

插电式串联混合动力轿车的选型匹配与仿真^{*}

孙永正¹, 李献菁¹, 邓俊¹, 胡宗杰¹, 李理光¹, 孙文凯², 杨安志²

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 浙江吉利汽车研究院, 临海 317000)

[摘要] 以某插电式串联混合动力轿车为例, 在整车性能指标和系统结构确定的基础上, 对电驱动系统、储能系统和辅助动力单元进行选型和优化匹配, 确定了发动机的最优工作点。对所建的整车仿真模型, 分别采用国家标准规定的UDC和NEDC循环工况、轻型车循环工况和等速行驶工况, 进行整车动力性、经济性的仿真验证。结果表明, 在3种工况下, 所确定的动力系统方案都能很好地满足整车动力性和经济性的要求。

关键词: 串联混合动力车; 插电式; 优化匹配; 仿真

Type Selection, Matching and Simulation of Plug-in Series Hybrid Electric Car

Sun Yongzheng¹, Li Xianjing¹, Deng Jun¹, Hu Zongjie¹, Li Liguang¹, Sun Wenkai² & Yang Anzhi²

1. College of Automotive Engineering, Tongji University, Shanghai 201804 2. Zhejiang Geely Automobile Research Institute, Linhai 317000

[Abstract] Taking a plug-in series hybrid electric car as example, based on definite vehicle performance and system architecture, the type selection and optimization matching for its electric drive system, energy storage system and auxiliary power unit are conducted and the optimal working points of engine are determined. By adopting UDC and NEDC driving cycle defined in national standard, driving cycle for light vehicles and constant speed driving cycle respectively, verification simulations on vehicle performance and fuel economy are carried out based on the simulation model built. The results show that with all three driving cycles, the power system scheme determined can well meet the requirements of vehicle performance and fuel economy.

Keywords: series HEV; plug-in; optimization matching; simulation

前言

随着我国经济的迅猛发展, 汽车的需求不断增加, 预计到2030年我国汽车保有量将达到2.7亿辆^[1], 这将会导致石油资源过度消耗, 加剧环境污染。混合动力汽车的节能环保、技术成熟和成本相对较低的特点将使之成为近期内替代传统汽车的优选方案之一^[2]。插电式串联混合动力轿车适用于城市内频繁起步和低速运行工况, 使发动机避免了怠速和低速运转的工况, 从而提高了发动机的效率^[3-4]; 同时可以从供电网获取电能, 在一定的行驶距离内以纯电动模式行驶, 降低对石油资源的依赖, 减少有害气体的排放。文中针对插电式串联混合动

力轿车, 从电驱动系统、储能系统和辅助动力单元这几方面进行选型匹配分析, 以期在满足整车动力性、续驶里程的前提下, 提高整车燃油经济性^[5]。

1 整车参数性能指标和系统结构

1.1 整车参数性能指标

所研究的串联混合动力轿车原型车是排量为1.8L的轿车。在结构不改变的情况下, 换装了新的动力系统。在确定整车纯电动续驶里程时, 参考美国私人交通调查报告(NPTS)^[6], 车辆日常行驶里程在60mile(约96.6km)以内的累积概率为60%, 考虑到动力电池通常并不是在充满状态, 故确定该车纯电动续驶里程为110km。整车参数及性能要求如表

^{*} 国家863项目(2006AA11A130)、上海市重点学科建设项目(B303)和吉利-同济汽车研究院基金资助。

原稿收到日期为2009年12月22日, 修改稿收到日期为2010年2月22日。

1所示。

表 1 串联混合动力轿车整车参数及性能要求

整车外形尺寸 /mm	4 635×1 789×1 470
预估整车整备质量 /kg	1 500
预估最大质量 /kg	1 950
30min 最高车速 /km·h ⁻¹	130
最大爬坡度 /%	≥20
0- 100km /s加速时间 /s	≤20
60km /h纯电动续驶里程 /km	110

1.2 整车系统结构

插电式串联混合动力电动轿车的结构如图 1所示,其动力系统主要由电驱动系统、储能系统和辅助动力单元 3部分组成,外部能源输入有发动机燃油供应和外接充电两种方式。发动机和 ISG 电机同轴连接组成辅助动力单元 (auxiliary power unit APU)。发动机工作在恒定的工作点带动 ISG 电机发电,动力电池用来平衡 APU 输出功率和电机输入功率:当 ISG 电机的输出功率大于电机需求功率时 (汽车减速滑行、低速行驶时停车等工况),控制器控制 ISG 电机向电池充电;当 ISG 电机的输出功率低于电机需求功率时 (汽车起步、加速、高速行驶和爬坡等工况),电池则向电机提供额外的电能。由于电机能够四象限运行,系统无须设置变速器和离合器,且电机在正反两个方向上都能实现驱动和制动能量回收,因而提高了系统效率。

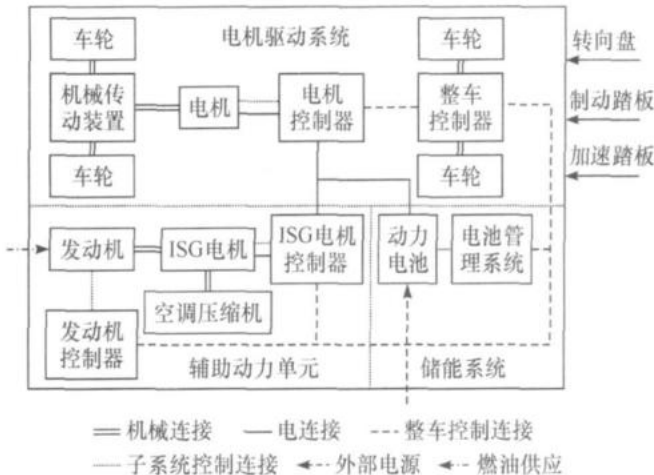


图 1 混合动力轿车动力系统结构

2 电驱动系统

电驱动系统主要由电机及其控制器、机械传动装置和驱动轮组成。与发动机特性不同,电机的机械特性是低速恒转矩和高速恒功率。低速时,电机

输出转矩大,正好满足汽车起步或爬坡工况车速较低时需要较大转矩的要求;高速时,电机输出恒功率,满足汽车的最高车速行驶要求;与汽车的行驶特性非常相符^[7]。因此,可用固定挡的齿轮传动装置来替代多速变速器,从而简化了机械传动装置。

2.1 电机选型

驱动电机选用永磁同步电机,其参数应由整车参数及其性能要求决定。相对发动机而言,电机具有一定的过载能力。选择电机功率时要综合考虑电机的额定功率和最大功率,在设计中一般根据最高车速确定电机的额定功率,整车的加速、爬坡性能则与峰值功率密切相关^[8-9]。电机功率越大,整车的加速和爬坡性能越好,但增大电机功率将导致电机的体积和质量迅速增加,而且会使电机不能经常工作在额定功率附近,电机的效率和功率因数下降。

考虑到国家标准 GB/T 19752—2005中所规定整车性能测试时装备质量要求,在计算电机功率需求时采用半载质量,即 $m = 1\,750\text{ kg}$ $g = 9.8\text{ m/s}^2$ 。传动效率 η_t 、路面滚动阻力系数 f 、汽车风阻系数 C_D 、汽车行驶迎风面积 A 、最高车速 v_{max} 、爬坡车速 v_a 、爬坡角度 α 、0- 100km/h加速时间 t 的值如表 2所示。

表 2 整车参数

η_t	f	C_D	A/m^2	$v_{\text{max}}/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	$v_a/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	$v_b/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	$\alpha/(^\circ)$	t/s
0.9	0.015	0.32	2.06	130	30	100	11.4	20

对满足整车性能的电机功率需求计算如下。

(1)满足最高车速的功率

$$P_{\text{max}} = \frac{1}{\eta_t} \left[\frac{mgf}{3\,600} v_{\text{max}} + \frac{C_D A}{76\,140} v_{\text{max}}^3 \right] \approx 30.8\text{ kW} \tag{1}$$

(2)满足最大爬坡度的功率

$$P = \frac{1}{\eta_t} \left[\frac{mgf \cos \alpha}{3\,600} v_a + \frac{mg \sin \alpha}{3\,600} v_a + \frac{C_D A v_a^3}{76\,140} \right] \approx 33.6\text{ kW} \tag{2}$$

(3)满足加速性能的功率^[10]

$$P = \frac{1}{\eta_t} \left\{ \frac{m v_b^2}{1\,296} \left[1 - \left(\frac{t - 0.1}{t} \right)^{0.58} \right] + \frac{mgf v_b}{3\,600} + \frac{C_D A v_b^3}{76\,140} \right\} \approx 60.6\text{ kW} \tag{3}$$

根据以上分析和计算结果,电机的额定功率至少为 30.8kW,峰值功率至少为 60.5kW。根据电动汽车用电机及其控制器技术条件 (GB/T 18488.1—2006)对电机功率等级的规定,确定电机的额定功率为 30kW,峰值功率为 70kW。控制器电压等级为

336VDC。综合考虑整车布置、电机技术等原因,确定电机额定转矩为 $100\text{N}\cdot\text{m}$,基速为 2800r/min ,最高转速为 6000r/min 。

2.2 固定传动比的确定

(1) 传动系最大传动比

传动比 i 应满足汽车行驶最高车速的要求,根据汽车理论:

$$i = 0.377 r_{\text{max}} / v_{\text{max}} \quad (4)$$

式中: r 为车轮滚动半径; n_{max} 为电机的最高转速。由于电机的外特性与发动机的不同,串联混合动力轿车的最高车速同时还受到电机最大功率的限制。

(2) 传动系最小传动比

确定最小传动比,应考虑3个因素:最大爬坡度、0-100km/h加速时间和地面附着率。根据汽车理论:

$$i = F_t r / (T_{\text{eq}} \eta_i) \quad (5)$$

式中: F_t 为汽车驱动力; T_{eq} 为电机转矩。可见,传动比越大,汽车的驱动力越大,整车的爬坡性和加速性能就越好。

GB/T 19752—2005规定的混合动力模式下的最高车速有两种情况:行驶1km以上的最高车速和30min最高车速,文中以30min最高车速来评价整车的动力性。通过选择不同的传动比,按照国家标准进行整车动力性仿真,得出不同传动比下整车的最高车速、爬坡性能和加速性能见图2和图3。

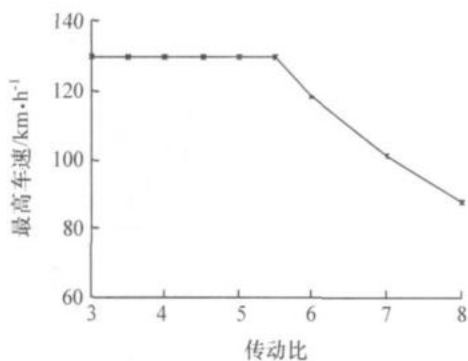


图2 最高车速随传动比的变化关系

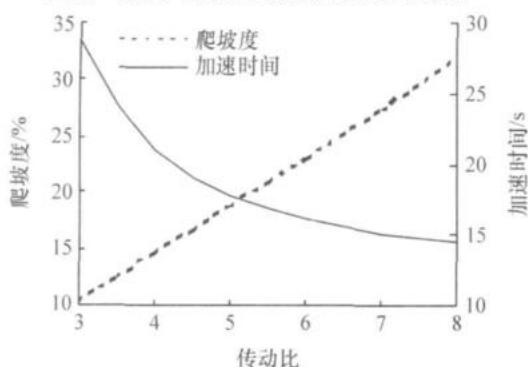


图3 爬坡性能、加速性能与传动比的关系

由图2可见,传动比较小时,最高车速受额定功率限制,保持在129km/h;当传动比大于5.5时,最高车速受到电机最高转速限制,逐渐变小。最高车速在电机额定功率下实现,由于电机还具有一定的过载能力,这样车辆在一定的时间内还可以达到更高的车速,当电机以30.8kW的功率运行时,车速可达130km/h。

由图3可见,车速为30km/h时爬坡度随着传动比的增大而直线上升。小传动比时,加速时间随着传动比的增大明显减少,但大传动比时变化比较平缓,直至趋于不变。这是因为电机的峰值功率主要受加速时间的限制。

综上所述,在满足最高车速的前提下,应尽可能选择大的传动比。同时根据主减速器的设计特点,确定本车固定传动比为5.4。

3 储能系统

混合动力轿车的储能系统是指动力电池、电池控制系统和外接充电系统。磷酸铁锂电池以其超长寿命、使用安全、可大电流快速充放电、耐高温、大容量、无记忆效应、体积小、质量轻和绿色环保等特点成为当前最佳的车用动力电源,因而选用磷酸铁锂电池。

3.1 电池参数的确定

电池的主要参数包括电压等级、容量和最大充电功率。

参数确定的原则为:电压要和HEV的电压等级和变化范围一致;容量要满足HEV在运行过程中对能量的要求;最大充电功率和放电功率要满足IG电机和电机的功率要求。

考虑到电机外电压,选择电池端电压为336V。电池组容量的选择主要考虑车辆行驶时的最大输出功率和消耗的能量,以保证电动汽车动力性和续驶里程的要求。结合整车纯电动续驶里程指标计算所需动力电池的容量。为避免电池过度放电,纯电动续驶里程一般以电池容量的75%来计算。

$$Q_{\text{bat}} = \frac{1}{0.75} \cdot \frac{W_{\text{bat}}}{U_{\text{bat}}} = \frac{1}{0.75} \cdot t \cdot \frac{P_{\text{bat,out}}}{U_{\text{bat}}} = \frac{1}{0.75} \cdot \frac{S}{v} \cdot \frac{P_m}{U_{\text{bat}}} \quad (6)$$

式中: v 为车辆等速运行速度, $v = 60\text{km/h}$; S 为 $v = 60\text{km/h}$ 时的续驶里程, $S = 110\text{km}$; P_m 为电机需求电功率, $P_m = 7.5\text{kW}$; U_{bat} 为电池端电压, $U_{\text{bat}} = 336\text{V}$; W_{bat}

为电池能量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; Q_{bat} 为电池的容量, $\text{A} \cdot \text{h}$

由式(6)可以计算出电池的容量为 $54.6 \text{A} \cdot \text{h}$ 。结合实际情况选择电池的容量为 $55 \text{A} \cdot \text{h}$ 。可放电能量为 $18.4 \text{kW} \cdot \text{h}$ 。电池连续工作可放电电流为 110A , 峰值可充放电功率为 110kW , 能够满足 ISG 电机发电和制动能量回收充电。

3.2 电池 SOC 界限的确定

根据电池特性, 在不同的放电电流下, 电池的电压不同, 因而, 放电电流的大小对电池的放电曲线有一定影响。通常在恒流放电时, 放电电流越大, 电池的电压下降越迅速。同时放电电流大小对电池的可用容量大小也有影响。在确定 SOC 界限时应考虑这一点, 以便选择合适的 SOC 初始值。根据所选电池参数, 通过仿真计算, 可得出不同车速下电池电压随 SOC 的变化关系, 如图 4 所示。

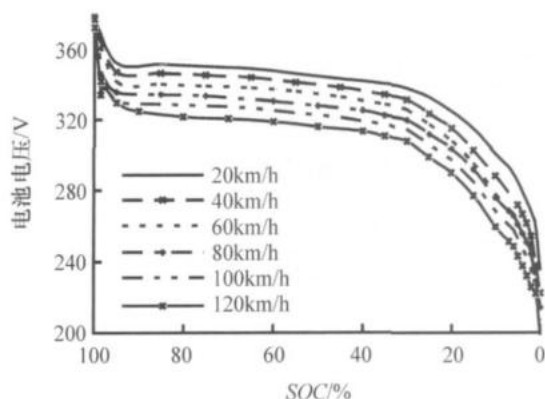


图 4 不同车速下电池电压与 SOC 关系

由图 4 可知, 电池电压随着 SOC 的降低而降低, 在相同的 SOC 下, 车速越高电池电压越低, 这是因高车速下放电电流较大引起的。为防止电池在较低的 SOC 下过度放电以及电池过充引起的电压瞬间升高, 同时为利用更多电能, 减少 APU 起停次数, 结合电机的最低电压限制为 240VDC , 故将 SOC 的界限值设为 $25\% \sim 90\%$ 。

根据确定的电池参数和电池 SOC 界限, 在 SOC 从 100% 降低到 25% 的情形下对不同车速下该车的纯电动续驶里程进行仿真分析, 结果如表 3 所示。从表 3 可知, 车速越高, 续驶里程越短, 故以中低速行驶可有效提高电动车辆的续驶里程。

表 3 不同匀速车速下的纯电动续驶里程

车速 / $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	20	40	60	80
纯电动续驶里程 / km	155	136	112	89

4 辅助动力单元

在串联混合动力轿车动力系统中, 辅助动力单元包括 ISG 电机、发动机和空调系统。在对辅助单元选型匹配过程中, 既要考虑电机的功率需求, 也要协调控制空调系统, 以取得最优的经济性。本车采用了原型车的空调系统, 由发动机直接驱动机械式压缩机。

4.1 ISG 电机选型

ISG 电机也选择永磁同步电机, 控制器电压等级为 336VDC 。APU 系统中的 ISG 电机产生的电能主要用来给电机供给稳态功率。ISG 电机功率的设计主要考虑以下几点。

(1) 满足轿车在稳定高速路行驶时的功率需求

根据我国的交通法规, 高速公路最高行驶车速为 120km/h , 最低车速为 60km/h 。通过计算可以得出整车以不同车速匀速行驶时的耗电功率, 车速为 60 、 80 和 120km/h 时, 消耗的电功率分别为 7.5 、 12.3 和 27.8kW 。

轿车在轻型车用运转循环快速路^[11] (CDC 快速) 下运行时电机消耗的电功率如图 5 所示, 在没有制动能量回收的情况下, 该车运行所消耗的平均电功率为 8.8kW , 有制动能量回收时消耗的平均电功率为 8.4kW , 循环需求的最大电功率为 32.9kW 。

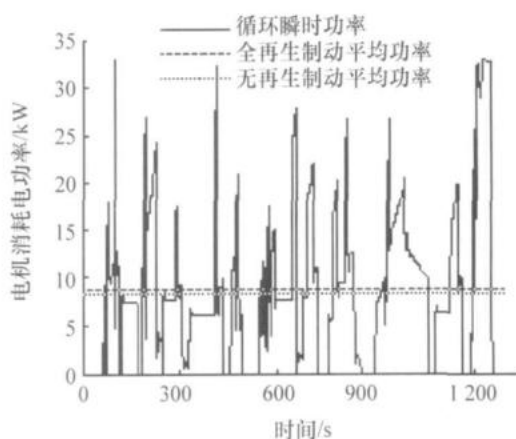


图 5 CDC 快速下的电机耗电功率

(2) 和电池一起满足加速和爬坡功率需求

在频繁起停的市区路行驶时, ISG 电机应产生足够的功率以保持峰值电源的能量存储, 使之有充裕的功率满足车辆加速和爬坡的功率需求。

轿车在轻型车用运转循环-城区^[11] (CDC 城区) 下运行的电机耗电功率图如图 6 所示, 在没有制动能量回收的情况下运行所消耗的平均电功率为 4.2kW , 有制动能量回收的情况下消耗的平均电功率为 3.6kW , 最大的电功率为 32.3kW 。

(3) 附属设备功率需求

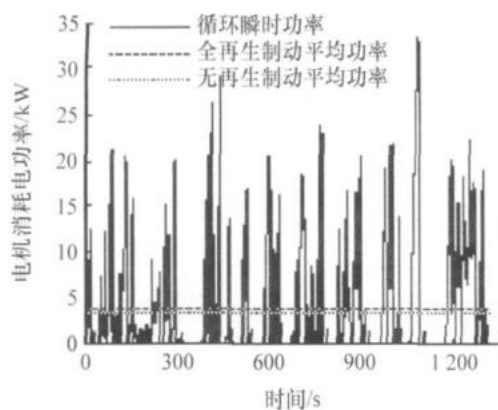


图6 CDC城区下的电机消耗电功率

还应考虑在整车运行过程中助力转向电机、照明和影音设备等各种电功率消耗设备的功率损耗。

电机所消耗的电功率需要 ISG 电机和电池供应, ISG 电机用来提供稳态功率, 电池用来提供峰值功率。根据上面的分析和计算结果, 选取 ISG 电机额定功率为 12kW, 这样一方面能够满足整车以 80km/h 匀速行驶的功率需求, 另一方面, 18.4 kW·h 的电池在 1C 放电的情况下所能提供的功率为 18.4kW, 再加上 ISG 电机的 12kW, 就能满足高速和加速行驶工况的功率需求。提高 ISG 电机额定转矩, 有利于发动机的起动, 但会增加永磁体体积, 不利于动力系统的布置。据此确定 ISG 电机的参数为: 额定转矩为 55N·m, 额定转速为 2400r/min, 最高转速为 6000r/min。

4.2 发动机选型及其工作点的确定

APU 系统中的发动机主要有两个功能: 驱动空调系统和驱动 ISG 电机发电。因而, 选择发动机时要考虑 ISG 电机和空调压缩机的额定功率, 以使发动机工作在最佳油耗区域。

根据空调系统方案, 确定不同运行模式下对发动机的功率需求。在该串联混合动力轿车上, 使用的空调压缩机机械功率需求为 3.8kW, ISG 电机额定功率为 12kW, 因而对发动机的功率需求在 12~15.8kW, 在此选用 1.0L 直列 3 缸四冲程发动机。发动机控制策略采用定点工作方式, 在对发动机 ISG 电机组进行匹配优化时, 只须考虑发动机不同工作点下的燃油经济性。

选定发动机、ISG 电机和空调压缩机之后, 为获得更好的燃油经济性, 须确定最佳燃油经济性工作点。图 7 为发动机、电机和空调压缩机转矩特性, 由图 7 可以看出, 空调压缩机和 ISG 电机的转矩在转速低时较大, 有利于提高发动机负荷率, 进而提高燃油经济性, 随着转速的上升, 二者的转矩降低, 远离

发动机的最优油耗区域。

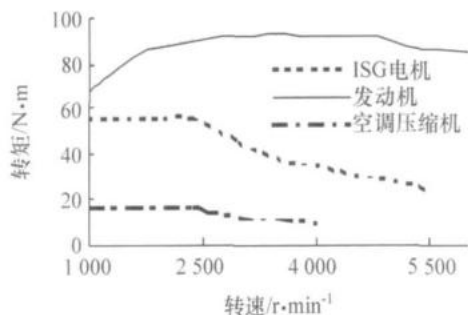


图7 发动机、电机和空调压缩机转矩特性

评价传统轿车的燃油经济性多采用 100km 燃油消耗量, 但串联混合动力轿车的发动机主要是用来驱使 ISG 电机发电, 参考轻型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法 (GB/T 19753—2005), 以单位燃油发电量 (kW·h/L) 评价 APU 的燃油经济性。运用 PID 控制可使发动机驱动 ISG 电机以 12kW 额定功率恒转速运行。通过设定不同的发动机转速, 得出不同工作点的单位燃油发电量见图 8。由图可见, 当发动机转速在 2400r/min, ISG 电机工作在额定功率点时, APU 系统获得了最优的燃油经济性。

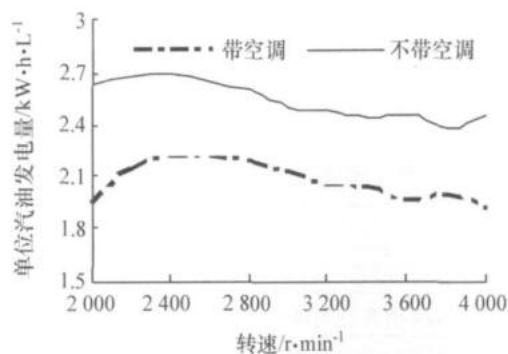


图8 单位汽油发电量随转速的变化关系

根据上面的分析最终确定发动机的工作点如图 9 所示: ISG 电机和空调压缩机同时工作时, 发动机工作在 A 点; 只有 ISG 电机发电时, 发动机工作在 B

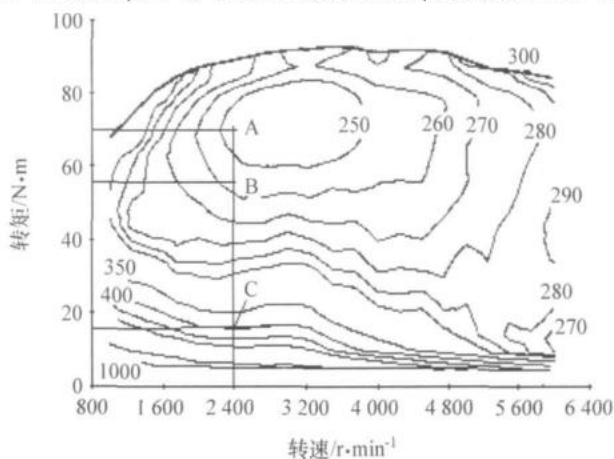


图9 发动机工作点

点;只有空调压缩机工作时,发动机工作在 C 点。

5 整车性能仿真

根据前面的分析,确定了串联混合动力轿车的动力系统各部件的参数,并最终确定了整车整備质量为 1 560kg 最大质量为 1 950kg 如表 4所示。据此建立了整车仿真模型。

表 4 动力系统各部件参数

部件	参数名称	参数值
驱动电机	额定功率 /kW (转速 /r·min ⁻¹)	30(2 800)
	峰值功率 /kW (转速 /r·min ⁻¹)	70(2 800)
动力电池	容量 /A·h	55
	可放电能 /kW·h	18.4
EG 电机	额定功率 /kW (转速 /r·min ⁻¹)	12(2 400)
	额定转矩 /N·m	55
发动机	最大功率 /kW (转速 /r·min ⁻¹)	52(6 000)
	最大转矩 /N·m (转速 /r·min ⁻¹)	91(3 600)

5.1 整车动力性

参照 GB/T 19752—2005进行整车动力性能仿真,其中纯电动续驶里程性能是在 SOC 从 100%降低到 25%的情形下得到的,结果如表 5所示。由表可见,所匹配动力系统可以满足整车动力性能指标。

表 5 整车动力性能仿真结果

最高车速 /km·h ⁻¹	130
最大爬坡度 /%	≥20.5
0—100km/h加速时间 /s	≤16.9
60km/h纯电动续驶里程 /km	112

5.2 整车经济性

仿真所选取工况为 GB/T 19753—2005规定的UDC和NEDC循环工况,我国轻型车用循环工况以及等速行驶工况(60km/h,80km/h),结果如表 6所示,其中带空调的情况是在 APU 系统工作情况下得出的 100km 燃油消耗量。

表 6 整车 100km 油耗结果 L

工况	不带空调	带空调
60km/h	4.65	5.66
80km/h	5.73	6.98
CDC快速	5.45	6.56
CDC城区	5.98	7.66
UDC	5.74	6.99
NEDC	6.20	7.55

该串联混合动力轿车可接受外部电网对车载电池组充电,进而减少对燃油的依赖程度,降低能量使用成本。若考虑外接充电的情况,以上海市为例,到 2009年 11月份,上海市 93汽油价格为 6.61元/L,未实行分时电价用户的居民生活用电价约为 0.615元/(kW·h)。以空调未启动的 NEDC 工况 100km 油耗为例对外接充电下的节约能量成本效果进行分析,如表 7所示,当外接充电电能占所消耗能量的 20%时,相比于单纯使用燃油可节约能量使用成本约 15%;如果外接充电电能达到 60%,则可节约能量使用成本约 45%。

表 7 外接充电下节约能量使用成本效果

外接充电电能所占比例 /%	消耗能量成本 /元	相比只用燃油节约成本 /%
0	40.98	0
20	34.84	15
40	28.69	30
60	22.55	45
80	16.40	60
100	10.26	75

从表 7中可以看出,对于空调未启动的 100km 燃油消耗量,与原型车综合工况(NEDC)下 100km 油耗不高于 6.5L的结果相比,在不考虑外接充电电能的情况下,本串联混合动力轿车的燃油经济性提高了 4.6%。若根据国家发改委在 2006年 10月份公布的乘用车燃料消耗量(第一批)的情况,在综合工况下 1.8L 级别轿车的综合工况油耗在 7.6~9.4L之间,即燃油经济性提高了 19.4%~34.0%。

根据所选定的动力系统的仿真结果,在国家标准规定的UDC和NEDC循环工况、轻型车循环工况和等速行驶的情况下,都获得了较好的燃油经济性。若考虑采用外接充电的情况,整车的燃油经济性会更好。因而,所选定的整车动力系统很好地满足了整车动力性能要求,同时具有较优的燃油经济性。

6 结论

(1) 合理利用电机特性优化设计传动比可以减少机械传动装置结构,获得较优的整车动力性能,最大爬坡度达到 20%,0—100km/s加速时间不到 17s。

(2) 车速大小影响电池的放电电压,据此设定 SOC 界限为 25%~90%,以增加电池使用寿命,同

(下转第 1025页)

4 结论

双球挤流燃烧室着火落后期长,放热速率明显降低,燃烧放热特性并不利于循环热效率提升,只是由于压缩比增加使其循环热效率相对于挤流环面半球形燃烧室有所提高;在爆燃抑制方面,虽然双球挤流燃烧室压缩比提高 10.2%,但各工况下测试爆燃强度却明显低于原机,充分体现抑制爆燃的有效作用;但双球挤流燃烧室的循环变动总体上较原机有所增加,特别是在低转速工况较为明显。

综合挤流环面半球形燃烧室、双球挤流燃烧室、半球形燃烧室和蝶形挤流燃烧室的放热规律,发现双球挤流和蝶形挤流燃烧室的着火落后期明显长于半球形和挤流环面半球形燃烧室,带挤流环面半球形燃烧室的速燃期明显短于双球挤流和蝶形挤流燃烧室。强烈压缩挤流有延缓缸内燃烧过程的趋势。

适当增加点火提前角,可使双球挤流燃烧室速燃期放热速率明显加快,平均有效压力进一步提高,而主燃期循环变动率降低,同时保持双球挤流燃烧室抑制爆燃的良好特性。

参考文献

- [1] Heywood J B. Internal Combustion Engine Fundamentals[M]. New York: McGraw-Hill Inc., 1988.
- [2] Adachi S, Horio K, Nakamura Y, et al. Development of Toyota 1ZZ-FE Engine[C]. SAE Paper 981087.
- [3] Miyagawa H, Kajima S, Katsumi N, et al. Numerical Analysis of the Effects of Squish Geometry on a Newly Developed 4-valve Gasoline Engine Combustion Process[C]. Proceedings of the International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines, JSME, Kyoto Japan, 1998: 227–232.
- [4] Nishii S, Inoue K, Mitsuishi S, et al. Internal Combustion Engine [P]. US7207312, 2007. 4–24.
- [5] Fujimoto M, Iwai K, Kataoka M, et al. Effect of Combustion Chamber Shape on Tumble Flow, Squish-generated Flow and Burn Rate[J]. JSAE, 2002, 23(3): 291–296.
- [6] Yohso T, Shishine K, Nishimoto T, et al. Combustion Chamber Structure for Spark Ignition Engine[P]. US20070056556, 2007. 3–15.
- [7] Miyamoto K, Hoshida Y, Hosono K, et al. Enhancement of Combustion by Means of Squish Pistons[J]. Mitsubishi Motors Technical Review, 2006, 18(3): 32–41.
- [8] 邵强, 吴志军, 李理光, 等. 串联混合动力摩托车动力系统设计及仿真[J]. 小型内燃机与摩托车, 2008, 37(1): 57–61.
- [9] Wang Lingfeng. Hybrid Electric Vehicle Design Based on A Multi-objective Optimization Evolutionary Algorithm [R]. Walter J. Kaplan's Summer Research Grant Report, 2005: 1–16.
- [10] Markel T, Simpson A. Plug-In Hybrid Electric Vehicle Energy Storage System Design [C]. Conference Paper NREL /CP-540–39614, 2006: 1–3.
- [11] 何洪文, 余晓江, 孙逢春, 等. 电动汽车电机驱动系统动力特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 136–140.
- [12] 陈全世. 先进电动车技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 257–262.
- [13] Ehsani Mehrdad, Gao Yin, 等. 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: 202–218.
- [14] 唐磊. 基于混合度的串联混合动力客车特性参数设计 [D]. 长春: 吉林大学, 2008: 28–30.
- [15] 李孟良, 张建伟, 张富兴, 等. 中国城市乘用车实际行驶工况的研究 [J]. 汽车工程, 2006, 28(6): 554–557.
- [16] 国务院发展研究中心产业经济研究部, 中国汽车工程学会, 大众汽车集团(中国). 中国汽车产业发展报告(2008) [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2008: 92–94.
- [17] 刘嘉, 吴志军, 李理光, 等. 微型混合动力车的研究概况及趋势 [J]. 北京汽车, 2008(1): 18–24.
- [18] Metin Gokasan, Seta Bogosyan, Douglas J Goering. Sliding Mode Based Powertrain Control for Efficiency Improvement in Series Hybrid Electric Vehicles [J]. IEEE Transactions On Power Electronics, 2006, 21(3): 779–790.

参考文献

(上接第 1020 页)

时也得到了较长的纯电动续驶里程。

(3) 根据确定的辅助能源系统方案进行了整车经济性能仿真,在空调未开启的综合工况情况下,相比于与原型车同级别的轿车,燃油经济性可提高 19.4%~34.0%,当外接充电电能占所消耗能量的 60%时,可节约能量使用成本约 45%。