考虑电机响应误差的四轮独立驱动电动汽车驱动防滑控制研究*

金号[1] 赵成康[1] 吴帅[1] 陈龙[2] 王春[1] 来升[1]

（1.四川轻化工大学，宜宾 644005；2.宜宾市科学技术局，宜宾 644002）

【摘要】针对四轮独立驱动电动汽车驱动防滑控制中各电机转矩响应存在误差，导致电机输出转矩不稳定的问题，提出一种考虑电机响应误差的驱动防滑控制策略，在综合分析电机动态响应和稳态响应对驱动防滑控制影响的基础上，设计了基于滑模控制的目标滑转率跟踪算法，并在控制底层对电机转矩响应误差进行补偿。通过CarSim和MATLAB/Simulink联合仿真对所提出控制策略进行了验证，结果表明，在低附着系数路面、中附着系数路面条件下，相对于未考虑电机响应误差的驱动防滑控制策略，该方法使车速分别提升了55.6%、31.8%，达到快速起步效果，且能够有效控制驱动防滑控制中滑转率的超调量，保障车辆驱动的安全性和稳定性。

关键词：四轮独立驱动 驱动防滑控制 电机响应误差 转矩补偿

中图分类号：U469.72 **文献标志码：**A **DOI：**10.20104/j.cnki.1674-6546.20250301

Study on Acceleration Slip Regulation of Four-Wheel Independent Drive Electric Vehicles Considering Motor Response Errors

Jin Hao[1], Zhao Chengkang[1], Wu Shuai[1], Chen Long[2], Wang Chun[1], Lai Sheng[1]

(1. Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644005; 2. Yibin Municipal Bureau of Science and Technology, Yibin 644002)

【Abstract】To address the issue of unstable motor output torque resulting from torque response discrepancies in Four-Wheel Independent Drive (FWID) electric vehicles, the paper proposes a drive antislip control strategy that accounts for motor response errors. On the basis of comprehensively analyzing the impact of the dynamic and steady-state responses of the motors on drive slip control, a target slip ratio tracking algorithm based on sliding mode control is designed, and the motor torque response errors are compensated at the control level. Through co-simulation of CarSim and MATLAB/Simulink, the proposed drive slip control strategy is verified under low-adhesion coefficient road and medium-adhesion coefficient road conditions. The results show that, compared with the drive slip control strategy that does not consider motor response errors, the proposed method increases the vehicle speed by 55.6% and 31.8% respectively to achieve a rapid start effect and effectively suppress the overshoot of the slip ratio in drive slip control, thus ensuring the safety and stability of vehicle driving.

Key words: Four-Wheel Independent Drive (FWID), Acceleration Slip Regulation (ASR), Motor response errors, Response compensation

【引用格式】金号, 赵成康, 吴帅, 等. 考虑电机响应误差的四轮独立驱动电动汽车驱动防滑控制研究[J]. 汽车工程师, 2026(6): 9-16.

JIN H, ZHAO C K, WU S, et al. Study on Acceleration Slip Regulation of Four-Wheel Independent Drive Electric Vehicles Considering Motor Response Errors[J]. Automotive Engineer, 2026(6): 9-16.

1 前言

在全球汽车产业加速向电动化、智能化转型的背景下，四轮独立驱动电动汽车以其独特的技术架构成为研究热点[1-2]。驱动防滑控制（Acceleration Slip Regulation，ASR）是重要的车辆主动安全技术之

*基金项目：四川省自然科学基金面上项目（2024NSFSC0145）；四川轻化工大学2024年教改项目（B40101655）。
通信作者：金号（1992—），男，博士，讲师，主要研究方向为车辆动力学控制，jinhao20161107@163.com。

一，对车辆稳定性和安全性的提高至关重要[3-4]。

针对四轮独立驱动电动汽车的驱动防滑问题，现有研究主要集中在车轮实时滑转率计算、路面识别和驱动防滑控制算法方面[5]。针对驱动控制算法：文献[6]利用集成自适应律的自适应滑模控制（Adaptive Sliding Mode Control，ASMC）和超螺旋滑模方法跟踪最优滑转率；文献[7]采用饱和函数代替传统滑模控制中的符号函数改善了抖振问题；文献[8]充分考虑纵向刚度摄动和外部噪声的作用，构建了参数不确定滑转率跟踪模型；文献[9]提出了一种不依赖精确车辆模型的模糊控制方法，以一侧车轮的驱动力矩为参考，通过将左、右车轮间的力矩误差控制在一定范围内来控制滑转率。

在车辆稳定性控制中的电机转矩响应研究方面，大部分学者重点关注电机力矩优化分配问题，未考虑电机转矩响应误差对整车控制的影响。在电机转矩响应建模方面：文献[10]采用一阶响应函数代替电机转矩响应，该方法模型结构简单、计算量小；为了更好地体现电机响应，文献[11]采用二阶传递函数，相对于一阶响应函数，该方法相对简单；文献[12]采用数学建模的方法，精度高但参数辨识难度大。在电机转矩响应误差对整车控制的影响方面：文献[13]指出，轮毂电机的电感参数易受电磁交叉耦合效应影响，导致不同电机的稳态输出特性与动态响应速度存在差异，进而影响车辆驱动防滑时的航向稳定性；文献[14]指出，电机输出精度不足会进一步放大转矩的预测误差，影响系统对车轮滑转的实时校正能力。

基于上述分析，现有以滑转率为目标的各轮力矩分配研究大多忽略了外部环境变化引起的电机参数与特性动态变化，导致电机转矩响应及状态反馈不稳定。本文分析永磁同步电机响应对传统驱动防滑控制中单轮滑转率跟踪精度与控制效果的影响，采用滑模控制算法跟踪单轮目标滑转率并分配各轮目标力矩，同时在电机底层对环境引起的响应误差进行补偿，以缩短控制路径、降低控制难度，提升系统抗干扰能力。

2　电机转矩响应误差对驱动防滑系统的影响

2.1　电机响应模型

轮毂电机通常采用永磁同步电机，环境温度对永磁体磁链和定子电阻具有显著影响，导致电机转矩响应发生变化[15]。

在分析电机响应对电机转矩输出的影响时，可以将电机转矩响应简化为二阶阻尼环节：

$$G(s)=\frac{T_{\mathrm{d}}}{T_{\mathrm{d}}^{*}}=\frac{K}{(T_{\mathrm{m}}s+1)(T_{\mathrm{e}}s+1)} \tag{1}$$

式中：$G(s)$为传递函数，T_{d}为实际输出转矩，T_{d}^{*}为目标转矩，K为稳态增益，$T_{\mathrm{e}}=L/R$为电气时间常数，$T_{\mathrm{m}}=RJ_{\mathrm{m}}/K_{\mathrm{e}}K_{\mathrm{T}}$为机械时间常数，$s$为复频率变量，$L$为电枢电感，$R$为电枢回路电阻，$J_{\mathrm{m}}$为电机转动惯量，$K_{\mathrm{e}}$为感应电压常数，$K_{\mathrm{T}}$为转矩常数。

2.2　电机转矩响应误差分析

用式（1）代替电机转矩响应，其中，T_{e}和T_{m}共同决定动态响应，K决定稳态响应，其通常为输出转速与输入电压的比值，这里输入为电机转矩，故将K的标准值设为1。温度升高时电阻增大，但电感变化较小，导致T_{e}减小，虽然在物理层面会缩短动态响应时间，但会导致电流环带宽降低、相位滞后增加，从而在控制层面延长系统的整体动态响应时间。

稳态响应误差表示为转矩响应达到稳定状态时实际转矩与期望转矩的偏差，在电机温度达到110 ℃和需求转矩为275 N·m的情况下，转矩稳态误差最大约为-10%[16]，故温度升高会减小电机转矩的稳态输出。动态响应误差表示为输出转矩达到稳态前实际转矩与期望转矩的偏差，可在开环系统中利用阶跃响应的电机转矩表示，如图1所示。同时，电机受自身的电气惯性和机械惯性影响，转矩响应呈现过阻尼系统的特点，且无论是否受到温度影响，均存在动态响应误差。

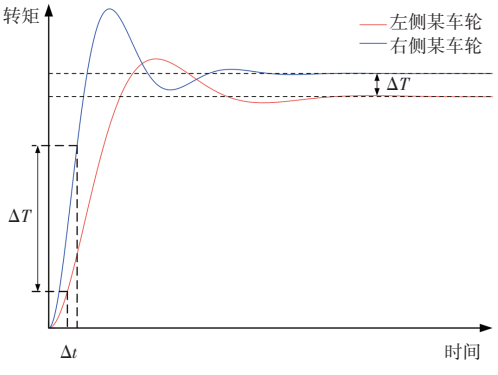


图1　电机转矩响应差异示意

2.3　电机响应误差对驱动防滑控制的影响

为验证外界环境对驱动防滑控制的影响，在驱动防滑的PID控制回路中输入电机的理想转矩响应模型和受外界影响的转矩响应模型，然后进行仿真

对比。控制回路如图2所示。

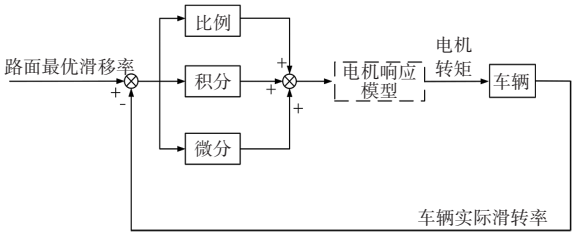


图2　响应误差模型对控制回路的影响

对于理想的电机响应，设T_e=0、T_m=0、K=1，即将控制转矩命令直接输入车辆。设路面附着系数为μ_0=0.2，CarSim中四轮独立驱动车辆模型的主要参数如表1所示，可以得到滑转率控制结果如图3所示。

表1　车辆参数

参数	数值
整车质量m/kg	1 704.7
质心与前轴的距离a/m	1.035
质心与后轴的距离b/m	1.655
轴距L_{wb}/m	2.69
绕Z轴转动惯量I_z/kg·m^2	2 200
车轮半径R_w/m	0.35

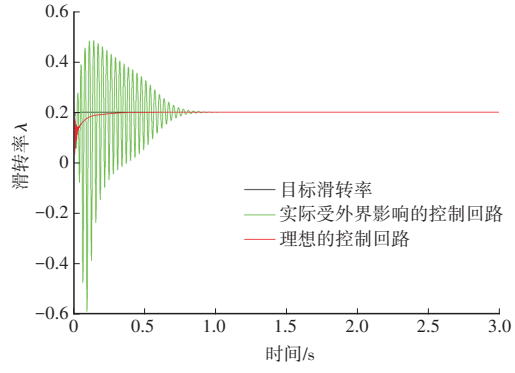


图3　电机响应对车轮驱动防滑控制回路的影响

由图3可知，原有的驱动防滑控制有效，加入受环境影响的电机响应模型后，控制回路滑转率波动剧烈、超调显著，控制回路失效。

3　考虑电机响应误差的驱动防滑控制

针对外界环境变化引起的电机响应误差，本文在底层进行转矩补偿控制，这是因为电机转矩在起步阶段输出大且响应迅速，若响应误差反馈至上层，会延长控制路径，增加反馈延迟，在复杂多变的行驶环境中，上层控制无法快速感知环境变化并进行响应，难以保证车辆的行驶稳定性。本文提出的控制策略如图4所示：根据驾驶员输入的加速踏板信号确定驱动力矩，结合滑转率计算模块计算获得4个车轮实际滑转率与最优滑转率间的误差，作为反馈信号输入整车驱动力矩分配模块；同时，考虑各电机的动态响应差异进行补偿控制，提高电机扭矩的响应精度。

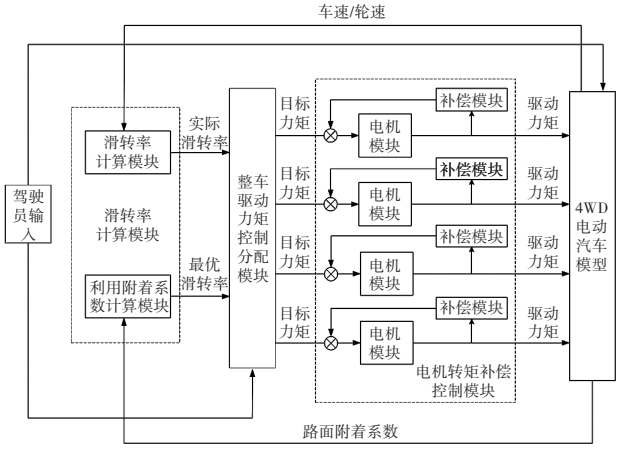


图4　整车驱动防滑控制框图

3.1　车轮旋转动力学模型

对单个车轮进行受力分析，如图5所示。其中，R_{roll}为车轮旋转半径，V为车轮轮速，F_z为轮胎垂向载荷，F_x为轮胎纵向力，通常表示为轮胎滑转率λ、路面附着系数μ_0和轮胎垂向载荷F_z的函数。

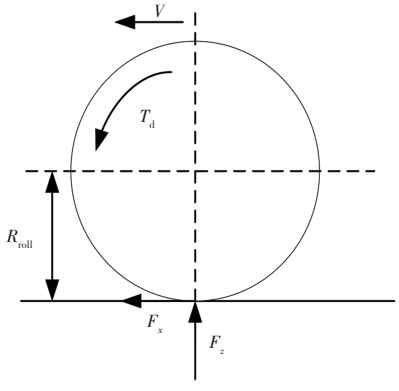


图5　车轮受力分析

忽略风阻的影响，可以推导获得车轮旋转动力学模型为：

$$\begin{cases}\dot{\omega}=\dfrac{1}{J}T_d-\dfrac{F_r+R_{roll}F_x\left(\lambda,\mu_0,F_z\right)}{J}\\ \lambda=\dfrac{R_{roll}\omega-V_x}{R_{roll}\omega}\end{cases}\tag{2}$$

式中：$\dot{\omega}$为车轮角加速度，F_r为滚动阻力，V_x为纵向车速，J为车轮的转动惯量。

为方便控制器设计，对当前时刻的滑转率工作点附近的轮胎纵向力-滑转率关系进行线性化处

理：

$$F_x(\lambda)=c_m\lambda$$
$$\text{s.t. } c_m=\left.\frac{\partial F_x}{\partial\lambda}\right|_{\lambda=\xi}\quad 0\leqslant\xi\leqslant\lambda \tag{3}$$

式中：c_m为工作点轮胎的纵向刚度，ξ为当前某一点的滑转率。

基于以上线性化假设，对式(2)中的滑转率计算方程求导并将其中的车轮扭矩平衡方程带入，以轮端转矩T_d为输入、轮胎滑转率λ为输出，车轮旋转动力学模型可以转化为线性系统：

$$\dot{\lambda}=\frac{(1-\lambda)^2}{JV_x}[T_d-(c_m\lambda+F_r)R_{roll}^2] \tag{4}$$

3.2 驱动防滑控制系统

对于其中一个车轮，控制框图如图6所示，其余车轮控制方法相同。

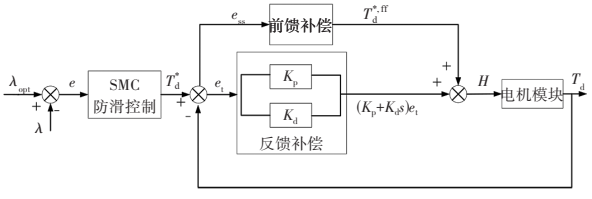


图6 驱动防滑控制和电机转矩响应补偿模块

采用滑模控制实现各电机的输出转矩控制，输入为滑转率误差，输出为控制力矩。采用稳态补偿和动态补偿消除电机响应带来的转矩误差，输入分别为稳态误差和动态误差，输出为电机的输入信号H，通过电机模块后输出实际转矩。

3.2.1 驱动防滑滑模控制算法

滑转率计算模块中，各车轮滑转率计算公式为：

$$\lambda_{ij}=\frac{R_{roll}\omega_{ij}-V_x}{R_{roll}\omega_{ij}} \tag{5}$$

式中：λ_{ij}为各轮滑转率，ω_{ij}为各轮角速度，ij=fl,fr,rl,rr分别表示左前轮、右前轮、左后轮、右后轮。

驱动防滑控制力矩分配模块以各轮的滑转率作为控制量，采用滑模控制实现各电机输出转矩的控制。

对于其中单个车轮，根据误差分析，滑转率误差e_λ表示为：

$$e_\lambda=\lambda-\lambda_{opt} \tag{6}$$

式中：λ为实际滑转率，λ_{opt}为目标滑转率。

其导数为：

$$\dot{e}_\lambda=\dot{\lambda}-\dot{\lambda}_{opt} \tag{7}$$

根据式(4)对纵向力-滑转率的关系进行线性化处理，得到滑转率误差动态方程：

$$\dot{e}_\lambda=\frac{1}{JV_x}[T_d-\left(c(\lambda_{opt}+e_\lambda\right)+F_r)R_{roll}]-\dot{\lambda}_{opt} \tag{8}$$

整理后可得线性化误差模型为：

$$\dot{e}_\lambda=aT_d+be_\lambda+d \tag{9}$$

式中：$a=\frac{1}{JV_x}$，$b=-\frac{c_mR_{roll}}{JV_x}$，$d=-\left(\frac{(c_m\lambda_{opt}+F_r)R_{roll}}{JV_x}+\dot{\lambda}_{opt}\right)$。

选择一阶线性滑模面：

$$\sigma=\dot{e}_\lambda+ke_\lambda \tag{10}$$

式中：σ为设计的滑模面，k>0为滑模增益。

对滑模面求导可得：

$$\dot{\sigma}=\ddot{e}_\lambda+k\dot{e}_\lambda \tag{11}$$

将式(9)带入式(11)可得：

$$\dot{\sigma}=a\dot{T}_d+(b+k)\dot{e}_\lambda \tag{12}$$

单个车轮滑模控制输出转矩T_d^*由等效控制转矩T_{meq}和切换控制转矩T_{sw}组成：

$$T_d^*=T_{meq}+T_{sw} \tag{13}$$

等效控制出现在$\dot{\sigma}$=0时，代入式(9)解得：

$$T_{meq}=\frac{1}{a}\left(-(k+b)e_\lambda-d\right) \tag{14}$$

为保证滑模面的可达性，引入带符号函数的切换项，切换控制转矩为：

$$T_{sw}=-\eta\cdot\mathrm{sgn}(s) \tag{15}$$

式中：η>0为切换增益。

又因$a=\frac{1}{JV_x}>0$，且η>0，有：

$$\sigma\dot{\sigma}=\sigma\cdot(-a\eta\cdot\mathrm{sgn}(s))=-a\eta|\sigma|<0 \tag{16}$$

滑模条件成立，系统稳定。

因此，将式(9)、式(14)、式(15)带入式(13)中得到车轮控制力矩T_d^*为：

$$T_d^*=JV_x(ke_\lambda+\dot{\lambda}_{opt})+c_mR_{roll}e_\lambda+(c_m\lambda_{opt}+F_r)R_{roll}-\eta\cdot\mathrm{sgn}(s) \tag{17}$$

3.2.2 转矩稳态响应误差前馈补偿控制

对于稳态响应误差，理想的电机稳态响应模型中K=1。但受外界影响，K的取值会发生变化，影响电机的稳态输出。

当系统进入稳态时，实际转矩为：

$$T_d^{*,ss}=K\cdot T_d^{ss} \tag{18}$$

式中：T_d^{ss}为稳态时的参考转矩。

恒定稳态误差为：

$$e_{ss}=T_d^{*,ss}-T_d^{ss} \tag{19}$$

前馈补偿模块在原参考指令中叠加补偿量

ΔT_{ff}，使补偿后参考指令 $T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ff}}$ 经过系统后 $T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ss}}$ 与 $T_{\mathrm{d}}^{\mathrm{ss}}$ 相等：

$$T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ff}}=T_{\mathrm{d}}^{*}+\Delta T_{\mathrm{ff}} \tag{20}$$

补偿后的稳态指令为：

$$T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ff,ss}}=T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ss}}+\Delta T_{\mathrm{ff,ss}} \tag{21}$$

式中：$\Delta T_{\mathrm{ff,ss}}$ 为稳态补偿量。

带入式(18)可得：

$$T_{\mathrm{d}}^{\mathrm{ss}}=K\cdot T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ff,ss}}=T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ss}} \tag{22}$$

为求解 $\Delta T_{\mathrm{ff,ss}}$，将式(18)、式(19)带入式(22)中，并将 K 用可观测值 e_{ss}、$T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ss}}$ 代替，可得：

$$(T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ss}})^2+T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ss}}\cdot\Delta T_{\mathrm{ff,ss}}-e_{\mathrm{ss}}\cdot T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ss}}-e_{\mathrm{ss}}\cdot\Delta T_{\mathrm{ff,ss}}=(T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ss}})^2 \tag{23}$$

因 e_{ss} 远小于 $T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ss}}$，微小项 $e_{\mathrm{ss}}\cdot\Delta T_{\mathrm{ff,ss}}$ 可忽略，简化后可得：

$$\Delta T_{\mathrm{ff,ss}}=e_{\mathrm{ss}} \tag{24}$$

动态条件下补偿量与实时 $T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ss}}$ 相匹配，结合式(24)，最终反馈补偿控制公式为：

$$\Delta T_{\mathrm{ff}}=\frac{e_{\mathrm{ss}}}{T_{\mathrm{d}}^{\mathrm{ss}}}\cdot T_{\mathrm{d}}^{*} \tag{25}$$

补偿后的参考指令为：

$$T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ff}}=T_{\mathrm{d}}^{*}\cdot\left(1+\frac{e_{\mathrm{ss}}}{T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ss}}}\right) \tag{26}$$

3.2.3　转矩动态响应误差反馈补偿控制

由式(1)可得：

$$G(s)=\frac{K}{T_{\mathrm{m}}'s^2+T_{\mathrm{e}}'s+1} \tag{27}$$

式中：$T_{\mathrm{m}}'=T_{\mathrm{m}}T_{\mathrm{e}}$，$T_{\mathrm{e}}'=T_{\mathrm{m}}+T_{\mathrm{e}}$。

定义动态误差 e_{t} 为：

$$e_{\mathrm{t}}=T_{\mathrm{d}}^{*}-T_{\mathrm{d}} \tag{28}$$

通过反馈控制器改善系统动态性能（如缩短响应时间、抑制超调），采用比例-微分（PD）控制器：

$$C(s)=K_{\mathrm{p}}+K_{\mathrm{d}}s \tag{29}$$

式中：K_{p}、K_{d} 分别为PD控制器的比例系数、微分系数。

则经过补偿控制后输出至电机的信号 H 可以表示为：

$$H=T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ff}}+(K_{\mathrm{p}}+K_{\mathrm{d}}s)\,e_{\mathrm{t}} \tag{30}$$

结合式(27)、式(28)和式(30)可得：

$$T_{\mathrm{d}}=\frac{K}{T_{\mathrm{m}}'s^2+T_{\mathrm{e}}'s+1}\cdot\left[T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ff}}+\left(K_{\mathrm{p}}+K_{\mathrm{d}}s\right)\left(T_{\mathrm{d}}-T_{\mathrm{d}}^{*}\right)\right] \tag{31}$$

因前馈已经消除稳态误差，且理想分母为 $s^2+2\zeta\omega_{\mathrm{n}}s+\omega_{\mathrm{n}}^2$，同时 K 通过可观测值 e_{ss}、$T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ss}}$ 代替，解得控制器参数为：

$$\begin{cases}K_{\mathrm{p}}=\dfrac{T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ss}}(T_{\mathrm{m}}'\omega_{\mathrm{n}}^2-1)}{T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ss}}-e_{\mathrm{ss}}}\\[2ex] K_{\mathrm{d}}=\dfrac{T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ss}}(2\zeta\omega_{\mathrm{n}}T_{\mathrm{m}}'-T_{\mathrm{e}}')}{T_{\mathrm{d}}^{*,\mathrm{ss}}-e_{\mathrm{ss}}}\end{cases} \tag{32}$$

式中：ζ 为二阶系统阻尼比，ω_{n} 为二阶系统固有频率。

4　仿真验证

4.1　仿真模型建立

在Simulink中搭建驾驶员模型、驱动防滑控制模型、电机转矩响应模型及响应补偿控制模型。本文研究电机响应误差条件下的驱动防滑系统控制，故驾驶员模型可简化为加速踏板开关输入，可以等效为加速踏板的阶跃信号，如图7所示，在0.1 s内开度达到100%。CarSim中四轮独立驱动车辆模型的主要参数见表1。

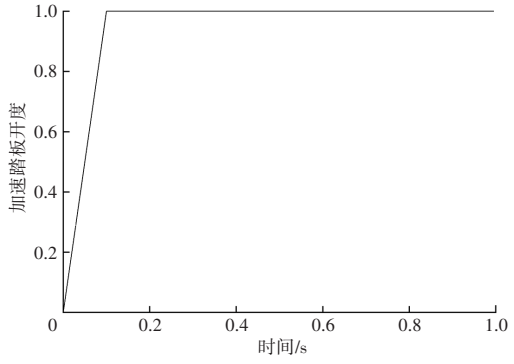
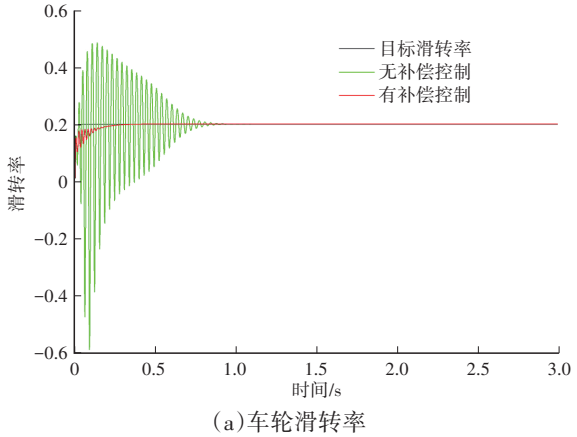


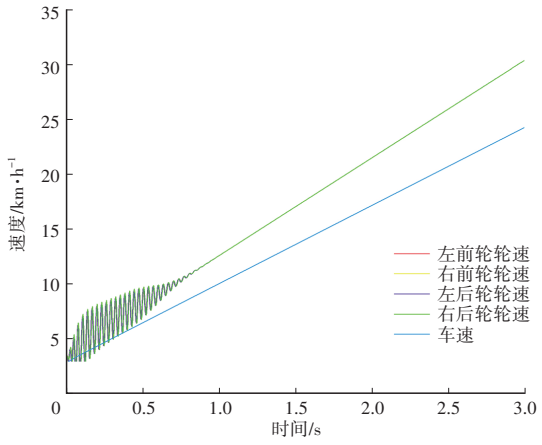
图7　驾驶员加速踏板输入

4.2　仿真结果分析

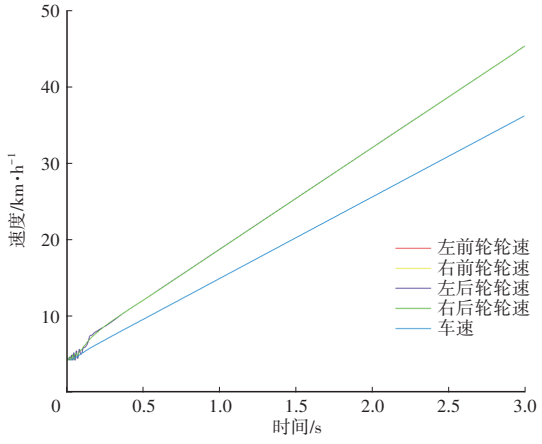
分别在低附着系数路面（μ_0=0.2）和中附着系数路面（μ_0=0.5）工况下对车轮滑转率控制情况、车辆加速度、轮速和车速进行仿真，在控制回路中加入受外界影响的电机响应误差模型后分别在有响应补偿控制和无响应补偿控制回路下进行比较分析，仿真结果如图8、图9所示。



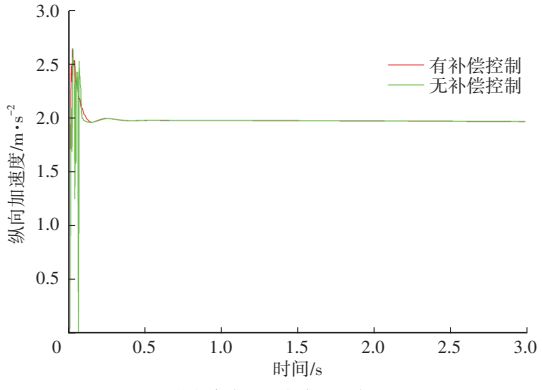
(a)车轮滑转率



(b)无补偿控制时各轮轮速与车速

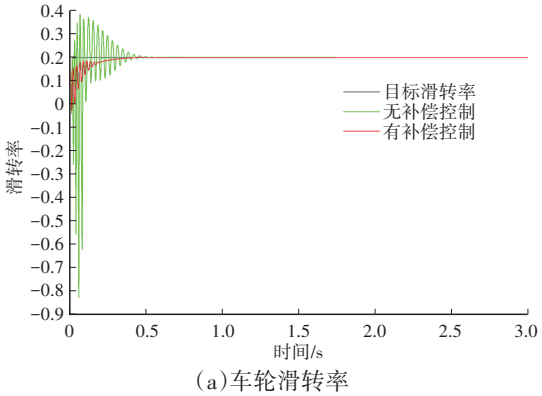


(c)有补偿控制时各轮轮速与车速

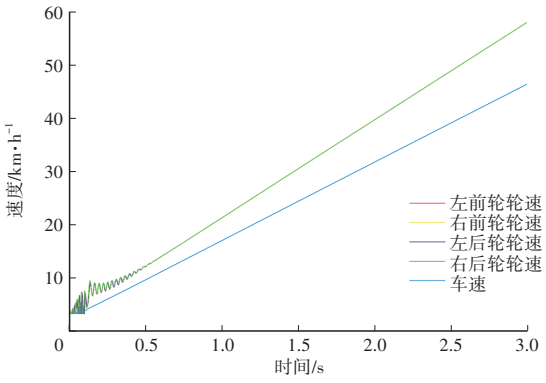


(d)车辆纵向加速度

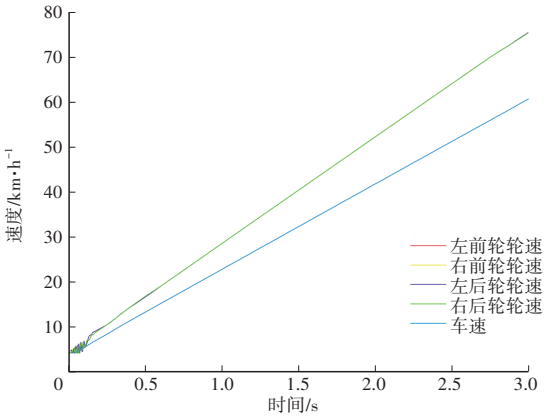
图8　低附着系数路面仿真结果



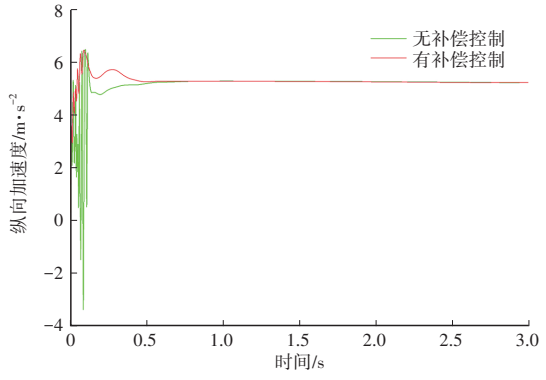
(a)车轮滑转率



(b)无补偿控制时各轮轮速与车速



(c)有补偿控制时各轮轮速与车速



(d)车辆纵向加速度

图9　中附着系数路面仿真结果

由图8可知：响应误差造成驱动防滑控制的滑转率最大超调量达142%，轮速在起步时抖动较大，加速度抖动频率较高，驾驶舒适度较差；在有补偿控制的情况下，滑转率几乎无超调量，且可快速达到目标量，车速提升55.6%，轮速抖动幅值降低81%，且抖动时间缩短90%，加速度稳定，舒适度良好。

由图9可知：无补偿时，驱动防滑滑转率超调91%，起步轮速、加速度抖动大，舒适度差；加入补偿控制后，滑转率无超调且快速收敛，车速提升31.8%，轮速抖动幅值降低85%、时间缩短93%，加速

度稳定，舒适度显著提升。与低附着系数路面仿真结果相比，中附着系数路面条件下驱动防滑控制的滑转率更稳定（小幅提升），加速度、车速更高，轮速抖动减小。

5 结束语

本文分析了四轮独立驱动电动汽车电机受到外界环境影响时转矩响应产生的误差对驱动防滑控制造成的影响，并构建电机响应误差模型，提出增加底层补偿控制的策略，采用滑模控制算法，通过滑转率调控输出转矩，将电机响应误差划分为动态、稳态误差分别补偿。仿真结果表明，该策略可有效控制驱动防滑控制的滑转率超调量，车速在低附着系数路面和中附着系数路面条件下分别提升55.6%、31.8%，达到快速起步效果，同时车轮对路面的利用率提升。底层转矩补偿控制以更短的控制路径、更快的响应速度，既提升驱动防滑控制的有效性，又有效弥补电机响应造成的误差，增强了车辆驱动防滑系统的可靠性。

该策略在转弯、加速等复杂工况下的有效性还有待研究，同时，受试验条件所限，现阶段未开展实物样机试验，未来将进一步拓展复杂行驶工况下的策略验证，并搭建实物样机试验平台开展实机试验。

参 考 文 献

[1] KLIMOV A V, ANTONYAN A V, KELLER A V, et al. Anti-Slip Control System with Self-Oscillation Suppression Function for the Electromechanical Drive of Wheeled Vehicles[J]. World Electric Vehicle Journal, 2025, 16(2).

[2] SUN X M, XIAO Z H, WANG Z, et al. Acceleration Slip Regulation Control Method for Distributed Electric Drive Vehicles under Icy and Snowy Road Conditions[J]. Applied Sciences, 2024, 14(15).

[3] 黄斌, 周佳强, 周军. 四轮独立电驱动越野车驱动力优化控制[J]. 江苏大学学报（自然科学版）, 2024, 45(2): 132-140.
HUANG B, ZHOU J Q, ZHOU J. Driving Force Optimization Control of Four-Wheel Independent Driving Electric Off-Road Vehicle[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2024, 45(2): 132-140.

[4] ZHAO B, XU N, CHEN H, et al. Stability Control of Electric Vehicles with In-Wheel Motors by Considering Tire Slip Energy[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 118: 340-359.

[5] 王震坡, 丁晓林, 张雷. 四轮轮毂电机驱动电动汽车驱动防滑控制关键技术综述[J]. 机械工程学报, 2019, 55(12): 99-120.
WANG Z P, DING X L, ZHANG L. Overview on Key Technologies of Acceleration Slip Regulation for Four-Wheel-Independently-Actuated Electric Vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(12): 99-120.

[6] ZHANG H Z, QI Y Y, SI W J, et al. An Improved Adaptive Sliding Mode Control Approach for Anti-Slip Regulation of Electric Vehicles Based on Optimal Slip Ratio[J]. Machines, 2024, 12(11).

[7] FAN X B, CHEN M X, ZHU S W, et al. Design of ABS Sliding Mode Control System for In-Wheel Motor Vehicle Based on Road Identification[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2025, 239(7): 2741-2752.

[8] 沙文瀚, 刘琳, 庄伟超, 等. 分布式驱动电动汽车鲁棒H_2/H_∞最优保性能自适应驱动防滑控制[J]. 东南大学学报（自然科学版）, 2025, 55(2): 566-574.
SHA W H, LIU L, ZHUANG W C, et al. Robust H_2/H_∞ Optimal Performance Adaptive Anti-Slip Control for Distributed Driving Electric Vehicle[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2025, 55 (2): 566-574.

[9] ZHA Y F, LIU G Q, MA F W, et al. Acceleration Slip Regulation Control for Four-Wheel Independently Drive Electric Vehicle Based on Fuzzy Control[J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2020, 20(4): 1-14.

[10] 朱绍鹏, 毛竞扬, 刘栋青, 等. 分布式驱动电动车辆的驱动防滑多模式控制策略设计[J]. 华南理工大学学报（自然科学版）, 2025, 53(6): 44-55.
ZHU S P, MAO J Y, LIU D Q, et al. Design of Acceleration Slip Regulation Multi-Mode Control Strategy of Distributed Drive Electric Vehicle[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2025, 53(6): 44-55.

[11] 彭金鑫. 基于轮边驱动商用车底盘集成控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2025.
PENG J X. Research on Integrated Control of Commercial Vehicle Chassis Based on Wheel Hub Drive[D]. Changchun: Jilin University, 2025.

[12] 张振浩. 双电机四驱电动汽车驱动防滑控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
ZHANG Z H. Research on Acceleration Slip Regulation Control of Dual-Motor Four-Wheel-Drive Electric Vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2024.

[13] 王科. 基于轮毂电机响应差异及故障的多轴车辆动力学控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
WANG K. Research on Dynamic Control of Multi-Axle Vehicle Based on Hub Motor Response Difference and Fault[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
[14] NUMASAWA K, KIZUKA T, ONO S. The Influence of the Motor Command Accuracy on the Prediction Error and the Automatic Corrective Response[J]. Physiology & Behavior, 2022, 250(1).
[15] SHAN J Z, CHE Z Y, LIU F B. Accurate Rotor Temperature Prediction of Permanent Magnet Synchronous Motor in Electric Vehicles Using a Hybrid RIME-XGBoost Model[J]. Applied Sciences, 2025, 15(7).
[16] 石力王. 考虑电机温度变化的车用永磁同步电机精确转矩控制方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
SHI L W. Research on Precise Torque Control Method of PMSM for Vehicles Considering Motor Temperature Variation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.

（责任编辑　斛　畔）
修改稿收到日期为2026年3月6日。

《汽车工程师》征稿启事

《汽车工程师》于1974年创刊，是由中国第一汽车集团有限公司主管、中国第一汽车股份有限公司主办的国内外公开发行的汽车应用技术类学术期刊，为RCCSE中国准核心学术期刊、CACJ中国应用型扩展期刊，被哥白尼精选数据库、EBSCO学术数据库、欧洲学术出版中心（EuroPub）数据库、J-Gate数据库收录。

《汽车工程师》以报道汽车产品设计领域的技术研究成果为主，专注于技术开发与应用层面的创新成果，提供汽车设计创新解决方案。《汽车工程师》将把握电动化、智能化、网联化、共享化的汽车技术主流发展趋势，努力吸收优质稿源，为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。重点征稿方向包括：锂离子电池与新体系电池、动力电池热管理与热失控、燃料电池及其关键零部件、车用电机及其控制器、自动驾驶汽车环境感知与感知融合、自动驾驶汽车定位与建图、自动驾驶汽车测试、人工驾驶-无人驾驶车辆混行条件下的自动驾驶控制、智能线控底盘、一体化底盘、功能安全和预期功能安全。

热忱欢迎汽车行业的专家学者不吝赐稿，反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将优先发表，我们期待与您共同践行“把论文写在祖国大地上”的指示精神，为强大中国汽车工业作贡献！

本刊使用协同采编系统处理稿件，请登陆期刊网站注册后投稿，投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏目的作者指南，网址：http://tjqc.cbpt.cnki.net。

《汽车工程师》编辑部