

白皮书

# 使用系统级设计来设计燃料电池系统

在 Simulink 和 Simscape 中建模和仿真

本白皮书介绍了如何使用 Simulink® 和 Simscape™ 设计和仿真用于电动出行的燃料电池系统。它将举例说明 Simulink 和 Simscape 如何协助实现以下目标：

- 燃料电池系统的多域物理建模和仿真，包括热、气体和液体系统。
- 不同的建模保真度级别。

几十年来，燃料电池一直用来为各种应用提供动力。燃料电池在美国太空计划中的应用就是其中一个例子。如今，氢动力燃料电池被认为是绿色出行转型的基石之一。

燃料电池的应用由来已久，这意味着它是一项业经验证的成熟技术，但是，要将其部署为用于电动出行的动力源会带来诸多挑战，例如对车辆效率和续航里程的影响。

燃料电池电动汽车 (FCEV) 的驱动系统包含来自不同工程领域（涵盖电气、控制、机械、热力学甚至化学领域）的多个组件，用于共同控制气体通过燃料电池膜的扩散。这些组件无论是单独设计，还是作为一个整体来设计，都将会影响车辆的性能。针对设计进行建模和优化，将有助于测试各种工况，缩短开发时间，并且降低成本。

本白皮书介绍了如何使用 Simscape 设计和参数化燃料电池模型及其支持系统（辅助设备）。该模型使用了 Simscape Fluids™ 附带的自定义膜电极组 (MEA) 模块 `FuelCell.ssc`，以及专为燃料电池建模设计的自定义多组分气体域。

这一模型基于聚合物电解质膜 (PEM) 燃料电池。该燃料电池以其低工作温度、低压和高效率的特点，成为出行应用中最常用的一种燃料电池。该模型还包含辅助设备组件。

## 为何使用燃料电池模型？

在各设计阶段，使用燃料电池模型而非传统的硬件原型具有诸多好处。您可以比较设计变体，进行权衡研究，以及选择组件并调整其大小，以实现所需的性能。在初始模型建立后，可以优化参数并确定最佳操作策略。

## 燃料电池模型的用途

燃料电池模型有许多用途，包括：

- 选择组件并调整其大小
  - 使用不同的设计变体进行权衡研究
  - 优化参数和操作策略

- 设计和验证控制算法
  - 执行热管理和湿度管理
  - 控制压力
- 分析性能
  - 分析蓄电池与燃料电池之间的能量流
  - 使用驾驶配置文件确定 FCEV 的续航里程

仿真的优点如下：

- 缩短开发时间
- 扩大测试工况范围
- 降低测试成本

使用此类模型，还能设计和验证控制算法和逻辑以及系统，甚至在获得硬件之前也可进行。您可以从一个简单模型开始，逐渐完善控制策略与整个系统。

当系统设计完成并得到验证后，您便可以通过代码生成来实现组件。MATLAB®、Simulink 和 Stateflow 提供了 C/C++、HDL 和结构化文本代码生成功能，它们可在任何处理器、FPGA 或 PLC 上运行。特别是对于汽车应用，这些代码生成功能还包括支持符合 AUTOSAR 标准的工作流。

使用仿真模型，可以探索燃料电池的各种工况，包括使用硬件原型时可能不切实际或不安全的工况。此外，还可以分析燃料电池系统的整体性能，例如确定蓄电池与燃料电池堆之间的能量流，以及估算 FCEV 的续航里程。借助从仿真中获得的见解，可以开发出更好的硬件原型，从而提高有效性并降低测试成本。

## 定义燃料电池模型

大到整个燃料电池系统的行为，小到混合气体的热力学和扩散特性，均可被 Simscape 模型系统捕获。在水热领域，该模型还可用于温度管理和加湿。

下面的模型（图 1）使用自定义库和自定义 Simscape 域进行多组分气体建模。膜电极组是一个使用 Simscape 代码设计的自定义组件，该组件可以根据具体需求加以调整。

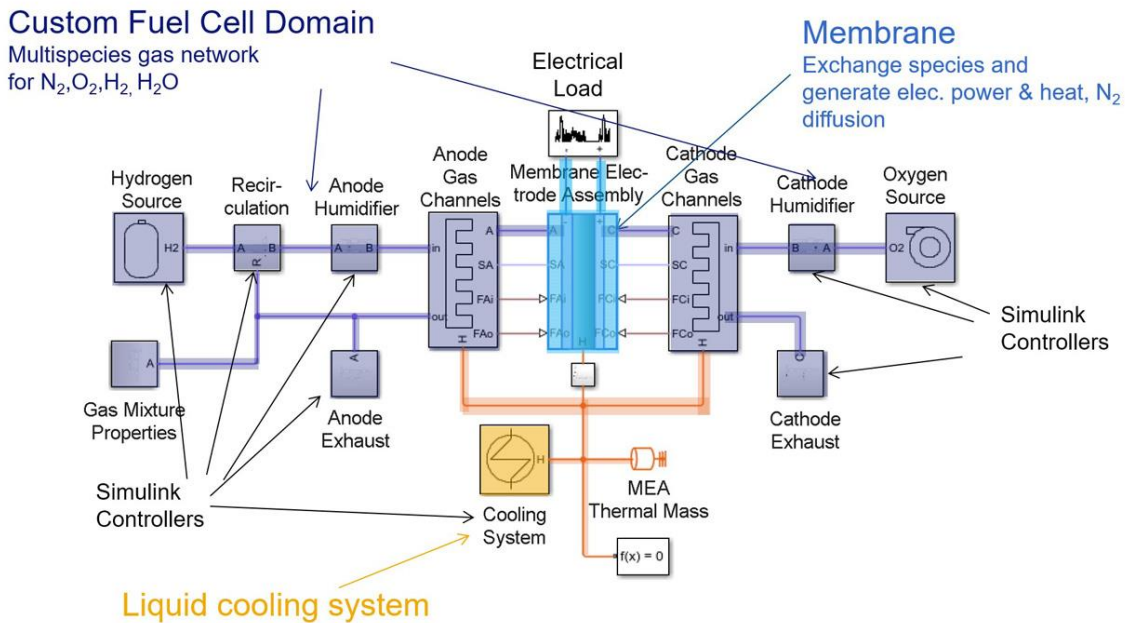


图 1.采用自定义燃料电池域的燃料电池系统，包括膜模型。

有关详细信息，请参阅此示例：[PEM 燃料电池系统。](#)

用淡紫色突出显示的部分代表自定义燃料电池域。该域解决了燃料电池系统作为多组分气体网络所带来的特殊复杂性问题。下面四种不同气体组分混合物的热力学和流体特性需要加以考虑：氮气 ( $N_2$ )、氧气 ( $O_2$ )、氢气 ( $H_2$ ) 和水蒸气 ( $H_2O$ )。

用蓝色突出显示的膜采用 Simscape 语言编写，该语言将在本文末尾进行简要介绍。膜模型依据法拉第定律和能斯特方程并通过膜与电池堆供电的电气负载的连接来计算电气行为。根据其属性，该模型还考虑到了氮气的扩散，这是净化策略设计中的一项重要能力，而这些净化策略反过来又是优化效率和功率输出并确定所需电池大小不可或缺的内容。

橙色部分表示热管理系统。燃料电池堆需要在大约  $80^\circ C$  的温度下工作，它们会产生废热，因此，需要使用冷却器、热交换器、泵及用于冷启动的加热器等辅助设备来进行热管理。

燃料电池系统的许多组件都需要不同类型的控制器，如图 1 所示。

## 燃料电池模型的组件

Simscape 提供了多个选项，用于在不同保真度级别对燃料电池建模。下一节将介绍如何选择合适的保真度级别。我们可将来自不同工程领域的各种组件与其各自的控制器一起精确建模。

燃料电池的基本组件包括：

- 氢源
- 再循环系统
- 加湿器
- 阳极
- 排放和净化系统

### 氢源

氢源由储氢罐、减压阀和管道组成（图 2）。储氢罐构成了一个定容室，这个概念贯穿于整个模型。图 2 还显示了储氢罐模块的参数列表。由于储氢罐中只储存氢气，因此，只有第三种组分氢气的初始摩尔分数（显示为红框，涵盖所有四种组分）设置为 1。这些组分的固定顺序是氮气、氧气、氢气和水蒸气。在整个建模过程中，我们将不断寻找这个向量。

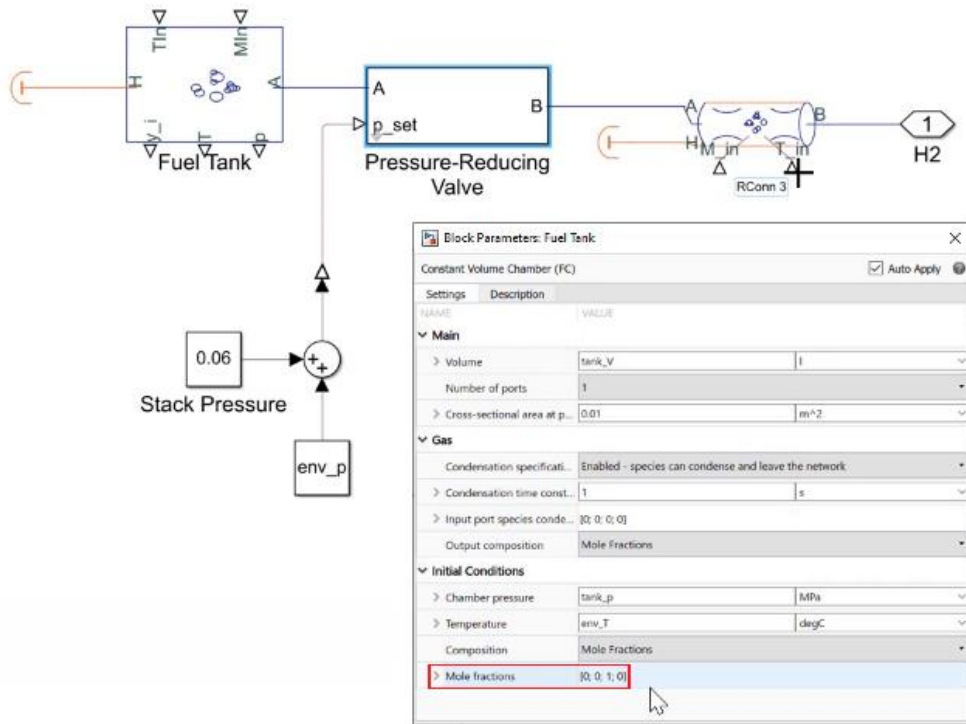


图 2.带有减压阀和控制器的储氢罐。

储氢罐在一定温度 ( $T_{In}$ ) 下获得外部质量流量 ( $M_{In}$ )。它有一个热连接端口 (H, 左), 在这种情况下处于隔热状态, 还有一个端口 (A), 将它连接到下一个单元, 即减压阀。此外, 储氢罐还具有压力 ( $p$ ) 和温度 ( $T$ ) 的测量输出, 以及涵盖全部四种组分的摩尔分数 ( $y_{i,j}$ )。连接的阀门可将储氢罐中的氢气压力 (约 700 巴) 降至燃料电池堆所需的 1.6 巴。阀门的端口 B 连接到一个管元件 (具有质量流量 ( $M_{In}$ ) 和温度 ( $T_{In}$ ) 输入), 以及一个热端口 (但这里并没有使用)。

## 再循环

之所以对再循环（图 3）建模，原因是并非所有氢气都在阳极中使用。未使用的氢气将进行再循环，而不是排放到外部环境中。再循环元件是一个带有三个端口的定容室。与端口 B 相连的是一个引射器，它带有一个控制器，可根据堆（ $i_{stack}$ ，左下）中电气负载使用的电流控制从 (R) 到定容室端口 (B) 的流量。

通过再循环模型，您可以了解更改新鲜氢气与从阳极回流的已用气体的比例对效率产生的影响。

在下一节中，使用 Simulink 和 Simscape 的仿真将帮助验证设计和控制器。您可以在使用硬件构建系统原型之前全面探索设计的各种可能性。

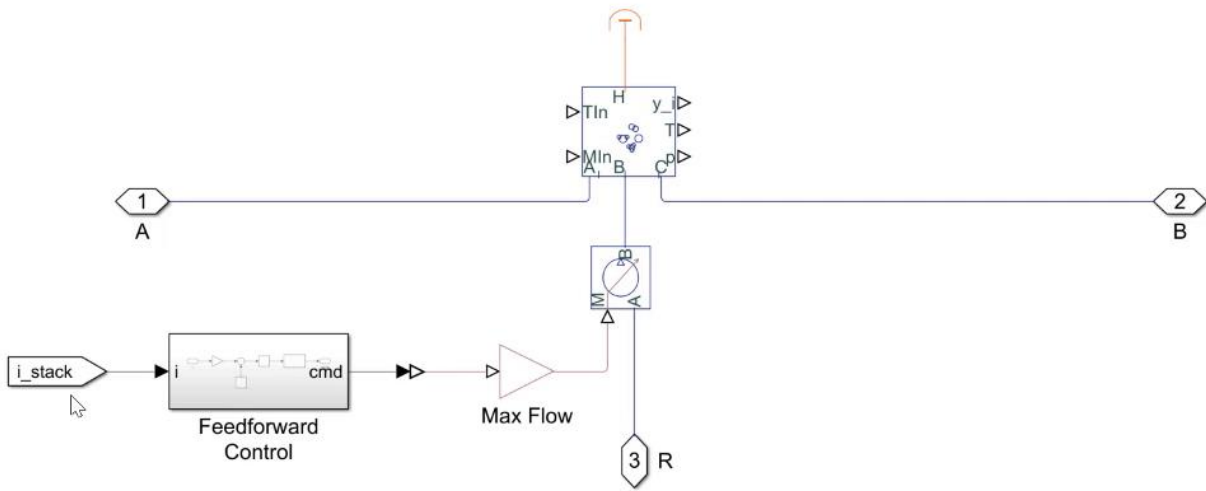


图 3.带有控制器和阀门的再循环。

## 加湿器

阳极的加湿器连接到再循环系统的端口 (B) (图 4)。在工作过程中，膜需要保湿，否则将会受损。为此，加湿器会通过向  $M_{in}$  上方的管道中注入水蒸气，使进入阳极的混合气体保持在 100% 的相对湿度。

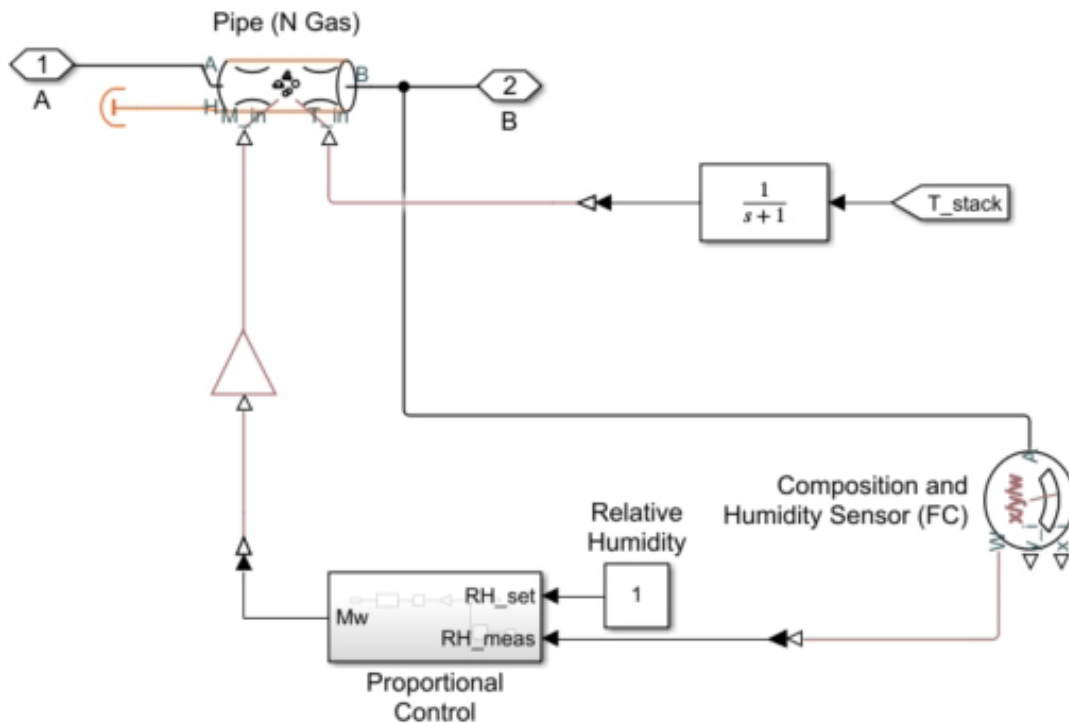


图 4.加湿器元件，包括连接到膜的成分和湿度传感器。

连接到膜的成分和湿度传感器，用于连续测量所有组分的质量 ( $x_i$ ) 和摩尔 ( $y_i$ ) 分数，而比例控制器则根据需要向混合物中加水。除了质量流量 ( $M_{in}$ ) 以外，还可以使用传递函数 (右上)，该函数可根据当前电池堆温度确定加入的水蒸气的温度。



## 阳极

在阳极（图 5）中，氢气被分解成质子和电子，这在化学上称为氧化。质子通过膜到达阴极。电子流过外部电路，产生电流，为连接的负载供电。

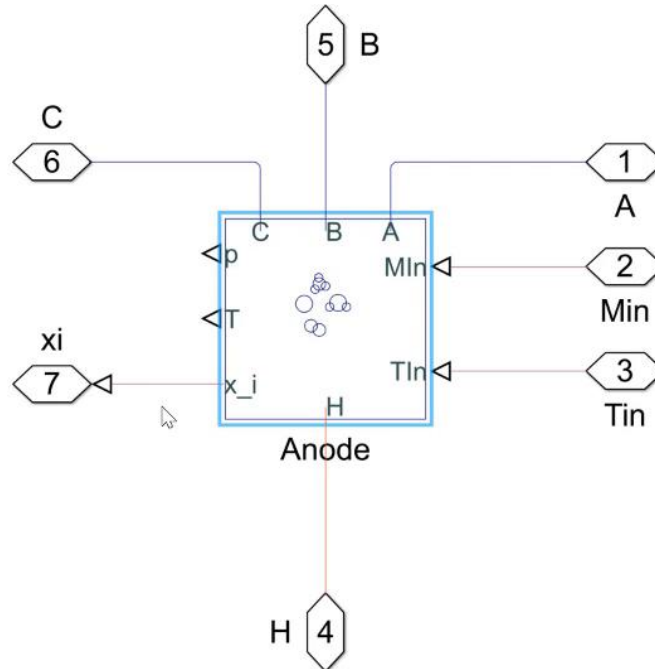


图 5.阳极气体通道子系统。

阳极也可以作为一个定容室来建模。它的输入位于端口 (C)，气体从端口 (B) 离开。端口 (A) 用于读取膜处的温度和压力，没有流量经过这个元件。端口 (Min) 和 (Tin) 用于控制从膜流出的流量。端口 (H) 用来与冷却/加热系统交换热量。端口 (x\_i) 用于获取各个气体组分的质量分数。

## 排放和净化系统

在工作期间，除了质子和水外，氮气也会通过燃料电池膜。氮会在阳极上积聚，这会降低氢燃料利用率，从而导致功率输出下降。为了减轻这种影响，燃料电池系统在阳极端采用了一种排放装置来净化系统。

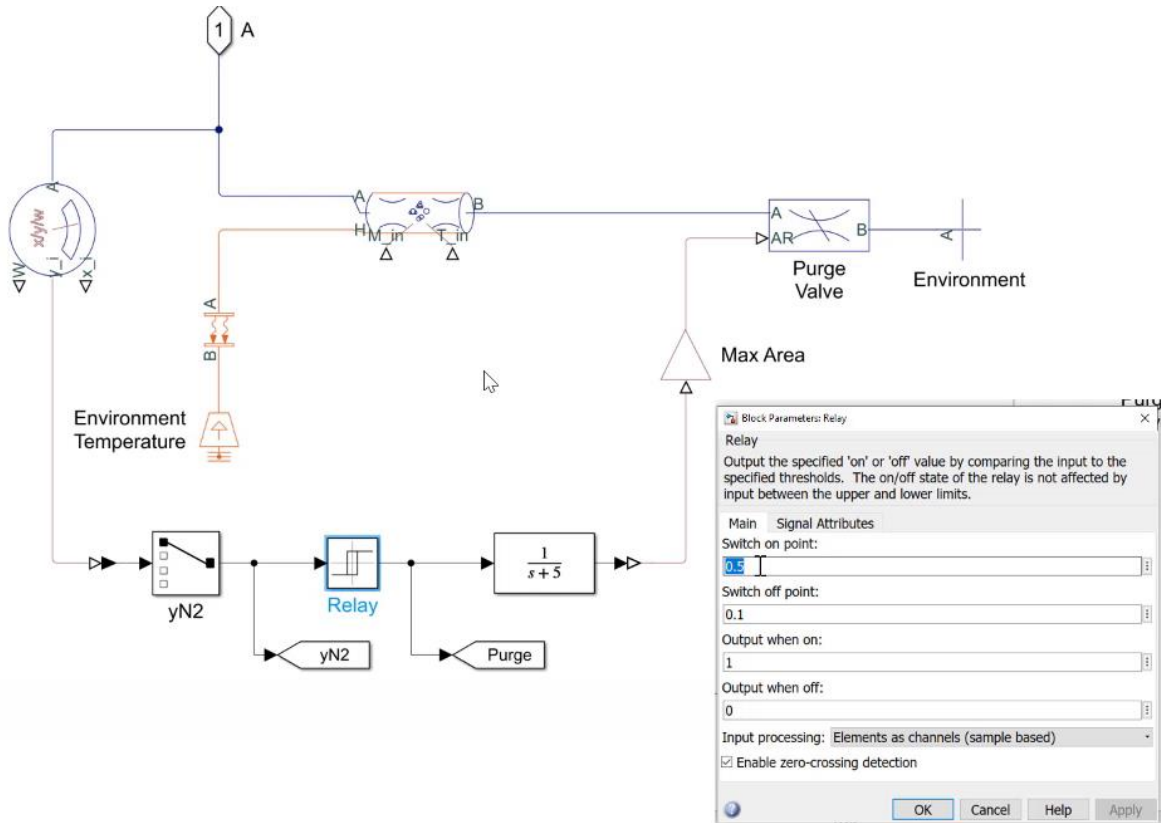


图 6.带有净化继电器的阳极排放装置。

在上例中，一旦氮气含量达到 0.5 的摩尔分数（继电器模块参数中的开启点，如图 6），继电器就会净化回流；当氮气含量达到 0.1 的摩尔分数（继电器模块参数中的断开点）时，回流将会停止。当净化过程启动时，净化阀将完全打开。当净化过程停止时，净化阀将完全关闭。

## 验证控制器策略：净化示例

您可以使用 Simscape 来验证该系统中的控制器操作。在仿真过程中，Simscape 会记录所有模块的输出。这些输出可以在 Simscape 结果浏览器中查看（图 7）。

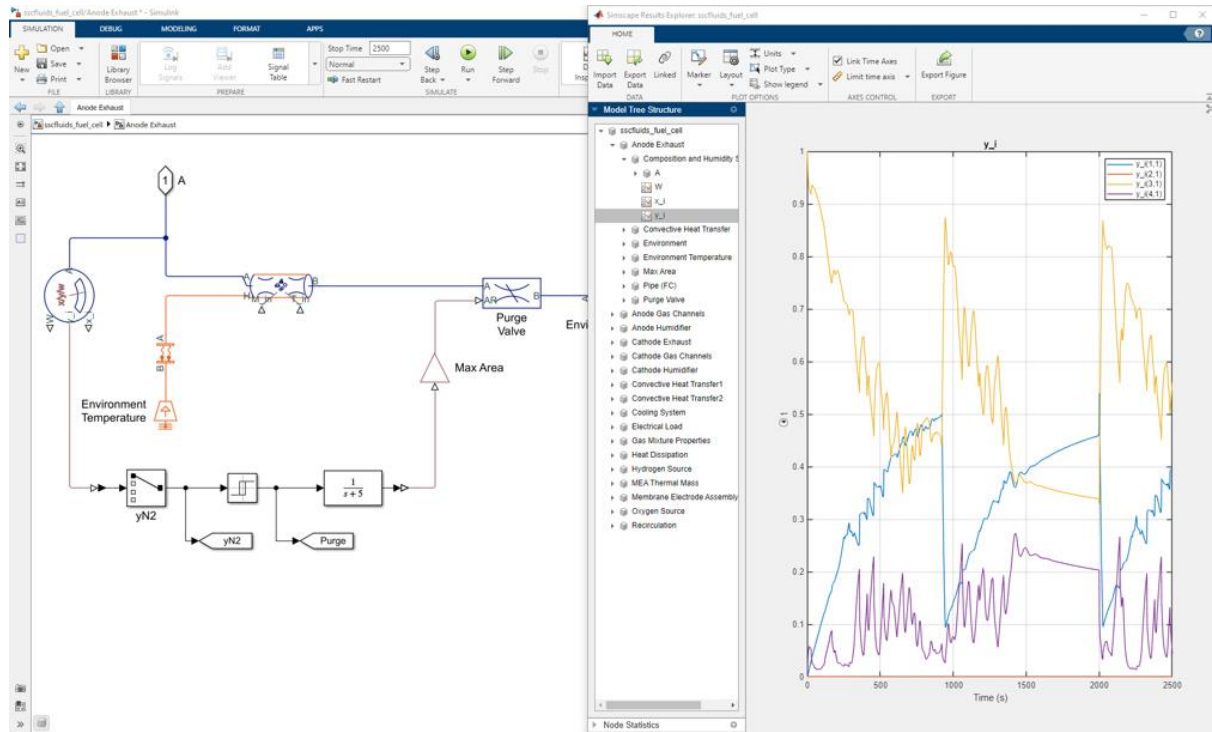


图 7.净化元件（左）以及 Simscape 结果浏览器中的仿真结果。

这里，我们看到的是在工作期间，阳极排放系统中成分和湿度传感器端口 (A) 处气体组分的摩尔分数 ( $y_i$ )。氮气含量（蓝色线）在开始时为零。随着氮气含量的上升，氢气的摩尔分数（黄色线）呈现下降趋势。当氮气的摩尔分数达到 0.5 时，净化过程启动，并按要求在 0.1 时停止。

同时，我们观察到水的摩尔分数（紫色线）在加湿器的控制下也在变化。最后，氧气的摩尔分数（橙色线）保持为零，这是一个好结果，因为我们可不希望氢氧一起出现在电池的同侧。仿真结果可用于直观地检查净化策略是否有效，从而对控制器进行验证。

## 进气

阴极模块（未显示）与图 5 所示的阳极看似一样，也具有相同的端口和输入。在阴极中，作为反应物的氧接受流过外部电路的电子，与穿过膜的质子发生反应，从而形成水。

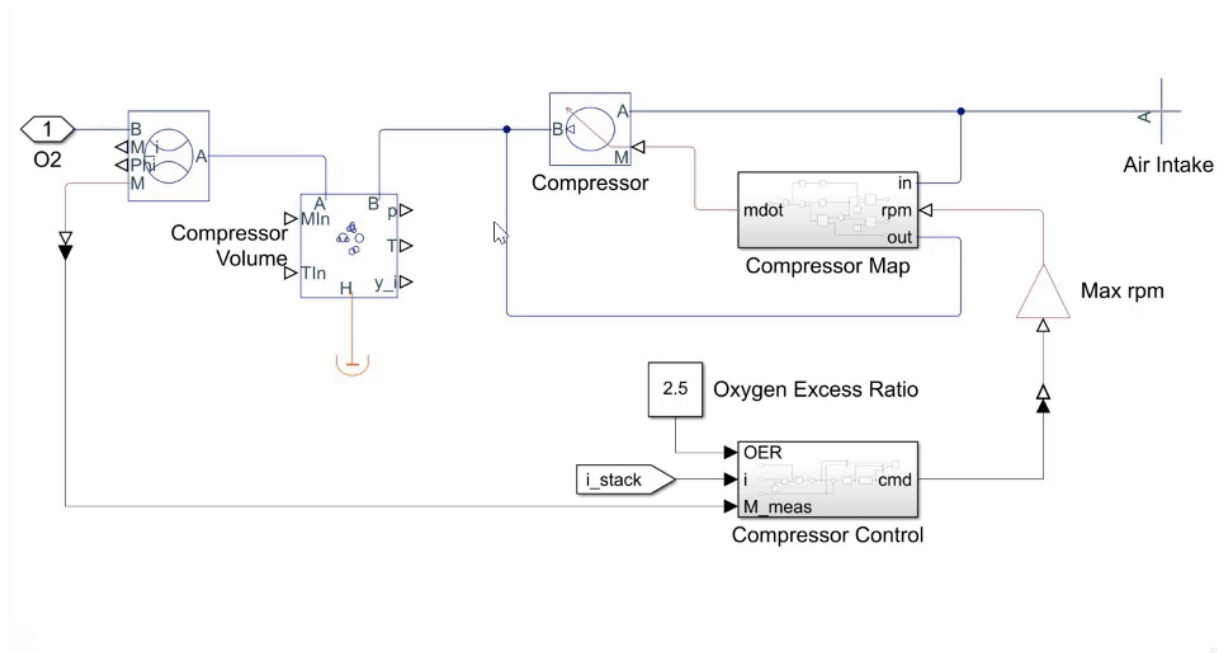


图 8.带有控制器的进气压缩机。

燃料电池系统的阴极侧与阳极侧不同，因为阴极侧在环境压力下吸入空气，因此需要一台压缩机使其达到电池堆内所需的压力（图 8）。压缩机有自己的控制器，该控制器根据电气负载 ( $i_{stack}$ ) 所需的电流进行操作。鉴于空气就是现成的资源，不需要任何再循环和净化系统。因此，只需排放即可。

## 冷却系统

冷却系统连接到阳极、阴极和膜（图 9）。液体冷却以其高效性成为理想的选择。该系统由一个水箱、一个泵、一个热交换器、一个散热器和一个泵控制器组成。泵控制器根据电池堆温度进行控制，该温度的设定值为 80°C。

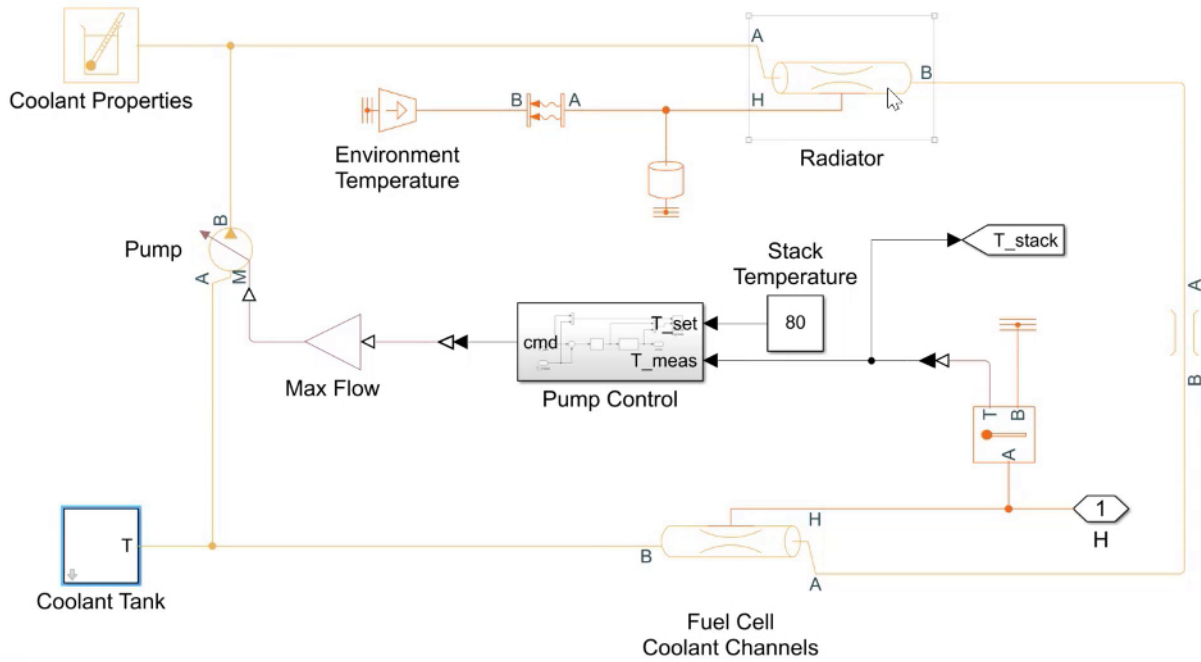
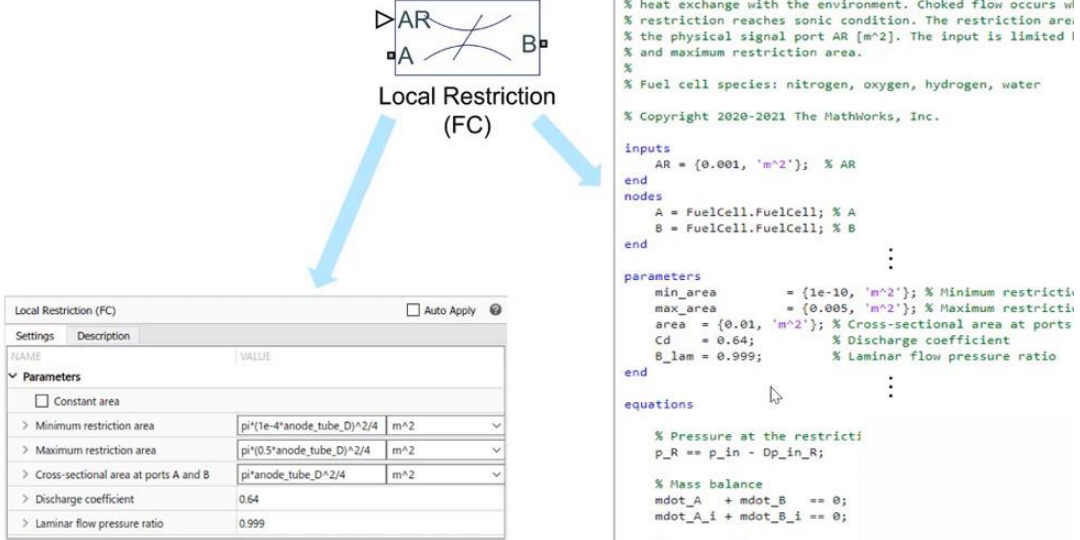


图 9.液体冷却系统。

## Simscape 语言：自定义组件和域的建模

您可以使用 Simscape 语言为自己的自定义组件和域建模，该语言基于 MATLAB，支持创建 Simscape 模块，这些模块可以像任何其他库模块一样使用（图 10）。为了简单起见，这里使用的示例是自定义燃料电池域中的局部限制模块。

### Example: Local Restriction within Fuel Cell Domain



The diagram shows a 'Local Restriction (FC)' block with three ports: 'AR' (input), 'A', and 'B'. Below the block, two blue arrows point to a parameter settings window and a code editor. The parameter settings window shows a table of parameters:

NAME	DESCRIPTION	VALUE
<b>Parameters</b>		
<input type="checkbox"/> Constant area		
> Minimum restriction area		$\pi^2(1e-4 \cdot \text{anode\_tube\_D})^2/4$ m <sup>2</sup>
> Maximum restriction area		$\pi^2(0.5 \cdot \text{anode\_tube\_D})^2/4$ m <sup>2</sup>
> Cross-sectional area at ports A and B		$\pi^2 \cdot \text{anode\_tube\_D}^2/4$ m <sup>2</sup>
> Discharge coefficient		0.64
> Laminar flow pressure ratio		0.999

The code editor shows the following code:

```
component LocalRestriction
% Local Restriction (FC) : 1.5
% This block models the pressure loss due to a flow area r...
% as a valve or an orifice in a fuel cell network. There i...
% heat exchange with the environment. Choked flow occurs w...
% restriction reaches sonic condition. The restriction are...
% the physical signal port AR [m^2]. The input is limited...
% and maximum restriction area.
%
% Fuel cell species: nitrogen, oxygen, hydrogen, water
% Copyright 2020-2021 The MathWorks, Inc.

inputs
AR = {0.001, 'm^2'}; % AR
end
nodes
A = FuelCell.FuelCell; % A
B = FuelCell.FuelCell; % B
end
parameters
min_area = {1e-10, 'm^2'}; % Minimum restricti...
max_area = {0.005, 'm^2'}; % Maximum restricti...
area = {0.01, 'm^2'}; % Cross-sectional area at ports...
Cd = 0.64; % Discharge coefficient
B_lam = 0.999; % Laminar flow pressure ratio
end
equations
% Pressure at the restricti...
p_R == p_in - Dp_in_R;
% Mass balance
mdot_A + mdot_B == 0;
mdot_A_i + mdot_B_i == 0;
```

图 10.使用 Simscape 语言开发的局部限制模块组件。

源代码（图 10，右）以 `component` 或 `domain` 开头，后跟名称。该代码中可能包含模块描述，然后是它所使用的输入：AR 及其节点（A 和 B），以及可以使用参数封装配置的参数（左下）。

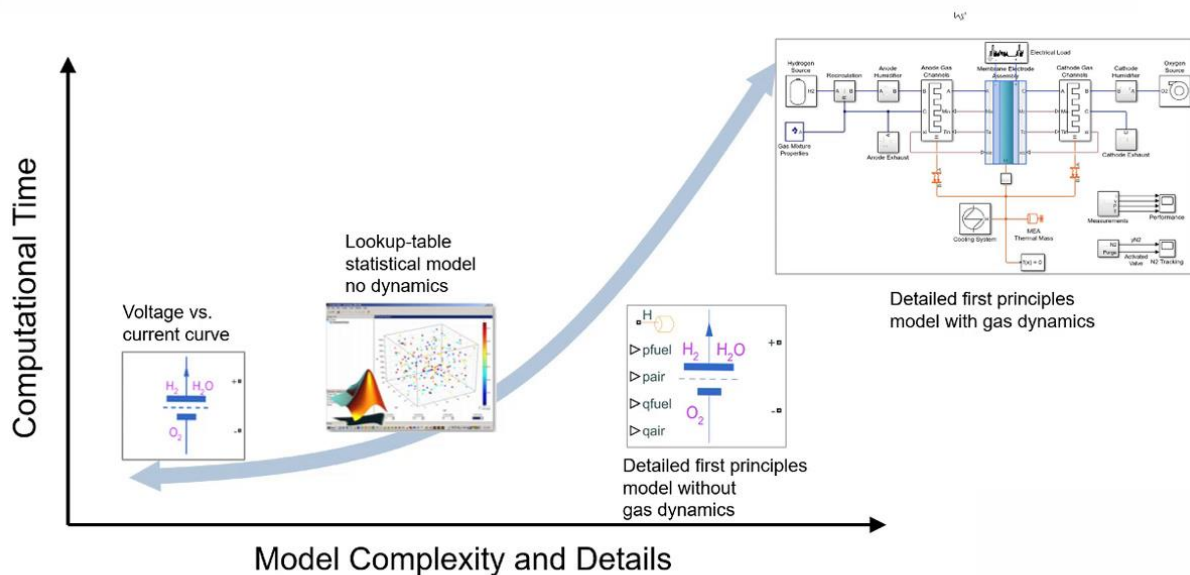
方程构成了自定义模块的关键部分。它们用于表达组件的行为，例如本例中限制输入端压力和质量平衡。这些模块也可以包括能量平衡或其他方程。

无论您是与合作伙伴共同开发模型和库，还是分发您的模型和库，都可以通过将它们保存为二进制文件，为您的 IP 提供额外的保护。

## Simscape 模块：选择系统建模的保真度级别

本白皮书中展示的模型运用了全面涵盖气体动力学特性的第一原理方法。这种保真度级别可用于调整组件大小、实现控制设计和验证、执行控制器调节，以及确定系统分支中所有气体组分的浓度。

对于某些应用，由于各个仿真花费的时间太长，或者只需表示大致的行为，因此，需要较低保真度级别，或者说这种级别足矣。在这些情况下，Simscape Electrical™ 包括一个简单的燃料电池模块，用于反映电压与电流行为（图 11，左下）。



🔍 📄 📊 📈 📉

图 11. 计算时间随模型复杂度的增加而增加。

Simscape Electrical 还包含基于第一原理但不含气体动力学特性的更细致模型（右二），以及基于查找表且不含动力学特性的统计模型（左二）。不过，后者需要大量的测量值，才能采集到所需的数据。

通过这些不同的模型，您可以选择在详细程度和仿真速度方面最能满足自身需要的模型，具体视应用而定。您还可以从详尽的模型中提取基于查找表的模型，并在不影响精度的情况下在开发后期阶段用它来加速仿真。此外，也可以结合使用其他仿真加速方法（例如并行或云计算），以提高工作效率并缩短开发时间。

## 结束语

Simscape 提供了多个选项，用于在不同保真度级别对燃料电池建模。您可以对来自不同工程领域的各个组件（例如储氢罐、阀门、燃料堆、加湿器和压缩机）及其控制器进行精确建模。

使用自定义域和组件，这些模型既可捕获整个燃料电池系统的行为，又可捕获混合气体的详细热力学和扩散特性，还可在水热领域用于温度管理和加湿。

您可以将这些仿真模型用于设计、组件参数调节、控制器和逻辑的验证和代码生成、集成研究以及系统和控制参数优化。

## 后续步骤

[详细了解燃料电池模型](#)

[观看网络研讨会：集成燃料电池实现电力推进系统](#)