

# 2020 MathWorks 中国汽车年会

## 燃料电池建模及虚拟整车仿真

汤一帆

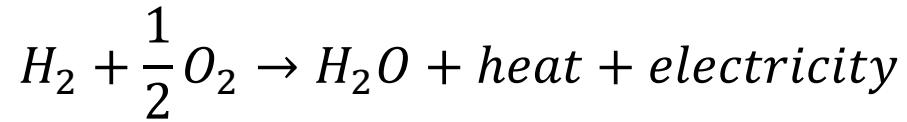
MathWorks 总部高级应用工程师



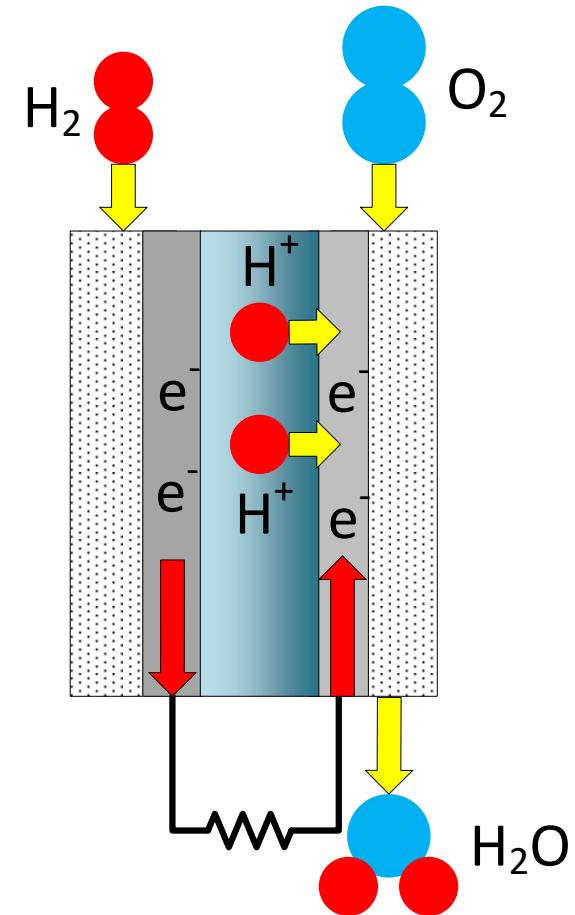
# 概述

- 质子交换膜(PEM) 燃料电池简介
- 燃料电池建模方法的概览
  - 面向系统集成的方法
  - 面向热力学的方法
- 燃料电池虚拟整车模型
- 结语

# 什么是质子交换膜 (PEM) 燃料电池



- 阳极 → 氧化  $H_2$
- 阴极 → 还原  $O_2$
- 电极 → 运输电子
- 质子交换膜(PEM) → 运输  $H^+$
- 液冷通道 → 温度控制
- 电气特性
  - $V_{\max} \sim 1.25$  volts
  - $i \sim 1\text{-}2$  A/cm<sup>2</sup>
  - 串联形成电压更高的电堆

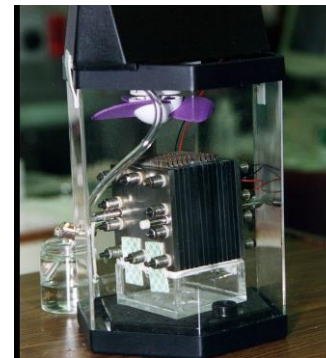


# 为什么是PEM燃料电池？

- 电气化大趋势
- 优势
  - 相对于传统燃料的低排放
  - 电池燃料经济性比传统燃料高
  - 可扩展性更高
  - 能量密度更高
- 不足
  - 高成本
  - H<sub>2</sub> 的储运挑战
  - 系统易受杂质影响而发生性能劣化
- 技术/资金投入



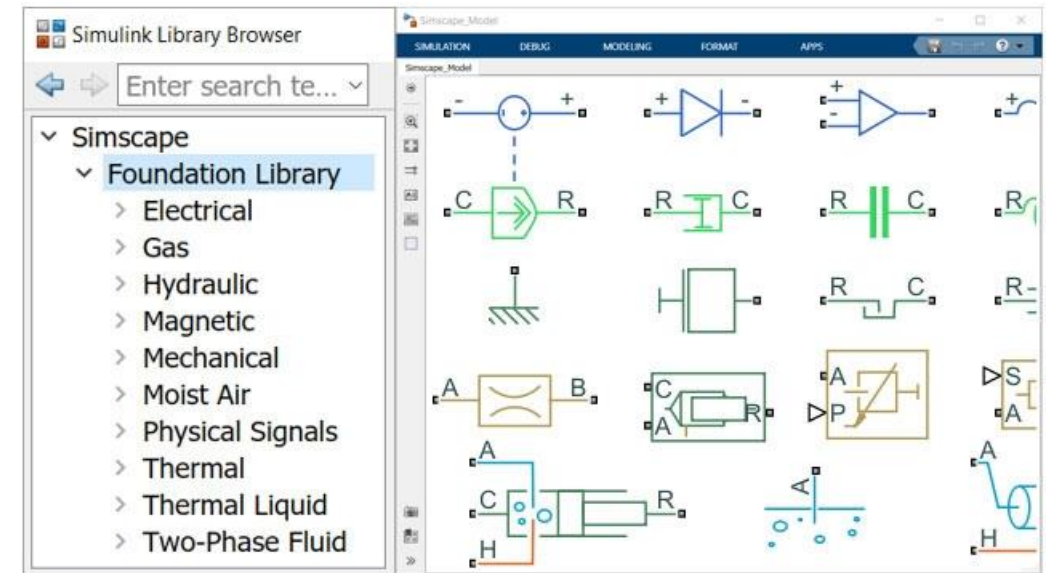
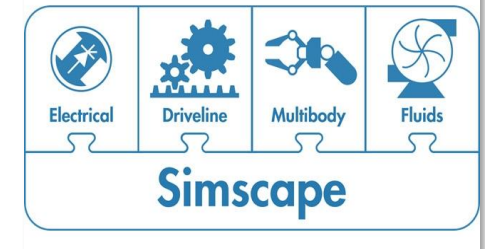
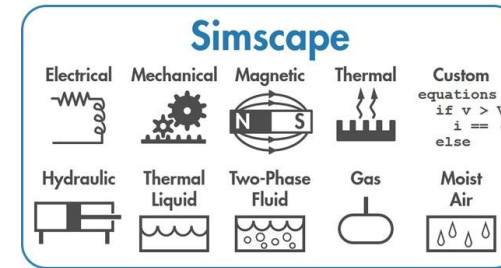
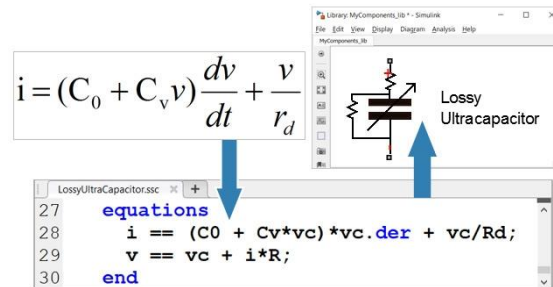
Source: [https://en.wikipedia.org/wiki/Toyota\\_Mirai](https://en.wikipedia.org/wiki/Toyota_Mirai)



Source: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell)

# 燃料电池建模工具 - Simscape

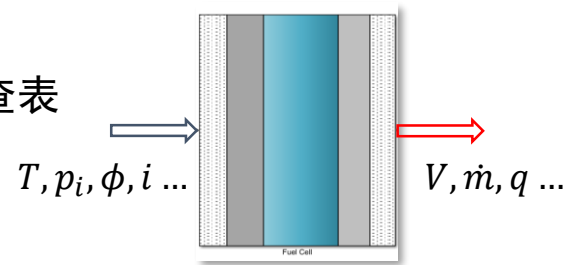
- Simulink 环境中的物理建模工具
  - 基于物理连接的模块建模方式
  - 多物理域基础组件库及附加产品库
  - 基于方程式的建模语言(微分方程及代数约束)
- 使用Simscape建模
  - 使用Simscape语言定制模块
  - 从模型到C代码生成的“白盒测试”
  - 与MATLAB和Simulink的无缝整合



# 燃料电池模型概览

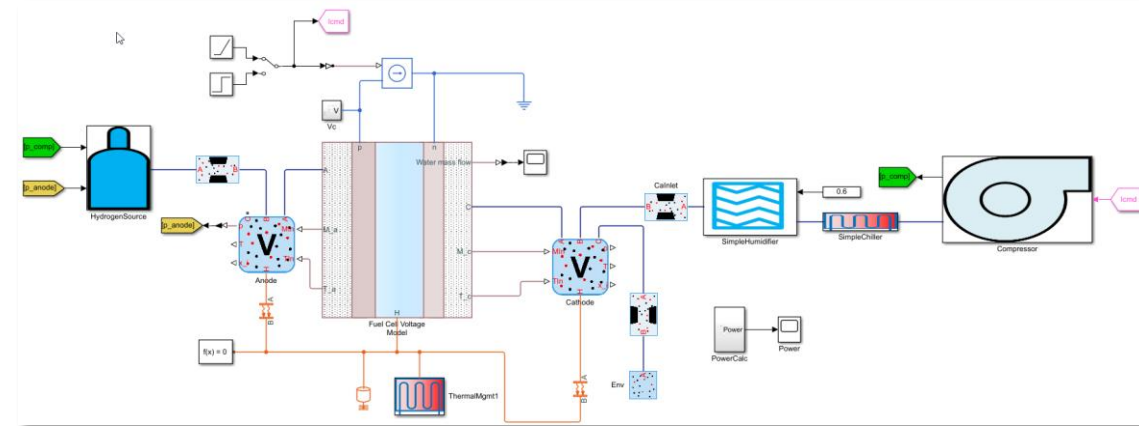
- 面向系统集成

- 基于输入-输出 / 查表
- 用于集成和监控



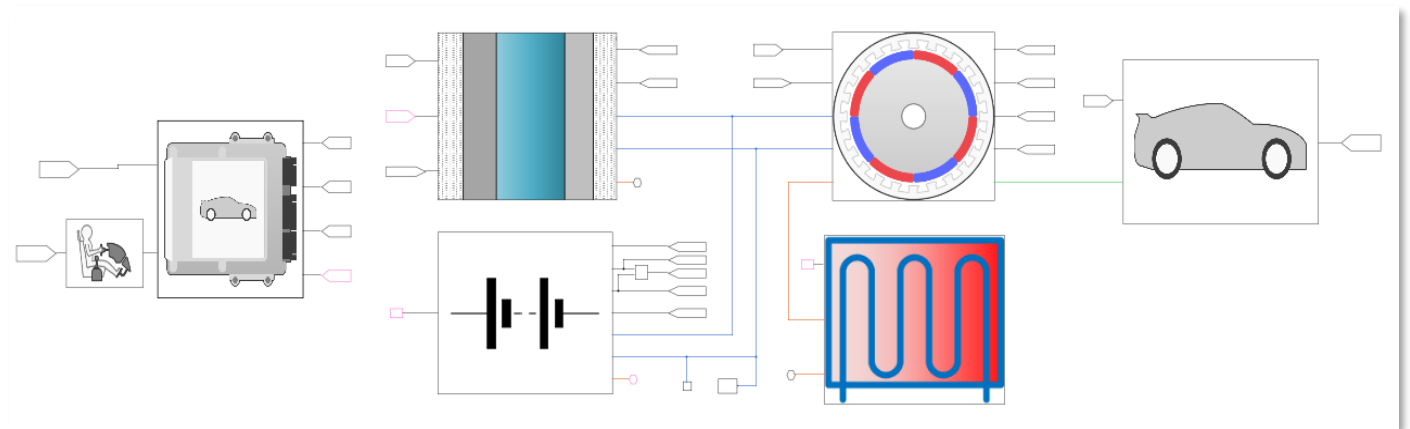
- 面向热力学

- 电化学和辅助系统
- 用于燃料电池系统的设计和优化



- 虚拟燃料电池整车模型

- 电气动力总成
- 热管理
- 车辆动力学
- 控制器和驾驶循环



# 面向系统集成的模型

- 概览

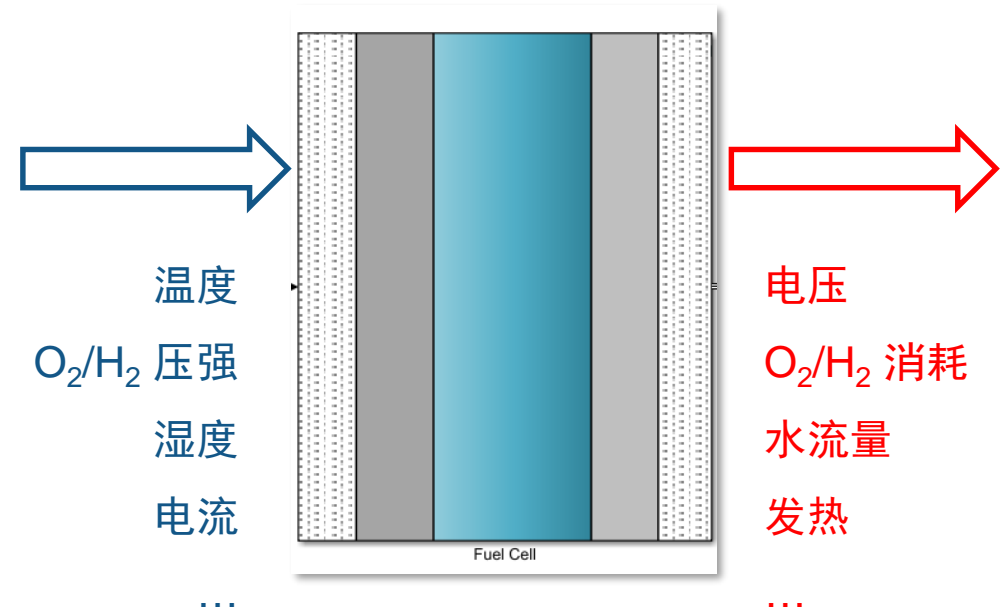
- 将燃料电池看作电气动力总成的能量源
- 基于需求搭建输入-输出模型
- 经验公式和查找表
- 简化、快速、静态 ...

- 应用

- 针对第三方/供应商的燃料电池系统
- 系统集成研究
- 辅助系统设计
- 控制器设计

- MathWorks 工具链

- Simulink, Simscape, Simscape Electrical



# 面向热力学的模型

- 概览

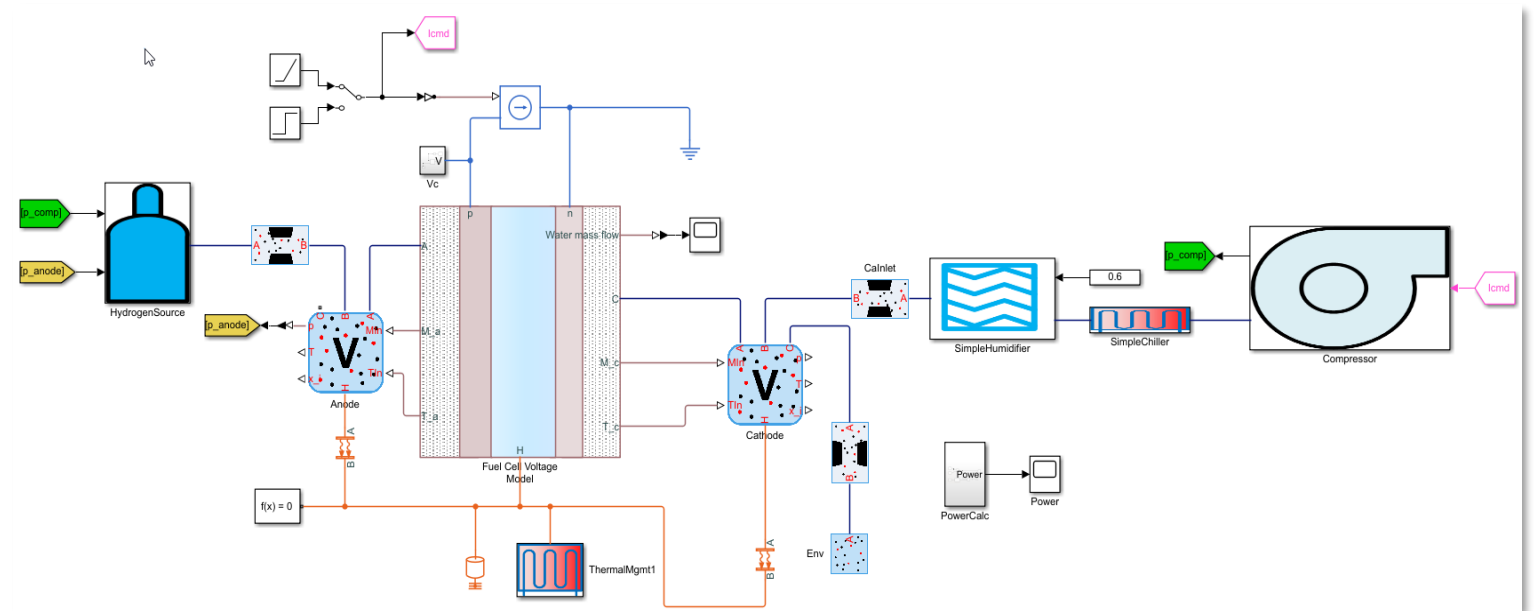
- 燃料电池堆的电化学
- 辅助系统特性
- 具体、实际、动态 ...

- 应用

- 系统布局研究
- 组件设计/尺寸
- 控制器设计
- 动态响应

- MathWorks工具链

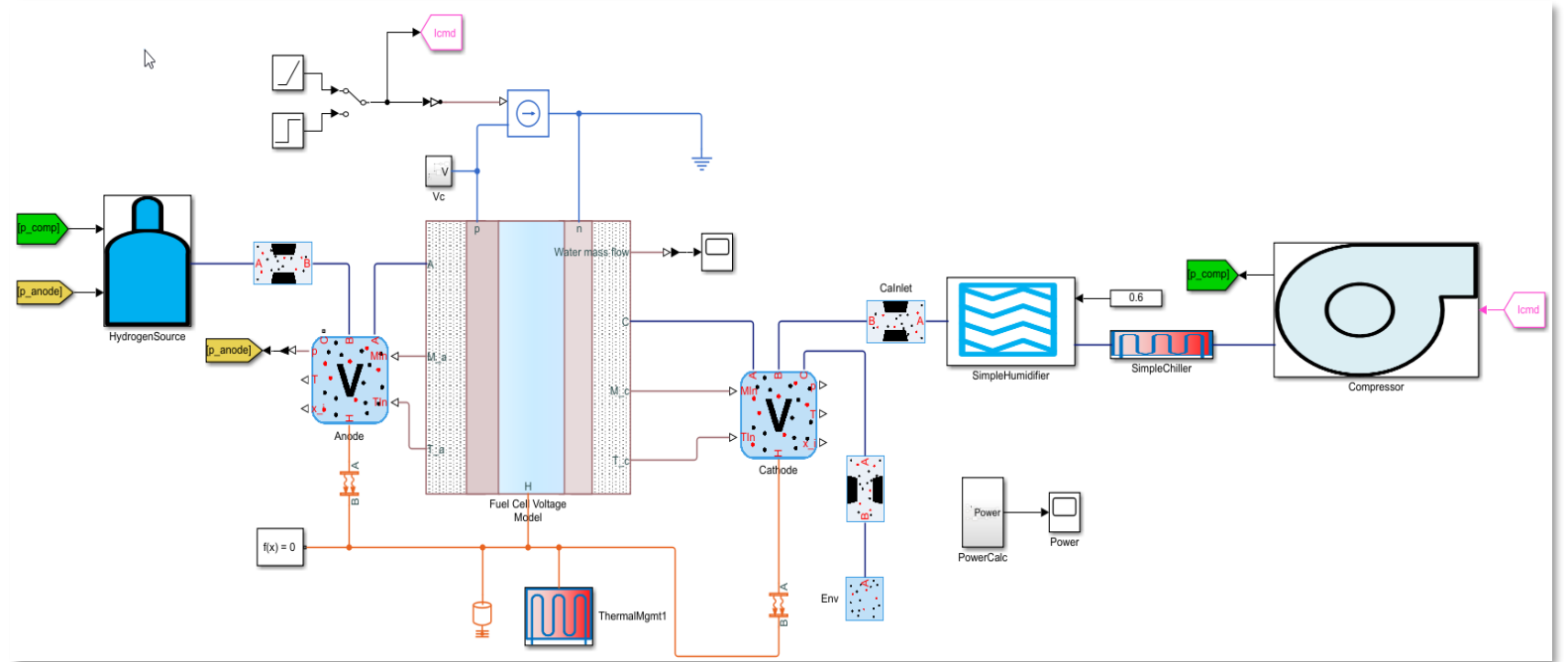
- Simscape, Simscape Electrical, Simscape Fluids, Simscape Language (customized domain)



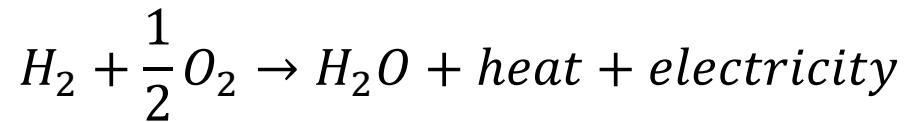


# 面向热力学的模型

- 燃料电池堆
  - 为反应定制Simscape模块
  - 多组分气体域
- 辅助系统
  - 压缩机
  - 气体冷却器
  - 湿度调节器
  - 热管理
  - H<sub>2</sub> 循环
  - 水管理
- 简单控制器



# 燃料电池堆建模



- 多域物理模块
  - 多组分气体域(N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O)
  - 电域
  - 热能域
- 使用Simscape语言实现
  - 方程式 + 库模块
  - 反应及发热的方程式
  - H<sub>2</sub>O与热传导组件
  - 简单N<sub>2</sub>传输模型

```
nodes
  A = GasN.GasN;    % A:left
  C = GasN.GasN;    % C:right

  % Electrical ports
  p = foundation.electrical.electrical; % p:left
  n = foundation.electrical.electrical; % n:right
end
```

多组分气体域接口

电域接口

```
nodes
  H = foundation.thermal.thermal;
end
```

热能域接口

```
equations
  Vcell == p.v - n.v;
  Vcell == Ncell*(Enernst - Vact - Vohmic - Vconc);
  mdot_w == Ncell*nWater*MWH2O*Acell;
```

电压计算

水渗流计算

```
% Reaction equations
H2ORxn == MWH2O*i*Acell*Ncell/(2*F);
O2Rxn  == -MWO2*i*Acell*Ncell/(4*F);
H2Rxn  == -MWH2*i*Acell*Ncell/(2*F);
```




气体消耗生成

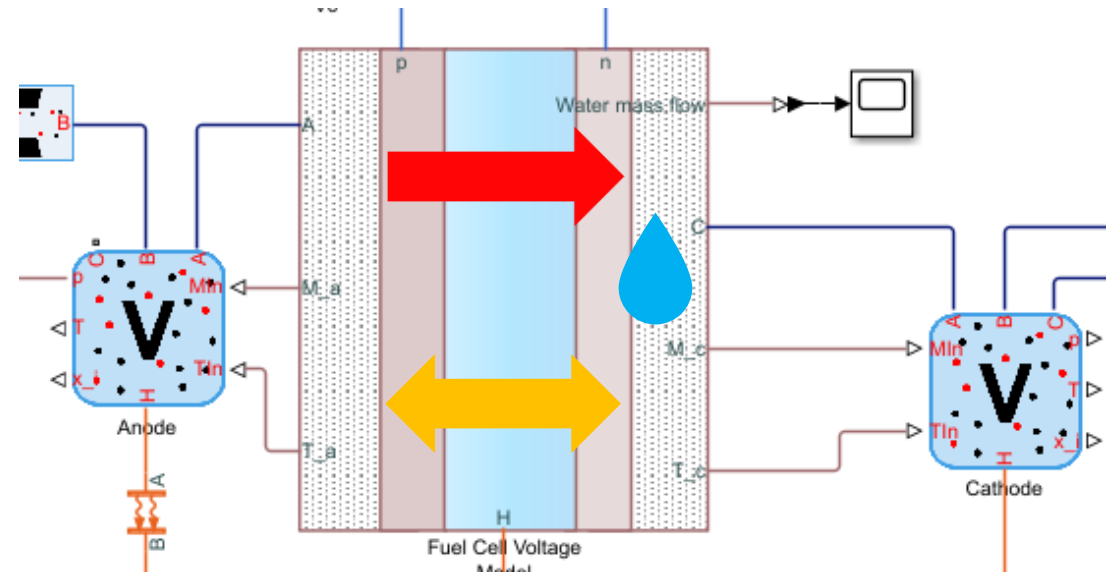
```
% Heat generated
HeatRxn == (Vtheory - Vcell)*i*Acell;
HFlow.S == HeatRxn;
```

热能生成

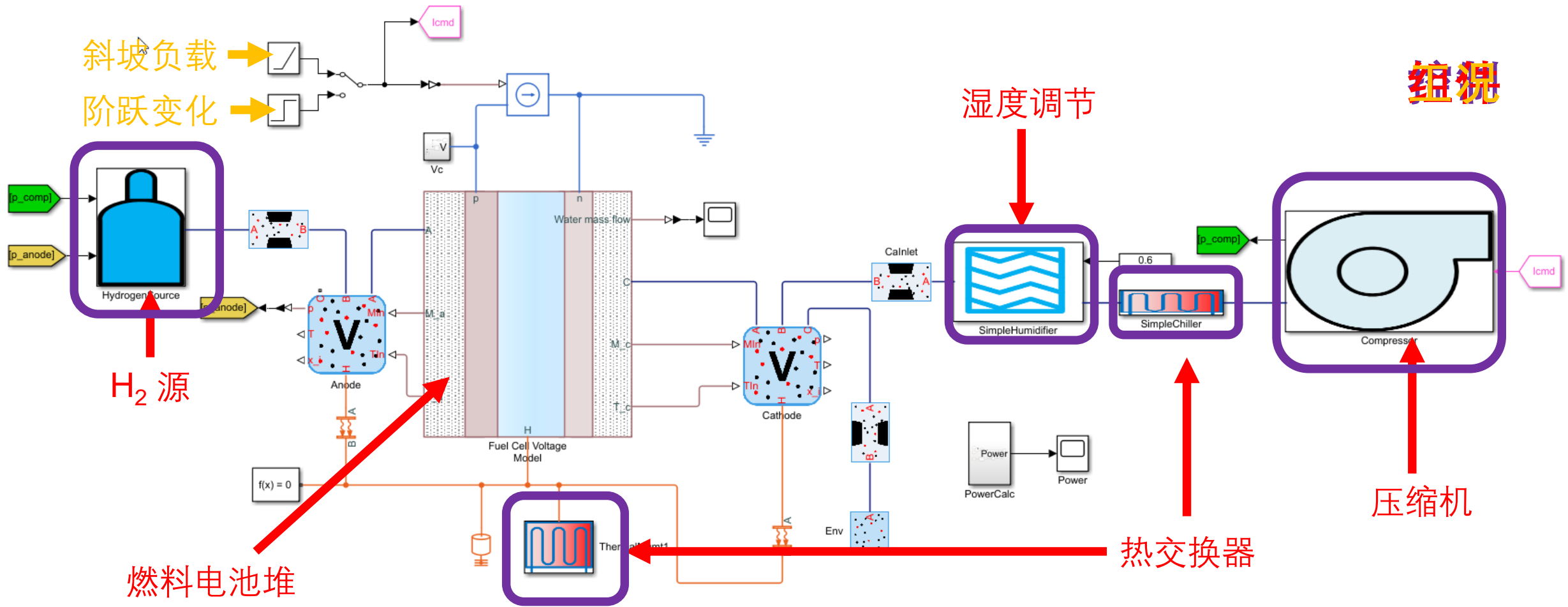
end

# 燃料电池堆建模

- 阳极阴极交换氢气、水以及氮气
- 阴极产生反应水 
- 穿越电池单体的两个过程
  - 电渗 (阳极 → 阴极) 
  - 扩散 (双向) 

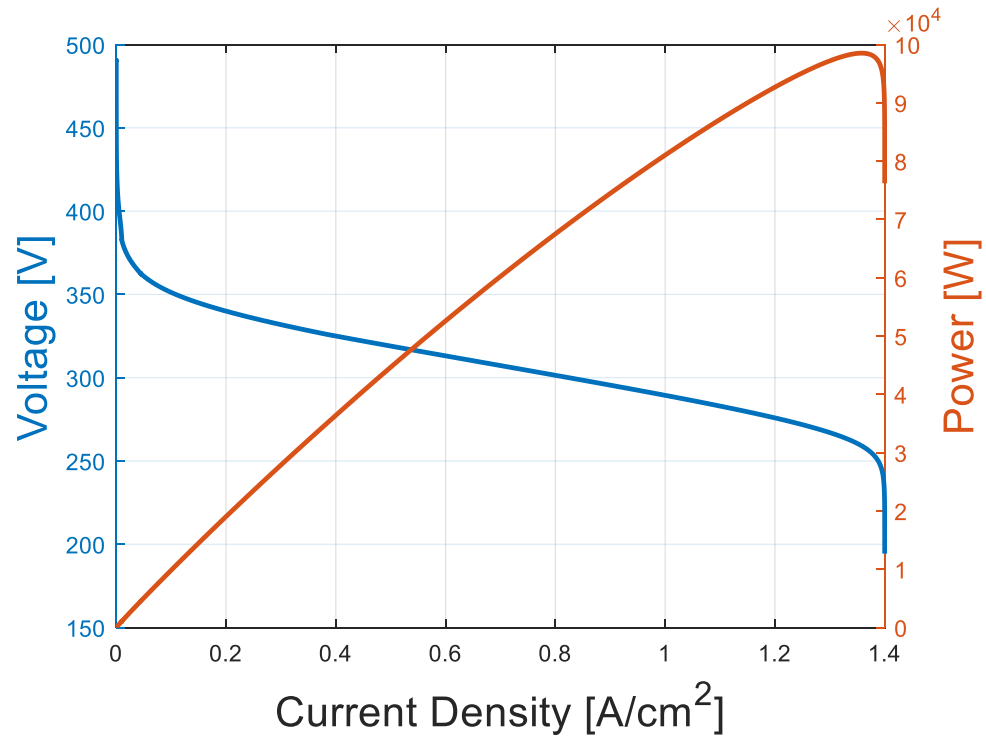


# 燃料电池系统

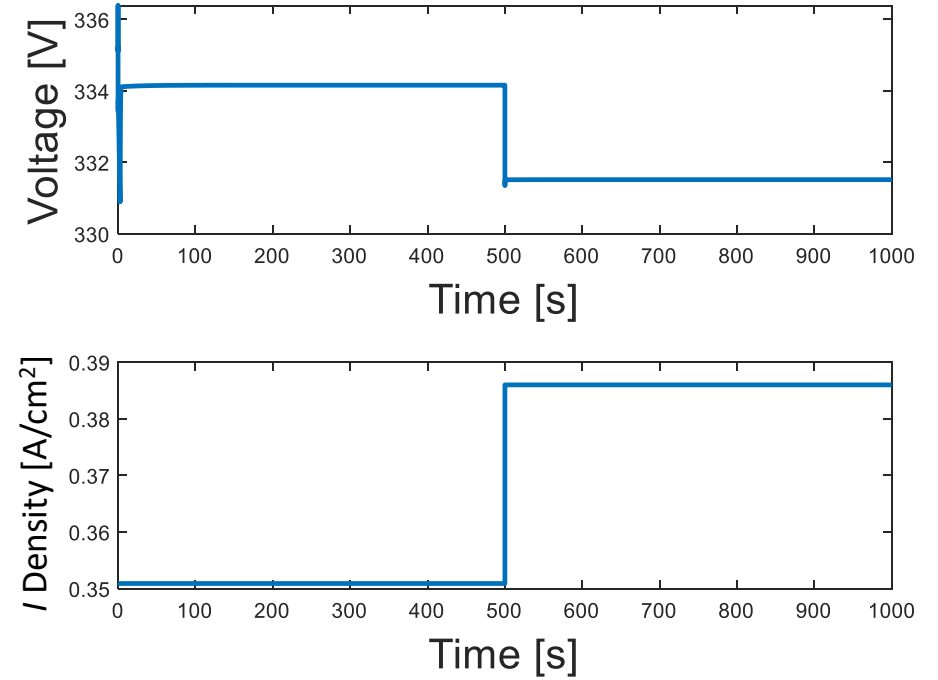


# 燃料电池系统测试

## 电流-电压 (I-V) 特征曲线



## 阶跃响应

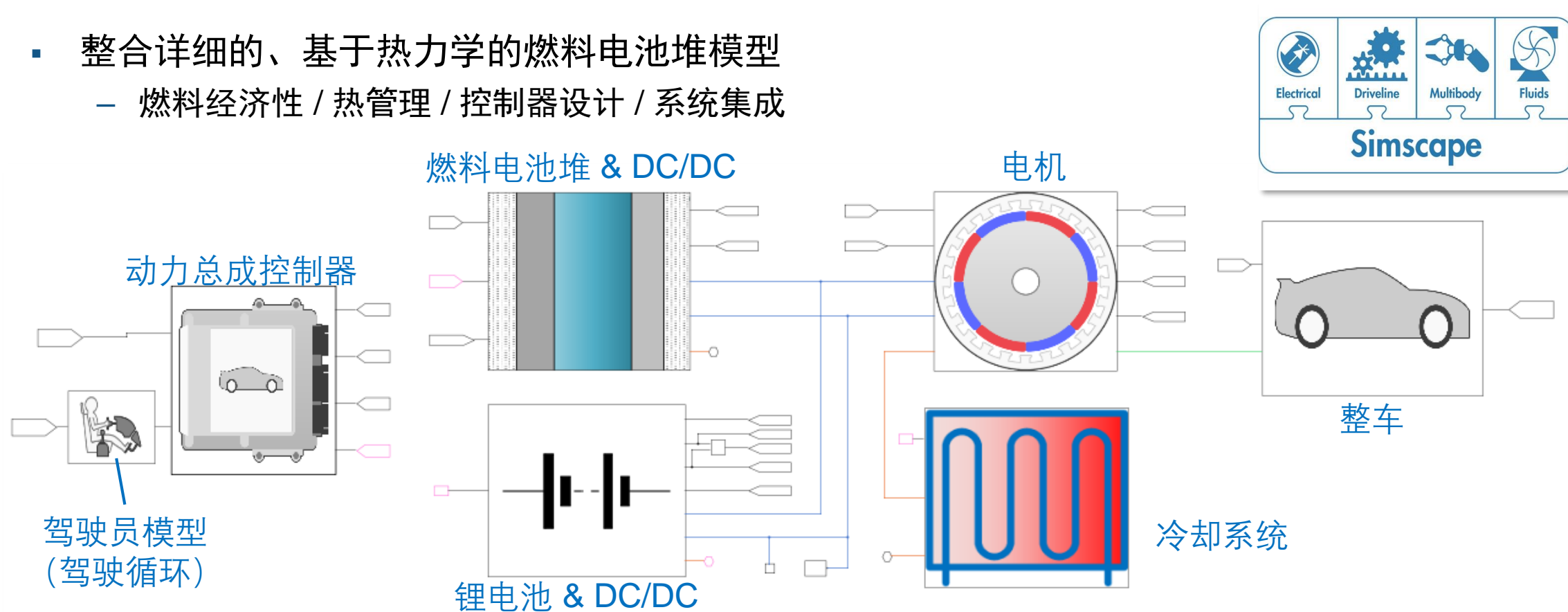


## 应用：面向热力学的燃料电池模型

- 系统架构研究
- 组件设计/尺寸
- 控制设计
- 热管理设计
- 实时仿真性能(恒温简化模型)
- 作为其他模型的能量源
  - 范例：燃料电池虚拟整车

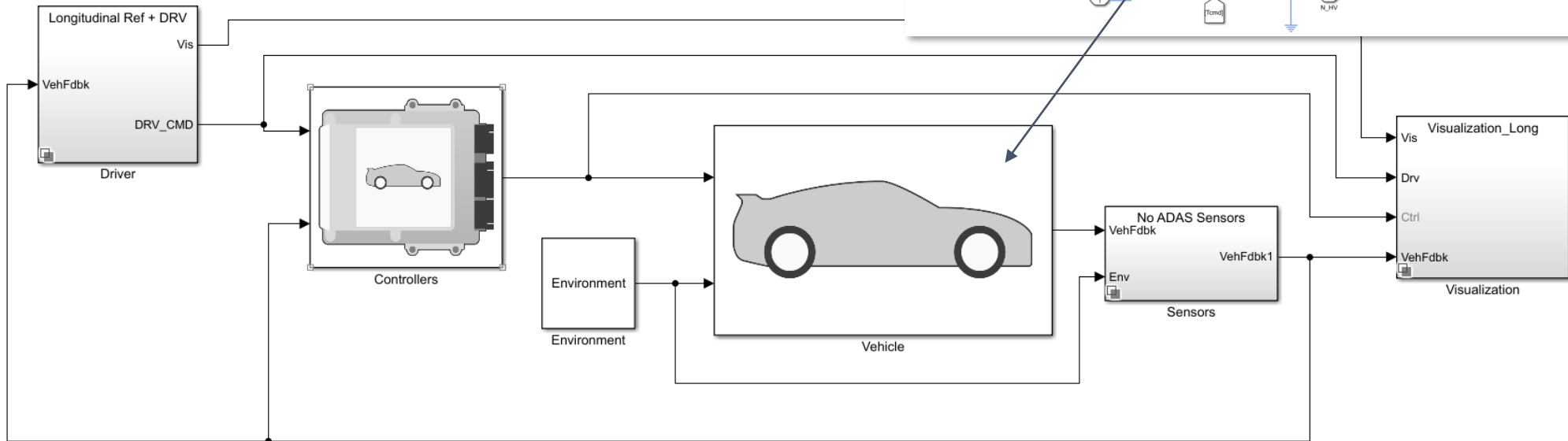
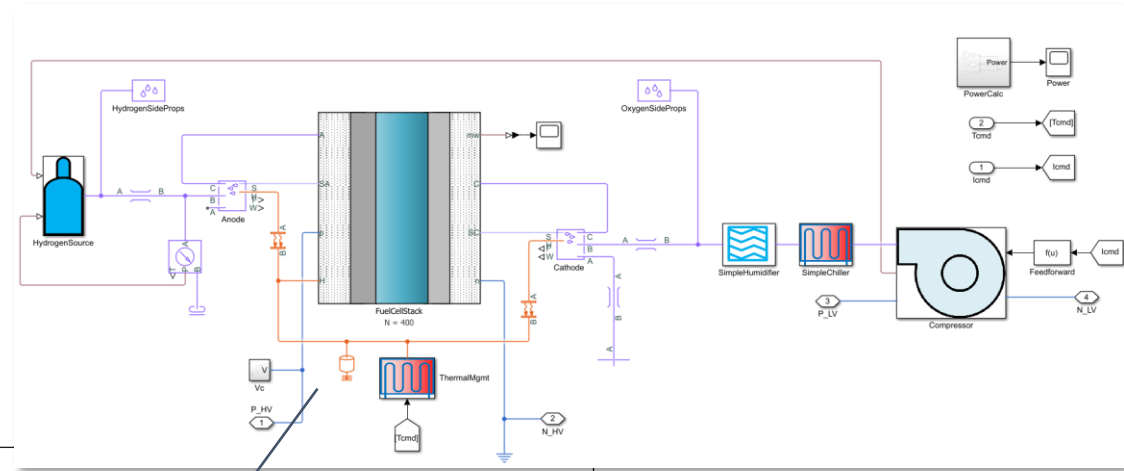
# 燃料电池虚拟整车 - Simscape

- 整合详细的、基于热力学的燃料电池堆模型
  - 燃料经济性 / 热管理 / 控制器设计 / 系统集成



# 燃料电池虚拟整车 – Powertrain Blockset (PTBS)

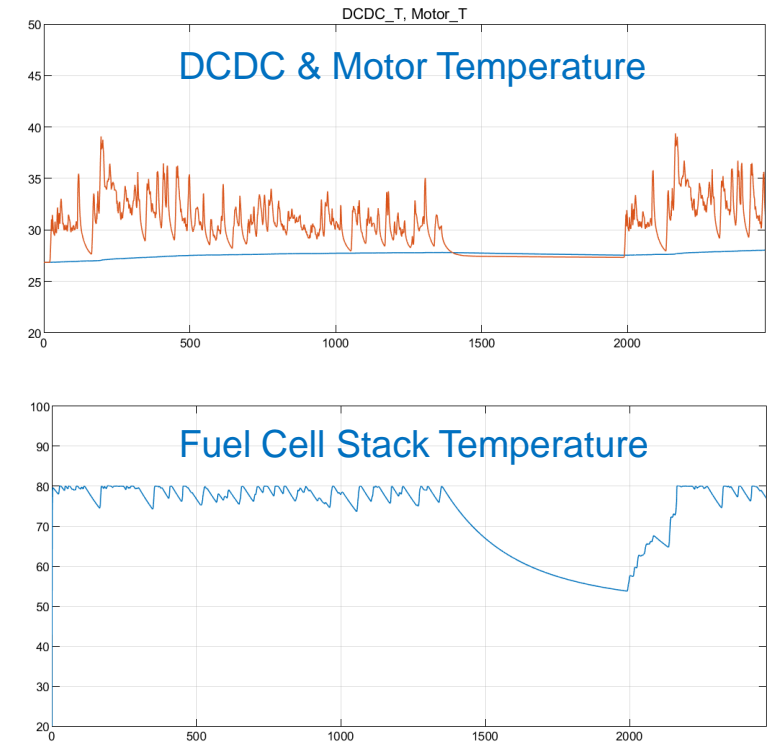
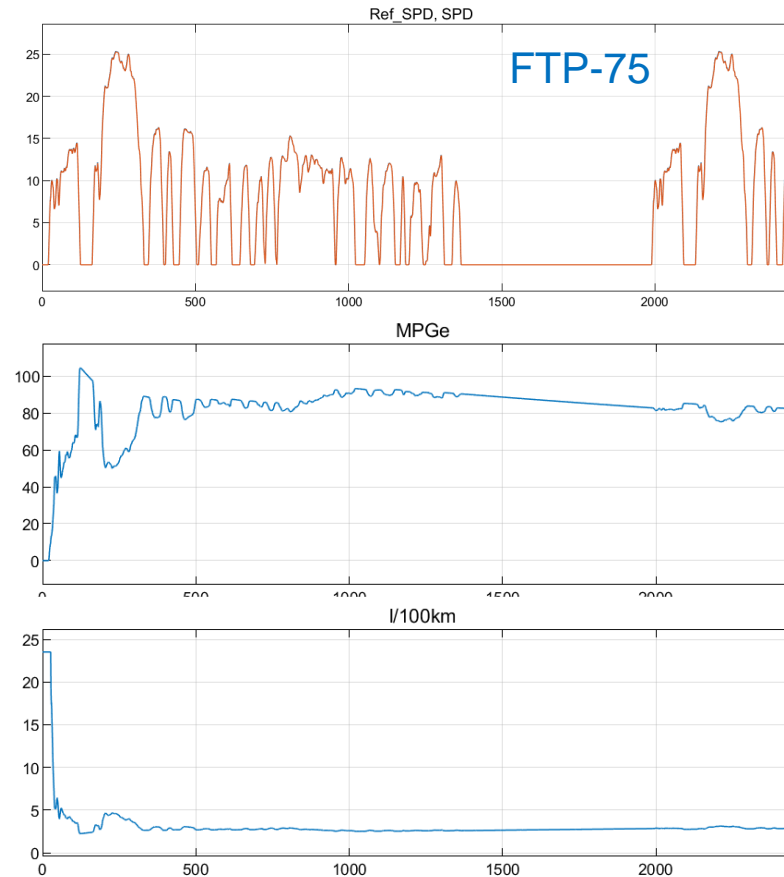
- PTBS整车框架整合Simscape部件模型
  - 动力总成结构研究
  - 燃料经济性 / 热管理 / 控制器设计 / 系统集成





# 燃料电池虚拟整车

- 燃料经济性研究
- 系统集成
- 控制器设计
- 热管理分析
- 架构研究



# 结语

- 使用MathWorks工具为PEM燃料电池系统建模
  - 面向系统集成的方法（简化的，静态的）
  - 面向热力学的方法（详细的，动态的）
- 使用Simscape和Powertrain Blockset 搭建燃料电池虚拟整车
- 与客户的深度合作
  - 潜在的行业：汽车 / 发电 / 船舶 / 更多 ...
  - 以传递知识为目的
  - 燃料电池与虚拟整车模型可供分享
  - 同时有白皮书说明此模型是如何建立的

# 谢谢

- Q & A?

