



天津大学  
Tianjin University

ICSC 2019  
Core Competence Enhanced by MBD



IDAJ CAE Solution Conference

# 内燃机智能标定方法与系统

—◇— 内燃机人工智能标定工程师系统 —◇—

报告人：谢辉 教授

xiehui@tju.edu.cn

天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室





汇报内容

CONTENTS

一

背景与现状

二

虚拟标定问题

三

核心技术

四

方案与平台

五

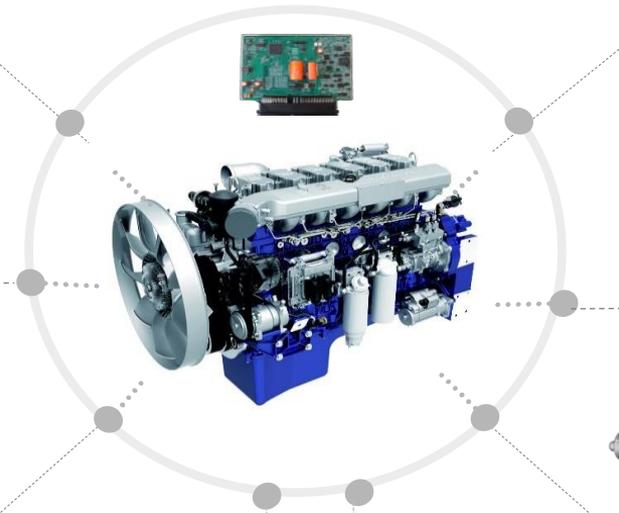
相关工具

六

实际案例



# 内燃动力的电气化、网联化、智能化趋势



电动增压



电动风扇



ISG 飞轮



电动气门

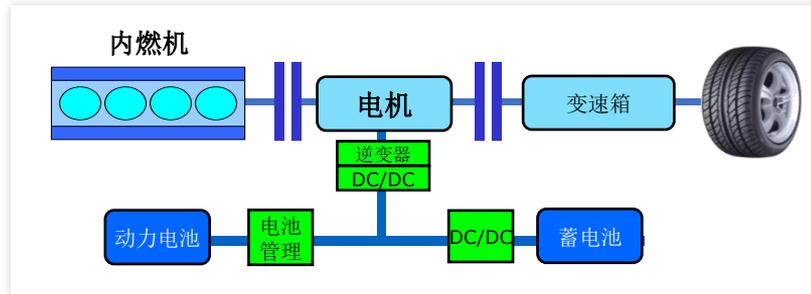


电动水泵



电动油泵

## 混合动力



## 智能网联





- ▶ 内燃机是机、电、液、热高度一体化的复杂机械系统
- ▶ 混合动力具有多个动力源，动力源的耦合和协调更为复杂



## 多变量-多工况-多目标

- ▶ 系统复杂度增加
- ▶ 道路工况多样
- ▶ 多目标相互折衷

## 多机构-高动态-强耦合

- ▶ 多变量、相互耦合
- ▶ 多系统、特性差异

## 严法规-短时间-强竞争

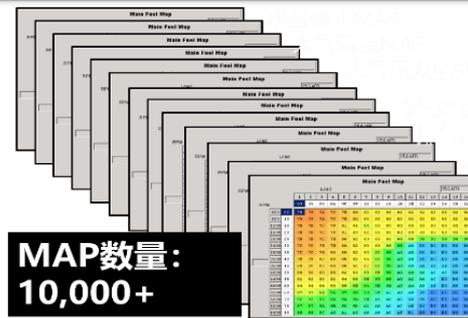
- ▶ 法规严、测试多
- ▶ 周期短、竞争强
- ▶ 自诊断、监控化

多机构、多目标、短周期  
巨量优化难题

➤ 控制器 = 硬件 + 算法 + **控制参数**



➤ 标定过程: **优化控制参数**



多变量

多目标

驾驶风格千差万别

道路工况多样

RDE循环

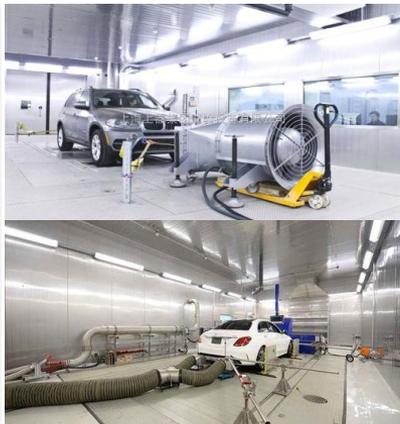
**开发新内燃动力系统的标定工作量大、周期长，消耗资源多**



## ➤ RDE——实际行驶污染物排放试验

### ➤ 传统排放试验

- 实验室进行
- 环境恒温恒湿、转毂阻力和坡度恒定
- 固定的车速曲线跟随



### ➤ RDE试验

- 外面环境道路
- 环境温度、风阻、路面坡度等都不可控
- 路试驾驶时交通路况复杂



**RDE试验持续时间：90-120min**

**行驶路线：34%市区，33%市郊，33%高速  
(无统一行驶路线)**

**车速要求：<60km/h，60-90km/h，>90km/h**

**工况点分布更广，  
排放优化点更多，  
影响因素也更宽！**



map多达**1万**张以上<sup>[1]</sup>

对**数千**个参数进行标定<sup>[2]</sup>

管理系统工况多达**300**个

“**国六**”即将全面实施

**巨量标定难题**



人工标定
进行实验
调整参数
评价分析

- 时间成本和经济成本高
- 缺乏严格的理论指导
- 高度依赖标定工程师的经验

重复进行



**虚拟标定  
智能标定**

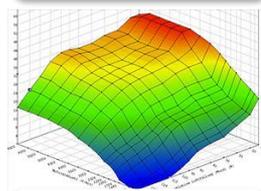
经验



经验



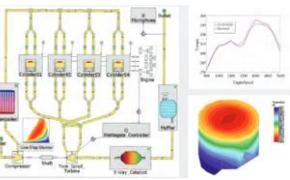
数据



数据



知识

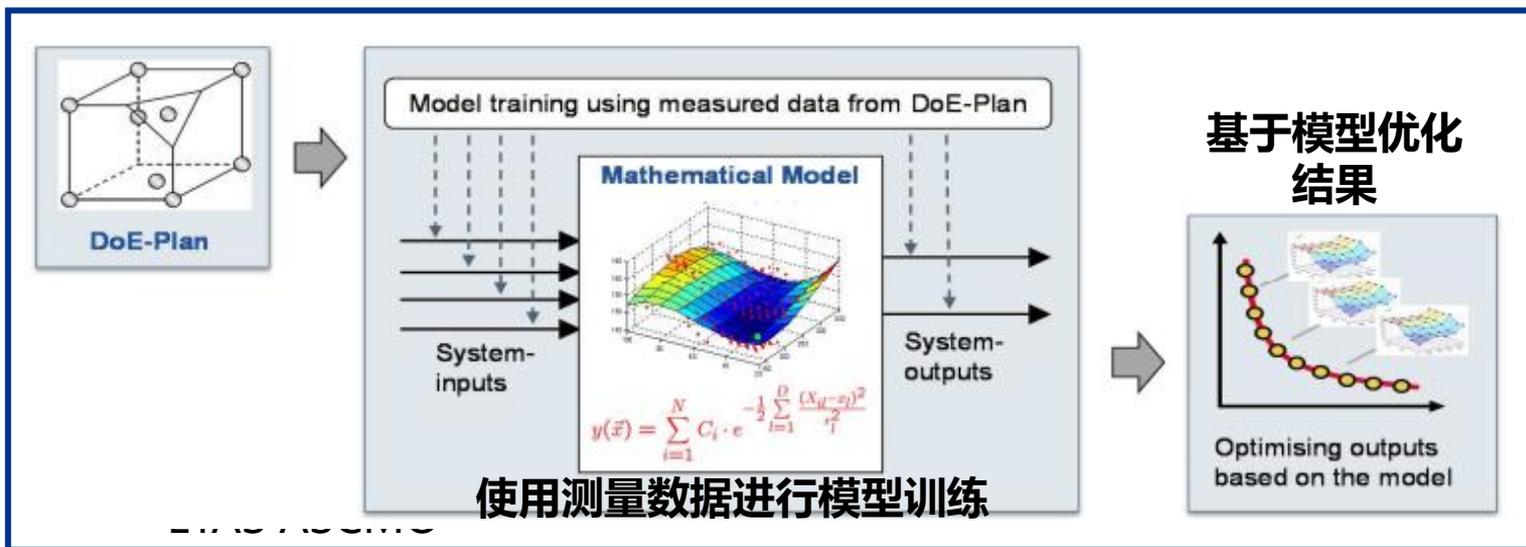


模型



**发动机开发**

- 采用**数学模型+DoE方法**：基于高斯过程的机器学习方法。**目标**：构建ECU参数集。
- **特点**：响应时间短，可用在硬件在环（HiL）测试系统，甚至直接在ECU上。

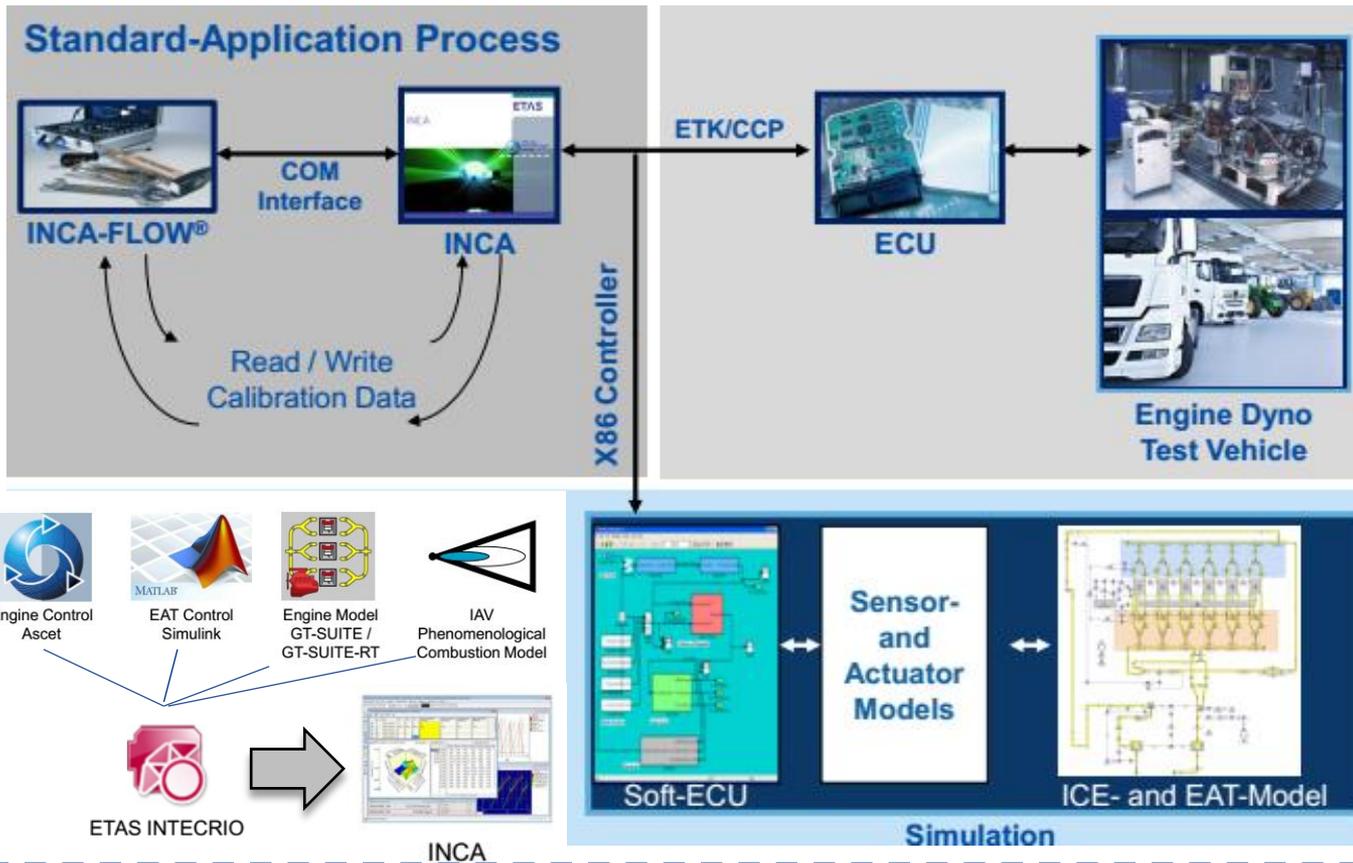


**方法：物理模型**

**特点：模拟极端条件下工作过程：**

- 高海拔
- 高寒
- 发动机部件损坏

## 基于模型的标定方法虚拟开发平台





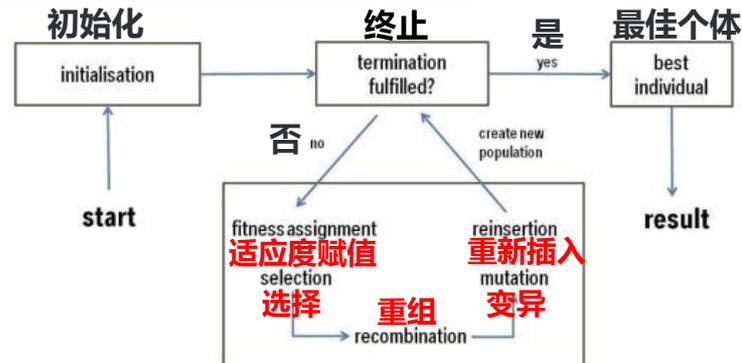
## 一维物理模型+遗传优化算法



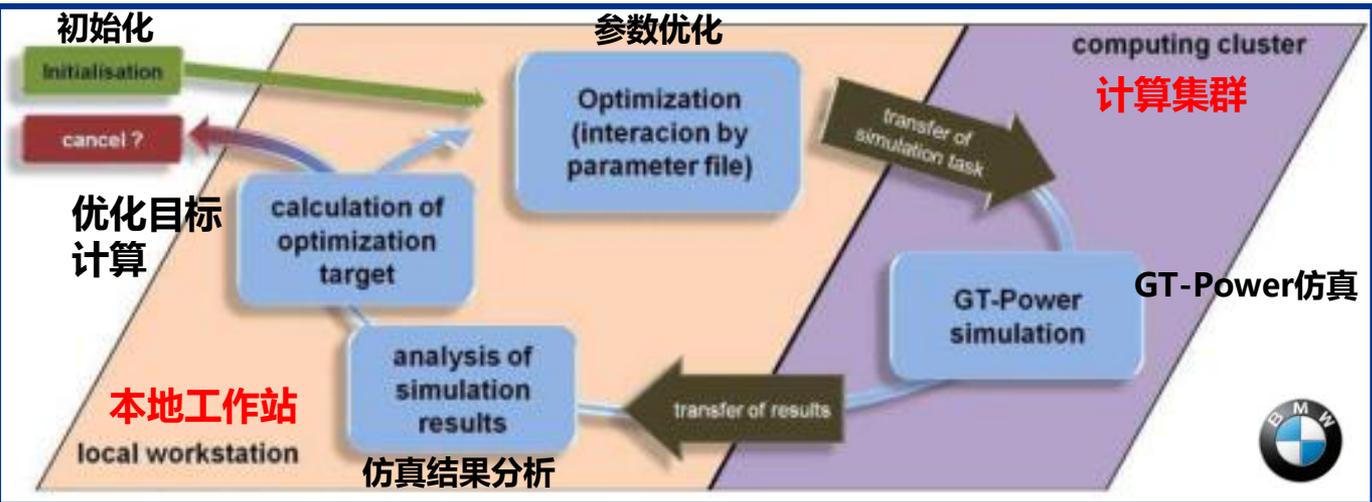
目标

### 改进模拟和优化技术，实现快速自动标定

- 参数可变
- 鲁棒性好
- 效果好
- 节省时间

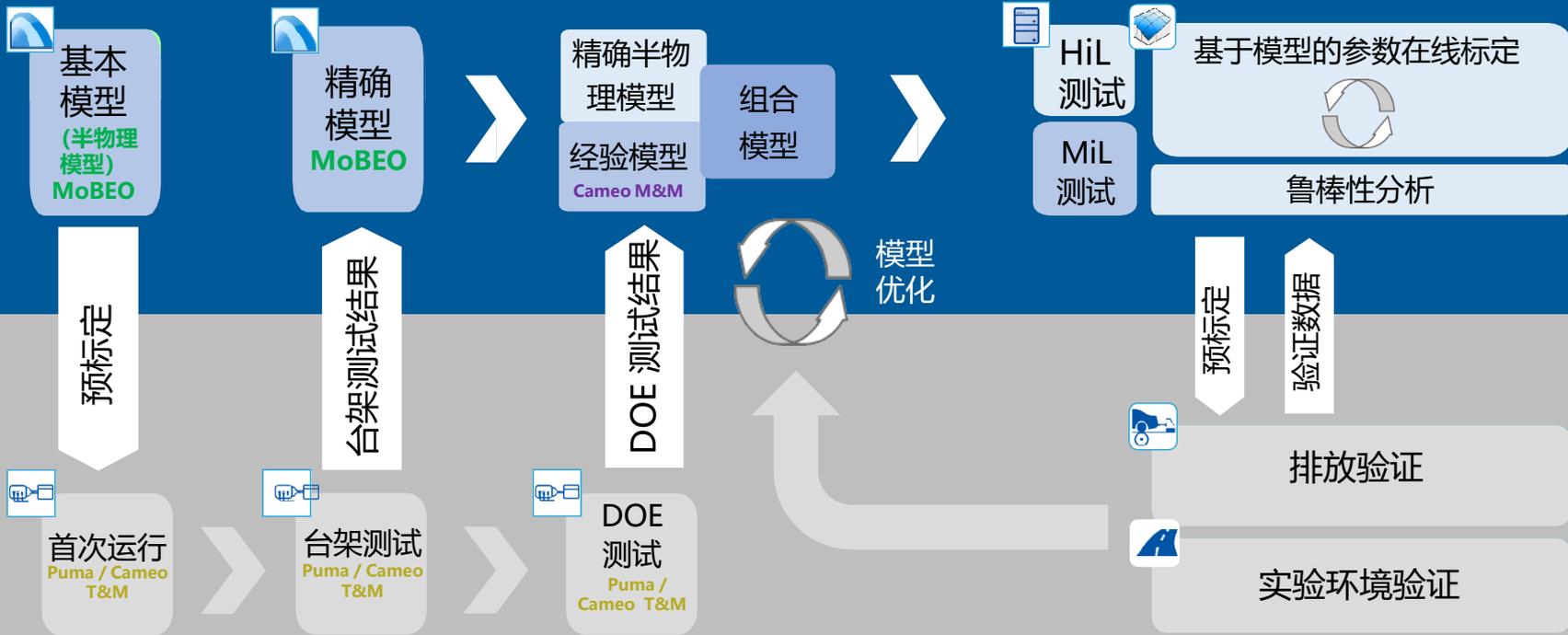


### 进化优化算法结构 (基于自然生物进化的随机搜索方法)





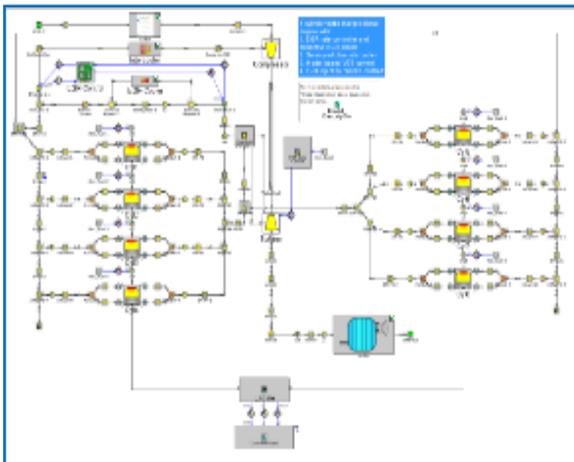
### 虚拟环境



### 真实环境

## 一维仿真工具:

- GT-Power-RT
- Cruise-M
- Boost
- Wave-RT



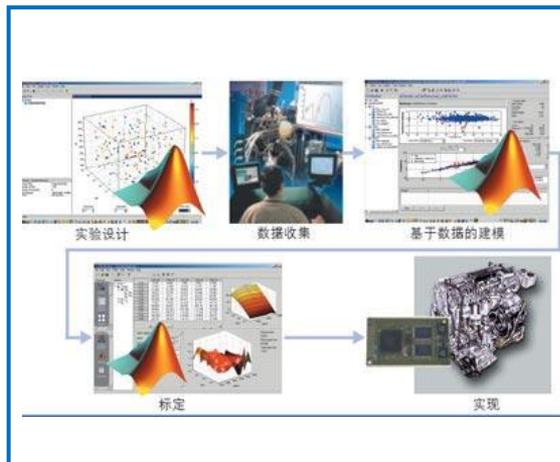
## HIL工具:

- LabCar
- Dspace
- NI PXI
- FPGA



## 优化建模工具:

- MBC Matlab
- 人工神经网络 ANN
- Simulink
- ModeFrontier





汇报内容

CONTENTS

一

背景与现状

二

虚拟标定问题

三

核心技术

四

方案与平台

五

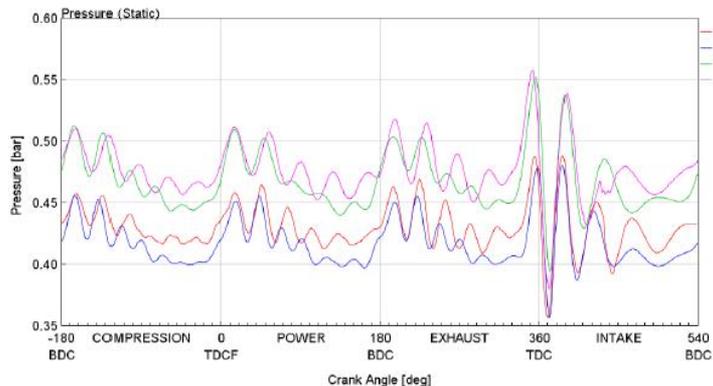
相关工具

六

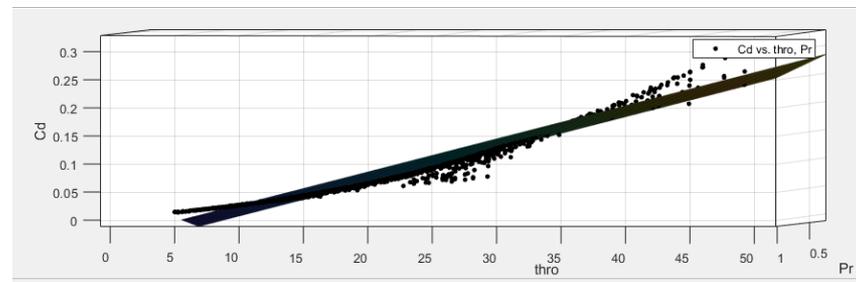
实际案例



## 物理模型的建立存在扰动误差、数字模型的建立严重依赖数据量



进气压力波动拟合误差



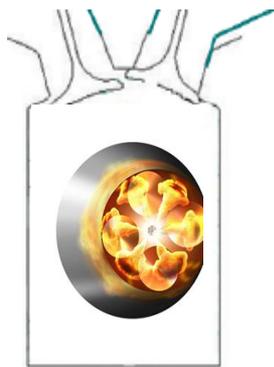
节气门流量系数拟合误差



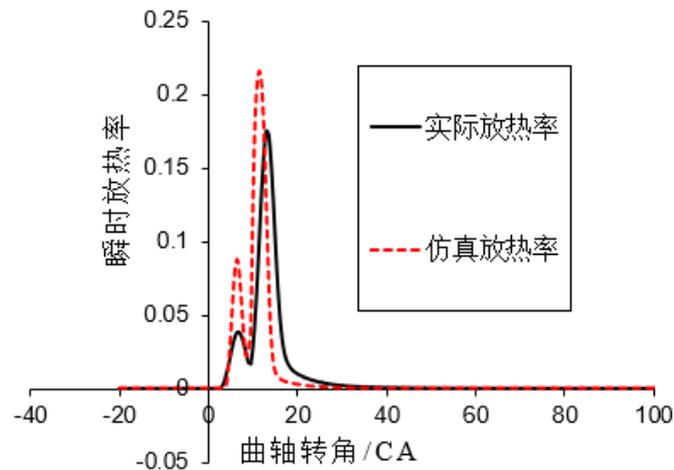
## 单变量的误差在模型中引发的耦合误差

外界输入

- 喷油次数
- 喷油正时
- 进排气门相位
- 循环喷油量
- 轨压
- 排气氧浓度
- EGR率
- 增压压力
- 转速

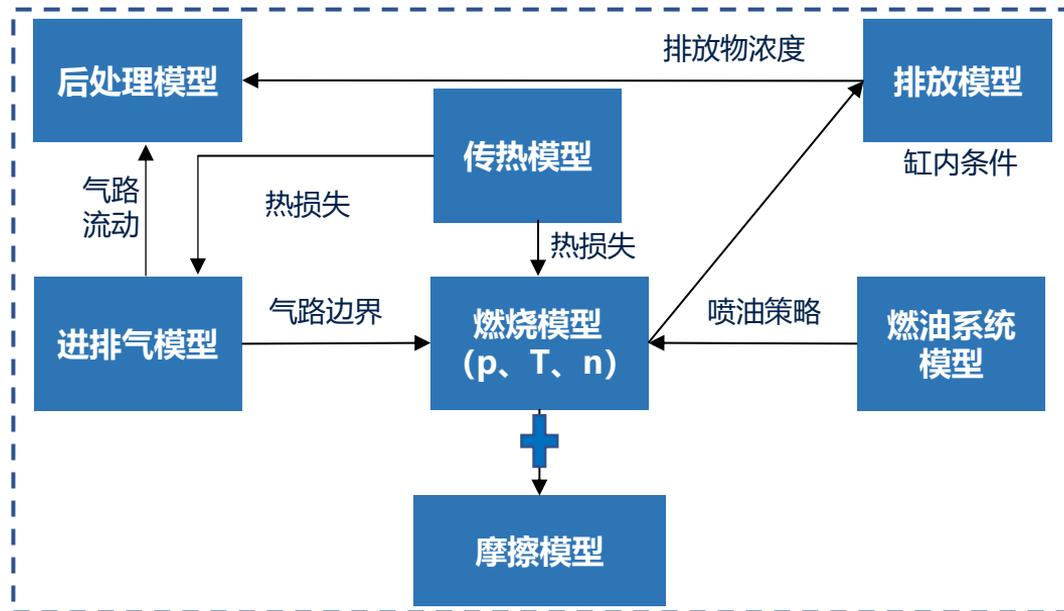


模型输出



燃烧模型标定面临多变量的影响，极易汇聚误差，导致模型误差增大

## 模型间变量传递/协同整定导致误差放大



子模型之间的相互关联和协同工作进一步增加误差



汇报内容

CONTENTS

一

背景与现状

二

虚拟标定问题

三

关键技术

四

方案与平台

五

相关工具

六

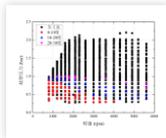
实际案例



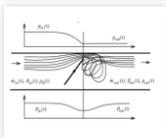
## 天津大学主要关注点

### 关键核心技术

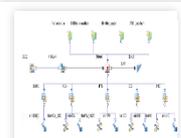
基于历史数据和机理的试验设计



基于机理的模型参数设计



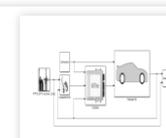
多模型参数的联合整定



基于粒子群算法的模型寻优



多尺度计算耦合技术



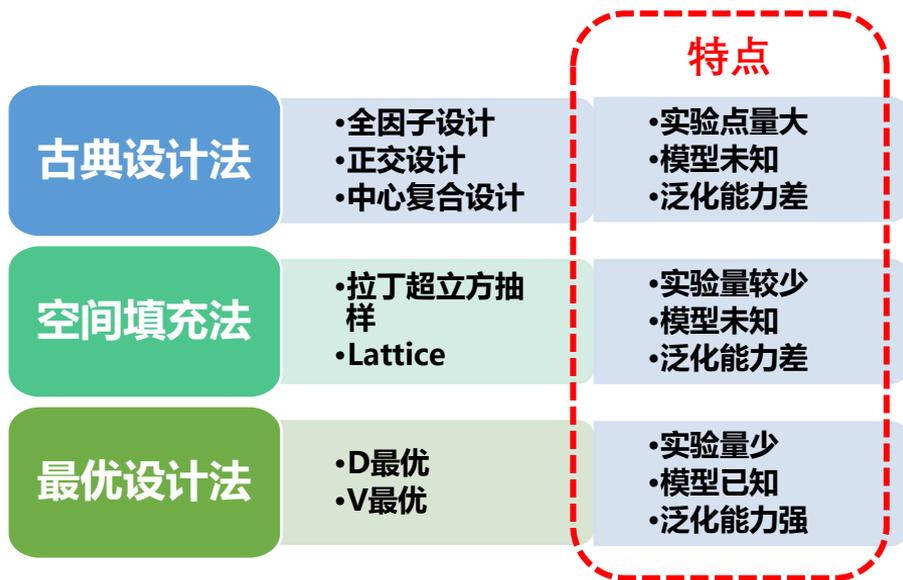
数据管理、存储与分析



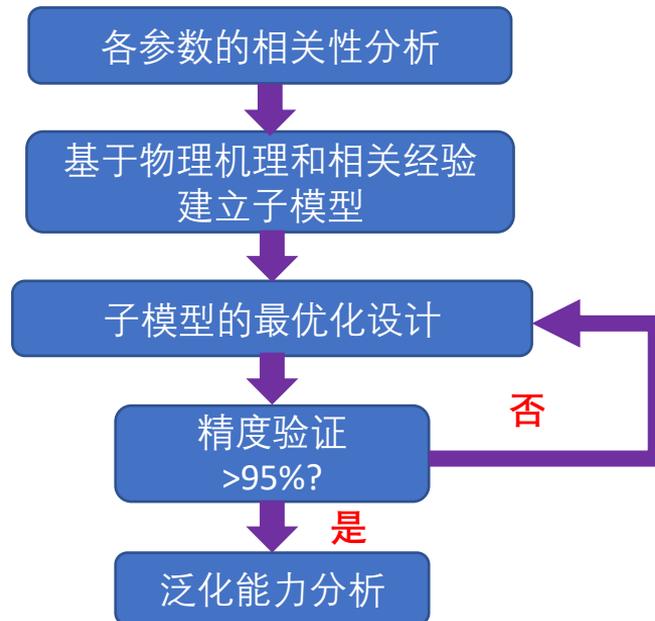


# 1. 基于历史数据和机理的试验设计

DOE试验设计：按照**最有效**的方式制定试验计划，以**最小的试验代价**获取最大的试验信息，从而进行有效的**统计分析**的数学理论与方法。



传统试验设计方法

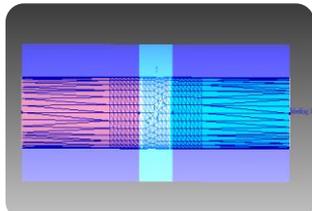


基于物理机理的最优实验设计

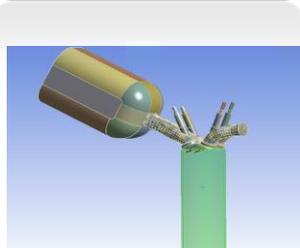
通过少量的试验来建立汽油机的控制变量、状态参数和汽油机响应之间的数学模型

## 基于物理机理的发动机子模型建立

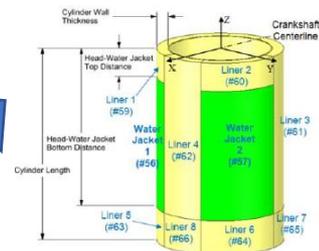
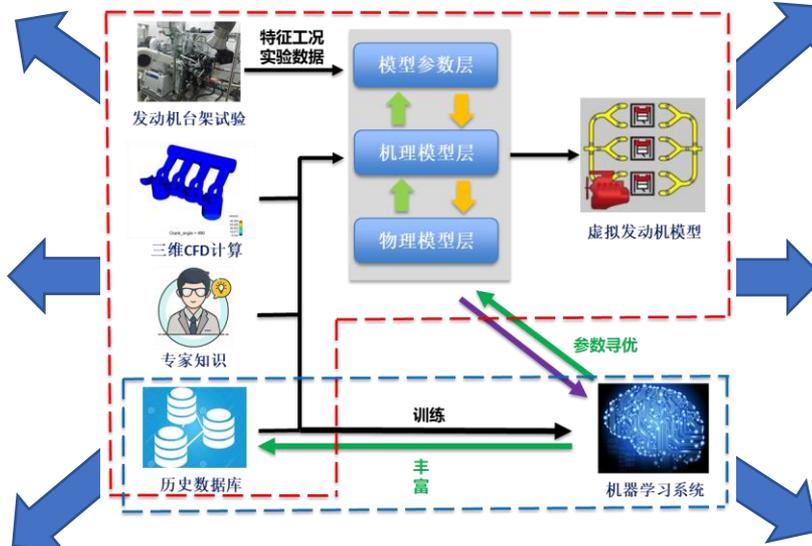
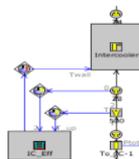
节气门模型



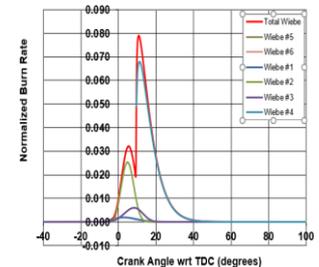
进排气门模型



中冷模型



传热模型

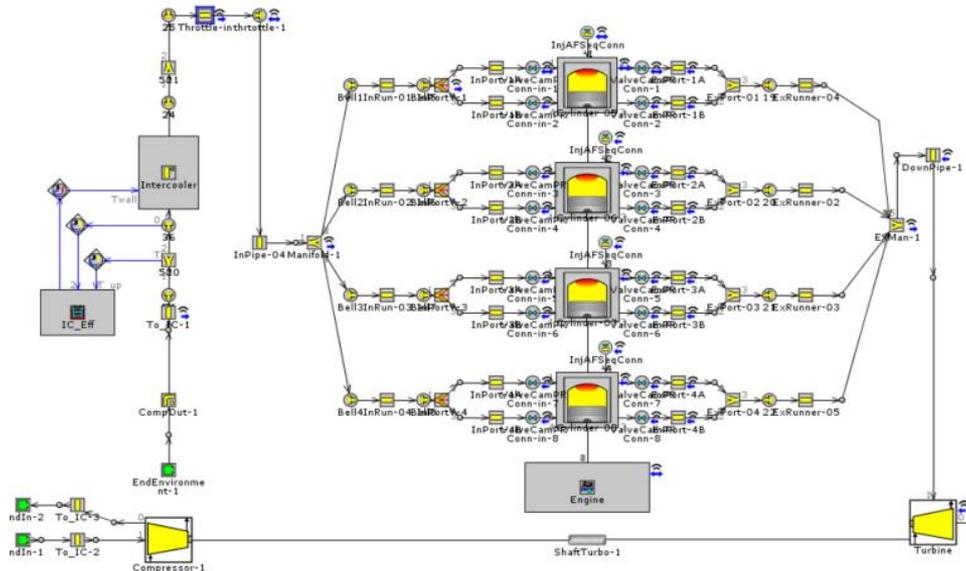


燃烧模型

摩擦模型、供油模型.....

## GT整机标定

## 外挂模型



监测器&误差统计



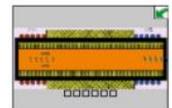
涡轮增压器控制



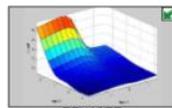
喷油控制



排气传热标定



标定MAP对比



电子节气门控制



缸内传热标定



涡后压力标定



进排气门特性标定



机械损失标定



**模型寻优算法：**通过智能优化算法对已经标定好的发动机MAP进行全局寻优，找到发动机性能较好的工况点。

**优化算法：**

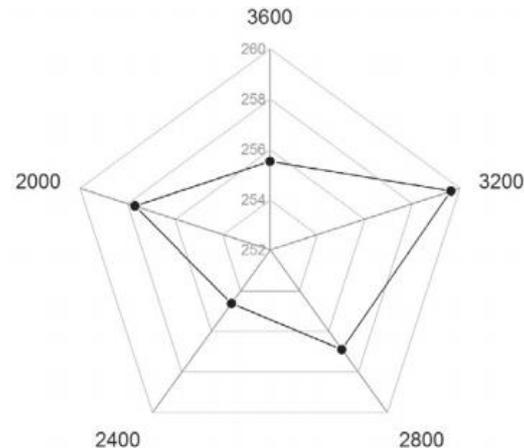
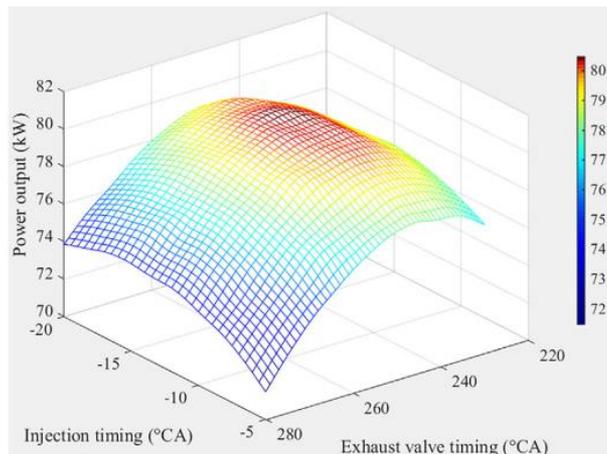
- 神经网络
- **粒子群算法 (PSO)**
- BP算法
- 混沌算法

**传统PSO算法的特点：**

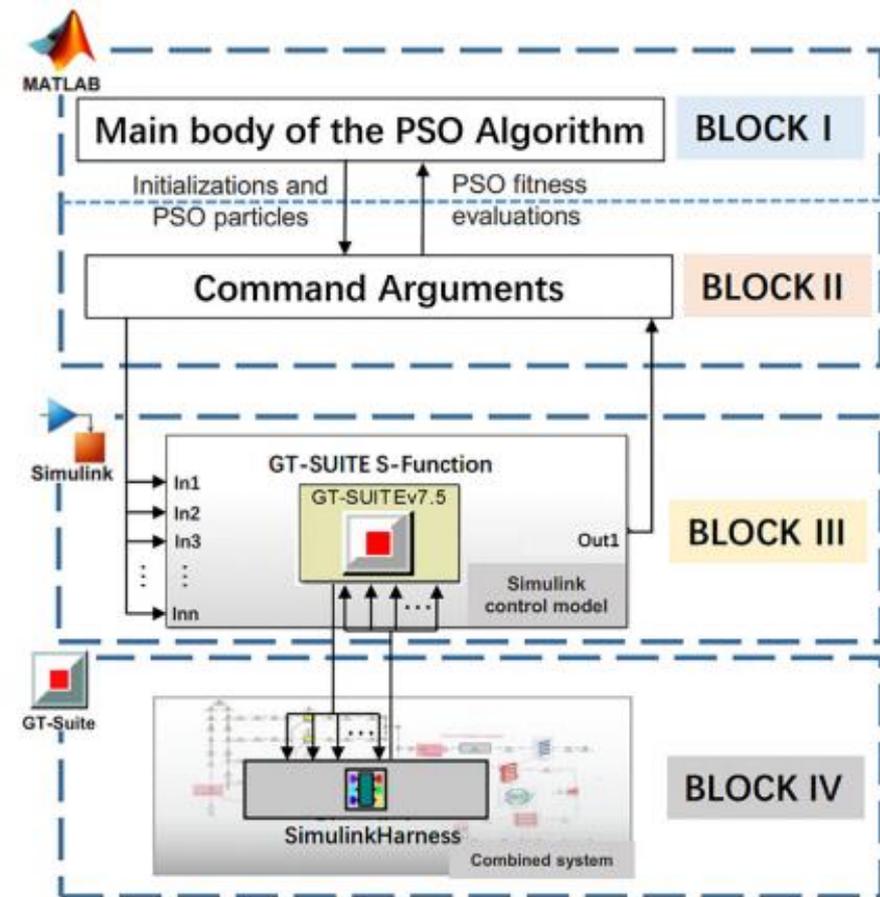
- 计算速度快
- 参数少
- 易于实现

**传统PSO算法的缺点：**

- 寻找的局部最小值
- 全局搜索能力差



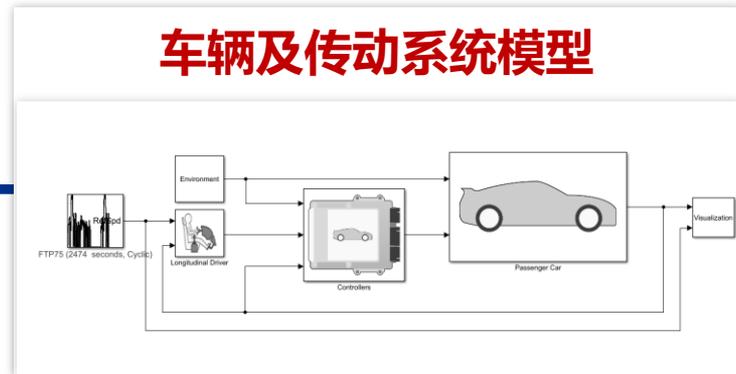
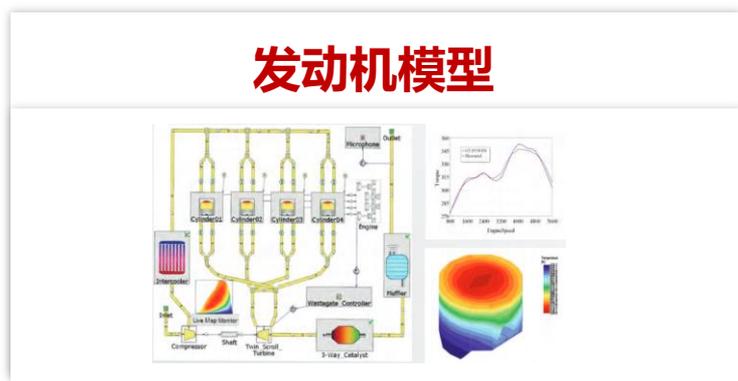
Exhaust valve timing



**PSOSCALF算法**是将**PSO算法**与**正弦余弦算法 (SCA)** 中的**位置更新方程式**和**Levy飞行方法**相结合的一种新的寻优算法。

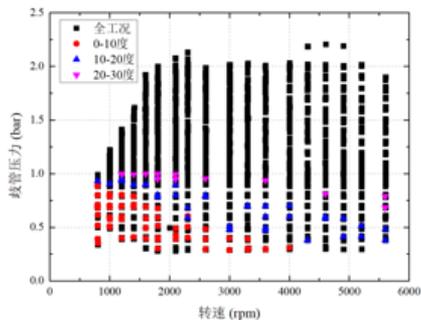
**PSOSCALF算法的优点:**

- 计算速度快
- 粒子跳跃能力强
- 可实现全局寻优



- 详细发动机以基于固定曲轴转角进行周期性仿真
- 车辆及传动系统以基于固定时间步长进行连续性仿真

## 台架实验

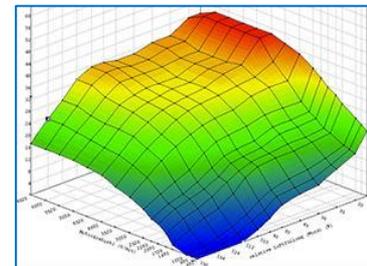


基于物理机理的  
试验设计方法

历史实验数据



历史MAP数据

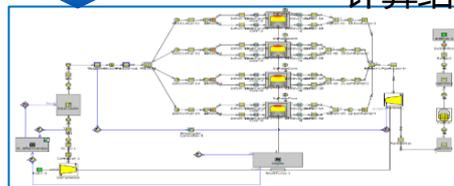


基于人工智能的  
控制MAP生成算法

模型系数

数据中心

计算结果



仿真模型



汇报内容

CONTENTS

一

背景与现状

二

虚拟标定问题

三

关键技术

四

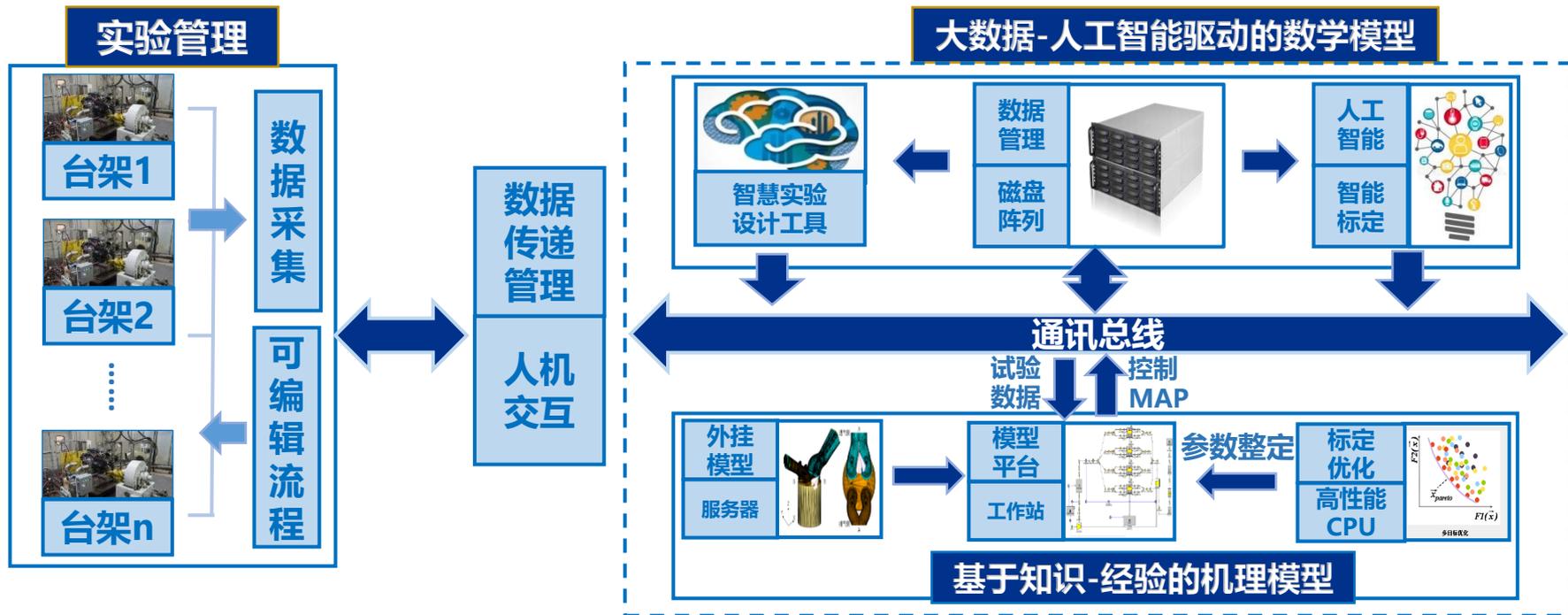
方案与平台

五

相关工具

六

实际案例





汇报内容

CONTENTS

一

背景与现状

二

虚拟标定问题

三

关键技术

四

方案与平台

五

相关工具

六

实际案例



## GT



GT-ISE



GEM3D



COOL3D



VTDESIGN



GT-SPACECLAIM



GT-POST



Integrated Optimization



Distributed Computing



DOE & DOE-POST



### GT-RT

➤ 建模标定平台



## 天津大学 Tianjin University

### 智能标定系统

实验设计、管理、监控系统

数据管理、存储与筛选工具

基于历史数据和机理的  
试验设计

多模型参数的联合整定工具

基于机理研究的模型参数设计

动力总成动态运行模拟技术

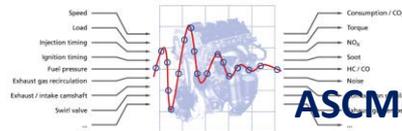


### 智能实验系统



## ETAS

DRIVING EMBEDDED EXCELLENCE



### ASCMO



### Congra



### MDA



### INCA-FLOW

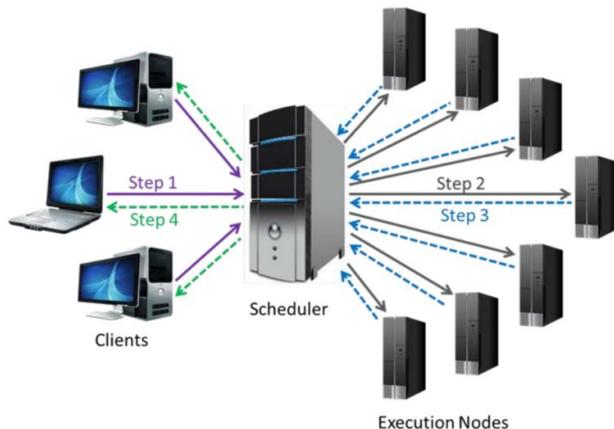


### Labcar

➤ 优化测试平台



## 多核分布式运行



分布式计算机群



并行计算中心

可以大幅缩短虚拟发动机模型的标定时间以及基于模型的虚拟标定的时间



**实验设计模块**

实验数据分析 模型分析 **实验设计** GT运行分析 退出

发动机数据分析 发动机模型分析 实验设计

实验设计和样本点选取

**实验设计方案**

均匀选点设计 基于物理机理的设计 全工况

设计变量选择	最小值	间隔	最大值	点数	取整位数	四舍五入进制	计划点数	实际点数
rpm	794.0	100	5606.0	48.0	-2	5	1872.0	
P_mani	280.0	50	2207.0	39.0	-2	5		

样本点和测试点选取

确定

**GT运行模块**

实验数据分析 模型分析 实验设计 **GT运行分析** 退出

发动机数据分析 发动机模型分析 实验设计 GT运行和分析

**GT运行参数设置**

GT运行设置

运行方法设置

基础

原GT模型名称: 3TVAES1 废气阀控制模式: 目标增压压力

目标GT模型名称: 3TVAES1 燃烧模型模式: 给定ca50和duration

引用EXCEL名称: 3TVAES1

运行Cases: all 多核设置

最小循环数: 60 packet\_min: 1

最大循环数: 70 packet\_max: 1

是否分布式运行: 是

监测器是否打开: on

**GT运行自优化设置**

自优化设置

修正系数	自学习是否启动	启动时间(cycle)	启动判断阈值	大误差判断阈值	优化目标修正 (一般工况)	优化目标修正 (误差偏高)	优化目标修正 (误差偏低)	固化是否启动
节气门流量系数	是	13	3%					否
缸内传热系数	是	25	3%	3%	0%	3%	-3%	否
进气量修正系数	是	35	3%	3%	0%	3%	-3%	否
非气道传热系数	是	45	3%	3%	0%	3%	-3%	否
废气阀开度		18						否

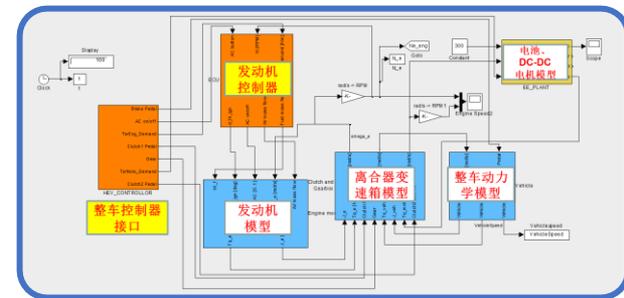
开始运行



# 天津大学“人工智能标定工程师”-HEV硬件在环系统

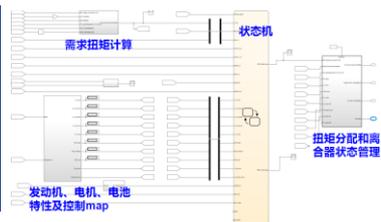


## 策略集成

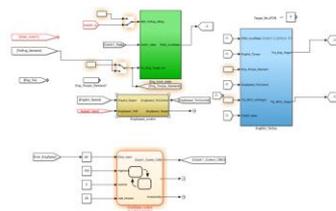


## 混合动力模型

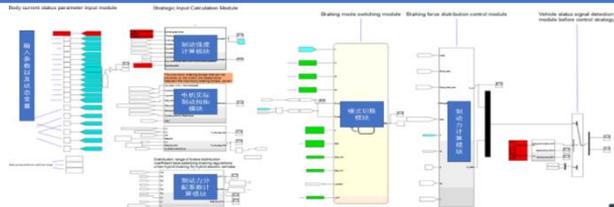
### 能量管理策略



### 扭矩管理策略



### 制动回收策略

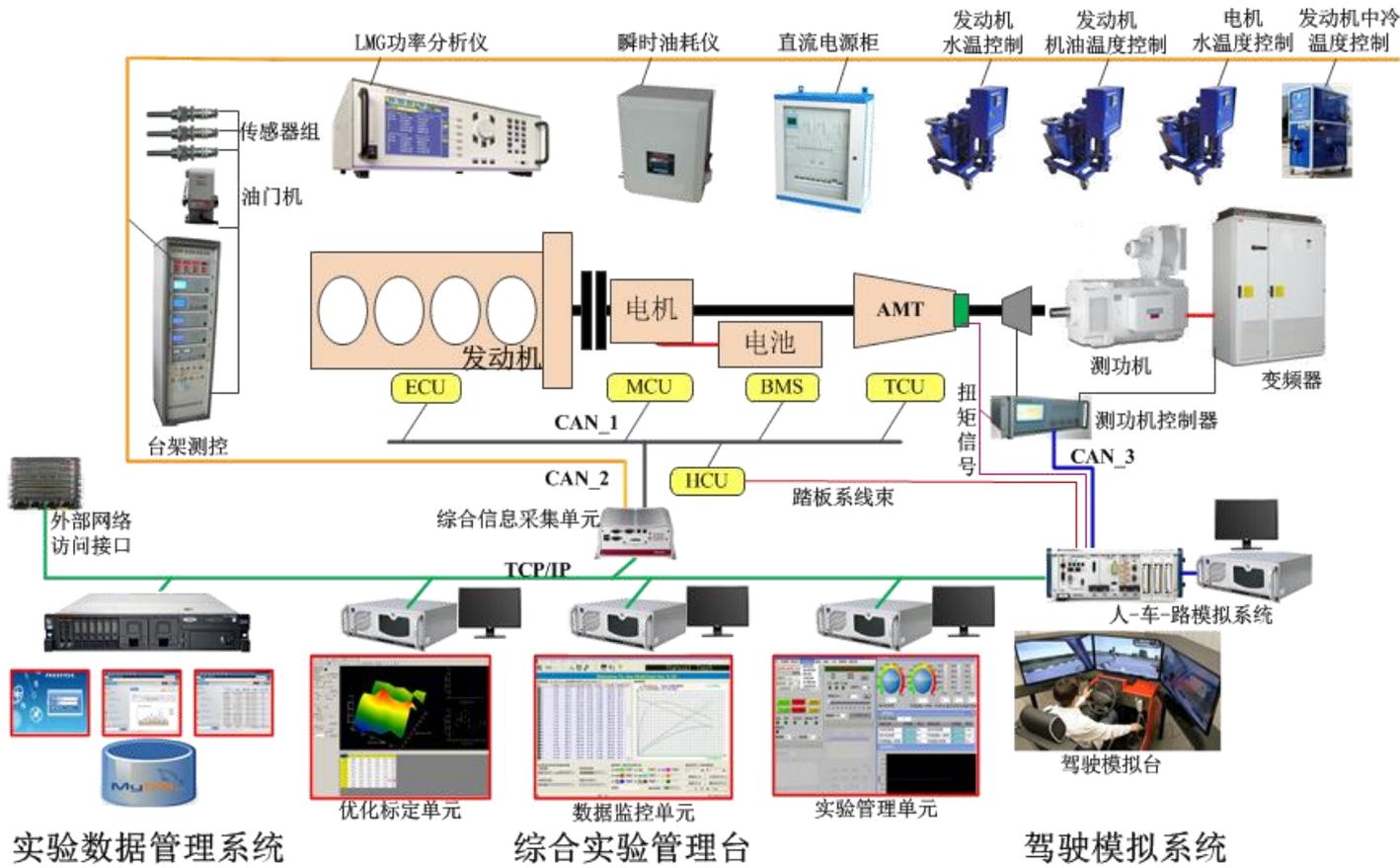




## 整体架构

基础台架单元

高级管理单元





汇报内容

CONTENTS

一

背景与现状

二

虚拟标定问题

三

关键技术

四

方案与平台

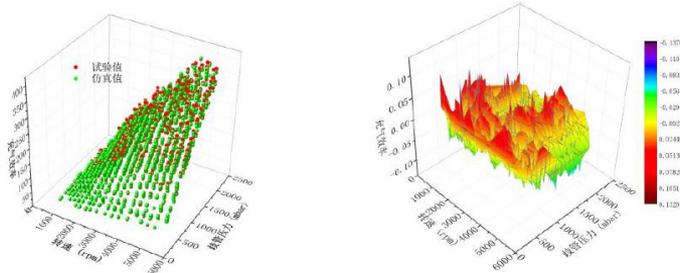
五

相关工具

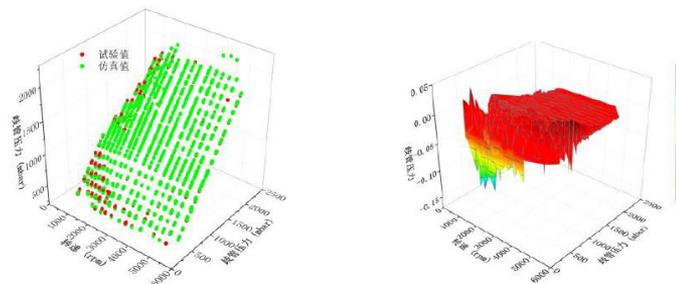
六

实际案例

- ▶ 通过校企合作，进行了发动机充气模型的虚拟标定研究，降低80%以上标定工作量
- ▶ 建立节气门、进排气门流量系数模型、燃烧模型、传热模型深层机理模型及标定方法
- ▶ 用500个工况点，保证2660个采样点中95%以上充气效率精度在95%以上（误差小于5%）



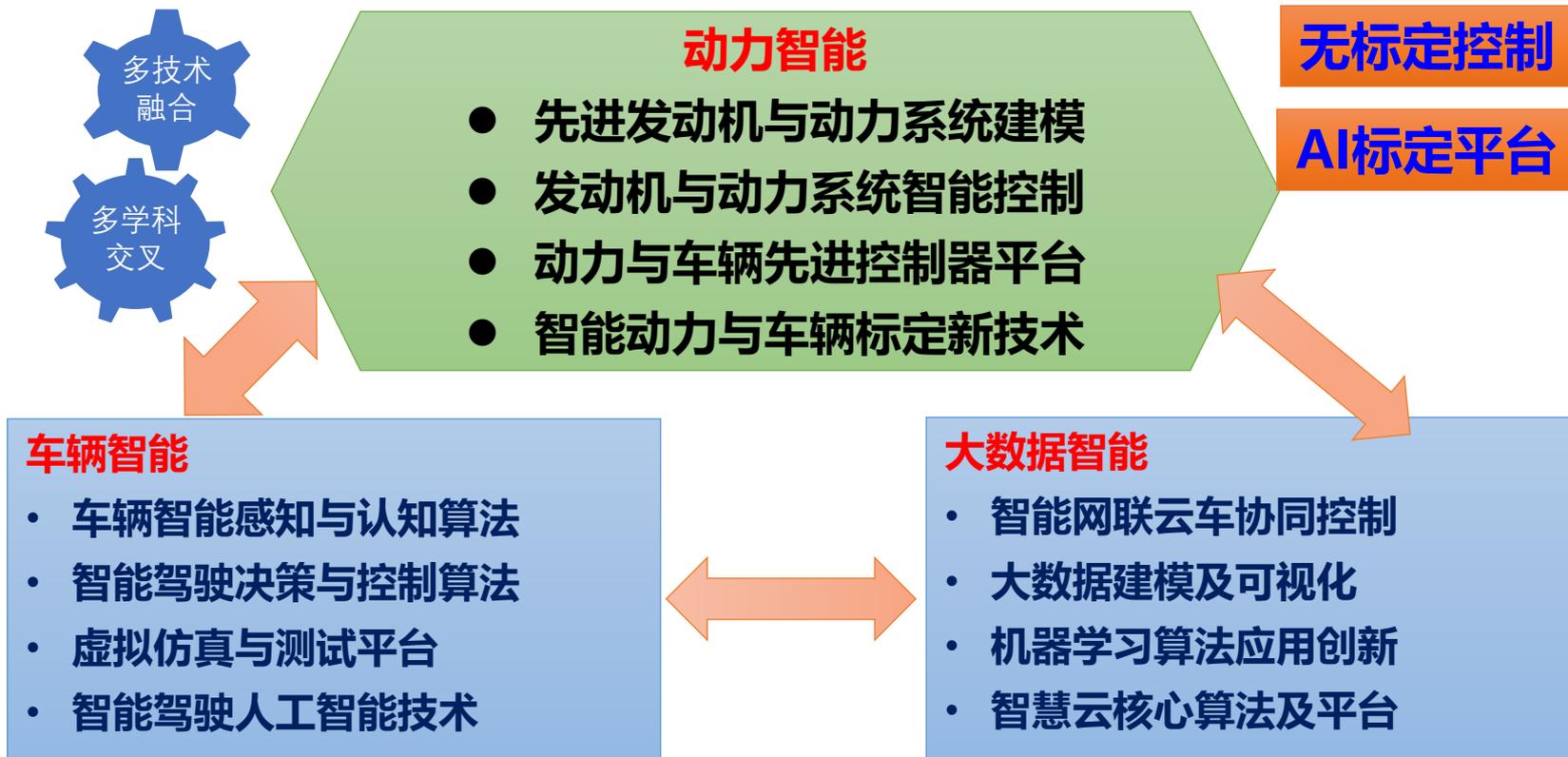
充气效率试验与仿真值对比及偏差分布



歧管压力试验与仿真值对比及偏差分布



## 模型 算法 平台



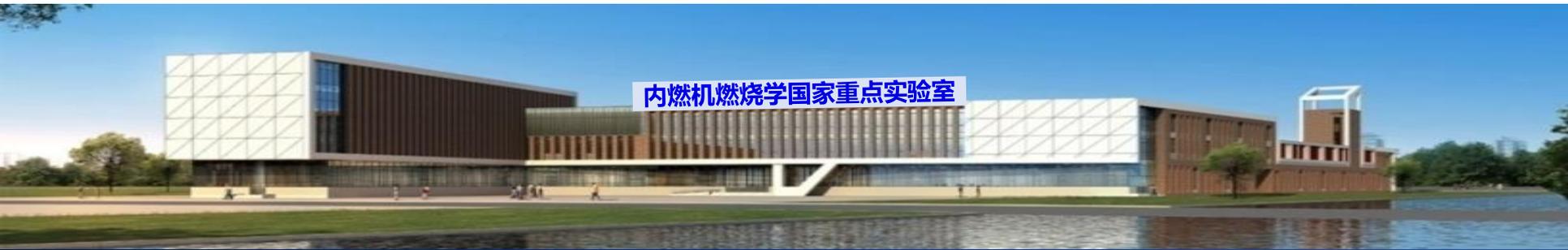


智能象空气一样，无处不在，无人不需

ICSC 2019  
Core Competence Enhanced by MBD  
IDAJ CAE Solution Conference



**谢谢大家，欢迎多多交流合作！**  
**xiehui@tju.edu.cn**



内燃机燃烧学国家重点实验室