

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201601024

微型燃气轮机增程式电动汽车设计

周雅夫^{1,2}, 麻笑艺^{1,2}, 胡晓炜^{1,2}, 李琳辉^{1,2}, 连 静^{1,2}

(1.工业装备结构分析国家重点实验室(大连理工大学), 辽宁 大连 116024; 2.大连理工大学 汽车工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 为提高纯电动轿车的适用性, 弥补其续驶里程的缺陷, 提出以微型燃气轮机作为增程器的增程式电动汽车开发方案. 对主要动力总成及零部件进行分析, 并根据分析确定整车参数, 对主要零部件进行计算选型, 在 Advisor 中对整车模型的可行性和燃油经济性进行了仿真验证. 仿真结果表明: 所提出的设计方案在纯电动模式下可以满足大部分人的需求, 在增程模式下, 平均每百公里等价油耗为 2.02L. 该设计方案提升车辆的燃料适应性, 同时充分利用了电网能量, 相比于传统车, 燃油经济性也有很大提升.

关键词: 整车设计与计算; 微型燃气涡轮发动机; 增程式电动汽车; 控制策略; 仿真

中图分类号: U469.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)07-0100-06

Design of range-extended electric vehicle with micro gas turbine

ZHOU Yafu^{1,2}, MA Xiaoyi^{1,2}, HU Xiaowei^{1,2}, LI Linhui^{1,2}, LIAN Jing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment(Dalian University of Technology), Dalian 116024, Liaoning, China; 2. School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: For the purpose of improving the driving range and the applicability of electric vehicle, a range-extended electric vehicle using a micro gas turbine as the range-extender is designed. Firstly, the powertrain and main parts of a certain model of electric vehicle are analyzed. Then the vehicle specifications and main parts are determined according to the analyzing and calculating results. Finally the vehicle model is built in Advisor and the feasibility and fuel consumption are simulated. According to the simulating results, Gas turbine range-extended electric vehicle presented in this paper can meet the demand of most users in pure electrical mode. In range-extended mode, the equivalent fuel consumption is 2.02 L/100 km. This scheme makes vehicle adaptive to multiple kind of fuel, and compared with conventional vehicles, the energy from power grid is fully used and the fuel economy is greatly improved.

Keywords: Vehicle design and calculation; micro gas turbine; range-extended electric vehicle; control strategy; simulation

相比于传统汽车, 电动车不仅有更高的能量效率, 而且有排放污染低, 能回收制动能量的能力, 维护成本更低以及低噪音等优势. 纯电动汽车是今后汽车研究和发展的方向. 然而, 有限的续驶里程、充电时间长、充电桩少等因素, 阻碍了电动车的普及. 其中, 令电动车无法满足更多人需求的首要因素是电动车的续驶里程较短. 在当前的电池技术水平下, 增程式电动车(REV, range-extended electric vehicle) 的应用是增加行驶里程, 满足更多用户需求的可行办法^[1-2].

现有的增程式电动车大多以往复式内燃机作为增程器, 下文简称内燃机(ICE, internal combustion

engine). ICE 的优势在于宽广的工作范围与高比功率, 其已经多年在汽车市场上占据了主导地位. 但由于它的燃料能量效率较低, 零件多, 结构复杂, 污染相对严重等原因, ICE 作为增程器存在一定局限性. 增加电池数量也是延长纯电动汽车续驶里程的方法, 但过多的电池会使车辆过重, 操纵稳定性和安全性都会受到影响, 不是根本的解决办法.

本文采用的微型燃气轮机(GT, gas turbine) 与用于飞机、船舶及特殊车辆(如坦克、工程车等) 上的大型燃气轮机不同, 它体积较小, 可用于普通轿车上, 可以满足车用的功率需求. GT 比 ICE 活动部件少, 结构更紧凑, 比功率高, 因此使用 GT 时尺寸比使用 ICE 时更小, 质量更轻, 排放更低, 也可使用不同种类的燃油, 可以将 CNG/LPG、酒精、煤油以及可再生燃油等作为燃料, 摆脱柴油和汽油的限制^[3-4]. 相比于电池, GT 具有高比功率的特性. 所以在增程设备中, GT 是 ICE 的理想替代品.

收稿日期: 2016-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(61473057, 61203171, 51107006);
中央高校基本科研业务费专项基金(DUT17LAB11,
DUT15LK13); 国家高技术研究发展计划(2010AA11A205)

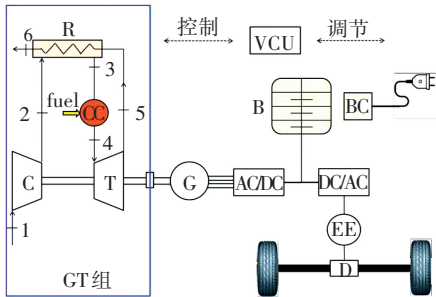
作者简介: 周雅夫(1962—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 连 静, lianjing407@ sina.com

基于以上优势,本文提出将微型燃气轮机作为纯电动汽车的增程器,开发出一种全新的车型:微型燃气轮机增程式电动车 (GTREV, gas turbine range-extended electric vehicle). 当然,GT 也有不及 ICE 的劣势,例如对零件可靠性极高的要求以及相应产生的高昂造价、高频噪声、高温废气等缺点也阻碍了它如同 ICE 一样广泛普及.

1 原车配置分析及 GT 设计

GT 虽然在其最佳工作区间运行时具有较高的工作效率,但过窄的工作范围使其无法直接驱动车轮. 为使 GT 在合适的工作点持续工作,本文设计了如图 1 所示结构.



C—压气机; T—涡轮机; R—换热器; CC—燃烧室; G—发电机; AC/DC—交流/直流转换; B—电池; BC—充电器; EE—电机; D—差速器; VCU—整车控制器.

图 1 GTREV 的整车结构简图

Fig.1 GTREV vehicle structure diagram

GT 组由 4 部分构成:压气机、涡轮机、燃烧室及换热器. GT 组与发电机机械连接,所产生电能用于驱动电机,再由电机驱动车轮,并将剩余电能存储于电池中. 这种结构使得 GT 组能维持在高效工作区间运转,避免了 GT 的缺点,也提高了能量的使用效率. 换热器用于将废气携带的剩余热量传递给即将进入燃烧室的新鲜空气,其位于压缩机和燃烧室之间. 换热器的加入能够提高进气温度,提升燃料利用率,另外结合稀薄燃烧等新型燃烧技术能够减少废气中有害物质的含量,使 GTREV 达到更高的排放标准.

1.1 原始车型分析

受当前的电池发展水平所限,由于电池能量密度并没有本质上的提升,因此即使是对于当前最先进的动力电池,都无法和内燃机系统的能量密度相提并论^[5-6]. 因此,若要通过增加动力电池数量使电动汽车的续驶里程达到或接近传统汽车的水平,车辆自重会变得非常大,操纵性和制动能力也会随之降低. 此外,相对于汽车的其他主要零部件,动力电池的寿命相对较短,而且目前也没有完整的电池回收体系,大

量达到寿命的电池势必会损害环境. 根据 2014 年销量,表 1 中列出目前具有代表性的几款纯电动车单次充电的最大行驶里程^[7].

表 1 当前具有代表性的纯电动车

Tab.1 Representative electric car nowadays

序号	制造商	型号	里程/km	销量
1	Nissan	Leaf	175	61 027
2	Tesla	Model S	500	31 623
3	BMW	i3	160	16 052
4	Mitsubshi	iMiEV	198	3 936
5	BYD	e6	300	3 611

选择表 1 中最具代表性的车型 1 作为原型车,详细参数见表 2^[8]. 该车因需满足 175 km 的续驶里程,不得不装载 276 kg 的电池包以满足日常行驶需要,并且需要 8 h 来完成充电,即使是使用快速充电桩充电,也需要 30 min 才能充满电池容量的 80%. 目前,国内快速充电桩的数量远不能满足使用需求,虽然大多数人只是偶尔有远途行驶的需求,车主还是很难选择纯电动车辆作为家庭用车.

表 2 Nissan 纯电动原车参数

Tab.2 Parameter of the Nissan original car

长×宽×高/mm	轴距/mm	轮距/mm	车轮滚动半径/mm
4 448×1 770×1 550	2 700	1 540	316
迎风阻力系数	迎风面积/mm ²	摩擦阻力系数	整车整备质量/kg
0.25	1.40	0.015	1 494
最大装载质量/kg	最高车速/(km·h ⁻¹)	0~50 km 加速时间/s	最大爬坡度/%
1 920	144	4.40	20
最大续驶里程/km	电动机最大功率/kW	电动机最大扭矩/(N·m)	
175	80	280	
电动机最高转速/(r·min ⁻¹)	电池容积/(kW·h)	百公里耗电量/kWh	
10,390	24	14.60	

根据目前中国的调查报告,每日平均行驶里程小于 80 km 以内的车辆占有所有车辆的91.31%,也就是说,续驶里程为 80 km 的车辆就完全可以满足大部分人平时行驶里程的需求^[9],而现今纯电动车的设计令车主不得不装载大量不必要的电池,过多的电池在影响操纵稳定和制动性能的同时,也增加了车的耗电量. 本文提出的 GTREV 是基于使用者的实际使用情况,在维持原车型动力性的前提下,削减了动力电池的数量以减轻质量.

1.2 GT 组构造

典型的微型燃气轮机由一个单级径流式压气机和一个单级径流式涡轮机构成,并由旋转杆将它

们与发电机转轴相连接. 虽然 GT 在工作时转速非常高,但其只有一个部件在运动,相比于 ICE 结构大为简化,具有很大优势^[10-11]. 图 2 中数字显示了气体的行进顺序. 在 GT 工作时,新鲜空气经进气口进入压气机,由压气机进行升压升温. 压缩空气离开压气机后在换热器中吸收燃烧废气的热量,再进入燃烧室与燃料充分混合并燃烧,从而膨胀做功,推动涡轮机叶轮转动,所产生的动能主要用于发电机发电,另有小部分动能用于压气机工作. 燃烧后产生的高温废气在被排放之前,先通过换热器将部分热能传递给压缩后的新鲜空气,以提升燃料利用率,减少废气有害物. 由于单级压气机与单级涡轮机组成的 GT 不足以提供整车所需动力,因此本文最终选用了图 2 所示的 GT 组,它由一个两级压气机和一个三级轴流式涡轮机组成,这样的结构使得 GT 组的功率大大增加,能够满足整车的动力性需求.

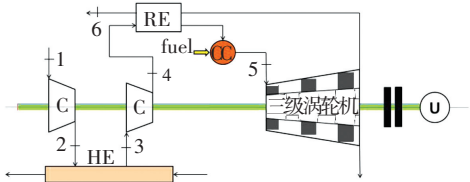


图 2 配有两级压气机和三级涡轮机的 GT 组

Fig.2 GT set with 2-stage compressor and 3-stage turbine

本文提出的微型燃气轮机增程式电动车基于纯电动汽车的优势,并结合了微型燃气轮机能够使用不同种类燃料的特点,使得车辆在不同地区不同状态下最大程度地满足驾驶员的需求;而在最常使用的市区工况下使用纯电动模式完成,在经济性和排放上都处于最佳工况.

2 整车结构设计

本文设计的 GTREV 的动力性与原型车辆一致,因此,总需求功率也与原型车辆保持一致.

1)最高车速模式

在增程式电动汽车以最高车速行驶的工况下,忽略坡度阻力功率和加速阻力功率,根据汽车行驶的功率平衡方程计算车辆需求功率为

$$P_{eu} = \frac{Mgf}{3\,600}u_{\max} + \frac{c_D A}{76\,140}u_{\max}^3.$$

式中: M 为整车最大总质量 (kg), f 为滚动阻力系数, $u_{\max}$ 为车辆最高行驶速度 (km/h), C_D 为迎风阻力系数, A 为车辆迎风面积 (m²); 得

$$P_{eu} = 25.01\text{ kW}.$$

2)最大爬坡度模式

在增程式电动汽车以最大爬坡度运行的模式下,忽略加速阻力功率和空气阻力功率,根据汽车功

率平衡方程计算最大爬坡度行驶功率为

$$P_{ea} = \frac{Mgf}{3\,600}u_a \cos \alpha + \frac{Mg \sin \alpha}{3\,600}u_a.$$

式中: u_a 为增程式电动汽车爬坡时的行驶速度, $u_a = 20\text{ km/h}$; α 为坡度角 (°); 得

$$P_{ea} = 28.97\text{ kW}.$$

3)最大加速度模式

在增程式电动汽车以最大加速度行驶的模式下,忽略坡度阻力,根据汽车功率平衡方程计算行驶所需的功率为

$$P_{ec} = M \left(\frac{u_a^2}{2t} + \frac{1}{1+x} f g u_a \right) + \frac{\rho C_D A}{2(2x+1)} u_a^3.$$

式中: u_a 为加速结束时的车速, $u_a = 50\text{ km/h}$; t 为加速到 u_a 所需的时间, $t = 4.4\text{ s}$; x 为拟合系数,为 0.5; ρ 为空气密度,取 $1.2258\text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-4}$; 得

$$P_{ec} = 21.8\text{ kW}.$$

$P_e = \max(P_{eu}, P_{ea}, P_{ec}) = 28.97\text{ kW}.$

电机峰值功率

$$P_{e\max} = \lambda P_e.$$

式中: λ 为电机过载系数,其定义为电动机峰值扭矩与额定转矩之比,一般为 1.8~2.2; P_e 为燃气涡轮机的额定功率 (kW).

本文设计的 GTREV 使用在串联控制逻辑,在此逻辑下,每当增程式电动汽车电池的荷电状态 (SOC, state of charge) 过低时,纯电动模式关闭,增程器被自动启动,汽车使用增程模式继续行驶,车辆的最高车速为 144 km/h,车辆所需的微型燃气轮机功率为

$$P_n = \frac{1}{\eta_T} \left(\frac{Mgf}{3\,600} + \frac{C_D A}{76\,140} u_a^3 \right) = 29.42\text{ kW}.$$

现有的微型燃气涡轮机的功率 30~60 kW,为了使燃油消耗率最小化,选定 Capstone 公司型号 C30 的微型燃气轮机,参数见表 3^[12]:

表 3 GT 参数

Tab.3 GT parameters

转速/ (r · min ⁻¹)	额定功率/ kW	最大允许圆周速度/ (m · s ⁻¹)	燃油低热值/ (kJ · kg ⁻¹)
100 000	25	500	50 241
空气密度/ (kg · m ⁻³)	入口压力/ kPa	压气机传送 压力/ kPa	入口温度/ K
1.18	100	440	288
最大允许 温度/ K	再生度		最大允许轴 扭转应力/ MPa
1 400	0.50		40
涡轮多变效率		压气机多变效率	机械效率
0.90		0.85	0.90

由于 GT 在额定点外的效率继续下降的特殊性,

GT 比 ICE 运行的状态要求严格^[13-14], 所以 GT 只与发电机直接相连. 本文选定的 GT 的额定工作点在 80 000~90 000 r · min⁻¹, 额定转矩在 3 N · m 左右. 为了使动力总成达到最佳工作状态, 选择适应 GT 额定工作点发电机, 所选发电机功率为 32 kW, 效率为 0.95, 整个增程系统的总效率为

$$\eta = \eta_{pt} \cdot \eta_{pc} \cdot \eta_m \cdot \eta_{ge} = 0.65.$$

为满足 GT 组对零部件结构方面的需求, 本文还对燃料箱和换热器进行了合理设计, 以满足温度交换的需求. 这些零部件的设计图如图 3 和表 4 所示. 换热器的设计参考美国 Capstone 公司 C30HEV 混合动力车所采用的高效换热器, 可满足换热需求; 燃料箱考虑了 GT 燃料消耗量 (包括启动油耗与正常工作油耗) 和与原车型的汽油机款油箱容积可提供的续驶里程进行设计.

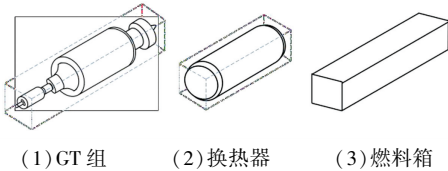


图 3 部件结构

Fig.3 Component structure

由于重新配制的车辆增加了 GT 组、蓄热器、燃料箱, 增加 140 kg 的总质量, 同时也减轻电池质量 149 kg, 因此重新配备的整车质量比原始车辆轻 9 kg. 重新配置的车辆共保留 88 个电池单体, 即 22 个电池模块, 质量为 127 kg, 电池容量为 11 kW · h, 理论续驶里程 80.2 km. 原车的动力性得以持续保

持, 本文重新配置的车辆与原车的对比如表 5 所示.

表 4 部件尺寸及质量

Tab.4 Components size and weight

部件	长/mm	宽/mm	高/mm	质量/kg	总质量/kg
GT 组	836	572	729	91	
换热器	340	130	120	12	
燃料箱	880	270	270	37	
电池包	510	400	185	127	

267

表 5 原车与重新配置车的对比

Tab.5 Comparison of the original car and the reconfigured car

车型	质量/ kg	$u_{max}/$ (km · h ⁻¹)	0~50 km 加速时间/s	纯电动续 驶里程/km	电池容量/ (kW · h)
原纯 电动车	1 494.0	144.0	4.4	175.0	24.0
重配置 GTREV	1 485.0	144.0	4.4	80.2	11.0

3 仿真实验

为验证本文设计的微型燃气轮机增程式电动车的燃油经济性, 以重新配置后的整车参数 (见表 5) 为基础, 基于 Matlab/Simulink 仿真平台, 运用 Advisor 仿真软件, 分别建立整车模型和子模型, 整车模型为 SERIES_GTREV_in.m, 子模型包括涡轮机模型、电机模型、电池模型、主减速器模型、车轮和车轴模型、控制策略模型和车身模型 (见图 4).

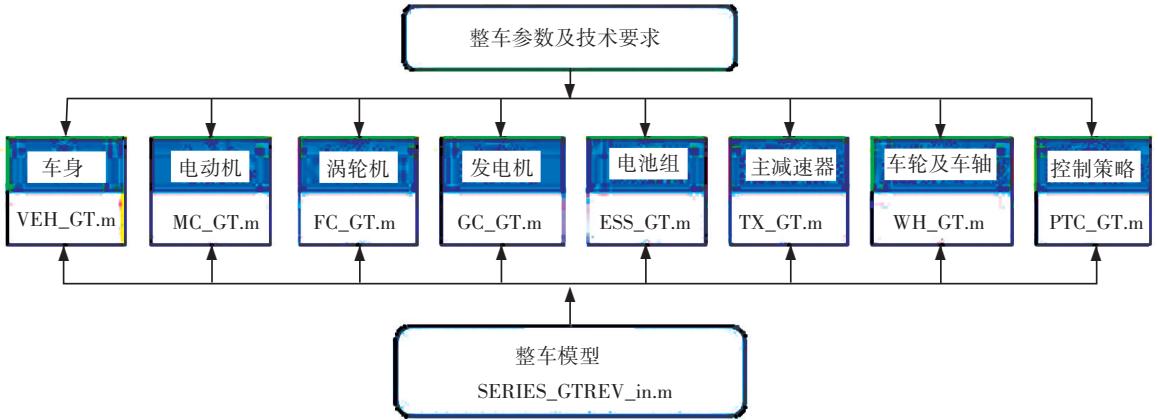


图 4 整车仿真模型构建

Fig.4 Vehicle simulation model construction

仿真实验所采取的控制策略设计如下: 当荷电状态 ≤ 0.3 时, GT 组开启, 发电机将电力传给驱动电机驱动车辆, 同时将多余电量传递至电池包中储存; 当荷电状态 ≥ 0.5 时, GT 组关闭, 车辆使用电池内电

量驱动车辆.

本文在仿真实验时选取欧洲实行的汽车行驶油耗测试工况 ECE (economic commission for europe) + EUDC (extra urban driving cycle) 作为车辆的循环工

况,这种循环工况是当前世界上普遍使用的测试工况,对矫正仿真结果有重要意义(见图 5)^[15-16]. 对于不同行驶里程的模拟,本文通过重复 ECE+EUDC 的方式来实现.

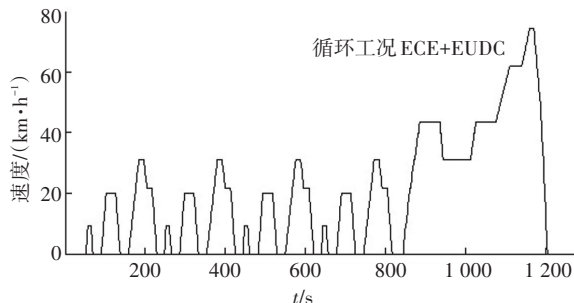


图 5 本文仿真使用的循环工况

Fig.5 Standard driving cycle used in simulation

仿真实验 1 短途仿真.

在模拟仿真中,GTREV 配备了 22 个电池模块,最大充电功率为 30 kW. 首先对所设计的车型进行了不同初始荷电状态的两短途仿真,仿真结果如图 6、图 7. 图 6 为模拟电池充满后测试的循环工况和结果,该车在纯电动模式下可行驶 7 个 ECE+EUDC 循环(约 140 min 的行驶时间),在此之后荷电状态会下降至 0.3. 图 7 为模拟电池在荷电状态到达下限后测试的循环工况和结果,设计跑行 6 个 ECE+EUDC 循环,期间 GT 开启 2 次,每百公里燃油消耗量为 8.2 L.

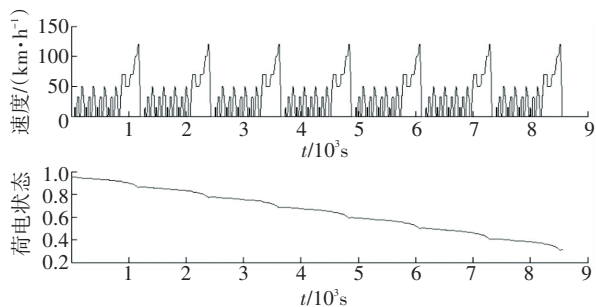


图 6 满电初始状态下仿真结果

Fig.6 Simulation results of full power as initial state

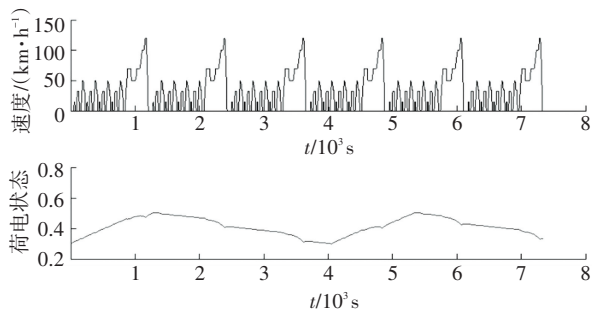


图 7 亏电初始状态下仿真结果

Fig.7 Simulation results of loss of power as initial state

根据国标 GB/T 19753—2013 的算法^[17],

$$C = \frac{(D_e \times c_1 + D_{av} \times c_2)}{D_e + D_{av}}$$

式中: C 为百公里燃油消耗量(L), D_e 为纯电动续航里程(km), c_1 为储能装置处于充电终止的最高荷电状态后试验所得百公里燃油消耗量(L), $D_{av} = 25$ km, c_2 为储能装置处于放电结束的最低荷电状态后试验所得百公里燃油消耗量(L). 仿真实验结果显示,本文设计的 GTREV 的百公里燃油消耗率为 2.02 L.

仿真实验 2 长途仿真.

本文进行了结果如图 8 的长途仿真,循环工况为长达 218.6 km 的 ECE+EUDC 的循环工况,时长为 6 h 56 min,GT 组开启了 4 次,燃油消耗量为 4.42 L,与同级别的传统内燃机近似车型(同里程下消耗 13.55 L)相比,GTREV 相对有更好的燃油经济性^[18]. 仿真结果显示,本文设计的 GTREV 不但能满足大多数人日常行驶的需求,也能满足更多人长途行驶的需求,因此有广泛的应用价值.

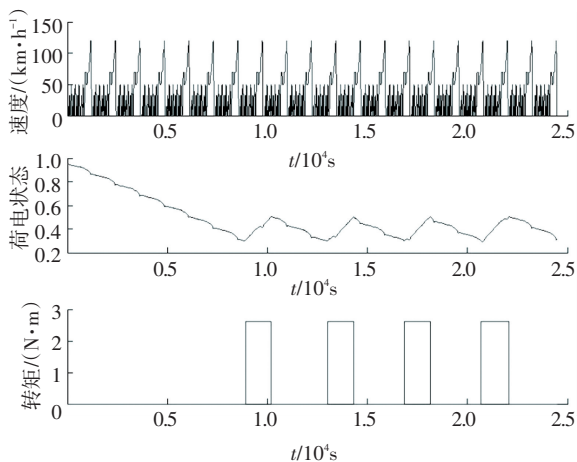


图 8 长途测试结果

Fig.8 Simulation results of long distance

4 结 论

1) 微型燃气涡轮增程式电动汽车在不同的荷电状态状态下使用不同的动力形式. 在车辆电池的荷电状态大于 0.5 时,GT 组关闭,使用电池内电量为驱动电机供电,因此能充分利用供电电网存储的电能;当荷电状态 ≤ 0.3 时,微型燃气涡轮组启动,部分能量用于驱动车辆,部分能量储存到电池中.

2) 在 ECE+EUDC 循环模拟中,车辆行驶里程为 7 个循环(约 80 km)时,动力电池从电网获取的能量得到了最好的应用,车辆使用纯电动模式行驶,整车经济性能最佳. 当车辆行驶里程大于 80 km 时,整车平均百公里等价油耗为 2.02 L,与传统内燃机车辆相比,经济性提高了 67%.

3)在当今环境污染与能源紧张的压力之下,在汽车的研发中,降低能耗与减少污染的设计目标越来越重要. 本文所述的 GTREV 是一种新的电动汽车设计方案,兼顾了节能减排与长距离使用的需求,具有广阔的发展前景.

参考文献

[1] STEPHAN C H, SULLICAN J. Environmental and energy implications of plug-in hybrid electric vehicles [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(4):1185-90.

[2] CONSTANTINE S, KYLE M. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from plug-in hybrid vehicles: implications for policy [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(9):3170-3176.

[3] PILAVACHI P A. Mini-and-micro-gas turbines for combined heat and power [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(18):2003-2014.

[4] CAPATA R, COCCIA A, LORA M, et al. The gas turbine hybrid vehicle prototype of the university of roma 1: status review [C]// Proceedings of IMECE 2005 Conf. Orlando: IMECE Press, 2005: 5-11.

[5] PALOMARS V, SERRAS P, VILLALUENGA I, et al. Na-ion batteries, recent advances and present challenges to become low cost energy storage systems [J]. Energy & Environmental science, 2012, 5(3):5884-5901.

[6] DUNN B, KAMATH H, TARASCON J M. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices [J]. Science, 2011, 334(6058):928-935.

[7] YANG Xiaohong. Global sales of electric cars in 2014 [EB/OL]. [2015-12-19] <http://www.d1ev.com/37425.html>.

[8] NISSAN™. Leaf E30 Parameter configuration [Z/OL]. [2015-12-19]. <http://www.dongfeng-nissan.com.cn/Venucia/car/e30>.

[9] HOU Cong, DU Jiuyu, WANG Hewu. Survey of daily vehicle travel distance and impact factors in Beijing [C]//7th IFAC Symposium on

Advances in Automobile Control AAC 2013-Proceedings. Beijing: [s.n.], 2013: 35-40.

[10] FAVUZZA S, GRADITI G, IPPOLITO M G, et al. Optimal electrical distribution systems reinforcement planning using gas micro turbines by dynamic ant colony search algorithm [J]. Power Systems IEEE Transactions on, 2007, 22(2):580-587.

[11] MEEGAHAPOLA L, FLYNN D. Characterization of gas turbine lean blowout during frequency excursions in power networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4):1877-1887.

[12] CAPSTONE. Gas turbine set specification [R/OL]. [2015-11-5]. http://interstatepower.us/Capstone%20Document%20Library/Application%20Guides/480009_HEV_Application_Guide.pdf.

[13] CAPATA R, SCIYBBA E. The low emission turbogas hybrid vehicle concept-preliminary simulation and vehicle packaging [J] Journal of Energy Resources Technology, 2013, 135(135):364-392.

[14] SARRADJ E, GEYER T, JOBUSH C, et al. Noise characteristics of a micro gas turbine for use in a serial hybrid concept [C]//SAE 8th International Styrian Noise, Vibration and Harshness Congress; The European Automotive Noise Conference, ISNVH 2014. Sparkassenplatz 1: SAE International, 2014. DOI:10.4271/2014-01-2066.

[15] RUUSKANEN V, NERG J, PYRHONEN J, et al. Drive cycle analysis of a permanent-magnet traction motor based on magnetostatic finite-element analysis [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(3):1249-1254.

[16] SRIDHARAN S, KREIN T. Induction motor drive design for traction application based on drive-cycle energy minimization [C]// IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-Apec. Fort Worth: Institute of Electrical and Electronic Engineering Inc, 2014: 1517-1521. DOI:10.1109/APEC.2014.6803508.

[17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19753—2013. 轻型混合动力电动车能量消耗量试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

[18] ZHANG Caiping, JIANG Jiuchun, ZHANG Weige, et al. Estimation of state of charge of lithium-ion batteries used in HEV using robust extended kalman filtering [J]. Energies, 2012, 5(4):1098-1115.

(编辑 杨 波)