

文章编号: 1002-0268 (2008) 06-0147-07

燃料电池城市客车动力驱动系统的合理匹配研究

陈树勇, 陈全世, 仇斌, 田光宇

(清华大学, 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为实现国家“十一五”863重大科研项目——燃料电池城市客车专项的燃料电池城市客车动力性能指标, 建立了燃料电池城市客车的整车动力系统结构形式, 进而完成新样车的概念设计。对实际目标样车动力驱动系统不同部件(包括电机、变速器、燃料电池、蓄电池)性能参数的合理匹配理论和过程进行了详尽的研究。建立了基于电压控制策略的动力驱动系统仿真模型。仿真结果达到目标样车的动力性能指标, 同时建立的仿真模型对进一步深入研究整车控制策略的优化具有重要指导意义。匹配理论和仿真模型对其他类型的电动汽车研究具有一定的参考价值。

关键词: 汽车工程; 参数匹配; 燃料电池城市客车; 动力驱动系统

中图分类号: U469.72

文献标识码: A

Research on Reasonable Matching of Powertrain of Fuel Cell City Bus

CHEN Shu-yong, CHEN Quan-shi, QIU Bin, TIAN Guang-yu

(The State Key Laboratory of Automobile Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to realize dynamic performance indices on Fuel Cell City Bus (FCCB), the powertrain configuration of the whole vehicle was established, and then the conceptual design of a new prototype vehicle was completed. The theory and process of performance parameters reasonable matching for different components (including motor, gearbox, fuel cell, battery) of real target prototype vehicle powertrain were discussed in detail. The simulation model of powertrain based on voltage control strategy was built. The simulation results meet dynamic performance indices of target prototype vehicle. Meanwhile, the simulation model has instructional significance for the optimization of the whole vehicle control strategy profoundly. The matching theory and simulation model have a certain reference value for other types of electric vehicles.

Key words: automotive engineering; parameters matching; fuel cell city bus; powertrain

0 引言

燃料电池城市客车(Fuel Cell City Bus, 简称 FCCB)是解决当前汽车环境污染和能源紧张问题的有效方案之一^[1-3]。其动力驱动系统的构型选择、参数匹配和整车控制策略,是整车集成的关键技术之一,对车辆的动力性、经济性影响很大。鉴于此,以国家“十一五”863计划电动汽车重大专项某燃料电池城

市客车项目为背景,针对某改进型低地板燃料电池城市客车动力驱动系统构型,从整车动力性指标和目标工况的需求功率出发,分别对驱动电机参数、变速器传动比及档位数、动力源(燃料电池和动力电池系统)参数进行了合理匹配与选择;最后,建立了整车动力驱动系统仿真模型,对提高国内燃料电池城市客车的研究水平具有一定的参考价值。

收稿日期: 2007-04-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA11A102)

作者简介: 陈树勇(1972-),男,安徽芜湖人,工学博士,研究方向为节能与新能源汽车、汽车动力学。(shuyongchen@sina.com)

1 整车动力驱动系统结构形式及动力性能指标

目前燃料电池城市客车研究，通常是从某一种成熟的常规车型出发，按照既定的整车设计目标对其动力驱动系统进行改造和重新设计。某改进型燃料电池城市客车目标样车的动力驱动系统采用“FC+DC/DC+B”的能量复合型结构形式，如图1所示。

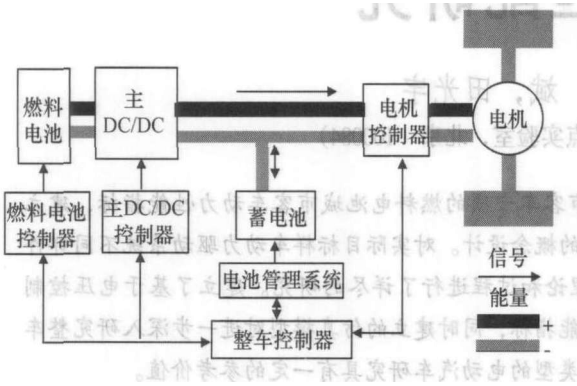


图1 结构形式

Fig.1 Structure of powertrain

该结构特点是：燃料电池功率较小，其发出的总能量不足以满足汽车在整个行驶循环的能量需求，因此，汽车在按工况循环运行后动力电池组SOC较运行前降低，多次循环后需要对动力电池组进行充电^[4]。

整车参数如表1所示。

表1 燃料电池城市客车的整车参数

Tab.1 Whole vehicle parameters of fuel cell city bus

参数	数值	参数	数值
整备质量 m/kg	12 600	空载前桥/kg	4 200/8 400
满载总质量 m_s/kg	17 150	满载前桥/kg	6 400/10 750
轴距/mm	5 980	长×宽×高/mm	12 000×2 500×3 350
迎风面积 A/m^2	7.95	前悬/mm	2 650/3 370
轮胎滚动半径 r/mm	475	后悬/mm	
传动系统效率 η_T	0.92	空气阻力系数	0.7
		C_D 滚动阻力系数 f_r	$0.007 6 + 0.000 056 u_a$

国家“十一五”863计划电动汽车重大项目燃料电池城市客车专项对改进型燃料电池城市客车提出必须要满足的各项动力性能指标是^[5]：

- (1) 最高车速 ≥ 80 km/h;
- (2) 最大爬坡度 $\geq 18\%$;
- (3) 0~50 km/h 全力加速时间 ≤ 25 s。

为了实现以上动力性能指标，必须重新对动力驱动系统参数进行合理匹配。

2 参数匹配原理

匹配燃料电池城市客车的动力驱动系统，首先要

根据设计的动力性能指标要求进行初步设计，完成驱动电机和变速器的参数匹配，再对汽车的动力性能进行检验，从理论上初步评价该系统是否达到动力性能的设计指标。如果不符合要求，重复进行初步设计和性能检验两个步骤，直至达到性能指标要求，最后对动力源进行匹配^[6-9]。

2.1 初步设计

在初步设计过程中，首先确定驱动电机类型，再根据目标样车的动力性能要求得到驱动电机的基本性能参数，进而确定变速器的传动比及档位数。

2.1.1 确定燃料电池城市客车用驱动电机类型

根据电机的使用要求、特点和设计经验来初步确定电机的类型。FCCB用驱动电机不同于工业电机，一般是专门设计的。目前电动汽车中常用的驱动电机包括有刷直流电机、感应电机、永磁同步电机及开关磁阻电机等。其中，感应电动机主要应用中、大功率的驱动系统中。随着电力电子及微电子技术的进步和新型控制理论的发展，使得感应电机的控制得到了很大的提高。综合各种因素，样车选用直接转矩控制的三相交流笼型感应电机。

2.1.2 确定电机性能要求

电机性能参数的选择应主要考虑整车动力性能要求，所以车辆需求功率以及功率谱的分析非常必要。

(1) 整车需求功率分析

根据汽车理论，汽车功率平衡关系为：

$$P_v = \frac{1}{\eta_T} \left(\frac{mgf_r u_a}{3 600} + \frac{mgi u_a}{3 600} + \frac{C_D A u_a^3}{76 140} + \frac{\delta m u_a}{3 600} \frac{du}{dt} \right), \quad (1)$$

式中， P_v 为车辆需求功率； i 为道路坡度； δ 为旋转质量换算系数； du/dt 为加速度； u_a 为车速。

最高车速 u_{max} 对应的车辆需求功率为：

$$P_{v1} = \frac{1}{\eta_T} \left(\frac{mgf_r u_{max}}{3 600} + \frac{C_D A u_{max}^3}{76 140} \right). \quad (2)$$

最大爬坡度 α_m 对应的车辆需求功率为：

$$P_{v2} = \frac{1}{\eta_T} \left(\frac{mgf_r \cos \alpha_m u_a}{3 600} + \frac{mg \sin \alpha_m u_a}{3 600} + \frac{C_D A u_a^3}{76 140} \right). \quad (3)$$

原地起步加速到指定车速的全力加速时间为：

$$T = \int_0^{u_a} dt = \delta m \int_0^{u_a} \left(\frac{u_a}{P_{v3} \eta_T} - \frac{3 600}{mgf_r} - \frac{76 140}{C_D A u_a^2} \right) du, \quad (4)$$

由式(4)可以计算出给定全力加速时电机对应于车速 u_a 的车辆功率需求 P_{v3} 。

利用式(2~4)，可得到目标样车的最高车速、最大爬坡度(假定爬坡时最低车速为20 km/h)以及全力加速时间对应的车辆功率需求，见表2。

表2 整车动力性指标对应的车辆功率需求

Tab.2 Vehicle power requirement corresponding to the dynamic performance indicators

动力性指标	性能要求	功率需求
最高车速	80 km/h	$P_{v1} = 98.7 \text{ kW}$
最大爬坡度	$\geq 18\%$	$P_{v2} = 91.8 \text{ kW}$
0~50 km/h 全力加速时间	$\leq 25 \text{ s}$	$P_{v3} = 65 \text{ kW}$

图2为北京城郊公共汽车某行驶工况实测结果及相应的功率谱。图2中功率为负值时,表示制动时电机回馈的功率。

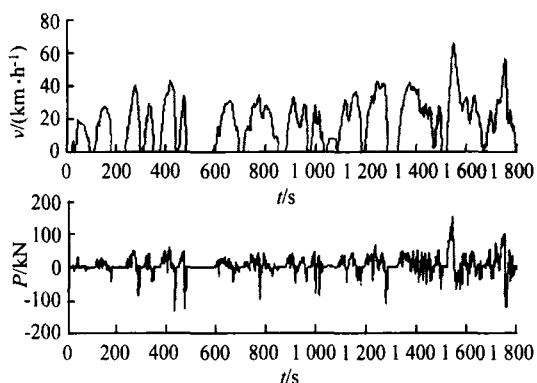


图2 北京城郊公共汽车某行驶工况及相应的车辆功率谱

Fig.2 The driving behavior and the corresponding power spectrum of Beijing urban bus

由图2可知北京城郊工况对应车辆最大驱动需求功率和最大回馈制动功率分别为165 kW和120 kW。

(2) 电机额定功率 P_e

根据预期的最高车速来初步确定 P_e , 如式(5)所示, 选定 $P_e = 100 \text{ kW}$:

$$P_e \geq P_{v1} \quad (5)$$

(3) 电机最大功率 P_{emax}

P_{emax} 必须同时满足整车动力性指标要求, 即 $P_{emax} \geq \max(P_{v1}, P_{v2}, P_{v3})$ 。由表2可知, P_{emax} 至少应高于98.7 kW。

但是, P_{emax} 还应能满足 FCCB 在北京城郊行驶工况下的车辆功率需求, 同时考虑到电机驱动系统效率, 所以选定 $P_{emax} = 185 \text{ kW}$ 。

(4) 电机最高转速 n_{max} 、额定转速 n_e

实际上, n_{max} 与自身的尺寸、质量和内在损耗都有直接关系。根据选用的电机类型, 初步确定 $n_{max} = 6000 \text{ r/min}$ 。在电动车辆用电机调速范围上, 对电机扩大恒功率区系数 β (即弱磁扩速能力), 一般要求在3~5之间范围, 才能满足最高行驶车速的要求。 β 太小则额定转矩、转子电流、内在损耗、电机尺寸和质量均较大; β 太大则传动比也较大, 会造成驱动轴转矩和

齿轮应力增大。 n_e 和 n_{max} 有如下关系:

$$n_e = m_{max} / \beta \quad (6)$$

由于国内研制单位的车用驱动电机技术与工艺水平等因素, 并参考国家“十一五”863计划以前研制的样车上采用的驱动电机, 选定 $n_e = 1800 \text{ r/min}$ 。经校验 $\beta = 3.3$, 满足 β 的范围要求。

(5) 电机额定转矩 T_e 、最大转矩 T_{max}

额定转矩 T_e 可由式(7)确定, $T_e = 531 \text{ Nm}$:

$$T_e = 9549 P_e / n_e \quad (7)$$

对车辆在最大坡度上行驶和0~50 km/h加速行驶两种工况下动力因数进行分析, 就可以确定牵引电机的转矩过载系数 k_T 和最大转矩 T_{max} 。

在18%度坡上上坡行驶时, 动力因数为:

$$D_{1max} = \frac{F_{1max}}{G} = \sin(\arctan(0.18)) + f \cos(\arctan(0.18)) \quad (8)$$

在0~50 km/h加速行驶时动力因数为:

$$D_{2max} = \frac{F_{2max}}{G} = f + \frac{C_D A}{21.15 G v_a^2} + \frac{\delta}{3.6} \frac{du_a}{dt} \quad (9)$$

考虑车辆起动时的牵引力需求, 引入起动系数 $s_q \approx 1.1 \sim 1.3$, 因此, 最大动力因数为:

$$D_{max} = s_q \max(D_{1max}, D_{2max}) \quad (10)$$

牵引电机的转矩过载系数 k_T 由式(11)确定:

$$k_T = \frac{T_{max}}{T_e} = \frac{D_{max} G r / (i_1 \eta_T)}{9549 \frac{P_e}{n_e}} = \frac{D_{max} G r n_e}{9549 P_e i_1 \eta_T} \quad (11)$$

式中, i_1 为传动比。

忽略空气阻力, 式(1)可改写为

$$P_e = P_{vmax} \approx \frac{f G u_{max}}{3600 \eta_T} \quad (12)$$

$$u_{max} = 0.377 \frac{n_{max} r}{i_g i_o} \quad (13)$$

由式(6)、(11)、(12)、(13)可得:

$$k_T = \frac{D_{max}}{\beta} \quad (14)$$

由式(14)选定 $k_T = 2.14$, 再由转矩过载系数的定义选择电机最大转矩为1100 Nm。

最终确定选用湖南某电机厂生产的驱动电机, 其主要性能参数如表3所示。

表3 驱动电机主要性能参数

Tab.3 Main performance parameters of driving motor

类型	三相交流感应电机	额定电压	360 V
峰值功率	185 kW (2 min)	额定功率	100 kW (1 h)
最大转矩	1100 Nm	额定转矩	531 Nm
额定转速	1800 r/min	最高转速	6000 r/min

2.1.3 确定变速器的传动比和档位数

由于国家“十一五”863计划该项目对整车最高车速及爬坡性能等指标的提高,以及国内电机及控制器制造工艺水平有限,固定速比的变速器可能无法满足汽车动力性能要求,所以可以考虑采用多档变速器。车辆以最高车速行驶时用最小传动比档位工作,在最大爬坡度时用最大传动比档位工作。

车辆传动比 i_t 包括变速器传动比 i_g 和主减速器传动比 i_0 。主减速器仍采用原车型结构,故 $i_0 = 6.2$ 。

$$i_t = i_g \cdot i_0 \quad (15)$$

(1) 变速器最小传动比 i_{gmin} 应满足汽车行驶最高车速的要求,根据汽车理论知识可知:

$$i_{gmin} = \frac{0.377 m_{max}}{i_0 u_{max}} \quad (16)$$

(2) 一般来说,在3项动力性要求中,爬坡对汽车的转矩要求比较高。所以变速器的最大传动比 i_{gmax} 由式(17)确定:

$$i_{gmax} = \frac{F_{\alpha max} r}{T_{max} i_0 \eta} \quad (17)$$

式中, $F_{\alpha max}$ 为最大爬坡度 α_{max} 下的行驶阻力, $F_{\alpha max} = mg(f \cos \alpha_{max} + \sin \alpha_{max})$; $\frac{C_D A}{21.15} u_a^2$; $u_a = 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

(3) 档位数的确定

变速器的传动比范围分别与 $\{i_g | i_g \geq i_{gmax}\}$ 和 $\{i_g | i_g \leq i_{gmin}\}$ 两个集合的交集应该都不为空。比较 i_{gmin} 和 i_{gmax} , 当 i_{gmin} 较大或二者相等时,即满足 $i_{gmax} \leq i_g \leq i_{gmin}$, 只需要一个固定速比 i_g 的变速器可以实现最高车速和最大爬坡度的动力性要求; 当 i_{gmax} 较大时, 变速器的最高档的传动比 i_{gn} 应满足 $i_{gn} \leq i_{gmin}$, 其最低档的传动比 i_{gl} 应满足 $i_{gl} \geq i_{gmax}$ 。相邻档位的传动比的比值,即公比 q 的取值通常小于 1.7~1.8, 否则会造成换档困难,同时一档传动比取值较大时,可以减小对电机的最大转矩需求,有利于减小过载,延长电机寿命。按此原则,根据 i_{gl} 和 i_{gn} 的比值就可以得到变速器的档位数 n :

$$n = \text{ceil} \left(\log_q \frac{i_{gl}}{i_{gn}} \right) + 1 \quad (18)$$

根据档位数和高低档的传动比,在允许的范围适当调整各档的传动比以利于变速器的设计和制造。选用重庆某齿轮厂生产的变速器,一档传动比 $i_{gl} = 3.06$,二档传动比 $i_{g2} = 1.86$,此时 $q = 1.65$ 。

2.2 性能检验

2.2.1 最高车速

对二档变速器的动力驱动系统来说,最高车速通常是指二档工况下的最高车速。对于驱动电机的输出端,汽车行驶阻力平衡的计算公式如式(19)所示:

$$\frac{T_m i_0 i_{g2} \eta_T}{r} = mgf \cos \theta + mg \sin \theta + \frac{C_D A}{21.15} u_a^2 + \frac{\delta m}{3.6} \frac{du_a}{dt} \quad (19)$$

式中, T_m 为电机输出转矩。

根据式(19),可以绘出汽车的驱动力-行驶阻力平衡图,从而确定最高车速为 82.96 km/h。

2.2.2 最大爬坡度

最大爬坡度是指一档时的爬坡度,不同车速下的最大爬坡度可以由式(20)计算得到:

$$\theta_{max} = \arcsin \frac{\frac{T_m i_0 i_{g1} \eta_T}{r} - \frac{C_D A}{21.15} u_a^2}{G} - f \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{T_m i_0 i_{g1} \eta_T}{r} - \frac{C_D A}{21.15} u_a^2 \right)^2}{G^2} + f^2} \quad (20)$$

当 $u_a = 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,最大坡度角 11.7°(20.4%)。

2.2.3 加速能力

感应电机的外特性包括恒转矩区域和恒功率区域。加速过程通常会涵盖恒转矩区域和部分恒功率区域,其加速时间的微分方程分别为:

$$dt = \frac{1}{3.6 \frac{T_{max} i_0 i_g \eta_T}{r} - Gf - \frac{C_D A}{21.15} u_a^2} \delta m \quad (21)$$

$$dt = \frac{\frac{\delta m u_a}{12960}}{P_{max} \eta_T - \frac{Gf u_a}{3600} - \frac{C_D A u_a^3}{76140}} du_a \quad (22)$$

对于两档变速器,首先必须确定换档车速。为此可以将不同档时不同车速下的加速度全部计算出来;当从某一车速开始,某一低速档的加速度小于与其相邻的高速档的加速度时,该车速就是取得最小加速时间的该低速档的换档车速。计算表明,当车速达到 24.80 km/h 的时候开始由一档换成二档全力加速至 50 km/h 的加速时间 $t_f = 3.23 + 7.895 = 11.125 \text{ s}$, 此时间即为 0~50 km/h 的最小加速时间。

综上所述,电机和变速器的参数匹配均达到目标样车的动力性能指标要求。

2.3 动力源匹配

2.3.1 燃料电池组功率的确定

燃料电池组应能单独提供汽车平时正常运行所需要的功率,并留有一定的富余功率对动力电池充电。考虑到系统效率,燃料电池组的恒定净输出功率(额

定功率) P_{fc} 如式 (23) 所示。

$$P_{fc} \eta_{DC} \geq \frac{P_{max}}{\eta_{mc} \eta_b \eta_t} + P_{acc}, \quad (23)$$

式中, P_{max} 为目标样车以巡航车速行驶时的最大需求功率; η_{DC} 为 DC/DC 效率; η_{mc} 为电机及控制器系统总效率; η_b 为动力电池组充放电折算效率; η_t 为传动系统效率; P_{acc} 为辅助设备消耗功率。

但是必须综合考虑燃料电池的制造成本、比功率和效率等因素, 在满足设计性能要求的基础上应尽可能降低其功率等级。综合考虑各种因素, 选定燃料电池组额定功率为 90 kW。

2.3.2 动力电池组参数的确定

课题选用镍氢电池, 其参数确定方法概括如下:

(1) 以整车动力性指标为设计条件, 根据燃料电池的外特性选择镍氢电池的最大功率, P_b 如式 (24) 所示, 计算结果为 185 kW。

$$P_b = \frac{P_{max}}{\eta_t \eta_{mc}} - P_{fc}, \quad (24)$$

式中, P_{max} 为最大需求行驶功率。

(2) 直流总线额定电压和最小电压的选择: 比较稳妥的设计方案是保证供电的直流总线电压始终高于电机的额定电压, 或者最小值不能低于电机额定电压的 90%。设电机额定电压为 U_m , 则直流总线最低电压 U_{min} 应满足如下设计原则:

$$U_{min} \geq 0.9 U_m, \quad (25)$$

选定 $U_m = 360$ V, 所以 U_{min} 应大于 324 V。

(3) 镍氢电池容量参数的选择: 电池容量越大表示汽车的储能能力越强, 汽车爬坡、加速时的后备功率越大; 但是, 电池容量越大, 则电池质量越大, 必然会影响到汽车的动力性。所以在选择电池容量参数时要综合考虑。

根据动力电池组的电流随时间的变化关系, 可以得到累计蓄电池组安时数的变化量随时间的变化关系:

$$\Delta C(t) = \int_0^t I(t) dt.$$

找到 $\Delta C(t)$ 中安时数的最小值 ΔC_{min} (充电后) 和最大值 ΔC_{max} (放电后)。如果燃料电池匹配正常的话, ΔC_{min} 为负数, 而 ΔC_{max} 为正数。按照样车的控制策略, 考虑燃料电池工作在较为恒定的某一功率点上, 假设希望动力电池组的 SOC 维持在 SOC_0 如 0.7 左右, 在工况循环下电池的 SOC 的常用范围是 $SOC_1 \sim SOC_2$ 如 0.5 ~ 0.8, 则给蓄电池组充入 $|\Delta C_{min}|$ 的电量, 动力电池组能够保持 $SOC \leq SOC_2$; 给蓄电池组放出 ΔC_{max} 的电量, 蓄电池组能够保持 $SOC \geq SOC_1$ 。动力电池组的容量可定为:

$$C \geq \max\left(\frac{-\Delta C_{min}}{SOC_2 - SOC_0}, \frac{\Delta C_{max}}{SOC_0 - SOC_1}\right). \quad (26)$$

选定的镍氢动力电池组具体参数如下: 标称容量: 100 Ah; 单体电池额定电压: 1.2 V; 电池组最小电压: 324 V; 电池组内单体电池数目: 320 个, 每 10 个单体组合为额定电压 12 V 的模块。

3 动力系统的建模与仿真分析

利用 Matlab/Simulink 软件封装技术建立的 FCCB 动力驱动系统模型如图 3 所示, 主要包括 6 个子系统模块: 工况模块、驾驶员模块、整车综合控制单元、电机驱动系统模块、车辆模块和动力源模块。该模型结合了前向、后向仿真的优点^[9]。

Clock 将时间信息输入到工况模块, 读取北京城郊某公交试验工况数据。工况模块将工况数据提供给驾驶员模块, 驾驶员模块根据工况数据和车辆模块反馈过来的车速信号, 对工况进行跟踪, 做出加速和减

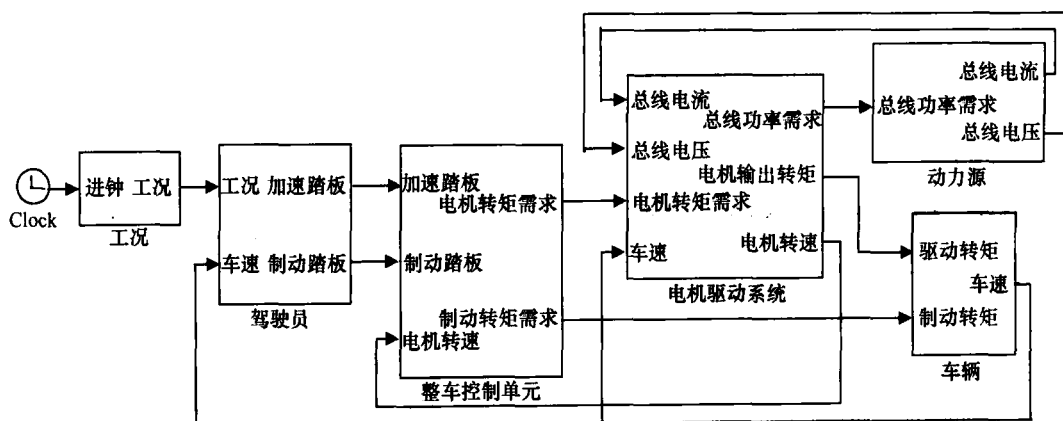


图 3 动力驱动系统模型

Fig.3 Model of powertrain

速的指令,将加速踏板信号和制动踏板信号输出到整车综合控制单元。整车综合控制单元根据加速、制动踏板信号和电机驱动系统反馈过来的电机转速等信号,发出电机转矩需求信号和制动转矩需求信号,分别输出给电机驱动系统模块和车辆模块。电机驱动系统模块根据电机转矩需求和动力源模块反馈过来的总线电压信号和总线电流信号以及车速信号,分别计算出电机实际输出转矩和转速,并将信号输出给车辆模块和整车控制单元;同时,向动力源模块输出总线功率需求信号。车辆模块根据电机驱动系统模块传来的驱动转矩和整车控制单元传来的制动转矩需求信号,输出车速信号;车速信号被反馈到驾驶员模块和电机驱动系统模块。动力源模块主要由燃料电池、动力电池和主DC/DC模块组成,它根据电机驱动系统输出的总线功率需求和燃料电池、动力电池的实际性能,向电机驱动系统模块输出实际总线电流和总线电压。

整车动力驱动系统采用电压控制策略,其功率分配基本特点为:在低速行驶等汽车需要较小功率需求时,能量主要由燃料电池提供,同时燃料电池会给动力电池组以一定电流充电,即进行恒压控制;当需求功率超过燃料电池的额定功率时(如加速、爬坡等),进入恒功率模式,燃料电池保持额定功率输出,不足的功率需求由动力电池组系统降压提供^[10]。

图4为工况车速与仿真车速的对比,由图4可知仿真车速与工况车速基本吻合。图5为动力电池组SOC变化历程仿真结果,由图5可知SOC变化历程基本恒定。

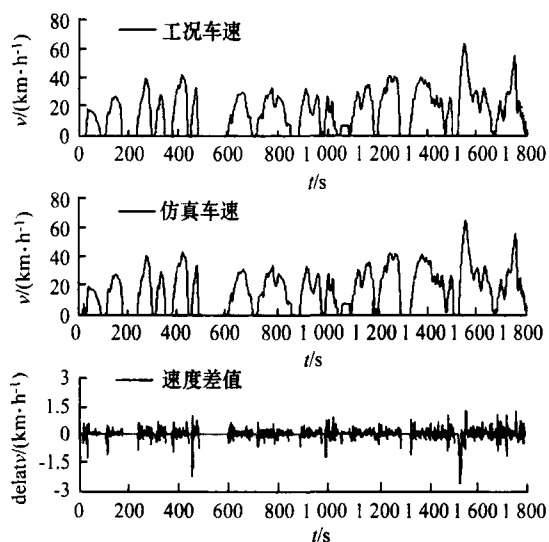


图4 工况车速与仿真车速的对比

Fig.4 Contrast of driving behavior speed and simulation speed

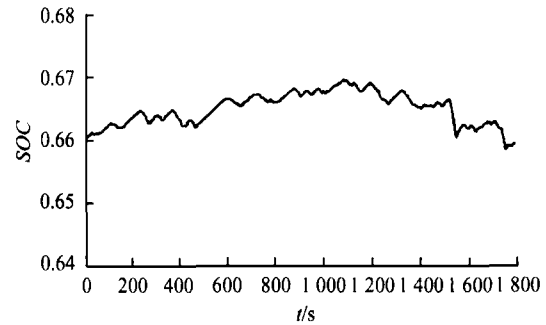


图5 动力电池组SOC变化历程仿真结果

Fig.5 Simulation result of power battery packs SOC change course

4 结论

(1) 针对国家“十一五”863计划电动汽车重大专项燃料电池城市客车课题,对动力驱动系统的参数合理匹配理论和方法进行了详尽探讨,匹配结果达到整车动力性能指标。

(2) 运用Matlab/Simulink建立了基于电压控制策略的FCBE整车动力驱动系统仿真模型,仿真结果满足北京公交的运营需要,达到了预期的效果。

(3) 由于863该项目工作计划的阶段性,动力驱动系统部件参数的实际匹配结果仍需要通过下一阶段的样车实车性能试验的验证,以对参数和控制策略进行必要的调整。

参考文献:

References:

- [1] 陈全世,齐占宁.燃料电池电动汽车的技术难关和发展前景[J].汽车工程,2001,23(6):361-364.
CHEN Quan-shi, QI Zhan-ning. Technology Challenge and Prospect of Fuel Cell Vehicle [J]. Automobile Technology, 2001, 23 (6): 361-364.
- [2] 陈勇,陈全世,仇斌.燃料电池城市大客车驱动系统的发展现状及趋势[J].汽车技术,2004(8):1-4.
CHEN Yong, CHEN Quan-shi, QIU Bin. Developing Status Quo and Trend of Drive Systems of Fuel Cell Electric Buses [J]. Automobile Technology, 2004 (8): 1-4.
- [3] 黄勇,曾帆,陈全世,等.燃料电池城市客车混合动力系统的自适应控制[J].公路交通科技,2006,23(9):121-125.
HUANG Yong, ZENG Fan, CHEN Quan-shi, et al. Adaptive Control of the Hybrid Power System in Fuel Cell City Bus [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (9): 121-125.
- [4] 秦孔建,高大威,卢青春,等.燃料电池汽车混合动力系统构型研究[J].汽车技术,2005(4):24-27.

- QIN Kong-jian, GAO Da-wei, LU Qing-chun, *et al.* Study on Configuration of the Hybrid Power System of Fuel Cell Electric Vehicles [J]. *Automobile Technology*, 2005 (4): 24 - 27.
- [5] 863 计划现代交通技术领域办公室. 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 现代交通技术领域-“节能与新能源汽车”重大项目 2006 年度课题申请指南 [Z]. 北京: 863 计划现代交通技术领域办公室, 2006.
Office of Modern Transportation Technology of 863 Plan. The National High-tech Research and Development Plan (863 Plan) Modern Transportation Technology: Guidelines for 2006 Subject of Major Project “Energy Conservation and New Energy Vehicle” [Z]. Beijing: Office of Modern Transportation Technology of 863 Plan, 2006.
- [6] CHU Liang, WANG Qing-mian, LIU Ming-hui, *et al.* Parametric Design of Series Power-Train for Fuel Cell Transit Bus [C] // SAE Paper.2004-01-2608: 107 - 112.
- [7] 贡海涛, 万钢, 孙泽昌. 燃料电池汽车动力总成结构配置及参数优化匹配 [J]. *汽车工程*, 2006, 28 (8): 729 - 733.
- YUN Hai-tao, WAN Gang, SUN Ze-chang. A Study on Configuration and Parameters Optimization of Drive-train for Fuel Cell Vehicle [J]. *Automotive Engineering*, 2006, 28 (8): 729 - 733.
- [8] EHSANI M, GAO Y, GAY S E, *et al.* Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005: 375 - 385.
- [9] 陈全世, 仇斌, 谢起成, 等. 燃料电池电动汽车 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 100 - 111.
CHEN Quan-shi, QIU Bin, XIE Qi-cheng, *et al.* Fuel Cell Electric Vehicle [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 100 - 111.
- [10] 何彬, 卢兰光, 李建秋, 等. 燃料电池混合动力汽车能量控制策略仿真研究 [J]. *公路交通科技*, 2006, 23 (1): 151 - 155.
HE Bin, LU Lan-guang, LI Jian-qiu, *et al.* Simulation Research on Energy Management Strategy of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2006, 23 (1): 151 - 155.
- CHEN Guang-hua. Methods and Practice of Economic Assessment in Transport Developing Strategy [J]. *Urban Transport of China*, 2004 (2): 41 - 46.
- [6] 北京交通发展研究中心. 北京市交通发展年度报告 [R]. 北京: 北京交通发展研究中心, 2003 ~ 2006.
Beijing Transportation Research Center. Annual Report of Beijing Traffic Development [R]. Beijing: Beijing Transportation Research Center, 2003 ~ 2006.
- [7] 北京市城市规划设计研究院. 北京市城市交通综合调查成果文件 [R]. 北京: 北京市城市规划设计研究院, 2002.
Beijing Municipal Research Institute of Urban Planning and Design. Beijing Urban Traffic Comprehensive Survey Results [R]. Beijing: Beijing Municipal Research Institute of Urban Planning and Design, 2002.
- [8] 北京交通发展研究中心. 国家智能交通系统工程技术研究中心. 北京市综合交通运输成本研究研究报告 [R]. 北京: 北京交通发展研究中心, 2007.
Beijing Transportation Research Center, National Center of ITS Engineering and Technology. Report of Beijing Comprehensive Transportation Cost Research [R]. Beijing: Beijing Transportation Research Center, 2007.
- [1] DELUCCHI M A. The Annualized Social Cost of Motor-vehicle Use in U.S., 1990-1991: Summary of Theory, Data, Methods, and Results [R]. 1998.
- [2] 王海洋, 周伟, 王元庆. 旅客行为时间价值确定方法研究 [J]. *公路交通科技*, 2004, 21 (8): 134 - 141.
WANG Hai-yang, ZHOU Wei, WANG Yuan-qing. Research on Methods for Value of Time Determination for Freight Transport [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2004, 21 (8): 134 - 141.
- [3] 顾典. 旅客出行时间节省价值的研究 [D]. 上海海事大学, 2004.
GU Dian. Research on Value of Travel-time Saving [D]. Shanghai Maritime University, 2004.
- [4] 北京市统计局. 北京统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2000, 2005.
Beijing Statistics Bureau. Beijing Statistics Yearbook [M]. Beijing: The Chinese Statistics Publishing House, 2000, 2005.
- [5] 陈光华. 交通发展战略经济评价方法与实践 [J]. *城市交通*, 2004 (2): 41 - 46.

(上接第 146 页)

参考文献:

References: