DOI: 10.3901/JME.2020.22.201

复合功率分流系统发动机起动模型预测控制*

赵治国 付 靖 蒋蓝星 范佳琦
(同济大学汽车学院 上海 201804)

摘要: 复合功率分流混合动力系统从纯电动模式至电子无级变速(Electronic-continuously variable transmission, E-CVT)混合动力模式的切换过程, 伴随发动机的起动。由于发动机在整个起动过程始终与传动系相连, 其低速往复脉动阻力矩特性对车辆模式切换过程的驾驶平顺性有直接影响, 若控制不当, 常引起较大的车辆纵向冲击。针对复合功率分流混合动力系统模式切换过程, 基于 Matlab/Simulink 平台建立传动系动态模型和发动机阻力矩模型; 提出一种发动机起动模型预测优化控制策略, 在线计算电机转矩拖转发动机跟踪目标最优转速曲线并补偿输出端转矩波动。离线仿真及硬件在环台架试验结果表明, 所开发的发动机模型预测转速跟踪控制策略能够快速起动发动机并使车辆平稳切换, 将整车纵向冲击度限制在 11.0 m/s^3 以内, 且对整车参数扰动具有较好的鲁棒抑制效果。

关键词: 发动机起动; 模型预测控制; 功率分流系统; 模式切换

中图分类号: U461

Model Predictive Control of Engine Start-up for Compound Power-split Hybrid Powertrain

ZHAO Zhiguo FU Jing JIANG Lanxing FAN Jiaqi
(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract: When the compound power split hybrid system transitions from pure electric mode to hybrid mode, the engine always starts. However, because the engine is always connected to the driveline during start-up process, its low-speed reciprocating pulsation resistance torque has a direct impact on the driving smoothness of the vehicle. If improperly controlled, it often causes a large longitudinal jerk of the vehicle. For the engine start-up process of the compound power-split hybrid system, the power-split hybrid powertrain model and the engine resistance torque model are established based on the Matlab/Simulink platform. An engine start-up optimization mode predictive control strategy is proposed and the motor torque is calculated online to track the optimal engine speed curve and compensate for output torque fluctuation. The offline simulation and hardware-in-the-loop test results show that the proposed model predictive speed tracking control strategy can not only achieve rapid engine start, but also smoothly complete the mode transition. Besides, it limits the vehicle's longitudinal jerk within 11.0 m/s^3 and has a good robust suppression on vehicle parameter perturbation.

Key words: engine start; model predictive control; power-split system; mode transition

0 前言

随着节能与新能源汽车技术的不断发展, 功率分流混合动力系统已成为国内外众多车企竞相开发的热点。功率分流混合动力系统从纯电动模式至电子无级变速(Electronic-continuously variable trans-

mission, E-CVT)混合动力模式的切换过程包括发动机起动、换挡元件动作以及动力源动力切换等多个阶段^[1]。功率分流混合动力系统中由于发动机在整个起动过程始终与传动系统相连, 其低速往复脉动阻力矩经功率分流变速箱放大并传至动力输出端, 对车辆驾驶平顺性有直接影响^[2], 故发动机起动过程控制已成为功率分流混合动力系统模式切换控制的重点^[3]。

在功率分流混合动力系统模式切换发动机起动

* 国家自然科学基金资助项目(51675381)。20191205 收到初稿, 20200420 收到修改稿

过程控制研究方面,利用电机实施主动阻尼控制是常用的协调控制方法。ZHU 等^[4]基于单电机双行星排混合动力系统非线性特点,设计了模糊增益 PID 控制器,作为自适应反馈控制器调节电机和行星架的转矩。CHEN 和 HWANG 等^[5-6]针对通用双模混动系统(Advanced hybrid system, AHS)的发动机起、停过程进行研究,基于发动机转矩估计方法,采用电机动态补偿发动机转矩波动,同时使用旁通式扭转减振器直接连接发动机与变速箱,进一步提高模式切换过程车辆的驾驶平顺性。赵治国等^[1]和王晨等^[7-8]针对一种双行星排复合功率分流的混合动力轿车模式切换过程进行研究,采用基于转矩解耦的控制方法来求解不同切换阶段动力源的目标转矩,提出了基于发动机转矩估计和电机转矩补偿的模式切换优化控制策略。ZUO 等^[9]针对丰田混动系统(Toyota hybrid system, THS)的发动机起动过程进行研究,以发动机和输出端转矩波动以及燃油消耗率为控制目标,设计模式切换协调控制策略分阶段利用电机转矩调节,在起动发动机的基础上协调电机使离合转速同步。考虑到发动机始终与传动系相连,LIU 等^[10]针对一种拉维娜式双行星排复合功率分流混合动力系统,把纵向加速度作为控制目标,使用电机补偿发动机转矩波动,并分析了不同试验初始条件对试验结果产生的影响。ZHUANG 等^[11]针对改进 THS 构型从纯电动模式至混合动力模式的切换过程,建立了发动机动态起动模型,使用动态规划求解出最优发动机转速曲线,基于动力性和模式切换时间两个目标制定了发动机起动控制策略。ZENG 等^[12]针对 THS 系统纯电动和混合动力模式之间的相互切换过程,建立了考虑行星轮和动力源转动惯量的冲击度预测模型,采用模型预测控制方法决策出每个控制步长电机转矩的变化,仿真结果表明该协调控制策略可以有效地降低系统模式切换的冲击度。XIANG 等^[13]以一种三行星排双模功率分流混合动力系统为研究对象,针对纯电动至混合动力的切换过程,提出了一种基于混合动力汽车多目标动态优化模型的非线性最优控制方法。然而,上述研究多集中于使用电机转矩抵消或补偿发动机和动力输出端转矩波动的角度进行优化控制,而对于发动机起动问题的研究则较少,对发动机起动最优转速曲线动态跟踪控制研究则更为缺乏。

本文以复合功率分流混合动力系统为研究对象,提出了一种基于模型预测控制的发动机起动转速跟踪控制策略并进行试验验证。首先,针对纯电动至 E-CVT 混合动力模式切换过程进行分析,建

立了模式切换过程的动态模型。其次,在发动机最优起动转速轨迹的基础上,综合考虑发动机实际转速与其最优目标转速的偏差以及齿圈转速波动,采用模型预测控制方法对发动机起动过程进行转速在线跟踪,以保证发动机拖转过程整车驾驶平顺性。

1 复合功率分流系统动态建模

1.1 混合动力系统结构

本文研究对象为图 1 所示的双行星排复合功率分流混合动力系统^[14-15]。主要由发动机、小电机 MG1、大电机 MG2、湿式制动器 B1 和 B2 以及共用行星架和齿圈的双行星排功率分流装置组成。其中,双行星排装置为改进的拉维娜式构型,前排小太阳轮 S1、后排大太阳轮 S2 分别与电机 MG1、MG2 连接,行星架 C1(C2)连接发动机,齿圈 R1(R2)连接输出端,湿式制动器 B1、B2 分别用于锁止发动机和电机 MG1。

图 1 复合功率分流混合动力系统结构

该系统的主要工作模式如表 1 所示,通过换挡元件的动作和不同动力源工作状态的组合,复合功率分流混合动力系统主要的工作模式有三种:MG2 单独驱动的纯电动模式、发动机和两个电机共同协调工作的 E-CVT 模式和发动机与 MG2 共同驱动的并联模式。

表 1 复合功率分流系统主要工作模式

工作状态	ENG	MG1	MG2	B1	B2
纯电驱动	○	○	●	●	○
E-CVT	●	●	●	○	○
并联模式	●	○	●	○	●

注:●和○分别代表工作和不工作。

1.2 传动系动态建模

为了方便模型建立与求解,将图 1 所示复合功率分流系统传动系简化为纯刚性模型,将各连接轴的转动惯量集中等效至动力源输出端,如图 2 所示。

图2 传动系动力学模型

在进行动态分析时,考虑输入输出轴的黏性阻尼。可以得到电机 1 轴、电机 2 轴、输入轴和输出轴的转矩方程^[16]

$$T_{S1} = T_{MG1} - I_{MG1} \dot{\omega}_{MG1} \quad (1)$$

$$T_{S2} = T_{MG2} - I_{MG2} \dot{\omega}_{MG2} \quad (2)$$

$$T_{C1} = T_{ENG} - I_{ENG} \dot{\omega}_{ENG} - c_{ENG} \omega_{ENG} \quad (3)$$

$$T_L = T_{R1} - I_L \dot{\omega}_L - c_L \omega_L \quad (4)$$

式中, T 为转矩, ENG 表示发动机, L 表示等效输出端, I 为等效转动惯量, $\dot{\omega}$ 为角加速度, c 为黏性阻尼系数, T_L 为等效输出端的负载转矩, I_L 为等效输出端(包括齿圈、整车、车轮和半轴等)转动惯量。

根据图 2 所示传动系动力学模型,忽略各轴的黏弹性,得出各动力元件的角加速度关系式为

$$\dot{\omega}_{MG1} = (1 + \rho_1) \dot{\omega}_{ENG} - \rho_1 \dot{\omega}_L \quad (5)$$

$$\dot{\omega}_{MG2} = (1 - \rho_2) \dot{\omega}_{ENG} + \rho_2 \dot{\omega}_L \quad (6)$$

为保证双行星排转矩平衡,双行星排转矩关系式为

$$T_{S1} + T_{S2} + T_{C1} - T_{R1} = 0 \quad (7)$$

$$T_{R1} + \rho_1 T_{S1} - \rho_2 T_{S2} = 0 \quad (8)$$

式中, ρ_1 和 ρ_2 分别表示前后行星排的特征参数,即齿圈与太阳轮齿数之比。

1.3 发动机阻力矩模型

复合功率分流混合动力系统从纯电动至 E-CVT 模式切换过程,发动机始终与传动系相连,当利用电机拖转发动机时,活塞循环往复运动产生的脉动阻力矩将直接作用于传动系统,因此必须建立较为准确的发动机阻力矩模型以充分反映系统的动态特性。

如图 3 所示,通过理论与试验^[8,17]建模,可以得到发动机在不同转速下,低速脉动阻力矩与曲轴转角的变化曲线,如图 4a 所示。发动机被倒拖至中高速时,其阻力矩过渡到平均稳态阻力矩,通过发

图3 发动机阻力矩建模方法

动机台架试验,得到图 4b 发动机稳态阻力矩曲线。

(a) 低速脉动阻力矩

(b) 稳态阻力矩

图4 发动机阻力矩曲线

1.4 模式切换过程分析

复合功率分流混合动力系统由 B1 锁止纯电动模式切换到 E-CVT 混合动力模式,采用杠杆法^[18]对模式切换过程进行分析。

如图 5 所示,从纯电动至 E-CVT 混合动力模式的切换过程包括制动器 B1 锁止、B1 打开、发动机起动和转矩切换四个阶段。图 5c 表示制动器 B1 完全打开之后,进入发动机拖转阶段,需要协调电机转矩将发动机转速从零转速拖转至发动机喷油转速,完成发动机起动。本文主要针对图 5c 发动机起动阶段提出了一种基于模型预测控制(Model predictive control, MPC)的发动机起动转速跟踪控制策略。

图5 模式切换过程杠杆图

1.5 发动机起动最优转速曲线

发动机起动过程存在的低速脉动阻力矩是造成模式切换过程整车平顺性较差的重要原因,为发动机设计最优拖转转速轨迹^[17]可以减小发动机起动带来的冲击。本文以发动机起动时间和整车平顺性两方面确定代价函数

$$J = \lambda_1 \int_{t_0}^{t_f} \ddot{\theta}_L^4(t) dt + \lambda_2 \int_{t_0}^{t_f} dt \quad (9)$$

式中, λ_1 、 λ_2 分别为平顺性和拖转时间的权重系数; 第一项可以代表振动剂量值(Vibration dose value, VDV)大小,用于评价发动机拖转过程的平顺性; 第二项为发动机拖转过程的时间。选取发动机转速 $\dot{\theta}_{ENG}$ 和曲轴转角 α 为状态变量,通过动态规划算法,求解权重系数 $\lambda_1=0.5$, $\lambda_2=0.5$ 最优拖转转速曲线。结果如图6所示。

图6 发动机起动最优拖转转速曲线

2 发动机起动模型预测控制

下文基于模型预测控制算法^[19-22],开展发动机起动优化控制策略的研究,对发动机最优拖转转速曲线进行转速闭环跟踪控制,控制策略框图如图7所示。

图7中发动机倒拖阻力矩由发动机阻力矩模型

图7 发动机起动模型预测控制框图

得到,发动机目标参考转速由发动机起动最优转速曲线得到。其中将发动机起动过程的电机转矩分为两个部分,一部分由模型预测算法在线决策,包括发动机拖转转矩和齿圈端补偿转矩,另一部分为整车动力性电机转矩,用于避免整车动力中断,结合式(7)、(8),其计算式为

$$T_{MG1_drive} = \frac{\rho_2 - 1}{\rho_1 + \rho_2} T_{R_dem} \quad (10)$$

$$T_{MG2_drive} = \frac{\rho_1 + 1}{\rho_1 + \rho_2} T_{R_dem} \quad (11)$$

式中, T_{MG1_drive} 和 T_{MG2_drive} 分别表示为了满足动力性目标时电机 MG1 和 MG2 的需求转矩, T_{R_dem} 为齿圈端需求转矩。

2.1 状态空间方程建立

根据式(1)~(8),选取状态变量和输出变量为发动机转速和动力输出端转速,电机 MG1 和 MG2 的转矩为控制变量,可以得到传动系统的状态空间方程为

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_{ENG} \\ \dot{\omega}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -e_3 c_{ENG} & e_4 c_L \\ -l_3 c_{ENG} & l_4 c_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_{ENG} \\ \omega_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_1 & e_2 \\ l_1 & l_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{MG1} \\ T_{MG2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_3 & e_4 \\ l_3 & l_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{ENG} \\ T_L \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{式中} \quad e_1 &= \left(\frac{1 + \rho_1}{I_2} - \frac{\rho_1}{I_4} \right) / \left(\frac{I_1}{I_2} - \frac{I_3}{I_4} \right); \\ e_2 &= - \left(\frac{\rho_2 - 1}{I_2} - \frac{\rho_2}{I_4} \right) / \left(\frac{I_1}{I_2} - \frac{I_3}{I_4} \right); \\ e_3 &= \frac{1}{I_2} / \left(\frac{I_1}{I_2} - \frac{I_3}{I_4} \right); \quad e_4 = - \frac{1}{I_4} / \left(\frac{I_1}{I_2} - \frac{I_3}{I_4} \right); \\ l_1 &= \left(\frac{1 + \rho_1}{I_1} - \frac{\rho_1}{I_3} \right) / \left(\frac{I_2}{I_1} - \frac{I_4}{I_3} \right); \\ l_2 &= - \left(\frac{\rho_2 - 1}{I_1} - \frac{\rho_2}{I_3} \right) / \left(\frac{I_2}{I_1} - \frac{I_4}{I_3} \right); \\ l_3 &= \frac{1}{I_1} / \left(\frac{I_2}{I_1} - \frac{I_4}{I_3} \right); \quad l_4 = - \frac{1}{I_3} / \left(\frac{I_2}{I_1} - \frac{I_4}{I_3} \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{\text{ENG}} + I_{\text{MG1}}(1 + \rho_1)^2 + I_{\text{MG2}}(1 - \rho_2)^2; \\ I_2 &= -I_{\text{MG1}}\rho_1(1 + \rho_1) + I_{\text{MG2}}\rho_2(1 - \rho_2); \\ I_3 &= I_{\text{MG1}}\rho_1(1 + \rho_1) - I_{\text{MG2}}\rho_2(1 - \rho_2); \\ I_4 &= -(I_{\text{L}} + I_{\text{MG1}}\rho_1^2 + I_{\text{MG2}}\rho_2^2). \end{aligned}$$

系统模型的 C 矩阵等于单位矩阵, 采用零阶保持器将系统连续的状态方程式(12)近似离散化, 采样周期 $T = 0.01 \text{ s}$, 得到离散状态方程

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) + \mathbf{G}_d \omega_d(k) \\ \mathbf{y}(k+1) = \mathbf{C}_d \mathbf{x}(k+1) \end{cases} \quad (13)$$

式中 $\mathbf{A}_d = \begin{pmatrix} 1 - e_3 c_{\text{ENG}} T & e_4 c_{\text{L}} T \\ -l_3 c_{\text{ENG}} T & 1 + l_4 c_{\text{L}} T \end{pmatrix};$

$$\mathbf{B}_d = \begin{pmatrix} e_1 T & e_2 T \\ l_1 T & l_2 T \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{G}_d = \begin{pmatrix} e_3 T & e_4 T \\ l_3 T & l_4 T \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{C}_d = \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

2.2 多步输出预测

假设在采样时刻 $k (k > 0)$, $\mathbf{x}(k)$ 表示状态变量在 k 时刻的值, N_c 表示控制步数, N_p 表示预测步数, 则 k 时刻未来 N_p 个预测步长的输出变量预测值的表达式为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{P}_{\text{px}} \mathbf{x}_k + \mathbf{H} \mathbf{U} + \mathbf{D} \Omega \quad (14)$$

式中 $\mathbf{x}_k = \mathbf{x}(k);$

$$\mathbf{Y} = (y(k+1) \ y(k+2) \ \cdots \ y(k+n_p))^T;$$

$$\mathbf{U} = (u(k) \ u(k+1) \ \cdots \ u(k+n_c-1))^T;$$

$$\Omega = (\omega(k) \ \omega(k+1) \ \cdots \ \omega(k+n_c-1))^T;$$

$$\mathbf{P}_{\text{px}} = (C_d A_d \ C_d A_d^2 \ \cdots \ C_d A_d^{n_p})^T;$$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} C_d B_d & 0 & 0 & 0 \\ C_d A_d B_d & C_d B_d & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_d A_d^{n_p-1} B_d & C_d A_d^{n_p-2} B_d & \cdots & C_d A_d^{n_p-n_c} B_d \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} C_d G_d & 0 & 0 & 0 \\ C_d A_d G_d & C_d G_d & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_d A_d^{n_p-1} G_d & C_d A_d^{n_p-2} G_d & \cdots & C_d A_d^{n_p-n_c} G_d \end{pmatrix}.$$

式中, $\mathbf{Y}$ 表示 k 时刻未来 N_p 个预测步长的输出变量预测序列, $\mathbf{U}$ 表示 k 时刻未来 N_c 个控制步长的控制序列。

由式(14)可知未来 N_p 个预测步长的输出变量预测序列可以根据被控系统在 k 时刻的状态变量和未来 N_c 个控制步长的控制序列计算得到。

2.3 最优控制律设计

模型预测控制利用系统模型预测被控对象未来

的输出状态, 并基于评价函数最小的原则计算最优控制序列, 使模型预测输出值和未来参考值误差最小。设计反映控制误差的二次型评价函数如下

$$J = (\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_r - \mathbf{e})^T \mathbf{W}_y (\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_r - \mathbf{e}) + \mathbf{U}^T \mathbf{W}_u \mathbf{U} \quad (15)$$

式中, $\mathbf{Y}_r$ 为目标参考序列, 对应发动机目标参考转速序列以及输出端转速参考序列; $\mathbf{e}$ 为上个周期的预测偏差, $\mathbf{W}_y$ 为输出量误差的权重系数对角矩阵, $\mathbf{W}_u$ 为控制量权重系数对角矩阵。

式(14)代入式(15), 并对控制量求偏导, 使 $\frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}} = 0$, 求解控制变量

$$\mathbf{U} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W}_y \mathbf{H} + \mathbf{W}_u)^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W}_y (\mathbf{Y}_r + \mathbf{e} - \mathbf{P}_{\text{px}} \mathbf{x}_k - \mathbf{D} \Omega) \quad (16)$$

选取控制步数和预测步数为 4, 决策出当前采样时刻和未来三个采样时刻的电机 MG1 和 MG2 转矩, 并取 k 时刻的电机 MG1 和 MG2 转矩用于控制

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} T_{\text{MG1}}(k) & T_{\text{MG2}}(k) \\ T_{\text{MG1}}(k+1) & T_{\text{MG2}}(k+1) \\ T_{\text{MG1}}(k+2) & T_{\text{MG2}}(k+2) \\ T_{\text{MG1}}(k+3) & T_{\text{MG2}}(k+3) \end{pmatrix}^T \quad (17)$$

$$\mathbf{Y}_r = \begin{pmatrix} \omega_{\text{ENG_ref}}(k) & \omega_{\text{L_ref}}(k) \\ \omega_{\text{ENG_ref}}(k+1) & \omega_{\text{L_ref}}(k+1) \\ \omega_{\text{ENG_ref}}(k+2) & \omega_{\text{L_ref}}(k+2) \\ \omega_{\text{ENG_ref}}(k+3) & \omega_{\text{L_ref}}(k+3) \end{pmatrix}^T \quad (18)$$

为了验证 MPC 控制策略的有效性, 设计 PI 跟踪控制控制器进行仿真对比。基于发动机当前实际转速与期望发动机目标转速的转速差, 采用 PI 控制器决策期望发动机角加速度, 用于计算电机 MG1 和 MG2 的拖转转矩。电机 MG1 和 MG2 拖转转矩计算公式为

$$T_{\text{MG1}} = (1 + \rho_1) I_{\text{MG1}} \dot{\omega}_{\text{ENG}} - \frac{\rho_2}{\rho_1 + \rho_2} (T_{\text{ENG}} - I_{\text{ENG}} \dot{\omega}_{\text{ENG}}) \quad (19)$$

$$T_{\text{MG2}} = (1 - \rho_2) I_{\text{MG2}} \dot{\omega}_{\text{ENG}} - \frac{\rho_1}{\rho_1 + \rho_2} (T_{\text{ENG}} - I_{\text{ENG}} \dot{\omega}_{\text{ENG}}) \quad (20)$$

采用极点配置法确定 PI 控制器参数:
 $K_p = 5; K_i = 0.5$ 。

3 模型预测控制策略仿真验证

在 Matlab/Simulink 平台搭建控制策略和混合动力系统仿真模型, 对发动机起动过程进行仿真分析。仿真所用整车及关键零部件参数如表 2 所示。

选取仿真工况如下: 固定 20% 油门踏板开度匀加速过程, 车辆初始速度为 0 km/h, 从单电机

表2 整车及关键零部件参数表

整车及部件	参数	数值
发动机	发动机最大功率/kW 转速/(r/min)	102 6 000
	发动机最大转矩/(N·m) 转速/(r/min)	170 3 400
电机	电机1最大转速/(r/min)	10 500
	电机1额定功率/kW 转矩/(N·m)	30 81
	电机2最大转速/(r/min)	8 500
	电机2额定功率/kW 转矩/(N·m)	50 203
蓄电池	蓄电池容量/(A·h)	6.5
	蓄电池标称电压/V	288
整车	前排/后排特征参数	3.175/2.35
	整车质量/kg	1 745
	车轮半径/m	0.317
	空气阻力系数	0.26
	有效迎风面积/m ²	2.289

纯电动模式切换至 E-CVT 模式。分别对 MPC 控制策略以及 PI 控制策略进行仿真,为考虑模型参数 c_{ENG} 、 c_L 的不准确性对于传动系预测模型的影响,在模型中加入+50%的输入轴和输出轴阻尼参数摄动,以验证控制策略的鲁棒性。仿真结果如图8所示。

图8 发动机起动过程仿真结果

— MPC - - - PI
- - - MPC/+50% PI/+50%

如图8a所示,采用数字1~4表示模式切换过程中四个阶段。1代表单电机纯电动阶段,2代表双电机纯电动阶段,3代表发动机起动阶段,4代表动力源转矩切换阶段。模式切换从8.01 s开始,制动器B1在8.12 s完全打开,在制动器B1完全打开(8.2 s)之后,进入发动机起动阶段,MPC控制器在线决策电机拖转转矩,跟踪发动机目标参考转速,发动机转速在拖转转矩作用下逐渐增加,在8.62 s到达800 r/min,完成发动机起动。

如表3所示,未加入阻尼参数摄动时,采用MPC跟踪控制策略模式切换过程的冲击度最大幅值为10.95 m/s³,发动机拖转时间0.49 s;PI控制策略冲击度最大幅值为12.33 m/s³,拖转时间为

表3 发动机起动仿真结果对比

参数摄动	组别	拖转时间/s	冲击度/(m/s ³)
未加入参数摄动	MPC	0.49	10.95
	PI	0.52	12.33
加入参数摄动	MPC/+50%	0.62	13.80
	PI/+50%	0.71	19.07

0.52 s; 两种控制策略均能快速起动发动机, 并满足模式切换阶段的平顺性需求。在加入+50%阻尼参数摄动后, 采用 MPC 策略拖转时间和冲击度幅值有所增加, 但仍能完成发动机起动; PI 跟踪策略加入参数摄动后, 发动机转速跟踪效果变差, 拖转时间增加至 0.71 s, 冲击度最大幅值增至 19.07 m/s^3 , 不能满足发动机起动要求。

由仿真结果可知, 采用 MPC 和 PI 控制器均能实现对发动机参考转速有效跟踪; 加入阻尼参数摄动后, 发动机拖转时间和冲击度幅值有所增加, 但由于 MPC 算法存在反馈校正环节, 从冲击度、齿圈转速和发动机转速图中可知, 算法仍然能满足发动机起动性和平顺性要求, PI 控制器由于不能对参数进行实时标定, 在加入参数摄动后控制效果变差, 说明 MPC 相比 PI 控制器对于参数摄动具有更好的鲁棒抑制效果。

4 台架试验验证

4.1 台架测试系统方案

为了进一步验证发动机起动 MPC 跟踪控制策略的有效性, 在半消声室环境中搭建了图 9 所示的复合功率分流混合动力系统动态性能测试台架。台架主要包括模拟电机、功率分流变速箱、差速器、半轴、穿墙轴和测功机。进行试验时, 使用电机模拟发动机的输出转矩和脉动阻力矩, 测功机用于模拟道路负载。AVL 的 PUMA 控制系统用于控制测功机的运转和监控测功机运行状态。

图 9 功率分流混合动力系统动态性能测试台架

图 10 为台架测试系统方案, 利用 Matlab/Simulink 自动代码生成工具链, 将所设计的发动机起动模型预测控制策略自动生成 C 代码, 下载到 Rapid ECU 控制器中; 控制器通过 CAN 总线与试验台架、测功机系统控制柜通信; 上位机通过标定协议与控制器通信, 发送转矩指令等至试验台架并接收转速转矩等实际测量值。

图 10 台架测试系统方案

4.2 台架试验结果及分析

试验验证工况: 测功机模拟道路阻力矩, 电机转矩模拟发动机脉动阻力矩和正向输出转矩。针对采用 MPC 的发动机起动优化控制策略进行了 3 组试验, 其中, 在第 2、3 组试验时, 分别加入 +50% 和 -50% 的输入轴和输出轴阻尼参数摄动对策略的鲁棒性进行验证。试验结果如图 11 所示。

由图 11a、11b、11d 可知, 制动器 B1 打开时间为 0.12 s, 采用 MPC 优化控制策略冲击度幅值为 10.55 m/s^3 , 发动机在 0.41 s 内拖转至怠速, 齿

(a) 切换阶段

(b) 纵向冲击度

(c) 发动机转速

图 11 发动机起动过程台架试验结果

圈转速波动幅值为 64.2 r/min ，与仿真结果基本保持一致。加入+50%和-50%的阻尼参数摄动后，冲击度幅值增大至 13.79 m/s^3 ，相比于没有参数摄动时增大了 30.71%，齿圈转速波动幅值分别增大至 80.0 r/min 和 84.5 r/min ，发动机起动时间稍有增加。

由图 11c、11e、11f 可知，在制动器 B1 完全打开后，发动机转速从模式切换开始时持续增加，进入 E-CVT 模式后保持稳定，三组试验的发动机转速曲线趋势基本一致。在纯电动模式时，由于电机 MG2 单独驱动，MG2 的转矩基本不变以保持车辆匀加速行驶。在进行模式切换时，两个电机转矩在原来基础上叠加额外的转矩以拖转发动机起动，最后进入双电机和发动机共同协调工作的混合动力模式。

台架试验结果表明采用 MPC 控制策略能实现对发动机目标转速的动态跟踪，快速起动发动机；切换过程冲击度与仿真结果基本一致，符合国家标准，满足车辆驾驶平顺性要求；加入阻尼参数摄动后，冲击度和发动机起动时间有所增大，但仍能保证发动机正常拖转，说明 MPC 跟踪控制策略对于阻尼参数摄动具有一定的鲁棒性。

5 结论

针对复合功率分流混合动力系统模式切换发动机起动过程进行了研究，开发了发动机起动优化控制策略，主要研究结论如下。

(1) 建立了混合动力系统模式切换过程动态模型，包括传动系模型以及发动机阻力矩模型，并采用杠杆法对纯电动至 E-CVT 模式切换过程进行了分析，为发动机起动控制策略研究奠定了基础。

(2) 基于发动机最优拖转转速曲线，提出了发动机起动模型预测控制策略，考虑发动机实际转速与最优目标转速的偏差以及齿圈转速波动，模型预测控制器可实时决策电机转矩，实现发动机转速的跟踪。

(3) 基于 Matlab/Simulink 平台对文中所提出的发动机起动模型预测控制策略进行仿真验证，相比 PI 控制器，本文所设计的 MPC 控制器能满足发动机起动要求，且对模型参数摄动具有更好的鲁棒性。

(4) 搭建功率分流混合动力系统性能试验台架对所提出的发动机起动模型预测跟踪控制策略进行硬件在环仿真验证，试验结果表明，发动机模型预测控制策略能满足发动机起动性和车辆平顺性要求，并将发动机起动时间控制在 0.5 s 内，最大冲击度限制 11 m/s^3 以内。

参 考 文 献

- [1] 赵治国, 代显军, 王晨, 等. 复合功率分流混合动力轿车驱动模式切换的协调控制[J]. 汽车工程, 2015, 37(3): 260-265, 259.
ZHAO Zhiguo, DAI Xianjun, WANG Chen, et al. Coordinated control of driving mode switching of compound power-split hybrid electric car[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(3): 260-265, 259.
- [2] 杨南南. 基于历史数据的行星混联式客车在线优化控制策略[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
YANG Nannan. Historical data based online optimal control strategy for power-split hybrid electric bus[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [3] 戴宇童. 双行星混联式客车的能量管理与模式切换协调控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
DAI Yutong. Study on energy management strategy and mode transition control for a dual planetary hybrid electric bus[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [4] ZHU F, CHEN L, YIN C, et al. Dynamic modelling

- and systematic control during the mode transition for a multi-mode hybrid electric vehicle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2013, 227(7): 1007-1023.
- [5] CHEN J S, HWANG H Y. Engine automatic start-stop dynamic analysis and vibration reduction for a two-mode hybrid vehicle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2013, 227(9): 1303-1312.
- [6] HWANG H Y. Minimizing seat track vibration that is caused by the automatic start/stop of an engine in a power-split hybrid electric vehicle[J]. Journal of Vibration & Acoustics, 2013, 135: 061007-1.
- [7] 王晨, 王博. 深度混合动力系统发动机起动控制研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(5): 545-552.
- WANG Chen, WANG Bo. A study on engine start control in a full hybrid electric vehicle[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(5): 545-552.
- [8] WANG C, ZHAO Z, ZHANG T, et al. Mode transition coordinated control for a compound power-split hybrid car[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2017, 87: 192-205.
- [9] ZUO Y H, XIANG C L, YAN Q D, et al. Engine start control strategy research for parallel-series hybrid electrical vehicles[C]// Intelligent Control and Automation IEEE, 2010: 2097-2102.
- [10] LIU D, ZHANG J, ZHANG D, et al. Experimental and numerical analysis of the seat track vibrations caused by engine starts in a power-split hybrid electric vehicle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2017, 231(3): 395-404.
- [11] ZHUANG W, KUM D, PENG H, et al. Optimal engine starts of an input-split hybrid electric vehicle[J]. SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2015, 4(2): 343-351.
- [12] ZENG X, YANG N, WANG J, et al. Predictive-model-based dynamic coordination control strategy for power-split hybrid electric bus[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2015, 60-61: 785-798.
- [13] XIANG C, ZHANG D, ZHENG H, et al. A novel nonlinear optimal control approach for the dynamic process of a hybrid electric vehicle equipped with electromechanical transmission[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015.
- [14] 王晨, 赵治国, 张彤, 等. 复合功率分流式 E-CVT 结构优化及验证[J]. 中国公路学报, 2015, 28(3): 117-126.
- WANG Chen, ZHAO Zhiguo, ZHANG Tong, et al. Structure optimization and its validation for compound power-split E-CVT[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(3): 117-126.
- [15] 赵治国, 王晨, 张彤, 等. 复合功率分流变速器的设计与验证[J]. 汽车工程, 2015, 37(4): 407-415, 390.
- ZHAO Zhiguo, WANG Chen, ZHANG Tong, et al. Design and validation of a compound power-split transmission[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(4): 407-415, 390.
- [16] 赵治国, 蒋蓝星, 李蒙娜, 等. 基于参考模型的复合功率分流系统模式切换中的转矩协调控制[J]. 汽车工程, 2018, 40(10): 1132-1138, 1165.
- ZHAO Zhiguo, JIANG Lanxing, LI Mengna, et al. Torque coordinated control during mode switching of a compound power-split hybrid system based on reference model[J]. Automotive Engineering, 2018, 40(10): 1132-1138, 1165.
- [17] ZHAO Z, JIANG L, WANG C, et al. Engine start-up optimal control for a compound power-split hybrid powertrain[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2019, 120: 365-377.
- [18] BENDORD H L, LEISING M B. The lever analogy: A new tool in transmission analysis[R]. SAE, 810102, 1981.
- [19] 李文华. 动力定位系统模型预测控制与失效移位研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- LI Wenhua. Model predictive control and loss of position detection of dynamic positioning systems[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.
- [20] 刘袁龙. 协作式分布式模型预测控制算法通信策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- LIU Yuanlong. Research on communication strategy of cooperative distributed model predictive control algorithm[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [21] 张浪文. 网络信息模式下分布式协调模型预测控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- ZHANG Langwen. Study on networked cooperative distributed model predictive control[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [22] BISHOP R H. Model-based predictive control[M]. Boca Raton: CRC Press, 2003.

作者简介: 赵治国, 男, 1971 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为车辆动力学控制、混合动力汽车系统集成优化控制及新型传动系统控制。

E-mail: zhiguo.zhao@tongji.edu.cn

付靖, 男, 1996 年出生。主要研究方向为功率分流混合动力系统模式切换优化控制。

E-mail: fujing@tongji.com