

串并联混合动力系统自适应模式切换优化控制

赵治国, 黄琪琪, 倪润宇

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 为改善某新型串并联插电式混合动力系统双电机纯电动至并联驱动模式切换品质,同时确保不同车辆行驶状态及驾驶员输入下模式切换策略的适应性,提出了平顺性起机和动力性起机概念,设计了自适应模式切换优化控制策略。首先,建立该串并联混合动力系统动力学模型,并对其双电机纯电动至并联驱动模式切换过程进行分析,确定模式切换不同阶段控制目标及控制策略;其次,以车辆驾驶平顺性和发动机起动时间为优化指标,通过动态规划求解发动机最优拖转转速曲线,提出一种发动机起动模型预测优化控制策略,在线计算离合器滑摩转矩以拖转发动机跟踪目标最优转速曲线,并通过电机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,所开发的自适应模式切换控制策略能够满足不同的驾驶需求,并具有较好的驾驶平顺性。

关键词: 串并联混合动力系统;模式切换;模型预测控制;发动机起动

中图分类号: U461.4;U461.2

文献标志码: A

Optimal Control of Adaptive Mode Transition for Series-Parallel Hybrid Power System

ZHAO Zhiguo, HUANG Qiqi, NI Runyu

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to improve the switching quality of the dual-motor electric mode to parallel hybrid mode transition process of a new series-parallel hybrid power system, and ensure the adaptability of the mode switching strategy in different vehicle driving states and driver input, two mode switching control strategies of smooth starting and dynamic starting were proposed. First, the dynamic model of the series-parallel hybrid system was established, and the mode switching process from electric mode to parallel hybrid mode was analyzed to determine the control objectives and control strategies in different

stages of mode switching. Then, taking the vehicle driving comfort and engine starting time as the optimization indexes, the optimal engine cranking speed curve was solved through dynamic programming, and an engine starting model predictive optimization control strategy was proposed to calculate the clutch friction torque online. The engine tracked the target optimal speed curve, and the torque fluctuation at the output was compensated by the motor. The results of the simulation and hardware in loop bench test show that the two mode switching control strategies can meet different driving requirements and have good a driving comfort.

Key words: series-parallel hybrid power system; mode transition; model predictive control; engine start

与其他构型插电式混合动力汽车 (plug-in hybrid electric vehicle, PHEV) 相比,串并联混合动力系统具有结构简单、工作模式多样等特点^[1],可在不同的行驶工况及驾驶员需求转矩下通过模式切换以合理分配各动力源的转矩输出,还可利用电机优化发动机工作点并补偿其转矩波动^[2-4],以保证其在各种工况下均能实现最佳动力匹配、经济性和驾驶舒适性^[5-6]。可见,串并联构型 PHEV 为了适应不同的行驶工况,在工作模式间切换不可避免,保证模式切换品质是切换过程的控制难点。尤其在涉及发动机起、停的模式切换中,由于低速发动机阻力矩波动较大,若控制不当将会引起车辆动力中断或者输出转矩大幅波动,从而导致车辆动力性以及驾乘舒适性变差^[7-8]。

针对纯电动至并联混合驱动模式切换过程,模式切换控制研究已较成熟,大都采用进一步细分模式切换子阶段并设计相应的控制策略^[9-11]。Song 等^[12]针对某并联构型混动汽车设计了分阶段控制策

收稿日期: 2021-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(51275355)

第一作者: 赵治国(1971—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为新能源汽车动力传动系统控制。

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



论文
拓展
介绍

略,优化了其从纯电切换至并联驱动的平顺性。赵彬等^[13]针对于P2架构的混动汽车,在车辆行进中设计了离合器前馈+反馈拖转发动机起动,并利用电机补偿反拖发动机产生的阻力矩,以确保车辆不出现制动感觉。Sun等^[14]针对单轴并联混合动力系统,使用模型预测控制算法抑制模式切换过程中转矩波动,取得了良好的控制效果。刘永刚等^[15]针对单电机重度混合动力系统行进中起动发动机的平顺性问题,设计了ISG(integrated starter and generator)电机转矩补偿控制策略,充分利用电机响应速度快的特点,同时还根据电机速差PID(proportional-integral-derivative)控制器对补偿转矩进一步修正。赵治国等^[16]利用混杂系统理论分析了基于AMT(automated mechanical transmission)变速器的四驱混动轿车的模式切换过程,实现了从纯电动至四轮混动驱动模式的切换。Chen等^[17]基于模型参考自适应算法对串并联混动系统的模式切换过程离合器及动力源的转矩进行协调控制,发动机动态转矩响应的不足由电机得以补偿。然而,上述研究多集中于使用电机转矩补偿发动机和动力输出端转矩波动的角度对模式切换过程进行优化控制,而对于发动机起动过程关注则较少,且对不同车辆状态下的模式切换研究更为缺乏。

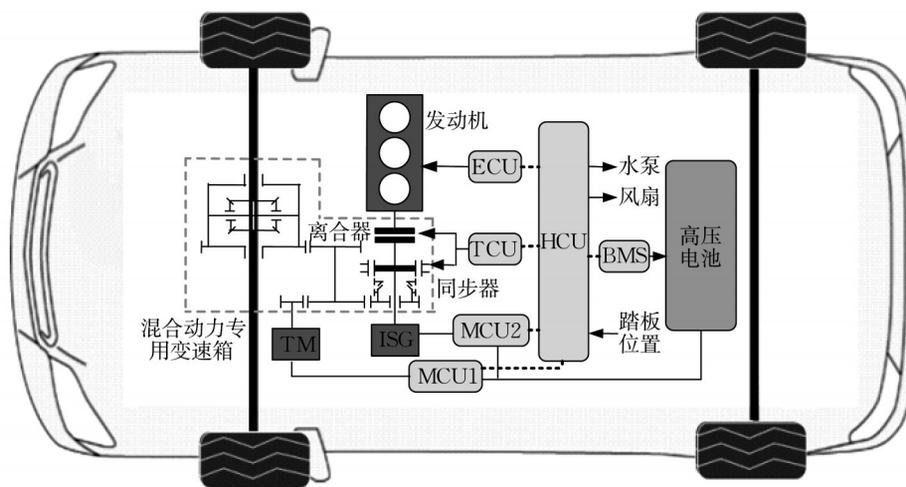
论文针对某新型串并联混合动力系统,建立了

模式切换过程不同阶段的动力学模型及发动机阻力矩模型,并根据车辆状态,提出了平顺性起机、动力性起机两种不同的纯电动至并联驱动模式切换策略。在此基础上,制定模式切换不同阶段的控制目标及控制策略;其次,在发动机最优起动机转速轨迹的基础上,综合考虑发动机实际转速与最优目标转速的偏差,采用模型预测控制方法对发动机起动机过程进行在线转速跟踪,以保证发动机拖转过程整车驾驶平顺性;最后,对所设计的控制策略进行了离线仿真及台架试验验证。

1 新型串并联混合动力系统动力学建模

1.1 串并联混合动力系统结构

研究对象为某新型串并联混合动力系统,其结构如图1所示。该混合动力系统主要包括发动机、TM(traction motor)电机、ISG电机、混合动力专用变速箱、电控离合器和电控同步器。发动机和ISG电机的输出轴同轴,并通过离合器连接。同步器安装在ISG电机和变速器的一个输入轴之间,TM电机的输出轴直接连接到变速器的另一个输入轴。离合器和同步器用于切断发动机和ISG电机之间的机械传递路径,以及ISG电机和变速箱之间的路径。



ECU: 发动机控制单元 TCU: 变速器控制单元 HCU: 整车控制单元 MCU: 电机控制器 BMS: 电池管理系统
 汽车总线 —— 高压电气连接 ← 低压电气连接 —— 机械连接

图1 串并联构型混合动力系统结构

Fig.1 Structure of series-parallel hybrid power system

该系统的主要工作模式如表1所示,通过离合器、同步器的动作和不同动力源工作状态的组合,系统主要的工作模式有5种:单电机模式、双电机模

式、串联模式、并联模式和发动机直驱模式。

1.2 切换过程动力学模型

串并联混合动力系统双电机纯电动模式至并联

驱动模式切换过程涉及离合器的转矩交互,其主要包括3个动态连续阶段,分别为模式切换初始时刻、模式切换过程和模式切换结束时刻。

表1 串并联混合动力系统主要工作模式

Tab.1 Main working modes of series-parallel hybrid power system

工作状态	发动机	TM电机	ISG电机	离合器	同步器
单电机模式	○	●	○	○	○
双电机模式	○	●	●	○	●
串联模式	●	●	●	●	○
并联模式	●	●	●	●	●
发动机直驱模式	●	○	○	●	●

注:●和○分别代表工作和不工作。

1.2.1 模式切换初始时刻

模式切换初始时刻, TM电机和ISG电机驱动车辆行驶,可以得到式(1)所示的动力学方程。

$$\begin{cases} \omega_e = 0 \\ T_{ISG} - T_{mg} - c_c \omega_c = (I_c + I_g) \dot{\omega}_c \\ T_{gm} + T_{TMm} - T_{optm} - c_m \omega_m = I_m \dot{\omega}_m \\ T_{TM} - T_{mTM} - c_{TM} \omega_{TM} = I_{TM} \dot{\omega}_{TM} \\ T_{mopt} - T_r - c_{opt} \omega_{opt} = I_{opt} \dot{\omega}_{opt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 为角速度; T 为转矩; I 为转动惯量; c 为等效阻尼系数; 下标 e 表示发动机(包括发动机曲轴与离合器主动盘); ISG 表示 ISG 电机; mg 表示变速器中间轴作用于 ISG 轴; c 表示离合器(包括离合器从动盘、同步器花键毂结合套及 ISG 电机输入轴); g 表示变速器 ISG 轴空套齿轮; gm 表示 ISG 轴作用于变速器中间轴; TMm 表示 TM 轴作用于变速器中间轴; $optm$ 表示变速器输出轴作用于变速器中间轴; m 表示变速器中间轴(包括中间轴及其固接的两个齿轮); TM 表示 TM 轴; mTM 表示变速器中间轴作用于 TM 轴; $mopt$ 表示变速器中间轴作用于变速器输出轴; r 表示折算到输出轴上的行驶阻力; opt 表示变速器输出轴。

各传动轴之间的转矩和转速满足如式(2)、(3)的约束关系。

$$T_{gm} = T_{mg} i_2 \eta, T_{TMm} = T_{mTM} i_1 \eta, T_{mopt} = T_{optm} i_0 \eta \quad (2)$$

$$\begin{cases} \omega_c = \omega_m i_2 = \omega_{opt} i_0 i_2 \\ \omega_{TM} = \omega_m i_1 \end{cases} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: η 为齿轮的传动效率; i 为传动比; 下标 0 表示主减速器; 1 表示 TM 轴侧第一级传动比; 2 表示 ISG 轴侧第一级传动比。

联立式(1)~(3), 可得双电机纯电动模式至并联驱动模式切换初始时刻的动力学方程为

$$I_{opt}^{equ1} \dot{\omega}_{opt} = i_0 i_2 \eta^2 T_{ISG} + i_0 i_1 \eta^2 T_{TM} - T_r - c_{opt}^{equ1} \omega_{opt} \quad (4)$$

式中: c_{opt}^{equ1} 、 I_{opt}^{equ1} 分别为折算到变速器输出端的等效阻尼系数以及转动惯量。

$$\begin{cases} I_{opt}^{equ1} = I_{opt} + i_0^2 \eta I_m + i_0^2 i_1^2 \eta^2 I_{TM} + i_0^2 i_2^2 \eta^2 (I_c + I_g) \\ c_{opt}^{equ1} = c_{opt} + i_0^2 \eta c_m + i_0^2 i_1^2 \eta^2 c_{TM} + i_0^2 i_2^2 \eta^2 c_c \end{cases} \quad (5)$$

1.2.2 模式切换过程

双电机纯电动至并联驱动模式切换过程中, 离合器通过滑摩拖动发动机起动, 发动机在达到预设转速时点火, 并调速至与离合器从动端转速相等。通过受力分析可以得到以下动力学方程:

$$\begin{cases} T_e - \text{sgn}(\omega_e - \omega_c) T_c - c_e \omega_e = I_e \dot{\omega}_e \\ T_{ISG} + \text{sgn}(\omega_e - \omega_c) T_c - T_{mg} - c_c \omega_c = (I_c + I_g) \dot{\omega}_c \\ T_{gm} + T_{TMm} - T_{optm} - c_m \omega_m = I_m \dot{\omega}_m \\ T_{TM} - T_{mTM} - c_{TM} \omega_{TM} = I_{TM} \dot{\omega}_{TM} \\ T_{mopt} - T_r - c_{opt} \omega_{opt} = I_{opt} \dot{\omega}_{opt} \end{cases} \quad (6)$$

此过程中, 离合器处于滑摩状态, 系统可简化为以下两自由度系统:

$$\begin{cases} I_e \dot{\omega}_e = T_e - \text{sgn}(\omega_e - \omega_c) T_c - c_e \omega_e \\ I_{opt}^{equ2} \dot{\omega}_{opt} = i_0 i_2 \eta^2 [T_{ISG} + \text{sgn}(\omega_e - \omega_{opt}) T_c] + i_0 i_1 \eta^2 T_{TM} - T_r - c_{opt}^{equ2} \omega_{opt} \end{cases} \quad (7)$$

式中: c_{opt}^{equ2} 、 I_{opt}^{equ2} 分别为折算到变速器输出轴的等效阻尼系数和转动惯量, 与式(5)所示相等。

$$\text{sgn}(\omega_e - \omega_c) = \begin{cases} 1 & \omega_e \geq \omega_c \\ -1 & \omega_e < \omega_c \end{cases} \quad (8)$$

1.2.3 模式切换结束时刻

模式切换结束后, 离合器接合并锁止, 系统进入由发动机、ISG 和 TM 电机共同驱动的工作模式, 可得如下的动力学方程:

$$I_{opt}^{equ3} \dot{\omega}_{opt} = i_0 i_2 \eta^2 (T_e + T_{ISG}) + i_0 i_1 \eta^2 T_{TM} - T_r - c_{opt}^{equ3} \omega_{opt} \quad (9)$$

式中: c_{opt}^{equ3} 、 I_{opt}^{equ3} 分别为折算到变速器输出轴的等效阻尼系数和转动惯量, 如式(10)所示。

$$\begin{cases} I_{opt}^{equ3} = I_{opt} + i_0^2 \eta I_m + i_0^2 i_1^2 \eta^2 I_{TM} + i_0^2 i_2^2 \eta^2 (I_c + I_e + I_g) \\ c_{opt}^{equ3} = c_{opt} + i_0^2 \eta c_m + i_0^2 i_1^2 \eta^2 c_{TM} + i_0^2 i_2^2 \eta^2 (c_e + c_c) \end{cases} \quad (10)$$

1.3 发动机阻力矩模型

由于在模式切换过程中, 发动机不仅参与了驱动过程, 还存在倒拖起动过程, 发动机低速大幅脉动阻力矩会对切换过程产生较大影响, 通过分析发动

机动态特性及试验^[18-19],最终得到图 2 所示发动机阻力矩曲线。

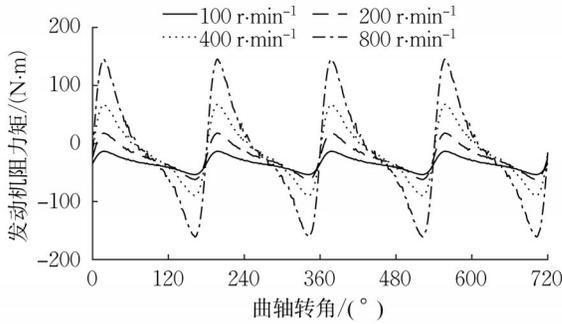


图 2 发动机阻力矩

Fig.2 Resistance torque of engine

2 纯电动至并联模式切换过程优化控制

2.1 纯电动至并联模式切换过程分析

车辆从双电机纯电动模式切换至并联驱动模式,针对模式切换不同的触发条件,可将起工况分为两大类,分别为平顺性起机和动力性起机。

对于平顺性起机,当蓄电池电量不足时,若驾驶员未改变转矩需求即未松开油门踏板,系统需要切换到发动机参与发电的并联模式,由于该条件下模式切换主要为了在保证动力性不变的情况下起动发动机以防止蓄电池电量的进一步下降,因此该切换过程驾驶平顺性是主要因素而切换时间是次要因素。

对于动力性起机,当驾驶员深踩油门提高需求转矩时,若蓄电池 SOC(state of charge)能够满足继续供电给两电机,系统将进入发动机、TM 电机和 ISG 电机共同驱动的并联模式,为了快速响应驾驶员的动力需求,需提高切换速度,此时模式切换时间

成为优先考虑的因素。

图 3 为双电机纯电动至并联驱动模式切换流程图。图中, x_c 为离合器实际行程, x_{c_idle} 为离合器空行程, x_{c_lock} 为离合器接合锁止行程, n_e 为发动机转速, n_{e_ign} 为发动机点火转速, n_{ISG} 为 ISG 电机转速, δ_{n_lock} 为发动机与 ISG 电机转速差阈值。模式切换过程主要包括离合器消除空行程阶段、发动机拖转起动阶段、发动机点火同步阶段和离合器接合并锁止阶段。

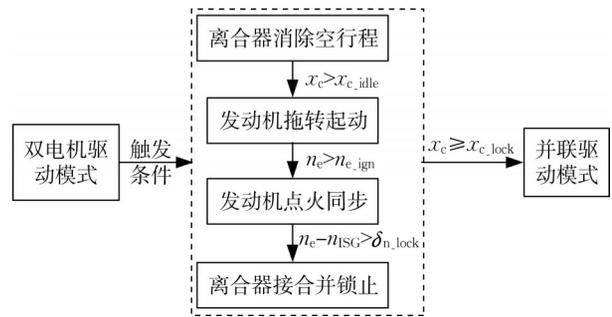


图 3 双电机纯电动至并联驱动模式切换流程图

Fig.3 Flow chart of transition from dual-motor pure electric mode to parallel drive mode

2.2 模式切换优化控制

模式切换优化控制策略如图 4 所示。首先,选取发动机起动过程车辆驾驶平顺性和起动时间等为优化目标,采用动态规划求解出发动机最优拖转转速曲线。起机 MPC(model predictive control)控制器根据发动机实际转速,决策出离合器滑摩转矩来调节发动机转速;离合器跟踪控制器根据 MPC 控制器的离合器滑摩转矩目标决策出执行器电机的控制转矩。电机转矩分配根据系统当前状态并结合 TM 电机和 ISG 电机的转矩限值,决策出 ISG 电机和 TM 电机转矩。

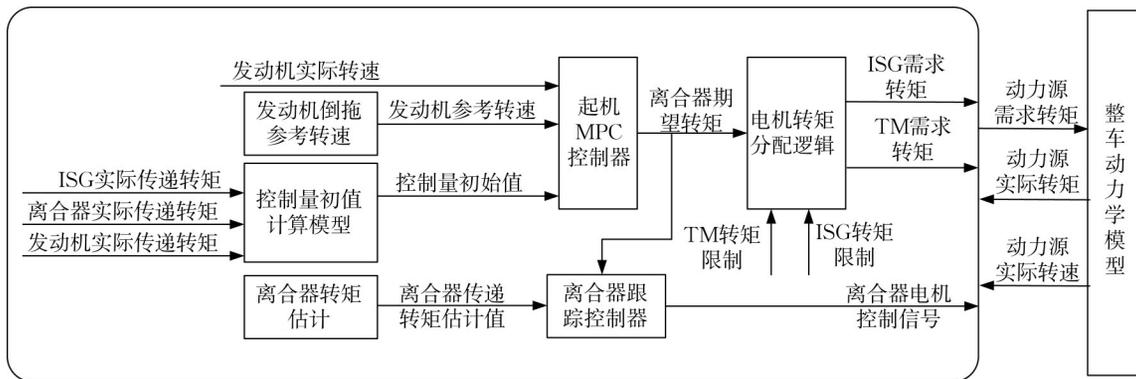


图 4 双电机纯电动至并联驱动模式切换策略

Fig.4 Strategy of transition from dual-motor pure electric mode to parallel drive mode

2.2.1 发动机最优转速曲线^[20]

在发动机拖转起机阶段,发动机脉动阻力矩会对整车动力输出造成较大波动,这是因为该阶段发动机的阻力矩特性无可避免地被耦合到轮边,为发动机设计最优拖转转速轨迹可减小发动机起动带来的冲击。本文兼顾切换过程时间和冲击度确定代价函数为

$$J = \lambda_1 \int_{t_0}^{t_f} \dot{\omega}_{\text{ISG}}^4(t) dt + \lambda_2 \int_{t_0}^{t_f} dt \quad (11)$$

式中: λ_1 、 λ_2 分别为平顺性、拖转时间的权重系数;式中第一项为振动剂量(vibration dose value, VDV),用于评价发动机拖转过程的正平顺性;式中第二项为发动机拖转过程的时间。为在优化发动机起动阶段的驾驶平顺性的同时,保证起动时间不宜过大,取 $\lambda_1 = 0.9$ 、 $\lambda_2 = 0.1$,结果如图5所示。

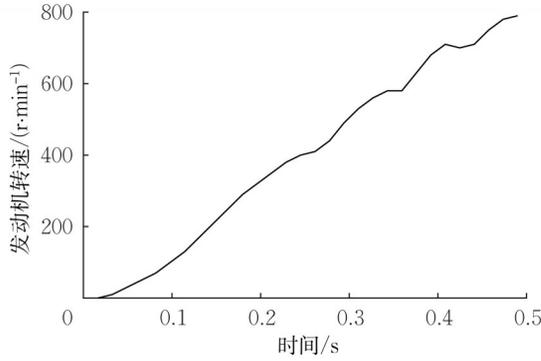


图5 发动机起动最优拖转转速曲线

Fig.5 Optimal drag speed curve for engine start

2.2.2 离合器消除空行程阶段

当模式切换条件触发,系统进入离合器消除空行程阶段。此阶段动力性起机和平顺性起机模式切换过程相同,其主要控制目标为消除离合器空行程。

2.2.3 发动机拖转起机阶段

当离合器完成消除空行程后,进入发动机拖转起机阶段。该阶段控制策略以干式离合器作为控制核心,起机MPC控制器根据目标发动机拖转曲线,决策出离合器滑摩转矩并发送给离合器控制器决策离合器电机转矩,电机转矩分配模块根据离合器滑摩转矩决策出ISG电机的实时补偿转矩,补偿拖转

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \cdots & 0 \\ CA^2B & CAB & CB & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_{\text{prd}}-1}B & CA^{N_{\text{prd}}-2}B & CA^{N_{\text{prd}}-3}B & \cdots & CA^{N_{\text{prd}}-N_{\text{ctrl}}}B \end{bmatrix}; \Phi_2 = \begin{bmatrix} CG & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CAG & CG & 0 & \cdots & 0 \\ CA^2G & CAG & CG & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_{\text{prd}}-1}G & CA^{N_{\text{prd}}-2}G & CA^{N_{\text{prd}}-3}G & \cdots & CA^{N_{\text{prd}}-N_{\text{ctrl}}}G \end{bmatrix};$$

发动机导致的动力系统输出总转矩的下降和转矩波动,满足模式切换过程的各项性能要求。

2.2.3.1 起机MPC控制器

(1)预测模型^[21]。根据式(7)中发动机端动力学模型建立控制量为离合器滑摩转矩,状态量为发动机转速的预测模型,动力学方程如下:

$$T_{\text{Eng,drag}} + T_c - c_e \omega_e = I_e \dot{\omega}_e \quad (12)$$

式中: T_c 为离合器传递转矩; $T_{\text{Eng,drag}}$ 为发动机倒拖阻力矩。

选取发动机转速为系统状态变量,离合器滑摩转矩为控制变量,建立系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = A_m x + B_m u + G_m \omega \\ y = C_m x \end{cases} \quad (13)$$

式中: $x = \omega_e$; $u = T_c$; $\omega = T_{\text{Eng,drag}}$; $A_m = -c_e/I_e$; $B_m = 1/I_e$; $G_m = 1/I_e$; $C_m = 1$ 。

对于实际控制系统,需对式(13)进行离散化,即

$$\begin{cases} x_d(k+1) = A_d x_d(k) + B_d u(k) + G_d \omega_d(k) \\ y_d(k+1) = C_d x_d(k+1) \\ y_d(k) = C_d x_d(k) \end{cases} \quad (14)$$

根据式中被控系统在 k 时刻和 $k+1$ 时刻的离散状态,引入新的状态变量 $x(k) = [\Delta x_d(k)^T, y_d(k)]^T$,重新构造增广模型,具体的表达式如下:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x(k+1) \\ \Delta x_d(k+1) \\ y_d(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ A_d & 0 \\ C_d A_d & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x_d(k) \\ y_d(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ B_d \\ C_d B_d \end{bmatrix} \Delta u(k) + \begin{bmatrix} G \\ G_d \\ C_d G_d \end{bmatrix} \Delta \omega_d(k) \\ y(k) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} x(k) \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)根据系统预测的控制序列对系统状态和输出进行预测,设 N_{ctrl} 为控制步长, N_{prd} 为预测步长,则在 k 时刻,被控系统的控制增量序列为 $\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+N_{\text{ctrl}}-1)$,系统输出的预测序列的具体表达式为

$$Y = Fx(k) + \Phi_1 \Delta U + \Phi_2 \Delta \Omega \quad (16)$$

式中:

$$\begin{bmatrix} CG & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CAG & CG & 0 & \cdots & 0 \\ CA^2G & CAG & CG & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_{\text{prd}}-1}G & CA^{N_{\text{prd}}-2}G & CA^{N_{\text{prd}}-3}G & \cdots & CA^{N_{\text{prd}}-N_{\text{ctrl}}}G \end{bmatrix};$$

$$Y = \begin{bmatrix} y(k+1|k) \\ y(k+2|k) \\ y(k+3|k) \\ \vdots \\ y(k+N_{\text{prd}}|k) \end{bmatrix}; F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_{\text{prd}}} \end{bmatrix}; \Delta U = \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \Delta u(k+2) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_{\text{ctrl}}-1) \end{bmatrix}; \Delta \Omega = \begin{bmatrix} \Delta \omega(k) \\ \Delta \omega(k+1) \\ \Delta \omega(k+2) \\ \vdots \\ \Delta \omega(k+N_{\text{ctrl}}-1) \end{bmatrix}.$$

其中, Y 表示 k 时刻输出变量预测序列; ΔU 表示 k 时刻控制增量序列; $\Delta \Omega$ 表示 k 时刻干扰量增量序列。

(2) 滚动优化。模型预测控制通过实时滚动计算更新求解最优控制序列, 设计可以反馈闭环控制误差的二次型代价函数如下:

$$J_{\text{Eng_drag}} = (R_{\text{Eng_spd}} - Y - e)^T (R_{\text{Eng_spd}} - Y - e) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \quad (17)$$

式中: $R_{\text{Eng_spd}}$ 为发动机目标转速序列; e 为系统实际输出与预测输出之间的偏差; Y 为系统预测输出; $(R_{\text{Eng_spd}} - Y - e)^T (R_{\text{Eng_spd}} - Y - e)$ 为经过误差反馈修正的发动机转速预测序列与目标参考转速序列之间的误差, 表示 MPC 控制器对参考目标序列的跟踪能力; $\Delta U^T \bar{R} \Delta U$ 为控制序列的耗能, 反映了发动机拖转过程中离合器执行电机和 ISG 电机耗能; \bar{R} 为对角矩阵 $r_{\omega} I_{N_{\text{ctrl}} \times N_{\text{ctrl}}}$ ($r_{\omega} \geq 0$), r_{ω} 为权重系数, 用于协调跟踪误差项和耗能项的所占权重。

将式 (16) 代入式 (17), 并取极值, 即

$$\frac{\partial J_{\text{Eng_drag}}}{\partial \Delta U} = 0, \text{ 得控制量增量和控制量的表达式为}$$

$$\Delta U = (\Phi_1^T \Phi_1 + \bar{R})^{-1} \Phi_1^T (R_{\text{Eng_spd}} - Fx(k) - \Phi_2 \Delta \Omega - e) \quad (18)$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (19)$$

起机 MPC 控制器计算出离合器目标传递转矩, 接下来电机转矩分配逻辑模块将求解各部件需求转矩。

2.2.3.2 电机转矩分配逻辑模块

如图 6 所示在发动机拖转过程中, 整车部分动力用于拖转发动机, 此时若不由 ISG 补偿这部分动力损失, 则会导致车辆出现制动冲击的现象, 因而转矩分配逻辑直接将离合器的滑摩转矩作为 ISG 电机的补偿转矩与模式切换前的 ISG 电机转矩进行叠加并在满足限制条件下得到 ISG 转矩; TM 电机转矩保持模式切换前的转矩变化率即可。

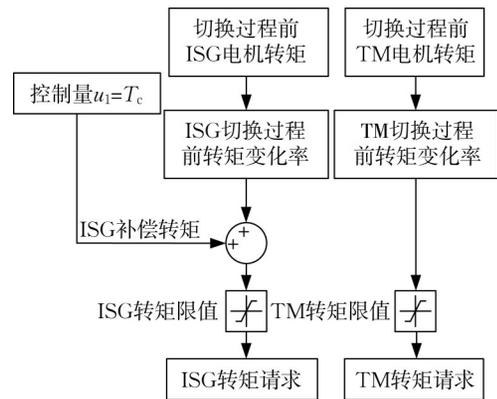


图6 电机转矩分配逻辑框图

Fig.6 Block diagram of motor torque distribution logic

2.2.4 发动机点火同步阶段

当发动机的转速达到所设定阈值时, 发送点火并开始逐步对外输出正转矩。由于平顺性起机的目的在于保证发动机起动过程中的转矩波动尽量不要传递到轮边, 故在发动机点火输出正转矩后, 离合器将分离至预接合点 (kiss point) 的位置保持预接合状态, 同时控制发动机转速跟踪 ISG 电机转速。由于动力性起机的目的在于保证发动机起动过程尽可能快, 故在发动机点火输出正转矩的同时, 离合器不进行分离, 而是采用 PID 控制策略继续滑摩离合器, 使得发动机的正转矩能够及时传递到动力系统。

2.2.5 离合器接合并锁止阶段

当发动机转速提升至略高于从动盘转速时, 采用 PID 的控制策略控制离合器尽快接合并锁止。但对于平顺性起机而言, 在离合器锁止后, 控制策略还需要协调控制发动机和 ISG 的转矩切换, 利用 ISG 将发动机调整到最优工作曲线附近。

3 仿真结果与分析

为了验证纯电动至并联驱动模式切换优化控制策略的有效性, 在 MATLAB/Simulink 软件平台上进行仿真。仿真所用整车及关键零部件参数如表 2 所示。图 7 和图 8 分别为纯电动至并联混动模式切换平顺性起机和动力性起机策略的仿真结果。

如图 7a 所示, 采用数字 1~4 分别表示离合器消除空行程阶段、发动机拖转起动阶段、发动机点火同步阶段和离合器接合并锁止阶段。具体仿真结果如表 3 所示。

平顺性起机策略模式切换过程各动力源转速、转矩关系如图 7b、图 7c 所示, 从 0.90 s 开始进入发

表 2 整车及关键零部件参数

Tab.2 Parameters of vehicle and key components

整车及部件	参数	数值
发动机	峰值功率/kW	86
	峰值扭矩/(N·m)	180
	最高转速/(r·min ⁻¹)	6 000
TM电机	峰值功率/kW	52
	峰值扭矩/(N·m)	155
	最高转速/(r·min ⁻¹)	12 000
ISG电机	峰值功率/kW	52
	峰值扭矩/(N·m)	155
	最高转速/(r·min ⁻¹)	12 000
传动系统	TM总传动比	9.348
	ISG/发动机总传动比	4.125
整车	整备质量/kg	1 542
	迎风面积/m ²	2.44
	空气阻力系数	0.34
	轮胎半径/m	0.337

动机拖转起动阶段,MPC控制器决策出离合器滑摩转矩拖转发动机跟随最优曲线起动,ISG电机及时补偿离合器的传递转矩;1.47 s发动机达到800 r·min⁻¹并点火起动,离合器分离同时ISG降低转矩补偿;1.99 s发动机转速同步,离合器随即接合至锁止状态;2.79 s发动机和ISG电机开始转矩交互,系统最终进入发动机+TM电机驱动,ISG发电的并联工作模式,整个过程的冲击度如图7d所示,其最大冲击度为4.01 m·s⁻³。

动力性起机策略模式切换过程各动力源转速、转矩关系如图8b、图8c所示。模式切换从0.17 s开始,在0.55 s时进入发动机拖转起动阶段,至1.12 s发动机转速达到800 r·min⁻¹并点火起动,为尽可能减少模式切换时间,此时离合器保持滑摩状态,依靠离合器滑摩和自身动力共同作用快速提升转速;1.52 s时完成转速同步,离合器随即接合至锁止状态;1.87 s离合器锁止并进入并联驱动模式,由于过程中离合器持续滑摩且其接合时发动机输出正转矩,易对系统造成冲击,整个过程的冲击度如图8d所示,其最大冲击度为9.01 m·s⁻³。

综上,平顺性起机策略模式切换最大冲击度为4.01 m·s⁻³,相较于动力性起机的最大冲击度为9.01 m·s⁻³,控制效果符合平顺性起动的要求;动力性起机策略模式切换总时间为1.60 s,相较于平顺性起机的模式切换时间2.28 s,动力性起机能更快响应驾驶员的动力需求,且冲击度在规定的范围内^[22],控制效果符合动力性起动的要求,从而验证了双电机驱动至并联模式切换两种模式切换控制策略的有效性。

4 台架试验验证

为进一步验证本文中所提出策略的有效性,选

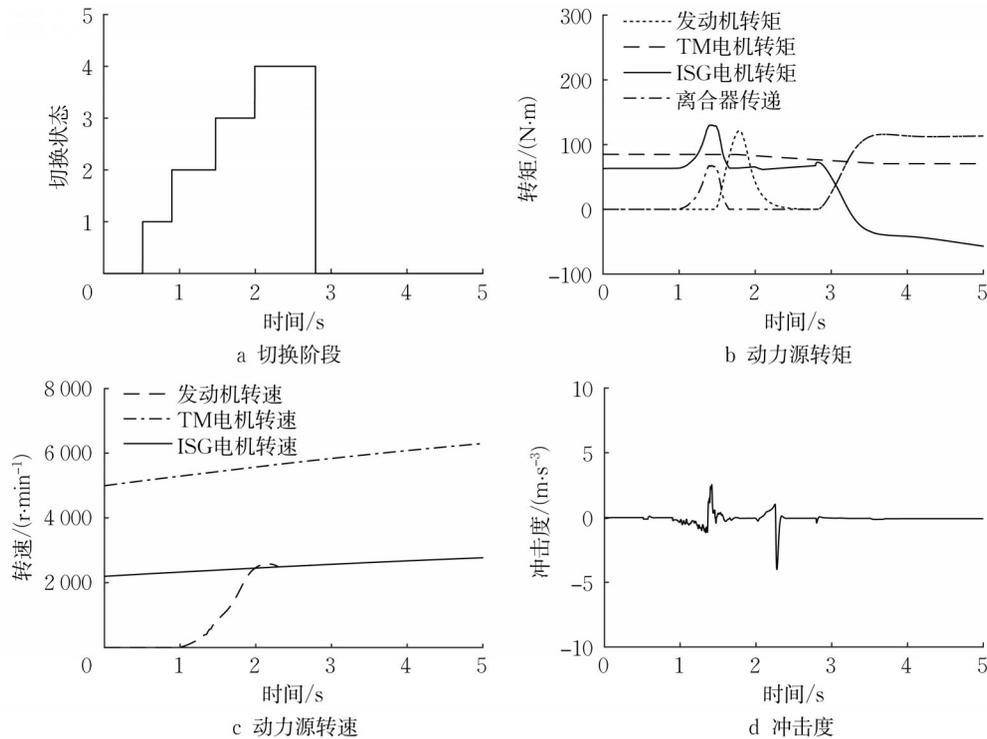


图 7 平顺性起机策略仿真结果

Fig.7 Simulation results of smooth starting strategy

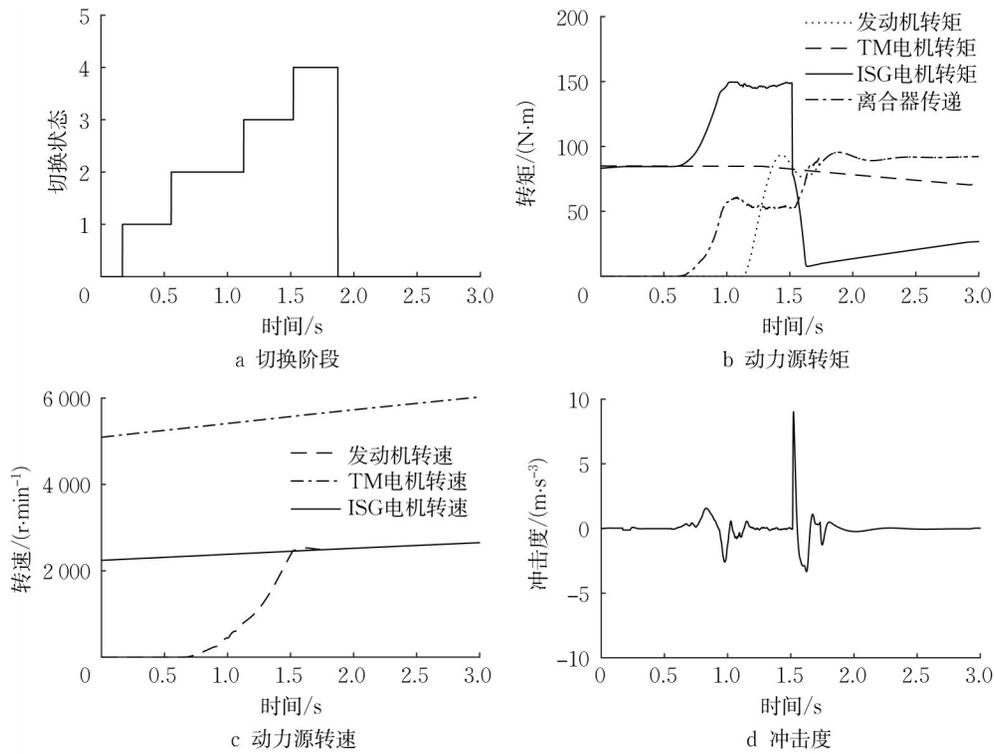


图 8 动力性起机策略仿真结果

Fig.8 Simulation results of dynamic starting strategy

表 3 串并联混合动力系统主要工作模式

Tab.3 Comparison of simulation results of two mode switching strategies

起机模式	发动机点火同步阶段时间/s	离合器接合锁止阶段时间/s	模式切换时间/s	最大冲击度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-3}$
平顺性	0.52	0.80	2.28	4.01
动力性	0.40	0.35	1.60	9.01

取与仿真验证相同的试验工况,开展了模式切换硬件在环台架试验。如图 9 所示,混合动力系统试验台架主要包括驱动电机、电控离合器装置、负载电机等。其中,驱动电机模拟“ISG 电机+TM 电机”总成,负载电机模拟发动机,电控离合器装置模拟发动机与 ISG 电机间的离合器。



图 9 混合动力系统试验台架

Fig.9 Test bench of hybrid power system

图 10 为台架测试系统方案,将 MATLAB/Simulink 中的模式切换控制策略自动生成 C 代码,下载到 Rapid ECU 控制器中;控制器通过 CAN

(controller area network)总线与试验台架通信,发送转矩等控制指令至试验台架;上位机通过标定协议与控制器通信,并接收转速转矩等实际测量值。台架试验结果如图 11、图 12 所示。

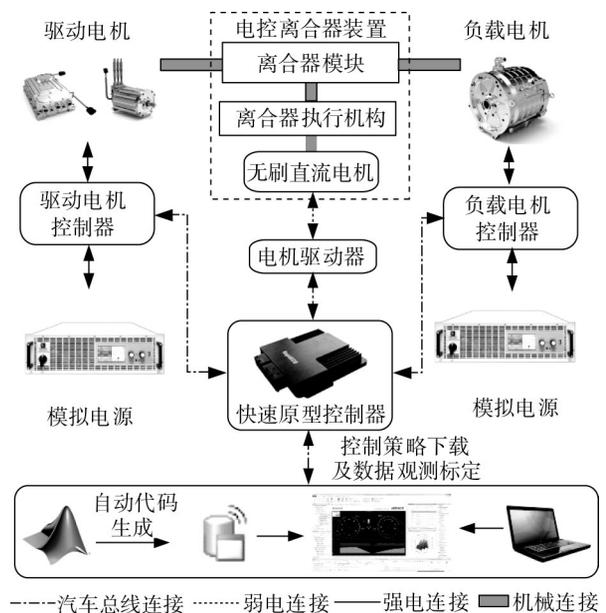


图 10 台架测试系统方案

Fig.10 System scheme of bench test

图 11a 和图 11b 中,平顺性起机策略发动机点火同步阶段历经 0.59 s,离合器接合锁止阶段历经

0.81 s,整个模式切换的时间为2.21 s。由图11c可以看出,离合器在通过滑摩拖转发动机达到点火转速后,离合器分离至预接合位置。由图11d得出整

个模式切换最大冲击度为 $6.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$,整个模式切换过程较为平稳。由图12a和12b可知,动力性起机策略发动机点火同步阶段历经0.38 s,离合器接合

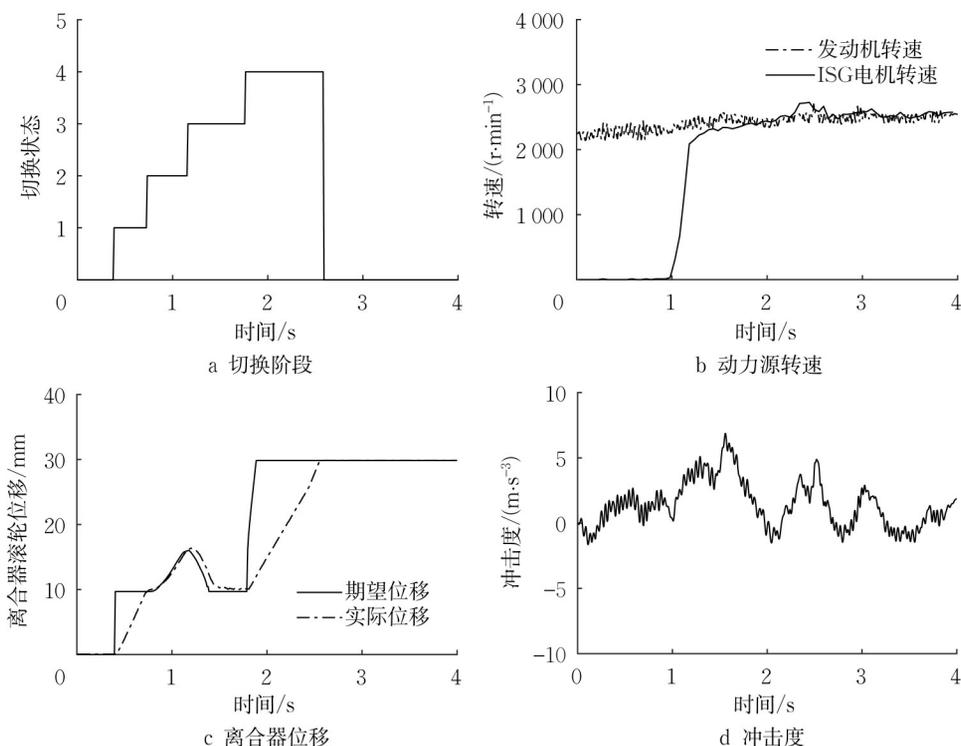


图11 平顺性起机策略台架试验结果

Fig.11 Bench test results of soft starting strategy

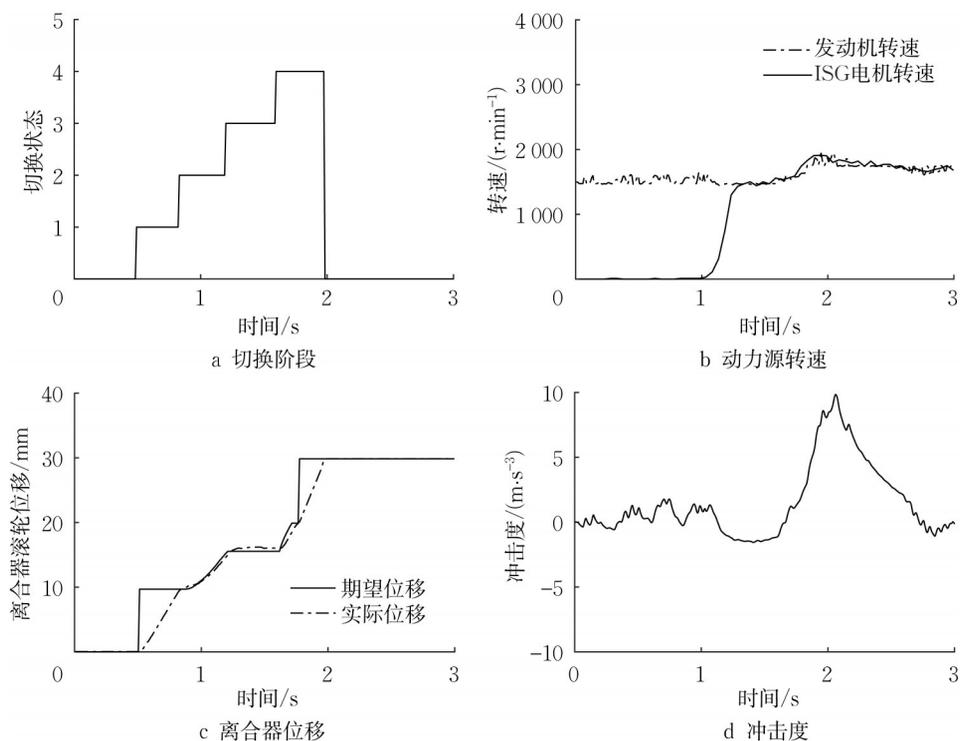


图12 动力性起机策略台架试验结果

Fig.12 Bench test results of dynamic starting strategy

锁止阶段历经0.38 s,整个模式切换的时间为1.51 s,由图12c可以看出,离合器在通过滑摩拖转发动机达到点火转速后,离合器保持滑摩转矩不变,由图12d可以看出,在离合器接合锁止阶段,由于离合器主、从动端的转速差以及发动机接入传动系统,产生较大的冲击,整个模式切换最大冲击度为 $9.84 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$,整个模式切换过程较平顺性起机过程更为迅速,从而能更好满足车辆动力性需求。

因此,硬件在环试验较为准确地模拟了平顺性起机和动力性起机的模式切换过程,并验证了所提出的模式切换模型预测控制策略的有效性。

5 结论

针对某新型串并联PHEV双电机纯电动模式至并联驱动模式的动态切换过程进行了分析,开发了模式切换优化控制策略,主要结论如下:

(1)建立了串并联混合动力汽车模式切换过程动力学模型,包括传动系模型以及发动机阻力矩模型,并针对该混合动力系统特点及车辆状态的不同,提出了平顺性起机和动力性起机的概念,并设计了自适应模式切换控制策略。基于发动机最优拖转转速曲线,提出了发动机起动机模型预测控制策略,实时决策离合器传递转矩,实现发动机转速对最优目标转速的跟踪。

(2)基于MATLAB/Simulink平台,对提出的两种模式切换控制策略进行仿真验证。其中,平顺性起机控制策略模式切换总时间为2.28 s,最大冲击度为 $4.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$ 。动力性起机控制策略模式切换总时间为1.6 s,最大冲击度为 $9.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$ 。可见,所设计的模式切换控制策略既能满足动力性起机模式切换时整车的动力需求快速响应,又能满足平顺性起机模式切换时整车的舒适性要求。

(3)搭建混合动力系统性能试验台架对所提出的模式切换控制策略进行硬件在环仿真验证,试验结果表明,平顺性起机和动力性起机控制策略能分别满足整车的动力性和车辆驾驶平顺性要求。

作者贡献声明:

赵治国:研究思路与控制方法设计,论文指导及修改。

黄琪琪:撰写初稿,数据整理与可视。

倪润宇:仿真分析,试验验证。

参考文献:

- [1] HAN Z, WU Z, GAO X, *et al.* Development and demonstration of a new range-extension hybrid powertrain concept [R]. SAE Technical Paper, 2020. DOI: 10.4271/2020-01-0845
- [2] DU C, YAN F, CAO Z, *et al.* Smooth mode-switch control for the powertrain of parallel hybrid electric vehicle [C]//2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Wuhan: IEEE, 2009: 1-4.
- [3] 王庆年,冀尔聪,王伟华. 并联混合动力汽车模式切换过程的协调控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(1): 1. WANG Qingnian, JI Ercong, WANG Weihua. Coordinated control for mode-switch of parallel hybrid electric vehicle [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology), 2008, 38(1):1.
- [4] 杨阳,杨文辉,秦大同,等. 强混合动力汽车驱动模式切换扭矩协调控制策略[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(2): 74. YANG Yang, YANG Wenhui, QIN Datong, *et al.* Coordinated torque control strategy for driving-mode-switch of strong hybrid electric vehicle [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(2): 74.
- [5] WANG Y, WANG X, SUN Y, *et al.* Model predictive control strategy for energy optimization of series-parallel hybrid electric vehicle [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 199: 348.
- [6] XIONG W, ZHANG Y, YIN C. Optimal energy management for a series - parallel hybrid electric bus [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(7): 1730.
- [7] 赵治国,范佳琦,蒋蓝星,等. 复合功率分流系统发动机起动机 H_{∞} 鲁棒优化控制[J]. 汽车工程, 2020, 42(4): 417. ZHAO Zhiguo, FAN Jiaqi, JIANG Lanxing, *et al.* Engine start-up H_{∞} robust optimal control of the compound power-split system [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(4):417.
- [8] 王磊,张勇,舒杰,等. 基于模糊自适应滑模方法的混联式混合动力客车模式切换协调控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(14): 119. WANG Lei, ZHANG Yong, SHU Jie, *et al.* Mode transition control for series-parallel hybrid electric bus using fuzzy adaptive sliding mode approach [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(14):119.
- [9] YANG Y, ZHANG Y, ZHANG S, *et al.* Control strategy of mode transition with engine start in a plug-in hybrid electric bus [J]. Energies, 2019, 12(15): 2989.
- [10] YANG C, SHI Y, LI L, *et al.* Efficient mode transition control for parallel hybrid electric vehicle with adaptive dual-loop control framework [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(2): 1519.
- [11] 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.
- 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.
- [12] SONG M, OH J, KIM H. Engine clutch control algorithm during mode change for parallel hybrid electric vehicle [C]// 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Seoul: IEEE, 2012: 1118-1121.
- [13] 赵彬, 宁甲奎, 周达, 等. P2混合动力离合器辅助发动机启动控制方法研究[J]. 汽车技术, 2018(12): 23.
- ZHAO Bin, NING Jiakui, ZHOU Da, *et al.* Research on clutch-assisted engine start control of P2 hybrid system [J]. Automobile Technology, 2018(12): 23.
- [14] SUN J, XING G, LIU X, *et al.* A novel torque coordination control strategy of a single-shaft parallel hybrid electric vehicle based on model predictive control [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 1.
- [15] 刘永刚, 秦大同, 刘振军, 等. 单电机重度混合动力系统行进间发动机启动控制策略研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(1): 49.
- LIU Yonggang, QIN Datong, LIU Zhenjun, *et al.* A research on the control strategy for engine starting while driving in a full hybrid power system with single motor [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(1): 49.
- [16] 赵治国, 何宁, 朱阳, 等. 四轮驱动混合动力轿车驱动模式切换控制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(4): 100.
- ZHAO Zhiguo, HE Ning, ZHU Yang, *et al.* Mode transition control for four wheel drive hybrid electric car [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(4): 100.
- [17] CHEN L, XI G, SUN J. Torque coordination control during mode transition for a series - parallel hybrid electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(7): 2936.
- [18] WANG C, ZHAO Z, ZHANG T, *et al.* Mode transition coordinated control for a compound power-split hybrid car [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 87: 192.
- [19] ZHAO Z, JIANG L, WANG C, *et al.* Engine start-up optimal control for a compound power-split hybrid powertrain [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 120: 365.
- [20] 赵治国, 付靖, 蒋蓝星, 等. 复合功率分流系统发动机启动模型预测控制[J]. 机械工程学报, 2020, 56(22): 201.
- ZHAO Zhiguo, FU Jing, JIANG Lanxing, *et al.* Model predictive control of engine start-up for compound power-split hybrid powertrain [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(22): 201.
- [21] XI Y, HUANG H, TIAN Z, *et al.* Design of transition mode attitude controller for a tilt-rotor UAV based on MPC method [C]//2021 40th Chinese Control Conference (CCC). Shanghai: IEEE, 2021: 7797-7802.
- [22] LIU J, MA B, LI H, *et al.* Control strategy optimization for a dual-clutch transmission downshift with a single slipping clutch during the torque phase [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part D. Journal of Automobile Engineering, 2018, 232(5): 651.