

低速行驶车辆的非线性系统建模及控制

宾 洋, 李 克 强, 连 小 珉

(清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 针对低速行驶工况下的车辆 Stop and Go (起-停) 巡航控制系统, 本文推导其纵向行驶的非线性动力学方程. 在此基础上采用精确线性化变换将非线性系统转化为线性可控正则型, 并对此正则型设计一种跟踪控制器, 实现了车辆低速甚至起-停工况的加速度精确跟踪.

关键词: 非线性系统; 精确线性化; 跟踪控制

中图分类号: U27 **文献标识码:** A

Modeling and control of nonlinear systems for vehicular stop-and-go cruise control

BIN Yang, LI Ke-qiang, LIAN Xiao-min

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A nonlinear equation of vehicle longitudinal dynamics is deduced for the low-speed vehicular stop-and-go cruise control systems. Based on the equation, an exact linearization transformation is utilized to convert the nonlinear system in to a linear controllable normal form, and a tracking control algorithm is investigated for this normal form to keep more precise acceleration tracking on the low-speed or stop-and-go conditions.

Key words: nonlinear systems; exact linearization; tracking control

1 引言(Introduction)

具有 Stop and Go 功能的车辆自适应巡航控制(adaptive cruise control)系统是针对拥挤的城市交通工况而设计的一种符合驾驶员驾驶行为特性的自动辅助驾驶系统. 它能够根据当前车辆的行驶状况以及外界环境的变化, 自适应控制车与车之间的相对距离和相对速度, 从而有效降低驾驶员的工作压力, 增加道路的交通流量, 提高汽车行驶的安全性能, 是更先进的自适应巡航控制系统.

作为 ACC 系统关键环节的加速度跟踪控制, 由于在低速行驶工况下, 发动机经常在节气门开度 < 50% 及低转速的非线性工况下运转, 而且液力变矩器的容量系数在转速比很宽的非线性范围内变化, 此外还受到各种外界行驶阻力的影响, 因此车辆表现出较强的非线性动力学特性, 从而导致对车辆低速行驶这一典型工况的加速度控制变得尤为困难. 针对这一难题, 国外学者已进行了初步的探索. Yi K 等应用 LQ、PID 等线性控制方法实现了对 ACC 系统的上/下位控制器的设计^[1]. 大前学在其文献^[2]中, 设计了基于 H-infinity 鲁棒控制方法的 MMC(模

型匹配控制)系统. Fritz A, Schiehlen W 在其文献^[3]中提出了一种四状态变量的状态空间车辆模型, 并采用反馈线性化方法实现非线性系统的精确线性化, 但其所建立的车辆模型将发动机输出转矩简化线性函数, 并忽略了液力变矩器的影响.

基于以上的研究工作, 本文有针对性的建立低速工况下的包括发动机、液力变矩器的动力传动系统以及车辆行驶受力的动力学方程, 然后采用反馈线性化技术对此非线性动力学方程进行研究, 并给出一种加速度控制器的设计, 最后通过仿真计算验证其控制效果.

2 车辆动力学系统建模(Modeling of vehicle dynamic systems)

图 1 所示为纵向行驶车辆的运动受力图^[4]. 其中, G_g 为车辆重力, F_t 为驱动力, $R_r = R_{rf} + R_{rn}$, R_c , R_a 分别为滚动阻力、坡度阻力和迎风阻力. 图 2 所示为车辆动力传动系统, 由发动机、液力变矩器、自动变速箱和主减速器组成, 其中, α_{th} 为节气门开度, n_{ed} , T_{ed} 为发动机转速和动态输出扭矩, T_p , T_t , n_t 分

别为液力变矩器的泵轮扭矩、涡轮扭矩和涡轮转速。在低速行驶工况下,对车辆动力学特性影响较大的两个非线性部件为:发动机和液力变矩器,下面将分别详细推导其模型建立。

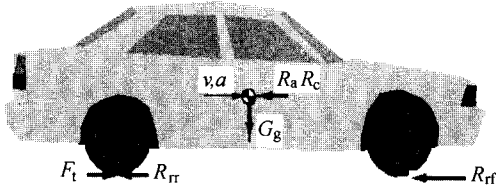


图1 车辆纵向行驶受力图

Fig. 1 Forces acting on longitudinal moving vehicle

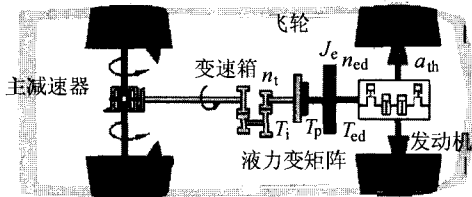


图2 车辆动力传动系统

Fig. 2 Vehicle power train system

2.1 发动机模型(Engine model)

由发动机的节气门开度 α_{th} , 转速 n_{ed} 和静态输出扭矩 T_{es} 关系曲线(即发动机 MAP 图 3)可知,在低转速 $< 2000 \text{ r/min}$ 和节气门开度 $< 50\%$ 的工况下,发动机表现出强非线性特性.对小开度下的 MAP 图曲线进行拟合(如图 3 中相应直线),建立发动机的静态数学模型。

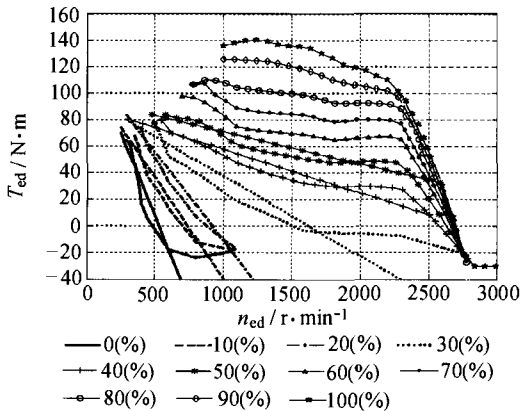


图3 发动机MAP图

Fig. 3 EngineMAP chart

$$T_{es} = \text{MAP}(\alpha_{th}, n_{ed}) =$$

$$k_1 \alpha_{th} n_{ed} + k_2 \alpha_{th} + k_3 n_{ed} + k_4, \quad (1)$$

k_1, k_2, k_3, k_4 为发动机的拟合常数。

此外,考虑发动机的燃烧迟滞特性,其动态输出扭矩的动力学特性描述为

$$T_1 \dot{T}_{ed} + T_{ed} = T_{es}, \quad (2)$$

T_1 为时间常数。

2.2 液力变矩器模型(Torque converter model)

根据液力变矩器的特征曲线(图 4),建立液力变矩器泵轮扭矩和转速之间的数学模型

$$T_p = C \left(\frac{n_t}{n_{ed}} \right) n_{ed}^2, \quad (3)$$

其中容量系数与转速比的关系为 $C \left(\frac{n_t}{n_{ed}} \right) = (\tau_1 \left(\frac{n_t}{n_{ed}} \right)^2 + \tau_2 \left(\frac{n_t}{n_{ed}} \right) + \tau_3) / 2\pi$ 。

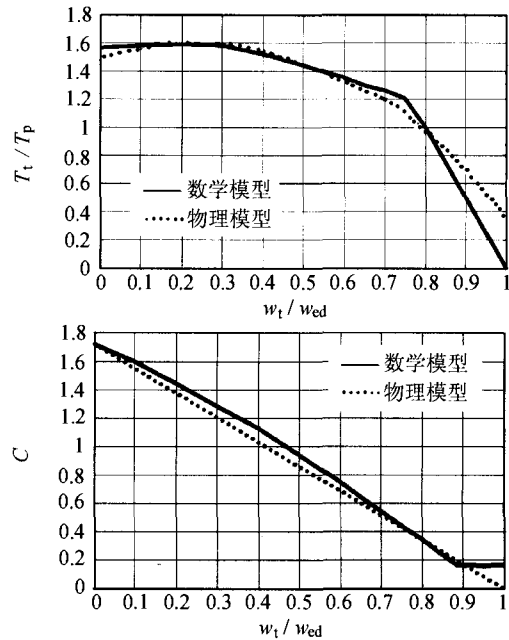


图4 液力变矩器特征曲线

Fig. 4 Torque converter characteristics curve

此外,液力变矩器扭矩比 T_t/T_p 与转速比 ω_t/ω_{ed} 之间的关系,可表示为

$$T_t = t \left(\frac{n_t}{n_{ed}} \right) T_p, \quad (4)$$

$$t \left(\frac{n_t}{n_{ed}} \right) = t_1 \left(\frac{n_t}{n_{ed}} \right) + t_2,$$

$\tau_1, \tau_2, \tau_3, t_1, t_2$ 为液力变矩器的拟合常数。

2.3 车辆纵向行驶动力学(Vehicle longitudinal dynamics)

由车辆纵向行驶时的驱动力-外界阻力平衡关系,可得以下行驶方程式:

$$\delta M \dot{v} = F_t - (R_r + R_a + R_c). \quad (5)$$

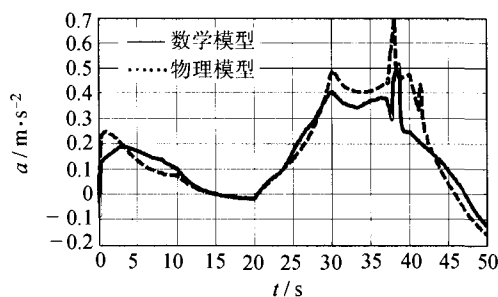
其中: $\delta = 1 + 0.04 + 0.0025 N_{if}^2$ 为汽车旋转质量换算系数, N_{if} = 主减速器传动 i_0 $\times$ 比自动变速箱档位传动比 i_g (一档传动比), 迎风阻力 $R_a = 0.232 \cdot 9.8 \cdot v^2$, 滚动和坡度阻力 $R_r + R_c = M \cdot (\mu_r + \sin \vartheta) \cdot$

9.8, η_r 为滚动阻力系数, ϑ 为道路坡度。

联立方程(1)~(5), 得到车辆纵向行驶的微分方程组如下:

$$\begin{aligned} \dot{S} = V &= \frac{0.377 \cdot r \cdot 60}{3.6 \cdot i_g \cdot i_0 \cdot 2\pi} n_t, \\ \delta M \frac{0.377 \cdot r \cdot 60}{3.6 \cdot i_g \cdot i_0 \cdot 2\pi} \dot{n}_t &= \\ (t_1(\frac{n_t}{n_{ed}}) + t_2(\tau_1(\frac{n_t}{n_{ed}})^2 + & \\ \tau_2(\frac{n_t}{n_{ed}}) + \tau_3)(\frac{n_{ed}}{2\pi})^2 \frac{i_g \cdot i_0 \cdot \eta_k}{r} - & \\ (0.232 \cdot 9.8) \cdot (\frac{0.377 \cdot r \cdot 60}{3.6 \cdot i_g \cdot i_0 \cdot 2\pi})^2 n_t^2 - & \\ M(\eta_r + \sin\vartheta) \cdot 9.8, & \quad (6) \\ J_e \dot{n}_{ed} = T_{ed} - (\tau_1(\frac{n_t}{n_{ed}})^2 + \tau_2(\frac{n_t}{n_{ed}}) + \tau_3)(\frac{n_{ed}}{2\pi})^2, & \\ T_1 \dot{T}_{ed} = k_1 n_{ed} \alpha_{th} + k_2 \alpha_{th} + k_3 n_{ed} + k_4 - T_{ed}, & \end{aligned}$$

r 为有效轮胎半径, η_k 总传动效率。



对上述方程进行简化, 得到

$$\dot{X} = F(X) + G(X)u = \begin{bmatrix} an_t \\ an_t^2 + bn_t n_{ed} + cn_{ed}^2 + d \frac{n_t^3}{n_{ed}} - \frac{\lambda}{\delta} \\ gn_t^2 + fn_t n_{ed} + en_{ed}^2 + \frac{T_{ed}}{J_e} \\ j \cdot n_{ed} + k - \frac{T_{ed}}{T_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ h \cdot n_{ed} + i \end{bmatrix} \alpha_{th}, \quad (7)$$

式(7)为一单输入仿射非线性系统. 其中 $a, \lambda, \delta, a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k$ 为简化后的常系数。

图5是对物理和数学模型的仿真比较, 虚线和实线分别代表数学和物理模型的仿真结果. 由仿真结果可见, 所建立的数学模型能够较好的近似实际的车辆物理模型, 尤其是在低速工况下, 其误差较小. 从而为下一步的控制器设计提供了精确的数学模型。

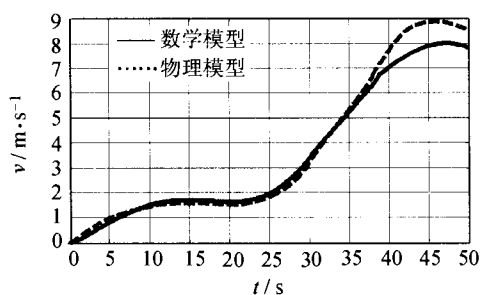


图5 物理/数学模型的仿真结果比较

Fig. 5 Simulation results comparison between physical and mathematical model

针对工程问题中广泛存在的非线性系统, 对其综合问题的研究仍缺乏比较系统的方法. 而非线性系统的线性化, 是工程技术应用处理非线性模型的一种常用的方法. 经典的线性化方法是描述函数法, 通过在平衡点附近作级数展开, 舍去高次项, 取其线性近似. 但上述线性化方法的主要缺点是, 在工作平衡点附近展开的线性化系统, 只能反应系统在这个状态近旁的性状, 而其舍去项的误差会随着使用区域的扩大而加大. 因此, 它不适合用于需要控制精度高的系统, 也不适用讨论状态远离平衡点的系统的控制. 克服描述函数法不足的有效途径是采用精确线性化方法. 随着微分几何方法的研究深入, 精确线性化方法已得到系统的发展. 实现非线性系统精确线性化有三种方式: 无反馈线性化、反馈线性化和动态补偿线性化. 本文主要采用反馈线性化方法来处理以上仿射非线性系统(7)。

3 非线性系统的精确线性化 (Exact linearization of nonlinear systems)

实现非线性系统(7)精确线性化目的是寻找一个合适的输出变量 $y = h(X)$, 使得系统满足以下充要条件^[5]:

1) $\text{rank}\{G, ad_F G, ad_F^2 G, ad_F^3 G\} = 4$ 即保证系统的能控性;

2) 分布 $D = \text{span}\{G, ad_F G, ad_F^2 G\}$ 是对合分布, 也即检验下列条件是否满足 $\text{rank}\{G, ad_F G, ad_F^2 G, [ad_F^i G, ad_F^j G]\} (i < j, i, j = 0, 1, 2) = 2$, 从而保证向量场 $G, ad_F G, ad_F^2 G$ 的可积性。

由此构造出坐标变换 Z 及反馈控制 u

$$\begin{aligned} Z &= \phi(X), \\ u &= \Delta(X, V). \end{aligned} \quad (8)$$

将原座标空间 X 变换至 Z 空间, 实现非线性系统转化为线性能控正则型. 其中 ad 表示李括号 (Lie Bracket), 定义为

$$ad_F G = \frac{\partial G}{\partial X} F - \frac{\partial F}{\partial X} G. \quad (9)$$

直接验证这两个充要条件需要十分繁琐的计算过程,而由文献[5]的结论可知,条件(1)的能控性表明 $G, ad_F G, ad_F^2 G, ad_F^3 G$ 在平衡点 X_0 (即包含 $F(X_0) = 0$ 的点) 是线性无关的,该条件等价于当且仅当在 X_0 的邻域 U 内 (U 是一个 $\mathbb{R}^4$ 的开子集), 如果存在 $h(x)$ 解满足

$$\begin{cases} L_G h(X) = L_G L_F h(X) = L_G L_F^2 h(X) = 0, \\ L_G L_F^3 h(X) \neq 0. \end{cases} \quad (10)$$

$$Z = \phi(X) = \begin{pmatrix} h(X) \\ L_F h(X) \\ L_F^2 h(X) \\ L_F^3 h(X) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S \\ an_t \\ \alpha(an_t^2 + bn_t n_{ed} + cn_{ed}^2 + d \frac{n_t^3}{n_{ed}} - \frac{\lambda}{\delta}) \\ k_1 n_t^3 + k_2 n_t^2 n_{ed} + k_3 n_t n_{ed}^2 + k_4 \frac{n_t^4}{n_{ed}} + k_5 n_t + k_6 n_{ed} + k_7 n_{ed}^3 \\ + k_8 \frac{n_t^5}{n_{ed}^2} + k_9 \frac{n_t^2}{n_{ed}} + k_{10} n_t \frac{T_{ed}}{J_e} + k_{11} n_{ed} \frac{T_{ed}}{J_e} + k_{12} \frac{n_t^3}{n_{ed}^2} \frac{T_{ed}}{J_e} \end{pmatrix} \quad (13)$$

和反馈变换

$$u = \Delta(X, V) = \frac{-L_F^4 h(X) + V}{L_G L_F^3 h(X)}. \quad (14)$$

即可将原系统变换为以下线性能控正则型

$$\dot{Z} = \tilde{F} \cdot Z + \tilde{G} \cdot V = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} V, \quad (15)$$

其中: $k_1 = \alpha(2a^2 + 4db - de + bg)$, $k_2 = \alpha(3ba + 3dc + bf + 2cg)$, $k_3 = \alpha(b^2 + 2ac + be + 2cf)$, $k_4 = \alpha(5ad - df)$, $k_5 = \alpha(-\frac{2a\lambda}{\delta})$, $k_6 = \alpha(-\frac{b\lambda}{\delta})$, $k_7 = \alpha(bc + 2ce)$, $k_8 = \alpha(3d^2 - dg)$, $k_9 = \alpha(-\frac{3d\lambda}{\delta})$, $k_{10} = \frac{ab}{J_e}$, $k_{11} = \frac{2ac}{J_e}$, $k_{12} = \frac{ad}{J_e}$.

下面将在实现非线性系统精确线性化的基础上,利用线性系统中成熟的控制方法(比如 LQ, PID, 极点配置),对线性化后的非线性系统进行控制器设计,最后将控制变量转换到原系统,从而使得被控系统的动态特性能够较好的满足设计要求.

4 加速度跟踪控制器设计 (Design of acceleration tracking controller)

车辆纵向行驶的加速度跟踪控制是指:给定任意合理的期望加速度 a_d , 寻求节气门 α_{th} 的反馈控

或者写成如下表达式

$$\frac{\partial h}{\partial x} [G, ad_F G, ad_F^2 G] = 0. \quad (11)$$

则系统在区域 $\{X = (S, n_t, n_{ed}, T_{ed})^T: 0 \leq S, n_t, n_{ed}, T_{ed} < \infty\}$ 内每一点有严相对阶 4, 从而保证系统的能控性. 其中 L 表示李导数 (Lie Differential), 定义为

$$L_F G = \frac{\partial G}{\partial X} F. \quad (12)$$

容易验证 $y = h(X) = S$ 的确满足以上方程. 因此, 构造坐标变换

制,使得车辆的实际加速度 a 跟踪期望值. 首先定义加速度的跟踪误差

$$\varepsilon = a_d - a. \quad (16)$$

于是,为了使跟踪误差 ε 收敛为零,提出如下跟踪误差的微分表达式为

$$\beta \dot{\varepsilon} + \phi \varepsilon + \tau \int \varepsilon = 0, \quad (17)$$

其特征方程为

$$\beta s^2 + \phi s + \tau = 0, \quad (18)$$

要使被控系统稳定,方程(18)的特征值应配置在复平面的左半平面,即满足以下条件

$$\beta, \phi, \tau > 0. \quad (19)$$

求解方程(17)可得到

$$\alpha \ddot{n}_t = \frac{\beta \dot{a}_d + \phi \varepsilon + \tau \int \varepsilon}{\beta}, \quad (20)$$

于是,节气门 α_{th} 的反馈控制

$$u = \alpha_{th} = \frac{\frac{\beta \dot{a}_d + \phi \varepsilon + \tau \int \varepsilon}{\beta} - L_F^4 h}{L_G L_F^3 h}. \quad (21)$$

5 仿真及分析 (Simulation and analysis)

为检验非线性控制器的控制效果,本文设计图 6 的期望加速度跟踪曲线,以及相应的速度变化. 作为比较,表 1 及图 7 分别给出了跟踪控制及 PID 控制的控制器参数、加速度误差、节气门开度和发动机扭矩的仿真结果.

表 1 控制器参数
Table 1 Controller parameters

跟踪控制 (基于精确线性化模型)		PID 控制	
β	1.5	PID-P	15000
ϕ	59	PID-I	200
τ	10	PID-D	10

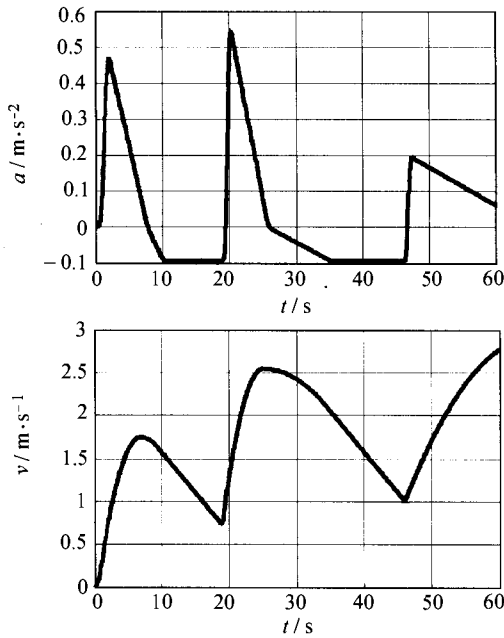


图 6 期望加速度/速度跟踪曲线

Fig. 6 Desired acceleration/velocity tracking profile

由图 7 的仿真结果可见,基于精确线性化的跟踪控制能够明显提高控制精度,尤其体现在车辆静止起步和低速行驶加速工况.其中 PID 控制的加速度误差最大绝对值超过 0.09 m/s^2 ,远大于基于精确线性化的跟踪控制误差(0.02 m/s^2).此外,对发动机节气门开度和输出扭矩的控制响应平滑,这是因为基于精确线性化模型的跟踪控制只需配置较小的控制参数.而对于 PID 控制,为得到较好的控制效果,必须配置较大的控制参数,然而大的控制参数将导致系统未建模部分的高频振荡,这可以从图中 0 s, 19 s, 46 s 瞬间加速的响应观察到.

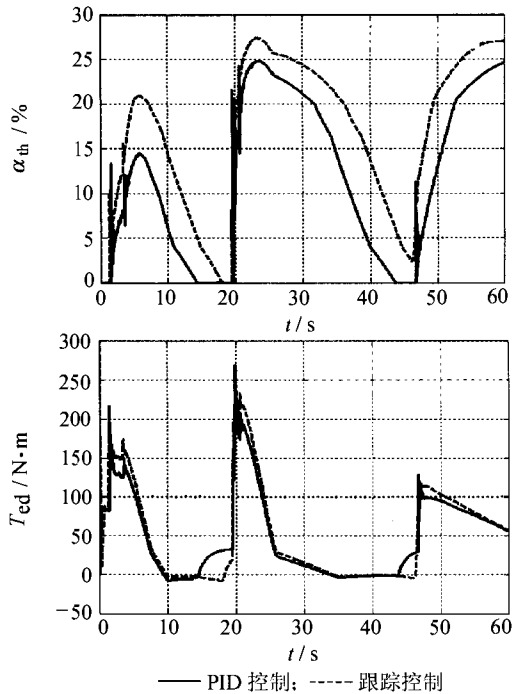
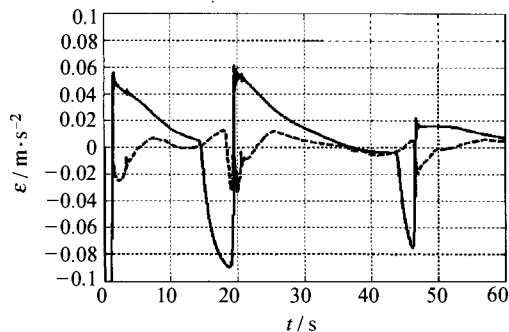


图 7 采用跟踪控制和 PID 控制的仿真结果比较
Fig. 7 Simulation results comparison between tracking and PID control

6 结论(Conclusions)

针对 Stop and Go 巡航控制系统,本文首先详细推导了低速行驶工况下的车辆动力学模型,然后采用反馈线性化方法,实现对车辆非线性动力学方程的精确线性化研究,并给出一种加速度跟踪控制器的设计.仿真计算表明:

- 1) 所建立的车辆纵向行驶非线性动力学模型在低速工况下具有较高的精度;
- 2) 基于精确线性化的控制系统能够有效的改善控制性能;
- 3) 通过配置小的控制参数,较好的避免了由于未建模部分引起的高频振荡.

参考文献(References):

- [1] YI K, HKI M, YOUNG D K. A Vehicle-to-vehicle distance control algorithm for stop-and-go cruise control [C]// *IEEE Proceeding of Intelligent Transportation Systems*. Oakland, CA: [s. n.], 2001: 478 - 482.
- [2] MABABU O. *Study on the control system for vehicle platooning* [D], Tokyo: University of Tokyo, 1999.
- [3] AXEL F, WERNER S. Automatic cruise control of a mechatronically steered vehicle convoy [J]. *Vehicle System Dynamics*, 1999, 32(4 - 5): 331 - 344.
- [4] THOMAS D G. *Fundamentals of Vehicle Dynamics* [M]. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc, 1992.
- [5] ALBERTO I. *Nonlinear Control Systems* [M]. Berlin, Heidelberg:

Springer-Verlag, 1985.

- [6] SLOTTINE J, LI W. *Applied Nonlinear Control* [M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1991.

作者简介:

宾 洋 (1976—), 男, 博士研究生, 研究领域为鲁棒非线性系统控制, 车辆 Stop and Go 巡航控制, E-mails: biny02@mails.tsinghua.edu.cn;

李克强 (1963—), 男, 工学博士, 博士生导师, 1992年~1994年在日本五十铃汽车公司车身技术中心作客座研究员, 1994年~1997年为重庆大学汽车工程系教授, 1997年~1998年在日本东京农工大

学车辆动力学与控制研究室访问学者, 1998年~2000年在日本国立交通安全与公害研究所工作, 2000年至今, 清华大学教师、STA Fellow, 2003年~2004年在德国亚琛工业大学(RWTH-Aachen) IKA 访问教授, 研究兴趣为智能汽车与智能交通系统, 混合动力电动汽车(HEV)整车控制系统, 车辆噪声振动分析与控制;

连小琨 (1955—), 男, 工学博士, 博士生导师, 1982年~1983年在四川省交通科学研究所工作, 1986年至今, 清华大学教师, 1988年~1990年, 日本五十铃汽车公司的研究人员, 研究领域为汽车噪声与振动控制, GPS 汽车导航, 智能交通系统, 计算机辅助设计, 计算机辅助测试技术.

(上接第 809 页)

参考文献(References):

- [1] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学(E 辑), 1999, 29(1): 32-42.
(LI Hongxin. Adaptive fuzzy controller based on variable universe [J]. *Science in China (Series E)*, 1999, 29(1): 32-42.)
- [2] 李洪兴. 一类高精度模糊控制器的设计[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(6): 868-876.
(LI Hongxin. Design on a class of high-accuracy fuzzy controller [J]. *Control Theory & Applications*, 1997, 14(6): 868-876.)
- [3] 李洪兴, 苗志宏, 王加银. 四级倒立摆的变论域自适应模糊控制[J]. 中国科学(E 辑), 2002, 32(1): 65-75.
(LI Hongxin, MIAO Zhihong, WANG Jiayin. Variable universe adaptive fuzzy control on the quadruple inverted pendulum [J]. *Science in China (Series E)*, 1999, 29(1): 32-42.)

- [4] 汪荣鑫. 随机过程[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993.
(WANG Rongxing. *Random Process* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1993.)
- [4] 李少远. 模糊滑动模态控制系统的性质分析[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(1): 14-18.
(LI Shaoyuan. Analysis of property of fuzzy sliding mode control [J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(1): 14-18.)

作者简介:

岳士弘 (1964—), 男, 博士, 副教授, 从事数据挖掘, 数据融合, 模糊控制和优化理论等工程应用研究, E-mail: shyue1999@tju.edu.cn;

张绍杰 (1972—), 男, 博士生, 从事控制理论及其工程应用研究;

李 平 (1954—), 男, 教授, 博士生导师, 浙江大学工业控制技术研究所所长, 从事控制理论与应用的研究.

(上接第 813 页)

- [5] 李斌. 金融时间序列数据挖掘关键算法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2001.
(LI Bin. *The main algorithm research on financial time series data mining* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2001.)
- [6] YANG Junan, LI Bin, ZHUANG Zhenquan. Research of quantum genetic algorithm and its application in blind source separation [J]. *J of Electronics*, 2003, 20(1): 62-68.
- [7] 李映, 焦李成. 一种有效的基于并行量子进化算法的图像边缘检测方法[J]. 信号处理, 2003, 19(1): 69-74.
(LI Ying, JIAO Licheng. An effective method of image edge detection based on parallel quantum evolutionary algorithm [J]. *Signal Processing*, 2003, 19(1): 69-74.)

- [8] NARAYANAN A, MOORE M. Quantum-inspired genetic algorithm [C]// *Proc of IEEE Int Conf on Evolutionary Computation*. Piscataway: IEEE Press, 1996: 61-66.

作者简介:

张葛祥 (1974—), 男, 博士研究生, 研究领域为进化计算、雷达辐射源信号处理、优化理论与优化控制、神经网络等, E-mail: dy-lan7237@sina.com;

金炜东 (1959—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为优化理论与优化控制、智能信息处理、系统仿真等;

胡来招 (1945—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究领域为信号处理、侦察接收机、无源定位等.