



From Germany to China:

A successful partnership always starts locally

MBD: Coordination Engine+ EAT for Emission Reliability prediction

基于模型的开发:前后端协作下的排放可靠性预测

The 9th International Conference of ICE Reliability Technology Oct. 31-Nov.01.2020

第九届内燃机可靠性技术国际研讨会

Qing Li, et al. IAV Berlin 李青, 德国IAV, 柏林



Greeting Speech from Berlin 德国IAV董事长致辞祝贺大会圆满召开

Together with modern technology
for a cleaner future
科技为先，拥抱蓝天

Dr. Ulrich Eichhorn

IAV Germany, Chairman of the Board
德国IAV董事长



IAV, Your Strong Engineering Partner What we develop moves you

作为全球领先的工程合作伙伴，
德国IAV致力于机动性能的未来发展。



整车开发

传动系统

开发标定

减排标定



虚拟开发

电动传动

燃料电池



自动驾驶

智能出行

人工智能



>8200名全球员工 25家全球分部 含北京/上海
研发工程师和科学家超过65%，经验创新高度集成，是我们成功的基石

>10亿欧元年营业额
营业额常年保持汽车工程服务公司前3，源于客户深度信任

>35年行业经验积累
星火源于柏林工业大学专家创业，今已稳健成长为全球最大的工程公司之一

>45座测试台架
从内燃机测功台架到电动机传动，从化学催化到电化学转化，整车转毂，燃料电池台架，碰撞翻滚测试道，顶尖物理化学工程实验室，是唯一拥有高海拔气候整车台架的工程公司

李青 Qing Li

报告主讲

IAV德国总部预研主管工程师/中国区项目负责人



qing.li@iav.de

同济大学本科，柏林工业大学硕士

留德12年业内经验8年

常年与欧洲日本知名车企共同开展预研发，配合系统布置量产落地

项目经历：发动机标定，台架测试，汽/柴油/燃气甲醇/等减排方案布置，催化化学&电化学能量仿真模拟等



Jochen Schaeffner

约翰·舍夫勒

IAV德国总部预研仿真测试部部长

jochen.schaeffner@iav.de

德国工程硕士/MBA

业内经验近20年

建立并发展IAV高精尖物理化学实验室和仿真团队，联合并组织相关部门实现全局方案落地



杨明明 Mingming Yang

IAV中国商用车市场负责人

mingming.yang@iav.de

清华大学本科

斯图加特大学硕士

拥有多年在乘用车及商用车领域研发，生产与验证，质量控制经验，并负责技术推广和与德国团队对接。

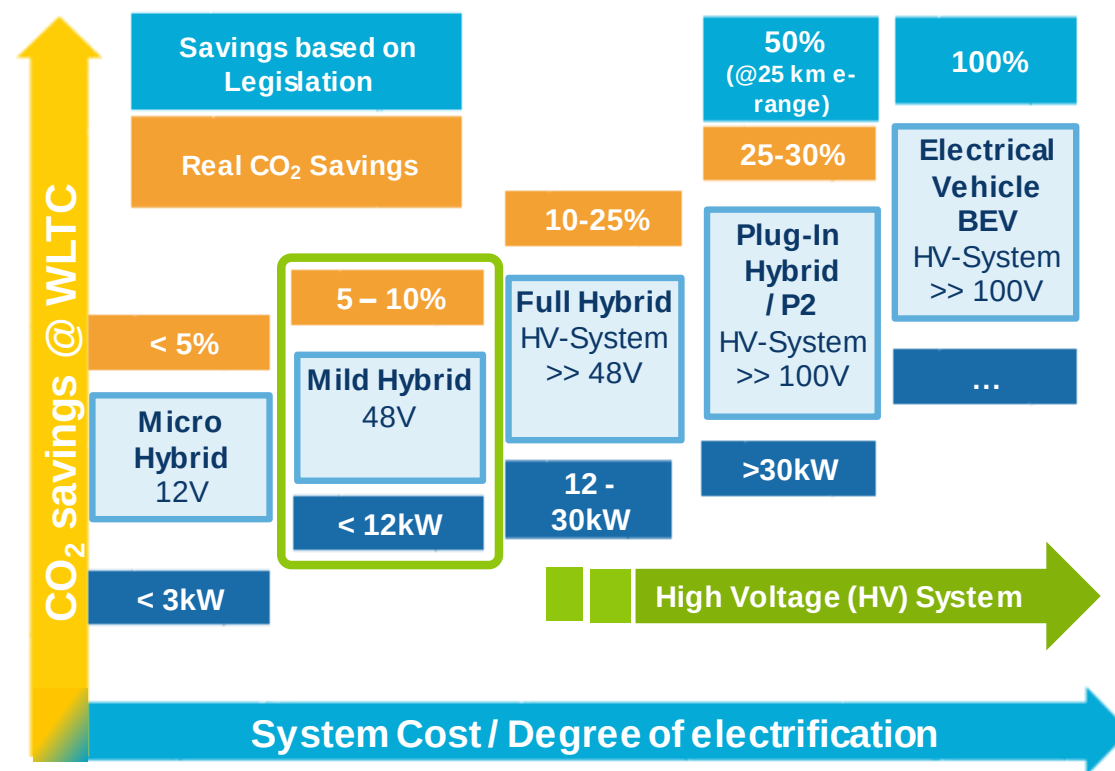
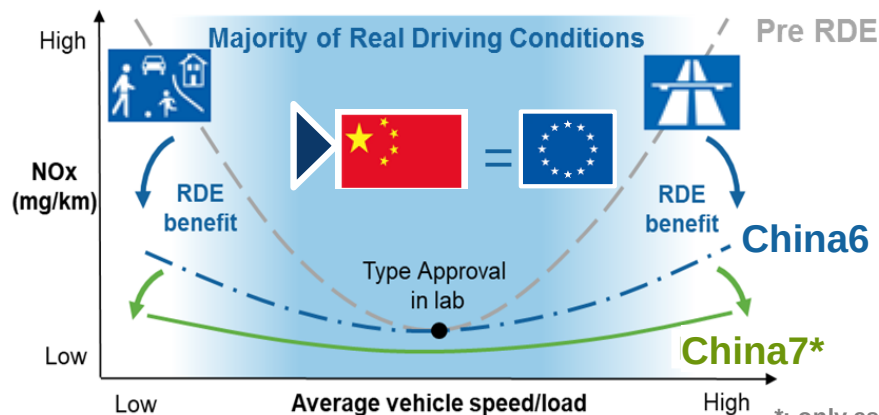
项目经历：动力系统先进技术预研发，发动机及整车标定，台架测试，整车验证，质量管理等



- Greeting speech from Chairman of the IAV Board
德国IAV董事长致辞祝贺大会召开
- Introduction
德国IAV&报告人简介
- Motivation of the coordination Engine + EAT
前后端协作动机
- Key components and IAV technical application
相关前后端关键元件和IAV独家技术介绍
- Future Diesel powertrain concepts for Engine + EAT
未来柴油机传动尾排总布置示例
- MBD virtual Platform for Emission Reliability prediction
排放可靠性预测，MBD在环仿真平台
- High accurate EAT component and Sensor modelling
高精度EAT元件仿真建模介绍
- Ultra fast AI/Machine Learning EAT + Sensor model
超高速AI机器学习模型 EAT +Sensor
- Summary/Outlook **总结与展望**

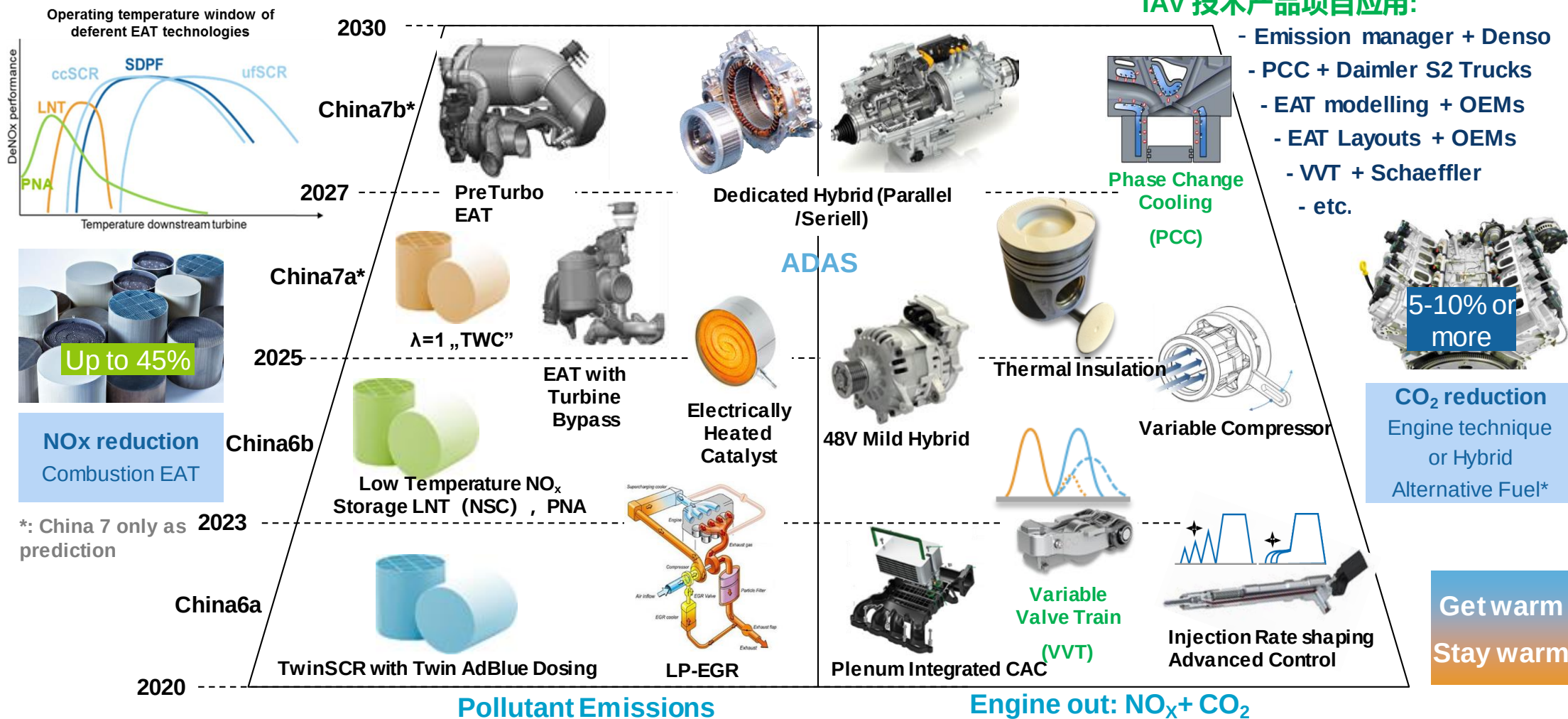
Motivation of the coordination Engine + EAT 前后端协作动机

Emission Trends*	CO ₂	= 5l/100km in 2020 f(mass)
	NO _x	40-60% ↓
	PM	60% ↓
	PN	23 nm → 10 nm, # < 6*10 ¹¹
	Secondary Emissions	N ₂ O, NH ₃ , CH ₂ O, (NO ₂ , CH ₄)
	Test Procedure	RDE 16 → 8 → 3 km Cf = 2.1 → 1.7 → 1.0



- 国六新规加入了排放质保，测试流程升级，新增监测PN数据，RDE PEMS 涵盖更全面,苛刻的动态工况
- 后处理元件也属于主机厂家需要负责质保的可靠性关键零部件
- 排放可靠性和前后端紧密相关，前后端协调更能发挥两端潜力，为发动机减负，进一步确保可靠性
- IAV 后处理和系统布置预研发团队陪伴了当时欧洲车企切换准备过程, 12年积累之经验可有效辅助国内客户布局规划

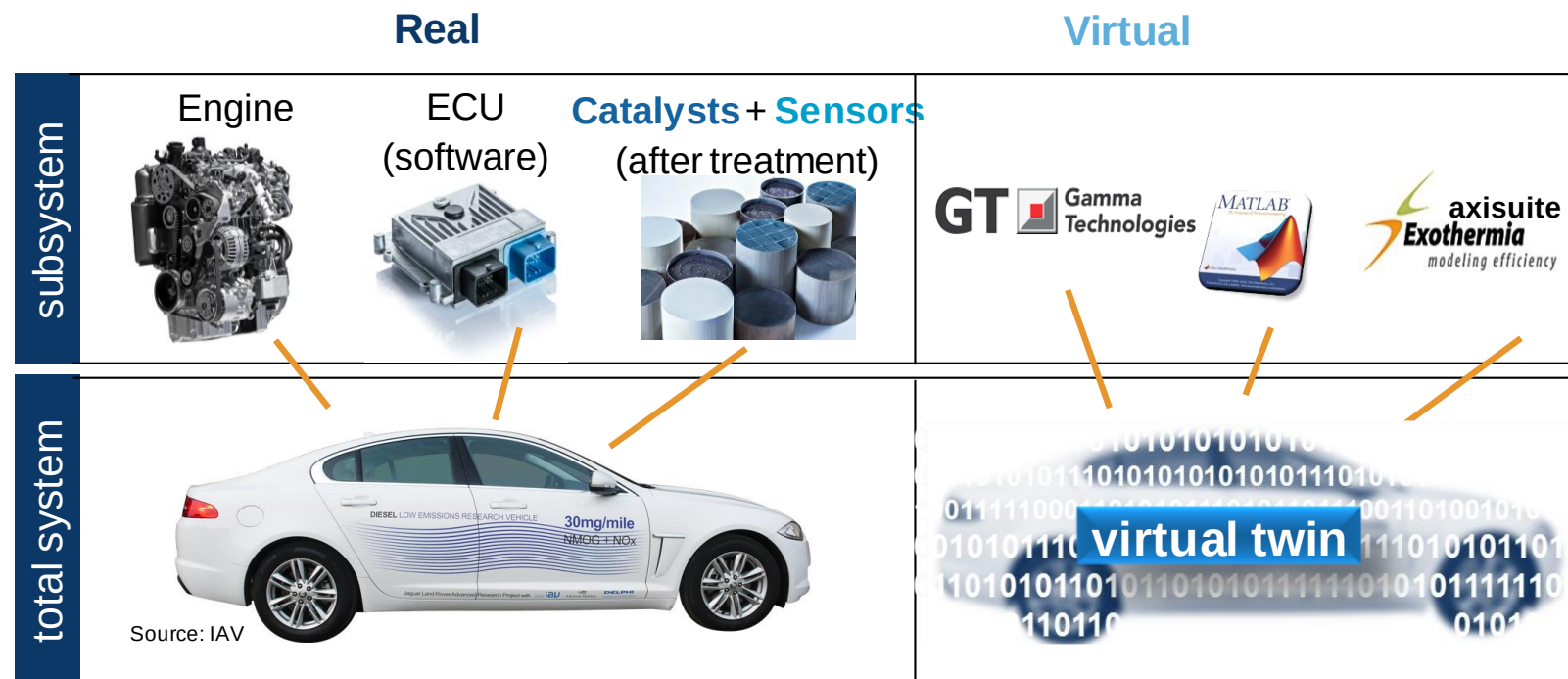
Key components and IAV technical application 相关前后端关键元件和IAV独家技术介绍



→ 先进的减排手段多管齐下: 借助电气化手段从发动机端降低原排控制CO₂; 后端选用可靠后处理元件不同组合进一步提高转化率

MBD virtual Platform for Emission Reliability prediction 排放可靠性预测，MBD在环仿真平台

愈发复杂方案组合需要虚拟平台的支持：可靠性预测 → 虚拟样机 → 关键元件建模



RDE Simulator



- 虚拟样机是由基于数据集成的各部件模型，通过数学运算组装而成
- 在匹配的环境模型下可以作为虚拟双胞胎使用，输入交通信息后甚至可以进行复杂线下测试
- 最终实现借由虚拟标定桌面和标定模拟器，预测RDE油耗和排放可靠性

MBD virtual Platform for Emission Reliability prediction 排放可靠性预测，MBD在环仿真平台

Submodel set-up and validation

Model Integration

CAE studies



Engine test bench



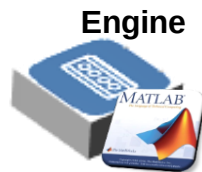
Synthetic gas lab



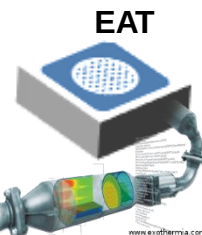
Motor test bench



Battery test bench



Engine



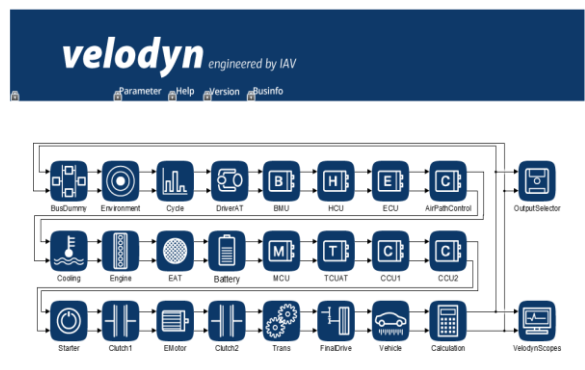
EAT



Electric motor

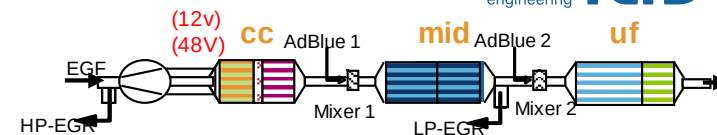


Battery



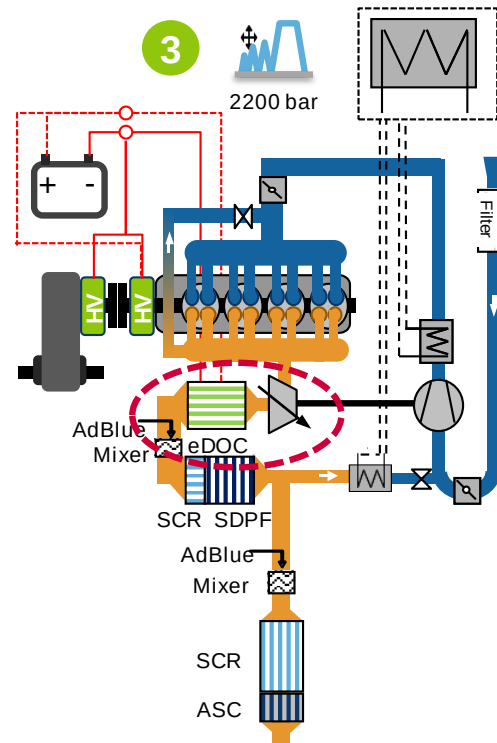
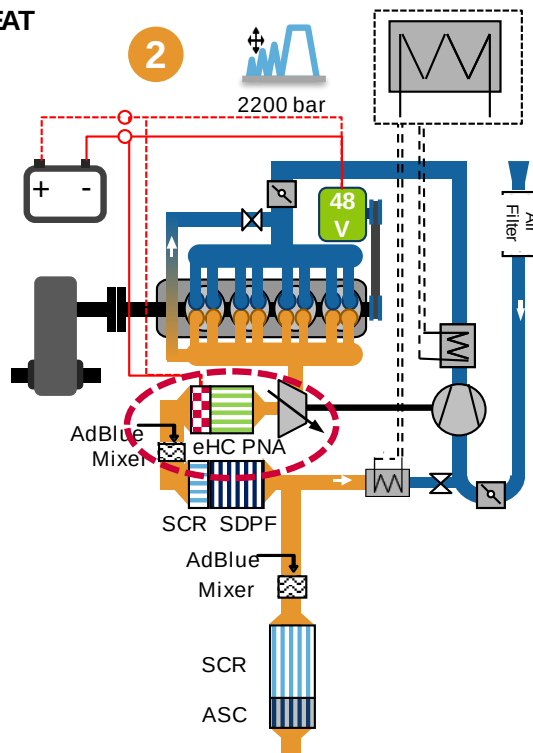
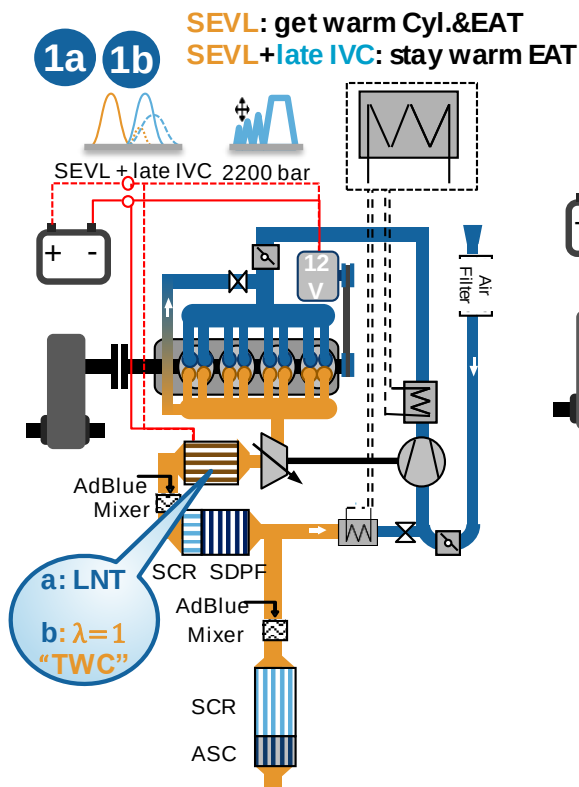
- 全面的排放可靠性标定需要匹配的虚拟测试环境: 子模型建立 - 模块集成 - CAE预标定 - 连接标定工具 - 虚拟标定桌面完成
- 前瞻性减排开发和落地经验和完整的虚拟前后端开发工具链Velodyn+axisuite, 因其高兼容性也可分块使用或与其他软件对接

Future Diesel powertrain concepts for Engine + EAT 12V or 48V concepts未来柴油机传动尾排总布置示例



*: only as prediction of China 7

LD Application	Concept	EAT – cc	EAT – mid	EAT – uf	AdBlue dosing	EGR	Alternative	CO ₂ Potential
Basis China 6b		DOC	SDPF	SCR	TwinDosing	HP / LP-EGR		
China 7* Approach a/b	12V	LNT or $\lambda=1$ „TWC”	SCR / SDPF	SCR	TwinDosing	iEGR / HP / LP-EGR	48V or iEGR	
China 7 Approach	48V Mild Hybrid	PNA+EHC	SCR / SDPF	SCR	TwinDosing	HP / LP-EGR	-	
China 7 Approach	Dedicated Hybrid	eDOC	SCR / SDPF	SCR	TwinDosing	LP-EGR	-	

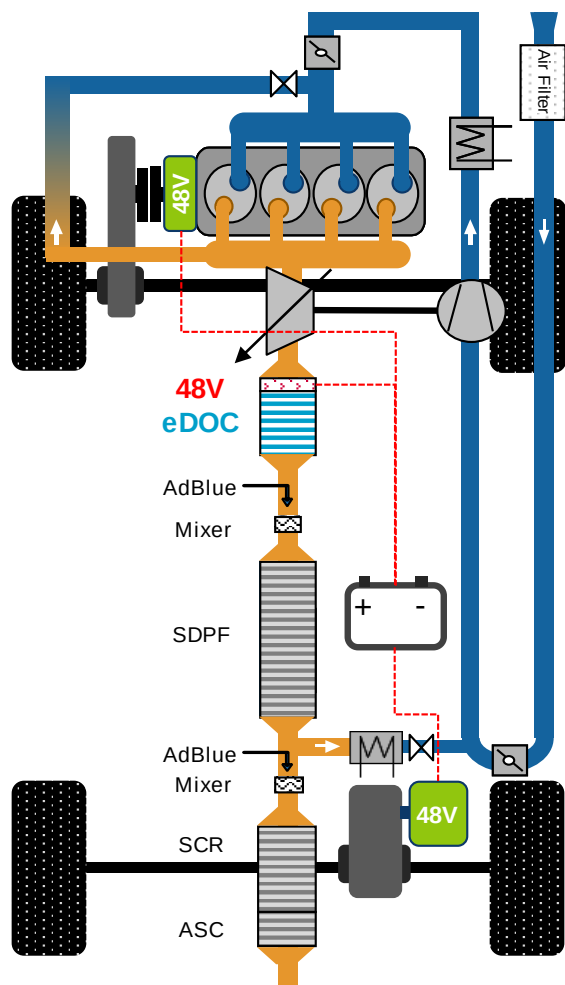


- 12V系统需要在缸内燃烧效率上继续攻坚（喷射压力，可变气门调节气体浓度）
- 48V系统可承载高效热管理，有效改善冷启动排放
- 48双电机混联混动方案拥有更高自由度（串联/并联/增程/驱动时充电等）对电驱动，变速器等配合要求也更高
- 考虑到CO₂ NO_x，最受欢迎的方案是专用混动+柴油

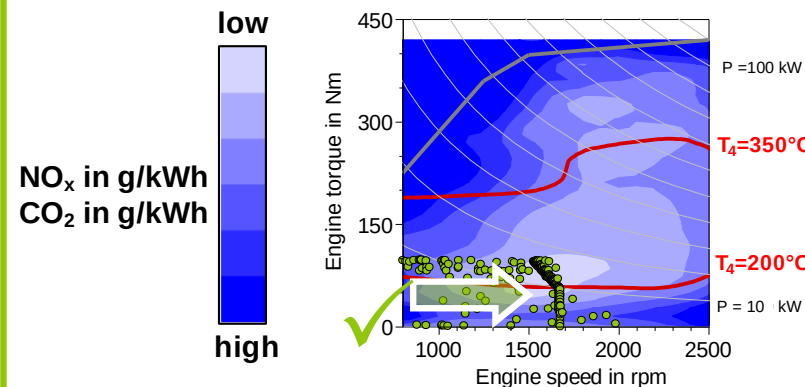
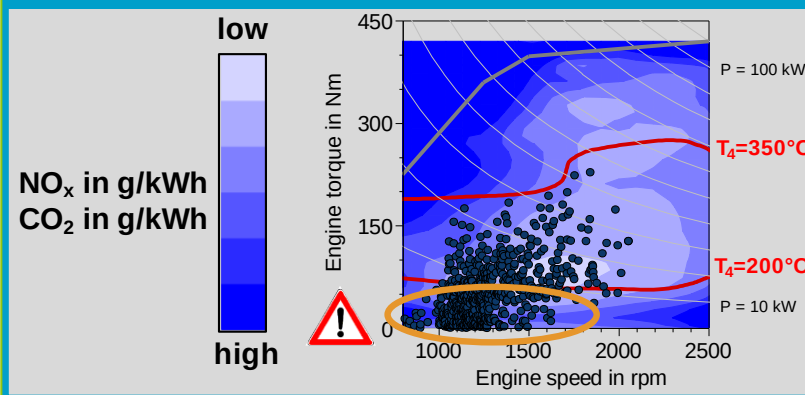
MBD virtual Platform for Emission Reliability prediction

排放可靠性预测, MBD在环仿真平台: P1+P4 专用混动“RDE 3 km”示例

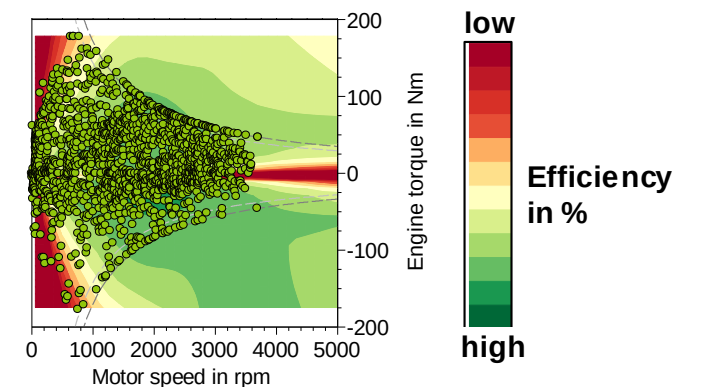
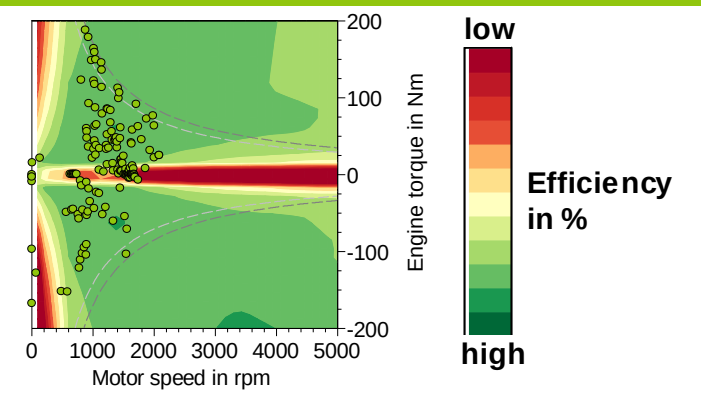
NO_x Step III (20 mg/km, RDE 3 km)



48V eDOC-SCRF-SCR



Twin 48V P1/P4 Mild Hybrid eDOC-SCRF-SCR

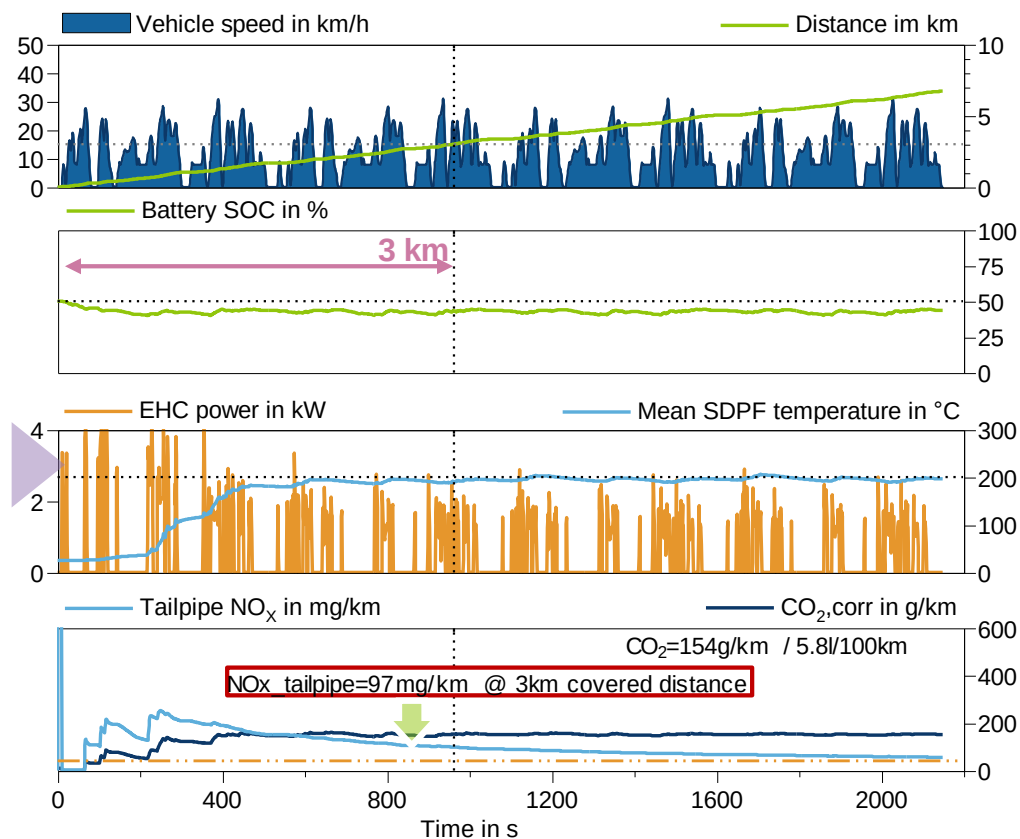


- 双电机提升电驱动工况自由度 (并联, 串联, 增程), 内燃机仅在最优特性区间工作, 大幅降低油耗和原排, 亦可尽量保持工况在后处理工作温度区间

MBD virtual Platform for Emission Reliability prediction

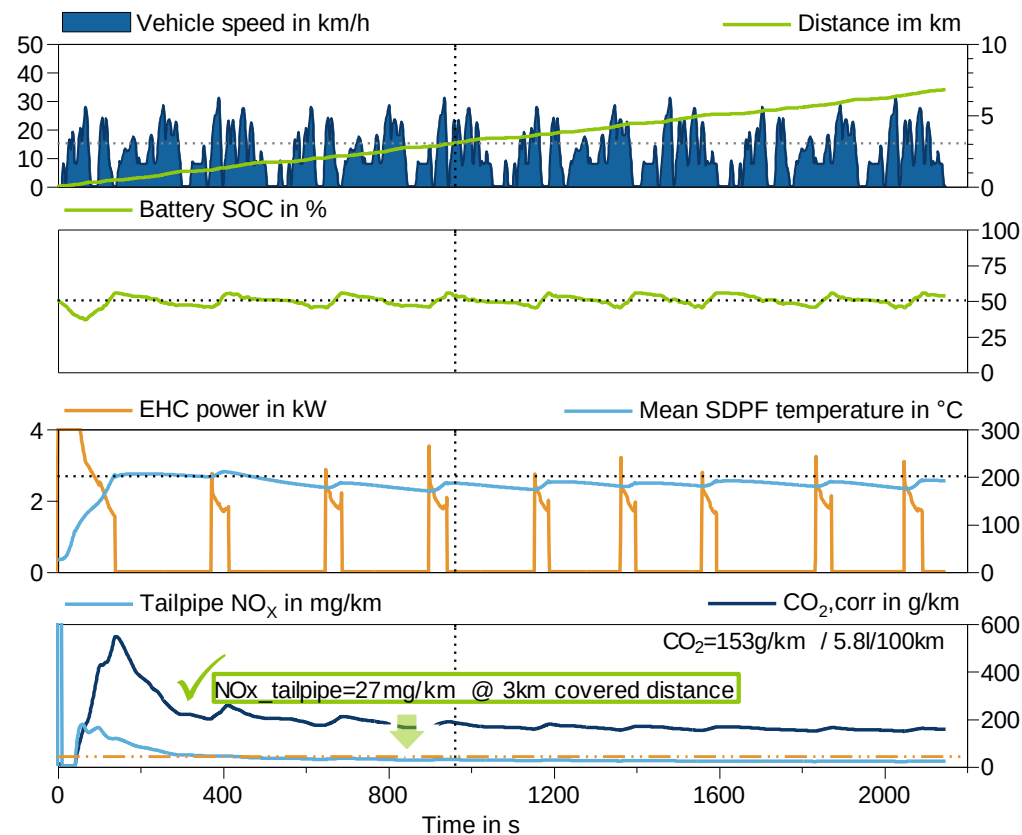
排放可靠性预测, MBD在环仿真平台: P1+P4 专用混动“RDE 3 km”示例

Combined MHEV P1 + P4 Parallel EM Operation



NO_x_engine out = 680mg/km NO_x_tailpipe = 55mg/km ✓
DeNO_x=85%

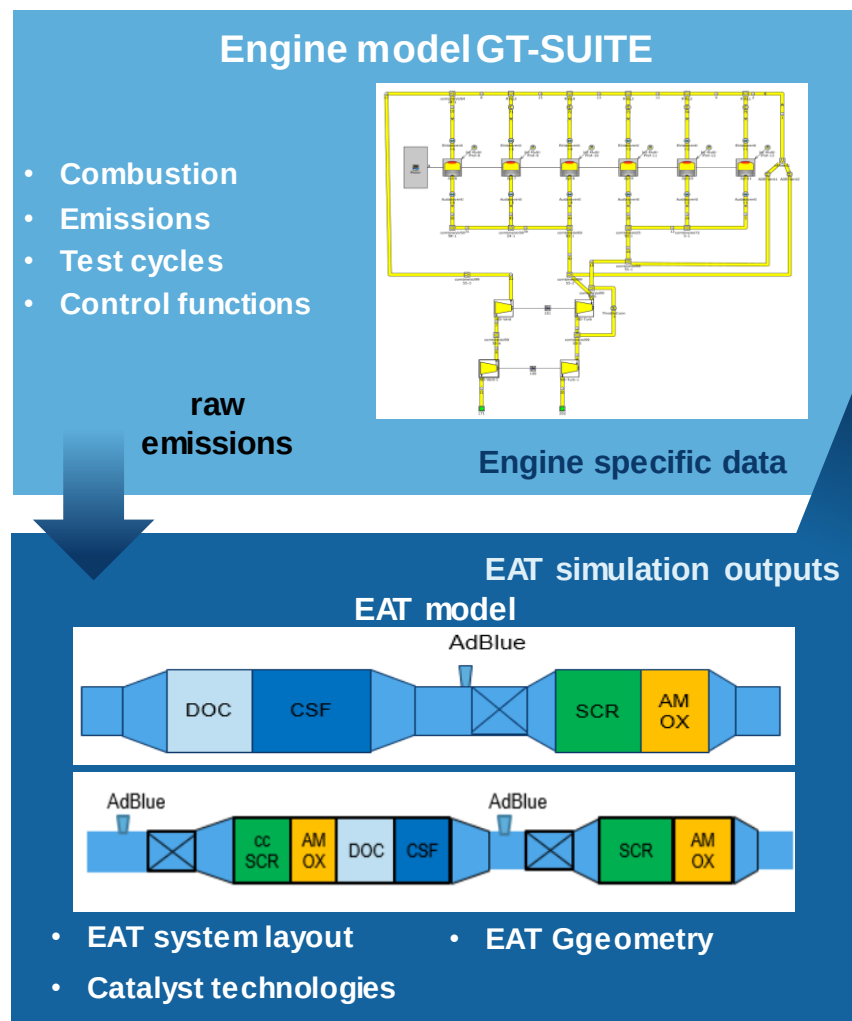
Combined MHEV P1 + P4 Serial/Parallel EM Operation



NO_x_engine out = 168mg/km NO_x_tailpipe = 19mg/km ✓
DeNO_x=95%

MBD virtual Platform for Emission Reliability prediction

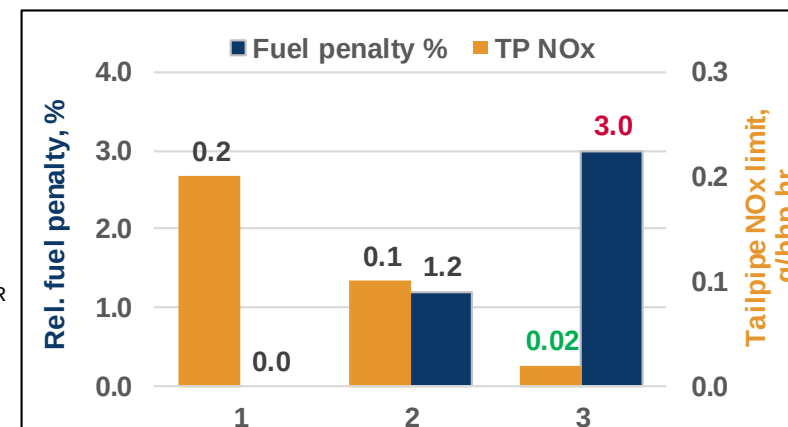
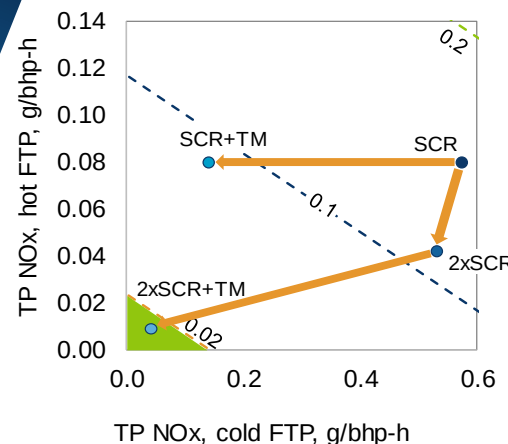
排放可靠性预测, MBD在环仿真平台: 重柴道路应用排放硬件上限分析



HD重柴道路应用: FTP循环中需要权衡取舍原排中CO₂和NO_x

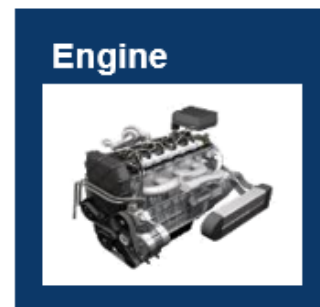
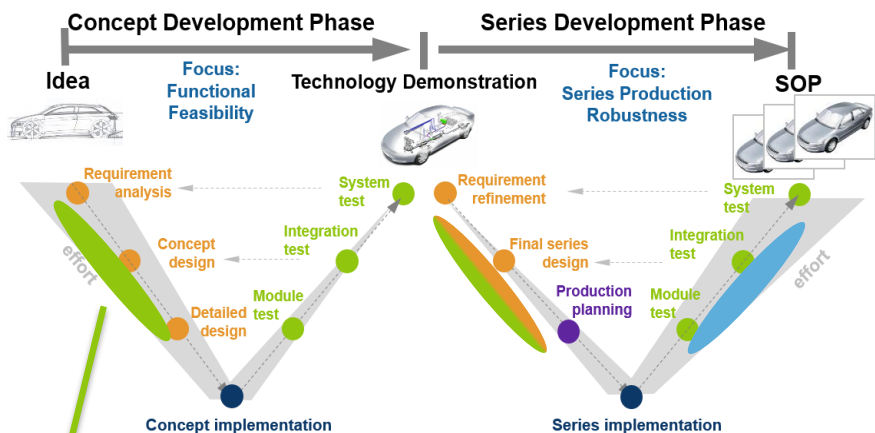
Integration
Matlab/Simulink

1. Baseline NO_x tail-pipe 0.2 g/bhp.hr
2. NO_x tail-pipe 0.1 g/bhp.hr alternative scenario: 1.2% fuel penalty
3. NO_x tail-pipe 0.02 g/bhp.hr (Ultra Low NO_x): 3.0% fuel penalty

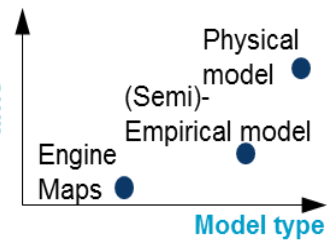


- 通过低NO_x排放标定和双喷射EAT方案, 超低NO_x尾排0.02g/bhp.hr可实现
- 但由于高频次热管理, 尽管配合了米勒循环, 油耗有所升高, 需进一步优化后处理配置, 减缓油耗压力

MBD virtual Platform for Emission Reliability prediction 排放可靠性预测，MBD在环仿真平台：子模型类别选择



Computation time



- a) Map Based
 - generic or specific
- b) none → stimuli data

Physical approach
- generic or specific

none → stimuli data

- semi empirical approach
 - air path
 - emission core
 - fluid system
- hybrid models

- Generic or Accurate Physico-chemical models
- Accurate Physico-chemical models or AI/ML Ultra fast models

后处理方案设计和分析

发动机驱动方案和分析

公差分析
(后处理传感器执行器)

Offline排放标定
(发动机 + 后处理)

RDE 验证流程

→ 在不同开发阶段可选用不同精度模型进行系统方案布置，不同精度也意味着不同模拟时长和算量需求
→ 除基于特性曲线图的模型外，IAV共划分了4类复现发动机原排的建模方式，分级将气路，排放核心，液态循环纳入模型
→ 后处理建模则分为generic基本功能性表征模型，accurate高精度物理化学模型，和超高速AI&ML机器学习模型

High accurate EAT component and Sensor modelling

高精度EAT元件仿真建模: 高精度模型基石 - IAV顶级物理化学工程实验室PCL

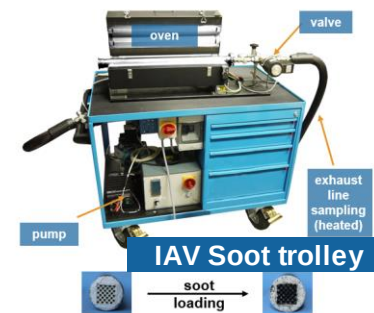


IAV Highly modern Physical Chemical Laboratory (PCL) :

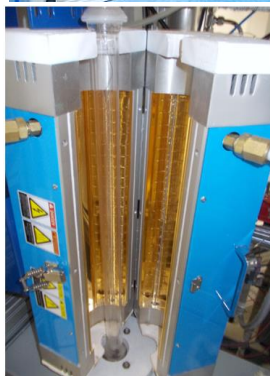
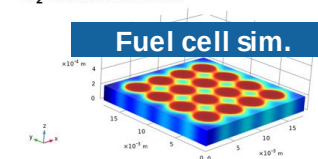
- 4 fully automated test benches, 5 w/ manual intervention, ISO certified
- Gas analytics: 5xFTIR, 5xFID, 3xNDIR, 1xPMA
CI-MS / C/IEI-MS for each test line, infrared heating oven: 8 s to 650°C
- Soot trolley: loading real soot from engine gas of filter
- Highly automatic: Close-loop online control (T°C, time, eff.%, Storage)

High precise Testing:

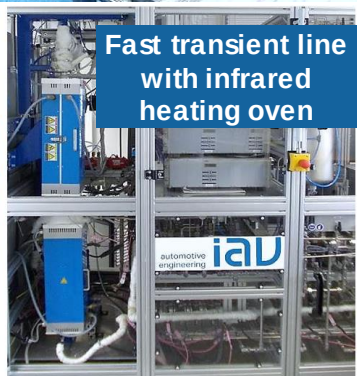
- EAT function benchmarking tests (catalyst & Filters)
- Stationary and transient measurements and driving cycles
- Back pressure, Sensor measurements
- Aging and poisoning investigations, Chemical Analysis



O₂ fraction cathode

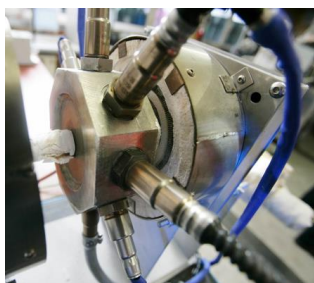


Fast transient line
with infrared
heating oven



高精度的模型离不开高精度的测试数据. IAV物理化学实验室不仅提供实验数据输入给汽/柴油/燃气/甲醇发动机后处理测试和仿真, 同时也为电池/燃料电池的开发提供电化学老化毒化测试和仿真

IAV PCL: Testing + Modelling



Sensor mea. up to 8



NO_x / wide band / NH₃ / switch type sensors



HD EAT Aging (max. 1100°C)



EAT Poisoning



Analyse

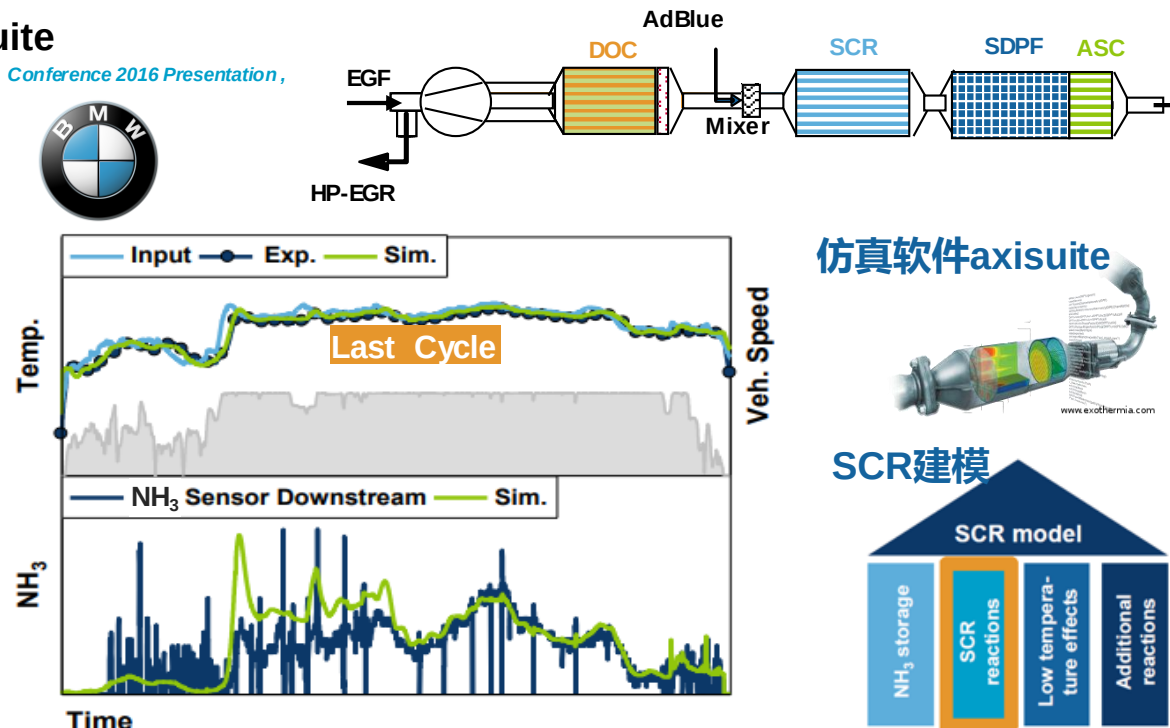
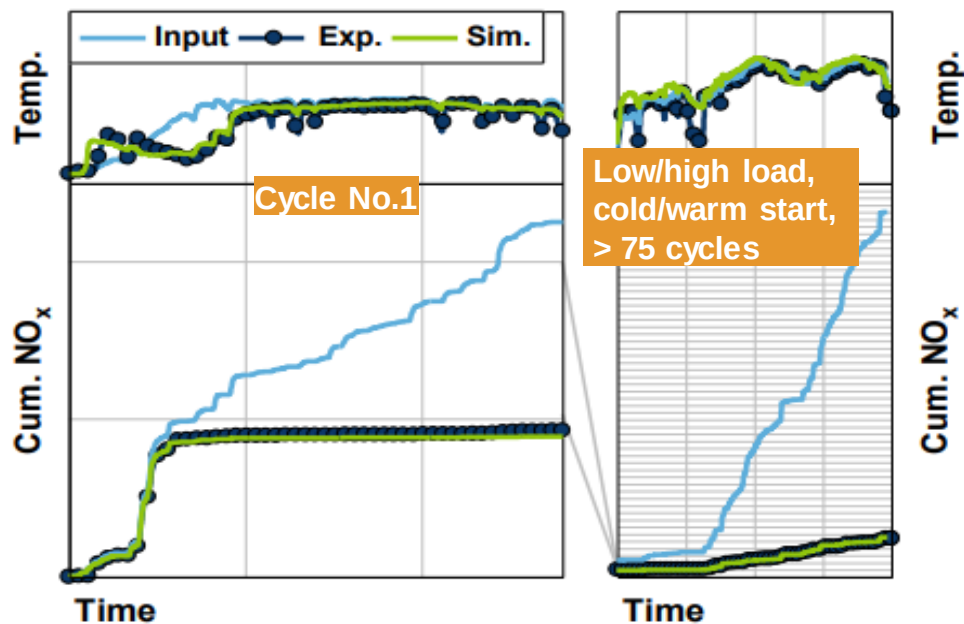


Light Microscopy

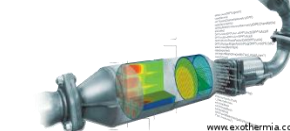
High accurate EAT component and Sensor modelling 高精度EAT元件仿真建模示例: IAV与BMW共同开发的SCR量产应用控制

Example for SCR application: Validation Results in axisuite

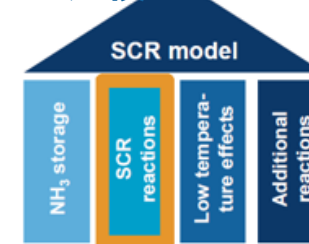
Source: IAV GmbH & BMW Group, MinNOx Conference 2016 Presentation, "Model Based SCR Application"



仿真软件axisuite



SCR建模



项目要求:

基于超过>1000 km的RTB实验数据和小样实验室测试对DOC, SCR, SDPF, ASC建模;对NO_x, NH₃进行系统校验;虚拟双胞胎模型可用以进行尿素喷射策略定量优化

挑战:

低温下的SCR反应, NH₃ 储存状态 (由于连续模拟, 单一循环的误差会逐步叠加, 多个循环后造成较大偏差), SDPF在多个循环内发生再生

结果:

模型历经超过75个循环工况后尾排T°C, NO_x 高精度复现, NH₃ 信号甚至仅最大偏差仅仅为1-2 ppm

→ 高精度的EAT系统模型精准复现了RTB超长动态排放, 作为数字双胞胎辅助客户减排策略自由制定, 优化前后端喷射策略等

High accurate EAT component and Sensor modelling 高精度EAT元件仿真建模示例: 滤清器背压仿真 Back pressure modelling

背压仿真的物理模型建立

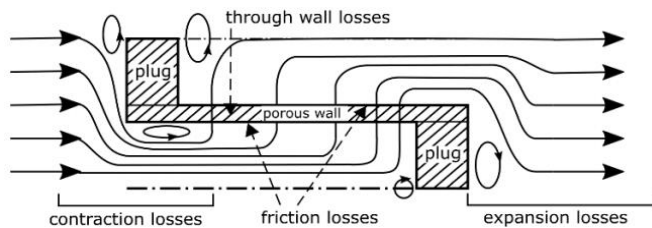


Figure 1 A schematic of pressure loss contributions for a plugged filter: cross-section of half of the inlet and half of the outlet channel.

Source: 2019, SAE International Journal of Engines, vol. 12, no. 4, 03-12-04-0030,

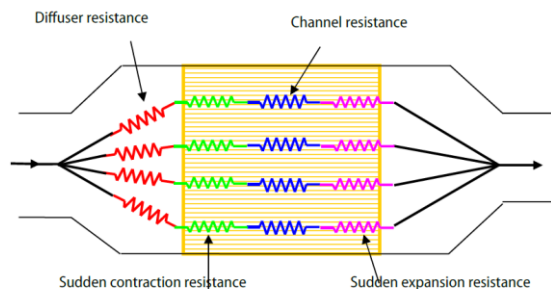
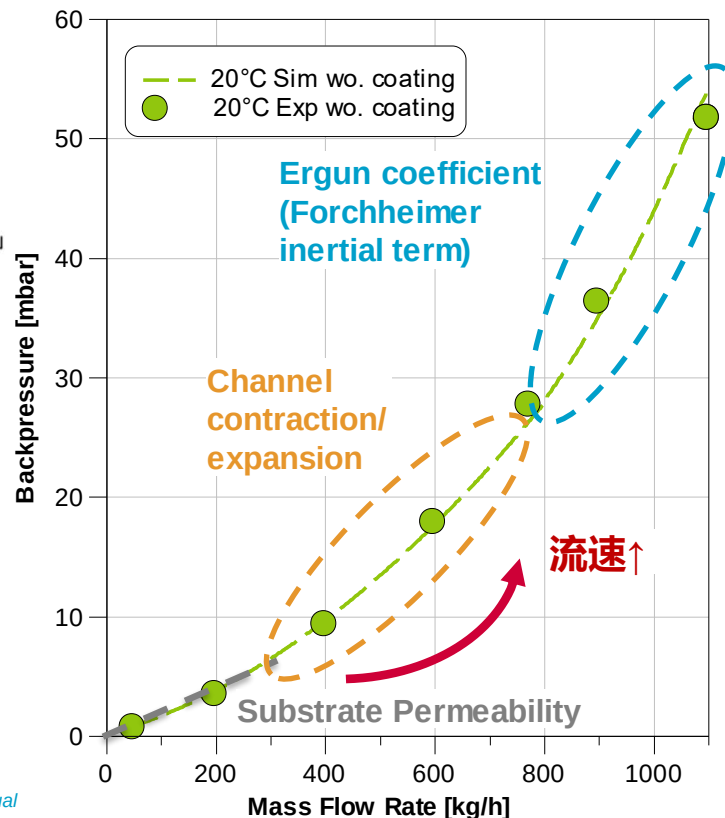


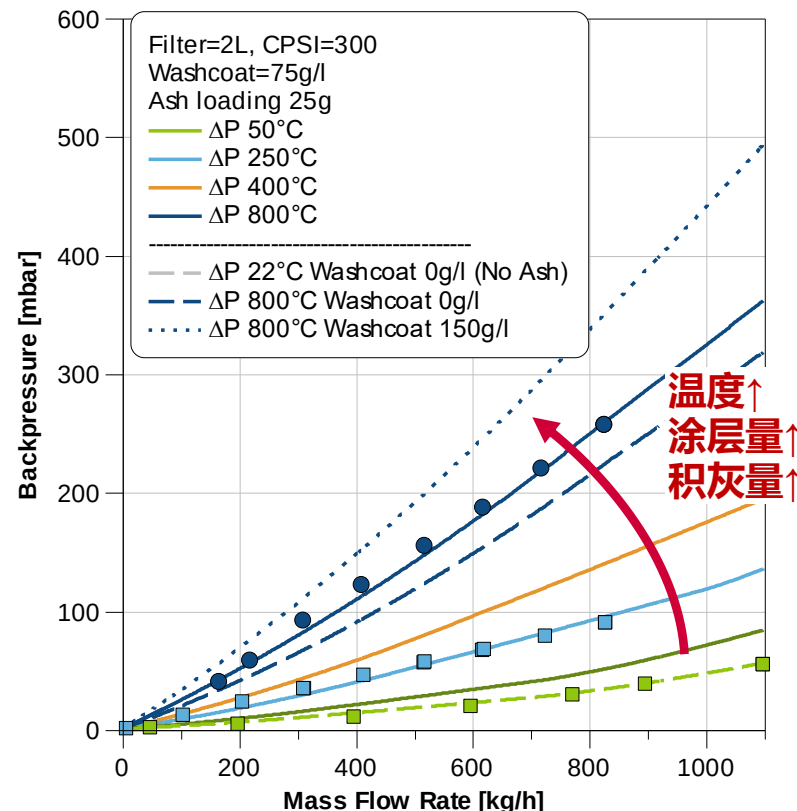
Figure 10: Equivalent hydraulic circuit used for the solution of the flow field in the multi channel problem

Source: axisuite, solver axitrap manual

新鲜件在不同流速下的背压变化 Sim vs Exp.



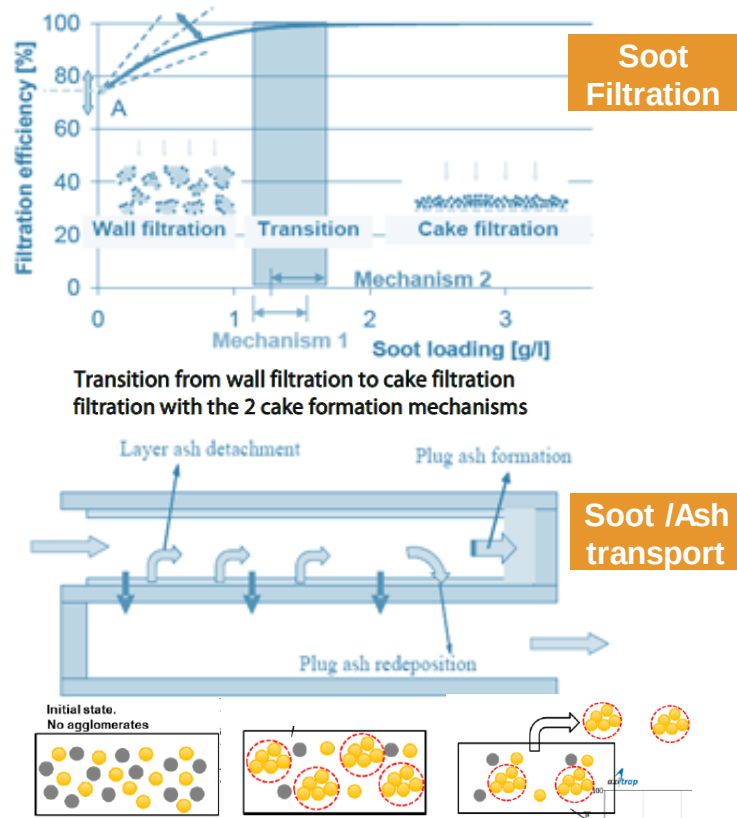
不同流速, 温度, 涂层量下的背压变化



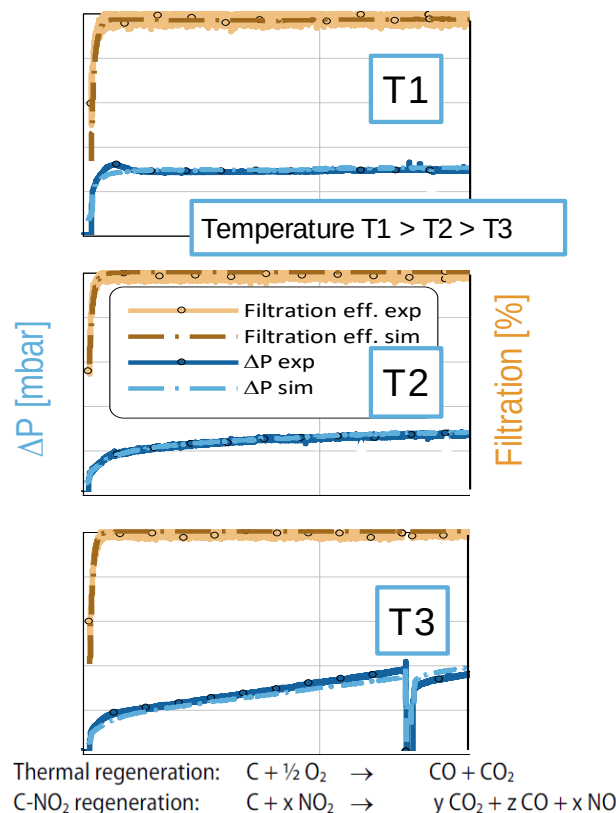
- 建模软件自带完成模型构架, 全面考量载体物理特性, 通道内摩擦, 瞬时压降等, 可按需调用内嵌默认模型或自定义参数
- 背压建模的过程: 无涂层附着的滤清器 - 流速考量 - 温度考量 - 涂层考量 - 碳烟灰分考量, 模拟效果可与高压气体台架测试验证

High accurate EAT component and Sensor modelling 高精度EAT元件仿真建模示例：积碳过程与再生状态

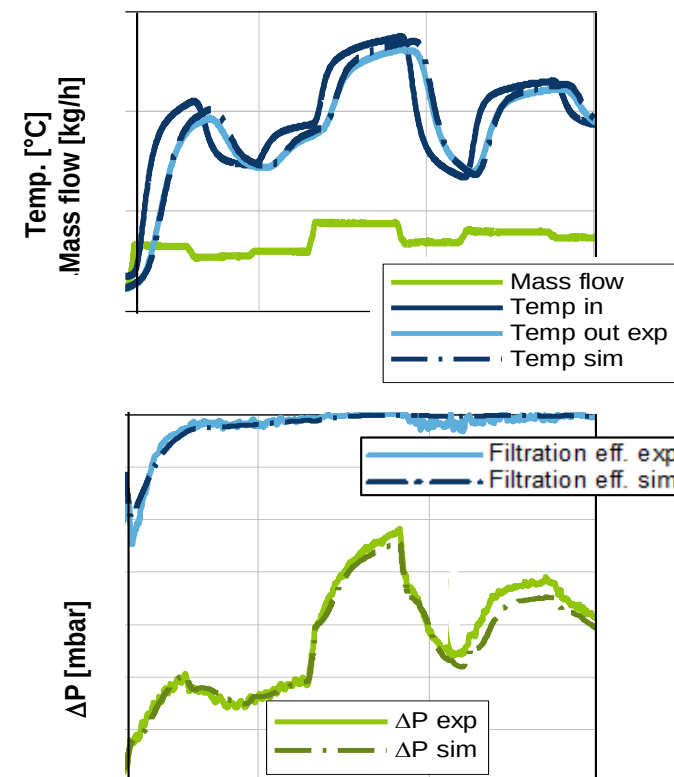
axisuite积碳积灰模型原理浅析



积碳仿真: CRT effect 被动再生状态



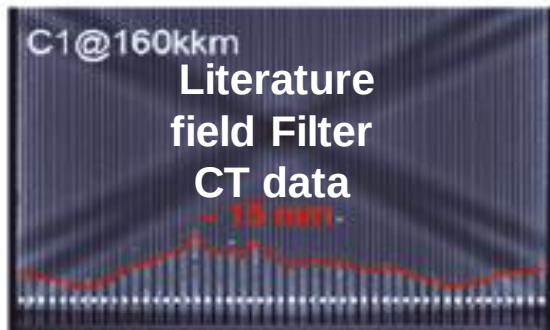
动态积碳状态下的温度，过滤效率压差变化



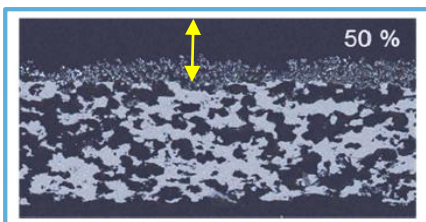
- Simulation of soot loading, back pressure, filtration, soot regeneration under various conditions
- IAV high accurate filter model shows great agreement with experiment results 过滤,积碳和再生过程可精准仿真再现

High accurate EAT component and Sensor modelling 高精度EAT元件仿真建模示例: 积灰模型 Ash modell

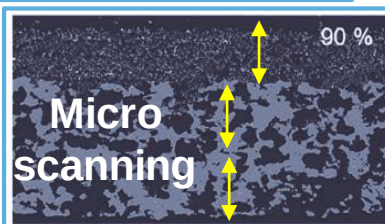
真实耐久件积灰在channel内分布



Source: A Study of Ash Accumulation on Gasoline Particulate Filter through On-Road Fleet Durability Testing 2019, Rose, Boger, LV, etc.

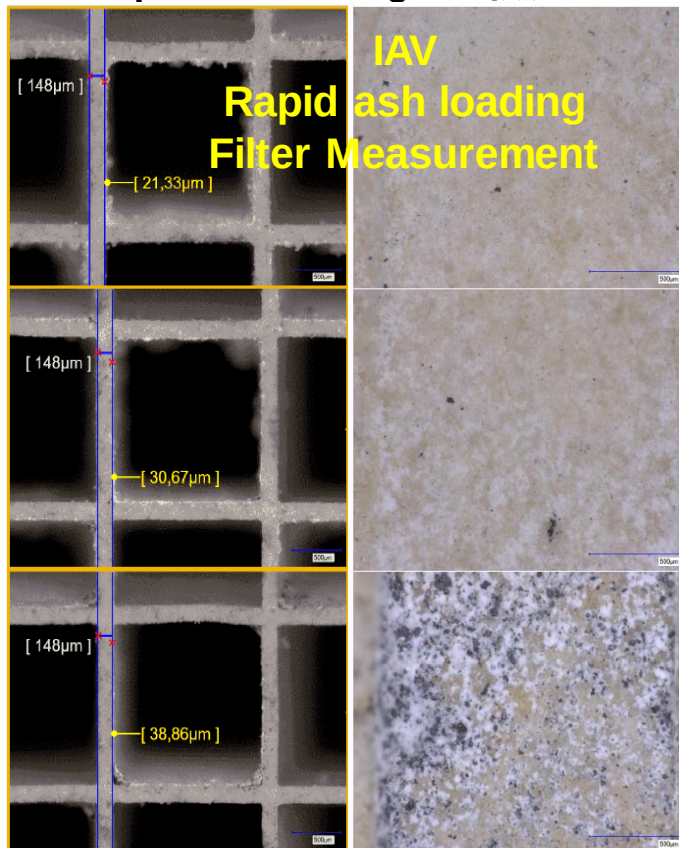


Source: Full Useful life evaluation of gasoline particulate filters by accelerated ash loading and thermal aging 2018, Sterlepper, Claßen, Gorge, etc.

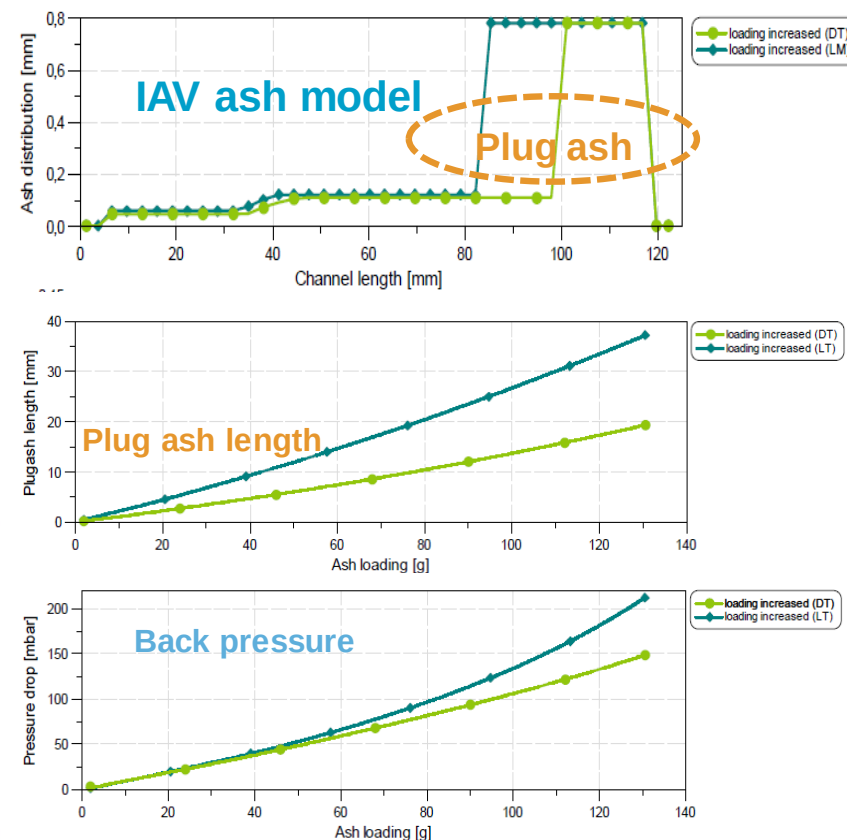


distance from inlet

IAV Rapid ash loading快速积灰件



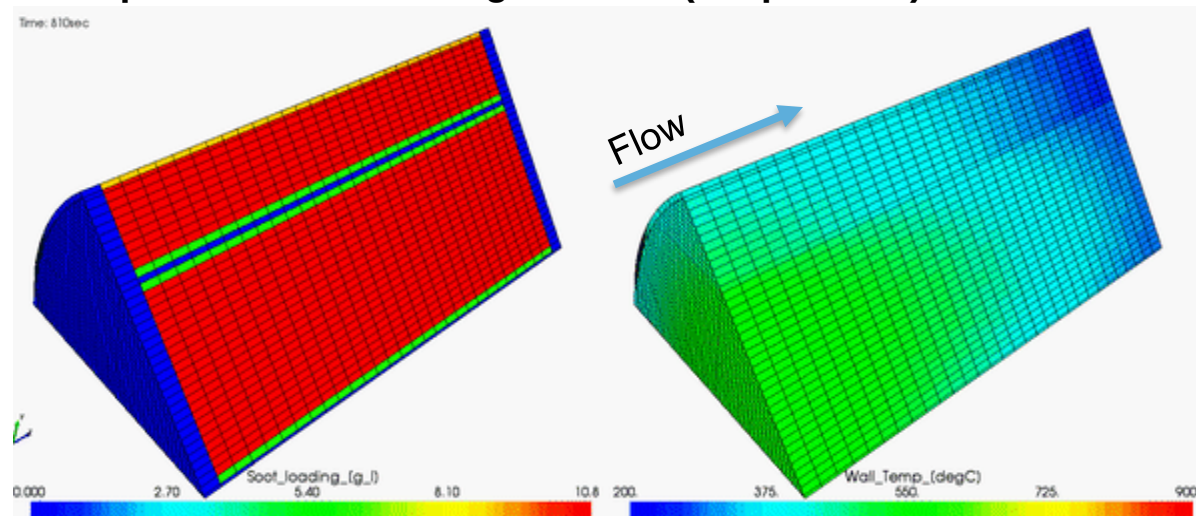
axisuite不同积灰模型对比



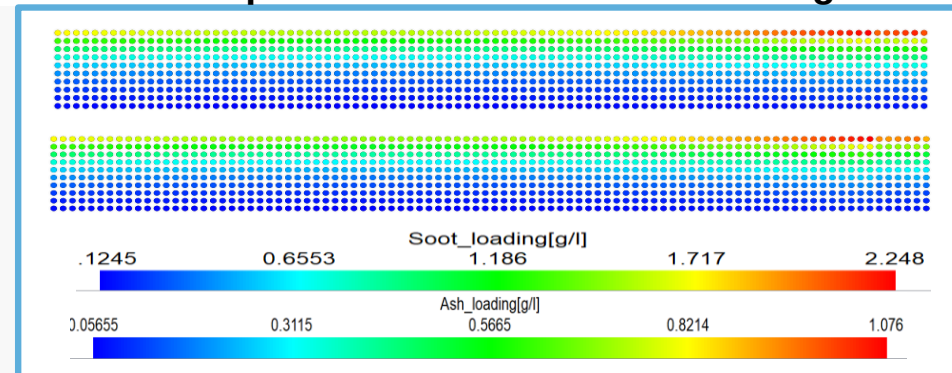
- 通过对积灰件的光学显影和CT扫描可获取灰分轴向和壁内分布，积灰件可通过真实耐久件或者直接燃烧机油快速积灰获得
- 积灰建模精度，可通过对比较满灰分时仿真背压，Plug ash长度与真实耐久件来验证

High accurate EAT component and Sensor modelling 高精度EAT元件仿真建模示例: 3D可视化积碳积灰建模 3D soot simulation

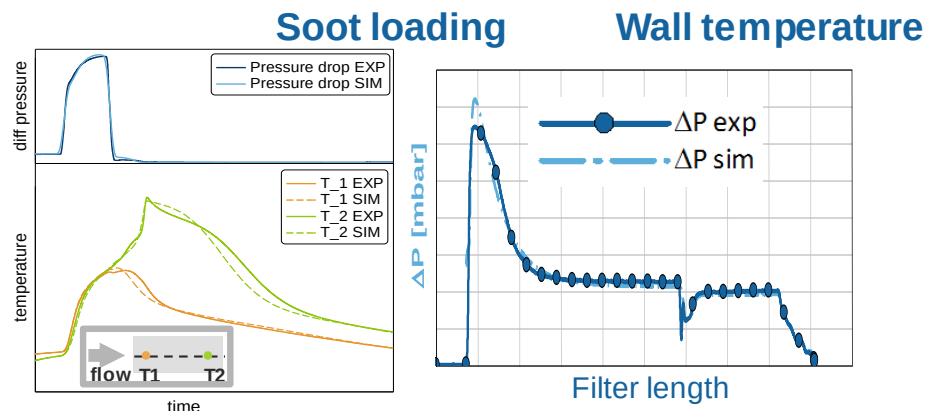
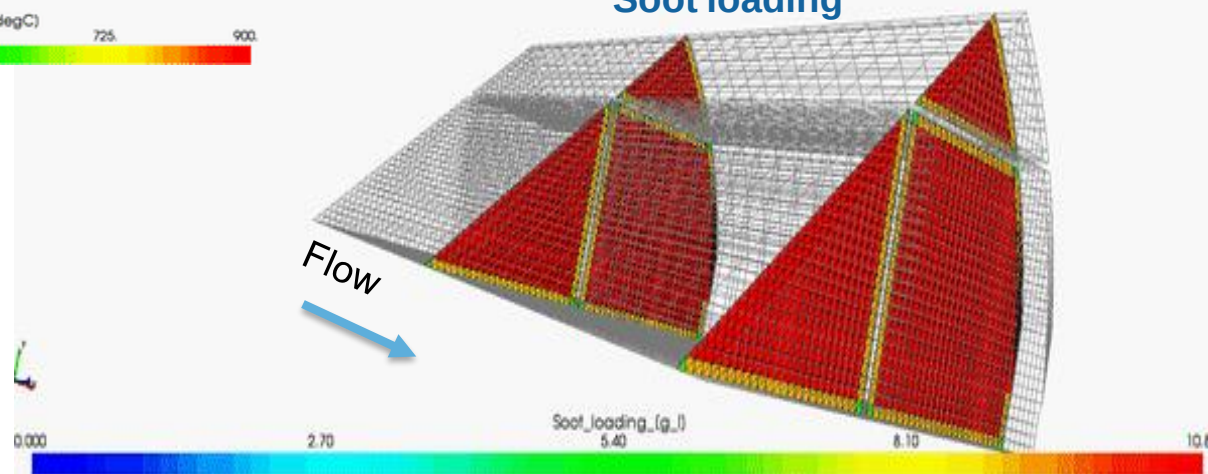
Example for active filter regeneration (Drop-to-Idle)



Example for intra wall soot/ash loading



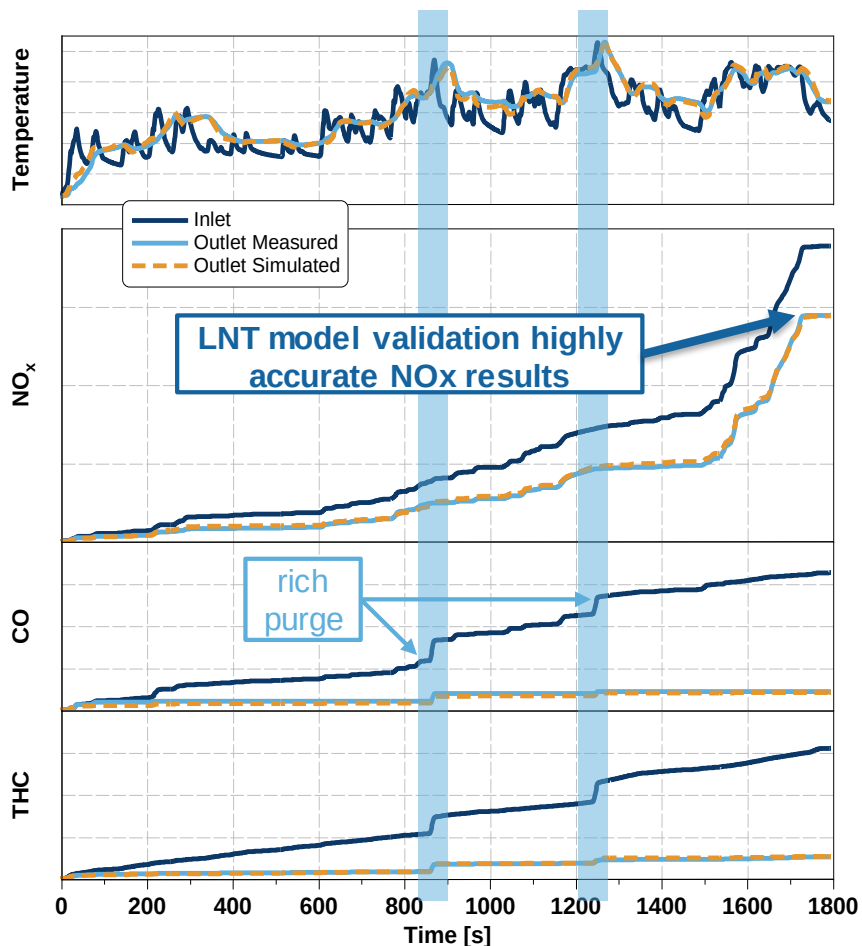
Model slice at 1/2 length + befor rear plug Soot loading



→ axisuite的3D仿真: 颗粒滤清器在DTL时内部积碳量变化; 高可视化利于再生温控/时长等参数对再生效果影响的校验和理解

High accurate EAT component and Sensor modelling 高精度EAT元件仿真建模示例: Lean NOx Trap (LNT) 建模

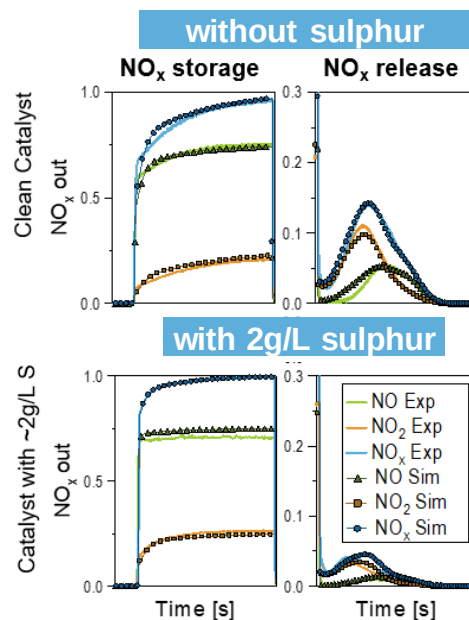
高精度LNT模型与实际WLTC循环校验



模型结果 (1D 物理化学模型)

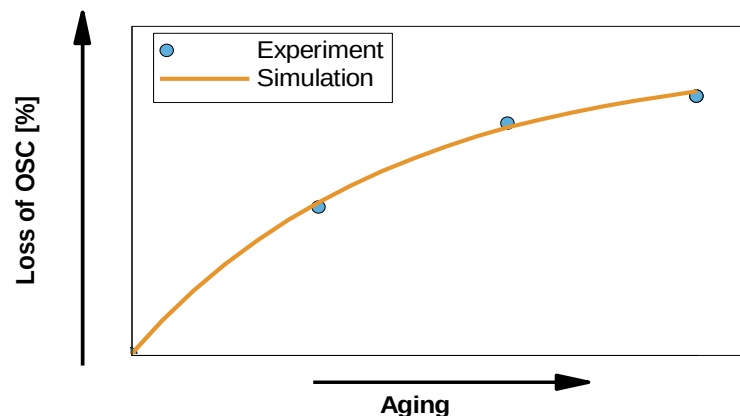
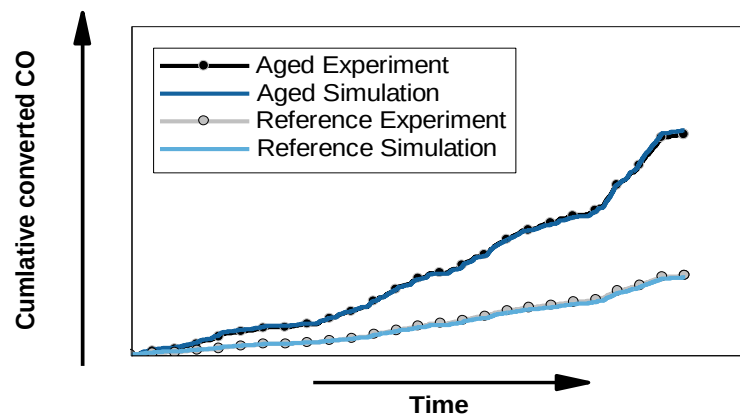
高精度模型建模过程:

- 基于核心尺寸实验室, 模拟稳态和瞬态条件, 包括OSC, NSC, 结合温度标定, 包含针对涂层储NOx以及CO&THC转化能力,
- 整合硫中毒反应, 脱硫工况等的独立功能检验
- 针对次级排放的高精度模拟 (例如 N_2O 和 NH_3)
- 结合元件热力学特性, 小样模型放大至台架或整车商的全尺寸模型
- 与WLTC测试结果校验



- 模型复杂程度取决于项目目标
- 模型精度取决于实验数据的质量, 尤其是在rich工况下
- 建模精度在很大程度上取决于再生阶段的模拟, 还取决于催化剂的工况历史, 如预处理等
- LNT的涂层特性转化为化学模型后较为复杂, 精准模型包含化学反应式高达40余个, 还有大量表征组分间的互相抑制作用的参数
- 如何将功能表征单独用测试分离并定量分析, 是Know how的深层积累

High accurate EAT component and Sensor modelling 高精度EAT元件仿真建模示例: 贵金属老化预测建模 PGM, Aging prediction

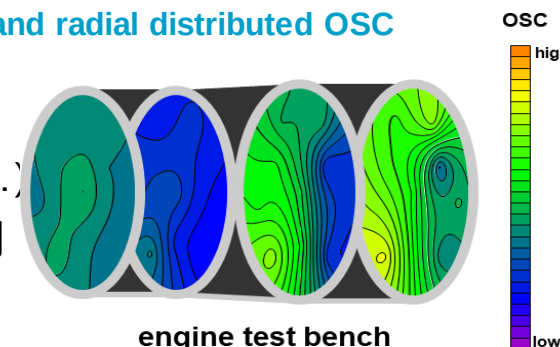


催化原件不可逆的老化:

- 热老化 (取决于使用温度和时长):
 - PGM 烧结 (Pt/Pd, Rh)
 - OSC 烧结化学老化 (毒化 S, P, Zn, K, 等...)

每种老化效果的模型中都可以包含单独的老化机制

Axial and radial distributed OSC



老化预测建模方法:

- 参考状态元件建模 (例如新鲜件)
- 在不同的老化状态下测量元件功能特性 (例如老化时间, 温度)
- 校准老化模型用以表征不同的老化状态
- IAV开发了自己的Aging model, 建模软件中axisuite也内嵌了老化功能结构
- Aging factor老化系数 = $f(\text{time}, \text{temperature})$

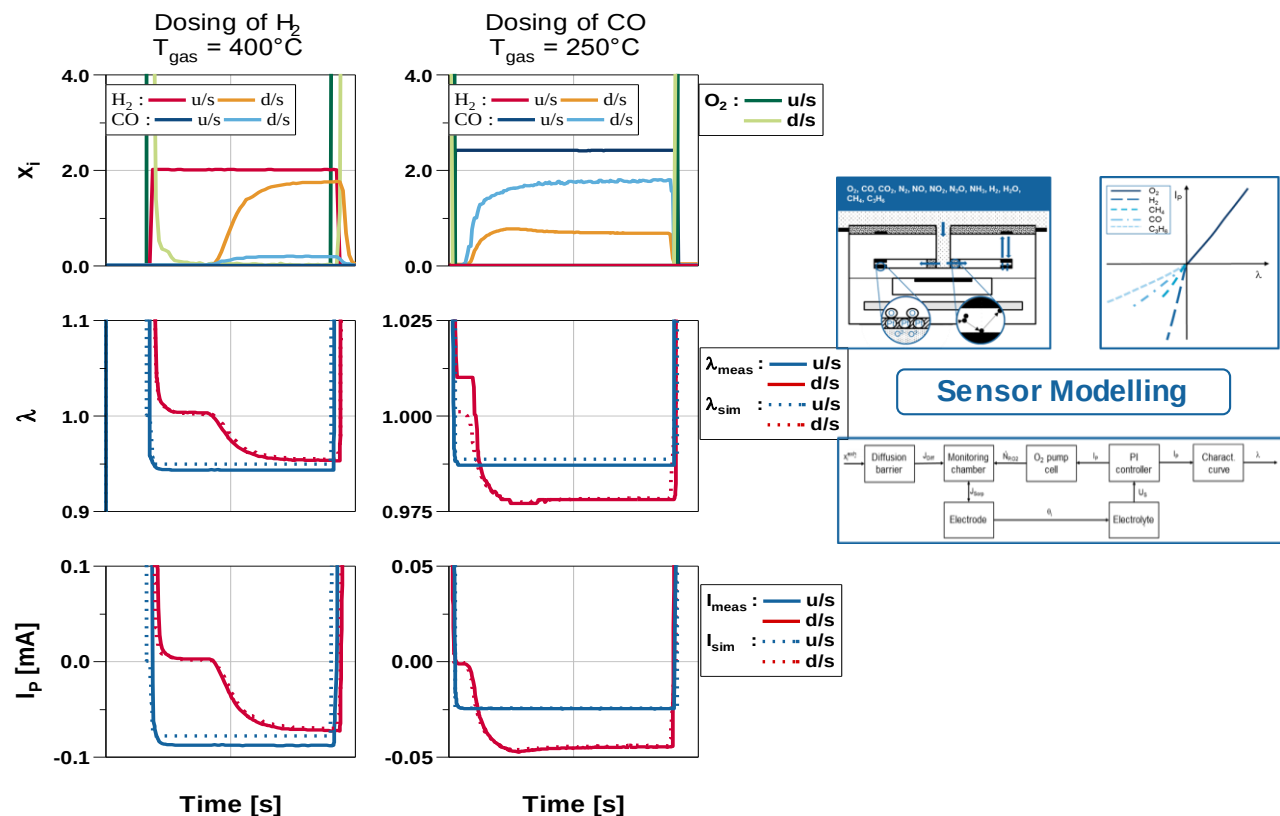
老化预测模型拓展应用:

- 用于方案优化评估, 贵金属用量, 载体截面长度比, 分区涂覆+机器学习快速模型 (方案点云)

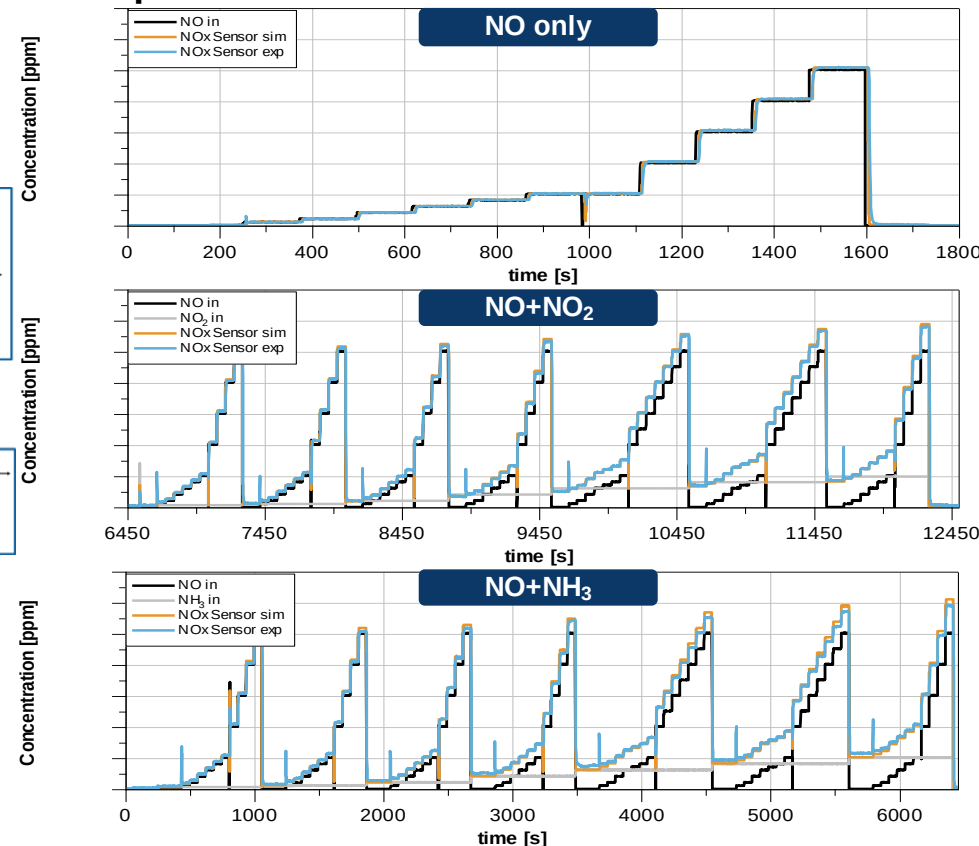
→ TWC三元催化器不仅用于汽油机, 同时也是天然气卡车重要的后处理元件, 此处针对TWC氧化能力OSC的老化预测建模
→ 贵金属含量不仅意味着元件成本, 其含量表征 (有效活性含量) 也象征着EAT不同老化阶段
→ 即使在高转化率要求下, 贵金属也并不是越多越好, 放热过多反而加速老化, 可选择分区涂覆或与载体多孔性优化相结合

High accurate EAT component and Sensor modelling 高精度EAT元件仿真建模示例：氧传感器和NO_x传感器模型

Example λ wideband sensor :



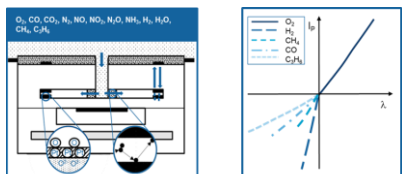
Example NO_x sensor :



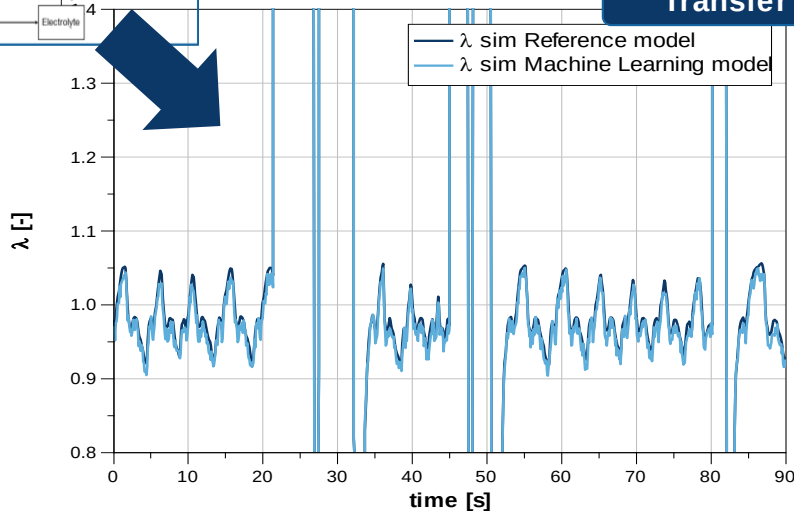
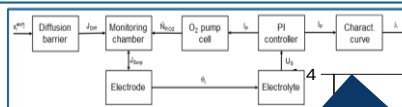
- 宽频氧传感器 λ wideband sensor 模型是基于窄频氧传感器 λ switch type sensor model 的拓展
- 宽频氧传感器 λ wideband sensor 可以很好的复现真实 I_p 电量从而对上下游 λ 值进行精度仿真
- 基于宽频氧传感器拓展而成的NO_x传感器也具有较高仿真精度，在含有NO₂ NH₃ 的环境中仍旧可以给出良好的NO_x 仿真信号

Ultra fast AI/Machine Learning EAT + Sensor model 超高速AI机器学习模型: 氧传感器模型RDE示例

Exemplarily results for a RDE cycle (Wideband and switch sensor)



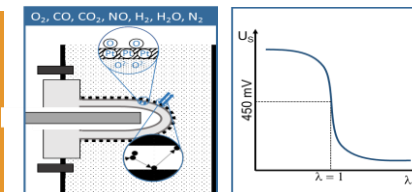
Wideband Sensor Modelling



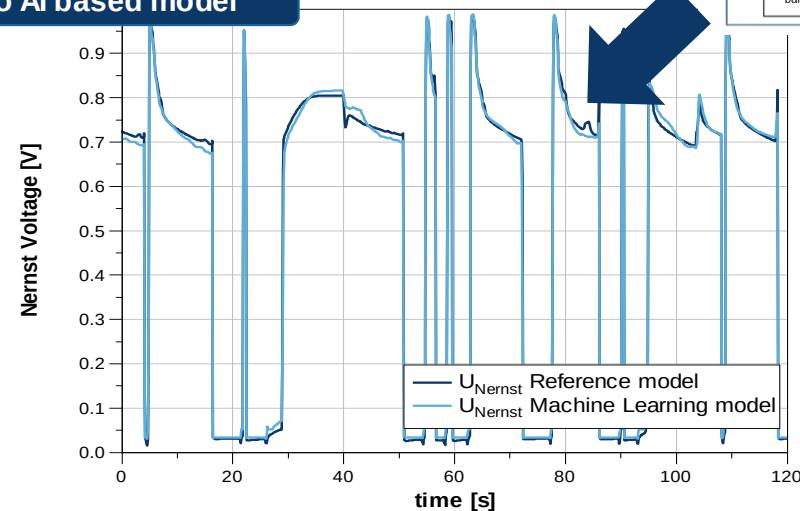
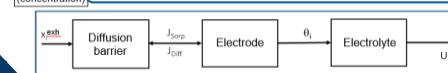
- 虚拟开发环节接近量产阶段时, 超高速机器学习模型有助于多车型变种标定
- 基于高精度EAT和sensor模型, 通过IAV 开发的机器训练方式可以大幅度提高仿真速度同时保证其精度

- Reference model: Real time
- AI model: > 16000 times faster than real time

Transfer to AI based model



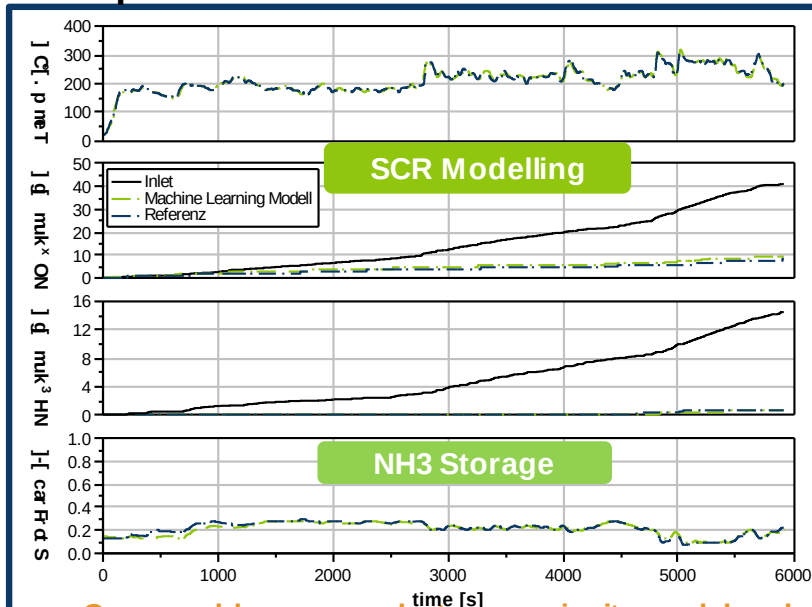
Switch Sensor Modelling



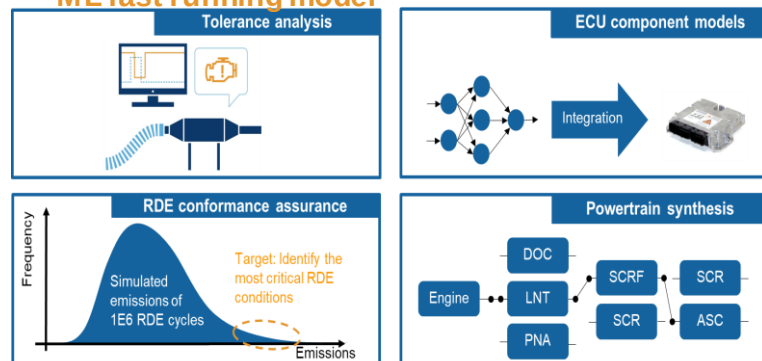
- 两种超高速AI/ML传感器模型都具有和参考模型象媲美的模型精度, 仿真速度比real time实时模型快 16000-21000倍!
- 超高速模型需要尽可能多有关于其应用场景的信息输入, 如气体浓度上下限, 标定控制策略等, 以确保其实用性和可靠性
- 超高速模型需要高精度物理化学模型作为基准, 属于开发策略上的拓展优化环节

Ultra fast AI/Machine Learning EAT + Sensor model 超高速AI机器学习模型EAT + Sensor: RDE动态循环模拟

Example SCR + Sensor:

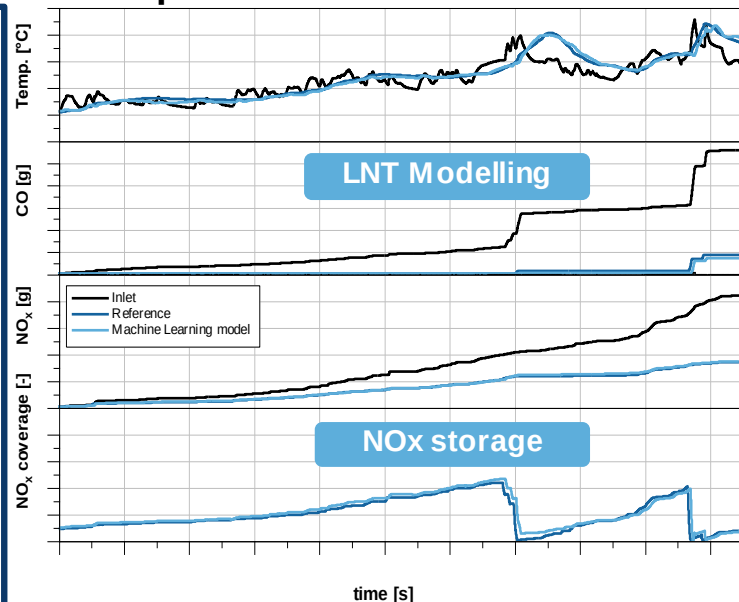


- Comparable accuracy between axisuite model and ML fast running model



- Fast Integration into ECU

Example LNT + Sensor:

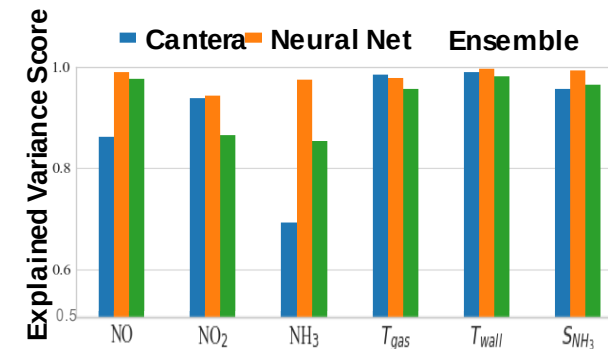


Model	Accuracy %		
	Worst	Average	Best
axisuite®	Reference		
Cantera	69	90	99
Esemble	85	93	98
Neural Network	94	98	99

Model	Times	
	Training	Simulation
axisuite®	---	40.5 s
Cantera	---	8.2 s
Esemble	14 min	33.5 s
Neural Network	28 min	0.09 s

IAV publication SAE Paper 2020-01-2178

Kühne, J., März, C., Werfel, J., Gelbert, G. et al., "Hybrid Modeling of a Catalyst with Autoencoder Based Selection Strategy"

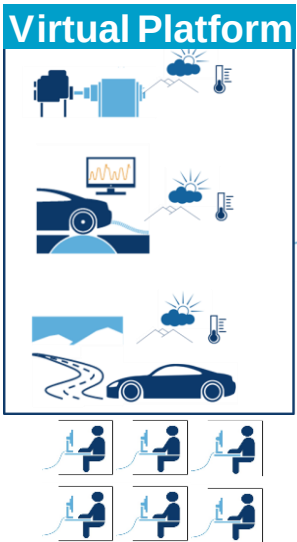


- 超高速模型万倍以上快于实时模型并保持高精度
- 可用于快速筛选最优参数组合, 如几何尺寸改变, 涂层分区, 重复循环复现老化效果对转化效率, OBD等的影响
- 海量模拟结果数据库可辅助未来后处理系统的OTA化, 在使用年限中尽可能保持最优转化效率

Summary and Outlook 综述与展望

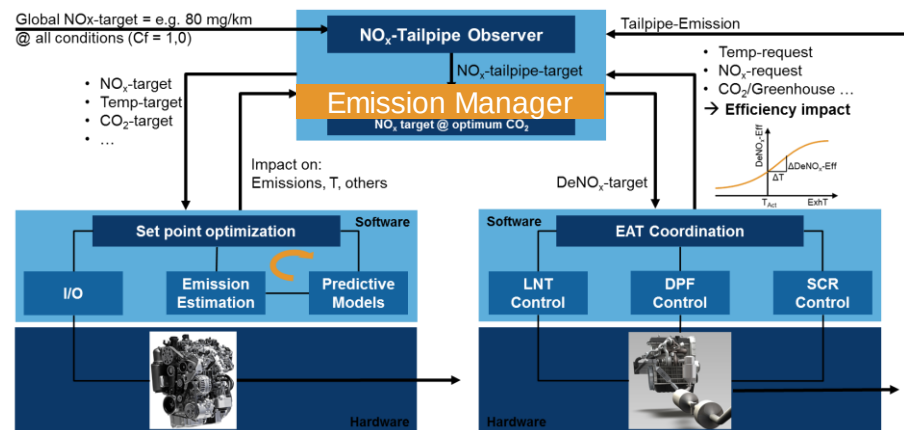


- 完整的虚拟开发平台可同时协调前后端，缩短开发时长成本，全面覆盖可靠性方案
- 明确技术或成本目标是否可行，进行技术路线预判，评估和建议
- 明确供应商产品应满足的条件，缩短沟通时间，更有针对性



- 仿真能力是可靠性验证的绝佳工具，也是建立巩固拓展自主知识体系的帮手。
- 避免极限工况，延长后处理寿命
- 增加辅助电驱动后，热管理和控制策略都对发动机端有联动效果。因此不应局限于供应商解决范畴，主机厂可以更早的介入布局

- IAV独家Emission controller控制算法可集成于客户ECU内。在实际道路行驶时通过监控尾排NOx与过往预期转化率的差异，自动调节优化发动机工况，以确保尾排达标。 项目经验 + 日本电装Denso
- 在不超于硬件能力范围内，PEMS测试额外NOx减排可达32%



IAV具有丰富前瞻性减排开发和落地经验，期待与您一起以先进技术为导向，伴随清洁内燃机，重新拥抱蓝天

感谢您对IAV的关注!

Qing Li 李青

IAV GmbH

Carnotstraße 1, 10587 Berlin

Telefon +49 303997-89039

qing.li@iaav.de

www.iaav.com