文章编号:1674-2869(2025)04-0448-07

水冷质子交换膜燃料电池热管理研究

王 旭[1],张 刚[1],杨 侠[1],王育平[2],罗 燕[*1]
1.武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205;
2.武汉第二船舶设计研究所,湖北 武汉 430205

摘 要:为提高质子交换膜燃料电池内部温度的均匀性,并实现对冷却系统模型的精准控制,设计了一种Y型树状分形冷却流道。利用Fluent软件对带有冷却流道的单电池进行数值模拟,分析了冷却水温度及流量对质子交换膜表面温度分布和单电池极化曲线的影响。同时,利用Simulink搭建PID控制器和自抗扰控制器(ADRC)模型,分别对电堆温度进行控制,并对比分析了二者控制效果的优劣。结果表明:当冷却水质量流量为1 g/s时,333 K的冷却水比298 K的冷却水对燃料电池的冷却效果更佳,质子交换膜表面温差更小,温度分布也更均匀;当冷却水温度为室温298 K、质量流量为1.5 g/s时,达到最大电流密度0.440 3 A/cm^2;当冷却水预热至343 K、质量流量为6 g/s时,达到最大电流密度0.476 8 A/cm^2;ADRC的控制效果优于PID控制器,当负载电流3次阶跃变化时,ADRC调节电堆温度的超调量比PID控制器分别减小了62.5%,56.2%和46.6%,调节时间分别减小了10.32,18.46和24.18 s。

关键词:水冷;热管理;冷却流道;数值模拟;控制效果
中图分类号:TM912 **文献标志码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202405005

Thermal management of water-cooled proton exchange membrane fuel cells

WANG Xu[1], *ZHANG Gang*[1], *YANG Xia*[1], *WANG Yuping*[2], *LUO Yan*[*1]
1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430205, China

Abstract: A Y-shaped tree fractal cooling channel was designed to improve the internal temperature uniformity of proton exchange membrane fuel cells and to achieve precise control of the cooling system mode. Numerical simulation of a single cell with a cooling channel was carried out using the Fluent software, and the effects of the coolant water temperature and flow rate on the surface temperature distribution of the proton exchange membrane and the polarization curve of the single cell were analyzed. Meanwhile, a PID controller model and an active disturbance rejection controller (ADRC) model were built using Simulink to control the temperature of the cell stack, and their advantages and disadvantages were compared. The results showed that when the coolant water mass flow rate is 1 g/s, the cooling effect of 333 K coolant water on the fuel cell is better than that of 298 K coolant water. The smaller the temperature difference on the surface of the proton exchange membrane is, the more uniform the temperature distribution is. When the coolant water temperature is 298 K, and the mass flow rate is 1.5 g/s, the maximum current density is 0.440 3 A/cm^2. When the coolant water is preheated to 343 K, the mass flow rate is 6 g/s, the maximum current density is 0.476 8 A/cm^2. The control effect of the ADRC controller is better than that of the PID controller. When the load current changes

收稿日期:2024-05-09
基金项目:国家自然科学基金(12002246);武汉工程大学第十五届研究生教育创新基金(CX2023206)
作者简介:王 旭,硕士研究生。Email: xu_wang2022@163.com
***通信作者**:罗 燕,博士,讲师。Email: 9723805@qq.com
引文格式:王旭,张刚,杨侠,等.水冷质子交换膜燃料电池热管理研究[J].武汉工程大学学报,2025,47(4):448-454.

in three steps, the overshoot of the ADRC controller is 62.5%, 56.2%, and 46.6% less than that of the PID controller, and the regulation time is 10.32, 18.46, and 24.18 s shorter than that of the PID controller, respectively.

Keywords: water cooling; thermal management; cooling flow channel; numerical simulation; effect of control

随着石油、煤炭等主要能源的枯竭，以及人类生活环境日趋恶劣，氢能源汽车未来会成为人们出行的首选工具。质子交换膜燃料电池（proton exchange membrane fuel cell，PEMFC）是氢能源汽车动力系统的重要零部件，具有比功率大、能量转化效率高、工作温度低、启动快、零排放、低噪音等优点，能够满足氢能源汽车对于长时间、高效能源、高环保的需求。随着对续航需求的增大，动力系统对燃料电池散热能力的要求也在增强，汽车以大功率运行时，燃料电池温度会骤增，需要更多更大的风量来降低燃料电池的温度，因此会发出巨大噪音。当流体在冷却流道流动时，与流道壁面相接触的流体处于悬停状态，此时流体与流道壁面之间相当于只有热传导存在[1-2]。以水为例，常温下水的导热系数和比热容分别约为空气的23.00和4.17倍，因此水的流动换热比空气换热效果更好，更能满足燃料电池的温控需求。

燃料电池产生的废热中约有5%被空气尾气带出燃料电池，约有95%依赖于冷却液带走，因此冷却液的性能以及冷却液控制策略的效率，直接关乎氢燃料电池的性能、寿命和安全性。杨昆鹏等[3]对风冷石墨流场板及密封件进行结构力学仿真分析，研究表明当密封圈厚度为0.5 mm，双极板长度为225 mm，装配压力为2.5 MPa时，双极板应力分布均匀性最好，电池性能最优。汪龙飞等[4]对不同流道结构的液冷散热锂电池组进行流-固耦合仿真，研究发现U型流道比串型流道和双串型流道的冷却效果好。彭明等[5]采用数值模拟研究了阴极氧气过量系数对风冷燃料单电池性能的影响，研究发现提高过量系数有利于风冷燃料电池热管理和运行安全，提升膜电极中膜态水含量和电池性能。胡佳丽等[6]用线性二次型最优控制与二阶滑模控制算法对空气供给系统参数进行优化，研究发现两种控制算法均能在不同负载电流下迅速准确调节过氧比至设定值，调节时间相比传统PID缩短约30%，空压机消耗功率减少约10%。张婷婷等[7]提出一种新型车载氢燃料电池系统通风散热方法，提高了系统散热效率，降低了散热风机能耗。

综上所述，目前研究大多关注风冷对PEMFC性能的影响，关于冷却流道、冷却水温度及流量对PEMFC性能影响的研究较少。为了更有效地降低燃料电池温差，使温度分布更均匀，本文设计了Y型树状分形冷却流道，利用Fluent软件对单电池进行仿真分析，研究冷却水温度及流量对燃料电池性能的影响，并提出PID控制器和自抗扰控制器（active disturbance rejection controller，ADRC）分别对电堆温度进行控制，为燃料电池流道结构设计和温度控制策略设计提供了思路。

1　PEMFC模型

1.1　单电池几何模型及尺寸

单电池几何模型如图1(a)所示，主要由双极板、冷却流道、气体流道、扩散层、催化层、质子交换膜组成。单电池的整体边长为78 mm×32 mm，双极板厚度为4 mm，扩散层厚度为0.21 mm，催化层厚度为0.018 mm，质子交换膜厚度为0.035 mm。以Y型树状分形结构为理论设计的气体流道和冷却流道结构模型如图1(b)所示，二者结构和流向均相同，其几何参数详见表1。

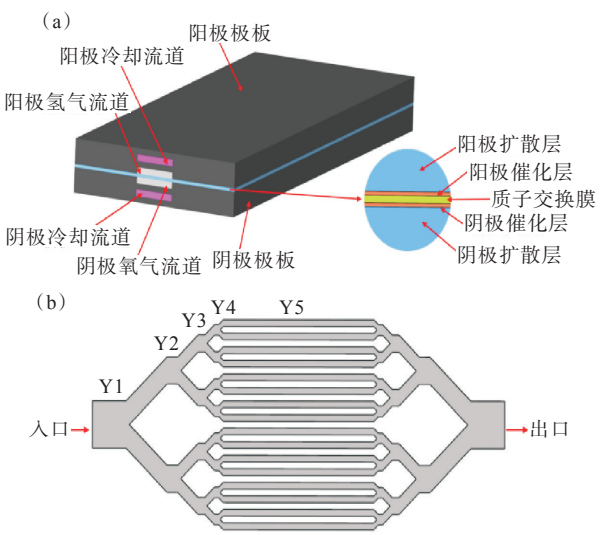

图1　单电池几何模型(a)与流道结构模型(b)

Fig. 1　Geometric model of a single cell (a) and flow channel structure model (b)

表1 流道几何参数

Table 1 Geometric parameters of the flow channel

分形级数	流道宽度 / mm	分支长度 / mm	深度 / mm
Y1	7.00	6.39	1
Y2	4.02	2.02	1
Y3	2.53	1.26	1
Y4	1.59	0.80	1
Y5	1.00	28.50	1

1.2 数学模型

物质传递主要表现为氢气和氧气的扩散、流场内水的输送，化学反应主要发生在催化层。其内部的工作机理遵循质量守恒方程、动量守恒方程、组分守恒方程、能量守恒方程和电荷守恒方程[8-9]。

1.3 网格划分与无关性验证

采用HyperMesh软件对单电池进行网格划分，网格数量会对数值模拟的计算结果产生影响，为节省计算资源，选择合适的网格数量，首先要进行网格无关性验证。对单电池分别采用47.3万个、68.1万个、91.5万个、118.1万个和137.5万个5种网格数量，在其余工况均相同的情况下，设置输出电压为0.75 V，网格无关性验证结果如图2所示。电流密度随网格数量的增加而增大，但其增长速率在逐渐减小，网格数量为118.1万个和137.5万个所对应的电流密度误差小于5%。因此本文后续均采用网格数量为118.1万个的网格模型进行数值模拟。

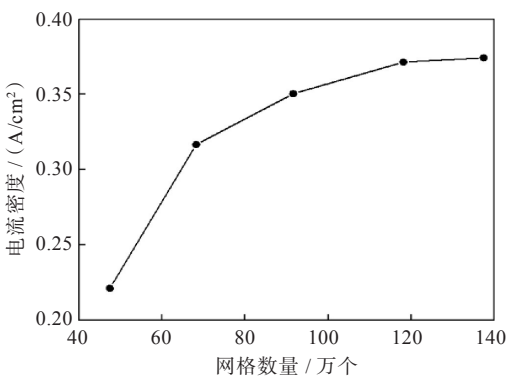

图2 网格无关性验证

Fig. 2 Verification of grid-independence

1.4 边界条件与材料物性参数

设置操作压力为101 325 Pa，开路电压为1 V。阴极和阳极进口为质量流量入口，质量流量分别为3.094×10^{-2}和3.428×10^{-3} g/s，氢气质量分数为0.113，氧气质量分数为0.135，气体温度均为353 K；阴极和阳极出口为压力出口，阳极极板表面电势为0 V，阴极极板表面电势为0~1 V之间。分别采用3种冷却方案，方案Ⅰ通入298 K的冷却水，方案Ⅱ通入333 K的冷却水，方案Ⅲ不冷却，阴极和阳极冷却流道进口均设置为质量流量入口，质量流量均为1 g/s，冷却流道出口设置为压力出口。具体材料物性参数详见表2。

表2 材料物性参数

Table 2 Parameters of the materials' physical properties

电池部件	密度 / (kg/m³)	比热容 / [J/(kg/K)]	电导率 / (S/m)
双极板	1 900	700	3.5×10^{7}
气体扩散层	450	750	4 200
催化层	2 000	750	1 000
质子交换膜	1 980	2 000	1×10^{-16}

1.5 仿真模型验证

为了验证仿真模型的可靠性，将方案Ⅲ仿真计算的极化曲线与文献[10]中的数据进行对比，如图3所示。由图3可知，当电流密度小于0.6 A/cm²时，所得结果与文献[10]中结果基本一致；当电流密度大于0.6 A/cm²时，仿真结果略高于文献[10]中结果。可能是因为仿真时忽略了液态水的重力影响，水不易被排出电池体，堵塞了流道，从而加剧了浓差损失。虽然低电压时仿真数据略大于文献数据，但整体看来二者仍然高度吻合，因此该仿真模型可以用于本文后续的性能预测。

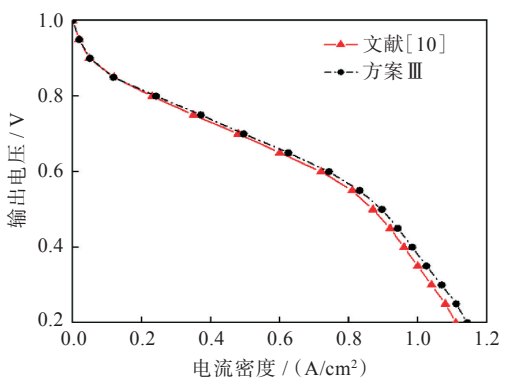

图3 仿真数据与文献[10]数据对比验证

Fig. 3 Comparison and verification of simulation data and literature[10] data

2 仿真结果及分析

2.1 极化曲线

极化曲线用于表示燃料电池电流密度和输出电压的对应关系[11]，图4为不同冷却方案单电池的极化曲线。由图4可知，方案Ⅰ与方案Ⅱ的极化曲线整体居于方案Ⅲ的极化曲线上方，当电压为

0.2 V时，方案Ⅰ、方案Ⅱ、方案Ⅲ的最大电流密度分别为1.216，1.251，1.143 A/cm²，方案Ⅰ与方案Ⅱ的最大电流密度相对于方案Ⅲ分别增大了6.0%和9.7%，这说明方案Ⅰ与方案Ⅱ均取得了较好的冷却效果，但方案Ⅱ比方案Ⅰ的整体冷却效果好，可能是因为方案Ⅱ通入333 K冷却水恰好能够带走电化学反应产生的多余热量，使燃料电池内部最低温度较方案Ⅰ高且分布更均匀，加快了电化学反应速率，从而使电流密度增大，提高了燃料电池的性能。

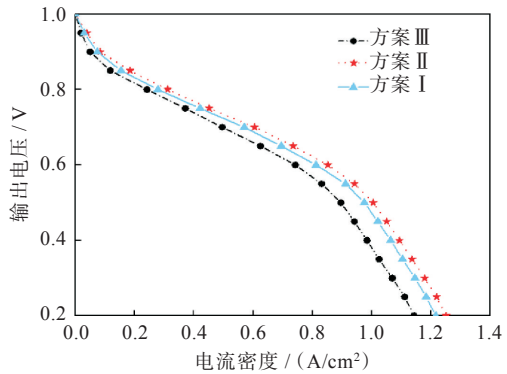

图4　不同冷却方案单电池的极化曲线

Fig. 4　Polarization curves of a single cell with different cooling schemes

2.2　质子交换膜温度分布

目前应用最广泛的Nafion膜的最佳工作温度在70~80 ℃。图5为输出电压为0.75 V时，不同冷却方案质子交换膜温度分布云图，其中反应气体和冷却水均从上方入口流入，下方出口流出。由图5(a)可知，方案Ⅰ质子交换膜的最低温度为338 K，最高温度为353 K，温差高达15 K，这是因为通入温度较低的298 K冷却水带走了大量的热，使膜内温度降低。由图5(b)可知，方案Ⅱ质子交换膜的最低温度为348 K，最高温度为353 K，温差为5 K，这是因为通入预热的333 K冷却水既能够带走电化学反应产生的热量，又能够使膜的最低温度处于最佳工作温度范围内，从而提高燃料电池性能。由图5(c)可知，方案Ⅲ质子交换膜的最低温度为353 K，最高温度达到358 K，温差为5 K，这是因为方案Ⅲ没有考虑冷却，热量在电池内部聚集，没有及时排出电池体外，导致膜的温度升高，催化剂的活性降低(在65~80 ℃活性较佳)，从而使燃料电池性能降低，局部高温还可能导致膜的损坏。综上所述，方案Ⅱ的冷却效果最好，燃料电池性能最佳；虽然方案Ⅰ有较好的冷却效果，但平行流道部分温度过低，燃料电池性能次之；方案Ⅲ没有考虑冷却，燃料电池性能最差，同时也印证了图4中的结论。

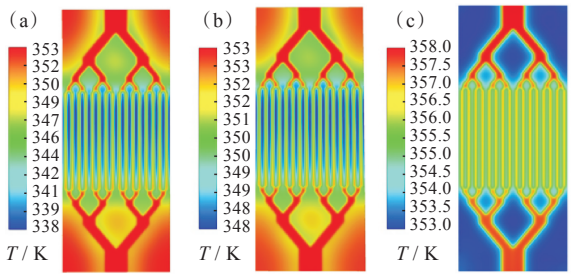

图5　不同冷却方案质子交换膜温度分布云图：(a)方案Ⅰ，(b)方案Ⅱ，(c)方案Ⅲ

Fig. 5　Cloud diagrams of proton exchange membrane temperature distribution of cooling schemes: (a)scheme Ⅰ, (b)scheme Ⅱ, (c)scheme Ⅲ

2.3　冷却水温度及流量对PEMFC性能的影响

冷却水的温度和流量会影响电池和冷却水之间热交换的能力和速度[12]。为了保持PEMFC的最佳性能，需要确保燃料电池在固定的温度范围内运行，以确保质子交换膜和催化剂具有较高的活性，同时避免因温度过高或膜干燥而导致失活。对冷却水的选择和控制可以从温度上划分为两种：一是采用室温冷却水，通过调整冷却水流量控制电池温度；二是将冷却水预热至稍低于电池进气温度的固定温度，同时控制冷却水温度和流量从而达到冷却效果。

输出电压为0.75 V时，电流密度随不同室温冷却水质量流量变化的曲线如图6所示，室温冷却水温度分别为298，291和286 K。由图6可知，电流密度随冷却水质量流量增大先升高再降低，当冷却水质量流量为1.5 g/s时，298，291和286 K的冷却水分别使电流密度达到峰值0.440 3，0.438 8和0.439 4 A/cm²。室温冷却水质量流量小于1.5 g/s不能满足散热需求，此时冷却水温度越低对电池

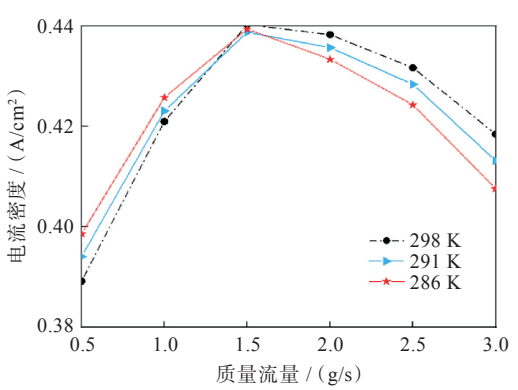

图6　电流密度随不同室温冷却水质量流量变化曲线

Fig. 6　Curves of current density with cooling water flow at different room temperatures

性能的改善效果越好；而冷却水质量流量大于1.5 g/s时，冷却水质量流量太大会带走过多热量而降低催化剂活性，削弱电化学反应程度，此时冷却液温度越高对电池性能的改善效果越好。因此，应当针对不同的应用场景选择合适的冷却水温度和流量，从而达到最优的冷却效果。

输出电压为0.75 V时，电流密度随不同预热温度冷却水质量流量变化的曲线如图7所示，进气温度为353 K，预热冷却水温度分别为333，343和350 K，冷却水质量流量范围为1~10 g/s。由图7可知，接近进气温度的350 K冷却水基本无法起到冷却作用，电流密度随冷却水质量流量增大而有所提高，但数值明显低于通入333和343 K冷却水时的电流密度。通入333和343 K冷却水均能够达到较好的冷却效果，333 K冷却水质量流量达到3 g/s时，使电池达到最大电流密度0.475 4 A/cm^2，随着质量流量继续增大，电流密度略微减小；343 K冷却水质量流量达到6 g/s时，使电池达到最大电流密度0.476 8 A/cm^2，质量流量的进一步增大基本不会对电流密度产生影响。综上所述，低于进气温度10~20 K的预热冷却水能够对燃料电池起到较好的冷却效果，进而提高燃料电池性能。

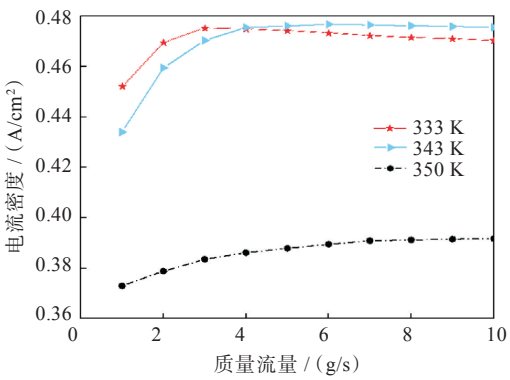

图7 电流密度随不同预热温度冷却水质量流量变化曲线

Fig. 7 Curves of current density with cooling water flow at different preheating temperatures

3 热管理系统控制策略分析

3.1 PEMFC电堆模型

3.1.1 电化学模型 PEMFC的输出电压与电流密度、气体压力、电池温度和质子交换膜湿度等因素有关，对于燃料电池电化学过程而言，电堆的实际输出电压为：

$$V_{\text{stack}} = N(E_{\text{Nerst}} - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{con}}) \quad (1)$$

式中：N为单电池数量；E_{Nerst}为能斯特电压，V；V_{act}为活化过电压，V；V_{ohm}为欧姆过电压，V；V_{con}为浓差过电压，V。

3.1.2 电堆温度模型 基于热力学第一定律，建立燃料电池温度动态变化模型：

$$m_{\text{st}}c_{p,\text{st}}\frac{\mathrm{d}T_{\text{st}}}{\mathrm{d}t} = Q_{\text{gen}} - P_{\text{st}} - Q_{\text{amb}} - Q_{\text{cool}} \quad (2)$$

式中：m_{st}为电堆质量，kg；$c_{p,\text{st}}$为电堆比热容，J/(kg·K)；T_{st}为电堆温度，K；Q_{gen}为单位时间内产生的化学能，J；P_{st}为输出到外部负载的电功率，W；Q_{amb}为单位时间内辐射传热带走的热量，J；Q_{cool}为单位时间内冷却水带走的热量，J。

图8为利用Simulink软件搭建的电堆模型，其中，I为电堆电流、A为膜面积、p_{H_2}为氢气分压、p_{O_2}为氧气分压，u为控制输入的变量参数。

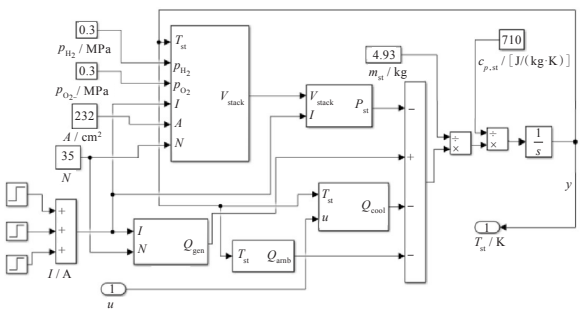

图8 电堆模型

Fig. 8 Stack model

3.2 控制器模型

PID控制是一种“利用误差控制误差”的控制方法，基于被控量的设定值和实际输出值的计算误差，对误差进行比例、积分和微分计算，并通过线性组合形成新的控制量，对被控量进行调节，使其最终稳定在设定值上，最终PID控制器的输出结果u_1可表示为：

$$u_1 = K_{\text{p}}e + K_{\text{i}}\int_0^t e\,\mathrm{d}t + K_{\text{d}}\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t} \quad (3)$$

式中：K_{p}，K_{i}，K_{d}分别为比例系数、积分系数和微分系数；e为误差。

图9为利用Simulink软件搭建的PID控制器模型，其中，K_{p}=1.2×10^{-5}，K_{i}=1.6×10^{-6}，K_{d}=−3.5×10^{-6}；$\frac{K\,T_{\text{s}}}{z-1}$和$\frac{K(z-1)}{T_{\text{s}}z}$表示离散积分符号，增益系数$K$=1，采样时间$T_{\text{s}}$=0.1 s，$z$为当前时刻的输出；$u_1$作为控制输入的变量参数接入到电堆模型中。

自抗扰控制技术就是对扰动进行观测，利用控制器将观测的扰动抵消，则原系统就可以被视为无扰动的系统进行控制。控制目标是使电堆温度维持在设定工作温度$T_{\text{st,ref}}$(348 K)，将式(2)作如下转换：

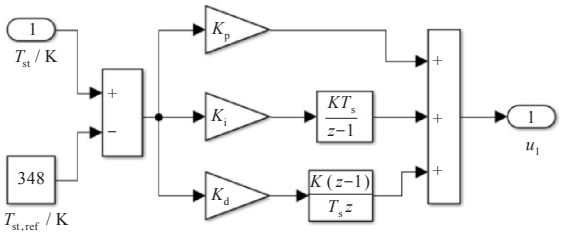

图9　PID控制器模型

Fig. 9　PID controller model

$$\frac{\mathrm{d}T_{st}}{\mathrm{d}t}=\frac{Q_{gen}-P_{st}-Q_{amb}-\rho_{H_2O}q_m c_{p,H_2O}(T_{st}-335)}{m_{st}c_{p,st}} \tag{4}$$

式中：ρ_{H_2O}为冷却水密度，kg/m³；q_m为冷却水质量流量，g/s；c_{p,H_2O}为冷却水比热容，J/(kg·K)。

根据自抗扰控制思想，将式(4)转化为标准型，选取系统的总扰动f_{total}为：

$$f_{total}=\frac{Q_{gen}-P_{st}-Q_{amb}}{m_{st}c_{p,st}} \tag{5}$$

将控制增益定义为：

$$b=-\frac{\rho_{H_2O}c_{p,H_2O}(T_{st}-335)}{m_{st}c_{p,st}} \tag{6}$$

选取状态变量$x_1=T_{st}$，控制ADRC模型的输出$u_2=q_m$，则温度闭环控制系统标准型$\dot{x}_1$可表示为：

$$\dot{x}_1=f_{total}+bu_2 \tag{7}$$

将式(7)扩张为二阶系统，其状态空间方程为：

$$\begin{cases}x_2=f_{total}\\ y=x_1=T_{st}\\ u_2=w_{cl}\end{cases} \tag{8}$$

式中：将系统总扰动f_{total}定义为扩张状态x_2，将电堆模型的输出y定义为T_{st}。定义扩张状态观测器中被控量微分的观测值为z_1和外部扰动实时作用值为z_2，具体表达式为：

$$\begin{cases}z_1=\hat{y}\approx x_1=T_{st}=y\\ z_2=\hat{f}_{total}\approx x_2=f_{total}\end{cases} \tag{9}$$

式中：$\hat{y}$为电堆温度的观测值；$\hat{f}_{total}$为系统总扰动的观测值。

设计二阶非线性扩张状态观测器为：

$$\begin{cases}e=z_1-y\\ \dot{z}_1=z_2-\beta_1 g_1(e)+bu_2\\ \dot{z}_2=-\beta_2 g_2(e)\end{cases} \tag{10}$$

式中：β_1、β_2为可调节的参数，本文选择$\beta_1=30$，$\beta_2=5.5$；$g(e)=fal(e,\alpha,\delta)$，其作为函数滤波器，可表示为：

$$g(e)=fal(e,\alpha,\delta)=\begin{cases}\dfrac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e|\le\delta\\ |e|^{\alpha}\operatorname{sgn}e, & |e|>\delta\end{cases} \tag{11}$$

式中：α为待整定的参数，范围为0~1；δ为滤波因子，本文选择$\alpha=\delta=0.9$。通过调节α和δ可以使扩张状态观测器跟踪到系统扰动，设计非线性状态误差反馈控制律为：

$$\begin{cases}e_1=T_{st,ref}-z_1\\ u_0=\beta_3 fal(e_1,\alpha,\delta)\\ u_2=u_0-z_2/b\end{cases} \tag{12}$$

式中：β_3为可调节的参数，本文选择$\beta_3=1$。

将控制律式(12)带入到系统标准型式(7)中得：

$$\dot{x}_1=f_{total}+bu_0-z_2 \tag{13}$$

因为扩张状态观测器可以跟踪到系统总扰动：$f_{total}\approx\hat{f}_{total}=z_2$，则式(13)可转化为：

$$\dot{x}_1=bu_0 \tag{14}$$

系统的总扰动f_{total}最终被估计观测和补偿消除掉，ADRC通过合理提取微分并安排过渡过程，对外部扰动的作用进行补偿，同时采用非线性组合方式，克服了PID控制器的不足。

图10为利用Simulink软件搭建的ADRC模型，其中，b=10，u_2作为控制输入的变量参数接入到电堆模型中。

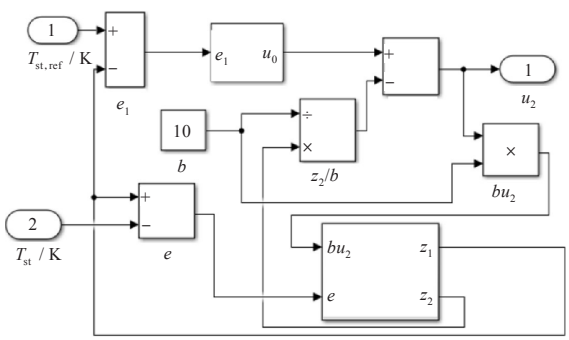

图10　ADRC模型

Fig. 10　Model of ADRC

3.3　结果分析

利用电流阶跃信号模拟外部负载的动态变化，测试在外部负载突然变化时，PID控制器和ADRC对燃料电池温度的控制效果。在0 s时刻，动态负载电流为60 A；在500 s时刻，电流减小为40 A；在1 000 s时刻，电流增加至110 A；在1 500 s时刻，电流最终减小至70 A。以冷却水质量流量为控制量，电堆温度为被控量，燃料电池集总参数模型为被控系统，分别采用PID控制器和ADRC调节冷却水质量流量。

图11为不同控制策略下电堆温度随时间的变化曲线。由图11可知，当电流3次阶跃变化时，PID控制器调节电堆温度的超调量为0.8，2.3，1.5 K，ADRC调节电堆温度的超调量为0.3，1.0，0.8 K，

ADRC调节温度的超调量比PID控制器分别减小了62.5%、56.2%和46.6%，并且ADRC调节电堆温度至设定温度的时间更短，分别减小了10.32，18.46和24.18 s。综上所述，ADRC对于电池温度的控制效果更优。

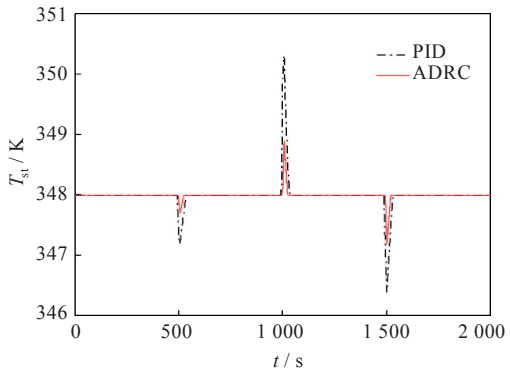

图11 不同控制策略下的电堆温度变化曲线

Fig. 11 Stack temperature variation curves under different control strategies

图12为不同控制策略下的冷却水质量流量随时间的变化曲线。由图12可知，冷却水质量流量曲线的变化趋势与电堆温度变化曲线类似，负载电流发生变化时，ADRC调节冷却水质量流量的响应速度明显快于PID控制器，可以使冷却水质量流量迅速达到所需要的数值并保持稳定，避免因冷却水不足或过量而导致电堆温度偏离设定值。

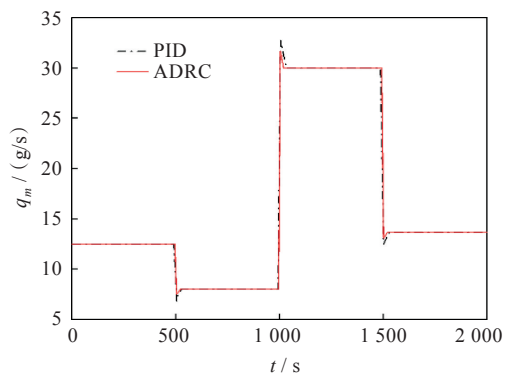

图12 不同控制策略下的冷却水质量流量变化曲线

Fig. 12 Cooling water mass flow curves under different control strategies

4 结 论

（1）当冷却水质量流量为1 g/s时，333 K冷却水比298 K冷却水对燃料电池的冷却效果更优，质子交换膜表面的温差更小，温度分布也更均匀，对燃料电池性能的改善效果更好。

（2）在冷却水温度为室温的条件下，当冷却水温度为298 K、质量流量为1.5 g/s时，达到最大电流密度0.440 3 A/cm^2；在冷却水温度为预热的条件下，当冷却水温度为343 K、质量流量为6 g/s时，达到最大电流密度0.476 8 A/cm^2。

（3）ADRC对电堆温度和冷却水质量流量的控制效果优于PID控制器。当负载电流3次阶跃变化时，ADRC调节电堆温度的超调量比PID控制器分别减小了62.5%，56.2%和46.6%，调节时间分别减小了10.32，18.46和24.18 s。

参考文献

[1] 王峰，李茂德.电池热效应分析[J].电源技术，2010，34(3)：288-291.

[2] SAW L H，POON H M，THIAM H S，et al. Novel thermal management system using mist cooling for Lithium-ion battery packs[J]. Applied Energy，2018，223：146-158.

[3] 杨昆鹏，杨海沦，裴后昌，等.风冷燃料电池结构优化及装配压力设计[J].电源技术，2023，47(3)：362-365.

[4] 汪龙飞，罗燕，刘根战，等.冷却流道结构对锂电池组液冷性能的影响[J].武汉工程大学学报，2022，44(1)：97-101.

[5] 彭明，夏强峰，蒋理想，等.阴极过量系数与流场布置对风冷燃料电池性能影响的数值模拟[J].化工学报，2023，74(10)：4267-4276.

[6] 胡佳丽，赵春鹏，肖铎.水冷燃料电池空气供给系统建模与控制研究[J].太阳能学报，2021，42(9)：428-433.

[7] 张婷婷，付鹏，文午，等.有轨电车氢燃料电池系统通风散热方法研究[J].电力机车与城轨车辆，2021，44(2)：50-52，69.

[8] KAHRAMAN H，ORHAN M F. Flow field bipolar plates in a proton exchange membrane fuel cell：analysis & modeling [J]. Energy Conversion and Management，2017，133：363-384.

[9] IONESCU V. Simulating the effect of gas channel geometry on PEM fuel cell performance by finite element method [J]. Procedia Technology，2016，22：713-719.

[10] WAN X Y，CAO J Y，YANG X，et al. Research on the flow field of the PEMFC bipolar plate based on the tree-like fractal theory [J]. Fractals，2023，31 (8)：2340185.

[11] BOYD B，HOOMAN K. Air-cooled micro-porous heat exchangers for thermal management of fuel cells [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer，2012，39(3)：363-367.

[12] 陈姝彧.金属双极板水冷型质子交换膜燃料电池研究与设计[D].武汉：华中科技大学，2021.

本文编辑：霍淑利