

# 燃料电池混合动力汽车能源系统优化配置\*

李玉芳 林逸 何洪文

**【摘要】** 利用 Advisor 整车仿真模型,提出一种以特定循环行驶工况下整车燃油经济性为优化目标,将能量元件尺寸和控制策略参数共同作为优化变量的燃料电池混合动力汽车能源系统综合优化配置方法。最后通过实例对此优化配置方法进行了分析和有效性验证。

**关键词:** 混合动力汽车 燃料电池 能源系统 优化

**中图分类号:** U469.72

**文献标识码:** A

## Optimization Study on Power System Configuration for Fuel Cell Hybrid Vehicle

Li Yufang Lin Yi He Hongwen

(Beijing Institute of Technology)

### Abstract

Based on vehicle model of Advisor simulation platform, a combined optimization method of power configuration for fuel cell hybrid electric vehicles was presented, namely both power size and control parameters of the energy component were taken as design variable simultaneously with fuel economy of specific driving cycle as optimization target. Finally this method was used to configure one certain fuel cell hybrid bus for analyzing and its validation.

**Key words** Hybrid electric vehicle, Fuel cell, Hybrid power system, Optimization

## 引言

燃料电池混合动力车能源系统的配置由整车动力性能和燃油经济性能要求等因素决定。不同配置的能源系统需要合理的控制策略参数值,才能客观地评价能源系统所能达到的性能水平。影响电-电混合的燃料电池混合动力车能源系统配置的主要因素有:车辆的动力性能、续航里程和成本要求以及车辆的行驶工况等<sup>[1-2]</sup>。文献[3~4]指出车辆的行驶循环工况是设计燃料电池发动机、蓄电池、电机驱动系统等部件功率/容量的主要参考依据。综合以上影响因素的分析得出在进行能源系统配置时,改变能源系统配置需要同时调整其控制参数才能客观地评价能源系统所能达到的性能水平。本文基于 Advisor 车辆仿真模型,针对某燃料电池和蓄电池混合动力客车,提出以满足车辆行驶工况要求为约束

条件、以整车燃油经济性为优化目标、元件尺寸和能量管理控制参数同时作为优化变量的配置优化方法。

## 1 能源系统配置要素

### 1.1 元件选型

混合动力能源系统元件选型是指选择两种能量储存装置的类型、功率尺寸和各特性参数。两种能源功率尺寸比例决定了能源系统的配置型式,根据燃料电池提供功率占总系统功率的比例可将系统分为能量混合型和功率混合型两大类<sup>[2]</sup>。两种能源的不同功率输出特性直接影响到混合动力系统的输出性能,需对混合能源系统配置进行优化处理。

### 1.2 能量管理策略

能量管理策略包括驱动能量分配和制动能量回收管理两部分,前者是指车辆在行驶过程中如何根

收稿日期:2007-01-29

\* 国家部委基础科研项目(项目编号:K0304050201)

李玉芳 北京理工大学机械与车辆工程学院 博士生,100081 北京市

林逸 北京理工大学机械与车辆工程学院 教授 博士生导师

何洪文 北京理工大学机械与车辆工程学院 副教授

据功率需求分配两种能量源的输出功率。对于电-电混合的燃料电池混合动力系统,其驱动能量分配策略主要是根据车辆需求功率,确定燃料电池的输出功率,并由 DC/DC 变换器实施输出功率控制,蓄电池的输出是间接被动控制;制动能量回收管理主要是根据蓄电池的 SOC 状态确定电机的再生制动功率的大小。能源系统的控制参数如下:

### (1) 燃料电池控制

燃料电池的控制包括其开关控制和功率输出大小控制两部分。开关控制主要是根据当前蓄电池的 SOC 和车辆的功率需求确定燃料电池的开关状态;燃料电池输出功率的大小是根据车辆需求功率和蓄电池的 SOC 以及当前燃料电池状态通过一定分配算法确定,控制参数一般包括对边界和动态特性的约束,边界限值将燃料电池的功率输出限定在一定范围内,而动态特性限值给出了燃料电池当前状态下的最大允许动态响应速度,燃料电池的动态特性直接影响到混合动力系统对蓄电池瞬时输出功率和容量的要求。

### (2) 蓄电池控制

能量管理系统对蓄电池的控制主要是:一方面限制其 SOC 值在一定范围内,保证蓄电池的充放电效率在较高的范围内,同时有利于延长蓄电池的使用寿命;另一方面根据 SOC 值的大小给出其修正充电功率,保证蓄电池 SOC 处于适当的状态,既能输出足够的瞬时功率,又能保证再生制动时能量的顺利吸收。

## 1.3 循环工况

车辆的实际行驶工况直接影响到能源系统的功率输出特性,因此能源系统配置必须选择或制定和车辆实际工况最相近的驱动循环作为系统输入。国际上根据不同城市的交通状况制定相应标准循环工况和测试规程,对混合动力车辆比较常用的测试规程有:TEST\_CITY-HWY 主要针对传统车辆和并联混合动力车辆进行燃油经济性和排放测试;TEST\_CITY-HWY-HYBRID 主要针对燃油经济性受蓄电池 SOC 影响较大的串联混合动力车辆,可以描述混合动力车特别是串联混合动力车随 SOC 变化的工作特性<sup>[5-6]</sup>。燃料电池混合动力车辆是串联型式,根据车辆的动力性能要求,本文优化过程采用后者,图 1 给出其特性曲线。

## 2 优化配置方法

Advisor 是美国国家再生能源实验室 (NREL) 为传统车辆和先进车辆进行能量消耗和排放分析而开发的计算机仿真工具,它基于 Matlab/Simulink 图

形仿真环境,对车辆的能量流和燃料消耗进行后向仿真。它使用 Simulink 图形模块对各个部件建模,用 Matlab 数据文件设置车辆结构参数、控制系统参数和元件性能数据等。

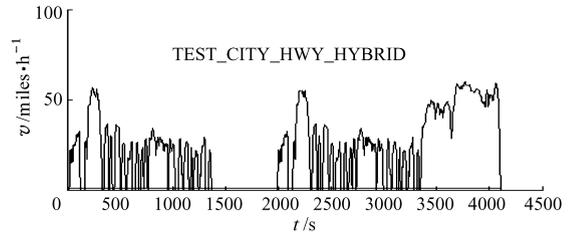


图 1 测试规程 TEST\_CITY\_HWY\_HYBRID

Fig. 1 TEST\_CITY\_HWY\_HYBRID procedure

Advisor 燃料电池混合动力车控制系统相关参数的调整通过元件功率比例系数进行调节,从而保证各个能源元件功率输出始终限定在一定的功率比例范围内,保证元件始终工作在较高的效率区,缺点是只考虑了元件的效率,没有考虑整个系统的效率,所以本文选择能源系统的几个关键控制参数作为优化变量参与优化计算,能够比较合理地评价能源系统配置能够达到的性能指标。

对控制参数和元件尺寸参数进行优化配置是基于 Advisor 的整车仿真模型,利用 Advisor 仿真模型同各种优化软件的接口,编写相应的优化程序和优化控制算法。利用 Matlab 优化工具箱提供的 FMINCON 函数编写相应优化程序进行优化计算。优化程序包括三部分:目标函数、约束函数和主函数。目标函数的作用主要是在主函数引入优化变量取值并调用整车仿真模型,对选定驱动循环进行仿真,最后返回优化目标值和约束值到工作空间;约束函数的主要作用是对加速、爬坡工况进行仿真分析并返回约束值到工作空间;主函数主要是设置优化变量、约束变量限值和优化选项并调用优化函数,最后保存优化结果,优化问题可以表示为

$$\begin{cases} \min f_1(\mathbf{x}) \\ \text{s. t. } g_j(\mathbf{x}) \geq 0 \\ \mathbf{x}'_i \leq \mathbf{x}_i \leq \mathbf{x}''_i \end{cases} \quad (1)$$

优化算式为

$$[\mathbf{X}, \mathbf{y}] = \text{fmincon}(f_1(\mathbf{X}); \mathbf{X}_0, \mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{A}_{eq}, \mathbf{B}_{eq}, \mathbf{L}, \mathbf{U}, f_2(\mathbf{x}), \dots, \mathbf{L}_c, \mathbf{U}_c) \quad (2)$$

式中  $f_1(\mathbf{x})$ ——优化目标函数,在优化变量空间内对指定的测试循环进行仿真,返回燃油消耗反数值  
 $\mathbf{L}, \mathbf{U}$ ——优化变量的上、下限值,分别由  $\mathbf{x}'_i$ 、 $\mathbf{x}''_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) 组成的向量  
 $\mathbf{X}_0$ ——优化初始值

$f_2(x)$ ——边界函数

$g_j$  分别为对加速性能、最高车速和最大爬坡度进行仿真计算,并返回仿真的结果, $j = 1, \dots, m$ ,其他参数定义参见 Matlab 中 fmincon 函数定义。

### 3 实例分析

燃料电池和蓄电池混合动力车整车参数和动力

表 1 燃料电池混合动力车参数

Tab.1 Parameters of the fuel cell hybrid vehicle

整车参数	数值	性能参数	数值
满载质量/kg	5 000	最高车速/ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	90
外形尺寸/mm	5 900×2 000×2 750	加速性能	0~60 km/h 加速时间小于 30 s
车轮半径 $r/\text{m}$	0.37	最大爬坡度	20% (10 km/h), 直接挡行驶有 8% 的爬坡能力
迎风面积 $A/\text{m}^2$	4.6	续驶里程/km	300

表 2 基准元件选型参数

Tab.2 Parameters of basis parts

参数名称	燃料电池发动机	蓄电池	电机
元件类型	PEMFC	NiMH	AC
额定功率/容量	50 kW	28 Ah	75 kW
仿真模型	功率-效率 MAP 图	内阻模型	效率 MAP 图
其他参数	最高效率 60%	串联、模块电压范围 4.8~7.8 V	最高转速 10 000 r/min 最大扭矩 270 N·m

几项说明如下:①燃料电池发动机的动态响应速度直接影响到能源系统蓄电池的配置,为了更合理地表述燃料电池输出功率动态特性,将燃料电池发动机输出功率范围划分为五挡工况,分别对应空气压缩机五挡调速范围,并分别就工况变化中和变化完两个状态对动态特性限值及工况转换时间进行了设定。②蓄电池采用串联方式,并联方式以增大蓄电池容量来取代,根据蓄电池放电内阻特性曲线取 SOC 限值范围为[0.4 0.8]。③电机输入电压范围为 120~480 V,考虑到提高动力总线电压等级可以提高驱动系统效率和减小驱动系统的体积和质量,一般限定动力总线电压为 380 V 以上<sup>[2]</sup>,所以蓄电池组的端电压范围限定为 240~480 V。④由于电机具有良好的调速特性,所以车辆采用固定变速比的一级减速器,同主减速器一起满足最高车速要求。

#### (2) 控制系统模型

仿真优化过程能量管理策略采用基线控制,其具体控制原理参见 Advisor 相关文献。

表 3~5 列出的 3 种能源配置系统 HEV1、HEV2、HEV3 分别都能满足车辆动力性能要求,但三者都没有针对测试规程进行控制参数优化和燃油经济性综合优化,为了比较综合优化结果,仿真过程

性能设计指标如表 1 所示。根据整车参数及性能设计要求编写整车参数文件,整车质量会根据燃料电池和蓄电池的不同选型而更新。

优化仿真模型包括基准元件模型和控制系统模型。

#### (1) 基准元件选型

基准元件选型如表 2 所示。

中采用了 SOC 校正,可以看出综合优化控制取得了良好的优化结果。其中综合经济性的计算公式为

$$f_{\text{combined}} = 0.55f_{\text{city}} + 0.45f_{\text{HWY}} \quad (3)$$

式中  $f$ ——百公里燃料消耗

用 Advisor 进行系统配置分析的优点是借助系统提供的大量试验数据和整车仿真模型,可以方便地根据自己的需要对某些模块或数据进行相应的修改,操作简单、易于实现,其局限性是由于系统仿真基本上都是采用试验数据构建的稳态模型,没有考虑行驶车辆功率动态特性对类似燃料电池这种效率受动态特性影响很大的元件的影响。

表 3 优化系统配置

Tab.3 Parameters of the optimized configurations

编号	FCE 功率/kW	蓄电池容量/Ah	蓄电池模块数	电机功率/kW	爬坡 度/%	加速时间/s
HEV1	29	36	53	76	20.02	8.75
HEV2	35	30	50	80	21.39	10.57
HEV3	48	24	50	74	20.19	14.60
综合优化值	50	38	51	76	22.30	9.70

### 4 结束语

在 Advisor 车辆仿真平台上,对燃料电池混合

表4 控制参数优化结果

Tab.4 Optimal control parameters of different configurations

编号	充电 功率/kW	FCE 最小 功率/kW	FCE 最大 功率/kW	FCE 最小 关闭时间/s	FCE 初始 状态(1:on)
HEV1	7.5	24	26	848	0
HEV2	12.5	7	30	242	0
HEV3	9	12.5	29	848	0
综合优化	18	21	30	982	0

动力车能源系统配置要素进行了阐述,提出在满足系统动力性能要求的前提下,以选定工况下车辆燃油经济性最优为目标,对电-电混合的燃料电池混合能源系统进行系统选型配置需要将控制参数同时作为优化变量的综合优化配置方法,最后对采用基线

表5 车辆 TEST-CITY-HWY-HYBRID 测试

规程下的燃油消耗比较

Tab.5 Comparison of fuel economy of

TEST-CITY-HWY-HYBRID kg/100 km

编号	城市工况	高速公路工况	C 综合评价
HEV1	2.361 6	2.179 8	2.279 8
HEV2	2.310 0	2.140 0	2.233 5
HEV3	2.374 0	1.996 0	2.203 9
综合优化	2.287 8	1.954 8	2.138 0

控制的某燃料电池混合动力客车进行了优化配置分析,取得了良好的优化结果,验证了优化方法的可行性和合理性。

### 参 考 文 献

- 1 陈清泉,孙逢春,祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2001.
- 2 陈全世,仇斌,谢起成. 燃料电池电动汽车[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- 3 陈勇,孙逢春. 电动汽车续航里程及影响因素的研究[J]. 北京理工大学学报,2001,21(5):46~50.
- 4 秦孔建,高大威,卢青春,等. 燃料电池汽车混合动力系统构型研究[J]. 汽车技术,2005(4):26~29.
- 5 Wong Y S, Chau K T, Chan C C. Optimization of energy management system in energy hybridizations[C]. EVS 18, 2001.
- 6 Keith Wipke, Tony Markel, Doug Nelson. Optimizing energy management strategy and degree of hybridization for a hydrogen fuel cell SUV[C]. EVS 18, 2001.

(上接第 17 页)

回收长坡制动能量、滑行能量等。对充放电控制策略理论的验证与优化可在试验台系统中进行,另外对其他储能方式的研究也可以根据需要进行扩展。

### 3.3 制动踏板平稳性在环仿真

电制动力矩作为辅助制动力矩将影响制动踏板跳动与驾驶平顺性,需要对电制动力矩进行优化控制,以使汽车制动与常规汽车制动系制动感觉相同。

尝试利用先进的控制方法,根据该模型与制动力相关关系和制动平顺性要求,建立制动踏板平稳性控制策略。控制策略的仿真试验可由本试验台架实现。

### 3.4 复合制动协调兼容在环仿真

要在保证制动安全的条件下实现能量充分回

收,就要与常规制动系统、ABS 系统良好协调兼容,要合理设计电动机制动转矩和制动器制动转矩,调整综合控制策略,实现电动机回馈能量制动与 ABS 制动协调控制。本试验台可进行集成了 ABS 功能及其他一些车辆行驶安全功能的再生制动系统的控制器仿真试验研究。

## 4 结束语

采用模块化分层设计的方法建立了汽车能量再生制动仿真试验台,具备汽车行驶工况、制动过程、道路阻力模拟、能量转换和能量储存功能。测控系统灵活方便、开放性较强。可实现包括汽车能量再生理论与方法研究在内的在环仿真试验,并且可以根据研究需要进行扩展。

### 参 考 文 献

- 1 何仁. 汽车制动能量再生方法的探讨[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2005,24(6):1~4.
- 2 何仁,孙龙林,吴明. 汽车新型储能动力传动系统节能机理[J]. 长安大学学报,2002,22(3):67~71.
- 3 Eiji Nakamura, Masayuki Soga, Akira Sakai. Development of electronically controlled brake system for hybrid vehicle[C]. SAE Paper 2002-01-0300, 2002.
- 4 Chan C C. The state of the art of electric and hybrid vehicle[J]. IEEE,2002,90(2):247~275.
- 5 赵国柱. 电动汽车再生制动稳定性研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2006.
- 6 全力,赵德安,朱学忠. 基于 DSP 的开关磁阻启动/发电机系统研究[J]. 农业机械学报,2005,36(10):138~141.