

# 燃料电池有望在印度取代柴油发电机

印度国家化学实验室的科学家将目光投向了一种低成本的燃料电池，期望能取代印度电信塔目前正在使用的性能不稳定的高污染柴油发电机。

作者 LEXI CARVER

近年来印度的发电和输电能力已得到了显著的改善，但仍有 2.1% 的能源缺口，并且约有 2 万个村庄没有纳入电网覆盖范围。不仅如此，通往城乡的电力供应仍旧不稳定。因此，柴油发电机被大范围地应用于分散式供电。柴油发电机(图 1 上)虽然价格低廉，但普遍效率低下，同时会对周边环境和居民的健康带来潜在危害。

为解决这一难题，印度国家化学实验室 (National Chemistry Laboratory, 简称 NCL) 联合印度科学与工业研究理事会 (Council of Scientific and Industrial Research, 简称 CSIR) 下属的两所实验室——中央电化学研究所 (Central Electrochemical Research Institute, 简称 CECRI) 和国家物理实验室 (National Physical Laboratory, 简称 NPL)，着手研究清洁、高效、可靠的发电技术为电信塔供电，并期望最终能够为建筑物提供能源。

质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, 简称 PEM 燃料电池或 PEMFC, 见图 1) 是一种兼顾了成本和污染问题的理想解决方案。如今许多应用中都能看到 PEM 燃料电池的身影，它正逐步替代传统的电力技术。燃料电池的优势明显：碳排放量小、

噪音低、燃料兼容性强，与其他可再生能源解决方案具有良好的互补性，因此适用于交通运输、住宅楼、办公室以及一些工业领域。PEM 燃料电池系统的总转换效率超过 30% (柴油发电机约为 22%~25%)，当使用纯氢气发电时，排放物只有水蒸气。

## » PEM 燃料电池的工作原理

PEM 燃料电池中包含一个膜电极组件 (membrane electrode assembly, 简称 MEA)，由气体扩散层、电极和聚合物电解质膜构成。在 MEA 内发生电化学反应，产生电能。

在单个 PEM 燃料电池中，氢气流向组件的阳极，在阳极催化剂的作用下分解为质子和电子。电子在通过电极中的碳纳米颗粒网络传导至另一侧的阴极之前，会先输出电流，为设备提供电能。与此同时，质子穿过质子交换膜到达阴极，空气中的氧气通过 MEA 中的气体扩散层 (gas diffusion layer, 简称 GDL) 到达阴极 (图 2)。

在阴极催化剂的活性位点上，质子与氧气及电子反应生成水；副产物只有水和热量。多个单体电池相互串联，便组成了 PEM 燃料电池堆 (图 3)。

燃料电池的输出功率和效率取决于多种因素，其中包括：阳极和阴极活性层



图 1. 上图：为印度的电信塔供电的柴油发电机。下图：PEM 燃料电池。

的催化活性、电极将气体扩散电极中的液态水输送至外部的能力、碳网络的电导率和孔隙率、反应气体流向催化剂的传输过程、PEM 的质子电导率以及双极板的电导率。

## » 寻找最高效的配置

为印度的电信塔选择 PEM 燃料电池的关键在于找到转化效率最高的最优结构。众所周知，对一个设计因素进行优化时，可能会降低另一个因素的效率。举例来说，增加气体扩散层的孔隙率更有利于氢气和空气自由地进入、水分自由地离开，但可能会降低电导率。

由 NCL 项目的首席科学家 Ashish Lele 博士领衔的专业团队针对不同的配置进行了模拟和分析，力求为印度电信塔使用的 PEM 燃料电池寻找最优性能组合。他表示：“我们希望进一步了解碳电极中发生的反应，研究电极中的反应气体和质子的传输过程如何影响总反

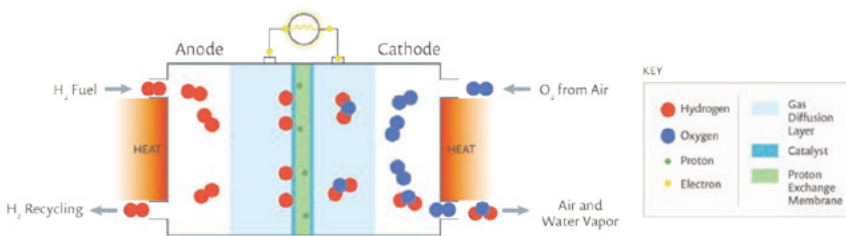


图 2. PEM 燃料电池的概念图。氢气进入阳极，在阳极催化剂的活性位点上发生反应，分解成质子和电子。电子经过有负载的外电路传导到阴极，质子穿过质子交换膜中的电解质迁移到阴极。PEM 可由可传导质子但不传导电子的固体聚合物制成。图注：Recycling – 循环；Heat – 热；Fuel – 燃料；Anode – 阳极；Cathode – 阴极；O<sub>2</sub> from Air – 空气中的氧气；Air and Water Vapor – 空气和水蒸汽；Hydrogen – 氢；Oxygen – 氧；Proton – 质子；Electron – 电子；Gas Diffusion Layer – 气体扩散层；Catalyst – 催化剂；Proton Exchange Membrane – 质子交换膜。

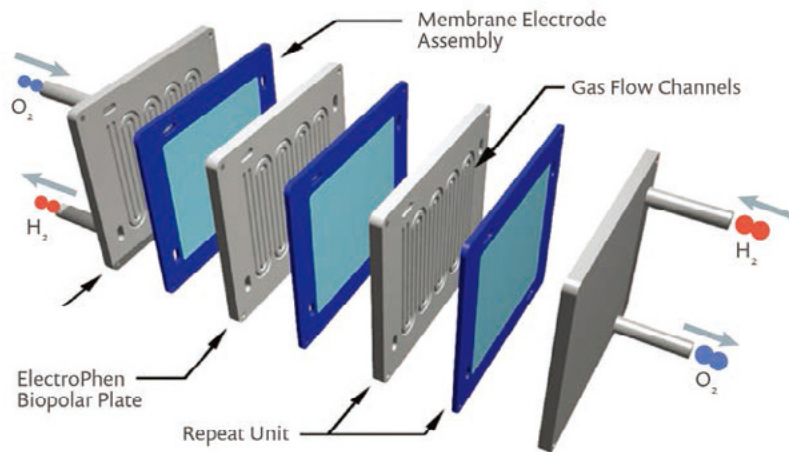


图 3. PEM 燃料电池堆的示例，它包含多层重复单元。图注：ElectroPhen Bipolar Plate – 双极板；Membrane Electrode Assembly – 膜电极组件；Gas Flow Channels – 气体流道；Repeat Unit – 重复单元

应速率。我们的最终目标是了解各类不同参数对 PEM 燃料电池整体性能的影响，这些参数包括工作条件、流场的几何形状和 MEA 结构等。”

Lele 和他的团队模拟了反应气体的对流、催化剂层中的伴随反应，以及质子在 PEM 燃料电池中的传导过程。在模拟过程中，他们使用了 COMSOL Multiphysics® 软件的化学反应建模和电化学阻抗谱 (EIS) 仿真功能。EIS 方法通过测量阻抗和频率响应来表征电化学系统。下一页中的短文简要介绍了 COMSOL® 软件的 EIS 仿真功能。

“COMSOL 软件出色的功能让我们能同时兼顾质量平衡、动量平衡、物质平衡和电荷平衡。”他解释说，“我们对

不同参数进行了灵敏度分析，例如流场形状等设计参数、背压和化学当量等操作参数，以及离聚物-碳比等结构参数，从而确定了各个参数对 PEM 燃料电池性能产生的影响。”在 COMSOL 软件的帮助下，他们能够深入理解上述变量对 PEM 燃料电池总功率输出的影响。

图 4 展示了化学当量 (即反应气体的实际流入量和产生给定电量所需的反应气体量之间的比率) 在平行流场条件下带来的影响。

Lele 团队研究了不同的流场类型，随后从中选定了效率最高的流道形状和布局。“我们分析了四种常见的流场类型：平行、蛇形、针状和叉指形。”他解释说，“COMSOL 的分析结果表明，最

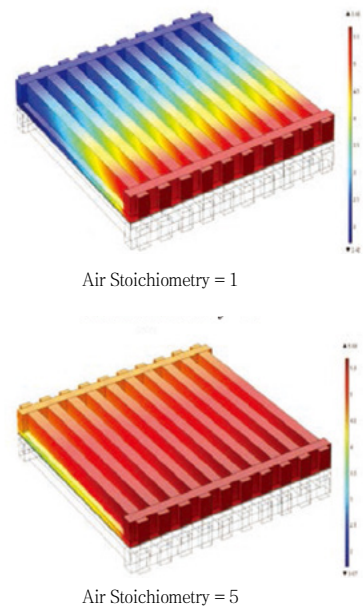
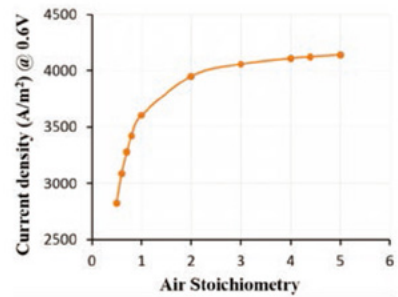


图 4. 绘图显示了不同空气化学当量对应的燃料电池产生的电流密度。当空气-燃料比为 5 时，电流输出不仅更大，而且更加统一。图注：Air Stoichiometry – 空气的化学当量

后一类(叉指形)流场具有特定的优势,更适合应用于高温 PEM 燃料电池。”

通过比较不同流动形状下的电流密度,团队进一步证实了叉指形流场是最佳选择(图 5)。具体来说,叉指形流场中的反应速率较快的原因在于电极和 GDL 中由压力差驱动的对流质量传递,而此类质量传递是其他三种流动类型所不具备的。叉指形流场中的反应速率越快,反应效率就越高,氢气和氧气的消耗量也随之增加。压力曲线(图 5)清晰地显示了两个连续通道间的压降与 GDL 内产生对流之间的关系。

### » 迈向绿色燃料之路

通过使用 COMSOL 对 PEM 燃料电池的配置进行分析,研究团队找到了最佳的流动模式、碳纤维层和气体输

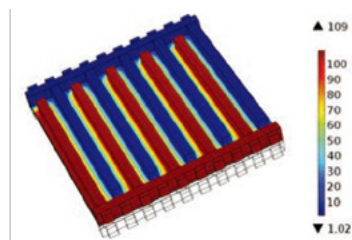
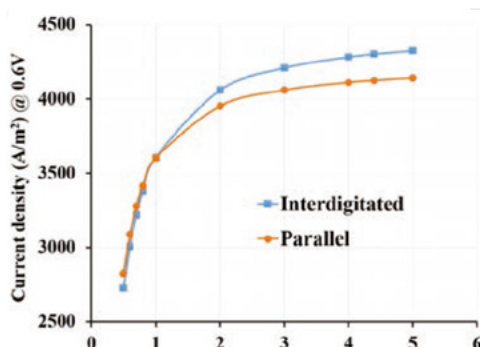


图 5. 左图:比较叉指形流场和平行流场设计中的燃料电池产生的平均电流密度与空气化学当量之间的函数关系。右图:叉指形流场设计中微流道的内部流体压力。

入水平,从而最大限度地提高了功率输出。Lele 总结道:“在 COMSOL 的帮助下,我们研究了所有相关变量对最终输出的影响。在运行了灵敏度分析后,就能够找出关键变量。”

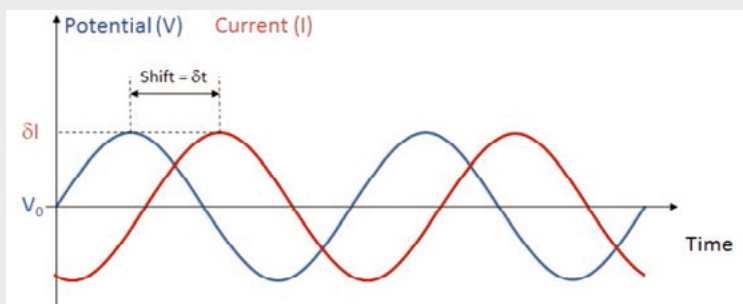
NCL 研究人员的下一步计划是将该

技术进行授权推广,并将 PEM 燃料电池进行大规模量产。他们非常期待能为印度电信塔提供更清洁、更可靠的能源服务。他们希望此项成果能为房屋建筑和交通网络稳定地提供绿色能源,推动整个国家迈向绿色燃料之路。🌀

## 使用 EIS 分析对系统特性进行虚拟研究

作者 ED FONTES

电化学阻抗谱 (Electrochemical Impedance Spectroscopy, 简称 EIS) 的原理非常简单:当系统的平均电压 ( $V_0$ ) 受到一个随时间变化的正弦扰动时,作为对电压扰动的响应,系统会产生一个相应的正弦电流(参考下图)。



电流响应可能会存在一个时间偏移 ( $\delta t$ ),这种偏移是由于某些原因造成的电流对电压正弦扰动的延迟响应。举例来说,在低频下,诸如质量传递之类的缓慢步骤可能会造成偏移,而快速步骤可以紧紧地“跟随”电压扰动。在高频下,缓慢步骤只能“看见”平均电压,但无法响应电压扰动。与之相比,快速的步骤(例如反应动力学)则会引起高频下的响应偏移。此外,响应的振幅 ( $\delta I$ ) 也会跟随频率而相

应地变化。

EIS 分析法通过扫描不同的频率,进而分离出具有不同时间常数的步骤。时间偏移和针对电压扰动的电流响应幅度可以通过复数阻抗进行表示,其中阻抗的虚部表示时间偏移,实部表示响应的比例。

阻抗响应有助于深入了解燃料电池的多种特性和反应过程。在高频下,电容、电化学反应和局部电阻等短时过程可以影响阻抗;另一方面,在低频下,孔隙电解质中的扩散等现象会对阻抗产生影响。频率扫描可以在不同的燃料电池极化下进行,由此研究不同负荷下的现象。将 EIS 建模和依靠实验数据的参数估算相结合,人们能够对不同负荷下系统的传递和反应特性进行精准地描述。🌀