

分布式电驱动重载车辆复合转向容错控制策略研究*

李军求¹, 陈胜玥¹, 陈建文², 杨永喜¹, 李潇汉¹

(1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 江麓机电集团有限公司, 湘潭 411100)

[摘要] 分布式电驱动重载车辆采用转向助力电机和轮端驱动电机差动实现复合转向, 通过对多电机协调控制实现多种主动安全控制功能并降低驾驶员操纵负担。针对驱动电机和转向助力电机失效故障带来的行驶安全性问题, 本文提出一种包含模式切换和容错转矩分配的容错控制策略。所提模式切换策略依据车辆位姿信息, 引入横摆角速度残差函数作为容错模式的切换条件; 所提容错转矩分配策略考虑输出冗余和整车稳定性, 求解驱动电机和转向助力电机的目标输出转矩。最后, 搭建硬件在环仿真平台验证了控制策略的有效性和实时性。

关键词: 分布式驱动; 复合转向; 执行器失效故障; 容错控制

Study on Fault-Tolerant Control Strategy of Composite Steering for Heavy Load Vehicles with Distributed Electric Drive

Li Junqiu¹, Chen Shengyue¹, Chen Jianwen², Yang Yongxi¹ & Li Xiaohan¹

1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;

2. Jianglu Electromechanical Group Co., Ltd., Xiangtan 411100

[Abstract] Distributed electrically-driven heavy-duty vehicles achieve compound steering through the differential between the steering assist motor and the wheel-end drive motor. By means of coordinated control of multiple motors, various active safety control functions are realized and the driver's operational burden is reduced. For the driving safety issues brought about by the failure of the drive motor and the steering assist motor, in this paper a fault-tolerant control strategy encompassing mode switching and fault-tolerant torque distribution is proposed. The proposed mode-switching strategy, based on the vehicle pose information, introduces in the yaw rate residual function as the switching condition for the fault-tolerant mode. The proposed fault-tolerant torque distribution strategy takes into account of the output redundancy and the vehicle's stability to solve for the target output torque of the drive motor and the steering assist motor. Finally, a hardware-in-the-loop simulation platform is established to verify the effectiveness and real-time performance of the control strategy.

Keywords: distributed drive; compound steering; actuator failure; fault-tolerant control

前言

分布式电驱动相较于集中驱动, 摆脱了机械传动系统布置的限制, 具有集成度高、传动效率高、可

拓展性强的优势^[1], 在特种运输、大件运输等军用、民用领域潜力巨大。此外分布式电驱动相较于集中式驱动, 两侧车轮转矩独立可控, 可实现驱动防滑、直接横摆力矩控制等多种主动安全控制功能^[2-4], 还能通过差动转向技术 (differential drive steering,

* 国家重点研发计划项目(2021YFB2501801)和国家自然科学基金(52072037)资助。

原稿收到日期为2024年06月02日, 修改稿收到日期为2024年10月17日。

通信作者: 李军求, 教授, 博士, E-mail: lijunqiu@bit.edu.cn。

DDS)与转向助力电机协同作用实现复合转向,在降低驾驶员操纵负担的同时为转向系统提供冗余^[5-6],在稳定性控制方面具有优越性。但由于引入了驱动电机、转向助力电机及控制器等电子部件,相比于采用液压助力转向或电液助力转向的传统车辆,其系统故障概率高,可靠性降低^[7]。转向助力电机或驱动电机发生失效故障时,将导致转向助力减弱或由于两侧驱动力不对等产生附加横摆力矩,影响车辆横摆稳定性,如果不采取合理的容错方法,极易造成车辆失稳。因而,研究针对电机故障的容错控制技术,是保障分布式电驱动重载车辆行驶安全的重要途径。

容错控制的主要思想是考虑系统故障失效的情形,设计相应策略保证系统稳定性与可靠性^[8]。对于以电机作为执行器的系统,先前的研究多以精确诊断单个电机故障类别为目标,提出了基于信号处理^[9-11]、基于模型分析^[12-13]和基于智能算法^[14-16]的多种故障诊断与隔离(fault detection and isolation, FDI)方法。但上述方法依赖 FDI 提供的实时故障信息,且故障诊断和切换控制需要一定响应时间,难以保证车辆在高速过弯等紧急情况下容错控制的实时性^[17]。研究者们为提高故障检测和故障诊断的时效性,提出了面向不同执行器故障的通用被动容错控制方法^[18],并基于模型预测控制(model predictive control, MPC)补偿执行器故障,以维持车辆的跟踪性能^[19],从而保证执行器故障未准确定位之前车辆的稳定性与可接受的性能表现。此类方法为整车状态参数在故障干扰下出现较大瞬时波动时,先行切换为容错控制策略以减小行驶风险提供了启发。

分布式电驱动车辆容错控制采用模式切换的方式:系统检测到故障后,主动隔离故障以削弱故障对整个系统的影响,使系统的性能接近或恢复正常水平。早期研究者对被动容错控制开展研究,主要采用鲁棒控制^[20]、滑模控制(sliding mode control, SMC)等方法,在一定程度上牺牲系统的工作性能,以保证整体运行稳定可靠^[21-22]。主动容错控制要求构建精度较高的故障诊断(fault diagnosis, FD)系统,通过在线的故障信息重构控制器或调节控制信号,以保证系统的稳定性和性能指标。其中文献[23]提出了一种无模型自适应主动容错控制方法,在不同失效工况下通过驱动与转向协调控制,保证车辆在转向失效时既不降低车速,又不会大幅偏离原定轨迹。文献[24]中针对分布式驱动车辆线控转向失效容错控制问题,提出了基于滑模控制理论的直接横摆力矩控制和差速转向控制方法,得到了车辆稳定性和

DSS所需的前轮直接横摆力矩和差速驱动力矩。

综上所述,复合转向系统执行器失效故障容错控制问题有以下3个特点:一是差动转向为转向系统提供冗余,通过驱动电机和转向助力电机协调控制,为转向助力电机或转向桥驱动电机失效时保持转向助力提供了基础;二是车辆切换为容错控制模式需要较快的响应速度以减少轨迹横向偏移,传统基于故障诊断的方法难以满足高速过弯等紧急情况下实时性需求;三是重载车辆驱动电机、转向助力电机及其多种组合形式发生失效故障,造成车辆失稳的机理不同,整车可控性和动态响应也存在差异,传统基于故障分类的容错控制方法^[25]难以兼顾实时性和鲁棒性。

本文针对采用复合转向的分布式电驱动重载车辆行驶安全性的问题,提出统一考虑驱动电机和转向助力电机两种执行器失效故障的转向工况容错控制策略。该策略分析了驱动电机、转向助力电机及其多种组合形式失效故障对整车横摆稳定性的影响,引入横摆角速度残差函数作为转矩分配策略模式的切换条件;设置失效因子以实现失效执行器的故障隔离,以整车附着利用率与转向冗余为目标构建容错转矩分配优化,改善执行器失效故障下主动与被动容错性能,提高重载车辆转向工况行驶的安全性。

1 车辆动力学建模

本文所研究的对象为非铰接式重载车辆,采用12×12分布式电驱动:每个车轮采用独立控制的轮边电机驱动,经行星减速器减速增转矩后驱动车轮行驶。车辆前两桥为转向桥,采用复合转向。

1.1 2自由度整车动力学模型

针对车辆转向工况执行器失效时的轨迹跟踪问题,为提高控制算法实时性,对车辆动力学模型进行适当简化,忽略车辆在垂直方向的平动、绕y轴的俯仰运动以及绕x轴的侧倾运动,建立考虑车辆纵向、横向以及横摆运动的2自由度动力学模型,如图1所示,其中 ω_r 为车身横摆角速度, v_x 和 v_y 分别为车辆坐标系下的横、纵向速度, F_{y_i} 和 α_i ($i=1,2,\dots,6$)分别为每轴侧向力和侧偏角, M_z 为附加横摆力矩。

$$\begin{cases} M(\dot{v}_y + v_x \omega_r) = \sum_{i=1}^6 F_{y_i} \\ I_z \dot{\omega}_r = \sum_{i=1}^6 F_{y_i} L_i + M_z \end{cases} \quad (1)$$

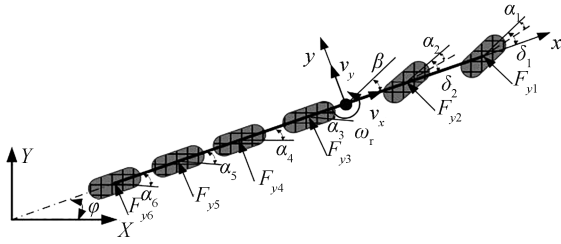


图1 六轴车辆2自由度动力学模型

式中 $M, I_{zz}, L_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 作为车辆固有属性分别为车辆总质量、绕质心 z 轴的转动惯量以及每轴到质心的纵向距离,以质心前取正,后取负。

当转向轴的车轮转角 δ 较小时, $\cos \delta \approx 1$, $\sin \delta \approx \delta$, 并假定车辆侧向加速度不大,轮胎工作在线性侧偏刚度区间,可以计算得到:

$$F_{yi} = C_i \left(\delta_i - \frac{v_y + L_i \omega_r}{v_x} \right) \quad (2)$$

式中 δ_i, C_i 分别为每轴的等效转角与侧偏刚度。

1.2 复合转向系统模型

本文研究的重载车辆前两桥为差动转矩协调转向助力电机的复合转向系统,如图2所示。

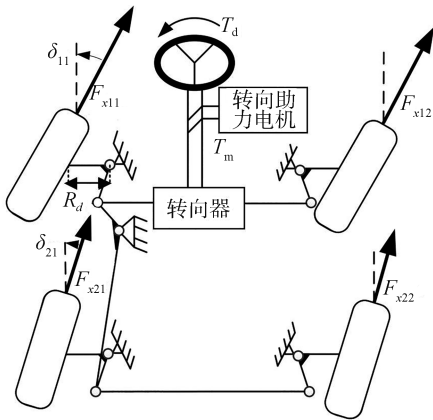


图2 复合转向系统模型

驾驶员通过转向盘输入转矩后,与转向助力电机输出的助力转矩叠加;同时两侧驱动电机输出差动转矩,通过主销向转向系统输出转向力矩。转向桥在驾驶员转矩、转向助力电机助力转矩和差动转矩的共同作用下实现转向操作。

一、二桥采用机械联动的方式,其转角关系近似为 $\delta_2 = p \cdot \delta_1$ 。忽略转向桥杆系刚度与阻尼,将转向系统等效为转向柱的转动。转向系统动力学方程可以表示为

$$I_s \ddot{\delta}_s + B_s \dot{\delta}_s = T_{a,1} + M_{zw} + T_{a,2} \quad (3)$$

式中: δ_s 表示转向柱转角; I_s 和 B_s 分别为转向系统等

效转动惯量和阻尼; $T_{a,1}$ 为轮胎差动转矩,是由于两侧车轮驱动力不对等产生的作用于转向主销的旋转力矩:

$$T_{a,1} = \sum_{i=1}^2 (F_{xw,i1} - F_{xw,i2}) \cdot d \quad (4)$$

式中 d 为考虑主销内倾角和主销后倾角的等效主销偏移距。

M_{zw} 为轮胎回正力矩,当轮胎工作在线性侧偏刚度区间时,可以近似计算为

$$M_{zw} = \sum_{i=1}^2 \frac{l^2}{3} C_{\alpha i} \alpha_i \quad (5)$$

其中: $C_{\alpha i}$ 为轮胎侧偏刚度; l 为轮胎的接地长度。

$T_{a,2}$ 为驾驶员施加的操作转矩和辅助电机固定助力比放大后的助力转矩之和:

$$T_{a,2} = K_d T_d \quad (6)$$

1.3 曲率扰动跟踪预测模型

构建曲率扰动跟踪预测模型,对模型进行线性化和离散化处理,从而获得预测时域内的系统输出和系统当前时刻的控制增量,是求解容错转矩分配策略中带约束优化问题,也是实现车辆轨迹跟踪的必要前提。

假设车辆以中高车速 ($v_x \geq 15 \text{ m/s}$) 行驶在良好附着且道路曲率变化较小的水平道路上。针对给定参考轨迹,轨迹跟踪的横向误差与航向误差表示为

$$\begin{cases} \dot{e}_\varphi = w_r - v_x \rho_r \\ \dot{e}_d = v_x e_\varphi + v_y \end{cases} \quad (7)$$

式中: ρ_r 为参考轨迹的曲率; e_φ 和 e_d 分别为车辆与目标路径之间的偏航角偏差和法线距离。

以 $\mathbf{x} = [v_y \quad r \quad \delta \quad \dot{\delta} \quad e_\varphi \quad e_d]^T$ 作为轨迹跟踪状态量, $u = T_{a,1}$ 作为控制量, $\mathbf{v} = [\rho_r \quad T_{a,2}]$ 作为外部可测扰动输入,可以得到曲率扰动跟踪预测模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_c \mathbf{x} + \mathbf{B}_{u,c} u + \mathbf{B}_{v,c} \mathbf{v} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}_c \mathbf{x} \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\mathbf{A}_c =$

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^6 C_{\alpha j} & & & & & \\ -\frac{\sum_{j=1}^6 C_{\alpha j}}{m v_x} & -\frac{a_1}{m v_x} - v_x & \frac{a_2}{m l N} & 0 & 0 & 0 \\ & \sum_{j=1}^2 \frac{L_j^2 C_{\alpha j}}{m v_x} & \frac{a_3}{I_{zz} N} & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{l^2 a_2}{3 I_s v_x N} & \frac{l^2 a_3}{3 I_s v_x N} & \frac{l^2 a_4}{3 I_s v_x N} & -\frac{B_s}{I_s} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & v_x & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{u,c} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_s} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$B_{v,c} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -v_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_s} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C_c = \text{diag}[1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$$

$$a_1 = \sum_{j=1}^2 L_j C_{\alpha j} - \sum_{j=3}^6 L_j C_{\alpha j} ; \quad a_2 = C_{\alpha 1} + p C_{\alpha 2}$$

$$a_3 = L_1 C_{\alpha 1} + p L_2 C_{\alpha 2} ; \quad a_4 = L_1 C_{\alpha 1} + p^2 L_2 C_{\alpha 2}$$

设离散状态下的采样时间为 T_s , 对上述连续状态空间方程使用零阶保持法离散:

$$\begin{cases} A_d = e^{A_c T_s} = L^{-1} \left\{ (sI - A_c)^{-1} \right\} \Big|_{t=T_s} \\ B_{u,d} = \left(\int_{\tau=0}^{T_s} e^{A_c \tau} d\tau \right) B_{u,c} = A_c^{-1} (A - I) B_{u,c} \\ B_{v,d} = \left(\int_{\tau=0}^{T_s} e^{A_c \tau} d\tau \right) B_{v,c} = A_c^{-1} (A - I) B_{v,c} \\ C_d = C_c \end{cases} \quad (9)$$

得到离散状态空间表达式为

$$\begin{cases} x(k+1) = A_d x(k) + B_{u,d} u(k) + B_{v,d} v(k) \\ y(k+1) = C_d x(k+1) \end{cases} \quad (10)$$

式中: I 为单位矩阵; k 为离散步长。

2 面向电机失效故障的容错转矩分配策略

采用复合转向的分布式电驱动重载车辆, 系统故障概率高, 硬件可靠性得不到有效的保证。如果不采取合理的容错方法, 转向助力电机失效时, 车辆将丧失转向能力; 驱动电机失效则会造成纵向驱动力损失, 并产生由于两侧驱动力不对等带来的附加横摆力矩, 影响行车横摆稳定性。因而本文提出一种面向输出冗余和整车稳定性的容错转矩分配策略。

2.1 基于残差阈值的模式切换策略

如图3所示, 车辆在正常工作状态中发生执行器失效故障, 须经过故障检测环节判断故障发生, 期间主要依靠系统的被动容错能力维持车辆稳定行驶。当车辆处于中高速转向工况 ($v_x \geq 15 \text{ m/s}$) 并发生电机失效故障时, 故障检测过程的耗时决定了被动容错状态下车辆轨迹横向偏移量的大小, 是决定车辆是否发生严重事故的关键参数。

在传统的故障处理过程中, 驱动电机和转向助力电机的故障检测依赖电机控制器反馈的故障码/

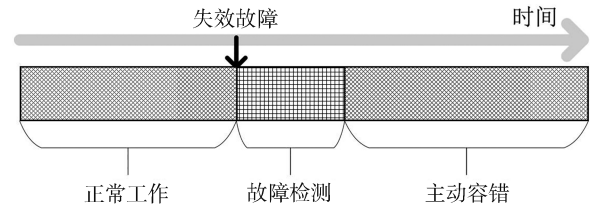


图3 故障处理过程

故障等级, 整车控制器根据收到的故障码/故障等级进行故障隔离并切换容错控制策略。其中控制器故障检测以及数据反馈耗时较长 ($\geq 0.1 \text{ s}$), 时效性不足以满足行驶安全的需求。因而考虑整车行驶状态参数在故障干扰下出现较大瞬时波动时, 先一步切换为容错转矩分配策略以减小行驶风险。

考虑到转向桥两侧驱动电机与转向系统的耦合, 对转向桥驱动电机失效和非转向桥驱动电机失效可能产生的对整车横摆稳定性的影响进行分析。车辆状态方程为

$$\dot{\tilde{x}} = \tilde{A}_c \tilde{x} + \tilde{B}_{u,c} u + \tilde{B}_{v,c} v \quad (11)$$

其中 $\tilde{x} = [v_y \quad w_r \quad \delta \quad \dot{\delta}]^T$

当非转向桥电机发生失效故障时, 从车辆横摆稳定性角度分析, 等效于引入一个额外的附加横摆力矩干扰, 此时状态方程为

$$\dot{\tilde{x}} = \tilde{A}_c \tilde{x} + \tilde{B}_{u,c} u + \tilde{B}_{v,c} v + E d \quad (12)$$

式中: $E = \begin{bmatrix} 0 & -i_g B / R_w I_{zz} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$; $d = \Delta T_{\text{fault}}$ 为失效电机损失转矩引入的差动转矩干扰量。计算由干扰到横摆角速度状态的稳态增益为

$$G_{\text{dw}} = - \left(\frac{i_g B}{R_w I_{zz}} \right) / \frac{\sum_{j=1}^2 L_j^2 C_{\alpha j}}{I_{zz} v_x} \quad (13)$$

当转向桥驱动电机故障时, 不仅为车横摆运动引入附加横摆力矩干扰, 同时还为转向系统引入转向力矩干扰, 此时:

$$E = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{i_g B}{R_w} & 0 & \frac{R_d \eta}{R_w N} \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

计算由干扰到横摆角速度状态的稳态增益变为

$$G_{\text{dw},1} = G_{\text{dw}} + G_{\delta} \quad (15)$$

式中 $G_{\delta} = -3I_s v_x R_d \eta / N R_w l^2 I_{zz}$, 表示差动转矩横摆角速度的增益。

对比分析不同驱动电机失效产生的干扰到横摆角速度状态的稳态增益, 非转向桥驱动电机与转向桥电机发生失效时对整车横摆角速度影响的程度不

同:在附加横摆力矩到横摆角速度传递增益 G_{dw} 基础上,转向桥电机失效故障所产生的差动转矩还增加了从转向系统转角状态到横摆角速度的增益 G_{δ} ,对整车横摆角速度扰动幅度更大。同时,转向助力电机失效也通过对转向系统转角状态的影响产生对横摆角速度的干扰。因此通过对横摆角速度状态的观测,可以快速检测执行器失效故障的发生并执行容错转矩分配策略,从而提高切换到容错控制的时效性。

定义横摆角速度观测残差为

$$Re = \omega_r - \tilde{\omega}_r \quad (16)$$

表示横摆角速度观测量与预测模型预测量之间的差值。设置残差函数为

$$J_e = |Re(t) - Re(t - T_s)| \quad (17)$$

其反映出残差变化的剧烈程度。设残差函数设置阈值为 J_{thr} ,当检测到残差函数值超过设定的阈值时,判断发生执行器故障。

需要说明的是,基于残差的故障检测仅在车辆横摆状态受到较大干扰时才会发挥作用,帮助容错转矩分配策略尽快介入,并不能清晰地判明具体故障位置。而当执行器失效故障对车辆状态影响较小时,车辆有足够的时间等待电机控制器反馈具体故障再隔离故障并切换为容错控制策略。

2.2 执行器失效组合形式分析

分布式电驱车辆不同位置驱动电机及转向助力电机发生失效故障也存在多种组合形式。对于不同失效组合制定并采取针对性的容错转矩分配策略,虽然能取得较好的控制效果,但会导致控制策略的复杂与冗繁,一定程度上影响控制策略整体的鲁棒性^[26]。本文通过对不同失效组合的车辆可控性进行理论分析,作为失效故障容错策略的理论基础。

由于驱动电机和转向助力电机失效故障具体组合形式较多,个别驱动电机失效故障组合的可控性比较明确,下面仅对可能导致系统不可控的严重失效组合形式进行分析。

如图4(a)所示,非转向桥驱动电机单侧失效时,失效侧驱动转矩转移至转向桥驱动电机,直线工况下两侧驱动转矩只能由前转向桥输出,整车纵向动力性下降。在转向工况下,后桥无故障侧电机仍可通过转矩分配补偿前桥差动协调转向产生的附加横摆转矩。该失效故障属于可控失效。

如图4(b)所示,非转向桥电机全失效时,为了降低附加横摆力矩对整车横摆稳定性的影响,驱动

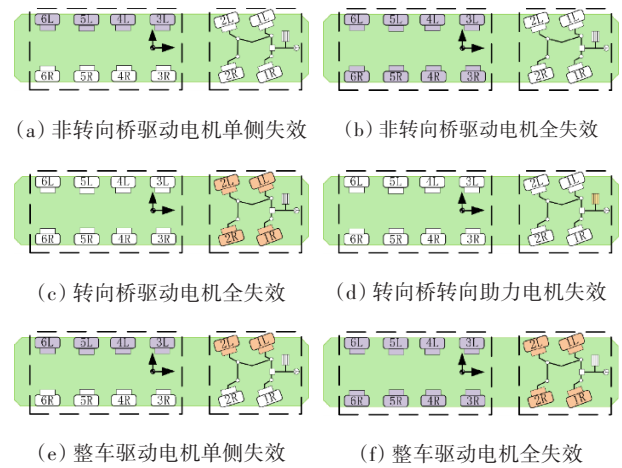


图4 电机失效故障组合形式

转矩只能由前转向桥驱动电机输出,纵向动力性下降。此时转向系统无法在差动转矩协调模式下工作,只能由转向助力电机单独工作实现辅助转向,转向系统缺乏冗余,此状态下车辆没有应对转向助力电机失效的容错能力。该失效故障属于可控失效。

如图4(c)和图4(d)所示,转向桥驱动电机全失效时,需求广义转向转矩完全由转向助力电机转矩提供,同理当转向助力电机发生失效故障,需求广义转向转矩完全由转向桥差动转矩提供,整车仍能继续稳定行驶。该失效故障属于可控失效。

如图4(e)和图4(f)所示,整车驱动电机单侧失效时,剩余电机驱动转矩产生的附加横摆力矩无法通过转矩再分配策略抵消,对车辆横摆稳定性有不可忽视的干扰,车辆无法继续行驶。而当整车驱动电机全失效时,车辆失去动力,无法继续行驶,应立即停车处理。该失效故障属于不可控失效。

对于上述不可控失效的情况,车辆应及时对驾驶员发出停车预警,以保证道路交通安全。针对可控失效组合形式,考虑对驱动电机转矩与转向助力电机转矩在转向工况下协调分配的统一容错策略。

2.3 差动协调的容错转矩分配策略

设置失效因子对失效电机进行故障隔离,避免其继续干扰到车辆行驶。以失效因子 ξ_{ij} 指示每个驱动电机失效情况:

$$\xi_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{正常工作} \\ 0, & \text{发生失效故障} \end{cases}$$

对于转向助力电机失效的情况,用失效因子 ξ_m 表示。

轮胎附着利用率描述了车辆产生横纵向力的潜

机输出的转矩还应满足广义转向转矩的需求;差动转矩可能会影响整车纵向驱动力,将对纵向驱动力相关的约束设置为软约束,以保证车辆优先满足稳定性与安全性需求,再满足纵向驱动力需求:

$$[\xi_{11} \ \xi_{12} \ \cdots \ \xi_{62} \ 0]T_x + V_3e = T_{total} \quad (30)$$

式中: T_{total} 为总需求纵向转矩; V_3 为驱动转矩归一化系数; $e \geq 0$ 为松弛变量。然后在代价函数中引入松弛变量相关项,得到:

$$J = \begin{bmatrix} T_x \\ e \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} H & \\ & \rho^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ e \end{bmatrix} + [f \ 0] \begin{bmatrix} T_x \\ e \end{bmatrix} \quad (31)$$

求解上述线性二次规划问题,得到正常工作的驱动电机和转向助力电机的目标转矩输出。

3 仿真实证

结合策略模型和整车动力学模型搭建硬件在环的实时仿真平台对所提控制策略进行验证,仿真流程和平台如图5所示。实时仿真机(Speedgoat)配置 Intel i7 4核 4.2 GHz 处理器,控制器采用域控制器,其搭载了 Nvidia Jetson AGX Xavier 和 Ubuntu 系统,算力 30 TOPS。Speedgoat 运行 17 自由度车辆模型,通过 CAN 总线将车辆的运行状态信息实时传递到域控制器;域控制器运行本文所提策略,基于车辆状态信息计算车辆控制指令,并通过 CAN 总线反馈到车辆模型,实现车辆的闭环控制。最后,Speedgoat 实时仿真机将车辆运行状态信息传输到 Prescan,以渲染车辆实时运行场景并可视化车辆运行状态信息。

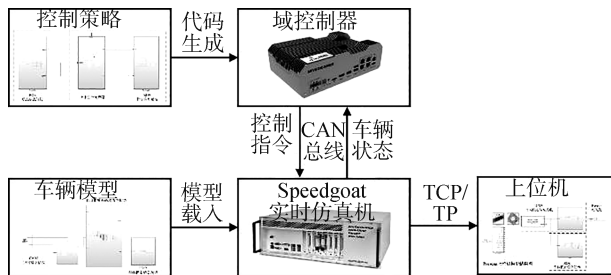


图5 硬件在环仿真流程

对 12×12 分布式电驱动非铰接式重载车辆做出如下假设:车身为关于 xoz 平面对称的刚体,左右电动轮位置对称,整车侧倾中心高度一致;忽略电动轮传动系统摩擦阻尼、车身俯仰和垂向运动;忽略悬架系统动态特性与车轮垂向位移。构建 17 自由度的车辆动力学模型,包括簧上质量车身刚体横向、纵向

和横摆 3 自由度运动、簧下质量部分每个电动轮绕车轮轴线转动共 12 个自由度、前联合转向桥和后联合转向桥 2 个自由度。轮胎模型选用魔术公式经验模型,模型参数通过查阅轮胎厂家相关资料以及部分实验数据拟合得到。车辆关键参数如表 1 所示。

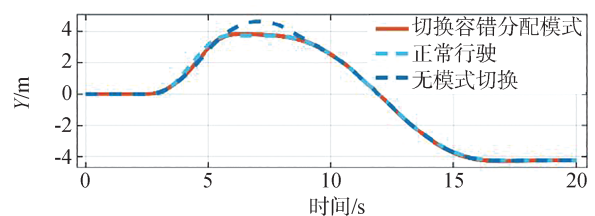
表 1 车辆关键参数

参数	数值	单位
整车质量 m	70 000	kg
轮距 B	2.61	m
整车转动惯量 I_x	310 000	$kg \cdot m^2$
各轴到执行距离 $L_1 \sim L_6$	3.9/2.2/-4.6/-6.3/-8.7/-10.4	m
轮胎侧偏刚度 $C_l \sim C_r$	400 000/380 000	$N \cdot rad^{-1}$

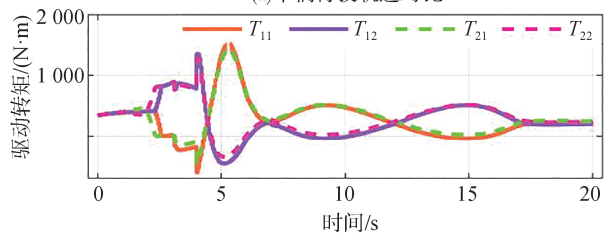
3.1 复合转向系统容错能力验证

选择良好路面(摩擦因数 $\mu = 0.8$) 的连续弯道工况,设置车辆以面向能效的转矩分配策略行驶^[27],车速为 15 m/s。如图 4(d) 所示,转向助力电机在第 3.0 s 发生失效故障,对比分析故障有无处理条件下目标车辆实际行驶轨迹,对复合转向系统差动助力容错能力进行验证。

图 6(a) 所示为故障有无处理下目标车辆实际的行驶轨迹的对比,可以看出整车转矩分配模式切换为容错转矩分配策略后,与系统正常时的行驶轨迹相差不大,而无模式切换时整车行驶轨迹较期望轨迹产生较大的偏差,有偏离车道的风险。图 6(b) 为转向桥各驱动轮转矩输出的变化曲线,系统检测到存在电机失效故障后,整车驱动转矩分配模式切换为容错转矩分配策略,对转向助力电机进行故障隔离,并增加一、二桥差动转矩输出以满足转向助力转



(a) 车辆行驶轨迹对比



(b) 转向桥各轮驱动转矩

图6 故障有无处理下行行驶轨迹与输出转矩对比

矩需求。说明转向助力电机发生失效故障时,需求广义转向转矩全部由转向桥差动转矩提供,使复合转向系统具有容错能力。

3.2 容错策略下失效故障仿真

上述连续弯道行驶工况下,后四桥左侧驱动电机在第3.0 s发生失效故障,容错转矩分配策略对失效驱动电机进行故障隔离并对其他正常工作电机进

行转矩再分配,如图7(a)~图7(d)所示。可以看出,由于后四桥左侧驱动电机失效,失效侧驱动转矩转移至前桥驱动电机,前桥电机驱动转矩较后四桥转矩明显增加,且在前桥两侧电机差动转矩产生附加横摆转矩时,所提策略通过合理分配后桥无故障侧电机转矩产生反向横摆转矩进行补偿,改善车辆横摆稳定性。

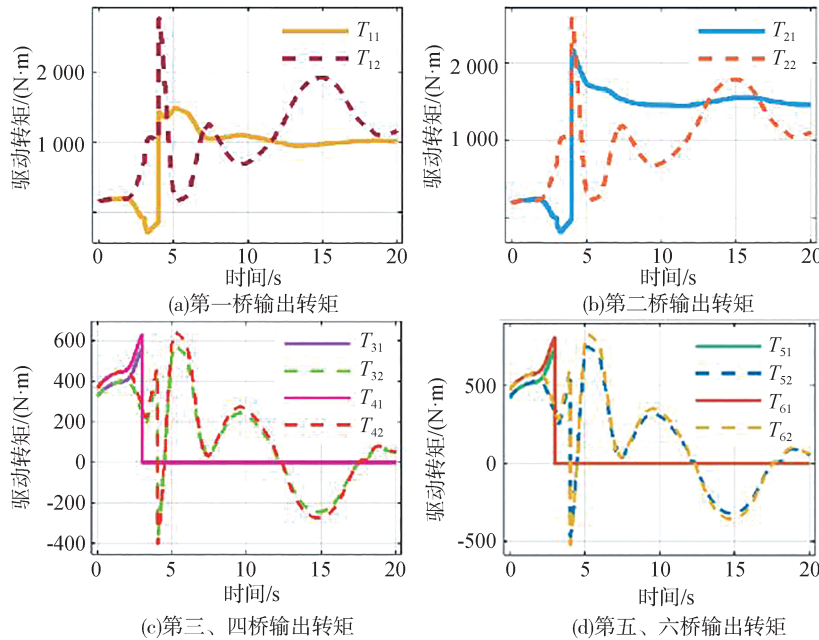


图7 左侧后四桥驱动电机失效时容错转矩输出

以基于平均分配规则的容错转矩分配策略^[28]为对比算法,和所提策略进行对比。图8(a)为整车横摆角速度的对比,当所提容错转矩分配策略介入后,后续车辆横摆运动与未发生故障时趋势一致,可以按照原定轨迹行驶。图8(b)为附着利用率平方和的对比,可以看出,所提策略相比基于规则的策略,整车车轮附着利用率最多可降低14.28%,得到较为明显的改善,有利于车辆行驶稳定性的提高。因而所提容错转矩分配策略具有较好的主动容错性能。

3.3 多失效事件下容错策略硬件在环仿真

考虑到实际控制策略运行在整车控制器上,实时对车辆发出控制指令,若不能保证所提控制算法的运行效率,可能会给整车性能表现和行车安全带来负面影响。因此,基于搭建的实时仿真平台,设置较长时间段多次突发故障情景,对所提策略进行时效性和稳定性验证。

为模拟实际车辆行驶中可能面临的多次电机执行器失效故障的情形,设置各电机执行器失效时序:

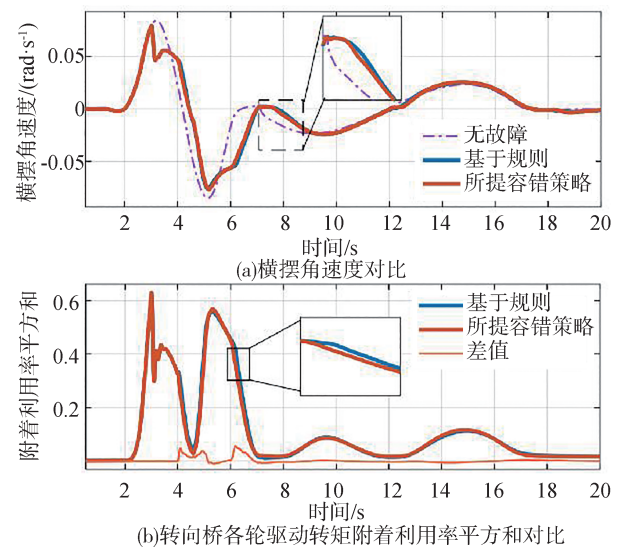


图8 所提容错转矩分配策略与基于规则策略对比

第一桥和第二桥左侧电机L1和L2在第10 s时发生失效故障,第三桥和第五桥右侧电机R3和R5在第

14 s发生失效故障,转向助力电机在第19 s发生失效故障,假设以上故障连续发生,以充分验证所提容错转矩分配策略的容错性能。

如图9所示,第10 s转向桥驱动电机L1和L2发生失效故障失去转矩输出,在第10.1 s时控制器通过对横摆角速度状态量的观测,计算出其预测残差函数值 J_e 超出阈值 J_{th} ,触发模式切换策略,系统切换在容错转矩分配策略下工作。

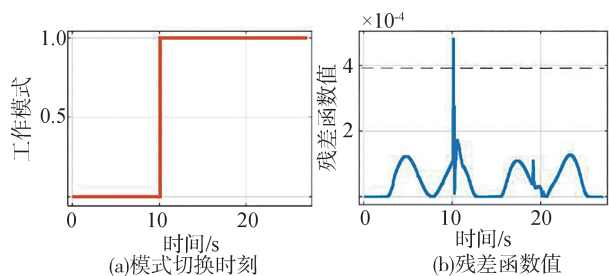


图9 模式切换策略触发

后续第14 s发生R3与R5电机失效,第19 s发生转向助力电机失效,容错策略均可以在接收到各执行器回传的故障信息后对失效电机进行故障隔离,然后对剩余正常工作电机进行转向转矩与驱动转矩的分配。各轮驱动转矩变化如图10所示。

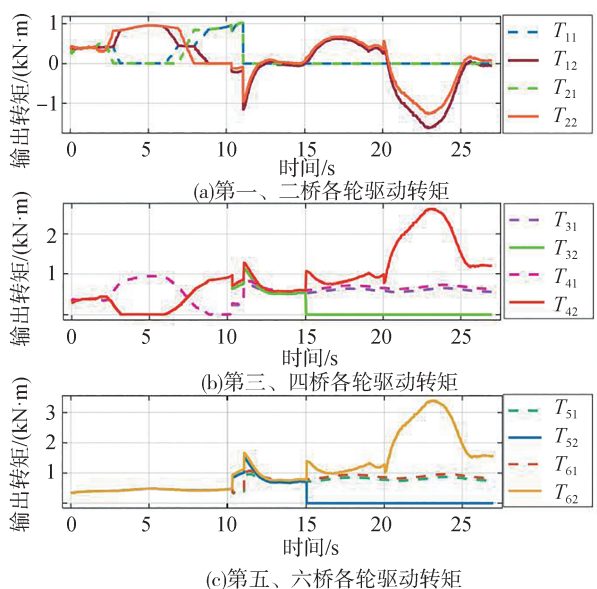


图10 执行器失效故障下各轮转矩变化

考虑系统工作在容错转矩分配策略下的被动容错性能,图11中对比第14 s发生R3、R5失效故障和第19 s发生转向助力电机失效故障后,采取故障隔离和不采取故障隔离时的车辆横向跟踪性能和横摆

角速度变化趋势,由于整车横摆转动惯量相对较大,在个别非转向桥驱动电机失效时,如第14 s时R3和R5失效,其失效故障对车辆的行驶状态影响有限,因而整车横向跟踪性能基本没有影响。在第19 s转向助力电机发生失效故障时,如不进行故障隔离,系统转向能力出现缺失,车辆横向跟踪偏差迅速增大,有偏离车道的风险,而采用所提容错控制策略的车辆对道路的横向跟踪偏差始终稳定在0.1 m内。

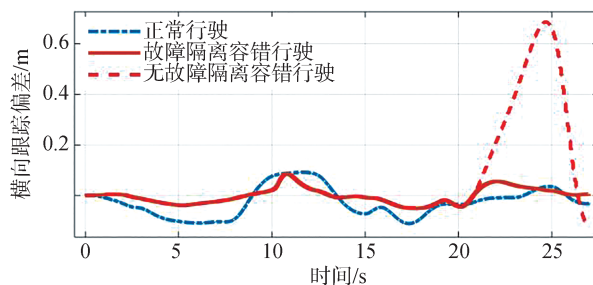


图11 横向跟踪偏差对比

4 结论

针对采用复合转向的分布式电驱动重载车辆行驶安全性问题,提出了中高速转向工况下,统一考虑驱动电机和转向助力电机两种执行器失效故障的容错控制策略。通过所搭建的硬件在环平台进行了实时仿真分析,实验选用的连续弯道工况下,相比基于规则的策略,所提策略整车车轮附着利用率降低14.28%;多失效事件下车辆对道路的横向跟踪偏差始终稳定在0.1 m内。证明了所提失效容错控制策略在执行器失效故障时,可改善车辆行驶的稳定性和降低横向跟踪偏差。

参考文献

[1] 刘聪,刘辉,韩立金,等.分布式电驱车辆极限越野环境下高速避障与稳定性控制[J].兵工学报,2021,42(10):2102-2113.
 LIU Cong, LIU Hui, HAN Lijin, et al. High-speed obstacle avoidance and stability control of distributed electric drive vehicle in extreme off-road environment [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(10):2102-2113.
 [2] 蔡立春,廖自力,李嘉麒,等.8×8分布式电驱装甲车辆稳定性直接横摆力矩与转矩矢量控制[J].兵工学报,2021,42(10):2196-2205.
 CAI Lichun, LIAO Zili, LI Jiaqi, et al. Direct yaw moment and torque vector control of armored vehicle stability with 8×8 distributed electric drive [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(10):

- 2196-2205.
- [3] 刘徐坤, 骆媛媛, 杨影, 等. 分布式电驱动车辆状态感知与控制研究综述[J]. 机械工程学报, 2019, 55(22): 60-79.
LIU X K, LUO Y Y, YANG Y, et al. Review on state perception and control for distributed drive electric vehicles [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(22): 60-79.
- [4] 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 Zhenpo, DING Xiaolin, ZHANG Lei, et al. 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.
- [5] 彭博, 李军求, 孙逢春, 等. 多轴分布式电驱动车辆后桥差动转向控制策略研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(7): 909-916.
PENG Bo, LI Junqiu, SUN Fengchun, et al. Research on rear axle differential steering control strategy of multi-axle distributed electric drive vehicle [J]. Automotive Engineering, 2019, 42(7): 909-916.
- [6] WEI R, LI J, LIU J, et al. Differential steering strategy for distributed drive vehicle with double rear steering bridges based on sliding mode control [C]. 2021 40th Chinese Control Conference (CCC), Shanghai, China, 2021: 5985-5991.
- [7] 张雷, 王子浩, 孙逢春, 等. 四轮轮毂电机驱动智能电动汽车转向失效容错控制研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(20): 141-152.
ZHANG Lei, WANG Zihao, SUN Fengchun, et al. Research on steering failure tolerance control of intelligent electric vehicle driven by four-wheel hub motor [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(20): 141-152.
- [8] NIEDERLINSKI A. A heuristic approach to the design of interacting multi-variable systems [J]. Automatica, 1971, 7: 691-701.
- [9] 李红梅, 陈涛. 电动汽车 PMSM 退磁故障诊断及故障模式识别 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 1-8.
LI Hongmei, CHEN Tao. Fault diagnosis and fault mode recognition of electric vehicle PMSM demagnetization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 1-8.
- [10] El Khil S K, Jlassi I, Cardoso A J M, et al. Diagnosis of open-switch and current sensor faults in PMSM drives through stator current analysis [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 5925-5937.
- [11] 陈勇, 梁洪, 王成栋, 等. 基于改进小波包变换和信号融合的永磁同步电机匝间短路故障检测 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(S1): 228-234.
CHEN Yong, LIANG Hong, WANG Chengdong, et al. Fault detection of winding-to-winding short circuit in permanent magnet synchronous motor based on improved wavelet packet transform and signal fusion [J]. Journal of Electrical Engineering, 2020, 35(S1): 228-234.
- [12] 许良, 赵吉文, 宋俊材, 等. 基于 ALE-MRAS 磁链观测器的永磁同步直线电机均匀退磁诊断研究 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7347-7356.
XU Liang, ZHAO Jiwen, SONG Juncai, et al. Research on uniform demagnetization diagnosis of permanent magnet synchronous linear motor based on ALE-MRAS flux observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7347-7356.
- [13] 陈勇, 张健建, 陈章勇. 基于电流观测器的三相逆变电路开路故障在线诊断 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(S2): 609-617.
CHEN Yong, ZHANG Jianjian, CHEN Zhangyong. On-line diagnosis of open-circuit fault in three-phase inverter circuit based on current observer [J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 34(S2): 609-617.
- [14] SONG X, ZHAO J, SONG J, et al. Local demagnetization fault recognition of permanent magnet synchronous linear motor based on S-transform and PSO-LSSVM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 7816-7825.
- [15] TUERXUN W, CHANG X, HONGYU G, et al. Fault diagnosis of wind turbines based on a support vector machine optimized by the sparrow search algorithm [J]. IEEE Access, 2021, 9: 69307-69315.
- [16] SONG X, ZHAO J, SONG J, et al. Local demagnetization fault recognition of permanent magnet synchronous linear motor based on S-transform and PSO-LSSVM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 7816-7825.
- [17] 夏秋, 陈龙, 徐兴, 等. 基于故障估计的无人车容错控制方法 [J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(7): 723-732. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2021.161.
XIA Qiu, CHEN Long, XU Xing, et al. Unmanned vehicle fault-tolerant control method based on fault estimation [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(7): 723-732. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2021.161.
- [18] WANG R, WANG J. Passive actuator fault-tolerant control for a class of overactuated nonlinear systems and applications to electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(3): 972-985.
- [19] HUANG C. Delta operator-based fault estimation and fault-tolerant model predictive control for steer-by-wire systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(5): 1-8.
- [20] MUTOH N, TAKAHASHI Y. Front-and-rear-wheel-independent-drive type electric vehicle (FRID EV) with the outstanding driving performance suitable for next-generation advanced EVs [C]. IEEE Vehicle Power & Propulsion Conference. IEEE, 2009.
- [21] GUO J, LUO Y, LI K. Robust H_{∞} fault-tolerant lateral control of four-wheel-steering autonomous vehicles [J]. International Journal of Automotive Technology, 2020, 21(4): 993-1000.
- [22] ZHANG B, LU S, XIE W. Cooperative game-based driver assistance control for vehicles suffering actuator faults [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 10.1109/TITS.2021.3076200.
- [23] 胡云, 江发潮, 陈锐, 等. 分布式电动车辆驱动系统 MFAC 主动容错控制 [J]. 汽车工程, 2019, 41(9): 8.
HU Yun, JIANG Fachao, CHEN Rui, et al. MFAC active fault tolerance control for distributed electric vehicle drive system [J]. Automotive Engineering, 2019, 41(9): 8.

- 械工业出版社, 2019.
- CHEN J, CHANG H, et al. Plastic molding process and mold design [M]. Beijing: China Machine Press, 2019.
- [20] WEI J L, SUN L Y, et al. Study on the interfacial properties of bi-material structures manufactured by injection molding after compression[J]. *Composite Structures*, 2023, 309(1): 116740.
- [21] WEI J L, SUN L Y. Interface fracture prediction of multi-material hybrid structures by modified phase field models[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 121: 103562.
- [22] WEI J L, SUN L Y, SUN J X, et al. Mesoscale failure analysis of the hybrid structure by injection overmolding after compression process[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 146: 107145.
- [23] 王倩. 模压注塑混合工艺界面的粘附机理及力学性能表征[D]. 北京:北京航空航天大学, 2019.
- WANG Q. Research on bonding mechanism and mechanical properties characterization of AF RTP interface[D]. Beijing: Beihang University, 2019.
- [24] WANG Q, SUN L Y, LI L J, et al. Experimental and numerical investigations on microstructures and mechanical properties of hybrid fiber reinforced thermoplastic polymer[J]. *Polymer Testing*, 2018, 70: 215-225.
- [25] DUAN Z, LIU Y, FAN J, et al. Concurrent multi-material and multi-scale design optimization of fiber-reinforced composite material and structures for minimum structural compliance[J]. *Composite Structures*, 2023, 311: 116796.
- [26] ASTM International. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials standard: ASTM D3039[S]. 2014.
- [27] ASTM International. Standard test method for strength properties of double lap shear adhesive joints by tension loading: ASTM D3528-96[S]. 2008.
- [28] ASTM International. Standard test method for shear properties of composite materials by the V-notched beam method: ASTM D5379/D5379M-19[S]. 2019.
- [29] ASTM International. Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites :ASTM D-5528[S]. 2007.
- [30] ASTM International. Standard test method for mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites:ASTM D7905[S]. 2007.
- [31] REMKO A, MARK B, SEBASTIAAN W. Analysis of the thermoplastic composite overmolding process: interface strength [J]. *Frontiers in Materials*, 2020(7): 27.
- [32] ASTM International. Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials :ASTM D7264[S]. 2015.
- [33] ASTM International. Standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates :ASTM D2344/D2344M-16[S]. 2016.

(上接第733页)

- [24] LEE J H. Model predictive control: review of the three decades of development [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2011, 9(3): 415-424.
- [25] LEE K, LEE M. Fault-tolerant stability control for independent four-wheel drive electric vehicle under actuator fault conditions [J]. *IEEE Access*, 2020, 8:91368-91378.
- [26] ZHANG G, ZHANG H, HUANG X, et al. Active fault-tolerant control for electric vehicles with independently driven rear in-wheel motors against certain actuator faults [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24(5): 1557-1572.
- [27] WU Y, LI J, WANG W. Differential drive based cooperate steering control strategy considering energy efficiency for multi-axle distributed vehicle[C]. *ICEIV2022*, Chapter 131, 978-981-99-1026-7.
- [28] ZHAI L, SUN T, JIE W. Electronic stability control based on motor driving and braking torque distribution for a four in-wheel motor drive electric vehicle [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(6):4726-4739.