



燃料电池供氢系统用比例阀关键技术进展：高频驱动、氢相容材料与协同设计

李维波¹, 吴体珂¹, 虞丽娟¹, 李庆², 罗仁超², 赵子涵¹

(¹武汉理工大学 新能源与电气工程学院, 湖北省 武汉市 430000; ²湖北创偲诺电气科技股份有限公司, 湖北省 恩施市 445000)

摘要: 燃料电池供氢系统用比例阀承担氢气流量调节、压力匹配和运行状态切换等功能, 其动态响应、流量控制精度、故障能量限制和氢环境耐久性会影响电堆入口氢气化学计量比、阳极压力稳定性及系统运行效率。本文围绕高频驱动、氢相容材料和协同设计三个方面梳理比例阀关键技术。比较 IGBT、Si MOSFET 和 SiC MOSFET 在不同供电电压、负载功率和开关频率下的适用特点, 分析高频 PWM 驱动对线圈电流纹波、开关损耗、温升和电磁兼容性的影响, 指出 SiC 器件在中高压和高频场景具有应用条件, 但在 12V 或 24V 低压比例阀中的系统收益仍需结合功率、散热、成本和故障能量进行评价; 归纳金属氢致损伤、聚合物氢渗透、快速卸压、涂层缺陷和交变载荷对阀体、阀芯、密封件及连接界面的影响, 比较 316L 奥氏体不锈钢、镍基合金、聚合物密封材料以及阻氢涂层和表面改性技术的适用范围; 并从电堆供氢需求出发, 分析阀门动态开度、可压缩氢气流、压力波动、线圈温升和密封界面载荷之间的耦合关系, 讨论三维流动模拟、热结构分析和状态反馈控制在协同设计中的作用。综述表明, 比例阀性能不能仅由开关频率、响应时间、材料硬度或渗透系数评价, 其结果取决于驱动、结构、材料、控制方法和试验条件的共同匹配。现有研究在长期氢环境耐久、动态密封、产品一致性、三维多物理场耦合及电堆级验证方面仍需加强。后续应建立统一的工况定义、数据提取和寿命评价方法, 为比例阀设计和工程应用提供依据。

关键词: 燃料电池; 供氢系统; 比例阀; 氢相容材料; 协同设计

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0644

中图分类号: TH 138.52+2; TM 911.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-09

Key Technological Advances in Proportional Valves for Fuel Cell Hydrogen Supply Systems: High-Frequency Drive, Hydrogen-Compatible Materials, and Co-Design

Li Weibo¹, Wu Tike¹, Yu Lijuan¹, Li Qing², Luo Renchao², Zhao Zihan¹

(¹School of New Energy and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, Hubei Province, China; ²Hubei Chuang Si Nuo Electrical Technology Corp, Enshi 445000, Hubei Province, China)

Abstract: Proportional valves used in fuel cell hydrogen supply systems perform functions such as hydrogen flow regulation, pressure matching, and operating mode switching. Their dynamic response, flow control accuracy, fault energy limitation, and durability in hydrogen

收稿日期: 2026-07-24; 修改稿日期: 2026-08-23。

基金项目: 湖北省科技计划重点研发项目 (2024BAB067); 楚天英才计划双创团队专项 (20259109)

第一作者及通信联系人: 李维波 (1973—), 男, 博士, 教授, 电磁阀精密驱动控制技术, E-mail: liweibo@whut.edu.cn。

引用本文: 李维波, 吴体珂, 虞丽娟, 等. 燃料电池供氢系统用比例阀关键技术进展: 高频驱动、氢相容材料与协同设计[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX (XX): 1-9.

Citation: Li Weibo, Wu Tike, Yu Lijuan, et al. Key Technological Advances in Proportional Valves for Fuel Cell Hydrogen Supply Systems: High-Frequency Drive, Hydrogen-Compatible Materials, and Co-Design[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX (XX): 1-9.

environments affect the stoichiometric ratio of hydrogen at the stack inlet, anode pressure stability, and system operating efficiency. This paper summarizes the key technologies of proportional valves from three aspects: high-frequency drive, hydrogen-compatible materials, and co-design. First, this paper compares the suitability of IGBTs, Si MOSFETs, and SiC MOSFETs under different supply voltages, load powers, and switching frequencies. It analyzes the impact of high-frequency PWM drive on coil current ripple, switching losses, temperature rise, and electromagnetic compatibility, and points out that while SiC devices are suitable for medium- to high-voltage and high-frequency applications, their system benefits in 12 V or 24 V low-voltage proportional valves still need to be evaluated in terms of power, heat dissipation, cost, and fault energy. Second, the study summarizes the effects of metal hydrogen-induced damage, hydrogen permeation through polymers, rapid depressurization, coating defects, and alternating loads on the valve body, valve spool, seals, and interface connections, and compares the applicability of 316L austenitic stainless steel, nickel-based alloys, polymer sealing materials, as well as hydrogen-barrier coatings and surface modification technologies. Third, based on the hydrogen supply requirements of fuel cells, this study analyzes the coupled relationships among valve dynamic opening, compressible hydrogen flow, pressure fluctuations, coil temperature rise, and sealing interface loads, and discusses the roles of three-dimensional flow simulation, thermal-structural analysis, and state-feedback control in collaborative design. The review indicates that the performance of proportional valves cannot be evaluated solely based on switching frequency, response time, material hardness, or permeability coefficient; rather, the results depend on the combined matching of the actuator, structure, materials, control methods, and test conditions. Existing research still needs to be strengthened in the areas of long-term durability in hydrogen environments, dynamic sealing, product consistency, three-dimensional multiphysics coupling, and fuel cell stack-level validation. Future work should establish unified definitions of operating conditions, data extraction methods, and life evaluation methods to provide a basis for proportional valve design and engineering applications.

Keywords: fuel cells; hydrogen supply systems; proportional valves; hydrogen-compatible materials; collaborative design

引 言

燃料电池供氢系统承担氢气输送、压力调节、流量控制和安全保护等功能,其运行状态影响电堆的氢气利用率、输出稳定性和耐久性^[1-3]。比例阀是供氢系统中的流量执行部件,通过改变阀芯开度调节进入电堆的氢气流量,以适应启动、变载和稳态运行等工况。供氢比例阀的性能要求主要包括流量范围、线性度、迟滞、重复性、响应时间、内外泄漏和工作耐久性。部分研究将响应时间小于 10ms、控制精度达到满量程 (Full Scale, FS) 的 $\pm 0.5\%$ 作为设计目标,但具体指标应根据产品压力等级、

额定流量、测试条件及相应标准确定。氢气分子尺寸较小,且在特定材料、应力和环境条件下可能引起氢致损伤,因此比例阀还需考虑材料相容性、密封性能及压力循环寿命。

现有研究涉及电磁驱动、阀芯结构、流量控制、密封设计和材料选用等方向。提高脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 频率有助于减小线圈电流纹波,但会增加开关损耗、温升及电磁兼容设计要求;采用耐氢材料及表面改性技术可改善局部耐磨和阻氢性能,其效果则受材料组织、涂层缺陷和循环载荷影响。驱动、结构、材料和控制之间存在耦合关系,单项性能的改善不等同整阀性

能的改善。

本文比较硅基与 SiC 功率器件在比例阀驱动中的应用特点，归纳氢致损伤、基体材料、密封材料及表面工程研究进展，并讨论多物理场建模、协同控制和工程验证方法^[4-6]。比例阀的动态滞后、流量迟滞和压力波动会导致实际供氢量与电堆耗氢量之间产生偏差。氢气化学计量比可表示为：

$$\lambda_{H_2}(t) = \frac{\dot{n}_{H_2,in}(t)}{\dot{n}_{H_2,react}(t)} \quad (1)$$

式中， λ_{H_2} 为氢气化学计量比，量纲为 1； $\dot{n}_{H_2,in}$ 为比例阀入口氢气摩尔流量，mol/s； $\dot{n}_{H_2,react}$ 为电堆反应消耗的氢气摩尔流量，mol/s。比例阀的响应滞后和流量波动会通过氢气供给过程影响阳极压力及氢气利用率，但其对电堆净输出功率密度的具体影响还取决于电堆结构、流场形式、膜电极状态和控制策略。

1 高频驱动技术：从硅基器件到 SiC 器件的发展

1.1 驱动系统及工作原理

比例阀高频驱动是利用功率器件对直流电源进行 PWM 调制，通过改变电磁线圈电流调节电磁力、阀芯位移和氢气流量。系统主要包括控制器、隔离或电平转换电路、栅极驱动电路、功率开关、

保护与续流电路、比例阀线圈及采样反馈电路，见图 1。控制器根据电流、温度和故障信息调整 PWM 占空比，形成电流闭环^[7-9]。

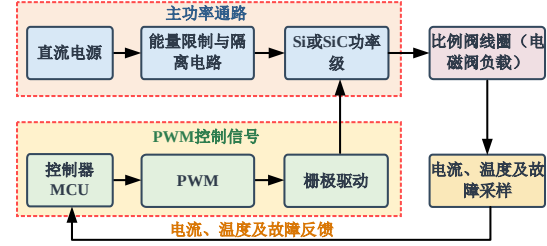


图 1 比例阀 Si/SiC 高频驱动系统组成框图
Fig.1 Block Diagram of the Si/SiC High-Frequency Drive System for Proportional Valves

线圈电压可表示为：

$$u(t) = R(T)i(t) + \frac{d\lambda(x,i)}{dt} \quad (2)$$

当磁链近似表示为 $\lambda(x,i) = L(x)i$ 时：

$$u(t) = R(T)i(t) + L(x)\frac{di(t)}{dt} + i(t)\frac{dL(x)}{dx}\dot{x} \quad (3)$$

式中， $u(t)$ 为线圈电压，V； $R(T)$ 为温度 T 下的线圈电阻， Ω ； $i(t)$ 为线圈电流，A； $L(x)$ 为阀芯位移相关电感，H； x 为阀芯位移，m； $\dot{x}$ 为阀芯速度，m/s。

1.2 功率器件与驱动特性对比

IGBT、Si MOSFET 和 SiC MOSFET 的适用范围存在差异^[10-11]，见表 1。

表 1 比例阀驱动用功率器件对比

Table 1 Comparison of Power Devices for Proportional Valve Drives

对比项目	IGBT	Si MOSFET	SiC MOSFET
典型应用范围	中高压、较大功率	低压、中小功率	中高压、高频场合
开关特性	存在拖尾电流	开关速度较快	开关速度较快，反向恢复损耗较低
高频运行约束	开关频率升高后损耗增加	受导通电阻、栅极电荷及反向恢复影响	受寄生参数、过电压和 EMI 影响
驱动与保护	技术成熟	技术成熟	对栅极回路及 PCB 布局要求较高
比例阀适用性	适用于较大功率负载	适用于 12 V、24 V 等低压线圈	需结合电压、功率和频率评价
成本特征	相对稳定	低压器件选择较多	器件及配套设计成本相对较高

分析表 1 得知，在比例阀通常采用 12 V 或 24 V 低压直流供电的场景下，Si MOSFET 通常具有较好的器件可得性和成本适应性。SiC MOSFET 的优势主要体现在较高母线电压、较高开关频率或较高环境温度条件下。在低压、小功率比例阀中，SiC 器件的耐压优势未必能够转化为系统收益，器件选型仍需综合比较导通损耗、开关损耗、栅极驱动、散热、EMI、故障能量和成本^[12-15]。

在忽略磁饱和且参数近似恒定的条件下，线圈电流纹波可近似表示为：

$$\Delta I_{pp} \approx \frac{(U_{dc} - RI - e_m)D}{Lf_s} \quad (4)$$

式中， ΔI_{pp} 为峰峰值电流纹波，A； U_{dc} 为直流母线电压，V； I 为平均电流，A； D 为占空比； f_s 为开关频率，Hz。开关损耗可近似表示为：

$$P_{sw} \approx \frac{1}{2} U_{ds} I_d (t_{on} + t_{off}) f_s \quad (5)$$

式中, P_{sw} 为开关损耗, W ; U_{ds} 为开关电压, V ; I_d 为开关电流, A ; t_{on} 和 t_{off} 分别为开通和关断时间, s 。提高开关频率可减小电流纹波, 但会增加单位时间内的开关次数, 频率选择需兼顾纹波、损耗、温升和电磁干扰。

1.3 故障能量限制与工程约束

氢气环境下的电气安全设计应限制正常及故障状态下的电压、电流、储能、火花能量和表面温度。线圈储能为:

$$E_L = \frac{1}{2} LI^2 \quad (6)$$

式中, E_L 为线圈电感储能, J ; L 为电感, H ; I 为线圈电流, A 。工程上可采用限流、供电隔离、有源钳位、续流和缓冲电路, 并缩短功率回路及栅极回路以降低寄生电感。若产品需要满足本质安全型防爆要求, 还应依据相应标准进行正常状态和规定故障状态下的点燃能力评估。

SiC 器件较快的电压、电流变化率可能增加开关过电压、共模电流和电磁干扰^[16], 因此需同时设计栅极电阻、米勒钳位、负压关断、过流保护和散热结构。比例阀响应时间还受磁路、线圈参数、阀芯质量、弹簧刚度、摩擦和控制算法影响, 不能仅根据功率器件类型判断^[17-20]。SiC 器件的高速开关会提高功率回路的电压和电流变化率, 可能引起过电压、共模电流及采样干扰。对于涉氢系统, 应重点评估栅极回路、续流路径、采样隔离、线束布置及故障保护。是否采用 SiC 器件不能仅依据开关频率确定, 还应结合比例阀的供电电压、线圈参数、开关频率、温升限值和电磁兼容要求进行判断。

2 氢相容材料技术: 氢环境下的材料相容性与耐久性

2.1 材料体系与失效机理

氢相容材料是指在规定的氢气压力、温度、应力和循环次数下, 其力学性能、密封性能及尺寸稳定性满足使用要求的材料^[21,22], 见图2。供氢比例阀涉及阀体、阀芯、弹簧、阀座、密封件及连接界面, 需要结合氢渗透、压力循环、摩擦磨损、温度循环和快速卸压等工况评价。

调研得知, 氢分子在金属表面吸附并解离后, 可沿晶格、晶界和位错扩散, 并在缺陷或应力集中区域富集。氢致弱化理论认为氢富集会降低局部原

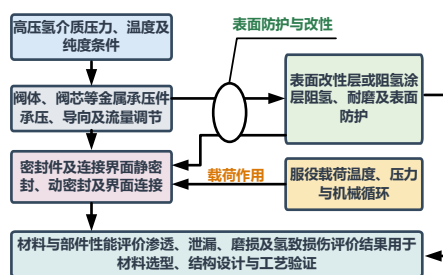


图2 比例阀氢相容材料体系及作用关系示意图
Fig.2 Hydrogen-Compatible Material System and Its Functional Relationships for Proportional Valves

子结合力; 氢增强局部塑性理论认为氢会影响位错运动, 使塑性变形局部化。两类机制在实际材料中可能同时存在, 其作用程度与材料组织、冷加工状态、焊接状态、应力水平、温度和氢气纯度有关。对聚合物密封材料, 除稳态氢渗透外, 还需关注压力循环、温度循环和快速卸压引起的溶胀、起泡、内部裂纹和接触应力衰减。因此, 材料相容性不能仅通过单一渗透率或静态浸氢试验判断。高频驱动会提高阀芯开启和关闭的重复次数, 阀芯运动可能产生机械碰撞、摩擦和微动磨损; 气体压力波动会使阀座、密封件和连接界面承受交变载荷; 温度循环则会改变聚合物密封材料的弹性模量、压缩永久变形和尺寸稳定性。对于金属承压件, 交变应力可能促进氢在缺陷和裂纹尖端富集, 增加氢致疲劳风险; 对于聚合物密封件, 压力循环和快速卸压可能导致起泡、裂纹和接触应力衰减; 对于表面涂层, 阀芯冲击和摩擦可能引起微裂纹及界面脱层。因此, 材料评价应结合动态开闭、压力循环、温度循环和快速卸压后的泄漏变化进行。

2.2 基体、密封材料与表面工程

现将比例阀氢相容材料与表面技术的定量评价框架及证据边界小结于表2中。

对于强度、塑性和疲劳寿命等“数值越大越好”的指标, 性能保持率定义为:

$$\eta_x = \frac{X_{H_2}}{X_{ref}} \times 100\% \quad (7)$$

式中, η_x 为性能保持率, %; X_{H_2} 为氢环境或改性后的性能值; X_{ref} 为参考环境或未改性状态下的性能值。对于氢渗透系数、磨损率等“数值越小越好”的指标, 降低率定义为:

$$R_x = \left(1 - \frac{X_{mod}}{X_{sub}}\right) \times 100\% \quad (8)$$

式中, R_x 为指标降低率, %; X_{mod} 为改性材料

表2 比例阀氢相容材料与表面技术的定量评价指标及证据边界

Table 2 Quantitative Evaluation Indicators and Evidence Boundaries for Hydrogen-Compatible Materials and Surface Technologies of Proportional Valves

材料或技术	主要应用部位	建议提取的定量指标	数据比较的控制条件与证据边界
奥氏体不锈钢 (304/316L) [23-24]	阀体、管路、阀芯	屈服强度/MPa、断后伸长率/%、疲劳寿命/次、氢扩散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)、泄漏率/($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	应统一牌号、冷加工量、焊接状态、氢压和温度
镍基合金 [25-26]	承压件、关键运动件	屈服强度/MPa、断后伸长率/%、裂纹扩展速率/($\text{m} \cdot \text{cycle}^{-1}$)、疲劳寿命/次	应统一合金牌号、制造工艺、氢压、温度和载荷形式；
钴基合金及涂层 [27]	阀座、摩擦副	硬度/HV、摩擦因数、磨损率/[$\text{mm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$]、结合强度/MPa	应统一基体、涂层厚度、载荷、速度和介质；
聚合物密封材料	动、静密封界面	氢渗透系数、体积溶胀率/%、压缩永久变形/%、泄漏率/($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)、快速卸压损伤等级	应统一材料配方、氢压、温度、压缩率和卸压速率；
TiN、CrN、AlCrN等PVD涂层 [28-30]	阀芯、阀座、承压件表面	厚度/ μm 、硬度/GPa、临界载荷/N、磨损率/[$\text{mm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$]、氢渗透系数	应统一基体、沉积工艺、厚度、孔隙率和测试温度；
PIII&D梯度改性层	运动件、承压件表面	改性层深度/ μm 、硬度/GPa、氢扩散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)、残余应力/MPa、缺陷密度	应统一注入元素、能量、剂量、基体状态和氢环境；

注：表中指标用于规范文献数据提取。不同来源的数据只有在材料状态、氢压、温度、载荷和测试方法相近时才可进行横向比较。

测试值； X_{sub} 为未处理基体测试值。为在同一图中比较不同量纲指标，程序采用方向统一的对数效应量：

$$E = \begin{cases} \log_2(X_{\text{test}}/X_{\text{ref}}), & \text{数值越大越好} \\ -\log_2(X_{\text{test}}/X_{\text{ref}}), & \text{数值越小越好} \end{cases} \quad (9)$$

$E > 0$ 表示改性后性能改善， $E < 0$ 表示性能衰减。与直接比较原始数值相比，该方法可减少单位和数量级差异的影响。

表2表明，比例阀材料评价应由定性描述转向可测量指标。金属基体应重点考察氢环境下的强度、塑性和疲劳性能，聚合物密封材料应关注氢渗透、压缩永久变形及快速卸压损伤，表面改性层则需同时评价耐磨性、界面结合和氢渗透性能。

3 协同设计与系统集成：驱动与材料的耦合优化

3.1 驱动、结构与材料的协同关系

比例阀协同设计是在统一工况和性能约束下，对功率驱动、线圈参数、磁路、阀芯结构、承压材料、表面涂层和密封材料进行联合设计，见图3。

如图3所示，控制器通过功率驱动器调节线圈电流，依次改变电磁力、阀芯位移和氢气流量，并根据电流、温度、位移和压力反馈修正控制量。提高PWM频率可减小电流纹波，但开关损耗和温升会影响线圈绝缘及密封材料寿命；阀芯质量、摩擦副材料和涂层状态会影响响应时间、迟滞及重复

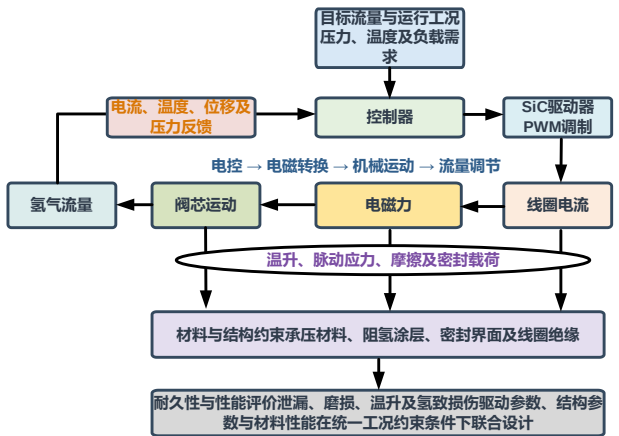


图3 比例阀协同设计及多物理场作用关系示意图

Fig.3 Schematic Diagram of the Co-Design of Proportional Valves and the Interactions Among Multiple Physical Fields

性；压力波动和阀芯碰撞则会对密封界面及表面改性层形成循环载荷。因此，驱动参数应受到材料允许温度、绝缘等级、故障储能和电磁兼容要求的约束，材料与结构设计也需考虑驱动频率、阀芯运动和热循环^[31-33]。

3.2 多物理场建模与控制

在忽略磁滞、涡流和磁饱和影响的条件下，比例阀电磁力可近似表示为：

$$F_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} \quad (10)$$

阀芯运动方程为：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + F_t + F_p = F_e \quad (11)$$

式中， F_e 为电磁力，N； i 为线圈电流，A；

$L(x)$ 为位移相关电感, H ; x 为阀芯位移, m ; m 为运动部件质量, kg ; c 为阻尼系数, $N \cdot s/m$; k 为弹簧刚度, N/m ; F_f 和 F_p 分别为摩擦力和气体压力作用力, N 。

供氢比例阀的流动过程具有可压缩气体特征。在较大压差和较小流通面积条件下, 阀内可能出现阻塞流、局部高速射流、回流区和压力波动。是否形成局部激波及其衰减特征, 取决于上游压力、背压、阀芯开度、流道几何和气体温度, 不能仅由阀门额定压力判断。三维数值模型应考虑可压缩流

动、阀芯运动、阀体传热、密封间隙和压力边界变化, 并通过流量、压力和温度试验进行验证。可增加阻塞流判据, 即:

$$\frac{p_b}{p_0} \leq \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \tag{12}$$

式中, p_b 为背压, Pa ; p_0 为上游总压, Pa ; γ 为气体比热比, 量纲为1。通过耦合电磁、机械、热、流体、氢扩散及接触密封模型, 可分析驱动参数对温升、应力、阀芯运动和氢气流量的影响, 其设计与控制方法见表3。

表3 比例阀设计与控制方法对比
Table 3 Comparison of Proportional Valve Design and Control Methods

方法	主要对象	适用问题	主要约束
单参数设计	驱动、结构或材料之一	部件选型和局部参数匹配	难以反映跨域耦合影响
多物理场联合设计	电、磁、热、力、流体及材料 ^[34]	温升、应力、流量和泄漏关联分析 ^[35,36]	参数获取和模型验证工作量较大
自适应滑模控制	摩擦、负载及参数变化 ^[37]	提高参数变化条件下的跟踪能力	需处理抖振及采样噪声
模型预测控制 (MPC)	多变量约束系统 ^[38,39]	协调电流、温度和阀芯行程约束	依赖模型精度及实时计算能力
数字孪生与状态监测	运行状态和退化过程 ^[40]	状态识别与剩余寿命评估	需要长期运行数据和退化模型

表3表明, 多物理场联合设计适合分析驱动、结构和材料之间的关联, 自适应滑模控制与MPC (Model Predictive Control) 分别适用于参数变化和多约束控制, 但其有效性均依赖传感器精度、模型可信度和产品参数一致性。复杂控制算法在低成本嵌入式硬件上的实现需要考虑控制周期、采样频率、存储资源、定点计算误差、传感器噪声和故障降级策略。工程上可采用“快速电流内环+查表补偿+慢速状态估计”的分层结构: 底层由PI控制和

硬件保护完成实时电流控制, 中层通过温度、压力和阀芯位置标定进行补偿, 上层再运行模型预测控制或寿命状态估计。对于计算资源有限的MCU, MPC模型应进行降阶处理, 并保留传统控制器作为实时控制和故障降级通道。

3.3 试验评价与工程应用

比例阀工程验证应覆盖流量特性、动态响应、泄漏、环境适应性和工作耐久性, 见表4。

表4 燃料电池供氢比例阀主要评价项目
Table 4 Key Evaluation Items for Proportional Valves in Fuel Cell Hydrogen Supply Systems

评价项目	本文工程参考条件	指标来源或适用边界
公称工作压力	不大于1.6 MPa	企业标准或产品技术条件
环境温度	-40~85℃	企业标准或产品技术条件
响应时间	小于10ms	设计目标, 需明确判据
流量精度	±0.5%FS	设计目标, 需明确流量计精度
工作耐久性	不低于15Hz, 累计200万次	企业标准或耐久试验方案
耐久后复测	泄漏、流量和响应	产品验收或企业标准

表4表明, 耐久试验中的“循环频率”不能只依据电信号频率确定, 还应通过电流、位移或流量信号确认阀芯完成规定动作。耐久试验结束后, 应复测泄漏、流量特性和响应时间, 并报告相对于初始状态的变化量。相关技术可根据压力等级、介质

条件和认证要求应用于燃料电池汽车、氢能船舶及固定式供氢设备。

4 总结与展望

本文梳理了燃料电池供氢比例阀在高频驱动、

氢相容材料和协同设计方面的研究进展。SiC 器件可为提高开关频率和减小电流纹波提供条件，但其在低压场景中的适用性仍需结合损耗、成本、故障能量及电磁兼容要求评价。氢相容材料与表面改性技术可用于控制氢渗透、氢致损伤和磨损，其效果受材料组织、密封结构及循环载荷影响。后续应研究 GaN 器件与低压驱动拓扑的适配性，开展新型涂层、非晶合金和增材制造阀体的耐久性评价，完善多物理场模型、状态监测及试验标准。对于氢—天然气、氢—氨等多组分介质，还需研究物性变化、组分扩散、临界流动、材料相容性和流量标定；涉及燃烧系统时，应进一步评估火焰传播与异常点火风险。

参考文献

- [1] 魏小童, 芦宇航, 孔红兵, 等. 燃料电池氢循环回路控制策略探索及优化[J]. 车用发动机, 2025, (5): 81-88. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-2222.2025.05.011
Wei X T, Lu Y H, Kong H B, et al. Exploration and Optimization of Control Strategies for Hydrogen Circulation Loops in Fuel Cells [J]. Automotive Engines, 2025, (5): 81 - 88. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-2222. 2025.05. 011
- [2] 王冰, 侍崇诗, 黄明宇, 等. 燃料电池供氢系统的研究进展[J]. 现代化工, 2018, 38(1): 35-39+41. DOI: 10.16606/j. cnki. issn0253-4320.2018.01.008.
Wang B, Shi C S, Huang M Y, et al. Research Progress on Hydrogen Supply Systems for Fuel Cells [J]. Modern Chemical Industry, 2018, 38(1): 35 - 39+41. DOI: 10.16606/j. cnki. issn0253-4320.2018.01.008.
- [3] 李晶, 张力, 邹姜昆, 等. 燃料电池氢气流量控制系统变负载匹配设计与仿真[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(8): 1297-1304. DOI: 10.11908/j. issn. 0253-374x. 23096
Li J, Zhang L, Zou J K, et al. Design and Simulation of a Variable-Load-Matching Hydrogen Flow Control System for Fuel Cells [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2024, 52 (8): 1297 - 1304. DOI: 10.11908/j. issn.0253-374x.23096
- [4] 刘帅, 宋立辉, 杨德仁, 等. 4H-SiC 基功率器件的 high-k 栅介质材料研究进展[J]. 人工晶体学报, 2024, 53(12): 2027-2042. DOI: 10.16553/j. cnki. issn1000-985x. 20241030.005.
Liu S, Song L H, Yang D R et al. Recent Advances in High-k Gate Dielectric Materials for 4H-SiC-Based Power Devices [J]. Journal of Artificial Crystals, 2024, 53(12): 2027 - 2042. DOI: 10.16553/j. cnki. issn1000-985x. 20241030.005.
- [5] 贾鑫, 魏俊俊, 黄亚博, 等. 金刚石散热衬底在 GaN 基功率器件中的应用进展[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 111-123. DOI: 10.16490/j. cnki. issn.1001-3660.2020.11.013.
Jia X, Wei J J, Huang Y B, et al. Progress in the Application of Diamond Heat-Sink Substrates in GaN-Based Power Devices [J]. Surface Technology, 2020, 49(11): 11-123. DOI: 10.16490/j. cnki. issn.1001-3660.2020.11.013.
- [6] 王志宽, 冯治华, 陈容, 等. 碳化硅功率器件高密度互连技术研究进展[J]. 微电子学, 2023, 53(3): 465-471. DOI: 10.13911/j. cnki. 1004-3365.230223.
Wang Z K, Feng Z H, Chen R, et al. Recent Advances in High-Density Interconnection Technology for Silicon Carbide Power Devices [J]. Microelectronics, 2023, 53(3): 465-471. DOI: 10.13911/j. cnki. 1004-3365.230223
- [7] 沙庆康, 向玉德, 田飞, 等. 混合动力变速箱中比例电磁阀变频控制研究[J]. 液压与气动, 2019, (12): 51-56. DOI : 10.11832/j. issn. 1000-4858.2019.12.008
Sha Q K, Xiang Y D, Tian F et al. Study on Variable-Frequency Control of Proportional Solenoid Valves in Hybrid Transmissions [J]. Hydraulics and Pneumatics, 2019, (12): 51-56. DOI: 10.11832/j. issn. 1000 - 4858.2019.12.008
- [8] 邓勇, 沙庆康, 向玉德, 等. 变速箱中比例电磁阀 P-I 控制算法的研究[J]. 液压与气动, 2018, (9): 38-43. DOI: 10.11832/j. issn. 1000-4858.2018.09.007
Deng Y, Sha Q K, Xiang Y D, et al. A Study on the P-I Control Algorithm for Proportional Solenoid Valves in Automatic Transmissions [J]. Hydraulics and Pneumatics, 2018, (9): 38-43. DOI: 10.11832/j. issn. 1000 4858.2018.09.007
- [9] 张志佳, 尹秀萍, 王婷婷, 等. 比例电磁阀复合控制方法研究[J]. 控制工程, 2017, 24(9): 1763-1767. DOI: 10.14107/j. cnki. kzgc. 150844.
Zhang Z J, Yin X P, Wang T T, et al. A Study on Composite Control Methods for Proportional Solenoid Valves [J]. Control Engineering, 2017, 24(9): 1763-1767. DOI: 10.14107/j. cnki. kzgc. 150844.
- [10] 黄先进, 潘嘉琪, 贾静雯, 等. 优化 IGBT 并联开关特性的差压异步驱动技术[J]. 电工技术学报, 2025, 40(14): 4547-4557. DOI: 10.19595/j. cnki. 1000-6753. tces. 240999.
Huang X J, Pan J Q, Jia Jing W et al. Differential-Voltage Asynchronous Drive Technology for Optimizing the Switching Characteristics of Parallel IGBTs [J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 40(14): 4547-4557. DOI: 10.19595/j. cnki. 1000-6753. tces. 240999.
- [11] 白建成, 客金坤, 高冲, 等. 基于多段式电平调控的 SiC MOSFET 驱动与保护策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(22): 7301-7312. DOI: 10.19595/j. cnki. 1000-6753. tces. 242096.
Bai J C, Ke J K, Gao C, et al. "SiC MOSFET Drive and Protection Strategy Based on Multi-Stage Voltage Regulation" [J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 40(22): 7301-7312. DOI: 10.19595/j. cnki. 1000-6753. tces. 242096.
- [12] KABLUKOVSKY A F, LI Z, COLLAZO R, et al. SiC power devices: Physics, characteristics, reliability, and applications[J]. Journal of Applied Physics, 2022, 131: 230901. DOI: 10.1063/5.0092064
- [13] SHE X, HUANG A Q, LUCIA O, et al. Review of silicon carbide power devices and their applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8193-8205. DOI: 10.1109/TIE.2017.2652401

- [14] MILLÁN J, GODIGNON P, PERPIÑÀ X, et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(5): 2155-2163. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2268900
- [15] KOLAR J W, BIELA J, WAFFLER S, et al. PWM converter power density barriers[C]//Proceedings of the IEEE Power Conversion Conference. Nagoya: IEEE, 2007: P-9-P-29. DOI: 10.1109/PCCON.2007.372914
- [16] 段卓琳,范涛,张栋,等. 全SiC三相逆变器传导电磁干扰建模与预测[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(1): 1-7. DOI: 10.12067/ATEEE1611057
- Duan Z L, Fan T, Zhang D, et al. Modeling and Prediction of Conducted Electromagnetic Interference in All-SiC Three-Phase Inverters [J]. New Technologies in Electrical Engineering and Power, 2018, 37(1): 1-7. DOI:10.12067/ATEEE1611057
- [17] 王涛,郝云晓,赵斌,等. 基于参数辨识的比例阀非线性摩擦自适应补偿控制方法[J]. 机电工程, 2023, 40(9): 1403-1410. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2023.09.012
- Wang T, Hao Y X, Zhao B, et al. An Adaptive Compensation Control Method for Nonlinear Friction in Proportional Valves Based on Parameter Identification [J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2023, 40(9): 1403 - 1410. DOI: 10.3969/j.issn.1001 4551.2023.09.012
- [18] 范玉,陈丰章,谢良涛,等. 两种直动式高速电磁阀数值模拟与动态响应对比分析[J]. 内燃机工程, 2024, 45(4): 81-88. DOI: 10.13949/j.cnki.nrgc.2024.04.010.
- Fan Y, Chen Y Z, Xie L T, et al. Comparative Analysis of Numerical Simulations and Dynamic Responses of Two Types of Direct-Acting High-Speed Solenoid Valves [J]. Internal Combustion Engine Engineering, 2024, 45(4): 81-88. DOI: 10.13949/j.cnki.nrgc.2024.04.010.
- [19] 张克. 四驱系统电液式扭矩管理器的响应时间分析[J]. 内燃机与配件, 2022, (6): 44-46. DOI: 10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2022.06.017.
- Zhang K. Analysis of the Response Time of the Electro-Hydraulic Torque Manager in a Four-Wheel-Drive System [J]. Internal Combustion Engines and Components, 2022, (6): 44-46. DOI: 10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2022.06.017.
- [20] 牛羽,吕坤,苏海龙,等. 高频响比例阀响应特性影响因素仿真研究[J]. 应用科技, 2022, 49(5): 102-108. DOI: 10.111991/yykj.202203006
- Niu Y, Lü K, Su H L, et al. Simulation Study on Factors Affecting the Response Characteristics of High-Frequency Proportional Valves [J]. Applied Science and Technology, 2022, 49(5): 102 - 108 DOI: 10.111991/yykj.202203006
- [21] 王修云,吴进贤,王德强,等. 含氢气体环境中管线钢材料氢相容性评价的力学性能关键指标研究[J]. 力学与实践, 2023, 45(2): 286-295. DOI: 10.6052/1000-0879-23-061
- Wang X Y, Wu J X, Wang D Q, et al. Study on Key Mechanical Property Indicators for Evaluating the Hydrogen Compatibility of Pipeline Steel Materials in Hydrogen-Containing Atmospheres [J]. Mechanics and Practice, 2023, 45(2): 286 - 295. DOI: 10.6052/ 1000-0879-23-061
- [22] Huang S, Zhang Y, Yang C, et al. Fracture strain model for hydrogen embrittlement based on hydrogen enhanced localized plasticity mechanism[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(46): 25541-25554. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.271.
- [23] 张慧云,孙晓思,孙颖,等. 固溶态304奥氏体不锈钢的氢脆行为[J]. 锻压技术, 2024, 49(11): 189-201. DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.11.026. DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.11.026
- Zhang H y, Sun X S, Sun Y, et al. Hydrogen Embrittlement Behavior of Solution-Treated 304 Austenitic Stainless Steel [J]. Forging and Pressing Technology, 2024, 49(11): 189 - 201. DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.11.026. DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.11.026
- [24] 张国信. 氢环境脆化损伤机理、影响因素及相关问题探讨[J]. 炼油技术与工程, 2024, 54(8): 1-7. DOI: 10.20138/j.cnki.issn1002-106X.2024.08.001.
- Zhang G X. A Discussion on the Mechanisms, Influencing Factors, and Related Issues of Hydrogen-Induced Environmental Brittleness [J]. Oil Refining Technology and Engineering, 2024, 54 (8): 1-7. DOI: 10.20138/j.cnki.issn1002-106X.2024.08.001.
- [25] 陆大敏,靳丽莉,张克实,等. 氢对45CrNiMoVA钢和FGH96镍基高温合金拉伸性能的影响[J]. 机械工程材料, 2025, 49(12): 122-130. DOI: 10.11973/jxgccl250129
- Lu D M, Jin L L Zhang K S, et al. Effect of Hydrogen on the Tensile Properties of 45CrNiMoVA Steel and FGH96 Nickel-Based Superalloy [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2025, 49(12): 122 - 130. DOI: 10.11973/jxgccl250129
- [26] 李晓闻,张浩成,温志勋,等. 850℃下DD6镍基单晶高温合金低周疲劳性能的取向相关性[J]. 机械科学与技术, 2026, 45(1): 183-190. DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.20240033.
- Li X W, Zhang H C, Wen Z X, et al. Orientation-Dependent Low-Cycle Fatigue Properties of DD6 Nickel-Based Single-Crystal Superalloy at 850° C [J]. Mechanical Science and Technology, 2026, 45(1): 183-190. DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.20240033.
- [27] 佟健,陈甲祺,郑志,等. 脱芯工艺对钴基高温合金DZ40M组织和性能的影响[J]. 材料研究学报, 2016, 30(2): 140-148. DOI: 10.11901/1005.3093.2015.204
- Tong J Chen J Q, Zheng Z, et al. Effect of Core-Removal Process on the Microstructure and Properties of Cobalt-Based Superalloy DZ40M [J]. Journal of Materials Research, 2016, 30 (2): 140-148. DOI: 10.11901/1005.3093.2015.204
- [28] 刘书琪,李子涵,苏波泳,等. 激光加工微织构对TC4钛合金表面AlCrN涂层耐磨性的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50(8): 278-285. DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2025.08.044.
- Liu S Q, Li Z H, Su B Y, et al. Effect of Laser-Processed Microstructures on the Wear Resistance of AlCrN Coatings on TC4 Titanium Alloy Surfaces [J]. Metal Heat Treatment, 2025, 50 (8): 278 - 285. DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2025.08.044.
- [29] Han P, Yang S, Ren Z. Research on micro-texture and coating preparation process strategy for macro and micro properties of cemented carbide surface[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2026, 135107503-107503. DOI: 10.1016/J.IJRMHM.2025.107503.

- [30] 耿东森,余俊杰,许雨翔,等. AlTiN 和 AlTiN/AlCrN 涂层对 Ti(C,N)基金属陶瓷性能的影响[J]. 中国表面工程, 2025, 38(2): 49-56. DOI: 10.11933/j.issn.1007-9289.20241216002
- Geng D S, She J J, Xu Y X, et al. Effect of AlTiN and AlTiN/AlCrN Coatings on the Properties of Ti(C,N)-Based Metal Ceramics [J]. Chinese Journal of Surface Engineering, 2025, 38(2): 49-56. DOI: 10.11933/j.issn.1007-9289.20241216002
- [31] 吴仁智,周凡,秦磊,等. 基于 PWM 驱动的比例减压阀仿真分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(2): 272-278. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.02.035
- Wu R Z, Zhou F, Qin L et al. Simulation Analysis of a PWM-Driven Proportional Pressure-Reducing Valve [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Sciences), 2022, 36(2): 272 - 278. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.02.035
- [32] 黄圆志. 基于 PWM 控制技术的电液比例阀的研究[J]. 科技资讯, 2022, 20(11): 26-28. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2112-5042-3355.
- Huang Y Z. A Study on Electro-Hydraulic Proportional Valves Based on PWM Control Technology [J]. Science and Technology Information, 2022, 20(11): 26 - 28. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2112-5042-3355.
- [33] 钟麒,徐恩光,贾伟伟,等. 基于开关先导技术的新型比例阀动态性能及控制精度实验研究(英文)[J]. Journal of Zhejiang University-Science A(Applied Physics & Engineering), 2022, 23(4): 272-285. DOI:10.1631/jzus.A2100484
- Zhong Q, Xu E G, Jia T W, et al. Dynamic performance and control accuracy of a novel proportional valve with a switching technology-controlled pilot stage[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2022, 23(4): 272-285. <https://doi.org/10.1631/jzus.A2100484>
- [34] 魏明,余建宏,郑飞侠,等. C 形与铁壳式支架微型比例阀磁路性能对比与提升[J]. 机电工程技术, 2025, 54(22): 118-123. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2025.22.023
- Wei M, Yu J H, Zheng F X, et al. Comparison and Improvement of Magnetic Circuit Performance in C-Shaped and Iron-Shell-Type Miniature Proportional Valves [J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2025, 54(22): 118 - 123. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2025.22.023
- [35] 尧克刚,金陆乔,陆振宇,等. 基于驱动特性补偿的功能可编程比例阀控缸自抗扰位置控制[J]. 机床与液压, 2025, 53(23): 58-65. DOI:10.3969/j.issn.1001-3881.2025.23.007
- Yao K G, Jin L Q, Lu Z Y, et al. Self-disturbance-resistant position control of a functionally programmable proportional valve-controlled cylinder based on drive characteristic compensation [J]. Machine Tools & Hydraulics, 2025, 53(23): 58-65. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2025.23.007
- [36] 赵申诞,吴德发,金玉柱,等. 水液压柱塞泵间隙密封技术研究现状及展望[J/OL]. 机械工程学报, 1-13[2026-07-22]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2187.TH.20260507.1603.070>. DOI:10.3901/JME.260331
- Zhao S D, Wu D F, Jin Y Z, et al. Current Status and Prospects of Clearance Sealing Technology for Water-Hydraulic Plunger Pumps [J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 1-13 [July 22, 2026]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2187.TH.20260507.1603.070>. DOI:10.3901/JME.260331
- [37] 朱仲文,程谭龙,江维海,等. 燃料电池氢气系统自适应滑模解耦控制研究[J]. 汽车工程, 2025, 47(1): 85-95+126. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2025.01.009.
- Zhu Z W, Cheng T L, Jiang W H, et al. Research on Adaptive Sliding-Mode Decoupling Control of Hydrogen Systems in Fuel Cells [J]. Automotive Engineering, 2025, 47(1): 85-95+126. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2025.01.009.
- [38] 王伊民,胡建飞,张伟,等. 基于 MPC 的直驱式动力变速器离合器分级控制策略[J]. 机电工程, 2022, 39(1): 18-25. DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.01.003
- Wang Y M, Hu J F, Zhang W, et al. An MPC-Based Staged Control Strategy for the Clutch of a Direct-Drive Power Transmission [J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2022, 39(1): 18 - 25. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2022.01.003
- [39] Mitov A, Kralej J, Slavov T. Model predictive control design for axial-piston pump[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024, 1380(1): 012017-012017. DOI: 10.1088/1755-1315/1380/1/012017.
- [40] Raduenz H, Mendoza A E Y, Ferronato D, et al. Online fault detection system for proportional hydraulic valves[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2018, 40(7): 1-20. DOI:10.1007/s40430-018-1240-3.