

电磁耦合混合动力公交车整车控制策略及参数匹配

王锋, 冒晓建, 杨林, 卓斌

(上海交通大学机械与动力工程学院, 200240, 上海)

摘要: 设计了一种新的基于动力伺服的电磁耦合强混合动力公交车方案, 可使发动机一直运行在最佳经济运行线上而不受轮边负荷约束, 从而达到节油目的. 此系统采用双电机取代了传统的机械离合器和手动变速箱, 可同时起到电磁离合器和无级变速箱的作用. 在分析系统结构、工作原理和确定整车控制策略的基础上, 以目标车辆满足整车动力性指标和典型循环工况为前提, 对发动机、双电机、蓄电池参数的设计依据和匹配进行了研究, 并利用整车后向仿真模型验证了此方案, 结果表明: 0—60 km/h 加速时间比传统目标车辆减少了 16.5%; 基于上海 Xumin 循环工况的燃油经济性提高了 39.6%.

关键词: 混合动力公交车; 电磁耦合; 无级变速

中图分类号: U469.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)03-0342-05

Control Algorithm and Parameter Match for an Electromagnetic Coupling Hybrid Electric Bus

WANG Feng, MAO Xiaojian, YANG Lin, ZHUO Bin

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on the knowledge of dynamic servo, a novel research project of electromagnetic coupling hybrid electric bus is proposed to keep the internal combustion engine running at an optimal operation line independent of wheel load. The mechanical clutch and manual transmission fixed in the conventional bus are replaced by double motors to execute the functions of electromagnetic clutch and continuously variable transmission simultaneously. By analyzing the operating principle and determining the control algorithm, the parameter design and match of engine, double motors and power battery are investigated to meet the vehicle dynamic performance and typical driving-cycles for the aim bus. The simulation results from the vehicle backward simulation model indicate that the acceleration period from 0 to 60 km/h decreases by 16.5% and fuel economy of the novel bus improves by 39.6% compared with the conventional bus.

Keywords: hybrid electric bus; electromagnetic coupling; continuously variable speed

油电混合动力汽车是目前电动汽车中最为现实的节油和降低排放污染的解决方案. 对于强混合技术方案, 在交通拥挤的城市路段, 节油率达 50% 以上^[1]. 强混合方案一般为混联式, 其主要优点是发动机一直运行在最佳经济运行线上而不受轮边负荷约束, 极大地节省了燃油消耗. 目前强混合方案以 Prius^[2] 为代表, 但其配备的行星齿轮机构等机械部件

极为昂贵, 使整车造价过高, 很难用节省的燃油费弥补多支出的购车款.

本文利用动力伺服知识设计了电磁耦合双电机混合动力系统: 以交换系统工作象限的方式实现发电机到电动机的转换及发电机和电动机功率的叠加; 以机械功率透过式发电机取代行星齿轮机构; 发电机和电动机的相互作用在减小各自功率的同时降

低了成本,该系统在保证功能的同时,解决了强混合方案造价过高的问题。

1 系统结构与原理

1.1 系统结构

基于动力伺服的电磁耦合混合动力公交车方案如图1所示,它省去了传统汽车的机械离合器和手动变速箱,增加了双电机、动力伺服驱动器、泵升单元和蓄电池。发电机为动能透过式发电机,起电磁离合器作用。发电机转子和发动机曲轴相连,随曲轴一起旋转,为输入轴,其定子和电动机的转子相连并通过滑环电刷与三相高压线相接。发电机使发动机转速独立于主减速器相连的输出轴转速,转速差为发电机目标转速(转速控制)。电动机定子和整车固定,转子和输出轴连接,输出轴通过连轴器和主减速器相连。电动机使发动机扭矩独立于输出轴扭矩,扭矩差为电动机目标扭矩(扭矩控制)。双电机一个调速、一个调扭,使发动机运行点完全独立于轮边负荷且保持高效,同时起到电磁离合器和无级变速箱的作用,其冷却方式为变压器油淋浴式冷却。双母线和泵升单元的作用是提高双电机的工作电压,最终提高它们的运行效率并减小蓄电池的质量和体积。

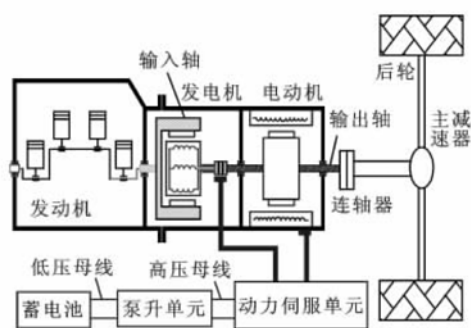


图1 电磁耦合混合动力公交车系统结构

1.2 工作原理

双电机有4种工作模式来调节发动机曲轴的转速和扭矩:①整车高速加速时,使输出轴转速和扭矩增加;②整车低速大负荷时,使输出轴转速降低,扭矩增加;③整车制动或对蓄电池充电时,使输出轴转速和扭矩减小;④整车巡航时,使输出轴转速增加,扭矩减小。

发电机转速为输出轴与输入轴的转速差,并传递发动机曲轴发出的扭矩。电动机扭矩为输出轴需求扭矩与输入轴扭矩之差,其转速与输出轴的转速保持一致。下面以广西玉柴YC4F柴油机为例,具体说明其工作原理(如图2所示)。

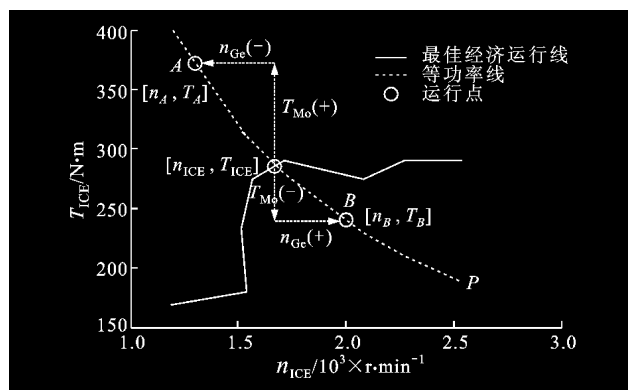


图2 电磁耦合系统工作原理

根据柴油机的万有特性曲线,连接各功率下的最高效率点并进行平滑处理,得其最佳经济运行线。当需求功率为 P 时,发动机工作于等功率线和最佳经济运行线的交点处。图2中的A、B点为整车在不同状态时的主减速器输入端转速和扭矩需求。对于A、B点,发电机分别发电和电动来减小和增加发动机曲轴转速,电动机分别电动和发电来增加和减小发动机曲轴扭矩。它们之间的功率、扭矩和转速关系如下

$$P = P_{ICE} + P_B = P_{ICE} + P_{Mo} + P_{Ge} \quad (1)$$

$$T = T_{ICE} + T_{Mo} \quad (2)$$

$$n = n_{Mo} = n_{ICE} + n_{Ge} \quad (3)$$

$$P = Tn = (T_{ICE} + T_{Mo})(n_{ICE} + n_{Ge}) \quad (4)$$

式中: P 为功率; T 为扭矩; n 为转速;下标ICE表示发动机;Ge表示发电机;Mo表示电动机;B表示蓄电池。

我们以整车低速大负荷运行(即图2中的A点)为例,来分析电磁耦合系统的效率:当发动机运行于 (n_{ICE}, T_{ICE}) 时,效率为 η_{ICE} ,此时主减速器输入端转速 n 低于 n_{ICE} ,需求扭矩 T 大于 T_{ICE} ,需要发电机发电以降低输出轴转速,且保持 $n_{Ge} = n - n_{ICE}$ 为负, $T_{Ge} = T_{ICE}$ 。同时,需要电动机电动来弥补输出轴扭矩的不足,且保持 $T_{Mo} = T - T_{ICE}$ 为正, $n_{Mo} = n$ 。

若不考虑能量转化损失,电动机所需的电能完全由发电机提供,但实际上因存在能量转换损失,蓄电池需输出功率 P_B 且为正,大小为 $[(P_{Mo}/\eta_{Mo}) + P_{Ge}\eta_{Ge}]/\eta_B$,即双电机变速传动效率 η_T 为 $P_{ICE}/(P_{ICE} + P_B)$,最终得电磁耦合系统的效率为 $\eta_{ICE}\eta_T$ 。

2 整车控制策略

2.1 能量管理策略

电磁耦合混合动力公交车的能量管理策略主要为蓄电池电荷状态(SOC, State of Charge)平衡^[3]和发动机运行点控制策略。

2.1.1 蓄电池 SOC 平衡控制 蓄电池 SOC 要控制在目标值附近,若 SOC 低于目标值,则发动机需额外发出功率对蓄电池充电. 蓄电池期望充电功率

$$P_{\text{Ch}} = \begin{cases} \frac{(B_{\text{SOC}} - B_{\text{SOC_aim}})}{B_{\text{SOC}}} P_{\text{opt}} & B_{\text{SOC}} < B_{\text{SOC_aim}} \\ 0 & B_{\text{SOC}} \geq B_{\text{SOC_aim}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{\text{opt}} = f(B_{\text{SOC}}, \theta_B)$ 为蓄电池最优充电功率,其中 B_{SOC} 、 θ_B 分别是蓄电池 SOC 及其温度; $B_{\text{SOC_aim}}$ 为蓄电池 SOC 控制目标值. 它们均为可标定变量.

2.1.2 发动机运行点控制 驾驶员通过油门踏板发出的整车期望功率与蓄电池期望充电功率之和是发动机运行点控制的依据. 分析图 3 中的 YC4F 柴油机最佳经济运行线,因为在这条线上的燃油消耗率相差很大,所以根据燃油消耗率不同将这条最佳经济运行线分成 3 段,对应的发动机工作区域为 A、B、C. 在 A 区域,发动机关闭,整车为纯电动模式,直到蓄电池充电期望功率加上整车驱动期望功率大于 21 kW 时柴油机启动,进入区域 B. 在 B 区域,通过共高压直流母线的双电机实现整车无级变速,将发动机的运行点调整到需求功率与最佳经济运行线相交的点上,实现节能目的. 在 C 区域,因为油耗大,故柴油机恒运行于 77 kW 的最佳经济运行点上,剩余的需求功率由蓄电池提供.

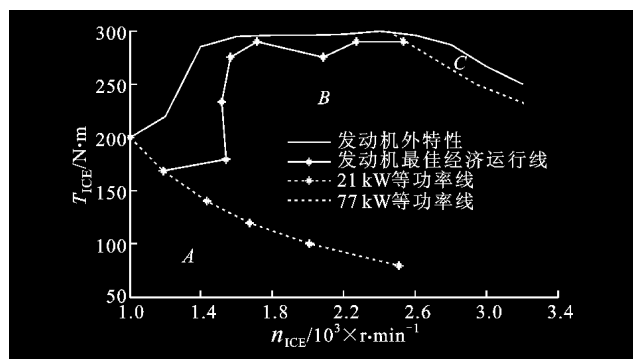


图3 YC4F 柴油机最佳经济运行线与区域划分

由当前整车运行状态和驾驶员驾驶意图,可确定发动机运行点,然后就可确定系统其他部件的工作点,因此发动机运行点控制是整个电磁耦合系统能量管理策略的关键.

2.2 再生制动策略

当驾驶员踩踏制动踏板时,只有驱动轮后轮可进行制动能量回收. 此时发动机或怠速、或停机,发电机三相高压线不供电,其转子随曲轴怠速空转或者停转,定子随输出轴减速旋转. 如果分配给后轮的刹车功率小于等于电动机的最大功率,后轮全部采用电刹;如果分配给后轮的刹车功率大于电动机的

最大功率,电动机以最大功率再生制动,剩余的后轮制动力由气压制动系统提供. 另外,电动机的最大功率受蓄电池最大充电功率限制. 整车滑行时,电动机可处于发电模式来模拟发动机倒拖.

3 参数匹配

基于 Matlab/Simulink,建立了电磁耦合混合动力公交车整车后向仿真模型和控制策略. 参数匹配时,整车模拟运行典型循环,假定系统部件无限大,完全可以跟随速度曲线.

电磁耦合混合动力公交车选取广西桂林客车集团的 8.3 m 公交车进行改装. 整车总质量 m 为 9 375 kg,风阻系数 C_D 为 0.7,车轮半径 r 为 0.445 m,滚阻系数 f 为 0.009 2,迎风面积 A 为 7 m²,主减速比为 5.714. 参数匹配以满足整车动力性指标为前提,以典型循环工况为依据,最大限度地降低双电机和蓄电池容量. 匹配时不需完全满足典型循环中出现概率很小的最大功率需求,因为若按此最大值选型,系统部件尺寸和成本将过大,得不偿失,因此可将最大值通过滤波过滤掉. 原车动力性指标为最高车速 90 km/h,0—60 km/h 加速时间 17 s,最大爬坡度 15%. 因电磁耦合混合动力公交车和原车的装备质量相差不多,故令其相等. 选用的 4 例典型循环工况的统计参数如表 1 所示.

表1 典型循环工况参数统计表

循环工况	Xumin	89Road	Manhattan	NewYork Bus
总时间/s	2 592	2 929	1 089	600
总路程/km	21.70	12.91	3.32	0.99
平均车速/ km·h ⁻¹	30.14	15.87	10.89	5.93
最大车速/ km·h ⁻¹	74.45	56.29	40.72	49.57
最大加速度/ m·s ⁻²	2.62	1.71	2.06	2.77
平均加速度/ m·s ⁻²	0.65	0.63	0.54	1.17
最大减速度/ m·s ⁻²	-3.03	-3.23	-2.50	-2.06
平均减速度/ m·s ⁻²	-0.83	-0.78	-0.67	-0.67

3.1 发动机选型

该电磁耦合混合动力公交车的阻力曲线与原车一致. 在最高车速 u_{max} 等于 90 km/h 时,发动机应该满足此车速下的行驶功率要求

$$P_{\text{ICE}} = P_w + P_f = \left(\frac{C_D A u_{\text{max}}^3}{76.14} + \frac{mgfu_{\text{max}}}{3.6} \right) / \eta \quad (6)$$

式中: P_w 和 P_f 为风阻和滚阻功率, W. 考虑主减速器传动效率 η 为 95%, 发动机需求持续功率不低于 71.7 kW, 加上 10% 的爬坡和对蓄电池的充电功率裕量, 以及汽车空调等附件消耗功率, 选取发动机型号为玉柴 YC4F, 其在 3 200 r/min 时发出最大功率 85 kW.

3.2 双电机选型

发电机和电动机的选型分为额定和最大功率、扭矩两方面, 因为额定指标的大小决定了它们的温度场设计, 而最大指标决定了它们的磁场设计^[4].

3.2.1 发电机选型 发电机除了上文提到的功能外, 还可启动柴油机. 利用整车仿真模型, 完成了典型循环工况的发电机需求工作点分布计算, 如图 4 所示. 综合系统裕量, 选定发电机最大扭矩为 350 N·m; 由图 4 中的发电机平均工作扭矩, 选定额定扭矩为 250 N·m; 选定发电机的基速为 1 500 r/min. 这样, 发电机可覆盖图 4 中典型循环工况 98% 以上的需求工作点.

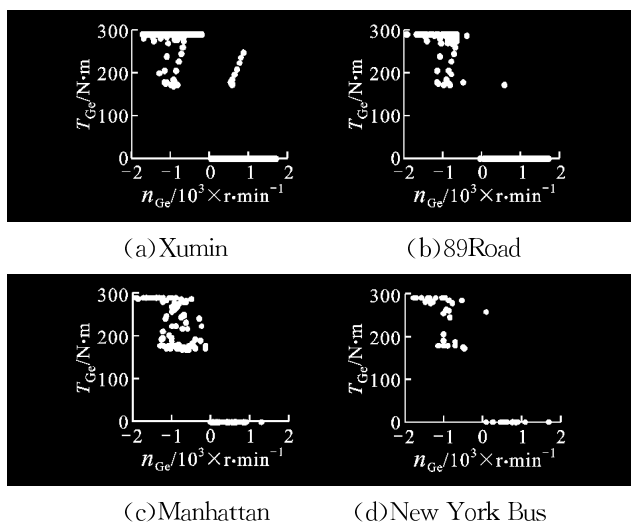


图4 典型循环工况下的发电机需求运行点分布

综上所述, 发电机可以工作在第一、三象限, 起电动和发电作用, 并可在 $\pm 1\,810$ r/min 范围内传递发动机在最佳经济运行线上的最大扭矩.

3.2.2 电动机选型 设定客车在最大爬坡度时的最高车速为 10 km/h, 可计算出不同最大爬坡度所对应的电动机最大需求扭矩. 控制柴油机在整个加速过程发出最佳经济运行线上的最大扭矩, 根据加速时间算法可得不同电动机最大扭矩和基速对应的 0—60 km/h 加速时间. 同时, 还完成了典型循环工

况下的电动机需求扭矩分布计算.

由整车最大爬坡度要求和典型循环工况下的电动机需求扭矩分布, 根据概率分布和综合系统裕量, 选定电动机最大扭矩为 900 N·m, 它可包含典型循环工况 98% 以上的需求扭矩. 选定电动机额定扭矩为 500 N·m, 它可包含典型循环工况 75% 以上的需求扭矩. 最后, 根据选定的最大扭矩和 0—60 km/h 加速时间要求, 并综合系统裕量, 选定电动机的基速为 1 200 r/min, 且由整车最高车速得电动机最大转速为 3 065 r/min.

综上所述, 电动机可以工作在第一、四象限, 起到电动和发电作用.

3.3 蓄电池选型

蓄电池选择已比较成熟的镍氢电池. 利用与上文同样的方法, 可得典型循环工况下的蓄电池需求充放电功率分布. 根据概率分布和综合系统裕量, 选定蓄电池最大放电功率为 90 kW, 最大充电功率为 -70 kW, 它们可以包含典型循环工况 98% 以上的充放电需求功率. 为保证蓄电池的充放电效率, 选定蓄电池额定电压为 312 V. 本系统控制 SOC 为某个目标值, 比如 0.6. 对于镍氢蓄电池, 常温下充电时工作电压在 340 V 附近, 放电时在 330 V 附近, 由此得蓄电池最大充电电流为 -206 A, 最大放电电流为 273 A. 根据镍氢电池的特性, 选定其最大放电倍率为 7C (C 为蓄电池充放电倍率), 最大充电倍率为 5C, 得镍氢电池安时数为 41.2 A·h, 综合系统裕量选定为 45 A·h.

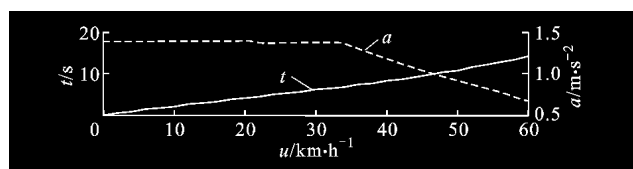
4 仿真结果

将整车仿真模型中的系统部件参数用上文所选参数代替, 运用整车控制策略进行动力性和经济性仿真, 循环工况以上海 Xumin 工况为例. 模型中蓄电池为内阻模型, 发电机和电动机效率曲线选用电动汽车仿真软件 ADVISOR 中的数据.

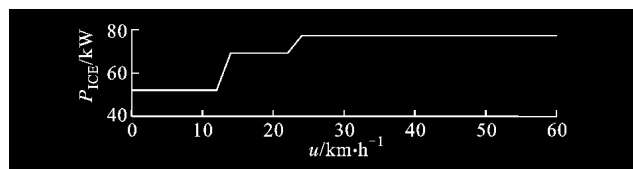
4.1 动力性仿真

4.1.1 0—60 km/h 加速 加速过程中的车速、时间历程和加速度如图 5a 所示, 加速时间为 14.2 s, 比原车减少了 16.5%. 发动机功率如图 5b 所示, 发动机一直发出最大扭矩 290 N·m, 在车速为 0~12 km/h 时, 发动机功率为 52 kW, 车速在 12~22 km/h 时, 功率为 69 kW, 之后功率为 77 kW. 若发动机一开始就发出功率 69 kW, 此时发动机转速为 2 272 r/min, 对应的发电机期望转速为 -2 272 r/min, 由于发电机性能参数的限制, 发电机在此转速下无法

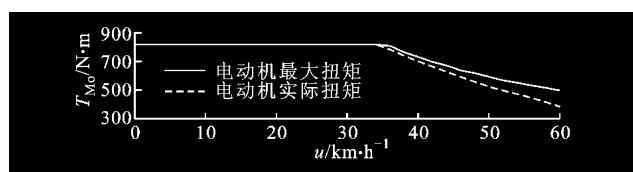
传递 $290 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的扭矩,因此发动机功率需逐步增加。图 5c 为电动机扭矩图,在车速为 34 km/h 之后,由于蓄电池的最大放电功率限制,电动机的扭矩被限制,不能发出当前转速下的最大扭矩。蓄电池电流和 SOC 如图 5d 所示,初始 SOC 为 0.6。SOC 先升高后降低,电流先负后正,蓄电池由充电过渡到放电,最后放电电流被限制。加速过程的电磁耦合系统变速比如图 5e 所示。



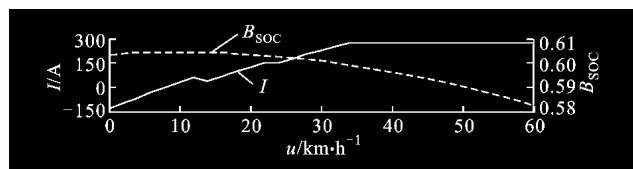
(a) 加速时间和加速度



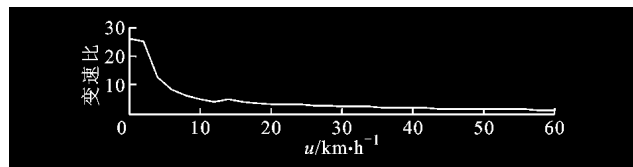
(b) 发动机功率



(c) 电动机扭矩



(d) 蓄电池电流及 SOC



(e) 变速比

图 5 加速过程状态

4.1.2 最高车速 当整车以最高车速 90 km/h 运行时,系统各个部件的运行点如表 2 所示。

表 2 系统部件运行参数

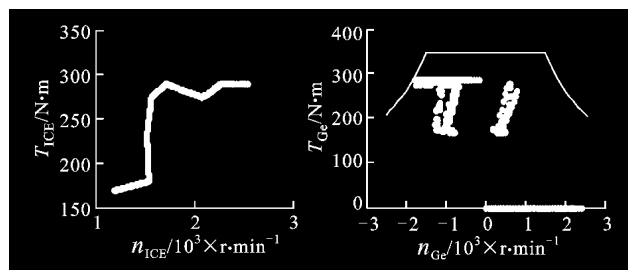
部件	转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	扭矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	功率/kW	效率/%
轮边	536	1 215	68.2	
主减速器输入端	3 065	223	71.8	95.0
发动机	2 364	290	71.8	35.7
发电机	701	290	21.3	83.0
电动机	3 065	-67	-21.3	91.0
蓄电池			7.2	89.0

在最高车速时,原车发动机的效率为 27.4% ,传统手动变速箱 5 档的效率为 93% ,即传统系统效率为 25.5% 。本文方案的发动机效率为 35.7% ,双电机变速传动效率为 90.9% ,电磁耦合系统效率为 32.5% ,比原车提高了 27.5% 。

4.2 经济性仿真

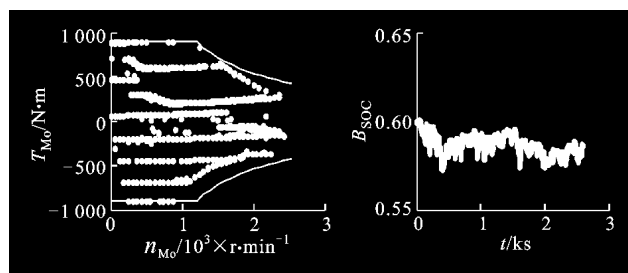
基于上海 Xumin 循环工况的电磁耦合混合动力公交车系统部件运行点如图 6 所示:发动机一直运行于最佳经济运行线上;发电机主要运行在大扭矩或零扭矩处;电动机转速和扭矩范围很宽,高转速时主要为发电状态,大的负扭矩为再生制动时发出;蓄电池 SOC 保持在目标值 0.6 附近。

原车的燃油经济性为 $23.5 \text{ L}/(100 \text{ km})$,而电磁耦合公交车的燃油经济性为 $14.0 \text{ L}/(100 \text{ km})$,循环终止 SOC 为 0.582。使用线性衰退法对蓄电池终止 SOC 的零变化进行燃油经济性修正,得燃油经济性为 $14.2 \text{ L}/(100 \text{ km})$,最终基于上海 Xumin 循环工况的电磁耦合混合动力公交车的燃油经济性比传统公交车提高了 39.6% 。分析可知,燃油经济性提高的主要原因是发动机运行点效率大大提高,同时双母线的使用使双电机变速传动效率保持高效,此外制动能量的回收利用也是原因之一。



(a) 发动机运行点

(b) 发电机运行点



(c) 电动机运行点

(d) SOC 时间历程

图 6 上海 Xumin 循环工况下的仿真结果

5 结 论

电磁耦合混合动力公交车结合了串联和并联式混合动力系统的优点,发动机一直保持高效率运行而不受轮边负荷约束。仿真结果表明: $0-60 \text{ km/h}$ 的加速时间比原车减少了 16.5% ,基于上海 Xumin

循环工况的燃油经济性比原车提高了 39.6%。下一步我们将根据本文选定的参数进行双电机的设计和加工制造,以及整车控制策略的具体代码实现,为台架和整车试验做好准备。

参考文献:

- [1] 赵子亮,刘东秦,刘明辉,等. 并联混合动力汽车控制策略与仿真分析研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 13-18.
ZHAO Ziliang, LIU Dongqin, LIU Minghui, et al. Study on control strategy and simulation for parallel hybrid electric vehicle [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12): 13-18.
- [2] KNEBUSCH M. 2004 Toyota Prius [J]. Machine Design, 2004, 76(8):111-116.
- [3] 谢辉,宋小武,周能辉. 轻度混合动力系统控制模式分层决策及能量管理策略的研究[J]. 内燃机学报, 2005, 23(2): 155-161.
XIE Hui, SONG Xiaowu, ZHOU Nenghui. Hierarchical control mode and energy management strategy for a mild hybrid electrical vehicle [J]. Transactions of CSICE, 2005, 23(2): 155-161.
- [4] 黄苏融,张琪,谢国栋,等. 燃料电池轿车用高密度无刷永磁牵引电动机[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 69-75.
HUANG Surong, ZHANG Qi, XIE Guodong, et al. High density brushless permanent traction motor for fuel cell vehicles [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12): 69-75.

(编辑 葛赵青)