DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.8.110 **中图分类号**：TM911.4 **文献标志码**：A

多堆燃料电池架构和功率管理策略综述

武小花[1,2]，毛建卫[1]，汪 鑫[1](中国电源学会学生会员)，
杨继斌[1,2](中国电源学会会员)，邓鹏毅[1,2]，李 颖[1]
(1.西华大学汽车测控与安全四川省重点实验室，成都 610039；2.宜宾西华大学研究院，宜宾 644000)

摘要：随着环境问题的日益严峻，燃料电池作为新能源发展的核心技术之一，已经成为实现碳减排和能源结构优化的关键技术。在满足大功率需求的应用场景中，多堆质子交换膜燃料电池系统(多堆燃料电池系统)展现出巨大的潜力。在此背景下，针对多堆燃料电池系统的架构(电气、流体和热)、功率管理策略、寿命、效率和氢耗等方面的研究状况和进展进行了详细的综述，并探讨分析多堆燃料电池系统与单堆燃料电池系统在寿命、效率和氢耗等关键指标上的差异，旨在彰显多堆燃料电池系统的显著优势。

关键词：多堆燃料电池系统；架构；功率管理策略；寿命；效率；氢耗

Review of Multi-stack Fuel Cell Architectures and Power Management Strategies

WU Xiaohua[1,2], MAO Jianwei[1], WANG Xin[1], *Student Member*, *CPSS*, YANG Jibin[1,2], *Member*, *CPSS*, DENG Pengyi[1,2], LI Ying[1]
(1. Vehicle Measurement Control and Safety Key Laboratory of Sichuan Province, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. Yibin Research Institute, Xihua University, Yibin 644000, China)

Abstract: As the environmental problems escalate, fuel cells have emerged as a pivotal technology in the development of new energy for reducing carbon emissions and optimizing energy structures. Under the application scenarios demanding high power, multi-stack proton exchange membrane fuel cell systems (multi-stack fuel cell systems) demonstrate significant potential. In this context, the research status and progress of multi-stack fuel cell systems are reviewed in detail, focusing on their electrical, fluid and thermal, power management strategies, lifetime, efficiency and hydrogen consumption. In addition, the differences in key indicators such as lifetime, efficiency and hydrogen consumption between multi- and single-stack fuel cell systems are also discussed, with an aim of highlighting the substantial advantages of multi-stack fuel cell systems.

Keywords: Multi-stack fuel cell system; architecture; power management strategy; lifetime; efficiency; hydrogen consumption

随着人类社会的快速发展，能源消耗持续增长，碳排放和全球变暖问题日益严重[1-3]。氢能作为一种新型可再生能源，具有广阔的应用前景。氢燃料电池因环保性能优、可持续性强、能量转换效率较高等优点备受关注[4-6]。然而，燃料电池目前仍面临一些技术挑战，如成本昂贵、电堆老化快、输出稳定性能差及动态响应速度慢等问题，导致

收稿日期：2024-11-15；**修回日期**：2025-01-11；**录用日期**：2025-01-21；**网络首发日期**：2025-03-07
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52407254)；四川省科技计划资助项目(2024YFHZ0314，2024ZDZX0035，2025ZNSFSC0427)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52407254; Science and Technology Department of Sichuan Province under the grants 2024YFHZ0314, 2024ZDZX0035 and 2025ZNSFSC0427

单堆燃料电池系统难以满足大功率应用场景的需求[7]。因此，有学者提出了一种由几套低功率单堆燃料电池组成的多堆燃料电池系统，以解决这些问题。该系统不仅能实现大功率运行，还能有效提高电堆耐久性和系统稳定性[8]。

本文综述了当前学者对多堆燃料电池系统电气、流体、热架构及功率管理策略的研究，并梳理了多堆燃料电池系统相对于单堆燃料电池系统在寿命、效率、氢耗方面的性能优势。

1　多堆燃料电池系统的架构

多堆燃料电池系统主要由电气、流体和热 3 种架构组成，这些架构及其辅助设备在系统的控制层面上紧密相连[9]。首先，在电气架构中，单个燃料电池可以直接连接到直流母线或通过 DC-DC 变换器连接，以确保多堆燃料电池系统中不同电堆输出合适的操作电压。若一个或多个电堆发生故障，系统可控制停用或绕过故障电堆，从而保证剩余电堆的正常运行[10]。其次，流体架构负责提供氢气和氧气。最后，热架构控制每个电堆的温度，确保多堆燃料电池系统在不同工况下达到最佳性能。随着系统中燃料电池数量的增加，所采用的架构也会有所不同。不同电气和流体架构结合不同的变换器，满足了燃料电池不同级别的控制和性能要求。根据所选体系结构，启用降级模式操作可使系统更可靠。如果系统由多个电堆组成，那么堆叠的电气、流体和热架构可以通过不同的架构连接。但使用分段堆叠创建的系统主要受其电气架构变化的影响，因为分段堆叠设计决定了流体和热架构[9]。下面分别介绍当前学者对 3 种不同架构的研究。

1.1 电气架构

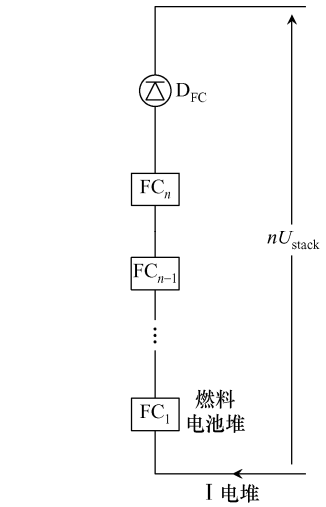
多堆燃料电池系统的电气架构可以根据是否配备 DC-DC 变换器分为无 DC-DC 变换器的电气架构和有 DC-DC 变换器的电气架构。

1.1.1　无 DC-DC 变换器的多堆燃料电池系统

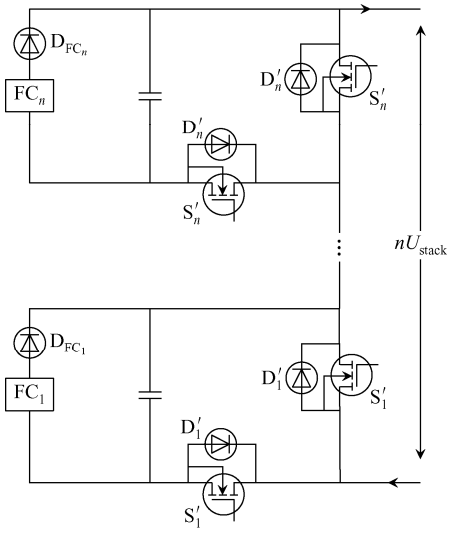
无 DC-DC 变换器的多堆燃料电池系统可以显著降低成本和效率损失，特别适用于质量受限的应用场景[11]。该系统的电气架构可分为串联电气架构和并联电气架构。

(1)串联电气架构。燃料电池串联是将多个电堆通过链式连接，以达到所需功率。可通过增减电堆数量，控制输入电压。电堆之间的串联可以分为 2 种架构：电堆直接串联，如图 1(a)所示；模块化串联，如图 1(b)所示[12]。模块化串联通过 2 组开关实现功率共享和电堆隔离。其中，开关 S'_n 的状态影响电堆的抑制，电堆的耦合则与开关 S_n 的状态有关。

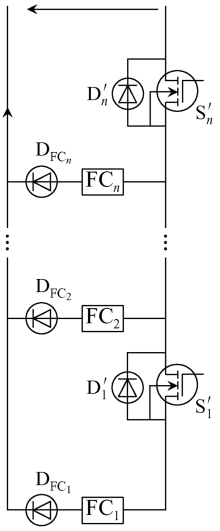
(2)并联电气架构。并联架构的负载可由每个电堆共享，开关 S'_n 可以控制电堆的启动/停止，如图 1(c)所示[12]。需要注意的是，并联架构中所有电



(a) 电堆直接串联



(b) 模块化串联



(c) 并联

图 1 无 DC-DC 变换器的多堆燃料电池系统的电气架构

Fig. 1 Electrical architectures for multi-stack fuel cell system without DC-DC converter

堆的电压必须保持相等。文献[11]探究了无 DC-DC 变换器的串联和并联架构下，多堆燃料电池系统的动态和瞬态特性、功率自适应分配以及输出稳定性。

1.1.2 有 DC-DC 变换器的多堆燃料电池系统

目前诸多学者对有 DC-DC 变换器的电气架构开展了研究。带有 DC-DC 变换器的多个电堆有 4 种耦合方式，如图 2 所示。为使方案清晰，使用理想电压源表示电堆，根据各电堆(经 DC-DC 转换后)与直流母线的关系，4 种耦合方式分为并联、模块化串联、串并联和串联[12]。带有 DC-DC 变换器的多堆燃料电池系统具有扩展不同结构的可能性，提高了系统的容错能力。表 1 展示了 4 种有 DC-DC 变换器的多堆燃料电池系统电气架构的优、缺点。近年来，基于模块化多电平变换器 MMC(modular multilevel converter)的部分功率变换架构逐步兴起。郭小凡等[13]将 MMC 与部分功率变换电路结合，提出一种适用于大功率多堆燃料电池的新型电气架构，该架构兼顾串联低损耗与并联高容错的优势，进一步丰富了多堆燃料电池变换架构体系。

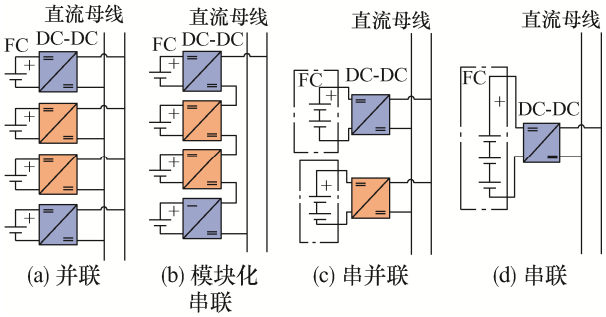


图 2 带有 DC-DC 变换器的 4 种耦合方式

Fig. 2 Four types of coupling with DC-DC converter

1.2 流体架构

流体架构指分别向每个电堆的阴极提供空气、向阳极提供氢气的结构。Kolli[17]介绍了 3 种在电堆阴极入口放置空压机的流体架构 A、B、C，如图 3 所示。

表 1 有 DC-DC 变换器的多堆燃料电池系统电气架构的优、缺点

Tab. 1 Advantages and disadvantages of electrical architectures for multi-stack fuel cell system with DC-DC converter

架构类型	优点	缺点
并联	提供了冗余，可对每个电堆进行单独控制[9,12,14-18]；系统可在降级模式下运行[12,16,18]。	对开关和被动储能组件有更高的应力要求[9,12,16,18]。
模块化串联	全局电压在不同电堆之间分配，使 DC-DC 变换器开关上的应力较低[9,12,18]。	一个电堆发生故障会导致整个系统故障[9,14,18]。
串并联	与并联架构相比，其升压比更小[9,18]；支持不同串联之间的能力共享，并通过并联带来更多冗余[9,18]；一个电堆发生故障不会导致整个系统故障，是 4 种方案中最可靠的[14]。	负载功率在电堆之间共享，且它对系统中每个电堆的寿命和系统总体效率的影响导致配置的复杂性增加，设计难度增大[14]；与并行架构相比，该架构提供的单个功率控制能力较低[16]。
串联	采用低增益 DC-DC 变换器，使其开关上的应力较小[9,16,18]；该架构最为简单与廉价[14,18]。	不能单独控制每个电堆，且一个电堆发生故障会导致整个系统故障[9,12,14,16,18]。

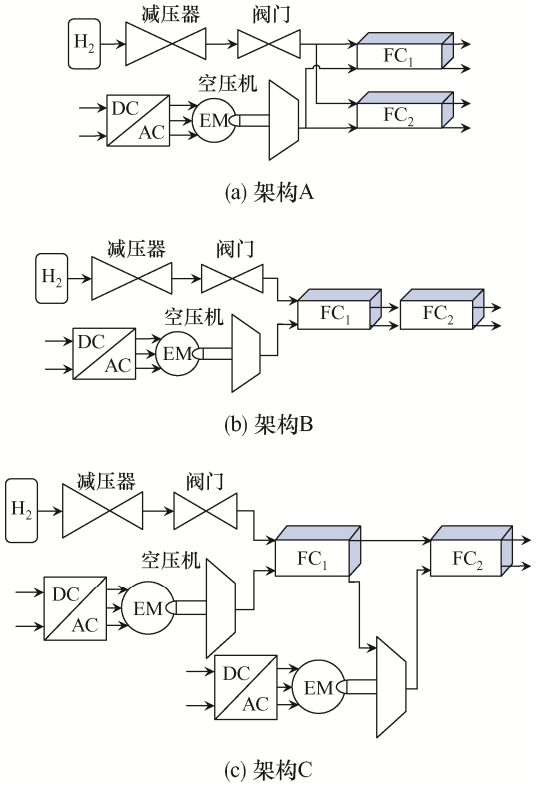


图 3　多堆燃料电池系统流体架构

Fig. 3 Fluid architectures for multi-stack fuel cell system

架构 A：并联排列，该配置有 1 个空压机。氢气供给系统包括 1 个储氢装置 H_2、减压器和阀门，同时为 2 个电堆提供反应物。

架构 B：串联排列，氢气供给系统与架构 A 类似。不同之处在于反应物的供给只提供给第 1 个电堆。每经过 1 个电堆均会产生一定的压降，因此需提高空压机的功率，这导致了空压机的消耗增多，降低了系统净输出效率。

架构 C：串并联排列，氢气供给系统只在第 1 个电堆的阳极入口。为解决每个电堆产生的压降，在每个电堆的阴极入口处增加空压机进行补偿。这减少了第 1 个空压机的消耗，但随着空压机数量的增加，系统体积增大，成本和复杂性也会增加。

流体架构面临的一些常见挑战包括电流密度分布不均，进出口压力变化产生的功率损失，以及对系统输出性能的不利影响。为解决这些问题，Qi 等[19]对流体架构进行优化，提出了 2 种新型流体架构：多 U 型与分配多 U 型。模拟和实验结果表明，与传统的平行流体架构和蛇形流体架构相比，分配多 U 型架构具有显著优势，能有效降低进出口压力，缩小膜电极中的局部低氧和无氧区域，从而提高电流密度的均匀性。Zou 等[20]建立了三维多相质子交换膜燃料电池 PEMFC(proton exchange membrane fuel cell)模型开展性能估算，并基于人工神经网络对电池结构进行优化。结果表明，优化后的 PEMFC 在净功率密度、氧气分布均匀性方面均得到明显提升，同时排水能力也得到有效改善。研究发现，流场的几何形状对燃料电池内反应气体的分布、传质和压降等因素具有显著影响。Zhou 等[21]则利用机器学习的方法预测流量密度，从而实现了对不同几何形状流体架构燃料电池性能的快速准确预测。这些研究为多堆燃料电池系统流体架构的设计提供了最新进展和优化策略，有助于提高燃料电池的性能。

1.3 热架构

热架构一般由内循环和外循环 2 部分组成。其中，内循环是与双极板和散热器接触的冷却水系统，而外循环则由暖气片和空气通风构成[15]。内循环回路负责在低温启动或运行阶段对燃料电池进行加热，外循环回路则负责在高温条件下散热。文献[22]中，燃料电池的最佳工作温度一般在 60~80 ℃之间，上海神力科技有限公司生产的燃料电池电堆的最佳温度约为 70 ℃。过高或过低的温度均会影响电池性能，因此需要有效的热管理控制策略来保持最佳温度范围。为此，文献[23]采用比例−积分−微分控制 PID(proportional integral derivative control)算法调节 2 个水泵的转速，以控制冷却液回路和次级流体回路的流量。当电堆冷却液入口温度超过 60 ℃时，水泵加速运行以降低温度；当电堆冷却液出口与入口温度的差值超过 10 ℃时，次级流体回路水泵加速运行，通过换热器减小温差。散热器主要通过调节散热风扇的转速来控制温度，传感器监测电堆入口温度的变化。当电堆温度低于 55 ℃时，节温器关闭，散热器不工作；当电堆温度超过 65 ℃时，节温器逐渐开启至最大开度，散热器随即启动并以较低功率运行[23]。

对于串联型热架构，如图 4(a)所示，冷却液依

次冷却每个电堆，随着冷却电堆数量的增加，冷却液温度逐渐升高。因此，需要控制冷却液流量和散热器功率，以确保每个电堆的工作温度；对于并联型热架构，如图 4(b)所示，冷却液同时冷却每个电堆。如果所有电堆相同且运行条件一致，则每个电堆的温度变化应相同。通过测量进风口与出风口的温度差，可以快速诊断电堆是否缺乏冷却[15]。Gao 等[24]的研究表明，与分布式热架构相比，集成式热架构在热管理性能上并没有显著优势，但在结构设计上具有一定优势。

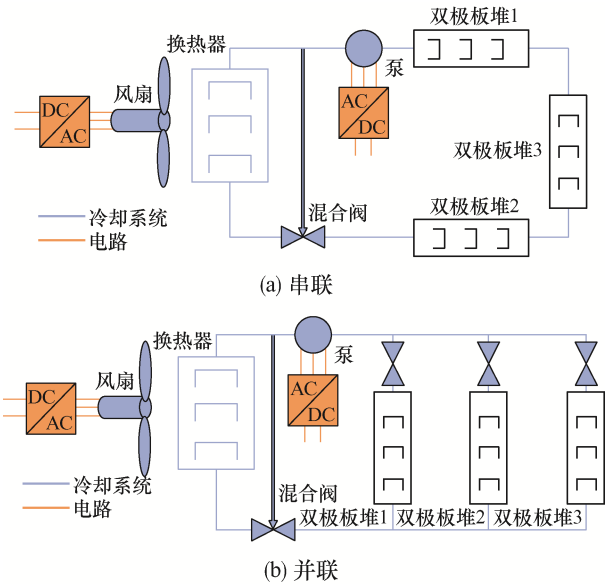


图 4 多堆燃料电池系统热架构冷却系统

Fig. 4 Cooling systems in thermal architectures for multi-stack fuel cell system

2 多堆燃料电池系统的功率管理策略

在多堆燃料电池系统中，运用功率管理策略的目的主要是控制能量流动。如果功率管理策略能有效地将功率分配给燃料电池和动力电池，即可延长系统的使用寿命，提高其效率[25]。

由于内部和外部因素的不同，每个 PEMFC 的性能表现各异。Macias 等[26]比较了平均分配与串级链分配 2 种功率分配策略的特点，并提出了旋转串级链分配，该策略以燃料电池的需求功率、荷电状态 SOC(state of charge)、最大功率和最高效率为目标分配燃料电池与动力电池之间的功率，使每个 PEMFC 在最高效率和最大功率范围内运行，从而确保每个电堆的退化程度相等。此外，在自适应功率策略和在线识别方法辅助下，进一步使电堆在高效区运行。文献[27-28]提出了一种基于遗忘因子递推最小二乘在线辨识的功率分配策略；高锋阳等[29]面向燃料电池有轨电车混合动力系统，结合马尔可夫链蒙特卡洛工况预测模型与燃料电池-动力电池寿命衰减模型设计双层能量管理架构，综合考量氢耗与动力源老化程度开展多目标协同优化。所提策略可平抑燃料电池、动力电池的功率波动，有效均衡 2 类电源的衰减速率，同步提升燃料经济性与系统运行效率，丰富了混合电源系统多目标功率分配体系。Ghaderi 等[30]为实现有效功率分配，提出了一种基于博弈论的在线识别方法；Macias Fernandez 等[31]设计了自适应状态机策略，相较于平均分配和串级链分配，改善了系统的整体性能；Wang 等[32]提出了一种评估电堆性能退化程度的方法，用来确保性能的一致性，从而延长使用寿命，并采用虚拟下垂控制法实现电堆的功率分配；李奇等[33]针对延长多堆燃料电池系统使用寿命，提出了一种考虑电堆老化的自适应功率分配方法；徐冰等[34]围绕 PEMFC 寿命预测问题，将电堆老化解构为全局容量衰减、动态电压波动、停机恢复 3 类特征分量，结合混合滤波算法实现了单体电堆剩余使用寿命的高精度预测。该研究细化了燃料电池老化状态辨识方法，可为多堆燃料电池系统全周期耐久性优化与负荷均衡分配提供理论参考。侯欣[35]为重型载货车设计了一种具有多种工作模式的功率分配策略，该策略结合了双堆燃料电池系统的 DC-DC 变换器控制规律和基于模式切换的功率分配策略，从而实现了在负载变化时提高动力系统的效率，降低氢耗；蔡良东等[36]以减少多堆燃料电池系统氢耗量和提高耐久性为目标，通过海鸥优化算法与无源控制相结合，实时优化每个电堆的输出功率以及系统的氢耗量与耐久性；Zhang 等[37]提出了一种双层多模式功率管理策略：在第一层通过平滑多堆燃料电池系统功率需求来确定其与电池之间

输出功率的分配；在第二层分析了多堆燃料电池系统在正常模式和经济模式下，电堆输出功率的优化分配方法，以提高系统的效率，延长剩余使用寿命 RUL(remaining useful life)，降低生命周期成本 LCC (life cycle cost)。

综上所述，多堆燃料电池系统的功率管理策略包括平均分配、串级链分配、旋转串级链分配、自适应状态机策略、在线识别功率分配策略等，其中多数策略采用双层结构设计。

3　多堆燃料电池系统的优势

目前，燃料电池在技术上仍存在诸多限制，如大功率车辆的需求难以满足、大功率区间较窄、效率较低以及耐久性和可靠性较差，这些因素限制了其在交通领域的广泛应用。为此，多堆燃料电池系统被认为是解决这些限制的主要方法之一。在大功率应用中，多堆燃料电池系统相较于单堆燃料电池系统在效率和燃料消耗方面表现更佳，能够提供更高的输出功率和平均效率[32]。图 5 为某双堆燃料电池系统效率最优分配下的效率曲线与等功率大小下单堆燃料电池系统效率曲线的对比。本节针对多堆燃料电池系统的寿命、效率、氢耗等方面，总结了当前关于多堆燃料电池系统的研究进展。

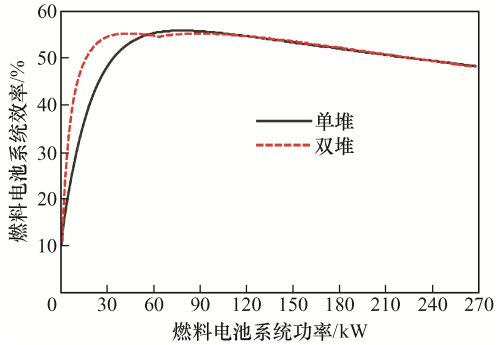


图 5　双堆燃料电池与单堆燃料电池效率对比曲线

Fig. 5 Comparison curves of efficiency between multi- and single-stack fuel cells

3.1　寿命

有文献表明，单堆燃料电池较短的使用寿命是促使研究人员转向多堆燃料电池系统的主要原因。Abuzant 等[14]发现多堆燃料电池系统的使用寿命较长，这增加了其商业推广的潜力。此外，多堆燃料电池系统具备单堆燃料电池系统没有的冗余，这种冗余可用于降级模式操作、应对老化或减小燃料消耗。文献[32-33,35-36]中提出的虚拟下垂控制法、自适应功率分配法、基于模式切换的功率分配策略和海鸥优化算法等功率分配优化方法，对提高多堆燃料电池系统的耐久性、延长电池的使用寿命具有重要参考价值。周苏等[38]提出，在满足相同电功率负载工况需求的情况下，与单堆燃料电池系统相比，多堆燃料电池系统的燃料经济性可提高约 4%，系统寿命性能也有所改善。

部分学者也对多堆燃料电池系统寿命的影响因素进行了研究。Zhou 等[39]发现，与单堆燃料电池系统相比，多堆燃料电池系统具有更高的效率和更长的 RUL，随着多堆燃料电池系统电堆数量的增加，其效率和 RUL 将进一步提高。Zuo 等[40]针对三堆燃料电池系统，考虑其电堆之间的切换与负载分配，提出了一种基于事件的决策策略，旨在削弱由负载幅值变化引起的劣化现象；焦道宽等[41]为了改善多堆燃料电池系统整体衰减过快的问题，提出了一种不均匀功率分配方法，在多工况条件下避免单个电堆快速衰减，从而维持系统的平衡并延长整个系统的 RUL；赵嘉鹏[42]则以最小化燃料电池堆损耗成本、氢耗，最大化电效率和 RUL 为目标，提出了电堆优化分配策略，使各电堆的工作负荷更加平衡，进一步延长了电堆 RUL；裴冯来等[43]构建多堆燃料电池系统 LCC 优化模型，综合考虑电堆购置、老化损耗及氢气消耗等多项成本要素，求解工况下各电堆的最优功率分配。仿真结果表明，该方法可均衡各电堆衰减速率、延长系统整体 RUL，同时降低 LCC，为多堆燃料电池系统电堆间功率分配提供了兼顾耐久性与经济性的优化思路。

3.2　效率

多堆燃料电池系统因其独有的冗余性，在提高系统效率的同时确保了可靠性，因此被业界广泛认为是适用于大功率应用场景的燃料电池解决方案。

Dépature 等[15]提出了一种面向控制的多堆燃

料电池系统仿真模型，相较于单堆燃料电池系统，该模型在性能、效率和系统集成度方面均有显著提高；Palma 等[10]提出了一种由 DC-DC 变换器供电的模块化燃料电池系统，当电堆中存在性能不良的电池时，该系统能够避免加热不均和电池电压变化，从而形成一个容错系统，进一步提高多堆燃料电池系统效率。该效率 η 的计算式[26]为

$$\eta=\frac{U_{\mathrm{FC}}I_{\mathrm{FC}}}{L_{\mathrm{HV}}F_{\mathrm{low,H_2}}} \tag{1}$$

式中：U_{FC} 为电堆电压；I_{FC} 为电堆电流；L_{HV} 为氢气的低热值；$F_{\mathrm{low,H_2}}$ 为氢气流量。

De Bernardinis 等[12]提出了一种原始功率变换器架构，该架构利用高频平面变压器实现 2 个电堆的并联和串联磁耦合，并通过 DC-DC 变换器接入直流母线。台架试验表明，该结构效率较高。Cardozo 等[16]基于链式分配，分别用 η_{average} 和 $\eta(P_{\mathrm{tot}})$ 表示按电堆启动顺序得到的平均效率和最优分配方法的效率，其表达式分别为

$$\eta_{\mathrm{average}}=\frac{1}{P_{\max}}\int_{P=0}^{P_{\max}}\eta(P)\mathrm{d}P \tag{2}$$

$$\eta(P_{\mathrm{tot}})=\frac{P_{\mathrm{tot}}}{L_{\mathrm{HV}}\cdot F_{\mathrm{low,H_2}}(P_{\mathrm{FC_1}}\cdots P_{\mathrm{FC_4}})} \tag{3}$$

式中：$P_{\max}$ 为系统最大功率；P_{tot} 为系统总输出功率；$P_{\mathrm{FC_1}}$ 为多堆燃料电池系统电堆 1 的功率。

部分学者以优化多堆燃料电池系统效率为目标，通过算法改善其效率和特性。李奇等[44]针对多堆燃料电池系统，提出了一种基于卡尔曼滤波的在线辨识方法，用于跟踪系统最高效率点，从而提高了燃料电池的耐久性和效率；Wang 等[27]针对传统平均分配方法的不足，提出了一种在线辨识的功率分配策略以提高系统效率；刘强等[45]则提出了一种基于 Salp 群算法的多堆燃料电池系统效率优化控制方法；梁建英等[28]通过改进链式功率分配并结合遗忘因子递推最小二乘在线辨识方法，提高了多堆燃料电池系统的平均效率；王鑫等[46]针对多堆燃料电池系统在全功率范围高效运行和暂态电压稳定方面的控制难题，提出了一种考虑系统效率特性的氢储混合系统协调控制方法；Wang 等[47]分析了三堆燃料电池系统在不同海拔下的效率和功率特性，提出一种基于最高效率范围概念的协调优化分配策略。与传统策略相比，该策略提高了系统在高海拔地区的效率和燃油经济性。Zheng 等[48]提出了一种实时功率分配策略，在平均分配、串级链分配、优化分配的基础上，考虑了 PEMEC 堆叠的安全性、工作特性、退化特性、能源效率，并根据整体功率和退化程度选择分配模块，以提高系统的能效、延长 RUL；Liang 等[49]以多堆燃料电池系统最优效率的在线识别为目标，结合卡罗需-库恩-塔克条件 KKT(Karush-Kuhn-Tucker conditions)确定功率分配点，并采用递推梯度校正方法，与平均分配和串级链分配方法相比，该方法具有较高效率和较低耗氢。单个电堆的效率定义为燃料电池产生的电能与所供应氢气的质量流量中的能量率之间的比率[18]。燃料电池电堆效率 η_{FC} 可以表示为

$$\eta_{\mathrm{FC}}=\frac{P_{\mathrm{FC}}}{P_{\mathrm{H_2}}}\times100\%=\frac{U_{\mathrm{FC}}I_{\mathrm{FC}}\times2F}{\Delta H_{\mathrm{HV}}I_{\mathrm{FC}}\times\lambda_{\mathrm{H_2}}}\times100\%=\frac{U_{\mathrm{FC}}}{1.482\times\lambda_{\mathrm{H_2}}}\times100\% \tag{4}$$

式中：P_{FC} 为燃料电池系统功率；$P_{\mathrm{H_2}}$ 为氢气功率；F 为法拉第常数；ΔH_{HV} 为氢气高热值；$\lambda_{\mathrm{H_2}}$ 为氢过量系数。

3.3 氢气消耗

在氢气消耗方面，部分学者探讨了影响多堆燃料电池系统氢耗的因素，并给出了减少氢耗的措施。

Ghaderi 等[30]指出电堆的健康状况会影响氢耗；Wang 等[27]提到多堆燃料电池系统的氢耗取决于输出功率、效率和负载的变化。研究表明，合理的功率管理策略有助于最大限度地减少燃料消耗。Macias Fernandez 等[31]提出的自适应状态机策略旨在通过优化功率分配来减少氢耗，提高系统耐用性；Wang 等[32]则提出了一种考虑电堆老化的多堆燃料电池系统自适应功率分配方法，有效降低了氢耗；Macias 等[26]为降低氢耗，提出了一种旋转串级链的功率管理策略，结果显示该策略比等分布串级链和普通串级链分别降低了 8.7%和 4.7%的氢

耗；侯欣[35]在对双堆燃料电池系统进行效率分析的基础上，提出了一种基于模式切换的功率分配策略，以降低系统氢耗；蔡良东等[36]以减少多堆燃料电池系统氢耗量、提高耐久性为目标，通过结合海鸥优化算法与无源控制，有效降低了系统氢耗；Bouisalmane 等[50]提出了一种基于粒子群优化算法的功率分配策略，通过调整燃料电堆的输出功率实现氢耗的最小化。

4　结论

由于多堆燃料电池系统能够满足燃料电池在大功率应用方面的需求，因此被视为燃料电池发展的重点方向之一。本文对多堆燃料电池系统在架构、功率管理策略、寿命、效率和氢耗等方面的研究进行了总结，结论如下。

(1)多堆燃料电池系统架构不同于单堆燃料电池系统架构，包括电气、流体和热架构，这些架构及其辅助设备在系统的控制层面上紧密相连。

(2)多堆燃料电池系统的功率管理策略包括平均分配、串级链分配、旋转串级链分配、自适应状态机策略、在线识别功率分配策略和基于模式切换的功率分配策略等。

(3)多堆燃料电池系统寿命的影响因素有电堆数量、功率管理策略、负载工况的变化、自身状态等。大多数情况下，相对于单堆燃料电池系统，多堆燃料电池系统寿命更长。

(4)多堆燃料电池系统的总效率取决于功率管理策略、架构、单个电堆效率、DC-DC 变换器等。

(5)多堆燃料电池系统的氢耗取决于功率管理策略、输出功率、电堆健康情况、效率、功率输出和负载变化等。

参考文献：

[1] Guo Xiaopeng, Li Wenjing, Ren Dongfang, et al. Prospects for the development of hydrogen fuel cell vehicles in China [J]. Renewable Energy, 2025, 240: 122231.

[2] 孙闫, 夏长高, 尹必峰, 等. 燃料电池电动汽车的能量管理[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(9): 2130-2138.
Sun Yan, Xia Changgao, Yin Bifeng, et al. Energy management strategy of fuel cell electric vehicles [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(9): 2130-2138. (in Chinese)

[3] 张抗, 张立勤, 刘冬梅. 近年中国油气勘探开发形势及发展建议[J]. 石油学报, 2022, 43(1): 15-28, 111.
Zhang Kang, Zhang Liqin, Liu Dongmei. The situation and development suggestions of oil and gas exploration and development in China in recent years [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(1): 15-28, 111. (in Chinese)

[4] Lu Qiang, Zhang Bo, Yang Shichun, et al. Life cycle assessment on energy efficiency of hydrogen fuel cell vehicle in China [J]. Energy, 2022, 257: 124731.

[5] Jamal T, Shafiullah G M, Dawood F, et al. Fuelling the future: An in-depth review of recent trends, challenges and opportunities of hydrogen fuel cell for a sustainable hydrogen economy [J]. Energy Reports, 2023, 10: 2103-2127.

[6] İnci M. Future vision of hydrogen fuel cells: A statistical review and research on applications, socio-economic impacts and forecasting prospects [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 53: 102739.

[7] Usai L, Hung C R, Vásquez F, et al. Life cycle assessment of fuel cell systems for light duty vehicles, current state-of-the-art and future impacts [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 125086.

[8] Kang T, Ham S, Kim M. Performance analysis of multi-stack fuel cell systems for large buildings using electricity and heat [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 87: 389-400.

[9] Marx N, Boulon L, Gustin F, et al. A review of multi-stack and modular fuel cell systems: Interests, application areas and on-going research activities [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(23): 12101-12111.

[10] Palma L, Enjeti P N. A modular fuel cell, modular DC-DC converter concept for high performance and enhanced reliability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(6): 1437-1443.

[11] Duan Hao, Zhang Caizhi, Wang Gucheng, et al. Experimental study of the dynamic and transient characteristics

of sub-health fuel cell multi-stack systems without DC/DC [J]. Energy, 2022, 238: 122007.

[12] De Bernardinis A, Péra M C, Garnier J, et al. Fuel cells multi-stack power architectures and experimental validation of 1 kW parallel twin stack PEFC generator based on high frequency magnetic coupling dedicated to on board power unit [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(8): 2367-2383.

[13] 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. Lightweight research on hydrogen fuel cell power supply system integrating MMC and partial power conversion [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 161-173. (in Chinese)

[14] Abuzant S, Jemei S, Hissel D, et al. A review of multi-stack PEM fuel cell systems: Advantages, challenges and on-going applications in the industrial market [C]// 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Belfort, France, 2018: 1-6.

[15] Dépature C, Boulon L, Sicard P, et al. Simulation model of a multi-stack fuel cell system [C]// 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). Lille, France, 2013: 1-10.

[16] Cardozo J, Marx N, Boulon L, et al. Comparison of multi-stack fuel cell system architectures for residential power generation applications including electrical vehicle charging [C]// 2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Montreal, QC, Canada, 2015: 1-6.

[17] Kolli A, De-Bernardinis A, Khatir Z, et al. Part-load control stategy of a 20 kW SiC power converter for embedded PEMFC multi-stack architectures [C]// IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Yokohama, Japan, 2016: 4627-4632.

[18] Zhou Su, Fan Lei, Zhang Gang, et al. A review on proton exchange membrane multi-stack fuel cell systems: Architecture, performance, and power management [J]. Applied Energy, 2022, 310: 118555.

[19] Qi Wenjie, Chen Xin, Zhang Zhigang, et al. Performance of the multi-U-style structure based flow field for polymer electrolyte membrane fuel cell [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 23318.

[20] Zou Guofu, Chen Ke, Chen Wenshang, et al. Multi-objective optimization of proton exchange membrane fuel cell flow channel baffle based on artificial neural network and genetic algorithm [J]. Fuel, 2025, 380: 133205.

[21] Zhou Xi, Zhang Jinyuan, Feng Kejie, et al. Machine learning-assisted design of flow fields for proton exchange membrane fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2025, 626: 235753.

[22] 符昊宇, 谢长君, 朱文超, 等. 70 kW 燃料电池热电联产系统水热管理研究[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(5): 454-462.
Fu Haoyu, Xie Changjun, Zhu Wenchao, et al. Research on water and heat management of 70 kW fuel cell cogeneration system [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(5): 454-462. (in Chinese)

[23] 刘如意, 王哲, 李玲莲, 等. 液冷型燃料电池热管理子系统建模与控制研究[J]. 电源技术, 2024, 48(4): 701-710.
Liu Ruyi, Wang Zhe, Li Linglian, et al. Modeling and control of thermal management subsystem for liquid-cooled PEMFC [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(4): 701-710. (in Chinese)

[24] Gao Jianhua, Zhou Su, Lu Yanda, et al. Simulation of a novel integrated multi-stack fuel cell system based on a double-layer multi-objective optimal allocation approach [J]. Applied Sciences, 2024, 14(7): 2961.

[25] Luo Yang, Wu Yinghong, Li Bo, et al. Development and application of fuel cells in the automobile industry [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42: 103124.

[26] Macias A, Kandidayeni M, Boulon L, et al. A novel online energy management strategy for multi fuel cell systems [C]// 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Lyon, France, 2018: 2043-2048.

[27] Wang Tianhong, Li Qi, Yin Liangzhen, et al. Hydrogen consumption minimization method based on the online identification for multi-stack PEMFCs system [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(11): 5074-5081.

[28] 梁建英, 陈维荣. 基于 FFRLS 的多堆燃料电池系统功

率分配方法[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(4): 722-728, 782.

Liang Jianying, Chen Weirong. Power distribution method of multi-stack fuel cell system based on forgetting factor recursive least square [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(4): 722-728, 782. (in Chinese)

[29] 高锋阳, 苏红宇, 查鹏堂, 等. 基于工况预测和动力源寿命衰减协同的燃料电池有轨电车能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(13): 4316-4329.

Gao Fengyang, Su Hongyu, Zha Pengtang, et al. Energy management strategy of fuel cell tram based on working condition prediction and coordinated decay of power source life [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(13): 4316-4329. (in Chinese)

[30] Ghaderi R, Kandidayeni M, Soleymani M, et al. Online health-conscious energy management strategy for a hybrid multi-stack fuel cell vehicle based on game theory [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(6): 5704-5714.

[31] Macias Fernandez A, Kandidayeni M, Boulon L, et al. An adaptive state machine based energy management strategy for a multi-stack fuel cell hybrid electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(1): 220-234.

[32] Wang Tianhong, Li Qi, Wang Xiaotong, et al. A power allocation method for multistack PEMFC system considering fuel cell performance consistency [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5340-5351.

[33] 李奇, 刘强, 李艳昆, 等. 考虑燃料电池老化的多堆自适应功率分配方法[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(4): 713-721.

Li Qi, Liu Qiang, Li Yankun, et al. Multi-stack adaptive power allocation method considering fuel cell aging [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(4): 713-721. (in Chinese)

[34] 徐冰, 张敏, 杨文涛, 等. 质子交换膜燃料电池基于老化特征的剩余使用寿命混合预测方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(17): 5703-5714.

Xu Bing, Zhang Min, Yang Wentao, et al. Hybrid prediction method for remaining useful life of proton exchange membrane fuel cells based on aging characterrustics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(17): 5703-5714. (in Chinese)

[35] 侯欣. 车用双堆燃料电池系统功率分配策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.

Hou Xin. Research on power distribution strategy of vehicle dual-stack fuel cell system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)

[36] 蔡良东, 李奇, 刘强, 等. 考虑系统氢耗和耐久性的多堆燃料电池优化控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(10): 3670-3679.

Cai Liangdong, Li Qi, Liu Qiang, et al. Optimal control method for multi-stack fuel cells considering system hydrogen consumption and durability [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3670-3679. (in Chinese)

[37] Zhang Gang, Zhou Su, Xie Zhengchun, et al. Bi-level power management strategies optimization for multi-stack fuel cell system-battery hybrid power systems [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 71: 108066.

[38] 周苏, 王克勇, 文泽军, 等. 车用多堆燃料电池系统能量管理与控制策略[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 107-115.

Zhou Su, Wang Keyong, Wen Zejun, et al. Energy management and control strategy of multi-stack fuel cell system for automotive applications [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(1): 107-115. (in Chinese)

[39] Zhou Su, Zhang Gang, Fan Lei, et al. Scenario-oriented stacks allocation optimization for multi-stack fuel cell systems [J]. Applied Energy, 2022, 308: 118328.

[40] Zuo Jian, Cadet C, Li Zhongliang, et al. A deterioration-aware energy management strategy for the lifetime improvement of a multi-stack fuel cell system subject to a random dynamic load [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 241: 109660.

[41]焦道宽, 马继成, 侯永平, 等. 工况约束的燃料电池多堆系统寿命优化方法[J]. 控制理论与应用, 2025, 42(8): 1625-1631.

Jiao Daokuan, Ma Jicheng, Hou Yongping, et al. Life optimization method for fuel cell multi-stack system based on working conditions constraints [J]. Control Theory & Applications, 2025, 42(8): 1625-1631. (in Chinese)

[42] 赵嘉鹏. 基于 MPC 的多堆燃料电池混动系统能量管理策略设计[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2024.
Zhao Jiapeng. Energy management strategy for multi-stack fuel cell hybrid systems using model predictive control [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2024. (in Chinese)

[43] 裴冯来, 张岗, 周苏. 基于最小 LCC 的 MFCS 电堆分配方法[J]. 电源学报, 2025, 23(7): 128-135.
Pei Fenglai, Zhang Gang, Zhou Su. Stack allocation method for MFCS based on minimum life cycle cost [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(7): 128-135. (in Chinese)

[44] 李奇, 刘强, 王天宏, 等. 基于 EKF 在线辨识的多堆燃料电池系统最大效率点跟踪控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 673-683.
Li Qi, Liu Qiang, Wang Tianhong, et al. Maximum efficiency point tracking control method of multi-stack fuel cell system based on EKF online identification [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 673-683. (in Chinese)

[45] 刘强, 李奇, 王天宏, 等. 基于 Salp 群算法的多堆燃料电池系统效率优化控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(22): 7730-7739.
Liu Qiang, Li Qi, Wang Tianhong, et al. Efficiency optimal control method of multi-stack fuel cell system based on Salp swarm algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7730-7739. (in Chinese)

[46] 王鑫, 涂春鸣, 郭祺, 等. 计及多堆燃料电池效率特性的氢储混合系统协调优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(7): 19-26.
Wang Xin, Tu Chunming, Guo Qi, et al. Coordinated optimization control method of hybrid system with hydrogen and battery considering efficiency characteristics of multi-stack fuel cells [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 19-26. (in Chinese)

[47] Wang Yingmin, Chen Weirong, Li Qi, et al. Coordinated optimal power distribution strategy based on maximum efficiency range of multi-stack fuel cell system for high altitude [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50: 374-387.

[48] Zheng Wendi, Lü Bochao, Shao Zhenguo, et al. Optimization of power allocation for the multi-stack PEMEC system considering energy efficiency and degradation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 53: 1210-1225.

[49] Liang Yifan, Liang Qianchao, Zhao Jianfeng, et al. Online identification of optimal efficiency of multi-stack fuel cells(MFCS) [J]. Energy Reports, 2022, 8: 979-989.

[50] Bouisalmane N, Wang Tianhong, Breaz E, et al. Hydrogen consumption minimization with optimal power allocation of multi-stack fuel cell system using particle swarm optimization [C]// 2021 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). Chicago, IL, USA, 2021: 154-160.



武小花

作者简介：

武小花(1984—)，女，博士，教授。研究方向：新能源汽车控制技术。E-mail：xiaohuawu13@163.com。

毛建卫(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：多堆燃料电池重卡能量管理。E-mail：1055776315@qq.com。

汪鑫(2000—)，女，中国电源学会学生会员，通信作者，硕士研究生。研究方向：燃料电池汽车能量管理。E-mail：793083910@qq.com。

杨继斌(1989—)，男，中国电源学会会员，博士，副教授。研究方向：新能源车辆动力系统优化控制。E-mail：yangjibin08@163.com。

邓鹏毅(1972—)，男，博士，副教授。研究方向：氢燃料电池动力系统，动力电池安全。E-mail：961499493@qq.com。

李颖(1994—)，女，硕士研究生。研究方向：燃料电池重卡能量管理。E-mail：1215200638@qq.com。

(责任编辑：耿越)