

# 汽车纵向加/减速度多模型分层切换控制

高 锋, 李家文, 李志强, 王建强

(清华大学, 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

**[摘要]** 针对汽车纵向动力学模型的大不确定性, 设计了一种基于鲁棒控制理论的汽车纵向加速度多模型分层切换控制系统。通过分析汽车纵向动力学特性, 用 4 个不确定模型覆盖对象不确定性, 并应用 LMI 方法设计对应的鲁棒性能控制器集合。考虑鲁棒控制系统的特点, 设计了一种对不确定性的系统增益进行估计的切换指标函数, 以选择控制器进行控制。实验表明, 提出的方法在大不确定性下可以对纵向加速度有效控制。

**关键词:** 加速度控制; 分层切换控制; 鲁棒性

## Multi-Model Hierarchical Switching Control of Vehicle Longitudinal Acceleration/Deceleration

Gao Feng, Li Jiawen, Li Keqiang & Wang Jianqiang

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

**[Abstract]** To deal with the large uncertainties of the vehicle longitudinal model, a multi-model hierarchical switching control system for vehicle longitudinal acceleration/deceleration is designed based on robust control theory. After analyzing the vehicle longitudinal dynamics, four multiplicative-uncertainty models are built to cover the uncertainties of the controlled object. And LMI approach is adopted to design a corresponding robust performance controller set. Considering the features of the robust control system, a switching index function representing the gain of the uncertainty system estimated is introduced for selecting the proper controller. Experiment results show that the proposed method can effectively control the longitudinal acceleration/deceleration of the vehicle in the presence of large uncertainties.

**Keywords:** Acceleration control; Hierarchical switching control; Robustness

### 前言

纵向运动控制系统通常被设计成分层结构: 上层控制器根据汽车状态输出期望加/减速度, 主要考虑驾驶员特性等问题; 下层控制器即文中的加/减速度控制器, 通过对节气门/制动的控制来实现期望加/减速度, 主要考虑车辆动力学问题<sup>[1]</sup>。在这一研究领域, 目前已经取得了一定成果, 但对由未建模动态特性和参数变化引起的模型不确定性考虑的不够充分<sup>[2-8]</sup>。虽然一些鲁棒和参数自适应控制方法已被用于控制器的设计, 但这些方法只能处理较小或慢时变的不确定性。由于汽车纵向动力学系统的复

杂性, 往往存在较大的建模误差, 而且在实际行驶条件下, 存在挡位、坡度等快速变化的参数。此时, 传统的鲁棒或参数自适应控制方法很难获得较好的控制效果。

针对上述问题, 文中设计了一种基于鲁棒控制理论的汽车纵向加/减速度多模型分层切换控制系统。首先通过逆模型来削弱汽车纵向动力学特性中的非线性。在分析由逆向和正向车辆纵向动力学模型组成的对象传递特性基础上, 建立 4 个乘性不确定模型来覆盖对象的不确定性, 并应用 LMI 方法设计对应的鲁棒性能控制器集合。考虑鲁棒控制系统中常用系统增益描述不确定性的方法, 设计了一种对不确定性的系统增益进行估计的切换指标函数,

原稿收到日期为 2006 年 7 月 11 日, 修改稿收到日期为 2006 年 12 月 1 日。

与估计器和切换逻辑一起构成监督器,以从控制器集合中选择合适的控制器进行控制。理论分析和实验结果表明,文中设计的控制系统对汽车纵向动力学模型中存在的大不确定性具有良好鲁棒性,同时具有良好的跟踪性能。

1 汽车纵向动力学特性及模型集合的建立

为研究汽车纵向动力学模型的不确定性以及参数变化对动态特性的影响,首先建立了图1所示的非线性车辆纵向动力学模型,并进行了实验验证<sup>[9]</sup>。

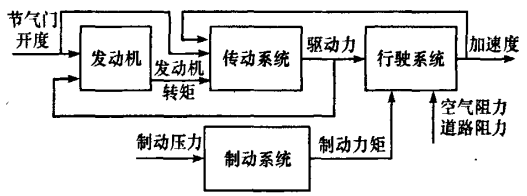


图1 汽车纵向动力学模型

直接对这样具有大模型不确定性的非线性对象进行控制是比较困难的,文中首先采用逆汽车纵向动力学模型来消除其中非线性特性,并将逆向和正向汽车动力学模型组成新的系统作为被控对象,如图2所示<sup>[8]</sup>。

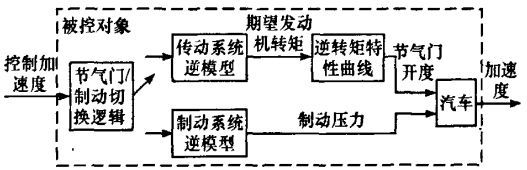


图2 逆模型线性化后的被控对象

图2中的节气门/制动切换逻辑为:当控制加/减速度  $u > a_{\min}(v) + h$  时,根据传动系统逆模型及发动机逆转矩特性曲线  $MAP^{-1}(\cdot)$  计算节气门开度  $\theta$ ,制动压力  $P=0$ ;当  $u < a_{\min}(v) - h$  时,根据制动系统逆模型计算  $P, \theta=0$ ;当  $a_{\min}(v) - h \leq u \leq a_{\min}(v) + h$  时,  $P=0, \theta=0$ 。其中  $a_{\min}(v)$  表示节气门全关时的加/减速度,是车速  $v$  的函数,  $h$  是为了避免制动/油门频繁切换而设的缓冲区,根据试验取为  $0.1 \text{ m/s}^2$ 。节气门开度的计算式为

$$T_{des} = \frac{r}{R_d R_{g0} \eta_0} (M_0 u + C_D A v^2 + M_0 g f_0)$$
$$\theta = MAP^{-1}(\omega_e, T_{des}) \tag{1}$$

其中  $T_{des}$  为期望发动机转矩;  $r$  为车轮半径;  $R_d$  为主减速器速比;  $g$  为重力加速度;  $\omega_e$  为发动机转速;  $C_D$  为空气阻力系数;  $A$  为迎风面积;  $R_{g0}, M_0, f_0, \eta_0$  分别为变速器速比、汽车质量、滚动阻力系数和机械效率的公称值。制动压力的计算式为

$$P = -(M_0 u + C_D A v^2 + M_0 g f_0) / K_{b0} \tag{2}$$

式中  $K_{b0}$  为制动力与制动压力比值的公称值。式(1)和式(2)中会发生变化的参数范围及公称值如表1所示。

表1 车辆和环境参数变化范围

参数	取值范围	公称值
汽车质量 $M/\text{kg}$	1 000 ~ 1 500	1 250
道路坡度 $\beta/\text{rad}$	-0.1 ~ 0.1	0
风速 $v_w/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	-8 ~ 8	0
滚动阻力系数 $f$	0.01 ~ 0.04	0.025
发动机时间常数 $\tau/\text{s}$	0.2 ~ 0.5	-
传动系统机械效率 $\eta$	0.8 ~ 0.99	0.977
变速器速比 $R_g$	0.74, 1.1, 1.44, 2.71	1.416
制动系数 $K_b/\text{N} \cdot \text{MPa}^{-1}$	1 000 ~ 1 300	1 150

如图2所示,新对象的输入为  $u$ , 输出为加/减速度  $a$ 。逆模型消弱了汽车纵向动力学特性中的非线性,文中将其近似为线性系统。实际道路条件下汽车和环境参数会发生变化,将表1所示的参数变化范围离散为有限个点,在每个点采用 Taylor 线性化方法获得  $u$  到  $a$  的线性化模型。所有参数点对应的传递函数组成的幅相频特性变化范围见图3。

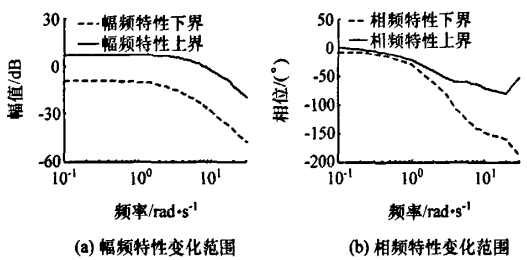


图3 被控对象频域特性变化范围曲线

此外对象具有约0.2 s的纯延时,对于这样特性在大范围内变化的对象,仅建立一个模型会造成很大的模型不确定性。文中考虑到挡位对汽车纵向动力学特性的影响最大,参考文献[10]中的模型集合设计方法,在每挡建立一个模型,从而得到了如下所示的由4个乘性不确定模型组成的模型集合  $P$ 。

$$P = \{P_i(s) = G_i(s) [1 + \Delta_i W(s)], i = 1, \dots, 4\} \tag{3}$$



动会使  $a_i$  不能收敛到  $a$ 。所以输出估计误差  $e_i$  中包含了模型误差引起的扰动信息,可以由  $e_i$  和  $z_i$  对模型  $G_i(s)$  与对象之间不确定性  $L_{2\delta}$  增益进行估计。根据文献[13]、文献[14]中的分析,为了能将图4所示的系统转化为不确定切换系统进行控制器设计,采用如下形式的切换指标函数。

$$J_i(t) = (\|e_i\|_2^2) - (\|z_i\|_2^2) = \frac{1}{s+\delta}(e_i^2 - z_i^2), \quad i=1, \dots, 4 \quad (9)$$

切换指标  $J_i(t)$  能够衡量对应的模型同对象之间不确定性的  $L_{2\delta}$  增益的大小。显然,切换指标最小的模型与对象最接近,那么基于该模型设计的控制器应该具有较好的控制效果,采用如下的切换逻辑。

$$\sigma(t) = \underset{i=1, \dots, 4}{\operatorname{argmin}} J_i(t) \quad (10)$$

运算符号  $\operatorname{argmin}(\cdot)$  表示将最小变量的下标作为输出,即在  $t$  时刻,若所有切换指标中  $J_k(t)$  最小,则令  $\sigma(t) = k$ ,同时将编号为  $k$  的控制器切换到反馈回路中。

### 2.3 控制器集合设计

根据文献[13]中的结论,由上述状态共享估计器、切换指标函数和切换逻辑构成的监督器可以保证信号  $e_{\sigma(t)}$  到信号  $z_{\sigma(t)}$  的  $L_{2\delta}$  增益小于1。将  $e_i = a_i - a$  代入式(8),经过整理可以将对象的输入输出特性采用如下的不确定切换系统表示。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_{E1} \\ \dot{x}_{E2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10 & 0 \\ 0 & -5.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{E1} \\ x_{E2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} C_{E\sigma(t)} \begin{bmatrix} x_{E1} \\ x_{E2} \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} e_{\sigma(t)} \\ a = C_{E\sigma(t)} x_{E1} - e_{\sigma(t)}, z_{\sigma(t)} = C_E x_{E2} + D_E u, \\ e_{\sigma(t)} = \Delta z_{\sigma(t)}, \|\Delta\|_{\infty} < 1, \sigma(t) \in \{1, 2, 3, 4\} \end{cases} \quad (11)$$

从而得到如图5所示的等效控制系统结构图。

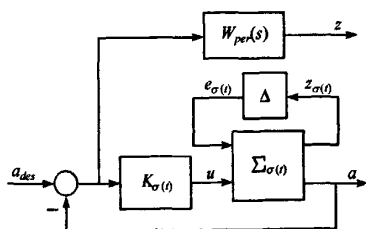


图5 等效的反馈控制系统结构

图5中  $\Sigma_{\sigma(t)}$  为由式(11)表示的不确定切换系统;  $K_{\sigma(t)}$  为控制器集合中的元素;  $W_{per}(s)$  为性能指

标加权函数。为了对期望加/减速度具有较好的跟踪效果,要求低频信号加权系数较大;对高频噪声不敏感,要求对高频信号具有较小的加权系数。综合考虑,文中取  $W_{per}(s) = (0.1s + 1.1)/s$ 。控制器集合设计的目的是使得控制器集合在切换信号作用下,与图5所示的闭环系统对不确定性  $\Delta$  具有鲁棒性;存在不确定性  $\Delta$  时,闭环系统对  $a_{des}$  具有一定的抑制能力,即要求信号  $a_{des}$  到信号  $z$  的  $L_{2\delta}$  增益小于1。

由  $H_{\infty}^s$  范数与  $H_{\infty}$  范数满足的关系式(6)和文献[13]可知,上述控制器集合的设计问题可以转化为一组线性矩阵不等式可解性问题。利用 Matlab 中的 LMI 工具进行求解,并采用平衡截断降阶法进行降阶处理后得到控制器集合中的元素为

$$\begin{cases} K_1(s) = \frac{137.14(s+4.9)(s+3.133)}{s(s+41.85)(s+45.7)} \\ K_2(s) = \frac{233.41(s+4.9)(s+3.133)}{s(s+80.06)(s+21.42)} \\ K_3(s) = \frac{572.97(s+4.9)(s+3.133)}{s(s+29.63)(s+99.3)} \\ K_4(s) = \frac{283.35(s+4.9)(s+3.133)}{s(s+54.15)(s+19.89)} \end{cases} \quad (12)$$

为避免切换引起控制器状态的切换和减小控制量的突变,控制器集合采用可观规范型描述。

$$C = \begin{cases} \dot{x}_c = A_{Ci} x_c + B_{Ci} (a_{des} - a) \\ u = [1 \ 0 \ 0] x_c \end{cases}, I=1, \dots, 4 \quad (13)$$

其中  $[1 \ 0 \ 0](sI - A_{Ci})^{-1} B_{Ci} = K_i(s)$ 。

## 3 实车实验

在完成汽车纵向加/减速度多模型分层切换控制系统设计后,通过实验对其控制性能进行验证。实验过程中,汽车和环境的参数未知,但在表1所示的范围内,而且汽车行驶过程中会经过一段长度约为50m,坡度约为4°的坡道。实验主要包括两个过程:第一段为加速工况,主要验证系统加速过程的性能;第二段为制动过程,主要验证系统减速过程的性能。实验结果如图6所示。

图6(a)为加/减速度响应曲线:0~15s为一段加速过程,最大期望加速度为  $0.5 \text{ m/s}^2$ ; 27~40s为一段制动过程,最大期望减速度为  $0.75 \text{ m/s}^2$ 。虽然汽车纵向动力学模型存在很大模型不确定性,且实验过程中会经过一段坡道,但从图6(a)可以看出,整个控制过程中,汽车的加/减速度能够及时准确地

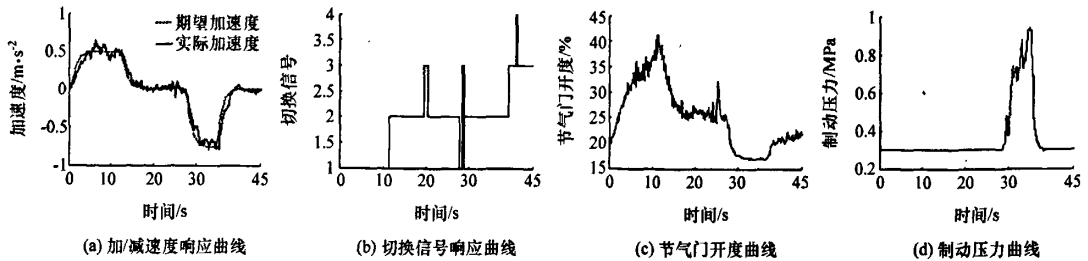


图6 加/减速度控制系统实验结果

跟踪期望加速度的变化。图6(b)为切换信号,从曲线可以看出,随着汽车状态和环境的变化,不同的控制器会被切换到反馈回路中,说明文中设计的切换指标函数能够衡量控制器集合中元素的潜在控制性能。从图6(c)和图6(d)可以看出,设计的加/减速度控制系统虽然存在着控制器的切换,但节气门开度和制动压力曲线并没有发生明显的突变,采用式(13)的控制器集合的可观规范型形式,有效地避免了控制量的突变。

## 4 结论

文中针对汽车纵向动力学模型存在较大模型不确定性的问题,设计了一种汽车纵向加/减速度多模型分层切换控制系统。实验结果表明:

(1) 汽车加/减速度响应平稳,未出现振荡和发散现象,设计的控制系统对汽车纵向动力学模型中的大不确定性具有鲁棒性;

(2) 虽然汽车纵向动力学模型中存在大不确定性,但整个控制过程中,汽车加/减速度可以较好地跟踪期望值,控制器集合具有较好的鲁棒性。

因此设计的汽车加/减速度控制系统能够满足汽车纵向运动控制系统的要求。

## 参考文献

- [1] Rajamani R, Shladover S E. An Experimental Comparative Study of Autonomous and Cooperative Vehicle Following Control Systems [J]. Transportation Research Part C, 2001, 9: 15-31.
- [2] Hedrick J K. Nonlinear Controller Design for Automated Vehicle Applications [C]. UKACC International Conference on Control, 1998: 23-32.
- [3] Kyongsu Yi, Young Do Kwon. Vehicle to Vehicle Distance and Speed Control Using an Electronic Vacuum Booster [J]. JSAE Review, 2001, 22: 403-412.
- [4] Kyongsu Yi, Il-ki Moon. A Driver Adaptive Stop and Go Cruise Control Strategy [C]. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing & Control, Taiwan, 2004: 601-606.
- [5] Germann St, Isermann R. Nonlinear Distance and Cruise Control for Passenger Cars [C]. Proceedings of the American Control Conference, Washington, 1995: 3081-3085.
- [6] Lu Xiao-yun, Karl Hedrick J. Longitudinal Control Design and Experiment for Heavy Duty Trucks [C]. Proceedings of the American Control Conference, Colorado, 2003: 36-41.
- [7] Lee G D, Kim S W. A longitudinal Control System for a Platoon of Vehicles Using a Fuzzy Sliding Model Algorithm [J]. Mechatronics, 2002, 12: 97-118.
- [8] 侯德藻, 高峰, 李克强. 基于模型匹配方法的汽车主动避撞下位控制系统 [J]. 汽车工程, 2003, 25(4): 399-342.
- [9] 侯德藻, 高峰, 李克强. 应用于汽车主动避撞系统的车辆纵向动力学模型 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(2): 258-261.
- [10] Rong X, Zhao Zhanlue, Li Xiaobai. General Model Set Design Methods for Multiple Model Approach [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(9): 1260-1276.
- [11] Aniruddha Datta. Adaptive Internal Model Control [M]. London: Springer, 1998: 25-26.
- [12] Hespanha J, Daniel Liberzon, Stephen Morse A. Hysteresis-based Switching Algorithms for Supervisory Control of Uncertain Systems [J]. Automatica, 2003, 39: 263-272.
- [13] 高峰, 李克强, 王建强, 等. 具有大不确定性对象的分层切换控制方法 [J]. 控制工程, 2007, 14(3): 297-300.
- [14] Gao Feng, Li Keqiang, Lian Xiaomin. Hierarchical Switching Control of Multiple Models Based on Robust Control Theory [J]. ACTA Automatica Sinica, 2006, 32(3): 411-416.