

四驱电动赛车 TCS 滑模预测控制系统设计与实现

杜衡轩, 刘 帅, 马云鹏, 孙泽培

(哈尔滨工业大学(威海)信息科学与工程学院, 山东 威海 264209)

摘要: 针对四驱电动方程式赛车在不同路面工况下过度打滑的问题, 设计了一种结合卡尔曼滤波车速估计和滑模控制的牵引力控制系统, 以提高整车直线加速性能、减小车轮打滑以保证稳定性和快速加速中的安全性; 控制器以车轮滑转率为控制变量, 通过调整各驱动轮输出扭矩, 以保证滑转率控制在最优范围内; 考虑获取准确车速是得到最优滑转率的前提, 设计卡尔曼滤波器, 实现车速估计; 针对滑模控制自身存在的抖振问题, 采用改进的指数趋近律, 提高稳定性; 利用 Matlab/Simulink 和 CAR-SIM 联合仿真, 验证了该控制系统的有效性; 最终完成实车测试与应用, 在实际应用中实现控制系统满足四驱电动方程式赛车的快速平稳加速的工程要求。

关键词: 四驱电动赛车; 卡尔曼滤波; TCS 控制系统; 滑模控制; 抖振

Design and Implementation of TCS Sliding Mode Predictive Control System for Four-wheel Drive Electric Racing Vehicle

DU Hengxuan, LIU Shuai, MA Yunpeng, SUN Zeyu

(School of Information and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai Branch), Weihai 264209, China)

Abstract: To solve the problem that four-wheel drive formula electric racing vehicles excessively slip under different road conditions, a traction control system combining Kalman filter for estimating speed and sliding mode control is presented to improve acceleration performance on straight track, reduce the driving wheel slip to ensure the stability and safety of vehicles. The controller takes the slip rate as the variable, the torque of each driving wheel is adjusted to ensure that the slip rate is controlled within an optimal range. accurate vehicle speed is obtained a prerequisite for calculating the optimal slip rate, Kalman filter is designed to estimate the speed of vehicles. To solve the inherent chattering phenomenon of sliding mode control, this paper gives an improved exponential convergence rate to ensure the stability. Through the simulation between Matlab/Simulink and CARSIM, the effectiveness of the control system is verified. Finally, the test and application of vehicles are accomplished, the control system is ultimately verified to meet the requirements of rapid and stable acceleration for 4WD formula electric racing vehicle.

Keywords: 4WD four-wheel drive electric racing vehicle; Kalman filter; TCS control system; sliding mode control; buffeting

0 引言

随着电动方程式赛车技术领域的不断创新, 多电机分布式驱动模式逐渐取代集中式驱动模式。采用分布式驱动模式, 将驱动电机分散布置在各个驱动轮, 因而可实现各轮单独控制驱动转矩, 驱动轮间运动状态相对独立。与传统的集中式驱动相比, 分布式驱动模式能够简化驱动系统、传动效率高, 且响应迅速、灵活性高、可使用更复杂准确的控制策略^[1-2], 广泛应用于电动方程式赛车中。

驱动防滑牵引力控制系统 (TCS, traction control system) 用于使汽车在各种行驶状况下都能获得最佳的牵引力。TCS 控制系统检测车速及车轮转角, 若检测到驱动力过大, 则发出指令减小驱动力, 进而减小车轮滑转率。采用 TCS 控制系统, 可防止在起步、加速时驱动轮打滑过度, 以维持整车的稳定性^[3-4]。TCS 控制系统主要有制动力矩控

制和发动机转矩控制两种, 考虑设计成本及控制快速稳定的实现度, 本文采用发动机转矩控制, 通过控制驱动转矩使车轮滑转率最优范围内。

车轮滑转率计算需要使用准确的车速和轮速值。传统的四驱赛车车速估计主要有两种。一是简单地将滑转率最小的轮速作为车速, 但估计结果偏大。二是通过加速度传感器获取加速度值, 并通过积分获得车速值, 但精确度较高的加速度传感器成本较高, 而全球定位系统 (GPS, global positioning system) 或惯性测量单元 (IMU, inertial measurement unit) 传感器成本低但精度差, 且存在严重的积分偏差, 对测量结果造成影响^[5]。为获得相对准确的车速估计值, 本文采用卡尔曼滤波算法, 对两类传感器获取的数据整合处理。

通过转矩控制实现滑转率控制的方法有很多种, 如最优 PID 控制、滑模控制等^[6-7]。但 PID 策略通常响应时间

收稿日期: 2023-08-12; 修回日期: 2023-08-17。

作者简介: 杜衡轩(2002-), 女, 大学本科。

刘 帅(1980-), 男, 博士, 教授。

引用格式: 杜衡轩, 刘 帅, 马云鹏, 等. 四驱电动赛车 TCS 滑模预测控制系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 147-153.

长,实际操作困难;而滑模控制,具有快速响应、对参数变化及扰动不灵敏、物理实现简单等优点,即有很强大的鲁棒性和抗干扰能力^[8-9],可适用于不同路面工况。但其缺点在于存在“抖振”现象,在实际应用中需进行消抖处理。目前,消除抖振的方法主要有边界层法^[10]、趋近律改进法^[11]、智能控制法^[12]、滤波方法等^[13]。本文采用改进趋近律法减小抖振现象。

依据汽车动力学模型,计算不同路面情况下的最优滑转率,其中采用卡尔曼滤波算法估计实时车速。以滑转率控制在最优范围内为目标,利用改进的滑模控制,设计TCS控制系统。通过Matlab/Simulink和Carsim仿真软件分别构建控制模型和整车模型进行联合仿真测试,并完成不同工况下的直线实车测试,实现了控制理论的可行性和有效性,最终应用在四驱方程式电动赛车上。

1 获取最优滑转率

1.1 汽车动力学模型的建立

四轮驱动电动汽车能够实现四轮独立控制、独立驱动,因此可研究一个驱动轮的运动模型来代替整车模型。忽略空气阻力和滚动阻力等,车轮受力如图1所示。

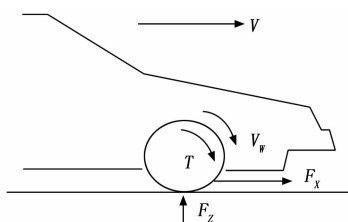


图1 车辆动力学模型

由牛顿运动定律和刚体转动微分方程,得到汽车动力学运动方程:

$$J\dot{\omega} = T - F_x \cdot r \quad (1)$$

$$M\dot{V} = F_x \quad (2)$$

$$F_x = \mu \cdot F_z \quad (3)$$

式中, T 为驱动电机转矩; F_x 为地面对车辆的纵向驱动力; F_z 为驱动轮法向反力,可通过安装于悬架的线位移传感器直接获得当前四轮悬架的状态,并进一步得到足够精确的四轮载荷分配; μ 为地面附着系数, J 为车轮转动惯量, r 为车轮半径, ω 为车轮角速度, M 为1/4车辆质量。

1.2 路面估计

汽车的驱动力大小在一定程度上由路面附着系数决定。因此为获得路面最大附着系数,应先确定相应的最优滑转率及控制区间。

车轮滑转率与路面附着系数的对应关系如图2所示,定义附着系数最大处所对应的滑转率为最优滑转率。

针对纵向滑转率的控制,采用卡尔曼滤波算法完成车速估计,基于Burckhardt模型与经典路面库完成对路面——即曲线的估计,并给出最优滑转率及其对应的控制范围,如图3所示。

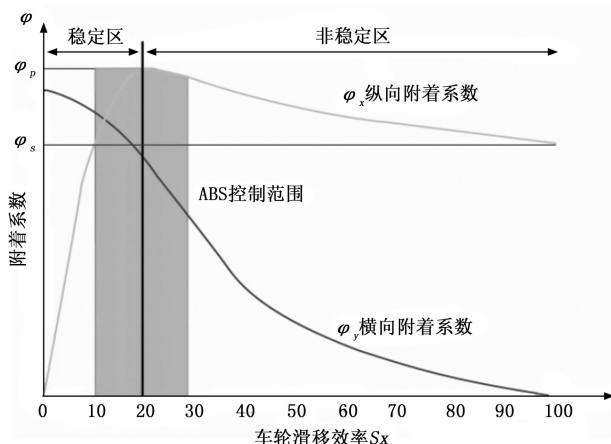


图2 车轮滑转率-路面附着系数关系示意图

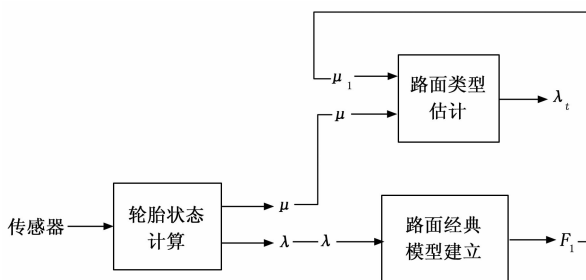


图3 最优滑转率估计流程

1.2.1 基于卡尔曼滤波的车速估计

卡尔曼滤波器的主要思想是通过观测值更新预测值,方法是加权平均,而加权的权重又可以逐次迭代,使得多次迭代后输出值一步步接近真实值^[14]。

卡尔曼滤波算法分为预测、更新两步:预测阶段,利用 $k-1$ 时刻的预测值来估计当前 k 时刻的值,成为获取先验预估值;更新阶段,根据传感器测得的 k 时刻的实际值,对先验预估值更新,得到 k 时刻预测值,并计算下一时刻 $k+1$ 的先验预估值。本文使用IMU传感器得到的加速度作为预测值,使用电机AMK的反馈速度值作为观测值,设计卡尔曼滤波器。

系统的状态改变和观测服从线性方程:

$$\begin{cases} x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + \theta_k \\ z_k = Hx_k + \delta_k \end{cases} \quad (4)$$

其中: x_k 、 x_{k-1} 为系统状态变量,即预测值; z_k 为观测变量; u_k 为系统控制输入量; θ_k 为过程激励噪声、 δ_k 为观测噪声; A 、 B 、 H 均为状态变换矩阵,即状态变换的调整系数,可设为常数。

过程激励噪声、观测噪声相互独立,均为服从正态分布的白噪声,此时可定义协方差矩阵 Q 、 R ,满足:

$$\theta_k \sim N(0, Q) \quad (5)$$

$$\delta_k \sim N(0, R) \quad (6)$$

预测过程,卡尔曼滤波器的时间更新方程:

$$\hat{x}_k = Ax_{k-1} + Bu_k \quad (7)$$

$$\hat{P}_k = \mathbf{A}P_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}$$

(8)

更新过程，卡尔曼滤波器的状态更新方程：

$$\mathbf{K}_k = \hat{P}_k \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \hat{P}_k \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$$

(9)

$$\mathbf{x}_k = \hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_k)$$

(10)

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \hat{P}_k$$

(11)

其中： $\hat{\mathbf{x}}_k$ 为 k 时刻的先验预估值； \mathbf{x}_{k-1} 、 \mathbf{x}_k 为预测值，均为估计量； \hat{P}_k 为先验估计值的协方差； P_{k-1} 、 P_k 为预测值的协方差； K_k 为卡尔曼滤波系数。

在 Matlab/Simulink 中搭建卡尔曼滤波算法，如图 4。其中，观测量 z_k 为实际轮速，由 AMK 电机控制器可实时读取准确轮速；输入量 u_k 为 IMU 传感器所获取的实时加速度信息；预测值 x_k 为应估算所得的实际车速。

通过对 Q 和 R 取值的调整与优化，实现对车速较准确的估计，最终调试结果如图 5 所示。可以看出，卡尔曼滤波算法的引入大大提高车速估计的准确性，这是后文控制实现中，确保车轮滑转率准确的前提。

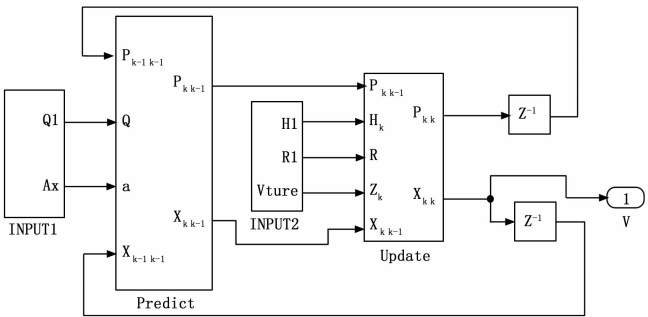


图 4 卡尔曼滤波-simulink 模型

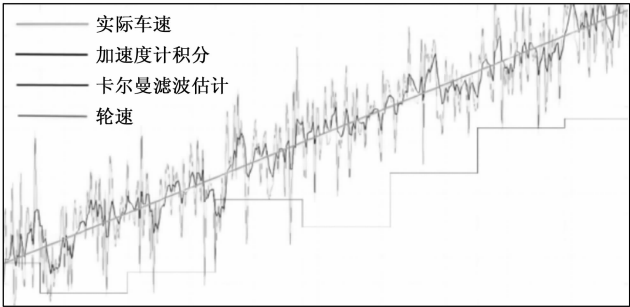


图 5 卡尔曼滤波仿真效果验证

1.2.2 轮胎状态计算

传感器获取的速度信息经卡尔曼滤波后可得车速信息，由此可计算得到实际的当前滑转率与路面附着系数值。

车辆轮胎滑转率定义为：

$$\lambda = \frac{V_{\omega} - V}{V_{\omega}}$$

(12)

$$V_{\omega} = \omega \cdot r$$

(13)

其中： V_{ω} 为车轮轮速，由电机控制器 AMK 获取准确数据； V 为整车车速，由上述卡尔曼滤波算法，通过结合实际轮速值与加速度积分值，整合估计得到实际滑转率和路面附着系数。

结合汽车动力学方程可得：

$$\mu = \frac{T - J\dot{\omega}}{F_z r}$$

(14)

1.2.3 路面经典模型建立

轮胎模型本身具有较强的非线性特性，为保证精度且避免模型过于复杂，采用 Burckhardt 轮胎模型。该模型仅用 3 个拟合参数即可体现 $\mu-\lambda$ 模型的非线性，拟合精度高，在汽车动力学研究中应用广泛^[15-16]。其表达式如下：

$$\mu(\lambda) = K_1(1 - e^{-K_2\lambda}) - K_3\lambda$$

(15)

其中： K_1 、 K_2 、 K_3 为路面的拟合参数。

为保证路面识别模型的准确性，选用八种标准路面的 Burckhardt 轮胎模型参数 K_1 、 K_2 、 K_3 ，以及峰值附着系数 μ_{\max} 、最佳滑转率 λ_{opt} 如表 1、 $\mu-\lambda$ 关系如图 6 所示。

表 1 标准路面参数

路面类型	K_1	K_2	K_3	λ_{opt}	μ_{max}
干沥青	1.281	23.993	0.520	0.170	1.171
干水泥	1.196	25.166	0.539	0.160	1.092
湿沥青(低)	1.027	29.494	0.442	0.143	0.950
湿沥青(中)	0.856	33.821	0.345	0.131	0.800
湿沥青(高)	0.628	33.765	0.200	0.110	0.600
鹅卵石	0.400	60.010	0.120	0.088	0.386
雪地	0.195	94.129	0.065	0.065	0.190
冰	0.050	306.390	0.001	0.030	0.050

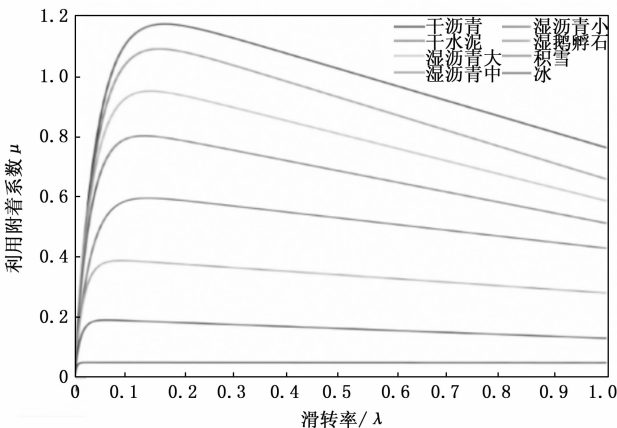


图 6 标准路面曲线

为了能够将实时路面状态与路面库中经典路面做出比较进而进行估计，应先计算 λ 为实时滑转率的情形下，经典路面反映出的路面附着系数 μ_i 的值，将实时滑转率 λ 带入前文八条以确定参数的 Burckhardt 轮胎模型后有 μ_i ($i=1, 2, \dots, 8$):

$$\begin{cases} \mu_1(\lambda) = 1.281(1 - e^{-23.993\lambda}) - 0.52\lambda \\ \mu_2(\lambda) = 1.196(1 - e^{-25.166\lambda}) - 0.539\lambda \\ \mu_3(\lambda) = 1.027(1 - e^{-29.494\lambda}) - 0.442\lambda \\ \mu_4(\lambda) = 0.856(1 - e^{-33.821\lambda}) - 0.345\lambda \\ \mu_5(\lambda) = 0.628(1 - e^{-33.765\lambda}) - 0.2\lambda \\ \mu_6(\lambda) = 0.4(1 - e^{-60.01\lambda}) - 0.12\lambda \\ \mu_7(\lambda) = 0.195(1 - e^{-94.129\lambda}) - 0.065\lambda \\ \mu_8(\lambda) = 0.05(1 - e^{-306.39\lambda}) - 0.001\lambda \end{cases}$$

(16)

1.3 最优滑转率计算

实时路面特性是由众多经典路面加权叠加而成, 因此实际和也应以相对应的权重叠加得到。

实时路面特性是由众多经典路面加权叠加而成, 因此实际 μ_{\max} 和 λ_{opt} 也应以相对应的权重叠加得到。

对于第 i 个经典路面的权重 σ_i , 我们希望在车轮滑转率同取实时滑转率 λ 时, 若此经典路面反映出的路面附着系数 μ_i 的值越接近真实值 μ , 则它的权重 σ_i 应越大。以下是两种简单的对于 σ_i 函数的构造。

针对 $\mu = \mu_i$ 的情况, 定义 $\epsilon \ll |\mu - \mu_i|$ 。基于反比例函数, 构造:

$$\sigma_i = \frac{1}{|\mu - \mu_i| + \epsilon} \quad (17)$$

经过仿真调试, 选定 $\epsilon = \mu_{\max} \cdot 10^{-2}$ 。其中, μ_{\max} 为干水泥地的峰值附着系数 1.171。

为提高区分能力, 定义 α 用于调节指数函数的斜率, 使其在 $|\mu - \mu_i|$ 的量级上有较好的区分能力。基于指数函数, 构造:

$$\sigma_i = e^{-\alpha |\mu - \mu_i|} \quad (18)$$

经过仿真调试, 令 $e^{-\alpha \cdot 0.1} = e^{-\alpha \cdot 0} 50\%$, 可得 $\alpha \approx 7$ 。

由此可计算得到最佳滑转率为:

$$\lambda_f = \frac{\sum \sigma_i \cdot \lambda_{\text{opt}}}{\sum \sigma_i} \quad (19)$$

1.4 滑模控制策略

为保证不同路面工况下, 车辆行驶的稳定性, 本文将车轮滑转率作为控制目标, 即保证不同路面状态下电动汽车的车轮滑转率控制在最优范围之内。因此, 本文选用鲁棒性较强的滑模控制策略。

1.4.1 滑模控制

对于任意系统 $\dot{x} = f(x, u)$, 若满足:

$$f(x, u) = \begin{cases} f^+(x, u) = f(x, u^+) & S(x) > 0 \\ f^-(x, u) = f(x, u^-) & S(x) < 0 \end{cases} \quad (20)$$

其中: x 为状态量, u 为系统输入, $S(x)$ 为状态函数, $S(x) = 0$ 为切换面。上式分段即分别处于切换面两侧, 且有如下条件时, 系统构成滑模控制。

1) 形成滑动模态区:

滑动模态示意图如图 7 所示, A 为常点; B 为起点; C 为止点。当一个切换面两侧附近都是止点时, 系统状态运转到该区域时, 就会被吸附到切换面上, 到达且切换面的系统会不断在其两侧做小振幅滑模运动, 该区域称为滑动模态区。

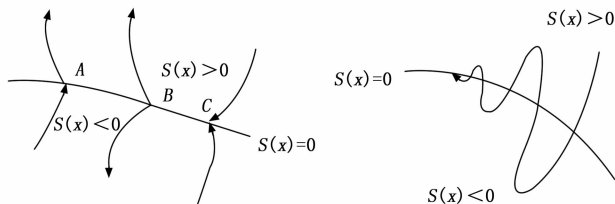


图 7 滑动模态示意图

处于滑模区时, 状态函数在切换面附近应保证系统在滑模面的任一侧运动方向均指向滑模面, 即:

$$\begin{cases} \lim_{S(x) \rightarrow 0^+} \frac{dS(x)}{dt} \leq 0 \\ \lim_{S(x) \rightarrow 0^-} \frac{dS(x)}{dt} \geq 0 \end{cases} \quad (21)$$

2) 滑动模态可达性:

运动过程分为正常运动段和滑模阶段, 分别指系统达到滑模面前和后的过程。可达性是指系统可在有限时间内达到滑模面, 即

$$\exists \eta > 0 \text{ s. t. } \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{dt} S^2(x) \leq -\eta |S(x)| \quad (22)$$

该式还对系统的正常运动段提出速度要求, 确保了在有限时间内达到滑模面。

3) 滑模系统稳定性:

根据 Fillipov 理论

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \mu f^+(x, u) + (1 - \mu) f^-(x, u) \\ \mu \in (-1, 1) \\ S(x) = 0 \end{cases} \quad (23)$$

当切换面上存在平衡点 $x=0$ 时, 系统渐近稳定。

4) 系统的动态品质:

滑模可达条件仅针对正常运动段, 但趋近运动的具体轨迹未作限制。因此, 需要设计合理的趋近律来改善滑模阶段的动态品质。

常见的几种典型趋近律如下。

等速趋近律:

$$\dot{s}(x) = -\epsilon \cdot \text{sgn}(s(x)) \quad \epsilon > 0 \quad (24)$$

指数趋近律:

$$\dot{s}(x) = -\epsilon \cdot \text{sgn}(s(x)) - k s(x) \quad \epsilon > 0, k > 0 \quad (25)$$

幂次趋近律:

$$\dot{s}(x) = -k |s(x)|^a \cdot \text{sgn}(s(x)) \quad k > 0 \quad (26)$$

一般趋近律:

$$\dot{s}(x) = -\epsilon \cdot \text{sgn}(s(x)) - f(s(x)) \quad \epsilon > 0 \quad (27)$$

1.4.2 滑转率估算

本文以滑转率作为控制状态量, 对其求导后带入动力学方程可得:

$$\dot{\lambda} = \frac{VT}{rJ\omega^2} - \frac{\mu F_z}{rM\omega} - \frac{V\mu F_z}{J\omega^2} \quad (28)$$

以前文所得最佳滑转率为分界点, 将附着系数与滑转率定义为分段近似线性关系, 如图 8。以最优滑转率作为分界点, 分段进行线性估计^[17]。

$$\mu(\lambda) = \begin{cases} k_{\text{uit}} \lambda & \lambda \leq \lambda_{\text{th}} \\ \mu_{\text{max}} - k_{\text{uih}} (\lambda - \lambda_{\text{th}}) & \lambda > \lambda_{\text{th}} \end{cases} \quad (29)$$

将 $\mu(\lambda)$ 值代入化简可得:

$$\dot{\lambda} = \begin{cases} \frac{-k_{\text{uit}} \lambda F_z}{rM\omega} + \frac{VT}{rJ\omega^2} - \frac{VF_z k_{\text{uit}} \lambda}{J\omega^2} & \lambda \leq \lambda_{\text{th}} \\ \frac{-[\mu_{\text{max}} - k_{\text{uih}} (\lambda - \lambda_{\text{th}})] F_z}{rM\omega} + \frac{VT}{rJ\omega^2} - \frac{VF_z [\mu_{\text{max}} - k_{\text{uih}} (\lambda - \lambda_{\text{th}})]}{J\omega^2} & \lambda > \lambda_{\text{th}} \end{cases} \quad (30)$$

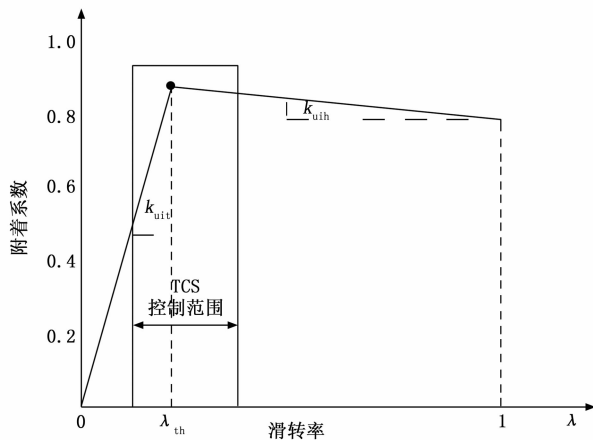


图 8 附着系数的近似线性

1.4.3 控制率设计

为保证在系统状态空间中，能够使任意状态空间位置的初始滑转率均引入滑模面上，使系统状态保持在滑模面上运动，需设计 TCS 滑模控制器的控制率。设计的基本思想为，确定滑模控制的输入变量，以保证系统状态能够进入到滑动模态区域。

本文定义滑模面 $S = \lambda - \lambda_{th}$ 。为了满足滑模控制的到达条件，并提高控制的反应速度，我们采用指数趋近律：

$$\dot{s}(x) = -\epsilon \cdot \text{sgn}(s(x)) - ks(x) \quad \epsilon > 0, k > 0 \quad (31)$$

由于指数趋近律响应速度快、波动大，在实际应用中出现抖振现象，对车辆损害较大，且不易保证稳定性^[18-19]。因此采用饱和函数代替符号函数，进行改进。

$$\text{sgn}\left(\frac{s}{\varphi}\right) = \begin{cases} 1 & \left(\frac{s}{\varphi}\right) > 0 \\ 0 & \left(\frac{s}{\varphi}\right) = 0 \\ -1 & \left(\frac{s}{\varphi}\right) < 0 \end{cases} \quad (32)$$

$$\text{sat}\left(\frac{s}{\varphi}\right) = \begin{cases} \left(\frac{s}{\varphi}\right) & \left|\frac{s}{\varphi}\right| \leq 1 \\ \text{sgn}\left(\frac{s}{\varphi}\right) & \left|\frac{s}{\varphi}\right| > 1 \end{cases} \quad (33)$$

$$\dot{S} = -\eta_s \cdot s^2 \cdot \text{sat}\left(\frac{s}{\varphi}\right) - ks \quad k > 0 \quad (34)$$

其中： η_s 为收敛因子； $\text{sat}\left(\frac{s}{\varphi}\right)$ 构建一个边界层，用于克服滑模面上的抖动； φ 为边界层厚度。当 η_s 取值很小而 k 很大时，可保证在远离滑模面时趋近速度很大，而到达滑模面附近时趋近速度较小； η_s 足够小时，就能够保证趋近速度小，系统运动穿过滑模面的距离小，切换的滞后小，因此抖振小。

对趋近律满足滑模控制的可达条件 $S\dot{S} \leq 0$ 进行验证：

$$S\dot{S} = -\eta_s \cdot s^3 \cdot \text{sat}\left(\frac{s}{\varphi}\right) - ks^2 \leq 0 \quad (35)$$

无论 S 为何值，始终满足可达性要求，故系统运动过程能够实现渐近稳定。

经以上推导可得到 TCS 滑模控制器的控制率为：

$$T = \begin{cases} \frac{J\omega k_{uit} \lambda F_z + r k_{uit} \lambda F_z - r J \omega^2}{MV} \left[\eta_s \cdot s^2 \cdot \text{sat}\left(\frac{s}{\varphi}\right) + ks \right] & \lambda \leq \lambda_{th} \\ \frac{J\omega [\mu_{max} - k_{uib}(\lambda - \lambda_{th})] F_z}{MV} + F_z [\mu_{max} - k_{uib}(\lambda - \lambda_{th})] + \frac{r J \omega^2}{V} \left[\eta_s \cdot s^2 \cdot \text{sat}\left(\frac{s}{\varphi}\right) + ks \right] & \lambda > \lambda_{th} \end{cases} \quad (36)$$

2 四驱电动方程式赛车的测试与分析

IMU 加速度传感器获取加速度信号，AMK 电机控制器获取实时轮速信息，二者根据卡尔曼滤波算法，完成车速估计。车速、角速度、车轮滑转率为实时变化量，以车轮滑转率为控制量作为输入，经上述滑模控制策略计算控制率并输出，如图 9~10 所示。

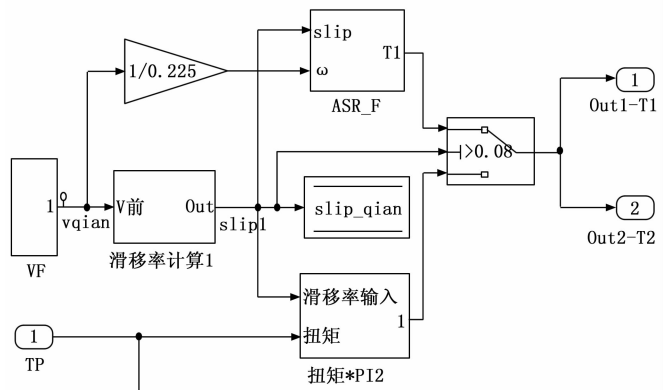


图 9 simulink-TCS 控制模型

考虑到比赛受到功率限制，且功率过大、转速过快时容易降低驱动轮部件、电机部件、电机控制器等的寿命，因此在模型中加入限幅，防止轮速过高、功率过大。

在 CARSIM 中搭建与实车相同的车辆模型，基于 CARSIM 和 Matlab/Simulink 对该部分进行联合仿真。仿真过程中，以车辆参数为定量，观测 75 m 直线加速时间，通过调整参数值，得到较优取值，如图 11。

通过对实车路面的测试以及仿真的调试，确定直线加速的最佳车轮滑转率为 0.2，在此基础上对滑模控制的相关参数进行了调试，取 k 为 1.035，边界层厚度 φ 为 0.01， η_s 为 0.01 为最优取值。

图 12~13 为无滑模控制的速度—时间响应曲线、滑转率—时间响应曲线。其中：1 为后轮状态，2 为前轮状态。可以看出，无滑模控制时，实际轮速与车速相差较大，滑转率明显增大，即后轮出现明显打滑现象，大大降低加速性能。

图 14~15 为有滑模控制时的速度—时间响应曲线、滑转率—时间响应曲线。可以看出，有滑模控制时，轮速和车速在起步阶段二者大小接近，前后轮实际轮速变化趋势相同、大小相近，且前后轮的滑转率变化趋势相同并趋近于 0.2，故后轮没有出现打滑，控制效果显著。

此外，通过多次仿真数据的处理，赛车 75 m 直线加速在 Carsim 中稳定保持在 3.9 秒。

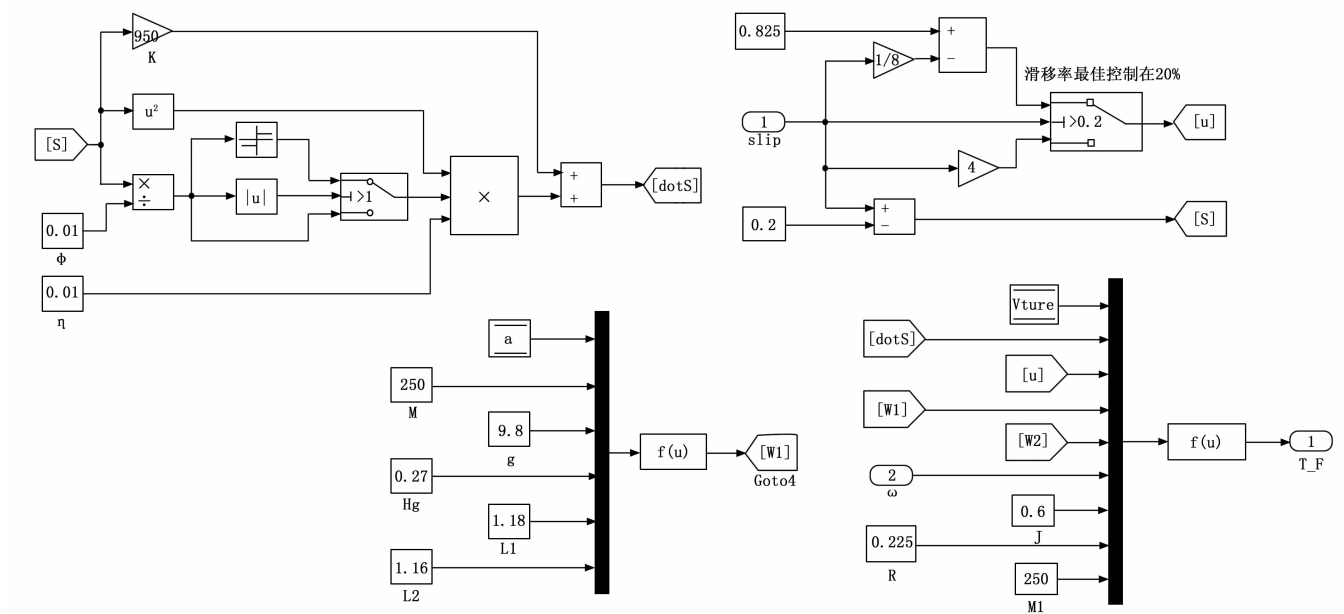
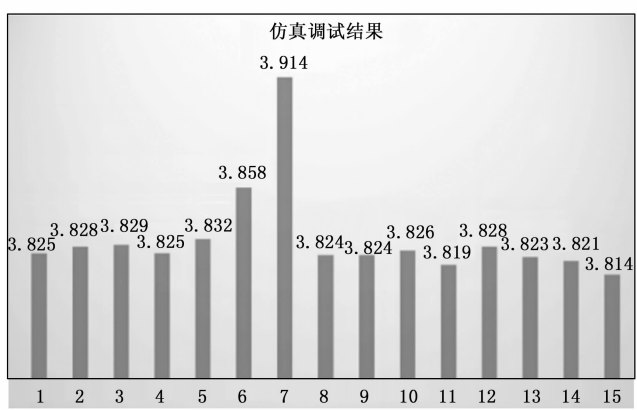


图 10 滑模控制模型



	K	ϕ	s	η	T
1	950	0.01	0.2	0.01	3.825
2	950	0.015	0.2	0.01	3.828
3	950	0.005	0.2	0.01	3.829
4	950	0.009	0.2	0.01	3.825
5	950	0.01	0.2	0.02	3.832
6	950	0.01	0.2	1	3.858
7	950	0.01	0.2	5	3.914
8	950	0.01	0.18	0.01	3.824
9	950	0.01	0.16	0.01	3.824
10	950	0.01	0.14	0.01	3.826
11	1000	0.01	0.2	0.01	3.819
12	1300	0.01	0.2	0.01	3.828
13	1200	0.01	0.2	0.01	3.823
14	1100	0.01	0.2	0.01	3.821
15	1035	0.01	0.2	0.01	3.814

图 11 部分核心调试参数

将仿真模型投入实车测试中，由数据采集系统实时采集 AMK 测得的实时轮速及扭矩、IMU 实时测得的整车实际加速度、经控制模型运行后由卡尔曼滤波算法估算的实际车速。经多次实车测试，电动赛车能够稳定保持在 4 秒以内，大大提高了其加速性能和稳定性。该系统成功运用

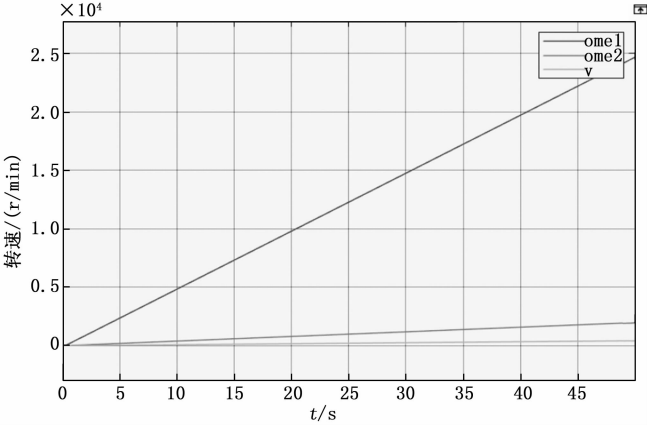


图 12 无滑模控制的速度—时间响应

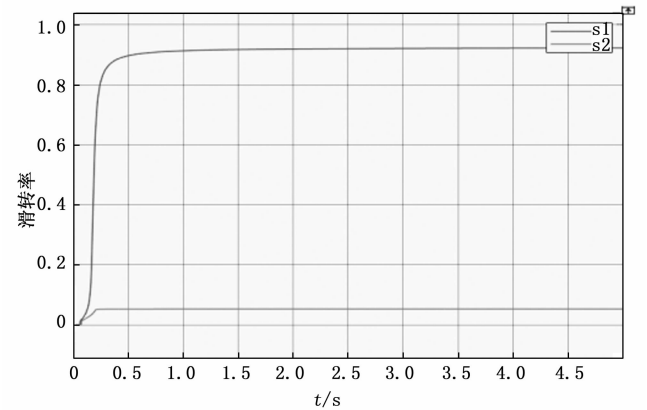


图 13 无滑模控制的滑转率—时间响应

在 2022 中国大学生电动方程式大赛的参赛车辆中，其加速特性在 80 多个参赛队伍中获大赛第二名，证明了控制系统设计的工程运用有效性。

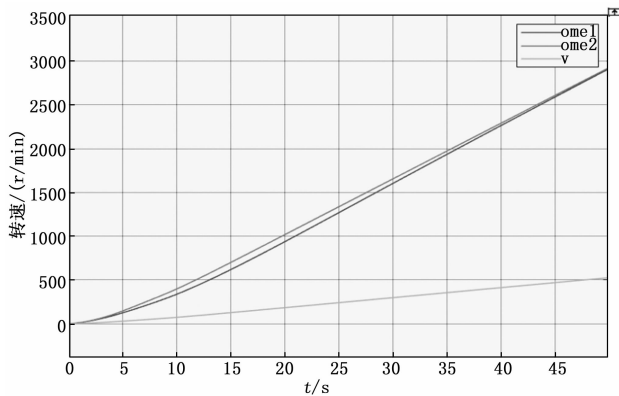


图 14 有滑模控制的速度—时间响应

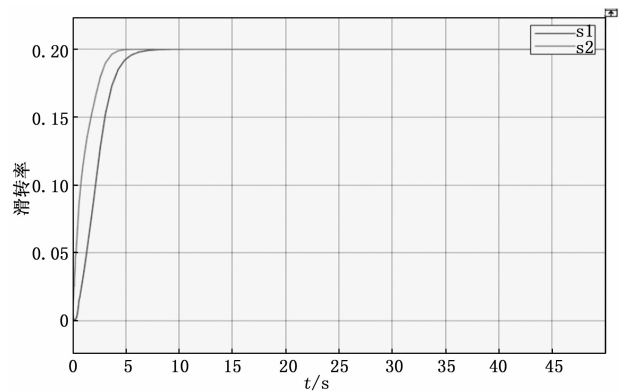


图 15 有滑模控制的滑转率—时间响应

3 结束语

针对四驱电动方程式赛车的加速性能和稳定性的提升,设计了一种结合车速估计和滑模控制的 TCS 控制系统。获取准确车速是保证控制有效的前提,本文利用卡尔曼滤波算法,完成整车车速估计。根据地面附着系数和滑转率的关系,以两段线性区间,分别控制输出扭矩,保证滑转率在最优范围内;为减小滑模控制的抖振现象,对趋近律改进,增加边界层。联合 Matlab/Simulink 和 CARSIM 完成仿真测试,并最终实现实车测试,成功将控制模型应用在四驱电动方程式赛车中。

参考文献:

[1] 余卓平,冯源,熊璐. 分布式驱动电动汽车动力学控制发
(上接第 146 页)

[12] 聂瑞华. 基于 BP-LSTM 的涂布机维修策略研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2023.

[13] 陈树念. 基于多目标优化遗传算法的动态空域配置方法研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2022.

[14] 赵晓健. 基于遗传算法的多约束叠合梁斜拉桥钢梁维护策略优化 [J]. 广东工业大学学报, 2018, 35 (4): 75-80.

[15] 修炳杰. 融合多源运维数据的风电机组状态评价与维护策略研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.

[16] 徐新玉, 崔建荣. 基于非劣排序遗传算法的轨道电路维修策

展现状综述 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (8): 105-114.

[2] 赵志刚, 骆志伟, 胡小龙, 等. 四轮独立驱动电动车控制系统设计与研究 [J]. 微特电机, 2016, 44 (11): 51-53.

[3] 付中元. 分布式后驱电动方程式赛车整车控制系统研究 [D]. 杭州: 浙江科技学院, 2021.

[4] 王顺民. 四轮驱动汽车 TCS 控制策略研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.

[5] 郑太雄, 单荣明, 蒋国英, 等. 汽车 ABS 参考车速的确定方法 [J]. 汽车技术, 2010 (3): 37-40.

[6] 李亮, 康铭鑫, 宋健, 等. 汽车牵引力控制系统的变参数自适应 PID 控制 [J]. 机械工程学报, 2011, 47 (12): 92-98.

[7] 郭景华, 李克强, 罗禹贡. 智能车辆运动控制研究综述 [J]. 汽车安全与节能学报, 2016, 7 (2): 151-159.

[8] 刘陆, 丁世宏, 李世华. 高阶滑模控制理论综述 [J]. 控制理论与应用, 2022, 39 (12): 2193-2201.

[9] 李鹏. 传统和高阶滑模控制研究及其应用 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.

[10] 刘世杰, 黄志来, 杨明星, 等. 含边界层的机械臂分数阶滑模控制 [J]. 上海工程技术大学学报, 2021, 35 (4): 327-332.

[11] 刘帅, 王金环, 白杰, 等. 基于改进滑模趋近律的航空发动机控制器设计 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (34): 408-413.

[12] 赵希梅, 金鸿雁. 基于 Elman 神经网络的永磁直线同步电机互补滑模控制 [J]. 电工技术学报, 2018, 33 (5): 973-979.

[13] 苏皓, 杨先海. 阀控液压缸系统低通滤波滑模变结构控制抖振问题的研究 [J]. 煤矿机械, 2018, 39 (11): 77-79.

[14] 杨柳曼, 万丽琴, 江石媛. 基于卡尔曼滤波的智能车速调速 PID 控制研究 [J]. 现代信息科技, 2020, 4 (7): 8-10.

[15] 田浩. 轮毂电机汽车驱动防滑控制研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.

[16] 何幸福. 四驱电动汽车操纵稳定性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.

[17] 李雪栋. 低附工况下四轮驱动电动汽车牵引力控制算法研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.

[18] 张鹏, 张金鹏. 变结构控制的抖振问题研究 [J]. 航空兵器, 2013 (2): 9-13.

[19] 姚娟. 滑模变结构中抖振消除方法研究 [J]. 机电工程技术, 2016, 45 (9): 90-91.

[20] 略优化分析 [J]. 山东农业大学学报 (自然科学版), 2020, 51 (1): 106-109.

[17] 张炎亮, 马秋丽, 雷俊辉. 基于改进诊断算法的空压机维护策略研究 [J]. 工业工程与管理, 2017, 22 (6): 32-39.

[18] 姚申思, 王猛. 基于预算约束遗传算法的医疗设备更换决策辅助方法 [J]. 现代科学仪器, 2023, (3): 126-131.

[19] 郭晶. 基于遗传 PID 算法的风光互补充电控制方法的研究与实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.

[20] 钱倩, 蒋祖华. 考虑预防维修时间及相关性的多部件系统维护策略 [J]. 工业工程, 2020, 23 (6): 95-100.