

# 质子交换膜燃料电池系统的设计及计算

徐蓉辉，袁伟

(华南理工大学机械与汽车工程学院，广东广州510640)

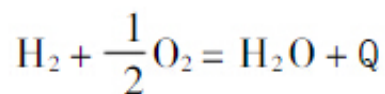
摘要：介绍了质子交换膜燃料电池(PEMFC)系统的设计及计算，根据华南理工大学50kW燃料电池电站的设计参数，计算了供气量及空气和氢气加湿量，提出了一整套详细的包括供气系统、加湿系统、水热管理系统、安全控制系统在内的燃料电池电站设计方案。

随着传统能源储量的不断减少及其利用方式所造成的环境污染的不断增加，人类必须尽快寻找开发能替代传统能源的新能源。而被称为第四代发电技术的燃料电池，由于其发电效率高、无污染而倍受人们的关注。燃料电池是一种基于氢能的能量转换装置，它可以连续地将氢气和氧化剂(纯氧或空气)通过电化学反应直接转换成电能。科学家预测，氢能有可能成为21世纪替代传统能源的清洁能源。因此，开发燃料电池在能源领域具有重要的意义。

## 1 工作压力及反应气

燃料电池的工作压力通常都是在0.4MPa以下，最低压力为大气压。就理论而言，要想获得高的功率密度，质子交换膜燃料电池(PEMFC)必须在较高的工作压力下运行，但是如果工作压力过大，可能会导致电堆核心部件——质子交换膜因负荷过大而受损。由于燃料电池的工作压力和反应气通过电堆后压力降对于各个燃料电池都是不同的，通常根据燃料电池的不同工况提供压力可控的气源。另外，氧化剂采用纯氧，电池的功率密度明显高于采用空气，但实际应用中考虑到经济性和方便性，所设计的燃料电池电站采用空气作为氧化剂，以净化重整气(纯度99.9%)代替纯氢，系统工作压力为0.25MPa。

燃料电池总的化学反应式：



$$P = n_2 U_0 I = n_2 U_0 \frac{n_1 e}{t}$$

式中：Q))) 化学反应热，J P))) 电堆设计输出功率，kW；U<sub>0</sub>))) 单层设计输出电压，V；e))) 电子电量，1.6 × 10<sup>-19</sup> C；t))) 时间，s；n<sub>1</sub>))) 单层反应转移的电子数；n<sub>2</sub>))) 电堆层数。

按照电堆设计输出功率50kW计算，同时单层设计电压选取0.5V，但实际电压在0.7V左右，这样处理只是为了放大氢气的流量。理论上为达到50kW的输出功率每小时反应所产生的氢离子数：

$$N = n_1 n_2 = \frac{P t}{U_0 e} = 2.250 \times 10^{24}$$

氢消耗量:

$$m_H = \frac{N}{6.02 \times 10^{23}} = 3.738 \text{ kg/h}$$

氧消耗量:

$$m_O = \left(16 \times \frac{1}{2}\right) m_H = 29.900 \text{ kg/h}$$

由此计算氢气的体积流量:

$$V_{H_2} = 697.760 \text{ L/min}$$

氧气的体积流量:

$$V_{O_2} = 348.833 \text{ L/min}$$

空气的体积流量:

$$V_{air} = 1.662 \text{ m}^3/\text{min} (\text{理论值})$$

实际所需空气体积流量是理论值的1.5倍以上，取2.583m<sup>3</sup>/min，未反应完的空气直接排入大气。

## 2供气系统设计

### 2.1空气供给系统

空气供给系统为燃料电池电站提供压力和流量可控的气源，其中供气系统包括空气压缩机、储气罐、冷冻式干燥机、空气减压阀、电动调节阀、空气流量计、空气加湿器以及湿度传感器、温度传感器和压力传感器等，整个系统流程如图1所示。

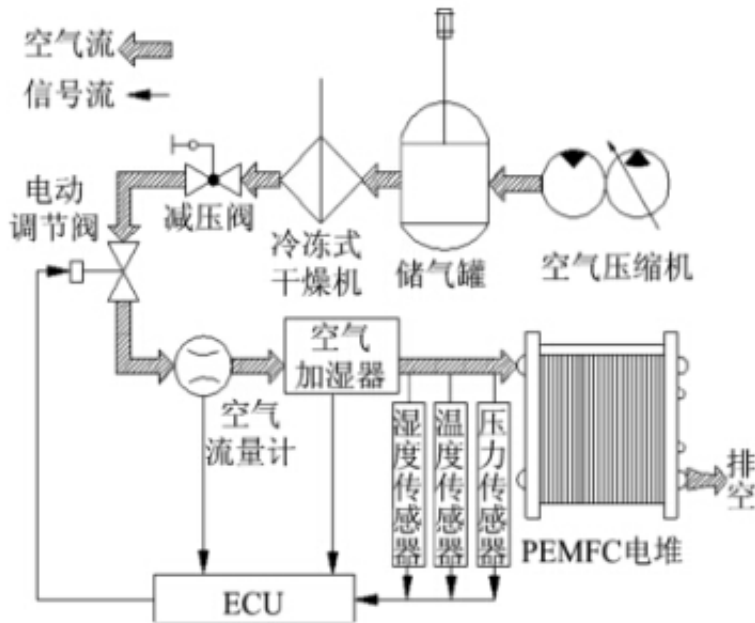


图 1 空气供给系统流程图

此空气供给系统中，空压机采用斯可络公司的螺杆式空压机，最大空气流量达 $3.1\text{m}^3/\text{min}$ ，最高工作压力为 $0.7\text{MPa}$ ，大于 $50\text{kW}$ 燃料电池电站设计流量 $2.583\text{m}^3/\text{min}$ 和设计压力 $0.25\text{MPa}$ ，故可以满足系统运行要求。管路中空压机提供的气体通过减压阀将压力降低到工作值，供气系统中的电动调节阀实际上是一个小型的步进电机，可以通过调节电动执行器的蜗杆位置来控制阀的开度，从而控制空气的流量。空气流量计安装在加湿器的入口前，它与电动调节阀构成了简单的闭环控制，以精确控制空气的流量。湿度传感器、温度传感器和压力传感器采集空气在进入电堆前的各项物理参数，确保空气供给系统运转正常。

## 2.2 氢气供给系统

氢气供给系统中，采用重整气(纯度 $99.9\%$ ，压力 $0.4\text{MPa}$ )，氢气经过减压阀后压力降为 $0.2\sim 0.25\text{MPa}$ 再经由氢气电磁阀、电动调节阀、氢气流量计及氢气加湿器进入电堆，流程如图2所示。

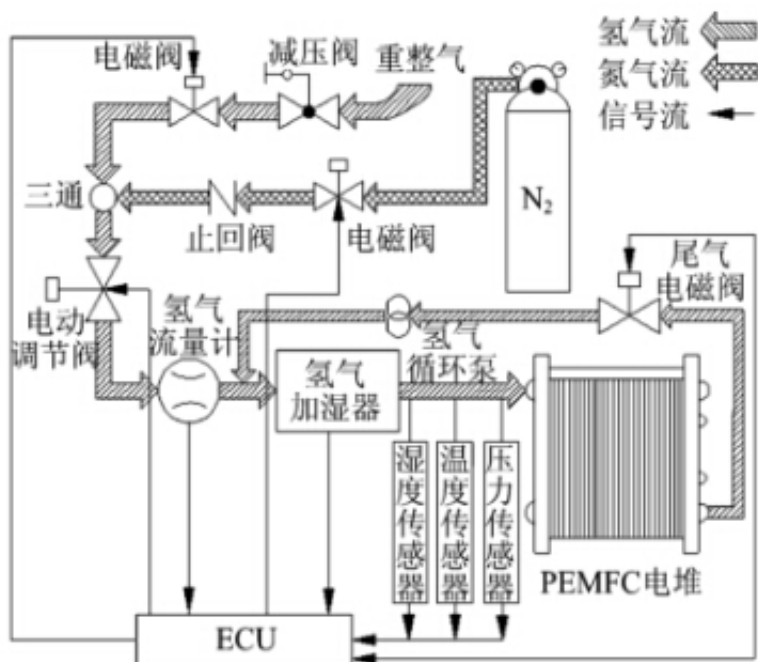


图 2 氢气供给系统流程图

由于在实际运转过程中，空气总是过量的，燃料的消耗率主要是指氢气的消耗率，由于氢气较为昂贵，且氢气直接向外界排放存在严重的安全隐患，因此设置了一个氢气循环泵，用于把反应后的残余氢气重新泵入氢气供给管路。此外，系统中还专门设置了氮气扫气支路，它与氢气支路相并联，其作用是在燃料电池发动机启动前和关机后执行扫气流程，将管路中残存的氢气清除，以免残余氢气和空气混合产生危险。

### 3加湿系统设计

PEMFC的运行模拟和试验分析表明：随着电流密度的提高，电池内阻会明显增大、工作电压急剧下降，其原因主要是由于电池内失去水平衡，没有满足膜的润湿条件。保持PEMFC中的水平衡往往是提高电池性能和寿命的关键因素之一。为了使50kW质子交换膜燃料电池所需的氢气和空气达到湿度的要求，所需的加湿量计算如下：

#### (1)空气加湿量

若空压机入口温度为  $25^{\circ}\text{C}$ 、压力为  $P_b = 0.1 \text{ MPa}$ 、饱和蒸汽压为  $P_s = 0.003168 \text{ MPa}$ 、相对湿度  $\leq 60\%$ ，则空压机入口每  $1 \text{ kg}$  空气的含湿量:

$$d_1 = 0.01205 \text{ kg}$$

入堆空气的温度为  $70^{\circ}\text{C}$ 、压力为  $P_b = 0.25 \text{ MPa}$ 、饱和蒸汽压为  $P_s = 0.0311 \text{ MPa}$ 、相对湿度  $\leq 100\%$ ，则进入电堆每  $1 \text{ kg}$  空气的含湿量:

$$d_2 = 0.08837 \text{ kg}$$

则对每  $1 \text{ kg}$  空气需要的加湿量

$$\Delta d = 0.07632 \text{ kg}$$

由于空气的体积流量取  $V_{Q_{\text{air}}} = 155 \text{ m}^3/\text{h}$ ，干空气密度为  $1.029 \text{ kg/m}^3$ ，则入堆空气的质量流量为:  $m_{\text{air}} = V_{Q_{\text{air}}} \cdot \rho_{\text{air}} = 159.495 \text{ kg/h}$ ，最后得到空气的加湿量是  $G_{\text{air}} = m_{\text{air}} \cdot \Delta d = 12.173 \text{ kg/h}$ 。

#### (2) 氢气加湿量

由于采用了高纯度的氢气 ( $99.9\%$ )，认为氢气进入加湿器前含湿量为 0。取进入电堆前氢气的温度  $70^{\circ}\text{C}$ 、压力为  $P_b = 0.25 \text{ MPa}$ 、相对湿度  $\leq 100\%$ ，并假设其饱和蒸汽压和空气相同，同理计算每  $1 \text{ kg}$  氢气需要的加湿量  $\Delta d = 0.08837 \text{ kg}$ 。由于  $V_{\text{H}_2} = 41.866 \text{ m}^3/\text{h}$ ，干氢气的密度  $\rho_{\text{H}_2} = 0.0899 \text{ kg/m}^3$ ，则氢气加湿量是  $G_{\text{H}_2} = V_{\text{H}_2} \cdot \rho_{\text{H}_2} \cdot \Delta d = 0.3326 \text{ kg/h}$ 。

#### 4 燃料电池电站水热管理系统设计

燃料电池电站工作中，电堆中的化学反应会产生大量的热量，如果不能及时散发，那么过多的热量积累必将导致电堆内温度的升高、质子交换膜的失水、电堆性能的下降。运行中的 PEMFC 电堆热量来源主要有化学反应热、焦耳热（来源于欧姆极化）、加湿气体带来的热量和吸收的环境辐射热；电堆散热主要渠道有电堆尾气、热辐射、循环水冷却、电堆的热平衡。

为了平衡  $50 \text{ kW}$  燃料电池的反应热，设计方案选择耐热循环水泵以及储水箱构成冷却循环水系统。在冷却水循环部分中，冷却水由水箱通过冷却水泵进入电堆，流出电堆后进入氢气加湿器加湿氢气，然后通过散热器散热后流回水箱。

。此循环回路中，在电堆的循环水进口、出口处及水箱中分别设置温度传感器，以检测进出电堆的循环水温和水箱内的水温；在电堆前专门设置一个电导率传感器，以监测进入电堆的循环水电导率；由于进入电堆的循环水要求有较小的电导率，因此循环水必须使用脱离子水，在冷却水泵出口处接一个离子交换器，用于缓和循环水中离子量的增加。

此外，由于水箱中的水会不断减少，需设置液位传感器。电堆工作时，ECU根据温度传感器、水流量计传回的信号来控制冷却水泵的流量，将循环水的进堆水温控制在70e左右，出堆水温控制在80e左右，从而维持电堆内部的热平衡，使电堆高效、稳定运行。为安全起见，冷却水的电导率必须控制在0~200Ls/cm以下，一旦电导率传感器检测到冷却水的电导率超过规定值，ECU将发出报警信息，提前再生水循环或者更换冷却循环水。

## 5安全控制系统的设计

通过各个传感器、ECU和执行元件来完成对氢气供给系统、空气供给系统和水/热管理系统的控制，以满足负载变化对电池电站功率的要求。为了电堆电站运行的安全，必须在开机前先用N<sub>2</sub>对整个系统进行一次扫气，以清除管路中的残余氢气；为防止质子交换膜两侧的气体压力升高速度太快，对氢气供给系统电动调节阀的开启状况和空气供给系统电动调节阀的开启状况进行调节，使其压力升高速率按一定规律进行；在系统中设置H<sub>2</sub>传感器和电导率传感器，当探测到有H<sub>2</sub>泄漏或冷却循环水电导率过高时，立即通过ECU发出信号，切断H<sub>2</sub>系统和空气系统入口电磁阀；当氢气、空气供给系统中的压力差过高时，应立即切断氢气和空气的供给。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/99145.html>