

混合动力汽车牵引力分层控制与硬件在环试验*

赵峰¹ 罗禹贡² 李克强² 张文明¹

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083;

2. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

【摘要】 传统内燃机汽车牵引力控制系统发出的控制命令无法直接给混合动力汽车,需要重新设计混合动力汽车的牵引力控制系统。提出 ISG 型混合动力汽车牵引力分层控制体系,上层控制采用基于动态滑模的整车期望驱动总力矩制定策略;中层控制采用基于低通滤波的发动机目标转矩设计算法和基于模型匹配二自由度控制的转矩动态协调控制策略;底层控制采用基于动态补偿的系统退出策略。对控制系统进行了仿真和硬件在环试验验证,结果表明提出的混合动力汽车牵引力控制方法能够快速、准确地抑制车轮的过度滑转,有效地实现了 ISG 型混合动力汽车牵引力控制功能。

关键词: 混合动力汽车 牵引力控制 分层控制 硬件在环试验

中图分类号: U469.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)04-0008-05

Hierarchical Traction Control for Hybrid Electric Vehicle
and Hardware-in-loop Test

Zhao Feng¹ Luo Yugong² Li Keqiang² Zhang Wenming¹

(1. School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract

Control method for traction control system of conventional internal combustion engine vehicle is not suitable for hybrid electric vehicle. The traction control system of hybrid electric vehicle should be redesigned. Hierarchical traction control system for ISG hybrid electric vehicle was proposed. In the top layer, desired traction total torque calculation strategy was used based on dynamical sliding mode control. In the middle layer, design algorithm of target engine torque based on low pass filtering and dynamic coordinate control strategy based on model matching 2-DOF control were developed. In the bottom layer, exit strategy based on dynamic compensation was proposed. At last, tests of simulation and hardware-in-loop were performed to verify the control system. Results of simulation and test showed that the proposed hierarchical traction control method for ISG hybrid electric vehicle could control the slipped wheels quickly and accurately to realize the traction control function of ISG hybrid electric vehicle effectively.

Key words Hybrid electric vehicle, Traction control, Hierarchical control, Hardware-in-loop test

引言

混合动力汽车具有发动机、电机等多个动力源,其驱动系统的驱动特性与传统内燃机汽车不同。虽然传统内燃机汽车牵引力控制系统的研究已经相对成熟^[1-3],但是无法将传统内燃机汽车牵引力控制

系统的控制命令直接给混合动力汽车,需要针对混合动力汽车多动力源的特点,重新设计其牵引力控制系统。

混合动力汽车牵引力系统的研究目前还比较少。文献[4]设计了混合动力汽车模糊牵引力控制器,但是只调节了电机输出转矩,没有协调控制发动

收稿日期: 2010-10-21 修回日期: 2010-11-05

* 国家自然科学基金资助项目(50805081)和汽车安全与节能国家重点实验室自主科研资助项目(ZZ080183)

作者简介: 赵峰,博士生,主要从事混合动力汽车及车辆动力学控制研究,E-mail: zhaofeng2222@126.com

机系统和电机系统。文献[5]提出了基于PID的电机转矩控制和基于逻辑门限值的发动机节气门控制相结合的混合动力汽车牵引力控制系统,但是该方法的发动机节气门控制目标的制定过于简单,缺乏计算依据,而且控制过程中电机转矩波动较大,系统特性有待改善。

本文针对均一低附着系数路面,提出 ISG 型混合动力汽车牵引力分层控制系统(简称 MHEVTCS)。

1 分层控制系统设计

针对 ISG 型混合动力汽车双动力源的特点,提出了 ISG 型混合动力汽车牵引力分层控制系统,如图 1 所示。

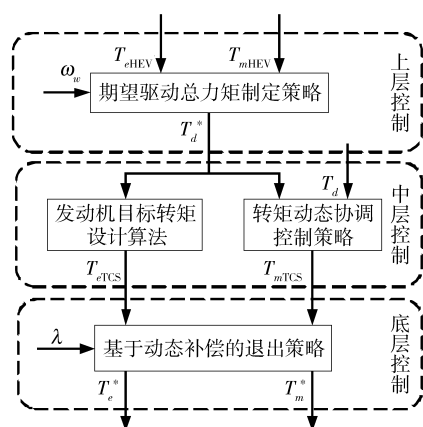


图 1 ISG 型混合动力汽车牵引力分层控制系统原理图

Fig. 1 Schematic of ISG hybrid electric vehicle hierarchical traction control system

分层控制系统位于整车能量管理策略和部件执行系统之间。能量管理策略通过解读驾驶员意图制定期望发动机转矩 T_{eHEV} 和期望电机转矩 T_{mHEV} , 并将其作为 MHEVTCS 系统的输入。MHEVTCS 系统根据既定的控制算法, 将求得的发动机转矩命令 T_e^* 和电机转矩命令 T_m^* 发给由发动机系统和电机系统组成的部件执行系统。

图 1 中, ω_w 为反馈轮速, T_d 为实际发动机转矩 T_e 和实际电机转矩 T_m 经动力耦合后得到的实际驱动总力矩, T_d^* 为整车驱动系统期望驱动总力矩, T_{eTCS} 、 T_{mTCS} 分别为中层控制制定的发动机目标转矩和电机目标转矩, λ 为实际滑转率。

所提控制系统分为 3 层, 上层为期望驱动总力矩计算层, 提出基于动态滑模的整车期望驱动总力矩制定策略, 设计动态滑模控制器, 计算整车驱动系统期望的驱动总力矩; 中层为动态协调控制层, 提出基于低通滤波的发动机目标转矩设计算法和基于模型匹配二自由度控制的转矩动态协调

控制策略, 动态协调发动机系统和电机系统, 准确地跟踪上层控制得到的期望驱动总力矩; 底层为退出策略层, 提出基于动态补偿的系统退出策略, 弥补系统退出时发动机转矩响应特性的不足, 保证系统退出过程中仍能很好地满足驾驶员的驾驶需求。

2 上层期望驱动总力矩制定策略

动态滑模控制具有抗干扰能力强、控制输出抖振弱等优点^[6-7], 因此选用动态滑模控制算法计算整车驱动系统期望驱动总力矩。

以 1/2 车辆模型为受控对象, 可得非线性受控系统为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_{11}x_1^2 + a_{12}f(x_1, x_2) \\ \dot{x}_2 = a_{21}f(x_1, x_2) + a_{22}u \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$x_1 = v_x \quad x_2 = \omega \quad u = T_d^*$$

$$f(x_1, x_2) = \mu(v_x, \omega)$$

$$a_{11} = -\rho AC / (2m) \quad a_{12} = \gamma_f g$$

$$a_{21} = -\gamma_f mgr_\omega / (2J_\omega) \quad a_{22} = i_g i_0 / (2J_\omega)$$

式中

m ——整车质量 v_x ——纵向车速

ρ ——空气密度 A ——车辆的迎风面积

C ——风阻系数 J_ω ——车轮转动惯量

ω ——驱动轮角速度 r_ω ——车轮半径

i_g, i_0 ——传动系统的传动比

γ_f ——车辆静态前轴载荷比例

控制目标是使得 x_2 跟随 nx_1 变化, 其中 $n = 1 / [r_\omega(1 - \lambda_d)]$, λ_d 为目标滑转率。

取动态滑模面和滑模趋近率分别为

$$s = (x_2 - nx_1)' + c(x_2 - nx_1) + du \quad (2)$$

$$\dot{s} = f(s) = -ks - \varepsilon \operatorname{sgn}(s) \quad (3)$$

其中, c, d, k, ε 均为正数。

求得动态滑模控制器输出为

$$\dot{u} = \frac{1}{d} [- (x_2 - nx_1)'' - c(x_2 - nx_1)' + f(s)] \quad (4)$$

3 中层发动机电机动态协调控制算法

3.1 发动机目标转矩设计算法

发动机是 ISG 型混合动力汽车主要的动力源, 调整发动机转矩是解决 ISG 型混合动力汽车驱动轮打滑的根本方法, 但是发动机转矩控制的响应速度远低于电机, 而且易于波动。

针对此问题, 提出了基于低通滤波的发动机目标转矩设计算法, 使发动机响应期望驱动总力矩的低频部分, 使电机动态补偿期望驱动总力矩的高频部分。滤波方法为

$$T_{dc}^*(k) = T_{dc}^*(k-1) + [T_{sc}^*(k) - T_{dc}^*(k-1)] \frac{T_s}{T_f} \left(1 - \frac{T_s}{2T_f}\right) \quad (5)$$

式中 T_{dc}^* ——滤波后的期望驱动总力矩

T_{sc}^* ——滤波前的期望驱动总力矩

T_s ——控制周期 T_f ——滤波时间常数

同时,设计的发动机目标转矩不能大于能量管理策略制定的期望发动机转矩,即不能大于驾驶员的需求。否则,将造成发动机转矩上升,违背了驱动防滑控制降低驱动力矩的根本目的。

综上所述,MHEVTCS系统制定的发动机目标转矩为

$$T_{eTCS} = \min(T_{dc}^*, T_{eHEV}) \quad (6)$$

3.2 基于模型匹配控制的转矩动态协调控制策略

针对转矩动态协调控制策略对快速性、准确性、鲁棒性以及线性输入输出传递特性的要求,提出如图2所示的基于模型匹配二自由度控制的转矩动态协调控制策略。

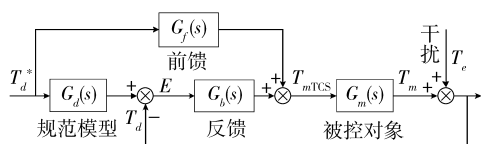


图2 模型匹配二自由度动态协调控制策略

Fig.2 Dynamic coordinate control strategy of model matching 2-DOF control

建立被控对象模型,即电机模型

$$G_m(s) = \frac{1}{\tau_m s + 1} \quad (7)$$

式中 τ_m ——电机系统的滞后时间常数

取规范模型为

$$G_d(s) = \frac{1}{\tau_d s + 1} \quad (8)$$

式中 τ_d ——时间常数

前馈控制器为

$$G_f(s) = \frac{G_d(s)}{G_m(s)} = \frac{\tau_m s + 1}{\tau_d s + 1} \quad (9)$$

反馈控制器采用PID控制器。

4 底层基于动态补偿的系统退出策略

针对系统退出过程中发动机响应特性的不足,提出了如图3所示的基于动态补偿的系统退出策略。设计的动态补偿算法弥补了发动机转矩上升时响应速度的不足,使得退出过程中实际驱动总力矩仍能很好地跟随期望驱动总力矩。

图3中 λ_{out} 为滑率退出门限, t 为滑率低于退出门限的计时时间, t_{out} 为时间门限, δ_r 为发动机

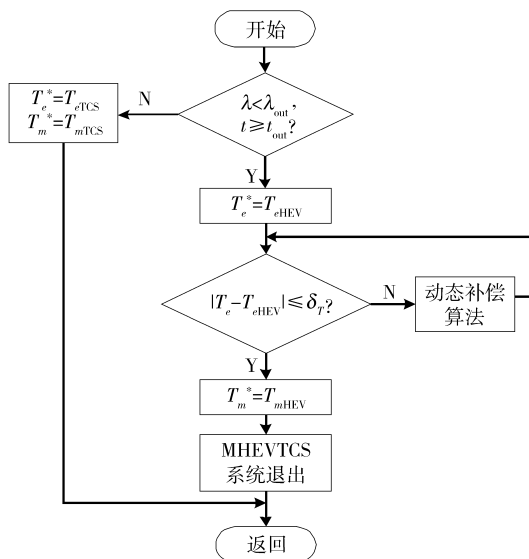


图3 基于动态补偿的系统退出策略

Fig.3 System exit strategy based on dynamic compensation

转矩误差门限。

设计的动态补偿算法为

$$\begin{cases} T_e(k+1) = \frac{T_{dc}(k) - T_{eact}(k)}{t_n - k\delta} \delta + T_e(k) \\ T_m(k+1) = \frac{T_{dm}(k) - T_{de}(k) + T_{eact}(k)}{t_n - k\delta} \delta + T_m(k) \end{cases} \quad (10)$$

式中 t_n ——总过渡时间

δ ——单位时间步长

$T_{dc}(k)$ ——切换后发动机目标转矩

$T_e(k)$ ——动态过程中发动机转矩

$T_{eact}(k)$ ——动态过程中发动机实际转矩

$T_{dm}(k)$ ——切换后电机目标转矩

$T_m(k)$ ——动态过程中电机转矩

5 仿真验证

在搭建的仿真试验平台上,分别针对以下两种工况进行仿真分析:均一路面,附着系数0.1、I挡、100%加速踏板起步加速;均一路面,附着系数0.1、II挡、初始车速5 m/s,以100%加速踏板加速。仿真结果如图4、5所示。

图4表明无MHEVTCS控制时,驱动轮轮速在0.16 s左右就达到了16 m/s,打滑现象严重;有MHEVTCS控制时,驱动轮轮速在0.7 s左右被控制在目标值附近,合理地实现了对打滑车轮的控制;MHEVTCS系统起作用后,实际驱动总力矩和期望驱动总力矩的差值控制在 $\pm 8 \text{ N}\cdot\text{m}$ 以内。

从图5可以看出,无MHEVTCS控制时,驱动轮轮速在0.5 s左右就已经接近30 m/s,驱动轮发生过度滑转;有MHEVTCS控制时,驱动轮轮速在0.5 s

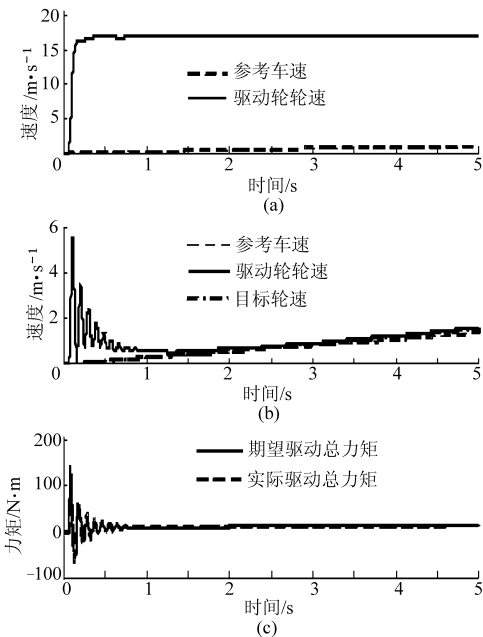


图 4 工况 1 仿真结果

Fig.4 Simulation results of case 1

- (a) 无 MHEVTCS 控制速度曲线
- (b) 有 MHEVTCS 控制速度曲线
- (c) 有 MHEVTCS 控制力矩曲线

左右被控制在目标值附近,有效地抑制了驱动轮打滑;MHEVTCS 系统起作用后,实际驱动总力矩和期望驱动总力矩的差值控制在 $\pm 7\text{N}\cdot\text{m}$ 以内。

6 硬件在环试验验证

为了更加直观、真实地验证提出的 ISG 型混合动力汽车牵引力分层控制方法,搭建了如图 6 所示的混合动力汽车牵引力控制硬件在环仿真试验平台。

试验平台主要包括:

(1) 驱动部分:驱动电机及其控制器,用于产生作用在车轮端的驱动力矩。

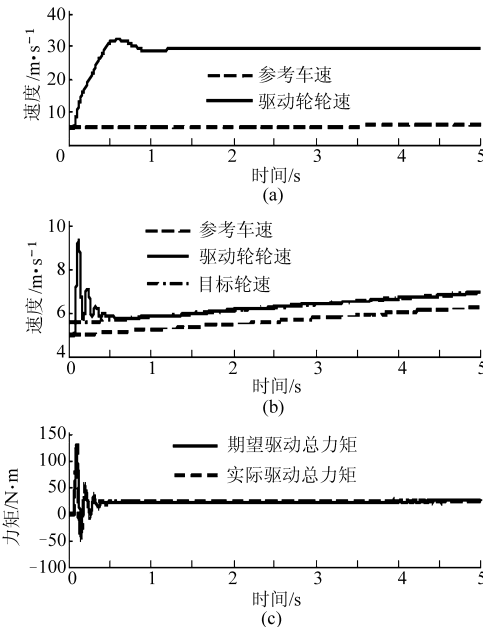


图 5 工况 2 仿真结果

Fig.5 Simulation results of case 2

- (a) 无 MHEVTCS 控制速度曲线
- (b) 有 MHEVTCS 控制速度曲线
- (c) 有 MHEVTCS 控制力矩曲线

(2) 车轮模拟部分:飞轮及传动轴等,其作用是模拟车轮的转动惯量。

(3) 道路模拟部分:动态测功机及其控制器等,其作用是模拟车辆行驶时路面对车轮的纵向作用力。

(4) 信号检测与调理部分:转矩与转速传感器、扭矩仪以及相应的处理电路等,其作用是检测车辆当前状态,并将状态值实时反馈。

(5) 控制与监测部分:AutoBox、计算机等,其作用是实现既定的控制策略,监测并记录试验中的各项数据。

在上述试验平台中,计算机通过 TCP/IP 协议与 AutoBox 进行信息传递。AutoBox 根据当前工况

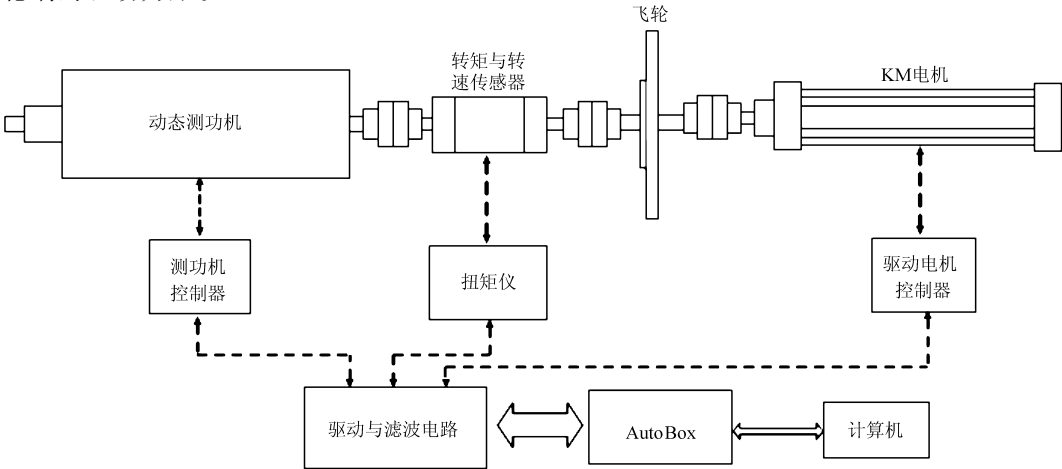


图 6 硬件在环试验平台原理图

Fig.6 Schematic of hardware-in-loop test platform

实时控制电机系统和测功机系统,产生作用在驱动轮端的驱动力矩和路面对驱动轮的纵向作用力,并将其分别作用在飞轮两端。飞轮在电机和测功机的联合作用下,转速相应发生变化,反映牵引力控制系统对车轮的动态控制效果。

试验平台用飞轮等实际部件代替了仿真试验平台中的仿真模型,可以得到更直观、更接近实际车辆的控制结果。

通过搭建的试验平台,对工况 1 进行了试验验证,结果如图 7 所示。

从图 7 中可以得出,无 MHEVTCS 控制时,驱动轮轮速在 0.4 s 左右就已达到 15 m/s,驱动轮严重打滑,试验 6 s 后车速仅为 1.6 m/s;有 MHEVTCS 控制时,驱动轮轮速在 1 s 左右被控制在目标轮速附近,MHEVTCS 控制系统有效地抑制了驱动轮的过度滑转,合理地实现了混合动力汽车牵引力控制功能,试验 6 s 后车速达到 2.05 m/s,车辆加速性能提高 28%。

7 结论

(1) 提出的 ISG 型混合动力汽车牵引力分层控

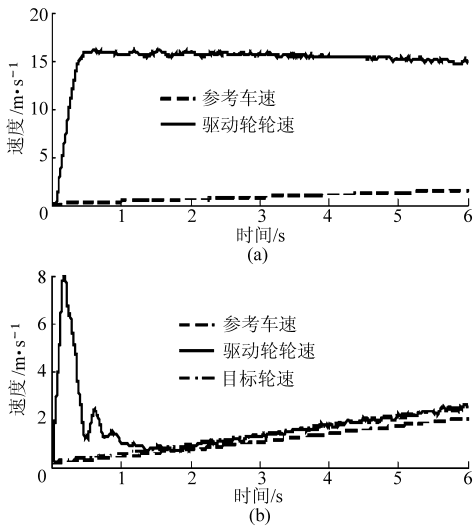


图 7 工况 1 硬件在环试验结果
Fig. 7 Results of hardware-in-loop test of case 1
(a) 无 MHEVTCS 控制 (b) 有 MHEVTCS 控制

制系统快速、准确地实现了对打滑车轮的控制,提高了车辆的加速性能。

(2) 提出的 ISG 型混合动力汽车牵引力分层控制系有效地实现了混合动力汽车牵引力控制功能。

参 考 文 献

- 1 Kazushi Hosomi, Akira Nagae, Shinsuke Yamamoto. Development of active-traction control system [C]. SAE Paper 2000-01-1636, 2000.
- 2 Wolfgang Maisch, Wolf Dieter Jonner, Robert Mergenthaler, et al. ABS5 and ASR5: the new ABS/ASR family to optimize directional stability and traction[C]. SAE Paper 930505, 1993.
- 3 Qingyuan Li, Keith W Beyer, Quan Zheng. A model-based brake pressure estimation strategy for traction control system[C]. SAE Paper 2001-01-0595, 2001.
- 4 Jianlong Zhang, Chengliang Yin, Jianwu Zhang. Use of fuzzy controller for hybrid traction control system in hybrid electric vehicles[C] // Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2006: 1 351 ~ 1 356.
- 5 Liao Chenglin, Li Shoubo, Chen Shanglou, et al. Modeling and simulation of traction control of hybrid electric vehicle[C] // Proceedings of the 2009 International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA, 2009: 3 252 ~ 3 256.
- 6 Pieper J K. First order dynamic sliding mode control[C] // Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision & Control, 1998: 2 415 ~ 2 420.
- 7 Koshkouei A J, Burnham K J, Zinober A S I. Dynamic sliding mode control design[J]. IEEE Proceedings, Control Theory Application, 2005, 152(4):392 ~ 396.