DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.03.006　　文章编号：1000-128X(2023)03-0050-07

# 轨道交通多堆燃料电池系统架构及控制技术研究

刘佰博[1]，张　晗[1]，张　擘[1]，马天才[2]
（1.中车工业研究院有限公司，北京　100070；
2.同济大学 汽车学院，上海　201804）

**摘　要：**为了满足轨道交通车辆大功率应用需求，文章提出了一种轨道交通用多堆燃料电池系统架构和控制方法。首先，依据多堆燃料电池系统定义，设计了多堆系统的拓扑结构，包括整体系统、单堆系统、热管理系统和电气系统；然后，对多堆系统的控制系统进行了设计，包括网络拓扑结构、控制流程和功率分配策略；最后，研制了350 kW多堆燃料电池系统样机，并在中国中车某型调车机车上进行了装车验证。结果表明，方案可满足调车机车日常工作的大功率需求，样机的额定工作点效率达到42.1%。

**关键词：**轨道交通；燃料电池；多堆系统；功率分配；调车机车
**中图分类号：**U260.9+3；TK91　　**文献标识码：**A

# Study on architecture and control technology of multi-stack fuel cell system for rail transit

**LIU Baibo[1], ZHANG Han[1], ZHANG Bo[1], MA Tiancai[2]**

(1. CRRC Industrial Academy Co., Ltd., Beijing 100070, China;
2. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** To satisfy the high-power application demands of rail transit vehicles, an architecture and control method of a multi-stack fuel cell system specifically designed for rail transit was proposed. Firstly, the topology of the multi-stack system was designed based on the definition of the multi-stack fuel cell system, including the overall system, the single-stack system, the thermal management system and the electrical system. Then, the control system of the multi-stack system was designed, covering network topology, control flow, and power allocation strategy. Finally, a prototype of a 350 kW multi-stack fuel cell system was developed and validated on a certain type of shunting locomotive manufactured by CRRC. The results show that the proposed solution can fulfill the high-power demand of daily work for shunting locomotives, with the rated working point efficiency of the prototype reaching 42.1%.

**Keywords:** rail transit; fuel cell; multi-stack system; power allocation; shunting locomotive

## 0　引言

由于人类对自然资源的需求日益增加，随之也带来了影响世界的能源危机、气候变化和环境污染[1-2]。为了应对气候变化，降低碳排放，交通运输行业掀起了一股绿色低碳的热潮[3-4]。由于高效率、零排放、安静运行、快速启动、低工作温度等特点，以质子交换膜燃料电池

基金项目：中车“十四五”科技重大专项（2021CXZ021）
通信作者：张　晗（1989—），男，博士，工程师，主要从事氢动力轨道交通车辆混合动力系统及氢燃料电池系统方面的研究；
E-mail: h.zhang.phd@foxmail.com
引用格式：刘佰博, 张晗, 张擘, 等. 轨道交通多堆燃料电池系统架构及控制技术研究[J]. 机车电传动, 2023(3): 50-56.
Citation: LIU Baibo, ZHANG Han, ZHANG Bo, et al. Study on architecture and control technology of multi-stack fuel cell system for rail transit[J]. Electric Drive for Locomotives,2023(3): 50-56.

为核心的燃料电池混合动力系统，已成为轨道交通车辆尤其是机车车辆的绿色化动力解决方案之一[5-7]。

目前，单堆燃料电池系统（通常小于100 kW）难以满足轨道车辆的大功率需求[8]。为了拓展燃料电池的应用场景，业界将多个燃料电池电堆进行组合，构建出多堆燃料电池系统，突破了燃料电池系统输出功率瓶颈[9]。相关学者对多堆燃料电池系统相关技术进行了研究。文献[10]介绍了多堆燃料电池系统的拓扑结构及控制方法。文献[11]针对多堆系统的故障预测和健康管理进行了分析和总结。文献[12]详细介绍了多堆系统在降级模式下的系统重构，以及相应的能量管理策略。文献[13]提出了几种5 kW以下功率的多电堆拓扑结构。文献[14]提出了一种适用范围更广的多堆系统拓扑结构，其电气、反应物和热管理连接方式更加灵活，控制策略更加多样。文献[15]研究了不同流体结构下多堆系统的性能特点。文献[16]提出了4种典型的多堆系统电气架构，并分析其优缺点。文献[17]建立了多堆系统电堆容量分配的多目标优化模型，并获得了电堆容量最优分配方案。文献[18] 针对并联电气结构的多堆系统，提出了一种基于优化的策略。文献[19]研究了不同道路工况对多电堆模块性能衰减的差异性。对于双堆燃料电池系统，文献[20]研究了2种能量管理策略——效率优化策略和瞬时优化策略。文献[21]构建了一种基于多智能体强化学习算法的多堆燃料电池混合动力系统能量管理策略，可有效降低氢燃料消耗。

上述研究多是基于数值仿真或小功率样机验证，并取得了不错的效果。然而，由于实验室条件限制，这些研究没有应用到大功率燃料电池系统中，而大功率应用（如大于300 kW）才能更好地体现多堆系统的性能优势。此外，燃料电池系统多考虑公路交通应用场景，相关产品尤其是大功率多堆系统在轨道交通车辆的装车验证较少，而这也是验证多堆系统能否匹配轨道交通行业不可缺少的一环。因此，本文研究了一种多堆燃料电池系统拓扑结构和控制方法，并基于此研制了350 kW多堆系统样机。为了验证该样机的实际性能，将其装载至中车某型调车机车上进行试验验证。试验结果表明，该样机可满足调车机车的大功率需求。

## 1　多堆燃料电池系统定义

燃料电池（Fuel Cell, FC）是一种将氢燃料具有的化学能直接转换成电能的化学装置。由于燃料电池是通过电化学反应把氢燃料的化学能中的吉布斯自由能部分转换成电能，不受卡诺循环效应的限制，因此其效率较高。另外，燃料电池将氢燃料和氧气作为原料，排放出的有害气体极少。从节约能源和保护生态环境的角度来看，采用燃料电池是最有发展前途的发电技术之一。

在当前技术与工艺水平下，质子交换膜燃料电池金属堆的膜电极有效面积通常不大于350 $cm^2$，单堆膜电极片数在400片以内，功率密度约为1.2 $W/cm^2$。基于这些参数，燃料电池金属单电堆的输出功率通常低于168 kW。考虑系统辅助功率（通常高于20 kW）和系统的输出效率（通常要求不低于40%），单堆燃料电池系统（Single-stack Fuel Cell System, SFCS）的净输出功率常低于150 kW[1]。因此，单套SFCS无法满足轨道交通动力源的功率需求（200~1 800 kW）。为解决这一问题，多堆燃料电池系统（Multi-stack Fuel Cell System, MFCS）应运而生。MFCS的特点是，基于多个较低功率的电堆进行协同工作，实现整套系统的大功率输出。为了满足轨道交通行业的实际需求，研究团队研制出350 kW大功率多堆燃料电池系统。下面对该系统进行介绍。

## 2　多堆燃料电池系统拓扑结构

### 2.1　多堆系统总体结构

净输出功率为350 kW的多堆燃料电池系统的整体拓扑结构如图1所示。整套350 kW系统由2套燃料电池双堆模块、2个冷却水塔、1个二级DC/DC系统、1个网关及相关连接件组成。单套燃料电池双堆系统由2个单堆燃料电池系统构成，每个单堆系统包含电堆、空气供应子系统、氢气供应子系统、热管理系统和电气系统，结构原理见图2。系统主要参数如表1所示。

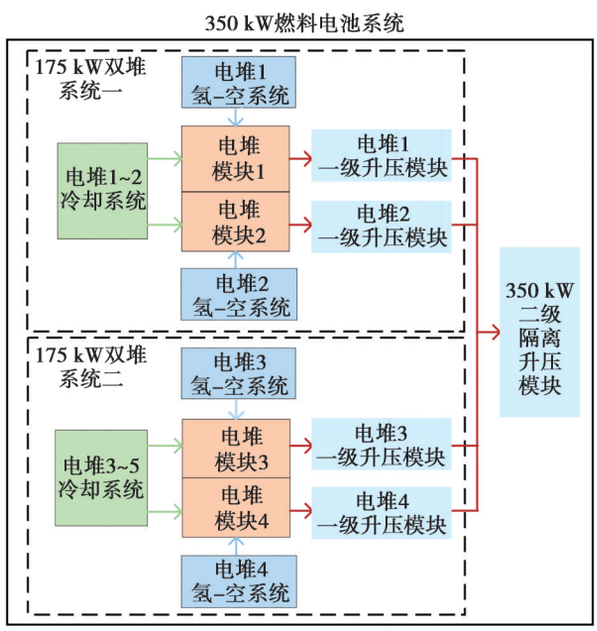


图1　350 kW多堆燃料电池系统拓扑结构

Fig. 1　Topology of 350 kW multi-stack fuel cell system

### 2.2　单堆系统结构

单堆燃料电池系统原理图如图2所示，主要包含空气供应子系统、氢气供应子系统、热管理子系统和电气系统。其中，4套单堆系统的热管理系统和电气系统存在耦合关系。

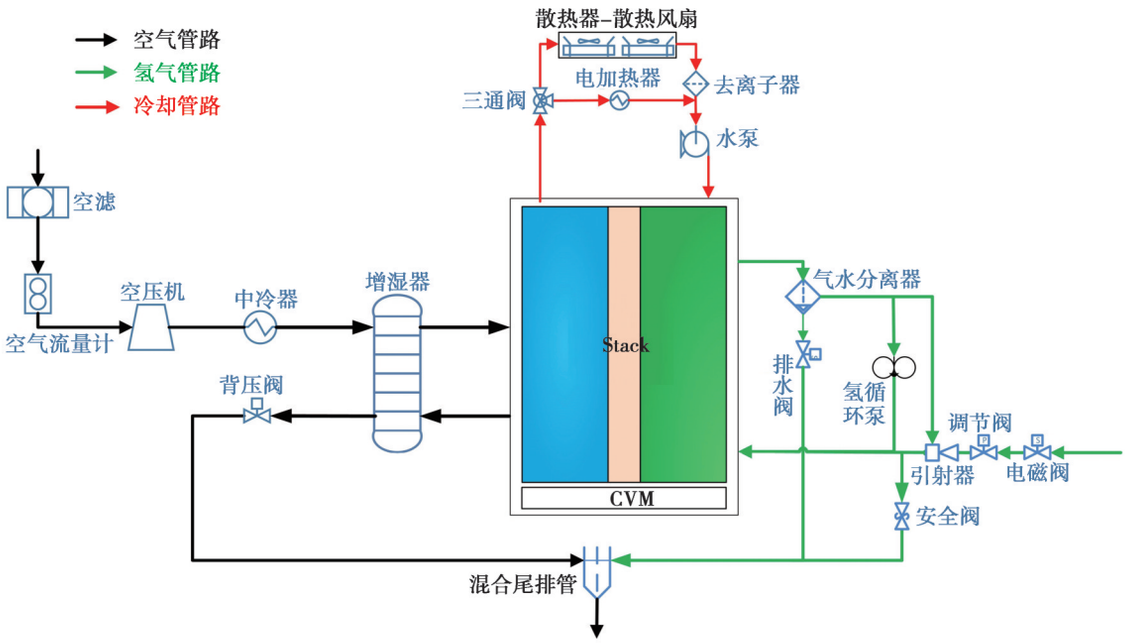


图2 单堆燃料电池系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of a single-stack fuel cell system

表1 350 kW燃料电池系统主要参数

Table 1 Main parameters for 350 kW fuel cell system

| 参数名称 | 参数值 |
|---|---|
| 额定净输出功率/kW | 350 |
| 电堆最高效率/% | ≥55 |
| 工作环境温度/℃ | −30~40 |
| 系统尺寸（长×宽×高） | 5 000 mm×1 800 mm×1 500 mm |
| 系统质量（不含箱体）/t | ≈1 |

2.2.1 空气供应子系统

空气供应系统为燃料电池系统中的电堆提供合适的流量、压力、温度和湿度的空气（有效成分为氧气）。系统主要包括空气压缩机、空气过滤器、预冷器（中冷器）、加湿器、背压调节阀和相应管路等零部件。

空气压缩机作为气源动力装置，向阴极供给空气，通过调节电机转速控制空气供应流量。为了避免空气中杂质进入电堆污染催化剂，需要在压缩机前端配置空气过滤器。加湿器通常采用喷水或膜交换的方式对进堆空气进行加湿。通常空气经压缩机加压后温度升高，需要使用预冷器来调节空气的温度，避免进入电堆的空气温度过高。背压调节阀安装在阴极排气管路末端，用来调节电堆阴极的工作压力。空气的流动一方面保证燃料电池发动机正常工作所需要的氧气量，另一方面可以将电堆反应过程中生成的部分热量和水分带出电堆。空气系统原理如图3所示。

2.2.2 氢气供应子系统

为了满足电堆工作对氢气的压力和流量要求，氢气供应系统通过减压模块，将高压氢瓶中的氢气减压至合适的压力范围，并通过调节阀控制氢气的供应流量和阳极工作压力。

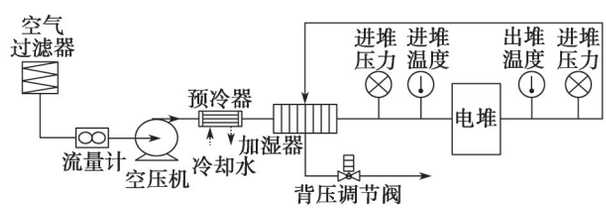


图3 空气供应子系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of air supply subsystem

通常，氢气供应系统安装有氢气循环装置如氢气循环泵或引射器等，循环装置能促进电堆内部的氢气流动，将电堆阳极内部多余的液态水分排出，并提高氢气的使用效率。氢气湿度控制通常无需额外的加湿设备，而是基于电堆内阴极反应生成的水与阳极侧存在浓差梯度的特点，通过膜的渗透作用使阴极侧水进入阳极，进而对氢气进行加湿。为了排出氢气侧积累的废气和水，并防止外部空气进入电堆，系统的出口处安装了氢气排气电磁阀。氢气供应系统原理如图4所示。

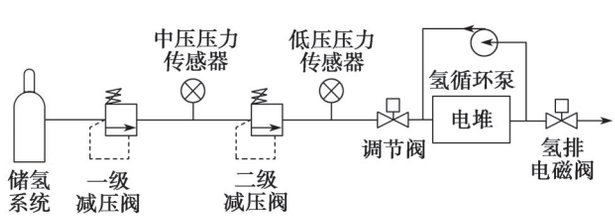


图4 氢气供应子系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of hydrogen supply subsystem

## 2.3 热管理系统

350 kW燃料电池系统的热管理系统采用塔式结构，冷却空气通过双风机，由车辆顶部进入冷却器（散热器），经过热交换后从车底排出，其功能是使燃料电池

堆及其他主要耗能部件保持在适宜的工作温度下。系统主要部件包括：冷却风机、电堆冷却器（Fuel cell equipment cooling，简称FE冷却）、电力电子设备冷却器（Power electronics cooling，简称PE冷却）、PE冷却水箱、FE冷却水箱等。系统的冷却对象包括4个电堆、4个中冷器、4个空压机及其控制器、4套非隔离升压DC/DC系统、4套冷却水加热器、1套隔离升压DC/DC系统。系统原理如图5所示，其中PTC 1~ PTC 4为4套冷却水加热器。

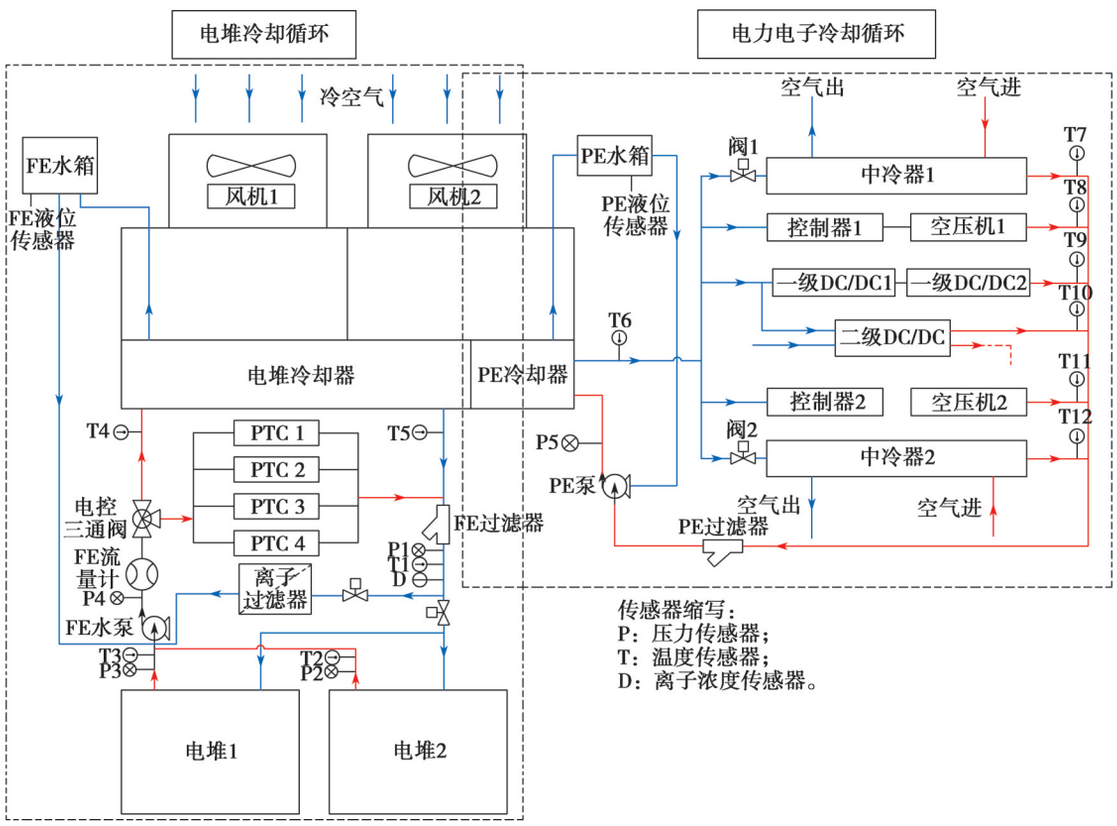


图5　热管理系统原理图

Fig. 5　Schematic diagram of thermal management system

### 2.4　电气系统

350 kW燃料电池系统由4个额定功率为115 kW的燃料电池模块构成，通过功率集成向整车输出DC 1 500 V的高压电。为了实现这一供能，电气系统包含3套供电系统（原车AC 380 V、DC 110 V辅助低压和DC 1 500 V主高压），2套DC 24 V低压供电系统（驱动电和控制电）。

## 3　多堆燃料电池控制系统

### 3.1　多堆系统网络拓扑结构

多堆燃料电池系统的网络拓扑结构包含2层：即整车层和系统层。其与单堆系统的差异主要体现在系统层，目前主流的多堆系统（模组系统）整车层网络拓扑结构如图6所示。

由图6可知，多堆系统整车层网络用于支撑各燃料电池模块与整车控制器之间的通信交互。通常，整车控制器根据当前轨道车辆的功率需求，以及燃料电池模块自身状态，基于混合动力功率分配单元（整车控制器内）和燃料电池功率分配单元（整车控制器或燃料电池主模块控制器内），计算出各燃料电池模块和动力电池的输出功率目标，并通过整车通信总线分别传递给各燃料电池模块和动力电池模块。

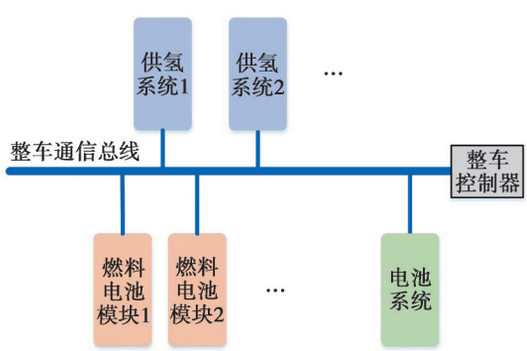


图6　整车层网络拓扑

Fig. 6　Vehicle layer network topology

当燃料电池模块内的燃料电池系统控制器接收到整车输出功率请求后，控制器通过系统层网络，与模

块内部各阀类、泵类和传感器进行通信交互，实现核心零部件控制和系统功率输出。系统层网络拓扑结构如图 7 所示。

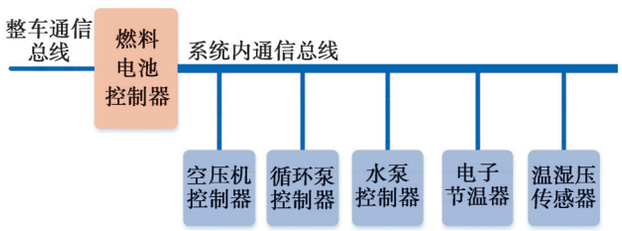


图 7　系统层网络拓扑

Fig. 7　System layer network topology

### 3.2　多堆系统工作流程及控制方法

多堆燃料电池系统的正常工作流程可简要归纳为 3 个阶段：启动自检阶段、功率输出阶段、降载停机阶段。下面对这 3 个阶段进行简单介绍。

#### 3.2.1　启动自检阶段

燃料电池系统的构成较为复杂，包含多个低压部件和高压部件，因此其启动和自检过程包含多个步骤，如图 8 所示。

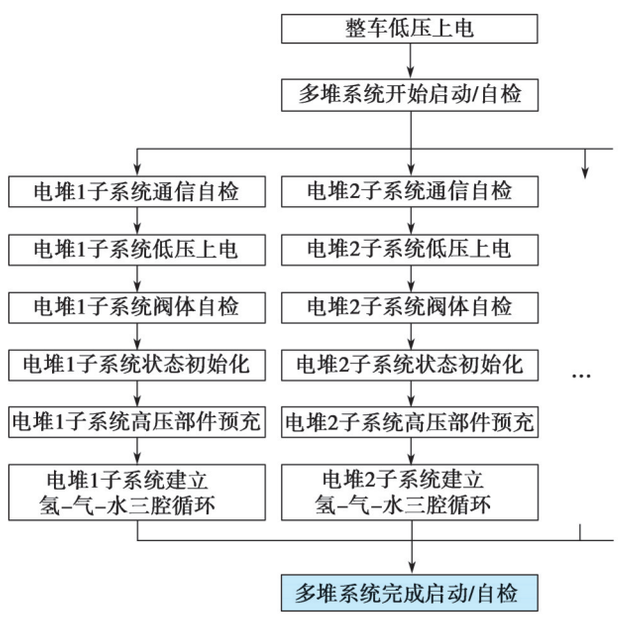


图 8　启动自检流程

Fig. 8　Self-test start-up process

#### 3.2.2　功率输出阶段

在功率输出阶段，多堆燃料电池系统根据功率需求指令，对核心零部件进行实时控制，同时监控系统自身运行状态。该阶段流程如图 9 所示。

#### 3.2.3　降载停机阶段

由于质子交换膜对环境的要求较高，因此在停机时，燃料电池系统需要根据质子交换膜的特点进行相应处理，以达到延长质子交换膜寿命的目的。系统降载停机过程如图 10 所示。

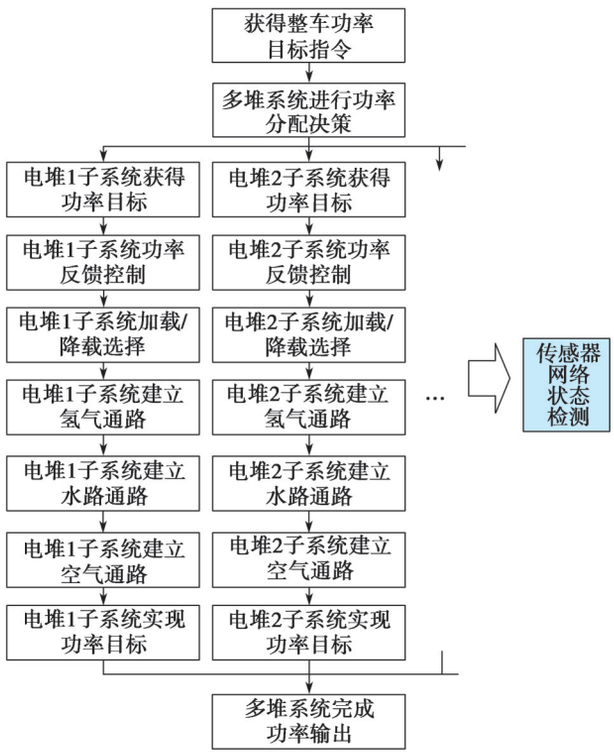


图 9　功率输出过程

Fig. 9　Power output process

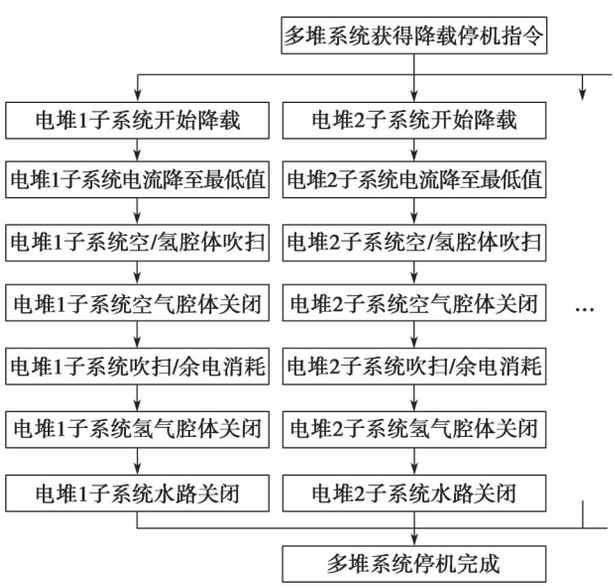


图 10　降载停机过程

Fig. 10　Unloading shutdown process

### 3.3　多堆系统功率分配策略

本文所涉及的多堆燃料电池系统采用等额分配策略，该策略将系统总需求功率让所有燃料电池堆平均分担。该策略如下式所示：

$$\left.\begin{aligned} l_{\mathrm{d}} &= \left[l_{\mathrm{d}1}, l_{\mathrm{d}2}, \cdots, l_{\mathrm{d}i}\right]^{\mathrm{T}} \\ \sum_{i=1}^{n} l_{\mathrm{d}i} &= 1 \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中：$l_{\mathrm{d}i}$ 为第 $i$ 个电堆的分配条件；$n$ 为系统中电堆的数量。

通常，每个DC/DC支路上的电堆参数均保持一致。因此，采用等额支配策略的系统，其“效率–功率”曲线图与单堆系统的特征相一致，仅将其横坐标功率值乘以$n$即可。

功率等额分配策略的特点是在高功率区间系统的效率较高，而在低功率区间系统的效率较低。该策略计算简单，为了利用其不占用计算资源的便利性，可直接由整车控制器将总需求功率等分后，将各电堆需求功率指令直接发送给各电堆相应子控制器中。该方案的优势为无需设置燃料电池系统主控制器，因此该策略工程中常用于燃料电池模组系统。

## 4　多堆系统样机及装车验证

基于上文分析研究的内容，对多堆燃料电池系统进行集成。350 kW多堆燃料电池系统样机如图11所示。



图11　350 kW燃料电池系统样机

Fig. 11　350 kW fuel cell system prototype

为了验证多堆系统工作性能，将该系统样机装载至中车某型调车机车上，对350 kW多堆燃料电池系统进行装车验证，试验工况和结果如图12所示。由图12可知，多堆燃料电池系统可跟随整车需求功率进行工作，最大输出功率可达到350 kW。由于采用等额分配策略，双堆模块1与双堆模块2输出功率几乎一致。2组模块输出功率不完全一致的原因是不同电堆的一致性存在不可避免的较小差异。

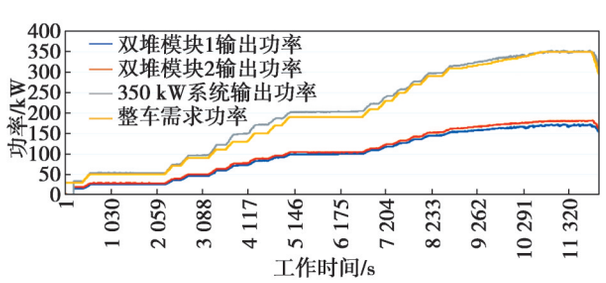


图12　多堆系统试验结果

Fig. 12　Multi-stack system test results

以双堆模块1为例，双堆模块的功率–效率曲线如图13所示。值得注意的是，该效率考虑了一级升压DC/DC的功率损耗。由图13可知，在超过90%工况点上，双堆模块均能获得超过40%的效率。当模块处于额定工作点时，模块净输出功率为175 kW，此时系统效率为42.1%。当双堆模块净输出功率为83.5 kW时，模块效率达到最大值，即47.3%。由图13还可知，双堆模块功率–效率曲线的变化趋势为先升后降，这是因为系统核心零部件的消耗功率并不与电堆输出功率同比例增大，而是在高于某个工作点之后快速增大。

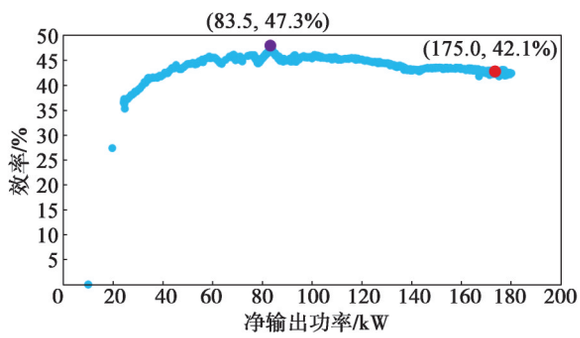


图13　双堆模块效率曲线

Fig. 13　Efficiency curve of double-stack module

## 5　结语

针对单堆燃料电池系统无法满足轨道交通场景下大功率需求这一问题，本文设计了一种多堆燃料电池系统的拓扑架构，以及与之相配套的热管理系统、电气系统和控制方法。基于上述方法，研制了350 kW多堆燃料电池系统样机，并装载在中车某型调车机车上进行验证。试验结果表明，该系统可满足轨道交通车辆的大功率需求。考虑DC/DC消耗，单套双堆系统的额定工作点效率约为42.1%，最高效率约为47.3%。

本文所述方法与装车试验成果，验证了为满足轨道交通大功率需求的多堆燃料电池系统这一技术路径的可行性；同时，本文也为多堆燃料电池系统的架构设计和控制方法研究提供参考。未来，氢燃料动力系统将逐步应用在市域列车、城际动车和高速动车组等兆瓦级功率的应用场景，这也对多堆燃料电池系统的单堆功率、电压等级、控制精度和环境适应性等提出了更高的要求。随着这些关键问题的突破，氢动力系统必将成为轨道交通绿色化发展的强大推动力。

## 参考文献：

[1]　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.

[2]　MAHMOUDIMEHR J, DARBANDI A. Technical study of a PEM fuel cell on the Psychrometric chart[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(1): 607-613.

[3]　王旭海, 齐红瑞, 孙凤霞, 等. 氢燃料电池增程式混合动力

机车动力系统设计[J]. 机车电传动, 2022(3): 110-115.
WANG Xuhai, QI Hongrui, SUN Fengxia, et al. Powertrain system design of hydrogen fuel cell range-extended hybrid electric locomotive[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022 (3): 110-115.

[4] 刘斌, 康明明, 邢涛, 等. 出口德国混合动力调车机车设计[J]. 铁道技术监督, 2019, 47(4): 43-47.
LIU Bin, KANG Mingming, XING Tao, et al. Design of hybrid power shunting locomotives exported to Germany[J]. Railway Quality Control, 2019, 47(4): 43-47.

[5] LIU Yongfeng, FAN Lei, PEI Pucheng, et al. Asymptotic analysis for the inlet relative humidity effects on the performance of proton exchange membrane fuel cell[J]. Applied Energy, 2018, 213: 573-584.

[6] YAN Yu, LI Qi, CHEN Weirong, et al. Optimal energy management and control in multimode equivalent energy consumption of fuel cell/supercapacitor of hybrid electric tram [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66 (8): 6065-6076.

[7] 齐洪峰, 郭爱, 陈超, 等. 基于电堆允许电流的车载燃料电池空气流量控制[J]. 机车电传动, 2022(3): 125-129.
QI Hongfeng, GUO Ai, CHEN Chao, et al. Airflow control in fuel cell for vehicles based on stack allowable current[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(3): 125-129.

[8] KARPENKO-JEREB L, INNERWINKLER P, KELTERER A M, et al. A novel membrane transport model for polymer electrolyte fuel cell simulations[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(13): 7077-7088.

[9] 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, Part C: 122007.

[10] 陈维荣, 朱亚男, 李奇, 等. 轨道交通用多堆燃料电池发电系统拓扑及系统控制与检测方法综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6967-6980.
CHEN Weirong, ZHU Yanan, LI Qi, et al. Review and prospect of structures, control and detection schemes of multi-stack fuel cell power generation system used in rail traffic [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6967-6980.

[11] QIU Yuqi, ZENG Tao, ZHANG Caizhi, et al. Progress and challenges in multi-stack fuel cell system for high power applications: architecture and energy management[J]. Green Energy and Intelligent Transportation, 2023, 2(2): 100068.

[12] MA Rui, CHAI Xiaoyue, GENG Ruixue, et al. Recent progress and challenges of multi-stack fuel cell systems: fault detection and reconfiguration, energy management strategies, and applications[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 285: 117015.

[13] RAJALAKSHMI N, PANDIYAN S, DHATHATHREYAN K S. Design and development of modular fuel cell stacks for various applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(1): 449-454.

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

[15] ASSABUMRUNGRAT S, RUANGRASSAMEE N, VIVANPATARAKIJ S, et al. Influence of stack arrangement on performance of multiple-stack solid oxide fuel cells with non-uniform potential operation[J]. Journal of Power Sources, 2009, 187(1): 1-7.

[16] FRAPPÉ E, DE BERNARDINIS A, COQUERY G, et al. Corrective action with power converter for faulty multiple fuel cells generator used in transportation[C]//IEEE. 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Lille: IEEE, 2010: 1-6.

[17] ZHANG Gang, ZHOU Su, GAO Jianhua, et al. Stacks multi-objective allocation optimization for multi-stack fuel cell systems[J]. Applied Energy, 2023, 331: 120370.

[18] GARCIA J E, HERRERA D F, BOULON L, et al. Power sharing for efficiency optimisation into a multi fuel cell system[C]//IEEE. 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Istanbul: IEEE, 2014: 218-223.

[19] HUANG Weifeng, NIU Tong, ZHANG Caizhi, et al. Experimental study of the performance degradation of proton exchange membrane fuel cell based on a multi-module stack under selected load profiles by clustering algorithm[J]. Energy, 2023, 270: 126937.

[20] HAN Xu, LI Feiqiang, ZHANG Tao, et al. Economic energy management strategy design and simulation for a dual-stack fuel cell electric vehicle[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(16): 11584-11595.

[21] SHI Wenzhuo, HUANGFU Yigeng, XU Liangcai, et al. Online energy management strategy considering fuel cell fault for multi-stack fuel cell hybrid vehicle based on multi-agent reinforcement learning[J]. Applied Energy, 2022, 328: 120234.

收稿日期：2023-02-22