

论文分类号:U463.4
密 级:内部

单 位 代 码:10183
研 究 生 学 号:2201202

吉 林 大 学

硕 士 学 位 论 文

燃料电池混合动力汽车参数匹配与控制策略研究

Study on the Parametric Design and Control Strategy of Fuel
Cell Hybrid Electric Vehicles

作者姓名：刘志茹

专 业：车辆工程

导师姓名

及 职 称：王庆年 教授

论文起止年月：2002 年 3 月至 2003 年 3 月

内 容 提 要

初步研究表明,采用燃料电池系统并联蓄电池这种电电混合动力方式是降低成本,克服燃料电池汽车不能回收制动能量的有效途径。基于此,作为初步探索,本论文的重点内容如下:系统地提出动力总成的元件选型及参数匹配的方法,以红旗轿车为基本车型,完成燃料电池混合动力汽车的参数匹配,并以 ADVISOR 软件为平台进行仿真,分析与燃料电池汽车相比,燃料电池混合动力汽车在提高性能、降低成本方面所具有的优势。以提高燃油经济性和整车动力性能为目标,分析研究质子交换膜燃料电池电-电混合动力汽车的控制策略,提出整车起动策略和更完善的制动力分配控制算法;根据工作模式完成了燃料电池系统和蓄电池组间功率分配的算法。针对汽车中多个控制器间的数据信息传输方式的高要求,设计基于 CAN 总线的燃料电池混合动力汽车控制系统结构方案。本文为建立控制系统的离线仿真模型、控制软件的设计奠定基础。

目 录

内容提要

目 录

第一章 绪论	6
1.1 燃料电池汽车的概述	1
1.2 燃料电池汽车开发的背景及意义	7
1.3 燃料电池汽车的技术发展、现状	10
1.4 论文主要研究内容	12
第二章 质子交换膜燃料电池	14
2.1 质子交换膜燃料电池的发展简史	14
2.2 质子交换膜燃料电池的工作原理、组成	15
2.2.1 工作原理	15
2.2.2 组成	16
2.3 质子交换膜燃料电池的性能及效率	17
2.3.1 性能及其影响因素	17
2.3.2 效率	21
2.4 质子交换膜燃料电池的燃料	23
2.4.1 氢	23
2.4.2 甲醇和汽油	25
2.5 小结	25
第三章 燃料电池混合动力汽车参数匹配与性能仿真	27
3.1 车型及基本参数	27
3.2 仿真软件及模型	27
3.2.1 仿真软件	27
3.2.2 仿真模型	28
3.3 循环工况的选择	30

3.4 动力总成参数确定	32
3.4.1 电机	32
3.4.2 燃料电池系统	35
3.4.3 蓄电池	38
3.5 仿真结果的分析	41
3.5.1 燃油经济性的分析	42
3.5.2 动力性分析	44
3.6 成本分析	44
3.7 启动、瞬态响应问题	46
3.7.1 启动问题	47
3.7.2 瞬态响应问题	47
3.4 小结	48
第四章 燃料电池混合动力汽车控制策略研究及控制器的网络通信技术	49
4.1 燃料电池混合动力汽车控制策略的选择	49
4.1.1 开关模式	49
4.1.2 功率跟随模式	49
4.1.3 整车控制策略研究的内容	50
4.2 控制策略研究	50
4.2.1 电-电混合动力系统工作原理	50
4.2.2 燃料电池系统工作范围确定	51
4.2.3 蓄电池组 SOC 值上限和下限的确定	52
4.2.4 踏板信号与转矩输出指令	53
4.2.5 汽车起动控制策略	560
4.2.6 燃料电池系统与蓄电池组的功率分配	56
4.2.7 控制电流的确定	593
4.3 控制器网络的通信技术(CAN 总线通信)	60
4.4 小结	63
第五章总结	错误！未定义书签。
参考文献	61

致谢	66
摘要	67
Abstract	70
原创性声明	74

第一章 绪论

1.1 燃料电池汽车的概述

燃料电池汽车 (FCV, Fuel Cell Vehicle), 是 20 世纪 70 年代产生而最近 10 年兴起开发的一种高效、清洁的车型。

燃料电池是通过化学反应直接将燃料的化学能转化为电能的装置,而且当以氢为燃料时产物只有水。燃料电池的特点是高效率、低污染,燃料具有通用性,来源并不仅局限于化石燃料。在六种燃料电池中,最适合作为汽车动力源的燃料电池是质子交换膜燃料电池 (PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell),与其它燃料电池相比起动快、工作温度低,具有更高的功率密度^[1-3]。

以燃料电池为动力源的汽车称为燃料电池汽车。广义的燃料电池汽车包括两种燃料电池混合动力汽车^[25-27]。燃料电池汽车的配置只以燃料电池系统为动力源,像电动车中的蓄电池组,燃料电池向车辆的驱动系统供电。用燃料电池系统代替传统的内燃机为动力源使得燃料电池汽车具有电动车的优点:即传统的内燃机汽车所不能达到的高效率和零排放性能,基本的能量消耗可以节省 60%,CO₂ 的排放量可以减少 75%^[25],其它有毒物质的排放也大幅度的减少。而且能够快速添加燃料,有长的续驶里程。

燃料电池混合动力汽车蓄电池组与燃料电池系统并联驱动,类似于内燃机串联混合动力汽车,是电-电混合动力,这种运行方式充分利用了燃料电池系统的高能量密度和蓄电池组的高功率密度,车辆在不同的行驶工况下燃料电池系统和蓄电池组构成的混合动力系统工作在不同的模式下。这种车型不但具有上述纯燃料电池汽车的优点,还能够克服纯燃料电池汽车目前无法解决的弊端:成本过高,不能回收再生制动能量,起动困难及瞬态响应性差等。

目前世界各国政府以及各大汽车公司纷纷投入巨资进行质子交换膜燃料电池混合动力汽车的研究与开发。

1.2 燃料电池汽车开发的背景及意义

治理汽车尾气排放，改善人类生存环境，发展“清洁汽车”，遏止大气状况恶化成为汽车工业可持续发展面临的首要难题。研究表明，造成大气污染的气体主要有非烷有机物、氮氧化合物和一氧化碳。据统计^[1]，在美国有 43% 的非甲烷有机物、57% 的氮氧化合物和 82% 的一氧化碳都是通过汽车排放产生的，而全世界 20% 的一氧化碳排放量来源于汽车废气。在过去的 100 年中，氮氧化合物在空气中的含量上升了 15%。另外，汽车尾气也是产生酸雨、光化学烟雾等致使环境恶化的重要因素。近年来，温室效应问题受到全世界的广泛关注。在人为因素产生的温室气体中（主要是二氧化碳）有 25% 是由交通运输业带来的，每加仑汽油从生产、销售到用于驱动汽车大约要产生 25 磅二氧化碳。据统计^[1]，自从 1765 年以来，二氧化碳在大气中的含量已经从 280×10^{-6} 上升到了目前的 360×10^{-6} 。

能源是人类赖以生存的五大要素之一，是国民经济和社会发展重要战略物资。我国人口众多，人均能源资源占有量不到世界平均水平的 1/2，石油仅为 1/10。据预测^[1]，中国未来能源供需缺口将越来越大。石油进口依存度（净进口与消费量之比）由 1995 年的 6.6% 上升为 2000 年的 20%，预计 2010 年将上升为 23%。在新的世界石油危机面前，我国能源供应的安全性必将受到威胁。根据国际上通行的能源预测数据，石油将在 40 年内枯竭，天然气将在 60 年内用光，煤炭也只能用到 2220 年。寻找新型能源和可替代能源已成为人类社会发展的必经之路。

近几十年来，世界各国政府和学术界以及工业界一直致力于研究开发和推广使用各种低排放或零排放汽车，以解决空气污染问题。与 60 年代的汽车相比，如今燃油汽车的非甲烷有机物和一氧化碳的排放量减少了 76%。尽管取得了如此大的进步，但由于汽车总量和行驶里程的不断增加，汽车仍是造成大气污染的主要污染源。为了彻底解决汽车废气排放问题，美国加利福尼亚大气资源委员会（CARB）在 1990 年 10 月提出了全美也是全世界第一个限制汽车废气排放的法案。该法案规定：到 1998 年，凡在加利福尼亚销售汽车的汽车制造商，其零排放车至少要占到总数的 2%，到 2003 年零排放车至少占 10%。1993 年 9 月，联邦政府和美国汽车联合会（USCAR）（包括克莱斯勒、福特、通用）进行了历史性的合作，提出

了新一代汽车合作计划 (PNGV)。PNGV 把美国政府的 7 个联邦政府部门研究工作联系在一起，主要目标是在 10 年把燃油经济性提高 3 倍而维持价格不变。在美国的影响下，世界各主要汽车生产国和消费国纷纷制定了类似的政策法规，并投入巨资开始研究新型零排放汽车。

电动汽车是当前能满足“零排放”要求的首选方案。电动汽车运行中没有排放污染，如果发电厂以核能、水力、太阳能、风能或天然气为能源发电，对大气的污染会很小，而远离城市的火力发电厂对人们生存环境的影响可以控制。在市区内行驶，电动汽车的能量效率比普通汽油机汽车高 40% 左右。电动汽车可以利用夜间用电低谷的富余电能充电，这可以平衡电网的负载，提高电网能量的利用率。除此之外，电动汽车还具有低噪声、低热辐射、易操纵和易维护等优点。然而电动汽车的关键技术——电池技术是其不可逾越的障碍：电池的能量密度低，电动汽车一次充电的续驶里程和动力无法达到当前内燃机汽车水平；此外，电动汽车空调和暖风的选用必须充分考虑其能量消耗对电动汽车续驶里程的影响，乘员的舒适性受到限制；充电时间太长（4~8h），循环寿命有限，且配套设施费用昂贵。因此，常规电池电动车在可见的将来替代内燃机汽车的可能性微乎其微，只能扮演辅助能源和有限范围内运输工具的角色。

在传统的内燃机汽车的致命的缺点不能从根本上解决，而电动汽车由于技术问题在目前难以推广的情况下，人们提出了混合动力汽车这一概念。它采用内燃机和蓄电池作为混合动力源，实践证明，混合动力汽车能大幅度提高燃油经济性（30~40%），降低排放（50~60%）^[53]，而且弥补了电动车辆续驶里程短的不足。虽然有上述优点，但混合动力汽车终究是一种过渡产品，因为它不能彻底的解决污染问题。

至今各国政府和专家及大企业集团均看好的是燃料电池汽车。

对于汽车而言，燃料电池的效率（从燃料到车轮）可达到 30%~40%，热机的这一效率只有 16%~18%^[1]。这是因为燃料电池是一个电化学反应系统，不受卡诺循环效率的限制，主要产生电能，并把氢气和氧气转化成水，而内燃机则主要产生热能，只有一少部分变成有用的机械功，而且燃烧尾气成分复杂，包括未反应的有机物、CO 和 NO_x。

燃料电池汽车对环境的意义是明显的，因为燃料电池几乎没有 NO_x、SO_x 和粉尘的排放，CO 和挥发性有机物（VOC）的排放量也很低。单就非管制性排放物 CO₂ 而论，燃料电池的高效表明，同样使用化石燃料取得

单位有用功所排放的 CO_2 ，燃料电池系统比热机系统要低。如使用水电、核电、风电和太阳能发电，则不存在 CO_2 污染问题。使用再生生物质发电，能够不增加 CO_2 的排放总量。

英国能源政策研究中心进行了一项研究，比较燃料电池汽车与现代汽车的能源消耗及污染物排放情况，其结果见表 1-1^[1]。

表 1-1 不同动力汽车的污染物排放及能耗比较

动 力	内燃机	柴油机	燃料电池	燃料电池
燃料	汽油	柴油	甲醇	天然气
$\text{NO}_x/\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$	0.26	0.57	0.04	0.024
$\text{SO}_x/\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$	0.2	0.13	0.006	0.0063
$\text{CO}/\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$	2.3	0.65	0.014	0.0074
$\text{NMHC}/\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$	0.77	0.25	0.047	0.019
$\text{CH}_4/\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$	0.042	0.03	0.072	0.059
$\text{CO}_2/\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$	209	154	130	83
$\text{PM}/\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$	0.01	0.05	0.0015	-----
能耗/ $\text{kJ}\cdot\text{km}^{-1}$	3160	2360	2630	1690

表 1-1 中，燃料电池的 CO 、 SO_x 、 NMHC (Non-Methane Hydrocarbon, 非甲烷碳氢化合物)、 NO_x 和 PM (Particle Materials, 颗粒物) 的排放比普通汽车小 1~2 个数量级。天然气燃料电池汽车，没有 PM 排放。甲醇燃料电池汽车和天然气燃料电池汽车的 CO_2 排放分别是汽油动力汽车的 62% 和 40%，甲烷的排放增加了约一半，但基值较低，只有 $0.04\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ 。甲烷也是一种温室气体，但由于 CO_2 排放降低了 40%~60%，对降低温室效应作用还是显著的。需要指出的是表中燃料电池汽车的 NO_x 、 CO 、 NMHC 和 SO_x 的排放主要来自甲醇和天然重制氢过程。这预示着随着燃料电池技术的发展，以及与之相适应的燃料供应商的完善，燃料电池汽车的环境效益会更加显著。

燃料电池汽车所用的燃料具有通用性，燃料电池适用于几乎所有的燃料，即便将来有一天化石燃料用尽，也不威胁它的生存，因为可以采用生物质和废弃物质制氢。可再生的生物将是未来能源工业的一个重要原料，一些西方国家已经进行了尝试，如瑞典、英国、美国。燃料电池汽车具有包容性，除不用内燃机的相关的传动部件外，现有汽车所有的部件和技术

都可直接用在燃料电池电动汽车上，因而易为市场所接受。

目前阻碍燃料电池汽车走向市场的主要原因有成本太高，用户无法接受；当以氢作燃料时，建设加氢设施费用昂贵，且存在重大的安全隐患；当采用车载制氢方案时，不仅系统复杂，难于布置，且使整车成本进一步提高^[22-24]。

尽管如此，20 世纪末国际上仍旧掀起了一个燃料电池汽车开发的热潮。

1.3 燃料电池汽车的技术发展、现状

目前，世界各国政府以及各大汽车公司纷纷投巨资进行质子交换膜燃料电池汽车的研究与开发。其中影响最大的开发项目有两个：一个是由美国 DOE 组织的国家 PEMFC 研究机构，一个是以加拿大 Ballard 动力公司的技术为支持、由奔驰、福特等公司支持的 PEMFC 电动汽车项目。几乎与此同时，丰田汽车公司宣布投资 8 亿美元开发非石油燃料发动机，即氢燃料电池汽车^[2]。除此之外，Chrysler、GM、Renault、Toyota、Mazda、Nissan、Volkswagen 等各大汽车公司也正在积极开发各种类型的 PEMFC 汽车。自 1993 年 EP 公司开发出世界上第一辆 PEMFC 驱动的“绿色汽车”（Green car）之后，其它汽车公司的 PEMFC 样车相继推出，且性能越来越高。

Green car 是美国 Energy Partners 公司在 DOE 的支持下于 1993 年开发出的世界上第一辆 PEMFC 驱动的“绿色汽车”，该车的功率为 15kW，0~30m/h 的加速时间为 10s，最高时速达 60m/h，一次充氢行驶里程为 96km^[3]。

P2000 是福特公司于 1999 年推出的纯燃料电池汽车；Necar4（new electric car）是 DaimlerChrysler 公司于 1999 年在 Necar1~3 的基础上研制的 PEMFC 车。下面以 P2000 和 Necar4 为例来说明纯燃料电池汽车性能及其技术水平^[3]。

福特推出的 P2000 是 5 成员纯燃料电池轿车，用前轮驱动，整车质量为 1518kg。电机为 56kW 的三相异步交流电机，燃料电池系统的总功率为 75kW（3 × 25kW），以压缩氢气为燃料。P2000 的最高车速大于 80km/h，

0~30km/h 的加速时间为 4.2s，0~60km/h 的加速时间为 12.3s。

Necar4 是 5 员乘坐轿车，采用前轮驱动。它的设计基于 Mercedes-Benz 的 A-class 车，车辆总质量为 1750kg，比同类内燃机汽车约重 300kg。电机可提供 55kW 的功率。2 台 35kW 的质子交换膜燃料电池组由该联盟的 Ballard 动力系统提供。Necar4 以液氢为燃料，一次加注的燃料可供 Necar4 行驶 450km。Necar4 的试验车速已达 125km/h。若电动机允许，最高时速可达 145km/h。

实验证明，Necar4 平均每行驶 100km 消耗 1.1kg 氢，相当于 4.0L 汽油，和 3.7L 柴油。而相似类型的内燃机汽车，如 A140 60kW 汽油车，每行驶 100 km 平均消耗 7.1L 汽油；A160(b) 44kW 柴油车需消耗 4.5L 柴油才能行驶 100km。实验测得质子交换膜燃料电池组平均效率为 62.2%，即燃料电池将它消耗的氢气所含总能量的 62.2% 转化为电能，其余的 37.8% 已废热排出。质子交换膜燃料电池的辅助系统（空气增压、冷却泵与通风等）消耗了总能量的 16.4%。电推进系统的逆变器，电动机和变速系统等无功损耗占总能量的 8.1%。因此，从液氢罐中的液氢所得到的能量有 37.7% 被传送到车轮被用于车辆的推进。这一效率高于同类以内燃机为动力的汽车。同类以汽油为燃料的汽车总效率为 16% ~ 18%。

表 1-2 为 Necar4 与同类型汽油、柴油车加速性能对比。

表 1-2 Necar4 与同类型汽油、柴油车加速性能对比

车 型 加 速	Necar4 (55kW,燃料电池) (样车)	A140 (60kW,汽油) (商业化)	A160CDI (44kW) (商业化)
加速 0~30km/h	2.8s	2.2s	2.8s
加速 0~100km/h	26.3s	12.9	18.0s
变速 0~100km/h	18.1s	7.9	11.0s

上述内容表明纯燃料电池混合动力汽车的燃油经济性明显高于传统的内燃机汽车，当以直接氢为燃料是排放为零，低功率动态特性可与传统的内燃机车相比，但 0~100km/h 加速的高功率的动态响应特性远远低于内燃机车。而且 P2000 和 Necar4 的起动只能由 12V 的辅助蓄电池完成。所选的 75kW 和 70kW 的燃料电池系统的成本即使按每年 50,000 台的生产量计算也难以接受（见第三章中的成本分析）。

正是由于目前纯燃料电池汽车存在许多自身无法解决的问题,如汽车的起动,瞬态响应特性,燃料电池系统带来的成本等,世界各大汽车厂商开始把重点转向燃料电池电-电混合动力汽车。

本田于 2001 年 9 月 4 日在以传媒为对象举行的“2001 本田会议”上宣布开发出了新型燃料电池混合动力汽车“FCX-V4”^[14]。燃料电池组采用的是加拿大 BALLARD POWER SYSTEMS 公司的产品,蓄电池组使用了最新的“Mark900”,在实现系统小型化的同时将输出功率由原来的 62kW 提高到了 78kW。最高时速由原来的 130km/h 提高到了 140km/h。日本丰田汽车公司开发了新型燃料电池混合动力汽车“FCHV3”^[15],该车采用氢吸附合金供氢方式,配备镍氢电池,其最高时速可达 150 公里。其中燃料电池的输出功率高达 90 千瓦。

国内东风汽车公司、大连化物所和中科院电工所合作开发出 PEMFC 轻型客车。2001 年底上汽委托泛亚和上海交通大学联合开发了名为凤凰的燃料电池混合动力汽车。该车以别克 GL8(商务用车)为开发平台,可乘 5 人,总重 2500kg,最高时速 113 公里,0~100 公里/小时的加速时间仅为 13 秒。该车可以实现以下几种工作方式:低速且蓄电池充电不足时,燃料电池向电动机输出功率并向蓄电池充电;中速时,燃料电池只向电动机输出功率;减速制动时,电动机转换为发电机,向蓄电池充电;当蓄电池 SOC 很高时,只是蓄电池向电动输出功率;自动控制只让燃料电池工作。这几种方式基本满足了车辆行驶的各种状态。

国家科技部将燃料电池混合动力汽车的研制和开发列为十五“863”计划电动汽车重大专项的攻关技术之一。同济大学、清华大学等各高校都作为承担单位在进行燃料电池混合动力汽车的整车控制系统的研制与开发。

1.4 论文主要研究内容

研究表明^[25-26,42-43],采用燃料电池并联蓄电池这种电电混合动力方式是降低成本,克服燃料电池汽车不能回收制动能量的有效途径。基于此作为初步探索,本文的主要研究内容如下:

系统地提出燃料电池混合动力汽车的参数匹配方法和原则,通过仿真

对质子交换膜燃料电池汽车和混合动力汽车进行比较，证明电-电混合动力汽车的性能优于纯燃料电池汽车。分析混合动力汽车在成本降低上的优势。

以提高燃油经济性和整车动力性能为目标，分析研究质子交换膜燃料电池电-电混合动力汽车整车策略。针对汽车中多个控制期间的数据传输方式，设计基于 CAN 总线的燃料电池混合动力汽车控制系统结构方案，为建立控制系统的离线仿真模型、控制软件的设计奠定基础。

第二章 质子交换膜燃料电池

燃料电池是一种将氢和氧的化学能通过电极反应直接转换成电能的装置。它的种类很多，分类方式也很多。最常用的分类方法是根据电解质的性质将燃料电池划分为五大类^[1-3]：碱性燃料电池（AFC）、磷酸燃料电池（PAFC）、熔融碳酸盐燃料电池（MCFC）、固体氧化物燃料电池（SOFC）和质子交换膜燃料电池（PEMFC）。

质子交换膜燃料电池的优点如下：

- （1）寿命长
- （2）可用空气作氧化剂
- （3）室温工作
- （4）比功率大
- （5）启动迅速
- （6）输出功率可随意调节

上述优点正是采用质子交换膜燃料电池作为汽车动力源的原因。他的缺点是电极材料稀少、膜电极的制备工艺复杂、电池组成本高。关于质子交换膜燃料电池优越的环境特性见第一章，这里不再赘述。

2.1 质子交换膜燃料电池的发展简史

美国通用电气公司(General Electric Inc. GE)是最早研究质子交换膜燃料电池(PEMFC)的机构，在其开始研究阶段，将它命名为离子交换膜燃料电池(Ion Exchange Membrane Fuel Cells, IEMFC)，后来由于电池采用固体聚合物作电解质(Solid Polymer Electrolyte)，他们获得了专用商标名SPE，因此也被称为SPE、SPEC或PEFC。近年来，众多研究者将其称为PEMFC。

通常都将PEMFC的发展历史追溯到20世纪60年代美国的GE公司为NASA研制的空间电源。虽然PEMFC的性能表现良好，但是当时仍存在着一些问题：如功率密度较低($<50\text{mW}/\text{cm}^2$)，聚苯乙烯磺酸膜在电化学反应

应条件下稳定性较差，寿命仅为 500h 左右，而且 Pt 催化剂用量太高。因此，PEMFC 在空间上的应用一度停顿。此后，GE 公司继续对 PEMFC 进行开发，其中最大的突破发生在 60 年代中期。当时美国杜邦(Dupont)公司研制出新型性能优良的全氟磺酸膜，即 Nafion 系列产品。GE 公司采用内部加湿和增大阴极区反应压力的办法解决了膜在工作过程中干涸的问题。

1984 年加拿大国防部资助加拿大 Ballard Power System 开始研究 PEMFC，其首要任务是解决氧化剂以及极板的问题，即用空气代替纯氧和采用石墨极板。1987 年 Ballard Power System 采用美国 Dow 化学公司研制的新型聚合物膜，开发出性能更高的 PEMFC 系统，其电流密度可达 $4.3\text{A}/\text{cm}^2$ ^[2]。80 年代末，以军事应用为目的的研制与开发，使得 PEMFC 技术取得了长足的进展，以美国、加拿大和德国为首的国家纷纷向燃料电池领域投入巨额开发资金。

90 年代初期，特别是近几年，人们对传统发电技术和汽车造成的环境污染更加重视，PEMFC 的开发逐渐由军用转向民用，如固定电站和电动车。目前，世界上各大汽车公司，如戴姆勒-克莱斯勒、通用、宝马、丰田等都在积极开发以 PEMFC 系统为动力源的 PEMFC 电动车，并曾先后推出各种类型的 PEMFC 电动车样车，有的公司甚至开始进行 PEMFC 电动车队的示范运行。PEMFC 以其优异的性能以及对环境很少的污染等特性被称为是第四代发电技术，更有人认为它将是 21 世纪汽车内燃机最有希望的取代者。

2.2 质子交换膜燃料电池的工作原理、组成

2.2.1 工作原理

与常规电池一样，质子交换膜燃料电池由阳极、阴极和电解质构成。质子交换膜燃料电池以固体电解质膜做电解质。这种膜不是通常意义上的导体，不传导电子，而是是氢离子的优良导体。质子交换膜燃料电池的工作原理如图 2-1 所示（见下页）。氢气和氧气通过双极板上的导气通道分别到达电池的阳极和阴极，反应气体通过电极上的扩散层到达质子交换膜。在膜的阳极一侧，氢气在阳极催化剂的作用下解离为氢离子（质子）

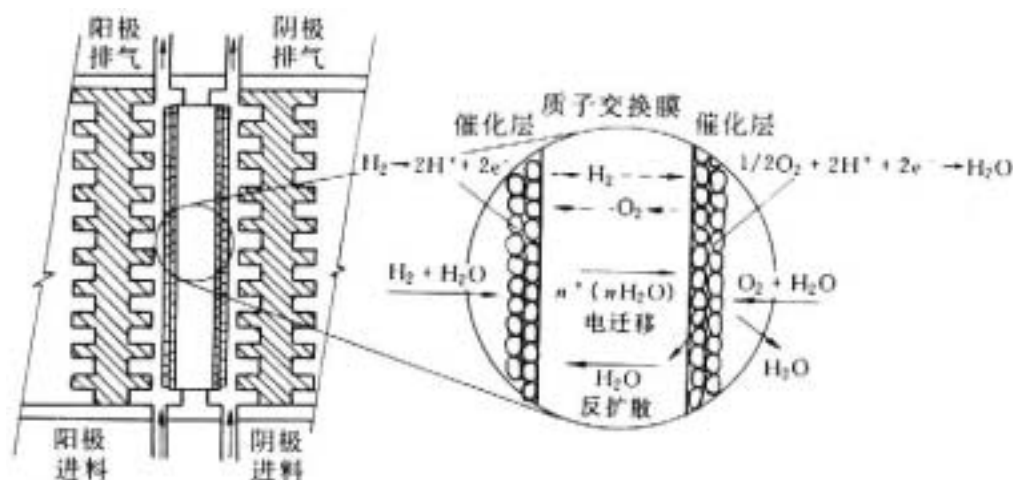


图 2-1 质子交换膜燃料电池工作原理示意图

和电子，氢离子以水合质子 $H^+ (xH_2O)$ 的形式，在质子交换膜中从一个磺酸基 ($-SO_3H$) 转移到另一个磺酸基，最后到达阴极。同时，在阴极催化剂作用下，氧气分子得到电子，并从质子交换膜中得到质子而生成水分子。电极反应如下：



这样在质子交换膜燃料电池的阴极和阳极之间就产生了电动势，对外表现为阴极为正极性，阳极为负极性。

2.2.2 组成

上述单体燃料电池的电动势很低，输出可用电流时一般为 0.7V 左右，因此为得到符合应用要求的高电压需要把若干个单体燃料电池串联。典型的质子交换膜燃料电池的单体（电堆）、电池单体及其膜电极示意图如图 2 - 2 所示（见下页）。质子交换膜燃料电池本体由若干个电池单体通过双极板串联组成，如图中所示，而电池单体主要由膜电极（阴极和阳极）、密封套和带有导气通道的集流板组成，集流板通常由石墨制成，由于两侧均刻有导气通道，因而集流板也称为双极板。膜电极的组成如图中下方所示，中间为质子交换膜，它除了有质子交换功能外，还可以起到隔离燃料

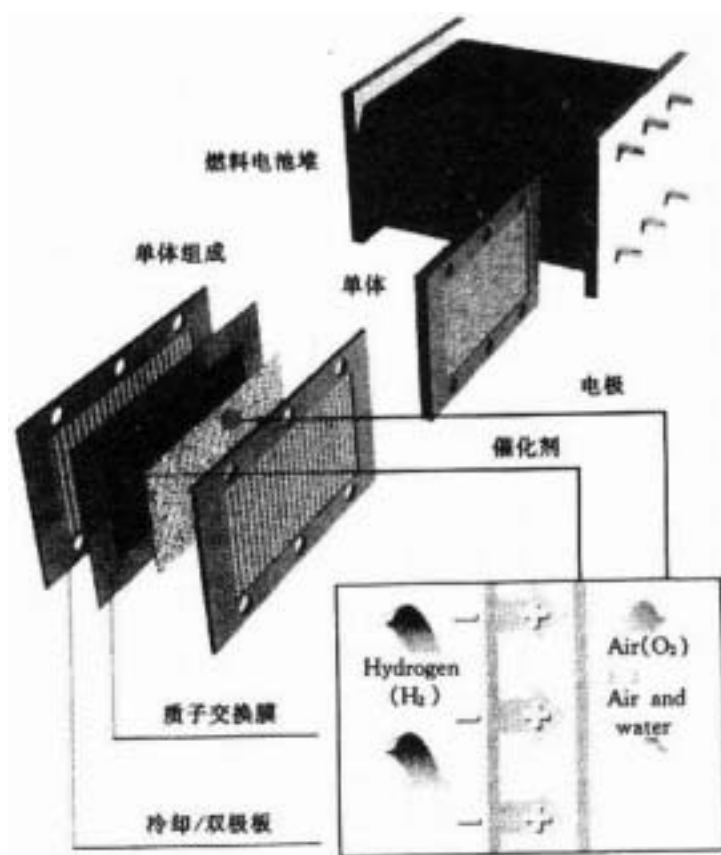


图 2 - 2 质子交换膜燃料电池示意图

气和氧化剂气体的作用；膜两边是气体电极，它由兼作电极导电支撑体和气体扩散层的碳纸和催化剂组成。

2.3 质子交换膜燃料电池的性能及效率

2.3.1 性能及其影响因素

燃料电池的性能通常采用单位面积电流的大小来衡量，即电流密度，单位为 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。对于包括外围设备的燃料电池系统，其性能参数常为根据额定功率、质量和体积导出的功率密度 ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-3}$) 和比功率 ($\text{kW}\cdot\text{kg}$)，但有时直接采用功率和电流的大小来描述。

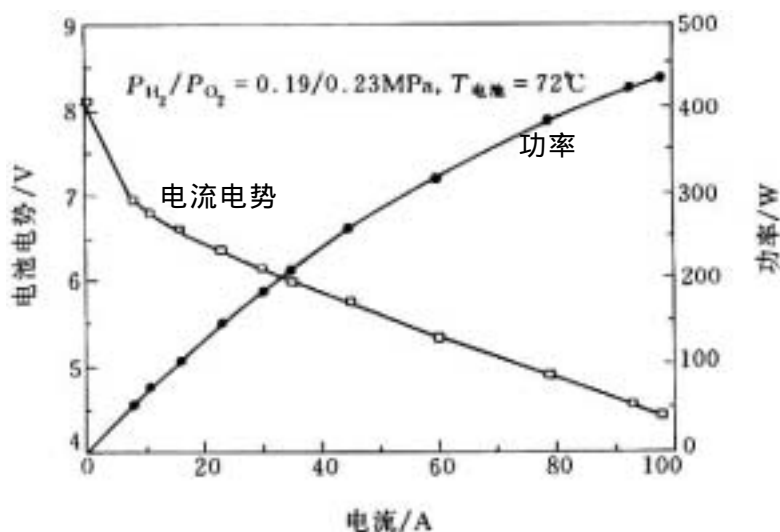


图 2-3 质子交换膜燃料电池组的工作性能曲线

质子交换膜燃料电池组的工作性能曲线如图 2 - 3 所示。

对于特定的燃料电池，即电极及电解质材料一定时，影响燃料电池工作性能的因素有很多，如温度、压力、杂质以及反应气体的组成及利用率等。

2.3.1.1 温度的影响

温度对质子交换膜燃料电池的性能有显著的影响，如图 2 - 4 所示(见下页)。从图中可看到，随着温度的升高，电压-电流密度曲线图上线性区的斜率(绝对值)是降低的，这主要是因为温度升高，电解质的欧姆电阻降低，使电池内部电阻降低。温度升高，燃料的功率密度增大，传质速度也增大。实验数据统计结果显示，温度每升高 1℃，电压增加 1.1~2.5mV。另外，工作温度升高，降低了 CO 的化学吸附，因为吸附反应的放热反应。但质子交换膜燃料电池的工作温度受到质子交换膜中水的蒸汽压限制，温度过高，膜脱水将导致离子电导率降低。

质子交换膜燃料电池的温度特性是由其膜决定的。由于目前多数质子交换膜燃料电池均采用 Nafion 系列，而这种电解质在超过 80℃ 时，其热稳定性和质子传导性能将会严重下降，因而质子交换膜燃料电池的最佳工作温度为 80℃ 左右。Dow 化学公司开发的新型离子膜允许质子交换膜燃

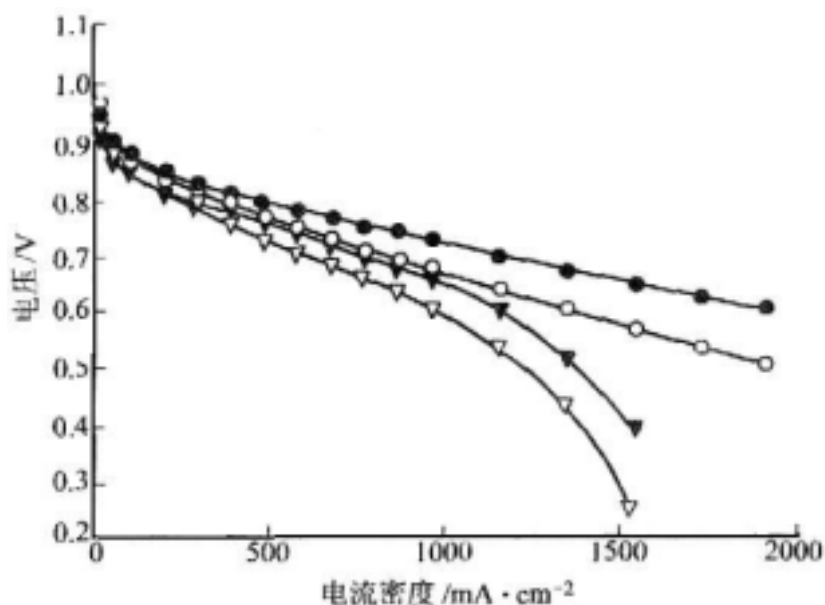


图 2-4 燃料电池工作温度对其性能的影响

条件：电极 Pt 载量 $0.45\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ；Dow 膜；工作压力：0.5Mpa

- 95 °C，氧气； - 50 °C，氧气； - 95 °C，空气； - 50 °C，空气

料电池的工作温度提高 10~20 °C [1-2]。

2.3.1.2 压力影响

目前，质子交换膜燃料电池的工作压力范围可以从常压到 0.8Mpa(8atm)。通常来说，在质子交换膜两侧的反应气体的压力要保持相等，以减小气体扩散程度，进而避免造成电池电压的下降或氢氧混合物的爆炸。不同的应用环境，质子交换膜燃料电池的氧化剂类型也不同。如在陆地应用时，一般使用空气，在太空或水下应用时，则使用纯氧。图 2-5（见下页）显示了工作压力和氧化剂类型对质子交换膜燃料电池性能的影响。可分析出，压力下降电池功率密度下降。该图还显示，空气电池与纯氧电池相比较，电压-电流密度曲线有两个显著差别：

（1）电压-电流曲线斜率明显高于空气系统。

（2）在较低电流密度时，偏离直线。

这说明氧气分压对传质速率有很大影响。一般认为，空气中的 N_2 阻

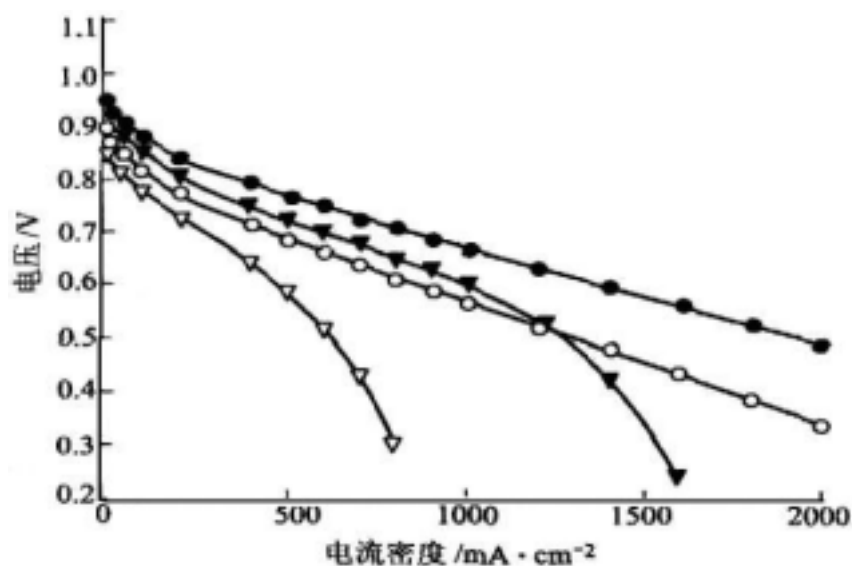


图 2 - 5 压力对质子交换膜燃料电池性能的影响

条件：电极 Pt 载量 $0.45\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ；Dow 膜；50

- 0.5MPa，氧气； - 0.1MPa，氧气

- 0.5MPa，空气； - 0.1MPa，空气

碍 O_2 的传质。

增加压力提高电池性能，还应考虑压缩系统的成本和能耗，综合性能、成本和体积等各种因素。

2.3.1.3 燃料中一氧化碳的影响

CO 是质子交换膜燃料电池催化剂的严重毒化剂，即使只有几个 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的含量，也对电池性能有很大影响。特别是在高电流密度时，如图 2 - 6 所示（见下页）。解决此问题的办法就是采用选择氧化的办法将 CO 氧化成 CO_2 。此外，增加反应温度和压力可减轻 CO 的影响。

2.3.1.4 反应气体组成及利用率的影响

利用率及气体组成对燃料电池的效率有很大的影响。反应气体的利用率是指发生电化学反应的燃料或氧化剂所占进入燃料电池的燃料或氧化剂的百分比。燃料和氧化物气体的浓度越高燃料电池电压越高，燃料和氧化物的利用率越高燃料电池的电压越低。因此用空气代替纯氧会降低质子

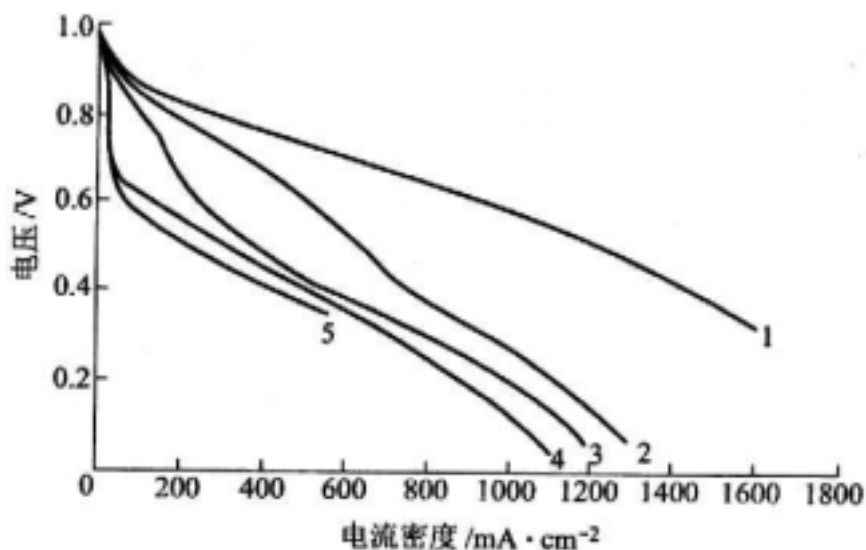


图 2 - 6 CO 对质子交换膜燃料电池性能的影响

条件：电极 Pt 载量 $0.45\text{mg}\cdot\text{cm}^2$ ；Nafion117 膜；89℃，
 氢气压力 0.2 MPa；氧气压力 0.2 Mpa
 氢气中 CO 质量浓度 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)：1 - 1；2 - 10；
 3 - 100；4 - 100；5 - 10000

交换膜燃料电池的性能；反应过程中要提供过量的空气和氢气以降低利用率提高电池的性能。

质子交换膜燃料电池还有其它一些特性，如质子交换膜燃料电池的环境特性，模块特性，启动特性、燃料多样性、安全可靠性等。

2.3.2 效率

一般来讲，能量转换装置的效率是指装置输出的能量与输入能量的百分比，即

$$\beta = \text{输出能量} / \text{输入能量} \quad (2-3)$$

除电化学能量转换装置以外，其它能量转换装置大都是将化学反应能转换为机械能或热能，然后再转换成电能。在这样的过程中，效率是受一定限制的。如热机受卡诺循环效率的限制。而燃料电池由于工作过程中不涉及氢氧的燃烧，仅仅是氢和氧通过电化学反应生成水，因而不受卡诺循

环的限制，其能量转换效率要比其它能量转换装置的效率高。质子交换膜燃料电池系统的效率如图 2 - 7 所示。

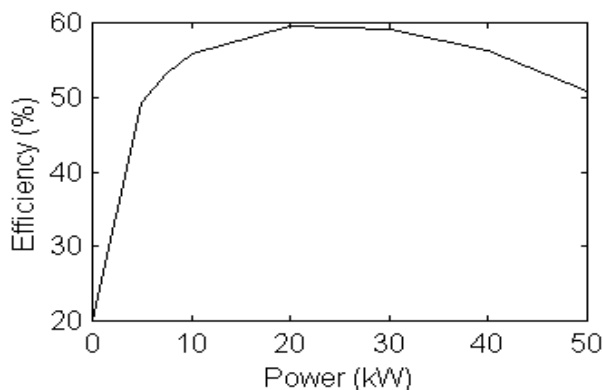


图 2-7 燃料电池系统的效率图

燃料电池的效率表达方式非常复杂，各种资料的介绍也不严格一致，以下介绍的是几种常用的效率表达方法。

(1) 热力学效率

当电化学能量转换装置处于理想工作状态时，反应的吉布斯自由能变化全部转化为电能。因而燃料电池的热力学效率为

$$\eta_{th} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H} \quad (2-4)$$

(2) 电化学效率

电化学电池只有在最佳状态（理想、可逆）时，才能输出 G 。对于不同的电池设计，即使是相同的电化学反应，相同的反应焓变，也会有不同的电化学效率。

电化学效率 η_{el} 也称为电压效率，其定义为

$$\eta_{el} = \frac{-nFE_k}{\Delta G} = \frac{E_k}{E_0} \quad (2-5)$$

式中 E_k —燃料电池的工作电压，V；

E_0 —燃料电池的可逆电压，V。

(3) 电流效率 η_F 也称法拉第效率，它的定义为

$$\eta_F = \frac{I}{I_m} \quad (2-6)$$

式中， I —燃料电池的实际电流；

I_m —以反应物反应消耗的量计算的理论期望电流。

通常，燃料电池的电流效率低于 1。

(4) 总效率

对于完整的燃料电池系统来说，它包括燃料和氧化气体的输送、加热、冷却电极所需能量，电解质管路、电池的组装、电池的设计等诸多要素，这部分效率综合起来称为系统效率 η_s 。

燃料电池总效率 η_t 可看作是热力学效率、电压效率、电流效率及系统效率综合作用的结果。因而，总效率 η_t 为

$$\eta_t = \eta_{th} \eta_{el} \eta_F \eta_s \quad (2-7)$$

燃料电池系统与传统的发动机一个不同的特点是最高效率点不在高功率水平，而是处于中低功率水平，如图 2-7 所示。

2.4 质子交换膜燃料电池的燃料

质子交换膜燃料电池的燃料基本有三种：氢，甲醇和汽油。

2.4.1 氢

纯氢是质子交换膜燃料电池最理想的燃料。当用氢作为燃料时，因其不需要燃料处理系统而效率最高。各国均已试验了以高压氢、贮氢材料贮氢和液氢为燃料的样车，已使电动车实现了真正的“零”排放。

目前，氢气生产的主要原料有天然气、液化石油气、汽油、柴油、煤、生物质及醇类。生产方法有蒸汽重整、不完全氧化、气化法、热裂解和催化裂解等。世界氢气总产量的 3/4 来自天然气蒸汽重整。

氢的储存一直是一个技术难题。储氢的重量能量存储密度与体积能量存储密度和成本与技术水平存在着一定的矛盾。对于纯氢，最常见的储存方式有三种，即气态储氢、液态储氢和固态储氢。

气态氢的储存多采用高压钢瓶，储存压力为 15Mpa 左右，而且需要制备特殊的高压钢瓶，其有效储氢密度仅为 1wt.% 左右，这大大降低了整个质子交换膜燃料电池系统的能量密度。为了提高其储氢密度，国外研制

出多种重量轻、耐高压的复合材料气罐，如玻璃纤维增强铝金属罐、碳纤维增强铝金属罐等，其储氢压力达 30Mpa，储氢密度可达 3 wt.%，甚至更高。但用此种方法储存氢存在以下两个缺点：一是储氢压力太大，安全性差；二是要得到如此高压的氢气，需要消耗一部分能源，降低了整个系统的效率。尽管气态储氢存在局限性，然而考虑到其实现性，德国奔驰公司于 1996 年开发出的 NECAR 型质子交换膜燃料电池电动车就采用了由碳纤维增强的塑料罐提供氢源，1997 年开发的质子交换膜燃料电池驱动的 NEBUS 大型客车仍采用高压气罐储氢，气罐由玻璃纤维增强的 Al 材料制成，其储氢压力可达 30Mpa。几乎目前所有在运行的燃料电池试验车都以气态氢作为燃料。

液态方式储氢与气态方式相比，其储运效率高且重量能量存储密度和体积能量存储密度相对较大。但其要求高纯氢，液化时耗能大，且充氢系统复杂。由于其高能量密度，美国 H Power 公司曾于 1996 年推出以液氢为燃料的质子交换膜燃料电池驱动的大巴，另外，德国奔驰公司于 1999 年 3 月也在美国展示了以液氢为燃料的质子交换膜燃料电池驱动的第四代电动车 NECAR4。

固态储氢是利用金属氢化物储氢，其储氢机理为：某些金属或合金在一定条件下可与氢气发生反应，生成金属氢化物，生成的金属氢化物在适当的温度和压力条件下，又能将所吸收的氢气释放出来。用金属氢化物储氢具有体积密度大，安全性好，运输方便的优势，另外，操作也比较容易，特别适合于对体积要求较严格的场合。目前，世界上仅日本丰田公司于 1996 年开发出世界上第一套质子交换膜燃料电池电动车用金属氢化物储氢装置。尽管各国最近在金属氢化物储氢的应用开发上取得了重大的进展，但目前仍存在着储氢量低，放氢温度高，成本高等问题。

从输送与储存经济性及安全性总体考虑，传统的氢储运方式并不能满足人们的需要。因而，世界各国一直在致力于寻找出新的储氢方式，最近研究人员在碳纳米材料和玻璃球储氢技术上取得了一些突破。碳纳米管是一种具有很大表面积的材料。材料尺寸非常细小，通常为 $1 \sim 100 \mu\text{m}$ ，因而具有非常大的表面积；同时碳纳米管中含有许多尺寸均一的微孔。这样当氢到达材料表面时，一方面被吸附在材料表面；一方面在毛细力的作用下，氢被压缩到微孔中，这种毛细力可使氢由气态变为固态，因此能储存相当多的氢。目前结果表明，在 82K 和 0.77Mpa 的氢压下，储氢量可达

8.4wt.%，研究人员正致力改善这种材料在室温附近的储氢性能。另外还有碳凝胶、玻璃微球和碳晶须等先进的储氢技术。

2.4.2 甲醇和汽油

由于纯氢的储存、输送有一定的危险性，而且要建立氢供给设施的投资也十分巨大。因此研究人员提出以液态的碳氢化合物为燃料，经过重整得到氢气或直接将其导入质子交换膜燃料电池，这些碳氢化合物包括甲醇、汽油等。

甲醇作为最简单的碳氢化合物，重整过程相对简单，重整气体中所含杂质含量较少，作为液态燃料可利用现在的汽车燃料设施进行储运，现已成为人们开发的重点。

汽油有以下优点：广泛现存的基础设施、最高的能量存储密度和最低的单位能量的价格。然而，从燃料转换器的角度来看，它却存在着巨大的挑战，因为它需要高温燃料处理，且要有大量的 CO 的净化工作，这将会导致起动和瞬态延迟，使效率损失很大。

为取消燃料重整器，降低燃料电池的尺寸和造价，近年来又新开发一种燃料电池——直接甲醇燃料电池（DMFC）。直接甲醇燃料电池是以甲醇为燃料的质子交换膜燃料电池。它的突出优点是甲醇来源丰富，价格便宜，其水溶液易于携带和储存。因此，直接甲醇燃料电池特别适宜于作为车载动力电源。目前直接甲醇燃料电池的主要技术难关，也是其研究热点，是如何提高阳极催化剂的催化性能。

质子交换膜燃料电池系统的研究与开发已经取得了一定的成果，但一些以前就存在的问题还没有解决，这些“模糊”问题变成了目前甚至是以后的焦点：电极、空气管理系统、当不以纯氢为燃料时车载重整器以及系统集成等关键技术。电极的核心技术主要集中在以下几个方面：提高 CO 中毒的能力，降低贵金属的载量，改善工艺性。

2.5 小结

本章简单介绍了质子交换膜燃料电池的发展简史，主要阐述了其组成、工作原理、性能影响因素和效率。并比较了质子交换膜燃料电池的几

种燃料和纯氢存储方式。最后提出了质子交换膜燃料电池系统的关键技术。

第三章 燃料电池混合动力汽车参数匹配与性能仿真

混合动力总成的匹配是燃料电池混合动力汽车的关键,它决定整车性能和电-电混合动力优越性的发挥。本章选择红旗轿车为基本车型,以 Advisor 仿真软件为平台,对于燃料电池汽车和燃料电池混合动力汽车两种车型进行了参数匹配和性能仿真。本章的目的旨在研究,与燃料电池相比,燃料电池混合动力汽车在提高性能、降低成本方面所具有的优势。

3.1 车型及基本参数

本文仿真分析选用的车型是 CA7220 红旗轿车,它是 4×2 前轮驱动的中高级轿车,仿真涉及到的相关参数及性能如表 3-1 所示^[59]。

表 3-1 : CA7220 红旗轿车的相关参数和性能

空气阻力系数 CD	0.3	前轴载荷	0.62
迎风面积 A (m^2)	2	轴距 (m)	2.687
轮胎半径 R (m)	0.314	整车整备质量 (kg)	1300
滚动阻力系数(f)	0.009	迎风面积 (m^2)	2
发动机最大功率 (kW)	67	附件载荷 (W)	700
0~100km/h 加速时间 (s)	<15.5	最高车速 (km/h)	169
90km/h 的等速油耗(L/100km)	8.1	城市油耗(L/100km)	13
90km/h 的等速油耗(L/100km)	9.9	主减速比	4.111

3.2 仿真软件及模型

3.2.1 仿真软件

采用的仿真软件是 Advisor, 该软件在国内业已为大家所熟悉, 在许

多文献资料中均有介绍^[49,53-54]，这里不再详述。

3.2.2 仿真模型

仿真模型采用的是 Advisor 中带有蓄电池的燃料电池汽车和不带蓄电池的燃料电池汽车两种模型，其结构图如 3-1、图 3-2 所示。这两种仿真

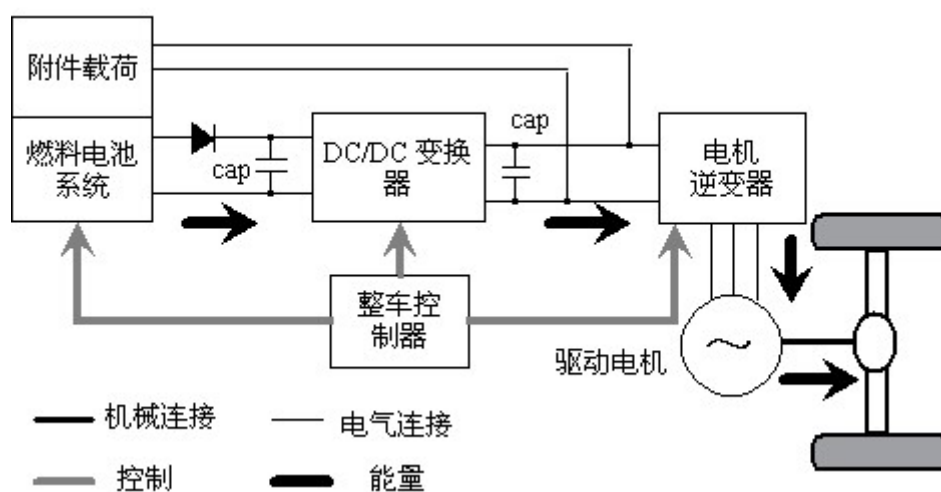


图 3-1 纯 PEM 燃料电池汽车

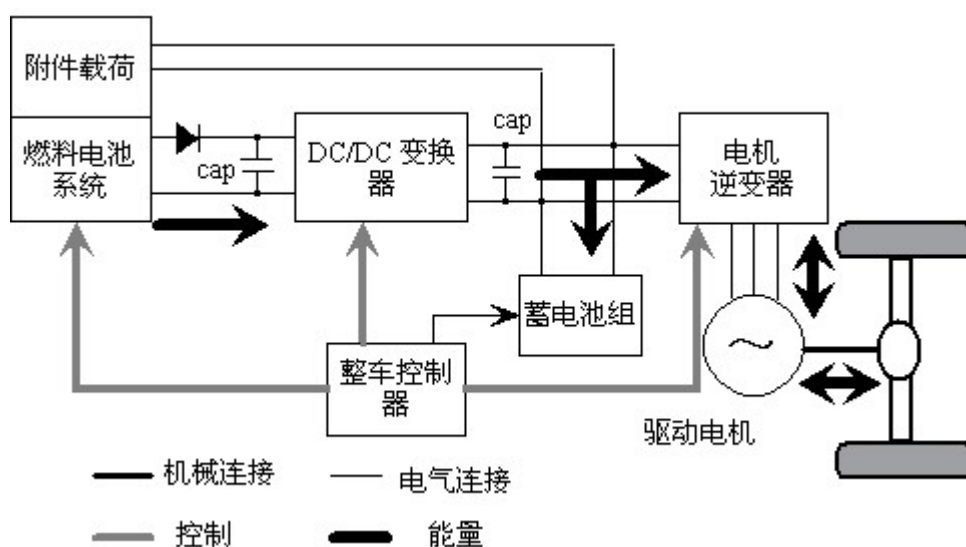


图 3-2 PEM 燃料电池混合动力汽车

模型均为前轮驱动，这与内燃机红旗轿车保持一致。本文只分析燃料电池系统的模型，燃料电池汽车及燃料电池混合动力汽车整车模型中的其它子系统模型与串联混合动力汽车相同，见其它文献^[54]。

燃料电池模型

在仿真模型中，燃料电池模块根据来自其他子模块的功率要求，按所选择的模式计算能够输出的功率，并且计算燃料电池的燃料消耗和排放，如图 3-3。

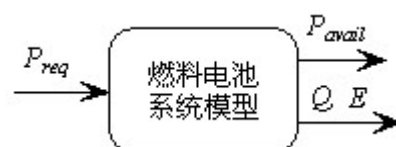


图 3-3 燃料电池系统模块

仿真模型中燃料电池系统模块有三种模式，仿真时用户根据变量 *fc_fuel_cell_model* 选择。这三种模式分

别是功率与效率模式，极化曲线模式和 GCTool 外部模式。功率与效率模式只需要用户提供燃料电池系统功率输出与燃料消耗及排放之间的关系数据。极化曲线模式要求有关燃料电池系统更详细的数据信息，包括电压-电流特性、燃料电池系统附件的功率需求特性等。GCTool 要求用户有 GCTool 工具，它是由美国阿尔贡实验室为燃料电池开发的计算机软件^[26]。本次仿真的目的不是研究燃料电池的工作特性，故采用的比较简单的功率与效率模式。燃料电池系统模型如图 3-4 所示。

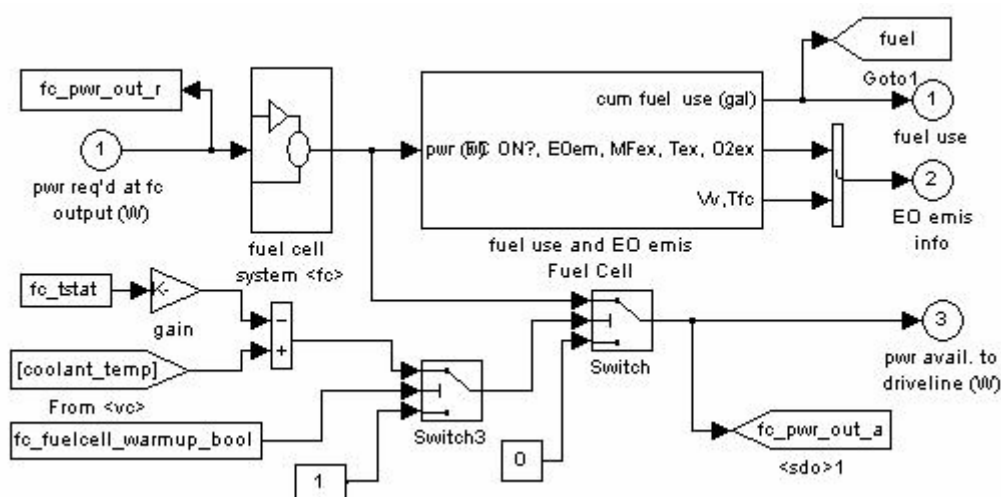


图 3-4 燃料电池系统模型

图 3-4 中的 fuel cell system<fc>子系统
如图 3-5 所示。

仿真过程中它的计算方法如下：

(1) 燃料电池能够输出的功率

$$P_{avail} = \min(P_r, P_{max}) \quad (3-1)$$

式中， P_r —需要燃料电池输出的功率；

P_{max} —燃料电池的最大功率；

(2) 燃料消耗：

$$Q = \sum (Q_{step} \times T_{crr}) \quad (3-2)$$

其中

$$T_{crr} = 1 + \left(\frac{95 - T_{clt}}{75} \right)^{3.1} \quad (3-3)$$

$$T_{clt} = T_{clt-p} + \frac{\Delta T}{\Delta t} \cdot t_{step} \quad (3-4)$$

当燃料电池处于工作状态时，

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = -1.1 \times \frac{\log(1 - \frac{40}{75})}{218} \times (95 - T_{clt-p}) \quad (3-5)$$

燃料电池关闭时，

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = 0.45 \times (-8.22 \times 10^{-5} \times v + 8.09 \times 10^{-6} \times 4 - 1.45 \times 10^{-4}) \times (T_{clt-p} - T_{amb}) \quad (3-6)$$

式中， Q_{step} —每一时间步燃料消耗；

T_{crr} —温度修正系数；

T_{clt} ， T_{clt-p} ， T_{amb} —冷却介质温度，上一时间步的 T_{clt} ，环境温度；

T ， t ， t_{step} —温度变化，时间变化，时间步

由于燃料电池直接以氢气为燃料，所以排放均为零。

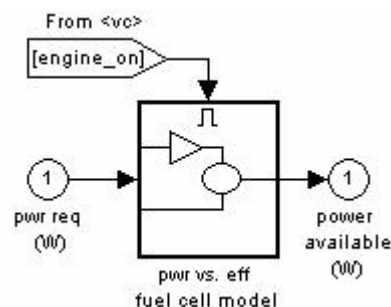


图 3-5 燃料电池模型

3.3 循环工况的选择

仿真过程中循环工况的选择对燃油经济性的比较有一定的影响。所以本文选用了四种不同的标准循环工况：CYC_UDDS、CYC_US06、C65 和 HWFET，如图 3-6 所示，它们的部分特性参数如表 3-2 所示。

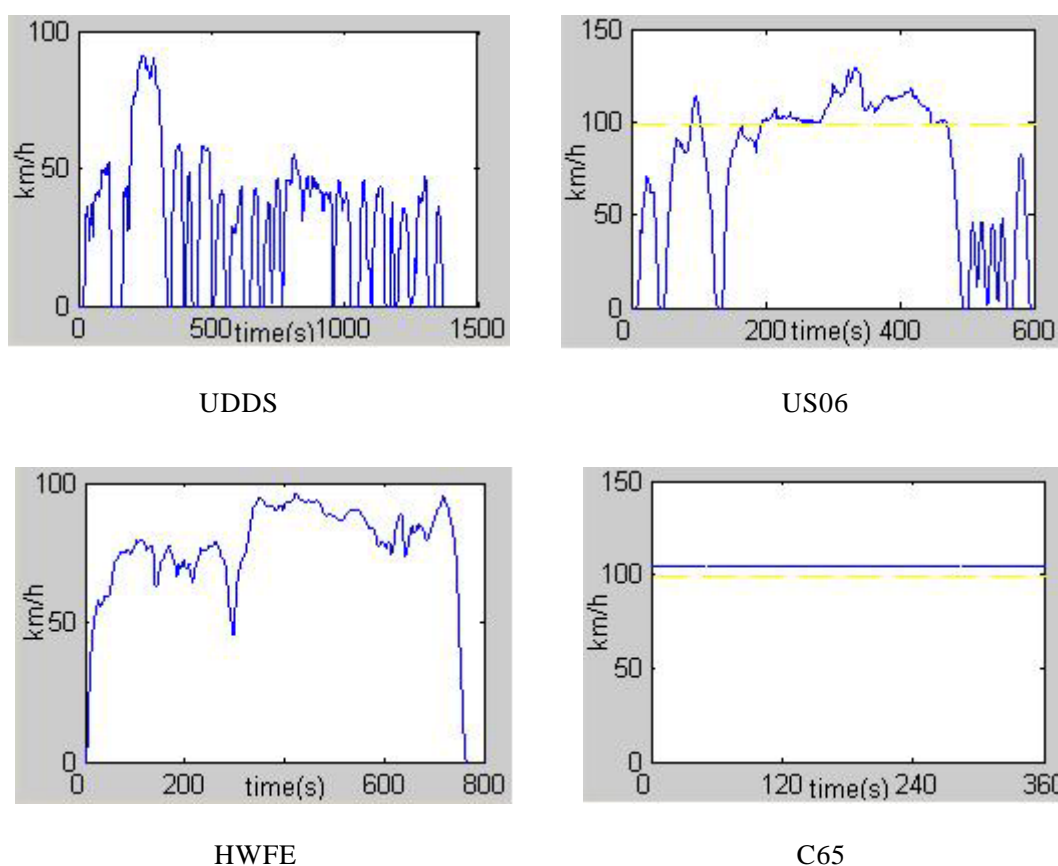


图 3-6 四种不同的标准循环工况

CYC_UDDS 代表城市动态驱动工况，它是联合测试工况（FTP-75）中的第一部分，它也被称作 FUDS，LA4，FTP72，EPA，或城市测试，代表城市驱动工况，它常用于轻型车辆测试。

HWFET 代表高速燃油经济性的测试驱动循环工况，美国环保署将它用于客车的总的平均燃油经济性的检测。

US06 也是美国环保署颁布的测试规程，它有更高的车速和更大的加速度，更能真实的代表当今的车辆行驶工况，所以虽然该工况多用于尾气

表 3-2：四种标准循环工况的特性参数

	UDDS	US06	HWFET	C65
平均车速 (km/h)	31.51	77.2	77.58	104.61
最高车速 (km/h)	91.25	129.23	96.4	104.61
最大加速度 (m/s^2)	1.48	3.76	1.43	0
最大减速度 (m/s^2)	-1.48	-3.08	-1.48	0
平均加速度 (m/s^2)	0.5	0.67	0.19	0
平均减速度 (m/s^2)	-0.58	-0.73	-0.22	0
时间 (s)	1369	600	765	360
距离 (km)	11.99	12.89	16.51	10.46
怠速时间 (s)	259	45	6	0
停车次数	17	5	1	0
坡度 (%)	0	0	0	0

排放的测试，但也常被用于分析评价新开发车型的燃油经济性。

C65 是水平路面上的恒高速工况，该工况中没有减速制动，可用来分析再生制动对燃油经济性的影响。

3.4 动力总成参数确定

质子交换膜燃料电池混合动力汽车动力总成设计要完成的任务包括元件的选型和参数匹配两部分。

3.4.1 电机

电机是燃料电池混合动力汽车行驶的唯一驱动力来源，其参数的选择要依照车辆具体的加速性能和爬坡性能以及最高行驶车速要求而定，包括功率、额定转速和最高转速等。

1. 电机选型

适合于燃料电池汽车的电机有直流电机、交流感应电机、开关磁阻电机以及永磁无刷动机等，但受控制技术水平和不同类型电机本身结构的特点的限制，目前在国内的混合动力汽车大多采用交流感应电机^[9,67-69]。

本文选用交流感应电机。

2. 电机的转速

高速电机适用于燃料电池轿车，因为电机良好的控制特性能够满足轿车的行驶特性要求。图 3-7 是根据车辆传动系统的要求通过控制实现的电机转矩、转速特性：基速以下恒扭矩，基速以上恒功率。高速电机经过控制后的特性与轿车行驶时的高的车速范围、较低的扭矩要求相一致。对于转速范围是 0~8500r/min 的电机，其控制特性能够满足轿车的起动转矩、

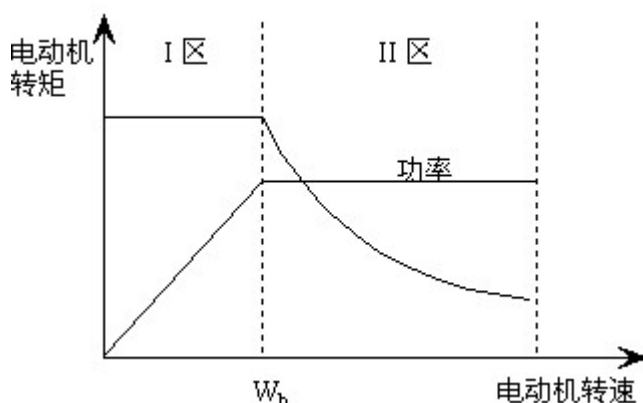


图 3-7 电机转矩转速特性

行驶过程中车速变化的要求，因此所选的变速箱模型是一对具有固定速比的常啮合齿轮。

3. 电机功率

电机的功率参数包括额定功率和峰值功率。额定功率又称为连续功率。

参考汽车选择发动机的方法，电机的额定功率应大体等于但不小于最高车速行驶时行驶阻力之和，即

$$P_m = \frac{1}{\eta_T} \times \left(\frac{Gf}{3600} \times u_{a \max} + \frac{C_D A}{76140} \times u_{a \max}^3 \right) \quad (3-7)$$

式中， η_T —传动系统机械效率；

$u_{a \max}$ —汽车最高车速，km/h；

对于单级减速主减速器机械效率通常取 96%，单级变速箱的机械效率取为 97%^[62]，将相应参数代入上式计算

$$P_m = \frac{1}{0.96 \times 0.97} \times \left(\frac{1300 \times 9.8 \times 0.009}{3600} \times 169 + \frac{0.3 \times 2}{76140} \times 169^3 \right)$$

$$P_m = 46.62 \text{ kW}$$

将车速提高到 180km/h 时，所需要的功率为

$$P_m = \frac{1}{0.96 \times 0.97} \times \left(\frac{1300 \times 9.8 \times 0.009}{3600} \times 180 + \frac{0.3 \times 2}{76140} \times 180^3 \right)$$

$$P_m = 55.57 \text{ kW}$$

初步将电机的功率取为 56kW。

根据汽车的最高车速及电机的最高转速可确定减速比，汽车行驶的最高车速 V_{\max} 为

$$V_{\max} = 0.377 \cdot \frac{r \cdot n_{\max}}{i_g \cdot i_0} \quad (3-8)$$

式中： r — 车轮半径

n_{\max} — 电机最高转速

i_g, i_0 — 变速箱速比，主减速比

将红旗轿车的主减速比 i_0 ，车轮半径 r ，电机的最高转速 n_{\max} 代入式 3-7 中计算

$$180 = 0.377 \cdot \frac{r \cdot n_{\max}}{i_g \cdot i_0} = 0.377 \times \frac{0.314 \times 8500}{i_g \times 4.111}$$

$$i_g = 1.360$$

电机的功率还要满足车辆的动力性能要求，即加速时间 t 、爬坡度 α 。

$$t = \frac{1}{3.6} \cdot \int_0^v \frac{\delta \cdot m}{F_t - F_w - F_f} dv \quad (3-9)$$

式中： F_t — 车辆行驶驱动力/N；

F_w — 车辆行驶空气阻力/N；

F_f — 车辆行驶滚动阻力/N；

— 旋转质量换算系数，对燃料电池混合动力汽车其计算式为：

$$\delta = 1 + \frac{I_w + I_m \cdot i_g^2 \cdot i_0^2}{m \cdot r^2} \quad (3-10)$$

式中： I_w —车轮总转动惯量， $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ；

I_m —与电动机输出轴相连的所有电动机转动部件转动惯量之和；

m —整车质量

将相应的数据代入（电机取额定值），应用计算机计算得 0~100km/s 的加速时间为 13.2s。

$$\alpha = \arcsin \frac{F_t - (F_f - F_w)}{m \cdot g} \quad (3-11)$$

根据此公式计算，最大爬坡度约为 32%。

上述计算结果表明，选择额定功率为 56kW 的电机能够提高原车的动力性。

电机的峰值功率只代表当电机的转速高于基速时的过载能力，一般为额定功率的 2 倍。电机以峰值功率连续运转的时间不能超过 30~60s，因此车辆实际行驶过程中要求电机的过载时间不能长于该值。

燃料电池混合动力汽车所选择的电机参数见表 3-3。

表 3-3 燃料电池混合动力汽车的电机参数

类型	三相交流异步感应电机	控制特性	矢量控制，基速以下恒扭矩，基速以上恒功率
峰值扭矩	432Nm		
峰值功率	112kw	额定电压	320V
额定功率	56kw	基速/最高转速	2550rpm/8500rpm
额定扭矩	240Nm	最高效率	92%

在燃料电池混合动力汽车中，电机的作用除了将燃料电池或蓄电池组（混合驱动时）提供的电能转换为用于驱动车轮的机械能，还要作为发电机将制动或减速时的能量回收，存储在蓄电池。

纯燃料电池汽车的电机选型和参数设计与混合动力汽车相同，参数见表 3-3。

3.4.2 燃料电池

纯燃料电池汽车中的燃料电池系统必须向驱动系统提供足够高的功率，以确保整车性能不受功率源的限制。燃料电池系统的功率的 P_f 为

$$P_f \eta_{dc} = \frac{P_m}{\eta_{逆}} + P_{附} \quad (3-12)$$

式中, P_m —电机的功率, kW;

η_{dc} , $\eta_{逆}$ —DC/DC 变换器效率, 电机及逆变器效率;

$P_{附}$ —附属设备功率

本文电机及逆变器最大功率对应的效率为 92%, 汽车的附属设备设为 2kW, DC/DC 变换器效率取 90%^[1], 代入式(3-11)

$$P_f = (\frac{56}{0.92} + 2) / 0.9 = 69.8kW$$

因此, 选择纯燃料电池汽车的燃料电池系统的功率为 70 kW。

燃料电池系统模型的效率为整个燃料电池系统的净效率, 即已经将燃料电池系统的辅助设备如空气压缩机的功率消耗等计算在内。与内燃机效率不同, 质子交换膜燃料电池系统的峰值效率不是出现在高功率水平, 而是处于中低功率水平, 而且在整个范围内除了功率水平低于 10~15% 外效率曲线比较平坦。

图 3-9 是纯燃料电池汽车仿真模型中燃料电池系统的效率曲线。所选的质子交换膜燃料电池系统的参数见表 3-4。

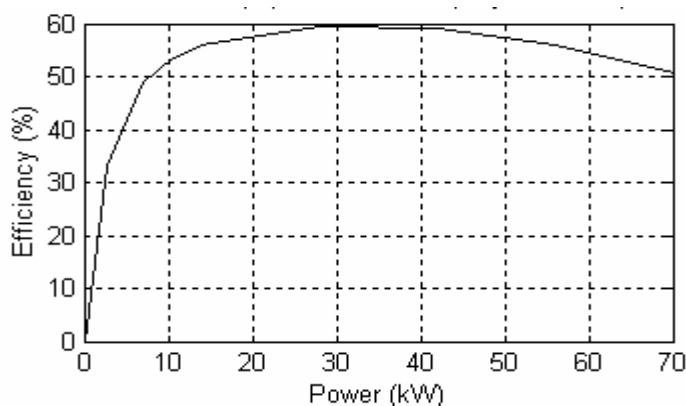


图 3-9 纯燃料电池汽车燃料电池系统的效率曲线

表 3-4 纯燃料电池汽车燃料电池系统参数

类型	PEM 燃料电池	最大功率 (kW)	70	工作温度()	80 ± 5
燃料	氢	峰值效率	60%	总质量 (kg)	283

燃料电池混合动力汽车中，由燃料电池系统 P_{fc} 和蓄电池组 (P_B) 共同向驱动系统提供功率，即

$$P_{fc} + P_B = P_m \quad (3-13)$$

通过燃料电池汽车中燃料电池系统功率选择可知，混合动力系统的功率不应小于 70kW。

在完成上式中的参数匹配时，应尽量减少质子交换膜燃料电池的功率，以降低成本（见下文），基于此，本文认为燃料电池混合动力汽车的燃料电池系统功率的确定要依据下面的原则。

燃料电池系统功率能够使蓄电池组的 SOC 值在整个循环工况仿真前后基本上不变，从而确保燃料电池系统是整个行驶过程中功率消耗的唯一来源。选择四种标准循环工况中平均功率水平最高的工况 US06 初步确定燃料电池的功率，通过多次仿真计算，满足这一要求的燃料电池的最小功率为 40kW，整个仿真过程中蓄电池组 SOC 值变化为-0.014，如图 3-10 所示。UDDS 工况中 SOC 值的变化为-0.012，见图 3-11。

此外，还要保证燃料电池系统单独驱动充电维持状态时一定车速下的

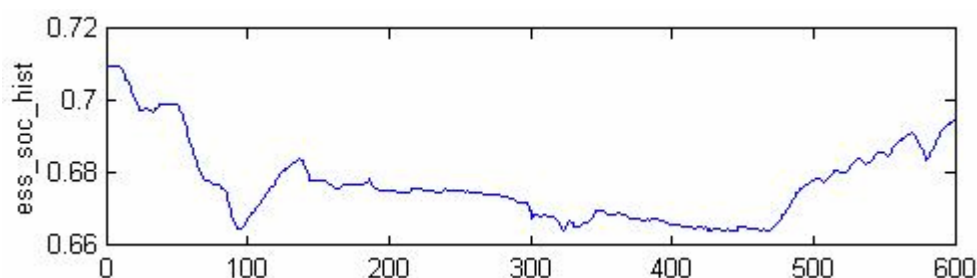


图 3-9 循环工况 US06 中 SOC 值的变化历程

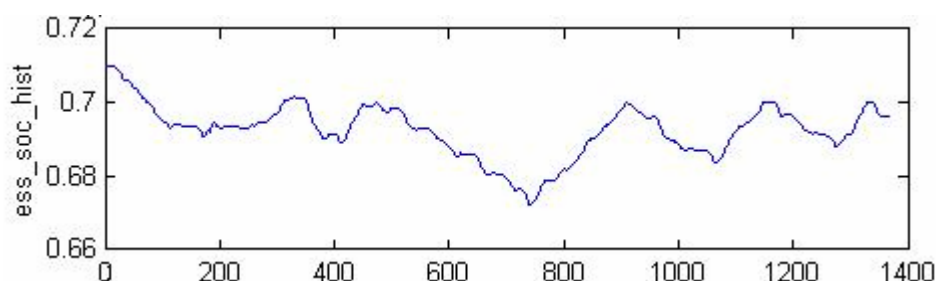


图 3-10 循环工况 UDDS 中 SOC 值的变化历程

爬坡能力。经过仿真计算，取燃料电池的功率为 40kW，当车速为 88km/h 时，燃料电池单独驱动的爬坡度为 7%；车速为 48km/h 的爬坡度为 28%。

因此，燃料电池混合动力汽车仿真模型中燃料电池系统的功率选择为 40kW，剩余的功率则由蓄电池组提供。仿真使用的混合动力汽车燃料电池系统的效率曲线如图 3-11 所示，参数见表 3-5。

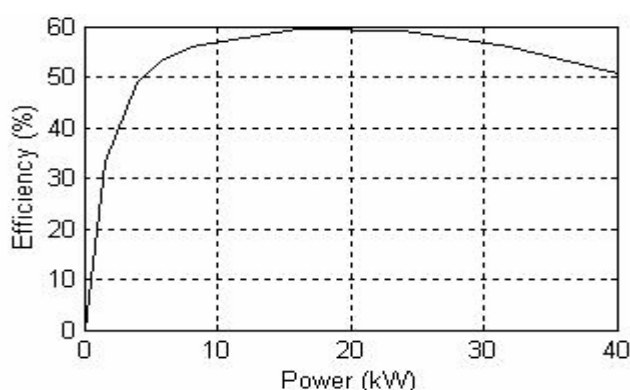


图 3-11 燃料电池混合动力汽车燃料电池系统的效率曲线

表 3-5 纯燃料电池汽车燃料电池系统参数

类型	PEM 燃料电池	最大功率 (kW)	40	工作温度()	80 ± 5
燃料	氢	峰值效率	60%	总质量 (kg)	193

3.4.3 蓄电池

混合动力汽车上的蓄电池的使用状况不同于电动汽车，在工作中蓄电池处于非周期性的充放电循环中，要求它的充放电速率和效率高。因此，混合动力电动汽车用蓄电池以高功率密度（W/kg）为主。

1. 蓄电池的选型

目前已研究开发的蓄电池有十几种，但目前应用于电动车的只有铅酸电池、镍氢电池与锂离子电池。

铅酸电池技术较为成熟，具有可靠性高、价格低的特点，但比能量和比功率较低、电池的均匀性较差，而且铅酸电池性能提高的潜力有限。

镍氢电池相比铅酸电池其优点是：比能量高（一次充电可行驶的距离长），比功率高（是普通铅酸电池的 2 倍），在大电流工作时也能平稳放电（加

速爬坡能力好), 低温放电性能好, 循环寿命长(在 80%的放电深度下, 具有 1000 次的循环寿命), 安全可靠, 免维护; 无记忆效应, 无污染。因此倍受各国关注。在欧美各国新研制的混合动力电动车中, 多以镍氢电池为动力源。在国内研制开发的适用于混合动力汽车的大型镍氢电池在技术水平和性能上取得了很大的成功。目前需要解决的问题是进一步降低成本。

锂离子电池具有优于镍氢电池的性能。目前, 锂离子电池能达到的指标为: 比能量超过 $100\text{W} \cdot \text{h/kg}$, 比功率大于 200W/kg , 循环寿命为 1200 次(100 %的放电深度)。但是作为动力电池由于充放电过程的控制问题及安全性还有待解决, 其价格又高^[37]。因此, 从实际使用的角度, 本文暂不考虑锂离子电池。

超级电容是近年来研制出的能量存储装置。与蓄电池相比, 它最具吸引力的特点是具有高的比功率和高的循环效率, 比蓄电池能更有效的弥补燃料电池混合动力汽车在加速时燃料电池系统的动态响应特性, 但它最主要的缺陷是能量密度比较低, 目前大约在 $7\sim 10\text{wh/kg}$ 。因此超级电容只能为缓解电源的峰值输出、改善燃料电池混合动力汽车电源的工作条件和为制动能量回收提供辅助能源。

经过上述比较, 仿真所选的蓄电池的类型为镍氢电池。

2. 电池的参数选择

(1) 电压

蓄电池组的电压要与电机的额定电压相匹配, 根据电池的单节电压可计算出所选择的电池的块数 N 。

$$V_{sum} = V_{per} \times N \quad (3-14)$$

(2) 容量

要求蓄电池的容量既能满足车辆行驶的要求, 又不能过大而导致其质量、体积以及成本的增加。表 3-6 中是几种不同容量的镍氢电池的质量、体积比较。

表 3-6 几种镍氢电池的质量、体积参数比较比较

容量(C/3)	质量 (kg)	体积规格(mm×mm×mm)	模块体积(L)
28 Ah	3.6	195×102×81	1.6
45 Ah	8.4	340×74×135	3.4
60 Ah	11.6	385×102×119	5.0
90 Ah	16.7	385×102×168	6.1

燃料电池混合动力汽车中蓄电池多处于浅循环充放电状态，典型的蓄电池的工作过程如图 3-12 所示，它的容量围绕目标 SOC 值上下波动，波动幅度根据电池的充放电特性确定，一般不超过 20%。因此，实际上蓄电池的可用能量大约只有其总能量的 $1/3 \sim 1/2$ ，混合动力车中蓄电池的可用能量范围为 $0.3 \sim 3 \text{ kWh}^{[37]}$ 。

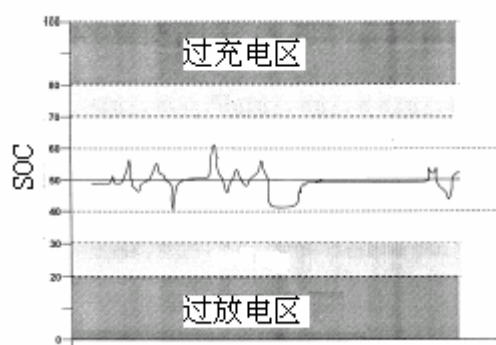


图 3-12 典型的 SOC 值的曲线

容量选择同时要确保蓄电池组的功率能够满足车辆加速行驶的要求。图 3-13，是容量分别为 28Ah 和 16.8Ah 时对应的瞬时功率图，图 3-14 是

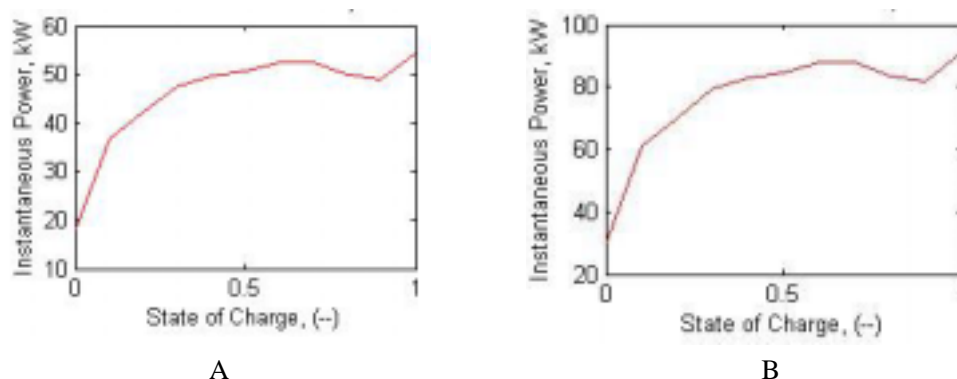


图 3-13 不同容量蓄电池的瞬时功率

A—16.8Ah B—28Ah

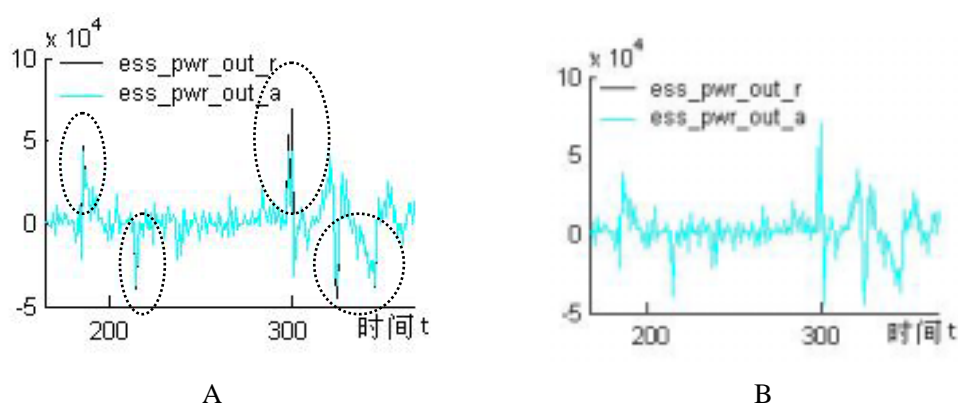


图 3-14 不同容量蓄电池的要求输出功率与实际输出功率的比较

A—16.8Ah B—28Ah

应用两种容量的蓄电池进行仿真,结果中要求蓄电池输出的功率与实际功率输出的比较。对于较小容量的蓄电池,虽然能够满足能量要求但功率偏低,不能够向电机提供足够的功率,尤其在再生制动工况下,能够回收能量受蓄电池的充电功率的限制。因此对于所仿真的车型,选择的是高功率、中等容量的镍氢蓄电池:容量为 28Ah,其额定总能量为 8.75kWh。

根据上述分析,质子交换膜燃料电池混合动力车的仿真模型所选的电池的类型及参数见表 3-7。

表 3-7 质子交换膜燃料电池混合动力总成的电池参数

电池类型	镍氢电池	单节最小电压	4.57V
单节电压	6V	单节最大电压	7.84V
容量(C/3)	28Ah	额定总能量(C/3)	8.75kwh
块数	50	瞬时功率(0.5/DOD)	80kw
总重量	180kg	单节体积(L*W*H)	195mmX102mmX81mm

3.5 仿真结果的分析

在完成了纯燃料电池汽车和燃料电池混合动力汽车的元件选型、参数匹配之后,将其编成仿真软件需要的数据文件并按照前述的四种循环工况对两种车型进行了性能仿真。表 3-8 是燃油经济性的结果,图 3-15 是条形图比较(见下页)。动力性的仿真结果见表 3-9。

表 3-8 两种车型的汽油等效燃油经济性 (L/100km)

车型	UDDS	US06	HWFET	C65
燃料电池汽车	4.1	4.4	3	3.3
燃料电池混合动力汽车	3.2	3.9	2.7	3.1
提高百分比(%)	21.95	11.36	10	6.06

表 3-9 两种车型的动力性

车型	燃料电池汽车		燃料电池混合动力汽车	
电机过载系数	1.8	1	1.8	1
0~100km/h 加速时间(s)	12.2	13.3	8.4	13.2
60~100km/h 加速时间(s)	6.7	6.7	4.3	6.7
0~137km/h 加速时间(s)	25.8	26.3	15.5	26.2
最大加速度 m/s^2	4.2	3.0	5.1	3.0

续表 3-9

车型	燃料电池汽车	燃料电池混合动力汽车
10km/h 爬坡度	32.6%	32.6%
30km/h 爬坡度	32.5 %	32.5 %
88km/h 爬坡度	14.1%	14.1%
最高车速(km/h)	178	177.9

仿真结果表明，两种燃料电池汽车的燃料经济性比原车提高了 2~3 倍，动力性也有显著提高，0~100km/h 的加速时间由原来 15.5s 提高到 8.4s。此外，因为氢为燃料，两种燃料电池汽车实现了零排放，这是内燃机红旗轿车无法相比的。

由表 3-8 和 3-9 可以看出，燃料电池混合动力汽车的燃油经济性要高于纯燃料电池汽车；燃料电池混合动力汽车的优势在很大程度上依赖于行驶工况；燃料电池混合动力汽车的动力性也高于纯燃料电池汽车。

3.5.1 燃油经济性的分析

燃料电池混合动力汽车的燃油经济性比燃料电池汽车高的原因有两个：一是由于燃料电池系统的平均工作效率提高，另一个原因是再生制动能量的回收。

两种燃料电池汽车中燃料电池系统的效率见表 3-10（见下页），条形比较图如图 3-16 所示。燃料电

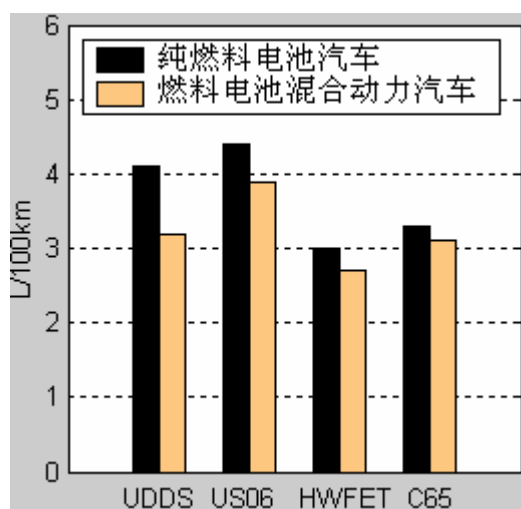


图 3-15 燃油经济性比较

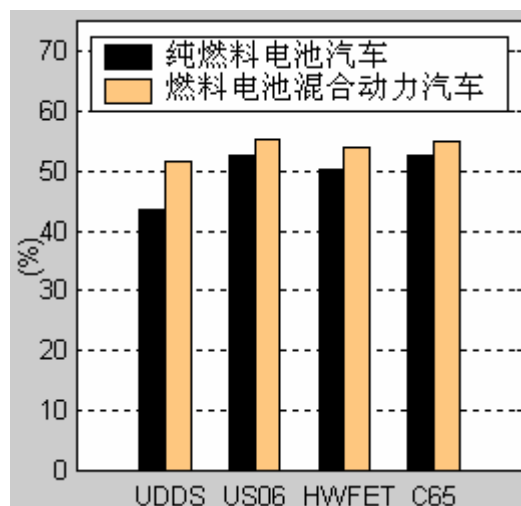
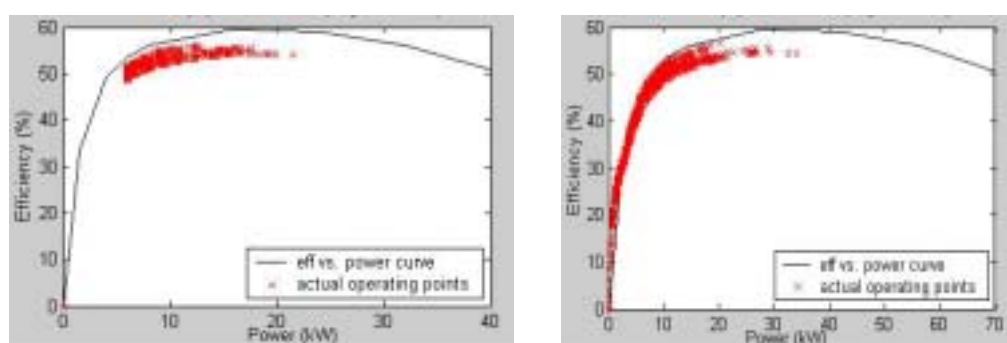


图 3-16 效率比较

表 3-10 燃料电池系统的平均效率 (%)

车型	UDDS	US06	HWFET	C65
燃料电池汽车	43.4	52.6	50.2	52.7
燃料电池混合动力汽车	51.6	55.4	54	55.1

混合动力汽车燃料电池系统的平均效率高于纯燃料电池汽车。这是因为混合动力整车控制策略限制了燃料电池系统的最低功率，而该值的选择依据就是燃料电池系统的效率。以 UDDS 工况为例，仿真结果中两种车型的燃料电池系统的工作效率分布如图 3-17 所示。



A

B

图 3-17 两种车型 PEM 燃料电池系统效率比较（效率 vs. 功率）

A 燃料电池混合动力汽车燃料电池系统

B 燃料电池汽车燃料电池系统

另一个原因是再生制动能量的回收。表 3-11 所列的是四种工况的再生制动回收能量与电机驱动车辆行驶消耗的总能量的数据，图 3-18（见下页）是相应的图形表示。在工况 C65 中，再生制动回收能量为零，它的燃油经济性提高的最低。

表 3-11 再生制动回收能量与驱动总能量

	UDDS	US06	HWFET	C65
再生制动回收能量	720	1086	265	0
驱动总能量	6052	9145	7430	5585
百分比(%)	11.90%	11.88%	3.57%	0%

3.5.2 动力性分析

燃料电池混合动力汽车的动力性的优越性主要体现在电机过载时的加速性能远远高于纯燃料电池汽车。这种不超过电机的30~60s的加速过载在电机的允许范围之内。此时电机的过载属于功率过载，混合动力配置中的蓄电池能够充分地提供所需的额外功率。而纯燃料电池系统则由于受其最大输出功率的影响不能满足电机的功率过载要求，选择较大的燃料电池系统来增加“后备功率”又受到成本的限制（见3.6节）。

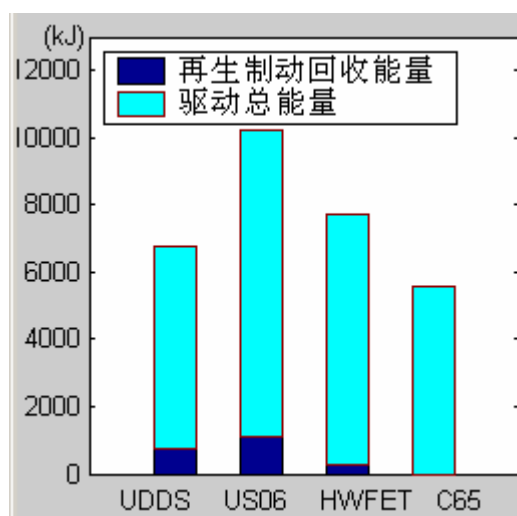


图 3-18 能量比较图

3.6 成本分析

质子交换膜燃料电池技术的研究与开发已经取得了一定的成果，但与传统的内燃机汽车相比其成本仍然是一个制约其推广的不可忽视的因素。而燃料电池混合动力汽车的电-电混合动力的配置对降低整车成本起很大作用。

2001 年美国阿尔贡实验室的试验研究结果^[29]表明年产量为 50,000 套时功率为 50kW 的不带重整器的质子交换膜燃料电池系统的成本为 220US\$/kW，表 3-12 中所列数据为不带燃料重整器的质子交换膜燃料电池各部件及材料成本^[29]。

表 3-12 质子交换膜燃料电池各部件及材料成本（\$/kW）

质子交换膜	56.2	扩散层	13.68	空气供给	20
电极	82.17	双极板冷却	10.86	尾气处理	7
双极板的连接	10.86	其他	7.24	冷却系统	12
模块成本总计	181			固定成本总计	39

目前镍氢电池的成本约为 900\$/kWh^[37]。需要指出的是，蓄电池的性能参数通常为蓄电池的容量（ $C/3$ ）及根据额定电压由此推导出的额定能量，因此其成本用单位能量成本表示。

应用上述数据、根据第四节中的纯质子交换膜燃料电池汽车和混合动力汽车的配置，分析由混合动力带来的制造成本上的降低。

纯质子交换膜燃料电池汽车功率源的成本用 C_1 表示，则

$$C_1 = C_{pf} \times P_f \quad (3-15)$$

式中， C_{pf} —燃料电池系统单位功率成本，\$/kW；

P_f —所用燃料电池系统的功率，kW；

质子交换膜燃料电池混合动力汽车的功率源成本用 C_2 表示，则

$$C_2 = C_{pf} \times P_f + C_{pB} \times E_B \quad (3-16)$$

式中， C_{pB} —蓄电池单位能量成本，\$/kWh；

E_B —所用蓄电池的额定容量，kWh；

质子交换膜燃料电池系统的成本与功率不成正比^[24,29]，这是因为燃料电池的构成部件分成两部分，一部分成本固定，不随燃料电池系统总功率的增加而增加，另一部分的成本与最大功率成正比。阿尔贡实验室的研究表明，直接氢质子交换膜燃料电池系统中，电池模块的成本随燃料电池系统的最大功率增大而成正比增加，其中包括质子交换膜，电极、扩散层、双极板的连接/冷却费用等；空气供给系统、尾气处理系统和冷却系统的成本固定不变^[29]。因此，直接氢质子交换膜燃料电池系统的单位功率成本为

$$C = \frac{P_0 \times C_F + \frac{P^2}{P_0} \times C_S}{P} \quad (3-17)$$

式中， P_0 ， P —单位功率成本已知的燃料电池系统的最大功率，单位功率成本未知的燃料电池系统的最大功率，kW；

C_F ， C_S —固定成本，与最大功率成正比的单位功率成本，\$/kW；

根据上述原则及表 6-1 提供的数据，可以计算出最大功率为 70kW 的质子交换膜燃料电池系统的单位功率成本为

$$C_{70} = \frac{50 \times 39 + \frac{70^2}{50} \times 181}{70} = 281.26 \$ / kW$$

最大功率为 40kW 的质子交换膜燃料电池系统的单位功率成本为

$$C_{40} = \frac{50 \times 39 + \frac{40^2}{50} \times 181}{40} = 193.55 \$ / kW$$

将纯燃料电池车的燃料电池的单位功率成本 C_{70} 及最大功率 70kW 代入式 3-11 中计算可的纯燃料电池汽车的功率源成本

$$C_1 = C_{pf} \times P_f = 281.26 \times 70 = 19688 \$$$

同理将镍氢电池的单位能量成本、额定能量和燃料电池混合动力汽车的单位功率成本 C_{40} 及最大功率代入公式 3-12，混合动力汽车的功率源成本为

$$C_2 = 193.55 \times 40 + 900 \times 8.75 = 15617 \$$$

比较 C_1 、 C_2 ，

$$C_1 - C_2 = 19688 - 15617 = 4071 \$$$

质子交换膜燃料电池混合动力汽车的功率源成本要比纯燃料电池汽车低 20%。

根据上述分析计算，与纯燃料电池汽车相比，燃料电池混合动力汽车可以在很大程度上降低整车制造成本。

为了将质子交换膜燃料电池混合动力汽车的成本与其它车型进行比较，DI 公司提出了周期成本概念，包括初始成本，燃油消耗成本，还考虑了整个燃油循环空气污染、温室气体造成的损害而带来的间接成本以及石油供应安全保障费用等更多的因素。在这种评价方法中进行了合理的假设，最终的评价结果表明，与传动的内燃机车、内燃机混合动力汽车相比，质子交换膜燃料电池混合动力汽车是以后发展中周期成本最低的车型^[30]。

3.7 启动、瞬态响应问题

3.7.1 启动问题

燃料电池混合动力汽车充分利用其电-电混合动力特性解决了纯燃料电池汽车的启动问题。

质子交换膜燃料电池属于低温燃料电池,它启动迅速,一般需要几秒,但是作为车用发动机燃料电池需要在启动后对系统进行预热,使整个系统达到正常工作状态。另一方面,燃料电池系统的附属设备要消耗一定的功率,该功率在燃料电池启动后可来自燃料电池系统,但在启动阶段对纯燃料电池汽车来说则是一个困难,因为在启动过程中,燃料电池的压缩系统所需要的功率约是其峰值功率的 10%^[1],且属于高压系统(300V)。为了启动燃料电池系统,纯燃料电池汽车需要用 12V 的车辆蓄电池组来提供必要的功率。12V 电压通过升压型 DC/DC 变换器升高到 300V 与燃料电池系统的高电压附件匹配。就这一系统而言,需要 15~20s 来启动燃料电池系统^[25]。

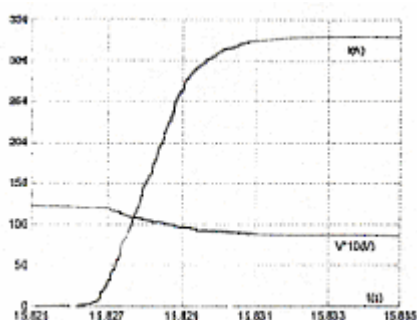


图 3-19 蓄电池突加负载动态过程
(SOC=0.8)

而这对于燃料电池混合动力汽车来说则不成问题,它可由蓄电池组来完成。图 3-19 是铅蓄电池组初始状态为空载,突然加载的动态过程曲线^[1]。电流的响应时间约为 5ms,蓄电池的动态响应特性允许质子交换膜燃料电池汽车立即启动。在启动汽车的同时,蓄电池组向燃料电池系统的附属设备提供功率启动燃料电池系统,使其进入预热状态准备正常工作。

3.7.2 瞬态响应问题

图 3-20 (见下页)是功率为 30kW 的质子交换膜燃料电池在 78 时动态响应过程曲线^[1]。该燃料电池以高压纯氧为氧化剂,动态响应过程时间约为 150ms。因此可以说明,直接氢燃料电池汽车的瞬态响应问题并非来自燃料电池反应过程本身,主要来自空气系统的响应时间。

在整个行驶工况中功率要求变化迅速，因此对燃料电池汽车配置而言要求空气变化也要迅速，然而空气压缩机从提供最小空气流量到最大空气流量的变化速度是受制约的，这些限制会使燃料电池系统的输出功率在几秒钟内受到限制，或者使燃料电池的净效率下降。而混合动力系统则可以控制燃料电池的输出功率

平滑，以给空气压缩机更长的时间响应功率要求的变化，当空气压缩机不能提供足够的空气流量满足功率的要求时，由蓄电池来提供额外的功率。

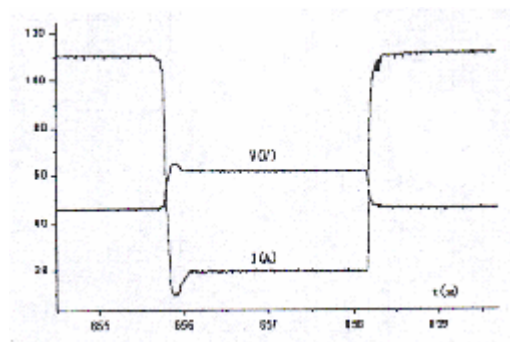


图 3-20 质子交换膜燃料电池的动态响应特性

3.4 小结

本章系统地提出了动力总成的元件选型及参数的匹配方法，完成了燃料电池混合动力汽车动力总成匹配；并通过仿真分析得出以下结论：燃料电池混合动力汽车能够在燃料电池汽车的基础上进一步提高燃油经济性，其原因有两个，燃料电池系统平均工作效率的提高和再生制动；燃料电池混合动力汽车能够将其功率源的成本降低 20%，电-电混合动力的配置解决了纯燃料电池汽车的起动、瞬态响应问题。

第四章 燃料电池混合动力汽车控制策略 研究及控制器的网络通信技术

控制策略的研究是燃料电池混合动力汽车的核心。因此本章将以提高燃油经济性和整车动力性能为目标，对质子交换膜燃料电池电-电混合动力汽车控制策略进行初步探讨。针对汽车中多个控制器间的数据信息传输方式，设计基于 CAN 总线的燃料电池混合动力汽车控制系统结构方案。

4.1 燃料电池混合动力汽车控制策略的选择

燃料电池电-电混合动力汽车的控制策略是以提高燃油经济性和动力性为目标实现整车控制。电-电混合动力汽车控制策略有两种：一种是开关模式，另一种是功率跟随模式。

4.1.1 开关模式

开关控制模式的思路简单：在整个控制过程中，蓄电池的 SOC 值在设定的范围内浮动，根据判断当前蓄电池组的 SOC 值来确定燃料电池系统的开关状态，当燃料电池系统的状态处于开时，始终工作在一个恒定的功率水平。这种控制策略能够保证燃料电池系统和蓄电池组工作各自的高效率，但研究表明^[54]，这种控制策略不适合电-电混合动力汽车，其动力性差，燃油经济性比功率跟随模式低 9.1%。而且，对于燃料电池系统而言，由于直接以氢为燃料不存在排放问题，因此汽车行驶过程中关闭燃料电池系统没有意义。相反燃料电池系统对温度、湿度、压力等工作环境要求很高，反复启动会给燃料电池系统的控制及寿命带来许多不利影响。

4.1.2 功率跟随模式

功率跟随模式中，蓄电池组 SOC 值的范围仍然不超过设定的限值，但它的管理以电量消耗最小为目标；燃料电池系统的输出功率不是恒定值，而是跟随车辆行驶的功率要求在设定的功率范围内变化，优先考虑整车的功率要求并维持蓄电池组的电量状

态为某一目标值。

功率跟随模式的控制策略不存在开关控制模式的缺点，但它相当复杂，要确定燃料电池系统和蓄电池组的工作范围，并在汽车行驶工况下完成燃料电池系统与蓄电池组之间的功率分配。本章应用逻辑控制方法选择功率跟随模式对整车控制策略进行分析研究。

4.1.3 整车控制策略研究的内容

根据燃料电池系统混合动力汽车控制系统的功能，结合功率跟随模式的原则，整车控制策略研究要完成的任务如下：

- (1) 确定燃料电池系统的工作范围及蓄电池组 SOC 值的限值。
- (2) 将踏板开度信号转换为动力总成转矩输出要求。在驱动工况，燃料电池混合动力汽车单独由电机驱动，因此要确定加速踏板开度与电机的转矩输出之间的关系；在制动工况还要确定再生制动转矩与机械制动转矩的分配关系。
- (3) 汽车起动控制策略。
- (4) 确定燃料电池系统的功率、电流输出，即实现功率分配。根据电机的电功率输入要求、当前蓄电池组能够提供的功率的大小确定燃料电池系统的输出功率，进而根据总线电压确定 DC/DC 变换器的输出电流。

4.2 控制策略研究

4.2.1 电-电混合动力系统工作原理

由燃料电池系统和蓄电池组组成的系统工作原理图如图 4-1 所示（见下页），燃料电池系统和蓄电池组并联。其中， i_l 为负载电流， i_b 为蓄电池组的电流， i_f 为燃料电池的电流， R_l 为负载电阻， R_b 为蓄电池内阻， R_f 为燃料电池内阻。负载越大，负载电阻越小，电流也就越大。

燃料电池混合动力汽车的电-电混合系统基本上可分为以下几个工作模式：燃料电池单独驱动；蓄电池单独驱动；燃料电池和蓄电池联合驱动；再生制动能量回收。根据燃料电池系统和蓄电池组的工作状态，整车驱动电路中电流的流向与其关系如表 4-1 所示。

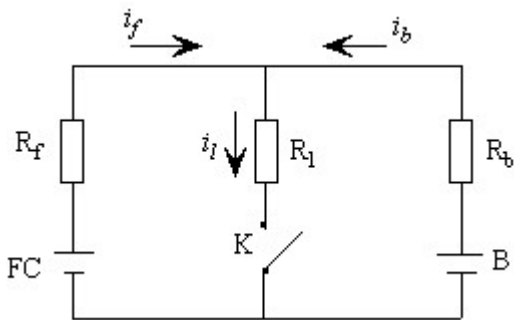


图 4-1 工作原理电路图

表 4-1：燃料电池与蓄电池组及其电流匹配关系

工况	1	2	3	4
i_b	0	+	-	+
i_f	+	+	0	0
i_l	+	+	-	+
工作状态	燃料电池单独驱动并给蓄电池充电	燃料电池和蓄电池联合驱动	再生制动能量回收	蓄电池单独驱动

燃料电池系统与蓄电池组之间的功率分配即根据实际要求调整蓄电池组电流 i_b 、燃料电池系统电流 i_f 的大小和方向。在实际的控制系统中，这需要通过 DC/DC 变换器控制燃料电池系统的输出功率来实现。

4.2.2 燃料电池系统工作范围确定

燃料电池系统工作范围的确定目标与传统的内燃机相同,是为了提高整车的燃油经济性、降低排放,但较为简单。因为燃料电池系统直接以氢为燃料,排放为零,因此根据燃料电池系统的工作特性,其工作范围的确定只需考虑燃料电池系统的效

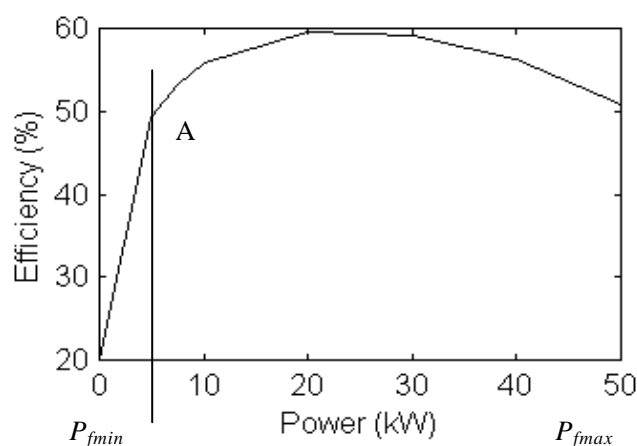


图 4-2 燃料电池的效率(vs 功率)

率。图 4-2 是一个典型的燃料电池系统的效率曲线,在低功率区某一点 A 处燃料电池的效率急剧下降,因此为了保证燃料电池系统的效率,将燃料电池的最小功率 P_{fmin} 设在 A 点,当系统要求的功率小于 P_{fmin} 时,燃料电池系统并不关闭,而是以最小功率进入“怠速”状态。燃料电池系统的最大输出功率 P_{fmax} 不能超过设计要求的最大功率,因为随着输出电流的增大,燃料电池系统的电压减小,而且当电流增大到一定值时,电压迅速下降,此时系统的效率也下降。

4.2.3 蓄电池组 SOC 值上限和下限的确定

电池在充放电过程中有部分能量消耗在内阻上。为减少内阻消耗,电池的工作区间应选择在低内阻区间,如图 4-3 所示。为了限制电池的工作区间,需要设定电池组电量状态的上限值 SOC_{high} 和下限值 SOC_{low} 。控制算法保证电池在工作过程中的 SOC 基本处于 SOC_{high} 和 SOC_{low} 之间。图 4-3 是本文设计的燃料电池混

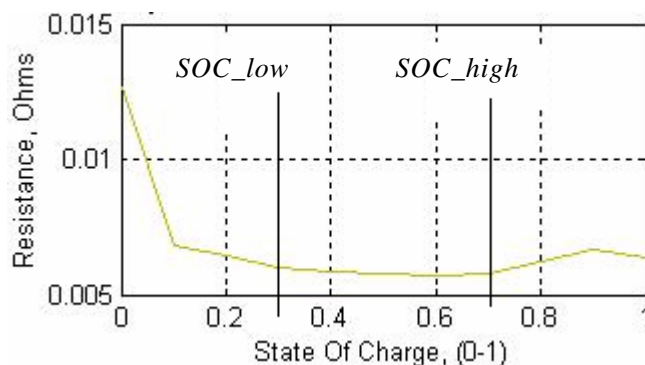


图 4-3 充放电内阻与 SOC 值

合动力汽车所采用的 NiMH 蓄电池的内阻特性曲线，依据上述原则该车控制策略中充电维持 SOC 值为 0.55，SOC_{low} 和 SOC_{high} 分别为 0.3 和 0.7。

4.2.4 踏板信号与转矩输出指令

控制系统应能如实地反映驾驶员的意图，并根据驾驶员的实际操作正确地将传感器采集的踏板开度信号转换成车辆行驶需求的转矩值。根据预先设定的控制策略和控制算法，确定转矩或功率的分配，向相关子系统发出控制指令。

4.2.4.1. 驱动工况

当汽车处于驱动行驶工况时，动力总成转矩全部来自电机。为了简化算法，设加速踏板的开度 L_{acc} 与输出转矩 T 为线性关系，即

$$T = L_{acc} \times T_{max} \quad (0 \leq L_{acc} \leq 1) \quad (4-1)$$

式中， T_{max} —电机的峰值转矩，N·m；

电机的负荷率 L

$$L = \frac{L_{acc} \times T_{max}}{T_{max}} = L_{acc} \quad (4-2)$$

可见，电机的负荷率即为踏板开度。

4.2.4.2 制动工况

当汽车减速制动时，制动转矩由两部分提供，包括机械制动和电机处于发电状态进行再生制动提供的转矩。为了简化算法，将制动踏板开度 L_b 与制动转矩输出 T_b 的关系设为线性，即

$$T_b = L_b \times (T_{gmax} + T_{fmax}) \quad (0 \leq L_b \leq 1) \quad (4-3)$$

式中， T_{gmax} —电机发电状态的峰值输入转矩，N·m；

T_{fmax} —最大机械制动转矩，N·m；

设能够保证方向稳定性的前后轮制动力分配系数为 β ，则前轮制动扭矩 T_{front} 、后轮制动力 T_{rear} 分别为

$$T_{front} = \beta \times T_b \quad (4-4)$$

$$T_{rear} = (1 - \beta) \times T_b \quad (4-5)$$

对于驱动轮来说，制动转矩是由再生制动系统和机械制动系统联合提供的。因此，在确定转矩输出时应首先确定即为再生制动转矩和机械制动转矩的分配问题。

(1) 前轮为驱动轮

后轮制动转矩为再生制动转矩 T_g 和机械制动转矩 T_f 之和

$$T_{front} = T_g + T_f \quad (4-6)$$

文献[53]提出了 T_g 与 T_f 分配依据再生制动转矩分配系数直接进行，这种控制算法简单，但没有考虑当前的 SOC 值以及电机在发电状态能够提供的最大再生制动转矩。因此本文提出了较完善的控制策略：在减速制动工况下，根据行驶车速、要求的制动力的大小以及当前蓄电池组的 SOC 值进行判断，将再生制动转矩与机械制动转矩的分配分为三种模式。

1. 单独再生制动

当满足下述全部条件时单独由电机进入再生发电状态提供制动力：

- (1) $v > v_{reg}$ ；
- (2) $0 < T_b < T_{gmax}$ ；
- (3) $SOC < SOC_{high}$ ；
- (4) $Reverse = 0$ ；

其中， v_{reg} - 根据电机实际控制特性确定的最低再生制动车速；

$Reverse = 1$ ，倒车； $Reverse = 0$ ，前进行驶。

机械制动转矩 $T_f = 0$ ，根据式(4-6)，电机提供的发电转矩 T_g 为

$$T_g = T_{front} = \beta \times L_b \times (T_{gmax} + T_{fmax}) \quad (4-7)$$

根据式(4-3)、(4-5)后轮制动力为

$$T_{rear} = (1 - \beta) \times L_b \times (T_{gmax} + T_{fmax}) \quad (4-8)$$

2. 单独机械制动

在满足下述条件时，单独由机械制动来提供所需的全部制动力：

- (1) $T_b > 0$ ；

(2) $v < v_{reg}$ 或 $SOC > SOC_high$ 或 $Reverse=1$;

电机转矩为零, $T_g = 0$, 前轮机械制动转矩,

$$T_f = T_{rear} = \beta \times L_b \times (T_{g\max} + T_{f\max}) \quad (4-9)$$

后轮制动力同式(4-8)。

3. 联合制动

当满足下述条件时, 由机械制动和再生制动共同提供制动力:

- (1) $v > v_{reg}$;
- (2) $T_b > T_{g\max}$;
- (3) $SOC < SOC_high$;

电机提供的制动扭矩, $T_g = T_{g\max}$; 前轮机械制动系统提供的转矩,

$$T_f = T_{front} - T_g = T_{front} - T_{g\max} ; \quad (4-10)$$

后轮制动转矩同式(4-8)。

输出的电机转矩指令即电机处于发电状态的负荷率为

$$L = \frac{T_g}{T_{g\max}} \quad (4-11)$$

(2) 后轮为驱动轮

分配算法同前轮为驱动轮。

根据上述控制策略则能够编制出关于三种模式的逻辑判断流程图与算法框图, 避免工作重复, 本章不再赘述, 具体形式见文献[53]。

4.2.4 汽车起动控制策略

正常情况下燃料电池混合动力汽车由蓄电池组提供起动功率，当驾驶员打开点火开关时，由蓄电池组启动附属设备，使燃料电池系统处于工作状态并开始预热。当驾驶员踏下加速踏板，燃料电池尚未达到正常工作温度时由蓄电池组提供驱动车辆所需的能量，直至燃料电池系统达到正常工作温度能向外输出电能为止。此后功率分配由正常行驶时的控制策略确定。该起车模式充分发挥了电-电混合动力汽车启动性能的优势。

特殊情况下，应由蓄电池组向燃料电池系统提供燃料电池系统的启动功率，启动后燃料电池系统进入预热状态，待燃料电池系统达到正常工作条件时由燃料电池系统起动汽车。

4.4.5 燃料电池系统与蓄电池组的功率分配

当汽车起动后燃料电池系统达到正常工作温度并能向电机提供功率时，控制策略的核心任务是完成燃料电池系统与蓄电池组之间的功率分配。

4.2.4.1 燃料电池系统和蓄电池组联合驱动模式

根据电机输入功率 P 、蓄电池组的 SOC 值进行判断，符合下述全部条件时，进入燃料电池系统和蓄电池组联合驱动模式：

- (1) $v > 0$ ；
- (2) $P > P_{fmax}$ ；
- (3) $SOC > SOC_{low}$ ；
- (4) $fuel_cell_on = 1$ 且 $T_f > T_{cs}$ ；

其中， P_{fmax} —燃料电池系统的最大输出功率；

$fuel_cell_on$ —燃料电池系统的状态， $fuel_cell_on=1$ ，燃料电池系统运行，
 $fuel_cell_on=0$ ，关闭状态；

T_f, T_{cs} —燃料电池系统的工作温度，控制策略中规定的燃料电池系统进入驱动工况的最低温度；

电机的输入功率为

$$P = \frac{L_{acc} \times T_{max} \times n}{\eta} \quad (4-12)$$

由燃料电池系统和蓄电池组共同提供

$$P = P_f + P_B \quad (4-13)$$

要求燃料电池系统的输出功率为其最大输出功率，

$$P_f = P_{f\max} \quad (4-14)$$

DC/DC 变换器的端电压跟随蓄电池组电压，因此要求 DC/DC 变换器的输出电流为

$$I_{ref} = \frac{P_f}{V_B} = \frac{P_{f\max}}{V_B} \quad (4-15)$$

4.2.4.2 燃料电池系统单独驱动并维持蓄电池组的 SOC 值

当行驶工况及燃料电池、蓄电池组的状态满足下述全部条件时，电机的输入功率由燃料电池系统单独驱动并维持蓄电池组的 SOC 值：

- (1) $v > 0$ ；
- (2) $0 < P < P_{fmax}$ ；
- (3) $SOC_{low} < SOC < SOC_{high}$ ；
- (4) $fuel_cell_on=1$ 且 $T_f > T_{cs}$ ；

此时，要求燃料电池系统输出的功率为

$$P_f = P + P_B \quad (4-16)$$

$$P_B = \Delta SOC \times P_{cs_chg} \quad (4-17)$$

其中，

$$\Delta SOC = \frac{(SOC_low + SOC_high)/2 - SOC}{(SOC_high - SOC_low)/2} \quad (4-18)$$

$$P_{cs_chg} - \frac{(SOC_low + SOC_high)/2 - SOC}{(SOC_high - SOC_low)/2} = 1 \text{ 时蓄电池组需要的充电功率；}$$

要求 DC/DC 变换器的输出电流为

$$I_{ref} = \frac{P_f}{V_B} = \frac{P - P_B}{V_B} \quad (4-19)$$

4.2.4.3 燃料电池系统单独驱动模式

当汽车行驶和蓄电池组都需要燃料电池系统输出功率时,汽车的动力性能优先于蓄电池组的需求。根据电机输入功率 P 、蓄电池组的 SOC 值进行判断,符合下述全部条件时,进入燃料电池系统单独驱动模式:

- (1) $v > 0$;
- (2) $P > P_{fmax}$;
- (3) $SOC < SOC_low$;
- (4) $fuel_cell_on = 1$ 且 $T_f > T_{cs}$;

此时,蓄电池组不再输出功率。燃料电池系统的输出功率为其最大值,见式(4-10),要求 DC/DC 变换器输出电流的算法见式(4-11)。

4.2.4.4 最小功率模式

当电机输入功率小于燃料电池系统的最小值时,燃料电池系统不关闭而是以最小功率工作,剩余功率用于给蓄电池组充电。

根据电机输入功率 P 、蓄电池组的 SOC 值进行判断,符合下述全部条件时,进入燃料电池系统单独驱动并给蓄电池组充电模式:

- (1) $v > 0$;
- (2) $0 < P < P_{fmin}$;
- (3) $fuel_cell_on = 1$ 且 $T_f > T_{cs}$;

此时,燃料电池系统的输出功率为

$$P_f = P_{fmin} \quad (4-20)$$

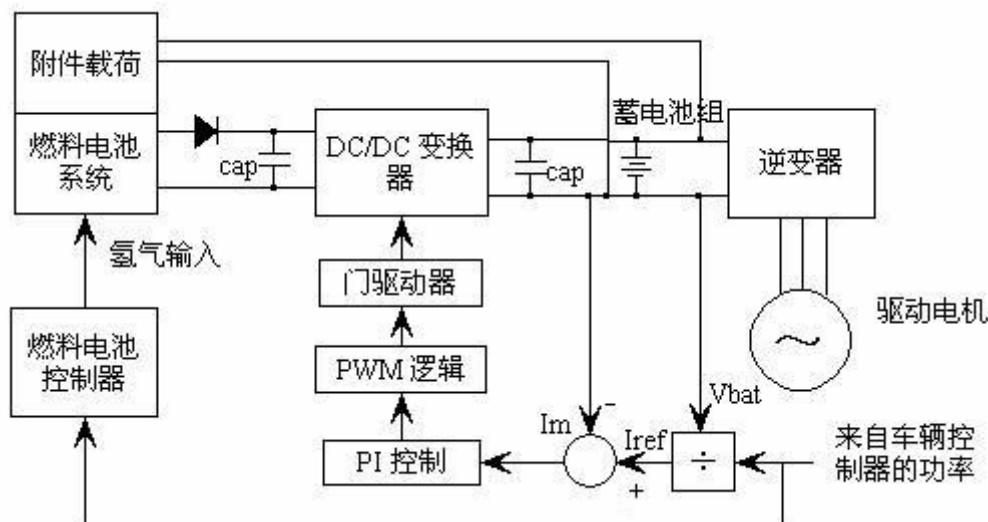


图 4-4 控制 DC/DC 变换器的输出电流

要求 DC/DC 变换器的输出电流为

$$I_{ref} = \frac{P_f}{V_B} = \frac{P_{f \min}}{V_B} \quad (4-21)$$

4.2.5 控制电流的确定

燃料电池系统的功率输出控制通过 DC/DC 变换器对电流的控制来实现。下面分析比较控制 DC/DC 变换器输出电流和输入电流两种控制方式。

如图 4-4（见下页），在这种控制方法中，通过控制 DC/DC 变换器的输出电流来控制燃料电池系统的输出功率，电流 I_{ref} 为要求 DC/DC 变换器输出的电流。 I_m 是 DC/DC 变换器输出端的实测电流，由 I_{ref} 与 I_m 的差值可导出控制 DC/DC 变换器输出功率的占空比，来调节 DC/DC 变换器的输出。燃料电池控制系统根据 P_f 确定氢气的供给量 $Q(P_f)$ 。

在这种类型的控制中，DC/DC 变换器的输出功率为

$$P_{DCO} = V_B \times I_{ref} \quad (4-22)$$

由于蓄电池的电压 V_B 随电机的输入功率而变化，因此 P_{DCO} 随蓄电池的电压变化。从而导致燃料电池系统的实际输出功率 P_{fo} 也变化，如下式所示

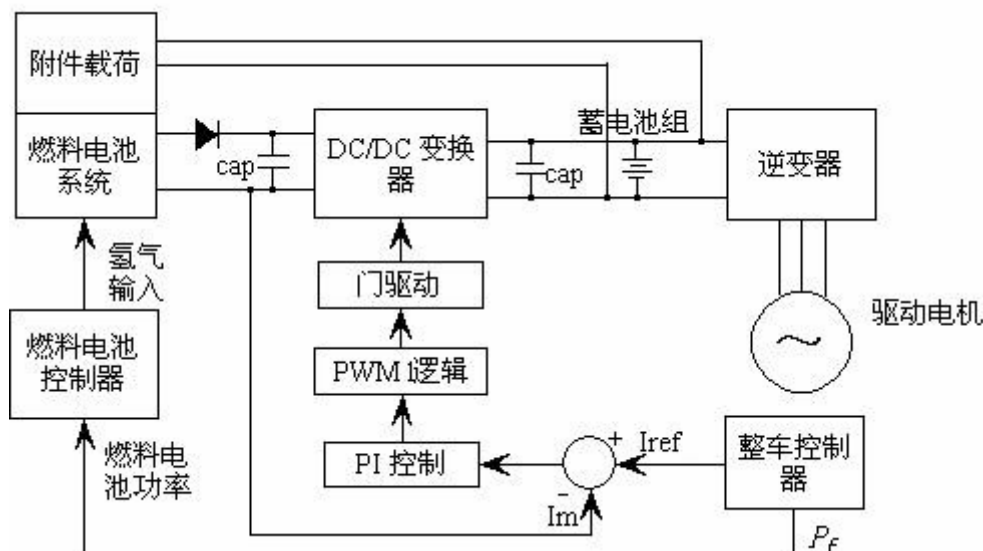


图 4-5 控制 DC/DC 变换器的输入电流

$$P_{fo} = \frac{P_{DCO}}{\eta_{dc}} = \frac{V_B \times I_{ref}}{\eta_{dc}} \quad (4-23)$$

燃料电池的输出功率与氢气的供给量成正比，引起燃料电池的燃料输入要求发生变化，而 $Q(I_{ref})$ 为定值。

所以这种控制方式不可能有效的进行控制，它不仅要求控制器在任何条件下都有宽范围的稳定性，而且会给燃料电池系统本身造成很大的损害。

如果控制 DC/DC 变换器的输入电流即直接控制燃料电池输出的电流，则输入到燃料电池组的氢气量可以得到很好的控制，控制燃料电池输出电流的控制策略如图 4-5 所示。在一个控制周期内，由于 DC/DC 变换器输入端的电流稳定，因此燃料电池的电压稳定，燃料电池组的输出功率也稳定。这种控制策略在控制过程中不受蓄电池电压的影响，避免了实际过程中要求的燃料电池组燃料输入在大范围内波动，从而能够有效的控制燃料电池的燃料输入，保证了它的高效率和寿命。

所以，控制策略的实现应选择 DC/DC 变换器的输入电流为控制变量。

4.3 控制器网络的通信技术(CAN 总线通信)

质子交换膜燃料电池混合动力汽车整车控制器从其它的控制器及传感器收集

信息、通过一定的算法运算发出信息和控制命令。对于这些繁重的控制数据信息交换任务，如果数据传输方式采用常规的传输协议则会给布线带来很大的困难。从导线数量来说，常规的点到点的方式势必造成导线数量的增加；从电磁兼容性方面考虑，在燃料电池混合动力汽车中存在着像电机及其逆变器、DC/DC 变换器等使用强电的电气电动设备和大功率、大电流电力电子设备，这些强电设备产生的强烈电磁噪声将对传输的模拟信号产生严重的干扰甚至使其不能正常工作。而且简单的连接方式、传输协议不能够满足控制器之间的某些信息传输的要求。Bosch 公司提出的 CAN 总线协议以其优良的特性在汽车整车电气系统以及其他一些实时控制单元中等到广泛的应用。

基于控制器局域网 CAN(Controller Area Network)总线的控制系统是当前比较流行的汽车控制系统。它的通讯介质可以是双绞线、同轴电缆或光导纤维。CAN 总线是一种多主总线，与传统的传输协议相比 CAN 总线有以下特点：

1. CAN 协议的最大的特点之一就是废除了传统的站地址编码方式，扩展了对通讯数据进行编码的方式，这样就使网络内的节点数在理论上不受限制。这种按数据块进行编码的方式，还可以不同的节点同时接收到相同的数据。通讯方式灵活，可实现点对点 and 广播方式传输数据。

2. CAN 总线以报文为单位进行数据传输，数据传输用短帧结构，数据段长度最多为 8 个字节。8 个字节不会占用总线时间过长从而保证了通信的实时性。传输时间短，受干扰的概率低。CAN 的通讯速率可高达 1Mbps。CAN 协议采用了 CRC 检验并可提供相应的错误处理功能，保证了数据通信的可靠性。

3. 采用非破坏性基于优先权的总线仲裁技术，具有暂时错误和永久性故障节点的判别及故障节点的自动脱离功能，不关闭总线即可任意挂接或拆除节点，使系统其它节点的通信不受影响，增强了系统的灵活性和可扩展性。

4. 采用统一的标准和规范，使各设备之间具有较好的互操作性和互换性，系统的通用性好（1991 年 Philips Semiconductors 制订并发布了 CAN 技术规范（Version2.0），包括 A 和 B 两部分。1993 年 11 月 ISO 正式颁布了 CAN 国际标准 ISO11898）。且现场布线和安装简单，易于维护，经济性好。

CAN 是一种串行数据通讯协议，遵从 OSI (Open System Interconnection) 七层参考模式。在其通讯接口中集成了 CAN 协议的物理层和数据链路层功能，可自动完成对通讯数据的成帧处理，包括位填充、数据块编码、循环冗余检验及优先级判别等工作。在数据传输时，数据标识符的值越小其优先级越高。通过数据链路控制，每个接收器完成帧接收滤波确定此帧是否有效。CAN 控制器监听总线电平决定发送

接收是否有效。

基于上述内容,本文研究的燃料电池混合动力汽车控制系统与各子系统的网络通信采用 CAN 总线通信技术。基于 CAN 总线的燃料电池混合动力汽车控制系统的结构框图如图 4-7 所示。

本人在完成混合动力汽车正向仿真建模就采用类似图 4-7 所示的结构,在电机、

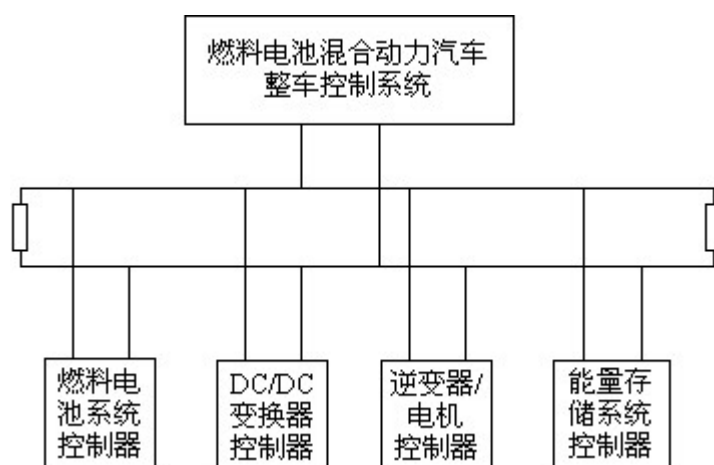


图 4-6 基于 CAN 总线燃料电池混合动力汽车控制系统的结构

发动机、电池、AMT(电控机械式自动变速器)等各总成控制模块与整车控制模块之间成功地实现了 CAN 总线数据通信。所采用的 Dspace 为 Autobox, 它提供了 4 个 CAN 接口, CAN 控制器为 AS82527, CAN 收发器为 PCA82C251, 采用的协议标准是 SAE J1939 协议, 通讯方式为广播方式。基于该正向仿真模型的控制策略的功能演示在 2002 年底的解放牌混合动力汽车多能源动力总成台架试验中已经实现, 并通过国家科技部的验收。在该控制系统中为了便于调试采用的是点对点的通讯方式, 即 HCU 与各个 ECU 之间的点对点。各个控制器所用的 CAN 控制器与收发器的类型不尽相同, 包括 SJA1000、AS82527 和 DSP 的在片 CAN 控制器等多种类型。

燃料电池混合动力汽车的控制系统的结构及其工作环境与传统的混合动力汽车的控制系统极其相似: 从结构本身来看, 都由若干个控制器组成, 控制器之间进行数据交换; 从电磁兼容这方面来考虑, 这些控制器都工作在有电机逆变器、电机和蓄电池或电容等强电的电气电动设备和大功率、大电流电力电子设备附近。因此 CAN 总线通信技术在混合动力汽车控制系统中的成功应用能够说明, 在与之类似的

燃料电池混合动力汽车控制系统中采用 CAN 总线通信技术同样有其可行性。

4.4 小结

本章以提高燃油经济性和整车动力性能为目标,对质子交换膜燃料电池混合动力汽车电-电混合动力总成的控制策略进行了系统的分析设计:本文提出的启动控制策略能够保证该车具有良好的起动特性;提出了更完善的制动力分配的控制算法;根据工作模式完成了燃料电池系统和蓄电池组间功率分配的算法。针对电-电混合动力总成中多个控制器间的数据信息传输方式的高要求,本章设计了基于 CAN 总线的燃料电池混合动力汽车控制系统结构方案。

第五章 全文总结

近年来,随着质子交换膜燃料电池技术的不断成熟和完善,以该种燃料电池作为动力源的燃料电池汽车业进入实用化阶段。国外的研究表明,尽管质子交换膜燃料电池汽车具有高效率、零排放以及不直接消耗化石燃料等诸多优点。但由于其成本过高,在现阶段还很难进入市场,同时因其在起动过程中需要一定的预热时间,这也是用户难以接受的原因之一。因此,大幅度降低质子交换膜燃料电池汽车制造成本并使之具有与传统汽车相同的起动性能已成为燃料电池汽车开发过程中亟待解决的关键问题之一。基于此,作为一种探索,本文借助于混合动力的概念,以所在单位承担的国家 863 计划课题为依托,对质子交换膜燃料电池混合动力汽车的参数匹配与性能仿真、控制策略与算法以及成本估算等问题进行了系统的研究,并取得了如下初步成果;

1 本文以国产红旗轿车为基本车型,以 Advisor 软件为平台对燃料电池汽车和燃料电池混合动力汽车两种车型进行了参数匹配和性能仿真。研究结果表明在相同的条件下燃料电池混合动力汽车比燃料电池汽车具有更好的燃油经济性和动力性,同时具有与传统汽车相一致的起动性能。更有意义的是,与燃料电池汽车相比,燃料电池混合动力汽车功率源的制造成本可以降低 20% 之多。由此可以认为,混合动力技术是解决上述燃料电池汽车存在的主要问题的一個有效途径,因此燃料电池混合动力汽车应当作为燃料电池汽车开发的首要选择。

2 本文系统地提出了燃料电池混合动力汽车动力总成元件选型和参数匹配的方法和原则,并在此基础上以提高燃油经济性和整车动力性能为目标,对质子交换膜燃料电池混合动力汽车电-电混合动力总成的控制策略进行了系统分析设计。本文提出的起动控制策略能够保证燃料电池混合动力汽车具有良好的起动特性。在考虑了蓄电池组 SOC 值、车速及再生制动转矩限制的基础上,提出了更完善的制动力分配控制算法。根据工作模式完成了燃料电池系统和蓄电池组间功率分配的算法。针对电-电混合动力总成中多个控制器间的数据信息传输方式的高要求,本文设计了基于 CAN 总线的燃料电池混合动力汽车控制系统结构方案。

3.本文提出了一种燃料电池混合动力汽车的功率源的成本估算方法。这种方法根据美国阿尔贡实验室发表的质子交换膜燃料电池系统的研制报告中质子交换膜燃料电池系统的结构成本特性,估算燃料电池系统的单位功率成本,而蓄电池组则采用单位能量成本来进行计算。将此方法应用于文中设计的车型,估算结果为燃料电池混合动力汽车能够很大幅度降制造成本,这与目前的实际情况相符。

本文为质子交换膜燃料电池混合动力汽车动力总成的匹配、参数设计以及建立控制系统的离线仿真模型奠定了基础,文中提出的原则、得出的结论和控制策略需要进一步的深入研究并结合试验来完善。

参考文献

1. 李瑛 王林山 燃料电池 冶金工业出版社 2000.11
2. 黄倬 屠海令 质子交换膜燃料电池的研究开发与应用 冶金工业出版社 20005
3. 衣宝廉 燃料电池—高效、环境友好的发电方式 北京工业出版社 2000.11
4. 朱起明, 魏俊梅 中国氢气的生产和应用 — 现状与前景 中国新能源网 2001
5. 郑乃金 车用燃料电池的开发与存在的问题 环境保护 1999.1
6. 刘翔海 燃料电池及相关技术在汽车领域的应用与研究 汽车研究与发展 2001.4
7. 何仁 燃料电池汽车研究现状与发展前景 汽车工业研究 2001.2
8. 宋书贤 氢燃料汽车与氢燃料电池汽车 汽车工业研究 2001.5
9. 邵杰 电动汽车燃料电池和驱动系统的发展 汽车电器 2000.1
10. 郝利君 燃料电池电动汽车 商用汽车 2001.2
11. 吴昕 燃料电池及其发展概况 动力工程 2001.1 vol.21 No.2
12. 郑海金 驶向未来的燃料电池汽车 国外科技动态 2001.1
13. 李径定 质子燃料电池电动汽车的关键技术 汽车技术 1998.2
14. 本田开发出新型燃料电池汽车 <http://tech.enorth.com.cn/kjqy/xpsx>
15. 日本开发出时速 150 公里的燃料电池汽车 <http://www.cssti.net.cn/>
16. 马友良, 陈全世 混合动力电动汽车的发展 公路交通科技 2001.2 vol.18 No.1
17. M. R. Adrew, W. J. Gressler A fuel cell/lead-acid-battery hybrid car SAE 720191
18. Review of the Research Program of the Partnership for a New Generation of Vehicles: Sixth Report, [http://: www.nap.edu/openbook/0309070945](http://www.nap.edu/openbook/0309070945)
19. California Air Resources board, 1998 zero-emission vehicle biennial program review 1998.6
20. Paola Costamagna, Supramaniam Srinivasan, Quantum jumps in the

致 谢

- PEMFC science and technology from the 1960 to the year 2000 Part II. Engineering, technology development and application aspects, Journal of Power Source 102(2001) 253-269
21. Michel Fuchs, Frano Barbir, Attila Husar and Jay Neutzler. Performance of Automotive Fuel Cell Stack. SAE 2000-01-1529
 22. Richard K. Stobart, Fuel cell power for passenger cars—what barriers remain? SAE 1999-01-0321
 23. Philip Pindo Mok Automotive fuel cell —clean power for tomorrow's vehicles, SAE 1999-01-0320
 24. C. E. Thomas, Brian, D. James, Societal impact of fuel optional for fuel vehicles, SAE 982469
 25. Kaushik Rajashekara, Propulsion system strategy for fuel cell vehicles SAE 2000-01-0369
 26. Paul Atwood, Stephen Gurski, Degree of hybridization ADVISOR modeling of a fuel cell hybrid electric sport utility vehicle 2001 Joint ADVISOR/PSAT vehicles systems modeling user conference
 27. David J. Friedman, Maximizing direct-hydrogen PEM fuel cell vehicle efficiency—is hybridization Necessary? SAE 1999-01-0530
 28. Roland Nolte, Fuel cell vehicles at GM/Opel, Journal of Power Sources 4573 (2001)1-7
 29. Report to Department of Energy, Cost Analysis of Fuel Cell System for Transportation 2001
 30. Joan M. Ogden, Robert H. Williams, Eric D. Larson, Societal Lifecycle Costs of Cars With Alternative Fuel/engines. Energy Policy 2002
 31. Detlef zur Megede, fuel processors for fuel cell vehicles Journal of Power Sources 106(2002) 35-41
 32. Ahmad A. Pesaran, thermal characterization of selected EV and HEV batteries Annual Battery Conference Long Beach 2001.9
 33. B. Emonths, J.Bögild Hansen, Fuel cell drive system with hydrogen generation in test Journal of Power Sources 86(2000) 228-236
 34. B. D. McNicol, D. A. J. Rand, K. R. Williams. Fuel cells for road transportation purposes—yes or no?. Journal of Power Sources 100 (2001)

47-59

35. Gaston Maggetto, Joeri Van Mierlo, Electric Vehicles Hybrid Electric Vehicles and Fuel Cell Electric Vehicles: State of the Art and Perspectives, Ann. Chim. Sci. Mat, 2001,26(4)
36. M. De Francesco, E. Arato. Start-up analysis for automotive PEM fuel cell systems. Journal of Power Sources 4703 (2002) 1-13
37. Robert F. Nelson. Power requirements for batteries in hybrid electric vehicles. Journal of Power Sources 91 2000 2–26
38. U. Köhler, J.Kümpers, M. Ullrich. High performance nickel-metal hydride and lithium-ion batteries. Journal of Power Sources 105 (2002) 139-144
39. Akihiro Taniguchi, Noriyuki Fujioka, Munehisa Ikoma, Akira Ohta, Development of nickel/metal-hydride batteries for EVs and HEVs. Journal of Power Sources 100 (2001) 117–124
40. Hideyuki Tamura, Mikio Ura, Masafumi Sasaki, Takashi Imaseki, Katsunori Oshiage and Toshio Hirota, Development of the Nissan Fuel Cell Vehicle. SAE 2000-01-1584
41. Kimberly J. Martin and Patrick J. Szary. Fabrication and Testing of a Hybrid Electric Vehicle Utilizing a Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell. SAE 2000-01-1552
42. Michael J. Ogburn. Douglas J. Nelson. Keith Wipke. Tony Markel. Modeling and Validation of a Fuel Cell Hybrid Vehicle. SAE 2000-01-1566
43. Stephen Gurski, D. Evants, D.Knox, Design and Development of the 2001 Virginia Tech Future Truck: A Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle
44. Ayoub Kazim, Introduction of PEM Fuel Cell Vehicle in the Transportation Sector of the United Arab Emirates. Applied Energy 2002
45. Per Ekdunge, Monika Raberg, the Fuel Cell Vehicle Analysis of Energy Use Emissions and Cost
46. Matthew Alan Merkle, Variable Bus Voltage Modeling for Series Hybrid Electric Vehicle Simulation,
47. John P. Bird, Model of the Air System Transients in a Fuel Cell Vehicles, Blacksburg, Virginia, 2002

48. The Year 2000 Battery Technology Advisory Panel, Advanced Batteries for Electric Vehicles: An Assessment of Performance, cost and Availability 2000
49. T. Markel, A. Brooker, T. Hendricks, V. Johnson, ADVISOR: a system analysis tool for advanced vehicle modeling , Journal of Power Sources 4801 (2002) 1-12
50. Hyun seok Lee, Kwi Seong Jeong, Byeong Soo Oh, An experiment study of controlling strategies and drive forces for hydrogen fuel cell hybrid vehicles, International Journal of Hydrogen Energy, 2002
51. Satoshi Aoyagi, Yusuke Hasegawa, Energy efficiency improvement of series hybrid vehicle, JSAE Review 22(2001) 259-264
52. Levent U. Gökdere, Khalid Benlyazid, A virtual prototype for a hybrid electric vehicle, Mechatronics 12(2002) 575-593
53. 初亮 混合动力总成的控制算法和参数匹配 研究博士学位论文 2003.6
54. 曾小华 军用混合动力轻型越野汽车动力总成匹配及控制策略研究 硕士学位论文 2002.3
55. 阮新波, 严仰光 零电压零电流开关 PWM DC/DC 全桥变换器的分析, 电工技术学报, 2000.4 15 (2)
56. 华伟 30kW 电流模式 PWM 控制的 DC/DC 功率变换器, 机车电传动, 1999.9 NO.5
57. 郭雁恩, 王长河 无损耗单端正反激软开关 DC/DC 变换器, 半导体情报, 1998.8 35 (4)
58. 万沛森 电动汽车的关键技术 北京理工大学出版社 1998.12
59. 中国第一汽车集团公司 红旗 (中国轿车丛书) 北京理工大学出版社 1998.10
60. 乌宽明 CAN 总线原理和应用系统设计 北京航空航天大学出版社 1996.11
61. 陈清泉 孙逢春编译 混合电动车辆基础 北京理工大学出版社
62. 余志生 汽车理论 机械工业出版社
63. 王季秩、陈影华 电机实用技术 上海科学技术出版社 1997 年
64. 朱松然 蓄电池手册 天津大学出版社 1998 年

致 谢

- 65. 陈晓东 混合动力汽车发展所面临的挑战 汽车工业研究 2001.6
- 66. 孙逢春 镍氢电池充放电特性研究 汽车技术 2001.6
- 67. 邓隐北、姜彦珍 电动汽车的电机驱动系统 河南交通科技 1999 .4
- 68. 孙立志 电动汽车中的电机驱动系统 电工电能新技术 1997.4
- 69. 王怡 国外电动汽车电机驱动系统发展评述 微电机 1997.3
- 70. 曾岳南 电压控制型异步电动机无速度传感器的矢量控制方法 中国工控网

致 谢

本文是在导师王庆年教授的悉心指导下完成的。本文从选题一直到论文的撰写，整个过程都得到了导师的精心指导和全力帮助。导师渊博的学识、严谨治学的态度和忘我工作的精神，使学生深受教益，铭记在心。从导师那里学到的东西将使我终身受益，在此，对尊敬的导师表示衷心的感谢和崇高的敬意。

在本文的研究工作中得到了课题组初亮老师、王伟华老师的指导和帮助，得到了师兄曾小华博士研究生的帮助，在此对他们表示真诚的感谢。

在研究工作中，课题组各位老师都给予我了无私的帮助，同时，他们的忘我工作的精神和融洽的合作关系也深深的鼓舞和感染了我，在此向他们表示感谢。

在攻读硕士学位期间，父母及亲人给我创造了良好的条件让我专心完成学业，他们默默的付出是对我的最大支持，在此向他们表示深深的谢意。

最后，感谢所有帮助和支持过我的亲人、老师、同学及朋友。

摘 要

论文题目 :燃料电池混合动力汽车参数匹配与控制策略研究

专 业 : 车辆工程

指导教师 : 王庆年

内燃机动力体现了整整一个世纪人类智慧的精华,主宰了汽车动力几十年,但它致命的弱点是造成环境污染,而且世界的石油资源只够再开采大约 50 年,内燃机很难从根本上摆脱这一被动的不利局面。常规电池虽然无污染、无噪声,但是其能量密度作为汽车动力较小,充电时间太长(4~8h)是目前难以逾越的障碍。因此,常规电池电动车在可见的将来替代内燃机汽车的可能性微乎其微,只能扮演辅助能源和有限范围内运输工具的角色。20 世纪 90 年代兴起的混合动力车也仅是一种过渡形式的车,不能彻底解决汽车尾气污染的问题。

20 世纪末国际上已形成一个质子交换膜燃料电池汽车开发的热潮。目前世界各国政府以及各大汽车公司纷纷投入巨资进行质子交换膜燃料电池车的研究与开发。科技部也将质子交换膜燃料电池混合动力汽车列为国家十五 863 计划电动汽车重大专项的主要攻关技术之一。

燃料电池汽车(FCV, Fuel Cell Vehicle)是 20 世纪 70 年代产生而最近 10 年兴起开发的一种高效、清洁的车型。

以燃料电池为动力源的汽车称为燃料电池汽车。燃料电池是通过化学反应直接将燃料的化学能转化为电能的装置,而且当以氢为燃料时产物只有水。燃料电池的特点是高效率、低污染,燃料具有通用性,来源并不仅局限于化石燃料。在六种燃料电池中,最适合作为汽车动力源的是质子交换膜燃料电池(PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell),与其它燃料电池相比,它具有起动快、工作温度低以及更高的功率密度等优点。

广义的燃料电池汽车包括两种:燃料电池汽车和燃料电池混合动力汽车。燃料电池汽车的配置只以燃料电池系统为动力源,与电动车中的蓄电池组类似,燃料电池系统向车辆的驱动系统供电。用燃料电池系统代替传统的内燃机作为动力源使得燃料电池汽车具有电动车的优点:即传统的内

燃机汽车所不能达到的高效率和零排放性能，基本的能量消耗可以节省 60%，CO₂ 的排放量可以减少 75%，其它有毒物质的排放也大幅度的减少。而且能够快速添加燃料，有长的续驶里程。

燃料电池混合动力汽车由蓄电池组与燃料电池系统并联驱动，类似于串联混合动力汽车，是电-电混合动力，这种运行方式充分利用了燃料电池系统的高能量密度和蓄电池组的高功率密度，在不同的行驶工况下由燃料电池系统和蓄电池组构成的混合动力系统工作在不同的模式下。这种车型不但具有上述纯燃料电池汽车的优点，还能够克服纯燃料电池汽车目前无法解决的弊端：成本过高，不能回收再生制动能量，起动困难及瞬态响应性差等。

基于此，作为初步探索，本文对燃料电池混合动力汽车的参数匹配和控制策略进行了研究。

混合动力总成的匹配是燃料电池混合动力汽车的关键，它决定整车的性能和电-电混合动力优越性的发挥。本文选择红旗轿车为基本车型，以 Advisor 仿真软件为平台，对燃料电池汽车和燃料电池混合动力汽车两种车型进行了参数匹配和性能仿真，旨在研究与燃料电池汽车相比，燃料电池混合动力汽车在提高性能、降低成本方面所具有的优势。

本文系统的提出了燃料电池混合动力汽车动力总成元件选型及参数匹配的方法和原则，完成了燃料电池混合动力汽车动力总成的匹配。选择了四种标准循环工况，根据匹配结果进行性能仿真，得出以下结论：燃料电池混合动力汽车能够在燃料电池汽车的基础上进一步提高燃油经济性，其原因有两个，燃料电池系统平均效率的提高和再生制动能量回收；燃料电池混合动力车的优势在很大程度上依赖于仿真工况。经过分析计算可以证明，燃料电池混合动力汽车能够将纯燃料电池汽车的功率源成本降低 20%。电-电混合动力汽车的配置解决了纯燃料电池汽车的起动和瞬态响应问题。

控制策略是燃料电池混合动力汽车的核心。因此本文以提高燃油经济性和整车动力性能为目标，对质子交换膜燃料电池混合动力汽车电-电混合动力总成的控制策略进行了系统分析设计。本文提出的起动控制策略能够保证燃料电池混合动力汽车具有良好的起动特性。在考虑了蓄电池组 SOC 值、车速及再生制动转矩限制的基础上，提出了更完善的制动力分配控制算法。根据工作模式完成了燃料电池系统和蓄电池组间功率分配的算

法。针对电-电混合动力总成中多个控制器间的数据信息传输方式的高要求，本文设计了基于 CAN 总线的燃料电池混合动力汽车控制系统结构方案。

本文为质子交换膜燃料电池混合动力汽车动力总成的匹配、参数设计以及建立控制系统的离线仿真模型奠定了基础，文中提出的原则、得出的结论和控制策略有待进一步的深入研究并结合试验来完善。

关键词：质子交换膜燃料电池；混合动力车；参数匹配；控制策略；CAN 总线；

Abstract

TITLE: Study on the Parametric Design and Control Strategy
of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles

SPECIALITY: Automotive Engineering

ADVISOR: Prof. Wang Qingnian

Internal-combustion engine incarnates the distillate of human wisdom of the full century and dominates the power of the vehicles dozens of years. But the fatal weakness is to result pollution. And the oil source in the world can be exploited for only about 50 years. Internal-combustion engine hardly breaks away from the passive complexion radically. Conventional battery is without contamination and noise but as the power of vehicle its low energy density and long charging time are the barriers which are difficult to overstep. So the presumption that electric vehicle of conventional battery substitute the internal-combustion engine vehicle is very little in the obvious future. It can only act the part of assistant power and transport tool limitedly. The hybrid electric vehicles rising in the nineties of 20th century are only intergradations vehicles and it can not settle the problems of pollution from vehicle exhaust drastically.

In the end of 20th century an upsurge in development of proton exchange membrane fuel cell vehicle has come into being. At present the government all over the world and automakers invest heavily in research and development of proton exchange membrane fuel cell vehicles. The Ministry of science and technology set the project of proton exchange membrane fuel cell hybrid electric vehicle as one of main technologies of national Tenth Five-year plan of 863 program electric vehicles key project.

Fuel cell vehicle is a type of efficient and cleanly vehicle that produced in the end of seventies of 20th and rose in recent ten years.

Fuel cells are devices that convert the energy of a chemical reaction

directly into electrical energy. When the fuel is direct hydrogen the product is only water. The traits of fuel cell are efficient and low emission. The fuel is comprehensive, its source is not only limited to petrification fuel. Among six types of fuel cells, proton exchange membrane fuel cells are considered the best solution for vehicular applications because of their low operating temperature, high power density, specific power, longevity, efficiency, relatively high durability, and the ability to rapidly adjust to changes in power demand.

Fuel cell vehicles can be classified as fuel cell electric vehicles and hybrid electric vehicles. A fuel cell electric vehicle uses a fuel cell as the power source without use of a battery. Like the battery in the electric vehicles, the fuel cell system provides electricity to the drivetrain of the vehicle. Fuel cell vehicles have the advantages of battery powered electric vehicles, the performance of high efficiency and zero emission that the internal-combustion engine vehicle can not achieve at all. The fuel cell offers good performance, long range, fast refueling. Replacement of the internal-combustion engine with fuel cell system could save 60% of the primary energy consumption, the CO₂ emission can be reduced by about 75% and release of the other toxic substances could be largely reduced.

The fuel cell hybrid electric vehicle has a battery in parallel with the fuel cell system, similar to series electric vehicle, is electric-electric hybrid. This operating mode makes the most of the high energy density of the fuel cell system and the high power density of the battery. Under different driving cycles the hybrid electric system made of the fuel cell system and battery operate in different modes. This type of vehicle not only takes on the advantages of the fuel cell electric vehicle but overcomes the drawbacks that at present the fuel cell electric vehicle can not resolve: the high cost, without regenerating the brake energy, difficult rapid start-up and the bad transient response performance and so on.

According to these, as the primary probe, the thesis researched the parameters design and control strategy of the fuel cell hybrid electric vehicle.

The design of hybrid powertrain is the key to the fuel cell hybrid electric

vehicle. It determines how the advantages of electric-electric hybrid bring into play. The thesis brought forwards the methods of components selecting and parameters design systematically and worked out the powertrain design of the fuel cell hybrid electric vehicle based on the characteristics of the vehicle Hongqi. The simulation program Advisor is applied and in order to analysis the potential of hybridization comprehensively, four standard drive cycles of varying dynamics are investigated. It is determined that the fuel economy with hybridization is high than without use of battery; this is the result of complex effects of both the mean operating efficiency of fuel cells and capture of the regenerative brake energy; the superiority is highly dependent on the simulation drive cycles. Besides these, comparing with fuel cell electric vehicle, the use of battery allows rapid start-up. Through analysis and calculation it is proved that the fuel cell hybrid electric vehicle can reduce the cost of the fuel cell electric vehicles power device by 20%. The configuration of the fuel cell hybrid electric vehicles resolves the problem of rapid start-up and transient response of the fuel cell electric vehicles.

Control strategy is the kernel of the fuel cell hybrid electric vehicle. The thesis analyzed and designed the control strategy of the fuel cell hybrid electric vehicle powertrain aiming at improve the fuel economy and performance of the vehicle. The start-up control strategy makes the most of the characteristic of the rapid start-up of the battery. The better control algorithm is presented: the power flows between the mechanical brake torque and regenerative brake torque revolves the SOC of the battery and vehicle speed and the limit of the regenerative brake torque. According to the operating modes worked out the algorithm of the power flow between the fuel cell system and the battery. In the overall drivetrain system various assemblies are controlled by more than one controller. In such case, a communication network between these controllers should be established using a communication protocol. The overall control system applies the controller area network (CAN) which has widely used in most vehicle drivetrain to substitute conventional data information transmission protocol. In this thesis has designed a control system structure scheme for fuel cell hybrid electric vehicle based on CAN bus and demonstrated its feasibility.

The thesis settled a foundation for designing powertrain and parameter

致 谢

and establishing off-line simulation model of the proton exchange membrane fuel cell hybrid electric vehicle. The principle presented , the conclusion drew here and the control strategy require to improve by research and development with experiments deeply next.

Keywords: Proton exchange membrane fuel cell, hybrid electric vehicle, parameter design, control strategy, CAN (controller area network) bus