

储能测试与评价



基于物理参数辨识的燃料电池比例阀自适应标定筛选策略

李维波¹, 赵子涵¹, 虞莉娟¹, 李 庆², 罗仁超²

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

摘 要: 质子交换膜燃料电池供气系统中比例阀的动态响应特性与流量控制精度直接影响电堆供气稳定性。受机械加工误差、弹簧刚度离散、磁路气隙偏差以及低温润滑状态变化等因素影响, 同批次比例阀易出现启动迟滞、维持电流冗余及流量输出非线性等问题, 传统统一控制参数难以兼顾个体差异。针对上述问题, 提出一种基于物理参数辨识的燃料电池比例阀自适应标定与分级筛选策略。通过构建比例阀模型, 提取启动延时、稳态位移、速度峰值及衰减时间常数等动态响应特征, 并采用白鲸优化算法 (BWO) 对静摩擦力、弹簧刚度、磁路增益及黏性阻尼进行联合辨识, 同时与粒子群优化、遗传算法、模拟退火及局部搜索算法进行对比分析。在此基础上, 建立性能异常与物理参数偏差到补偿动作的映射关系, 设计低温启动 Boost 补偿、维持电流自适应修正及基于查找表 (LUT) 的电流重映射策略, 并构建 A~D 四级筛选规则。结果表明, BWO 获得最低目标函数值, 辨识参数与设定值误差较小。在 -30℃ 冷启动条件下, 启动延时由 12.0 ms 缩短至 4.8 ms; 针对弹簧刚度偏差仿真工况, 维持电流由 0.50 A 降至 0.474 A, 稳态温升由 45℃ 降至 38.15℃; 针对磁路增益偏差仿真工况, LUT 补偿后流量误差控制在允许范围内。本工作所提方法无需改变阀体硬件结构即可实现参数辨识、软件补偿与等级判定闭环流程, 为燃料电池比例阀批量生产中的一致性控制与质量筛选提供仿真依据和方法参考。

关键词: 燃料电池; 比例阀; 动态响应; 参数辨识; 自适应标定; 仿真验证

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0381

中图分类号: TM 911

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 09-3774-10

Research on an adaptive calibration and screening strategy for fuel cell proportional valves based on physical parameter identification

LI Weibo¹, ZHAO Zihan¹, YU Lijuan¹, LI Qing², LUO Renchao²

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

Abstract: The dynamic response characteristics and flow control accuracy of proportional valves in proton exchange membrane fuel cell gas supply systems directly affect the stability of gas supply to the fuel cell stack. Due to factors such as machining errors, variations in spring stiffness, deviations in the magnetic circuit air gap, and low-temperature lubrication changes, proportional valves from the same batch typically exhibit startup hysteresis, current overshoot, and nonlinear flow output; traditional uniform control parameters struggle to

收稿日期: 2026-05-07; 修改稿日期: 2026-06-23。

基金项目: 湖北省科技计划重点研发项目 (2024BAB067); 中央高校基本科研业务费资助 (104972025YJS0119); 楚天英才计划双创团队专项 (20259109); 中国科协青年科技人才培养工程博士生专项。

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

引用本文: 李维波, 赵子涵, 虞莉娟, 等. 基于物理参数辨识的燃料电池比例阀自适应标定筛选策略[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(9): 3774-3783.

Citation: LI Weibo, ZHAO Zihan, YU Lijuan, et al. Research on an adaptive calibration and screening strategy for fuel cell proportional valves based on physical parameter identification[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(9): 3774-3783.

account for these individual variations. To address these issues, this study proposes an adaptive calibration and hierarchical screening method for fuel cell proportional valves based on physical parameter identification. A proportional valve model is constructed to extract dynamic response characteristics, including startup delay, steady-state displacement, peak velocity, and decay time constants. Subsequently, the Beluga whale optimization (BWO) algorithm is used to jointly identify static friction, spring stiffness, magnetic circuit gain, and viscous damping, and comparative analysis is performed using particle swarm optimization, genetic algorithms, simulated annealing, and local search algorithms. Based on this analysis, a mapping relationship was established between performance anomalies, physical parameter deviations, and compensation actions. Strategies for low-temperature startup boost compensation, adaptive maintenance current correction, and lookup table (LUT) -based current remapping were designed, and a four-level A-D screening rule was developed. The simulation results demonstrate that BWO achieves the lowest objective function value, minimizing the error between the identified parameters and their corresponding setpoints. Under -30°C cold start conditions, the startup delay was reduced from 12.0 to 4.8 ms. For the simulation scenario involving soft spring stiffness, the maintenance current decreased from 0.50 to 0.474 A, and the steady-state temperature rise dropped from 45°C to 38.15°C . For the simulation scenario involving magnetic circuit gain deviation, the flow error was controlled within the permissible range after LUT compensation. The proposed method enables a closed-loop process of parameter identification, software compensation, and grade classification without altering the hardware structure of the valve body and provides a simulation basis and methodological reference for consistency control and quality screening in the mass production of fuel cell proportional valves.

Keywords: fuel cell; proportional valve; dynamic response; parameter identification; adaptive calibration; simulation validation

质子交换膜燃料电池是一种高效、清洁的能源转换装置,其性能在很大程度上依赖气体供应系统的控制精度,而比例阀和喷射阀是实现氢气与空气精确供给的关键执行部件^[1]。在批量化制造过程中,受机械加工精度和装配工艺波动影响,阀门不可避免地存在参数离散现象。例如,弹簧刚度差异会导致复位力变化,磁路气隙偏差会引起电磁力增益波动。在低温环境下,润滑脂黏度升高进一步放大上述差异,易造成阀门启动迟滞、流量偏差等问题,影响燃料电池系统的稳定运行。现有生产标定通常采用统一控制参数,难以兼顾个体差异,容易导致部分功能正常但参数偏离的产品被误判为不合格,从而降低生产良率。

针对上述问题,本工作提出一种基于物理参数辨识的比例阀自适应标定方法^[2]。通过软测量技术辨识静摩擦力、弹簧刚度、阻尼系数和磁路增益等关键参数,并依据辨识结果实施差异化软件补偿,以减弱硬

件离散性对控制性能的影响。同时,引入分级筛选机制,实现关键执行部件的一致性评价与优化管理^[3]。本工作主要贡献如下:①建立“性能异常-物理参数偏差-控制补偿动作”的映射关系,实现由性能现象向物理根源的追溯;②针对静摩擦力、弹簧刚度和磁路增益偏差,分别设计启动补偿、电流修正及查找表(LUT)电流重映射策略;③提出基于辨识参数与补偿后性能指标的分级筛选方法,构建从参数辨识、软件补偿到等级判定的闭环标定流程。

1 系统原理与参数辨识模型

1.1 动力学建模

燃料电池比例阀是一个典型的电-磁-机耦合非线性系统^[4]。忽略涡流与漏磁影响,则机械动力学方程见式(1)。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{\text{mag}}(i, x) + F_p - F_{\text{spring}}(x) - F_{\text{fric}} \times \text{sgn}(\dot{x}) - c\dot{x} \quad (1)$$

式中, m 为阀芯质量, kg; x 为阀芯位移, m; F_{mag} 为电磁力, N; F_p 为阀芯两端压差产生的等效压力驱动力, N; F_{spring} 为弹簧力, N; F_{fric} 为静摩擦力, N; c 为黏性阻尼系数, N·s/m, $\dot{x}$ 和 $\ddot{x}$ 分别为阀芯速度(m/s)和加速度(m/s²)。

电磁力 F_{mag} 、弹簧力 F_{spring} 和压差驱动力 F_p 计算方法分别为式(2)~式(4)。

$$F_{\text{mag}} = \frac{N^2 i^2 \mu_0 A}{2(x_0 - x)^2} \quad (2)$$

$$F_{\text{spring}} = k(x + x_{\text{pre}}) \quad (3)$$

$$F_p = A_c \Delta p \quad (4)$$

式中, i 为线圈励磁电流 (A); μ_0 为真空磁导率, H/m; N 为线圈匝数; A 为有效磁路截面积, m²; x_0 为初始气隙, m; k 为弹簧刚度, N/m; x_{pre} 为预压缩量, m; A_c 为阀芯等效受压面积, m²; Δp 为阀芯两端压力差, Pa。

为描述阀门开度变化对氢气供给能力的影响, 建立阀芯位移 x 与阀口有效流通面积 A_v 的关系式[式(5)]。

$$A_v = K_A x, \quad 0 \leq x \leq x_{\text{max}} \quad (5)$$

式中, A_v 为阀口有效流通面积, m²; K_A 为位移与面积比例系数, m; x_{max} 为阀芯最大物理行程, m。

阀口面积及其两端压力共同决定氢气质量流量, 其关系式见式(6)。

$$\dot{m} = f(C_d, A_v, P_u, P_d, T) \quad (6)$$

为描述阀后容腔内气体质量积累引起的压力变化, 可建立下游容腔压力动态方程, 见式(7)。

$$\frac{dP_d}{dt} = \frac{RT}{V_d} (\dot{m}_{\text{in}} - \dot{m}_{\text{out}}) \quad (7)$$

式中, $\dot{m}$ 为阀口氢气质量流量, kg/s; C_d 为流量系数; P_u 为阀口上游绝对压力, Pa; P_d 为阀口下游绝对压力或下游容腔压力, Pa; T 为气体热力学温度, K; R 为氢气气体常数, J/(kg·K); V_d 为下游等效容腔体积, m³; $\dot{m}_{\text{in}}$ 为进入下游容腔的气体质量流量, kg/s; $\dot{m}_{\text{out}}$ 为下游负载消耗或泄放的气体质量流量, kg/s; t 为时间, s。

阀芯位移的变化最终通过阀口有效流通面积影响供氢能力。考虑氢气的可压缩特性, 阀口质量流量采用可压缩节流模型描述, 其大小由阀口有效面积、流量系数以及上下游绝对压力共同决定, 并根据压力比区分为临界流和亚临界流两种工作状态。一方面, 由于阀口流量变化会进一步影响下游容腔压力, 因此阀门动态响应不仅取决于机械运动过

程, 还与气体状态变化密切相关, 两者共同决定了系统的流量输出特性。另一方面, 输入电流对阀芯运动的作用需要通过电磁响应过程传递, 而真实电磁力与气隙长度、磁阻特性及装配误差之间存在明显的非线性关系。为平衡模型复杂度与参数辨识效率, 本工作采用电磁力模型描述电流到电磁力的转换过程, 并将其作为机械子系统的驱动输入。其中, 磁路增益用于表征输入电流与电磁力之间的映射关系, 时间常数用于描述电磁建立过程中的动态迟滞特性。该建模方法能够较好地统一电磁侧、机械侧与气动侧之间的耦合作用关系, 为后续关键参数辨识及补偿策略设计提供模型基础。

1.2 参数辨识方法

为减弱参数间耦合对辨识结果的影响, 本工作采用分阶段辨识策略^[5-6]。首先, 基于设计标称刚度对静摩擦力进行初始估算; 随后, 在稳态工况下辨识实际弹簧刚度, 并对静摩擦力进行一次修正, 从而获得关键参数的初始解耦估算。在此基础上, 为进一步提高辨识精度, 本工作将磁路增益 K_{mag} 、静摩擦力 F_{fric} 、弹簧刚度 k 、阻尼系数 c 设为联合辨识对象, 构造待辨识参数向量 θ , 即式(8)。

$$\theta = [K_{\text{mag}}, F_{\text{fric}}, k, c]^T \quad (8)$$

在低温启动工况下进行静摩擦力辨识^[7-9]。通过向线圈注入阶跃电流, 采集阀芯启动瞬间的延时 T_{delay} 。当阀芯处于启动临界状态时, 其位移与加速度均近似为零, 动力学方程可简化为静力平衡关系, 从而利用启动电流 i_{start} 反推静摩擦力。静摩擦力 F_{fric} 的计算方法见式(9)。

$$F_{\text{fric}} \approx K_{\text{mag}} i_{\text{start}}^2 - k x_{\text{pre}} \quad (9)$$

式中, K_{mag} 为磁路增益, N/A; i_{start} 为启动时刻的电流, A。

在稳态维持工况下进行弹簧刚度辨识。在阀门全开保持阶段, 采用微降电流方法逐步降低驱动电流, 以确保阀芯脱离吸合位置时的临界电流在该临界状态下, 电磁力与最大弹簧力达到平衡关系, 且力平衡方程表示为式(10)。

$$k(x_{\text{max}} + x_0) = F_{\text{mag}} \quad (10)$$

根据式(10)计算出实际的弹簧刚度 k 。图1表示基于物理参数辨识的阀门自适应标定过程。

由图1可知, x 、 v 和 a 分别为阀芯位移、速度和加速度; F_{fric} 为静摩擦力, 阶跃电流注入后, 阀芯经过启动延时 T_{delay} 后开始运动, 并逐渐达到稳态位移

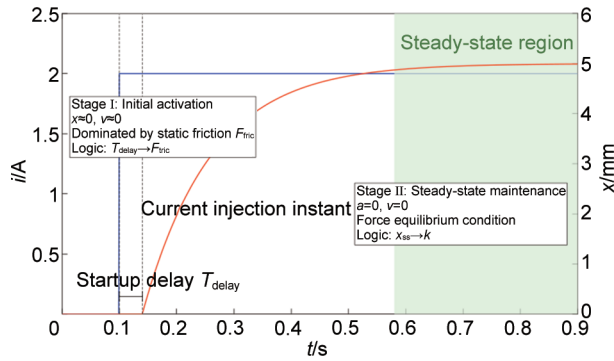


图1 阶跃电流激励下阀门物理参数辨识过程

Fig. 1 Physical-parameter identification process of the valve under step-current excitation

x_{ss} 。其中, T_{delay} 可表征阀芯克服静摩擦力的启动特性, x_{ss} 可为稳态力平衡条件下的弹簧刚度辨识提供依据。通过提取上述响应特征, 可为静摩擦力、弹簧刚度及其他关键物理参数的联合辨识提供数据基础。

2 自适应补偿策略

比例阀个体性能离散的根本并不只体现在响应时间、线性度或温升等外部表征差异上, 更对应静摩擦力、弹簧刚度及磁路增益等内部物理参数的偏移。因此, 参数辨识的意义在于建立“性能异常-物理参数偏差-控制补偿动作”的映射关系^[10]。基于这一思路, 本工作将辨识得到的关键参数作为控制参数在线修正的依据: 针对静摩擦力偏大的阀门, 增强启动驱动; 针对弹簧刚度偏差引起的保持力冗余, 进行维持电流修正; 针对磁路增益失配导致的非线性输出, 实施查找表补偿, 从而实现面向个体差异的针对性调节。

2.1 摩擦力补偿策略

系统通过高频采样获取电流 $i(t)$ 与位移 $x(t)$ 的动态响应曲线, 采样率不低于 10 kHz。在阀芯即将启动的临界时刻, 即位移满足 $x(t) > \varepsilon$ (ε 为一微小阈值) 时, 阀芯处于由静止向运动过渡的临界状态, 其受力可近似满足牛顿第二定律下的平衡条件。基于电磁阀的动力学模型, 建立方程式(11)。

$$F_{mag}(t) = F_{fric} + F_{spring_pre} + m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (11)$$

式中, m 为阀芯质量, kg; F_{spring_pre} 为弹簧预紧力, N。系统依据位移阈值从时域响应中定位阀芯启动时刻, 并据此获得启动延时 T_{delay} 及对应启动电流 i_{start} 。随后 II 在该临界时刻下, 依据速度和加速度近似为零的条件, 将动力学方程简化为静力平衡

关系, 从而反推出静摩擦力, 即式(12)。

$$F_{fric} = K_{mag} i(T_{delay}) - k x_0 \quad (12)$$

式中, $i(T_{delay})$ 为启动时刻的电流, A。

启动延时 T_{delay} 主要用于定位阀芯启动临界时刻, 不直接作为静力平衡项参与计算。

为了避免启动补偿仅依赖经验判断, 本工作在静摩擦力辨识结果的基础上进一步设定补偿触发阈值。设常温合格样本的标称静摩擦力为 $F_{fric,0}$, 样本统计标准差为 σ_F , 则静摩擦力触发阈值计算方法见式(13)。

$$F_{fric,th} = \max(F_{fric,0} + 3\sigma_F, \gamma_F F_{fric,0}) \quad (13)$$

式中, γ_F 为安全系数。

当 $F_{fric} > F_{fric,th}$ 时, 说明阀芯启动阶段存在额外阻力, 需要在启动窗口内增强驱动量。此时, 启动峰值电流可按式(14)修正。

$$I_{peak} = \min\left(I_{max}, I_0 + \lambda_F \frac{F_{fric} - F_{fric,th}}{K_{mag}}\right) \quad (14)$$

式中, I_0 为标准启动峰值电流, A; I_{max} 为线圈允许通过的最大安全电流, A; λ_F 为补偿系数。

除启动峰值电流外, 启动脉宽也应根据静摩擦力超限程度进行修正。

2.2 刚度补偿策略

根据麦克斯韦电磁力公式与胡克定律, 建立的力学平衡方程见式(15)、式(16)。

$$F_{mag} = F_{spring} + F_{residual} \quad (15)$$

$$\frac{1}{2} \times \frac{N^2 I^2 \mu_0}{(\delta + \delta_0)^2} = k(x_{max} + x_{pre}) \quad (16)$$

式中, I 为线圈电流, A; δ 为工作气隙, 吸合或临界维持状态下可取为对应工况下的等效气隙长度; δ_0 为初始或附加等效气隙, m。

弹簧刚度 k 与临界维持电流的平方成正比, 即式(17)。

$$k \propto I_{critical}^2 \quad (17)$$

若实际辨识的弹簧刚度低于设计值, 则说明阀门在临界维持阶段所需的保持力相应降低, 标准维持电流可能存在冗余。为避免维持电流下调后出现保持失稳, 本工作引入保持力安全系数。维持阶段电磁力应满足式(18)。

$$F_{mag}(I_{hold}) \geq S_h [F_{spring,max} + F_{p,max}] \quad (18)$$

式中, S_h 为保持安全系数; $F_{spring,max}$ 为最大弹簧复位力, N; $F_{p,max}$ 为最大压差扰动力, N。

为进一步明确维持电流下调边界, 可根据保持

力安全系数得到维持电流安全下限, 即式(19)。

$$I_{\text{hold, min}} = \sqrt{\frac{25^2 S_h (F_{\text{spring, max}} + F_{p, \text{max}})}{\mu_0 N^2 A}} \quad (19)$$

因此, 补偿后的维持电流应满足式(20)。

$$I_{\text{hold, c}} = \max \left(I_{\text{hold, min}}, I_{\text{hold, 0}} \sqrt{\frac{k}{k_0}} \right) \quad (20)$$

式中, $I_{\text{hold, c}}$ 为补偿后的维持电流, A; $I_{\text{hold, min}}$ 为维持电流安全下限, A; $I_{\text{hold, 0}}$ 为标准维持电流, A; k 为实际辨识的弹簧刚度, N/m; k_0 为标称弹簧刚度, N/m。

2.3 线性度补偿策略

根据麦克斯韦电磁力公式, 电磁力 F_{mag} 与电流 i 及气隙 δ 之间的关系见式(21)、式(22)。

$$F_{\text{mag}} = \frac{\mu_0 N^2 A i^2}{2\delta^2} \quad (21)$$

$$K_{\text{mag}} = \frac{\mu_0 N^2 A}{\delta^2} i \quad (22)$$

如上所述, 电磁力与工作气隙的平方成反比。当装配误差导致初始气隙偏小时, 在相同驱动电流条件下, 电磁力将增大, 进而使阀门实际输出相比目标指令产生超调。以典型工况为例, 当上位机给定 50% 开度指令时, 阀门实际开度可能增大至 60%。针对磁路增益偏大这一情况, 例如有效行程偏小导致气隙不足, 系统构建逆向电流查找表, 对目标指令对应的驱动电流进行重映射修正, 以补偿磁路参数偏差引起的非线性失真, 从而提高阀门全行程范围内的控制线性度与输出一致性。

2.4 基于辨识参数的分级筛选策略

在完成静摩擦力、弹簧刚度、磁路增益和阻尼系数等关键参数辨识后, 本工作进一步建立基于辨

识参数与补偿后性能约束的比例阀分级筛选策略。该策略并非仅依据补偿前的响应结果直接判定阀门是否合格, 而是首先根据辨识参数判断性能偏差的物理来源, 再选择相应的软件补偿方式, 最后结合补偿后的启动响应、流量线性度、线圈温升及安全电流裕度完成等级判定。

设比例阀标称参数向量为, 即式(23)。

$$\theta_0 = [F_{\text{fric, 0}}, k_0, K_{\text{mag, 0}}, c_0]^T \quad (23)$$

辨识参数向量计算方法见式(24)。

$$\hat{\theta} = [\hat{F}_{\text{fric}}, \hat{k}, \hat{K}_{\text{mag}}, \hat{c}]^T \quad (24)$$

式中, θ 为标称参数向量, $\hat{\theta}$ 为辨识参数向量。静摩擦力增量、弹簧刚度偏差、磁路增益偏差和阻尼系数偏差可分别定义为式(25)~式(28)。

$$r_F = \frac{\hat{F}_{\text{fric}} - F_{\text{fric, 0}}}{F_{\text{fric, 0}}} \times 100\% \quad (25)$$

$$r_k = \frac{|\hat{k} - k_0|}{k_0} \times 100\% \quad (26)$$

$$r_K = \frac{|\hat{K}_{\text{mag}} - K_{\text{mag, 0}}|}{K_{\text{mag, 0}}} \times 100\% \quad (27)$$

$$r_c = \frac{|\hat{c} - c_0|}{c_0} \times 100\% \quad (28)$$

式中, r_F 主要用于评价静摩擦力增大程度。对于弹簧刚度、磁路增益和阻尼系数, 则采用相对偏差的绝对值评价其相比标称设计值的离散程度。为便于工程筛选, 本工作将参数偏差划分为正常偏差区、可补偿偏差区、边界偏差区和严重异常区。考虑本工作研究对象为仿真比例阀模型, 相关阈值主要用于说明分级筛选流程, 后续实际应用中可根据批量阀门的台架统计数据进一步修正。具体参数分级标准如表 1 所示。

表 1 基于辨识参数偏差的比例阀初始分级标准

Table 1 Initial classification criteria for proportional valves based on identified parameter deviations

等级	补偿后性能状态	判定结果	处理方式
A级	补偿前已满足要求	直接合格	采用标准控制参数
B级	补偿前存在部分指标超限, 补偿后 $T_{\text{delay}} \leq 5\text{ms}$ 、 $e_{\text{flow}} \leq 3\%$ 、 $\Delta T \leq 40^\circ\text{C}$	补偿后合格	写入个体化补偿参数
C级	补偿后满足基本限值, 但安全裕度不足, $40^\circ\text{C} < \Delta T \leq 45^\circ\text{C}$	条件合格/待复核	重复测试或限制工况使用
D级	补偿后仍存在 $T_{\text{delay}} > 5\text{ms}$ 、 $e_{\text{flow}} > 3\%$ 、 $\Delta T > 45^\circ\text{C}$	不合格	剔除或返修

在完成参数分级后, 还需要进一步结合补偿后的性能指标进行复核。本工作选取启动延时 T_{delay} 、最大流量线性度误差 e_{flow} 、维持阶段稳态温升 ΔT , 标准见式(29)~式(31)。

$$T_{\text{delay}} \leq 5 \text{ ms} \quad (29)$$

$$e_{\text{flow}} \leq 3\% \quad (30)$$

$$\Delta T \leq 45^\circ\text{C} \quad (31)$$

根据补偿后性能指标进行复核: 若补偿后任一基本性能约束不满足, 直接判定为D级; 若补偿后满足基本性能约束, 但启动电流、温升或保持安全系数接近边界, 判定为C级; 若补偿后各项性能均满足要求并具有足够安全裕度, 判定为B级; 若补偿前各项指标均满足要求, 判定为A级。该分级方

式能够将辨识参数与补偿效果联系起来,通过上述方法,可实现“参数辨识-偏差来源判断、软件补偿、补偿后等级筛选”的判定流程闭环。

3 模型搭建与参数辨识

3.1 基于 Simulink 环境搭建仿真平台

为验证所提出方法的可行性,本工作在 Matlab/Simulink 平台搭建了燃料电池供氢比例阀机电耦合仿真模型。模型以阀芯动力学方程为核心,输入端采用阶跃/斜坡电流指令,电磁子系统将输入电流转换为电磁驱动力;机械子系统综合考虑静摩擦力、弹簧刚度、黏性阻尼系数及磁路增益对阀芯运动的影响;流量子系统基于氢气可压缩节流模型计算阀口气体质量流量,并进一步通过下游容腔压力动态模块描述阀后压力建立过程。仿真过程中,通过模块输出电磁驱动力、阀芯位移、阀芯速度、阀口面积、氢气质量流量及下游压力等关键变量,用于特征提取、参数辨识与补偿效果评估。基于 Matlab 脚本与 Simulink 联合调用,实现参数一体化辨识。

3.2 参数辨识结果

在完成静摩擦力与弹簧刚度初步估算的基础上,本工作进一步选取启动延时 T_{delay} 、稳态位移 x_{ss} 、速度峰值 v_{peak} 及速度衰减时间常数 τ 作为表征比例阀动态特性的关键响应特征,并构建关键物理参数联合辨识的目标函数。设待辨识参数向量为 $\theta = [K_{\text{mag}}, F_{\text{fric}}, k, c]^T$, 加权目标函数可表示为式(32)。

$$J(\theta) = w_1 \left(\frac{T_{\text{delay}} - T_{\text{delay}}^{\text{ref}}}{T_{\text{delay}}^{\text{ref}}} \right)^2 + w_2 \left(\frac{x_{\text{ss}} - x_{\text{ss}}^{\text{ref}}}{x_{\text{ss}}^{\text{ref}}} \right)^2 + w_3 \left(\frac{v_{\text{peak}} - v_{\text{peak}}^{\text{ref}}}{v_{\text{peak}}^{\text{ref}}} \right)^2 + w_4 \left(\frac{\tau - \tau^{\text{ref}}}{\tau^{\text{ref}}} \right)^2 \quad (32)$$

式中, $J(\theta)$ 为参数向量 θ 对应的无量纲加权目标函数值, $T_{\text{delay}}^{\text{ref}}$ 、 $x_{\text{ss}}^{\text{ref}}$ 、 $v_{\text{peak}}^{\text{ref}}$ 和 τ^{ref} 分别为参考模型或预设目标工况提取的特征量; $w_1 \sim w_4$ 为各特征项的权重系数。

该目标函数能够综合表征模型输出与参考特征在启动和稳态阶段的偏差。基于 Matlab/Simulink 联合平台,本工作以静摩擦力、弹簧刚度、阻尼系数和磁路增益为辨识参数,采用白鲸优化算法 (beluga whale optimization, BWO) 进行参数寻优,并与粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO)、遗传算法 (genetic algorithm, GA)、模拟退火算法 (simulated annealing, SA) 及随机局部

搜索算法 (random local search, LS) 进行对比。各算法在相同优化条件下的收敛结果如图2所示。

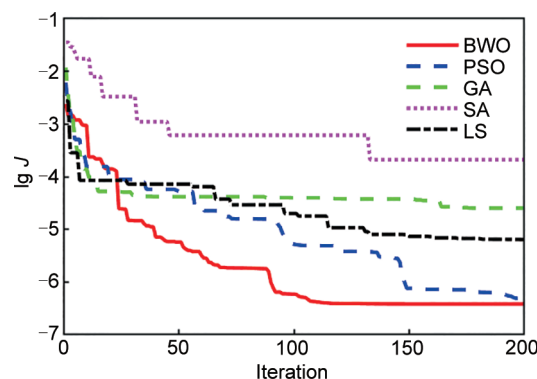


图2 不同优化算法的目标函数收敛曲线对比

Fig. 2 Comparison of objective function convergence curves using different optimization algorithms

图2给出了不同优化算法在相同搜索范围、最大迭代次数和目标函数评价方式下的收敛曲线。为便于比较,各算法的主要收敛特征总结如表2所示。

表2 不同优化算法收敛特征对比

Table 2 Comparison of convergence accuracy among different optimization algorithms

算法	最终目标函数 平均值	最差目标 函数值	最终目标函数 对数平均值
BWO	1.1672×10^{-4}	1.8103×10^{-4}	-3.9930
PSO	3.6811×10^{-4}	8.9476×10^{-4}	-3.7747
GA	2.5058×10^{-3}	4.4394×10^{-3}	-2.6695
SA	1.0692×10^{-3}	1.4112×10^{-3}	-2.9926
LS	5.4027×10^{-4}	7.4622×10^{-4}	-3.2852

由图2和表2可知, BWO在迭代前期快速收敛,并在中后期保持持续寻优能力。其最终目标函数平均值为 1.1672×10^{-4} , 较 PSO、GA、SA 等算法分别降低 68.3%、95.3%、89.1% 和 78.4%; 最差目标函数值为 1.8103×10^{-4} , 同样为各算法最低值。由于纵坐标为 $\lg J$, 其数值越负表示辨识误差越小, BWO 的对数平均值为 -3.9930, 进一步表明其具有较高的收敛精度和稳定性。为验证参数辨识结果, 进一步将 BWO 辨识值与设定值进行对比, 结果见表3。

参数辨识结果如图3所示, 图中分别给出了静摩擦力、弹簧刚度、阻尼系数以及磁路增益在白鲸优化算法迭代过程中的变化情况。白鲸优化算法在参数辨识过程中表现出较好的收敛特性。目标函数值在初始迭代阶段快速下降, 表明算法能够迅速进入优势搜索区域; 随后曲线缓慢下降并最终趋于稳

表3 设定值与辨识值比较

Table 3 Comparison of actual values and identified values

参数	设定值	辨识值
静摩擦力/N	10.00	10.063
弹簧刚度/(N/m)	705.43	704.82
阻尼系数/(N·s/m)	5.00	4.871
磁路增益/(N/A)	12.5	12.492

定, 由此说明其参数搜索过程已达到收敛状态。

由图3可知, 4个待辨识参数在初始迭代阶段均存在一定波动, 这是由于算法在搜索初期需要在较大参数范围内进行全局寻优, 以避免陷入局部最优。随着迭代次数的增加, 各参数曲线逐渐趋于平稳, 说明算法搜索过程逐步收敛, 辨识结果趋于稳定。其中, 静摩擦力最终收敛至约10.063 N, 弹簧刚度收敛至约704.82 N/m, 阻尼系数收敛至约4.871 N·s/m, 磁路增益收敛至约12.492 N/A, 均与设定实际值较为接近。各参数的辨识误差均处于较小范围内, 表明所构建的目标函数能够有效反映模型输出特征与参考特征之间的差异, 白鲸优化算法能够较准确地搜索到满足动态响应特征匹配要求的参数组合。

结合图3的收敛曲线和表3的对比结果可以看出, 本工作所提出的基于物理参数辨识的自适应控制方法具有较好的辨识精度和收敛稳定性, 能够为后续启动补偿、维持电流修正以及磁路增益失配补偿提供可靠的参数依据。

4 仿真验证与结果分析

为验证所提方法的可行性, 基于 Matlab/Simulink 比例阀耦合模型构建低温冷启动、弹簧刚度离散和磁路增益偏差3类典型仿真工况, 并分别开展补偿前后对比分析。仿真中通过修改静摩擦力、弹簧刚度及磁路增益等模型参数, 等效模拟不同制造偏差和环境影响, 并输出启动延时、阀芯位移、驱动电流、线圈温升及阀口流量等性能指标。以下结果用于验证所提参数辨识、自适应补偿与分级筛选方法在典型参数偏差条件下的有效性, 不代表实际比例阀台架测试结果。

4.1 低温冷启动补偿仿真

在仿真模型中设置-30℃低温工况, 并通过增大静摩擦力等效表征低温下润滑介质黏度升高所

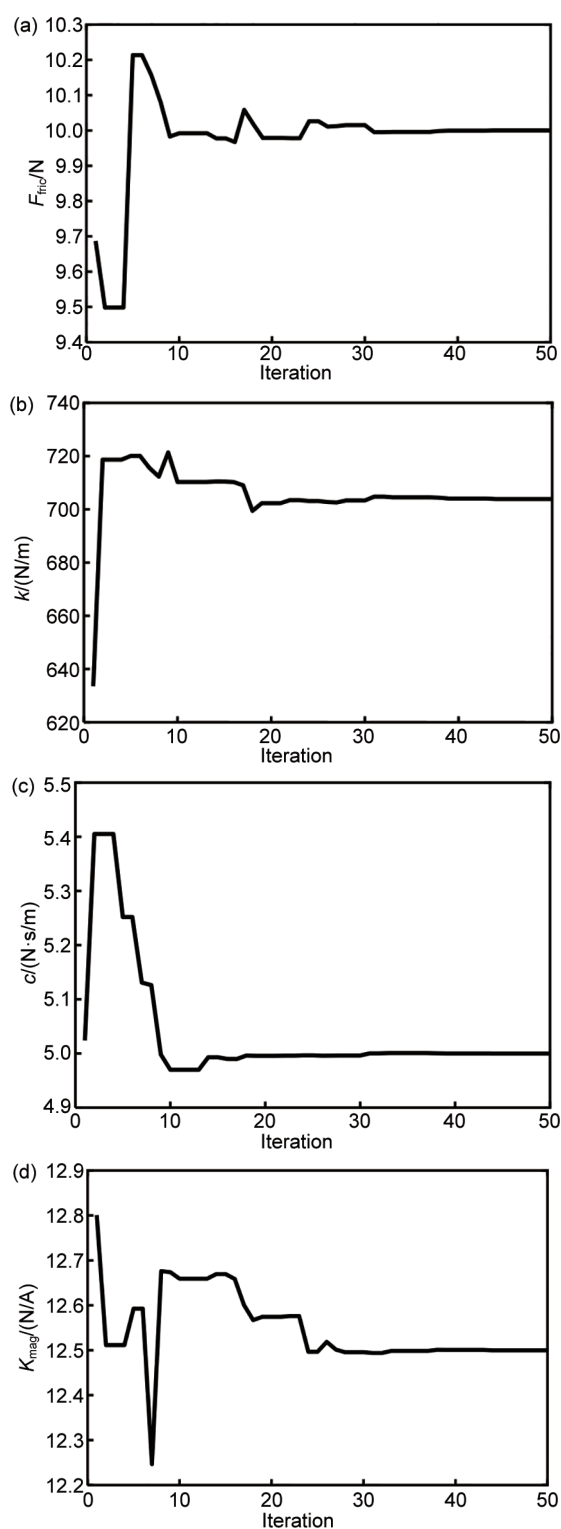


图3 (a) 静摩擦力辨识过程; (b) 弹簧刚度辨识过程; (c) 阻尼系数辨识过程; (d) 磁路增益辨识过程

Fig. 3 (a) Static friction identification process, (b) spring stiffness identification process, (c) damping coefficient identification process, (d) magnetic gain identification process

引起的额外启动阻力。在标准控制参数作用下，阀芯启动延时为 12.0 ms，高于 5 ms 的设定限值。参数辨识结果表明，该工况下静摩擦力明显增大。根据辨识结果，控制器执行低温启动 Boost 补偿，将启动峰值电流由 2.0 A 提高至 2.5 A，并相应增加启动脉冲宽度。补偿前后的仿真结果如表 4 所示。

表 4 低温启动补偿前后仿真结果对比				
Table 4 Comparison of simulation results before and after low-temperature start-up compensation				
参数指标	标准值(25℃)	补偿前仿真值(-30℃)	补偿后复测值(-30℃)	判定结果
启动延时 T_{delay} /ms	≤5.0	12.0	4.8	合格
静摩擦力 F_{fric} /N	2.5	6.8	—	—
启动峰值电流 I_{peak} /A	2.0	2.0	2.5	—
启动脉冲宽 t_{boost} /ms	2.0	2.0	12.0	—

仿真结果显示，在相同的-30℃等效低温工况下，阀芯启动延时由 12.0 ms 缩短至 4.8 ms，满足不高于 5 ms 的设定要求。阀门响应特性显著改善，消除了启动迟滞现象。

图 4 为补偿前后的阶跃响应对比曲线。曲线 A（补偿前）显示电流上升缓慢，导致位移曲线在 12 ms 处才出现拐点；曲线 B（补偿后）显示电流以更陡峭的斜率上升至 2.5 A，位移曲线在 4.8 ms 处即出现拐点，表明所提补偿策略在该仿真工况下具有较好的启动改善效果。

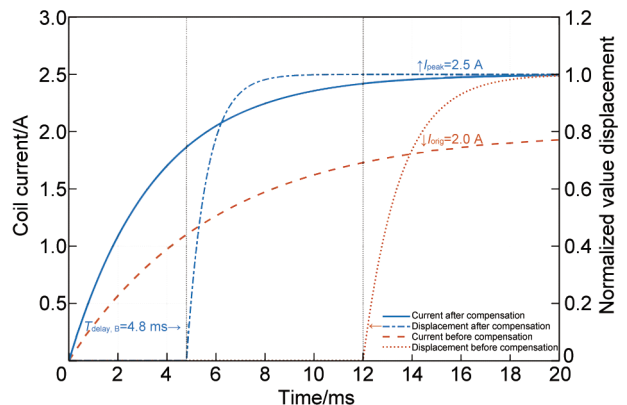


图 4 低温启动补偿前后仿真响应曲线
Fig. 4 Simulation response curves before and after low-temperature start-up compensation

图中， I_{orig} 和 I_{peak} 分别为补偿前启动电流和补偿后启动峰值电流，单位均为 A。通过双轴坐标系，直观对比了-30℃低温工况下阀门自适应补偿前后的动态响应特性。曲线 A（补偿前）表明，在原控制策略下，受低温高黏滞阻力影响，电流上升速率有限，电磁力需要累积至 12 ms 才能克服静摩擦力驱动阀芯动作，表现出显著的开启滞后；而曲线 B（补偿后）显示，基于辨识结果对启动电流实施 Boost 补偿，电流以更高的斜率快速攀升至 2.5 A

峰值，在 4.8 ms 时即具备足以克服阻力的电磁力。对比结果表明，该系统可有效消除低温迟滞现象，将阀门启动响应时间从 12 ms 的异常值恢复至 <5 ms 的标准范围。

本研究基于物理参数辨识方法，在无需额外改动硬件的条件下，实现了对低温冷启动失效问题的有效抑制，显著提升了燃料电池系统在极端环境下的运行可靠性。

4.2 刚度离散性节能补偿仿真

在 24 V 供电仿真条件下，将复位弹簧刚度设置为标称值的 90%，以构造弹簧刚度偏软工况。在标准控制参数下，维持阶段存在驱动电流冗余问题，导致模型计算得到的线圈稳态温升偏高。根据辨识得到的弹簧刚度，控制器在满足保持力安全系数的前提下，将维持电流由 0.50 A 修正为 0.474 A。补偿后维持功耗和线圈温升均有所降低，仿真结果如表 5 所示。

表 5 刚度补偿前后仿真性能对比
Table 5 Comparison of simulation performance before and after stiffness compensation

性能指标	标准控制参数 (补偿前)	自适应修正参数 (补偿后)	变化幅度/%
弹簧刚度	偏软(-10%)	偏软(-10%)	—
维持电流/A	0.50	0.474	-5.2
线圈功耗/W	6.0(内阻 24Ω)	5.4	-10.0
稳态温升/℃	45	38.15	-15.2
最终温度/℃	83.41	79.15	-5.1

图 5 为补偿前后的维持阶段电流与温升曲线对比图。

图 5 表明，针对弹簧刚度偏软的阀门，所提出的刚度补偿策略在保证可靠维持的前提下，将维持电流由 0.50 A 降至 0.474 A，从而降低了维持阶段的功率损耗。达到热稳态时，对应温升由 45℃ 降至 38.15℃。结果表明，该方法能够有效抑制线圈发热，验证了刚度补偿策略降低维持阶段功耗和线

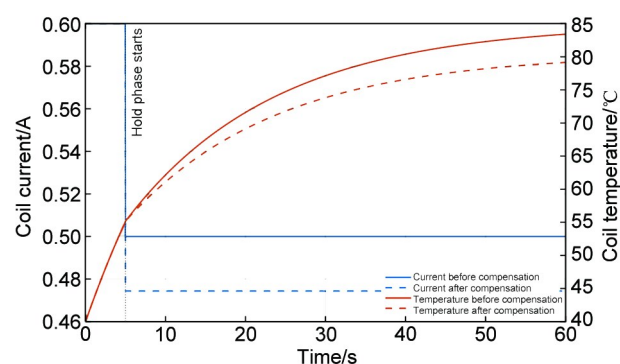


图5 补偿前后的维持阶段电流与温升曲线对比图

Fig. 5 Comparison of current and temperature rise curves during the holding phase before and after compensation

表6 LUT校准前后仿真流量对比

Table 6 Comparison of performance data

目标开度/%	标准模型电流/A	补偿前实际流量/(L/min)	LUT修正后电流/A	补偿后实际流量/(L/min)	流量线性度误差 $e_{\text{flow}}/\%$
20	0.40	42.00	0.485	59.85	0.25%
50	1.00	167.99	0.915	150.14	0.10%
80	1.60	279.99	1.345	240.44	0.18%

针对因气隙偏小引起磁路增益偏大，进而导致流量输出呈上凸形非线性的阀门，系统构建了逆向查找表，用于校准与补偿。图6给出了修正前后目标开度-实际流量输出特性曲线的对比结果，用于验证自适应标定方法的实际效果。

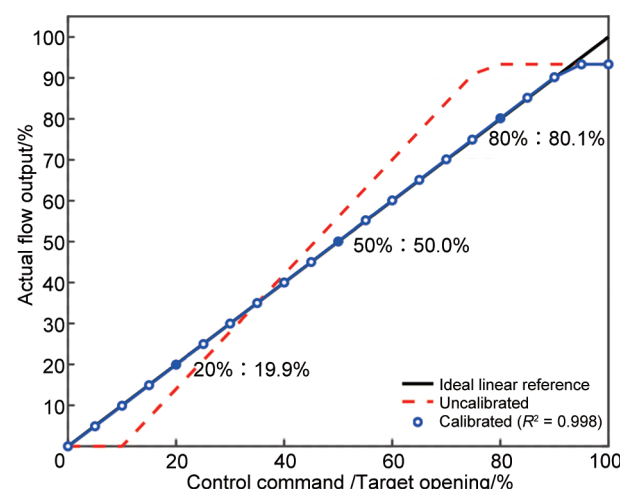


图6 LUT补偿前后目标开度与仿真流量特性对比

Fig. 6 Comparison of target valve opening and simulated flow characteristics before and after LUT compensation

由图6可知，受制造公差影响，当初始气隙偏小、磁路增益偏大时，未校准状态下，低开度区域受启动死区和静摩擦影响，模型输出流量低于理想值；

圈热负荷的可行性。

4.3 流量线性度校准仿真

在电磁阀制造过程中，磁路气隙装配偏差会导致磁路增益出现偏差，进而影响阀门的控制线性度。当实际气隙偏离设计值时，相同驱动电流对应的电磁力发生变化，使电流与流量映射关系偏离标定基准。针对该问题，本工作基于辨识得到的磁路增益参数构建逆向查找表，对驱动电流进行重映射修正。经补偿后，阀门输出特性与目标流量指令重新匹配，有效减小了制造偏差引起的非线性偏差，提高了开环控制精度，其补偿效果如表6所示。

中高开度区域受磁路增益偏大影响，模型输出流量高于理想线性基准。以50%目标开度为例，补偿前模型输出流量为167.99 L/min，较150 L/min目标值偏高约12.0%；经LUT校准后，输出流量降至150.14 L/min，流量线性度误差为0.10%。经自适应标定后，通过辨识关键物理参数并结合LUT补偿策略对驱动电流进行重映射修正，输出特性与理想线性基准基本重合，线性度判定系数提高至0.99以上。

结果表明，所提出的软件补偿方法能够在不改变硬件结构的前提下有效改善阀门全量程线性度，并对制造偏差引起的磁路参数偏差实现等效补偿，从而提升产品一致性和工程应用价值。

4.4 分级筛选结果

基于上述3类典型工况的补偿结果，可进一步对比例阀仿真情况进行分级判定。具体筛选示例如表7所示。

由表7可知，3类典型参数偏差仿真工况在补偿前均存在响应迟滞、温升偏高或流量误差大等问题，经参数辨识与针对性软件补偿后，各项仿真性能指标均降至允许范围，并被判定为B级。结果表明，所提出的分级筛选策略能够避免仅依据补偿前性能直接判废，使部分存在参数偏差的阀门通过软件修正达到使用要求，表明该策略具有减小直接判废概率并提高参数偏差样本利用率的应用潜力。需要说明的是，表7

表 7 典型工况下的分级筛选结果

Table 7 Classification results under typical operating conditions

工况类型	主要偏差来源	补偿前表现	补偿方式	补偿后结果	等级
低温冷启动	静摩擦力增大	启动延时 12.0 ms 超限	Boost 启动补偿	启动延时降至 4.8 ms	B 级
刚度离散	弹簧刚度偏软	维持电流冗余，温升较高	维持电流修正	温升由 45℃ 降至 38.15℃	B 级
线性度偏差	磁路增益偏大	中间开度流量超调	LUT 电流重映射	流量误差降至允许范围	B 级

主要展示B级典型样本。对于补偿前已满足性能要求的样本可判定为A级；补偿后虽满足基本限值但接近安全边界的样本判定为C级；补偿后仍存在性能指标超限的样本则判定为D级并进行返修或剔除。

5 结 论

针对燃料电池比例阀量产一致性不足的问题，本工作提出了一种基于物理参数辨识的自适应标定与分级筛选方法，并通过仿真验证了其有效性，主要结论如下。

（1）基于仿真动态响应信号分析，实现了静摩擦力、弹簧刚度、阻尼系数及磁路增益等关键参数的辨识，建立了阀门性能偏差与内部物理参数之间的对应关系，为个体化补偿控制提供了依据。

（2）针对静摩擦增大、弹簧刚度偏软及磁路增益失配等问题，分别设计启动补偿、维持电流修正和LUT电流重映射策略。结果表明，该方法能够有效改善低温启动性能、降低线圈温升并提高流量输出线性度，从而提升阀门动态响应与稳态控制性能。

（3）构建了基于辨识参数与补偿后性能指标的分级筛选机制，实现了典型参数偏差仿真工况的补偿修正与等级判定，该方法为减少由参数离散导致的误判和直接判废提供方法依据。

综上，本工作建立了由参数辨识、软件补偿和分级筛选构成的闭环标定方法，为燃料电池比例阀批量生产中的一致性控制和质量分级提供了一种可行思路。

参 考 文 献

[1] 黄良卉. 质子交换膜燃料电池系统动态建模与温度控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.

[2] 韩博, 贾子钊, 江源, 等. 基于自适应遗传算法的3-PURU/S并联稳定平台运动学标定[J]. 机械工程学报, 2025, 61(9): 264-276. DOI: 10.3901/JME.2025.09.264.

HAN B, JIA Z Z, JIANG Y, et al. Kinematics calibration of 3-PURU/S parallel stabilized platform based on adaptive genetic algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(9): 264-276. DOI:10.3901/JME.2025.09.264.

[3] 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. Nonlinear friction adaptive compensation control method of proportional valve based on parameter identification[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2023, 40(9): 1403-1410. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-4551.2023.09.012.

[4] 吴东来. 燃料电池发动机用比例阀工作特性试验分析[J]. 电池工业, 2025, 29(1): 9-12. DOI:10.19996/j.cnki.ChinBatInd.2025.01.003.

WU D L. Experimental analysis of operating characteristics of proportional valves for fuel cell engines[J]. Chinese Battery Industry, 2025, 29(1): 9-12. DOI:10.19996/j.cnki.ChinBatInd.2025. 01.003.

[5] 王知雨, 王斌, 王朝晖. 采用非线性最小二乘法的超级电容等效电路模型参数辨识[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(4): 10-18. DOI: 10.7652/xjtuxb202004002.

WANG Z Y, WANG B, WANG (C /Z)H. A parameter identification method for an equivalent circuit model of supercapacitor using nonlinear least squares[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(4): 10-18. DOI:10.7652/xjtuxb202004002.

[6] 孙鑫, 杨海晶, 谷青发, 等. 基于分数阶模型的分阶段自适应锂离子电池荷电状态估计[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(2): 183-192.

SUN X, YANG H J, GU Q F, et al. Staged adaptive lithium-ion battery SOC estimation based on fractional order model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(2): 183-192.

[7] 张文轩, 王栋. 两轴两框架机载光电系统摩擦模型辨识的研究[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(2): 144-151.

ZHANG W X, WANG D. Friction model identification of two-axis and two-frame airborne photoelectric system[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2023, 21(2): 144-151.

[8] KARAHAN O, KARCI H. Swarm intelligence based nonlinear friction and dynamic parameters identification for a 6-DOF robotic manipulator[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2023, 108(2): 19. DOI:10.1007/s10846-023-01868-5.

[9] ZHANG L B, WANG J C, CHEN J L, et al. Dynamic modeling for a 6-DOF robot manipulator based on a centrosymmetric static friction model and whale genetic optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2019, 135: 102684. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2019.05.006.

[10] 陈立娟, 彭泽钦, 孙家庆, 等. 先导式电液比例阀非线性位置自适应补偿控制[J]. 液压与气动, 2021, 45(8): 64-71. DOI: 10.11832/j.issn.1000-4858.2021.08.009.

CHEN L J, PENG Z Q, SUN J Q, et al. Nonlinear position adaptive compensation control of pilot operated electro-hydraulic proportional valve[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, 45 (8): 64-71. DOI:10.11832/j.issn.1000-4858.2021.08.009.