DOI: 10.3901/JME.2020.16.227

基于多方法切换的四轮轮毂电机驱动电动汽车容错控制策略*

张雷^{1,2} 余文³ 王震坡^{1,2} 丁晓林^{1,2}

- (1. 北京理工大学北京电动车辆协同创新中心 北京 100081;
2. 北京理工大学电动车辆国家工程实验室 北京 100081;
3. 广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院 广州 511434)

摘要: 四轮轮毂电机驱动电动汽车是典型的过驱动系统, 可有效提高车辆操作稳定性和安全性, 但由于驱动电机数目多且工作条件恶劣, 增大了驱动系统失效概率, 而电机失效时由于异侧驱动力不等极易导致车辆横摆失稳。针对四轮轮毂电机驱动电动汽车驱动电机失效, 提出基于多方法切换的容错控制策略。该策略包含转矩转移法、控制分配法、约束方程直接求解法三种控制方法, 通过对三种控制方法适用工况以及转矩重构对转向系统影响的分析, 构建了基于车辆预估跑偏距离与附加横摆角速度的控制方法切换规则, 既保证了驱动电机失效情况下的车辆动力性与横摆稳定性, 又有效提高了控制策略的执行效率。最后, 在多种直线行驶与转弯行驶工况下, 仿真验证了该控制策略的有效性, 保证了四轮轮毂电机驱动电动汽车在电机失效时的安全性。

关键词: 四轮轮毂电机驱动电动汽车; 容错控制; 多方法切换

中图分类号: U469

Fault Tolerant Control Based on Multi-methods Switching for Four-wheel-independently-actuated Electric Vehicles

ZHANG Lei^{1,2} YU Wen³ WANG Zhenpo^{1,2} DING Xiaolin^{1,2}

- (1. Collaborative Innovation Center for Electric Vehicles in Beijing, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;
2. National Engineering Laboratory for Electric Vehicles, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;
3. GAC Research and Development Center, Guangzhou 511434)

Abstract: Four-wheel-independently-actuated electric vehicles have the potential of improving the vehicle handling performance and safety thanks to the over-actuation property. But they may be more prone to motor failure issues that would jeopardize vehicle safety and compromise the driving performance. To meet this challenge, a fault tolerant control strategy is presented based on multi-methods switching. Conventional control methods including torque transfer, control allocation and constraint equation derivation. A switching mechanism is proposed to select the appropriate control method by analyzing their characteristics, application occasions and potential influence on the steering system. The proposed control strategy can improve vehicle driving performance and yaw stability while reducing computational load. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy is verified under various straightforward and cornering driving conditions in Simulink/Carsim co-simulation.

Key words: four-wheel-independently-actuated electric vehicles; fault tolerant control; multi-methods switching

0 前言

四轮轮毂电机驱动电动汽车具有传动链短、传

动效率高、电机响应快和转矩精确可控等特点, 成为新能源汽车的重要技术发展方向之一。四轮轮毂电机驱动电动汽车将四个轮毂驱动电机分别安装在四个车轮轮毂内, 四个车轮均具备独立驱动/制动能力, 提高了底盘操控性能^[1-3]。通过对四个驱动电机的协调控制, 可实现多种动力学控制功能, 如牵引

* 国家重点研发计划(2017YFB0103600)和北京市科技计划课题(D171100007517001)资助项目。20191116 收到初稿, 20200218 收到修改稿

力控制(Traction control system, TCS)、直接横摆力矩控制(Direct yaw moment control, DYC)以及其他车辆主动安全控制功能^[4-5]。然而,四轮轮毂电机驱动电动汽车在提升车辆操控性能的同时,由于驱动电机数目多且工作条件恶劣,增大了驱动系统故障概率^[6]。当驱动系统出现一个或多个驱动电机失效时,不仅会降低车辆动力性,而且由于异侧驱动力不等产生的附加横摆力矩极易导致车辆横摆失稳^[7-8],威胁车辆行驶安全。因此,研究四轮轮毂电机驱动电动汽车驱动电机失效容错控制策略对提升车辆动力性与安全性具有重要意义。

针对四轮轮毂电机驱动电动汽车, MUTOH 等^[9-10]提出了切断前轴或后轴驱动电机动力输出的失效控制方法。该方法具有逻辑简单及鲁棒性好等特点,但削弱了车辆的驱动能力,且仅适用于单电机失效或同轴双电机失效工况。褚文博等^[11]基于动力性和车辆稳定性控制目标,建立了基于规则的驱动电机失效容错控制方法。该方法通过驱动电机转矩重构,充分利用正常工作电机的驱动能力,保证了车辆的动力性与安全性。但该方法在部分工况下可能产生附加横摆力矩,且未考虑转矩重构后前轴异侧转矩不等对转向系统的影响。

基于广义目标控制分配法, WANNER 等^[12]利用单电机失效工况下驱动系统过驱动特性不变的特点,将驱动电机失效状态作为控制分配约束以实现失效控制,该方法不仅保证了车辆动力性与横摆稳定性,还通过充分利用路面附着系数提高了车辆的安全性。也有文献通过转矩重构与主动前轮转向

(Active front steering, AFS)耦合控制,提高车辆在驱动电机失效后的行驶安全性^[13-14]。控制分配法虽然能够有效保持车辆动力性与横摆稳定性,但对控制器的运算能力要求较高,且仅适用于部分驱动电机失效后仍具有过驱动性的驱动系统。此外,上述控制方法依赖于电机控制系统及时准确的故障诊断,属于被动容错控制^[15]。WANG 等^[16-17]在此基础上,引入了主动故障诊断系统,通过轮胎动力学特性判断各驱动电机失效状况,取得了较好的控制效果。

综上所述,驱动电机失效容错控制本质上是如何在部分驱动电机失效情况下实现驱动系统的转矩重构,单一控制方法往往难以满足多种失效工况的控制需求。为此,本文提出了一种基于多方法切换的控制策略,以保证车辆在部分驱动电机失效时的动力性与横摆稳定性为目标,同时引入转矩转移法、控制分配法与约束方程直接求解法,充分利用三种方法的优势,通过控制方法切换,提高控制策略在线执行效率。最后,通过 Simulink/Carsim 联合仿真验证其有效性。

1 驱动电机失效容错控制策略

四轮轮毂电机驱动电动汽车驱动电机失效容错控制策略的输入为驾驶员总转矩需求与车辆前轮转角,通过采集各驱动电机的失效因子进行驱动转矩重构。本文提出的控制策略基本架构如图1所示,分为三部分,即“失效形式判断”、“控制方法选择”和“控制方法执行”。

图1 驱动电机失效容错控制策略

1.1 失效形式判断

根据失效驱动电机的数目与位置, 驱动电机失效形式可分为以下五类。

(1) 单电机失效: 单个车轮的驱动电机失效, 共四种失效形式。

(2) 异侧双电机失效: 位于车辆异侧的两个驱动电机同时失效, 共四种失效形式。

(3) 同侧双电机失效: 位于车辆同侧的两个驱动电机同时失效, 共两种失效形式。

(4) 三电机失效: 三个驱动电机同时失效, 共四种失效形式。

(5) 四电机失效: 四个驱动电机同时失效。

本文提出的控制策略适用于单电机失效和异侧双电机失效的情况, 对其余三种失效形式, 则将四个驱动电机分配转矩同时置零。失效形式判断通过各驱动电机反馈的电机失效因子确定。电机失效因子为电机控制系统反馈的驱动电机失效标志位。电机失效因子为 1 时, 表示该电机正常工作; 电机失效因子为 0 时, 表示该电机失效。因此, 各驱动电机实际输出转矩与电机失效因子及电机分配转矩间的关系为

$$T_i^* = T_i \times \lambda_i \begin{cases} \lambda_i = 1 & \text{电机正常} \\ \lambda_i = 0 & \text{电机失效} \end{cases} \quad (1)$$

式中, T_i 为驱动电机分配转矩, T_i^* 为驱动电机实际输出转矩, λ_i 为电机失效因子。

1.2 控制方法选择

对于单电机失效形式, 采用转矩转移法与控制分配法切换控制的原则; 对于异侧双电机失效形式, 则采用约束方程直接求解法。针对单电机失效形式, 控制策略的核心为转矩转移法与控制分配法的切换规则。转矩转移法与控制分配法均采用了分层架构, 即上层控制器根据驾驶员驾驶意图和车辆横摆稳定性控制需要计算广义纵向力和附加横摆力矩; 下层控制器根据上述广义纵向力与附加横摆力矩进行驱动电机转矩分配, 其约束方程为

$$\begin{cases} \frac{T_1 \lambda_1}{R_0} + \frac{T_2 \lambda_2}{R_0} + \frac{T_3 \lambda_3}{R_0} + \frac{T_4 \lambda_4}{R_0} = \frac{T_{\text{exp}}}{R_0} \\ \frac{B_f T_2 \lambda_2}{2R_0} - \frac{B_f T_1 \lambda_1}{2R_0} + \frac{B_r T_4 \lambda_4}{2R_0} - \frac{B_r T_3 \lambda_3}{2R_0} = \Delta M \end{cases} \quad (2)$$

式中, R_0 为车轮有效滚动半径, B_f 和 B_r 是前后轮距, T_{exp} 为由加速/制动踏板解析的驾驶员转矩需求, ΔM 为广义附加横摆力矩。

转矩转移法是将电机失效前分配的转矩需求, 转移叠加至同侧未失效电机以保证车辆横摆稳定性。

因此, 不论哪个驱动电机失效, 转矩转移法均会造成前轴两侧电机输出转矩不等, 进而产生前轮转向角扰动, 影响车辆横摆运动。控制分配法是在转矩转移法的基础上, 引入基于目标横摆角速度追踪的附加横摆力矩, 有效抵消前轴转矩不等引起的车辆附加横摆运动。综上可知, 转矩转移法具有逻辑简单、执行效率高的特点, 但易造成车辆附加横摆运动; 控制分配法能够有效弥补转矩转移法的缺点, 但控制复杂、执行效率较低, 因此, 通过设计有效的切换规则可以充分发挥两者的优势。

1.2.1 转向系统影响模型

目前乘用车多采用齿轮齿条转向系统, 假设转向系统的转向梯形与齿轮齿条转向器为刚体及它们之间为刚性连接, 转向管柱为具有一定扭转刚度的弹性体。驱动电机失效情况下, 由于前轴两侧车轮纵向驱动力不等, 导致其产生的绕左右两侧主销的转矩不等, 无法相互抵消, 进而通过转向拉杆产生作用于转向齿条上的附加作用力。转向管柱一端通过齿轮与齿条啮合, 另一端与驾驶室内方向盘相连, 转向齿条上的附加作用力使得转向管柱与转向齿条分别产生附加转角与位移, 同时通过转向梯形产生前轮附加转角, 造成前轮转角扰动。

为量化计算前轮转角扰动, 以车辆右前轮为例, 其受力示意图如图 2 所示。

图2 车轮受力示意图

轮胎作用力对主销的转矩为

$$M_{sx} = F_x C_s \sin \beta_s \quad (3)$$

$$M_{sy} = F_y R_0 \tan \gamma_s \cos \gamma_s \quad (4)$$

$$M_{sz} = F_z \sin \gamma_s (-R_0 C_s \tan \beta_s) \quad (5)$$

式中, F_x 、 F_y 和 F_z 是路面对轮胎的纵向、侧向和垂向作用力, M_{sx} 、 M_{sy} 和 M_{sz} 分别为轮胎纵向力、侧向力与垂向力产生的主销转矩, β_s 为主销内倾角, C_s 为主销偏移距, γ_s 为主销后倾角。驱动电机失效时, 采用转矩转移法将导致前轴两侧车轮纵向力突变, 主销转矩不等, 并通过转向拉杆产生拉力作用

于转向器齿条, 转向器齿条受力分析如图3所示。

图3 转向器齿条受力示意图

$$F_w = F_{rr} - F_{rl} \quad (6)$$

$$F_{rl} = -\frac{M_{sl}}{l} \quad F_{rr} = \frac{M_{sr}}{l} \quad (7)$$

式中, l 为主销到齿条的纵向垂直距离, F_{rr} 和 F_{rl} 是左右主销转矩通过转向拉杆齿条产生的拉力, M_{sr} 和 M_{sl} 是左右主销转矩, F_w 为转向器齿轮对齿条作用力。

齿条受左右拉杆作用力不等产生的附加作用力与齿轮对齿条的作用力平衡, 齿轮对齿条作用力大小由与齿轮相连的转向管柱刚度与形变决定。因此, 转向管柱形变及齿条附加位移可以表示为

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta F_w r_p}{K_{col}} \quad (8)$$

$$\Delta y = \Delta\alpha r_p \quad (9)$$

式中, r_p 为转向器齿轮半径, K_{col} 为转向管柱刚度, $\Delta\alpha$ 是转向管柱扭角。

根据转向系统的转向特性查表获得前轮附加转角, 齿条位移与前轮转角关系如图4所示。同时考虑转向系统的响应特性, 加上一阶惯性环节后的前轮附加转角表示为

$$\Delta\delta = f(\Delta\alpha r_p) \frac{1}{\tau s + 1} \quad (10)$$

图4 齿条位移与前轮转角关系

1.2.2 车辆动力学建模

本文采用三自由度车辆动力学模型量化分析上述附加前轮转角的影响(图5), 该模型包括纵向运动、

侧向运动和横摆运动, 可表示为

$$m(\dot{v}_x - v_y \gamma) = (F_{x1} + F_{x2}) \cos \delta + F_{x3} + F_{x4} - F_{wind} - (F_{y1} + F_{y2}) \sin \delta \quad (11)$$

$$m(\dot{v}_y + v_x \gamma) = F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + F_{y4} + (F_{x1} + F_{x2}) \sin \delta \quad (12)$$

$$I_z \dot{\gamma} = [(F_{x2} - F_{x1}) \cos \delta + (F_{y1} - F_{y2}) \times \sin \delta] \frac{B_f}{2} + (-F_{x3} + F_{x4}) \frac{B_r}{2} + [(F_{y1} + F_{y2}) \times \cos \delta + (F_{x1} + F_{x2}) \sin \delta] L_f - (F_{y3} + F_{y4}) L_r \quad (13)$$

式中, m 为车辆质量, v_x 和 v_y 是车辆质心的纵向和侧向速度, δ 为前轮转角, γ 为车辆横摆角速度, I_z 为车身绕 z 轴的转动惯量, L_f 和 L_r 是车辆质心到前轴和后轴的距离, F_{xi} 和 F_{yi} 是四个轮胎的纵向力和侧向力, F_{wind} 为空气阻力。

图5 三自由度车辆动力学模型

车辆动力学模型输入为轮胎纵向力与侧向力, 轮胎的纵向力与侧向力分别由驱动电机的输出转矩与轮胎侧偏角决定, 假设轮胎处于线性区域, 其纵向力与侧向力表达式为

$$F_{xi} = T_i^* / R_0 - F_{fi} \quad (14)$$

$$F_{yi} = k_i \alpha_i^* \quad (15)$$

式中, F_{fi} 为轮胎滚动阻力, k_i 为轮胎侧偏刚度, α_i^* 为轮胎侧偏角。

基于车辆动力学模型计算转矩转移法产生的附加横摆角速度, 并将其作为制定转矩转移法与控制分配法切换规则的依据。

1.2.3 控制方法切换规则

为了保持转弯工况下电机失效容错控制过程中

驾驶员驾驶手感的一致性, 车辆在转弯行驶工况下采用单一失效控制法。因此, 制定如下驱动电机失效容错控制策略。

(1) 在直线行驶工况下, 允许转矩转移法与控制分配法的切换, 切换的依据是基于附加横摆角速度预估车辆保持当前状态不变行驶 10 s 后的相对跑偏距离, 预估跑偏距离表达式为

$$S_{\text{offset}} = \int_0^{10} v_x \psi dt \quad (16)$$

式中, S_{offset} 为预估车辆相对跑偏距离, ψ 为车辆偏航角, 由附加横摆角速度积分求得, 式(16)可进一步表示为

$$S_{\text{offset}} = \int_0^{10} v_x \left(\int_0^t \gamma dt_1 \right) dt \quad (17)$$

由式(17)可知, 预估车辆相对跑偏距离由车速与附加横摆角速度共同决定。本文设定 0.3 m 为车辆相对跑偏阈值, 当预估跑偏距离低于该阈值时, 采用转矩转移法; 当预估跑偏距离高于该阈值时, 则采用控制分配法。

(2) 在转弯行驶工况下, 通过监测附加横摆角速度值, 选择转矩转移法或控制分配法, 并在整个转弯工况下保持不变。转向过程监测到的附加横摆角速度值大于 $0.1(^{\circ})/\text{s}$ 时, 选择控制分配法, 否则选择转矩转移法。

控制方法选择主要是根据驱动电机失效形式、行驶工况和车辆状态。当单电机失效时, 根据转矩转移法和控制分配法切换规则进行失效控制; 当异侧双电机失效时, 采用约束方程直接求解法进行电机失效容错控制。

1.3 控制方法执行

本文提出三种失效控制方法, 分别为针对单电机失效的转矩转移法与控制分配法以及针对异侧双电机失效的约束方程直接求解法。

1.3.1 转矩转移法

转矩转移法的基本工作原理是将驱动电机失效前分配的转矩需求转移叠加至同侧未失效电机, 以满足驱动电机失效前车辆广义纵向力与附加横摆力矩需求。其具体工作流程如下: 首先根据电机控制系统反馈的电机失效因子判断失效电机位置, 以确定转矩转移目标车轮; 然后将失效电机分配转矩设为零, 并将失效前分配转矩转移叠加至同侧未失效电机; 若叠加分配转矩超过驱动电机当前状态最大允许输出转矩, 则将未失效侧电机总分配转矩降低为驱动电机最大允许输出转矩。以左前轮驱动电机

失效为例, 其转矩超限控制流程如图 6 所示, 其中 T_{max} 为驱动电机最大允许输出转矩。

图 6 转矩转移法超限控制流程

1.3.2 控制分配法

控制分配法采用分层控制思想, 控制架构分为上下两层, 上层控制器计算广义附加横摆力矩, 下层控制器进行转矩优化分配。

上层控制器以车辆横摆稳定性为控制目标, 以横摆角速度为控制变量, 基于车辆二自由度模型以及车速、前轮转角输入, 计算车辆期望横摆角速度为

$$\gamma_d = \frac{v_x}{(L_f + L_r)(1 + K v_x^2)} \delta \quad (18)$$

$$K = \frac{m}{(L_f + L_r)^2} \left(\frac{L_f}{k_2^*} - \frac{L_r}{k_1^*} \right) \quad (19)$$

式中, γ_d 为期望车辆横摆角速度, K 为车辆稳定性因数, k_1^* 和 k_2^* 是前轴与后轴侧偏刚度。

以车辆实际横摆角速度与期望横摆角速度之差作为反馈, 设计 PID 控制器计算广义附加横摆力矩, 并将其作为下层控制器转矩分配的约束。

下层控制器基于车辆广义纵向力与附加横摆力矩需求, 将驱动电机失效因子引入控制分配算法。以广义纵向力和附加横摆力矩 $\mathbf{v} = (T_{\text{exp}}, \Delta M)^T$ 为控制目标, 以 4 个车轮分配转矩 $\mathbf{u} = (T_1, T_2, T_3, T_4)^T$ 为控制输入, 由式(2)得到等式约束 $\mathbf{v} = \mathbf{B}\mathbf{u}$ 。其中, 约束矩阵 $\mathbf{B}$ 表示为

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 \\ -\frac{B_f \lambda_1}{2R_0}, -\frac{B_f \lambda_2}{2R_0}, -\frac{B_r \lambda_3}{2R_0}, -\frac{B_r \lambda_4}{2R_0} \end{pmatrix} \quad (20)$$

单电机失效时车辆过驱动特性不变, 构成静不定系统, 为了保证轮胎具有良好的储备驱动能力和侧向稳定性, 在满足上述等式约束的同时, 以四个轮胎利用负荷率之和最小为目标函数进行转矩优化分配, 其目标函数表示为

$$J = \sum \left(\frac{\lambda_i T_i}{\mu_i F_{zi}} \right)^2 \quad (21)$$

式中, μ_i 为各车轮处的路面附着系数, F_{zi} 为各车轮垂向载荷。

本文采用积极集算法 KKT 求解转矩优化分配问题, 上述控制目标可用 l_2 -范数的形式表示为

$$u = \arg \min_{u_{\min} \leq u \leq u_{\max}} \left(\|W_u u\|^2 + w \|W_v (Bu - v)\|^2 \right) \quad (22)$$

式中, W_u 和 W_v 是附着优化矩阵和对角加权矩阵, $W_u = \text{diag}\{\lambda_1/(\mu_1 F_{z1}), \lambda_2/(\mu_2 F_{z2}), \lambda_3/(\mu_3 F_{z3}), \lambda_4/(\mu_4 F_{z4})\}$, $W_v = \text{diag}(W_{v\text{Exp}}, W_{v\Delta M})$, w 为权重系数, 为了保证等式约束目标, w 取值较大。

除了满足上述控制目标外, 各驱动电机分配转矩均不得超出其当前状态下最大允许输出转矩, 即

$$u_{\min}(n) \leq u \leq u_{\max}(n) \quad (23)$$

式中, $u_{\min}(n)$ 和 $u_{\max}(n)$ 是当前转速 n 时的最小和最大允许输出转矩。

1.3.3 约束方程直接求解法

异侧双电机失效时, 仍有两个驱动电机可以正常工作, 能够保证车辆的基本行驶能力。由式(20)可知, 此时约束矩阵 B 为满秩矩阵, 下层控制器可通过直接求解式(2)得到各正常工作驱动电机的分配转矩。广义附加横摆力矩与前文单电机失效形式下的计算方法相同。

由约束方程直接求解法求得两个正常工作电机分配转矩后, 与驱动电机最大允许输出转矩进行比较; 若超过电机最大允许输出转矩, 电机实际分配转矩设为电机最大允许输出转矩。以前轴左右两侧驱动电机同时失效为例, 其转矩超限分配流程如图7所示。图7中, T_3'' 和 T_4'' 分别为求解得出的后轴左右两侧驱动分配转矩。

图7 约束方程直接求解法超限控制流程

本文以保证电机失效时车辆动力性与横摆稳定性为目标, 针对单电机失效与异侧双电机失效, 分别制定了转矩转移法与控制分配法切换控制方法以及约束方程直接求解法的多方法切换控制策略, 提高了驱动电机失效容错控制的实时性。

2 仿真验证

为了验证上述控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 和 Carsim 中分别搭建多方法切换容错控制策略和四轮轮毂电机驱动电动汽车整车动力学模型, 并在直线行驶工况和双移线行驶工况下进行了仿真验证, 车辆主要参数如表1所示。

表1 车辆基本参数

参数	数值
车辆整备质量 m/kg	1 554
横摆转动惯量 $I_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1 536.7
前轴到质心距离 L_f/m	1.015
后轴到质心距离 L_r/m	1.895
车辆前轮轮距 B_f/m	1.495
车辆后轮轮距 B_r/m	1.525
车轮滚动半径 R_0/m	0.298
路面附着系数 μ	1.0
控制分配权系数 w	1 000

2.1 直线行驶工况仿真

直线行驶工况下, 车辆方向盘转角始终为零, 单电机失效形式假定为左前电机失效, 双电机失效形式假定为左前和右后电机同时失效。

2.1.1 40 km/h 匀速行驶

仿真中, 设定车辆以 40 km/h 的车速匀速行驶, 5 s 时左前驱动电机失效, 对比研究了多方法切换容错控制策略、控制分配法以及无控制情况下的车辆响应, 仿真结果如图8所示。

由图8a可以看出, 当前工况下的预估相对跑偏距离为 0.07 m, 小于 0.3 m 的设定阈值, 采用转矩转移法进行转矩重构。正常工作驱动电机实际输出转矩如图8b所示, 可以看出左前电机失效后, 其失效前分配转矩转移至左后电机, 左后电机实际输出转矩为其余正常驱动电机的两倍。由图8c和8d可以看出, 转矩转移法有效地减少了车辆跑偏现象, 其控制效果与控制分配法相差无几, 且车速基本保持不变, 保证了驱动电机失效前后车辆的动力性。通过图8e可以看出, 转矩转移法仍无法抵消转矩重构对转向系统的影响, 导致横摆角速度与期望值之间存在偏差, 但在可接受范围之内。本文以仿真程序运行 1 s 时所需实际时间对比各控制策略的运算效率, 在上述仿真工况下, 采用转矩转移法控制的运算效率为 0.172 2 s/sims。

2.1.2 40 km/h 加速工况

仿真中, 设定车辆初始车速为 40 km/h, 总驱动转矩为 145 N·m 不变, 同样设定 5 s 时左前驱动电机失效, 仿真结果如图9所示。

图 8 40 km/h 匀速直线行驶、左前电机失效时, 不同控制方法下的车辆响应及驱动电机输出转矩

由图 9a 可知, 在直线加速行驶工况下, 车辆预估相对跑偏距离超过了设定阈值, 根据本文提出的多方法切换控制策略, 采用控制分配法进行转矩分配, 各正常工作驱动电机实际输出转矩如图 9b 所示。由图 9c 可知, 采用控制分配法有效减小了车辆跑偏距离, 控制效果明显优于转矩转移法和无控制的情况。同时, 如图 9d 和 9e 所示, 车辆能够有效地跟

踪期望车速和期望横摆角速度, 保证了驱动电机失效前后车辆的动力性与横摆稳定性。在该仿真工况下, 控制分配法的运算效率为 1.638 6 s/sims。

2.1.3 80 km/h 加速工况双电机失效

仿真中, 设定车辆初始车速为 80 km/h, 总驱动转矩为 145 N·m 不变, 设定 5 s 时左前与右后驱动电机同时失效, 仿真结果如图 10 所示。

图9 初始车速 40 km/h 且总驱动转矩 145 N·m 保持不变直线行驶、左前电机失效时, 不同控制方法下的车辆响应及驱动电机输出转矩

5 s 时左前与右后驱动电机同时失效, 采用约束方程直接求解法得到各驱动电机分配转矩如图 10a 所示。可以看出, 左后驱动电机分配转矩高于右前驱动电机, 产生的附加横摆力矩可抵消转矩重构对前轴转向系统的影响。由图 10b 可以

看出, 采用该控制策略显著减小了车辆的跑偏距离; 同时, 如图 10c 所示, 车辆能够有效跟踪期望车速, 保证了驱动电机失效前后车辆的动力性; 如图 10d 所示, 车辆横摆角速度同样能够跟踪其期望值, 保证了车辆的横摆稳定性与行车安全;

在该仿真工况下, 约束方程直接求解法的运算效率为 0.232 6 s/sims。

由仿真结果可知, 相对于无控制时, 直线工况

下的多方法切换容错控制策略能够同时保证驱动电机失效前后车辆的动力性与横摆稳定性, 验证了其在直线工况下的有效性。

图 10 初始车速 80 km/h 且总驱动转矩为 145 N·m 不变直线行驶、异侧双电机失效时, 不同控制方法下的车辆响应及驱动电机输出转矩

2.2 双移线工况仿真

为了检验本文提出的多方法切换容错控制策略在转弯行驶工况下的控制效果, 在双移线工况下进行了仿真验证。同样设定单电机失效形式为左前电机失效, 异侧双电机失效形式为左前和右后电机同时失效, 双移线工况路径如图 11 所示。

2.2.1 40 km/h 加速工况

仿真中, 设定车辆初始车速为 40 km/h, 总驱动转矩为 100 N·m 不变, 设定 5 s 时左前驱动电机失效, 仿真结果如图 12 所示。

由图 12a 可知, 驱动电机失效后造成的附加横摆角速度小于 0.1 (°)/s, 此时选择转矩转移法进行车辆的容错控制; 图 12b 为各驱动电机分配转矩, 与直线行驶工况下的转矩分配相似, 左后电机的分配转矩为其余正常工作电机分配转矩的两倍; 由图

12c 可知, 转矩转移法显著减小了车辆的跑偏距离; 同时, 如图 12d 所示, 在本文提出的控制策略下, 车

图 11 双移线工况轨迹

图12 初始车速40 km/h且总驱动转矩为100 N·m不变双移线工况、左前电机失效时,不同控制方法下的车辆响应及驱动电机输出转矩

速能够有效地跟踪目标值,而无控制情况下,车辆车速则出现了明显降低;由图12e可知,在控制作用下,车辆横摆角速度同样能够有效跟踪期望值,而在无控制情况下,车辆横摆角速度与其期望值出现明显偏差,车辆出现较大跑偏。

2.2.2 70 km/h 加速工况

仿真中,设定车辆初始车速为70 km/h,总驱

动转矩为500 N·m不变,设定2 s时左前驱动电机失效,仿真结果如图13所示。

由图13a可知,此工况下,车辆附加横摆角速度达到了0.2 ($^{\circ}$)/s,选择控制分配法进行车辆的容错控制;图13b为各电机分配转矩,除了满足车辆的广义纵向力与附加横摆力矩约束外,同时保证车辆各驱动轮负荷率之和最小;由图13c可知,侧向

图 13 初始车速 70 km/h 且总驱动转矩为 500 N·m 不变双移线工况、左前电机失效时, 不同控制方法下的车辆响应及驱动电机输出转矩

位移在控制分配法的作用下能够有效地跟踪其期望值, 而无控制情况下车辆则出现了严重的跑偏现象; 由图 13d 和 13e 可以看出, 车速和横摆角速度均能有效跟踪其期望值, 保证了驱动电机失效前后车辆的动力学和横摆稳定性。

2.2.3 70 km/h 加速工况双电机失效

仿真中, 设定车辆初始车速为 70 km/h, 总驱动转矩为 500 N·m 不变, 设定 2 s 时左前与右后驱动电机同时失效, 仿真结果如图 14 所示。

2 s 时左前与右后驱动电机同时失效, 采用约束方程直接求解法得到各驱动电机分配转矩如图 14a 所示。可以看出, 左后驱动电机分配转矩高于右前驱动电机, 产生的附加横摆力矩可抵消转矩重构对前轴转向系统的影响; 由图 14b 可知, 在本文提出的控制策略作用下, 车辆的跑偏距离显著减小; 同时, 如图 14c 和 14d 所示, 车速和横摆角速度均能有效跟踪其期望值, 保证了驱动电机失效前后车辆的动力性和横摆稳定性。

图14 初始车速 70 km/h 且总驱动转矩为 500 N·m 不变双移线工况、异侧双电机失效时, 不同控制方法下的车辆响应及驱动电机输出转矩

由上述仿真结果可以看出, 在双移线工况下, 本文提出的多方法切换容错控制策略仍具有良好的控制效果, 相对于无控制的情况, 能够有效保证异侧双电机失效前后车辆的动力性与横摆稳定性。

2.3 结果分析

在多种直线与转弯行驶工况下, 对所提出的控制策略进行了仿真验证, 结果表明, 本文提出的基于多方法切换的容错控制策略能够有效保证驱动电机失效前后车辆的动力性和横摆稳定性, 同时, 能够根据实际工况切换控制方法, 有效提高控制策略的运算效率。文中所述转矩转移法、控制分配法和约束方程直接求解法的运算效率如表 2 所示。

表 2 各控制方法计算效率

电机失效形式	控制方法	仿真计算效率/(s/sims)
单电机失效	转矩转移法	0.172 2
单电机失效	控制分配法	1.638 6
异侧双电机失效	约束方程直接求解法	0.232 6

由表 2 可知, 相对于控制分配法, 转矩转移法和约束方程直接求解法能够有效提高控制算法的执

行效率。本文提出的控制策略能够根据不同的工况选择合适的控制方法, 在保证车辆动力性和横摆稳定性的同时, 有效降低控制器的运算负荷。

3 结论

建立了一种多方法切换控制策略, 首先建模分析了前轴异侧电机转矩不等对转向系统的影响, 引入预估车辆跑偏距离作为多方法切换的依据。在单电机失效时引入转矩转移法与控制分配法的切换规则, 在异侧双电机失效时利用约束方程直接求解法进行电机失效容错控制。仿真结果表明, 在多种直线与转弯行驶工况下, 提出的基于多方法切换的容错控制策略均能有效保证驱动电机失效前后车辆的动力性与横摆稳定性, 同时有效提高了控制器的运算效率。

参 考 文 献

- [1] HORI Y. Future vehicle driven by electricity and control-research on four-wheel-motored UOT electric

- march II[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(5): 954-962.
- [2] WANG R, WANG J. Actuator-redundancy-based fault diagnosis for four-wheel independently actuated electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(1): 239-249.
- [3] MATTEO K, ARNAU D, JOSEP M. Yaw moment MRAC with optimal torque vectoring for a four in-wheel motor EV[C]//2018 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2018, 1820-1825.
- [4] ALIPOU H, BANNAE S M B, SABAH M. A modified integral sliding mode control to lateral stabilisation of 4-wheel independent drive electric vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(12): 1584-1606.
- [5] NAM K, FUJIMOTO H, HORI Y. Lateral stability control of in-wheel-motor-driven electric vehicles based on sideslip angle estimation using lateral tire force sensors[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(5): 1972-1983.
- [6] ZHANG D, LIU G, ZHOU H. Adaptive sliding mode fault-tolerant coordination control for four-wheel independently driven electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(11): 9090-9100.
- [7] SILVEIRA A, RUI E A, CASTRO R D. Survey on fault-tolerant diagnosis and control systems applied to multi-motor electric vehicles[C]//Doctoral Conference on Computing, 2011, 353-360.
- [8] WANG R, WANG J. Fault-tolerant control with active fault diagnosis for four-wheel independently driven electric ground vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(9): 4276-4287.
- [9] MUTOH N, TAKAHASHI Y, TOMITA Y. Failsafe drive performance of electric vehicles with the structure driven by the front and rear wheels independently[C]//Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2008: 1064-1070.
- [10] MUTOH N, TAKAHASHI Y. Front-and-rear wheel independent drive type electric vehicle with the outstanding driving performance suitable for next-generation advanced EVs[C]//IEEE Vehicle Power & Propulsion Conference. IEEE, 2009: 280-285.
- [11] 褚文博, 罗禹贡, 韩云武, 等. 基于规则的分布式电驱动车辆驱动系统失效控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(10): 90-95.
- CHU Wenbo, LUO Yugong, HAN Yunwu, et al. Rule-based traction system failure control of distributed electric drive vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(10): 90-95.
- [12] WANNER D, WALLMARK O, JONASSON M, et al. Control allocation strategies for an electric vehicle with a wheel hub motor failure[J]. International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing, 2015, 10(3): 263-287.
- [13] NAH J, KIM W, YI K, et al. Fault-tolerant driving control of a steer by wire system for six-wheel driving six-wheel steering vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2013, 227(4): 506-520.
- [14] ITO A, HAYAKAWA Y. Design of fault tolerant control system for electric vehicles with steer-by-wire and in-wheel motors[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(21): 556-561.
- [15] 张多, 刘国海, 赵文祥, 等. 电动汽车多电机独立驱动技术研究综述[J]. 汽车技术, 2015(10): 1-6.
- ZHANG Duo, LIU Guohai, ZHAO Wenxiang, et al. Overview of multi-motor independent drive of electric vehicles[J]. Automotive Technology, 2015(10): 1-6.
- [16] 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.
- [17] WANG R, WANG J. Actuator-redundancy-based fault diagnosis for four-wheel independently actuated electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(1): 239-249.
-
- 作者简介: 张雷, 男, 1987年出生, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学理论与控制, 电动车辆储能系统管理技术等。
E-mail: lei_zhang@bit.edu.cn
- 余文, 男, 1996年出生。主要研究方向为四轮轮毂电机驱动电动汽车动力学理论与控制。
E-mail: 1670901511@qq.com
- 王震坡(通信作者), 男, 1976年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学理论与控制, 车用锂离子动力电池成组理论与技术。
E-mail: wangzhenpo@bit.edu.cn
- 丁晓林, 男, 1993年出生, 博士研究生。主要研究方向为四轮轮毂电机驱动电动汽车动力理论与控制。
E-mail: xld_vehicle@163.com