

DOI: 10.7652/xjtuxb201901008

一种考虑加速度需求的车速自适应控制方法

熊璐^{1,2}, 付志强², 柏满飞¹, 章仁燮¹

(1. 同济大学汽车学院, 201804, 上海; 2. 同济大学中德学院, 201804, 上海)

摘要: 针对智能车辆纵向控制要同时满足期望车速和期望加速度的需求,同时考虑到道路阻力变化对纵向控制的影响,提出一种考虑加速度需求的车速自适应控制方法。利用车辆纵向动力学模型,通过自适应遗忘因子递归最小二乘法对道路阻力进行估计。在此基础上基于条件积分方法设计耦合的车速和加速度控制律,通过积分自动调节和切换策略,保证了车速控制和加速度控制的平滑切换,并且通过建立李雅普诺夫函数,证明了车速跟踪误差的全局渐进稳定。最后,通过仿真试验和实车试验验证了控制方法的有效性。

关键词: 智能车辆; 车速控制; 加速度控制; 自适应方法; 条件积分方法

中图分类号: U46 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)01-0062-08

A Vehicle Speed Adaptive Control Method Considering Acceleration Demand

XIONG Lu^{1,2}, FU Zhiqiang², BAI Manfei¹, ZHANG Renxie¹

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Sino-German School for Postgraduate Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The longitudinal control of an intelligent vehicle involves achieving expected vehicle speed and acceleration at the same time, and the influence of change of road resistance ought to be taken into account. To satisfy all the requirements, an adaptive vehicle speed control method considering the acceleration demand is proposed. With a longitudinal dynamic model of the vehicle, the road resistance is estimated via recursive least square method with forgetting-factor, then the control law of coupled vehicle speed and acceleration can be designed by the conditional integration algorithm, which automatically adjusts and switches control strategies with integration algorithm to ensure a smooth switch in vehicle speed control or acceleration control. Establishing the Lyapunov function, the global asymptotic stability of vehicle speed tracking error is proved. Finally, the effectiveness of the control algorithm is verified by simulation and real vehicle tests.

Keywords: intelligent vehicle; speed control; acceleration control; adaptive algorithm; conditional integration algorithm

智能车运动控制包含横向控制和纵向控制,其中纵向控制是通过控制油门和制动来达到上层系统规划出的期望车速和期望加速度^[1]。由于车辆模型参数具有不确定性及非线性特点,提高车辆纵向控制方法的鲁棒性具有重要研究价值。

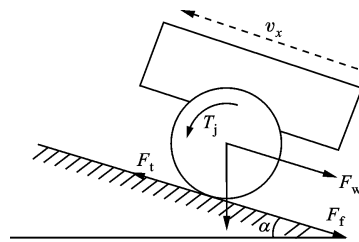
纵向控制方法主要有比例积分微分(proportion

integral derivative, PID)控制、基于车辆模型的闭环反馈控制和自适应控制等方法。赵盼提出了利用专家规则的 PID 车速控制方法,建立了油门和刹车的协调切换逻辑,根据专家规则来调整 PID 参数^[2]。Zhou 提出了一种增量式 PD 模糊逻辑控制器,利用车速跟踪误差和误差的变化率作为输入进行调节,有效地降低了车速稳态误差^[3]。陈刚等提出了一种模糊自适应 PID 控制方法,利用模糊控制方法实现参数自适应整定^[4]。但是针对车辆纵向控制的非线性特点,这些 PID 控制方法需要调节很多参数,并且忽略了外界环境不确定性可能会引起系统的不稳定。还有一部分方法是利用车辆动力学模型进行反向求解来控制输入。Shakouri 等使用了线性化的车辆模型来设计增益调度的线性二次方程,将其分别作用于油门和制动^[5]。Attia 等提出了基于动力传动系统动力学模型的车速控制方法,分别控制油门和制动输入,并分析了系统的稳定性,但是没有考虑加速度需求^[6]。Zhu 等提出了基于模糊控制的加速度控制方法,基于建立的车辆模型分别设计了油门和制动模糊控制器,仿真结果表明控制效果优于传统 PID 控制^[7]。为了考虑车辆参数的不确定性和外部干扰,文献[8-9]提出了基于时变参数的自适应加速度控制器,通过改进后线性化的车辆模型设计自适应控制律,该方法不需要复杂的车辆模型及参数,即可达到很好的跟踪效果。

综上所述,大部分文献都忽略了道路阻力变化对纵向控制的影响,而且都是单一的车速控制或者加速度控制,没有同时考虑到车速控制过程中的加速度需求。因此,本文考虑了道路阻力的变化,针对时变参数采用自适应遗忘因子递归最小二乘法(forgetting-factor recursive least square method, FFRLS)对道路阻力进行估计,并且基于条件积分方法分别设计车速控制律和加速度律,通过一阶系统积分的自动调节保证了车速控制和加速度控制的协调切换,使得纵向控制在大误差下几乎没有超调。通过仿真和实车试验验证了本文自适应控制方法的有效性,并且验证了在坡度路面上,本文方法的跟踪效果优于未加入道路阻力估计器的跟踪效果。

1 车辆纵向动力学模型

根据车辆纵向运动过程中的受力状态,在不考虑纵向和侧向耦合的情况下,忽略转向在纵向的分力,假设车辆行驶在坡度角为 α 的道路上,车辆纵向受力可以简化为如图1所示的单轮模型。



F_t :行驶驱动力; F_w :空气阻力; F_t :滚动阻力;

v_x :纵向车速; T_j :驱动轮力矩

图1 单轮车辆模型

车辆的整体纵向运动方程为

$$F_t = F_w + F_\psi + F_j \quad (1)$$

式中: F_j 为加速阻力; F_ψ 为道路阻力, $F_\psi = F_f + F_i$, F_i 为坡度阻力。

对于前驱车辆,将纵向受力代入式(1)可得

$$\frac{T_F}{R_1} = Mv_x + \frac{1}{2}\rho C_d A v_x^2 + mgf \cos\alpha + mg \sin\alpha \quad (2)$$

式中: T_F 为前轴驱动力矩; ρ 为空气密度; C_d 为空气阻力系数; A 为迎风面积; g 为重力加速度; f 为滚动阻力系数; M 为包含了旋转质量的车辆等效质量, $M = m + \sum_{j=1}^2 I_j / R_j^2$,其中 m 为车辆质量, I_1 为前轴的转动惯量, I_2 为后轴的转动惯量, R_1 为前轮的滚动半径, R_2 为后轮的滚动半径。

2 考虑加速度的车速自适应控制方法

基于车辆纵向动力学模型,采用 FFRLS 对道路阻力进行估计,将纵向动力学模型中的非线性项通过前馈进行抵消,并分别建立基于条件积分方法的车速和加速度控制律,设计过渡控制律将其耦合,建立切换策略保证车速能够快速跟踪并且在此过程中不会出现超调。

2.1 道路阻力估计

汽车行驶过程中,驱动力用来克服空气阻力、加速阻力、道路阻力,其中空气阻力可以通过查阅相关参数计算得到,加速阻力可以利用惯导得到的加速度计算得到,但是道路阻力与道路条件有关,无法直接获得。道路阻力包括滚动阻力和坡度阻力,占行驶阻力的一大部分,是影响车辆纵向动力控制的重要参数,因此需要设计估计器进行估计。

对于渐变参数的估计,传统的 FFRLS 采用定值遗忘因子能使估计值较快地收敛,但是对于突变的参数的估计,传统的 FFRLS 由于遗忘因子取为大于 0.9 的定值,历史数据的权重很大,导致估计值

不能快速地收敛。因此,本文采用自适应 FFRLS,通过定义遗忘因子的自适应法则来优化估计方法的性能^[10]。

令 $y = F_t, b = M\dot{v}_x + \frac{1}{2}\rho C_d A v_x^2, w = mgf \cos\alpha + mgsin\alpha$, 根据式(1)和(2)可得 $y = b + w$ 。通过 FFRLS 得到

$$\left. \begin{aligned} \hat{w}(k) &= \hat{w}(k-1) + L(k)[y(k) - b(k)] \\ L(k) &= P(k-1)/[\lambda + P(k-1)] \\ P(k) &= [1 - L(k)]P(k-1)/\lambda \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $L(k)$ 为递推增益; $P(k)$ 为协方差; λ 为遗忘因子, 取值区间为 $(0, 1]$ 。遗忘因子的大小关系着辨识精度和收敛速度, 取值必须综合考虑。

设遗忘因子的初值为 λ_0 , 根据观测向量纵向力的预测误差来确定遗忘因子的取值。观测向量纵向力的预测误差和预测误差的方差分别为

$$\left. \begin{aligned} e_k &= y_k - \hat{y}_k = y_k - b_{k-1} - \hat{w}_{k-1} \\ d_k &= \frac{1}{n_0} \sum_{k=1}^{n_0} e_k^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: n_0 为遗忘因子的调整次数; y_k 为 k 时刻纵向驱动力; $\hat{y}_k$ 为 k 时刻估计的纵向驱动力; b_{k-1} 为 $k-1$ 时刻加速阻力和空气阻力之和; $\hat{w}_{k-1}$ 为 $k-1$ 时刻估计得到的道路阻力。

当预测误差的方差超过事先设定的阈值时, 需要立刻减少遗忘因子至 λ' , 之后随着样本数据的增加再慢慢增大遗忘因子, 降低估计值对噪声的敏感性。实际的遗忘因子计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \lambda_0, & d_k &< \phi_0 \\ \lambda &= \lambda' + \frac{\lambda_0 - \lambda'}{n_0} k, & d_k &\geq \phi_0, k = 1, 2, \dots, n_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

2.2 车速跟踪控制方法

车速控制律基于条件积分方法, 能够防止由于执行器约束而长时间无法镇定系统, 因而导致积分运算发散从而使控制方法失效的现象^[11], 并且能够保证设计的运动学控制器控制律有界。不考虑轮胎出现滑移, 对于前轮驱动的车辆, 设控制律为 $u_T \in [-T_{\max}, T_{\max}]$, 式中: u_T 为前轮驱动力矩; $T_{\max}$ 为最大驱动力矩取值, 需要综合考虑电机的驱动性能和地面附着系数。 $T_{\max}$ 的计算公式为

$$T_{\max} = \min\left(\frac{P_n i_t}{n_n}, \mu F_z R_1\right) \quad (6)$$

式中: P_n 为电机额定功率; i_t 为电机到车轮的传动比; n_n 为电机额定转速; μ 为路面附着系数; F_z 为前

轴垂向载荷。

不考虑轮胎滑移, 将式(1)和(2)转换为

$$\dot{v}_x = \frac{T_F}{R_1 M} - \frac{F_w}{M} - \frac{F_\psi}{M} \quad (7)$$

将式(7)转换为镇定系统, 车速跟踪误差 $e_v = v_d - v_r$, 式中 v_r 是实际车速, v_d 是期望车速。令 $u_T = T_F$, 通过驱动力矩转换得到

$$\dot{e}_v = \frac{F_w}{M} + \frac{F_\psi}{M} - \frac{u_T}{R_1 M} + \dot{v}_d \quad (8)$$

利用反馈线性化的思想, 将系统中的非线性项通过前馈抵消, 同时也是为了保证控制律不超过最大值。令 $\dot{e}_v = 0$, 得到前馈控制率为

$$\left. \begin{aligned} T_f &= (M\dot{v}_d + F_w + F_\psi)R_1 \\ T_{\text{fore}} &= \text{sgn}(T_f) \min(T_{\max}, |T_f|) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: T_f 为前馈计算中间转化量; T_{fore} 为前馈控制率; sgn 为符号函数。

基于条件积分方法, 保证积分运算不发散, 令

$$\Delta T = T_{\max} - \text{sgn}(e_v) T_{\text{fore}}, s_1 = \frac{Me_v}{\Delta T \theta_0} + \frac{\sigma}{\Delta T}, \text{得到}$$

$$\left. \begin{aligned} u_T &= T_{\text{fore}} + \Delta T \text{sat}(s_1) \\ \dot{\sigma} &= -k_0 \sigma + k_0 \Delta T \text{sat}(s_1) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: k_0 和 θ_0 为车速控制器参数, 均大于 0; σ 为积分中间变量; sat 为饱和函数。

当积分运算未饱和时, 即 $|s_1| < 1$ 时, 将式(10)代入闭环系统中可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{e}_v &= -\frac{e_v}{\theta_0} - \frac{\sigma}{M} \\ \dot{\sigma} &= \frac{k_0 Me_v}{\theta_0} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

建立李雅普诺夫函数 V 如下

$$V = \frac{1}{2} e_v^2 + \frac{1}{2} \frac{\theta_0}{M^2} \sigma^2 \quad (12)$$

可以看出: 当 $e_v = 0$ 时, $V = 0$; 当 $e_v \neq 0$ 时, $V > 0$; $\dot{V} = e_v \dot{e}_v + \frac{\theta_0}{k_0 M^2} \sigma \dot{\sigma} = -\frac{e_v^2}{\theta_0} < 0$ 。因此, 误差全局渐进稳定。

当 $|s_1| \geq 1$ 时, 积分运算中间变量 σ 收敛于 ΔT , 控制律收敛于最大值, 此时积分运算的导数为

$$\dot{s}_1 = \frac{Me_v}{\Delta T \theta_0} + \frac{\dot{\sigma}}{\Delta T} = \frac{Me_v}{\Delta T \theta_0} \quad (13)$$

当 $s_1 > 1$ 时, $\dot{s}_1 = \frac{M}{\Delta T \theta_0} \left(-\frac{\Delta T}{M}\right) = -\frac{1}{\theta_0} < 0$; 当 $s_1 < -1$ 时, $\dot{s}_1 = \frac{M}{\Delta T \theta_0} \frac{\Delta T}{M} = \frac{1}{\theta_0} > 0$ 。积分值趋向稳定之后, s_1 会最终收敛到 $[-1, 1]$, 保证了积分运算不发散, 车速跟踪误差渐进稳定。

2.3 耦合的车速和加速度控制方法

为了在跟踪期望车速的过程中满足上层系统的期望加速度需求,本文将加速度控制模式由加减速跟踪控制模式和加减速过渡控制模式组成,将车速控制律和加速度控制律耦合,基于条件积分算法设计了加速度控制律,通过积分自动调节和建立切换策略,保证了车速控制模式和加速度控制模式的平滑切换。

2.3.1 车速控制模式和加速度控制模式的切换策略 本文提出的自适应控制方法一共有 3 种控制模式——车速控制模式、加速度跟踪控制模式、加速度过渡控制模式,其中加速度过渡控制模式是为了使加速度跟踪控制模式能平顺地切换到车速控制模式。本文方法需要制定车速控制模式和加速度控制模式之间切换的策略,并确定车速控制区间、加速度跟踪控制区间、加速度过渡区间,以及各个区间之间切换的条件,切换策略示意如图 2 所示。

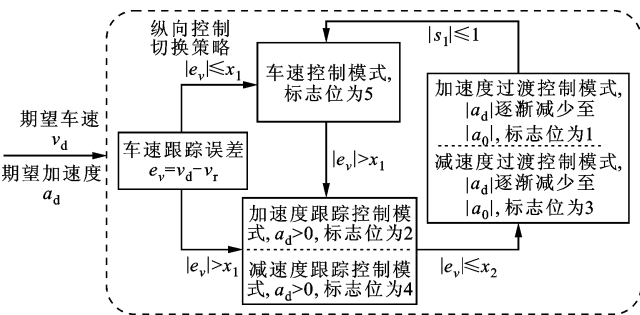


图2 切换策略示意图

首先需要设置车速控制阈值 x_1 , 当车速跟踪误差 $|e_v| > x_1$ 时, 进入到加速度跟踪控制模式, 该模式具体分为加速度跟踪控制模式和减速度跟踪控制模式, 分别对应标志位 2 和 4; 设置车速控制阈值 x_2 , 如果车速跟踪误差的绝对值减少到设定的阈值 $|e_v| \leq x_2$ ($x_2 \leq x_1$), 则切换到加速度过渡控制模式, 具体分为加速度过渡控制模式和减速度过渡控制模式, 分别对应标志位 1 和 3; 设置加速度控制阈值 a_0 , 之后如果实际车速跟踪上期望车速, 通过积分自动调节, 期望加速度绝对值逐渐收敛到较小值 a_0 , 有效避免了切换过程中出现的抖动, 平滑切换到车速控制模式, 即 $|a_d| \leq |a_0|$, 对应标志位为 5。若开始车速误差 $|e_v| \leq x_1$, 则进入车速控制模式, 之后如果期望车速变化太快导致车速误差大于阈值 x_1 , 则切换到加速度跟踪控制模式。

2.3.2 加速度控制算法设计 基于车辆纵向动力学方程, 利用条件积分算法设计加速度控制律。与车速控制律类似, 定义加速度跟踪误差 $e_a = a_d - a_r$,

式中 a_r 表示实际加速度, 引入积分运算, 满足执行器约束, 则加速度控制律为

$$\left. \begin{aligned} u_a &= T_{\max} \text{sat}\left(\frac{e_a}{\theta_a T_{\max}} + \frac{\sigma_a}{T_{\max}}\right) \\ \dot{\sigma}_a &= -k_a \sigma_a + k_a T_{\max} \text{sat}\left(\frac{e_a}{\theta_a T_{\max}} + \frac{\sigma_a}{T_{\max}}\right) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: θ_a 和 k_a 为控制器设计参数, 均大于 0。

根据条件积分算法的饱和特性, 在车速控制律饱和时, 用加速度控制律代替车速控制饱和时的控制律, 将两者耦合在一起, 即当车速跟踪误差 $|e_v| > x_1$ 时, 令积分系数 k_0 取较大的值使其快速饱和, 达到跟踪期望加速度的目的, 此时有

$$\left. \begin{aligned} u_T &= u_a \\ \dot{\sigma} &= -k_0 \sigma + k_0 \Delta T \text{sat}(s_1) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

2.3.3 过渡控制律设计 传统的车速控制器和加速度控制器都是两个不同且相互独立的控制器, 当从加速度控制模式切换到速度控制模式时, 车速不可避免地会出现抖动甚至是严重超调, 进而影响系统的稳定性。本文利用一阶系统积分的收敛特性来设计过渡控制律。由于一阶系统的特性, 在加速度控制模式时, 积分运算中间变量 σ 逐渐收敛于 ΔT 。当车速误差绝对值小于设定的阈值 x_2 时, 控制模式从加速度控制模式进入到过渡控制模式, 在过渡过程中期望加速度为 a_0 , 此时加速度控制律为 u_{a0} , 利用这一特性, 将过渡控制律设计为

$$\left. \begin{aligned} u_T &= \sigma \\ \dot{\sigma} &= -k_0 \sigma + k_0 u_{a0} \text{sat}(s_1) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

此时, 控制律逐渐收敛于 u_{a0} , 加速度也逐渐减小至 a_0 。积分系数 k_0 决定了收敛速度, 若收敛速度太快, 则不能保证快速地跟踪车速, 若收敛太慢, 则会降低车速跟踪的平顺性。因此, k_0 的取值需要满足当 σ 收敛到 u_{a0} 时, 控制模式刚好进入到车速控制模式。假设加速度在过渡控制模式中是均匀减小的, 车速误差阈值 x_2 与加速度及收敛时间 t_0 的关系为

$$x_2 = \int_{a_0}^{a_d} a_r dt = \frac{(a_d + a_0)t_0}{2} \quad (17)$$

为了获得积分系数 k_0 与收敛时间 t_0 的关系, 仿真了不同 σ 收敛到 u_{a0} 的时间, 结果见表 1。

表1 积分系数与收敛时间的关系

k_0	0.5	1	1.5	2	4
t_0/s	3.82	2.34	1.59	1.20	0.58

通过拟合表格中的数据及结合式(17)可得

$$k_0 \approx \frac{2.4}{t_0} \approx \frac{1.2(a_d + 0.2)}{x_0} \tag{18}$$

2.3.4 控制算法稳定性分析 耦合的控制算法在车速控制阶段的稳定性已经证明,过渡控制过程中一阶系统的控制律逐渐收敛,在加速度控制阶段,当积分未饱和时,代入到闭环系统中可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{e}_a &= -\frac{e_a}{\theta_a} - \sigma_a \\ \dot{\sigma}_a &= \frac{k_a e_a}{\theta_a} \end{aligned} \right\} \tag{19}$$

建立李雅普诺夫函数如下

$$V_a = \frac{1}{2}e_a^2 + \frac{1}{2}\theta_a\sigma^2 \tag{20}$$

当 $e_a=0$ 时 $V_a=0$,当 $e_a \neq 0$ 时 $V_a>0$, $\dot{V}=e_a\dot{e}_a+\frac{\theta_a}{k_a} \cdot \sigma_a\dot{\sigma}_a=-\frac{e_a^2}{\theta_a}<0$,因此误差全局渐进稳定。当积分饱和时,积分逐渐收敛于执行器最大值,使得积分运算不发散,保证了系统在执行器饱和后仍可镇定收敛。

3 仿真试验

为了验证道路阻力估计器的准确性以及本文方法的跟踪效果,在 Carsim 软件中搭建相同的车辆模型,车辆参数如表 2 所示。通过 Simulink/Carsim 联合仿真来验证控制策略的有效性,根据仿真效果来调整不同模式下耦合的控制器参数,结果如表 3 所示。

表 2 车辆参数

m/kg	$l_f^{①}/\text{m}$	$l_r^{②}/\text{m}$	$J_z^{③}/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	R_1/m
1 080	1.117	1.188	1 835	0.29

①:质心到前轴的距离;②:质心到后轴的距离;③:车辆横摆转动惯量。

表 3 控制器参数

标志位	k_0	θ_0	k_a	θ_a	x_1	x_2
5	3	30				
2 或 4	100	0.1	0.2	2	10	10
1 或 3	式(18)		2			

3.1 道路阻力估计器仿真试验

在纵向控制中,为了验证道路阻力估计器的估计效果,对比了实际的道路阻力和估计的道路阻力之间的误差。估计的道路阻力如图 3 所示,仿真工况如下:车速为 30 km/h;路面为水平路面和 6°坡度路面;附着系数均为 0.85。

车辆在水平路面行驶时,只有滚动阻力和未知

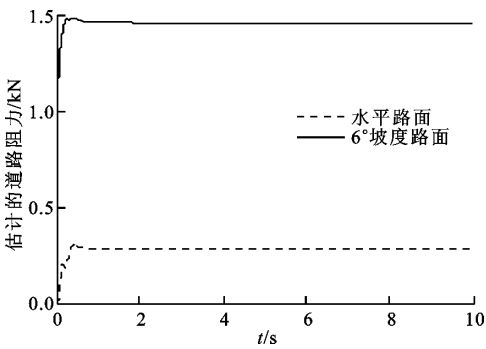


图 3 估计的道路阻力

阻力。从图 3 中可以看出,估计的道路阻力在不到 1 s 内就收敛到了稳定值 285 N。计算的滚动阻力为 188 N,因此未知阻力为 97 N。在坡度路面,车辆受到了较大的坡道阻力。图 3 中估计的道路阻力为 1 465 N。计算的滚动阻力为 1 434 N,未知阻力取水平路面的 97 N,因此实际的道路阻力为 1 631 N。估计的道路阻力与实际的道路阻力误差为 4.1%,在可接受的范围内,该估计器的效果得到了验证。

3.2 本文方法仿真试验

为了验证本文方法在水平路面和坡度路面的控制效果,设置以下 2 种试验工况。

工况一:水平路面,路面附着系数为 0.85。第 1 组试验是期望车速从 0 逐渐加速到 50 km/h,再逐渐回到 0,车速控制仿真效果如图 4 所示;第 2 组试验是为了验证在车速跟踪误差较大时的跟踪效果,期望车速从 0 阶跃加速到 50 km/h,期望加速度为 2 m/s²,再减速到 20 km/h,期望减速度为-3 m/s²,车速控制仿真效果如图 5 所示,对应的加速度控制仿真效果如图 6 所示。

从图 4 和图 5 中可以看出:本文方法在车速跟踪误差较小和车速跟踪误差较大的情况下,都几乎没有超调现象,稳态误差小于 0.2 km/h。从图 6 中可以看出:在车速跟踪误差大于设置的阈值时,纵向控制的阶跃响应性能较好能,能够满足期望加速度的需求。

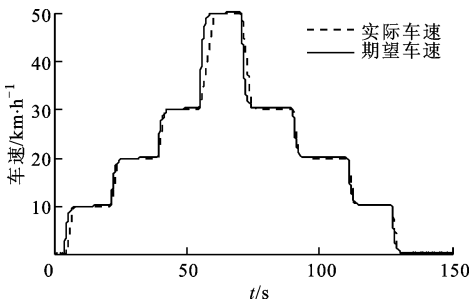


图 4 纵向车速控制阶跃响应

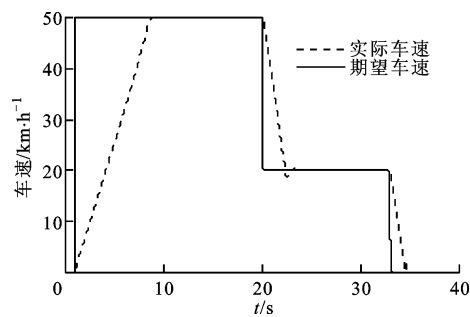


图 5 考虑加速度的纵向控制阶跃响应

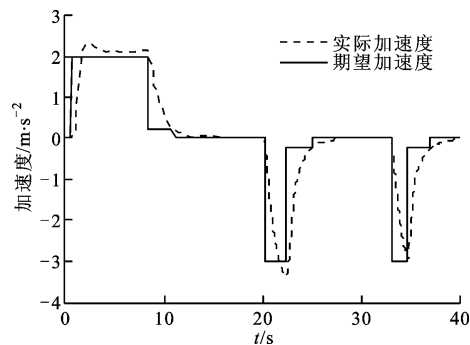


图 6 加速度跟踪效果

工况二:8°坡度路面,路面附着系数为 0.85。试验是期望车速从 0 到 10 km/h,目的是为验证纵向控制方法在坡度路面上的跟踪效果。在坡度路面上的车速控制效果如图 7 所示。

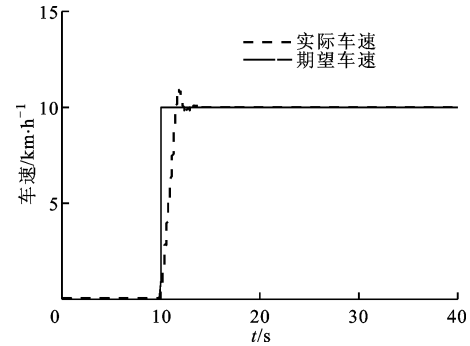


图 7 坡度路面上纵向控制跟踪效果

从图 7 可以看出,在坡度路面上,实际车速迅速达到期望车速,稳态误差小于 0.2 km/h,但相对超调量为 0.5%。本文算法在坡度路面上的跟踪效果得到了验证。

综合上述 2 种工况下的跟踪效果可知,本文提出的考虑加速度需求的自适应车速控制方法在水平路面和坡度路面都能有较好的跟踪效果。

4 实车试验

在仿真试验的基础之上,进行实车试验来验证本文方法的跟踪效果,试验平台如图 8 所示,该平台

经过改造后驱动电机可以实现线控。纵向车速由车辆底盘轮速信号转换得到,加速度通过惯导设备 RT3003 获取,嵌入式控制器用于数据采集和实时控制,如图 9 所示。试验场地为图 10 中的圆形试车场,该试车场包括坡度路面。



图 8 试验平台

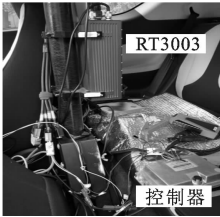


图 9 试验车内部图

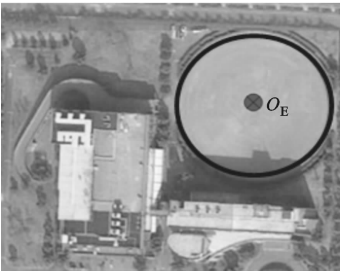


图 10 试验场地

为了验证本文方法对期望车速的跟踪能力,在水平路面设计阶跃响应试验工况,在坡道上设计上坡起步和下坡车速跟踪试验工况,分别与未加入道路阻力估计器的方法进行对比分析。

图 11 是本文方法在水平路面 0~50 km/h 的阶跃期望车速的跟踪效果,可以看出:在跟踪稳态车速时,误差不到 0.2 km/h,与图 4 中的仿真效果几乎相同,能够快速准确地响应到期望车速;当期望车速从 30 km/h 增加到 50 km/h 时,实车试验的车速有些超调和抖动,但相对超调量低于 0.5%,在可以接受的范围之内。由此,纵向控制器的稳态跟踪能力得到了验证。此外,由于水平路面上道路阻力相对较小,未加道路阻力估计器的跟踪效果和自适应控制跟踪效果差别不大。

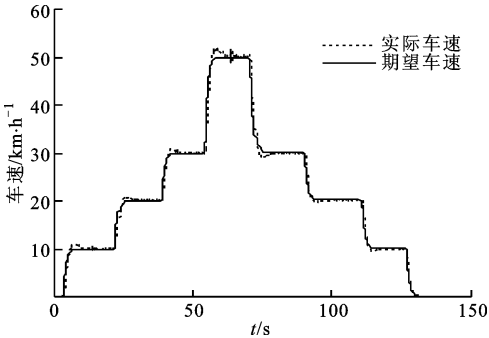


图 11 本文方法的阶跃响应

在坡度路面上坡的车速跟踪效果如图 12 所示,下坡跟踪效果如图 13 所示,可以看出:未加估计道路阻力的方法在坡道上起步时有超过 2 s 的溜坡现象,且无论上坡还是下坡,车速均有明显的超调;本文方法在坡道上起步时只有不到 1 s 的溜坡现象,且车速无明显超调,基本上可以忽略坡度对车速控制的影响,和图 7 的仿真效果基本相同。由于实车试验时对阶跃的期望车速加了滤波,所以实车试验的车速几乎没有超调,跟踪效果更好,而仿真中出现不超过 1% 的相对超调量,可以接受。显然,本文方法控制效果更好,能在一定程度上抑制路面坡度对车速控制的影响。

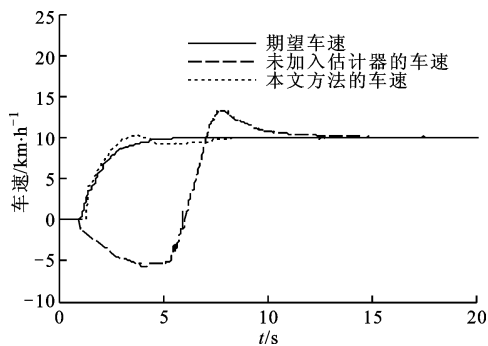


图 12 上坡车速跟踪效果对比

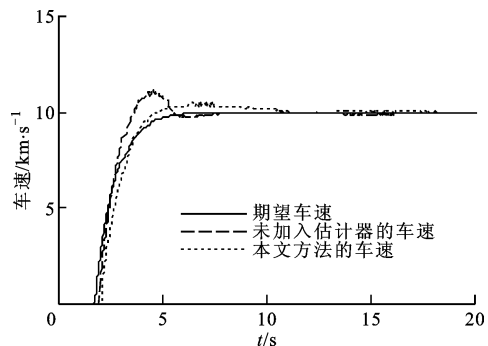


图 13 下坡车速跟踪效果对比

为了验证本文方法在跟踪期望车速过程中跟踪期望加速度的能力,在水平路面上设计了不同的期望加速度跟踪试验。

加速度控制试验一:水平路面,路面附着系数 0.8, 50 km/h 的阶跃期望车速响应,加速度为 1 m/s^2 ,减速度为 -1 m/s^2 。将本文方法与传统的 PI 控制方法进行对比。由于传统的 PI 控制方法无法同时跟踪期望车速和期望加速度,因此分别进行车速跟踪和加速度跟踪试验。

图 14 和图 15 是期望加速度较小时,控制方法的试验效果对比,可以看出:本文方法相比传统的 PI 控制方法能够在较大车速误差下超调较小,并且

能够在跟踪加速度时满足车速的需求。本文方法在一开始就进入到加速度跟踪控制模式中,实际加速度能快速稳定地跟踪上期望的加速度,稳态误差在 $\pm 0.1 \text{ m/s}^2$;在过渡控制模式中,实际加速度的绝对值逐渐从初始值减小至 0.2 m/s^2 ,实际车速平稳地跟踪上期望车速且毫无超调。传统的 PI 控制方法超调相对较大,整体响应较慢,无法在跟踪加速度时满足车速的需求。在大车速跟踪误差下,本文方法的跟踪效果得到了验证。

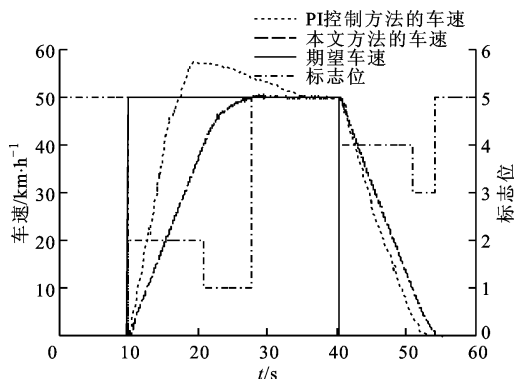


图 14 纵向车速控制跟踪效果对比及相应的标志位

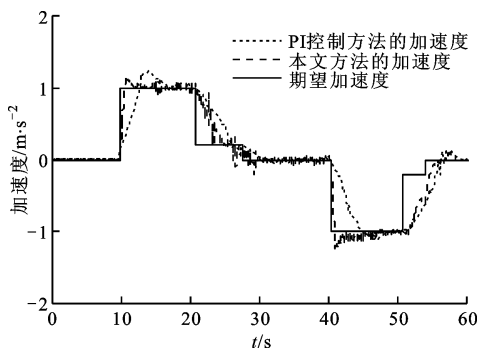


图 15 纵向加速度控制跟踪效果对比

加速度控制试验二:水平路面,路面附着系数 0.85,期望车速从 0 到 50 km/h 再到 20 km/h 再到 0 的阶跃期望车速响应,加速度为 2 m/s^2 ,减速度为 -3 m/s^2 。

图 16 和图 17 是期望加速度较大时,控制算法的实车试验效果对比。与仿真试验效果图 5 和图 6 相比,二者基本相同,但实车试验减速控制中出现的超调较大。加速度跟踪过程中,仿真效果比实车试验效果好,仿真效果的稳态误差为 $\pm 0.15 \text{ m/s}^2$,实车试验的稳态误差为 $\pm 0.1 \text{ m/s}^2$ 。同时可以看出:传统的 PI 控制方法在车速跟踪时无法同时满足期望加速度的需求,在减速过程中,本文方法响应较快,并且超调较小;当期望车速为 50 km/h 时,阶跃变化后,本文方法的实际加速度能快速准确地跟踪

期望加速度 2 m/s^2 , 稳态误差不超过 0.1 m/s^2 , 同时在加速度过渡模式逐渐收敛到 0.2 m/s^2 , 使加速度跟踪控制模式能够平滑地过渡到车速控制模式; 当期望车速从 50 km/h 突然降到 20 km/h 时, 本文方法的实际减速度也能快速准确地跟踪期望减速度 -3 m/s^2 , 误差不超过 0.1 m/s^2 , 同时在加速度过渡模式快速收敛到 -0.2 m/s^2 , 能够在较大的速度时紧急制动到给定车速, 对于紧急避障有重大意义, 而传统的 PI 控制方法在减速度跟踪过程中响应较慢, 无法用相同的参数来满足各种工况, 并且无法证明闭环系统的稳定性。综上, 本文提出的考虑加速度需求的车速控制算法能够满足智能车运动控制的需求, 并且跟踪效果较好。

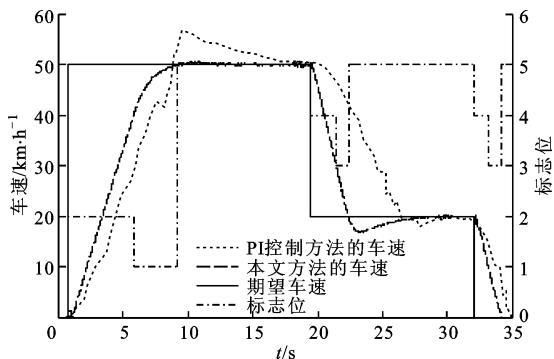


图 16 纵向车速控制跟踪效果及相应的标志位

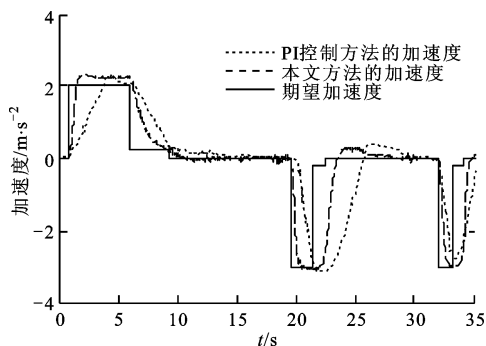


图 17 纵向加速度控制跟踪效果对比

5 结 论

本文提出了一种考虑上层加速度需求的车速自适应控制方法。首先, 针对智能车行驶中道路阻力的不确定性, 基于 FFRLS 算法设计了道路阻力估计器, 通过仿真及实车试验, 验证了车速自适应控制方法在坡道上的跟踪效果优于未加入估计器时的效果。之后, 考虑上层的期望加速度需求, 基于条件积分算法设计了耦合的车速和加速度控制律, 通过积分自动调节和切换策略, 保证了同时跟踪期望车速和期望加速度, 通过仿真及实车试验验证了本文方

法的有效性。

参考文献:

- [1] PADEN B, ČÁP M, YONG S Z, et al. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016, 1(1): 33-55.
- [2] 赵盼. 城市环境下无人驾驶车辆运动控制方法的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012: 33.
- [3] ZHOU Y. Fuzzy incremental PD controller design for vehicle speed control [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2016: 440-445.
- [4] 陈刚, 张为公. 基于模糊自适应 PID 的汽车驾驶机器人的车速控制 [J]. 汽车工程, 2012, 34(6): 511-516. CHEN Gang, ZHANG Weigong. Speed control of vehicle robot driver based on adaptive fuzzy PID control [J]. Automotive Engineering, 2012, 34(6): 511-516.
- [5] SHAKOURI P, ORDYS A, LAILA D S, et al. Adaptive cruise control system: comparing gain-scheduling PI and LQ controllers [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44(1): 12964-12969.
- [6] ATTIA R, ORJUELA R, BASSET M. Combined longitudinal and lateral control for automated vehicle guidance [J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(2): 261-279.
- [7] ZHU Z, XU Y, MA Y, et al. Design of intelligent vehicle longitudinal acceleration tracking controller based on fuzzy control [J]. Journal of Military Transportation University, 2014, 16(8): 176-182.
- [8] KIM H, KIM D, SHU I, et al. Time-varying parameter adaptive vehicle speed control [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(2): 581-588.
- [9] RESCHKA A, BÖHMER J R, SAUST F, et al. Safe, dynamic and comfortable longitudinal control for an autonomous vehicle [C]//Proceedings of Intelligent Vehicles Symposium. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2012: 346-351.
- [10] OH K S, SEO J H. Adaptive model free speed control algorithm of DC motors based on recursive least-squares with forgetting factor [J]. Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 2018, 35(3): 311-318.
- [11] JIN C, XIONG L, YU Z, et al. Path following control for skid steering vehicles with vehicle speed adaption: SAE Technical Papers [R]. Warrendale, PA, USA: SAE, 2014.

(编辑 陶晴)