

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.12.025

基于最小瞬时等效燃油消耗的液压混合动力车辆能量管理策略

李翔晟¹, 陈斗², 周永军¹

(1. 中南林业科技大学 交通运输与物流学院, 湖南 长沙 410004;
2. 湖南铁路科技职业技术学院, 湖南 株洲 412000)

摘要: 为提高混合动力车辆的燃油经济性和降低尾气排放, 根据混合动力车辆2个或2个以上能量流之间的功率分流分配和能量利用情况, 提出了最小瞬时等效燃油消耗量策略。通过分析串联式液压混合动力传动能量流关系, 以储能元件蓄能器的虚拟等效燃油消耗为准则, 建立了液压混合动力车辆最小瞬时等效燃油消耗模型。对液压混合动力车辆能量管理进行了研究, 并以某型公共汽车参数为例, 运用计算机软件通过城市循环工况第1部分和公路循环工况对该策略的液压混合动力车辆燃油经济性进行了仿真计算。仿真结果表明: 采用最小瞬时等效燃油消耗策略的液压混合动力车辆的燃油经济性改善率接近30%; 采用最小瞬时等效燃油消耗策略在提高车辆节能效果上具有较明显的优势。

关键词: 汽车工程; 能量管理; 最小瞬时等效燃油消耗策略; 液压混合动力车辆; 优化; 燃油经济性

中图分类号: U469.79

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2012) 12-0148-05

Energy Management Strategy of Hydraulic Hybrid Vehicle Based on Instantaneous Equivalent Fuel Consumption Minimization

LI Xiangsheng¹, CHEN Dou², ZHOU Yongjun¹

(1. School of Transportation and Logistics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha Hunan 410004, China;
2. Hunan Vocational College of Railway Technology, Zhuzhou Hunan 412000, China)

Abstract: In order to improve the fuel economy and reduce the emission of hybrid vehicle, according to the power flow distribution and energy utilization of two or more energy flows of hybrid vehicle, the strategy of instantaneous equivalent fuel consumption minimization was put forward. Based on analyzing the relationship of serial hydraulic hybrid power transmission energy flows, taking the virtual equivalent fuel consumption of the energy storage element accumulator as the criterion, the model of transient equivalent fuel consumption minimization of hydraulic hybrid vehicle was established. The energy management of hydraulic hybrid vehicle was discussed. Taking the parameters of a type of bus as an example, the fuel economy of the hydraulic hybrid vehicle using the presented strategy under the first portion of the urban driving cycle and the road driving cycle was simulated by computer software. The simulation results show that (1) the fuel economy improvement rate of the hydraulic hybrid vehicle using the presented strategy is about 30%; (2) by means of the strategy of minimum instantaneous equivalent fuel consumption in improving energy-saving effect of vehicle has obvious advantage.

Key words: automobile engineering; energy management; instantaneous equivalent fuel consumption

收稿日期: 2012-02-13

基金项目: 湖南省教育厅基金项目 (09C1023)

作者简介: 李翔晟 (1963-), 男, 湖北天门人, 教授. (jerry@126.com)

minimization strategy; hydraulic hybrid vehicle; optimization; fuel economy

0 引言

节能与环保是汽车工业可持续发展的永恒主题。由于液压混合动力车辆的储能元件液压蓄能器较蓄电池在能量充放效率和时效性以及功率密度和比功率等方面具有明显优势,尤其是对启停频繁的行走机械和循环工况的执行机构,因蓄能器能快速实现能量再生转换,具有明显的节能效果,因此液压混合动力传动也越来越受到关注。液压混合动力车辆采用液压储能传动和二次调节技术,这种动力传动系统由于储能元件蓄能器的加入使得它与传统车辆的工作方式有很大的不同,主要表现在动力源的工作方式基本与负载无关联,即液压泵的输出流量与液压马达流量没有直接的耦联关系,二者之间的流量差将直接流入或流出蓄能器(蓄能或释能)。这样动力源可在相对经济稳定的工作区工作,降低燃油消耗和排放。液压混合动力车辆的工作原理、特点、技术方案和储能元件匹配特性参见文献[1-4]。

在国外,美国在液压混合动力车辆及能量管理策略方面进行了较全面深入的研究,一些研究成果已在实际中应用,如美国环保署和伊顿公司对 UPS 的送货车的联合试验表明:液压混合动力车辆的燃油经济性改善率一般为 30%~60%^[5]。德国 M. A. N 公司、日本 Mitsubishi 公司和英国 Ricardo 公司都开发研制过液压混合动力车辆,对样车的测试表明:其燃油经济性较传统车辆可提高 25%~34%^[6-7]。在国内,液压混合动力车辆的研究主要集中在哈尔滨工业大学、上海交通大学、北京理工大学、华南理工大学和南京理工大学等一些高校以及上海交大神舟、嘉捷博大和北京创世奇科技公司等研究机构和单位^[8-10]。其研究主要集中在制动能再生和二次调节技术,对能量管理策略方面的研究还不够深入。本文提出将蓄能器储存的能量定义为虚拟比油耗,利用最小瞬时等效燃油消耗对其能量管理策略进行优化分析,并通过城市和公路循环工况对使用优化策略的燃油经济性进行仿真分析,探讨其对燃油经济性的改善情况。

1 液压混合动力系统的简化模型

为了说明能量流关系,将液驱混合动力车辆传动系统简化为图 1 所示模型。图 1 中显示了每个组件之间的功率流和相关的效率,其中正向能量流指

流入蓄能器和车辆行驶需求的能量,逆向能量流指流出蓄能器和车辆减速或制动工况回收反馈的能量。当蓄能器释放能量参与驱动车辆时,动力源(由发动机-液压泵和液压蓄能器组成)输出的总能量是发动机-液压泵和液压蓄能器输出能量之和。为了保持辅助动力源蓄能器的压力或充液状态在期望的水平,在蓄能器释放能量后必须重新补充能量回来。给蓄能器充液的这部分能量要么由发动机提供,要么由车辆制动能反馈。相反,若驱动车辆行驶时,蓄能器处于充液过程,这时发动机提供满足车辆行驶和蓄能器充液所需的能量。这些储存在蓄能器的能量保持系统压力(或蓄能器的充液状态)接近目标水平或低阈值水平,进一步准备满足车辆将来可能发生的运动状态变化(加速或制动),这意味着将来可使用更少的燃油驱动车辆行驶。

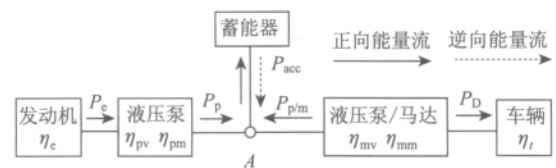


图 1 串联式液压混合动力车辆能量流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of energy flow of serial hydraulic hybrid vehicle

根据图 1,忽略蓄能器连接管路的压力损失和油箱压力变化的影响,对能量流节点 A 列出功率平衡方程:

$$P_{acc} = P_p + P_{p/m}, \quad (1)$$

式中, P_{acc} 为流入/流出蓄能器的瞬时功率; P_p 为液压泵的输出功率; $P_{p/m}$ 为二次元件(液压泵/马达)的功率。

2 最小瞬时等效燃油消耗策略

2.1 优化目标函数

在理想情况下,发动机-液压泵和蓄能器之间的功率最优分配满足式(1),并取决于发动机总的燃油消耗在整体行驶循环中是否最小化。若采用全局最优能量管理策略,需要事先完全清楚车辆整体行驶规律。然而在通常情况下,车辆行驶的速度或载荷变化是未知的或动态变化的,其变化规律很难事先完全清楚。为了克服全局最优过程的这一缺点,提出采用最小瞬时等效油耗策略,即以局部最优方法代替全局最优。即在任何时间,优化

目标函数描述为:

$$\min J = \min_{u(k)} \left\{ \frac{d[m_{\text{fequ}}(t)]}{dt} \right\}, \quad (2)$$

式中, $\frac{d[m_{\text{fequ}}(t)]}{dt}$ 为等效燃油消耗量, g/s, 其值为发动机实际燃油消耗量和蓄能器储存或释放能量的等效燃油消耗量之和, 即

$$\frac{d[m_{\text{fequ}}(t)]}{dt} = \frac{d[m_{\text{fice}}(t)]}{dt} + \frac{d[m_{\text{face}}(t)]}{dt}, \quad (3)$$

式中, $\frac{d[m_{\text{fice}}(t)]}{dt}$ 为发动机实际燃油消耗量, g/s; $\frac{d[m_{\text{face}}(t)]}{dt}$ 为蓄能器储存或释放能量的等效燃油消耗量, g/s。

2.2 最小等效燃油消耗策略

利用能量流概念, 在液压混合动力传动系统中, 液压蓄能器可被模仿为 1 个虚拟的辅助可逆油箱。当蓄能器处于释放能量模式时, 意味着消耗额外的燃油; 当蓄能器处于充液模式时, 意味着储存一些燃油到油箱供以后使用。因此, 最小瞬时等效燃油消耗策略的方法是将储存在液压蓄能器的液压能 E_{acc} 转换为一定数量的燃油量 $m_{\text{face}}^{[11]}$, 其大小通过能量流节点 A 的能量比率和转化成液压能的平均效率来估计等效燃油量。将燃油转化为液压能的过程如图 2 所示, 把储存在蓄能器的能量作为等效燃油流入或流出蓄能器, 以虚拟比油耗加以定义。



图2 能量流及燃油转化成液压能示意图

Fig. 2 Schematic diagram of energy flow and conversion of fuel mass to hydraulic energy

将蓄能器的虚拟比油耗 $\overline{SC}_{\text{acc}}$ 定义为给蓄能器充液储存 1 kW 液压能发动机所消耗的平均燃油量, 它可以用式 (4) 计算:

$$\overline{SC}_{\text{acc}} = \frac{\overline{SC}_{\text{ice}}}{\eta_p \eta_{\text{acc}}}, \quad (4)$$

式中, $\overline{SC}_{\text{ice}}$ 为发动机将燃油转换为液压能的平均比油耗, g/(kW·h); η_p 为液压泵的平均总效率; η_{acc} 为蓄能器的平均充放效率。

蓄能器的等效燃油率可用式 (5) 和式 (6) 计算。

当蓄能器充液时:

$$\frac{d[m_{\text{face}}(t)]}{dt} = - \frac{\overline{SC}_{\text{acc}} P_{\text{acc}} \eta_{\text{acc}}}{3600}. \quad (5)$$

当蓄能器放液时:

$$\frac{d[m_{\text{face}}(t)]}{dt} = - \frac{\overline{SC}_{\text{acc}} P_{\text{acc}}}{3600 \eta_{\text{acc}}}. \quad (6)$$

式中负号是为了说明蓄能器是消耗燃油 (+), 还是储存燃油 (-); 当蓄能器充液时功率流为正, 式 (5) 为负对应储存燃油; 当蓄能器放液时功率流为负, 式 (6) 为正对应消耗燃油。

根据式 (5) 和式 (6), 蓄能器的“等效燃油率”可为正、负或零, 取决于蓄能器的功率流方向及大小; 发动机燃油率只能为正或零, 即发动机运行或关闭。因此, 在所有时间要使等效燃油消耗最小, 发动机的燃油消耗应始终接近最小值。即要使等效燃油消耗率最小, 发动机瞬时燃油消耗率在所有运行时间内也应减少到最低限度。

已知发动机的最小燃油消耗率是发动机输出功率的函数, 蓄能器的等效燃油率是蓄能器输出/输入功率的函数, 则等效燃油率方程 (3) 可改写为:

$$\frac{d[m_{\text{fequ}}(t)]}{dt} = \frac{d\{m_{\text{fice}}[P_e(t)]\}}{dt} + \frac{d\{m_{\text{face}}[P_{\text{acc}}(t)]\}}{dt}. \quad (7)$$

将式 (1) 代入式 (7) 得:

$$\frac{d[m_{\text{fequ}}(t)]}{dt} = \frac{d\{m_{\text{fice}}[P_e(t)]\}}{dt} + \frac{d\{m_{\text{face}}[P_p(t) + P_{p/m}(t)]\}}{dt}. \quad (8)$$

又知发动机比油耗 $b_e = \frac{C}{\eta_e}$, 燃油消耗量

$\frac{d[m_{\text{fice}}(t)]}{dt} = b_e P_e$, 由于 $P_e = P_p / \eta_p$, 则发动机的燃油消耗量可表示为:

$$\frac{d[m_{\text{fice}}(t)]}{dt} = \frac{C}{\eta_e} \cdot \frac{P_p}{\eta_p}, \quad (9)$$

式中, C 为与发动机类型有关的常数, 柴油机 $C = 86.9 \text{ g/(kW·h)}$, 汽油机 $C = 84.7 \text{ g/(kW·h)}$; η_e 为发动机的效率, 柴油机为 34% ~ 45%, 汽油机为 27% ~ 35%; $\eta_p(\beta_p, \Delta p_p, n_p)$ 为液压泵的效率。

一般来说, 等效燃油消耗最小化策略是基于动力系统的准稳态假设, 发动机的转矩 T_e 和转速 n_e 与液压泵的转矩 T_p 和转速 n_p 完全匹配。根据发动机与液压泵的匹配关系 $T_e = T_p$, $n_e = n_p$; 则发动机的效率 $\eta_e(T_e, n_e)$ 可以转换用 $\eta_e(\beta_p, \Delta p_p, n_p)$ 表示。其中, β_p 为变量液压泵的排量比; Δp_p 为液压泵进

出口压差。

由式 (9) 可知, 要使发动机燃油消耗最小, 在液压泵的输出功率一定时, 要求液压泵和发动机效率的乘积最大。根据文献 [2], 动力源的总效率是液压泵排量比、转速和压力的函数, 则发动机燃油量可表示为液压泵功率和压力的函数。因此等效燃油消耗量可表示为:

$$\frac{d[m_{\text{equ}}(t)]}{dt} = \frac{d[m_{\text{ice}}(P_p, \Delta p_p)]}{dt} + \frac{d[m_{\text{acc}}(P_p + P_{p/m})]}{dt} \quad (10)$$

对一个给定的行驶周期, 假定已知在每个瞬间液压马达功率的需求, 通过搜索液压泵输出功率所有的可能值, 以最小瞬时等效燃油消耗策略, 利用式 (10) 选择瞬时功率流分配, 求解式 (2)。

其中, 液压泵的输出功率:

$$P_p = \frac{Q_p \Delta p_p}{60} = \frac{V_{p\text{max}} \beta_p n_p \Delta p_p}{60\,000} \quad (11)$$

式中, Q_p 为液压泵流量, L/min; $V_{p\text{max}}$ 为液压泵最大排量, mL/r; n_p 为液压泵转速, r/min。

二次元件 (液压泵/马达) 输出或需求的功率:

$$P_{p/m} = \left(\frac{mgfu_a}{3\,600} + \frac{C_D A u_a}{76\,140} + \frac{\delta m a u_a}{3\,600} \right) \eta_{p/m}^{\pm 1} \quad (12)$$

式中, $\eta_{p/m}^{\pm}$ 的 (+) 为泵模式效率, (-) 为马达模式效率; u_a 为车辆行驶车速; m 为车辆质量; g 为重力加速度; A 为车辆迎风面积; a 为车辆行驶加速度; C_D 为空气阻力系数。其他符号含义见表 1。

表 1 仿真计算使用主要参数

Tab. 1 Main parameters for simulation

参 数	参数值	参 数	参数值
整车总质量 m/kg	11 000	蓄能器最高压力 $p_{\text{max}}/\text{MPa}$	30
迎风面积 A/m^2	6.80	蓄能器最低压力 $p_{\text{min}}/\text{MPa}$	20
轮胎半径 R/m	0.45	蓄能器充气压力 p_0/MPa	12
滚动阻力系数 f	0.014	液压泵的排量	125
空气阻力系数 C_D	0.60	$V_{p\text{max}}/(\text{mL} \cdot \text{r}^{-1})$	
旋转质量换算系数 δ	1.05	液压泵的最高转速 /	2 200
主减速器传动比 i_0	6.33	$(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	(A4VSO)
发动机 $P_{\text{emax}}/\text{kW}$	155/2 500	液压马达排量	55
	$\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	$V_{m\text{max}}/(\text{mL} \cdot \text{r}^{-1})$	
发动机 $T_{\text{emax}}/(\text{N} \cdot \text{m})$	700/1 500	蓄能器容积 V_{acc}/L	40 63 80
	$\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	多变指数	1.2

车辆行驶车速:

$$u_a = \frac{377 Q_m \eta_{mv} R}{i_0 V_{m\text{max}} \beta_m} \quad (13)$$

式中, $Q_m = Q_p + Q_{\text{acc}}$ 为液压马达流量, L/min; Q_{acc} 为蓄能器提供的流量, L/min; β_m 为液压马达排量

比; $V_{m\text{max}}$ 为液压马达最大排量, mL/r; η_{mv} 为液压马达容积效率。

液压泵和马达进出口两端压差:

$$\Delta p = p_{\text{in}} - p_{\text{out}} \quad (14)$$

式中, p_{in} 和 p_{out} 分别为液压泵和马达的进口和出口压力。

3 仿真分析

为了说明最小瞬时等效燃油消耗策略的效果, 根据本文上面的分析和建立的数学模型, 运用 MATLAB/Simulink, 以某型公共汽车基本参数根据城市行驶循环工况 (ECE) 的第 1 部分和公路行驶工况 (HWEFT) 要求进行仿真计算, 仿真模型如图 3 所示^[11-12]。对液压驱动混合动力车辆, 储能元件蓄能器的充液状态可以在很大范围内变化, 例如从 10% ~ 100%。另外气囊式蓄能器有 2 个突出的特点: 一是它可以瞬时快速充放; 二是它没有蓄电池深度充/放电相关的问题。因此, 从最大限度地提高液压混合动力车辆燃油经济性的观点出发, 可不必考虑蓄能器充液状态的限制。为了实际应用的需要, 优化时动力源采用文献 [12-13] 介绍的基于规则的运行模式。仿真计算使用的主要参数如表 1 所示, 计算结果如表 2 所示。

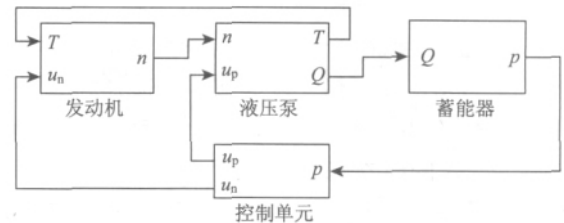


图 3 仿真程序逻辑图

Fig. 3 Diagram of simulation program logic

表 2 燃油经济性改善率

Tab. 2 Improvement rate of fuel economy

策 略	蓄能器 容积/L	燃油经济性改善率 (城市工况) /%	燃油经济性改善率 (公路工况) /%
基于初始 规则	40	23.55	7.30
	63	24.75	6.31
	80	23.56	5.10
基于等效油耗 最小策略	40	29.85	12.80
	63	29.83	11.20
	80	29.10	10.10

由表 2 可知, 采用最小瞬时等效燃油消耗策略在城市行驶循环工况下较传统车辆燃油经济性改善

率最高接近 30%；对于公路行驶工况，由于车辆启停次数少，制动能量回收少，动力源经常处于工作状态，燃油经济性改善率不如城市工况明显，但其改善率最低也能达到 10% 以上。另外，通过仿真分析，匹配不同容积的蓄能器对燃油经济性的改善率也有影响。在不同的能量管理策略下，其容积大小对燃油经济性的改善影响也不同，除初始规则假设外，匹配较小容积的蓄能器具有最好的燃油经济性改善率，因为较小容积的蓄能器质量较轻，比能量和循环效率高。对于城市循环工况，采用最小瞬时等效燃油消耗策略时，蓄能器容积的大小对燃油利用效率没有明显影响，不同于基于初始规则的结果，这主要是由优化方法的特性决定的。不论蓄能器容积的大小，最小瞬时等效燃油消耗策略总可以找到发动机与液压泵最好的匹配功率点。

4 结论

本文在简要介绍液压混合动力能量管理策略对其燃油经济性影响的基础上，提出了在最小瞬时等效燃油消耗策略下对液压混合动力车辆经济性进行研究的思想。通过对最小瞬时等效燃油消耗策略思想的分析，建立了相应的计算模型。根据该模型，以城市和公路循环工况对使用策略的燃油经济性进行了仿真计算。仿真结果表明：采用最小瞬时等效燃油消耗策略，液压混合动力车辆的燃油经济性改善率接近 30%，比一般基于规则方法的燃油经济性改善率提高 5% 以上，在改善车辆节能效果上具有较明显的优势。同时在满足车辆性能和制动能量回收要求的条件下，储能元件采用较小容积的蓄能器，对于城市和公路行驶循环工况均具有最好的经济性。

参考文献:

References:

- [1] 常思勤. 关于一种液压混合动力车辆的探讨 [C] // 2002 年江苏机电一体化技术学术会议. 南京: 南京机械工程学会, 2002: 26 - 27.
CHANG Siqin. Research on a Kind of Hydraulic Hybrid Vehicle [C] // The Jiangsu Electromechanical Integration Technology Conference in 2002. Nanjing: Society of Mechanical Engineering of Nanjing, 2002: 26 - 27.
- [2] 李翔晟, 常思勤. 静液压储能传动汽车动力源系统的匹配效率 [J]. 中国公路学报, 2007, 20 (1): 118 - 122.
LI Xiangsheng, CHANG Siqin. Matching Efficiency of Power Source System for Vehicle with Energy Accumulation Hydrostatic Drive [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20 (1): 118 - 122.
- [3] 李翔晟, 常思勤. 新型电控液驱车辆储能元件特性分析 [J]. 中国机械工程, 2007, 18 (10): 1244 - 1247.
LI Xiangsheng, CHANG Siqin. Study on Characteristics of Energy Storage Element for a New Vehicle with Electronic Control and Hydraulic Drive [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18 (10): 1244 - 1247.
- [4] 李翔晟, 常思勤. 蓄能器与车辆静液压储能传动系统特性及匹配分析 [J]. 公路交通科技, 2004, 21 (3): 110 - 113.
LI Xiangsheng, CHANG Siqin. Research on Matching between Accumulator and Hydrostatic Transmission System of Vehicle [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21 (3): 110 - 113.
- [5] KIM Y J, FILIPI Z. Series Hydraulic Hybrid Propulsion for a Light Truck: Optimizing the Thermostatic Power Management [J]. SAE Paper, 2007 - 24 - 0080.
- [6] NUKAZAWA N, YOICHIRO K. Development of a Braking Energy Regeneration System for City Buses [J]. SAE Paper, 872265.
- [7] BOLOHM T, ANDERSON S. Hybrid Refuse Truck Study [C] // 2004 MSC Software Virtual Product Development Conference. Huntington Beach, California: IEEE, 2004: 101 - 105.
- [8] 赵春涛, 姜继海, 赵克定. 车辆串联混合传动中二次调节系统的节能制动 [J]. 中国机械工程, 2003, 14 (6): 529 - 532.
ZHAO Chuntao, JIANG Jihai, ZHAO Keding. Research on Energy Recovery Braking in Hydrostatic Transmission with Secondary Regulation of Series Hybrid Vehicle [J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14 (6): 529 - 532.
- [9] 陈华志, 苑士华. 城市用车辆制动能量回收的液压系统设计 [J]. 液压与气动, 2003 (4): 1 - 3.
CHEN Huazhi, YUAN Shihua. Design of the Hydraulic System for Braking Energy Storage to City Vehicle [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2003 (4): 1 - 3.
- [10] 舒红, 潘文军, 袁景敏, 等. 混合动力汽车匀速下坡再生制动模型预测控制 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (2): 137 - 143.
SHU Hong, PAN Wenjun, YUAN Jingmin, et al. Model Predictive Control of Regenerative Braking for a Hybrid Electric Vehicle Cruising Downhill [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (2): 137 - 143.

(下转第 158 页)

- ZHANG Xi. The Relevance Analysis of Cargo Transportations among Various Transport Means in China [J]. Systems Engineering, 1991, 9 (2): 51-57.
- [6] 狄娟. 江苏省交通运输结构变化分析和预测 [D]. 南京: 东南大学, 2005.
- DI Juan. Research on Change and Forecast of Transportation Structure in Jiangsu Province [D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [7] 帅斌, 李明, 胡骥, 等. 交通运输经济 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2011: 27-29.
- SHUAI Bin, LI Ming, HU Ji, et al. Traffic and Transportation Economy [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2011: 27-29.
- [8] 荣朝和. 论运输化 [M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2006: 52-79.
- RONG Chaohe. On Transportation [M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2006: 52-79.
- [9] 许庆斌, 荣朝和, 马运, 等. 运输经济学导论 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006: 52-79.
- XU Qingbin, RONG Chaohe, MA Yun, et al. Introduction of Transportation Econom [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006: 52-79.
- [10] 李莹英. 运输结构分析与协调性评价研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- LI Yingying. Analysis of Transportation Structure and Research on Its Coordination Evaluation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [11] 袁静. 交通运输供需结构均衡研究 [D]. 西安: 长安大学, 2007.
- YUAN Jing. Study on Structure Equilibrium of Transportation Supply and Demand [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [12] 广东省统计局. 广东统计年鉴 (2010 年) [EB/OL]. [2012-08-08] <http://www.gdstats.gov.cn>.
- Guangdong Provincial Statistics Bureau. Statistic Yearbook of Guangdong Province (2010) [EB/OL]. [2012-08-08] <http://www.gdstats.gov.cn>.
- [13] 广东省统计局. 2011 年广东国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. [2012-08-08] <http://www.gdstats.gov.cn>.
- Guangdong Provincial Statistics Bureau. Statistical Communique of National Economy and Society Development in Guangdong Province in 2011 [EB/OL]. [2012-08-08] <http://www.gdstats.gov.cn>.
- [14] 陈贻龙, 邵振一. 运输经济学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002: 525-602.
- CHEN Yilong, SHAO Zhenyi. Transportation Economics [M]. Beijing: China Communications Press, 2002: 525-602.

(上接第 147 页)

- [9] 李阳, 吴群琪. 我国交通运输可持续发展的战略研究 [J]. 综合运输, 2004 (10): 7-11.
- LI Yang, WU Qunqi. Research on Strategy of Sustainable Transportation Development in China [J]. Comprehensive Transportation, 2004 (10): 7-11.
- [10] 梁晓辉, 李琼, 吴燕. 可持续发展政策下的交通运输发展战略 [J]. 交通科技与经济, 2008 (5): 99-101.
- LIANG Xiaohui, LI Qiong, WU Yan. The Transportation Developmental Strategy under Sustainable Development Policy [J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2008 (5): 99-101.
- [11] 尹杰, 李枫, 李旭辉. 发达国家可持续发展交通发展战略研究 [J]. 交通与运输, 2009 (7): 39-42.
- YIN Jie, LI Feng, LI Xuhui. Research on the Sustainable Transportation Development Strategies in the Developed Countries [J]. Traffic & Transportation, 2009 (7): 39-42.
- [12] 石宝林. 我国交通发展模式转型研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
- SHI Baolin. Study on China Transport Development Mode Transformation [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.

(上接第 152 页)

- [11] 李宏才, 王伟达, 韩立金, 等. 混联式混合动力控制系统硬件在环仿真平台设计与应用 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (4): 130-135.
- LI Hongcai, WANG Weida, HAN Lijin, et al. Design and Application of HIL Simulation Platform for Parallel-series Hybrid Power Control System [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (4): 130-135.
- [12] 闫叶翠, 刘国庆, 陈杰. 液压混合动力公交车动力性能仿真与试验研究 [J]. 汽车工程, 2010, 32 (2): 93-97.
- YAN Yecui, LIU Guoqing, CHEN Jie. Research on Dynamic Performance Simulation and Testing of a Hydraulic Hybrid Bus [J]. Automotive Engineering, 2010, 32 (2): 93-97.
- [13] 李翔晟, 常思勤, 韩文. 静液压储能传动汽车动力源系统匹配及性能分析 [J]. 农业机械学报, 2006, 37 (3): 12-16.
- LI Xiangsheng, CHANG Siqin, HAN Wen. Research on Performances and Matching between Engine and Accumulator and Pump for the Vehicle of Hydrostatic Transmission System [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37 (3): 12-16.