

电动公交车用增程器起停及切换过程优化

徐 宁, 楼狄明, 谭丕强, 胡志远

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 基于半实物仿真平台,对增程器起停及切换过程控制策略进行了优化.结果表明:倒拖转矩增大和倒拖终了转速提高后,增程器启动时间降至 1.01 s;暖机启动过程发动机颗粒排放数量浓度峰值达 2.0×10^8 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$;停机过程通过发电机加载转矩实现负载停机,转速波动得以明显抑制;采用快速启动和增大增程器输出功率上升率限值后,整车动力性有所改善;切换过程发动机颗粒排放数量浓度峰值达 2.5×10^8 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$;发动机调速模式相对发电机调速模式,增程器电功率输出较平缓,但发动机更易偏离最佳油耗曲线.

关键词: 电动公交车; 增程器; 快速启动; 转速波动; 调速模式; $0 \sim 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 加速时间

中图分类号: TK427

文献标志码: A

Transit Control Strategy Optimization for Range Extender of Electric Bus

XU Ning, LOU Diming, TAN Piqiang, HU Zhiyuan

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on a semi-physical range extender experimental system, the control strategies of both start/stop and power following of range extender were optimized. Results show: with the increase of motor dragged torque and dragged end speed, the time of start process decreases to 1.01 s, the number of ultrafine particles for warm start is about 2.0×10^8 per cm^{-3} ; during the engine stop with load from generator, the speed fluctuation decreases obviously; with the fast start and the increase of rise limit for range extender output electric power, the bus power performance is improved; the number of ultrafine particles is about 2.5×10^8 per cm^{-3} during switchover process; the power output of engine speed control method is smoother compared with the generator speed control method, but tends to deviate from the

optimum fuel consumption curve.

Key words: electric bus; range extender; rapid start; speed variation; speed control mode; $0 \sim 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ acceleration time

增程式电动车具有结构及控制相对简单等特点,逐渐成为新能源汽车的一条重要技术路线^[1-3].在乘用车领域,多通过小型化的两缸、三缸以及转子发动机等来解决效率及振动噪声问题^[2].在公交客车等商用车领域,增程器多匹配柴油机,并且增程器控制策略主要以实现基本功能为目标.研究表明,功率跟随控制策略下增程器需要快速起停技术来进一步降低油耗^[3],这将导致发动机暖机起停频繁,同时带来振动噪声等问题^[4].增程式电动公交车还存在馈电状态时加速时间长的问题,为了在馈电时发动机能快速输出功率来补充电机消耗的电功率,需要进行快速功率跟随控制策略设计.现有的增程器功率跟随控制策略主要有发动机调速和发电机调速两大类.清华大学采用基于前馈和反馈的控制进行调速^[3,5],湖南南车时代电动汽车股份有限公司以及中国汽车设计研究院则进行了发动机电子控制单元(ECU)重新开发^[6],在发动机控制器中增加了转速闭环控制;上海牌增程式电动轿车采用了发电机调速模式^[7].

本文进行了公交车用增程器起停过程控制策略优化,并设计了发动机调速和发电机调速 2 种基于前馈和反馈的工况切换策略.最后,基于半实物仿真平台进行了优化试验研究.

1 试验设备及方案

研究对象为某增程式电动公交车,整车参数如

收稿日期: 2017-02-27

基金项目: 国家重点研发计划(YS2017YFGH000476)

第一作者: 徐 宁(1989—),男,工学博士,主要研究方向为增程式电动公交车能量管理及集成控制优化.

E-mail: xuningtjauto@163.com

通讯作者: 楼狄明(1963—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为柴油机的结构设计与性能优化.

E-mail: loudiming@tongji.edu.cn

表 1 所示. 所搭建的半实物仿真平台如图 1 所示. 采用 Matlab/Simulink 进行建模, 通过 Motohawk 快速开发平台进行代码编译并移植到 Mototran ECM-0565-128 控制器上, 控制器采用的是 Motorola MPC565 芯片. 动力电池初始荷电状态 (SOC) 为 30%, 增程器采用多点式控制策略^[7-8].

表 1 整车结构参数

Tab.1 Vehicle parameters

参数	数值
长×宽×高 (mm×mm×mm)	11 990×2 500×3 300
整车整备质量/kg	12 980
满载质量/kg	17 980
0~50 km·h ⁻¹ 加速时间/s	≤20

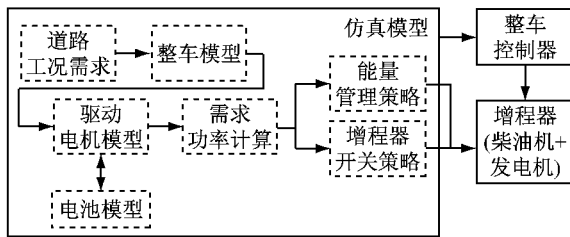


图 1 半实物仿真系统框架图

Fig.1 Semi-physical system block diagram

增程器匹配某 1.9 L 四缸柴油机, 最大功率为 71 kW, 对应转速为 3 000 r·min⁻¹. 试验燃料为国 V 柴油. 采用永磁同步电力测功机模拟增程器用发电机. 整车控制器通过 CAN (controller area network) 总线与发电机控制器进行通信, 并通过控制电压输出来控制发动机油门开度. 整车控制器采集发动机磁电转速传感器转速信号, 并通过 CAN 采集发电机转速. ES590 结合可标定 BOSCH ETK 进行发动机喷油参数标定. 采用测试粒径范围为 5.6~560 nm 的 TSI EEPS 3090 颗粒粒径测试仪进行柴油机超细颗粒排放数量分析. 试验系统如图 2 所示.

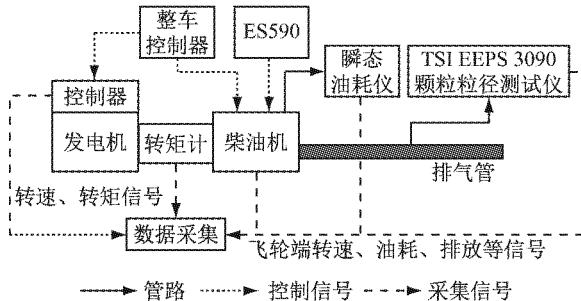


图 2 增程器和试验系统

Fig.2 Range extender and experimental system

2 试验结果

2.1 暖机起动过程

增程器暖机起动试验过程中, 发动机水温控制

在 65 °C 左右. 依靠发电机倒拖使发动机起动, 并通过控制发电机倒拖转矩和倒拖终了转速来控制起动过程. 由于增程器转动惯量较大, 发电机倒拖过程消耗的功率较大, 不宜采用过大倒拖转矩. 通过标定系统进行了起动过程发动机喷油限制, 试验设置及起动过程所需时间试验结果如表 2 所示.

表 2 起动策略优化测试方案

Tab.2 Start strategy optimization test scheme

倒拖终了转速/ (r·min ⁻¹)	倒拖转矩/ (N·m)	喷油限制	起动时间/ s
600	80		2.8
600	100	无	2.0
600	120		1.6
900	80		1.8
900	100	无	1.4
900	120		1.0
900	80	0~600	2.3
900	100	r·min ⁻¹	1.8
900	120	不喷油	1.2

图 3 为不同起动策略下发动机转速响应. 从图 3 可见, 不同起动策略下, 转速达到 1 000 r·min⁻¹后完成起动并进入怠速闭环控制. 起动过程中在转速 300 r·min⁻¹以及 600 r·min⁻¹处都分别出现了一个较小和一个较大的转速波动峰值. 倒拖转矩增大及倒拖终了转速提高后, 发动机起动时间缩短. 在低速不喷油时, 发动机起动时间会有所延长.

图 4 为不同起动策略下发动机燃空比及超细颗粒排放数量浓度. 从图 4 可见, 虽然超细颗粒数量浓度相对于燃空比有约 2 s 滞后, 但是与燃空比有很强的相关性. 起动策略对起动过程超细颗粒数量浓度变化的影响没有明显规律. 起动过程超细颗粒数量浓度峰值在 2.0×10⁸ 个·cm⁻³左右. 聚集态颗粒只在前几个发动机循环内占比较高. 这主要是由发动机过量喷油使燃空比变小引起的. 之后的发动机循环内聚集态颗粒占比都低于 10%, 这主要是因为燃空比较小, 芳香烃等高分子有机物生成增加, 导致生成的二次核态颗粒物增加.

倒拖终了转速提高及发动机低速不喷油都会使起动阶段聚集态颗粒占比明显降低, 如图 5 所示.

不同起动策略下起动时间、油耗、超细颗粒数量浓度以及电耗对比如图 6 所示, 相对系数为各起动策略对应性能参数相对该性能参数下最大值的比值. 从图 6 可见, 较大倒拖转矩以及较高倒拖终了转速会加快起动过程, 较高倒拖终了转速的电耗明显增加, 而较大倒拖转矩的电耗增加不明显. 较高倒拖终了转速下发动机低转速不喷油时, 起动过程油耗较低, 但起动时间延长, 起动电耗也有所增加, 而且

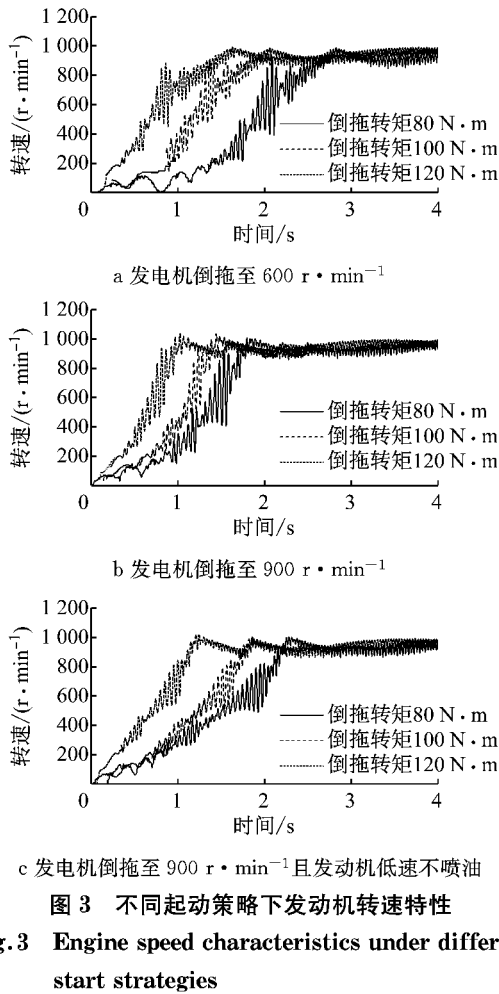


图 3 不同起动策略下发动机转速特性

Fig.3 Engine speed characteristics under different start strategies

起动过程超细颗粒排放没有明显改善. 虽然较大倒拖转矩以及较高倒拖终了转速对应电耗较大,但是具有可以加速起动的优势,对应倒拖转矩 $120 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、倒拖终了转速 $900 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,起动时间只有 1.01 s ,适合暖机快速起动.

2.2 停机过程

图 7 所示为自由停机(停机 1)过程发动机转速变化特性.

从图 7 可以看出,自由停机过程中,发动机在转速 $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 以及 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 处分别出现了一个较大和一个较小的转速波动峰值,在转速为 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 附近发动机转速波动峰值最大可达 $195 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,同时伴随着明显的停机噪声,而在 $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 附近发动机转速波动峰值为 $80 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$.

在发动机不喷油的状态下,采用发电机倒拖发动机来测试瞬时发动机转速,并分析其在起停转速范围的轴系扭振(包含滚振和扭振),如图 8 所示.

从图 8 可以看出,在起停转速范围的较低转速时,发动机轴系扭振角度第 2 阶谐量比较大,且在 $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 附近最明显,扭振角度高达 400°CA ,

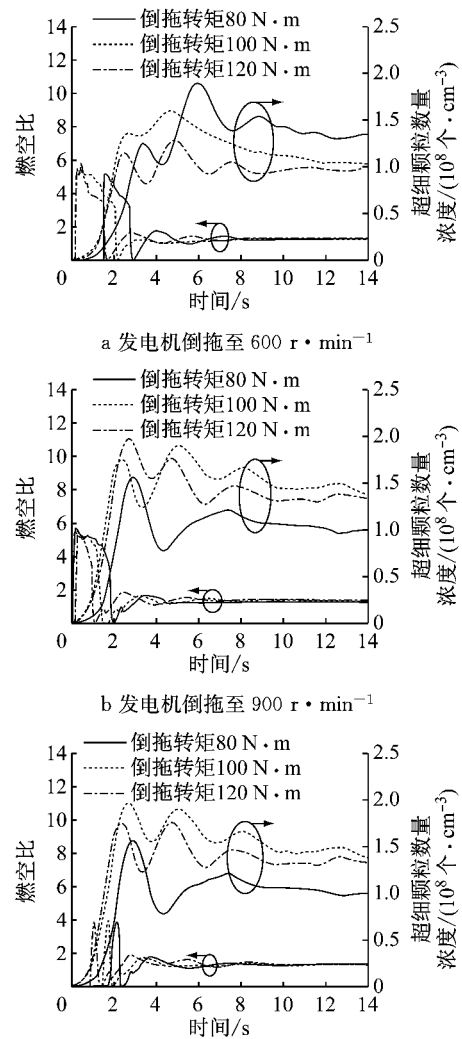


图 4 不同起动策略下超细颗粒排放数量浓度与燃空比

Fig.4 Number concentration of ultrafine particles and air/fuel ratio under different start strategies

这主要是由驱动气门的凸轮轴系特性引起的^[9]. 当转速大于 $400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 后,发动机轴系扭振角度第 1 阶谐量更加明显,在 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右扭振角度最大,高达 1000°CA ,这主要是由曲轴轴系系统固有特性决定的. $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 2 个转速附近,共振更明显,从而导致停机过程转速波动较大并带来噪声.

为了减少停机过程的转速波动,尝试在停机过程采用关闭节气门来抑制作为转速波动激励源的气体力和快速穿越共振明显区域 2 种方法,以减少转速波动. 在关闭节气门的策略下,起停转速范围内发动机轴系扭振特性如图 9~11 所示.

从图 9~11 可见,进气门关闭后,扭振角度第 1 阶谐量明显减少,这主要是因为减少了作为激励源的气体力,而扭振角度第 2 阶谐量却基本不变.

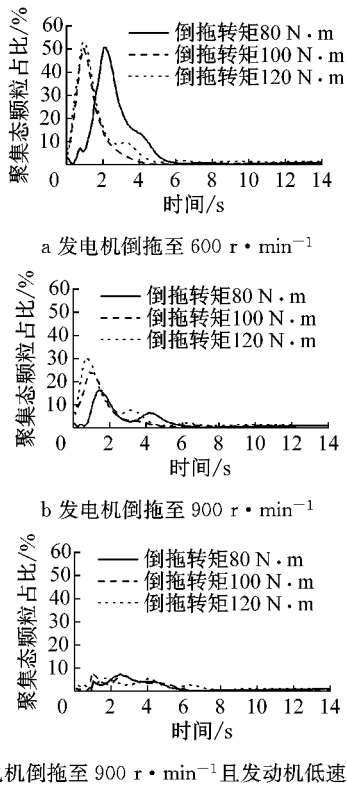


图 5 不同起动策略下聚集态颗粒数量占比对比

Fig.5 Ratio of accumulation mode ultrafine particles to all particles under different start strategies

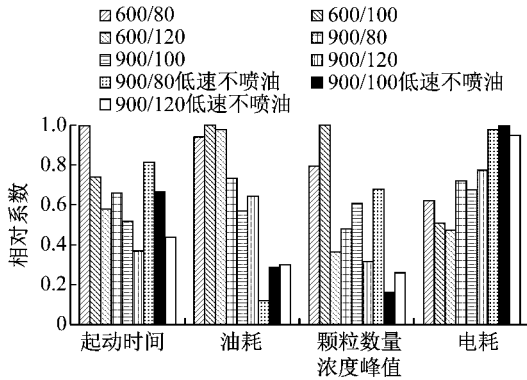


图 6 不同起动策略下主要性能对比

Fig.6 Comparison of main performances under different start strategies

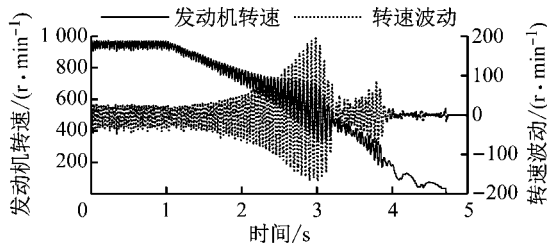


图 7 自由停机过程发动机转速变化特性

Fig.7 Engine speed variation characteristics during normal stop

分别采用节气门关闭和发电机加载的负载停机来抑制发动机轴系扭振,负载停机控制策略如图 12

所示. 停机负载分别设置为 40 N·m(停机 2)和 80 N·m(停机 3). 负载脱离转速设置为 300 r·min⁻¹, 既保证停机过程 600 r·min⁻¹和 300 r·min⁻¹的转速波动减少,又能够防止增程器反转.

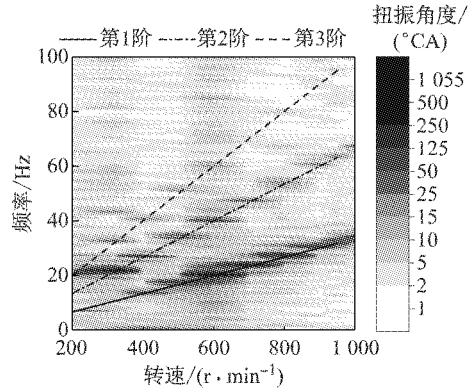


图 8 节气门开启时扭振角度频谱图

Fig.8 Spectrum of torsion angle with throttle opened

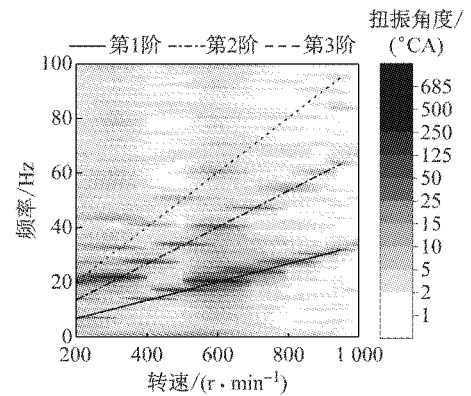


图 9 节气门关闭时扭振角度频谱图

Fig.9 Spectrum of torsion angle with throttle closed

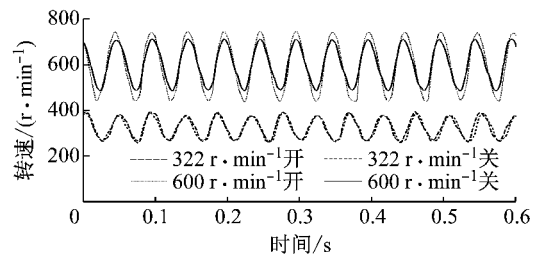


图 10 节气门开启或关闭时转速波动情况

Fig.10 Engine speed variation with throttle opened or closed

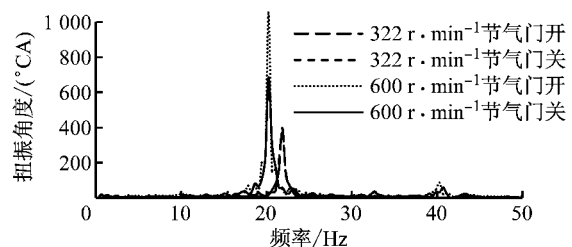


图 11 节气门开启或关闭时扭振角度

Fig.11 Torsion angle with throttle opened or closed

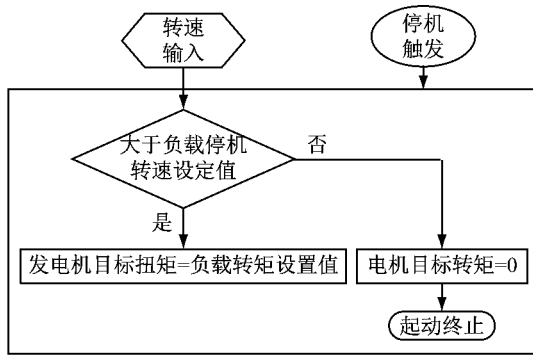


图 12 停机过程控制策略

Fig.12 Control strategy of stop

试验结果如图 13 所示. 从图 13 可以看出, 节气门关闭和负载停机都会使发动机转速波动明显减少, 如表 3 所示. 节气门关闭之后, 发动机转速波动有所减少, 在自由停机过程第 1 阶共振最大转速的 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 附近转速波动减少了 $61 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 而第 2 阶共振最大转速的 $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 附近变化不明显. 负载停机过程相对自由停机过程, 转速波动减少很明显, $40 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $80 \text{ N} \cdot \text{m}$ 负载停机过程相对自由停机过程中第 1 阶共振最明显时对应转速 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 附近转速波动分别减少了 $50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $81 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$. 采用 $80 \text{ N} \cdot \text{m}$ 负载停机, 噪声也得到缓解.

2.3 切换过程

切换过程即为功率跟随过程. 采用如图 14 所示的发动机调速和发电机调速 2 种基于前馈和反馈的控制策略.

针对增程式电动公交车 $0 \sim 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 满负荷

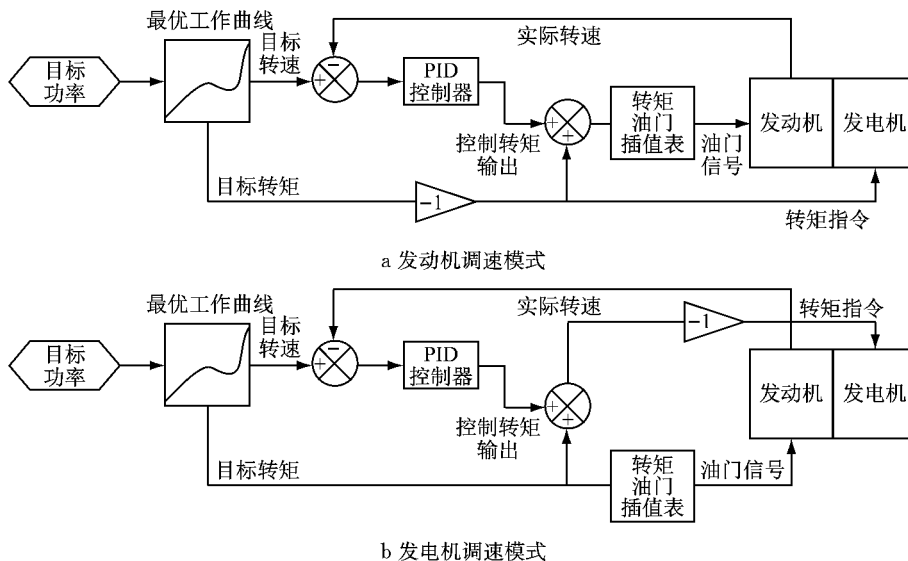
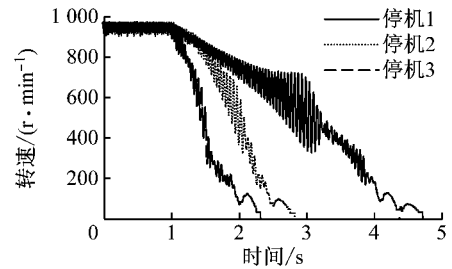
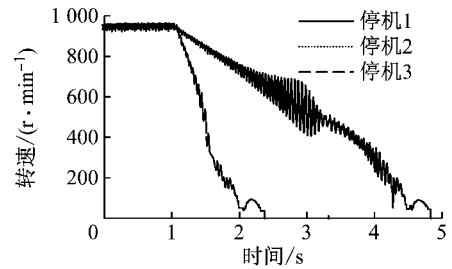


图 14 基于前馈和反馈的控制策略

Fig.14 Transit control strategy based on feedforward and feedback



a 节气门开启



b 节气门关闭

图 13 不同停机策略下发动机转速波动

Fig.13 Engine speed variation characteristics under different stop strategies

表 3 停机策略对停机过程转速波动的影响

Tab.3 Effect of stop strategy on engine speed variation characteristics

试验	$600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 附近转速波动/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 附近转速波动/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$
停机 1/节气门关闭	195/134	83/95
停机 2/节气门关闭	145/92	69/47
停机 3/节气门关闭	114/69	108/47

加速过程, 分别采用 2 种调速模式并设计了 4 套控制策略组合, 进行半实物仿真下增程器控制策略对比试验. 控制策略组合及 $0 \sim 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 加速时间和动力电池荷电状态如表 4 所示.

表 4 0~50 km·h⁻¹加速过程增程器控制策略
Tab.4 Range extender control strategy during 0-50 km·h⁻¹ acceleration process

编号	起动过程		切换过程		0~50 km·h ⁻¹ 加速	
	终了转速/(r·min ⁻¹)	倒拖转矩/(N·m)	调速模式	功率上升限值/(kW·s ⁻¹)	时间/s	终了荷电状态/%
B0	增程器关闭		增程器关闭		33.7	28.15
B1	600	80	发动机	10	21.2	28.86
B2	900	120	发动机	15	20.5	28.90
B3	600	80	发电机	10	20.9	28.90
B4	900	120	发电机	15	20.7	28.93

图 15 为增程式电动公交车 0~50 km·h⁻¹加速过程驱动电机需求电功率和增程器输出电功率。

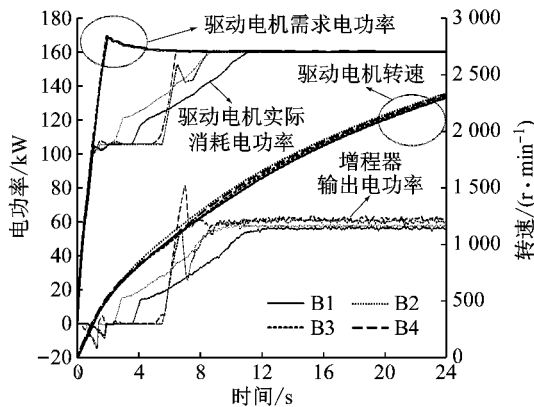


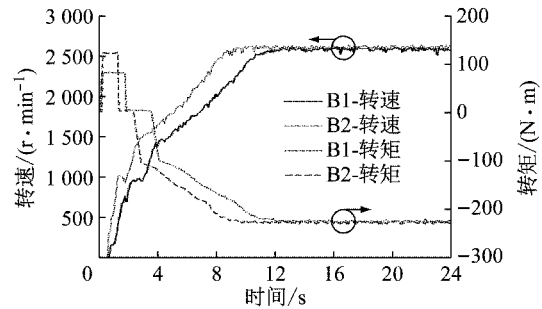
图 15 0~50 km·h⁻¹加速过程驱动电机需求电功率和增程器输出电功率

Fig.15 Electric power of e-drive motor and rang extender during 0-50 km·h⁻¹ acceleration process

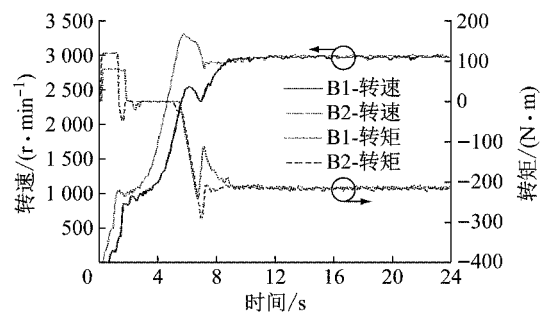
从表 4 和图 15 可以看出,在动力电池荷电状态较低时,动力电池输出功率受限制,当驱动电机转速大于一定转速时,驱动电机将不能工作在全负荷,因此 0~50 km·h⁻¹加速时间达 33.7 s。为提升加速性能,需要增程器补充驱动电机电功率,而不同策略下增程器从输出功率到输出最大功率都需要一段时间,所以驱动电机无法满负荷加速,0~50 km·h⁻¹加速时间都大于 20 s。发动机调速模式和发电机调速模式下,当采用快速起动策略和较大功率变化率限值时,增程器输出功率响应速度明显增大,0~50 km·h⁻¹加速时间变短,分别减少了 0.7 s 和 0.2 s,而荷电状态变化不大,分别只少增加了 0.04% 和 0.03%。此外,倒拖起动时,如果电池输出功率能够同时满足驱动电机外特性和倒拖发电机电功率需求,整车加速性能就不受倒拖起动影响,否则加速性能将变差,但不明显。

图 16 为不同调速模式下增程式电动公交车加

速过程增程器转速和转矩。从图 15、16 可以看出,发动机调速模式下增程器电功率输出比较平缓,但在发电机调速控制模式下,由于 PID 控制器对发动机转矩的调节,增程器先完成加速过程后才输出电功率,导致增程器输出电功率有所滞后和波动。



a 发动机调速模式



b 发电机调速模式

图 16 0~50 km·h⁻¹加速过程增程器转速和转矩响应
Fig.16 Speed and torque characteristics of range extender during 0-50 km·h⁻¹ acceleration process

图 17 所示为 2 种调速模式下增程式电动公交车加速过程发动机工况点分布情况。

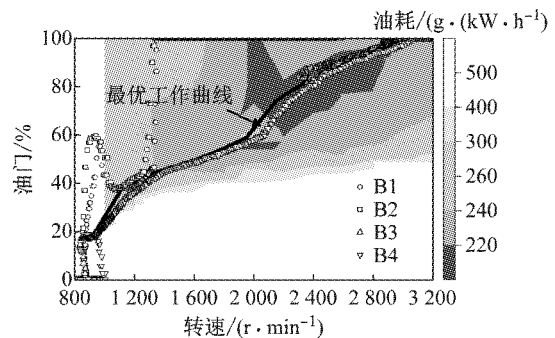


图 17 0~50 km·h⁻¹加速过程发动机工况点分布
Fig.17 Engine working point distribution during 0-50 km·h⁻¹ acceleration process

从图 17 可以看出,发电机调速模式下,发动机工况点分布主要集中在最优工作曲线附近,而发动机调速模式下,当目标转速增大时,PID 控制系统输出正转矩,在目标转矩不减小时,发动机输出转矩有

增大的趋势,因此发动机工况点分布将由最优工作曲线向较大转矩的外特性曲线偏移.当输出功率上升限值增大后,PID控制输出的正扭矩也增大,发动机工况点分布将更向外特性曲线偏移.此外,在发动机最优工作曲线距离外特性较近时,容易出现提速缓慢甚至无法提速现象,这都将导致发动机油耗的恶化.

图 18 所示为 2 种控制模式下增程式电动公交车加速过程发动机超细颗粒物数量浓度排放特性.

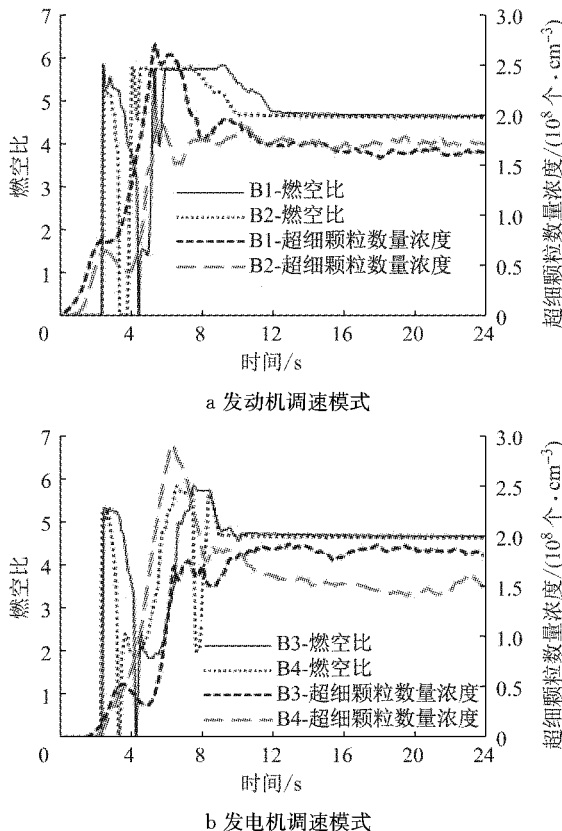


图 18 加速过程超细颗粒物数量浓度和燃空比

Fig. 18 Number concentration of ultrafine particles and air/fuel ratio during acceleration process

从图 18 可以看出,增程式电动公交车加速过程超细颗粒排放变化特性相对燃空比滞后,发动机模式和发电机模式对超细颗粒物数量浓度影响不明显,超细颗粒物数量浓度峰值不是出现在起动阶段,而是出现在加速加载阶段,为 2.5×10^8 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$,并且此过程中聚集态颗粒所占比例多达 90%.这主要是因为此阶段燃空比较大,导致油滴雾化较差,局部缺氧现象严重,因此燃烧不完全产生的碳粒增加,聚并而成的聚集态颗粒也增加^[10].

3 结论

(1) 倒拖转矩增大和倒拖終了转速提高都会加

快增程器起动过程,组合作用下起动时间可低至 1.01 s.

(2) 停机过程采用负载停机和关闭节气门停机后,停机过程转速波动都会减小,但负载停机时更明显,也更易实现.

(3) 在快速起动和增大增程器输出功率上升限值后,电动公交车 $0 \sim 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 加速时间有所减少.

(4) 发动机调速模式相对发电机调速模式,功率输出更加平缓,但发动机工况点分布会偏离发动机最优工作曲线.

参考文献:

- [1] TATE E, HARPSTER M O, SAVAGIAN P J. The electrification of the automobile: from conventional hybrid, to plug-in hybrids, to extended-range electric vehicles[J]. SAE International Journal of Passenger Cars Electronic & Electrical Systems, 2008, 1(1):156.
- [2] FRAIDL G K, BESTE F, KAPUS P E, *et al.* Challenges and solutions for range extenders: from concept considerations to practical experiences[R]. Detroit: SAE, 2011.
- [3] 欧阳明高,李建秋,杨福源,等.汽车新型动力系统:构型、建模与控制[M].北京:清华大学出版社,2008. OUYANG Minggao, LI Jianqiu, YANG Fuyuan, *et al.* Automotive new powertrain: system, model and controls[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [4] GUO R, CAO C, MI Y, *et al.* Experimental investigation of the noise, vibration and harshness performances of a range-extended electric vehicle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2015, 20(11):13.
- [5] 曹桂军,闫凤军,李雪峰,等.串联混合动力客车辅助功率单元控制研究[J].汽车工程,2007,29(4):321. CAO Guijun, YAN Fengjun, LI Xuefeng, *et al.* A study on the control of auxiliary power unit of series hybrid electric bus[J]. Automotive Engineering, 2007, 29(4): 321.
- [6] 李雪峰,郭俊,汪伟,等.带前馈串联式混合动力车辅助功率单元控制方法及装置:102019927 B[P].2010-12-14. LI Xuefeng, GUO Jun, WANG Wei, *et al.* Method and device for controlling auxiliary power unit of tandem hybrid vehicle with feedforward: 102019927 B[P]. 2010-12-14.
- [7] 孙逸神,程伟.串联混合动力汽车车载供电系统的设计及验证[J].汽车工程,2013,35(3):261. SUN Yishen, CHENG Wei. Design and verification of on-board power supply system for series hybrid electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(3): 261.
- [8] 叶冬金.增程式纯电动车动力系统参数匹配及控制策略研究[D].长春:吉林大学,2012. YE Dongjin. Study on parameters design and control strategy for powertrain system of extended-range electric vsehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [9] HEYWOOD J. Internal combustion engine fundamentals[M]. New York: McGraw-Hill Education, 1988.
- [10] KITTELSON D B. Engines and nanoparticles: a review[J]. Journal of Aerosol Science, 1998, 29(5/6): 575.