

# 2020 MathWorks 中国汽车年会

## 基于虚拟整车的客观驾驶性标定

胡洪祥

MathWorks 中国 高级应用工程师



# 主要内容

## ■ 驾驶性标定简述

## ■ 整车模型建立

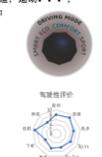
## ■ 定义目标函数

## ■ 驾驶性标定优化

## ■ 验证

### 驾驶性标定简述

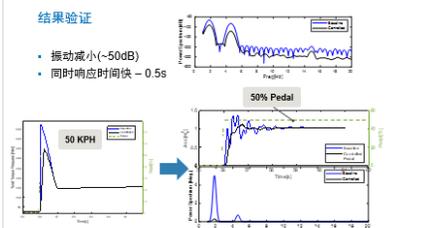
- 驾驶性定义:
  - 驾驶性反映汽车驾驶“感觉”的性能指标;如:平顺、舒适、运动...
  - 汽车纵向运动方向上的动态变化,表现为纵向加速度变化;
- 驾驶性标定内容和影响因素:
  - 控制器和控制策略:
    - 发动机ECU/变速箱TCU/离合器控制VCM/DCU.....
  - 驾驶工况:
    - 发动机转速/Tip In/Tip Out/巡航/开/关/油门上下坡.....
- 驾驶性主观评价:
  - 驾驶员感受:
    - 舒适性/噪音/抖动/换挡.....
  - 主观驾驶性评分
    - 不同驾驶员评分标准影响



MathWorks AUTOMOTIVE CONFERENCE

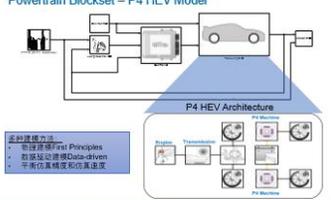
### 结果验证

- 振动减小(-50dB)
- 同时响应时间快 - 0.5s



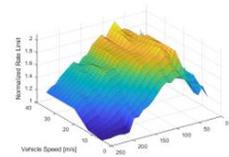
MathWorks AUTOMOTIVE CONFERENCE

### 整车模型建立: Powertrain Blockset - P4 HEV Model



MathWorks AUTOMOTIVE CONFERENCE

### 标定优化结果



MathWorks AUTOMOTIVE CONFERENCE

### 定义目标函数: 优化简介

- 有约束的最小值(或最大值) 优化问题
- 目标函数——定义标定/优化目标
  - 如: 求某个测量信号值最小化
- 设计变量——定义需要标定的量
  - 物理模型的参数
  - 控制器的参数
- 约束——定义变量边界或约束条件
  - 最大/最小值 (Min/Max)
  - 边界范围

Objective Function

$$\min_x f(x)$$

线性或非线性

设计变量 (离散或连续)

线性约束	非线性约束
$Ax \leq b$	$c(x) \leq 0$
$A_{eq}x = b_{eq}$	$c_{eq}(x) = 0$
$l \leq x \leq u$	

MathWorks AUTOMOTIVE CONFERENCE

# 驾驶性标定简述

## ■ 驾驶性定义：

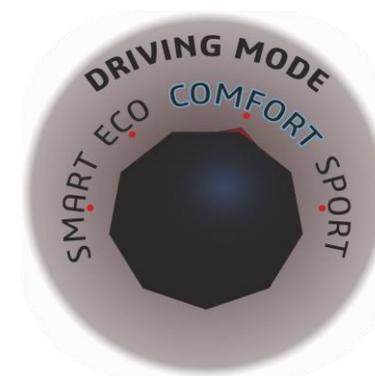
- 驾驶性反映汽车驾驶“感觉”的性能指标；如：平顺，舒适，运动。。。；
- 汽车纵向运动方向上的动态变化，表现为纵向加速度变化；

## ■ 驾驶性标定内容和影响因素：

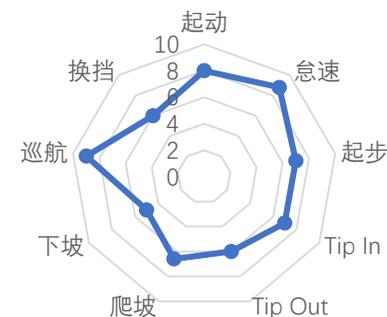
- 控制器和控制策略：
  - 发动机ECU/变速器TCU/整车控制VCU/HCU.....；
- 驾驶工况：
  - 起动/怠速/换挡/Tip in/Tip Out/巡航/开关空调/上下坡.....；

## ■ 驾驶性主观评价：

- 驾驶感觉表现：
  - 抖动/响应慢/冲击大/喘振/Jerks.....；
- 主观驾驶性评分
  - 不同驾驶员评分标准影响



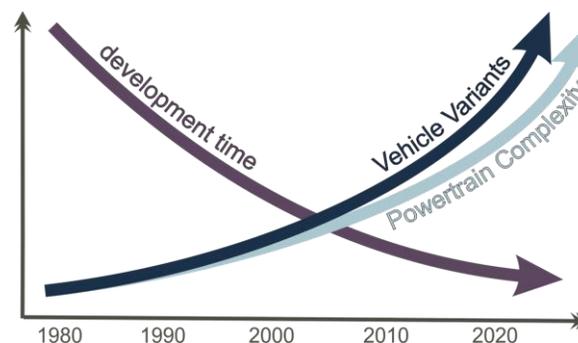
驾驶性评价



# 驾驶性标定简述

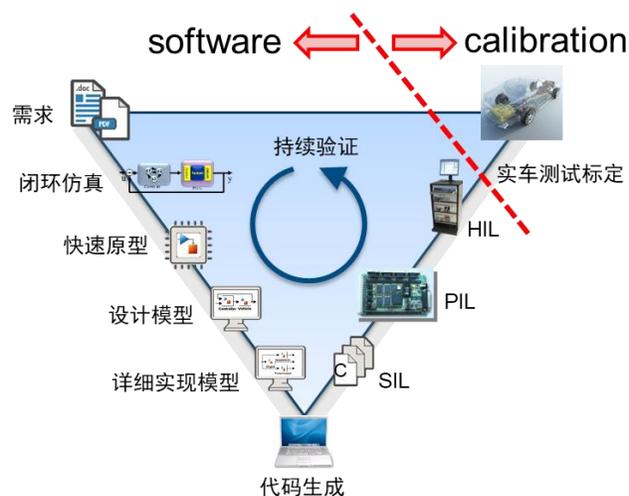
## ■ 主观驾驶性标定方法遇到的挑战：

- 手动标定耗时费力
- 驾驶性评价依赖于驾驶员主观经验
- 改善效率的必要性：
  - 开发时间缩短
  - 动力总成结构复杂度和多样性增加

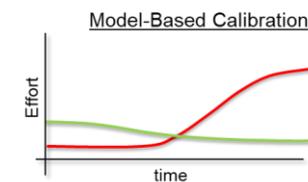
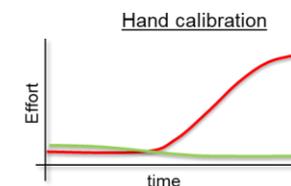


## ■ 解决方法：

- 使用基于模型的客观驾驶性标定方法
  - 需求驱动
  - 基于客观评价 – 可重现
  - 自动化 – 节省时间
  - 根据需求进行最优化

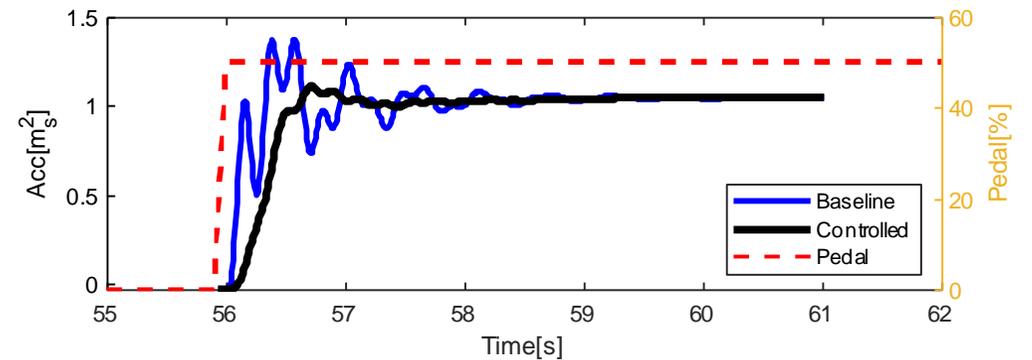
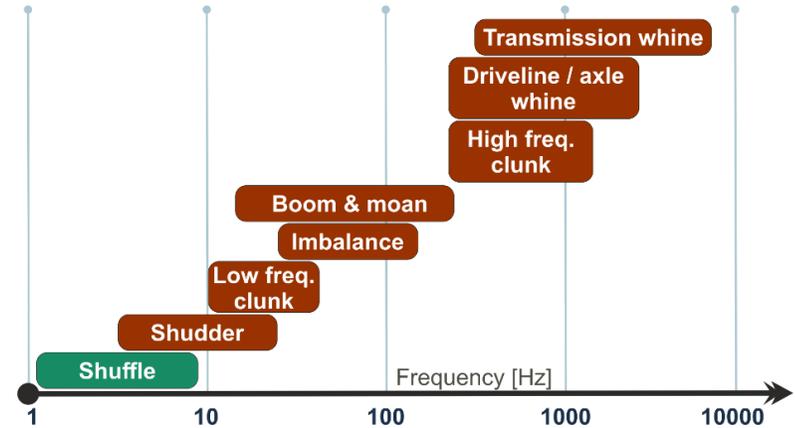
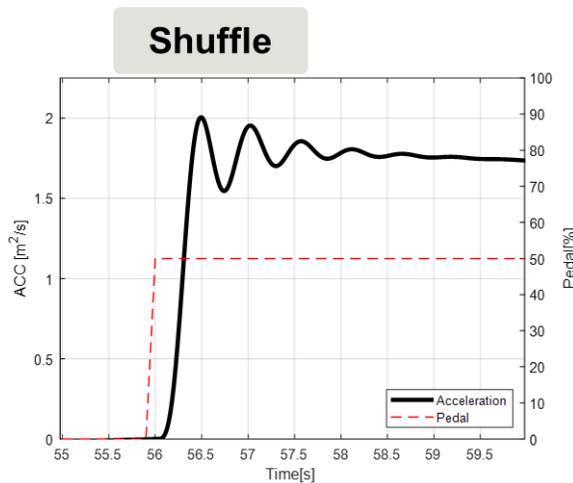


Calibration development

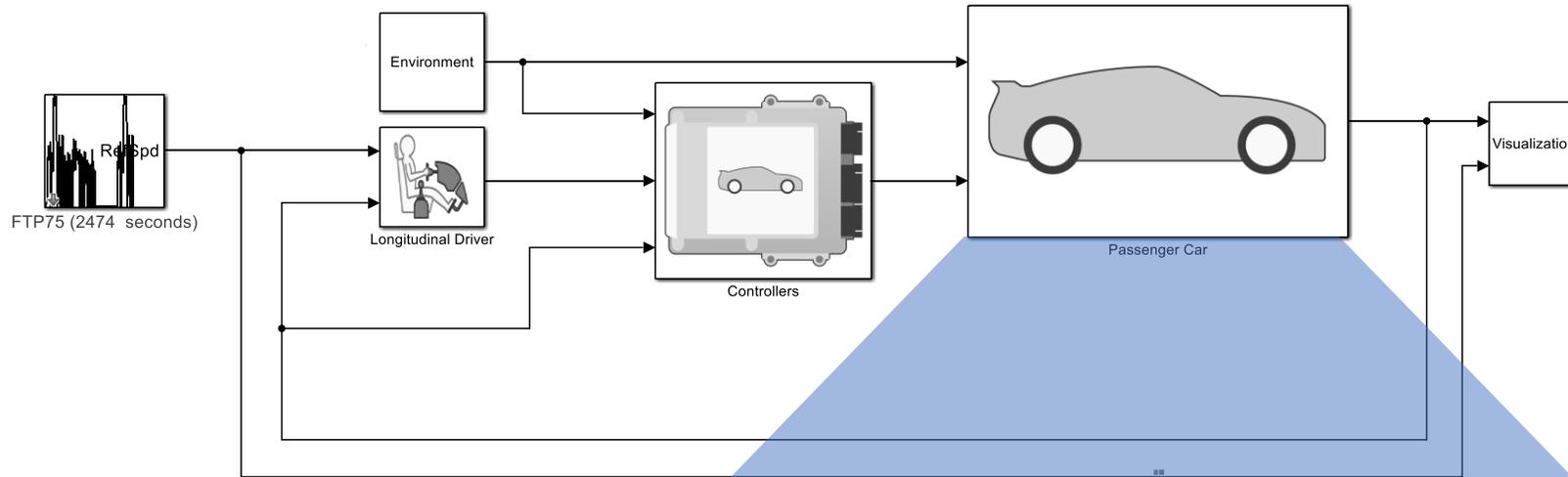


# 驾驶性标定简述

- 问题描述：
  - 选择Tip In工况标定作为例子，解决Tip In的Shuffle问题；
    - Tip In时，汽车纵向动态响应变化由传动系扭矩突变导致；
    - 传动系零部件确定的情况下，主要对ECU控制标定的优化；
    - 主要针对2-8 Hz的抖动问题，不同挡位会有所不同；
  - 本例中，不考虑换挡冲击，clunk或更高阶的模态问题；
  - 通过测量整车加速度信号获取整车的性能；
  - 本例中，Tip in过程中不涉及换挡。



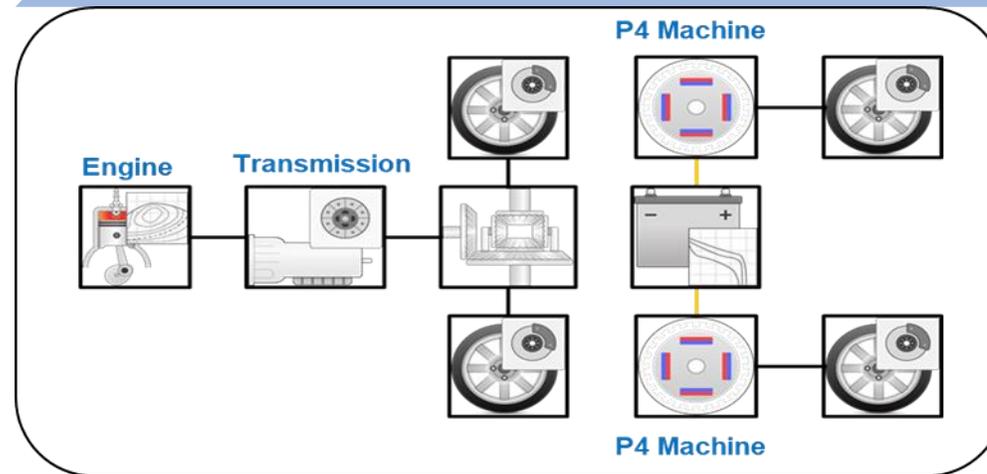
# 整车模型建立： Powertrain Blockset – P4 HEV Model



## P4 HEV Architecture

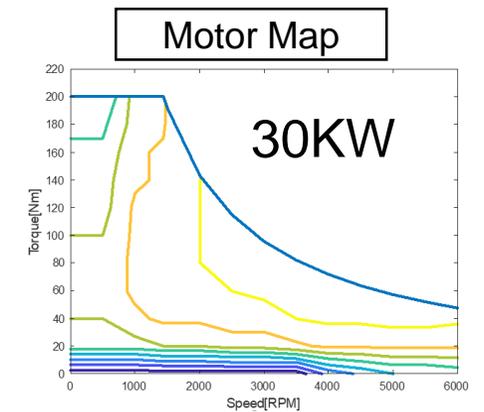
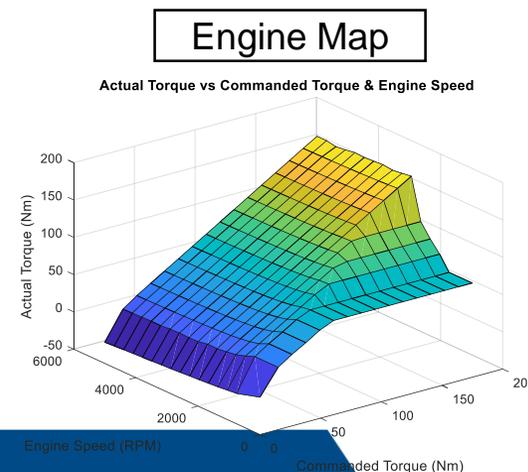
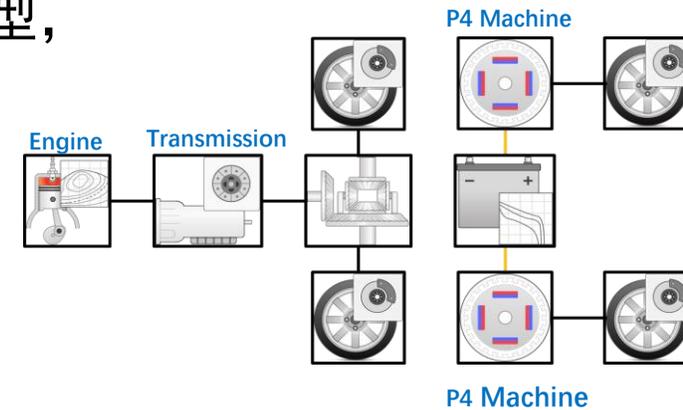
### 多种建模方法：

- 物理建模First Principles
- 数据驱动建模Data-driven
- 平衡仿真精度和仿真速度



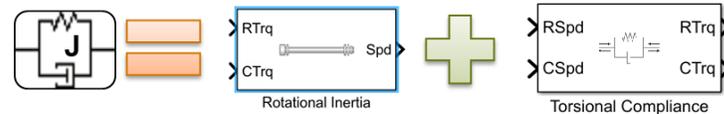
# 整车模型建立： Powertrain Blockset – P4 HEV Model

- P4 HEV模型
  - 基于Powertrain Blockset工具箱的参考应用模型，加入自定义的Tip-in控制器模型；
  - 模型精度能满足动力性经济性分析要求；
  - 模型复用
- 发动机模型
  - 1.5L L4 95kW(126hp) @5500RPM
  - Map-Based Model
- P4双电机
  - 30kW电机
  - Map-Based Model
- 1.3 kWh电池
  - Map-Based Model



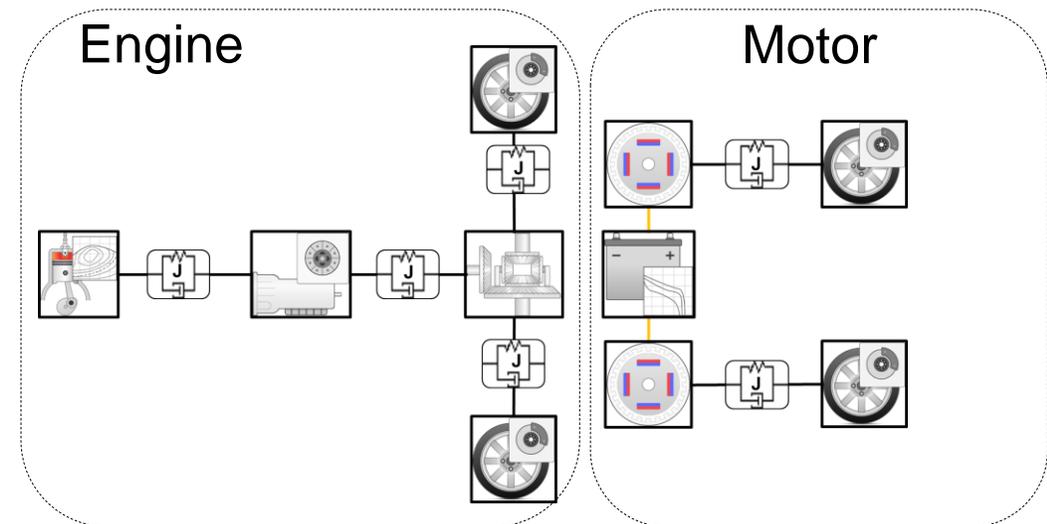
# 整车模型建立： P4零部件总成建模

- 传动系的抖动（oscillations）通过调节参考模型中的惯量，传动轴刚度/阻尼等参数获得；



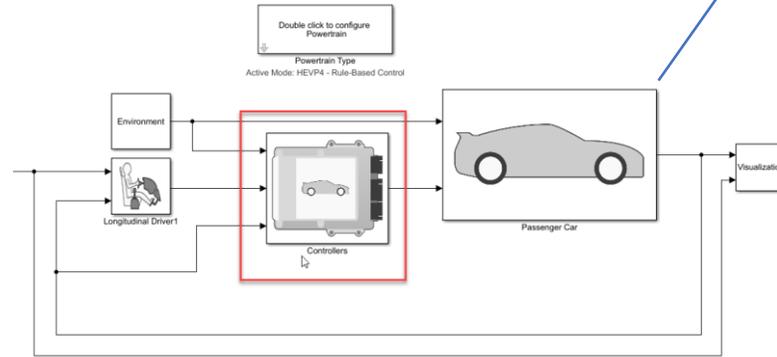
- 可以对开放的模型进行修改和调试，获得与实测一致的非线性特性；

- 2路扭矩源
  - 发动机
  - 电机

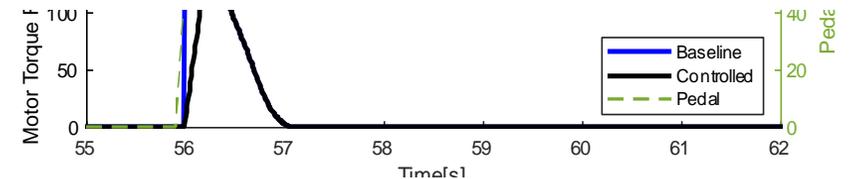
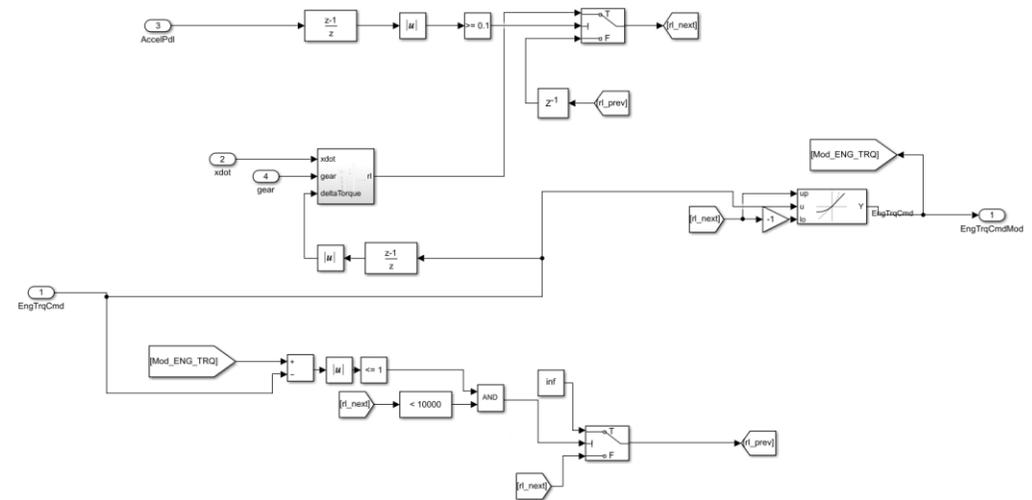


# 整车模型建立： Tip-In控制模型

- 通过调节输出扭矩变化率，控制传动系扭矩的变化；
  - 扭矩变化率由需求扭矩变化量，车速和挡位决定；
  - Rate limit = function (  $|\Delta T|$ , V, Gear)
- Tip In时，扭矩变化率的限制起作用：
  - $|\Delta \text{Torque request}| > 10 \text{Nm}$
  - Vehicle Speed  $> 2 \text{ MPH}$



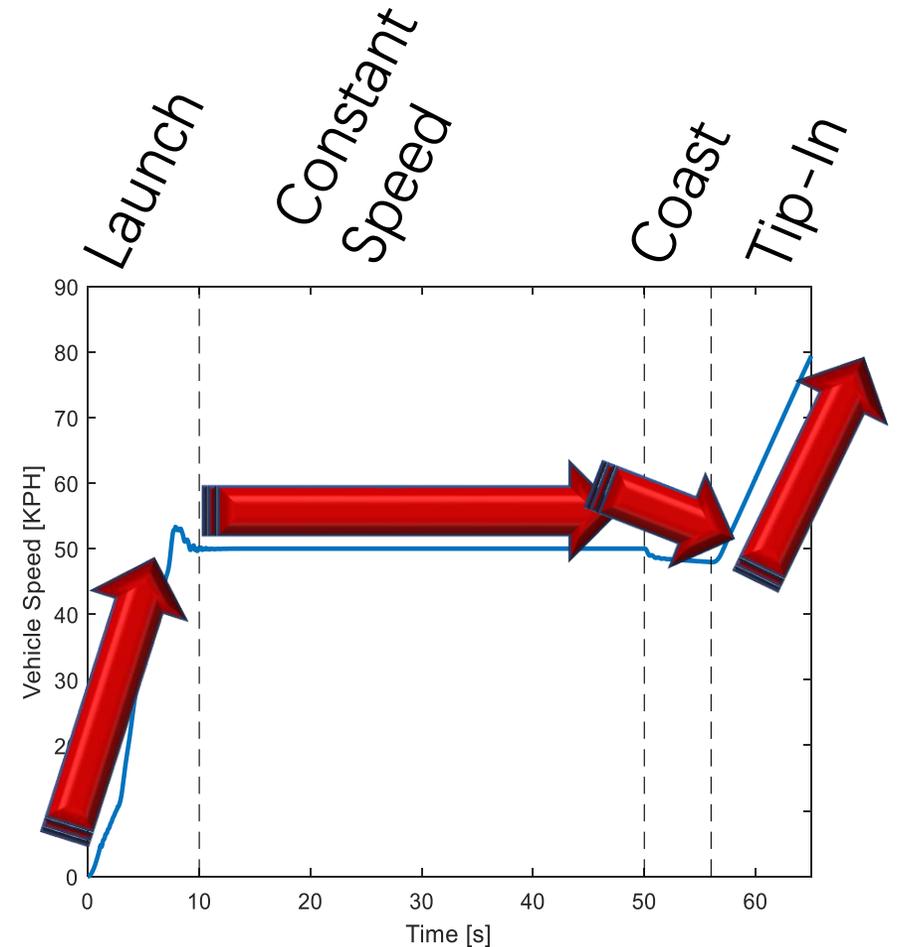
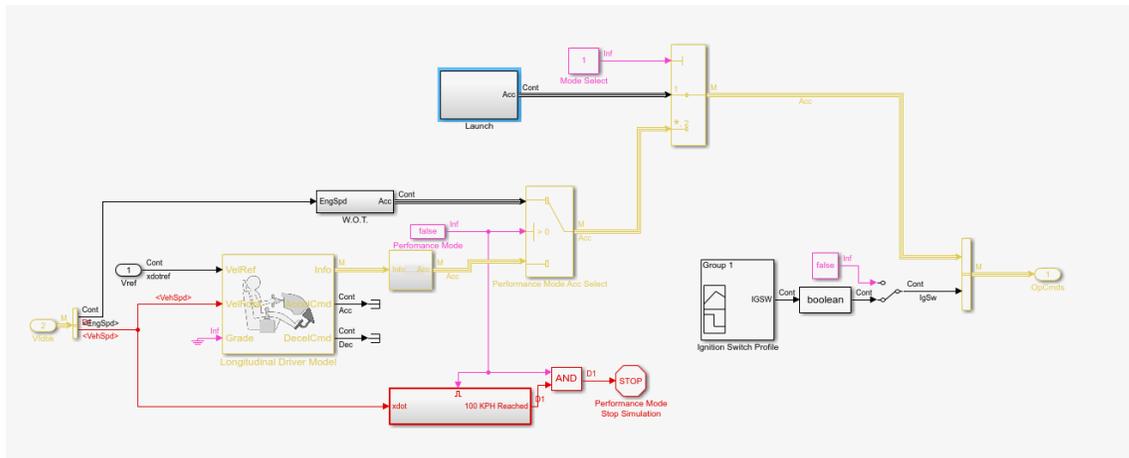
Copyright 2018 The MathWorks, Inc.



# 整车模型建立：驾驶工况

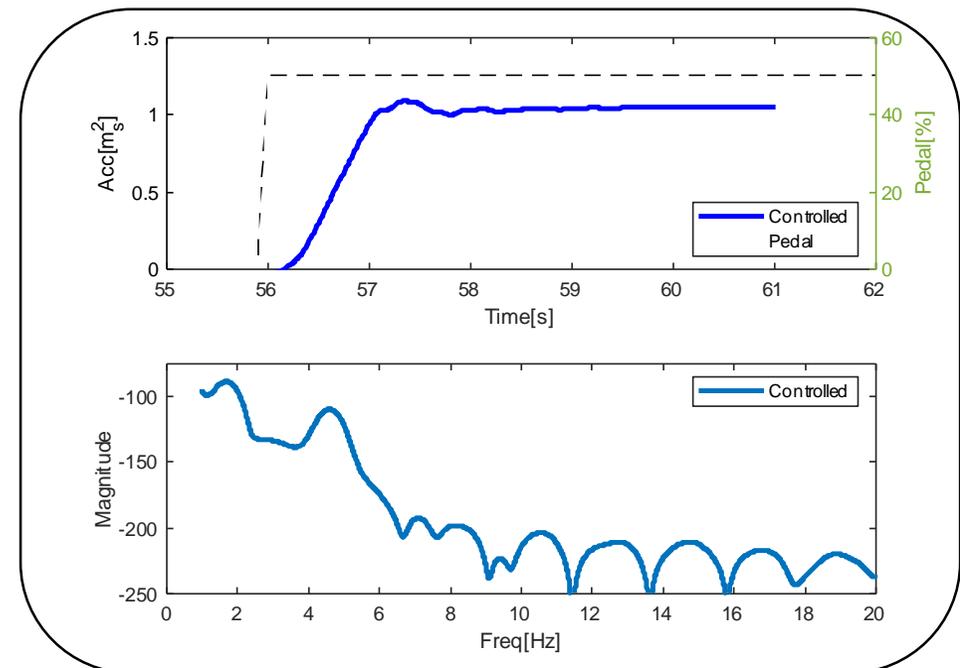
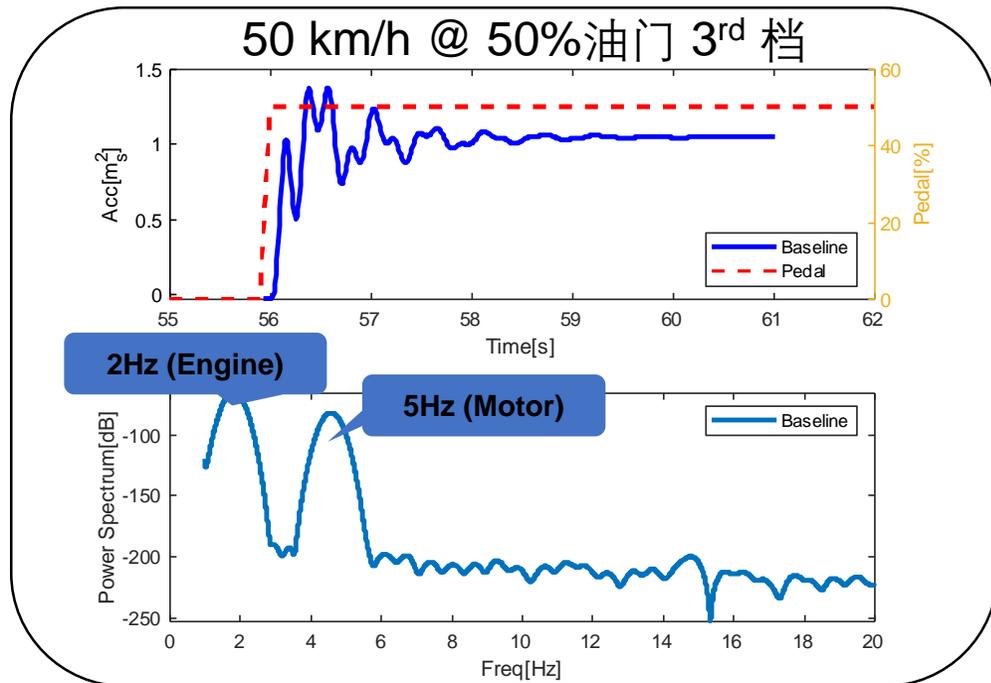
## ■ 本例使用的工况条件：

- 加速到指定车速；
- 保持车速并换到指定挡位，允许一定的过渡；
- 松开油门；
- 再次踩油门（Tip In）。



# 整车模型建立：Tip in初始仿真结果

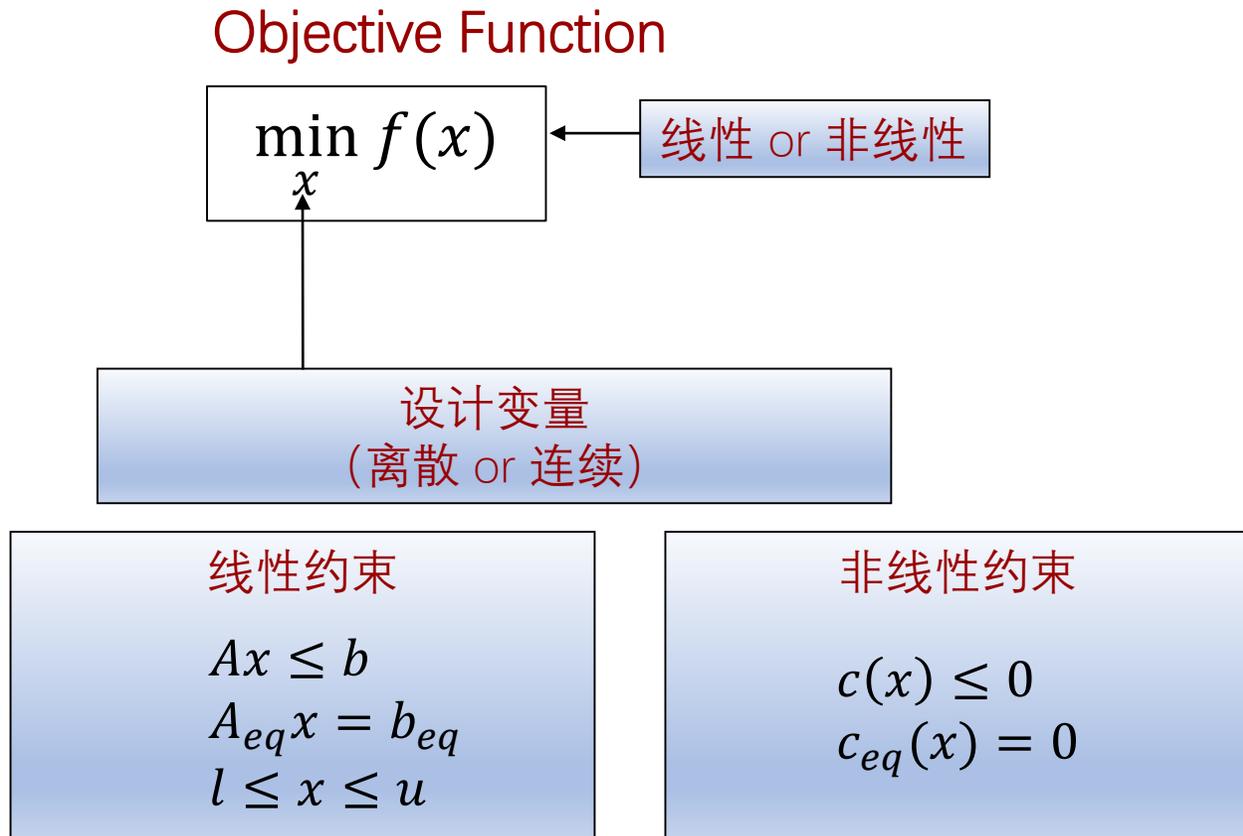
- 初始数据的仿真可以看出：
  - 模型可以仿真出两路扭矩的造成的抖动；
  - 需要通过标定优化，获得更好的驾驶性能。



Example: Manually Calibrated Rate Limit

# 定义目标函数：优化简介

- **有约束的最小值 (或最大值) 优化问题**
- **目标函数——定义标定/优化目标**
  - 如：求某个测量信号值最小化
- **设计变量——定义需要标定的量**
  - 物理模型的参数
  - 控制器的参数
- **约束——定义变量边界或约束条件**
  - 最大/最小值 (Min/Max)
  - 边界范围



# 定义目标函数：驾驶性问题转化为优化问题

## 变量

What are my choices?

- 扭矩变化率限值Rate limit
  - 档位
  - 扭矩变化量 $\Delta T$
  - 车速

## 目标

What are my goals?

- 抖动 (oscillations) 最小
- 响应时间最短

## 约束

What restricts my choices?

- 响应时间
- Jerk
- .....

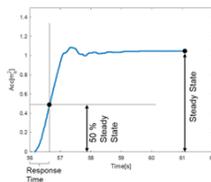
# 定义目标函数

## Shuffle Objective Function

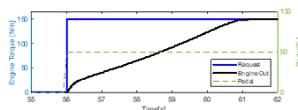
$$\min_{RL} (t_{resp} + jerk_{max} + VDV + constraints)$$

### 定义目标函数：动力性指标

- 响应时间
  - $t_{resp}$  = 从0加速到稳态加速度的50%，所花的时间；
  - 使用最小时间要求（1s）归一化；
  - 考虑边界条件：电机或发动机不能提供足够的扭矩；

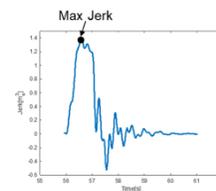
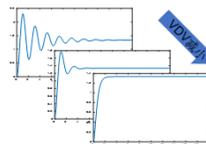


例如：低转速时的高扭矩需求



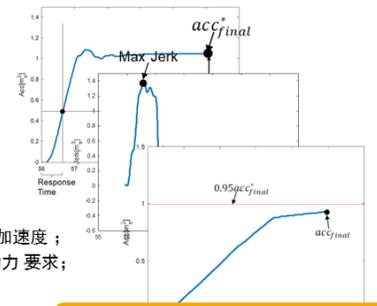
### 定义目标函数：舒适性指标

- 振动剂量VDV (Vibration Dose Value)：加速度四次方均值，即
 
$$VDV = \left( \int_0^T a^4(t) dt \right)^{1/4}$$
  - VDV 对加速度峰值敏感；
  - 使用无扭矩斜率限制时所对应的最大VDV值进行归一化。
- 加速度抖动(Jerk)峰值Maximum Jerk:
 
$$Jerk_{max} = \max \left( \frac{da}{dt} \right)$$
  - 使用无扭矩斜率限制时所对应的最大Jerk值进行归一化。



### 定义约束条件

- 响应时间  $t_{resp} \leq 1\text{sec}$
- 峰值抖动  $Jerk_{max} \leq 2 \frac{m}{s^3}$
- $acc_{final} \geq 0.95 acc_{final}^*$ 
  - $acc_{final}^*$  无扭矩斜率限制时的加速度；
  - 保证边界条件下，也能满足动力要求；
- 约束条件 =  $\begin{cases} 10^6 & \text{如果发散} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

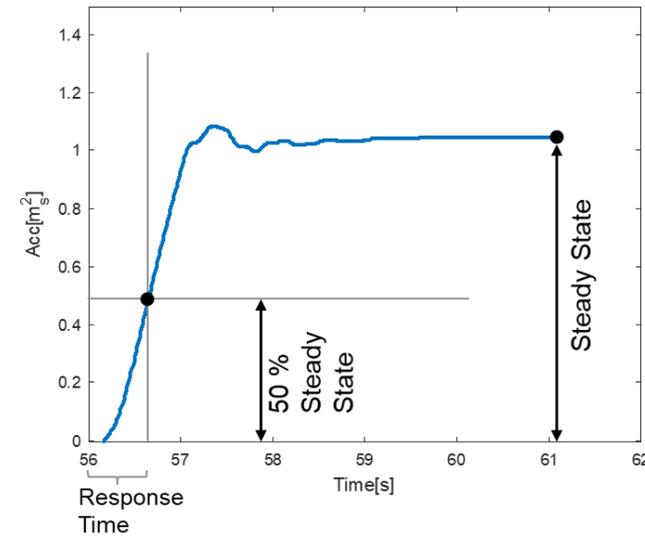


约束条件  $\Rightarrow$  需求

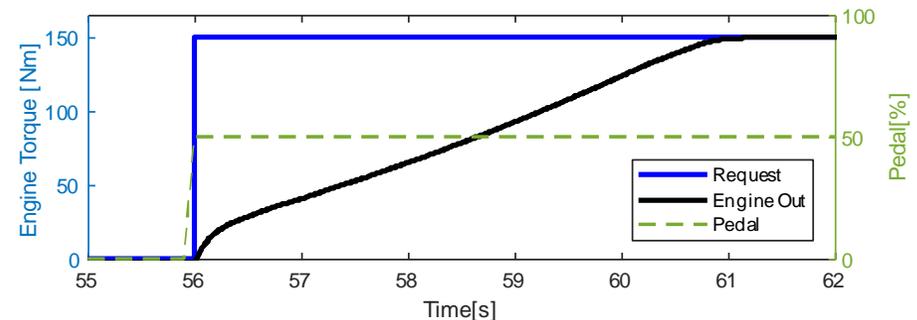
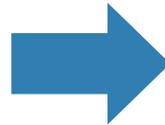
# 定义目标函数：动力性指标

## ■ 响应时间

- $t_{resp}$  = 从0加速到稳态加速度的50%，所花的时间；
- 使用最小时间要求（1s）归一化；
- 考虑边界条件：电机或发动机不能提供足够的扭矩；



例如：低转速时的高扭矩需求

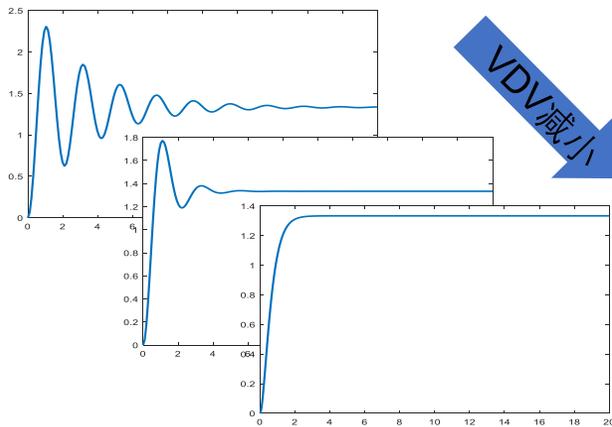


# 定义目标函数：舒适性指标

- 振动剂量VDV (Vibration Dose Value)：加速度四次方均根值，即

$$VDV = \left( \int_0^T a^4(t) dt \right)^{1/4}$$

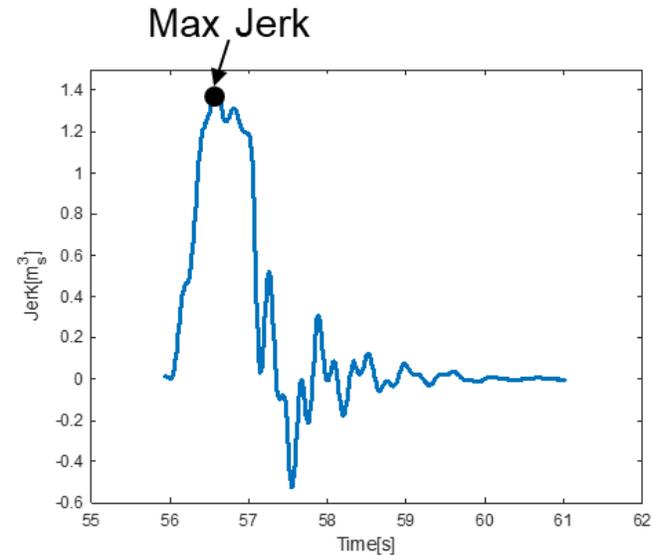
- VDV 对加速度峰值敏感；
- 使用无扭矩斜率限制时所对应的最大VDV值进行归一化。



- 加速度抖动(Jerk)峰值Maximum Jerk:

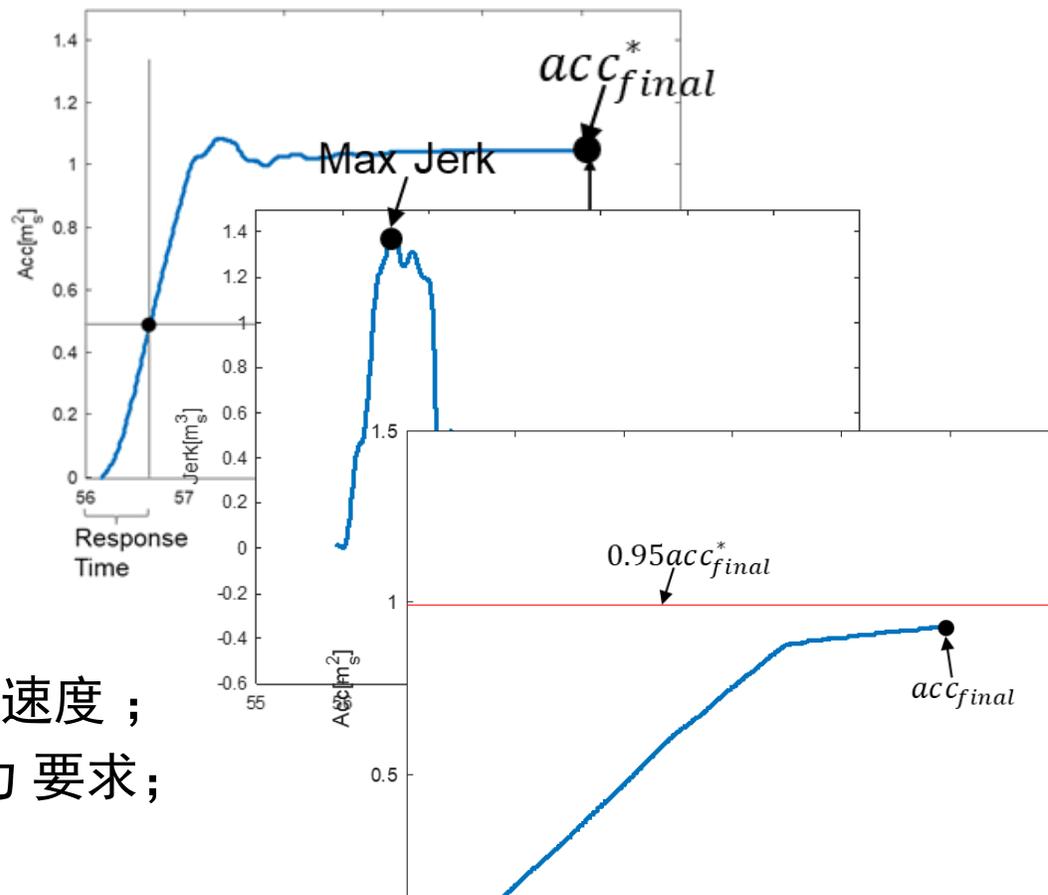
$$Jerk_{max} = \max \left( \frac{da}{dt} \right)$$

- 使用无扭矩斜率限制时所对应的最大Jerk值进行归一化。



## 定义约束条件

- 响应时间  $t_{resp} \leq 1 \text{ sec}$
- 峰值抖动  $Jerk_{max} \leq 2 \frac{m}{s^3}$
- $acc_{final} \geq 0.95 acc_{final}^*$ 
  - $acc_{final}^*$  无扭矩斜率限制时的加速度；
  - 保证边界条件下，也能满足动力要求；
- 约束条件 =  $\begin{cases} 10^6 & \text{如果发散} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

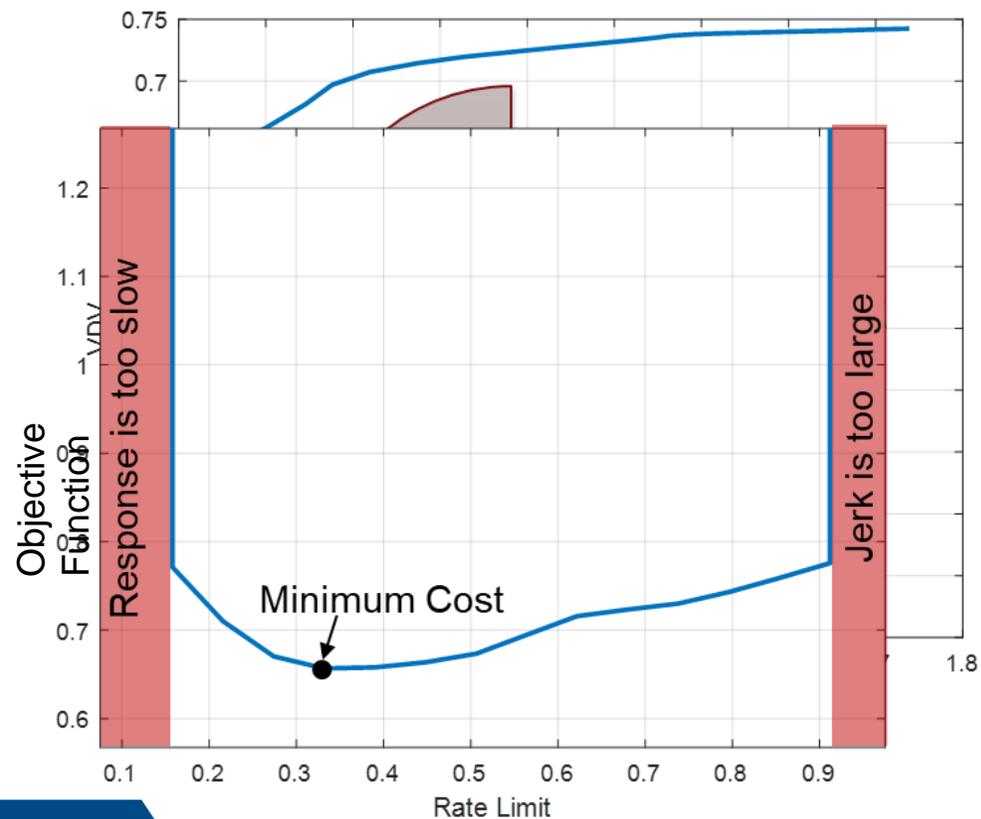
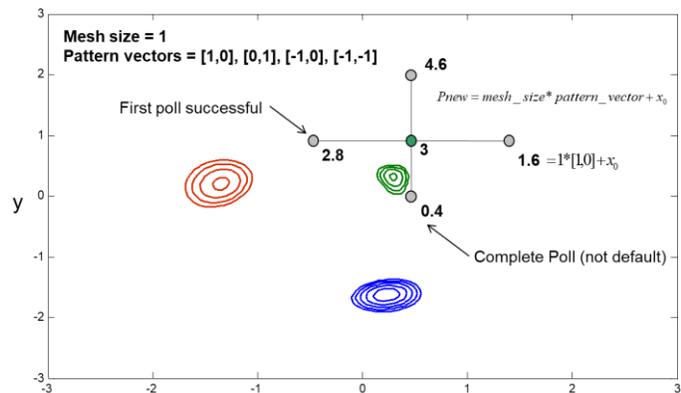
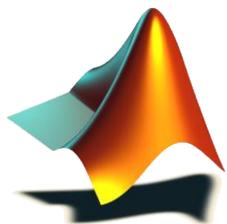


约束条件  $\Rightarrow$  需求

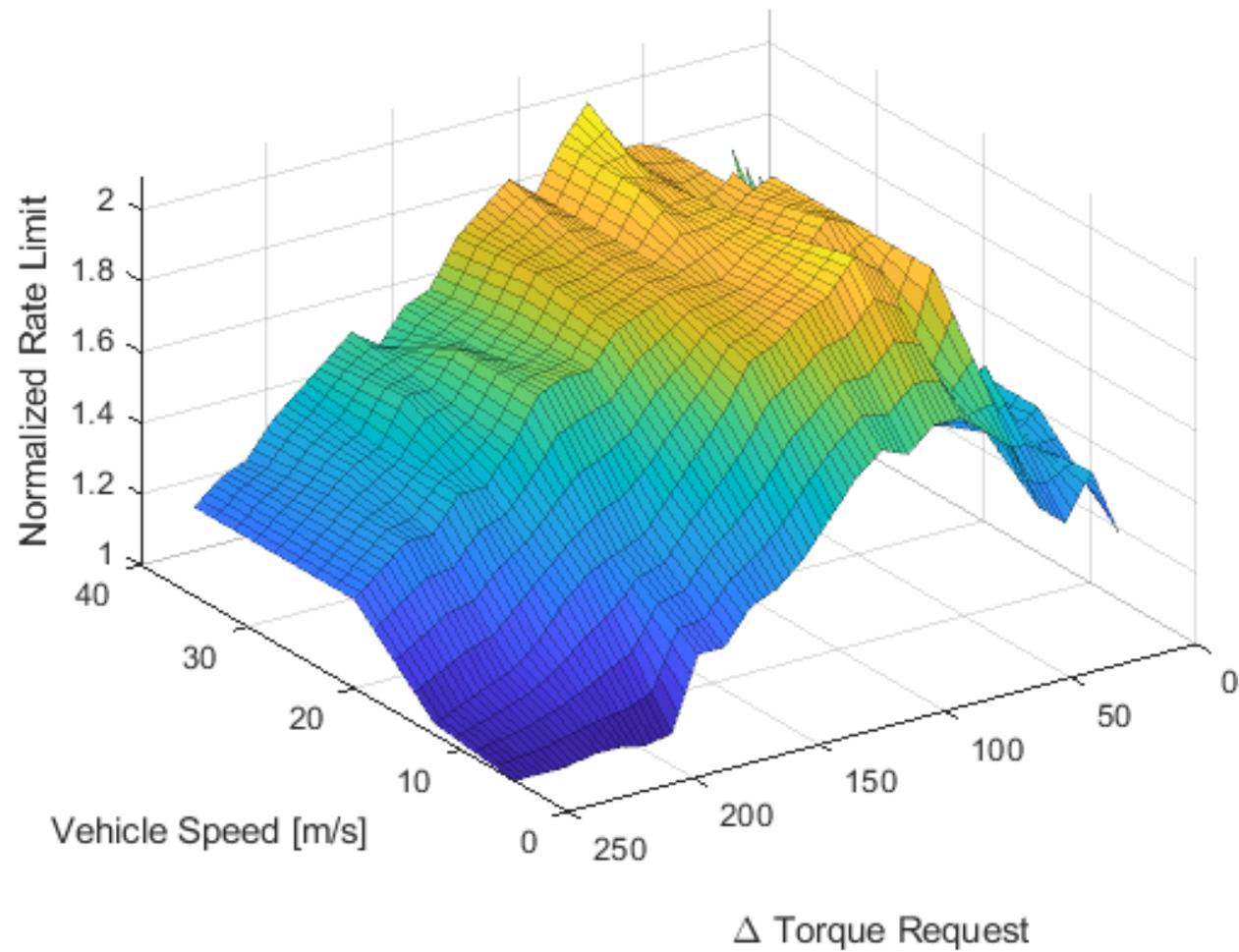
# 目标函数

## 特点:

- 多目标优化问题：抖动与响应时间之间存在帕累托曲线
  - 响应越快，抖动越大；
- 目标函数：
  - 可能是不光滑的
  - 可能存在多个最小值
- 全局优化方法：Pattern Search

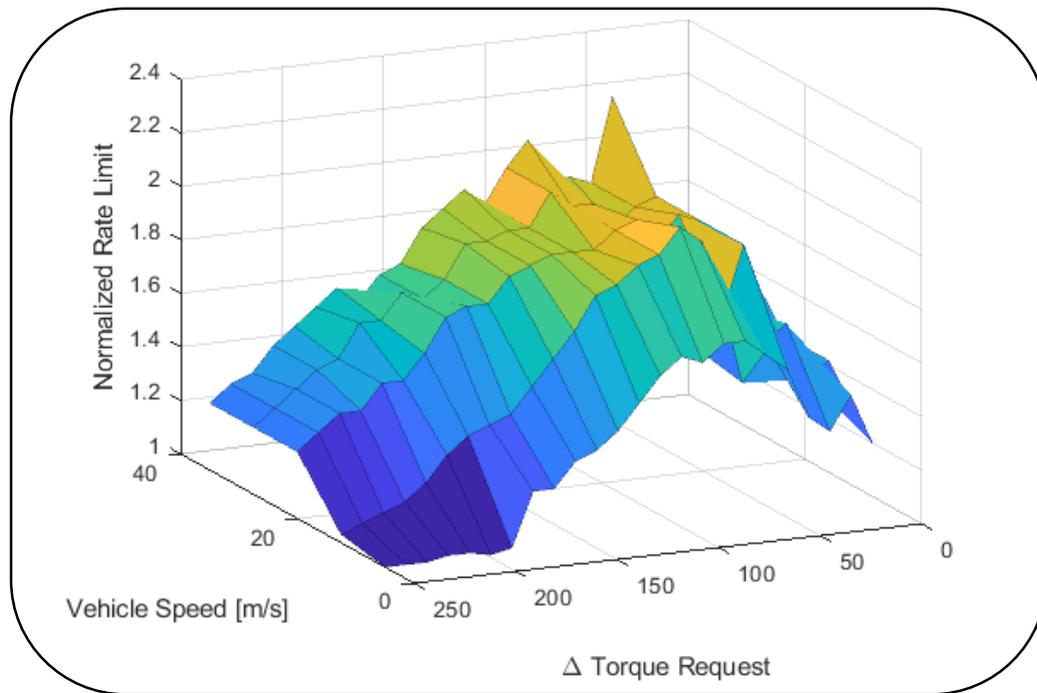


# 标定优化结果

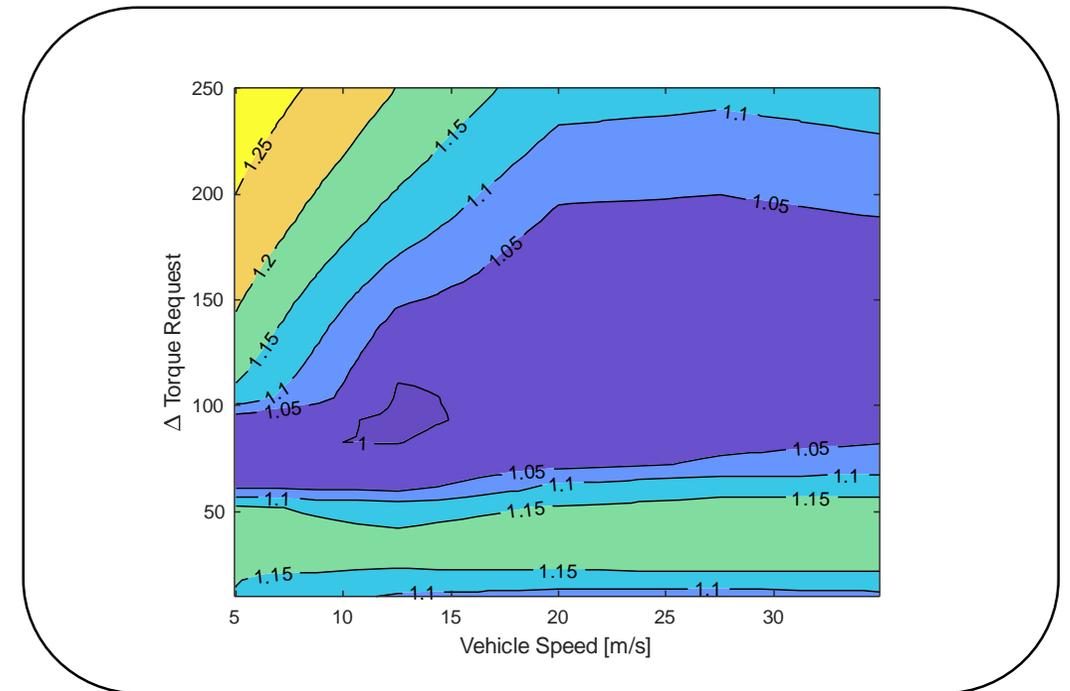


# 标定优化结果

- 高敏感区域可以通过精细化坐标断点提高优化精度
- 如下所示为5档条件下的优化结果



标定表格

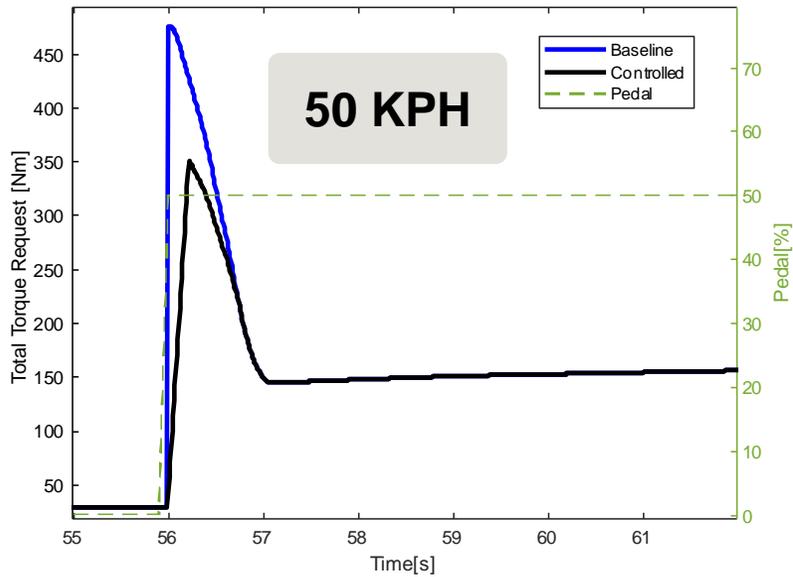
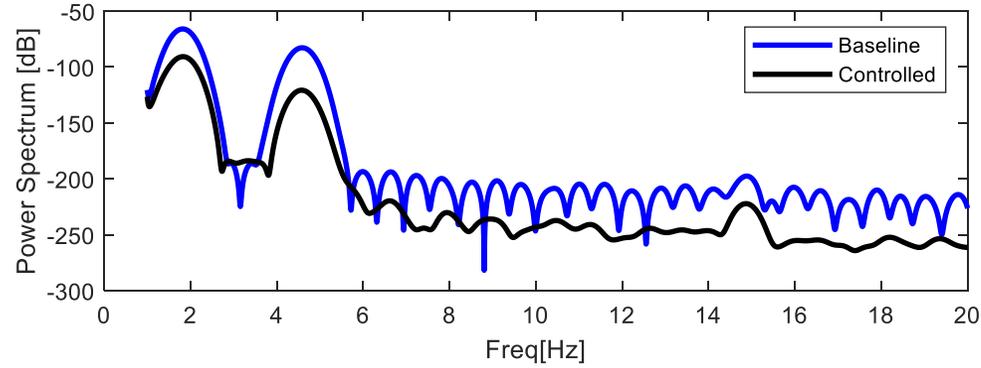


优化后的目标函数值分布图

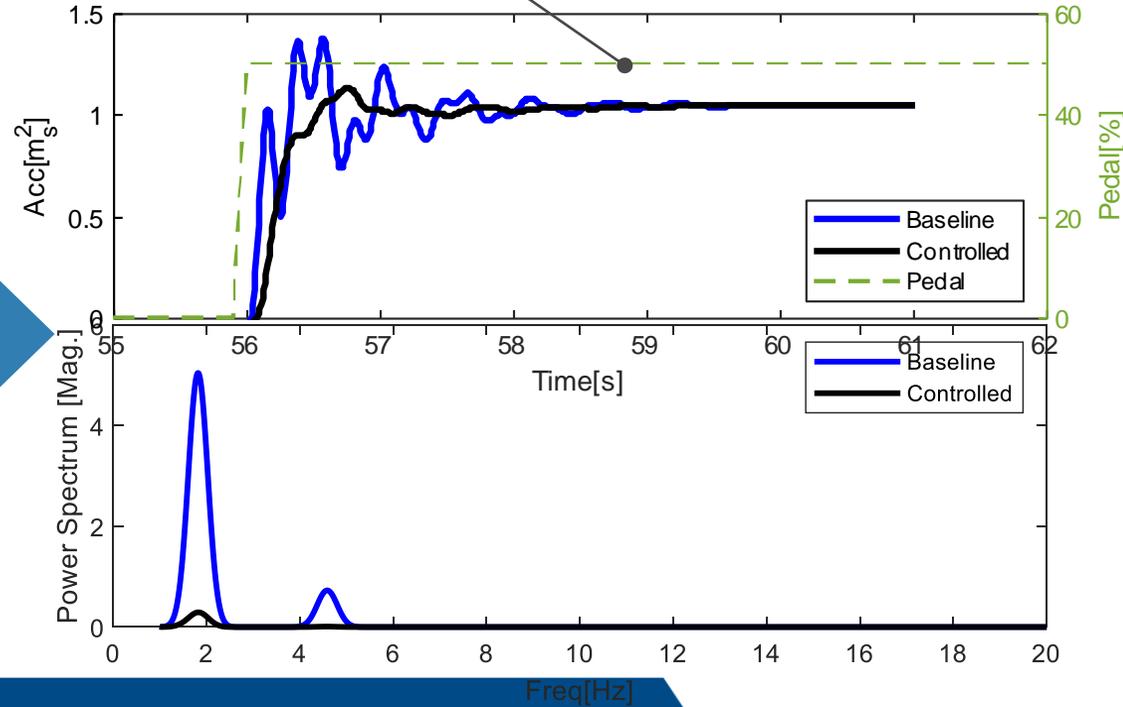


# 结果验证

- 振动减小(~50dB)
- 同时响应时间快 – 0.5s



50% Pedal



# 下一步

- 下一步可能的工作方向：

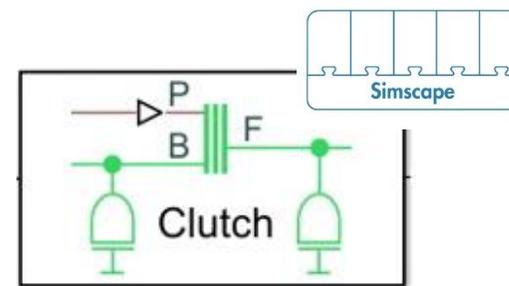
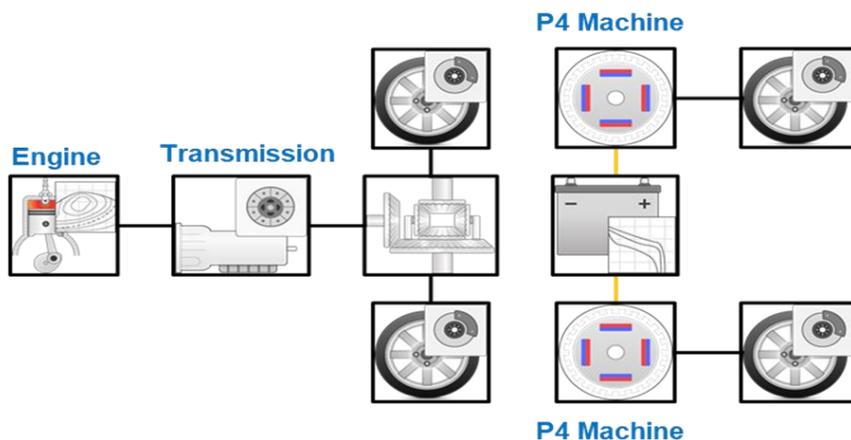
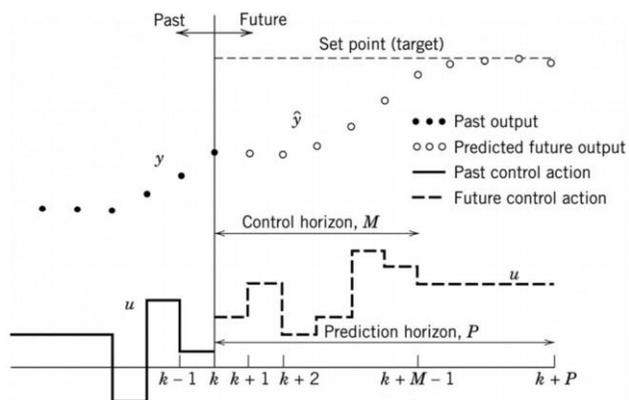
- 引入其他控制方法和手段

- 使用敏感度分析对标定表格的坐标断点进行细化
- 使用基于模型的预测控制（MPC）方法并考虑对油耗的影响

- 提高模型精细程度

- Simscape Driveline

- 同样的方法用于其他标定任务



# 总结

- 使用了基于模型的方法，进行驾驶性标定优化；
- Powertrain Blockset具有仿真低频驾驶性标定的能力
- 客观驾驶性标定优点：
  - 缩短标定时间
  - 平衡各性能指标
  - 回溯需求
  - 客观而非主观 → 可重复性
- 基于模型的标定方法和思路：
  - 模型
  - 优化工具
  - 硬件（HIL）

