

# 多堆燃料电池系统温度模型预测控制

沈 伟<sup>1</sup>, 石 霖<sup>3</sup>, 陈春光<sup>1</sup>, 周 苏<sup>1,2</sup>, 王 宁<sup>1</sup>, 裴冯来<sup>3</sup>

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学 中德学院, 上海 201804; 3. 上海机动车检测认证技术研究中心有限公司, 上海 201805)

**摘要:** 针对多堆燃料电池系统各电堆温度的控制问题, 提出了一种将阴阳极出口气体温度作为电堆温度修正项的并联式热管理子系统模型, 并对多堆燃料电池系统进行热平衡分析。首先, 采用模型预测控制方法进行温度控制; 然后, 应用系统模型辨识的方法建立多个预测模型, 通过切换预测模型控制不同工况点的电堆温度过程; 最后, 设计测试工况进行仿真验证。结果表明: 在相应的温度指标下, 并联式热管理子系统应用模型预测控制算法能够快速准确地进行多堆燃料电池系统中各电堆的温度控制, 并且增加典型工况点的多个预测模型有助于提升控制效果, 使得超调量减小, 调节时间缩短。

**关键词:** 燃料电池; 多堆燃料电池系统; 温度控制; 模型预测控制

中图分类号: TM911.4

文献标志码: A

## Analysis of Temperature Model Predictive Control of a Multi-Stack Fuel Cell System

SHEN Wei<sup>1</sup>, SHI Lin<sup>3</sup>, CHEN Chunguang<sup>1</sup>, ZHOU Su<sup>1,2</sup>, WANG Ning<sup>1</sup>, PEI Fenglai<sup>3</sup>

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Chinesisch-Deutsches Hochschulkolleg, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shanghai Motor Vehicle Inspection Certification and Tech Innovation Center, Shanghai 201805, China)

**Abstract:** Aimed at the problem of controlling the temperature of each stack in the multi-stack fuel cell system, a parallel connection thermal management subsystem is proposed and built. The outlet gas temperature of anode and cathode is taken as the correction term of the stack temperature, and a thermal balance analysis is conducted for the multi-stack fuel cell system. First, the model predictive control method is used to control the temperature. Then, several prediction models are established by using the system

identification method, and the performance of the stack is predicted by switching between different prediction models. Finally, the test conditions are designed for simulation verification. The results show that under the corresponding temperature index, the model predictive control algorithm can be used to control the temperature of each stack in the multi-stack fuel cell system quickly and accurately, and the increase of prediction points can improve the control effect, reduce the overshoot, and shorten the regulation time.

**Key words:** fuel cell; multi-stack fuel cell system; temperature control; model predictive control

质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 以氢气为燃料, 除了对环境友好之外, 还具有工作温度低、比能量高、启动速度快和寿命较长等优点, 是包括汽车动力电源在内的多个应用领域的潜在零排放发电装置之一<sup>[1-2]</sup>。但是, 传统的单堆 PEMFC 系统很难满足诸如商用车、船舶和重型机械等高功率需求应用场景; 并且单堆 PEMFC 是由多个单池串联组成的电结构, 若某个单池出现故障, 会导致整个单堆系统失效, 这种低容错率也制约了 PEMFC 系统向大功率应用场景的拓展<sup>[3-4]</sup>。为解决上述问题, 可将多个单堆 PEMFC 进行组合构成多堆燃料电池系统 (multi-stack fuel cell system, MFCS)。这样不仅可以提高系统的输出功率和能量转换效率、拓展应用场景, 还可以增加系统运行的冗余度, 提高系统工作的可靠性。

当前, 对 MFCS 的研究主要集中于系统层面。Palma 等<sup>[5]</sup>利用 DC/DC 将单个 PEMFC 电堆分成多个模块, 提高了系统的容错率。Marx 等<sup>[6]</sup>对 MFCS 结构的研究结果表明, MFCS 的输出性能和寿命等

收稿日期: 2021-10-13

基金项目: 同济大学-重塑科技联合实验室基金

第一作者: 沈 伟(1979—), 男, 博士生, 主要研究方向为动力电池热管理系统集成与控制技术。

E-mail: ceo@tongji.edu.cn

通信作者: 裴冯来(1983—), 男, 高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为氢燃料电池系统测评及故障诊断方法。

E-mail: fenglai@smvic.com.cn



论文  
拓展  
介绍

与MFCS结构具有一定的关联。Long等<sup>[7]</sup>研究发现,MFCS并联结构有利于温度控制。戴丽君<sup>[8]</sup>和马天才等<sup>[9]</sup>针对MFCS热管理问题设计了系统的管理方案以及零部件应用方案。不论是单堆PEMFC系统还是MFCS,其涉及的电化学反应区域都需要具备合适的温度条件<sup>[10-11]</sup>,这对燃料电池的催化剂活性、质子交换膜含水量、电化学反应速率、反应气体压力和电堆寿命等都有重要影响<sup>[12-13]</sup>。因此,采用合适的热管理子系统以及相应的控制策略来维持MFCS各电堆的工作温度是必不可少的。

本文针对MFCS各电堆温度控制问题,借鉴单堆PEMFC系统模型和热管理控制方法,设计了面向MFCS的并联式热管理子系统并建立了相关模型;基于热平衡动态分析,采用模型预测控制(model predictive control, MPC)算法对时滞性较大的各电堆温度过程进行实时控制;引入电堆气体出口温度作为修正项重新定义了电堆温度;应用模型参数辨识方法,建立对应于典型工况点的多个预测模型,在不同工作点处通过模型切换,控制MFCS各电堆温度;基于设计的测试工况,比较并分析了多个预测模型对各电堆温度的控制效果。

## 1 MFCS热管理子系统模型搭建

### 1.1 热管理子系统

适用于大功率应用场景的MFCS采用水冷方式,由于电堆数量的增加,需要重新设计热管理子系统。如图1所示,针对MFCS设计了并联式热管理子系统。旁通阀和分流器的引入可以调节各支路的冷却液流量以满足各电堆的冷却需求,混合器用于混合各电堆出口冷却液,节温器用于控制大小循环。

### 1.2 热平衡分析

MFCS的传热过程模型有如下假设:①燃料电池外部环境温度恒定;②气体和冷却液在管路内的流动为层流;③冷却液与电堆充分均匀换热;管路为绝热系统,忽略冷却液在管路中流动的散热;④冷却液在流经中冷器组时与流进电堆的空气进行换热,换热后的冷却液温度变化由查表所得,后续建模不再给出相关计算公式;⑤忽略水泵运转对系统冷却液温度的影响。

涉及的MFCS由3个70kW的PEMFC单堆组成。假设3个单堆的冷却液与外界的换热过程一致,故以单堆为例对其换热过程进行分析。单堆的热平衡关系包括电堆与外界的热交换和自身内部电

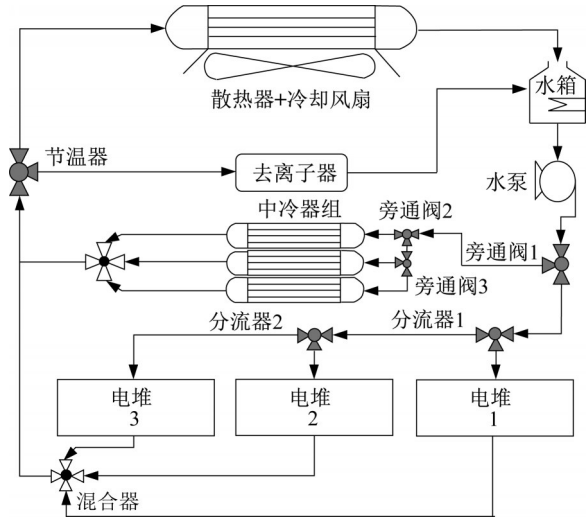


图1 MFCS热管理子系统

Fig. 1 MFCS thermal management subsystem

化学反应产热<sup>[12]</sup>,可由式(1)表示,式(1)中的各项分别由式(2)-(5)表示:

$$\dot{Q}_{add} = \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{react} - \dot{Q}_{out} - \dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{conv} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{in/out} = \dot{Q}_{an, in/out} + \dot{Q}_{ca, in/out} + \dot{Q}_{cool, in/out} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{react} = I_{st} \cdot (n_{cell} \cdot E_{HHV} - V_{st}) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \varphi \cdot A_{rad} \cdot (T_{st}^4 - T_0^4) \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{conv} = \bar{h}_{conv} \cdot A_{conv} \cdot (T_{st} - T_0) \quad (5)$$

式中: $\dot{Q}$ 为热功率值; $I$ 为电堆电流; $n$ 为电堆所包含的单池片数; $E_{HHV}$ 为电堆等效电压; $V$ 为电堆对外输出电压; $\varepsilon$ 为斯特藩-玻尔兹曼常量; $\varphi$ 为电堆黑度; $A$ 为电堆表面积; $T_{st}$ 为电堆温度; $T_0$ 为环境温度; $\bar{h}$ 为电堆表面对流换热系数;下标an为阳极,ca为阴极,cool为冷却液,in、out代表流入、流出电堆的物质,st为电堆,cell为单池,react为电化学反应,rad为热辐射,conv为热对流。

式(2)中各项包含了PEMFC阴阳极气体和电堆冷却液流入流出所发生的热交换<sup>[12]</sup>,分别由式(6)-(11)表示:

$$\dot{Q}_{an, in} = \dot{m}_{an, in}^{H_2} \cdot C_{p_{H_2}} \cdot (T_{an, in} - T_0) + \dot{m}_{an, in}^{vap} \cdot [C_{p_{vap}} \cdot (T_{ca, in} - T_0) + r] \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{an, out} = \dot{m}_{an, out}^{H_2} \cdot C_{p_{H_2}} \cdot (T_{an, out} - T_0) + \dot{m}_{an, out}^{vap} \cdot [C_{p_{vap}} \cdot (T_{an, out} - T_0) + r] + \dot{m}_{an, out}^{liq} \cdot C_{p_{liq}} \cdot (T_{an, out} - T_0) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{ca, in} = & \dot{m}_{ca, in}^{O_2} \cdot C_{p O_2} \cdot (T_{ca, in} - T_0) + \dot{m}_{ca, in}^{N_2} \cdot C_{p N_2} \cdot \\ & (T_{ca, in} - T_0) + \dot{m}_{ca, in}^{vap} \cdot [C_{p vap} \cdot (T_{ca, in} - T_0) + r] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{ca, out} = & \dot{m}_{ca, out}^{N_2} \cdot C_{p N_2} \cdot (T_{ca, out} - T_0) + \\ & \dot{m}_{ca, out}^{O_2} \cdot C_{p O_2} \cdot (T_{ca, out} - T_0) + \\ & \dot{m}_{ca, out}^{vap} \cdot [C_{p vap} \cdot (T_{ca, out} - T_0) + r] + \\ & W_{ca, out}^{liq} \cdot C_{p liq} \cdot (T_{ca, out} - T_0) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{cool, in} = \dot{m}_{cool, in} \cdot C_{p cool} \cdot (T_{cool, in} - T_0) \quad (10)$$

$$\dot{Q}_{cool, out} = \dot{m}_{cool, out} \cdot C_{p cool} \cdot (T_{cool, out} - T_0) \quad (11)$$

式中:  $\dot{m}$  为质量流量;  $C_p$  为定压比热容;  $r$  为汽化潜热; 上标 vap 为水蒸气, liq 为液态水。

通过式(12)、(13)可以计算阴极氧气和阳极氢气的消耗量, 然后通过维持阴阳极相应的气体过量系数可以实时计算得到阴极气体的入堆流量。

$$\dot{m}_{react}^{O_2} = M_{O_2} \frac{n_{cell} I_{st}}{4F} \quad (12)$$

$$\dot{m}_{react}^{H_2} = M_{H_2} \frac{n_{cell} I_{st}}{2F} \quad (13)$$

式中:  $M$  为分子质量;  $F$  为法拉第常数。

热管理子系统的热平衡过程可由图2表示。散热器出口为低温冷却液, 混合器中为高温冷却液, 二者之间的温差是由散热器散热造成的。

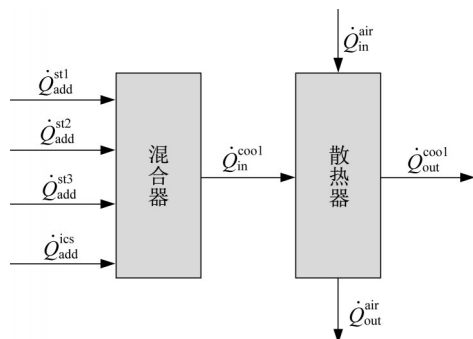


图2 MFCS热管理子系统热平衡图

Fig. 2 Heat balance diagram of MFCS thermal management subsystem

混合器将流经中冷器组和不同电堆的高温冷却液混合均匀, 其热平衡过程可由式(14)描述:

$$\dot{Q}_{in}^{cool} = \dot{Q}_{add}^{st1} + \dot{Q}_{add}^{st2} + \dot{Q}_{add}^{st3} + \dot{Q}_{add}^{ics} \quad (14)$$

散热器将高温冷却液中的热量释放, 其热平衡过程可由式(15)表示:

$$\dot{Q}_{rad} = \dot{Q}_{out}^{air} - \dot{Q}_{in}^{air} = \dot{Q}_{in}^{cool} - \dot{Q}_{out}^{cool} \quad (15)$$

模型中各参数如表1所示。

表1 模型参数

Tab. 1 Model parameter

参数	取值	参数	取值
$n_{cell}$	440	$T_0$	298.15K
$E_{HHV}$	1.48V	$\bar{h}_{conv}$	$10W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$\epsilon$	$5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$	$F$	$96485C \cdot mol^{-1}$
$\varphi$	0.85	$A$	$0.96m^2$

### 1.3 被控温度定义

在常规模型中, 通常将PEMFC冷却液出口温度视为电堆温度, 并且将此温度作为被控温度<sup>[14]</sup>。实际的PEMFC内部温度分布并不均匀, 热管理本质上要控制的是各单池电化学反应区域(膜电极)的温度, 并且相关研究<sup>[15]</sup>表明, PEMFC气体出口温度也与膜电极温度相关。为了更好地表征电池内部膜电极的温度状况, 将气体出口温度作为修正项, 重新定义电堆温度为

$$T_{st} = \lambda_1 T_{cool, out} + \lambda_2 T_{ca, out} + \lambda_3 T_{an, out} \quad (16)$$

式中:  $\lambda$  为相关物质的温度系数, 可以根据相关流体的比热容和质量流量确定。本文中, 冷却液、阴极和阳极气体的温度系数分别取0.894、0.100和0.006。

## 2 MFCS温度模型预测控制

### 2.1 MPC控制器设计

MPC算法的原理如图3所示。MPC控制器利用每一个当前采样时刻获取的测量信息, 在线求解一个有限时域开环优化问题, 并将所得到的控制序列的第1个元素作为控制输出, 作用于被控对象。通过不断重复该过程, 得到每一时刻的最优控制量<sup>[16]</sup>。

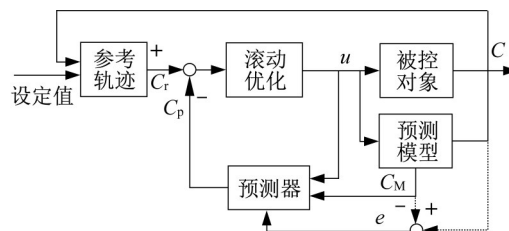


图3 MPC基本原理

Fig. 3 MPC fundamentals

MFCS的热管理子系统是一个内部结构复杂的多输入多输出系统, 其中各电堆的温度过程时滞性较大。相较于其他算法而言, MPC算法能够更好地处理多变量、大时滞的控制问题。因此, 选用MPC



算法对被控温度进行控制,以期获得更好的控制效果。选取风扇、水泵、分流器1和2作为执行器。控制映射关系由式(17)表示:

$$H: \begin{bmatrix} \theta_{\text{dis1}} \\ \theta_{\text{dis2}} \\ n_{\text{fan}} \\ n_{\text{pump}} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} T_{\text{st1}} \\ T_{\text{st2}} \\ T_{\text{st3}} \\ T_{\text{st, in}} \end{bmatrix} \quad (17)$$

控制器的输出,即控制变量为风扇转速 $n_{\text{fan}}$ 、水泵转速 $n_{\text{pump}}$ 和分流器1、2的开度 $\theta_{\text{dis1}}$ 、 $\theta_{\text{dis2}}$ ,系统输出为各电堆的温度 $T_{\text{st1}}$ 、 $T_{\text{st2}}$ 、 $T_{\text{st3}}$ 以及入堆冷却液温度 $T_{\text{st, in}}$ 。MFCS各电堆负载电流 $I_i$ 为可测的系统扰动输入。模型选择器根据负载电流的大小选择预测模型对应的参数集。建立的MPC控制器结构如图4所示。

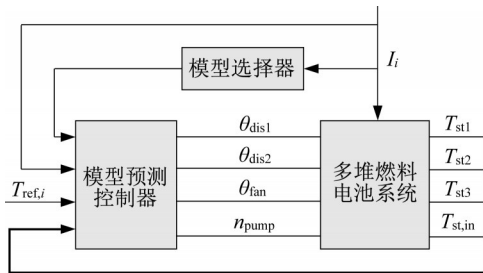


图4 MPC控制器结构

Fig. 4 MPC controller architecture

## 2.2 预测模型

PEMFC电堆涉及的温度过程非线性强、时滞性大,单一的预测模型无法反映不同工作条件下的温度过程特性。因此,分别选取活化极化区后段、欧姆

极化区全段和浓差极化区前段的典型工作点,利用系统辨识方法建立相应工作点的预测模型集。温度MPC运行时,根据实际系统的工作状态选用与之相匹配的预测模型。

利用8阶M序列生成辨识信号,分别在单堆负载电流为80A、170A和250A这3个工作点处进行系统辨识。以风扇转速、水泵转速、分流器1与2的开度和3个电堆的实际电流为被控系统的7个输入变量,各电堆温度和入堆冷却液温度作为4个输出变量,这样一个多输入、多输出热过程的状态空间模型可由式(18)表示,其中 $A$ 、 $B$ 和 $C$ 分别代表系统矩阵、输入矩阵和观测矩阵。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (18)$$

其中,状态空间的维数(或模型的阶数)与MFCS热管理子系统(被控对象)的热储能单元数量有关。如图1所示,MFCS热管理子系统中每个电堆具有电堆质量体、冷却液流道、空气流道和氢气流道4个热储能单元,堆外具有混合器、水箱、中冷器空气流道与冷却液流道和散热器空气流道与冷却液流道6个热储能单元,因此,3个电堆的MFCS热管理子系统(被控对象)的热储能单元数量为18。考虑到小电流工况时,电堆内空气流道与冷却液流道的热储能功能较弱,模型的阶数根据模型辨识的结果可以小于18。

以80A工作点处为例,模型辨识的结果分别由式(19)-(21)表示,相应的状态空间维数为17。

$$A = \begin{bmatrix} -0.0030 & -0.0022 & 0.0003 & -0.0018 & -0.0052 & 0.0002 & 0.0022 & -0.0026 & -0.0001 \\ -0.0074 & -0.0589 & 0.0060 & -0.0259 & -0.1057 & -0.0088 & -0.0085 & -0.0033 & -0.0010 \\ 0.0035 & 0.0063 & -0.0112 & 0.0032 & 0.0116 & -0.0433 & 0.0024 & -0.0009 & 0.0051 \\ -0.0003 & -0.0338 & 0.0037 & -0.0371 & -0.0745 & 0.0003 & 0.0254 & 0.0080 & 0.0009 \\ 0.0321 & 0.4357 & -0.0635 & 0.3065 & -0.4761 & 0.0062 & 0.0737 & -0.1244 & -0.3858 \\ -0.0066 & 0.0356 & 0.0513 & 0.0360 & -0.1102 & -0.1548 & 0.0128 & -0.0466 & 0.1342 \\ -0.0128 & -0.0455 & 0.0097 & -0.1198 & 0.1291 & -0.0003 & -0.1880 & 0.0193 & 0.0839 \\ 0.0280 & 0.1688 & -0.0439 & 0.0987 & -0.2916 & 0.0100 & 0.0406 & -0.2254 & -0.2855 \\ 0.0257 & 0.2050 & -0.0579 & 0.1732 & -0.2654 & 0.0715 & 0.0348 & -0.0953 & -0.2402 \\ -0.0143 & -0.0316 & 0.0392 & -0.0775 & 0.4728 & -0.0569 & 0.0974 & -0.3254 & -0.2834 \\ 0.0174 & 0.0380 & -0.0515 & 0.0949 & -0.4379 & 0.1542 & 0.0731 & -0.2793 & 0.6082 \\ 0.0046 & 0.0147 & -0.0416 & 0.0314 & -0.1596 & 0.0782 & 0.0026 & -0.1014 & 0.1675 \\ 0.0128 & 0.0719 & -0.0185 & 0.0404 & -0.2575 & -0.0011 & 0.0770 & -0.1652 & 0.1175 \\ 0.0154 & 0.0070 & -0.0520 & 0.0996 & -0.4611 & 0.1273 & 0.0654 & -0.2272 & 0.6675 \\ 0.0086 & 0.0280 & -0.0087 & 0.0299 & -0.2272 & -0.0435 & 0.0461 & -0.0526 & 0.2543 \\ -0.0569 & 0.0021 & 0.1945 & -0.2506 & 1.2578 & -0.4447 & -0.3415 & 0.9742 & -1.7771 \\ 0.0202 & 0.0636 & -0.0321 & 0.0650 & -0.4928 & -0.0535 & 0.2357 & -0.4212 & 0.4166 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0.000\,2 & -0.000\,1 & -0.000\,3 & 0 & -0.000\,1 & 0.000\,1 \\
 0.001\,3 & 0.001\,4 & 0.000\,4 & -0.001\,4 & -0.003\,0 & 0.000\,4 & -0.001\,6 & -0.000\,3 \\
 0.003\,3 & -0.001\,8 & -0.001\,1 & -0.001\,7 & 0.003\,3 & -0.000\,3 & 0.000\,1 & -0.000\,1 \\
 0.001\,1 & 0.000\,3 & 0.002\,5 & 0.000\,6 & -0.001\,9 & 0.001\,2 & -0.000\,6 & 0 \\
 -0.067\,5 & 0.055\,5 & 0.011\,0 & -0.032\,2 & -0.089\,4 & 0.051\,6 & -0.024\,3 & 0.034\,5 \\
 0.141\,9 & -0.119\,5 & -0.103\,3 & -0.023\,2 & 0.038\,9 & -0.009\,0 & 0.012\,8 & 0.039\,7 \\
 -0.208\,6 & 0.053\,1 & -0.174\,1 & -0.085\,3 & 0.030\,7 & -0.028\,2 & -0.005\,8 & 0.011\,1 \\
 0.564\,0 & 0.040\,3 & -0.048\,8 & -0.153\,4 & -0.037\,8 & -0.066\,9 & -0.023\,1 & 0.002\,7 \\
 -0.097\,4 & -0.135\,5 & 0.054\,2 & -0.226\,7 & 0.020\,9 & 0.191\,5 & 0.076\,9 & 0.240\,9 \\
 -0.102\,1 & 1.081\,1 & -0.255\,8 & 1.088\,9 & -0.528\,6 & 0.422\,2 & -0.153\,5 & 0.115\,7 \\
 -0.495\,6 & -0.180\,0 & 0.032\,6 & -0.378\,0 & 0.042\,1 & -0.101\,6 & 0.224\,5 & 0.336\,5 \\
 0.682\,5 & 4.097\,0 & -0.299\,8 & -0.474\,1 & 0.141\,0 & -0.097\,5 & 0.122\,4 & 0.221\,6 \\
 -0.829\,5 & 0.136\,5 & -0.020\,9 & -0.285\,1 & 0.141\,0 & -0.603\,5 & 0.098\,2 & -0.147\,3 \\
 0.633\,7 & 0.109\,6 & -0.047\,2 & -0.329\,0 & 0.591\,1 & -1.069\,2 & 0.409\,2 & 0.132\,5 \\
 -0.922\,1 & 0.219\,3 & -0.330\,5 & 0.587\,1 & 1.291\,6 & 0.772\,5 & 0.344\,9 & 0.848\,8 \\
 -2.826\,6 & 0.388\,8 & -0.317\,7 & 1.957\,6 & -2.294\,9 & 3.913\,0 & -1.554\,8 & -0.224\,4 \\
 1.026\,0 & -0.350\,1 & 0.257\,3 & -0.449\,1 & 1.049\,6 & -3.331\,7 & 0.488\,8 & -1.182\,3
 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$B = \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0.000\,1 & -0.000\,2 & -0.000\,5 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001\,5 & -0.007\,6 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -0.005\,8 & 0.000\,8 & 0.000\,2 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -0.000\,6 & -0.003\,6 & -0.005\,1 & 0 \\
 -0.000\,1 & -0.000\,1 & 0 & 0.011\,8 & -0.006\,1 & -0.381\,9 & 0.000\,1 \\
 0.000\,1 & -0.000\,1 & -0.000\,1 & -0.039\,8 & -0.007\,9 & -0.030\,2 & 0 \\
 0 & -0.000\,1 & 0.000\,2 & -0.009\,5 & 0.090\,4 & 0.121\,4 & 0 \\
 -0.000\,2 & 0.000\,1 & 0.000\,2 & 0.105\,3 & -0.043\,4 & -0.283\,9 & 0.000\,1 \\
 -0.000\,2 & -0.000\,2 & 0 & 0.068\,6 & -0.043\,3 & -0.240\,6 & 0 \\
 0 & -0.000\,2 & 0.000\,3 & -0.189\,1 & 0.120\,5 & 0.131\,8 & 0 \\
 0.000\,2 & -0.000\,2 & 0 & 0.082\,7 & -0.076\,9 & -0.095\,5 & -0.000\,1 \\
 -0.000\,3 & 0 & 0 & 0.193\,5 & -0.092\,8 & -0.052\,8 & 0 \\
 0.000\,4 & 0.000\,1 & 0.000\,2 & -0.037\,4 & 0.028\,4 & -0.141\,1 & 0 \\
 0.000\,1 & 0.000\,1 & 0 & 0.210\,6 & -0.177\,4 & -0.085\,8 & -0.000\,1 \\
 0.000\,2 & -0.000\,8 & 0.000\,1 & -0.315\,6 & 0.111\,5 & 0.048\,5 & -0.000\,1 \\
 0.000\,3 & -0.001\,7 & 0.000\,3 & -1.199\,5 & 0.623\,8 & 0.523\,5 & 0.000\,1 \\
 0.000\,3 & 0.001\,8 & -0.000\,1 & 0.446\,3 & -0.174\,0 & -0.424\,1 & 0.000\,1
 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$C = \begin{bmatrix}
 -657.382\,4 & 29.423\,6 & -101.218\,3 & 9.704\,3 & -0.458\,4 & 0.939\,4 & -0.408\,5 & 0.376\,5 \\
 -684.774\,0 & 75.772\,4 & 41.468\,0 & -26.462\,3 & -0.463\,5 & -0.626\,7 & -0.647\,3 & 0.326\,3 \\
 -700.803\,3 & -40.770\,6 & 25.991\,9 & 130.847\,4 & -0.328\,8 & -0.165\,9 & 0.457\,9 & 0.734\,1 \\
 -584.728\,2 & -93.309\,5 & 8.677\,6 & -43.737\,1 & 3.515\,4 & 0.085\,4 & -0.329\,8 & 0.250\,1 \\
 0.002\,5 & 0.122\,0 & 0.014\,0 & -0.026\,9 & 0.056\,0 & -0.010\,7 & 0.016\,1 & 0.003\,6 & -0.003\,1 \\
 -0.001\,4 & 0.105\,5 & 0.048\,6 & 0.020\,2 & 0.028\,5 & 0.000\,3 & 0.015\,2 & 0.006\,7 & 0.000\,1 \\
 -0.004\,6 & 0.106\,9 & 0.055\,1 & -0.039\,9 & 0.004\,8 & -0.000\,6 & 0.009\,5 & 0.002\,4 & 0.003\,6 \\
 -0.354\,4 & -0.028\,8 & 0.041\,3 & -0.009\,6 & 0.006\,5 & -0.026\,5 & 0.006\,0 & -0.007\,7 & 0.000\,8
 \end{bmatrix} \quad (21)$$

MFCS中各堆的电功率输出相近时才能够达到系统效率最优<sup>[17-18]</sup>。因此,设定MFCS中各堆工作功率相差不超过15kW,并且按照3个电堆负载电流的平均值大小进行模型切换。模型切换条件如表2所示。

表2 MPC模式选择

Tab. 2 MPC mode selection

平均电流/A	稳态工作电流点/A
50~100	80
100~200	170
200~300	250

### 2.3 控制器参数设定

MPC控制器的采样时间 $T_s$ 根据系统特性确定,由于被控的温度过程时滞性大,取采样时间 $T_s=24s$ 。预测时域 $P$ 对控制算法耗时影响较大,控制时域 $M$ 则对控制效果影响较大,不同的控制时域和预测时域对控制算法耗时和控制效果的组合影响分别由图5和图6所示。

综合控制算法耗时和控制效果,最终确定控制器相应的参数为 $T_s=24s$ , $P=28$ , $M=2$ 。

## 3 MFCS温度控制仿真

Simulink是MATLAB软件中的一种可视化仿真工具,在Simulink平台上可以对动态系统进行建模、仿真和分析。本文在Simulink平台上对MFCS以及相应的控制器进行建模与仿真,分析系统的动态特性和控制器的控制效果,仿真结果可以为MFCS热管理控制提供一定的指导与借鉴。

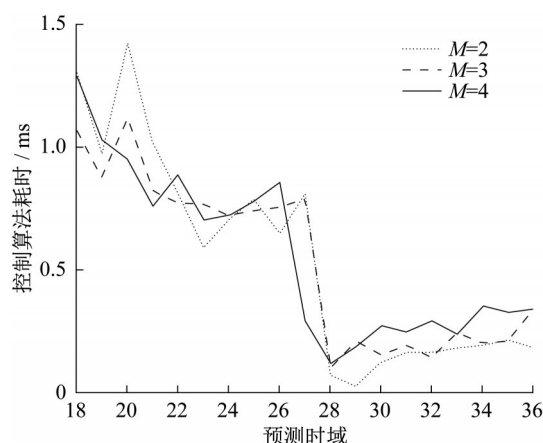


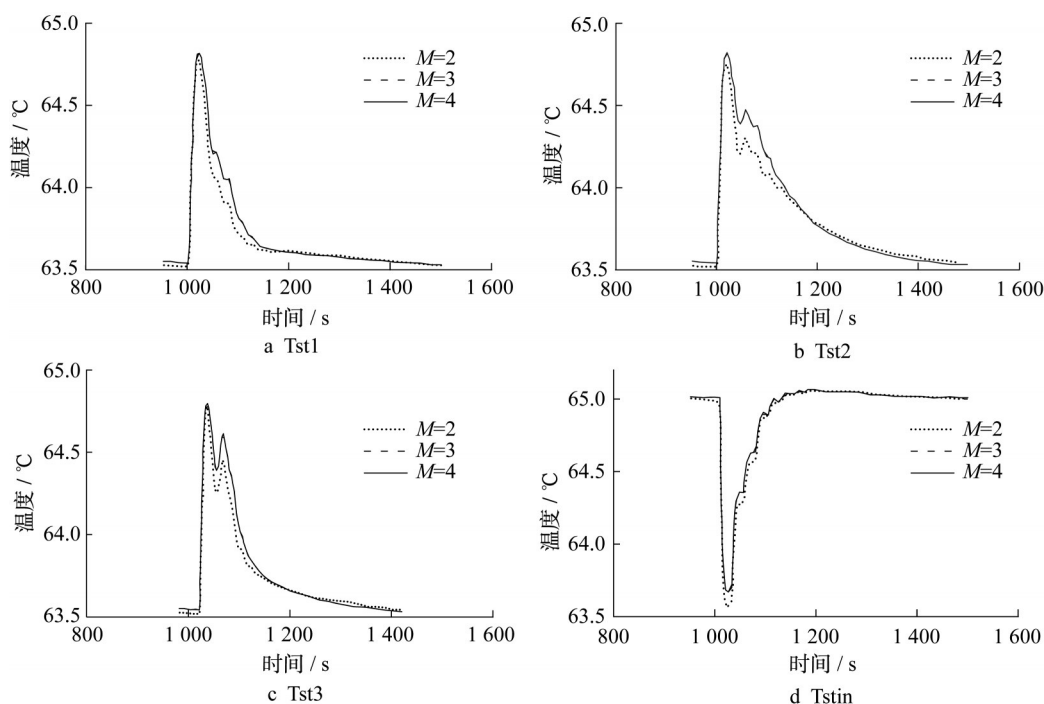
图5 不同预测和控制时域下的控制算法耗时

Fig. 5 Time consuming in different prediction and control time domains

### 3.1 测试工况设计

根据MFCS中相关部件工作特性的约束条件以及工作环境的约束条件,仿真过程中的各个约束与边界条件如表3所示。

为了验证MPC控制效果,所设计的测试工况应该能够反映MFCS的大部分运行状况。其运行工况有以下6种:①1、3个电堆中1个电堆的负载上升,其余2个维持不变;②2、3个电堆中2个电堆的负载上升,其余1个维持不变;③3个电堆的负载同时上升;④3个电堆中2个电堆的负载下降,其余1个维持不变;⑤3个电堆的负载同时下降;⑥3个电堆中1个电

图6 不同预测和控制时域下 $T_{st1}$ 、 $T_{st2}$ 、 $T_{st3}$ 和 $T_{stin}$ 的控制效果Fig. 6 Control effects in different prediction and control time domains of  $T_{st1}$ ,  $T_{st2}$ ,  $T_{st3}$ , and  $T_{stin}$

堆的负载下降,其余2个维持不变。

表3 MPC控制器约束

Tab. 3 MPC controller constraints

约束条件	分流器开度/%	风扇转速/rpm	水泵转速/rpm	电堆温度/℃	入堆冷却液温度/℃
下限值	10	0	300	25	25
上限值	90	4 000	3 500	100	90

根据上述运行工况,分别设计MFCS中3个电堆的测试工况,组合后形成的热管理控制器测试工况如图7所示。图中分别标出了对应于6个测试工况的典型,每个工况的开始时刻分别为2 500s、4 000s、5 000s、6 000s、6 500s、7 000s,持续时间均为500s。

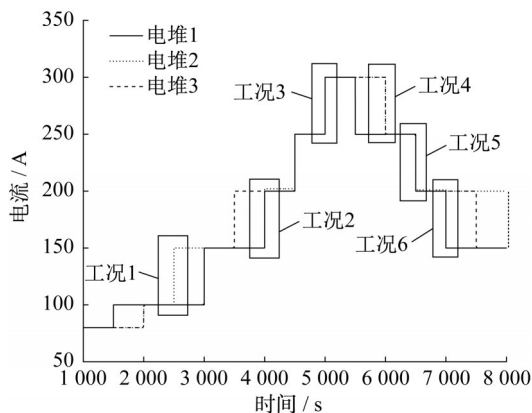


图7 MFCS测试工况

Fig. 7 MFCS test working conditions

### 3.2 仿真结果分析

基于测试工况,利用MPC控制器对MFCS热管理系统进行控制仿真,仿真结果如图8所示。部分典型时间点的控制效果如表4所示。可以看出,在MPC控制器的作用下,3个电堆的温度在整个测试工况中都维持在设定值(75℃)附近,超调量最大为1.10℃,稳定时间最小为100s,最大为450s;入堆冷却液温度在整个测试工况下也维持在设定值(65℃)附近,超调量最大为1.30℃,稳定时间最大为450s。由此可知,整体上MPC控制器对MFCS的温度控制具有较好的效果。但是,在2 500s、4 000s、4 500s和6 500s附近控制效果不佳,超调量较大,稳定时间较长。

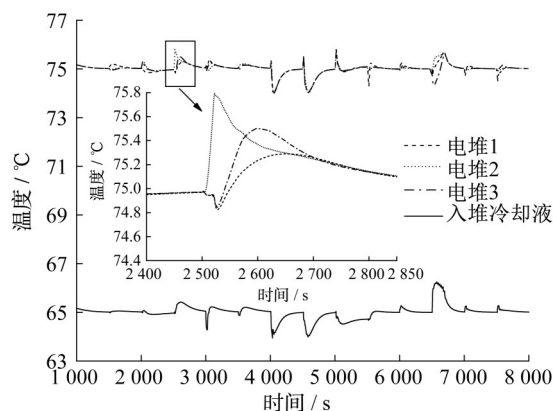


图8 MPC控制仿真结果

Fig. 8 MPC control simulation results

表4 部分时间点控制效果

Tab. 4 Partial time point control effects

时间点/s	电堆1		电堆2		电堆3		入堆冷却液	
	超调量/℃	稳定时间/s	超调量/℃	稳定时间/s	超调量/℃	稳定时间/s	超调量/℃	稳定时间/s
2 500	0.30	450	0.80	450	0.50	450	0.50	450
4 000	1.00	350	0.90	350	1.10	350	1.00	350
4 500	1.00	400	1.00	400	1.00	400	1.00	400
6 500	0.70	400	0.70	400	0.60	400	1.30	400

测试工况对应的电堆平均电流、辨识电流和切换电流与时间的关系如图9所示。对比图8和9可知,在2 500s、4 000s、4 500s和6 500s时间节点处控制效果较差是因为这3个点均处于预测模型切换边界。模型切换会导致燃料电池系统的工作点距离模型辨识点较远,预测模型与实际系统间差异较大,从而使得控制效果变差。另外,4 500s和6 500s处还存在整体电流变化较大的情况,较大的系统干扰会造成较大的超调量和较长的稳定时间。

针对上述问题,对MPC控制器中的预测模型数目加以改进,增设120A和220A这2个系统辨识点。

当辨识点增多后,MPC控制器根据燃料电池的不同工况点可以更好地就近选择预测模型,在一定程度上改善预测模型不精准的缺点。

对改进后的系统采用同样的测试工况进行仿真,结果如图10所示,预测模型数目改进后部分时间点的控制效果如表5所示。对比图8和图10可知,在2 500s、4 000s和6 500s这3个时间点处的控制效果发生了不同的变化。2 500s处电堆和冷却液温度的稳定时间均减小了50s,电堆1和电堆3的超调量也分别减小了0.15℃和0.20℃,说明在改进后的MPC控制器的作用下,电堆2的工况变化对电堆

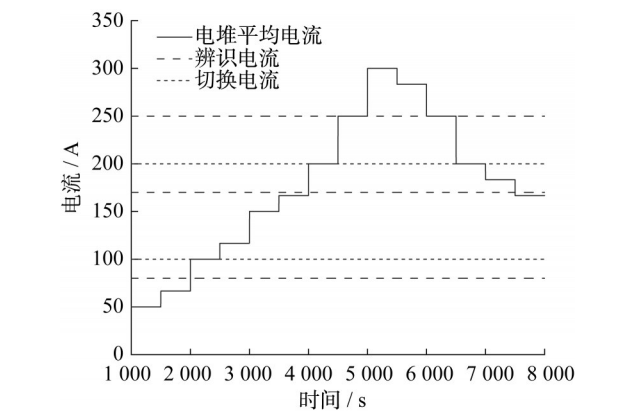


图9 测试工况电流信息

Fig. 9 Current information under test condition

1 和电堆 3 的影响减小;4 000s 处的电堆温度和冷却液温度的稳定时间都减小了 50s,超调量最高可减小 0.80℃;6 500s 点处冷却液温度的超调量减小了

0.50℃。对控制器的改进使得其对 MFCS 中各电堆的温度控制效果得到了提升。

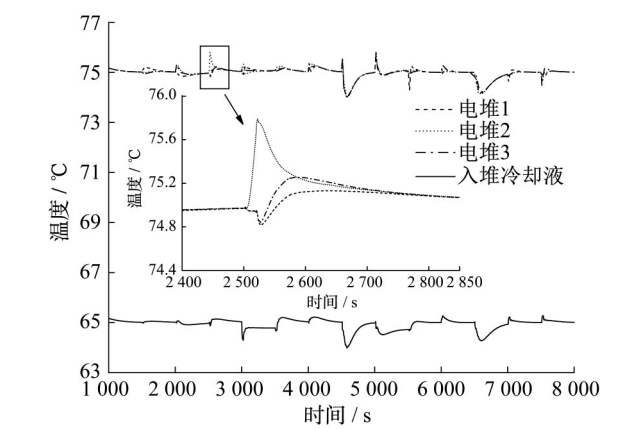


图10 改进的MPC控制器仿真结果

Fig. 10 Simulation results of improved MPC controller

表5 模型改进后部分时间点控制效果

Tab. 5 Partial time point control effects after model improvement

时间点/s	电堆1		电堆2		电堆3		入堆冷却液	
	超调量/℃	稳定时间/s	超调量/℃	稳定时间/s	超调量/℃	稳定时间/s	超调量/℃	稳定时间/s
2 500	0.15	400	0.80	400	0.30	400	0.20	300
4 000	0.40	300	0.40	300	0.30	300	0.20	300
4 500	1.00	400	1.00	400	1.00	400	1.00	400
6 500	0.80	400	0.80	400	0.70	400	0.70	400

## 4 结语

搭建了用于MFCS 各电堆温度控制的并联式热管理子系统模型,引入PEMFC 阴极和阳极的出口气体温度作为修正项重新定义了电堆温度,设计了MPC 控制器对MFCS 中各电堆温度进行控制,并利用测试工况进行了仿真研究。研究结果显示,MPC 控制器对MFCS 各电堆温度的控制具有较好的效果,可为水冷型MFCS 的电堆温度控制提供一定的参考。在MPC 控制器的作用下,MFCS 中电堆温度的波动能够维持在1.10℃以内,电堆温度调节时间能够维持在450s 以内。对MPC 控制器进行改进,将预测模型数目由3 个增加至5 个,能够缓解模型切换过程中预测模型与PEMFC 差异性较大的问题,进一步改善控制效果,4 000s 处的电堆温度波动量最高能够减少0.80℃,电堆温度调节时间能够减少50s。

### 作者贡献声明:

沈 伟:论文撰写、数据分析。  
石 霖:论文撰写、仿真研究。

陈春光:论文撰写、仿真研究。  
周 苏:论文思路指导。  
王 宁:论文思路指导。  
裴冯来:论文思路指导及论文数据分析。

### 参考文献:

- [1] 周苏,纪光霁,马天才,等.车用质子交换膜燃料电池系统技术现状[J].汽车工程,2009,31(6):489.  
ZHOU Su, JI Guangji, MA Tiancai, *et al.* The state of the art of PEMFC for automotive application [J]. Automotive Engineering, 2009, 31(6):489.
- [2] LIU Yongfeng, GAO Jianhua, WANG Na, *et al.* Asymptotic analysis for the effects of anode inlet humidity on the fastest power attenuation single cell in a vehicle fuel cell stack [J]. Applied Sciences, 2018, 8(11):2307.
- [3] HONG Ling, CHEN Jian, LIU Zhiyang, *et al.* A nonlinear control strategy for fuel delivery in PEM fuel cells considering nitrogen permeation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(2):1565.
- [4] 李曦,曹广益,朱新坚.质子交换膜燃料电池电堆温度特性的模糊建模[J].上海交通大学学报,2005(S1):191.  
LI Xi, CAO Guangyi, ZHU Xinjian. Fuzzy modeling for PEMFC stack temperature characteristic [J]. Journal of



- Shanghai Jiaotong University, 2005(S1):191.
- [5] PALMA L, ENJETI P N. A modular fuel cell, modular DC-DC converter concept for high performance and enhanced reliability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(6):1437.
- [6] MARX N, BOULON L, GUSTIN F, *et al.* A review of Multi-stack and modular fuel cell systems: Interests, Application areas and On-going research activities [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39 (23) : 12101.
- [7] LONG Rong, QUAN Shuhai, ZHANG Liyan, *et al.* Current sharing in parallel fuel cell generation system based on model predictive control [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40, 11587.
- [8] 戴丽君. 一种多电堆燃料电池热管理系统: CN208655799U [P]. 2019-03-26.
- DAI Lijun. A thermal management system for multi-stack fuel cells:CN208655799U[P]. 2019-03-26.
- [9] 马天才, 刘通, 朱东. 用于多电堆燃料电池发动机系统的分流集成装置:CN209515861U[P]. 2019-07-09.
- MA Tiancai, LIU Tong, ZHU Dong. A shunting integration device for multi-stack fuel cell engine system:CN209515861U [P]. 2019-07-09.
- [10] NADA Zamel, LI Xianguo. Non-isothermal multi-phase modeling of PEM fuel cell cathode[J]. International Journal of Energy Research, 2010, 34(7):568.
- [11] TANG W, LIN R, WENG Y, *et al.* The effects of operating temperature on current density distribution and impedance spectroscopy by segmented fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(25):10985.
- [12] LIU Yongfeng, GAO Jianhua, PEI Pucheng, *et al.* Effects of dynamic changes in inlet temperature on proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2019, 11(4):044302.
- [13] XIA S, LIN R, CUI X, *et al.* The application of orthogonal test method in the parameters optimization of PEMFC under steady working condition[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(26):11380.
- [14] 陈维荣, 牛茁, 韩喆, 等. 水冷 PEMFC 热管理系统流量跟随控制策略[J]. 化工学报, 2017, 68(4):1490.
- CHEN Weirong, NIU Zhuo, HAN Zhe, *et al.* Flow following control strategy for thermal management of water-cooled PEMFC[J]. CIESC Journal, 2017, 68(4):1490.
- [15] TANGIRALA A K, VASU G. Control orientated thermal model for proton exchange membrane fuel cell systems [J]. Journal of Power Sources, 2008, 183(1):98.
- [16] 陈飞, 罗仁宏. 基于模型预测控制的水冷型燃料电池冷却系统研究[J]. 汽车技术, 2021 (7):6.
- CHEN Fei, LUO Renhong. Research on water cooled fuel cell cooling system based on MPC [J]. Automobile Technology, 2021 (7):6.
- [17] 陈维荣, 朱亚男, 李奇, 等. 轨道交通用多堆燃料电池发电系统拓扑及系统控制与检测方法综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23):6967.
- CHEN Weirong, ZHU Yanan, LI Qi, *et al.* Review and prospect of structures, control and detection schemes of Multi-stack fuel cell power generation system used in rail traffic [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23):6967.
- [18] 周苏, 王克勇, 文泽军, 等. 车用多堆燃料电池系统能量管理与控制策略[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49 (1):107.
- ZHOU Su, WANG Keyong, WEN Zejun, *et al.* Energy management and control strategy of Multi-Stack fuel cell system for automotive applications [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(1):107.