

基于 GT-COOL 的质子交换膜燃料电池发动机冷却系统仿真

罗马吉¹, 朱高辉¹, 詹志刚², 潘 牧²

(1. 武汉理工大学 汽车工程学院, 湖北武汉 430070;

2. 武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室, 湖北武汉 430070)

摘 要: 运用 GT-COOL 软件建立了 30 kW 质子交换膜燃料电池发动机冷却系统的一维仿真模型, 该模型主要由电堆、水泵、风扇和散热器子模型组成。利用该模型对燃料电池在各工况点的冷却系统散热特性进行仿真, 并将仿真结果与实验数据进行比较分析, 仿真结果与实验值的相对误差在 5% 以内, 表明所建模型是合理的。

关 键 词: 质子交换膜燃料电池; 冷却系统; 仿真; 循环水温度

中图分类号: TM911.4 文献标识码: A

引 言

以清洁和可再生燃料氢气作为燃料的质子交换膜 (PEM) 燃料电池凭借其高效、低温高功率密度、快速启动和零排放的特点引起人们的高度重视, 最有可能成为新能源汽车的动力装置。PEM 燃料电池发动机的工作效率大概在 40% ~ 60% 之间, 理想工作温度为 65 ~ 70 °C。燃料电池工作时会产生大量的废热, 其中 95% 以上通过冷却循环水带走, 以保证燃料电池在合适的温度下工作。因此, 冷却系统能带走多少废热对燃料电池发动机温度控制具有决定性作用。温度又是影响其性能主要因素之一: 低温时, 电池内各种极化增强, 欧姆阻抗也较大, 因此使电池性能恶化; 温度升高时, 会降低欧姆阻抗, 减少极化, 并有利于提高电化学反应速度和质子在膜内的传递速度, 电池性能变好。但温度高的同时会导致膜脱水, 电导率下降, 电池性能变差, 甚至影响电池的寿命, 所以冷却系统工作的好坏对燃料电池运行有着重要的意义。

目前, 对于燃料电池发动机内部的水热管理阐

述较多^[1~2], 而对冷却系统的研究主要集中在冷却系统试验研究、水热管理系统设计研究以及基于 Simulink 的温度控制模型研究上^[3~5], 对冷却系统的建模和模拟研究较少。本研究在分析燃料电池散热量的基础上, 基于传统汽车发动机 (内燃机) 冷却系统设计与分析软件 GT-COOL 建立了燃料电池发动机冷却系统仿真模型, 通过对冷却系统不同工况的仿真及与试验数据对比, 验证了模型的合理性。

1 燃料电池散热量分析

1.1 热量来源

燃料电池电堆工作时, 其热量主要来源于 4 个方面: 化学反应热、焦耳热 (来源于欧姆极化)、加湿气体带入的热量和吸收环境辐射热。通常加湿气体带入的热量以及吸收环境的辐射热与化学反应热和焦耳热相比相对较小, 可忽略不计。因此, 燃料电池产生的废热为化学反应热与焦耳热之和^[4]:

$$\Delta Q = I_{\text{cell}} (1.48 \times N - V_{\text{output}}) \quad (1)$$

式中: I_{cell} —电池电流; N —电堆单电池个数; V_{output} —电堆输出总电压。

1.2 热量散发途径

燃料电池电堆散发热量主要有 3 个途径: 电堆尾气、热辐射、循环水冷却。电堆尾气和热辐射带走的热量相比于循环水冷却带走的热量很小, 可以忽略不计。电堆冷却循环水带走的热量:

$$\Delta Q_{\text{conv}} = c \rho \times V_{\text{H}_2\text{O}} \times (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (2)$$

式中: c —水的比热容; ρ —水的密度; $V_{\text{H}_2\text{O}}$ —水的体积流量; T_{out} —电堆循环水出口温度; T_{in} —电堆循环

收稿日期: 2009-10-27 修订日期: 2010-04-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 基金资助项目 (2008AA11A106)

作者简介: 罗马吉 (1974—), 男, 江西吉安人, 武汉理工大学副教授, 博士。

水入口温度。

2 冷却系统建模与仿真

以武汉理工大学自制的某 30 kW 质子交换膜燃料电池发动机冷却系统为研究对象。该冷却系统由水泵、散热器、风扇、水箱以及连接水管组成。在建立冷却系统仿真模型时,还应该包含燃料电池电堆。

2.1 燃料电池电堆模型

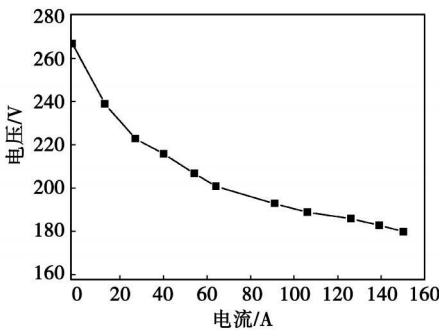


图 1 某 30 kW 燃料电池发动机极化曲线

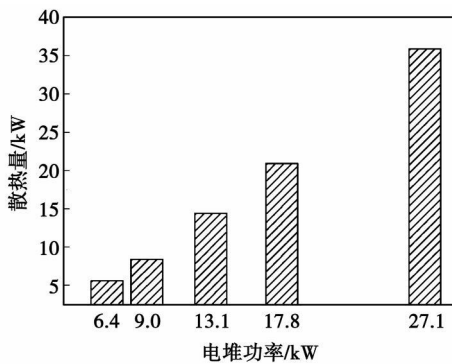


图 2 燃料电池发动机在 5 种工况下的散热量

燃料电池的性能可以用极化曲线(伏安特性曲线)图来表述,该 30 kW 燃料电池发动机试验所得极化曲线如图 1 所示。根据伏安特性图以及由式(1)可以得到该燃料电池发动机在各个工况下的散热量,如图 2 所示。燃料电池发动机与内燃机在结构上以及运行原理上具有本质的差别,所以运用 GT-COOL 软件建模时,不能直接使用其中的发动机模块。为了建立和分析燃料电池冷却系统模型,对系统做以下假设:不考虑燃料电池电堆内部的传热传质过程,只考虑其为热源,并且燃料电池产生的热

量完全直接由冷却循环水带走。因此,燃料电池电堆建模可采用 GT-COOL 中的“热源”模块,“热源”的输入热量等于该工况下的散热量。这种建模方法能比较准确地反映燃料电池电堆实际运行状态,比较合理地解决燃料电池发动机在 GT-COOL 中的建模问题。

2.2 水泵模型

水泵的特性曲线由下列方程组描述:

$$V_{H_2O} = V_0 - \alpha (\Delta P)^b \quad (3)$$

$$V_0 = V_r \times \frac{1}{1 - [(\Delta P)_r / (\Delta P)_0]^b} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{V_r}{(\Delta P)_0^b - (\Delta P)_r^b} \quad (5)$$

式中: V_0 —水泵最大的体积流量; b —压力上升指数; V_r —水泵的参考体积流量; ΔP —压力升高量。

2.3 风扇模型

风扇模型与水泵模型类似,可描述为:

$$V = V_f - a(P_r - 1)^b \quad (6)$$

式中: V_f —风扇最大的体积流量; b —压力上升指数; P_r —压力升高率。

2.4 散热器模型

散热器存在两种流体(水和空气)流动,即冷却水侧以及空气侧,当散热器表面与两种流体之间的热交换率达到平衡时,可以得出散热器表面的温度,即:

$$\frac{dT_{wall}}{dt} = \frac{(hA\Delta T)_M + (hA\Delta T)_S}{\rho V C_p} \quad (7)$$

式中: h —平均换热系数; A —换热面积; ΔT —流体温度与壁面温度差; ρ —散热器材料密度; V —散热器材料体积; C_p —散热器材料比热容。下标“M”代表冷却水侧参数,“S”代表空气侧参数。

平均换热系数 h 根据 Nusselt 准则确定: $Nu = Cr_e^m Pr^{1/3}$, 其中 $Nu = hL/k$, $Re = \rho_f UL/\mu$, $Pr = \mu C_{p,f}/k$, ρ_f —流体密度; U —流体速度; L —参考长度; k —流体导热系数; $C_{p,f}$ —流体比热容; μ —流体动力粘度; C_m —经验常数。

2.5 燃料电池发动机冷却系统模型

温度对燃料电池性能影响很大,所以在燃料电池发动机测试过程中,在低负荷时,不开启风扇,使电堆温度快速上升。当电堆功率逐渐增加时,散热量将进一步加大,在不开启风扇的情况下,温度将超

出电堆工作温度, 此时必须开启风扇。通过对风扇的控制, 可以使电堆在一个稳定的状态(稳态)下运行, 此时循环水进出堆温度保持不变。考察电堆在稳态下的运行情况, 并对发动机冷却系统在稳态下进行建模, 以对其散热特性进行分析。

冷却系统建模按照实际系统建立仿真模型, 系统结构参数均取自实际装置的冷却系统, 一些部件的物性参数则通过查阅相关资料得到。由于试验所采用的 4 个散热器及风扇都是同一个型号, 所以假定散热器及风扇的性能完全一致。GT-COOL 建模

过程中将各部件模块化, 有针对性地对具体问题进行集中建模, 这样既能考虑模型的多样性, 又能提高模型的精度。对流体处理采用容积法将各部件离散成“小单元”容积, “小单元”容积之间由边界相连。通过对连续性方程、能量守恒方程以及动量守恒方程求解得出各个变量的值。所建燃料电池发动机冷却系统模型如图 3 所示。在计算散热器平均换热系数的 Nusselt 准则中, 经验常数 C 和 m 在冷却水侧分别取为 $C=0.006$, $m=0.88$ 在空气侧分别取为 $C=0.03$, $m=0.65$ 。

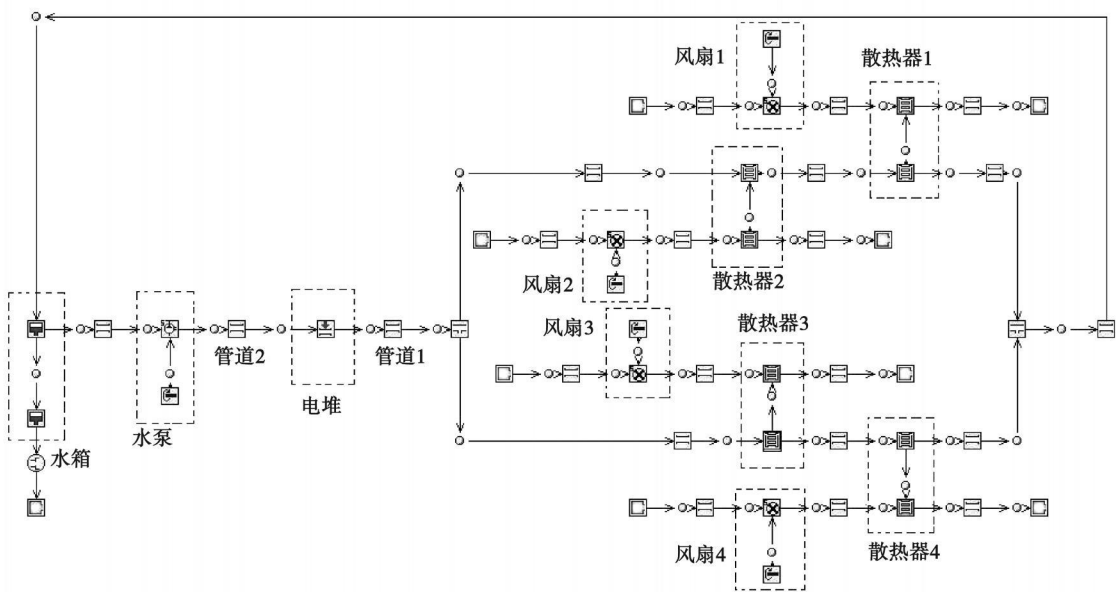


图 3 燃料电池发动机冷却系统 GT-COOL 模型

3 模型验证

为了验证所建立的燃料电池发动机冷却系统仿真模型, 对课题组自制的某 30 kW 燃料电池发动机冷却系统进行了相关试验。试验时, 水泵流量为 1.76 kg/s , 散热器周边环境温度及风扇转速由风速温度计测定, 进出堆冷却循环水温度利用温度传感器进行监测。试验表明, 电堆在 4 个工况点达到稳态运行时, 必须采取如下风扇控制策略: 在电堆 9.0 kW 时开启一个风扇; 在 13.1 kW 时开启两个风扇; 在 17.8 kW 时开启 3 个风扇; 在 27.1 kW 时开启 4 个风扇。另外, 当增大进堆空气流量使电堆性能提升, 效率提高时, 在 29.2 kW 开启 4 个风扇电堆也

可以稳定运行, 具体试验工况及结果如表 1 所示。

用上述模型对该 30 kW 燃料电池发动机在表 1 所示 5 种工况进行模拟计算。本研究以图 3 模型中管道模块管道 2 的出口温度为冷却水进堆温度, 以管道 1 的出口温度为冷却水出堆温度。根据所建立的燃料电池发动机冷却系统模型计算得到的冷却水出堆温度与试验数据对比如表 1 所示。由表可见, 在 Nusselt 准则经验常数选取恰当的情况下, 多种工况的仿真结果与试验结果表现的趋势一致, 相对误差在 5% 以内。误差产生的原因主要是所建立的仿真模型未考虑以下 3 个方面带来的影响: 一是冷却系统的散热量仅仅考虑燃料电池的化学反应热与焦耳热, 没有考虑进堆空气带入的热量; 二是忽略了电堆本身辐射热; 三是忽略了电堆尾气带走的热量。

当电堆输出功率较小时,进堆空气流量较小,进堆空气带入电堆的热量也很小,计算误差主要取决于所忽略的散热量。而电堆输出功率较大时(例如达 27 kW以上),进堆空气流量较大,发动机系统温度也相对高很多,进堆空气带入的热量和所忽略的散热量对计算误差的影响均增大。

表 1 试验工况及计算与试验数据对比

功率 P_e /kW	散热量 Q_e /kW	燃料电池 效率 %	冷却水出堆温度 / $^{\circ}\text{C}$		相对误 差 %
			计算值	试验值	
9.0	8.4	51.7	54.7	53	3.29
13.1	14.2	48.1	55.0	54	1.79
17.8	20.8	46.1	56.3	56	0.54
27.1	35.9	43.0	69.7	67	4.01
29.2	36.2	44.6	70.2	68	3.24

4 结 论

基于传统汽车发动机冷却系统设计与分析软件 GT-COOL建立了 30 kW 燃料电池发动机冷却系统仿真模型,并对燃料电池多种工况进行了模拟计算。

研究表明,在计算散热器平均换热系数的 Nusselt 准则的经验常数选取恰当的情况下,仿真结果与试验结果相对误差在 5% 以内,说明仿真模型具有较强可信度,可以对燃料电池发动机冷却系统总体性能指标进行全面分析,为燃料电池发动机冷却系统设计与分析提供依据。

参考文献:

- [1] BAO CHENG OUYANG MINGGAO YI BAOLIAN Analysis of the water and thermal management in proton exchange membrane fuel cell systems [J]. International Journal of Hydrogen Energy 2006 31: 1040-1057
- [2] KANDLIKAR SATISH G LU ZIJE Thermal management issues in a PEMFC stack-a brief review of current status [J]. Applied Thermal Engineering 2009 29: 1276-1280
- [3] 许思传,夏明智,赵建洪.燃料电池汽车散热试验研究[J].汽车工程 2008 35(8): 388-310
- [4] 唐永华,颜伏伍,侯献军.燃料电池发动机水热管理系统设计研究[J].华东电力,2005 33(4): 25-28
- [5] 马天才,孙泽昌,许思传.质子交换膜燃料电池温度控制仿真模型[J].系统仿真学报,2005 17(3): 548-551.

(编辑 陈 滨)

新技术、新工艺

湿动力循环的系统比较和多目标优化

据《ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power》2009年7月号报道,英国剑桥大学机械工程系的学者对湿动力循环的性能及其优化进行了深入的理论研究。

蒸汽回注式燃气轮机(STIG)、湿空气涡轮(HAT)和顶部湿空气涡轮(TOPHAT)循环是当前燃气轮机业界争论的中心。在把这些循环应用于航改型燃气轮机时,湿动力循环将给出优异的性能。

在研究中,针对系统的部件和工作流体的特性,使用热力学和经济学的模型来模拟这些系统,以便对这些循环进行系统的比较,并对系统进行多目标的优化。

使用由剑桥工程设计中心制定的多目标 Tabu 搜索算法优化了 3 个湿动力系统和 10 个系统参数。

根据他们的分析研究,剑桥大学的学者声称,在这些湿动力循环中, TOPHAT 循环具有最高的效率和比功, HAT 循环紧随其后,然后是 STIG 循环。

(吉桂明 摘译)

its minimum emission concentration of SO_2 at 720°C , 23.7% of that at 820°C . The corn stalk, wood sawdust and rice straw all attain their minimum emission concentration of SO_2 , 63.2%, 20.3% and 20.9% of those at 820°C respectively. In a range from 670°C to 920°C , the sulfur retention rate of the biomasses are between 10.93% and 89.2%. When the temperature is within a range from 670°C to 720°C , the sulfur retention rate of the biomasses are relatively high, reaching 44.15% to 89.20%. Key words: biomass combustion ash, sulfur retention

基于 GT-COOL 的质子交换膜燃料电池发动机冷却系统仿真 = Simulation of a Proton-exchange Membrane Fuel Cell Engine Cooling System Based on Software GT-COOL [刊, 汉] / LUO Ma-ji, ZHU Gao-hui (College of Automobile Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430070), ZHAN Zhi-gang, PAN Mu (National Key Laboratory on Material Synthesis New Technologies, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430070) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 561 ~ 564

By using software GT-COOL, established was a one-dimensional simulation model for a 30 kW proton-exchange membrane fuel cell engine cooling system. The model in question is mainly composed of a fuel cell stack, water pump, fan and radiator sub-model. By utilizing the model under discussion, simulated were the heat dissipation characteristics of the fuel cells of the cooling system at various operating conditions and performed was a comparison along with an analysis of the simulation results with the test data. The relative errors between the simulation results and the test ones are within a range of 5%, showing that the model being established is rational and feasible. Key words: proton-exchange membrane fuel cell, cooling system, simulation, circulating water temperature

阳极热解挥发分氢气和甲烷的析出特性研究 = Study of the Precipitation Characteristics of Anode Pyrolysis Volatile Component Hydrogen and Methane [刊, 汉] / ZHANG Li-qi, ZUO Yuan-ji, ZHENG Chu-guang (National Key Laboratory on Coal Combustion, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 565 ~ 569

Studied were the precipitation characteristics of anode pyrolysis volatile component hydrogen and methane. A pyrolysis test was performed of the anode samples on a miniature fixed bed and the influence of different temperature rise speeds and anode volumes (weights) on the precipitation of volatile component hydrogen and methane. The research results show that the precipitation of hydrogen and methane assumes a conspicuous dual peak distribution and the temperature difference between the peak values is about 230°C . With an increase of the temperature rise speed, the precipitation speed of the volatile component will increase and the peak value of the gas precipitation will shift to the high temperature side. However, the precipitation characteristics of both gases are basically kept unchanged. The precipitation dynamics of the gases, hydrogen and methane were analyzed by adopting Gaussian multi-peak method and the dynamic parameters for their release were obtained. Key words: anode pyrolysis, volatile content, hydrogen, methane, temperature rise speed