

并联混合动力汽车动力系统匹配与控制研究*

伊海霞¹ 杨正林¹ 蒋元广² 吴海啸²

(¹南京航空航天大学 能源与动力学院,南京 210016)(²南京汽车集团有限公司 汽车工程研究院,南京 210028)

Research of the application and control of parallel hybrid powertrain system

YI Hai-xia¹, YANG Zheng-lin¹, JIANG Yuan-guang², WU Hai-xiao²

(¹Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(²Nanjing Automobile Group Corporation, Nanjing 210028, China)

【摘要】针对轻型商用车,进行了发动机轴动力组合式并联轻度混合动力驱动系统的开发,对动力系统关键零部件进行参数匹配和设计。设计了整车控制策略并利用 dSPACE/MicroAutobox 将经过 MATLAB/Simulink 离线仿真验证的混合动力汽车控制系统模型生成快速控制原型,并在实车状况下对控制系统性能进行了试验。试验表明所设计的控制系统性能满足设计要求,整车动力性及经济性有大幅提高。

关键词:混合动力;并联;匹配;控制

【Abstract】 A parallel hybrid powertrain system is designed based on a light commercial vehicle. The application of the key components of power system is researched. The control strategy is designed, and rapid control prototype is created to test the performance of control strategy. The test results show that the performance of designed control system meets the design requirements, and the vehicle has a substantial increase in economic and power performance.

Key words: Hybrid; Parallel; Application; Control

中图分类号:TH16,U469.7 文献标识码:A

1 前言

目前,国内混合动力汽车的开发主要集中在大客车与乘用车,而对于中小型客车、城市物流载货车等城市轻型商用车的混合动力研发还基本处于空白。选择轻型商用车进行混合动力开发,是企业实现自主创新的一个机遇。与乘用车相比,轻型商用车的布置空间较大,对于混合动力系统关键零部件的安装空间约束较小,动力部件选型较为灵活,可更多的兼顾燃油经济性^[1]。

文章介绍了在某轻型商用车基础上开发的轻度混合动力汽车的动力系统设计以及关键零部件的选型匹配,在此基础上进行了控制系统的开发,并对控制系统的性能进行了实车试验。

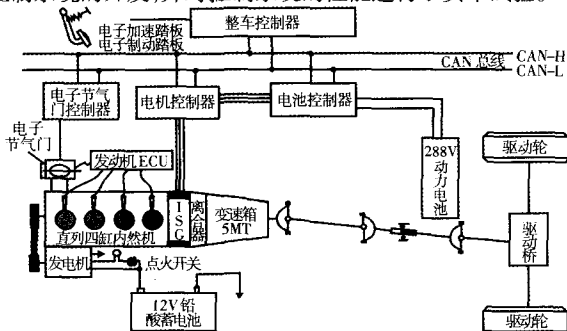


图1 动力系统结构简图

2 动力系统结构设计

本项目目标为混合动力功能样车的研制,在某轻型商用车的平台上进行混合动力系统的开发。考虑技术可行性并尽可能的节约成本,在充分利用现有资源,并对原型车改造较小的基础上,项

目采用 ISG 型轻度混合动力系统结构,其动力驱动系统结构简图,如图1所示。

3 关键部件参数匹配与设计

3.1 车辆性能指标要求

所选取的原型车整车参数,如表1所示。

表1 原型车整车参数

满载总质量(kg)	空气阻力系数	迎风面积(m ²)	滚动半径(m)	滚动阻力系数
3550	0.5	4.325	0.34	0.011

按照项目目标,混合动力样车性能不低于原型车动力性能指标,并具有一定得纯电动续驶里程,样车开发初确定主要性能指标如下:(1)巡航车速:80km/h;(2)最大车速: $V_{\max} \geq 120\text{km/h}$;(3)最大爬坡度:30%,爬坡车速:10km/h;(4)0~100km/h的加速时间: $t < 40\text{s}$;(5)纯电动匀速30km/h行驶1.5km。

3.2 关键部件参数匹配

3.2.1 发动机

项目动力系统采用 ISG 型轻度混合动力驱动系统,为电辅助型混合动力系统。发动机主要提供车辆平均行驶功率,由电机提供峰值功率,因此发动机功率的选择主要依据是车辆在经济巡航车速行驶时使发动机工作在最佳工作区间。

发动机工作于最佳工作区间时应该满足以下动力性要求:

(1)发动机单独驱动能达到最大巡航车速80km/h;(2)发动机单独驱动车辆能在车速为60km/h时爬坡度为6%。

$$P_{\text{emax}} = \frac{1}{3600\eta_t} \left[mgfu_{\text{emax}} + \frac{C_D A_D}{21.15} u_{\text{emax}}^3 \right] = 25.6\text{kW} \quad (1)$$

$$P_{\max} = \frac{1}{3600\eta_t} \left[mgf \cos(\alpha) u_0 + \frac{C_D A_D^3}{21.15} + mg \sin(\alpha) u_0 \right] = 524 \text{ kW} \quad (2)$$

式中: u_{\max} —最大巡航车速; u_0 —发动机单独驱动经济车速; α —发动机单独驱动最小坡度; η_t —整车动力传动系统效率。

计算得到车辆需求功率, 考虑空调等附件的功率为 5 kW 和 10% 的充电功率裕量^[9], 则发动机需求功率为 63 kW。为节约成本, 利用现有资源, 选择 MG1.4L 汽油机。该发动机的主要参数, 如表 2 所示。

表 2 MG1.4L 汽油机技术参数

最大功率	最大扭矩	最大转速	排量
73kW(5500r/min)	123N·m(4000r/min)	6500r/min	1.4L

3.2.2 电动机

(1) 电动机额定转速和最高转速选择

分析电机特性, 当电机功率一定时, 随着电机最高转速增加, 电机启动转矩减小, 当电机最高转速超过 16000rpm 后, 转矩降低幅度变小。由于电机最高转速过高, 会导致电机制造成本增加, 并使转矩合成器的尺寸增大, 因此电机最高转速不宜过高。一般可选取 $n_{\max} = (9000 \sim 13000) \text{ rpm}$, 这里选取最高转速为 10000rpm。

电动机最高转速与基速之比为 k 。当转矩合成器速比一定时, 随着 k 增加, 所需的电机启动功率下降, 因此应该选取较大的 k 。但是随着 k 的增大, 电机启动转矩增大, 虽然这有利于汽车原地起步加速和爬坡, 但对电机支承的要求提高, 高转矩也需要较大的电机电力电子设备, 增加了功率变换器硅钢片的尺寸和损耗, 也增大了驱动轴转矩和传动部件的应力, 所以 k 不宜过大, 通常 k 的取值范围为在 (4~6) 之间, 这里选取 $k=4$, 则电机的基速为 2500rpm。

(2) 电动机功率选择

电动机的最大功率主要依据为车辆行驶所需求的峰值功率, 即发动机最大功率 P_{\max} 加上电动机最大功率 P_{\max} 应满足 (1) 混合动力时最高车速需求功率 $P_{\max1}$; (2) 最大爬坡度时需求功率 $P_{\max2}$ 。

$$P_{\max1} = \frac{1}{3600\eta_t} \left[mgfu_{\max} + \frac{C_D A_D^3}{21.15} - u_{\max}^3 \right] = 84.811 \text{ kW} \quad (3)$$

$$P_{\max2} = \frac{1}{3600\eta_t} \left[mgf \cos(\beta) u + \frac{C_D A_D^3}{21.15} u^3 + mg \sin(\beta) u \right] = 32.071 \text{ kW} \quad (4)$$

式中: $P_{\max1}$ —最高车速需求功率; η_t —整车动力传动系统效率; u_{\max} —联合驱动最高车速; u —爬坡车速; β —最大爬坡度。

由发动机选择得到发动机峰值功率 P_{\max} 为 73 kW, 则可计算电动机最大功率 $P_{\max} \geq 84.811 - 70 = 14.811 \text{ kW}$ 。选择电机额定功率为 15 kW, 最大功率 P_{\max} 为 20 kW。

项目目标中对功能样车有纯电动要求, 则电机功率需要满足纯电动以 30 km/h 车速行驶需求功率 (考虑 2% 坡度):

$$P_n = \frac{1}{3600\eta_t} (mgf u_{\text{elec}} f \cos \theta + \frac{C_D A_D^3}{21.15} + mg u_{\text{elec}} \sin \theta) + p_{\text{other}} = 15.8 \text{ kW} \quad (5)$$

式中: u_{elec} —纯电动车速; p_{other} —附件功率。

所以所选择的电机完全能够满足纯电动行驶的功率需求。

3.2.3 动力电池参数匹配

由于在功能样车的性能指标中有纯电动行驶里程要求, 则动力电池组的容量由纯电动行驶里程决定。动力电池组的总能量 C_b 按下式计算^[10]:

动力电池组的容量由纯电动行驶里程决定。动力电池组的总能量 C_b 按下式计算^[10]:

$$C_b = \frac{P_m}{\eta_b \eta_m} \cdot \frac{s}{u} \cdot \frac{1}{SOC_{\text{high}} - SOC_{\text{low}}} = 2.43 \text{ kW} \cdot \text{h} \quad (6)$$

式中: P_m —纯电动行驶功率需求; η_b —蓄电池效率; η_m —电机效率; s —纯电动续驶里程; u —纯电动车速; SOC_{high} 、 SOC_{low} —蓄电池最高和最低荷电状态。

3.2.4 主减速器与变速器参数匹配

经过验证原车的主减速器与变速器可以满足车辆性能要求, 为节约开发成本, 并联式混合动力汽车采用原车型的主减速器与变速器。变速速比具体数值, 如表 3 所示。

表 3 原型车传动系统速比情况

变速器 i_0					主减速器 i_g
5.24	3.296	1.913	1.266	1	4.88

4 整车控制系统设计

并联式混合动力汽车要实现节能环保的目标, 其开发核心是整车控制系统, 重点为能量管理策略。能量管理系统的核心是如何合理的分配发动机和电动机的能量, 以满足驾驶员对整车驱动能量需求的同时保证发动机工作在高效区。样车控制系统使用的是转矩控制策略。

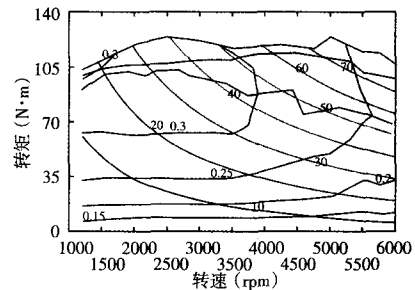


图 2 发动机万有特性曲线

4.1 动力源特性分析

如图 2 所示, 本项目所选用的 1.4L 发动机稳态效率特性图。如图 3 所示, 所选用的 ISG 电动机效率特性图。分析发动机与电机的稳态效率特性图得到: 发动机在中高负荷时效率较高, 在低速和小负荷时效率较低; 电动机在低速时具有较大的转矩, 在中高速时效率较高。由发动机万有特性知, 发动机的燃油消耗率在低速或高速时较大, 而在一定转速范围内较低。此外, 发动机转速越低则进气歧管压力变化的时间常数越大, 一般为几百毫秒, 从而导致发动机响应较迟缓, 而电动机的转矩响应非常迅速, 通常只有 10ms 以内^[9]。

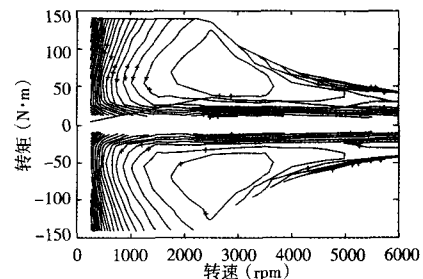


图 3 电机特性曲线

4.2 整车控制策略

所开发的并联式混合动力汽车有以下几种工作模式: 发动机单独驱动、纯电动、混合驱动、再生制动等。整车控制系统根据不

同行驶工况下的汽车能量需求与蓄电池的 SOC 值选择工作模式,然后根据发动机和电动机稳态三维 MAP 图,合理的对发动机与电动机进行动力分配,调节发动机工作于低油耗低排放的最佳工作区,从而保证动力系统总体效率最高。在 Matlab/Simulink 中建立 ISG 型并联式混合动力汽车的控制系统模型,如图 4 所示。

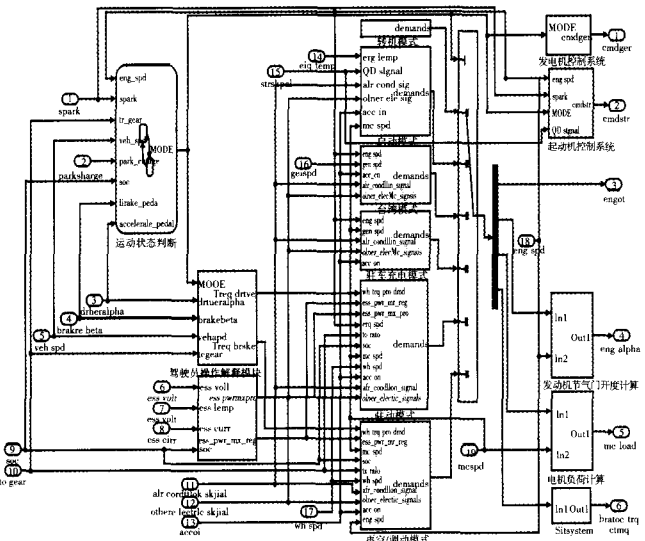
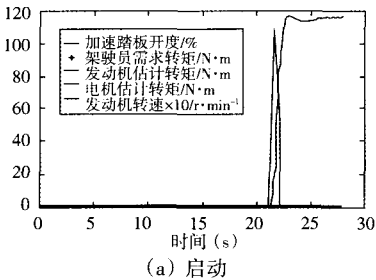


图 4 ISG 型并联式混合动力汽车控制系统模型

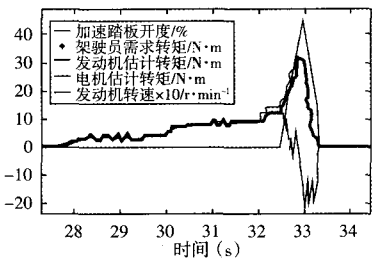
4.3 控制系统实车试验验证

为验证控制系统的有效性,并进一步优化控制策略,应用 dSPACE 实时仿真系统将所设计的控制策略下载到 MicroAuto-box 中生成快速控制原型,该控制系统与电机、电池等系统通过 CAN 总线连接进行整车控制,利用该控制系统装车进行实车验证,运用 CAN 总线分析工具 CANoe 记录数据,部分工况的试验结果,如图 5 所示。由图 5(a)中可以看出,ISG 电机快速启动发动机,此时蓄电池放电,ISG 电机瞬间把发动机转速升到 800rpm 后,发动机喷油点火,此时电机提供约 100Nm 的扭矩;图 5(b)可以看出,发动机提供转矩大于需求转矩,此时电机的转矩为负值,整车处于行车发电模式,发动机驱动汽车行驶的同时,带动 ISG 电机给蓄电池充电;图 5(c)是联合驱动模式,需求转矩等于发动机和 ISG 电机转矩之和,发动机和 ISG 电机共同驱动汽车行驶;图 5(d)是再生制动模式,驾驶员踩制动踏板制动,车速和发动机转速均下降,此时 ISG 电机提供负转矩发电。由以上分析可以看出,所设计的控制策略的功能满足了设计要求。

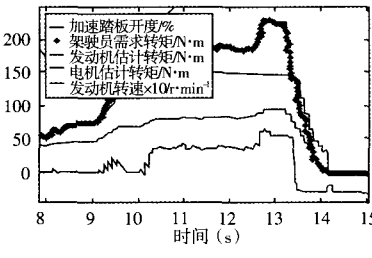
对装配该控制系统的试验样车进行转鼓试验和实车道路试验,试验结果,如表 4 所示。整车性能指标满足了设计指标的要求,与原型车相比,试验车的动力性有了较大提高,而油耗有了大幅下降,节能效果良好。



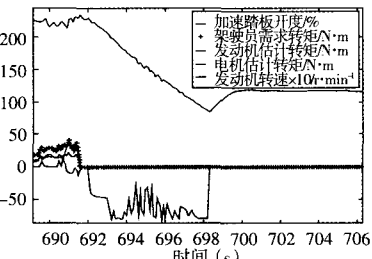
(a) 启动



(b) 行车发电



(c) 联合驱动



(d) 再生制动

图 5 混合动力系统工作状态

表 4 性能指标对比

项目名称	设计指标	测试结果	原车性能
最大车速(km/h)	120	131.7	119.4
30%坡度车速(km/h)	10	13.5	8.6
0-100km/h 加速时间(s)	40	34.6	43.9
ECE-15 工况油耗(L/100km)	18	16.3	24.1

5 结论

针对发动机轴动力组合式并联轻度混合动力驱动系统的开发,对动力系统关键零部件进行参数匹配和设计,进行了 ISG 轻度混合动力驱动系统的设计,开发了以转矩为主要的控制变量,以发动机稳态效率特性为基础的整车控制策略。应用 dSPACE 实时控制系统快速控制原型系统对所设计的控制策略进行实车试验,试验结果表明,整车控制策略在使试验车比原型车动力性有较大提高的前提下,有效的提高了整车燃油经济性,所设计的控制系统各项性能指标满足设计要求。

参考文献

1 Morita K. Automotive power source in 21st century[J]. JSAE Review, 2003 (24): 1-7
2 Mehrdad Ehsani Yimin Gao, Sebastien E. Gay Ali Emadi, 倪光正. 现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车—基本原理、理论和设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2008
3 吴伟岸. 混合动力汽车动力系统参数选择及匹配研究:[硕士学位论文]. 合肥:合肥工业大学, 2005
4 L. Triger, J. Paterson, and P. Drozd. Hybrid Vehicle Engine Size Optimization[J]. SAE 931793, 1993
5 田光宇, 彭涛等. 混合动力电动汽车关键技术[J]. 汽车技术, 2002(1): 8-11