DOI: 10.3901/JME.2020.02.145

基于 GA-ECMS 电机转矩优化的混合动力 系统协调控制*

林歆悠^{1,2} 郑清香¹ 吴超宇¹

(1. 福州大学机械工程及自动化学院 福州 350002;

2. 流体动力与电液智能控制福建省高校重点实验室(福州大学) 福州 350002)

摘要: 在保证经济性的前提下,以提高驱动工况中混合动力系统的模式切换控制品质为研究目的,构建一种基于 GA-ECMS 电机转矩优化的协调控制策略。基于等效燃油消耗最小策略(Equivalent fuel consumption minimization strategy, ECMS)获得混合动力系统各个模式下的优化转矩控制策略以及各个模式下的价值量,并根据各个模式下的价值量获得模式切换的边界曲线。然后在此基础上,进而引入驱动电机的转矩系数为控制变量,以电池荷电状态(State of charge, SOC)为状态量,整车的冲击度为价值量构建目标函数,采用遗传算法(Genetic algorithm, GA)进行优化,获得基于电机转矩系数优化的协调控制策略。在 Matlab/Simulink 的仿真平台上建立整车仿真模型,采用 NEDC 和 HWFET 高速工况的综合工况进行仿真验证,结果表明在 NEDC 工况下,最大冲击度从 $19.45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$,降低至 $10.96 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$,降低了 43.65%;在 HWFET 工况下,最大冲击度 $10.692 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$,降低至 $5.869 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$,降低了 45.11%,同时也开展模式切换瞬时冲击度和整车经济性验证。通过以 D2P 系统为核心的硬件在环试验进一步以福州实际行驶工况进行验证。根据试验结果说明采用所制定的基于转矩优化协调控制策略相比于无协调控制能有效地降低冲击度,提高模式切换品质,并具有良好的整车经济性。

关键词: 等效燃油消耗最小策略(ECMS);协调控制策略;遗传算法;平顺性

中图分类号: U462

Coordinated Control of Hybrid Electric Powertrain Based on GA-ECMS Motor Torque Optimization

LIN Xinyou^{1,2} ZHENG Qingxiang¹ WU Chaoyu¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002;

2. Key Laboratory of Fluid Power and Intelligent Electro-Hydraulic Control(Fuzhou University),
Fujian Province University, Fuzhou 350002)

Abstract: To improve the mode transition quality under the mode switching process and the mode operation process without sacrificing the economy performance. A coordinated control strategy based on GA-ECMS torque optimization during driving mode is proposed. Firstly, the real-time optimal operation model and optimized data table of torque under different mode are obtained by the equivalent fuel consumption minimization strategy(ECMS). Secondly, the torque coefficient of the motor is introduced as control variable, the SOC is defined as the state variable and the transition jerk of vehicle is constituted as the objective cost function. Finally, the genetic algorithm(GA) is applied to optimize the torque coefficient of the motor, and coordinated control strategy based on optimization of motor torque coefficient is proposed. A hybrid electric powertrain simulation model is developed on Matlab/Simulink simulation platform, the driving cycle of NEDC and HWFET were used for verification. The results show that under the NEDC cycles, the maximum jerk reduce from $19.45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$ to $10.96 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$, decreased by 43.65%; and under the HWFFET cycles, the maximum jerk reduce from $10.692 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$ to $5.869 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$, decreased by 45.11%. The hardware in the loop experiment based on the D2P system used Fuzhou driving cycle is further verified, which shows that the coordinated control strategy based on torque optimization can effectively reduce the transition jerk of vehicle compared to normal strategy, and the fuel economy performance is improved.

* 国家自然科学基金资助项目(51505086)。20181218 收到初稿, 20190517
收到修改稿

Key words: hybrid system; equivalent fuel consumption minimization strategy(ECMS); coordinated control strategy; genetic algorithm; drivability

0 前言

混合动力汽车具有多种运行模式可以极大的提升车辆对不同工况的适应性,但解决不同模式间切换的协调控制是综合提升混合动力汽车性能的另一关键技术问题。例如,混合动力汽车在驱动模式时,由于发动机转矩响应时间较长,使得在模式切换状态和模式运行状态时,转矩出现波动,影响了动力传动的平稳性。

关于多个动力源和传动系统的协调控制的研究一直是混合动力汽车的研究热点之一^[1]。冀尔聪等采用电机辅助的协调控制方法,有效地提高了整车的平顺性^[2-3]。文献[4]通过基于PID闭环控制电机转速以及限制发动机转矩变化率的动态协调控制策略来进行协调控制,降低整车的转矩波动。王伟华等^[5]提出基于车轮转速差PID控制的电机转矩补偿控制方法,降低了模式切换中总输出转矩的波动,有效保证了整车的动力性和平顺性。文献[6]采用基于模型预测控制的转矩协调控制策略来解决模式切换中的冲击问题。文献[7]为了改善纯电动模式切换到混合驱动模式的动力性,采用了基于模型预测控制和转矩分配控制的协调控制策略。

上述的研究主要从整车的平顺性出发进行协调控制的研究,几乎没有关注系统的经济性。DANIEL^[8]提出了考虑平顺性指标的能量管理策略,把随机动态规划加入了平顺性的指标限制,得到权衡优化后的转矩分配,综合考虑了经济性和平顺性两个指标。文献[9]以系统效率最优为基础进行系统工作模式划分,在模式切换时以整车冲击度最小为控制目标,进行协调控制,实现了低冲击度和无动力中断。SCHACHT^[10]提出了考虑驾驶性的实时等效燃油消耗最小策略,通过系统的稳定性反馈来提升驾驶性能和效率。文献[11]通过控制发动机启动来优化整车的平顺性,通过动态规划权衡求解驾驶性和快速启动两大问题。

提出的控制策略是以多模式混合动力系统为研究对象,旨在以等效燃油消耗最小策略(Equivalent fuel consumption minimization strategy, ECMS)为基础实现模式切换过程和模式运行过程动力传递的平稳性。通过ECMS获得实时最佳运行模式和不同工况的优化转矩控制数表,然后引入驱动电机的转矩系数为控制变量,以电池荷电状态(State of charge,

SOC)为状态量,整车的冲击度为价值量构建目标函数,采用遗传算法(Genetic algorithm, GA)进行优化得到最终最优的转矩优化系数,进而对模式运行状态中电机和发动机的转矩分配进行优化,以达到降低冲击度和提高转矩跟随的目标。

1 混合动力系统的运行分析

1.1 混合动力系统组成

本文研究的混合动力系统结构如图1所示,采用一种以行星排为动力耦合机构的混合动力系统。如图1所示,发动机输出轴经单向离合器和湿式多片离合器,与动力耦合机构行星排的齿圈连接;电机转子和行星排的太阳轮连接;系统动力通过行星排的行星架输出,在经过变速器和差速器传递给车轮。根据系统结构特点,通过控制电机和发动机的开启与关闭、单向离合器和湿式多片离合器的结合与断开,多模式混合动力系统可实现多种驱动模式,包括纯电动驱动、发动机单独驱动、混合驱动转矩耦合模式、混合驱动转速耦合模式、行车充电。

图1 混合动力系统

1. 发动机 2. 电池 3. 逆变器 4. 行星排 5. 主减速器
6. AMT 变速器 7. 电机 8. 湿式多片离合器 9. 单向离合器

1.2 模式切换状态协调控制

本文采用电机转矩补偿和控制电机与发动机转矩变化率的模式切换协调策略。模式切换有涉及发动机启动时,由于发动机启动存在阻力矩,造成整车的输出转矩不能达到需求转矩,引起转矩波动;由于发动机响应滞后的特性,发动机实际输出的转矩与发动机需求转矩是存在误差的,这也将引起转矩波动。通过电机补偿发动机实际输出的转矩误差,使得变速器实际输出的转矩等于需求转矩,减少转矩波动。

通过电机转矩补偿的控制策略能使变速器输出端的转矩不发生波动。电机转矩补偿的基础是发动机

的实际输出转矩能进行较精确的估计, 如果估计不精确, 也将引起转矩波动。利用电机转矩补偿时由于发动机转矩估计不精确的问题, 因此通过限制发动机和电机的转矩变化率来控制其转矩的变化。

电机和发动机的转矩变化率如式(1)所示

$$\begin{cases} T_{e_req} = T_{e_0} + \int k_e dt \\ T_{m_req} = T_{m_0} + \int k_m dt \end{cases} \quad (1)$$

电机和发动机的转矩变化率关系如式(2)所示

$$k_m = [k_{req} - k_e (n_e / n_c)] \cdot (n_c / n_m) \quad (2)$$

式中, T_{e_0} 、 T_{m_0} 为切换前发动机和电机转矩; k_e 、 k_m 、 k_{req} 分别为发动机转矩变化率、电机转矩变化率和需求转矩变化率; n_e 、 n_c 、 n_m 为发动机转速、行星架转速、电机转速。

1.3 多模式混合动力汽车关键部件建模

1.3.1 发动机数值建模

本文采用试验数据建模法, 这里建立发动机油耗模型和转矩模型。根据数值插值法, 发动机的油耗数值模型的转速、转矩和比油耗的关系如式(3)所示

$$Q = \frac{1}{3.6 \times 10^6 \rho} \int_0^t b_e P_e dt \quad (3)$$

式中, Q 为燃油消耗量; b_e 为燃油消耗率; P_e 为发动机输出功率; ρ 为燃油密度。

后续研究中发动机的转矩响应特性极其重要。利用插值法得到不同发动机需求转矩和转速下发动机节气门开度, 如式(4)所示, 得到节气门开度模型如图 2 所示。进而再通过插值法得到不同节气门开度下发动机的输出转矩, 如式(5)所示

$$\alpha = \alpha(T_{e_input} / T_{e_max}, n_e) \quad (4)$$

$$T_e = T_e(\alpha, n_e) \quad (5)$$

式中, α 为节气门开度; T_{e_input} 为发动机输入转矩; T_{e_max} 为发动机最大转矩; n_e 为发动机转速; T_e 为发动机输出转矩。

图2 发动机节气门开度模型

1.3.2 电机及电池数值建模

将电机和控制器综合为一个整体, 考虑电机快速响应的特性, 用一阶传递函数来得到电机的输出转矩, 如式(6)所示

$$T_m = \frac{1}{\tau_m \times s + 1} T_{m_req} \quad (6)$$

式中, T_m 为电机转矩; τ_m 为时间常数; T_{m_req} 为电机需求转矩。

电机驱动功率为电池的输出功率, 如式(7)所示; 建模中电池 SOC 的估算可由式(8)、(9)联合算出

$$P_m = \frac{T_m \times n_m}{\eta_m(T_m, n_m)} \quad (7)$$

式中, P_m 为电机驱动功率; n_m 为电机转速; $\eta_m(T_m, n_m)$ 为电机效率, 如图 3 所示。

$$\begin{cases} V_t = \sqrt{P_m(t) \cdot R_d} \\ I_d(t) = \frac{V_0 - V_t}{R_d} \end{cases} \quad (8)$$

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\int_0^t I_d(i) di}{Q_c} \quad (9)$$

式中, V_t 为电池输出电压; R_d 为内阻; I_d 为电池工作电流; SOC_0 为电池初始荷电状态; Q_c 为电池容量。

图3 电机效率模型

1.3.3 动力耦合机构数值建模

本文的动力耦合机构为单排行星齿轮机构。转矩是本文的关注点, 单排行星齿轮机构在锁止时为单自由度机构, 行星排的三个部件转速相等, 此时为转矩耦合; 未锁止时为两自由度机构, 行星排的三个部件转速不相等, 此时为转速耦合。本文忽略系统摩擦, 行星齿轮机构的转矩关系, 如式(10)所示

$$\begin{cases} -T_c = (1 + \rho) \cdot T_r = \frac{1 + \rho}{\rho} T_s & \text{转速耦合} \\ T_r = T_c - T_s & \text{转矩耦合} \end{cases} \quad (10)$$

式中, T_c 为行星架转矩; T_r 为齿圈转矩; T_s 为太阳轮转矩; ρ 为行星机构特性参数。

由式(10)可知, 转速耦合时, 转矩分配是按固定的分配比分配, 因此该模式下不进行转矩优化,

在混合驱动时只对转矩耦合模式进行转矩优化。

2 基于 GA-ECMS 的转矩优化协调控制

本文在以平衡经济性的前提下,以实现模式切换过程和模式运行过程动力传递的平稳性为目的,建立基于 GA-ECMS 的转矩优化协调控制策略,其具体开发实现流程如图4所示。

图4 基于转矩优化的协调控制策略

整车处在驱动模式时有两种状态,包括模式切换状态和模式运行状态。模式切换前后发动机和电机的转矩将会发生突变并且由于发动机的响应滞后的特性,将会引起整车的转矩波动;在模式运行状态中基于能管管理策略的转矩分配因为需求转矩的突变以及发动机的响应滞后的特性,也会造成转矩不平稳。为了提高模式切换过程和模式运行过程动力传动的平稳性,提出了基于 GA-ECMS 转矩优化的协调控制策略。

本方案以 ECMS^[12]为基础对需求转矩进行转矩分配以及划分驱动模式,引入了电机的转矩优化系数 λ ,利用遗传算法以整车冲击度最小为目标价值函数对电机转矩优化系数进行优化;通过该系数对需求转矩的分配进行修正,得到新的转矩分配,以实现动力传递的平稳性。

2.1 基于 ECMS 的工作模式划分

以等效燃油消耗最小策略(ECMS)为提高系统经济性的能量管理策略。单位时间的等效燃油消耗量由发动机单位时间燃油消耗量和电池单位时间等效燃油消耗量两部分组成。通过计算能量消耗所对应的成本之和的方式将这两种能量统一起来度量,如式(11)所示

$$Q_c(t) = \int_0^{t_f} \left[j_f Q_f(t) + j_e \frac{P_{ess}(t)}{\eta_g} \right] dt \quad (11)$$

式中, t_f 为终端时刻, j_f 为每升油的价格, $Q_f(t)$ 为 t 时刻的燃油消耗量, j_e 为每度电的价格, $P_{ess}(t)$ 为 t 时刻电池的充放电功率, η_g 为电网的充电效率为0.98, $Q_c(t)$ 为 t 时刻等效燃油消耗的成本。

ECMS 将总消耗最小的全局问题分解为单位时间的等效燃油消耗最小问题。等效燃油消耗最小策略在电池 SOC 约束下的目标函数如式(12)所示

$$\begin{cases} J_{ECMS} = \int_{t_0}^{t_f} \min Q_c dt \\ SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \\ P_{e_min} \leq P_e(t) \leq P_{e_max} \\ P_{m_min} \leq P_m(t) \leq P_{m_max} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $SOC(t)$ 、 SOC_{min} 、 SOC_{max} 分别为电池荷电状态、最低电池荷电状态、最高电池荷电状态。 $P_e(t)$ 、 $P_m(t)$ 为发动机和电机转矩; P_{e_min} 、 P_{e_max} 为发动机最小功率和最大功率; P_{m_min} 、 P_{m_max} 为电机最小功率和最大功率

以该式为目标函数在不同的需求转矩、需求转速、SOC 下进行寻优,得到满足等效燃油消耗最小的 T_{e_req} 和 T_{m_req} 及等效燃油消耗成本。将需求转矩、需求转速离散化,并与得到的优化结果 T_{e_req} 和 T_{m_req} 制成数表,在构建整车仿真模型时以线性插值的方法得到发动机和电机的需求转矩。由于篇幅所限,仅例混合驱动转矩耦合模式下的 ECMS 优化结果,如图5所示。

图5 混合驱动模式的 ECMS 优化结果

优化也将得到混合动力系统等效燃油消耗的成本随着需求转矩、需求转速不同的变化情况。将不同驱动模式的等效燃油消耗成本 MAP 图整合在一起进行对比, 如图 6 所示。

图 6 各模式下等效燃油消耗的成本曲面

将图 6 中各模式下等效燃油消耗成本 MAP 图作转速和转矩平面上投影, 从而可划分出混合动力系统各个工作模式的工作区域, 如图 7 所示。

图 7 驱动模式划分

2.2 基于 GA 转矩系数优化的协调控制

由于电机对转矩响应快速、准确的特性, 在协调整车转矩波动和冲击方面, 主要利用电机来进行协调控制^[13], 因此本文引入了电机转矩优化系数 $\lambda(t)$ 为控制变量, 以电池 SOC(t) 为状态量, 如式(13)所示。通过电机转矩优化系数对模式运行状态中的需求转矩进行优化分配, 以降低整车冲击度。

$$\begin{cases} x(t) = \text{SOC}(t) \\ u(t) = \lambda(t) \end{cases} \quad (13)$$

考虑混合动力汽车的实际运行特性, 状态变量和控制变量的限制条件如式(14)所示

$$\begin{aligned} x(t) &= \{\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOC}_{\max}\} \\ u(t) &= \{0.8 \leq \lambda(t) \leq 1.5\} \end{aligned} \quad (14)$$

利用电机转矩优化系数作为增益对由等效燃油消耗最小策略得到的电机转矩进行修正, 如式(15)所示。进而得到式(16)的发动机优化转矩。把通过 ECMS 得到的电机转矩视为 λ 为 1 的优化转矩。约

束条件如式(17)所示

$$T_{m_opt} = \lambda(t) \cdot T_{m_req}(t) \quad (15)$$

$$T_{e_opt}(t) = T_{req}(t) - T_{m_opt}(t) \quad (16)$$

$$\begin{cases} T_{m_min} \leq T_{m_opt} \leq T_{m_max} \\ T_{e_min} \leq T_{e_opt} \leq T_{e_max} \end{cases} \quad (17)$$

式中, $T_{m_req}(t)$ 为通过 ECMS 得到的电机需求转矩; $T_{m_opt}(t)$ 、 $T_{e_opt}(t)$ 分别为优化后的电机和发动机转矩; T_{m_min} 、 T_{m_max} 为电机的最小转矩和最大转矩; T_{e_min} 、 T_{e_max} 为发动机的最小转矩和最大转矩

为了寻求整车冲击度最小的最优控制序列, 设置的目标价值函数如式(18)^[14]所示

$$J = \min \left[\frac{i_0 i_g}{\delta m r} \left(\frac{d(T_{e_opt}(t) + \lambda(t) \cdot T_{m_req}(t))}{dt} \right) \right] \quad (18)$$

式中, i_0 、 i_g 为主减速器和变速器传动比, δ 汽车旋转质量换算系数, m 为汽车质量, r 为车轮半径。

2.2.1 构建电机转矩优化系数模型

电机转矩优化系数是实时的, 不同荷电状态、不同时刻的工况对应不同的转矩优化系数, 因此构建转矩优化系数和车速的模型来表征转矩优化系数的实时性。所以转矩优化系数表示为

$$\lambda(t) = f(\text{SOC}, v(t)) \quad (19)$$

为了得到能降低整车冲击度的一组最优的转矩优化系数 $\lambda_{opt}(t)$ 。本文得到 $\lambda_{opt}(t)$ 的方法是将 0~120 km/h 的车速以 10 km/h 为一个间隔, 每个间隔设置一个 λ , 因此设置了 $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{11}$ 等 12 个 λ 值, 通过遗传算法优化这 12 个值, 再把优化结果拟合成曲线即为电机转矩优化系数和车速的模型。

2.2.2 基于 GA 优化得到的转矩优化系数

以标准工况 NEDC+HWFET 的综合工况, 对车辆的整车模型进行评价。通过 GA 可得到不同 SOC 下 λ 最优值的分布, 并通过拟合的方式得到电机转矩优化系数曲线。如图 8 所示为 SOC 在 0.7、0.6、0.5 的 λ 分布与拟合曲线。由图 8 可以看出不同荷电状态时电机转矩优化系数曲线不同, 随着电池荷电状态的降低, 电机转矩优化系数也相应降低。

图 8 转矩优化系数与车速的拟合曲线

3 试验验证

3.1 整车协调控制验证及分析

为验证所制定的基于转矩优化的协调控制策略的合理性,利用 Matlab/Simulink 建立整车仿真模型,包括发动机、电池、电机等动力子系统数值模型、动力耦合机构模型、控制策略的控制器等理论模型。NEDC 典型城市工况和 HWFET 高速工况组成的综合工况下进行仿真验证。

图 9 为整个工况下有无采用转矩优化协调控制策略的发动机和电机转矩仿真对比图。从图中可看出在有转矩分配的混合驱动模式中,相比于优化前,优化后的发动机转矩较低且平稳,波动减小;且优化后的电机转矩提高了。可以看出优化后的电机转矩对发动机转矩进行有效地削峰填谷,可提高整车动力传递的平稳性。图 10 为整个工况下采用转矩优化协调控制策略的转矩跟随试验结果图,图 11 为未采用优化协调转矩跟随试验结果。为了更清楚观察转矩优化协调控制的效果,从时间轴上 1 500~1 800 s 截取这一片段放大以进行比较,很明显从图中可以看出,相比于采用优化协调控制前,优化协调控制后的实际输出转矩能很好跟随需求转矩。

图 9 优化前后的发动机和电机转矩对比图

图 10 优化协调控制转矩跟随对比图

图 11 未优化协调控制转矩跟随

图 12 为整个工况下转矩协调控制策略优化前后冲击度的结果对比。从图中可以看出,在 NEDC 工况下的冲击偏大,这是由于工况的变化,整车的需求转矩出现突变。但是相比于优化前,在 NEDC 工况下优化后的冲击度得到了很好的抑制,最大冲击度从优化前的 $19.45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$ 降低至 $10.96 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$,降低了 43.65%。在 HWFET 工况下,消除了大部分的冲击度,最大冲击度从优化前的 $10.692 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$ 降低至 $5.869 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$,降低了 45.11%。

图 12 优化前后冲击度对比

3.2 模式切换冲击度及整车经济性验证

为验证不同驱动模式间瞬时切换冲击度控制的有效性,以从纯电动模式切换到发动机单独驱动模式为例进行验证说明,如图 13 为验证结果。整车在 127.7 s 发出模式切换的指令后,在协调控制下电机 2 并没有立即退出工作,对发动机克服阻力矩时进行转矩补偿,然后再逐渐退出工作。有效地抑制了冲击度,最大冲击度为 $10.96 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$,而未协调控制下的最大冲击度为 $19.45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$,由此相比则模式切换冲击度控制效果降低了 43.65%。

对于经济性的验证,在不同的循环工况下,将采用基于 GA-ECMS 协调控制策略与基于规则以及基于 ECMS 的控制策略获得的等效燃油消耗进行对比分析。由图 14 可知,基于 GA-ECMS 控制策略的仿真结果百公里等效燃油消耗明显低于基于规则的

图 13 纯电动模式切换到发动机单独驱动模式

图 14 等效燃油消耗对比

控制策略, 略高于单纯以经济性为优化目标的 ECMS 控制策略, 但油耗均控制在比 ECMS 控制策略高 8% 之内。鉴于此, 表明采用基于 GA-ECMS 的协调控制策略不仅可以提高模式切换品质的同时也能保证混合动力系统经济性。

3.3 硬件在环试验验证

3.3.1 D2P 硬件在环试验系统

为进一步验证所制定的基于 GA-ECMS 的转矩优化协调控制策略的有效性, 进行了硬件在环实验验证。如图 12、13 所示为构建以 D2P 为核心的硬件在环系统, 硬件部分为双电机台架试验装置, 由电机 1 代替发动机输出转矩, 设计试验时模拟发动

图 15 D2P 硬件在环试验台架原理图

机特性在发动机 ECU 内设置延迟控制电机 1。硬件部分和软件部分通过 CAN 总线进行信息交互, 试验台架上的各传感器由控制柜的信息采集卡采集, 并在控制柜的显示屏上显示。

图 16 D2P 硬件在环试验系统

试验过程: 首先通过 MotoHawk 完成 Simulink 控制策略模型的规格定义和功能设计, 再利用 MotoTune 将控制策略模型针对硬件 ECU 自动生成 C 代码, 最后用 USB 代码刷写器刷写到整车控制器中并进行调试。接着通过控制试验操作台的踏板和档位将负载信号导入到 CAN 总线进行交互, VCU 得到负载信号后, 发出控制信号给发动机 ECU、电机 ECU 和 BMS, 进而控制试验台架各部件。最后对反馈到控制柜的显示屏上的转速、转矩信号分析。

3.3.2 实际行驶工况验证

选择了福州工况来验证基于 GA-ECMS 的转矩优化协调控制策略, 如图 17 所示。硬件在环的试验结果图如图 18、19 所示。图 18 为 GA 优化前后的发动机和电机的转矩对比。由图 18 可以看出, GA 优化后, 在混合驱动模式时, 发动机转矩输出更平稳, 电机转矩对发动机转矩起到了削峰填谷的效果。

图 17 福州市的测试工况

图 18 GA 优化前后的发动机和电机转矩对比

图 19 GA 优化前后的冲击度对比

图 19 为 GA 优化前后的冲击度对比图。由图可以看出, GA 优化后整车冲击度有所抑制, 相比于仿真试验冲击度降低幅度不大, 但是整体的趋势是一样的。因此也验证基于 GA-ECMS 的转矩优化协调控制策略的有效性。

4 结论

本文以混合动力系统模式切换控制品质为研究目标, 构建了基于 GA-ECMS 转矩优化的协调控制策略并进行了试验验证, 得到以下的结论。

(1) 本文意在保证系统经济性的前提下提高模式切换控制品质, 进而保证运行过程动力传递的平稳性。通过等效燃油消耗最小策略获得实时最佳运行模式和不同工况的优化转矩控制 MAP, 并引入驱动电机的转矩系数, 构建了基于转矩优化的协调控制策略。对该策略进行试验验证, 结果表明所采用的协调控制策略能有效降低冲击度, 满足平顺性要求, 更好地跟随需求转矩, 并提升了整车的经济性。

(2) 电机转矩优化系数模型的构建可以更精确, 取 λ 的间隔更小时, 可以得到更精确的转矩优化系数模型。本文仅以 ECMS 为基础进行冲击度的单目标优化, 在后续的工作中将研究经济性和驾驶性的双目标优化, 改善整车的经济性能和驾驶性能。

参 考 文 献

[1] JAUCH C, TAMILARASAN S, BOVEE K, et al. Modeling for drivability and drivability improving control of HEV[J]. Journal of Control Engineering Practice, 2017, 70: 50-62.

[2] 叶心, 秦大同, 胡明辉, 等. ISG 型中度混合动力 AMT 汽车换挡综合控制[J]. 汽车工程, 2011, 33(9): 798-804.

YE Xin, QIN Datong, HU Minghui, et al. Comprehensive shifting control of ISG type medium hybrid electric vehicle with AMT[J]. Journal of Automotive Engineering, 2011, 33(9): 798-804.

[3] 童毅, 欧阳明高, 张俊智. 并联式混合动力汽车控制算

法的实时仿真研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 156-161.

TONG Yi, OUYANG Minggao, ZHANG Junzhi. Real-time simulation and research on control algorithm of parallel hybrid electric vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(10): 156-161.

- [4] WANG Chen, ZHAO Zhiguo, ZHANG Tong, et al. Mode transition coordinated control for a compound power-split hybrid car[J]. Journal of Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 87: 192-205.
- [5] 王伟华, 王文楷, 冯博, 等. 并联式混合动力汽车驱动模式切换协调控制方法[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(2): 90-97.
- WANG Weihua, WANG Wenkai, FENG Bo, et al. Dynamic coordinated control method of driving mode switch of parallel hybrid electric vehicle [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(2): 90-97.
- [6] SUN Jing, XING Guojing, LIU Xudong, et al. A novel torque coordination control strategy of a single-shaft parallel hybrid electric vehicle based on model predictive control[J]. Mathematical Problem in Engineering, 2015, 1: 1-12.
- [7] MINH V T. Modeling and model predictive control for hybrid electric vehicles[J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(3): 477-485.
- [8] OPILA D F. Incorporating drivability metrics into optimal energy management strategies for hybrid vehicles[C]// Proceedings of 47th IEEE Conference on Decision and Control, Cancun, Mexico; IEEE, 2008: 4382-4389.
- [9] 胡明辉, 陈爽, 曾剑峰. 双电机耦合系统驱动模式切换控制策略研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(14): 59-67.
- HU Minghui, CHEN Shuang, ZENG Jianfeng. Coordinated control for mode-shift of dual-motor coupling powertrain[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(14): 59-67.
- [10] SCHACHT E J. Addressing drivability in an extended range electric vehicle running an equivalent consumption minimization strategy (ECMS)[C/CD]// Proceedings of SAE 2011 World Congress & Exhibition, 2011.
- [11] KUM D, PENG Huei, BUCKNOR N K. Control of engine-starts for optimal drivability of parallel hybrid electric vehicles[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2013, 135(2): 450-472.
- [12] 林歆悠, 冯其高, 张少博, 等. 效因子离散全局优化的等效燃油瞬时消耗最小策略能量管理策略[J]. 机械工程学报, 2016, 52(20): 102-110.
- LIN Xinyou, FENG Qigao, ZHANG Shaobo. Global

- optimal discrete equivalent factor of equivalent fuel consumption minimization Strategy Based Energy management strategy for a series-parallel plug-in hybrid electric vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(20): 102-110.
- [13] 杜波, 秦大同, 段志辉, 等. 新型并联式混合动力汽车模式切换协调控制[J]. 中国机械工程, 2012, 23(6): 739-744.
- DU Bo, QIN Datong, DUAN Zhihui, et al. Coordinated control for mode-switch of a new parallel HEV[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(6): 739-744.
- [14] 杨阳, 李小强, 苏岭. 重度混合动力汽车工作模式切换控制策略[J]. 中国公路学报, 2014, 27(6): 109-119.
- YANG Yang, LI Xiaoqiang, SU Ling. Control strategy for mode-switch of full hybrid electric vehicle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(6): 109-119.
-
- 作者简介:** 林歆悠(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为新能源汽车能量控制策略与车辆传动。
E-mail: linxinyou@fzu.edu.cn
- 郑清香, 男, 1992 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为新能源汽车能量控制策略与车辆传动。
E-mail: 269849884@qq.com
- 吴超宇, 男, 1992 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为新能源汽车能量控制策略与车辆传动。
E-mail: 576908121@qq.com