

实现更准、更快、更全、更早的CAE分析

李 康

中国第一汽车股份有限公司 技术中心

2015年11月 上海



www.idaj.cn 您身边的CAE&CFD专家

Your True Partner for CAE&CFD

ICSC 2015

目 录



1

产品开发对CAE的要求

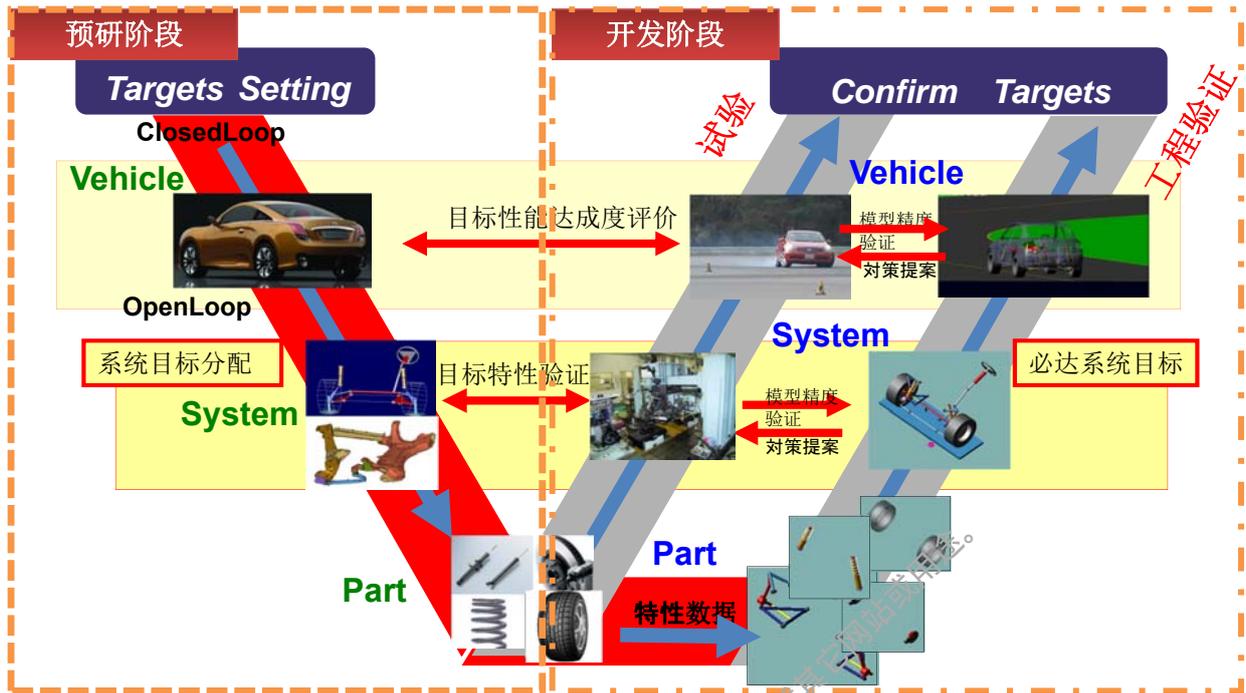
2

提升CAE能力的思考与实践

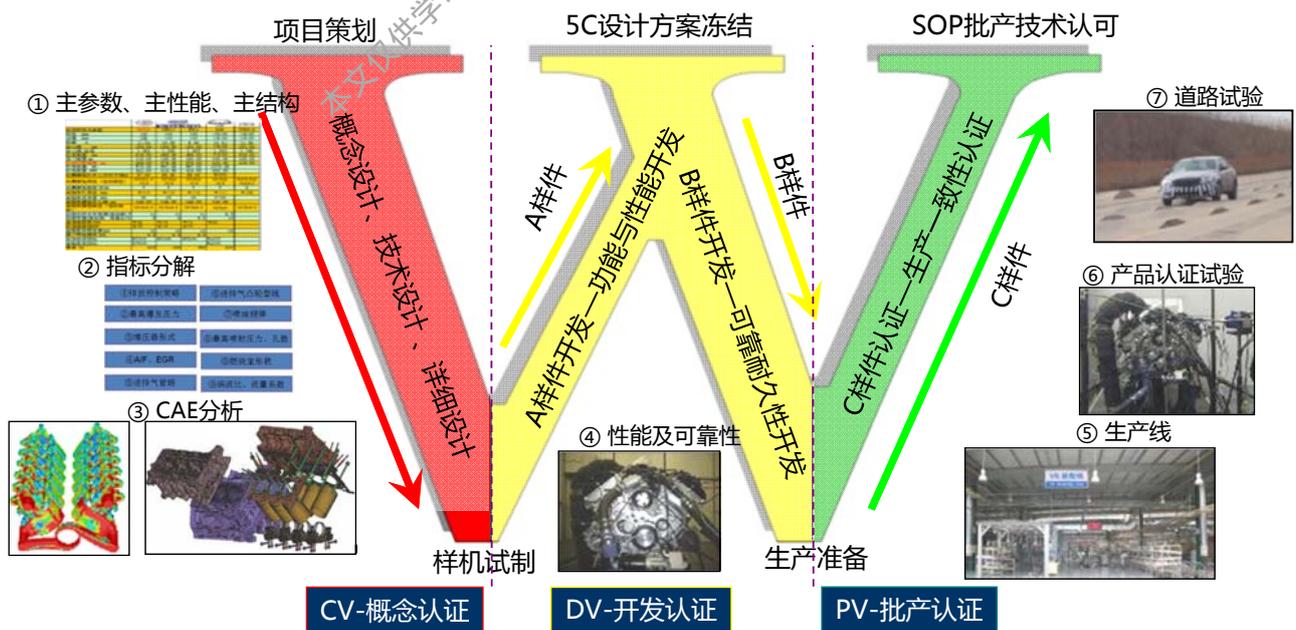
3

总结

车辆典型开发流程

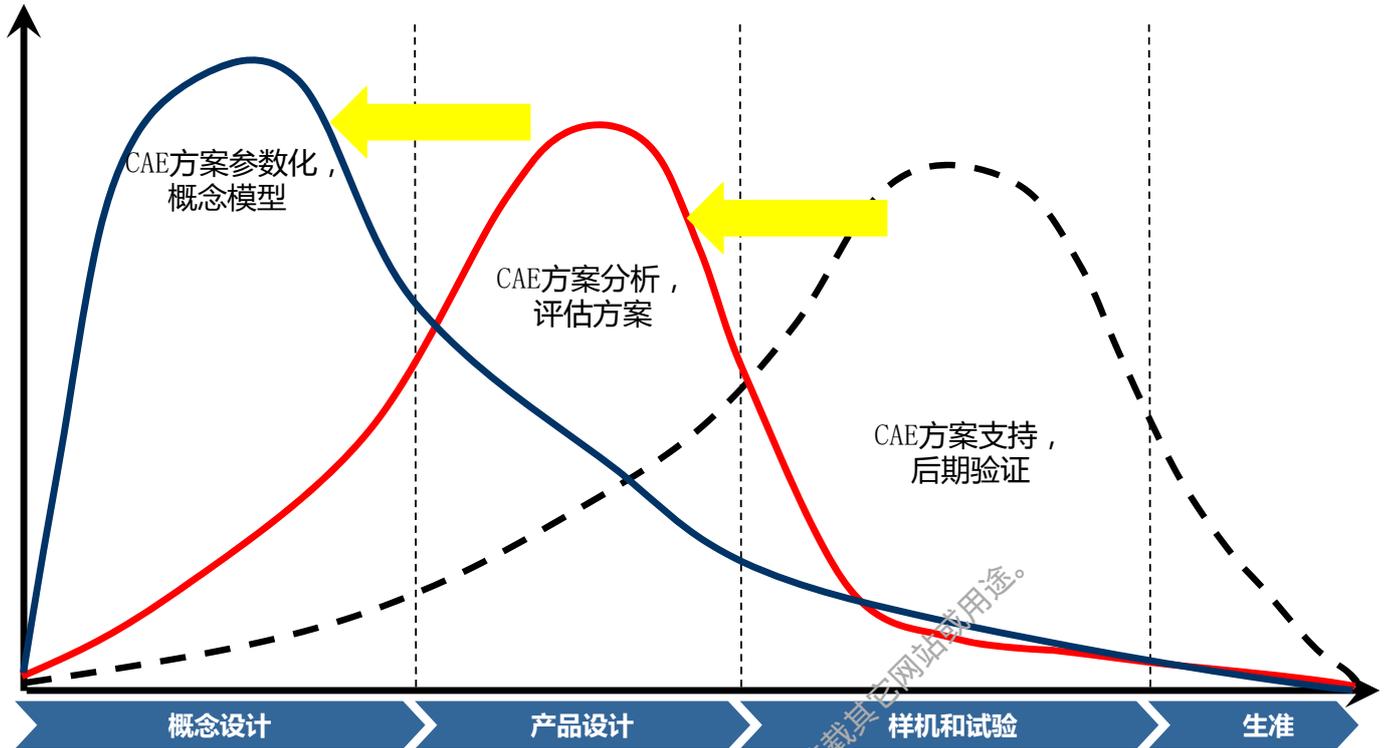


发动机产品开发流程



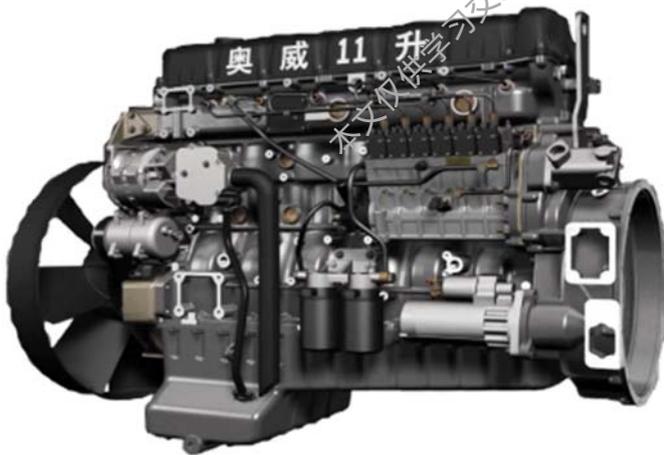
■ 发动机CAE分析贯穿于发动机产品开发的全过程，主要工作集中在概念设计和技术设计阶段

产品研发中的CAE分析



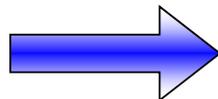
■ 发动机CAE分析贯穿于发动机产品开发的全过程，主要工作集中在概念设计和技术设计阶段

5



长寿命 Long Life
 大功率 Large Power
 低技术风险 Low Technique Risk
 低油耗 Low Fuel Consumption
 长保养周期 Long Maintenance Interval
 高技术水平 Level with State of the Arts
 大制动功率 Large Engine Brake
 低排放 Low Emission
 低成本 Low Cost
 高动力输出 Large PTO
 低噪音 Low NVH

- 发动机开发设计目标高
- 发动机开发性能指标高
- 发动机可靠性指标高
- 产品开发需要考虑的变量多
- 系统复杂
- 产品开发周期短



- CAE覆盖率增加
- CAE精度提高
- CAE前移
- CAE计算评价速度更快

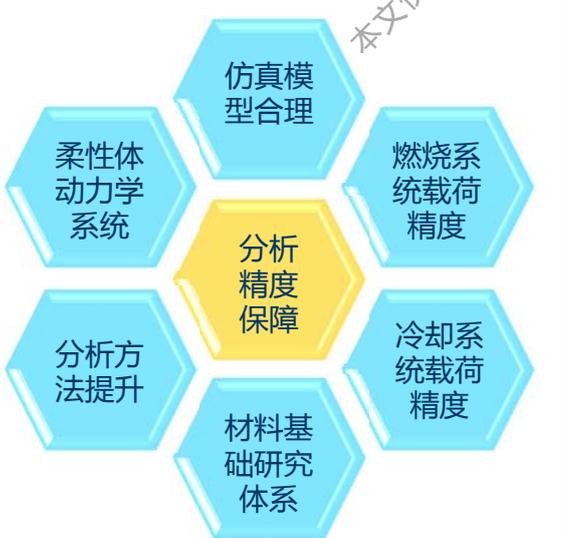
6

- 更准，准确到可以在相应的阶段进行工程决策
- 更快，快到适应产品开发流程的要求
- 更早，支撑产品策划
- 更全，CAE分析的覆盖面更广，综合性更强，全流程应用

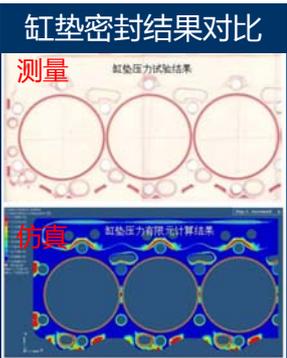
本文仅供学习交流，未经IDAJ-China许可，谢绝转载其它网站或用途。

发动机结构CAE计算分析-分析精度

保障发动机结构强度分析精度的六要素



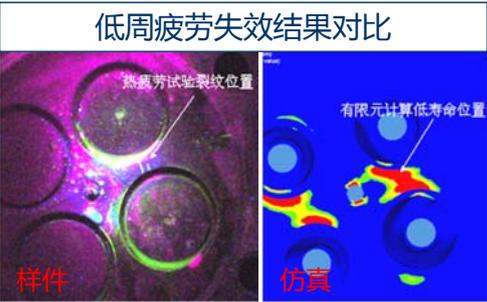
缸垫密封结果对比



测量 缸垫压力试验结果

仿真 缸垫压力有限元计算结果

低周疲劳失效结果对比

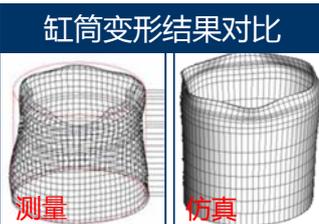


热疲劳试验裂纹位置

有限元计算低寿命位置

样件 仿真

缸筒变形结果对比



测量 仿真

高周疲劳失效结果对比



初始裂纹位置

低疲劳安全系数位置

样件 仿真

■ 构建控制发动机结构强度CAE分析精度的六要素，保障了仿真结果预测强度失效模式和风险的准确度，有效融入发动机产品开发体系中，发挥巨大作用。

通过试验验证提升CAE分析成熟度

CAE与功能试验耦合校验



CAE分析模型工程精度现状

类别	现状	国际水平
零部件温度场	80%	90%
缸筒变形	80%	93%
水流CFD分析	85%	93%
1D热力学	90%	95%
3D热力学	85%	90%
.....

■ 部分CAE虚拟分析技术代替发动机开发实体试验。

未经IDAJ-China许可，谢绝转载其它网站或用途。

发动机CAE计算分析评价数据库

CAE与功能试验耦合校验



CAE评价数据库

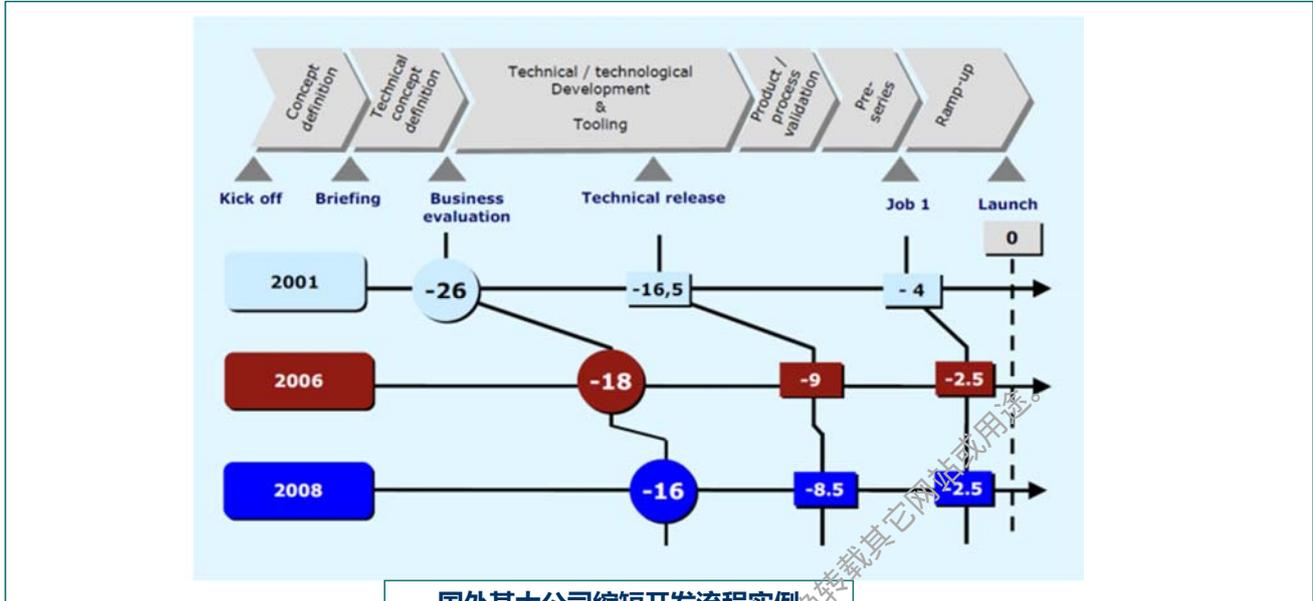
系统名称	机型	缸径×行程 (mm)	排量 (L)	额定功率 (Pa)	爆发压力 (bar)
12-CA6DL3-40E5[66R]型换代发动机CAE分析评价表-燃油机燃系统CFD分析与评价	CA6DL3-40E5	114×145	8.9	400	200
11-CA6DL3-40E5[66R]型换代发动机CAE分析评价表-发动机齿轮系强度分析与评价	CA6DL3-40E5	114×145	8.9	400	200
10-CA6DL3-40E5[66R]型换代发动机CAE分析评价表-发动机噪声系统分析与评价	CA6DL3-40E5	114×145	8.9	400	200
09-CA6DL3-40E5[66R]型换代发动机CAE分析评价表-冷却系统分析	CA6DL3-40E5	114×145	8.9	400	200
08-CA6DL3-40E5[66R]型换代发动机CAE分析评价表-润滑系统分析	CA6DL3-40E5	114×145	8.9	400	200
07-CA6DL3-40E5[66R]型换代发动机CAE分析评价表-供气系统分析	CA6DL3-40E5	114×145	8.9	400	200
06-CA6DL3-40E5[66R]型换代发动机CAE分析评价表-配气系统分析	CA6DL3-40E5	114×145	8.9	400	200
05-CA6DL3-40E5[66R]型换代发动机CAE分析评价表-热力学计算	CA6DL3-40E5	114×145	8.9	400	200
02-CA6DL3-40E5[66R]型换代发动机CAE分析评价表-气流流道能力分析	CA6DL3-40E5	114×145	8.9	400	200
01-CA6DL3-40E5[66R]型换代发动机CAE分析评价表-传动系统分析	CA6DL3-40E5	114×145	8.9	400	200

评价点	评价内容	评价标准	结果输出
气阻流率	进气CFD分析	40L/min 流速 1	31.0 m/s
气阻流率	进气CFD分析	40L/min 流速 1	32.0 m/s
气阻流率	进气CFD分析	40L/min 流速 2	31.5 m/s
气阻流率	进气CFD分析	40L/min 流速 3	31.5 m/s

■ 建立了完整的发动机CAE计算分析评价数据库。

强化开发流程成果实例

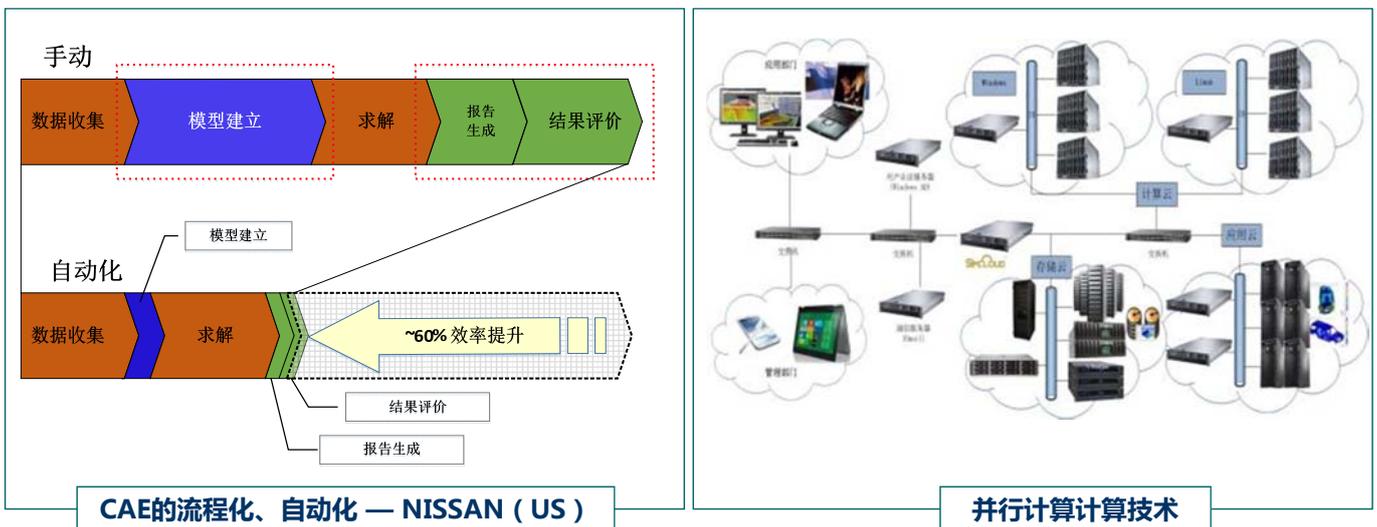
- 性能主导的产品开发
- 技术平台、组件的标准化和CAE技术的广泛应用是缩短产品开发周期的最有效途径



国外某大公司缩短开发流程实例

CAE的高效化

- CAE的流程化、自动化极大提升了CAE的分析效率
- 求解器自身效率的提高，并行计算的开发是CAE高效化的另一途径
- CAE工程师更为关注工程问题本身的分析



CAE的流程化、自动化 — NISSAN (US)

并行计算计算技术

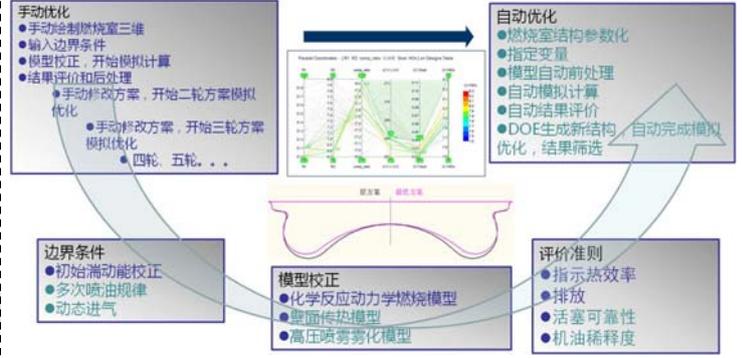
发动机产品开发中的CAE分析自动化

发动机燃烧系统分析平台

手动优化



自动优化



发动机CAE流程化、自动化极大提升了CAE的分析效率。

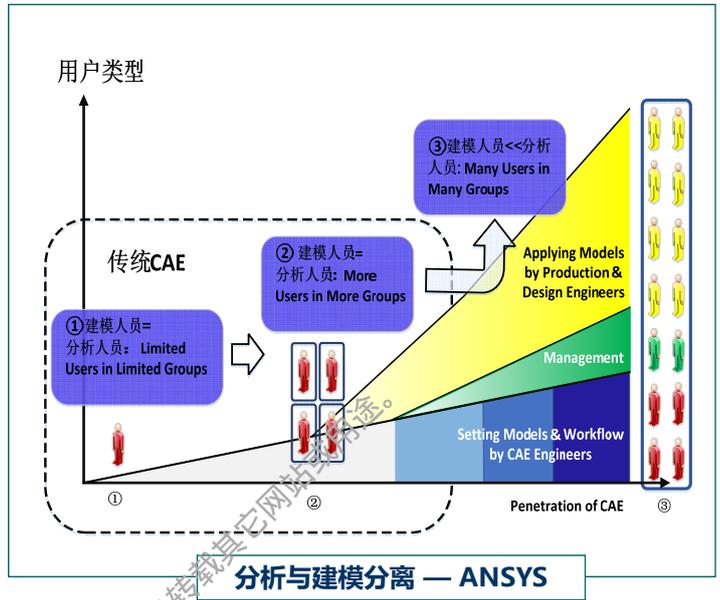
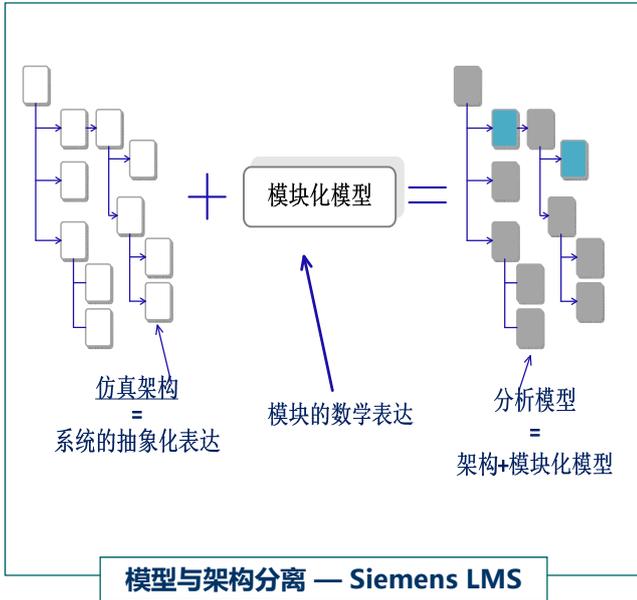
柴油机燃烧概念CFD分析

<h3>柴油机燃烧时分分区控制</h3>	<h3>全新双区燃烧室</h3>	<h3>混合气时间、空间分布</h3>
<h3>避开污染物生成区</h3>	<h3>充分利用空间和氧气改善燃烧</h3>	<h3>能量分布</h3>

基于柴油机燃烧模拟分析，实现分时分区控制燃油分配，建立了FAW分布式燃烧平台。

CAE的大众化

- **两分离**：模型与架构分离
- 降低CAE分析的门槛，将更多的CAE分析工作延伸至工程师的桌面

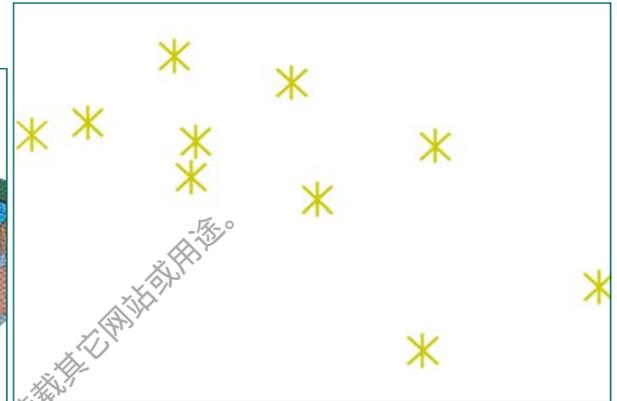
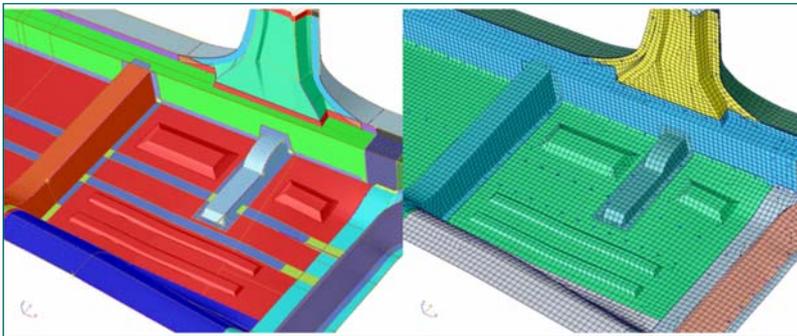
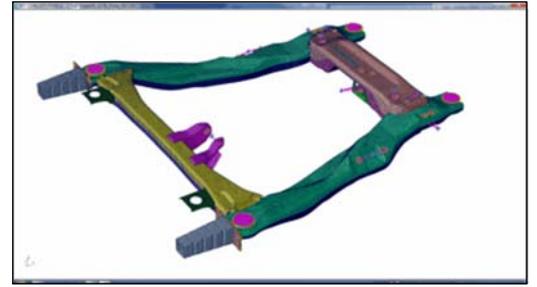


面向设计师的气道自动化分析平台



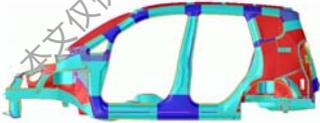
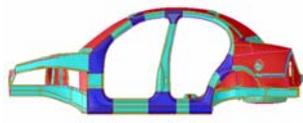
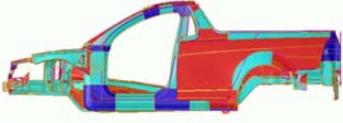
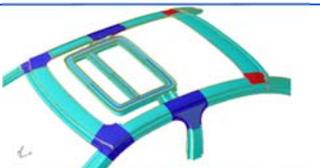
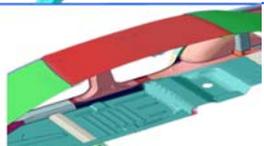
参数化CAE模型

- **模型全参数化**驱动，能对客户需求做出快速反应
- **设计早期**阶段快速确立最佳设计方案，节省研发时间和成本
- 减少重复工作量，减少方案**修改次数**，节约产品设计的更改成本
- 有效并快速实现企业产品**战略平台**



本文仅供学习交流，未经IDAJ-China许可，谢绝转载其它网站或用途。

参数化模型实现多种变形

大的概念			
材料	aluminum	steel	composites
拓扑变化			
形状变化			
壁厚			

强化开发流程过程

- CAE分析覆盖面逐年提高，发放数据前80%的开发目标可以通过虚拟验证和评价
- 物理样机和测试循环次数大幅减少。

	TOTAL IN TECHNICAL RELEASE	VIRTUAL IN TECHNICAL RELEASE	PHYSIC IN TECHNICAL RELEASE	% COVERED BY THE VIRTUAL TECHNICAL RELEASE
Safety	86	44	42	51%
Operational strenght	44	44	0	100%
NVH	36	21	15	58%
Aerodynamics	1	1	0	100%
HVAC	11	9	2	82%
Energy management	71	26	45	37%
Ergonomy	98	98	0	100%
Packaging vehicle	39	39	0	100%
packaging platform	184	184	0	100%
Weight	2	2	0	100%
Complete vehicle	3	3	1	100%
Materials, environment	6	6	0	100%
Chassis & Vehic. Dynam.	16	10	6	63%
Total	592	487	105	82%

虚拟验证在图纸发放中的覆盖率



虚拟验证在开发目标中的覆盖率的生长

	Equivalent prototypes (*)	Testing loops
2001	130	5
2007/8	50	2
2010	40-45	1,7-1,8

Process verification vehicles and pre-series are not counted

物理验证和等效原型的减少

发动机结构CAE计算分析

发动机主体结构可靠耐久仿真技术平台

服务对象

支撑领域

- | | | | | |
|-------|---------|---------|------------|----------------|
| ■ 气缸盖 | ■ 缸盖罩盖 | ■ 气门座圈组 | ■ 高温失效分析 | ■ 缸筒 '精圆' 设计分析 |
| ■ 气缸体 | ■ 缸盖下框架 | ■ 火花塞组件 | ■ 高周疲劳失效分析 | ■ 轴瓦 '失圆' 控制分析 |
| ■ 气缸套 | ■ 主轴承盖 | ■ 喷油器组件 | ■ 低周疲劳寿命预测 | ■ 整机变形趋势预测 |
| ■ 气缸垫 | ■ 螺栓组 | ■ 主轴瓦组件 | ■ 缸垫密封性能分析 | ■ 零件贴合状态分析 |

发动机运动件及附件可靠耐久仿真技术平台

服务对象

支撑领域

- | | | | | |
|--------|--------|-----------|------------|-----------------|
| ■ 连杆组件 | ■ 排气歧管 | ■ 活塞组 | ■ 高温失效分析 | ■ 轴承孔 '精圆' 设计分析 |
| ■ 曲轴 | ■ 油底壳 | ■ 功能支架 | ■ 高周疲劳失效分析 | ■ 屈曲失效分析 |
| ■ 凸轮轴组 | ■ 前罩盖 | ■ 其它..... | ■ 低周疲劳寿命预测 | ■ 共振风险预测及规避分析 |

(介入)

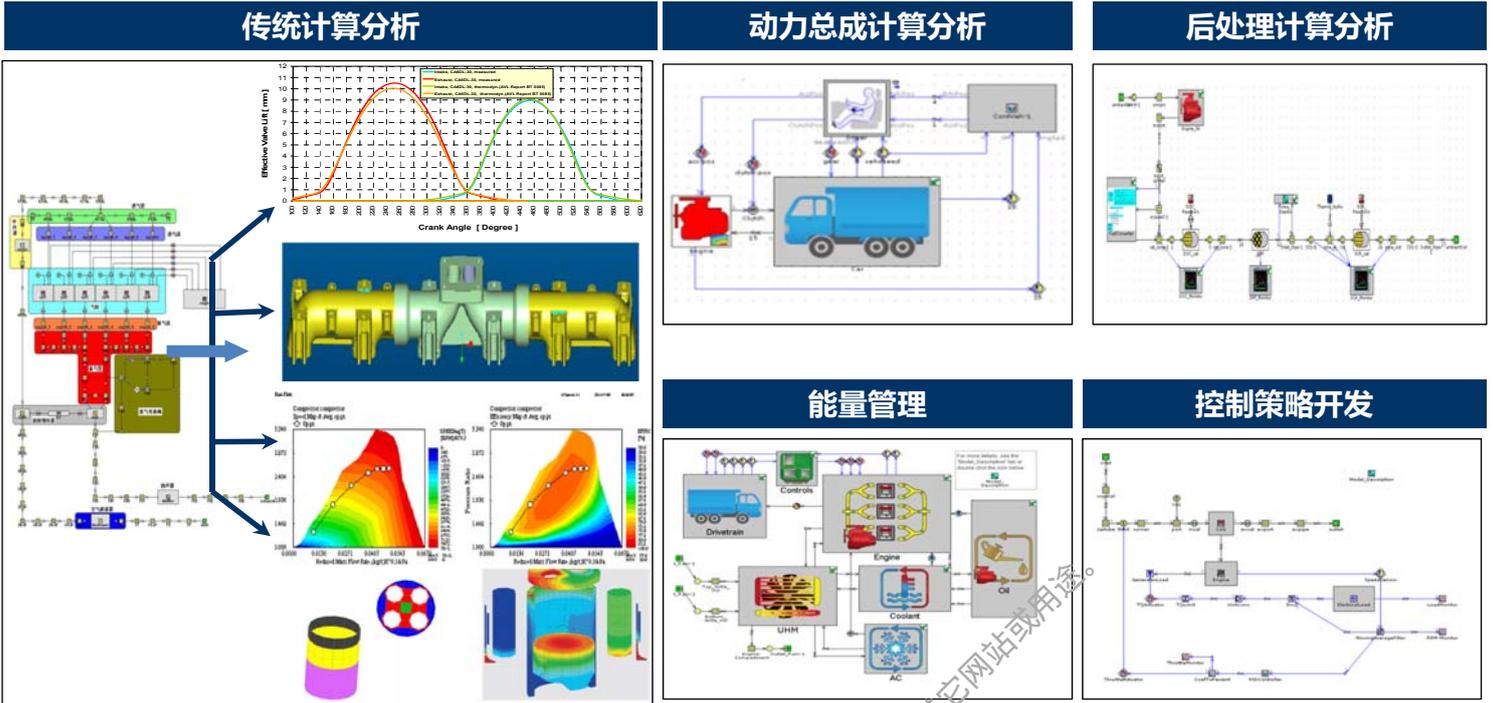
(全面开展和持续改善)

(跟踪)

产品策划 → 产品定义 → 设计 验证 → 生产准备 → 试生产 → 市场投放

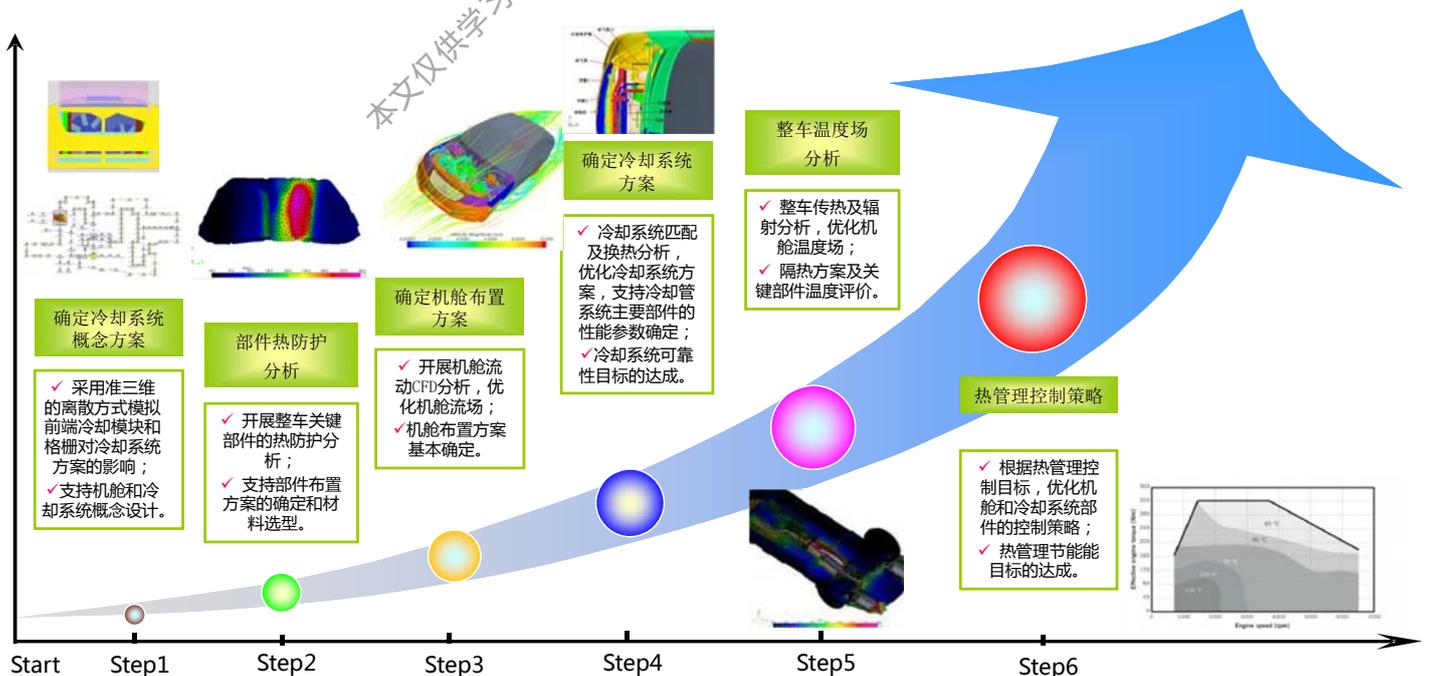
■ 运用两大技术平台，发动机结构强度设计覆盖78项承载零部件，从产品开发策划阶段介入，在技术设计和详细设计阶段全面展开，以消除发动机典型结构强度失效模式为目标，实现发动机主要承载结构的可靠耐久正向设计。

发动机1D热力学分析



■ 1D热力学CAE计算分析实现了进排气系统优化设计、增压系统优化设计，边界条件输出，性能预测等，扩展进行动力总成、后处理、能量管理、控制策略、虚拟标定等。

发动机热管里CAE分析

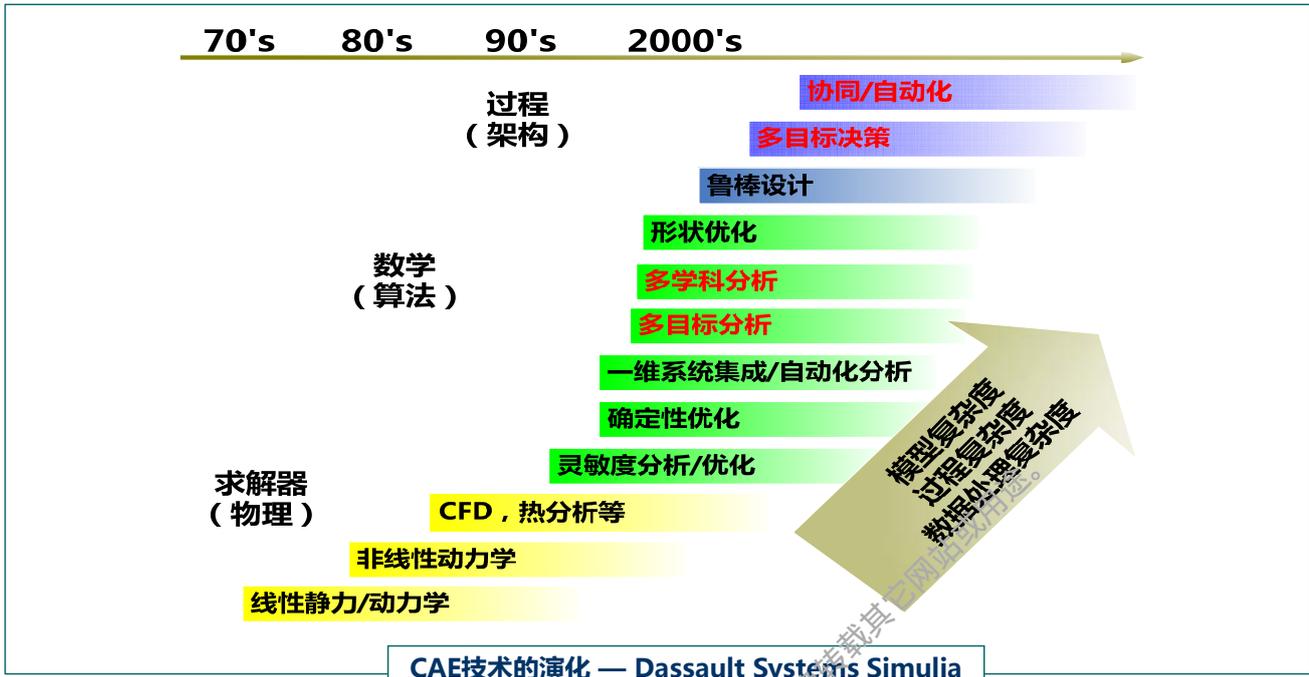


热管理分析流程

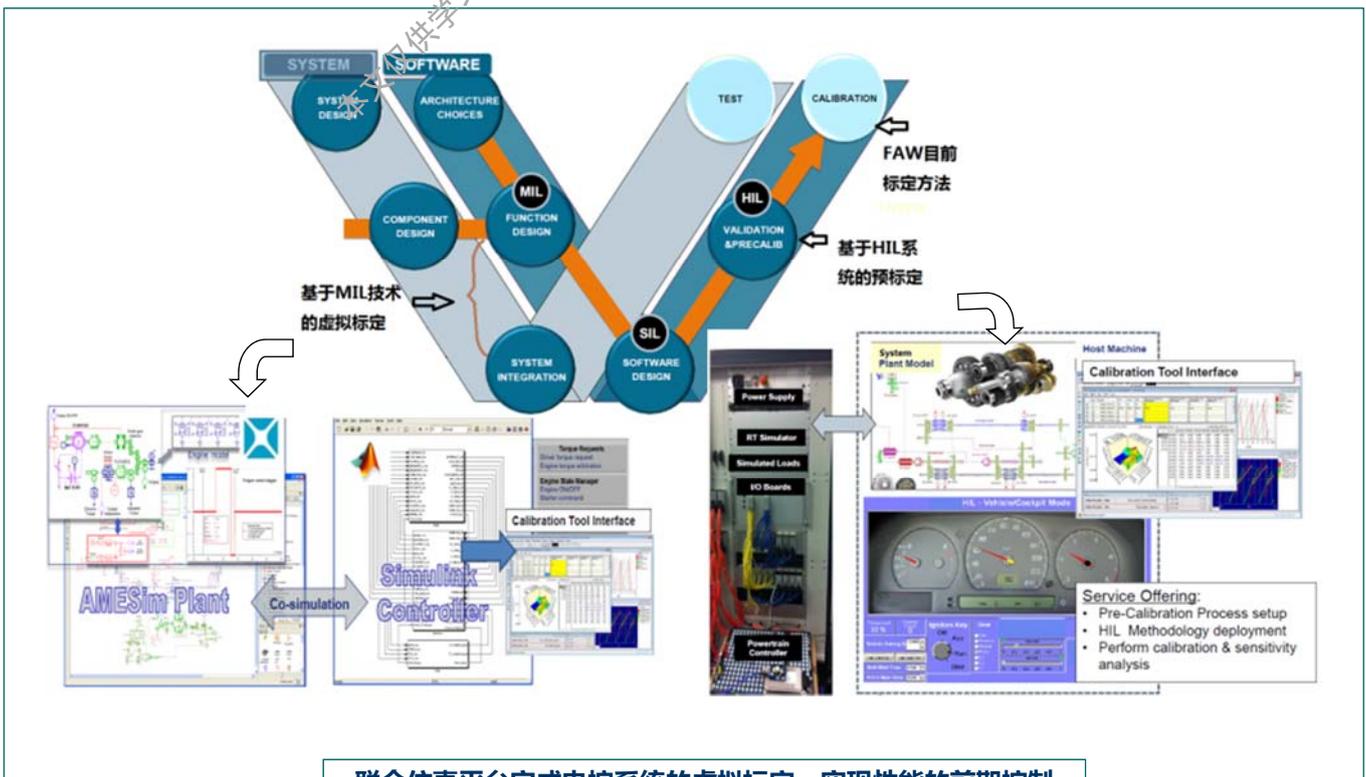
■ 整车开发过程中应用不同热管理分析技术保证热管理目标的达成。

CAE的集成化

■ CAE的多学科集成：由单一学科、单一目标向多学科、多目标集成分析演化



基于模型的调校技术-基于模型的标定技术



基于模型的调校技术-CAE辅助调校

- CAE辅助调校可以减小调校周期，降低调校成本，提高调校效率。

底盘（平台）调校

结构参数更新

性能参数更新

↓

动力学模型更新

↓

调校件范围确定

↓

调校件匹配分析

↓

调校方案确认

35	4 Rubber bushing front top mount	-3 ShA
36	4 Rubber bushing front top mount	-3 ShA
37	4 Rubber bushing front top mount	-6 ShA
38	4 Rubber bushing rear top mount	-3 ShA
39	4 Rubber bushing rear top mount	-3 ShA
40	4 Rubber bushing rear top mount	-6 ShA
41	4 Rubber bushing Frt lower control arm inner bushing	-3 ShA
42	4 Rubber bushing Frt lower control arm inner bushing	-3 ShA
43	4 Rubber bushing Frt lower control arm damper bushing	-3 ShA
44	4 Rubber bushing Frt lower control arm damper bushing	-3 ShA

CAE辅助调校前提：
动力学模型精度

CAE辅助调校目的：
1、给出调校方向
2、防止任意调校

CAE模型与物理样机测试之间的集成

- CAE与物理样机测试融合：从传统的虚拟模型发展到半实物模型

Office Simulation

Real-time Simulation environment (Lab/Rig)

Vehicle Simulation Software

Vehicle Simulation Software

Real-time HW

Real-time HW

Rig Control

Real-time HW

Vehicle Interface

Real-time HW

MIL

SIL

ECUHIL

NetworkHIL

SimulationHIL

VehicleHIL

CAE与测试的集成 — Siemens LMS

整车性能仿真平台



人-车-环境

驾驶员

车



交通



天气



道路

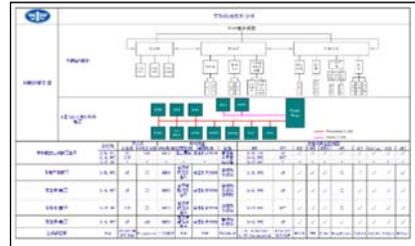
环境

本文仅供学习交流，未经IDAJ-China许可，谢绝转载某云网站或用途。

产品的策划



名称	规格/指标	车辆产品特征结构
1	1.1 舒适性	
2	2.1 防止和行驶阻碍舒适性	
3	3.1 动力总成噪音	
3	3.1.2 车身噪音	
3	3.1.3 噪音	
3	3.1.4 乘坐舒适性	
2	2.2 防止和行驶中的振动舒适性	
2	2.3 操作舒适性	
2	2.4 空间舒适性	
3	3.1.4.1 空间感	
3	3.1.4.2 脚踏上下车的方便性	
3	3.1.4.3 后座上下车的方便性	
3	3.1.4.4 后座空间的扩展性	
2	2.5 车内空气质量 (空调舒适性)	
3	3.1.5.1 车内通风	
3	3.1.5.2 车内湿度	
3	3.1.5.3 车内噪音	
2	2.6 座椅舒适性	
3	3.1.6.1 座椅倾斜舒适性	
3	3.1.6.2 座椅倾斜舒适性	
1	1.2 行驶平顺性	
1	1.3 操纵/可驾性	
2	2.5.1 操控范围	
2	2.5.2 操控范围	
3	3.2.1 车身稳定性 (车外控制/元件的稳定性)	
3	3.2.2 车外控制	
2	2.5.3 声音降噪	
3	3.3.1 功能引起的噪音	
3	3.3.2 车辆静止状态下由于振动/操作/零件引起的车内噪音	



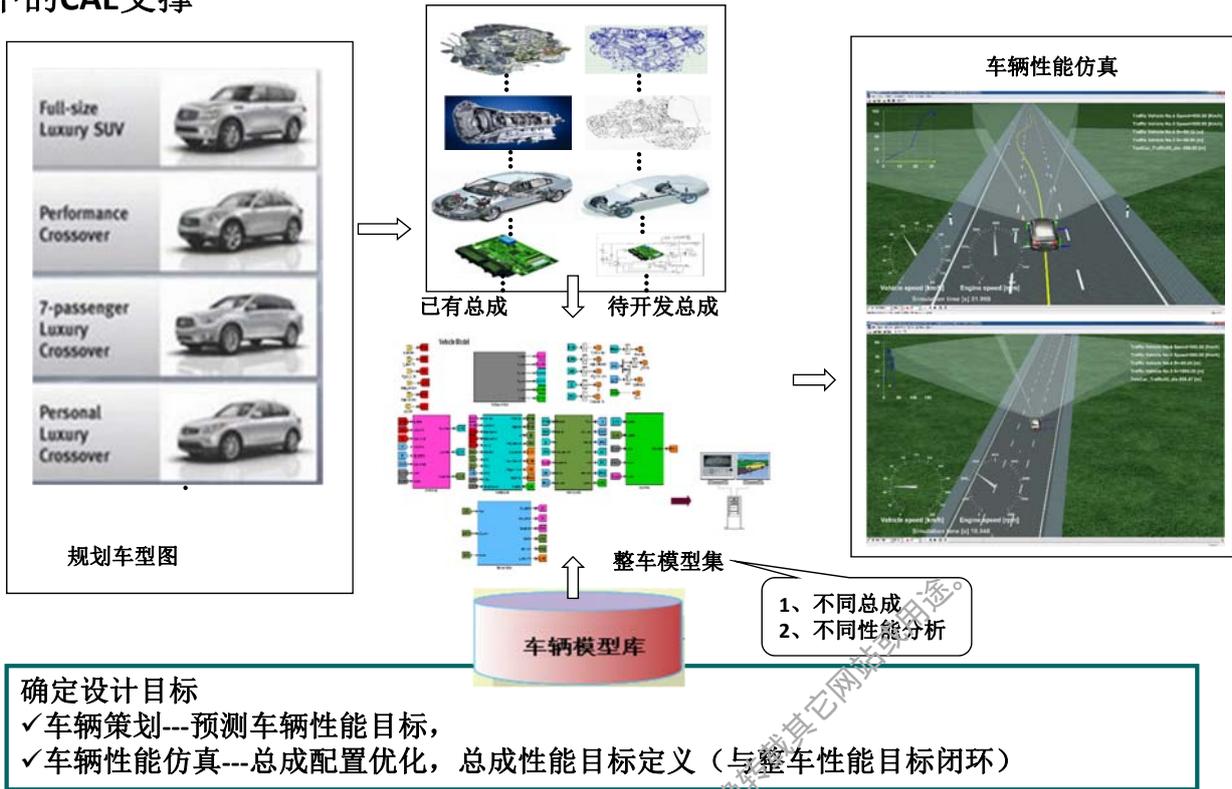
整车动力性经济性性能分析项目				
分析项目	单位	特征指标	参照试验标准	
动力性	各档位极限车速	km/h	最大车速	GB/T12544-1990
			最高档最大车速	GB/T12544-1990
			最低档最大车速	GB/T12544-1990
			最低档最小车速	GB/T12544-1990
			起步连续换挡加速	s
动力性	超车加速	s	80-140km/h 加速时间 [最高档]	GB/T12543-1990
			80-140km/h 加速时间 [可换挡]	GB/T12543-1990
			最低档最大爬坡度	GB/T12543-1990
			侧拉最大爬坡度	GB/T12543-1990
经济性	各档位等速行驶燃料消耗量	L/100km	90km/h 燃料消耗量	GB/T12545.1-2008
			120km/h 燃料消耗量	GB/T12545.1-2008
经济性	工况行驶燃料消耗量	L/100km	NEDC 燃料消耗量	GB/T12545.1-2008
			滑行距离	m

确定设计目标
 ✓不同配置和结构→模型
 ✓性能目标→预测验证工况及目标

车辆开发目标定义

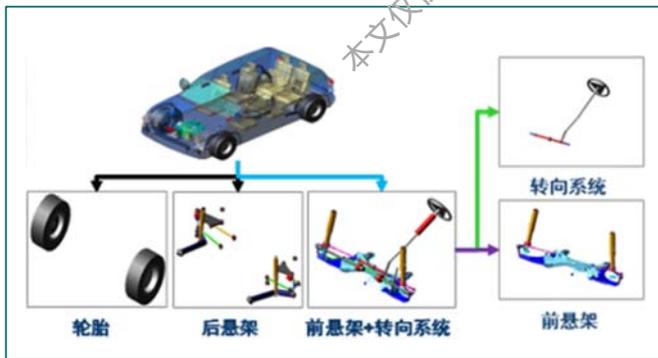
整车性能目标预估及检验工况

策划中的CAE支撑



基于参数的模型：实现整车级指标到总成级指标的分解

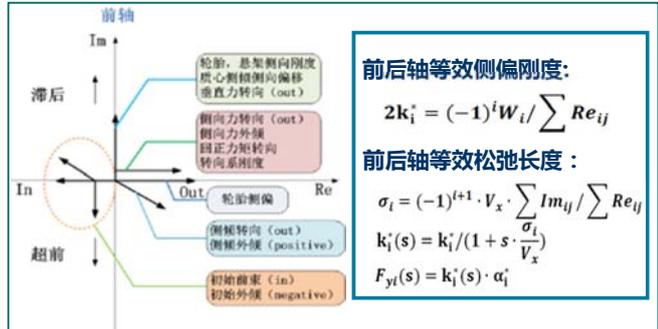
■ 要素1：制定悬架指标分解准则



■ 要素2：基于变权层次分析法的均衡量化分解



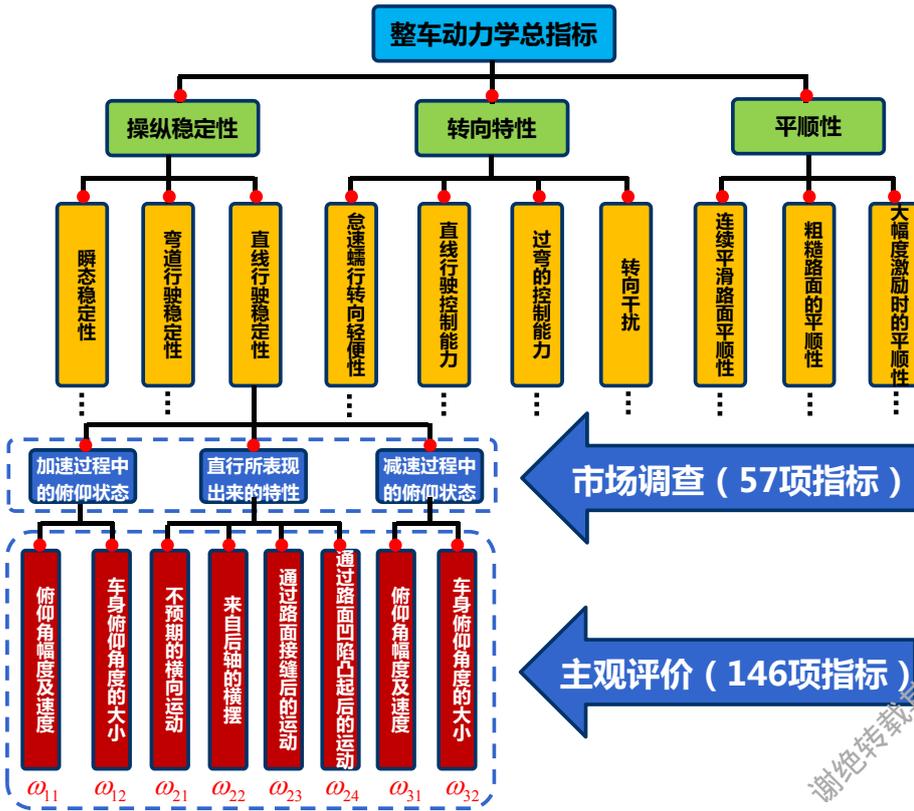
■ 要素3：瞬态矢量分解



■ 要素4：悬架转向系统刚度与K&C指标确定



基于指标的模型：建立从市场调查到专业指标的关联关系



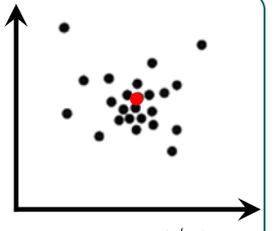
层次分析方法

$$P_k = \begin{bmatrix} 1 & a_{12}^k & \dots & a_{1n}^k \\ a_{21}^k & 1 & \dots & a_{2n}^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1}^k & a_{n2}^k & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

- ◆ 获得比较矩阵
- ◆ 计算最大特征根
- ◆ 计算一致性比例
- ◆ 计算权值

$$CR = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \cdot \frac{1}{RI} < 0.1 \rightarrow \omega_i^k = \frac{1}{\sqrt{\prod_{j=1}^n a_{ij}^k}}$$

引入中心距离方法计算评价者自身权重，降低评价结果离散性对最终结果的影响。



$$d_i = |S_i - \bar{S}| \rightarrow w_i = \frac{1/d_i}{\sum_{i=1}^m 1/d_i}$$

SimWorks - 仿真数据管理平台



任务名称	任务编号	项目名称	任务描述	任务状态	FAW任务单号	运行方法	完成方式	任务达标状态	任务来源
A3111-整车性能仿真-起步	A3111-10004100201-1	CAE/CAE/整车性能仿真	整车起步	待运行	心	0	1	●	CAE/CAE/整车性能仿真
A3111-整车性能仿真-起步	A3111-10004100210-2	CAE/CAE/整车性能仿真	整车起步	待运行	123456	0	2	●	CAE/CAE/整车性能仿真
A3111-整车性能仿真-起步	A3111-10004100201-3	CAE/CAE/整车性能仿真	整车起步	待运行	心	0	3	●	CAE/CAE/整车性能仿真
A3111-整车性能仿真-起步	A3111-10004100201-4	CAE/CAE/整车性能仿真	整车起步	待运行	心	0	4	●	CAE/CAE/整车性能仿真
A3111-整车性能仿真-起步	A3111-10040450001-1	CAE/CAE/整车性能仿真	整车起步	待运行	心	0	4	●	CAE/CAE/整车性能仿真
A3111-整车性能仿真-起步	A3111-10050000001-1	CAE/CAE/整车性能仿真	整车起步	待运行	心	0	0	●	CAE/CAE/整车性能仿真
A3111-整车性能仿真-起步	A3111-10050000001-2	CAE/CAE/整车性能仿真	整车起步	待运行	心	0	1	●	CAE/CAE/整车性能仿真
A3111-整车性能仿真-起步	A3111-10050000002-1	CAE/CAE/整车性能仿真	整车起步	待运行	心	0	1	●	CAE/CAE/整车性能仿真
A3111-整车性能仿真-起步	A3111-10050000002-2	CAE/CAE/整车性能仿真	整车起步	待运行	心	0	1	●	CAE/CAE/整车性能仿真
A3111-整车性能仿真-起步	A3111-10050000003-1	CAE/CAE/整车性能仿真	整车起步	待运行	心	0	0	●	CAE/CAE/整车性能仿真
A3111-整车性能仿真-起步	A3111-10050000003-2	CAE/CAE/整车性能仿真	整车起步	待运行	心	0	1	●	CAE/CAE/整车性能仿真
A3111-整车性能仿真-起步	A3111-10000010001-1	CAE/CAE/整车性能仿真	整车起步	待运行	心	0	0	●	CAE/CAE/整车性能仿真
A3111-整车性能仿真-起步	A3111-10000010001-2	CAE/CAE/整车性能仿真	整车起步	待运行	心	0	0	●	CAE/CAE/整车性能仿真
A3111-整车性能仿真-起步	A3111-10000010001-3	CAE/CAE/整车性能仿真	整车起步	待运行	心	0	0	●	CAE/CAE/整车性能仿真

- 解决CAE分析数据统一管理问题
- 解决CAE分析过程统一规范问题
- 解决CAE活动项目沟通、工作统计、对标分析问题
- 建立CAE自动化基础，在几个专业实现自动化

- 能做什么?
- 怎么做?
- 该做什么?
- 做了什么?
- 做的如何?

■ 利用SimWorks平台实现仿真活动和数据的管理。

CAE的有效应用：

■集成化

有效集成CAE人力资源、分析工具、数据及工作流程。

面向整车性能的多总成、多系统综合分析

多学科耦合的综合CAE分析

CAE与CAD的无缝集成，建立与CAD关联的CAE。

CAE与测试的集成，通过CAE分析，优化试验工况，指导试验参数的选择。

■高效化

通过CAE的流程化、自动化提升CAE效率。

求解器自身效率的提高，并行计算技术的应用是CAE高效化的另一途径。

■前移化

CAE在产品开发过程中的前移，用于支撑产品策划过程，由CAE验证模式转变为CAE驱动模式，综合分析能力和数据积累是关键

■大众化

模型与架构分离，分析与建模分离。

降低CAE分析的门槛，将更多的CAE分析工作延伸至工程师的桌面。

CAE 中国一汽
关爱自然 服务社会
CARE THE NATURE AND SERVE THE SOCIETY
——让汽车更清洁 更节能
Contribute cleaner and more energy saving vehicles

