

燃料电池混合动力汽车驱动系统的优化控制

王爱华^{1,2}, 陈耀斌²

(1. 南京工业职业技术学院 电气系, 江苏 南京 210046; 2. Transportation Active Safety School Purdue, Institute of Engineering and Technology, Indianapolis 46202, USA)

摘要: 为了既提高整车系统效率, 又维持燃料电池和蓄电池工作在各自的高效区, 提出了一种全局优化与局部协调相结合的燃料电池混合车的能量控制策略的设计思想. 首先形成一个非线性、具有限制的、以整车系统效率最大为目标的优化问题, 然后选用序列二次规划法算法求解. 为保证各子系统工作在最优的范围内, 利用燃料电池动态特性慢的特点, 采用蓄电池第一优先使用的策略. 仿真结果表明, 所提议的优化控制策略提高了整车系统的效率, 维持了蓄电池的荷电状态在合理的区间, 同时使燃料电池也工作在高效区.

关键词: 燃料电池混合动力汽车; 能量控制策略; 序列二次规划算法

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2009)04-0363-06

Optimizing the energy management system of a parallel fuel cell hybrid electric vehicle

WANG Ai-hua^{1,2}, CHEN Yao-bin²

(1. Department of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Institute of Industry Technology, Nanjing, 210046, China; 2. Transportation Active Safety School Purdue, Institute of Engineering and Technology, Indianapolis 46202, USA)

Abstract: This paper presents a design philosophy for optimizing energy management strategies for fuel cell hybrid electric vehicles, combining global optimization and local coordination. First, a nonlinear optimization problem subject to a set of constraints was formulated and then solved using a sequential quadratic programming algorithm. In order to ensure optimal operating states of subsystems, the battery was always prioritized because fuel cell dynamic behavior is slower. Computer simulation results demonstrated that the proposed method raised the efficiency of the whole system. In addition, it showed that the battery works within its high-efficiency range.

Keywords: fuel cell hybrid electric vehicle; energy control strategy; sequential quadratic programming

燃料电池混合动力汽车, 其燃料电池作为电化学装置, 可直接转换气体燃料(如氢气)的化学能成为电能, 比传统的内燃发动机的效率更高, 并能实现零排放, 从而成为当今国内外开发研究的热点. 但是由燃料电池与其他储能元件(蓄电池、超级电容等)组合, 构成混合动力系统结构以及燃料电池发动机本身的新颖和复杂性, 给能量控制系统的开发带来了巨大的挑战.

目前关于能量控制策略的研究主要有3种. 一是基于规则的能量控制策略, 功率分配以维持蓄电池的荷电状态(SOC)在最有效区间为第一优先原则, 以此确定蓄电池需提供的功率, 剩余的功率由

燃料电池提供. 由于2套动力系统分别有自己的高效工作区, 不可能同时达到高效. 基于规则策略只提高蓄电池的效率, 没有对燃料电池产生的电能转化为机械能的效率进行优化, 也无法保证整车系统达到最大效率. 二是模糊控制策略, 利用模糊规则灵活地分配总的需求功率给燃料电池和蓄电池, 协调2个能量源尽量工作在各自的高效区. 不过, 该策略只能做到局部优化, 很难改进整车系统的效率^[1]. 第3种方法通常以提高燃料经济为目标而进行全局优化, 不足之处是只能全局优化, 不能保证局部(燃料电池和蓄电池)子系统工作在自己的最优区. 本文提出一种实时的燃料电池混合动力系统的能量优化和分配算法. 该算法以系统效率最大为设计目标, 在优化整个系统效率时, 采用蓄电池第一优先使用的策略, 即在蓄电池达到最小值极限之前一般是不充

电的.在这种情况下,总是用蓄电池提供车所需功率,燃料电池作为后备,燃料电池常工作在低功率区,反而具有高的效率.

1 驱动系统及其控制模式

1.1 驱动系统

燃料电池混合动力车驱动系统结构和控制系统如图1所示.该系统主要由氢质子膜燃料电池发动机、直流/直流变换器、镍氢蓄电池组、驱动电机、传动装置等组成.该车以燃料电池发动机为主要动力,以蓄电池为辅助动力.由于燃料电池和蓄电池2套独立驱动系统以并联方式连接,在不同的行驶工况下,可具有多种工作模式:在汽车加速或爬坡等高功率需求时,燃料电池和蓄电池同时提供功率;当车辆下坡或减速时,蓄电池利用回收制动时的能量充电;在汽车以巡航速度行驶时,由燃料电池供电,多余电量给蓄电池充电.

燃料电池产生的电能是通过功率变换器驱动电动机而转变为扭矩来得到的.通常将燃料处理与供给单元、燃料电池组及其运行支持系统与附属设备、功率控制器、变频调速器、电动机与减速器及相应的控制系统进行机电一体化集成,构成了质子交换膜燃料电池发动机概念^[2].本文选用福特 P2000 车用 75 kW 质子膜燃料电池发动机.蓄电池系统是选自本田(Insight)车用 6.5 A·h, 288 V 镍氢电池组.该电池组由 24 个模块串接而成.表1是单体电池的具体参数.

表1 镍氢电池规格表

Table 1 Battery specifications

电池参数	参数值
标称电压	1.2 V
比功率	200 W·/kg
比能量	65~70 W·h/kg
能量密度	150 W·h/kg
内阻	40~80 Ω
安培小时效率	90%

1.2 控制模式

驱动系统中各部件都具有独立的部件控制器(如图1所示),负责对各子部件的工作和调节控制,属于底层控制.整车控制器则对整个系统进行能量管理、功率分配及各部件的协调控制,属于上层控制.在整车控制器与驱动系统之间还连接有一个能量流控制器,属于协调控制层.能量流控制器的任务是综合来自上层控制器的总的功率需求命令和底层控制器反馈的各部件信息,制定合理有效的功率分配方案,送给部件控制器执行^[3].

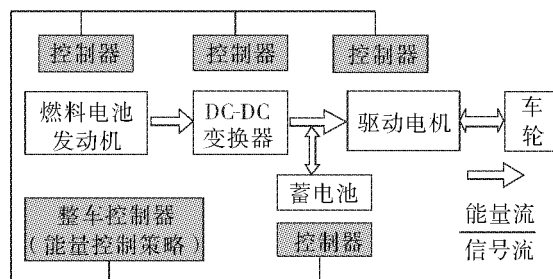


图1 动力驱动及控制系统示意图

Fig.1 Block diagram of the fuel cell HEV

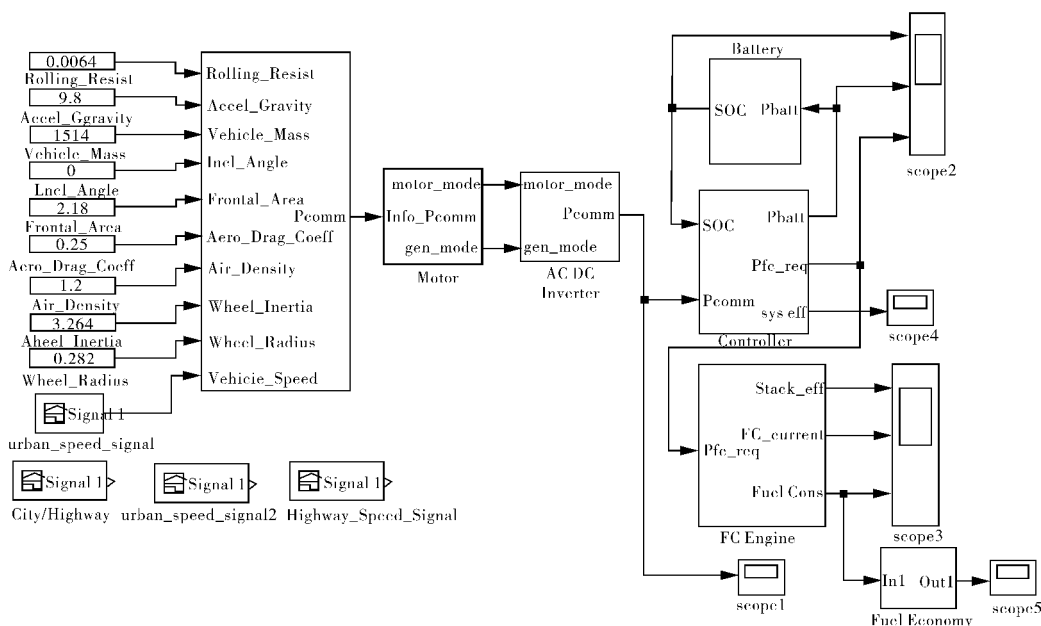


图2 燃料电池混合车仿真模型

Fig.2 The fuel cell HEV simulation model

燃料电池混合动力车仿真模型如图2所示.在整车建模的基础上,一个能量流控制器也同时建立.它有2个输入和2个输出.给出车辆总需求的功率(P_d)和蓄电池的荷电状态(SOC),这个控制器将得到所需的燃料电池功率(P_c)和蓄电池(P_b)的功率.能量流控制器如图3所示.

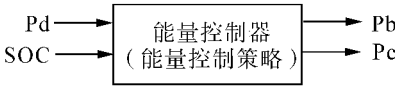


图3 能量流控制器框图

Fig.3 Energy controller model

2 能量控制策略的建立

能量流控制器的能量分配实际上是通过能量控制策略实现的.一个优化的能量流控制策略应实现在总的系统效率和燃料经济性最佳的前提下,协调各个子系统也工作在自己的高效区^[4].

本文共建立了3种控制策略:基于规则策略、模糊控制策略和数学优化策略.不同的控制策略有各自的控制目标,其控制效果也不同(如表2所示).

表2 3种控制策略优化目标及效果

Table 2 Design goals for three control strategies

控制策略	优化目标	优化效果
基于规则	蓄电池	局部
模糊控制	蓄电池、燃料电池	局部
数学优化	蓄电池、燃料电池、整车系统	局部、全局

2.1 基于规则的能量控制策略

对蓄电池而言,当蓄电池SOC最小极限值(SOC_{min})的定义域小于或等于30%,蓄电池必须无条件充电;SOC在50%~70%时,视车辆总的需求功率情况,可以充电也可以放电;当SOC大于90%时不充电.

本文使用燃料电池效率图(图4)作为燃料电池工作模型.燃料电池功率范围从0~8kW时是低功率区,在8~13kW时燃料电池的效率最高.当燃料电池运行在中等需求功率时(8~35kW),任何超出多余功率的都能用来给蓄电池充电.在需求功率较高时(35~75kW),不使用燃料电池充电给蓄电池.

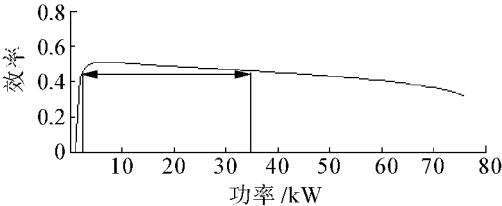


图4 燃料电池发动机效率图

Fig.4 Efficiency map for fuel cell engine

基于上述考虑,定义能量控制规则如下:

如果车所需的功率是负值,使用回收刹车能量充电给蓄电池,直到达到最大荷电状态(SOC_{max});

如果车所需功率是正值和零,那么初始的功率分布如下:

1) 如果 $SOC \geq SOC_{min}$, 使用蓄电池提供功率,由燃料电池提供剩余功率;

2) 否则使用燃料电池提供所需功率,多余功率充电蓄电池. 所需功率与充电方式如表3.

表3 所需功率与充电方式

Table 3 Required power and charge mode

所需功率 P_d /kW	充电方式
0~8	快速充电
8~35	慢速充电
35~75	不充电

2.2 模糊控制策略

模糊推理系统的输入有2个变量,分别是蓄电池的SOC和总需求的功率(P_d).输出是所需的蓄电池功率(P_b).为了简化,所需的燃料电池功率(P_c)没有加入模糊系统.它可通过下式得到: $P_c = P_d - P_b$.

输入变量 P_d 和SOC各定义了3个隶属度函数:大、中、小和高、中、低.输出 P_b 定义了5个隶属度函数:正大、正小、零、负小、负大.因此,模糊规则库有9个规则,如表4所示.注意:当SOC是低(L)时,定义域小于30%,蓄电池必须充电.当SOC是中(M)和高(H)时,定义SOC在30%~90%,对应总需求功率等于或大于零.需要指出的是,蓄电池功率(P_b)大于0(正大、正小)为放电,小于0(负小、负大)为充电^[5].

表4 模糊规则

Table 4 Fuzzy rules

条 件	结 论
如果 P_d 是大,且 SOC 是高	那么 P_b 是正大
如果 P_d 是中,且 SOC 是高	那么 P_b 是正小
如果 P_d 是小,且 SOC 是高	那么 P_b 是零
如果 P_d 是大,且 SOC 是中	那么 P_b 是正小
如果 P_d 是中,且 SOC 是中	那么 P_b 零
如果 P_d 是小,且 SOC 是中	那么 P_b 是负小
如果 P_d 是大,且 SOC 是低	那么 P_b 是零
如果 P_d 是中,且 SOC 是低	那么 P_b 是负小
如果 P_d 是小,且 SOC 是低	那么 P_b 是负大

2.3 数学优化控制策略

数学优化控制策略首先形成一个以整车系统效率最高为目标的优化问题,然后应用序列二次规划

法求解^[5]. 考虑到燃料电池动态反映慢的特点, 优化系统效率时, 在蓄电池达到最小值极限之前一般是不充电的.

2.3.1 整车系统效率计算

整车系统效率定义为

$$\eta = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}}$$

式中: P_{output} 为驱动车辆总的需求功率, P_{input} 为提供总需求功率的总功率消耗.

计算系统效率时, 2 种操作模式: 推进模式和减速制动模式, 是分别计算的. 推进模式包括加速、巡航和停止 3 种模式^[6]. 换句话说, 当车需求的功率是正值时, 车工作在推进模式. 反之, 当所需功率是负值时, 车工作在回收制动能量模式. 当所需功率是正值, 功率方程是:

$$P_{\text{output}} = P_{\text{total}} + P_{\text{accessories}},$$

$$P_{\text{input}} = P_{\text{fc}} + P_{\text{batt}},$$

燃料电池的效率和蓄电池效率分别如下:

$$\eta_{\text{fc}} = \frac{P_{\text{fc_request}}}{P_{\text{fc}}},$$

$$\eta_{\text{batt}} = \frac{P_{\text{batt_request}}}{P_{\text{batt}}}.$$

式中: $P_{\text{fc_request}}$ 为所需的燃料电池的功率, $P_{\text{batt_request}}$ 为所需的蓄电池功率, P_{fc} 由燃料电池提供的功率, P_{batt} 由蓄电池提供的功率. 那么整个系统的效率表示为

$$\eta = \frac{P_{\text{total}} + P_{\text{accessories}}}{P_{\text{fc}} + P_{\text{batt}}} = \frac{P_{\text{request}}}{\frac{P_{\text{fc_request}}}{\eta_{\text{fc}}} + \frac{P_{\text{batt_request}}}{\eta_{\text{batt}}}}.$$

2.3.2 非线性优化问题的形成

1) 推进模式.

在推进模式中, 当所需功率是正值时, 燃料电池和蓄电池是并联使用提供功率, 因此, 优化问题可写成:

$$\max \frac{P_{\text{request}}}{\frac{P_{\text{fc_request}}}{\eta_{\text{fc}}} + \frac{P_{\text{batt_request}}}{\eta_{\text{batt}}}},$$

subject to:

$$P_{\text{fc_request}} + P_{\text{batt_request}} = P_{\text{request}},$$

$$0 \leq P_{\text{fc_request}} \leq P_{\text{fc_request_max}},$$

$$0 \leq P_{\text{batt_request}} \leq P_{\text{batt_request_max}},$$

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC} \leq \text{SOC}_{\max},$$

and

$$P_{\text{batt_request_min}}(\text{SOC}) \leq P_{\text{batt}} \leq P_{\text{batt_request_max}}(\text{SOC}).$$

式中: $P_{\text{batt_max}}$ 表示最大蓄电池功率, SOC_{\max} 、 SOC_{\min} 和 $\text{SOC}_{\text{current}}$ 分别为最大、最小和当前蓄电池能量极限值^[7].

2) 回收制动模式.

在回收刹车模式中, 蓄电池功率为负值, 燃料电池单独提供能量. 在这种情况下, 优化问题能写成:

$$\max \frac{P_{\text{request}}}{\eta_{\text{fc}}},$$

subject to:

$$P_{\text{fc_request}} + P_{\text{batt_request}} = P_{\text{request}},$$

$$0 \leq P_{\text{fc_request}} \leq P_{\text{fc_request_max}},$$

$$P_{\text{batt_max}} \leq P_{\text{batt_request}} \leq 0.$$

and

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC} \leq \text{SOC}_{\text{init}}.$$

SOC_{init} 为车开始发动时的蓄电池的电荷水平, 从限制条件中可见, 车辆运行中若给蓄电池充电, 只要达到初始 SOC_{init} 值 (本文 $\text{SOC}_{\text{init}} = 65\%$) 即可, 没有必要充到 SOC 的最大值. 这是为了让蓄电池留有空间在后继的运行中通过回收刹车功率充电.

2.3.3 用序列二次规划法求解

上面描述的非线性的有限制的优化问题, 因为实时执行的需要, 应用序列二次规划法来求解^[8]. 下面简单的算法是用于得到这个解.

If $P_{\text{request}} \geq 0$

If $\text{SOC} > \text{SOC}_{\min}$, 优化应用于推进模式

Else

优化应用于推进模式和蓄电池充电模式,

直到 SOC 达到 SOC_{init}

End

End

3 仿真结果及分析

为了验证能量管理策略的控制效果, 3 个能量控制策略: 数学优化法、基于规则法和模糊控制法分别进行了城市、高速和城市—高速混合工况下的仿真. 图 5 所示城市工况和所需的功率.

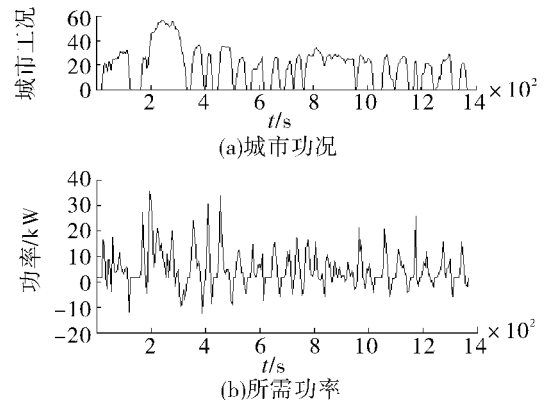


图5 城市驾驶循环工况和所需功率

Fig. 5 City drive cycles and required power

图6是3个控制策略在城市工况下的仿真.该图中有9个子图,从上到下平分成3组,每组由SOC的水平、蓄电池功率 P_b 以及燃料电池功率 P_c 3部分组成,都记录为时间的函数.从各组图中可见,电池组SOC的初始值是65%,最低极限是30%.燃料电池功率水平范围为0~30 kW.

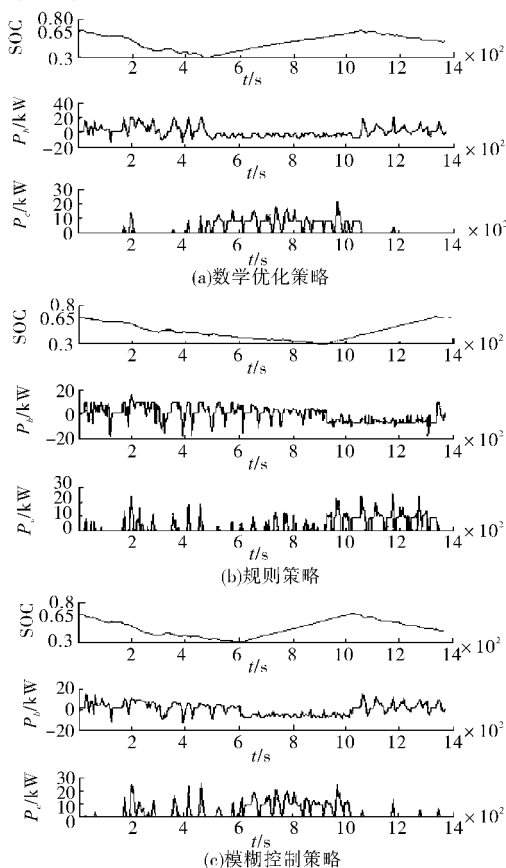


图6 3个控制策略在城市工况下的仿真

Fig.6 Simulation results for three energy control strategies

图6顶部的一组图是数学优化法.该策略优先使用蓄电池功率,燃料电池作为后备.从仿真开始到第450 s期间,蓄电池的SOC从65%一直在减少到最小允许值,这段期间完全或几乎完全使用蓄电池提供车所需功率.与此同时,燃料电池运行在很低功率或完全停止工作,只在大约200 s时出现了几个尖头图案,对应蓄电池功率此时正好是供不应求.因为蓄电池的SOC已减到最小可允许值,在450~1000 s的期间,燃料电池开始成为主要功率提供者.此时蓄电池功率变为负值(例如回收制动能量用于再充电).

图6中间一组图是基于规则策略在城市工况下的仿真.与数学优化策略相比,其蓄电池放电更慢,充电更快.在燃料电池工作期间,燃料电池功率范围是0~30 kW,平均值大约为15 kW.相比之下,数学优化策略中燃料电池功率用的较少,很难超过15 kW,通常只有8 kW.

图6底部的一组图是模糊控制策略的仿真结果.与数学优化法比较,可看出蓄电池功率用的更节省, SOC减少的更慢.电池充电也更慢,就有更多机会回收制动能量.

总的来说,基于规则法和模糊法没有数学优化法在功率分配和蓄电池充电方面好.原因是蓄电池的峰值功率在基于规则和模糊控制法中是低于在数学优化法中.基于规则和模糊控制法的最大蓄电池功率小于20 kW.而数学优化法曾几次达到20 kW,而且放电时间短而充电时间长.这说明数学优化使用较少的燃料电池功率给蓄电池充电,保证燃料电池工作在相对低的功率区而得到较高的效率.

图7给出了3种循环工况下的系统效率和燃料经济的统计数据图表.数学优化的系统性能优于模糊逻辑系统,而模糊逻辑系统又优于基于规则系统.从燃料经济看,高速的燃料经济比城市的高,因为车在城市运行时速度慢而且经常停.从系统效率看,城市运行好于高速,因为城市运行所需功率较低,通常只需蓄电池单独提供车所需功率即可.

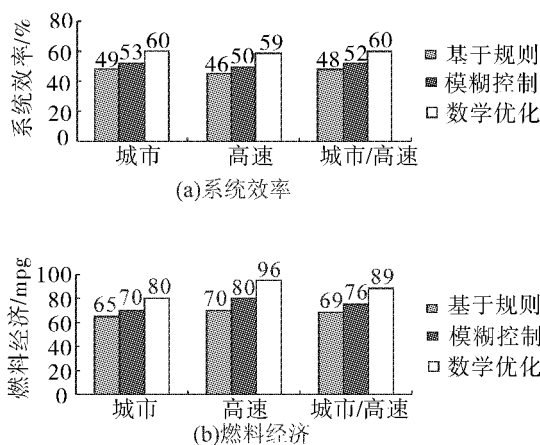


图7 系统效率和燃料经济

Fig.7 System efficiency and fuel economy

4 结束语

本文分析了并联燃料电池混合动力汽车的控制策略,对燃料电池混合动力车的整车模型进行了不同工况、不同控制策略的仿真.从仿真结果可以看出所提议的数学优化的控制策略是有效的,不仅满足了改进燃料经济的目标而且提高了整个驱动系统的效率.通过对3种控制策略的比较,不难发现所提议的数学优化策略在不同的工况下有更优越的性能,尤其在城市中行驶的效果更为明显,因为此时汽车总的需求功率较低,而燃料电池工作在低功率区时的效率是最高的.

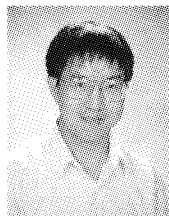
参考文献:

- [1] WANG A. Novel design of energy control strategy for parallel hybrid electric vehicle[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 26(2): 107-113.
- [2] KIM M J, PENG H, LIN C C, et al. Testing, modeling, and control of fuel cell hybrid vehicle [C]// Proc ACC, Portland, USA, 2005:3859-3864.
- [3] ZHANG R, CHEN Y. Control of hybrid dynamic systems for electric vehicles [C]//Proc ACC, Arlington, VA: [s. n.], 2001:103-108.
- [4] WANG A, YANG W. Design of energy management strategy in hybrid vehicles by evolutionary fuzzy system [C]//Intelligent Control and Automation, Dalian, 2006, 2: 8324-8328.
- [5] WANG A. An intelligent energy management and control system for hybrid electric vehicles [D]. West Lafayette: Purdue University, 2001.
- [6] CHO H Y. A new power control strategy for fuel cell hybrid vehicles [D]. Starkville: Mississippi State University, 2004.
- [7] ZHU Y, CHEN Y, WU Z, WANG A. Optimization design of an energy management strategy for hybrid vehicles [J]. Int J Alternative Propulsion, 2006, 1(1):47-62.
- [8] 朱元, 吴志红, 田光宇. 基于马尔可夫决策理论的燃料电池混合动力汽车能量管理策略[J]. 汽车工程, 2006, 28(9):798-802.
- ZHU Yuan. WU Zhihong, TIAN Guangyu. An energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicle based on Markov decision process [J]. Automotive Engineering, 2006, 28(9):798-802.

作者简介:



王爱华,女,1954年生,副教授(访问学者)。主要研究方向为建模与仿真、人工智能、控制算法、智能系统工程。



陈耀斌,男,1960年生,教授。主要研究方向为人工智能、生物系统建模与仿真。

2010 图像分析与信号处理国际会议

2010 International Conference on Image Analysis and Signal Processing

IASP 2010 aims to provide a high-level international forum for scientists, researchers and engineers to present the state-of-the-art advancements in the studies of Image Analysis and Signal Processing. It will be held in Huaqiao University, Xiamen, Fujian, China on April 9 ~ 11, 2010. It aims to strengthen relations between industry research laboratories, and universities and to create a primary symposium for Chinese scientists and their overseas counterparts to exchange ideas, research results and practical experiences.

This conference is technical sponsored by IEEE-Hangzhou Chapter and universities from home and abroad. Accepted Academic papers will be published by IEEE Press with the cooperation of American Scholars Press. The proceedings will be indexed by EI and ISTP database.

The conference encourages submissions on practical experiences. The topics of interest include, but are not limited to:

A. Image Analysis B. Signal Processing C. Computer Related Fields D. Applications

The conference will accepted papers for review before, during and after the conference before the deadline. Authors are invited to submit their papers electronically (as .doc or .pdf attachments) following the instruction on the conference web pages Aug 01, 2009. The website of IASP2010 will be opened on Aug 01, 2009. Formatting information is available from the website at <http://iasp2010.hqu.edu.cn>.

Important Dates:

Paper submission starting: Aug 01, 2009.

Paper submission deadline: Dec 01, 2009.

Notification of paper acceptance: Dec 31, 2009.

Final version of paper submission deadline: Jan 20, 2009.

Registration deadline: Jan 20, 2009.

Contact Information:

Address: College of Computer Sci. & Tec., Huaqiao University, Xiamen, Fujian, China.

E-mail: IASP2010@hqu.edu.cn.

Tel: (+86)595-22692621.