

文章编号:1671-8879(2009)06-0098-05

# 电动汽车起步加速过程的动力学建模与仿真

汪贵平<sup>1,2</sup>, 马 建<sup>2</sup>, 杨盼盼<sup>1</sup>, 闫茂德<sup>1</sup>

(1. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**为了提高单电机驱动电动汽车起步加速过程的性能,通过对电动汽车的行驶阻力方程和无刷直流电机数学模型的分析,建立了电动汽车起步加速过程的动态数学模型,实现了汽车与电机系统的有机结合。在此基础上,利用 Matlab7.0/Simulink 软件,建立了车速与电流双闭环调速系统的仿真模型,并对车速阶跃响应进行了仿真研究。结果表明,采用车速与电流双闭环调速策略,能使电机获得良好的机械特性,使电动汽车起步加速过程更加符合驾驶人的驾驶习惯,且具有超调小、响应快、控制精度高和抗干扰能力强等优点,可满足电动汽车起步加速过程对驱动系统的要求。

**关键词:**汽车工程;电动汽车;无刷直流电机;起步加速过程;双闭环调速系统

**中图分类号:**U469.72

**文献标志码:**A

## Dynamic modeling and simulation of starting and acceleration for electric vehicle

WANG Gui-ping<sup>1,2</sup>, MA Jian<sup>2</sup>, YANG Pan-pan<sup>1</sup>, YAN Mao-de<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to enhance the performance of starting and acceleration processes for electric vehicle (EV) driven by single-motor, the dynamic model is presented by analyzing the equation of running resistance and the mathematic model of brushless directing current motor (BLDCM), which can realize the reasonable combination of vehicle and motor. On the basis of this dynamic model, the simulation model of vehicle speed and current double closed-loop speed regulating system is established, and the step response of vehicle speed is simulated by employing the Matlab 7.0/Simulink software. The results show that: the mechanical properties of motor can be improved by using speed and current dual-loop speed control strategy that makes the starting and acceleration processes to correspond with the driver's driving habits; the overshoot is small, the output speed following input signal changes quickly, and the system has better performance and stronger anti-interfere ability. Therefore, the double closed-loop speed regulating system can satisfy the demands of starting and acceleration process for driving system of EV. 7 figs, 9 refs.

**Key words:** automobile engineering; electric vehicle; brushless direct current motor; starting and acceleration process; double closed-loop speed regulating system

## 0 引言

汽车工业的可持续发展面临能源安全与环境保护的双重压力,电动汽车作为一种无污染和有效利用能源特性的绿色交通工具,在世界各国呈现加速发展的趋势<sup>[1]</sup>。电动汽车的电机驱动系统是研究的重点,其核心装置是电机及其控制器。无刷直流电机具有效率高、调速范围宽广平滑、起动及制动性能好和容易实现再生制动等一系列优点,已经在电动汽车中获得了广泛的应用。电动汽车在行驶过程中,其电源电压、道路状况和驾驶模式多变,为保证良好的驾驶特性和乘坐舒适性,对电动汽车起步加速和速度控制的研究具有重大的理论价值和实用意义<sup>[2]</sup>。文献[3]针对电动汽车的无阻尼和有阻尼加速过程,根据起步加速时间的要求,分别研究了电机的恒转矩和恒功率控制策略,但没有考虑电机动态模型;文献[4]建立了电动汽车用无刷直流电机的数学模型,对无刷直流电机及其转速/电流双闭环调速控制系统的阶跃响应进行了设计与仿真,改善了电机的机械特性,可满足电动汽车驱动的要求,但没有融合电动汽车的行驶速度、行驶阻力和启动加速特性。为此,本文通过对电动汽车起步加速过程中的受力模型和无刷直流电机数学模型的分析,提出了电动汽车电机动态模型、输出转矩与车速的交互关系,建立了起步加速过程电动汽车的动态数学模型;进而采用车速与电流双闭环控制策略,对起步加速过程进行了分析与动态建模,并对其进行了仿真。

## 1 电动汽车起步加速过程的建模

### 1.1 电动汽车起步加速的行驶阻力

电动汽车在起步加速过程中,需要克服的阻力有<sup>[5]</sup>:滚动阻力  $F_f$ 、空气阻力  $F_w$ 、坡道阻力  $F_i$  和加速阻力  $F_j$ 。因此,电动汽车行驶的总阻力  $F_t$  为

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (1)$$

通过分析电动汽车的行驶阻力,可以得到电动汽车行驶方程式为

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j = fmg \cos(\alpha) + \frac{C_D A V^2}{21.15} + mg \sin(\alpha) + \delta m \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

式中: $f$ 为滚动阻力系数; $m$ 为电动汽车车身质量; $g$ 为重力加速度; $\alpha$ 为电动汽车在坡道上行驶时道路的坡度角; $C_D$ 为空气阻力系数; $A$ 为电动汽车迎风面积; $V$ 为电动汽车行驶速度; $\delta$ 为电动汽车旋转质量转换系数; $t$ 为时间。

$\delta$  主要与飞轮的转动惯量、车轮的转动惯量以及传动系的传动比有关,其计算式为

$$\delta = 1 + \frac{1}{m} \frac{\sum I_w}{r^2} + \frac{1}{m} \frac{I_f i_g^2 i_0^2 \eta}{r^2} \quad (3)$$

式中: $I_w$ 为车轮的转动惯量; $I_f$ 为飞轮的转动惯量; $i_0$ 为主传动比; $i_g$ 为变速器的速比; $\eta$ 为传动系的机械效率; $r$ 为车轮半径。

### 1.2 无刷直流电机的数学模型

永磁无刷直流电机的等效电路如图1所示。其中: $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 为三相输入电压; $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 为三相定子电流; $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 为三相反电动势; $R_a = R_b = R_c = R_s$ 为定子每相电阻; $L_s$ 为定子每相绕组的自感; $L_m$ 为任意两相绕组之间的互感;定义电感  $L = L_s - L_m$ 。

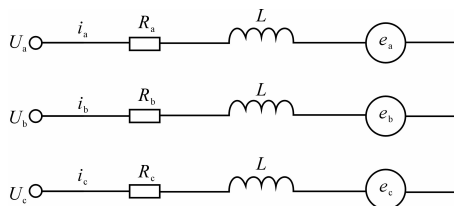


图1 无刷直流电机等效电路

对电机模型做以下假设<sup>[6]</sup>:①忽略齿槽效应和磁路饱和;②忽略磁滞、涡流、集肤效应和温度参数的影响;③定子绕组为  $60^\circ$  相带整距绕组;④三相定子绕组对称。可以得出其电压平衡方程<sup>[7]</sup>为

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

当 a、b 两相导通时,设  $i_a = -i_b = I_d$ ,  $e_a = -e_b$ , 则由式(4)可得无刷直流电机的动态电压方程为

$$U_a - U_b = 2R_s I_d + 2L \frac{dI_d}{dt} + 2e_a \quad (5)$$

设  $U_a - U_b = U$ , 则有

$$U = 2R_s I_d + 2L \frac{dI_d}{dt} + 2e_a \quad (6)$$

整理后,可得

$$\frac{dI_d}{dt} = -\frac{R_s}{L} I_d - \frac{e_a}{L} + \frac{U}{2L} = -\frac{1}{T_1} I_d - \frac{e_a}{L} + \frac{U}{2L} \quad (7)$$

式中: $T_1 = L/R_s$ 。

根据无刷直流电机的特性,其反电势幅值正比于速度。可表示为

$$e_a = k_e \omega \quad (8)$$

式中: $k_e$  为反电势系数; $\omega$  为电机角速度。

根据电机拖动基本原理<sup>[8]</sup>,则有

$$\left. \begin{aligned} e_a &= -e_b = k_e \omega \\ T_e &= \frac{P}{\omega} = \frac{e_a i_a + e_b i_b}{\omega} = 2k_e I_d \\ T_e - T_L &= J \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: $J$  为电机的转动惯量; $T_e$  为电机输出电磁转矩; $T_L$  为负载转矩。

根据式(7)和式(9),可得无刷直流电机的状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \frac{2k_e I_d - T_L}{J} \\ \frac{dI_d}{dt} &= -\frac{1}{T_i} I_d - \frac{k_e \omega}{L} + \frac{U}{2L} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

根据式(7)~式(10),可得无刷直流电机的动态结构如图 2 所示( $s$  为微分系数)。

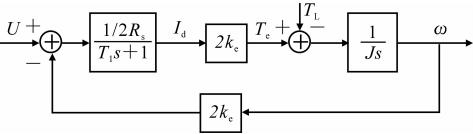


图 2 无刷直流电机动态结构

1.3 电动汽车起步加速过程的数学模型

电动汽车在正常行驶时,电机轴输出的转矩为  $T_e$ ,经过变速器和减速箱后,传送到驱动轴上的转矩  $T_t$  为

$$T_t = T_e i_g i_0 \eta \quad (11)$$

又根据  $T_t = F_t r$ ,可得

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{T_t}{i_g i_0 \eta} = \frac{F_t r}{i_g i_0 \eta} = \\ &= \left[ fmg \cos(\alpha) + \frac{C_D A V^2}{21.15} + mg \sin(\alpha) + \right. \\ &\quad \left. \delta m \frac{dV}{dt} \right] r / i_g i_0 \eta \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{令 } k = \frac{r}{i_g i_0 \eta},$$

$T_L = k fmg \cos(\alpha) + k mg \sin(\alpha)$ ,则有

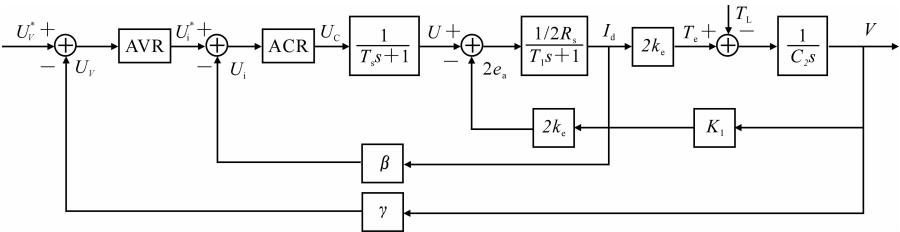


图 4 电动汽车车速与电流双闭环控制系统

电动汽车的车速和电机电流分别由 2 个独立的调节器 AVR 和 ACR 控制,车速调节器的输出就是

$$T_e - T_L = \frac{k C_D A V^2}{21.15} + k \delta m \frac{dV}{dt} \quad (13)$$

令  $C_1 = \frac{k C_D A}{21.15}$ ,  $C_2 = k \delta m$ ,则可得出电动汽车车速与电机输出转矩的关系式为

$$T_e - T_L = C_1 V^2 + C_2 \frac{dV}{dt} \quad (14)$$

由于电动汽车在起步阶段车速较低, $C_1 V^2$  可忽略不计,故式(14)可简写为

$$T_e - T_L = C_2 \frac{dV}{dt} \quad (15)$$

电动汽车车速与电机输出转速的关系式为

$$V = \frac{\pi n r}{30 i_g i_0} \quad (16)$$

式中: $n$  为电机转速。

由式(8)、式(13)和式(14),可以得出电动汽车起步加速过程的结构框图如图 3 所示。其中, $K_1 =$

$$\frac{\omega}{V} = \frac{2\pi n / 60}{V} = \frac{i_g i_0}{r}。$$

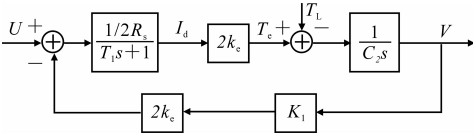


图 3 电动汽车起步加速过程

2 起步加速过程双闭环调速系统

2.1 起步加速过程双闭环模型

根据得出的电动汽车起步加速过程的结构框图,结合自动控制原理和直流电机调速理论,在起步加速阶段,电动汽车的车速与电流双闭环控制系统的框图如图 4 所示。其中: $\beta$  为电流反馈系数; $\gamma$  为车速反馈系数。车速环作为外环,主导整个调速控制系统的框图如图 4 所示。其中: $\beta$  为电流反馈系数; $\gamma$  为车速反馈系数。车速环作为外环,主导整个调速控制系统,使车速快速跟随给定电压  $U_v^*$  变化;电流环作为内环,使电流紧紧跟随外环调节器输出电压变化; $U_i^*$  为计算后的电压; $U_i$ 、 $U_v$  均为反馈电压; $U_c$  为控制电压。

电流调节器的给定。因此,电流环能够随车速的偏差调节电机电枢的电流。车速调节器 AVR 和电流调节

器 ACR 均为 PI 调节器。

### 2.2 起步加速过程分析

#### 2.2.1 电机电流上升阶段

在突加给定电压  $U_V^*$  后,偏差电压  $\Delta U = U_V^* - U_V$  经过 AVR 和 ACR 调节,使电机电流  $I_d$  上升,当  $I_d$  大于负载电流  $I_{dL}$  后,电机开始转动。由于电机的惯性作用,使车速不会上升很快,偏差电压仍然很大,使 AVR 的输出电压保持为限幅值  $U_{im}^*$ ,迫使  $I_d$  迅速上升。这时 AVR 进入饱和状态。

#### 2.2.2 电机电流恒定,车速上升阶段

在此阶段,AVR 始终处于饱和状态,车速环相当于开环。ACR 为在给定  $U_{im}^*$  为恒值下的电流调节系统, $I_d$  恒定,电机获得加速转矩,电机输出转速增加,使车速上升。

#### 2.2.3 车速调整阶段

当车速上升到期望值  $V_0$  后,AVR 输入偏差为 0;但 AVR 由于积分作用,输出仍为  $U_{im}^*$ ,车速继续上升。当车速超过给定转速时,AVR 的输入偏差为负,开始退饱和。AVR 的输出减小,即电流给定减小,并通过电流环调节,使  $I_d$  下降,电机将因为电磁转矩减小而减速,车速最终调整在给定值达到稳定状态<sup>[9]</sup>。

## 3 仿真结果分析

在 Matlab7.0/Simulink 环境下对电动汽车起步加速过程进行了仿真研究。电动汽车参数为: $m = 900\text{ kg}$ , $r = 0.285\text{ m}$ , $i_0 = 6.17$ , $i_g = 1$ , $\eta = 0.95$ ;电机参数为: $R_s = 0.34\text{ }\Omega$ , $L_s - L_m = 0.75\text{ mH}$ , $k_e = 0.16\text{ V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 。电动汽车起步加速过程车速曲线、电机输出转矩曲线和电机电流曲线分别如图 5 ~ 图 7 所示。

从图 5 可以看出,当给定期望车速  $V_0 = 5\text{ m/s}$  时,经过 5 s 后车速达到给定值。从图 6 可以看出,在

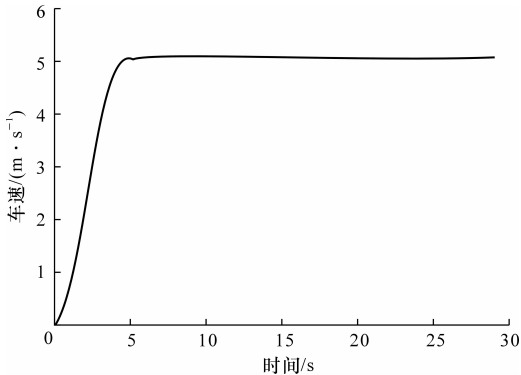


图 5 电动汽车起步加速过程车速曲线

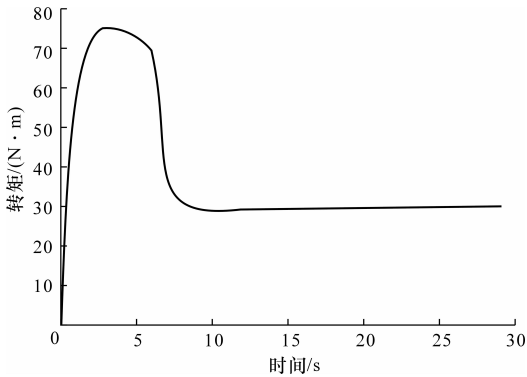


图 6 电机输出转矩曲线

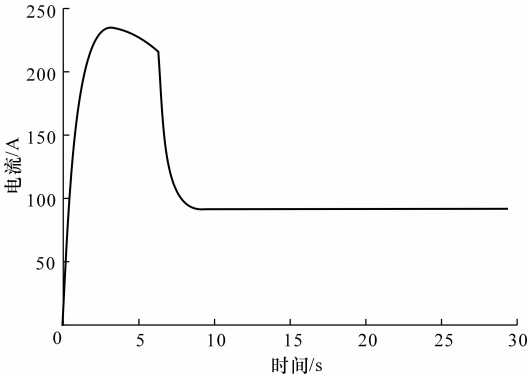


图 7 电机电流曲线

电动汽车起步加速阶段,电机输出电磁转矩,使车速上升;当车速达到给定车速时,只需要电机输出相应的转矩,以克服路面滚动阻力、空气阻力等因素,电机输出  $30\text{ N} \cdot \text{m}$  的转矩与阻力相平衡。从图 7 可以看出,电流由 0 迅速上升到恒定值,并保持不变,使车速迅速上升;当车速达到给定车速时,电流迅速下降到恒定值,电机仅提供克服行驶阻力的电磁转矩。

## 4 结 语

(1)通过分析电动汽车起步加速过程的受力模型和无刷直流电机的动态模型,建立了无刷直流电机驱动的电动汽车在起步加速过程中的动态数学模型,实现了机(汽车)电(电机)的有机结合。

(2)针对电动汽车起步加速过程的动态数学模型,采用车速与电流双闭环控制策略,使电机获得良好的机械特性,并使电动汽车在起步加速过程的行驶状态更加符合驾驶人的驾驶习惯,且具有结构简单、实现方便等优点。

(3)在 Matlab7.0/Simulink 环境下,对双闭环控制系统进行了仿真。仿真结果表明,采用车速与电流双闭环控制策略的无刷直流电机系统,具有响应快、控制精度高和抗干扰能力强的特点,可满足电动汽车起步加速过程对电机的要求。

参考文献：

References:

[1] 吴克刚. 低排放汽车技术的发展趋势[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(5): 67-70.  
WU Ke-gang. Development of low exhaust emission automotive technique[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2003, 23(5): 67-70.

[2] 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, 2002.

[3] 余建刚, 万淑芸. 电动汽车电动机起步加速控制研究[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2003, 17(1): 1-3, 8.  
SHE Jian-gang, WAN Shu-yun. A study on the control of starting and acceleration for EV motor[J]. Journal of Hubei Automotive Industries Institute, 2003, 17(1): 1-3, 8.

[4] 卫国爱, 全书海, 朱忠尼. 电动汽车驱动用无刷直流电动机的控制与仿真[J]. 电机与控制应用, 2009, 36(1): 16-19, 31.  
WEI Guo-ai, QUAN Shu-hai, ZHU Zhong-ni. Simulation and control of brushless DC motor in electric ve-

hicle drives[J]. Electric Machines & Control Application, 2009, 36(1): 16-19, 31.

[5] 余志生. 汽车理论[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[6] Chau K T, Chan C C, Liu C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2246-2257.

[7] 黄志峰, 胡育文, 高瑾, 等. 无刷直流电机仿真模型的建立与不同控制策略的仿真研究[J]. 电机与控制应用, 2006, 33(9): 3-7.  
HUANG Zhi-feng, HU Yu-wen, GAO Jin, et al. Research of BLDC simulation model and comparison under different control strategies[J]. Electric Machines & Control Application, 2006, 33(9): 3-7.

[8] 陈伯时, 阮毅, 陈维钧, 等. 电力拖动自动控制系统: 运动控制系统[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2003.

[9] Powell B K, Bailey K E, Cikanek S R. Dynamic modeling and control of hybrid electric vehicle powertrain systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1998, 18(5): 17-33.

(上接第 97 页)

频率比  $\omega < 1$  时,  $\omega_{gj} < \omega_l$ , 液流边界与气流边界将相互倾扎、渗透。气液体流速差越大, 则气液体交界面的空穴或相互倾扎越大, 液膜两侧空穴处将产生微涡流。因此, 即使在周围气体环境完全相同(包括静止空气环境)的情况下, 喷射的液束也会沿中轴线发生略微的倾斜, 这一“对称性破缺”现象已经被其他研究者的试验和本项目试验所证实。

6 结 语

(1) 色散关系式与准则(液体韦伯数、欧拉数、气液体雷诺数和气体马赫数)有关, 而气液体表面波的圆频率和气相扰动振幅的差别取决于雷诺数; 在此基础上, 能够进一步研究喷射表面波的波形、碎裂条件、碎裂点的最不稳定频率, 以及射流的稳定性随这些准则的变化关系。

(2) 当气液体圆频率比  $\omega = 1$  时,  $\omega_{gj} = \omega_l$ , 液流边界与气流边界重合; 当  $\omega > 1$  时,  $\omega_{gj} > \omega_l$ , 气体的扰动振幅将大于液体的扰动振幅, 在液流边界与气流边界之间将出现空穴; 当  $\omega < 1$  时,  $\omega_{gj} < \omega_l$ , 液流边界与气流边界将相互倾扎、渗透。

(3) 气液体流速差越大, 则气液体交界面的空穴或相互倾扎越大, 液膜两侧空穴处将产生微涡流; 即使在周围气体环境完全相同(包括静止空气环境)的情况下, 喷射的液束也会沿中轴线发生轻微的倾

斜, 出现“对称性破缺”现象。

参考文献：

References:

[1] Jazayeri S A. Nonlinear analysis and experimental investigation of liquid sheet breakup[D]. Victoria: University of Victoria, 1997.

[2] Jazayeri S A, Li X G. Nonlinear instability of plane liquid sheets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 406: 281-308.

[3] Rangel R H, Sirignano W A. Nonlinear growth of Kelvin-Helmholtz instability: effect of surface view tension and density ratio[J]. Physical Fluids, 1988, 31: 1845-1855.

[4] Lozano A, Olivares A G, Dopazo C. Instability growth leading to a liquid sheet breakup[J]. Physics of Fluids, 1998, 10(9): 2188-2197.

[5] Tharakan T J, Ramamurthi K, Balakrishnan M. Nonlinear breakup of thin liquid sheets[J]. Acta Mech, 2002, 156(1/2): 29-46.

[6] 周光炯, 严宗毅, 许世雄, 等. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

[7] 岳晓峰, 王瑾, 梁亮, 等. 油束雾化形成机理分析[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 117-121.  
YUE Xiao-feng, WANG Jin, LIANG Liang, et al. Analysis of fuel spray atomization mechanism[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 117-121.