

交通运输

基于 ACC 系统的跟驰模型改进分析

金峻臣

(北京交通大学,北京 100044)

摘要 目前,国内车辆并没有广泛应用 ACC(Adaptive cruise control)系统。研究表明,在跟驰过程中,驾驶员通过感知改变自己跟驰状态,因此该系统具有很大的主观性。在常用的基于 ACC 的跟驰模型的基础上,建立了考虑驾驶员行为的跟驰模型。通过传统的跟驰模型,进一步研究车辆流之间关系。最后,借助频域分析法验证了该系统的稳定性。利用时域分析法分析得到在特定输入条件下的稳态误差及动态特性。

关键词 时域分析法 频域分析法 驾驶员行为 自适应巡航控制系统

中图法分类号 U491.264; **文献标志码** A

跟驰模型主要是运用动力学方法,研究在单一车道上车辆列队行驶时的状态。其主要目的之一就是辅助管理部门预测跟驰现象对交通流的影响,从而通过一些手段,在高密度车流的情况下,使追尾撞车事故的发生率降低^[1-3]。

在实际的交通环境下,驾驶员行为很大程度上影响跟驰系统。在已有的车辆跟驰模型中,多数模型的构建是基于对交通现象的直观认识,并没有全面考虑驾驶员在跟驰过程中的状态。此外,多数模型并没有对时域特性及频域特性进行详细分析。因此,本文基于其他专家学者的对自适应巡航系统的研究,建立考虑驾驶行为的跟驰模型,并且对其时域、频域特性进行分析。

1 基于 ACC 系统的跟驰模型

1.1 模型介绍

ACC 系统是采用雷达检测当前的交通情况,其标定量为两车设计间距^[4]。利用 ACC 系统的跟驰模型(见图 1)。其中, $x_i(t)$ 为第 i 辆车在 t 时刻的位移; $x_{r,i}(t), x'_r(t)$ 为第 i 辆车与第 $i-1$ 辆车的相

对位移和相对速度; $x''_i(t)$ 为第 i 辆车的加速度; $x_{r,e,i}(t)$ 为通过 ACC 系统第 i 辆车与第 $i-1$ 辆车的设计距离, $e_i(t)$ 为相对位移与期望距离之差。

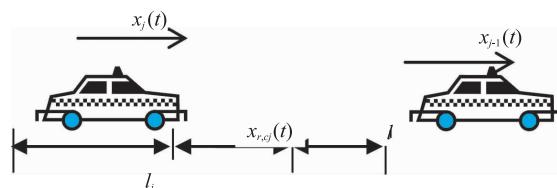


图 1 基于 ACC 系统跟驰模型图

1.2 模型分析

而对于没用装备雷达系统的车辆,该模型不再适用。通过研究分析,每个司机的期望间距是与个人的性格、年龄、精神状态等主观因素相关,并且是与时间 t 有关的函数。并且驾驶员常常通过观察与其最近的前面多辆车来做出相应反应。这导致多辆车之间的相互关系对它们之间的协同作用产生一定影响,而不是单独两辆车之间的关系^[4,5]。

2 改进的跟驰模型的建立

2.1 基于驾驶员行为建模

在跟驰过程中,前车的加速度变化导致两车间距变化,跟驰车驾驶员通过感知,改变跟驰车的加速度,以保持与前车的间距稳定^[6,7]。我们通过这

一系列的过程建立模型(见图 2)。

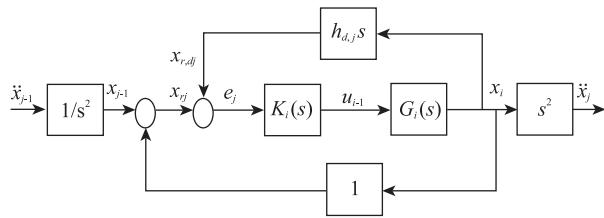


图 2 传递函数图

控制变量 $u_i(t) = \omega_{K,i}^2 \left(\frac{1}{\omega_{K,i}} e'_i(t) + e_i(t) \right)$, $G_{i,j}(t)$,

包括一个低层次的控制系统,具体关系为:

$$G_{i,1}(t) = k_{G,i} \int_0^t u(t) dt, t \geq 0 \quad (1)$$

$$G_{i,2}(t) = \int_0^t G_{i,1}(t) dt, t \geq 0 \quad (2)$$

$$\tau_i G'_{i,3}(t) + G_{i,3}(t) = G_{i,2}(t) \quad (3)$$

$$x_i(t) = G_{i,3}(t - \beta_i) \quad (4)$$

基于驾驶员行为的期望间距为 $x_{r,d,i}(t)$, $h_{d,i}$ 为车头时距,则二者关系为^[9]:

$$x_{r,d,i}(t) = h_{d,i} x'_i(t) \quad (5)$$

式(5)中, $k_{G,i}, \omega_{G,i}, \tau_i$ 为可变参数, β_i 为延迟时间。

2.2 模型简化

由于 $G_i(s) = \frac{k_{G,i}}{s^2(\tau_i s + 1)} e^{\beta_i s}$ 存在延迟环节,而

延迟环节是一个非线性的函数,有延迟的系统是很
难分析和控制的。不妨令 $e^{\beta_i s} = \frac{1}{\beta_i s + 1}$ 。则将 $G_i(s)$

简化为: $G_i(s) = \frac{k_{G,i}}{s^2(\tau_i s + 1)(\beta_i s + 1)}$, 那么其闭环
传递函数为

$$T_i(s) = \frac{G_i(s) K_i(s)}{1 + H_i(s) G_i(s) K_i(s) + G_i(s) K_i(s)} \circ$$

其中 $H_i(s) = h_{d,i} s$ 。经过化简,可得

$$T_i(s) = (k_{G,i} \omega_{K,i}^2 + k_{G,i} \omega_{K,i} s) \times (\tau_i \beta_i s^4 + (\tau_i + \beta_i) s^3 + (1 + k_{G,i} \omega_{K,i} h_{d,i}) s^2 + (k_{G,i} \omega_{K,i}^2 h_{d,i} + k_{G,i} \omega_{K,i}) s + k_{G,i} \omega_{K,i}^2)^{-1} \circ$$

2.3 车辆流之间关系

上述模型是一个跟驰系统输入与输出之间的
关系,在实际跟驰过程中,存在车辆流的现象,即将
第 i 辆车的输出作为第 $i+1$ 辆车的输入(见图 3)。

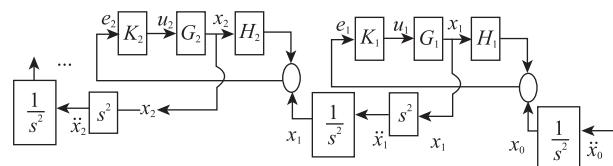


图 3 车辆流传递函数图

3 系统特性分析

3.1 稳定性分析

该系统的开环传递函数为: $M_i(s) = T_i(s) = \frac{G_i(s) K_i(s)}{1 + H_i(s) G_i(s) K_i(s)}$, 其频率特性函数为:

$$M_i(j\omega) = \frac{k_{G,i} \omega_{K,i} (\omega_{K,i} + j\omega)}{-\omega^2 (\tau_i j\omega + 1) (\beta_i j\omega + 1) + k_{G,i} h_{d,i} \omega_{K,i} j\omega (\omega_{K,i} + j\omega)} \circ$$

基于国内外专家学者对 ACC 模型的分析,车辆流系统的参数如表 1 所示^[8]。

表 1 车辆流系统参数

第 i 辆车	$k_{G,i}$	τ_i	β_i	$\omega_{K,i}$	$h_{d,i}$
1	0.7	0.1	0.0	3.0	1.0
2	1.0	0.5	0.1	0.3	1.0

可得第一辆车的开环传递函数如下:

$$M_1(s) = \frac{2.1(3+s)}{s^2(0.1s+1) + 2.1s(3+s)} \circ$$

其频率特性函数为:

$$M_1(j\omega) = \frac{2.1(3+j\omega)}{-\omega^2(0.1j\omega+1) + 2.1j\omega(3+j\omega)} \circ$$

通过对 Nyquist 以及 Bode 图分析,可以得出第一辆车的跟驰系统是稳定的。(见图 4、图 5)

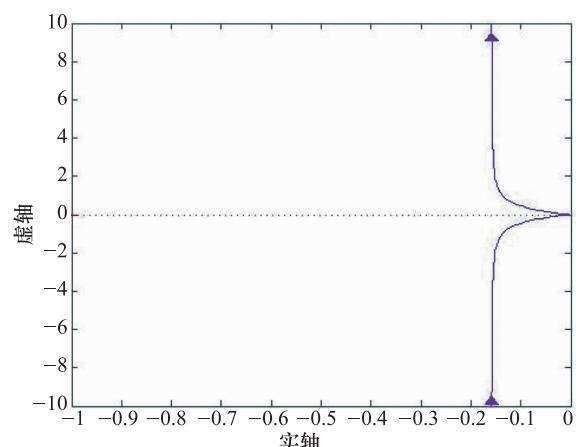


图 4 第一辆车频域函数的奈奎斯特图

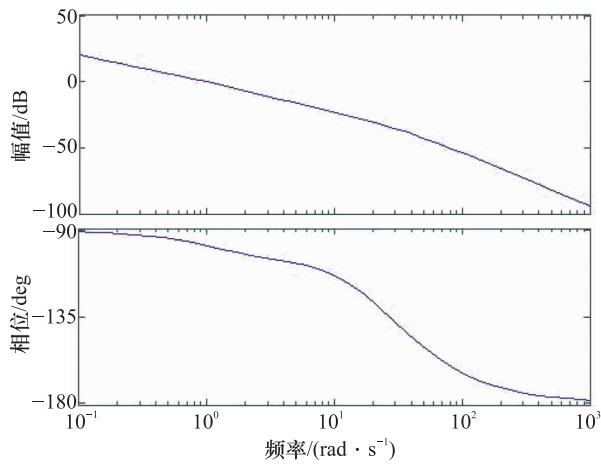


图 5 第一辆车频域函数的伯德图

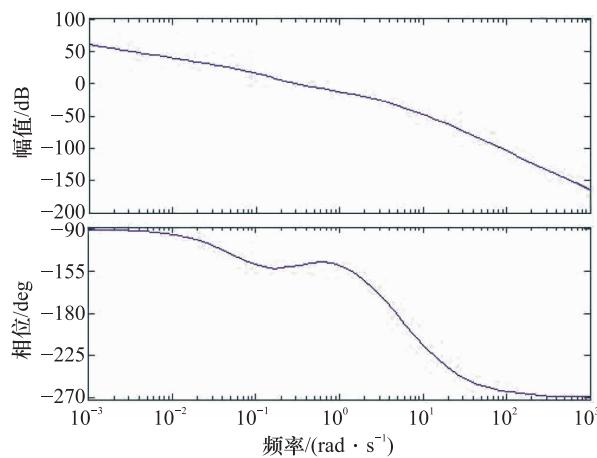


图 7 第二辆车频域函数的伯德图

第二辆车的开环传递函数如下：

$$M_2(s) = \frac{0.3(0.3+s)}{s^2(0.5s+1)(0.1s+1)+0.3s(0.3+s)}.$$

其频率特性函数为：

$$M_2(j\omega) = \frac{0.3(0.3+j\omega)}{-\omega^2(0.5j\omega+1)(0.1j\omega+1)+0.3j\omega(0.3+j\omega)}.$$

通过对 Nyquist 以及 Bode 图分析, 可以得出第二辆车的跟驰系统是稳定的(见图 6、图 7)。

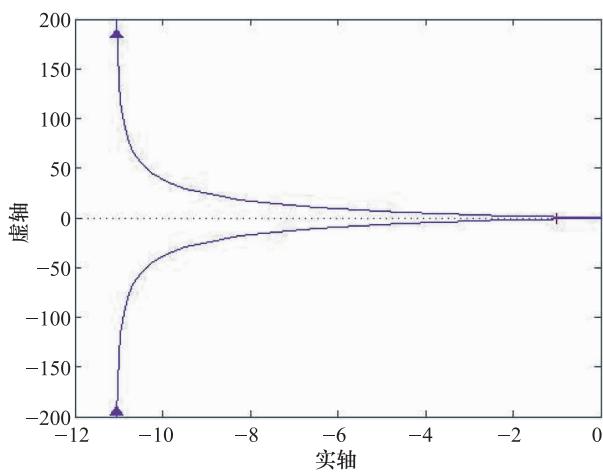


图 6 第二辆车频域函数的奈奎斯特图

3.2 稳态误差分析

通过以上分析, 可得扰动存在下的传递函数(见图 8)。

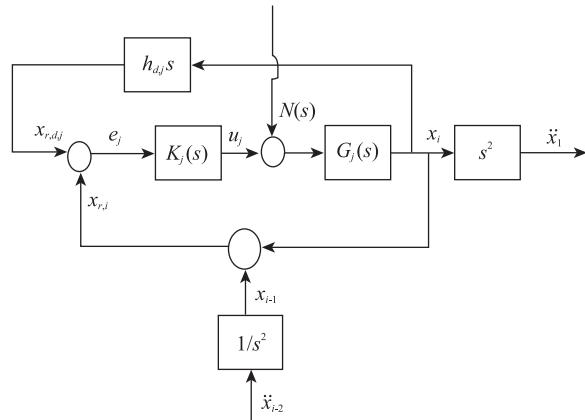


图 8 扰动存在下的传递函数

$$E(s) = \frac{x''_{i-1}(s)}{s^2(1 + H_i(s)G_i(s)K_i(s) + G_i(s)K_i(s))} + \frac{-G_i(s)N(s)}{1 + H_i(s)G_i(s)K_i(s) + G_i(s)K_i(s)};$$

$$e_{ss}(s) = \frac{s(\tau_i s + 1)(\beta_i s + 1)R(s)}{\tau_i \beta_i s^4 + (\tau_i + \beta_i)s^3 + (1 + k_{G,i}h_{d,i}\omega_{K,i})s^2 + (k_{G,i}\omega_{K,i} + k_{G,i}h_{d,i}\omega_{K,i}^2)s + k_{G,i}\omega_{K,i}^2} + \frac{-k_{G,i}s^2N(s)}{\tau_i \beta_i s^4 + (\tau_i + \beta_i)s^3 + (1 + k_{G,i}h_{d,i}\omega_{K,i})s^2 + (k_{G,i}\omega_{K,i} + k_{G,i}h_{d,i}\omega_{K,i}^2)s + k_{G,i}\omega_{K,i}^2}.$$

由此可知:

当输入为单位阶跃函数 $x''_1(t) = 1(t)$ 则

$$e_{ssr} = \frac{1}{k_{G,i}\omega_{K,i}^2};$$

当输入单位斜坡函数 $x''_1(t) = t$, 则 $e_{ssr} = \infty$;

当输入为单位加速度函数 $x''_1(t) = \frac{1}{2}t^2$, 则

$$e_{ssr} = \infty;$$

当扰动为单位阶跃函数 $N(t) = 1(t)$, $e_{ssn} = 0$;

当扰动为单位斜坡函数 $N(t) = t$, $e_{ssn} = 0$;

当扰动为单位加速度函数 $N(t) = \frac{1}{2}t^2$, 则

$$e_{ssn} = -\frac{1}{\omega_{K,i}^2}, e_{ss} = e_{ssr} + e_{ssn} \circ$$

3.3 动态特性分析

根据表 1, 通过分析, 第一辆车和第二辆车都是稳定的。系统的闭环函数如下:

$$T_i(s) = (k_{G,i}\omega_{K,i}^2 + k_{G,i}\omega_{K,i}s)[\tau_i\beta_i s^4 + (\tau_i + \beta_i)s^3 + (1 + k_{G,i}h_{d,i}\omega_{K,i})s^2 + (k_{G,i}\omega_{K,i} + k_{G,i}h_{d,i}\omega_{K,i}^2)s + k_{G,i}\omega_{K,i}^2]^{-1}。$$

则可得, 当输入为单位阶跃函数时, 即 $x''_0(t) = \frac{1}{s}$, 第一辆跟随车输出为:

$$x''_1(s) = \frac{2.1s + 6.3}{0.1s^4 + 3.1s^3 + 8.4s^2 + 6.3s} = \frac{0.0264}{s + 28.0894} + \frac{-1.0264(s + 1.4553)}{(s + 1.4553)^2 + 0.3535^2} - \frac{0.0376}{(s + 1.4553)^2 + 0.3535^2} + \frac{1}{s};$$

通过反拉普拉斯变换可得:

$$x''_1(t) = 0.0264e^{28.0894t} - 1.0264e^{1.4553t} \times \cos 0.3535t - 0.1064e^{1.4553t} \sin 0.3535t + 1.$$

由此可得到系统的瞬态性能指标, 当输入为单位阶跃函数时, 第一辆车系统的上升时间为 $t_r = 1.7s$, 调节时间 $t_s = 3.0s$ (见图 9)。

当输入为单位阶跃函数时, 即 $x''_0(s) = \frac{1}{s}$, 第二

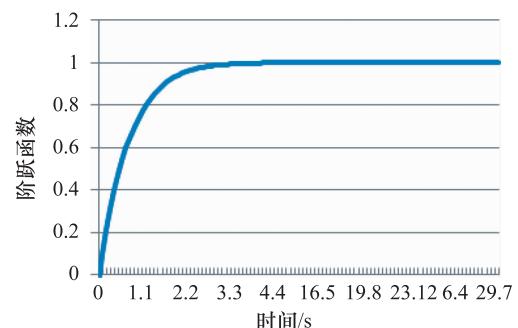


图 9 第一辆车瞬态性能指标

$$x''_2(s) = x''_2(s) \left(\frac{0.3s + 0.09}{0.05s^4 + 0.6s^3 + 1.3s^2 + 0.39s + 0.09} \right) = a_i \left(\frac{-0.0101}{s + 9.2892} - \frac{0.1489}{s + 2.4037} - \frac{1.1388(s + 0.1536)}{(s + 0.1536)^2 + 0.2388^2} + \frac{0.0894}{(s + 1.1536)^2 + 0.2388^2} + \frac{1}{s} \right).$$

其中 a_i 为 $x''_1(t)$ 。

通过反拉普拉斯变换可得:

$$x''_2(t) = -0.0101e^{-9.2892t} - 0.1489e^{-2.4037t} + 1.1388e^{-0.1536t} \cos 0.2388t + 0.0894 \frac{e^{-0.1536t} \sin 0.2388t}{0.2388} + 1.$$

当输入为单位阶跃函数时, 第二辆车系统的延迟时间 $t_k = 0.2s$; 上升时间为 $t_r = 0.5s$; 峰值时间为 $t_p = 2.1s$; 调节时间 $t_s = 16.8s$; z 最大超调量为 $\delta\% = 80\%$

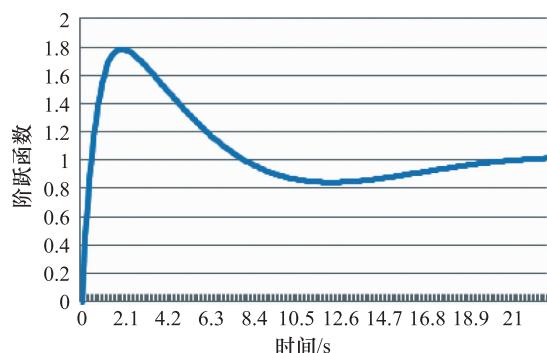


图 10 第二辆车瞬态性能指标

4 结论

通过利用时域分析法以及频域分析法对基于驾驶员行为的跟驰模型进行分析,可以得出该模型是稳定的,且分析了输入及扰动单独存在的情况下 的稳态误差,另外,针对第一辆与第二辆车的跟驰系统,进行了动态性能分析。另外,该系统还有很大的提升空间,比如,两车间距是根据每个驾驶员行为的特性而变化,其相关参数难以标定。

参 考 文 献

- 1 Brackstone M, McDonald M. Car — following. a historical review; Transportation Research Part F,2000;2(1999) :181—196
- 2 Ranney T A. Psychological factors that influence car — following and car — following model development. Transportation Research Part F,
- 3 Chakraborty P, Kikuchi S. Evaluation of the general motors based car-following models and a proposed fuzzy inference mode. Transportation Research Part C,1999;7(1999) :209—235
- 4 王有信,王斌松. 基于神经网络的车辆跟驰模型. 淄博学院学报(自然科学与工程版),2002;4(1):65—67
- 5 贾洪飞,唐 明,李 莉. 基于驾驶员认知过程的车辆跟驰模型的建立. 公路交通科技,2008;25(2):123—126
- 6 翟 静,熊 坚. 基于驾驶员视觉的车辆跟驰建模与仿真. 道路交通与安全,2007;7(3):34—37
- 7 吴超仲,严新平,马晓风. 考虑驾驶员性格特性的跟驰模型. 交通运输工程与信息学报,2007;5(4):18—22
- 8 Gerrit J L, Naus V, Ploeg J. String-stable CACC design and experimental validation; a frequency-domain approach. Transactions on vehicular technology , 2010; 10(59):4268—4278
- 9 Zhang H M, Kim T. A car-following theory for multiphase vehicular traffic flow. Transportation Research Part B; 2004, (2005) ; 39: 385—399

Research on Improved Car-following Based on ACC System

JIN Jun-chen

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China)

[Abstract] Nowadays, only few people take advantages of ACC system. the drivers' cognition behavior in the process of car-following based on the previous studies about ACC system is mainly discussed. In addition, the time-domain analysis is used and the frequency-domain analysis is analyzed the model's steady-state performance, transient performance, etc. In order to analyze the system more graphically, The Nyquist diagram and the Bode diagram are drawed.

[Key words] time-domain analysis frequency-domain analysis driver behavior ACC