

# 多堆燃料电池系统空气供应解耦控制器设计

顾欣<sup>1,2</sup>, 周苏<sup>1,3</sup>, 谢正春<sup>1</sup>, 高建华<sup>1</sup>

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 上海新动力汽车科技股份有限公司, 上海 200438;

3. 上海中侨职业技术大学 智能制造学院, 上海 201514)

**摘要:** 大功率多堆燃料电池空气供应系统控制由储气罐控制、各堆进气流量节流阀控制以及进气压力背压阀控制构成。试验分析发现,在节流阀与背压阀控制之间存在较强耦合性。为此,基于多堆空气系统架构,采用相关技术来辨识其空气供应子系统在稳态工作点附近的局部线性化传递函数矩阵,并基于前馈解耦补偿技术,实现多堆空气系统储气罐、节流阀与背压阀在稳态工作点附近的相对独立控制。实验结果表明,该方法可实现多堆燃料电池空气供给系统的供给压力、进气流量与进气压力的解耦,具有良好的解耦效果和实用性能。

**关键词:** 多堆燃料电池;解耦控制;空气供应系统;硬件在环仿真(HIL)

中图分类号: TP29

文献标志码: A

## Decoupling Controller Design for Air Supply Subsystem of MFCS System

GU Xin<sup>1,2</sup>, ZHOU Su<sup>1,3</sup>, XIE Zhenchun<sup>1</sup>, GAO Jianhua<sup>1</sup>

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai new power Automotive technology Co., Ltd., Shanghai 200438, China; 3. College of Intelligent Manufacturing, Shanghai Zhongqiao Vocational and Technical College, Shanghai 201514, China)

**Abstract:** Air Supply Subsystem of multi-stack fuel cell system (MFCS) consists of air compressor, buffer tank, inlet flow throttle valve and backpressure valve, because of strong coupling between air mass flow and back pressure control in the air supply system, proposed decoupling control needed to be adopt in MFCS. Based on Air Supply Subsystem of MFCS, the transfer function matrix of the air supply subsystem for MFCS is identified near steady state point and then air flow and back pressure is decoupled via feed-forward compensation decoupling control technique. Experimental results show that the designed controller can really achieve the decoupling control of air flow and back pressure.

**Keywords:** multi-stack fuel cell system (MFCS); decoupling control; air supply subsystem; hardware-in-loop simulation (HIL)

由于具有高效率、零排放、无声运行、启动快、工作温度低等优点<sup>[1]</sup>,质子交换膜燃料电池(PEMFC)可以为减少石油能源负担与降低环境污染做出突出贡献<sup>[2-3]</sup>。为发挥燃料电池续航里程长、加氢时间短的优势,中国提出的燃料电池应用场景主要为大功率应用领域(船舶、潜艇和重型车辆等)。然而,对于功率需求超过 300 kW 的应用需求,当前单电堆的燃料电池系统(SFCS)显然无法满足其要求,因此,建立多个较低功耗的电堆燃料电池(SFCS)为一个集成的多堆燃料电池系统(MFCS)是最优的解决方案。为了提升燃料电池系统的总功率,采用多堆燃料电池系统后,如果仅仅使用多套单堆系统的气、热、电供应子系统,其成本、工作效率及占用空间仍然无法满足实际应用需求,所以将氢气子系统、空气子系统、温度控制子系统与电堆功率控制子系统进行适当集成是一个较好的解决方案,为此,需要设计特有的附件子系统与MFCS相匹配<sup>[4]</sup>。

周苏等针对MFCS设计了集成式的空气供应系统并与SFCS的传统空气供应系统进行了比较<sup>[5]</sup>,结果表明,采用带有缓冲罐的集成空气供应系统可有效降低燃料电池的寄生功率,提升工作效率,并且随着电堆采用的功率提升,这种优势将越明显。然而,与SFCS的空气系统控制方法不同,MFCS采用空压机控制储气罐压力为各子电堆系统提供空气,各子电堆系统内部则采用节流阀控制进气流量以及采用背压阀控制进气压力。该系统作为一个多输入多输出的耦合系统,与SFCS系统同样具有较强的非线性与不确定性,因此,如何有效控制系统的压力与

收稿日期: 2023-12-12

第一作者: 顾欣(1990—),男,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为整车动力系统建模与控制。E-mail: 2180076@tongji.edu.cn

通信作者: 周苏(1961—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为车辆动力系统建模与控制。E-mail: suzhou@tongji.edu.cn

流量,成为提高系统效率与可靠性的关键。

针对单堆燃料电池空气耦合系统控制,吉林大学的李蒙<sup>[7]</sup>在其硕士学位论文中提出了广泛适用于非线性空气耦合系统的反馈线性化方法,通过将系统的输入输出线性化,利用线性系统的控制方法设计控制律,并且结合自抗扰控制策略,实时估计和补偿不确定性对系统的干扰,建立了一套针对多输入多输出耦合系统的完整控制策略。同济大学陈凤祥<sup>[8-10]</sup>采用M序列辨识的方法获得高精度的传递函数矩阵,并通过局部补偿与静态前馈解耦的方式获得较好的控制效果,然后,又提了将内模控制与多变量解耦理论相结合的解耦流量和压力的控制策略,证明这种方法在模型失配情况下能比PID解耦控制器具有较好的性能;接下来又研究了模型预测控制算法(MPC),建立了线性变参数(LPV)模型作为MPC的预测模型,研究了自适应的控制效果,证明了在整个工况范围内,采用MPC算法和单点MPC算法均能获得较好的控制效果,且对电堆压力和质量流量的控制精度较高。同济大学周苏等<sup>[12]</sup>在前馈补偿解耦的基础上对空压机的调速功能添加了自适应查表算法,证明了改进后的算法能够在线自适应地更新压缩机转速表,很好的解决了PI调节器的积分饱和问题,压缩机的响应速度得到了加强。

目前国内外针对多堆燃料电池空气供应子系统的空气压力与流量的协同控制还鲜有涉及,周苏、谢正春等<sup>[5]</sup>针对特定的应用场景车辆(204 kW),基于C\_WHTC循环,设计了缓冲罐集成的空气供应装置,探讨了在不同的缓冲罐压力控制策略如恒压控制和混合控制下,集成供气装置的电功率消耗,而针对各电堆的流量与压力控制则未见描述。因此,本文针对多堆燃料电池的空气供应系统的耦合情况进行了探讨,应用解耦控制策略针对多堆空气系统进行了控制器的设计、仿真验证和性能分析研究。

## 1 控制方法设计

### 1.1 多堆燃料电池空气供应系统

本研究对象基于某公司量产的70 kW单堆燃料电池系统,对该系统进行了扩展,采用并联的方式完成了70 kW、100 kW、120 kW分堆合并后的多堆燃料电池系统的搭建。燃料电池系统的结构如图1所示,其多堆的功率可根据不同的工况采用平均分配或是独立分配。

在MFCS系统中包含了4大核心子系统。电堆

子系统:多堆燃料电池的电堆子系统包括3个堆,其最大堆的功率为120 kW,电堆内部的工作机理与特性与量产单堆相同,而各电堆间采用了并联的方式进行连接。氢气子系统包括氢瓶、减压阀、比例阀、蓄压共轨管、引射器、氢气循环泵、排氢阀与排水阀等部件,与单堆的区别为采用了共轨管的方式针对多堆供氢进行集中氢气供压控制。

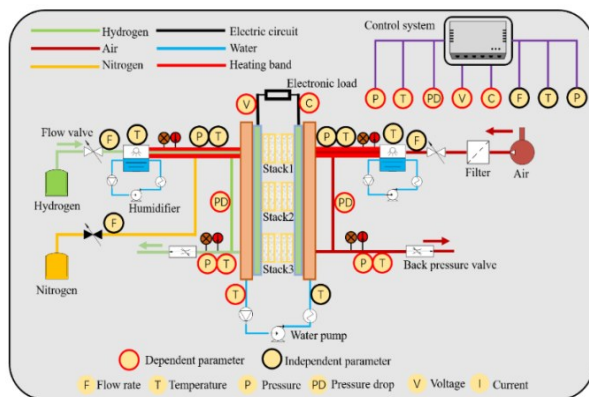


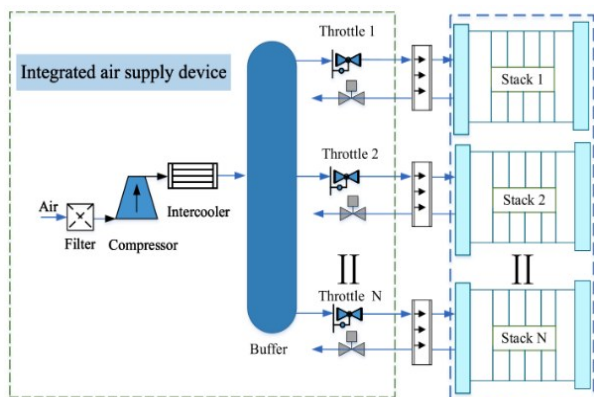
图1 MFCS系统结构示意图<sup>[6]</sup>

Fig.1 MFCS system structure schematic diagram

热管理系统的目标是为了稳定中冷器与3个燃料电池子电堆的温度以满足燃料电池冷却与加热的温度需求,其中节温器、冷却水泵、冷却风扇、水箱与冷却止回阀部件的排布无改变,而混合器与旁通阀零部件进行了优化,即由原来的连接单电堆与中冷器,变为了连接3个电堆与中冷器的四通阀,为了增强散热,也提高了冷却水泵与冷却风扇的冷却能力,以保证冷却效果。

区别于单堆燃料电池系统,为满足多堆燃料电池的空气需求,多堆燃料电池系统对空气子系统的架构做了较大改变,如图2所示。首先将过滤器、空压机及中冷器作为电堆公用部件,进行3个电堆的集中供气,为了维持给3个电堆供气的稳定性,增加了空气缓冲罐部件,为了增加进气流量将空压机升级为大功率的电动空压机;针对于每个电堆,将节气门、增湿器以及背压阀,单独配置到每一个电堆子系统,便于每个电堆内部的人堆进气流量与进气压力的控制。因此针对于多堆燃料电池控制系统,需要采用空压机进行空气缓冲罐稳压控制;而针对于每个子电堆的进气流量控制,则增加了进气节气门部件,同时配备了各自的增湿器以及背压阀。

针对图2的多堆燃料电池空气供应系统,储气罐压力、各子电堆的空气流量和背压控制存在两种控制方案,即方案一:以空机电压 $U_{AC}$ 控制储气罐

图 2 多堆燃料电池系统结构空气系统<sup>[5]</sup>Fig.2 Structure diagram of the integrated air supply system for MFCS<sup>[5]</sup>

的压力,以进气节流阀电压  $U_{IT}$  和背压阀电压  $U_{ET}$  为操纵变量控制各个子电堆的入堆空气流量和背压;方案二:分别对空压机电机构建转速环,对进气节流阀与背压阀电机构建开度环,<sup>[7]</sup>。

本文的研究重点在于控制空压机转速、以及进气节流阀与背压阀的开度来实现储气罐流量、空气流量与入堆压力的控制,引入了空压机转速环控制后,不仅可以抑制电机转速环内本身的干扰,提升系统的线性化程度,还可以实现电机本身的转速控制与空气系统控制独立。而进气节流阀与背压阀在本系统中则采用了电子节气门实现,具有较强的非线性,因此引入开度环后将局部非线性子系统线性化,从而使得整体系统更接近线性。考虑上述情况,本文在方案二基础上进行解耦控制器设计,控制系统结构如图3所示。

分析空气系统中可能产生耦合的4对变量有:①电堆子系统1中的空气流量、入堆压力 vs 进气节流阀开度、背压阀开度;②电堆子系统2中的空气流量、入堆压力 vs 进气节流阀开度、背压阀开度;③电堆子系统3中的空气流量、入堆压力 vs 进气节流阀开度、背压阀开度;④储气罐中的压力 vs 流入储气罐的进气流量(空压机转速)、流出储气罐的进气流量(3个电堆的进气节流阀开度叠加)。首先通过系统辨识来分析其耦合特性并辨识系统平衡点的传递函数,后续针对这4对变量的耦合性与解耦算法进行讨论研究。

## 1.2 控制系统辨识分析

在非线性系统辨识分析中,需要辨识测试信号在平衡点附近的系统传递函数阶数,以确定传递函数的结构,幸运的是,对于单堆燃料电池系统在平衡点的传递函数阶次已经有大量文献进行了研究,如



图 3 多堆燃料电池空气控制系统结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the air control system structure for MFCS

文献5中通过双通道延时M序列的方式对一款高压燃料电池系统动态特性进行了辨识,确认其在平衡点附近的传递函数为一阶系统,则对于多堆燃料电池系统的各个子电堆系统动态特性,应该也是一阶系统。

### 1.2.1 系统辨识信号设计

对于动态系统而言,辨识的关键是辨识信号的设计,一方面,辨识信号需要满足在时域上充分激励所辨识系统的所有模态;另一方面,需要满足在频域上足以覆盖系统的频谱;另外,还要求辨识信号能使辨识获得的模型精度最高。针对非线性动态系统,一般选择白噪声或伪随机信号作为系统的测试输入信号。伪随机信号的自相关函数  $R(\tau)$  和白噪声一样,但是它有重复周期  $T$ ,使其具有良好的自相关性,且自相关函数的计算只需要在一个周期内进行,显示了比白噪声更好的优越性<sup>[11]</sup>。本文选择两通道延时M序列作为辨识信号,通过在输入信号中叠加辨识信号的方法对两通道的传递函数同时进行辨识,该方法具有抗噪声干扰的优点,符合本文系统辨识的要求。

### 1.2.2 子电堆空气系统传递函数

首先对于电堆子系统1中的空气流量、入堆压力 vs 进气节流阀开度、背压阀开度的耦合性进行研究,则电堆子系统2与3的耦合性研究方法电堆1一致。本文采用了阶跃响应对电堆子系统进行了开环测试,确认其时间常数为1.3 s,稳定时间为4.2 s,系统带宽频率  $f_b$  大约为0.3 Hz,根据开环测试的信

息结果可知码元的最小保持时间  $\Delta T \leq \frac{1}{3f_b}$ 。考虑电子节气门的响应特性,兼顾码元最小保持时间应在截至频率  $f_b$  的 2~5 倍左右,则取  $\Delta T$  为 6 s。考虑到序列的周期  $N$  应满足  $N \leq \frac{T_{ad}}{\Delta T} + 1$ ,其中  $T_{ad}$  为开环测试系统调节时间,且  $N$  只可能为  $2^n - 1$ ,本文选取的序列周期  $N$  长度为 63。最后,根据多通道延时  $M$  序列辨识原理,设计如下测试序列:进气节流阀开度(通道 1)幅值为 0.03(0~1),背压阀开度(通道 2)幅值为 3(0~100),辨识序列信号如图 4 所示。

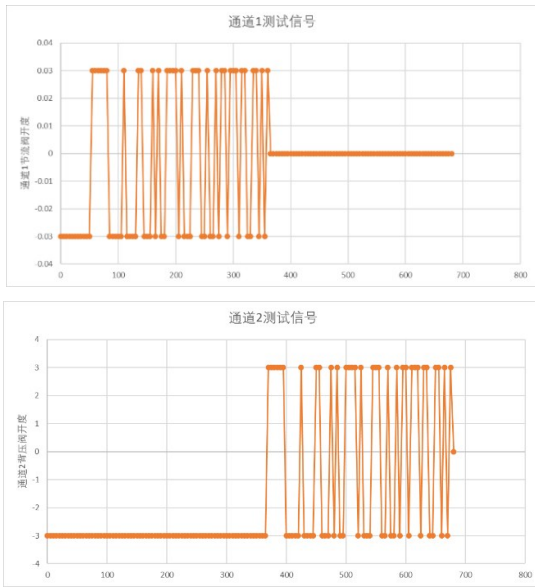


图4 测试用辨识序列(1周期)

Fig.4 Test identification sequence (1 cycle)

选定子电堆 1 的空气子系统的平衡点  $(\theta_{in}, \theta_{out})$  为 (0.1, 25), 此时储气罐压力稳定在 1.8 bar, 子电堆 1 的空气流量与空气背压为 200 kg/h、1.3 bar。在测试时候叠加上述辨识序列, 并采用 Matlab 软件中的系统辨识工具箱辨识获得系统输入输出数据, 即燃料电池系统的进气节流阀开度、背压阀开度、流量和压力信号, 并最终获得 TITO(两输入两输出) 系统的传递函数矩阵, 如式 1 所示。

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{149\ 300}{s+405} & \frac{34.5}{s+2.73} \\ \frac{10.7}{s+3.98} & \frac{-0.31}{s+4.96} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

流量通道与压力通道在平衡点的辨识拟合率为 82% 与 93%, 曲线拟合结果分别如图 5 和图 6 所示, 由图可见, 模型的辨识结果较为准确。同样, 用相同

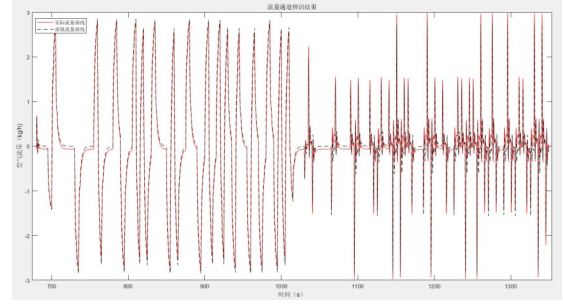


图5 流量通道辨识结果

Fig.5 Identification results of air mass flow channels

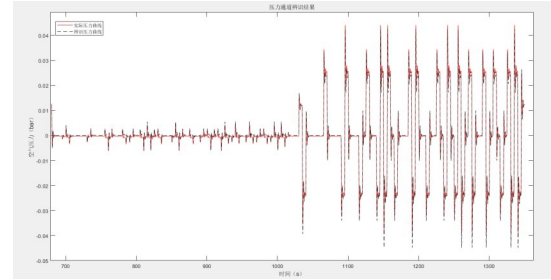


图6 压力通道辨识结果

Fig.6 Identification results of air pressure channels

的方法得到 100 kW 子电堆 2 的模型传递函数, 如式 (2) 所示; 得到 20 kW 子电堆 3 的模型传递函数, 如公式 3 所示。

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{268\ 600}{s+908} & \frac{13.4}{s+3.16} \\ \frac{14.23}{s+4.685} & \frac{-0.158}{s+7.6} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{198\ 700}{s+552} & \frac{15}{s+2.7} \\ \frac{11}{s+4} & \frac{-0.153}{s+5.74} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 1.2.3 子电堆空气系统耦合性

对于多堆系统的各个子电堆而言, 为了确认其输出量空气流量  $m$ 、入堆压力  $p$  与输入量进气节流阀开度  $\theta_{in}$ 、背压阀开度  $\theta_{out}$  存在耦合关系, 首先需要确定这个双输入双输出一阶系统的相对增益矩阵; 而对于已知的空气系统一阶传递函数而言, 可采用求取静态增益矩阵来计算相对增益矩阵。该系统的静态增益矩阵如式 (4) 所示。

$$\begin{cases} K_1 = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 368.6 & 12.7 \\ 2.69 & -0.06 \end{bmatrix} \\ K_2 = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 296 & 4.24 \\ 3.03 & -0.021 \end{bmatrix} \\ K_3 = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 360 & 5.55 \\ 2.75 & -0.026 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

相对增益矩阵可以用式(5)表示,可得到的3个子电堆的增益矩阵计算输出如式(6)所示。

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix} = K \times (K^{-1})^T \quad (5)$$

$$\begin{cases} \lambda_{-1} = \begin{bmatrix} 0.39 & 0.61 \\ 0.61 & 0.39 \end{bmatrix} \\ \lambda_{-2} = \begin{bmatrix} 0.33 & 0.67 \\ 0.67 & 0.33 \end{bmatrix} \\ \lambda_{-3} = \begin{bmatrix} 0.38 & 0.62 \\ 0.62 & 0.38 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

当 $\lambda$ 越接近1时,耦合性越弱,当 $\lambda < 0.8$ 或 $\lambda > 1.2$ 时,则为强耦合系统,需要解耦以获得更强的控制效果。从增益矩阵上来看,由于耦合系数 $\lambda$ 均小于0.8或大于0.2,所以多对燃料电池的空气系统具有较强的耦合性,需要进行前馈解耦控制。

#### 1.2.4 储气罐系统耦合性

本文研究的多堆采用了储气罐来存储由空压机提供给3个子电堆的空气,而流出储气罐的空气则由3个子电堆的需求进气量来决定。文献[5]提及,采用储气罐可以有效平抑由于3个子电堆进气量变化导致的空气系统耦合的情况,以此来解耦空压机系统与燃料电池各子电堆的进气控制,避免空压机因为喘振、超速和阻塞导致的系统失效。本文给出了储气罐系统的数学模型,如式(7)所示。

$$\frac{dP}{dt} = \frac{R \times T}{M \times V} \times (m_{in} - m_{out}) \quad (7)$$

式中: $R$ 为理想气体常数,8.314 (J/mol)/K; $P$ 为储气罐压力,kPa, $T$ 为储气罐中的空气温度,经过热管理系统控制后,其温度稳定在342 K; $V$ 为储气罐的容积,0.3 m<sup>3</sup>; $M$ 为空气的摩尔质量,29 kg/mol; $m_{in}$ 为空压机提供的空气流量,kg/s; $m_{out}$ 为通过进气节流阀控制从储气罐流入3个子电堆的空气流量,kg/s。

式7表明,如将流出储气罐空气流量作为干扰因素,当流出空气流量由于电流拉载导致波动变化时,由于系统中存在积分环节(低通滤波器),因此空压机控制的输入空气流量针对于储气罐压力的控制不会产生突变,本文针对储气罐的数学模型建立系统仿真模型后,在子电堆平衡点处叠加了辨识测试序列后,流出储气罐电堆流量产生如图7所示变化的情况下,确认输入的空气流量在采用PID控制策略控制储气罐压力时未发生耦合情况。

#### 1.3 前馈解耦闭环控制算法

多堆燃料电池的各子电堆的空气系统压力控制

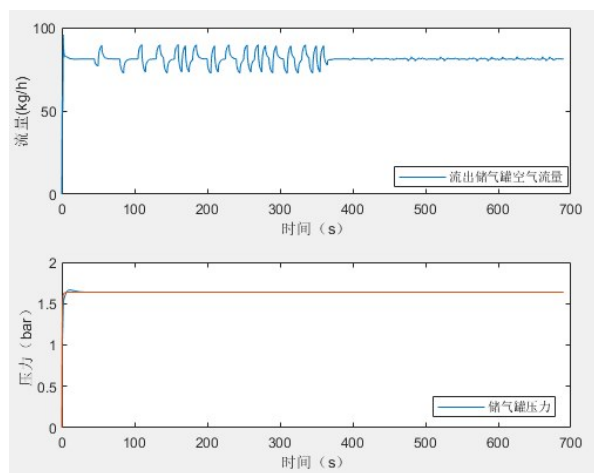


图7 储气罐压力耦合性仿真

Fig.7 Pressure coupling simulation for air buffer

与目标流量控制具有耦合作用,因此需要进行解耦控制,所谓耦合,是指控制变量与被控变量之间是相互影响的,一个控制变量的改变会同时引起几个被控变量变化的现象,这种影响严重时可能会导致各控制回路无法正常工作。针对空气供应系统,空气流量与压力存在较强的耦合性,利用传统的PID控制难以有效解决压力与流量之间的相互影响,对空气供应系统的控制产生不利影响,因此需要进行解耦控制,本文选择了前馈补偿解耦法,控制系统的结构框图如图8所示为了使得系统达到解耦的要求,需要使流量 $m$ 与压力调节器输出 $V_2$ 无关,而压力 $p$ 则与流量调节输出 $V_1$ 无关。那么需要满足以下公式:

$$\begin{aligned} G_{21}(s) + N_{21}(s) \cdot G_{22}(s) &= 0 \\ G_{12}(s) + N_{12}(s) \cdot G_{11}(s) &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

根据式(8)可计算求解得到式(9)。由于解耦控制器的设计在多数情况下,只需要考虑静态解耦就可以达到较好的效果,因此此处求取式(9)的静态增益如表1所示。

为了使控制器可以快速响应子电堆的空气入堆流量和压力的变化而做出相应的控制指令,本文在前馈补偿解耦控制的基础上,设计了流量调节器与压力调节器的反馈PID控制的调节方式,如图8所示,而采用的解耦系数则如表1所示。

表1 多堆燃料电池空气系统解耦系数

Tab.1 MFCS air supply system decoupling coefficient

$I_1=70$ A		$I_2=100$ A		$I_3=120$ A	
$N_{-1_{12}}$	$N_{-1_{21}}$	$N_{-2_{12}}$	$N_{-2_{21}}$	$N_{-3_{12}}$	$N_{-3_{21}}$
-0.02	43.5	-0.014	146.6	-0.015	102.3

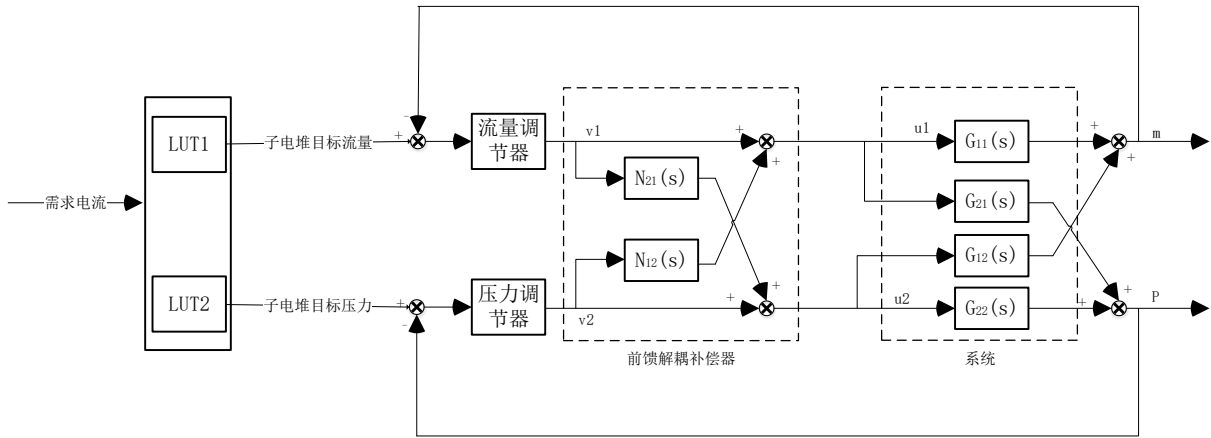


图8 多堆燃料电池子电堆空气系统解耦控制框图

Fig.8 MFCS sub-stack air system decoupling control block diagram

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{121}(s) = \frac{34.91s + 173.1}{s + 3.974} \\ N_{112}(s) = \frac{-0.0002311s - 0.0936}{s + 2.729} \\ N_{221}(s) = \frac{90.32s + 687}{s + 4.685} \\ N_{212}(s) = \frac{-0.00005s - 0.04543}{s + 3.162} \\ N_{321}(s) = \frac{71.04s + 407.8}{s + 3.98} \\ N_{312}(s) = \frac{-0.000075s - 0.04167}{s + 2.698} \end{array} \right. \quad (9)$$

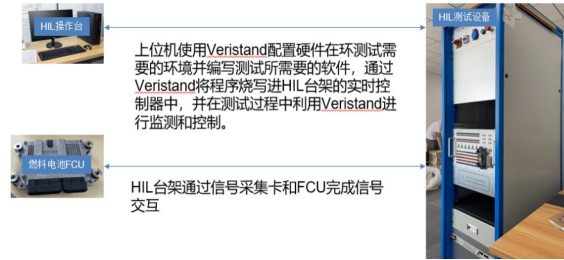


图9 多堆燃料电池 HIL 测试台架

Fig.9 HILtest bench for multi-stack fuel cells system

## 2 硬件在环仿真(HIL)

### 2.1 HIL 平台搭建

燃料电池控制器(FCU)的HIL设备采用了NI硬件在环测试套件,包括PXI机箱、实时控制器、模拟量采集卡、IO采集卡、CAN通讯采集卡等,硬件设备与HIL控制系统架构如图9所示。由图9可以看出,上位机软件用到了HIL资源配置软件NI Veristand与测试管理及自动化测试软件NI Teststand,HIL台架采用的燃料电池对象模型则是自建的多堆燃料电池MFCS动态系统模型,包含了电堆模型、空气供应系统模型、氢气供应系统模型及热管理系统模型等。FCU在接收到3个电堆的功率请求指令后,参考HIL测试台架输出的模型状态参数后,进行控制策略运算与执行器、控制器输出,如针对多堆燃料电池空气子系统输出空压机转速、进气节流阀与背压阀开度控制信号。

### 2.2 验证结果与讨论

基于HIL系统测试台架,给FCU发送3个电堆的拉载电流分别为70 A、100 A、120 A,并且待MFCS燃料电池空气子系统稳定工作在稳态点后,当在第10 s期望压力发生突变,并在第15 s撤销,而期望流量维持不变时,如图10所示。解耦控制器控制下的3个子电堆的实际空气压力可快速跟随期望压力的变化而变化且几乎无超调(产生的超调量为0、0、0.15 bar),而此时图10中显示的空气流量的耦合波动较小(产生了11.4 kg/h、32 kg/h、10 kg/h);而未解耦PID控制器控制下的实际空气压力在跟随时效果较解耦控制器差(产生了0.15 bar、0.18 bar、0.23 bar的超调偏差),且此时空气流量的波动(产生了22 kg/h、70 kg/h、26 kg/h的偏差)也大于解耦时,是前者的两倍多。当在30 s时期望流量发生突变,并且在40 s时撤销,而期望压力维持不变时,采用解耦控制器与未解耦PID控制器进行控制,得到的效果如下图11所示,两种控制器控制下的实际空气流量随期望流量快速跟随并保持一致,均能达到较好的效果。对于图11中所示的压力波动而言,

未解耦PID控制器控制下的背压产生了接近于0.25 bar、0.25 bar、0.25 bar的波动,而解耦控制器控制下的背压几乎无波动(只产生了0.060 bar、0.058 bar、0.030 bar的偏差),未解耦与解耦控制波动差了4倍多波动。基于多堆燃料电池空气系统控制的效果看,显然未解耦时的控制流量与压力的波动过大,这种变化幅度对燃料电池膜有较大的危害。

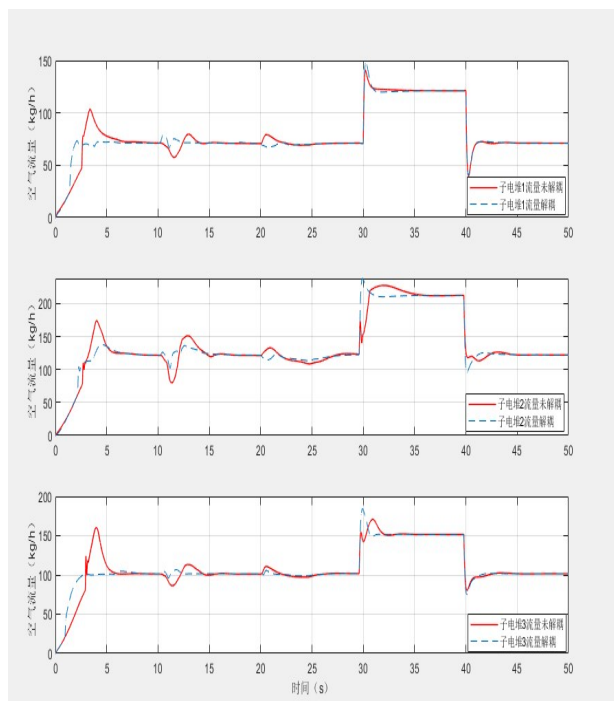


图 10 多堆燃料电池电堆压力变化对于流量影响

Fig.10 The effect of cathode pressure changes on air mass flow in MFCS

将上述控制器作用于HIL测试台架,进行实际的燃料电池控制动态变载荷实验,首先,采用同样的系统辨识方法,针对各子电堆在30 A、160 A、200 A、260 A平衡点的解耦系数进行了辨识,然后采用FCU空气系统前馈解耦控制器独立调节储气罐压力、子电堆的空气流量以及背压,最终各子电堆动态控制的实验结果如图12和图13所示,在前馈补偿解耦PID控制策略的作用下,多堆燃料电池电流动态变化载荷时,子电堆的进气节流阀和背压阀的响应迅速,实际的空气入堆流量和背压均可迅速跟随目标,且超调量较小;在稳态工况下,各子电堆进气节流阀和背压阀开度工作均较平稳,实际的空气入堆流量和背压压力与目标值的稳态误差几乎为0,且波动较小。

FCU空气系统调节储气罐压力的结果如图14

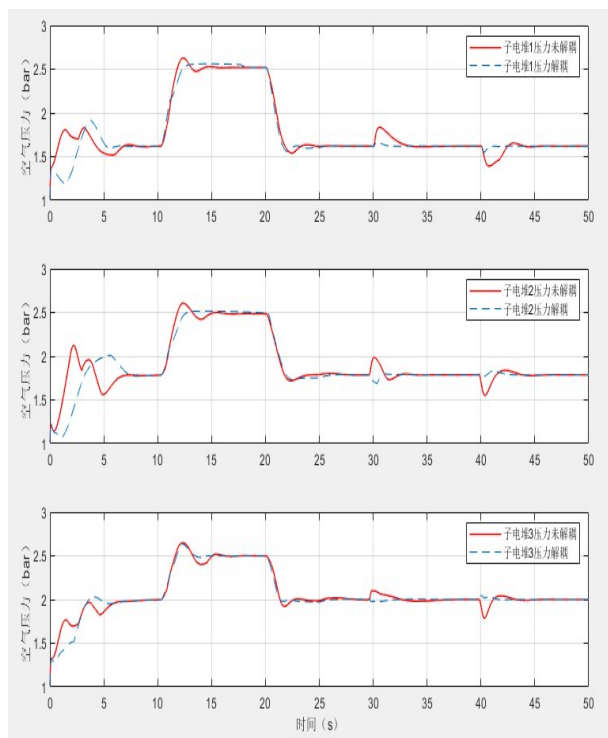


图 11 多堆燃料电池电堆流量变化对于压力影响

Fig.11 The effect of air mass flow changes on cathode pressure in MFCS

所示,在独立PID控制策略的作用下,在多堆燃料电池电流动态变化载荷时,通过空压机转速可平稳控制总的进气储罐压力且实际压力跟随目标压力的效果良好,超调量较小,同时在各子电堆进气流量不断发生变化时,储罐压力可保持稳定,且稳态误差几乎为0。

综合阶跃拉载电流实验结果和动态变载荷实验结果可以验证,前馈解耦控制可以在储气罐目标压力、子电堆的空气入堆目标流量和压力单独改变或者同时改变时,起到良好的控制效果,多堆燃料电池空气供应子系统表现出了良好的动态和稳态特性。

### 3 结语

本文阐述了采用多堆燃料电池系统的必要性,并介绍了多堆燃料电池系统及其空气供应子系统的架构。针对大功率多堆燃料电池空气子电堆供应系统中的空气流量和进气压力控制存在的耦合性问题,以进气节流阀和背压阀开度做为操纵变量,应用稳态点附近的反馈控制和静态前馈补偿解耦控制实现了子电堆空气供应系统的解耦。模型辨识结果表明,采用多通道延时M序列辨识的方法可以获得高精度的系统传递函数矩阵,设计的解耦控制器与

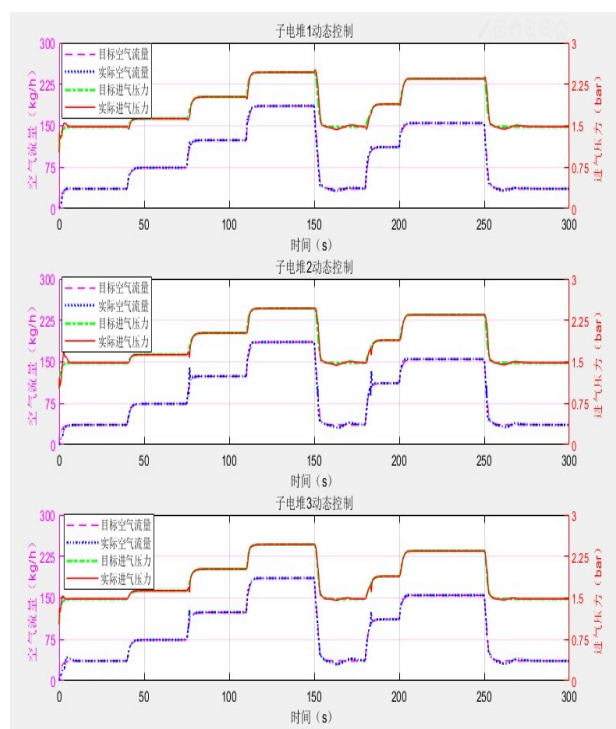


图12 多堆燃料电池子电堆流量与压力控制效果图

Fig.12 Control effects of the MFCS cathode air mass flows under decoupling control

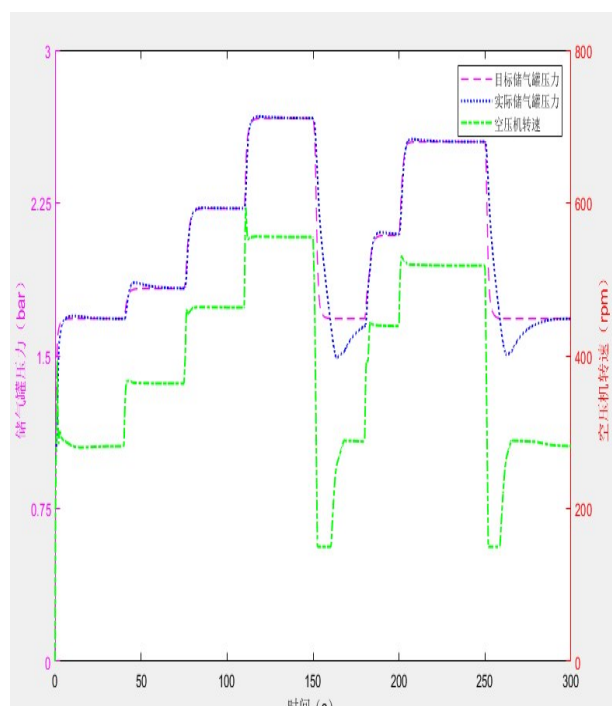
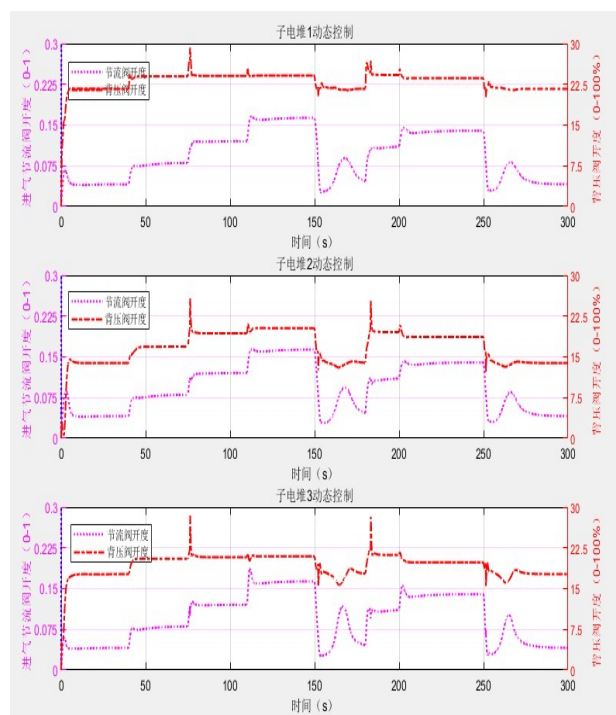


图14 多堆燃料电池储气罐压力控制效果图

Fig.14 Schematic diagram of pressure control effects for MFCS air buffer

图13 多堆燃料电池子电堆进气节流阀与背压阀开度变化图  
Fig.13 Variation diagram of inlet flow throttle valve and back pressure valve in MFCS

未解耦PID控制进行了比较,仿真结果表明:该控制器能够很好地实现流量和进气压力的解耦。

## 参考文献:

- [1] YONOFF R E, OCHOA G V, CARDENAS-ESCORCIA Y, *et al.* Research trends in proton exchange membrane fuel cells during 2008—2018: a bibliometric analysis [J]. *Heliyon*, 2019, 5(5): e01724.
- [2] ÁLVAREZ F R, CORBERA C S, BELTRÁN C F, *et al.* Fuel optimization strategy for hydrogen fuel cell range extender vehicles applying genetic algorithms [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2018, 81: 655.
- [3] LIU X, REDDI K, ELGOWAINY A, *et al.* Comparison of well-to-wheels energy use and emissions of a hydrogen fuel cell electric vehicle relative to a conventional gasoline-powered internal combustion engine vehicle [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2020, 45(1): 972.
- [4] ZHOU S, FAN L, ZHANG G, *et al.* A review on proton exchange membrane multi-stack fuel cell systems: architecture, performance, and power management [J]. *Applied Energy*, 2022: 310: 118555.
- [5] ZHOU S, XIE Z C, CHEN C, *et al.* Design and energy consumption research of an integrated air supply device for multi-stack fuel cell systems [J]. *Applied Energy*, 2022, 324: 119704. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119704>.
- [6] ZHOU S, GAO J, FAN L, *et al.* A study on optimization design of hydrogen supply integrated subsystem for multi-stack fuel cells [J]. *SAE Technical Paper*, 2022(1): 7039.
- [7] 李蒙. 质子交换膜燃料电池发动机进气系统建模与解耦控制 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.

- LI Meng. Modeling and decoupling control of proton exchange membrane fuel cell engine air supply system [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [8] 陈凤祥,陈俊坚,许思传,等. 高压燃料电池系统空气供应解耦控制器设计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(7): 1096. CHEN Fengxiang, CHEN Junjian, XU Sichuan, *et al.*. Decoupling controller design for air supply subsystem of high pressure PEMFC system [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(7): 1096.
- [9] 陈凤祥,陈兴. 燃料电池系统空气供应内模解耦控制器设计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(12): 1924. CHEN Fengxiang, CHEN Xing. Internal model decoupling controller design for high pressure PEMFC air supply system [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(12): 1924.
- [10] CHEN F, LIN Z, JIAO J, *et al.*. Research on control algorithm of air supply system for high-pressure PEMFC engine [C]//WCX SAE World Congress Experience. SAE Technical Papers, 2019. DOI:10.4271/2019-01-0379.
- [11] 谢非. 基于HIL的车用燃料电池空气供应系统控制方法研究[D]. 上海:同济大学, 2018. XIE Fei. Study on control methods of automotive fuel cell air supply system based on HIL [D]. Shanghai: Tongji University, 2018.
- [12] 周苏,胡哲,谢非. 车用质子交换膜燃料电池空气供应系统自适应解耦控制方法研究[J], 汽车工程, 2020, 42(2): 172. ZHOU Su, HU Zhe, XIE Fei. Study on adaptive decoupling controll algorithm for air supply system of vehicle proton exchange membrane fuel cell [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(2): 172.