

文章编号: 1006-2467(2008)06-0882-05

基于双离合器的单轴并联式混合动力系统仿真

王家明, 郭晋晟, 冒晓建, 敖国强, 杨林, 卓斌
(上海交通大学汽车电子技术研究所, 上海 200240)

摘要: 为了改善单轴并联式 (ISG) 混合动力系统能量回收效率较低等不足, 提出了一套新型 ISG 混合动力总成方案, 该方案取消了变速器, 安装了 2 个自动离合器, 并采用较大功率的电动机。根据汽车动力学理论计算了车辆在中国典型城市等多种工况下的需求动力, 设计了新方案动力总成的基本参数; 分别建立了新方案与 ISG 混合动力系统的仿真模型。仿真结果表明, 新方案的动力性和经济性均比 ISG 混合动力系统有着不同程度的提高。

关键词: 混合动力汽车; 单轴并联式; 动力总成; 仿真

中图分类号: U 462 **文献标识码:** A

Simulation of a Single-axle Parallel Hybrid Electronic System with Two-clutches

WANG Jiameing, GUO Jinsheng, MAO Xiaojian, AO Guoqiang, YANG Lin, ZHUO Bin
(Institute of Automotive Electronic Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A new single-axle parallel hybrid electronic system was proposed, which installs two automatic clutches and a high power motor, and the transmission is eliminated. The structural differences between this system and the integrated starter and generator (ISG) hybrid electronic vehicle were analyzed. The new system's powertrain parameters were designed effectively by statistical analysis of vehicle's power requirements during the Chinese Typical Civic Drive Cycle, Manhattan Bus Drive Cycle, and UK Bus Drive Cycle. Simulation models and control strategies of the two systems were also established. The simulation results show that the motility and fuel economy of the new system are both improved effectively compared with the ISG hybrid electronic vehicle.

Key words: hybrid electronic vehicle (HEV); integrated starter and generator (ISG); powertrain system; simulation

由石油资源枯竭引起的能源危机和汽车尾气排放带来的环境污染问题是制约汽车工业发展的两个主要因素。混合动力汽车具有油耗低、污染小等优势, 因此成为了当今汽车业发展的重要方向。

城市客车的运行特点是起动、制动频繁, 怠速时间长, 平均行驶速度较低等。传统的单轴并联式

(ISG) 混合动力客车虽然在一定程度上提高了燃油经济性, 却有着能量回收效率较低, 动力性一般等不足^[1]。综合考虑城市客车的运行特点以及现有 ISG 混合动力汽车 (HEV) 的不足, 本文提出了一套新型并联式 HEV 方案。

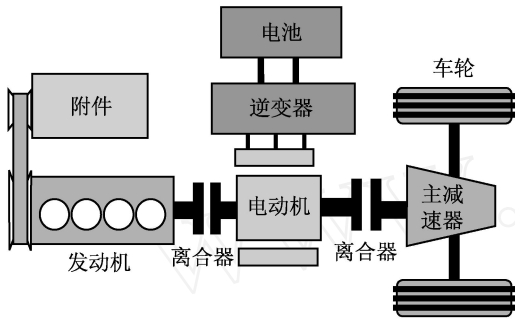
收稿日期: 2007-07-16

作者简介: 王家明 (1982-), 男, 江苏南京市人, 硕士生, 主要研究方向为混合动力汽车系统仿真及优化设计。

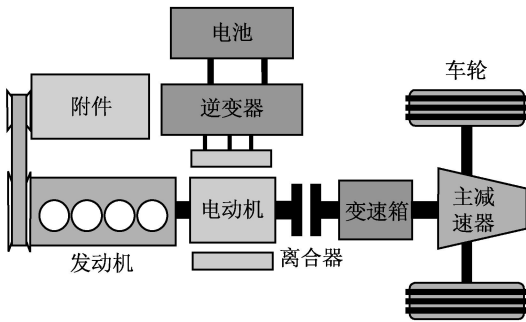
冒晓建 (联系人), 男, 副教授, 电话 (Tel.): 13817909869; E-mail: xjmao@sjtu.edu.cn.

1 动力系统结构及特点

新型并联式混合动力总成方案的结构为:发动机通过自动离合器与电机连接,电动机再经过一个自动离合器直接与主减速器相连,然后动力由半轴传递到车轮上.该方案的主要结构特点是取消了传统的变速器装置,并在传动系统中安装了 2 个自动离合器,新方案与 ISG 混合动力总成的结构如图 1 所示.



(a) 新型并联式混合动力总成结构



(b) ISG 混合动力总成结构

图 1 两种混合动力总成结构

Fig. 1 Structure of two HEV

由图可见,新方案主要具有以下优点:

(1) 通过控制自动离合器可以避免车辆在纯电动模式运行时拖动发动机运转,从而减少了能量损失;新方案可以取消发动机的怠速工况,并控制发动机工作在高效率区域,从而有效提高车辆的燃油经济性.

(2) 选择较大功率的电动机,采用电动机加速助力和低速时电动机单独驱动等运行模式,增强了车辆动力性,并且实现了低速时污染物的零排放.

(3) 通过控制电动机与发动机的转速,减小离合器主动片与从动片之间的极小转速滑差,从而减少了离合器的磨损,延长其使用寿命.

(4) 实现了无级变速的功能,因此,车辆的平顺性好,减轻了司机的驾驶疲劳^[2].

2 动力总成参数设计

汽车行驶方程式为

$$F_t = F_f + F_i + F_w + F_j \quad (1)$$

式中: F_t 为车辆的驱动力; F_f 为滚阻力; F_i 为坡阻力; F_w 为风阻力; F_j 为加速阻力. 即

$$F_t = m g f_r \cos \alpha + \frac{f_a A}{21.15} u_a^2 + m g \sin \alpha + m \frac{du}{dt} \quad (2)$$

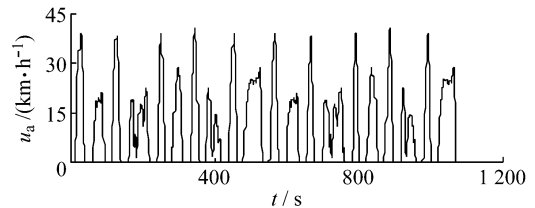
式中: m 为汽车质量; f_r 为滚动阻力系数; α 为道路坡度; f_a 为空气阻力系数; A 为车辆挡风面积; u_a 为车辆行驶速度; $\frac{du}{dt}$ 为转动质量换算系数.

车辆需求转矩与驱动力之间的关系为

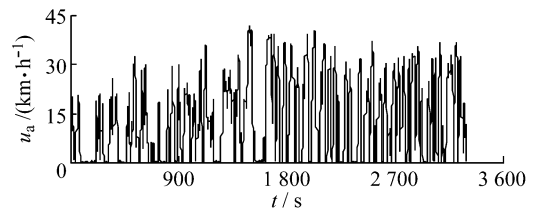
$$F_t = (\eta T_{tq} i_g i_0) / r \quad (3)$$

式中: η 为传动系的机械效率; T_{tq} 为车辆需求转矩; i_0 为主减速器传动比; r 为车轮半径; i_g 为变速器传动比,由于新方案取消了变速器,故 $i_g = 1$.

根据汽车动力学方程,可以算出车辆在中国典型城市工况,曼哈顿城市、英国城市工况(见图 2) 下车速与需求动力之间的关系,如图 3 所示.



(a) 曼哈顿城市



(b) 英国城市

图 2 典型城市工况

Fig. 2 Typical vehicle speed traces

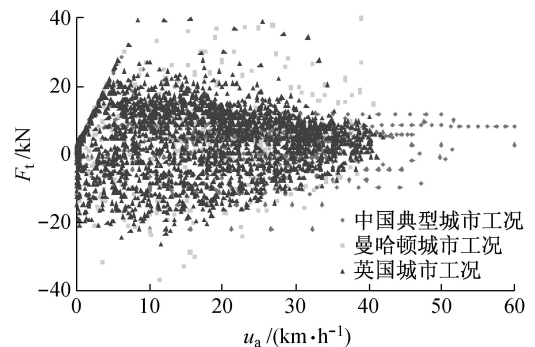


图 3 车辆在各工况下的动力需求

Fig. 3 The relationship of vehicle's speed and power requirement in each drive cycle

由图可见,在中国典型城市工况和英国城市工况中,随着汽车行驶速度的提高,车辆需求动力总体

呈减小趋势;然而曼哈顿城市工况中仍有一小部分运行点分布在车速较高且动力需求较大的区域,这主要是由于该工况的某些工况点对车辆的加速度要求较高的缘故。

2.1 发动机选型

由于小功率发动机具有油耗低等优点,故在满足汽车动力性的前提下,应该选择较小功率的发动机;另外,新方案取消了变速器装置,因此,发动机的转速变化范围较大.为了满足车辆的最高车速性能指标($> 80 \text{ km/h}$),需选择较高转速的发动机.因此,本文初步选取 SOFIM8140.43S 电控柴油机,该发动机怠速转速 800 r/min ,起动转速 650 r/min ,额定功率 $97 \text{ kW}/3\ 600 \text{ r/min}$,最大扭矩 $297 \text{ N}\cdot\text{m}/2\ 160 \text{ r/min}$.

2.2 主减速比设计

发动机转速与车辆行驶速度之间的关系为

$$u_a = 0.377 \frac{r \cdot n}{i_0} \quad (4)$$

式中, n 为发动机转速.

根据设计指标,车辆最高行驶速度须大于 80 km/h ,此时发动机运行在最高转速附近.另外,由于车辆在低速时由电动机单独驱动,为了保证电动机驱动到发动机驱动的过渡顺畅,过渡时电动机转速必须高于发动机起动转速.结合选定的 SOFIM 发动机特性可以算出, $i_0 = 6.37 \sim 8.82$.

由式(3)可知,当车辆需求动力保持不变时,随着主减速比的不断增大,车辆需求转矩会不断减小,因此,为了减小发动机和电机的功率,需选择较大的 i_0 .另外,综合考虑驾驶平顺性等因素,本文初步选取 $i_0 = 8$.

2.3 电动机参数设计

根据汽车动力学方程以及车辆在中国典型城市等工况下的动力需求关系,可以算出各工况下发动机、电动机转速与需求转矩间的关系,如图 4 所示.

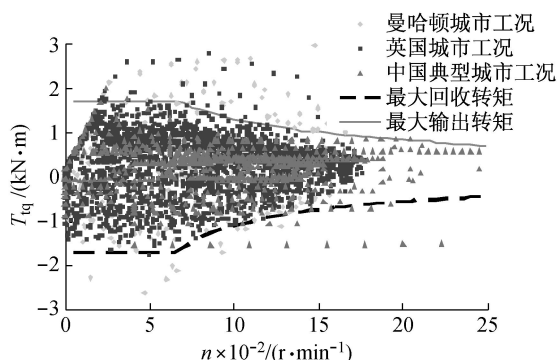


图 4 车辆转矩特性

Fig. 4 Torque features of the vehicle

为了达到车辆的动力性指标,发动机与电动机所提供的动力必须满足各工况下大部分运行点的动力需求.本文采用了不同功率的电动机,考察随着电动机最大扭矩和拐点转速变化时,各工况运行点的覆盖情况,如图 5 所示.由图可知,当电动机最大扭矩为 $1.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 时,该匹配方案包含了 3 种循环工况中 95% 以上的运行点,随着电动机转矩 T_m 的进一步增大,该覆盖率 p 的上升趋势明显减缓.因此,本文初步选取最大扭矩 $1.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$,拐点在 650 r/min 的交流感应电动机,该电动机额定功率为 115 kW .将发动机外特性和电动机特性叠加,可以得到车辆的转矩特性,如图 4 所示.

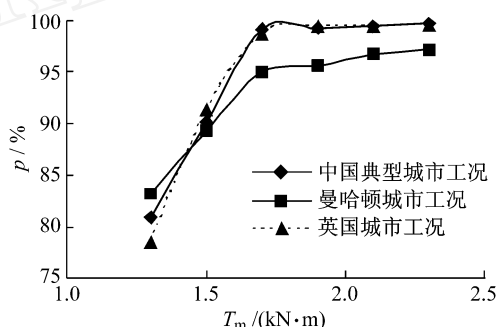


图 5 电动机转矩变化时,车辆在各工况下动力点覆盖率
Fig. 5 Percentage of coverage as motor's power changes

2.4 电池参数设计

电池电量 (SOC) 定义为

$$\text{SOC} = \frac{E_s}{E_{\text{cap}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: E_s 为电池剩余电量; E_{cap} 为电池容量.

根据电池的充放电电流特性和城市客车的助力回馈功率要求,本系统初步选择镍氢电池作为车辆电源, $E_{\text{cap}} = 40 \text{ A}\cdot\text{h}$,总电压 312 V .

3 系统仿真

3.1 仿真条件和基本控制策略

本文运用后向仿真软件 ADVISOR 分别建立 2 套混合动力总成的仿真模型,从而比较分析 2 套方案的动力性和经济性,考察车辆电池 SOC、电动机以及发动机输出转矩的变化规律.仿真中,混合动力客车的基本参数^[3]为: $m = 15\ 600 \text{ kg}$, $A = 7.0 \text{ m}^2$,车辆长度 $L = 11.2 \text{ m}$, $f_a = 0.5$, $f_r = 0.014$.

仿真中,ISG 混合动力客车的基本参数为:发动机额定功率 $135 \text{ kW}/2\ 200 \text{ r/min}$,最大扭矩 $600 \text{ (N}\cdot\text{m)}/1\ 450 \text{ r/min}$,电动机额定功率 $50 \text{ kW}/2\ 200 \text{ r/min}$,镍氢电池容量 $40 \text{ A}\cdot\text{h}$,总电压 312 V , $i_g = 6.93, 4.27, 2.63, 1.623, 1$, $i_0 = 4.94$.

电池 SOC 是否平衡是衡量混合动力汽车性能

的重要指标,本方案对不同电池 SOC 的控制策略为:当电池电量充足时,发动机运行在最佳经济区,电动机正常助力或单独驱动汽车;当电池电量不足时,发动机将发出比车辆实际需求更多的动力,并将多余的能量带动电动机发电,从而给电动机充电,维

持电池 SOC 平衡,控制策略如图 6 所示^[4].图中: T_e 为发动机输出转矩; T_{ew} 为发动机实际输出转矩; $T_{e,min}$ 为发动机最小输出转矩; $T_{e,max}$ 为发动机最大输出转矩.

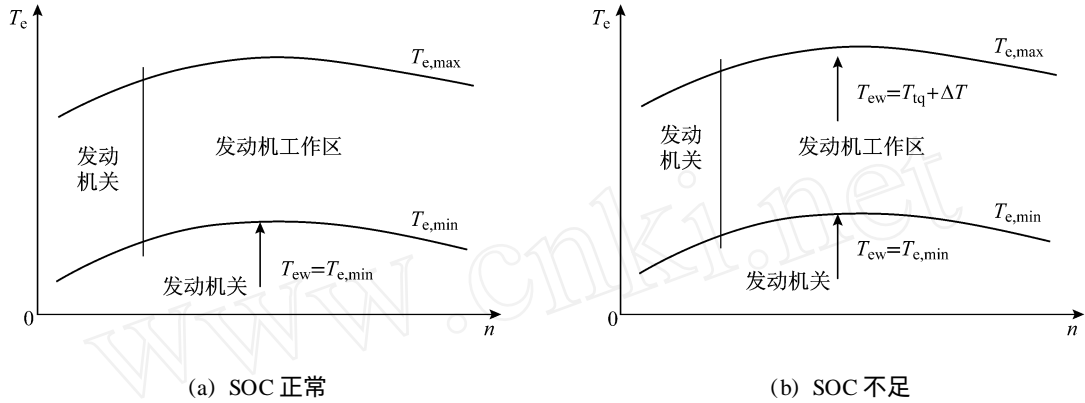


图 6 不同电池电量时的控制策略

Fig. 6 Vehicle's control strategy when SOC changes

3.2 结果分析

新型并联式混合动力总成与 ISG 混合动力总成在中国典型城市工况下的动力性,电池 SOC 以及电机、发动机输出转矩的变化规律如图 7 所示.由图可见,两套方案的实际车速均达到需求车速要求,因

此可以满足中国典型城市工况的动力要求,并且电池 SOC 均可以较好地保持平衡.另外,由于新方案中采用了较大功率的电机和较小功率的发动机混合驱动的动力模式,因而电机提供了较大的助力转矩,并回收了更多的制动能量.

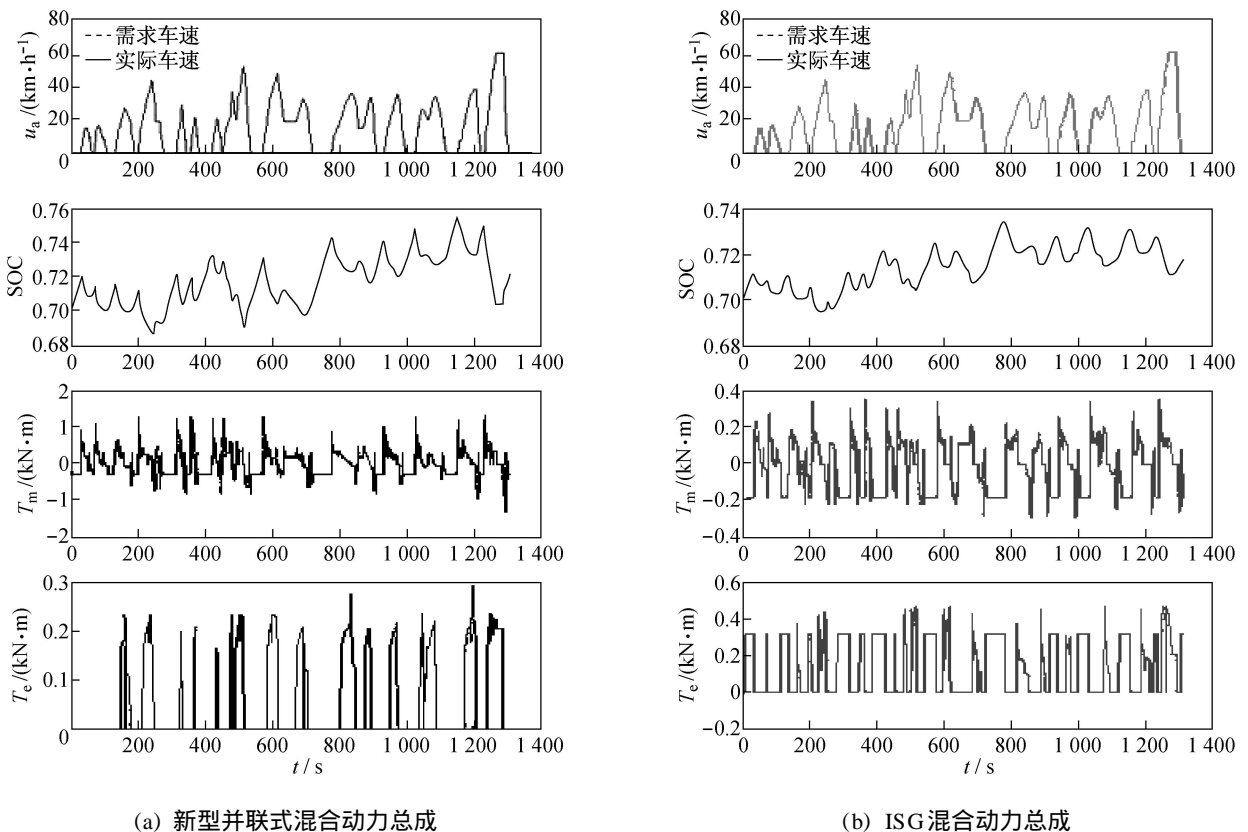


图 7 两种混合动力汽车仿真结果分析

Fig. 7 Simulation results of the two HEV

新方案与 ISG 混合动力方案在中国典型城市工况下的动力性和经济性仿真结果如表 1 所示。由表可见,新方案在动力性、经济性上均比 ISG 混合动力方案有不同程度的提高,主要原因为:

(1) 采用了大功率电动机,因此,车辆在低速纯电动阶段以及加速助力阶段将具有更好的动力性。

(2) 在车辆纯电动、制动、以及停车充电等运行模式下均可以通过控制自动离合器从而脱开电动机与发动机的连接,避免了发动机被拖转,减小了能量损失,并可以实现高效的制动能量回馈,提高了燃油经济性。另外,选用了较小功率的发动机,从而有效地降低油耗^[5]。

表 1 新型混合动力汽车与 ISG 动力性、经济性比较

Tab. 1 Comparison of the motility and fuel economy of the new PHEV and the ISG HEV

系统	油耗/L	加速时间/s			最大车速/ (km·h ⁻¹)
		0~20 km/h	25~70 km/h	0~80 km/h	
ISG	28.1	9.0	26.4	43.7	90.9
新系统	23.6	4.7	23.8	39.1	80.6
改善率/%	16.0	47.9	9.85	10.5	-11.3

4 结 语

本文提出了一套单轴并联式混合动力总成方案,该方案取消了变速器,并安装了 2 个自动离合器,选用了大功率电动机和较小功率发动机的组合方案,因此该方案在降低油耗的同时,增强了车辆的动力性能。通过建立 2 套混合动力系统的仿真模型,

对新方案与 ISG 混合动力总成的动力性和经济性进行了仿真计算。结果表明,新型并联式混合动力总成在动力性和经济性上比 ISG 混合动力客车有着不同程度的提高。

参考文献:

- [1] 浦金欢,殷承良,张建武. 并联型混合动力汽车燃油经济性最优控制[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(6): 947-957.
PU Jin-huan, YIN Chen-liang, ZHANG Jian-wu. Fuel optimal control of parallel hybrid electric vehicles [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, 40(6): 947-957.
- [2] Tyrus J M, Long R M, Kramskaya M, et al. Hybrid electric sport utility vehicles [J]. *IEEE Trans Vehicular Technology*, 2004, 53(5): 1607-1622.
- [3] Albert I J, Kahrmanovic E, Emadi A. Diesel sport utility vehicles with hybrid electric drive trains [J]. *IEEE Trans Vehicular Technology*, 2004, 53(4): 1247-1256.
- [4] 敖国强,黄伟山,龚秋明,等. 单轴并联式混合动力汽车性能仿真[J]. 车用发动机, 2006, 161(1): 29-32.
AO Guo-qiang, HUANG Wei-shan, GONG Qiu-ming, et al. Simulation research of single-axle parallel hybrid vehicle [J]. *Vehicle Engine*, 2006, 161(1): 29-32.
- [5] Fish S, Savoie T B. Simulation-based optimal sizing of hybrid electric vehicle components for specific combat missions [J]. *IEEE Trans Magnetics*, 2001, 37(1): 485-488.

下期发表论文摘要预报

一种汽轮机再热主汽阀门机构的动力学建模与虚拟样机仿真研究

时 兵, 鲍劲松, 金 焯, 胡小峰

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 针对汽轮机再热主汽阀门机构运行卡涩的典型问题, 为描述阀轴与衬套的实际运动接触状态, 考虑阀轴与衬套的装配同轴度误差, 建立了径向轴承铰和阀门机构的动力学模型, 并在不考虑阀轴与衬套的装配同轴度误差情况下, 利用 COSMOS 动力学分析软件建立了阀门机构的功能化虚拟样机。通过理论分析和虚拟样机仿真, 研究了装配同轴度误差对阀门机构动力学特性的影响。研究表明: 装配同轴度误差是影响汽轮机再热主汽阀门机构动态行为的重要因素, 不同的误差值对约束反力和摩擦阻力矩的变化影响显著。