

分布式驱动电动汽车多目标转矩分配策略*

李琴¹, 李壮¹, 汤建明¹, 王勇², 张博远¹, 贺德强¹

(1. 广西大学机械工程学院, 南宁 530000; 2. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100080)

[摘要] 转矩分配策略对分布式驱动电动汽车起着至关重要的作用, 可以提高车辆安全性和能耗经济性。为减少前后轴双电机驱动电动汽车的能耗, 本文提出了一种基于分层控制架构的多目标转矩分配方法, 综合考虑车辆安全性、操纵稳定性和能耗。上层是主动安全层, 基于非线性模型预测控制(NMPC)实现车辆的安全性和稳定性控制; 下层是转矩分配层, 考虑电机空载损耗下的前后轴电机转矩控制。仿真结果表明, 本文所提出的多目标转矩分配方法与平均分配方法相比, 能够在确保车辆安全行驶的同时, 提升车辆的稳定性, 在NEDC和WLTC工况下整车能耗分别降低了6.6%和3.5%。

关键词: 分布式驱动电动汽车; 转矩分配; 节能控制; 稳定性控制; 多目标优化

Multi-objective Torque Distribution Strategy for Distributed Drive Electric Vehicles

Li Qin¹, Li Zhuang¹, Tang Jianming¹, Wang Yong², Zhang Boyuan¹ & He Deqiang¹

1. School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530000;

2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100080

[Abstract] The torque distribution strategy plays a crucial role in improving the safety and energy efficiency of distributed drive electric vehicles. In order to reduce the energy consumption of electric vehicles with dual-motor drive on the front and rear axles, a multi-objective torque distribution method based on a hierarchical control architecture is proposed in this paper, that comprehensively considers vehicle safety, handling stability, and energy efficiency. The upper layer is the active safety layer, which uses nonlinear model predictive control (NMPC) to achieve vehicle safety and stability control. The lower layer is the torque distribution layer, which considers the torque control of the front and rear axle motors under no-load loss of the motor. The simulation results show that compared with the average distribution method, the proposed multi-objective torque distribution method can improve the vehicle's stability while ensuring safe driving, with the total energy consumption reduced by 6.6% and 3.5% under the NEDC and WLTC driving cycles, respectively.

Keywords: distributed drive electric vehicles; torque distribution; energy saving control; stability control; multi-objective optimization

前言

随着对环境问题的重视和能源危机的日益严

重, 发展高效电动汽车已成为国家战略。电动汽车有效缓解了化石燃料带来的环境污染和能源枯竭, 成为应对这些挑战的关键举措。安全性和能源管理一直是电动汽车研究的热点^[1-4]。分布式驱动电动

* 广西自然科学基金青年基金(2025GXNSFBA069567)、广西科技计划桂科AD基金(23026205)和北京理工大学科技创新计划项目(2023YCX023)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09月13日。

通信作者: 王勇, 博士, E-mail: 17862709675@163.com。

汽车在车轮上直接安装电机,提供了灵活的转矩分配解决方案。这种设计凭借出色的动力性、经济性和安全性,成为新兴研究热点,研究主要集中在基于安全性和经济性的转矩分配策略,能显著提高车辆稳定性和整车能效^[5-7]。

现有的转矩分配控制研究可分为两类:以提升操纵稳定性为目标的转矩分配,以及以提升经济性为目标的转矩分配。前者从车辆横摆稳定性控制角度出发,研究分布式驱动电动汽车的直接横摆力矩控制(DYC)策略。Ahmadian等^[8]提出主动前轮转向(AFS)和DYC集成的自适应协调控制,但切换时存在控制量波动。宋强等^[9]提出了基于多参数控制的车辆操纵稳定性控制方案,能在高速低附着条件下改善车辆稳定性和轨迹跟踪。Bai等^[10]提出了一种基于模型预测控制的纵向动力学底盘综合控制系统,通过双层转矩分配提高了车辆的整体稳定性和制动性能。Han等^[11]提出了基于质心侧偏角相位特性的能耗最低横摆稳定控制方案,实现横摆角速度和质心侧偏角的差异化控制。

以提升经济性为目标的转矩分配策略的研究主要是以提升分布式驱动电动汽车的轮毂电机运行效率为目的,其原理是根据电机的工作效率会随工作点的变化而产生较大变动的特性,采用转矩分配的方式让电机尽量在高效率点工作。漆星等^[12]提出了基于电机效率最优和基于电池效率最优的前后轮双电机转矩分配方法,采用多目标优化算法实现整体效率的优化。Hu等^[13]提出了基于模型控制理论的节能转矩分配策略,利用电机效率图提高电机效率的同时降低整车能耗。Fan等^[14]针对低速工况提出了包括自适应巡航跟车控制和基于能效的转矩分配策略,采用模型预测控制和遗传算法实现主车能耗最小。Chen等^[15]提出了基于规则的能效转矩分配策略,根据车速选择制动过程的力矩分配,兼顾能效和安全性。

尽管上述研究取得了显著进展,但单一目标优化的传统转矩分配策略仍存在局限性,无法很好地平衡车辆动力学稳定性和能量利用效率的需求。另外,现有研究鲜有同时考虑电机空载损耗的能效优化。为此,本文提出一种基于分层优化的多目标转矩分配策略,在保证车辆安全的同时最小化能量消耗。上层采用非线性模型预测控制(NMPC)计算直接偏航力矩以提高系统安全性,下层采用考虑电机空载损耗的多目标优化转矩分配以确保电机高效运行。该方法有效兼顾了车辆安全性和能量管理的协

同优化。最后,基于MATLAB/Simulink仿真平台验证该方法的有效性。

1 车辆模型

1.1 2自由度车辆动力学模型

分布式前后轴双电机驱动电动汽车由安装在车轮前后轴上的两个永磁同步电机驱动。考虑到2自由度车辆模型能够充分捕捉关键动力学特性、计算复杂度较低且与优化框架相匹配,基于对问题需求和算法实现的权衡,本文采用考虑横向运动和偏航运动的2自由度车辆动力学模型,如图1所示,包括横向运动和偏航运动,其运动微分方程如下:

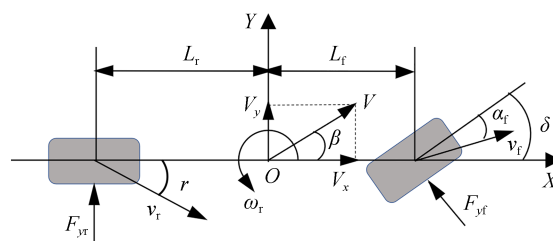


图1 2自由度车辆动力学示意图

$$\begin{cases} \dot{V}_y = \frac{F_{yf} + F_{yr}}{m} - V_x \omega_r \\ \dot{\omega}_r = \frac{L_f F_{yf} - L_r F_{yr}}{I_z} \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为整车质量; L_f, L_r 为车辆前、后轴到质心的距离; I_z 为汽车的转动惯量; V_x 为纵向速度; δ 为前轮转角; ω_r 为横摆角速度。

为拓展车辆模型适用范围,引入Fiala非线性轮胎模型^[16-18]:

$$F_y = \begin{cases} -C_\alpha \tan \alpha + \frac{C_\alpha^2}{3\mu F_z} |\tan \alpha| \tan \alpha - \\ \frac{C_\alpha^3}{27\mu^2 F_z^2} \tan^3 \alpha, & |\alpha| < \alpha_{\text{sat}} \\ -\mu F_z \operatorname{sgn} \alpha, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$\alpha_{\text{sat}} = \arctan \frac{3\mu F_z}{C_\alpha} \quad (3)$$

式中: C_α 为轮胎侧偏刚度; μ 为路面附着系数; F_z 为轮胎垂向载荷; α 为轮胎侧偏角; α_{sat} 为轮胎饱和侧偏角。前后轮轮胎侧偏角计算公式为

$$\begin{cases} \alpha_f = \frac{L_f \omega_r}{V_x} + \beta - \delta \\ \alpha_r = \beta - \frac{L_r \omega_r}{V_x} \end{cases} \quad (4)$$

式中: α_f 和 α_r 分别为前、后轮轮胎侧偏角; β 为质心侧偏角。车辆加速制动会引起轮胎垂向载荷动态变化。根据非线性轮胎模型,垂向载荷变化影响轮胎侧向力,进而影响整车横动力学。考虑纵向负载转移效应,前后轴垂向载荷公式^[18-19]为

$$\begin{cases} F_{zf} = \frac{L_r}{L} mg - \frac{h_{CG}}{L} ma_x \\ F_{zr} = \frac{L_f}{L} mg + \frac{h_{CG}}{L} ma_x \end{cases} \quad (5)$$

式中: h_{CG} 是到车辆质心高度; g 是重力加速度; L 是车辆轴距; a_x 是车辆纵向加速度。

1.2 纵向运动控制模型

纵向动力学控制使车辆能够跟踪参考纵向速度。由前馈控制和基于PI的反馈控制组成,利用驱动牵引力和负阻力建立了纵向动力学模型,即

$$m\dot{V}_x = F_t - F_{res} = T_{des} R_{eq} - F_{res} \quad (6)$$

$$F_{res} = F_a + F_w = m \times g \times c_r + \frac{1}{2} \times \rho_L \times c_w \times A_f \times V_x^2 \quad (7)$$

式中: F_t 为电机提供的总牵引力; F_{res} 为行驶阻力; T_{des} 为总转矩需求; R_{eq} 为等效轮胎半径。行驶阻力由加速度阻力 F_a 和空气阻力 F_w 组成,其中坡道阻力对结果的影响较小,故不考虑其影响。其中 c_r 、 ρ_L 、 c_w 、 A_f 分别表示车辆的滚动系数、空气密度、风阻系数和迎风面积^[20]。由于理论总需求转矩 T_{des} 与式(8)中前馈控制器所采用的转矩需求存在偏差,故采用反馈控制器来解决^[21]。

$$T_{des,ff} = \xi_k \cdot m \cdot R_{eq} \cdot sV_x \quad (8)$$

$$T_{des,fb} = \frac{s\xi_p + \xi_i}{s} (V_{x,des} - V_x) \quad (9)$$

式中: ξ_k 是比例增益; s 为拉普拉斯算子。本文采用比例积分(PI)控制器的反馈控制器消除纵向速度的静态偏差。故 T_{des} 是前馈转矩需求与反馈转矩需求之和:

$$T_{des} = T_{des,ff} + T_{des,fb} \quad (10)$$

1.3 电机模型

永磁同步电机功率密度高、效率高、转矩范围大,故本研究选择永磁同步电机作为分布式驱动电动汽车的驱动电机。对于分布式驱动电动汽车,电机在 t 时刻的功率计算公式为

$$P_m(t) = \frac{T_m(t)n_m(t)}{9550} \quad (11)$$

式中: P_m 为电机功率; T_m 为电机转矩; n_m 为电机转速。本文重点研究轴间驱动力分配的能耗,因此不

考虑电池及其他组件的工作效率。

在电机的工作过程中,期望电机尽量工作在高效率区。图2为本文所用前后轴电机的电机效率MAP图,直观地表达电机的工作效率与电机转矩、电机转速之间的关系。

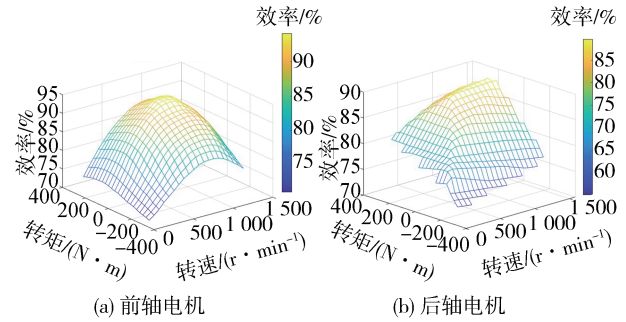


图2 电机效率MAP图

2 多目标转矩分配方法

2.1 策略框架

提出的多目标能效优化的转矩分配策略采用分层框架,如图3所示。上层采用非线性模型预测控制(NMPC)计算直接偏航力矩,提高系统安全性和稳定性;下层采用基于多目标优化的转矩分配方法,目标包括最小化电机损耗功率和电机空载损耗,确保电机在高效区域运行。该方法在保证车辆稳定性和安全性的基础上,以最低能耗实现最优的转矩分配。

2.2 上层主动安全控制器

通过对车辆动力学的非线性化,设计了一种NMPC控制器,用于对前轮转向角控制和计算直接偏航力矩,使车辆能够平稳、安全地实现轨迹跟踪控制。

由式(1)建立状态空间模型,表达式如下:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (12)$$

$$\text{其中: } \mathbf{x} = [v_y, \omega_r] \quad (13)$$

$$\mathbf{u} = [M_z] \quad (14)$$

式中: \mathbf{f} 为系统的状态方程; \mathbf{x} 为状态变量; \mathbf{u} 为控制变量。

系统输出方程为

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} = \mathbf{C}[v_y, \omega_r] \quad (15)$$

$$\mathbf{C} = [I_2] \quad (16)$$

设控制时域和预测时域分别为 N_c 和 N_p ,在采样时刻 k 控制变量序列 $\mathbf{U}_c(k)$ 和系统输出变量序列 $\mathbf{Y}_p(k)$ 分别为

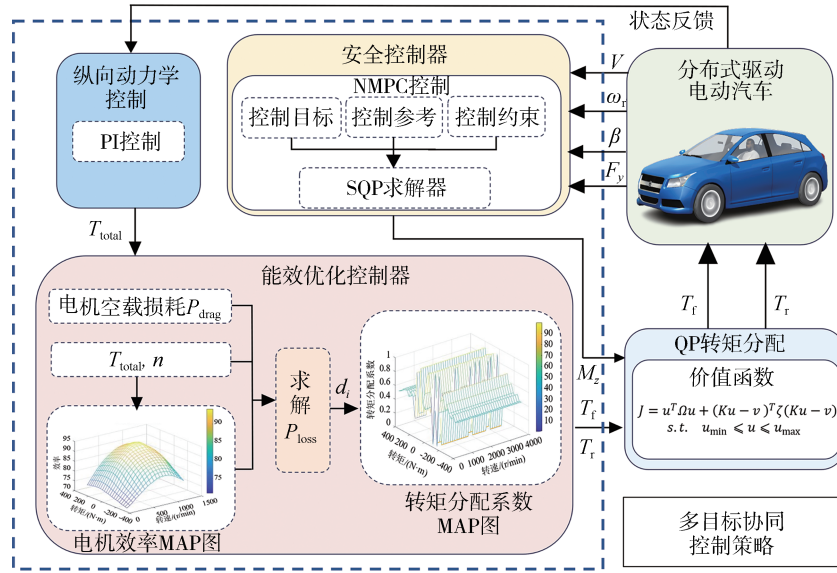


图3 提出的转矩分配控制策略框架图

$$U_i(k) = \begin{bmatrix} u_i^T(k|k) \\ u_i^T(k+1|k) \\ \vdots \\ u_i^T(k+N_c-1|k) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$Y_i(k) = \begin{bmatrix} y_i^T(k|k) \\ y_i^T(k+1|k) \\ \vdots \\ y_i^T(k+N_p|k) \end{bmatrix} \quad (18)$$

在采样时刻 k , 预测控制起始点 $y_i(k)$ 等于 $y_i(k|k)$, 以此作为系统状态的初始值来预测系统未来的动态变化。系统状态和输出预测分别如式(19)和式(20)所示。

$$\begin{cases} x_i(k+1|k) = f^k(x_i(k|k), u_i(k|k))\Delta t + y_i(k|k) \\ x_i(k+2|k) = f^k(x_i(k+1|k), u_i(k+1|k))\Delta t + y_i(k+1|k) \\ \dots\dots\dots \\ x_i(k+N_c|k) = f^k(x_i(k+N_c-1|k), u_i(k+N_c-1|k))\Delta t + y_i(k+N_c-1|k) \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} y_i(k+1|k) = C_i x_i(k+1|k) \\ y_i(k+2|k) = C_i x_i(k+2|k) \\ \dots\dots\dots \\ y_i(k+N_p|k) = C_i x_i(k+N_p|k) \end{cases} \quad (20)$$

在每个采样时刻, 利用实时测量的车辆状态信息更新系统预测变量, 进行一次优化求解, 得到最优

直接偏航力矩。该优化过程在任务结束前持续进行。

NMPC 通过求解每个时间步长的优化问题, 得到最优的直接偏航力矩, 以提高车辆在极限工况下的操纵稳定性和主动安全性。

(1) 车辆稳定性控制通过跟踪驾驶员期望响应实现, 目标函数综合考虑侧向速度和质心侧偏角:

$$J_1 = \sum_{i=1}^p \left\| y(k+i|k) - y_{des}(k+i) \right\|_Q^2 = \sum_{i=1}^p [Q_{v_y}(v_y(k+i|k) - v_{ydes}(k+i))^2 + Q_{\omega_r}(\omega_r(k+i|k) - \omega_{rdes}(k+i))^2] \quad (21)$$

式中: Q_{v_y} 为侧向速度的权重; Q_{ω_r} 是质心侧偏角控制的权重; v_{ydes} 和 ω_{rdes} 分别是期望的侧向速度和质心侧偏角。

(2) 在满足安全稳定的前提下, 还应避免控制信号的变化率过大。

$$J_2 = \sum_{i=0}^{m-1} \left\| \Delta u(k+1|k) \right\|_R^2 = \sum_{i=0}^{m-1} [R(\Delta M_i(k+1|k))^2] \quad (22)$$

(3) 为防止在求解过程中存在变量不可解的问题, 须加入松弛变量, 并设置相应的代价函数:

$$J_3 = \left\| S(\text{opt}) \right\|_{\zeta}^2 \quad (23)$$

式中 ζ 是表征松弛变量重要程度的权重阵。

根据非线性控制模型方程和上述各目标函数方程的定义, 优化问题可表示为

$$\begin{cases} \min J(\mathbf{u}) = J_1 + J_2 + J_3 \\ \text{s. t. } h_m(\mathbf{u}) \leq 0, m = 1, 2, \dots \\ g_n(\mathbf{u}) \leq 0, n = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (24)$$

式中: $h_m(\mathbf{u})$ 为线性不等式约束; $g_n(\mathbf{u})$ 为非线性不等式约束。

序列二次规划(SQP)是一种有效求解非线性约束规划问题的方法。它在每个迭代点处求解一个二次规划子问题,得到搜索方向,然后进行一维搜索得到新迭代点,直至靠近最优解。SQP算法流程如下。

(1)取合理的初始解 u_0

(2)求解二次规划子问题

$$\begin{cases} \min_d [\nabla J(\mathbf{u}_k)]^T \mathbf{d} + \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \nabla^2 J(\mathbf{u}_k) \mathbf{d} \\ \text{s. t. } [\nabla h_m(\mathbf{u}_k)]^T \mathbf{d} + h_m(\mathbf{u}_k) \leq 0 \\ [\nabla g_n(\mathbf{u}_k)]^T \mathbf{d} + g_n(\mathbf{u}_k) \leq 0 \end{cases} \quad (25)$$

得到搜索方向 d_k ;

(3)如果 $|d_k| < \varepsilon$ 或者 $k > N_c$, 则停止,反之继续进行下一步;

(4)找到步长 α_k , 满足 $0 \leq \alpha_k \leq 1$ 且

$$f(\mathbf{u}_k + \alpha_k d_k) < f(\mathbf{u}_k)$$

(5)令 $\mathbf{u}_{k+1} = \mathbf{u}_k + \alpha_k d_k, k = k + 1$, 转至步骤(2)。

2.3 下层能效转矩分配控制器

下层控制器的目标是优化前后轴之间的能量分配,以满足上层的稳定性要求。本小节强调电机能效的减少是实现优化的关键因素。

2.3.1 考虑电机空载损耗的转矩分配模型

前后轴电机之间的转矩分配由转矩分配系数确定,转矩分配系数定义如下:

$$d_i = \frac{T_r}{T_{\text{total}}} = \frac{T_r}{T_f + T_r} \quad (26)$$

式中: T_f, T_r 分别为前后电机转矩; T_{total} 为所需总转矩。转矩分配系数 d_i 取值范围为0到1,当 $d_i=0$ 时仅前轴驱动, $d_i=1$ 时仅后轴驱动,其他值均表示前后轴电机共同驱动。

分布式电动车电机直连车轴,单电机驱动模式下非工作电机被带动旋转,产生的损耗称为电机空载损耗 T_{drag} 。可通过测功机测量得到电机空载损耗,则电机空载损失功率的计算公式为

$$P_{\text{drag}} = \frac{T_{\text{drag}} \cdot n}{9550} \quad (27)$$

根据电机在车辆行驶过程中驱动和制动时的能量流动特性,得出电机在驱动和制动时的电机损耗功率。

$$\text{驱动: } P_{\text{loss}_d} = P_m \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) = \frac{T_m \cdot n_m}{9550} \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \quad (28)$$

$$\text{制动: } P_{\text{loss}_b} = P_m \cdot (1 - \eta) = \frac{T_m \cdot n_m}{9550} \cdot (1 - \eta) \quad (29)$$

式中: P_{loss} 代表电机损耗功率; η 是电机在当前转矩和转速下的效率。

为便于分析,假设车辆转速相等,前后轴减速器的传动比相同。由式(24)和式(25),建立电机总损失功率模型:

$$J_d = \frac{T_{\text{total}} \cdot n}{9550} \cdot \left[(1 - d_i) \cdot \frac{1 - \eta_f}{\eta_f} + d_i \cdot \frac{1 - \eta_r}{\eta_r} \right] \quad (30)$$

$$J_b = \frac{T_{\text{total}} \cdot n}{9550} \cdot \left[(1 - d_i) \cdot (1 - \eta_f) + d_i \cdot (1 - \eta_r) \right] \quad (31)$$

式中: η_f 为转速为 n 、转矩为 $T_{\text{total}} \cdot (1 - d_i)$ 时的前轴电机效率; η_r 为转速为 n 、转矩为 $T_{\text{total}} \cdot d_i$ 时的后轴电机效率。

考虑电机空载损耗时,需要根据式(23)对目标函数进行修改。当处于单电机模式($d_i=0, 1$)时,须分别对相应电机的空载损耗进行解释,最终目标函数可表述如下:

$$J_d = \begin{cases} \frac{T_{\text{total}} \cdot n}{9550} \cdot \left[(1 - d_i) \cdot \frac{1 - \eta_f}{\eta_f} + d_i \cdot \frac{1 - \eta_r}{\eta_r} \right], & 0 < d_i < 1 \\ \frac{T_{\text{total}} \cdot n}{9550} \cdot \frac{1 - \eta_r}{\eta_r} + P_{\text{drag}_f}(n), & d_i = 1 \\ \frac{T_{\text{total}} \cdot n}{9550} \cdot \frac{1 - \eta_f}{\eta_f} + P_{\text{drag}_r}(n), & d_i = 0 \end{cases} \quad (32)$$

$$J_b = \begin{cases} \frac{T_{\text{total}} \cdot n}{9550} \cdot \left[(1 - d_i) \cdot (1 - \eta_f) + d_i \cdot (1 - \eta_r) \right], & 0 < d_i < 1 \\ \frac{T_{\text{total}} \cdot \eta}{9550} \cdot (1 - \eta_r) + P_{\text{drag}_f}(n), & d_i = 1 \\ \frac{T_{\text{total}} \cdot \eta}{9550} \cdot (1 - \eta_f) + P_{\text{drag}_r}(n), & d_i = 0 \end{cases} \quad (33)$$

式中 $P_{\text{drag}_f}(n)$ 和 $P_{\text{drag}_r}(n)$ 表示转速为 n 时的前后轴电机空载损耗功率。

以电机总损耗功率最小为目标函数,可得在总需求转矩 T_{total} 和转速 n 条件下,电机总损耗可表示为转矩分配系数 d_i 的函数。据此可建立考虑电机空载损耗的转矩分配控制模型。

$$\text{目标函数:} \begin{cases} \min J_d \\ \min J_b \end{cases} \quad (34)$$

控制变量: d_i

$$\text{约束条件:} \begin{cases} |T_{\text{total}} \cdot (1 - d_i)| \leq T_{\text{fmax}} \\ |T_{\text{total}} \cdot d_i| \leq T_{\text{rmax}} \\ 0 \leq n \leq n_{\text{max}} \\ \eta_f = \eta_f [n, T_{\text{total}} \cdot (1 - d_i)] \\ \eta_r = \eta_r (n, T_{\text{total}} \cdot d_i) \end{cases} \quad (35)$$

式中: T_{fmax} 、 T_{rmax} 分别表示当前转速下前后轴电机的最大转矩; n_{max} 是电机的最大转速。

2.3.2 转矩分配系数的确定

根据数学模型和效率MAP图,确定离线最优转矩分配系数。在双电机模式下,计算不同分配系数下的总损耗最小值 P_{loss_D} 及对应的 $d_{i,D}$,并与前后电机总损耗 P_{loss_f} 和 P_{loss_r} 对比,确定使总损耗最小的最优转矩分配系数。

$$\begin{cases} \text{若 } P_{\text{loss}_f} \leq P_{\text{loss}_D} \text{ 则 } d_i = 0; \text{ 反之, } d_i = d_{i,D} \\ \text{若 } P_{\text{loss}_r} \leq P_{\text{loss}_D} \text{ 则 } d_i = 1; \text{ 反之, } d_i = d_{i,D} \end{cases}$$

基于考虑和不考虑空载损耗的两种目标函数,针对不同总转矩和转速条件,分别以式(32)、式(33)和式(30)、式(31)为目标函数进行求解。结果以MAP图的形式表示,可用于实时查表应用。图4为这两种情况下的转矩分配系数MAP图。

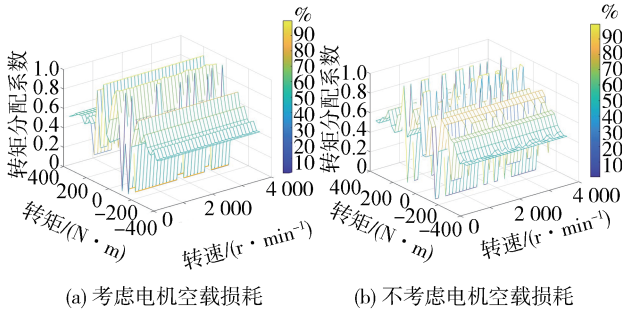


图4 转矩分配系数MAP图

从图中可看出:总转矩需求是最优转矩分配的主导因素,影响较大,而电机转速影响相对较小。在低转矩时,采用单前轴电机驱动可获得较高效率,实现节能;在高转矩时,采用双电机工作模式使整体电机在高效区域运行。

2.3.3 转矩分配控制方法

根据先前的研究,将驱动电机的工作形式定义为

$$T'_i = d_i T_i, \quad i = \text{fl, fr, rl, rr} \quad (36)$$

式中: T'_i 为电机实际输出转矩; T_i 为电机期望输出转矩; d_i 为前后轴转矩分配系数; fl, fr, rl, rr 分别为左前轮、右前轮、左后轮、右后轮。因为本文针对的是前后轴双电机分布式电动汽车,故前轴左右轮转矩相等,后轴左右轮转矩相等,即 $T_{\text{fl}} = T_{\text{fr}} = T_{\text{rl}} = T_{\text{rr}}$ 。

在转矩分配控制器中,建立基于轮胎附着利用率最小化的优化目标函数:

$$\min J = \min \sum_{i = \text{fl, fr, rl, rr}} \frac{(T_i / \omega_r)^2}{(\mu F_{zi})^2} \quad (37)$$

在优化分配算法求解过程中,有效解须满足总需求转矩 T_{total} 和直接偏航力矩 M_z 的要求,还受限于驱动电机的最大输出转矩,约束条件为

$$\begin{cases} (d_{\text{fl}} T_{\text{fl}} + d_{\text{fr}} T_{\text{fr}} + d_{\text{rl}} T_{\text{rl}} + d_{\text{rr}} T_{\text{rr}}) = T_{\text{total}} \\ \frac{d_s}{2\omega_r} (d_{\text{fr}} T_{\text{fr}} - d_{\text{fl}} T_{\text{fl}}) + \frac{d_s}{2\omega_r} (d_{\text{rr}} T_{\text{rr}} - d_{\text{rl}} T_{\text{rl}}) = M_z \\ \min T_i \leq T_i \leq \max T_i \end{cases} \quad (38)$$

采用二次规划方法对各轮驱动转矩进行求解,得到的性能指标为

$$\begin{cases} J = \mathbf{u}^T \mathbf{\Omega} \mathbf{u} + (\mathbf{K} \mathbf{u} - \mathbf{v})^T \zeta (\mathbf{K} \mathbf{u} - \mathbf{v}) \\ \text{s. t. } \mathbf{u}_{\text{min}} \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}_{\text{max}} \end{cases} \quad (39)$$

其中:

$$\mathbf{\Omega} = \text{diag} \left\{ \frac{1}{(r_w \mu F_{z\text{fl}})^2}, \frac{1}{(r_w \mu F_{z\text{fr}})^2}, \frac{1}{(r_w \mu F_{z\text{rl}})^2}, \frac{1}{(r_w \mu F_{z\text{rr}})^2} \right\}$$

式中: $\zeta = \text{diag} \{ \zeta_1, \zeta_2 \}$ 是满足等式条件的权重矩阵, ζ_1, ζ_2 分别是 T_{total} 和 M_z 的权重; $\mathbf{u} = [T_{\text{fl}} \quad T_{\text{fr}} \quad T_{\text{rl}} \quad T_{\text{rr}}]^T$ 是求解器的优化向量; \mathbf{v} 为 T_{total} 和 M_z 的期望值,即

$$\mathbf{v} = [T_{\text{total}} \quad M_z]^T \quad (40)$$

\mathbf{K} 为增益矩阵,可表示为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} [d_{\text{fl}} \quad d_{\text{fr}} \quad d_{\text{rl}} \quad d_{\text{rr}}] \\ \frac{d_s}{2\omega_r} \times [-d_{\text{fl}} \quad d_{\text{fr}} \quad -d_{\text{rl}} \quad d_{\text{rr}}] \end{bmatrix} \quad (41)$$

3 实验结果

3.1 实验设置

本文基于 MATLAB/Simulink 仿真平台构建了汽车模型。仿真模型的主要参数设置如表1所示。

表1 仿真模型主要参数

参数	数值
车辆质量	1 412 kg
前轴距离	1.1 m
后轴距离	1.65 m
车轮有效半径	298 mm
减速器传动比	8.61
前电机额定功率	65 kW
后电机额定功率	40 kW

为验证所提出的多目标协调控制策略的实验效果,采用了以下几种控制方法进行对比实验。

LQR+AD:上层采用线性二次型调节器(LQR),下层采用转矩平均分布(AD)。

MPC+AD:上层采用模型预测控制(MPC),下层同样采用转矩平均分布(AD)。

NMPC+WCNLC:上层采用非线性模型预测控制(NMPC),下层采用不考虑电机空载消耗(WCNLC)的转矩分配控制。

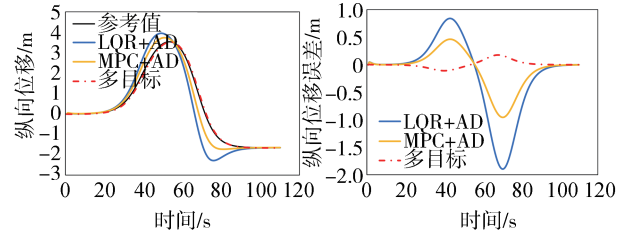
多目标协调控制(本文方法):上层采用非线性模型预测控制,下层采用考虑电机空载消耗的转矩分配控制。

将这几种方法在双移线(DLC)、NEDC和WLTC 3种工况下进行仿真实验,对比分析车辆安全性和能耗效果。

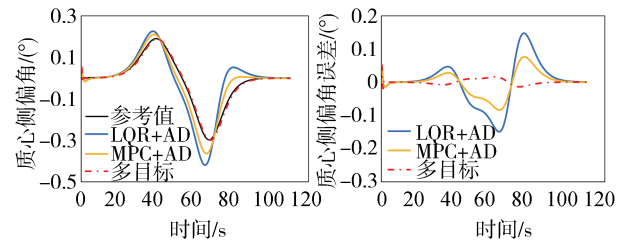
3.2 车辆安全性能分析

首先,对上层安全控制策略的结果进行分析。车辆在湿滑路面上进行DLC工况仿真,参考车速 $V_x=80$ km/h,路面附着系数 $\mu=0.35$ 。将本文提出的多目标控制方法与LQR+AD和MPC+AD方法进行对比实验。图5为DLC工况下安全性能分析结果。

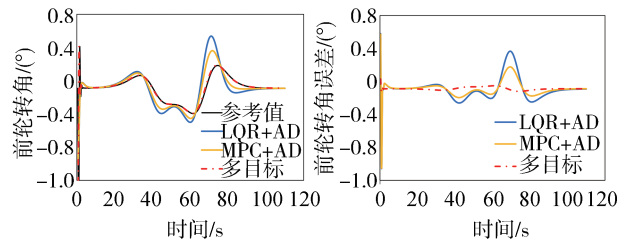
从纵向位移和纵向位移误差(图5(a))可以看出,在3种方法中,不采用主动安全控制的LQR+AD方法效果最差,纵向位移误差最大约为1.8 m。由本文提出的采用主动安全控制的多目标方法效果最好,可以很好地跟踪参考路径,最大纵向位移误差仅约0.2 m,通过本文提出的多目标纵向位移减少约1.6 m。在质心侧偏角和质心侧偏角误差(图5(b))中看出,本文提出的多目标方法的质心侧偏角仅为 0.3° ,最接近参考值,其他方法的质心侧偏角均大于 0.3° 。LQR+AD方法最大质心侧偏角误差约为 0.15° ,而多目标方法约为 0.03° 。在前轮转角与前轮转角误差(图5(c))中,无主动安全控制的LQR+AD和MPC+AD方法的前轮角度均大于本文所提多



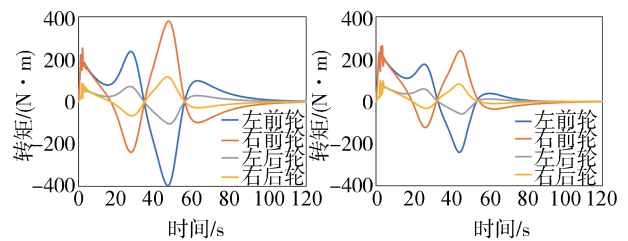
(a) 纵向位移与纵向位移误差



(b) 质心侧偏角与质心侧偏角误差



(c) 前轮转角与前轮转角误差



(d) MPC+AD转矩分布与多目标控制的转矩分布

图5 DLC工况安全性能结果

目标方法,LQR+AD的最大前轮角度甚至是本文所提多目标方法的近两倍。多目标方法能很好地跟踪前轮参考值,误差稳定在 0.2° 以内,具有更好的稳定性。从MPC+AD和本文所提出的多目标方法的转矩分布图(图5(d))中可以看出,多目标方法最大转矩 270 N·m小于MPC+AD方法的最大转矩 390 N·m,这是因为多目标方法利用更小的前轮角度来降低转矩要求,从而有利于降低能耗。

为了更全面地评估控制方法,在不同车速(60、80 km/h)和不同路面附着系数(0.35、0.5)下进行了DLC工况的仿真对比,结果如表2所示。

表2 DLC不同工况安全性能结果对比

工况	方法	eY_{\max}/m	$e\omega_{\max}/(^{\circ})$	$e\delta_{\max}/(^{\circ})$
$V_x=80\text{ km/h}$ $\mu=0.35$	LQR+AD	1.86	0.148	0.41
	MPC+AD	0.98	0.073	0.23
	多目标	0.24	0.052	0.13
$V_x=60\text{ km/h}$ $\mu=0.35$	LQR+AD	1.52	0.125	0.33
	MPC+AD	0.64	0.053	0.18
	多目标	0.14	0.033	0.10
$V_x=80\text{ km/h}$ $\mu=0.5$	LQR+AD	1.55	0.120	0.30
	MPC+AD	0.71	0.060	0.21
	多目标	0.18	0.035	0.13

注: eY_{\max} 为最大纵向位移误差; $e\omega_{\max}$ 为最大质心侧偏角误差;
 $e\delta_{\max}$ 为最大前轮转角误差。

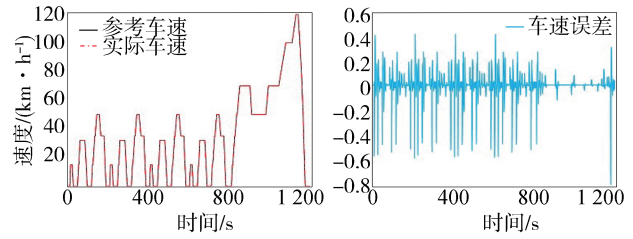
根据表2所示的仿真结果可看出:在 $V_x=60\text{ km/h}$, $\mu=0.35$ 条件下,多目标方法最大纵向位移误差仅为0.14 m,比LQR+AD减小1.38 m,最大质心侧偏角误差和最大前轮转角误差也明显减小;在 $V_x=80\text{ km/h}$ 和 $\mu=0.5$ 条件下,多目标方法最大纵向位移误差、最大质心侧偏角误差和最大前轮转角误差分别优于MPC+AD方法0.53 m、0.025°和0.08°。

由仿真结果分析可知,在几种方法中本文提出的多目标方法跟踪性能最好,并且稳定性最好。综上所述,所提出的多目标方法的安全性能优于其他几种方法。

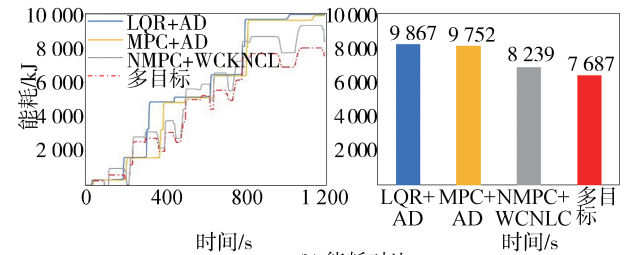
3.3 车辆综合能效分析

本节分别通过NEDC和WLTC工况来评估所提出的多目标方法的节能效果。将所提出的多目标方法与LQR+AD、MPC+AD和NMPC+WCNLC 3种方法进行对比。

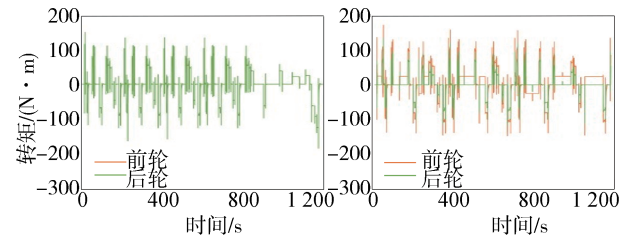
图6为在NEDC工况下几种方法关于能耗性能的对比结果。由图6(a)所示的速度跟踪可以看出,所提出的多目标方法的车速误差均在1 km/h以内,说明其具有良好的速度跟踪性能。从图6(b)所示的能耗对比图可看出,所提出的多目标方法比其他方法能耗低,其消耗的能量7 687 kJ比LQR+AD方法的9 867 kJ减少2 180 kJ所降低能耗约有20%。从图6(c)所示的转矩分布对比图来看,相比MPC+AD方法,多目标方法的前轮承担更多转矩任务,后轮转矩减少约50 N·m。在快速加减速时,多目标方法采用前后轴电机共同工作以实现快速速度响应。但当加速需求降低时,多目标方法会切换为前轴单电机运行,进一步降低能耗。而MPC+AD方法采用的平均转矩分配使前后轴电机一直共同工作且转矩相同,导致功率和能耗较大。



(a) 速度跟踪



(b) 能耗对比



(c) MPC+AD转矩分布与多目标控制的转矩分布

图6 NEDC工况能效结果

表3给出了4种方法在NEDC工况下的能耗和电机平均效率的具体数值。与采用平均转矩分配的方法相比,本文所提出的控制策略很好地降低了总能耗,提高了电机的平均效率。与未考虑电机空载损耗的NMPC+WCNLC方法相比,能耗降低552 kJ,节能约6.6%,电机平均效率由78.2%提升至80.4%,提高约1.8%。

表3 NEDC工况能效结果对比

方法	能耗/kJ	电机平均效率/%
LQR+AD	9 867	72.6
MPC+AD	9 752	74.3
NMPC+WCNLC	8 239	78.2
多目标	7 687	80.4

在WLTC工况下的仿真结果(图7)表明,与NEDC工况下的仿真结果相似,本文提出的多目标控制方法在车速跟踪和能耗性能方面均优于LQR+AD和MPC+AD等其他方法。多目标方法的车速误差控制在0.8 km/h以内,显示出良好的跟踪性能;同

时其能耗也明显低于其他方法,后轮转矩比 MPC+AD 法减少了大约有 $50 \text{ N}\cdot\text{m}$,且在快速加减速下采用前轴单电机运行模式,进一步降低了能耗。

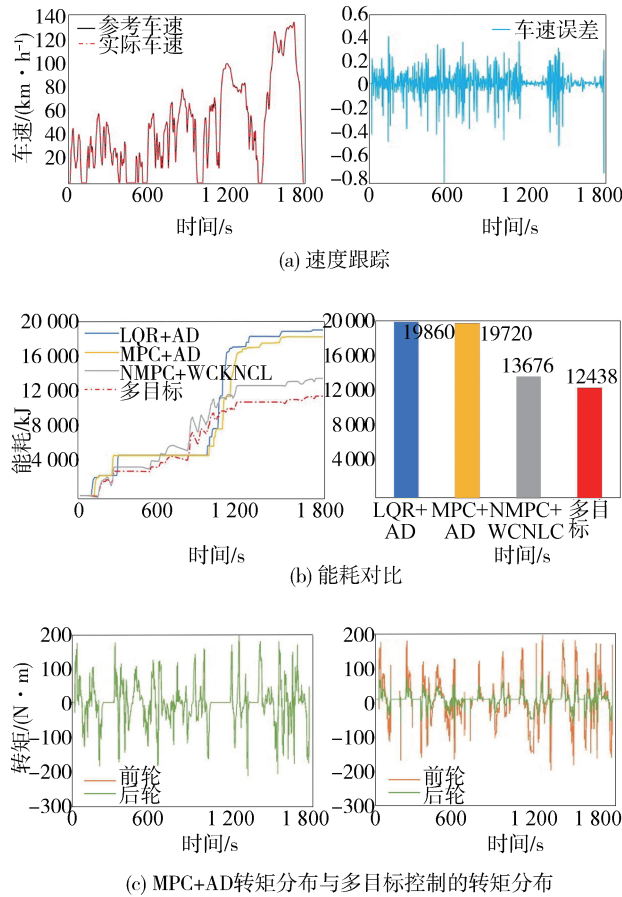


图7 WLTC工况能效结果

表4给出了4种方法在WLTC下的能耗和电机的平均效率的具体数值。从表中可看出所提出的多目标方法的能耗为 $12\,438 \text{ kJ}$,电机平均效率为 84.4% ,比 NMPC+WCKNCL 的能耗 $13\,676 \text{ kJ}$ 降低了约 3.5% 。与 NMPC+WCKNCL 电机的平均效率 81.3% 相比提高了约 3.1% 。

表4 WLTC工况能效结果对比

方法	能耗/kJ	电机平均效率/%
LQR+AD	19 860	75.4
MPC+AD	19 720	76.6
NMPC+WCKNCL	13 676	81.3
多目标	12 438	84.4

在NEDC和WLTC工况下几种方法的仿真结果对比分析可知,本文提出的多目标方法能耗相对较低,具有良好的节能效果。

4 结论

为了提升前后轴双电机分布式驱动电动汽车的安全性及能耗经济性,本文提出了一种基于分层控制架构的多目标转矩分配方法。

(1)该分层控制的转矩分配方法包括:上层主动安全层,基于非线性模型预测控制(NMPC)实现车辆的安全与稳定性控制;下层转矩分配层,采用基于多目标优化的方法,通过最小化电机损耗功率和电机空载损耗来降低能耗。

(2)实验结果表明:在DLC工况下,该方法展现出优异的稳定性。通过利用较小的前轮转角,降低了转矩需求,有助于整体节能。相比 NMPC+WCKNCL 方法,在NEDC工况下,该策略将总能耗降低约 6.6% ,平均电机效率提高约 1.8% 。在WLTC工况下,总能耗降低约 3.5% ,电机效率平均提高约 3.1% 。

(3)该方法适用于前后轴独立驱动的分布式电动车,能有效降低车辆的总能耗,同时也能更好地保障车辆行驶安全,体现了其在节能、安全、稳定方面的优势。

参考文献

- [1] WANG Y, TAN H, WU Y, et al. Hybrid electric vehicle energy management with computer vision and deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 17(6): 3857-3868.
- [2] 李琴,汤建明,张博远,等.分布式驱动电动汽车多执行器容错控制研究[J]. 汽车工程, 2023, 45(12): 2251-2259.
LI Q, TANG J M, ZHANG B Y, et al. Research on fault-tolerant control of multi-actuator for distributed drive electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(12): 2251-2259.
- [3] 陈爽,胡明辉,赵佳伟.系统损耗最小的双电机纯电动汽车实时转矩分配策略[J]. 机械工程学报, 2023, 59(22): 411-423.
CHEN S, HU M M, ZHAO J W. Real-time torque distribution strategy for dual-motor pure electric vehicle with minimum system loss[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(22): 411-423.
- [4] 林歆悠,黄强,张光吉.基于 PSO 的新型双电机多模式驱动系统转矩分配策略优化[J]. 汽车工程, 2022, 44(8): 1218-1225.
LIN Y Y, HUANG Q, ZHANG G J. Torque distribution strategy optimization of a novel dual-motor multi-mode drive system using PSO algorithm [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(8): 1218-1225.
- [5] WEI H, AI Q, ZHAO W, et al. Modelling and experimental vali-

- duction of an EV torque distribution strategy towards active safety and energy efficiency[J]. *Energy*, 2022, 239: 121953.
- [6] 徐兴,陈特,陈龙,等.分布式驱动电动汽车转矩节能优化分配[J].*中国公路学报*, 2018, 31(5): 183-190.
- XU X, CHEN T, CHEN L, et al. Optimized torque energy-saving allocation for distributed drive electric vehicle[J].*China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(5): 183-190.
- [7] GUO L, XU H, ZOU J, et al. Torque distribution strategy of four-wheel independent drive electric vehicle based on optimal energy consumption[C]. 2020 IEEE 3rd International Conference on Electronics Technology (ICET). IEEE, 2020: 252-256.
- [8] AHMADIAN N, KHOSRAVI A, SARHADI P. Integrated model reference adaptive control to coordinate active front steering and direct yaw moment control [J]. *ISA Transactions*, 2020, 106: 85-96.
- [9] 宋强,王冠峰,商赫,等.基于多参数控制的分布式驱动电动汽车操纵稳定性控制策略研究[J].*汽车工程*, 2023, 45(11): 2104-2112.
- SONG Q, WANG G F, SHANG H, et al. Research on handling stability control strategy for distributed drive electric vehicle based on multi-parameter control [J]. *Automotive Engineering*, 2023, 45(11): 2104-2112.
- [10] BAI X, WANG Y, JIA M, et al. An NMPC-based integrated longitudinal and lateral vehicle stability control based on the double-layer torque distribution[J]. *Sensors*, 2024, 24(13): 4137.
- [11] HAN Z, XU N, CHEN H, et al. Energy-efficient control of electric vehicles based on linear quadratic regulator and phase plane analysis[J]. *Applied Energy*, 2018, 213: 639-657.
- [12] 漆星,王群京,陈龙,等.前后轴双电机电动汽车转矩分配优化策略[J].*电机与控制学报*, 2020, 24(3): 62-70.
- QI X, WANG Q J, CHEN L, et al. Optimization strategies of torque distribution for front and rear dual motor driven electric vehicles[J]. *Electric Mach. Control*, 2020, 24(3): 62-70.
- [13] HU X, WANG P, HU Y, et al. A stability-guaranteed and energy-conserving torque distribution strategy for electric vehicles under extreme conditions[J]. *Applied Energy*, 2020, 259: 114162.
- [14] FAN X, MENG D, TIAN M, et al. Adaptive cruise control and energy-efficient torque allocation for distributed-drive electric vehicles under low-speed stop-and-go scenarios [C]. 2022 6th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI). IEEE, 2022: 1-5.
- [15] CHEN H, DU P, WANG Y, et al. Dynamic energy-efficient torque allocation algorithm for in-wheel motor-driven vehicle[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2020, 234(7): 1815-1825.
- [16] NAKANISHI R, MATSUBARA M, ISHIBASHI T, et al. Experimental validation of elliptical contact patch tire model [J]. *Tire Science and Technology*, 2023.
- [17] BELRZAEG M, AHMED A A, ALMABROUK A Q, et al. Vehicle dynamics and tire models: an overview [J]. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 2021, 12(1): 331-348.
- [18] NAKANISHI R, MATSUBARA M, ISHIBASHI T, et al. Tire mechanical model for cornering simulation with friction coefficient calculated from viscoelasticity of rubber by multiscale friction theory[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2023: 1-2.
- [19] 方培俊,蔡英凤,陈龙,等.基于车辆动力学混合模型的智能汽车轨迹跟踪控制方法[J].*汽车工程*, 2022, 44(10): 1469-1483.
- FANG P J, CAI Y F, CHEN L, et al. Trajectory tracking control method based on vehicle dynamics hybrid model for intelligent vehicle[J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(10): 1469-1483.
- [20] FAN L, ZHANG Y, DOU H, et al. Design of an integrated energy management strategy for a plug-in hybrid electric bus[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 448: 227391.
- [21] DALBONI M, MARTINS G, TAVERNINI D, et al. On the energy efficiency potential of multi-actuated electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024.