

基于 ANFIS 的高速公路车辆跟驰模型与仿真

陆斯文, 王俊骅

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 为了更好地描述高速公路上驾驶员在车辆跟驰过程中表现出来的模糊、不确定性的行为特征, 采用自适应模糊神经网络 ANFIS 来建立车辆跟驰模型。首先, 通过小波分析方法, 对采集到的跟车数据进行降噪, 消除外界因素的干扰, 从而恢复数据的原始信息; 根据信号处理方法, 利用相关函数计算出驾驶员在跟驰过程中的反应时间。然后, 建立以两车速度差、车头间距和后车速度作为输入, 以及后车加速度作为单输出的自适应模糊神经网络跟车模型。最终, 对该模型仿真训练, 自适应生成驾驶员跟驰行为规则, 并与传统的 GM 跟车模型对比分析。结果表明, 该网络模型能较客观地反映高速公路上的驾驶员跟驰行为。

关键词: 自适应模糊神经网络; 跟驰模型; 小波降噪; 反应时间

中图分类号: U 491

文献标识码: A

Freeway Car-following Model and Simulation Based on Adaptive Neuro-fuzzy Inference System

LU Siwen, WANG Junhua

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to better describe the fuzzy and uncertain characteristics of drivers when following a leading car on the freeway, the adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) was applied to the car-following model. Firstly, the real-time car-following data collected by the five-wheel system were denoised by the wavelet tool in order to eliminate the disturbance from the surrounding and recover the initial information of data. Meanwhile, the driver's reaction time was calculated by the correlation function in term of signal processing method. Then, the car-following model based on ANFIS was developed with the relative speed, distance headway between leading vehicle and following vehicle and

speed of following vehicle as inputs and car-following acceleration as the output. Finally, the model that generated the adaptive rule of drivers' car-following behavior was simulated and trained to compare with General Motors based car-following models. The car-following model based on ANFIS proves to be able to reflect the driving behavior of real freeway situation.

Key words: car-following model; adaptive neuro-fuzzy inference system; wavelet denoising; reaction time

车辆跟驰模型是交通系统仿真中最重要的微观驾驶行为模型之一, 用以描述在单车道不能换车道情形下, 驾驶员根据不同的跟驰条件对车辆的相应控制行为。在跟驰过程中, 驾驶员对前车、道路和交通环境等产生的刺激会作出感知、理解、判断和动作一系列的连续控制行为, 从而形成人一车一路一环境的闭环反馈控制系统。但传统的跟驰模型难以体现出驾驶员上述一系列生理、心理活动的不确定性和不一致性特点^[1]。比如, GM (general model) 模型、Helly 线性模型和安全距离模型^[2]; 基于人工神经网络的跟驰模型虽然能通过自适应学习的方式来处理复杂的非线性跟驰系统, 但仍无法很好地模拟驾驶员凭借丰富的跟驰经验和知识来操纵车辆行驶^[3]; 基于模糊推理系统的跟驰模型虽能模拟跟驰时的驾驶经验, 但这些经验具有一定主观性, 不是从大量实际的跟车数据中提取^[4]。并且, 上述文献在构建跟驰模型过程中, 都没有提到数据预处理方法。因此, 为了克服这些模型的一些不足, 且更好地描述驾驶员的不确定性和模糊性, 笔者首先通过小波降噪方法进行跟驰数据预处理, 来提高建模的精度, 再采用基于自适应模糊神经网络

收稿日期: 2009-04-04

基金项目: 高等学校博士学科点专项研究基金资助项目(200802470028)

作者简介: 陆斯文(1983—), 男, 博士生, 主要研究方向为道路交通安全。E-mail: lusiwenwinner@163.com

王俊骅(1979—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为道路安全、道路规划与设计。E-mail: benwjh@163.com

ANFIS (adaptive network-based fuzzy inference system) 来建立跟驰模型. 自适应模糊神经网络 ANFIS 是神经网络和模糊推理系统二者的有机结合. 该模糊神经网络与李德慧提出的模糊神经网络^[4]相比,理论上处理速度快,运算方便. 本身又能够从实际数据库中自适应提取模糊规则,并且能够选择任何常用隶属度函数形式.

1 自适应模糊神经网络 ANFIS 的结构

ANFIS 具有很好的自学习、构建规则库和分类的能力. 为了简化说明,假设它有 2 个输入 x 和 y 以及 1 个输出,网络结构有 5 层,具体如图 1 所示. 其中,第 k 层的第 i 个节点的输入功能表示为 $O_{k,i}$,且同一层的每个节点具有相似的功能^[5].

第一层,每个节点 i 是以节点函数表示的方形节点,主要是将输入变量模糊化,得到不同模糊集下的隶属度.

$$\left. \begin{aligned} O_{1,i} &= u_{Ai}(x), & i &= 1, 2 \\ O_{1,i} &= u_{B(i-2)}(y), & i &= 3, 4 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: u 表示不同模糊集下的隶属度; A, B 表示不同的语言模糊集.

第二层,节点用 Π 来表示,主要将输入信号相乘,而将其乘积输出为

$$O_{2,i} = w_i = u_{Ai}(x)u_{Bi}(y), \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

第三层,节点在图 1 中用 Σ 表示,第 i 个节点计算第 i 条规则的 w_i 与全部规则的 w 之和的比值为

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = w_i / \sum_{i=1}^2 w_i, \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

第四层, i 为自适应节点,其输出为

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (4)$$

式中, p_i, q_i, r_i 都表示该层第 i 个自适应节点的线性回归参数.

第五层,单节点是固定节点,所有输入信号的总输出为

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \sum_i w_i f_i / \sum_i w_i \quad (5)$$

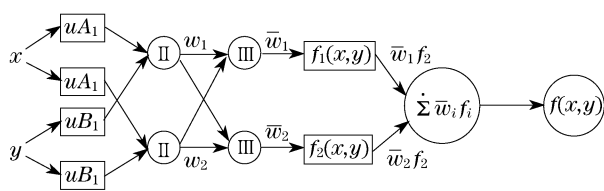


图 1 ANFIS 结构

Fig.1 Structure of ANFIS

ANFIS 运用梯度下降法和最小二乘法的综合算法来确定模型输入和输出参数,这些参数决定了网络反应与训练数据的拟合程度.

2 基于 ANFIS 的跟驰模型构建

2.1 模糊变量的选取

GM 模型是最典型的刺激反应模型,反应行为用后车的加速度或减速度表示,刺激用后车与前车的相对速度表示. 它的一般表达式为^[6]

$$a_{n+1}(t+T) = cv_{n+1}^m(t+T) \frac{[v_n(t) - v_{n+1}(t)]}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} \quad (6)$$

式中: $v(t), a(t)$ 和 $x(t)$ 分别表示车辆在 t 时刻的速度、加速度和位置; T 表示驾驶员的反应时间; c, m 和 l 都表示模型的参数.

根据 GM 模型,后车驾驶员作出的加、减速度行为,受到两车速度差、后车速度及车间距的影响. 因此,选用上述影响因素作为 ANFIS 的输入模糊变量,将后车的减速度 $a_n(t+T)$ 作为输出模糊变量.

2.2 数据采集

先选用几名驾驶员操作安装非接触式五轮仪设备的两辆测试车,然后,分别在高速公路上以一定初始间距进行跟驰实验,实时采集能反映非自由流特征的跟驰行驶状态下的两车物理运动参数. 在跟驰过程中,五轮仪以频率 $f = 10 \text{ Hz}$ 来实时采集跟驰时两车行驶距离和速度,从而计算出两车速度差、车辆加速度和两车间距. 其中,车辆的加速度和两车间距分别通过式(7), (8)来计算^[7]

$$a_n = (v_{n+1} - v_{n-1}) / 2\Delta t = (v_{n+1} - v_{n-1}) f / 2 \quad (7)$$

式中: n 表示采样数; Δt 为采样间隔时间; a_n 表示加速度.

$$d_t = x_{1,t} - x_{2,t} - d_0 \quad (8)$$

式中: $x_{1,t}, x_{2,t}$ 分别是五轮仪采集到的前后车行驶距离; d_0, d_t 分别是两实验车的初始车头间距和 t 时刻前后两实验车的车头间距.

2.3 数据降噪

非接触式五轮仪在数据采集和信号处理过程中不可避免地会带有噪声,但贾宏飞在其利用五轮仪进行跟驰数据采集过程中没有提到如何预处理数据^[7]. 因此,为了得到更为准确的实验数据,选用小波技术对五轮仪采集到的原始数据进行降噪处理. 小波变换是数据和信息处理的一个新的分支,具有

多分辨率,能够在时频两域分析信号.通过小波变换,可以把信号分解成低频和高频两部分,低频成分给出了信号的特征,高频成分则与噪音和扰动连在一起;将信号的高频成分去掉,信号的基本特征仍然可以保留,然后再重构,这样就剔除了数据中的噪声^[8].原理如下:

对于离散情况,假设 $\psi(t)$ 为一个基本小波或母小波,固定伸缩步长 $a_0 > 1$,位移步长 $b_0 \neq 0$, $a = a_0^{-m}$, $b = nb_0 a_0^{-m}$,则其离散小波形式为

$$\psi_{m,n}(t) = a_0^{m/2} \psi(a_0^m t - nb_0), \quad m, n \in \mathbb{Z} \quad (9)$$

对于任意信号 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$,其离散小波变换为

$$\langle f, \psi_{m,n} \rangle = a_0^{m/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi(a_0^m t - nb_0)} dt \quad (10)$$

则可以建立从小波系数 $\langle f, \psi_{m,n} \rangle$ 重建 f 的数字方法.特别有

$$f(t) = \frac{2}{A+B} \sum_{m,n \in \mathbb{Z}} \langle f, \psi_{m,n} \rangle \psi_{m,n} + R \quad (11)$$

其中, $|R| \leq O(B/A - 1) \|f\|$, A, B 为满足一定条件的系数.

然而,高频信号本身也会含有信号的少许有效成分,在去掉高频的同时,也丢失了信号的这部分有用信息,因此,可选择合理的小波函数和阈值进行消噪处理.经过反复实验发现,小波函数选用 db 小波和固定软阈值,并分析五层比较合适.结果如图 2 所示.

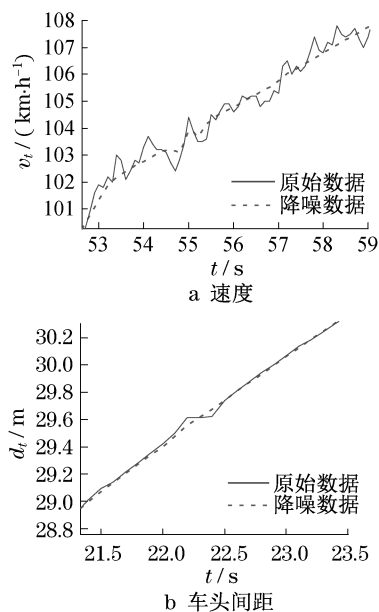


图2 原始数据和降噪数据对比

Fig.2 Comparison between the raw data and denoised data

2.4 反应时间的确定

很多情况下,跟驰过程中驾驶员反应时间一般都是根据以往反应时间的研究成果直接确定一个合理值,而较少考虑到是否完全符合采集到的跟驰数据所表达出的反应时间.因此,通过互相关函数法,能确定出更合理反映当前车辆跟驰过程中的反应时间.互相关主要是描述两列信号之间的相似性,其中一列较另一列有一个时间上的延迟^[9].通过计算两列信号的互相关函数系数,从而求出对应的最相似时刻,即互相关函数系数的峰值点所对应的时间延迟.互相关系数的公式为

$$\rho_{xy} = [R_{xy}(\tau) - u_x u_y] / \sigma_x \sigma_y \quad (12)$$

其中: $R_{xy}(\tau)$ 是两时间序列 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的互相关函数; u_x 和 u_y 分别是两列时间序列的均值; σ_x 和 σ_y 是两列时间序列的标准差; τ 为两列时间序列数据的时间延迟.

因此,通过互相关系数最大值所对应的时间延迟,能够计算出驾驶员的反应时间.而驾驶员反应时间合理范围选为 0.5~3.0 s,采样频率 $f = 10$ Hz.所以,其时间延迟 τ 范围为 5~30 个时间间隔,每个间隔为 0.1 s,小于 5 个或超过 30 个归为异常值.最终,驾驶员反应时间为

$$\tau^* = \{\tau | \max(\rho_{xy}), 0.5f < \tau < 3f\} \quad (13)$$

$$T = \tau^* / f \quad (14)$$

根据 GM 模型,可以确定刺激速度差是影响驾驶员跟驰行为的主要因素,故可通过选用一段速度差 $\Delta v(t)$ 和加、减速度 $a_{n+1}(t)$ 来计算出相应的延迟.最终结果如图 3 所示.

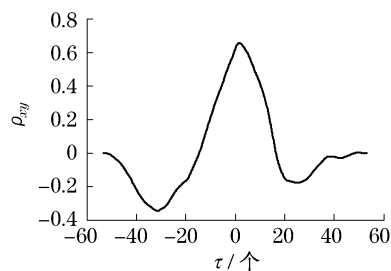


图3 $\Delta v(t)$ 和 $a_{n+1}(t)$ 序列的延迟关系

Fig.3 Relationship of time lag between two time series of relative speed and acceleration/deceleration

从图 3 中可以发现,最大的延迟发生在 13,所以,其相对应的反应时间为 1.7 s.为了让计算结果能更符合驾驶员在不同跟驰状态过程中的总体反应水平,计算多段跟驰状态过程中的反应时间来求出驾驶员的平均反应时间,结果为 1.6 s.

2.5 网络训练

使用 Matlab 提供的网格法,从实时的跟驰数据中产生初始的模糊跟驰推理系统,从而避免了通过专家主观知识来构建模糊推理系统.在这一步中,可以选择不同形式的隶属度函数来构建模糊推理系统(如高斯、三角形函数),然后,通过混合算法来训练初始的隶属度函数,直至均方根误差满足规定的条件.

3 训练结果和讨论

3.1 ANFIS 的训练结果

训练和测试的 ANFIS 模型性能可以通过均方根误差以及相关系数来评价,训练结果的均方根和相关系数分别为 0.056 7 和 0.983,均满足系统的要求.图 4 表明,基于 ANFIS 的跟驰模型能够很好地拟和实际跟车数据,且 ANFIS 的每个输入变量都有 5 个模糊子集,对应的隶属度函数最佳形式是高斯函数.例如,相对速度输入变量有 5 个语言类: {正大,正一般,在零附近,负一般,负大}.因此,ANFIS 跟驰模型总共生成 125 条规则,部分规则如下:

——如果 Δv 在“零附近”,后车速度很慢,车头间距 Δd 很近,那么,加速度 $a(t+1.6) = p_1 v_f + q_1 \Delta v + s_1 \Delta d + r_1$.

——如果 Δv 在“零附近”,后车速度一般, Δd 很近,那么, $a(t+1.6) = p_2 v_f + q_2 \Delta v + s_2 \Delta d + r_2$.

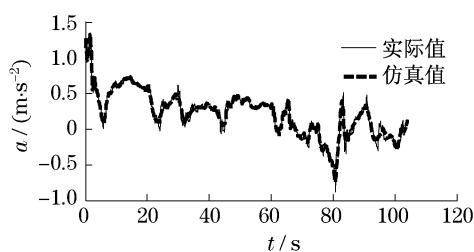


图 4 仿真结果

Fig.4 Results of simulation

由于 Sugeno 型的模糊推理系统的输出结果是以线性函数表示,虽然能提高运算速度,但不能很好地反映输出结果的模糊性.因此,通过模糊 C 均值聚类法,将输出结果转化成语言变量,具体分成 5 类——{不加减速,一般加速,大加速,一般减速,大减速}.因此,可以从实际数据中生成全部是语言变量的跟驰模糊规则.部分规则形式如下:

——如果 Δv “正一般”,后车速度快, Δd 一般,

那么,驾驶员采取“一般加速”行为.

——如果 Δv 在“正大”,后车速度很快, Δd 远,那么,驾驶员采取一般加速行为.

3.2 与 GM 模型的对比

根据式(6),可以看出 GM 模型认为速度是唯一的刺激,具有对称性和确定性.即驾驶员只有感觉到前后速度差为负时,才会减速;当前后速度差为正时,才会加速.而且当其他条件不变、相对速度差正好是相反数时,驾驶员做出的加减速大小相同.但这跟实际跟车时,驾驶员的反应还是有所不同.通过跟车实验,发现两车距离超过驾驶员的期望间距一定范围(即前后速度差为负)时,驾驶员会选择加速;当两车距离小于驾驶员期望间距而前后速度差为正时,驾驶员会选择减速.如图 5 所示.

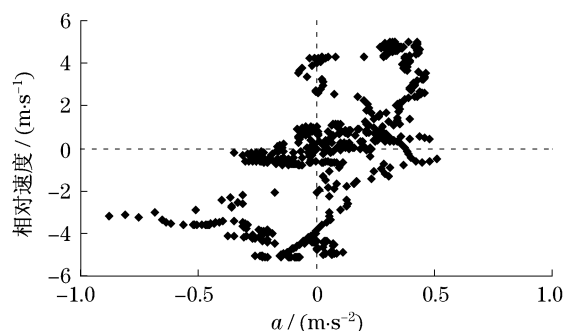


图 5 加、减速度与相对速度之间的关系

Fig.5 Acceleration/deceleration versus relative speed

通过牛顿-高斯迭代法,得出其回归参数分别为 $c = 3\ 153$, $m = 2.11$, $l = 4.21$,均方根误差为 0.185 5.具体结果如图 6 所示.通过对比可以看出,该模型能够很好反映实际驾驶员的跟驰行为,尤其是跟驰过程中的不确定性和非对称性驾驶行为.其优越性胜过传统的 GM.

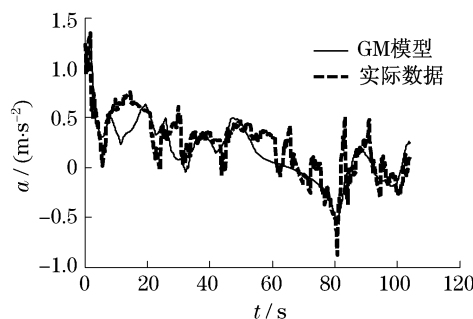


图 6 GM 模型与实测加速度的对比

Fig.6 Comparison between real data and predicted data of GM model

4 结论

利用小波降噪技术,很好地减少了五轮仪采集的跟驰数据中夹杂的噪声,提高了所建立的跟驰模型精度.同时,借助互相关函数法,计算出符合跟驰数据特征的平均反应时间——1.6 s,从而更能反映出驾驶员在跟驰过程中的延迟行为特性.相比 GM 模型,基于 ANFIS 神经网络所建立的跟驰模型与实际结果更为接近;结合模糊聚类方法,又能自适应生成完全具有语言属性的模糊规则,反映出驾驶人在跟驰过程中的模糊和不确定性行为.上述结果表明,用自适应模糊神经网络 ANFIS 方法来构建跟驰模型完全具有可行性和有效性.但该跟驰模型及其模糊规则应有的全面性和合理性,还需通过更全面、更多的车辆跟驰数据来不断完善,从而真正体现出模型的实用性及应有的价值.

参考文献:

- [1] 贾宏飞,王晓原.基于模糊推断的车辆跟驰模型[J].中国公路学报,2001,14(2):81.
JIA Hongfei, WANG Xiaoyuan. Car-following model based on fuzzy inference system [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(2): 81.
- [2] 张智勇,荣建.跟车模型研究综述[J].公路交通科技,2004,21(8):108.
ZHANG Zhiyong, RONG Jian. Review of car-following model research[J]. Journal of Highway and Transportation Research

and Development, 2004, 21(8): 108.

- [3] 徐学明,荣建.混合神经网络跟驰模型的构建[J].公路交通科技,2007,24(3):130.
XU Xueming, RONG Jian. Development of a car-following model based on combined neural network model[J]. 2007, 23(3): 130.
- [4] 李德慧,刘晓明.基于模糊神经网络的车辆跟驰建模与仿真研究[J].北京工业大学学报,2007,33(4):398.
LI Dehui, LIU Xiaoming. Car-following safety and modeling and simulation based on with fuzzy neruo network[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(4): 398.
- [5] Mehmet A Y. Mahmut Firat. Adaptive neuro fuzzy inference system approach for municipal water consumption modeling; an application to Izmir, Turkey [J]. Journal of Hydrology, 2008 (365): 225.
- [6] MA Xiaoliang, Andréasson Ingmar. Estimation of driver reaction time from car-following data; application in evaluation of general motor-type model, transportation record reboard[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2006(1965): 130.
- [7] 贾宏飞.应用五轮仪采集车辆跟驰过程描述参数[J].山东工程学院学报,2002,16(3):33.
JIA Hongfei. Data collection on car-following behaviour using five-wheel system [J]. Journal of Shandong Institute of Technology, 2002, 16(3): 33.
- [8] 付明.小波变换在信号降噪中的应用研究[J].微计算机信息,2008,24(1):267.
FU Ming. The application of decreasing noise by wavelet transform[J]. Journal of Microcomputer Information, 2008, 24(1): 267.
- [9] 乔晋.车辆跟驰模型参数标定与验证研究[D].上海:上海交通大学安泰经济与管理学院,2008.
QIAO Jin. Reasearch on parameters calibration and verification of car-following models [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University. Antai Economy and Managment Institute, 2008.

(上接第 985 页)

参考文献:

- [1] Lu Y, Chiew Y M, Cheng N S. Review of seepage effects on turbulent open-channel flow and sediment entrainment [J]. Journal of Hydraulic Research, 2008, 46(4): 476.
- [2] 刘涛,冯秀丽,林霖.海底孔压对波浪响应试验研究及数值模拟[J].海洋学报,2006,28(3):173.
LIU Tao, FENG Xiuli, LIN Lin. Study of seabed pore water pressure based on in-situ test and numerical simulation[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(3): 173.
- [3] Cornforth D H, Lowell J A. The 1994 submarine slope failure at Skagway, Alaska [C] // Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides. Rotterdam: Balkema, 1996: 527-532.
- [4] 于玉贞,谢立全,孙逊.渗流作用下的江河岸坡冲刷变形分析[J].岩土力学,2007,28(增刊):311.
YU Yuzhen, XIE Liquan, SUN Xun. Analysis of scour deformation of riverbank subject to seepage force[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S1): 311.

- [5] Hoque M A, Asano T. Numerical study on wave-induced filtration flow across the beach face and its effects on swash zone sediment transport[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(14-15): 2033.
- [6] 谢立全,于玉贞.渗流作用下的岸坡泥沙起动条件[J].清华大学学报:自然科学版,2006,46(9):1534.
XIE Liquan, YU Yuzhen. Study on incipient motion condition of riverbank sand subject to seepage[J]. J Tsinghua Univ: Sci & Tech, 2006, 46(9): 1534.
- [7] Xie L Q, Lei H J, Yu Y Z, etc. Incipient motion for riverbank sediments with outflow seepage [J]. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, 2009, 135(3): 228.
- [8] 李广信.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004.
LI Guangxin. Advanced soil mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [9] 谢立全,于玉贞,单宏伟.水流对渗流的影响实验研究[J].水科学进展,2008,19(4):525.
XIE Liquan, YU Yuzhen, SHAN Hongwei. Experimental study on effect of water flow on seepage[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(4): 525.