

考虑转矩波动的轮毂电机驱动汽车能耗优化方法*

吴石, 马茂原, 李文广, 李明义, 于文庆

(哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 哈尔滨 150080)

[摘要] 针对轮毂电机驱动汽车在凹凸不平路面和汽车频繁变速时出现的转矩波动大所引起能耗高的问题, 本文提出了一种考虑转矩波动的轮毂电机驱动汽车能耗优化方法。首先, 基于电动汽车纵向驱动动力学方程和CarSim车辆动力学模型, 建立电机能耗模型、轮胎滑移能耗模型、横摆力矩跟踪误差模型作为上层控制目标, 并建立考虑路面激励的轮毂电动力学模型作为下层控制目标。其次以上层控制目标为轮毂电机汽车转矩优化的目标函数, 以电机转矩和转速极限为不等式约束, 以模糊控制方法进行目标函数权重分配, 基于NSGA II建立了上层转矩优化模型; 同时, 基于滑模抗扰动观测器建立了路面激励引起轮毂电机转矩超调和延迟的下层轮毂电机矢量控制模型。最后进行四轮轮毂电机驱动汽车的Simulink和CarSim联合仿真, 分析了WLTC工况和CLTC-P工况下汽车前后轴车轮转矩、汽车总能耗、汽车电池SOC在不同优化方法下的变化情况。轮毂电机台架试验表明, 考虑转矩波动的轮毂电机驱动汽车能耗优化方法在WLTC和CLTC-P工况下能有效降低能耗。

关键词: 轮毂电机驱动汽车; 转矩波动; NSGA II; SMADO; 能耗优化

A Method for Energy Consumption Optimization of In-wheel Motor-Driven Vehicles Considering Torque Fluctuations

Wu Shi, Ma Maoyuan, Li Wenguang, Li Mingyi & Yu Wenqing

School of Mechanical Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080

[Abstract] For the high energy consumption problem caused by the large torque fluctuations of in-wheel motor-driven vehicles on uneven roads and frequent shifting of vehicles, in this paper a method for energy consumption optimization of in-wheel motor-driven vehicles considering torque fluctuations is proposed. Firstly, based on the longitudinal drive dynamics equation of electric vehicles and the CarSim vehicle dynamics model, the motor energy consumption model, tire slip energy consumption model, and yaw torque tracking error model are established as the upper control target, and the in-wheel motor dynamics model considering road surface excitation is established as the lower control target. Secondly, taking the upper-level control target as the objective function of the torque optimization of the in-wheel motor vehicle, the motor torque and speed energy limit as the inequality constraints, and the fuzzy control method for objective function weight distribution, the upper-level torque optimization model is established based on NSGA II. At the same time, the lower-level in-wheel motor vector control model of torque overshoot and delay caused by road surface excitation is established based on the sliding mode anti-disturbance observer. Finally, the joint simulation of Simulink and CarSim of a four-wheel in-wheel motor-driven car is carried out, and the changes of the front and rear axle wheel torque, total energy consumption of the car, and the SOC of the car battery under different optimization methods are analyzed under WLTC operating conditions and CLTC-P operating conditions. The in-wheel motor bench test shows that the energy consumption optimization method of in-wheel motor-driven vehicles considering torque fluctuations can effectively reduce energy consumption under WLTC and CLTC-P op-

* 国家重点研发计划项目(2019YFE0121300)资助。

原稿收到日期为2024年09月17日, 修改稿收到日期为2024年11月06日。

通信作者: 吴石, 教授, 博士后, E-mail: wushi971819@163.com。

erating conditions.

Keywords: in-wheel motor drive automobiles; torque fluctuation; NSGAI; SMADO; energy consumption optimization

前言

四轮轮毂电机驱动汽车(four in-wheel motor drive vehicle, 4IWMDV)具有转向灵活、传动效率高、驱/制动力矩易于分配等特点,成为新能源汽车技术未来主要发展方向之一^[1]。4IWMDV在路面凹凸不平 and 车速不断变化的情况下,轮毂电机转矩波动造成汽车总能耗损失较大,探究该问题对能耗优化具有重要的研究意义。

针对轮毂电机驱动汽车建模主要围绕车辆动力学模型进行研究。Sun等^[3]和Zhao等^[4]基于车辆动力学模型,分析车辆转弯节能机理和轮胎滑移能耗,建立车辆节能模型。而Wu等^[5]在其基础上额外建立了考虑轮毂电机功率损失的4IWMDV能耗模型。以上研究大多聚焦于车辆动力学模型所造成的能耗,以传递函数的形式代替轮毂电动力学模型,未考虑轮毂电动力学模型行驶时的动态能耗。丁晓林等^[6]基于轮毂电机台架试验数据得出轮毂电机模型在汽车行驶能耗中占重要地位的结论。于是Lei等^[7]除了考虑车辆动力学模型,还通过帕累托前沿分析了电机效率和质量对汽车能耗的影响,提出了约束能量法建立轮毂电动力学模型,降低汽车在高效区的能耗。而Deng等^[8]采用麦克斯韦应力张量法分析,认为路面激励引起的不平衡径向力也会对轮毂电机的转矩和能耗产生影响。上述研究表明,针对4IWMDV的建模,从最开始只针对多自由度车辆动力学建模,进一步又在动力学模型基础上将车辆的转向阻力系数、轮胎侧偏刚度等纳入考虑因素,到现在额外分析轮毂电动力学模型所引起的汽车驱动能耗。所以本文旨在分析同时考虑车辆动力学模型和路面激励下轮毂电动力学模型的轮毂电机驱动汽车的能耗问题。

针对4IWMDV的转矩优化分配,已有很多学者将不同的控制方法运用在上面进行研究。Wang等^[9]通过模糊控制调节PID控制参数自适应调控汽车转向时车轮差优化汽车转矩分配。Zhou等^[10]通过非线性模型预测方法优化车轮滑移率输出车轮转矩。黄彩霞等^[11]基于区域极点配置,分析了保性能

权重矩阵参数对控制性能的影响,提出了规则化转矩分配控制策略。Adeleke等^[12]在动态规划算法上加入反向递归算法,逆向计算车辆前后轮转矩分配和车辆能耗的动态最优路径。He等^[13]对各种转矩优化方法进行对比分析得出,当优化目标在某些区域内存在冲突时,智能优化算法相比模型预测、动态规划等方法可以有效提高能效和计算效率,并具有良好的实时性。漆星等^[14]针对电动汽车的电机效率和电池效率在某些区域内存在控制策略冲突问题,采用粒子群算法优化车辆整体转矩分配和能耗问题。针对轮毂电机驱动汽车转矩分配优化,带精英策略的遗传算法通过适应度筛选多目标函数值具有更好的优势。但NSGA II所具有的固定权重系数不能及时适应汽车在各种行驶状态下的经济性和稳定性,所以设计了模糊控制动态调整NSGA II优化目标的权重系数。

目前针对下层轮毂电机的抗扰动控制研究较少,大多以电机矢量控制为主,结合其他控制方法来增强系统对扰动的抑制情况。Gandhi等^[15]在转速环上采用粒子群算法优化PID控制器参数,使控制器参数随着扰动的变化而实时整定。Fan等^[16]在电机矢量控制的转速环上改进非线性自抗扰控制,通过对系统产生的扰动进行估计和补偿,提高系统抗扰动性能。相比于其他控制方法,由于滑模控制不是规定一个值,而是建立一个滑模面,使控制对象到达滑模面持续振荡,不需要对其精确控制。所以其在电机抗扰动控制中有较多的应用。Wang等^[17]在传统矢量控制框架上加入了滑模速度控制器对扰动进行抑制。但由于传统滑模控制方法只能把扰动规定在一个范围。所以本文改进传统滑模方法,使扰动到达滑模面后逐渐趋向于原点。并根据改进滑模方法推导滑模抗扰动观测器,在对扰动进行估计后传递给速度环,增加抗扰动控制的精确性,降低转矩变化时的能耗。

针对上述问题,本文以轮毂电机驱动汽车为研究对象。首先,基于4IWMDV驱动动力学和CarSim车辆动力学模型,建立电机能耗模型、轮胎滑移能耗模型、横摆力矩跟踪误差模型作为上层控制目标,并建立考虑路面激励的轮毂电动力学模型作为下层

控制目标。其次,以上层控制目标为目标函数,通过模糊控制器实时控制轮胎滑移能耗和横摆力矩跟踪误差的权重系数构建上层转矩分配优化控制器;同时,基于滑模抗扰动观测器建立下层轮毂电机矢量控制模型。最后,搭建考虑转矩波动的4IWMDV能耗优化方法的联合仿真平台,并通过轮毂电机台架

进行试验验证。

1 轮毂电机驱动汽车模型

为研究4IWMDV能耗优化,建立能耗优化总体控制结构模型图,如图1所示。

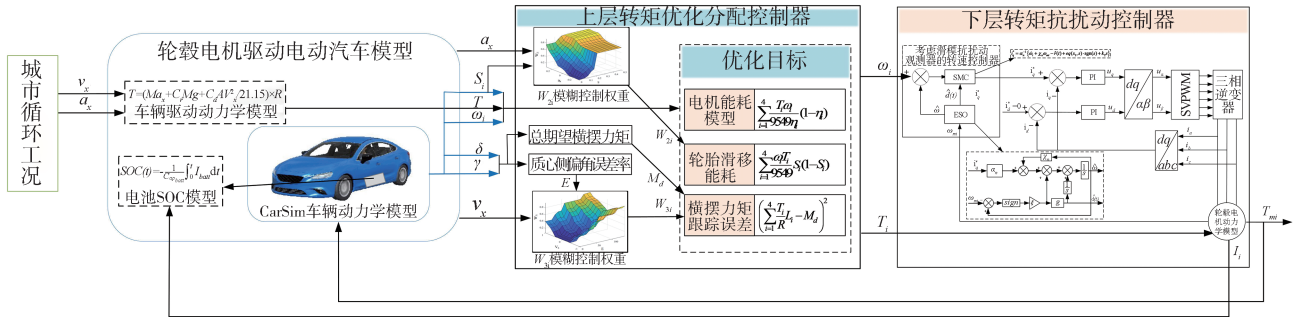


图1 4IWMDV能耗优化总体控制结构

基于CarSim车辆动力学模型、电动汽车驱动动力学模型和电池SOC模型建立轮毂电机驱动汽车模型。然后根据城市循环工况提供的汽车行驶所需的目标车速、加速度等数据,计算出上层控制器所需的总驱动转矩、各车轮转速和滑移率、前轮转角,上层控制器根据参数计算每个车轮的驱动转矩并分配给对应车轮的轮毂电机控制器驱动汽车行驶。同时4个轮毂电机将行驶所消耗的电传输到电池模型,通过电池模型计算汽车行驶能耗。

1.1 电动汽车驱动动力学模型

建立车辆驱动受力示意图,如图2所示。根据受力分析,车辆在行驶过程中会受到4个轮毂电机产生的驱动力、空气阻力、坡度阻力、滚动阻力以及加速阻力的共同作用。因此车辆行驶所需总转矩为

$$T = F_t \times R = (F_a + F_C + F_r + F_\omega) \times R \quad (1)$$

其中:

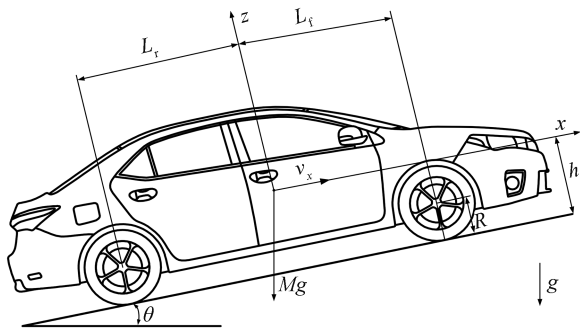


图2 车辆驱动受力示意图

$$\begin{cases} F_a = Ma_x \\ F_C = Mg \sin \theta \\ F_r = fMg \cos \theta \\ F_\omega = \frac{1}{2} \rho AC_a v_x^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: F_a 为加速阻力; F_C 为坡度阻力; F_r 为滚动阻力; F_ω 为空气阻力; M 为车辆总质量; v_x 为纵向车速; a_x 为纵向加速度; g 为重力加速度; f 为滚动阻力系数; C_a 为空气阻力系数; A 为车身迎风面积; R 为车轮半径。

1.2 考虑路面激励的轮毂电动力学模型

任何行驶环境中的凹凸不平等路面状况,都会通过车轮传递给轮毂电机,造成车轮和轮毂电机经历不断的冲击和振动。导致轮毂电机出现气隙形变问题,这就会对电磁转矩和转矩脉动造成影响^[18]。所以建立考虑路面激励下气隙形变的永磁同步轮毂电动力学方程:

$$\begin{cases} T_{mi} - T_i = \frac{J}{P_0} \cdot \frac{d\omega_i}{dt} \\ T_{mi} = \frac{3}{2} P_0 [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] = \frac{3}{2} P_0 \psi_f i_q \\ \psi_f = NBA_0 \\ B = \frac{\mu_0 H_g}{g_0 + \delta_g} \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_{mi} 为电机的输出转矩; P_0 为电机转子的磁极对数; T_i 为输入转矩; J 为转动惯量; ψ_f 为磁链; i_d 、 i_q 分别为定子电流的直轴和交轴电流分量; L_d 、 L_q 分别为直轴和交轴同步电感; N 为线圈匝数; B 为磁通密

度; A_0 为磁场面积; H_g 为气隙磁场强度; g_0 为初始气隙长度; δ_g 为气隙形变量。

1.3 轮毂电机能耗模型

4IWMDEV 动力系统所需的轮毂电机总功率需要由电池提供,其公式如下:

$$P_{\text{total}} = P_{\text{out}} + P_{\text{loss, out}} \quad (4)$$

式中: P_{total} 表示 4IWMDEV 动力系统所需总功率; P_{out} 为轮毂电机的输出功率; $P_{\text{loss, out}}$ 表示轮毂电机的功率损失,如式(5)所示。

$$P_{\text{loss, out}} = \frac{T_i \omega_i}{9549\eta} (1 - \eta) \quad (5)$$

从式(5)可以看出,轮毂电机损失功率不仅与转速和转矩有关,还与轮毂电机效率有关。所以利用轮毂电机测功柜,测试轮毂电机输入和输出功率,并基于式(6)计算出轮毂电机各工作点效率,建立轮毂电机 MAP 图,如图 3 所示。其中轮毂电机参数如表 1 所示。

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (6)$$

式中 P_{out} 和 P_{in} 分别为轮毂电机的输出和输入功率。

表 1 轮毂电机参数

参数	数值
标称电压/V	500~550
额定功率/kW	54
峰值功率/kW	75
额定转矩/(N·m)	515
峰值转矩/(N·m)	716
额定转速/(r·min ⁻¹)	600
峰值转速/(r·min ⁻¹)	1 000

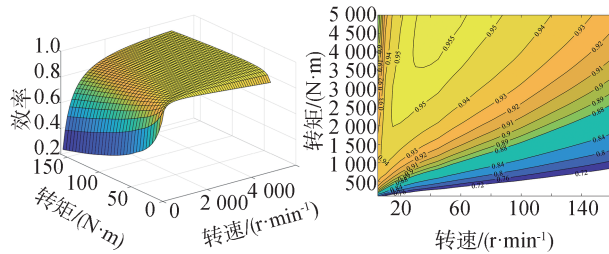


图 3 轮毂电机 MAP 图

因此,轮毂电机及其传动系统功率损失如式(7)所示:

$$J_1 = \sum_{i=1}^4 P_{\text{loss, out}i} = \sum_{i=1}^4 \frac{T_i \omega_i}{9549\eta_i} (1 - \eta_i) \quad (7)$$

式中 T_i 、 ω_i 分别为转矩优化后轮毂电机的输入转矩和输入转速, $i = 1, 2, 3, 4$ 分别代表 4IWMDEV 的左

前、右前、左后、右后车轮。

1.4 轮胎滑移能耗模型

轮胎滑移能耗的产生主要是因为是在滑移区域内轮胎接触面与地面之间的相对滑动。根据车轮转动动力学方程和滑移率计算方程^[19],可以将各轮胎滑移能量消耗表示为

$$J_2 = \sum_{i=1}^4 F_{si} v_{si} = \sum_{i=1}^4 \frac{\omega_i T_i}{9549} S_i (1 - S_i) \quad (8)$$

式中: F_{si} 为车轮滑移力; v_{si} 为车轮滑移速度。

1.5 横摆力矩跟踪误差模型

采用前馈加反馈的控制方法计算横摆力矩跟踪误差模型,既能利用前馈控制的快速响应特性,还能通过反馈控制保持系统鲁棒性。横摆力矩跟踪误差模型框架如图 4 所示。

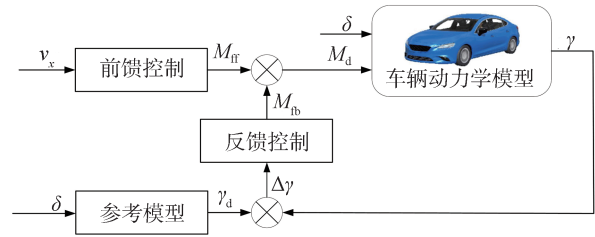


图 4 横摆力矩跟踪误差模型框图

首先,根据前轮转角 δ 计算出车辆稳定性控制所需的理想质心侧偏角^[20],如式(9)所示。

$$\gamma_d = \min \left\{ \left| \frac{\delta v_x / L}{i_s (1 + K_s v_x^2)} \right|, \left| \frac{\xi_\gamma \mu g}{v_x} \right| \right\} \cdot \text{sgn}(\delta) \quad (9)$$

式中: L 为轴距; K_s 为稳定系数; i_s 为转向系统传动比; ξ_γ 为纵向力对横向力的修正系数。

因此,前馈控制和反馈控制的横摆力矩分别如式(10)和式(11)所示。

$$M_{ff} = \frac{(L_f + L_r) L_i C_f C_r - L_f C_f M v_x^2}{L_f C_f - L_r C_r + M v_x^2} \quad (10)$$

$$M_{fb} = g_{nb} (\gamma_d - \gamma) \quad (11)$$

式中: L_f 、 L_r 分别为质心到前后轴长度; C_f 、 C_r 分别为前后轮侧偏刚度; g_{nb} 为反馈系数。

所以系统总期望横摆力矩为

$$M_d = M_{ff} + M_{fb} \quad (12)$$

车辆转弯时产生的实际附加横摆力矩为

$$M_r = \sum_{i=1}^4 \frac{T_i}{R} L_i \quad (13)$$

式中 L_i 分别表示前左、前右、后左、后右绕 Z 轴旋转的力臂。

因此,横摆力矩跟踪误差可以表示为

$$J_3 = \left(\sum_{i=1}^4 \frac{T_i}{R} L_i - M_d \right)^2 \quad (14)$$

1.6 电池SOC模型

电池模型的目的是根据电流估算电池SOC,所以电池模型采用等效内阻模型,其功率计算公式为

$$P_{bat} = U_t I_{batt} \quad (15)$$

式中: I_{batt} 表示电池的内部电流; U_t 表示电池总电压,可以表示为式(16)。

$$U_t = U_{oc} - R_o \cdot I_t \quad (16)$$

式中: U_{oc} 为开路电压; R_o 为电池内阻。

电池电流为

$$I_{batt} = \frac{I_{in}}{N_p} \quad (17)$$

式中: I_{in} 表示电池输入电流; N_p 表示并联电池节数。

最后对电流进行积分估算电池SOC值:

$$SOC(t) = -\frac{1}{C_{ap_{bat}}} \int_0^t I_{batt} dt \quad (18)$$

式中 $C_{ap_{bat}}$ 表示电池容量。

2 4IWMDV 转矩分配优化控制

2.1 4IWMDV 转矩分配多目标优化

以电机能耗、轮胎滑移能耗和横摆力矩跟踪误差为4IWMDV转矩优化的目标函数,建立转矩能耗优化问题。因此根据式(7)、式(8)、式(14)可得总优

化目标函数为

$$J = \min(w_{1i}J_1 + w_{2i}J_2 + w_{3i}J_3) \quad (19)$$

式中: J_1 为电机能耗; J_2 为轮胎滑移损耗; J_3 为横摆力矩跟踪误差。其中 w_{1i} 为0.5,并由于 J_2 和 J_3 相互影响,所以对其权重系数 w_{2i} 和 w_{3i} 进行互相限制,如式(20)所示。

$$\begin{cases} \left(\frac{w_{2i}}{w_{2i} + w_{3i}} + \frac{w_{3i}}{w_{2i} + w_{3i}} \right) \times 50\% = 0.5 \\ w_{2i}^* = \frac{w_{2i}}{w_{2i} + w_{3i}}; w_{3i}^* = \frac{w_{3i}}{w_{2i} + w_{3i}} \end{cases} \quad (20)$$

式中 w_{2i}^* 、 w_{3i}^* 分别为实际轮胎滑移能耗和横摆力矩跟踪误差权重系数。

在计算过程中,要保证总驱动转矩需求,即

$$\sum_{i=1}^4 T_i = T \quad (21)$$

其次,各电机的驱动转矩应在轮毂电机输出转矩范围内,定义为

$$\begin{cases} T_i(t) \in [T_{\min i}(\omega_i(t)), T_{\max i}(\omega_i(t))] \\ \omega_i(t) \in [0, \max(\omega_i(t))] \end{cases} \quad (22)$$

2.2 4IWMDV 转矩分配多目标优化权重系数模糊控制器

在不同行驶条件下,4IWMDV是保证稳定性还是保证经济型取决于多目标优化函数中的权重系数。所以设计如图5所示的权重系数模糊控制器。该模糊控制器可以根据系统状态参数反馈实时调整目标函数的权重系数,从而在不影响稳定性的情况下保证车辆的经济性。

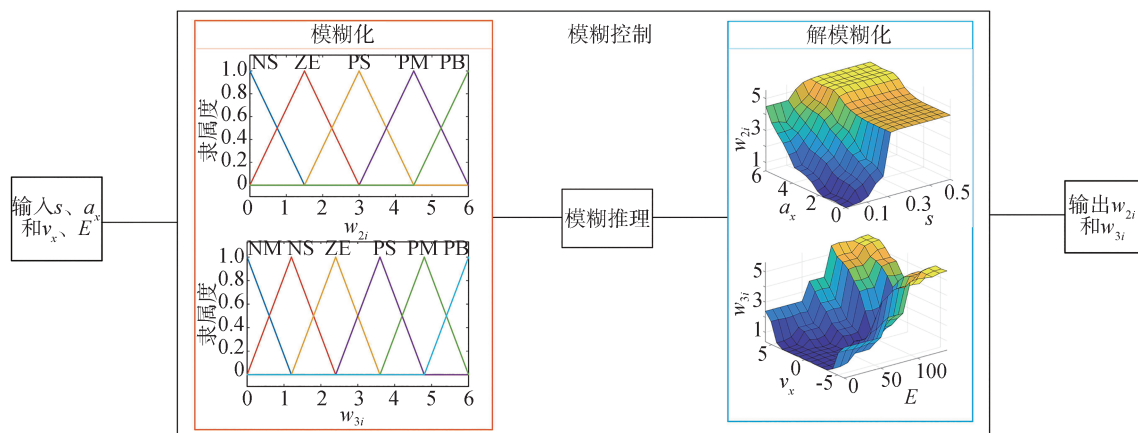


图5 模糊控制框架

轮胎滑移能耗的权重系数 w_{2i} 与车轮滑移率 s 和车辆加速度 a_x 两个变量有关。据此建立基于 s 和 a_x 的对 w_{2i} 进行动态调整的模糊控制器,其中 s 、 a_x 和 w_{2i} 的隶属度函数设置如图6所示,模糊推理规则如表2

所示。

横摆力矩跟踪误差权重系数 w_{3i} 由车速 v_x 和质心侧偏角误差率 E 两个变量求得,质心侧偏角误差率定义如下:

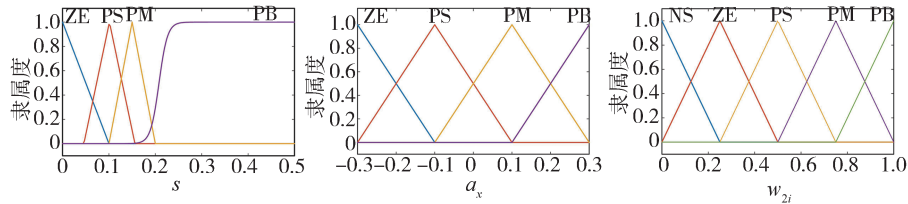


图6 s 、 a_x 和 w_{2i} 隶属度函数

$E = (\gamma_d - \gamma) / \gamma_d$ (23) 糊控制器。其中 v_x 、 E 和 w_{3i} 隶属度函数设置如图7所示,模糊推理规则如表3所示。

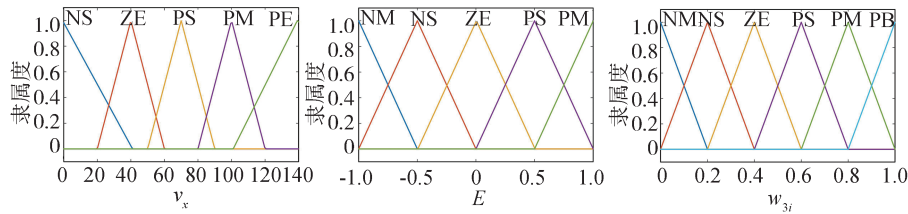


图7 v_x 、 E 和 w_{3i} 隶属度函数

表2 权重系数 w_{2i} 的模糊推理规则

w_{2i}		a_x			
		ZE	PS	PM	PB
s	ZE	NS	NS	ZE	PM
	PS	NS	ZE	PS	PM
	PM	ZE	PS	PM	PB
	PB	PM	PM	PB	PB

表3 权重系数 w_{3i} 的模糊推理规则

w_{3i}		E				
		NM	NS	ZE	PS	PM
v_x	NS	ZE	NM	NM	NM	ZE
	ZE	PS	NS	NM	NS	PS
	PS	PM	ZE	NS	ZE	PM
	PM	PM	PS	ZE	PS	PM
	PB	PB	PM	PS	PM	PB

2.3 基于NSGA II算法的转矩分配优化问题求解

确定各权重指标的权重系数后,本文选择NSGA II来求解多目标优化函数。NSGA II与传统NSGA相比,加入了精英策略,保证尽可能多的最优个体成功进化而不丢失,改善了种群进化品质,同时将非支配排序与拥挤度评估结合,既降低了计算复杂度,使得更适合处理四轮转矩优化分配这种大规模、复杂的多目标优化问题,又对Pareto前沿解集进行了合理的筛选,避免了局部最优解,使得

NSGA II能够生成均衡的Pareto前沿解集。将NSGA II算法用于转矩分配优化的具体求解流程如图8所示。

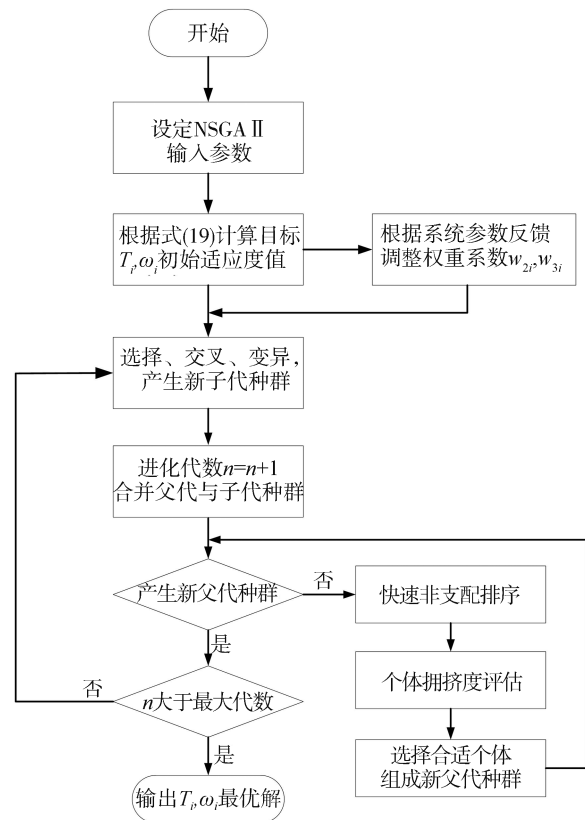


图8 基于NSGA II算法的转矩分配优化流程图

3 4IWMDEV 转矩抗扰动控制

通过上层转矩分配优化控制器获得每个轮毂电机的最优输入转矩和转速。但由于路面坡度和汽车行驶车速变化会造成轮毂电机内部对输入转

矩响应的延迟和超调,进而造成转矩变化瞬间电流过大,造成能耗。所以为了让轮毂电机输出转矩能够更好地跟踪输入转矩。本文提出了一种基于改进型趋近律的滑模抗扰动观测器(sliding mode anti-disturbance observer, SMADO),其控制框图如图9所示。

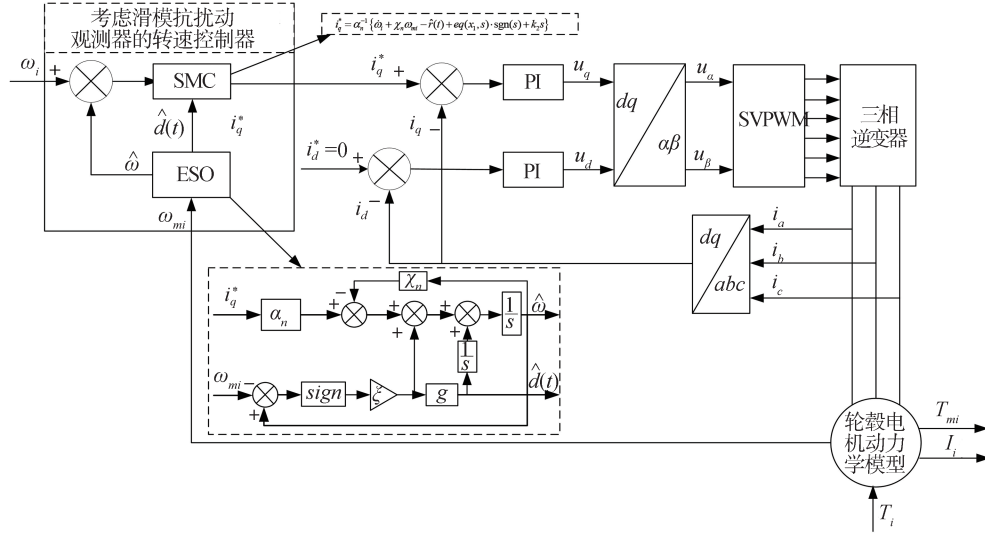


图9 轮毂电机系统控制图

3.1 滑模抗扰动观测器的建立

根据式(3),考虑轮毂电机内部参数变化,电动力学方程可以改写为

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{mi} = \alpha_n i_q - \chi_n \omega_{mi} + r(t) \\ r(t) = \Delta\alpha i_q - \Delta\chi \omega_{mi} - \beta T_{mi} \\ d(t) = \dot{r}(t) \end{cases} \quad (24)$$

其中:

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_n + \Delta\alpha = 3p^2\psi_\psi/2J \\ \beta = \beta_n + \Delta\beta = p/J \\ \chi = \chi_n + \Delta\chi = pB/J \end{cases} \quad (25)$$

式中: α_n, β_n 和 χ_n 是标称参数; $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\chi$ 是电机参数变化值; $r(t)$ 表示内部参数变化和外部负载扰动等集中扰动; $d(t)$ 为 $r(t)$ 的变化率。

当集中扰动存在时,如果相应的补偿方法不能抑制它,则会降低控制性能。为此,提出了SMADO在线估计集中扰动 $r(t)$,并将估计的扰动作为前馈部分,对式(24)中的扰动进行补偿,其结构框图如图10所示。

因此,为系统式(24)构造滑模抗扰动观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\omega}} = \alpha_n i_q - \chi_n \hat{\omega}_{mi} + \hat{r}(t) + u_{smo} \\ \hat{r}(t) = g u_{smo} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $\hat{\omega}$ 为速度 ω 的估计值; $\hat{r}(t)$ 为集中扰动 $r(t)$ 的估

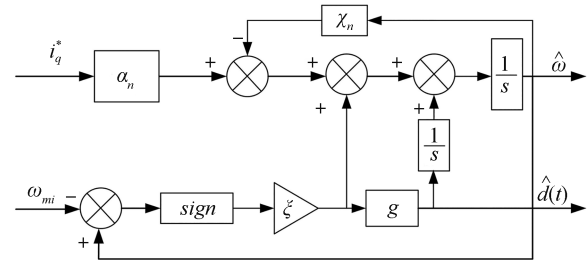


图10 滑模抗扰动观测器结构框图

计值; g 为滑模参数, $g = 1$; u_{smo} 表示为开关信号,将其设计为式(27)。

$$u_{smo} = \xi \cdot \text{sgn}(s) \quad (27)$$

式中 $\xi > 0$ 。

3.2 转速环控制器设计

该改进型滑模趋近律是在传统指数趋近律的基础上改进的,能够适应系统状态的变化,从而抑制控制过程中存在的扰动现象。改进型趋近律如式(28)所示。

$$\begin{cases} \frac{ds}{dt} = -eq(x, s) \text{sat}(s) - k_2 s \\ eq(x, s) = \frac{k_1}{\left[k_3 + \left(1 + \frac{1}{|x|} - k_3 \right) e^{-\delta|s|} \right]} \end{cases} \quad (28)$$

式中: x 表示系统状态; $k_1 > 0, \delta > 0, 0 < k_3 < 1, k_2 > 0$ 。

转速环控制器应在扰动发生时准确地保持参考转速 ω_i 的实际转速轨迹。所以建立如下转速环滑模面:

$$S = e = \omega_i - \omega_{mi} \quad (29)$$

式中: e 为转速跟踪误差; ω_{mi} 为轮毂电机的输出转速。

最后,将式(26)和新的趋近律式(28)代入式(29)中可得在SMC+SMADO方法下的速度环控制器 i_q^* :

$$i_q^* = \alpha_n^{-1} \{ \dot{\omega}_i + \chi_n \omega_{mi} - \hat{r}(t) + eq(x, s) \cdot \text{sgn}(s) + k_2 s \} \quad (30)$$

该控制器可以在线估计和补偿系统扰动,提高

轮毂电机系统的抗扰动能力。

3.3 基于滑模抗扰动控制器的能耗优化效果分析

不论是路面坡度还是汽车车速变化,主要影响的还是转矩的变化,因此为更直观验证转矩变化对能耗的影响,截取0.5s的轮毂电机在输入负载转矩下的转矩和电流变化情况,分别在0和0.2s对轮毂电机施加转矩,观察转矩变化下的电流变化,如图11所示。从图11中可以看出,转矩在发生变化时,电流会在瞬间发生剧烈变化,并须经过一段时间才能恢复稳定,造成系统能耗的增加。图12和图13分别为施加5、10 N·m扰动后转矩及其局部放大对比图。从图12(a)和图12(b)中可以看出,SMADO转矩波动明显比PI和传统SMC要小,且系统状态也更

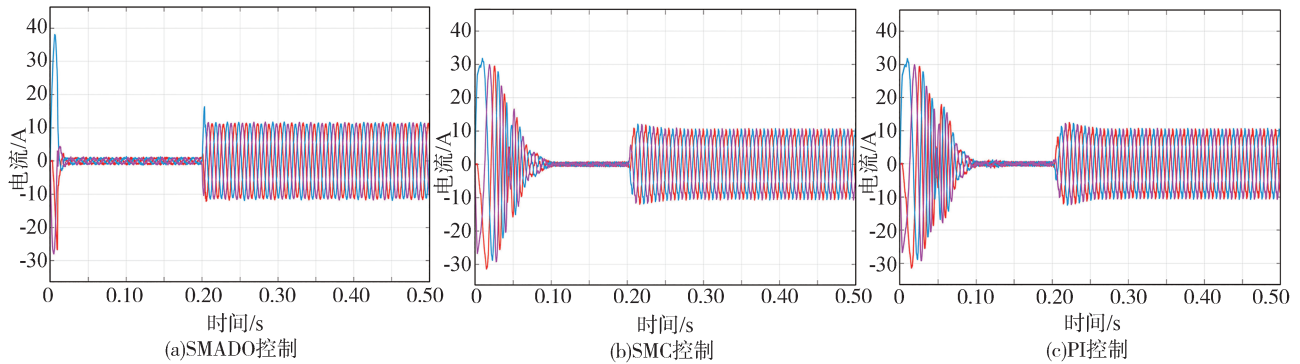


图11 转矩波动下的电流变化图

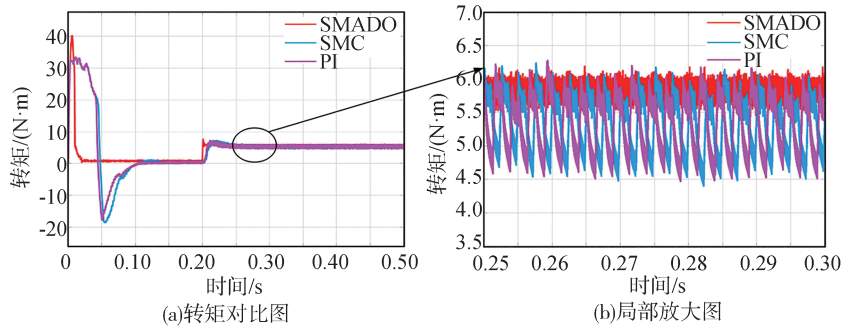


图12 施加5 N·m转矩波动后转矩及其局部放大对比图

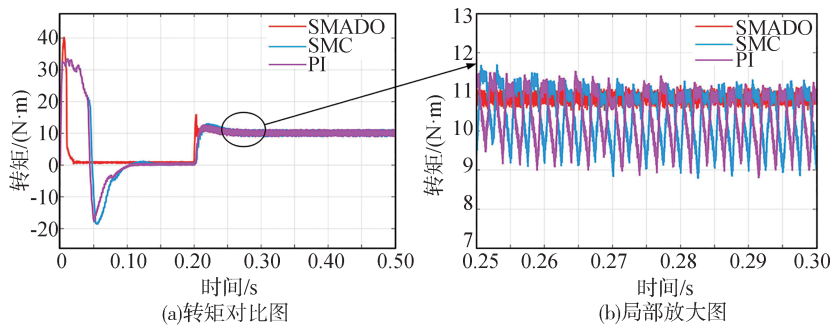


图13 施加10 N·m转矩波动后转矩及其局部放大对比图

稳定。而从图 13 可以看出,即使增加较大扰动,系统依然有很好的抗扰动能力。而通过图 11(a)与图 11(b)、图 11(c)两种控制方法下的电流变化图进行对比可以发现,基于 SMADO 的下层控制方法可以有效抑制转矩响应延迟和超调带来的电流瞬间波动过大所造成的电机能耗。

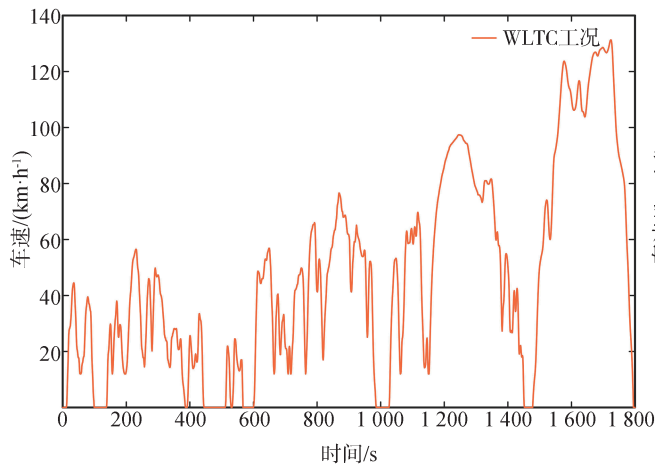
4 轮毂电机驱动汽车能耗优化方法仿真分析

在 CarSim 中选取 WLTC 工况和 CLTC-P 工况作为 4IWMDV 的能耗测试工况,并搭建坡度变化的操场道路分析路面坡度变化对 4IWMDV 的能耗影响,其中整体路面附着系数设为 0.85;通过对比 NSGA

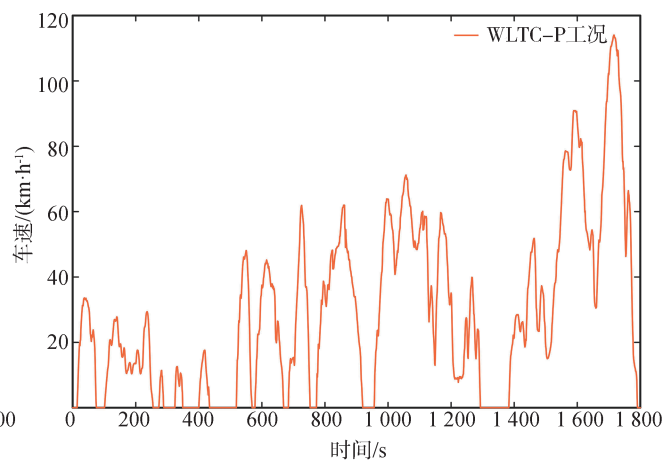
II-SMADO、NSGA II、平均分配方法下的电池 SOC 下降值和汽车能耗值,验证本文所提算法的优越性。其中,用于仿真的 4IWMDV 参数如表 4 所示。两工况下车速如图 14 所示。

表 4 4IWMDV 参数

车身参数	数值
汽车整备质量 M/kg	1270
滚动阻力系数 C_r	0.017
迎风面积 A/m^2	1.97
空气阻力系数 C_a	0.35
车轮滚动半径 R/m	0.31
前轴到质心距离 L_1/m	1.8
旋转质量系数 K_s	1.1
前后轴长度 $B_1, B_2/\text{m}$	3.4



(a)WLTC工况车速

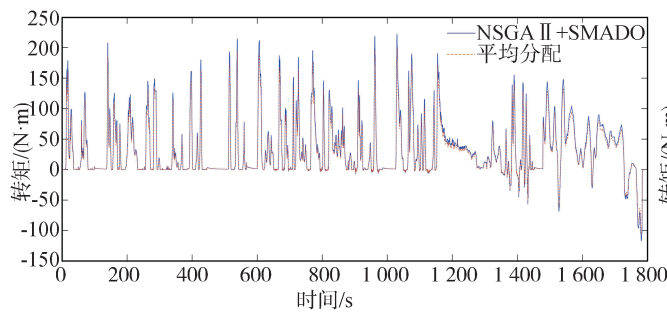


(b)WLTC-P工况车速

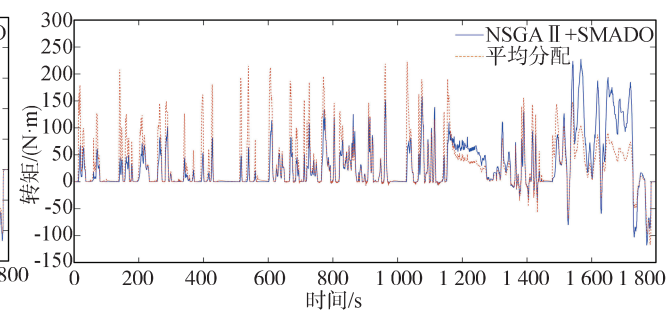
图 14 WLTC 工况和 CLTC-P 工况车速

通过 NSGA II-SMADO 对转矩进行分配优化,分别得到两种工况下车轮转矩的分配结果,如图 15 和图 16 所

示。然后通过电池 SOC 模块计算出电池 SOC 值和汽车总能耗,如图 17 和图 18 所示。能耗对比结果如表 5 所示。



(a)前轴(左右)车轮转矩



(b)后轴(左右)车轮转矩

图 15 WLTC 工况下汽车前后车轮转矩分配

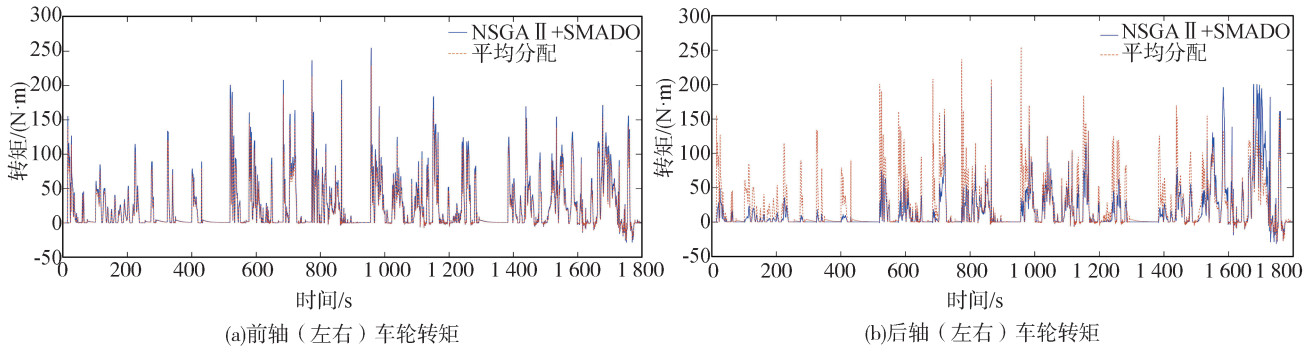


图16 CLTC-P工况下汽车前后车轮转矩分配

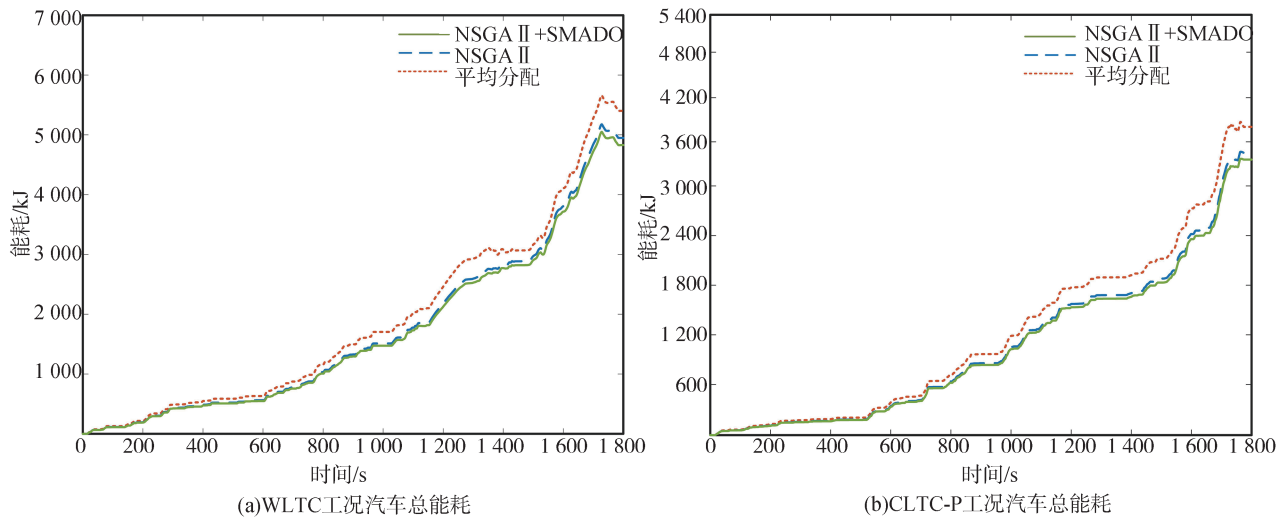


图17 两种工况下的汽车总能耗

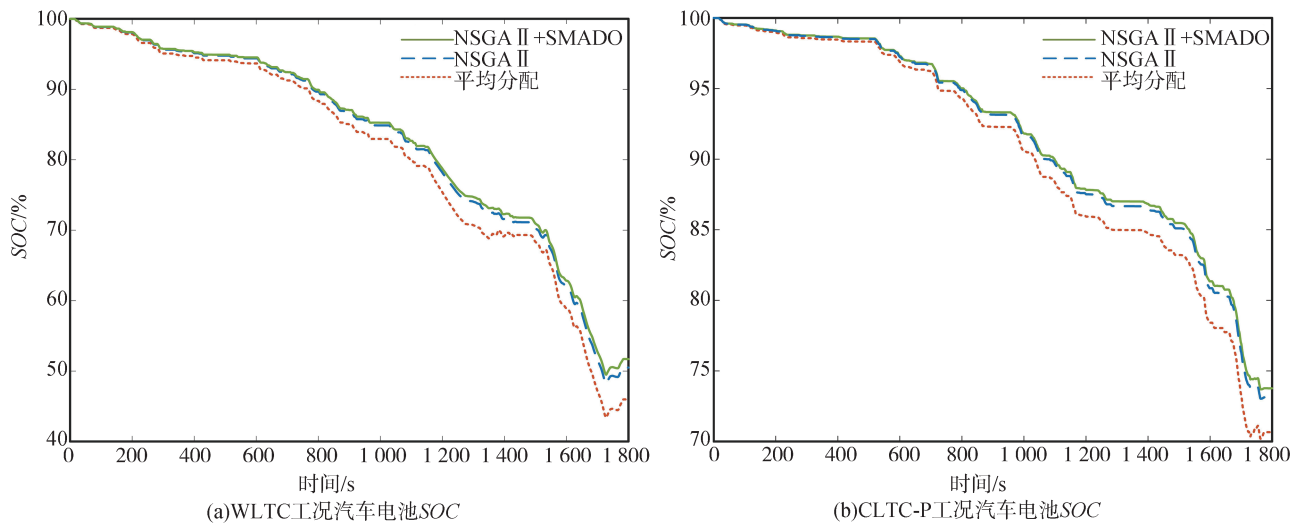


图18 两种工况下的汽车电池SOC

由图15和图16可知,在平均分配模式下,不论行驶速度是多是低,整车前后轴转矩都趋向于平均

分配。因此如图17和图18所示,可以看出在加速阶段会导致电池SOC急剧下降。而在NSGAII-

表5 不同能耗优化方法下仿真结果对比

工况	转矩优化分配策略	循环能耗/ kJ	SOC/% (初始/结束)
WLTC	平均分配	5 437.75	100/47.5
	NSGA II	4 977.44	100/50.1
	NSGA II-ESMDO	4 890.71	100/51.3
CLTC-P	平均分配	3 723.26	100/70.9
	NSGA II	3 556.93	100/72.7
	NSGA II-ESMDO	3 403.39	100/73.4

SMADO 模式下,汽车在行驶速度较低时,整车转矩趋向于前轴分配;行驶速度较高,纵向驱动力矩需求较小时,整车转矩趋向于后轴分配。此时电池 SOC 下降变小,减小了汽车能耗。由表5可知,本文所提出的算法在两种工况下与平均分配、NSGAII优化方

法相比,都减少了汽车能耗。其中在 WLTC 工况下比平均分配电池 SOC 消耗降低了 3.80%,能耗降低了 10.06%;比 NSGA II 优化方法的电池 SOC 消耗降低了 1.20%,能耗降低了 1.74%。在 CLTC-P 工况下比平均分配电池 SOC 降低了 2.50%,能耗降低了 8.59%;比 NSGA II 优化方法电池 SOC 消耗降低了 1.20%,能耗降低了 4.32%。因此,本文提出的能耗优化方法能有效降低行驶能耗。

5 轮毂电机台架试验验证

为进一步验证本文中提出的考虑转矩波动的轮毂电机驱动汽车能耗优化方法的有效性,开展了硬件在环 HIL 试验,如图 19 所示。

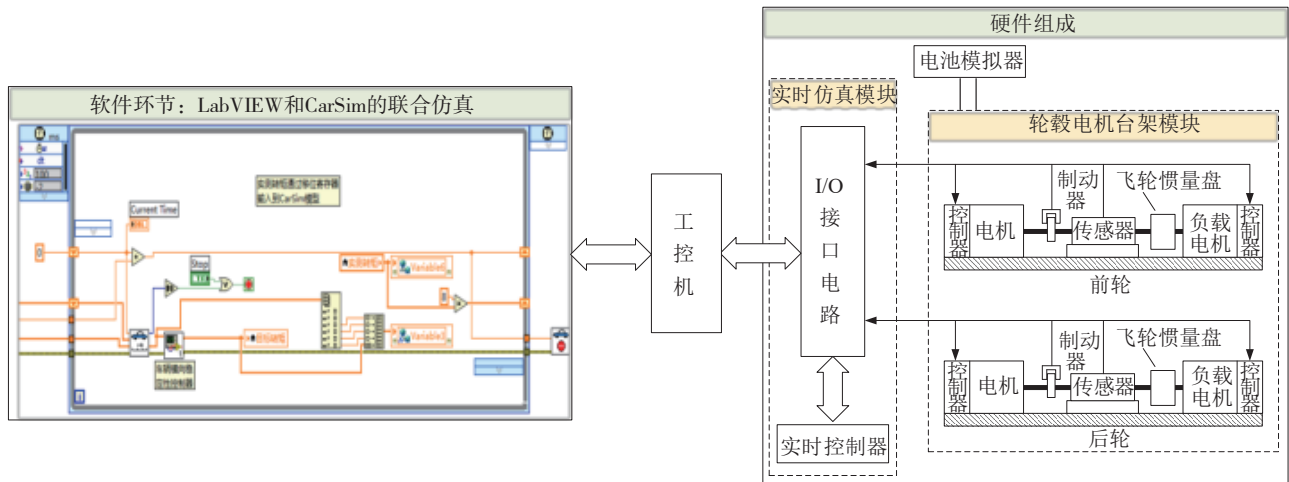


图19 HIL试验框架图

HIL 试验具体可分为硬件系统和软件系统两个子系统。硬件系统包括实时控制器 HNL10-16、轮毂电机控制器 HN01、轮毂电机、工控机、电池模拟柜 4 部分组成,其中信号采集卡采用中泰的 EM9636,通信协议采用 TCP/IP 协议;软件系统由实时仿真模块和控制器算法模块组成。实时仿真模块包括基于 CarSim 开发的整车动力学模型和道路模型,控制器算法模块基于 Matlab/Simulink 进行开发。HIL 试验搭建环境如图 20 所示,工控机主界面如图 21 所示。

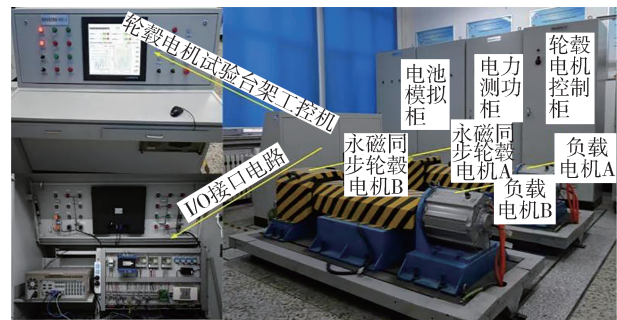


图20 HIL试验搭建环境

在城市循环工况下,由于前文对横摆力矩进行了实时跟踪及控制,所以在转矩分配的过程中,只考虑前后轮对于总转矩的分配,而后进行左右轮转矩的分配。因此,采用如图 20 所示的轮毂电机台架,两组轮毂电机分别模拟车辆的前轮和后轮,并通过在工控机输入不同能耗优化方法控制轮毂电机运

行,实时记录和计算 4IWMDV 在两种工况下的运行数据。

重复上述试验,分别得到平均分配、NSGA II、NSGA II-SMADO 3 种能耗优化方法下 4IWMDV 的电池 SOC 曲线,如图 22 所示。由试验结果可以看

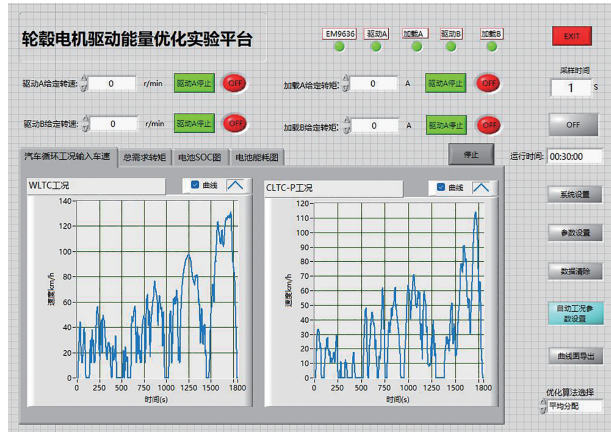
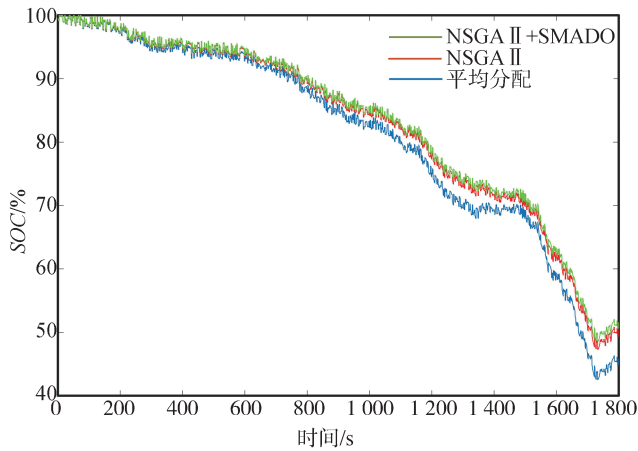


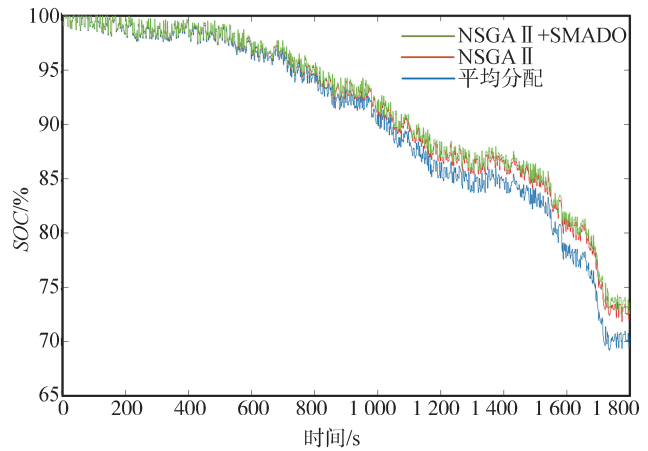
图 21 轮毂电机台架工控机控制系统主界面

出,在NSGA II-SMADO 能耗优化方法下,车辆能耗

在两种工况下均小于平均分配和NSGA II 优化分配。其中,在WLTC 工况下,与平均分配相比,电池SOC 消耗降低了4.7%;与NSGA II 优化方法相比,电池SOC 消耗降低了1.2%。在CLTC-P 工况下比平均分配,电池SOC 降低了3.2%;与NSGA II 优化方法相比电池SOC 消耗降低了0.9%。并对试验值和仿真值进行误差均值计算,能耗优化试验对比结果如表6 所示。通过表6 可以看出,在两种工况下试验值较仿真值误差较少,其中在CLTC-P 工况下试验结果最为接近仿真值,而在WLTC 工况下试验结果误差较大,是因为在超过120 km/h 的高速下试验值和仿真值误差较大。但日常行驶超过120 km/h 的高速使用较少,所以考虑转矩波动的4IWMDV 能耗优化方法能够有效降低行驶能耗。



(a)WLTC工况汽车电池SOC试验结果



(b)CLTC-P工况汽车电池SOC试验结果

图 22 两种工况下的汽车电池 SOC

表 6 不同能耗优化方法下试验结果对比

评价指标	平均分配	NSGA II 优化方法	NSGA II +SMADO 优化方法
WLTC 工况电池 SOC	100/45.1	100/49.4	100/50.6
CLTC-P 工况电池 SOC	100/70.2	100/72.2	100/73.0
WLTC 工况电池 SOC 仿真值和试验值误差均值对比	100/6.2	100/0.9	100/0.7
CLTC-P 工况电池 SOC 仿真值和试验值误差均值对比	100/3.2	100/0.5	100/0.4

6 结论

针对4IWMDV 在凹凸不平路面和汽车频繁变速时出现的转矩波动大所引起能耗高的问题,本文提出了一种考虑转矩波动的4IWMDV 能耗优化方法。

(1) 基于汽车纵向驱动动力学模型和CarSim 车

辆动力学模型,建立电机能耗模型、轮胎滑移能耗模型、横摆力矩跟踪误差模型作为上层控制目标。并建立了考虑路面激励影响轮毂电机转矩波动的轮毂电动力学模型。

(2) 在NSGA II 算法的基础上,加入模糊控制器实时控制轮胎滑移能耗和横摆力矩跟踪误差的权重系数,构建兼顾稳定性与经济性的上层转矩分配优化控制器。

(3) 在轮毂电机矢量控制基础上,加入滑模扰动观测器和滑模转速环,对转矩波动进行实时观测和抑制,进而降低因为转矩变化导致电流瞬间过大造成的能耗。

(4) 通过轮毂电机台架试验,模拟4IWMDV在城市循环工况下运行,得到不同转矩优化方法下的SOC曲线。试验结果表明,考虑转矩波动的4IWMDV能耗优化方法在WLTC和CLTC-P工况下能有效降低能耗。

参考文献

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述·2023 [J]. 中国公路学报, 2023, 36(11): 1-192.
Editorial Department of China Highway Journal. Review of academic research on Chinese automotive engineering·2023[J]. China Highway Journal, 2023, 36(11): 1-192.
- [2] 张海川, 王姝, 赵轩, 等. 轮毂电机驱动电动汽车4WS和DYC协调控制[J]. 汽车工程, 2024, 46(10): 1766-1779.
ZHANG Haichuan, WANG Shu, ZHAO Xuan, et al. Electric vehicle electric vehicle 4WS and DYCLE control [J]. Automotive Engineering, 2024, 46(10): 1766-1779.
- [3] SUN W, WANG J N, WANG Q N, et al. Simulation investigation of tractive energy conservation for a cornering rear-wheel-independent-drive electric vehicle through torque vectoring [J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61: 257-272.
- [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] WU S, LI Y, GUAN Y, et al. Distribution method of automotive torque for hub motor considering energy consumption optimization [J]. International Journal of Automotive Technology, 2023, 24(3): 913-928.
- [6] 丁晓林, 王震坡, 张雷. 四轮轮毂电机驱动电动汽车驱动系统参数多目标优化匹配[J]. 机械工程学报, 2021, 57(8): 195-204.
DING Xiaolin, WANG Zhenpo, ZHANG Lei. Multi-objective optimization and matching of parameters of four-wheel in-wheel motor drive electric vehicle drive system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(8): 195-204.
- [7] LEI F, BAI Y, ZHU W, et al. A novel approach for electric powertrain optimization considering vehicle power performance, energy consumption and ride comfort [J]. Energy, 2019, 167: 1040-1050.
- [8] DENG Z, LI X, LIU T, et al. Modeling and suppression of unbalanced radial force for in-wheel motor driving system [J]. Journal of Vibration and Control, 2022, 28(21-22): 3108-3119.
- [9] WANG J, LUO Z, WANG Y, et al. Coordination control of differential drive assist steering and vehicle stability control for four-wheel-independent-drive EV [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 11453-11467.
- [10] ZHOU H, JIA F, JING H, et al. Coordinated longitudinal and lateral motion control for four wheel independent motor-drive electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(5): 3782-3790.
- [11] 黄彩霞, 雷飞, 胡林, 等. 轮毂电机驱动汽车区域极点配置横向稳定性控制[J]. 汽车工程, 2019, 41(8): 905-914.
HUANG Caixia, LEI Fei, HU Lin, et al. In-wheel motor drive car area pole configuration lateral stability control [J]. Automotive Engineering, 2019, 41(8): 905-914.
- [12] ADELEKE O P, LI Y, CHEN Q, et al. Torque distribution based on dynamic programming algorithm for four in-wheel motor drive electric vehicle considering energy efficiency optimization [J]. World Electric Vehicle Journal, 2022, 13(10): 181.
- [13] HE S, FAN X, WANG Q, et al. Review on torque distribution scheme of four-wheel in-wheel motor electric vehicle [J]. Machines, 2022, 10(8): 619.
- [14] 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 Xing, WANG Qunjing, CHEN Long, et al. Torque distribution optimization strategy for electric vehicles with dual motors on the front and rear axles [J]. Journal of Motor and Control, 2020, 24(3): 62-70.
- [15] GANDHI R, BHATTACHARYA D, ANAND A, et al. Speed control of PMSM using modified particle swarm optimization technique based on inertia weight updating mechanism [J]. SN Computer Science, 2023, 4(6): 774.
- [16] FAN B, HU Q, WANG J, et al. Active disturbance observation rejection control based on port-controlled Hamiltonian with dissipation model for PMSM [J]. Electrical Engineering, 2024: 1-11.
- [17] WANG Y, FENG Y, ZHANG X, et al. A new reaching law for ant disturbance sliding-mode control of PMSM speed regulation system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(4): 4117-4126.
- [18] LI Y, CHAI F, SONG Z, et al. Analysis of vibrations in interior permanent magnet synchronous motors considering air-gap deformation [J]. Energies, 2017, 10(9): 1259.
- [19] KIM J. Optimal power distribution of front and rear motors for minimizing energy consumption of 4-wheel-drive electric vehicles [J]. International Journal of Automotive Technology, 2016, 17: 319-326.
- [20] WANG J, LUO Z, WANG Y, et al. Coordination control of differential drive assist steering and vehicle stability control for four-wheel-independent-drive EV [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 11453-11467.