

水冷型 PEMFC 输出特性建模与仿真分析

高 志, 蔡 慧, 卫 东, 王 振, 周杭霞

(中国计量大学机电工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 针对燃料电池传统寻优方法存在的不足, 选取内阻作为输出性能的寻优指标, 建立内阻与操作条件机理模型, 操作条件之间耦合模型, 以总内阻最小为仿真寻优原则, 确定不同电流密度下的最佳温湿度点, 并建立最佳温湿度与电流密度经验模型, 使用遗传算法对模型参数进行优化, 为下一步控制策略优化提供基础与参考。

关键词: 燃料电池; 温湿度; 内阻; 仿真; 控制

中图分类号: TM911.4

文献标识码: A

0 引 言

质子交换膜燃料电池(PEMFC)具有环境友好、低噪声、清洁环保、比功率高等优点, 有光明的应用前景。在 PEMFC 正常运行中, 操作条件是影响输出性能的关键因素, 文献[1, 2]通过 $V-I$ 特性曲线法, 研究温度、压力和进气加湿度对输出性能的影响; 文献[3]通过检测外部电压, 确定输出电压最高的温度和尾气排放时间, 文献[4]使用 300 W 燃料电池进行定电流实验, 寻得不同电流密度对应的最优温度, 并拟合电流密度与最优温度经验模型。

传统输出性能寻优方法一般采用 $V-I$ 特性曲线法, 以外部特性参数为寻优指标, 该方法虽然明了直观, 便于对输出性能进行实时监测, 但无法深入清晰反映堆内电化学和传质传热过程, 指导操作条件的调整和控制变量的调节, 并且 $V-I$ 曲线法无统一的最优标准[5]; 内阻作为内部特性参数, 与堆内水热状况直接相关, 在电池任意工作阶段, 总内阻最小必然对应性能最优。

本文以内阻为研究对象, 建立各段内阻与温湿度操作条件的机理模型, 操作条件之间耦合模型, 以总内阻最小为仿真寻优原则, 寻得不同电流密度对应的最佳温湿度; 建立最佳温湿度与电流密度经验模型, 使用遗传算法对模型参数进行优化, 为下一步控制策略优化提供基础与参考。

1 PEMFC 输出特性建模

1.1 燃料电池等效电路模型

PEMFC 可等效为含有多个内部阻抗的电压源[6], 活化极化现象产生的等效内部阻抗称为活化内阻(R_i), 电荷传输过程中欧姆极化现象产生的等效阻抗称为欧姆内阻(R_m), 浓差极化现象产生的等效阻抗称为浓差内阻(R_d), 电路中的双电层分布电容 C_{dl} 客观体现燃料电池电极表面多孔结构的电化特性[7]。等效电路模型如图 1 所示。

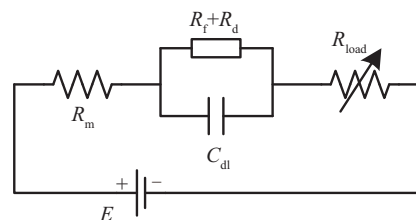


图1 燃料电池等效电流模型

Fig. 1 Fuel cell equivalent circuit model

1.2 各输出特性段内阻建模

电化学反应初始的活化能垒是活化内阻产生的根本原因, 其大小与电堆温度、电化学反应程度密切相关, 可用式(1)表示[8]:

$$R_i = \frac{R}{\alpha n F i \times \exp \left[1268 \left(\frac{1}{T_{\text{stack}}} - \frac{1}{T_0} \right) \right]} \quad (1)$$

收稿日期: 2016-12-27

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0210702); 浙江省基础公益研究计划(LGG18E070004; LGF18F020017)

通信作者: 蔡 慧(1980—), 男, 博士、副教授, 主要从事新能源发电系统检测与优化控制研究。caihui@cjlu.edu.cn

质子在膜中传输时会受到膜的阻力,阻力的大小与膜的含水量以及电堆温度有关,可用式(2)的模型表示欧姆内阻^[9]:

$$R_m = \frac{t_m}{(5.139\lambda - 3.26) \times 10^{-3} \times \exp\left[1268 \times \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{\text{stack}}}\right)\right]} \quad (2)$$

式中, $\lambda = 0.043 + 17.18RH_{\text{stack}} - 39.85RH_{\text{stack}}^2 + 36RH_{\text{stack}}^3$ 。

在燃料电池的正常工作中,必须持续不断地向电堆提供燃料和氧化剂,当电堆工作在高电流

$$R_{\text{stack}} = N \times (R_f + R_d + R_m)$$

$$= N \times \left\{ \frac{R}{\alpha n F i \cdot \exp\left[1268 \left(\frac{1}{T_{\text{stack}}} - \frac{1}{T_0}\right)\right]} + \frac{RT_{\text{stack}} \delta}{SC_g D_{\text{eff}} n^2 F^2} + \frac{t_m}{(5.139\lambda - 3.26) \times 10^{-3} \times \exp\left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{\text{stack}}}\right)\right]} \right\} \quad (4)$$

1.3 温湿度特性关系机理建模

1.3.1 电堆含水量建模

电堆内部温湿度耦合关系虽异常复杂,但存在温度对湿度影响大湿度对温度影响小的耦合规律^[12]。热管理模型主要反映的是湿度对温度的影响,因此不能充分表征耦合关系,本文从水管理模型入手,通过研究温度对湿度的影响实现温湿度解耦。

电堆内部含水量的变化,主要来自于反应气体中含有的水蒸气,电化学反应生成的水汽,以及尾气排放带走的水汽;电堆内部水传输过程如图2所示。

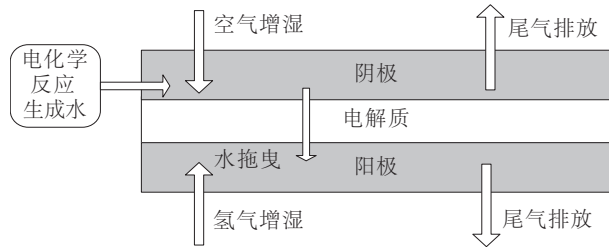


图2 电堆内部水转移过程

Fig. 2 Internal water transfer process of stack

水冷型电堆含水量模型如式(5):

$$W_{\text{stack}} = W_g + W_{H_2} + W_{O_2} - W_{\text{out}}^a - W_{\text{out}}^c \quad (5)$$

1) 电堆生成水量 W_g 计算

电堆内部生成水量如式(6)所示:

$$W_g = \frac{M_{H_2O} \cdot (n \cdot iA)}{2F} \quad (6)$$

密度时,反应物浓度急剧下降,这时会产生浓差损失^[10,11]。

$$R_d = \frac{RT_{\text{stack}} \delta}{SC_g D_{\text{eff}} n^2 F^2} \quad (3)$$

式中, $D_{\text{eff}} = 10^{-6} \exp\left[2416 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{\text{stack}}}\right)\right] \cdot (2.563 - 0.33\lambda + 0.0264\lambda^2 - 0.000671\lambda^3)$; $n = [\beta \tau^2 F / RT_{\text{stack}}]^{-1/2}$ 。

由于燃料电池工作时输出为直流电,不考虑容性阻抗的影响,根据等效电路模型,有:

2) 氢气进气含水量 W_{H_2} 计算

阳极氢气含水量可用加湿氢气质量 $M_{H_2, \text{in}}$ 与氢气湿度比 q_1 来描述,如式(7)所示,式(8)为氢气湿度比。

$$W_{H_2} = M_{H_2, \text{in}} \cdot q_1 \quad (7)$$

$$q_1 = \frac{m_{H_2O,1}}{m_{H_2O,1} + m_{H_2, \text{dry}}} \quad (8)$$

加湿氢气中水蒸气和干氢气特性满足理想气体状态方程,描述如式(9)和式(10)。

$$p_{H_2O,1} \cdot V_1 = n_{H_2O,1} \cdot R \cdot T_{H_2} \quad (9)$$

$$p_{H_2, \text{dry}} \cdot V_1 = n_{H_2, \text{dry}} \cdot R \cdot T_{H_2} \quad (10)$$

将式(9)和式(10)代入式(8)可得式(11):

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{M_{H_2O} \frac{p_{H_2O,1} \cdot V_1}{R \cdot T_{H_2}}}{M_{H_2O} \frac{p_{H_2O,1} \cdot V_1}{R \cdot T_{H_2}} + M_{H_2} \frac{p_{H_2, \text{dry}} \cdot V_1}{R \cdot T_{H_2}}} \\ &= \frac{M_{H_2O} \cdot p_{H_2O,1}}{M_{H_2O} \cdot p_{H_2O,1} + M_{H_2} \cdot p_{H_2, \text{dry}}} \end{aligned} \quad (11)$$

通过膜管增湿器,加湿气体相对湿度可测,湿度如式(12)所示,将式(12)代入式(11)可得比湿 q_1 和加湿气体相对湿度 RH_{gas} 关系如式(13)所示:

$$RH_{\text{gas}} = \frac{p_{H_2O,1}}{p_{\text{sat}}} \quad (12)$$

$$q_1 = \frac{M_{H_2O} \cdot (RH_{\text{gas}} \cdot p_{\text{sat}})}{M_{H_2O} \cdot (RH_{\text{gas}} \cdot p_{\text{sat}}) + M_{H_2} \cdot p_{H_2, \text{dry}}} \quad (13)$$

3) 空气含水量 W_{air} 计算

同理,空气进气含水量 W_{air} 与比湿 q_2 关系如式(14)所示,空气比湿与加湿气体相对湿度 RH_{gas} 关系描述为式(15):

$$W_{\text{air}} = M_{\text{air},\text{in}} \cdot q_2 \quad (14)$$

$$q_2 = \frac{m_{\text{H}_2\text{O},2}}{m_{\text{H}_2\text{O},2} + m_{\text{air},\text{dry}}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (RH_{\text{gas}} \cdot p_{\text{sat}})}{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (RH_{\text{gas}} \cdot p_{\text{sat}}) + M_{\text{air}} \cdot p_{\text{air}}} \quad (15)$$

4) 尾气排放含水量 W_{out}^a 、 W_{out}^c 计算

尾气排放中存在部分氢气和氧气、氮气以及水蒸气的混合气体,其比湿无法直接计算,故采用绝对湿度公式计算尾气排放中水质量,如式(16):

$$\varphi_w = \frac{W_{\text{out}}}{V_{\text{out}}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot n_{\text{H}_2\text{O},\text{out}}}{V_{\text{out}}} \quad (16)$$

并根据理想气体状态方程,阳极尾气排放水蒸气满足:

$$p_{\text{H}_2\text{O},\text{P}}^a \cdot V_{\text{out}}^a = n_{\text{H}_2\text{O},\text{P}}^a \cdot R \cdot T_{\text{stack}} \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)可得绝对湿度变化式(18):

$$\varphi_w = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot n_{\text{H}_2\text{O},\text{out}}}{V_{\text{out}}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p_{\text{H}_2\text{O},\text{P}}^a}{R \cdot T_{\text{stack}}} \quad (18)$$

阳极尾气排放气体体积可用式(19)表示:

$$V_{\text{out}}^a = (V_a - \frac{i \cdot V_m}{2F}) \cdot t' \quad (19)$$

由于电堆内部有液态水生成,故根据饱和湿度及露点定义,可认为尾气电堆排放尾气近似饱和,则阳极尾气排放水蒸气质量为:

$$\begin{cases} W_{\text{out}}^c = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p_{\text{H}_2\text{O},\text{P}}^c}{R \cdot T_{\text{stack}}} \cdot V_{\text{out}}^c = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p_{\text{sat}}}{R \cdot T_{\text{stack}}} \cdot (V_c - \frac{i \cdot V_m}{4F}) \\ W_{\text{out}}^a = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p_{\text{H}_2\text{O},\text{P}}^a}{R \cdot T_{\text{stack}}} \cdot V_{\text{out}}^a = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p_{\text{sat}}}{R \cdot T_{\text{stack}}} \cdot (V_a - \frac{i \cdot V_m}{2F}) \cdot t' \end{cases} \quad (20)$$

将式(6)、式(7)、式(14)、式(20)代入式(5)中可得电堆水管理模型如式(21)所示:

$$\begin{aligned} W_{\text{stack}} = & \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}(n \cdot iA)}{2F} + M_{\text{H}_2,\text{in}} \cdot \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (RH_{\text{gas}} \cdot p_{\text{sat}})}{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (RH_{\text{gas}} \cdot p_{\text{sat}}) + M_{\text{H}_2} \cdot p_{\text{H}_2,\text{dry}}} + \\ & M_{\text{O}_2,\text{in}} \cdot \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (RH_{\text{gas}} \cdot p_{\text{sat}})}{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (RH_{\text{gas}} \cdot p_{\text{sat}}) + M_{\text{air}} \cdot p_{\text{air}}} - \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p_{\text{sat}}}{R \cdot T_{\text{stack}}} \cdot \\ & (V_a - \frac{i \cdot V_m}{2F}) \cdot t' - \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p_{\text{sat}}}{R \cdot T_{\text{stack}}} \cdot (V_c - \frac{i \cdot V_m}{4F}) \cdot t' \end{aligned} \quad (21)$$

1.3.2 温湿度特性耦合建模

假设堆内的水均为气态,则含水量 W_{stack} 与水蒸气分压 RH_{stack} 的关系如式(22):

$$\begin{cases} W_{\text{stack}} = M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot n_{\text{H}_2\text{O},\text{stack}} \\ n_{\text{H}_2\text{O},\text{stack}} = \frac{p_w \cdot V_{\text{stack}}}{R \cdot T_{\text{stack}}} \\ P_w = RH_{\text{stack}} \cdot p_{\text{sat}} \end{cases} \quad (22)$$

由于进气加湿度 RH_{gas} 、阴阳极进气压力 p_{air} 、 $p_{\text{H}_2,\text{dry}}$ 等均为可控变量,仿真时可设为定值,将式(22)代入式(21)合并化简得:

$$RH_{\text{stack}} = \left(\frac{\zeta_1 \cdot i \cdot T_{\text{stack}}}{p_{\text{sat}}} + \frac{\zeta_2 \cdot T_{\text{stack}}}{\zeta_3 \cdot p_{\text{sat}} + 1} + \frac{\zeta_4 \cdot T_{\text{stack}}}{\zeta_5 \cdot p_{\text{sat}} + 1} \right) \cdot \frac{1}{\zeta_6 - \zeta_7 \cdot i} \quad (23)$$

式中, $\zeta_1 \sim \zeta_7$ ——可变参数,取值只受控制变量影响,计算模型如下:

$$\begin{cases} \zeta_1 = \frac{n \cdot A}{2F} \\ \zeta_2 = \frac{M_{\text{H}_2,\text{in}} \cdot RH_{\text{gas}}}{M_{\text{H}_2} \cdot p_{\text{H}_2}} \\ \zeta_3 = \frac{(M_{\text{H}_2\text{O}} - M_{\text{H}_2}) \cdot RH_{\text{gas}}}{M_{\text{H}_2} \cdot p_{\text{H}_2}} \\ \zeta_4 = \frac{M_{\text{air},\text{in}} \cdot RH_{\text{gas}}}{M_{\text{air}} \cdot p_{\text{air}}} \\ \zeta_5 = \frac{(M_{\text{H}_2\text{O}} - M_{\text{air}}) \cdot RH_{\text{gas}}}{M_{\text{air}} \cdot p_{\text{air}}} \\ \zeta_6 = \frac{V_{\text{stack}} + (V_a + V_c) \cdot t'}{R} \\ \zeta_7 = \frac{3At' \cdot V_m}{4F \cdot R} \end{cases} \quad (24)$$

式(24)中饱和蒸汽压 p_{sat} 只与温度 T_{stack} 有关,关系如式(25):

$$\lg p_{\text{sat}} = -2.179 + 0.0295T_{\text{stack}} - 9.184 \times 10^{-5}T_{\text{stack}}^2 + 1.445 \times 10^{-7}T_{\text{stack}}^3 \quad (25)$$

1.4 内阻的温湿度耦合模型

由式(23)可知,在控制变量设定不变时,堆内湿度主要受温度和电流密度影响。将式(23)代入式(4)中,将式(4)中的湿度 RH_{stack} 用耦合模型取代,得到考虑温湿度耦合关系的燃料电池温度寻优模型。可用该模型进行不同电流密度下温度仿真寻优实验,如式(26)所示:

$$R_{\text{stack}} = g(T_{\text{stack}}, i) \quad (26)$$

电堆温度的变化对湿度影响较大,湿度的变化对温度影响微乎其微,故湿度寻优模型近似忽略温湿度耦合影响,只需将式(4)中的温度 T_{stack} 设为定值即可,得到湿度工作寻优模型如式(27)所示:

$$R_{\text{stack}} = g'(RH_{\text{stack}}, i) \quad (27)$$

2 仿真实验结果

2.1 边界条件

活化段时,电化学反应还不够充分,堆内温湿度相对处于较低水平,故设置活化段温度仿真边界为 315~330 K,相对湿度为 50%~80%;欧姆段时电化学反应速率加快,温湿度可调节区间变宽,设置温度仿真边界为 328~348 K,相对湿度为 50%~90%;浓差段时电化学反应剧烈进行,反应产生大量的水和热,温湿度可调节区间变窄,设置浓差段温度仿真边界为 338~353 K,相对湿度为 55%~90%。

操作条件变化主要受控制变量的影响,仿真时可设为定值,控制变量边界为:阳极进气流量 V_a (0~30 L/min),阴极进气流量 V_c (0~50 L/min),尾气排放时间 t' (0.1~0.4 min),阳极进气压力 p_{H_2} (0.1~0.3 MPa), p_{air} (0.15~0.35 MPa)。

2.2 温湿度仿真寻优

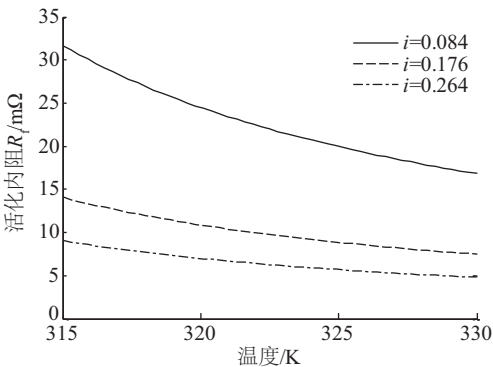
根据燃料电池耦合特性规律,温度仿真寻优实验时,将湿度设为常规定值;在进行湿度仿真寻优实验时,将温度设为最优值;利用 Matlab/Simlink 仿真软件对温湿度寻优模型式(30)和式(31)进行仿真寻优,共选取 10 个电流密度点,仿真出定电流密度下各段内阻和总内阻随温度和湿度的变化曲线,相关参数如表 1 所示,仿真结果如图 3~图 8 所示。

表1 参数符号及说明

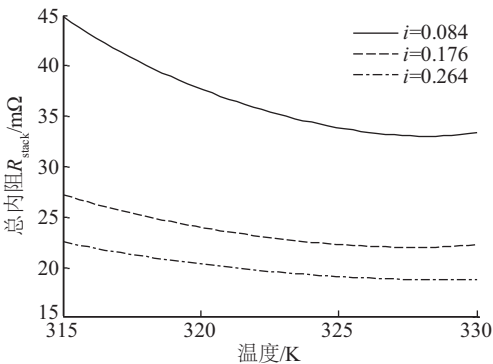
| Table 1 Parameter symbols and instructions | | |
|--|---------|-------|
| 参数 | 意义 | 数值 |
| a | 电化学反应常数 | 0.05 |
| R | 理想气体常数 | 8.316 |
| T_0/K | 参考温度 | 303 |
| S/cm^2 | 活化面积 | 280 |
| β | 电导率系数 | 6 |
| $\delta/\mu m$ | 扩散层厚度 | 800 |
| μ | 转移电子数 | 2 |
| C_g/mol | 反应物浓度 | 4 |
| F | 法拉第常数 | 96487 |
| $T_m/\mu m$ | 膜厚度 | 51 |
| V_m/L | 摩尔体积 | 22.4 |
| N | 电池片数量 | 1 |

2.2.1 温度仿真寻优实验结果

由于篇幅有限,活化段时欧姆内阻与浓差内阻的阻值又偏小,因此仅给出活化内阻和总内阻与温度的仿真图。由图 3a、图 3b 可知,随着温度的升高,活化内阻与总内阻均呈现先快速降低,后趋于稳定的趋势;由图 3b 可知,不同电流密度下,总内阻最小对应的最优温度点各不相同,随着电流密度的升高在逐渐增大;对比图 3a、图 3b 还可发现,图 3b 中高温段曲线走势比图 3a 更快趋于稳定,产生这种现象是因为过高的温度加剧水分蒸发,膜水合能力下降,导致欧姆内阻变大。



a. 活化段不同电流密度下活化内阻与温度

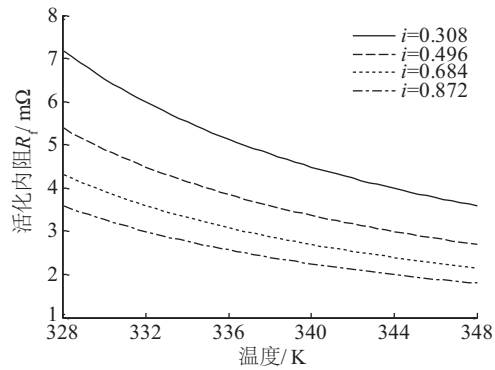


b. 不同电流密度下活化段总内阻与温度

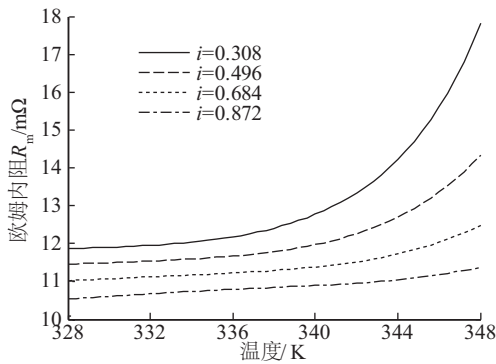
图3 活化段总内阻和段内阻与温度关系曲线

Fig. 3 Total and period resistance and temperature curve in activation period

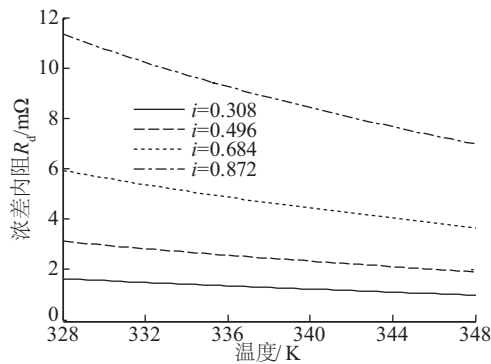
由图 4a、图 4c 可知,欧姆段时,随着电流密度的增大,活化内阻逐渐变小,浓差内阻逐渐变大;温度在低电流密度段对活化内阻影响较大,而在高电流密度段对浓差内阻影响较大,现象产生的原因是低电流密度时电化学反应潜力较大,温度可影响反应的速率;高电流密度时电化学反应异常剧烈,导致反应气体供应不足,温度的升高加快气体的流通



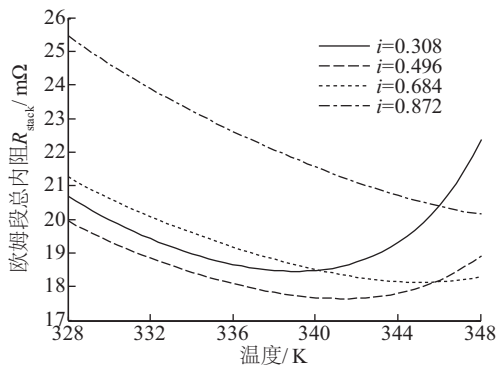
a. 欧姆段不同电流密度下活化内阻与温度



b. 欧姆段不同电流密度下欧姆内阻与温度



c. 欧姆段不同电流密度下浓差内阻与温度



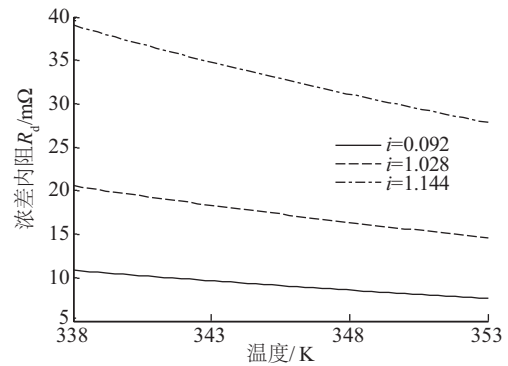
d. 不同电流密度下欧姆段总内阻与温度

图4 欧姆段总内阻和段内阻与温度关系曲线

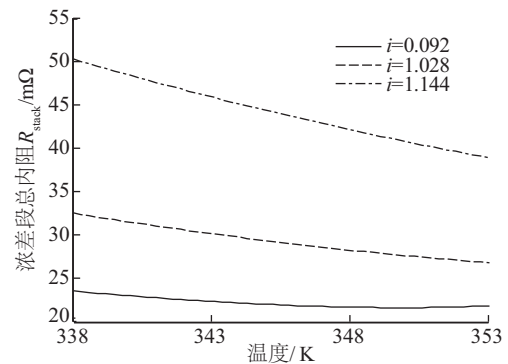
Fig. 4 Total and period resistance and temperature curve in ohm period

速率;由图 4b 可知,欧姆内阻随温度的增大先缓慢增大后快速增大,且随电流密度增大增幅在逐渐减小,这是由于在高电流密度时,化学反应产生的大量水分降低质子传输时所受阻力;由图 4d 可知,在低电流密度段,总内阻随着温度的升高先逐渐减小后逐渐增大,高电流密度段,则变为先减小后趋于稳定,这是由于高电流密度段,浓差内阻在总内阻中占比增大,欧姆内阻占比减小;最佳温度点在逐渐增大。

由于篇幅有限,又考虑到浓差段时活化内阻和欧姆内阻阻值偏小,因此只给出浓差内阻和总内阻与温度的关系;由图 5a 可知,随着温度的升高,浓差内阻逐渐下降,电流密度越高,下降的幅度越大,这说明随着电流密度的增大,温度对浓差内阻的影响逐渐增大;由图 5b 可知,总内阻随着温度的升高先逐渐减小后趋于稳定,当温度达到 349~352 K 时,总内阻达到最小值;由于此时电化学反应异常剧烈,堆内温度很高,温度可调节空间不大,故浓差段最佳温度值变化不大。



a. 不同电流密度下浓差内阻和温度



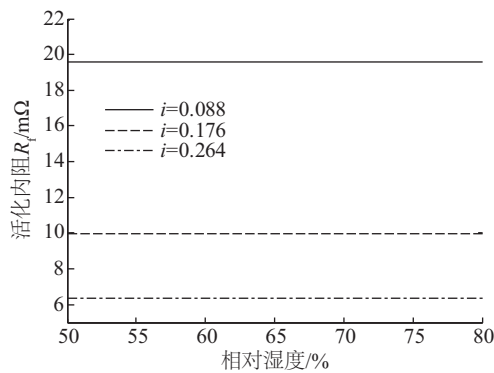
b. 不同电流密度下浓差段总内阻和温度

图5 浓差段总内阻和段内阻与温度关系曲线

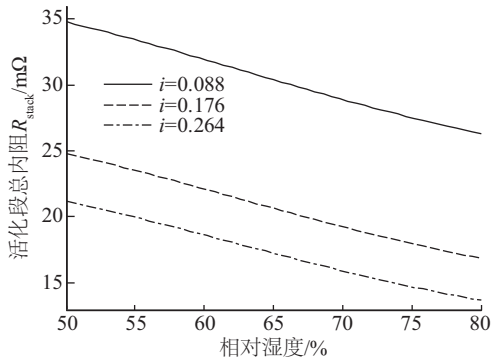
Fig. 5 Total and period resistance and temperature curve in concentration period

2.2.2 湿度仿真寻优实验结果

由图 6a 可知,活化段时,湿度对活化内阻基本无影响,这是由于湿度基本不影响化学反应速率;由图 6b 可知,湿度的升高可降低总内阻的大小,这说明活化段时湿度的升高有利于输出性能的提升,最优湿度点在上边界 80%附近;考虑到实际工况下,活化段时,随着电流密度的增大,化学反应产生的水分逐渐增多,堆内湿度逐渐升高,湿度变化的实际上边界在逐渐增大,因此活化段时最优湿度值在逐渐升高。



a. 活化段不同电流密度下活化内阻与相对湿度

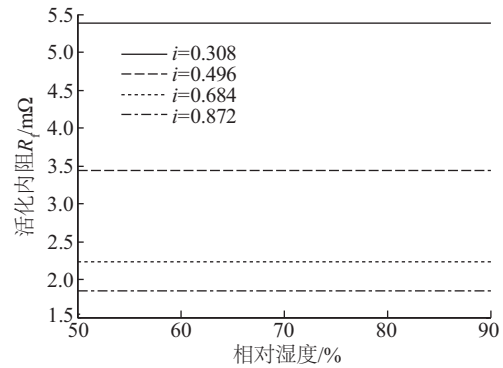


b. 不同电流密度下活化段总内阻与相对湿度

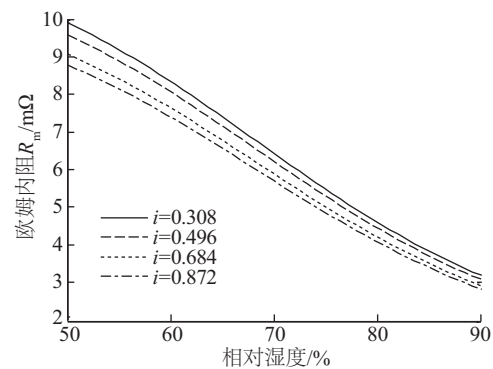
图 6 活化段总内阻和段内阻与湿度关系曲线

Fig. 6 Total and period resistance and humidity curve in activation period

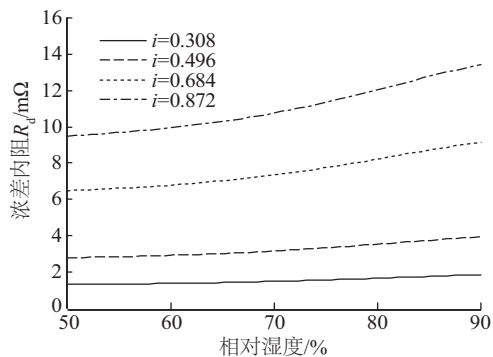
由图 7a~图 7c 可知,欧姆段时,随着电流密度的增加,活化内阻在快速减小,欧姆内阻基本不变,浓差内阻快速增加;由图 7c 还可发现,越接近于浓差段,湿度对浓差内阻的影响越大;由图 7d 可知,不同电流密度下,总内阻随湿度的变化趋势差异很大,低电流密度时,随着湿度的增加,总内阻逐渐下降;高电流密度时,先是缓慢下降后又逐渐上升,产生这种现象的原因是电流密度越大,浓差内阻在总



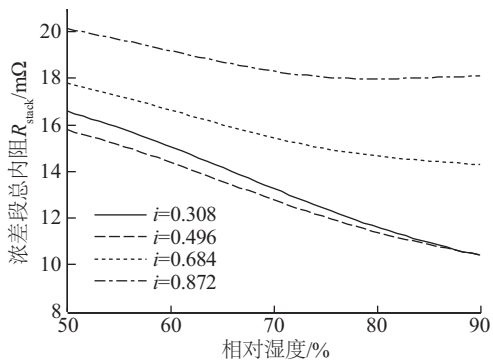
a. 欧姆段不同电流密度下活化内阻与相对湿度



b. 欧姆段不同电流密度下欧姆内阻与相对湿度



c. 欧姆段不同电流密度下浓差内阻与相对湿度



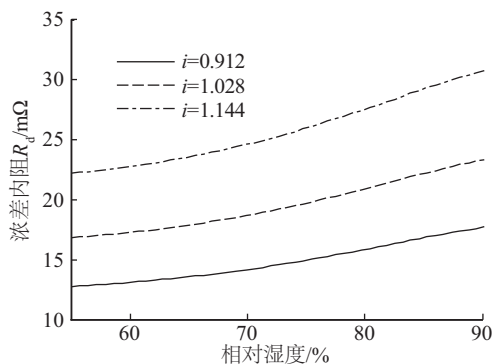
d. 不同电流密度下欧姆段总内阻和相对湿度

图 7 欧姆段总内阻与分内阻与湿度曲线

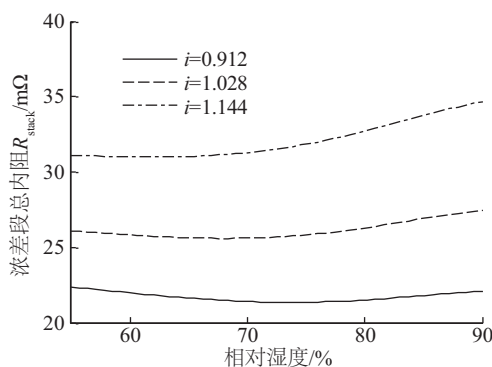
Fig. 7 Total and period resistance and humidity curve in ohm period

内阻中占比越大,随着湿度的升高,浓差内阻快速增大,导致总内阻曲线相应上浮;最优湿度点先逐渐增加后趋于稳定,再快速减小。

在浓差段时,从图 8a 可看出,随着湿度的增加,浓差内阻迅速增加,这是因为浓差段时电化学反应生成大量的水,湿度过高极易引起气体的传输通道堵塞,引发“水淹”现象,反应物供应不足;从图 8b 可得,随着电流密度的增加,最佳湿度值在逐渐减小。



a. 浓差段不同电流密度下浓差内阻和相对湿度



b. 不同电流密度下浓差段总内阻和相对湿度

图 8 浓差段总内阻和段内阻与湿度曲线

Fig. 8 Total and period resistance and temperature curve in concentration period

2.3 最优操作条件建模

以仿真结论为指导,结合燃料电池的实际工作机理,可得最佳温度值在活化段快速增加,欧姆段平缓增加,浓差段趋于稳定;最佳湿度值在活化段缓慢增加,欧姆段逐渐增加后趋于稳定再快速减小,浓差段逐渐减小;最佳温湿度与电流密度具体对应数值如表 2 和图 9 所示。

对最佳温湿度与电流密度特性关系的分析可

得,最佳温度与电流密度满足指数函数模型,最佳湿度与电流密度满足四次多项式函数模型。

表 2 最佳温湿度与电流密度

Table 2 Best temperature and humidity and current density

| 电流密度 $i/\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ | 最佳温度 T/K | 最佳湿度 RH |
|--------------------------------------|-------------------|-----------|
| 0.088 | 325~327 | 78%~79% |
| 0.176 | 328~329 | 79%~80% |
| 0.264 | 329~330 | 80%~82% |
| 0.308 | 334~337 | 84%~85% |
| 0.496 | 337~340 | 85%~87% |
| 0.684 | 342~344 | 82%~84% |
| 0.872 | 345~347 | 75%~77% |
| 0.912 | 347~348 | 72%~74% |
| 1.028 | 350~351 | 67%~69% |
| 1.144 | 351~352 | 63%~65% |

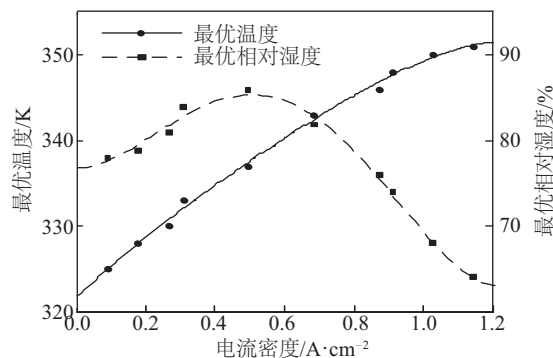


图 9 最佳温湿度与电流密度曲线

Fig. 9 Best humidity and current density curve

$$T_{\text{优}} = a \lg i + b + m \exp(ni) \quad (28)$$

$$RH_{\text{优}} = \alpha_1 i^4 + \alpha_2 i^3 + \alpha_3 i^2 + \alpha_4 i + \alpha_5 \quad (29)$$

使用 Matlab 自带的遗传算法与直接搜索 (GADS) 工具箱对电堆温湿度特性模型参数进行优化。由表 3、表 4 可知,模型决赛系数 R^2 均大于 0.95,表明该模型具有较高得精度,可为进一步控制提供依据和参考。

表 3 最佳工作温度特性模型参数优化结果

Table 3 Parameters optimization result of best working temperature characteristic model

| a | b | m | n | R^2 |
|-------|-------|------|--------|-------|
| 36.47 | 348.3 | 2497 | -6.515 | 0.973 |

表4 最佳工作湿度特性模型参数优化结果

Table 4 Parameters optimization result of best working humidity characteristic model

| α_1 | α_2 | α_3 | α_4 | α_5 | R^2 |
|------------|------------|------------|------------|------------|-------|
| 1.41 | -3.2169 | 1.8463 | -0.119 | 0.775 | 0.953 |

3 结 论

本文通过机理建模方式,分别建立燃料电池内阻与温湿度操作条件模型,操作条件之间解耦模型,以总内阻最小为仿真寻优实验原则,对内阻的温湿度解耦模型进行仿真寻优,通过对仿真实验结果分析发现,最佳温湿度随电流密度的变化趋势满足电堆内部水热变化的客观机理,模型是正确、有效的;考虑后续控制的需要,建立最佳温湿度与电流密度之间经验模型,使用遗传算法对模型参数进行优化,提高模型精度,下一步可结合文献[12]对冷却水流量、进气加湿度等进行综合控制,以期获得更好的控制效果。

符号表

| | |
|------------------------------|---------------------|
| D_{eff} | 水迁移系数 |
| τ | 电化学反应转移电子数 |
| λ | 膜的水含量 |
| $M_{\text{H}_2\text{O}}$ | 水的摩尔质量, g/mol |
| M_{H_2} | 氢气的摩尔质量, g/mol |
| p_{sat} | 饱和蒸汽压, MPa |
| p_w | 水蒸气分压, MPa |
| V_m | 标况下单位摩尔体积, L |
| $p_{\text{H}_2\text{O},a}^p$ | 阳极排放尾气分压, MPa |
| $p_{\text{H}_2\text{O},c}^p$ | 阴极排放尾气分压, MPa |
| V_{stack} | 电堆体积, cm^3 |
| $M_{\text{H}_2,\text{in}}$ | 氢气进气质量流量, kg/s |
| $M_{\text{air},\text{in}}$ | 空气进气质量流量, kg/s |
| RH_{gas} | 加湿气体相对湿度, % |
| RH_{stack} | 电堆内部相对湿度, % |
| $m_{\text{H}_2\text{O},l}$ | 加湿氢气中水蒸气质量, kg |
| $T_{\text{优}}$ | 最佳温度, K |
| $RH_{\text{优}}$ | 最佳相对湿度, % |

[参考文献]

[1] 卫 东, 郑 东, 郑恩辉. 空冷型质子交换膜燃料电池堆温湿度特性自适应模糊建模与输出控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(23): 114—120.

[1] Wei Dong, Zheng Dong, Zheng Enhui. Temperature and humidity characteristics modeling and output control based on adaptive fuzzy method for proton exchange membrane fuel cell Stack [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(23): 114—120.

[2] Wei Dong, Zheng Dong, Chu Leimin. Output control of optimal performance for air-cooling PEMFC stack[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2010, 61(5): 1293—1300.

[3] 王斌锐, 金英连, 褚磊民, 等. 空冷燃料电池最佳温度及模糊增量PID控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(8): 109—114.

[3] Wang Binrui, Jin Yinglian, Chu Leimin. et al. Temperature optimization and fuzzy control for air-breath proton exchange membrane fuel cell stack[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(8): 109—114.

[4] Li Qi, Chen Weirong. Temperature optimization and control of optimal performance for a 300 W open cathode proton exchange membrane fuel cell [J]. Procedia Engineering, 2012, 29: 179—183.

[5] 郑恩辉, 卫 东, 楼洪 等. 燃料电池堆组件退化现象对输出性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(5): 86—92.

[5] Zheng Enhui, Wei Dong, et al. Influence analysis of degradation phenomenon on output performance for fuel cell stack assemblies [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(5): 86—92.

[6] Cooper K R, Smith M. Electrical test methods for on-line fuel cell ohmic resistance measurement [J]. Journal of Power Sources, 2006, 160(2): 1088—1095.

[7] 杨 涛, 史鹏飞. 质子交换膜燃料电池研究进展[J]. 能源技术, 2006, 27(3): 107—110.

[7] Yang Tao, Shi Pengfei. The study and development of self humidification of PEMFC [J]. Energy Technology, 2006, 27(3): 107—110.

[8] Faysal Tiss, Ridha chouikh. Dynamic modeling of a PEM fuel cell with temperature effect [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38: 8532—8541.

[9] 衣宝廉. 燃料电池系统[M]. 北京: 北京化工出版社, 2001: 5—19.

[9] Yi Baolian. Fuel cell system [M]. Beijing: Beijing Chemical Industry Press, 2001: 5—19.

[10] 王 珂. 基于电流断路法的空冷型燃料电池阻抗谱实验分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(29): 87—93.

[10] Wang Ke. Experimental diagnosis of air breath proton

- exchange membrane fuel cell through current interrupt [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(29): 87—93.
- [11] O' Hayre Ryan, Frinz Whitney Cliehha. Fuel cell fundamentals[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [12] 郑 东. 水冷型质子交换膜燃料电池堆输出性能控制与分析[D]. 杭州: 中国计量大学, 2012.
- [12] Zheng Dong. Control and analysis of output performance for water-cooling PEMFC stack [D]. Hangzhou: Journal of China Jiliang University, 2012.

WATER-COOLING PEMFC OUTPUT CHARACTERISTIC MODELING AND SIMULATION ANALYSIS

Gao Zhi, Cai Hui, Wei Dong, Wang Zhen, Zhou Hangxia

(School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Based on the shortcomings of traditional optimization methods, the internal resistance is chosen as the optimal index of output performance. The internal resistance and operating condition mechanism model and the decoupling model are established. The total internal resistance is the minimum simulation principle. The optimal temperature and humidity points corresponding to each current density are obtained. The optimal model of temperature, humidity and current density is established. The genetic algorithm is used to optimize the model parameters, which provides the basis and reference for the next control strategy optimization.

Keywords: fuel cell; temperature and humidity; simulation; control