

9-2-2020

Modeling and Control of Thermal System of Fuel Cells for Locomotive

Guo Ai

School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

Weirong Chen

School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

Li Qi

School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

Zhixiang Liu

School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Control of Thermal System of Fuel Cells for Locomotive

Abstract

Abstract: Temperature in the stack plays an important role in ensuring efficient and reliable operations for proton exchange membrane fuel cells driving locomotive which is a new field in railway development. *The thermal model of fuel cells for locomotive was built including the stack, bypass, radiator and their resistance to coolant. The control objective that the temperature at inlet of the stack maintained at a setting temperature with the temperature difference between the stack less 10°C was accomplished by adjusting the air flow rate through the radiator and the coolant flow rate through the pump; and the two controllers including PI controller and the state feedback controllers with integral were designed. The simulations show not only that these two controllers can satisfy the objective with the temperature error less 0.1°C, but also the performance of the latter is better for its involving coupling relation between input signals and output signals.*

Keywords

fuel cells, stack temperature, resistance model, state feedback control with integral

Authors

Guo Ai, Weirong Chen, Li Qi, Zhixiang Liu, and Yankun Li

Recommended Citation

Guo Ai, Chen Weirong, Li Qi, Liu Zhixiang, Li Yankun. Modeling and Control of Thermal System of Fuel Cells for Locomotive[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(1): 133-141.

燃料电池机车温度系统建模和控制

郭爱, 陈维荣, 李奇, 刘志祥, 李艳昆

(西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 以质子交换膜燃料电池为动力源的燃料电池机车是机车发展的一个新方向, 温度是保证系统性能和可靠性的重要条件之一。建立了燃料电池机车温度系统的动态模型, 其中包含电堆、旁路阀、散热片等部件及其阻力模型; 通过调节散热器空气流速和循环泵冷却液流速, 实现电堆入口温度保持在设定温度及电堆出入口温度差 $<10^{\circ}\text{C}$ 的控制目标; 温度控制器分别采用了 PI 控制器和带积分的状态反馈控制器。仿真实验验证了 PI 控制和带积分的状态反馈控制不仅都能达到满意效果, 二者的温度误差 $<0.1^{\circ}\text{C}$, 由于带积分的状态反馈控制考虑了输入和输出之间的耦合关系, 其控制性能明显优于 PI 控制。

关键词: 燃料电池; 电堆温度; 阻力模型; 带积分的状态反馈控制

中图分类号: TM911.4 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 01-0133-09

Modeling and Control of Thermal System of Fuel Cells for Locomotive

Guo Ai, Chen Weirong, Li Qi, Liu Zhixiang, Li Yankun

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Temperature in the stack plays an important role in ensuring efficient and reliable operations for proton exchange membrane fuel cells driving locomotive which is a new field in railway development. The thermal model of fuel cells for locomotive was built including the stack, bypass, radiator and their resistance to coolant. The control objective that the temperature at inlet of the stack maintained at a setting temperature with the temperature difference between the stack less 10°C was accomplished by adjusting the air flow rate through the radiator and the coolant flow rate through the pump; and the two controllers including PI controller and the state feedback controllers with integral were designed. The simulations show not only that these two controllers can satisfy the objective with the temperature error less 0.1°C , but also the performance of the latter is better for its involving coupling relation between input signals and output signals.

Keywords: fuel cells; stack temperature; resistance model; state feedback control with integral

引言

质子交换膜燃料电池 (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, 简称 PEMFC) 具有工作温度低, 能够快速启动, 且能量转换效率超过 40%,

已成为适应性最广的燃料电池, 且已应用在分布式电站、航空航天、移动通讯、电动汽车铁路机车等领域^[1]。

在以 PEMFC 为动力源的燃料电池机车中, 往往期望燃料电池系统的净输出功率最大或是系统效率最高^[2], 这就需要电堆温度和湿度进行合理控制^[3-4]。在燃料电池内部, 氢氧发生化学反应和电荷移动会产生热量, 从而使电堆内部温度升



作者简介: 郭爱(1970-), 女, 山西运城人, 博士生, 讲师, 研究方向为大功率燃料电池系统建模与控制。

收稿日期: 2013-12-20 修回日期: 2014-05-15
基金项目: 国家自然科学基金(51177138)

高, 温度升高会加快化学反应和水分活度, 提高膜的含水量, 改善膜的导电率, 因而温度升高有利于提高电池的性能。然而 PEMFC 的电解质膜是一种有机膜, 耐温有限, 而且考虑膜的含水性问题, 因而工作温度不能高过 100°C 。此外, 如果燃料电池的工作温度过高, 不仅膜容易脆化受损, 而且加快铂粒子传输, 使得催化剂降解更快, 从而缩短电池寿命^[5]。

目前在燃料电池温度控制方面已有学者做了一些研究工作。J. W. Ahn 等^[6]建立燃料电池系统的温度模型, 包括旁路阀、带风扇的散热器、储液器、冷却液泵及空气供应的风机、进气和出气管路。分别采用了比例积分(PI)控制器和带积分的状态反馈控制器对电堆温度控制, 同时利用前馈控制减小温度对空气流量率的影响。Xi Li 等^[7]在利用优化算法识别的燃料电池温度仿射模型基础上, 设计了一种具有快速平滑趋近定律和快速收敛的变结构滑模控制器。Alicia Arce 等^[8]针对一个 1.2 kW Nexa 燃料电池模块, 热敏电阻延时性采用了一阶惯性环节(时间常数取 10 s), 将该方程与空气供应子系统的方程^[2]组成状态方程, 采用显示模型预测控制设计控制器, 实现最小化电堆的性能衰减和最大化电堆的效率。王斌锐等^[9]对燃料电池系统热传递进行分析, 建立了温度场热模型方程。通过实验得到不同负载时燃料电池输出功率最大的最佳温度值, 设计了模糊增量 PID 温度控制器实现温度控制。

将燃料电池作为机车的牵引动力引起了越来越大的兴趣。Hess K. S.等^[10]介绍了用于城市和军事基地铁路的燃料电池机车原型, 燃料电池连续净输出功率 240 kW。Guo Liping 等^[11]讨论了燃料电池混合机车功率系统的设计和建模。Hsiao Der-Ren 等^[12]研究了 200 W 的燃料电池小火车, 燃料电池与铅酸蓄电池并联连接作为系统动力源。

将研究适合于作为铁路站场吊车的 150 kW 质子交换膜燃料电池的温度系统, 首先对其进行建模, 模型中包括散热器风量和各部件管路压力;

然后建立系统方程, 在额定工作点处, 利用小信号线性化处理得到系统状态方程和传递函数。为比较控制性能, 设计了两种控制器: PI 控制器和带积分的状态反馈(State Feedback, SF)控制器, 重点介绍了带积分的状态反馈控制器的设计方法。最后, 通过仿真实验验证所设计的控制器静态和动态性能, 比较两种控制器在动态过程中的能耗, 并分析两种控制器对燃料电池工作性能的影响。

1 温度系统的工作原理

机车燃料电池系统如图 1 所示。系统由 3 个子系统组成, 即氢气供应系统、空气供应系统和温度系统。温度系统由冷却液循环泵、电堆、旁路阀和散热片以及相应的管路组成。

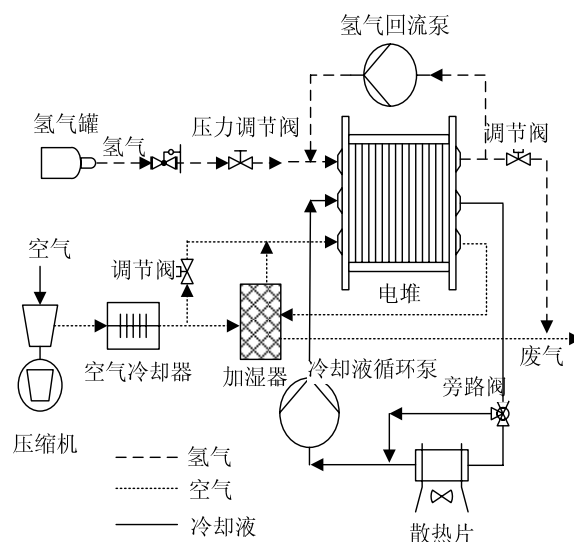


图 1 机车燃料电池系统

2 温度系统建模

为了建立面向控制的温度系统模型, 对每一部分不考虑冷却液空间位置引起的流量变化。建模时基于的假设见文献[13]。温度系统建模包含有电堆、旁路阀、散热器、各部件阻力和冷却水循环泵模型。

2.1 电堆模型

机车燃料电池工作时, 湿氢气从电堆阳极输入, 湿空气从电堆阴极输入, 冷却液从冷却管道

输入。燃料电池化学反应除了产生电能外, 且伴随着大量热量产生, 引起电堆温度升高, 使得电堆中反应气体和冷却管道中冷却液温度升高, 而流出电堆的气体和冷却液带走大量热量。为了建立电堆的温度模型, 可以将电堆看成一个开口系统, 如图 2 所示。在图中, 流入电堆能量有参加化学反应气体具有的化学能、气体和冷却液具有的热能, 流出系统的能量有电堆产生的电能、反应物和未参加反应的气体以及冷却液具有的热能; 系统能量增量就是电堆热能增量, 表现为电堆温度的变化。

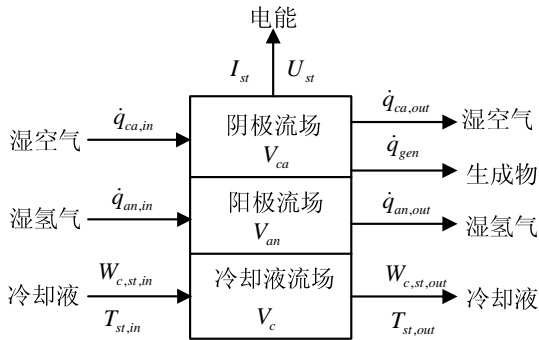


图 2 开口能量系统

2.1.1 冷却液流场

冷却液流场指电堆内部从冷却液的入口到其出口部分。机车燃料电池系统的冷却液大多采用去离子水, 因而流入冷却液流场的热功率 $\dot{q}_{c,st,in}$ 是

$$\dot{q}_{c,st,in} = W_{c,st,in} C_{p_c} (T_{st,in} - T_0) \quad (1)$$

其中: $W_{c,st,in}$ 是冷却液流入的质量流量; C_{p_c} 是冷却液的定压热容, $T_{st,in}$ 是电堆冷却液入口的温度, T_0 是基准温度(298.15K)。

流出冷却液流场的热功率 $\dot{q}_{c,st,out}$ 是

$$\dot{q}_{c,st,out} = W_{c,st,out} C_{p_c} (T_{st,out} - T_0) \quad (2)$$

其中: $W_{c,st,out}$ 是冷却液流出的质量流量; $T_{st,out}$ 是电堆冷却液出口的温度。

2.1.2 电化学反应

燃料电池在电化学反应过程中, 产生电能释放出热量并生成水。反应产生的热量可以通过将实际系统转换到在标准状态下(温度 298.15K, 压

力 1.01325 bar)进行计算。物质电化学反应的总功率 P_{rect} 是

$$P_{rect} = N_{cell} E_{equ,HHV} I_{st} \quad (3)$$

其中: N_{cell} 燃料电池单体个数; $E_{equ,HHV}$ 是单体电池高热值等效电压(1.481V), I_{st} 是电堆电流。

若电堆输出电压是 U_{st} , 则电化学反应产生的电功率是 $P_{ele} = U_{st} I_{st}$, 因此电堆产生的热功率是

$$P_{hot} = P_{rect} - P_{ele} = (N_{cell} E_{equ,HHV} - U_{st}) I_{st} \quad (4)$$

2.1.3 电堆的温度

忽略电堆表面与外界之间的热量交换, 由热力学第一定律可得电堆获得的热功率 \dot{q}_{st} 是:

$$\dot{q}_{st} = P_{hot} + (\dot{q}_{ca,in} - \dot{q}_{ca,out}) + (\dot{q}_{an,in} - \dot{q}_{an,out}) + (\dot{q}_{c,st,in} - \dot{q}_{c,st,out}) - \dot{q}_{gen} \quad (5)$$

其中: $\dot{q}_{ca,in}$ 和 $\dot{q}_{ca,out}$ 分别是湿空气带入和带出电堆阴极的热功率, $\dot{q}_{an,in}$ 和 $\dot{q}_{an,out}$ 分别是阳极氢气带入电堆的热功率, \dot{q}_{gen} 是反应生成物水带出电堆的热功率。

在电堆组成部件中最大的容热部件是双极板, 构成双极板的主要材料是石墨, 因而电堆热容参数可采用石墨, 在考虑电堆的冷却流场中有冷却液情况下, 有

$$\dot{q}_{st} = (m_{st} C_{p_{st}} + \rho_{wair} V_{ca} C_{p_{wair}} + \rho_{wH2} V_{an} C_{p_{wH2}} + \rho_c V_c C_{p_c}) \frac{dT_{st}}{dt} \quad (6)$$

其中: m_{st} 是电堆质量; $C_{p_{st}}$ 是石墨的定压热容; ρ_c 和 V_c 分别是冷却液的密度和体积; ρ_{wair} 和 ρ_{wH2} 分别是湿空气、湿氢气的密度; V_{ca} 和 V_{an} 分别是阴极流场、阳极流场的体积; $C_{p_{wair}}$ 和 $C_{p_{wH2}}$ 分别是湿空气、湿氢气的定压热容; T_{st} 是电堆出口温度。

2.2 旁路阀

旁路阀用于调节散热片中冷却液流量, 它将冷却液分成两路, 一路流入散热片, 另一路进入支路, 其信号图如图 3 所示。阀门响应时间比温度响应时间快得多, 可以忽略。将流过散热片和支路的冷却液流量看成是阀门开度的线性函数^[5], 即为:

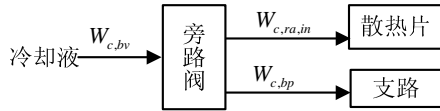


图 3 旁路阀

$$\begin{cases} W_{c,ra,in} = k_{bv} W_{c,bv} \\ W_{c,bp} = (1 - k_{bv}) W_{c,bv} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $W_{c,ra,in}$ ， $W_{c,bp}$ 和 $W_{c,bv}$ 分别是冷却液流入散热片、支路及旁路阀流量； k_{bv} 表示阀门开度，取值范围是 $0 \leq k_{bv} \leq 1$ 。

2.3 散热片

散热片在温度系统中是关键部件，它将电堆产生的大量废热散发到周围环境中去。散热片温度模型包括 2 部分：一部分是冷却液与散热片之间的能量交换；另一部分是散热片与周围环境的热交换量，其框图如图 4 所示。

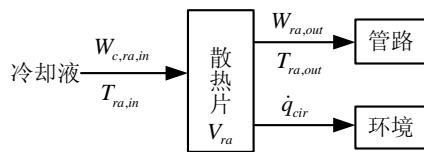


图 4 散热片

假设进入散热片的冷却液流量 $W_{c,ra,in}$ 与流出的流量 $W_{c,ra,out}$ 满足 $W_{c,ra,out} = k_{bv} W_{c,ra,in}$ ，有

$$\rho_c V_{ra} C_p \frac{dT_{ra}}{dt} = W_{c,ra,out} C_p (T_{ra,in} - k_{bv} T_{ra,out}) - \dot{q}_{cir} \quad (8)$$

其中： V_{ra} 和 T_{ra} 分别是散热片的体积、温度； $T_{ra,in}$ ， $T_{ra,out}$ 分别是流入、流出散热片的冷却液温度； T_{ra} 是二者的均值； \dot{q}_{cir} 是从散热片传给周围环境的热功率，与环境温度、周围空气流速、冷却液流量和入口温度有关。

散热器的热量传递系数 h_{rad} (kW/m²/K) 采用经验公式计算^[6]，即：

$$h_{rad} = -1.4495 W_{air}^2 + 5.9045 W_{air} - 0.1157 \quad (9)$$

其中： W_{air} (kg/s) 是空气流量

散热量 \dot{q}_{cir} 的计算公式是：

$$\dot{q}_{cir} = A h_{rad} (T_{ra} - T_0) \quad (10)$$

其中： A 是散热面积， T_{ra} 是散热器的温度。

2.4 各部件阻力

在机车燃料电池系统中，冷却液在循环泵的作用下流经电堆、散热片和相应的管路，它们产生压降等于循环泵提供的压降。

2.4.1 电堆阻力

电堆阻力与冷却液流速关系取决于其冷却流场的流道形状和材质。由于流道的复杂性，难于从理论推导方面建立二者精确的关系，可以根据实验数据拟合得到二者关系。对于 BALLARD 公司 HD6-150 kW 的燃料电池，根据文献[14]提供的数据进行拟合得到

$$p_{st,c} = c_{3,st} q_c^3 + c_{2,st} q_c^2 + c_{1,st} q_c + c_{0,st} \quad (11)$$

式中： $p_{st,c}$ (mbar) 和 q_c (LPM) 分别是冷却流场的压力和流量，且流量 ≤ 330 LPM。 $c_{0,st} \sim c_{2,st}$ 是拟合系数，数值分别是 $c_0 = 6.7807 \times 10^{-1}$ ， $c_1 = 1.5864$ ， $c_2 = 7.7398 \times 10^{-3}$ ， $c_3 = 2.2126 \times 10^{-7}$ 。

2.4.2 散热器管路阻力

散热器管路压降即使水侧阻力，其公式为：

$$p_{rad} = \frac{\rho_{cool} V_w^2}{2} \left(\frac{4f L_{rad}}{De} + \xi \right) N_{rad} \quad (12)$$

其中： V_w 是管内流速； f 为范宁摩擦因子； L_{rad} 是单根水管长度； De 是水管当量直径； N_{rad} 是单根水管根数； ξ 是局部阻力系数。

旁路阀的阀门系数调节散热器中冷却液流量和流速，继而改变水侧总阻力，阀门系数与水侧阻力的关系是

$$p_{rad} = k_{bv}^2 p_{rad0} \quad (13)$$

式中： p_{rad0} 是阀门系数是 1 时的散热器的压降。

2.4.3 管路的阻力

连接电堆的冷却水流场和散热器及循环泵之间管路的阻力计算公式是：

$$p_{line} = S_p q_c^2 \quad (14)$$

其中： S_p 是阻抗，它与连接管的材质、直径以及是弯曲角度有关。

2.5 冷却液循环泵

冷却液循环泵为冷却液在各部件和管路之间

流动提供动力, 其输出的压力为电堆阻力、散热器阻力和管路阻力之和, 它输出的功率是

$$P_{pump,out} = \frac{W_c}{\rho_c} (p_{st,c} + p_{rad} + p_{line}) \quad (15)$$

3 温度控制器设计

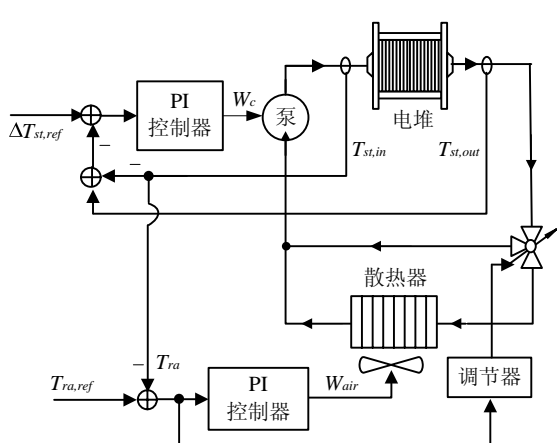
本文对 BALLARD 公司 HD6-150kW 燃料电池堆的温度系统进行了建模, 模型中使用的数据来自自己发表文献中的实验数据和 BALLARD 公司产品技术说明书, 其燃料电池相关参数见表 1。模型中空气过氧比系数取 2, 氢气当量系数取 1.6。

燃料电池工作时, 电堆入口温度和电堆温度差(出口温度减去入口温度)必须得到良好的控制, 图 5 所示的是其温度控制框图, 分别采用了 PI 控制和状态反馈控制。在温度系统中, 电堆温

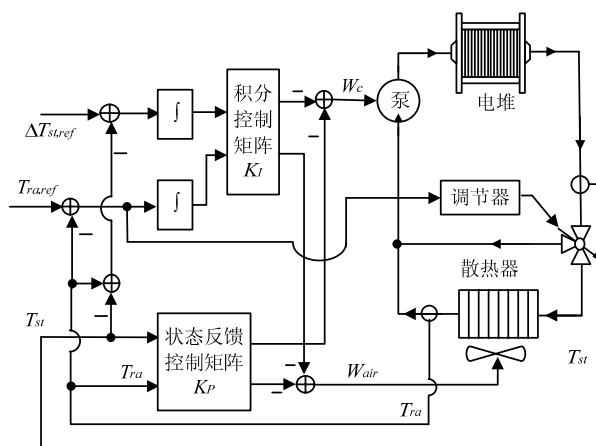
度高低主要取决于散热器中空气流速; 而电堆温度差高低主要由冷却管路中冷却液的流速决定; 因此图 5(a)中, 使用 2 个 PI 控制器调节 2 个流速分别控制电堆温度和温度差。旁路阀门开度对它们也有影响, 但影响较弱, 为了降低控制的复杂度, 阀门开度 k_{bv} 仅在系统启动时作用, 即电堆温度低于设定温度 10°C 时使 k_{bv} 为 0, 冷却液不通过散热器, 使电堆温度尽快升高; 其它状态使 k_{bv} 为 1。

表 1 燃料电池温度系统参数

含义	值
燃料电池单体个数	778
膜电极有效面积	300 cm^2
干电堆的质量	117.4 kg
电堆冷却液流场体积	0.00629 m^3
冷却液管道体积	0.01 m^3
散热器冷却液体积	0.01 m^3
散热器有效面积	1.0 m^2



(a) PI 控制



(b) 带积分的状态反馈控制

图 5 温度系统控制框图

3.1 系统数学方程

燃料电池温度系统是一个较复杂的非线性系统, 为了分析方便起见, 作以下处理:

(1) 湿氢气和湿空气进入电堆中的带来的热量以及生成物水带走热量远小于冷却液带出的热量, 可以忽略, 即

$$(\dot{q}_{ca,in} - \dot{q}_{ca,out}) + (\dot{q}_{an,in} - \dot{q}_{an,out}) - \dot{q}_{gen} = 0 \quad (16)$$

(2) 启动后每个器件以及管路中冷却液已充满, 可以认为各处冷却液流速相等, 即电堆入口

和出口冷却液流速相等, 即 $W_{c,st,in} = W_{c,st,out}$, 记为 W_c ; 当旁路阀门开度 k_{bv} 为 1 时, 散热器入口和出口冷却液流量相等, 即

$$W_{c,ra,in} = W_{c,ra,out} = W_c \quad (17)$$

(3) 燃料电池温度系统是一个大惯性系统, 时间常数远大于管路引起的温度延时, 可以忽略管路延时, 因此散热器入口温度和电堆出口冷却液温度相等, 记为 T_{st} ; 散热器出口温度和电堆入口冷却液温度相等, 记为 T_{ra} ; 有:

$$\begin{cases} T_{c,ra,in} = T_{c,st,out} = T_{st} \\ T_{c,ra,out} = T_{c,st,in} = T_{ra} \end{cases} \quad (18)$$

令 $A_1 = m_{st}Cp_{st} + \rho_{wair}V_{ca}Cp_{air} + \rho_{wH2}V_{an}Cp_{H2} + \rho_cV_cCp_c$,
由式(1)~(6)、式(8)和式(16)~(18)整理得到:

$$\begin{cases} A_1 \frac{dT_{st}}{dt} = (V_{EHHV} - U_{st})I_{st} + W_cCp_c(T_{ra} - T_{st}) \\ \rho_cV_{ra}Cp_c \frac{dT_{ra}}{dt} = W_cCp_c(T_{st} - k_{bv}T_{ra}) - \dot{q}_{cir} \end{cases} \quad (19)$$

由式(9)可以看出这是一个非线性方程。系统在额定工作点时,各个参数值见表 2。将式(9)在工作点 W_{air}^0 附近线性化后,散热量 \dot{q}_{cir} 可由式(9)和(10)计算得到。状态方程和变量如下定义:

$$\begin{cases} \delta \dot{x} = A\delta x + B_u\delta u + B_w\delta w \\ \delta y = C\delta x \end{cases} \quad (20)$$

状态矢量 $x = [T_{st} \ T_{ra}]^T$ 控制量 $u = [W_c \ W_{air}]^T$
扰动量 $w = I_{st}$ 系统输出 $y = [T_{ra} \ \Delta T_{st}]^T$

表 2 额定工作点各参数值

参数	值
电堆电流 I_{st}^0	250A
电堆电压 U_{st}^0	578.21V
阀门开度 k_{bv}	1
冷却液流速 W_c^0	4.784kg/s
电堆出口温度 T_{st}^0	339K
散热器出口温度 T_{ra}^0	332K
散热器空气流速 W_{air}^0	0.9238kg/s

3.2 PI 控制器

根据状态方程可以看出系统是一个 2 输入 2 输出系统,冷却液流速和散热器空气流速是控制量,并相互耦合。图 5(a)中,2 个 PI 积分器分别控制冷却液流速和散热器空气流速;为了最小化 2 个控制量之间耦合关系,设计时选择 2 个控制器参数,使其各自闭环响应时间差一个数量级。选电堆入口温度闭环响应时间高温度差一个数量级。根据式(19)得到温度差与冷却液流速之间、电堆入口温度和空气流量传递函数是传递函数分别是:

$$H_{\Delta}(s) = \frac{\delta \Delta T_{st}(s)}{\delta W_c(s)} = \frac{-(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{\rho_c V_{ra} C p_c}) \Delta T_{st}^0 C p_c}{s + W_c^0 C p_c (\frac{1}{A_1} + \frac{1}{\rho_c V_{ra} C p_c})} \quad (21)$$

$$H_{ra}(s) = \frac{\delta T_{ra}(s)}{\delta W_{air}(s)} = \frac{A_1 K_1 (T_0 - T_{ra}^0)}{\rho_c V_{ra} C p_c s + A_1 K_1 W_{air}^0 + W_c^0 C p_c} \quad (22)$$

代入数值后得到:

$$H_{\Delta}(s) = \frac{-0.9266}{s + 0.6244} \quad H_{ra}(s) = \frac{-2.6128}{s + 0.5497}$$

两个传函都是一阶系统,使用 PI 控制器后,闭环系统是都是具有一个 0 点的二阶系统,通过选择闭环带宽和使阻尼系数最佳($\zeta = 0.707$)得到的控制参数往往使系统发生震荡,原因是不能考虑到冷却液流速散热器和空气流速限制条件(冷却液流速 ≤ 6 kg/s,空气流速 ≤ 2.036 kg/s)。本文选取采用了 Ziegler-Nichols 方式,得到温差控制器的中控制参数 $K_{P_{\Delta}} = 0.0810$, $K_{I_{\Delta}} = 0.0151$ 和温度控制器的参数 $K_{P_{ra}} = 0.0581$, $K_{I_{ra}} = 0.005$ 。

3.3 线性二次最优调节器

PI 控制是通过分别独立控制冷却液流量和散热风机转速实现,忽略了控制量之间耦合关系。而采用状态反馈控制,不仅考虑到系统控制量的耦合,还可以通过加权矩阵中系数的选取控制冷却液和空气流速的大小。

选取将式(19)在工作点附近线性化后,得到状态方程(忽略二次项),为:

$$\begin{cases} \delta \dot{T}_{st} = -\frac{W_c^0 C p_c}{A_1} \delta T_{st} + \frac{W_c^0 C p_c}{A_1} \delta T_{ra} + \frac{C p_c (T_{ra}^0 - T_{st}^0)}{A_1} \delta W_c + \frac{U_{st}^0}{A_1} \delta I_{st} \\ \delta \dot{T}_{ra} = \frac{W_c^0 C p_c}{\rho_c V_{ra} C p_c} \delta T_{st} - \frac{W_c^0 C p_c + A K_1 W_{air}^0}{\rho_c V_{ra} C p_c} \delta T_{ra} + \frac{C p_c (T_{st}^0 - T_{ra}^0)}{\rho_c V_{ra} C p_c} \delta W_c + \frac{A K_1 (T_0 - T_{ra}^0)}{\rho_c V_{ra} C p_c} \delta W_{air} \end{cases} \quad (23)$$

由状态方程可以得到系数矩阵分别为:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{W_c^0 C p_c}{A_1} & \frac{W_c^0 C p_c}{A_1} \\ \frac{W_c^0 C p_c}{\rho_c V_{ra} C p_c} & -\frac{W_c^0 C p_c + A K_1 W_{air}^0}{\rho_c V_{ra} C p_c} \end{bmatrix},$$

$$B_u = \begin{bmatrix} \frac{Cp_c(T_{ra}^0 - T_{st}^0)}{A_1} & 0 \\ \frac{Cp_c(T_{st}^0 - T_{ra}^0)}{\rho_c V_{ra} Cp_c} & \frac{AK_1(T_0 - T_{ra}^0)}{\rho_c V_{ra} Cp_c} \end{bmatrix},$$

$$B_w = \begin{bmatrix} \frac{U_{st}^0}{A_1} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ 和 } C = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

代入数值计算矩阵 A 和 B 具体数值, 有:

$$A = \begin{bmatrix} -0.1472 & 0.1460 \\ 0.4784 & -0.5170 \end{bmatrix} \quad B_u = \begin{bmatrix} -0.2106 & 0 \\ 0.7100 & -0.7714 \end{bmatrix}$$

为了消除系统的误差, 引入 2 个误差积分器: ①是对于电堆入口温度; ②是对于电堆温度差; 选这 2 个积分器输出为状态变量, 即:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} T_{ra}^* - T_{ra} \\ \Delta T_{ra}^* - \Delta T_{st} \end{bmatrix} \quad (24)$$

利用线性二次最优调节器设计带积分的状态反馈控制器, 其控制性能指标是:

$$J = \int_0^\infty (\delta x^T Q_x \delta x + q^T Q_q q + \delta u^T R \delta u) dt \quad (25)$$

其中: Q_x 和 R 分别是对状态变量和输出变量的加权矩阵; Q_q 是温差积分的加权矩阵。

根据二次型最优调节器可知, 控制量是:

$$\delta u = -K[\delta x \ q]^T = -K_p \delta x - K_I q \quad (26)$$

其中控制矩阵 $K = R^{-1} B_e^T P$ 。 P 是 Riccati 代数方程的解, 而其 Riccati 代数方程是:

$$P A_e + A_e P + Q - P B_e R^{-1} B_e^T P = 0 \quad (27)$$

其中系数矩阵 $A_e = \begin{bmatrix} A & 0_{2 \times 2} \\ 0 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$,

$B_e = \begin{bmatrix} B_u & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}$, 加权矩阵 $Q = \begin{bmatrix} Q_x & 0 \\ 0 & Q_q \end{bmatrix}$ 。

选取各个加权矩阵中系数为:

$$R = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 30 \end{bmatrix}, \quad Q_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Q_q = \begin{bmatrix} 0.008 & 0 \\ 0 & 0.005 \end{bmatrix}$$

因此可以得到控制矩阵分别是:

$$K_p = \begin{bmatrix} -0.0983 & 0.0784 \\ -0.0094 & 0.0211 \end{bmatrix},$$

$$K_I = \begin{bmatrix} -0.2894 & -0.1167 \\ 0.0155 & 0.0043 \end{bmatrix}.$$

4 仿真结果和分析

为了验证所设计的控制器的性能, 设计了 3 个仿真实验。HD6 燃料电池工作时, 要求电堆入口的气体温度不能超过 63 °C, 电堆温度差不超过 10 °C, 且该电堆电流最大值是 300 A。

电堆电流 I_{st} 是 250 A, 电堆入口温度设定值是 60 °C, 电堆温度差设定是 7 °C, 仿真结果见表 3。两种控制器稳态精度方面基本相同。

表 3 性能参数比较

控制方法	PI 控制	SF 控制
温度误差	-0.041 0 °C	0.056 5 °C
温度差误差	0.002 1 °C	0.177 0 °C

系统处于稳定工作状态, 此时电堆电流 I_{st} 是 250 A, 电堆温度差是 7 °C, 电堆的入口温度是 60 °C。为验证控制器对于电堆温度入口温度设定值发生跳变时的控制性能, 令电堆入口温度在 0 s, 200 s, 400 s 和 600 s 时分别是 60 °C, 70 °C, 60 °C, 80 °C, 仿真结果如图 6 所示。图(a)中, 在每个设定温度发生变化后, PI 控制的调节时间较大, 在 t=400~500 s 发生震荡, 原因是发生饱和(空气流速>0)。图(b)中 t = 400~500 s, PI 控制的冷却液流速出现凹陷。从而使得图 (c) 和图 (d) 中在 t=400~500s 区间, PI 控制效果变差。

根据冷却液流速, 由式(11)~(12)和式(14)可以得到电堆、散热器和管路阻力, 再利用式(15)计算得到循环泵的功率, 对其在[0 s, 600 s]区间积分, 可得 PI 控制的能耗 4.6476×10^5 J 和, SF 控制的能耗 $5.609 5 \times 10^5$ J。PI 控制能耗小的主要原因在 440 s 附近冷却液流量有一个骤降(图 6(b)), 这使得是电堆温度差在 450 s 附近超过 10 °C(图 6(d)), 电堆温度差波动较大。

电堆入口温度设定值是 60 °C, 电堆温度差设定是 7 °C; 电堆电流是 200A, 系统已稳定工作, 在 0 s 和 200 s 时电堆电流分别跳变为 250 A, 200A, 仿真结果如图 7 所示。在电堆电流跳变时, SF 控制能够及时调节散热器风量和冷却液流量, 比 PI 控制响应快且无超调(图(a)和图(b)), 从而使得电堆入口温度和温度差变化较小(图(c)和图(d))。

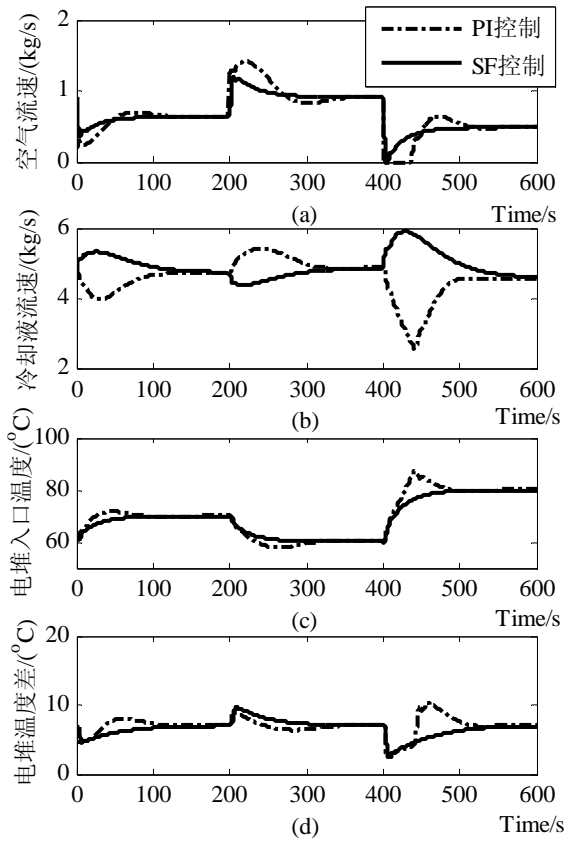


图 6 电堆入口温度发生多次跃变时系统响应

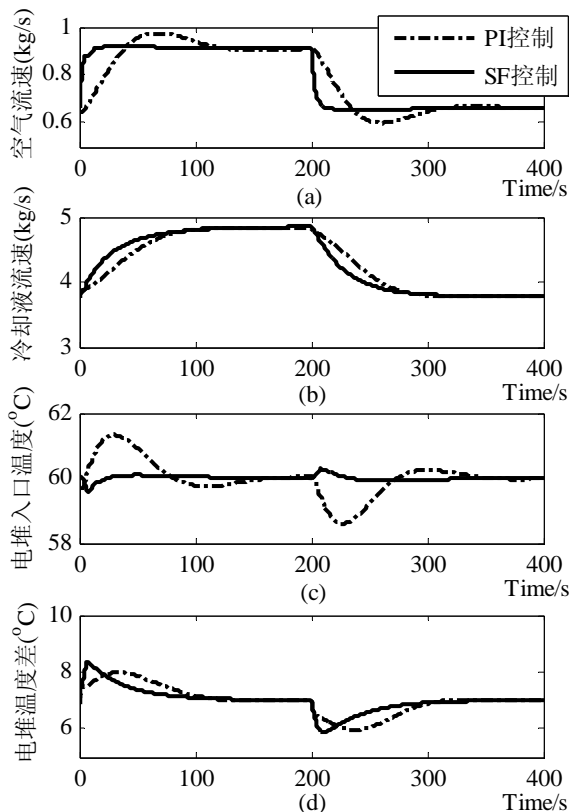


图 7 脉冲电堆电流时系统响应

在机车用燃料电池系统中,要求冷却液流场的液体流速 $<330 \text{ LPM}^{[14]}$,即 5.5 kg/s 。在仿真实验中,2 类控制器控制的冷却液流量在大部分情况下都 $<5.5 \text{ kg/s}$ (见图 6(b)和图 7(b)),仅在图 6(b)中 $[410 \text{ s}, 440 \text{ s}]$ 区间, SF 控制的流量 $>5.5 \text{ kg/s}$ 。其原因是温度的设定值由 60°C 跳变为 80°C ,改变幅度过大所致, PI 控制也出现剧烈震荡(图 6(a), (b)和(d))。SF 控制在设计控制器时通过加权矩阵 R 参数的选取使得冷却液流速小于限定值,而 PI 控制是调节比例系数和积分系数使冷却流速小于限定值。相比于 PI 控制, SF 控制的冷却液流速变化比较平坦,冷却液通过电堆产生的压力变化小。由于冷却液流场压力需小于等于阴极流场压力,其压力波动大,会增加对阴极流场压力的控制难度,影响电堆的正常工作。

燃料电池输出电压等于单体个数与单体电压之积。单体输出电压等于能斯特电压、活化电压、欧姆电压和浓度差电压代数和。能斯特电压受电堆工作温度的影响,欧姆电压大小由电堆电流和内部电阻阻值决定,而阻值是电堆工作的温度和交换膜湿度的函数,因而电堆电压受到电堆温度和交换膜湿度的影响。

在 $50^\circ\text{C}\sim 90^\circ\text{C}$ 范围内,电堆电压随电堆温度呈单调变化趋势,其原因表现在 2 个方面:(1) 温度对能斯特电压的影响;(2) 在燃料电池中,虽然交换膜的湿度可以通过加湿器加湿到设定的湿度,但是阴极流道和阳极流道气体湿度会影响它的湿度;在电堆不发生“水淹”情况下,交换膜湿度越大(≤ 1),膜电极的导电性能越好,欧姆电阻就越小,电堆电压越高。电堆温度差波动大,使得进入电堆内部阴极流场的湿空气和阳极流场的湿氢气的湿度变化波动大,交换膜的湿度波动较大,欧姆电压变化大,继而电堆电压变化波动大。与 PI 控制相比较, SF 控制的电堆温度波动相对较小(图 6(c)和(d)),使得燃料电池输出电压较平坦,纹波小,有利于负载正常工作。

5 结论

燃料电池机车的温度控制是发挥其最大效能主要条件之一。本文建立了温度系统模型, 考虑了散热器风量和管路压力, 利用热力学第一定律, 建立了温度系统状态方程, 设计了 2 种控制器: PI 控制策略和带积分的 SF 控制策略。由于 PI 控制策略是使用两个独立的 PI 控制器, 忽略了冷却液流速对入口温度、散热器风速对温度差的影响, 使得 PI 控制策略的控制效果变差。SF 控制策略明显由于 PI 控制策略。

通过仿真实验, 可以看出为简化系统数学方程, 可以忽略了湿氢气和湿空气带入电堆的热量及管路延时。温度系统的控制量有 3 个, 本文为了简化处理, 仅考虑了 2 个控制量, 而将旁路阀门开度设计成仅在启动时开关控制, 但是阀门开度不仅影响电堆入口温度和电堆温度差, 而且通过调节散热器中冷却液流量可以降低循环泵功耗。这是将要在下一步继续研究的课题。

参考文献:

- [1] Ehsani M, Gao Yimin, Emadi A. 现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车—基本原理、理论和设计 [M]. 倪光正, 译. 北京: 机械工业出版社, 2010, 8.
- [2] Arce Alicia, Del Real Alejandro J, Bordons Carlos, *et al.* Real-time implementation of a constrained MPC for efficient airflow control in a PEM fuel cell [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2010, 57(6): 1892-1905.
- [3] Nita Solehati, Joonsoo Bae, Agus P Sasmito. Optimization of operating parameters for liquid-cooled PEM fuel cell stacks using Taguchi method [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry (S1226-086X), 2012, 18(3): 1039-1050.
- [4] Li Yunzhe. Thermodynamic Analysis of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Performance under Varying Cooling Conditions [J]. International Journal of Hydrogen Energy (S0360-3199), 2012, 37(14): 10798-10806.
- [5] Norlan J, Kolodziej J. Modeling of an automotive fuel cell thermal [J]. Journal of Power Sources (S0378-7753), 2010, 195(15): 4743-4752.
- [6] Ahn J-W, Choe S-Y. Coolant Controls of a PEM fuel cell system [J]. Journal of Power Sources (S0378-7753), 2008, 179(1): 252-264.
- [7] Li Xi, Deng Zhonghua, Wei Dong, *et al.* Novel variable structure control for the temperature of PEM fuel cell stack based on the dynamic thermal affine model [J]. Energy Conversion and Management (S0196-8904), 2011, 52(11): 3265-3274.
- [8] Arce A, Panos Christos, Bordons Carlos, *et al.* Design and Experimental Validation of an Explicit MPC Controller for Regulating Temperature in PEM Fuel Cell Systems [C]// Milano, Italy: Proceedings of the 18th IFAC World Congress (ISSN:14746670), 2011, 18(1): 2476-2481.
- [9] 王斌锐, 金英连, 褚磊民, 等. 空冷燃料电池最佳温度及模糊增量 PID 控制 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(8): 109-112. (Wang Binrui, Jin Yinglian, Chu Leimin, *et al.* Temperature Optimization and Fuzzy Incremental PID Control for Air-breathing Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack [J]. Proceedings of the CSEE (S0258-8013), 2009, 29(8): 109-112)
- [10] Hess K S, Miller A R, Erickson T L, *et al.* Demonstration of a Hydrogen Fuel-Cell Locomotive [C]. 2010 Rail Conference. America: American Public Transportation Association, 2010: 1-6.
- [11] Guo Liping, Yedavalli Karthik, Zinger Donald. Design and modeling of power system for a fuel cell hybrid switcher locomotive [J]. Energy Conversion and Management (S0196-8904), 2011, 52(2): 1406-1413.
- [12] Hsiao Der-Ren, Huang Bo-Wun, Shih Nai-Chien. Development and dynamic characteristics of hybrid fuel cell-powered mini-train system [J]. International Journal of Hydrogen Energy (S0360-3199), 2012, 37(1): 1058-1066.
- [13] 马天才. 燃料电池发动机控制问题研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007, 6.
- [14] Ballard. Fcvelocity-HD6 Integration Manual [K]. Canada: Ballard Power Systems, Inc., 2011: 21.