

燃料电池汽车的氢耗分析模型与应用

曾小华,纪人桓,宋大风[†],李广含,雷宗坤

(吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室,吉林 长春 130025)

摘要:为便于定量分析燃料电池汽车的氢耗影响因素和整车氢耗潜力,文中基于燃料电池汽车行驶时内部的能量流动关系,首先定义平均综合传动效率并提出理论氢耗计算分析模型.通过对氢耗的多种影响因素进行分析,进一步得到理论氢耗增量模型.最后基于 advisor 自带的燃料电池汽车模型,通过理论和仿真分析量化了滚动阻力系数、传动系机械效率、电机效率、燃料电池效率对整车经济性的影响.此外,基于各影响因素未来可能达到的极限状态,通过仿真得氢耗潜力为 0.6 kg/100 km.不同因素的量化分析和氢耗潜力的确定不仅对燃料电池汽车动力系统前期研发有重要指导意义,而且在实车开发期间可为部件选择和参数标定提供优化方向.

关键词:车辆工程;燃料电池;氢耗计算模型;氢耗分析;经济性

中图分类号:U462.2

文献标志码:A

Hydrogen-Consumption Analysis Model of Fuel Cell Vehicles and Its Application

ZENG Xiaohua,JI Renhuan,SONG Dafeng[†],LI Guanghan,LEI Zongkun

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control,Jilin University,Changchun 130025,China)

Abstract: In order to facilitate the quantitative analysis of hydrogen-consumption impact factors and hydrogen-consumption potential for fuel cell vehicle, the average integrated transmission efficiency was first defined and a theoretical model of hydrogen-consumption calculation and analysis was proposed, on the basis of the internal energy flow relationship of the fuel cell vehicle during driving. By analyzing the various impact factors of hydrogen-consumption, the theoretical hydrogen-consumption-increment model was further obtained. Finally, based on the fuel cell vehicle model provided by the advisor, the effects of rolling resistance coefficient, mechanical efficiency of the drive train, motor efficiency and fuel cell efficiency on the economics of the vehicle were quantified through theoretical and simulation analysis. In addition, based on the possible-limit state that each influencing factor may reach in the future, the hydrogen consumption potential obtained from the simulation is 0.6 kg/100 km. The quantitative analysis of different factors and the determination of hydrogen consumption potential not only provide critical reference for future research of the fuel cell vehicle powertrain, but also point out the optimization direction for component selection and parameter calibration during the development of actual vehicle.

Key words: vehicle engineering; fuel cell; hydrogen-consumption-calculation model; hydrogen-consumption analysis; fuel economy

* 收稿日期:2018-04-17

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0105300,2018YFB0105900),National Key Research and Development Program of China (2018YFB0105300, 2018YFB0105900);国家自然科学基金资助项目(51575221,51675214),National Natural Science Foundation of China (51575221,51675214)

作者简介:曾小华(1977—),男,江西吉安人,吉林大学教授,博士

[†] 通讯联系人,E-mail:songdf@126.com

燃料电池汽车只需要 3~5 min 的加氢时间就可连续行驶 500 km 以上,同时其排放物是水,不污染环境.除此之外,燃料电池因不受卡诺循环的限制,其能量转化效率目前已高达 55%,在未来随着技术的进步,理论上可高达 85%^[1].鉴于燃料电池汽车加氢时间快、续航里程长、环保和能量转化效率高的优点,其已成为当前研究热点,特别是如何提高经济性,而定量的分析氢耗影响因素对整车经济性的提高具有重要指导意义.

相比于传统汽车,燃料电池汽车已经拥有较高的能量利用率,但如何进一步提升燃料电池汽车的经济性依然是当前的研究热点,其中主要包括构型研究^[2-4]、参数匹配优化^[5-7]和控制策略研发^[8-12].构型研究主要是分析燃料电池汽车不同构型对整车经济性的影响,目前普遍认为燃料电池+蓄电池的构型(FC+B)可使整车获得较好的性能,其中蓄电池可弥补燃料电池动态响应慢和无法充电的缺点.参数匹配多是基于各部件特性,在满足动力性要求的前提下,优化参数匹配进而提高整车经济性.控制策略多是基于燃料电池系统强非线性的特点,开发基于规则的模糊控制或一些智能控制策略以求优化燃料电池工作点的分布.上述已有研究主要是基于仿真模型采用优化方法提高燃料电池汽车的经济性,缺乏对氢耗影响因素的深入研究.目前也有对氢耗影响因素的分析^[13-14],但比较宽泛且缺乏理论支撑.这些已有的研究对燃料电池汽车经济性的提高具有一定指导意义,但缺乏对氢耗影响因素细致的定量分析研究.定量分析影响氢耗的不同因素不仅对研发人员有一定指导意义,而且在整车开发期间有助于在部件选择与参数优化标定方面提供理论指导.

为进行整车氢耗影响因素的定量分析,文中首先基于整车内部能量流动关系定义平均综合传动效率,并得到理论氢耗模型.在理论氢耗模型的基础上分析不同因素对氢耗的影响并得到理论氢耗增量模型,文中为便于定量分析不同因素对氢耗的影响定义了节氢量和节氢率.最后以 advisor 中自带的燃料电池汽车作为实例,通过仿真与理论氢耗分析模型进行对比,定量分析不同影响因素对该车氢耗的影响.此外,还进一步分析该燃料电池汽车未来可能达到的理论氢耗值.文中所提出的氢耗影响因素的定量分析对燃料电池汽车的开发具有重要理论指导意义.

1 基于能量计算的理论氢耗模型

图 1 所示为 FC+B 构型燃料电池汽车动力系统的能量传递,文中将该构型燃料电池汽车的动力系统分为动力源模块、传动系统模块和车体模块.其中动力源模块包括蓄电池、燃料电池和储氢罐.传动系统模块包括电动机和变速机构.

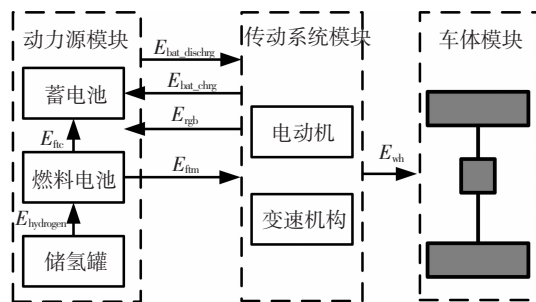


图 1 燃料电池汽车动力系统能量传递

Fig.1 Energy transfer of fuel cell vehicle power system

在这里定义平均综合传动效率.平均综合传动效率的定义为有效益的能量与供给传动系总能量的比值(克服各种摩擦损失的能量属于一种无效益的能量).这里以车轮为分析的节点,用来克服滚动阻力、空气阻力、坡度阻力和加速阻力的能量为有效益的能量,同时若汽车行驶结束后电池的 SOC 升高,那么充入电池的能量在不考虑电机等效率时也是有效益的能量.实际情况充入电池的能量在使用时还要经过放电效率和传动系效率,因此其转化到车轮处的能量才是有效益的能量.从宏观上看只有用来抵抗汽车行驶阻力的能量才是真正有效益的能量,也就是循环工况总驱动能量的理论值.

在不考虑各种效率时平均综合传动效率也就变成了整车总效率(理论循环总驱动能量与提供的总能量的比值),其计算公式如下:

$$\eta_{tr} = \frac{E_{wh} + (E_{bat_chg})}{E_{hydrogen} + E_{regh} + (E_{bat_dischg})} \quad (1)$$

$$E_{wh} = \sum_{t=0}^n \left[\begin{cases} F_t(t) \cdot v(t) / 1000 & (F_t(t) > 0) \\ 0 & (F_t(t) < 0) \end{cases} \right] \quad (2)$$

式中: E_{wh} 为循环工况总驱动能量的理论值,kJ; E_{bat_chg} 为循环工况结束后蓄电池中增多的能量,kJ; $E_{hydrogen}$ 为消耗的氢气所包含的能量,kJ; E_{regh} 为再生制动充入蓄电池的能量,kJ; E_{bat_dischg} 为循环工况结束后蓄电池中减少的能量,kJ.

实际情况中各种效率不能忽略,当考虑燃料电

池效率、机械效率、蓄电池效率、电机效率影响时,文中定义的平均综合传动效率的计算公式为式(3):

$$\eta_{tr} = \frac{E_{wh} + E_{bat_chrg} \times \eta_{bat_dischrg} \times \eta_{tr}}{E_{hydrogen} \times \eta_{fc} + E_{rgb} \times \eta_{bat_dischrg} + E_{bat_dischrg} \times \eta_{bat_dischrg}} \quad (3)$$

式中: $\eta_{bat_dischrg}$ 为蓄电池平均放电效率; η_{fc} 为燃料电池效率; $E_{hydrogen} \times \eta_{fc}$ 为燃料电池实际输出的能量,该实际输出的能量可用下式表示:

$$E_{hydrogen} \times \eta_{fc} = f_e / C \times b_{e_avg} \quad (4)$$

$$C = 1/\rho_{fuel} / 3\ 600 \times 100/x_{tot} \quad (5)$$

$$b_{e_avg} = \sum M_e / \sum P_e \quad (6)$$

式中: f_e 为百公里耗氢量,L(20 Mp下的体积); C 为氢电转换系数; b_{e_avg} 为燃料电池的平均氢气消耗率, $g/(kW \cdot h)$; ρ_{fuel} 为20 Mp下氢气的密度(18 g/L), x_{tot} 为循环工况总行驶里程数,km; $\sum M_e$ 为燃料电池在仿真循环中所消耗的氢的质量,g; $\sum P_e$ 为燃料电池在循环工况中输出的总功率, $kW \cdot h$.

将式(4)代入式(3)可得平均综合传动效率最终公式为式(7).

$$\eta_{tr} = \frac{E_{wh} + E_{bat_chrg} \times \eta_{bat_dischrg} \times \eta_{tr}}{f_e / b_{e_avg} \times C + E_{rgb} \times \eta_{bat_dischrg} + E_{bat_dischrg} \times \eta_{bat_dischrg}} \quad (7)$$

对式(7)进行变换得式(8),称式(8)为理论氢耗计算模型.

$$f_e = (E_{wh} + E_{bat_chrg} \times \eta_{bat_dischrg} \times \eta_{tr} - E_{rgb} \times \eta_{bat_dischrg} \times \eta_{tr} - E_{bat_dischrg} \times \eta_{bat_dischrg} \times \eta_{tr}) / \eta_{tr} \cdot b_{e_avg} \cdot C \quad (8)$$

循环中当电池的SOC前后平衡时 $E_{bat_dischrg}$ 和 E_{bat_chrg} 都为0.然而当电池的SOC前后不平衡时,其综合氢耗为:(当 $SOC_{end} < SOC_{int}$ 时, $E_{bat_chrg} = 0$.当 $SOC_{end} > SOC_{int}$ 时, $E_{bat_dischrg} = 0$).

$$f_{e_unify} = \begin{cases} f_e + E_{bat_dischrg} \cdot \eta_{bat_dischrg} \cdot b_{e_avg} \cdot C & (SOC_{end} < SOC_{int}) \\ f_e - E_{bat_dischrg} \cdot \eta_{bat_dischrg} \cdot b_{e_avg} \cdot C & (SOC_{end} > SOC_{int}) \end{cases} \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)可得整车理论综合氢耗计算模型为式(10).

$$f_{e_unify} = E_{wh} \left[1 - \frac{E_{rgb}}{E_{wh}} \eta_{tr} \eta_{bat_dischrg} \right] / \eta_{tr} \cdot b_{e_avg} \cdot C \quad (10)$$

2 氢耗量化分析模型

从式(8)可以看出,在整车参数、控制策略和循环工况确定的情况下影响氢耗的因素主要有燃料电池的效率、电池的放电效率、综合传动效率,其中综合传动效率是表征传动系统的效率,而传动系统的效率主要由机械传动效率和电机效率决定.除上述之外还有再生制动回收的能量.在FC+B构型燃料电池汽车中,再生制动能量回收量主要由电机效率、机械效率和电池的充电效率决定.

除上述讨论的氢耗影响因素外,根据理论氢耗计算模型还可以看出,氢耗还与循环工况总驱动能量的理论值有关.在循环工况确定后,该理论值由行驶阻力决定,而当整车参数确定后影响行驶阻力的因素为滚动阻力系数.综上影响氢耗的主要因素有滚动阻力系数、机械效率、电机效率、燃料电池效率和电池的充放电效率.

2.1 理论综合氢耗增量模型

根据式(10),为进一步分析平均综合传动效率和燃料电池效率对综合氢耗的影响而定义平均综合传动效率梯度和燃料电池平均氢气消耗率梯度分别为式(11)中的 ∇ 和式(12)中的 γ .

$$\begin{cases} \nabla = \Delta\eta/\eta_{tr} \\ \eta_{tr_inc} = \eta_{tr} + \Delta\eta = \eta_{tr}(1 + \nabla) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \gamma = \Delta b_e / b_{e_avg} \\ b_{e_avg_inc} = b_{e_avg} + \Delta b_e = b_{e_avg}(1 + \gamma) \end{cases} \quad (12)$$

由于当平均综合传动效率变化后,再生制动回收的能量也会相应变化,因此定义变化后的再生制动能量为式(13).

$$E_{rgb_inc} = E_{rgb} + \Delta E_{rgb} \quad (13)$$

将式(11)~(13)代入式(10)得式(14),称式(14)为理论综合氢耗增量模型.

$$f_{e_unify_inc} = E_{wh} \left[1 - \left(\frac{(1+\gamma)[\nabla + \frac{E_{rgb_inc} \cdot \eta_{bat_dischrg}}{E_{wh}} \eta_{tr}(1+\nabla)]}{1+\nabla} - \gamma \right) \right] / \eta_{tr} \cdot b_{e_avg} \cdot C \quad (14)$$

2.2 节氢量和节氢率

为便于定量分析不同因素变化后氢耗的变化量,在这里定义节氢量为某一因素变化后综合氢耗的变化量.节氢量的计算公式见式(15).

$$\Delta f_e = f_{e_unify} - f_{e_unify_inc} = E_{wh} \times \left[\frac{(1+\gamma)\nabla}{1+\nabla} + \frac{\Delta E_{rgb} + \gamma \cdot E_{rgb_inc}}{E_{wh}} \eta_{tr} \cdot \eta_{bat_dischrg} - \gamma \right] / \eta_{tr} \cdot b_{e_avg} \cdot C \quad (15)$$

为更清楚地量化分析不同因素对氢耗影响的重要程度,在这里定义节氢率为动力系统节约氢气的能量占车轮处理论循环总驱动能量的比值. 节氢率的计算公式见式(16).

$$\sigma_{f_e} = \frac{(1+\gamma)\nabla}{1+\nabla} - \gamma + \frac{\Delta E_{rgb} + \gamma \cdot E_{rgb_inc}}{E_{wh}} \times \eta_{tr} \cdot \eta_{bat_dischrg} \quad (16)$$

2.3 简化分析

为进一步反应不同因素对节氢率的影响,对式(16)进行简化分析,首先分析系统平均综合传动效率变化对节氢率的影响.公式(16)中右侧前两项表示系统综合传动效率变化与燃料电池的工作效率变化相互耦合,两者共同影响氢耗.右侧第三项表示综合传动效率变化引起再生制动能量回收变化进而影响氢耗.这里对节氢率公式(16)进行简化,重点分析平均综合传动效率变化对系统氢耗的影响规律,假设维持基本控制规则不变,燃料电池效率基本不变.式(17)为平均综合传动效率变化时简化的节氢率公式.

$$\sigma_{f_e-\eta} = \frac{\nabla}{1+\nabla} + \frac{\Delta E_{rgb}}{E_{wh}} \times \eta_{tr} \cdot \eta_{bat_dischrg} \quad (17)$$

假设循环工况已确定,当燃料电池各工作点效率同等程度的增大或减少,在控制策略不变的前提下,循环工况中燃料电池的工作点的分布将不会变化.燃料电池效率的变化对再生制动回收的能量和平均综合传动效率无影响,只对每时刻氢气的消耗量有影响.所以公式(16)可以简化为式(18).从式(18)可以看出节氢率与燃料电池平均氢气消耗率的变化梯度成正比.

$$\sigma_{f_e-be} = \gamma \left(\frac{E_{rgb} \cdot \eta_{bat_dischrg}}{E_{wh}} \eta_{tr} - 1 \right) \quad (18)$$

3 仿真分析验证

首先将根据能量流动关系编写的氢耗模型与 advisor 中的燃料电池汽车模型进行对比以验证氢耗模型的准确性.然后将氢耗模型仿真得到的仿真值和从上述理论公式计算得到的理论值对比以验证上述公式的准确性.最后结合氢耗模型和上述理论公式定量分析各因素对氢耗的影响,并分析该车

未来可能达到的理论氢耗值.

3.1 整车基本参数

文中以 advisor 软件中自带的燃料电池汽车模型(FUEL_CELL_defaults_in)为研究对象.该燃料电池汽车的构型见图 2,其整车基本参数见表 1.

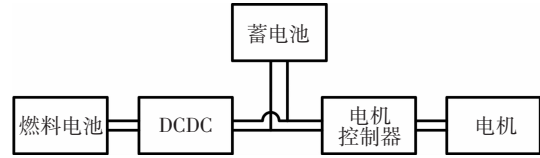


图 2 动力系统结构形式

Fig.2 The configuration of the power system

表 1 整车基本参数

Tab.1 The basic parameters of the vehicle

项目	数值
整车总质量	1 380 kg
风阻系数	0.335
滚阻系数	0.009
主减速比	6.6732
车轮半径	0.282 m
燃料电池	峰值功率 50 kW
电机	基速转速 2 000 r/min 额定转矩 270 N·m
电池	25 Ah&&325 V

3.2 氢耗模型的验证

为验证上述理论公式的正确性和相应简化的合理性,需采用仿真方法进行验证,但 advisor 自带模型在仿真后需繁杂的数据输入过程以得到理论氢耗计算模型的计算值,为此编写氢耗模型.氢耗模型中上至能量管理策略、再生制动策略下至部件参数都按照 advisor 自带的燃料电池汽车模型设定.将氢耗模型与 advisor 自带的燃料电池汽车模型的仿真结果进行对比以验证其准确性.对比结果见表 2.从表 2 可以看出氢耗模型有较好的准确性.

表 2 对比结果

Tab.2 The results of the comparison

项目	advisor	氢耗模型	误差/%
百公里氢耗/(L(kg))	54.20 (0.975 6)	54.26(0.976 7)	0.11
仿真初始/终止 SOC	0.76/0.76	0.76/0.76	—
燃料电池效率/%	53.44	53.03	0.77
电机驱动效率/%	81.78	82.60	1.00
电机发电效率/%	72.90	73.50	0.82
再生制动能量/kJ	930.00	952.02	2.37

运行氢耗模型不仅可得到氢耗的仿真值,而且可根据氢耗模型得到理论氢耗计算模型(8)所需的输入变量值,进而直接得到氢耗理论值.因此,氢耗模型不仅方便后续定量分析而且可验证理论氢耗计算模型的准确性.

图3是循环工况中各时刻燃料电池输出功率对比.燃料电池的开启和关闭受功率跟随控制策略的控制,因此其开启或关闭受当前SOC的影响.由于两仿真程序的SOC无法在每一时刻都一样,所以燃料电池的开启或关闭的时刻会有细微差别.

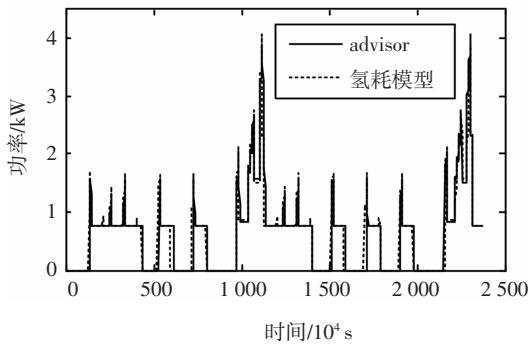


图3 循环工况中燃料电池各时刻输出功率

Fig.3 Output power of fuel cell at various times in cyclic condition

以上的对比分析说明了根据能量流动关系编写的氢耗模型的准确性与合理性,证明可以使用该氢耗模型进行更进一步的氢耗定量分析.

3.3 理论氢耗公式的验证

将表3的氢耗模型仿真结果代入式(10)得理论氢耗值为54.31 L,该值与根据氢耗模型得到的仿真氢耗值的误差为0.09%.该误差足以说明理论氢耗公式的准确性.

表3 氢耗模型仿真结果

项目	NEDC 工况
百公里氢耗/(L(kg))	54.26 (0.976 7)
仿真初始/终止 SOC	0.76/0.76
综合传动效率	60.31
理论循环总驱动能量/kJ	8 770.40
再生制动回收能量/kJ	952.02
电池平均放电效率/%	98.60
燃料电池效率(g/kW·h)/%	(56.57)53.03
电机平均驱动/充电效率	82.60/73.49

从表3可以看出电机的平均驱动效率和平均再生制动发电效率不同,为便于更进一步分析电机效率的改变对氢耗的影响,这里将电机的效率设为恒定值,同时为保证程序结果的合理性,将电机的基础效率值定为81.35%.电机效率设为恒定值后其仿真结果如表4所示.将表4中数据代入式(10)得百公里氢耗的理论值是54.43 L.氢耗的仿真值与理论值的误差约为0.07%.之后的分析均以该情况为基础值,定量分析多种因素对氢耗的影响.

表4 电机效率恒定时仿真结果

Tab.4 Simulation results when the motor efficiency is constant

项目	NEDC 工况
百公里氢耗/(L(kg))	54.39(0.979 0)
仿真初始/终止 SOC	0.76/0.76
综合传动效率	59.60
理论循环总驱动能量/kJ	8 770.40
再生制动回收能量/kJ	1 052.71
电池平均放电效率/%	98.70
燃料电池效率(g/kW·h)/%	(56.40)53.20
电机平均驱动/充电效率	81.35/81.35

3.4 氢耗影响因素定量分析

在验证了氢耗模型和理论公式的准确性后进一步分析包括滚动阻力系数、传动系机械效率、电机效率和燃料电池效率的提高对氢耗的影响,并分析在未来当所分析的氢耗影响因素都得到改善后该车氢耗所能达到的理论值.该部分分析量化了前述影响因素对氢耗的影响,对燃料电池汽车的研发具有重要指导意义.

3.4.1 滚动阻力系数影响分析

从表5可以看出,滚动阻力系数每减少0.001,车轮处理论循环总驱动能量降低253.55 kJ左右,节氢1.544 L/100 km,再生制动回收能量增加17.45 kJ左右,节氢0.107 L/100 km,理论总节氢1.544+0.107=1.651 L/100 km.随着滚动阻力系数减少,再生制动回收能量增多的原因是当汽车制动时,路面滚动阻力减少,为达到相同的减速效果,电机需要提供更多的负力矩.图4为滚动阻力系数变化时由氢耗模型得到的仿真氢耗和根据公式(10)得到的理论氢耗.图5是以仿真氢耗为参考值得到的理论氢耗的误差.误差最大值不超过0.2%,进一步说明了氢耗模型和前述理论公式的准确性.

表 5 不同滚动阻力系数的仿真结果
Tab.5 Simulation results of different rolling resistance coefficients

	Case0	Case1	Case2	Case3	Case4
滚动阻力系数	0.009	0.008	0.007	0.006	0.005
理论综合氢耗/(L/100 km)	54.91	53.30	51.67	49.48	48.33
实际氢耗/(L/100 km)	54.39	52.78	51.14	48.96	47.79
平均氢气消耗率/(g/kW·h)	56.37	56.38	56.35	56.22	56.36
平均综合传动效率/%	59.60	59.40	59.30	59.60	59.10
再生制动回收能量/kJ	1 052.7	1 070.2	1 087.6	1 105.1	1 122.5
理论循环总驱动能量/kJ	8 770.4	8 516.8	8 263.3	8 009.7	7 756.2
电池放电效率/%	98.70	98.80	98.80	99.11	99.02
仿真节氢量/(L/100 km)	—	1.61	1.63	2.19	1.15
理论节氢量/(L/100 km)	—	1.61	1.64	2.18	1.17

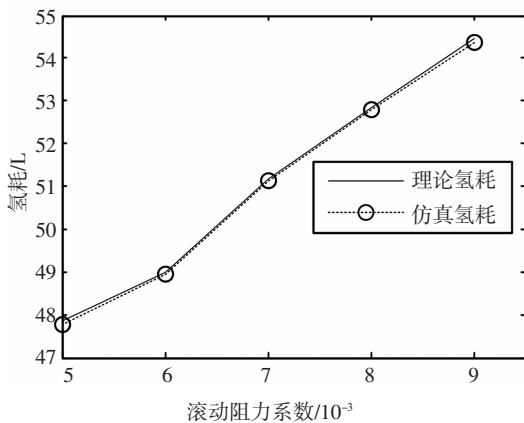


图 4 各滚动阻力系数的氢耗

Fig.4 Hydrogen consumption at each rolling resistance coefficient

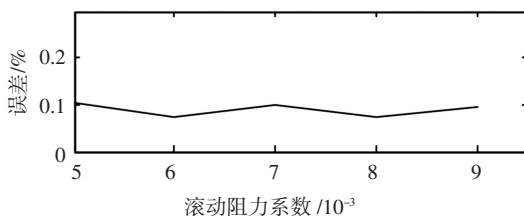


图 5 理论氢耗的误差

Fig.5 The error of theoretical hydrogen consumption

3.4.2 传动系机械效率影响分析

从表 6 可以看出机械效率每增加 2%，系统平均综合传动效率梯度变化 2%左右，节氢率提升 2.01%，节氢量提升 1.1615 L/100 km.图 6 中的节氢率是机械效率变化后累积的节氢率，其中的线性关系更进一步验证前述结论.宏观的角度上，机械效率的提升可以减少燃料电池所需的输出能量，同时机械效率的提升可增加再生制动回收的能量，进而减少氢耗.图 7 是以仿真节氢率为参考值得到的简化节氢率的误差.足够小的误差验证了简化分析的准确性和简化的合理性.

表 6 不同机械效率的仿真结果

Tab.6 Simulation results of different mechanical efficiencies

	Case0	Case1	Case2	Case3	Case4
机械效率/%	88.32	90.32	92.32	94.32	96.32
实际氢耗/(L/100 km)	54.39	53.10	51.95	50.77	49.74
平均燃氢消耗率/(g/kW·h)	56.40	56.39	56.41	56.42	56.44
平均综合传动效率/%	59.60	60.80	62.00	63.20	64.40
再生制动回收能量/kJ	1 052.70	1 075.90	1 099.10	1 122.20	1 145.40
理论循环总驱动能量/kJ	8 770.40	8 770.40	8 770.40	8 770.40	8 770.40
电池放电效率/%	98.70	98.74	98.79	98.84	98.77
仿真节氢率/%	—	2.20	1.97	2.05	1.83
理论节氢率/%	—	2.17	2.02	2.07	1.90
简化与实际节氢率误差/%	—	-1.04	0.68	0.88	1.48

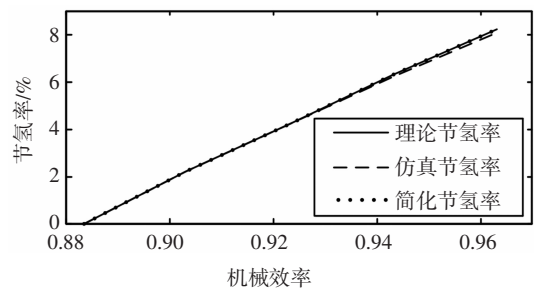


图 6 各机械效率的节氢率

Fig.6 Hydrogen saving rate at each mechanical efficiency

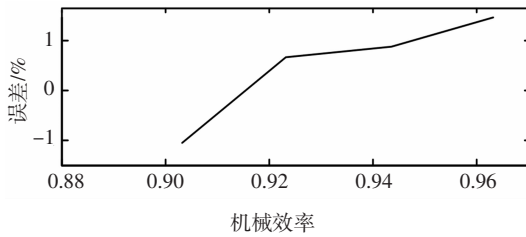


图7 简化节氢率的误差

Fig.7 The error of simplified hydrogen saving rate

3.4.3 电机效率影响分析

从表7可以看出电机效率每增加2%，系统平均综合传动效率梯度变化2.30%左右，节氢率提升2.38%，节氢量提升1.3552 L/100 km。该构型只有一个驱动电机，机械效率和电机效率都增加2%，但是电机效率的增加获得的节氢率更大。这是由于效率变化虽然相同，但是电机的效率变化梯度更大。

表7 不同电机效率的仿真结果

Tab.7 Simulation results of different motor efficiencies

	Case0	Case1	Case2	Case3	Case4
电机效率/%	81.35	83.35	85.35	87.35	89.35
实际氢耗/(L/100 km)	54.39	53.02	51.77	50.49	49.36
平均氢气消耗率/(g/kW·h)	56.40	56.39	56.41	56.42	56.47
平均综合传动效率/%	59.60	60.90	62.20	63.50	64.80
再生制动回收能量/kJ	1 052.70	1 077.90	1 103.10	1 128.20	1 153.30
理论循环总驱动能量/kJ	8 770.40	8 770.40	8 770.40	8 770.40	8 770.40
电池放电效率/%	98.70	98.75	98.80	98.85	98.81
仿真节氢率/%	—	2.33	2.15	2.23	2.01
理论节氢率/%	—	2.32	2.18	2.22	2.04
简化与实际节氢率误差/%	—	-0.30	0.52	0.27	0.52

3.4.4 燃料电池效率影响分析

从表8可以看出燃料电池平均氢气消耗率每降低2 g/kW·h：节氢率提升约3.38%，节氢量提升1.93 L/100 km。

3.4.5 假设未来可以达到的氢耗极限

从表9可以看出，在未来各部件参数及效率得到进一步优化，该FC+B构型燃料电池汽

车在NEDC工况下的综合百公里氢耗有望降至33.26 L(0.60 kg)。

表8 不同平均氢气消耗率的仿真结果

Tab.8 Simulation results of different average hydrogen consumption rates

	Case0	Case1	Case2	Case3	Case4
平均氢气消耗率/(g/kW·h)	56.40	54.40	52.40	50.40	48.40
实际氢耗/(L/100 km)	54.39	52.46	50.53	48.60	46.67
平均综合传动效率/%	59.60	59.60	59.60	59.60	59.60
再生制动回收能量/kJ	1 052.70	1 052.70	1 052.70	1 052.70	1 052.70
理论循环总驱动能量/kJ	8 770.40	8 770.40	8 770.40	8 770.40	8 770.40
电池放电效率/%	98.70	98.70	98.70	98.70	98.70
氢气消耗率变化梯度	—	-3.55	-3.68	-3.82	-3.97
仿真节氢率/%	—	3.29	3.29	3.41	3.54
理论节氢率/%	—	3.30	3.42	3.55	3.69
简化与实际节氢率误差/%	—	1.07	1.95	2.62	3.01

表9 各影响因素依次变化后的氢耗

Tab.9 Hydrogen consumption after changing the influencing factors in turn

序号顺序	项目	当前基本值到未来值	氢耗 L/100 km (kg/100 km)
01~02	滚动阻力系数	0.009~0.005	54.39~47.79 (0.98~0.85)
02~03	机械传动效率	88.32~96.32	47.79~44.32 (0.85~0.80)
03~04	电机效率/%	81.35~91.35	44.32~38.99 (0.80~0.70)
04~05	燃料电池平均氢气消耗率(等价效率)	56.40~48.40 (53%~62%)	38.99~33.26 (0.70~0.60)

4 结论

1)文中提出的理论氢耗计算模型不仅详细体现了影响氢耗的因素而且深刻揭示了各因素间的

耦合关系,完善和发展了节能分析理论,深化了对节能机理的理解,可为进一步提升整车经济性做出贡献。

2)准确可靠的氢耗模型可方便今后对同构型燃料电池汽车经济性影响因素的定量分析,同时与理论氢耗计算模型形成相互验证,提高量化分析的准确性与可靠性。

3)理论氢耗计算模型与氢耗模型相结合的数量化分析揭示了不同因素对燃料电池汽车经济性影响的重要程度。其分析结果不仅为动力系统前期方案论证提供理论基础,而且为实车的研发、标定指明优化方向。

参考文献

- [1] 杨建新,林子敬.氢气燃料的燃料电池系统最大发电效率[J].中国科学技术大学学报,2016,46(12):993—998.
YANG J X, LIN Z J. The maximum electricity efficiency of hydrogen fueled fuel cell system [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2016, 46 (12):993—998. (In Chinese)
- [2] 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.
QING K J, GAO D W, LU Q C, *et al.* Study on configuration of the hybrid power system of fuel cell electric vehicles [J]. Automobile Technology, 2005(4):24—27. (In Chinese)
- [3] 郭斌,秦孔建,卢青春,等.燃料电池混合动力系统构型和控制方法研究[J].汽车科技,2006(3):10—14.
GUO B, QING K J, LU Q C, *et al.* Research on configuration and control method of fuel cell hybrid power system [J]. Automotive Science and Technology, 2006(3):10—14. (In Chinese)
- [4] 负海涛,徐煜超,曹爱霞,等.燃料电池叉车动力系统结构设计及参数匹配[J].济南大学学报(自然科学版),2018,32(1):1—6.
YUN H T, XU Y C, CAO A X, *et al.* Design of power system configuration and matching parameter for fuel cell forklift [J]. Journal of Jinan University (Science and Technology), 2018, 32 (1):1—6. (In Chinese)
- [5] HU Z Y, LI J Q, XU L F, *et al.* Multi-objective energy management optimization and parameter sizing for proton exchange membrane hybrid fuel cell vehicles [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 129:108—121.
- [6] 秦大同,林毓培,刘星源,等.基于系统效率的PHEV动力与控制参数优化[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(2):62—68.
QIN D T, LIN Y P, LIU X Y, *et al.* Optimization of power and control parameters for PHEV based on system efficiency [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(2):62—68. (In Chinese)
- [7] LIU C H, LIU L. Optimal power source sizing of fuel cell hybrid vehicles based on Pontryagin's minimum principle [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40 (26):8454—8464.
- [8] 徐梁飞,李相俊,华剑锋,等.燃料电池混合动力参数辨识及整车控制策略优化[J].机械工程学报,2009,45(2):56—61.
XU L F, LI X J, HUA J F, *et al.* Parameter identification and control strategy optimization of hybrid fuel cell power train [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45 (2):56—61. (In Chinese)
- [9] 何洪文,林逸,魏跃远.燃料电池混合动力汽车控制策略研究[J].北京理工大学学报,2007(3):223—226+273.
HE H W, LIN Y, WEI Y Y. Study on the control strategy for a fuel cell hybrid vehicle [J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2007(3):223—226+273. (In Chinese)
- [10] 周云山,贾杰锋,李航洋,等. CVT插电式混合动力汽车经济性控制策略[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(8):25—31.
ZHOU Y S, JIA J F, LI H Y, *et al.* Economic control strategy for a plug-in hybrid electric vehicle equipped with CVT [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43 (8):25—31. (In Chinese)
- [11] HAMES Y, KAYA K, BALTACIOGLU E, *et al.* Analysis of the control strategies for fuel saving in the hydrogen fuel cell vehicles [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43 (23): 10810—10821.
- [12] TRIBIOLI L, COZZOLINO R, CHIAPPINI D, *et al.* Energy management of a plug-in fuel cell/battery hybrid vehicle with on-board fuel processing [J]. Applied Energy, 2016, 184:140—154.
- [13] 杨慧敏,宋珂,张涛,等.动力系统配置对燃料电池车经济性的影响分析[J].机电一体化,2016,22(1):51—55.
YANG H M, SONG K, ZHANG T, *et al.* Powertrain configuration impacts on the fuel economy and use-cost of fuel cell vehicle [J]. Mechatronics, 2016, 22(1):51—55. (In Chinese)
- [14] 殷婷婷,孙逸神,梁潇,等.燃料电池轿车经济性影响因素分析[J].电源技术,2015,39(9):2035—2037.
YING T T, SUN Y S, LIANG X, *et al.* Study on influencing factors of fuel cell vehicle economical efficiency [J]. Power Supply Technology, 2015, 39(9):2035—2037. (In Chinese)