

质子交换膜燃料电池树枝状仿生流场的结构优化与性能分析

陈紫萱, 尚渤海, 张拴羊*, 周煜轩, 徐帅豪, 田歆睿

宁波工程学院机械与汽车工程学院, 浙江 宁波

收稿日期: 2026年8月1日; 录用日期: 2026年8月25日; 发布日期: 2026年9月2日

摘 要

质子交换膜燃料电池(PEMFC)的性能提升受到反应物传输和热量不均以及水管理不足等问题的限制。为改善传统流场中存在的传质瓶颈, 本文借鉴自然界树枝结构特征, 提出了一种树枝状仿生流场(Tree-Like Flow Field, TLFF), 并通过调节分支数量构建了TLFF-1、TLFF-2和TLFF-3三种结构。系统研究了不同分支结构对阴极侧氧气传输、膜含水量、温度分布以及电化学性能的影响。结果表明, 随着分支数量增加, 树枝状流场能够有效扩展气体输运路径, 改善催化层界面的氧气分布均匀性, 并促进水分迁移和热量扩散。其中, TLFF-3凭借更加完善的多级分支网络结构, 实现了更优的气-水-热协同管理, 在高电流密度条件下表现出更强的传质能力。极化性能分析表明, TLFF-3的最大电流密度达到约 0.81 A/cm^2 , 峰值功率密度约为 0.50 W/cm^2 , 明显优于TLFF-1和TLFF-2。研究结果表明, 树枝状仿生流场能够有效提升PEMFC的综合性能, 为高性能双极板流场结构设计提供了新的优化方向。

关键词

质子交换膜燃料电池, 仿生流场, 氧气传输, 水管理, 数值模拟

Structural Optimization and Performance Analysis of Tree-Like Biomimetic Flow Field in Proton Exchange Membrane Fuel Cells

Zixuan Chen, Botao Shang, Shuanyang Zhang*, Yuxuan Zhou, Shuaihao Xu, Xinrui Tian

School of Mechanical and Automotive Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo Zhejiang

Received: August 1, 2026; accepted: August 25, 2026; published: September 2, 2026

*通讯作者。

文章引用: 陈紫萱, 尚渤海, 张拴羊, 周煜轩, 徐帅豪, 田歆睿. 质子交换膜燃料电池树枝状仿生流场的结构优化与性能分析[J]. 建模与仿真, 2026, 15(9): 13-21. DOI: 10.12677/mos.2026.159129

Abstract

The performance of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) is constrained by issues such as reactant transport limitations, uneven temperature distribution, and inadequate water management. To address the mass transfer bottlenecks inherent in conventional flow fields, this study proposes a tree-like biomimetic flow field (TLFF) inspired by natural branching structures; three configurations-TLFF-1, TLFF-2, and TLFF-3-were constructed by varying the number of branches. The effects of these branching structures on oxygen transport at the cathode, membrane water content, temperature distribution, and electrochemical performance were systematically investigated. The results demonstrate that increasing the number of branches allows the tree-like flow field to effectively expand gas transport pathways, improve the uniformity of oxygen distribution at the catalyst layer interface, and facilitate water migration and heat dissipation. Notably, TLFF-3 achieved superior synergistic management of gas, water, and heat due to its more sophisticated multi-level branching network, exhibiting enhanced mass transfer capabilities under high current density conditions. Polarization analysis revealed that TLFF-3 achieved a maximum current density of approximately 0.81 A/cm² and a peak power density of approximately 0.50 W/cm², significantly outperforming TLFF-1 and TLFF-2. These findings indicate that tree-like biomimetic flow fields can effectively enhance the overall performance of PEMFCs, offering a new optimization strategy for the design of high-performance bipolar plate flow field structures.

Keywords

Proton Exchange Membrane Fuel Cell, Biomimetic Flow Field, Oxygen Transport, Water Management, Numerical Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为应对气候变化并减少温室气体排放，能源体系正经历以低碳化为核心的深刻变革，推动能源结构向清洁化、高效化和可持续化方向发展[1][2]。氢能作为一种清洁、高效的能源载体，被认为是未来能源体系实现低碳转型的重要技术路径之一。在众多氢能利用技术中，质子交换膜燃料电池(PEMFC)具有启动速度快、能量转换效率高以及零排放等优势[3][4]。其核心组成部分包括双极板(BP)、气体扩散层(GDL)、微孔层(MPL)、催化剂层(CL)和质子交换膜(PEM) [5]。BP 作为 PEMFC 电堆的关键组件，承担导电、导热、导热、分隔和支撑等功能，其流场结构优化对改善反应物分布、强化水热管理以及提升电池性能具有重要作用。

目前，PEMFC 流场优化主要围绕传统流场改进和仿生流场设计展开。传统流场在高电流密度运行下易出现反应物分布不均和水管理不足等问题，而仿生流场通过模拟自然输运结构，为强化气体传输和优化水管理提供了新的解决方案。Lv 等人[6]结合胸腔结构特征与树枝状分支输运模式，提出了一种仿生混合流场(H 型)，并进一步融合交指型流场的优势，构建了一种新型复合流场(I 型)。研究结果表明，与 H 型流场相比，I 型流场的峰值功率密度提高了 22.6%。Zhang 等人[7]对蜂窝状仿生流场进行了研究，结果表明，其氧气分布均匀性优于平行流场和蛇形流场，压降较蛇形流场降低约 6.9 倍，电流密度分别提高 14.0%和 10.4%。Jiang 等人[8]将翼型挡板结构引入平行流场，通过优化挡板高度及旋转角度，提出了一

种仿生翼型流场(BAFF)。与平行流场相比,优化后的 BAFF 实现了净功率密度提高 10.3%、氧气分布均匀性提升 12.3%以及传质能力增强 35.8%。综上所述,仿生流场设计能够有效借鉴自然界中的高效运输机制,在改善反应物均匀分布、强化传质过程以及优化水热管理方面表现出明显优势,为高性能 PEMFC 流场结构开发提供了新的研究方向。

为了进一步优化流道结构,本研究受自然界树状输运网络高效传质特性的启发,提出了一种树枝状仿生流场结构,通过对各级流道直径进行差异化设置,实现流道结构的合理调控,进而改善反应气体分布均匀性,强化传质过程并促进液态水排出,从而提升 PEMFC 的综合性能。

2. 模型建立

2.1. 几何模型

本研究借鉴自然界树枝状结构的分叉特征,将单个树枝分叉结构定义为基本仿生单元,并通过在流场中心区域布置多个仿生单元构建树枝状仿生流场(Tree-Like Flow Field, TLFF)。该流场采用多级分支结构,由中心主流道沿径向逐级分叉形成一级、二级和三级子流道,实现流体由中心区域向周围区域的扩散输运,其整体结构如图 1 所示。具体几何参数和运行参数如表 1 所示。根据不同层级分支数量的组合方式,设计了三种不同结构的 TLFF,分别命名为 TLFF-1、TLFF-2 和 TLFF-3。

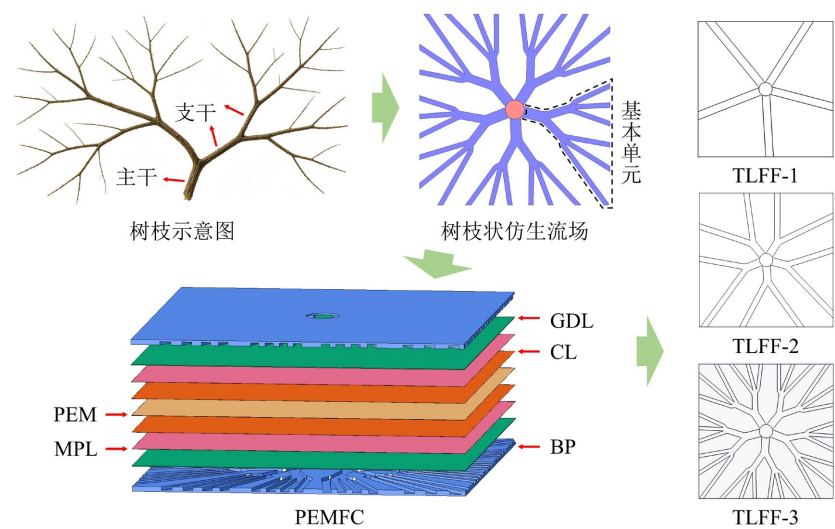


Figure 1. Tree structure and design of different tree-like flow fields
图 1. 树枝结构与不同新型树状流场设计

Table 1. Geometric parameters and operating parameters
表 1. 几何参数和运行参数

参数类别	参数	数值
几何参数	活化面积/cm ²	25
	入口直径/mm	5
	极板厚度/mm	0.75
	流场深度/mm	0.5
	GDL、MPL、CL、PEM 厚度/mm	0.1, 0.02, 0.01, 0.03
	GDL、MPL、CL 孔隙率	0.7, 0.6, 0.5

续表

运行参数	工作温度/K	353.15
	工作压力/Pa	101,325
	阳极/阴极化学计量比	1.5/2
	阳极/阴极相对湿度	50%/50%

2.2. 数学模型

为保证模型合理性并提高数值计算效率,本文在建模过程中对 PEMFC 内部传输过程进行了合理简化与假设。模型采用稳态运行条件,假设流道内反应气体为层流流动,并视为不可压缩理想气体;PEM 具有理想选择透过性,仅允许质子传输;同时,将多孔介质等效处理为均匀各向同性介质。在上述假设基础上,建立 PEMFC 数值模型,其控制方程如下[9] [10]:

连续性方程

$$\nabla(\varepsilon \rho \mathbf{u}) = S_m \quad (1)$$

式中, ε 为多孔介质孔隙率; ρ 为流体密度; $\mathbf{u}$ 为速度矢量; S_m 为质量源项。

动量守恒方程

$$\nabla(\varepsilon \rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\varepsilon \nabla p + \nabla(\varepsilon \mu \nabla \mathbf{u}) + S_u \quad (2)$$

式中, p 为压力; μ 为动力粘度; S_u 为动量源项。

能量守恒方程

$$\nabla(\varepsilon \rho c_p \mathbf{u} T) = \nabla(k_{\text{eff}} \nabla T) + S_q \quad (3)$$

式中, c_p 为定压比热容; T 为温度; k_{eff} 为有效热导率; S_q 为能量源项。

组分守恒方程

$$\nabla(\varepsilon \mathbf{u} C_k) = \nabla \cdot (D_k^{\text{eff}} \nabla C_k) + S_k \quad (4)$$

式中, k 为组分种类; C 为组分浓度; D_{eff} 为有效扩散系数; S_k 为组分源项。

电流守恒方程

$$\begin{aligned} \nabla(\sigma_s \nabla \varphi_s) + R_s &= 0 \\ \nabla(\sigma_m \nabla \varphi_m) + R_m &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, σ 为电导率; φ 为相电势; s 和 m 为固相和膜相; R 为电势源项。

水的传输和相变模型

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho_l \mathbf{u} s) = r_w \quad (6)$$

式中, l 为液态水; s 为水饱和度; r_w 为水饱和度源项。

2.3. 边界条件

入口均采用质量流量入口(mass flow inlet)边界条件;流道出口均设置为压力出口(pressure outlet)边界条件,出口压力设定为大气压。

$$m_a = \frac{\rho_g^a \lambda_a I_{\text{ref}} A_{\text{MEA}}}{2 F C_{\text{H}_2} A_{\text{in}}} \quad (7)$$

$$m_c = \frac{\rho_g^c \lambda_c I_{\text{ref}} A_{\text{MEA}}}{4 F C_{\text{O}_2} A_{\text{in}}} \quad (8)$$

式中, λ 为化学计量比; A_{MEA} 为膜电极面积; I_{ref} 为参考电流密度; A_{in} 为入口面积。

阳极集流体电势设置为 0 V 作为参考电势, 阴极集流体施加 0.6 V 工作电压, 以模拟实际运行状态。此外, 模型中其他固体壁面均采用无滑移边界条件。

3. 网格独立性和模型验证

为保证计算精度与计算效率之间的合理平衡, 本文对模型进行了网格无关性验证。构建了 6 组网格数量分别为 170,810、1,005,432、1,651,848、2,269,310、3,008,580 和 3,663,870 的计算模型, 并以 0.6 V 工作电压下平均电流密度作为评价指标进行对比分析。如图 2 所示, 当网格数量由 3,008,580 增加至 3,663,870 时, 电流密度变化率仅为 0.14%, 表明进一步加密网格对计算结果影响较小。因此, 综合考虑计算精度与计算成本, 后续模拟均采用 3,008,580 个单元的网格模型。此外, 本研究所采用的 PEMFC 数值模型已在前期工作中进行了模型验证, 相关验证过程及结果详见文献[11]。验证结果表明, 该模型具有较高的准确性和可靠性。

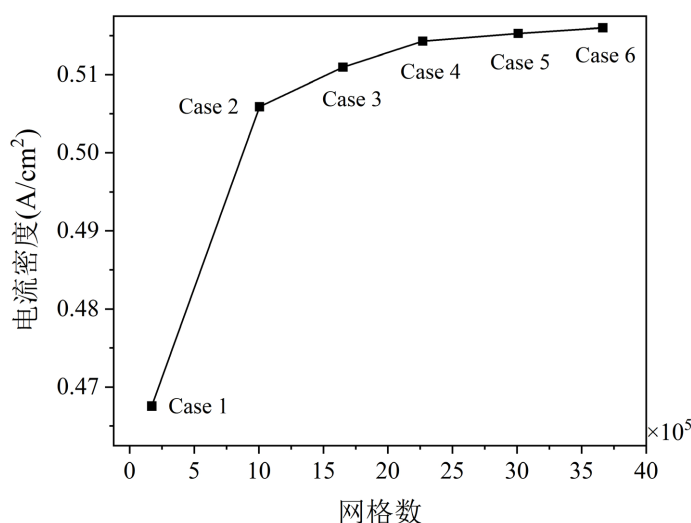


Figure 2. Grid independence
图 2. 网格无关性

4. 结果与讨论

4.1. 氧气摩尔浓度分布

图 3 为三种树枝状仿生流场在阴极 MPL 和 CL 界面处的氧气摩尔浓度分布。从图中可以明显看出, 对于 TLFF-1, 由于其分支层级较少, 氧气主要沿有限的运输通道向反应区域扩散, 导致中心区域及一级分支入口附近保持较高氧气浓度, 而远离主流道的区域氧气供应逐渐减弱, 形成较明显的浓度梯度。这表明简单的分支结构虽然能够实现基本的气体运输, 但受限于供气路径, 外围区域难以获得充分的反应气体补充, 容易造成局部传质限制。随着分支数量增加, TLFF-2 通过增加一级分支数量, 使氧气运输路径更加分散, 催化层界面的浓度梯度明显降低。更多分支通道的引入缩短了氧气由主流道向反应区域的传输距离, 使氧气能够覆盖更大的活性区域, 从而改善局部供氧不足现象。进一步增加分支数量后, TLFF-3 表现出更加均匀的氧气分布特征。由于更多次级分支通道的引入, 氧气能够快速扩散至整个反应区域, 催化层界面大部分区域维持较高氧气浓度, 仅在局部远离主流道区域出现轻微降低。这说明多级分支结构能够有效强化气体运输能力, 减小不同区域之间的供氧差异, 从而改善催化层表面的反应物分布。

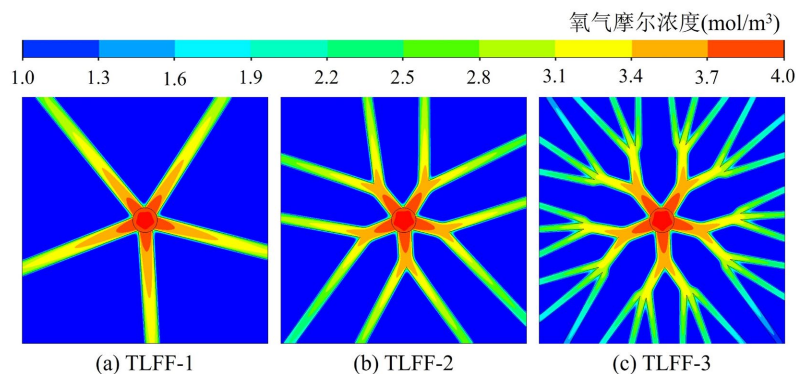


Figure 3. Distribution of oxygen molar concentration in three different flow fields

图 3. 三种不同流场的氧气摩尔浓度分布

综上所述, 树枝状仿生流场通过多级分支结构能够有效调控氧气输运路径, 提高阴极催化层界面的供氧能力。其中, TLFF-3 由于具有更加完善的分支网络结构, 使氧气能够更加均匀地输送至反应区域, 表现出更优的氧气分布特性, 为提升 PEMFC 电化学反应均匀性和输出性能提供了有利条件。

4.2. 膜水含量分布

图 4 为三种流场在膜区域的含水量分布情况。TLFF-1 的膜区域整体含水量较低, 且分布较为均匀, 仅在流道对应区域出现局部高含水区域。这主要是由于 TLFF-1 分支数量较少, 气体输运路径相对集中, 反应生成水主要在有限区域内积累, 同时较少的分支通道限制了液态水向外围区域的扩散与排出。因此, 虽然较低的膜含水量有利于降低局部水积聚风险, 但过低的含水状态可能导致膜水合不足, 增加质子传输阻力, 影响电池的 electrochemical performance。随着分支数量增加, TLFF-2 流场中膜含水量明显提高。相比 TLFF-1, TLFF-2 具有更多的分支通道, 能够扩大气体输运范围并改善反应物供应, 使催化层内电化学反应更加充分, 同时促进生成水在膜电极区域内的重新分布。从分布特征来看, 高含水区域主要沿分支流道呈连续分布, 而流道间区域仍保持较低含水状态, 表明该结构能够在一定程度上改善膜内水分分布均匀性。当分支数量增加至 TLFF-3 时, 膜区域含水量进一步升高。密集分支结构增强了反应气体供应, 使电化学反应更加充分, 同时促进了水在膜电极区域内的传输, 使整体含水量水平明显高于 TLFF-1 和 TLFF-2。同时, 流道附近形成连续高含水区域, 说明该结构增强了局部水传输能力。然而, 过多的分支通道也使膜区域整体含水量升高, 部分区域出现较高含水状态, 可能增加阴极侧水积聚风险。因此, 在提高膜水合程度的同时, 需要兼顾过量水排出的能力。

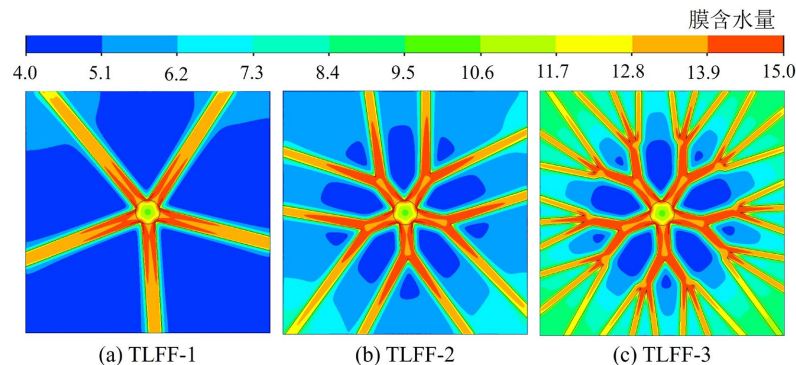


Figure 4. Distribution of membrane water content in three different flow fields

图 4. 三种不同流场的膜水含量分布

因此,膜内水分布并非含水量越高越有利,而需要维持适宜的水合水平。TLFF-1 由于分支数量较少,存在膜局部水合不足的问题; TLFF-3 虽然具有更强的水传输能力,但局部高含水区域增加,可能引发水淹的隐患; TLFF-2 在膜水合程度和水分布均匀性之间实现了较好的平衡,有利于维持适宜的质子传导环境并降低局部水淹风险。

4.3. 温度分布

图 5 为三种流场在阴极 MPL 和 CL 界面处的温度分布情况。TLFF-1 的温度主要沿主流道及一级分支通道呈带状分布,并在中心汇流区域形成明显热点,而流道间区域保持较低温度。由于 TLFF-1 分支数量较少,气体运输路径相对集中,导致热量主要集中在有限流道附近区域,温度分布表现出较明显的不均匀性。同时,在中心汇流区域由于反应物汇集以及电化学反应较强,形成局部高温区域。随着分支数量增加,TLFF-2 流场的温度分布均匀性得到改善。相比于 TLFF-1,更多的分支通道扩大了流体覆盖范围,使反应热能够通过更多流动路径及时传递至流道区域。可以观察到,高温区域由连续的条带状分布逐渐转变为沿分支通道分布的局部区域,整体温度梯度减弱。这表明多级分支结构能够增强流体扰动和热量传递能力,有助于降低局部热量积聚。进一步增加分支数量后,TLFF-3 表现出更加分散的温度分布特征。由于三级分支网络更加密集,流场覆盖区域进一步扩大,热量能够沿多个分支路径快速传递,使整体温度分布更加均匀。相比 TLFF-1 和 TLFF-2,TLFF-3 中的高温区域明显减少,且主要集中于分支连接位置。这说明增加分支数量能够有效缩短热量传输距离,提高流场对局部热量的调控能力。然而,由于分支结构增多,分支交汇区域的流动状态更加复杂,局部反应速率增强可能导致少量热点产生。

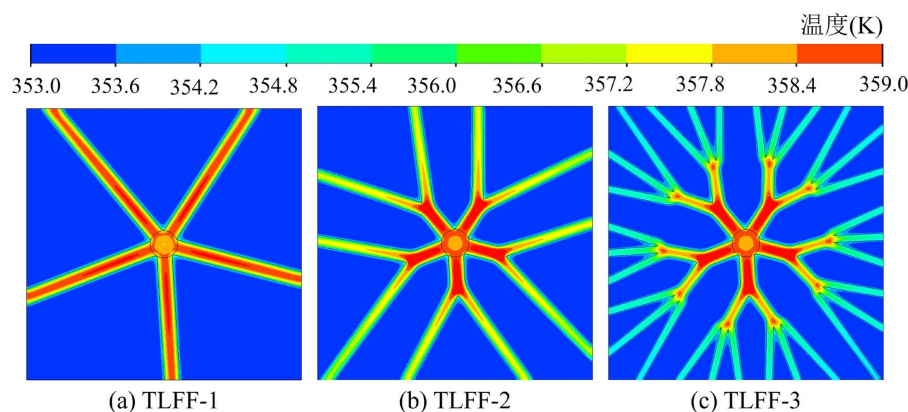


Figure 5. Distribution of temperature in three different flow fields

图 5. 三种不同流场的温度分布

总体来看,随着树枝状仿生流场分支数量增加,温度分布逐渐趋于均匀,局部高温区域得到抑制。其中,TLFF-3 具有更完善的分支网络结构,能够提供更广泛的流体覆盖范围和更强的热量传递能力,有利于降低 PEMFC 运行过程中的温度梯度,提高电池运行稳定性。

4.4. 极化曲线分析

图 6 为三种不同流场在不同工作电压条件下的极化曲线及功率密度变化。由图可知,随着工作电压降低,三种流场对应的电流密度逐渐增加,表现出典型的 PEMFC 输出特性。其中,TLFF-3 在整个电压范围内均获得了最高的电流密度和功率密度,其次为 TLFF-2,而 TLFF-1 的输出性能最低,表明分支结构优化能够有效提升电池的电化学性能。

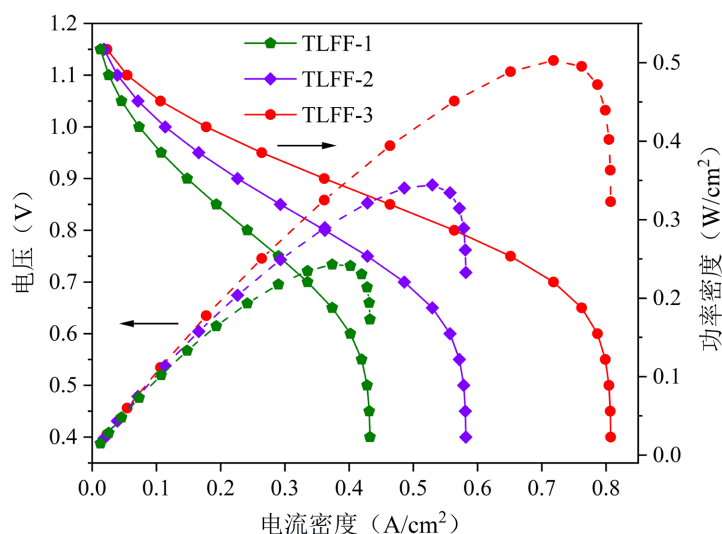


Figure 6. Polarization curves and power density curves of three different flow fields
图 6. 三种不同流场的极化曲线和功率密度曲线

在较高工作电压区域, 由于电流密度较低, 反应物消耗量有限, 三种流场均能够满足催化层的供氧需求, 因此不同结构之间的性能差异较小。随着工作电压进一步降低, 电流密度逐渐增加, 反应物消耗速率提高, 流场结构对传质过程的影响逐渐显现。TLFF-1 由于分支数量较少, 气体输运路径相对集中, 导致外围区域氧气补充能力不足。结合氧气浓度分布结果可知, TLFF-1 在远离主流道区域存在明显的氧气浓度降低现象, 使局部电化学反应受到限制, 进而导致高电流密度区域下性能衰减较快。相比之下, TLFF-2 通过增加一级分支数量, 提高了气体在活性区域内的分配能力, 使催化层界面的氧气浓度分布更加均匀。同时, 膜含水量分析表明, TLFF-2 能够促进反应生成水在膜电极区域内重新分布, 使膜保持适宜的水合状态, 有利于质子传导。因此, TLFF-2 相比 TLFF-1 具有更高的电流输出能力, 并在中高负载区域表现出更加稳定的性能。TLFF-3 表现出最佳的综合性能, 其最大电流密度约达到 0.81 A/cm^2 , 峰值功率密度约为 0.50 W/cm^2 , 明显高于 TLFF-1 和 TLFF-2。这主要归因于其更加完善的多级分支网络结构。一方面, 多级分支结构增加了氧气输运路径, 使反应气体能够更加均匀地供应至催化层区域, 降低了高负荷运行条件下的传质阻力; 另一方面, TLFF-3 较高的膜含水量表明其具有更强的水迁移能力, 可维持较好的膜水合状态, 提高质子传输效率。此外, 温度分布结果显示, TLFF-3 能够有效改善阴极侧温度均匀性, 减少局部热积累, 从而进一步促进电化学反应的稳定进行。

综上所述, 树枝状仿生流场能够通过优化流体输运路径改善 PEMFC 内部多物理场分布。其中, TLFF-3 凭借更加合理的分支网络结构, 实现了氧气供应、水分布和温度场之间的协同优化, 显著提升了高负荷条件下的电流输出能力, 验证了多级树枝状分支结构在提升 PEMFC 性能方面的有效性。

5. 结论

本文基于自然界树枝状输运网络结构特征, 构建了树枝状仿生流场(TLFF), 通过调控不同层级的分支数量研究了不同流场结构对 PEMFC 输出性能的影响, 主要结论如下:

1) TLFF 能够有效改善阴极侧反应物传输特性。随着分支数量增加, 气体输运路径逐渐增多, 氧气在催化层界面的分布均匀性得到提升。其中, TLFF-3 凭借多级分支网络结构, 有效降低了氧气浓度梯度, 提高了反应区域供氧能力。

2) 分支结构优化能够强化 PEMFC 内部气 - 水 - 热协同管理。相比 TLFF-1, TLFF-2 和 TLFF-3 均改

善了膜区域水合状态，并促进了热量扩散，降低了局部温度不均。其中，TLFF-3 表现出更优的温度均匀性和水传输能力，有助于维持稳定的电化学反应环境。

3) 极化性能分析表明，TLFF 结构能够显著提升燃料电池输出性能。TLFF-3 在不同工作电压下均表现出最高的电流密度，其最大电流密度达到约 0.81 A/cm^2 ，峰值功率密度约为 0.50 W/cm^2 。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划项目(202511058011)。

参考文献

- [1] Yang, Y., Xu, J., Ibrahim, A., Al-Shamma'a, A.A., Farh, H.M.H. and Hadjaissa, A. (2026) An Intelligent Control Strategy and Power Management for a Microgrid Electrical Vehicle Application Based on a Hybrid PV/PEMFC/Battery Renewable Energy System. *Renewable Energy*, **260**, Article ID: 125144. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.125144>
- [2] Bakır, H. and Ağbulut, Ü. (2026) Efficient Design, Operation and Control of Commercial Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) in Clean Energy Technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, **197**, Article ID: 152498. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.152498>
- [3] Sun, X., Xie, M., Fu, J., Zhou, F. and Liu, J. (2023) An Improved Neural Network Model for Predicting the Remaining Useful Life of Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, **48**, 25499-25511. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.219>
- [4] Zhang, T., Li, M.J., Ni, J.W. and Qian, C. (2024) Study of Dynamic Performance of PEMFC-Based CCHP System in a Data Center Based on Real-Time Load and a Novel Synergistic Control Method with Variable Working Conditions. *Energy*, **300**, Article ID: 131637. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131637>
- [5] Lee, J.H., Pak, S.B. and Park, I.S. (2026) Optimization of the Length-Width-Height Combination of Unit-Channel PEMFC for Maximizing Volumetric Power Density. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **172**, Article ID: 110345. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.110345>
- [6] Lv, J., Ge, W., Sun, W., Fang, H., Zhang, Y. and Liu, Q. (2026) Bio-Inspired Channel Configuration Derived from Morphological Traits of Thoracic Ribcage and Dendritic Branching for Bipolar Plates of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell. *Process Safety and Environmental Protection*, **207**, Article ID: 108374. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.108374>
- [7] Zhang, S., Liu, S., Xu, H., Liu, G. and Wang, K. (2022) Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells with Honeycomb-Like Flow Channel Design. *Energy*, **239**, Article ID: 122102. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122102>
- [8] Jiang, K., Fan, W., Zhao, T., Liu, M., Su, X., Luan, Y., *et al.* (2025) A Biomimetic Airfoil Flow Field to Improve Mass Transfer and Gas Distribution of PEMFC. *Renewable Energy*, **247**, Article ID: 123047. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123047>
- [9] 张拴羊, 徐洪涛, 张国宾, 等. 海豚状肋片仿生流场的 PEMFC 性能研究[J]. *汽车工程*, 2025, 47(10): 1953-1962.
- [10] 石自航, 杨亚晶, 魏衍举, 等. 质子交换膜燃料电池双极板流动结构仿生设计探究[J]. *西安交通大学学报*, 2025, 59(4): 70-80.
- [11] Chen, Z., Chen, D., Zhang, S., Yuan, Q., Wang, P., Deng, X., *et al.* (2026) Numerical Investigation on the Impacts of Different Rib-Structured Flow Fields on the Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell. *Journal of Power Sources*, **678**, Article ID: 240123. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2026.240123>