

MATLAB EXPO

2021

基于模型构建燃料电池堆与整车虚拟平台

齐卓鋈, MathWorks



要点

- MathWorks 工具为虚拟燃料电池整车建模赋能
 - 真实的环境和测试场景
 - 基于整车仿真的分析、控制设计和优化

- 燃料电池系统建模的方法论和工作流
 - 基于物理和化学的第一法则法
 - 使用实验数据或高精度仿真的数据驱动统计方法

交通运输领域：什么是电气化？



电气化是指电气技术和能源管理日益增多的使用，以提高交通运输，工业系统，消费级和专业级设备以及发电和输电系统的效率、性能和可靠性。

汽车领域的电气化技术

能量源

电池

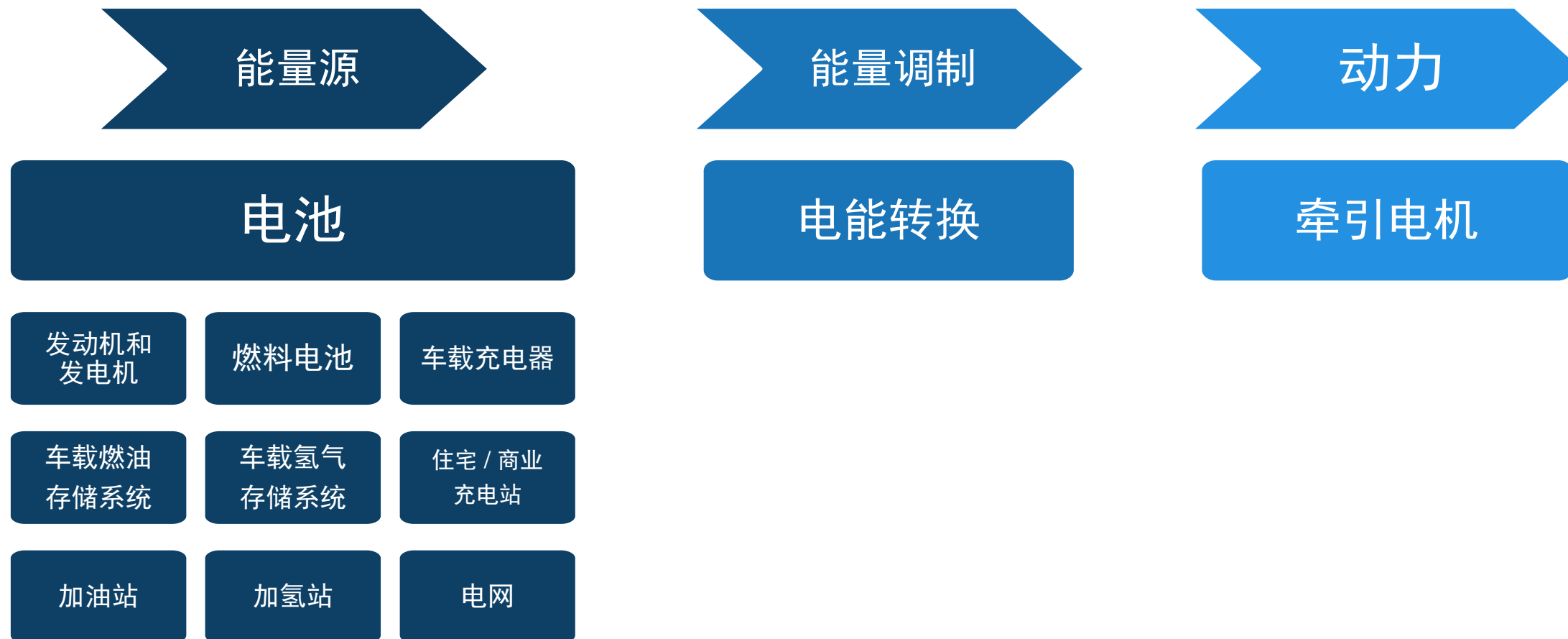
能量调制

电能转换

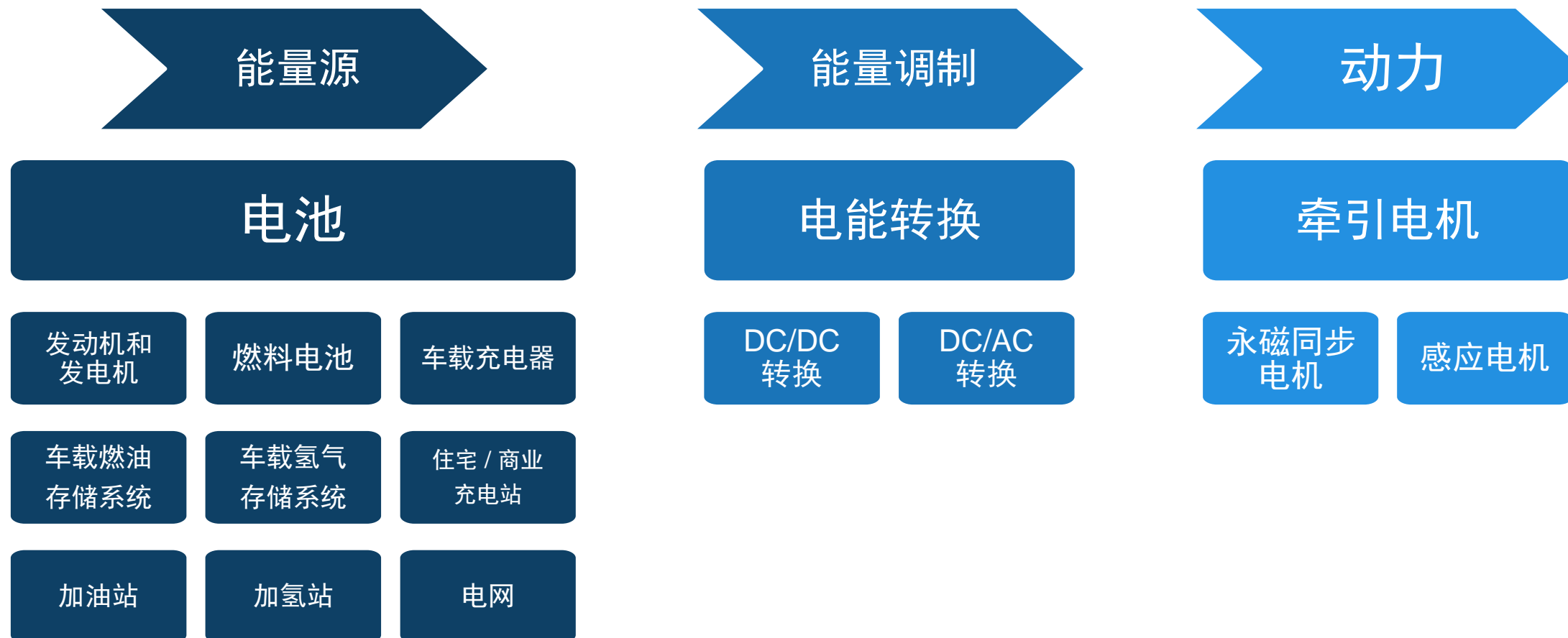
动力

牵引电机

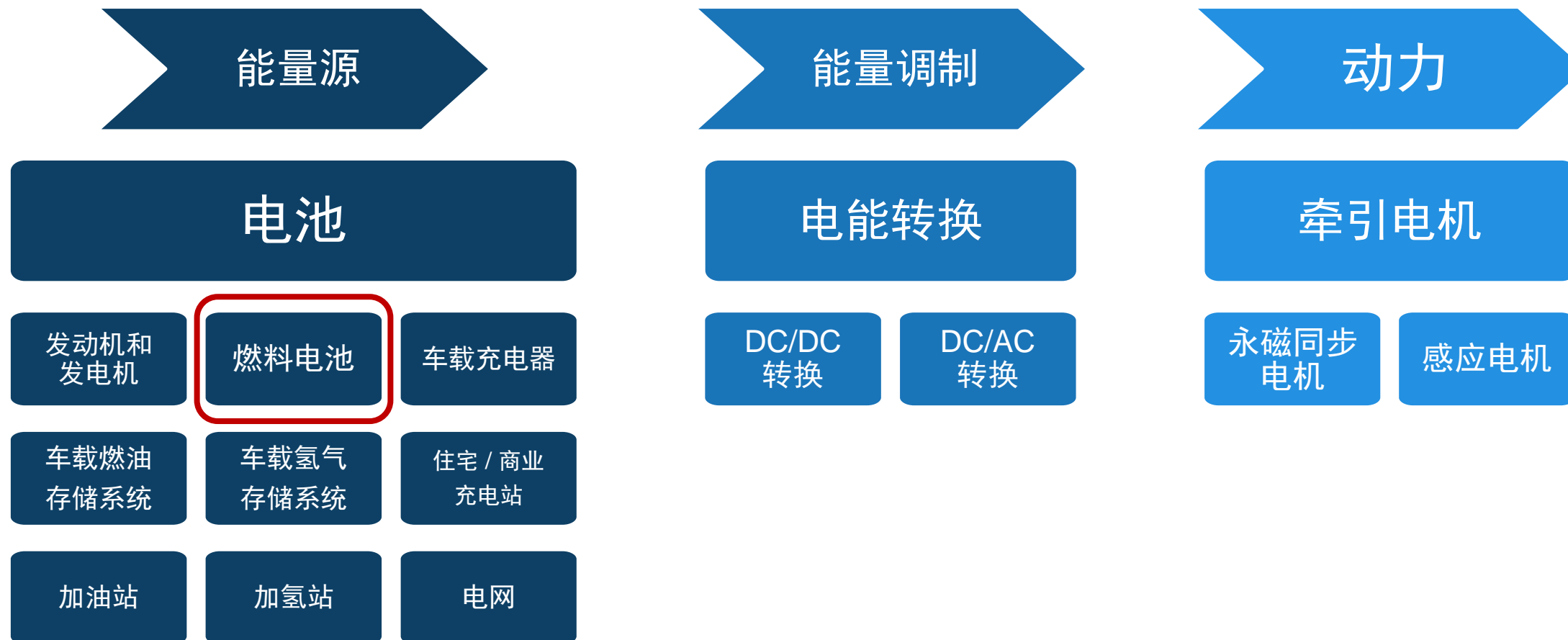
汽车领域的电气化技术



汽车领域的电气化技术



汽车领域的电气化技术



燃料电池分类

| 燃料电池类型 | 电解质类型 | 工作温度 | 催化剂类型 | 优势 | 劣势 | 应用领域 |
|--------|---------|----------|--|--|---|---|
| PEM | 高分子电解质膜 | 50-100 | 铂 | <ul style="list-style-type: none"> 快速启动 室温工作 空气为氧化剂 | <ul style="list-style-type: none"> 对 CO 敏感 反应物需加湿 | <ul style="list-style-type: none"> 车辆动力 便携电源 |
| AFC | 碱 | 90-100 | 镍 / 银 | <ul style="list-style-type: none"> 快速启动 室温工作 | <ul style="list-style-type: none"> 需要纯氧气作为氧化剂 | <ul style="list-style-type: none"> 航空航天 军工 |
| PAFC | 磷酸 | 150-200 | 铂 | <ul style="list-style-type: none"> 对 CO₂ 不敏感 | <ul style="list-style-type: none"> 对 CO 敏感 启动缓慢 | <ul style="list-style-type: none"> 分布式发电 |
| SOFC | 固体氧化物 | 650-1000 | LaMnO ₃ / LaCoO ₃ | <ul style="list-style-type: none"> 空气为氧化剂 高能源效率 | <ul style="list-style-type: none"> 工作温度高 | <ul style="list-style-type: none"> 大型分布式发电 便携电源 |
| MCFC | 熔融碳酸盐 | 600-700 | 镍 | <ul style="list-style-type: none"> 空气为氧化剂 高能源效率 | <ul style="list-style-type: none"> 工作温度高 | <ul style="list-style-type: none"> 大型分布式发电 |

燃料电池分类

| 燃料电池类型 | 电解质类型 | 工作温度 | 催化剂类型 | 优势 | 劣势 | 应用领域 |
|--------|---------|----------|--|--|---|---|
| PEM | 高分子电解质膜 | 50-100 | 铂 | <ul style="list-style-type: none"> 快速启动 室温工作 空气为氧化剂 | <ul style="list-style-type: none"> 对 CO 敏感 反应物需加湿 | <ul style="list-style-type: none"> 车辆动力 便携电源 |
| AFC | 碱 | 90-100 | 镍 / 银 | <ul style="list-style-type: none"> 快速启动 室温工作 | <ul style="list-style-type: none"> 需要纯氧气作为氧化剂 | <ul style="list-style-type: none"> 航空航天 军工 |
| PAFC | 磷酸 | 150-200 | 铂 | <ul style="list-style-type: none"> 对 CO₂ 不敏感 | <ul style="list-style-type: none"> 对 CO 敏感 启动缓慢 | <ul style="list-style-type: none"> 分布式发电 |
| SOFC | 固体氧化物 | 650-1000 | LaMnO ₃ / LaCoO ₃ | <ul style="list-style-type: none"> 空气为氧化剂 高能源效率 | <ul style="list-style-type: none"> 工作温度高 | <ul style="list-style-type: none"> 大型分布式发电 便携电源 |
| MCFC | 熔融碳酸盐 | 600-700 | 镍 | <ul style="list-style-type: none"> 空气为氧化剂 高能源效率 | <ul style="list-style-type: none"> 工作温度高 | <ul style="list-style-type: none"> 大型分布式发电 |

PEM 燃料电池是汽车领域的首要选项。

燃料电池分类

| 燃料电池类型 | 电解质类型 | 工作温度 | 催化剂类型 | 优势 | 劣势 | 应用领域 |
|--------|---------|----------|--|--|---|--|
| PEM | 高分子电解质膜 | 50-100 | 铂 | <ul style="list-style-type: none"> 快速启动 室温工作 空气为氧化剂 | <ul style="list-style-type: none"> 对 CO 敏感 反应物需加湿 | <ul style="list-style-type: none"> 车辆动力 便携电源 |
| AFC | 碱 | 90-100 | 镍 / 银 | <ul style="list-style-type: none"> 快速启动 室温工作 | <ul style="list-style-type: none"> 需要纯氧气作为 | <ul style="list-style-type: none"> 航空航天 |
| PAFC | 磷酸 | 150-200 | 铂 | <ul style="list-style-type: none"> 对 CO₂ 不敏感 | | |
| SOFC | 固体氧化物 | 650-1000 | LaMnO ₃ / LaCoO ₃ | <ul style="list-style-type: none"> 空气为氧化剂 高能源效率 | | |
| MCFC | 熔融碳酸盐 | 600-700 | 镍 | <ul style="list-style-type: none"> 空气为氧化剂 高能源效率 | | |

PEM 燃料电池是汽车领域的首要选项。

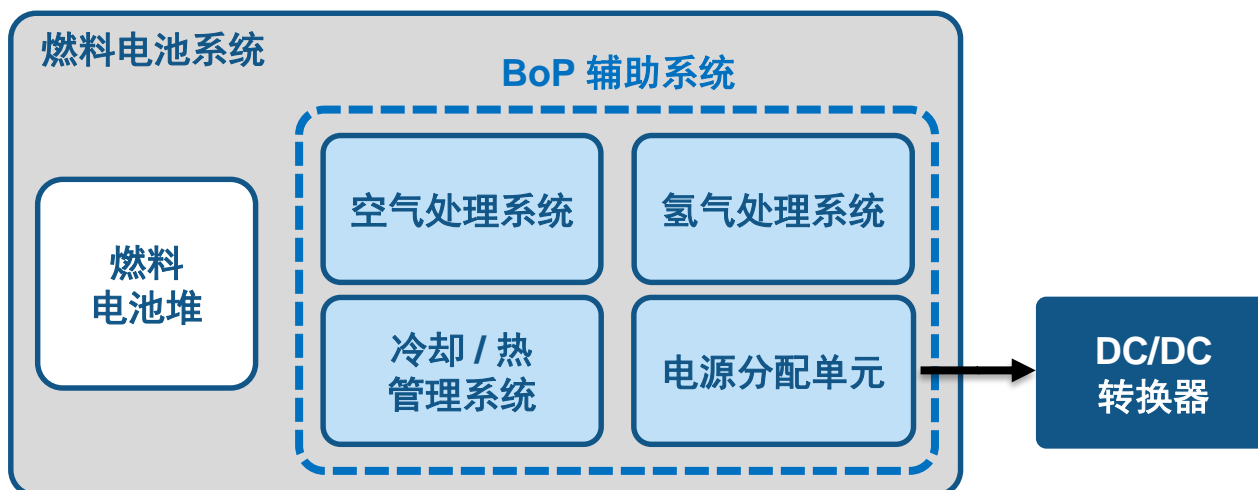
- 优势
 - 较传统燃油更低的排放
 - 较传统燃油更高的燃油经济性
 - 较其它系统更易扩展
 - 相同功率下较电池更轻
- 劣势
 - 成本更高
 - 纯氢气的存储和运输面临挑战
 - 杂质会降低系统性能
- 其他 – 大量的投资!

燃料电池虚拟整车 (FCEV) 架构



挑战: 燃料电池系统与电驱动总成其余部分的相互作用

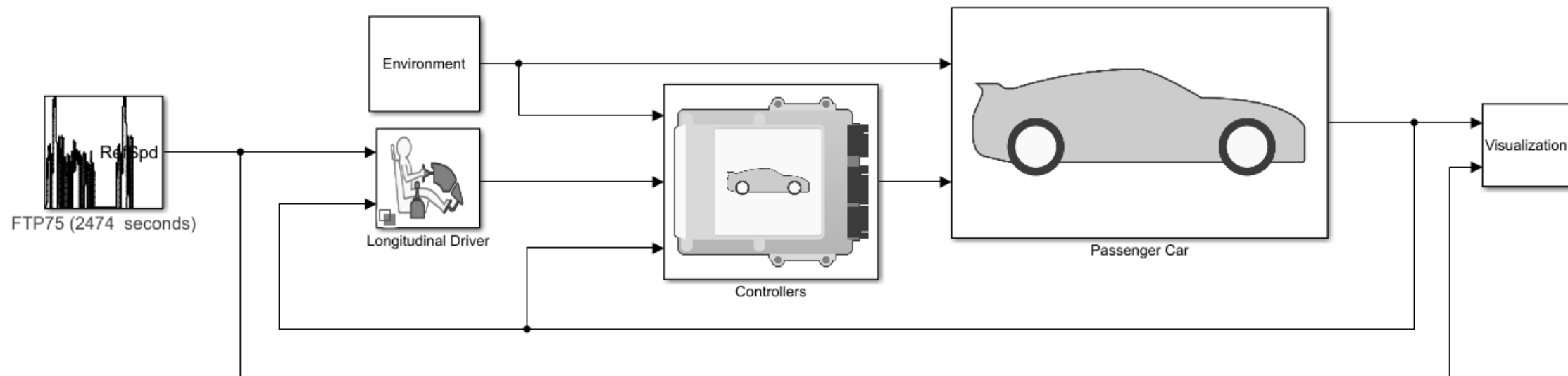
- 驾驶循环和运行场景
- 电机, 电池, DCDC 转换器, 传动总成
- 顶层调度和局部控制算法

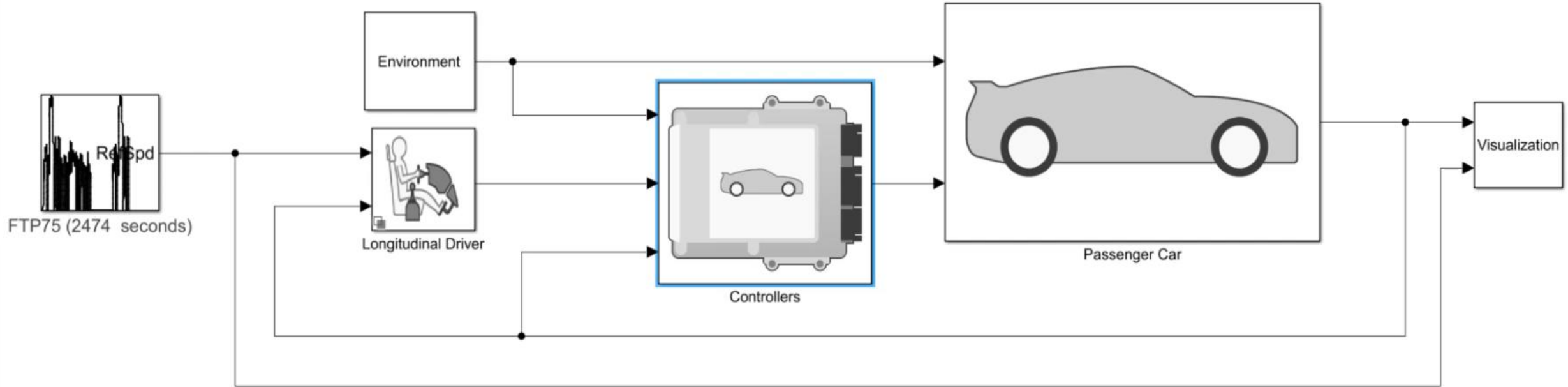


FCEV 中的燃料电池系统操作

- 确定瞬时功率需求
- 将功率需求转换为电流需求
- 在电池和燃料电池之间分配电流需求
- 将电流指令转换为氢气/空气流量的指令

案例视频: 燃料电池整车的控制开发





Analyze Power and Energy

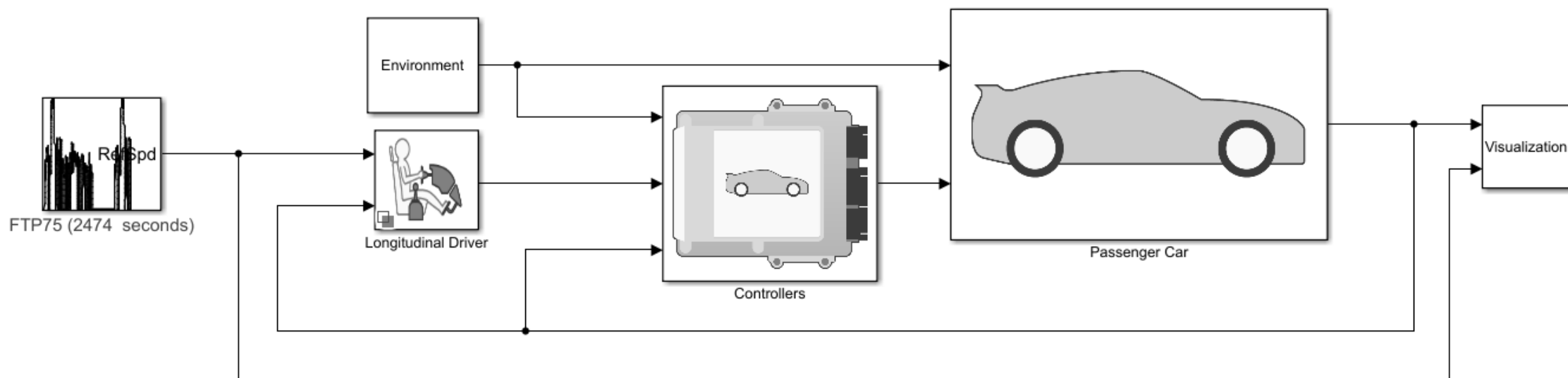
燃料电池虚拟整车建模

通过垂直集成实现基于燃料电池的系统交付

燃料电池、电驱动总成
和虚拟车辆建模

燃料电池与虚拟整车模型的
集成

燃料电池虚拟整车模型的
标定和分析



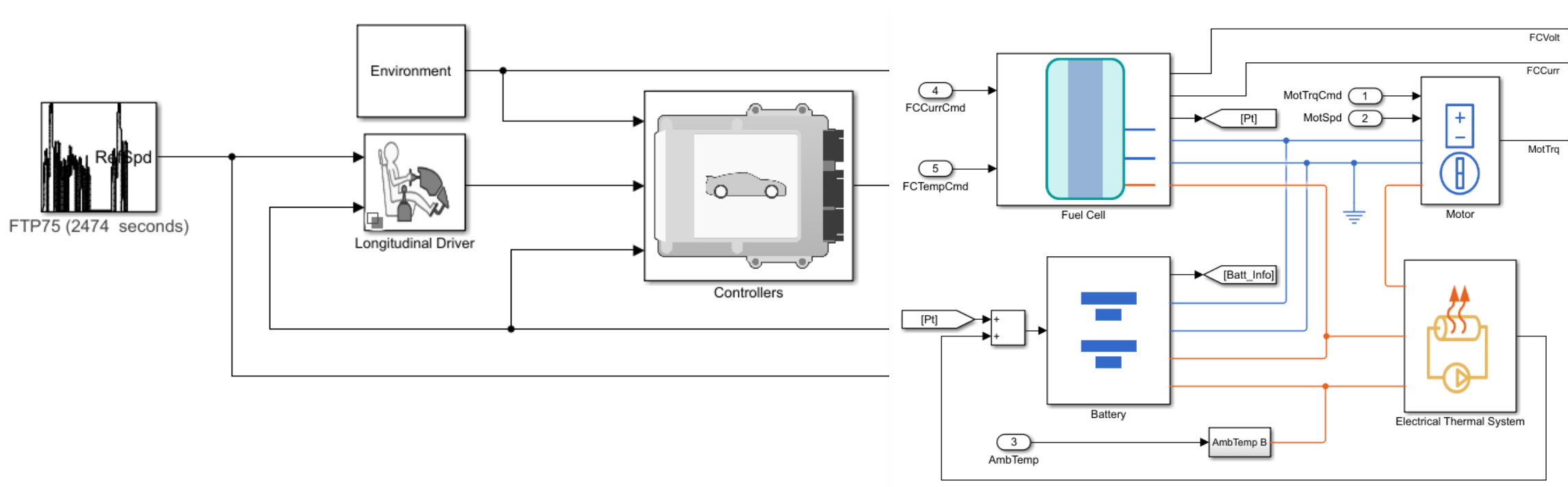
燃料电池虚拟整车建模

通过垂直集成实现基于燃料电池的系统交付

燃料电池、电驱动总成
和虚拟车辆建模

燃料电池与虚拟整车模型的
集成

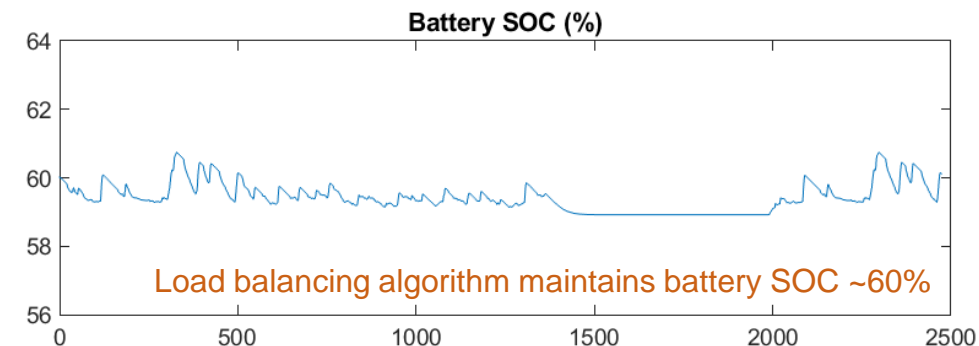
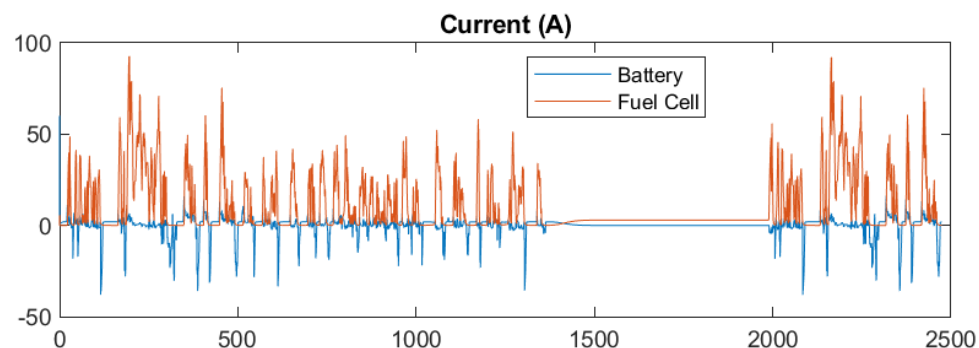
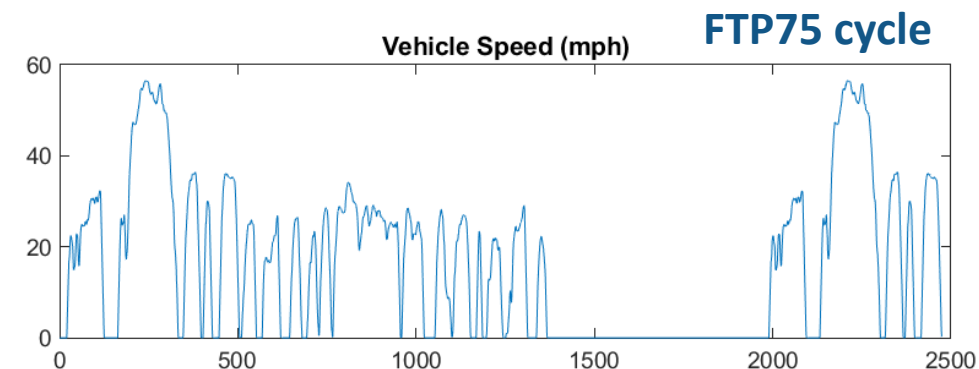
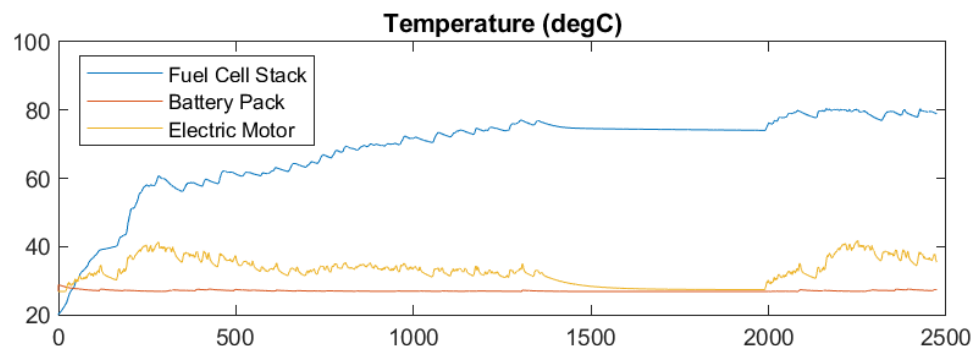
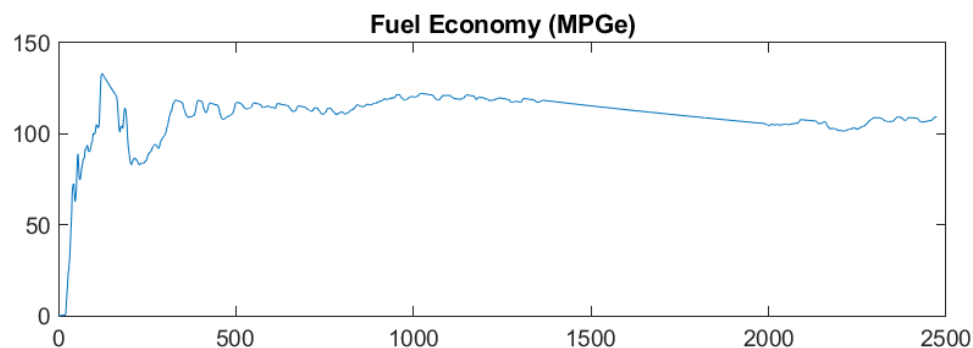
燃料电池虚拟整车模型的
标定和分析



电驱动物理模型

案例: 燃油电池虚拟整车的仿真

- 整车燃油经济性、性能和热分析
- 实现基于模型的控制设计



燃料电池系统建模

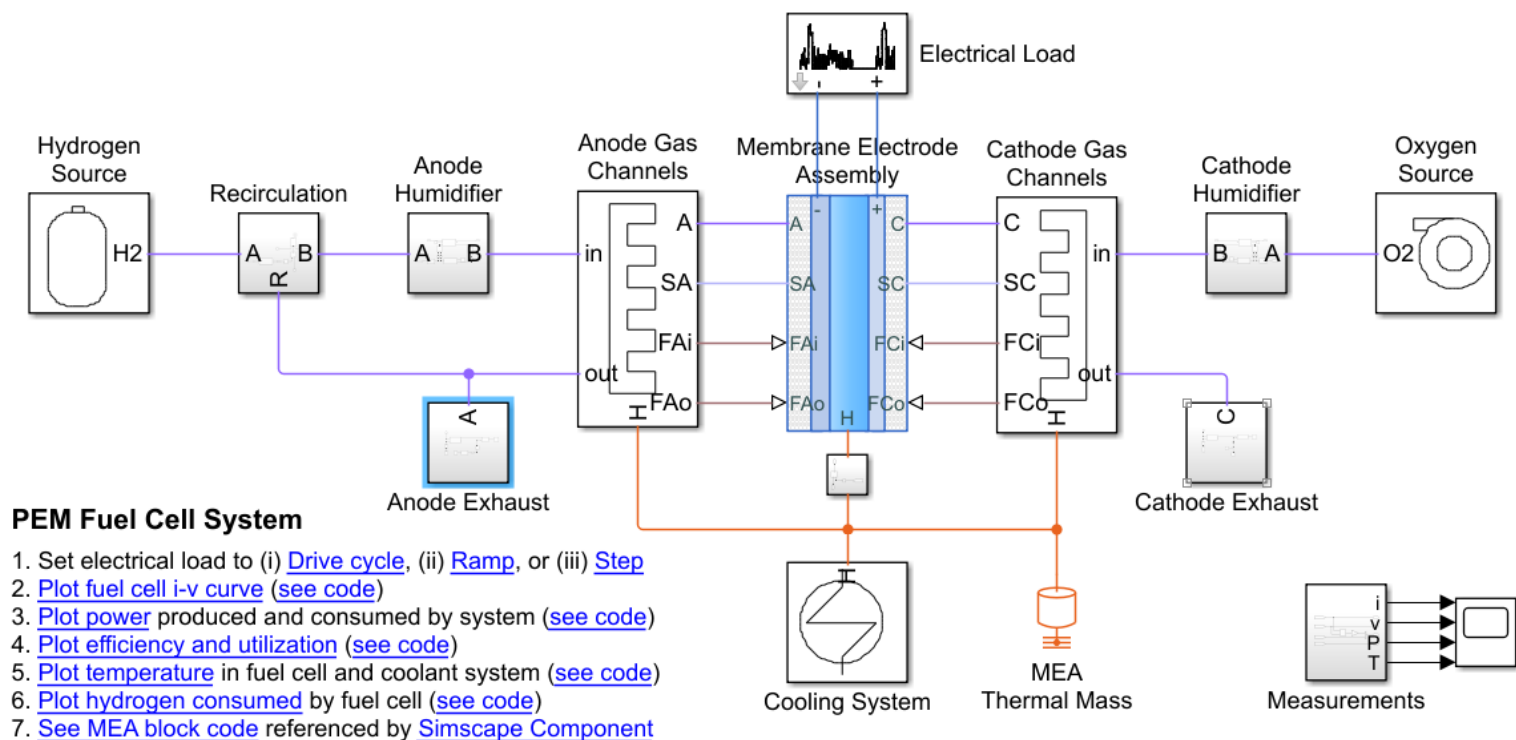
- 面向热力学的方法论
 - 电化学 & BoP 辅助系统
 - 设计并优化燃料电池系统
 - 更高精度，更多细节
 - 物理建模工具
- 面向系统集成的方法论
 - 输入-输出 / 查表 / 统计学
 - 集成和调度控制
 - 快速运行，更少细节
 - 统计建模工具

燃料电池系统模型: 面向热力学

- 燃料电池堆
 - 用 Simscape language 来实现反应过程

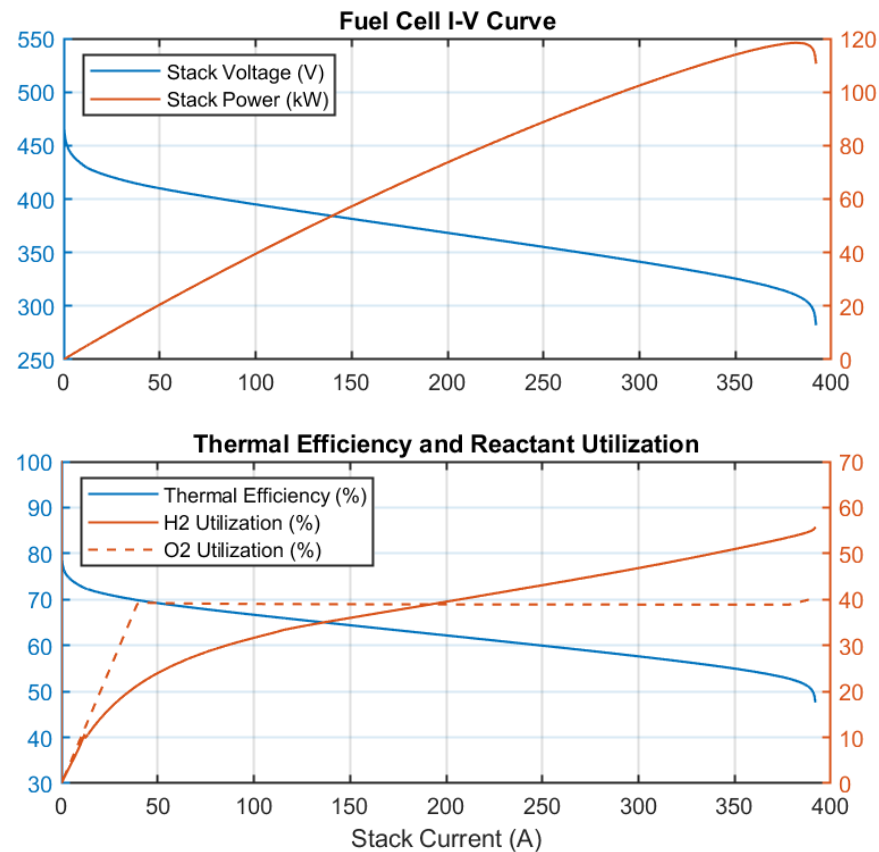
- BoP 辅助系统
 - 压缩机
 - 加湿器
 - 冷却系统
 - 氢气再循环
 - 水管理

Shipping example in R2021a: PEM Fuel Cell System

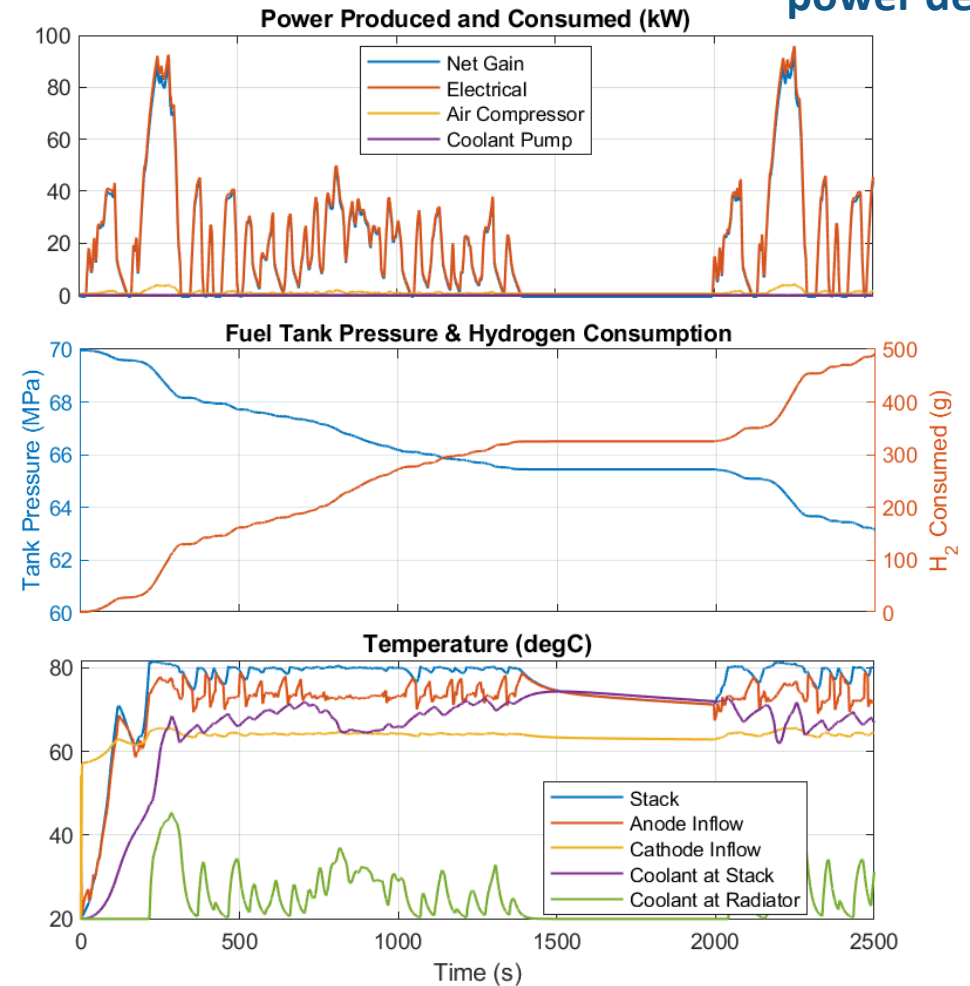


案例: 特性曲线和驾驶循环研究

Stack Characteristic Curves (Current sweep)

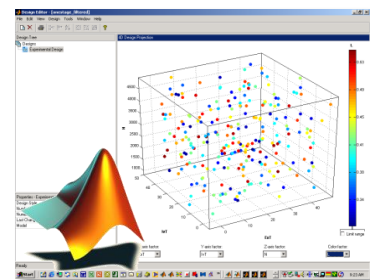


Drive-Cycle Response Based on FTP75 power demand

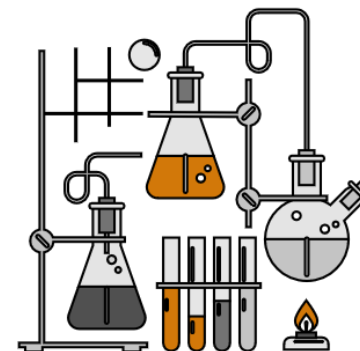


燃料电池系统模型: 面向系统集成

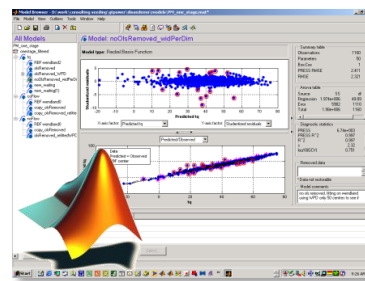
- 建立查表 (LUT) 和基于统计的模型
 - 从试验数据集创建
 - 从高精度仿真创建
 - 适用于集成分析和控制开发的快速运行模型
- Model-Based Calibration Toolbox
 - 用于复杂非线性系统建模和标定的应用程序和设计工具



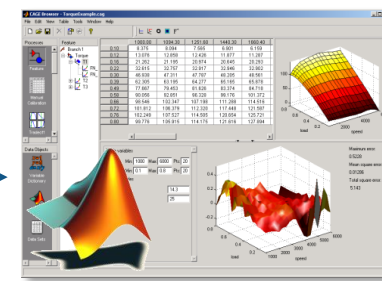
Design Experiment



Data Collection

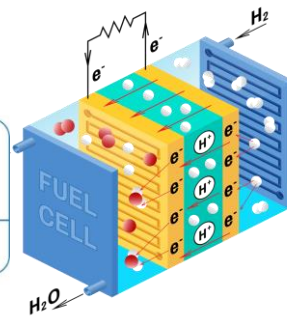
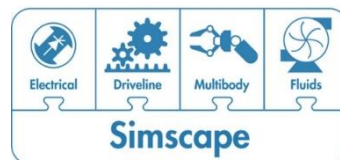


Data Modeling



Calibration / LUT Export

Implementation

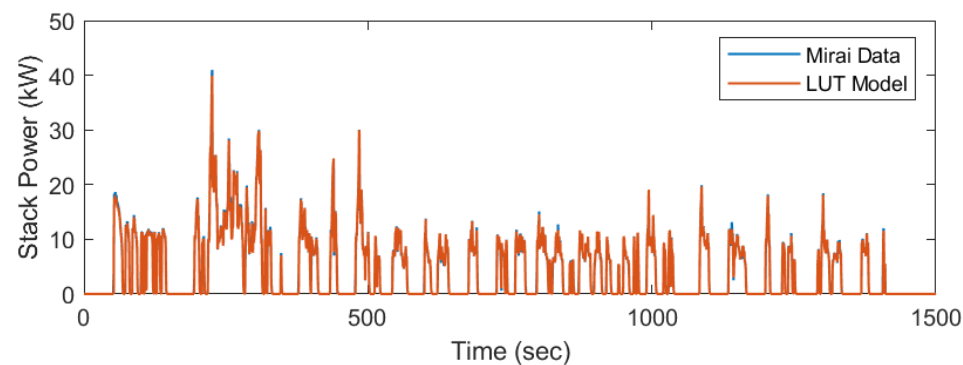
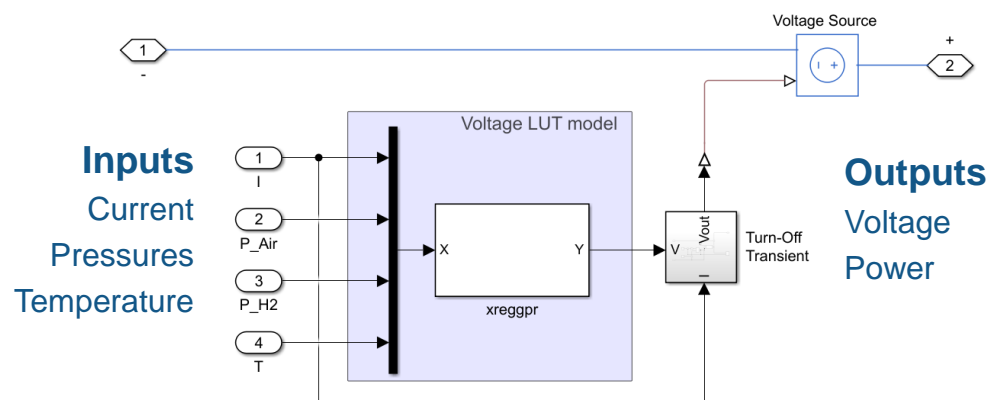
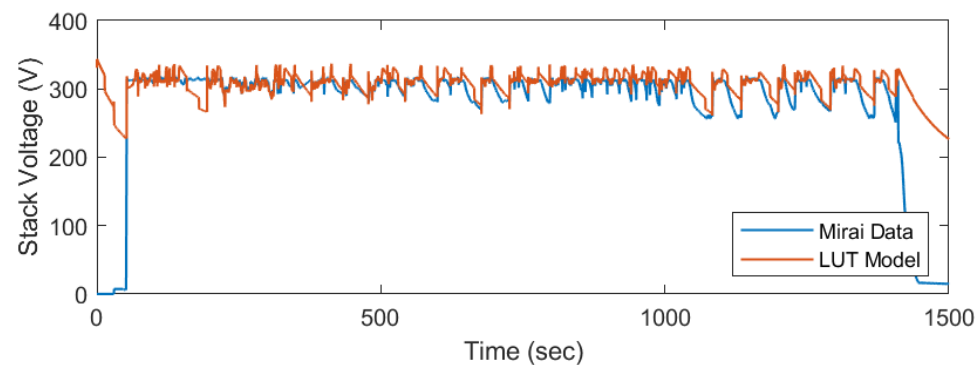
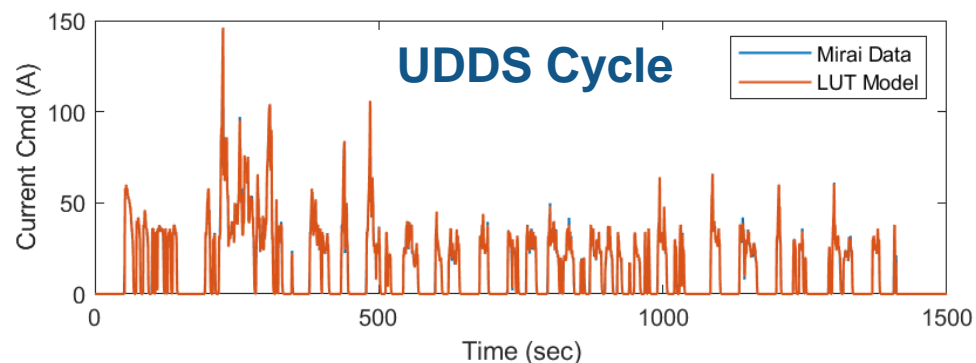


案例: 从试验数据建立燃料电池模型

■ 从燃料电池实车收集而来的实验室数据

[Argonne National Laboratory, "Technology Assessment of a Fuel Cell Vehicle: 2017 Toyota Mirai", ANL/ESD-18/12](#)

- 为后续的仿真和验证生成并导出 MBC 模型
- 从试验数据到仿真模型的快速通道



总结

- PEM 燃料电池系统成为电驱动总成的趋势
- MathWorks 工具具备燃料电池虚拟车辆模型建模能力
- MathWorks 工具和工作流，支持使用如下方式建立燃料电池系统模型
 - 1) 基于燃料电池堆电化学原理的解析方法
 - 2) 基于试验数据或高精度仿真的统计学数据驱动方法
- 用于燃料电池电动车燃油经济性、性能和热分析的高效、可定制解决方案，

MATLAB EXPO 2021

谢谢！

