

文章编号:1000-582X(2012)02-112-06

天然气混合动力城市客车动力系统的设计与开发

舒红宇¹,王 锐¹,陈齐平¹,田 野²,代幼文²

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044;2. 重庆恒通客车有限公司,重庆 401120)

摘 要:在选取循环工况和制定整车基本控制策略的基础上,对天然气混合动力城市客车的动力系统进行了设计与开发,包括其系统结构布置方案的确定,发动机、电机、电池和传动系统等参数设计和匹配。动力系统的仿真结果表明设计达到了要求。样车试制完成以后,进行目标循环工况下的实际道路试验,结果表明:与同级天然气城市客车相比,最大爬坡度增加了 28%,0~50 km 加速时间减少 1.8 s 以上,中国典型城市公交循环工况下的节气率达到 22%。

关键词:天然气混合动力城市客车;动力系统;控制策略;仿真建模;试验分析

中图分类号:U 469.13

文献标志码:A

Design and development of propulsion system for CNG-electric hybrid city-bus

SHU Hong-yu¹, WANG Kun¹, CHEN Qi-ping¹, TIAN Ye², DAI You-wen²

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Chongqing Hengtong Bus Co. Ltd., Chongqing 401120, P. R. China)

Abstract: The design of propulsion system for CNG-electric hybrid city-bus is introduced based on the selection of driving cycle and the establishment of control strategy. Making program of powertrain's configuration is included as well as parameters' selection and matching of components such as engine, motor, battery and transmission. The simulation results show that the design meets the requirements. The components of the propulsion system are integrated together, and then they are installed into the sample city-bus. The roadway test has been done under the target driving cycle. Compared with the peer CNG city-bus, there are 28% increasing in the largest climb degree and the acceleration time of 0~50 km is reduced more than 1.8 s, and the fuel saving rate achieves to 22% under the typical city-bus driving cycle of China.

Key words: CNG-fueled hybrid electric city-bus; propulsion; control strategy; simulation model; test analysis

作为公共交通工具之首的城市客车在我国现代交通运输中占据着十分重要的地位。由于其特殊的运行工况,其燃料消耗量大、污染物排放多。综合考虑,混合动力方式仍然是近来城市客车的首选^[1-3]。

而天然气汽车不仅具有清洁环保、价格相对低廉、安全性能好等特点,而且由于我国天然气资源丰

富,开发利用潜力大,可操作性强。因此,在我国设计开发天然气混合动力城市客车具有重要的现实意义和实用价值。

目前国内外天然气混合动力城市客车动力系统的研究开发还不成熟,美国曾经在城市客车上采用了气电混合动力系统,但其动力系统采用的是效率

收稿日期:2011-06-20

基金项目:重庆市科委重点攻关项目(CSTC2009AB0624);重庆市科委攻关项目(CSTC2009AC6051)

作者简介:舒红宇(1963-),男,重庆大学教授,主要研究方向为车辆系统动力学,(E-mail)shycqu@163.com。

较低的串联式结构^[4];我国浙江大学公布了一种并联型气电混合动力车动力系统的专利^[5],但其采用牵引力合成式结构且没有产品化;清华大学汽车安全与节能国家重点实验室开发的天然气串联式混合动力城市客车^[6],其动力系统同样采用效率较低的串联式结构,且整车动力性能比同类型传统城市客车有所下降。

笔者在选取循环工况和制定整车基本控制策略的基础上,设计了一种效率较高的单轴并联式天然气混合动力城市客车动力系统,并论述了其结构系统布置方案,发动机、电动机、电池和传动系统等参数设计和匹配。利用仿真软件,对所设计的动力系统进行了仿真和分析。通过动力系统各部件的集成安装、样车试制并进行目标循环工况下的实际道路试验,验证了设计与开发的合理性和有效性。

1 设计依据

1.1 循环运行工况选择

混合动力城市客车的循环运行工况是对其动力系统设计的基础之一。根据目标工况进行动力系统的参数设计和匹配,可以在保证整车动力性能的基础上,提高经济性并降低排放。一般地,车辆的经济性能和排放性能的具体要求均是针对某一具体循环运行工况而言。因此,循环运行工况的选择是混合动力城市客车动力系统设计的重要一环^[7]。

循环运行工况的选择依据 GB/T 19754-2005《重型混合动力电动汽车 能量消耗量试验方法》。针对混合动力城市客车,选择中国典型城市公交循环工况,如图1所示。

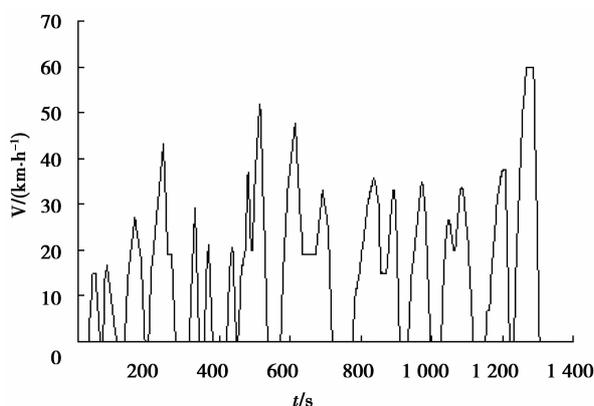


图1 中国典型城市公交循环

1.2 整车控制策略制定

天然气混合动力城市客车动力系统的设计与整

车的基本控制策略密切相关,在设计工作进行之前需要首先制定整车的基本控制策略。

1.2.1 基本控制策略

天然气混合动力城市客车动力总成成为并联式结构,它基于转矩合成方式,所以采用电力辅助控制策略,其基本思想是:发动机作为主动力源,提供整车常用能量;电动机作为辅助动力源,提供峰值扭矩和功率。

电力辅助控制策略以整车经济性和排放性为优化控制目标,根据整车的实时工况计算所需要的转矩,同时根据发动机、电池的状态,选择合理的运行模式和变速器档位,使发动机、电机工作于高效率区间^[8-13]。

各工况具体控制策略如下:

1) 起动发动机。工作在电动机模式的电机将发动机转速在短时间内提升至怠速以上,使发动机快速启动。这个过程减少了发动机起动过程中的燃料消耗和废气排放。

2) 纯电动起步和纯电动驱动。平路起步或者低速行驶时,整车所需驱动转矩不大于发动机的最小工作转矩,发动机参与工作会降低整车的经济性和排放性。此时,若电池荷电量满足一定要求,则电动机单独工作,以纯电动形式进行驱动。

3) 混合驱动。大负荷或重载情况下,整车行驶所需功率大于发动机工作在最佳区域内时所能提供的功率,则不足部分由电动机提供;或者整车所需行驶功率大于发动机能提供的功率,则发动机仍然工作在优化区域,电动机提供峰值驱动功率,进行辅助驱动。

4) 发动机单独驱动。车辆运行稳定,整车所需的驱动功率位于发动机最佳工作区域,电池荷电量达到或超过上限值,则此时整车运行所需动力全部由发动机提供。

5) 能量回收。车辆在减速制动过程中,若电池荷电量低于上限值,则电机工作在发电机模式,将整车惯性动能转化为电能,储存在电池中。

6) 发动机驱动和充电。限制发动机在最佳工作区域内工作,驱动车辆的过程中同时带动工作于发电机模式的电机,进行充电。

7) 停车停机。电动机可以快速启动发动机,因此在车辆停止时,关闭发动机,减少发动机怠速时的油耗和排放。

1.2.2 制动能量回馈控制策略

车辆在制动开始时,整车控制系统首先判断SOC值,如果需要回馈制动,且电池组的充电功率

可以达到最大值,则工作在发电机模式的电机依据自身可产生的最大制动力矩进行回馈制动;制动过程中,如果车轮即将出现抱死状况,ABS 开始工作时,停止回馈制动,仅有传统制动系统起作用;制动过程中,车速低于 5 km/h 时,停止回馈制动。

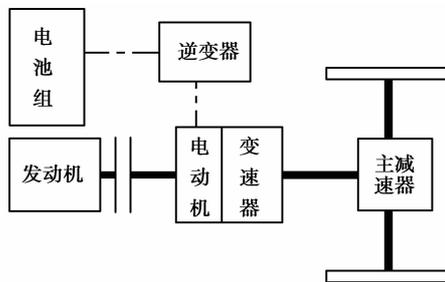
在回馈制动过程中,分离离合器,中断发动机动力传递,可以提高制动能量的回收效率。考虑到分离离合器将会消耗一定得能量,且这一操作会导致系统的复杂化,所以在制动时发动机动力传递不会被切断,即离合器不会被分离。

2 系统设计

2.1 布置方案

目标车型为 11.6 米级的天然气混合动力城市客车,发动机后置,采用 4×2 的后轮驱动形式。

其采用所设计开发的天然气混合动力城市客车动力系统。该系统具体结构为单轴并联式,如图 2 所示。发动机和电机同轴连接,之间没有任何动力耦合机构,通过离合器将两者连接。相对于变速器,电机前置布置,以充分利用变速器多档速比提高电动机转矩^[14-16]。



图中:粗实线代表机械连接;点划线代表电力连接

图 2 混合动力城市客车动力系统结构

电动机进行辅助驱动时,离合器接合,在电动机

的输出轴上将发动机输出转矩和电动机转矩合成之后输入变速器;纯电动驱动时,离合器分离,输入变速器的转矩只有电动机提供;发动机单独驱动时,离合器接合,电动机空转。

与传统城市客车动力系统相比,它只是在离合器和变速器之间加入一个电动机,同时保留传统起动系统。当电动机、逆变器或者电池组产生故障时,电机相当于传动轴,传统起动系统起动发动机。

2.2 部件参数设计和匹配

目标车型整车参数:整备质量 $m=11\ 600\ \text{kg}$,总质量 $m_a=17\ 500\ \text{kg}$,空气阻力系数 $C_D=0.65$,迎风面积 $A=6.84\ \text{m}^2$,车轮滚动半径 $R_r=0.495\ \text{m}$,滚动阻力系数 $f_r=0.015$,机械效率 $\eta_T=0.87$ 。

2.2.1 发动机

采用 6 缸四冲程压缩天然气发动机。发动机参数设计主要是指发动机功率的选取。在混合动力城市客车中,发动机功率偏大会导致整车燃油经济性和排放性变差;发动机功率偏小会导致后备功率不足,则电动机必须提供更多的功率,从而导致电池组容量的增大、整车质量和成本的增加,同时给整车布置带来困难^[17]。该混合动力城市客车的发动机提供车辆以较高车速匀速行驶的驱动功率(考虑到市内高速公路运行)。按式(1)初选发动机功率。

$$P_{\text{emax}} = \frac{1}{\eta_T} \left(\frac{m_a g f_r}{3600} v_a + \frac{C_D A}{76140} v_a^3 \right) \quad (1)$$

式中: P_{emax} 为发动机最大功率; v_a 为车辆的速度。

按式(1)估算得到发动机最大有效功率,约比发动机外特性的最大功率值低 12%~20%;另外,还考虑车辆在平路上以 v_a 行驶时需要预留 10%左右的充电功率裕量。

结合满足国 III 排放的要求,最终选取的天然气发动机为:YC6J210N-30,其参数如表 1 所示。

表 1 YC6J210N-30 配置

发动机布置形式	发动机型式	发动机点火顺序	燃料种类	排量/mL	压缩比	额定功率比转速/ (kW·(r·min ⁻¹) ⁻¹)	最大扭矩比转速/ (N·m(r·min ⁻¹) ⁻¹)	最低燃气消耗率/ (g·(kW·h) ⁻¹)
后置	直列六缸、水冷	1-5-3-6-2-4	天然气(CNG)	6494	11:1	155/2500	710/1500	≤220

2.2.2 电机

采用结构紧凑、体积小、效率高的盘式永磁无刷同步电机,它既可作电动机,也可作发电机^[18]。

电机的参数设计涉及额定转速 n_m 、最高转速 n_{mmax} 、额定功率 P_m 、峰值功率 P_{mmax} 、额定转矩 T_m 和

峰值扭矩 T_{mmax} 。

电机在基速以下的转速范围内恒转矩工作,在基速以上的转速范围内恒功率工作。发动机和电机同轴连接,无任何变速装置,考虑到离合器摩擦效率对传递效率的影响,电机的最高转速略高于发动机

的最高转速。

电机的额定功率主要用于提供以纯电动方式行驶时车辆所需功率,按式(2)选取电机功率。同时按式(3)选取电机的额定转矩。

$$P_m = \frac{1}{\eta_T} \left(\frac{m_a g f_r}{3600} v_e + \frac{C_D A}{76140} v_e^3 \right) \quad (2)$$

式中: v_e 为车辆纯电动行驶车速。

$$T_m = \frac{9549 P_m}{n_m} \quad (3)$$

电机峰值扭矩的选取要满足以下条件:

1)混合驱动时,0~50 km/h 的加速时间 t_{50} 不大于 27 s,即

$$t_{50} = \frac{1}{3.6} \int_0^{50} \frac{\delta m_a}{F_t - (F_f + F_w)} dv \leq 27 \quad (4)$$

式中: δ 为旋转质量换算系数; F_t 为车辆驱动力; F_f 为滚动阻力; F_w 为空气阻力。

2)混合驱动时,最大爬坡度 i_{\max} 不小于 20%,即

$$i_{\max} = \tan \left(\arcsin \frac{D_{\max} - f \times \sqrt{1 - D_{\max}^2 + f^2}}{1 + f^2} \right), \quad (5)$$

$$i_{\max} \geq 20\%。$$

式中: D_{\max} 为混合动力模式驱动时,I 档动力因数的最大值。

3)同时考虑车辆的驱动转矩要小于路面的附着转矩。电动机峰值扭矩确定以后,利用式(6)确定其峰值功率。

$$T_{\text{mmax}} = \frac{9549 P_{\text{mmax}}}{n_m} \quad (6)$$

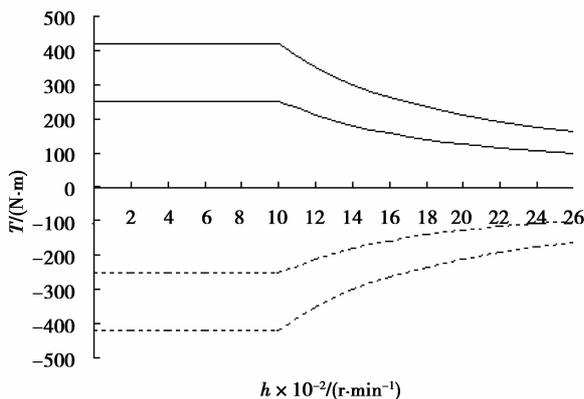


图 3 电动机转矩特性图

经过计算,并结合整车控制策略和动力系统其他部件的要求,最终确定了电机参数,其转矩特性如图 3, T 为扭矩, h 为转速。电机具体数值如下:

$$n_m = 1\,000 \text{ R}^{-1}; n_{\text{mmax}} = 2\,600 \text{ R}^{-1};$$

$$P_m = 26 \text{ kW}; P_{\text{mmax}} = 44 \text{ kW}; T_m = 252 \text{ N} \cdot \text{m};$$

$$T_{\text{mmax}} = 420 \text{ N} \cdot \text{m}。$$

2.2.3 电池

采用比能量、比功率较高,且安全性好、使用寿命较长的锂离子电池。电池作为储能单元,其作用主要有两个方面:第一,电动机提供驱动功率时,电池释放能量;第二电动机以发电机模式工作时,电池吸收制动能量。这就要求:电池在规定的 SOC 区域内工作时,其峰值放电功率大于电动机的最大功率;SOC 值较低而发动机开始工作时,其峰值充电功率满足整车控制策略的充电功率要求。

电池组的总电压要综合考虑效率和安全的因素。电池组容量关系着低速纯电动行驶时的续航里程,容量过小会限制最大放电电流值,造成发动机频繁开关。

经过试验验证之后,确定了选用的锂离子电池组,其由两个模块串联而成,每个模块有 48 个电池单体,电池单体的电压为 3.6 V,容量为 5.5 Ah,质量比能量为 66 Wh/kg。电池组的 SOC 工作范围为 0.3~0.7,总电压为 345.6 V。另外,车辆采用的辅助电源为 24 V 的铅酸蓄电池。

2.2.4 传动系

采用 AMT 机械式自动变速器和单级主减速器。

传动系参数设计主要是档位数的确定和传动比的选择,包括最大传动比和最小传动比。

档位数越多,发动机工作在最大功率附近的机会越多,汽车的加速和爬坡能力就会得到加强;同时,发动机工作在低燃油消耗率区的可能性越大。所以说档位数的增加会很好改善整车的动力性和经济性。因此,选用的 AMT 为 6 档。

最大传动比的选择主要考虑如下两个方面:

1)最大爬坡度(此时忽略空气阻力),即

$$i_{g1} i_0 \geq \frac{G(f \cos \alpha_{\max} + \sin \alpha_{\max}) R_r}{T_{\text{tqmax}} \eta_t} \quad (7)$$

正式中: i_{g1} 为变速器 I 档传动比; i_0 为主减速器传动比; G 为整车重量; α_{\max} 为最大爬坡角度; T_{tqmax} 为 I 档最大驱动转矩。

2)考虑驱动轮的附着率,检查附着力的极限值是否满足上坡或加速的要求。

最小传动比的选择需要满足最高车速的要求,即 $i_{g6} i_0$ 应该选择到车辆的最高车速为发动机和电动机功率合成曲线上最大功率点对应的车速,因为此时车速最高。

综合考虑整车动力性能、变速器和主减速器的尺寸和结构,最终确定传动系各传动比,如表 2。

表 2 传动系各传动比

档位	传动比
1 档	7.05
2 档	4.13
3 档	2.52
4 档	1.59
5 档	1
6 档	0.78

3 仿真结果

利用 AVL Cruise V3.0 对所设计的天然气混合动力系统进行建模和仿真,仿真计算过程中,只对其进行动力性和经济性仿真。仿真结果如表 3。

表 3 仿真结果

	仿真项目	技术要求	仿真结果
动力性	最高车速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	≥ 80	88
	最大爬坡度/%	≥ 20	40
	0~50 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的加速性能/s	≤ 27	20
经济性	中国典型城市公交循环	—	32.5
	工况百公里燃料消耗量/ m^3	—	26.7
	50 km/h 等速行驶百公里燃料消耗量/ m^3	—	26.7

仿真结果表明:天然气混合动力城市客车动力性基本满足各项技术要求的需要,中国典型城市公交循环下百公里的气耗为 32.5 m^3 ,50 km/h 等速行驶百公里燃料消耗量为 26.7 m^3 。

4 整车性能试验分析

将天然气混合动力城市客车动力系统各部件集成并组装在 11 m 级的专用客车底盘上,完成样车的试制工作。经过初步调试之后,满载情况下在重庆北部新区经开园附近的水泥道路上进行实际道路试验。并且与同类型传统天然气城市客车进行对比,对比车型采用 169 kW 的 6 缸天然气发动机和 6 档手动变速器,主减速比为 6.5。

4.1 动力性能试验

整车动力性能试验结果表明:样车的各项动力性能指标已达到整车的设计要求,且各项指标均高于同类型传统车辆。如表 4。

表 4 整车动力性能试验结果

试验项目	技术要求	试验结果		
		传统车	初试	复试
最高车速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	≥ 80	84.3	84.5	81.8
最大爬坡度/%	≥ 20	25.6	25.9	20.0
0~50 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的加速性能/s	≤ 27	26.9	26.8	28.7

4.2 经济性能试验

在中国典型城市公交循环工况下,初试和复试时整车实际道路试验前后的电池容量变化仅为 -0.33 kWh 、 -0.17 kWh ,因此经济性能试验结果可以比较准确地反映出样车的实际经济性能。针对整车经济性能试验结果,通过整理并加以计算,可以得出:中国典型城市公交循环工况下,相比传统车型,该车的燃料节约率达到了 22%。

相比同类型传统天然气城市客车,该车的 50 km/h 等速行驶燃料消耗量(限定条件下的平均使用燃料消耗量)也下降了 15% 左右。

表 5 整车经济性能试验结果

试验项目	试验结果		
	传统车	初试	复试
50 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 等速行驶百公里燃料消耗量/ m^3	32.4	27.5	27.6
中国典型城市公交循环工况百公里燃料消耗量/ m^3	51.3	39.7	39.2

4.3 排放性能试验

根据汽油车双怠速污染物的排放要求,在试验中测试了双怠速时期 CO 和 HC 的排放量,如表 6。实验结果表明:整车 CO 和 HC 的排放远远低于技术要求限值,满足汽油车双怠速污染物的排放要求。同时,由于该车经济性明显提高,整车的排放性能也将会相应提高。

表 6 整车排放性能试验结果

试验项目	技术要求	试验结果		
		传统车	初试	复试
怠速	CO(%)	≤ 1.0	0.44	0.48
	HC(10^{-6})	≤ 200	113	122
汽油车双怠速污染物	CO(%)	≤ 0.7	0.22	0.28
	HC(10^{-6})	≤ 200	87	95
	λ	1 ± 0.03	1.015	1.018

5 结 论

试验结果表明:天然气混合动力城市客车与同类型传统天然气城市客车相比,其具有较好的动力性和经济性。在动力性方面,最高车速略有提高,最大爬坡度增加了 28%,0~50 km 的加速时间减少 1.8 s 以上;在经济性方面,中国典型城市公交循环工况下的燃料节约率达到了 22%,50 km 等速行驶的燃料消耗量也下降了 15%左右。另外,根据实验结果可知,天然气混合动力城市客车双怠速时的排放也达到了相关技术要求。

综上所述,笔者设计开发的单轴并联式天然气混合动力城市客车动力系统是成功有效的,采用的整车基本控制策略、结构系统布置方案、各部件参数的设计和匹配分析以及仿真等是正确的,其将为进一步的市场化打下较好的基础。

参考文献:

- [1] 陈清泉,孙逢春,祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002.
- [2] AO G-Q, QIANG G-Q, ZHONG H, et al. Fuel economy and NO_x emission potential investigation trade-off of a hybrid electric vehicle based on dynamic programming[J]. Journal of Automobile Engineering, 2008, 644(33): 1851-1864.
- [3] ZHAO H, ZHANG B Z, ZHANG B L. Research on parameters matching of parallel hybrid electric vehicle powertrain [C]//Proceedings of the Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Sep. 3-5, 2008, Harbin, China. [s.l.]: IEEE Press, 2008:1-4.
- [4] SIURU B. CNG hybrid-electric buses [EB/OL]. (2008-04-28) [2010-01-13]. <http://www.masstransitmag.com/online/article.jsp?siteSection=5&id=6180&pageNum=1>.
- [5] 浙江大学. 并联型气电混合动力车动力系统: 中国, 200710069746.8[P]. 2007-05-15.
- [6] 何桦,杨福源,杨雨平,等. 天然气串联式混合动力城市客车开发[J]. 汽车工程, 2008, 30(3): 202-210. HE HUA, YANG FU-YUAN, YANG YU-PING, et al. Development of CNG-fueled series hybrid electric city bus[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(3): 202-210.
- [7] BANJAC T, TRENC F, KATRA? NIK T. Energy conversion efficiency of hybrid electric heavy-duty vehicles operating according to diverse drive cycles [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(12): 2865-2878.
- [8] LI C F, SHI Y Q. Concurrent optimization for parameters of powertrain and control system of hybrid electric vehicle based on multi-objective genetic algorithms[C]// Proceedings of the International Joint Conference on SICE-ICASE, Oct. 18-21, 2006, Bexco, Busan, Korea. [s.l.]: IEEE Press 2006: 2424-2429.
- [9] 王园,贺延松,王保华. 基于 CRUISE 的 PHEV 控制策略参数仿真[J]. 重庆大学学报,2006, 29(12): 22-25. WANG YUAN, HE YAN-SONG, WANG BAO-HUA. Parameter simulation on the control strategy for a parallel hybrid electric vehicle by CRUISE [J]. Journal of Chongqing University, 2006, 29(12): 22-25.
- [10] OHN H, MIN K. Combustion stability analysis during engine stop and restart in a hybrid powertrain [J]. International Journal of Automotive Technology, 2009, 10(2): 241-249.
- [11] ZHONG H, AO G Q, WANG F, et al. Torque distribution strategy for integrated starter/generator hybrid bus implemented fuzzy algorithm [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 13(3):323-329.
- [12] ZHAO S P, ZHANG S F, XU P Y, et al. Control strategy and simulation analysis of hybrid electric vehicle [C]//Proceedings of the Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments, Aug 16-18, 2007, Xi'an, China. [s.l.]: IEEE Press, 2007: 318-321.
- [13] OH K C, MIN J H, CHOI D H, et al. Optimization of control strategy for a single-shaft parallel hybrid electric vehicle [J]. Journal of Automobile Engineering, 2007, 221(93): 555-565.
- [14] WANG C L, YIN C L, ZHANG T, et al. Powertrain design and experiment research of a parallel hybrid electric vehicle [J]. International Journal of Automotive Technology, 2009, 10(5): 589-596.
- [15] HUANG K D, TZENG S C, JENG T M, et al. Integration mechanism for a parallel hybrid vehicle system[J]. Applied Energy, 2005, 82(2): 133-147.
- [16] YAN Y C, LIU G Q, CHEN J. Parameter design strategies of a parallel hydraulic hybrid bus [C]// Proceedings of the Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Sep. 3-5, 2008, Harbin, China. [s.l.]: IEEE Press, 2008:1-6.
- [17] 王庆年,何洪亮,李幼德,等. 并联混合动力汽车传动系参数匹配[J]. 吉林工业大学:自然科学学报, 2000, 30(1): 72-75. WANG QING-NIAN, HE HONG-LIANG, LI YOU-DE, et al. Study on parameter matching for parallel hybrid electric vehicle powertrain [J]. Journal of Jilin University of Technology: Natural Science, 2000, 30(1): 72-75.
- [18] WU H X, LI L Y, KOU B Q, et al. The research on energy regeneration of permanent magnet synchronous motor used for hybrid electric vehicle[C]//Proceedings of the Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Sep. 3-5, 2008, Harbin, China. [s.l.]: IEEE Press, 2008:1-4.