

论文编号:



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

(工程硕士)

混联式混合动力客车整车控制器开发

姓名：胡毅

学号：1121180035

所在院系：汽车学院

职业类型：工程硕士

专业领域：车辆工程

指导教师：戴海峰

副指导教师：姚杰

二〇一六年六月



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master of Engineering

Development of Vehicle control unit for the Parallel-Series Hybrid Electric Bus

Candidate: Huyi

Student Number: 1121180035

School/Department: School of Automotive Studies

Discipline: Engineering Master

Major: Vehicle Engineering

Supervisor: Dai Haifeng

Vice Supervisor: Yao Jie

June, 2016

混联式混合动力客车整车控制系统开发

胡毅

同济大学

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；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：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，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。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

整车控制器是混合动力汽车的核心控制部件，它可以根据加速踏板位置、档位、制动踏板力等驾驶员的操作意图和蓄电池的荷电状态计算出运行所需要的发动机输出功率、电动机和发电机转矩等参数，从而来协调各个动力部件的运动，保障电动汽车的正常行驶，此外可通过行车充电和制动能量回收等实现较高的能量效率。因此整车控制器的设计直接影响着汽车的动力性、经济性、可靠性和其它性能。

本文针对某款国产混合动力大客车整车控制系统展开研究。该混合动力系统动力链上主要配置一个六缸发动机、一个ISG电机和一个主驱电机。在对该系统的配置及零部件的选型进行简单介绍后，分别从硬件设计及控制策略设计两个角度研究了该车型的整车控制器开发。

硬件设计部分，在分析了混合动力汽车整车电气结构的基础上，得到了整车控制器的功能、性能及电气接口等具体的设计需求，并进一步细化得到整车控制器的硬件配置表。然后根据硬件配置需求分别设计了相关的接口电路。结合项目目标和设计目标，设计了整车控制器的详细测试项目，并根据测试项目对整车控制器的各项指标进行了测试。测试结果表明各个指标均达到相关标准或设计目标的要求。

控制策略部分则根据 EHS (Easy hybrid system 简单混联系统) 混合动力系统结构，开发了相应的控制策略。在混合动力客车动力系统工作模式分析的基础上，设计了整车控制策略，对该车纯电动模式、串联驱动模式、并联驱动模式、驻车充电模式、再生制动能量回馈模式、发动机直接驱动模式和停车模式的转换进行控制。同时研究了提高混合动力客车燃油经济性的能量管理策略，结合中国典型城市公交循环工况设计了油耗测试试验，验证能量管理策略。测试结果表明，此方案动力性和经济性相对于原车都有较大幅度的提高，其中 0~50 km/h 加速时间缩短了 13.7%，油耗降低 28.3%。

关键词：混联型混合动力系统，整车控制器，硬件设计，控制策略，匹配，经济性

ABSTRACT

The vehicle control unit(VCU) is the heart of the hybrid vehicle, which can calculate the required parameters such as engine power output, the drive motor's and generator's torque, according to the driver's intention such as the accelerator pedal position, gear, brake pedal operating force and the charge of the battery, and so on. It can coordinate the movement of individual parts to protect normal driving electric buses, in addition to achieve higher energy efficiency by the charge, and the driving and braking energy recovery. So the design of VCU directly will affect the power, economy, reliability, and other properties of the bus.

The paper studied about the domestic hybrid bus vehicle controller. The hybrid power system chain configuration is made of a six cylinder engine, a ISG motor and a main drive motor, The paper studied the model of development of vehicle control from the hardware design and control strategy design two aspects.

In the hardware Design section, the paper analyzed the electric structure of hybrid Vehicle, so as to get the vehicle controller's function, performance and electrical interface specific design requirements, and further refined to the vehicle controller hardware configuration table. Then, according to the requirements of hardware configuration, the interface circuit is designed. Combining the project objective and the design objective, design the detailed test project of the whole vehicle controller, and test the index of the whole vehicle controller according to the test project. The test results show that all the indexes meet the requirements of the relevant standards or design objectives.

In the control strategies section, the author developed the corresponding control strategy based on the EHS (Easy hybrid system) hybrid system structure. After the analysis of the whole vehicle power system operation with the vehicle control strategy, which are pure electric mode, series traffic mode, parallel traffic mode, the parking charge, regenerative braking mode and stop mode. Also the paper studied to improve the energy management strategy for hybrid electric bus fuel economy. Fuel consumption test is designed according to the Chinese typical city bus cycle, to verify the proposed energy management strategy. The test results show that the power and economy of this scheme are improved greatly, and the acceleration time of 0 ~ 50

km/h is reduced by 13.7%, and the fuel consumption is reduced by 28.3%.

Key Words: parallel and series hybrid propulsion system, vehicle control unit, hardware design, control strategy, parameter matching, economical efficiency

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外混合动力汽车现状	2
1.3 混合动力汽车研发存在的问题	4
1.4 国内外混合动力汽车整车控制系统的发展概况	4
1.5 混合动力客车控制策略研究现状	6
1.6 课题研究目的、理论意义和实际应用价值	6
1.6.1 课题研究目的	6
1.6.2 课题研究的意义	7
1.7 本文内容及结构	7
第 2 章 EHS 混合动力系统方案及关键部件选型	9
2.1 混联型混合动力城市大客车设计要求	9
2.2 混合动力客车动力系统的结构方案	9
2.3 电动机参数选择	10
2.3.1 电动机类型的选择	11
2.3.2 电动机额定转速和最高转速的选择	12
2.3.3 驱动电机转矩与功率选择	12
2.3.4 电机型号的确定	13
2.4 APU 系统参数的确定	14
2.4.1 发动机选型	15
2.4.2 ISG 电机的选择	16
2.5 电池参数的选择	18
2.6 本章小结	19
第 3 章 整车控制器硬件开发	21
3.1 整车控制器工作环境分析	21
3.1.1 气候条件	21
3.1.2 机械条件	22
3.1.3 电气条件	22
3.1.4 ISO16750 标准	23

3.2 整车电气架构及整车控制器电气接口	24
3.2.1 EHS 混合动力动力系统结构及整车控制器的功能定义	24
3.2.2 EHS 混合动力整车电气架构	25
3.2.3 EHS 混合动力整车控制器接口需求	27
3.2.4 整车控制器硬件资源配置	30
3.2.5 整车控制器硬件框图	31
3.3 整车控制器低压电源设计	32
3.3.1 电源电路设计	32
3.3.2 电源电路测试及应用效果	34
3.4 整车控制器输入输出电路	34
3.4.1 数字开关量输入电路	35
3.4.2 PWM 输入电路	37
3.4.3 PWM 输出电路	37
3.4.4 模拟量输入电路	37
3.4.5 功率输出电路	38
3.4.6 CAN 通讯模块	39
3.5 整车控制器主控单元	39
3.6 整车控制器试验测试	40
3.6.1 整车控制器测试内容及设备	41
3.6.2 整车控制器测试结果汇总	41
3.7 本章小结	44
第 4 章 混合动力客车动力系统运行模式及基本控制策略	45
4.1 EHS 动力系统结构工作特点分析	45
4.2 EHS 整车上下电控制策略	46
4.2.1 EHS 系统上电过程	46
4.2.2 EHS 系统下电过程	46
4.3 整车动力系统工作模式分析	47
4.3.1 纯电驱动模式	47
4.3.2 串联驱动模式	47
4.3.3 并联驱动模式	48
4.3.4 驻车充电模式	50
4.3.5 再生制动能量回馈模式	51

4.3.6 发动机直接驱动模式	52
4.4 动力系统工作模式切换控制策略	53
4.4.1 纯电动 (EV) 模式	53
4.4.2 混联模式 1 (HEV1)	53
4.4.3 混联模式 2 (HEV2)	53
4.4.4 串联模式 (HEV3)	55
4.4.5 制动模式	55
4.5 整车故障诊断及容错处理策略	55
4.5.1 故障诊断代码管理	55
4.5.2 故障处理策略	56
4.6 双 CPU 容错控制策略	60
4.7 本章小结	61
第 5 章 混合动力客车整车燃油经济性测试与优化策略	63
5.1 油耗测试条件	63
5.1.1 场地测试	63
5.1.2 线路测试	64
5.2 经济性测试结果及策略优化	66
5.2.1 离合器结合时电机转速	66
5.2.2 回馈制动	67
5.2.3 HEV1 切换 HEV2 模式转速	68
5.2.4 HEV2 切换 HEV3 模式转速	68
5.3 正交试验	69
5.3.1 正交试验方法介绍	69
5.3.2 油耗优化正交试验	70
5.4 根据油耗优化结果修正 EHS 整车工作模式	72
5.5 本章小结	74
第 6 章 总结与展望	75
6.1 全文总结	75
6.2 展望	75
致谢	77
参考文献	78

第1章 绪论

1.1 引言

十九世纪八十年代以来,环境污染和能源危机两大问题日益受到重视。石油在世界总能源消费中超过 40%,按目前的探明储量和消耗速度估计,其可能在 50 年内耗尽^[1]。

汽车既是石油的主要消耗者,又是大气污染的重要制造者。汽车排放的 CO₂ 是地球温室效应的主要来源之一,排放的其它成分在城市大气污染中也占主导地位。各种统计资料表明,城市区域 75%以上的大气污染物来源于汽车^[2, 3, 4, 5]。而以上海为例,仅占汽车保有量不到 10%的出租车(保有量为 4 万辆)和公交车(近 2 万辆),由于运力频繁,其排污量已占到汽车尾气排放总量的 50%^[6, 7]。

针对汽车排放污染,世界各国出台了机动车辆排放限值,表 1.1 为美国环保署(EPA)排放限值,表 1.2 为加州大气资源局(CARB)排放限值^[8]。

表 1.1 EPA 排放限值

Bin	NOx	NMOG	CO	HCHO	NOx	PM
5	0.07	0.09	4.2	0.018	0.09	0.01
4	0.04	0.07	2.1	0.011	0.05	0.01
3	0.03	0.055	2.1	0.011	0.04	0.01
2	0.02	0.01	2.1	0.004	0.03	0.01
1	0	0	0	0	0	0

注:单位: g/mile; 排放耐久要求(10 年/120000 英里); HCHO 为甲醛、NMOG 为非甲烷有机化合物。

表 1.2 CARB 排放限值

分类	NOx	NMOG	CO	HCHO	NOx	PM
LEV	0.04	0.09	4.2	0.018	0.1	0.1
ULEV	0.07	0.055	2.1	0.011	0.1	0.1
SULEV	0.02	0.01	1	0.004	0.03	0.1

注:单位: g/mile; 排放耐久要求(10 年/120000 英里); PZEV (Partial Zero Emission Vehicle):首先符合 SULEV 限值规定,并且保证 15 年/150000 英里+零燃油蒸发的要求。

排放法规的日趋严格,而传统燃油客车在降低排放上的空间将越来越小,混合动力电动客车由于具有废气排放低、燃油经济性好、适合城市运行、技术可行性高等特点必将逐步取代传统的燃油客车成为城市公交的替代者。

为迎接 2010 年上海世博会,上海市政府向国务院提出提前分别实施国家标

准《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(II)》和《车用压燃式发动机排气污染物排放限值及测量方法》以应对世博会对大气环境质量的要求。绿色环保汽车已经被上海市公交车辆有限公司定为优先发展的车型。而作为绿色环保的先锋,混合动力客车必将为上海市带来一片更蓝的天空。上汽集团承担的混合动力公交客车的项目已运行一年有余,积累了很多经验,也得到了很多教训,继续大力发展混合动力汽车,这既是企业发展战略要求,也契合国家汽车产业振兴计划,本课题就是在此背景下开展进行。

1.2 国内外混合动力汽车现状

混合动力汽车可以将内燃机(发动机)动力与电机动力有效的结合,具备了传统汽车续驶里程长、加油方便和纯电动汽车效率高、污染少的双重优点,而且成本增加较少,但可以得到可观的燃料经济性和排放性能收益,很容易为市场接受,成为各大汽车公司重点开发的产品。

国外对混合动力公交客车的研究已经有很长的时间,从90年代开始,美国、日本及欧洲都进行了混合动力汽车的开发,并且得了重大进展。90年代后,美国加强了企业与政府间的合作,以混合动力汽车开发为重点,联合国防部、能源部和运输部,投入巨资鼓励各大汽车公司开展混合动力汽车的研究。1993年9月通用、福特和克莱斯勒三大汽车公司提出了新一代汽车合作伙伴计划,以混合动力汽车为重点方向开发新一代节能汽车^[9, 10]。由于公交车是大型的柴油车,更容易污染了城市空气,各个国家都限制客车排放,努力开发新型客车,研制成功并投入示范运行的混合动力车型如表1.3所示。

表 1.3 国外混合动力公交客车车型表

车型	国家	型式	最高车速 (km/h)	发动机
Toyota Coaster HEV	日本	串联	80	柴油
Orion VI HEV bus	美国/加拿大	串联	100	柴油
ISE ThunderVolt TB 30H	美国	串联	88	CNG/柴油
ISE ThunderVolt TB 40H	美国	串联	122	CNG/柴油
Iveco 12m Altrobus Hybrid	意大利	串联	62	柴油
EI Dorado National	美国	串联	80	柴油
AVS-30	美国	串联	88	燃汽轮机
AVS-35	美国	串联	88	燃汽轮机
Den Oudsten X97	荷兰	串联	80	柴油
Gillg unfixed name (40-foot)	美国	串联	80	柴油

车型	国家	型式	最高车速 (km/h)	发动机
Nissal Diesel-Unifix	日本	串联	70	液化天然气
GM 40-foot RTS	美国	串联	95	柴油
Van Hool A30BH	比利时	串联	60	柴油
NASA transit bus	美国	串联	95	柴油
Altra HEV bus	意大利	串联	80	柴油

国内各大汽车公司也在重点开发混合动力电动汽车，表 1.4 给出了国内部分混合动力客车车型。

表 1.4 国内混合动力公交客车车型

车型	企业	电机	供应商
BJ6123C7B4D	福田汽车	美国伊顿	美国伊顿
ZK6126HGZ1	宇通客车	美国伊顿	美国伊顿
EQ6122HEV	东风汽车	北京中纺锐力机电公司	神舟科技
BK6129HV	北京京华	北京中科易能新技术公司	江苏百乐电热电器公司
LCK6120GHEV	中通客车	株洲时代华通电动	泰州春兰研究院
XML6112PHEV1	厦门金旅	深圳港新动力科技公司	美国 OPTIMA
SWBHEV6128	申沃客车	襄樊特种电机制造有限公司	杭州万向电动汽车有限公司
HFF6110GZ-3	安凯客车	株洲电力机车研究所	美国 OPTIMA
NE6111SHEV1	宁波吉江	四川东风电机厂	泰州春兰研究院
CA6113SH8	一汽大连	伊偌华公司	江苏春兰清洁能源研究院
FDG6111HEVG	五洲龙	大连天元电机公司	深圳雄韬电源科技公司
PK6112AGH	安源客车	襄樊特种电机制造有限公司	远望创新（北京）

目前国内在这方面的研究，跟国外水平相比还存在一定的差距^[11, 12]，主要表现在以下几个方面：

- (1)混合动力汽车已成热点，各大科研院所及各个省市纷纷立项，重复立项和建设问题突出，没有形成共同的研发合力和资源共享；
- (2)零部件技术不高，如电机技术、蓄电池技术、变速箱技术等；
- (3)系统集成不够，各子系统之间不能协调工作，无法形成一个有机的整体；
- (4)实验开发条件不足，缺乏行之有效的电动汽车试验，检测标准体系。

1.3 混合动力汽车研发存在的问题

目前，混合动力汽车研发存在如下的问题：

(1)开发混合动力汽车的成本过高，因为 HEV 除了安装传统的动力装置外，还须配备动力电池及电池管理系统，电机及电机控制器，目前的趋势是采用锂电池作为动力电池，而其成本在短期内难以下降很多。

(2)混合动力系统的控制比较复杂，需要协调控制多个动力系统装置，还要监控比常规汽车更具挑战的安全管理。

(3)混合动力系统参数匹配及其优化方法的问题。

(4)混合动力控制系统开发问题。硬件可靠性及理想的控制策略，使混合动力系统燃油消耗最低或系统总效率最高。

(5)混合动力系统开发和试验平台的研究，目前国内混合动力汽车试验平台还不完善，需要制定更加合理的检验标准。

1.4 国内外混合动力汽车整车控制系统的发展概况

混合动力系统除有相互耦合的多个动力源外，还包括蓄电池、传动系统、制动系统等。混合动力汽车是机械、电力和热力组件的总成，是非线性系统，具有多种运行模式，因此需要复杂的整车控制单元对其进行统筹管理。整车控制器的研究成为混合动力车技术发展和产业化进程中的重要研究开发内容。混合动力汽车整车控制器的发展主要经历了两代：

第一代为中心式控制系统。用一台微控制器进行集中控制：采集所有信息，经过运算处理，输出控制信号。这种控制方式具有较大的局限性：由于汽车控制中要采集和控制的信号数量较多，导致整个线路复杂度较高，可靠性差，而且一旦系统软硬件设计完成，很难进一步扩展。

第二代为分布式控制系统。在整车相对输入输出比较集中的某一部位，用高性能单片机组成独立的模块，完成这一部位的信号采集和控制，各模块之间通过 CAN 总线交换数据，再用高性能的芯片通过总线与各模块相连。这种系统的优点十分明显，首先减少布线，因为输入输出接点与模块距离较近，而且模块之间通过总线连接；其次结构简单，可靠性大大提高，抗干扰能力则增强；另外，分布控制系统具有通用、开放、可扩展性，减少了整车布线和传感器数量，并为其他模块的加入提供了便利。

近年来，混合动力整车控制系统的研究进展主要表现在对整车控制器的开发及其控制策略的研究。国外推出了应用于不同车型的整车控制器，美国 PINGV 项

目在混合动力控制模块集成技术领域取得了较大进展。在PNGV (Partnership for a New Generation of Vehicles) 计划的推动下,美国各大汽车厂商都推出应用于混合动力汽车的控制系统,其中通用Precept混合动力汽车整车控制系统可控制电动机与发动机的输出能量分配,并具有能量管理、再生制动、电池状态判断等功能。福特汽车公司开发的整车控制器能够控制整车系统中各部件稳定协调的工作,并且能够实现不同工作模式的切换。同时,美国的一些著名高校也加入到混合动力汽车的研究和开发当中,并且在美国三大汽车公司的支持下,推出各自的混合动力车型,并开发出相应车型的整车控制器。其中美国加州大学戴维斯分校推出的Yosemite混合动力车及其整车控制系统PCM(Power-train Control Module)威斯康星大学研制的Moollenium混合动力车及基于MotoTronPCM555的总成控制系统。HEV整车系统控制单元需要与各个子系统之间传输来自传感器的信息以及重要的控制信号,大量数据的实时交换对整车控制系统设计提出了极高的要求。

国外整车控制器总结出来有以下特点:

一是国外整车控制器技术成熟。控制策略成熟度较高,很多控制器算法可以借鉴传统汽车的控制模型。整车节油效果率高,控制器产品通过高强度的车载试验。

二是原来生产发动机控制器的零部件企业积极开展整车控制器研发、生产和制造。如德尔福、大陆、博世公司都进行整车控制器研发和生产。相关汽车设计公司也为整车厂提供整车控制器技术方案和产品,如RICARDO、FEV、AVL在混合动力汽车整车控制器领域也有成功的案例。

三是控制器开发中软硬件模块标准化。由汽车制造商、电子半导体供应商和软件系统公司,联合组建汽车开放系统架构联盟,编制了AUTOSAR(汽车开放系统架构)标准,简化了开发流程,同时提高了控制器软件的复用性。

国内整车控制器的前期开发主要是高校,如上海交通大学、同济大学、清华大学、北京理工大学等,已基本掌握了整车控制器的软、硬件开发能力,产品功能完备,可以满足混合动力汽车功能性需求。同时,部分汽车制造企业与国外公司(如FEV、RICARDO)进行合作,吸收国外相关技术和经验,联合开发。部分整车企业进行了完全自主开发,如奇瑞汽车、比亚迪汽车、上海汽车、北汽福田等,都开发出整车控制器产品。

总体水平而言,在混合动力整车控制器产品技术方面,还有一些可以提高的地方,如:

(1) 应用软件方面,在整车安全控制策略、系统软件诊断及监控功能方面可以进一步优化和提高。

(2) 软件开发还未完全形成成熟的软件模块,在产品测试上也需进一步

完善。

(3) 国内企业的产品需要进一步提高稳定性和可靠性。

(4) 各整车企业控制器电气接口和网络协议采用不同的标准，控制器的通用性和复用性差，不利于控制器的产业化和规模化。

(5) 硬件可靠性测试设备和方法有待完善，可靠性设计方面有待进一步的提高。

1.5 混合动力客车控制策略研究现状

在国内，由于混合动力汽车的起步较晚，混合动力汽车的控制策略研究也不是很成熟，大部分都处于理论研究阶段。在应用方面也是刚刚起步，与国外有关混合动力汽车控制方面的技术水平也有较大差距。因此，加强混合动力汽车控制器策略的研究开发，有助于提高混合动力汽车产品的成熟度和性能优化。

国内混合动力汽车控制策略研究现状有如下特点：

(1) 混合动力汽车根据结构形式可以分为三大类：串联式、并联式和混联式。目前国内的控制策略研究针对串联式的较多。

(2) 目前的混合动力汽车控制策略较多的是基于逻辑门限进行控制策略的设计。

(3) 针对电池老化、发动机动态特性变化的自适应策略上研究较少。

(4) 由于国内混合动力汽车的研究大都是在样车上验证控制策略，缺少批产车的实际运营检验，所以很难判断控制策略是否符合实际运营路线及工况。

1.6 课题研究目的、理论意义和实际应用价值

2010年世博会在上海召开，世博园区外围运营需要150辆混合动力客车，上汽集团为了响应世博会绿色环保的号召，针对上海的路况（车型、路线、爬坡度等）开发了简单混联式混合动力客车，本部门在该项目中承担了整车控制器开发的任务，本文的相关工作就是在该项目的背景下完成。

1.6.1 课题研究目的

作为新能源汽车关键零部件的“三电”之一，整车控制器是保证实现新能源商用车性能指标的关键。对于整车制造企业而言，新能源整车控制器的开发与自主知识产权更具有重要的意义，开发整车控制器也是整车企业申报新能源客车准入

优选的条件。

本文工作正是针对混合动力客车“三电”之一的整车控制器展开自主开发。分别从硬件设计和控制策略设计两方面展开研发工作。通过设计的整车控制器，有效地对整车工作模式进行控制，并优化系统的能耗。

新能源商用车整车控制器对于可靠性、使用条件、安全性等方面的要求比较严格；与国际水平相比，我国在汽车电子控制技术方面的差距很大，尤其在商用车方面更为显著，主要表现在缺乏自主知识产权的核心关键技术和产品，缺乏电子产品工程化开发的技术、能力和经验，进而导致无法开发出可以批量应用的高质量、高性价比、良好的一致性、可靠性和耐久性的产品；另外，新能源商用车种类繁多，车型平台众多而每一款车型的产量不高，针对每一款车型均设计一款整车控制器将导致开发任务、时间、资源、成本等方面的问题；因此本课题的目的旨在开发一款通用、兼容、平台化的成熟可靠的产品。

1.6.2 课题研究的意义

研究开发具有自主知识产权的整车控制器可以帮助整车制造企业在选型零部件及产品定义上具有自主权。整车控制器是新能源汽车的控制中枢，负责新能源汽车的能量流管理、转矩管理和安全管理等功能。整车控制器在整车电气系统中处于所有控制器的最高层，整车控制器通过 CAN 总线连接电机、电池、仪表、附件系统、远程监控系统及诊断系统。掌握了整车控制器自主权后就可以根据产品定位选择不同零部件供应商，也可以根据不同的新能源车使用条件进行不同的控制策略开发。掌握整车控制器自主产权后，整车制造企业可以定义自主的整车电气架构及网络架构；同时对提高整车安全等级具有重大意义。

1.7 本文内容及结构

本文主要任务是研究 EHS 混合动力客车整车控制器硬件开发，并对动力系统的参数匹配和控制策略进行研究，主要包括：

(1) 根据汽车动力学，对混合动力系统主要参数进行计算，初步选定动力系统各零部件参数。

(2) 根据混合动力客车整车控制电气架构确认整车控制器的需求，根据需求设计整车控制器。

(3) 分析 EHS 混合动力客车动力系统的结构，确定整车工作模式和基本的整车控制策略。

(4) 结合具体路况进行整车能量经济性策略优化，并进行实验验证，优化整

车综合油耗。

因此，本文结构上共分为六章，分别如下：

第一章为绪论。

系统地介绍了国内外混合汽车行业发展的现状和整车控制系统的发展历程，比较分析了国内外混合动力控制系统的特点，总结了目前国内混合动力控制系统的主要问题及混合动力整车开发中的几大问题。

第二章为 EHS 混合动力系统方案简介及零部件选型。

主要根据整车性能设计要求，运用汽车理论的相关知识及公式直接计算，分别对主驱动电机、APU 系统、储能系统关键部件进行了选型计算和匹配比较，确定选型。

第三章为整车控制器硬件开发。

首先介绍了汽车电气环境，明确了整车控制器的工作环境要求。接着介绍了混合动力系统的系统框图，混合动力汽车的整车的电气结构，从而得到了整车控制器的功能需求、性能需求、电气接口等具体的需求；得到整车控制器的硬件配置表。然后根据硬件配置需求分别介绍了各种接口电路。最后结合项目目标和设计目标给出了整车控制器的测试内容。根据测试内容对整车控制器的各项指标进行了测试，测试结果表明各个指标均达到相关标准或设计目标的要求。本章内容还给出了详细的测试过程记录。

第四章为混合动力客车控制策略。

根据混合动力客车整车设计方案，对混合动力系统的结构及工作特点进行了阐述。在此基础上，结合整车的控制需求分别给出了整车上下电控制策略和动力系统工作模式转换的基本控制策略。分析了新能源汽车特有的故障及故障容错控制策略。

第五章为混合动力客车经济性策略。

依据混合动力汽车 4 年运营的数据和经验，从离合器结合速度、回馈制动、发动机工作点、安全保护措施等对影响经济性的单因素控制策略进行讨论和优化。最后采用正交试验方法，设计了正交试验表，进行了 4 因素 3 水平的平行正交试验，得出了优化参数配置。

第六章为总结与展望。

提出混合动力客车控制器后续开发需要在控制器优化、软件版本管理、软件安全架构和软件诊断等方面完善，解决好参数标定、策略调整、零部件性能优化和根据路况的动态参数寻优方法等方面的问题。

第2章 EHS 混合动力系统方案及关键部件选型

整车控制器是混合动力客车的控制中心，负责协调整车各个系统的工作时序，能量流管理与高压电安全管理等。本文第四章将会就混合动力系统运行模式进行控制策略研究，第五章将会进行混合动力客车整车经济性策略进行分析验证，为了更好的描述控制策略，本章简要介绍了论文研究所针对的混合动力系统方案，并对动力系统关键部件进行选型与参数设计。

2.1 混联型混合动力城市大客车设计要求

上海汽车简单混联型混合动力大客车 EHS 是在申沃原型大客车 SWB6116HG 为平台的基础上进行开发而成，申沃原型大客车的行驶参数如表 2.1 所示，要求设计完成后整车性能必须满足以下几点：

(1) 基本动力性要求

整车行驶最高车速 $U_{a_max} \geq 80$ km/h，最大爬坡度 $i_{max}=7\%$ ，同时要求 0~50 km/h 加速时间 $t \leq 25$ s。

(2) 燃油经济性和排放要求

在燃油经济性方面要求与原车相比提高 $\geq 20\%$ ；排放要求满足欧IV排放标准。

(3) 纯电模式续驶里程要求

等速 40 公里行驶工况下，纯电续驶里程要求大于 30 公里。

表 2.1 原车（SWB6116HG）行驶参数

物理量	代号	单位	数值
整备质量	m0	kg	11000
满载质量	m1	kg	17000
迎风面积	A	m ²	7.5
风阻系数	CD		0.62
轴距	L	mm	5800±10
车轮滚动半径	r	m	0.508
滚动阻力系数	f		0.02

2.2 混合动力客车动力系统的结构方案

在混合动力客车混联系统中使用变速箱是一个比较普遍的方案，使用变速箱可以很方便的对整车的最高车速、爬坡度等进行设计，并且在不同车速的时候更灵活的匹配发动机和电机的高效区。

但是国内客车用的变速箱能够实现产业化生产、性能稳定的较少；采用国外

商用车变速箱又存在价格过高的问题。本文方案系统结构与混联方案基本相同，但取消了变速系统，结构简单，称之为简单混联型结构（Easy hybrid system）。该系统节油效果略低于复杂混联技术路线，但系统成熟，综合效果好，是目前产业化的优选方案，图 2.1 是动力系统结构原理图。

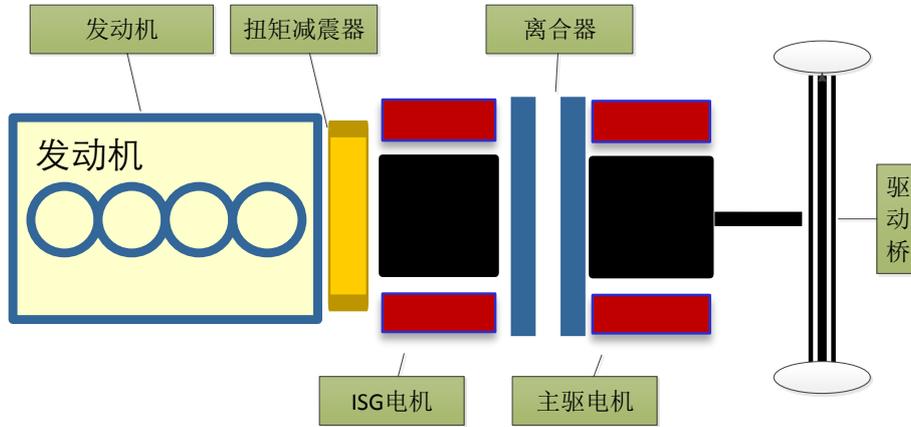


图 2.1 动力系统结构原理图

图 2.1 是动力系统动力传动链原理图（动力电池跟动力耦合不存在机械连接关系，故本图中省略）。该系统结构方案中，ISG 电机通过扭矩减震器安装在发动机曲轴上，ISG 电机主要用于起动发动机以及保持电池荷电状态（SOC）平衡，动力经过自动离合器传递至主驱动电机上，再经过主减速器，由半轴传递到车轮。

当离合器分离时，由主驱电机驱动车辆，发动机带动 ISG 电机发电，此时本动力系统是一种串联模式。当离合器结合，发动机和主驱电机同时驱动车辆时，此时本动力系统工作在并联模式。整车控制器通过控制离合器的分离和结合，同时协调各动力系统的能量分配来实现驾驶员的意图，故本文所述动力系统为简单混联系统。

在本文的混合动力系统中，同时配备电力驱动系统和辅助动力单元 APU（Auxiliary Power Unit）系统，辅助动力单元是指柴油发动机和 ISG 电机的结合体，该辅助动力系统既可以驱动车辆，也可以发电为动力电池充电。

2.3 电动机参数选择

在混合动力汽车应用中，电动机的选用原则为^[31]：

- (1) 高性能、低重量和小尺寸；
- (2) 在较宽的转速范围内有较高的效率；
- (3) 电磁辐射尽量小；
- (4) 成本低；

(5) 能够实现双向控制，对制动再生能量可以回收。

2.3.1 电动机类型的选择

目前新能源汽车用电机主要有直流电动机、交流感应式电动机、永磁同步电动机、永磁异步电动机、开关磁阻电动机。

直流电动机的优点是结构简单，调速方便，效率高，控制容易。但是直流电动机也存在缺点：体积大、重量大、价格高，直流电机驱动系统在低速低转矩区的效率较交流电动机低，对于城市用公交客车具有经常在低速低转矩区的行驶特性，这一点已经不符合要求。

交流异步电机优点是：结构简单、坚固耐用、成本低、转速极限高，利用矢量控制技术时其动态性能可与直流电机调速媲美。交流电机在低转矩区的效率也高于直流电机，非常适合应用在混合动力汽车系统中，并且技术较成熟，可移植性较好^[32]。

永磁无刷同步电机优点：输出扭矩大、效率高、功率因数高、功率密度大、可实现变频调速，在混合动力汽车和电动汽车中已得到广泛应用。

开关磁阻电机运用较少。开关磁阻电机优点是：结构简单、成本较低、可靠性高、起动性能好、调速性能好、控制装置简单；主要缺点为转矩脉动大、噪声大。表 2.2 给出了上述不同类型电机的典型性能对比。

表 2.2 各种电机的特性参数^[33]

项目	直流电机	感应电机	永磁电机	开关磁阻电机
功率密度	低	中	高	较高
过载能力 (%)	200	300~500	300	30~500
峰值效率 (%)	85~89	94~95	95~97	90
负荷效率 (%)	80~87	90~95	85~97	78~86
功率因数 (%)	——	82~85	90~93	60~65
恒功率区	——	1:5	1:2.25	1:3
转速范围(r/min)	4000~6000	2000~20000	4000~10000	可大于 15000
可靠性	一般	好	优良	好
结构的坚固性	差	好	一般	优良
外形尺寸	大	中	小	小
电机质量	重	中	轻	轻
控制操作性能	最好	好	好	好
控制器成本	低	高	高	一般

混联型混合动力客车要考虑选用功率较大、转矩较大，转速较高的电动机，并且还要考虑技术成熟度以及成本。由上述分析比较可见，直流电机对于混合动力汽车不太适用，目前应用相对较少。永磁电机造价高，开关磁阻电机成熟度低，交流感应电机在混合动力汽车中得到较大应用。故本文选择技术较成熟、成本较低的交流感应电机作为混联型混合动力客车的驱动电机系统。

2.3.2 电动机额定转速和最高转速的选择

电机额定转速是指在额定功率下电机的转速。根据 EHS 的动力系统结构可知，主驱电机转速除以后桥速比就是整车轮速，所以电机最高转速可由式 (2.1) 计算：

$$N_{e\max} \geq \frac{v_{\max} i_0}{0.377r} \quad (2.1)$$

其中： $N_{e\max}$ 为电机机最大转速；车辆最高车速 $v_{\max}=80$ km/h，车轮半径 $r=0.5$ m，后桥速比 $i_0=6.3$ （按传统车后桥初取）。

因此电动机的最高转速为：

$$N_{e\max} \geq \frac{v_{\max} i_0}{0.377r} = \frac{80 \times 6.3}{0.377 \times 0.5} = 2674 \text{ r/min}$$

电机的最高转速与额定转速比值称为扩大恒功率区系数，以 β 表示。当电机额定功率一定时，额定转速越低，对应的电机额定转矩越高，对提高车辆的动力性能是有利的。但高转矩需要大的工作电流，增大了电机控制器的尺寸和损耗。因此，驱动电机额定转速的选取原则就是在满足车辆动力性能的基础上，尽量选取较大的额定转速，以降低对电机其他方面的要求。一般情况下交流电动机的最高转速在 3000~10000 r/min，电动机的额定转速 N_{mr} 和最高转速 $N_{e\max}$ 有如下关系：

$$N_{mr} = \frac{N_{e\max}}{\beta} \quad (2.2)$$

本项目中，取 $\beta=2$ ，可得 $N_{mr}=1337$ r/min。

2.3.3 驱动电机转矩与功率选择

2.3.3.1 驱动电机的最大转矩

混合动力汽车工作与纯电机驱动时，要求驱动电机能够为车辆提供足够的加速扭矩和功率，因此电机功率参数要根据车辆加速和爬坡性能确定。车辆的起步爬坡计算公式为：

$$T_{tm} = \frac{r}{i_0 \eta_{gc} \eta_{mc}} [mgf \cos(a \tan(i_{\max})) + mg \sin(a \tan(i_{\max}))] \quad (2.3)$$

其中： T_{tm} 为电机最大力矩需求； $\eta_{gc}=0.95$ 为发电转换效率； $\eta_{mc}=0.95$ 为电动机效率； m 为整车质量。根整车设计指标，最大爬坡度 $i_{\max}=7\%$ 。爬 7% 的坡度需要的转矩为：

$$T_{tm} = \frac{r}{i_0 \eta_{gc} \eta_{mc}} [mgf \cos(a \tan(i_{\max})) + mg \sin(a \tan(i_{\max}))]$$

$$= \frac{17500 \times 9.8 \times 0.019 \times \cos(a \tan 0.07) + 17500 \times 9.8 \times \sin(a \tan 0.07) \times 0.5}{6.3 \times 0.95 \times 0.95}$$

$$= 1367 \text{ N m} \quad (2.4)$$

这里假设以匀速爬坡，车辆速度不大，风阻可忽略不计。

2.3.3.2 驱动电机的最大功率

车辆在平直路面上的加速时间 t 是反映车辆动力性的重要指标，根据设计要求车辆 0~50 km/h 加速时间 $t \leq 25\text{s}$ ，根据加速性能的功率需求^[33]：

$$P_{50} = \frac{1}{3600\eta_t} \left(mgfv + \frac{C_D A v^3}{21.15} \right) + \frac{\delta m v^2}{1296\eta_t} \left[1 - \left(\frac{t_m - 0.1}{t_m} \right)^{0.58} \right] = 154.2 \text{ kW} \quad (2.5)$$

其中 P_{50} 表示车辆 0~50 km/h 加速需求的最大驱动功率， η_t 为传动效率， C_D 为风阻系统， A 为迎风面积， $v = 50 \text{ km/h}$ ， $t_m = 25\text{s}$ 在考虑 10% 的裕量，需求的驱动功率至少为 170 kW，可以选用峰值功率为 200 kW 左右的电机。

额定功率的选择参照额定转速选择原则， α 取 2，电动机的额定转速 P_e 和峰值功率 P_{\max} 有如下关系：

$$P_e = \frac{P_{\max}}{\alpha} \quad (2.6)$$

可得 $P_e = 100 \text{ kW}$ ($\alpha = 2$)。

按式 (2.5)，速度 v 取值 80 km/h，加速度部分功率需求为 0 即可得出整车最高车速时的电机功率需求为 108 kW，所以电机峰值功率 200 kW 满足加速时间需求和最高车速需求。

2.3.4 电机型号的确定

电机功率一定的情况下，电压越低，电流就越大，线路功率损失越大。电压越高，线路电流越小，效率越高，但电压过高，就需要更多的电池串联使用，对整车的绝缘要求越高，器件耐压等级要求也高。目前，混合动力系统电机的额定电压一般选择在 144~720V 之间。

本文选择襄樊特种电机有限公司生产的，型号为 YCVF280M-8D 的交流感应驱动电机，表 2.3 给出了主驱动电机具体参数，图 2.2 是该电机效率图。

表 2.3 驱动电机参数

型号	YCVF280M-8D
额定功率 (kW)	110
峰值功率 (kW)	220
额定转矩 (N·m)	778
峰值转矩 (N·m)	1556
额定转速 (r/min)	1335
最高转速 (r/min)	3000
额定电压 (Vac)	600
重量 (kg)	365

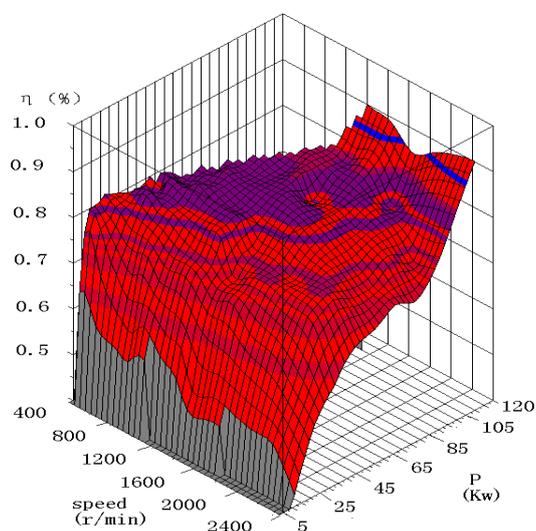


图 2.2 主驱动电机效率图

2.4 APU 系统参数的确定

本方案中, APU 系统包含六缸柴油机和 ISG 电机, 图 2.3 是该系统的数模图。

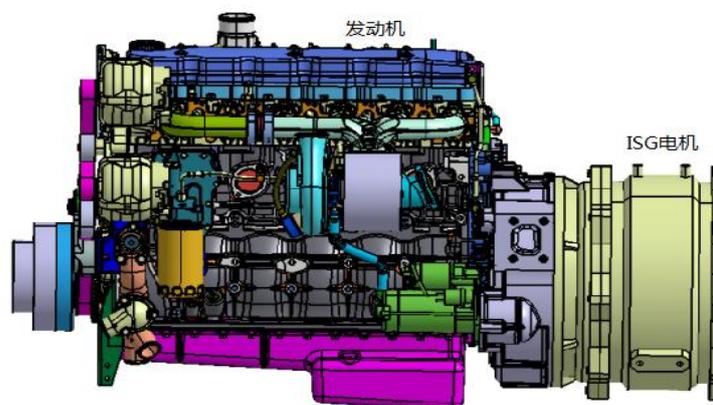


图 2.3 APU 系统数模图

2.4.1 发动机选型

2.4.1.1 发动机功率选择

一般来说，在选择发动机时要考虑以下几个方面^[31]：

- (1) 发动机的转速和转矩特性必须符合测试工况点的分布规律；
- (2) 为了提高车辆的燃油经济性，并降低整车成本，应尽量选择较小功率的发动机；
- (3) 动力系统必须满足测试工况的需求；
- (4) 维持电池系统 SOC 平衡；
- (5) 发动机功率满足车辆巡航的要求。

选择混合动力汽车用发动机时，首先要考虑的就是满足汽车性能需求的发动机尺寸与额定功率问题。发动机的额定功率取决于车辆需求的平均功率。对于混合动力汽车而言，电机也参与整车驱动，使得发动机功率能满足汽车平均需求功率即可。

在本方案中，为了到达燃油经济性的最佳状态，发动机始终运行在高效率区，整车需要加速扭矩和超出平均功率时由电机提供相应扭矩和功率，因此发动机的功率值选择主要考虑车辆匀速行驶时的功率需求，确保汽车在平均车速匀速行驶下，发动机能工作在最佳经济区，即：

$$P_{e_{\max}} = \frac{1}{3600\eta_{gc}\eta_{mc}} [mgf \cos(a \tan(i_{\max})) + mg \sin(a \tan(i_{\max})) + \frac{C_d A v_{aver}^2}{21.15}] v_{aver} \quad (2.7)$$

其中： $P_{e_{\max}}$ 发动机最大输出功率；发电转换效率 $\eta_{gc}=0.95$ ；电动机效率 $\eta_{mc}=0.95$ ；整车质量 $m=17500\text{kg}$ ；滚动阻力系数 $f=0.019$ ；空气阻力系数 $C_d=0.65$ ；迎风面积 $A=7.6\text{m}^2$ 。根据上海城市路况，最大爬坡坡度为 $i_{\max}=7\%$ ，平均行驶速度为 $v_{aver}=30\text{km/h}$ ，计算发动机功率得：

$$P_{e_{\max}} = 139.1\text{kW}$$

实际应用中，为满足汽车动力性的要求，增加安全裕度 10 kW；发动机高效、低油耗区域大约位于负荷率 80~90% 之间，故发动机实际功率应再增加 15 kW；发动机附件消耗功率约为 5 kW，空调功率设计需要 15 kW。考虑到上述功率裕度和附件功率，再考虑到发动机还要为电池组充电，再增加 10 kW。因此发动机需求的总功率为：

$$P_{e_{\text{total}}}=139+10+15+20=184\text{kW}$$

2.4.1.2 发动机转速选择

为了保证发动机工作在高效区，当车速大于 75km/h 时，选用驱动电机工作。发动机不直接驱动车辆运行，而是要根据实际情况（如爬坡、动力电池 SOC 等）

选择是否工作。发动机最高转速依据以下公式计算：

$$N_{eng_max} \geq \frac{i_0 v_{75}}{0.377r} \quad (2.8)$$

由后桥 $i_0=6.3$ 可得：

$$N_{eng_max} \geq \frac{i_0 v_{75}}{0.377r} = \frac{6.3 \times 75}{0.377 \times 0.5} = 2500r / \min$$

发动机选择的原则是在现有产品中选择成熟产品。并要考虑排放要求，选择欧IV发动机，以满足设计要求。考虑到设计成本、开发周期和企业现有技术基础，只是对现有成熟产品作适当改造，不准备对发动机的控制和标定作大量工作，所以为满足排放设计要求，选择现成的满足欧IV排放标准的柴油发动机。同时，由于混合动力车采用了 CAN 总线技术，发动机控制单元（ECU）必须支持 CAN 通讯并最好能支持 CAN 总线控制工作方式。

分析后初步得到 4 款比较合适的发动机，如表 2.4 所示。

表 2.4 备选发动机及其基本参数

	额定功率 (kW)	最大扭矩 (N·m)	额定转速 (r/min)	最高转速 (r/min)
上柴	179	970	1500	2200
玉柴	191	915	1500	2200
康明斯	169	900	1400	2500
上菲红	185	900	1300	2700

综合上述计算结果，本方案最终选用上汽菲亚特红岩动力总成有限公司生产的 NEF6_185 发动机，既能满足车辆动力性能要求，又能保证发动机尽可能的工作在经济区。

2.4.2 ISG 电机的选择

ISG (Integrated Starter Generator) 电机的要求为性能稳定、重量轻、尺寸小、转速范围宽、效率高、成本低等。交流异步电机具有结构简单、坚固耐用、成本低廉、转速极限高的优点。ISG 电机采用交流电机，跟永磁电机比较，具有以下优点。

(1) 采用异步电机可避免永磁电机因传导发动机热量及自身发热而导致退磁问题。

(2) 交流异步电机控制技术较成熟，成本相对较低。

本方案中 ISG 电机连接是后离合器形式，电机无法单独发出驱动力，ISG 电机所具备的作用一是带动发动机实现快速起动，二是在加速行驶和爬坡等时提供电力辅助。因此，ISG 电机的参数匹配主要是通过研究电机参数对发动机的起动能力，以及对整车爬坡性能的影响，确定电机的峰值功率、最高转速和持续功率。

根据混联混合动力功率传递的特点及整车工作特性, 保证整车满足一定的动力性和经济性。发动机、ISG 电机与主电机同时提供力矩, 在速度为 30km/h, 爬 18% 坡度时车辆需求的力矩为:

$$T_{eng+isg+TM} = mgf \cos(a \tan(0.18)) + mg \sin(a \tan(0.18)) + \frac{C_d A v^2}{21.15} r / i_0 \eta_{gc} \eta_{mc} \quad (2.9)$$

$$= 3182 \text{ N} \cdot \text{m}$$

如图 2.4 是发动机外特性图; 所选发动机最大转矩为 $T_{eng} \approx 900 \text{ N} \cdot \text{m}$, 前面计算主驱动电机最大转矩为 $T_{TM} \approx 1367 \text{ N} \cdot \text{m}$, 本项目所选主驱电机的峰值扭矩为 $1556 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。可以得出 ISG 电机最大转矩需求 $T_{isg} \approx 726 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。同样取 2, 得出 ISG 的额定扭矩应为 $T_{isg} \approx 363 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

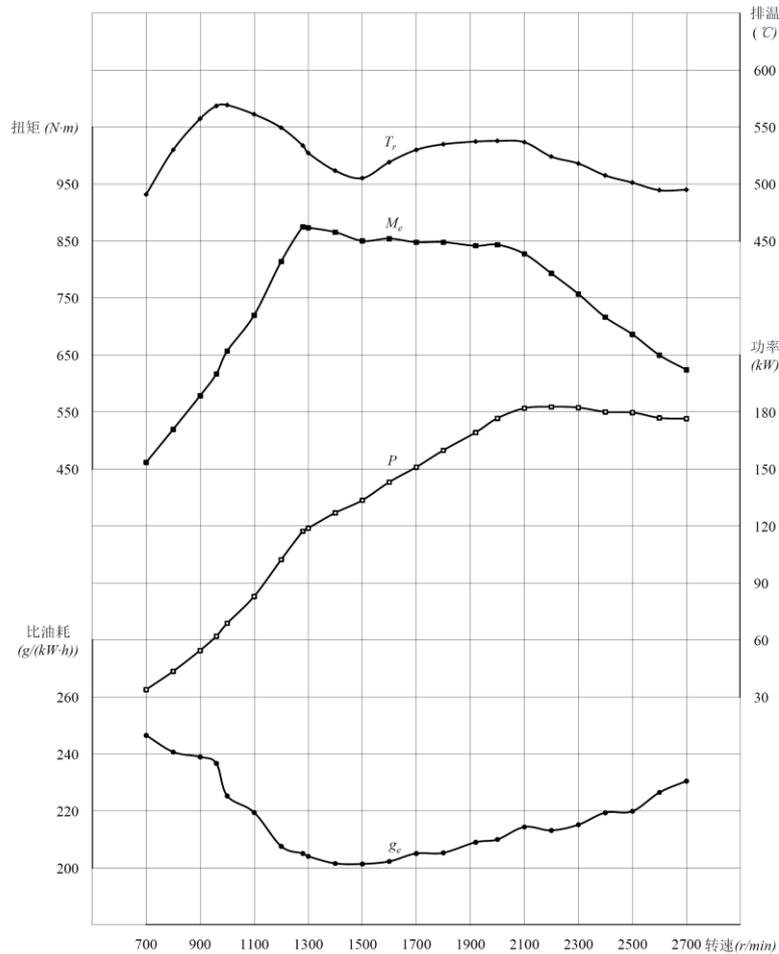


图 2.4 发动机外特性图

参考发动机运行高效区的转速范围 (1400~1800r/min) 取中间经济转速 1600 r/min, 根据:

$$P = \frac{Tn}{9550} \quad (2.10)$$

其中: T - ISG 电机额定转矩, n - 电机转速, 得到 ISG 额定功率 $P_e \approx 60.6 \text{ kW}$ 。

本文选用襄樊电机有限公司生产型号为 YCVF280S-6C 的交流感应 ISG 电机，其参数如表 2.5 所示。

表 2.5 ISG 电机特性

型号	YCVF280S-6B
额定功率 (kW)	70
额定转矩 (N·m)	393
额定转速 (r/min)	1680
最高转速 (r/min)	3000
额定电压 (Vac)	600
峰值功率 (kW)	140

2.5 电池参数的选择

动力电池有多种类型，考虑到安全性及能量密度等因素，本方案选用磷酸铁锂电池为车载电池。相比其它类型的电池，锂离子电池主要优点表现在：

- (1) 比能量高。具有高储存能量密度，目前已达到 110~140Wh/kg。
- (2) 使用寿命长，使用寿命可达到 6 年以上，磷酸亚铁锂为正极的电池用 1C 充放，可以使用 3000 次以上。
- (3) 额定电压高（单体工作电压为 3.7V 或 3.2V），便于组成电池电源组。
- (4) 具备高功率承受力，便于高强度的启动加速。
- (5) 自放电率很低，这是该电池最突出的优越性之一，目前一般可做到 1%/月以下。

电池参数主要指电压等级、功率、单体电池电压应用范围。一般考虑如下原则：

- (1) 电压等级要与电力系统电压等级和变化范围一致。
- (2) 最大充电和放电功率要满足电机的功率要求。
- (3) 单体电池电压状态应用范围。

该车选用的是万向公司生产的单体电压为 $V_{bat}=3.2V$ （额定），容量为 $I_{bat}=15Ah$ 的磷酸铁锂电池，图 2.5 为单体电池不同倍率放电曲线，倍率表示电池在工作中的电流强度。可见当电池以 1C 放电时，电池容量利用率达到 97.4%，倍率越大，放电电流越大，对电气系统要求越高，该电池限定最大的放电倍率为 8C。

选择高等级电压可有效降低主电机工作电流，对整车高压系统设计提供便利，一般根据交流感应电机的电压等级可分为 288V，366V，600V 等，根据前面的电机选型，本设计选定动力电池组的额定电压为 600V。

根据电机的峰值功率，计算动力电池的最大充放电功率。因为驱动电机的峰

值功率为 220kW，假设效率为 0.9，则整个系统所需电池提供的功率为 244kW。因本项目拟采用的动力电池最大放电倍率为 8C，所选电池的容量至少应为：

$$C_{\text{总}}=244/8/600=50\text{Ah}。$$

单体电池为 15Ah，应该选 4 节单体并联方案，则总容量为 60AH，满足电机需求。

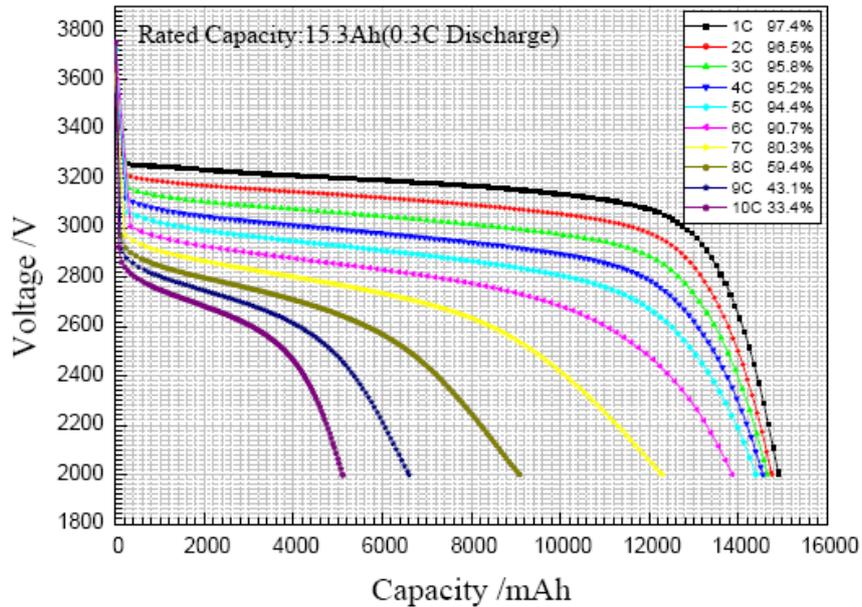


图 2.5 单体 3.2V15Ah LiFePO₄ 电池不同倍率放电曲线

根据混联混合动力功率传递的特点及整车工作特性，保证整车在纯电动模式下（发动机不工作，仅主驱动电机工作）能有一定的续驶里程，保证车辆能通过限制区域。考虑车辆在水平道路以速度为 30km/h 行驶，以 1C 倍率放电，需求的驱动力为：

$$F = mgf + \frac{C_d A v^2}{21.15} \quad (2.11)$$

即 $F = 3468.1N$ 。

假设电池放电时效率为 0.974，则续驶里程为

$$L = \frac{U_{\text{总}} \cdot 60 \cdot 3600 \cdot 0.974}{F} = 34941 \text{ m}$$

满足纯电工况行驶 30 公里的整车技术要求。

2.6 本章小结

本章首先给出了混联型混合动力客车的设计要求，再分别对主驱动电机、发动机、动力电池部件进行了选型匹配分析。

对于主驱动电机，分析了目前可应用的四类电动机的优缺点，再从技术成熟度和成本方面考虑选用三相交流异步电机，并通过计算得出选用电动机的额定转

速和最高转速、电机的转矩，电机的峰值功率。

对于 APU 系统，从动力性能要求计算发动机的需求功率为 184kw 以及额定转速 2500r/min，最终选用上汽菲亚特红岩动力总成有限公司生产的 NEF6_185 发动机；ISG 电机的参数匹配主要是通过研究电机参数对发动机的启动能力，以及对整车爬坡性能的影响，确定电机的峰值功率、最高转速和连续功率。

动力电池选用磷酸铁锂电池，总电压为 576V，电池容量为 60Ah，纯电模式行驶里程为 34km，满足整车动力性及纯电续驶里程要求。

第3章 整车控制器硬件开发

本章先进行了整车控制器的工作环境分析；同时为后面测试做准备，介绍了ISO16750标准中控制器的5个等级。再从混合动力客车的电气架构出发，得出整车控制器的电气接口需求，进而得出整车控制器的硬件资源需求。最后根据各个硬件模块需求来设计相应的模块电路。

3.1 整车控制器工作环境分析

在电子产品随车使用时，汽车的环境条件很大程度上影响着电子产品的功能、性能和寿命。理清这些条件和边界是第一步，设计过程中考虑这些因素是第二步，最后在模拟这些条件的实验中检验是第三步。在本章中，将对整车控制器工作环境条件做一个简单分析。

作为交通和运输工具的汽车，内部的电子模块需要在全世界不同的气候、环境的地区使用，因此控制器工作环境可以从气候条件、机械条件和电气条件几个方面进行探讨。

3.1.1 气候条件

气候条件包括温度、湿度、水分、灰尘和化学物质等方面。

(1) 温度：汽车的使用范围要覆盖全世界的绝大部分国家，因此要满足所有的陆路气候，包括沙漠炎热气候和北极圈寒冷气候。温度有最低温度、最高温度和温度变化三个方面的需求。车身内电子电器产品的温度要求为-40-85℃。但在汽车上某些区域温度可上升至很高的范围，排气口附近可能达到105℃，引擎附近甚至可达到125℃。

(2) 湿度：空气的相对湿度一般是衡量空气中有多少水蒸气。对于汽车电子模块来说，它要满足这个残酷的相对湿度范围，从低于10%到接近100%，是这世界大部分地区的气候所决定的。典型的就高湿度的热带雨林气候和干燥的沙漠气候。高湿度会迫使水蒸气进入模块的部分元器件中，将会造成绝缘损坏、器件腐蚀和材料劣化等不良的情况发生。

(3) 水分：比湿度更严重的是水分，大多数电子模块面对水是非常脆弱的。虽然车辆内部大多数情况是干燥的，但还是要关注某些内部区域。如当下雨时或者车子进水时，座椅下方可能会有一定的积水。那些直接暴露的电子模块有可能滴洒上各种液体，如在车内喝水时有小部分倒在模块上面。安装在汽车车身后方的电子模块，在行李箱打开时容易受潮沾染水分。另外一种情况特别常见，冬天

气温较低,汽车启动后内部温度升高引起水蒸汽在模块表面液化,形成的水珠也会对模块造成潜在的威胁。

(4) 灰尘: 车辆行驶在比较差的道路上会引起模块的灰尘堆积。灰尘会影响某些执行器件,如开关、继电器和连接器等的正常工作。

(5) 化学物质: 在清洗和维修汽车时,往往在汽车中残留一部分化学物质,这会引起模块的腐蚀。在沿海地区,空气中的水分含盐度很高,也会对电子模块造成非常大的影响。这些都是需要关注和了解的。

3.1.2 机械条件

汽车机械方面的考虑主要是振动和冲击,这两种情况会对汽车电子模块产生破坏作用,典型为元件脱焊脱线、触点接触不良、搭铁不良、元器件断裂等现象。模块会经受来自不同方向、不同频率的振动和冲击,这与模块的安装位置有关。

(1) 机械振动: 车辆行驶或者发动机运行时,模块总是处在振动状态中。发动机运行时仅是轻微振动,车辆行驶时,轮胎和道路会让模块处在较大的振动状态中。

(2) 机械冲击: 当汽车撞击、汽车下线和运输过程中等都要经受很大的机械冲击。

另一项值得关注的则是模块的自由跌落。在电子模块加工处理甚至是组装过程中(模块下线和汽车生产商的生产线上),可能由于意外的原因跌落到地面上会造成损坏和失效。因此,在设计时就需要保证在这个过程中产品不能有隐性的损坏。某种程度上,表面和明显的损坏更容易被发现而被更换;外观上损坏不明昆的模块则会被直接装上车辆,如果其内部含有隐性的损坏,这对于消费者来说会是一项很大的隐患。因此,这项内容是电子模块设计时必须要考虑的。自由跌落的失效模式主要为机械损坏,跌落到地面产生的高加速度使内部元器件与电板分离等情况发生。跌落产生的加速度与跌落高度和跌落的地面有关,实验时跌落高度为 1m 或按照协定的高度进行。地面则选择在混凝土地面或钢板上进行测试。

3.1.3 电气条件

汽车的电气条件包括电池电压和地偏移、浪涌电压、无线电磁波干扰等方面。

(1) 电池电压和地偏移: 发生在汽车启动时,电池电压可能会低于 12V,甚至最低时为 6~7V。充电系统存在故障时,电池电压将会超过 18V。因此,汽车电子模块需要经受一个很宽的电压范围。汽车上不同的地回路接点,各自之间也会存在一定的电压差,这是地线回流引起的,也被称为地偏移。一个模块输入/输出信号较多时,由于不同信号的电线分布在不同的接地点上,因此需要慎重

考虑信号的地偏移。

(2) 浪涌电压：电压尖峰主要是由于打开或关闭负载引起的，模块后的负载和其他模块控制都有可能引发电压尖峰。除了在同一个电源线上的负载，也有可能是别的电源线上的负载。大电流负载的导通与断开，会在电源线上引起电源电压和地线的波动干扰。特别需要注意发电机“抛负载”的情况，它表征在发电机上的大部分负载断开时，发电机并没有停止工作而是继续运行，这时在电源线上将会产生一个很大的干扰电压。

(3) 无线电磁波干扰：汽车内部有很多噪声源，如雨刮电机、燃油泵电机、点火线圈感性负载、空调电机、汽车发电机输出线连接的间歇切断、车窗电机等；随着无线电子设备的普及，如手机、GPS、MP3 和其他消费类电子设备等，汽车电子模块需要经受很宽的频带干扰。汽车电子零部件的 EMC 情况较为复杂，不过基本可以分为辐射骚扰、传导骚扰、辐射骚扰抗扰度、传导骚扰抗扰度、静电放电五个方面。这部分规范复杂，并且随着电子产品的发展更新较快，不同的产品差异也较大。

3.1.4 ISO16750 标准

以上介绍的内容已经比较完整地记录在测试标准中，这些标准是对环境条件的抽象和模拟。国际化组织将其定义为《道路车辆电气和电子设备的环境条件和试验》ISO16750 国际标准。这是基于世界上的整车 OEM 企业自身测试标准的妥协结果。这些标准是通过对汽车进行实验和积累，获取数据并进行分析；用来描述电子模块在寿命周期内使用时预期要承受的真实环境，包括全世界的温度、湿度和降水等气候条件，也考虑了各地的污染和海拔等影响。制定这些标准，可以使零部件企业按照标准规定的条件去设计模块，并根据这些条件对产品进行检验，一般而言整车 OEM 的标准比 ISO 标准更为严格。零部件企业在开始设计之前，一定要确认产品所需要的实验标准。

在检验过程中，标准中对于模块的功能情况进行实验等级分类，一般可分为五个等级。

A 级：在标准设定的条件下和返回设定的条件后，模块所有功能满足设计要求。

B 级：在标准设定的条件下，模块所有功能满足设计要求，允许有一个或多个超出规定允差；返回正常的条件后，所有功能自动恢复到规定限值。存储器功能应符合 A 级。

C 级：在标准设定的条件下，模块中一个或多个功能不满足设计要求；返回正常的条件后，所有功能自动恢复到规定运行。

D 级：在标准设定的条件下，模块中一个或多个功能不满足设计要求；且返

回正常的条件后，不能自动恢复到规定运行，需要对模块简单操作重新激活。

E级：在标准设定的条件下，模块中一个或多个功能不满足设计要求；且返回正常的条件后，不能自动恢复到规定运行，需要对模块修理或更换。

这些等级使得不同模块在同一种条件下表现的性能并不相同，这与汽车中不同模块的安全等级的分类基本一致。本文要求控制器能达到 A 级或部分功能 C 级。

3.2 整车电气架构及整车控制器电气接口

混合动力汽车的核心部件之一就是整车控制器，整车控制器采集加速踏板位置、档位、制动踏板力等信号，再结合驾驶员的操作意图和动力蓄电池的SOC状态运算出车辆运行所需要的发动机功率、电动机和发电机功率转矩参数，协调各个动力系统的运作。

3.2.1 EHS 混合动力动力系统结构及整车控制器的功能定义

图3.1 为本文研究的EHS混合动力系统结构图。该系统采用双电机结构，发动机与ISG电机通过一个常闭离合器联接，ISG电机与主驱电机间通过一个气缸控制的离合器联接。

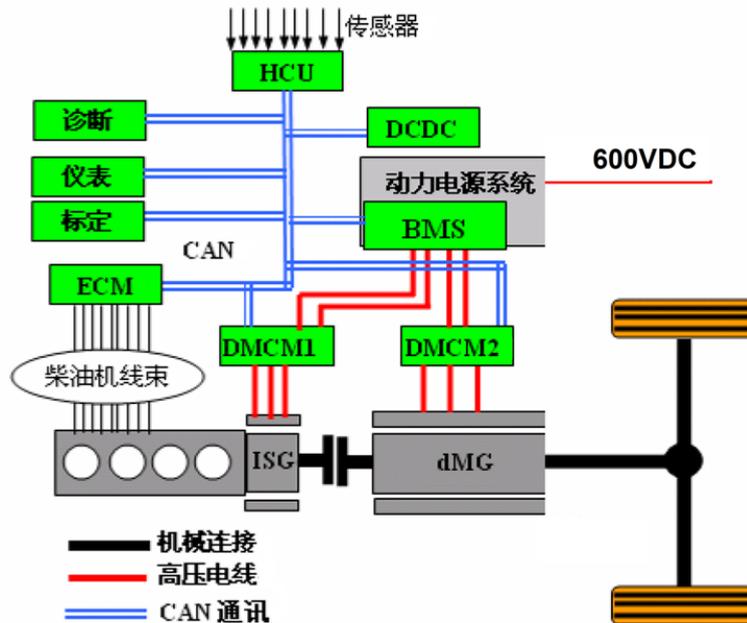


图 3.1 EHS 混合动力动力系统结构

上图的混合动力系统方案中，发动机通过CAN总线与VCU连接，VCU通过CAN总线发送控制指令，控制发动机的启动、停止、扭矩及功率请求；两个电机控制器也是通过CAN总线与VCU通讯，电机的工作模式、扭矩及转速指令也是

通过CAN总线获取；电池管理系统通过CAN总线与整车网络连接，电池管理系统通过CAN总线上传电池的相关信息、充电请求等；系统中采用了分层控制的方法来对驾驶员的意图和各个动力系统零部件进行信号采集和控制。其中整车控制器是整车控制的核心，通过CAN总线协调各个控制器来驱动汽车，并且必须满足如下的系统硬件（含独立运行的底层驱动程序）基本功能：

- (1) 整车各控制器（发动机控制器、车身控制模块、电池管理系统、电机控制器等）的唤醒；
- (2) 上电初始化：整车控制器自检，整车控制器初始化，仪表灯，高压接通；
- (3) 驾驶员指令与传感器信号处理；
- (4) 停车维护充电控制；
- (5) 驱动力控制、车辆运行工况（起步、加速、巡航、减速、驻车、停车、倒车）控制；
- (6) 最高车速限制；
- (7) 对各个控制器发出控制指令；
- (8) 发动机启动模式控制；
- (9) 指令控制；
- (10) 接收电池管理系统的有关动力蓄电池组状态信号（电流、电压、温度等）；
- (11) 接收电机控制器的有关电机、逆变器总成的运行参数和状态信息；
- (12) 硬件故障自诊断与处理；
- (13) 硬件失效控制；
- (14) 开机和停机过程控制、干扰和复位处理；
- (15) 将有关信息送至仪表板；
- (16) CAN 通讯；
- (17) 监测和标定；
- (18) 与故障诊断仪的通信。

3.2.2 EHS 混合动力整车电气架构

图3.2所示为所研究混合动力客车的整车电气架构图。整车控制器在整车电气架构中处于中央处理器位置，协调各个控制器系统工作功能、时序。具体的高压电气联接在此不详细阐述，低压控制器在整个电气架构中分2个CAN网络，CAN1网络上连接发动机管理系统、SCR（Selective Catalytic Reduction）控制器、

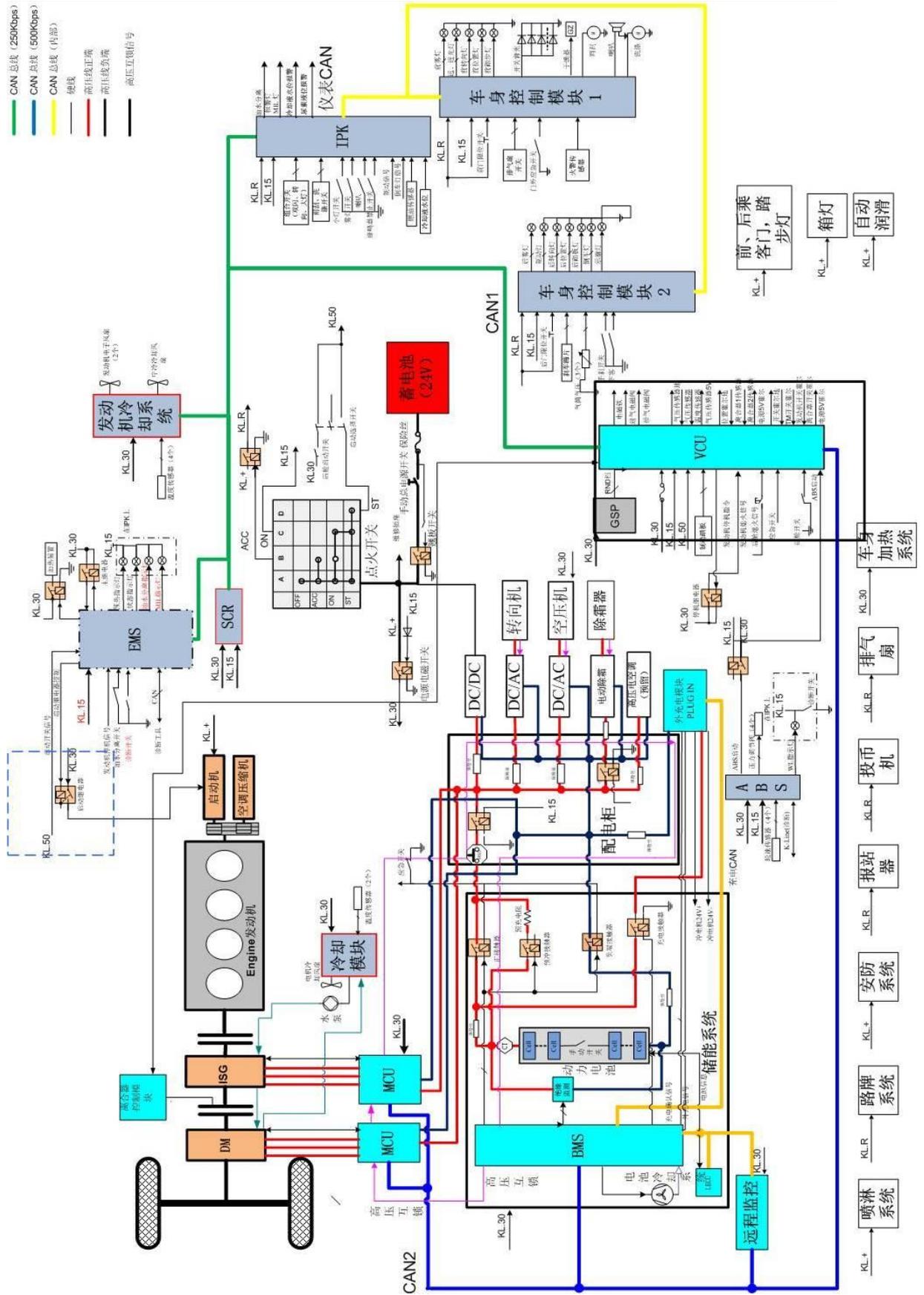


图 3.2 EHS 混合动力动力整车电气架构

仪表、车身控制器模块、ABS（antilock brake system）等，CAN2网络上连接电池管理系统、2个电机控制器、远程监控系统等。

本文设计的EHS混合动力客车系统中有3路CAN总线。CAN1上连接的为传统汽车的系统及零部件，包括发动机、变速箱（本文未配置）、ABS系统、SCR系统、仪表总成等。CAN2上连接的为新能源汽车新增系统及零部件，包括电机控制器、电池管理系统、电附件系统及远程监控系统。CAN3为整车标定及诊断仪接口。具体网络拓扑如图3.3。

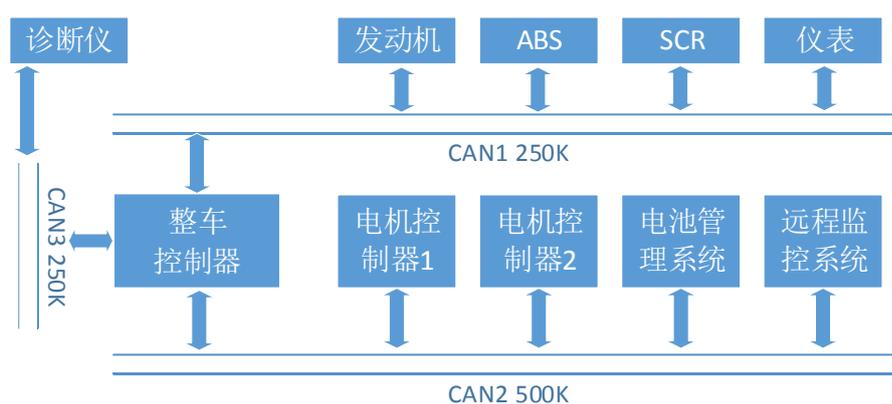


图3.3 EHS混合动力客车网络拓扑

3.2.3 EHS 混合动力整车控制器接口需求

根据图 3.2 的整车电气架构及整车控制器的车辆功能需求分析，总结了整车控制器的电气接口需求。简单混联混合动力客车整车控制器的电气接口需求如表 3.1 所示

表 3.1 整车控制器输入输出信号表

输入、输出信号确认表						
序号	定义	输入 输出	电气特性	负载特性	整车控制器 PIN	说明
1	ON	DIH	Active high(0~27.5v)		3	控制器唤醒
2	Start	DIH	Active high(0~27.5v)		66	脉冲信号，脉宽>1s
3	马达启动控制信号	DOL	LS	线圈电阻约 160Ω，开关型	40	发动机传统启动方式（控制继电器送 EMS start 口）
4	BATT	PWRI	27.5V		67、74	系统驱动电源正
5	ABS active	DIH	Active high(0~27.5v)		59	通过常闭继电器，VCU 内部配置为高有效，内部下拉。
6	发动机停机指令	DOL	LS	高阻	26	兼容继电器驱动

输入、输出信号确认表						
序号	定义	输入输出	电气特性	负载特性	整车控制器 PIN	说明
7	发动机后熄火信号	DIL	Active low(0~27.5v)		63	
8	发动机舱门开关	DIL	Active low(0~27.5v)		56	
9	踏板/气压传感器 5V 供电	PWRO	5V	<50mA	33	刹车踏板/气压传感器共用
10	刹车制动模拟量	AI	0~5V		45	
11	刹车制动开关 NC	DIL	Active low (0~5V)		62	VCU 内部上拉，低有效（反逻辑）
12	刹车制动开关 NO	DIH	Active high (0~5V)		65	硬件内部下拉，高有效（正逻辑）
13	踏板/气压传感器地	AGND			7	刹车踏板/气压传感器共用
14	制动气压传感器	AI	0~5V		34	选装，可通过仪表 CAN 发送
15	空调开关信号	DIH	Active high(0~27.5v)		64	空调工作状态(建议通过继电器)
16	急停开关	DIL	Active low(0~27.5v)		57	
17	挡位开关 R1	DIH	Active high(0~27.5v)		55	
18	挡位开关 R2	DIH	Active high(0~27.5v)		61	常闭开关。VCU 内部配置仍为高有效，内部上拉（反逻辑）
19	挡位开关 P	DIH	Active high(0~27.5v)		54	可选
20	挡位开关 N	DIH	Active high(0~27.5v)		60	
21	挡位开关 D	DIH	Active high(0~27.5v)		53	
22	开关霍尔 5V 电源	PWRO	5V	<50mA	35	开关霍尔共用
23	离合器开关霍尔	HAI			46	离合器从动盘转速
24	发动机开关霍尔	HAI			47	发动机转速，霍尔输入
25	TM 开关霍尔	HAI			36	TM 转速，霍尔输入
26	开关霍尔地	DGND	0V		8	数字地
27	位置霍尔 5V 电源	PWRO	5V	<50mA	37	线性霍尔共用

输入、输出信号确认表						
序号	定义	输入输出	电气特性	负载特性	整车控制器 PIN	说明
28	离合器1位置传感器	AI	1~4V		48	大离合器位置
29	离合器2位置传感器	AI	1~5V		49	小离合器位置
30	位置霍尔地	AGND	0V		10	两线性霍尔共用
31	传感器5V电源	PWRO	5V	<50mA	39	温度/压力共用
32	气压传感器(离合器)	AI	0~5V		38	需确认传感器信号类型范围
33	温度传感器(离合器)	AI	0~5V		50	需确认传感器信号类型范围
34	传感器地	AGND	0V		12	温度/压力共用
35	离合器1进气电磁阀	HSP	PWM, 电压幅值 27.5V, <500Hz	线圈 8Ω/6.9mH, 峰值电流 3.5A 时间 <100ms, 维持电流约 1A	76	高边优先
36	离合器1排气电磁阀	HSP	PWM, 电压幅值 27.5V, <500Hz	线圈 8Ω/6.9mH, 峰值电流 3.5A 时间 <100ms, 维持电流约 1A	69	高边优先
37	离合器2电磁铁	HSP	PWM, 电压幅值 27.5V, <500Hz	线圈 2.4Ω/1.1mH, 峰值电流 6.5A 时间 <100ms, 维持电流约 2A	68	高边优先
38	CAN1H	CAN	COM		31	传统动力系统
39	CAN1L	CAN	COM		43	

输入、输出信号确认表						
序号	定义	输入 输出	电气特性	负载特性	整车控制器 PIN	说明
40	CAN2H	CAN	COM		32	新增动力系统 用于标定, 诊断
41	CAN2L	CAN	COM		44	
42	CAN3H	CAN	COM		30	
43	CAN3L	CAN	COM		42	
44	BATT	PWRI	27.5V		1	系统电源正
45	GND	PWRI	0V		27、28、80	系统电源地
46	Peaklaunch 开关	DIH	Active high(0~27.5v)		58	

根据表 3.1 EHS 混合动力整车控制器接口需求, 设计的整车控制器的接口框图如图 3.4 所示:

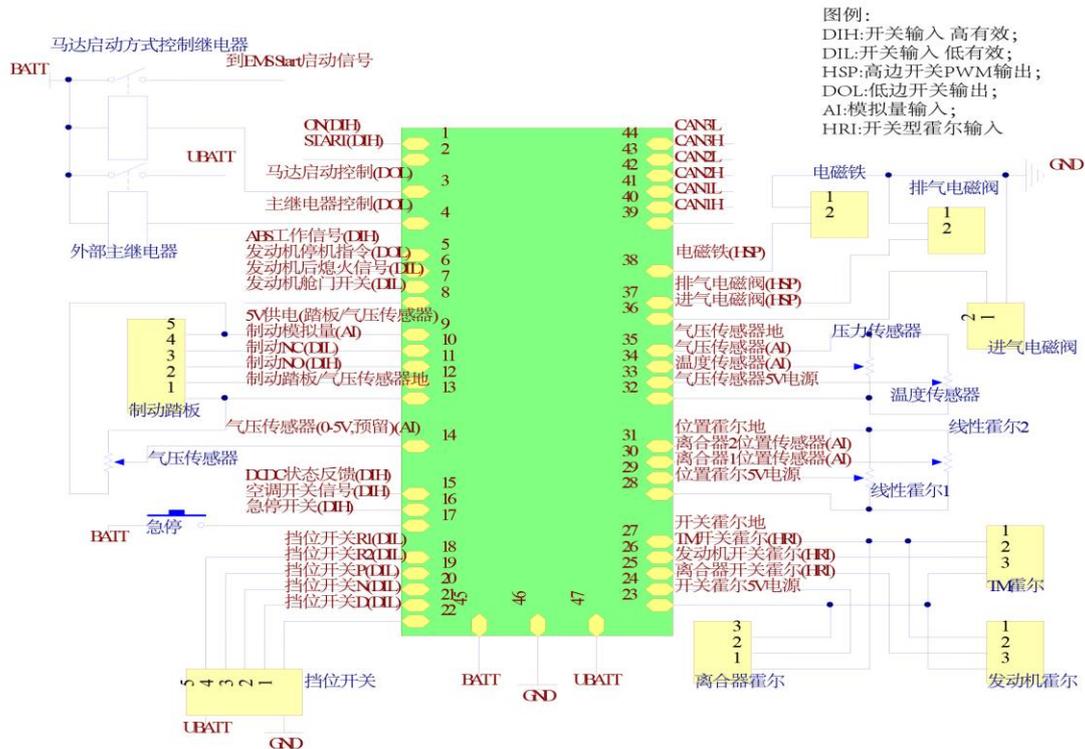


图 3.4 EHS 混合动力整车控制器接口图

3.2.4 整车控制器硬件资源配置

通过以上3节可以规整出整车控制器的硬件资源需求, 但考虑到整车控制器是平台化产品, 为了满足后续的功能扩展需求, 各种接口都需要一定的预留, 各种信号的输入输出、功率驱动电路等都留出了足够的备份。本文设计的整车控制器的硬件资源配置如下:

- (1) 控制器工作电压：16~32VDC；
- (2) 控制器工作温度：-40~105℃；
- (3) 内存：Flash(512K)/RAM(32K)/EEPROM(4K)；
- (4) 最高工作频率40M；
- (5) 低有效数字输入口13路（可配置成高有效）；
- (6) 高有效数字输入口11路；
- (7) 8路10位模拟输入；
- (8) 4路10位模拟输出；
- (9) 4路PWM输入；
- (10) 4路PWM输出；
- (11) 3路CAN接口；
- (12) 7路连续7A高边驱动功率输出；
- (13) 6路连续1.1A高边驱动功率输出；
- (14) 保护：输出自诊断，短、断路保护；
- (15) 防护等级：IP67；
- (16) 抗扰度：满足ISO7637-2-2004要求。

3.2.5 整车控制器硬件框图

图3.5是整车控制器的系统框图，系统采用双处理器结构，两个处理器由独立的电源电路供电，可以增加系统的稳定性，有助于提高整车的安全性。本文设计的整车控制器有3路CAN总线，其中CAN1和CAN2是整车功能性总线，CAN3是整车标定和诊断用总线，具体的网络拓扑图见下节。数字开关信号包括高有效和低有效输入，在整车电气中主要接收车载开关信号、档位开关信号等，如后仓门开关、急停开关。模拟量输入信号包括油门位置信号，刹车踏板行程信号，压力信号有以及线性霍尔信号。PWM输入信号主要采集转速信号。功率驱动部分包括高边控制和低边控制两种模式，在本文系统中主要控制继电器及电磁铁，负载均为感性负载。PWM输出信号和模拟量输出信号为预留信号，在本文设计的混合动力系统中没有应用。

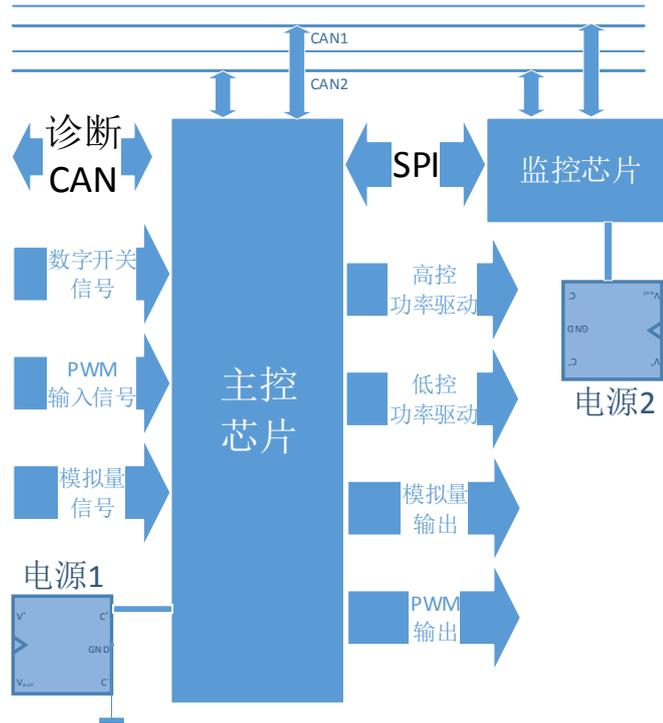


图3.5 EHS混合动力整车控制器硬件框图

3.3 整车控制器低压电源设计

汽车低压电源设计比传统的工业电源设计要求苛刻，在抗扰性、可靠性、防振动等方面要求更高；而新能源汽车的整车电气环境中除了传统汽车中发动机、大灯、雨刮、喇叭、继电器等干扰源外，还多了一些高压高频干扰源：高压动力电池、电机控制器（变频器）、DC-DC、DC-AC 等各种高频高压干扰源。同时现代汽车工业的发展，使得大量的车载电子设备广泛应用于汽车，如车载卫星导航系统、车载影音娱乐系统、车身照明系统、防盗系统、自动空调系统等。各种各样的车载电子设备稳定工作，相互配合，需要有稳定的供电系统。因此，高性能的车载电源设计是整车控制器可靠工作的保障。

3.3.1 电源电路设计

在进行汽车低压电源设计时，除了尽量对干扰源进行消除外，更重要的是提升低压电源系统的抗干扰能力。提升低压电源抗干扰能力的方法有：吸收法吸收尖峰滤除，消除正向脉冲干扰，采用的电子器件可以有TVS（Transient Voltage Suppressor）管、压敏电阻等；针对负向脉冲，通常采用二极管来拦截干扰。针对电源跌落干扰，通常是增加电源端的电容，在满足性能指标和成本的前提下，尽可能选用宽电压输入范围的电源芯片。针对ISO7637-2对汽车电子设备对沿电源线上的抗扰度要求，下面给出一种低压电源系统设计方案，如图3.6所示。

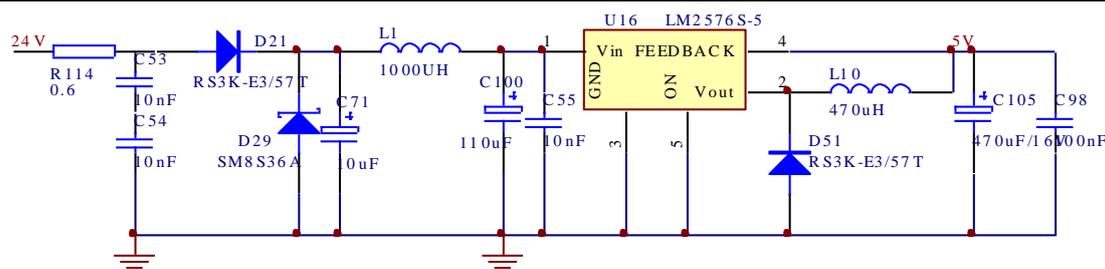


图 3.6 汽车低压电源电路设计图

低压电源系统包括防静电设计、防反接保护电路、防浪涌电路、低压电压转换电路4个部分。各部分工作原理如下

(1) C53和C54是两个防静电电容，瓷片电容耐压普遍较低，加上电源线的特殊需求，需要电容串联，防止单个电容短路时引起电路短路。

(2) 防反接电路使用一个二极管就可以实现，图中D21的二极管持续电流可达3A,反向电压可达100V。

(3) 防浪涌保护电路由一个功率电阻R114和TVS二极管D29组成，可以有效抵抗汽车抛负载形成的脉冲干扰，TVS是瞬态电压抑制二极管，汽车电子系统中TVS管的选用有很多参数需要计算，但在实际应用中在12V系统里用SM8S24A较多，24V系统里用SM8S36A较多。当有超过TVS电压值的干扰脉冲进入电源线路时，TVS会被导通，对流向TVS管后端电路的瞬间电流进行分流，进而保护的TVS管后端电压被限制在TVS的箝制电压。这里在TVS管前面加另一个限流电阻，就是充分应用电阻瞬间过载能力强的特点，有效的保护TVS管在长时间的高电压时被击穿；同时，此电阻的另一目的是防止模块上电时由于去耦电容过大引起二极管的损坏。

(4) 低压电源转换电路根据实际电路应用完成电源转换，例如10V、5V、3.3V等。本电源系统选用车载级电源芯片LM2576。它具有7~40V的宽电压输入范围，电源持续输出驱动电流达到3A，能满足各种负载及传感器的需求。LM2576是一个DC/DC转换器，电源输入管脚上设计了一大一小两个电容，除了滤除高频噪声，还具有储能功能，其中C100为高品质电解电容，因为电源芯片LM2576的最低工作电压为8V，整车电压有可能会跌落到6V，为保证在整车电源跌落的短瞬间芯片仍能提供正常输出电压，C100的容值要足够大，在低压电源跌落时能提供足够电流，方案实际测试结果表明电容C100的值至少要为110μF。由于LM2576是开关电源，其后端需要接一个电感，此案例中LM2576的输出选的是5V，所以根据后端负载电流不同，可以根据图3.7选择电感，本文选择470μH。

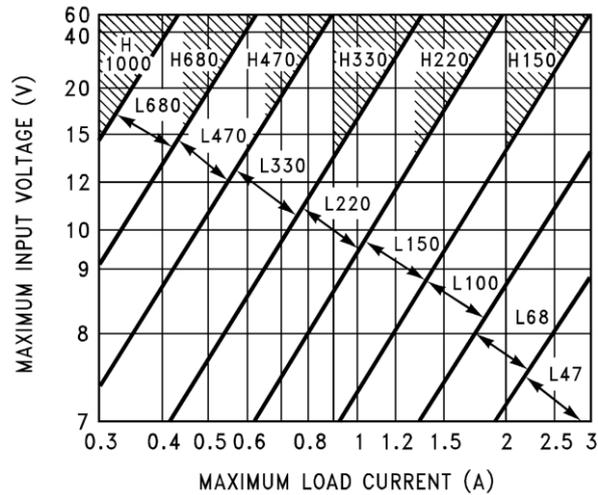


图 3.7 电源芯片输出端电感选择表

3.3.2 电源电路测试及应用效果

以上电源电路在本文设计的EHS混合动力客车整车控制器上应用。该控制器单元满足ISO7637中所有波形的设计要求。测试过程如图3.8所示。

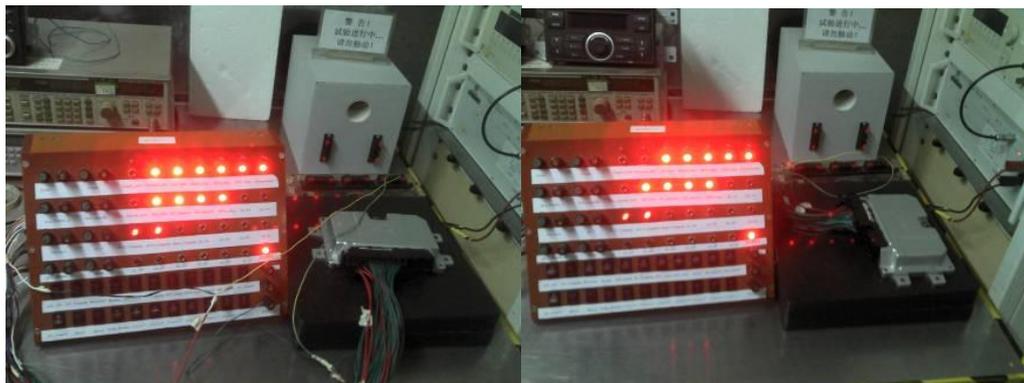


图 3.8 ISO7637 各脉冲群测试

将整车控制器与测试设备连接好，处于工作状态，整车控制器点亮相应的测试负载灯，如图 3.8 左图所示。然后施加所规定的瞬时电压（在整车控制器供电电源端和地线之间施加），具体按照 ISO 7637-2-2004 标准规定的 pulse 1、2a、2b、3a、3b、4、5a、5b 脉冲进行试验，在试验过程中整车控制器所控制的负载灯没有发生闪烁，试验后控制的负载灯的状况也没有发生改变，如图 3.8 右图所示，具体测试过程及结果如表 3.2 所示。

3.4 整车控制器输入输出电路

在汽车电子模块中，很重要的一部分内容就是由输入电路和输出电路构成

的处理电路。从整车电气系统来说，开关、模块、执行器都是电气系统的一部分，模块读取外部的输入信号，执行一定的逻辑算法驱动对应的执行器。本节的主要内容就是介绍整车控制器的输入输出电路。

3.4.1 数字开关量输入电路

整车控制器的外部数字开关量输入可分为两种：

(1) 高电平有效开关输入：指模块检测到低电平时，认为外部开关或者模块没有动作；模块高电平时，认为外部信号有效并予以识别。

(2) 低电平有效开关输入：指模块检测到高电平时，认为外部开关或者模块没有动作；模块低电平时，认为外部信号有效并予以识别。

整车控制器外部开关量信号接入内部电路后，需要通过转换电路转换成单片机可以接受的电压信号，同时还要满足注入电流及静电防护要求，具体约束条件有以下几点：

(1) 湿电流。湿电流是指开关需要通过维持一定的电流用于清理开关触点表面的尘垢和腐蚀，可以保持开关触点状态良好的最小电流值。这个电流对金属表面的氧化起阻止作用，防止开关失效。这个参数由外部零部件参数提供设计参考值。

(2) 对电源和对地短路保护。在国际标准 ISO16750 中有明确的测试项，对各信号电路实施短接到电源和短接到地的测试，持续 60s 时间。有了这样一个约束条件设计就不能采用 5V 低压供电。如果采用 5V 的电源系统，短路到电源时，24V 系统对 5V 电源系统就形成了一个倒灌的形式。如果短接到地，5V 电源系统能够维持的电流本来就极为有限，电流如果超过额定值，会对低压线性稳压器产生过大的热负荷。

(3) 单片机端口电平。单片机对输入电压高低状态有一定的限制，一般有如下的参数：

低电平电压阈值，单片机能够识别出低电平时输入 I/O 端口的最大电压。通常的值为 $0.7 \cdot V_{dd}$ ， V_{dd} 是单片机的逻辑供电电压。

高电平电压阈值，单片机能够识别出高电平时输入 I/O 端口的最小电压。通常的值为 $0.3 \cdot V_{dd}$ ， V_{dd} 是单片机的逻辑供电电压。

对于高电平电压阈值和低电平电压阈值之间的电压，微控制器会随机读取为高电平或者低电平，所以设计时必需避开这个电压区间。因此电路就需要把 24V 系统的电压转化成 5V 系统的电压，一般采用电阻分压电路实现这个设计，为了同时满足以上两个值，需要正确的选择分压电阻的阻值比例。

(4) 钳位和注入电流。由于 24V 系统的电压范围较宽，一般的电压范围

18~32V 都要能正常工作。这就使得电压比变得非常困难，在整个电压范围内同时满足低电平电压阈值和高电平电压阈值的要求，势必需要在高电压时对电压进行钳位，一般可以使用二极管实现。用二极管对输入电压进行钳位的同时需要注意二极管的注入电流，注入电流不能超出二极管的持续额定工作电流。由于本设计中的主控芯片 I/O 端口内部集成了钳位二极管，所以在设计开关量转换电路中只需设计注入电流限制电路即可。

(5) 静电和传导干扰。汽车电子模块需要能够承受各个引脚的静电试验和传导耦合试验，所以电路中需要增加静电电容和滤波电容，防止静电暂态脉冲引起的单片机识别错误。增加防静电电容后，也起到开关的抖动滤波作用。但是电容的容值如果取太大，会导致开关达到稳定状态的时间过长。

根据以上的设计参数要点，结合整车要求，可以设计出基本的低电平有效电路结构如图 3.9。其中上拉电阻 R1 为对地短路时候的限流电阻，即上面所述的湿电流。电阻 R16 和 R50 为分压电阻。电容 C2 和 C3 为防静电电容，同时起到滤除开关抖动产生脉冲的作用。

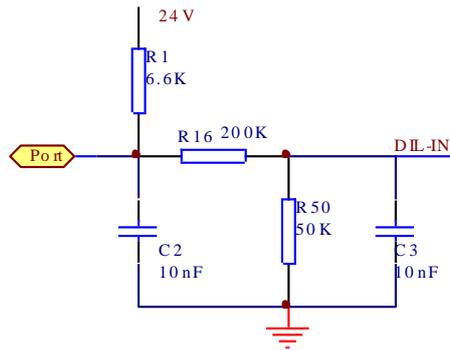


图 3.9 低电平有效电路

其中上拉电阻 R1 为对地短路时候的限流电阻，即上面所述的湿电流。电阻 R16 和 R50 为分压电阻。电容 C2 和 C3 为防静电电容，同时起到滤除开关抖动产生脉冲的作用。

高有效电路跟低有效电路相似，分压、防静电部分完全一致，只是不需要设计上拉电阻。具体电路如图 3.10。

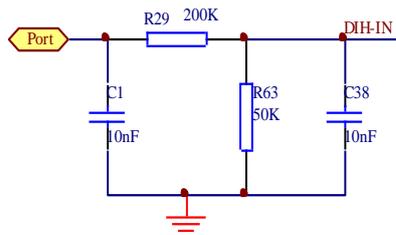


图 3.10 高电平有效电路

3.4.2 PWM 输入电路

整车控制器外部的脉冲信号输入幅值为 24V，必须经过滤波电容和电阻网络分压后再经过比较器MC33174D与2.5V电压做比较，由于比较器采用5V供电，后端输出就可以输入单片机管脚。PWM脉冲输入处理电路图如图3.11所示。

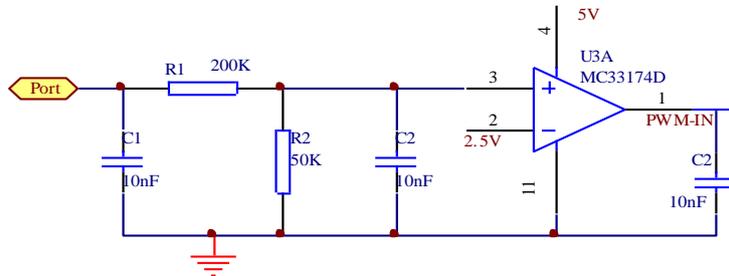


图3.11 脉冲输入电路

3.4.3 PWM 输出电路

输出PWM信号时，需要把整车控制器的PWM数字输出信号由5V转换为整车兼容的24V。在此电路中运算放大器用作一个电压比较电路，运算放大器的输入端2脚接固定电压2.5V，另外一端管脚3的信号为主控芯片的输出，主控信号的电压在“0”和“1”之间变化时，端口电压为5V或0V，在PWM输出端就可以实现24V和0V之间的变化，实现PWM输出的作用。PWM脉冲输出处理电路图如图3.12所示。

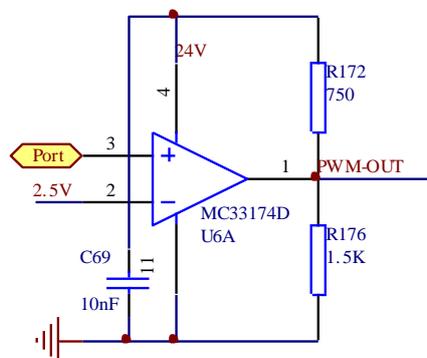


图3.12 PWM脉冲输出电路

3.4.4 模拟量输入电路

整车控制器设计了 8 路 10 位模拟输入，该电路采用电阻分压后再通过运放MC33174D进行跟随。这样就可以兼容 5V 和 10V 的模拟量输入，5V 输入时只要在组织焊接物料时取消 R2 即可；如果是 10V 模拟量输入时，R1 跟 R2 分压后再通过运放 MC33174D 跟随即可。电路结构如图 3.13 所示。

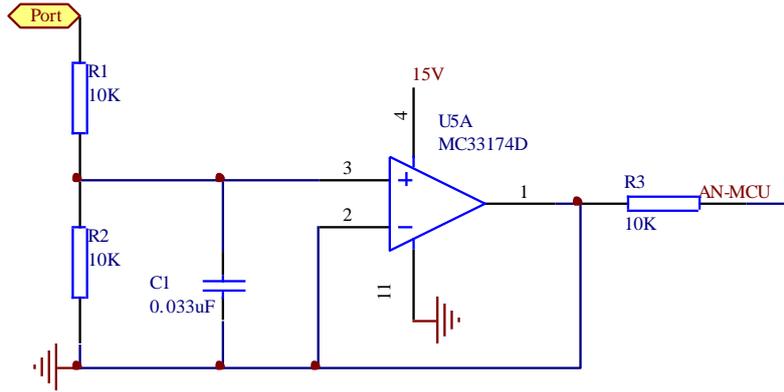


图 3.13 模拟量输入电路

3.4.5 功率输出电路

功率驱动模块主要是指整车控制器的输出功率控制电路。本文选取英飞凌功率驱动芯片 BTS6163D 和 BTS4141N，作为功率驱动模块的驱动芯片，其中 BTS6163D 为智能芯片，带故障诊断功能。BTS6163D 芯片的峰值电流达 17A，持续电流为 5.5A。这两个芯片的控制信号端可直接与微控制器输出连接，图 3.14 是 BTS6163D 驱动模块的电路原理图，其中 D23 是续流二极管。

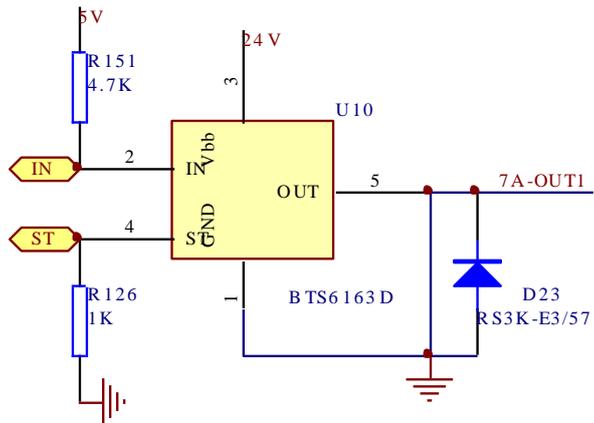


图 3.14 BTS6163D 驱动模块电路原理图

BTS4141N 芯片的峰值电流达 1.4A，持续电流为 1.1A。图 3.15 是 BTS4141N 驱动模块的电路原理图，其中 D30 是续流二极管。

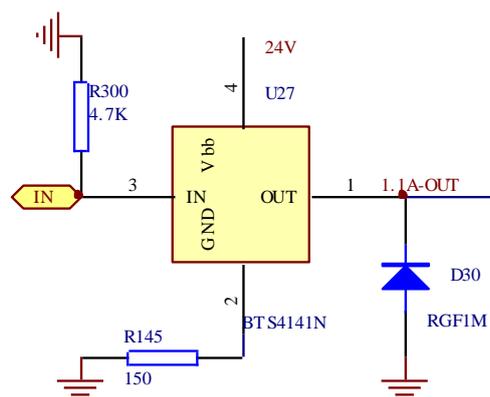


图 3.15 BTS4141N 驱动模块电路原理图

3.4.6 CAN 通讯模块

CAN 通信模块是整车控制器的通信网络模块，MC9S12XDP512 片上共有 5 路 CAN 接口，根据控制器设计要求，采用 3 路 CAN 通信。CAN 收发器采用 TLE6251DS 高速 CAN 总线收发器，该芯片可采用+5V 电压供电，具有很强的抗电磁干扰能力和高温保护功能，主要应用在汽车的高速 CAN 通信上，最高传输速度可达到 1Mbit/s，支持远程唤醒功能。本文中整车控制器的三路 CAN 通信模块电路原理完全相同，下图是其中一路。图 3.16 是 CAN 收发器电路原理图，其中 Tx D 接主控芯片的引脚 TxCAN，Rx D 接主动芯片的引脚 RxCAN，L13 为共模滤波器。

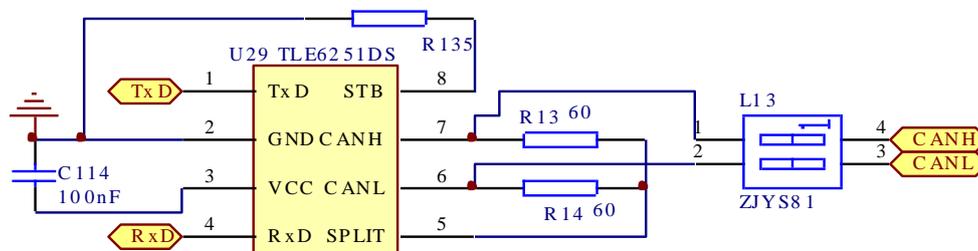


图 3.16 CAN 收发器电路原理图

3.5 整车控制器主控单元

根据整车的需求，统计了CAN总线通道数量、I/O数量、定时器数量、AD转换通道数量，结合软件中变量对RAM的需求以及软件本身对存储器的要求，本次开发选用的主控芯片是MC9S12XDP512。

同时为了能够提高整车控制器的安全等级，本项目设计中采用双处理器安全监控架构，主控芯片(PCU)为MC9S12XDP512，安全监控芯片(SCU)为Microchip公司的产品，型号为PIC24HJ256GP610A。结构原理图如图3.17所示。

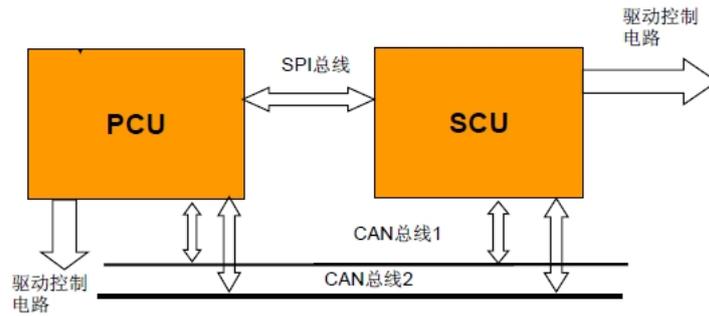


图 3.17 双处理器架构

本系统采用双处理器架构有如下特点：芯片物理上异构，提高系统稳定性；执行功能上异构；完全独立的双电源供电系统；PCU与SCU采用CAN及SPI冗余直接通讯；双处理器架构避免了单点故障。

采用双处理架构优点明显：PCU和SCU互相检测工作状态；对重要的控制量可以进行冗余控制；在异常情况下对BMS及MCU的安全控制；提高跛行回家工况时的安全等级。

3.6 整车控制器试验测试

本文设计的整车控制器需要达到IP67的防护等级，VCU的外壳采用铝压铸外壳，上下壳体间采用橡胶压条密封。同时，内部电路板增加了防潮、防盐雾、防霉处理。电路板实物照片如图3.18所示。



图 3.18 整车控制器实物照片

整车控制设计过程中，分别对上述各个硬件模块进行了模块的功能、性能测试。然后根据整车控制器的整车需求进行模块和模块间的配置，再考虑整车控制器的整体布局需求、安装需求、电气需求进行整合设计。本文对整车控制器进行了各种测试，包括可靠性、稳定性及性能测试。

3.6.1 整车控制器测试内容及设备

根据设计目标及项目设计目标规划了相关的整车控制器的硬件测试内容如下：

- (1) 叠加交流电压
- (2) 反向电压测试
- (3) 过电压测试
- (4) 供电电压缓降和缓升试验
- (5) 电压瞬断试验
- (6) 掉电复位能力试验
- (7) 启动时电压波动试验
- (8) 短路测试
- (9) 耐电压试验
- (10) 绝缘阻抗
- (11) 温度快速变化冲击试验
- (12) 温度梯度
- (13) 防水测试
- (14) 辐射抗扰度（BCI 法）
- (15) 静电放电试验
- (16) 沿电源线传导的瞬态骚扰抗扰度（脉冲群）
- (17) 辐射骚扰
- (18) 传导骚扰

表 3.1 检验仪器设备清单

序号	仪器、设备名称	型号、规格
1	高低温交变湿热箱	WGD/SJ-71
2	热冲击试验箱	TSG-200S-W
3	直流稳压电源	JC17320
4	示波器	TDS 3014
5	静电模拟器	ESS-2002
6	大电流注入系统（BCI）	CWS500D-MF/ 衰减器*3/电流注入钳/标准夹具/监控探头 F5
7	汽车抗扰测试系统（ISO7637 系统）	泰斯特 TEST
8	数字万用表	F-289

3.6.2 整车控制器测试结果汇总

针对上述的测试内容，经过测试后结果全部符合设计要求，测试结果如表 3.2 所示。图 3.19 所示为过电压试验现场照片。

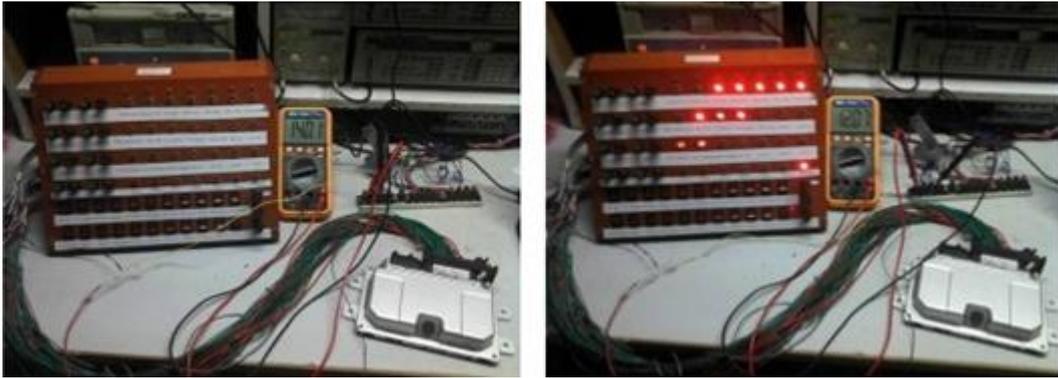


图 3.19 过电压试验

表 3.2 试验结果汇总表

序号	试验项目	试验条件	试验依据	试验结果
1	叠加交流电压	在 DUT 的所有有效输入端子加上如下的电压。Usmax=16V, Upp=4V 电源内阻 50mΩ-100mΩ, 频率为 50Hz-20KHz, 持续时间为 120s, 扫频次数 5 次。	ISO 16750-2_2006 4.4	功能状态达到 ISO16750-1 第六章描述的 A 级
2	反向电压测试	将设备放置室温环境中, 施加 24V 电压到 DUT 所有有效输入端子、持续时间60±6s后断开。	ISO 16750-2_2006 4.7	功能状态达到 ISO16750-1 第六章描述的 C 级
3	过电压测试	将设备放置室温环境中, 施加 36V 电压到 DUT 所有有效输入端子、持续时间 60s 后断开。	ISO 16750-2_2006 4.3.1.2	功能状态达到 ISO16750-1 第六章描述的 C 级
5	电压瞬断试验	在 DUT 的所有有效输入端子加上如下的电压。Usmin=9V, 上升沿和下降沿的时间不能大于 10ms., 其中瞬断时间为 100ms。	ISO 16750-2_2006 4.6.1	功能状态达到 ISO16750-1 第六章描述的 A 级
6	掉电复位能力试验	在 DUT 的所有有效输入端子加上如下的电压。Usmin=9V。每次以 5% 的电压下降并保持 5S 直到电压降为 0V。然后以同样方法从 0V 不断上升到 9V 试验。	ISO 16750-2_2006 4.6.2	功能状态达到 ISO16750-1 第六章描述的 C 级
7	启动时电压波动试验	在 DUT 的所有有效输入端子加上如下的电压。Un=12V。Us=8V,Ua=9.5V,T8 =10S,Tf =100ms.执行 10 个循环, 每个循环之间间隔 1-2S。按照第 2 级要求试验。	ISO 16750-2_2006 4.6.3	功能状态达到 ISO16750-1 第六章描述的 A 级
8	短路测试	DUT 所有有效输入输出端, 依次连接到 smax=32V、地, 各维持 60±6S。其它输入输出端保持开路。	ISO 16750-2_2006 4.10	功能状态达到 ISO16750-1 第六章描述的 A 级

序号	试验项目	试验条件	试验依据	试验结果
9	耐电压试验	在 DUT 完成湿热循环后,在 RT 环境中放置 0.5h。再按照以下要求给 DUT 加上 500V (50-60HZ)并持续 60S。1: 各个接线端之间; 2: 接线端与外壳之间; 3: 接线端与有外包装的电极之间;	ISO 16750-2_2006 4.11	功能状态达到 ISO16750-1 第 六章描述的 C 级
10	绝缘阻抗	在 DUT 完成湿热循环后,在 RT 环境中放置 0.5h。再按照以下要求给 DUT 加上 500V DC 并持续 60S1: 各个接线端之间; 2: 接线端与外壳之间; 3: 接线端与有外包装的电极之间。	ISO 16750-2_2006 4.12	绝缘电 阻>10MΩ
11	温度快速 变化冲击 试验	将 DUT 放入专用温度冲击试验箱中(能在 6 分钟内快速升温或降温,达到其设定温度值的恒温设备)按如图温度曲线,其中 T Smax=+85℃, T Smin=-40℃, T1=1 h, T2≤3min, 进行温度、保持时间设置后自动循环 20 个周期	ISO 16750-4_2006 5.3.2	功能状态达到 ISO16750-1 第 六章描述的 C 级
12	温度梯度	将DUT置于温度箱中,使温度以 20℃为一个梯度从 20℃ 开始降低到-40℃,再从-40℃升高到 80℃。在每个梯度温度下保证 DUT 已经 符合依据要求稳定在新的温度或在每个温度下保持 30 分钟	ISO 16750-4_2006 5.2	功能状态达到 ISO16750-1 第 六章描述的 A 级
13	防水测试	常温常压条件下,将设备至于 1000mm 深水里,最低点应低于水面 1000mm。此处试验水温与室温温差不大于 5K。试验持续 30min;	GB 4208-2008 14.2.7	试验后功能正 常,内部没有 水进入
14	辐射抗扰 度 (BCI 法)	大电流注入 (BCI) 用 100mA 电流试验。详细试验方法参考 ISO11452-4_2005	GB T 17619-1998 9.5	试验中和试验 后功能正常
15	静电放电 试验	将静电枪探头选择 150pF, 330Ω档位上。需要进行静电放电的测试点是在装车之后,所有可以人为所接触到的表面部位。 1.空气放电: 将静电枪探头慢慢接近 DUT需试验的位置,直至放电产生放电电压: ±15KV, 放电次数: 3 次。 2.接触放电: 将静电枪探头直接接触到 DUT 需试验的位置,进行直接接触放电试验。放电电压: ±8KV, 放电次数: 3。	ISO 16750-4-2006	功能状态达到 ISO16750-1 第 六章描述的 C 级
16	沿电源线 传导的 瞬态骚扰 抗扰度(脉 冲群)	将DUT与各种设备连接好,处于工作状态,然后施加所规定的瞬时电压(在 DUT 电源端和地线之间施加)。具体按照 ISO 7637-2-2004 标准规定的 pulse 1、2a、2b、3a、3b、4 脉冲进行试验。试验按第四级要求进行。 各试验脉冲电压等级与时间见下表(每个 pulse 详细试验脉冲波形参考ISO 7637-2-2004 标准中规定数值	ISO 7637-2-2004 5.6.1~5.6.4	功能状态达到 ISO7637-1 定 义的 A 级

序号	试验项目	试验条件	试验依据	试验结果
17	辐射骚扰	将 DUT 置于 ALSE 中并按经典负载和整车条件下工作，测量应在三个垂直的平面进行，且记录每个频率点的最大电平。	GB 18655-2002	试验限值低于标准要求值
18	传导骚扰	将 DUT 连接电源网络与负载并置于屏蔽室中正常工作，用峰值检波器和准峰值检波器确定其为窄带还是宽带，并测定数据是否小于下表中 符合依据要求限制	GB 18655-2002	试验限值低于标准要求值

3.7 本章小结

本章内容首先介绍了汽车电气环境，明确了混合动力整车控制器的环境要求。接着介绍了混合动力系统的系统框图，混合动力汽车的整车的电气结构，进而得出整车控制器的功能需求、性能需求、电气接口要求等；最后确定整车控制器的硬件配置。根据硬件配置需求分别介绍了各种模块电路，并结合项目目标 and 设计目标给出了整车控制器的测试内容。根据测试内容对整车控制器的各项指标进行了测试，测试结果表明各个指标均达到相关标准或设计目标的要求。

第4章 混合动力客车动力系统运行模式及基本控制策略

混合动力客车各零部件系统的配置确定下来之后,建立整车控制系统结构和优化控制策略是实现混合动力客车低油耗、低排放目标的关键^[42]。根据 EHS 混合动力客车设计要求,本章主要介绍其运行模式和控制策略。

4.1 EHS 动力系统结构工作特点分析

本文系统方案中,ISG 电机安装在发动机曲轴上,ISG 电机主要用于起动发动机以及保持电池荷电状态(SOC)平衡,动力经过离合器传递至主驱动电机上,再经过主减速器,由半轴传递到车轮。

图 2.1 已经给出了本混合动力系统的方案,此方案的主要结构特点为:系统中不含变速箱,并采用了具有较大主减速比的主减速器。ISG 电机随时可按发电模式工作,对电池充电,从而解决动力电池可能的亏电问题,保持 SOC 平衡,延长电池寿命;ISG 电机、主驱动电机和发动机可在一根动力轴上进行扭矩复合,为了能制动回馈能量,两个电机都具有电驱动功能和发电功能。

整车行进时,该系统通过双电机的同步调整,完成离合器的无滑差接合。该系统结构简单、零部件相对成熟,是目前混合动力城市客车产业化的较好的方案。该系统在制动能量回收的基础上,通过发动机怠速停机/快速起动、纯电驱动模式、串联驱动模式、并联混合驱动模式等几种模式的合理转化,动态调节发动机工作点,提高整车经济性。

EHS 混合动力客车动力总成的控制是基于整车控制系统实现的,其动力系统主要由电驱动子系统、能源子系统和辅助能源子系统三部分组成,驾驶员通过操纵转向盘、制动和加速踏板等来驾驶汽车。整车控制器的主要功能就是进行整车能量管理和动力系统的控制。

总体来讲,本系统的工作优点如下:

- (1) 传动系统结构简单,减少了变速器环节的能量损失。
- (2) 具有混联系统的所有工作模式。
- (3) 主驱电机和 ISG 电机可以同时进行刹车能量回馈,有效的提高了刹车扭矩,相应的提高了整车效率。

4.2 EHS 整车上下电控制策略

整车档位设置有停车挡（钥匙 0 位）、启动档（钥匙 1 位）、行车档（钥匙 2 位），发动机点火（钥匙 3 位）四个档位，驾驶员通过对档位的操作实现了 EHS 系统的上下电过程，其过程如图 4.1。

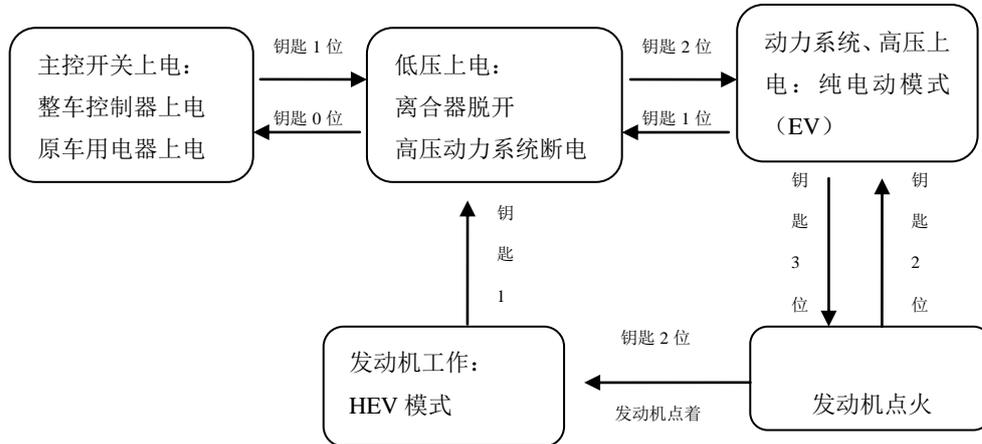


图 4.1 EHS 上下电逻辑

4.2.1 EHS 系统上电过程

(1) 主控开关上电：整车控制器上电。

(2) 钥匙置 1 位，低压档上电：电池管理系统，CAN 总线通信开始，仪表显示屏显示相关信息。

(3) 钥匙置 2 位，高压上电：车载高压系统上电，驾驶员根据运行环境、动力电池 SOC 值（观察仪表显示值）对混合动力客车运行模式做出判断：可采取纯电动模式或待发动机启动后采取混合动力驱动模式。

(4) 钥匙置 3 位（复位）：发动机点火启动，混合动力客车根据控制策略，实现整车的不同运行模式。

4.2.2 EHS 系统下电过程

(1) 钥匙置 1 位：高压系统下强电，低压系统处于上电状态。可以在纯电动或混合动力模式运行下通过拧动钥匙开关，控制器接收指令，离合器脱开，高压动力系统断电，发动机熄火

(2) 钥匙置 0 位：控制系统、系统总线系统、车载显示系统断电不工作，整车停机。

4.3 整车动力系统工作模式分析

混联系统利用 2 台电机的 5 种工作模式（发电、电驱动）组合的合理应用，结合控制策略，能实现纯电驱动模式、串联驱动模式、并联混合驱动模式、驻车充电模式、再生制动模式及发动机直接驱动模式。

EHS 混合动力系统各种工作模式的定义及模式的切换过程中，动力电池的 SOC 值是一个重要的参数。因此在分析 EHS 混合动力系统工作模式之前，我们先来阐述一下整车的电池 SOC 平衡策略。动力电池的 SOC 值由电池管理系统采集运算，为了延长电池的使用寿命，电池管理系统对 SOC 的控制目标是 50%~72%，当动力电池的 SOC 值<50%时，电池管理系统通过 CAN 总线发送充电请求，当动力电池的 SOC 值>72%时，电池管理系统通过 CAN 总线发送停止充电请求。同时，每隔 10ms 电池管理系统把当前动力电池可提供的最大充电电流和最大放电电流发送至 CAN 总线，便于整车控制器分配电机的输出扭矩或者是制动回馈扭矩。

4.3.1 纯电驱动模式

本系统中，当车速<30km/h 时，主驱电机的对应转速为小于 800 转/分钟，此时发动机工作在怠速模式，离合器处于分离状态，整车处于纯电驱动模式。当主驱电机把车速提升到 30km/h 以上时，离合器才具备结合条件。纯电驱动模式下，离合器分离，发动机不参与驱动车辆。

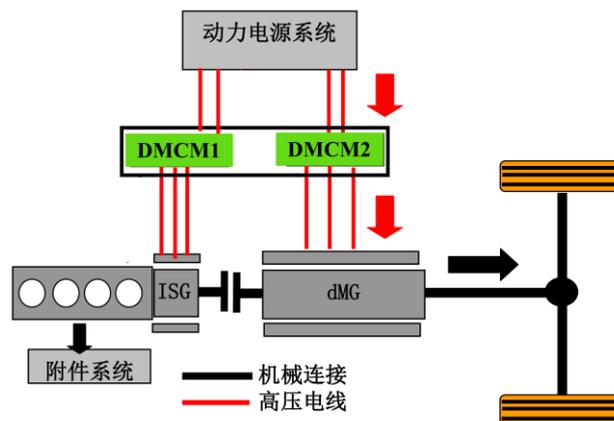


图 4.2 纯电驱动模式

4.3.2 串联驱动模式

发动机运行在最优区间：综合考虑油耗、效率、污染物排放等因素，并标定

发动机运行范围；发动机带动 ISG 电机发电，离合器分离，ISG 电机不输出扭矩（车用）；主驱电机 DMG 直接驱动整车，其能量流动关系如图 4.3 所示，其中 DMCM1 为 ISG 电机控制器，DMCM2 为主驱电机控制器。串联驱动模式下，发动机带动 ISG 电机发电，但不参与车辆驱动。整车的驱动能量全部由主驱电机提供。

该模式用于车辆起步阶段或通过低排放要求区域时。此时发动机运行在高效区，机械能经 ISG 电机转化为电能储存在动力电池中，部分能量被主驱动电机消耗，尽管传递路径增加，但避免发动机运行在低效、高污染物排放区间，综合效率仍得到优化；在发动机转速不能满足车速要求的高速工况同样也可以使用此模式运行。

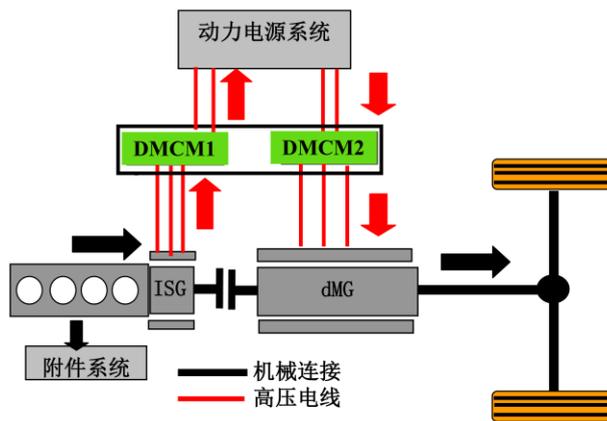


图 4.3 串联驱动模式

4.3.3 并联驱动模式

根据路况要求，整车并联驱动模式又分如下三种情况：

- (1) 发动机和 ISG 电机二动力并联驱动，如图 4.4 所示。

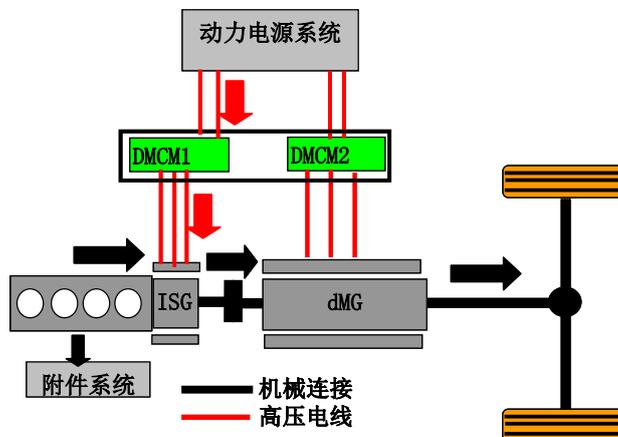


图 4.4 发动机和 ISG 电机二动力并联驱动

本系统中的两个电机由于主要的工作模式不同,会导致两个电机的高效区不同。ISG电机的高效区接近发动机的高效区,在1600转/分钟左右,主驱电机的高效区设计转速较低。所以当车辆的速度对应发动机和电机转速在1600转/分钟左右时,采用发动机和ISG电机二动力并联驱动模式。此模式下,发动机运行,ISG电机作驱动用,电控离合器接合,dMG电机空转运行(动力电池不供电)。

该模式动力输出表达式为:

$$\begin{cases} P_{out} = P_{eng} + P_{isg} \\ T_{out} = T_{eng} + T_{isg} \end{cases} \quad (4.1)$$

其中 P_{out} 为车辆需求功率, P_{eng} 为发动机功率, P_{isg} 为 ISG 电机功率。 T_{out} 为车辆需求扭矩, T_{eng} 为发动机扭矩, T_{isg} 为 ISG 电机扭矩。

(2) 发动机和 dMG 电机二动力并联驱动,如图 4.5 所示。当整车扭矩需求较大且处于 dMG 电机高效区时,采用此模式。该模式下,发动机运行,dMG 电机电驱动,电控离合器接合,ISG 电机空转运行(动力电池不供电)。

该模式动力输出表达式为:

$$\begin{cases} P_{out} = P_{eng} + P_{dMG} \\ T_{out} = T_{eng} + T_{dMG} \end{cases} \quad (4.2)$$

其中 P_{dMG} 为 dMG 电机功率, T_{dMG} 为 dMG 电机扭矩。

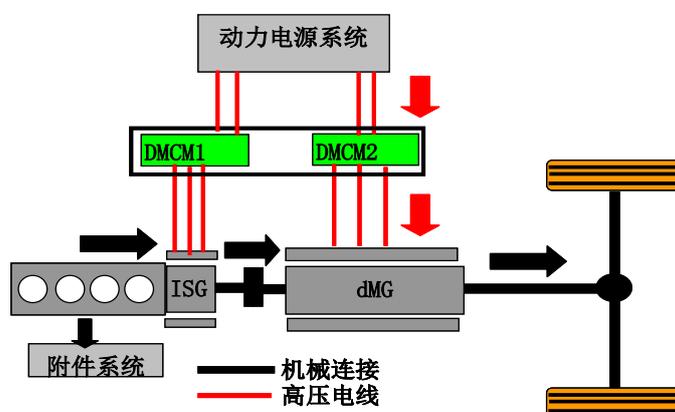


图 4.5 发动机和 dMG 电机二动力并联驱动

(3) 发动机、ISG 电机和 dMG 电机三动力并联驱动,如图 4.6 所示

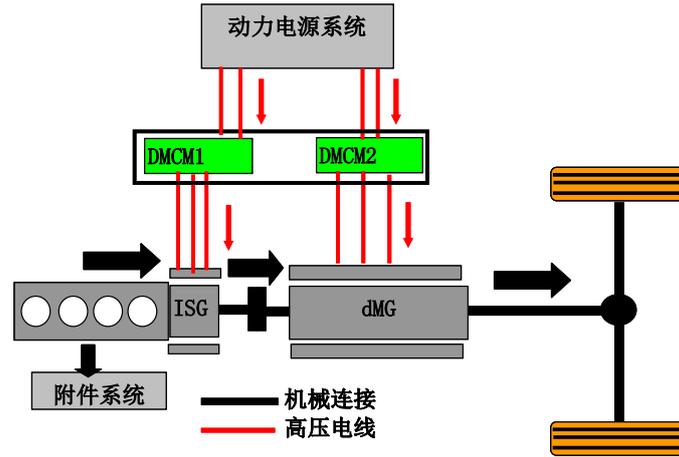


图 4.6 发动机、ISG 电机和 dMG 电机三动力并联驱动

当车辆运行工况需要大转矩，如高负荷加速，爬较大坡度时采用该模式。此时发动机运行，电控离合器接合，ISG 电机和 dMG 电机电驱动，SOC 值高于下限值，经过三个动力单元系统扭矩与功率叠加，能满足车辆运行在极端情况下的动力输出需求。

该模式动力输出表达式为：

$$\begin{cases} P_{out} = P_{eng} + P_{dMG} + P_{isg} \\ T_{out} = T_{eng} + T_{dMG} + T_{isg} \end{cases} \quad (4.3)$$

4.3.4 驻车充电模式

当车辆停止，又要保持空调系统运转，而动力电池的 SOC 低于 SOC 下限值时，APU 系统仍保持工作，此时发动机工作，输出扭矩一部分带动附件系统工作，一部分带动 ISG 电机发电，给动力电池充电。其能量流动关系如图 4.7 所示。

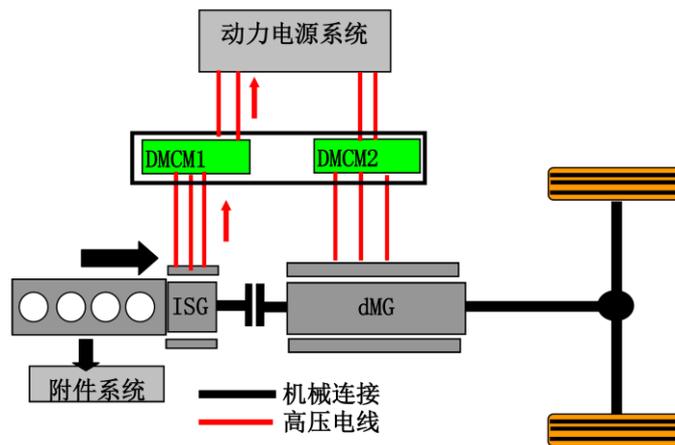


图 4.7 驻车充电工作模式示意图

4.3.5 再生制动能量回馈模式

再生制动能量回馈就是指当车辆减速和制动时，利用电动机的反拖作用发电回收能量。根据能量流动的不同，可以分为如下三种模式。

(1) 车辆中速滑行时能量回馈，能量流动图如图 4.8 所示。

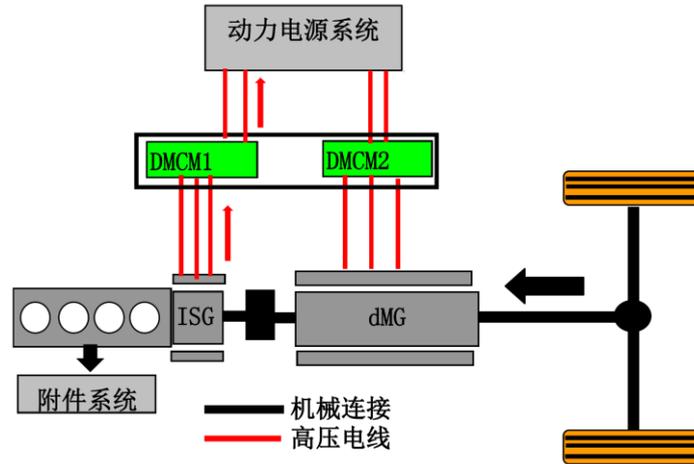


图 4.8 车辆滑行或下坡时能量回馈模式

此时，车速在 1700RPM 左右，处于 ISG 的高效区，电控离合器结合，ISG 电机发电产生制动扭矩；主驱空转。此种模式适用于车辆中速滑行减速的能量回馈制动。

(2) 中强能量回馈或车速较低时模式，能量流动图如图 4.9 所示。

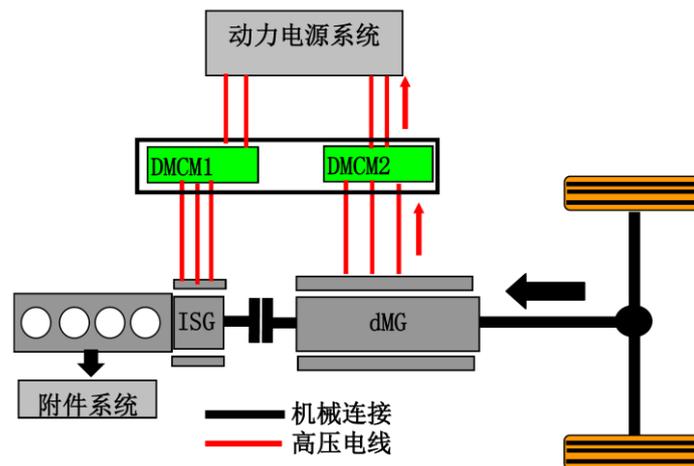


图 4.9 中强能量回馈模式

此时电控离合器分离，发动机供油停止，不提供扭矩；ISG 电机空转，dMG 主驱电机发电并产生回馈制动；制动产生的能量由动力电池回收。

(3) 强能量回馈模式，能量流动图如图 4.10 所示。

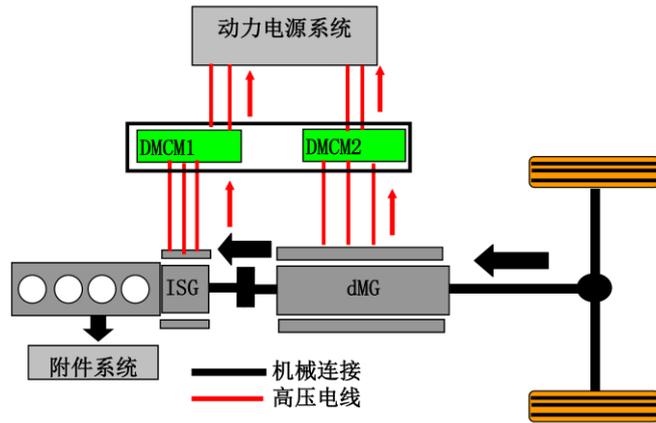


图 4.10 强能量回馈模式

当车辆以并联模式运行时，在紧急状况下采取的应对措施。此时电控离合器接合；发动机供油停止；ISG 电机和 dMG 主驱电机发电并产生回馈制动；制动产生的能量由动力电池回收。

以上三种情况都是电机再生制动，从而实现了制动能量回收，提高了整车效率。

4.3.6 发动机直接驱动模式

能量流动图如图 4.11 所示，该模式是发动机直接驱动，电控离合器接合，ISG 电机不发电，dMG 电机不驱动；一般是当发动机输出的扭矩可以满足整车需求，并且发动机运行在高效率区域，此外还有一部分带动附件系统工作。

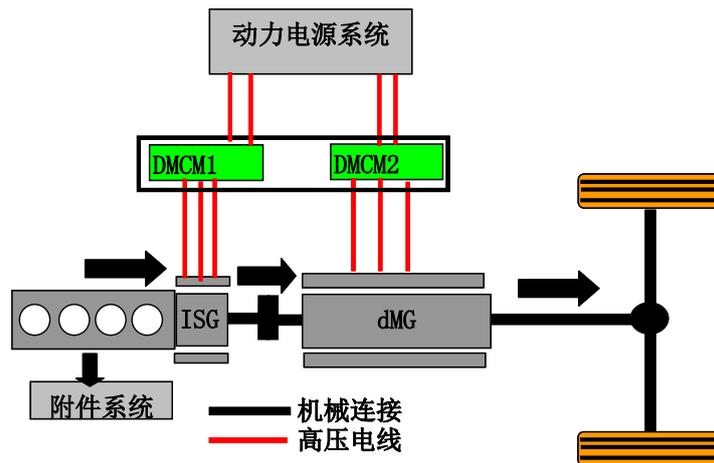


图 4.11 发动机直接驱动模式

4.4 动力系统工作模式切换控制策略

由于本文所述的混合动力系统为直连系统，没有变速机构。发动机、ISG电机和驱动电机之间没有变速机构，所以，主电机（驱动电机）转速跟车速成线性正比，电机或发动机的转速就代表车速，为了方便论述，以下模式控制策略就以电机转速为参考。

根据不同的电机转速（车速），可以把所有工作模式按不同的需求分配在四个转速区域内，如图4.12。

4.4.1 纯电动（EV）模式

当主电机转速小于750RPM时，ISG电机和主电机之间的离合器分离，主电机根据扭矩请求分配驱动扭矩。发动机和ISG电机根据电池SOC状态来决定发动机的输出功率。

4.4.2 混联模式1（HEV1）

当主电机转速在750RPM~1200RPM时，进入混联模式1，调节发动机转速，当两者的转速差小于30转/分钟时，离合器闭合。

此模式下，当油门踏板值小于40%时，主驱电机不工作，发动机的扭矩等于整车需求扭矩与ISG电机发电扭矩之和。ISG电机发电功率由电池SOC值和ISG电机的高效区共同决定。

当油门踏板值大于40%时，说明整车的扭矩需求相对较大，此时主驱电机和ISG电机不工作，发动机所有扭矩都输出到整车。

当制动踏板值有效时，进入回馈制动模式。根据车速、制动踏板值、电池SOC值分配电机的回馈制动扭矩。

4.4.3 混联模式2（HEV2）

当主电机转速大于1200RPM时，进入混联模式2，此时离合器保持闭合状态。此模式下，当油门踏板值小于40%时，主驱电机不工作，发动机的扭矩等于整车需求扭矩与ISG电机发电扭矩之和。ISG电机发电功率由电池SOC值和ISG电机的高效区共同决定。

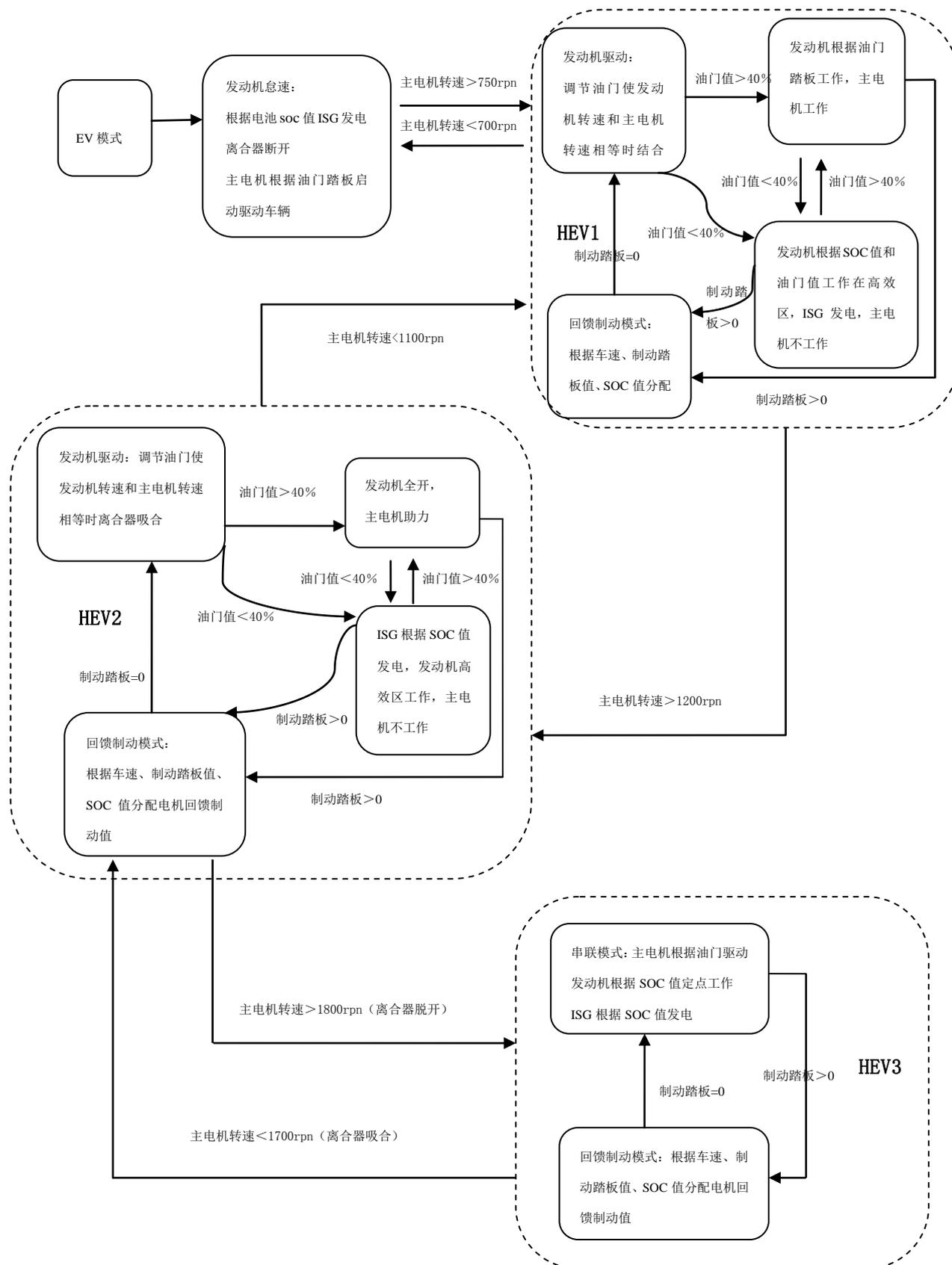


图 4.12 EHS 整车工作模式

当油门踏板值大于 40% 时,说明整车的扭矩需求相对很大,发动机在相对转速下输出最大扭矩,主驱电机和 ISG 电机根据整车扭矩需求进行助力行驶。当制动踏板值有效时,进入回馈制动模式。根据车速、制动踏板值、电池 SOC 值分配电机的回馈制动扭矩。

4.4.4 串联模式 (HEV3)

当主电机转速大于 1800RPM 时,有图 2.4 可知,此转速已经脱离了发动机的高效区,发动机的比油耗已经接近 210g/(kw.h),此时离合器打开,进入串联模式。

发动机根据电池 SOC 值以及主驱电机的功率需求带动 ISG 电机发电。主驱电机根据整车扭矩需求进行扭矩分配。

当制动踏板值有效时,进入回馈制动模式。根据车速、制动踏板值、电池 SOC 值分配电机的回馈制动扭矩。

4.4.5 制动模式

EHS 混合动力系统中,ISG 电机和主驱电机通过一个离合器结合,在整车进行制动能量回馈时,不同的工况可以选择不同的电机进行制动能量回馈。

当车速对应的电机轴转速小于 750RPM 时,由于此时离合器处于分离状态,所以只能选择主驱电机进行回馈制动。

当车速对应的电机轴转速在 1400RPM~1700RPM 时,此时 ISG 电机的效率比主动电机的效率高,此时选择 ISG 电机进行回馈制动。

在其他转速区域时,整车控制器会根据具体的工况进行 ISG 电机和主驱单机的效率 MAP 图进行比较,选择效率高的电机进行回馈制动。

4.5 整车故障诊断及容错处理策略

4.5.1 故障诊断代码管理

本章定义了判断某故障情况是否应设置诊断故障代码时所使用的通用机制,同时定义了如何设置诊断故障代码状态字节须支持的状态位。

4.5.1.1 故障出现计数器

故障出现计数器用于自上次清除诊断故障代码后,故障出现次数的计数。该参数应保存于非易失性存储器。如果“本次操作循环测试失败”位由“0”变为“1”,

则故障出现次数加 1。如果数值溢出，则其应保持在 255（十六进制 FF）。

4.5.1.2 故障待定计数器

故障待定计数器是指进入未确认故障阶段的次数标称值。对于每个操作循环，进入未确认故障阶段只发生一次。处于不同操作循环之间时，此值必须保存于非易失性存储器。在无故障的操作循环内，一旦“未确认的诊断故障代码”位清零，则该计数器应重置为“0”。

4.5.1.3 故障警示灯点亮机制

如果确定已出现故障，且仪表有相应的故障警示灯，则应点亮其故障警示灯，并且诊断故障代码状态字节的“请求点亮警告指示灯”位应在此之前置“1”。

4.5.1.4 诊断故障代码老化管理

诊断故障代码一旦生成，将会一直保留，直到通过发送诊断指令清除，或者诊断故障代码老化机制确定此故障不复存在。如果故障不复存在，则诊断故障代码的老化用于确保任何关联的诊断故障代码和除已老去计数器之外所有相关的信息都被清除，以减少不必要的维护成本。

如果之前 40 个连续的操作循环期间，每个操作循环的测试都没有失效，则允许相应的诊断故障代码老去。

作为诊断故障代码老化管理的一部分，有指示灯的诊断故障代码应关闭故障警示灯。

4.5.2 故障处理策略

4.5.2.1 故障等级

所有故障根据严重程度、对整车安全影响程度分为三级。

一级故障：一般故障，是指局部的非致命性的传感器故障，或是零部件性能的指标漂移，但不影响整车安全。

二级故障：严重故障，子系统故障，影响零部件寿命但不影响整车安全。

三级故障：致命故障，系统严重故障，影响整车安全。

4.5.2.2 故障等级分类

整车控制器根据每个故障的故障等级进行相应的故障报警，同时根据具体的故障内容进入相应的故障处理机制。所有故障按故障严重程度分为三级，各个故障等级的报警行为如下：

一级故障：黄灯警告。

二级故障：红灯警告，降功率运行，限速运行。

三级故障：红灯警告，蜂鸣器警告，切断高压，停止电机扭矩请求。

4.5.2.3 新能源汽车特有故障处理策略

混合动力客车动力系统中，除了发动机外，还有动力电池系统、电机系统和电附件系统。由于发动机的故障管理及处理机制比较成熟，本文就不再对发动机的故障处理策略进行相应的论述。

(1) 油门踏板故障，故障等级为二级故障，相应的故障处理策略是：车速为0：禁止档位请求；车速大于0：限制车速，限制扭矩输出。

(2) 刹车踏板故障，故障等级为二级故障，相应的故障处理策略是：车速为0：禁止档位请求；车速大于0：禁止扭矩输出。

(3) 档位信号故障，故障等级为三级故障，相应的故障处理策略是：车速为0：禁止档位请求；车速大于0：禁止扭矩输出。

(4) 电机驱动系统初始化失败，故障等级为三级故障，相应的故障处理策略是：禁止闭合高压接触器。

(5) ISG 电机驱动系统初始化失败，故障等级为三级故障，相应的故障处理策略是：禁止闭合高压接触器。

(6) 驱动电机逆变器散热器超温报警，故障等级为二级故障，相应的故障处理策略是：降功率运行。

(7) ISG 电机逆变器散热器超温报警，故障等级为二级故障，相应的故障处理策略是：降功率运行。

(8) 驱动电机逆变器散热器超温红色报警，故障等级为三级故障，相应的故障处理策略是：保持高压接触器闭合，0 扭矩输出。

(9) ISG 电机逆变器散热器超温红色报警，故障等级为三级故障，相应的故障处理策略是：保持高压接触器闭合，0 扭矩输出。

(10) 驱动电机超温报警，故障等级为二级故障，相应的故障处理策略是：降功率运行。

(11) ISG 电机超温报警，故障等级为二级故障，相应的故障处理策略是：降功率运行。

(12) 驱动电机超温红色报警，故障等级为三级故障，相应的故障处理策略是：保持高压接触器闭合，0 扭矩输出。

(13) ISG 电机超温红色报警，故障等级为三级故障，相应的故障处理策略是：保持高压接触器闭合，0 扭矩输出。

(14) CANBusOFFDiag 一级报警，故障等级为一级故障，相应的故障处

理策略是：车速为 0：禁止挂当请求，禁止扭矩请求；车速大于 0：限制车速。

(15) CANBusOFF250 二级报警，故障等级为二级故障，相应的故障处理策略是：车速为 0：禁止挂当请求，禁止扭矩请求；车速大于 0：保持高压接触器闭合，0 扭矩输出。

(16) CANBusOFF500 三级报警，故障等级为三级故障，相应的故障处理策略是：车速为 0：禁止挂当请求，禁止扭矩请求；车速大于 0：禁止扭矩输出，高压接触器断开。

(17) BMS 系统初始化故障，故障等级为三级故障，相应的故障处理策略是：不发送预充请求。

(18) 预充电路故障，故障等级为三级故障，相应的故障处理策略是：不发送预充请求。

(19) BMS 主接触器未响应，故障等级为三级故障，相应的故障处理策略是：不发送主接触器闭合请求。

(20) 电池组过压一级保护，故障等级为二级故障，相应的故障处理策略是：限制最大充电电流。

(21) 电池组过压二级保护，故障等级为三级故障，相应的故障处理策略是：禁止充电电流输入。

(22) 电池组欠压一级保护，故障等级为二级故障，相应的故障处理策略是：限制最大放电电流。

(23) 电池组欠压二级保护，故障等级为三级故障，相应的故障处理策略是：限制最大放电电流。

(24) 电池组故障，故障等级为一级故障，相应的故障处理策略是：报警，发送故障代码。

(25) 单体电池过压一级报警，故障等级为一级故障，相应的故障处理策略是：限制最大充电电流。

(26) 单体电池过压二级报警，故障等级为二级故障，相应的故障处理策略是：禁止充电电流输入。

(27) 单体电池欠压一级报警，故障等级为一级故障，相应的故障处理策略是：限制最大放电电流。

(28) 单体电池欠压二级报警，故障等级为二级故障，相应的故障处理策略是：限制最大放电电流。

(29) 电池过温一级报警，故障等级为一级故障，相应的故障处理策略是：限制最大充放电电流。

(30) 电池过温二级报警，故障等级为二级故障，相应的故障处理策略是：

限制最大充放电电流。

(31) 绝缘监测一级报警，故障等级为二级故障，相应的故障处理策略是：高压无效：禁止上高压；高压有效车速为0：断开高压接触器；高压有效车速大于0：限制车速，提醒靠边停车，当车速降为0后，断开高压接触器。

(32) 绝缘监测二级报警，故障等级为三级故障，相应的故障处理策略是：高压无效：禁止上高压；高压有效：切断高压接触器。

(33) 助力转向泵故障报警，故障等级为二级故障，相应的故障处理策略是：限制扭矩输出，限制最大车速。

(34) 空压机故障报警，故障等级为二级故障，相应的故障处理策略是：限制扭矩输出，限制最大车速。

(35) DCDC 故障，故障等级为一级故障，相应的故障处理策略是：报警。

(36) 高压互锁故障，故障等级为三级故障，相应的故障处理策略是：高压无效：禁止上高压；高压有效：禁止扭矩输出，切断高压接触器。

上面内容对每条新能源汽车特有故障进行了描述，归纳后如表 4.1 所示。

表 4.1 新能源汽车特有故障及相应策略

故障名称	故障等级	执行条件	控制策略
油门踏板故障	二级	车速为0	禁止档位请求
		车速不为0	限制车速，限制扭矩输出
刹车踏板故障	二级	车速为0	禁止档位请求
		车速不为0	禁止扭矩输出
档位信号故障	三级	车速为0	禁止档位请求
		车速不为0	禁止扭矩输出
电机驱动系统初始化失败	三级	无	禁止闭合高压接触器
ISG 电机驱动系统初始化失败	三级	无	禁止闭合高压接触器
驱动电机逆变器散热器超温报警	二级	无	降功率运行
驱动电机逆变器散热器超温红色报警	三级	无	保持高压接触器闭合，0 扭矩输出
ISG 电机逆变器散热器超温红色报警	三级	无	保持高压接触器闭合，0 扭矩输出
ISG 电机超温报警	二级	无	降功率运行
ISG 电机超温红色报警	三级	无	保持高压接触器闭合，1 扭矩输出
驱动电机超温红色报警	三级	无	保持高压接触器闭合，0 扭矩输出

故障名称	故障等级	执行条件	控制策略
CANBusOFF500 三级报警	三级	车速为 0	禁止挂当请求, 禁止扭矩请求
		车速不为 0	禁止扭矩输出, 高压接触器断开
CANBusOFFDiag 一级报警	一级	车速为 0	禁止挂当请求, 禁止扭矩请求
		车速不为 0	限制车速
CANBusOFF250 二级报警	二级	车速为 0	禁止挂当请求, 禁止扭矩请求
		车速不为 0	保持高压接触器闭合, 0 扭矩输出
单体电池欠压二级报警	二级	无	限制最大放电电流
电池过温一级报警	一级	无	限制最大充放电电流
电池过温二级报警	三级	无	限制最大充放电电流
绝缘监测一级报警	二级	高压无效	禁止上高压
		高压有效	断开高压接触器
		高压有效车速大于 0	限制车速, 提醒靠边停车, 当车速降为 0 后, 断开高压接触器
绝缘监测二级报警	三级	高压无效	禁止上高压
		高压有效	切断高压接触器
助力转向泵故障报警	二级	无	限制扭矩输出, 限制最大车速
空压机故障报警	二级	无	限制扭矩输出, 限制最大车速
DCDC 故障	一级	无	报警
高压互锁故障	三级	高压无效	禁止上高压
		高压有效	禁止扭矩输出, 切断高压接触器

4.6 双 CPU 容错控制策略

本文设计的整车控制器采用双处理器架构, PCU为MC9S12XDP512, SCU为PIC24HJ256GP610A。PCU与SCU由完全独立的双电源供电系统, PCU与SCU采用CAN及SPI冗余通讯, 双处理架构主要实现以下三个功能。

(1) 对重要的CAN报文信息进行校验。PCU与SCU同时从CAN总线上读取信息, 对重要的CAN报文信息通过SPI口进行校验, 如果校验一致, 则该报文信息有效, 如果报文信息校验不一致, 则采用该变量之前有效的值, CAN报文信息

无效。

(2) 对高压接触器进行双重控制。本文设计的控制器中, PCU与SCU同时对高压主接触器进行冗余控制。PCU的功率驱动部分采用高边控制输出控制信号至接触器线圈的正极, SCU的功率驱动部分采用低边控制输出控制信号至接触器线圈的负极。PCU与SCU独立采集判断主接触器闭合所需的所有信号, 独立按相同的逻辑进行判断, 当PCU与SCU同时判断有效时, 主接触器才能有效闭合, 有效的提高了高压控制安全。

(3) 当SCU检测到PCU失效时, 控制整车控制系统进入破行回家模式。当SCU同时无法同过CAN总线及SPI接口与PCU建立通讯, 通讯中断时间超过1000ms, 但SCU可以通过CAN总线读取到电机系统和电池系统的信息时, 进入破行回家模式。此时SCU发出控制指令, EHS系统工作在纯电动模式, 整车行驶速度不超过5km/h, 并且执行刹车优先原则。

4.7 本章小结

本章根据混合动力客车整车设计方案, 对简单混联型混合动力系统的结构及工作特点进行了阐述。在此基础上, 结合整车的控制需求分别给出了整车上下电控制策略和动力系统工作模式转换的基本控制策略。同时也对新能源客车特有的一些故障进行了对应的处理策略。最后对双CPU系统参与控制的三个功能进行策略开发。

第 5 章 混合动力客车整车燃油经济性测试与优化策略

对于混合动力车辆来说，经济性是最重要的考核指标之一。整车动力系统结构和匹配固定后，控制策略对燃油经济性也有着举足轻重的影响。燃油经济性研究是一个比较复杂和繁复的工作，各个制约因素互相关联且影响逻辑隐藏较深。本文研究的混合动力系统从试车到运营至今已有 5 年左右，经济性优化工作仍在持续进行中，且尚有不少改进空间。故本文单列一章对影响燃油经济性的控制策略进行讨论，试图在众多的制约条件中找出关键参数且定性的分析出改进的方向。

5.1 油耗测试条件

5.1.1 场地测试

场地测试按照 GB/T19754-2005《重型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法》中对于“中国典型城市公交循环数据”工况要求，由被测车搭载油耗仪进行测量，对标车型为其基型车 SWB6116HG。以“中国典型城市公交循环”工况为一个完整记录循环，原则上同一参数重复试验三次取均值。整车采用 65% 的负载。图 5.1 是中国典型城市工况的路谱图，表 5.1 是该路谱的统计信息。

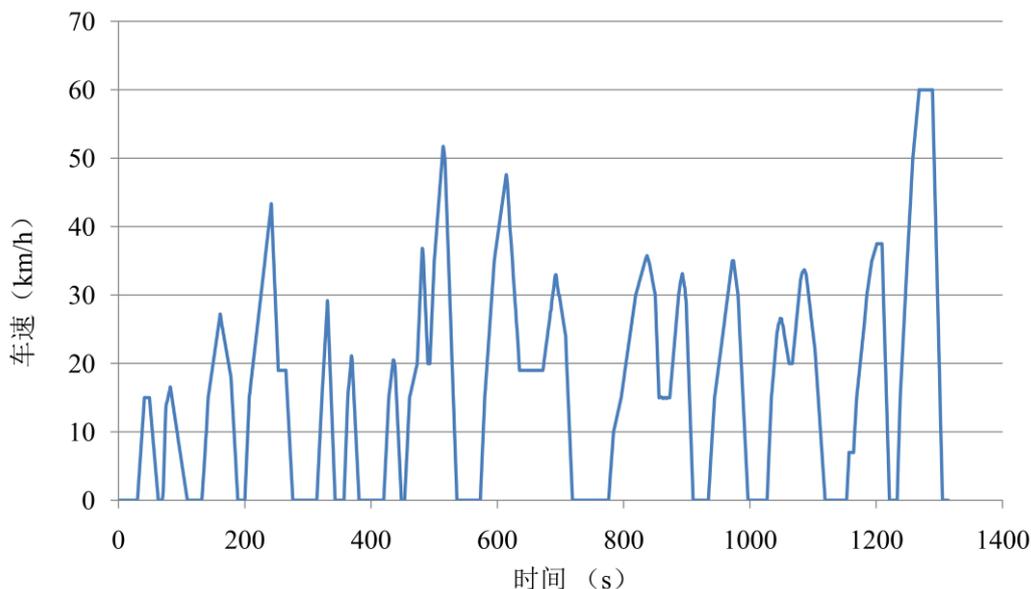


图 5.1 中国典型城市工况

表 5.1 中国典型城市工况信息

时间 (s)	里程 (km)	平均车速 (km/h)	最高车速 (km/h)	怠速时间 (s)	加减循环 (次)
1324	5.8	16	60	300	14

本次测试场地为海南博鳌滨海大道。该道路为一条长约 8 公里，人车稀少，坡度平缓的较直车道，与中国典型城市工况吻合度比较高，基本满足工况要求。图 5.2 为 EHS 混合动力客车在海南博鳌大道进行油耗路试时的照片。



图 5.2 海南博鳌大道油耗测试

5.1.2 线路测试

线路测试在浦西巴士二汽公司 13 辆混合动力客车上进行，其对标车为 35 辆



图 5.3 43 路线路走向

SWB6120V4 常规柴油动力手动五档车型和 2 辆 SWB6120V4LE 常规柴油动力自

动档车型。利用大采样率、较长时间（一个月）的油耗统计数据来消除驾驶员、路况、天气、交通等偶然影响因素产生的结果偏差。

图 5.3 为本次测试的线路图，表 5.2 是测试路线的行程路谱记录。该公交线路全长近 14 公里，中途停靠站点 19 个，最高车速 50km/h，平均车速 13km/h。

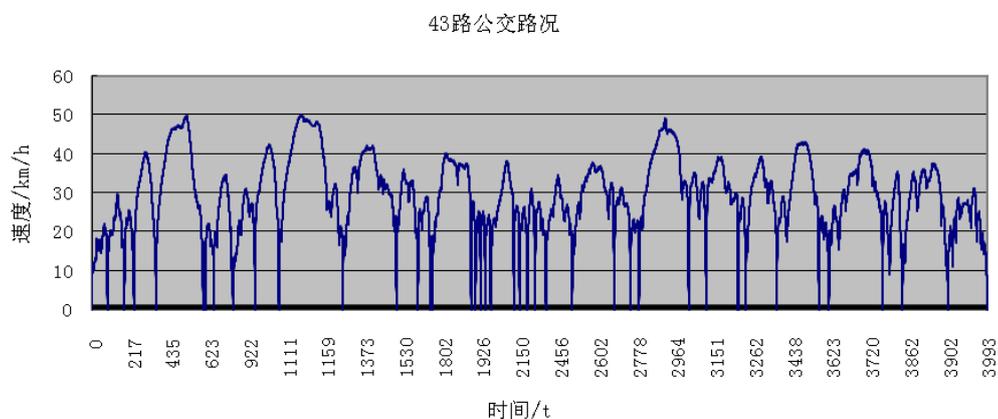


图 5.4 43 路公交路况

表 5.2 43 路路况特征

项目	特征指标	43 路路况信息
描述特征值	运行时间(s)	3191.75
	加速时间(s)	1197.00
	加速比例(%)	36.03
	减速时间(s)	1185.25
	减速比例(%)	38.60
	匀速时间(s)	0.00
	匀速比例(%)	0.00
	怠速时间(s)	815.50
	怠速比例(%)	25.50
	最大速度(km/h)	53.88
	平均速度(km/h)	13.87
	平均运行速度（除去怠速的平均速度）(km/h)	18.67
	最大加速度(m/s ²)	1.72
	加速段的平均加速度(m/s ²)	0.36
	最大减速度(m/s ²)	-2.08
	运行距离(km)	12.29
减速段的平均减速度(m/s ²)	-0.74	

5.2 经济性测试结果及策略优化

5.2.1 离合器结合时电机转速

(1) 目前策略

当主电机转速大于 750r/min 时，离合器结合，主电机速度小于 700r/min 时，离合器分离，离合器结合前和分离后，发动机怠速 600r/min，离合器结合后，发动机参与车辆驱动。

(2) 改善目标

在该工况下，标定不同车速下的离合器接合、分离，记录、分析不同条件下的整车油耗，优化离合器接合速度。

(3) 测试方法

以 50r/min 为间隔，调整离合器结合点速度。离合器结合前，发动机定点怠速点，离合器结合后，采用目前策略加载。试验中 5 种离合器结合点分别是 650r/min，700 r/min，750 r/min，800 r/min，850 r/min。

表 5.3 离合器结合速度油耗对比

程序编号	离合器结合转速 (r/min)	统计里程(m)	百公里油耗 (L/100km)	平均油耗 (L/100km)	节油率 (%)
1	650	6100	31.60	31.52	15.41
	650	6300	31.31		
	650	6200	31.67		
2	700	6300	32.10	31.07	15.32
	700	6300	29.40		
	700	6200	33.16		
3	750	6100	32.10	31.56	15.29
	750	6100	31.23		
	750	5900	31.36		
4	800	6100	31.41	31.55	16.60
	800	6400	29.58		
	800	5900	32.23		
5	850	5900	33.13	32.39	13.08
	850	5900	31.85		
	850	6200	32.18		

(4) 试验结果及分析

表 5.3 统计了 5 种不同离合器结合点的整车油耗数据。经过 5 组参数对比试验可知，不同的离合器结合速度对节油率的影响是显著的。其中采用 800 r/min

为离合器结合点时节油率表现最佳，为 16.60%。其中采用 850 r/min 为离合器结合点时节油率表现最差，为 13.08%。最佳油耗参数与最差油耗参数相差约 2.3%。可见，离合器结合点速度选用 800 r/min 为佳。

5.2.2 回馈制动

(1) 目前策略

主电机速度大于 900r/min 时，制动信号有效时，主电机制动功率为 60kW，主电机速度小于 900r/min 时，制动信号有效时，主电机制动功率 15kW。

(2) 改善目标

在该工况下，在不影响驾驶员操纵性、车辆平顺性的电池安全性前提下，最大限度利用回馈制动，提高整车经济性，记录、分析不同条件下的整车油耗，优化回馈制动策略。

(3) 测试方法

以 10 kW 为间隔，调整主驱电机的回馈制动功率。试验中当主驱电机回馈制动功率超过 90 kW 时，由于电池充电功率过大，电池电压瞬间上浮，引起 BMS 报警，所以回馈制动最大功率限制在 90 kW 以下。所以不同的回馈制动试验点分别为 60 kW，70 kW，80 kW，90 kW。

(4) 试验结果及分析

由表 5.4 不难发现，当电机回馈最大功率增大到 90 kW 时，节油率最佳，为 3.86%。由此可见，回馈制动功率选择 90 kW 为佳。

表 5.4 制动回馈值调整节油率对比

程序编号	回馈制动功率 (kW)	统计里程 (m)	百公里油耗 (L/100km)	平均油耗 (L/100km)	节油率 (%)
1	90	6300	38.40	36.85	3.86
	90	6304	35.42		
	90	6204	36.74		
2	80	6300	35.47	37.19	2.97
	80	6162	37.02		
	80	6219	37.36		
3	70	6137	37.89	37.22	2.89
	70	5991	38.05		
	70	6207	35.72		
4	60	5890	37.65	37.42	2.37
	60	6320	37.43		
	60	6117	37.18		

5.2.3 HEV1 切换 HEV2 模式转速

(1) 目前策略

由图 4.12 可知，当前策略为，当主驱电机转速大于 1200r/min 时，混合动力系统从 HEV1 切换至 HEV2 模式，当主驱电机转速小于 1100r/min 时，混合动力系统从 HEV2 切换至 HEV1 模式。

(2) 测试方法

以 50r/min 为间隔，调整模式切换点。试验中 5 种模式切换点分别是 1150r/min, 1200 r/min, 1250 r/min, 1300 r/min, 1350 r/min。

(3) 试验数据及分析

由表 5.5 可见，当采用 1300 r/min 为模式 HEV1 至 HEV2 模式的切换点时，节油率表现最佳，为 16.34%。

表 5.5 5 种切换点转速点节油率对比

程序编号	离合器结合转速 (r/min)	统计里程(m)	百公里油耗 (L/100km)	平均油耗 (L/100km)	节油率 (%)
1	1150	6123	31.47	31.52	15.08
		6311	31.79		
		6214	32.21		
2	1200	6354	32.11	31.07	15.62
		6309	31.26		
		6234	31.19		
3	1250	6167	30.75	31.56	15.01
		6158	24.68		
		5978	30.26		
4	1300	6107	29.03	31.55	16.34
		6423	27.71		
		5923	27.23		
5	1350	5908	31.26	32.39	13.08
		5945	31.19		
		6244	30.75		

5.2.4 HEV2 切换 HEV3 模式转速

(1) 目前策略

由图 4.12 可知，当前策略为，当主驱电机转速大于 1800r/min 时，混合动力系统从 HEV2 切换至 HEV3 模式，当主驱电机转速小于 1700r/min 时，混合动力

系统从 HEV3 切换至 HEV2 模式。

(2) 测试方法

以 50r/min 为间隔，调整模式切换点。试验中 5 种模式切换点分别是 1700r/min，1750 r/min，1800 r/min，1850 r/min，1900 r/min。

(3) 试验数据及分析

由表 5.6 可见，当采用 1750 r/min 为模式 HEV2 至 HEV3 模式的切换点时，节油率表现最佳，为 18.24%。

表 5.6 5 种切换转速点节油率对比

程序编号	离合器结合转速 (r/min)	统计里程(m)	百公里油耗 (L/100km)	平均油耗 (L/100km)	节油率 (%)
1	1700	6305	31.45	31.80	16.08
		6310	31.74		
		6234	32.23		
2	1750	6305	29.03	28.01	18.24
		6162	27.76		
		6218	27.25		
3	1800	6130	30.1	29.34	17.95
		5998	27.68		
		6207	30.25		
4	1850	5896	32.16	31.52	16.64
		6322	31.28		
		6308	31.14		
5	1900	6161	31.27	31.06	17.83
		6214	31.18		
		6135	30.73		

5.3 正交试验

以上为控制策略均为单因素优化验证，但是在整车控制策略中，影响整车油耗的参数非常多。若同时考察 3 个或 3 个以上的参数，而进行全面试验，则试验的规模将很大，因试验条件的限制而难于实施。因此采用正交试验设计的方法，安排多参数试验、寻求这些参数的最优组合。

5.3.1 正交试验方法介绍

正交试验是研究多因素多水平的一种设计方法，它是根据正交性从全面试验中挑选出来部分最具代表性的点进行试验，这些有代表性的点具备了“均匀分散，

齐整可比”的特点，正交试验设计是分式析因设计的主要方法。是一种高效率、快速、经济的实验设计方法。日本著名的统计学家田口玄一将正交试验选择的水平组合列成表格，称为正交表。

5.3.2 油耗优化正交试验

5.3.2.1 正交试验因子及水平选择

根据同线路对标车辆的情况及控制策略关键参数的数量，拟采用 4 因素进行正交实验方案，即对怠速发电功率、低速助力功率、高速补电车速、高速补电功率 4 个因素。

根据实际的因子在控制策略中的数值，结合试验的的可行性，拟采用每因素对应 3 水平的正交试验，如表 5.6。这是一个 4 因素，3 水平的试验，全面试验要做 81 次。其中 Eng_idle_gen_pw 为怠速发电功率，ISG_assist_pw 为低速助力功率，ISG_assist_end_spd 为高速补电车速，ISG_hi_spd_gen_pw 为高速补电功率。

表 5.6 4 因素 3 水平试验

Factor_No	Eng_idle_gen_pw/ /kW	ISG_assist_pw/kW	ISG_assist_end_spd /r/min	ISG_hi_spd_gen_pw/kW
1	1	1	1	1
2	2	2	2	2
3	3	3	3	3

5.3.2.2 正交试验表设计

对于该套混合动力系统，我们选择了只调整动力系统的参数来优化油耗，这种方法优点在于简单易行，但经济性提升空间非常有限。正交试验安排了 4 因素 3 水平 9 组参数的试验，由于样本量的缘故未做交互作用安排。

表 5.7 正交后的实验表

Test_No	Eng_idle_gen_pw/ kW	ISG_assist_pw/ kW	ISG_assist_end_spd /r/min	ISG_hi_spd_gen_pw/ kW
1	12	16	900	17
2	12	19	1000	20
3	12	22	1100	23
4	14	16	1000	23
5	14	19	1100	17
6	14	22	900	20
7	16	16	1100	20
8	16	19	900	23
9	16	22	1000	17

其中目前控制策略 4 因素值分别是，Eng_idle_gen_pw 为 14kW，ISG_assist_pw 为 19kW，ISG_assist_end_spd 为 1000 r/min，ISG_hi_spd_gen_pw 为 20kW，3 水平设计正交表如表 5.7 所示。

5.3.2.3 试验数据分析及结果

(1) 试验前油耗统计

试验之前，混合动力比手动档车油耗高 5.3% 左右，比自动挡油耗低 12.8%。如图 5.5。

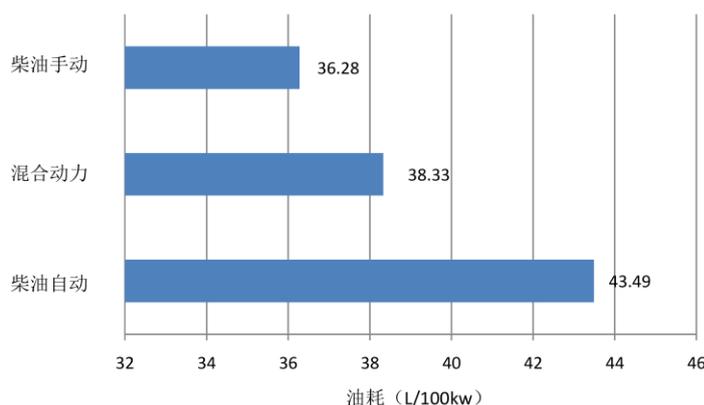


图 5.5 43 路混合动力车试验之前油耗比较

(2) 第 1 轮试验

试验数据采集和整理，得到如下（表 5.8）油耗统计。

表 5.8 第 1 轮试验试验数据

Paras_No	Eng_idle_gen_pw/ kW	ISG_assist_pw/ kW	ISG_assist_end_spd /r/min	ISG_hi_spd_gen_pw /kW	Fuel_Consumption /L/100km	同线路 自动挡	同线路混合 动力原程序
1	12	16	900	17	40.41	45.53（混合 动力最佳油 耗较自动挡 经济性提升 18.86%）	38.8 （较原程序经 济性提升 4.74%）
2	12	19	1000	20	39.49		
3	12	22	1100	23	38.29		
4	14	16	1000	23	40.27		
5	14	19	1100	17	39.40		
6	14	22	900	20	38.53		
7	16	16	1100	20	42.13		
8	16	19	900	23	40.29		
9	16	22	1000	17	36.94		

注：表格中油耗数据未注明之处单位都是 L/100km

(3) 试验结果分析。

由表 5.8 中数据直接分析可以得出最好的一组数据位第 9 组，考虑趋势及数据的稳定性，选取优于实验前的两组数据（第 9 组和第 3 组）进行第二轮试验。

取以上数据第 3、9 组进行第二轮试验，得出 5 个月油耗统计如下：

表 5.9 5 个月油耗数据数据

时间 (月)	1	2	3	4	5
常规柴油油耗(L/100km)	36.96	36.66	35.23	34.97	36.09
采用第 3 列参数混合动力油耗(L/100km)	36.41	36.65	35.1	34.4	34.7
节油率 (%)	1.49%	0.03%	0.37%	1.63%	3.85%
采用第 9 列参数混合动力油耗(L/100km)	36.21	37.35	34.79	34.1	34.5
节油率 (%)	2.03%	-1.88%	1.25%	2.49%	4.41%

(4) 结论

长期油耗数据体现出正交试验的结果符合预期，决定采用第 9 组参数，Eng_idle_gen_pw 为 16kW，ISG_assist_pw 为 22 kW，ISG_assist_end_spd 为 1000 r/min，ISG_hi_spd_gen_pw 为 17 kW 作为控制策略的数据进行长期跟踪。

采用第 9 组参数后，经过长期的油耗统计数据得出：与常规自动档车相比，节油约 28.3%；较优化试验前节油率提高约 8%，而且节油率较稳定。

5.4 根据油耗优化结果修正 EHS 整车工作模式

根据长期的油耗测试结果，对 EHS 混合动力系统运行中的模式切换参数也进行了相应的调整。结果显示，从 EV 模式切换至 HEV1 模式的转速选用 800 r/min 为佳，从 HEV1 模式切换至 HEV2 模式的转速选用 1300 r/min 为佳，从 HEV2 模式切换至 HEV3 模式的转速选用 1750 r/min 为佳。修正后得出的 EHS 整车工作模式图，如图 5.6。

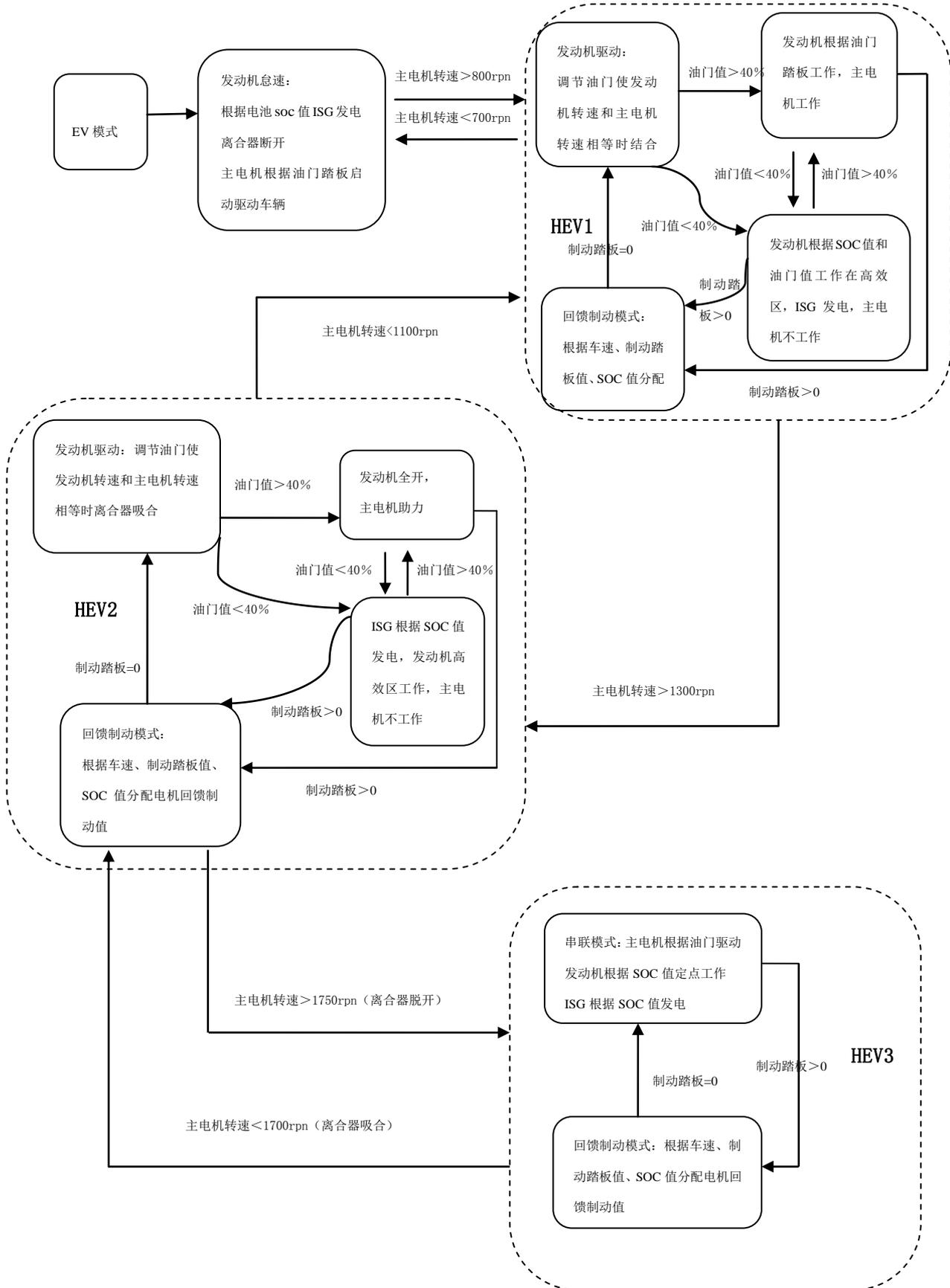


图 5.6 修正后的 EHS 整车工作模式

5.5 本章小结

本章首先对油耗测试及优化的条件做了简单介绍。然后分别从离合器结合速度、回馈制动及工作模式切换的转速点进行了燃油经济性优化。从各自的试验中得出了相对较优的控制参数。同时，选用了 4 因素 3 水平的正交试验方法进行了油耗优化试验，得出较优的控制策略参数后进行了长期的跟踪，发现较优的控制参数比试验前节油率提高约 8%，而且节油率较稳定。

第6章 总结与展望

6.1 全文总结

本文对混合动力汽车关键零部件之一的整车控制器进行了研究和开发。开展的工作完成了论文的既定目标。主要研究内容包括：

1、结合国内外整车控制器的开发现状，再根据汽车电子电气的要求制定了整车控制器的技术要求；确定了混合动力整车控制器的测试项目。

2、根据需求，设计出了相应的混合动力整车控制器硬件，并且根据既定的测试内容、测试方案进行了详尽的测试，各个指标均达到了预定的标准。

3、针对简单混联混合动力系统结构，结合简单混联型大客车设计要求进行了电机系统、APU系统及电池系统进行了选型。

4、针对简单混联型大客车 EHS 系统给出了整车上下电控制器策略；给出了混联大客车的各种工作模式控制策略。

5、对选用的简单混联混合动力客车进行了相关的油耗测试及燃油经济性优化。

本文工作到得如下结果：所设计方案动力性能达到设计指标，适合坡度在7%以内的城市道路工况。设计的整车控制器通过了相应的可靠性测试，通过相应的控制策略实现了相关工作模式的控制及切换，并实现了降低油耗的优化策略，燃油经济性较同平台自动挡车型提高 28.3%。

6.2 展望

整车控制器开发方面，虽然按项目及论文要求完成了整车控制器的硬件设计，给出了相关的控制策略，并且根据实际运营需求进行了一定的策略优化，但很多方面还需要加强和优化。

1、控制器硬件优化，提高集成度

跟国外成熟控制器相比，控制器的硬件模块集成度还不够高，等产业化有一定的产量后可以再进行优化设计，尽可能多的采用现成的成熟的汽车电路模块，提高整车控制器的稳定性。

2、完善软件安全架构

目前整车控制器硬件架构已经实现双处理器架构，硬件安全等级比较高，但软件上还没实现；同时也有必要在安全策略上进行优化和积累。

3、增强软件诊断功能模块

整车控制器完成了整车运营的功能实现和必要的故障诊断功能。对诊断的故障等级划分及时间轴积累机制还没有完善，需要加强该方面的工作。

4、参数标定

针对 EHS 混合动力系统在控制策略不变的情况下，对相关的主要参数进行标定，寻求参数间的最优组合，达到经济性最优级，可采用正交试验法；经验主观调整。

5、策略调整

对控制策略进行结构的完善和优化，增加相应的控制模块或改变控制模式，路况自适应系统等。根据经验，如增设滑行制动、纯串联模式、低速下发动机高速串联、根据路况的动态参数寻优等。

致谢

回想边工作，边读书的几年生活，尤其是进入同济大学以来攻读工学硕士期间，心有无限感慨。几年内，流转于同济大学校园及单位家庭之间，虽有疲惫，却又乐此不疲。尤其是在撰写学位论文期间，深深感受到了“严谨、求实、团结、创新”校训的内涵，同时也深深得到“同舟共济，自强不息”为核心的同济精神的无限教诲。深感在这百年学府中的求学深造经历是人生不可多的财富。

本学位论文是在戴海峰教授和姚杰博士的关心和指导下完成的。在课题的选题、研究方向的确立、研究工作的进行和论文的撰写过程中，无不浸透着导师的心血。恩师严谨求实的作风，系统广博的学识，不懈进取的精神，教书育人的责任心、开阔活泼的学术思维和平易近人的师长风范，无不使作者倍受启迪，受益终身。从恩师那里，我不仅学到了许多专业知识和科学研究方法，还学到了他对待科学执着追求的态度。谨此论文脱稿之际，向恩师表示衷心的感谢和崇高的敬意！

在课题的研究和学位论文的撰写过程中，得到了上海汽车商用车技术中心姚杰博士、齐洪元博士、王馨、李浩宇的帮助，他们的热心帮助使得各项研究工作都能顺利进行，与他们的讨论也使我的实际工作经验得到了迅速提高，研究课题和论文的顺利完成离不开他们的配合和支持。

在论文的修改过程中，除了戴海峰教授的悉心指导外，还要感谢赵治国教授、马天才教授和王心坚教授的细致审阅。同时，感谢学院的武老师，在此一并向他们表示衷心的感谢！

另外还要感谢鼓励我、支持我的妻子、亲友和所有朋友，她们的期许和鼓励使我能够以最大的信心和热诚完成本课题的研究。

2016年6月

参考文献

- [1] 余成光. 混合动力电动汽车驱动系统参数优化匹配[D]. 武汉: 武汉理工大学汽车工程学院, 2007
- [2] 韦保仁, 八木田浩史. 中国汽车保有量及年产量预测模型研究, 城市车辆, 2004(4): 21-24
- [3] Powers W. F., Nicastri P. R. Automotive vehicle control challenges in the 21st century. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(6): 605-618
- [4] 闻希. 北京: 12月30日实施国III排放标准. 石油商报. 2005.12.28
- [5] 罗毅. 中国机动车及发动机排放污染控制. 机电商报, 2005.11.07
- [6] 陈清泉, 孙逢春. 现代电动汽车技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002
- [7] 赵纪新, 陆兆华. 我国现阶段能源问题浅析明. 能源市场, 2005(3): 65-68
- [8] 世界各国针对混合动力汽车(HEV)(低油耗车)的优惠政策[J]. 汽车与配件. 2008(39)
- [9] 郭孔辉. 汽车技术的变革挑战与机遇. 上海国际工业博览会科技论坛报告. 2001.11
- [10] 《汽车产业调整和振兴规划》. 2009
- [11] GB18352.2-2001 《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(II)》
- [12] GB17691-2001 《车用压燃式发动机排气污染物排放限值及测量方法》
- [13] Gregory C. Nowell. Vehicle Dynamometer for Hybrid Truck Development [C]. SAE. 2002
- [14] 岳东鹅, 郝志勇. 混合动力电动汽车研究开发及前景展望[J]. 拖拉机与农用运输车. 2004 (2): 1-4
- [15] Rongjun Zhang, Yao bin Chen. Control of Hybrid Dynamical Systems for Electric Vehicles [C]. Proceedings of the American Control Conference, Arlington, VA June 25-27, 2001 pp.2884-2889
- [16] 王保华, 张建武, 罗永革. 并联混合动力汽车控制策略比较研究. 系统仿真学报. 2006, 18(2): 401-404
- [17] 邵强, 吴志军, 李理光, 等. 串联混合动力摩托车动力系统设计及仿真. 小型内燃机与摩托车, 2008, Vol. 37(1): 57-61
- [18] Metin Gokasan, Seta Bogosyan, and Douglas J. Goering. Sliding Mode Based Powertrain Control for Efficiency Improvement in Series Hybrid-Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2006, 21(3):779~790
- [19] 田光宇, 彭涛, 林成涛, 等. 混合动力电动汽车关键技术[J]. 汽车技术, 2002(1): 8-11
- [20] 刘嘉. 混合动力汽车动力系统控制策略及仿真[D]. 上海: 同济大学汽车学院, 2008
- [21] 王保华. 混合动力城市客车控制策略与试验研究[D]. 上海交通大学机械与动力工程学院, 2008
- [22] Sciarretta A, Guzzella L. The modeling and optimization of Hybrid Electric Vehicle. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005
- [23] K.T.Chau, Y.S.Wong. Overview of power management in hybrid electric vehicles. *Energy Conversion and Management* 43 (2002) 1953-1968 [13] Max Ahman. Primary energy efficiency of alternative power trains in vehicles. *Energy* 26(2001) 973-989
- [24] Mehrdad Ehsani 等. 现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池汽车-基本原理、理论和设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.6

- [25]赵树朋. 混合动力汽车能量利用试验与仿真及评价方法研究[D]. 河北农业大学, 2007
- [26]Reza Langari, Jong-Seob Won. A Driving Situation-Based Energy Management Strategy for Parallel Hybrid Vehicles [C]. SAE 2003-01-2311
- [27]吴伟岸. 混合动力汽车动力系统参数选择及匹配研究[D]. 合肥工业大学, 2005
- [28]ADVISOR2002, Software Disc:\ADVISOR2002\documentation\advisor_help.htm
- [29]初亮. 混合动力总成的控制算法和参数匹配研究[D]. 吉林大学博士论文, 2002年
- [30]张京明, 崔智全, 崔胜民. 一种混联式混合动力轿车动力源功率的优化计算[J]. 公路交通科技, 2004, 12(6): 11-14
- [31]王家明. 并联式 ISG 混合动力总成设计与性能优化研究[D]. 上海交通大学, 2008
- [32]刘明辉. 混合动力客车整车控制策略及总成参数匹配研究[D]. 吉林大学, 2005
- [33]唐磊. 基于混合度的串联混合动力客车特性参数设计[D]. 吉林大学, 2008
- [34]连志伟. 并联型混合动力牵引车动力系统参数匹配与优化[D]. 武汉理工大学汽车工程学院, 2008
- [35]SHIY, EBERHART R C. Fuzzy adaptive particle swarm optimization [A]. Proc Congress on Evolutionary Computation Seoul Piscataway [C]. New York: Washington DC, 2001
- [36]LOVBJ ERG M, RASMUSSEN T K, KRINK T. Hybrid particle swarm optimizer with breeding and subpopulations [A]. Proc of the Third Genetic and Evolutionary Computation Conference[C]. San Francisco: Morgan Kaufman Publishers, 2001
- [37]Thring R.H.Engine Transmission Matching. SAE Paper No.810446
- [38]William C. Water. General Purpose Automotive Vehicle Performance and Economy Simulator. SAE Paper, No.720043
- [39]刘磊. 基于经济性与排放性的轻型货车动力系统匹配优化方法研究, 山东理工, 2008
- [40]Lin Gan. Globalization of the automobile industry in China: dynamics and barriers in greening of the road transportation. Energy Polity, 2003, 5(6):537-55
- [41]宋宝玉, 任秉银, 于华波, 等. 汽车传动系参数优化设计系统的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(2): 179-182
- [42]EHASNI M, RHAMAN K, TOLIYAT H. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(1): 19-27
- [43]张翔. 电动汽车建模与仿真的研究[D]. 合肥工业大学, 2004
- [44]彭栋. AVL CRUISE-整车及动力总成仿真分析软件. 上海: 李斯特技术中心(上海)有限公司, 2007
- [45]张志涌等. 精通 MATLAB6.5 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.3
- [46]李攀, 王瑞敏, 王馨, 等. 混联型混合动力城市客车动力系统参数设计与校核[C]. 内燃机科技-中国内燃机学术年会 2009 年学术年会暨中小功率柴油机分会联合学术年会论文集, 上海: 同济大学出版社, 2009.10. 269-272
- [47]Rahman Z, Ehsani M, Butler K L. An Investigation of Electric Motor Drive Characteristics for EV and HEV Propulsion Systems[C]. SAE Paper 2000-01-3062
- [48]许士春, 范辉. 电动汽车总成控制器的 fuzzy 控制策略[J]. 成组技术与生产现代化, 2004, 21(4): 55-57
- [49]浦金欢. 混合动力电动汽车能量优化管理与控制策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2004
- [50]《上海汽车简单混联混合动力客车动力系统设计及性能仿真分析报告》, 2009.9
- [51]曲学基, 王增福, 曲敬铠 稳定电源实用电路选编 北京: 电子工业出版社 2003
- [52]朱玉龙 汽车电子硬件设计 北京: 北京航空航天大学出版社 2011

[53]李建秋 汽车电子学教程（第2版）北京：清华大学出版社 2011

[54]GB/T12534-1990《汽车道路试验方法通则》

[55]GB/T 19754-2005《重型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法》

[56]GB/T 12536-1990《汽车滑行试验方法》

[57]GB/T 12543-1990《汽车加速性能试验方法》

[58]GB/T 12544-1990《汽车最高车速试验方法》

[59]GB/T 18385-2005《电动汽车 动力性能试验方法》

[60]GB/T 18386-2005《电动汽车 能量消耗率和续驶里程 试验方法》

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

2014.4---

上海汽车商用车技术中心(上海极能客车动力系统有限公司)

新能源动力总成开发部 系统集成科

2007.8 --- 2014.4

上海汽车商用车技术中心 新能源技术开发部

2004.5---2007.8

上海汽车工程研究院 新能源技术开发科

2002.7---2004.5

上海内燃机研究所 清洁燃料发动机及电控技术研究室

2014.5 《灵活燃料甲醇控制系统的结构与工作原理》

2011.8 《纯电动汽车驱动电机选择方法》