

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.05.010

多轮独立电驱动车辆 ABS/ASR 集成控制研究

廖自力, 刘 栋, 阳贵兵, 陈路明
(装甲兵学院 控制工程系, 北京 100072)

摘要:针对多轮独立电驱动车辆驱动和制动过程中车轮滑转或滑移的问题,提出了基于最优滑转率控制的 ABS/ASR 集成控制策略。通过将电机与机械制动器简化为采用转矩控制的一阶动态系统模型,结合多轮独立电驱动车辆单轮模型,建立了被控系统精确的数学模型;在此基础上,采用模糊滑模控制理论设计了 ABS/ASR 集成控制算法,将驱动防滑和制动防抱死功能集成到控制器中,实现了对驱动力矩和制动力矩的调节,使车轮滑转率跟踪最优滑转率;最后采用多体动力学软件 Adams/View 与控制软件 Matlab/Simulink 进行机电联合建模与仿真实验。仿真研究结果表明:ABS/ASR 集成控制能够在车辆低速起步阶段或紧急制动时有效控制车轮滑转率,提高了车辆的动力性和制动性。

关键词:多轮独立电驱动;ABS/ASR 集成控制;模糊滑模控制;机电联合仿真

中图分类号:TH39;TJ811+.91;TP273

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)05-0494-07

Integrated control of ABS and ASR for multi-wheel independent electric drive vehicle

LIAO Zi-li, LIU Dong, YANG Gui-bing, CHEN Lu-ming

(Department of Control Engineering, Academy of Armored Force, Beijing 100072, China)

Abstract: Aiming at solving the problem of wheel slipping during driving and braking, an integrated control strategy of ABS and ASR based on optimal slip control was proposed for multi-wheel independent electric drive vehicle. By using the first-order dynamic system model of torque control and the single-wheel model of multi-wheel independent electric drive vehicle, the precise mathematical model of the controlled object was established. Based on this mathematical model and the theory of fuzzy sliding mode control, the integrated control algorithm of ABS and ASR was designed to adjust the output torque of motor and brake. The integrated control strategy and algorithm was verified through a sort of electromechanical joint simulation experiment based on the dynamics simulation software Adams and the control simulation software Matlab. The results indicate that integrated control of ABS and ASR is efficient at controlling the slip ratio of wheel, which improves the acceleration and braking performance of vehicle.

Key words: multi-wheel independent electric drive; integrated control of ABS and ASR; fuzzy sliding mode control (FSMC); electromechanical joint simulation

0 引 言

驱动防滑控制(ASR)和制动防抱死控制(ABS)是多轮独立电驱动车辆行驶控制的重要环节,能够提高车辆的动力性和制动性^[1]。与传统机械传动车辆不同,多轮独立电驱动车辆以轮毂电机为主要执行机构,

结合机械制动系统实现驱动和制动,一方面快速而精确的电机转矩控制可以加快控制响应,另一方面车辆采用机电联合制动,防滑控制对象是电机、机械制动器及车轮构成的非线性系统,增加了制动防抱死控制难度。

目前,电驱动车辆防滑控制的相关研究主要集中

收稿日期:2017-10-11

作者简介:廖自力(1974-),男,湖南宁乡人,副教授,博士生导师,主要从事电气工程及其自动化方面的研究。E-mail:17611322701@163.com

于驱动或制动单一工况下的防滑控制研究。KOS 等^[2]对采用电机和电助力制动器的轮毂电机驱动车辆 ABS 协调控制策略进行了研究,进而求解最大制动力矩限幅及该附着条件下的制动器制动压力,实现了对电机制动力矩和制动器制动力矩的最大可传递转矩控制,提高了制动稳定性;吴玲等^[3]将模糊 PID 控制应用于电驱动车辆制动防抱死控制中,解决了 PID 控制参数自适应整定的问题,但容易造成电机转矩输出的剧烈抖振;王国业等^[4]采用模糊控制设计了常规 ABS 模糊控制器及模糊补偿控制器,构成了 ABS 闭环控制系统的模糊直接自适应控制器,算法简单且鲁棒性强,但控制精度较低;阳贵兵等^[5]采用滑模变结构控制算法进行了复杂路况条件下的多轮独立电驱动车辆驱动防滑控制研究,通过设计趋近律的方法削减变结构控制抖振,系统抗干扰能力和鲁棒性增强。

对于多轮独立电驱动车辆,电机转矩、转速等信息可以准确快速反馈,结合车速等状态参数估计,可以实时计算车轮滑转率,通过路面识别估计最优滑转率,易于实现最优滑转率控制,而最优滑转率控制方法在车辆 ABS 与 ASR 中的应用基本一致,都是先进行最优滑转率估计,再根据滑转率误差及误差变化率对驱动力或制动力进行控制,控制目标相对统一,便于实现车辆 ABS/ASR 集成控制;另外,滑模变结构控制(SMC)具有较强的鲁棒性,适用于非线性系统的控制。

因此,笔者将采用最优滑转率控制的方法,基于模糊滑模控制(FSMC)理论设计 ABS/ASR 集成控制算法,利用动力学仿真软件 Adams/View 和控制软件 Matlab/Simulink 分别搭建车辆动力学模型和控制系统模型,通过机电联合仿真以验证控制策略的有效性。

1 车辆系统数学模型

对于多轮独立电驱动车辆,电机、机械制动器及传动机构集成于车轮内,电机与机械制动器实际输出力矩通过一定传动比加载到车轮上,ABS/ASR 防滑控制对象是由电机、机械制动器及车轮组成的非线性系统。为便于算法的实现,不考虑执行机构即电机和机械制动器本身的控制问题,都采用转矩控制方式,将其数学模型简化为带惯性环节的一阶动态系统模型,通过响应时间常数描述电机转矩和机械制动器的转矩响应速度。

分布式电驱动车辆的单轮模型如图 1 所示。

数学模型如下:

$$J\dot{\omega} = \varepsilon_1 T_e + \varepsilon_2 T_m - r(F_x + F_r) \quad (1)$$

$$T_e = (T_{ref_e} - T_e)\tau_1 \quad (2)$$

$$T_m = (T_{ref_m} - T_m)\tau_2 \quad (3)$$

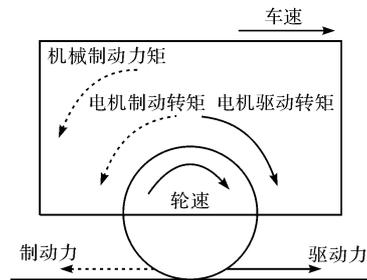


图 1 单轮车辆模型

式中: m —整车质量在单轮的分量(按照整车质量的 1/8 平均分配); v —车辆纵向速度; ω —车轮角速度; J —车轮转动惯量; r —轮胎有效半径; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ —电机和机械制动器输出传动比; T_e —电机实际输出转矩; T_m —机械制动器实际输出力矩; T_{ref_e} —电机转矩参考值; T_{ref_m} —机械制动力矩参考值; F_x —车轮纵向驱动力, $F_x = ma_x$; F_r —车轮的滚动阻力, $F_r = c_r \omega$; c_r —滚动阻力系数; τ_1, τ_2 —电机和机械制动器响应时间常数。

2 ABS/ASR 集成控制

以车轮滑转率或滑移率为控制目标,根据最优滑转率控制的基本结构设计 ABS/ASR 集成控制系统结构,如图 2 所示。

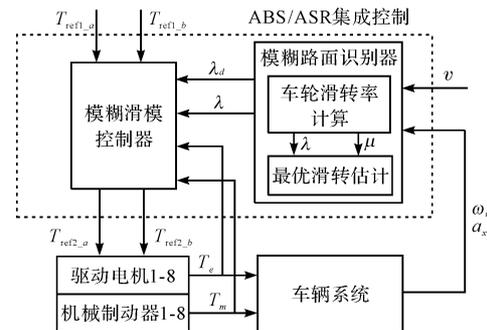


图 2 ABS/ASR 集成控制系统结构

由图 2 可见,ABS/ASR 集成控制系统由模糊路面识别器和模糊滑模控制器两部分构成,以预分配驱动力矩 T_{ref1_a} 、制动力矩 T_{ref1_b} 为输入,通过集成控制算法计算出优化驱动力矩 T_{ref2_a} 、制动力矩 T_{ref2_b} ,作为电机和机械制动器的转矩给定。

车辆及电机反馈状态参数包括车轮角速度 ω 、车辆纵向加速度 a_x 、电机实际输出转矩 T_e 、机械制动器实际输出力矩 T_m ,模糊路面识别器根据角速度及加速度信号,结合车辆纵向速度估计^[6],先计算车轮滑转率 λ 和路面附着系数 μ ,在以这两个参数为输入,通过模糊控制规则对路面参数最优滑转率 λ_d 进行估计,具体识别算法参考文献[7];模糊滑模控制器则以 $\lambda_d, \lambda, T_{ref1_a}, T_{ref1_b}, T_e, T_m$ 为输入,通过集成控制算法计算 T_{ref2_a}, T_{ref2_b} 。

2.1 模糊滑模控制理论

针对滑模变结构控制系统抖振问题,国内研究者提出了许多方法,例如采用准滑模动态、切换项增益自适应整定等方法。切换项增益模糊化是一种逻辑较为简单且抗抖振能力较强的方法,通过模糊规则调节切换项增益,削弱系统抖振,如 ZHUANG K Y 等^[8] 利用模糊控制对系统的不确定项进行在线估计,实现了切换增益的自适应调整,保证系统滑模到达条件的同时降低了系统抖振,且模糊方法可以不依靠被控对象模型,能够比较容易地将人的控制经验通过模糊规则导入控制器。因此,笔者采用基于等效控制的模糊滑模控制作为 ABS/ASR 集成控制算法。

基于等效控制的模糊滑模控制的控制机理^[9]:首先,通过设计合适的滑模面(切换面),将系统始于任何初始位置的状态轨迹引导至滑动模面上,实现滑模控制;其次,通过模糊规则设计对控制器的切换项增益进行调节。等效滑模控制输出 u 由等效控制项 u_{eq} 和切换控制项 u_s 组成,即 $u = u_{eq} + u_s$,其中,等效控制保证系统状态处于滑模面上,而切换控制则迫使系统状态在滑模面上滑动^[10],保证了滑模控制的鲁棒性,但同时也造成系统抖振,在等效滑模控制的基础上,引入模糊系数 α ,利用模糊规则对切换控制项进行模糊化处理,实现切换项增益自适应调节,使其在干扰较大时增大,在干扰较小时减小,在保证系统鲁棒性的同时减小抖振。

模糊滑模控制结构如图 3 所示。

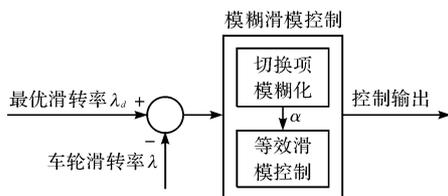


图 3 模糊滑模控制结构

2.2 模糊滑模控制器设计

2.2.1 控制器结构

传统 ABS/ASR 多采用逻辑门限控制,当控制目标高于门限值时,ABS/ASR 工作,控制器输出为根据控制算法计算得到的防滑控制转矩,当控制目标低于门限值时,ABS/ASR 不工作,控制器输出为预分配转矩,以确保车辆在附着条件较好路面正常行驶过程中的驱动能力和制动能力。传统液压制动系统的增压、保压、减压循环控制方式虽然响应速度慢,控制滞后,但在防滑控制转矩与预分配转矩切换时不会出现很大的抖振,而电机转矩调节响应快速,当控制逻辑判断 ABS/ASR 不工作时,防滑控制转矩与预分配转矩之间

的开关切换方式存在跳跃性,容易造成控制器输出转矩的剧烈抖振,这对于车辆的驱动和制动性能有着不利影响,因此需要在两者之间增加一个平滑切换函数,对两者进行加权处理,使得控制输出变化平缓,以减小控制器输出抖振。

模糊滑模控制器结构如图 4 所示。

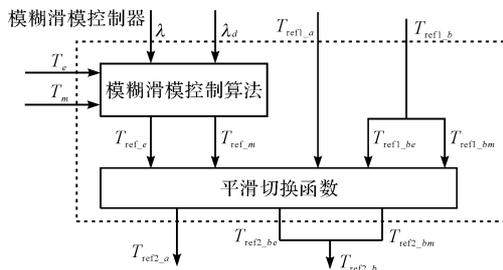


图 4 模糊滑模控制器结构

由图 4 可见,通过模糊滑模控制算法计算输出的防滑控制转矩包括电机转矩参考值 T_{ref_e} 和机械制动力矩参考值 T_{ref_m} 。

模糊滑模控制器输出的优化驱动力矩 T_{ref2_a} 和制动力矩 T_{ref2_b} 分别为:

$$\begin{cases} T_{ref2_a} = (1 - \zeta(\Delta\lambda))T_{ref1_a} + \zeta(\Delta\lambda)T_{ref_e} & (4) \\ T_{ref2_{be}} = (1 - \zeta(\Delta\lambda))T_{ref1_{be}} + \zeta(\Delta\lambda)T_{ref_e} & (5) \\ T_{ref2_{bm}} = (1 - \zeta(\Delta\lambda))T_{ref1_{bm}} + \zeta(\Delta\lambda)T_{ref_m} \end{cases}$$

相关物理量通过预分配转矩与防滑控制转矩按照一定权重相加的形式表示。其中,平滑切换函数 $\zeta(\Delta\lambda)$ 值越小,预分配转矩占比例越大,相反防滑控制转矩占比例越大。

当车轮剧烈滑转或抱死,防滑控制转矩的权重应为 1,当车轮运动状态良好,基本不发生打滑或抱死,为确保车辆正常的驱动、制动性能,使行驶更加平稳,防滑控制转矩权重应为 0,当车轮的滑转状态介于两者情况之间,应根据车轮滑转或滑移程度确定防滑控制转矩与预分配转矩的权重,因此,设置平滑切换函数 $\zeta(\Delta\lambda)$ 为滑转率误差 $\Delta\lambda$ 的函数,取值范围为 $[0,1]$,如下式所示:

$$\begin{cases} \zeta(\Delta\lambda) = 0 & |\Delta\lambda| \leq \Delta\lambda_1 \\ \zeta(\Delta\lambda) = \frac{e^{|\Delta\lambda|\rho} - e^{|\Delta\lambda_1|\rho}}{e^{|\Delta\lambda_2|\rho} - e^{|\Delta\lambda_1|\rho}} & \Delta\lambda_1 < |\Delta\lambda| \leq \Delta\lambda_2 \\ \zeta(\Delta\lambda) = 1 & |\Delta\lambda| > \Delta\lambda_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$ —滑转率误差上下限; ρ —权重因子。

通过调节参数 ρ 可以改变权重的计算值,当 $|\Delta\lambda| \leq \Delta\lambda_1$ 时, $\zeta(\Delta\lambda) = 0$,防滑控制转矩权重为 0,防滑控制不起作用,当 $\Delta\lambda_1 < |\Delta\lambda| \leq \Delta\lambda_2$ 时,根据 $\Delta\lambda$ 值进行权重计算,当 $\Delta\lambda_2 < |\Delta\lambda|$ 时, $\zeta(\Delta\lambda) = 1$,预分配转矩权

重为0,完全采用防滑控制输出。

2.2.2 控制律设计

根据前文中建立被控对象数学模型,设状态变量 $x_1 = \omega, x_2 = T_e, x_3 = T_m, x_{1d} = \omega_d, u_1 = T_{ref_e}, u_2 = T_{ref_m}, \omega_d$ 为车轮角速度参考值,令 $a_1 = \varepsilon_1/J, a_2 = \varepsilon_2/J, a_3 = mr/J, a_4 = c_r r/J$,系统的状态方程可写为:

建立如下被控对象状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 x_2 + a_2 x_3 - a_3 a_x - a_4 x_1 \\ \dot{x}_2 = -\tau_1 x_2 + \tau_1 u_1 \\ \dot{x}_3 = -\tau_2 x_3 + \tau_2 u_2 \end{cases} \quad (7)$$

$e = x_{1d} - x_1 = \omega_d - \omega$,选取滑模面 s :

$$s = \dot{e} + ce = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1 + ce \quad (8)$$

其中, $c > 0$ 。则有:

$$\dot{s} = \ddot{\omega}_d - f(x_1, x_2, x_3) - g(u_1, u_2) - d(t) + c\dot{e} \quad (9)$$

$$f(x_1, x_2, x_3) = -(a_1 \tau_1 + a_1 a_4) x_2 - (a_2 \tau_2 + a_2 a_4) x_3 + a_4^2 x_1 \quad (10)$$

$$g(u_1, u_2) = a_1 \tau_1 u_1 + a_2 \tau_2 u_2 \quad (11)$$

$$d(t) = a_3 a_4 a_x - a_3 \dot{a}_x \quad (12)$$

式中: $d(t)$ —系统总扰动; $|d(t)| \leq D; D$ —干扰的界。

取 $\dot{s} = 0, \beta$ 为切换项增益,等效控制律一般设计为:

$$u = u_{eq} + u_s \quad (13)$$

$$u_{eq} = \frac{1}{a\tau}(c\dot{e} + \ddot{x}_{1d} - f(x_1, x_2, x_3)) \quad (14)$$

$$u_s = \frac{1}{a\tau}\beta \text{sgn}(s) \quad (15)$$

考虑车辆驱动、制动工况下机电力矩的分配,将防滑控制转矩按照预分配转矩中机电力矩的分配比例进行分配,即:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{T_{ref1_{be}} + T_{ref1_{a}}}{T_{ref1_{bm}}} \quad (16)$$

建立模糊系统,输入为滑模函数 s ,输出为切换控制的模糊系数 α ,其模糊规则如下:

If s is N then α is P (a)

If s is Z then α is Z (b)

If s is P then α is P (c)

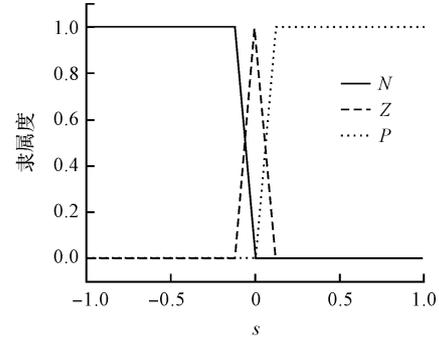
其中,模糊子集 Z、N、P 分别表示“零”“负”“正”,若系统受到干扰极小, $\alpha = 0$,此时控制律只由等效控制项构成;若系统受到干扰大, $\alpha > 0$,此时控制律由等效控制项和切换控制项构成。

输入/输出隶属度函数如图5所示。

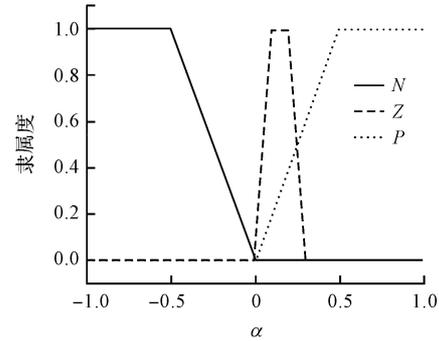
模糊滑模控制律设计为:

$$u = u_{eq} + \alpha \cdot u_s \quad (17)$$

联立式(14~17),得到防滑控制输出的8个轮毂



(a) 滑模函数s隶属度函数



(b) 切换项模糊化系数alpha隶属度函数

图5 输入/输出隶属度函数

电机和机械制动器的转矩参考值为:

$$T_{ref_e} = \frac{T_{ref1_{be}} + T_{ref1_{a}}}{a_1 \tau_1 (T_{ref1_{be}} + T_{ref1_{a}}) + a_2 \tau_2 T_{ref1_{bm}}}(c\dot{e} + \ddot{x}_{1d} + (a_1 \tau_1 + a_1 a_4) x_2 + (a_2 \tau_2 + a_2 a_4) x_3 - a_4^2 x_1 + \alpha \cdot \beta \text{sgn}(s)) \quad (18)$$

$$T_{ref_m} = \frac{T_{ref1_{bm}}}{a_1 \tau_1 (T_{ref1_{be}} + T_{ref1_{a}}) + a_2 \tau_2 T_{ref1_{bm}}}(c\dot{e} + \ddot{x}_{1d} + (a_1 \tau_1 + a_1 a_4) x_2 + (a_2 \tau_2 + a_2 a_4) x_3 - a_4^2 x_1 + \alpha \cdot \beta \text{sgn}(s)) \quad (19)$$

综合式(4,5,18,19),即可得出 ABS/ASR 集成控制输出的优化驱动力矩 $T_{ref2_{a}}$ 、制动力矩 $T_{ref2_{b}}$ 。

3 机电联合仿真分析

为充分验证 ABS/ASR 集成控制算法的有效性,本研究利用 Adams/View 与 Matlab/Simulink 联合仿真平台^[11],分别设计驱动防滑控制仿真实验和制动防抱死控制仿真实验,主要观察驱动和制动过程中,ABS/ASR 集成控制算法能否有效调节驱动力和制动力。

通过 Matlab/Simulink 与 ADAMS/View 软件接口搭建的联合仿真模型如图6所示。

3.1 驱动防滑控制仿真

车辆在路面最大附着系数为 $\mu = 0.2$ 的低附着路面起步后直线加速行驶,仿真时间设置为 20 s,加速踏板信号 $\eta = 1$,以左侧车轮为观察对象,实验结果如图7所示。

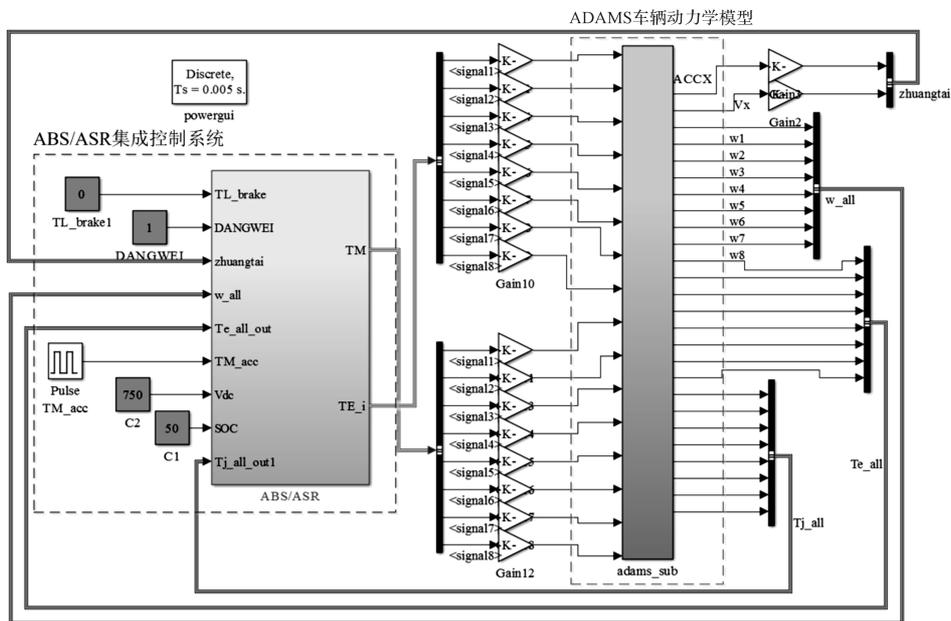


图 6 联合仿真模型

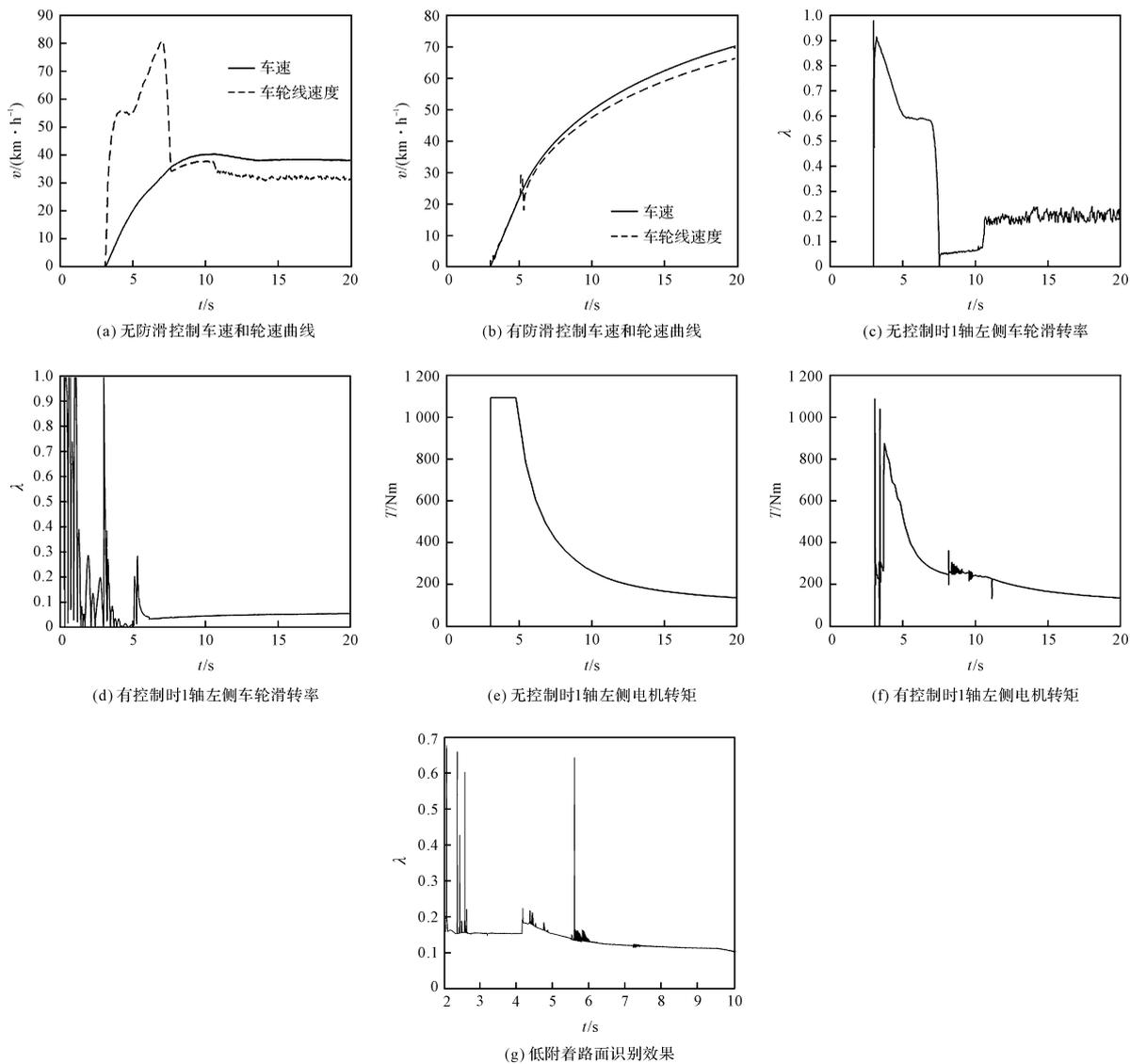


图 7 低附着路面直线加速行驶实验

图7(a~f)分别记录了无防滑控制和有防滑控制时车速与车轮线速度、车轮滑转率和电机输出转矩的仿真结果。由图7(a,c,e)可以看出:无防滑控制时,电机输出转矩为驾驶员给定的预分配驱动力矩,车轮线速度与车速出现较大差值,车轮发生较大滑转,20 s时车速最大值约为39 km/h;由图7(b,d,f)可以看出:加入防滑控制后,控制器快速调节预分配驱动力矩,此时电机输出转矩迅速响应,车轮滑转率快速降低并稳定在0.1左右,随后防滑控制不参与转矩调节,车速最大值达到70 km/h;图7(g)为路面识别效果,模糊识

别的路面最优滑转率与实际最优滑转率的理论值大致接近。对比仿真结果可以看出:ABS/ASR集成控制在车辆驱动过程中能够有效调节驱动力矩,控制车轮滑转率,提高车辆的动力性能。

3.2 制动防抱死控制仿真

仿真时间设置为20 s,车辆在路面最大附着系数为 $\mu = 0.2$ 的低附着路面开始直线加速行驶至32 km/h,随后紧急制动,制动强度 $\delta = 1$,以1轴左侧车轮为观测对象,仿真结果如图8所示。

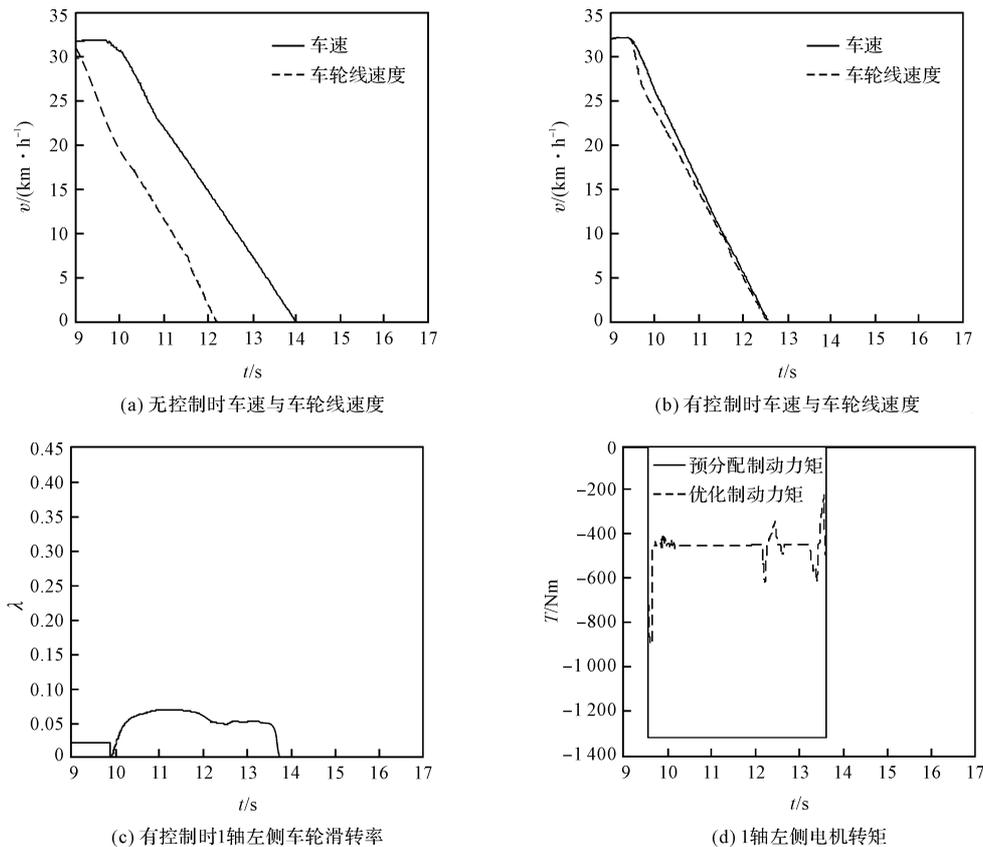


图8 紧急制动实验

1轴左侧车轮滑转率如图8(c)所示,在防滑控制作用下,车速和车轮线速度偏差逐渐减小,车轮滑转率基本不超过0.1;1轴左侧机械制动力矩如图8(d)所示,制动开始后,防滑控制迅速降低转矩输出,优化制动力矩明显低于驾驶员给定的预分配制动力矩,从制动开始至停车时间约为3.6 s,相比于无防滑控制时制动时间明显缩短。

4 结束语

笔者针对多轮独立电驱动车辆的防滑控制问题,根据最优滑转率控制的基本结构设计了ABS/ASR集成控制系统,基于模糊滑模控制理论设计了集成控制算法,实现了驱动防滑和制动防抱死功能的集成;通过Adams与Matlab机电联合仿真对集成控制进行了驱

动防滑控制和制动防抱死控制的仿真实验,结果表明:ABS/ASR集成控制算法能够有效调节驱动力矩或制动力矩,控制车轮滑转率。

文中制动防抱死控制研究只针对多轮独立电驱动车辆的紧急制动工况进行了仿真验证,而实际车辆运行过程中由于采用了机电联合制动,不同制动工况下制动方式有较大差别,防滑控制复杂程度增加,下一步将针对车辆不同制动工况下的ABS/ASR集成控制开展研究。

参考文献(References):

- [1] 褚文博,罗禹贡,赵峰,等.分布式驱动电动汽车驱动转矩协调控制[J].汽车工程,2012,34(3):185-189,196.
- [2] KO S, SONG C, KIM H. Cooperative control of the motor

and the electric booster brake to improve the stability of an in-wheel electric vehicle[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2017, 17(3):446-456.

- [3] 吴玲, 闻凯, 董敏, 等. 自适应模糊 PID 控制在汽车 ABS 系统中的应用[J]. *自动化技术与应用*, 2016, 35(1):26-37.
- [4] 王国业, 刘昭度, 胡仁喜, 等. 基于等效滑移率变化率的汽车防抱制动系统模糊直接自适应控制[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(11):242-247.
- [5] 阳贵兵, 廖自力, 马晓军, 等. 多轮独立电驱动车辆驱动力优化控制研究[J]. *兵工学报*, 2016, 37(1):23-30.
- [6] 阳贵兵. 8×8 轮毂电机驱动车辆转向控制技术研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院控制工程系, 2016.
- [7] 刘栋, 廖自力, 郑显柱, 等. 用于轮毂电机驱动车辆防滑

控制的路面识别算法研究[C]. 第四届特种车辆全电化技术发展论坛, 宁波: 北方车辆研究所, 2016.

- [8] ZHUANG K Y, SU H Y, CHU J, et al. Globally stable robust tracking of uncertain systems via fuzzy integral sliding mode control[C]. *Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation*, Hefei: IEEE, 2000.
- [9] 刘金琨. 滑模变结构控制 Matlab 仿真: 基本理论与设计方法[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [10] 戴彦. 汽车 ABS 滑移率的模糊滑模控制研究[J]. *机械设计与制造*, 2015(6):80-82.
- [11] 王正林, 王胜开, 陈国顺, 等. Matlab/Simulink 与控制系统仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.

[编辑: 张 豪]

本文引用格式:

廖自力, 刘栋, 阳贵兵, 等. 多轮独立电驱动车辆 ABS/ASR 集成控制研究[J]. *机电工程*, 2018, 35(5):494-500.

LIAO Zi-li, LIU Dong, YANG Gui-bing, et al. Integrated control of ABS and ASR for multi-wheel independent electric drive vehicle[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 35(5):494-500.

《机电工程》杂志; <http://www.meem.com.cn>

(上接第 468 页)

热电偶测得最高温升分别为 243.8 °C 和 162 °C。总结得: K 型热电偶且埋在钳块中部, 载重 3 t, 额定速度为 2.5 m/s, 最高温升在 67 °C ~ 70 °C; K 型热电偶且埋在钳块中部, 载重 4 t, 额定速度为 2.5 m/s, 最高温升在 77 °C ~ 80 °C; J 型热电偶且埋在钳块上部中间沟槽处, 载重 4 t, 额定速度为 2.5 m/s, 最高温升在 223 °C ~ 225 °C。从图 10(c) 和图 10(d) 可知: 钳块上部中间的沟槽里, 测得温度更符合, 同时也可看出 J 型热电偶相较于 K 型更合适。

4 结束语

本文研究了菱形表面安全钳制动过程的温升测量方法, 从仿真分析和试验角度分别测量安全钳制动过程中其表面温升变化。

研究表明: 额定速度在 2.5 m/s 以下的制动温升试验, 测量温度传感器宜用 J 型热电偶, 并将其埋在钳块上部第二排菱形凸起的中间沟槽里, 测得的最高温度与仿真结果基本相符, 同时由温度记录仪显示最高温升发生在制动开始阶段, 钳块温升最高区域在其上部第 1 排菱形块到第 3 排之间, 可对此区域的钳块表层进行特殊处理并增加菱形凸起间的缝隙以保证散热。

参考文献 (References):

- [1] BOWDEN F P, THOMAS P H. The surface temperature of sliding solids[J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 1954, 223(1152):29-40.
- [2] LIM S C, ASHBY M F, BRUNTON J F. The effect of sliding conditions on the dry friction of metals[J]. *Acta Metallurgica*, 1989, 37(3):767-772.
- [3] MOLINARI A, ESTRIN Y, MERCIER S. Dependence of the coefficient of friction on sliding conditions in the high velocity range[J]. *Journal of Tribology*, 1999, 121(1):35-41.
- [4] 李根义, 詹佳, 杨子江. 基于热流密度加载的防爆升降安全钳制停温升仿真分析[J]. *机电设备*, 2015(s1):39-42.
- [5] 倪陆, 张清鹏. 防爆电梯轿厢安全钳制动摩擦温升的仿真分析[J]. *国外电子测量技术*, 2010, 29(11):21-23.
- [6] 姚俊, 薛季爱, 江浩, 等. 防爆电梯安全钳制停摩擦温升数值模拟与实验研究[J]. *机电一体化*, 2011(12):13-17.
- [7] 金川, 史熙. 高速电梯安全钳制动摩擦温升的有限元分析[J]. *机械设计与研究*, 2015, 31(2):136-139.
- [8] 李龙. 温度对轮轨摩擦副摩擦系数和磨损的影响研究[D]. 兰州: 兰州交通大学机电工程学院, 2015.

[编辑: 周昱晨]