

DOI: 10.3901/JME.2010.10.116

基于加速度反馈的任意道路和车速 跟随控制驾驶员模型*

丁海涛 郭孔辉 李 飞 张建伟
(吉林大学汽车动态模拟国家重点实验室 长春 130022)

摘要: 建立一个高效的能够适应复杂汽车行驶工况的驾驶员模型是进行“人—车—路”闭环仿真的关键。利用离散的数表方式对驾驶员跟随的任意道路路径和车速进行描述。以此为基础,提出任意路径下的预瞄点搜索算法,使“预瞄—跟随”驾驶员建模理论可应用于任意道路路径和车速的跟随控制。根据车速变化不断更新侧向加速度增益,实现驾驶员模型方向控制和速度控制的解耦。通过引入加速度反馈,建立一个简单而有效的跟随任意道路路径和车速的方向与速度综合控制驾驶员模型。仿真表明该驾驶员模型具有良好的路径与车速跟随精度。

关键词: 驾驶员模型 “预瞄—跟随”理论 加速度反馈 方向与速度综合控制

中图分类号: U461.1

Arbitrary Path and Speed Following Driver Model Based on Vehicle Acceleration Feedback

DING Haitao GUO Konghui LI Fei ZHANG Jianwei
(State Key Laboratory of Automobile Dynamic Simulation, Jilin University, Changchun 130022)

Abstract: Establishing an effective driver model suitable for complex driving conditions is the key to “driver-vehicle-road” closed-loop simulations. The driver’s expected path and speed are described by discrete numerical tables. Based on this, a preview point searching algorithm for arbitrary path is proposed, which makes the “preview-follower” driver modeling theory be suitable for arbitrary path and speed following. Decoupling of the directional control and speed control of the driver model is implemented through updating vehicle lateral acceleration gain according to the vehicle speed. By introducing vehicle acceleration feedback, a simple but effective direction & speed integrated control driver model for arbitrary path and speed following is built. Simulation indicates the driver model has good accuracy in both path and speed following.

Key words: Driver model “Preview-follower” theory Acceleration feedback Direction and speed integrated control

0 前言

汽车的安全性不仅与汽车本身的特性有关,还与驾驶汽车的驾驶员行为特性密切相关。随着人们对汽车安全性的日益重视,“人—车—路”闭环性能的研究显得越来越重要。在“人—车—路”闭环性能仿真中最为关键的是建立一个高效的能够适应各种汽车行驶工况的驾驶员模型。目前国内外有不少

学者在此领域进行了深入的研究^[1-5]。本文是在郭孔辉院士提出的“预瞄—跟随”驾驶员建模理论的基础上,通过在方向控制和速度控制上引入加速度反馈,建立一个简单而有效的跟随任意道路路径和任意车速的方向与速度综合控制驾驶员模型,并给出了该驾驶员模型的参数获取方法。

1 驾驶员模型的描述

本文建立的驾驶员模型是在预先知道道路轨迹(以驾驶员跟随的道路中心线来描述)和期望车速(以道路上的速度要求来描述)的前提下建立的。它

* 国家高技术研究发展计划(863 计划, 2006AA1103103)和吉林省科技发展计划(20090112)资助项目。20090711 收到初稿, 20091228 收到修改稿

根据预期道路和预期车速的信息, 通过引入汽车速度和位置等姿态反馈, 决策驾驶员所应该施加到汽车上的转向盘转角和统一油门, 如图 1 所示。

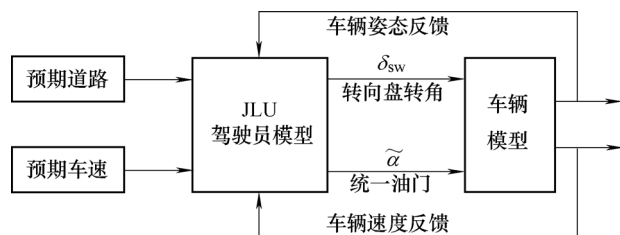


图 1 驾驶员模型描述

图 1 中统一油门是为了简化汽车的速度控制而提出的^[5]。它把驾驶员对制动踏板和油门踏板(包括变速器和离合器)的操作用一个统一的物理量来描述, 使得驾驶员速度控制模型得以简化。本文假设汽车装备自动变速器, 可以仅用油门踏板和制动踏板控制汽车的车速, 避免了使用手动变速器时需要换挡和操作离合器等复杂过程。而且, 把制动描述为一个“负油门”, 这样形成了“统一油门”的概念。由此可以看出, 驾驶员只需要决策统一油门, 就可以实现对车速的控制。决策出的统一油门可以进一步转化为驾驶员对油门踏板和制动踏板的操作。在装有手动变速器的汽车上, 也可根据“换挡规律”进一步转换为驾驶员对变速器和离合器的操作。

驾驶员希望跟随的“道路”和“车速”千变万化, 十分复杂。为了能够统一表达“预期道路”和“预期车速”, 本文采用了离散的数表方式进行描述(图 2 和下表)。驾驶员跟随的预期道路轨迹可以用“大地坐标系”下道路中心线上的一系列有序的点来描述。考虑到在道路上还有行驶车速的要求, 道路中心线上的点除了具有位置信息外, 还应该具有驾驶员期望的车速信息。因此, 每个点可用 (x_i, y_i, u_i) 三个变量来描述, 其中 (x_i, y_i) 表示了驾驶员需要跟随的预期道路中心线坐标, u_i 表示了 (x_i, y_i) 位置时驾驶员预期达到的车速。 $i=1$ 为道路的起点, $i=n$ 为道路的终点。在道路曲率比较小时, 描述道路的点可

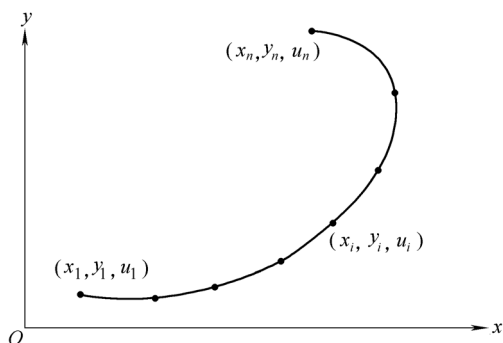


图 2 预期道路和预期车速的描述

表 描述驾驶员预期道路和车速的数表

序号	x 轴坐标	y 轴坐标	期望车速
1	x_1	y_1	u_1
2	x_2	y_2	u_2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
n	x_n	y_n	u_n

以取得稀疏一些; 在道路曲率比较大时, 即比较急的弯道上, 描述道路的点应该取得密一些。根据以上输入, 本文建立的驾驶员模型将决策适当的转向盘转角 δ_{sw} 和统一油门 $\tilde{\alpha}$, 使车辆的实际输出跟随驾驶员期望的道路轨迹和速度。

2 基于侧向加速度反馈的方向控制模型

为了使问题简化, 假设汽车以一个恒定的车速行驶, 跟随一个小曲率道路, 且汽车的侧向位移相对于纵向位移来说很小。这种假设下可以认为, 驾驶员对道路轨迹的跟踪就是对汽车期望的侧向位移的跟踪。设汽车期望的侧向位移为 $f(t)$, 汽车当前实际的侧向位移为 $y(t)$ 。根据“预瞄—跟随”驾驶员建模理论^[6], 驾驶员可以通过“预瞄”获取道路前方的信息。假设驾驶员的预瞄时间为 T , 驾驶员对当前转向盘的操作是希望在经过预瞄时间 T 后, 使车辆的实际侧向位移 $y(t+T)$ 尽可能逼近汽车期望的侧向位移 f_e , 其中 $f_e = f(t+T)$ 。

如图 3 所示, 车辆在 t 时刻的侧向位移为 y , 侧向速度为 v_y , 预瞄时间为 T 的预瞄点与车辆的侧向偏差为 Δf_p 。由前面的假设可知, $\Delta f_p \approx f_e - y$ 。假设汽车在当前时刻以一个理想的侧向加速度 a_y^* 在侧向做匀加速运动, 可以在时间 T 之后使车辆到达期望轨迹, 则

$$y(t+T) = y + v_y T + \frac{1}{2} a_y^* T^2 \quad (1)$$

考虑到 $y(t+T) = f(t+T)$, 则

$$a_y^* = \frac{2}{T^2} (f_e - y - v_y T) \quad (2)$$

设在此车速下, 汽车的侧向加速度对转向盘转角的稳态增益为 G_{ay} , 达到理想侧向加速度 a_y^* 应该施加的理想转向盘转角

$$\delta_{sw}^* = \frac{a_y^*}{G_{ay}} \quad (3)$$

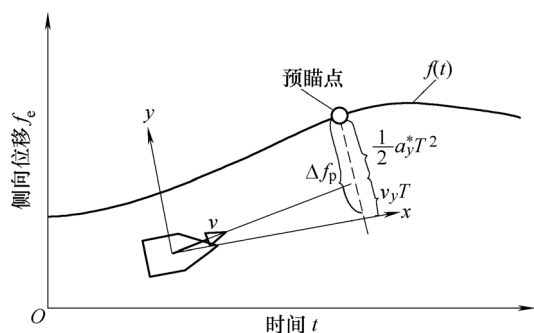


图3 恒车速小曲率道路下的方向控制驾驶员模型

驾驶员有其生理的限制,而且车辆的使用状态也十分复杂,仅采用式(3)决策出的转向盘转角对车辆进行控制是不现实的。考虑各种复杂因素后提出了图4所示的基于侧向加速度反馈的方向控制驾驶员模型。

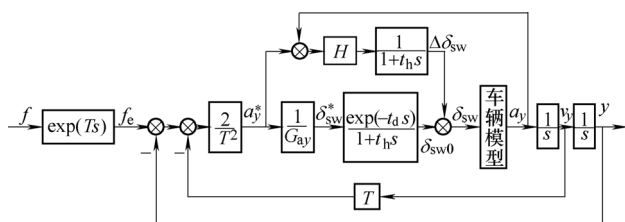


图4 基于侧向加速度反馈的方向控制驾驶员模型

驾驶员的生理限制主要来自驾驶员的反应滞后,可分为驾驶员的神经反应滞后和动作反应滞后两类。驾驶员的神经反应滞后描述的是驾驶员对各种信息的感知过程,这种滞后通常是一种纯滞后,可用传递函数 \$\exp(-t_d s)\$ 来表示, \$t_d\$ 为神经反应滞后时间。驾驶员的动作反应滞后描述的是驾驶员对汽车的操作过程,这种滞后通常可用一个一阶惯性环节来描述,传递函数为 \$1/(1+t_h s)\$, 其中 \$t_h\$ 为动作反应滞后时间常数。考虑驾驶员的生理限制后的转向盘转角为 \$\delta_{sw0}\$。由于驾驶员的反应滞后,车辆侧向动力学特性的非线性,以及汽车复杂的行驶工况(如路面摩擦因数变化等),使用 \$\delta_{sw0}\$ 进行方向控制时实际产生的汽车侧向加速度 \$a_y\$ 与理想的汽车侧向加速度 \$a_y^*\$ 有差别,使得驾驶员模型的跟踪精度降低。为此提出了采用侧向加速度误差反馈的方式对驾驶员模型决策出的转向盘转角进行修正,其修正量

$$\Delta \delta_{sw} = (a_y^* - a_y)H / (1 + t_h s) \quad (4)$$

采用这种修正后就可以弥补由于驾驶员反应滞后,以及各种原因引起的 \$G_{ay}\$ 与实际车辆侧向加速度增益不符(\$G_{ay}\$ 失配)造成的误差,使驾驶员模型具有很强的鲁棒性。比如,汽车在低附着路面上行驶,

由于路面摩擦因数的限制使得侧向加速度增益降低,这时使用高附着路面上得到的 \$G_{ay}\$ 决策出的转向盘转角偏小,汽车的实际侧向加速度偏小。采用侧向加速度误差反馈后就会增加一个附加的转向盘转角,以补偿 \$G_{ay}\$ 失配造成的误差。驾驶员模型最后决策出的转向盘转角为 \$\delta_{sw0}\$ 和修正量 \$\Delta \delta_{sw}\$ 之和。

3 任意道路下的预瞄点搜索算法

图4描述的是跟随小曲率道路的方向控制驾驶员模型,而且跟随目标必须是一个时域函数 \$f(t)\$。

下面定义

$$\Delta f_p = f_e - y \quad (5)$$

汽车在跟随空间域描述的任意道路路径时,只要车辆没有失稳,在汽车的当前位置看,所要跟随的道路路径都将是一个小曲率道路(否则将无法实现跟随控制)。而此时的 \$\Delta f_p\$ 即为车辆坐标系下预瞄点与汽车的侧向偏差(图5)。为了可以在任意道路跟随时应用基于侧向加速度反馈的方向控制驾驶员模型,提出了预瞄点搜索算法,用于计算在当前的车辆位置下,预瞄点在车辆坐标系下的侧向位移 \$\Delta f_p\$。

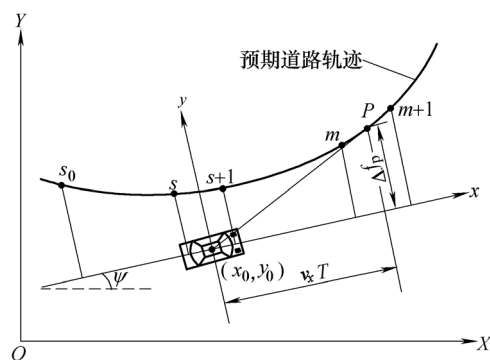


图5 任意道路下的预瞄点搜索算法

如图5所示,预期的道路轨迹用大地坐标系下道路中心线上的一系列点描述。假设 \$(X(i), Y(i))\$ 代表大地坐标下道路中心线上第 \$i\$ 点的坐标, \$(x(i), y(i))\$ 代表该点在车辆坐标系下的坐标。两者可以通过如下的坐标变换进行转换

$$\begin{pmatrix} x(i) \\ y(i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X(i) \\ Y(i) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中 \$i\$ 表示第 \$i\$ 点, \$\psi\$ 表示在大地坐标系下车辆的航向角。

假设车辆的当前位置在大地坐标系下的坐标为

(X_0, Y_0)。获得当前 Δf_p 的值可分为两个步骤: ① 在描述预期道路的数表中找出在车辆当前位置后面的最近点, 用来作为下一次搜索的起始点; ② 在预期道路的数表中确定两个相邻的点, 把预瞄点夹在中间, 然后利用线性插值计算预瞄点坐标, 并转换到车辆坐标系下。

假设 s_0 为上一次搜索所设定的当前搜索的起始点。本文认为车速始终为正值(不考虑倒车工况), 则 $x(s_0)$ 一定为负值。从 s_0 点开始, 在预期道路的数表中寻找一个点能够满足

$$x(s)x(s+1) \leq 0 \quad (7)$$

式中 s 为数表中满足式(8)条件的点的序号, 该点即为车辆当前位置后面的最近点, 且将其存储作为下一次搜索的起始点。

接下来寻找一个预期轨迹中在预瞄点后面的最近的点, 它应满足

$$[x(m) - v_x T][x(m+1) - v_x T] \leq 0 \quad (8)$$

式中, m 为数表中满足式(8)条件的点的序号。那么, 预瞄点 P 的位置即确定为在点 m 和点 $m+1$ 之间。于是 Δf_p 可以通过点 m 和点 $m+1$ 在车辆坐标系下坐标的线性插值方法计算得到

$$\Delta f_p = y(m) + \frac{y(m+1) - y(m)}{x(m+1) - x(m)} [v_x T - x(m)] \quad (9)$$

如上所述为一次搜索的过程, 当车辆运动至一个新位置时, 更新搜索起始点和车辆的位置, 继续完成一次新的搜索, 更新 Δf_p 。

4 任意道路与车速跟随控制模型

采用任意道路下的预瞄点搜索算法, 不仅可以获得 Δf_p , 还可以获得在预瞄点处的期望车速 u_p 。与方向控制相似, 假设汽车在纵向以一个理想的加速度 a_x^* 作匀加速运动, 可以在预瞄时间 T 后达到预期的车速, 则

$$a_x^* = (u_p - v_x) / T \quad (10)$$

同样要考虑驾驶员在速度跟随上的反应滞后等生理限制。为了使车辆能够产生期望的纵向加速度 a_x^* , 通过引入纵向加速度反馈, 并通过 PID 控制决策理想的统一油门开度 $\tilde{\alpha}^*$, 则

$$\tilde{\alpha}^* = \left(K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} \right) (a_x^* - a_x) \quad (11)$$

式中 K_p 、 K_i 和 K_d 为 PID 控制的三个系数。实际的

统一油门开度 $\tilde{\alpha}$ 是在 $\tilde{\alpha}^*$ 的基础上通过考虑驾驶员滞后所生成的。

把速度跟随控制与任意的道路跟随控制进行综合, 形成图 6 所示的任意道路与速度跟随控制的驾驶员模型。需要注意的是, 速度控制和方向控制的主要耦合作用来自车速对车辆侧向动力学特性的影响。除此之外两者的耦合作用非常小, 基本可认为是解耦的。对于本模型, 车速对车辆侧向动力学特性的影响主要体现为汽车侧向加速度增益是车速的函数, 应根据车速的变化不断更新 G_{ay} , 便可实现驾驶员方向控制和速度控制的解耦。

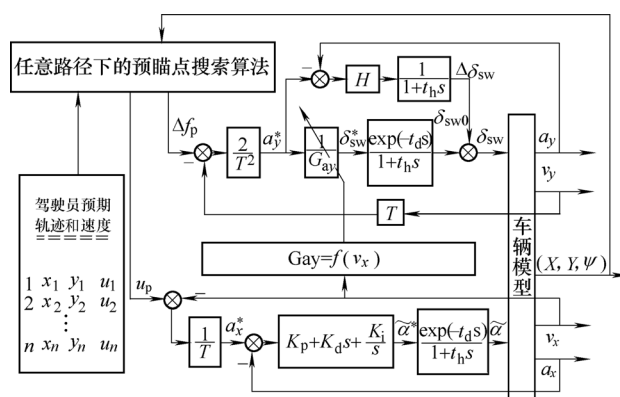


图 6 任意道路和速度跟随的驾驶员模型

5 驾驶员模型参数的获取

驾驶员的神经反应滞后时间 t_d 和动作反应滞后时间 t_h 与驾驶员的特性有关, 受年龄、性别、个性、健康状况等的影响。一般 $t_d = 0.2 \sim 0.6$ s, $t_h = 0.05 \sim 0.20$ s。驾驶员的预瞄时间 T 的范围一般为 $0.8 \sim 1.5$ s。

根据线性 2 自由度车辆模型, 在线性区内汽车的侧向加速度对转向盘转角的增益与车速的关系如下

$$G_{ay} = \frac{v_x^2}{L I_s (1 + K v_x^2)} \quad (12)$$

式中 L 为汽车的轴距; I_s 为转向盘转角到车轮转角的转向系角传动比; K 为汽车的稳定性因数。对于大多数汽车来说都具有适度的不足转向特性, 其 K 值通常的变化范围为 $0.002 \sim 0.004$ s²/m²。

在对驾驶员模型参数要求不高的情况下可以如下获得上述所需要的参数: 汽车的轴距和转向系角传动比是比较容易获得的参数, 可以直接测量得到; K 值可根据该车不足转向的程度在 $0.002 \sim 0.004$

s^2/m^2 范围内取值。

如果需要精确获得驾驶员模型参数, 可以通过如下的最小二乘非线性回归的方法获取: 式(12)为非线性回归方程, v_x 为自变量, G_{ay} 为应变量, LI_s 和 K 为待定参数。车速从低到高, 通过转向盘角阶跃试验获得汽车的侧向加速度增益(要求试验中的最大侧向加速度小于 $0.4g$), 于是得到非线性回归所需的数据对(v_x , G_{ay}), 通过非线性回归得到 K 值以及 LI_s 的值。

侧向加速度反馈系数 H 和纵向加速度反馈系数 K_p 、 K_i 和 K_d 需要在仿真中进行调整, 但一般也具有很强的鲁棒性, 可以在相当大的范围内取值都能够使驾驶员模型获得良好的控制效果。

6 仿真算例

以一辆中级轿车变车速通过“7S”道路为例, 应用本文提出的驾驶员模型进行仿真计算。“7S”道路是为检验汽车的极限操纵稳定性而设计的, 由 7 个弯道组成。试验中车辆通过弯道时需要降低车速, 通过后再增加车速。以“7S”道路中心线作为预期路径, 以一个真实驾驶员通过该道路的车速作为预期车速, 应用基于加速度反馈的任意道路和车速跟随控制驾驶员模型进行仿真, 结果见图 7 和图 8。

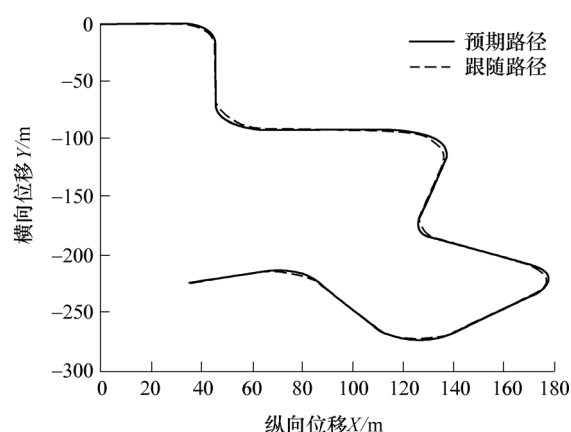


图 7 “7S”道路上的路径跟随结果

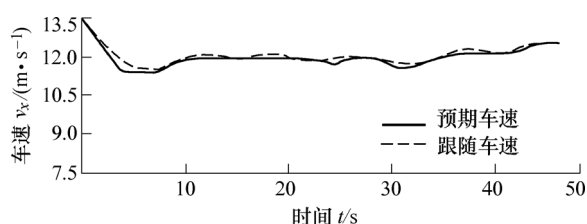


图 8 “7S”道路上的车速跟随结果

在本算例中如下选取驾驶员的特性参数: 神经反应滞后时间 $t_d=0.4\text{ s}$, 动作反应滞后时间 $t_h=0.1\text{ s}$, 预瞄时间 $T=1.2\text{ s}$ 。需要标定的参数为汽车的轴距 L 、转向盘角传动比 I_s 以及汽车的稳定性因数 K 。这些标定参数采用前面提到的最小二乘非线性回归的方法获得。

由于在“7S”道路上进行操纵稳定性试验时最大侧向加速度超过了 $0.8g$, 汽车已经进入明显的非线性区。进一步分析仿真结果可知, 在此极限工况下道路路径平均跟随误差约为 0.2 m , 瞬态最大路径跟随误差为 1.1 m 。车速跟随方面, 平均车速跟随误差为 0.08 m/s , 瞬态最大跟随误差为 0.35 m/s 。从图 7 和图 8 也可以看出本文提出的驾驶员模型在路径和车速跟随方面都获得了较好的跟随精度。

7 结论

(1) 采用离散的数表方式可以描述驾驶员期望跟随的任意道路路径和车速。在此描述下, 提出了任意道路下的预瞄点搜索算法, 使得驾驶员建模的“预瞄—跟随”理论可应用于任意道路路径和车速的跟随控制。

(2) 通过引入侧向加速度误差反馈, 对驾驶员模型中侧向加速度增益失配进行了有效地补偿, 提出了一种简单而有效的基于侧向加速度反馈的方向控制驾驶员模型。

(3) 速度控制和方向控制的耦合作用主要来自车速对汽车侧向动力学特性的影响。根据车速变化不断更新侧向加速度增益实现了驾驶员模型方向控制和速度控制的解耦, 建立了方向与速度综合控制模型, 仿真表明该模型具有良好的跟随精度。

参 考 文 献

- [1] MACADAM C C. Understanding and modeling the human driver[J]. Vehicle System Dynamics, 2003, 40(1-3): 101-134.
- [2] LIN Y, TANG P, ZHANG W J, et al. Artificial neural network modeling of driver handling behavior in a driver-vehicle-environment system[J]. International Journal of Vehicle Design, 2005, 37(1): 24-45.
- [3] 管欣, 张立存, 高振海. 驾驶员确定汽车预期轨迹的网格式优化模型[J]. 中国机械工程, 2006, 17(15): 1 641-1 644.

(下转第 125 页)

of Power Sources, 2006, 155: 395-400.

- [6] SHEN W X, CHAN C C, LO E W C, et al. Estimation of battery available capacity under variable discharge currents[J]. Journal of Power Sources 2002, 103: 180-187.
- [7] Smart Gauge Electronics. An in depth analysis of the maths behind Peukert's equation [EB/OL]. [2009-01-01]. http://www.smartgauge.co.uk/peukert_depth.html.
- [8] PEUKERT W. Über die Abhängigkeit der Kapazität von der Entladestromstärke bei Bleiakкумуляtoren[J]. Elektrotechnische Zeitschrift, 1897, 20: 20-21.
- [9] 全猛, 邵静玥, 黄海燕, 等. 基于二阶段放电容量试验的磷酸铁锂动力电池 Peukert 模型及机理分析[J]. 清华大学学报, 2010, 50(2): 106-110.
- TONG Meng, SHAO Jingyue, HUANG Haiyan, et al.

Research on the Peukert equations of lithium iron phosphate battery based on two stage discharge method[J]. Journal of Tsinghua University, 2010, 50(2): 106-110.

- [10] VERVAET A A K, BAERT D H J. The lead acid battery: Semiconducting properties and Peukert's law [J]. Electro- chimica Acta, 2002, 47: 3 297-3 302.

作者简介: 全猛, 男, 1970 年出生, 博士后。研究方向为车辆动力系统、动力电池测试及电池管理。

E-mail: drtongmeng@gmail.com

欧阳明高, 男, 1958 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车用能源动力系统。

E-mail: ouymg@tsinghua.edu.cn



(上接第 120 页)

GUAN Xin, ZHANG Licun, GAO Zhenhai. Driver model of vehicle preview course based on gridding optimization [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(15): 1 641-1 644.

- [4] DING Haitao, GUO Konghui, WAN Fang, et al. An analytical driver model for arbitrary path following at varying vehicle speed[J]. Int. J. of Vehicle Autonomous System, 2007, 5(3-4): 204-218.
- [5] GUO Konghui, DING Haitao, ZHANG Jianwei, et al. Development of a longitudinal and lateral driver model for autonomous vehicle control[J]. International Journal of Vehicle Design, 2004, 36(1): 50-65.

- [6] 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1991.

GUO Konghui. Vehicle handling dynamics[M]. Changchun: Jilin Science & Technology Press, 1991.

作者简介: 丁海涛(通信作者), 男, 1974 年出生, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为汽车动力学仿真与控制、人车闭环系统仿真。

E-mail: ding_hai_tao@126.com

郭孔辉, 男, 1935 年出生, 中国工程院院士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为轮胎力学、汽车操纵动力学、驾驶员建模与人车闭环仿真等。