氢燃料电池客车的动力系统匹配设计

刘 峰[1]，侯永坤[2]，郭清成[2]，管 勇[2]
（1. 中国公路车辆机械有限公司，北京 100011；2. 厦门丰泰国际新能源汽车有限公司，福建 厦门 361026）

摘 要：以澳洲客户的实际需求为例，重点介绍氢燃料电池客车动力系统的匹配设计，并根据用户的实际使用工况进行仿真分析，从而确定合适的动力系统总成和整车控制策略。

关键词：氢燃料电池；客车；动力系统；匹配设计
中图分类号：U469.72+2 **文献标志码**：A **文章编号**：1006-3331(2023)03-0001-05

Matching Design of Power System of Hydrogen Fuel Cell Bus

LIU Feng[1], HOU Yongkun[2], GUO Qingcheng[2], GUAN Yong[2]
(1. China Highway Vehicle & Machinery Co., Ltd., Beijing 100011, China;
2. Xiamen Fengtai Bus & Coach International Co., Ltd., Xiamen 361026, China)

Abstract: Based on the actual needs of customers in Australia, the authors focus on hydrogen fuel cell bus power system matching design, and do the simulation according to the actual use of the user, so as to determine the appropriate power system assembly and vehicle control strategy.

Key words: hydrogen fuel cell; bus; power system; matching design

氢燃料电池客车如何合理匹配氢燃料电池使其更高效更节能是开发商们研究的重点，本文根据用户的实际需要，结合用户的具体使用工况对氢燃料电池客车的动力系统进行匹配设计，确定更合理的燃料电池功率和控制策略，在满足用户需求的同时使氢燃料电池更节能、更高效。

1 用户需求

整车车长 12 m，满载总质量 18 t，最大载客量不小于 53 人，最高车速不低于 100 km/h，最大爬坡度不小于 18%，原地起步加速到 80 km/h 的时间不大于 27 s，续驶里程不低于 450 km。要求采用氢燃料电池作为动力系统。客车的实际使用工况路谱如图 1 车速曲线所示。

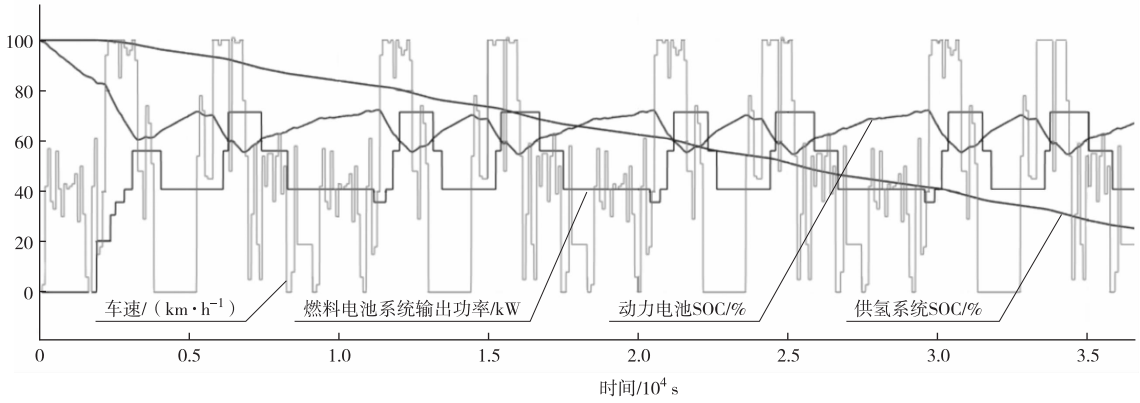

图 1 客车实际使用工况路谱

收稿日期：2022-11-11。

第一作者：刘 峰(1972—)，男，硕士；主要从事新能源商用车整车及核心零部件产品新技术应用的系统化研究与管理工作。E-mail：jizhifeng0210@163.com。

2 整车动力系统架构的确定

根据燃料电池输出特性,燃料电池工作时需要辅助能源系统参与工作。辅助能源系统通常为蓄电池组或超级电容,主要方式有[1]:燃料电池+动力电池、燃料电池+超级电容、燃料电池+动力电池+超级电容,目前应用最多的结构是“燃料电池+动力电池”。由于锂电池在纯电动汽车上的广泛应用使其具有较好的性价比,因此,动力电池大多采用的是锂电池[2],本文即采用“燃料电池+动力锂电池”的方案。

由氢燃料电池作为主能源,锂电池作为辅助能源的动力系统架构主要有 4 种,如图 2~图 5 所示。

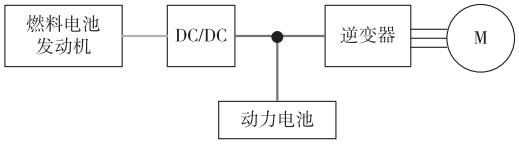

图 2 动力系统架构 1

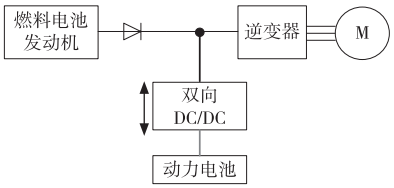

图 3 动力系统架构 2

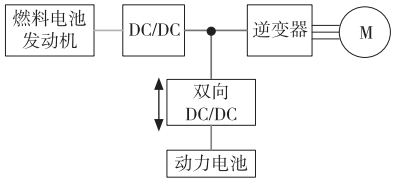

图 4 动力系统架构 3

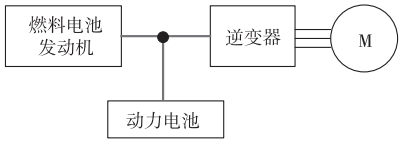

图 5 动力系统架构 4

结合客车的使用特点,本文选择图 2 所示的架构 1,这种结构也是目前客车普遍采用的,特点是燃料电池将氢气转化为电能,输出的电能先通过 DC/DC 升压再与动力电池并联输入到电驱动系统,电机输出扭矩来驱动车辆行驶;DC/DC 为单向升压输出;燃料电池电堆承受的负载稳定可控,结构简单[3]。

后桥速比及驱动电机的选定与普通纯电动客车一样,目前电车用的 ZF 后桥常用速比为 6.19,本文暂选这个速比。根据该后桥速比及整车主要参数计算可知,要满足最高车速 100 km/h 的要求,电机的最高转速应不小于 3 200 r/min;按照最大爬坡度不小于 18%的要求计算可知,电机的最大扭矩应不小于 2 800 N·m。

为满足以上要求,初步选择 DANA TM4 公司生产的 TZ368XSPE260WH 型号电机,其主要参数如下:额定功率 150 kW;额定扭矩 1 000 N·m;峰值功率 250 kW;峰值扭矩 3 000 N·m;最高工作转速 3 500 r/min;额定电压 600 V。

根据电机及整车参数,动力性仿真的结果见表 1。从表 1 中可以看出,选用后桥速比为 6.19 的 TZ368XSPE260WH 型号电机可满足用户的使用要求。

表 1 动力性仿真结果

参数	数值
最大爬坡度/%	18
最高车速/(km·h^{-1})	107.5(可限速 100)
4%坡度的最高车速/(km·h^{-1})	46
12%坡度的最高车速/(km·h^{-1})	18
18%坡度的最高车速/(km·h^{-1})	12
原地起步加速到 20 km/h 的加速时间/s	3.1
原地起步加速到 40 km/h 的加速时间/s	10.5
原地起步加速到 60 km/h 的加速时间/s	14.5
原地起步加速到 80 km/h 的加速时间/s	25.2

3 动力锂电池和氢燃料电池的选定

3.1 动力锂电池的选定

动力锂电池是辅助能源,它的选择与氢燃料电池的功率及工况有很大关系[4]。同时,根据选择的架构 1,动力锂电池的电压要和电机电压一致,需要满足电机的电压要求。前面选择的电机的额定电压为 600 V,电压范围为 550~750 V。因此,选择宁德时代的 173 Ah 电芯的电池(3 个 C 箱电池(1P63S)),其工作电压为 608.58 V,额定电量为 105.3 kW·h,其他主要参数见表 2。

表 2　动力锂电池参数(50%SOC,25 ℃)　　A

参数	数值
标准充电电流	173
持续放电电流	173
持续回充电流	173
最大脉冲放电电流	400
30 s 内最大脉冲充电电流	346

3.2　燃料电池的选定

由于该车是长途客车，高速路段较多，需要较大的燃料电池功率，根据目前燃料电池情况，选择了 2 款燃料电池，其最大输出功率分别为 80 kW 和 110 kW。根据用户提供的工况，最高车速 100 km/h 持续时间比较长，消耗功率较大，燃料电池功率不足时需要动力电池补充，所选燃料电池功率和动力电池带电量应能满足该工况的使用需要。经验算，2 款燃料电池功率在持续车速 100 km/h 时需要动力电池电量消耗情况见表 3。

表 3　2 款燃料电池所需动力锂电池电量计算结果

参数	所需动力电池电量	
	80 kW 燃料电池	110 kW 燃料电池
需要动力电池最大输出功率/kW	49.3	20.9
最高车速 100 km/h 的运行时间/h	1	1
最高车速持续运行需要动力电池输出电量/(kW·h)	49.3	20.9
实际需要动力电池最少电量/(kW·h)	61.6	26.1

注：根据上面用户提供的路谱(图 1)，车辆以最高车速 100 km/h 的运行时间按照最大连续运行 1 h 计算。

从以上计算结果可知，2 款燃料电池理论上都可以满足实际运行需要，但功率小的需要动力锂电池更多地参与工作，考虑到实际运行时动力锂电池的 SOC 状态，一旦上高速，动力电池的带电量小于 61 kW·h 将不能满足实际需要，同时，110 kW 的燃料电池要比 80 kW 的效率高(见图 6)。因此，推荐采用 110 kW 的燃料电池。

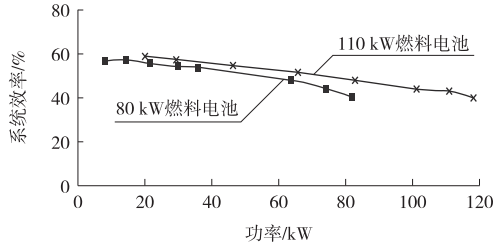

图 6　2 款燃料电池效率对比

4　控制策略的优化

电动汽车运行过程中，电机的输出功率是随着工况而变化的，而根据燃料电池的功率输出特性，燃料电池输出的功率应尽量减少波动；在电机功率需求的变化中，燃料电池与辅助电池(动力锂电池)2 种能源的特性处于动态变化，如何保证燃料电池和动力电池合理协调工作，使燃料电池性能稳定、寿命更长、可靠性更好是整个动力系统的关键[5]。当燃料电池输出功率稳定在一个值且需求功率较大时，需要更多的动力电池功率输出；而更多的动力电池功率输出又会导致动力电池带电量无法满足最小电量需求。因此，需要确定一个更优的系统控制策略(能量管理方法)[6]。

根据选定的燃料电池(110 kW)和动力锂电池，首先按照原有的控制策略对用户提供的工况进行了 2 种情况的仿真分析，图 7 和图 8 分别是动力锂电池初始 SOC 为 60%和 100%时整车运行的燃料电池输出功率和氢耗的关系曲线，最后的氢耗结果见表 4。

实际上，这 2 种状态是无动力电池充电口的燃料电池车辆投入使用的常用状态。图 8 是新车投入使用动力电池满电运行的状态，后期是按照图 7 状态持续运行的。也就是后期运行时，氢的消耗要达到 6.65 kg/100 km。

另外，从图 7 和图 8 可知，为了保持动力锂电池最后的 SOC 状态不小于 60%，燃料电池的输出功率变化较大(详见图上燃料电池输出功率曲线)，这对燃料电池是不利的，将大大影响其使用寿命[7]。

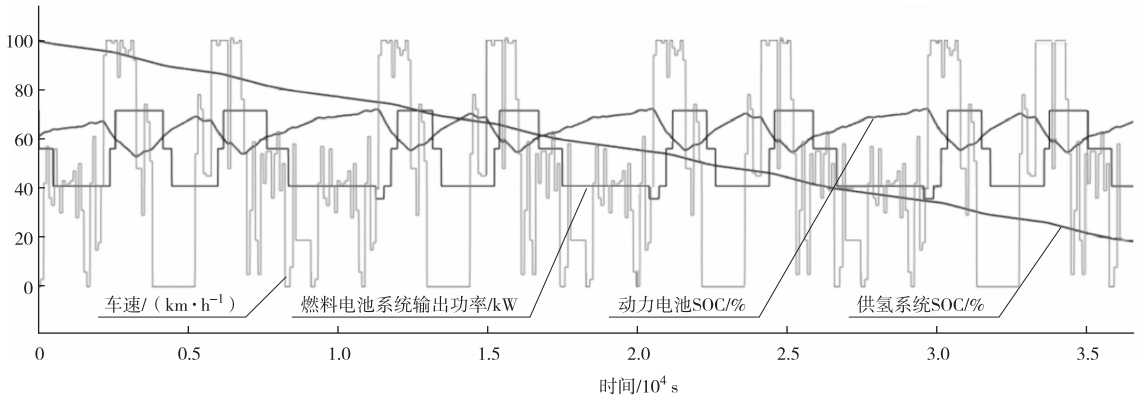

图 7 动力锂电池初始电量 SOC 60%时的燃料电池功率输出及氢耗关系曲线

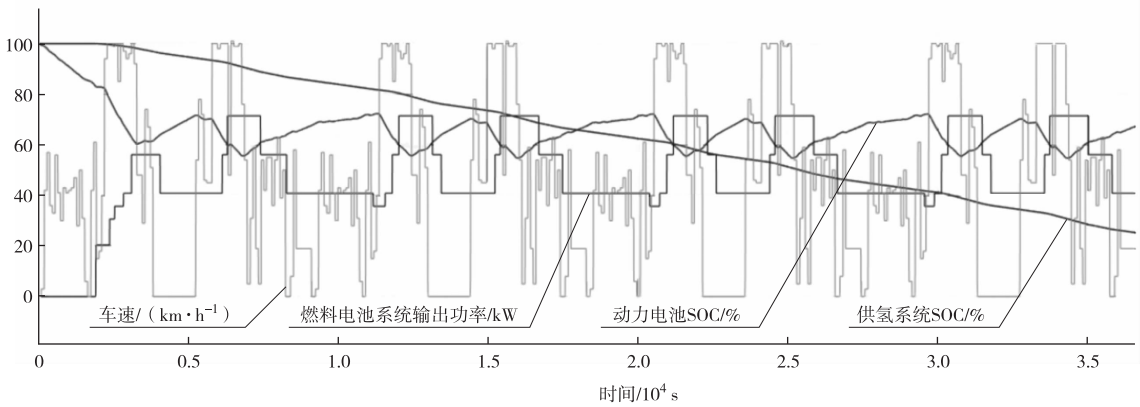

图 8 动力锂电池初始电量 SOC 100%时的燃料电池功率输出及氢耗关系曲线

表 4 动力锂电池初始电量不同的整车氢耗

车质量/kg	平均车速/（km·h⁻¹）	最高车速/（km·h⁻¹）	行驶里程/km	动力电池 SOC/%		供氢系统/%		总氢耗/kg	百公里氢耗/kg
				初始值	结束值	初始值	结束值		
18 000	44.65	101	453.9	60	67.58	100	18.36	30.18	6.65
				100			25.26	27.64	6.09

为了避免燃料电池输出功率的大幅波动，使燃料电池尽量在恒定功率（或较小的功率变化）下工作[8]，同时，还要满足动力电池剩余电量不小于 20%的要求。对燃料电池输出功率及动力电池输出功率进行优化调整，经过几轮优化，按照目前动力锂电池的带电量，优化后的最理想结果如图 9 和表 5 所示。

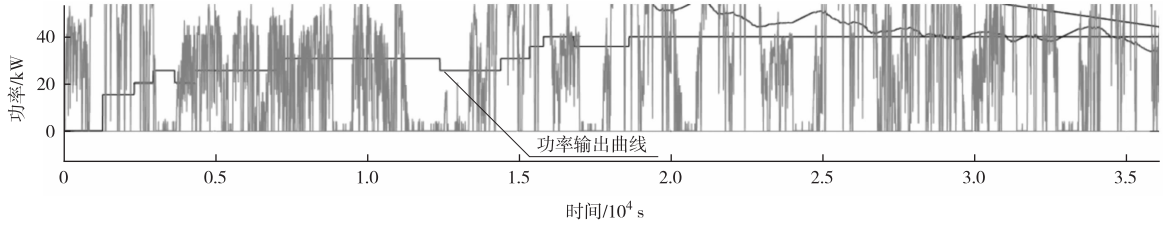

图 9 优化后的燃料电池功率输出曲线

表 5 优化后的氢气消耗

车质量/kg	平均车速/（km·h⁻¹）	最高车速/（km·h⁻¹）	行驶里程/km	动力电池 SOC/%		供氢系统/%		总氢耗/kg	百公里氢耗/kg
				初始值	结束值	初始值	结束值		
18 000	44.65	101	453.9	100	33.9	100	43.9	23.89	5.31

从上面优化结果可知，氢燃料电池的输出功率波动大幅减少，在路段运行后期，燃料电池基本维持恒功率输出，这对燃料电池是非常有利的，系统优化后的百公里耗氢为 5.31 kg，与图 7 的状态相比，氢耗减少 20%，能耗大大降低。但为了达到这个结果，动力锂电池的最后 SOC 状态最多只能达到 33.9%，无法满足不小于 60%的持续运行需要。为了满足车辆持续运行，需要额外增加动力电池充电口，经与客户沟通，根据加氢成本与充电成本对比，客户同意增加动力电池充电口，这样可以使运营成本大幅降低。而增加了充电口以后，动力电池的剩余电量(33.9%)还可以继续降低到 20%左右，这样更能节省氢气的消耗，但考虑到后期电池电量的衰减，不再继续优化。

5　结束语

虽然选择了合适的燃料电池功率和动力锂电池的带电量，但不同的控制策略对燃料电池正常运行和整车的能耗影响还是较大。因此，氢燃料客车的动力系统匹配不仅要考虑选择合适的燃料电池和动力锂电池，还要根据用户的实际使用工况去优化控制策略，以满足燃料电池的使用要求和用户的低成本运行需要。

参考文献：

[1] 步宏飞. 燃料电池发电系统 DC/DC 变换器的研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2006.

[2] 张琴. 燃料电池汽车动力系统能量管理策略研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2013.

[3] 毛宗强. 燃料电池[M]. 北京：化学工业出版社，2005：12-15.

[4] 衣宝廉. 燃料电池-原理・技术・应用[M]. 北京：化学工业出版社，2003：25-26.

[5] 吴保全. 燃料电池电动汽车能量流控制系统研究与开发[D]. 武汉：华中科技大学，2004.

[6] SU Yingchen. Sweitching based state-of-charge estimation of lithium-ion batteries [D]. New York：Kate Gleason College of Engineering Rochester Institute of Technologe，2011.

[7] 吴友宇，张成才，谢长君. 燃料电池电动车能量流管理系统[J]. 武汉理工大学学报，2004，28(4)：10-12.

[8] 曾卫. 燃料电池电动汽车能量管理系统优化控制与动态仿真研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2007.

热烈祝贺本刊新版网站正式上线运行

在招商局检测车辆技术研究院有限公司的大力支持下，经过大家的共同努力，《客车技术与研究》官网改版工作完成，并正式上线运行。

新网站版面清新，功能完善。稿件处理系统便于作者在线投稿、专家审稿，大大提高了工作效率；新增文献下载功能，为读者提供贴心服务。

欢迎使用，欢迎提出宝贵意见，以便进一步完善。

网址：http://bus-in.cmvr.com.cn。