

# 汽车操纵稳定性的模糊综合评判与验证

刘文婷 赵又群 阮米庆 汪 伟

南京航空航天大学,南京,210016

**摘要:**主观评价是汽车操纵稳定性评价发展过程中的主要评价手段,基于实车试验各单项评价指标的驾驶员打分,提出一种汽车操纵稳定性的模糊综合评判方法,并将该方法对两辆样车进行评价。以三自由度汽车转向开环模型为对象,基于汽车操纵逆动力学理论,建立汽车操纵逆动力学模型并对两辆样车的操纵稳定性进行仿真分析,将其与模糊综合评判结果比较,验证模糊综合评判方法应用到汽车操纵稳定性评判的可行性。

**关键词:**模糊综合评判;操纵逆动力学;权重;操纵稳定性

**中图分类号:**U461

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2013.19.024

## Fuzzy Comprehensive Evaluation and Verification for Handling Stability of Vehicle

Liu Wenting Zhao Youqun Ruan Miqing Wang Wei

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

**Abstract:** A subjective evaluation of a prototype vehicle is still a main evaluation means used in the automotive industry, and the overall performance of the scoring is more difficult. According to the scoring based on individual evaluation of the real vehicle test, a method used in fuzzy comprehensive evaluation of vehicle handling stability was presented. And the approach was applied in evaluating two prototype vehicles. Based on vehicle steering open-loop model with 3 degrees of freedom and vehicle handling inverse dynamics theory, the vehicle handling inverse dynamics model was established and the control stability of two cars were simulated and analyzed. The two results were compared to verify the feasibility of fuzzy comprehensive evaluation method applied to evaluate vehicle handling stability.

**Key words:** fuzzy comprehensive evaluation; handling inverse dynamics; weight; handling stability

## 0 引言

汽车操纵逆动力学的研究避开了驾驶员建模这一“瓶颈”问题,在已知汽车模型、汽车运动状态的基础上,反求出所允许的驾驶员的操纵输入,进而分析什么样的操纵才是大多数驾驶员所容易接受的、行驶最安全的和最快速的,这也可以称为汽车操纵动力学“反问题”<sup>[1-2]</sup>。

汽车的操纵稳定性评价是汽车主动安全性评价体系中极其重要的一部分。20世纪90年代,郭孔辉<sup>[3]</sup>提出了闭环系统主动安全性的综合评价与优化设计方法。2005年,赵伟平等<sup>[4]</sup>提出汽车的操纵稳定性评价要同时考虑汽车操纵性和稳定性的加权稳定性评价指标和考虑各种车速重要性的加权均匀操纵稳定性评价指标。经过十几年的研究,综合评价方法与理论得到很大的完善,但是仍然存在综合评价没有很好的方法确定指标权重、综合评价方法没有得到广泛应用这样两个问题。本文基于模糊多级综合评判基本理论,根据两辆样车实车试验的驾驶员打分,提出利用模糊

多级综合评判理论评价汽车操纵稳定性<sup>[5]</sup>。同时,建立考虑侧向、横摆和侧倾三个自由度的汽车操纵逆动力学理论模型,基于实验样车参数进行操纵逆动力学仿真分析,评价其操纵稳定性,对两种评价方法进行比较,从而验证模糊多级综合评判评价汽车操纵稳定性的可行性。

## 1 模糊综合评判基本理论

设因素集是  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 评价集是  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ , 模糊关系  $R$  表示对各个单因素  $x_i$  作各种评价的可能性, 例如  $r_{ij}$  就表示  $x_i$  作出  $y_j$  评价的可能。 $\tilde{A} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ , 表示各因素在评价中的重要性。评价的结果是模糊集  $\tilde{B} = (b_1, b_2, \dots, b_m)$ , 它表示各种评价的隶属度。

根据模糊变换原理, 模糊综合评判就是作如下的模糊变换:

$$(\tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \dots, \tilde{b}_m) = (\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{1j} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

收稿日期:2012-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11072106)

其中

$$b_j = \bigvee_{i=1}^n (a_i \wedge r_{ij}) \quad j = 1, 2, \dots, m$$

若  $b_{j_0} = \max(b_1, b_2, \dots, b_m)$ , 则得到综合评价为  $y_{j_0}$ 。

在综合评判中, 有 4 个基本要素: ① 因素集  $X$ ; ② 评价集  $Y$ ; ③ 单因素评价矩阵  $\tilde{R} = [r_{ij}]_{n \times m}$ ; ④ 各因素的权重分配  $\tilde{A}$ 。

当评判问题中考虑较多因素时, 使得每一因素分得的权重系数值很小, 加上合成运算中, 取大 ( $\vee$ )、取小 ( $\wedge$ ) 这两个运算往往会丢失许多有价值的信息, 结果导致最后评判的结果分辨率很差。为此, 常采用分层法来解决问题。同理, 低一层次单因素评价也可以是更低层次的多因素综合。由此, 可得到多因素模糊综合评判模型。

多层次模糊综合评判的步骤如下:

(1) 将因素集  $X$  按某些属性分成  $s$  个子集  $X_i = \{x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_{n_i}}\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, s$ 。

(2) 分别对每一个因素集  $X_i$  作出综合决策。设  $Y$  为评价集,  $X_i$  中各因素的权重分配为  $\tilde{A}_i = (a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_{n_i}})$ , 其中  $\sum_{t=1}^{n_i} a_{i_t} = 1$ 。若  $\tilde{R}_i$  为单因素矩阵, 则得一级评判向量  $\tilde{B}_i = \tilde{A}_i \tilde{R}_i = (b_{i_1}, b_{i_2}, \dots, b_{i_m})$ ,  $i = 1, 2, \dots, s$ 。

(3) 将每个  $X_i$  看作一个因素, 记

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_s\}$$

权重分配为

$$\tilde{A} = (a_1, a_2, \dots, a_s)$$

于是得到二级评判向量:

$$\tilde{B} = \tilde{A} \tilde{R} = (b_1, b_2, \dots, b_m)$$

若一级因素  $X_i$  仍含有较多因素, 还可将  $X_i$  再分小, 于是有三级模型、四级模型等。

## 2 样车操纵稳定性的模糊综合评判

### 2.1 因素集确定

因素集是应用模糊综合评判方法评判汽车操纵稳定性 4 个基本要素之一。在汽车操纵稳定性评判中, 考虑车辆路径跟踪优劣、驾驶员负担和翻车危险性三个一级因素  $X_1$ 、 $X_2$  和  $X_3$ , 其中一级因素路径跟踪优劣  $X_1$  包括方向误差和侧向位移误差两个二级因素, 驾驶员负担因素  $X_2$  包括驾驶员忙碌程度和驾驶员沉重负担两个二级因素, 翻车危险性因素  $X_3$  包括侧向加速度和侧倾角两个二级因素。

### 2.2 权重确定

权重是指标对总目标的贡献程度, 本文应用序关系指标权重法来确定指标权重, 该方法能真

实唯一地体现出各指标间的序关系, 计算简便、直观, 便于应用, 具体步骤如下<sup>[6]</sup>:

(1) 按照层次分析法, 汽车操纵稳定性的一级因素集可列为一个集合  $\{J_e, J_b, J_r\}$ , 其对应的二级因素集可分为三个集合, 分别为  $\{J_{e1}, J_{e2}\}$ ,  $\{J_{b1}, J_{b2}\}$ ,  $\{J_{r1}, J_{r2}\}$ 。

(2) 分别确定每一个因素集合的序关系, 即确定因素集中各单项因素按照一定准则排序。不失一般性, 假设某一个因素集合为  $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ , 其权重分别对应为集合  $\{W_1, W_2, \dots, W_n\}$ 。

对于某一评价因素集, 集合中最重要的一指标记为  $E_1$ ; 在剩余的  $n-1$  指标中, 对于某一准则, 选出被认为最重要的一个指标, 记为  $E_2$ ;  $\dots$ ; 在剩余的  $n-(k-1)$  个评价因素中, 对于某一准则, 选出被认为最重要的一个因素, 记为  $E_k$ ;  $\dots$ ; 经过  $n-1$  次操作后, 只剩最后一个因素, 记为  $E_n$ 。

这样, 用矢量  $(E_1, E_2, \dots, E_n)$  就确定了一个唯一的序关系。该向量中对应的权重系数分别为  $W_1, W_2, \dots, W_n$ 。

(3) 给出矢量  $(E_1, E_2, \dots, E_n)$  中相邻元素之间的相对重要程度的比较判断, 即

$$r_k = \omega_{k-1} / \omega_k \quad k = m, m-1, \dots, 3, 2 \quad (1)$$

其中,  $r_k$  的赋值可参考表 1<sup>[7]</sup>。

表 1  $r_k$  赋值参考表

$r_k$	备注
1.0	指标 $E_{k-1}$ 与指标 $E_k$ 重要性相同
1.2	指标 $E_{k-1}$ 比指标 $E_k$ 稍微重要
1.4	指标 $E_{k-1}$ 比指标 $E_k$ 明显重要
1.6	指标 $E_{k-1}$ 比指标 $E_k$ 强烈重要
1.8	指标 $E_{k-1}$ 比指标 $E_k$ 极端重要

(4) 计算权重系数  $\omega_k$ 。因为  $\prod_{i=k}^n r_i = \omega_{k-1} / \omega_n$ , 对  $k$  从 2 到  $n$  变化时求和, 得

$$\sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n r_i = \sum_{k=2}^n \omega_{k-1} / \omega_n \quad (2)$$

由于  $\sum_{k=1}^m \omega_k = 1$ , 得

$$\omega_n = (1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n r_i)^{-1} \quad (3)$$

则

$$\omega_{k-1} = r_k \omega_k \quad k = m, m-1, \dots, 3, 2 \quad (4)$$

(5) 把  $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$  与  $\{W_1, W_2, \dots, W_n\}$  对应起来。

(6) 按照上面的步骤 (2) ~ 步骤 (5) 确定其他因素集元素的权重。

由于汽车轨道跟踪的好坏直接影响着其主动

安全性,确定  $J_{e1}$  比  $J_{e2}$  强烈重要,对于集合  $\{J_{e1}, J_{e2}\}$  取  $r_2 = 1.6$ , 确定各权重分别为  $W_1 = 0.615\ 385, W_2 = 0.384\ 615$ 。

根据带助力转向轻便和高速时转向轻便的原则,确定  $J_{b1}$  比  $J_{b2}$  明显重要,对于集合  $\{J_{b1}, J_{b2}\}$ , 取  $r_2 = 1.4$ , 确定各权重分别为  $W_1 = 0.583\ 333, W_2 = 0.416\ 667$ 。

根据侧向加速度是操纵稳定性中最重要的汽车响应参数和评价指标的原则,确定  $J_{r1}$  比  $J_{r2}$  极端重要,取  $r_2 = 1.8$ , 确定各权重分别为  $W_1 = 0.642\ 857, W_2 = 0.357\ 143$ 。

对于一级评价因素集  $\{J_e, J_b, J_r\}$ , 根据碰撞或翻车的主动安全、驾驶员路感、驾驶员负担等原则确定该集合的序关系,依重要程度递减依次为  $J_r, J_b, J_e$ , 并取  $r_2 = 1.8, r_3 = 1.8$ , 显然  $r_k > 1/r_{k-1}$ , 确定各权重分别为  $W_1 = 0.536\ 424, W_2 = 0.298\ 013, W_3 = 0.165\ 563$ 。

对应于一级因素  $X_1, X_2, X_3$ , 各自的权重分配为

$$\begin{aligned} \tilde{A}_1 &= (0.615\ 385, 0.384\ 615) \\ \tilde{A}_2 &= (0.583\ 333, 0.416\ 667) \\ \tilde{A}_3 &= (0.642\ 857, 0.357\ 143) \end{aligned}$$

同理,二级因素集  $X = \{X_1, X_2, X_3\}$  的权重分配为

$$\tilde{A} = (0.536\ 424, 0.298\ 013, 0.165\ 563)$$

### 2.3 评判矩阵确定

不同的驾驶员的主观评价使得所得结果产生很大的离散性,为了减小离散性,如图 1 所示,选取整车质量  $M_1 = 1685\text{kg}, M_2 = 1500\text{kg}$  两种样车跟踪蛇形线路径,车速  $u = 90\text{km/h}$ ,转向盘转角在  $\pm 60^\circ$  之间。



图 1 实车试验图

本文采用 10 点评分等级,1 ~ 3.5 点为最佳至满足,3.5 ~ 6.5 点表示虽能满足性能但驾驶负担过重,6.5 ~ 10 点表示不能满足性能且驾驶负担过重<sup>[8]</sup>。选取 10 名经验丰富的驾驶员,根据每个驾驶员在不同时刻的打分,统计分析,得出评判矩阵,选取三位驾驶员在定点的打分,统计结果如表 2 所示。

表 2 驾驶员打分表

评价项目	一级因素	二级因素	样车一			样车二		
			驾驶员一	驾驶员二	驾驶员三	驾驶员一	驾驶员二	驾驶员三
操纵稳定性	$X_1$	方向误差	3	3.5	3	3.5	4	3
		侧向位移误差	2.5	3	2.5	3	3.5	2.5
	$X_2$	驾驶员忙碌程度	3.5	4	4	4	4.5	3.5
		驾驶员沉重负担	3	3.5	3.5	3.5	4	3.5
	$X_3$	侧向加速度	4	4	3.5	4	4.5	4
		侧倾角	4	3.5	4	4.5	4	3.5

先对样车一进行分析。首先统计实车试验驾驶员打分,得单因素评判矩阵  $\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \tilde{R}_3$ :

$$\begin{aligned} \tilde{R}_1 &= \begin{bmatrix} 0.642816 & 0.357184 & 0 \\ 0.721354 & 0.278646 & 0 \end{bmatrix} \\ \tilde{R}_2 &= \begin{bmatrix} 0.414584 & 0.585416 & 0 \\ 0.563728 & 0.436272 & 0 \end{bmatrix} \\ \tilde{R}_3 &= \begin{bmatrix} 0.336746 & 0.663254 & 0 \\ 0.372818 & 0.627182 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

则评判矩阵  $\tilde{B}_1$  为

$$\tilde{B}_1 = \tilde{A}_1 \tilde{R}_1 = [0.615385 \quad 0.357184 \quad 0]$$

由评判矩阵  $\tilde{B}_1$  得  $b_1 = \max(b_1, b_2, b_3)$ , 则  $J_e$  的综合评判为  $b_1$ , 则样车一的路径跟踪性能最佳至满足。

评判矩阵  $\tilde{B}_2$  为

$$\tilde{B}_2 = \tilde{A}_2 \tilde{R}_2 = [0.416667 \quad 0.583333 \quad 0]$$

由评判矩阵  $\tilde{B}_2$  得  $b_2 = \max(b_1, b_2, b_3)$ , 则  $J_b$  的综合评判为  $b_2$ , 则样车一的性能满足,但负担过重。

评判矩阵  $\tilde{B}_3$  为

$$\tilde{B}_3 = \tilde{A}_3 \tilde{R}_3 = [0.357143 \quad 0.642857 \quad 0]$$

由评判矩阵  $\tilde{B}_3$  得  $b_2 = \max(b_1, b_2, b_3)$ , 则  $J_r$  的综合评判为  $b_2$ , 则样车一的性能满足,但侧向加速度和侧倾角相对略大。

令

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} \tilde{B}_1 \\ \tilde{B}_2 \\ \tilde{B}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.615385 & 0.357184 & 0 \\ 0.416667 & 0.583333 & 0 \\ 0.357143 & 0.642857 & 0 \end{bmatrix}$$

因为  $X = \{X_1, X_2, X_3\}$  的权重分配为  $\tilde{A} = (0.536424, 0.298013, 0.165563)$ , 则

$$\tilde{B} = \tilde{A} \tilde{R} = [0.536424 \quad 0.357184 \quad 0]$$

由上述综合评判矩阵得  $b_1 = \max(b_1, b_2, b_3)$ , 则综合评判为  $b_1$ , 综合考虑  $b_2 = 0.357\ 184$  即本车的操纵稳定性总体性能良好,满足要求,但驾驶员操作稳定性负担略重。

再对样车二进行分析。同理分析,  $J_e, J_b$  和  $J_r$ 。

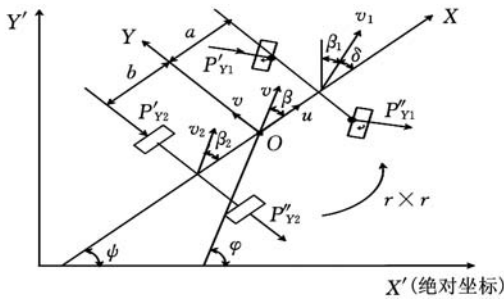
$$\begin{aligned} \tilde{B}_1 &= \tilde{A}_1 R_1 = [0.615432 \quad 0.346184 \quad 0] \\ \tilde{B}_2 &= \tilde{A}_2 R_2 = [0.615398 \quad 0.357684 \quad 0] \\ \tilde{B}_3 &= \tilde{A}_3 R_3 = [0.655655 \quad 0.437144 \quad 0] \\ \tilde{B} &= \tilde{A} R = [0.646217 \quad 0.347486 \quad 0] \end{aligned}$$

样车二的路径跟踪性能最佳至满足,性能满足,但驾驶负担略重,侧向加速度和侧倾角相对略大,综合评价样车二的操纵稳定性总体良好,满足要求但驾驶员操作稳定性负担略重。对比两车型路径跟踪能力均良好,跟踪误差不大,车型一的车身侧倾角相对于车型二较大,驾驶员操纵负担相对略重。

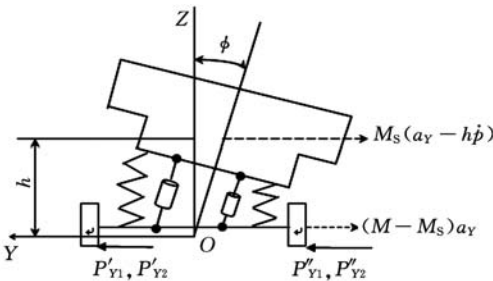
### 3 样车的操纵逆动力学仿真分析

#### 3.1 数学模型

汽车以车速  $u$  作等速行驶,忽略汽车的垂直振动情况,不计前后轮回正力矩系数及前后轮侧倾转向系数。如图 2 所示,取一套固定于汽车上的相对坐标系。将方向盘转角看作已知输入时,汽车的运动状态可以用三个广义坐标横摆角  $\psi$ 、质心侧偏角  $\beta$  和车身侧倾角  $\phi$  来表示。



(a) 汽车运动状态俯视图



(b) 汽车运动状态后视图

图 2 汽车运动状态坐标图

图中,  $M$  为汽车总质量,  $M_s$  为汽车悬架上质量,  $h$  为侧倾力臂,  $v$  为汽车质心侧向速度,  $r$  为汽车质心横摆角速度,  $p$  为汽车车身侧倾角速度,  $a_y$  为汽车质心绝对加速度在  $Y$  轴上的投影,  $a$ 、 $b$  为整车质心至前后轴的距离,  $\delta$  为汽车前轮转角。

在此相对坐标系中,坐标原点  $O$  的绝对加速度在  $Y$  轴上的投影为

$$a_y = u(r + \dot{\beta}) \quad (5)$$

悬架上质心重心的横向绝对加速度在  $Y$  轴上的投影为

$$a_{ys} = u(r + \dot{\beta}) - h\dot{p} \quad (6)$$

式中,  $a_{ys}$  为汽车悬架质心的绝对加速度在  $Y$  上的投影。

根据达朗贝尔原理,由  $\begin{cases} P_{Y1} = 2k_t \beta_1 \\ P_{Y2} = 2k_t \beta_2 \end{cases}$  (本节中未说明变量的含义均可参考文献[10])及几何关

系  $\begin{cases} \beta_1 = \beta + \frac{a}{u}r - \frac{\delta_{sw}}{i} \\ \beta_2 = \beta - \frac{b}{u}r \end{cases}$  得汽车运动微分方程:

$$\begin{cases} I_z \dot{r} + I_{xz} \dot{p} = N_v v + N_r r + N_\delta \frac{\delta_{sw}}{i} \\ M \dot{v} - M_s h \dot{p} = Y_v v + (Y_r - M u) r + Y_\delta \frac{\delta_{sw}}{i} - \\ M_s h \dot{v} + I_{xz} \dot{r} + I_x \dot{p} = M_s h u r + L_p p + L_\phi \dot{\phi} \\ \dot{\phi} = p \\ Y_r = -2(k_t a^2 + k_t b^2)/u & Y_\beta = -2k_t - 2k_r \\ N_r = -2(k_t a^2 + k_t b^2)/u & L_p = -D_l - D_r \\ N_\beta = 2(-a k_t + b k_r) & Y_\delta = -2k_t - 2k_r \\ L_\phi = -(C_l + C_r - M_s g h) & N_\delta = 2a k_t \end{cases} \quad (7)$$

选取状态变量  $\mathbf{X} = [v \quad r \quad p \quad \phi]^T$ , 汽车运动状态空间表达式为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{C} \mathbf{X} + \mathbf{M}^{-1} \mathbf{n} \delta_{sw} = \mathbf{A} \mathbf{X} + \mathbf{B} \delta_{sw} \quad (8)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & I_z & I_{xz} & 0 \\ M & 0 & -M_s h & 0 \\ -M_s h & I_{xz} & I_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} N_v & N_r & 0 & 0 \\ Y_v & Y_r - M u & 0 & 0 \\ 0 & M_s h u & L_p & L_\phi \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{n} = \begin{bmatrix} N_\delta / i \\ Y_\delta / i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

#### 3.2 最优控制模型

为了简化问题,不考虑驾驶员操纵反应的滞后和前视,将其操纵输入视为理想操纵输入,选取控制变量为转向盘的转角输入  $\delta_{sw}(t)$ ,综合考虑路径跟踪、驾驶员的操纵负担、侧滑的影响以及翻车危险性,理想的路径跟踪性能指标为

$$J(z) = \int_{t_0}^{t_e} \left[ \left( \frac{y(t) - y_d(t)}{E} \right)^2 + \left( \frac{\delta_{sw}(t)}{\delta_{sw}} \right)^2 + \left( \frac{F_{Yi}(t)/F_{Zi}}{\mu} \right)^2 + \left( \frac{\phi(t)}{\hat{\phi}} \right)^2 \right] dt \quad (9)$$

$$F_{Yi}(t)/F_{Zi} = \max(F_{Yi}/F_{Zi}) \quad i = 1, 2$$

式中,  $t_0$ 、 $t_e$  为汽车运动的初始、终端时刻;  $y_d(t)$  为跟踪的理想避让路径;  $F_{Y1}$ 、 $F_{Y2}$  为前后轮侧向力;  $F_{Z1}$ 、 $F_{Z2}$  为前后轮垂直载荷;  $E$  为侧向位移误差的标准阈值,本文取 0.3m;  $\delta_{sw}$  为转向盘转角的阈值,本文取 30°;  $\mu$  为  $F_{Yi}/F_{Zi}$  的标准阈值,本文取 0.3;  $\hat{\phi}$  为汽车的侧倾角标准阈值,本文取 3°。

### 3.3 数值仿真结果

将上述问题转化为终端时间固定的最优控制问题,利用离散微元化思想将最优控制问题转化为有限维非线性规划问题,并运用序列二次规划(SQP)方法求解<sup>[9-10]</sup>。

为了较真实地反应汽车进行避让时的操作性,验证上文模糊综合评判方法的正确性,选取上述实车试验两种车型跟踪蛇形线路径,车速  $u = 90\text{km/h}$ ,转向盘转角在  $\pm 60^\circ$  之间。

表 3 两种车型参数列表

参数名称	符号	量纲	车型一	车型二
整车质量	$M$	kg	1685	1500
悬架上质量	$M_s$	kg	1365	1180
质心至前轴距	$a$	m	1.185	1.17
质心至后轴距	$b$	m	1.283	1.195
前悬架侧倾刚度	$C_f$	$\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$	100 548	100 548
后悬架侧倾刚度	$C_r$	$\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$	32 732	32 732
绕 Z 轴惯性矩	$I_z$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	2280	1800
绕 X 轴惯性矩	$I_x$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	960	780
前悬架侧倾角阻尼	$D_f$	$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$	3430	3430
后悬架侧倾角阻尼	$D_r$	$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$	3430	3430
前轮有效侧偏刚度	$k_f$	$\text{N}/\text{rad}$	60 533	60 042
后轮有效侧偏刚度	$k_r$	$\text{N}/\text{rad}$	110 185	109 295
侧倾力臂	$h$	m	0.488	0.46
转向系传动比	$i$		24.9	24.9

取车速  $u = 90\text{km/h}$  进行仿真。从图 3、图 4 所示的仿真结果可以看出,两种车型跟踪路径较好,表明两辆样车路径跟踪性能均最佳至满足,与模糊综合评判结果吻合。

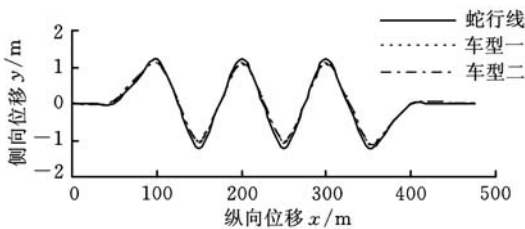


图 3 侧向位移仿真结果

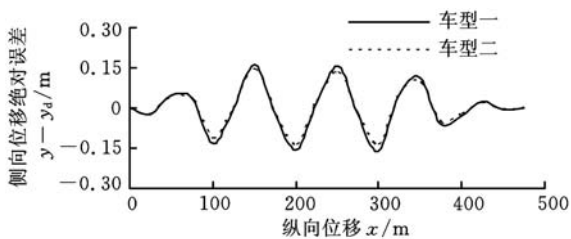


图 4 侧向位移绝对误差仿真结果

图 5、图 6 所示分别为转向盘转角及转向盘角速度仿真结果,表明两辆车型的驾驶均较忙碌,车型一在高速下进行连续避让时比车型二的仿真幅值大,操纵负担较车型二略重。

图 7、图 8 所示分别为两种车型进行蛇形避让时的汽车部分状态响应结果,同样可以得到两

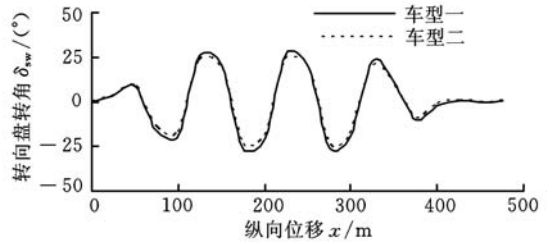


图 5 转向盘转角仿真结果

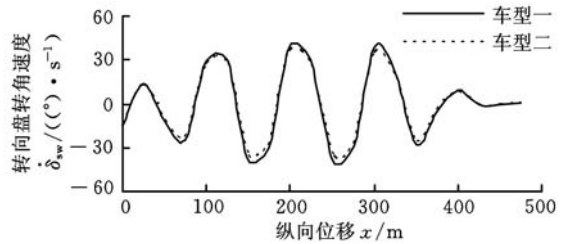


图 6 转向盘转角速度仿真结果

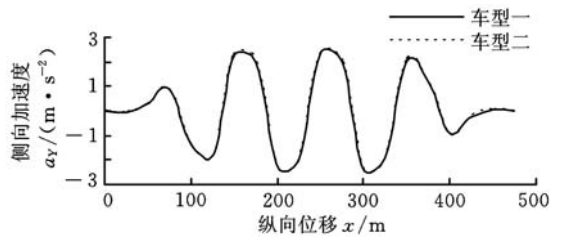


图 7 侧向加速度仿真结果

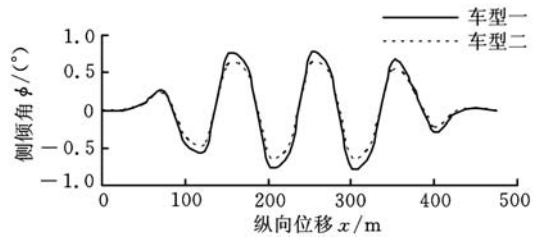


图 8 侧倾角仿真结果

种车型的侧向加速度、车身侧倾角相差不大,车型一的车身侧倾角大于车型二,更具翻车危险性。

根据汽车操纵逆动力学仿真分析,评价汽车操纵稳定性,其结果与利用模糊多级综合评判评价汽车操纵稳定性的结果相比较,吻合度较好,从而验证了模糊多级综合评判方法评价汽车操纵稳定性是可行的。

## 4 结论

(1)针对目前汽车操纵稳定性仍然以对样车的主观评价作为主要评价手段的情况,选取两辆样车跟踪蛇形线,统计专业驾驶员打分,利用模糊多级综合评判理论评价样车的操纵稳定性。

(2)基于汽车操纵逆动力学基本理论建立三自由度汽车逆动力学模型,利用最优控制理论求解并进行仿真分析,评价其操纵稳定性,评价结果与模糊多级综合评判结果吻合度较好,从而验证

了模糊多级综合评判评价汽车操纵稳定性的可行性。

#### 参考文献:

- [1] 赵又群,尹浩,张丽霞,等.汽车操纵逆动力学的现状与发展[J].中国机械工程,2005,16(1):77-82.  
Zhao Youqun, Yin Hao, Zhang Lixia, et al. Present State and Perspectives of Vehicle Handling Inverse Dynamics[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(1):77-82.
- [2] 许峰,陈怀海,鲍明.机械振动载荷识别研究的现状与未来[J].中国机械工程,2002,13(6):526-531.  
Xu Feng, Chen Huaihai, Bao Ming. Force Identification for Mechanical Vibration: State of the art and Prospect[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(6):526-531.
- [3] 郭孔辉.人一车一路闭环系统主动安全性的综合评价与优化设计[J].汽车技术,1993(4):4-12.  
Guo Konghui. Person-car-road Closed Loop System Active Safety Evaluation and Optimization[J]. Automobile Technology, 1993(4):4-12.
- [4] 赵伟平,赵又群,杨国权,等.汽车操纵性和运动稳定性的联合优化[J].汽车技术,2005(12):16-19.  
Zhao Weiping, Zhao Youqun, Yang Guoquan, et al. Joint Optimization of Vehicle Handling and Stability[J]. Automobile Technology, 2005(12):16-19.
- [5] 朱剑英.智能系统非经典教学方法[M].南京:南京航空航天大学出版社,2010.
- [6] Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [7] 郭亚军.综合评价理论、方法及应用[M].北京:科学出版社,2007.
- [8] Weir D H, Dimarco R J. Correlation an Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Date[J]. SAE Paper, 780010.
- [9] Sridhar J, Hatwal H. A Comparative Study of Four Wheel Steering Models Using the Inverse Solution[J]. Vehicle System Dynamics, 1992, 21(1):1-18.
- [10] Hendriks J P M, Meijlink T J J, Kriens R F C. Application of Optimal Control Theory to Inverse Simulation of Car Handling[J]. Vehicle System Dynamics, 1996, 26(6): 449-461.

(编辑 郭伟)

**作者简介:**刘文静,女,1989年生。南京航空航天大学能源与动力学院硕士研究生。研究方向为车辆动力学与控制。赵又群(通信作者),男,1968年生。南京航空航天大学能源与动力学院教授、博士研究生导师。阮来庆,男,1956年生。南京航空航天大学能源与动力学院副教授。汪伟,男,1984年生。南京航空航天大学能源与动力学院博士研究生。

(上接第2680页)

- [9] Wikman B, Svoboda A, H A Ggblad H A. A Combined Material Model for Numerical Simulation of Hot Isostatic Pressing[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 189(3): 901-913.
- [10] Kim H S. Densification Mechanisms during Hot Isostatic Pressing of Stainless Steel Powder Compacts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123(2): 319-322.
- [11] 韩凤麟.热等静压(HIP)工艺模型化进展[J].粉末冶金工业,2005,15(1):12-25.  
Han Fenglin. Progress in Modeling of HIP[J]. Powder Metallurgy Industry, 2005, 15(1): 12-25.
- [12] 华林,秦训鹏.粉末烧结材料屈服条件研究和进展[J].武汉理工大学学报,2004,26(4):1-5.  
Hua Lin, Qin Xunpeng. Research and Progress of Yield Criterion for Sintered Powder Materials[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 26(4): 1-5.
- [13] Hua L, Qin X, Mao H, et al. Plastic Deformation and Yield Criterion for Compressible Sintered Powder Materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 180(1): 174-178.
- [14] Shima S, Oyane M. Plasticity Theory for Porous Metals[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1976, 18(6): 285-291.
- [15] Sanchez L, Ouedraogo E, Federzoni L, et al. New Viscoplastic Model to Simulate Hot Isostatic Pressing[J]. Powder Metallurgy, 2002, 45(4): 329-334.
- [16] Special Metals Corporation. Inconel Alloy 625LCF [EB]. [2012]. <http://www.specialmetals.com>.
- [17] 杨劲松,沈其文,史玉升,等. SLS 模料特性及熔模铸造工艺研究[J].特种铸造及有色合金,2007,27(1):53-56.  
Yang jingsong, Shen Qiwen, Shi Yusheng, et al. Research on SLS Mold Material Properties and Investment Casting Process[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2007, 27(1): 53-56.
- [18] Ashby M F. A First Report on Sintering Diagrams [J]. Acta Metallurgica, 1974, 22(3): 275-289.

(编辑 郭伟)

**作者简介:**陆恒,男,1987年生。华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室硕士研究生。研究方向为热等静压、近净成形、镍基高温合金、数值模拟。魏青松,男,1975年生。华中科技大学材料科学与工程学院副教授、博士研究生导师。薛鹏举,男,1973年生。华中科技大学材料科学与工程学院博士研究生。王基维,男,1975年生。华中科技大学材料科学与工程学院博士研究生。史玉升,男,1962年生。华中科技大学材料科学与工程学院教授、博士研究生导师。