



人车路协同下的内燃机及其能源网络优化控制

谢 辉 教授，副主任

天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室

2016-5-6



汇报内容

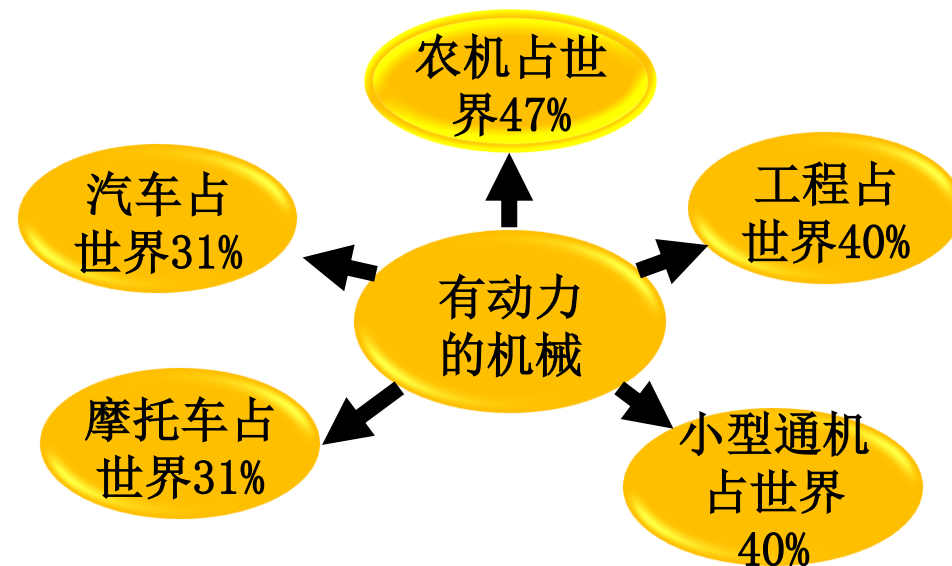
1. 内燃机的基本情况
2. 内燃机面临的控制问题
3. 内燃机的典型控制方案
4. 基于人车路协同的内燃动力系统控制



1. 内燃机的基本情况

内燃机是国民经济的主导动力设备

内燃机是热效率最高，功率密度高，燃料适应性好的动力机械。



- 内燃机是**交通运输、工程机械、农业机械、渔业船舶、国防装备**的主导动设备。
- 中国年产量超过8000万台，年产值超过**4000亿元**，内燃机工业是**重要的基础产业**。
- 中国总保有量超过**3亿台**，**我国是内燃机产销世界第一大国**。

美国科学院报告：到2025年，内燃动力将占车用动力系统的**98%**。

内燃机对国民经济发展有着极为重要的战略意义

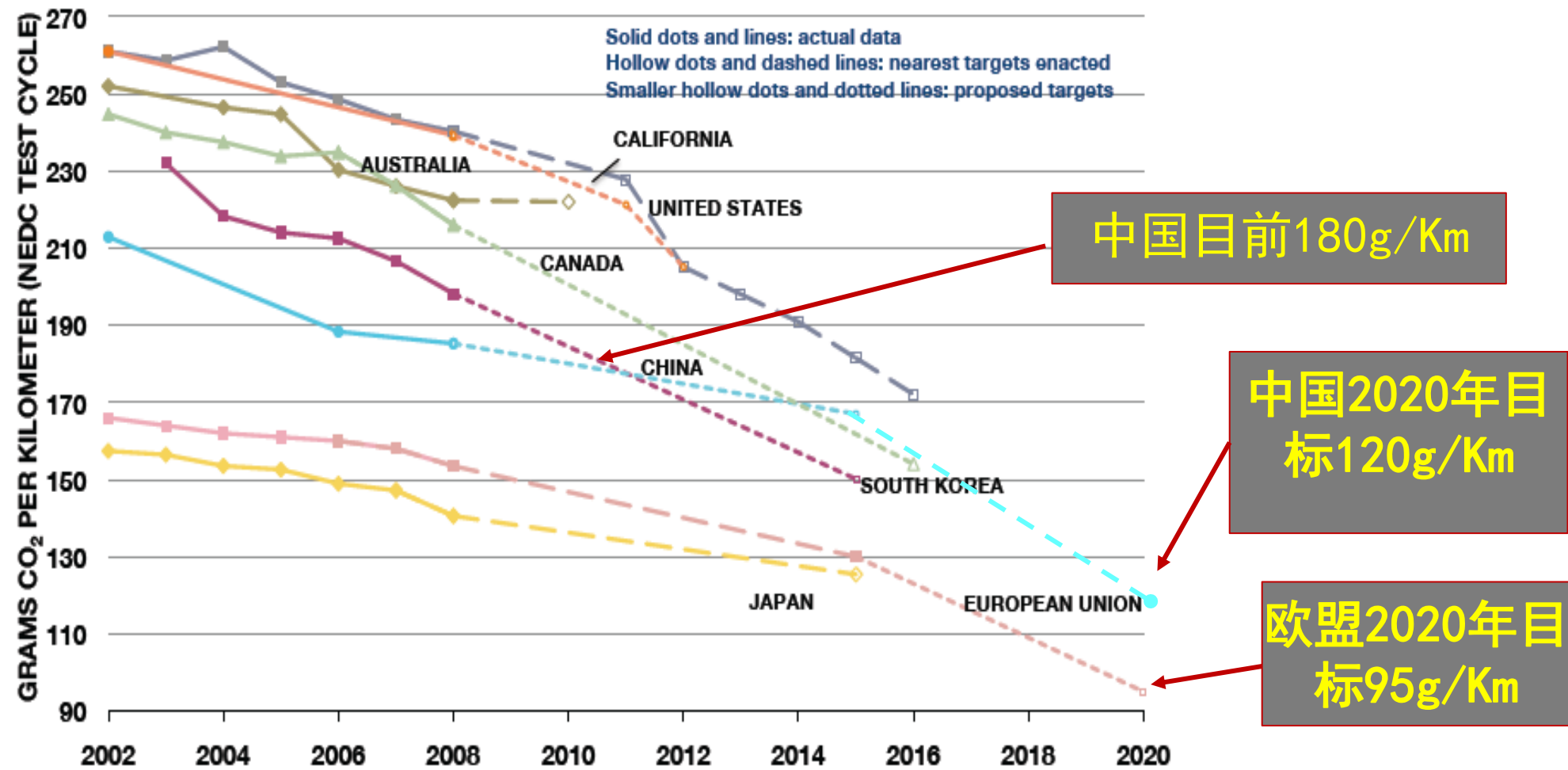
- 内燃机消耗我国石油总量的**60%以上**。
- 2013年我国**原油对外依存度已达58.1%**。
- 人类活动导致的CO₂排放中，**交通运输占25%**。
- 内燃机是PM2.5排放的**主要“贡献”者**。



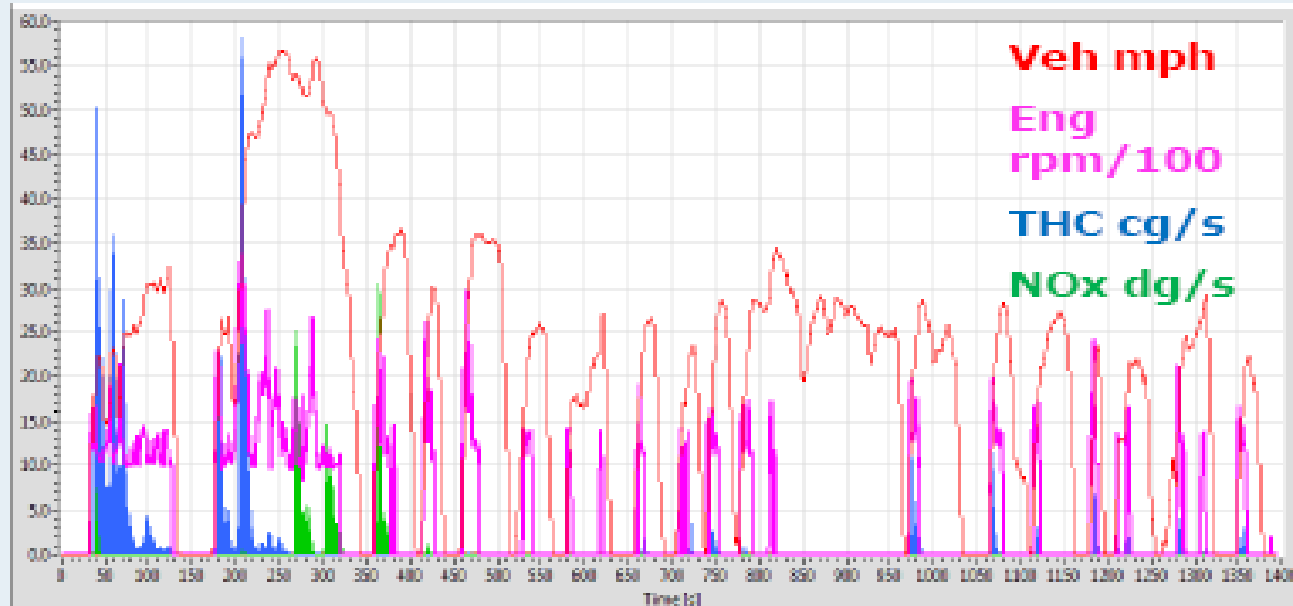
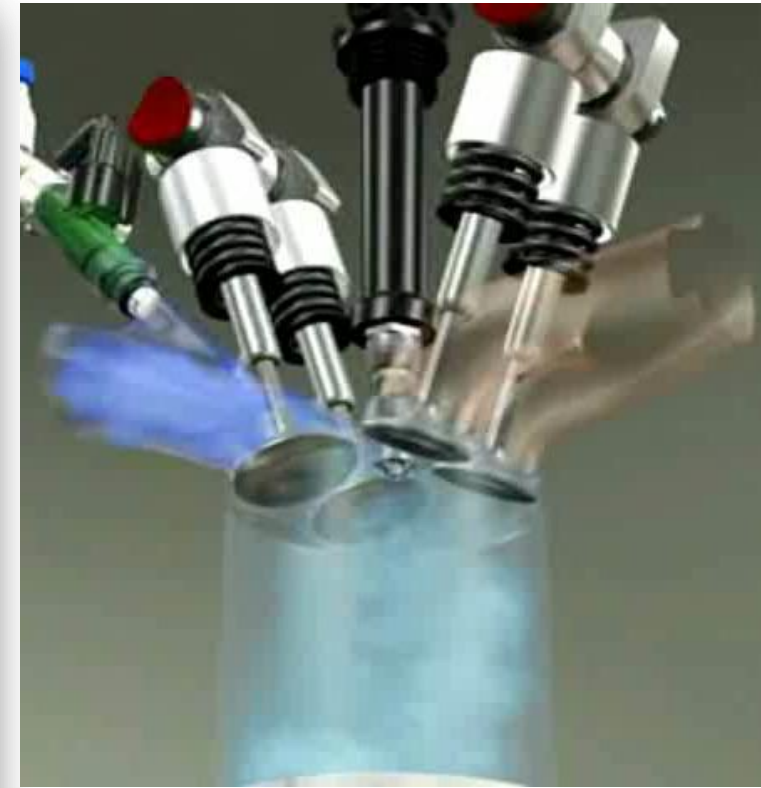
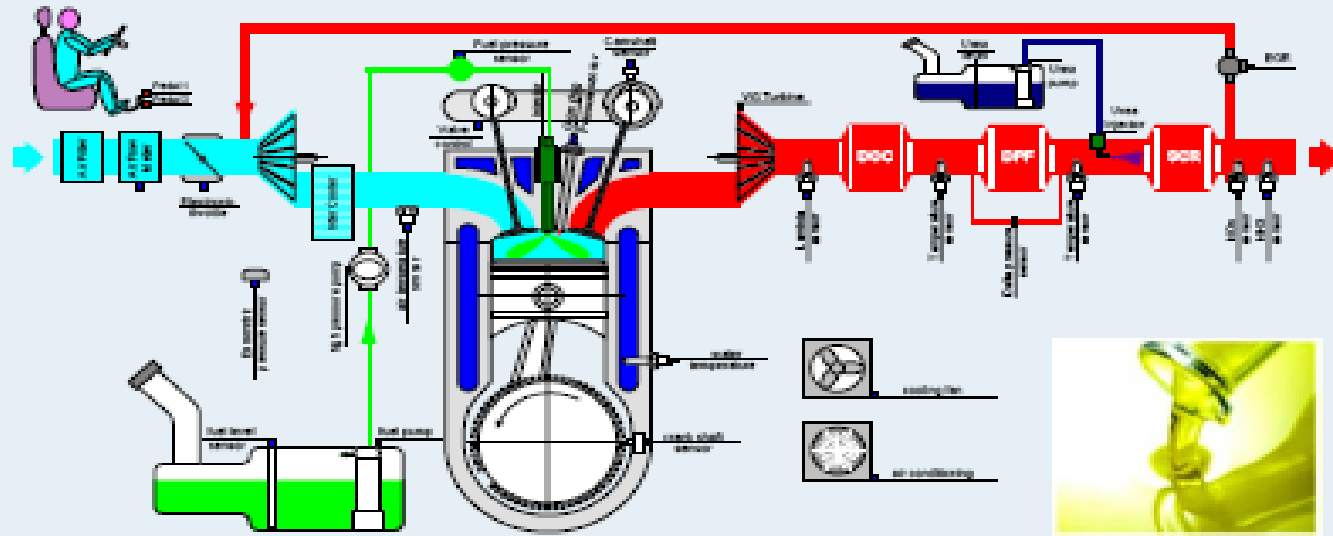
我国油气进口输运渠道

内燃机节能减排对国家能源安全和环境安全有重大意义！

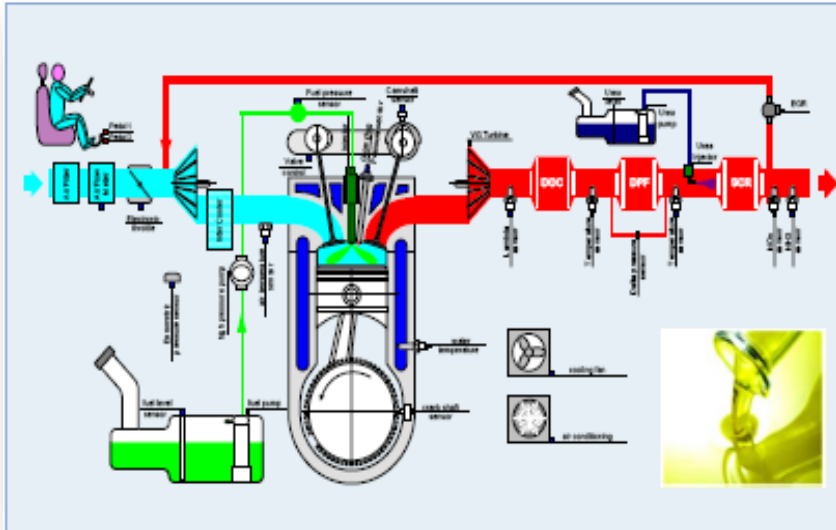
内燃机低碳技术既是科技挑战，也是国际政治斗争



国家目标：到2020年，CO₂排放须降低30%以上！

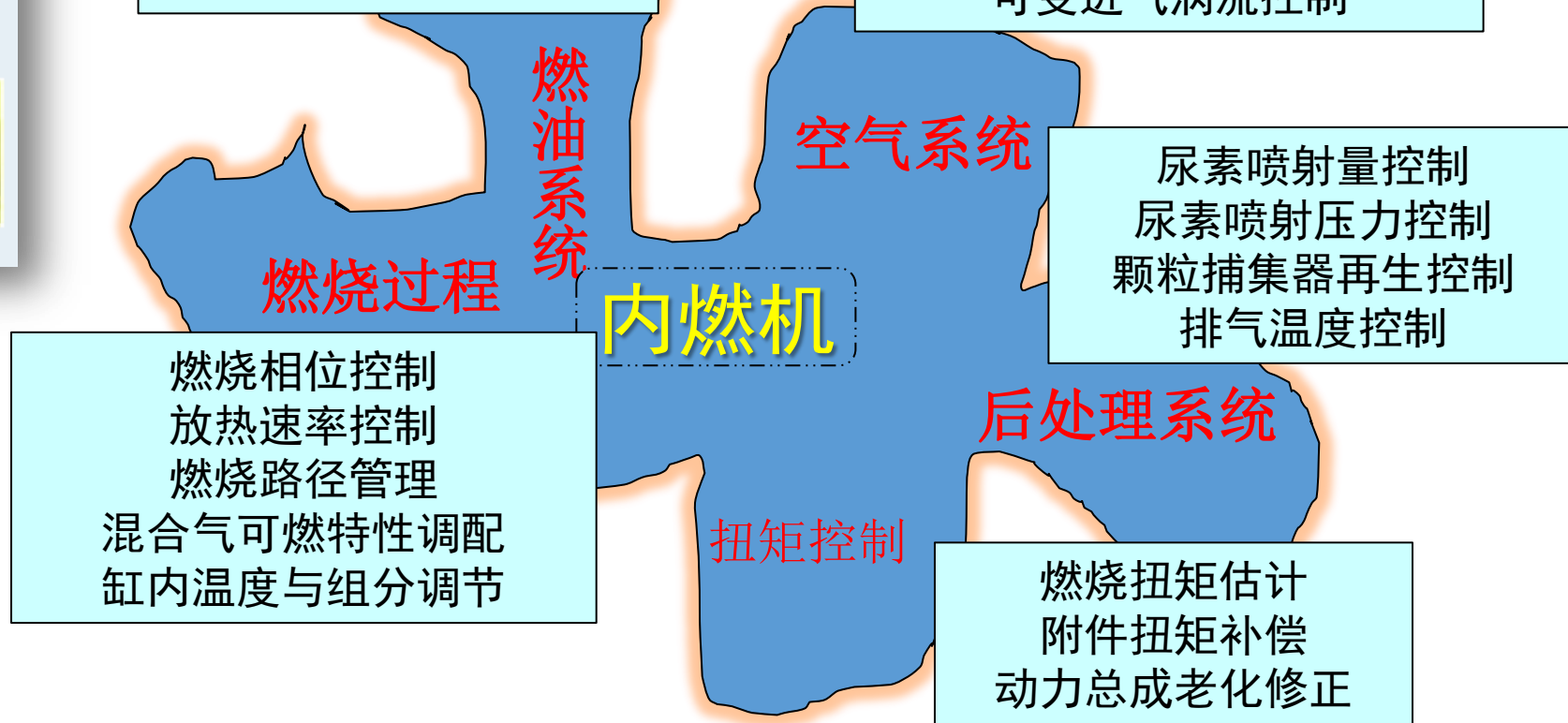


内燃机的复杂性



共轨管压力控制
进气道-缸内直喷控制
多次喷射控制
喷油器磨损补偿

可变几何截面增压控制
复合废气再循环控制
可变气门定时与升程控制
可变进气涡流控制



复杂的性能目标：油耗，排放（Nox, PM, HC, CO），动力性，可靠性



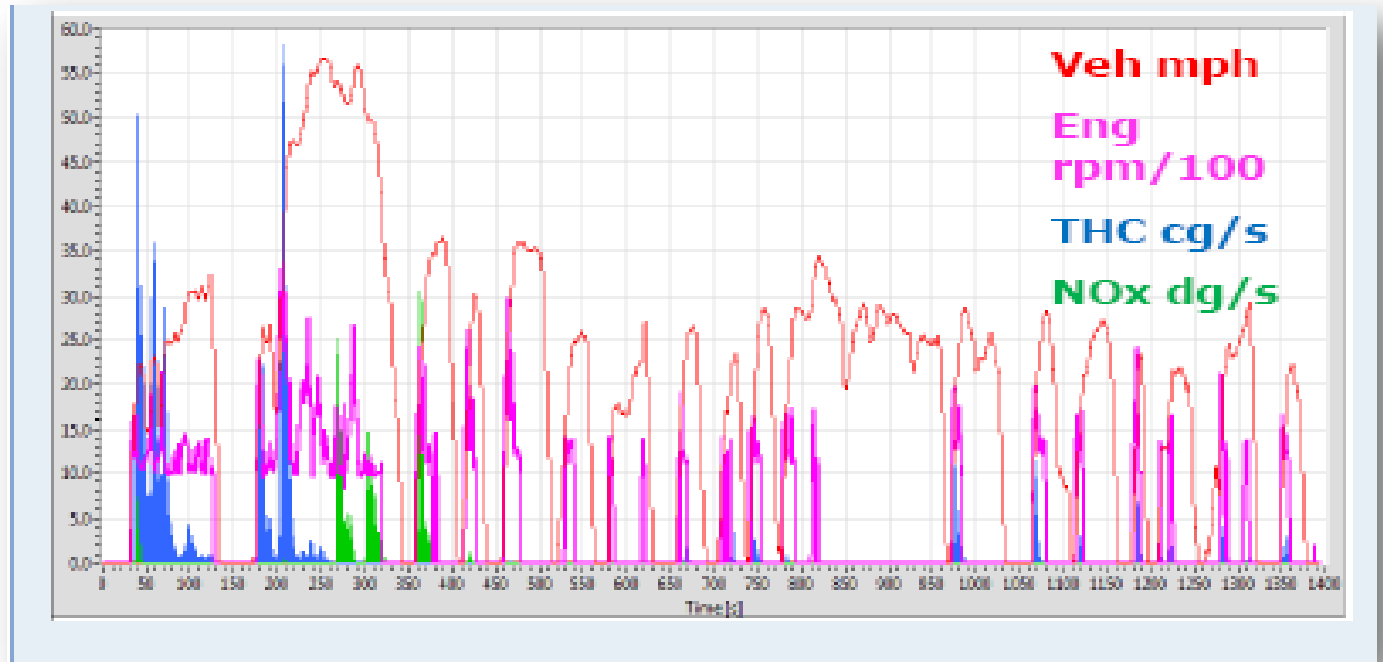
2. 内燃机的控制问题

内燃机是一种非线性，强耦合，高动态的复杂动力机械



- 非线性：**燃料和空气的复杂化学反应决定内燃机的动力输出；
- 强耦合：**多执行器对多参数的共同影响（燃油，空气，边界条件）；
- 高动态：**自身毫秒级别的工作循环，外界复杂多变的道路工况。

内燃机作为一个复杂的被控对象，对控制的软件，硬件和策略都有极高的要求。



控制挑战 (1) : 多变量多目标优化



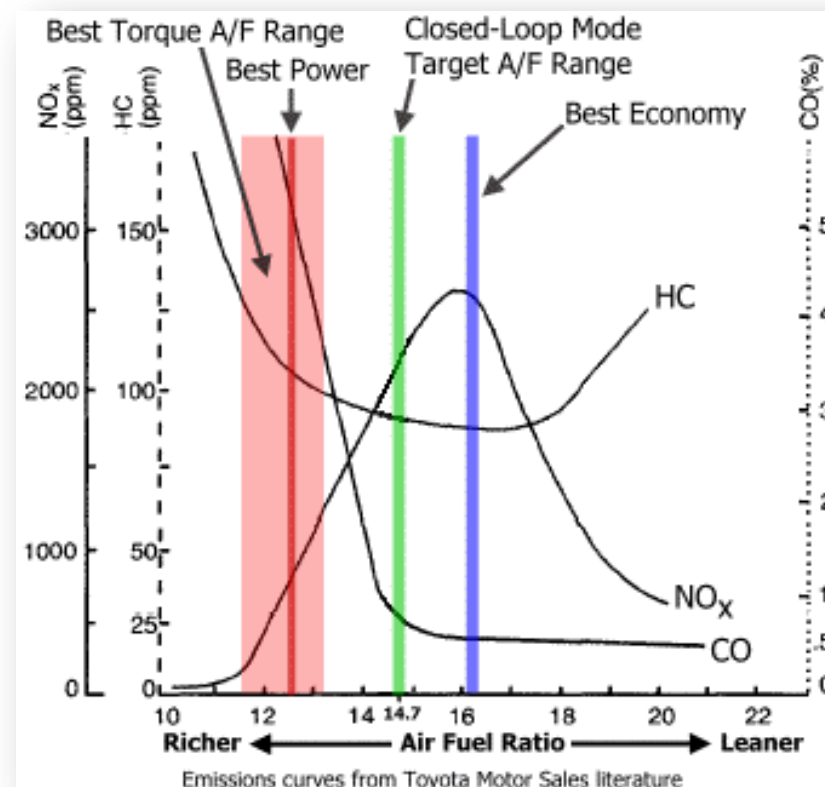
(1) 多变量系统特征

各子系统特性迥异、相互耦合



(2) 多目标优化需求

油耗、排放和动力性的折中



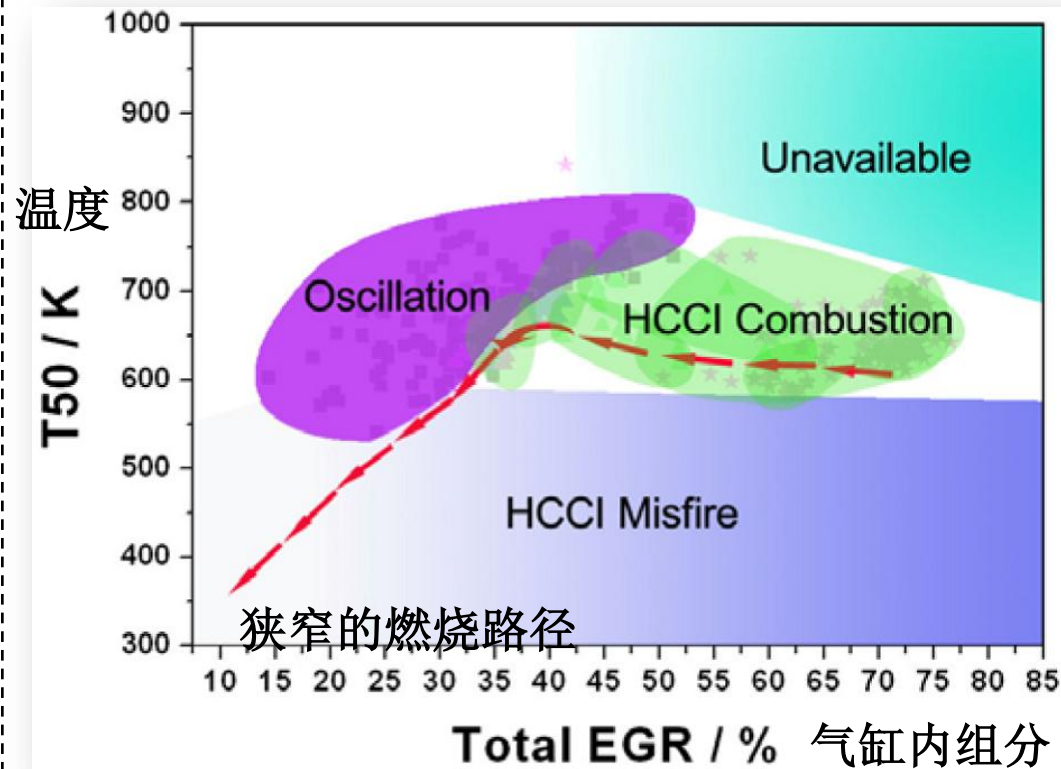
控制挑战（2）：对运行边界敏感、边界条件复杂

（3）对边界条件敏感

温度、空燃比、废气率、流动, …

（4）边界条件复杂

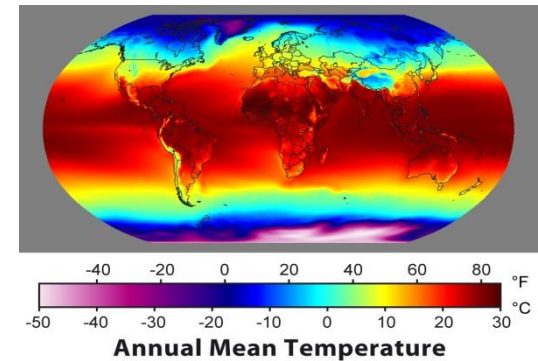
人-车-路边界、操作边界、运行边界



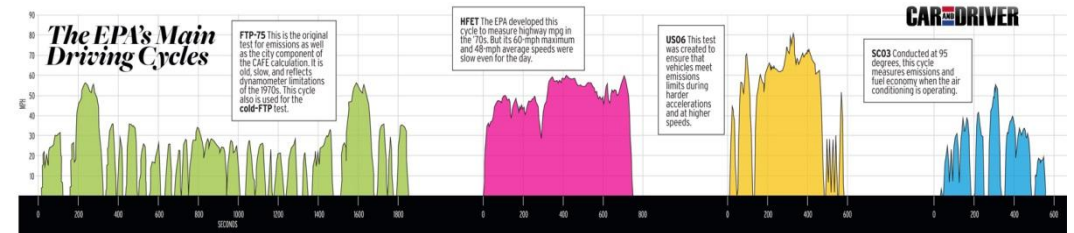
高效低温燃烧汽油机燃烧路径原理图



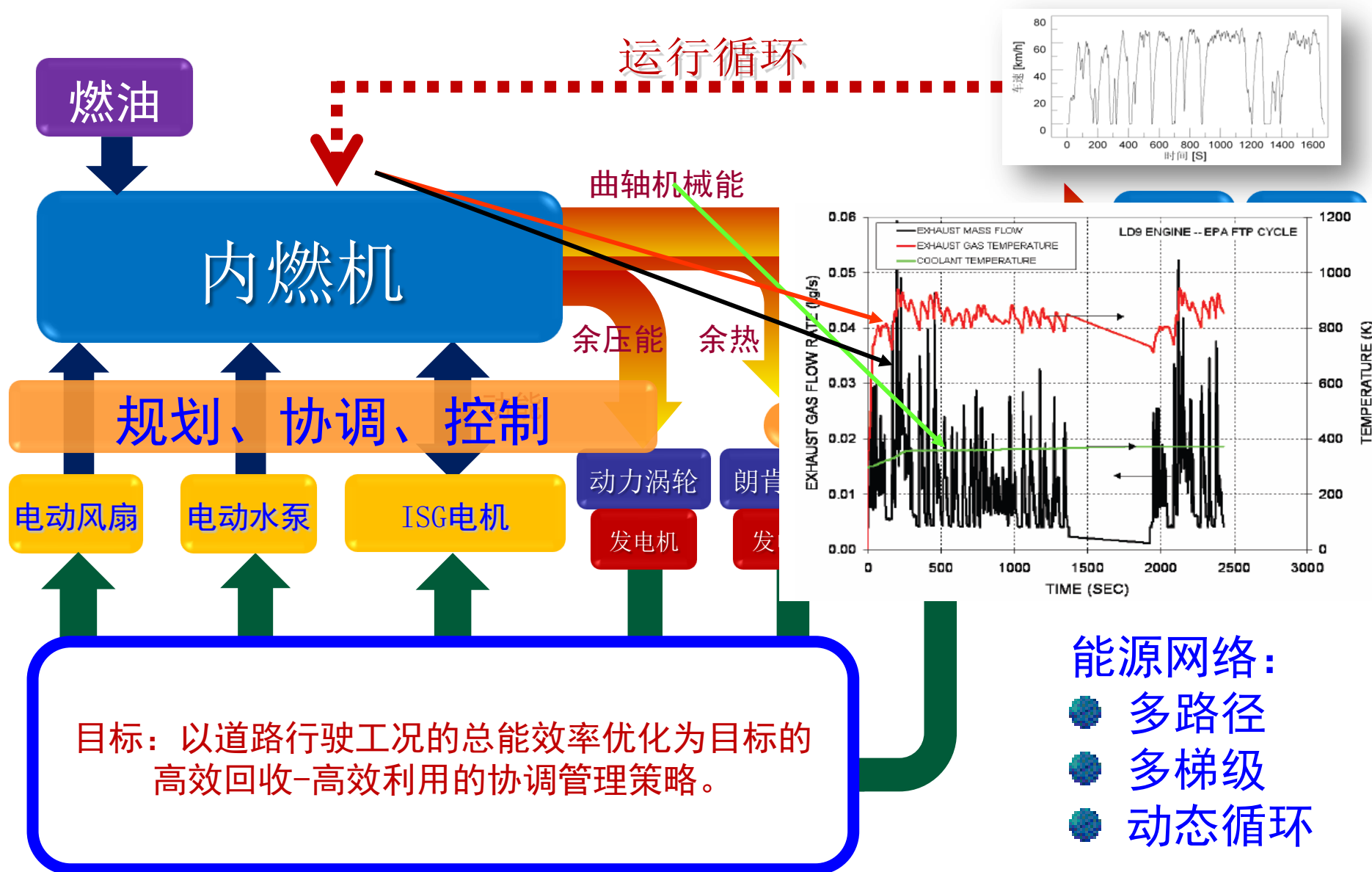
- 运行温度：
-40~80°C
- 运行海拔：
0~5000m



- 驾驶循环多样 (FTP75, US06, NEDC, WHTC, ...)



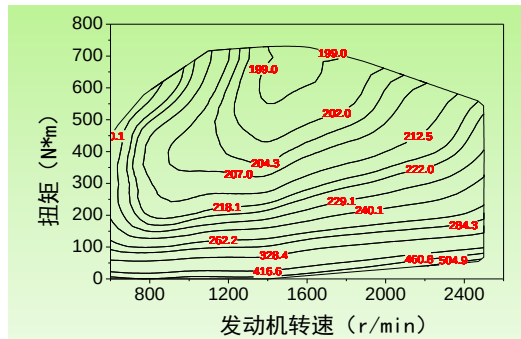
控制挑战（3）：能源网络特征



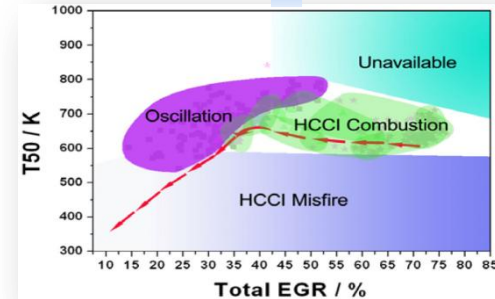
新挑战：不确定性抑制，瞬态效应，人车路全历程优化

■ 新需求：微观与宏观措施并举

A. 微观：挖掘油耗map潜力



新概念燃烧

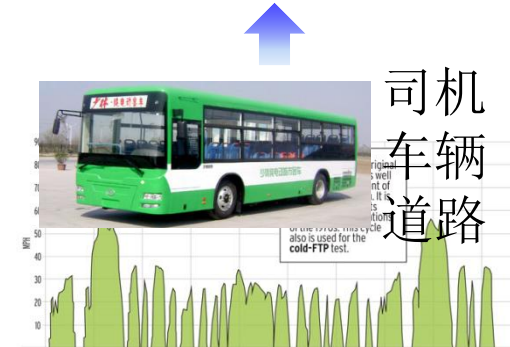
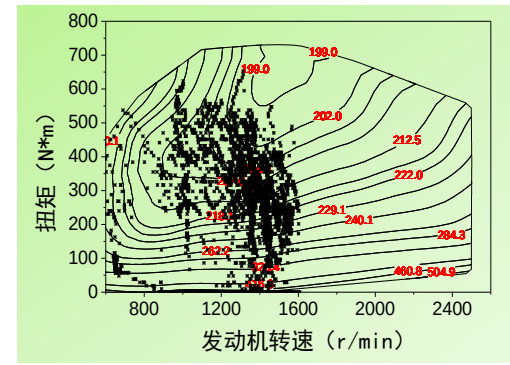


时间尺度：
1循环 (~100ms级)
→ 循环内 (~0.1ms级)

空间尺度：
缸内平均状态
→ 缸内不均匀分布

边界条件：
对不确定因素鲁棒
→ 对不确定因素敏感

B. 宏观：优化工况在油耗map上的分布



时间尺度：
固定道路测试循环
→ 全生命周期

空间尺度：
内燃动力系统
→ “司机+整车+道路”

边界条件：
动力总成功率需求
→ 驾驶风格、交通状态、
车辆老化

■ 新挑战： A) 确定性规律的归纳 B) 不确定性因素的抑制

C) 全局全周期优化：



内燃机动力系统控制问题的特征

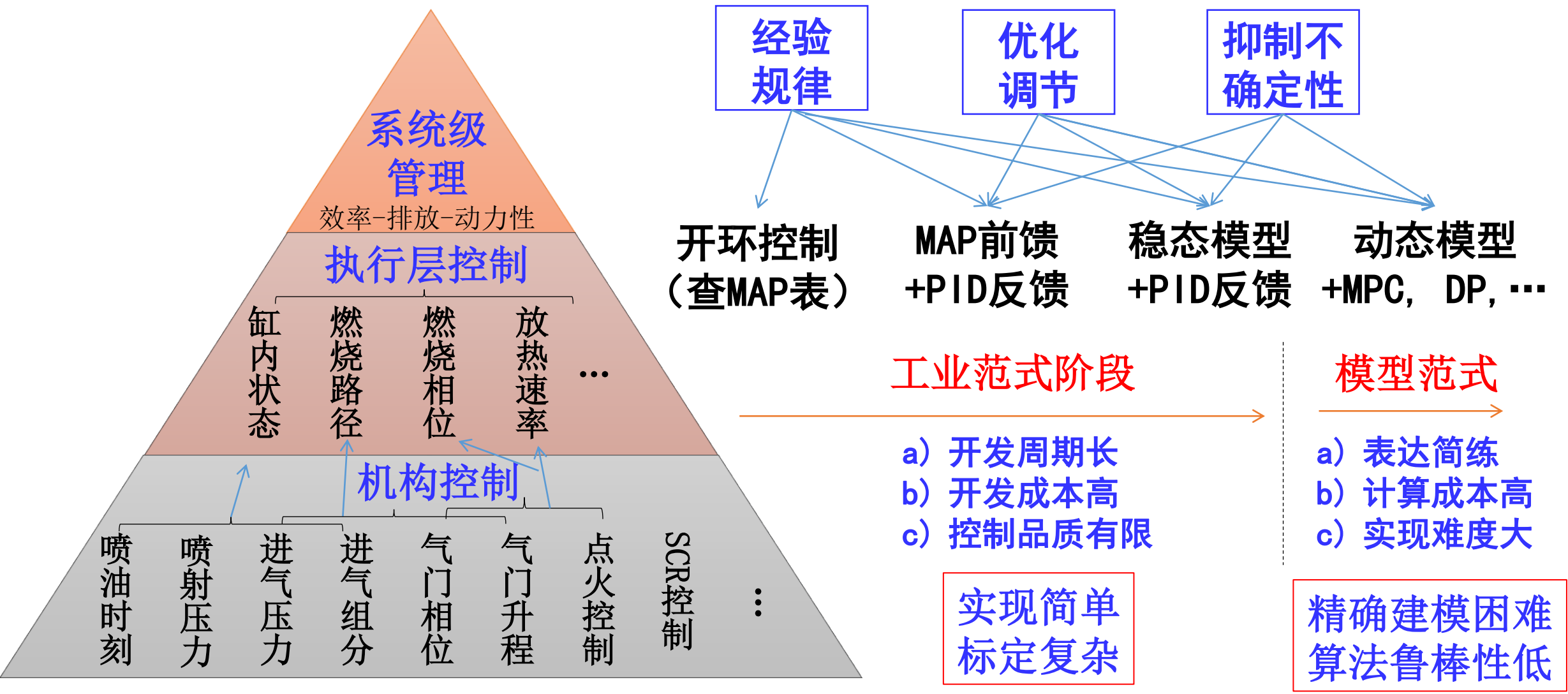
1. 多变量，多过程，高动态
2. 多目标优化：能效、动力性、排放、可靠性
3. 网络特征
4. 大规模对象，例如发动机，每一个型号几十万台
5. 复杂边界条件：
 - 外界操作边界（个性迥异的驾驶司机）；
 - 工况边界（复杂多变的行驶工况）；
 - 环境边界（温度、湿度、压力等等）；
 - 燃烧边界（温度、压力等）；
 - 驾驶风格。
6. 多问题特征：控制问题，优化问题，管理问题

日益严格的排放法规和能效要求成为先进控制方法的驱动力



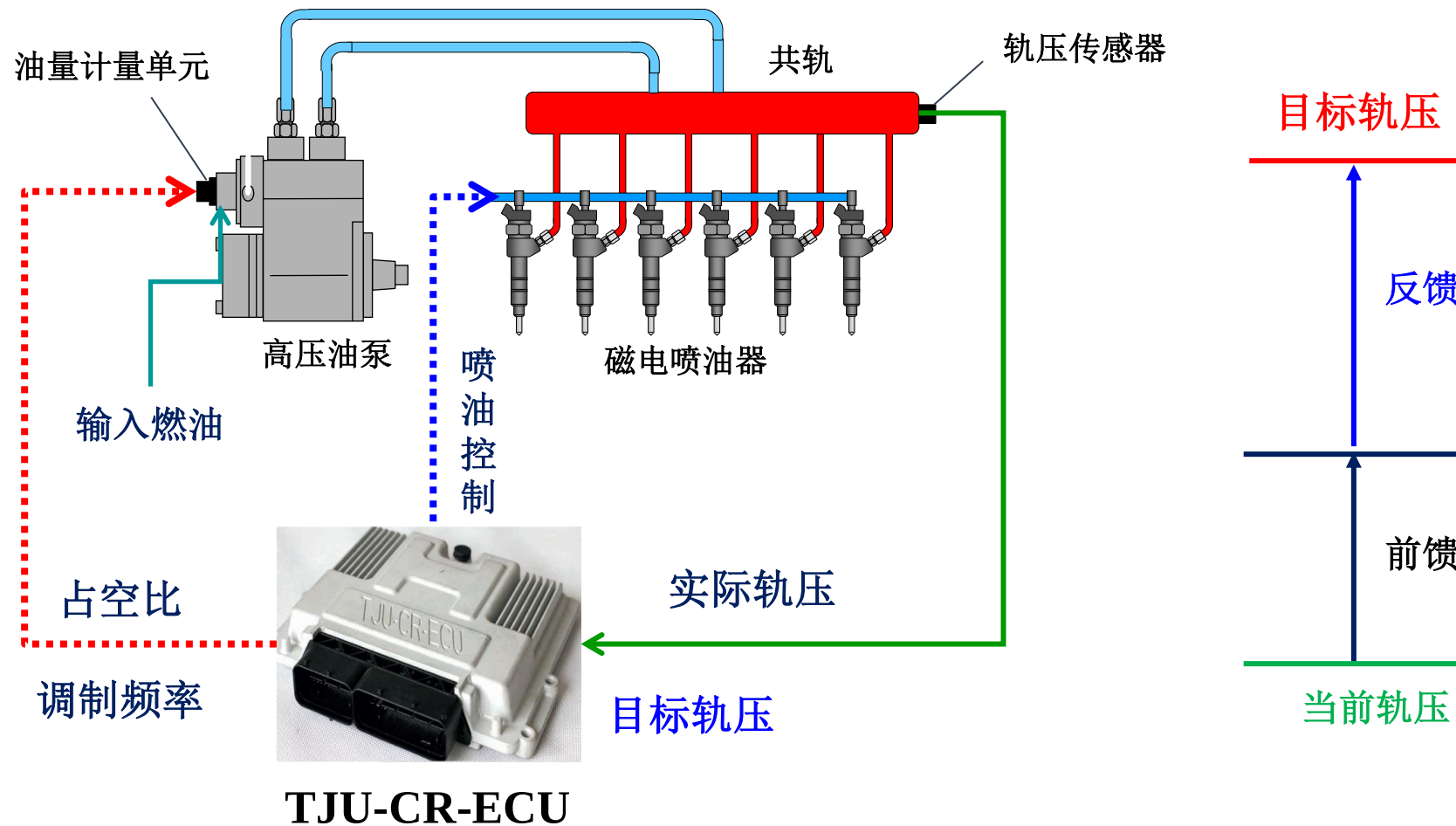
3. 内燃机的典型控制方案

解决方案： 分层管理， MAP结合模型前馈， 反馈抑制不确定性



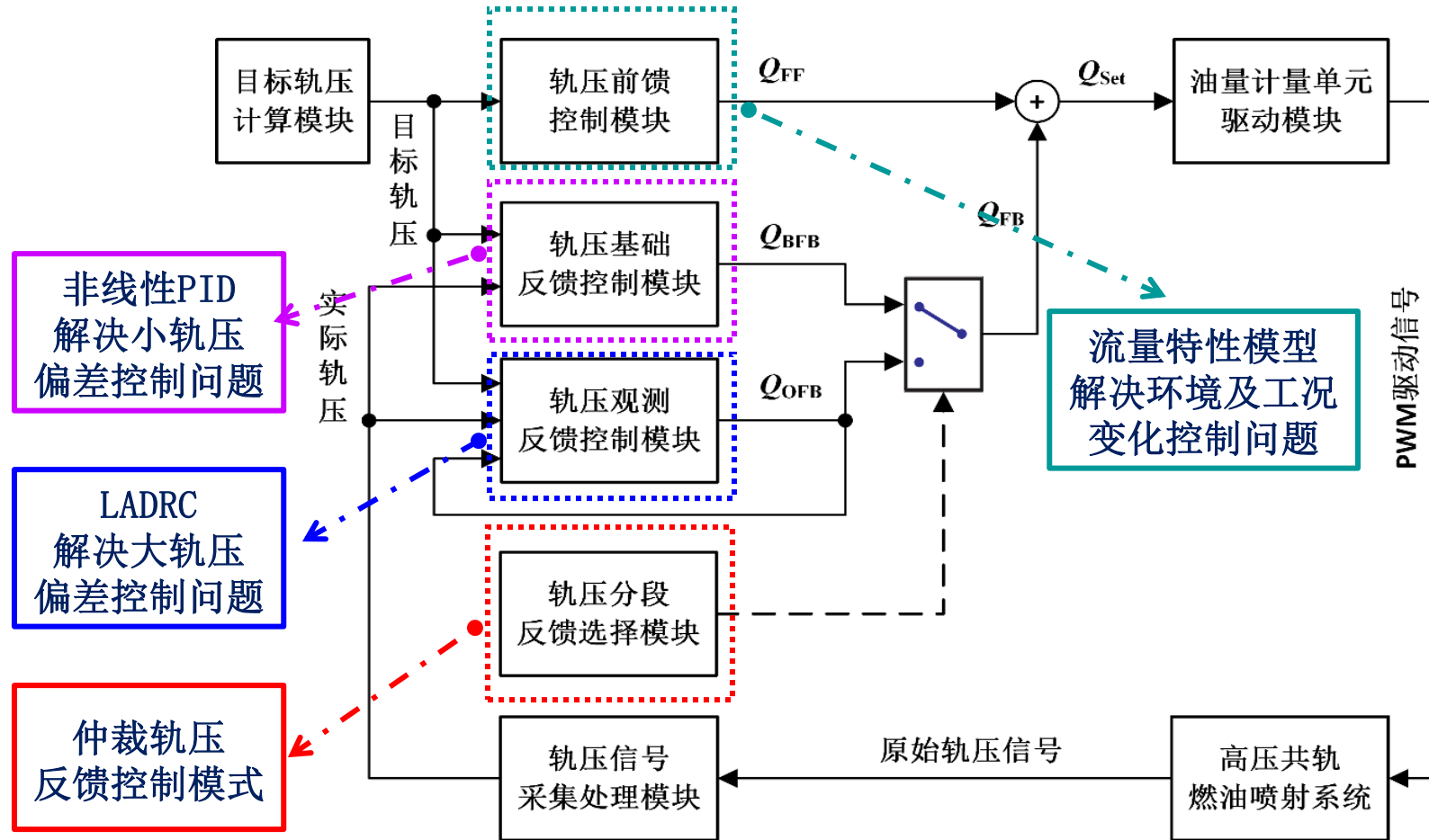
燃油系统的控制

高压共轨燃油喷射技术是实现柴油机节能减排的关键技术之一。



燃油系统的控制

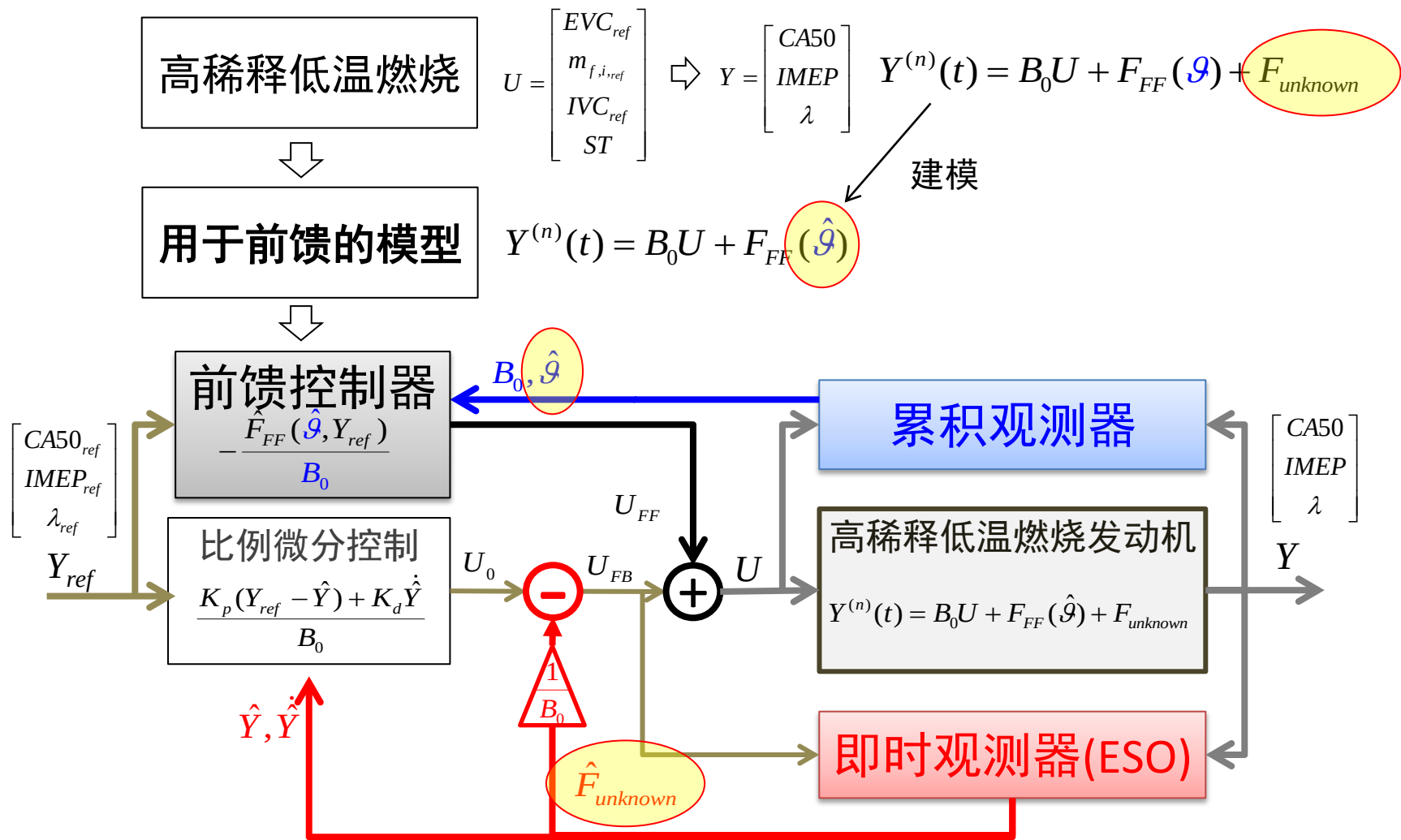
基于模型前馈和分段反馈的轨压控制算法



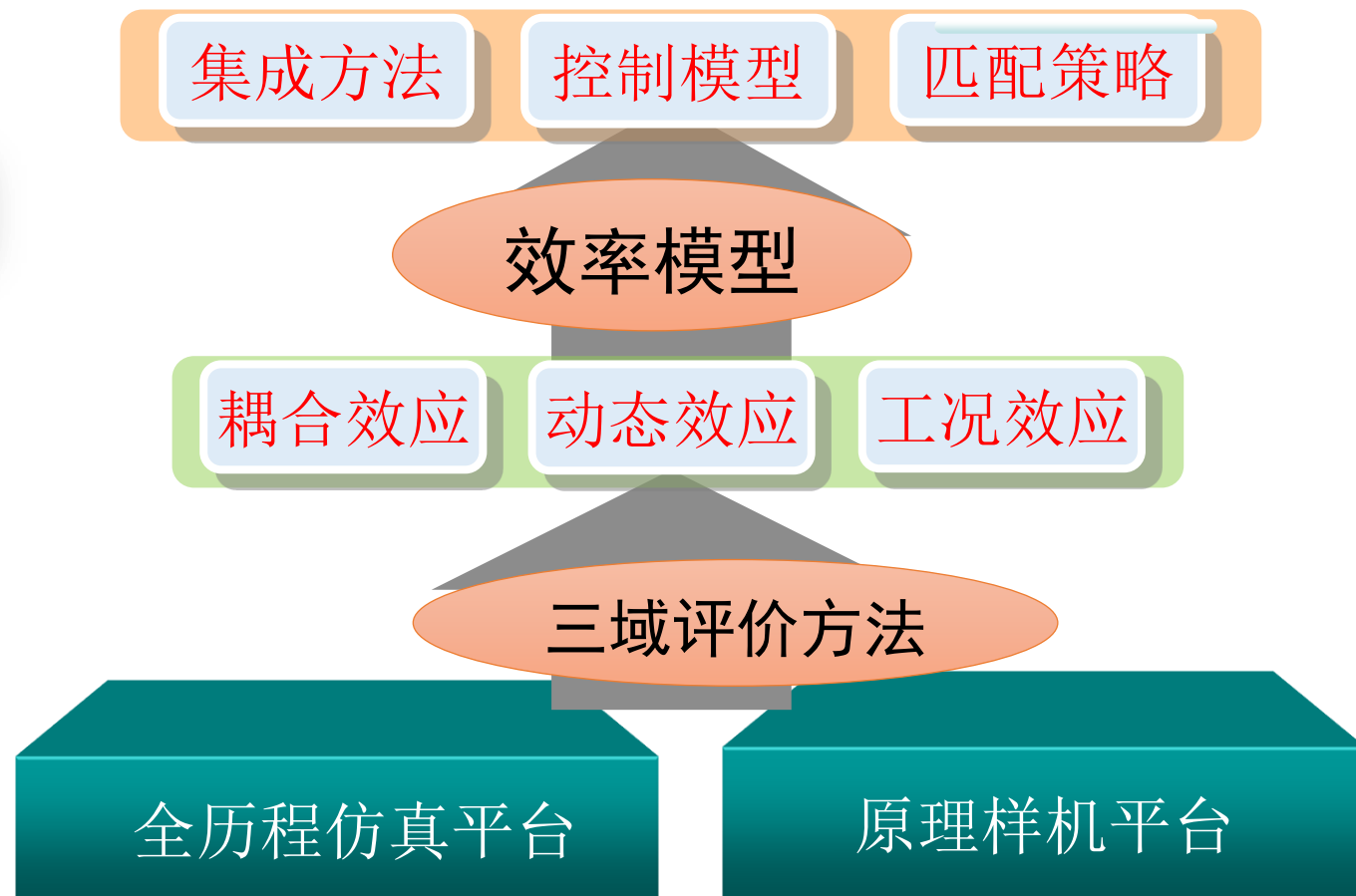
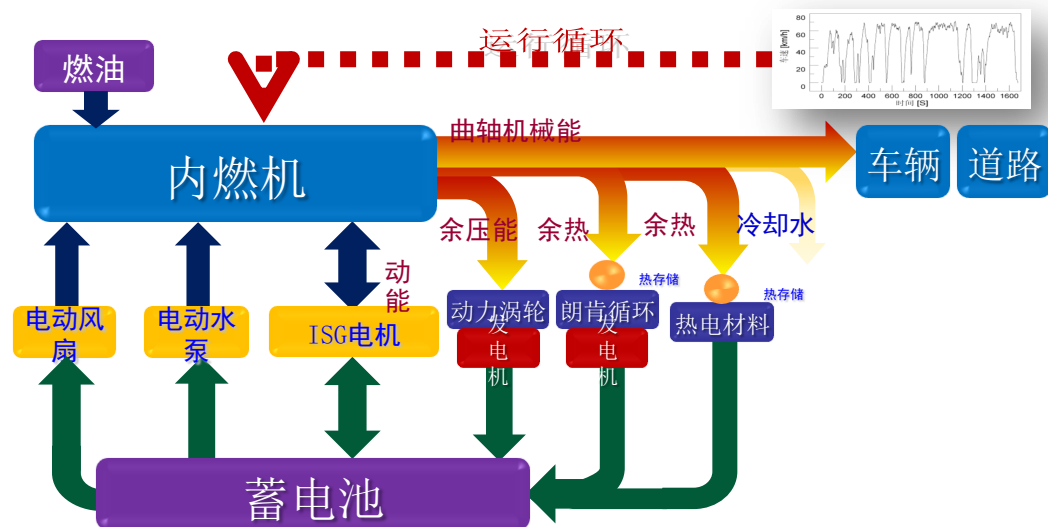


内燃机燃烧控制的“标准型”

控制思路：基于主动扰动抑制的自趋优控制

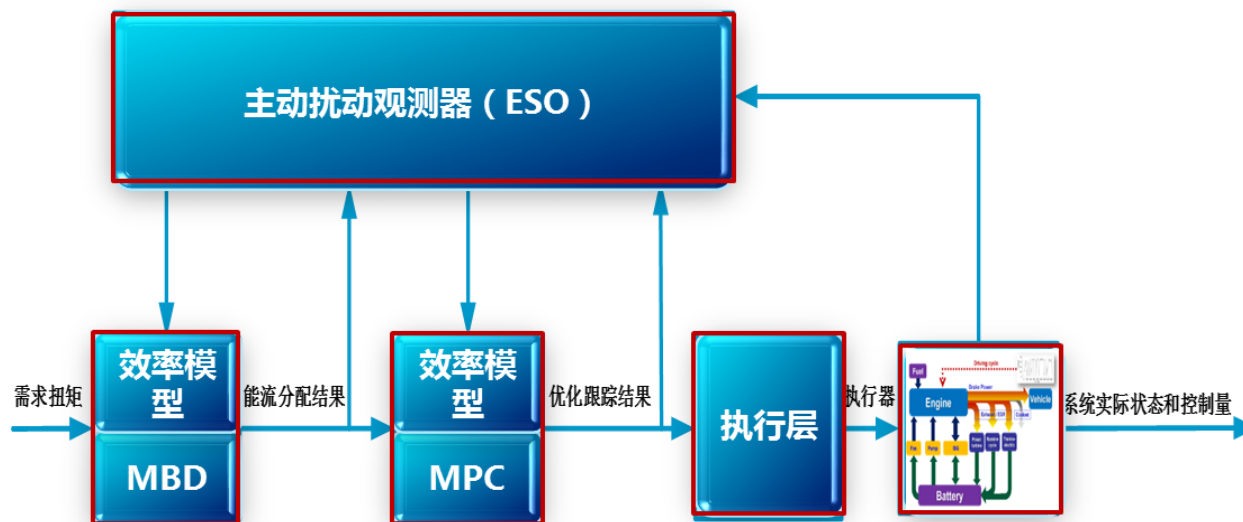


内燃机能源网络的优化管理



复杂动态能源网络优化控制器

- 引入主动扰动观测器补偿效率模型的偏差，解决模型精度与实时计算的折衷。
- 通过MBD与MPC的结合，解决能流分配与动态优化的协调。



MBD：基于效率模型的产能与用能双重规划，使总能效率最优。

MPC：基于效率模型的预测控制，使子系统转化效率最优。

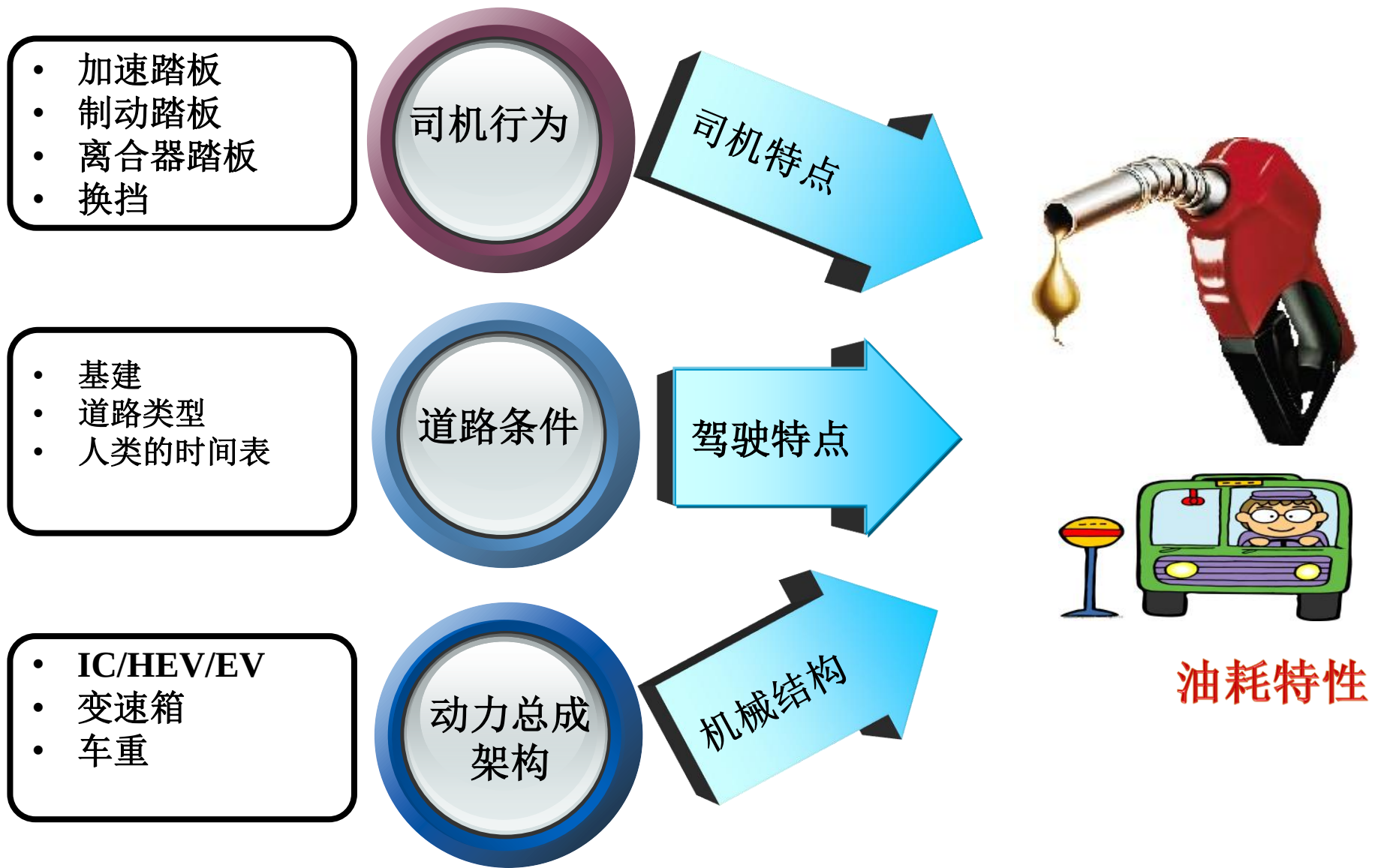
ESO：将效率模型的偏差等效为扩张状态，采用观测器进行观测和补偿。



4. 基于人车路协同的内燃动力系统控制

人车路协同的必要性

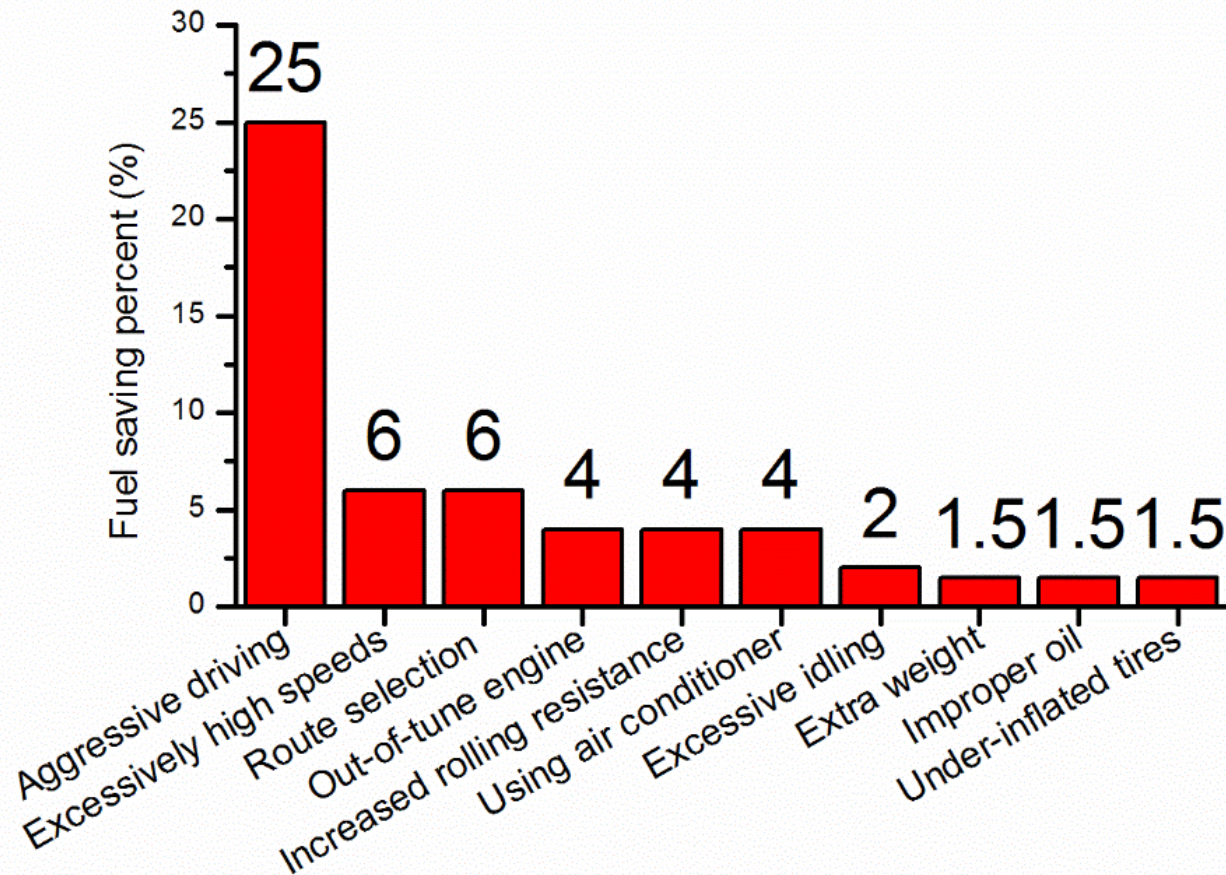
影响油耗的因素





人车路协同的必要性

节油因素对比分析

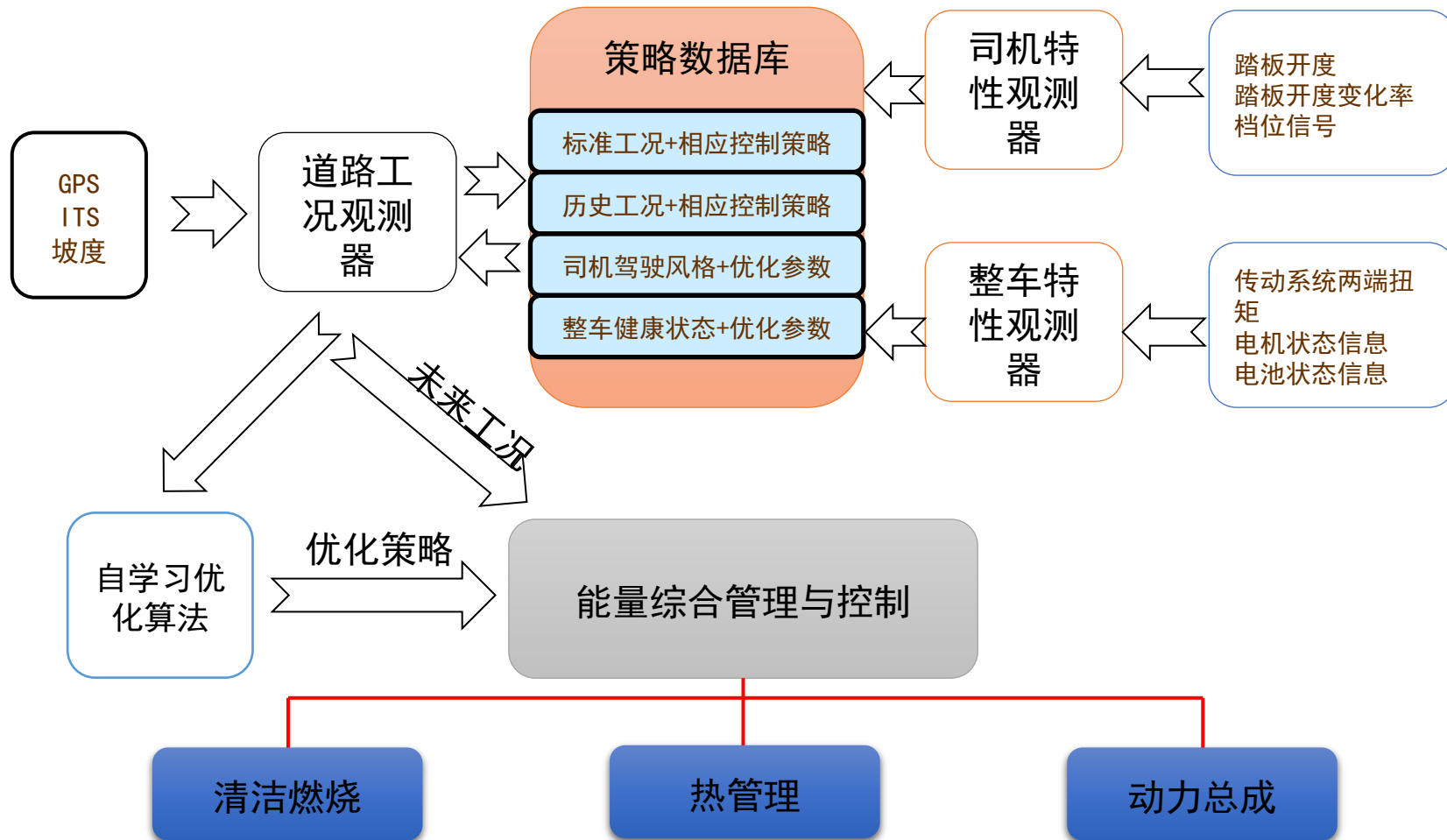


驾驶行为和道路因素极大地影响整车的油耗特性！

Sivak, M. and B. Schoettle, Eco-driving: strategic, tactical, and operational decisions of the driver that improve vehicle fuel economy. 2011.



面向人-车-路系统的车辆优化控制架构



人车路边界的感知

- ◆ 司机特征观测器
- ◆ 整车特征观测器
- ◆ 道路工况观测器

整车优化的范畴

- ◆ 清洁燃烧
- ◆ 整车热管理
- ◆ 动力总成控制

控制架构特点

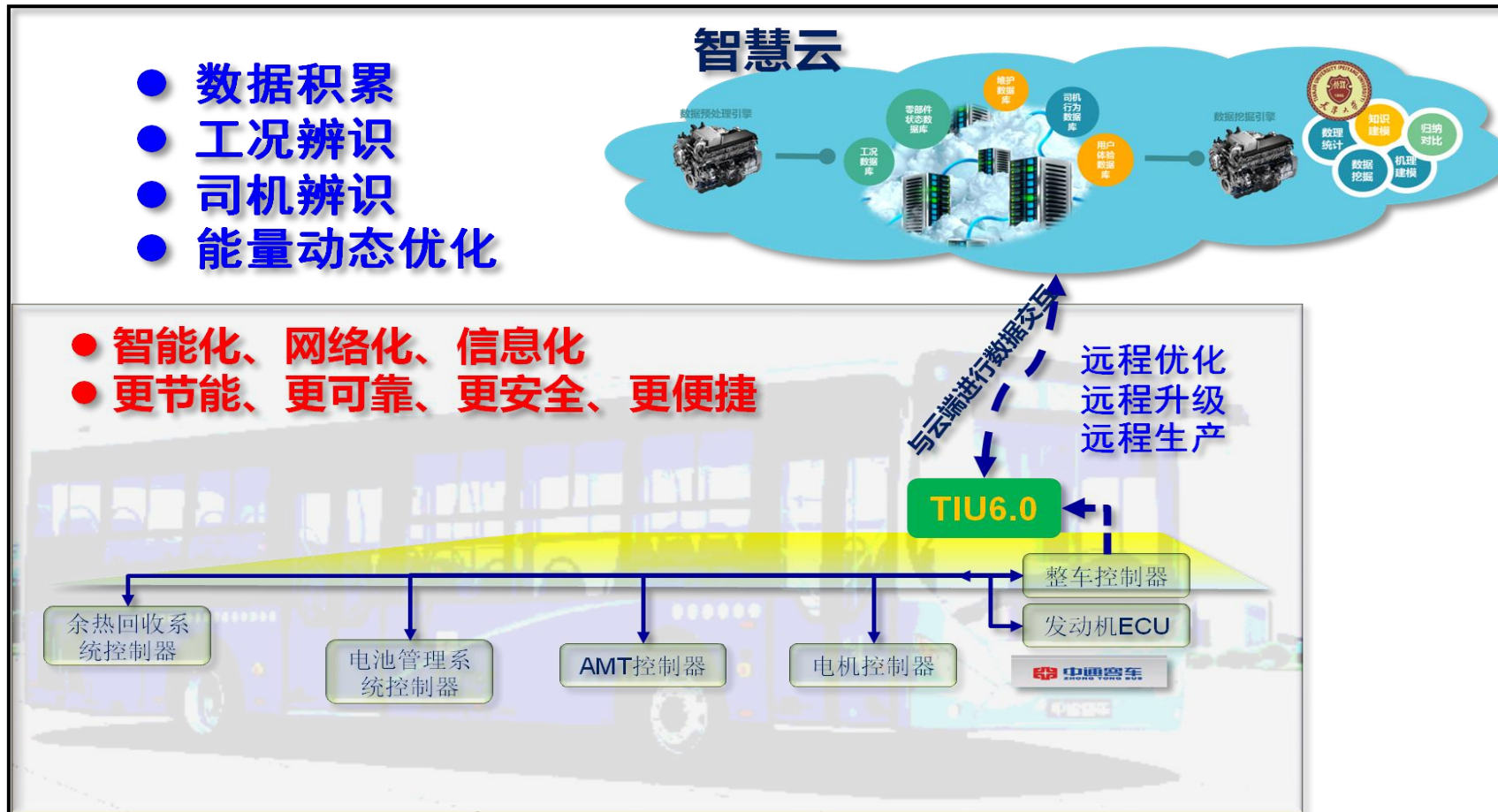
- ◆ 策略数据库
- ◆ 自学习优化算法

面向人-车-路系统的“车-云”结构

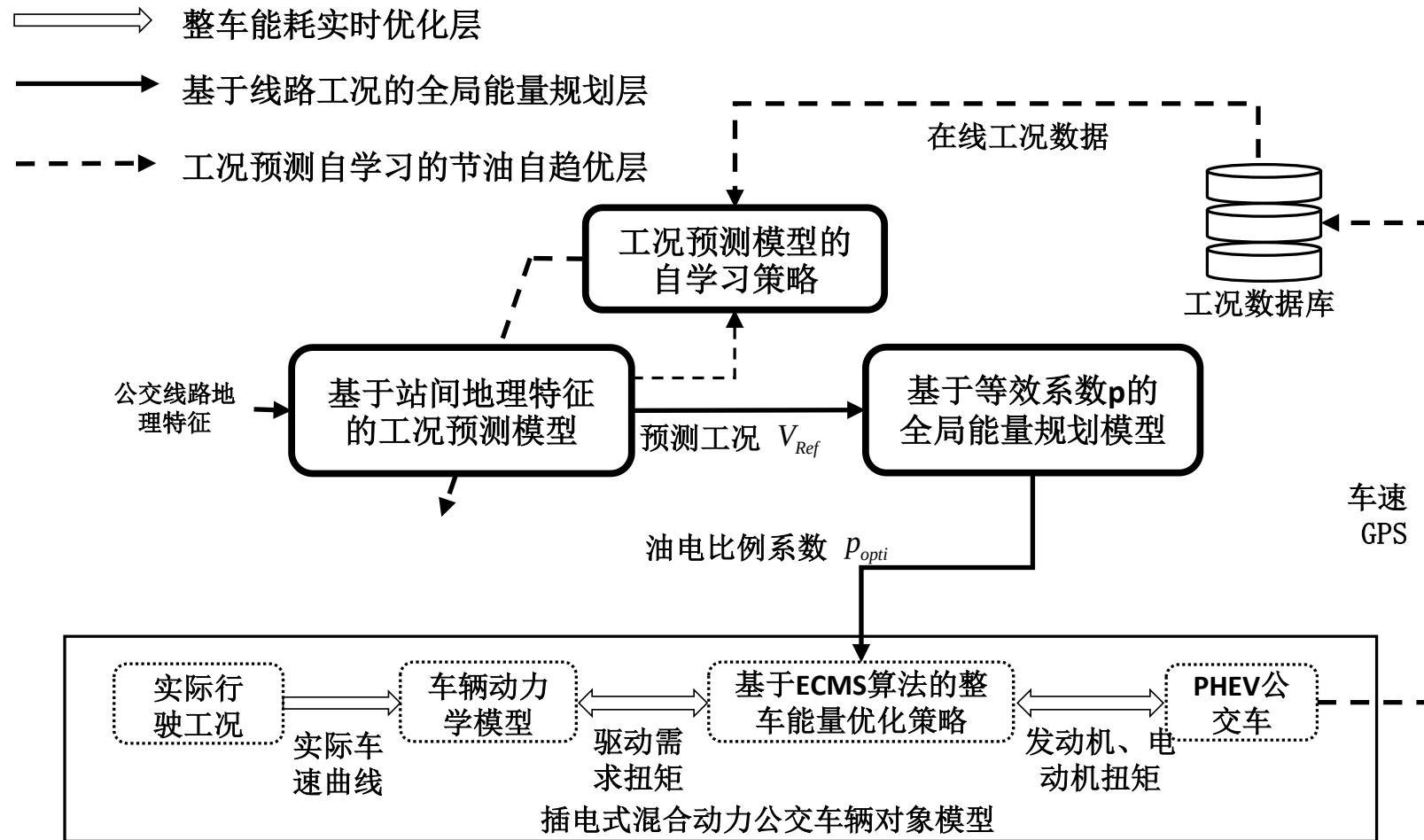
云端功能：司机、车辆、交通网的**特征统计**和**能量动态优化**。

车端功能：增加智能信息单元TIU的**多控制器总线网络**。

车云协同：整车实时控制器与云端数据的**远程优化**、**升级**和**生成**。



人车路云协同-基于工况预测模型自学习的全局能量规划

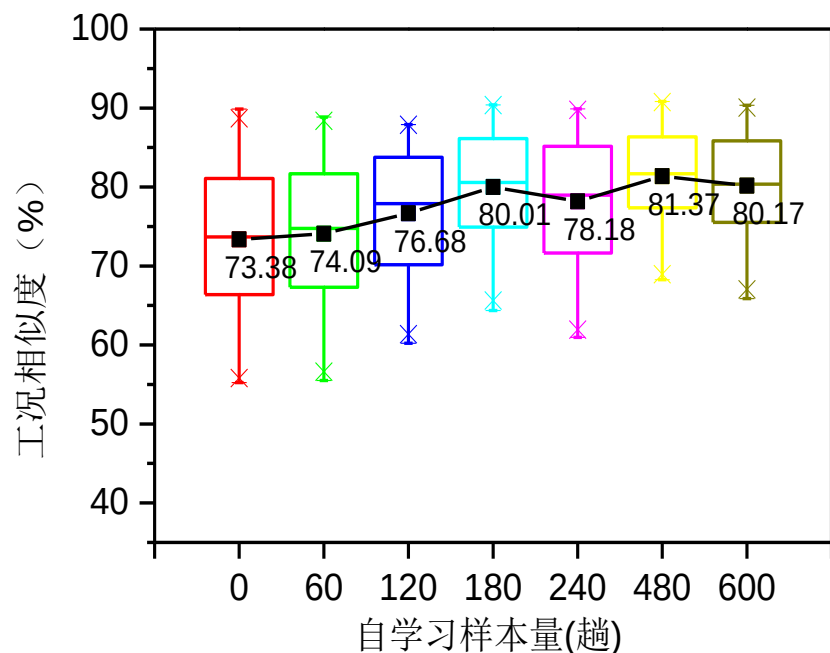


- ◆ 云端优化可以用于指导混合动力公交车辆的全局能量优化
- ◆ 车-路-云的协同为混合动力公交车辆出厂前和出厂后的优化奠定基础

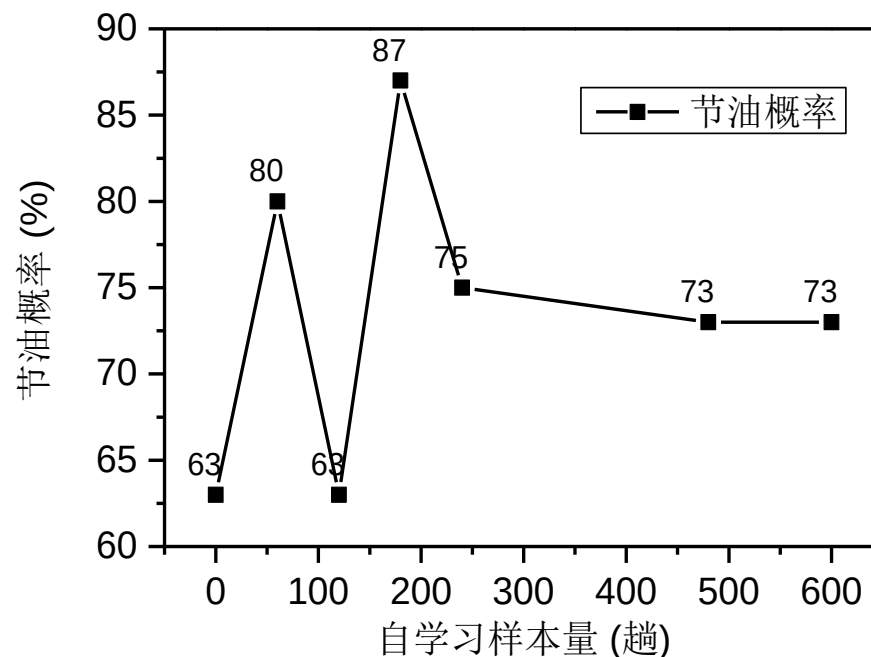
人车路云协同-基于工况预测模型自学习的全局能量规划



基于监控数据的工况自学习及其对混合动力公交节油优化效果



基于在线数据学习的预测工况与实际工况的相似度变化趋势

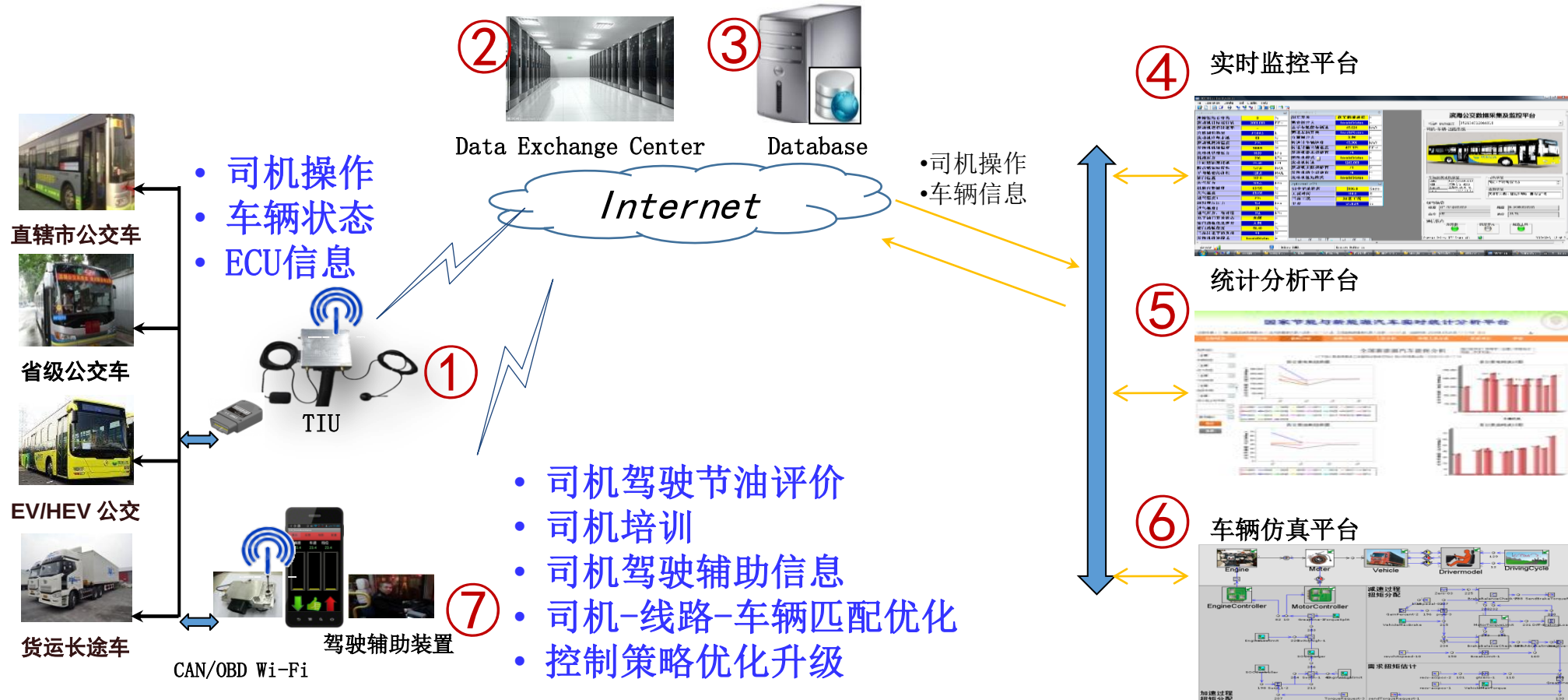


基于预测工况自学习结果的混合动力公交车车辆节油概率变化趋势

- ◆ 未进行工况自学前，车辆平均油耗降低1.03%，节油概率为63%。
- ◆ 加入工况自学习后，车辆平均油耗降低2.25%，节油概率趋于73%。

“人车路云协同平台”-城市公交行驶节油技术平台

复杂统计运算——云端，实时决策和反馈——多核控制器/Android手机



“人-车-路-云端” 研究平台-云端处理软件



1-实时监控软件



2-节能优化管理软件



3-安全预警管理软件



4-充电桩监控软件

功能定位：基于特征统计的节油、诊断、预警、监控

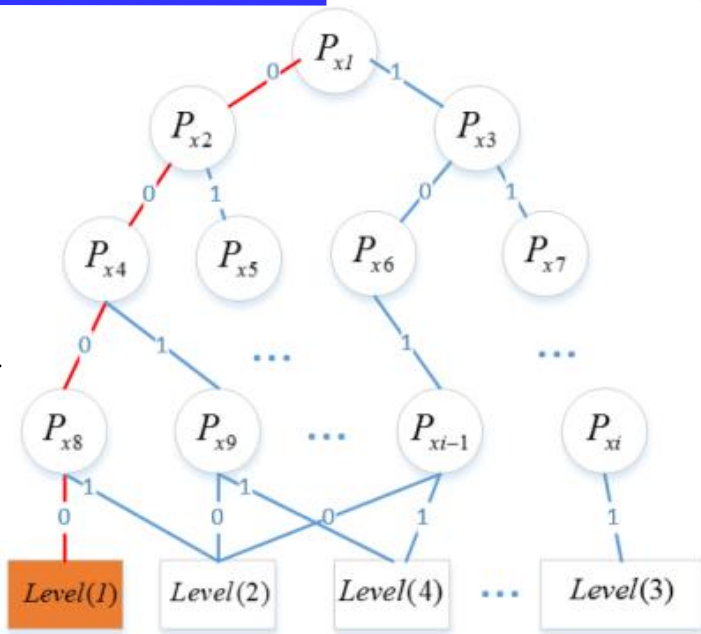
“人-车-路-云端” 研究平台-司机驾驶辅助节油系统

云端统计
优化

A_EndSpeed	1	加速结束时车辆的速度
A_AvgAcPedG1	2	档位1平均踏板开度
A_AvgAcPedG2	3	档位2平均踏板开度
A_AvgAcPedG3	4	档位3平均踏板开度
A_AvgAcPedG4	5	档位4平均踏板开度
A_AvgAcPedDiff+G1	6	档位1平均踏板正向变化率
A_AvgAcPedDiff+G2	7	档位2平均踏板正向变化率
A_AvgAcPedDiff+G3	8	档位3平均踏板正向变化率
A_AvgAcPedDiff+G4	9	档位4平均踏板正向变化率
A_G1toG2Speed	10	档位1->2的换挡速度
A_G2toG3Speed	11	档位2->3的换挡速度
A_G3toG4Speed	12	档位3->4的换挡速度
N_Gear3Ratio	13	3档比例
N_Gear4Ratio	14	4档比例
N_AvgAcPedalG3	15	3档加速踏板平均开度
N_AvgAcPedalG4	16	4档加速踏板平均开度
N_AcPedalStdG3	17	3档加速踏板波动标准差
N_AcPedalStdG4	18	4档加速踏板波动标准差
N_AvgAcPedDiff+G3	19	3档加速踏板正向变化率
N_AvgAcPedDiff+G4	20	4档加速踏板正向变化率
N_G3toG4Speed	21	3档换4档的平均速度
N_G4toG3Speed	22	4档换3档的平均速度
D_MotoredRatio	23	平均倒拖比例
D_FreeRatio	24	平均自由滑行比例
D_MtrBeg Speed	25	平均减速开始速度



驾驶节油辅助的
优化决策树



实时驾驶
辅助



基于安卓系统的驾驶辅助APP

2015年，基于无线远程监控和手机APP的司机节能驾驶提示系统

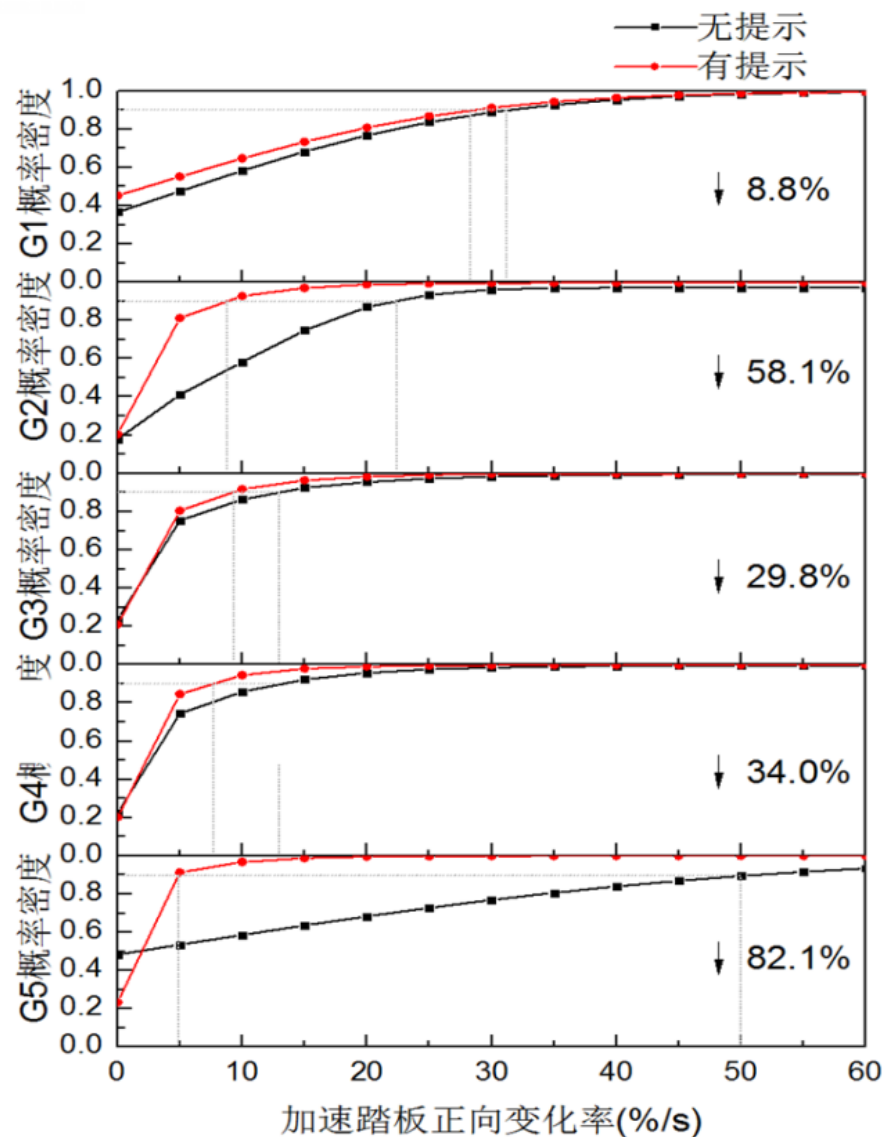
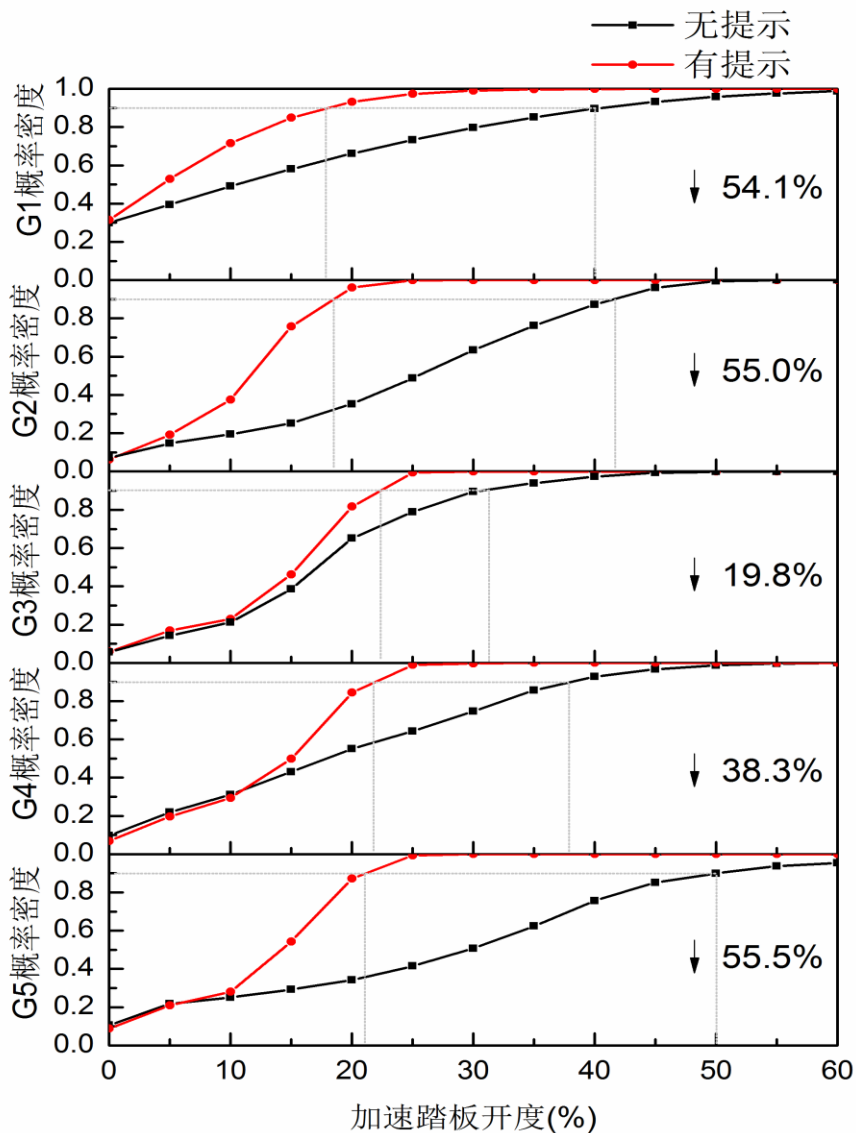
- ◆ 改善驾驶踏板操作风格
- ◆ 优化司机换挡时机和分布



“人-车-路-云端”研究平台-司机驾驶辅助节油系统

驾驶辅助改善效果:

- ◆加速踏板操作综合改进29.7%;
- ◆加速踏板变化率的综合改进12.5%;
- ◆车辆循环油耗改善6.25%。



“人-车-路-云端”-应用推广

新能源车辆运营监控服务系统

目前应用到至少6家电动汽车运营公司



车载信息单元安装

主要功能：

- ◆整车CAN总线数据采集
- ◆2G/3G无线网络通信
- ◆数据上传/下载
- ◆实时记录



蓄电池、电机数据实时反馈

结束语



- 能源和环境的双重压力致使内燃机控制技术变革迫在眉睫！
- 人车路协同的内燃机控制方法是一种行之有效的系统工程解决思路。
- 人车路协同对实时计算能力有很高的要求，因此基于互联网+的云车互动是实现基于人车路协同的内燃机控制的有效途径。



谢谢大家！

请多提宝贵意见！