DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.1.190 **中图分类号**：TM911.4 **文献标志码**：A

基于内阻特性的 PEMFC 发电效率建模与分析

周唯逸[1]，郑万俊[2]，卫 东[2]，徐钰栋[1]
(1.国网浙江电力有限公司乐清市供电公司，温州 325600；2.中国计量大学机电工程学院，杭州 310018)

摘要：基于质子交换膜燃料电池 PEMFC(proton exchange membrane fuel cell)等效电路模型和电化学反应理论，建立燃料电池发电效率计算模型，研究操作条件(工作温度、工作湿度)对电堆的内阻特性、输出特性和发电效率的影响，以堆内直流总内阻最小为原则，研究获得不同电流密度输出下的最佳操作条件；设计交流阻抗特性和 *U-I* 输出特性实验，验证模型的准确性和有效性。仿真和实验结果表明：内阻特性和输出电流密度是影响燃料电池发电效率变化的重要因素；堆内直流总内阻最小时所对应的操作条件，可优化电堆输出性能，提高发电效率；所建立的燃料电池发电效率模型可准确反映电堆内部特性，计算结果有效、可靠。

关键词：质子交换膜燃料电池；发电效率；操作条件；内阻特性；电流密度

Modeling and Analysis of PEMFC Power Generation Efficiency Based on Internal Resistance Characteristics

ZHOU Weiyi[1], ZHENG Wanjun[2], WEI Dong[2], XU Yudong[1]
(1. Yueqing Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Wenzhou 325600, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Based on the equivalent circuit model of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) and the electrochemical reaction theory, a fuel cell power generation efficiency calculation model is established to study the influences of operating conditions (e.g., working temperature and working humidity) on the internal resistance characteristics, output characteristics and power generation efficiency of the fuel cell stack. The principle of minimizing the total DC internal resistance inside the stack is adopted to obtain the optimum operating conditions under the output of different current densities. Experiments on AC impedance characteristics and *U-I* output characteristics are designed to verify the accuracy and effectiveness of the model. Simulation and experimental results indicate that the internal resistance characteristics and output current density are important factors affecting the variation in fuel cell power generation efficiency. The operating conditions corresponding to the minimum DC total internal resistance inside the stack can optimize the output performance of the stack and improve the power generation efficiency. The fuel cell power generation efficiency model established can accurately reflect the internal characteristics of the fuel cell stack, and the calculation results are effective and reliable.

Keywords: Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC); power generation efficiency; operation condition; internal resistance characteristic; current density

收稿日期：2024-09-23；**修回日期**：2024-12-08，2025-01-18；
录用日期：2025-02-03；**网络首发日期**：2025-03-07
基金项目：浙江省基础公益研究计划资助项目(LGG22E070003)
This work is supported by Zhejiang Provincial Basic Public Welfare Research Program under the grant LGG22E070003

质子交换膜燃料电池 PEMFC(proton exchange membrane fuel cell)因具有能量转换效率高、清洁无污染等优点，在交通运输、储能发电等领域得到广泛应用[1-2]。燃料电池发电效率是电堆输出性能的重要评价指标之一，受操作条件直接影响，随

堆内水热管理状态变化而变化。因此，建立基于内阻特性的燃料电池发电效率模型，研究操作条件对内阻特性的影响，获得 *U-I* 输出特性和电化学阻抗特性的变化规律，具有良好的理论研究意义和实际应用前景。

近年来，专家学者在以发电效率为指标评价燃料电池输出性能方面取得了丰硕成果。Huang 等[3]建立并验证了 1 个电堆系统的参数模型，讨论了电输出性能和热力学特性，以评价热管理，计算发电效率；Bayat 等[4]通过建立高温质子交换膜燃料电池的半经验模型，研究膜掺杂水平和漏电流密度对发电效率的影响；文献[5-6]通过建立燃料电池热力学模型，研究负载电流、压力、温度和湿度等参数对电堆输出性能和发电效率的影响；文献[7]借高频链同步抵消子模块功率波动，在电容瘦身的同时降低变换级损耗，使氢燃料电池发电效率提升；Kumar 等[8]通过控制燃料电池进气流量、温湿度为最佳值，研究不同浓度下的富氧空气对发电效率的影响；Li 等[9]通过建立传统的风冷燃料电池与带冷却通道的燃料电池模型，计算不同工况下的温度梯度，可以降低寄生功耗，提高发电效率；文献[10]通过提出基于模型引导极值搜索和自抗扰控制的发电系统效率监控策略，实现系统效率的实时优化；王怡戈等[11]提出 1 种燃料电池效率测试及评价方法，并根据实际需求中对高功率、高效率运行的重要程度，确定高发电效率的运行条件。

本文借鉴前期研究成果，从能量转换角度出发，建立燃料电池发电效率计算模型，分析操作条件、内阻特性对发电效率的影响。以堆内直流总内阻最小为原则，研究最佳操作条件对电堆发电效率的影响和变化规律，优化电堆输出性能，提高电堆发电效率。

1　PEMFC 发电效率建模与方法验证

基于燃料电池等效电路和电化学反应理论，建立 PEMFC 发电效率模型。从能量转换角度分析，电堆通过电化学反应产生的总能量焓变 ΔH 可分为能变 ΔG 和不可用能变 $T\Delta S$，即

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \tag{1}$$

式中：T 为热力学温度，K；ΔS 为熵变，$\mathrm{J\cdot K^{-1}\cdot mol^{-1}}$。

自由能变 ΔG 仅在理想状态下可全部转换为电能，即

$$-\Delta G = -(\Delta H - T\Delta S) = W = nFE \tag{2}$$

式中：W 为理想状态下自由能变做的功，$\mathrm{J\cdot mol^{-1}}$；n 为参与反应的电子数；F 为法拉第常数；E 为电动势。

在定压强条件下，熵变受温度的影响，对 Gibbs-Helmholtz 方程式推导可得

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T} = -\left[\frac{\partial \Delta G}{\partial T}\right]_{\mathrm{P}} = nF\left[\frac{\partial E}{\partial T}\right]_{\mathrm{P}} \tag{3}$$

式中，$[\partial E/\partial T]_{\mathrm{P}}$ 为电动势温度系数，$\mathrm{V\cdot K^{-1}}$。

结合式(1)~式(3)推导可得

$$\Delta H = \Delta G - T\left[\frac{\partial \Delta G}{\partial T}\right]_{\mathrm{P}} = -nFE + nFT\left[\frac{\partial E}{\partial T}\right]_{\mathrm{P}} \tag{4}$$

由式(4)可知，燃料电池在电化学反应过程中，一部分能变 ΔG 转换为电能 nFE，另一部分能量以热的形式损失 ($q=T\Delta S=nFT[\partial E/\partial T]_{\mathrm{P}}$)。在标准值 (298 K, 101.3 kPa)、理想状态下，$-\Delta G_0=nFE_0$。其中，ΔG_0 为标准吉布斯自由能变，$\mathrm{J\cdot mol^{-1}}$；E_0 为标准理想状态下的电动势，V。二阶 RC 等效电路如图 1 所示，图中：E_{ocv} 为开路电压；U_{st} 为输出电压；R_{f}、R_{m}、R_{d} 分别为活化内阻、欧姆内阻和浓差内阻；C_{d} 和 C_{d1} 为双电层电容。

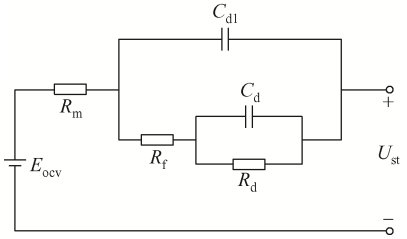


图 1　二阶 RC 等效电路

Fig. 1 Second-order RC equivalent circuit

1.1　PEMFC 发电效率建模

由上述能量转换分析可知，电化学反应过程中所释放的总能量将转换为热能损失 Q_{st}、实际输出电能 P_{st} 和电能损耗 P_{loss}。故发电效率模型可定义

为实际输出电能与电化学反应释放总能量之比，即

$$\eta_{\text{stack}}=\frac{P_{\text{st}}}{P_{\text{st}}+P_{\text{loss}}+Q_{\text{st}}} \tag{5}$$

1.1.1 电能损耗计算

分析图 1 可知，内阻特性(R_{f}、R_{m}和 R_{d})导致输出电压要低于开路电压，电能损耗 P_{loss}可表示为

$$P_{\text{loss}}=i^2A(R_{\text{f}}+R_{\text{m}}+R_{\text{d}}) \tag{6}$$

式中：i 为输出电流密度，A·cm^{-2}；A 为电化学反应面积，cm^2。

直流总电阻 $R_{\text{stack}}(T_{\text{stack}}, RH_{\text{stack}}, i)=R_{\text{f}}+R_{\text{m}}+R_{\text{d}}$，$R_{\text{f}}$、$R_{\text{m}}$、$R_{\text{d}}$[12-13]可分别表示为

$$R_{\text{f}}=\frac{RT_{\text{stack}}}{\alpha nFi}\ln\left\{\frac{iT_0}{i_0T_{\text{stack}}}\exp\left[\frac{E_{\text{a}}}{R}\left(\frac{1}{T_{\text{stack}}}-\frac{1}{T_0}\right)\right]\right\} \tag{7}$$

$$R_{\text{m}}=\frac{\alpha_1t_{\text{m}}\left[1+\alpha_2i+\alpha_3\left(\frac{T_{\text{stack}}}{\alpha_4}\right)^2i^{2.5}\right]}{A(\lambda_{\text{m}}-\alpha_5-3i)\exp\left[\alpha_6\left(\frac{T_{\text{stack}}-\alpha_7}{T_{\text{stack}}}\right)\right]} \tag{8}$$

$$R_{\text{d}}=\frac{RT_{\text{stack}}\delta}{4AF^2C_{\text{g}}D_{\lambda}\exp\left[2\,416\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T_{\text{stack}}}\right)\right]\left(\frac{\beta\tau^2F}{RT_{\text{stack}}}\right)^{-i}} \tag{9}$$

式中：R 为理想气体常数，J·mol^{-1}·K^{-1}；T_{stack} 为工作温度，K；α 为阴极氧还原反应速率常数；T_0 为标准工作温度，K；i_0 为 T_0 下的交换电流密度，A·cm^{-2}；E_{a} 为电化学反应活化能，J·mol^{-1}；t_{m} 为膜厚度，μm；λ_{m} 为膜含水量，$\lambda_{\text{m}}=\beta_1+\beta_2RH_{\text{stack}}-\beta_3RH_{\text{stack}}^2+\beta_4RH_{\text{stack}}^3$，$RH_{\text{stack}}$ 为工作湿度，β_1~β_4 为经验参数；δ 为扩散层厚度，μm；C_{g} 为反应物总浓度，mol·L^{-1}；D_{λ} 为初始状态的水迁移系数，m^2·s^{-1}，$D_{\lambda}=10^{-6}\times(\gamma_1-\gamma_2\lambda_{\text{m}}+\gamma_3\lambda_{\text{m}}^2-\gamma_4\lambda_{\text{m}}^3)$，$\gamma_1$~$\gamma_4$ 为经验参数；β 为电导率系数；τ 为转移离子摩尔数，mol；α_1~α_7 为经验参数。

1.1.2 输出电能计算

由图 1 可得输出电压 U_{st}和输出功率 P_{st}分别表示为

$$U_{\text{st}}=E_{\text{ocv}}-i(R_{\text{f}}+R_{\text{m}}+R_{\text{d}}) \tag{10}$$

$$P_{\text{st}}=iA[E_{\text{ocv}}-i(R_{\text{f}}+R_{\text{m}}+R_{\text{d}})] \tag{11}$$

通过能斯特方程求得式(11)中开路电压 E_{ocv}，即

$$E_{\text{ocv}}=\frac{-\Delta G_0}{nF}+\frac{\Delta S}{nF}\times(T_{\text{stack}}-T_0)+\frac{RT_{\text{stack}}}{nF}\ln(P_{\text{H}_2}\sqrt{P_{\text{O}_2}}) \tag{12}$$

式中，P_{H_2} 和 P_{O_2} 分别为阳、阴极气体分压，MPa。其随电流密度变化[14]，可表示为

$$P_{\text{H}_2}=\frac{RH_{\text{gas}}^{\text{a}}P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}}{2}\left\{\left[\frac{RH_{\text{gas}}^{\text{a}}P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}}{P_{\text{a}}}\exp\left(\frac{1.635i}{AT_{\text{stack}}^{1.334}}\right)\right]^{-1}-1\right\} \tag{13}$$

$$P_{\text{O}_2}=(P_{\text{c}}-RH_{\text{gas}}^{\text{c}}P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}})\left[1+\frac{0.79}{0.21}\exp\left(\frac{0.291i}{AT_{\text{stack}}^{0.832}}\right)\right]^{-1} \tag{14}$$

式中：$RH_{\text{gas}}^{\text{a}}$、$RH_{\text{gas}}^{\text{c}}$ 分别为阳、阴极气体增湿湿度；$P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}$ 为饱和蒸汽压，MPa；P_{a}、P_{c} 分别为阳、阴极气体入口压力。

饱和蒸汽压 $P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}$ 与 T_{stack} 有关的表达式[14]为

$$\lg P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}=1.4\times10^{-7}T_{\text{stack}}^3-2.1\times10^{-4}T_{\text{stack}}^2+0.1T_{\text{stack}}-20 \tag{15}$$

1.1.3 热能损失计算

由上述能量转换过程进一步分析可知，燃料电池电化学反应过程受到气体分压和温度的影响，使得自由能变 ΔG_0 的部分能量以热能形式损失。热能损失 Q_{st} 可表示为

$$Q_{\text{st}}=-iA\left(T_{\text{stack}}\left[\frac{\partial E}{\partial T}\right]_{\text{P}}+\frac{RT_{\text{stack}}}{nF}\ln(P_{\text{H}_2}\sqrt{P_{\text{O}_2}})\right) \tag{16}$$

综上可得，燃料电池发电效率 η_{stack} 的模型为

$$\eta_{\text{stack}}=P_{\text{st}}\Big/[i^2A(R_{\text{f}}+R_{\text{m}}+R_{\text{d}})-iAT_{\text{stack}}\left[\partial E/\partial T\right]_{\text{P}}-iART_{\text{stack}}\ln(P_{\text{H}_2}\sqrt{P_{\text{O}_2}})\Big/nF+P_{\text{st}}] \tag{17}$$

1.2 发电效率模型计算与氢能热值法对比验证

将文献[14]中广泛使用的氢能热值法与本文 1.1 节所建立的发电效率模型进行对比验证。为保证仿真结果可靠、有效，仿真中所用模型参数见表 1。氢能热值法中发电效率 η_{fc} 可表示为燃料

电池堆输出功率 P_{fc} 与输入氢气所含能量 F_{in} 的比值，即

$$\eta_{fc} = P_{fc} / F_{in} \tag{18}$$

表 1　仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
β	6	δ/μm	80
τ	2	RH_{gas}^{a}	1
T_0/K	298	RH_{gas}^{c}	1
N	16	T_{stack}/K	293~343
n	2	RH_{stack}/%	40~90
R/(J·mol^{-1}·K^{-1})	8.314	P_a、P_c/MPa	0.1~0.2
α	0.05	C_g/(mol·L^{-1})	4
t_m/μm	51	F/(C·mol^{-1})	96 485
A/cm^2	180	m/(g·mol^{-1})	2.016

输出电压 V 与输出电流 I 相乘可得输出功率 P_{fc}，即

$$P_{fc} = VI \tag{19}$$

输入能量 F_{in} 由氢气消耗速率 q_{H_2} 与总能量焓变 ΔH 的乘积表示，推导可得

$$F_{in} = q_{H_2}\Delta H = \left(\frac{m\Delta H}{nF} \right) I \tag{20}$$

式中，m 为氢分子的摩尔质量，g/mol。

模型仿真与氢能热值法对比如图 2 所示。本文模型与上述氢能热值法在电流密度 0~1 A·cm^{-2} 范围内进行计算，并将二者计算结果对比验证，随电流密度增大，发电效率变化趋势基本一致，且最大相对误差小于 5%，从而证明本文所建模型的准确性和合理性。

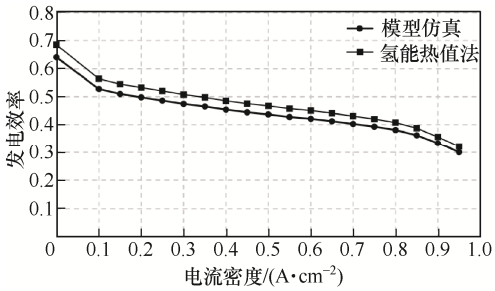


图 2　模型仿真与氢能热值法对比

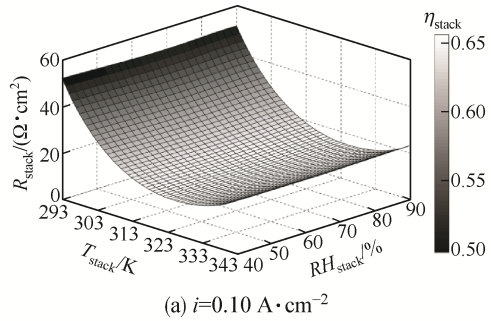
Fig. 2 Comparison between model simulation and hydrogen calorific value method

2　仿真结果与分析

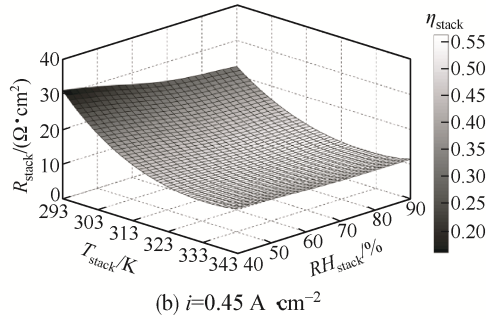
2.1　内阻特性与效率特性分析

在燃料电池发电过程中，操作条件对内阻特性变化起决定性作用，而内阻特性改变可通过发电效率高低来反映，不同电流密度输出下，PEMFC 输出性能受内阻特性影响，且产生机理不同。针对 1.1 节所建发电效率模型展开研究，依次分析不同电流密度段操作条件、直流总内阻对燃料电池发电效率的影响。模型参数及实验所用内部参数见表 1，其中 N 为质子交换膜燃料电池片数。

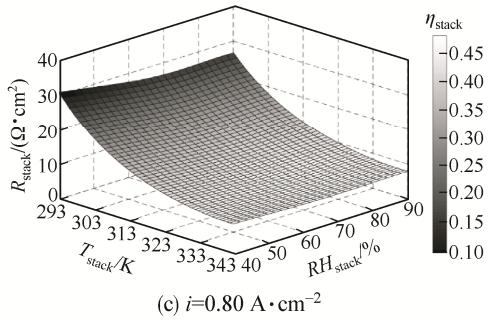
不同电流密度下发电效率 η_{stack} 的变化规律如图 3 所示，分析可知，$i = 0.10$ A·cm^{-2} 时，湿度的变



(a) i=0.10 A·cm^{-2}



(b) i=0.45 A·cm^{-2}



(c) i=0.80 A·cm^{-2}

图 3　不同电流密度下发电效率 η_{stack} 变化规律

Fig. 3 Variations in η_{stack} of power generation efficiency under different current densities

化对 R_{stack} 和 η_{stack} 影响较小。随着温度的升高，R_{stack} 先减小后增大，η_{stack} 呈现相反的变化趋势。电堆启动的初始阶段，反应速率较慢，提高电堆温度有助于降低活化能垒，驱动电子传输；温度过高则会导致膜变干，输出性能变差。

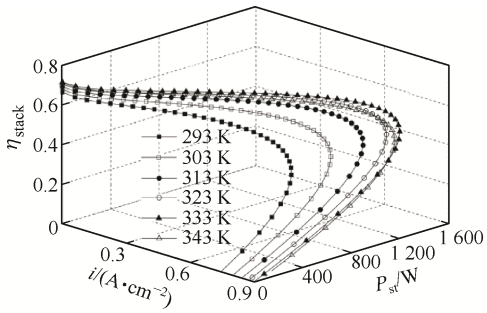
i = 0.45 A·cm^{-2} 时，η_{stack} 随着湿度的增大逐渐提高，R_{stack} 减小。较低的温度和湿度(293~313 K; 40%~75%)不利于电堆正常运行。中电流密度段电化学反应较为稳定，提高电堆湿度能够增强膜水合能力，提高质子传导速率；温度过高则会导致膜两侧水活性降低，发电效率降低。

i = 0.80 A·cm^{-2} 时，随着温度和湿度的升高，R_{stack} 先减小后增大，η_{stack} 先增大后减小。低工作温度(293~318 K)不利于电堆正常运行。高电流密度段电化学反应剧烈，堆内液态水增多，温度过高使电拖曳作用过强，造成阳极侧变干；湿度过高会导致堆内液态水无法及时排出，引发水淹故障，使发电效率降低[15-16]。综上可知，同一操作条件下，随电流密度的增大，总内阻 R_{stack} 先减小后增大，发电效率减小；同一电流密度输出下，存在最佳操作条件，使得堆内 R_{stack} 最小，优化输出性能，提高发电效率。

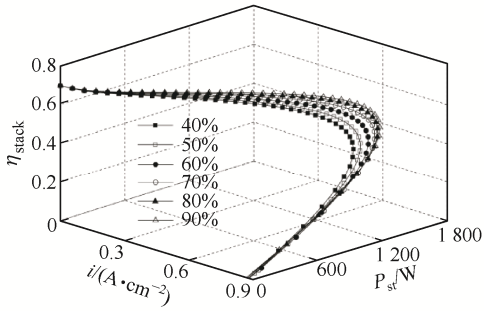
2.2 功率输出与效率特性分析

行业对 PEMFC 的需求不仅停留于燃料电池具有较高的发电效率，还要求其能快速、稳定地满足不同功率输出下的负载需求。因此，分析操作条件对输出性能和发电效率的影响规律，研究影响电堆输出性能的反应机理，是确定最佳操作条件和实现输出性能优化控制的前提。由式(12)可知，恒定电流密度输出下，开路电压仅受温度影响，提高温度，开路电压和堆内极化损耗均减小。输出功率和发电效率的变化规律如图 4 所示。由图 4(a)可见，电流密度接近于 0 A·cm^{-2} 时，发电效率变化较小(66%~71%)；随着电流密度的增大，发电效率随温度的变化率增大。

由图4(b)可见，低电流密度段(0 A·cm^{-2}<i≤0.3 A·cm^{-2})，湿度对堆内电化学反应影响较小；中电流密度段(0.3 A·cm^{-2}<i≤0.6 A·cm^{-2})，湿度对发电效率的影响较大，湿度从 40% 提升到 90%(i= 0.65 A·cm^{-2})，发电效率提升10%左右；高电流密度段(0.6 A·cm^{-2}<i≤0.9 A·cm^{-2})，堆内液态水增多，湿度过高会使电堆输出性能变差。综上可知，不同功率输出时，改变操作条件能够提高发电效率；随输出电流密度的增大，直流总内阻先减小后增加，输出功率呈现先增大后减小的趋势，发电效率减小。实际应用中，需要综合考虑输出功率和发电效率的重要程度，从而确定适宜的操作条件。



(a) RH_{stack}=60%, 不同温度下



(b) T_{stack}=323 K, 不同湿度下

图 4 输出功率和发电效率的变化规律

Fig. 4 Variations in output power and power generation efficiency

2.3 仿真结果分析

以仿真结论为指导，结合燃料电池实际工作机理可得不同电流密度输出下的最佳操作条件，见表 2。结合图 3 和图 4 分析可知，控制电堆在最佳操作条件下工作有利于减小堆内电能损耗，优化输出性能，提高发电效率。

表 2　不同电流密度下最佳操作条件及效率

Tab. 2 Optimum operating conditions and efficiency under different current densities

i/(A·cm^{-2})	T_{stack}/K	RH_{stack}/%	R_{stack}/(Ω·cm^2)	P_{st}/W	η_{stack}/%
0~0.1	320~325	60~64	34.3~77.3	0~226	65.3~68.6
0.1~0.2	325~327	64~70	20.9~34.3	226~425	63.4~65.3
0.2~0.3	327~329	70~78	15.8~20.9	425~608	60.8~63.4
0.3~0.4	329~331	78~84	13.0~15.8	608~776	58.6~60.8
0.4~0.5	331~334	79~84	11.3~13.0	776~934	51.7~58.6
0.5~0.6	334~337	71~79	10.0~11.3	934~108 0	45.1~51.7
0.6~0.7	337~344	60~71	9.2~10.0	1 080~120 5	43.1~45.1
0.7~0.8	340~343	54~60	8.6~9.2	1 205~1 319	40.7~43.1
0.8~0.9	343~345	52~54	8.6~9.0	1 281~1 319	35.6~40.7

3　实验与分析

设计水冷型质子交换膜燃料电池交流阻抗特性实验和 *U-I* 输出特性实验，验证燃料电池发电效率模型的准确性和有效性，以及不同操作条件下的电堆输出性能。测试系统如图 5 所示，包括：质子交换膜燃料电池堆；美国 Perm Pure 的 FC200-780-7 MP(Air)/240-5 MP(H_2)膜管增湿器；湿度传感器，精度为±2%RH(0~80%RH)和±4%RH(80%~100% RH)；日本 KIKUSUI(菊水)KFM2150 燃料电池阻抗测试仪，在 10 mΩ 量程下的精度为±3%；PLZ2004 WB 直流电子负载，定功率模式精度为±(0.2%+0.2%FS)，定电流模式精度为±(0.05%+0.05%FS)；温度传感器 Pt-100，用于检测电堆工作温度，精度为±0.1 ℃。实验中电堆达到稳定状态时再采集数据，避免动态时数据波动产生误差。为确保实验数据的可重复性，每次实验需将电堆稳定运行一段时间，确保操作条件稳定达到设定值，并记录数据。各操作条件实验重复 3 次以上，对测量数据取平均作为最终结果。电堆性能和操作条件清单见表 3。

3.1　交流阻抗特性实验

利用直流电子负载进行定功率-定电流实验，不同电流密度下电化学阻抗实验结果如图 6 所示。图中，Z_{Re} 和 Z_{Im} 分别为电化学阻抗 Z 的实部和虚部。由 KFM2150 交流阻抗测试仪向电堆发射频率为 0.1 Hz~20 kHz 的交流电信号，获得不同操作条件下的实验数据(图 6 中点所示部分)；根据图 1 建立交流阻抗特性模型，获得仿真数据(图 6 中线所示部分)。交流阻抗特性模型可表示为

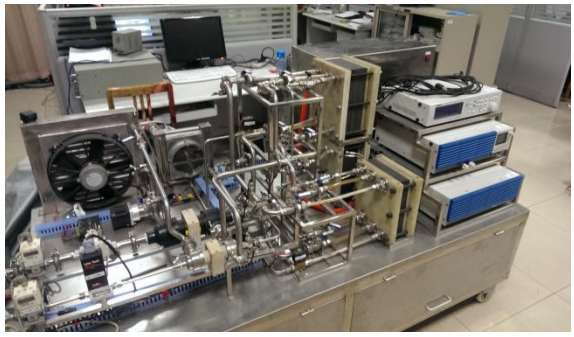


图 5　实验测试系统

Fig. 5 Experimental test system

表 3　电堆性能参数和操作条件清单

Tab. 3 List of stack performance parameters and operating conditions

参数	数值
电堆额定输出功率/kW	1.5
电堆额定电流/A	143
电堆额定电压/V	10.5
电堆输出电压范围/V	7.5~16.0
电堆输出电流范围/A	0~120
氢气进气压力/MPa	0.10~0.15
空气进气压力/MPa	0.10~0.15
单电池片有效反应面积/cm^2	180
单电池片数	16
电堆工作温度/K	293~350
电堆工作湿度/%	40~90

$$Z=R_m+\frac{R_f+R_d+j\omega R_f R_d C_d}{j\omega C_{dl}(R_f+R_d+R_f R_d j\omega C_d)+j\omega R_d C_d+1} \tag{21}$$

式中：ω 为角频率；C_d 为阳极双电层电容；C_{dl} 为阴极双电层电容。

阻抗谱的形状和位置反映电堆内部极化现象，其中高频响应与实轴的交点为 R_m(远离虚轴交点)，低频响应与实轴的交点为 R_{stack}(靠近虚轴交点)，阻抗谱图在实轴上截距对应 R_f+R_d，低频弧的大小反映 R_d，高频弧的大小反映 R_f，利用式(17)的电堆发电效率模型，计算电堆发电效率 η_{stack}。

由图 6 分析可知，低电流密度输出下(0 A·cm^{-2}< i≤0.3 A·cm^{-2})，R_f 和 R_m 是影响输出性能的主要因

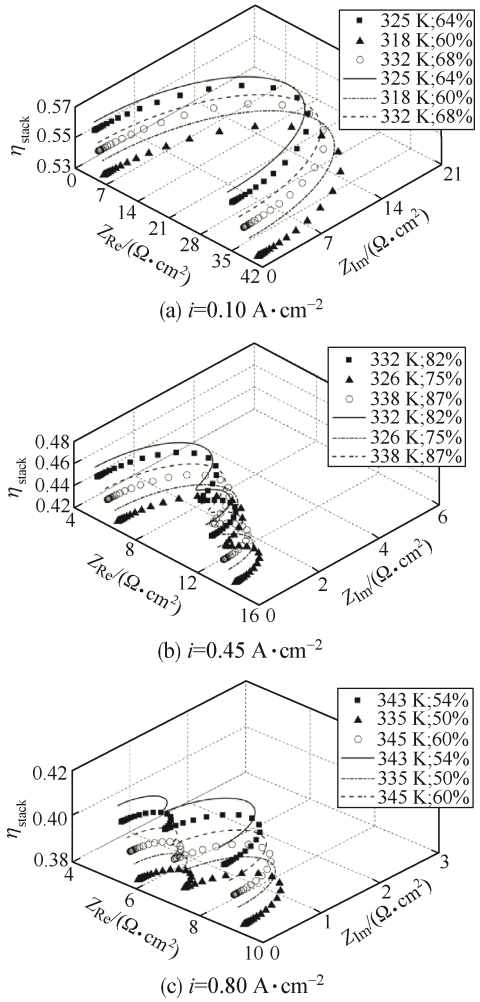


图 6 不同电流密度下电化学阻抗实验结果

Fig. 6 Experimental results of electrochemical impedance under different current densities

素；R_f对阻抗特性的影响占主导地位；优化状态下(320~329 K，60%~78%)，反应物由分子态向离子态转化的速率加快，R_f减小，质子传导速率提高，R_{stack} 减小 2.68~5.81 Ω·cm^2，对比正常状态发电效率提高 1.21%~2.62%。

中电流密度输出下(0.3 A·cm^{-2}<i≤0.6 A·cm^{-2})，电化学反应较为稳定；优化状态下(329~337 K，71%~84%)，催化剂活性增强，电导率增大，R_f 和 R_m 减小，R_{stack} 减小 0.78~1.52 Ω·cm^2，对比正常状态发电效率提高 1.58%~3.08%；相较于低电流密度输出，电化学反应程度加快，R_f减小，但 R_m 和 R_d 的增大速率小于 R_f 的减小速率，R_{stack} 整体减小；R_{stack} 的减小速率不及电流密度的增大速率，发电效率减小。

高电流密度输出下(0.6 A·cm^{-2}<i≤0.9 A·cm^{-2})，电化学反应剧烈，操作条件的变化对 R_f影响不大；优化状态下(337~345 K，52%~71%)，能减缓液态水堵塞流道和扩散层孔隙阻碍氧气向催化层扩散的问题，R_d 减小，R_{stack} 减小 0.31~0.62 Ω·cm^2，对比正常状态发电效率提高 1.14%~2.24%；相较于中电流密度输出，R_d 增大。综上所述，实验数据与仿真数据吻合，表明内阻特性模型能精确地模拟电堆特性；恒定电流密度输出下，优化状态下的阻抗图相较于其他状态更远离虚轴(R_{stack} 小)，发电效率提高。

3.2 *U-I* 输出特性实验

U-I 输出特性实验是与交流阻抗特性实验共同完成的，在获得最佳操作条件下的交流阻抗图谱的同时，检测电堆输出的电流和电压，绘制 *U-I* 输出特性曲线，结果如图 7 所示(线为仿真结果，点为实验结果)，其中仿真结果是由式(10)和式(17)仿真计算得到。由于不可逆电能损耗的影响，输出电压随电流密度的增大而减小，且在低、高电流密度段下降速度较快(*U-I* 曲线斜率绝对值大)，中电流密度段，输出电压几乎呈线性变化趋势(*U-I* 曲线斜率绝对值小)。低电流密度段下(0 A·cm^{-2}<i≤0.3 A·cm^{-2})，相较正常状态，优化状态下的 U_{st} 提高 0.11~0.60 V，发电效率提高 0.49%~2.70%；中电流密度段下(0.3 A·cm^{-2}<i≤0.6 A·cm^{-2})，相较正常状态，优化状态下的 U_{st} 提高 0.21~0.62 V，发电效率提高 0.94%~2.79%；高电流密度段下(0.6 A·cm^{-2}<i≤0.9 A·cm^{-2})，相较正常状态，优化状态下的 U_{st} 提高 0.41~0.61 V，发电效率提高 1.87%~2.78%。同一电流密度输出

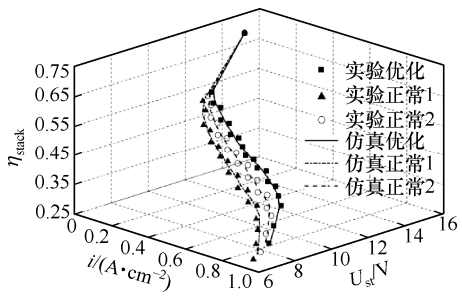


图 7 不同操作条件下 *U-I* 输出特性实验结果

Fig. 7 Experimental results of *U-I* output characteristics under different operating conditions

下，优化状态下的 *U-I* 曲线斜率绝对值小于非优化状态(曲线斜率绝对值小，则 R_{stack} 小)。正常状态 1、正常状态 2 下的电堆输出功率最大可达 1 155 W、1 234 W，发电效率分别为 36.1%、38.6%。优化状态下的输出性能相较于正常状态有所提高，且输出功率最大可达 1 399 W，发电效率为 40.1%。

4　结论

相较于传统方法，本文基于内阻特性，以堆内总内阻最小为原则优化操作条件，减少内阻功率损耗，改善电堆的输出性能，提高发电效率，提出 1 种电堆发电效率的建模与分析新方法。此外，所提方法重点关注电堆发电效率的计算与评价，未考虑辅助设备的能耗问题，因此与现有的燃料电池系统的发电效率研究成果相比，具有一定的局限性。本文结论如下。

(1)恒定电流密度输出下，燃料电池发电效率与直流总内阻直接相关，发电效率随着总内阻的减小而增大；随着电流密度的增大，直流总内阻呈现先减小后增大的趋势，发电效率逐渐减小。

(2)通过仿真和实验，获得总内阻最小条件下的电堆操作条件为：低电流密度段($0\ A{\cdot}cm^{-2}<i\leqslant 0.3\ A{\cdot}cm^{-2}$)最佳操作条件为(320~329 K；60%~78%)；中电流密度段($0.3\ A{\cdot}cm^{-2}<i\leqslant 0.6\ A{\cdot}cm^{-2}$)最佳操作条件为(329~337 K；71%~84%)；高电流密度段($0.6\ A{\cdot}cm^{-2}<i\leqslant 0.9\ A{\cdot}cm^{-2}$)最佳操作条件为(337~345 K；52%~71%)。

(3)在最佳操作条件下，电堆的输出性能和发电效率均有所提升，各电流密度下的总内阻 R_{stack} 均呈现不同程度的减小，减小范围为 1.52~5.81 $\Omega{\cdot}cm^2$，发电效率 η_{stack} 整体提高，提升范围为 1.14%~3.08%。

参考文献：

[1] 敖文杰, 陈家伟, 陈杰, 等. 燃料电池−锂电池混合供电系统的无源控制策略及参数设计方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(2): 580-594.
Ao Wenjie, Chen Jiawei, Chen Jie, et al. Passivity-based control strategy and parameter design method for fuel cell-lithium battery hybrid power supply system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 580-594. (in Chinese)

[2] 高锋阳, 高翾宇, 张浩然, 等. 全局与瞬时特性兼优的燃料电池有轨电车能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(21): 5923-5938.
Gao Fengyang, Gao Xuanyu, Zhang Haoran, et al. Management strategy for fuel cell trams with both global and transient characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(21): 5923-5938. (in Chinese)

[3] Huang Zipeng, Jian Qifei. Cooling efficiency optimazation on air-cooling PEMFC stack with thin vapor chambers [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 217: 119238.

[4] Bayat M, Özalp M. Effects of leak current density and doping level on energetic, exergetic and ecological performance of a high-temperature PEM fuel cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(60): 23212-23229.

[5] Li Yanju, Li Dongxu, Ma Zheshu, et al. Thermodynamic modeling and performance analysis of vehicular high-temperature proton exchange membrane fuel cell system [J]. Membranes, 2022, 12(1): 72.

[6] 高清振, 潘道远, 黄胜洲, 等. 氢燃料电池扩散层温度场演变研究[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 130-140.
Gao Qingzhen, Pan Daoyuan, Huang Shengzhou, et al. Study on temperature field evolution in hydrogen fuel cell diffusion layer [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 130-140. (in Chinese)

[7] 郭小凡, 李秉宇, 董增波, 等. 集成 MMC 与部分功率变换的氢燃料电池供电系统轻量化研究[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 161-173.
Guo Xiaofan, Li Bingyu, Dong Zengbo, et al. Research on lightweight of hydrogen fuel cell power supply system based on MMC and partial power conversion [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 161-173. (in Chinese)

[8] Kumar R, Subramanian K A. Enhancement of efficiency and power output of hydrogen fuelled proton exchange

membrane (PEM) fuel cell using oxygen enriched air [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(15): 6067-6075.

[9] Li Chengjie, Cheng Kunlin, Li Bo, et al. Feasibility study on supercritical fuel cooled solid oxide fuel cell stack with internal reforming [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50: 312-322.

[10] Yin Liangzhen, Li Qi, Breaz E, et al. Model guided extremum seeking and active disturbance rejection control for efficiency real-time optimization of PEMFC system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(6): 5905-5919.

[11] 王怡戈, 李航越, 吕泽伟, 等. 工业尺寸固体氧化物燃料电池高效及阳极安全运行条件研究[J]. 化学学报, 2022, 80(8): 1091-1101.
Wang Yige, Li Hangyue, Lü Zewei, et al. Study of operating conditions for high efficiency and anode safety of industrial-sizesolid oxide fuel cell [J]. Acta Chimica Sinica, 2022, 80(8): 1091-1101. (in Chinese)

[12] Chen Xi, Long Shichun, He Lingxuan, et al. Performance evaluation on thermodynamics-economy-environment of PEMFC vehicle power system under dynamic condition [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 269: 116082.

[13] 王茹, 沈永超, 卫东, 等. 基于直流内阻和交流阻抗特性的 PEMFC 水管理状态分析[J]. 化工学报, 2020, 71(7): 3247-3257.
Wang Ru, Shen Yongchao, Wei Dong, et al. Analysis of PEMFC water management status based on DC internal resistance and AC impedance characteristics [J]. CIESC-Journal, 2020, 71(7): 3247-3257. (in Chinese)

[14] Pandian M S, Anwari M, Husodo B Y, et al. Efficiency and economics analysis of proton exchange membrane fuel cell [C]// 2010 Conference Proceedings IPEC. Singapore, 2011: 875-880.

[15] Zhu Yanlong, Yousefi N. Optimal parameter identify-cation of PEMFC stacks using adaptive sparrow search algorithm [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(14): 9541-9552.

[16] Wilberforce T, Olabi A G, Rezk H, et al. Boosting the output power of PEM fuel cells by identifying best-operating conditions [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 270: 116205.



周唯逸

作者简介：

周唯逸(1986—)，男，高级工程师。研究方向：新能源发电系统的控制与故障诊断技术。E-mail：57590433@qq.com。

郑万俊(2000—)，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：质子交换膜燃料电池发电系统的控制与优化。E-mail：976528293@qq.com。

卫东(1969—)，男，博士，教授。研究方向：新能源发电系统检测、控制与故障诊断技术。E-mail：wd101@cjlu.edu.cn。

徐钰栋(1985—)，男，高级工程师。研究方向：新能源发电系统的控制与故障诊断技术。E-mail：56379404@qq.com。

(责任编辑：耿越)