

氢燃料电池客车动力系统匹配设计与仿真

甘元艺^{1,2}, 曾超^{1,2}, 冯杰^{1,2}

(1. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401133; 2. 中汽院新能源科技有限公司, 重庆 401133)

摘要: 氢燃料电池客车的动力性和经济性受动力系统布置方式、核心零部件参数选取的影响。随着氢燃料电池汽车行业的发展, 动力系统参数的匹配经验逐渐丰富, 但匹配结果通常与实际装车后试验结果有一定偏差, 导致车辆性能不满足设计要求。因此, 在核心零部件选型前期确定动力系统参数至关重要。文中针对车辆装车后性能偏差问题, 提出基于 Cruise 的氢燃料电池客车动力系统匹配方法, 初步计算参数后, 利用 Cruise 仿真软件建立氢燃料整车动力系统模型, 对整车性能目标进行仿真。结果表明, 将基于 Cruise 的氢燃料电池客车动力系统匹配方法用于动力系统匹配计算和车辆性能校核可行, 能满足整车动力要求及等速 40 km/h 工况、中国重型车商用车测试工况 (China Heavy-duty Commercial Vehicle Test Cycle, CHTC) 下性能要求。

关键词: 汽车; 氢燃料电池客车; 动力系统; 匹配设计; 性能校核

中图分类号: U469.722

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)02-0001-07

作为“全球脱碳时代”能源竞争的新焦点, 氢能已被发达国家列入国家能源发展战略, 氢能产业发展初具规模, 氢燃料电池汽车成为汽车产业能源转型的重要载体^[1-6]。整车经济性和动力性是制约氢燃料电池汽车商业化发展的关键因素^[7], 其中动力系统对车辆性能起重要作用, 可靠的系统核心零部件是整车开发的重要条件。

目前主要研究新能源电动汽车动力系统的相关特性、参数匹配设计等^[8-12], 其中对氢燃料电池汽车性能的研究集中于能量管理系统控制策略优化^[13-18], 对氢燃料电池客车动力系统的研究较少。白有俊等在纯电动旅游客车顶部增设太阳能充电板, 对纯电动旅游客车动力系统和太阳能电池板进行参数匹配设计计算, 并对整车动力性和经济性进行了验证^[12]。赵天宇等匹配复合电源系统作为燃料电池汽车动力源, 依据模糊控制策略和功率跟随策略对整车经济性进行了仿真^[13]。刘静等基于模糊控制策略研究了燃料电池汽车的能量管理策略^[14]。

在氢燃料电池客车动力系统设计阶段, 先确定整车动力系统构型和性能目标, 然后通过匹配计算初步确定动力系统核心零部件参数, 但部分计算结果与实际装车后的试验结果不符, 导致车辆性能不满足设计要求。本文以 100 kW 大功率氢燃料电池客车为研究对象, 根据大功率氢燃料电池保护优先

的控制策略对其动力系统进行匹配设计及优化, 然后利用 Cruise 仿真软件建立整车动力系统模型进行分析, 校核和优化动力系统零部件。

1 样车动力系统基本结构

氢燃料电池客车动力系统主要由氢燃料电池发动机、动力电池、驱动电机和控制单元组成, 氢燃料电池发动机和动力电池一起供应整车驱动所需电能。本文研究的氢燃料电池客车采用目前常见的燃料电池系统构型, 其基本结构和工作原理见图 1^[19]。

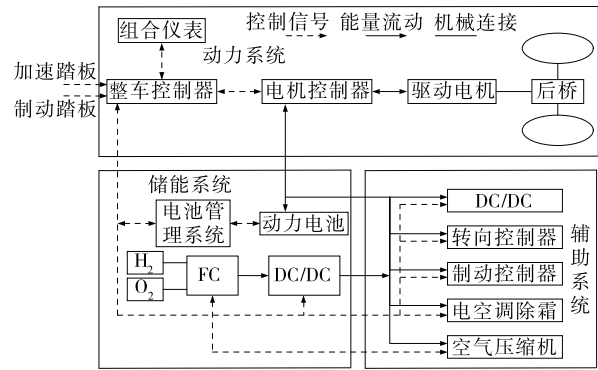


图 1 氢燃料电池电动汽车的基本结构与工作原理

由图 1 可知: 氢燃料电池客车在动力电池电能充足的情况下由动力电池单独向驱动电机提供电能, 使驱动电机产生运动和动力; 在动力电池电能不足时, 燃料电池发动机为整车驱动提供电能, 同时对动力电池进行电能补充。

2 样车性能目标设计

合理的性能目标设计对动力系统零部件选型、整车布置和道路应用至关重要。主要考虑整车基本参数、标准法规、应用场景和用户需求等进行氢燃料电池客车动力性能和经济性能目标设计。某氢燃料电池客车主要用于城市道路交通,综合考虑用户使用需求、城市道路场景和现行标准法规确定整车参数、整车动力性能、整车经济性能指标(见表 1~3)。

表 1 某氢燃料电池客车的基本参数

整车参数	参数值
整备质量 m/kg	9 840
最大设计总质量/ kg	14 000
迎风面积 A/m^2	8
风阻系数 C_D	0.7
滚动阻力系数 f	0.01
主减速比 i_0	6.04
轮胎滚动半径 r/m	0.451

表 2 某氢燃料电池客车的整车动力性能设计目标

指标	指标值
30 min 最高车速 $v_{\max}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	≥ 69
0~30 km/h 加速时间/s	≤ 5
0~50 km/h 加速时间/s	≤ 12
30~50 km/h 加速时间/s	≤ 10
最大爬坡度/%	≥ 18

表 3 某氢燃料电池客车的整车经济性能设计目标

指标	指标值
等速 40 km/h 工况纯电续航里程/km	≥ 40
等速 40 km/h 工况纯氢续航里程/km	≥ 360
等速 40 km/h 工况氢能消耗/ $[\text{kg} \cdot (100 \text{ km})^{-1}]$	≤ 5
CHTC 工况纯氢续航里程/km	≥ 255
CHTC 工况氢能消耗/ $[\text{kg} \cdot (100 \text{ km})^{-1}]$	≤ 7

注:CHTC (China Heavy-duty Commercial Vehicle Test Cycle) 工况是指中国重型商用车测试工况。

3 动力系统核心部件选型

氢燃料电池客车动力系统核心零部件主要有驱动电机、燃料电池发动机和动力电池。本文考虑氢燃料电池客车整车动力性能、经济性能指标,结合理

论计算^[20]对这 3 个零部件进行关键参数确认,并根据供应商成熟产品情况进行选型确认。

3.1 驱动电机选型

根据汽车理论对驱动电机参数进行匹配计算。驱动电机的额定特性和峰值特性决定整车巡航车速、稳定爬坡工况、最高车速、最大爬坡度和加速时间等,电机参数与整车性能的关系见图 2。

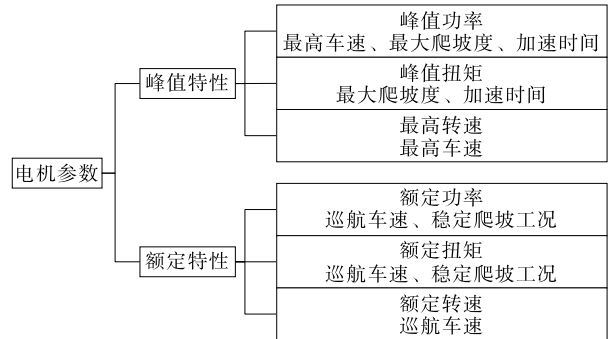


图 2 电机参数与整车性能的关系

3.1.1 驱动电机参数需求

(1) 峰值功率。根据车辆加速时间、最大爬坡度和最高车速进行电机所需功率计算,整车加速性能确定的峰值功率 P_{ma} 按式(1)计算,整车最大爬坡度 $\text{tg}\theta_{\max}$ 确定的峰值功率 P_{mi} 按式(2)计算,整车最高车速 v_{\max} 确定的峰值功率 P_{ei1} 按式(3)计算,取三者中最大值作为电机所需最小峰值功率。

$$P_{ma} \geq \left(mgf + \frac{C_D A v_m^2}{21.15} + \delta m \frac{v_m}{3.6 t_m} \right) \frac{v_m}{3600 \eta_t} \quad (1)$$

式中: δ 为汽车旋转质量换算系数,取 1.05; v_m 为加速末速度; η_t 为传动效率,取 0.9。

$$P_{mi} \geq \left[mg(f \cos \theta_{\max} + \sin \theta_{\max}) + \frac{C_D A v_i^2}{21.15} \right] \frac{v_i}{3600 \eta_t} \quad (2)$$

式中: v_i 为最大爬坡度时要求的车速,取 15 km/h。

$$P_{ei1} \geq \left(mgf + \frac{C_D A v_{\max}^2}{21.15} \right) \frac{v_{\max}}{3600 \eta_t} \quad (3)$$

(2) 额定功率。在满足 30 min 最高车速(电动汽车能够持续行驶 30 min 以上的最高平均车速)的情况下,氢燃料电池客车可持续正常行驶,电机所需额定功率 P_{ei2} 须满足:

$$P_{ei2} \geq \left(mgf + \frac{C_D A v_{\max}^2}{21.15} \right) \frac{v_{\max}}{3600 \eta_t}$$

(3) 最高转速。为满足整车最高车速指标,电机所需最高转速 n_{\max} 须满足:

$$n_{\max} \geq \frac{v_{\max} i_0}{0.377r}$$

(4) 峰值扭矩。为满足整车最大爬坡度指标,电机所需峰值扭矩 T_{\max} 须满足:

$$T_{\max} \geq \frac{[mg(f \cos \theta + \sin \theta)]r}{i_0 \eta_t}$$

(5) 额定扭矩。为满足稳定爬坡工况的要求,电机所需额定扭矩 T_e 须满足:

$$T_e \geq \left[mg(f \cos \theta + \sin \theta) + \frac{C_D A v_i^2}{21.15} \right] \frac{r}{i_0 \eta_t}$$

3.1.2 驱动电机选型结果

根据上述计算公式确定的样车驱动电机参数见表 4。

表 4 驱动电机参数

参数	参数值	说明
驱动电机峰值功率/kW	160	满足加速性能要求
驱动电机额定功率/kW	80	满足全荷电状态(SOC)下最高车速要求
电机最高工作转速/($r \cdot \min^{-1}$)	3 300	满足最高车速要求
驱动电机峰值扭矩/($N \cdot m$)	2 100	满足最大爬坡度要求
驱动电机额定扭矩/($N \cdot m$)	2 100	满足持续爬坡要求

3.2 燃料电池系统选型

目标车型采用插电式混合动力汽车(Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)架构,要求有一定的纯电续航里程,对动力电池的容量和功率要求较大,燃料电池发动机充当增程器的作用,根据一般设计要求,燃料电池须满足最高巡航车速要求,故主要确认燃料电池的额定功率参数。

图 3 为不同车速下等速行驶时整车需求功率。考虑整车设计目标,同时为保证车辆正常行驶,取 1.2 倍后备功率,燃料电池发动机参数选型见表 5。

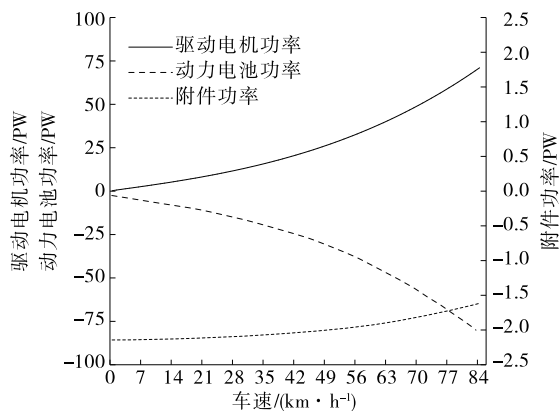


图 3 不同车速下等速行驶功率需求

表 5 燃料电池发动机参数

参数	参数值	说明
冷却方式	液冷	—
额定功率/kW	47	满足最高巡航车速要求
可用储氢量(25 °C)/kg	18	满足等速 40 km/h 续航里程要求
峰值功率(25 °C)/kW	47	满足加速性能要求
峰值放电电流(25 °C)/A	337.1	满足加速性能要求

3.3 动力电池选型

车辆类型和架构决定驱动源的数量与类型、整车对动力电池的功率及能量需求,根据整车指标推算整车对动力源的总功率和能量需求,再选取整车动力电池类型及关键参数。该车采用增程式 PHEV 架构,驱动模式主要有纯电行驶(CD)和混合驱动(CS)两种,不同荷电状态下整车能量消耗见图 4。

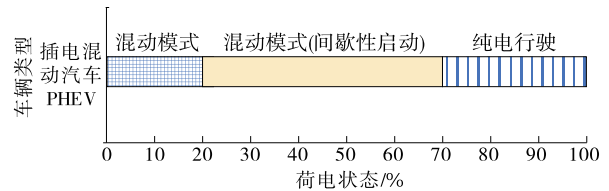


图 4 不同荷电状态下整车能量消耗

该氢燃料电池客车由燃料电池发动机充当增程器,根据续航里程需求,要求动力电池能单独驱动车辆,对电池的容量及功率需求较大。动力电池选型主要考虑以下方面:

(1) 根据车辆 CHTC 工况要求,车辆须在短时间内驱动,并满足整车加速性能要求。该车驱动功率由燃料电池和动力电池提供,考虑燃料电池启动时间及响应速度,确定动力电池功率与燃料电池功率之和满足:

$$P_{\text{Total}} = P_{\text{Bat}} + P_{\text{FC}}$$

式中: P_{Total} 为总功率; P_{Bat} 为动力电池功率; P_{FC} 为燃料电池功率。

(2) 根据设计指标和纯电续航里程需求,在不考虑制动能量回收的情况下,推算需求电池电量取 SOC 窗口 20%~95%,等速 40 km/h 续航里程 ≥ 40 km。在道路上按照 (40 ± 2) km/h 等速行驶,计算整车行驶阻力,设定为无风状态,在水平道路上等速行驶时没有坡度阻力和加速阻力。车辆按照上述工况行驶所需驱动力 F_1 为:

$$F_1 = mgf + \frac{C_D A v_a^2}{21.15}$$

车辆行驶所需的功 W 为:

$$W = F_1 S$$

式中: S 为行驶的距离, 即续航里程, 取 40 km。

燃料电池客车采用超级电容, 电池组有效能量 Q 为:

$$Q = U_s M N C_s n_{\text{DOD}} n_{\text{dis}}$$

式中: U_s 为单体电池电压; M 为电池串联数; N 为电池并联数; C_s 为单体电池额定容量; n_{DOD} 为放电深度; n_{dis} 为放电效率。

该车选用超级电容电池作为整车的动力电池, 其关键参数见表 6。

表 6 超级电容电池参数

参数	参数值	说明
冷却方式	风冷	—
最高工作电压/V	700	高压部件的工作能力
最低工作电压/V	504	
可用电量(25℃)/ (kW·h)	19.2	满足等速 40 km/h 续航(纯电)要求
峰值放电电流(25℃, 持续时间 20 s)/A	420	满足加速性能要求

4 整车控制策略

影响氢燃料电池客车动力性和经济性的最终结果主要有能量控制和能量回收两方面。本文对能量控制策略和能量回收策略进行简化, 以保证模型的高效运行和结果可靠。

4.1 燃料电池系统工作点选取

燃料电池工作点的选取与整车需求功率 P 、动力电池的荷电状态(SOC)、燃料电池系统的输出功率和效率、高压附电工作状态和运行工况等相关。SOC 较高或整车需求功率较低时, 燃料电池系统主要工作在高效工作点; SOC 较低或整车需求功率较高时, 燃料电池系统主要工作在高功率工作点(见表 7)。

表 7 燃料电池系统的工作点

工作点	输出功率/kW
A0	24
A1	47

工作点 A0 为高效工作点, 在满足输出功率的前提下, 保证燃料电池系统的输出效率; 工作点 A1 为高功率工作点, 考虑整车动力性能、燃料电池需要输出的额定/峰值功率。

4.2 燃料电池系统工作模式

根据动力电池荷电状态和整车需求功率的不同, 整车控制可以选择燃料电池系统处于功率输出、怠速或关闭状态。结合动力电池的特性, 设置燃料电池系统功率输出上下限分别为 20%(SOC1)、70%(SOC2); 结合整车动力性需求, 设置燃料电池系统功率输出上下限分别为整车需求功率 $P_{\min} = 24 \text{ kW}$ 、 $P_{\max} = 47 \text{ kW}$ 。根据燃料电池的不同工作状态及整车能量来源情况, 整车工作模式见图 5。

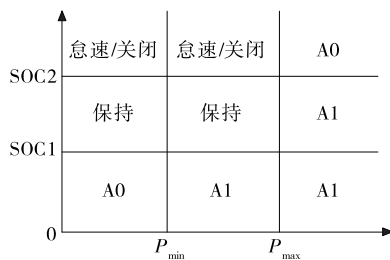


图 5 燃料电池系统的工作模式

4.2.1 纯电动工作模式

动力电池荷电状态高于 SOC2、整车需求功率低于 P_{\max} 时, 整车为纯电工作模式。此时燃料电池系统处于怠速或关闭状态, 整车的能量全部由动力电池提供。

4.2.2 混合模式

整车需求功率较小时, 增程器工作在高效率输出工作点 A0, 此时整车的能量主要由动力电池提供, 增程器起能量补充作用。整车需求功率上升或动力电池无法持续供能时, 燃料电池工作在高功率工作点 A1, 当燃料电池系统输出功率和整车消耗功率相等时, 维持电池荷电状态基本不变; 当燃料电池系统输出功率大于整车需求功率时, 多余的能量向动力电池充电; 当燃料电池系统输出功率小于整车需求功率时, 不足部分由动力电池补充。

4.3 能量回收工作模式

该项目考虑能量回收, 在滑行和制动条件下均进行能量回收。根据驾驶员驱动及制动需求, 控制电机驱动和电子制动扭矩分配。在制动能量回收退出前, 后轴制动力应等于制动器制动力加上能量回收力。能量回收提供的后轮制动力 F 为:

$$F = T \frac{i_0}{r}$$

式中: T 为电机输出扭矩。

5 整车性能指标仿真校核

利用整车参数、零部件参数和特性曲线、目标工

况和驾驶员信息对整车性能进行 Cruise 仿真分析, 得到不同工况下性能目标曲线及能耗信息, 对动力系统零部件参数进行优化。整车模型见图 6^[21]。

5.1 动力性能仿真

选用整车物理阻力模型对整车动力性能进行仿真分析。

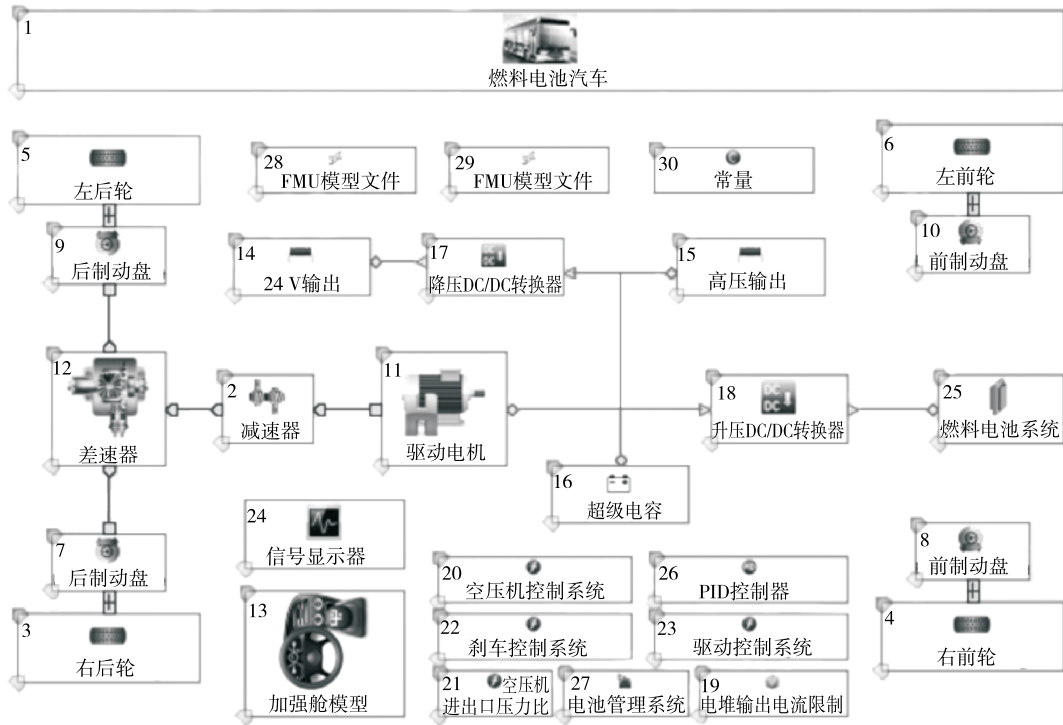


图 6 整车性能仿真模型

5.1.1 30 min 最高车速

运行 30 min 最高车速任务, 为保证电机长时间输出, 电机以额定功率输出。最高车速任务下客车热启动, 不考虑转向和滑移。仿真结果见图 7。

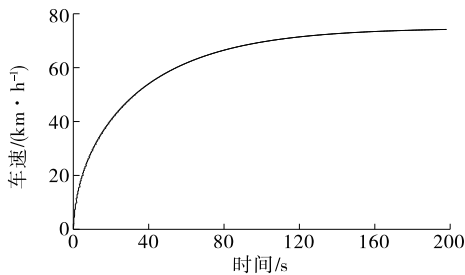


图 7 30 min 最高车速仿真结果

由图 7 可知: 30 min 最高车速仿真结果为 74 km/h, 设计指标为 ≥ 69 km/h, 满足设计要求。

5.1.2 加速时间

运行加速时间任务, 电机以峰值功率输出。加速时间任务下客车热启动, 不考虑转向和滑移。仿

真结果见图 8。

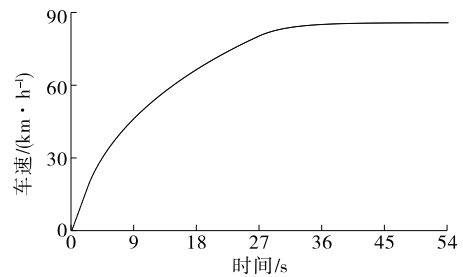


图 8 加速时间仿真结果

由图 8 可知: 0~30 km/h、0~50 km/h、30~50 km/h 加速时间的仿真结果分别为 4.70 s、10.55 s、5.85 s, 对应设计指标分别为 ≤ 5 s、 ≤ 12 s、 ≤ 10 s, 满足设计要求。

5.1.3 最大爬坡度

运行最大爬坡度任务, 电机以峰值功率输出。最大爬坡度任务下客车热启动, 不考虑转向和滑移。仿真结果如图 9。

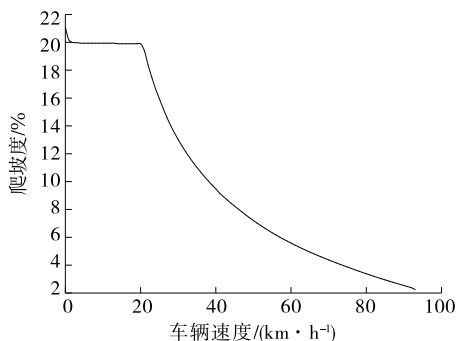


图9 最大爬坡度仿真结果

由图9可知:最大爬坡度仿真结果为20%,设计指标为 $\geq 18\%$,满足设计要求。

5.2 经济性仿真

5.2.1 等速 40 km/h 纯电续航里程

运行等速 40 km/h 纯电续航里程任务,电机以额定功率输出。仿真结果见图 10。

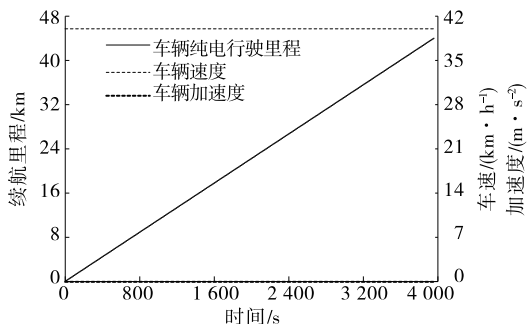


图10 等速 40 km/h 工况下纯电续航里程仿真结果

由图 10 可知:等速 40 km/h 工况下纯电续航里程仿真结果为 44 km,设计指标为 ≥ 40 km,满足设计要求。

5.2.2 等速 40 km/h 工况下氢能消耗

运行等速 40 km/h 工况下氢能消耗任务,仿真结果见图 11。

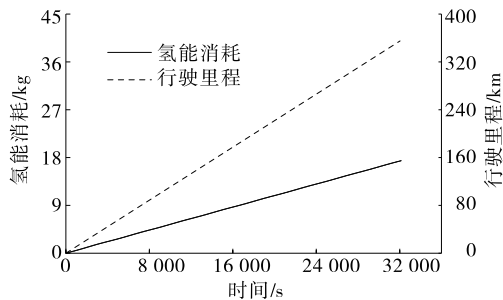


图11 等速 40 km/h 工况下氢能消耗与行驶里程仿真结果

由图 11 可知:等速 40 km/h 工况下氢能消耗、纯氢续航里程分别为 4.865 kg/(100 km)、370 km,

对应设计指标分别为 ≤ 5 kg/(100 km)、 ≥ 360 km,满足设计要求。

5.2.3 CHTC 工况下氢能消耗

运行 CHTC 工况下氢能消耗任务,仿真结果见图 12。

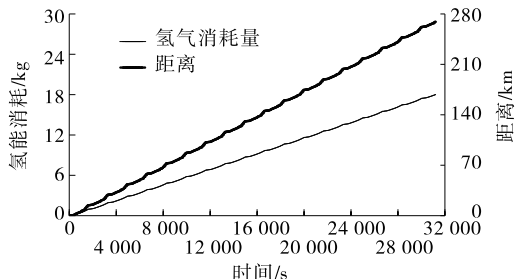


图12 CHTC 工况下氢能消耗与行驶里程仿真结果

由图 12 可知:CHTC 工况下氢能消耗、纯氢续航里程分别为 6.691 kg/(100 km)、269 km,对应设计指标分别为 ≤ 7 kg/(100 km)、 ≥ 255 km,满足设计要求。

5.3 仿真结果分析

对动力性能仿真结果、经济性仿真结果进行整理,得到表 8、表 9。

表8 动力性能仿真结果

目标项目	指标	仿真结果
30 min 最高车速/(km · h ⁻¹)	≥ 69	74
0~30 km/h 加速时间/s	≤ 5	4.7
0~50 km/h 加速时间/s	≤ 12	10.55
30~50 km/h 加速时间/s	≤ 10	5.85
最大爬坡度/%	≥ 18	20

表9 经济性仿真结果

目标项目	指标	仿真结果
等速 40 km/h 工况下纯电续航里程/km	≥ 40	44
等速 40 km/h 工况下纯氢续航里程/km	≥ 360	370
等速 40 km/h 工况下氢能消耗/[kg · (100 km) ⁻¹]	≤ 5	4.865
CHTC 工况下纯氢续航里程/km	≥ 255	269
CHTC 工况下氢能消耗/[kg · (100 km) ⁻¹]	≤ 7	6.691

由表 8、表 9 可知:整车动力系统动力性能、经济性仿真结果均满足设计要求,动力系统选型满足设计要求。

6 结语

本文对氢燃料电池客车性能目标、动力系统关键零部件参数进行匹配计算,利用 Cruise 仿真软件建立整车动力系统仿真模型,对动力系统进行校核,为整车企业燃料电池汽车开发设计提供参考,避免因设计不足导致装车后不满足设计目标的问题,提高整车设计水平。

参考文献:

- [1] 帕斯夸里·科尔沃,福图纳托·米格莱.车用氢燃料电池[M].北京:机械工业出版社,2019.
- [2] 周苏.燃料电池汽车建模及仿真技术[M].北京:北京理工大学出版社,2017.
- [3] 宋昱,韩恺,李小龙,等.燃料电池汽车混合度与能量管理策略研究[J].交通科技与经济,2019,21(2):40-46+67.
- [4] 王键,郑松林,郝景贤,等.后驱燃料电池客车的控制策略开发[J].重庆理工大学学报(自然科学),2018,32(12):31-37.
- [5] 衣宝廉.燃料电池和燃料电池车发展历程及技术现状[M].北京:科学出版社,2018.
- [6] 张戈,杨燕红,刘峰.我国氢燃料电池汽车标准体系的现状及分析[J].重庆理工大学学报(自然科学),2018,32(12):21-30.
- [7] GOKCE K,OZDEMIR A.A rule based power split strategy for battery/ultracapacitor energy storage systems in hybrid electric vehicles [J]. International Journal of Electrochemical Science,2016,11(2):1228-1246.
- [8] 张利新,刘逸群,明杰婷.纯电动城市客车动力系统匹配设计及仿真分析[J].客车技术与研究,2022,44(3):15-18.
- [9] 蒲磊,朱源.纯电动重型商用车动力参数匹配与仿真分析[J].专用汽车,2023(3):20-23.

- [10] MA J W.Parameter optimal design and simulation of power system of electric vehicle based on AVL-CRUISE[J].Journal of Physics:Conference Series,2019,1187(3):032029.
- [11] MA J W.Parameter design and simulation analysis of power system in plug-in hybrid vehicle[J].Journal of Physics:Conference Series,2019,1187(3):032030.
- [12] 白有俊,刘世豪,王军年,等.太阳能辅助纯电动旅游客车动力系统匹配设计与仿真[J].中国工程机械学报,2021,19(5):436-442.
- [13] 赵天宇,陈东,霍为炜,等.氢燃料电池汽车能量管理系统模糊控制仿真研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2022,36(3):36-40.
- [14] 刘静,孙闫.基于模糊控制的燃料电池汽车能量管理研究[J].公路与汽运,2022(4):11-13.
- [15] 王瑞鑫.大功率型燃料电池重卡动力系统匹配设计与能量管理策略研究[J].汽车工程,2021(2):196-203.
- [16] 严正峰,王浩琳,吴景铄,等.燃料电池客车驱动系统建模及能量管理策略优化研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2021,35(9):8-16.
- [17] 于瀛霄,孙闫,夏长高,等.燃料电池汽车双层模糊控制能量管理策略[J].重庆理工大学学报(自然科学),2022,36(8):21-28.
- [18] 甘锐,李奇,江淑娜,等.考虑燃料电池效率区间优化的混合动力系统双模式能量管理方法[J].中国电机工程学报,2021,41(20):7027-7039.
- [19] 王志福,张承宁.电动汽车电驱动理论与设计[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [20] 曼弗雷德·米奇克,亨宁·瓦伦托维兹.汽车动力学[M].陈荫三,余强,译.北京:清华大学出版社,2009.
- [21] 王锐,何洪文.基于 Cruise 的整车动力性能仿真分析[J].车辆与动力技术,2009(2):24-26+36.

收稿日期:2023-08-19

关于假冒杂志网站和邮箱的声明

目前互联网上出现以《公路与汽运》杂志名义建立的官方网站和投稿邮箱,它们盗用“公路与汽运”的名称,非法向外征稿并收取审稿费、版面费,严重损害了本刊的权益和声誉。为避免广大作者和读者上当受骗,本刊郑重声明:

1 本刊的网址为 <http://glyqy.csust.edu.cn>。互联网上以“公路与汽运”名义建立的其他网站都是假冒的,此类网站上发布的信息及由此造成的一切后果均与本刊无关。

2 本刊官方邮箱为 gongluyuqiyn@163.com,除此之外的任何以本刊名义设立的邮箱都是假冒的。本刊目前没有收取审稿费。

3 本刊强烈谴责这种假冒《公路与汽运》杂志名义、损害本刊和作者、读者权益的违法行为,并保留依法追究其法律责任的权利。

特此声明。

《公路与汽运》编辑部