

# 基于 GT-COOL 的质子交换膜燃料电池发动机冷却系统仿真

## PEM Fuel Cell Cooling System Simulation Based on GT-COOL Software

罗马吉 朱高辉

(武汉理工大学汽车工程学院, 武汉 430070)

**摘要:** 本文运用GT-COOL软件建立了50kW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部分负荷工况、标定工况、过载工况三种情况下冷却系统的传热特性进行仿真, 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 $\pm 5\%$ 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, GT-COOL

**Abstract:** With the GT-COOL software, a one-dimensional simulation model was developed for the cooling system of a 50kW PEM Fuel Cell engine. The model includes submodels of fuel cell stack, water pump, fan and radiator. By the developed model, the heat transfer characteristics of the cooling system under three cases including part load, rated load and overload were simulated. All simulation results were compared with experimental data, which showed that the relative error can be correlated within 5%. It is confirmed that the developed simulation model for PEM fuel cell cooling system is reasonable.

**Keywords:** PEM Fuel Cell , Cooling system , Simulation

## 1 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, 理想工作温度约为65℃。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<sup>[1,2]</sup>, 而对冷却系统的研究主要集中在冷却系统试验研究<sup>[3]</sup>、水热管理系统设计研究<sup>[4]</sup>以及基于Simulink的温度控制模型研究<sup>[5]</sup>, 对冷却系统的建模和模拟研究较少。本文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建立燃料电池发动机冷却系统仿真模型, 通过对冷却系统工作过程的仿真, 分析冷却系统在不同工况下冷却

循环水温度的变化, 为实现对燃料电池发动机冷却循环水温度控制, 从而进一步提高燃料电池的性能提供基础。

## 2 燃料电池散热量分析

### 2.1 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。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<sup>[4]</sup>:

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

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

### 2.2 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:

$$\Delta Q_{conv} = c \times \rho \times V_{H_2O} \times (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

式中:  $c$ ——水的比热;  $\rho$ ——水的密度;  $V_{H_2O}$ ——水的体积流量;  $T_{out}$ ——电堆循环水出口温度;

$T_{in}$ ——电堆循环水入口温度。

## 3 冷却系统建模与仿真

本文以武汉理工大学自制的某 50kW 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。

### 3.1 燃料电池电堆模型

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, 只考虑其为热源, 燃料电池产生的热量直接由冷却水带走。

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 50kW 燃料电池发动机试验所得极化曲线如图 1 所示。由于在燃料电池发动机实际运行过程中, 其电压以及电流在一定范围内波动, 根据伏安特性图以及由公式(1)可以得到该燃料电池发动机在各个工况(部分负荷工况 20%, 40%, 60%, 80%; 标定工况以及过载工况: 120%)下的散热量。为了简化计算, 在本模型中其散热量取燃料电池发动机在其各个负荷情况下的平均散热量, 如图 2 所示。

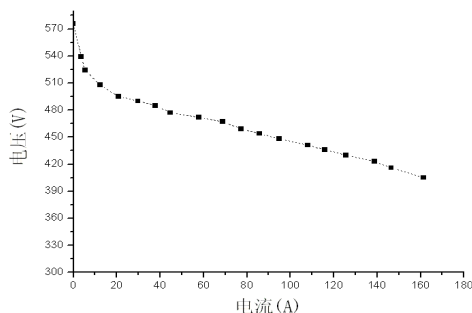


图 1 某 50kW 燃料电池发动机极化曲线图

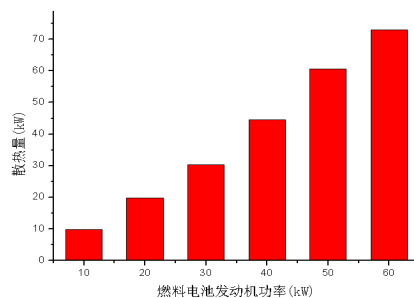


图 2 燃料电池发动机在各工况下的平均散热量

### 3.2 水泵模型

水泵的特性曲线由下列方程组描述：

$$V_{H2O} = V_0 - a(\Delta p)^b \quad (3)$$

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

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

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； $\Delta p$ ——压力升高量。

### 3.3 风扇模型

风扇模型与水泵模型类似，可用下述方程描述：

$$V = V_0 - a(p_r - 1)^b \quad (6)$$

式中： $V_0$ ——风扇最大的体积流量； $b$ ——压力上升指数； $p_r$ ——压力升高率。

### 3.4 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，即以下方程：

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

式中： $h$ ——传热系数； $A$ ——传热面积； $\Delta T$ ——流体温度与壁面温度差； $\rho$ ——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。

### 3.5 燃料电池发动机冷却系统模型

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。GT-COOL 建模过程中将各部件模块化，有针对性地对具体问题集中建模，这样既能考虑模型的多样性，又能提高模型的精度<sup>[6]</sup>。对流体的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。燃料电池发动机冷却系统模型如图 3 所示。尽管试验用冷却系统由 4 个相同的散热器组成，在不同工况下所开启的散热器个数是不同的，本文为了简化，在建模时只用了一个散热器模型，计算时采用当量风速考虑散热器的开启情况。

## 4 模型验证及分析

为了验证所建立的燃料电池发动机冷却系统模型，本文对课题组自制的某 50kW 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 1.0kg/s，环境温度 298K，风扇转速依据冷却循环水出堆温度进行调节，在燃料电池堆进出口均设有温度传感器，对进出堆冷却循环水温度进行监测，具体试验结果如表 1 所示。

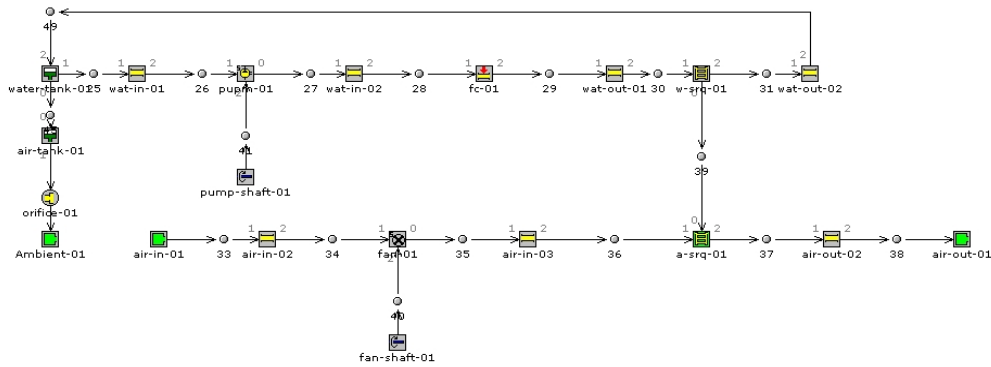


图 3 燃料电池发动机冷却系统 GT-COOL 模型

用上述模型对该 50kW 燃料电池发动机部分负荷工况、标定工况、过载工况进行模拟计算。本文以图 3 模型中管道模块 wat-in-02 出口温度为冷却水进堆温度，以 wat-out-01 出口温度为冷却水出堆温度。在实际试验过程中，冷却水温度随着散热量的变化而变化，所以我们仍以各工况下稳定时间内的平均出堆温度为冷却水出堆温度。根据本文所建立的冷却系统模型计算得到的冷却水出堆温度与实验数据对比如表 1 所示。由表可见，在合理设置冷却风扇当量转速和散热器换热系数经验常数的情况下，仿真结果与实验结果相对误差在±5%以内，表明所建模型是合理的。

表 1 冷却水出堆温度模拟计算与实验数据对比

工况点	功率(kW)	试验出堆温度 (°C)	模拟出堆温度 (°C)	误差率 (%)
1	10	43.3	44.6	3.00
2	20	49.2	50.5	2.64
3	30	56.7	57.2	0.88
4	40	58.3	59.0	1.20
5	50	62.9	64.5	2.54
6	60	62.8	63.7	1.43

从表 1 还可以看到,在低负荷工况下冷却循环水的出堆温度比较低,随着电堆负荷增大,电堆散热量增大,冷却循环水温度不断升高。电堆功率小于 30kW 时,冷却水温度随功率增大而上升的速率较快;电堆功率在 30~50kW 之间冷却水温度上升速率稍有减小。这是由于电堆功率增大时,电堆工作温度也提高,电堆的辐射散热量和尾气带走热量增大,通过冷却水的散热量所占比例下降,冷却水温度随功率升高的速率下降。当达到 60℃左右时需要开启风扇进行强制散热,最后将出堆温度控制在 63℃左右,这样可以保证燃料电池堆在较理想的情况下运行。

利用本文所建立的仿真模型的仿真结果与试验结果存在一定的误差,产生误差主要原因是:在模型中未考虑电堆本身辐射热以及尾气带走热量,根据电堆相关参数可得电堆辐射热量大概为 400W,尾气带走的热量大概为 1kW<sup>[4]</sup>;同时环境温度变化对于测试结果也有影响。另外,本文对冷却系统的四个散热器仅用一个散热器模型模拟,散热效果的模拟采用了当量风速,这种处理方法有待于进一步改进,可以考虑对这四个散热器分别建模,这样可以模拟散热器风扇是否开启的情况。

## 5 结论

本文基于传统汽车发动机冷却系统设计与分析软件 GT-COOL 初步建立了 50kW 燃料电池发动机冷却系统仿真模型,并对燃料电池部分负荷工况、标定工况、过载工况进行了模拟计算,仿真结果与实验结果相对误差在±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分析,为燃料电池发动机冷却系统设计提供依据。

## 6 参考文献

- [1] Cheng Bao Minggao Ouyang Baolian Yi. Analysis of the water and thermal management in proton exchange membrane fuel cell systems. *International Journal of Hydrogen Energy*,2006,31:1040–1057.
- [2] Satish G. Kandlikar, Zijie Lu. Thermal management issues in a PEMFC stack – A brief review of current status. *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. *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. *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. *系统仿真学报*,2005, 17(3):548–551
- [6] GT-COOL USER MANUAL VERSION 6.2, 2006