

## 摘要

混合动力汽车（HEV, Hybrid Electric Vehicle）被认为是当前解决能源短缺和环境污染问题切实可行的方案之一，而实现混合动力汽车能量管理与动力系统协调控制的整车控制策略是混合动力汽车的核心关键技术。本文的研究对于我国混合动力汽车这一领域的发展及企业产品的设计开发，具有一定的学术意义和实际应用价值。

本文以并联式混合动力汽车的整车控制策略为研究对象，首先针对能量管理策略开发的需要，在 MATLAB /SIMULINK 环境中建立了多能源动力总成的模型和整车纵向动力学模型，为整车能量管理策略的研究和开发提供了必要的仿真平台。然后以混合动力系统的工作模式为基础，重点论述了基于规则的逻辑门限值能量管理策略和模糊控制策略，构建了具有 25 条控制规则的模糊推理器，目的是为了在汽车行驶的过程中用模糊逻辑在一定范围内动态得调整部分关键控制参数，实现对行驶工况的自适应。在完成了基于模型的离线仿真验证后，采用基于 MPC555 和 dSPACE 实时仿真系统的 ByPass 方案，将控制代码移植到样车实际控制器中，通过台架和实车试验进一步验证了所设计的控制策略的有效性。

**关键词：**混合动力汽车 整车控制系统 能量管理策略 逻辑门限 模糊控制

## ABSTRACT

Hybrid Electric Vehicle (HEV) is regarded as one of the most feasible schemes to solve the problem of energy shortage and environmental pollution. Control strategy, which is responsible for realizing energy management and powertrain control of the whole vehicle, is one of the key techniques of HEV. The significance of the work in this dissertation lies not only in improving the domestic development of HEV, but also in providing a practical method for local automotive manufactories.

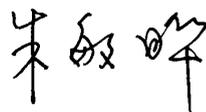
Control strategy of paralleled HEV is targeted as the main research object. At first, to meet the need of research and development of energy management strategy, a forward simulation model of hybrid powertrain and vehicle dynamic was built in MATLAB/SIMULINK. Then based on various function modes of HEV, logic threshold and fuzzy control strategy were deeply studied successively. A fuzzy inference engine with 25 rules was constructed in order to adjust some key parameters during driving cycles dynamically and adaptively. After being validated with off-line simulation models, the control strategy was downloaded into the real controller which was developed by using Bypass method with MPC555 and dSPACE real-time simulation system. The effectiveness of HEV control strategy was then validated by bench test and sample vehicle test.

**Keywords:** Hybrid Electric Vehicle, Vehicle Management System, Energy Management Strategy, Logic Threshold Control, Fuzzy Control

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：



2008年3月18日

-----  
经指导教师同意，本学位论文属于保密，在      年解密后适用  
本授权书。

指导教师签名：

学位论文作者签名：

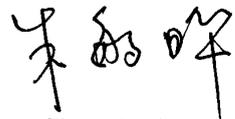
年 月 日

年 月 日

## 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

签名：



2008年 3 月 18 日

## 第1章 绪论

### 1.1 混合动力汽车的开发背景及其技术简介

#### 1.1.1 混合动力汽车的开发背景及课题来源

汽车工业蓬勃发展的百年历史记载了人类文明飞跃发展的光辉历程，然而，汽车保有量的不断增长在促进世界经济飞速发展和给人们提供便利的同时又将能源与环境问题推到了日益严重的处境。能源、环境和安全已成为 21 世纪世界汽车工业发展的 3 大主题。

目前世界汽车保有量约 8 亿辆，预计到 2020 年全球汽车保有量将达到 12 亿辆，主要增幅来自发展中国家。国际能源机构（IEA）的统计数据表明，2001 年全球 57% 的石油消费在交通领域，预计到 2020 年交通用油将占全球石油总消耗的 62% 以上。2020 年以后，全球石油需求与常规石油供给之间将出现净缺口。根据已探明的世界石油总储量估计，全世界的石油资源仅能供人类充分使用 43 年左右，而且世界范围内的石油产量将在 2010 年前后达到峰值，2050 年的供需缺口将相当于 2000 年世界石油总产量的两倍。近年来，石油需求正以每年 2% 至 3% 的速度增长，导致国际市场石油价格飞涨，而随着世界巨型油田渐趋枯竭，石油产量正缓慢并且确定无疑地下降。

近年来，我国汽车产业迅猛发展。2005 年，我国汽车产销量均超过 570 万，自主品牌汽车出口量也大幅增长。2007 年 8 月，我国自主品牌奇瑞（CHERY）第 100 万辆汽车正式下线。但我国目前的人均汽车保有量还很低，2003 年每千人汽车保有量仅为美国的 2.5%（19 辆），相当于美国 90 年前的水平。作为世界上汽车市场潜力最大的国家之一，预计 2020 年我国的汽车保有量将达到 1.3~1.5 亿辆，对石油燃料的需求也将随之大幅度增长。2003 年，我国石油进口量已达 0.9 亿吨，占全国总耗油量的 35%；预期 2020 年将达 2.7 亿吨，占全国总油耗的 60%；2050 年将达 6.2 亿吨，占全国总油耗的 78%。而交通运输将消耗石油的 25%；预期 2020 年将增至 2.56 亿吨，占 57%。因此，如果能减缓交通耗油的增长，将对保障石油供应有重要作用。

表 1.1 2006 年我国能源（石油）发展预测

我国能源发展预测（2006）				
	年份	2003	2020	2050
石油	耗量/亿吨（比重/%）	2.6 (100)	4.5 (100)	8.0 (100)
	进口量/亿吨（比重/%）	0.9 (35)	2.7 (60)	6.2 (78)
	交通用油/亿吨（比重/%）	0.7 (27)	2.56 (57)	5.0 (62)

除了日益紧张的能源问题，汽车工业的迅猛发展也带来了一系列的环境问题。

环境问题的表现形式为空气污染。据环境部门统计，目前，大气污染的 42% 来源于交通运输，而随着人们生活水平的提高，汽车保有量的迅速增加，这一比例也会相应得提高。汽车尾气是城市空气的最大污染源，每年经由汽车排入大气的污染物高达数十亿吨，预计到 2010 年汽车尾气排放将占空气污染源的 64%。由于大气状况严重恶化引起的一系列异常的自然现象，比如光化学烟雾、酸雨、厄尔尼诺、城市热岛效应等严重破坏和影响人类赖以生存的地面生态系统。全球范围内，温室气体 CO<sub>2</sub> 的排放量引起人们的极大关注。在过去几百年内，地球表面平均气温上升了 0.3~0.6℃，若对 CO<sub>2</sub> 气体排放不加限制的话，到 21 世纪末，地球表面平均气温将再上升 2℃，海平面将再上升大约 50cm，威胁到人类有限的陆地生存空间<sup>[1]</sup>。

近年来，环境保护问题在我国也引起了越来越多的重视。我国的城市大气污染非常严重。据环保部门对我国重点城市环境监测数据的分析表明，北京市机动车尾气排放对大气污染物中 CO、HC、NO<sub>x</sub> 的分担率分别为 63.4%、73.5% 和 46%；上海市中心地区机动车尾气排放对大气污染物中 CO、HC、NO<sub>x</sub> 的分担率分别为 86%、96%和 56%<sup>[2]</sup>。

认识到汽车对环境的影响，世界各国对汽车的排放要求提出了一系列法规。二十世纪六十年代末开始，世界各国不断推出越来越严格的汽车尾气排放法规和排放标准。2005 年欧洲开始实施欧 IV 排放法规。我国政府也已制定了强制性法规，2003 年起新车的污染物排放开始执行相当于欧 II 标准，2007 年 1 月起实施欧 III 排放标准，并定于 2008 年 1 月在北京试点实施欧 IV 标准。2008 年北京奥运会以及 2010 年上海世博会的即将召开也给我我国城市大气环境质量提出了更高的要求。

表 1.2 欧洲排放标准

法规名称	车型	CO (g/km)	HC (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	HC+ NO <sub>x</sub> (g/km)	PM (g/km)
欧 I	汽油机	2.72			0.97	0.14
	柴油机	3.16			1.13	0.18
欧 II	汽油机	2.2			0.5	
	非直喷柴油机	1			0.7	0.08
	直喷柴油机	1			0.9	0.1
欧 III	汽油机	2.3	0.2	0.15		
	柴油机	0.64		0.5	0.56	0.05
欧 IV	汽油机	1	0.1	0.08		0.025
	柴油机	0.5		0.25	0.3	

截止去年 8 月份，世界上已有 130 多个国家和地区出于环保目的开征了燃油税，使得成品油价格大幅上涨，油料费用成为今后汽车使用的主要成本，燃油经济性将成为决定汽车消费者选择的重要因素。而当前普遍使用的燃油发动机汽车，统计表明在占 80% 以上的道路条件下，一辆普通轿车仅利用了动力潜能的 40%，在市区还会跌至 25%。

在以上各大因素的多重推动下，从上世纪 90 年代开始，世界上各大汽车公司纷纷开展了高效节能汽车的研究与开发，而且首先都把目光投向了纯电动汽车（EV, Electric Vehicle）和燃料电池汽车（FCV, Fuel Cell Vehicle）上<sup>[3]</sup>。对于纯电动车辆和燃料电池汽车而言，由于都能实现行驶过程零排放，因而更加适合严格的环保法规要求。而且氢能作为最有希望的未来能源，使得燃料电池汽车成为最有希望的未来汽车。但燃料电池技术复杂，制氢、储氢等关键技术还尚未取得突破性进展，在现今看来，燃料电池汽车还有很长一段路要走。而纯电动汽车则由于电池技术的制约，如蓄电池的能量密度低而质量大，续行里程较短，使得其技术性能远达不到传统汽车的水平，而且蓄电池高昂的价格导致了纯电动汽车总成本居高不下，造成了纯电动汽车和燃料电池汽车一样都无法在短期内实现产业化和市场化。因此，1996 年以后多数汽车公司开始研究混合动力汽车。

混合动力汽车（HEV, Hybrid Electric Vehicle）被认为是清洁汽车中最具有产业化和市场化前景的车型。它采用发动机、电机和电池作为混合动力总成，

既继承了电动车辆作为“绿色汽车”的节约能源和超低排放的优点，又弥补了电动车辆续驶里程短的不足。在电动汽车技术取得重大突破之前，混合动力汽车已成为各国汽车公司的主要选择。如今，国内外的很多科研机构也对混合动力汽车产生了浓厚的兴趣<sup>[4,5,6,7,8]</sup>。在我国国内，一汽、东风、长安、奇瑞等汽车厂家都已经开发出混合动力汽车样车。而国内一些高校，如同济大学、北京理工大学、清华大学、上海交通大学、华南理工大学等也在进行混合动力技术的研究工作。国家在“十五”国家 863 计划中，设立了‘电动汽车重大专项’，分设混合动力汽车、纯电动汽车和燃料电池汽车三个主攻方向，确立了在“十五”末实现混合动力汽车批量生产和开发并通过国家汽车产品型式认证的产业化目标。混合动力汽车在 21 世纪正受到越来越多的青睐与关注。

本课题源于同济大学新能源汽车工程中心与华晨汽车有限公司的合作项目“中华 1.8T 混合动力轿车开发”。课题针对基于 ISG 电机的并联式混合动力汽车平台进行研究，对混合动力汽车关键技术中的能量管理策略以及基于模糊控制理论的算法优化问题展开了研究与分析。

### 1.1.2 混合动力汽车技术简介

混合动力汽车装备有两套动力装置：发动机和电动机。混合动力技术本质上是利用电力驱动来平衡和改善发动机的工况，通过减少发动机怠速工况、调整发动机工作在高效区以及制动能量回收提高燃油经济性、减少污染物排放。

形象一点表示，就是将传统发动机尽量做小，让一部分动力由电池—电动机系统承担，电动机可补充提供车辆起步、加速时所需转矩，又可以存储吸收发动机富余功率和车辆制动能量。这种混合动力装置既发挥了发动机持续工作时间长、动力性好的优点，又可以发挥电动机无污染、低噪声的好处，发动机和电动机二者“并肩战斗”，取长补短。区别于纯电动汽车和燃料电池汽车，混合动力汽车的最终能量来源依然是发动机对燃油的能量转化，所以没有额外基础设施建设投入的问题，可以利用既有的加油站进行燃料补充。虽然混合动力汽车没有实现零排放，但其动力性、经济性、续驶里程和排放等综合指标能满足当前苛刻要求。正因为此，混合动力汽车得到了迅速的发展。

### 1.1.3 混合动力汽车分类

混合动力汽车的分类方法很多，一般最常见的是根据动力传动系统布置形式以及按照混合度来进行分类。按照传动系统布置形式，可以分成串联式、并联式和混联式。近年来，随着混合动力技术的发展，除了串联式、并联式和混联式的结构以外，越来越多其他型式的混合驱动系统正在被开发出来。

除按照动力系统各部件的布置方式来分类外，按照“混合度”来对混合动力汽车系统进行分类的方法也被广泛采用。虽然到目前为止，尚没有统一明确的关于“混合度”的定义，但通常混合度可表示为：

$$\text{混合度} = \frac{\text{驱动电机功率}}{\text{发动机功率}} \quad (1-1)$$

根据混合度来分类，混合动力汽车可以分为弱混、中混和强混。一般而言，弱混可实现怠速停机、快速启动发动机、再生制动和电机助力功能，而强混除了上述功能以外还可以实现纯电动行驶功能。

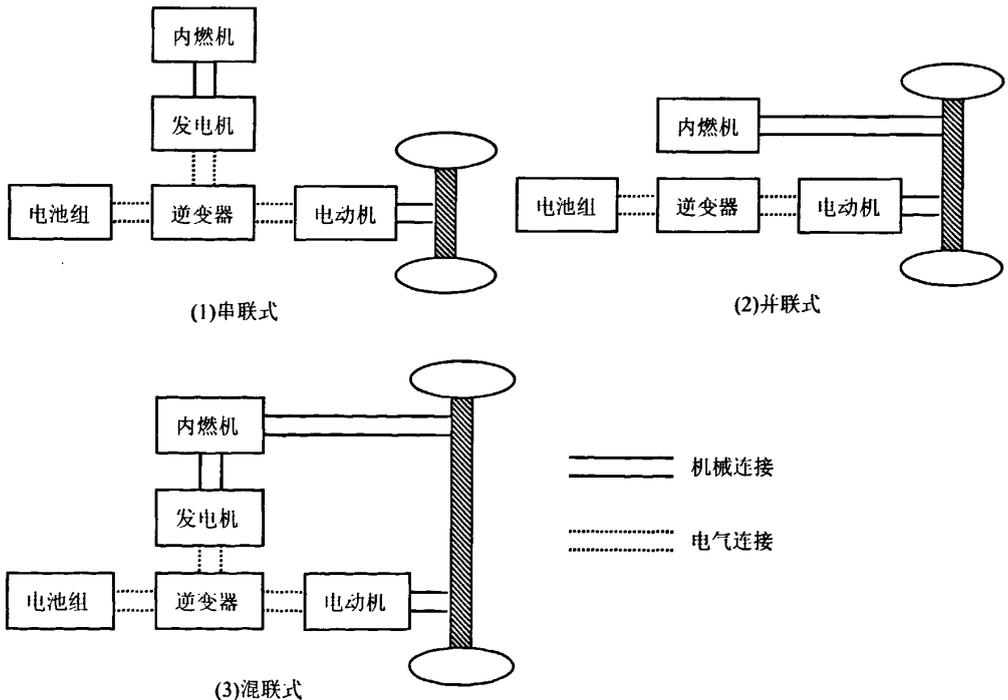


图 1.1 混合动力汽车动力系统结构分类

表 1.3 不同类型混合动力系统特点比较

	串联式	并联式	混联式
优点	动力系统结构简单， 控制系统简单	只需发动机和电动/发电机两 大动力部件	兼具串联式和并联式的 优点
	发动机一直可工作在最 优区域	功率传递效率高	发动机可以与驱动桥脱 开以单独驱动发电机 (串联式)
	低速低负荷、车辆起停频 繁的城市工况效果理想	可采用较小功率的发动机和电 动机，整个系统尺寸、质量小	发动机可在近最优的区 域工作并驱动车辆
缺点	功率经过热能->电能->机 械能转换，传递链长	控制系统复杂	结构复杂，成本高
	高负荷时效率低，甚至低 于传统车辆	发动机受行驶工况影响大，不 容易控制在高效区稳定工作	
	所需三大动力总成的功 率大，在中小型车上布置 困难	集成成本高	
代表 产品	丰田 Coaster 客车	本田 Insight 轿车	丰田 Prius 轿车

## 1.2 混合动力汽车国内外研究现状

### 1.2.1 国外研究动态及典型产品

日本、美国以及欧洲各大汽车公司在混合动力汽车研发方面起步早，都取得了显著的成果。其中，日本汽车公司尤其显得突出。

丰田是目前走在混合动力汽车领域最前沿的汽车公司，也是世界上最早开始进行混合动力汽车研究的汽车公司之一。早在 1977 年，丰田就推出了其第一辆混合动力原型车 TOYOTA Sport 800。到 1997 年，丰田公司再度连续推出 Coaster 混合动力客车和 Prius（意为“先驱”）的混合动力汽车，引起全球瞩目。紧接着，丰田又在第一代 Prius THS 的基础上推出了 2003 Prius 和 2004 Prius，每一款都相比前任有不小的进步。2004 Prius 驱动电机功率增加到 50kw，从丰

田 Prius 的发展来看是一个随着技术的成熟和进步,混合度不断加强的过程。2004 年 Prius 在日本城市循环工况 1015 下燃油经济性提升了近一倍,其中怠速关闭发动机占 25%,制动能量回收占 25%,改善发动机工况占 50%<sup>[9]</sup>。从 1997 年至 2006 年四月底,丰田 Prius 混合动力车在全球的销售已经超过了 50 万辆。作为世界上最早实现批量生产的混合动力汽车, Prius 因革命性地降低了车辆燃油消耗和尾气排放,其划时代的意义与先进性得到了全世界的高度评价。目前丰田公司在市场上的混合动力汽车还有 Lexus RX 400h SUV, Lexus 450h GS, Highlander SUV, Estima MPV, Alphard MPV, Sienna MPV, 充分显示出丰田在发展 HEV 这一新生事物方面的勇气和信心。

表 1.4 Prius 的发展以及与其他类型汽车的效率对比 (北美市场)<sup>[9]</sup>

	2003 年轿车平均水平	1999 Prius	2003 Prius	2004 Prius	燃料电池轿车
燃料开采效率	79%	79%	79%	79%	58% (天然气制氢)
汽车燃油效率	18%	27%	31%	37%	50%
综合效率	14%	21%	24%	29%	29%

除了丰田公司以外,本田、日产等日本汽车公司也分别研制了自己的混合动力汽车,并取得了骄人的成绩。本田于 2000 年推出独立研制的小型 2 座 Insight 混合动力车(目前已停产)。Insight 并联式混合动力汽车装备了本田公司的 IMA (Integrated Motor Assist) 动力系统和无级变速器,并且车身由质量轻的铝压材和树脂材组合而成,从而实现了 35km/L 的超低油耗和 80gCO/km 的洁净排放。2002 年以后,本田公司又陆续推出了 Civic 和 Accord 混合动力轿车。作为日本的第二大汽车制造商,日产公司于 2000 年推出了 Tino 混合动力轿车,采用启动/发电复用电机的同时还在 CVT 的传动系与发动机之间并联了一个驱动电机。但该车并没有大批量地推向市场。因为之前在绿色环保汽车上的研发,日产公司更注重在发动机的优化上,而非混合动力上,这导致了其排放虽然比丰田 Prius 低但油耗为 Prius 的一倍之多。为了加快其进入混合动力市场的步伐,日产在 2002 年与丰田签订了使用丰田混合动力零部件的合约,并于 07 年 1 月再度推出了 Altima 混合动力轿车。

表 1.5 首批走向市场的日本混合动力轿车技术参数对比

车型	Toyota Prius 2001	Nissan Tino	Honda Civic
发动机排量	1.5 L	1.8 L	1.4 L
额定功率	53kw / 4500rpm	73kw / 5200rpm	63kw / 5700rpm
最大扭矩	115Nm / 4200rpm	141Nm / 4000rpm	118Nm / 3300rpm
电机类型	永磁	三相同步	永磁
电机功率	33kw / 1040-5600rpm	17kw	10kw / 4000rpm
电池类型	镍氢电池 6Ah	锂离子电池 3.6Ah	镍氢电池 6.0 Ah
电池电压	273.6V (228cells*1.2V)	120-200V (48cells*2.5-4.1V)	144V (120cells*1.2V)
长*宽*高	4310*1695*1490mm	4270*1760*1610mm	4440*1715*1430mm
整备重量	1254kg	1500kg	1244kg
轴距	2550mm	2535mm	2619mm
前轮距	1475.7mm	1535mm	1471mm
后轮距	1480.8mm	1510mm	1471mm
最高车速	169km/h	166.7km/h	163km/h

日本汽车公司在混合动力汽车领域前瞻性得走在了整个世界的前沿。紧随其后的是美国和欧洲的各大汽车公司。

1999 年, 福特 Prodigy 弱混合动力汽车出现在上海国际汽车展览会上<sup>[10]</sup>。该车的显著特点是采用了 4Ah 的小镍氢蓄电池, 整车装备质量只有 1083 kg。Prodigy 是 ISG 并联形式的弱混合动力汽车, ISG 功率为 8kw。在 2001 年的北美国际车展上, 福特推出 Escape 混合动力 SUV 概念车, 获得广泛关注。2004 年底, 福特将 Escape SUV 推向市场, 混联式的 Escape 装备有一台 28kw 的发电机和一台 65kw 的驱动电机, 采用镍氢电池组, 特别适合城市道路行驶, 加速性能可与装备 V6 发动机的 Escape 媲美。2005 年 7 月福特开始销售其第二款混合动力汽车 Mercury Mariner。福特还计划在 2008 年推出其新车 Fusion 和 Milan 的混合动力版。

而美国通用汽车公司则将研发重心放在皮卡、SUV 等混合动力车型上。这是由于皮卡和 SUV 的价格比轿车高, 所以其改为混合动力后提高的成本比例相对较小, 更容易被客户接受。另外在重型车上应用混合动力可以节省更多的燃油消耗。通用的 2005 GMC Sierra 并联式混合动力皮卡 (PHT) 装配了一台 5.3

升的 Vortec V-8 发动机, 采用 ISG 混合动力系统, 电机峰值达到 14kw, 使用 42V 的铅酸电池, 具有与传统皮卡相同的强大动力。2007 SUV Saturn Vue Green Line Hybrid SUV 也已推向了市场, 这款车采用通用公司的新型 BAS 混合动力系统, 可以提高 20%燃油经济性。而在 2004 年底, 为了对抗日本汽车公司在混合动力方面的巨大优势, 通用和戴姆勒-克莱斯勒公司宣布在混合动力领域进行合作, 以加快混合动力产业化的进程, 后来宝马公司也加入合作。三家公司共同研发的双模式混合动力系统将应用于 2008 Chevrolet Tahoe 和 2008 GMC Yukon 两款 SUV 上, 该系统可以降低油耗 25%。另外 2008 年通用还将在推出的凯迪拉克 Escalade, Chevrolet Silverado 和 GMC Sierra Crewcab 上使用这套系统。

戴姆勒-克莱斯勒公司开发的 Citadel 则为四轮驱动并联式混合动力汽车。3.5L、189kw 的前置汽油机驱动后轮, 同时还有一个 52kw 的电机驱动前轮, 两套动力系统独立工作, 通过路面耦合。此外, 在 Dodge ESX3, Smart ForTwo 和 Smart Crosstown 这三款车上, 戴-克使用了自己开发的混合动力系统。其中, Dodge ESX3 使用 1.5 升直喷三缸柴油机, 20hp 电机, 车身采用全铝结构, 内饰使用高度集成塑料, 使得整车质量降低到 2250lb, 但 Dodge ESX3 目前尚处在概念阶段, 预计今年可以上市。在 Dodge Durango Hybrid SUV 上, 戴-克则将采用同宝马以及通用共同合作开发的双模式混合动力系统。

在欧洲市场, 一向推崇柴油汽车的大众汽车在不断提升其柴油车平台的同时, 也表示其第一款油电混合动力车预计将在 2009 年推出, 该车将是捷达混合动力车。而法国雷诺公司研制的 VERT 和 HYMME 两款混合动力电动汽车也已在法国接受了 10000km 的运行试验。

## 1.2.2 国内研究动态

我国在“十五”国家 863 计划中, 设立了电动汽车重大专项。节能与新能源汽车重大项目在混合动力方面的重点任务是实现混合动力汽车规模产业化。

在 863 电动汽车重大专项的支持下, 虽然我国混合动力汽车的研究开发取得了一定技术突破, 但是国内自主研发的混合动力汽车还尚未走向市场实现产业化。一汽和东风研发的混合动力轿车和混合动力客车已经在开始进行商业化示范运行。其自主研发的 20 辆混合动力公交客车已在武汉累计运行 40 多万公里, 载客 86 万人次。重庆长安公司开发了 ISG 弱混合动力轿车, 并在国内率先

开展了混合动力专用开发发动机的开发。华南理工大学研究的混合动力轿车采用了自主研发的新型功率汇流机构<sup>[11,12]</sup>。吉利工业大学研究开发了4WD 轻型越野混合动力公交动力汽车。北京客车厂与北京理工大学等单位合作研制了混合动力公交客车。同济大学开发了前轮发动机+SSG, 后轮轮毂电机驱动的地面耦合的混联式混合动力汽车。表 1.8 为目前国内几家主要汽车生产厂家正在自主研发的混合动力轿车, 其中几款已于车展上亮相。

表 1.6 国内汽车公司研发的混合动力轿车

厂家	车型及参数	混合度及型式
东风电动车辆股份有限公司	EQ7200HEV, BSG and Traction Motor with AMT, 336V 8Ah Ni-MH	强混合, 并联/混联
一汽集团	CA7200HEV, AMT, 336V 8Ah Ni-MH	强混合, 并联
上汽	HEV, Traction Motor	强混合, 并联/混联
	ISG	中度混合, 并联
长安汽车公司	CV9 HEV, ISG, CVT transmission, 144V Ni-MH.	中度混合, 并联
奇瑞	Chery BSG HEV	弱混合, 并联
	Chery ISG HEV	中度混合, 并联
上海华普汽车有限公司	Maple MB, ISG, 2 clutch system, 42V Super Capacitor.	中度混合, 并联
华晨汽车有限公司	中华 HEV, ISG, 144V 8Ah Ni-MH	中度混合, 并联

### 1.3 本文主要内容

本文围绕中华 1.8T 并联式混合动力试验样车展开, 旨在研究一种适合并联式混合动力汽车、具有实际工程应用价值的整车控制策略。主要的研究对象为基于规则的逻辑门限值能量管理策略以及控制参数的模糊算法优化。本文是基于大量实际调试、数据采集分析工作的基础上完成的, 所研究的“并联式混合动力汽车逻辑门限值控制策略”已应用于实际样车, 完成了功能性验证。针对仿真和实际样车调试阶段发现的逻辑门限控制策略的不足, 进一步提出了将智能模糊控制应用于混合动力汽车系统, 并通过基于模型的 MATLAB 仿真验证了所设计的模糊控制系统的有效性。

本文主要包括以下内容:

第一章: 分析了国内外混合动力汽车发展的动态, 确定了本文研究的重点和方向, 概述了本文的主要研究内容。

第二章：混合动力汽车整车建模。为了减少不必要的样车试验并加速控制策略的开发进度，本章针对混合动力汽车能量管理策略开发的需要，采用了实验建模为主、理论建模为辅的建模方法，建立了面向混合动力汽车能量管理策略开发的整车各部件模型，为整车能量管理策略的研究和开发提供了必要的仿真平台。

第三章：本章根据对并联式混合动力汽车的工作模式划分和分析，通过对不同能量管理策略的比较，建立了一套基于规则的逻辑门限值能量管理策略，并进行了基于模型的离线仿真和样车实车试验。

第四章：基于逻辑门限值控制策略的基础，采用 MATLAB FUZZY LOGIC TOOLBOX 设计了一种更接近人类思维方式、模仿人类经验和决策行为的模糊控制器，通过离线仿真进行了控制效果的验证。

第五章：混合动力汽车整车控制系统开发。在完成了整车系统控制策略部分开发的基础上，对控制策略赖以实现的硬件环境进行了介绍，采用 dSPACE 和 MPC555 构建了控制系统的快速开发平台。

第六章：全文归纳分析总结，并对后继研究工作提出建议，展望了未来的研究方向。

## 第2章 混合动力汽车整车建模

### 2.1 引言

任何车辆控制系统的构成都包括三大组成部分，即控制算法、传感器技术和执行机构的开发。作为控制系统的关键，寻求一个能够为车辆提供良好性能的控制算法，则需要控制理论与车辆动力学的紧密结合，且主要以计算机建模与仿真分析及实时控制试验为研究手段。

计算机仿真手段的出现，为混合动力汽车整车建模提供了有力的工具。仿真分析有助于深入理解混合动力系统的工作过程和分析能量管理策略中占主要影响的动力学因素，快速验证能量管理策略，减少不必要的样车制造和实车试验，缩短开发周期，降低开发成本。在能量管理策略设计中，系统部件模型还可以用来定量分析整车的能量消耗，建立能量消耗模型，用于算法设计。此外，在整车方案设计时，可以用整车仿真程序来评估整车性能，验证方案设计，以及对方案进行优化设计<sup>[13]</sup>，如今国际流行的V型快速原型开发模式即建立在计算机仿真基础之上<sup>[14]</sup>。

在混合动力汽车仿真分析中，MATLAB/SIMULINK软件作为仿真技术平台是主要国内外研究人员建模及离线仿真时候采用的主要研究手段之一。MATLAB是MATRIX LABORATORY（矩阵实验室）的缩写，由MathWorks公司推出的一种面向工程和科学运算的交互式计算软件。自1980年问世以来，已广泛应用于生物医学工程、图像信号处理、语言信号处理、时间序列分析、控制论和系统论等各个领域。而SIMULINK是MathWorks公司于1992年推出的交互式模型输入与仿真环境，为开发人员提供了采用鼠标拖放方式建立系统框图模型的图形交互平台。通过SIMULINK提供的丰富功能块，可以迅速地创建动态系统模型，而不需要手工书写传统代码。SIMULINK是MATLAB的可视化控制系统仿真集成环境，是进行复杂控制系统快速建模与仿真的首选工具。

本文正是基于MATLAB/SIMULINK软件平台，建立了面向混合动力汽车能量管理策略开发的前向仿真模型，包括发动机模型、电机模型、蓄电池模型、离合器模型、变速器模型、驱动桥模型、车轮模型、车辆行驶动力学模型、驾驶员模型和

车辆控制器模型。面向混合动力汽车能量管理策略开发的仿真模型着重于分析各动力部件的能量消耗，采用了基于各部件稳态试验数据，结合整车动力学动态模型的建模方法。同时，对于主要零部件模型一方面考虑了对稳态特性在温升等参数改变时的修正，另一方面考虑了负载变化和惯量的动态影响<sup>[13, 15, 16, 17]</sup>。

## 2.2 混合动力汽车仿真建模方法

关于混合动力汽车建模仿真，按照仿真过程中控制信号与能量流的传递路径，目前有两种基本方法，即前向仿真和后向仿真。从动力装置到车轮的方向，即动力传递的方向为正方向，顺着这个方向的称为“前向”，其逆方向称为“后向”。对应的仿真结构分别称为“前向仿真结构(Facing-Forward)”和“后向仿真结构(Facing-Backward)”。

### 2.2.1 后向仿真

后向仿真模型是在假设汽车能够按照给定的驾驶循环的请求行驶轨迹（如汽车行驶速度、道路坡度和汽车动态质量）来行驶，从而反推汽车各总成应如何工作。这种模型不要求驾驶员的特性参数，驱动汽车所需的力直接根据请求的目标行驶轨迹计算得到，再转化为上级总成直接提供的转矩，同时汽车前进的线速度被转化为发动机或电机的旋转速度。这种计算方法逐个部件地沿着传动系统向后执行，与车辆的实际功率流的方向相反。后向仿真模型中使用的各种特性通常是在稳态时测试出来的，在计算能量消耗时不包括动态效果，也不考虑节气门和制动踏板位置等输入控制信号，因此在控制策略的仿真中，不能直接对油门踏板和制动踏板等控制信号进行建模。

· 由于后向仿真模型中汽车传动系统各部件在不同扭矩和速度下的效率特性和其他特性已经事先被测试出，各部件的效率可以直接计算确定，所以后向仿真模型计算速度比前向仿真模型快。其缺点是它假设循环工况的轨迹请求能够被满足，但是当速度轨迹的加速度超出传动系统的能力时，汽车实际的加速度必然小于轨迹请求的加速度，而后向仿真模型无法反映这种实际存在的情况，也不合适计算汽车的最佳性能。

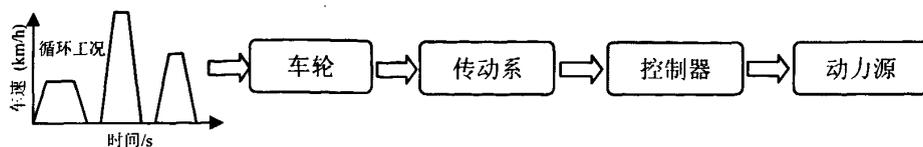


图 2.1 后向仿真流程图

### 2.2.2 前向仿真

前向仿真模型包括驾驶员模型，可以模拟驾驶员感觉车速并做出踩踏油门踏板加速或者踩踏制动踏板制动的操作，即考虑了加速踏板信号和制动踏板信号作为系统输入，计算路线是将这两个踏板信号转换成整车行驶的转矩或功率需求，在车辆控制器 VCU 模块中根据控制策略提出对各动力总成的转矩需求，动力总成模型根据该转矩需求及其能够提供的转矩限值向传动系输出转矩，扭矩沿着传动系向前直至传递到车轮。

前向仿真模型适合用于开发实际控制系统，基于前向仿真模型可以建立起控制系统的硬件在环仿真环境，能够处理实际传动系统中的测量数据。前向仿真方法的优点是其部件模型之间的联系更加接近于车辆的实际情况，比后向仿真方法的计算结果更准确，但也由此带来一个问题，就是计算量较大。因此，针对混合动力汽车能量管理策略开发的需要，本文采用前向仿真方法建立整车动力总成模型。

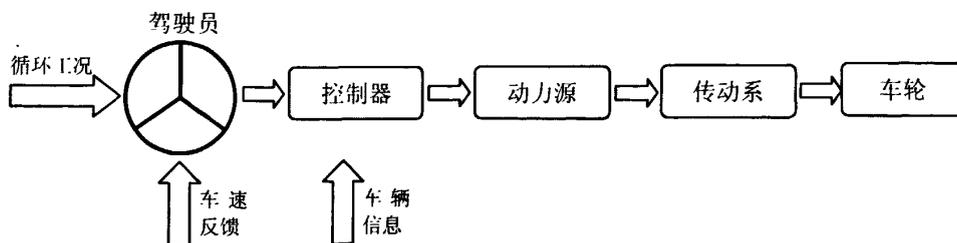


图 2.2 前向仿真流程图

## 2.3 混合动力总成各主要部件模型

### 2.3.1 发动机模型

发动机作为混合动力汽车的主要动力源，其模型的准确性直接影响着混合动力汽车的动力性、燃油经济性和污染物排放。发动机由于自身特性的显著非线性，真实模型相当复杂。

发动机建模有实验建模法和理论建模法两种方法<sup>[18]</sup>。实验建模法利用发动机输出转速、转矩、油耗以及排放之间的变化关系实验数据查表，其输入输出关系可以精确得表示发动机的稳态特性，并可根据环境对发动机工作特性的影响，引入环境变量对模型特性进行修正。实验数据建模法简单有效，模型需要的数据可以通过发动机性能试验得到，缺点是不能够反映发动机的瞬态响应特性，而且建立的模型只针对一台发动机。而理论建模法则基于理论分析，利用流体力学和动力学原理建立发动机的空气和燃油流量方程以及各运动部件的运动方程，涉及复杂的燃烧理论、各部件间的热传递等，其所需要的许多参数不容易测得，计算速度也非常缓慢，所以理论建模法主要运用于专项研究发动机内部结构以及工作机理对发动机性能参数的影响。

在混合动力汽车仿真程序中，发动机建模的主要任务是建立节气门开度与发动机转矩特性关系的模型，以及发动机燃油消耗和排放特性模型。建模过程中，我们只考虑发动机模型的输入和输出，而对其内部控制变量如点火提前角、废气再循环（EGR）和空燃比等不予考虑。所以，本文采用以实验建模为主、理论建模为辅的混合建模法。

发动机模型的基本结构分成四部分，包括：动力学计算模型，油耗和排放计算模型，和发动机热模型。

#### 1) 发动机动力学计算模型

发动机动力学模型的输入为发动机状态  $E_{state}$ （开启或关闭），发动机转速  $\omega_e$  (rad/s)，节气门开度  $\theta$ ，离合器状态  $Clutch_{state}$ （分离或结合）；输出为发动机输出扭矩  $M_{out}$  (Nm)。

设发动机产生的扭矩为  $M_e$ ，根据实验数据在 MATLAB 中利用二维查表一插值可得：

$$M_e = f(\theta, \omega_e) \quad (2-1)$$

设发动机实际输出转矩为  $M_{out}$ ，考虑惯性损失，可得：

$$M_{out} = M_e - J_e \cdot \dot{\omega}_e \quad (2-2)$$

式中  $J_e$  为发动机的转动惯量。

## 2) 发动机油耗和排放计算模型

发动机油耗和排放计算模型的输入为发动机状态  $E_{state}$ ，发动机转速  $\omega_e$ ，发动机产生的转矩  $M_e$ 。

发动机模型的油耗计算公式：

$$E_{fuel} = \int_0^t \dot{E}_{fuel} dt = \int_0^t f(\omega_e, M_e) dt \quad (2-3)$$

排放计算公式：

$$E_{emis} = \int_0^t \dot{E}_{emis} dt = \int_0^t f(\omega_e, M_e) dt \quad (2-4)$$

其中， $\dot{E}_{fuel}$  为发动机单位时间的燃油消耗量(g/s)， $\dot{E}_{emis}$  为单位时间的 CO（一氧化碳）、HC（碳氢化合物）、NOx（氮氧化合物）和 PM（微粒）排放量(g/s)； $f(\omega_e, M_e)$  为根据发动机转速  $\omega_e$  和转矩  $M_e$  两变量的二维查表函数。

由于发动机冷启动时的油耗和排放要高于发动机热机工作的油耗，为了更准确得计算油耗和排放，需要引入温度校正，定义油耗和排放修正系数为<sup>[19]</sup>：

$$G_{cold\_use} = (1 + \lambda_c^{3.1}) \cdot G_{hot\_use} \quad (2-5)$$

$$\lambda_c = \frac{ICE_{tstat} - T_{coolant}}{ICE_{tstat} - 20} \quad (2-6)$$

其中， $G_{cold\_use}$ 、 $G_{hot\_use}$  分别为发动机冷机的油耗、排放校正值和热机油耗、排放值， $\lambda_c$  为发动机冷却液温度关系系数， $T_{coolant}$  为发动机冷却液温度， $ICE_{tstat}$  为正常工作后冷却液的温度（设定常数）。

## 3) 发动机热模型

发动机热模型分成四部分：气缸套、气缸体、外部附件和引擎罩。在此不做赘述。

### 2.3.2 ISG 电机模型

在混合动力汽车仿真程序中，ISG 电机的输出性能（转矩、功率）是电机与电机控制器的综合性能，因此，建模中把电机及其控制器作为一个整体考虑。另外，

仿真的目的是为了体现电机的机械性能，而不是对电机内部结构进行设计，所以，同发动机建模一样，重点放在建立反映电机输入、输出关系的动力学（机械特性）模型，忽略其内部工作机制及电磁特性。这种建模方法的优点是适用于所有类型的电机，只要测得该电机的外特性数据即可。

在混合动力汽车中，ISG 电机除了作电动机工作外，还能用作发电机，所以，建立的电机模型还必须能同时满足模拟这两种工作模式的要求。

电机模型的输入为输入转矩  $M_{in}$  (Nm)，输入转速（即离合器模型的转速输出） $\omega_m$  (rad/s)，电机状态  $M_{state}$ ，需求转矩  $M_{req}$  (Nm)；输出为实际输出工作转矩  $M_{out}$  (Nm)，需求电功率  $P_{req}$  (W)。

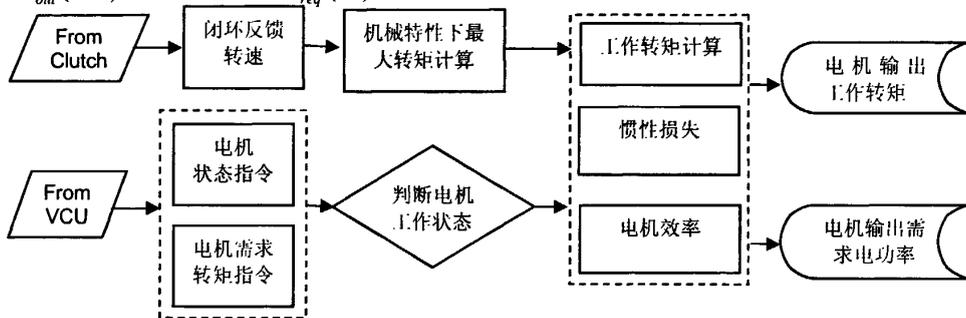


图 2.3 电机模型结构示意图

### 2.3.3 蓄电池模型

蓄电池作为混合动力汽车的电力能源储存装置，在驱动时，可以提供必要的辅助动力支持，在减速、制动过程中则回收能量。目前，在蓄电池建模方面，采用较多的是内阻模型（RINT）法，模型的建立主要采用经验公式与具体电池性能数据相结合的方法，这种建模方法的优点是建模方式简单，且存在一定的通用性。本文也采用 RINT 建模方法，将蓄电池模型等效为由开路电动势  $V_{oc}$  和等效内阻  $R_{int}$  构成的等效电路<sup>[20,21]</sup>，如图 2.4 所示。模型的输入为需求功率  $P_{req}$  (W)，输出为实际功率及蓄电池的 SOC 值。当  $P_{req} > 0$ ，功率需求为正，电池放电；当  $P_{req} < 0$ ，功率需求为负，电池充电。

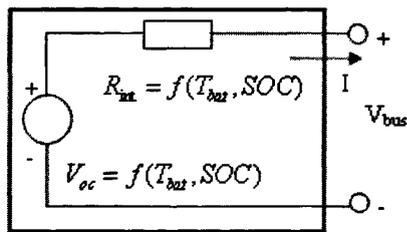


图 2.4 蓄电池模型的等效电路图

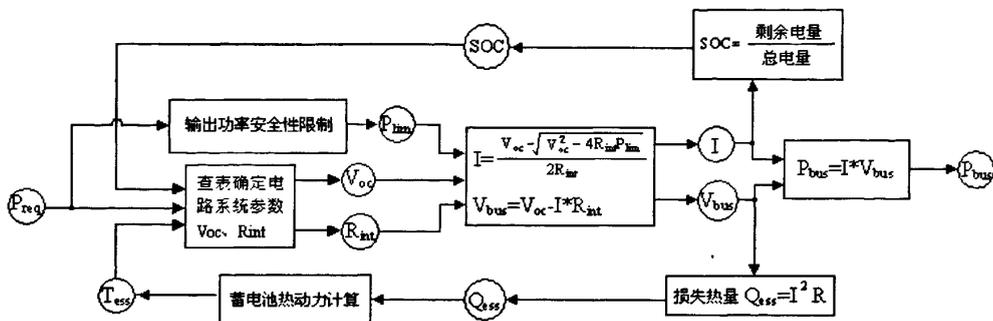


图 2.5 蓄电池模型示意图

等效内阻  $R_{int}$  ( $\Omega$ )和蓄电池开路电压  $V_{oc}$  (V)都是 SOC 和温度  $T_{bat}$  的函数，在 MATLAB 中，利用 Interpolation 内插值功能二维查表确定  $R_{int}$  和  $V_{oc}$  的值：

$$R_{int} = f(T_{bat}, SOC) \quad (2-7)$$

$$V_{oc} = f(T_{bat}, SOC) \quad (2-8)$$

等效电路基本方程：

$$I = \frac{V_{oc} - V_{bus}}{R_{int}} \quad (2-9)$$

$$P_{bus} = I \cdot V_{bus} = \frac{(V_{oc} - V_{bus})}{R_{int}} V_{bus} \quad (2-10)$$

其中， $I$  (A)是蓄电池充放电电流， $V_{bus}$  (V)是总线电压， $P_{bus}$  (w)是蓄电池实际输出功率。

蓄电池 SOC 值的预测与计算对蓄电池自身的许多参数变化以及整车能量管理策略都有着极其重要的影响，因而准确和可靠得获取蓄电池 SOC 是蓄电池仿真系统中最基本和最重要的任务。在此，采用安时累计法计算 SOC 值：

$$SOC = SOC_{int} - \frac{Q_{used}}{Q_{bat\_cap}} \quad (2-11)$$

$$Q_{used} = \begin{cases} \int I dt & I > 0 (\text{放电}) \\ \int (\eta_{clm} I) dt & I < 0 (\text{充电}) \end{cases} \quad (2-12)$$

其中， $SOC_{int}$  为 SOC 初始值， $Q_{used}$  (Ah)为已消耗的电量， $Q_{bat\_cap}$  (Ah)为蓄电

池的安时容量,  $I$  (A)为蓄电池充放电电流,  $\eta_{clm}$  为蓄电池充电库仑效率, 是与蓄电池温度有关的函数,  $\eta_{clm} = f(T_{bat})$ , 查表确定。

### 2.3.4 传动系模型

传动系统模型包括离合器模型、变速器模型和驱动桥（主减速器、差速器、半轴）模型。为车辆产生运动提供所需的推力和牵引力, 改变传动比, 使动力总成提供的扭矩适应车辆牵引力的瞬间需求。

#### 2.3.4.1 离合器模型

离合器主要是实现汽车动力源到变速器的传递, 是汽车动力传递的主要部件之一, 保证汽车平稳起步、传动系换挡动作平顺和防止传动系过载。可使汽车在静止状态下怠速运行, 可以从静止过渡运动, 也可以中断动力传递。在汽车开始启动时, 离合器打滑以补偿发动机与传动系之间的转速差。在不同状态时需要换挡, 换挡时离合器可使动力源与传动系分离。对于完整的离合器动力学模型, 文献<sup>[22, 23]</sup>进行了详细的描述。本文采用简化的模型, 即不考虑半离合打滑的状态, 而只考虑离合器完全接合和分离两个状态。

离合器模型的输入变量为: 输入转矩  $M_{in}$  (Nm), 离合器状态  $Clutch_{state}$ , 输入转速(即变速器模型的输出转速)  $\omega_m$  (rad/s); 输出变量为输出转矩  $M_{out}$  (Nm)和输出转速。

#### 2.3.4.2 手动变速器模型及驱动桥模型

变速器是汽车中从动力源到车轮的重要传动部件, 将动力系统传过来的转速和转矩通过变速齿轮的减速增矩传递到驱动桥, 改变动力输出的转矩和转速变化范围, 从而满足汽车不同的行驶条件和工况要求。

变速器模型的主要输入变量为档位指令  $gn$ , 来自离合器模型的转矩输入  $M_{in}$  (Nm), 从驱动桥反馈来的变速器输出轴转速; 主要输出变量为至驱动桥模型的输出转矩  $M_{out}$  (Nm), 模型的输出转速是计算得出的变速器输入轴转速, 向前反馈至离合器模型, 以确定需求动力输出部件的转速和转矩。

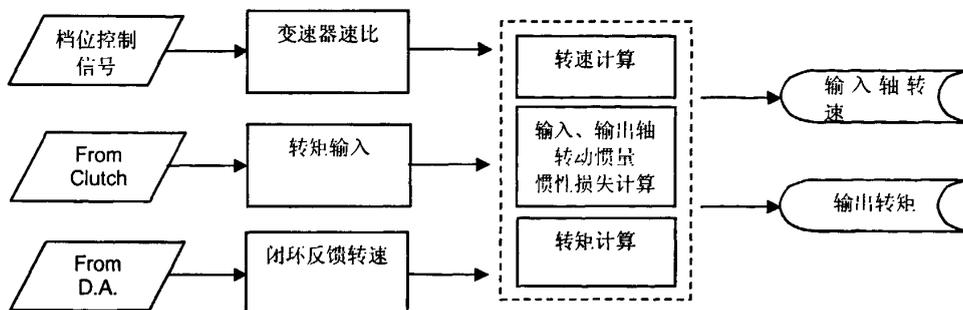


图 2.6 变速器模型的结构示意图

驱动桥处于动力传动系的末端，其作用是将转矩和转速最终传递到驱动轮。图 2.7 为驱动桥模型的输入输出。由于模型的输入输出关系比较简单，在此不再罗列各项公式。



图 2.7 驱动桥模型的输入输出

### 2.3.5 车辆纵向动力学模型

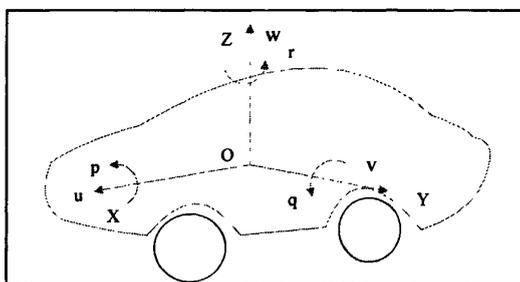


图 2.8 描述车身运动的 SAE 标准坐标系<sup>[24]</sup>

表 2.1 车身的六个运动自由度

符号	名称	意义	符号	名称	意义
u	纵向速度	车身质心速度沿车身系 x 轴分量	p	侧倾角速度	车身角速度沿车身系 x 轴分量
v	侧向速度	车身质心速度沿车身系 y 轴分量	q	俯仰角速度	车身角速度沿车身系 y 轴分量
w	垂直速度	车身质心速度沿车身系 z 轴分量	r	横摆角速度	车身角速度沿车身系 z 轴分量

在此，本文关心的是混合动力汽车的动力性和燃油经济性（包括排放），因此车辆动力学模型将只考虑 SAE 标准坐标系中 X 轴方向的车辆纵向动力学模型，即汽车的驱动和制动，而并不涉及车辆振动和行驶的操纵稳定性。

车辆纵向动力学模型包括车轮模型和汽车行驶动力学模型。

### 2.3.5.1 车轮模型

车轮（含制动器）模型的输入包括从传动系传递过来的输入转矩  $M_{in}$  (Nm)，从汽车行驶动力学模型传递来的车速  $V_{spd}$  (m/s)，以及摩擦制动力矩  $F_{brake}$ ；模型的输出为车轮驱动力  $F$  (N)，以及向传动系传递的车轮转速。需要说明的一点是，文本采用的是简化车轮模型，即在此并没有考虑摩擦制动力的前后轮分配问题。

考虑到路面的附着极限，车轮实际的驱动力或制动力  $F_{out}$  (N) 的输出受到道路附着系数的制约：

$$F_{out} = \begin{cases} G_{total} \cdot \mu & F > G_{total} \cdot \mu \\ F & -G_{total} \cdot \mu \leq F \leq G_{total} \cdot \mu \\ -G_{total} \cdot \mu & F < -G_{total} \cdot \mu \end{cases} \quad (2-13)$$

$$F = \frac{M_{in} - J_{wheel} \cdot \dot{\omega}_{wheel} - F_{brake}}{r} \quad (2-14)$$

其中， $J_{wheel}$  (kg/m<sup>2</sup>) 为车轮总的转动惯量， $\omega_{wheel}$  (rad/s) 为车轮转速， $G_{total}$  (N) 为车辆总重， $r$  (m) 为车轮滚动半径， $\mu$  为道路的附着系数。

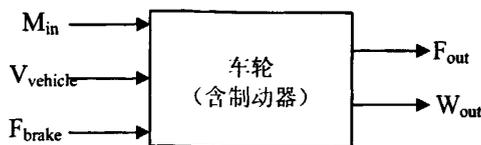


图 2.9 车轮（含制动器）模型的输入输出

### 2.3.5.2 汽车行驶动力学模型

汽车行驶动力学模型的输入为道路坡度值  $\alpha$  ( $^\circ$ )，驱动力  $F$  (N)；输出为车速  $V_{spd}$  (m/s)。

设道路坡度阻力为  $F_i$  (N)，空气阻力为  $F_w$  (N)，滚动阻力为  $F_f$  (N)，根据汽车行驶动力学经典方程，驱动力克服这三项行驶阻力后产生加速度。

道路坡度阻力  $F_i$  为：

$$F_i = G_{total} \cdot \sin(\alpha) \quad (2-15)$$

空气阻力为  $F_w$  为：

$$F_w = 0.5\rho_a C_D A V_{vehicle}^2 \quad (2-16)$$

滚动阻力为  $F_f$  为：

$$F_f = \begin{cases} G_{total} \cdot (f_1 + f_2 V_{vehicle}) \cdot \cos(\alpha) & V_{vehicle} \neq 0 \\ 0 & V_{vehicle} = 0 \end{cases} \quad (2-17)$$

其中， $V_{mass}$  (kg) 为车辆总质量， $G_{total}$  (N) 为车辆总重， $\alpha$  为坡度值， $\rho_a$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 为空气密度 1.2258， $C_D$  为空气阻力系数 0.35； $A$  为汽车正向迎风面积  $2 \text{ m}^2$ ， $f_1$  和  $f_2$  为滚动阻力系数。

设加速度为  $a$  ( $\text{m}/\text{s}^2$ )：

$$a = \frac{F - F_f - F_w - F_i}{V_{mass}} \quad (2-18)$$

加速度对时间积分，可得到模型的输出变量车速  $V_{vehicle}$  (m/s)：

$$V_{vehicle} = \int a dt \quad (2-19)$$

### 2.3.6 驾驶员模型

驾驶员模型是采用前向仿真策略进行建模分析的特有模型，是前向仿真区别于后向仿真的关键。驾驶员模型作为混合动力汽车整车模型的仿真起始点，通过控制器、动力源及整车传动系的计算，在整车动力学模型中得到仿真车速，同时将此车速反馈给驾驶员模型进行修正，在整体结构上构成了一个闭环反馈仿真系统，接近于实际的车辆行驶过程，通过设置不同的参数，驾驶员模型可描述不同驾驶风格以及不同的换档滞后时间。

驾驶员模型包括车速控制和换档控制两部分。采用了一个PID控制器来对驾驶员的操纵特性进行模拟，将输入的期望车速  $V_{cyc\_mph}$  与来自汽车行驶动力学模型输出反馈的实际车速  $V_{vehicle}$  进行比较，并将其差值  $\Delta V$  转变为加速踏板指令和制动踏板指令输出。

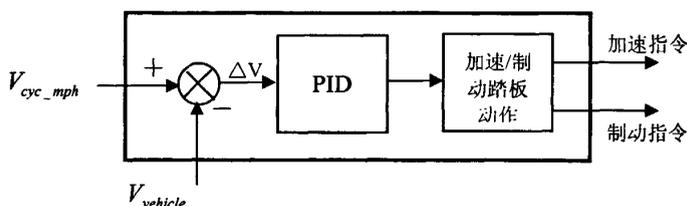


图 2.10 驾驶员模型的输入输出

PID 控制就是对误差信号进行加权、积分与微分运算，以完成整个控制过程。由于模型中只包含比例、积分、微分控制增益，因而模型控制参数较少，实现比较容易，只要将三个参数设定合适，就可得到比较满意的结果<sup>[25, 26]</sup>。PID 控制器的传递函数为：

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2-20)$$

### 2.3.7 车辆控制器模型

车辆控制器的功能是接收驾驶员的操作指令并实时检测整车运行状态，根据控制程序，计算并输出控制信号，控制混合动力系统执行相应的动作。控制器中的算法即控制策略是混合动力汽车的核心技术，负责协调控制各个零部件总成：发动机、

电机、蓄电池等，以满足混合动力汽车各项性能需求。车辆控制器模型基于 SIMULINK 及 STATEFLOW 建立，控制策略具体内容将在下章中讨论。

### 2.4 本章小结

本章基于 MATLAB/SIMULINK 软件平台，建立了面向混合动力汽车能量管理策略开发的整车各部件模型。由于混合动力系统自身及其各部件之间的协调工作复杂，建立系统的精确数学模型非常困难，因此本章采用了实验建模为主、理论建模为辅的建模方法。利用各部件稳态试验数据，同时考虑了各参数在不同外界条件如温度变化等对各主要部件参数的影响，并进行了修正，建立了多能源动力总成模型和整车纵向动力学模型。模型能够较准确地反映在不同工况下各部件的运行情况，计算整车的燃油消耗和排放，评估整车性能，从而为控制策略的仿真和研究打下了基础。

## 第3章 基于规则的逻辑门限能量管理策略

### 3.1 引言

混合动力汽车的整车控制系统，即车辆控制器，如同混合动力汽车的大脑，负责指挥各个系统的协调工作。混合动力系统的控制在本质上就是一个对不同能量源和动力元件进行协调控制的问题<sup>[27]</sup>。也就是说，混合动力汽车整车控制策略包括两部分内容：能量管理与驱动动力学协调控制。其中，能量管理策略是混合动力汽车技术的核心部分。能量管理策略的主要控制目标是提高汽车的燃油经济性，同时还得兼顾发动机排放、蓄电池寿命、驾驶性能及整车成本等多方面的要求，并针对混合动力汽车各部件的特性和汽车的运行工况，使发动机、电机、蓄电池和传动系统实现最佳匹配。由于并联式混合动力汽车有发动机和电机两个动力元件可以并行驱动汽车，因此除了能量管理策略以外，还必须对动力元件进行动力学协调控制，以保证两个动力元件在耦合工作过程中的驱动动力学性能。能量管理控制和动力学协调控制两者是密不可分的，它们互相联系、互为补充，统一于整车协调控制策略之中<sup>[28]</sup>。本文在控制策略方面以关注能量管理策略为主，而对汽车驱动动力学协调控制则不加以过多考虑。

### 3.2 并联式混合动力汽车能量管理策略概述

混合动力汽车驱动系统的布置方式不同，其控制策略也是不同的<sup>[29]</sup>。在混合动力汽车各部件的配置确定下来之后，如何优化控制策略是实现混合动力汽车低油耗、低排放目标的关键所在。在满足汽车的动力性和其他基本技术性能以及成本等要求的前提下，针对各部件的特性及汽车的运行工况，控制策略要实现能量在发动机、电机之间的合理而有效分配、使整车系统效率达到最高，获得整车最大的燃油经济性、最低的排放以及平稳的驾驶性能。

混合动力汽车系统同工业上用到的复杂系统一样，普遍采用分级分布式结构，如图 3.1 所示。最上层为整车系统的决策单元 VCU，是整个控制系统的核心，负责

整车的能量管理，统一协调和控制各个低端控制器；中间一层包括各个零部件低端控制器；最下层为各个执行器。

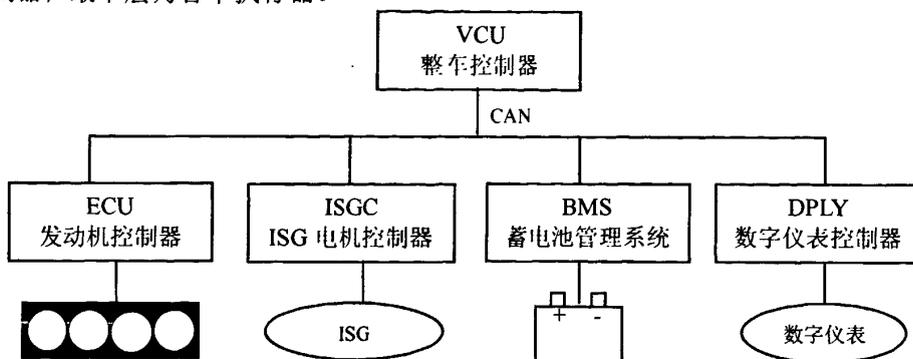


图 3.1 控制系统体系示意图

现阶段，在公开发表的文献中对并联式混合动力汽车能量管理策略的研究主要集中在四个方面：逻辑门限，瞬时最优，全局最优和智能能量管理策略。

### 3.2.1 基于规则的逻辑门限能量管理策略

逻辑门限能量管理策略通过一组参数，限定发动机工作区域，并根据预先设定的规则对混合动力系统的工作模式进行判断和选择。逻辑门限能量管理策略结构简单实用性强，很多基于优化算法的能量管理策略和智能能量管理策略都是以基于规则的逻辑门限能量管理策略为基础的<sup>[30]</sup>。

### 3.2.2 瞬时优化能量管理策略

瞬时优化能量管理策略是通过实时计算发动机和电机在不同功率分配组合和不同工作点处的瞬时燃油消耗和排放，以确定最佳的混合动力系统工作模式和工作点。需要实时采集并跟踪大量的发动机和电机运行数据的变化，使得控制系统的软件和硬件过于复杂，实现起来困难，成本高。

### 3.2.3 全局最优能量管理策略

全局最优能量管理策略是应用最优化方法和最优控制理论开发出来的混合驱动动力分配能量管理策略。对于给定循环工况，采用全局最优能量管理策略实现真正

意义上的最优化。但是，全局能量管理策略要求汽车的行程是已知的，而通常汽车的行程是无法预先知道的，因此一般只用于评估实时能量管理策略的效果不用于实时控制。

#### 3.2.4 智能能量管理策略

智能能量管理策略是应用模糊逻辑或神经网络来决策混合动力系统的工作模式和功率分配。其中，基于模糊逻辑的模糊能量管理策略鲁棒性强、实时性好，具有很强的实用性，而且还能克服逻辑门限能量管理策略的不足之处，是一种极具推广前景的能量管理策略。

由于在建立精确的混合动力汽车能量消耗解析模型方面尚无行之有效的方法，混合动力系统由于其复杂性也不能采用常规的控制系统设计方法，因此，直至今日，只有基于工程经验进行设计的逻辑门限控制方法在实际商品化混合动力汽车中得到了应用。瞬时优化能量管理策略由于计算量巨大，需要昂贵的高速运算芯片，成本比较高，加之在算法理论（能量回收预测模型）上尚欠完善，因而尚不能在实际混合动力汽车上推广应用。模糊控制在许多工程应用领域中已被证明是一种优越的控制技术，在许多传统控制技术不能胜任的场合，应用模糊控制可以取得良好的效果。在混合动力汽车控制领域，模糊逻辑也是一种比较适合的控制技术，具有很好的应用前景。模糊能量管理策略与逻辑门限能量管理策略关系密切，逻辑门限能量管理策略是基于传统布尔逻辑推理的控制方法，简单而有效，而模糊能量管理策略则基于模糊逻辑推理，在能量管理策略的分析与综合方法上，逻辑门限控制方法是模糊逻辑控制方法的基础。

本章针对并联型混合动力汽车，研究并设计了一种逻辑门限能量管理策略（LTCS）。区别于一般的逻辑门限能量管理策略的是，在此不仅把发动机高效区的转矩值作为控制策略的门限参数值，同时，把蓄电池受 SOC 的约束从而能够提供功率的限值以及 ISG 在一定转速下所允许的最大转矩也作为能量管理控制策略控制的参数，即：从整个系统最优化的角度来综合设计混合动力汽车整车能量管理策略。

### 3.3 标准城市循环工况下的并联式混合动力汽车工作模式划分

无论是串连、并联还是混联系统，所谓的‘混合动力汽车’关键词就是‘混合’，其区别于传统汽车的特征之一就是混合动力汽车配备了发动机及电动机两种动力源，从而可以根据最优化排放或最优化燃油利用率或综合性能最优化的目的在多种运行模式之间实时切换。因此，如何在不同的工况要求下进行混合动力汽车模式的划分、识别以及转矩的合理分配是控制策略首要解决的问题。

#### 3.3.1 标准城市循环工况

控制策略的验证，无论是基于 MATLAB 的离线或是实时仿真，都是基于国际标准的城市循环工况。目前，最为常用的考察车辆动力性能及能源消耗情况的城市循环工况有 UDDS、1015、NEDC。其中，UDDS 是美国城市循环工况，根据美国洛杉矶市中心的交通情况拟定，包括了一系列不重复的加速、减速、怠速和接近于等速的行驶过程。1015 是日本城市循环工况。NEDC 是新欧洲行驶循环，这是目前我国测试轿车燃油经济性和排放性能的主要循环工况。

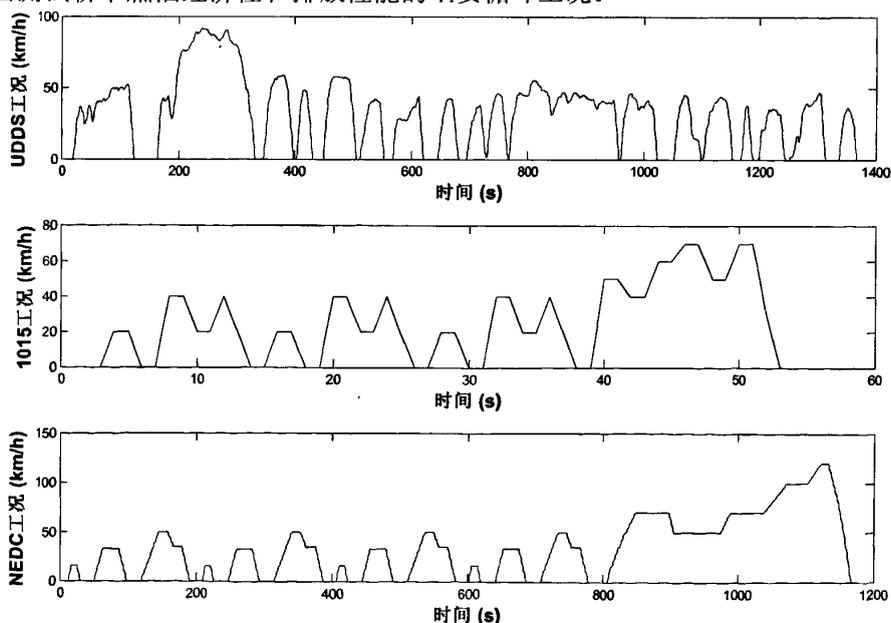


图 3.2 UDDS, 1015, NEDC 循环工况的车速时间历程

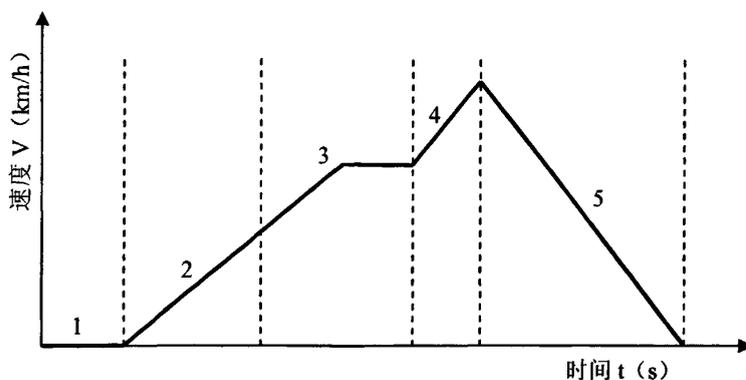
表 3.1 不同城市循环工况的特征数据对比<sup>[14]</sup>

特征数据	NEDC	1015	UDDS
时间(s)	1225	660	1369
距离(km)	10.93	4.16	12
最高车速(km/h)	120	70	91.25
平均车速(km/h)	32.1	22.68	31.51
最大加速度(m/s <sup>2</sup> )	1.06	0.79	1.48
最大减速度(m/s <sup>2</sup> )	-1.39	-0.83	-1.48
平均加速度(m/s <sup>2</sup> )	0.54	0.57	0.5
平均减速度(m/s <sup>2</sup> )	-0.79	-0.65	-0.58
停车怠速时间(s)	339	215	259
停车次数	13	7	17

根据 Wipke 等人的研究结果显示, 针对 NEDC 试验工况优化的车辆具有较高的适应性, 在美国和日本的试验工况上性能也比较好, 油耗和排放的综合结果仅次于针对某特定工况优化的车辆<sup>[31]</sup>。本文的目标是针对城市和公路的综合行驶工况, 最小化混合动力汽车的燃油消耗。因此, 本文选择新欧洲行驶循环 (NEDC) 作为整车控制器开发过程中离线仿真和实时仿真所采用的标准试验工况。

### 3.3.2 工作模式划分

从上一节可以看出, 对于任一循环工况, 均是由许多平均车速和运行时间不同的基本循环段组成的, 其中曲线 1 为停车/起动阶段, 2 为低速行驶的缓慢加速过程, 3 为正常行驶的加速及匀速行驶过程, 4 为急加速全负荷行驶过程, 5 为制动减速直至停车过程, 如图 3.3 所示。



1. 停车/起动 2. 低速行驶 3. 正常行驶 4. 全负荷行驶 5. 制动减速

图 3.3 循环工况的基本循环段组成

相应得，将混合动力汽车的工作模式划分为以下几种，见表 3.2。需要说明的是，本文在实车环境下调试所基于的并联式混合动力试验样车，由于受 ISG 功率限制，ISG 电机不能单独驱动车辆，也就是说，尚无法实现纯电动驱动功能，故在此，对纯电动模式不做考虑。

表 3.2 并联式混合动力汽车工作模式划分

工况	模式	说明
停车工况	停车模式	停车状态
起动工况	起动电机起动模式	起动电机起动发动机
	ISG 助力起动模式	ISG 快起发动机
驻车工况	驻车发电模式	ISG 以发电机状态运行
	发动机关闭模式	怠速停机
驱动行驶工况	发动机单独驱动模式	传统发动机单独驱动
	主动充电模式	SOC 低于安全限值时强制充电
	ISG 电机助力模式	ISG、发动机共同驱动
	ISG 电机发电模式	ISG 为蓄电池充电
制动工况	传统制动	传统摩擦制动
	纯电动制动	再生回馈制动
	复合制动	传统摩擦制动+再生制动

### 3.4 并联式混合动力汽车工作模式分析和转矩分配

模式划分后的一个难点就是整车控制系统如何根据各个输入信号来正确判断 HEV 当前的状态和驾驶员的意图, 从而通过控制逻辑和控制算法进行模式识别和模式切换。判断过程主要依据如下输入量: 钥匙位置  $Key$  (OFF、ON、START)、档位  $gn$ 、离合器状态  $Clutch_{state}$  (断开或闭合)、油门踏板信号  $app$ 、制动踏板信号  $bpp$ 、车速  $V_{spd}$ 、发动机转速和电池的 SOC 等。在实车环境下, 还必须实时采集 ISG 电机母线电压、电流、温度、电池组电压、电池组平均温度、充放电电流、高压继电器状态等各个部件的状态, 也作为整车控制系统的判断输入量, 情况要复杂得多。本文以讨论能量管理策略为主, 故不作赘述。

为了便于分析各种工作模式, 将驱动工况时变速器输入轴上的转矩请求  $M_{req}$  表述如下:

$$M_{req} = M_e + M_m \quad (3-1)$$

其中,  $M_e$  (Nm)、 $M_m$  (Nm) 分别为发动机扭矩和电机扭矩, 其中  $M_e$  为正;  $M_m$  有正有负, 正表示助力, 负表示发电。制动时的扭矩需求较为复杂, 在制动模式里单独讨论。

#### 3.4.1 起动模式

这里的“起动”指的是整车起动, 即起车。传统车辆在起步过程中, 发动机热效率低、排放性能差。而对于混合动力汽车而言, 一般起车有发动机起车和 ISG 电机起车两种情况。如果以 ISG 电机起车, 那么车辆可以直接以纯电动模式运行。由于本文的试验样车受 ISG 输出功率的限制, 暂不考虑 ISG 电机起车的情况。

##### 1) 起动电机起动模式

当钥匙信号  $Key$  在 Start 位, 发动机处于停机状态, 即发动机转速  $\omega_e$  为 0, 且变速器处于空档或离合器断开时, 进入冷起动模式, 由起动电机起动发动机。

##### 2) ISG 助力起动模式

当钥匙信号  $Key$  在 ON 位、加速踏板信号  $app \neq 0$ , 发动机处于停机状态, 即发动机转速  $\omega_e$  为 0, 变速器处于空档或离合器断开, 且蓄电池电量满足  $SOC \geq SOC_{min}$  时, 进入 ISG 助力起动模式, 由 ISG 电机热起动发动机, 一旦将发动机拖至怠速转

速以上，则退出该模式。

### 3.4.2 驻车模式

驻车模式又可划分为驻车发电模式和发动机关闭模式。

#### 1) 发动机关闭模式

发动机关闭模式是指怠速自动停机，以此减少传统车辆在怠速过程中不必要的燃油消耗及废气排放。

#### 2) 驻车发电模式

如果蓄电池 SOC 值低  $SOC < SOC_{low}$ ，则出于保护蓄电池的目的，发动机怠速不停机，而进入驻车发电模式，即 ISG 电机以发电机状态运行，发动机驱动 ISG 电机强制为蓄电池充电。若  $SOC \geq SOC_{low}$ ，则发动机关闭，ISG 停机，进入发动机关闭模式。此模式下发动机、电机扭矩分配如下，式中  $\omega_m$  (rad/s) 为 ISG 电机转速。

$$T_m = f(SOC, \omega_m), T_e = T_m \quad (3-2)$$

### 3.4.3 驱动模式

当发动机处于驱动状态，档位在非空档，离合器闭合时，判断车辆进入驱动工况，即  $app > 0 \& eng\_state = 1 \& gn \neq 0 \& Clutch_{state} = 1$ 。

根据上一节分析可知，驱动工况下情况较为复杂。需要考虑发动机单独驱动、主动充电、ISG 电机助力、ISG 电机发电这四种工作子模式。其中，发动机单独驱动、ISG 电机助力和 ISG 电机发电模式都是出于平衡和改善发动机工况、调整发动机工作在高效区的目的。而主动充电模式则是出于保护蓄电池的目的，强制充电，而暂时不考虑经济性和排放问题。

#### 1) 发动机单独驱动模式

当蓄电池 SOC 在正常工作区间，需求扭矩在发动机优经济区域范围内，由发动机单独驱动；当需求扭矩在发动机优经济区域范围之外但是蓄电池 SOC 值不合适时也由发动机单独驱动。即当满足式(3-3)时发动机单独驱动，进入该模式之后当满足式(3-4)时退出。

$$\begin{cases} T_{eng\_opt\_low} \leq T_{req} \leq T_{eng\_opt\_hi} \\ SOC_{low} \leq SOC \leq SOC_{hi} \end{cases} \parallel \begin{cases} T_{req} > T_{eng\_opt\_hi} \\ SOC < SOC_{low} \end{cases}$$

$$|| \begin{cases} T_{req} < T_{eng\_opt\_low} \\ SOC > SOC_{hi} \end{cases} \quad (3-3)$$

$$\begin{cases} T_{req} < T_{eng\_opt\_low} \\ SOC < SOC_{hi} \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} T_{req} > T_{eng\_opt\_hi} \\ SOC > SOC_{low} \end{cases} \quad (3-4)$$

此时，发动机，电机扭矩分配如下：

$$T_m = 0, T_e = T_{req} \quad (3-5)$$

## 2) 主动充电模式

当蓄电池 SOC 降低到其使用范围最低门限值，即  $SOC < SOC_{min}$  时，发动机驱动 ISG 电机强制为其充电。当  $SOC \geq SOC_{low}$  时，退出该模式。

发动机、电机扭矩分配如下：

$$T_m = f(SOC, T_{req}, \omega_m), T_e = T_{req} + T_m \quad (3-6)$$

## 3) ISG 电机助力模式

当需求扭矩大于发动机优经济区域上限且蓄电池 SOC 值在合适区间时 ISG 电机助力。即当满足式(3-7)时进入电机助力模式，满足式(3-8)时退出该模式。

$$\begin{cases} T_{req} > T_{eng\_opt\_hi} \\ SOC > SOC_{low} \end{cases} \quad (3-7)$$

$$SOC \leq SOC_{min} \text{ 或 } T_{req} < T_{eng\_opt\_hi} \quad (3-8)$$

## 4) ISG 电机发电模式

当需求扭矩小于发动机优经济区域下限且蓄电池 SOC 值在合适区间时，ISG 电机发电为蓄电池充电。即满足式(3-9)时进入 ISG 电机发电模式，满足式(3-10)时退出。

$$\begin{cases} T_{req} < T_{eng\_opt\_low} \\ SOC < SOC_{hi} \end{cases} \quad (3-9)$$

$$SOC \geq SOC_{hi} || T_{req} > T_{eng\_opt\_low} \quad (3-10)$$

### 3.4.4 制动模式

传统车辆的制动过程依靠摩擦热的方式消耗车辆行驶的动能从而达到降低车速的目的。而装备了 ISG 电机的混合动力电动汽车，可以在制动过程中将牵引电动

机作为发电机，依靠车轮的反向拖动产生电能和车轮制动力矩，从而在减缓车辆速度的同时将部分动能转化为电能以备再利用。制动能量回收系统能够改善混合动力汽车的能量利用效率，有效地降低车辆的排放量并提高燃油经济性和车辆的续驶里程。因此在制动模式下，控制策略的目标就是在满足驾驶员制动需求和车轮不趋于抱死的前提下最大程度得在驱动轮上增大由电机提供的再生制动扭矩，回收车辆的动能。当再生制动扭矩低于需求制动扭矩时，为了满足制动需求，进入复合制动模式，即摩擦制动装置参与制动，产生摩擦制动扭矩，配合再生制动扭矩共同工作，达到制动目的。

将制动模式分为传统摩擦制动模式、纯电动制动模式和复合制动模式。当制动踏板有信号即进入制动模式，控制器根据档位信号、离合器信号、SOC 值以及车速等信号，判断制动模式。

将制动时车轮上的转矩请求  $T_{req}$  表述如下：

$$T_{req} = T_b + (T_m + T_e) \cdot i_g \cdot i_f \quad (3-11)$$

式中， $T_e$ 、 $T_m$ 、 $T_b$  分别为发动机扭矩、ISG 电机扭矩及摩擦制动力矩大小； $i_g$ 、 $i_f$  为汽车变速器传动比和主减速器传动比。

### 1) 传统制动模式

当车速过低或传动系与 ISG 电机脱开或 SOC 过高时，进入传统制动模式，制动力矩由摩擦制动片提供。

### 2) 纯电动制动模式

为了尽可能多得回收制动能量，一般情况下控制策略在保证制动需求和安全的前提下尽量采用再生回馈方式制动，即 ISG 以发电机状态运行，产生一定的制动力矩，并为蓄电池充电。此时，若  $SOC \geq SOC_{max}$  时，则进入传统制动模式。

此模式下电机扭矩，制动力矩分配如下：

$$T_m = \frac{T_{req}}{i_g \cdot i_f} - T_e, T_b = 0 \quad (3-12)$$

### 3) 复合制动模式

由于电机可产生的制动转矩是当前电机转速的函数，所以当电机产生的实际反馈制动转矩已经达到最大值但依旧不能满足制动需求时，则要求液压制动系统提供

额外的制动力矩，即复合制动模式。若  $SOC \geq SOC_{max}$ ，则进入传统制动模式。

此模式下电机扭矩，制动力矩分配如下：

$$T_m = T_{m\_min} = f(\omega_m, SOC), T_b = T_{req} - (T_m + T_e) \cdot i_g \cdot i_f \quad (3-13)$$

### 3.5 能量管理策略控制参数

基于以上的模式识别和转矩分配，设计了一组逻辑门限能量管理策略的逻辑门限参数，在限制发动机工作区间的同时，限制电池的工作区间，即将蓄电池的荷电状态 SOC 值维持在合理的范围内。通过这种限定门限值的手段，将发动机控制在高效率区运行，提供要求的转矩；电动机作为负荷调节装置，当需要大力矩输出时电动机参与驱动，降低发动机负荷；当只需小力矩输出时电动机吸收发动机转矩进行发电，增加发动机负荷。能量管理策略中，逻辑门限参数是控制策略的依据和基础，参数设置的合适与否直接影响能量管理策略的控制效果。

表 3.3 逻辑门限能量管理策略控制参数

参数符号	动态调整因子	说明
$SOC_{max}$	/	蓄电池使用 SOC 上限值，由电池物理特性决定
$SOC_{hi}$	/	SOC 控制高效区上限
$SOC_{obj}$	/	SOC 控制目标值
$SOC_{low}$	/	SOC 控制高效区下限
$SOC_{min}$	/	蓄电池使用 SOC 下限值，由电池物理特性决定
$T_{eng\_opt\_hi}$	Cal_eng_hi	发动机高效区扭矩上限，动态参数
$T_{eng\_opt\_low}$	Cal_eng_low	发动机高效区扭矩下限，动态参数
$T_{char}$	Cal_char	主动充电转矩，动态参数
$T_{stay\_char}$	Cal_stay_char	驻车发电转矩，动态参数

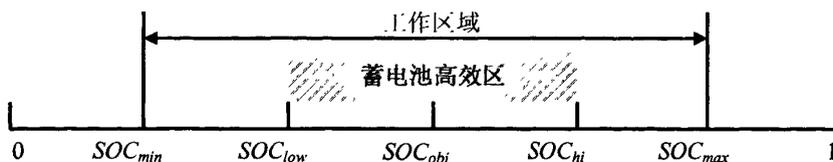


图 3.4 蓄电池 SOC 的分布

在  $(SOC_{low} \leq SOC \leq SOC_{hi})$  范围内，为蓄电池工作高效区，在此范围内，蓄电池的充放电内阻相对较低；在  $(SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{low})$  或  $(SOC_{hi} \leq SOC \leq SOC_{max})$  范围内，电池 SOC 值分别为较低及较高，但不影响蓄电池使用的安全性；当  $(SOC < SOC_{min})$  或  $(SOC > SOC_{max})$  时，SOC 值过低或过高，即在控制策略中应保证在任何时刻  $SOC > SOC_{min}$  且  $SOC < SOC_{max}$ ，否则会严重影响电池的寿命及使用安全性。

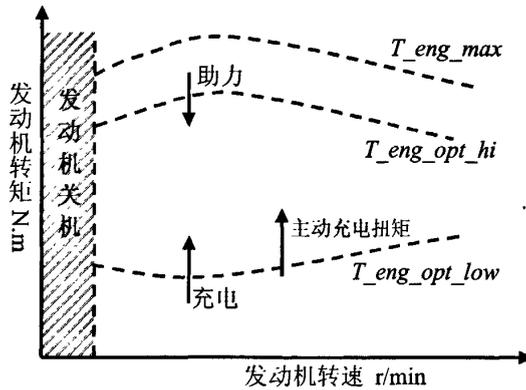


图 3.5 发动机负荷调节

### 3.6 离线仿真结果

将本章所研究的逻辑门限值控制策略结合于第二章建立的整车各主要模型中的车辆控制器子模型中进行仿真，仿真采用 NEDC 标准行驶循环工况。完整的混合动力汽车整车前向仿真模型如图 3.6。从模型中，可以实时监测发动机、电机、蓄电池及各个零部件的工作状态，并通过分析 SOC 值、油耗、车速、发动机转速、需求转矩与实际转矩分配情况等主要参数来验证控制策略的有效性。

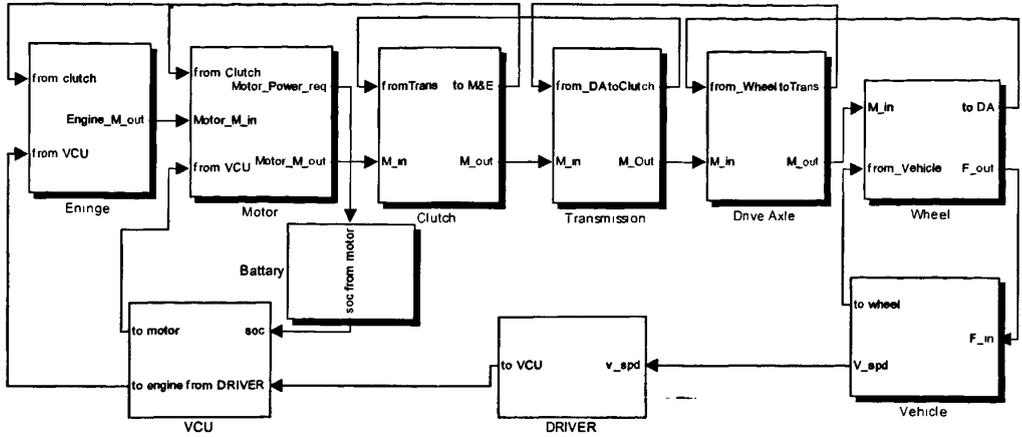


图 3.6 基于 Matlab/Simulink/Stateflow 的控制策略整车仿真模型架构

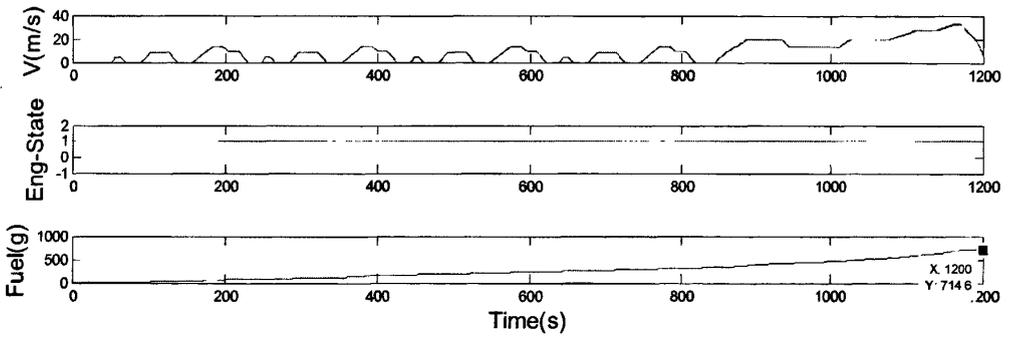


图 3.7 NEDC 工况下传统车辆仿真结果

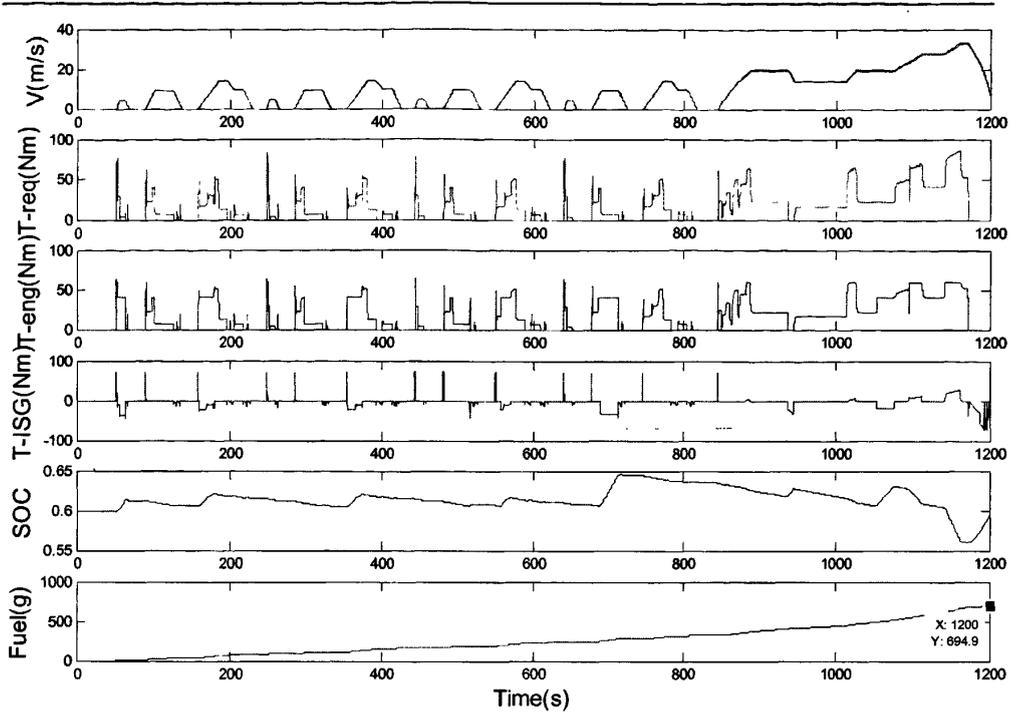


图 3.8 NEDC 工况下逻辑门限控制策略整车仿真结果（初始 SOC 为 0.6）

由图 3.8 所示的 NEDC 工况下需求车速与实际车速  $V(\text{m/s})$ 、需求转矩  $T\text{-req}(\text{Nm})$ 、发动机转矩  $T\text{-eng}(\text{Nm})$ 、ISG 电机转矩  $T\text{-ISG}(\text{Nm})$ 、SOC 值和油耗  $\text{Fuel}(\text{g})$  的仿真结果可以看到，发动机转矩采用逻辑门限值控制策略实现了混合动力汽车的怠速起停、再生制动及 ISG 扭矩调节功能。发动机转矩和 ISG 电机扭矩能够实时跟踪需求转矩的变化，需求转矩在二者之间进行合理分配。并且，在这过程中，将蓄电池的 SOC 值维持在一定的合适区间内。从油耗曲线中可以看出，利用逻辑门限值控制策略实现了怠速起停、再生制动和 ISG 扭矩调节功能后的整车 NEDC 工况下油耗为 694.9g。由于始末 SOC 值直接影响整车油耗，因此在平衡 SOC 始末差值对油耗进行修正处理后，油耗为 697.5g，相比于图 3.7 中原车在 NEDC 工况下 714.6g 的油耗，降低了 2.4%。

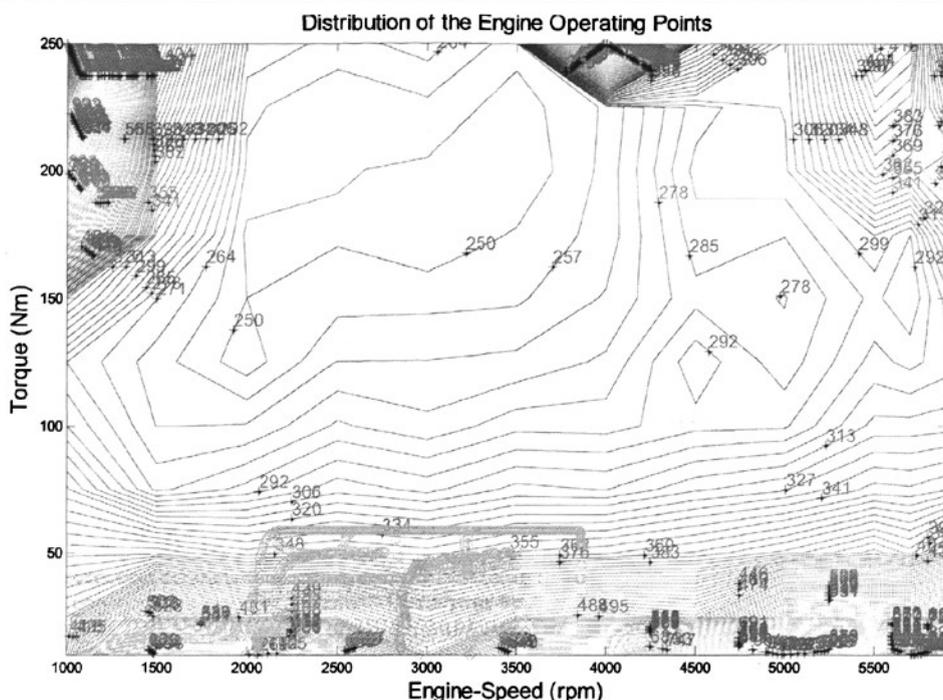


图 3.9 NEDC 工况下的发动机工作点分布 (初始 SOC 为 0.6)

从图 3.9 中的发动机工作点分布情况可以看到, 尽管 ISG 电机对发动机负荷进行了调节, 发动机工作点依旧聚集于万有特性图中的低效率区域。通过分析, 得出的原因是从混合动力汽车整车系统的角度来说, 150kW 的发动机功率过大了, 搭配 15kW 的 ISG 电机和 144v、8Ah 的蓄电池, 在一般的城市工况下, 发动机的大功率无法得到利用。在图 3.8 中也可以看到, ISG 电机除了快速启动的时候, 很少有机会在驱动的时候助力发动机, 蓄电池 SOC 值也维持在较高的区域, 造成的后果就是图 3.9 中发动机负荷较低, 工作于低效率区域, 而油耗相比于原车虽有节省, 但只节省了 2.4%, 不够理想。因此, 就从系统学的角度提出了一个问题, 即混合动力汽车整车系统各关键零部件的参数匹配问题。在第四章, 将从经济性和动力性两方面来重新选取大小合适的发动机, 在部件参数合适匹配的前提下, 进而专注于能量管理控制策略的研究。

### 3.7 实车试验结果

基于模型完成了离线验证后，将控制代码生成、下载并移植到实车上，通过实车试验来进一步验证逻辑门限控制策略的实际控制效果。

试验样车由华晨汽车有限公司提供，电机和电池等零部件由供应商提供，同济大学负责整车机械集成、CAN 协议制定以及控制系统开发工作。混合动力系统在发动机曲轴后端连接 ISG 电机，ISG 后端再以离合器与传动系连接。图 3.10 为整车配置方案的结构示意图。

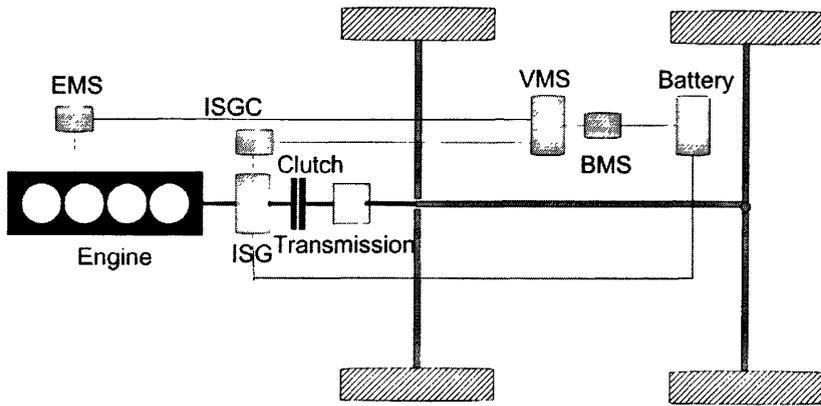


图 3.10 混合动力汽车整车系统结构简图

#### 3.7.1 主要部件特性

表3.4 主要部件特性参数

整车参数	长*宽*高	4880×1800×1450						
	样车总质量	1550kg						
	最高车速	210km/h						
	排放标准	国3标准（GB/T19755-2005）						
发动机特性	排量	150kW，1.8T汽油机						
电机特性	参数	15kW，ISG永磁同步电机						
蓄电池特性	参数	镍氢动力电池，144V，8Ah						
变速器及主减速器参数	项目	一档	二档	三档	四档	五档	六档	倒档
	速比	3.615	2.042	1.257	0.909	0.902	0.773	4.298
	主减速比	3.894				3.083		
	最大传递扭矩	235 Nm						
	输出转速范围	2000~5000 rpm						

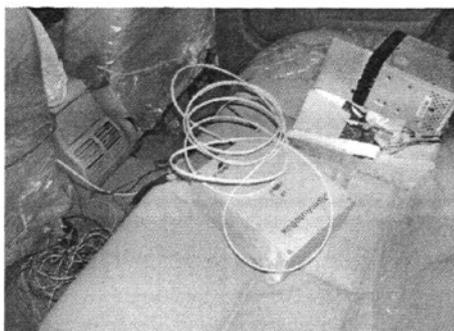


图 3.11 MicroAutoBox

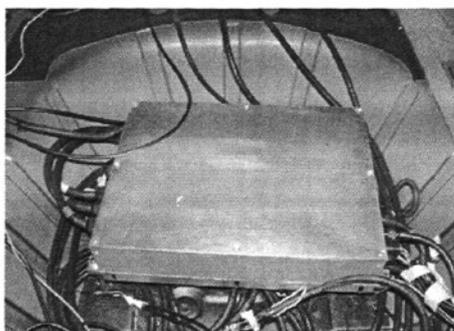


图 3.12 ISG 电机控制器

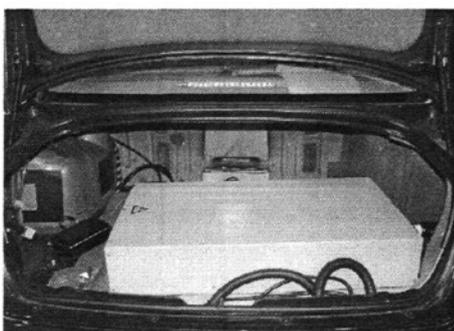


图 3.13 镍氢动力蓄电池

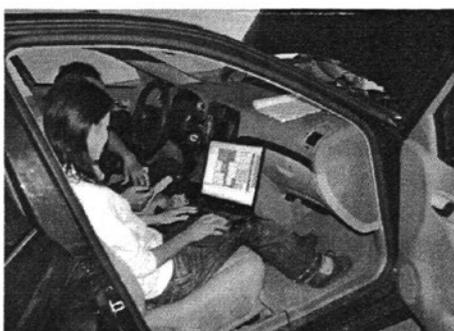


图 3.14 样车调试

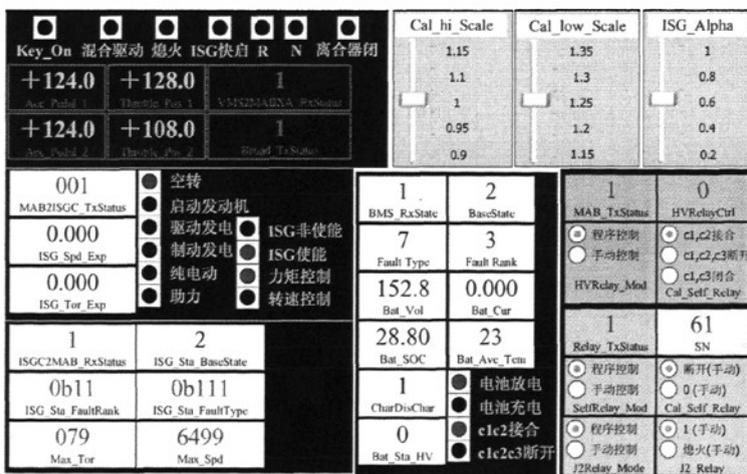


图 3.15 基于 dSPACE ControlDesk 的实车调试监控界面

## 3.7.2 实车试验结果分析

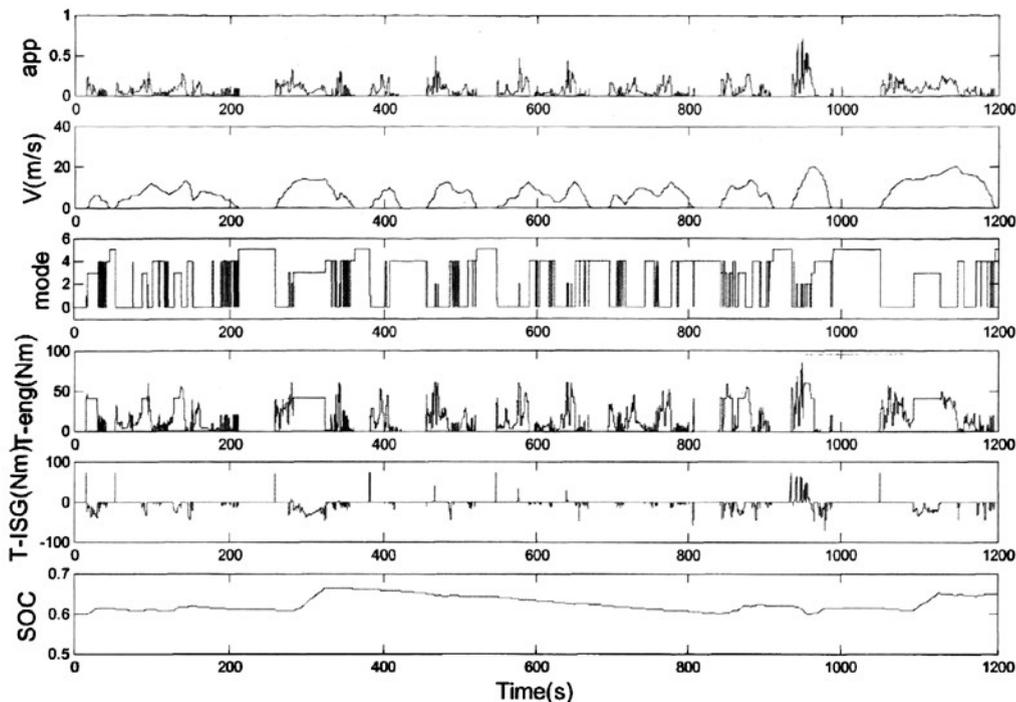


图 3.16 实车试验结果

利用图 3.15 所示的基于 dSPACE ControlDesk 的实车调试监控界面采集实车试验数据。部分参数时间历程曲线如图 3.16 所示。图中，*app* 曲线表示油门踏板开度（标定至 0-100%），*mode* 变量用来实时监控车辆运行状态，（0：发动机单独驱动，1：ISG 快起发动机，2：ISG 助力驱动，3：驱动充电，4：制动充电，5：怠速停机）。从图中可以看到，起步阶段，踩下油门踏板时，ISG 快速起动发动机，起步后，发动机负荷较低，发动机驱动 ISG 电机为蓄电池充电，SOC 值上升。当急踩油门踏板时，蓄电池为 ISG 电机提供电能使其协助发动机共同驱动。从实车试验过程记录下的曲线中可以看到，利用逻辑门限值控制策略实现了混合动力汽车样车所要求的各种功能。

### 3.8 本章小结

本章以第二章混合动力汽车各动力总成主要部件模型为基础，对并联式混合动力汽车的工作模式进行了划分。在 MATLAB/SIMULINK/STATEFLOW 环境下建立了一套基于规则的逻辑门限值能量管理策略。并且，在 NEDC 循环工况下，进行了基于模型的离线仿真，随后将控制代码移植至混合动力试验样车实车环境中，通过离线仿真和实车试验两方面表明了逻辑门限控制策略的控制有效性，为后续的控制策略优化打下了基础。

## 第4章 模糊控制在并联式混合动力汽车开发中的应用

### 4.1 引言

模糊控制抗干扰能力强，在测量不精确和部件特性变化时有很强的鲁棒性<sup>[32]</sup>，更适宜于用来模仿人的推理和决策行为，而在 HEV 系统的控制中，利用模糊控制则可以表达难以精确定量表达的规则，便于表现不同因素如转矩需求、SOC 等的影响。美国 Oakland 大学、Ohio 州立大学、国际可回收能源实验室、Seoul 大学等早前的研究<sup>[33-42]</sup>都表明模糊逻辑控制是非常适用于混合动力汽车控制的。Baumann<sup>[43,44]</sup>等利用模糊控制器修正根据加速踏板信号输入的发动机喷油量，以实现控制发动机工作点，显示了模糊逻辑在控制 HEV 这一充满不确定性因素的复杂系统上值得深入研究的潜力。

从第三章的分析中看到，用 ISG 电机驱动和用发动机驱动时的能量流向是不一样的。当使用发动机驱动时，能量直接从发动机通过传动系流向车轮；而当电机参与助力驱动时，能量先从发动机流向电池，再从电池流向电机，最后通过传动系统流向车轮。可以看出，电机参与驱动时的能量转换链路较长，相应的损耗也比发动机驱动时的能量损耗大。所以，当车辆的动力需求与发动机最优曲线上的动力差别不是很大时，发动机工作点通过电机调节到最优曲线上所获得的效率提高不足以克服电机调节所需能量在转换中的损失，此时采用逻辑门限值最优曲线控制策略就得不偿失。而且，从离线仿真曲线和实车试验曲线中都可以看到，基于布尔逻辑的逻辑门限值控制算法在临近门限值附近易引起频繁的模式切换，而频繁的模式切换对各零部件的寿命都是不利的。因此本章在逻辑门限值控制策略的基础上，进一步提出了将模糊算法应用于并联式混合动力汽车整车控制系统，基本思想是在汽车实际行驶的过程中用模糊逻辑在一定范围内动态得调整部分关键控制参数，实现对行驶工况的自适应性。

在上一章 NEDC 循环工况下的发动机工作点分布图和仿真结果图中可以看到，尽管利用逻辑门限值控制策略实现了混合动力汽车模式切换的各种功能并且通过 ISG 电机对发动机进行了扭矩调节，但是发动机决大多数情况下依旧工作于负荷较低的非最优区域。这是由于在所研究的循环工况下，发动机的功率过大。而对于混合动力汽车整车系统而言，保证各关键零部件的参数合理匹配，在这一前提下，再

进行控制策略的优化才更具价值和意义。因此，本章将根据汽车理论相关知识 [45,46,47]，从动力性和经济性两方面出发，以起步时间、最大扭矩、巡航车速、万有特性图等数值为参考，重新选择 41kW 功率发动机作为仿真研究对象。为了在同等条件下比较控制策略优化效果，对于重新选择的 41kW 发动机在逻辑门限值下的仿真结果也做了分析。

## 4.2 模糊控制系统设计

模糊控制器由四部分组成：模糊化接口、规则库、推理机制和非模糊化接口。

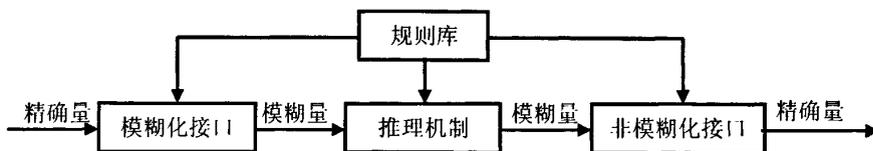


图 4.1 模糊控制器组成

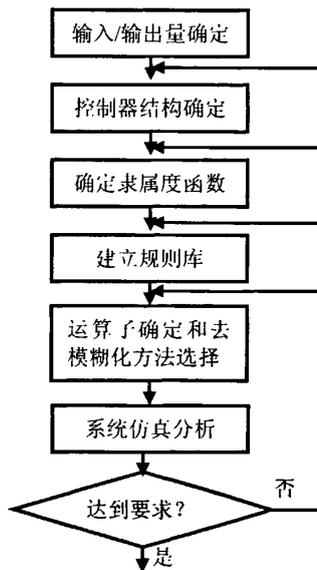


图 4.2 模糊控制器设计流程

### 4.2.1 模糊化接口

所谓模糊化，就是把精确输入变量数值，转换成模糊语言变量的语言值。隶属函数是用来表示模糊数的函数，表示  $x$  隶属于模糊集合  $A$  的程度，通常是一种分段函数，较常用的有三角模糊数、钟形模糊数、梯形模糊数等。

在此，令模糊控制器的输入量为整车的转矩需求  $T_{req}$  和蓄电池的 SOC 值。选择梯形隶属度函数。隶属度函数的设计主要根据发动机、ISG 和蓄电池的工作效率图，确定各自高效运行的模糊集。

对输入量做预处理：

设  $\alpha_{T_{req}}$  为需求转矩系数， $T_{e\_opt}$  为发动机最优燃油经济性曲线对应的不同转速下的转矩值：

$$\alpha_{T_{req}} = T_{req} - T_{e\_opt} \quad (4-1)$$

同理，设  $\beta_{soc}$  为 SOC 系数：

$$\beta_{soc} = 6 * \frac{SOC - \frac{SOC_{hi} + SOC_{low}}{2}}{\frac{SOC_{hi} - SOC_{low}}{2}}, \quad \beta_{soc} \in [-6, 6] \quad (4-2)$$

令输入量  $\alpha_{T_{req}}$  的模糊集合为：{NLL, NL, Z, PL, PLL}

令  $\beta_{soc}$  的模糊集合为：{NLL, NL, Z, PL, PLL}

其中，NLL 表示负很大，NL 表示负大，Z 表示零，PL 表示正大，PLL 表示正很大。

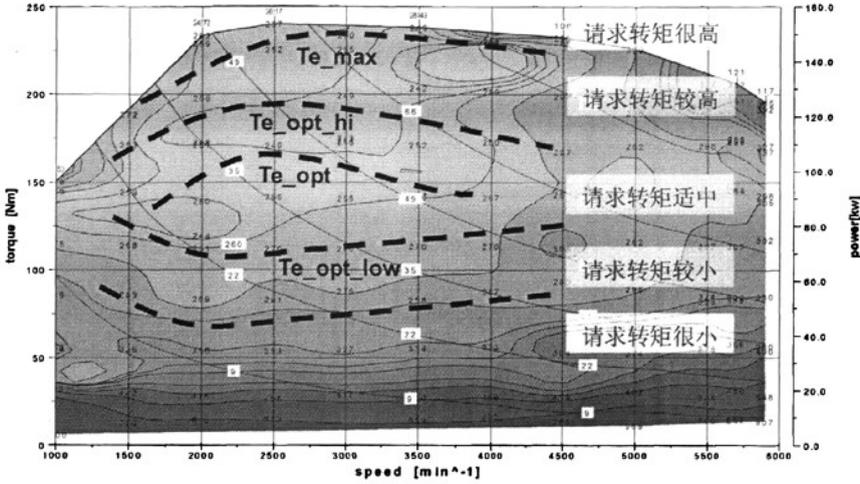


图 4.3 需求转矩  $T_{req}$  模糊子集

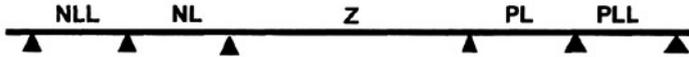


图 4.4 蓄电池 SOC 模糊子集

#### 4.2.2 非模糊化接口

将模糊结论转换成精确输出，也就是将输出的模糊子集的隶属度计算出确定的数值，用于实际控制。去模糊处理有各种方法，最简单、最常用的是面积重心法 COG<sup>[48]</sup>。

$$\text{COG 非模糊化: } y = \frac{\int y \mu_{\bar{b}}(y) dy}{\int \mu_{\bar{b}}(y) dy} = \frac{\sum_{k=1}^m c_k \int u_{\bar{b}_k}^c(y) dy}{\sum_{k=1}^m \int u_{\bar{b}_k}^c(y) dy} \quad (4-3)$$

其中， $\mu_{\bar{b}}(y) = \sum_{k=1}^m u_{\bar{b}_k}^c(y)$  为模糊结论的合成， $\int u_{\bar{b}_k}^c(y) dy$  为  $u_{\bar{b}_k}^c(y)$  的面积，

$$c_k = \frac{\int y u_{\bar{b}_k}^c(y) dy}{\int u_{\bar{b}_k}^c(y) dy} \text{ 为 } u_{\bar{b}_k}^c(y) \text{ 的重心。}$$

在此，令模糊控制器的输出量为 ISG 电机的转矩指令系数  $\gamma_{ISG}$ ， $\gamma_{ISG} \in [0, 1.5]$ 。

电机的转矩输出为  $T_{m\_out} = \gamma_{ISG} T_m$ ，其中， $T_m$  为当前电机转速下电机转矩的最大值和需求转矩同发动机最优转矩之间差值的较小值。由于整车需求转矩在 ISG 和发动机之间分配，一旦 ISG 转矩确定，则发动机转矩即确定，因此  $\gamma_{ISG}$  即相当于是发动机和电机之间的转矩分配指令。令输出量  $\gamma_{ISG}$  的模糊集为： $\{Z, S, M, L, LL\}$ 。其中，Z 表示零，S 表示小，M 表示适中，L 表示较大，LL 表示很大。输入语言变量和输出语言变量的隶属度函数如图 4.4 所示。

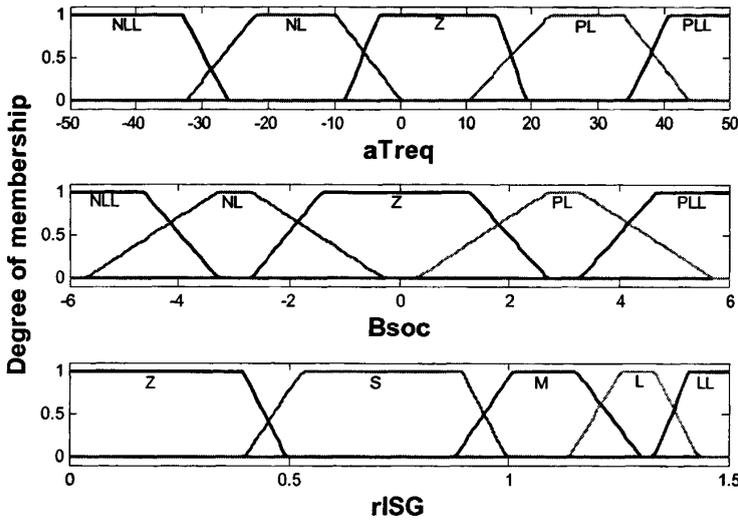


图 4.4 输入量和输出量的隶属度函数

### 4.2.3 规则库

规则库的设计需要确定合适的语言变量级数和控制规则的数目及建立正确的规则形式。规则库是模糊控制器的核心，由一组“IF...THEN”形式的规则组成，包含了关于如何达到控制目的的知识，这些知识用模糊变量加以量化并以模糊逻辑的形式表达。在“IF...THEN”规则中，THEN 前面的部分称为前件（Antecedent），THEN 后面的部分称为后件（Consequent）<sup>[49]</sup>，根据 IF-THEN 规则得到的计算结果称为模糊结论。前件中多个条件之间的逻辑运算称为模糊逻辑。相比于一个命题只能为真{1}或为假{0}的二值逻辑，在模糊逻辑中，一个命题的真值用一个模糊集来表示，即用它的隶属函数来表示真到什么程度，真值在[0,1]的闭区间中取值。

设  $U$  是所有命题构成的论域， $u$  是  $U$  中的元素， $T$  是命题的真值函数，对于模

糊多值逻辑， $T$  是  $u$  到闭区间  $[0,1]$  的一个映射<sup>[50]</sup>。模糊命题的一般形式是：“ $\tilde{p}: x \text{ is } \tilde{A}$ ”，命题真值  $T(\tilde{p})$  由模糊集合  $\tilde{A}$  的隶属函数  $u_{\tilde{A}}(x)$  给出：

$$T(\tilde{p}) = u_{\tilde{A}}(x) \quad (4-4)$$

定义模糊逻辑运算符如下：

与运算 ( $\wedge$ )：取小  $T(\tilde{P} \wedge \tilde{Q}) = \min(T(\tilde{P}), T(\tilde{Q}))$ ，或者取两者代数积  $T(\tilde{P} \wedge \tilde{Q}) = T(\tilde{P})T(\tilde{Q})$ ；

或运算 ( $\vee$ )：取大  $T(\tilde{P} \vee \tilde{Q}) = \max(T(\tilde{P}), T(\tilde{Q}))$ ，或者取两者代数和  $T(\tilde{P} \vee \tilde{Q}) = T(\tilde{P}) + T(\tilde{Q}) - T(\tilde{P})T(\tilde{Q})$ ，或者取有界和  $T(\tilde{P} \vee \tilde{Q}) = \min(1, T(\tilde{P}) + T(\tilde{Q}))$ ；

非运算 ( $\sim$ )： $T(\sim \tilde{P}) = 1 - T(\tilde{P})$ 。

本文中，根据需求转矩  $T_{req}$  系数  $\alpha_{T_{req}}$ 、SOC 系数  $\beta_{soc}$  这两个输入量和电机转矩指令系数  $\gamma_{ISG}$  制定的模糊控制规则的基本意图是：当需求转矩近似于当前发动机转速下最优效率曲线且 SOC 正常时，ISG 电机不工作；当需求转矩较高，则根据 SOC 大小情况选择是否通过 ISG 助力或 ISG 提供多少扭矩来降低负荷使发动机尽量工作于最优工作点曲线附近；当需求转矩较小时，根据 SOC 大小情况选择是否通过主动充电或提供多大的主动充电扭矩来提高负荷。

将意图表示为规则库的形式如下：

- (a) If ( $\alpha_{T_{req}}$  is NLL) and ( $\beta_{soc}$  is NLL) then ( $\gamma_{ISG}$  is LL) (1)
- (b) If ( $\alpha_{T_{req}}$  is NLL) and ( $\beta_{soc}$  is NL) then ( $\gamma_{ISG}$  is LL) (1)
- (c) If ( $\alpha_{T_{req}}$  is NLL) and ( $\beta_{soc}$  is Z) then ( $\gamma_{ISG}$  is L) (1)
- ...
- (y) If ( $\alpha_{T_{req}}$  is PLL) and ( $\beta_{soc}$  is PL) then ( $\gamma_{ISG}$  is LL) (1)
- (z) If ( $\alpha_{T_{req}}$  is PLL) and ( $\beta_{soc}$  is PLL) then ( $\gamma_{ISG}$  is LL) (1)

完整的 25 条模糊控制规则见表 4.1。

表 4.1 模糊控制规则库

$\gamma_{ISG}$		$\beta_{soc}$				
		NLL	NL	Z	PL	PLL
$\alpha_{Treq}$	NLL	LL	LL	L	M	S
	NL	LL	L	M	M	S
	Z	S	Z	Z	Z	Z
	PL	S	M	L	L	LL
	PLL	S	M	L	LL	LL

#### 4.2.4 推理机制

推理机制是模拟专家应用知识对输入进行解释并做出控制决策的过程，根据模糊输入，寻找并应用相应规则，得出模糊结论。“IF  $\tilde{P}$  THEN  $\tilde{Q}$ ”可以等价于蕴涵式  $\tilde{R} = \tilde{P} \rightarrow \tilde{Q}$ 。最常用的求法是 Mamdani 和 Larsen 模糊推理方法<sup>[51]</sup>。

$$\text{Mamdani: } \mu_{\tilde{R}}(x, y) = \min(\mu_{\tilde{P}}(x), \mu_{\tilde{Q}}(y)) \quad (4-5)$$

$$\text{Larsen: } \mu_{\tilde{R}}(x, y) = \mu_{\tilde{P}}(x) \mu_{\tilde{Q}}(y) \quad (4-6)$$

在此，采用 Mamdani 最小蕴涵。

#### 4.3 仿真结果与分析

为了便于下一步比较控制策略的优化效果，图 4.5、图 4.6 和图 4.7 给出了 NEDC 工况下传统车辆的仿真结果和 SOC 初始值为 0.6 时采用逻辑门限值控制策略的仿真结果和发动机工作点分布情况。仿真计算可得传统车辆 NEDC 循环工况下油耗为 656.3g，折算成百公里油耗为 8.3L/100km。采用逻辑门限控制实现怠速起停、扭矩调节、再生制动等功能后在 NEDC 下油耗为 578.6g，SOC 为 0.5760，平衡 SOC 始末差值对油耗进行修正后，油耗为 587 g，相当于 7.4L/100km。

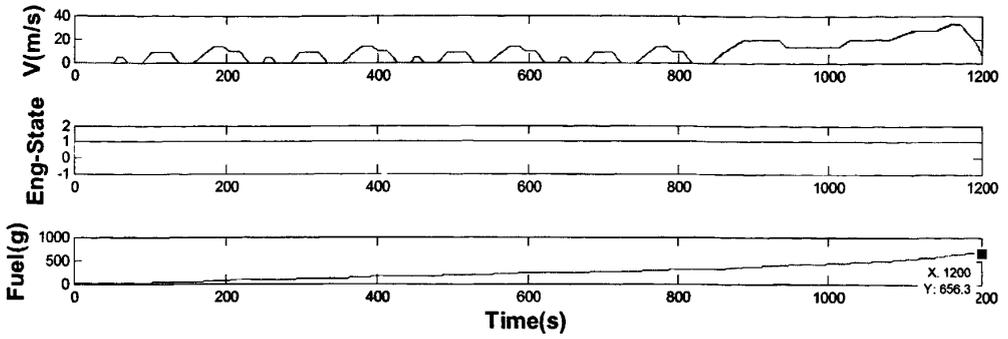


图 4.5 NEDC 工况下传统车辆仿真结果

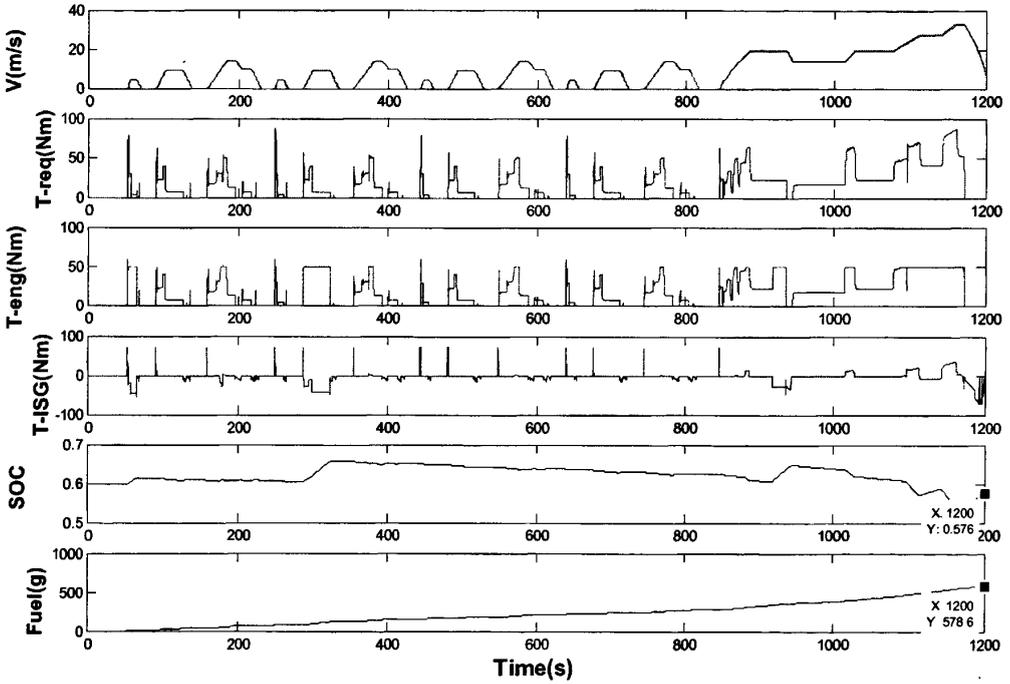


图 4.6 逻辑门限 NEDC 工况下发仿真结果 (初始 SOC0.6)



根据上一节所述的模糊控制器设计流程，利用 MATLAB FUZZY LOGIC TOOLBOX 建立了包含如上规则库和推理机制的模糊控制器，结合第二章建立的整车各部件模型一起于 SIMULINK 中进行仿真。模糊控制器输入输出量的关系如图 4.8，反映了所设计的 25 条规则的控制意图。

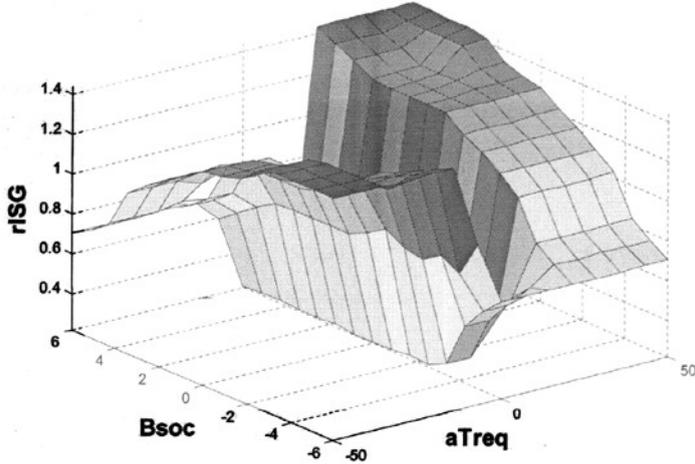


图 4.8 模糊控制器输入输出关系

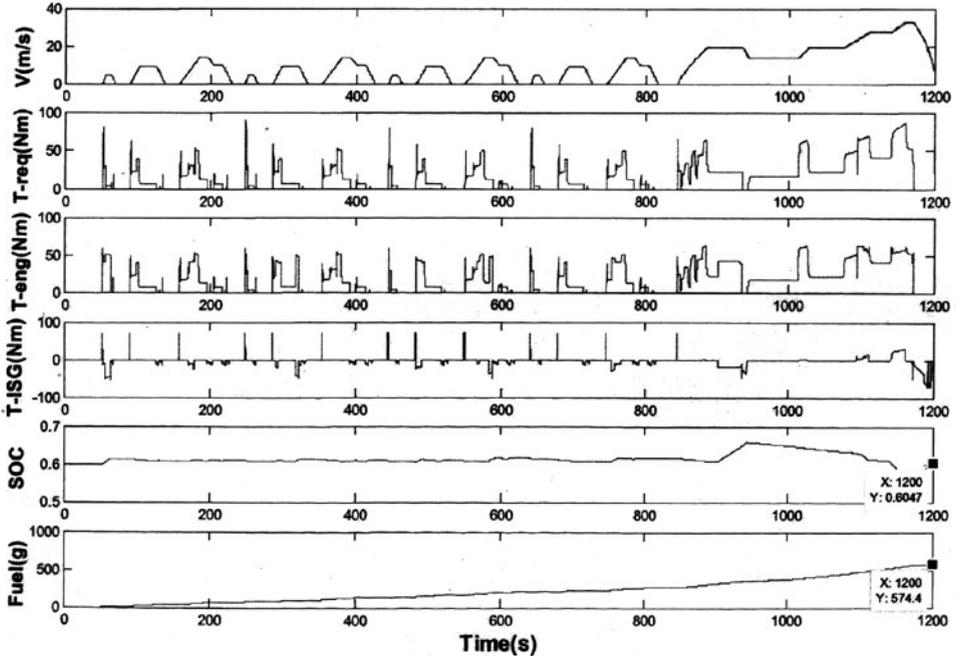


图 4.9 模糊控制策略 NEDC 工况下仿真结果 (初始 SOC0.6)

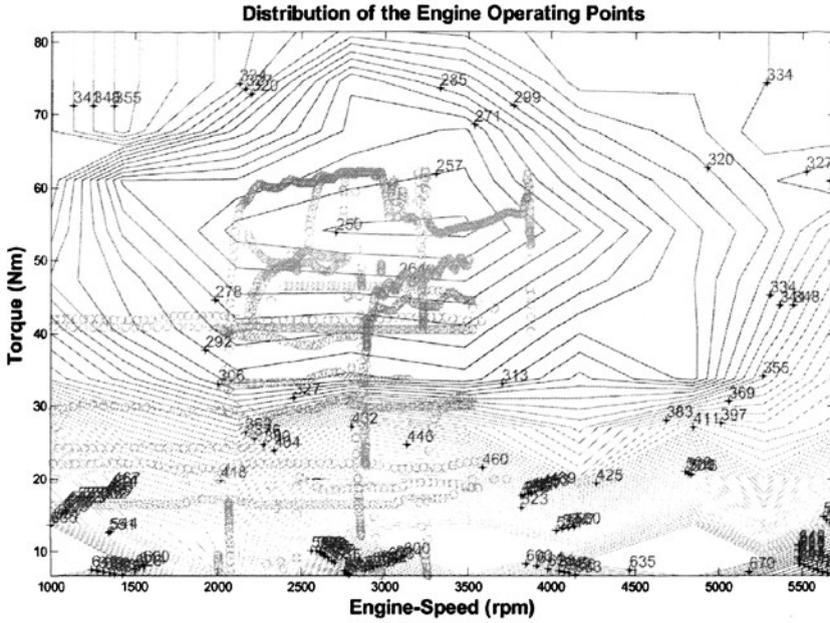


图 4.10 模糊控制 NEDC 工况下发动机工作点分布 (初始 SOC0.6)

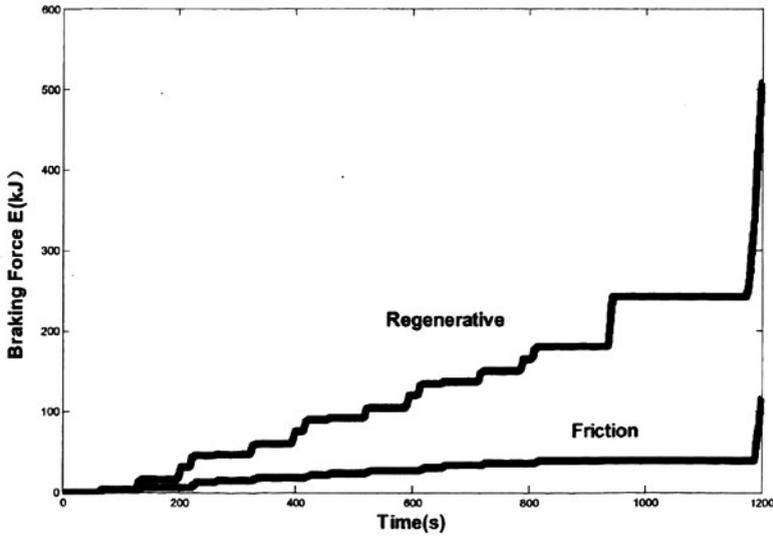


图 4.11 模糊控制策略 NEDC 工况下制动能量图

图 4.9 显示的是 NEDC 循环工况下、初始 SOC 为 0.6 时采用模糊控制策略仿真得到的车速  $V$ 、转矩需求  $T_{req}$ 、发动机转矩  $T_{eng}$ 、ISG 转矩  $T_{ISG}$ 、SOC 和油耗  $Fuel$  的时间历程曲线。从仿真结果可以看到，NEDC 工况下模糊控制策

略优化下的整车油耗为 574.4g，平衡 SOC 始末差值对油耗进行修正后，油耗为 572.7g。

从图 4.10 的发动机工作点分布情况中可以看出，相比与逻辑门限值控制策略，采用模糊控制后使得发动机工作点分布整体更接近高效率区，同时又在最优曲线两侧适当延展。仿真结束时的 SOC 值为 0.6047，仿真始末 SOC 的变化范围为 0.78%，相比于逻辑门限控制策略时 4% 的变化范围，可以看到，在相同的条件下，模糊控制策略更能在优化发动机工作特性的同时兼顾蓄电池以及电机的效率，以实现系统的整体优化。

图 4.11 显示的是模糊控制策略 NEDC 工况下的再生制动能量和传统摩擦制动能量。对应图 4.9 中车速和转矩需求历程曲线可以看到，急减速时再生制动能量大幅增加，同时为了保证行车的安全性，摩擦制动力也相应提高。循环工况运行过程中，再生制动和摩擦制动两者共同作用始终确保满足整车的制动需求。

为了进一步说明模糊控制策略的控制效果，对 SOC 初始值不同情况下的仿真结果进行了比较。当 SOC 初始值为 0.5 时，各参数的历程曲线中如图 4.12。对比图 4.9 SOC 为 0.6 的情况，可以看到在 SOC 初始值较低时，ISG 电机工作于发电模式的情况较多，且模糊控制策略根据当前需求转矩和 SOC 值的大小动态得调整转矩分配系数，优化发动机工作区域同时始终维持 SOC 在合适的区间内变化。

由图 4.13 逻辑门限和模糊控制模式切换情况图中看到，在某些时间点上，采用模糊控制策略避免了逻辑门限值控制下高速频繁的模式切换，以此减少过于频繁的模式切换对系统的不良影响以及改善驾驶操纵性。

通过以上对逻辑门限和模糊控制的仿真结果的比较以及在不同 SOC 下系统运行情况的差别可以得出，整车能量管理策略对混合动力汽车的性能有很大影响，合理的能量分配是多种影响因素的优化结果。

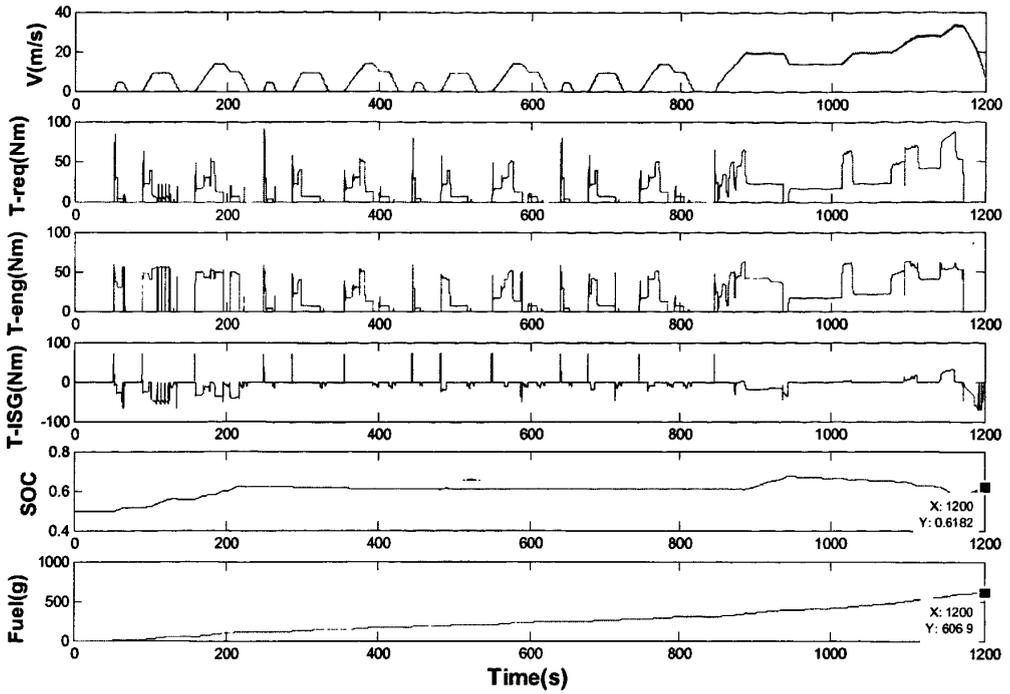


图 4.12 模糊控制策略 NEDC 工况下仿真结果（初始 SOC 为 0.5）

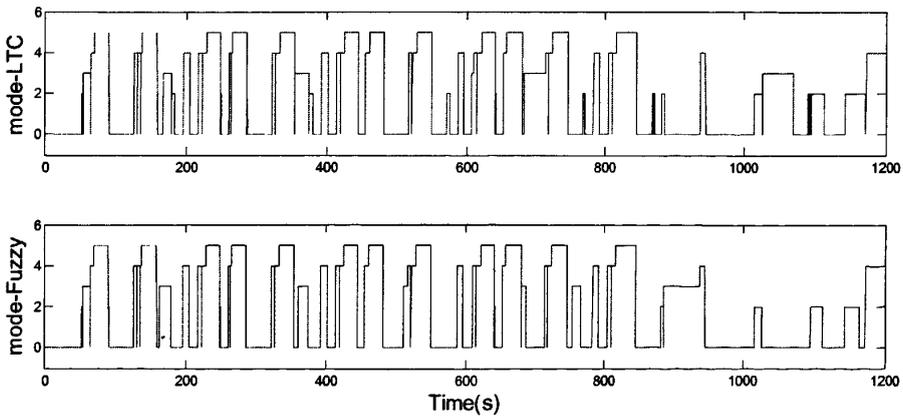


图 4.13 逻辑门限和模糊控制模式切换情况比较

#### 4.4 本章小结

本章在第三章的基础上，针对离线仿真阶段和实车试验阶段发现的逻辑门

限值控制策略的不足；应用模糊控制技术，按照完整的模糊器设计流程，以需求转矩  $T_{req}$  系数  $\alpha_{T_{req}}$  和蓄电池 SOC 系数  $\beta_{soc}$  为输入量，以电机转矩指令系数  $\gamma_{ISG}$  为输出量，制定了 25 条模糊控制规则和推理机制，进行了混合动力汽车整车控制系统模糊控制系统的设计。而且，通过对输入量和输出量的预处理，提高了模糊控制系统的适应性和通用性。所设计的模糊控制系统可以根据循环工况的变化动态得调整能量管理策略中的驱动力分配控制参数，体现了参数在远离和接近门限值时系统行为应有的区别，改善了发动机、蓄电池和 ISG 电机整个系统的工况状态，提高了混合动力汽车的燃油经济性，赋予了混合动力汽车对城市交通状况的自适应能力。

## 第5章 混合动力汽车整车控制系统开发

### 5.1 引言

混合动力汽车整车控制系统需要对不同的能量源和动力元件进行协调控制，是一个涉及了底层硬件驱动、上层控制策略算法以及 CAN 通信网络的复杂分布式控制系统，硬件接口繁多、控制策略复杂<sup>[52]</sup>。如果采用传统的自下而上的系统开发流程，则算法设计人员从开发初期就须先了解系统的硬件接口结构，在此基础上才能着手进行软件部分的程序设计，这将导致算法开发人员与硬件开发人员不能各司其职。而且，一旦系统的硬件平台发生改变，算法部分也只能随之重新进行设计。这种软件与硬件设计互相制约、断裂的流程给混合动力汽车整车控制器这样一种复杂的分布式控制系统的开发带来了很大的困难与不便。如何快速而有效得进行控制系统的开发成为了各大汽车公司及高校研发的重点<sup>[53]</sup>。因此，在前面几章对混合动力汽车控制策略的开发进行了研究之后，本章对控制策略赖以实现的系统硬件平台及开发环境进行了介绍。利用基于 MATLAB 平台的 dSPACE 实时仿真系统，通过 RCP (Rapid Control Prototyping) 快速控制原型、HILS (Hardwar-in-the-Loop Simulation) 硬件在环仿真、自动代码生成等技术，按照国际标准的 V 型开发模式流程，完成了控制策略代码的下载及基于 MPC555 32 位单片机的整车控制系统的开发。

### 5.2 V 型开发模式

V 型开发模式是汽车电子行业普遍采用的一种标准开发模式，它充分利用快速控制原型开发技术和硬件在环仿真技术。如图 5.1 所示，横向表示开发流程，便于安排开发计划和进度；纵向表示开发层次，即同层次在开发技术上具有相似性，便于综合调配各方面资源。因为整个控制系统开发流程呈 V 型，故称为 V 型开发模式<sup>[54]</sup>。相比于传统的开发过程曾，V 型开发模式最重要的特征就是计算机辅助控制系统设计 (CACSD: Computer-Aided Control System Design)，将计算机辅助工具贯穿于控制系统开发测试的全过程。

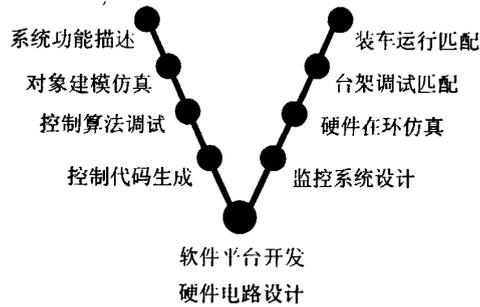


图 5.1 V 型开发模式

### 5.2.1 系统功能描述

这是采用 V 型模式进行混合动力汽车整车控制系统开发的第一步。在传统的设计流程当中，系统功能的需求分析都是用文字说明的方式在文档中表述的，在程序中不能体现出来，二者之间无法快速验证，一旦程序代码发生修改，就不得不重新修改和更新文档。在 V 型开发模式中，系统功能描述采用模型方式，用信号流程图的方式进行定义，而且描述系统功能的模型本身也是程序的一部分，大大简化了后面的编程过程。

### 5.2.2 快速控制原型 RCP

快速控制原型（RCP）指的是在开发的初期阶段，快速地建立控制对象及控制器模型，并对整个控制系统进行多次的、离线及在线的试验来验证控制系统的软、硬件方案的可行性。快速控制原型阶段包括控制对象的建模与仿真、控制算法的调试以及控制代码的自动生成，如图 3.2 所示。

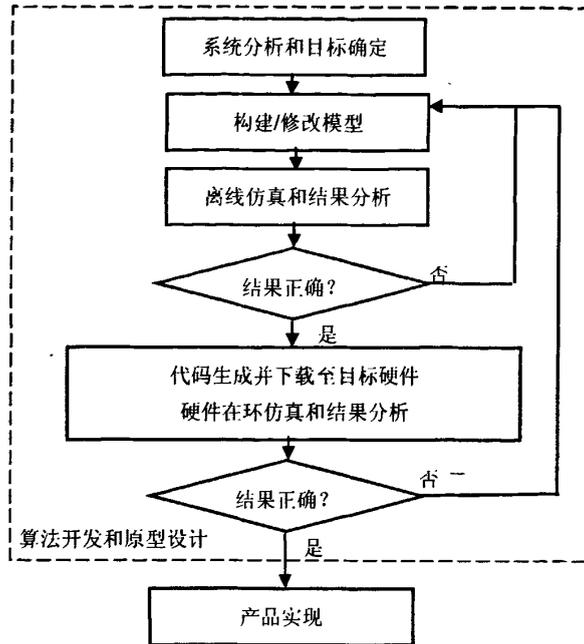


图 5.2 快速控制原型

控制对象的建模与仿真采用 MATLAB/SIMULINK, 建立尽可能准确的模型, 并进行离线仿真, 通过反复修改模型, 验证控制算法是否能够满足实际控制对象要求, 在开发的初期阶段就可以发现错误并改进。如果离线仿真的结果满足系统设计的要求, 就可以借助 RTW (Real Time Workshop) 自动代码生成工具生成 C 代码及可执行程序, 并下载至目标硬件平台, 从而快速实现控制系统的原型, 并且包括了实际系统中的各种 I/O, 软件及硬件中断等实时特性。将模型转换为代码是开发过程中最关键的一步, 虽然相比于传统的手工代码, 自动生成代码的运行效率较低, 但是自动生成代码可靠性高。最重要的是, 利用自动代码生成技术可以大大加快开发速度, 避免过多的人力资源浪费和时间浪费。

### 5.2.3 硬件在环仿真 HILS

硬件在环仿真 HILS 是指一种包含硬件的实时仿真。采用真实的控制器, 而被控对象或者系统运行环境部分采用实际的物体, 部分采用实时数字模型, 来模拟或者部分模拟控制器运行环境, 进行整个系统的仿真测试, 使得在实验室环境下就可以对所开发的控制器进行一些故障测试、极限测试或者失效测试等, HILS 是测试已开发控制器功能的有效途径。

## 5.3 基于 dSPACE 及 MPC555 的 ByPass 方案

### 5.3.1 dSPACE 实时仿真系统

dSPACE 实时仿真系统是由德国 dSPACE 公司开发的一套在实时环境下基于 MATLAB/SIMULINK 的控制系统开发及测试的工作平台，利用 RTI 接口库，实现了和 MATLAB/SIMULINK 的完全无缝连接<sup>[55]</sup>。dSPACE 实时系统拥有具有高速计算能力的硬件系统，包括处理器、I/O 等，还拥有方便易用的实现代码生成/下载和试验/调试的软件环境，可以完成从控制算法设计、测试和到实现的整个过程。

#### 1) dSPACE 硬件系统

整车控制系统快速原型开发阶段采用的是 MicroAutoBox 1401/1501 标准组件系统，通过 PCMCIA 接口与笔记本电脑相连。基于 PowerPC 750FX 内核，时钟频率为 800MHz，提供了 16MB 的非易失性闪存用于存储代码段和记录数据。具体参数如表 5.1 所示。

表 5.1 MicroAutoBox 1401/1501

CAN 接口	1 个双路 CAN 接口 共 2 个 CAN 通道
串行接口	基于 CAN 处理器的串行口 1 x RS232 接口 1 x K/L-线或 LIN 接口合用
ECU 接口	双端口存储器接口 16 K x 16-bit DPRAM
FlexRay 接口	N/A
模拟输入	16路12位通道 4到1多路开关 同时采样保持 所有通道的建立时间均为6.7 $\mu$ s 0-5 V 输入电压范围
模拟输出	8路12位通道 0-4.5 V 输出电压范围 最大 5 mA
数字 I/O	由 68336 从处理器上引出的数字I/O, 20MHz, 带有时间处理单元 16 个离散输入 4 个复用的频率或PWM输入 16 个时间处理单元通道TPU 16 个复用的离散量输入/输出 10个数字量输出, 5 mA 输出电流 4 个 PWM 输出, 2.5 Hz-100 kHz PWM 频率, 占空比 0-100%, 最高 16 位分辨率, 用于不同应用程序的 I/O 软件支持

## 2) dSPACE 软件系统

系统开发过程中所采用的软件系统可分成三部分：算法开发、实时运行、实时测试和监控。

算法开发有两种方式：在 SIMULINK 里设计在线模型和用 C 语言编写模型代码。实时运行模块依据算法开发的不同形式相应地也有两种方式：基于 SIMULINK 的模型在 RTW 和 RTI 的支持下自动完成模型的代码生成、编译、链接、下载；手工编写的模型则需要运行 dSPACE 提供的批处理命令完成上述功能。实时测试和监控模块由 Control Desk 和 MLIB/MTRACE 组成。ControlDesk 直接和 dSPACE 处理器实时交换数据，实现对实时硬件的图形化管理、虚拟仪

表的建立、变量和参数的可视化管理、实验过程的自动化等；而 MLIB/MTRACE 则构架了 MATLAB 和实时硬件数据通信的桥梁。从 MATLAB 中通过 M 编程，无需知道变量的地址，有变量名就能直接访问 dSPACE 板上运行的应用程序中的变量。这样就可以利用 MATLAB 的数字计算和图形能力进行顺序自动测试、数据记录和控制参数的优化。

本文在算法开发和实时运行阶段采用的是.mdl 模型和.m 文件结合在一起自动生成代码的方式。然后为了实时监控 RTW 自动生成的代码下载至目标硬件以后的运行过程以及观测整车控制系统的输出结果，基于 Control Desk 设计了一套用于混合动力汽车数据实时采集分析和在线调参的监控系统。

### 5.3.2 MPC555 微控制器

MPC555 微控制器是 Motorola 公司专为汽车电子、航空航天、智能系统等高端嵌入式控制系统推出的一款高性能的、以 PowerPC 内核为核心的 32 位单片机。它有 272 个引脚，BGA 封装，可在高速移动及苛刻的环境下工作（工作温度：-40~125℃）。主要有以下功能模块<sup>[56]</sup>：

- ◆ 主频 40MHz 的精简指令集 CPU (RCPU)
- ◆ 28MIPS 的运算能力
- ◆ 448KB Flash
- ◆ 26KB SRAM
- ◆ 独立工作双时间处理单元 (TPU3)
- ◆ 18 通道模块 I/O 系统 (MIOS1)
- ◆ 双队列模数转换模块 (QADC)
- ◆ 双 CAN2.0B 控制器模块 (TouCANs)
- ◆ 队列串行多通道模块 (QSMCM)

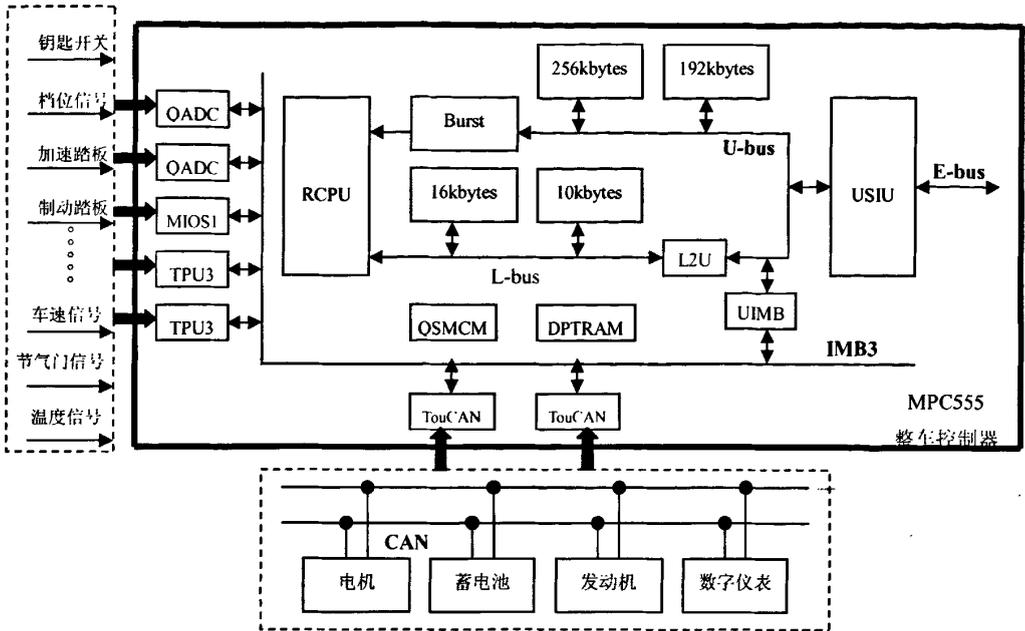


图 5.3 HEV 控制系统外围框架

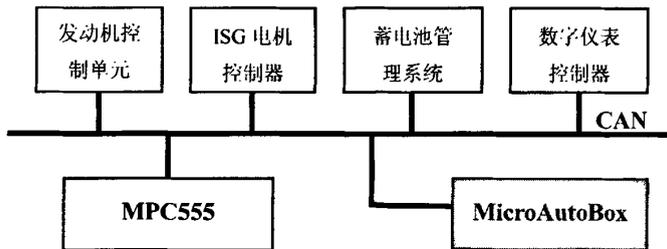


图 5.4 dSPACE 及 MPC555 的 ByPass 方案

由于 MPC555 卓越的片内集成功能、丰富的接口模块，可以很好得满足混合动力汽车控制系统的设计要求，所以直接利用 MPC555 采集混合动力试验车的所有数字量及模拟量信号，系统框架如图 5.3 所示。

同时，MPC555 集成了双路 CAN2.0 模块，通过 Philips 公司的 PCA82C250 收发器完成 CAN 高速通信。整车控制器负责对整个 CAN 网络进行监视管理和总体调度，通过 CAN 总线向电机控制器、蓄电池管理系统、发动机控制器以及数字仪表控制器等各节点发送报文，同时接收各节点传送的数据进行信息交换。整车控制器通过综合各节点状态信息，按照整车控制策略和算法发出相应控制命令以实现混合动力汽车不同工作模式的切换及多能源系统总成的协调控制。

按照上一节所介绍的 V 型开发流程，基于 MATLAB 和 dSPACE 软件平台，以 MPC555 为核心，同时结合 MicroAutoBox 硬件资源，利用图 5.4 所示的旁路（BYPASS）技术将控制器集成于开发过程中。在完成基于 MPC555 的整车控制器初步软硬件开发后从而再逐步完成从原型控制器到产品型控制器的转换，以实际的控制器替代快速原型阶段实现的混合动力汽车整车控制器功能的 dSPACE 系统。最后通过混合动力试验台和道路试验，验证了控制器控制策略的有效性 & 硬件系统的可靠性。

### 5.4 本章小结

针对传统开发模式的缺陷，本章结合 dSPACE 及 MPC555 开发平台，采用新型的 V 型开发模式进行了混合动力汽车整车控制器的开发。通过实践证明：本章所介绍的快速开发方法能够缩短整车控制系统的开发周期，为混合动力汽车整车控制系统这样一种大型复杂分布式系统的开发提供了一种有效的解决方案。

## 第6章 全文总结

### 6.1 全文总结

本文的工作基于实际样车展开，以并联混合动力汽车的能量管理策略研究以及在实车上的应用研究为主。重点论述了并联式混合动力汽车的逻辑门限控制策略，在此基础上，进一步提出了将模糊控制应用于混合动力汽车整车系统的新思路。基于模型的离线仿真和基于样车的道路试验结果表明：本文所研究的混合动力汽车逻辑门限值控制策略能够满足实际工程的需要，完成了功能样车的设计开发，应用模糊算法对控制系统优化的有效性也得到了验证。

全文总结如下：

- 1) 从研究混合动力系统能量管理策略角度，为减少不必要的样车试验并加速控制策略的开发进度，建立了基于稳态试验数据并考虑动态修正的混合动力系统前向仿真模型，模型并不着重于混合动力系统的瞬态动力学特性，而是着重于系统在一段时间内的能耗和效率分析，为整车能量管理策略的研究和开发提供了必要的仿真平台。
- 2) 基于逻辑门限值控制算法，从整车系统角度出发，在按照发动机最优工作范围控制的同时，把蓄电池的 SOC 高效工作范围、电机的扭矩也作为能量管理策略控制的参数。并针对‘非 0 即 1’的逻辑门限值控制策略的缺陷，利用智能模糊算法进行了混合动力汽车能量管理的优化控制，在运行过程中实时动态得调整转矩分配系数，避免了在门限值附近区域的频繁模式切换和振荡，提高各零部件寿命，也提高了驾驶的平顺性，使整车动力系统的整体效率获得了提高。
- 3) 提出了对动力系统关键部件参数的匹配优化。通过 150kw 发动机和 41kw 发动机在相同控制策略、参数设置和同一循环工况下的运行结果表明：由于动力系统配置不同而造成的燃油经济性差别很大。由此得出结论：对混合动力汽车进行优化不仅仅需要优化控制策略，更重要的是对动力系统部件进行优化，即在机械系统设计的时候就须注意动力系统各关键部件的参数匹配问题。
- 4) 采用基于 MPC555 和 dSPACE 实时仿真系统的 ByPass 方案，完成了控制策略代码的下载及实际整车控制系统的开发。试验证明：该控制系统快速开发

方法能够有效缩短整车控制系统的开发周期，自动生成的代码在实车环境下运行可靠，从而为大型复杂系统的开发提供了一种有效的解决途径。

## 6.2 进一步工作展望

- 1) 模糊控制策略的优化完善。由于规则库是模糊控制器的核心，而规则库建立的主要依据就是设计者的经验认识，因此在今后需要进一步确定合适的语言变量级数和控制规则数目，建立正确的规则形式，提高模糊控制器的控制效果。
- 2) 综合考虑混合动力汽车排放进行控制策略优化。本文中的优化工作均以整车的燃油经济性作为优化目标，并没有考虑排放性能。虽说燃油经济性的优化在一定程度上也能带来排放性能的优化，但是由汽车理论知识知道，发动机的燃油高效区和低排放区并不重合，因此在下一步的工作中可以考虑以油耗和排放综合加权指标作为优化的目标函数，实现两者的折中，提高优化的实际应用价值。
- 3) 再生制动时前后轮的制动力分配问题以及与 ABS 的协调问题。由于电机再生制动力仅作用于驱动轮，所以，与传统汽车相比，增加复合再生制动后改变了前后轴制动力分配比例，增加了驱动轮抱死的趋势，从而对制动稳定性产生了不利影响。因此，在再生制动系统及控制逻辑设计时，应考虑如何在回收尽可能多的能量的同时调整前后轴制动力的分配比例。
- 4) 由于混合动力汽车部件较多，控制系统复杂，高压电气系统和弱电控制系统并存，较传统车辆而言，更容易发生各种电气及信号传输故障。因此在控制策略中还应增加行车故障诊断和处理模块，在提高燃油经济性和排放性能的同时也保证车辆的安全性及稳定性。

## 参考文献

- [1] Naoto Kushi. CO<sub>2</sub> Reduction in Automotive Development. TOYOTA Technical Review, 1998, 47(2): 6~11
- [2] 汪卫东, 王建萍, 李纯菊. 清洁汽车的发展及对策. 东风汽车. 工程研究院2000年度信息研究课题, 2000
- [3] Floyd A. Wyszalek. Hybrid electric vehicle: year 2000 status. IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, March 2001, Vol.16
- [4] 成森. 车用混合动力系统技术发展分析. 车用发动机, 1999 年2 月
- [5] 陈全世, 杨宏亮, 田光宇. 混合动力电动汽车结构分析. 2001年第9期
- [6] 黄妙华, 金国栋, 邓亚东. 串联式混合动力电动汽车先导车的研究开发. 武汉理工大学学报, 2001 年9 月
- [7] 干庆年, 何洪文, 李幼德, 初亮. 并联混合动力汽车传动系参数匹配. 吉林工业大学自然科学学报, 2000 年1 月
- [8] 黄裕清, 姜招良. 浅议汽车混合动力系统的布置. 汽车研究与开发, 1999年第5期
- [9] 丰田汽车公司, <http://www.toyota.com/>
- [10] 胡焯, 宋慧主编. 电动汽车. 北京: 人民交通出版社, 2003
- [11] 罗玉涛. 混联式混合动力电动汽车的关键技术研究. 博士学位论文, 华南理工大学, 2002
- [12] Kelly K J, Zolot M, Glinsky G, et al. Test results and modeling of the Honda Insight using ADVISOR. SAE Paper 2001-01-2537
- [13] 浦金欢. 混合动力轿车的控制策略与建模. 上海交通大学学报, 2004(Vol.38) No.11
- [14] 熊璐. 混合动力汽车驱动协调控制研究, 博士学位论文, 同济大学, 2006
- [15] 邓亚东, 高海鸥, 王仲范. INSIGHT混合动力电动汽车驱动系统建模与仿真, 武汉大学学报(工学版), 2004 (Vol. 37) No. 6
- [16] 周春国, 冯莉, 刘凯, 崔亚辉. 并联混合动力汽车动力分配装置的建模与仿真, 西安理工大学学报, 2006 (Vol.22) No.1
- [17] Xiaoling He and Jeffrey W. Hodgson. Modeling and Simulation for Hybrid Electric Vehicles. IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, VOL. 3, NO. 4, DECEMBER 2002
- [18] 乐文峰. 遗传算法在混合动力汽车能量管理策略及匹配优化中的应用, 硕士学位论文, 同济大学, 2007
- [19] Aaron Brooker, Terry Hendricks, Valerie Johnson, Kenneth Kelly, Tony Markel, Michael O'Keefe, Sam Sprick, Keith Wipke. ADVISOR 3.2 Documentation. National Renewable Energy Laboratory, August 20, 2001
- [20] 陈清泉, 孙逢春 主编. 混合动力车辆基础, 北京理工大学出版社, 2001

- [21] 陈彪. 电动汽车前向仿真研究. 硕士学位论文, 武汉理工大学, 2005
- [22] 黄维纲. 电控离合器控制系统的研究. 博士学位论文, 上海交通大学, 1999
- [23] 陈俐. 汽车AMT 自动离合器接合过程的动力学与控制研究. 博士学位论文, 上海交通大学, 2000
- [24] 《汽车工程手册》编辑委员会. 汽车工程手册. 北京: 人民交通出版社, 2001
- [25] 王家波, 张成宝. 汽车驾驶员模型. 人类工效学, 2001年3月第七卷第一期
- [26] 苏永清. 自动变速器ECU测试仿真台及控制系统的研究与开发, 博士后学位论文, 同济大学, 2002
- [27] Soga M, Shimada M, Sakamoto J-I. Development of vehicle dynamics management system for hybrid vehicles: ECB System for improved environment and vehicle dynamic performance. *JSAE Review*, 2002, 23(4)
- [28] 熊璐. 混合动力汽车控制策略开发及参数匹配研究报告, 同济大学混合动力轿车核心技术研究项目组, 2004
- [29] 孙逢春. 电动汽车[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997
- [30] 朱正礼. 并联式混合动力轿车动力系统性能匹配与优化研究. 上海交通大学博士学位论文. 2004
- [31] Wipke K, Markel T, Nelson D. Optimizing energy management strategy and degree of hybridization for a hydrogen fuel cell SUV. *Proc. the 18th International Electric Vehicle Symposium, Berlin, Germany*, 2001
- [32] 彭涛, 陈全世. 并联混合动力电动汽车的模糊能量管理策略. *中国机械工程*, 2003 (9): 797~800
- [33] Niels J Schouten, Mutasim A Salman, Naim A Kheir. Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, 10(3): 460~468
- [34] Bailey K E, Cikanek S R, Sureshbabu N. Parallel hybrid electric vehicle torque distribution method. *Proceedings of the American Control Conference. Anchorage*, 2002. 3 708~3 710
- [35] Kalan B A, Lovatt H C, Brothers M, et al. Sytem design and development of hybrid electric vehicles. *Power Electronics Specialists Conference*, 2002. 768~772
- [36] Brahma A, Guezennec Y, Rizzoni G. Optimal energy management in series hybrid electric vehicles. *Proceedings of the American Control Conference, Chicago*, 2000. 61~64
- [37] Lin Can Chiao, Kang Jun Mo, Grizzle J W, et al. Energy management strategy for a parallel hybrid electric truck. *Proceedings of the American Control Conference. Arlington*, 2001. 2 878~2 883
- [38] Bernd M Baumann, Gregory Washington, Bradley Cglenn, et al. Mechatronic design and control of hybrid electric vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2000, 5(1): 58~72
- [39] Lee Hyeoun Dong, Sul Seung Ki. Fuzzy-logic-based torque control strategy for parallel-type hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1998, 45(4): 625~632
- [40] Koo Euh Suh, Lee yeoun Dong, Sul Seung Ki, et al. Torque control strategy for a parallel hybrid vehicle using fuzzy logic. *Conf. Rec. IEEE~IAS Annu. Meeting*. 1998. 1715~1 720
- [41] Passino K M, Yurkovich S. *Fuzzy Control*. Menlo Park, Calif.: Addison-Wesley, 1998
- [42] Lee C-C. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I. *IEEE Transactions*

## 参考文献

---

- on Systems, Man, and Cybernetics, 1990, 20(2): 404-418
- [43] Baumann B M, Washington G, Glenn B C, et al. Mechatronic Design and Control of Hybrid Electric Vehicles. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2000, 5(1):58-72
- [44] Schouten N J, Salman M A, Kheir N A. Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(3):460-468
- [45] 余志生. 汽车理论. 北京: 机械工业出版社, 1990
- [46] M.米奇克. 汽车动力学 第二版. 北京: 机械工业出版社, 1997
- [47] 姜清浩. 发动机与汽车理论. 北京: 人民交通出版社, 2005
- [48] Kevin M.Passino, Stephen Yurkovich. Fuzzy Control. 北京: 清华大学出版社, 2001
- [49] 诸静. 模糊控制理论与系统原理. 北京: 机械工业出版社, 2005
- [50] Timothy J.Ross. Fuzzy Logic with Engineering Applications. New York: McGraw-Hill, Inc, 1995
- [51] 廉小亲. 模糊控制技术. 北京: 中国电力出版社, 2003
- [52] 潘凯. 基于MPC555的混合动力电动汽车整车控制器硬件系统设计. 汽车工程, 2005,27
- [53] 石琦文. 基于 MATLAB 的车用快速控制原型软件平台的研究与实现. 计算机工程与应用, 2005,13.
- [54] 李建秋, 田光宇, 卢春春, 陈全世, 欧阳明高. 利用V型开发模式研制燃料电池混合动力客车的整车控制器. 机械工程学报, 2005,12
- [55] 吴进华, 刘跃兴, 史贤俊. dSPACE 仿真平台的实时仿真原理研究及其应用. 电子测量与仪器学报, 2004 年增刊
- [56] 张小芳. 基于 MPC555 微处理器的四轮直线行进系统的研究和实现. 硕士学位论文, 复旦大学, 2005

## 致谢

首先感谢我的导师萧蕴诗教授。萧老师渊博的学术知识、丰富的科研经验、严谨的治学态度、求实的工作作风令我受益匪浅和由衷钦佩。在整个论文写作期间对我进行了细致和耐心的指导。两年半的研究生学习期间，无论是严肃的学术讨论还是日常生活的点滴交流，每次同导师的交谈都给予我启发，使我能够以更广阔的思路和新颖的角度来思考问题，令我怀念。在此，对萧老师表示衷心的感谢！

感谢汽车学院的赵治国、尹明陆、刘庆凯老师以及乐文峰、邱冬硕士。一年多的项目合作期间，并肩经历了很多的困难与挫折，也共同享受了调试成功的激动与喜悦。与你们在一起，工程中心试制基地的底楼大厅里总是充满了欢乐。

感谢岳继光、何斌、苏永清老师，为课题组提供了良好的实验室科研环境并培养了团结和谐的学术交流氛围。谢谢这些年对我的指导和帮助。

感谢课题组的所有师兄姐妹，认识你们，是我读研期间收获的最大财富。

最后，感谢我的家人，谢谢这么多年对我不计回报的付出和默默无闻坚定的支持。没有你们，就不会有今天的我。

朱敏晔

2008年3月

## 个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历:

朱敏晔, 女, 1983年11月出生。

2005年7月毕业于同济大学电子与信息工程学院 自动化专业 获工学学士学位。

2005年9月入同济大学电子与信息工程学院攻读硕士学位。

### 已发表论文:

- [1] 朱敏晔, 赵治国, 萧蕴诗. 基于MPC555的HEV控制系统开发. 华东交通大学学报, 2007年8月, Vol.24 No.4