

文章编号:1000-582X(2011)02-074-8

# 强混合动力汽车驱动模式切换扭矩协调控制策略

杨 阳<sup>1</sup>, 杨文辉<sup>1</sup>, 秦大同<sup>1</sup>, 段志辉<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆长安汽车股份有限公司, 重庆 400023)

**摘 要:**在对强混合动力系统工作特性分析的基础上,以车辆行驶平顺性为目标,通过对系统在不同驱动模式切换过程中发动机、电机及离合器和变速器参数变化的分析,制定了针对不同模式切换过程扭矩波动的扭矩协调控制策略。建立了基于该控制策略的强混合动力汽车动力学仿真模型,进行了典型驱动模式切换过程的仿真与分析。结果表明,提出的扭矩协调控制策略能够减小驱动模式切换过程中的扭矩波动,有效提高强混合动力汽车在模式切换过程中的动力传递的平稳性。

**关键词:**混合动力电动汽车; 平顺性; 模式切换; 扭矩协调控制; 计算机仿真

**中图分类号:**U469.72

**文献标志码:**A

## Coordinated torque control strategy for driving-mode-switch of strong hybrid electric vehicle

YANG Yang<sup>1</sup>, YANG Wen-hui<sup>1</sup>, QIN Da-tong<sup>1</sup>, DUAN Zhi-hui<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;  
2. Chang'an Automotive Limited Company, Chongqing 400023, P. R. China)

**Abstract:** For a new type of strongly hybridized system, the vehicle ride performance is used as the study goal, a coordinated control strategy is put forward to suppress the torque surge after the analysis of the parameters changes of engine, motor, clutch and transmission during the driving-mode-switch process. The strongly hybridized vehicle simulation model is developed based on the coordinated control strategy. The typical drive mode switching process performance simulation and analysis are performed. The results show that introducing the coordinated control strategy reduces the torque surge during the driving-mode-switch process and improves the vehicle drivability.

**Key words:** hybrid electric vehicles; ride performance; mode-switch; coordinated torque control; computer simulation

混合动力系统中存在 2 类核心控制问题: 1) 稳态或动态过程中多个动力源的能量分配和效率优化; 2) 动态过程中多个机械动力源的相互配合协调工作, 目前对第一类问题研究比较成熟, 针对第二类问题的研究相对较少。

混合动力系统有多种工作模式, 可以实现怠速起停、纯电动驱动、发动机单独驱动、功率辅助、再生制动等车辆运行工况, 工作模式切换过程十分复杂。在车辆行驶过程中, 需根据整车行驶状况进行工作模式切换, 而切换过程中涉及到混合动力汽车的动态过程控

收稿日期: 2010-08-20

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2006AA11 A107-1); 国家自然科学基金(51075411); 重庆市科技攻关项目(CSTS, 2008AA6025)

作者简介: 杨阳(1958-), 男, 重庆大学副教授, 博士, 主要从事流体传动与控制 and 混合动力汽车的研究, (E-mail) yangyang@cqu.edu.cn。

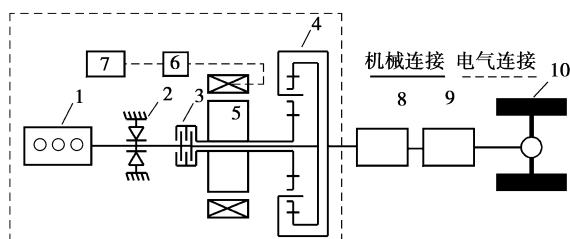
制,如果控制不好可能造成传动系统的动力中断或者转矩波动,影响整车的动力性和平顺性<sup>[1-4]</sup>。

笔者以强混合动力系统为研究对象,以行驶平顺性为目标,通过分析模式切换过程参数变化规律,确定系统在驱动模式切换过程中的控制策略和扭矩协调控制算法。通过建模和仿真分析,验证控制策略的有效性。

## 1 强混合动力系统运行工况分析

### 1.1 强混合动力汽车系统组成

笔者研究的强混合动力系统如图1所示。



1—发动机;2—单向离合器;3—湿式多片离合器;  
4—行星排;5—电机;6—逆变器;7—电机;  
8—AMT变速器;9—主减速器;10—车轮

图1 强混合动力系统结构图

发动机的输出轴与动力耦合装置行星排的齿圈、湿式多片离合器的主动盘以及单向离合器相连,行星排起动力分解与合成作用,其太阳轮与电机的转子连接,系统动力通过行星排的行星架输出,动力经过变速器、主减速器传至车轮。

### 1.2 系统不同工作模式分析

1) 纯电动工况:发动机未启动时,电机正向驱动太阳轮。由于车辆阻力作用于行星架上,齿圈通过单向离合器而锁死,湿式多片离合器分离,发动机不工作。电机输出扭矩经太阳轮传至行星架,驱动车辆起步和低速行驶。

2) 发动机单独驱动:在发动机单独驱动工况中,湿式多片离合器接合,单向离合器分离,电机空转,发动机扭矩经过齿圈至行星架输出至变速器输入端。

3) 混合驱动:

a. 重载低速运行工况时,单向离合器脱开,湿式多片离合器接合,电机输出扭矩,行星排锁死,传动比为1,电机和发动机扭矩耦合后输入到变速器。

b. 轻载高速运行工况时,单向离合器分离,湿式多片离合器分离,电机和发动机扭矩耦合后输入到变速器。

4) 行车充电:为提高发动机负荷率,如果电池电量较低,发动机驱动电机发电,此时单向离合器和湿式多片离合器都分离,电机作为发电机给电池充电,行星排锁止,电机和发动机扭矩耦合后输入到变

速器。

5) 行车起动发动机:需发动机工作时,湿式多片离合器接合,电机输出扭矩经太阳轮进行分配,一部分扭矩用于驱动车辆,另一部分用于短时起动发动机。

### 1.3 不同工作模式动力耦合机构的扭矩和转速关系

本文中的动力耦合机构是单排行星齿轮机构,转速合成特性可以表示为

$$i_{13}^H = \frac{n_1 - n_H}{n_3 - n_H} = -\frac{Z_3}{Z_1} = -\frac{1}{\rho} \quad (1)$$

式中: $i_{13}^H$ 为固定行星架后太阳轮与齿圈转速比; $n_1$ 、 $n_3$ 、 $n_H$ 为太阳轮、齿圈和行星架的转速; $Z_1$ 、 $Z_3$ 为太阳轮和齿圈齿数; $\rho$ 为行星机构特性参数。式(1)的转速关系可进一步表示为

$$(1 + \rho)n_H = n_1\rho + n_3 \quad (2)$$

根据虚拟杠杆原理<sup>[9]</sup>,混合动力汽车不同模式下的行星齿轮动力耦合机构的转速关系如表1所示。

表1 动力耦合机构转速关系

运行模式	转速关系
纯电动	$(1 + \rho)n_H = n_1\rho$
发动机单独驱动	$n_H = n_1 = n_3$
混合驱动	a. $n_H = n_1 = n_3$ b. $(1 + \rho)n_H = n_1\rho + n_3$
行车充电	$(1 + \rho)n_H = n_1\rho + n_3$
电机起动发动机	$(1 + \rho)n_H = n_1\rho + n_3$

忽略系统摩擦,根据转矩平衡和功率平衡原则可以得到行星齿轮机构的扭矩合成关系

$$-T_H = (1 + \rho) \cdot T_3 = \frac{1 + \rho}{\rho} \cdot T_1 \quad (3)$$

其中: $T_1$ 、 $T_3$ 、 $T_H$ 分别为太阳轮、齿圈和行星架的内扭矩。动力耦合机构通过控制离合器以及各能量转换装置的开关操作实现驱动模式的切换。

## 2 模式切换过程中扭矩协调控制策略

### 2.1 模式切换过程分析

为满足整车动力性、经济性要求,混合动力系统工作模式会随着车辆行驶状态变化而变化,因此混合动力系统在模式切换过程可能引起发动机和电机扭矩大幅变化及湿式多片离合器和行星齿轮机构等状态的变化。由于发动机和电机具有不同的动态特性,在从当前转矩向目标转矩的变化过程中,两者通过行星齿轮机构合成的扭矩输出可能产生大的波动,不能很好的跟随目标转矩,影响整车的运行平稳性及传动部件的使用寿命<sup>[5-12]</sup>。

各种工作模式之间的切换如图2所示。

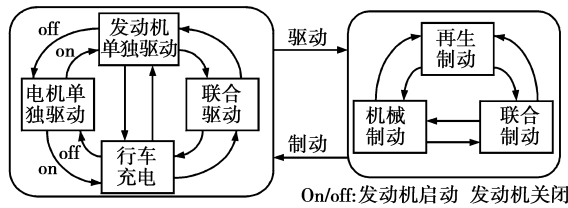


图 2 模式切换分类

### 2.1.1 驱动模式切换分类

根据驱动模式切换扭矩波动的严重程度及扭矩协调控制方法的相似性,可将驱动模式切换分为 3 类。

1) 纯电动→发动机参与工作的运行模式(发动机单独驱动、行车充电、混合驱动)。应考虑离合器的接合过程和发动机起动过程的扭矩控制。电机起动发动机时,考虑到发动机系统复杂的动态特性及其对目标扭矩的响应的滞后性,在离合器接合过程中,由于发动机存在阻力矩的原因,如果不进行协调控制,将产生纵向冲击,严重影响舒适性。

2) 有离合器分离过程模式切换过程。发动机驱动→纯电动和联合驱动(离合器接合)→联合驱动(离合器分离)。在发动机关闭过程中,逐渐减小发动机负荷命令,以扩大电机扭矩补偿的范围。

3) 有发动机参与的工作模式之间的切换(发动机单独驱动、联合驱动、行车充电)。应考虑对电机和发动机扭矩变化速率的控制,以避免短时大冲击度。在此类切换中,不存在发动机的关闭与起动过程。发动机处于正常工作状态,切换中其输出扭矩波动会相对较小。

## 2.2 扭矩协调控制策略的确定

### 2.2.1 控制策略总体思路

针对不同模式切换的特点,制定出了不同类型模式切换下的扭矩协调控制策略。而图 3 为整个模式切换过程的总体思路。

在有发动机参与工作的模式中,发动机扭矩控制是通过控制节气门开度实现的。为了使发动机更好地跟随目标扭矩和避免发动机扭矩控制在模式切换时节气门开度指令的不连续性,使用 PID 算法控制发动机节气门开度<sup>[13-15]</sup>。控制算法的输出为节气门开度增量  $\Delta\alpha$ ,控制算法为

$$\Delta\alpha = k_p \cdot k_i \int edt + k_d \cdot \dot{e} \quad (4)$$

式中: $e = T_{e\_tar} - T_{e\_act}$  为偏差控制量; $T_{e\_tar}$ 、 $T_{e\_act}$  分别为发动机目标扭矩和实际扭矩; $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  分别为比例、积分、微分增益。

### 2.2.2 第一类模式切换过程控制策略

第一类模式切换过程中,必须协调好纯电动驱动及起动发动机这两个任务之间的关系。起动发动机时,湿式多片离合器开始接合,电机带动发动机使其

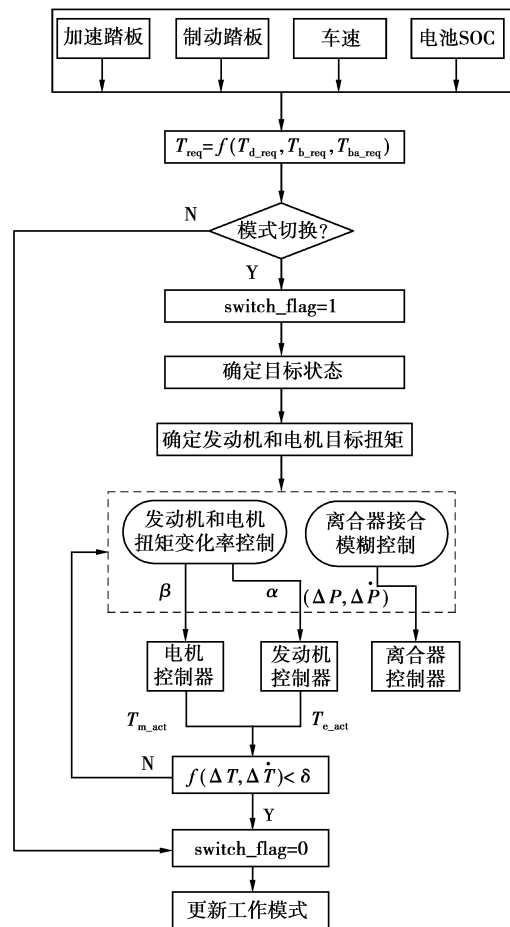


图 3 模式切换控制策略流程图

转速迅速升高。当转速升高至 800 r/min 时,控制器发出发动机点火信号,发动机起动后并不立即关闭电机,而是对发动机初始扭矩变化进行限制,扩大电机扭矩补偿范围。该过程需要准确控制湿式多片离合器的油压以保证:1) 发动机起动时有足够的起动转矩;2) 传动系统快速同步;3) 传动系统无动力中断和冲击<sup>[16-17]</sup>。而这 2 个目标是相互矛盾的,应设计不同的评价函数去控制上述目标的实现。

第一个目标是完成从纯电动到有发动机参与的工况的平稳切换和避免动力中断。评价函数为

$$J_1 = \sum_{n_1}^{n_2} \frac{1}{2} (T_{d\_req} - T_H)^2 \quad (5)$$

其中  $T_{d\_req}$  为等效到变速器输入端的需求扭矩; $(n_1, n_2)$  为控制时域。只要保证  $T_H$  跟随驾驶员需求扭矩,就可以保证系统低冲击度。即只要保证(5)式取得最小值,就可以保证目标实现。

第二个目标是解决传动系各部分的同步问题,而由式(5)的优化结果得到离合器传递扭矩  $T_{cl}$ ,电机输出扭矩  $T_{m\_opt}$ ,所以此目标实现需优化式(6)即可。

$$J_2 = \sum_{n_1}^{n_2} \frac{1}{2} (\omega_m - \omega_e)^2. \quad (6)$$

在满足结合平顺要求的前提下,应尽量缩短接合时间。离合器在滑摩状态下离合器的传递转矩表示为

$$T_d = \text{sgn}(\Delta\omega) \frac{2}{3} R\mu P_n S Z. \quad (7)$$

其中: $R=(r_2^3-r_1^3)/(r_2^2-r_1^2)$ ;  $r_1$ 、 $r_2$  分别为离合器摩擦片内、外径; $\mu$  为摩擦因数; $P_n$  为作用于离合器的压力; $S$  为离合器活塞的作用面积; $Z$  为摩擦副数; $\Delta\omega$  为离合器的主从动片的转速差,  $\Delta\omega = \omega_m - \omega_e$ ;  $\omega_e$ 、 $\omega_m$  为发动机转速和电机转速。

为有效控制离合器传递扭矩大小及变化速率,引入模糊逻辑来控制离合器接合速度<sup>[18]</sup>。模糊控制器输入量为离合器盘转速差( $E=\omega_m - \omega_e$ )和转速差绝对值的变化率( $EC=d(|\omega_m - \omega_e|)/dt$ ), 输出量  $U$  为离合器的压力变化率, 积分后得到离合器油压。将  $E$ 、 $EC$  和  $U$  的论域都定义为  $[-1, 1]$ 。各论域  $E$ 、 $EC$  和  $U$  中的语言变量为 {正大( $PB$ ), 正中( $PM$ ), 正小( $PS$ ), 零( $ZE$ ), 负小( $NS$ ), 负中( $NM$ ), 负大( $NB$ )}。隶属函数采用钟型函数, 控制规则如表 2 所示:

表 2 模糊控制规则表

$E_c$	$E$				
	$NB$	$NM$	$ZE$	$PM$	$PB$
$NB$	$NB$	$NB$	$NM$	$ZE$	$ZE$
$NM$	$NB$	$NM$	$NS$	$PS$	$PS$
$ZE$	$ZE$	$NM$	$ZE$	$PM$	$PM$
$PM$	$NS$	$NS$	$PS$	$PM$	$PB$
$PB$	$ZE$	$ZE$	$PM$	$PB$	$PB$

离合器油压随时间的变化可表示为

$$P_n(t) = P_0 + \int_0^t \dot{p}(t) dt. \quad (8)$$

式中,  $P_0$  为离合器初始油压。

在离合器接合和发动机起动之前, 电机控制器根据目标扭矩向电机发送指令, 电机输出相应的扭矩, 而电机目标扭矩的确定与离合器传递扭矩相关, 所以在电起机过程中, 只要合理控制离合器主、从动盘之间的压紧力, 即控制离合器液压缸油压, 利用电机的快速响应性, 在驱动车辆条件下即可同时起动发动机。离合器模糊控制方法同样适用于第二类模式切换中涉及到离合器接合过程的模式切换。

当离合器接合、发动机已经起动时, 电机并不是马上退出工作, 还需要控制发动机转矩上升速率和电机扭矩的变化, 用电机扭矩进行补偿, 直到输出扭矩波动进入某一范围且与目标扭矩之差进入要求的阈值时, 逐渐关闭电机。

第一类模式切换过程的控制策略选取离合器油压、电机与发动机输出扭矩作为控制变量, 离合器控制通过模糊控制算法实现的, 发动机扭矩是利用 PID 算法控制节气门开度实现的。

### 2.2.2 第二类模式切换过程控制策略

若变速器输入端需求扭矩为  $T_{\text{req}}$ , 理想情况下发动机、电机输出扭矩分别为  $T_{e_{\text{req}}}$ 、 $T_{m_{\text{req}}}$ , 则有

$$T_{\text{req}} = T_{e_{\text{req}}} \cdot (n_e/n_c) + T_{m_{\text{req}}} \cdot (n_m/n_c). \quad (9)$$

式中  $n_e$ 、 $n_m$ 、 $n_c$  分别为发动机、电机、行星架转速。

由于发动机实际输出扭矩  $T_e$  与理想输出扭矩存在误差, 即  $T_{e_{\text{req}}} - T_e = \Delta$ , 而电机实际输出扭矩和理想输出扭矩一致, 即  $T_{m_{\text{req}}} = T_m$ 。为保证变速器输入端扭矩平稳过渡, 假设电机扭矩补偿量为  $\Delta\alpha$ , 则变速器实际输入扭矩为

$$\begin{aligned} T_{\text{act}} &= T_e \cdot (n_e/n_c) + T_m \cdot (n_m/n_c) = \\ (T_{e_{\text{req}}} - \Delta) \cdot (n_e/n_c) + (T_m + \Delta\alpha) \cdot (n_m/n_c) &= T_{\text{req}} \end{aligned} \quad (10)$$

可以得到

$$\Delta\alpha = (n_e/n_m) \cdot \Delta. \quad (11)$$

上述扭矩补偿方法的准确性基于对驾驶员需求扭矩的准确解析, 如果不正确则达不到预期的目标, 甚至可能使模式切换过程平顺性变得更差。

因此, 应考虑通过控制发动机、电机的负荷信号的变化率来控制其扭矩变化率以改善模式切换过程扭矩波动。

$$T'_e = T_e + \int k_e dt. \quad (12)$$

$$T'_m = T_m + \int k_m dt. \quad (13)$$

$$T_{\text{req}} = T_e \cdot (n_e/n_c) + T_m \cdot (n_m/n_c). \quad (14)$$

$$\begin{aligned} T'_{\text{req}} &= T'_e \cdot \frac{n_e}{n_c} + T'_m \cdot \frac{n_m}{n_c} = \\ &\left( T_e \cdot \frac{n_e}{n_c} + T_m \cdot \frac{n_m}{n_c} \right) + \\ &\int \left( k_e \cdot \frac{n_e}{n_c} + k_m \cdot \frac{n_m}{n_c} \right) dt = \\ &T_{\text{req}} + \int k_{\text{req}} \cdot dt. \end{aligned} \quad (15)$$

只要令  $k_e \cdot (n_e/n_c) + k_m \cdot (n_m/n_c) = k_{\text{req}}$ , 即

$$k_m = (k_{\text{req}} - k_e \cdot (n_e/n_c)) \cdot (n_c/n_m). \quad (16)$$

式中:  $T'_e$ 、 $T'_m$  为切换过程中发动机、电机输出转矩;  $T'_{\text{req}}$  为切换过程中需求转矩;  $k_e$ 、 $k_m$  分别为发动机和电机扭矩变化率;  $k_{\text{req}}$  为切换过程需求扭矩变化率。

只要电机扭矩变化率满足(16)要求就可改善切换过程的扭矩波动。

这种控制方法不仅可以利用电机响应迅速的特点实时进行主动补偿以消除模式切换中的冲击, 而且把发动机的动态过程变成一系列准静态过程, 因此对发动机的动态特性要求不高。

### 2.2.3 第三类模式切换过程控制策略

当离合器在模式切换过程中没有接合或者分离动作时,则(15)可变化为

$$k_m = k_{req} - k_e. \quad (17)$$

只要知道驾驶员需求扭矩以及发动机输出扭矩的变化率,根据式(17),利用电机扭矩的快速响应特性,可直接对切换过程中驾驶员扭矩需求进行补偿。

整个切换过程的控制原则为:限制发动机的扭矩动态变化速率,即放慢节气门开度向目标开度的变化速率,扩大电机扭矩补偿范围。在需求扭矩变化不大的情况下,避免电机突然加载或卸载及避免电机频繁在电动和发电模式切换。

## 3 基于扭矩协调控制的系统建模与分析

### 3.1 系统动力学仿真模型

齿圈运动微分方程

$$T_e + T_{cl} - T_3 = \dot{n}_e(J_e + J_{oc} + J_{wa} + J_3). \quad (18)$$

太阳轮运动微分方程

$$T_m - T_1 - T_{cl} = \dot{n}_m(J_m + J_{wd} + J_1). \quad (19)$$

行星架运动微分方程

$$\left. \begin{aligned} -T_H - T_{vf} &= \dot{n}_H J_V, \\ J_V &= \left( \frac{J_w + M \cdot r^2}{i_o^2} + J_{mr} + J_{go} \right) / i_g^2 + J_{gi} + J_{Ho} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

行星机构角加速度约束方程

$$(1 + \rho) \dot{n}_H = \dot{n}_1 \rho + \dot{n}_3. \quad (21)$$

混合动力汽车运行在不同的工作模式时,

式(18)到(21)会衍化成不同形式。

行星齿轮内力矩方程

$$-T_H = (1 + \rho) \cdot T_3 = \frac{1 + \rho}{\rho} \cdot T_1. \quad (22)$$

整车运动学方程

$$\frac{T_H \cdot i_o \cdot i_g}{r} - F_b - (F_w + F_f + F_j + F_i) = ma. \quad (23)$$

$$T_{vf} = F_b + (F_w + F_f + F_i). \quad (24)$$

离合器完全接合时传递的扭矩为

$$T_{clock\_cl} = \frac{T_z \cdot J_c + T_c J_z}{J_c + J_z} = \frac{(J_e + J_{oc}) \cdot T_m - \frac{(J_e + J_{oc}) \cdot T_{vf}}{i_o \cdot i_g} + k \left( T_e - \frac{T_{vf}}{i_o \cdot i_g} \right)}{k + J_e + J_{oc}}. \quad (25)$$

其中: $T_e$ 、 $T_m$ 为发动机、电机输出扭矩, $T_z$ 、 $T_c$ 为离合器主、从动转矩, $T_{vf}$ 为整车阻力矩, $F_b$ 为制动力, $F_w$ 、 $F_f$ 、 $F_i$ 分别为风阻、滚动阻力、坡度阻力, $J_z$ 、 $J_c$ 为离合器主、从动部分转动惯量, $J_e$ 为发动机曲轴转动惯量, $J_m$ 为电机转动惯量, $J_{wa}$ 、 $J_{wd}$ 离合器主、从动片转动惯量, $J_1$ 、 $J_3$ 、 $J_H$ 分别为太阳轮、齿圈和行星架转动惯量, $J_{gi}$ 、 $J_{go}$ 分别为变速器输入、输出转动惯量, $J_{mr}$ 、 $J_w$ 分别为主减速器和车轮转动惯量; $i_g$ 、 $i_o$ 是变速器和主减速器的传动比。

### 3.2 仿真结果分析

基于驱动模式切换扭矩协调控制策略建立的整车仿真模型如图4所示,系统关键部件参数如表3所示。

表3 整车系统仿真参数

名称	整车部分	发动机	动力电池组	行星排	AMT	ISG电机
项目	模拟车型	排量/L	电池组类型	太阳轮齿数	档位数	电机型号
	整备质量/kg	峰值功率/kW	额定容量/Ah	齿圈齿数		额定功率/kw
		最高转速(r·min <sup>-1</sup> )	额定电压/V	行星轮齿数		额定电压/V
数值	长安 CV8	1.597	镍氢电池组	36	5	YZ131001
	1535	69	6	72		13
		5600	144	18		144

### 3.2.1 第一类模式切换过程仿真分析

仿真结果如图5所示。图5(a),当整车控制器在4.71s发车电起机的命令,离合器随即开始接合,瞬间冲击度小于2m/s<sup>3</sup>,发动机在5.15s启动,发动机启动后电机并没有立即停机,而是对发动机节气门开度变化进行限制,扩大电机补偿范围,保证发动机启动后的离合器输入端扭矩不产生大的波

动,整个过程扭矩波动在-10~5N·m内。图6(b)为没有扭矩协调控制的电起机过程,发动机启动时离合器输入端扭矩会产生大的波动,波动最大达到50N·m,整车冲击度大于要求的16m/s<sup>3</sup>,而且发动机启动过程远远大于要求的0.5s,不能满足电起机的要求。

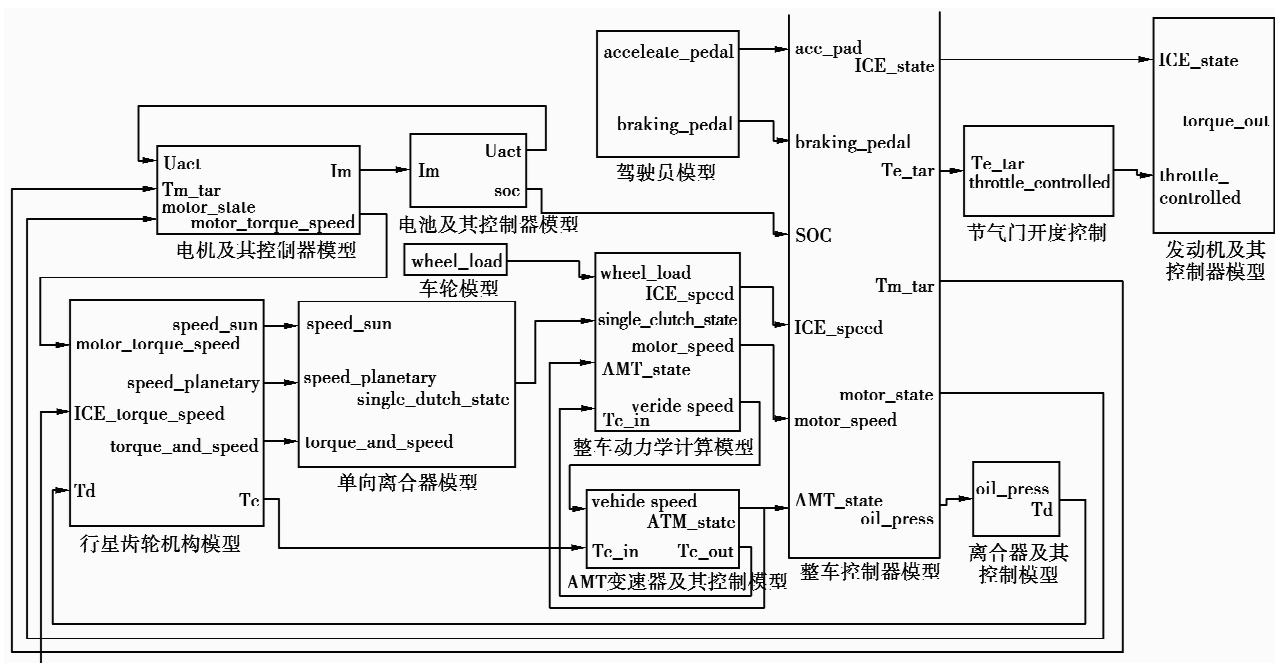


图 4 强混合动力轿车 Matlab/Simulink 模型

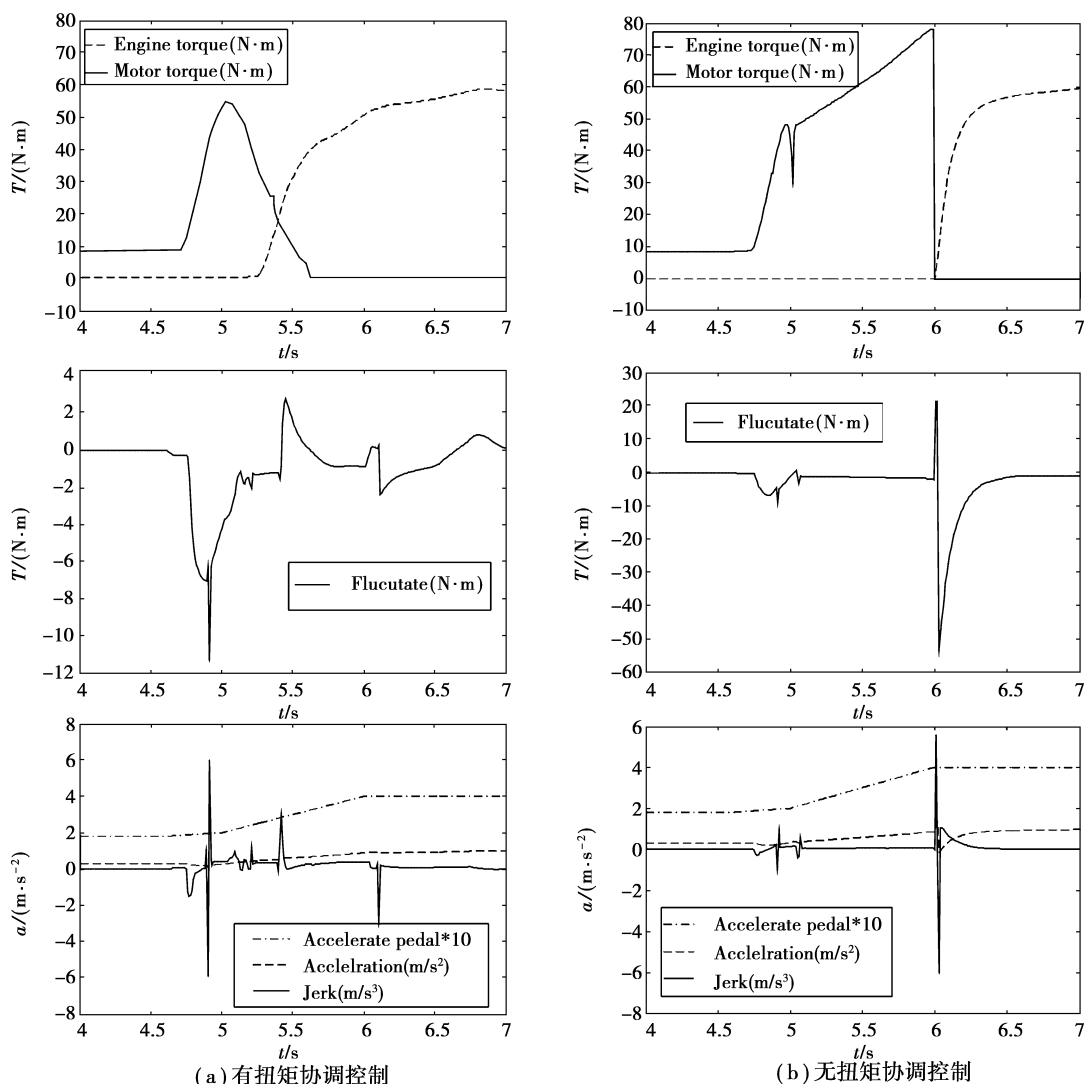


图 5 纯电动→发动机驱动的切换过程

### 3.2.2 第二类模式切换过程仿真分析

图6(a)为经过了协调控制的切换过程,当系统控制器向发动机控制器发出关机命令时,发动机扭矩缓慢降低,同时电机扭矩缓慢上升,利用电机进行扭矩补偿,保证发动机关闭时的离合器输入端扭矩不产生大的波动,最后电机按照控制策略在合适的

时间退出扭矩补偿,系统进入纯电机驱动工况,整个过程扭矩波动在 $-1\sim 7\text{ N}\cdot\text{m}$ ,满足了冲击度的要求。没有采用扭矩协调控制时(图6(b)),由于电机和发动机响应目标扭矩的速度不同,导致发动机启动时离合器输入端扭矩会产生大的波动,扭矩波动超过 $20\text{ N}\cdot\text{m}$ ,冲击度大于 $15\text{ m/s}^3$ 。

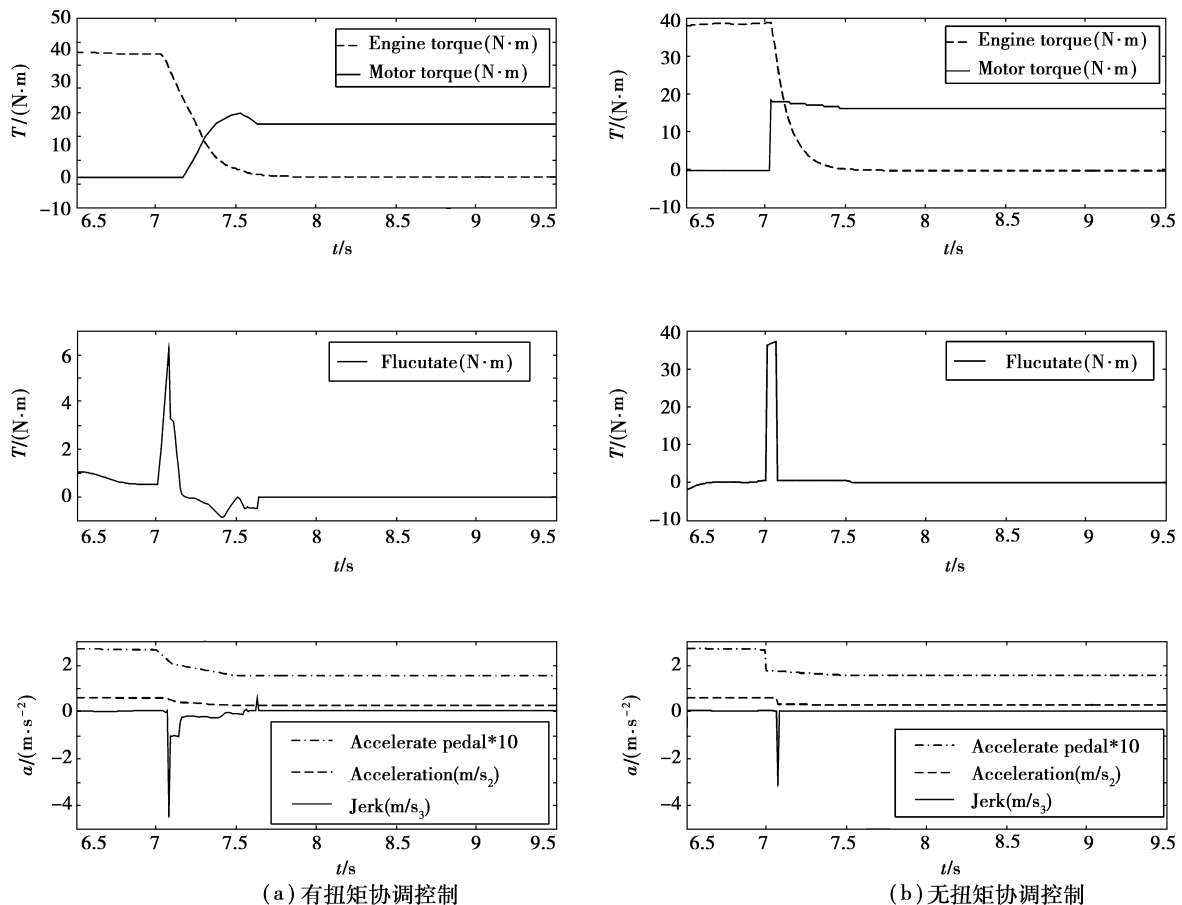


图6 发动机驱动→纯电动切换过程

### 3.2.3 第三类模式切换过程仿真分析

仿真结果如图7所示,是有发动机单独驱动向功率辅助模式的切换过程仿真分析。此类模式切换不涉及发动机起停过程,变速器输入端扭矩波动和冲击度相对于含有发动机启停过程的模式切换过程比较小。在 $4.65\text{ s}$ 时需要启动电机,为了避免电机突然加入引起变速器输入端扭矩波动,对电机扭矩变化率进行了限制,如图7(a)所示,电机扭矩按照一定的斜率上升。整个过程冲击度在 $-2\sim 3\text{ m/s}^3$

之间,扭矩波动幅度在 $-6\sim 6\text{ N}\cdot\text{m}$ 之间。而未采取扭矩协调控制的过程如图7(b)所示,冲击度绝对值超过 $10\text{ m/s}^3$ 。

仿真结果表明:强混合动力系统的模式切换控制的关键在于电机和发动机输出转矩控制及湿式多片离合器控制,其在很大程度上影响了模式切换过程的冲击度、切换时间、扭矩波动等工作参数,决定了动态协调过程的好坏。

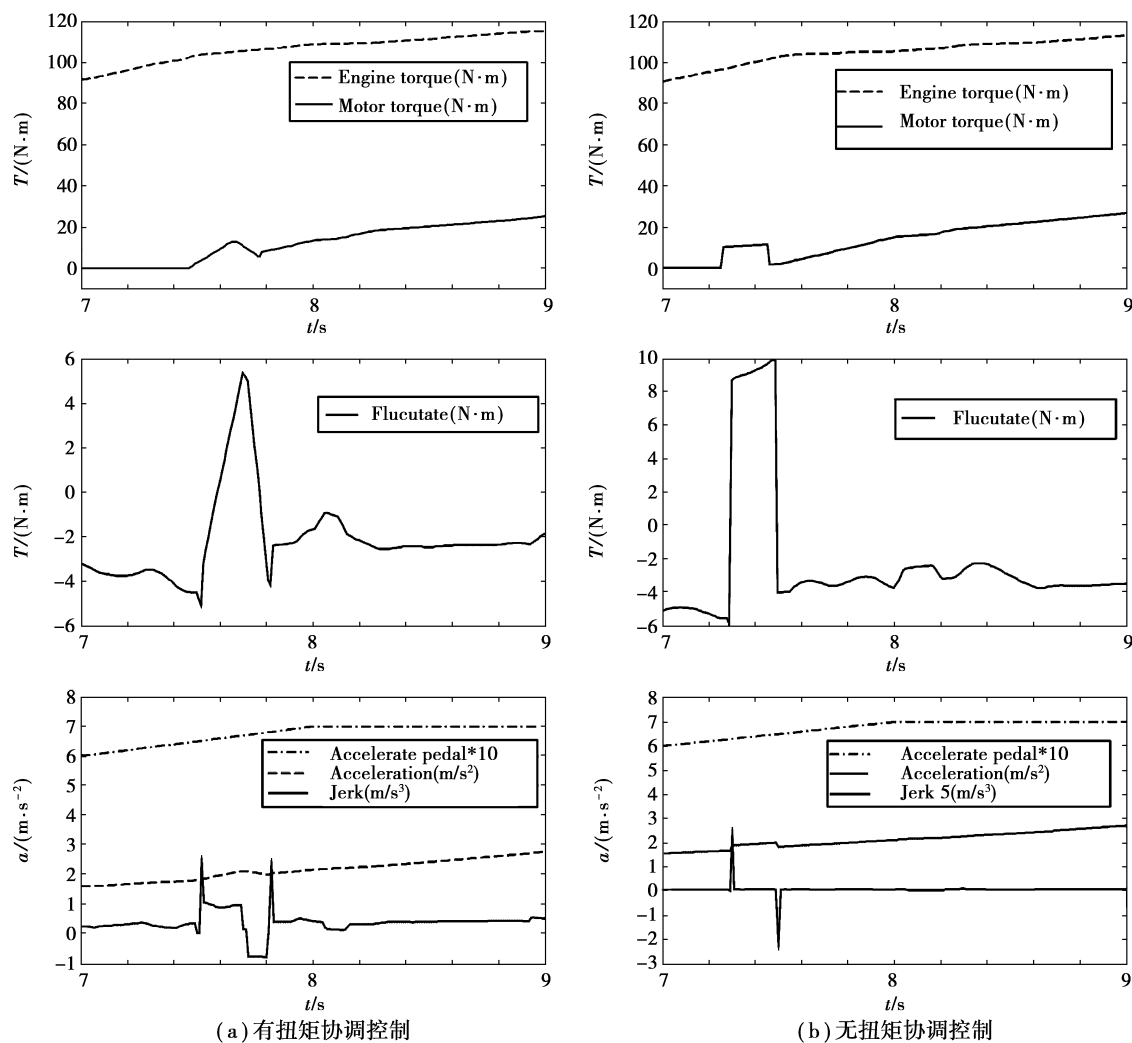


图 7 发动机驱动→功率辅助切换过程

## 4 结 论

笔者以 ISG 型混合动力长安轿车为应用对象,进行了强混合动力汽车驱动模式切换过程中的扭矩协调控制仿真分析,取得了以下成果:

1) 针对所应用的强混合动力系统,对在不同驱动模式下的系统状态及参数变化进行了分析。

2) 在对不同驱动模式之间切换过程分析基础上,为了减少模式切换过程中的系统输出扭矩波动,制定了基于电机辅助的针对不同模式切换过程的扭矩协调控制策略,实现了发动机、ISG 电机和湿式多片离合器的协调控制。

3) 建立了基于扭矩协调控制策略的强混合动力汽车整车仿真模型,进行了典型驱动模式切换过程的仿真与分析。结果表明,本文所提出的模式切换扭矩协调控制策略能够减少模式切换过程中的扭矩波动,达到了模式切换过程中对汽车平顺性的要求。

### 参考文献:

[1] LIU J, PENG H, FILIPI Z. Modeling and Control

Analysis of Toyota Hybrid System[C]// International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Monterey, CA. Jul, 2005; 24-28.

[2] R BECK. Model Predictive Control of a Parallel Hybrid Vehicle Drivetrain[C]// Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005 Seville, Spain, December 12-15, 2005; 2670-2675.

[3] 童毅. 并联式混合动力系统动态协调控制问题的研究[D]. 北京: 北京大学, 2004.

[4] 冀尔聪. 并联混合动力汽车模式切换中的协调控制问题研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.

[5] FAZAL U S, MING L K, JOHN C, et al. Derivation and Experimental Validation of a Power-Split Hybrid Electric Vehicle Model[C]// IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(6): 1731-1747.

[6] PARK J Y, PARK Y K, PARK J H, et al. Optimal power distribution strategy for series-parallel hybrid electric vehicles [J]. Proc IMechE J Automobile Engineering, 2008, 222(Part D): 989-1000.

(下转第 94 页)



- 55(10):1669-1673.
- [15] 乔佩利, 韩风, 张宏芳. 复合禁忌搜索算法求解流水调度问题[J]. 电机与控制学报, 2007, 11(6): 672-675.  
QIAO PEI-LI, HAN FENG, ZHANG HONG-FANG. Hybrid tabu algorithm for flow shop scheduling problems[J]. Electric Machines and Control, 2007, 11(6): 672-675.
- [16] 王正国, 刘振元, 王红卫. 适应性禁忌搜索算法求解带回程的时变速度车辆路径问题[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(9): 1453-1458.  
WANG ZHENG-GUO, LIU ZHEN-YUAN, WANG HONG-WEI. Reactive tabu search algorithm for time-dependent vehicle routing problem [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(9): 1453-1458.
- [17] 竺长安, 齐继阳, 曾议. 基于遗传禁忌混合搜索算法的设备布局研究[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(4): 630-636.  
ZHU CHANG-AN, QI JI-YANG, ZENG YI. Study on machine layout problem based on genetic algorithm and Tabu search hybrid algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(4): 630-636.
- [18] 王万良, 吴启迪. 生产调度智能算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 219.  
WANG WAN-LIANG, WU QI-DI. Intelligent Algorithm and Application for production scheduling [M]. Beijing: science press, 2007: 219.
- [19] 吴秀丽, 孙树栋, 余建军, 等. 多目标柔性作业车间调度优化研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(5): 731-736.  
WU XIU-LI, SUN SHU-DONG, YU JJIAN-JUN, et al. Research on multi-objective optimization for flexible job shop scheduling [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(5): 731-736.

(编辑 张小强)

## (上接第81页)

- [7] PHUCL D H, RAKSINCHAROENSAKL P, NAGAI M, et al. Control Strategy for Hybrid Electric Vehicles Based on Driver Vehicle Following Model[C]// SICE-ICASE International Joint Conference 2006 Otc, 18-21, 2006 in Bexco, Busan, Korea, 2006: 555-560.
- [8] 刘钊, 张超. 新型油电混合动力传动装置运行模式应用分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(9): 1250-1254.  
LIU ZHAO, ZHANG CHAO. Application analysis of run mode of a new type of oil-electric hybrid power transmission unit [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2008, 36(9): 1250-1254.
- [9] 步曦, 杜爱民, 薛锋. 混合动力汽车用行星齿轮机构的理论与仿真分析[J]. 汽车工程, 2006, 28(9): 834-838.  
BU XI, DU AI-MIN, XU FENG. Theoretical study and simulation on planetary gear set for hybrid electric vehicle[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(9): 834-838.
- [10] KOPRUBASI K, WESTERVELT E R, AND RIZZONI G. Toward the systematic design of controllers for smooth hybrid electric vehicle mode changes [C] // Proceedings of the 2007 American Control Conference, 2007, 6(4): 2985-2990.
- [11] ZHANG R J, CHEN Y B. Control of Hybrid Dynamical Systems for Electric Vehicles [J]. Proceedings of the American Control Conference Arlington, 2001(VA June 25-27): 2884-2889.
- [12] 安东尼·所左曼诺夫斯基. 混合动力城市公交车系统设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
- [13] DAVIS R I, LORENZ R D. Engine Torque Ripple Cancellation With an Integrated Starter Alternator in a Hybrid Electric Vehicle: Implementation and Control [C] // IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(6): 1765-1774.
- [14] LEE, YOUNG D. Method for controlling engine torque in hybrid vehicle: US Patents, US20100004831 [P]. 2010-01-07.
- [15] FRANKLIN G F, POWELL J D, NAEINI A E. 动态系统的反馈控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [16] 颜伏伍, 潘庆庆, 杜常清. 并联混合动力汽车从纯电动切换至发动机驱动的控制研究[J]. 汽车技术, 2009(01): 30-34.  
YAN FU-WU, PAN QING-QIGN, DU CHANG-QIGN. Research on Control of State-Switch from Pure Motor Drive to Engine Drive in PHEV[J]. Automotive Technology, 2009(01): 30-34.
- [17] 黄伟. 基于 CVT 的四轮驱动混合动力汽车传动控制策略研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2008.
- [18] SCHOUTEN N J, SALMAN M A, KHEIR N A. Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles[C] // IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 460-468.

(编辑 张小强)