燃料电池客车电－电混合动力系统的应用

周毅鹏

（厦门金龙旅行车有限公司，福建厦门361026）

摘要：基于某氢燃料电池客车整车研发，介绍燃料电池动力系统的开发背景和设计方案。从整车的动力性和经济性出发，采用综合能量密度更高的燃料电池与动力电池匹配形成的电-电混动系统作为整车的动力源方案，通过计算进行系统匹配，进一步提升燃料电池客车的综合性能。

氢燃料电池车作为新能源汽车的一个重要研究领域，它采用清洁能源氢气作为燃料，通过氢和氧的反应直接将化学能转换为电能提供动力，其能量转换效率高，燃料经济性好，行驶过程中排放物只有水，对环境没有污染[1]。与纯电动汽车相比，氢燃料电池车具有更好的续驶能力、能源补充时间短等优势，为新能源汽车的发展提供了一个更好的方向。

本文根据市场需求研发了一款氢燃料电池客车，针对燃料电池系统启动较慢、可靠性较低、过载能力差、成本较高的特点[2, 3]，采用了燃料电池系统和动力电池储能装置组成的电-电混合方案作为车辆动力源方案，提高车辆的实用性、可靠性和经济性。

1燃料电池客车动力系统

1.1动力系统结构

本方案是在纯电动系统的基础上，增加燃料电池系统，系统结构图如图1所示，主要由燃料电池系统、动力电池系统、驱动电机系统，以及整车控制系统等部件组成。其中，驱动电机系统采用集成式电机控制器总成和中央电机直接驱动后桥方式；燃料电池系统主要由燃料电池、高压DC/DC、储氢系统及相关附件等组成，用于提供车辆行驶的主驱动力；动力电池包含电池包、BMS及其附件等，用于增强车辆行驶的峰值功率，在车辆加速或爬坡时可以配合燃料电池系统提供充足的输出功率，提高动力性；在车辆怠速、低速工况下，燃料电池系统存在富余的能量可以输出给动力电池，为其充电；车辆减速时，可通过动力电池进行制动能量回收，提高整车动力系统的能量效率[10]。

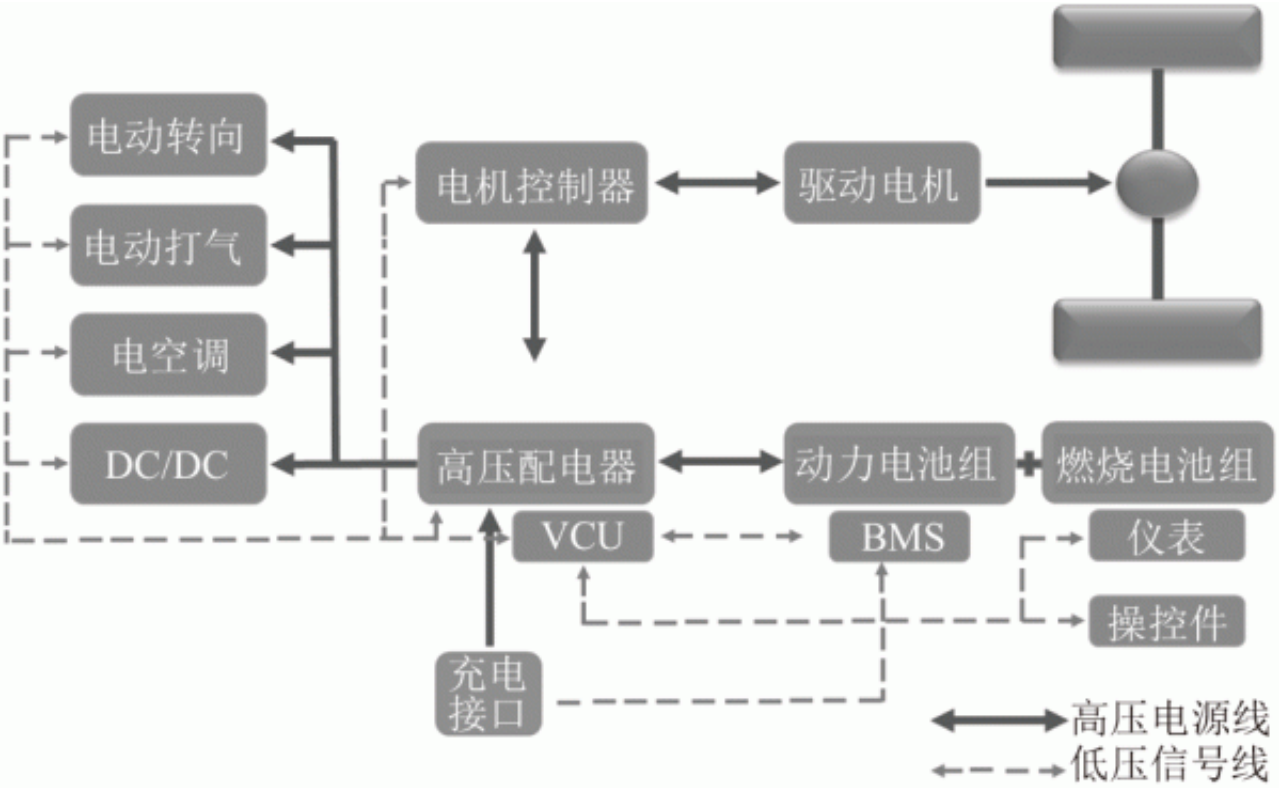

图1　动力系统结构

1.2系统部件技术参数（见表1）

表1　系统部件技术参数

系统部件	参数名称	参数值
驱动电机	额定转速/最高转速/(r/min)	1090/4500
	额定转矩/最高转矩/N·M	700/1250
	额定功率/最高功率/kW	90/150
	额定电压/V	537.6
电动转向	额定功率/kW	2.2
	使用电压范围/V	400～700
电动气泵	额定功率/kW	2.2
	使用电压范围/V	400～700
电动空调	额定功率/kW	6
	使用电压范围/V	400～700
DC/DC	额定功率/kW	3
	使用电压范围/V	400～700

1.3整车参数

本次车型开发是以8m纯电动考斯特中巴作为基础车型进行动力系统搭载设计，其整车参数如表2所示。

表2　整车参数

外形尺寸(长×宽×高)/mm	轴距/mm	满载总质量 m_0/kg	整车整备质量 m_1/kg	空气阻力系数 C_d	迎风面积 A/m^2	滚动半径 /m	滚动阻力系数 f
8050×2255×3310	4200	10 000	7500	0.62	6	0.372	0.011

设计目标如下：

1）燃料电池额定功率≥驱动电机额定功率×30%，且≥30kW；

2）燃料电池输出功率应满足国标[8]中等速行驶工况的功率需求，即在车辆载荷为满载质量的50%、平均车速为40km/h时整车的电功率需求；

3）续驶里程≥300km。

2燃料电池系统和动力电池系统选型设计

2.1燃料电池系统输出功率计算

1）电机的消耗功率[4,5,11]：

车辆载荷为满载质量的50%、平均车速为40 km/h时，电机的消耗功率：

$$P_m=\frac{1}{3600}\frac{1}{\eta_t\cdot\eta_m}\left(m_2\cdot g\cdot f+\frac{c_d\cdot A\cdot v^2}{21.15}\right)\cdot v_0$$

$$=\frac{1}{3600\times0.94\times0.94}\left(8750\times9.8\times0.011+\frac{0.62\times6\times40^2}{21.15}\right)\times40$$

$$=15.4\ \text{kW}$$

式中：η_t——机械传动效率，取0.94；

η_m——电机及控制器效率，取0.94；

v_0——车速，40 km/h；

m_2——整车半载质量，由表2计算得8750 kg。

2）整车耗电功率：

整车耗电功率P=电机功率P_m+电附件功率P_f，其中电附件的平均功率约为2 kW，因此P=15.4 +2=17.4 kW。

3）燃料电池系统输出功率：

燃料电池输出功率应大于整车耗电功率，即燃料电池输出功率应大于17.4 kW，根据整车设计目标要求燃料电池额定功率≥驱动电机额定功率×30%，且≥30 kW，燃料电池额定功率选择30 kW。

2.2动力电池选型计算

由于燃料电池系统不允许过载运行，即燃料电池系统工作时其输出功率≤30kW，因此整车行驶需求功率额外部分需要动力电池进行功率补充。本方案中动力电池选型优先考虑成熟的能量型电池方案，在燃料电池系统不工作或故障时车辆也能具备一定的纯电行驶能力。动力电池选型主要根据驱动电机的峰值功率（150kW）进行匹配计算，以补充燃料电池输出功率不足的部分。

1）动力电池峰值放电功率：

动力电池峰值放电功率PB≥驱动电机的峰值功率-燃料电池额定功率=120kW。

2）动力电池系统选型：

动力电池以原纯电动车型搭载的磷酸铁锂电池作为选型基础，其单体电压平台为3.2V，单体容量为120A·h，最大放电倍率可达2.2C。根据动力电池的峰值放电功率≥120kW，初步计算得出动力电池电量≥55kW·h，根据驱动电机及其控制器的使用电压范围，选定动力电池系统总电压平台为518.4V、总容量为120A·h、总电量Eb为62.2kW·h作为动力电池系统方案。

2.3储氢量计算与氢气瓶选型

2.3.1储氢量计算

根据设计目标要求，整车续驶里程≥300km，因此车辆在加满氢气的状态下需能具备行驶300km以上的能力。

1)整车消耗总能量计算[4]。

$$E = P \cdot t = \frac{P \cdot S}{v_0} = \frac{17.4 \times 300}{40} = 130.5\ \text{kW} \cdot \text{h}$$

式中：E——整车消耗总能量，kW·h；

t——行驶时间，h；

S——行驶距离，km。

2)燃料电池发电量计算。

根据燃料电池电动汽车续驶里程测试方法中的测试要求[9]，动力电池的初始SOC值为60%；因磷酸铁锂电池的特性限制，其最大放电极限可达SOC值为10%，所以动力电池的可用电量E_q为总电量的50%，即$E_q=E_b\times50\%=31.1$ kW·h。

故燃料电池需满足发电量 $C_F \geqslant E-E_q$=130.5－31.1 =99.4 kW·h。

3)单位质量氢气的发电量计算。

氢气在常温下的热值 C_p=1.43×10^{8}kJ/kg，即单位质量的氢气完全燃烧可产生热量 Q_H = 1.43 × 10^{8}kJ =39.7 kW·h。

由于本方案中燃料电池发电效率 η_F=46%，高压 DC/DC 的能量转换效率 η_D=85%，燃料电池附件能量消耗率 η_0=8%，氢气的利用率 η_H=95%，因此燃料电池系统中单位质量氢气所产生的可用电量为：

$$C_H = Q_H \cdot \eta_F \cdot \eta_D \cdot \eta_0 \cdot \eta_H$$
$$=39.7\times0.46\times0.85\times(1-0.08)\times0.95$$
$$=13.57\ \text{kW}\cdot\text{h}$$

4)单位体积氢气的质量计算。

由于燃料电池系统中的储氢系统为高压储氢，理想气体方程在此情况下计算偏差较大，因此采用压缩因子法。压缩系数计算公式为[6]：

$$Z = \frac{M_{H0} p V_{H0}}{m_{H0} R T}$$

式中：M_{H0}——氢气摩尔质量；

p——储氢系统压强；

V_{H0}——氢气容积；

m_{H0}——氢气质量；

R——理想气体常数；

T——气体的绝对温度。

表 3[7]给出了不同压强和温度条件下的氢气压缩系数。

表3　不同压强和温度条件下的氢气压缩系数

p/bar	Z			
	T=248.15 K	T=273.15 K	T=298.15 K	T=323.15 K
1.0133	1.001	1.001	1.001	1
10.1325	1.007	1.006	1.006	1.006
30.3975	1.0199	1.019	1.0182	1.0173
50.6625	1.0334	1.0319	1.0303	1.0288
101.325	1.0688	1.0649	1.0613	1.0579
151.9875	1.1056	1.099	1.0929	1.0875
202.65	1.1435	1.338	1.1252	1.1175
253.3125	1.1823	1.1693	1.1579	1.1479
303.975	1.2218	1.2053	1.1909	1.1783
354.6375	1.2619	1.2415	1.2241	1.2091

本方案采用高压储氢，也是目前国内普遍采用的一种储氢方案，氢气加满时压强p=35 MPa。当温度T为室温(298.15 K)时，从表3的数据中可得氢气压缩参数Z=1.2241，则单位质量(kg)氢气体积：

$$V_{H0}=\frac{Zm_{H0}RT}{M_{H0}p}$$

$$=\frac{1.2241\times1000\times8.31\times298.15}{2\times3.5\times10^{7}}\times1000$$

$$=43.1\ \text{L}$$

5)车辆所需的储氢量计算。

车辆所需的储氢质量

$$m_{H1}=\frac{C_F}{C_H}=\frac{99.4}{13.57}=7.32\ \text{kg}$$

车辆所需的氢气体积

$$V_{H1}=m_{H1}V_{H0}=7.32\times43.1=315.49\ \text{L}$$

2.3.2 氢气瓶选型

通过以上车辆所需的氢气体积计算，结合本方案选择的燃料电池工作要求氢气压强不得低于2 MPa，根据单位质量氢气体积的公式可以看出，同一温度下氢气体积跟压强成比例关系，可估算燃料电池系统中氢气瓶的总容量$V_F=315.49\div\left(1-\frac{2}{35}\right)=334.6\ \text{L}$。本方案根据整车的空间结构和市面上可选的氢气瓶尺寸，选择4个85 L的氢气瓶并联，总容积340 L，满足设计目标要求。

3整车搭载应用

基于8m纯电动考斯特的整车空间结构特点，本方案将动力电池设计成3个箱体布置在底盘中段的舱体；燃料电池发动机、高压DC/DC及其冷却系统布置在车辆尾部，并设计独立舱体与乘客舱隔离，舱体内部设计3层安装结构，其中上层布置燃料电池电堆、空滤等零部件，中间层布置高压DC/DC，下层布置电机控制器、电池高压盒等零部件；4个氢气瓶与供氢系统采用集成式架构设计（见图2），独立布置于后段车顶，并设计防护罩。整体布置方案如图3所示。

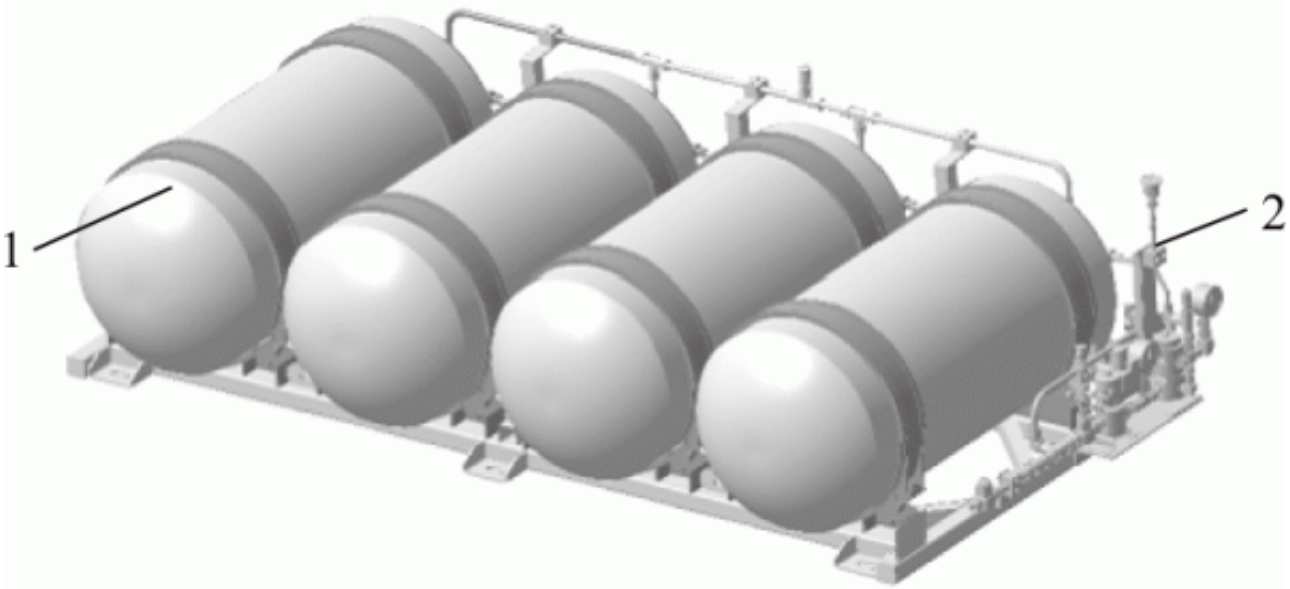

图2　整体式储氢和供氢系统设计结构

1.氢气瓶;2.供氢系统

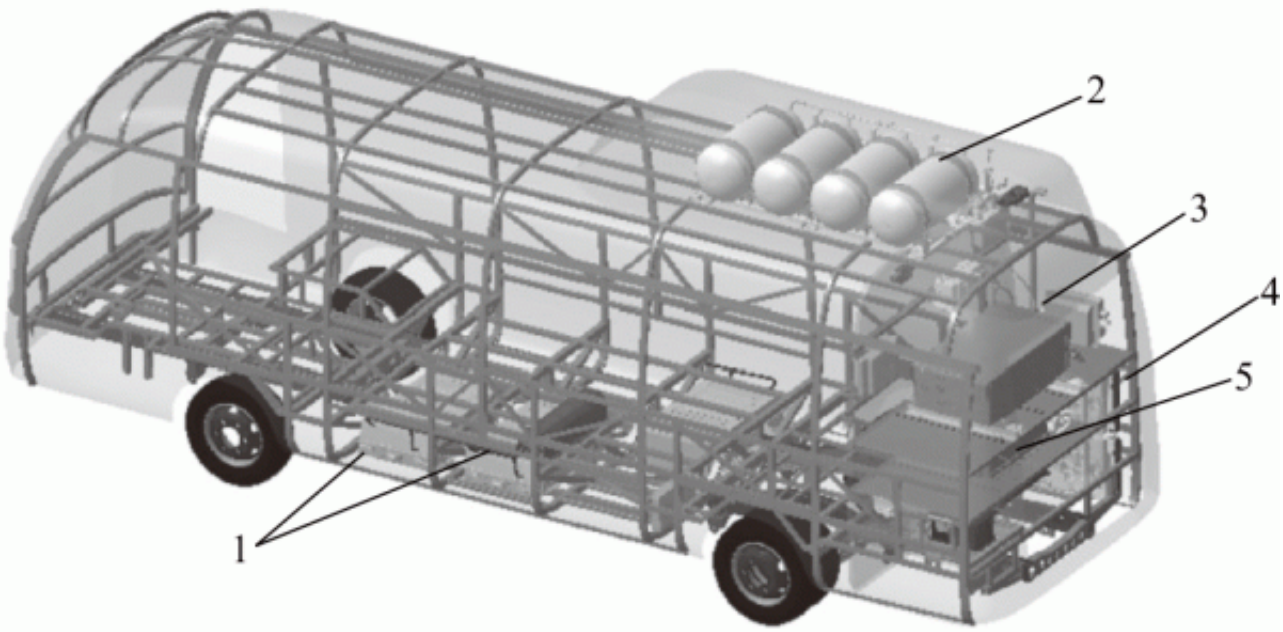

图3　燃料电池电动客车整车布置设计图

1.动力电池;2.储氢和供氢总成;3.燃料电池电堆;
4.燃料电池冷却系统;5.高压DC/DC

4结束语

本文采用电-电混合的动力系统方案作为燃料电池客车的动力系统，弥补了燃料电池的缺陷，改善了整车的动力性，提高了整车的续驶里程；针对燃料电池和动力电池系统的匹配选型进行了计算，同时根据整车的空间结构进行了合理的搭载应用，进一步确保燃料电池客车的性能指标符合设计要求：对燃料电池客车的设计与开发具有指导意义。

参考文献：

[1]高敏.燃料电池客车研发进展分析[J].客车技术与研究，2012（2）：1-4.

[2]林成涛，陈全世.燃料电池客车动力系统结构分析[J].公路交通科技，2003，20（5）：133-137.

[3]李玉鹏，李进，李飞强，等.燃料电池城市客车电电混合动力系统研究[J].客车技术与研究，2014（6）：21-23.

[4]余志生.汽车理论[M].北京：机械工业出版社，2000：57-70.

[5]林剑健.插电式混合动力系统匹配计算[J].机电技术，2013（4）：123-125.

[6]谢起成，赵广平.燃料电池电动汽车氢消耗量的计算[J].清华大学学报（自然科学版）2005，45（11）：1534-1536.

[7] GAS Encyclopaedia [M]. France：Elsevier Sicence Publishers，1976.

[8]能量消耗率和续驶里程试验方法：GB/T18386—2005[S].

[9]新能源汽车推广应用推荐目录[Z].中机函2017，2号文.

[10]陈笃廉.燃料电池客车氢系统与动力电池安全防护设计[J].机电技术，2017（2）：59-62.

[11]康燕语.快充型磷酸铁锂电池在纯电动客车中的应用[J].机电技术，2017（1）：96-98.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/161316.html