

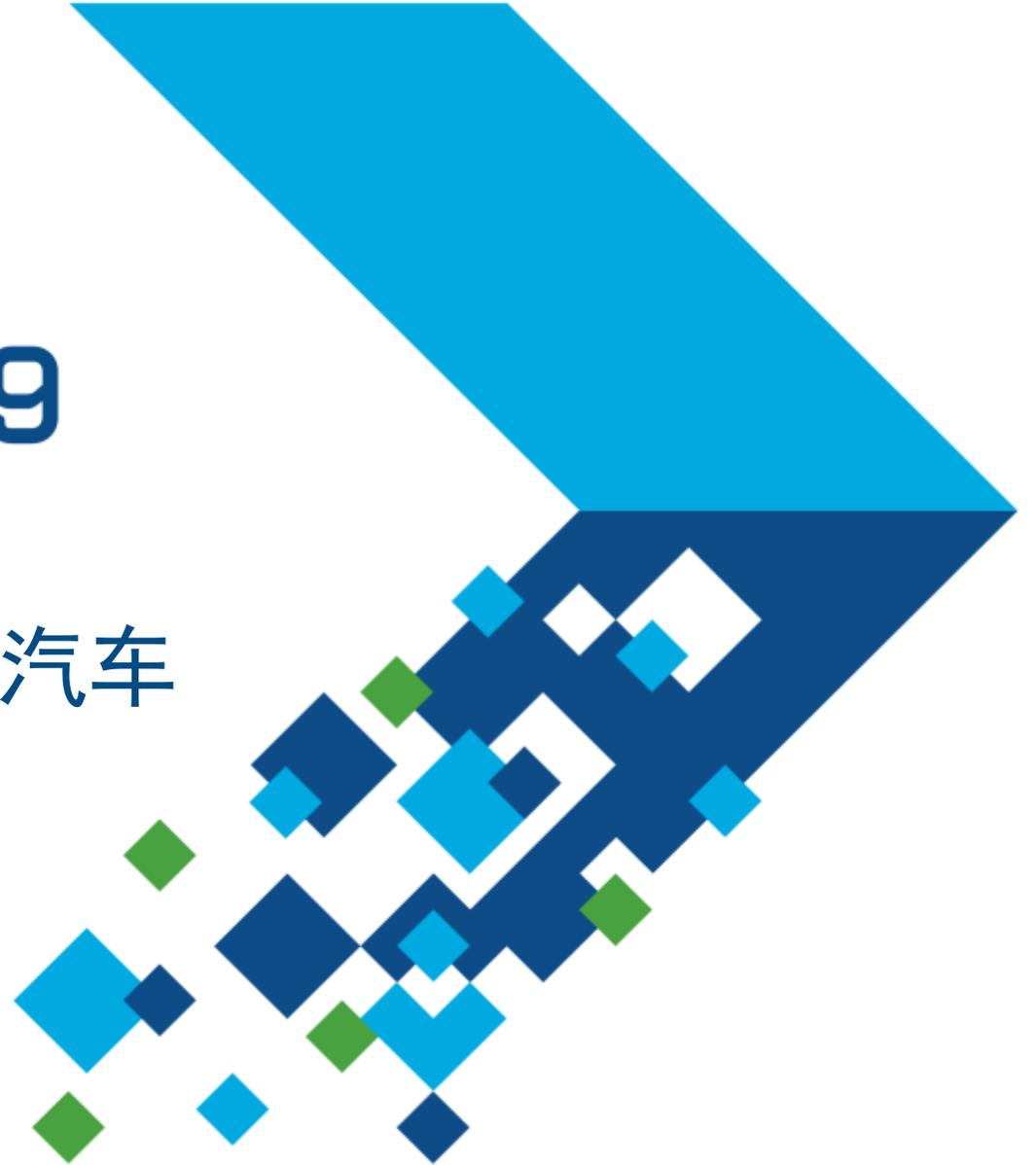
# MATLAB EXPO 2019

## 虚拟车辆模型搭建及在新能源汽车 开发中的应用

胡洪祥

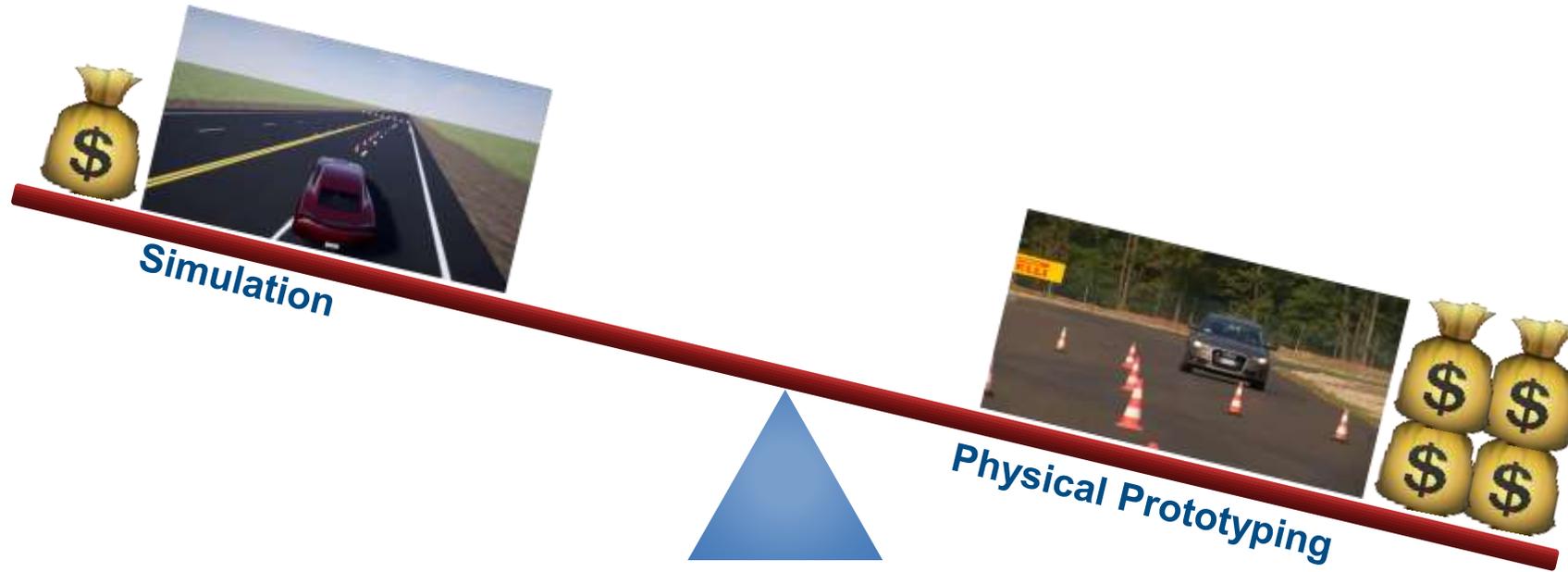
MathWorks中国

[vhu@mathworks.com](mailto:vhu@mathworks.com)



# 主要内容

- Simulink虚拟车辆仿真集成平台简述
- 用于结构选型的仿真模型建立（含控制模型和被控对象模型）
- 结构选型仿真及结果分析
- 总结





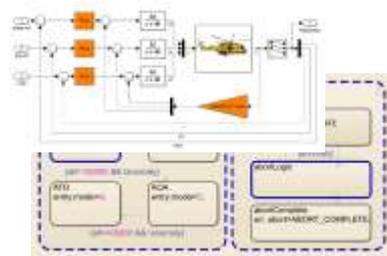
Simulation



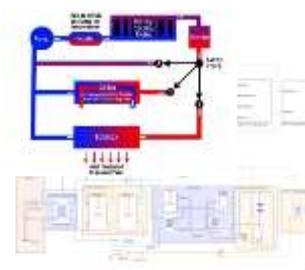
Physical Prototyping



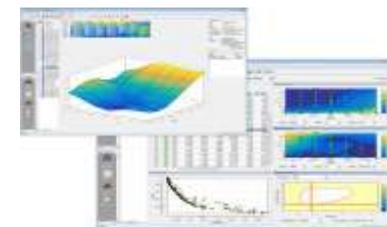
结构选型/性能开发



控制算法/策略开发



热管理/能耗分析

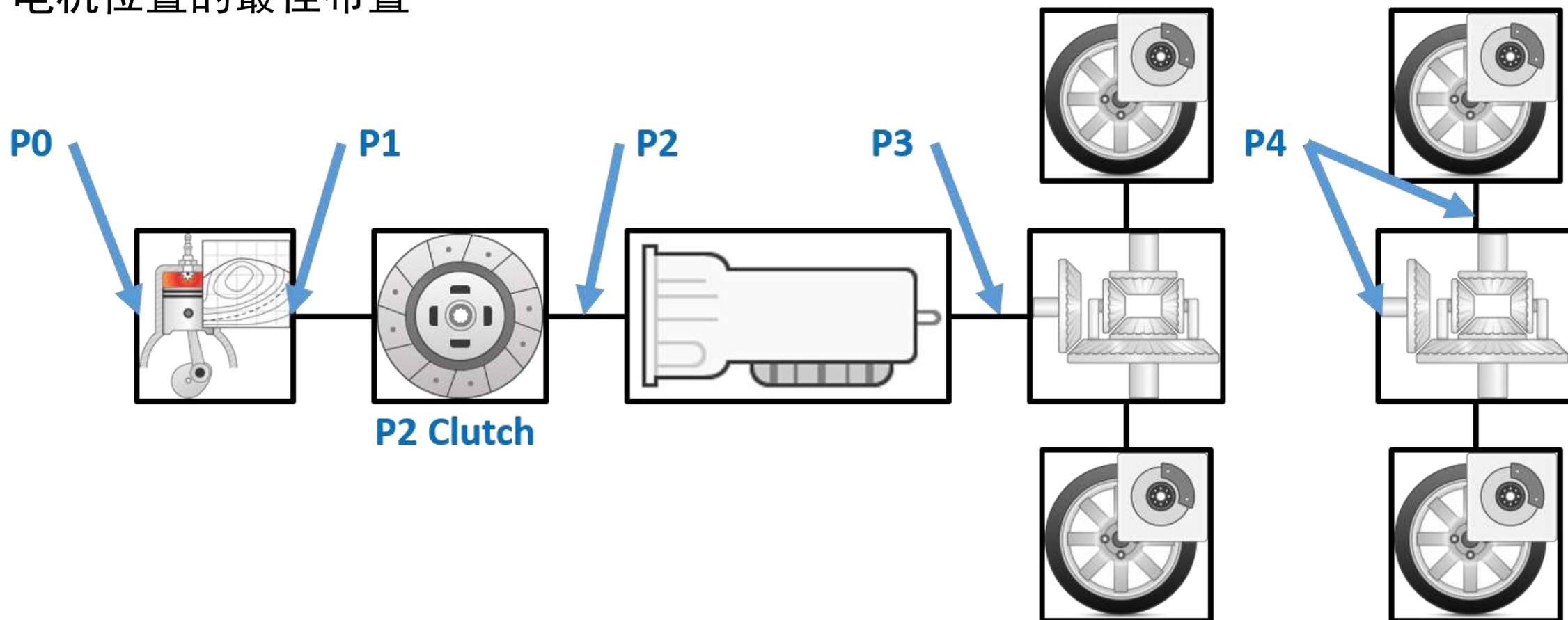


虚拟标定

.....

## 动力总成结构选型

- 考虑单电机，并联混合动力汽车的结构选型；
- 电机位置的最佳布置



# 问题描述

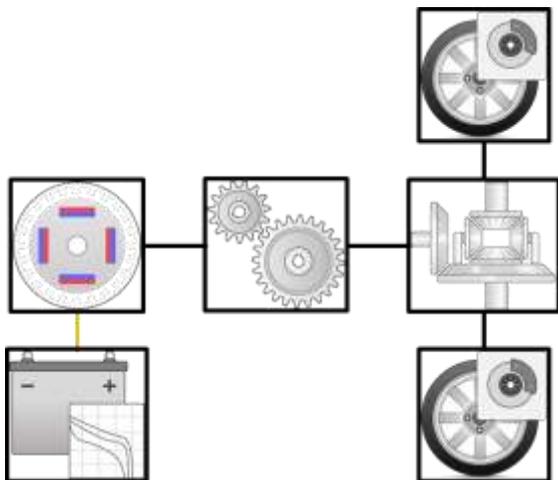
- 最小化：
  - 油耗 (以英里/加仑mpg表示, 驾驶循环FTP75, HWFET, 和 US06 US06)
  - 加速时间 (0-60mph)
- 约束条件：
  - 电机和发动机动力限制
  - 实际车速运行在驾驶循环目标车速2mph范围内
  - SOC范围:  $[SOC_{low}, SOC_{high}]$
  - $|SOC_{final} - SOC_{init}| < tol$  → requires iteration on supervisory control parameter

# 主要内容

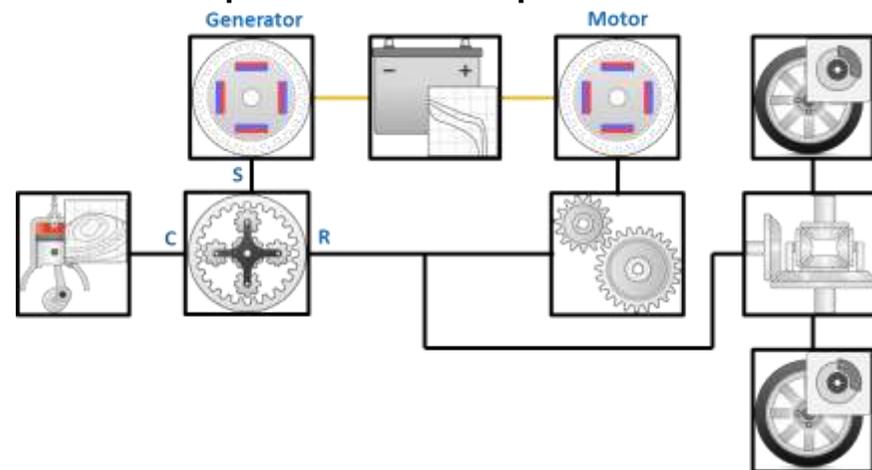
- Simulink虚拟车辆仿真集成平台简述
- 用于结构选型的仿真模型建立（含控制模型和被控对象模型）
- 结构选型仿真及结果分析
- 总结

# Powertrain Blockset 提供的EV / HEV动力总成结构

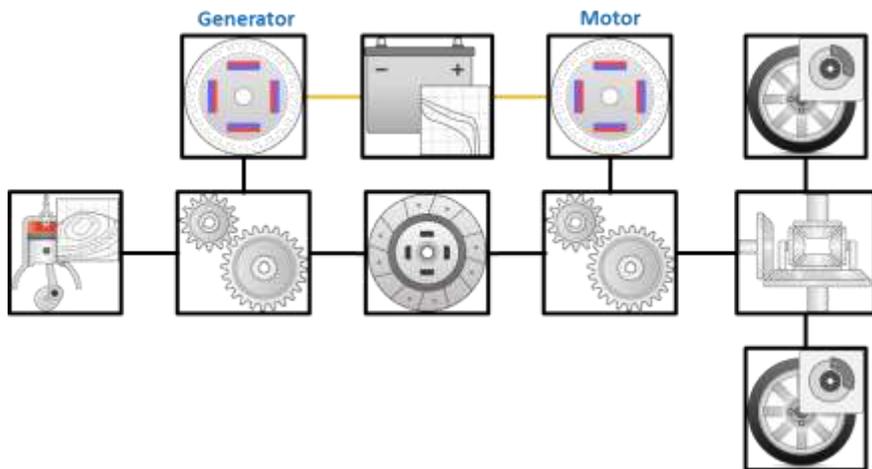
纯电动 EV



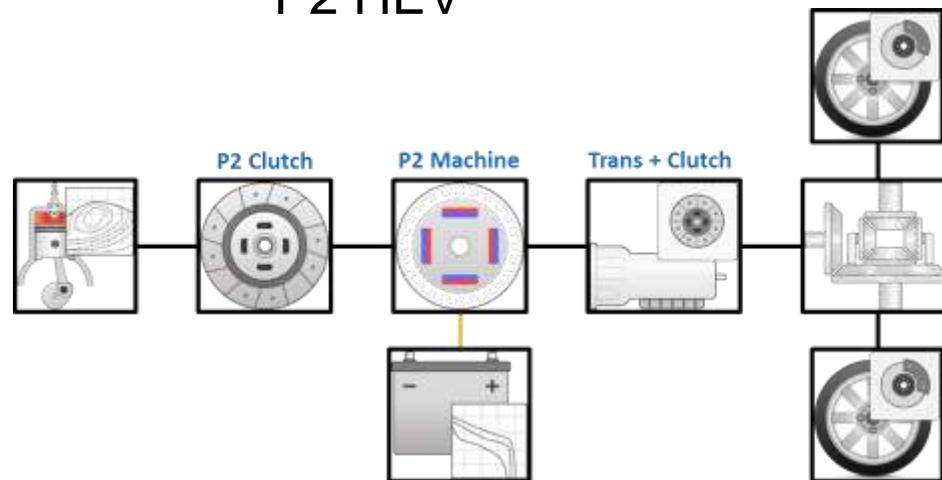
丰田Input Power-Split HEV



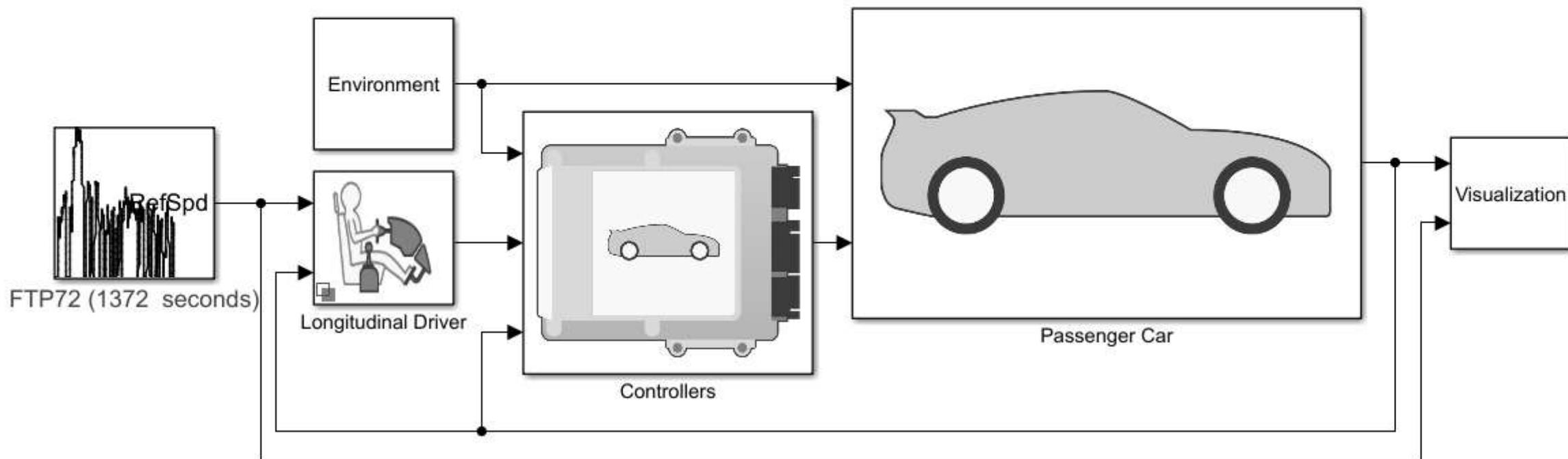
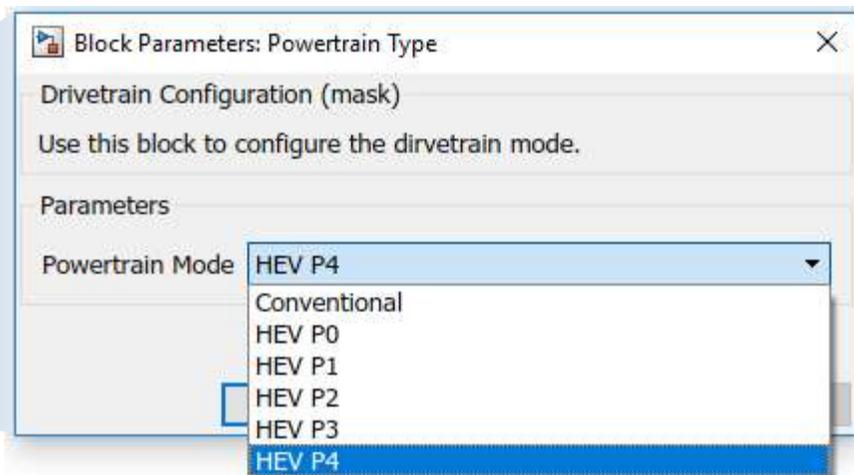
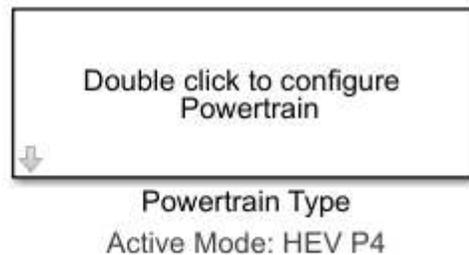
Multi-mode HEV → P1/P3



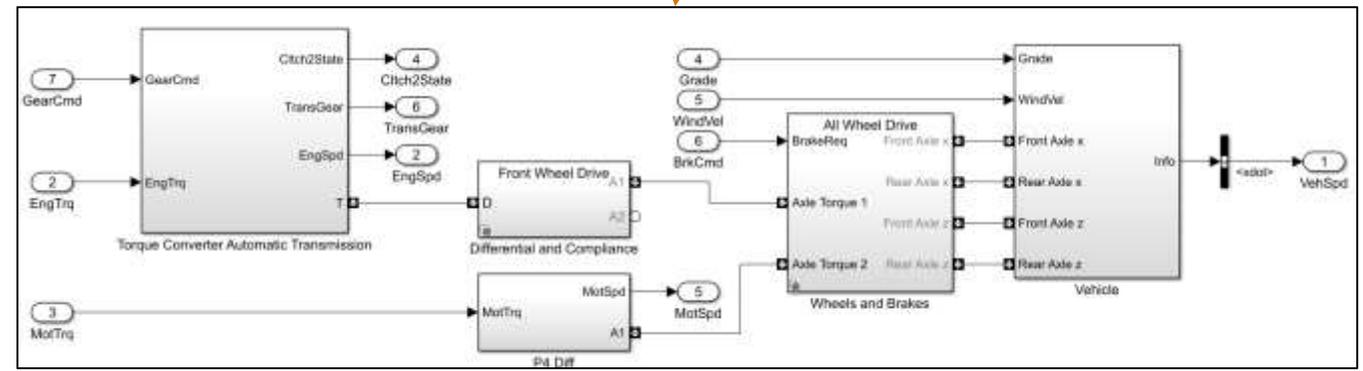
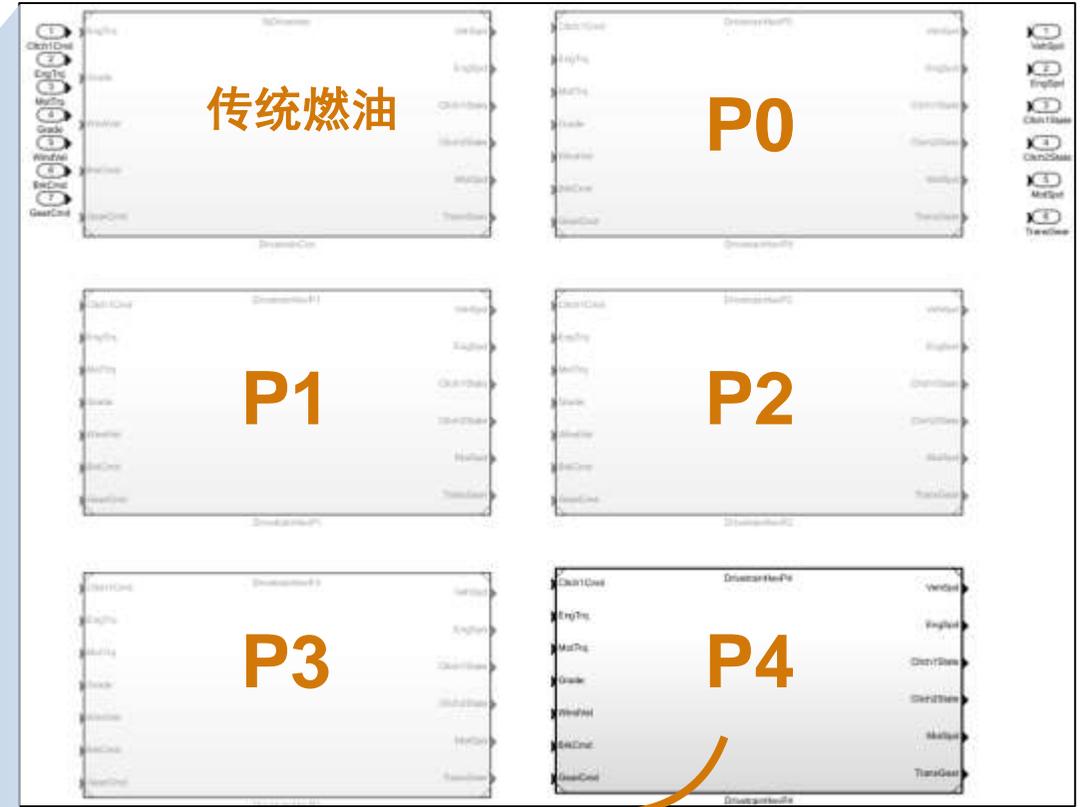
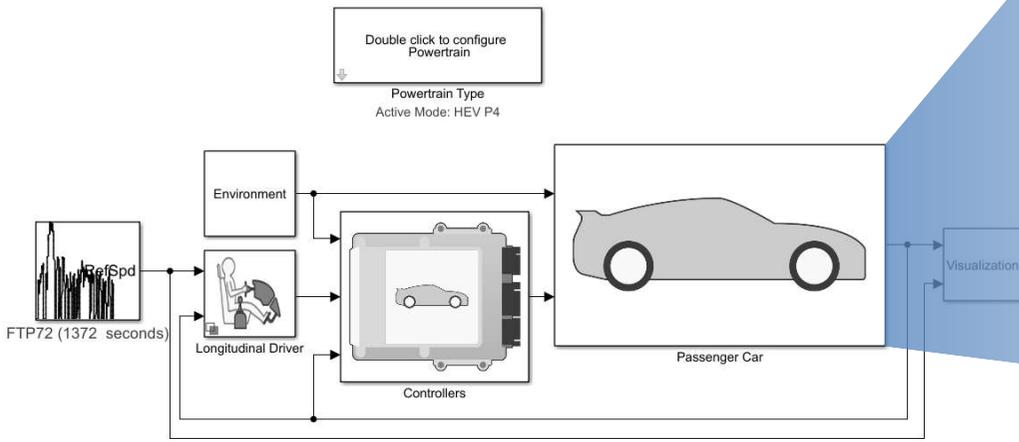
P2 HEV



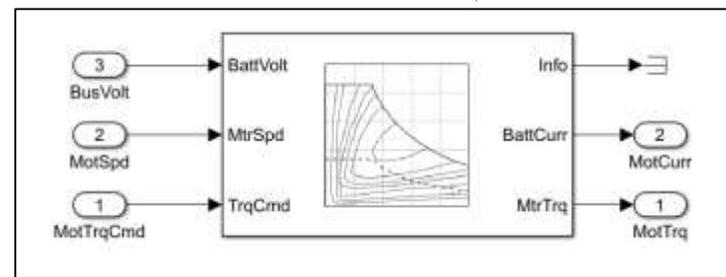
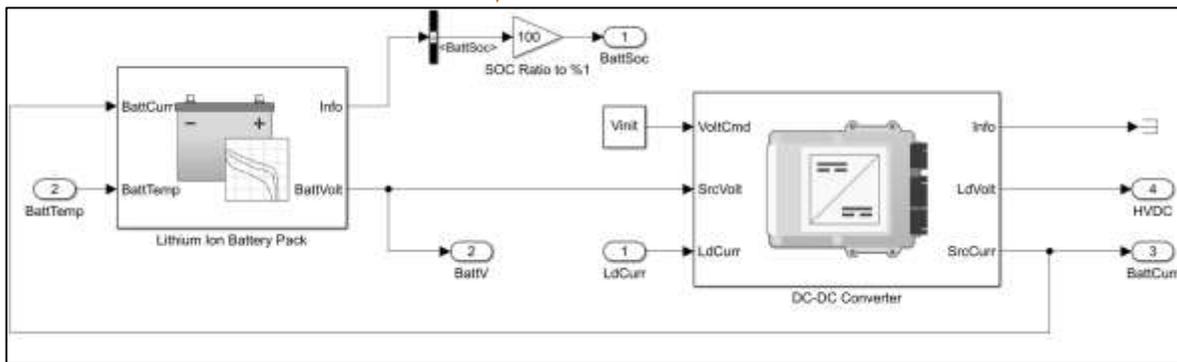
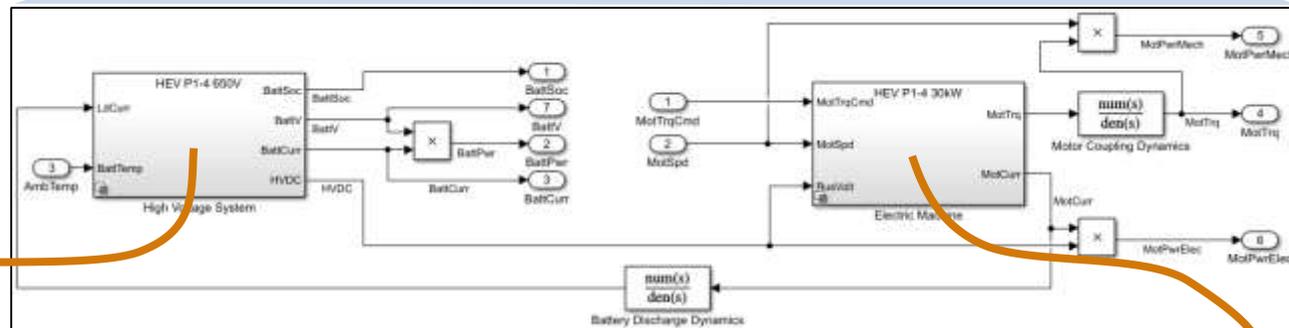
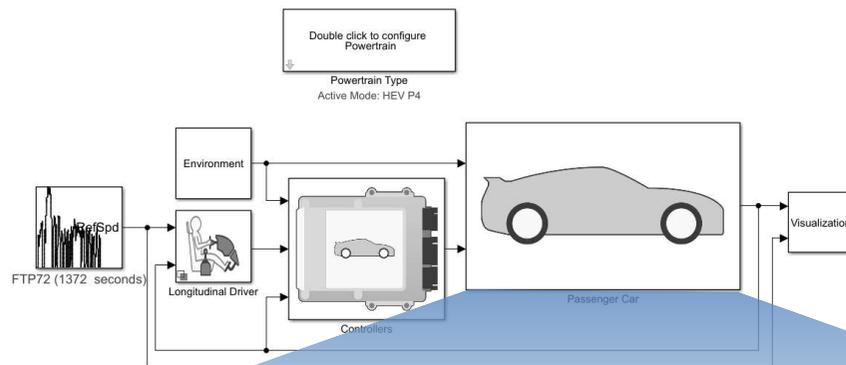
# 整车仿真模型建立： 系统级



# 整车仿真模型建立： 传动系子系统模型



# 整车仿真模型建立： 电气系统子模型

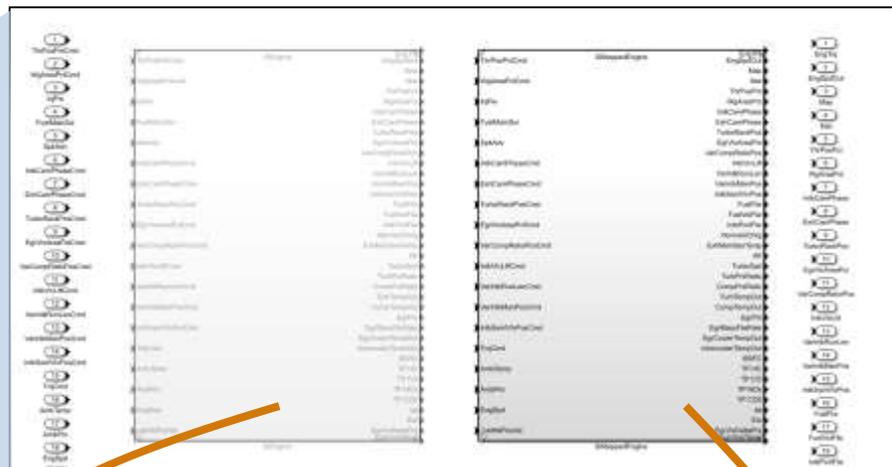
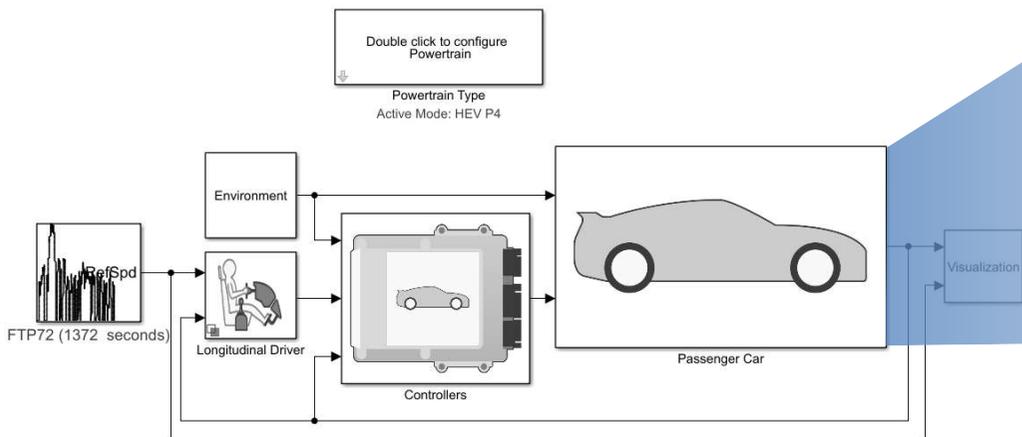


30 kW 电机  
(10 kW for P0)

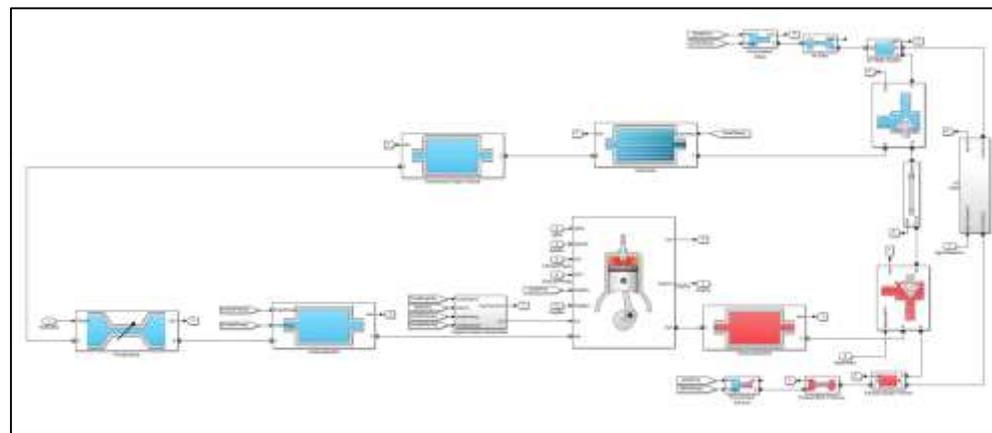
650 V 电池 & DC-DC

# 整车仿真模型建立： 发动机子系统模型

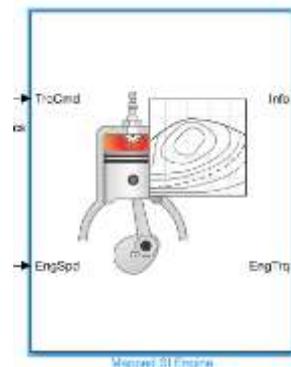
## 发动机子系统



1. 仿真获取发动机数据
2. 发动机台架实测数据
3. 已有发动机模型衍生



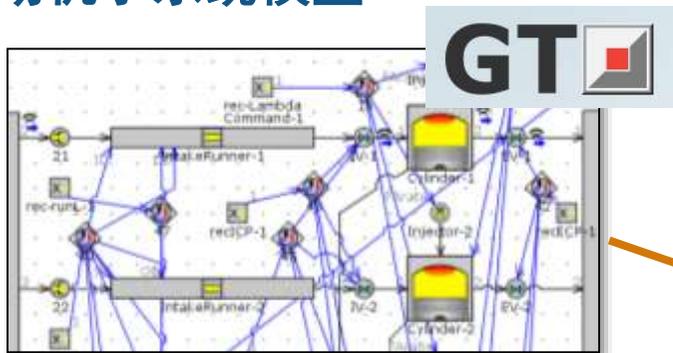
SI Dynamic Model



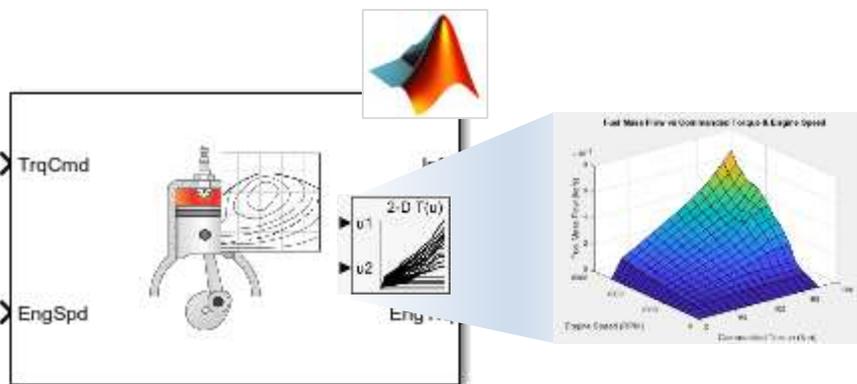
SI Mapped Model

# 整车仿真模型建立：1. 仿真数据建模

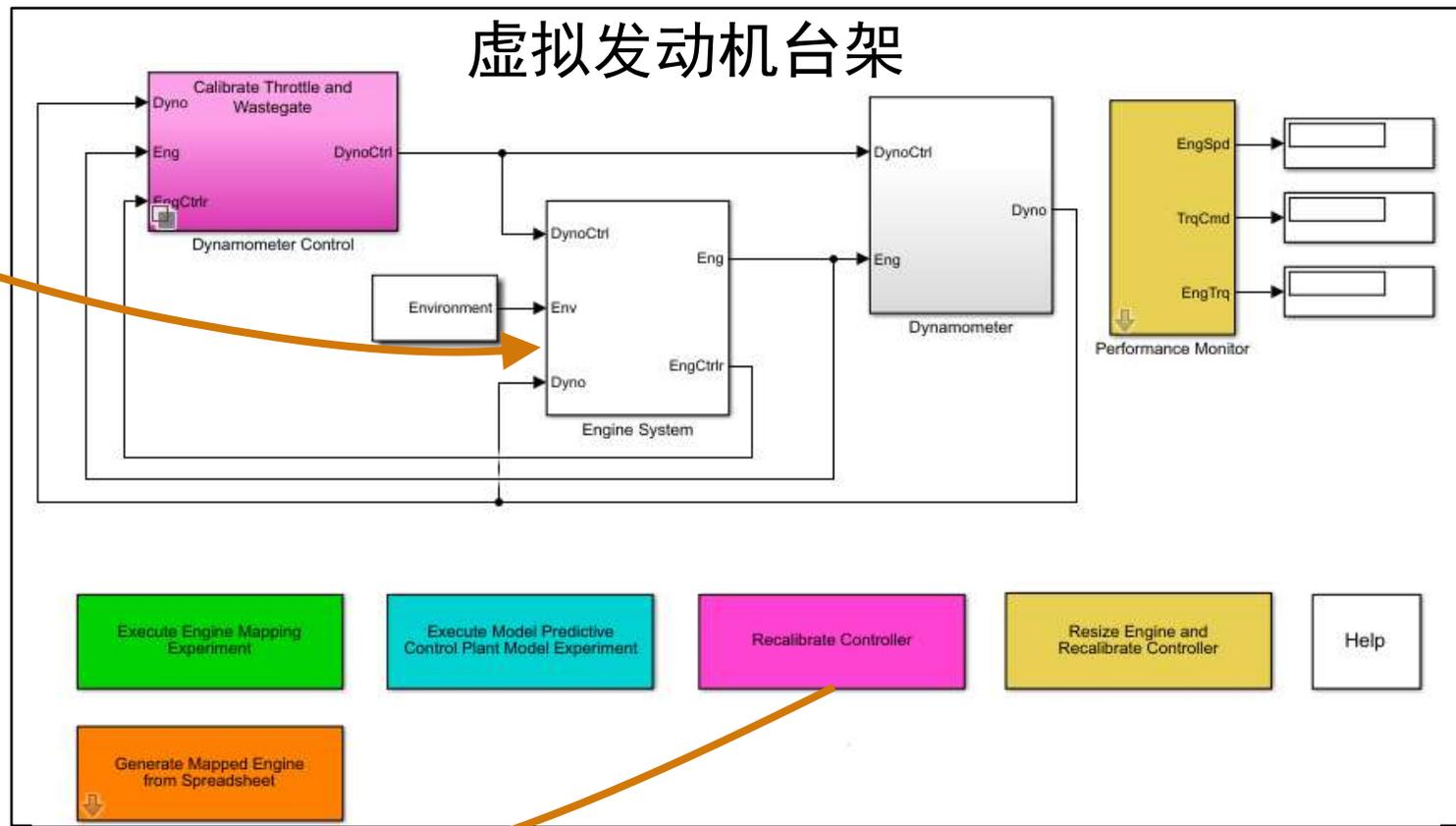
## 发动机子系统模型



用于本体设计，详细



用于控制开发，仿真速度快

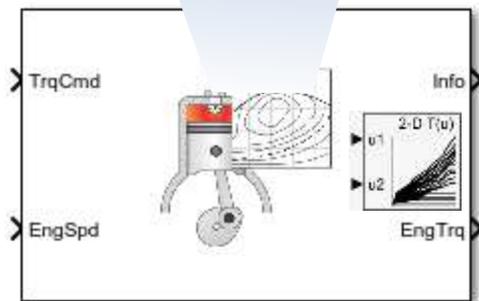
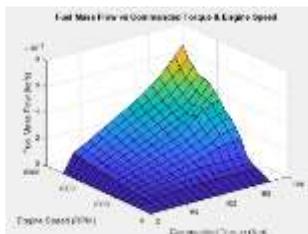


虚拟发动机自动生成mapped engine model

# 整车仿真模型建立：2. 实测发动机数据建模/自动参数化

## 发动机子系统模型

### 实测发动机台架数据



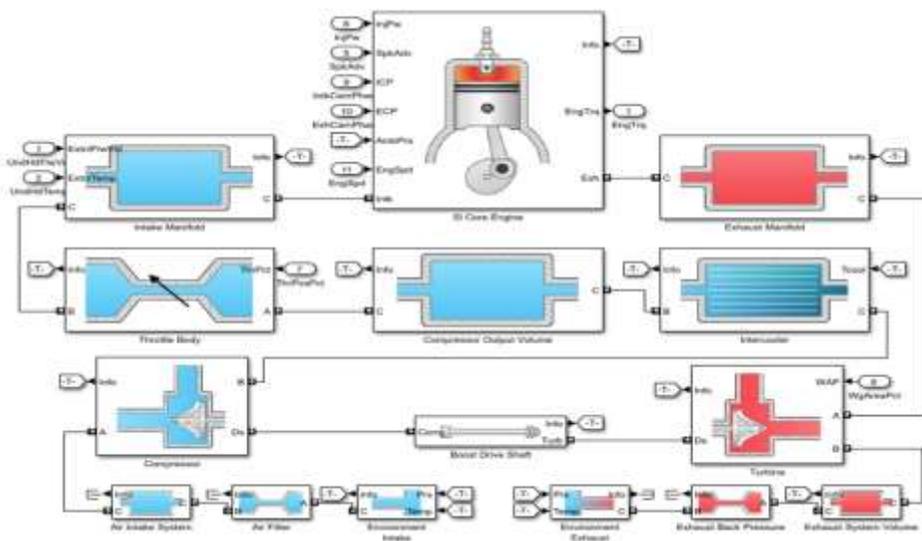
1.5L SI Mapped model

Name:	Torque	EngSpd	AirMassFlwRate	FuelMassFlwRate	ExhTemp	BSFC
Unit:	N*m	rpm	kg/s	kg/s	K	g/(kW)
Data:	33.598	750	0.003756044	0.000257263	767.6445	350.97
	45.847	750	0.004654959	0.000318832	788.1032	318.76
	56.568	750	0.005485734	0.000375735	800.8691	304.45
	68.245	750	0.006440062	0.0004411	880.7776	296.26
	76.223	750	0.007074802	0.000484576	909.6978	291.3
	76.223	750	0.007074794	0.000484575	909.6971	291.39
	28.544	1053.6	0.00502789	0.000344376	864.1794	393.66
	40.024	1053.6	0.005905243	0.000404469	877.6878	329.91
	51.453	1053.6	0.006903229	0.000472824	886.9836	299.89
	62.881	1053.6	0.008056477	0.000551813	900.5524	286.35
	74.31	1053.6	0.009218835	0.000631427	919.7863	277.26
	85.738	1053.6	0.010556639	0.000723057	990.6683	275.16
	95.025	1053.6	0.012052329	0.000825519	1071.628	283.46
	24.676	1357.1	0.005875772	0.00040245	901.2477	413.12
	36.983	1357.1	0.007204383	0.000493451	921.4745	338.20
	48.412	1357.1	0.008373948	0.000573558	926.201	300.20794
	59.84	1357.1	0.0097533	0.000668034	941.4953	282.79031
	71.269	1357.1	0.011219721	0.000768474	955.8058	273.14525
	82.697	1357.1	0.012688208	0.000869055	969.9667	266.19969

# 整车仿真模型建立：3. 已有发动机模型衍生（Resize Engine Model）

## 发动机子系统模型

具有动态性能的发动机模型



1.5L SI dynamic model

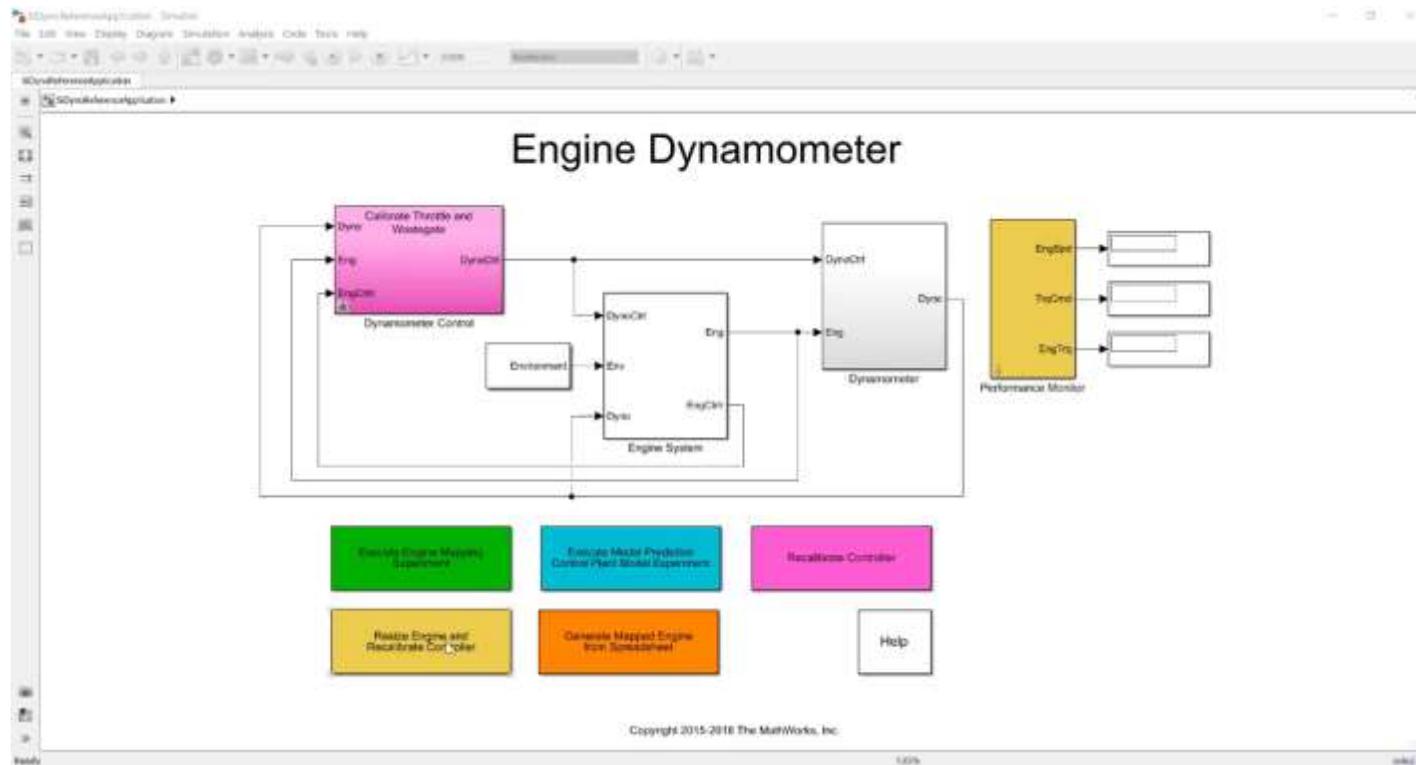


根据需要衍生不同大小的发动机模型

1.0L SI dynamic model

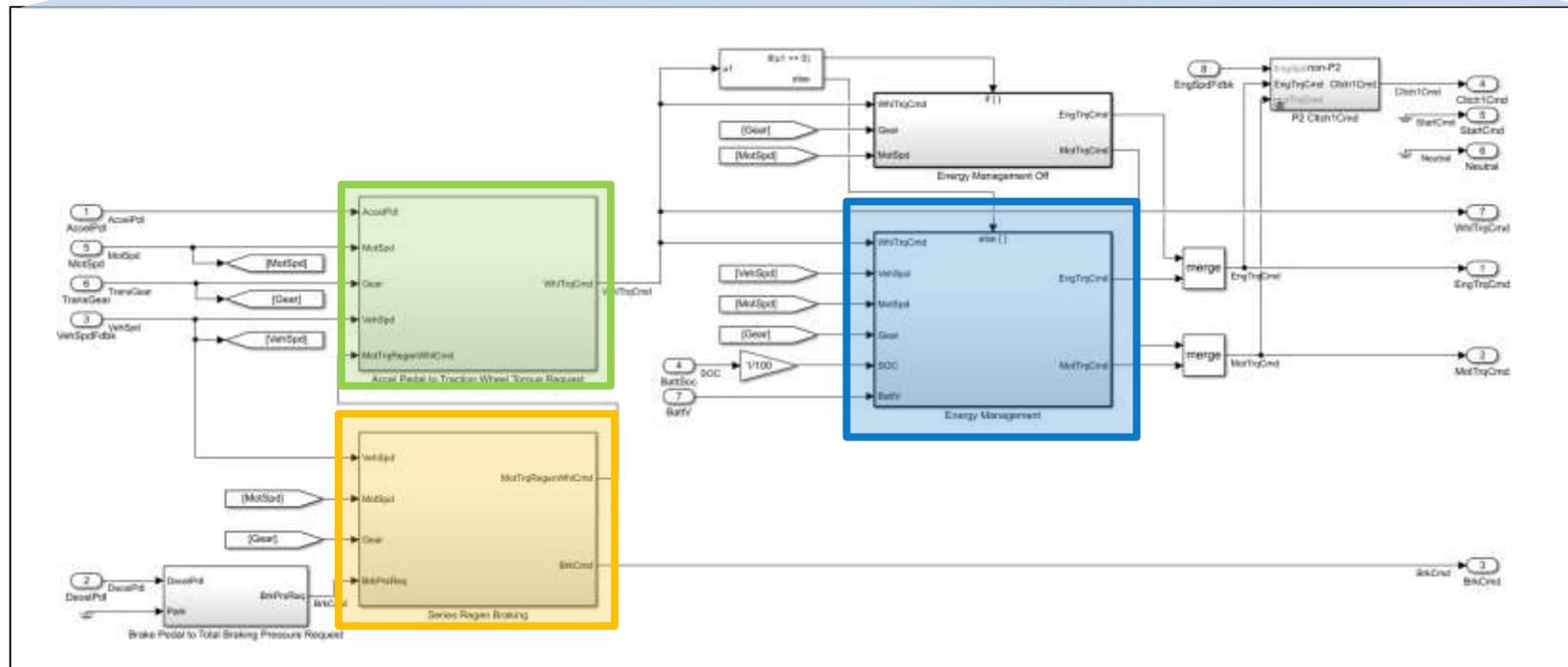
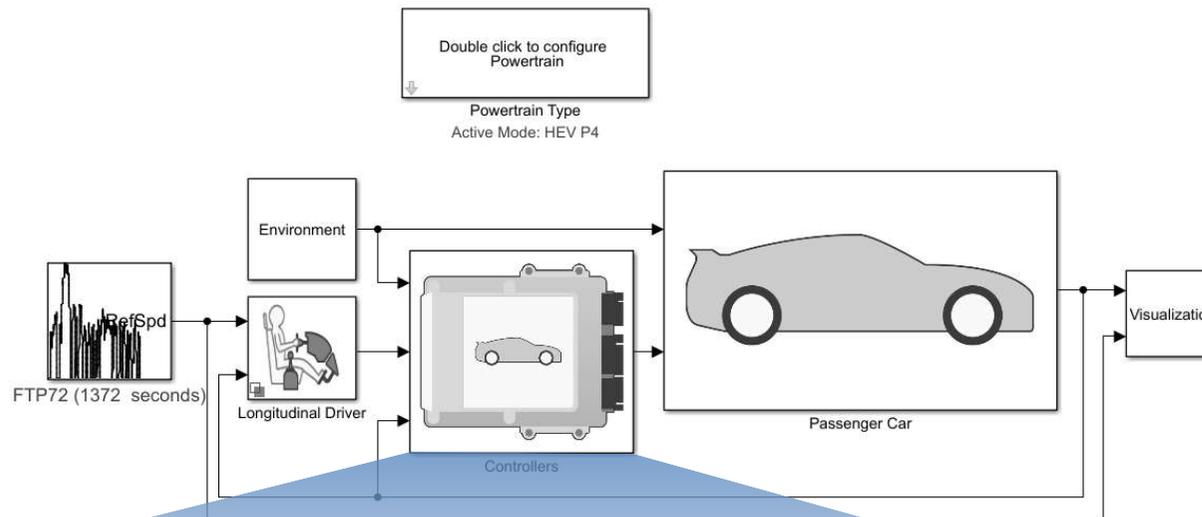
2.5L SI dynamic model

.....



# 整车仿真模型建立： 混合动力控制器

- 加速踏板位置 → 扭矩需求
- 制动能量回收
- 能量管理



# HEV能量管理

- 输出发动机/电机扭矩（或功率）指令
- 约束条件

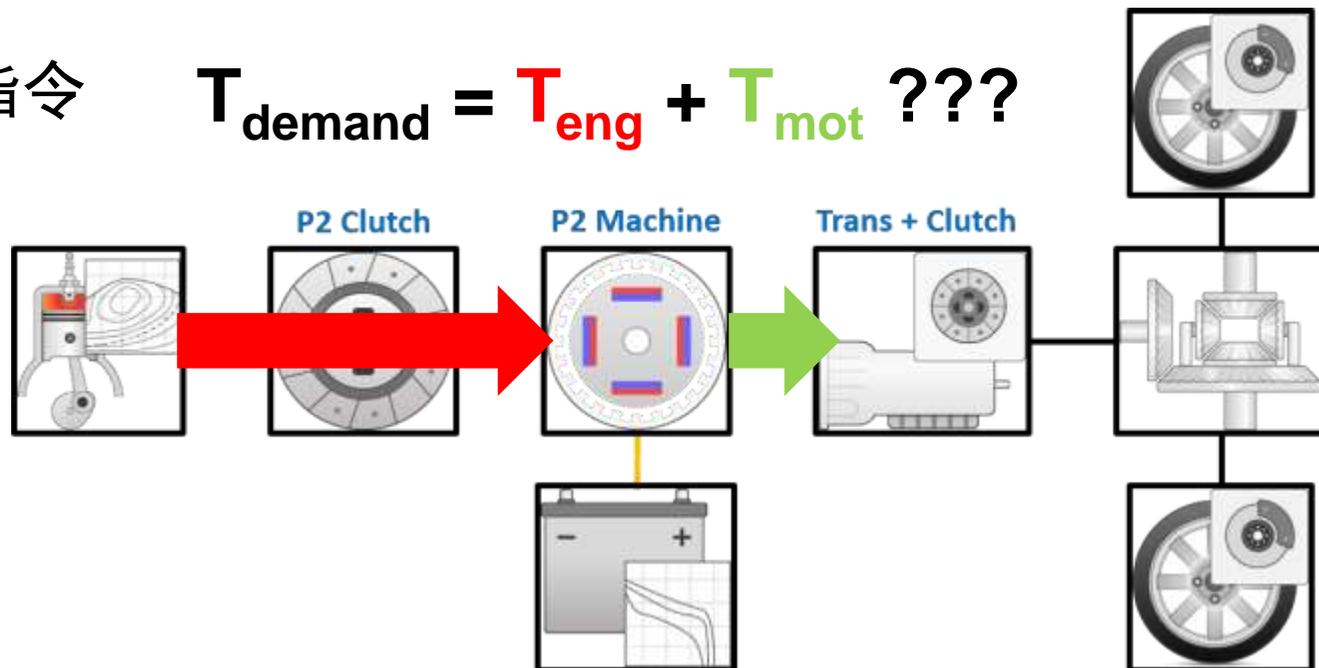
$$\tau_{min}(\omega) \leq \tau_{act} \leq \tau_{max}(\omega)$$

$$P_{chg}(SOC) \leq P_{batt} \leq P_{dischg}(SOC)$$

$$I_{chg}(SOC) \leq I_{batt} \leq I_{dischg}(SOC)$$

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$$

$$T_{demand} = T_{eng} + T_{mot} ???$$



- 以满足能量消耗最低为目标，同时尽量保持优良的驾驶性品质

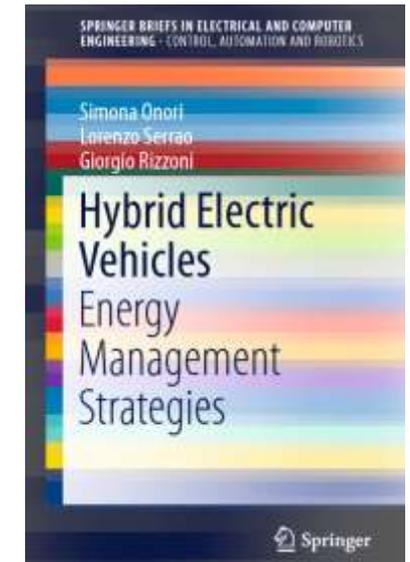
# 等效燃油消耗最小控制策略（ECMS）

- 等效燃油消耗最小控制策略（ECMS）是什么？
  - 决定什么时候使用发动机，电机或两者同时工作的一种整车控制算法；
  - 基于最小化瞬时等效燃油消耗的优化算法：

$$\min P_{equivalent}(t) = P_{fuel}(t) + s(t) \cdot P_{battery}(t),$$

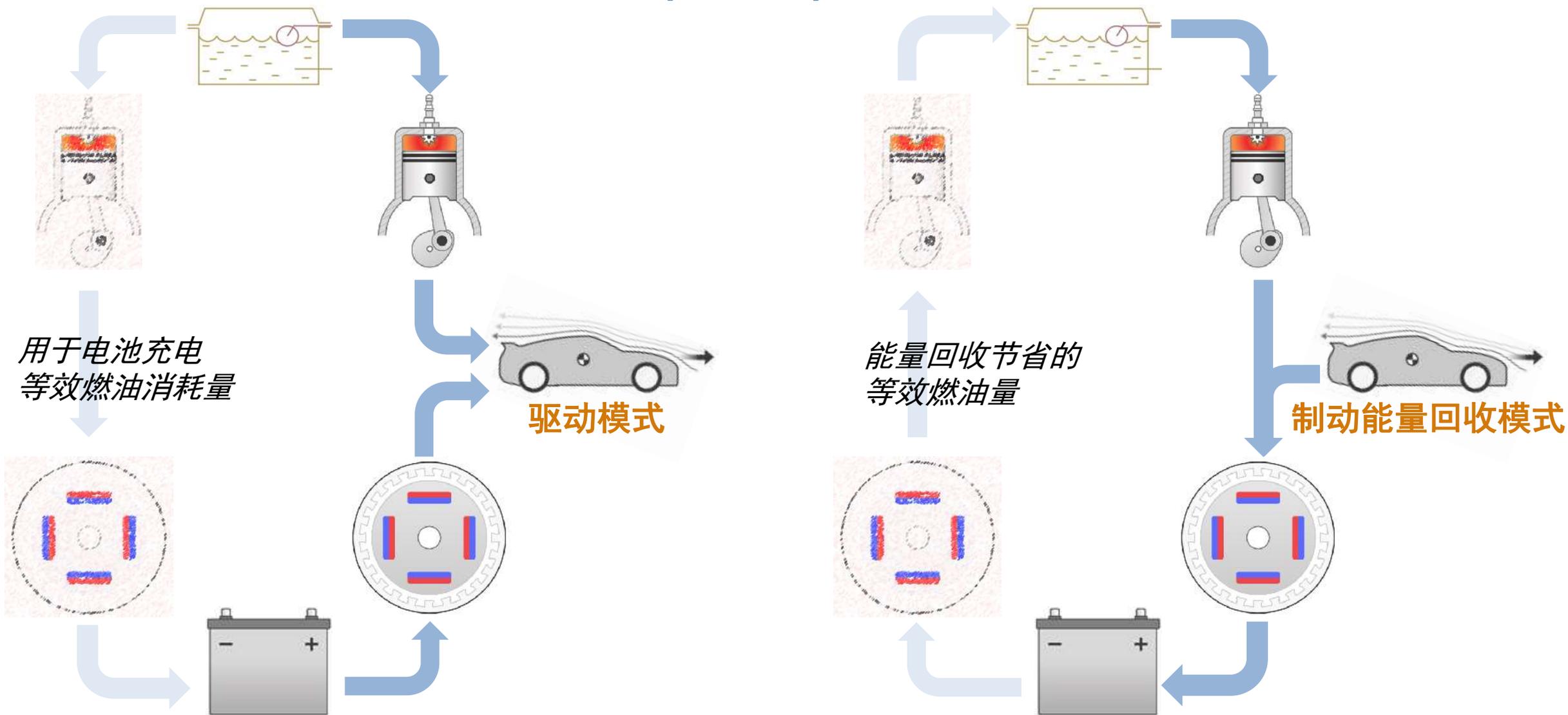
其中s(t)是“等效系数”

- 为什么使用ECMS？
  - 如果已知驾驶循环，能够提供接近最优的控制；
  - 可以方便的合理的对比不同混动动力结构类型的等效油耗（仅需要调整等效系数）；
  - 能方便的通过自适应算法进行改进和加强（自适应ECMS算法 即：Adaptive-ECMS）



<https://www.springer.com/us/book/9781447167792>

# 等效燃油消耗最小控制策略(ECMS)



# 等效燃油消耗最小控制策略(ECMS)工作过程

1. 创建扭矩分配矢量
2. 核查约束条件，确定不可行工况条件；
3. 计算和最小化代价函数

$$\begin{bmatrix} Trq\ Cmd \\ 0 \\ -Min\ Mot\ Trq \\ \vdots \\ +Max\ Mot\ Trq \end{bmatrix}$$

$$\tau_{min}(\omega) \leq \tau_{act} \leq \tau_{max}(\omega)$$

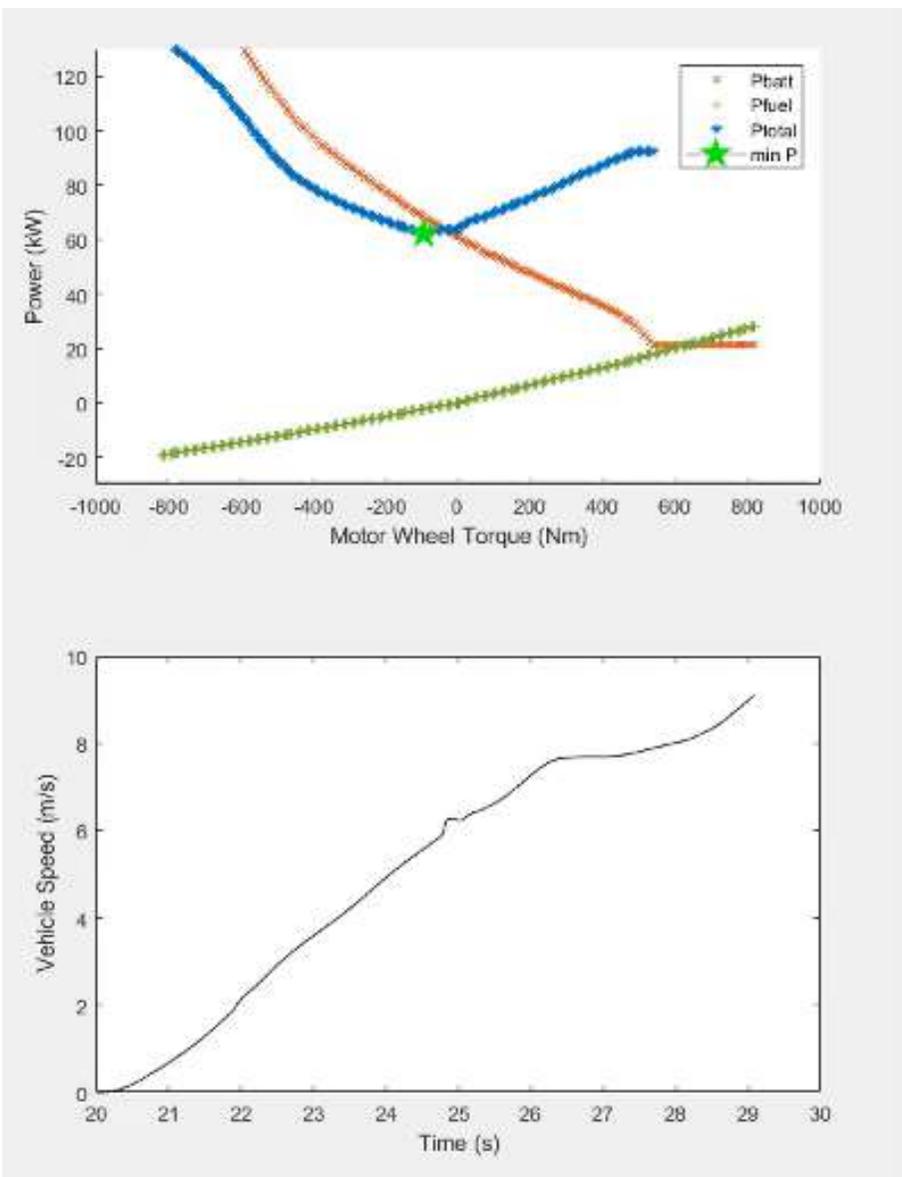
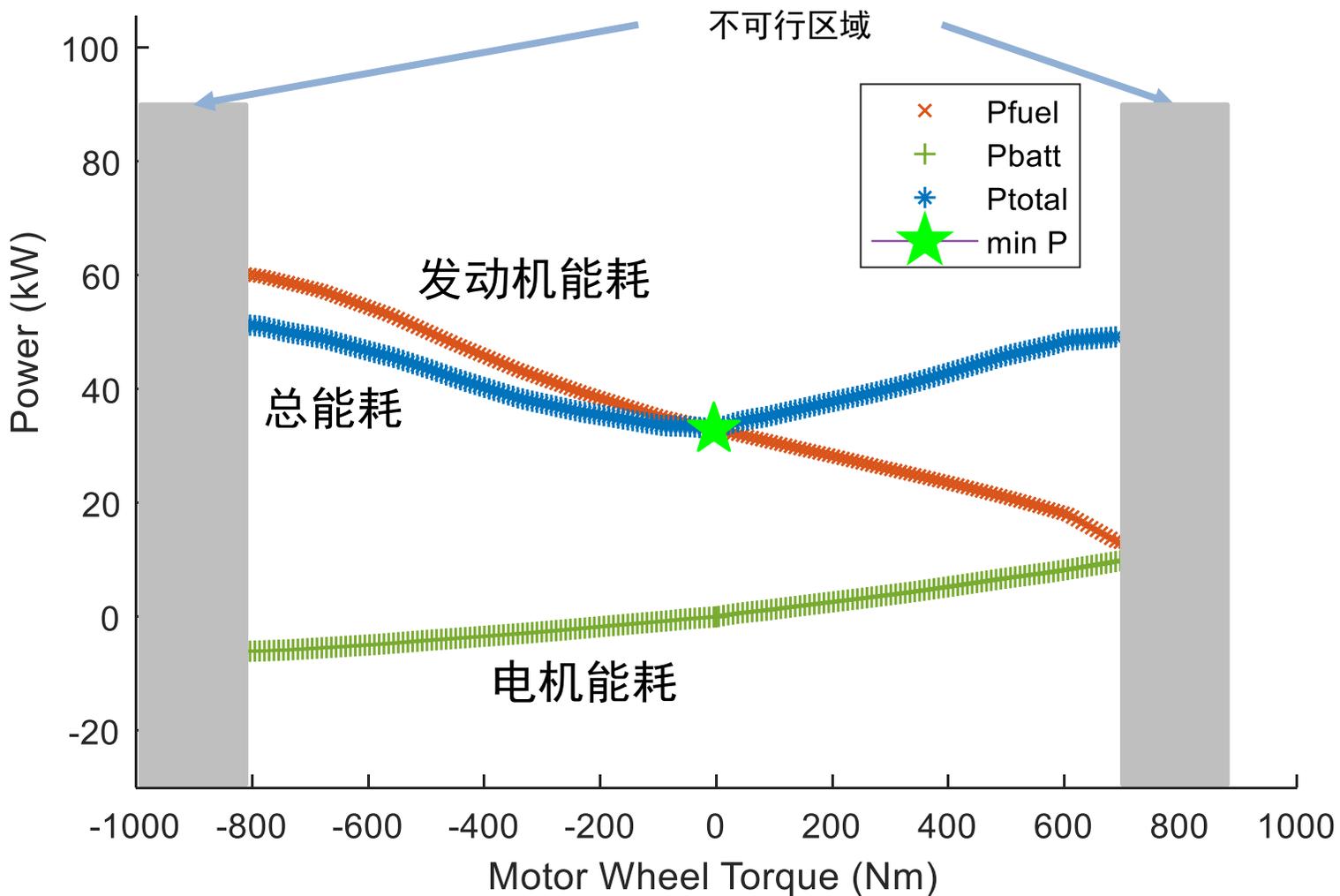
$$P_{chg}(SOC) \leq P_{batt} \leq P_{dischg}(SOC)$$

$$I_{chg}(SOC) \leq I_{batt} \leq I_{dischg}(SOC)$$

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$$

$$\min P = P_{fuel} + s \cdot P_{batt}$$

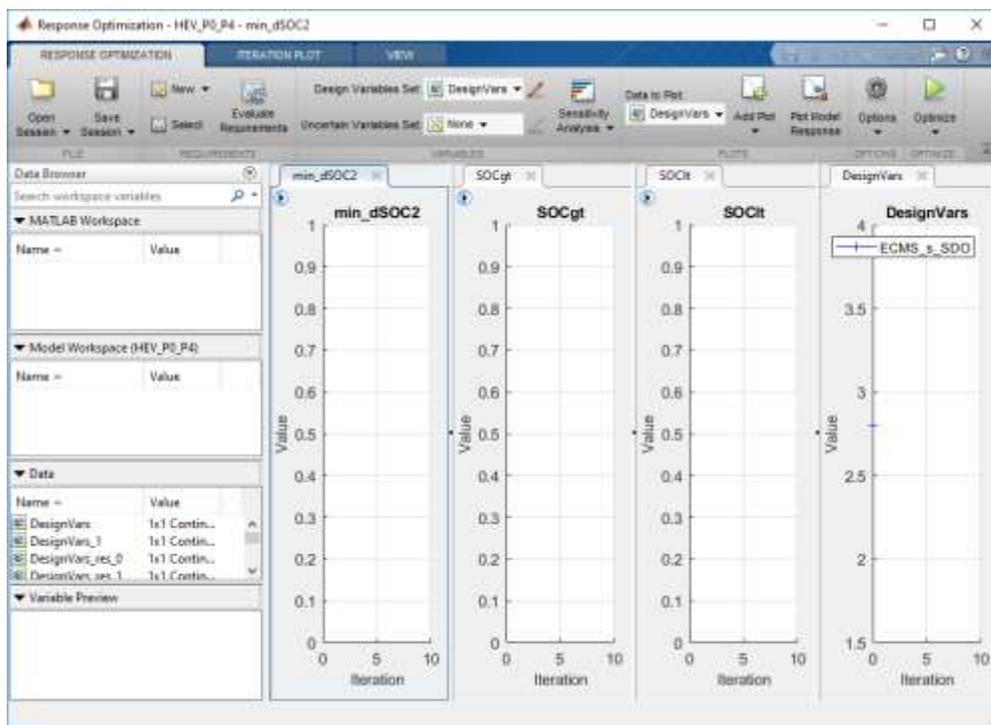
# 等效燃油消耗最小控制策略(ECMS)工作过程



# 主要内容

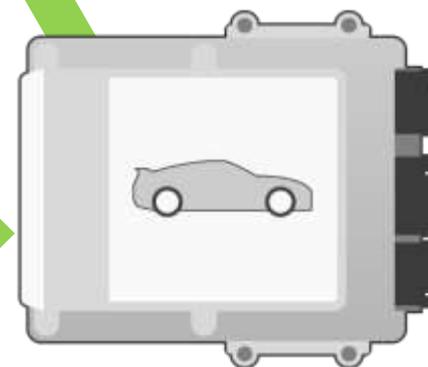
- Simulink虚拟车辆仿真集成平台简述
- 结构选型仿真模型建立（含控制模型和被控对象模型）
- 仿真及结果
- 总结

# 充电维持迭代过程



$\min \Delta SOC^2$   
SOC变化最小

更新 's'



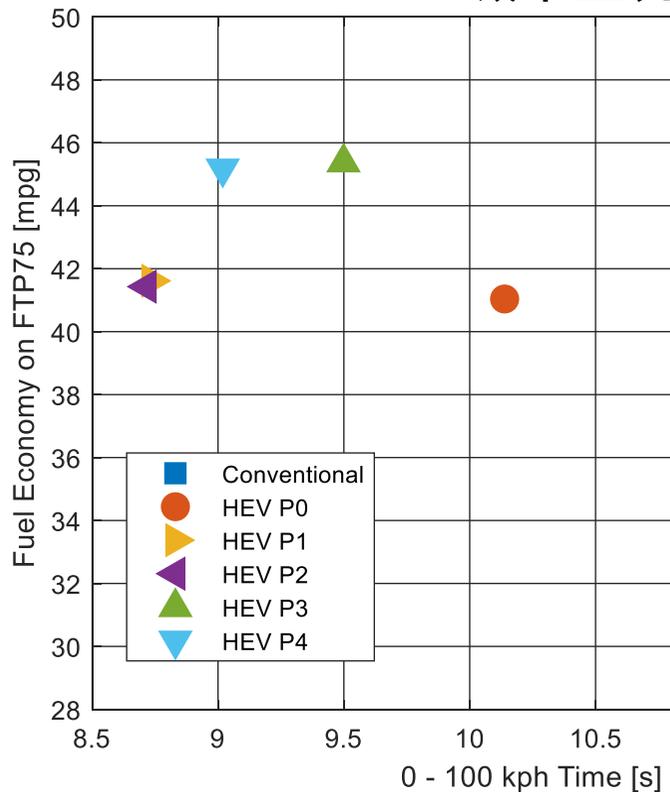
使用工具箱：

- Simulink Design Optimization Toolbox
- Optimization / Global Optimization Toolbox
- Parallel Computing Toolbox

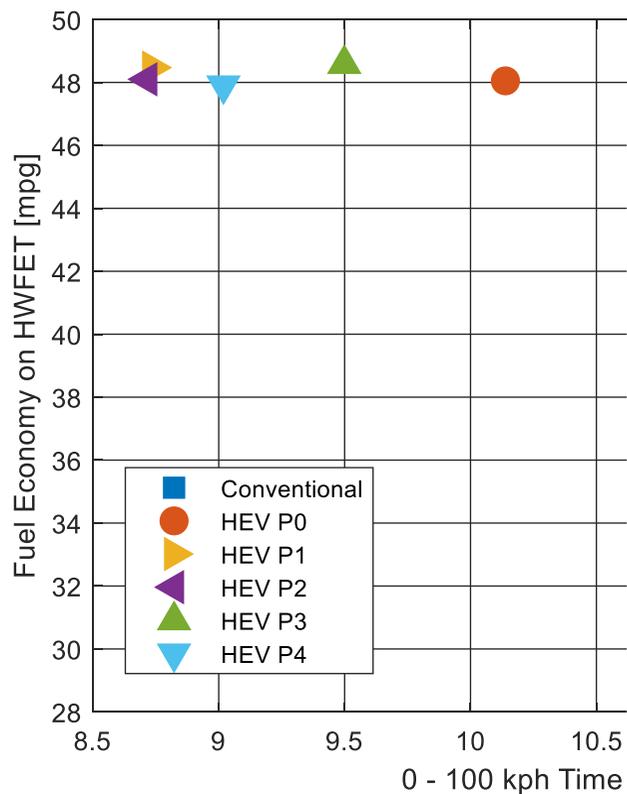
- 通过迭代，调整s（控制器参数），达到每个循环  $\Delta SOC \leq 1\%$  的目标；
- 评估不同驾驶循环（FTP75, HWFET, and US06）下的等效油耗；
- 评估全油门（WOT）下加速性能；

# 单个循环工况下，不同结构仿真结果对比

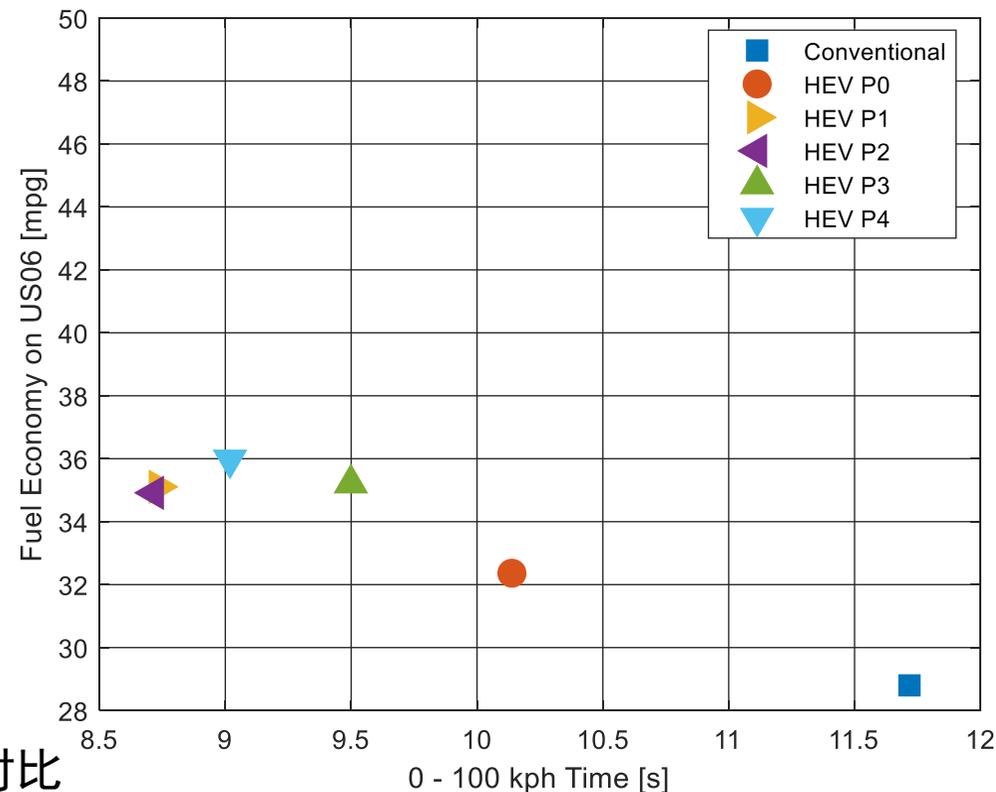
## 城市工况 (FTP75)



## 高速工况 (HWFET)



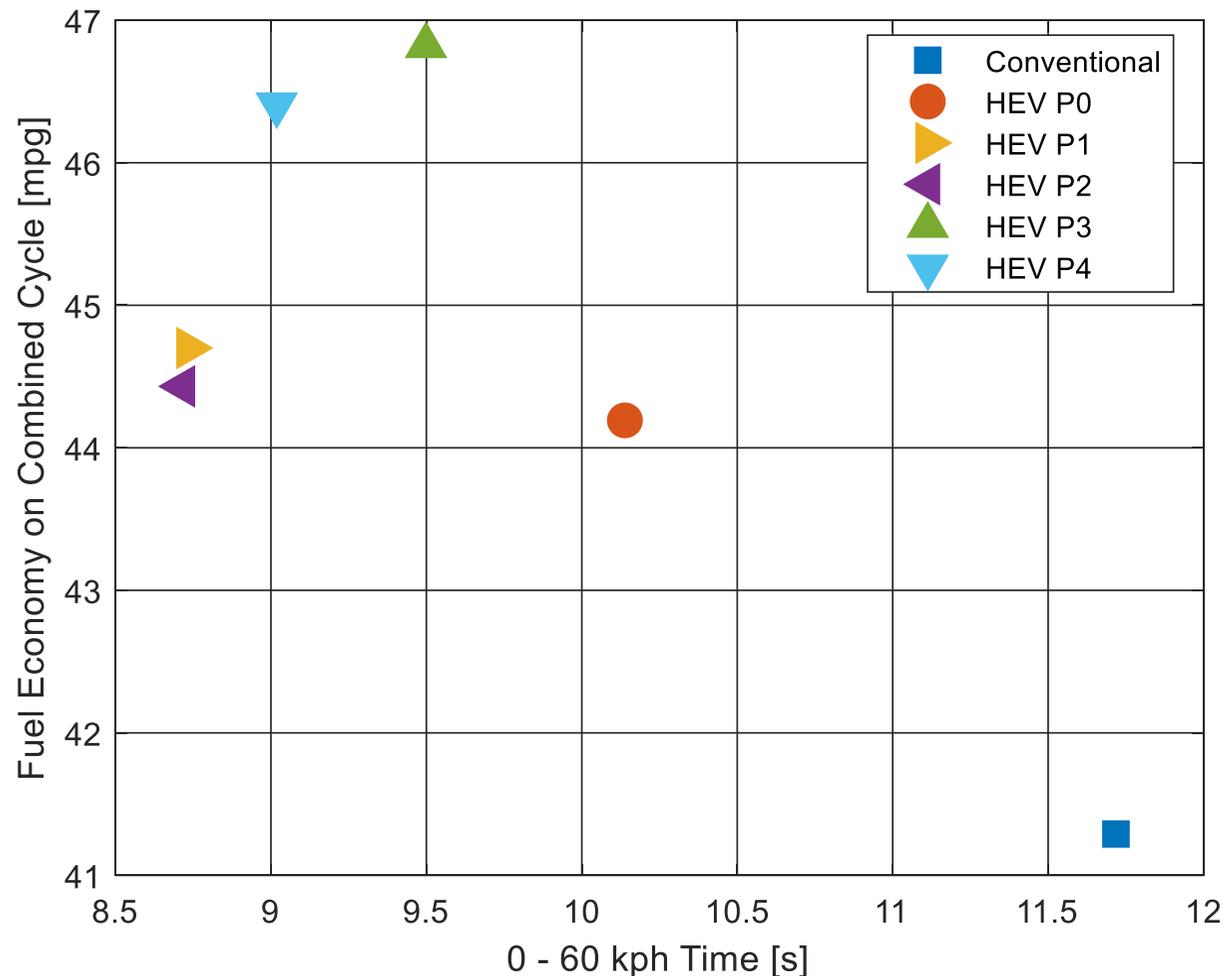
## US06



## P0-P4不同结构的油耗和动力对比

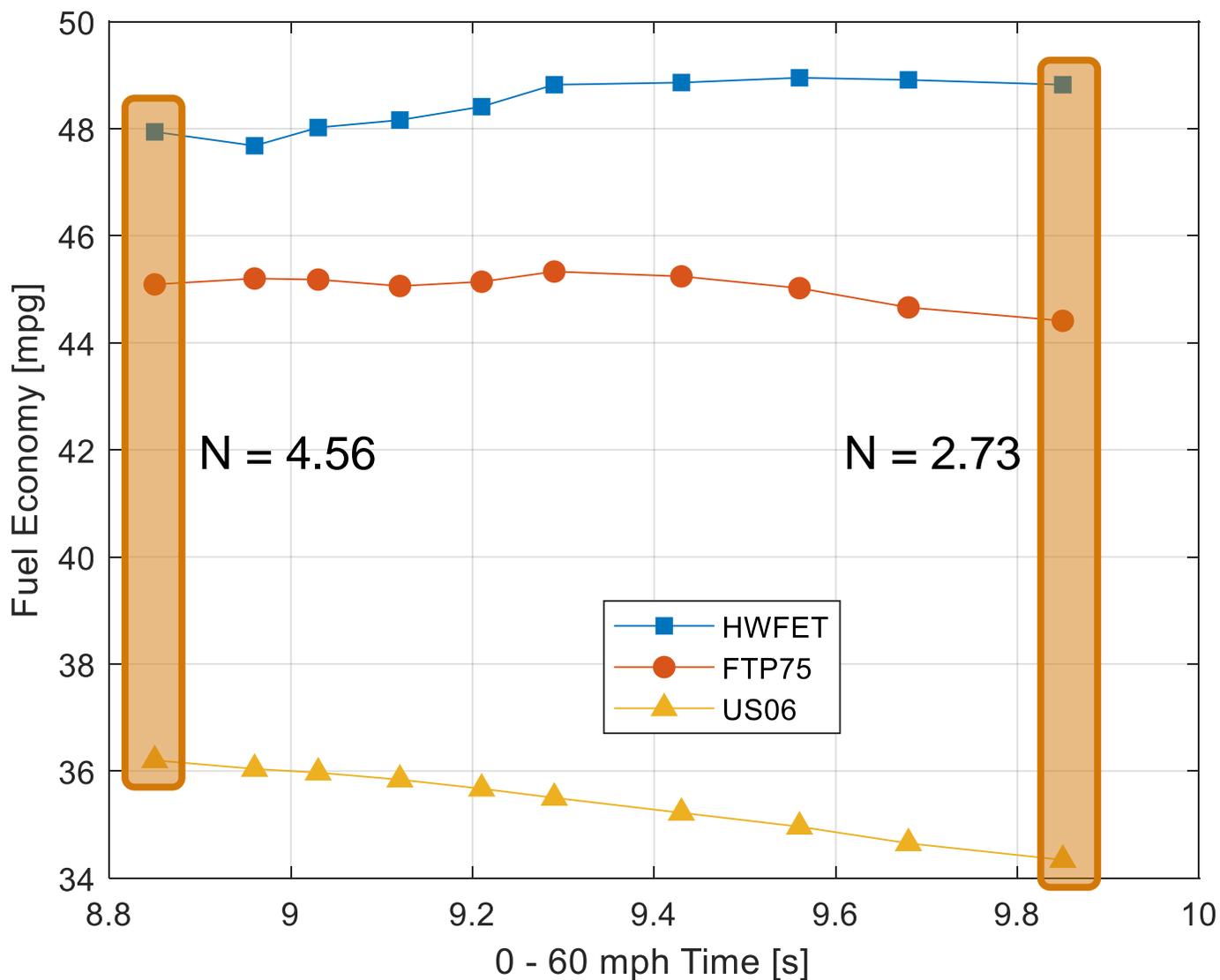
# 同时考虑两个循环工况下，不同结构仿真结果对比

城市工况FTP75 (55%) / 高速工况 (45%)



- 电机位置越靠近驱动轮：
  - 燃油经济性越好（能量回收效率更高）
  - 但动力性能下降（缺少变速器优势）
- ECMS算法方便合理的进行不同结构对比

## P4 轴速比变化仿真结果



- P4 轴是独立于发动机驱动轴的另一根轴；
- 对比性能仿真，确定速比对性能的影响；
  - 较高速比 → FTP75 / US06工况下，有较好的动力性能和油耗；
  - 较低速比 → 对于HWFET工况，油耗较好；

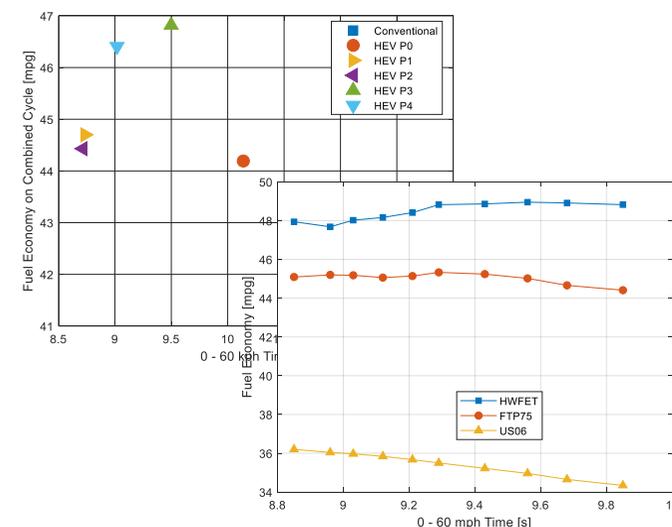
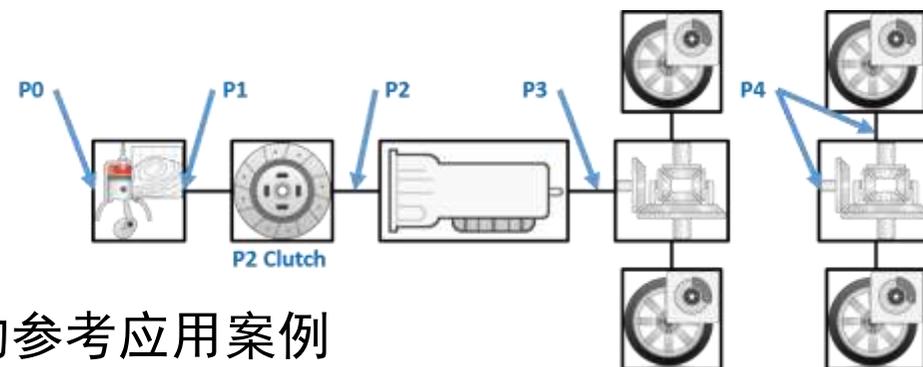
# 总结

## ■ 整车仿真平台：

- Powertrain Blockset作为提供系统级仿真架构，丰富的参考应用案例作为快速起步点；
- 模型二次开发和定制
  - 从将发动机设计用模型自动生成控制开发用模型Mapped engine models；
  - 零部件总成自动参数化；
  - 开放的模型方便进行二次开发，定制ECMS 控制策略方便对比P0 – P4不同结构的性能；

## ■ 进行闭环系统仿真，评估不同结构的燃油经济性/动力性能

- 通过控制器参数迭代调整，进行设计优化；
- 结果分析，确定较优结构；
  - P0-P4混合动力总成结构
  - P4 轴速比



# Simulink作为虚拟车辆仿真集成平台

### Powertrain Blockset

提供：纵向动力学模型/整车模型/模块库  
应用：动力性经济性仿真/动力总成控制开发

### Vehicle Dynamics Blockset

提供：车辆动力学模型/可视化/虚幻引擎接口  
应用：舒适性/操稳性/底盘控制/AD/ADAS

### Simscape

• 机/电/液/气多域物理仿真

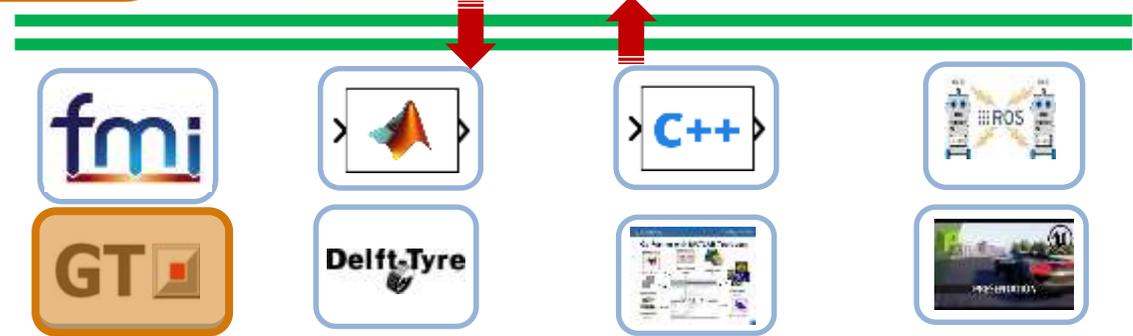
### 优化类工具箱：

Simulink Design Optimization Toolbox  
Model-Based Calibration Toolbox

### Simulink

### 仿真加速：

Parallel Computing Toolbox  
MATLAB Distributed Computing Server(MDCS)



**THANK YOU!**