

车用燃料电池系统控制策略综述

李滢龙¹, 陈会翠¹, 章桐¹, 裴普成²

(1. 同济大学, 上海 201804; 2. 清华大学, 北京 100091)

摘要: 针对车用燃料电池系统控制策略, 从系统结构、控制对象、控制目标、控制方法等方面总结了其研究现状和发展趋势。在系统结构设计方面, 需要研发高性能关键部件, 简化控制系统结构, 降低控制难度。在控制对象方面, 针对强耦合物理量的解耦控制有待深入研究。在控制目标方面, 多目标优化控制策略将是未来的研究重点。在控制方法方面, 复合控制策略和基于学习的智能控制策略将是未来的研究方向。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 系统结构; 解耦控制; 复合控制; 智能控制

中图分类号: TK91 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.04.02

Research on Control Strategies for Vehicle Fuel Cell Systems

LI Yinglong¹, CHEN Huicui¹, ZAHNG Tong¹, PEI Pucheng²

(1. Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100091, China)

Abstract: For the control strategy of the vehicle fuel cell system, the paper summarizes the current research status and development trends in the aspects of system structure, control objects, control objectives and control methods. In terms of system structure design, the development of high-performance key components is essential to simplify the control system structure and to reduce control complexity. Concerning control objects, the decoupling control for strongly coupled physical quantities requires further in-depth study. As for control objectives, multi-objective optimal control strategies will be the focus of future research. In regard to control methods, composite control strategies and intelligent control strategies based on learning will shape the future research trajectory.

Keywords: proton exchange membrane fuel cell; system structure; decoupling control; composite control; intelligent control

近几十年来, 可再生能源 (如氢能、太阳能等) 在全球经济的发展中起着重要的作用, 这些绿色能源的普及不仅缓解了全球能源危机, 也减少了对环境的污染^[1-2]。质子交换膜燃料电池 (Proton

Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) 以氢气作为燃料, 是一种绿色无污染的能源转换装置。因其具有能量转换效率高、噪声低、体积小、重量轻、低温快速启动、功率密度高等优点, 在国内外汽车

收稿日期: 2023-05-05 改稿日期: 2023-06-30 网络首发日期: 2023-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52272373)

参考文献引用格式:

李滢龙, 陈会翠, 章桐, 等. 车用燃料电池系统控制策略综述[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(4): 566-585.

LI Yinglong, CHEN Huicui, ZAHNG Tong, et al. Research on Control Strategies for Vehicle Fuel Cell Systems[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(4): 566-585. (in Chinese)



行业掀起了研发燃料电池汽车的热潮^[3-4]。尽管PEMFC具有如此多优势，但要保证其高效、持久、稳定地运行还存在很多困难。PEMFC系统是一个复杂的非线性“气-水-电-热-力”多物理量多耦合的发电装置，还面临着启停、变载、怠速和高负荷等频繁变化的工况，同时还要应对复杂的环境条件，致使车用燃料电池系统无法稳定地运行在理想工作区^[5-6]。而理想的车用动力源，需要满足输出功率的快速响应性、良好的环境适应性、一定的耐久性和经济性。对于车用燃料电池系统，除了开发新型材料、优化系统结构外，还需要采用适当的系统控制策略，对压力、湿度、温度等参数进行精准控制，从而提高燃料电池的性能。本文简单介绍了车用燃料电池系统，简述了燃料电池系统的控制目标，综述了氢气供应系统、空气供应系统、水/热管理系统和能量管理系统的系统结构，从控制方法、控制对象、控制目标、系统结构等方面对系统的控制策略进行了分析，提出了车用燃料电池系统控制策略的发展趋势及展望。

1 车用燃料电池系统概述和控制目标

1.1 燃料电池电堆概述

PEMFC本质上是一种能源转换装置，通过电化学反应将反应气体中的化学能转换成电能。理论上，只要不停地向电堆输送氢气和氧气，就能源源不断地产生电流。如图1所示，PEMFC单体由双极板和膜电极（MEA）组成，MEA被夹在双极板中间，MEA包括气体扩散层、催化层和质子交换膜。双极板有石墨双极板、金属双极板和复合材料双极板3种，通过流场将氢气和空气分布到MEA的阳极和阴极上。常规的流场有平行流场、蛇形流场、交指流场和点状流场等^[7]。MEA的电极通常是由碳纸组成的气体扩散层和催化剂（如阳极的Pt和阴极的Pt-Ru）组成的催化层构成，这些催化剂通常浸渍在活性炭、碳纳米管或碳纳米纤维等材料上^[8]。质子交换膜通常是对气体和电子不渗透的质子导电聚合物，能有效防止气体交叉和电子短路，但其有

效工作温度区间为70~90℃。PEMFC单体工作时，在Pt的催化下，氢气在阳极发生氧化反应，转化为质子和电子，质子穿过质子交换膜到达阴极，在Pt-Ru催化下与氧气发生还原反应，生成水，而电子经外部电路从阳极移动到阴极，从而产生电流对外输出做功，同时还会产生大量的热量。

其阳极、阴极电化学反应为：



因此PEMFC总反应式为：



理论上，PEMFC单体能产生1.23V的电势，但当连接上负载后，其工作电压通常维持在0.6~0.7V，这是由于不可避免的损耗，使燃料电池实际的输出电压总是低于热力学理论电压。电池的电压损耗由下列3部分组成：活化损耗、欧姆损耗和浓度损耗。典型的燃料电池极化曲线如图2所示。

1.2 燃料电池子系统概述

车用燃料电池发电系统除了电堆外，还需要其他辅助系统的配合才能成为一个合格的车用动力源。首先，电流的产生需要源源不断的反应物，这就需要氢气供应系统和空气供应系统以一定的化学计量比将空气和氢气送入PEMFC电堆中进行电化学反应，且要维持阴阳极气体压力稳定，以免对MEA产生冲击。PEMFC电化学反应产生的能量有近一半不是电能，而是反应热，这就需要水/热管理系统及时带走电堆内部的余热，维持电堆和膜电极的温度和湿度。由于单独的燃料电池很难满足汽车复杂工况的功率需求，通常需要引入锂离子电池或超级电容器，构成能源管理系统，通过合理的能量管理策略进行功率分配。典型的燃料电池动力系统如图3所示。

1.3 燃料电池系统控制目标

车用燃料电池的控制目标需要满足动态响应性能、稳定性、经济性、抗干扰能力和耐久性的需求。对于空气供应系统，空气过量比建议维持在1.65~2.00之间，当空气过量比较低时，产生的

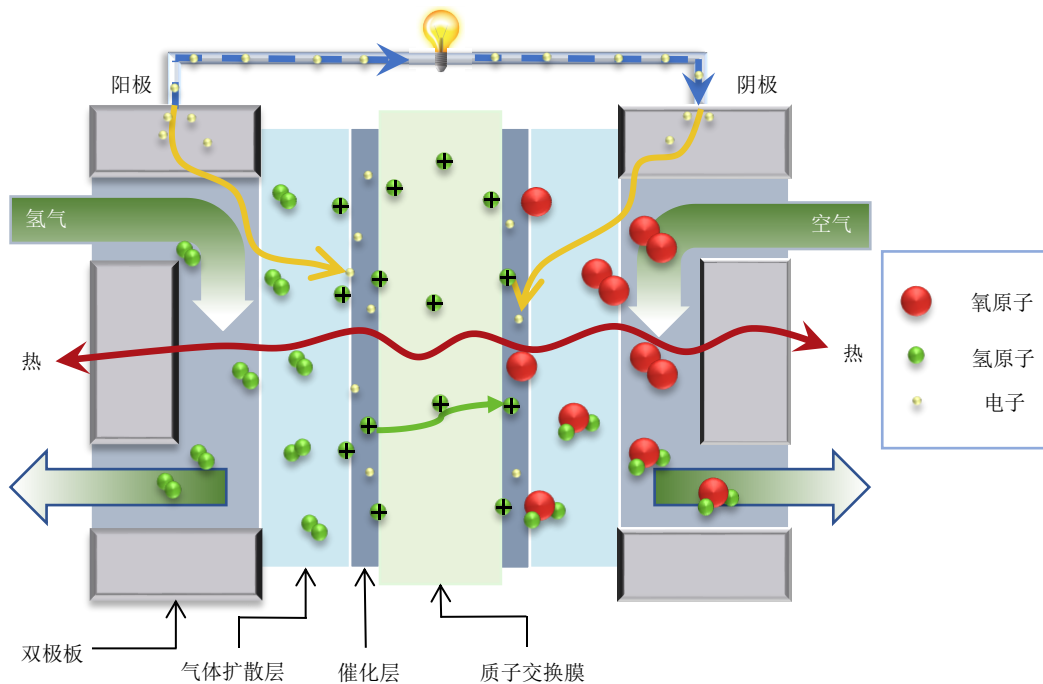


图 1 燃料电池工作原理

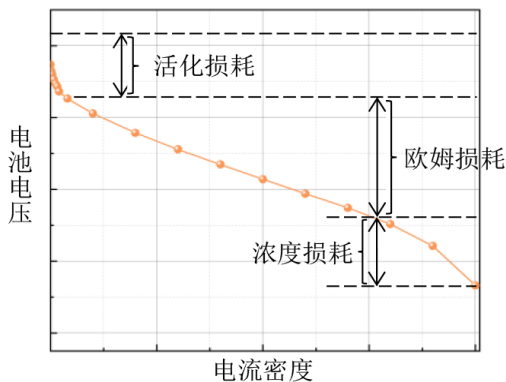


图 2 典型的燃料电池极化曲线

“氧饥饿”现象会导致电压分布不均匀和电压波动，甚至对 MEA 造成不可逆的损伤，如碳腐蚀和反极现象导致的 Pt 溶解^[9-11]。而当空气过量比较高时，会产生较大的寄生功率，降低动力系统的输出性能。而对于氢气供应系统，除了需要控制合适的氢气过量比外，还需要控制氢气压力跟踪空气压力变化，维持阴阳极气体压力稳定，防止较大的压力波动对 MEA 产生冲击，降低燃料电池的耐久性。有研究表明^[12]，同时满足提高燃料电池效率和耐久性的最佳氢气化学计量比为 1.1~1.5。PEMFC 的理想工作温度一般在 70~90 °C 之间，温度过高会引起质子交换膜脱水，产生“膜干”现象，影响质子

传输，甚至直接对膜造成损伤。而温度过低会降低催化剂的活性，影响燃料电池的动力学性能^[13]。因此，水/热管理系统的主要目标是将电堆的温度维持在理想工作范围，并且将电堆和质子交换膜的湿度维持在最佳水平。在车载工况下，PEMFC 只能被动地响应负载的变化，为了应对频繁启停、加速、减速等复杂工况对燃料电池稳定性和使用寿命的影响，需要能量管理系统进行合理的功率分配，提高燃料电池的耐久性。

2 燃料电池系统结构

2.1 氢气供应系统结构

氢气供应系统主要有 3 种工作模式，分别为氢气直流排通模式、死端模式和再循环模式^[14]。在流通模式中，保持排氢阀完全打开。这是最简单的氢气供应系统模式，来自储氢罐的高压氢气经调压阀调压和加湿器增湿后，被送入阳极流场参与电化学反应，而未反应的氢气则通过完全打开的排氢阀直接排入大气中。该模式结构简单，成本低廉，完全打开的排氢阀能有效避免水淹现象的发生。但是直接将未反应氢气排放到大气中，会使氢气的利用

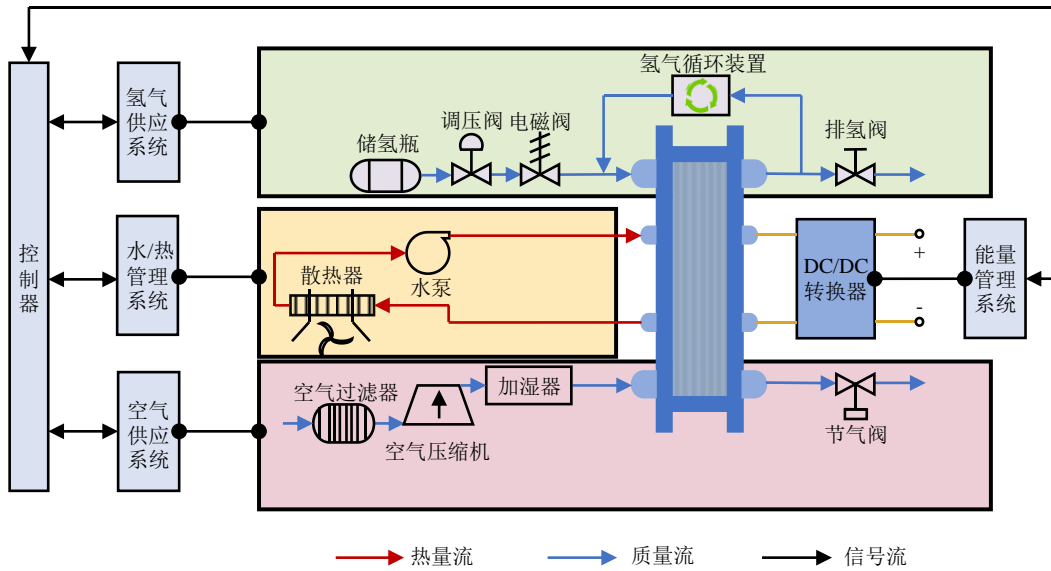


图 3 典型燃料电池车用动力系统 [7]

率降低，同时造成环境的污染，甚至还存在一定的安全隐患。如图 4 所示，在死端模式下，排氢阀处于常闭状态，由于出口被封闭，阳极通道内的氢气能充分参与电化学反应，不存在氢气浪费现象，氢气利用率高。但是由于排氢阀常闭，通过质子交换膜扩散到阳极的杂质气体和液态水会在阳极堆积。水和氮的积累引发的氢气供应不足，不仅会造成燃料电池性能的下降，还会引起催化层的碳腐蚀，从而对燃料电池造成不可逆转的损伤并缩短其使用寿命 [15]。由于该模式在效率、安全性等方面的劣势，目前还没有关于死端模式燃料电池汽车运行的报道 [16]。阳极氢气的加湿方式与阴极空气的加湿方式相同，都分为外增湿和内增湿。最常见的阳极外增湿方式是加湿器直接增湿，而基于自增湿质子交换膜、自增湿催化层等的内增湿方式结构简单，不需要外部装置协助，将在 2.2 节中详细说明。

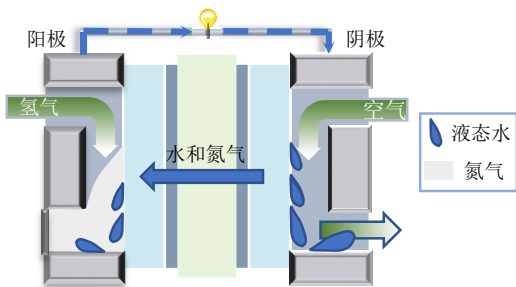


图 4 死端模式下 PEMFC 的物质传输

循环模式可以利用循环装置将阳极出口未反应氢气再通入到阳极入口，提高氢气利用率，同时完成对氢气的增湿，循环模式工作原理如图 5 所示。目前，氢气循环模式是燃料电池汽车中应用最广泛的氢气供应模式 [17]。氢气循环模式是未来主流的发展方向，通过循环装置进行氢气循环，不仅可以提高氢气的利用率，提高燃料经济性，还有利于提高氢气和水分在燃料电池内部分布的均匀性，增强燃料电池的耐久性，目前，商业化装车应用较广泛的是氢气循环泵模式和单引射器模式 [6]。循环泵模式，是通过循环泵增加循环气体的压力来进行气体循环。利用机械加压的方式将阳极出口气体增压，再次送入阳极入口进行氢气循环，具有稳定性能好、可适用于复杂工况、响应速度快等优点 [18]。氢气循环泵本质上是一台低压压缩机，有多种结构方案，其中，容积式压缩机提供高压的能力更适合于 PEMFC [15]。但是随着氢燃料电池往大功率方向发展，需要更大流量的氢气循环泵，会产生较大寄生功率，还有振动和噪声增大等问题 [17]。效率高，流量大，结构紧凑的氢气循环泵是未来的研究方向。

引射器模式，是利用高速喷射的一次流体产生的压差将二次流体吸入并再喷出，从而完成氢气的循环 [18]。引射器结构如图 6 所示，其中一次流体为

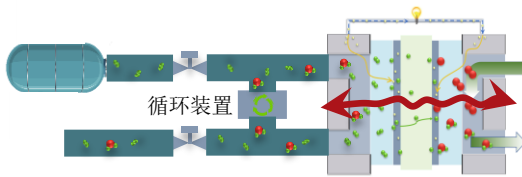


图5 循环模式工作原理

来自压力阀的高压氢气，二次流体为来自阳极流道的废气，包含未反应的氢气和水。来自压力阀的高压氢气经过喷嘴的绝热膨胀，压力降低，流速增加，在混合区域前形成了一个低压区，使二次流体向低压区移动，并在混合区混合，最后混合流体从出口喷出。相比氢气循环泵模式，引射器模式没有旋转或高速运动部件，结构简单，可靠性高。循环氢气的能量来自从压力阀流出的高压氢气，没有寄生功率。但是受引射器的工作原理限制，引射器循环系统的工作范围小于循环泵循环系统，引射器模式在低功率区，一次流体产生的压差小，引射效果不佳。需要优化引射器的结构，拓宽其有效引射

范围。

由于单循环泵模式和单引射器模式的不足，不少学者对循环装置进行了创新性的研究，如双引射器方案^[19]、引射器和氢气循环泵并联方案^[20]等，而文献^[17]对这些循环模式的优缺点进行了综述，见表1。虽然这些多循环部件配合的复杂系统结构极大地拓宽了氢气供应系统的工作范围，提高了系统效率，但是也带来了控制复杂和存在寄生功率的问题。因此，随着对高性能循环部件的不断研发和升级换代，单循环部件的简单氢气循环系统将成为未来的发展趋势。

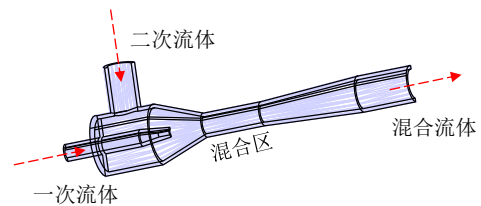


图6 引射器结构

表1 氢气供应模式的技术对比^[16]

供氢模式	优点	缺点
直排流通模式	系统简单	氢气利用率低，且存在安全隐患
死端模式	系统简单，氢气利用率高	阳极杂质气体和液态水的积累造成电压下降
单氢气循环泵	氢气利用率较高，工况范围广泛，响应速度快	有寄生功率，噪声，振动，维护成本高
单引射器	结构简单，运行可靠，无寄生功率	低功率工况引射效果差
双引射器	工作范围拓宽	控制策略复杂，无法覆盖所有工作范围
引射器与氢气循环泵并联	工作范围广，电堆效率高	控制复杂，有寄生功率
喷射器与氢气循环泵并联	电堆效率高	控制复杂，有寄生功率
引射器与旁通喷射器并联	低功率工况实现吹扫除水	控制复杂，无法覆盖所有工作范围
电化学泵	结构紧凑，循环过程中可实现氢气的分离和提纯，电堆效率高	需要外接电源，氢处理效率低

2.2 空气供应系统结构

空气供应系统对整个燃料电池系统起着关键性的作用，它的主要任务有空气的净化、加压和增湿^[21]。颗粒物或化学物质会对催化剂和膜造成破坏，空气在流入燃料电池电堆前必须通过空气滤清器进行净化^[22]。空气供应系统的质量流量直接影响电堆内氧气的浓度，需要供气系统提供足够的氧气以保障电堆的持续运行，避免出现“氧饥饿”现象^[23]。根据能斯特方程可以得出，PEMFC的性能随着反应物压力的增大而提高，而压力的增大也能

改善电池的动力学性能，最佳压力为150~250 kPa^[24]。同时，质子交换膜必须保持完全水合状态才能获得最佳性能。为了达到上述目标，空气滤清器、空气压缩机、加湿器被应用于典型的空气供应系统中，空气经过空气滤清器净化、空气压缩机增压和加湿器增湿后，被送入燃料电池电堆中参与电化学反应。

空气经空气压缩机增压后，送入燃料电池的电堆，系统的性能会随着空气压缩机的增压而提高，然而空气压缩机功耗占燃料电池系统输出功率的

13%，占系统寄生功耗的90%^[6]。为了提高系统的体积功率密度和系统效率，有学者提出了新的空气供应系统模式来完成增压任务，如图7所示。图中，M为电机，C为空气压缩机，T为膨胀机。图7a描述了空压机与电堆的一般结构，称为单级连接；图7b给出了空气压缩机和膨胀机与电堆的组合模式，其中空气压缩机和膨胀机耦合在一起，可以称为涡轮增压器；图7c展示了两级串联结构，通过使用第2个空气压缩机来进一步提高压缩比^[25]。文献[26]对比了空气压缩机加膨胀机与单级空气压缩机的功率消耗，空气压缩机加膨胀机模式消耗的功率约为单级空气压缩机的50%。文献[27]对3种不同空气压缩模式进行建模，由于涡轮机较高的机械回收效率，涡轮增压器和空气压缩机的二级串联模式功耗最低，其次是涡轮增压器，最后是单级空气压缩机。但是，到目前为止，对膨胀机的研究要远少于对空气压缩机的研究^[22]。对带膨胀机的燃料电池系统进行经济性分析，发现带膨胀机的燃料电池系统比不带膨胀机的表现出更高的性价比^[28]。因此，膨胀机的结构优化和空气压缩机与膨胀机的参数匹配研究将成为提高燃料电池系统效率的热门研究方向。同时，膨胀机的能量回收可以降低空气压缩机的功率需求，提高系统效率，实现空气压缩机的小型化，进而提高电堆的体积能量密度。

一般来说，无论是空气还是氢气，其自身的湿度都不足以满足电堆对气体湿度的需求，因此，燃料电池系统的湿度控制是以增湿为主，而增湿的方式有2种：外增湿和内增湿^[29]。外增湿就是依靠电堆以外的辅助装置进行增湿，如图8所示，通常使用的方式有加湿器直接增湿、基于阴极循环的膜增湿器增湿和焓轮阴极增湿、直接注水增湿等^[30]。加湿器直接增湿是阴极增湿最典型的方式，但外置加湿器增加了系统的体积和成本，同时，外置加湿器内部残留的液态水在温度为零下的环境中会结冰，影响燃料电池的冷启动速度，因此，去除外置加湿器成为一个重要的研究方向^[31]。膜增湿和焓轮增湿的原理是相同的，都是通过阴极废气循环完

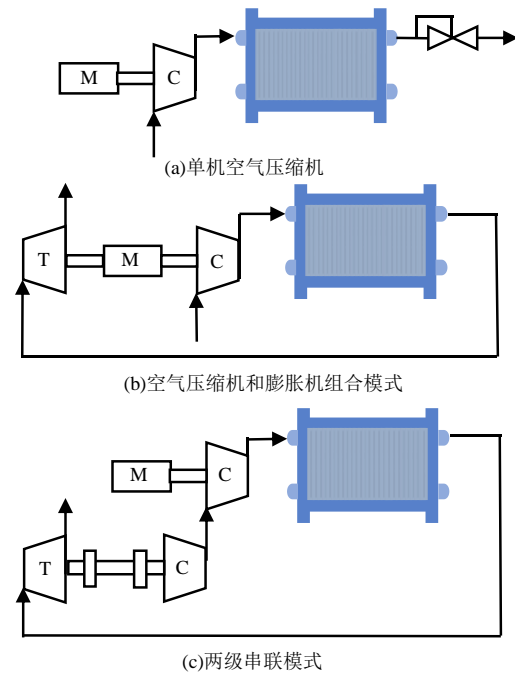
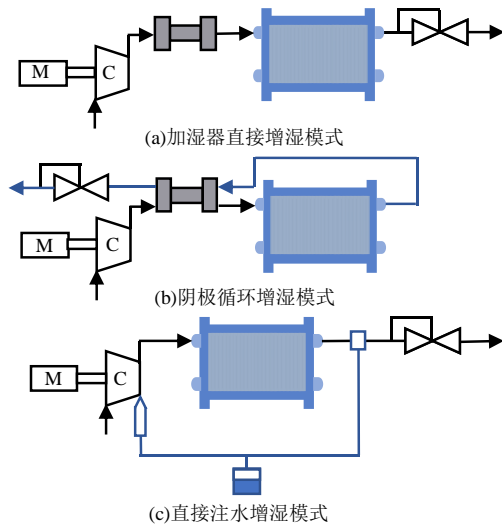


图7 空气供应系统加压结构^[25]

成对进堆空气的增湿，将燃料电池湿热的尾气通入到膜增湿器（焓轮增湿器）中，同时干冷的空气从另一端进入，进行水热交换。然而基于阴极循环的增湿方式，湿度无法达到100%，在低电流密度下能满足工作要求，但在高电流密度下效果就相对较差^[31]。直接注水增湿是通过直接在空气压缩机内部注水完成增湿，这样的集成式增湿空气压缩机具有体积小、能耗低等潜在优势，但注水过程需要精确的控制，否则很容易产生“水淹”现象^[21]。内增湿则仅仅依靠电堆的自身材料性质来满足燃料电池系统对湿度的要求，目前实现内增湿的方式主要有：自增湿质子交换膜、自增湿催化层、阴阳极流道气流逆流操作等^[31]。相较于外增湿，内增湿在简化系统结构、提高系统效率方面具有更大的潜力，但实现难度也较大，将是未来燃料电池系统气体增湿的主要研究方向。

2.3 水/热管理系统结构

温度控制会对燃料电池内气体的湿度、催化剂的活性、质子交换膜的性能、电化学反应速率等产生重大影响^[32]。燃料电池的冷却方法有多种，包括空气冷却、散热器冷却、相变冷却和液体冷却等^[33]。尽管其他冷却方法有液体冷却没有的优点，

图 8 空气供应系统加湿结构^[21]

但是由于高比热的冷却剂和集成的便利性，最适合车辆的冷却技术仍然是液体冷却^[34-35]。根据参考文献^[36]，目前商业化的燃料电池汽车采用的冷却方式均为液体冷却。PEMFC在工作时，燃料的能量约有50%被转化为热能，并且燃料电池中的气体流动只能带走小部分的热量，这意味着几乎全部的热量都需要依靠冷却剂带走^[37-38]。但是，PEMFC的工作温度较低，通常在80℃左右，这意味着冷却剂与环境的温差较小，散热比较困难^[36]。

适当的水管理可以确保燃料电池的正常运行并提高其工作效率。过量的水会覆盖阴极和阳极，导致PEMFC失效，而水分过少又会阻止电池的正常工作的^[39]。和热管理不当一样，水管理不当也会降低电池的使用寿命，使其整体性能不稳定，合理的水/热管理已经成为了PEMFC商业化的关键问题。过去，不少学者对PEMFC的水管理进行了广泛的研究，主要包括改变流道形状或MEA微观结构、从控制策略入手提供最佳工作条件、改变流道或MEA结构的材料组成3种手段^[40]。表2对常见的水管理方法进行了总结。其中，水管理控制策略的制定必须充分考虑PEMFC系统的整体结构设计和整体控制策略，尽可能提高系统结构的简洁性，减少系统功率损耗，降低控制成本。而改变MEA材料组成和结构设计因为没有任何寄生功率的产生而受到更多的关注。比如改变微孔层中孔的排布方式^[41]，添加亲水材料(如SiO₂)获得亲水孔^[42]等。

表 2 常见的水管理方法对比^[40]

方法	优点	缺点
改变电池结构	使水被动排出	结构变化可能会影响电池的性能
改变电池结构的材料组成	更好利用水分	材料失效后更换复杂，成本高
优化控制系统	低成本	难以充分考虑PEMFC所有情况

燃料电池的水/热管理系统主要包括去离子器、风扇、散热器、水泵、节温器、膨胀水箱等。在电堆启动时，电堆的温度尚未达到理想工作温度区间，通过小循环使电堆更快达到适宜的工作温度。此后，电堆不断产生热量，温度不断升高，通过大循环散热，将电堆温度维持在理想工作温度区间^[43]。而大小循环的转换依靠节温器进行控制，节温器的位置不同会产生不同的温度管理方案，如图9所示，可以将节温器布置在散热器下游，也可以将节温器布置在散热器上游^[44]。去离子器可以去除冷却液中的导电离子，降低冷却液电导率，避免短路现象发生。

在车用燃料电池系统中，除了对电堆的温度进行管理外，还对空压机、DC/DC转换器等部件的温度进行管理。实际上，它们内部的冷却结构彼此相似，并且它们中任何一项冷却技术已经足够成熟，已经发表了大量的论文和专利^[36]。因此，下一步研究的方向是对全部冷却系统进行集成管理，在满足其冷却需求的同时，简化系统结构。

2.4 能量管理系统结构

如果以燃料电池作为车用动力源直接驱动，其输出特性偏软，机动性较差，不能及时对不同的路况作出反应^[45]。因此，车用燃料电池系统通常由燃料电池和用作能量缓冲的锂离子电池或超级电容器组成。由于燃料电池、锂离子电池和超级电容器的电压水平不同，直接连接到车用电动机上，效率并不高，所以需要集成DC/DC转换器以产生电动机所需的电压^[46-47]。如图10所示，有3种连接方式：燃料电池+电池、燃料电池+超级电容器和燃料电池+电池+超级电容器。而在车用燃料电池系统

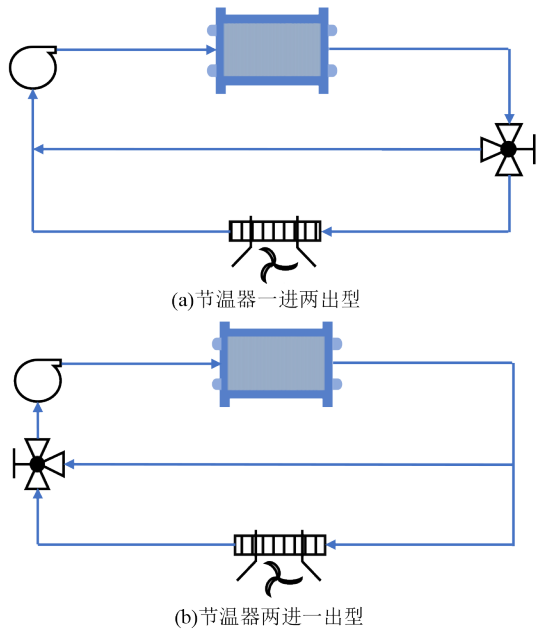


图9 热管理系统结构

中，最常见的结构为燃料电池+电池结构，如本田Clarity、丰田Mirai、奔驰GLC F-Cell、上汽荣威950 Full Cell等，虽然该结构有利于功率的分配，但控制功率流的灵活性较低。燃料电池+电池模式在启动时，电池提供一个高的电流去启动电机，避免燃料电池在低效率区运行。首次启动后，燃料电池开始工作以维持电机的运行，电池根据实际工况进行充放电，但是频繁的充放电会缩短电池的使用寿命^[48]。超级电容器可以承受更频繁的充放电循环，而且其电阻较小，可以提供更高的瞬时功率，满足突发情况下的瞬时功率需求，充放电迅速，但是因其能量密度较低，所以不能持久地提供能量^[49]。燃料电池+电池+超级电容器模式具有上述2种模式的优点，不仅能连续提供能量，而且还增强了系统在瞬态事件中的动态响应性能^[50]。但是，复杂的能量传输结构不仅会造成大量功率流的损失，还会增加能量管理系统的控制复杂性。

综合考虑系统成本、系统效率、结构复杂度和控制难度，燃料电池+电池结构是目前能量管理系统结构的最佳选择，但是随着未来燃料电池技术的发展，会逐渐形成大功率燃料电池+小功率锂离子电池的结构组成，大功率燃料电池用来满足车辆的功率需求，小功率锂电池用来回收制动能量。

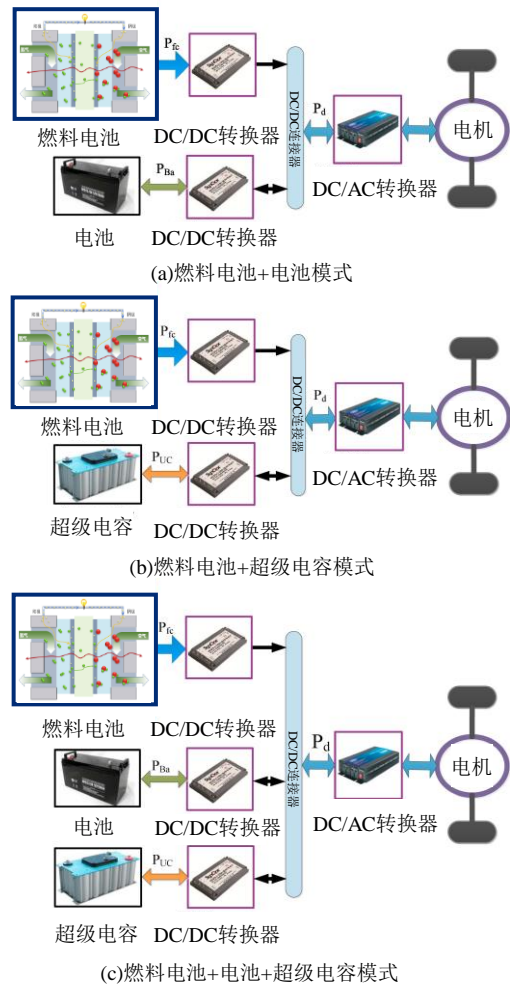


图10 车用燃料电池能量管理系统结构^[49, 51]

3 车用燃料电池系统控制策略

燃料电池是一个具有不确定性、大滞后性、强耦合性、时变性、非线性、多输入多输出的受约束系统^[5]。其性能受到多种因素的影响，国内外学者在权衡精度和计算量的基础上，对此展开了大量的研究，设计了各种控制策略。

3.1 氢气供应系统控制策略

氢气供应系统为PEMFC正常工作提供适当压力和流量的燃料。有研究发现^[12]，同时满足提高燃料电池效率和耐久性的最佳化学计量比为1.1~1.5。较低的化学计量比会使供气不足，造成“饥饿”现象，较高的化学计量比会产生较大的气体流速，排出的气体会带走电堆内大部分水分，容易产生“膜干”现象，同时，化学计量比的紊乱会对

PEMFC 内部电压稳定, 湿度稳定等产生影响, 进而降低电池的性能。同时还要控制阳极与阴极压力差稳定, 否则高压的脉冲和波动会对膜电极产生破坏, 所以要控制阳极压力跟随阴极压力同升同降, 以减少对膜的损害^[52]。

针对氢气供应系统的过氢比 (HER) 调节和压力平衡调节, QUAN Shengwei 等^[53] 基于反馈线性化模型开发了多输入多输出的模型预测控制策略, 如图 11 所示, 试验结果验证了所提策略在汽车 PEMFC 上的实时应用的前景。在车辆燃料电池系统中, 负载的变化和频繁的吹扫动作会导致阳极压力随氢气质量流量的波动而产生变化, 为避免膜失效、反应物不足甚至水管理故障等不良现象, 将阳极和阴极之间的压差控制在合理范围内至关重要。YUAN Hao 等^[54] 结合工程师对供氢系统行为的理解, 提出了一种带前馈的模糊逻辑 PI (FLPIF) 控制器, 将负载电流和吹扫动作视为扰动, 用于前馈补偿, 通过模糊决策过程调整 PI 参数, 从而对氢气压力进行控制。建立基于比例阀的单引射器模式供氢子系统模型, 验证了传统 PI 控制器、模糊逻辑 PI

(FLPI) 控制器和带前馈的模糊逻辑 PI (FLPIF) 控制器的性能。与 PI 控制器相比, FLPI 控制器显著提高了氢气压力的动态响应性能, 并且 FLPIF 控制器可以进一步减少扰动引起的过冲。HE Hongwen 等^[55] 建立了氢气循环泵模式的氢气系统模型, 基于模型提出了一种切换模型预测控制 (MPC) 策略来调节 PEMFC 的氢气循环, 根据工作电流将工作范围划分为低功耗和高功耗 2 种情况, 分别搭建线性化模型进行优化控制。将所提 MPC 与 PI 控制器进行对比, 所提 MPC 表现出更好的控制性能、快速响应性能和良好的跟踪精度。QUAN Shengwei 等^[56] 针对燃料电池的氢气供应系统提出了一种基于扰动预测的增强型 MPC。首先通过基于指数平滑的马尔科夫模型实时预测车速, 然后通过车辆动力学和燃料电池模型获得具有随机性的电流预测序列, 以此作为氢气控制系统的扰动, 并将其输入到模型预测控制的预测模型中。增强型 MPC 相对于传统 MPC 具有更良好的预测性能, 能有效降低阶跃变化电流的影响, 控制效果更佳。

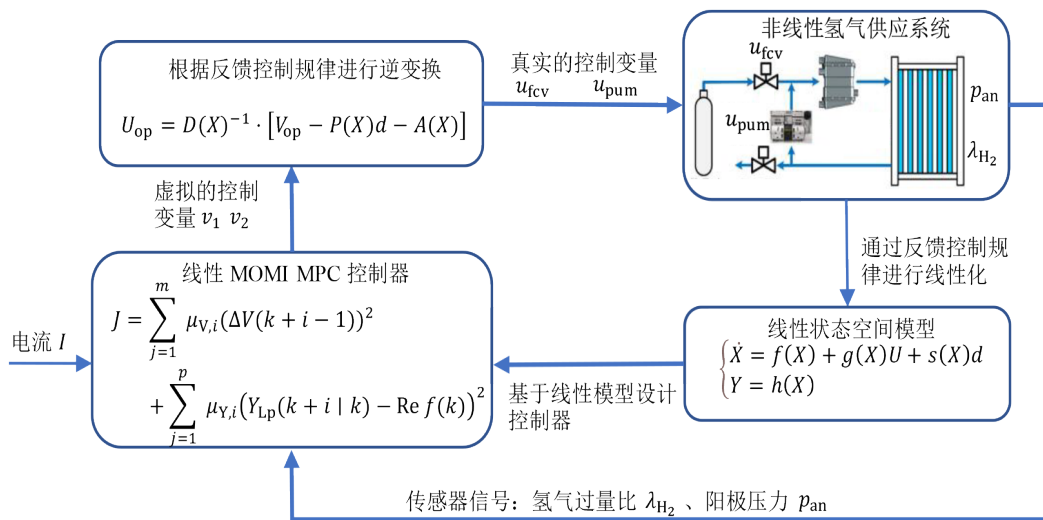


图 11 多输入多输出 MPC 原理^[53]

表 3 对氢气供应系统的控制策略进行了比较, 从控制策略来看, 智能控制策略已经成为现阶段氢气供应系统控制策略的主要研究方向, 实际工况复杂多变, 需要及时满足燃料电池的氢气需求, 基于模型的 MPC 由于具有很好的预测性, 所以得到了

广泛关注, 但是更精确的预测就意味着更庞大的计算量, 不少学者对此展开大量研究, 提出切换 MPC、分散式 MPC 等策略来降低计算量。从控制目标来看, 在提高氢气供应系统动态响应性能和耐久性的控制策略上已经有不少文献, 但对于提高氢

气利用率,提高系统经济性的研究较少。从系统结构来看,大量控制策略的控制目标包括弥补单氢气循环泵和单引射器模式的不足,这势必会导致计算

量的增加,因此,对于如氢气循环泵和引射器并联等新型系统结构的智能策略的开发将是未来研究的方向。

表3 氢气供应系统控制策略比较

控制策略	控制目标	系统结构	策略介绍	结果	参考文献
切换MPC	提高耐久性和稳定性	单氢气循环泵	根据工作电流将工作范围划分为低功耗和高功耗2种情况,分别搭建线性化模型进行优化控制	具有更好的控制性能、快速响应性能和良好的跟踪精度	[55]
基于扰动预测的增强型MPC	改善输出性能和提高耐久性	单氢气循环泵	将具有随机性的电流预测序列作为氢气控制系统的扰动,并将其输入到模型预测控制的预测模型中	能有效降低阶跃变化电流的影响,控制效果更佳	[56]
带前馈的模糊PI控制	提高动态响应性能和耐久性	单引射器	将负载电流和吹扫动作视为扰动,用于前馈补偿,通过模糊决策过程调整PI参数,从而对氢气压力进行控制	动态响应性能更好,同时将阴阳极压差控制在合适范围	[54]
多输入多输出MPC	提高动态响应性能	单氢气循环泵	通过控制流量控制阀和氢气循环泵实现对过氧比和氢气压力的调节	与传统MPC相比,阳极压力和HER的波动更小	[53]
分散式MPC	提高动态响应性能和耐久性	单引射器	根据负载电流将整个工作范围分解为多个较小的工作区域,模型切换策略来协调各个子模型	具有更小的压力波动,实现更好的目标跟踪	[57]
基于耦合分析的非线性MPC	提高动态响应性能和经济性	单氢气循环泵	利用非线性观测器在线估计内部状态,设计了一种基于自适应模型预测控制和非线性模型预测控制的新型控制方案	具有较好的动态性能、抗扰动能力和较高的氢气利用率	[58]

3.2 空气供应系统控制策略

空气供应系统的控制与氢气供应系统的控制类似,都需要对空气的压力和化学计量比进行控制。氢气通过高压的氢气罐提供,其压力和流量能满足电堆的需求^[59]。但空气依靠空气供应系统从环境中吸取,系统部件包括空气压缩机、中冷器、加湿器和背压阀等。由于机械响应缓慢,所以控制存在困难^[60]。此外,空气供应系统所需的总功率可以达到电堆产生功率的25%,因此,空气供应系统被认为是提高能源效率的关键因素^[61],为减少寄生功率,需要将空气的化学计量比控制在可以接受的范围内,否则过量的空气会增加空气压缩机的负担,造成能源浪费,而氧气不足又会引起“氧匮乏”现象^[62]。同时,空气供应系统是典型的两输入两输出耦合控制系统,两个耦合的控制变量,即质量流量和压力,同时受到空气压缩机转速和背压阀开度的影响。这意味着质量流量和压力中任何一个变量的变化都会对另一个变量产生干扰,因此,很难实现执行器的协调控制^[63]。

保持阴极压力稳定和避免缺氧对于PEMFC的空气供应至关重要。在大多数应用中,氧气过量比(OER)是通过传感器测量获得的,然而传感器通

常因时间延迟而不准确,这使精确控制空气供应系统变得困难。ZHAO Dongdong等^[64]提出一种基于观测器的分数阶PID(FOPID)控制器,通过一个非线性观测器来估计系统状态,得到OER和阴极压力。之后利用FOPID控制器来同时控制OER和阴极压力,所提控制方法的稳态和瞬态性能在负载动力学过程中得到了试验验证。在大多数研究中,OER仅通过调节PEMFC供气系统中空气压缩机的电压来控制,TIAN Ying等^[65]提出一种MPC和PID混合控制策略同时控制空气压缩机电压和背压阀开度,MPC用于PEMFC供应系统中空气压缩机和背压阀的协同控制,PID来消除MPC下系统处于稳态时的稳态误差,与MPC、PI和自抗扰控制器(ADRC)相比,MPC-PID混合控制能达到更好的控制效果。此外,MPC-PID混合控制策略在系统发生故障时也具有良好的被动和主动容错控制效果。PEMFC空气供应系统具有时变性、滞后性、干扰随机性和多个物理参数的强耦合性等特点。作为多变量控制系统,需要对气体的压力和流量进行协调优化,使整个系统获得最佳的动态响应和稳定性。LIU Zhao等^[66]提出一种基于前馈解耦控制器的双闭环模糊PID控制器,其原理如图12所示,实现对流量和压力的独立控制,从而表现出更好的动态响

应性能和稳定性, 从而降低缺气的可能性, 提高电堆的耐久性。ZENG Tao 等^[63]提出了一种基于前馈

结构的解耦控制方法, 独立控制进气质量流量和压力, 并且已通过试验进行了全面验证。

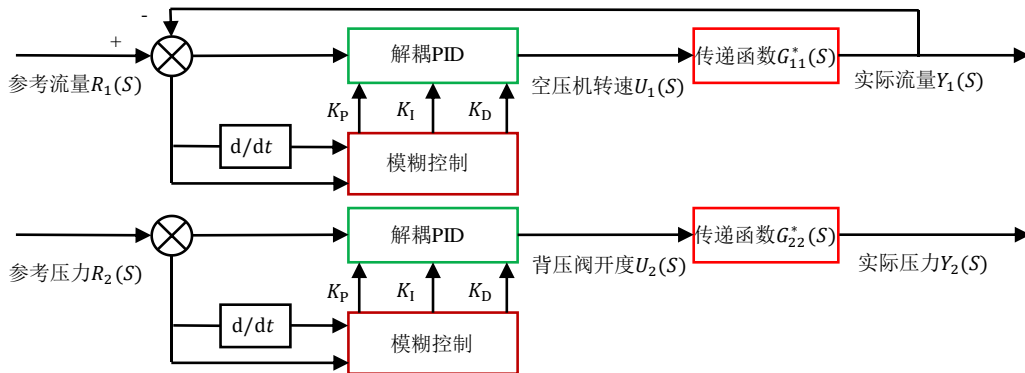


图 12 双闭环模糊PID控制^[60]

表 4 比较了近几年空气供应系统的控制策略, 由于 PEMFC 系统的非线性和较慢的动态响应, 单纯 PID 控制器抗干扰能力差, 控制效果不理想。模型预测控制可以应对 PEMFC 系统中的参数不确定性问题, 具有较强的鲁棒性。然而, 由于 PEMFC 系统的非线性特性, 预测计算时间很长, 系统响应能力差。滑模控制虽然能有效适应系统的动态变化, 但响应速度仍然较慢。模糊控制使用人类专家的简单规则来控制 PEMFC 的复杂非线性过程, 无需完全理解该过程。这种控制不需要精确的数学模型, 适应性好, 过冲小, 在参数和负载扰动变化时能达到稳定的控制效果, 但是模糊控制的设计尚缺乏系统性的理论, 获取模糊规则及隶属度函数完全凭经验进行, 高精度的模糊控制会降低决策速度。可见单一的控制策略不足以满足空气供应系统的控制需求。从控制策略来看, 模糊神经网络控制、模糊 PID 控制等复合控制策略已经成为热门的研究方向。从系统结构来看, 尾气的能量回收和自增湿系统结构有待深入研究。控制策略的目标除了满足动态响应和稳定性的需求外, 还需要考虑经济性、抗干扰能力和耐久性的需求。从控制对象来看, 空气供应系统的解耦控制已经得到了广泛的关注, 但是仍存在一些挑战。不少解耦控制器构建的系统模型是线性的, 但实际空气供应系统是强非线性系统, 空气的质量流量和压力具有强耦合特性, 其耦合关系和耦合强度随时间和负载而变化, 使传统的解耦

控制不适用于空气供应系统^[66]。因此, 关于 PEMFC 空气供应系统中压力和流量协同调节的解耦控制是未来的研究方向。

3.3 水/热管理系统控制策略

PEMFC 的温度管理是燃料电池汽车平稳运行的重要保障, 它直接影响 PEMFC 的性能和寿命^[68]。较高的温度会加剧液态水的蒸发, 从而导致膜脱水和电压下降, 而较低的温度可能导致阴极流道的“水淹”, 使氧气无法通过气体扩散层^[69]。PEMFC 在工作时, 燃料只有 50%~60% 的能量转化为电能, 其余能量都转化为了热能^[70]。这些热能被废气带走一部分, 以热辐射、热对流和热传导的形式传递到环境中, 剩余的大部分热量集聚在电堆中。这些集聚的热量如果不能及时被带走, 就会使电堆温度急剧升高, 超过其正常工作温度范围。而在启动过程时, 电堆的温度较低, 低于其正常工作范围, 使催化剂活性下降, 会降低燃料电池的动力学性能。同时, 电堆的内部温度分布不均也会降低电池的耐久性和稳定性。

PEMFC 系统固有的非线性和模型参数的不确定性使水/热管理系统的控制存在较大的困难。LI Jiawen 等^[71]提出了一种基于机器学习的 PID 控制策略, 可以实时地改变 PID 控制器的参数, 通过调整水泵中冷却水的流量实现对温度更精确的控制。仅针对水泵或风扇的单一阈值控制, 会导致入口温度与进出口温差之间存在很强的耦合关系。针对这一问题, SU Chuqi 等^[72]提出一种解耦控制策

表 4 空气供应系统控制策略比较

控制策略	控制目标	系统结构	策略介绍	结果	参考文献
非线性鲁棒控制	提高动态响应能力	单级空气压缩机增压和加湿器增湿	采用微分观测器获得不能直接测量的电堆阴极参数,同时对 OER 和电堆阴极压力进行解耦控制,分别设计了非线性鲁棒控制器	相对于反馈线性化控制,鲁棒性更好	[67]
基于观测器的分数阶 PID 控制	提高动态响应性能和稳定性	单级空气压缩机增压和阴极循环增湿	通过观测器估计系统内部状态,利用分数阶 PID 控制器同时控制 OER 和阴极压力	具有更小的过冲和更快的响应时间,稳态误差小	[64]
双闭环模糊 PID 控制	提高动态响应性能	单级空气压缩机增压和加湿器增湿	基于前馈补偿的解耦控制器消除了流量和压力的相互作用,实现对流量和压力的独立控制	能快速跟随负载的变化,无系统响应振荡和稳态误差	[60]
MPC 和 PID 混合控制	提高动态响应性能和稳定性	单级空气压缩机增压和加湿器增湿	MPC 用于 PEMFC 供应系统中空气压缩机和背压阀的协同控制, PID 来消除 MPC 下系统处于稳态时的稳态误差	控制效果更好,有良好的容错控制效果	[65]
模糊神经网络解耦控制	提高动态响应能力	单级空气压缩机增压和阴极循环增湿	弥补了神经网络在模糊数据处理中的不足和纯模糊逻辑在学习中的缺陷,实现进气流量与压力的解耦	系统响应速度快	[66]
基于前馈的解耦控制	提高动态响应能力和稳定性	单级空气压缩机增压和阴极循环增湿	解耦控制器实现流量和压力的解耦控制,前馈控制器保证发生故障时的可靠性	实现流量和压力的良好跟随,抗扰动能力强	[63]

略,建立了水泵流量控制器和模糊 PID 风机控制器,用来稳定负载变化工况下电堆的进出口温差,同时保证入口温度在目标温度值附近。结果表明,解耦控制策略控制效果良好,燃料电池温度可以始终稳定在设定的目标值附近,使燃料电池保持在高效率范围内运行。虽然上述算法可以实现对水泵和散热器风扇的单独控制,但没有考虑它们之间的相互影响。为了解决电堆热管理系统中水泵和散热器的协同控制问题,LI Jiawen 等^[73]提出了一种基于分布式深度强化学习的集成控制策略,取代了传统控制框架中水泵和散热器的独立控制器,考虑了水泵和散热器之间的相互影响,其控制原理如图 13 所示,试验结果表明,所提出的一体化控制策略能同时有效控制冷却水流速和风扇风速,从而提高了

PEMFC 的运行效率。大多数关于 PEMFC 水/热管理的研究仅针对于温度的控制,而忽略了温度对 PEM 含水量的影响, FU Shengxiang 等^[74]提出基于 Xgboost 算法的水/热管理策略在控制温度的同时,将 PEM 的含水量保持在合理水平,在 PEMFC 电堆的混合驾驶循环下与其他策略进行了比较,结果表明,与其他基于机器学习和模糊逻辑的控制策略相比,基于 Xgboost 算法的控制策略具有最佳的控制性能,降低了 PEMFC 电堆温度的最大偏差和 PEM 含水量的变化。

表 5 对水/热管理系统的控制策略进行了比较,从控制对象来看,考虑电堆温度和进出口温差的强耦合性,对水泵和风扇的协同控制已经被证明是 PEMFC 研究中的一个重点,对于水泵和风扇的解

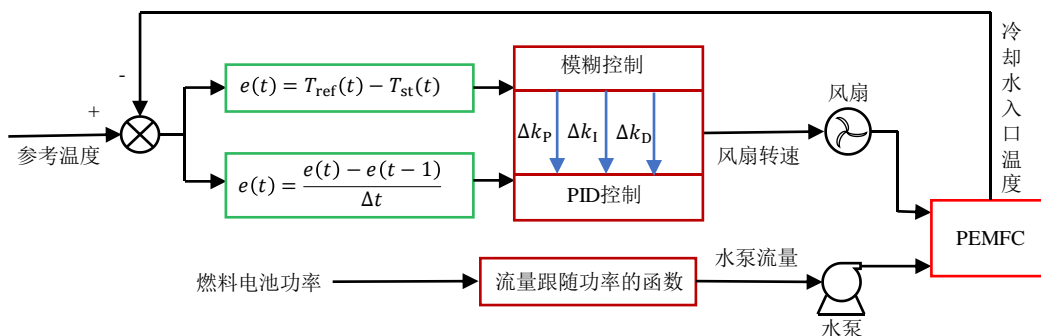


图 13 前馈控制和模糊 PID 控制原理^[73]

耦控制将是未来水/热管理系统控制的主要研究目标。同时,对温度和湿度的集成控制将是未来的一个研究方向。温度分布的均匀性对 PEMFC 的耐久性有很大影响,而现阶段对温度控制系统的策略研究更多停留在一维模型层面,考虑温度分布均匀性的控制策略有待进一步研究。从控制策略来看,由于 PEMFC 系统固有的非线性和模型参数的不确定

性,基于误差的 PID 控制和基于规则的模糊控制很难实现对温度的精确调节。基于模型的模型预测控制过于依赖于精确的模型,计算量大,无法保证控制的实时性。而基于数据驱动的深度强化学习策略具有较强的自适应能力,可以适应非线性控制系统固有的不确定性。因此,基于数据驱动的智能控制将成为未来水/热管理系统控制策略的研究方向。

表 5 水/热管理系统的控制策略比较

控制策略	控制对象	策略介绍	结果	参考文献
基于深度强化学习的 PID 控制	水泵	通过深度强化学习,实时调整 PID 控制的参数	所提控制方法具有较好的控制性能和鲁棒性	[71]
前馈控制和模糊 PID 控制	水泵和风扇的独立控制	水泵流量跟随功率控制,同时利用模糊 PID 控制器来调节风扇转速	控制效果良好,燃料电池温度可以始终稳定在设定的目标值附近	[72]
MPC 控制	水泵和风扇的协同控制	利用 MPC 策略对来风机和水泵进行协同控制	能将电堆的温度稳定在设定值,并实现对目标的跟踪控制	[75]
基于分布式深度强化学习的集成控制	水泵和风扇的协同控制	实现了对水泵和风扇的协同控制	能同时有效控制冷却水流速和风速,从而提高了 PEMFC 的运行效率	[73]
基于 Xgboost 算法的智能控制	温度和 PEM 的含水量	在实现温度控制的同时,也将 PEM 的含水量保持在合理水平	降低了 PEMFC 电堆的温度最大偏差和 PEM 含水量的变化	[74]

3.4 能量管理系统控制策略

燃料电池具有高效率、高功率密度、近零污染、快速启动和低腐蚀性等优点,但是由于其动态响应慢、电化学反应慢、制动能量无法回收等缺点,无法满足车辆的功率需求^[76-77]。车用燃料电池系统常以锂离子电池或超级电容器作为辅助能源,缓解 PEMFC 的上述局限性^[78]。然而,能源之间的功率分配将直接对燃料的经济性产生影响,同时,严重的功率波动也会影响燃料电池系统的耐久性,因此协调能源之间的能量流至关重要^[79]。

为了缓解功率波动对燃料电池耐久性的影响, FU Zhumu 等^[79]提出了一种基于模糊控制的频率解耦策略,将所需功率分离为 3 个频率范围,燃料电池、电池和超级电容器分别用来供应低频、中频和高频的功率,其控制原理如图 14 所示,仿真和试验结果表明,所提出的策略能有效降低氢气的消耗、限制燃料电池的功率波动,从而延长燃料电池寿命。考虑到能量管理对燃料电池老化降解的影响, TANG Xiaolin 等^[80]提出了一种基于深度强化学习的能量管理策略,将燃料电池系统退化纳入目

标函数,通过调整降解权重和氢消耗权重,实现燃料经济性和燃料电池系统退化之间的平衡,仿真结果表明,所提策略在略微提高燃料经济性的情况下,能有效提高燃料电池系统的寿命。综合考虑系统成本、燃料消耗和电池退化对燃料电池系统的影响, ZHOU Jiaming 等^[81]基于深度确定性策略梯度,提出了一种自优化功率匹配策略,基于所提出的策略,在最佳混合动力度下,燃料电池系统能耗更低,寿命更长。预测模型是 MPC 的基础,但对非线性模型进行线性化的过程会导致额外的预测误差和更多的计算成本, JIA Chao 等^[82]提出了一种基于实时自适应模型预测控制 (AMPC) 的能量管理策略,在每个控制间隔,通过线性变参数预测模型在线更新,来适应电池充电状态的变化,然后制定 AMPC 的约束优化问题,以实现氢消耗、PEMFC 电流波动、电池功率损耗和电池充电状态 4 个性能指标之间的期望权衡。结果表明,该策略在降低氢消耗和 PEMFC 电流波动方面性能较好。

表 6 对能量管理系统的控制策略进行了比较,从系统结构来看,燃料电池+电池的系统结构是能

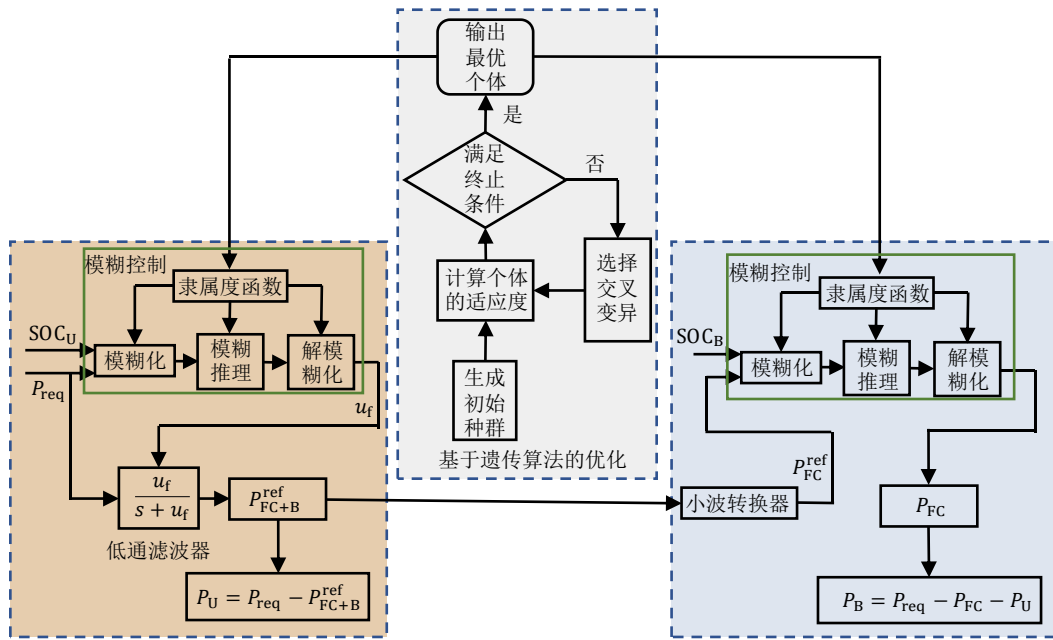


图 14 基于模糊控制的频率解耦控制原理 [79]

量管理系统研究的主流，但电池寿命依旧是难以解决的难点。从控制的目标来看，针对多目标优化的能量管理策略已经成为研究的热点，但是综合考虑氢消耗、PEMFC 性能衰退、电池老化和系统成本的控制策略还较少。对于能量管理系统的控制策略可以分为基于规则、基于优化和基于学习三大类 [49]。因为是基于简单的规则集，基于规则的控制适用于在线实现，具有很高的效率，但它通常是基于经验定律，规则参数可能受到驾驶条件的影响，结果不一定是理想的 [83]。基于优化的策略包括全局优化和实时优化 2 种：基于全局的优化在减小氢消耗方面有很高的性能，但是它需要提前了

解车辆驾驶路线的相关信息；基于实时的优化可以根据实时收集的信息给出优化方案，能及时地降低氢消耗和减缓电池退化，但是该算法的设计有很大难度，而且瞬时最优无法保证结果的全局最优 [84-85]。基于学习的策略是根据实时信息和历史数据库进行控制的，是无模型控制，具有较强的学习能力和自适应能力 [86]。因此，开发基于学习的多目标优化控制策略将是未来的研究方向。

4 总结与展望

在综合车用燃料电池系统控制存在的不足和目前研究现状的基础上，简述了燃料电池系统的控制目标，综述了氢气供应系统、空气供应系统、水/

表 6 能量管理系统控制策略比较

控制策略	控制方法	系统结构	策略介绍	结果	参考文献
基于模糊控制的频率解耦控制	基于规则	燃料电池+电池+超级电容	燃料电池、电池和超级电容分别用来提供低、中和高频的功率需求	有效降低氢气的消耗，限制燃料电池的功率波动，从而延长燃料电池寿命	[79]
基于深度强化学习的控制	基于学习	燃料电池+电池	通过调整降解权重和氢消耗权重，实现燃油经济性和燃料电池系统退化之间的平衡	在略微提高燃料经济性的情况下，能有效提高燃料电池系统的寿命	[80]
基于机器学习的控制	基于学习	燃料电池+电池	综合考虑系统成本、燃料消耗和电池退化对燃料电池系统的影响	在最佳混合动力度下，燃料电池系统能耗更低，寿命更长	[81]
可变模糊逻辑控制	基于规则	燃料电池+电池	与常规模糊控制相比，该策略引入燃料电池的降解作为第 3 输入	可延长燃料电池的使用寿命	[87]
自适应模型预测控制	基于优化	燃料电池+电池	实现了氢消耗、PEMFC 电流波动、电池功率损耗和电池充电状态 4 个性能指标之间的权衡	在降低氢消耗和 PEMFC 电流波动方面性能较好	[82]

热管理系统和能量管理系统的系统结构,从系统结构、控制对象、控制目标、控制方法等方面对车用

燃料电池系统的控制策略进行了分析,如图 15 所示。

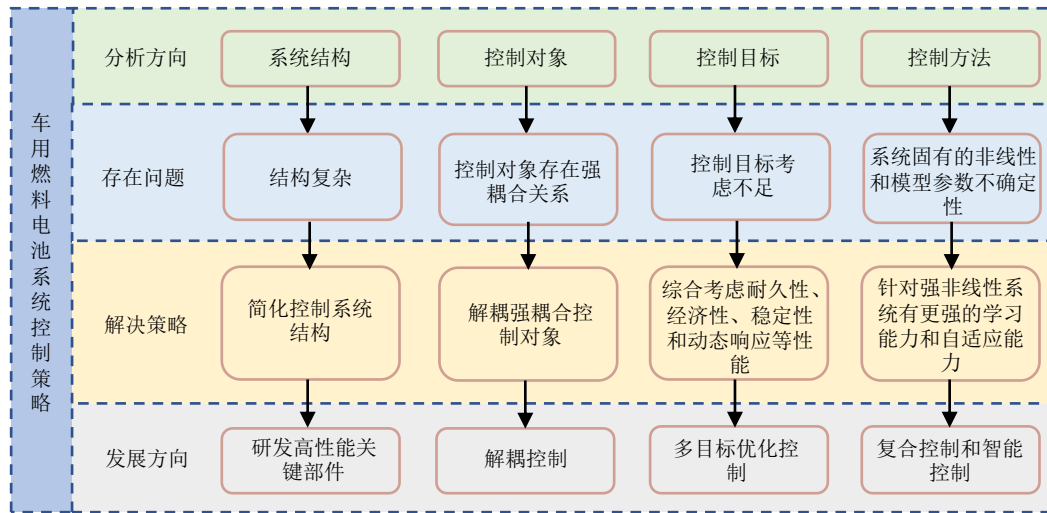


图 15 车用燃料电池系统控制策略分析

在车用燃料电池系统结构设计方面,需要综合考虑方案的效率、成本、控制难度、系统复杂度和技术成熟度等多方面因素。循环模式是目前应用最广泛的氢气供应系统,可通过开发高性能、低功耗、结构紧凑的氢气循环泵和优化引射器的结构来提高系统的性能。对于空气供应系统,单级空气压缩机增压和外增湿方式增湿被广泛应用,未来解决好空气压缩机和膨胀机的参数匹配问题,通过尾气能量回收可以提高系统的效率,而开发自增湿系统能简化系统结构。针对电堆的水/热管理系统已经比较成熟,但是囊括电堆、空气压缩机、DC/DC 转换器等多个发热部件的集成热管理系统还有待研究。燃料电池+电池结构是目前能量管理的最佳选择,但是随着未来燃料电池技术的发展,会逐渐形成大功率燃料电池+小功率锂离子电池的结构组成。

车用燃料电池的控制目标除了要满足动态响应性能和稳定性需求外,还要考虑经济性、抗干扰能力和耐久性的需求。基于模型的智能控制由于具有

很好的预测性,已经被广泛应用于氢气供应系统的控制,但更精确的预测就意味着更庞大的计算量,所以动态响应能力更强的智能控制将成为未来的研究重点。虽然关于空气供应系统的解耦控制已经得到广泛关注,但不少解耦控制器构建的系统模型是线性的,而实际系统是强非线性系统,这使传统的解耦控制不适用于空气供应系统,因此,关于 PEMFC 空气供应系统中压力和流量协同调节的解耦控制有待进一步深入研究。由于 PEMFC 系统固有的非线性和模型参数的不确定性,基于误差的 PID 控制和基于规则的模糊控制很难实现对温度的精确调节;基于模型的模型预测控制过于依赖精确的模型,计算量大,无法保证控制的实时性;而基于数据驱动的深度强化学习策略有较强的自适应能力,可以适应非线性控制系统固有的不确定性。由于基于学习的能量管理策略具有较强的学习能力和自适应能力,综合考虑氢消耗、PEMFC 性能衰退、电池老化和系统成本等多个优化目标的基于学习的能量管理策略将是未来的研究方向。

参考文献 (References)

[1] CHEN Xi, CHEN Yao, LIU Qian, et al. Performance Study on a Stepped Flow Field Design for Bipolar Plate in PEMFC[J]. Energy Reports, 2021, 7: 336-347.

[2] JIAO Kui, XUAN Jin, DU Qing, et al. Designing the Next Generation of Proton-Exchange Membrane Fuel Cells[J]. Nature, 2021, 595(7867): 361-369.

- [3] ZOU Wenjiang, KIM Y B. Temperature Control for a 5 kW Water-Cooled PEM Fuel Cell System for a Household Application[J]. IEEE Access, 2019, 7: 144826–144835.
- [4] SHEN Jun, TU Zhengkai, CHAN S H. Enhancement of Mass Transfer in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell with Blockage in the Flow Channel[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 149: 1408–1418.
- [5] 张东波. PEM燃料电池空气供给系统氧匮乏的模型预测控制[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- ZHANG Dongbo. Model Predictive Control for Oxygen Starvation in Air Supply System of PEM Fuel Cell[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [6] 王亚雄, 王轲轲, 钟顺彬, 等. 面向耐久性提升的车用燃料电池系统电控技术研究进展[J]. 汽车工程, 2022, 44(4): 545–559.
- WANG Yaxiong, WANG Keke, ZHONG Shunbin, et al. Research Progress on Durability Enhancement-Oriented Electric Control Technology of Automotive Fuel Cell System[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(4): 545–559. (in Chinese)
- [7] 刘英杰, 陈奔. 质子交换膜燃料电池流场强化传质研究进展[J]. 汽车工程, 2021, 43(6): 799–807, 814.
- LIU Yingjie, CHEN Ben. Research Progress in Mass Transfer Enhancement of Flow Field in Proton Exchange Membrane Fuel Cell[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(6): 799–807, 814. (in Chinese)
- [8] SOLER J, HONTANON E, DAZA L. Electrode Permeability and Flow-Field Configuration: Influence on the Performance of a PEMFC [J]. Journal of Power Sources, 2003, 118(1): 172–178.
- [9] KIM B, CHA D, KIM Y. The Effects of Air Stoichiometry and Air Excess Ratio on the Transient Response of a PEMFC Under Load Change Conditions [J]. Applied Energy, 2015, 138: 143–149.
- [10] SHEN Qiang, HOU Ming, YAN Xiqiang, et al. The Voltage Characteristics of Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Under Steady and Transient States [J]. Journal of Power Sources, 2008, 179(1): 292–296.
- [11] ZHANG Qian, LIN Rui, TÉCHER L, et al. Experimental Study of Variable Operating Parameters Effects on Overall PEMFC Performance and Spatial Performance Distribution [J]. Energy, 2016, 115: 550–560.
- [12] DALVI A, GUAY M. Control and Real-Time Optimization of an Automotive Hybrid Fuel Cell Power System [J]. Control Eng Pract, 2009, 17(8): 924–938.
- [13] CHEN Qin, ZHANG Guobin, ZHANG Xuzhong, et al. IS Thermal Management of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: A Review of Cooling Methods, Material Properties, and Durability [J]. Applied Energy, 2021, 286: 116496.1–116496.19.
- [14] 洪凌. 车用燃料电池发电系统氢气回路控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- HONG Ling. Fuel Delivery Control for Vehicular Fuel Cell Power Systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [15] KURNIA J C, SASMITO A P, SHAMIM T. Advances in Proton Exchange Membrane Fuel Cell with Dead-End Anode Operation: A Review [J]. Applied Energy, 2019, 252: 113416.1–113416.18.
- [16] 董凯瑞, 刘广彬, 高志成. 燃料电池氢气循环系统综述 [J]. 电源技术, 2021, 45(4): 545–551.
- DOND Kairui, LIU Guangbin, GAO Zhicheng. Review of Fuel Cell Hydrogen Cycle System [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(4): 545–551. (in Chinese)
- [17] 张立新, 李建, 李瑞懿, 等. 车用燃料电池氢气供应系统研究综述 [J]. 工程热物理学报, 2022, 43(6): 1444–1459.
- ZHANG Lixin, LI Jian, LI Ruiyi, et al. Research on the Hydrogen Supply System of Fuel Cell for Vehicle [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(6): 1444–1459. (in Chinese)
- [18] 刘俊峰, 李清, 秦燕, 等. 质子交换膜燃料电池氢气循环系统的发展现状 [J]. 能源技术与管理, 2022, 47(5): 45–48.
- LIU Junfeng, LI Qing, QIN Yan, et al. Developing Status of Hydrogen Recycling System of Proton Exchange Membrane Fuel Cell [J]. Energy Technology and Management, 2022, 47(5): 45–48. (in Chinese)
- [19] JAMES B D, SPISAK A B, COLELLA W G. Design for Manufacturing and Assembly Cost Estimate Methodology for Transportation Fuel Cell Systems [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(2): 024503.1–024503.6.
- [20] 邢子义, 王升科, 邢晓明. 一种氢气循环泵与引射器并联集成的燃料电池供氢系统: CN112864420B [P]. 2021–08–31.
- XING Ziyi, WANG Shengke, XING Xiaoming. A Fuel Cell Hydrogen Supply System with Hydrogen Circulation

- Pump and Primer Integrated in Parallel: CN112864420B [P].2021-08-31.(in Chinese)
- [21] BLUNIER B, MIRAOUI A. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Air Management in Automotive Applications [J]. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2010, 7(4):041007.1-041007.11.
- [22] ZHAO Yuanyang, LIU Yunxia, LIU Guangbin, et al. Air and Hydrogen Supply Systems and Equipment for PEM Fuel Cells: A Review [J]. *International Journal of Green Energy*, 2022, 19(4):331-348.
- [23] BANG J W, KIM H S, LEE D H, et al. Study on Operating Characteristics of Fuel Cell Powered Electric Vehicle with Different Air Feeding Systems [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2008, 22(8):1602-1611.
- [24] AKROOT A, EKICI O, KOKSAL M. Process Modeling of an Automotive PEM Fuel Cell System [J]. *International Journal of Green Energy*, 2019, 16(10):778-788.
- [25] HOU Junbo, YANG Min, KE Changchun, et al. Control Logics and Strategies for Air Supply in PEM Fuel Cell Engines [J]. *Applied Energy*, 2020, 269:115059.1-115059.15.
- [26] ZHAO Yuanyang, LI Liansheng, SHU Pengcheng. Thermodynamic Simulation of Scroll Compressor/Expander Module in Automotive Fuel Cell Engine [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2006, 220(5):571-577.
- [27] UHRIG F, SCHINNERL M, HALUSKA P, et al. Comparative Study of Different Air Supply Systems for Automotive Fuel Cell Applications [J]. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 2019, 8(1):29-39.
- [28] SAYADI S, TSATSARONIS G, DUELK C. Exergo-economic Analysis of Vehicular PEM (Proton Exchange Membrane) Fuel Cell Systems with and Without Expander [J]. *Energy*, 2014, 77:608-622.
- [29] 袁飞, 易山杉, 张晨. 基于自增湿 PEMFC 电堆阴极增湿必要性的对比测试研究 [J]. *科学技术创新*, 2020(16):6-9.
YUAN Fei, YI Shanshan, ZHANG Chen. A Comparative Test Study on The Necessity of Cathode Humidification Based on Self-Humidifying PEMFC Power Stacks [J]. *Science and Technology Innovation*, 2020(16):6-9. (in Chinese)
- [30] 王婧, 陈晓红, 王学军. 燃料电池增湿系统的研究现状及发展趋势 [J]. *有机氟工业*, 2013(2):47-53.
WANG Jing, CHEN Xiaohong, WANG Xuejun. Progress and Future Advances of Fuel Cell Humidifying Membrane [J]. *Organic-Fluorine Industry*, 2013(2):47-53. (in Chinese)
- [31] 王贵荣. 阴极循环对氢燃料电池系统电压钳位及自增湿效应的研究 [J]. *电源学报*, 2023(4):130-137.
WANG Guirong. Research on Voltage Clamping and Self-Humidification Effects of Cathode Cycling in Hydrogen Fuel Cell System [J]. *Journal of Power Supply*, 2023(4):130-137. (in Chinese)
- [32] 赵洪波. 质子交换膜燃料电池启停和变载工况下的动态特性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
ZHAO Hongbo. Study on Dynamic Characteristics of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Under Start-Stop and Variable Load Conditions [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [33] 侯健, 杨铮, 贺婷, 等. 质子交换膜燃料电池热管理问题的研究进展 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(1):19-30.
HOU Jian, YANG Zheng, HE Ting, et al. Research Progress on the Thermal Management of Proton Exchange Membrane Fuel Cells [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(1):19-30. (in Chinese)
- [34] WANG Yan, GAO Qing, ZHANG Tianshi, et al. Advances in Integrated Vehicle Thermal Management and Numerical Simulation [J]. *Energies*, 2017, 10:1636.
- [35] ZHANG Guangsheng, KANDLIKAR S G. A Critical Review of Cooling Techniques in Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stacks [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37:2412-2429.
- [36] XU Jiamin, ZHANG Caizhi, WAN Zhongmin, et al. Progress and Perspectives of Integrated Thermal Management Systems in PEM Fuel Cell Vehicles: A Review [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2022, 155:111908.1-111908.23.
- [37] WANG Yun, MUKHERJEE P P, MISHLER J, et al. Cold Start of Polymer Electrolyte Fuel Cells: Three-Stage Startup Characterization [J]. *Electrochimica Acta*, 2010, 55(8):2636-2644.
- [38] OZDEN A, SHAHGALDI S, LI Xianguo, et al. A Review of Gas Diffusion Layers for Proton Exchange Membrane Fuel Cells-with a Focus on Characteristics, Characteri-

- zation Techniques, Materials and Designs [J]. Progress Energy and Combustion Science, 2019, 74: 50–102.
- [39] FLUCKIGER R, TIEFENAUER A, RUGE M, et al. Thermal Analysis and Optimization of a Portable, Edge-Air-Cooled PEFC Stack [J]. Journal of Power Sources, 2007, 172(1): 324–333.
- [40] WANG X R, MA Y, GAO J, et al. Review on Water Management Methods for Proton Exchange Membrane Fuel Cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(22): 12206–12229.
- [41] BAE I, KIM B, KIM Y, et al. In-Plane 2-D Patterning of Microporous Layer by Inkjet Printing for Water Management of Polymer Electrolyte Fuel Cell [J]. Renewable Energy, 2020, 146: 960–967.
- [42] GUO Xiaoqian, ZENG Yachao, WANG Zhiqing, et al. Improvement of PEMFC Performance and Endurance by Employing Continuous Silica Film Incorporated Water Transport Plate [J]. Electrochimica Acta, 2016, 191: 116–123.
- [43] 李菁, 汪怡平, 陶琦, 等. 全功率燃料电池汽车散热系统设计、建模与分析 [J]. 汽车工程学报, 2019, 9(6): 462–467.
- LI Jing, WANG Yiping, TAO Qi, et al. Design, Modeling and Analysis of Heat Dissipation System for Full-Power Fuel Cell Vehicles [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(6): 462–467. (in Chinese)
- [44] 程子枫, 李明, 郭勤, 等. 节温器布置形式对质子交换膜燃料电池电堆冷却性能的影响 [J]. 汽车技术, 2021(1): 25–30.
- CHENG Zifeng, LI Ming, GUO Qin, et al. Effect of Thermostat Layouts on the cooling performance of proton exchange membrane fuel cell Stacks [J]. Automotive Technology, 2021(1): 25–30. (in Chinese)
- [45] ZHAO Qing, LI Ruying, JI Min, et al. Organic Content Influences Sediment Microbial Fuel Cell Performance and Community Structure [J]. Bioresource Technology, 2016, 220: 549–556.
- [46] 王志福, 罗崑, 徐崧, 等. 燃料电池汽车能量管理策略综述 [J]. 电池, 2022, 52(3): 328–332.
- WANG Zhifu, LUO Wai, XU Song, et al. A Review of Energy Management Strategy for Fuel Cell Vehicle [J]. Battery Bimonthly, 2022, 52(3): 328–332. (in Chinese)
- [47] DAS V, PADMANABAN S, VENKITUSAMY K, et al. Recent Advances and Challenges of Fuel Cell Based Power System Architectures and Control—A Review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 73: 10–18.
- [48] SAIB S, HAMOUDA Z, MAROUANI K. Energy Management in a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle Using a Fuzzy Logic Approach [C]//2017 5th International Conference on Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B), Oct. 29–31, 2017, Boumerdes, Algeria. Piscataway NJ: IEEE, c2017: 1–4.
- [49] INCI M, BUYUK M, DEMIR M H, et al. A Review and Research on Fuel Cell Electric Vehicles: Topologies, Power Electronic Converters, Energy Management Methods, Technical Challenges, Marketing and Future Aspects [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2021, 137: 110648.1–110648.27.
- [50] GARCÍA P, FERNÁNDEZ L M, TORREGLOSA J P, et al. Operation Mode Control of a Hybrid Power System Based on Fuel Cell/Battery/Ultracapacitor for an Electric Tramway [J]. Computers and Electrical Engineering, 2013, 39(7): 1993–2004.
- [51] LYU Xueqin, QU Yan, WANG Yudong, et al. A Comprehensive Review on Hybrid Power System for PEMFC-HEV: Issues and Strategies [J]. Energy Conversion Management, 2018, 171: 1273–1291.
- [52] 郑先娜, 林瑞全. 质子交换膜燃料电池控制策略综述 [J]. 电气技术, 2017(11): 1–5, 24.
- ZHENG Xianna, LIN Ruiquan. Summarization of Control Strategy for Proton Exchange Membrane Fuel Cell [J]. Electrical Engineering, 2017(11): 1–5, 24. (in Chinese)
- [53] QUAN Shengwei, WANG Yaxiong, XIAO Xuelian, et al. Feedback Linearization-Based MIMO Model Predictive Control with Defined Pseudo-Reference for Hydrogen Regulation of Automotive Fuel Cells [J]. Applied Energy, 2021, 293: 116919.1–116919.13.
- [54] YUAN Hao, DAI Haifeng, WU Wei, et al. A Fuzzy Logic PI Control with Feedforward Compensation for Hydrogen Pressure in Vehicular Fuel Cell System [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(7): 5714–5728.
- [55] HE Hongwen, QUAN Shengwei, WANG Yaxiong. Hydrogen Circulation System Model Predictive Control for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell-Based Electric Vehicle Application [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(39): 20382–20390.
- [56] QUAN Shengwei, WANG Yaxiong, XIAO Xuelian, et al.

- Disturbance Prediction-Based Enhanced Stochastic Model Predictive Control for Hydrogen Supply and Circulating of Vehicular Fuel Cells [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 238: 114167.1–114167.14.
- [57] ZHANG Bo, HAO Dong, CHEN Jinrui, et al. Modeling and Decentralized Predictive Control of Ejector Circulation-Based PEM Fuel Cell Anode System for Vehicular Application [J]. *Automotive Innovation*, 2022, 5(3): 333–345.
- [58] ZHU Y, ZOU J X, LI S, et al. Nonlinear Model Predictive Control of PEMFC Anode Hydrogen Circulation System Based on Dynamic Coupling Analysis [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(6): 2385–2400.
- [59] SANCHEZ V M, BARBOSA R, ARRIAGA L G, et al. Real Time Control of Air Feed System in a PEM Fuel Cell by Means of an Adaptive Neural-Network [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39 (29) : 16750–16762.
- [60] LIU Zhao, CHEN Huicui, PENG Lian, et al. Feedforward-Decoupled Closed-Loop Fuzzy Proportion-Integral-Derivative Control of Air Supply System of Proton Exchange Membrane Fuel Cell [J]. *Energy*, 2022, 240: 122490.1–122490.11.
- [61] TIRNOVAN R, GIURGEA S. Efficiency Improvement of a PEMFC Power Source by Optimization of the Air Management [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(9): 7745–7756.
- [62] PUKRUSHPAN J T, STEFANOPOULOU A G, PENG H. Control of Fuel Cell Breathing [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2004, 24(2): 30–46.
- [63] ZENG Tao, XIAO Long, CHEN Jinrui, et al. Feedforward-Based Decoupling Control of Air Supply for Vehicular Fuel Cell System: Methodology and Experimental Validation [J]. *Applied Energy*, 2023, 335: 120756.1–120756.15.
- [64] ZHAO Dongdong, LI Fei, MA Rui, et al. An Unknown Input Nonlinear Observer Based Fractional Order PID Control of Fuel Cell Air Supply System [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56 (5) : 5523–5532.
- [65] TIAN Ying, ZOU Qiang, LIU Jiaqi, et al. Novel Hybrid Control Scheme of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Air Supply System [J]. *Energy Technology*, 2022, 10 (2): 2100906.1–2100906.23.
- [66] JIA Yuru, ZHANG Ruiliang, ZHANG Tao, et al. Coordinated Control of the Fuel Cell Air Supply System Based on Fuzzy Neural Network Decoupling [J]. *ACS Omega*, 2021, 6(50): 34438–34446.
- [67] 马彦, 朱添麟. 燃料电池空气供应系统非线性鲁棒控制 [J]. *车用发动机*, 2021(1): 9–17.
- MA Yan, ZHU Tianlin. Nonlinear Robust Control of Fuel Cell Air Supply System [J]. *Vehicle Engine*, 2021(1): 9–17. (in Chinese)
- [68] XIAO Biao, ZHAO Junjie, TU Zhengkai, et al. Water Distribution and Performance Variation in a Transparent PEMFC with Large Active Area [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(76): 38040–38050.
- [69] LI Qinghe, LIU Zhiqiang, SUN Yi, et al. A Review on Temperature Control of Proton Exchange Membrane Fuel Cells [J]. *Processes*, 2021, 9(2): 1–21.
- [70] WANG Yun, CHEN K S, MISHLER J, et al. A Review of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Technology, Applications, and Needs on Fundamental Research [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(4): 981–1007.
- [71] LI Jiawen, LI Yaping, YU Tao. Temperature Control of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Based on Machine Learning [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2021, 9: 763099.
- [72] SU Chuqi, SUN Jingfeng, MENG Guodong, et al. Thermal Management Control Strategy of Liquid-Cooled Fuel Cell Vehicle [J]. *Energy Reports*, 2022, 8 (4) : 141–153.
- [73] LI Jianwei, LI Yaping, YU Tao. Distributed Deep Reinforcement Learning-Based Multi-Objective Integrated Heat Management Method for Water-Cooling Proton Exchange Membrane Fuel Cell [J]. *Case Study in Thermal Engineering*, 2021, 27: 101284.
- [74] FU Shengxiang, ZHANG Dongfang, CHA S W, et al. An Extreme Gradient Boosting-Based Thermal Management Strategy for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stacks [J]. *Journal of Power Sources*, 2023, 558: 232617.1–232617.13.
- [75] YUAN Xiaodong, WU Gang, ZHOU Jianduo, et al. MPC-Based Thermal Management for Water-Cooled Proton Exchange Membrane Fuel Cells [J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 338–348.
- [76] HU Xiaosong, ZOU Changfu, TANG Xiaolin, et al. Cost-Optimal Energy Management of Hybrid Electric Vehicles Using Fuel Cell/Battery Health-Aware Predictive Control [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35

- (1):382-392.
- [77] SULAIMAN N, HANNAN M A, MOHAMED A, et al. Optimization of Energy Management System for Fuel-Cell Hybrid Electric Vehicles: Issues and Recommendations[J]. Applied Energy, 2018, 228:2061-2079.
- [78] DAS H S, TAN C W, YATIM A H M. Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles: A Review on Power Conditioning Units and Topologies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76:268-291.
- [79] FU Zhumu, ZHU Longlong, TAO Fazhan, et al. Optimization Based Energy Management Strategy for Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Vehicle Considering Fuel Economy and Fuel Cell Lifespan[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(15):8875-8886.
- [80] TANG Xiaolin, ZHOU Haitao, WANG Feng, et al. Longevity-Conscious Energy Management Strategy of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle Based on Deep Reinforcement Learning [J]. Energy, 2022, 238 (Part A) : 121593.1-121593.14.
- [81] ZHOU Jiaming, FENG Chunxiao, SU Qingqing, et al. The Multi-Objective Optimization of Powertrain Design and Energy Management Strategy for Fuel Cell-Battery Electric Vehicle[J]. Sustainability, 2022, 14(10):1-19.
- [82] JIA Chao, QIAO Wei, CUI Junwei, et al. Adaptive Model-Predictive-Control-Based Real-Time Energy Management of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(2):2681-2694.
- [83] SORLEI I S, BIZON N, THOUNTHONG P, et al. Fuel Cell Electric Vehicles—A Brief Review of Current Topologies and Energy Management Strategies [J]. Energies, 2021, 14(1):1-29.
- [84] FATHY A, REZK H, NASSEF A M. Robust Hydrogen-Consumption-Minimization Strategy Based Salp Swarm Algorithm for Energy Management of Fuel Cell/Supercapacitor/Batteries in Highly Fluctuated Load Condition [J] Renewable Energy, 2019, 139:147-160.
- [85] FERNANDEZ R A, CARABALLO S C, CILLERUELO F B, et al. Fuel Optimization Strategy for Hydrogen Fuel Cell Range Extender Vehicles Applying Genetic Algorithms [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81(Part 1):655-668.
- [86] TRAN D D, VAFAEIPOUR M, EL BAGHDADI M, et al. Thorough State-of-the-Art Analysis of Electric and Hybrid Vehicle Powertrains: Topologies and Integrated Energy Management Strategies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 119(C):109596.1-109596.29.
- [87] LUCA R, WHITELEY M, NEVILLE T, et al. Comparative Study of Energy Management Systems for a Hybrid Fuel Cell Electric Vehicle—A Novel Mutative Fuzzy Logic Controller to Prolong Fuel Cell Lifetime[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(57):24042-24058.

作者简介



李滢龙 (2001-), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要研究方向为燃料电池发动机系统和燃料电池单体关键性技术。

Tel: 13137737613

E-mail: 2231562@tongji.edu.cn

通信作者



陈会翠 (1987-), 女, 河北石家庄人, 博士, 副教授, 主要研究方向为燃料电池发动机系统、燃料电池堆、燃料电池单体关键性技术。

Tel: 021-69588660

E-mail: chenhuicui@tongji.edu.cn