

第 1 章

绪 论

CAE(Computer Aided Engineering)指基于计算机并通过专业软件对工程问题和产品进行受力分析,以获得在特定使用工况下的模拟结果。CAE方法的基本思想是将结构离散化,用有限个易分析的单元来表示复杂的对象,单元之间通过有限个节点连接,然后根据变形协调条件进行综合求解,最后得到期望的结果。基于有限元思想的CAE方法,其基本过程是将连续体的求解区域分解为有限个子区域,即将一个连续体简化为由有限个单元组合的等效组合体;通过将连续体离散化,把求解连续体的场变量(应力、位移、压力和温度等)问题简化为求解有限的单元节点上的场变量;此时得到的基本方程是一个代数方程组,而不是原来描述真实连续体场变量的微分方程组;求解后得到近似的数值解,其近似程度取决于所采用的单元类型、数量及对单元的插值函数。

CAE方法理论上可以模拟实际中的各种工况,包括强度、刚度、屈曲稳定性、动力响应、热传导、接触、弹塑性及大变形等,但由于受各种条件的限制,其往往仅能计算特定或指定工况的受力情况,是一种近似数值分析方法,其分析结果和精度与材料、工艺、边界、载荷、连接等各种因素相关。

CAE方法的重要性主要表现在以下几个方面:

(1) 在产品前期或设计期间可以评估结构或产品设计的合理性,提前发现潜在的问题和风险点,进而进行优化设计,满足产品性能要求。

(2) 可以模拟大部分实际使用的工况或场景,同时可减少试验次数和时间,降低研发费用,缩短开发周期。

(3) 在样品或量产阶段,可根据出现的问题和现象快速查找原因,并根据失效模式进行优化分析,寻找出最优方案,进一步提升产品性能。

总之,CAE方法在很大程度上替代了传统设计中资源消耗极大的物理样机验证设计过程,通过不断地进行优化迭代和分析能预测产品在整个生命周期内的可靠性和潜在的失效模式,能极大地缩短产品开发周期,同时能提高产品的市场竞争力。

1.1 整车性能开发背景

整车性能开发涉及的面非常广,在所有动态性能领域(NVH、碰撞安全、操稳、经济性等)

中,CAE 占据着重要地位,包括车身、发动机、电机、动力电池等动力系统、底盘及悬架、内饰系统、电子电器等。

1.1.1 整车性能开发流程

整车性能开发是一个目标制定-分解-验证的综合性全过程,该流程同样适用于其他领域,如工程机械、船舶、航空等,其主要内容如下。

1. Benchmark 分析

- (1) 数据库的整理和挖掘。
- (2) 竞品车的对比测试与分析(主观与客观)。

2. 目标设定

- (1) 确定市场及竞争目标。
- (2) 考虑成本、质量与其他系统之间的平衡。
- (3) 确定目标。

3. 设计认证(包括仿真分析)

(1) CAE 是性能开发中重要的一环,特别是数字样机阶段,能预测设计缺陷及缩短开发周期等。

(2) 在实车调校阶段,能协助支持实车问题解决并提供相应方案。

(3) 以整车 NVH 性能为例,整车 CAE 仿真的主要阶段如图 1-1 所示;整车仿真的主要内容如图 1-2 所示(包括但不限于)。

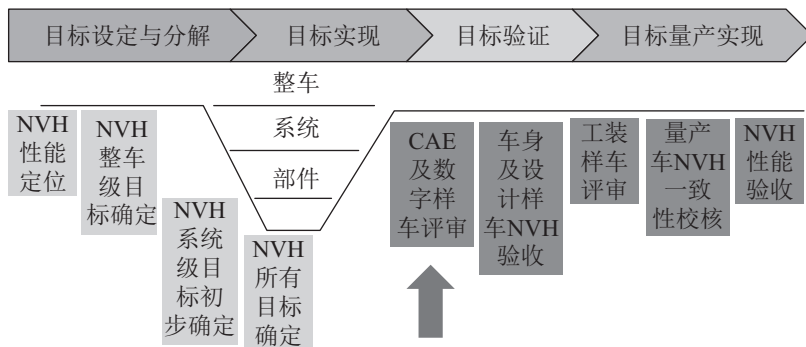


图 1-1 整车 CAE 仿真的主要阶段

1.1.2 CAE 仿真分析

CAE 仿真分析主要包括以下几个方面的内容：

- (1) 竞品车 CAE 分析。
- (2) 目标定义(根据竞品车和相近车型定义)。
- (3) 开发车型 CAE 分析及优化(包括开发的前期各阶段)。
- (4) 开发车型的试验相关性及模型标定。

(5) 实车问题跟踪及解决方案的提出。

1.1.3 汽车仿真内容

1. 汽车强度耐久仿真内容(不限于)

强度耐久分析包括的内容涵盖零部件级、TB级到整车级,其中零部件级占据大部分工作;分析内容主要包括刚度、强度、疲劳等;刚度主要包括零部件及各子系统关键区域、关键连接点的刚度;强度主要包括车身、门盖件、底盘零部件及关键安装支架等的静强度和动强度等;疲劳主要包括零部件级、系统级(如TB级、底盘系统等)及整车的疲劳分析和优化。

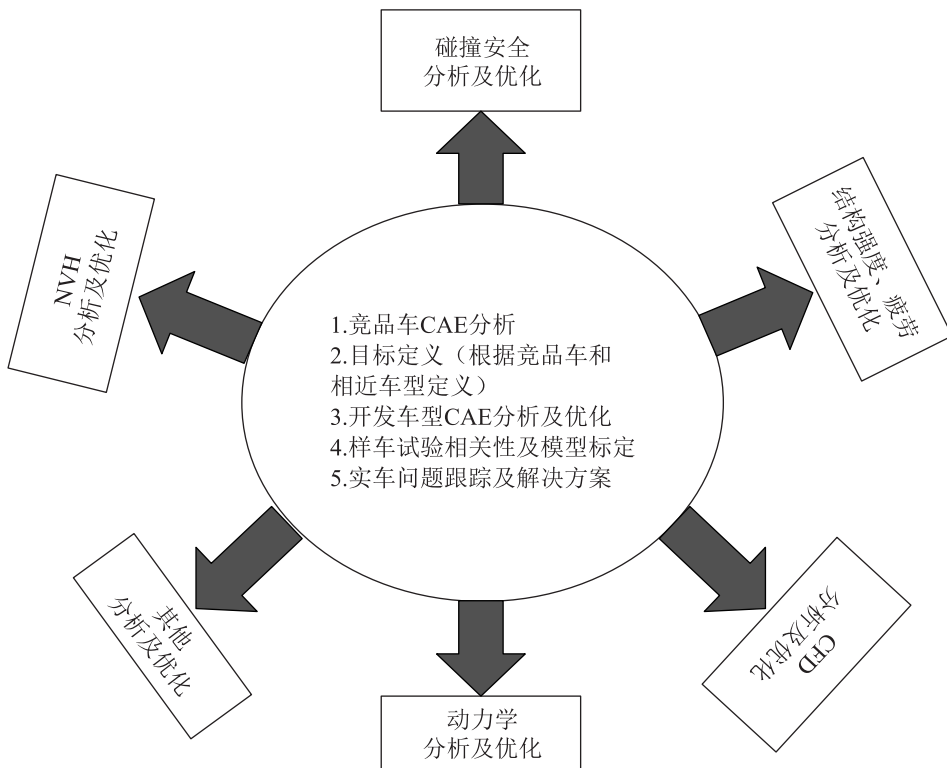


图 1-2 整车仿真的主要内容

2. 汽车 NVH 仿真内容(不限于)

1) 结构 NVH 分析

(1) 车身骨架系统: 车身模态分析、车身弯曲刚度分析、车身扭转刚度分析、车身接附点动刚度分析(包括底盘安装点及附件安装点)、车身钣金灵敏度分析、车身阻尼片布置分析、车身局部安装点静刚度分析(如座椅及安全卷收器)等。

(2) 底盘系统: 转向系统模态分析、动力传动系统模态分析、传动系统扭振分析、悬置系统模态分析、关键支架及系统模态分析等。

(3) Trimmed Body 级: TB 模态分析、GPA 分析、PACA 分析、FRF 分析、声腔模态分析、

NTF 分析、VTF 分析、IPI 分析(一般在车身级进行,可在早期进行优化分析)。

(4) 整车级:整车模态分析、整车 TPA 分析、整车路噪分析(如怠速、加速分析)、动力总成质心灵敏度分析、整车 Spindle 灵敏度分析、传动轴不平衡分析、轮胎不平衡分析、整车 Brake Shudder 分析、整车 Impact 分析、整车冷却风扇不平衡分析等。

2) 声学 NVH 分析

(1) 零部件及关键子系统隔声量分析(如防火墙)。

(2) 整车风噪、声学包、内外声场等分析。

(3) 异响分析、关门瞬时冲击分析等。

3. 汽车碰撞安全仿真内容(不限于)

汽车碰撞安全分析包括整车级、系统级及零部件级;整车级如国标及国际标准中要求的前后碰撞等;系统级,如顶盖抗压、行李箱冲击、汽车安全带安装固定点、ISOFIX 固定点系统等;零部件级,如侧及后防护栏、乘用车内部凸出物等。

4. 汽车 CFD 仿真内容(不限于)

汽车 CFD 分析包括整车级及零部件级,如整车风阻、除霜除雾、吹面吹脚等;零部件级,如电池包热仿真、电机热仿真等。

5. 汽车动力学仿真内容(不限于)

汽车动力学包括整车级及系统级,如悬架 K&C、操纵稳定性、平顺性等。

6. 汽车其他仿真内容

除了以上五大模块的分析及优化,还包括整车涉水、热匹配、密封等分析及优化。

1.2 超单元简介

1.2.1 超单元产生的背景

汽车 CAE 仿真中的内容和类型众多,对于整车级的仿真,如何快速高效地提升仿真效率,超单元起着重要的作用。对于整车级的 NVH 仿真,通常一个路噪仿真需要十几小时的时间,若优化,则还需要耗费大量的时间,而采用超单元后,其优化时间将大幅缩短,如路噪优化时间将由原先的近 20h 缩短至 4h 以内。

1.2.2 超单元的意义

1. 大幅度降低计算时间、提升分析效率

对于各种模型,特别是超大模型,如整车、工程机械等,采用超单元技术后,整体模型的分析及优化时间将大幅度降低。

2. 充分利用有限的计算资源和硬件

由于超单元可以大幅度降低整体模型的自由度,所以对计算资源及硬件的要求相对较低,进而可以分析各种复杂模型和超大模型。

3. 有效避免模型错误带来的额外风险

若整体模型中出现错误,则需要对整个模型进行处理及重新计算,而采用超单元后,不管是残余模型还是超单元模型出现问题,修改时间和计算时间也将大幅降低。

4. 可以实现模型的模块化处理

根据产品或平台的开发需要,可以对相同的系统或零部件采用超单元替代,从而可以实现不同平台或车型的模型模块化,极大地缩短车型的开发周期,能更好地实现结果的统一化和标准化处理。

5. 可以实现模型的保密

由于超单元可根据需要不显示具体的模型信息,仅采用矩阵格式进行显示,所以可以实现模型或关键部分的保密,以及不同区域的模型安全传递和使用。

1.2.3 超单元的定义

在一个有限元完整模型中,根据分析需要,特别是在优化过程中不变的部分,我们将完整模型切割成超单元模型和残余模型,即除了残余模型(可能需要优化或更改)之外全部为超单元模型,并通过采用特定的方法对超单元模型的特性通过模态、矩阵或传递函数进行表示及提取,这一过程称为超单元的生成(或缩聚),然后对残余模型与超单元的缩聚结果进行关联,关联过程可能是直接矩阵输入或模态(或传递函数)矩阵调用等;最后根据分析需要进行相应的工况分析及快速迭代优化,进而在有限的时间内寻找到满足要求的设计方案。整个超单元的应用流程如图 1-3 所示。

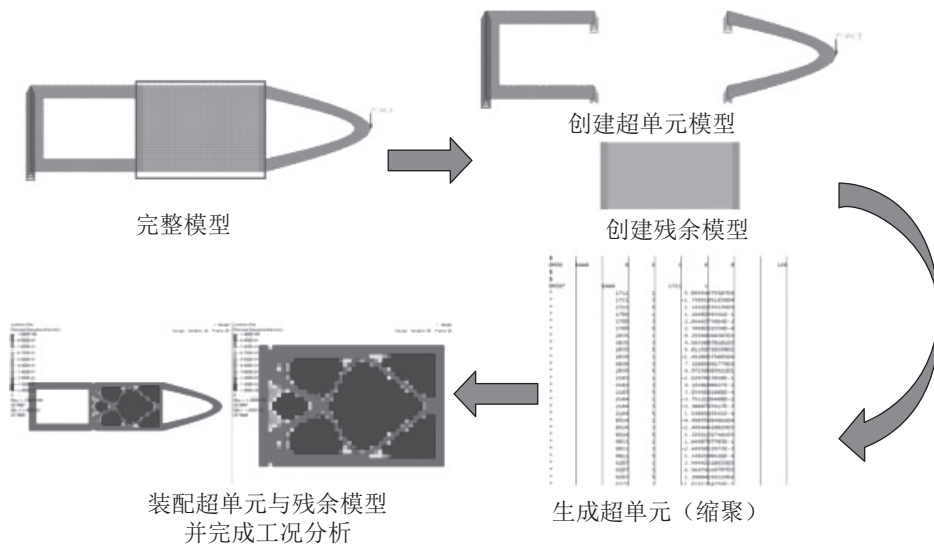


图 1-3 超单元的应用流程

根据超单元的特点及定义,可以得到超单元方法与传统有限元之间的差异,见表 1-1。

表 1-1 有限元与超单元对比

名 称	有 限 元	超 单 元
相同点	以节点作为输入/输出载体	以界面点作为输入/输出载体
	以材料和结构属性(如厚度、截面等)定义系统的属性	以质量矩阵、刚度矩阵、传递函数及载荷矩阵等定义系统的属性
不同点	基于三维几何模型生成	基于已创建的有限元单元或者试验数据生成
	有直观的可视化实体模型	采用 h3d、pch、dmg、op2、op4 等格式表述,无可可视化的实体模型,但可通过 PLOTEL 单元实现可视化
	计算资源及硬件等要求较高	由于自由度大幅度降低,所以对计算资源及硬件等要求相对较低

例如,某动力电池整个完整模型单元数为 651.7254 万个,通过采用超单元进行随机振动分析,分析结果显示完整模型的计算时间为 4h5min15s,而采用两种超单元方法后时间分别为 31min6s 和 32min11s,求解时间降低 87.32%,并且结果基本一致,效果非常明显,对比结果见表 1-2。

表 1-2 Z 向随机振动结果

方 案	完整模型/MPa	超单元方法 1/MPa	超单元方法 2/MPa
Z 向	35.94	35.678	35.749
计算时间	04:05:15	00:31:06	00:32:11