

车用燃料电池运行工况多参数全局敏感性分析

张扬 杨磊 乔墨

安徽江淮汽车集团股份有限公司

摘要: 本文结合燃料电池台架试验结果,建立了一套车用燃料电池敏感性分析模型,同时基于蒙特卡罗随机试验,采用“基本效应法”对模型的运行工况进行多参数全局敏感性分析。结果表明:不同运行工况参数的敏感性存在差异,其中阴极化学计量比、电堆工作温度和阴极进气湿度被分类为高敏感参数,证明了燃料电池在中高负荷运行时水热管理和阴极流量管理的重要性;高电流密度下运行工况参数的高敏感性,进一步证明了燃料电池在中高负荷运行时合理运行工况参数设置的必要性。

关键词: 燃料电池;蒙特卡罗随机试验;运行工况参数设置;敏感性分析

0 引言

燃料电池是一种将化学能直接转换为电能的设备,其中质子交换膜燃料电池因其高能量密度、高转化效率、低噪声和零排放等优点,在新能源汽车领域具有很好的发展潜力和应用前景。然而由于燃料电池的性能表现受其运行工况的影响较大,在车用耐久性上还存在较大挑战,因此研究车用燃料电池运行工况对其输出性能的影响敏感性有重要意义。

当前对燃料电池运行工况敏感性的研究多采用定性的单参数敏感性分析方法,该方法只能从一定程度上反映燃料电池性能在某一基准点附近随着某个特定参数的变化而变化,其结果具有一定的局限性,因此, Morris 提出并由 Campolongo 改良了一种能够同时确定多参数相对敏感性的“基本效应法”。本文结合燃料电池台架试验结果,建立了一套车用燃料电池仿真分析模型,同时基于蒙特卡罗随机试验,采用“基本效应法”对模型的运行工况进行多参数全局敏感性分析研究。

1 模型开发

1.1 燃料电池仿真模型

质子交换膜燃料电池主要由膜电极组件制成,包括电极板、电解质、阳极催化剂层、阴极催化剂层、

气体扩散层和质子交换膜。本文基于 Cruise_M 软件中的一维简化电化学燃料电池元件,建立了用于分析燃料电池工作中水、气、热和电耦合传递及变化过程的仿真模型,用于模拟燃料电池内部相关热力学和电化学过程。

本文模型采用了以下假设条件:

- (1) 堆栈及其所有域在通道流方向上是一维离散化的。
- (2) 燃料电池内部各层均视为均一相的和各向同性的。
- (3) 反应气体均视为理想气体。
- (4) 忽略重力和接触电阻的影响。
- (5) 忽略液态水的积阻、冻结等不利影响。
- (6) 燃料电池工作边界条件变化是迅速、充分且稳定的。

燃料电池的性能通常由其外特性曲线即极化曲线表述,燃料电池在标准状态下(0℃、101 kPa)的理想可逆电压为 1.23 V,但是受气体压力和浓度的影响,实际电压是小于理想电压的,由于不可避免的损耗,实际燃料电池输出电压为:

$$V = E_{\text{thermo}} - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{ohm}} - \eta_{\text{con}} \quad (1)$$

式中, V 为燃料电池的实际输出电压; η_{act} 为反应动力学引起的活化损失; η_{ohm} 为离子和电子传导引起的欧姆损失; η_{con} 为质量传输引起的浓差损失。本文中主要影

响燃料电池极化特性的为电化学参数，结合式（1）可得模型控制方程为：

$$V = E_{\text{thermo}} + k_{\text{act}_a} f_1(i) + k_{\text{act}_c} f_2(i) + k_{\text{ohm}} f_3(i) + k_{\text{con}_a} f_4(i) + k_{\text{con}_c} f_5(i) \quad (2)$$

式中， i 为电流密度； k_{act_a} 为阳极活化损失系数； k_{act_c} 为阴极活化损失系数； k_{ohm} 为欧姆损失系数； k_{con_a} 为阳极浓差损失系数； k_{con_c} 为阴极浓差损失系数。表 1 列出了燃料电池仿真模型的电化学设计参数。

表 1 模型电化学设计参数

参数名	模型中的符号	数值
阳极活化损失系数	k_{act_a}	1.020
阴极活化损失系数	k_{act_c}	1.020
欧姆损失系数	k_{ohm}	0.068
阳极浓差损失系数	k_{con_a}	0.960
阴极浓差损失系数	k_{con_c}	0.960

为验证模型的准确性，搭建台架并按照电堆标准运行工况边界条件进行台架试验，统计电堆平均单体电压，绘制电堆极化特性曲线，为模型验证提供数据支持。

将燃料电池模型按照相同运行工况边界条件进行仿真计算，并与台架试验结果进行对比，结果如图 1 所示，两组极化曲线在电流密度 1.5 A/cm^2 处存在最大误差为 1.1%，误差在合理范围内，模型仿真结果与台架试验结果吻合情况良好，模型准确性得到充分验证。

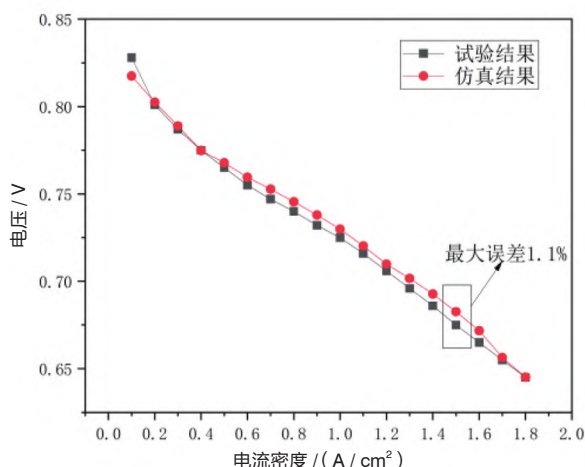


图 1 模型仿真结果与台架试验结果对比

1.2 敏感性分析模型

基于单个基准点的局部敏感性分析方法，得到的参数敏感性具有一定局限性，为得到准确且适用性广的量化分析结果，引入基于蒙特卡罗随机试验且采用基本效应法的全局敏感性分析方法。燃料电池作为一个多维耦合系统，其影响边界输入包括压力、温度和湿度等，将其参数记为 $X_1, X_2, \dots, X_k$ ， k 为参数总数，

燃料电池模型可简化为：

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) \quad (3)$$

式中， Y 为燃料电池输出电压； X_i 为标准化后的参数，在 $0 \sim 1$ 区间取值。假设参数被离散化为 L 个水平，则共同构成一个 k 维 L 水平的样本空间。参数 X_i 的基本效应计算方法为：

$$EE_i = \frac{f(X_1, X_2, \dots, X_i + \Delta, \dots, X_k) - f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_k)}{\Delta} \quad (4)$$

式中， EE_i 为参数的基本效应值； Δ 为参数的增量，其取值集合为 $\{1/(L-1), 2/(L-1), \dots, 1-1/(L-1)\}$ 。

根据 Morris 提出的一种高效方法，随机选取样本空间内的 r 条样本轨迹，每条样本轨迹包含 $k+1$ 个样本点，一条样本轨迹可以计算每个参数各一次基本效应。通过计算每条样本轨迹下参数 i 的基本效应值，并将结果作均值化处理，得到该参数在整个样本空间的敏感性指标：

$$\mu_i = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r EE_i^j \quad (5)$$

$$\mu_i^* = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |EE_i^j| \quad (6)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (EE_i^j - \mu_i)^2 \quad (7)$$

式中， EE_i^j 为参数 X_i 在第 j 条样本轨迹样本上的基本效应值； μ_i 、 μ_i^* 、 σ_i^2 分别为基本效应的均值、均值绝对值和方差，是基本效应法分析中评估参数敏感性的重要指标。 μ 的值可能呈正负的波动，可能将敏感参数误判为不敏感参数，因此用绝对值 μ^* 进行修正。以上三个敏感性指标都很大时，说明输出变量对该参数较敏感；而后两个敏感性指标都很小时，说明输出变量对该参数不敏感。

参数离散化水平 L 和样本轨迹数 r 的选择对敏感性分析结果很重要，它们之间联系密切。经过大量模型验算，在保证仿真时间和模型精度的前提下，本文选取参数水平 L 为 12，轨迹数 r 为 60。

2 敏感性分析结果及讨论

为量化不同参数敏感性，将燃料电池运行工况细化为 9 个参数，分别为阳极进气压力、阴极进气压力、阳极化学计量比、阴极化学计量比、阳极进气温度、阴极进气温度、电堆工作温度、阳极进气湿度和阴极进气湿度。结合多篇论文调研及大量模型仿真验算确定上述参数取值范围见表 2。

表 2 燃料电池运行工况参数取值范围

参数名	模型中的符号	取值范围
阳极进气压力 /bar	P_a	1.0 ~ 3.0
阴极进气压力 /bar	P_c	1.0 ~ 3.0
阳极化学计量比	S_a	1.4 ~ 3.0
阴极化学计量比	S_c	1.4 ~ 3.0
阳极进气温度 /℃	T_a	50 ~ 90
阴极进气温度 /℃	T_c	50 ~ 90
电堆工作温度 /℃	T_{cell}	50 ~ 90
阳极进气湿度	R_a	0.0 ~ 1.0
阴极进气湿度	R_c	0.0 ~ 1.0

2.1 特定电流密度下的敏感性分析

在特定电流密度下，每组参数在进行分析时随机设置 60 条轨迹，分别带入模型中计算出该样本参数下的燃料电池输出电压，将结果代入敏感性指标 μ_i 、 μ_i^* 、 σ_i^2 的求解公式中，最终确定各参数的敏感性量化指标。由于在不同电流密度下燃料电池性能关于同一参数的敏感性是有变化的，因此本文分析时选定了比较有代表性的电流密度。

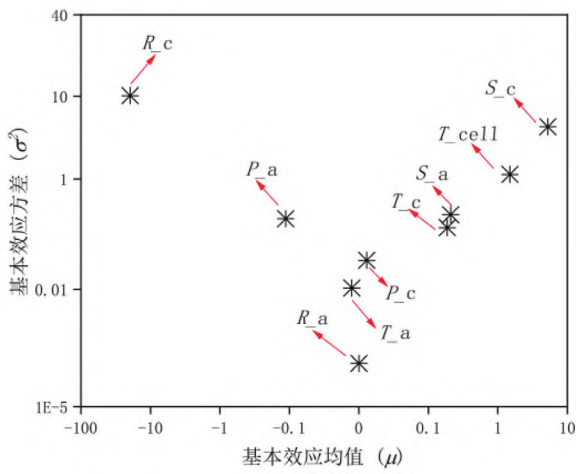
在 1.9 A/cm² 的高电流密度下，燃料电池运行工况各参数的敏感性量化指标如图 2 所示。从图中可以看出，阴极化学计量比、电堆工作温度和阴极进气湿度为高敏感参数。其中阴极进气湿度的 μ 为负值，说明该参数的增大总体上对性能的作用是消极的，而阴极化学计量比和电堆工作温度的 μ 为正值，说明该参数的增大总体上对性能的作用是积极的。其中电堆工作温度和阴极进气湿度的 μ 值绝对值比 μ^* 值小，说明该参数对性能的作用是非单调的，即该参数在取值范围内存在最佳数值。

通过比较 μ^* 值的大小，可以定量确定参数敏感性的分类原则： $\mu^* > 1$ 时为高敏感参数； $0.1 < \mu^* < 1$ 时为较敏感参数； $\mu^* < 0.1$ 时为不敏感参数。基于上述分类原则，得到特定电流密度下的燃料电池运行工况参数敏感性分类结果如表 3 所示。

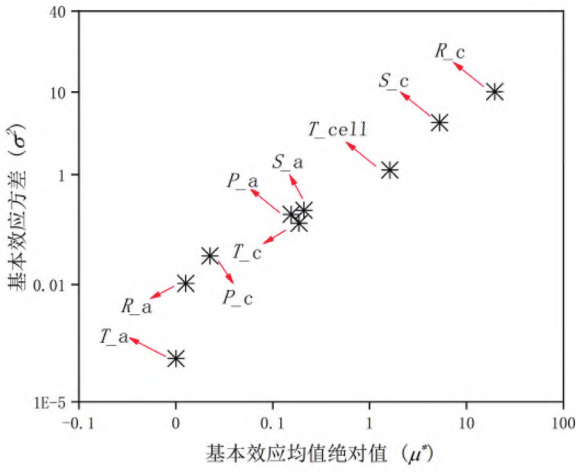
表 3 特定电流密度下的参数敏感性分类

分类	模型中运行工况参数
高敏感参数	S_c, T_{cell}, R_c
较敏感参数	P_a, S_a, T_c
不敏感参数	P_c, T_a, R_a

为了验证敏感性参数分类的可靠性，本文基于蒙特卡罗随机试验设计了验证算例，分别计算了高敏感性参数同时变化和不敏感性参数同时变化的燃料电池输出电压，汇总结果如图 3 所示。可以看出，高敏感



a) 敏感性分析图



b) 修正后的敏感性分析图

图 2 电流密度 1.9 A/cm² 时的参数敏感性量化指标

性参数变化下的输出电压主要在 0.63 ~ 0.74 V 之间，且在部分工况下覆盖整个区间范围，而不敏感性参数变化下的输出电压基本保持在 0.66 ~ 0.69 V 之间，说明本文得到的参数敏感性分析结果是正确和可靠的。

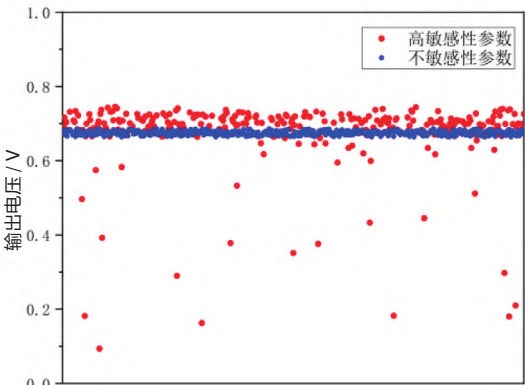


图 3 不同敏感性参数变化下的输出电压分布

2.2 不同电流密度下的敏感性分析

类似上一章节的求解方法，同一电流密度下每组

参数的轨迹数设置为 60, 不同电流密度区间内燃料电池运行工况参数敏感性变化如图 4 所示。在全电流密度区间, 阳极进气温度和阳极进气湿度的敏感性始终较低, 而阴极进气压力的敏感性随着电流密度增加逐渐降低, 最终稳定在一个较低水平。阳极化学计量比和阴极进气温度的敏感性随着电流密度增加逐渐升高, 而阳极进气压力的敏感性存在先下降后升高的趋势, 最终三个参数敏感性稳定在一个中等水平。阴极化学计量比、电堆工作温度和阴极进气湿度的敏感性在电流密度超过 0.8 A/cm^2 后迅速增大, 最终保持在一个较高水平且增长趋势明显, 这表明燃料电池在中高负荷运行时水热管理和阴极流量管理尤其重要。相比低电流密度, 高电流密度下绝大多数参数的敏感性更高, 这表明燃料电池随着负荷的增加, 合理的运行工况参数设置对保持燃料电池性能输出的必要性。

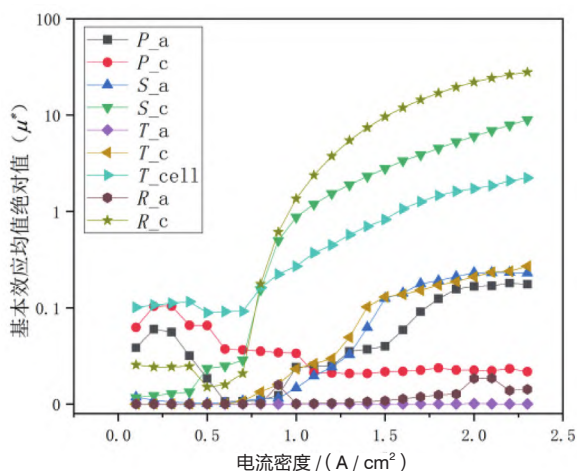


图 4 不同电流密度下参数敏感性量化指标

3 结语

本文结合燃料电池台架试验结果, 建立了一套车用燃料电池仿真分析模型, 同时基于蒙特卡罗随机试验, 采用“基本效应法”对模型的运行工况进行多参数全局敏感性分析, 主要结论如下:

(1) 不同运行工况参数的敏感性存在差异, 通

过全局敏感性量化分析, 定义了敏感性分类原则, 其中阴极化学计量比、电堆工作温度和阴极进气湿度被分类为高敏感参数, 阳极进气压力、阳极化学计量比和阴极进气温度被分类为较敏感参数, 阴极进气压力、阳极进气温度和阳极进气湿度被分类为不敏感参数。

(2) 阴极化学计量比、电堆工作温度和阴极进气湿度的敏感性在中高电流密度下保持在一个较高水平且增长趋势明显, 表明燃料电池在中高负荷运行时水热管理和阴极流量管理的重要性。

(3) 相比低电流密度, 高电流密度下绝大多数参数的敏感性更高, 表明燃料电池随着负荷的增加, 合理的运行工况参数设置对保持燃料电池性能输出的必要性。

参考文献

- [1] HAN I, PARK S, CHUNG C. Modeling and operation optimization of a proton exchange membrane fuel cell system for maximum efficiency[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 113: 52-65.
- [2] 于越. 工况下燃料电池性能衰减建模及寿命预测[D]. 大连: 大连交通大学, 2022.
- [3] 蒋杨. 质子交换膜燃料电池解析建模及其参数敏感性分析[D]. 天津大学, 2018.
- [4] MORRIS M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments [J]. Technometrics, 1991, 33(2): 161-174.
- [5] CAMPOLONGO F, CARIBONI J, SALTELLI A. An effective screening design for sensitivity analysis of large models[J]. Environmental modelling & software, 2007, 22(10): 1509-1518.
- [6] 焦魁. 质子交换膜燃料电池水热管理[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [7] SALTELLI A. Global sensitivity analysis: the primer [M]. Basel: John Wiley, 2008.