行車資料，來探討駕駛者經由接受環保駕駛課程前後，其駕駛行為之改善以及能耗的情形，結果發現受過訓練課程後之行車行為平均燃油量減少了 5.8%之多；Y. Kim 等人[7]將整個行駛過程導入三種節能方法，第一種為節能導引，目的是讓行車曲線能夠平滑減少踩踏油門與煞車，第二層為直接限制輸出功率，不讓電瓶有太多的功率輸出，而第三層為節能視窗，其根據車身狀態提供駕駛者參考，整體的節能效果可達到 19%之多。

結合道路資訊之節能駕駛

隨著科技進步以及車聯網橫向連結的發展，在過去十年內，有許多對於結合 ITS 資料之節能駕駛車輛之研究。車輛在道路上行駛最重要的外部資訊便是道路上之資訊，但大部分的人僅注意於安全資訊而忽略了節能效益方面的資訊，M.Ferreira [8]便根據道路車流量資料、車間通訊以及能耗模型，在高密度的車流道路上控制交通號誌變化以達減少廢氣排放之目的。F. Jiménez 等人[9]在傳統引

擎車上將其模型以半穩態的方式節省運算量，結合 V2I、V2V 之資訊得到交通資料，結合以上利用動態規劃法求得路段之最佳車速，將道路資訊也納入駕駛的一環。D.-W.-I. S. Gausemeier 等人[10]結合未來交通燈號的資訊，利用動態規劃法在節能與時間成本上做取捨，但在系統上僅限於模擬而未能在現實生活中實現。

S. Mandava 等人[11]根據交通號誌變化的資訊，以模型預測控制的方式計算出提供駕駛者適當的速度曲線，減少駕駛者於等待紅綠燈的時間。C. Manzie 等人[12]將近幾年發展之結合車載資通訊之智慧車輛與傳統汽油車進行比較，並得到在行車循環上在結合車載資通訊後優於傳統沒有結合車載資通訊汽車的結論。日本九州大學 M. A. S. Kamal 等人[13-15]在接收道路上下坡資料後，基於模型預測控制演算法對車速進行調節，有效地利用減少煞車以及劇烈加速減少油耗。

N. J. Kohut 等人[16]結合道路資訊以模型預測控制的方式，在前方道路速限內計算出一節能的車速曲線，J. Wollaeger 等人[17]結合了雲端計算將車輛前方道路已知的前提下以動態規劃法將速度優化，以達到節能的效果，T. van Keulen 等人[18]在基於 GPS 給定的資料下，對於每個路段分開來後設計最佳化的速度軌跡，並應用於 ACC 的系統上，C. Zhang 等人[19]對於插電式混合動力車之能量管理也將道路資訊納入考慮，並比較了動態規劃法 DP 與 ECMS 方法的差別。

節能巡航控制與適應性巡航控制

根據美國國家公路交通安全管理局(NHTSA)將自動駕駛分為 5 個層級[20]，等級 0 為輔助與警示駕駛者為主要目的，所有車輛操控權還是在駕駛者身上，如夜視系統以及交通號誌識別等，層級 1 在於一種駕駛權交由系統主管，例如方向盤、煞車、油門其中之一，但車輛主控權仍為駕駛者，目前主要應用如適應性巡航控制等。層級 2 則提升至兩種以上之駕駛輔助系統，例如將適應性巡航控制與道路追隨之整合，但駕駛仍需監視駕駛狀況在必要時介入控制。層級 3 則從系統自主駕駛的層面來到駕駛者不需要時時刻刻注意車身狀態，僅於必要時再將主導

權回歸駕駛者，層級 4 為完全自動駕駛，只要輸入目的地，透過各種感測器與演算法將可直接到達地點。本研究中主要發展於層級 1 之巡航控制，基於輔助駕駛與全自動駕駛整合，早期 C. Chien and P. Ioannou 等人期望改善交通阻塞發展跟車系統(Automatic vehicle intelligent cruise control, AiCC)[21]，目前用於巡航控制上已經非常的成熟，在各種交通與道路資料取得越來越容易下，其應用於車輛中控單元漸漸受到重視，越來越多的研究投入於各種應用上。

在文獻[22-24]利用前看控制設計之巡航控制系統，透過離散化之模型以 Dynamic Programming 解其最佳化之問題並應用在重型貨車上。T. Schwickart 等人[25]針對電動車利用非線性模型預測控制於節能巡航控制上，為了能夠於現實中實現，其採用車輛動能模型以及簡單的能耗模型以達到兼顧運算量低且一定精準度進行計算，進而實現在 real-time 上。除了應用在節能上，A. Mihály 等人結合地形及道路狀況等資料同時達到節能以及安全的目的[26]，針對插電式混合動力車以模型預測控制發展了調節 Eco-ACC 系統，針對前方車速變化進行微調以減少能耗。S. Park 等人[27]將節能巡航控制在幾種坡度地形以及巡航車速進行了分析與比較，在某些特定的路段與車速甚至可以高達 30~60%的節能效益。

插電式混合動力車與行車模式

插電式混合動力車(Plug-in hybrid electric vehicle, PHEV)其充電電池可使用外部電源進行充電，電池容量大於普通油電混合車，可以支持的行駛里程更長，若是通勤族使用在非長距離的用途，便可當作電動車使用，具備電動車的優點，而電池容量小於一般純電動車，但是帶有傳統引擎車之發動機、傳動系統與油箱等，在無法充電的狀況下只要有加油站就可以隨時補充動力來源，行駛里程不受充電站的制約便是插電式混合動力車比純電動車的優勢。

在行車模式上，插電式混合動力車之動力來源有馬達與引擎，較傳統汽車以及純電動車高出一個自由度，其能量管理以及模式切換邏輯將會相當複雜，

規則法的方式分
耗電模式(charge
, CS mode)，其主
換，在[30]中利用

太多的行車時間，但這並無考慮到坡度的影響，僅對速度進行調節。

<u>VSC State</u>	<u>Engine</u>	<u>Clutch</u>	<u>Motor</u>	<u>Description</u>
OFF	Engine Off	Disengaged	Off	Vehicle off state
MOTOR DRIVE	Engine Off	Disengaged	Tractive Force	Motor propelling the vehicle
REGEN – LOW VELOCITY	Engine Off	Disengaged	Generating	Regenerative Braking with engine disconnected
REGEN – HIGH VELOCITY	Engine Off	Engaged	Generating	Regenerative Braking with engine connected
ENGINE DRIVE	Engine On	Engaged	Off	Engine propelling the vehicle
BOOST	Engine On	Engaged	Tractive Force	Engine and motor both propelling the vehicle
CHARGING	Engine On	Engaged	Generating	Engine propelling the vehicle and charging the battery
ENGINE STOP	Engine Off	Disengaging	Tractive Force	Motor propelling the vehicle and starting the engine
ENGINE START	Engine On	Engaging	Tractive Force	Motor propelling the vehicle and stopping the engine
BLEED	Engine On	Engaged	Tractive Force	Engine propelling the vehicle and motor discharging the battery

圖 1.1、行車模式狀態定義圖[30]

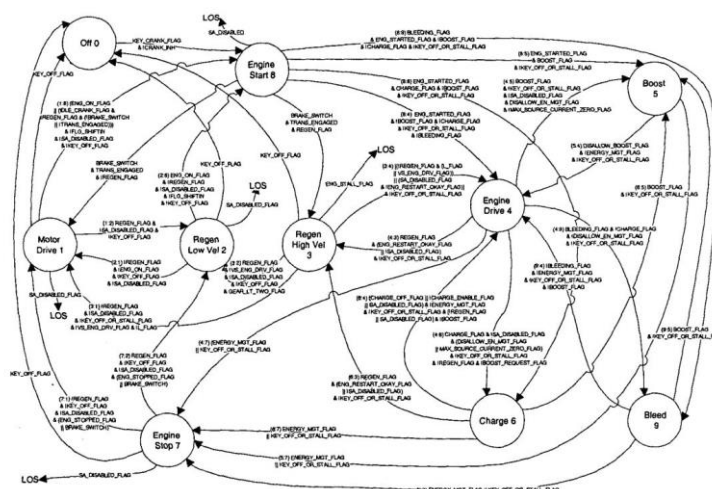


圖 1.2、行車模式切換邏輯[30]

本篇論文的架構如下，於第二章介紹系統架構與模型，第三章介紹以模型預測為基礎所針對兩種行車模式之動力分配發展節能巡航控制器，第四章介紹兩種動力分配模式之Eco-Cruise Control (Eco-CC)與模擬結果討論，並在此章中加入第二台車進入考慮，結合Adaptive Cruise Control(ACC)系統使節能巡航控制可同時兼具節能與安全之效果，第五章以實體馬達之響應驗證本研究Eco-CC之實際效能與結果。

1.3 研究貢獻

車載資通訊的應用已經越來越廣泛，各種感測器與慣性量測應用於車輛控制單元已經越來越廣泛，且在未來，車聯網已為一發展趨勢，能量管理與節能支應用必為重要的一環。本論文將車載資通訊技術導入節能駕駛輔助系統中，而為使能快速應用於車輛中空運算單元上之運算量不太過繁重，故本研究提出之節能運算單元將各種動力模式下之能耗模型以有效率且準確的方式納入演算法中。

本論文首先提出了對於傳統巡航控制的進行改善，其以模型預測控制為基礎結合道路坡度資料，提出節能巡航控制演算法，並針對不同的車輛動力系統開發不同之成本模型，計算出前方路段之適當行駛巡航車速。實驗模擬結果顯示不論是對於引擎模式或純電之巡航控制，透過此節能巡航控制器，根據地形進行車速調節，皆能有效改善能耗表現；從操作點圖來解析透過此節能巡航控制與傳統之定速巡航控制相比，在行駛結果皆在近似的行駛時間內有效降低其操作功率，代表著整段路程之能耗為較小；在應用層面提出對於車隊結合巡航控制之適應性巡航控制探討，將適應性巡航控制功能也納入考量，使整個節能巡航系統更加完善，研究最後以實際馬達作為驗證平台，進行節能巡航控制之成效驗證。

第二章 系統架構與模型



本章將介紹本論文所採用之車體架構、模擬系統架構以及相關之模型。

2.1 系統架構

本論文所使用的混合動力系統以裕隆集團旗下納智捷(LUXGEN)品牌之 EVx5 為參考基礎，針對其不同動力分配模式進行節能車輛控制研究之開發，其動力架構圖如圖 2.1。

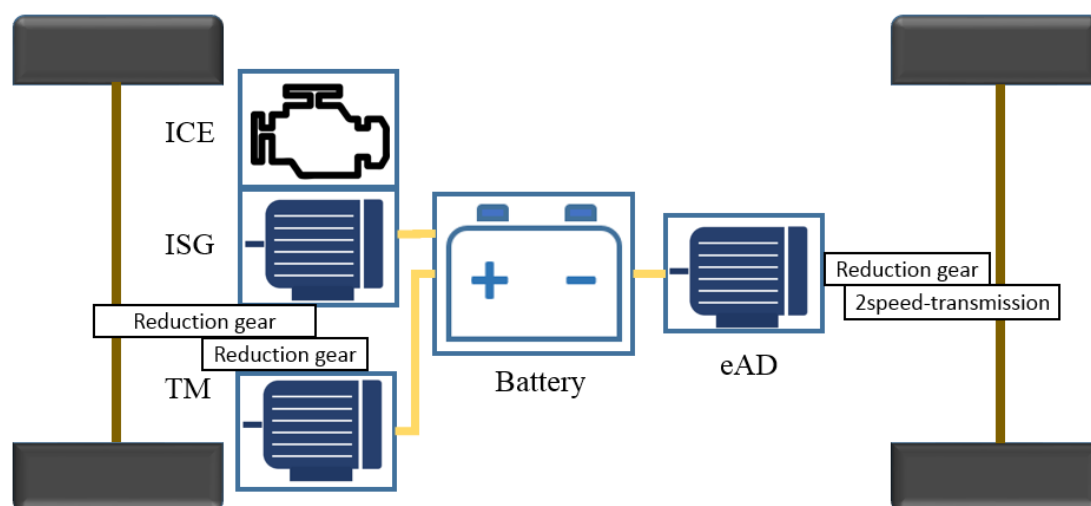


圖 2.1、EVx5 混合動力系統架構

EVx5 為一四輪驅動之插電式混合動力車，規格如表格 2-1，此系統為串並聯式的混合動力系統（圖 2.2），前軸動力來源包含一內燃機引擎 ICE(Internal Combustion Engine)、ISG(integrated starter generator)，兩者同軸連結，另一動力來源為 TM(Traction Motor)為一永磁同步馬達，其與終端齒輪前連結一行星減速齒輪表格 2-3，而後軸則由一大功率感應馬達 eAD(electric auxiliary drive)連結一兩段變速箱作為動力輸出。

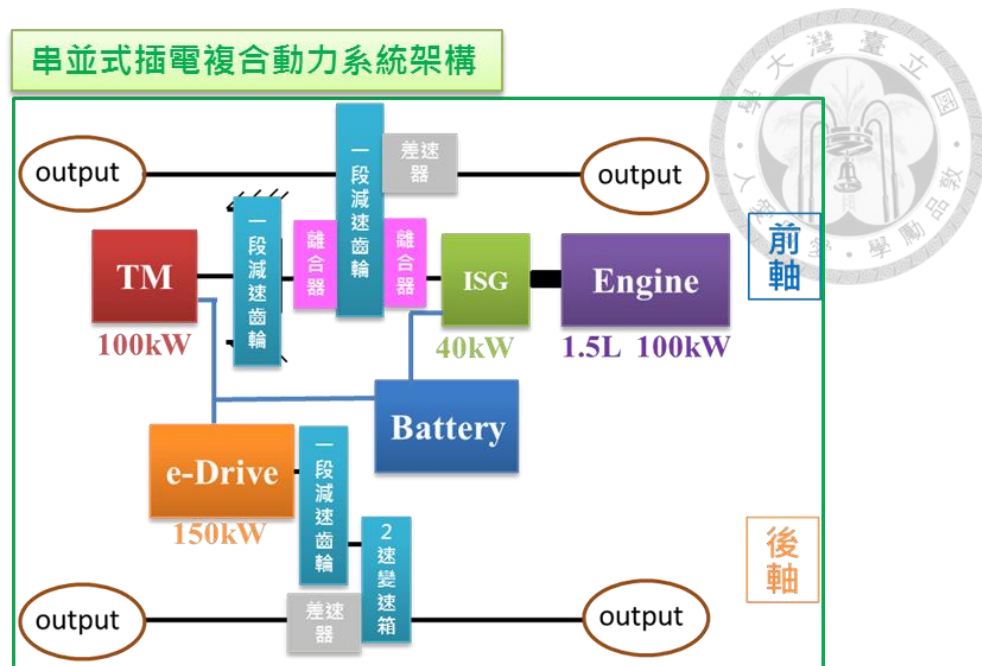


圖 2.2、串並式插電混合動力系統架構

表格 2-1、混合動力系統

車體	SUV
前軸	
永磁同步馬達	100kw
ISG	40kw
引擎	100kw
前軸終端減速機構	單速齒比
後軸	
感應馬達	150kw
變速箱	2 速自排
後軸減速機構	單速齒比

本研究之模擬系統架構圖如圖 2.3，其包含三大部分，第一部分為透過 ITS 以及車載資通訊所得之道路及前方車流資訊進行，首先會依據 Global Positioning System(GPS)定位目前所在座標，後依行車路線取得前方道路坡度、曲率與限速等資訊，本研究中假設這些資訊皆是能夠及時且正確的傳送給車輛控制單元 (Vehicle Control Unit, VCU)作為演算法需要之資訊；第二部分則為車輛控制單元 VCU，將於第三章控制器設計內介紹，是以模型預測為基底作為控制策略，其主要功能為在接收道路資訊以及車身動態後，計算出一速度曲線給力矩控制器做為控制目標，而力矩控制器再根據目前車身動態以及車速命令來決定動力系統的力矩輸入命令，最後第三部分為車輛動態模型以及各個動力元件之模型，主要功能為判斷上層控制命令是否超過各子系統之上限值，並做出相對應之動態響應，在這裡為力矩之輸出，最後經由能耗模型計算各個動力元件所產生之能耗。

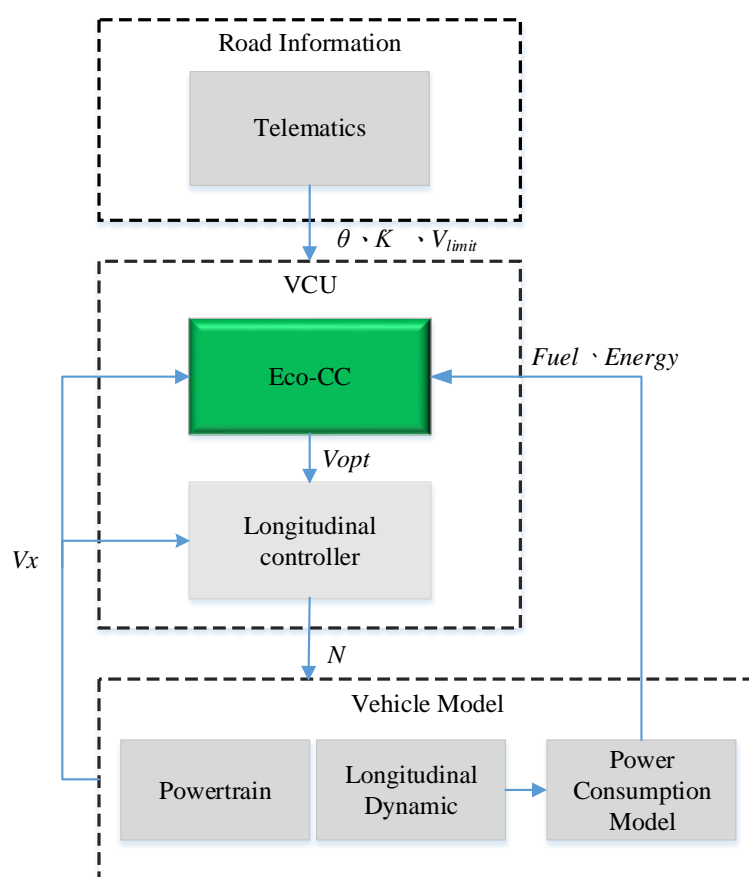


圖 2.3、智慧化節能行車控制架構圖



2.2 系統模型

2.2.1 引擎模型

模型的建立上大致可分為穩態、半穩態以及動態模型。穩態模型(steady-state model)為在模擬時忽略其暫態響應，直接將相關模型參數在每個時間點下根據輸入而由查表方式作輸出，但其缺點為忽略時間滯持(Time delay)等的暫態響應；動態模型則將系統加入時間的概念，使模型更加精準地描述各時間點的響應，其應用層面較廣泛，馬達、引擎等動力模型實際上相當的複雜，如引擎包含進氣、噴油及點燃等難以用數學方程式描述之動態行為，但在本研究中這些動力元件主要作為動力輸出用，並非進行細部的動態控制，若使用過於複雜的模型也將會導致運算量過大，故在本研究中將馬達、引擎等動力模型採用介於兩者之間的半穩態模型以節省運算時間但不失良好的輸出表現。

引擎模型主要功能為根據當時輸入之力矩命令以及引擎轉速，將實際產生之力矩當作輸出。而因引擎需要最低工作轉速，故會先檢查當前引擎之轉速是否工作轉速，若無則由 ISG 將其轉速帶至工作轉速後再進行力矩輸出，當接收到力矩命令後會先根據該轉速下之力矩命令是否超過力矩限制，其最大力矩限制如表格 2-2，後再透過引擎之能耗模型計算所消耗之耗油量。

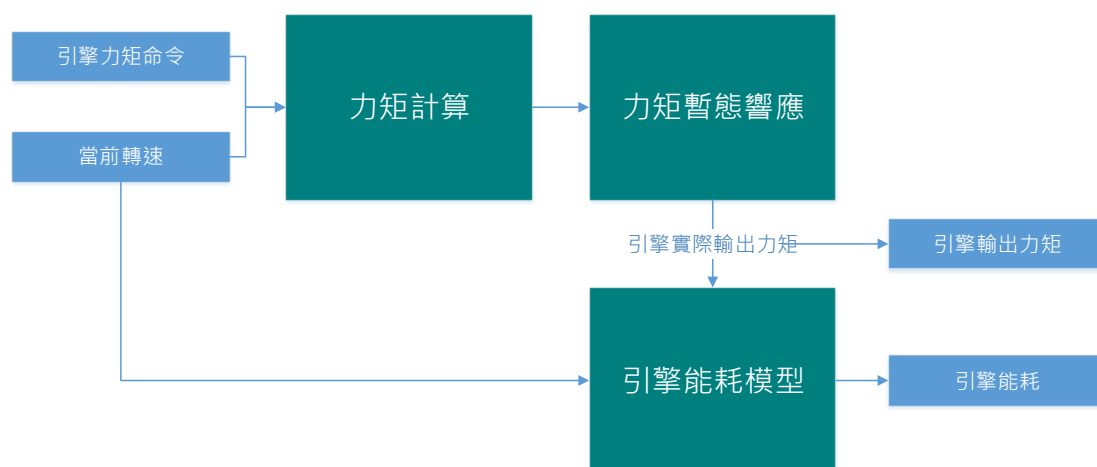


圖 2.4、引擎模型示意圖

表格 2-2、引擎最大力矩限制表

引擎轉速[rpm]	引擎力矩[Nm]
1000	139
1500	228
2000	250
2500	250
3000	253
3500	250
4000	250
4500	236
5000	220
5500	200

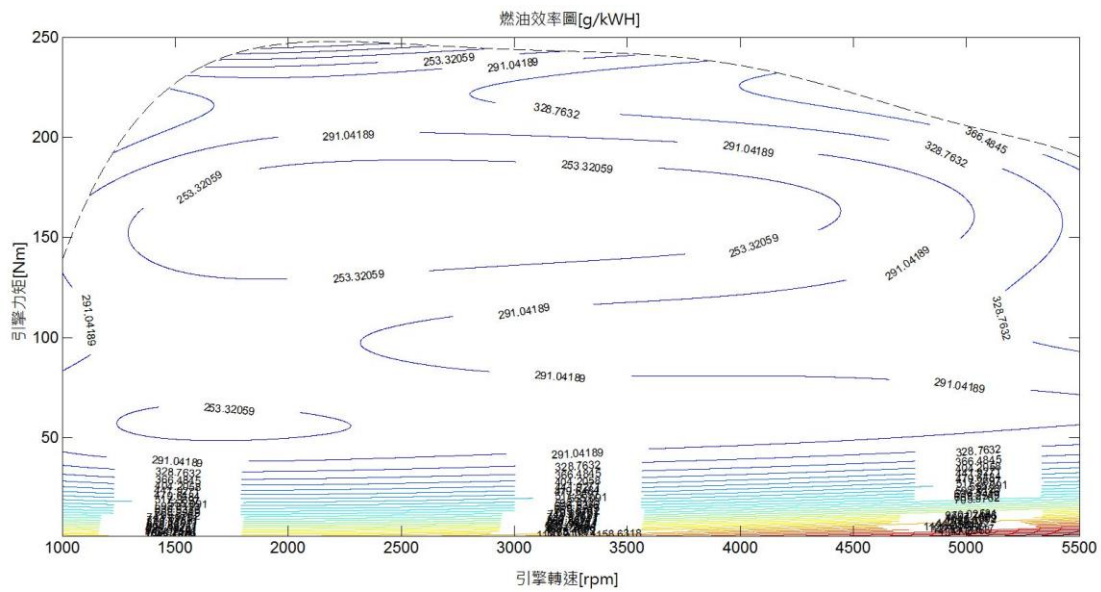


圖 2.5、引擎燃油效率圖

本研究所使用之能耗資料由華擎公司所提供之 1.5 L 引擎數據，其包括之力矩限制表格 2-2，此數據將用於演算法的限制式等，圖 2.5 為油耗效率，引擎的能耗模型將會根據此表進行建立。

2.2.2 馬達模型

前軸包含 ISG(Integrated starter generator)與 TM(Traction motor)兩顆馬達。其中 ISG 主要用於當引擎低於工作轉速但又需要提供力矩時，將引擎帶動至工作轉速之上；ISG 另一個功用為發電機，藉由引擎帶動之後對電池進行充電，以維持 SOC 值的高低。TM 則主要負責提供推進動力，其功率較 ISG 大。本研究所使用的 ISG 與 TM 相關資料由華創公司所提供，馬達系統模型如圖 2.6，其與引擎模型相同，在接受到力矩控制器之力矩命令後，加入一階之動態響應做簡易修正，雖然此一階延遲響應並不能完全與實際馬達相同，但其能更進一步接近實際馬達之響應。

後軸馬達為一高功率之感應馬達，主要功能為提供推進動力，而其搭配二段變速之齒輪箱之變速條件約為時速 100 公里-小時。馬達模型在本研究所扮演的角色如同引擎，主要作為動力輸出以及煞車回充的功能，並在接收上層之力矩命令後給予半穩態響應輸出至其他子系統。

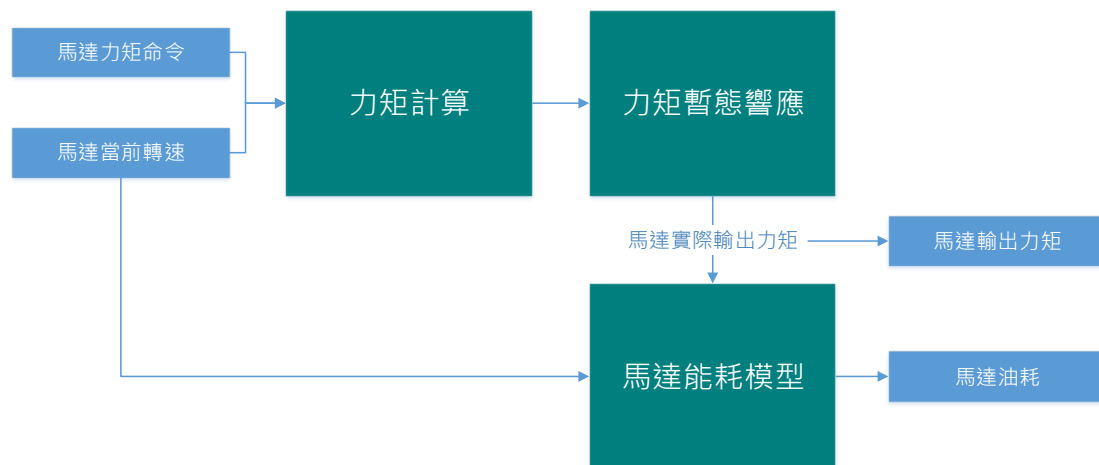


圖 2.6、馬達模型圖示

2.2.3 減速齒輪箱模型

後軸之感應馬達配有二段行星齒輪變速之變速箱，將馬達輸入之力矩傳遞至差速器以及後軸輪胎，透過此牽引將馬達之轉速下降、力矩提升。由於本研究針對縱向動態分析，故忽略差速器的影響，在不考慮轉動慣量的影響下可將齒輪相模型表示如(2-1)、(2-2)

$$T_{out} = T_{in} \times n_{gear} \times \eta \quad (2-1)$$

$$\omega_{out} = \omega_{in} / n_{gear} \quad (2-2)$$

其中 T_{out} 、 T_{in} 為輸出及輸入端之力矩， ω_{out} 、 ω_{in} 為輸出及輸入端之轉速， n_{gear} 為減速齒輪比， η 為機械傳遞效率。

表格 2-3、各部件齒輪比

齒輪比	TM	Engine/ISG	Final Drive
前軸	3.068	1	3.143
	1 st	2 nd	Final Drive
後軸	4.476	2.71	3.316

2.2.4 車輛縱向模型

本研究目的為開發一插電式混合動力車之節能行駛策略，而因車輛行駛中主要能量消耗於縱向運動中，故本論文將針對車輛縱向運動進行探討。

在描述車輛縱向動力學之前，先定義一慣性座標系(inertial coordinate system)及一附體座標(body-fixed coordinates)。慣性座標系的原點(origin)定義於空間中任一點，Z軸垂直於水平面向上，X軸平行於水平面向左；附體座標則固定於車輛，隨著車輛的移動，原點定義於車輛質心(center of mass)的位置， x 軸定義為車頭的方向， z 軸為垂直地面的方向，如圖 2.7 所示。

車輛縱向運動及受力的情形如圖 2.7 所示，車輛在行駛過程中會受到輪胎對地面的驅動力、風的阻力(aerodynamics drag force)、滾動阻力(rolling resistance force)及重力(gravity force)的影響，其中輪胎滾動阻力及風的阻力會與車輛的運動速度相反，重力朝向慣性座標系Z軸的負向。若車輛行駛於坡度為 θ 的道路上朝前方(正 x 方向)以 V_x 的速度行駛，則車輛在 x 軸上會受到反方向(負 x 方向)的空氣阻力 F_{aero} 以及前、後輪的滾動阻力 R_f 、 R_r ，以及重力作用，大小為 $mg \sin \theta$ ，其中 m 為車輛之質量， g 為重力加速度常數，其作用的方向由夾角 θ 的方向決定， θ 為附體座標 x 軸對慣性座標X軸的夾角，取順時針(clockwise)方向為正，反之為負。

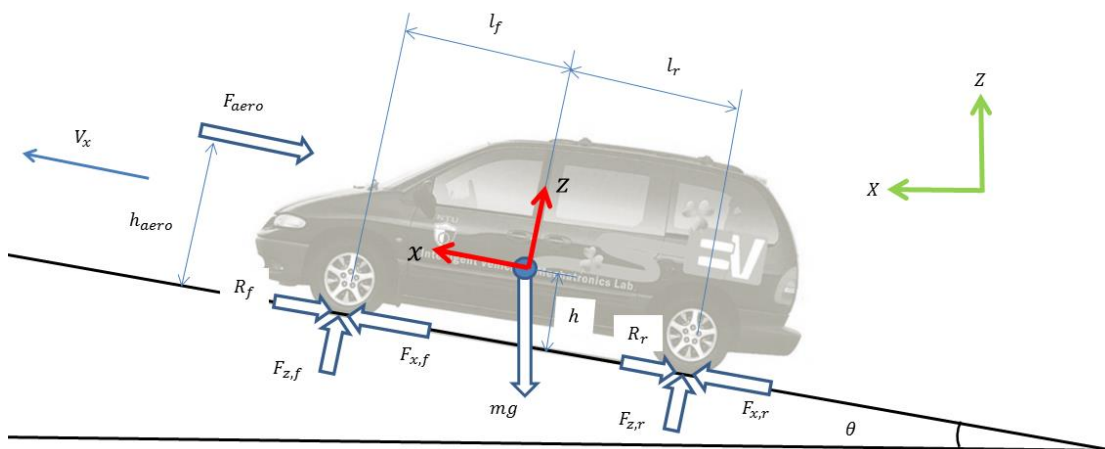


圖 2.7、車輛縱向動力學模型

根據上圖以及前述的說明，可以推導出其車輛縱向動力學方程式，如下所述

$$m\dot{V}_x = F_{x,f} + F_{x,r} - R_f - R_r - F_{aero} - mg \sin \theta \quad (2-3)$$

$F_{x,f}$ 、 $F_{x,r}$ 分別為前、後輪對地面的縱向作用力，由動力系統所提供。空氣阻力 F_{aero} 與車速及風速有關，可以簡化為如下的方程式

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho_d C_d A_F (V_x + V_{wind})^2 \quad (2-4)$$

其中 ρ_d 為空氣密度， C_d 為空氣阻力係數(aerodynamics drag coefficient)， A_F 為前視面積(frontal area of the vehicle)， v_{wind} 為風速，在本研究中階假設風速為零；滾動阻力 R_f 、 R_r 是由車輪在滾動前進時輪胎產生所變形造成的阻力，通常輪胎的滾動阻力與輪胎所受的正向力(normal force)有關，可以線性正比於正向力估計如(2-5)、(2-6)所示，其中 C_r 為輪胎的滾阻係數

$$R_r = C_r F_{z,r} \quad (2-5)$$

$$R_f = C_r F_{z,f} \quad (2-6)$$

車輛行駛過程中前、後輪所受之正向作用力 $F_{z,r}$ 、 $F_{z,f}$ 與車輛縱向加速度、車子質心距離前、後軸的距離及空氣阻力有關，若假設車輛的仰角(pitch)加速度為零，根據圖 2.7、車輛縱向動力學模型圖 2.7、車輛縱向動力學模型分別對前、後輪接觸地面的點計算力矩平衡，可計算得前後、後輪的正向作用力如(2-7)、(2-8)所示，其中車輛空氣阻力作用的等效位置距離地面高度為 h_{aero} ，車輛質心位置距離地面高度為 h ，前、後軸距離質心的距離分別定義為 l_f 、 l_r

$$F_{z,f} = \frac{-F_{aero} h_{aero} + m\dot{V}_x h - mgh \sin \theta + mgl_r \cos \theta}{l_f + l_r} \quad (2-7)$$

$$F_{z,r} = \frac{F_{aero} h_{aero} - m\dot{V}_x h + mgh \sin \theta + mgl_f \cos \theta}{l_f + l_r} \quad (2-8)$$

第三章 智慧節能駕駛單元控制系統設計

車輛在行駛期間，因地形的不同，不管是內燃機引擎或者是馬達電動機，在不同的轉速、扭矩下，動力系統會有不同的能量轉換效率，若使操作點落在不佳的操作區間或路段，將影響整體的能耗表現。

本篇研究主旨在於利用模型預測控制(Model Predictive Control, MPC)改善傳統巡航控制(Cruise Control)之能耗表現，在一般的巡航控制中，不論在任何道路的狀況下都將其車輛定速在駕駛設定之巡航速度值，但如此將會使動力系統操作點坐落在不佳的操作區間中，本研究擬賦予傳統定速巡航控制速度調變的區間，藉由此速度變化區間多一個改變的自由度，根據坡度對及縱向車輛動態的掌握，以及各個動力部件的能耗模型作為成本函數的調控，進而達到智慧節能行駛的目標，其中控制演算法最佳化運用了動態規劃法中 Dynamic Programming Bellman's principle 最短路徑演算法。

在車輛節能行駛中，駕駛者並無法完全掌控自身車體任一時間的能耗狀態，因此目前車廠即透過先進駕駛輔助系統(ADAS)以直接或間接的方式來改善駕駛者的駕駛習慣。而若欲取得良好的駕駛方式，必須先了解到不同的動力系統的能耗是否會根據動力系統內的部屬以及運作而有所不同，例如當以馬達輸出作為動力來源時必須考慮到馬達在各個扭力與轉速所造成的能耗會有所不同，以及在下坡時會有煞車回充提供額外的電力回到電瓶，故節能行駛控制策略必須依照當下之動力分配模式而有不同的成本函數以及限制條件等。以下將介紹在混合動力車主要的動力分配模式以及最佳化控制器之設計，最後加入適應性巡航控制(Adaptive Cruise Control, ACC)演算法與過彎車速限制等以完成整個節能巡航控制系統的設計。



3.1 插電式混合動力車動力模式

在插電式混合動力車中，動力元件為兩顆主要動力馬達以及一顆 ISG 作為發電使用，再加上 1.5L 之引擎，整個動力分配將會非常複雜，其分配後主要分為下列四種模式

➤ 純電行駛模式(EV mode)、增程發電模式(RE mode)

此兩種模式下由前軸永磁同步馬達以及後軸之感應馬達作為動力輸出，而在電池需要充電時引擎便啟動對 ISG 進行充電進入增程發電模式

➤ 引擎驅動模式(ICE mode)

在此模式下僅以引擎做為動力輸出，並會對 ISG 適時進行充電

➤ 混合放電模式(BOOST mode)

在此模式下馬達系統以及引擎系統均會參與動力輸出

上述動力模式可以簡單以圖 3.1 作為模式選擇，但綜括下來可以發現在整個駕駛過程中主要動力模式可以分為以馬達作為動力之模式 EV(RE)及以引擎(ICE)作為動力模式，BOOST 模式僅限於短時間內大動力需求，也就是若針對 EV(RE)、ICE 此兩種模式進行行車模式的優化，將可大大減少整個行程上的能耗。

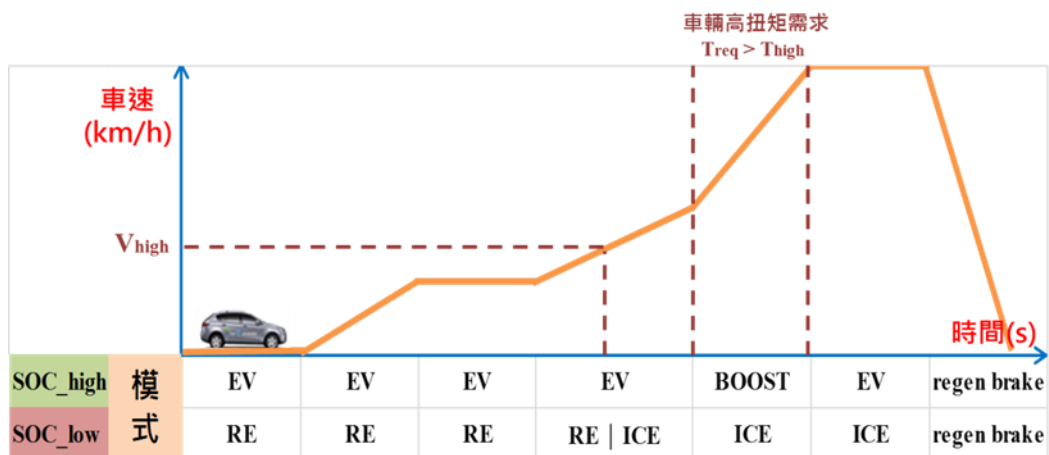


圖 3.1、EVx5 行車模式

Diagram illustrating a powertrain configuration for a vehicle, showing the connection between the front axle, transmission (TM), internal combustion engine (ICE), integrated starter generator (ISG), battery, electric drive (eAD), and rear axle with a 2-speed transmission.

圖 3.2、引擎模式動力元件

3.1.2 行車動力模式-純電模式(EV、RE mode)

在 EV 模式下動力來源將完全由前軸的 PMSM 以及後軸的 eAD 作為動力輸出來源，相較於以引擎作為動力來源，純電模式擁有動輒 80% 以上的能源轉換效率，故此模式為 PHEV 在整個行車模式下最常使用的模式，在多馬達系統的電動車上動力分配的狀況會影響整體的效率，在一般情況下 PMSM 在低扭力的區間會有較好的表現，而當操作區間落在高扭力時感應馬達的效率表現較佳，在設計動力分配時的複雜度會造成節能駕駛演算法在動力分配內需寫入龐大的邏輯判斷，進而造成運算輻的龐大，但若分配比例太過於簡單例如將動力分配平均分配在前後軸兩顆馬達上，由[32]其耗能甚至會比使用單顆馬達作為動力來源還要高，故在本論文

採用了 IPM(Instantaneous power minimization)作為多馬達系統的動力分配策略，其運作方式將於 3.6 小節介紹。

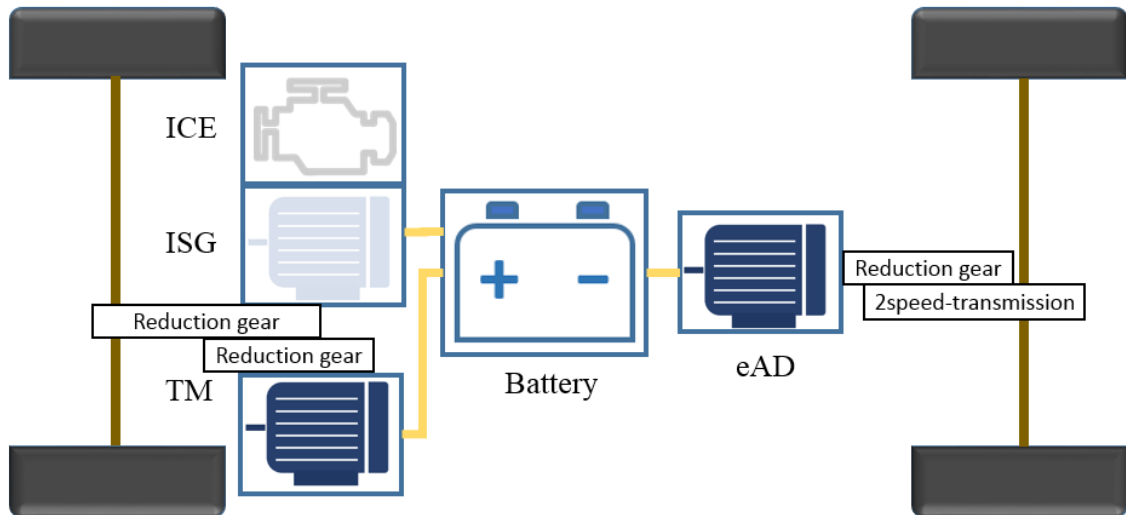


圖 3.3、純電模式動力元件

3.2 節能巡航控制車速最佳化設計

本章目標為設計一節能駕駛控制器，應用坡度資訊進行路段車速最佳化，求解路段行車車速之能耗最小化，其問題可藉由求解最佳化來得到，以下將進行車速最佳化之策略問題描述。

本問題中使用模型預測控制的概念，利用車輛動態模型對未來一段行車狀態區間進行預測，再針對這個區間內之各離散點的车辆狀態、馬達系統狀態、引擎系統狀態進行能耗與動態分析，求得最佳化之車速；下層力矩控制器會依據分配策略進行動力系統之力矩輸出，包括引擎力矩輸出以及兩顆馬達動力分配後進行輸出，此最佳化車速每隔一段時間會重新計算一次，以保持最佳化之車速輸入。

在最佳化區間的運算中，會依據車輛前方道路之坡度以及交通狀況建立預測區間相關限制及參數如車速上下限以及對於前車安全距離等，並將由 GPS 定位以及地圖資料等取得坡度資料，透過坡度資料將可以針對車輛動態模型進行預測，並求得車輛動態之負載，進而求得各個動力元件之動力分配與能耗。



3.2.1 成本函數

本研究目標在於節能的行車行為，故成本函數將以節能取向作為目標設計如下式(3-1)

$$J = \int_{k_0}^k w_0 \cdot E + w_1 \cdot [F + m \cdot g \cdot \sin\theta]^2 + w_2 \cdot [V - V_{desired}]^2 dk \quad (3-1)$$

其中 E 為能耗，會依據行車動力模式的會有所不同，將依據不同動力模式進行設計， F 代表整體車輛之縱向力， V 為目前之車速， $V_{desired}$ 為一設定之車速，在本研究為駕駛者設定之巡航速度， w_0 、 w_1 以及 w_2 為設計之成本函數權重，而 k 則為最佳化區間之終點。此成本函數目標為下列幾項：

第一項成本函數為使預測區間內之能耗最小化。若是純電模式下將以馬達系統之能耗作為此成本函數，若為引擎模式則以引擎能耗作為成本函數，但若僅考慮能耗最為成本函數則會使車速永遠在最低速限行駛，故須配合上限制條件以及其他項成本函數。

第二項成本函數為對於車輛行駛之加減速有所調整。在平地路段會減少過大的縱向力，由牛頓第二運動定律也就相對地減少加減速的變化，而當遇到預測區間內之若有坡度變化，例如遇到上坡時，由於重力加速度，故不希望在此時浪費能量於對抗重力加速度故對地之縱向力將會減少，也就代表降低車速於此路段，而在下坡路段時由於重力加速度為負值，故提供正向加速度意及提升車速。

第三項成本函數為控制車速不要遠離原本駕駛者設定之巡航速度，其權重將依據駕駛者習慣與接受度進行調整。

最佳化問題

最佳化控制問題大舉透過定義成本函數，於受控的動力模型中根據限制條件，透過最佳化演算法得到控制輸入(3-2)使其由某初始狀態至目標狀態時成本函數最小化。

$$u^* = \underset{k_0}{\operatorname{argmin}} \int_{k_0}^k w_0 E(k) + w_1 [F(k) + m \cdot g \cdot \sin\theta(k)]^2 + w_2 [V(k+1) - V_{desired}]^2 dk \quad (3-2)$$

其中最佳輸入 u^* 為使成本函數最小化之車速，接著給予力矩控制器進行速度追隨，由上式可以看出 $E(k)$ 與 $V(k)$ 皆為時間的函數，則整條方程式可由下式表示：

$$u^* = \underset{t_0}{\operatorname{argmin}} \int_{t_0}^T w_0 E(t) + w_1 [F(t) + m \cdot g \cdot \sin\theta(t)]^2 + w_2 [V(t+1) - V_{desired}]^2 dt \quad (3-3)$$

根據此條成本函數進行求解即可得到使行車能耗最佳化之車速 $V(t)$ ，力矩控制器便可根據此作為輸入進行車速控制。

3.2.2 預測模型

最佳化問題亦需系統模型及限制函數來求解每個最佳化區間成本函數，系統模型準確度將會影響最佳化之結果，進而影響到系統的表現，接下來將推導所需之系統模型。

車輛縱向模型

在巡航控制上大部分時間都位於縱向的速度控制上，並透過最佳化速度控制來減少能耗，車輛縱向模型表示如下：

$$m\dot{V}_x = F_x - R_f - R_{aero} - mg\sin\theta \quad (3-4)$$

是由總驅動力 F_x 與車輛阻力等構成縱向車速之變化，總驅動力 F_x 為由動力系統傳至前後軸之推動力，包括了由馬達系統及引擎系統的輸出組合成(3-5)

$$F_x = F_{mot} + F_{eng} \quad (3-5)$$



$$F_{mot} = \frac{T_{mot} \cdot n_{gear,mot}}{r_{wheel}} \quad (3-6)$$

$$F_{eng} = \frac{T_{eng} \cdot n_{gear,eng}}{r_{wheel}} \quad (3-7)$$

在馬達系統中 eAD 以及 TM 所輸出之扭矩之前後軸關係如(3-12)、(3-13)所列，其中 $n_{eng,front}$ 為引擎到軸間終端之齒輪比， $n_{TM,front}$ 為馬達輸出端到前軸終端軸之齒比， $n_{eAD,rear}$ 為 eAD 輸出端到後軸之終端齒比。

$$T_{front} = T_{eng} \cdot n_{eng,front} + T_{TM} \cdot n_{TM,front} \quad (3-8)$$

$$T_{rear} = T_{eAD} \cdot n_{eAD,rear} \quad (3-9)$$

$$F_{x,f} = T_{front}/r_{wheel} - B_f \quad (3-10)$$

$$F_{x,r} = T_{rear}/r_{wheel} - B_r \quad (3-11)$$

而總縱向力 F 將為所有縱向力加總後之值(3-18)

$$F = F_{x,f} + F_{x,r} - R_f - R_{aero} - mgsin\theta \quad (3-12)$$

能耗模型

在不同動力模式下將有不同的能耗模型，主要分為引擎之能耗模型與馬達之能耗模型，引擎能耗模型部分將引用華擎公司所提供之油耗排放測試數據，而馬達能耗模型之效率將經由實測之馬達效率圖進行建立。

電力系統之總耗能可由(3-13)表示

$$P_{total} = P_{TM} + P_{eAD} \quad (3-13)$$

由於馬達及驅動器所消耗之電功率取決於驅動器、馬達內之控制與設計，難以用簡單的方程式表達，故本研究以實測之資料作為依據，將馬達之輸入功率取決於



扭矩及轉速之函數(3-14)、(3-15)

$$P_{TM} = P_{TM}(T_{TM}, \omega_{TM}) \quad (3-14)$$

$$P_{eAD} = P_{eAD}(T_{eAD}, \omega_{eAD}) \quad (3-15)$$

各個馬達動力系統之消耗功率函式可表示為(3-16)，馬達根據當下之轉速以及力矩會有對應之轉換效率

$$P = \begin{cases} \frac{T_m \cdot \omega_m}{\eta}, & T_m \geq 0 \\ T_m \cdot \omega_m \cdot \eta, & T_m < 0 \end{cases} \quad (3-16)$$

其中 T_m 為馬達力矩， ω_m 馬達轉速，馬達根據當下之轉速以及力矩會有對應之轉換效率 η 。

引擎能耗模型方程式由[33]被定義為(3-17)(3-19)，此能耗模型根據實驗之數據得能耗模型之多項式，並兼具精確與降低運算量的優點，其運作方式為藉由當時有效之輸出力矩及引擎轉速以去計算出消耗的汽油量，在力矩輸出大於零時，會根據當下之輸出力矩以及轉速計算出相對應之油耗，而在力矩輸出小於零時，則為一常數值。

$$\dot{m}_f = \begin{cases} \alpha_0 + \alpha_1 P + \alpha_2 P^2, & \text{if } P \geq 0, \\ \alpha_0, & \text{if } P < 0, \end{cases} \quad (3-17)$$

$$\dot{m}_f = f_e(\omega_e, T_e) \quad (3-18)$$

以上為進行最佳化問題所需之系統模型包括縱向動態方程式及能耗模型。



3.2.3 限制條件

將車輛動力系統的限制給納入其中，包括考慮了引擎與馬達之工作區間、引擎之工作轉速以及車速上下限範圍等。

$$T_{ISG,min}(\omega_{ISG}) \leq T_{ISG} \leq T_{ISG,max}(\omega_{ISG}) \quad (3-19)$$

$$T_{TM,min}(\omega_{TM}) \leq T_{TM} \leq T_{TM,max}(\omega_{TM}) \quad (3-20)$$

$$T_{eAD,min}(\omega_{eAD}) \leq T_{eAD} \leq T_{eAD,max}(\omega_{eAD}) \quad (3-21)$$

$$T_{engine}(\omega_{engine}) \leq T_{engine} \leq T_{engine,max}(\omega_{engine}) \quad (3-22)$$

$$\omega_{TM,min} \leq \omega_{TM} \leq \omega_{TM,max} \quad (3-23)$$

$$\omega_{eAD,min} \leq \omega_{eAD} \leq \omega_{eAD,max} \quad (3-24)$$

$$\omega_{ISG,min} \leq \omega_{ISG} \leq \omega_{ISG,max} \quad (3-25)$$

$$\omega_{engine,min} \leq \omega_{engine} \leq \omega_{engine,max} \quad (3-26)$$

$$P_{ISG,min}(\omega_{ISG}(k)) \leq T_{ISG}(k) \cdot \omega_{ISG}(k) \leq P_{ISG,max}(\omega_{ISG}(k)) \quad (3-27)$$

$$P_{TM,min}(\omega_{TM}(k)) \leq T_{TM}(k) \cdot \omega_{TM}(k) \leq P_{TM,max}(\omega_{TM}(k)) \quad (3-28)$$

$$P_{eAD,min}(\omega_{eAD}(k)) \leq T_{eAD}(k) \cdot \omega_{eAD}(k) \leq P_{eAD,max}(\omega_{eAD}(k)) \quad (3-29)$$

$$P_{eng,min}(\omega_{eng}(k)) \leq T_{eng}(k) \cdot \omega_{eng}(k) \leq P_{eng,max}(\omega_{eng}(k)) \quad (3-30)$$

整個最佳化過程將會遵循這些限制式求解，其中本研究期望在定速巡航控制下賦予速度調變區間，故在車速限制式如下(3-31)

$$V_{x,min} \leq V_x \leq V_{x,max} \quad (3-31)$$



3.3 模型預測控制

模型預測控是以最佳化為基礎(optimization-based)的控制方法，其針對未來某一個預測區間(prediction horizon)做最佳化動作，而模型預測控制所求得之解為區域最佳解(local optimization)，其可依靠系統模型與現在所接收到的資訊來預測未來某段區間內的資料，因此只要控制器計算量足夠，便可以用於即時系統之中。本小節將以模型預測控制來解本章第一小節的最佳化問題。

成本函數通常由預測區間中的預測控制輸入及輸出與參考軌跡(reference trajectory)之間的誤差所組成；最佳化產生器(optimizer)會在限制式(constraints)的限制條件內求出最佳控制輸入，其架構如所示。

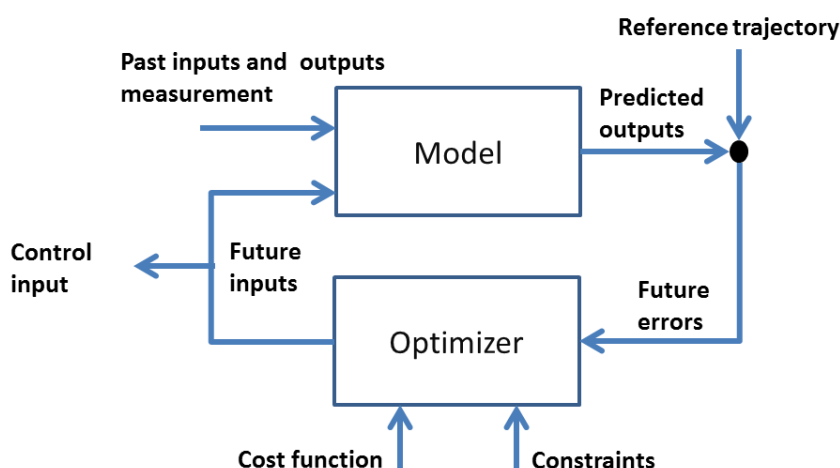


圖 3.4、模型預測控制系統架構

模型預測控制主要由三個部分組成，系統模型(plant model)、最佳化產生器(optimizer)及限制式(constraints)。系統模型為欲控制系統的動態方程式，通常模型預測控制中的模型多以離散化模型為主，如方程式(3-32)

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)) \quad (3-32)$$

此動態方程式描述系統輸出(x)與控制輸入(u)之間的關聯性，在模型預測控制中用以預測系統未來控制輸入及系統輸出之間的關係。未來預測輸出可利用所建

立的預測模型推得未來輸入，再結合由量測系統所到的過去輸入輸出來求得。

在模型預測控制中會對一個未來輸出入組合而成的成本函數作最佳化，最典型的成本函數是以模型的預測輸出對參考輸出路徑(reference trajectory)之間誤差的平方以及預測控制輸入訊號的平方所組成，如方程式(3-34)所示。

$$\min_u V_N(x, u) \quad (3-33)$$

$$V_N(x, u) = \sum_{k=0}^{N-1} w_{xk}(r_k - x_k)^2 + w_{uk}u_k^2 + w_{xN}(r_N - x_N)^2 \quad (3-34)$$

模型預測控制通常是包含限制條件的最佳化問題(an optimization problem with constraints)，其考量動態系統物理上的限制，或是設計欲加的限制，在模型預測控制的控制器設計中包含對系統預測狀態限制、輸入與輸出限制(3-35)、(3-36)。

$$u(k) \in \mathcal{U} \quad (3-35)$$

$$u(k) \in \mathcal{X} \quad (3-36)$$

在最佳化區間的計算由於整個預測模型為非線性之模型，為了減少在電腦處理器上之運算量，採用 Bellman's principle[34]之動態規劃法來減少運算量。



3.4 最佳化-動態規劃法

節能駕駛演算法的演算過程中，考慮車速變化以及能量消耗為一非線性最佳化的問題，其最終輸出為給予力矩控制器之車速命令，整個最佳化問題太過於複雜，而動態規劃法為一以最佳化為基礎之控制法，通常以動態規劃做為求解最佳化問題工具有以下特點：

- i. 求解問題可以分為前後之階段(Stage)，每個階段皆有其開始狀態(State)
- ii. 每個步驟會進行一次決策過程，將此階段之開始狀態依據相關函數計算至下一個階段之所有可能之狀態以及成本(Cost)
- iii. 對於給定的狀態，不論過去之控制為何，皆不影響後續步驟之決策，現階段狀態已經包含了前面階段所做之決策對系統的影響

在此以一簡單順向成本計算作為例子，考慮依最小成本路徑之問題如圖 3.5，此最小成本路徑問題有四個階段，每個階段各有不同的決策選擇，並根據不同選擇至下個狀態有不同之成本，以 a 為起點至下一個階段將有 b、c、d 等分別成本為 3、5、7，取最小成本狀態 b 至第二階段有 e、f 分別成本為 5、7，最終到達終點分別成本為 11 與 8，而總合起來 a-b-e-h，a-b-f-h 分別所需成本為 19 以及 18，但事實上這兩條路徑成本都不比 a-c-f-h 小，由此例可以知道若是要求得最小成本必須將所有路徑皆計算後才可以得知結果，而由動態規劃法以 Bellman's principle 在定義好最終成本後，以倒退的方式計算最佳化問題則可以減少許多不必要的組合，且只需計算與下個狀態間之成本，無須再往後重新計算一次。

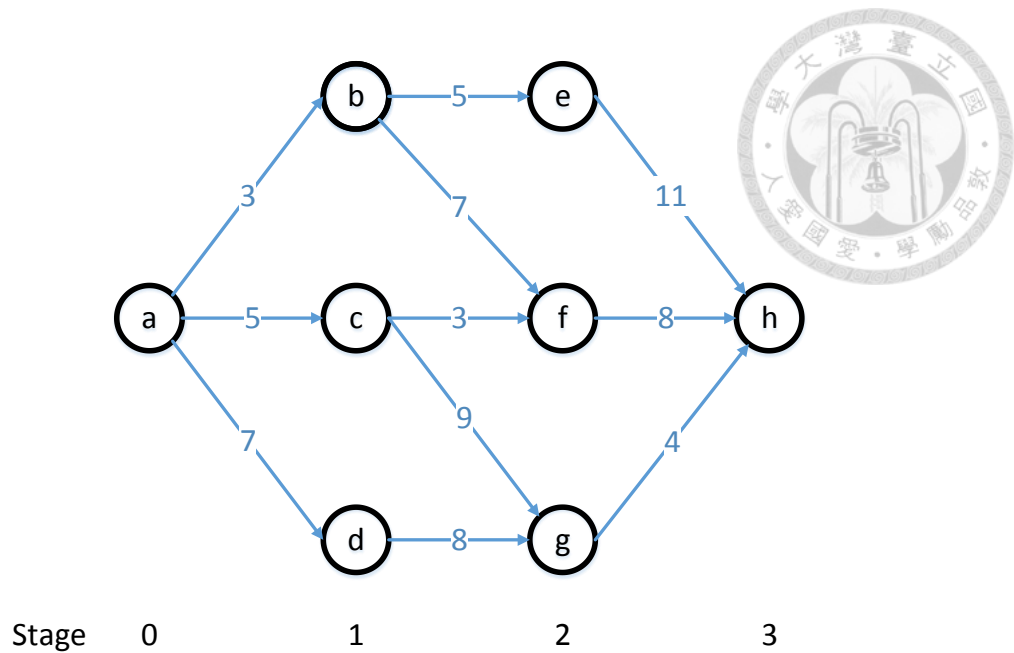


圖 3.5、最小成本路徑

將前小節最佳化問題視為道路空間上分隔，車輛在此階段的動態與下一階段的動態皆有連動關係，故若將整段道路分解為相互關係的路段，使每個階段上的系統狀態變化與最佳化問題成為一個較易求解的子問題，在決策時從初始狀態按順序逐段進行到最終階段為止，根據最佳化原則(principle of optimality)，可將整個複雜的最佳化問題利用反向式(backward)往回推算的方式求得全域最佳解，並透過限制式如車速上下限以及力矩、轉速限制減少運算量。

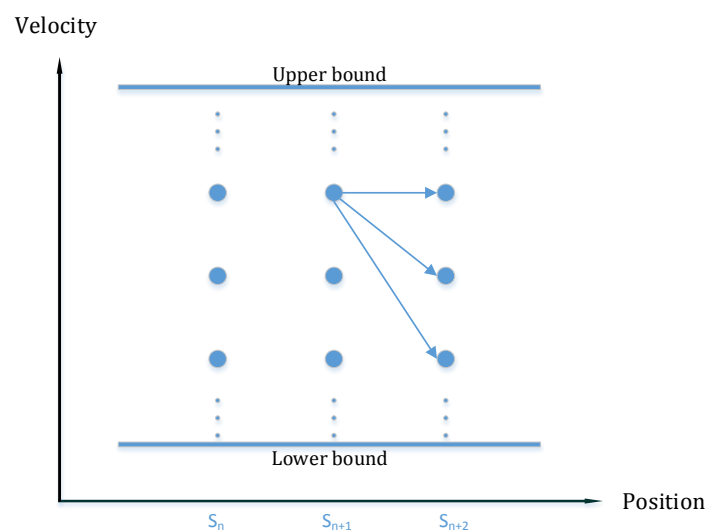


圖 3.6、以距離離散化最佳化問題

在加速、減速過程中，將整個系統模型過程區分為 M 段，定義系統模型如(3-37):

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)), k = 0, 1 \dots M-1 \quad (3-37)$$

k : 離散系統的第 k 階層

$x(k)$: 第 k 階層之狀態向量(state vector)

$u(k)$: 第 k 階層之控制輸入向量(control vector)

成本函數:

$$J = \min_{u_0 \dots u_{M-1}} \zeta_M(x_M) + \sum_{k=0}^{M-1} \zeta_k(x_k, u_k) \quad (3-38)$$

ζ_k : 在 k 階段至 $k+1$ 之執行成本(cost-to-go)，此成本透過此階段之狀態 $x(k)$ 以及控制輸入 $u(k)$ 決定

ζ_M : 在 M 階段之最終成本

最佳化原則(principle of optimality):

令 $u^* = \{u_0^*, u_1^*, u_2^*, \dots, u_{N-1}^*\}$ 為一最佳化問題的最佳解(optimal policy)，其最佳化區間為時間點 0 到時間點 N ；而當系統使用這個最佳輸入，在時間點 i 時系統的狀態(state)會是 x_i 。目前討論子問題(sub problem)，令系統目前狀態已經是 x_i ，則由現在這個時間點到時間終點 N 這個區間內的最佳解將會是片段最佳解(truncated policy) $u^* = \{u_i^*, u_{i+1}^*, u_{i+2}^*, \dots, u_{N-1}^*\}$ 。

動態規劃法為根據上述最佳化原則，並以倒退(backward)的方式由最佳化區間最後一個時間點，一步一步往回計算每個時間點到終點的最佳解。

而後將最佳化問題離散化以進行動態規劃，由節能駕駛研究成本函數來看，需要車輛動態模型以推得 $V(k)$ 以及各個動力模式下之能耗模型 $E(k)$ ，透過引進道路資料給節能駕駛演算法。本篇研究中藉由ITS資料以及車載資通訊的介入，取得道路資料以及交通狀況等，其資訊與地理位置相關，而這些資訊實際上為離散的資料，上述方程式的應用會有許多困難，例如無法得知未來時間上的坡度函數 $\theta(t)$ ，但若是以距離作為離散化目標，則可根據車身的位置取得前方一段距離的坡度函數 $\theta(k)$ ，故本研究之預測模型將以距離作為離散化目標，首先將車輛動態之時變函數改以距離作為函數(3-39)、(3-40)

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{ds} \frac{ds}{dt} = \frac{dv}{ds} v \quad (3-39)$$

$$\frac{dv}{ds} = \frac{1}{v} \frac{dv}{dt} \quad (3-40)$$

車輛動力學模型離散化後可以得到如下方程式(3-41)

$$\frac{\frac{1}{2}mV_x^2(k+1) - \frac{1}{2}mV_x^2(k)}{\Delta s} = (F_x(k) - F_{aero}(k) - R_x(k) - mg\sin\theta(k)) \quad (3-41)$$

其中道路坡度資訊 $\theta(k)$ 可透過地圖資料以及全球定位系統取得，而空氣阻力與滾動阻力計算如下(3-42)、(3-43)，其中忽略風阻影響，將 v_{wind} 設定為零

$$F_{aero}(k) = \frac{1}{2}\rho C_d A_f (v(k) + v_{wind})^2 \quad (3-42)$$

$$R_x(k) = \mu_R mg \cos\theta(k) \quad (3-43)$$



在前軸的動力輸出軸部分有引擎與馬達，引擎的部分與輸出軸連接一終端減速齒輪，其輸出力矩與轉速可表示為(3-45)、(3-46)

$$\omega_{wheel} = \frac{V_x}{r_{wheel}} \quad (3-44)$$

$$\omega_e(k) = \frac{V_x(k) \cdot n_{fFD}}{r_{wheel}} \quad (3-45)$$

$$T_{eng}(k) = \frac{F_x(k) \cdot r_{wheel}}{n_{fFD} \cdot \eta} \quad (3-46)$$

其中 $V_x(k)$ 為縱向車速， n_{fFD} 為前軸之終端齒輪比， η 為輸出與輸入軸之轉換效率

前軸搭載之永磁同步馬達與終端齒輪前有一行星減速齒輪相接，其輸出力矩與轉速可表示為(3-47)、(3-48)

$$\omega_{TM}(k) = \frac{V_x(k) \cdot n_{fFD} \cdot n_{TM}}{r_{wheel}} \quad (3-47)$$

$$T_{TM}(k) = \frac{F_x(k) \cdot r_{wheel}}{n_{fFD} \cdot n_{TM} \cdot \eta} \quad (3-48)$$

後軸搭載之感應馬達與終端齒輪前與二速變速箱相接，其輸出力矩與轉速可表示為(3-49)、(3-50)

$$\omega_{IM}(k) = \frac{V_x(k) \cdot n_{rFD} \cdot n_{IM}}{r_{eff}} \quad (3-49)$$

$$T_{IM}(k) = \frac{F_x(k) \cdot r_{eff}}{n_{rFD} \cdot n_{IM} \cdot \eta} \quad (3-50)$$

根據上列之模型相關參數離散化後帶入最佳化成本函數，可得



$$J = \sum_{k=k_0}^k w_0 E(k) + w_1 [F(k) + m \cdot g \cdot \sin\theta(k)]^2 + w_2 [V(k+1) - V_{desired}]^2 \quad (3-51)$$

$$u^* = \operatorname{argmin} \left(\sum_{k=k_0}^k w_0 E(k) + w_1 [F(k) + m \cdot g \cdot \sin\theta(k)]^2 + w_2 [V(k+1) - V_{desired}]^2 \right) \quad (3-52)$$

故在第n階段至下一個階段之成本函數定義如下

$$J_n = J_{n+1} + w_0 E(n) + w_1 [F(n) + m \cdot g \cdot \sin\theta(n)]^2 + w_2 [V(n) - V_{desired}]^2 \quad (3-53)$$

故在第n階段至最後階段之成本函數定義如下

$$J_n = J_T + \sum_{k=n}^N w_0 E(k) + w_1 [F(k) + m \cdot g \cdot \sin\theta(k)]^2 + w_2 [V(k) - V_{desired}]^2 \quad (3-54)$$

其中 J_T 為最終成本(final cost)

在每階段之最佳策略可以對(3-18)求解得到

$$\begin{aligned} u_n^* &= \operatorname{argmin}(J_n) \\ &= J_{n+1} + w_0 E(n) + w_1 [F(n) + m \cdot g \cdot \sin\theta(n)]^2 \\ &\quad + w_2 [V(n) - V_{desired}]^2 \end{aligned} \quad (3-55)$$

最終求得每個階段之最佳車速(3-59)

$$u^* = [V_0, V_1, V_2 \dots V_{N-1}]$$

(3-56)





模型預測控制執行步驟如下：

- i. 以目前系統動態作為初始狀態，並以目前地理位置作為起點 $x(k)$ ， $x + N_p$ 作為最佳化區間之終點
- ii. 求解上述最佳化問題，得到最佳化輸入 $u^* = \{u_k^*, u_{k+1}^*, u_{k+2}^*, \dots, u_{k+N_p-1}^*\}$
- iii. 以滾動時域控制取 N_c 項作為控制輸入
- iv. 系統接收到控制輸入執行後進入下一個系統狀態
- v. 重複上述步驟

在整段路程重複上述步驟後，將會得到一行車曲線圖 3.8，此即為求得之最佳輸入 u^* ，並將其送至被控系統中圖 3.7，得到系統響應後回到模型預測控制器。

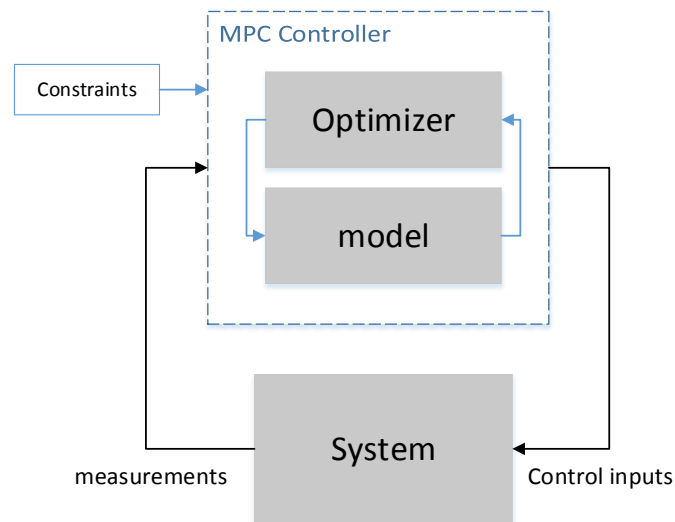


圖 3.7、模型預測控制與系統

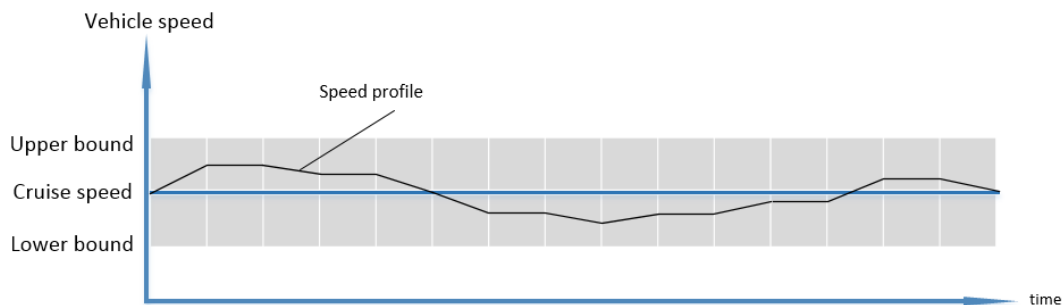


圖 3.8、速度曲線



3.5 適應性巡航控制系統

在定速巡航的普及後，其可自動調節車速之適應性巡航控制(Adaptive Cruise Control, ACC)系統也實踐在越來越多車輛上，其主要概念即是在定速巡航上加入安全跟車的目的，改善了在巡航控制下駕駛者還是必須花費精神於與前方的車距，並提升了整體安全性，ACC 運作方式如圖 3.9

- (1)在前方偵測無其他車輛的狀況下，維持設定之車速行駛
- (2)、(3)在偵測到前方車輛後，確保距離維持在理想車距，若前車車速低於設定車速，最終將跟隨前方車速行駛
- (4)當前方偵測無車輛後，恢復設定之定速巡航

其主要依據與前車之車距 S_r 與理想車距 S_d 之誤差作為控制輸入，依照控制器設定之數值輸出相對應之加速度，其相對應關係可由(3-57)、(3-58)表示。

$$S_d = S_r + t_g \cdot v \quad (3-57)$$

$$e_s = S_r - S_d \quad (3-58)$$

其中 S_0 代表靜止車距， t_g 代表時間車距， v 代表自身車速

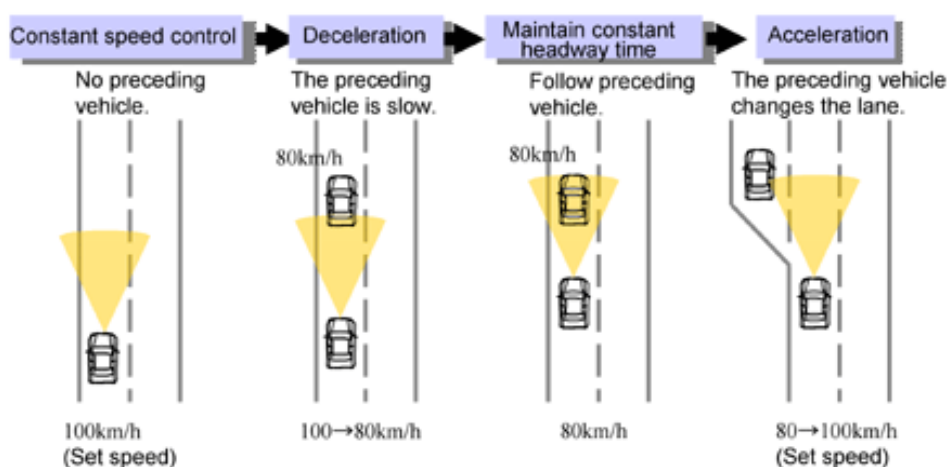


圖 3.9、Adaptive Cruise Control System



3.6 瞬時功率最小化策略

在多馬達系統中，當接收到上層給予之力矩命令後須將動力分配給兩顆馬達，兩顆不同之馬達分配方式將會影響整體輸出之結果。瞬時功率最小化策略 (Instantaneous power minimization, IPM) 便是針對此有多馬達系統且來自同一能量來源之系統進行動力分配之策略，最常見之例子如電動車上同時配備有兩顆以上不同特性之馬達，其能量來源皆來自同一電池系統，而不同馬達在不同力矩、轉速下會有不同的轉換效率，瞬時功率最小化即是針對這樣的特點去進行動力分配，找出在不同扭矩與不同轉速下的最佳化分配比例，使整體效能有所提升。

瞬時功率最小化運作分為下列步驟

- (1) 量測各個馬達之效率圖
- (2) 將效率圖座標轉換至可以互相匹配之座標
- (3) 進行最佳化之比較，找出各個力矩、轉速下之最佳分配比例
- (4) 將其結果建立規則庫，供動力分配系統進行即時分配

建立完規則庫之後，控制器只要根據目前車子的速度與所給之力矩命令和規則庫對照，便可以得到最佳化後的分配比例。

在本研究中動力系統為一顆永磁同步馬達以及一顆感應馬達所組成，其功能特性並不相同，前軸之永磁同步馬達以定齒比與前軸終端齒比相連，後軸 eAD 則有兩段變速功能，且其換檔時機約在時速一百公里，但在本研究中並不考慮 eAD 之換檔時機，故以第一檔位之變速作為討論。由於兩顆馬達在轉速以及扭力之極限值並不一樣，但經過齒輪箱轉換成縱向車速以及縱向力後在一定範圍便可以拿來做比較，故將效率圖之轉速座標轉換為車速，扭矩座標轉換為縱向力，以利於接下最佳化策略運作。



在輪胎無滑差之前提下，馬達轉速與車速之座標轉換如下

$$\omega_{TM} = \omega_{wheel} \cdot n_{TM,front} = V_x \cdot \frac{n_{TM,front}}{r_{wheel}} \quad (3-59)$$

$$\omega_{eAD} = \omega_{wheel} \cdot n_{eAD,rear} = V_x \cdot \frac{n_{eAD,rear}}{r_{wheel}} \quad (3-60)$$

在不考慮輪胎動態與轉動慣量的情況下，兩顆馬達之力矩與縱向驅動力關係如下

$$F_{x,TM} = \frac{T_{eAD} \cdot n_{TM,front}}{r_{wheel}} \quad (3-61)$$

$$F_{x,eAD} = \frac{T_{eAD} \cdot n_{eAD,rear}}{r_{wheel}} \quad (3-62)$$

目前將針對現有之馬達資料進行設計，資料為華擎提供之永磁同步馬達以及感應馬達資料，將其效率圖依上述進行座標轉換後如圖 3.10、圖 3.11

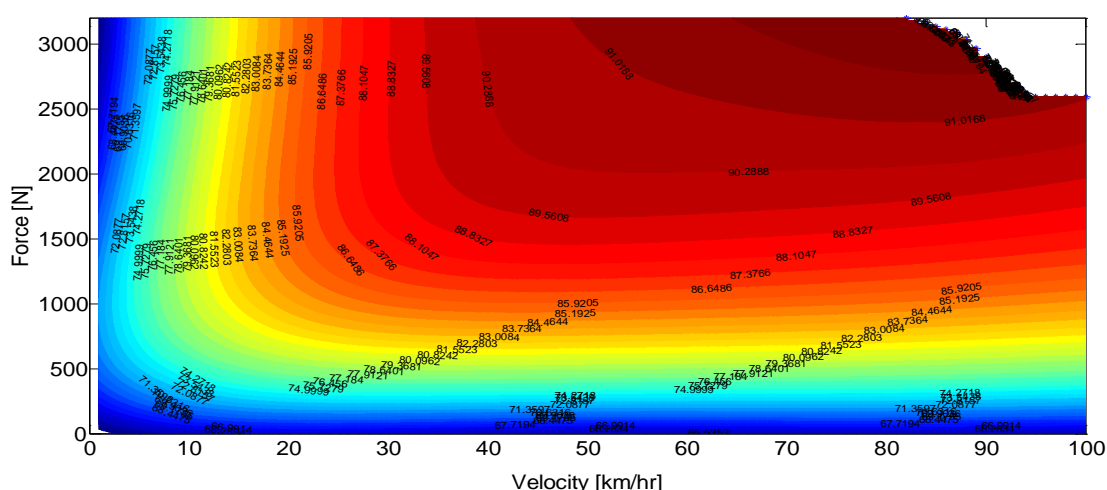


圖 3.10、永磁同步馬達效率圖

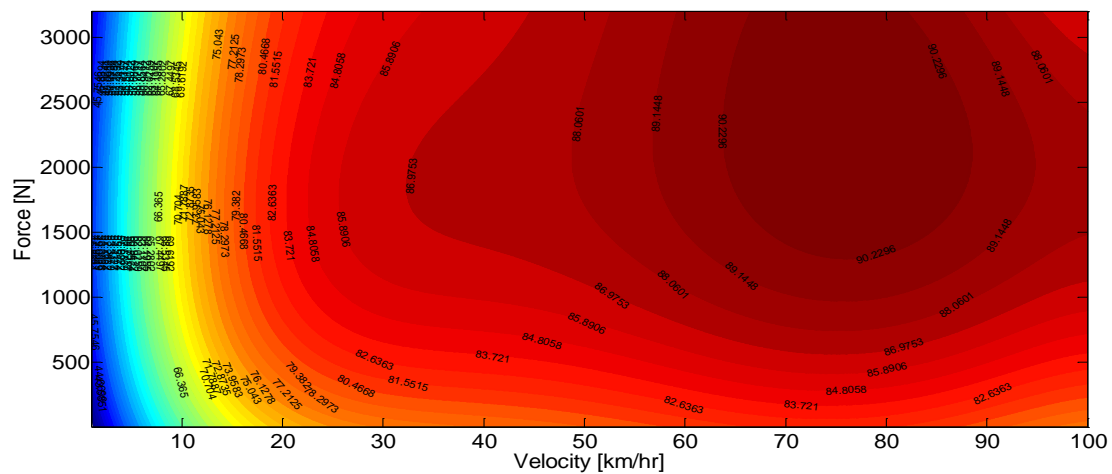


圖 3.11、感應馬達效率圖

電驅系統在行駛過程中耗能為 TM 與 eAD 之耗能之總和，計算方式如下

$$P_{ins} = P_{TM} + P_{eAD} \quad (3-63)$$

故可以兩個馬達子系統看作是一個虛擬大馬達系統，在這個虛擬的大馬達中，馬達效率在大部分情況下會比單一馬達多了一個自由度，意及在固定車速、固定縱向驅動力之下，虛擬的大馬達耗能會因為 $F_{x,TM}$ 、 $F_{x,eAD}$ 分配比例不同而改變，固可將瞬時功率以車速、各馬達縱向力之函數以下表示

$$P_{ins} = P_{ins}(V_x, F_{x,TM}, F_{x,eAD}) \quad (3-64)$$

為了使這個瞬時功率保持在最佳效率及整個行車行程能行駛於高效區內，調整各個馬達分配比例於每個操作點即可解決此問題，因此為了找到各個車速、馬達縱向力下之最佳分配比例，可將上述描述為下最佳化方程式

$$[F_{x,TM}^*, F_{x,eAD}^*] = \arg \min P_{batt} \quad (3-65)$$

此外為了避免產生超出馬達工作區間的解，必須限制每顆馬達的輸出

$$T_{TM,min}(\omega_{TM}) \cdot \frac{n_{TM,front}}{r_{wheel}} \leq F_{x,TM} \leq T_{TM,max}(\omega_{TM}) \cdot \frac{n_{TM,front}}{r_{wheel}} \quad (3-66)$$

$$T_{eAD,min}(\omega_{TM}) \cdot \frac{n_{eAD,rear}}{r_{wheel}} \leq F_{x,TM} \leq T_{eAD,max}(\omega_{TM}) \cdot \frac{n_{eAD,rear}}{r_{wheel}} \quad (3-67)$$

前軸與後軸之馬達在不同驅動力與車速下之輸入功率是以數值表示，此最佳化問題在於個個操作點間的分配比較，在求解上可以直接以暴力法(brutal force)即可求解，其求解方式如下：在固定之車速與縱向驅動力下，將此驅動力全部分配給第一顆馬達，計算此時之馬達總耗能，接下來逐步減少第一顆馬達分配到之驅動力，漸增第二顆馬達之驅動力並同時持續記錄下在各個比例下之馬達系統總耗能，將所有可能分配比例記錄下來後，比較其能耗，取最低者做為此操作點下之分配比例，接下來依序在各個車速、縱向驅動力進行此最佳化分配，並將其記錄，便可能到一所有縱向車速與驅動力下各馬達最佳分配比例。此虛擬大馬達之效率圖如圖 3.12，如圖可示原本永磁同步馬達在高轉速時之低驅動力在合併成大馬達後由感應馬達去補足，整體效率提升至八成以上，而感應馬達在於低轉時之效率低落也因為由前軸之永磁同步達補足，整體效率也都提升至七成以上。

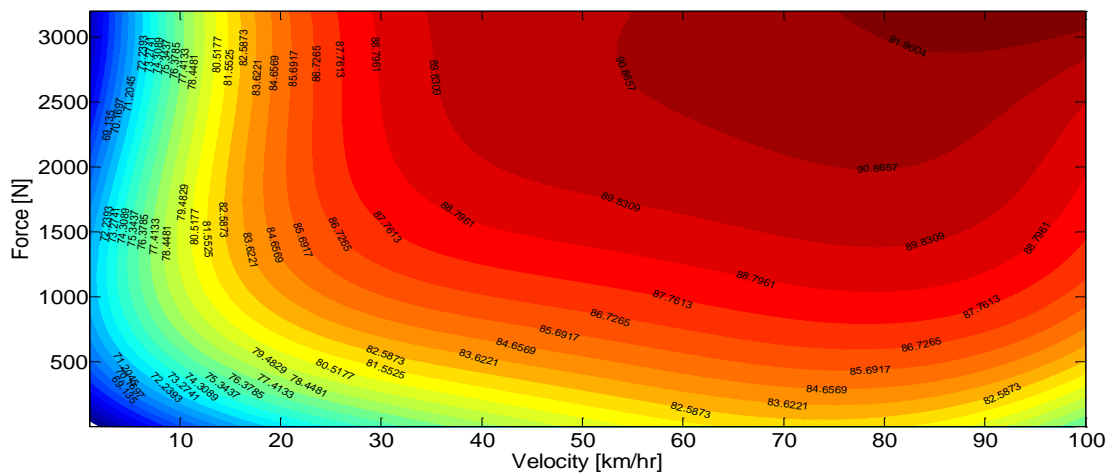


圖 3.12、IPM 效率圖

分配後之 TM 與 eAD 在不同車速與驅動力之分配如圖 3.13、圖 3.14，圖中 x 軸為車速，y 軸為縱向驅動力，z 軸為分配之驅動力，由圖 3.13 顯示大多時間馬達驅動力均分配在某一顆馬達上，這是因為此兩顆馬達之效率區間均落在高扭力地區，若在兩顆效能明顯差異之馬達例如 PMSM 在低扭力區域有高效區，則將與 IM 馬達高扭力之低校區有互補之作用。此兩顆馬達中，在低轉速時多以前軸之永磁同步馬達彌補感應馬達在此操作區間的低效率，而在高轉速時縱向力則多以感應馬達為主，與(3-6)、(3-7)邏輯相同。

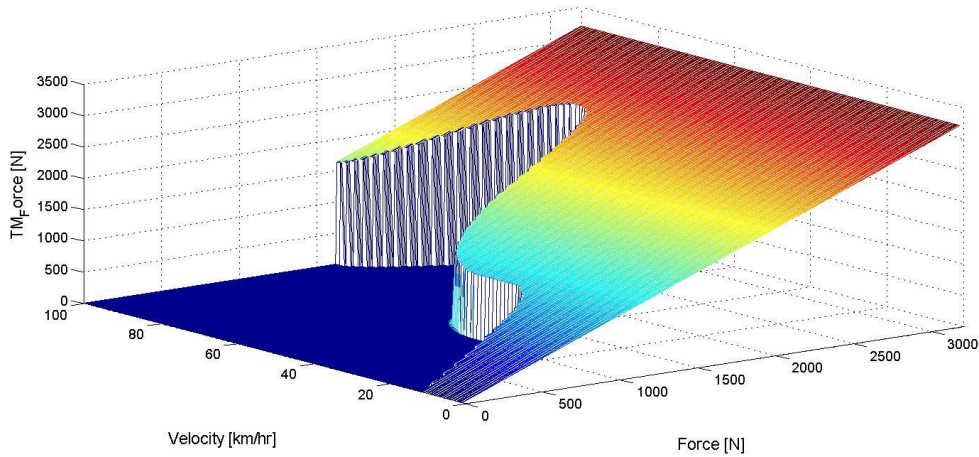


圖 3.13、永磁同步馬達分配驅動力

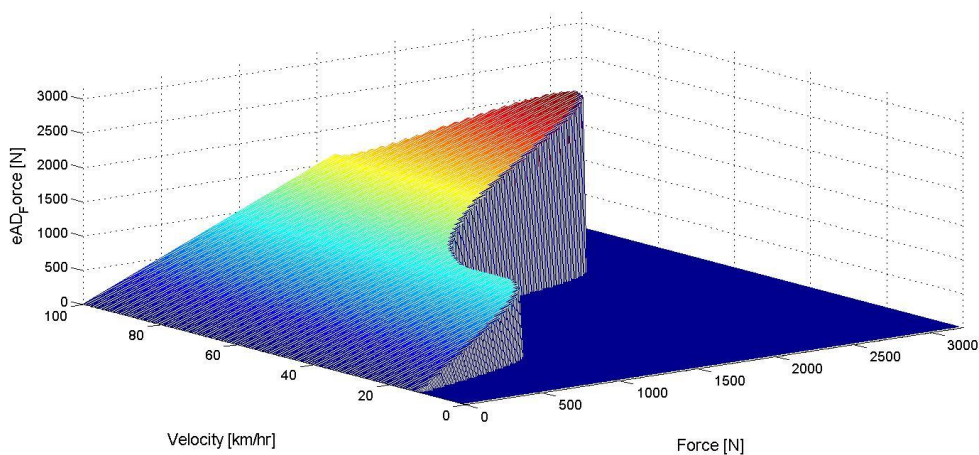



圖 3.14、感應馬達分配驅動力



瞬時功率最小化策略優點在於已將最佳化的分配做為一個資料庫，為決定馬達分配比例時已沒有動態方程式的問題，故直接將各個 F_x 、 V_x 所對應之分配比例記錄成資料庫，當需要判斷此行駛區間之馬達動力分配比例時，即能直接按照此資料庫進行分配。在上層之節能巡航控制器演算法中馬達的能耗模型便能根據這個資料庫迅速計算出相對應之能耗，減少許多運算量，比起其他線上最佳化才能取得最佳分配比例來的有效率且比用固定比例做為馬達動力分配者有更好的能耗表現。

第四章 模型迴路模擬



在本章中，將透過不同的模擬情境來驗證節能巡航控制之控制成效。在實現到實體之控制器之前，將所有相關模型建立在 matlab/ simulink 環境內，為所謂的 Model in the loop 作為驗證方法，包括第二章提到之車輛縱向動態模型、馬達與引擎之半穩態模型、動力元件之能耗模型、以及第三章之節能巡航控制器等，其相關模型介紹可見第二章與第三章，本章將各個動力模式下之節能巡航控制與傳統之巡航控制進行比較。

4.1 節能巡航控制

為了驗證坡度對於車輛動態能耗具有不可或缺的影響並驗證節能巡航控制器於不同地形對於車速的調節，本小節將以各種模擬情境進行節能巡航控制以及模擬結果探討。

模型預測控制參數，每個步長(Step)為 30 公尺，預測區間(Prediction Horizon)長度為 10 步也就是 300 公尺，均取第一步作為控制區間，並在模擬裡每 0.1 秒會更新一次目前車身狀態以及重新計算最佳化方程式，將計算出之最佳化車速至力矩控制器。

在此模型預測控制裡，求解之成本函數為(4-1)，其內容見第三章

$$u^* = \underset{k_0}{\operatorname{argmin}} \int_{k_0}^k w_0 E(k) + w_1 [F(k) + m \cdot g \cdot \sin\theta(k)]^2 + w_2 [V(k+1) - V_{desired}]^2 dk \quad (4-1)$$

4.1.1 上坡道路速度調節

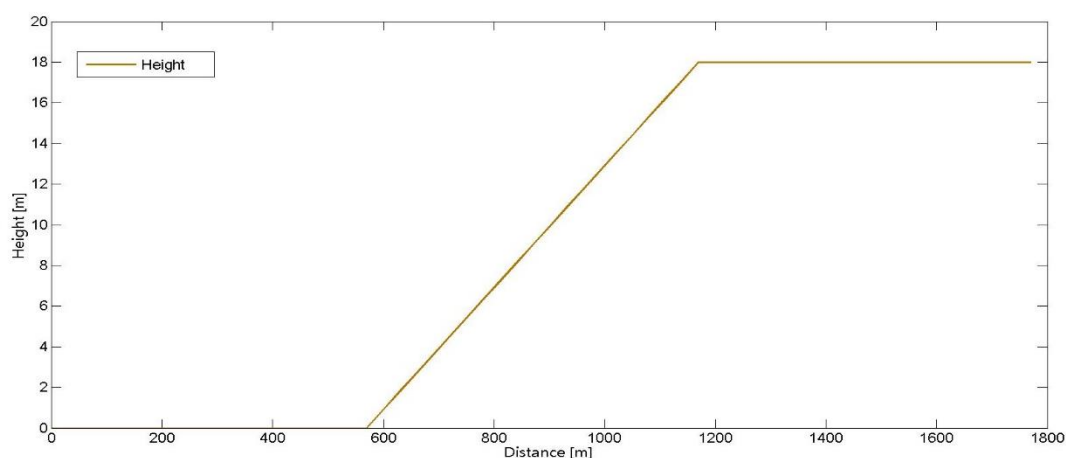


圖 4.1、上坡道路+3%

第一段模擬為車輛行駛過平地-上坡-平地之路段，總長約 1.8 公里，其上坡坡度為3%，(4-2)為坡度計算式，首先以引擎模式(ICE mode)進行路段之行駛，在車輛參數部分參考表格 4-1，車輛初始速度定為 90km/hr 開始行駛，藉由行駛過此路段來探討此控制器在前方為上坡路段時車輛動態行為以及能耗表現。

$$\text{坡度}(\%) = \text{垂直高度}(\text{m}) / \text{距離}(\text{m}) \quad (4-2)$$

而後進行定速巡航與節能巡航之比較，在此先以一般傳統巡航控制模擬結果以及節能巡航控制模擬結果進行結果說明，首先先以定速巡航作為標竿，在引擎模式圖 4.2、圖 4.3、圖 4.4 中，為車輛以定速 90km/hr 行駛之結果，其中 V_{ref} 為速度參考值給予力矩控制器進行追隨，可以看到有些微誤差為力矩控制器參數的調整，但沒有影響太大，在遇到上坡時由於阻力關係，速度約落在 89.2km/hr 左右，最後行經上坡後回到原本巡航速度 90km/hr，力矩部分由於皆為定速的關係，起伏非常平滑，可以看到定速巡航整段路上並沒有依據地形變化而進行車速的調整。

在節能巡航部分給予 ± 3 、 ± 5 、 ± 7 、 ± 10 km/hr 之變化區間作為調整進行比較，在此先以 90 ± 5 作為第一次比較，由圖 4.5、圖 4.6、圖 4.7 可以看到，車速在尚無坡度時約以等速 88km/hr 左右行駛，但在快接近上坡路段時，車速稍微往上提後才進入上坡，如此為為了減少於上坡路段驅動力的結果，而後車速因在上坡路段的關係，漸漸下降至 84km/hr 左右，同樣地此誤差與力矩控制器參數有關，直到回到坡度為零時車速又漸漸回升。由圖 4.7 與圖 4.4 比較可以看出，在一般定速巡航上為了穩定在時速 90 公里，在上坡路段時以高扭力高轉速做輸出，與圖 4.5 相比其將車速稍為提升後進入上坡路段以較低車速行駛，此行為第一步雖然提升車速需要額外能耗，但在初期進入上坡後將可以低扭力行駛，接著以低速行駛過上坡以減少油耗量，而能耗的變化與相關不同變數差異比較將於下述呈現。

表格 4-1、車輛參數

m	2300(kg)	整車重量
C_d	0.4	空氣阻力密度
g	9.81 m/s ²	重力加速度
A_f	3m ²	前視面積
ρ_d	1.2kg/m ²	空氣密度
r_{wheel}	0.372(m)	有效車輪半徑
n_{TM}	3.068	感應馬達齒輪箱減速比
n_{IM}	4.476	永磁馬達齒輪箱減速比
n_{fFD}	3.143	前軸終端齒比
n_{rFD}	3.316	後軸終端齒比

引擎模式-上坡路段

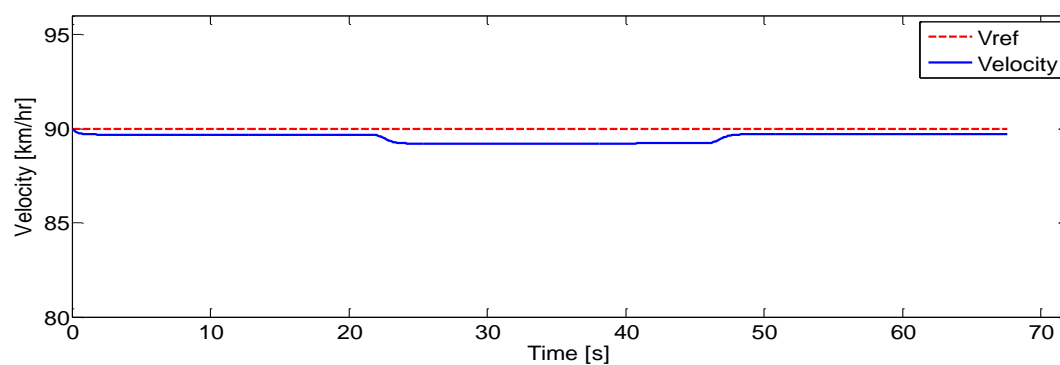


圖 4.2、定速巡航 90km/hr-車速

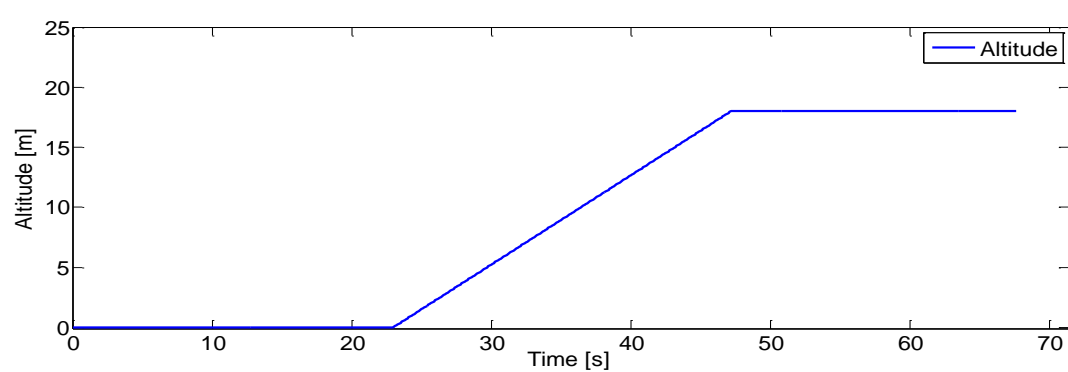


圖 4.3、定速巡航 90km/hr-高度

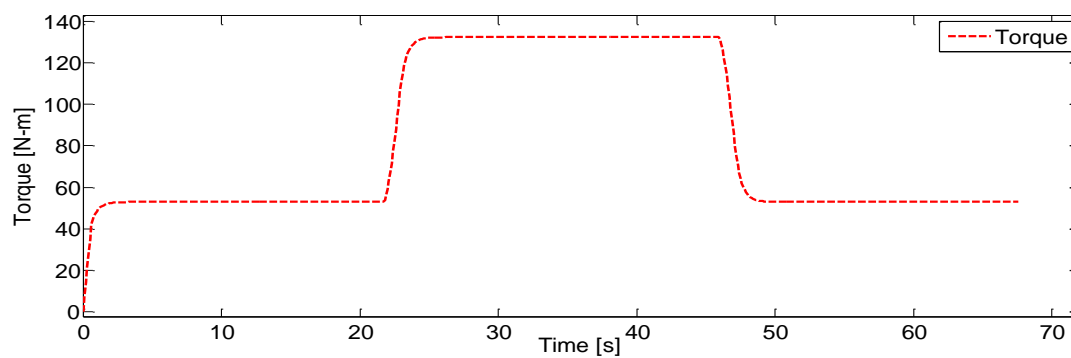


圖 4.4、定速巡航 90km/hr-引擎力矩

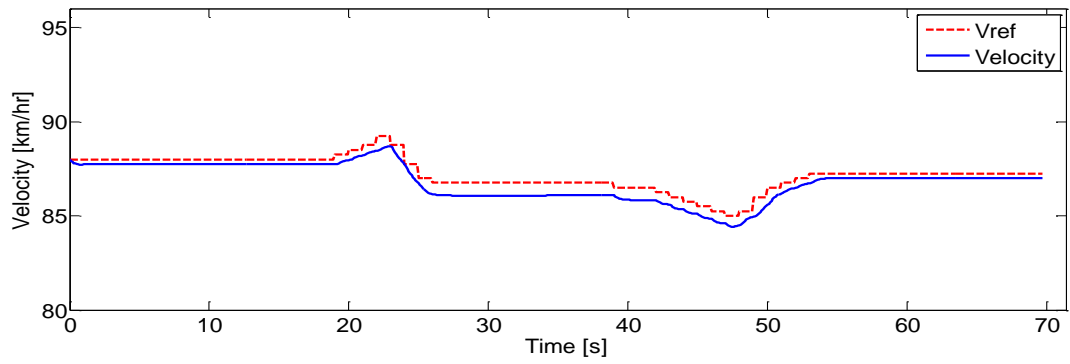


圖 4.5、節能巡航-車速

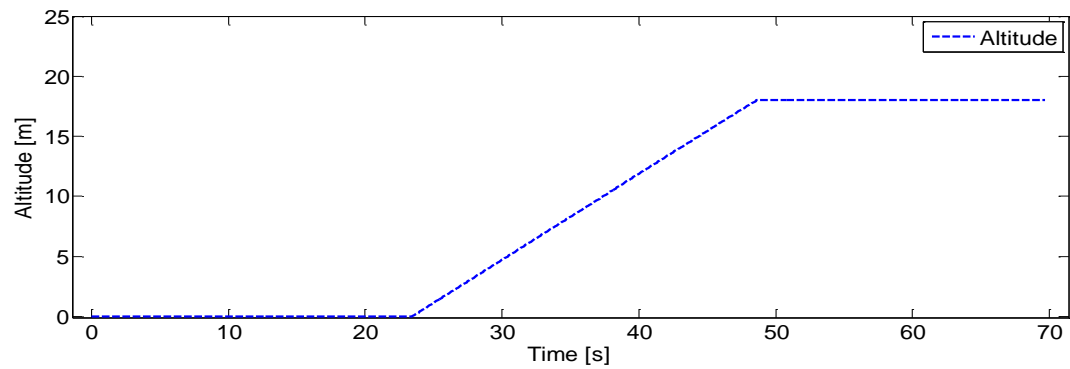


圖 4.6、節能巡航-高度

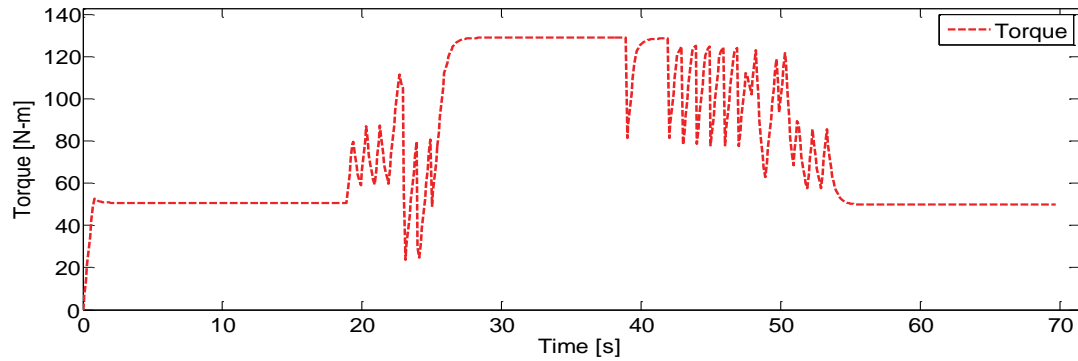


圖 4.7、節能巡航-力矩

純電模式-下坡路段

同樣地在純電模式下分別進行上坡路段與下坡路段行車模擬，首先為上坡路段之分析，從車速圖來看，可以看到車速與引擎模式有相同的趨勢在於偵測到前方有上坡路段時，會將車速預先提升，與引擎模式不同為純電模式上坡路段皆以最低允許車速行駛，其誤差值為力矩控制器在上坡路段追尋的誤差，而回到平地路段時再回升車速，若整趟路程皆以最低車速行駛雖整體能耗會最小，但其實毫無意義，其在上坡與平地車速值會依據成本函數而有所變動。而在操作點分析由於此動力模式下有兩顆馬達，且在此成本函數計算的並非轉換效率，操作點分析上以能耗圖進行表示，其轉換方式為將當下操作點之力矩轉速進而求得功率，將轉換後之總驅動力操作點來比較定速巡航與節能巡航之差異。

在功率圖上操作點越靠近左下角功率越低，從操作點來看由於定速巡航不管在任何地形都必須定速在每小時 90 公里，故容易在上坡路段等將操作點落在功率較高的地方，若長時間坐落在功率高的地方整體行駛之能耗將會提高，而在節能巡航的部分，整體操作點之功率往左下偏移，使的整體能耗較低。

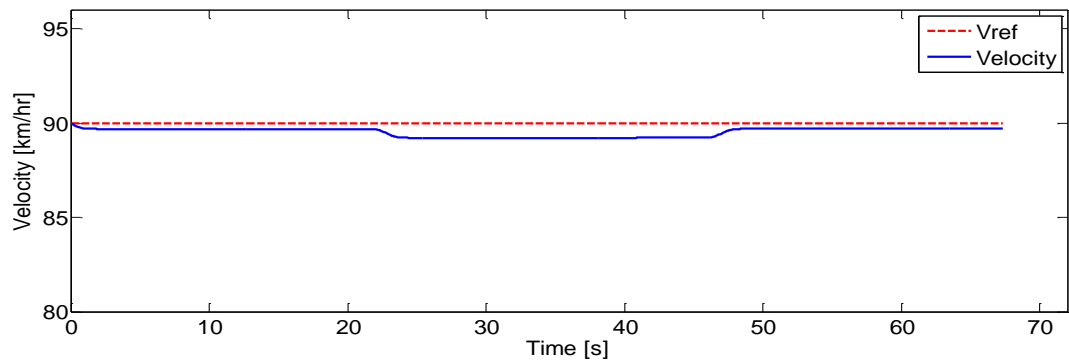


圖 4.8、定速巡航-車速

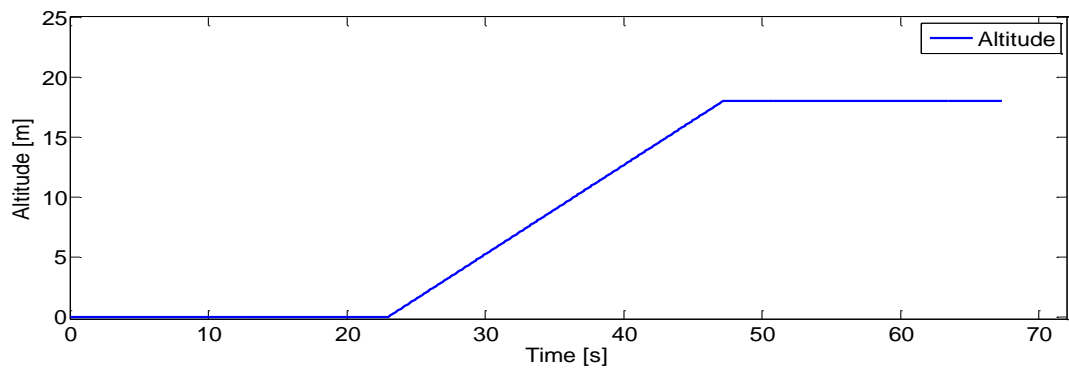


圖 4.9、定速巡航-高度

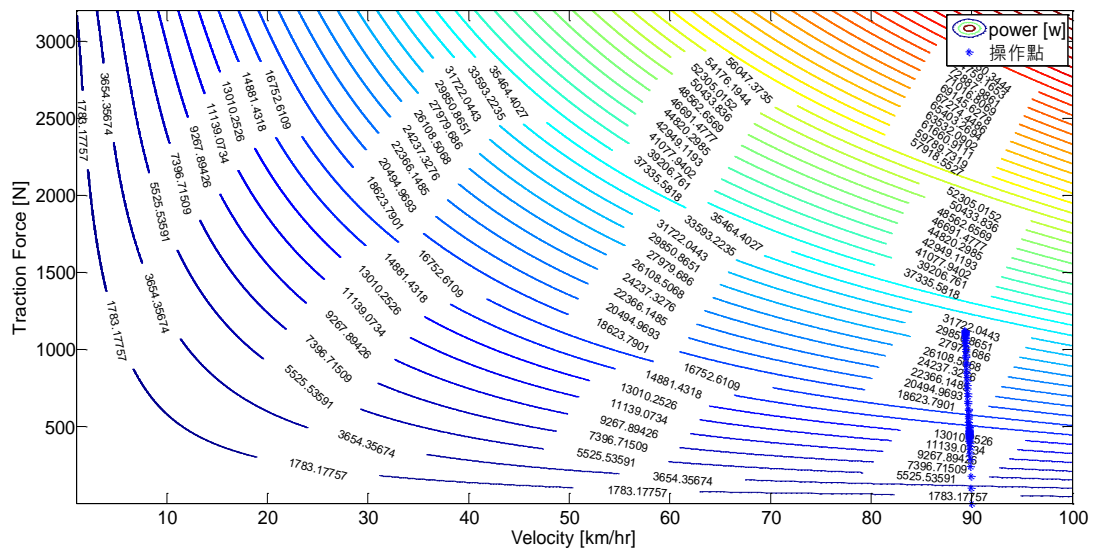


圖 4.10、定速巡航操作點

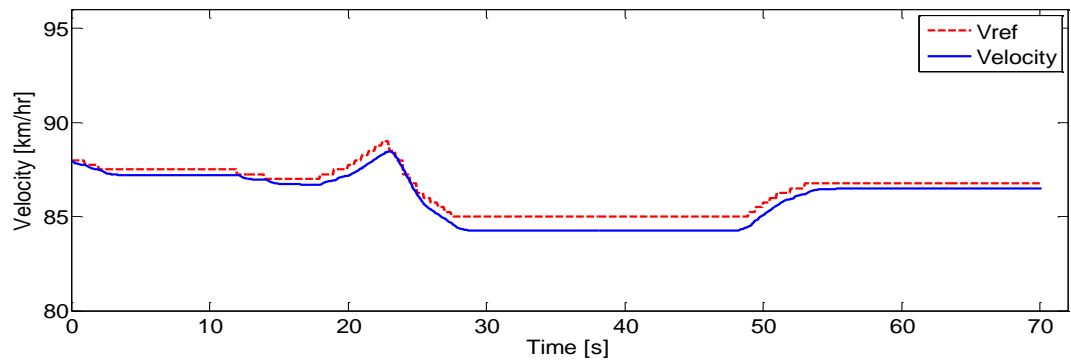


圖 4.11、節能巡航-車速

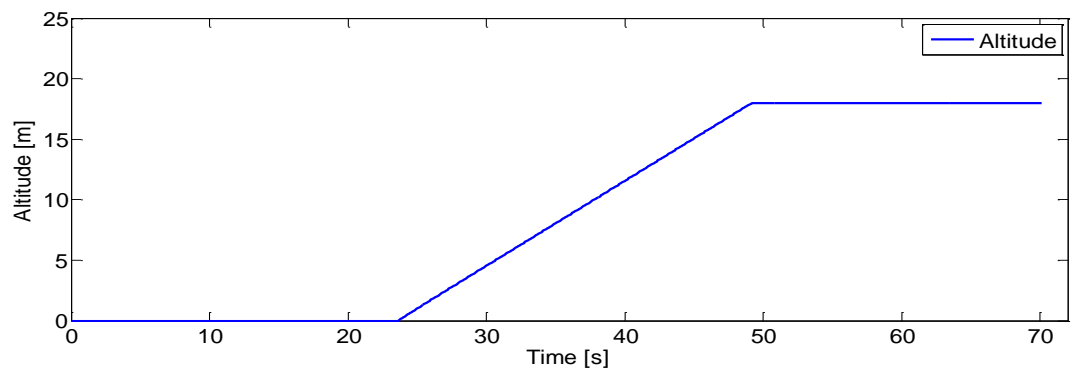


圖 4.12、節能巡航-高度

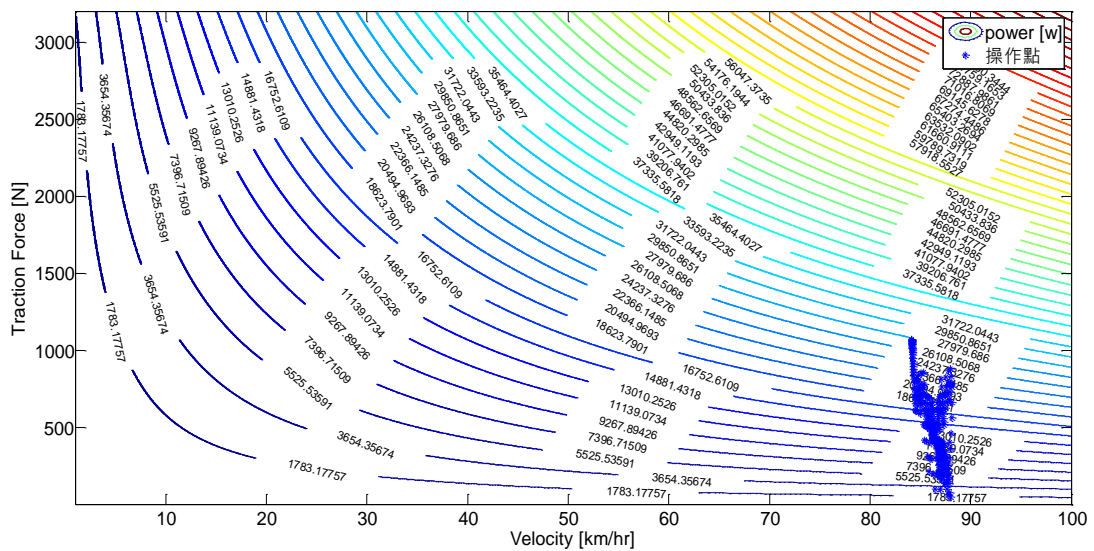


圖 4.13、節能巡航操作點

4.1.2 下坡道路速度調節

此小節將節能巡航控制器於下坡路段圖 4.14 時之表現進行探討，此小節模擬分為引擎模式與純電模式行駛於平地-下坡-平地之路段，總長約 1.8 公里，其下坡坡度為-3%，首先以引擎模式(ICE mode)進行路段之行駛，在車輛參數部分以及控制器設定與章節 4.1.1 相同。

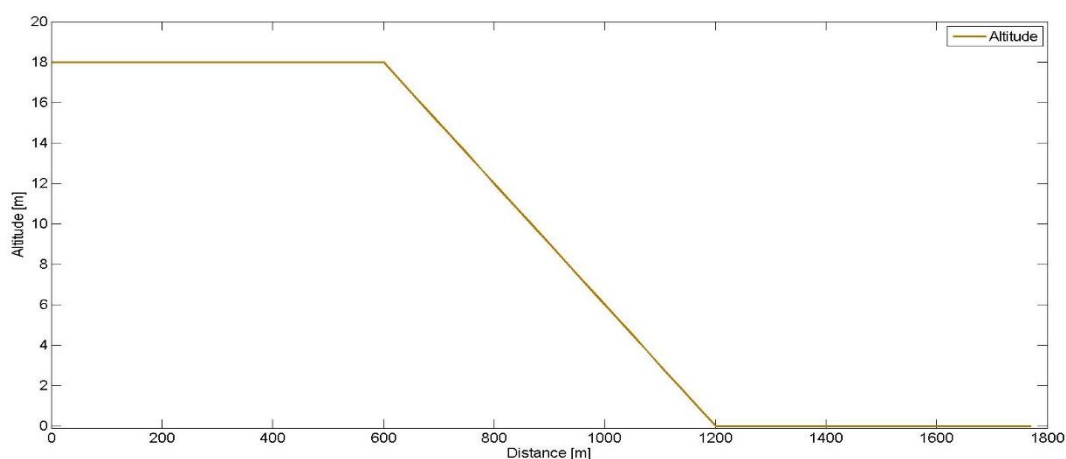


圖 4.14、下坡道路-3%

在下坡路段中定速巡航中，圖 4.15 為追尋車速結果， V_{ref} 為速度參考值給予力矩進行追隨，可以看到在平地路段與下坡路段有稍微誤差為力矩控制器參數設定誤差，在下坡路段力矩為零但其實車輛是持續在踩煞車以維持車速在 90km/hr，這中間浪費了許多能量於維持車速，但在節能巡航圖 4.18 中可以看到車輛在靠近下坡路段之前，節能巡航控制器將車速放至最低而至下坡後將車速提升，因為將有重力加速度提供動力來源，但在整個下坡路段中並沒有將車速直接放到最高，而是維持在約 92km/hr 左右，這是由於成本函數的限制並不希望車速遠離設定之巡航車速太多，直到快要接近平地時將車速提升至最高藉由重力加速度提供之動力在接下來的平地路段能減少的油門輸出於圖 4.20 所示。由於此模擬控制器以離散演算法進行，故輸入系統之車速參考值皆為離散值，才會使得力矩響應會有鋸齒狀。

引擎模式-下坡路段

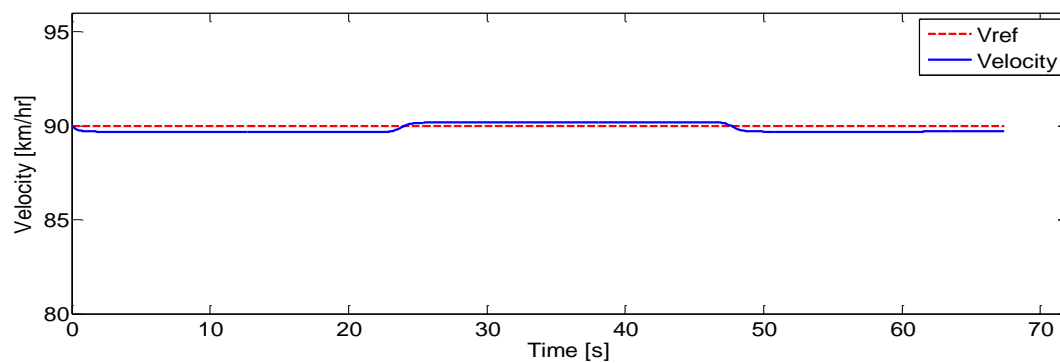
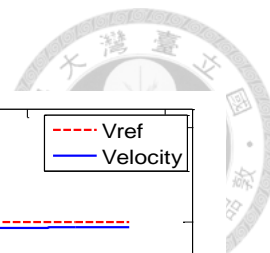


圖 4.15、定速巡航-車速

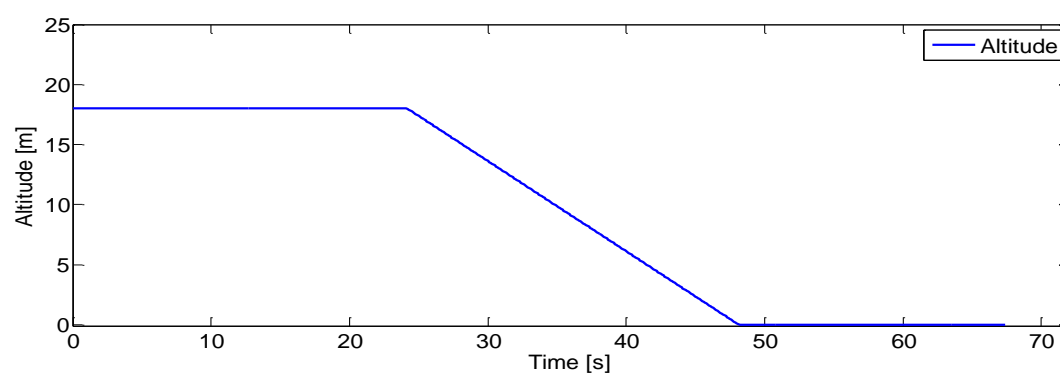


圖 4.16、定速巡航-高度

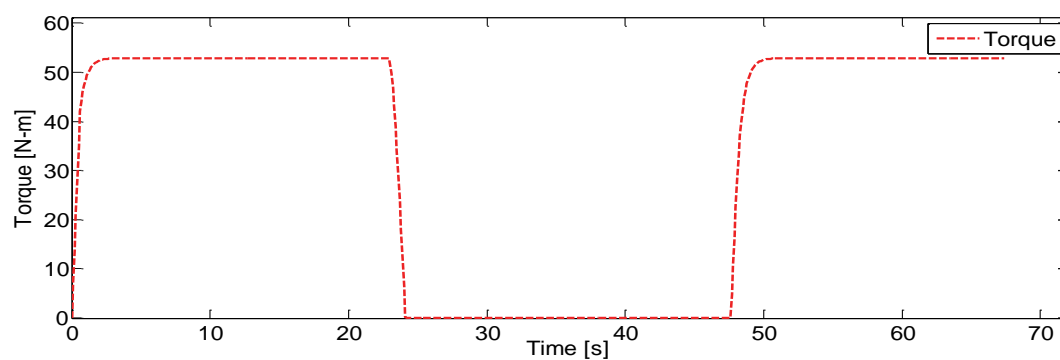


圖 4.17、定速巡航-力矩

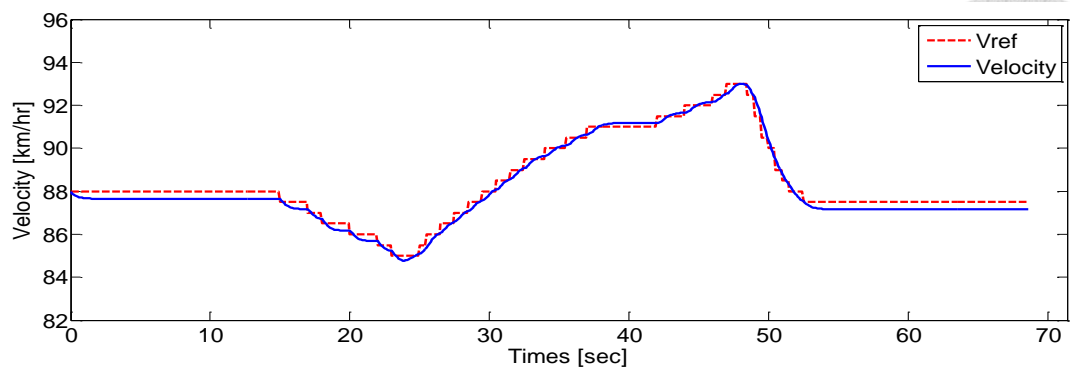


圖 4.18、節能巡航-車速

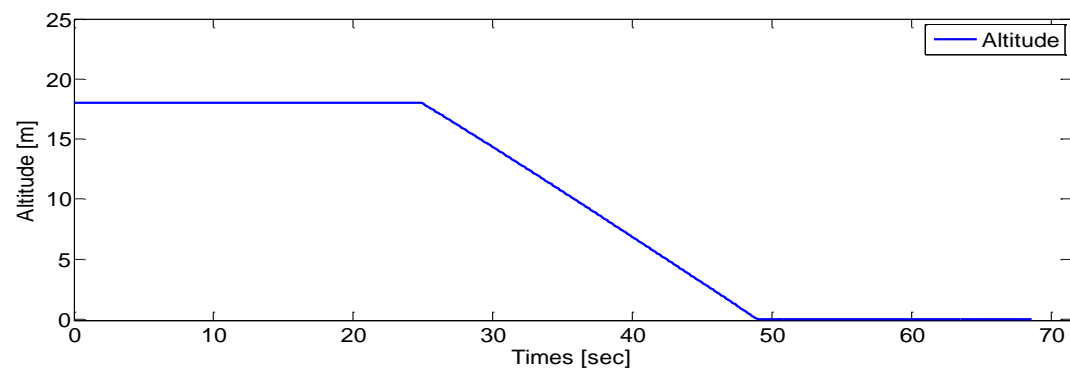


圖 4.19、節能巡航-高度

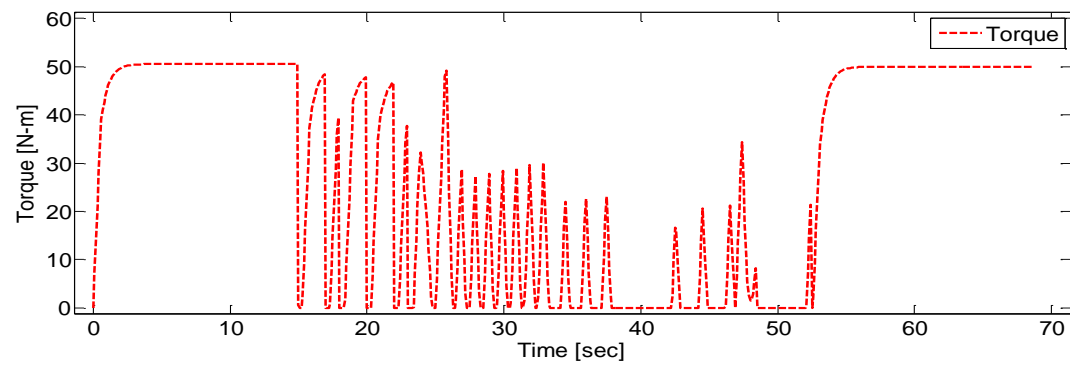


圖 4.20、節能巡航-力矩

純電模式-下坡路段

以下為在純電模式下進行下坡路段行車模擬，在下坡路段之定速巡航為每小時 90 公里，下坡路段為了維持車速會以煞車進行回充，但這不管下坡路段多長及變化都是以同樣的車速去維持，這將會少了利用地形及重力加速度提供額外的動力，從圖 4.23 圖 4.24 操作點可以看到相比上坡路段整體驅動力較小，是由於此段路段為平地以及下坡路段，基本上不需要額外的力矩輸出。

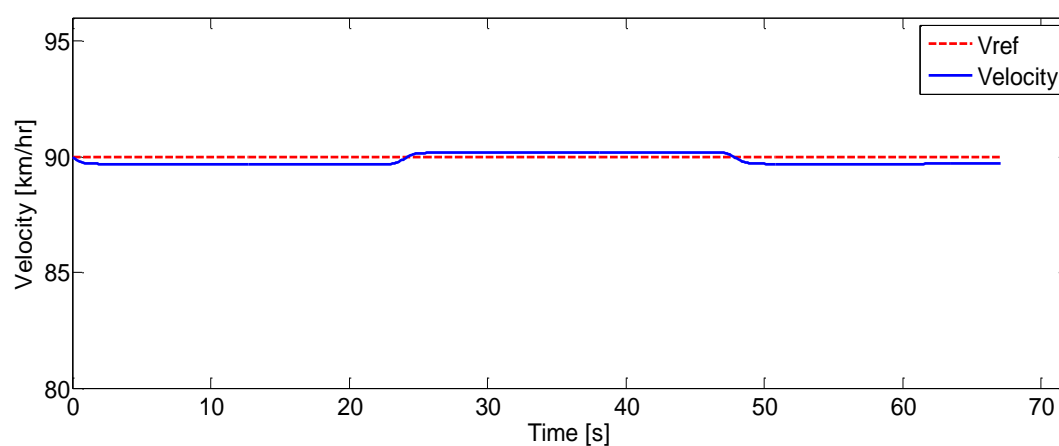


圖 4.21、定速巡航-車速

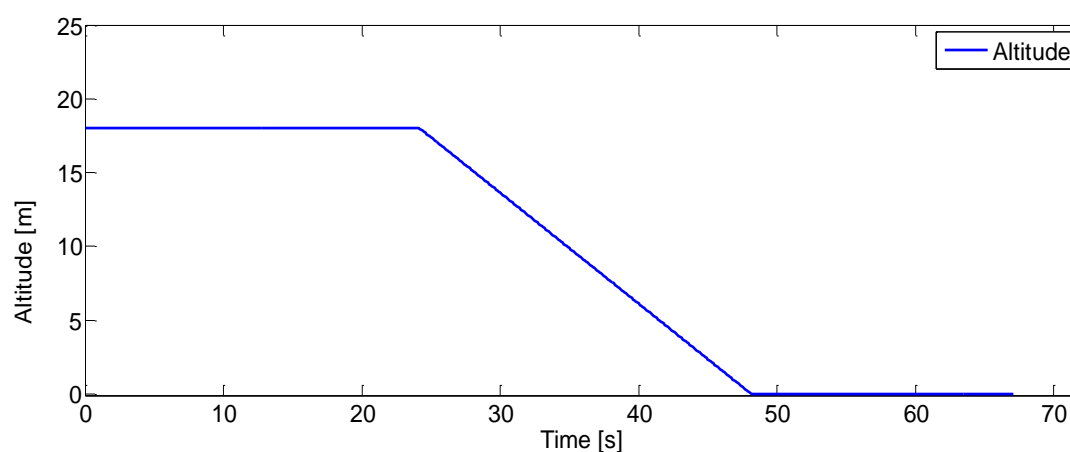


圖 4.22、定速巡航-高度

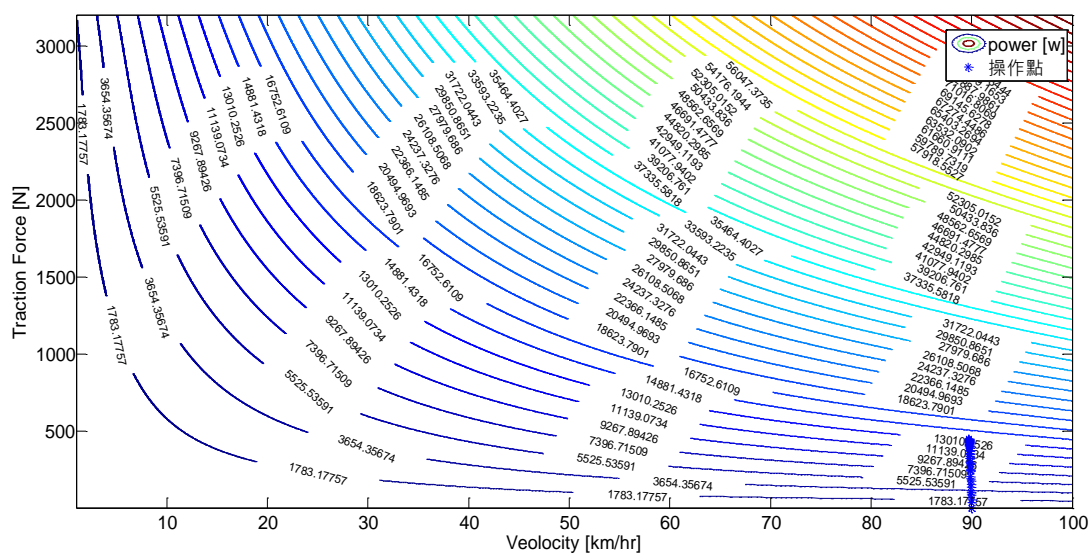


圖 4.23、定速巡航第一象限操作點

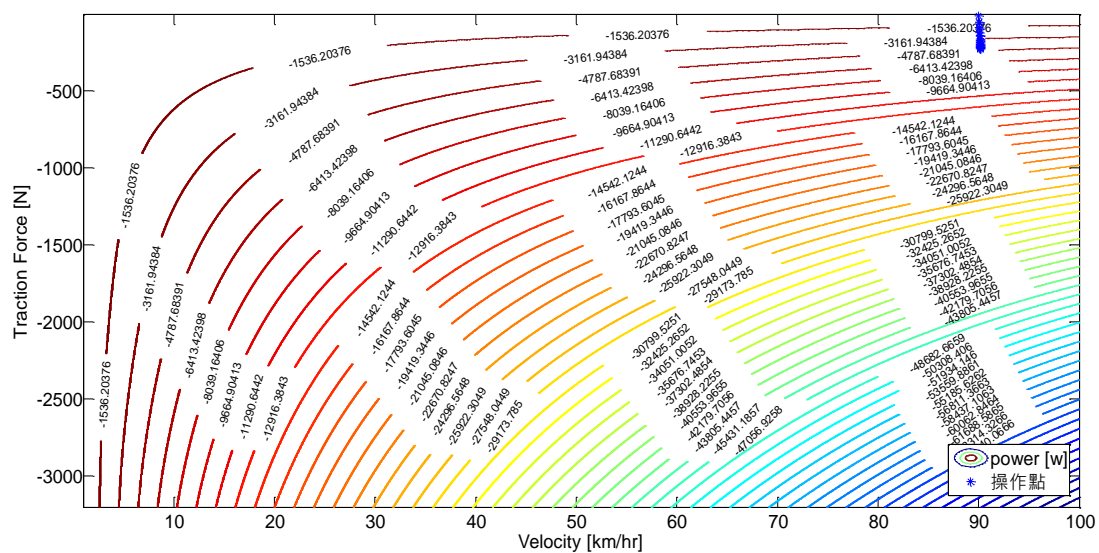


圖 4.24、定速巡航第四象限操作點

與定速巡航相比，節能巡航在下坡路段車速做了不少調整，在接近下坡路段時，節能巡航控制器會預先將車速放低以進入接下來的下坡路段，在這段路程會有稍微的能量回充，而在下坡路段將藉由重力加速度提供動能來源，但由於此下坡路段較長，故在中間路段將維持在時速 90 公里附近，為了維持在此車速，此路段持續地進行煞車回充，提供額外能量來源，直到控制器接收到前方為平地之訊息後，節能巡航控制器才將車速放開提高，直到下坡路段結束後將有額外的動能獲得，從操作點來看在第一象限的部分整體較定速巡航往左下分散，代表著整體功率是往下移的，而在第四象限的部分除了在下坡路段定速回充的部分，多了操作點在其他區域，此為利用下坡提供之額外動能所轉換的煞車力，而此操作點提供了額外的能量回充。

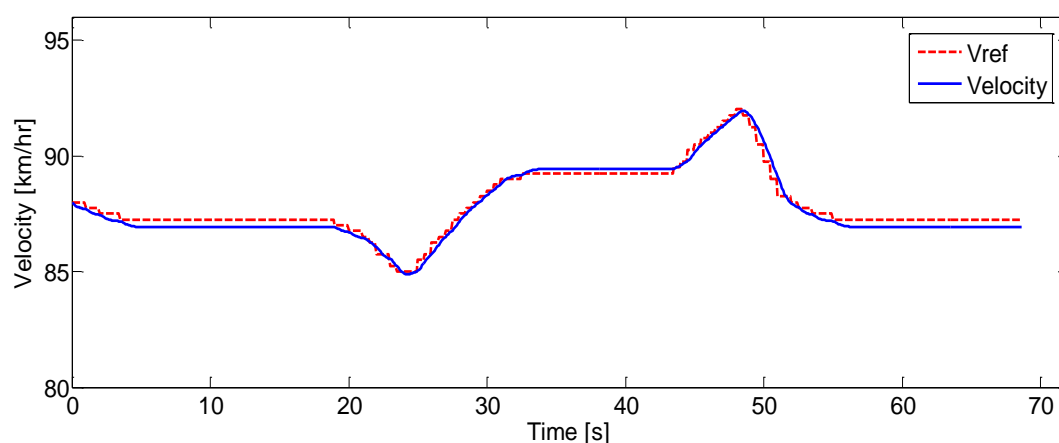


圖 4.25、節能巡航-車速

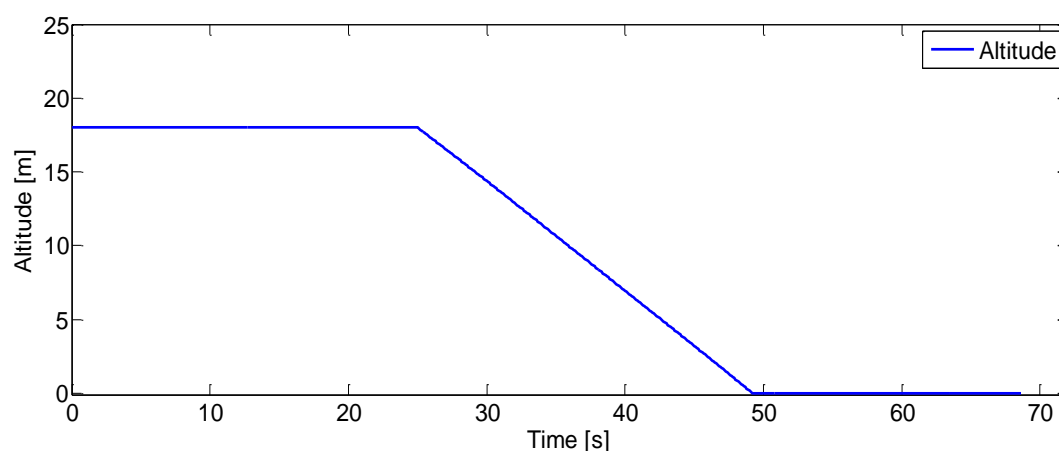


圖 4.26、節能巡航-高度

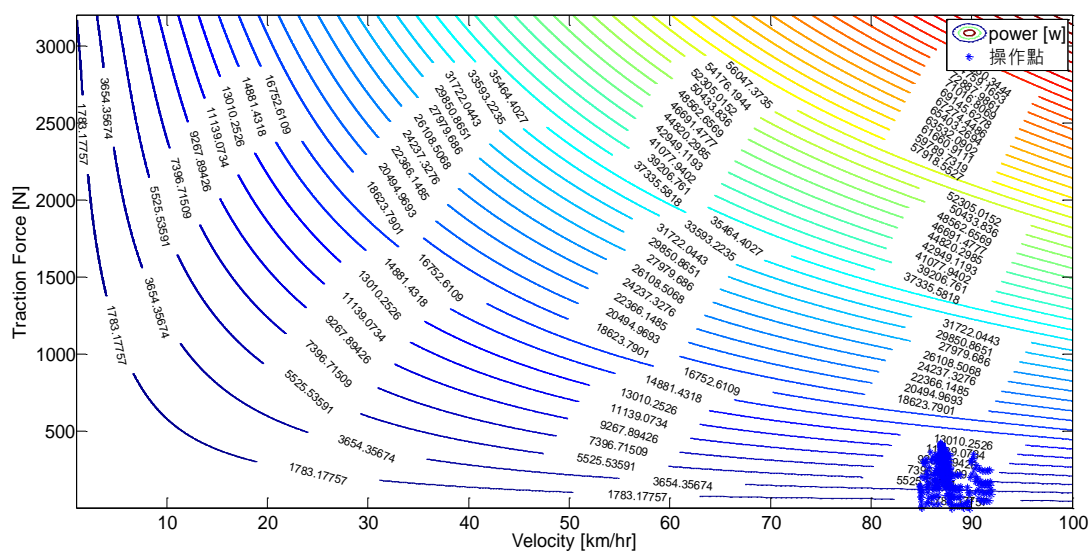


圖 4.27、節能巡航第一象限操作點

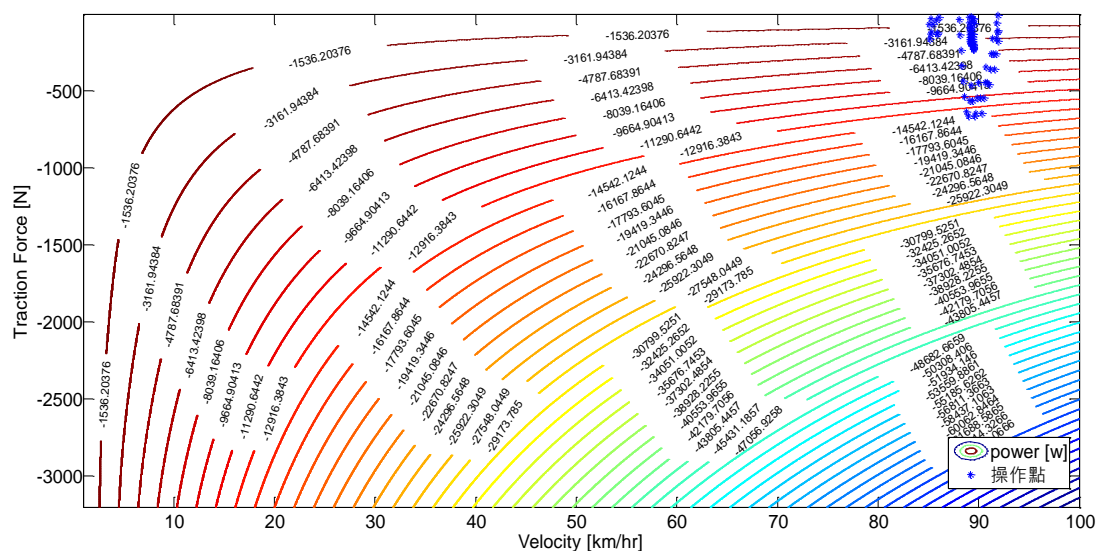


圖 4.28、節能巡航第四象限操作點

4.1.3 結合地圖資料-五股楊梅高架橋路段

在前面章節路段為預先設定好之坡度變化，為了更符合實際應用在此將真實之道路地形資料給納入模擬中，故透過 Google map 將台灣五股楊梅高架橋路段取樣其真實高度資料，納入模擬中以模擬行經此路段之能耗表現，控制器設定部分將定速巡航 90km/hr 與賦予變化區間值 ± 5 之節能巡航控制做比較。

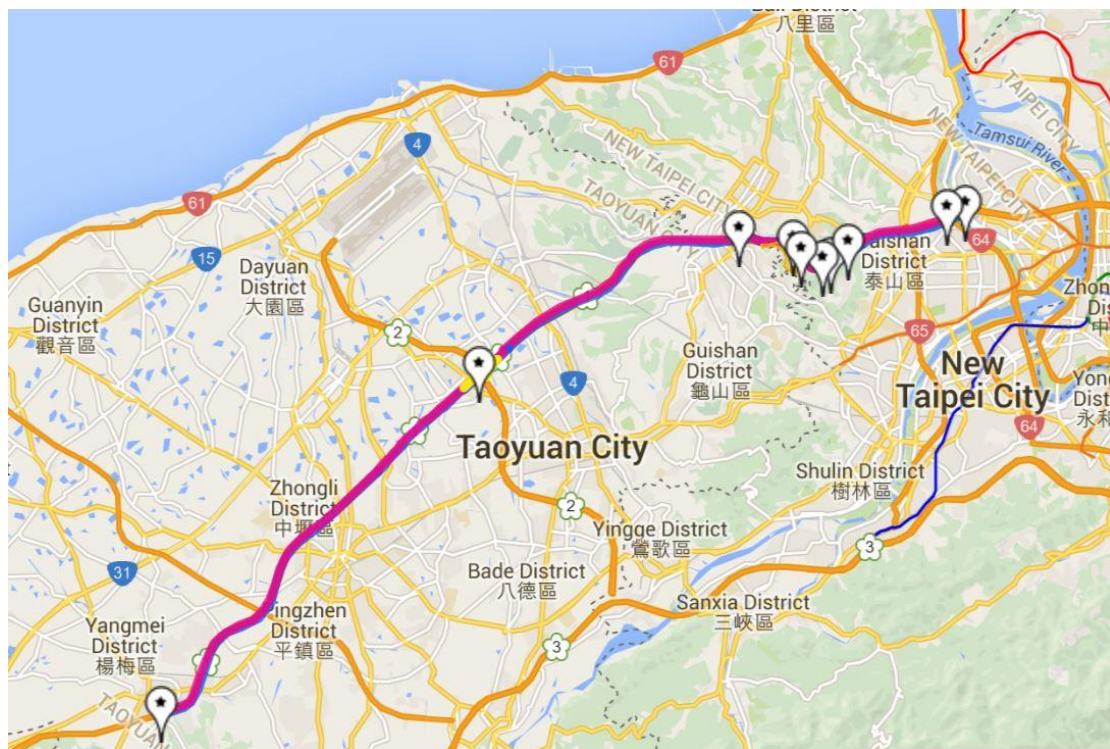


圖 4.29、五股楊梅高架橋路段

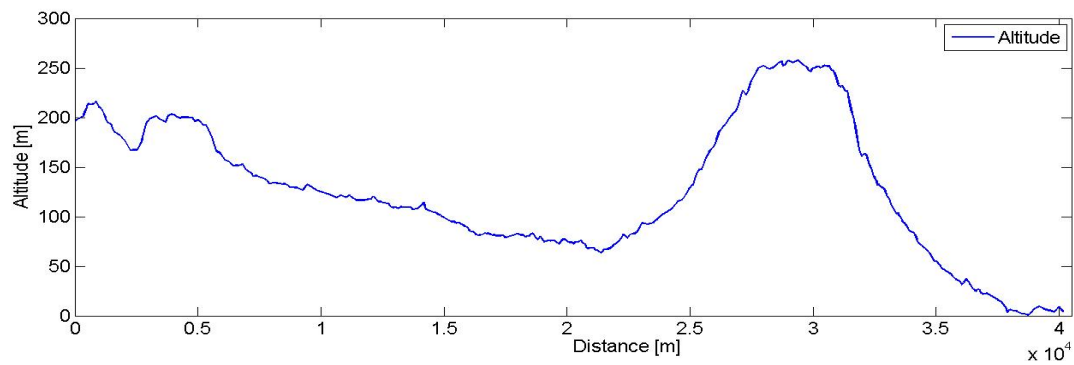


圖 4.30、五楊高架道路高度圖

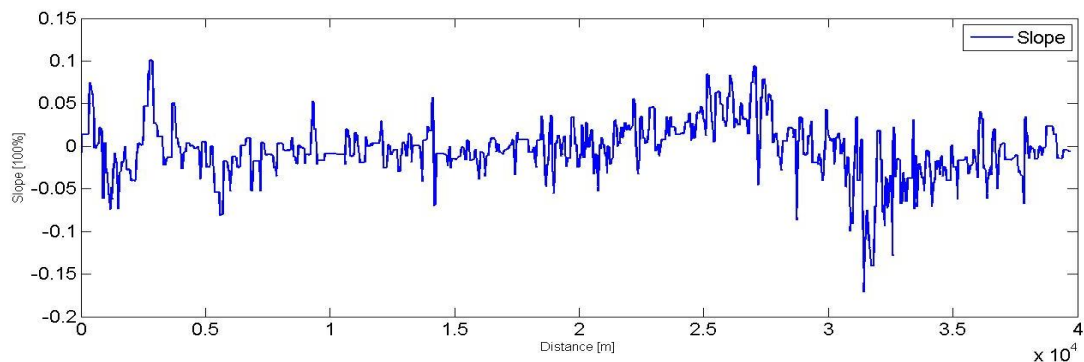


圖 4.31、五楊路段坡度

在五楊高架橋上可以看到此為一坡度變化非常劇烈的路段，其最大坡度達到10%而在下坡路段甚至達到-15%。

兩種模式分別以定速巡航及節能巡航完成這整段路程，引擎模式由於力矩限制的關係，且只有單速齒輪比，在坡度到達10%的時候稍微跟不上命令，其餘皆因地形車速有些微變化；而在節能巡航模式下，車速會依據前方的行進行調整，可以看到除大坡度的地方力矩控制器因限制的關係無法維持車在給定範圍，其餘皆會以求得之最佳車速行駛，在前半坡度較為平緩之地段車速維持較低而在後半路段大多為下坡路段時，大部分則維持高速以利用重力加速度作為動能來源。

模擬結果整理於表格 4-2、表格 4-3，由結果可以看到節能巡航控制相較定速巡航在整趟長距離行程帶來的節能效益約為6~8%左右，但行駛時間卻只差異約一分鐘左右。

引擎模式

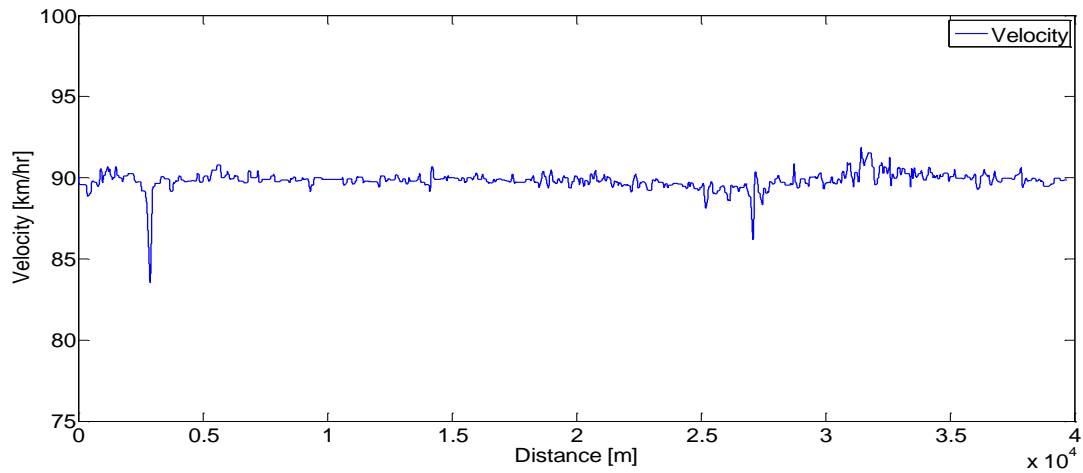
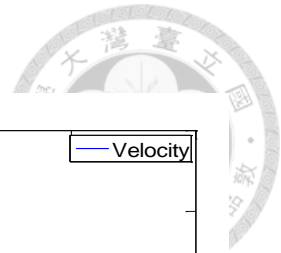


圖 4.32、引擎模式定速巡航車速圖

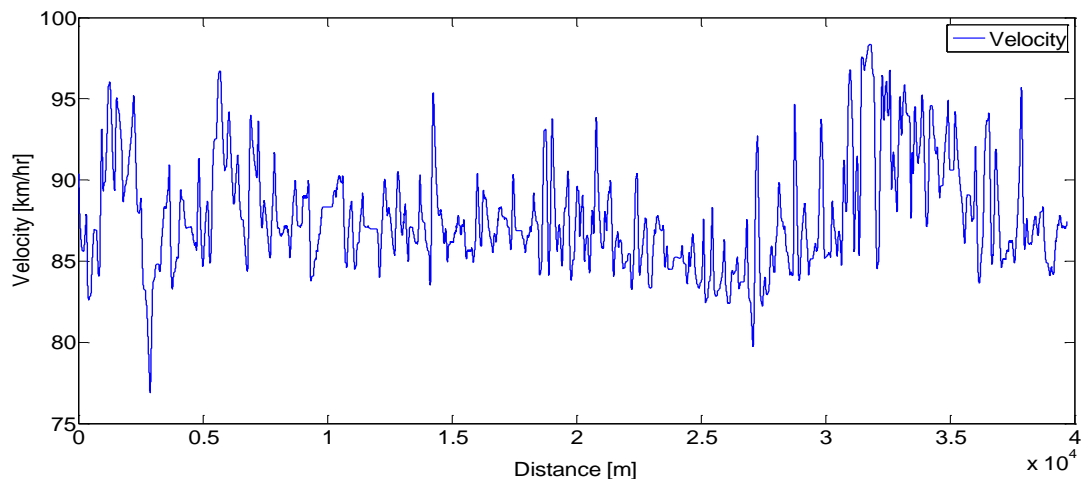


圖 4.33、引擎模式節能巡航車速圖

表格 4-2、引擎模式-五楊高架

巡航車速 [km/hr]	fuel consumption [g]	Time [s]	油耗百分比 [%]
定速巡航 90	1564.5	1605	100
節能巡航 90±5	1442.4	1637	92.2

純電模式

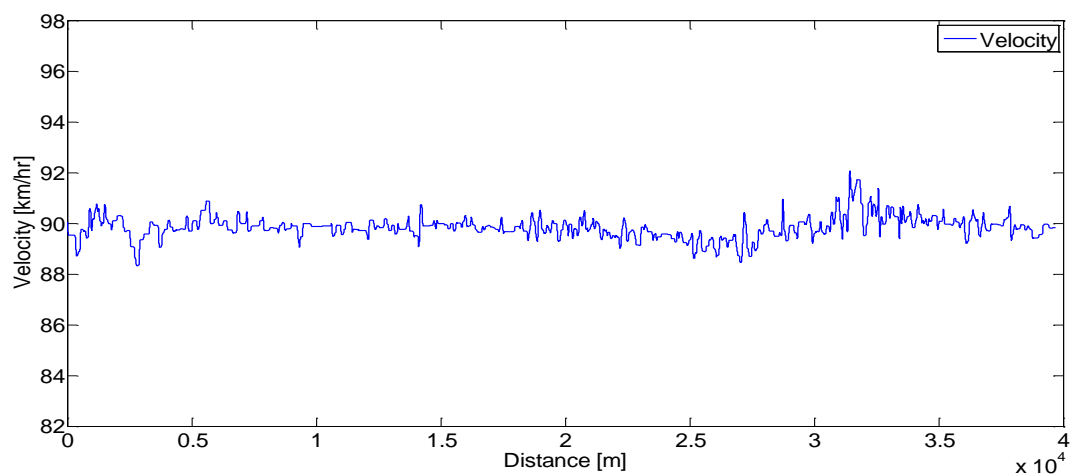
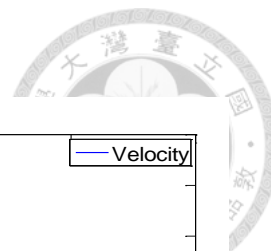


圖 4.34、純電模式定速巡航車速圖

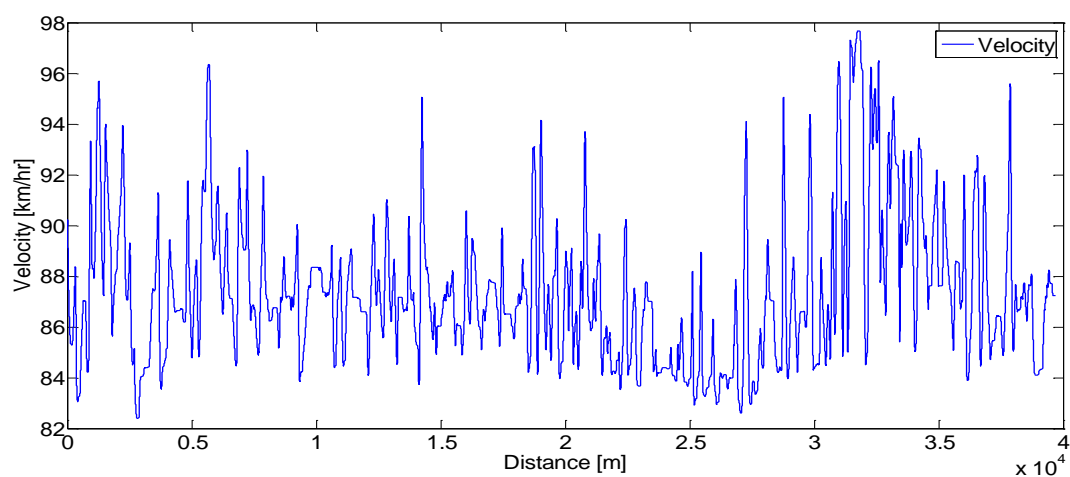


圖 4.35、純電模式節能巡航車速圖

表格 4-3、純電模式-五楊高架

巡航車速 [km/hr]	Energy consumption[kJ]	time	能耗百分比 [%]
定速巡航 90	17035.0	1604	100
節能巡航 90±5	15581.1	1649	91.5



4.1.4 差異分析-權重比較

由成本函數(4-3)可以看到需要調整之參數 w_0 、 w_1 、 w_2 ，分別為能耗、加減速調節、以及跟隨巡航車速三者之關係，三者關係是相對的，若要探討所有組合將會有無限多種結果，而在此將注重於探討三者權重其中一項變化對於車速調節的影響。

$$u^* = \underset{k=k_0}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_{k=k_0}^k w_0 E(k) + w_1 [F(k) + m \cdot g \cdot \sin\theta(k)]^2 \right. \\ \left. + w_2 [V(k+1) - V_{desired}]^2 \right) \quad (4-3)$$

在此模擬分別以引擎模式以及純電模式行駛過一段上坡下坡路段為 $\pm 3\%$ 之道路，固定其中兩種參數後，對第三種參數進行調整，來觀察此權重對於整個速度曲線以及能耗的影響。

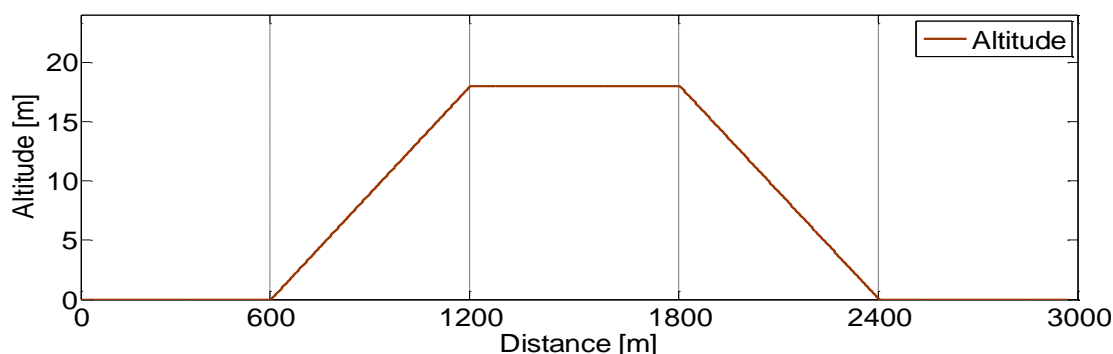


圖 4.36、比較權重高度圖

在第一項權重引擎模式將權重由 400 漸增至 700、1000、1500 以及 2000，從車速變化可以看到由於在能耗模型中車速越高對其能耗將會增加，尤其在於上坡路段同時力矩也增加，整個能耗會比平地多上許多，可以看到除了在下坡路段與放空油門而言是一樣的能耗，其餘皆因權重影響而將車速進行調節變低；而在

純電模式下當權重漸增，可以看到在於平地路段車速便會慢慢放低，而在上坡路段則一律都以最低車速行駛，在權重較低時會由於受到其他兩個權重的牽制，在平地路段在進入下坡前會回升一點車速，但若能耗權重越高，受其他權重影響將變小，明顯差異在於下坡路段，權重較低者提前將車速提到最高，並沒有利用到煞車回充的能量，而在能耗權重提高後，可以看到權重在 10 與 14 時都在下坡路段先以煞車維持一段車速，而此段其實是在進行回充的動作獲得額外能耗減少，在預知前方有下坡路段後再將車速完全放開。

而在第二項權重的部分，其主要影響為減少預測區段內之加減速行為，並根據前方地形對於車速有所調整，從引擎模式與馬達模式之車速圖可以看到，當此成本權重較低時期整體影響會交由其他權重影響例如距離定速巡航車速每小時 90 公里很近，若此成本權重越高，整體車速在平地、上下坡度路段皆會減少車速變化使的整個行車曲線較為平滑，在上坡時保持在低速而在下坡路段則會整體較高，在上坡路段接近平地時，將減少車速以平衡對於前方平地之縱向力變化，而在接近下坡路段則會先以減速行為來平衡前方下坡所提供之動力來源。

第三項成本函數代表著對於遠離設定巡航車速的成本，在引擎模式下整體車速可以看到當此權重在 200 時，車速變化在變化區間內是相當大的，代表著此項車速權重之成本較小，故車速變化都由其他項成本所影響，但在調高成本函數之後，整段路程之車速在除了上下坡路段，整體皆往設定之巡航車速每小時 90 公里靠近，代表著此權重的提升影響整個車速不偏離巡航車速太遠，此結果的影響在純電模式與引擎模式皆相同，但可以注意到的是在此權重的高低代表著相對其他項發揮空間大小，影響著整體能耗表現，也就是駕駛者若不希望車速變化太大，那麼得到的節能效益就較低，反之若駕駛者接受偏離巡航車速值較大，則其他項權重則較為重要，故整體能耗表現將會提升。

權重-能耗

引擎模式

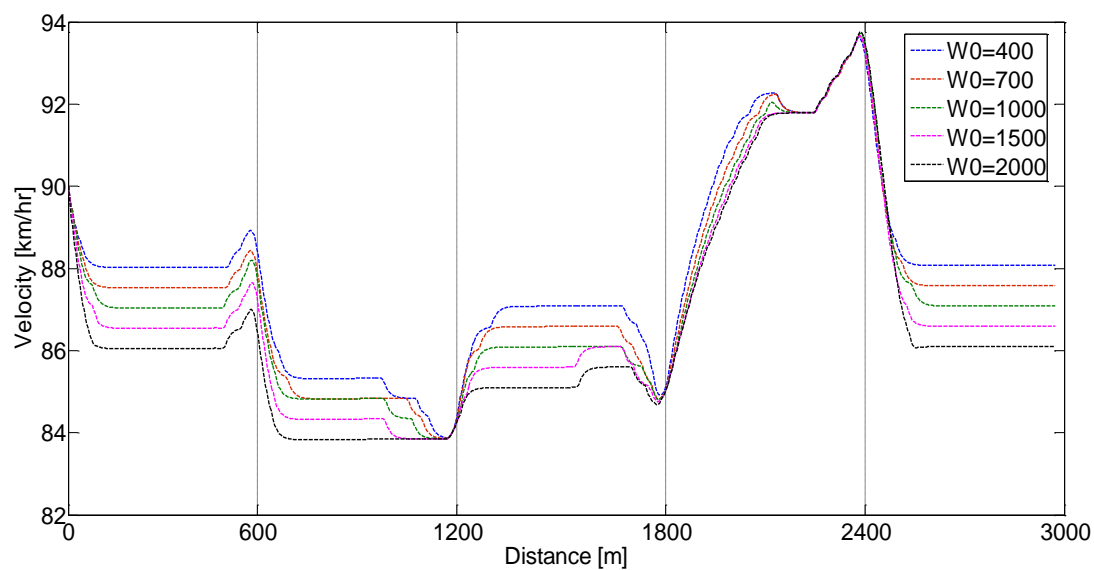


圖 4.37、引擎模式 w_0 變化車速影響

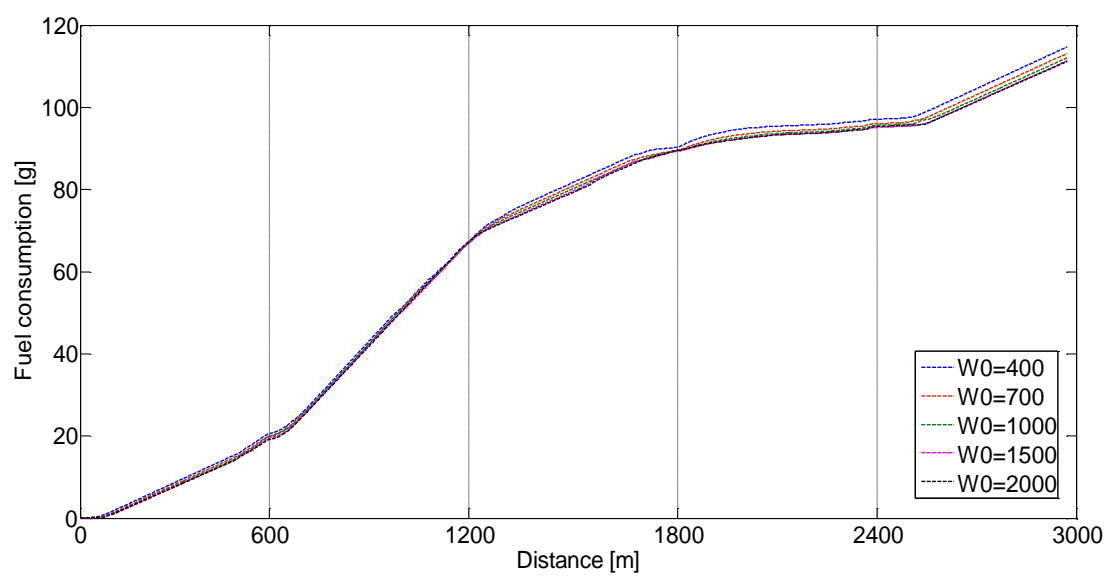


圖 4.38、引擎模式 w_0 能耗比較

純電模式

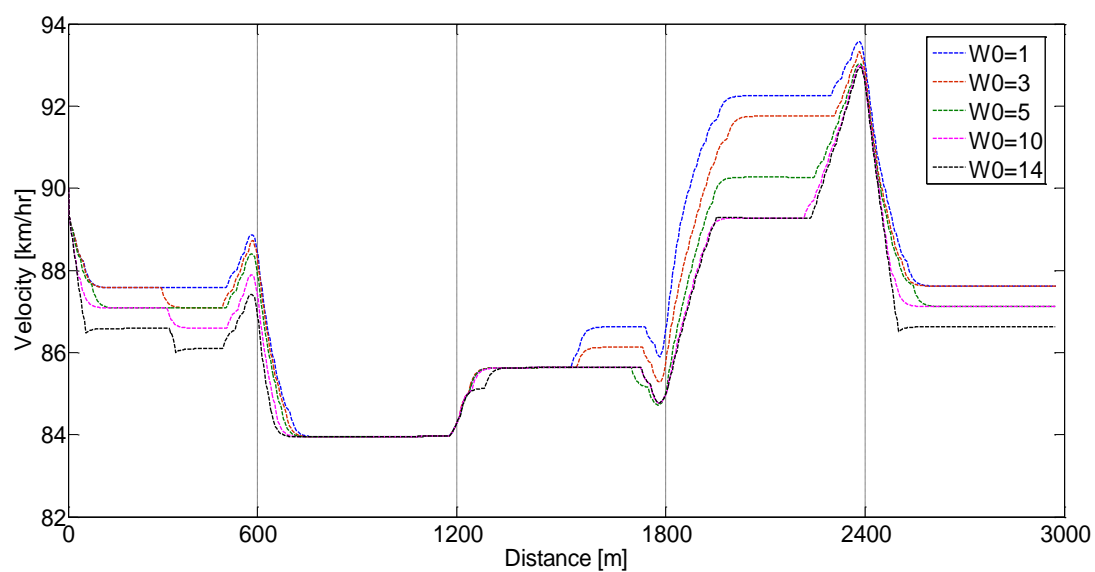
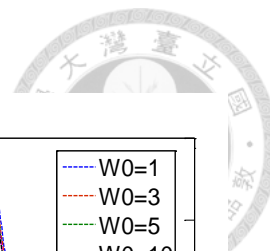


圖 4.39、純電模式 w_0 車速變化

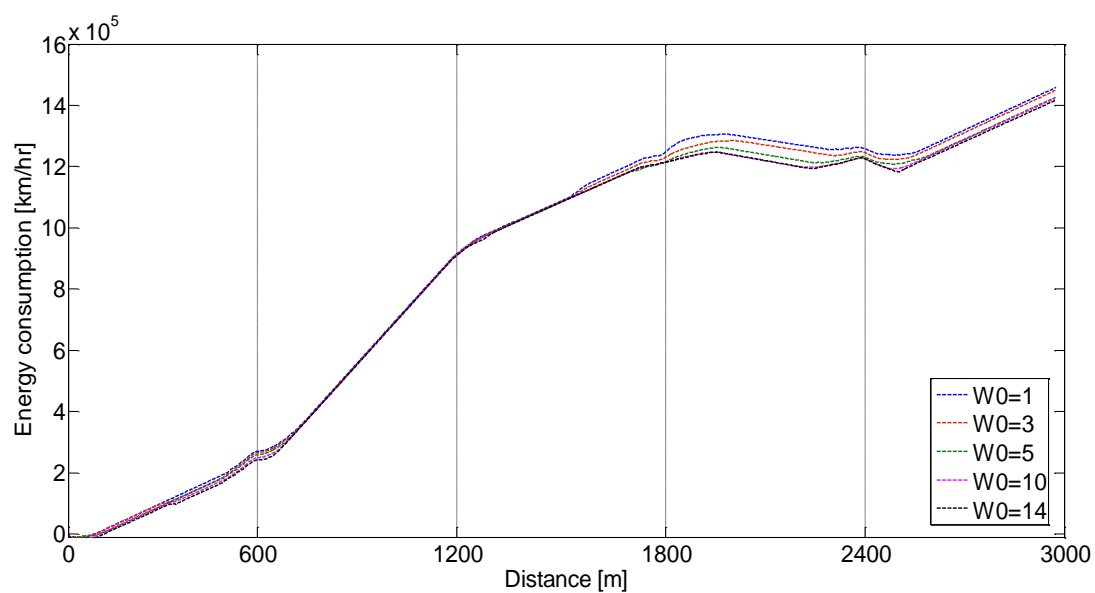


圖 4.40、純電模式 w_0 能耗變化

權重-加減速調節

引擎模式

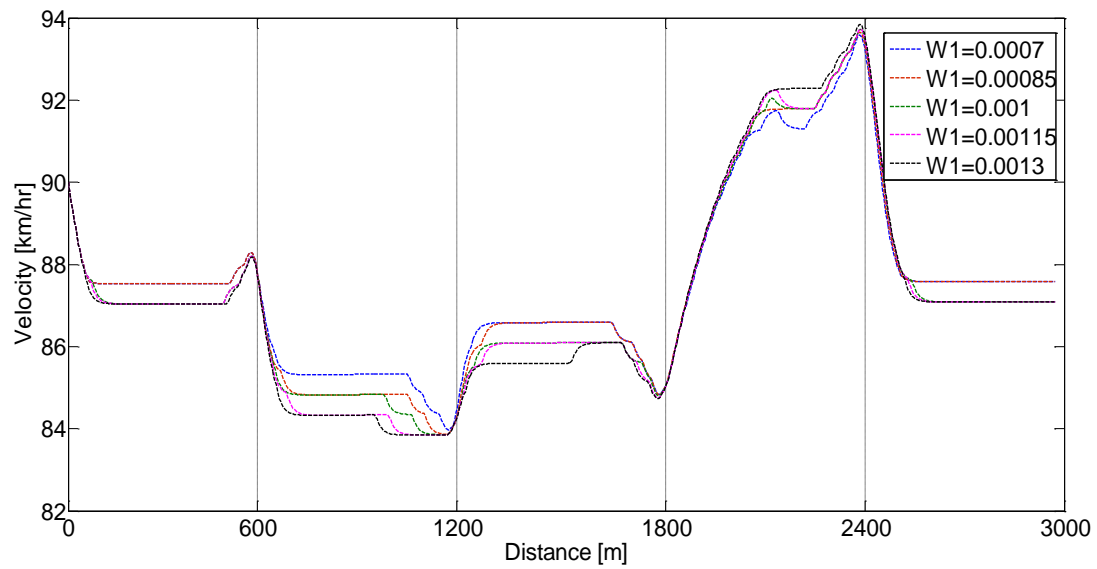


圖 4.41、引擎模式 w_1 車速變化

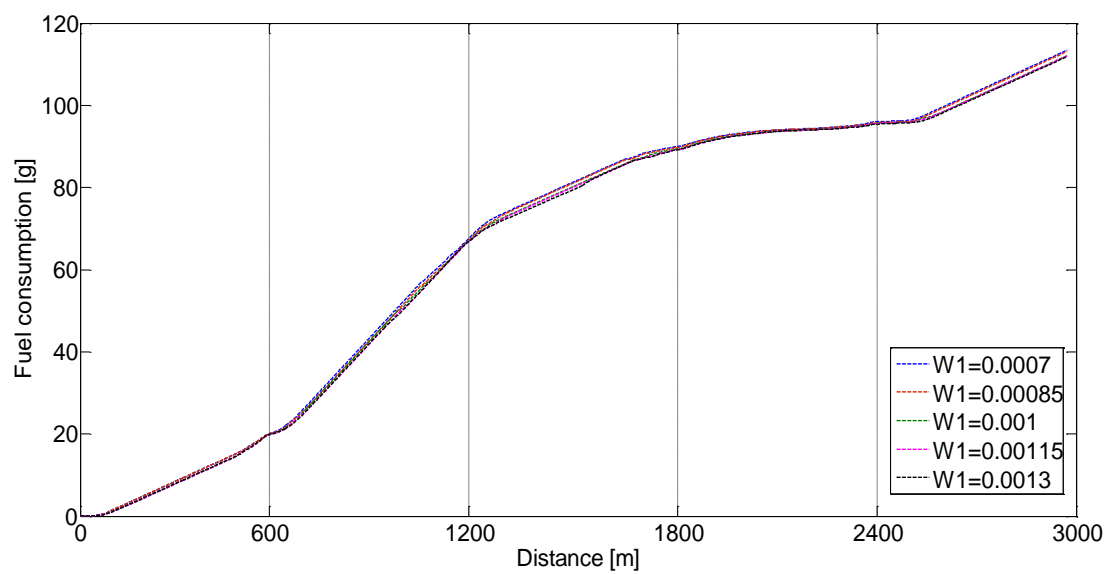


圖 4.42、引擎模式 w_1 變化能耗影響

純電模式

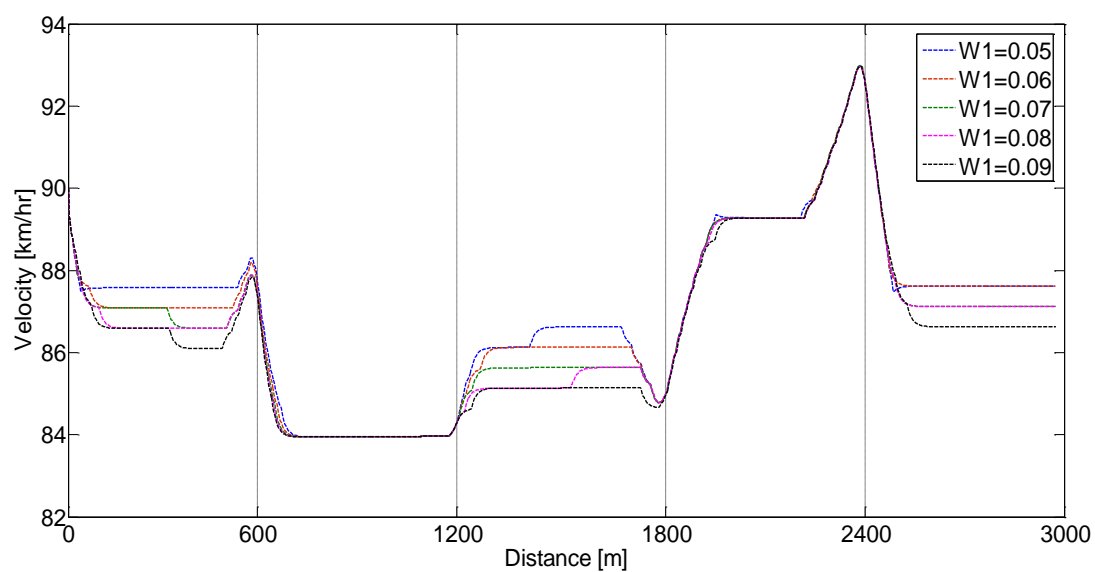
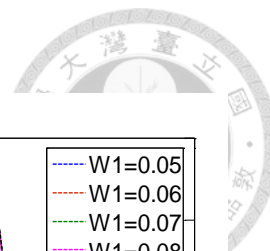


圖 4.43、純電模式 w_1 車速變化

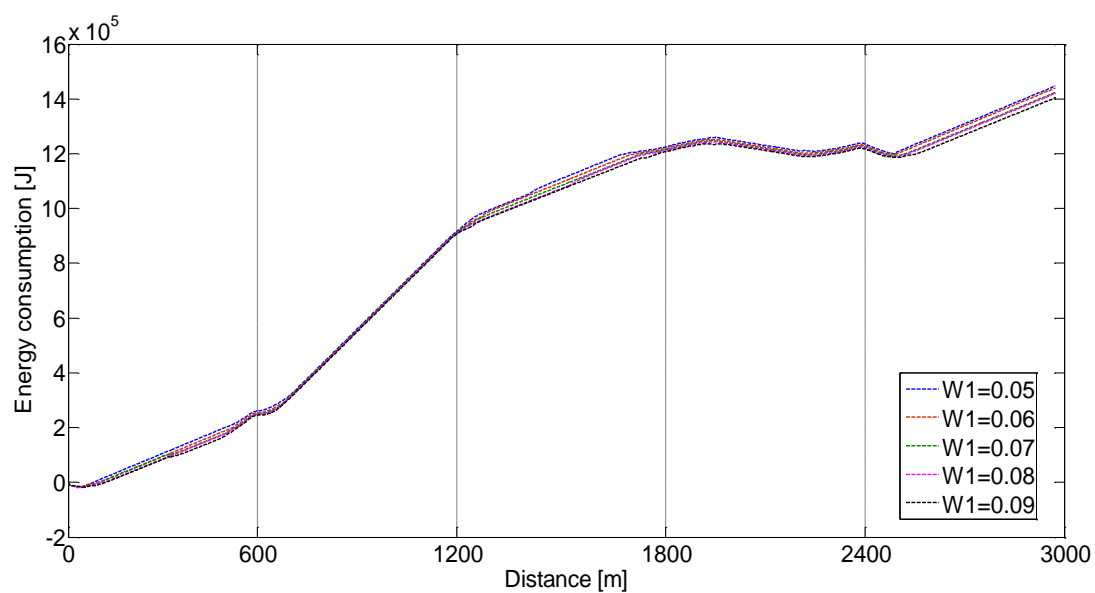


圖 4.44、純電模式 w_1 能耗變化

權重-距離設定巡航車速

引擎模式

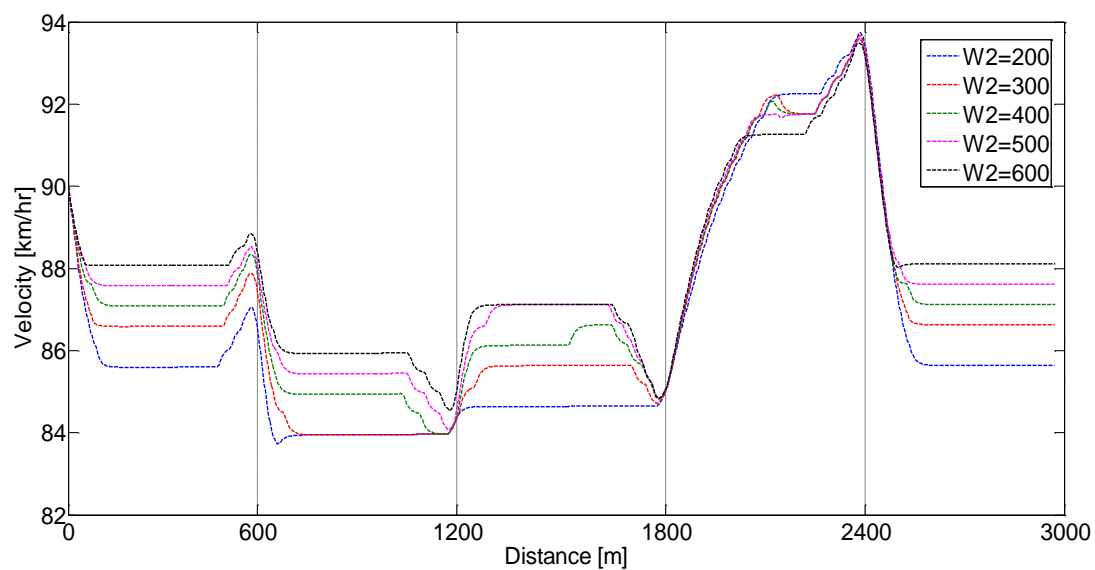


圖 4.45、引擎模式 w_2 變化車速影響

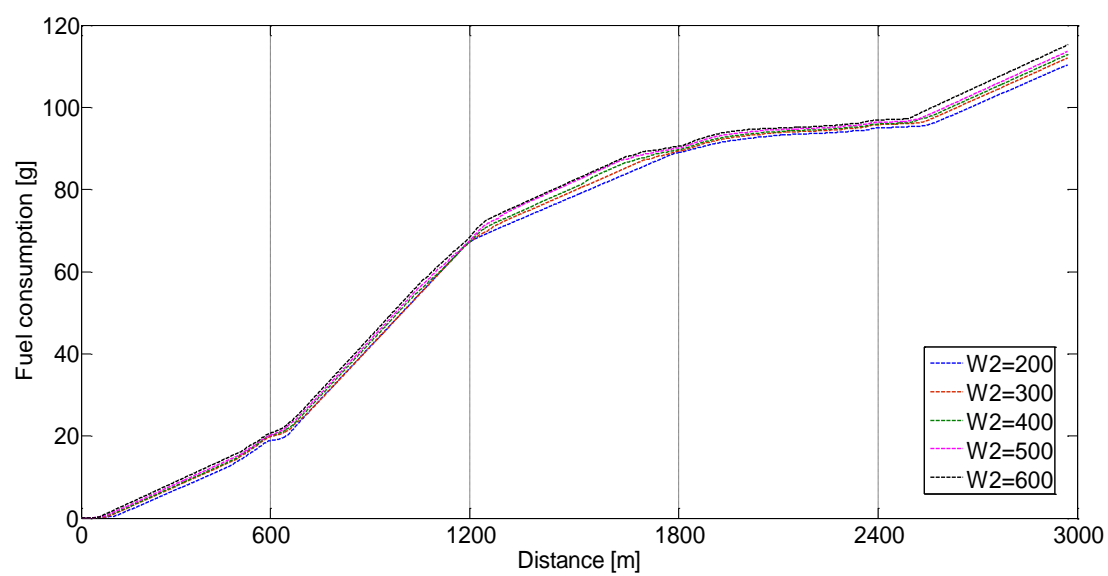


圖 4.46、引擎模式 w_2 變化之能耗變化

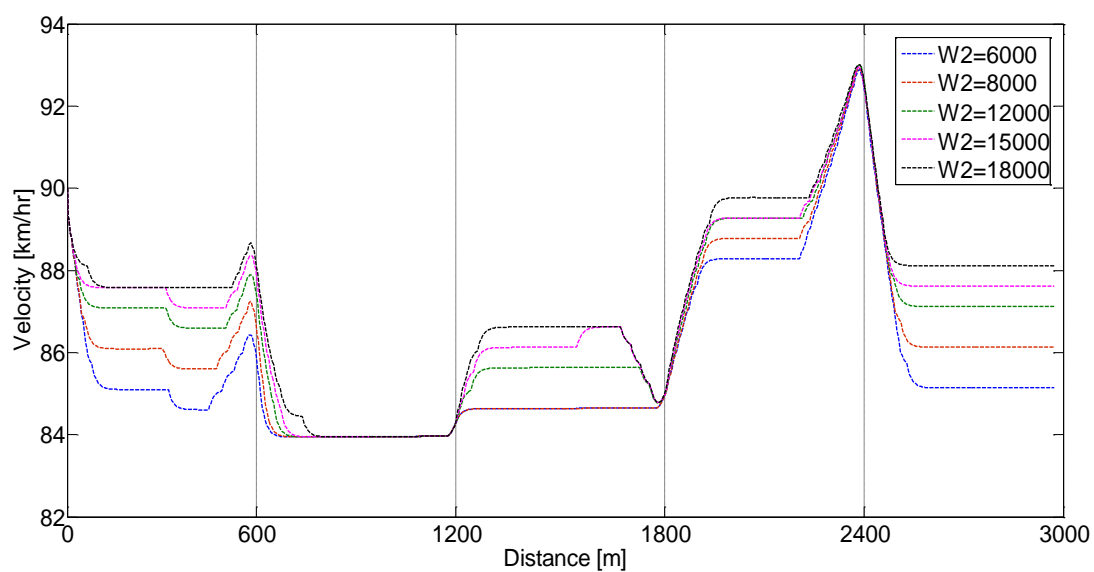
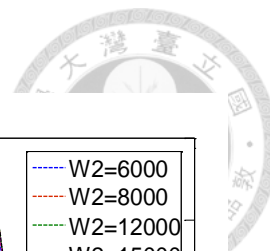


圖 4.47、純電模式 w_2 變化之車速影響

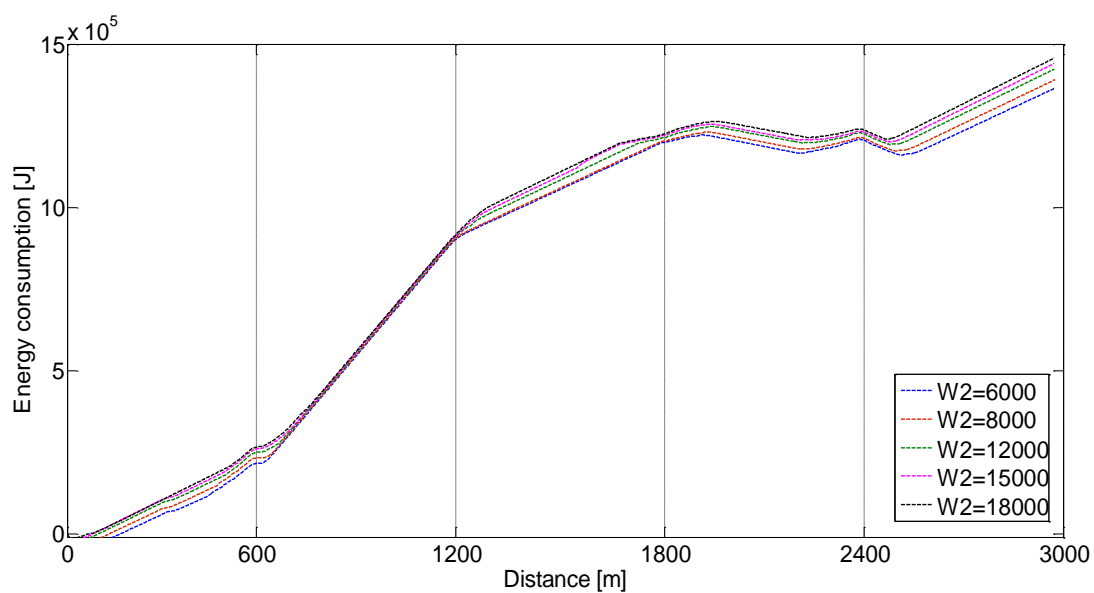


圖 4.48、純電模式 w_2 變化之能耗影響

在整個成本函數中，三項之間的關係是互相關聯的，但若要提供給車廠一個使用的參考值則將難以定義，在整個最佳化是以節能為主軸出發，故不論三個成本函數怎麼變化的結果皆比一般巡航駕駛有節能表現，故將進入此模式定義為 eco 模式與一般 cruise control 模式作區隔，接下來進一步在 eco 模式將第三項成本函數設計為幾種數值，代表著節能程度，從第三個權重比較可以看出，若是此項成本函數權重越高，代表著離設定巡航車速越近，但相對的其節能效果會相較變差，可將其視為駕駛者希望此節能駕駛的節能程度，駕駛者若接受車速變化遠離設定車速，那麼相對獲得之節能效益變越高，若無法接受，那麼就將第三項權重調高，但整體表現在進入 eco 模式後仍然是相較定速巡航更加節能的。



4.1.5 差異分析-不同巡航車速與權重關係

在成本函數中可以看到第二項與第三項權重不論駕駛設定之巡航車速在何處，皆不影響其成本效益，而在第一項權重直觀上能耗部分在高速巡航與較低車速巡航其能耗值會有所變動，在此以定速巡航以及節能巡航給予調節每小時 5 公里的幅度進行模擬各種不同設定巡航車速行駛後之能耗，由模擬結果可以看出實際中不論巡航車速設定為何，其設定之權重值並不需要進行調整，在每個區間皆有良好且差不多之節能效益，此是由於在第一項權重中代表著此預測路段內之能耗值，是以距離內能耗進行最小化，如果巡航車速降低，代表著單位距離內時間會等比例拉長，也就是相乘後權重比例一致，故此成本函數不論在任何巡航車速內皆可使用不須變動任何一項權重。

表格 4-4、引擎模式不同巡航車速之油耗

巡航車速[km/ hr]	定速巡航 油耗[g]	節能巡航 油耗[g]	油耗 百分比[%]
80	1345.2	1241.5	92.3
85	1448.7	1335.9	92.2
90	1564.5	1442.4	92.2
95	1691.2	1553.2	91.8
100	1829.3	1683.0	92.0

表格 4-5、純電模式不同巡航車速之能耗

巡航車速[km/ hr]	定速巡航 能耗[kJ]	節能巡航 能耗[kJ]	能耗 百分比[%]
80	12707.5	11584.1	91.2
85	14760.3	13504.7	91.5
90	17035.0	15581.1	91.5
95	19480.2	18029.9	92.5
100	21994.2	20242.1	92.0

4.1.6 差異比較-調節車速區間大小

將定速巡航車速定在 90km/hr，而節能巡航控制器則分別給予 ± 3 、 ± 5 、 ± 10 之變化區間，由於求解最佳化車速解析度越高，則其運算量將以指數成長，在此將其求解之解析度訂為 0.5 km/hr，也就是說最佳車速命令會落在 90 ± 0.5 、 90 ± 1 、 $90\pm 1.5\cdots$ 等數值。

在本章之節能巡航駕駛為賦予巡航控制調變車速之區間，駕駛者可以根據可接受的變化區間進行設定，接下來將針對行經一平地-上坡-平地-下坡之路段不同車速變化區間進行比較。

引擎模式

在車速調節的部分在起步時各個車速皆有調降車速的現象，為的是在平地上以較低速且穩定的車速行駛，在 90 ± 3 時之上坡路段由於變化區間的限制，最多只能下降到 87km/hr 行駛，但在上坡路段由於力矩控制器的參數設定，故會略低於其設定值，在所有節能巡航控制下，在進入上坡路段前都有預先提高車速以進入上坡路段，而在 90 ± 5 以上的變化區間可以看到，車輛在於上坡車速並不會一次降到最低，此是由於成本函數的限制，不讓車速永遠保持在最低速，而在控制器接收到前方道路坡度下降為平地時，將車速漸漸調降至最低剛好迎接到平地路段，此後再將車速調節回升，持續行駛至接近下坡路段時，模型預測控制接收到前方是下坡路段，故將車速放低，減少此段路之油門以及油耗，再接著下坡路段透過重力所提供之加速度行駛，其降至之低點會依照目前有多少車速變化區間而進行改變。

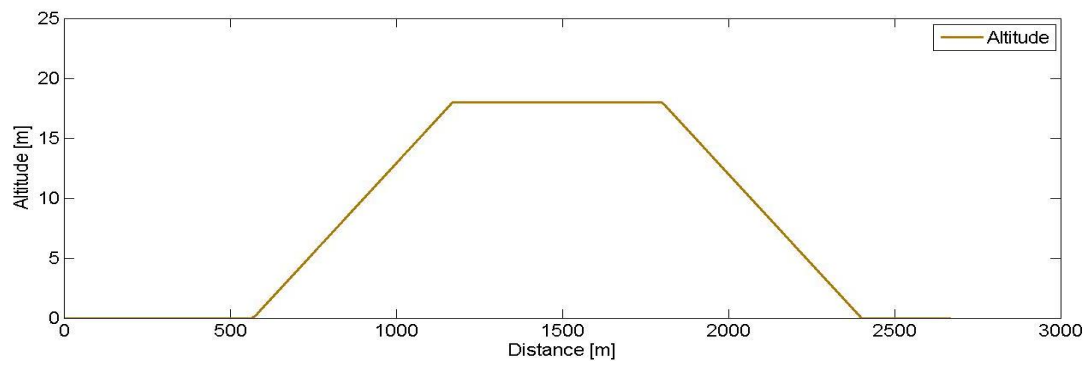


圖 4.49、+3%地形圖

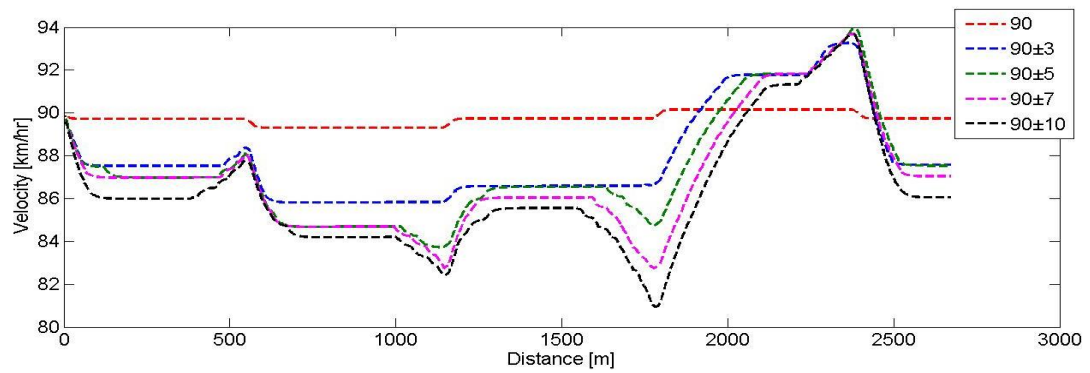


圖 4.50、定速巡航與不同車速變化

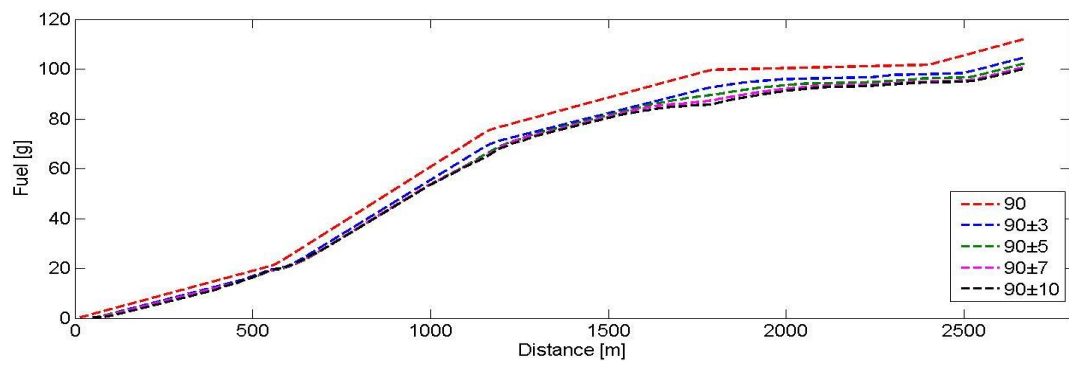


圖 4.51、油耗

表格 2-1 為行駛模擬油耗結果，綜括整個模擬結果而言，可以發現賦予之車速變化區間越大，其節能效果越顯著，到了 90 ± 10 有 10.7% 的節能效益存在，並且路程行駛時間並沒有因為節能駕駛而大幅增加，僅比定速巡航多了 2~4 秒的時間，就可以有 6~10% 的節能效益。但變化速度區間越大，就代表著離定速駕駛之意義越遠，同時速度區間越大，整個最佳化範圍也會增大，造成運算量的負擔，且由表格可以發現速度變化區間越大雖然能耗越小，但有邊際效益 (Marginal Effect) 遞減的現象，增加之變化區間並沒有達到等比例的能耗減少，故變化區間設計太大並非符合成本之結果。

表格 4-6、油耗結果比較

車速 [km/hr]	Fuel [g]	Normalized [%]	Time [s]
90	112.01	100	107.0
90 ± 3	104.61	93.4	109.4
90 ± 5	102.20	91.2	110.1
90 ± 7	100.78	90	110.7
90 ± 10	100.08	89.3	111.5

純電模式

在純電 EV 模式下節能巡航駕駛之能耗表現將在此小節呈現，在此模式下之成本函數形式與前面相同，但在能耗模型部分將油耗模型改為電能能耗，相關細節可以參照第三章，在此模擬以純電模式行駛過一平地-上坡-平地-下坡之路段。

在純電模式下與引擎模式其在平地與上坡等之能耗表現趨勢類似，其主要取決於成本函數的設定，主要差異在於路段多了馬達回充的能量。

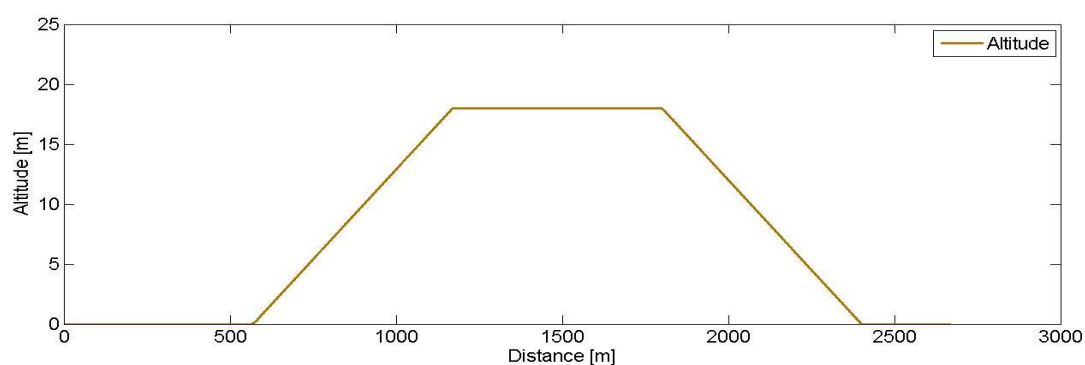


圖 4.52、地形圖

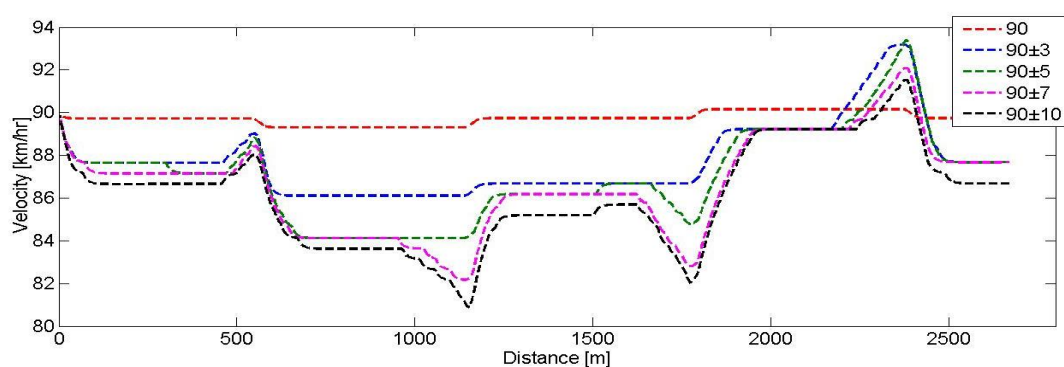


圖 4.53、車速變化圖

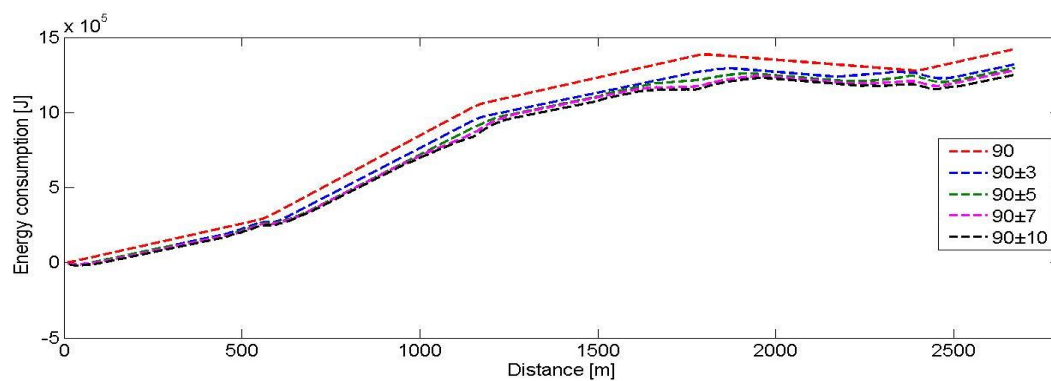


圖 4.54、能耗變化圖

表格 4-7 為行駛模擬電能能耗結果，與引擎模式一樣，賦予之車速變化區間越大，其節能效果越顯著，到了 $90\pm 10\text{km/hr}$ 有 12.1% 的節能效益，從圖 4.54 可以看出拉開能耗最明顯的部分在於下坡路段前之減速以及下坡路段的能量回充，但變化速度區間越大，就代表著離定速駕駛之意義越遠；而速度區間越大，整個最佳化範圍也會增大，造成運算量的負擔，且由表格可發現速度變化區間越大能耗越小，但同樣地亦具有邊際效益遞減的現象，增加之變化區間並未達等比例的能耗減少。

表格 4-7、純電模式能耗比較

車速[km/hr]	Energy consumption[kJ]	Normalized [%]	Time[s]
90	1421.0	100	107.1
90 ± 3	1319.1	92.8	109.6
90 ± 5	1295.6	91.2	110.5
90 ± 7	1279.9	90.0	111.0
90 ± 10	1250.0	87.9	111.7



4.2 節能巡航安全與跟車

在 4.1 節裡只考慮了單輛汽車之節能巡航控制，其為車輛的定速巡航駕駛行為帶來了節能性的進步。為使整個節能巡航系統更加完整，同時兼具安全性與節能性，在本章節裡將幾種常見之安全車速考量給納入考慮，並加入節能巡航之車速限制式內，在後半部將第二輛車及跟車系統亦加入考慮，以提供未來車隊、適應性巡航控制器等作為參考。在本章節主要談論為功能效果性，故以下模擬僅以純電 EV 模式之結果進行探討。

4.2.1 安全過彎車速調節

先前章節中僅考慮車縱向車速計算，但若當遇到有不相同之情境如曲率的路段，如同樣以縱向模型所求之車速進行行駛則可能會導致打滑或者無法順利過彎等狀況，因此必須將安全過彎的情境給納入考量。在偏航穩定控制方面已經有許多人投入研究，本研究所屬為最上層之車輛控制器，將以最綜觀的角度但不失安全原則去訂定過彎安全車速，故不採用複雜之車輛模型來計算安全過彎車速。最大安全過彎車速由各種參數影響，例如道路表面參數、輪胎參數以及各種車輛參數上的限制，本研究將透過地圖資料預先取得前方道路之曲率，預先將車速降至安全之過彎速度，將可免於多於之煞車介入或者需要透過主動式差動驅動去避免掉打滑的狀況，使得整個駕駛行為更加安全。

在決定安全過彎車速上，由[35]所提及在傳統過彎車速之安全穩定上，將車輛視為一個 Point mass model(PMW)，此質量點於過彎處之穩定性由(4-4)所示，在不同的曲率 R 下安全過彎車速 V_{safe} 將由過彎時之向心加速度提供，在車輛道路上為地面所提供之摩擦力 f 。

$$m \cdot \frac{V_{safe}^2}{R} = m \cdot g \cdot f \quad (4-4)$$

$$V_{safe} = \sqrt{R \cdot g \cdot f} \quad (4-5)$$

由(4-5)推得，過彎之速度所產生之離心加速度之安全性若是在面對極端的狀況例如雪地等，此時地面所能提供之摩擦力相當小，亦或旋轉半徑非常小，否則在一般道路狀況下在時速 90、100 公里正常路面上並不會發生過彎失速等現象，但並不代表所有過彎皆可以以如此高速下進行，亦必須考慮到乘客之舒適度等，由[36]可將在側向之加速度 a_h 與乘客舒適度簡單分為表格 4-8

表格 4-8、側向加速度值與乘客舒適度

加速度值(m/s^2)	乘客感受
$a_h < 1.8$	一般、舒適
$a_h < 3.6$	感受到不適
$a_h > 5$	無法忍受

在此段模擬中，將會以乘客過彎時之舒適以及安全之側向加速度值進行過彎速度的限制式，避免在過彎時有過高之車速。此模擬中，將以一段長為 1800 公尺之平地-下坡平地-路段如圖 4.55，在路段上設計了一個 45° 的轉彎以及 30° 之過彎情境圖 4.56，其旋轉半徑分別為 150 公尺以及 180 公尺。

由車速之模擬結果來看，圖 4.57 顯示之車速限制在一般直線道路上為每小時 90 公里，但在進入有曲率之路段時之車速限制則降低。節能巡航控制在配合上過彎時之車速限制後，能在抵達過彎處前將車速降至速限以下以適當之車速過彎，從側向加速度之 g 值可以看到，在原本沒有過彎車速考量之節能巡航控制將會產生超過 0.4g 的加速度，其值將會使得乘客感受到不舒服，而在考量過彎車速之節能巡航控制其側向加速度值在乘客不會感受到明顯壓力之值，而在過彎時之中心路線誤差由於路面狀況並不是非常極端，故兩者都沒有發生打滑之情形，但在中心誤差上可以看到在過彎時在車速過快情況下會有偏離太多的問題，嚴重時將會超出軌道之外，透過此模擬結果節能巡航控制器在結合地圖資料給予車速限制式的方式將能有效改善過彎安全與乘客舒適度之問題。

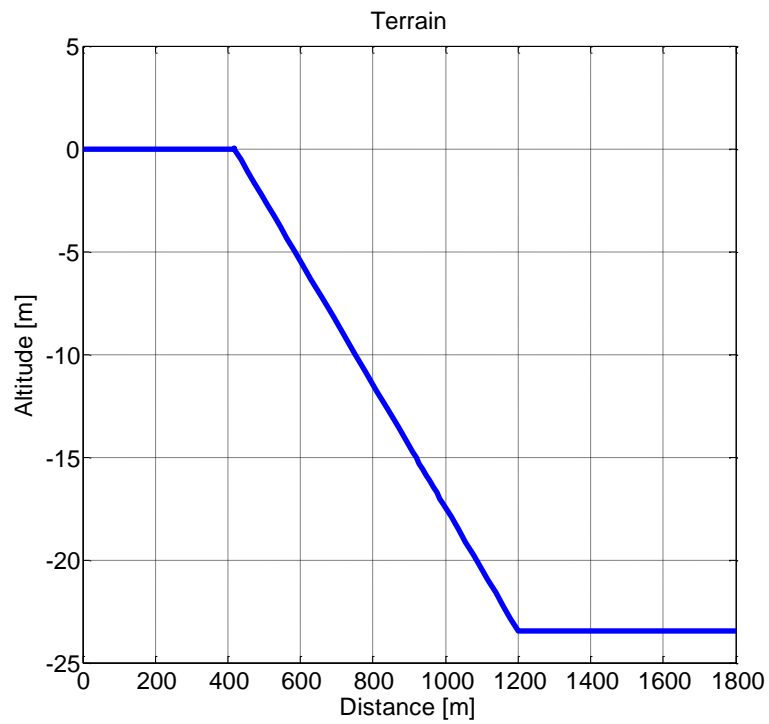


圖 4.55、模擬坡度圖

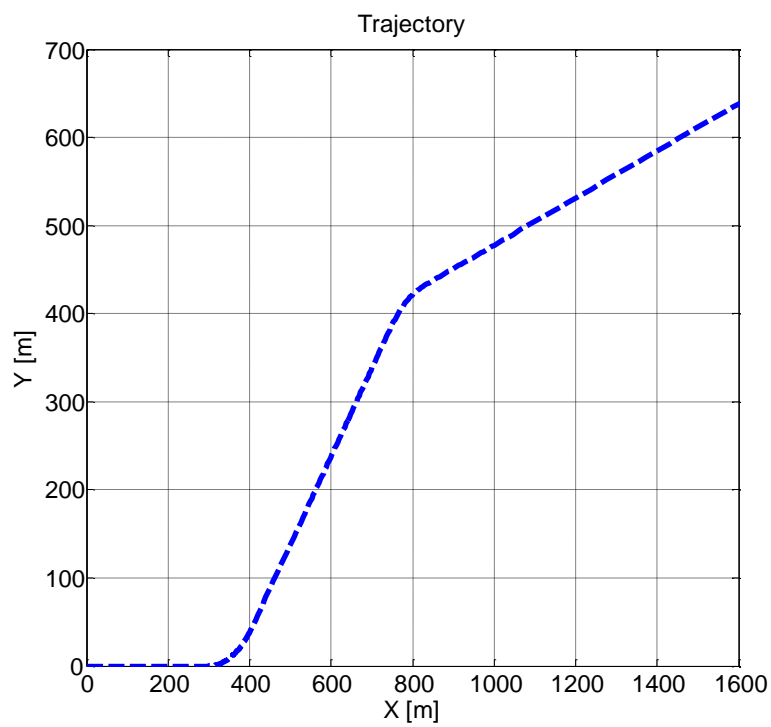


圖 4.56、平面軌跡圖

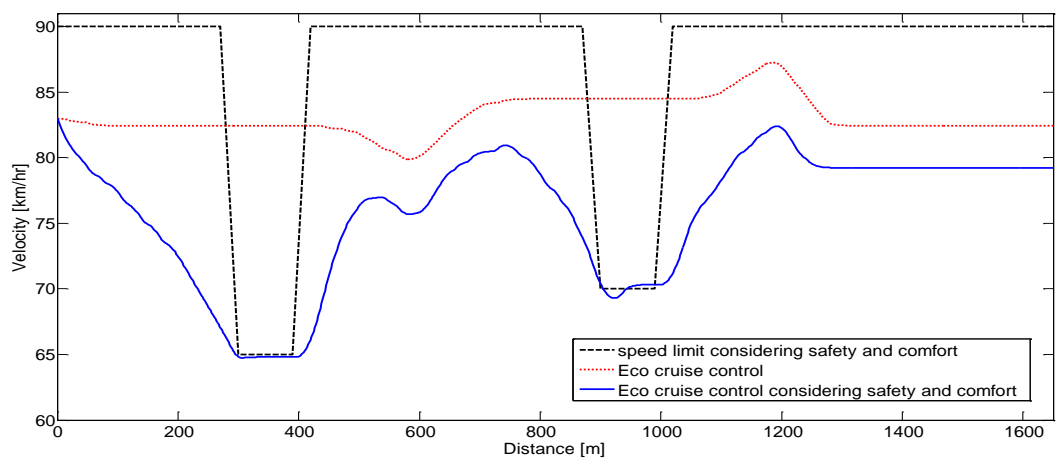


圖 4.57、安全過彎度車速圖

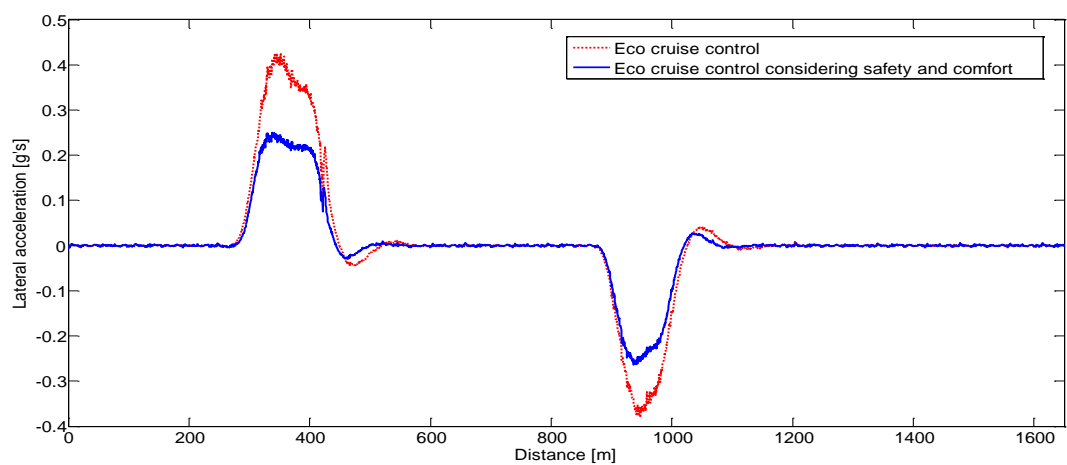


圖 4.58、安全過彎側向加速度圖

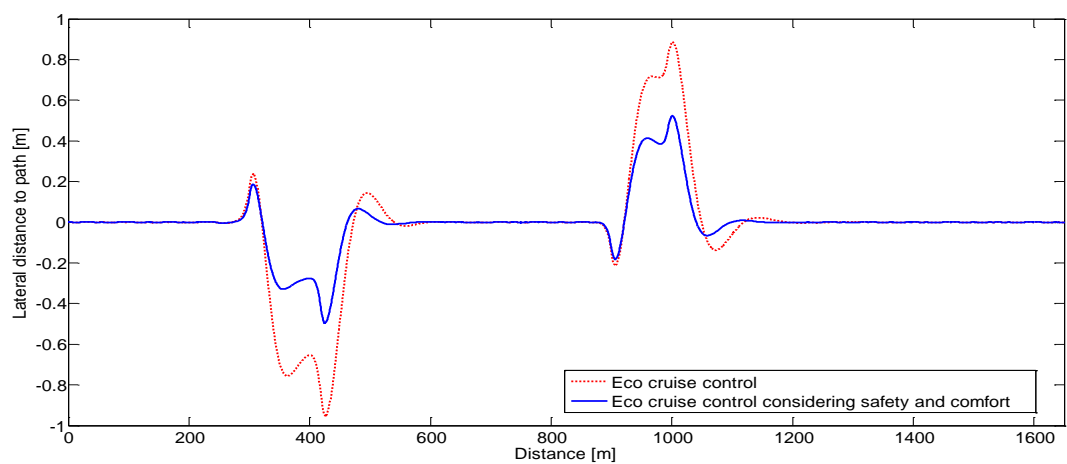


圖 4.59、安全過彎道路中心誤差圖

4.2.2 節能巡航 ECC/適應性巡航 ACC 切換

控制邏輯與模擬設計

本研究所發展之智慧化節能適應性巡航(Eco-Adaptive Cruise Control)系統，其功能包含 Eco-Cruise Control(Eco-CC)與 Adaptive Cruise Control(ACC)之功能，其情境描述如下:車輛具備有節能巡航駕駛系統之車輛以在一地形起伏之高速公路上，根據駕駛設定之巡航車速進行節能巡航控制(Eco-CC)，駕駛便無須再控制油門，車子將持續進行巡航控制直到前方偵測到低速/安全距離內之車輛，系統為安全起見進而減速保持安全距離，進行跟車直到前方車輛換車道或者加速離開。

由以上描述可知節能適應性巡航控制器必須具有節能巡航控制以及等距離追隨控制的功能，期望將兩者整合後不僅擁有節能性亦包含安全性。由於本研究並沒有針對適應性巡航控制之跟車距離等進行最佳化，僅做功能上之延伸，故在 ECC 與 ACC 之切換上以邏輯判斷進行切換，使節能巡航控制能同時兼顧節能與安全。

在 ECC/ACC 邏輯切換上如圖 4.60，在道路行駛上會透過雷達等感測器接收到前方車距以及圖資相關資訊，若與前方車輛距離大於理想車距代表著前方尚無車輛，則持續進行 Eco-CC，若前方感測到車輛且車速小於設定之巡航值，為了安全起見便進入 ACC 模式，直到前方車輛車速高於設定值並離開理想距離後，便切換回原來之 ECC 模式。



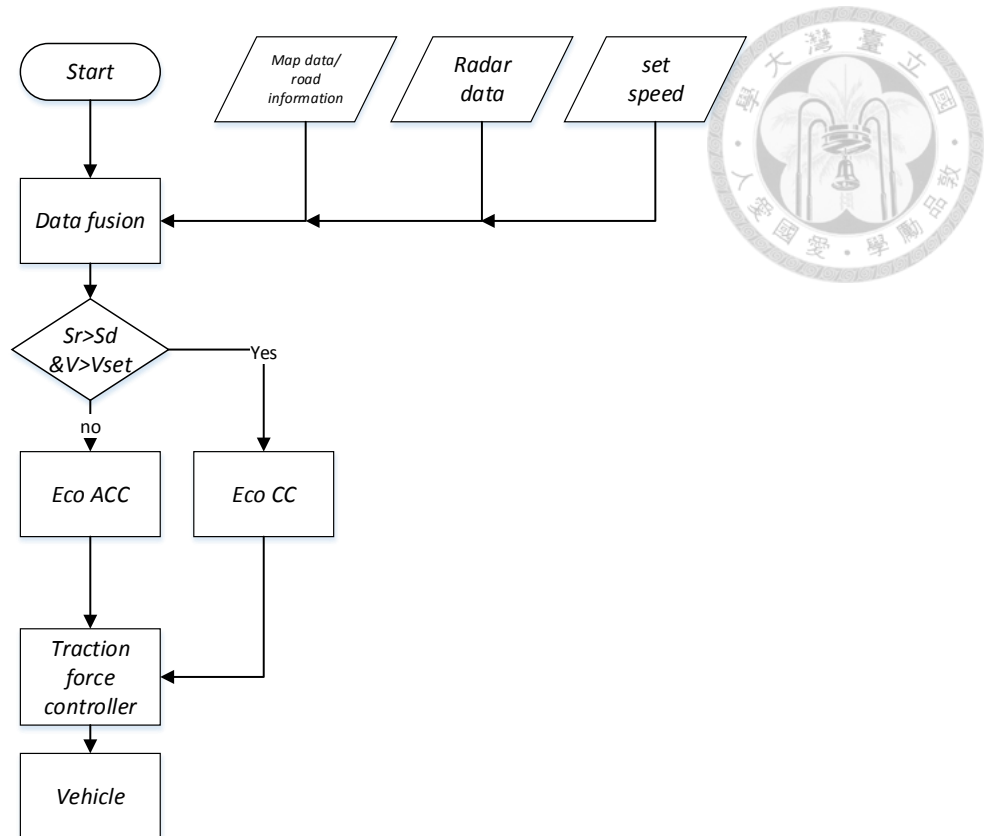


圖 4.60、ACC/ECC 切換

模擬情境之驗證為 Eco-CC 行駛於有坡度變化之道路上圖 4.61，藉由感測器感測到前方有車輛進入理想車距內，並且車速低於設定之巡航車速，為了安全必須切換為 ACC 模式保持與前車之距離，直到前車加速離去後，切換回原本之 Eco-CC 模式，以下將以 A 車代表前車，B 車代表後車進行描述。

表格 4-9、A 車參數

初始位置	60 m
初始車速	87km/hr
模式	Cruise Control
	車速由模擬內容設定如圖 4.62

表格 4-10、B 車參數

初始位置	0 m
初始車速	90 km/hr
模式	Eco Cruise Control / Adaptive Cruise Control
	90±5 km/hr
時間車距	1.6 sec
靜止車距	25 m

在初速方面，A 車為 87km/hr 而 B 車由 80km/hr 開始行駛，由 ACC 系統其控制法方程式(3-57)、(3-58)，其理想車距 S_d 約落在 65 公尺上下變動，意指若 B 車與 A 車之距離接近到 65 公尺以內時，則必須切換至 ACC 控制以保持距離以確保安全，由圖 4.63 圖 4.64 可以看出在前半路段由於在上坡路段，ECC 系統將 B 車車速控制低於 90km/hr，故兩車實際距離是持續拉開的，直到下坡路段 B 車開始加速後，兩車相對距離開始拉進，到 120 秒左右便進入了理想車距範圍，B 車之巡航控制系統便將模式切為 ACC 進行等距離跟車，直到 A 車離開理想車距且車速高於巡航設定值 90km/hr 後，B 車之巡航控制系統便將模式切回 ECC 進行車輛控制，透過此方法可見本研究所開發之節能巡航控制可以與現有之車用 ACC 系統進行模組化整合，而不須將整套巡航系統重新開發。

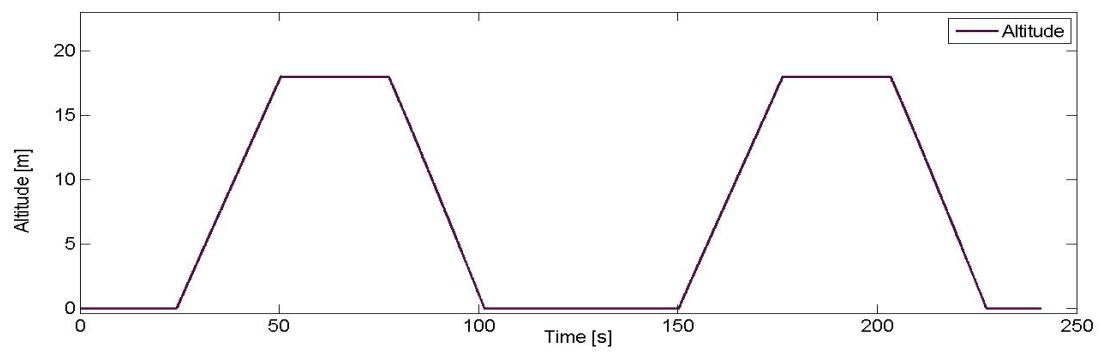


圖 4.61、地形圖

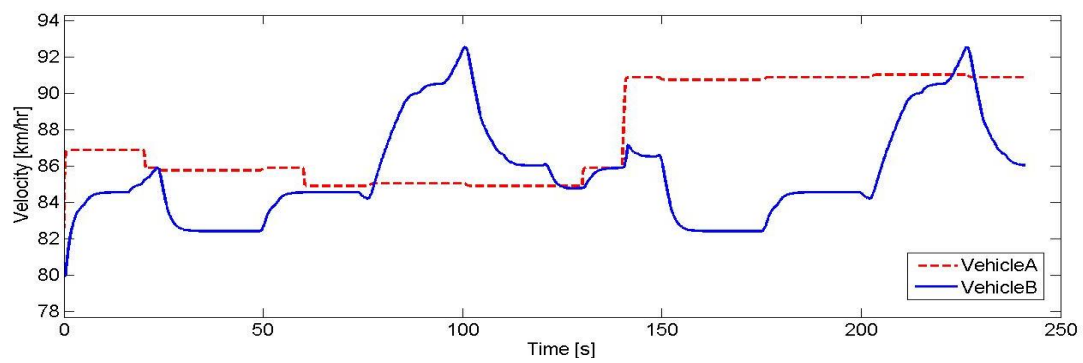


圖 4.62、A 車、B 車之車速圖

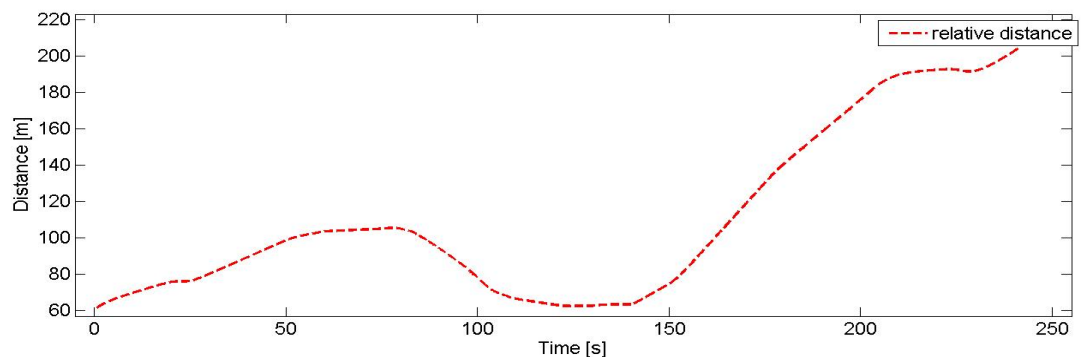


圖 4.63、兩車相對距離

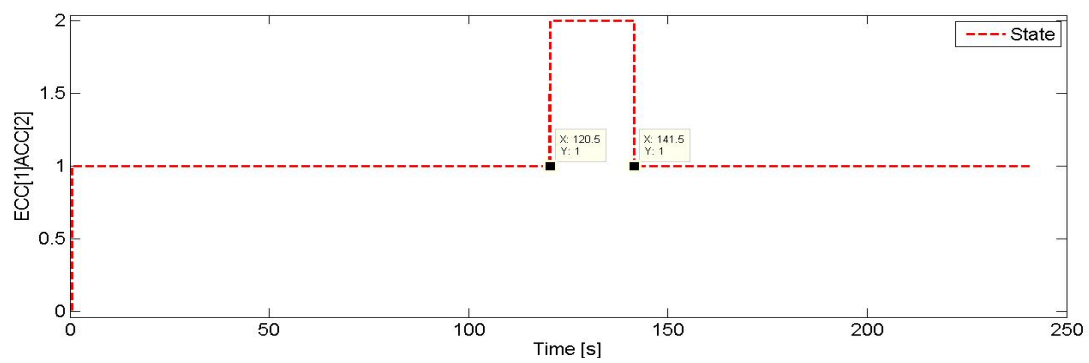


圖 4.64、模式切換狀態

4.2.3 節能巡航跟車

在一般車輛上設置高級車用運算單元以及感測設備僅限於車廠實驗車上，尚未普及於一般車輛，因此並非每台車都具有完善的車載資通訊系統，但若目前以利用車隊、跟車系統即可僅以少數的車輛配備有完善設備，執行領頭羊的功能，而剩餘車輛以車隊方式行駛達到同樣目的，在本小節模擬情境即以此想法構想，將前車配備有完善車載資通訊設備，並搭載有前述章節之 Eco- cruise control 系統，而後車僅需配備有發展完全之 Adaptive cruise control 系統進行跟車行為，以前面章節所敘述，前方之車輛將進行節能巡航控制將有能耗上的節省，而後車以跟車模式是否也能對於油耗方面有所改善，其示意圖如圖 4.65

在前車(A 車)配備有 ECC 的情況下以等速/節能巡航行駛過一段坡度地型，而在後車(B 車)則以 ACC 模式進行等距離跟車，這其中代表著跟車距離、加速性也會影響 B 車能耗結果，在此 A、B 車之參數如表格 4-11、表格 4-12 所示

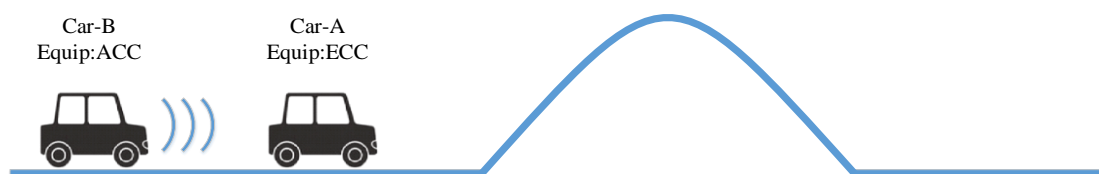


圖 4.65、節能巡航跟車示意圖

模擬情境參數

在此小節以功能取向，以純電模式進行模擬驗證，不再另外進行引擎模式之模擬，此模擬行經路段為平地-上坡-平地-下坡-平地之路段，其坡度分別為 $\pm 6\%$

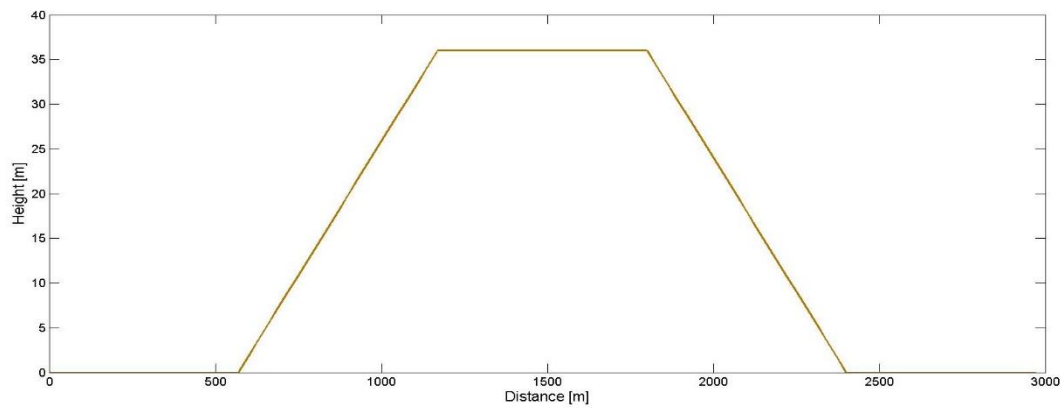


圖 4.66、坡度 $\pm 6\%$ 路段

表格 4-11、A 車資料

初始位置	60 m
初始車速	90km/hr
模式	Eco Cruise Control / Cruise Control
	90 \pm 5 / 90 km/hr

表格 4-12、B 車資料

初始位置	0 m
初始車速	90 km/hr
模式	Adaptive Cruise Control
時間車距	1 sec
靜止車距	30 m

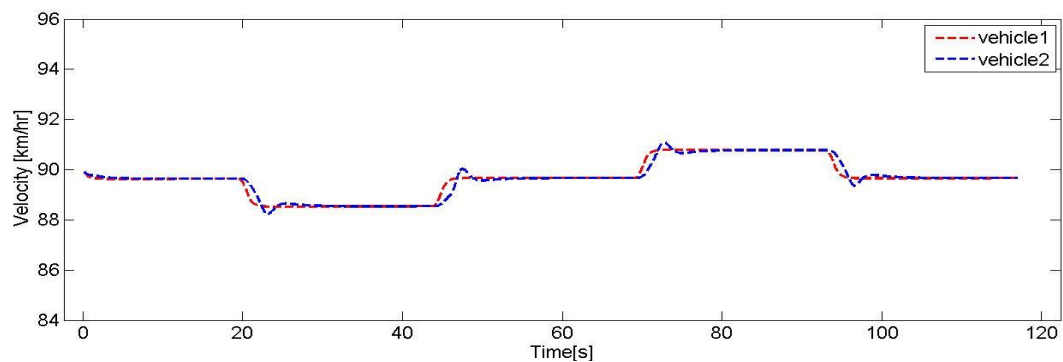


圖 4.67、定速跟車車速圖

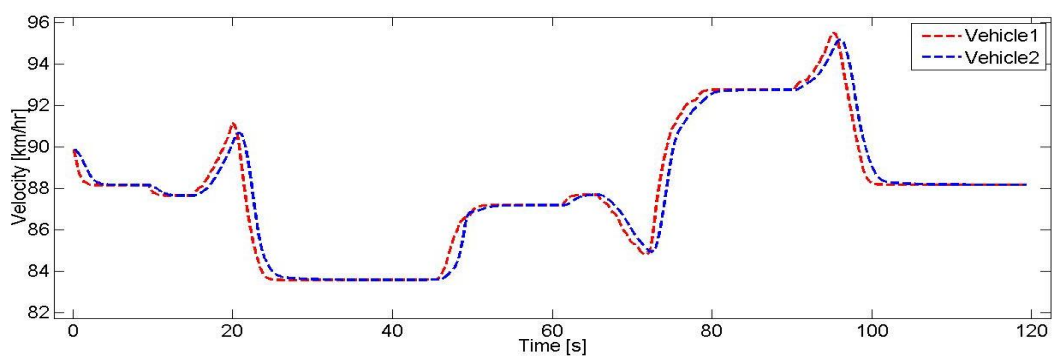


圖 4.68、節能巡航跟車車速

在模擬結果表格 4-13、節能巡航跟車模擬結果整理中，A 車代表前車配備有節能巡航駕駛控制器以進行節能巡航，B 車代表配備有適應性巡航控制器保持與 A 車的距離進行跟車，由表格結果顯示，B 車僅需要跟著 A 車進行行駛，便能有 5.9%之節能效益，代表著 B 車並不需要配備有昂貴的感測器以及通訊設備等，僅需以雷達進行跟車，這對於發展高速公路節能車隊極富參考價值。

表格 4-13、節能巡航跟車模擬結果整理

	B 車能耗 [kJ]	Normalized [%]
A 車定速巡航	1621.3	100
A 車節能巡航	1526.8	94.1

第五章 硬體迴路模擬



5.1 馬達動力平台耗能實驗量測

在電動車中，馬達為主要的耗能元件，也是最重要的動力輸出元件，若對於馬達在於動力輸出端之耗能有所掌握，對於提升電動車之性能將有很大的幫助，在本實驗中將利用馬達平台對於本研究所提出之節能巡航控制純電模式下的行車進行模擬，根據研究內容以及相關實驗平台進行驗證設計，以下將進行實驗平台的設計及驗證說明。

5.1.1 馬達動力平台

在本研究中純電模式下之動力系統組成為透過前軸永磁同步馬達以及後軸之感應馬達所構成，其兩顆皆為功率峰值皆可達 100kw 之高功率馬達，目前台大先進動力中心有一高功率 100kw 感應馬達以及本實驗室自有之 28kw 之永磁同步馬達，可構成本研究在於 EV 行車模式下之前軸一 PMSM 以及後軸一 IM 的動力系統，故採用此模式作為驗證節能巡航駕駛系統的可行性與能耗表現。

表格 5-1、動力平台馬達規格

	動力計馬達	感應馬達	永磁同步馬達
功率	250kw	100kw(peak)	28kw(rated)
扭矩	500N-m	200N-m(peak)	180N-m(rated)
轉速	15000rpm	11000(peak)	1350rpm(rated)

在台大先進動力中心之馬達動力平台目前架構如圖 5.1，AVL PUMA 為一中控平台，其將所有訊號傳送彙整後進行蒐集儲存，並由此下達控制命令，左側待測馬達及待測驅動器代表著電動車之動力系統馬達輸出力矩，而另一側為 250kw 高功率馬達負載端，用來提供馬達負載，造成阻力以模擬馬達在車輛上運轉時所受到的負載，待測馬達與負載端馬達間會以連軸器相接，並有扭力計以及轉速計以量測馬達之扭矩與轉速，而輸入待測端馬達之三向電流功率經由功率分析儀進行量測。

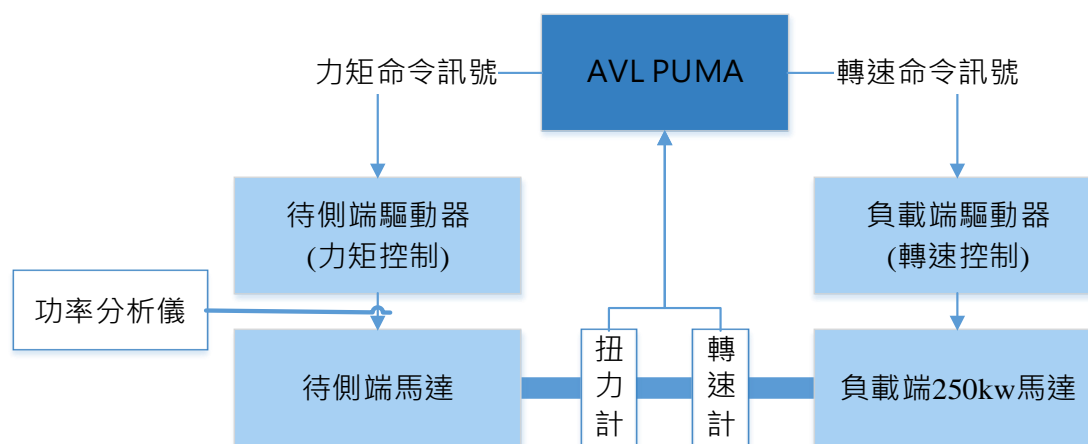


圖 5.1、馬達動力平台

在本次實驗中將依據模擬結果之資料進行實體馬達驗證，本研究中模擬架構如圖 5.2，在此架構中節能巡航控制器將計算出一節能車速給予力矩控制器，而力矩控制器將輸出力矩命令給予車輛模型進行控制，其中此段之力矩資料將被儲存下來，而在經過車輛動態響應後之各馬達轉速資料也將儲存下來，將這兩筆資料透過 PUMA 分別下達力矩命令給予待測端以及轉速命令給予負載端圖 5.3，並由待側端之功率分析儀來收集能耗結果，進行不同駕駛方法之節能效益比較。

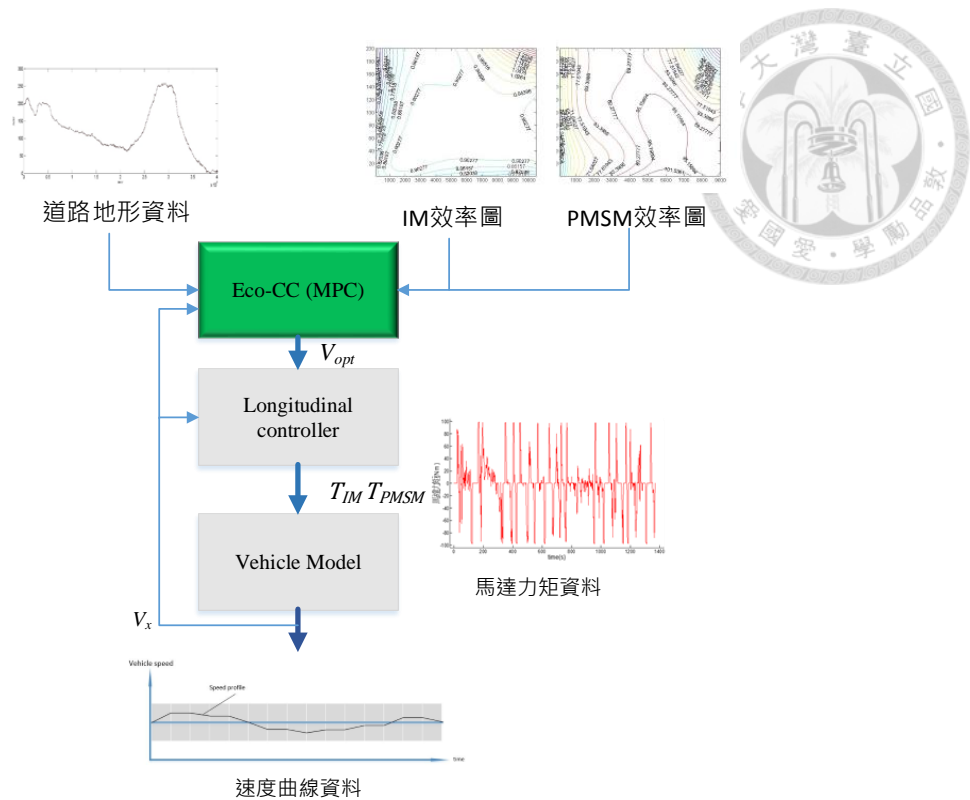


圖 5.2、模擬架構

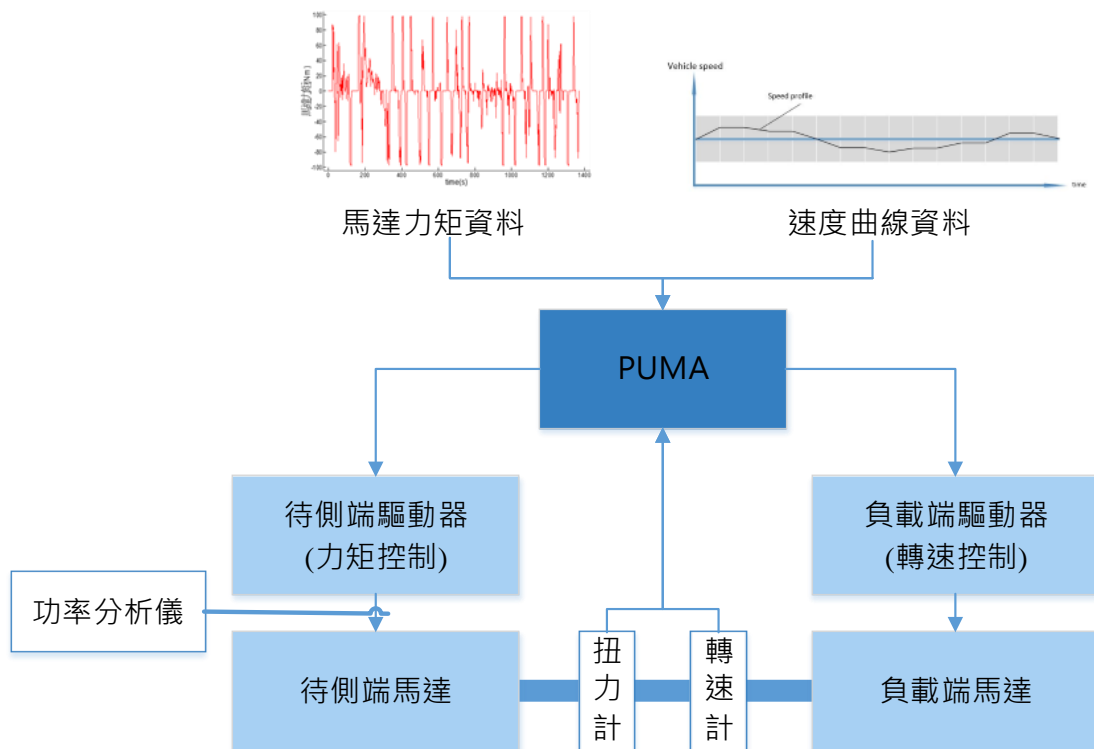


圖 5.3、透過 PUMA 輸入力矩轉速資料

5.1.2 實驗設備

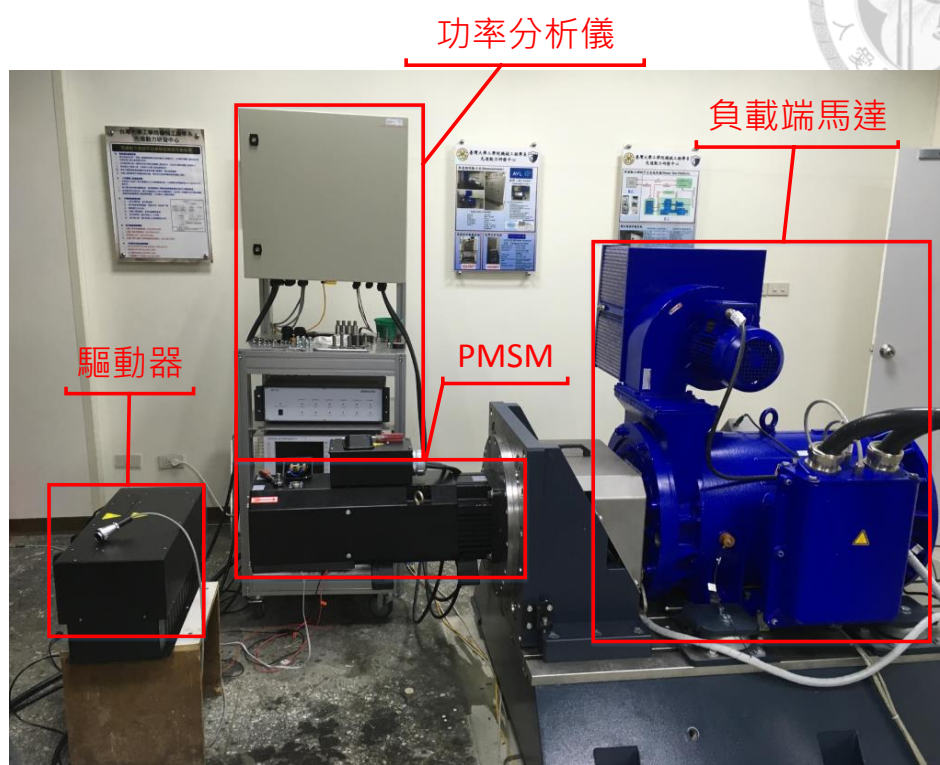


圖 5.4、馬達動力平台與永磁同步馬達

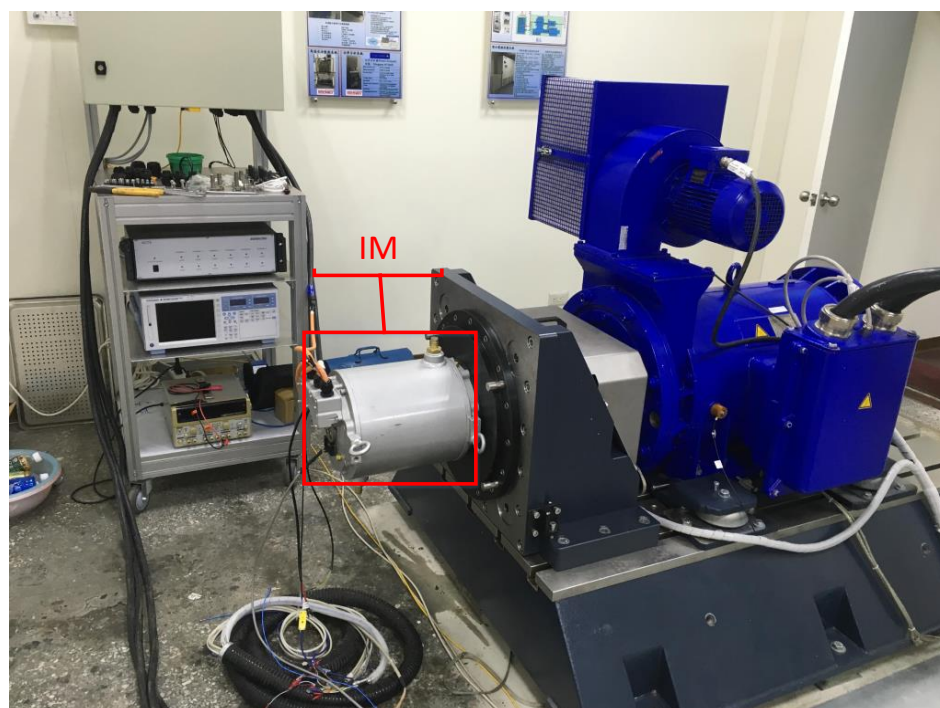


圖 5.5、馬達動力平台與感應馬達

輸入馬達之三向電流會先經由功率分析儀量測圖 5.6 及收集數據後接上馬達，相關資料皆會透過 AVL PUMA 圖 5.7 進行彙整蒐集。



圖 5.6、三向電流量測與功率分析儀

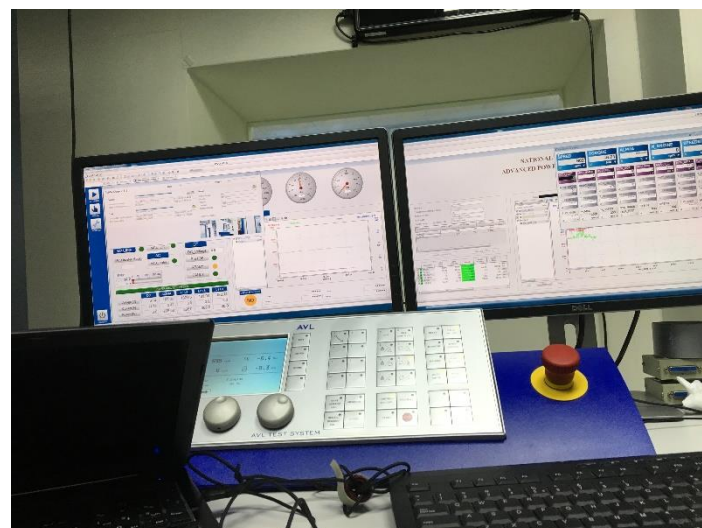


圖 5.7、AVL PUMA 操控平台

5.1.3 TN 轉換

在先前的模擬中，前軸之永磁同步馬達為 100kw，而實驗室之永磁同步馬達為額定 28kw 之馬達，其驅動器設定在額定，無法以更高轉速，力矩做動，其相關力矩轉速資料如圖 5.8，為符合原本車體之永磁同步馬達，將力矩與轉速以以下比例進行調整，將轉速與力矩座標上做了轉換(5-1)、(5-2)，也就是在模擬中任一操作點之轉速將等比例轉換於實際馬達上，並根據實際馬達上之效率圖以及響應回饋於模擬結果中。

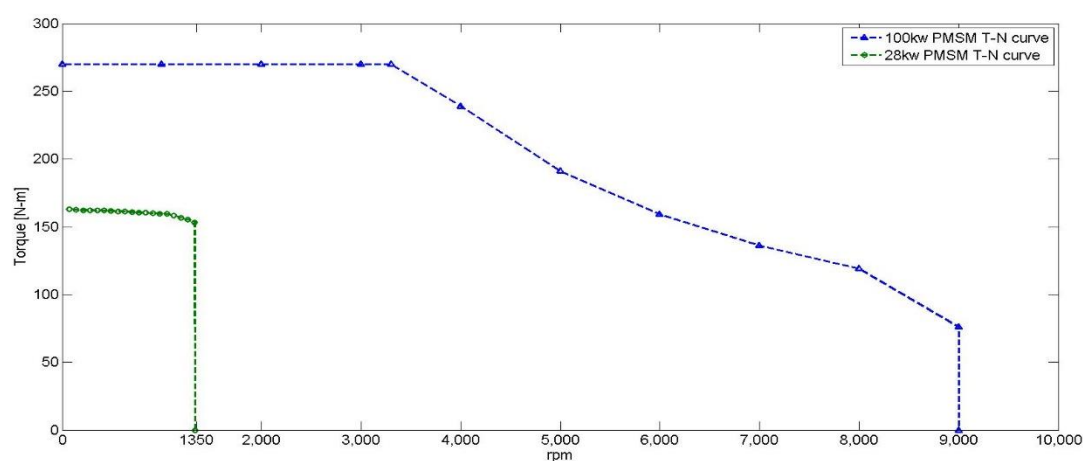


圖 5.8、永磁同步馬達轉速力矩圖

$$\omega_{sim} = 6.75 \cdot \omega_{real} \quad (5-1)$$

$$T_{sim} = 1.5 \cdot T_{real} \quad (5-2)$$

其中 ω_{sim} 、 T_{sim} 代表模擬混合動力車之高功率永磁同步馬達轉速， ω_{real} 、 T_{real} 為實際馬達之轉速與轉矩。

表格 5-2、永磁同步馬達規格表

	研究內永磁同步馬達	實際永磁同步馬達
功率	100[kw](peak)	28kw(rated)
轉速	9000[rpm](peak)	1350(rated)
力矩	270N-m(peak)	180(rated)

5.1.4 馬達效率圖建立

由第三章所使用之 IPM 方法，針對此兩顆馬達進行 IPM 策略之動力分配，在此先進行兩顆馬達的效率圖量測，馬達效率圖量測步驟如下，首先利用負載端將馬達轉速固定為 500rpm，接著給予 10% 的扭矩命令，等待轉速與力矩數值穩定後記錄功率分析儀之輸入功率、力矩與轉速感測器之值，最後將輸入功率與機械功率相除即為此操作點之效率，而後將力矩命令提升為 20%，並記錄數值，重複上述步驟直到將操作點皆量測並記錄。

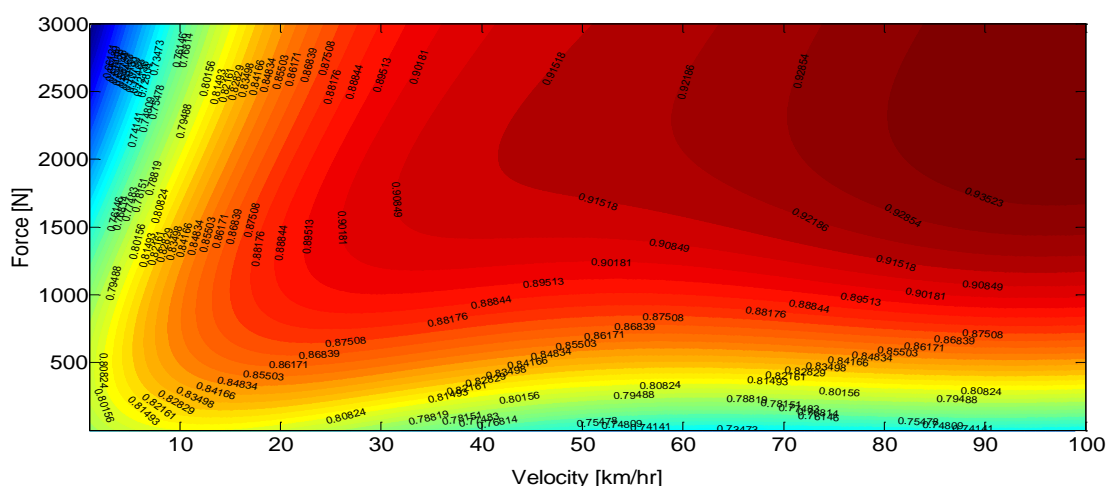


圖 5.9、永磁同步馬達效率圖

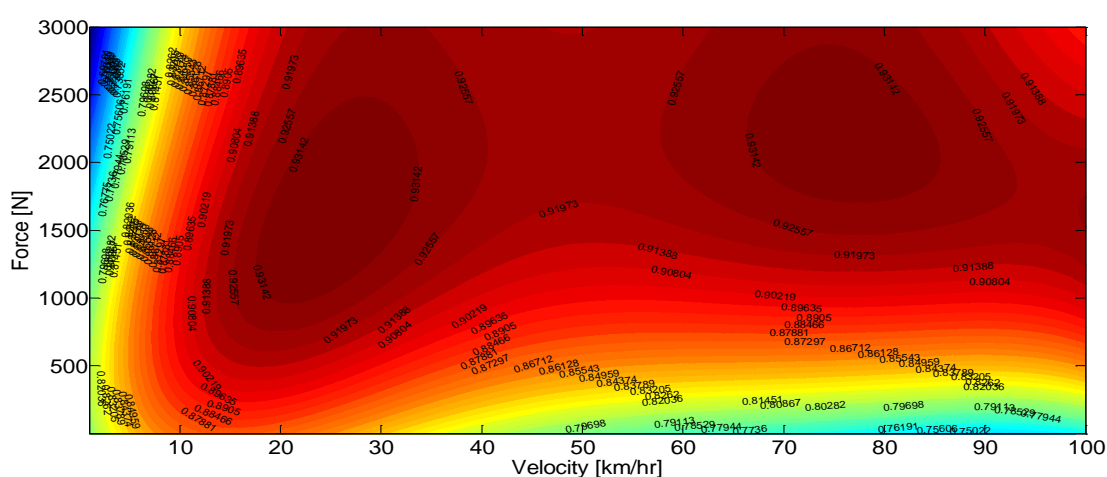


圖 5.10、感應馬達效率圖

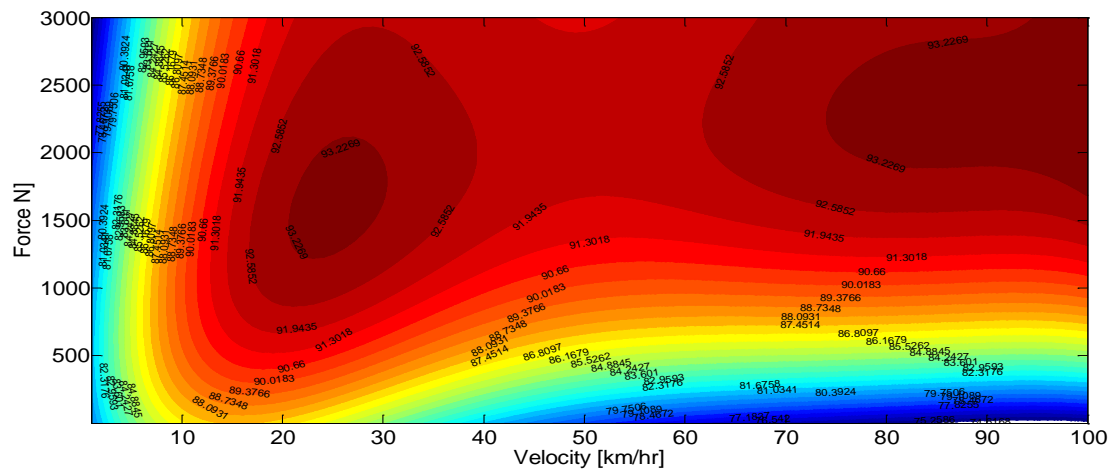


圖 5.11、IPM 效率圖

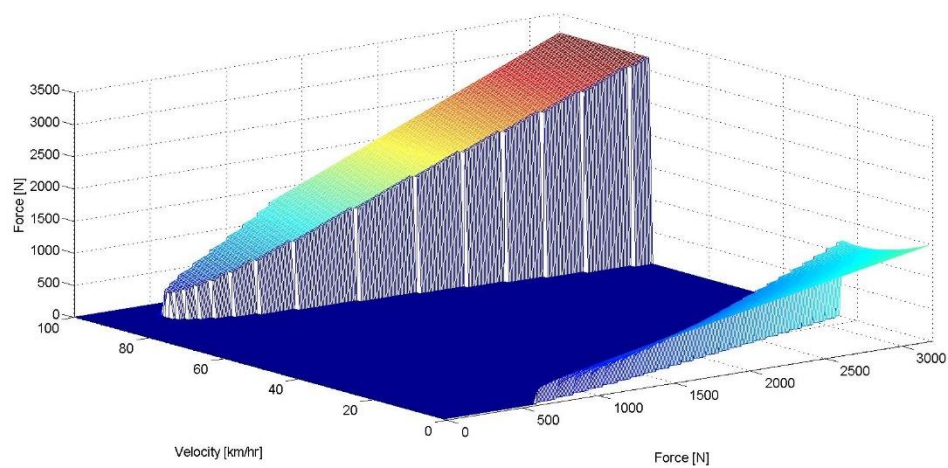


圖 5.12、永磁同步馬達驅動力分配

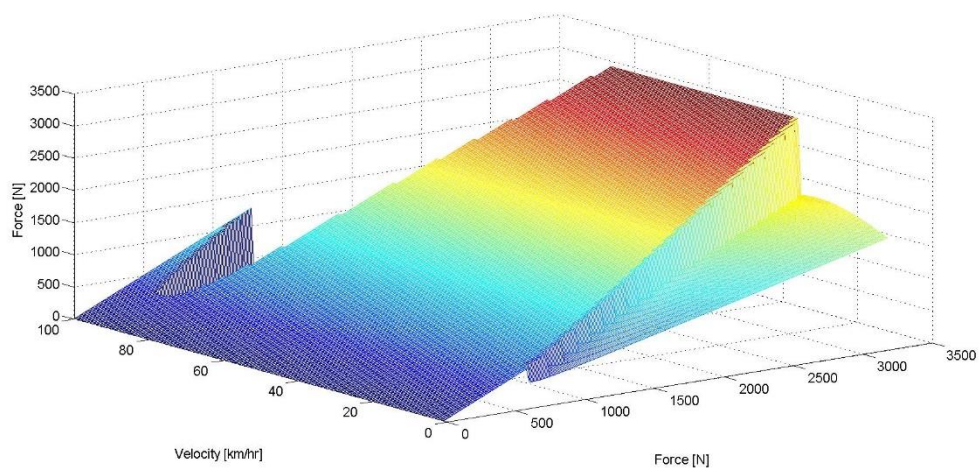


圖 5.13、感應馬達驅動力分配

由於實驗馬達兩顆高效區間圖 5.10 圖 5.11 部分重疊且整體感應馬達之效率高於永磁同步馬達，可以看到在大部分操作點皆由感應馬達進行力矩輸出，但在高速下之永磁同步馬達則有較好之轉換效率，故在高轉速時永磁同步則佔有主要之力矩輸出。

5.1.5 力矩命令查表建立

由於在動力端給予驅動器之力矩命令為百分比，並非直接下達力矩命令，故必須先建立力矩命令查表圖 5.14，在特定的轉速上，欲下達之力矩命令將會根據此表，對應到給予驅動器的力矩命令百分比。

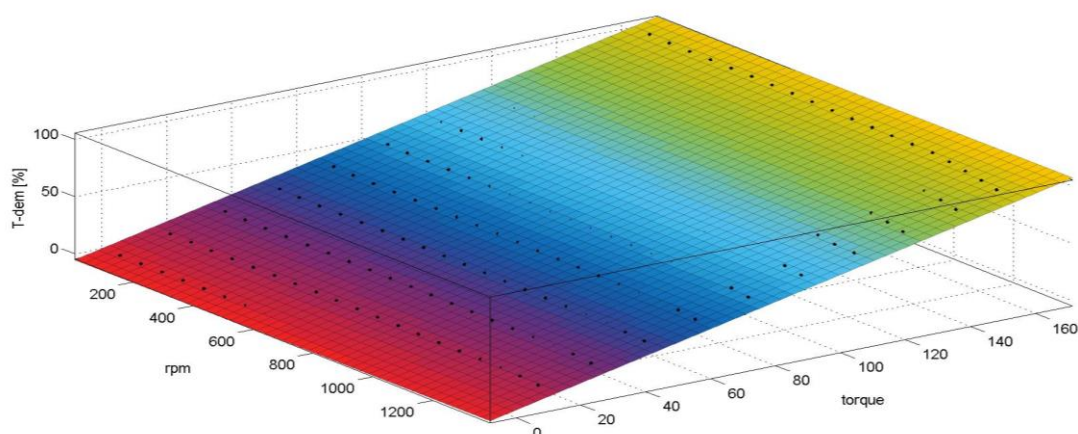


圖 5.14、力矩命令查表

模擬情境

在這裡建立了兩種主要之模擬道路情境，分為短程以及長程，短程為總長 3km 之路段，其包含了上坡下坡以驗證在於坡度變換時之力矩變化以及行車行為，短程為距離總長 20km 五楊高架橋後半段之路段，其特點是會駛上一段長距離上坡後再行經一段大部分為下坡之路段。

5.1.6 實驗情境-短程

在此以模擬為車輛經過一平地-上坡-平地-下坡之路段做為驗證之地形，其相關模擬內容可參照第四章，將模擬後前後馬達之轉速、力矩值記錄下來之後，透過先進動力中心 AVL 系統進行力矩、轉速響應之追尋。

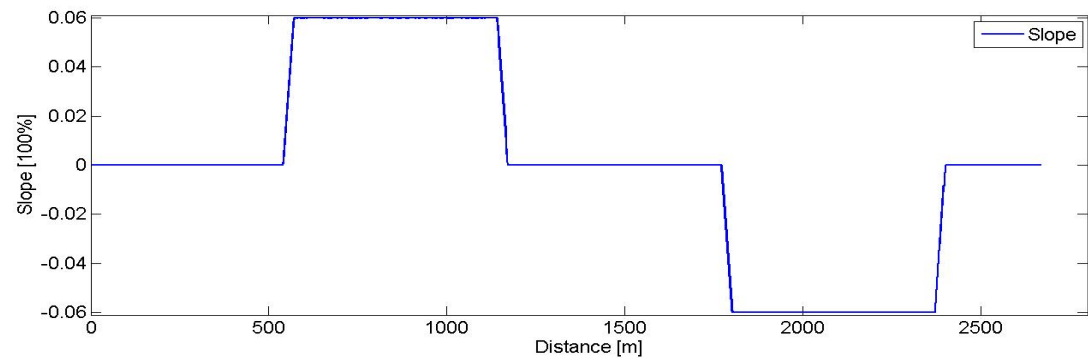


圖 5.15、情境一坡度圖

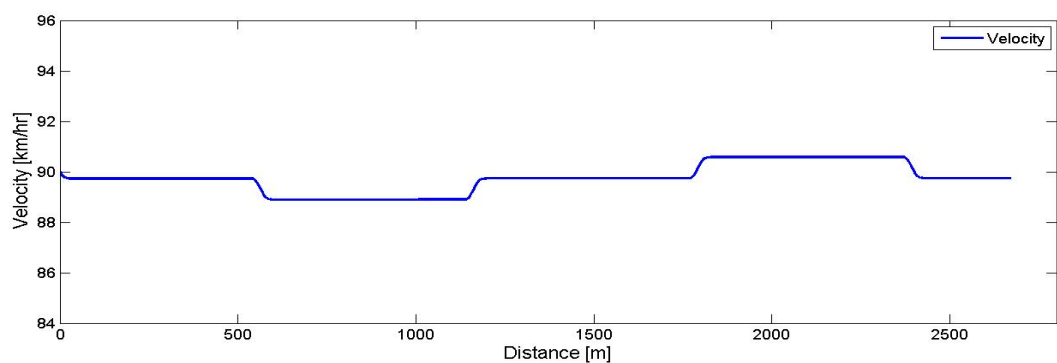


圖 5.16、定速巡航車速

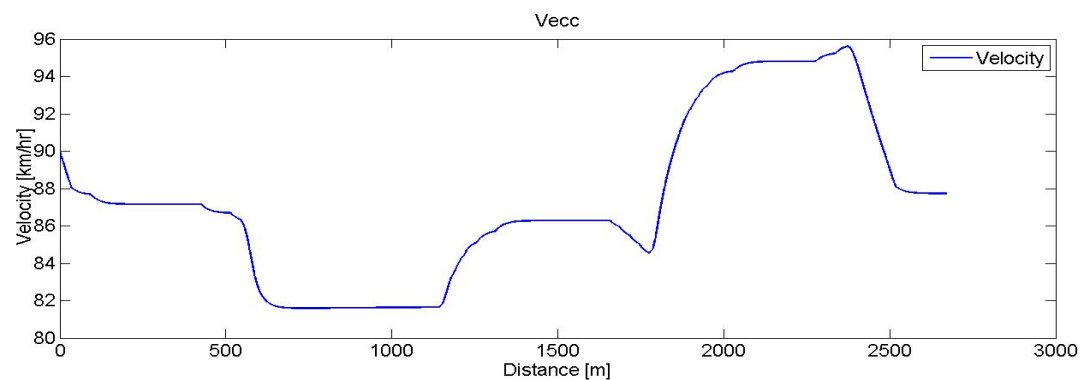


圖 5.17、節能巡航車速

定速巡航響應追尋-PMSM

首先為定速巡航(CC)下 PMSM 之轉速以及力矩命令追尋之響應圖，其中紅色虛線為模擬值，藍色為量測值，從 PMSM 響應圖可以看到在力矩劇烈變換時在負載端轉速需要時間進行矯正，但在大部分力矩響應內皆可以完整追隨到需求之轉速。

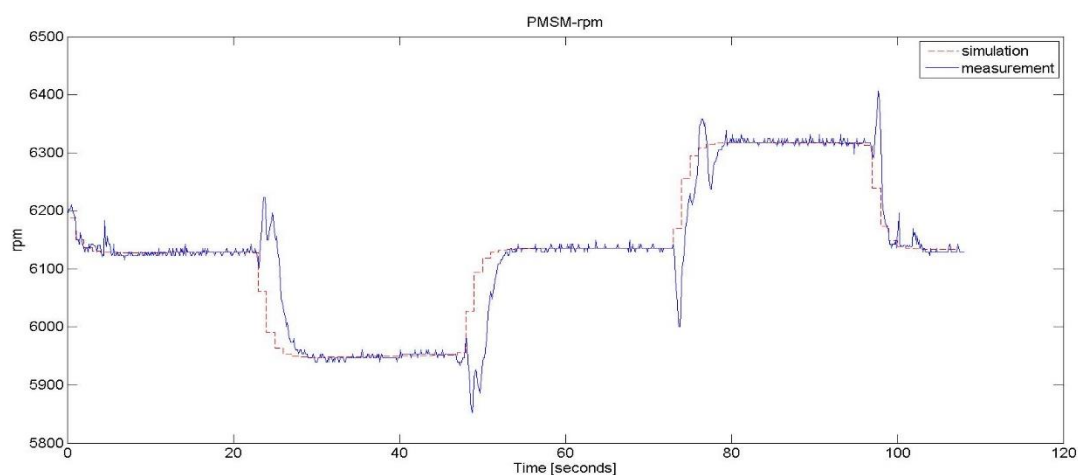


圖 5.18、短程定速巡航之永磁同步馬達轉速響應追尋

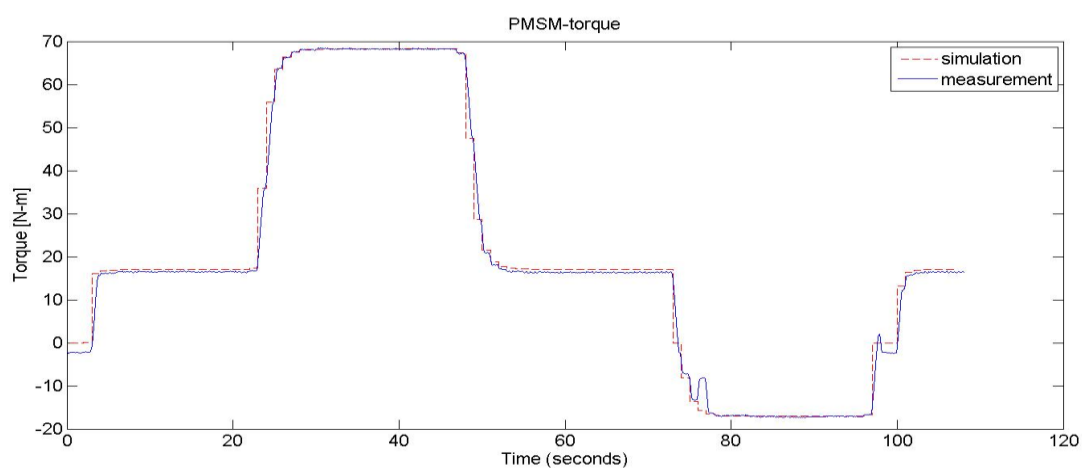


圖 5.19、永磁同步馬達力矩響應追尋

定速巡航響應-IM

在感應馬達部分轉速追尋大致皆有跟上命令，主要因為在定速巡航下其力矩分配區間正好大部分都分配給前軸之永磁同步馬達，故此時感應馬達大多時間是不出力的，以至於負載端馬達並沒有受到太大之動力輸出干擾轉速之追尋。

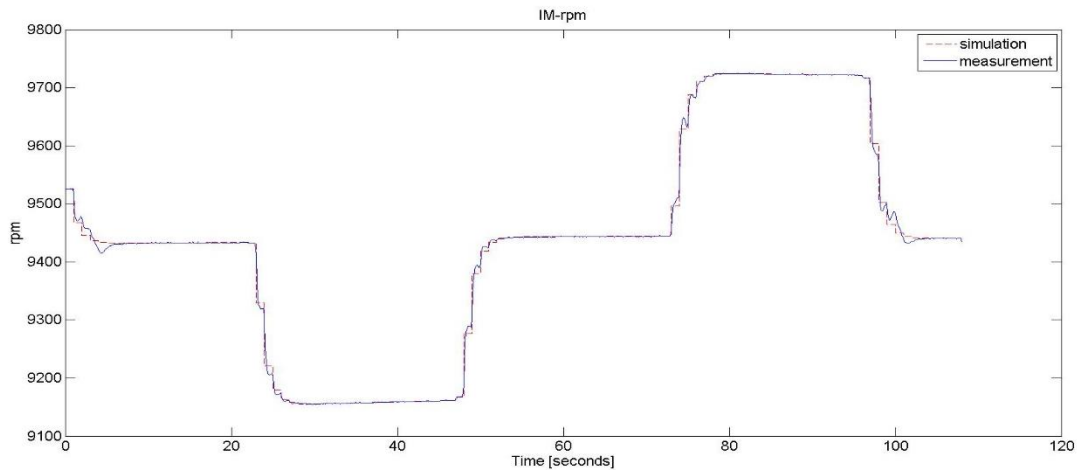


圖 5.20、感應馬達轉速響應追尋

在這一百多秒模擬中，定速巡航僅在一開始以及 70、100 秒左右有給與力矩響應，這是由於在定速巡航的操作區間內驅動力都分配給永磁同步馬達，相關噴配可見圖 5.12，而在 25 秒、50 秒左右力矩感測器感受到力矩主要為負載端馬達增、減速造成之慣量力矩。

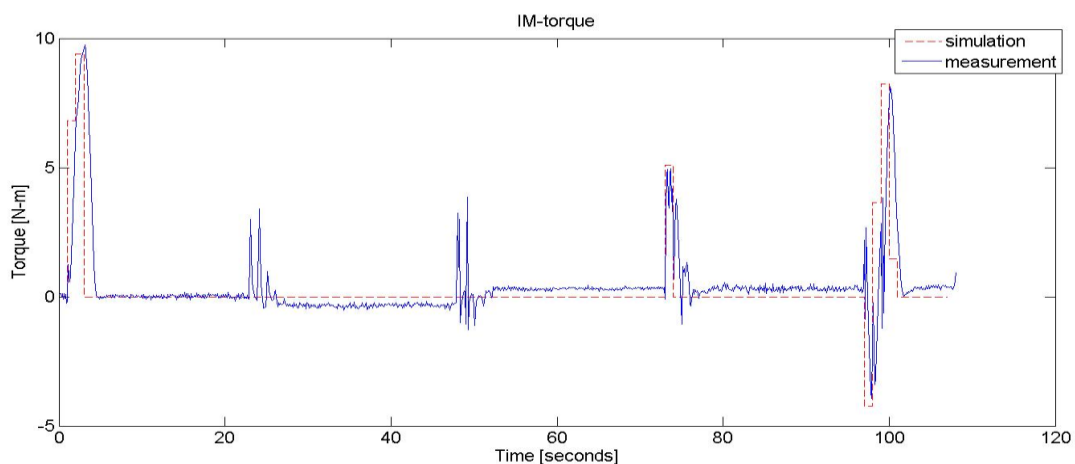


圖 5.21、感應馬達力矩響應追尋

節能巡航響應-PMSM

接下來為節能巡航前、後軸馬達之轉速、力矩響應給予動力平台之響應結果，首先為 PMSM 之轉速、力矩響應圖，可以看到轉速在大部分時間都可以追尋到參考值，主要誤差存在於力矩響應與轉速變化大時，負載端之轉速控制需要些許時間進行調整，而在力矩響應部分可以看到大部分追尋都非常精準，但在轉速變化較大時也會有互相牽動而造成感測器量測值與輸入值不同的狀況。

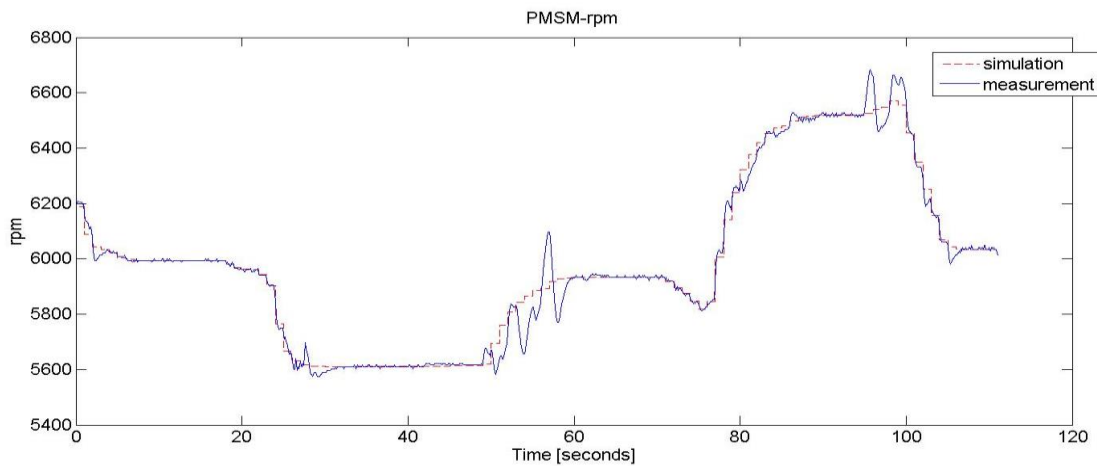


圖 5.22、永磁同步馬達轉速響應追尋

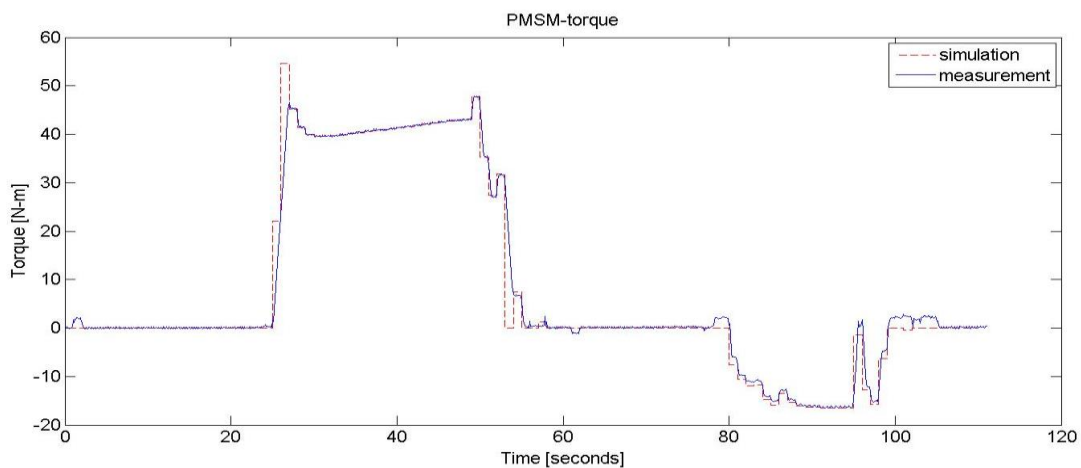


圖 5.23、永磁同步馬達力矩追尋響應

節能巡航響應-IM

接下來為節能巡航下之 IM 之轉速、力矩響應圖，與先前問題相同，感應馬達由於力矩變化不大，在負載端轉速追尋可以說非常吻合，但在於力矩控制上在某些加、減速劇烈，也就是轉速變化大時，其力矩控制會有些許誤差，響應會追不上，但其時還要考慮到加減速時對於力矩感測器的影響，但大致上此偏差尚可接受。

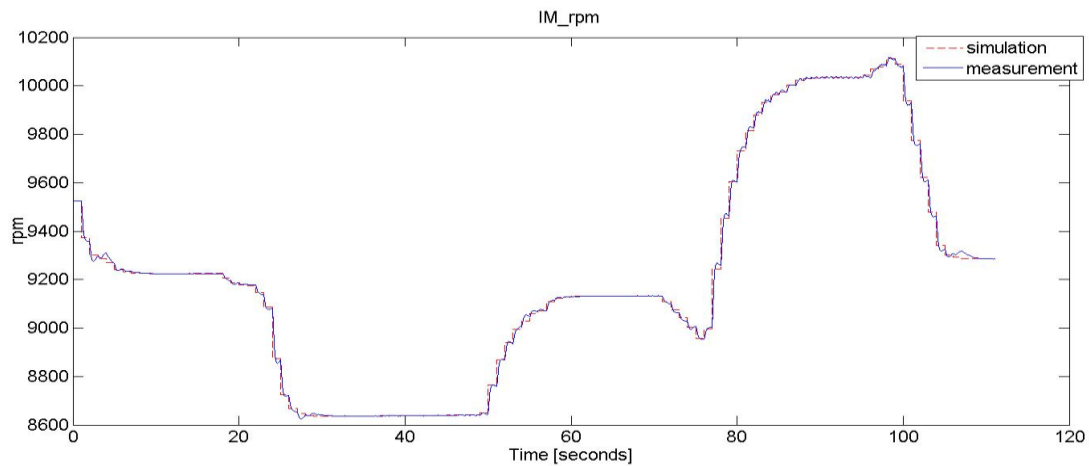


圖 5.24、感應馬達轉速響應追尋

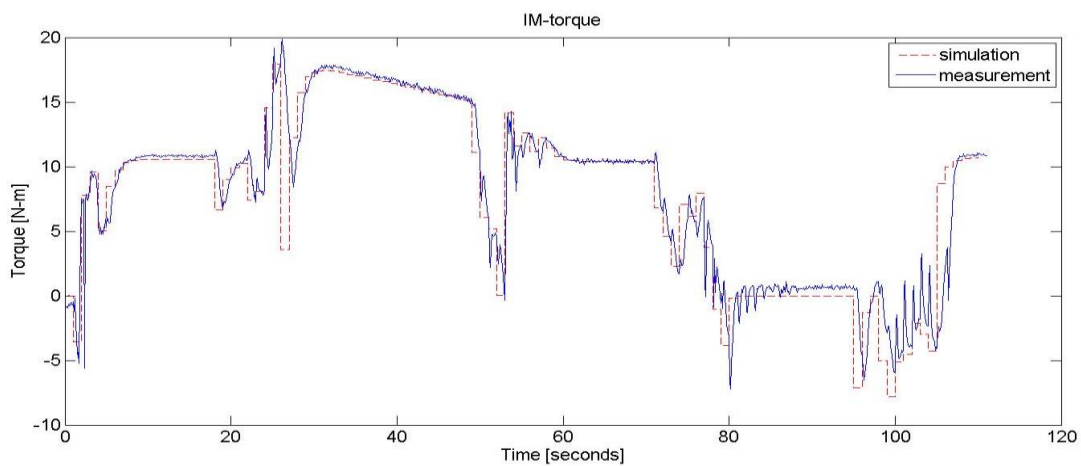


圖 5.25、感應馬達力矩響應追尋

模擬情境一之模擬結果如表格 5-3 表格 5-4，其中 CC-short 代表以定速巡航完成上下坡測試，ECC-short 代表為節能巡航之數據，而在 PMSM 之馬達之能耗結果由於在前面放大倍率，將由(3-18)回調。結果可以見雖然在實際馬達能耗上與模擬有些差異，但可視為模型準確度之差異以及機台人為等誤差，在模擬中之馬達模型可能仍過於理想而忽略了一些暫態響應，但在兩者相比之結果上節能巡航控制仍優於定速巡航約 5% 節能效益。

$$\text{永磁同步馬達總耗能} = \text{量測耗能} \times 6.75 \times 1.5 \quad (5-3)$$

表格 5-3、短距離模擬結果

	Energy consumption[kJ]	Normalized [%]
CC-short	1618.6	100
ECC-short	1507	93.1

表格 5-4、短距離實驗結果

	Energy consumption[kJ]	Normalized [%]
CC-short	1732.0	100
ECC-short	1649.4	95.2



5.1.7 實驗情境-20km

在模擬情境二中將取五楊高架橋後半段長為 20 公里之路段做為模擬情境，並將其結果資料記錄下來，其運作方式同第一小節

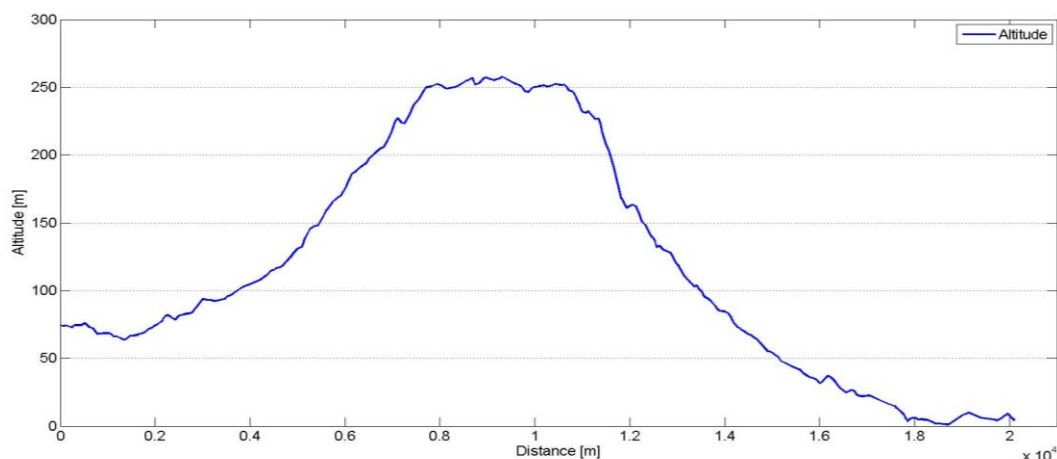


圖 5.26、五楊高架橋後半段

定速巡航與節能巡航

圖 5.27、圖 5.28 為永磁同步馬達之轉速與力矩響應，在定速循環下由於加減速變化不大，永磁同步馬達的部份在力矩響應部分非常接近，而在轉速上有時會稍微延遲但大體上並沒有偏差太多。

感應馬達的部分同樣的在轉速方面追尋是幾乎完全沒有問題，但在力矩響應上一樣在低扭力時會有很多小幅度的震盪，但並沒有太大的突波，大體上都有追尋到給予的命令值。

其實驗結果整理於表格 5-6 表格 5-6，其中 CC-20km 代表以定速巡航完成這趟行程，ECC-20km 代表為節能巡航駕駛之結果，由結果可以看到透過實際馬達之響應，與模擬結果在實際能耗上雖然不一樣，可見模擬之能耗模型仍過於理想，可能忽略了一些暫態上額外之能耗，但兩種情境相比之下仍然是節能巡航控制結果有著 5% 以上的節能表現。

定速巡航響應-PMSM

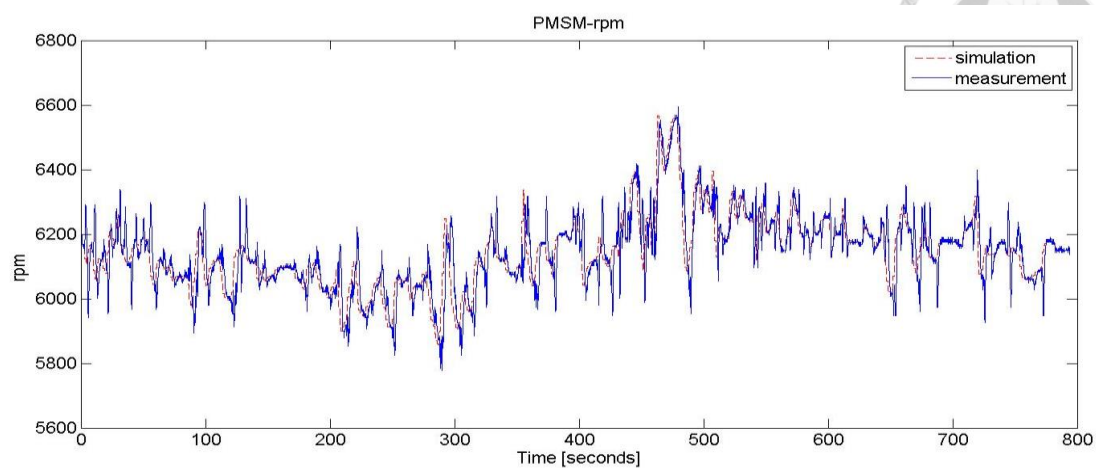
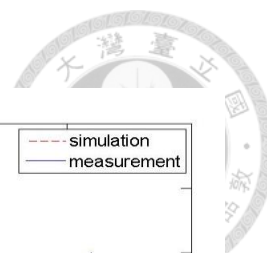


圖 5.27、永磁同步馬達轉速響應追尋

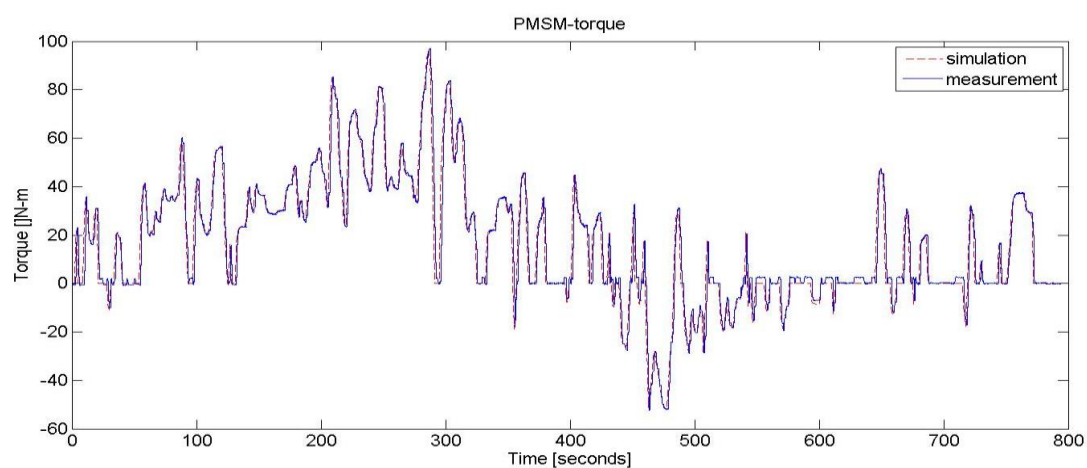


圖 5.28、永磁同步馬達力矩響應追尋

定速巡航響應-IM

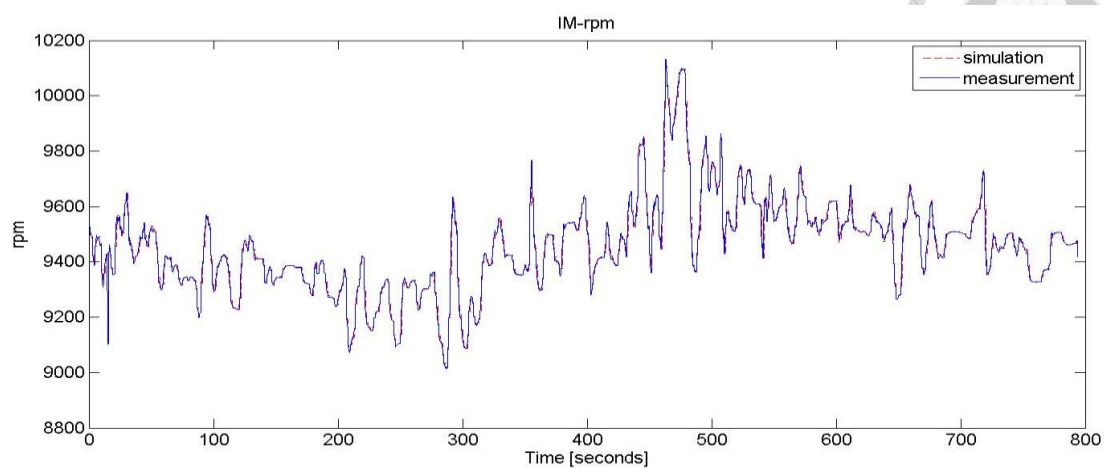


圖 5.29、感應馬達轉速響應追尋

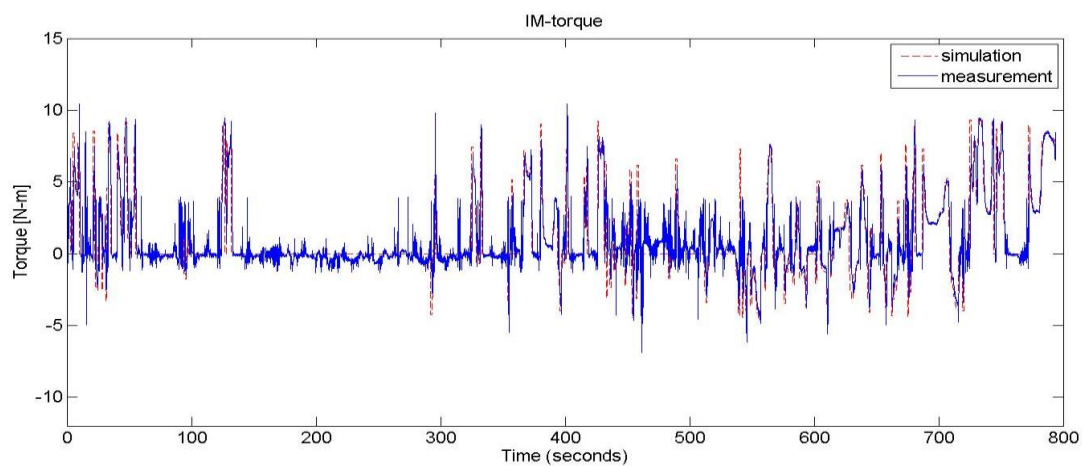


圖 5.30、感應馬達力矩響應追尋

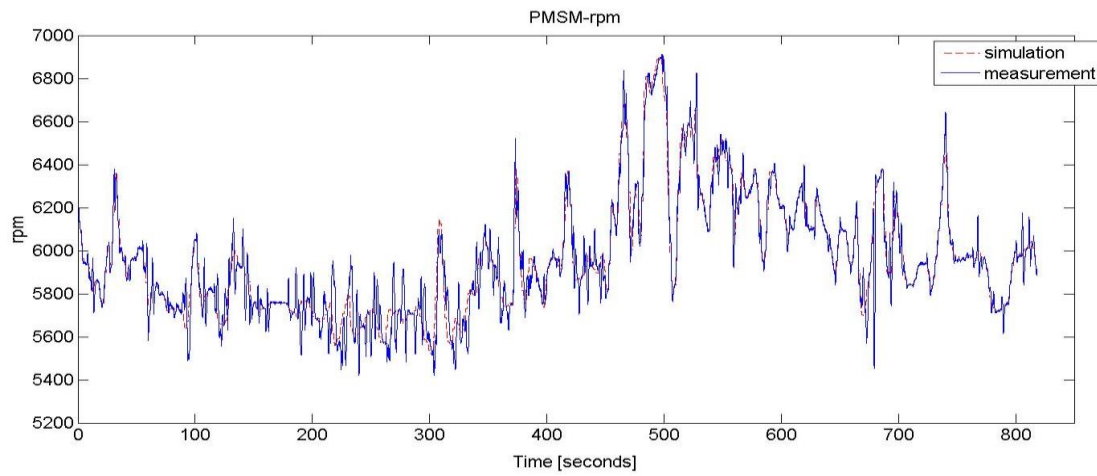
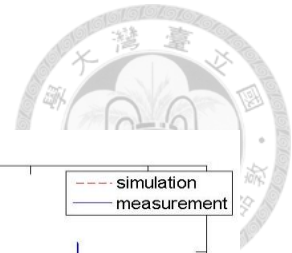


圖 5.31、永磁同步馬達轉速響應追尋

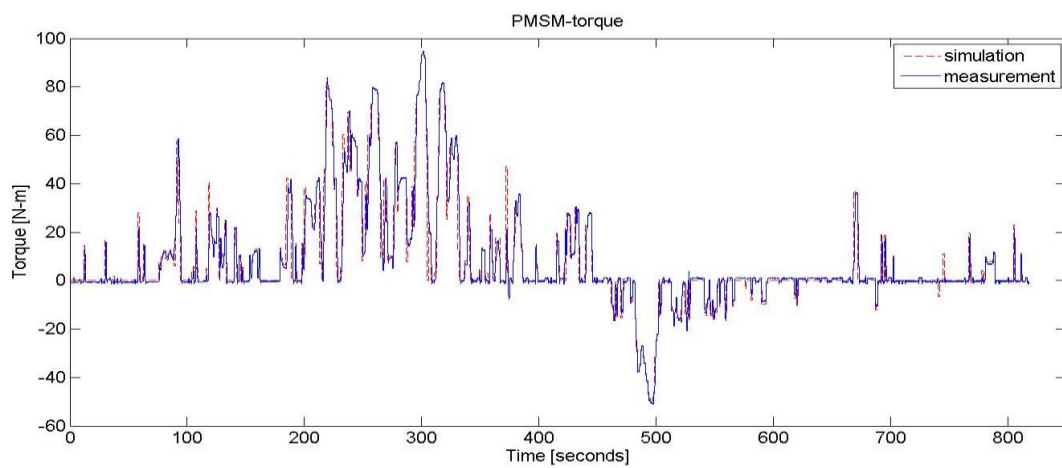


圖 5.32、永磁同步馬達力矩響應追尋

定速巡航響應-IM

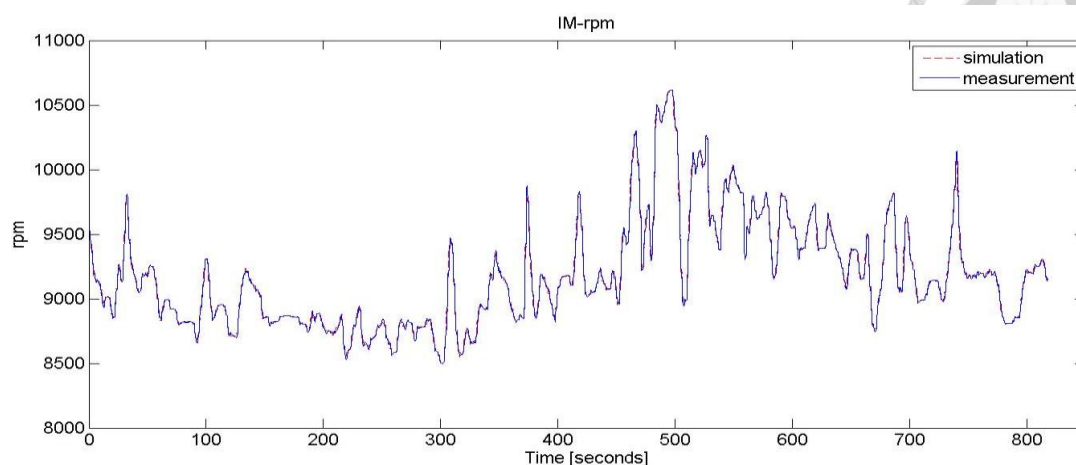
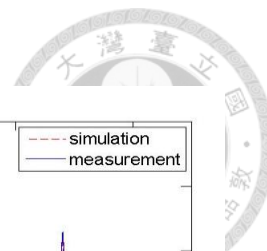


圖 5.33、感應馬達轉速響應追尋

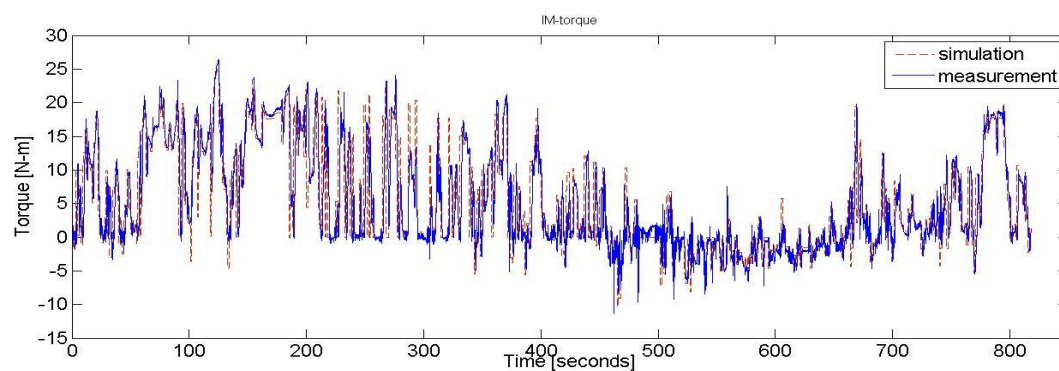


圖 5.34、感應馬達力矩響應追尋

表格 5-5、20km 模擬數據結果

	Energy consumption[kJ]	Normalized [%]
CC-20km	9989.2	100
ECC-20km	9213.1	92.2

表格 5-6、20km 實驗數據結果

	Energy consumption[kJ]	Normalized [%]
CC-20km	10923.9	100
ECC-20km	10297.7	94.2

第六章 結論與未來工作建議



6.1 結論

本論文針對插電式混合動力車中主要之兩種行車動力模式進行節能巡航駕駛的研究開發，並提出以模型預測為基礎之節能巡航駕駛控制器，其主要功能為在接收到前方道路坡度資訊以及自身車速資訊後，根據地形變化、道路曲率等計算出節能且安全之行車曲線給予車輛控制器系統進行節能巡航控制。

在節能巡航控制中，將傳統定速巡航賦予速度的調變區間，於成本函數的訂定中根據能耗的多寡、坡度變化以及偏離設定之巡航駕駛速度作為權重，依據地形坡度的不同而有不同之車速變化，於上坡、下坡路段可以發現控制器充分利用車載資通訊所提供之前方坡度資訊作為參考，在上坡路段前預先增加車速以減少上坡路段之能耗，在下坡路段前預先放慢車速以利藉重力提供動力。在節能巡航賦予之變速空間，可以發現若是給予控制器越大的調節車速空間，其能耗值也會越低，代表其能更有效的透過車速與地形的關係減少能耗。

在模擬中將實際道路資料也納入考慮，進行了長約 40km 之模擬，研究結果指出節能巡航僅稍微調整巡航車速便能擁有優於傳統定速巡航約 6~10% 的節能效益，且行駛時間僅相差約一分鐘。

節能巡航過彎之安全與舒適度考量也納入限制式，考慮了車輛在於過彎時之安全性以及乘客之舒適性，結合地圖於道路之曲率資料，透過限制式的方式在縱向車速進行調節，目的在過彎時調節至安全舒適之車速，由結果來看在結合地圖資料後之節能巡航控制有效改善原本僅考慮坡度時在過彎會有打滑的危險性以及乘客之不適性。

而在應用方面將跟車系統也納入考量，並將其應用於多車之情境，透過以安全距離以及前方車速當作條件，當節能巡航駕駛遇到前方有車輛時，會切換模式

保持與前車之距離以確保安全性，此節能巡航跟車系統比傳統等距離跟車系統不僅多了節能性亦能保有安全性。

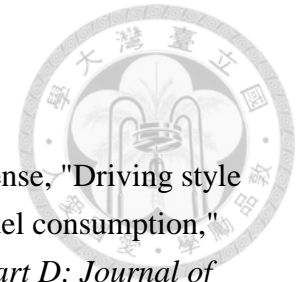
另一多車情境為在配備有節能巡航控制功能之車輛作為前車，使後面之車輛僅需跟隨前車行駛，不用配備有高階感測器與車載資通訊也能擁有節能巡航的特點，模擬結果仍有 5~6% 的節能效益。

本研究最後進行了節能巡航控制於實體馬達響應驗證，在此實驗將本研究之動力系統分配方式應用於實際之高功率馬達上，根據本實驗分別進行短距離以及長距離模擬之資料進行各別馬達之響應追尋，從實驗結果可得節能巡航控制整體定速巡航約 5% 之節能效益。

6.2 未來工作建議

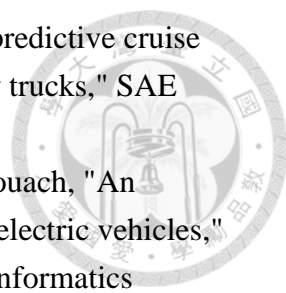
1. 在 ITS 資料上尚有許多可應用之資訊，如交通號誌、前方車流量與彎道曲率等，此皆為車速調節都是很重要的參數，若將這些列入參考，更可顧及車輛節能控制上之全面性。
2. 在本研究中針對縱向車速進行設計與討論，但車輛在行駛上不僅於縱向，亦有側向運動之情境必須考量，在相關文獻上較少對於側向運動節能駕駛的探討，故未來可以針對此情境進行研究。
3. 目前先進動力中心平台的建置包括有 dSPACE 模擬控制器與 AVL 動力平台，在未來將可以執行 Hardware in the loop, HiL 之模擬，但因目前尚未完成連結，僅能以離線方式進行數據存取後輸入到 AVL 動力平台進行進行模擬，故期望在未來平台建置完成後能透過 dSPACE 進行完整的 HiL 測試，使模擬驗證更臻完整。
4. 目前實測之馬達功率與研究中並非完全符合，若未來能有功率等級且性能相同者，更能驗證此控制法於動力系統上之節能效益。
5. 駕駛輔助系統於目前車輛產業電子化扮演十分重要的角色，而此項功能於節能駕駛方面的使用將為一重要的發展方向，本研究之方法若結合駕駛輔助系統如人機介面等，將可更有效提供駕駛者車速建議以達節能行車的目的。

參考文獻



- [1] J. Van Mierlo, G. Maggetto, E. Van de Burgwal, and R. Gense, "Driving style and traffic measures-influence on vehicle emissions and fuel consumption," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 218, pp. 43-50, 2004.
- [2] M. Taniguchi, "Eco-driving and fuel economy of passenger cars," in *Proc. of Annual Meeting of IEE Japan S*, 2008, pp. 5-8.
- [3] T. Bär, R. Kohlhaas, J. M. Zöllner, and K.-U. Scholl, "Anticipatory driving assistance for energy efficient driving," in *Integrated and Sustainable Transportation System (FISTS)*, 2011 IEEE Forum on, 2011, pp. 1-6.
- [4] T. J. Daun, D. G. Braun, C. Frank, S. Haug, and M. Lienkamp, "Evaluation of driving behavior and the efficacy of a predictive eco-driving assistance system for heavy commercial vehicles in a driving simulator experiment," in *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, 2013, pp. 2379-2386.
- [5] C. Vagg, C. J. Brace, D. Hari, S. Akehurst, J. Poxon, and L. Ash, "Development and field trial of a driver assistance system to encourage eco-driving in light commercial vehicle fleets," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 14, pp. 796-805, 2013.
- [6] B. Beusen, S. Broekx, T. Denys, C. Beckx, B. Degraeuwe, M. Gijsbers, et al., "Using on-board logging devices to study the longer-term impact of an eco-driving course," *Transportation research part D: transport and environment*, vol. 14, pp. 514-520, 2009.
- [7] Y. Kim, I. Lee, and S. Kang, "Eco Assist Techniques through Real-time Monitoring of BEV Energy Usage Efficiency," *Sensors*, vol. 15, pp. 14946-14959, 2015.
- [8] M. Ferreira and P. M. d'Orey, "On the impact of virtual traffic lights on carbon emissions mitigation," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 13, pp. 284-295, 2012.
- [9] F. Jiménez and W. Cabrera-Montiel, "System for road vehicle energy optimization using real time road and traffic information," *Energies*, vol. 7, pp. 3576-3598, 2014.
- [10] D.-W.-I. S. Gausemeier and I. K.-P. Jäker, "Multi-objective optimization of a vehicle velocity profile by means of dynamic programming," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 43, pp. 366-371, 2010.
- [11] S. Mandava, K. Boriboonsomsin, and M. Barth, "Arterial velocity planning

- based on traffic signal information under light traffic conditions," in 2009 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2009, pp. 1-6.
- [12] C. Manzie, H. Watson, and S. Halgamuge, "Fuel economy improvements for urban driving: Hybrid vs. intelligent vehicles," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 15, pp. 1-16, 2007.
- [13] M. A. S. Kamal, M. Mukai, J. Murata, and T. Kawabe, "Ecological vehicle control on roads with up-down slopes," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, pp. 783-794, 2011.
- [14] M. A. S. Kamal, M. Mukai, J. Murata, and T. Kawabe, "Model predictive control of vehicles on urban roads for improved fuel economy," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, pp. 831-841, 2013.
- [15] M. Kamal, M. Mukai, J. Murata, and T. Kawabe, "Ecological driving based on preceding vehicle prediction using MPC," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, pp. 3843-3848, 2011.
- [16] N. J. Kohut, J. K. Hedrick, and F. Borrelli, "Integrating traffic data and model predictive control to improve fuel economy," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 42, pp. 155-160, 2009.
- [17] J. Wollaeger, S. A. Kumar, S. Onori, D. Filev, Ü. Özgüner, G. Rizzoni, et al., "Cloud-computing based velocity profile generation for minimum fuel consumption: A dynamic programming based solution," in 2012 American Control Conference (ACC), 2012, pp. 2108-2113.
- [18] T. van Keulen, G. Naus, B. de Jager, R. van de Molengraft, M. Steinbuch, and E. Aneke, "Predictive cruise control in hybrid electric vehicles," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 3, 2009.
- [19] C. Zhang, A. Vahidi, P. Pisu, X. Li, and K. Tennant, "Role of terrain preview in energy management of hybrid electric vehicles," *IEEE transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, pp. 1139-1147, 2010.
- [20] N. H. T. S. Administration, "Preliminary statement of policy concerning automated vehicles," Washington, DC, pp. 1-14, 2013.
- [21] C. Chien and P. Ioannou, "Automatic vehicle-following," in American Control Conference, 1992, 1992, pp. 1748-1752.
- [22] E. Hellström, A. Fröberg, and L. Nielsen, "A real-time fuel-optimal cruise controller for heavy trucks using road topography information," *SAE Technical Paper 0148-7191*, 2006.
- [23] E. Hellström, J. Åslund, and L. Nielsen, "Design of a well-behaved algorithm for on-board look-ahead control," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, pp. 3350-3355, 2008.

- 
- [24] F. Lattemann, K. Neiss, S. Terwen, and T. Connolly, "The predictive cruise control—a system to reduce fuel consumption of heavy duty trucks," SAE Technical paper 0148-7191, 2004.
 - [25] T. Schwickart, H. Voos, J.-R. Hadji-Minaglou, and M. Darouach, "An efficient nonlinear model-predictive eco-cruise control for electric vehicles," in 2013 11th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2013, pp. 311-316.
 - [26] A. Mihály and P. Gáspár, "Look-ahead cruise control considering road geometry and traffic flow," in Computational Intelligence and Informatics (CINTI), 2013 IEEE 14th International Symposium on, 2013, pp. 189-194.
 - [27] S. Park, H. Rakha, K. Ahn, and K. Moran, "Predictive eco-cruise control: Algorithm and potential benefits," in Integrated and Sustainable Transportation System (FISTS), 2011 IEEE Forum on, 2011, pp. 394-399.
 - [28] H. Banvait, S. Anwar, and Y. Chen, "A rule-based energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicle (PHEV)," in 2009 American control conference, 2009, pp. 3938-3943.
 - [29] X. Wang, H. He, F. Sun, X. Sun, and H. Tang, "Comparative study on different energy management strategies for plug-in hybrid electric vehicles," *Energies*, vol. 6, pp. 5656-5675, 2013.
 - [30] A. M. Phillips, M. Jankovic, and K. E. Bailey, "Vehicle system controller design for a hybrid electric vehicle," in Control Applications, 2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on, 2000, pp. 297-302.
 - [31] A. Sciarretta, M. Back, and L. Guzzella, "Optimal control of parallel hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on control systems technology*, vol. 12, pp. 352-363, 2004.
 - [32] F.-C. Chou, K. Li, L.-W. Jeng, and C.-H. Li, "Model predictive control based optimal torque distribution strategy for a compound electric vehicle," in Automatic Control Conference (CACS), 2013 CACS International, 2013, pp. 417-422.
 - [33] H. A. Rakha, K. Ahn, K. Moran, B. Saerens, and E. Van den Bulck, "Virginia tech comprehensive power-based fuel consumption model: model development and testing," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 16, pp. 492-503, 2011.
 - [34] R. E. Bellman and S. E. Dreyfus, *Applied dynamic programming*: Princeton university press, 2015.
 - [35] T. D. Gillespie, "Fundamentals of vehicle dynamics," SAE Technical Paper1992.

- [36] H. Lorenz, Trassierung und Gestaltung von Straßen und Autobahnen: Bauverlag, 1971.
- [37] 周芳杰, "使用車載資通訊之電動車智慧節能行駛技術之研究," 2013.
- [38] 顏良喜, "運用車載資通訊技術之插電式混合動力電動車智慧化力矩分配策略研究," 2015.
- [39] 孫允中, "多動力元件組合之插電式串並聯式複合動力電動車能量管理研究," 2016.

