

# 汽油发动机开发中的 CAE 技术

## CAE Technologies in the Development of Gasoline Engine

王伟民 蔡志强 汪源利 史来锋

(东风汽车公司技术中心 湖北 武汉 430056)

**摘要:** 在近年来的汽油发动机开发中, 随着先进的 CAD/CAE/CAM 等数字化设计技术的大量引入, 使发动机设计方法出现了重大变革。特别是发动机各个领域的 CAE 技术正在不断进化, 趋近于实际发动机试验的虚拟发动机技术正在广泛应用于发动机产品开发。本文阐述了发动机各个不同的设计阶段中的各项 CAE 技术的内容, 并提出了加快发动机 CAE 技术发展的对策。

**关键词:** 汽油发动机, CAE, 计算流体力学, 多体动力学, 有限元分析, 铸造成型流动分析

**Abstract:** In the recent development of gasoline engine, engine design methods have had important changes with introduction of advanced digital design technologies included CAD/CAE/CAM. Especially CAE engine technologies in various fields become closer to the actual engine test, and virtual engine technology is widely used in engine product development. In this paper, CAE technologies in different engine design phases have been described, and some countermeasures of CAE technologies to speed up engine development have been put forward.

**Key words:** Gasoline engine, CAE, CFD, MBS, FEM, Casting forming flow analysis

## 1 引言

随着我国的自主品牌的汽车发动机开发的不断深入, 正向开发所需的发动机设计的新技术正在不断发展。先进的 CAD/CAE/CAM 等数字化设计技术大量引入大大加快了产品的开发进程, 一些大学和公司利用发动机性能预测和优化所用的 CAE 技术, 进行设计方案改善、对策探讨、确认和新现象解析, 发挥了很好的效果<sup>[1].[2].[3]</sup>。

发动机主机厂自主研发的重点主要是系统集成方面的创新。为了实现发动机各系统的良好集成, 主机厂需要进行发动机概念设计、系统参数优化, 如选择合理的供油系统、增压器系统等, 然后在概念设计的基础上进行详细的零部件设计。各类 CAE 分析技术已经渗透到发动机产品开发的各个设计阶段和不同的技术领域。

本文全面阐述了在概念设计、详细设计和试验验证阶段的 CAE 分析项目的主要内容, 并对预测一维发动机热力学性能仿真, 进气道和缸内的流动喷雾和燃烧性能的三维 CFD 仿真, 预测曲柄连杆机构、配气机构和带系等机构动力学性能的多体动力学仿真(MBS), 预测各主要零部件强度的有限元

分析(FEM),有助于缸体缸盖等主要零部件的生产工艺及模具设计的成型流动分析的技术发展要点进行了分析,提出了加快发动机 CAE 技术发展的对策。

## 2 概念设计中的 CAE 技术

### 2.1 概念设计中的 CAE 分析项目

发动机概念设计中的 CAE 分析项目如表 1 所示。本文仅阐述主要 CAE 分析项目(热力学性能仿真,润滑系统仿真,曲柄连杆机构动力学仿真和曲轴强度的初步计算)的基本内容。

表 1 发动机概念设计阶段的 CAE 分析项目

No.	项目名称	目的
1	一维热力学性能仿真	支持发动机主要结构的布局设计和调查各结构参数对发动机性能的影响。
2	一维润滑系统仿真	预测润滑系统的主回路压力,流量,油膜厚度等来支持发动机润滑系统的布局设计。
3	轴承摩擦预测	通过使用参数研究和试验数据库的发动机摩擦预测来支持轴承和其他转动副的布局的确定。
4	一维冷却系统仿真	预测不同发动机转速下的冷却液质量流量,压力损失,确定冷却系统方案,水泵流量等。
5	曲柄连杆机构多体动力学仿真	预测有平衡轴和没有平衡轴的情况下的自由力和自由力矩,确认往复惯性力的平衡效果。还分析了曲轴系的扭转振动,探讨了满足最大扭转转角限制的设计方案。
6	轴承载荷分析	预测各种的转速和载荷条件下轴承载荷和轨道曲线,为润滑系统分析提供输入。
7	曲轴强度的有限元分析	通过有限元分析能够预测应力和安全系数,支持曲轴结构布局和优化方案的确定。
8	凸轮配气机构动力学仿真	为配气机构的设计提供重要依据,热力学性能仿真提供输入。

### 2.2 一维热力学性能仿真<sup>[4],[5]</sup>

在发动机概念设计阶段,基于 GT-POWER 的热力学性能仿真分析的基本内容如下:

- 1) 选取对标机型:对新机型的基本结构配置、参数和性能已经进行定义,选取同类对标机型。如动力性,经济性指标,VVT、VIM 等配置参数。
- 2) 建立和标定对标机型仿真分析数模:通过 BENCHMARK 获得重要的测量数据以及对数据进行处理。如摩擦功、缸压曲线、等需处理成 CAE 的输入数据。
- 3) 建立和标定开发机型基本分析数模:由对标机型仿真分析数模来转换,关键是要清楚主要参数转换的方法和原则。如气道流量系数、摩擦功等所依据的转换原则。
- 4) 开发机型的对比和优化分析:如何针对发动机进、排气系统的主要部件制定对比、优化方案以及确定择优依据。如对气门升程、相位,进气歧管长度等参数进行优化时,须明确所关注的工况点和对应的性能要求。

### 2.3 一维润滑系统仿真<sup>[6]</sup>

在发动机概念设计阶段，基于 GT-COOL 的一维润滑系统仿真的基本内容如下：

- 1) 建立仿真分析基础数模：确定整机润滑系统的配置方案和主要的结构参数。如确定是否有活塞冷却喷嘴等。
- 2) 标定仿真分析基础数模：基于试验或经验对系统的压力分布，流量分布等进行分析调整。如主油路压力及各路流量的分配等。
- 3) 对比和优化润滑系统的设计方案：如何确定评价指标和计算工况及对应的方案。如在何种工况（转速、油温）下，对压力，流量，最小油膜厚度等的要求。

### 2.4 曲柄连杆机构动力学仿真<sup>[7]、[8]</sup>

在概念设计阶段，基于 Recurdyn 和 GT-CRANK 的曲柄连杆机构动力学仿真的基本内容如下：

- 1) 自由力和自由力矩分析：确定有无平衡轴的两种情况的结构参数，计算自由力和自由力矩，评价平衡轴系统的平衡效果。
- 2) 轴承载荷分析：输入正确的缸压曲线，计算主轴承和连杆轴承的载荷。
- 3) 扭振分析：关键是正确输入结构参数，利用 GT-CRANK 求出曲轴的最大扭转角。

### 2.4 曲轴强度的初步计算<sup>[9]</sup>

在概念设计阶段，一般不进行其他零部件的强度计算，只进行汽油发动机中最重要的部件之一的曲轴强度的初步计算，因为它的结构参数在很大程度上影响发动机的整体尺寸和重量，也影响发动机的疲劳寿命。基于 ABAQUS 的曲柄连杆机构动力学仿真分析的基本内容包括：

- 1) 工况和载荷的确定：根据曲轴连杆机构多体动力学的仿真结果确定工况和载荷。
- 2) 建立分析模型：创建有限元模型，特别要在应力集中处细分网格。
- 3) 疲劳寿命的预测：根据应力计算结果计算疲劳寿命。

## 3 详细设计中的 CAE 技术

### 3.1 详细设计中的 CAE 分析项目

发动机详细设计中的 CAE 分析项目如表 2 所示。本文仅阐述一部分主要的 CAE 分析项目（概念设计阶段的 CAE 分析项目的深化，燃烧开发、冷却水套和排气系统性能分析中的三维 CFD 分析，主要零部件的有限元分析和铸铝件生产工艺分析）的基本内容。

### 3.2 概念设计阶段的 CAE 分析项目的深化

概念设计阶段的仿真分析主要目的是整体方案的确定，而详细设计阶段则主要是关注具体结构参数的细化。其中关键的地方是不同结构参数对某一性能、要求的敏感度分析和不同性能、要求之间的平衡。如：对于自然吸气发动机，一般来说为了提高低速的动力性能常常会牺牲发动机高速的动力性能。而对于提高低速的动力性能而言，常常又会牺牲发动机的经济性能。因此，在详细设计、

分析之前,首先要明确改进的目标和相关的限制条件,然后对具体的结构参数进行敏感度分析,找到最佳的设计方案。

表 2 发动机详细设计阶段的 CAE 分析项目

No.	项目名称	目的
1	一维热力学性能仿真的深化	输入精确的系统参数,深化概念设计阶段的热力学性能仿真
2	一维润滑系统仿真的深化	输入精确的系统参数,深化概念设计阶段的润滑系统仿真
3	一维冷却系统仿真的深化	输入精确的系统参数,深化概念设计阶段的冷却系统仿真
4	一维喷油系统仿真	通过燃油喷射系统的压力和流动分析,支持喷射系统的详细设计
5	三维排气歧管和催化器CFD仿真	确定排气系统的流动特性,并能提供排气歧管的温度边界条件
6	三维缸内流动喷雾的稳态瞬态CFD仿真	评价其燃烧室形状的合理性,支持燃烧系统开发
7	三维缸内燃烧仿真	支持燃烧系统开发,定性地预测燃烧性能和排放性能
8	三维水套内热流体CFD仿真	支持冷却系统开发和水套的详细设计
9	曲柄连杆机构动力学仿真的深化	输入精确的系统参数,深化概念设计阶段的曲柄连杆机构动力学仿真
10	凸轮配气机构动力学仿真的深化	输入精确的系统参数,深化概念设计阶段的凸轮配气机构动力学仿真
11	正时驱动系统多体动力学仿真	通过链系多体动力学分析,支持正时驱动用的链系的详细设计
10	附件系(带系)多体动力学仿真	确定带系每一个区域的载荷和每一个附件的扭矩
11	曲轴有限元分析的深化	采用精确地CAD模型和材料参数,深化概念设计阶段的曲轴有限元分析
12	发动机缸体缸盖主轴承座结构的有限元分析	通过强度计算支持缸体缸盖主轴承座结构的详细设计
13	连杆有限元分析	通过强度计算支持连杆的详细设计
14	活塞有限元分析	通过强度计算支持活塞的详细设计
15	排气歧管热应力有限元分析	通过热应力疲劳强度计算支持排气歧管的详细设计
16	高压燃油喷射系统结构有限元分析	通过强度计算支持高压燃油喷射系统的详细结构设计
17	各种支架的有限元分析	通过强度计算支持各种支架的详细设计
18	发动机和变速箱的耦合模态分析	通过耦合系统弯曲模态分析,支持发动机和变速箱的连接设计
19	进排气系统噪声分析	声压强度和转速关系的预测,支持进排气系统设计
20	缸体和缸盖等铸铝件的成型流动分析	对铸铝件进行铸造工艺分析,支持铸铝件的结构设计和模具设计

对于表 2 中的 6 项概念设计阶段的 CAE 分析项目,一般都需要输入更准确的结构参数以及从供应商处得到的更明确的部件性能参数,明确概念设计阶段的不确定性因素,得到精度更高的 CAE 计算结果。

### 3.3 燃烧开发中的三维 CFD 分析<sup>[10],[11]</sup>

在发动机详细设计阶段,发动机燃烧开发的三维 CFD 仿真分析主要包括:

- 1) 发动机进气系统主要部件的稳态性能分析:其主要针对发动机进气歧管、进气道进行流通性能的分析 and 评价
- 2) 发动机缸内瞬态流动分析:评价其燃烧室形状的合理性。
- 3) 发动机喷雾瞬态流动分析:分析缸内空燃比分布,对发动机进气道与喷油器的匹配性进行相应的评估。
- 4) 发动机缸内燃烧瞬态分析:预测发动机工作缸内燃烧、排放性能。

### 3.4 冷却水套和排气系统性能分析中的三维 CFD 分析<sup>[12],[13],[14]</sup>

在发动机详细设计阶段,发动机冷却水套、排气系统的三维 CFD 仿真分析主要包括:

- 1) 发动机冷却水套稳态流动性能分析:评价其基本流动特性。
- 2) 发动机冷却水套稳态冷却性能分析:通过分析水套壁面换热系数以评价水套的冷却特性,并与有限元分析软件进行耦合以对缸体、缸盖进行热应力、温度场的计算。

- 3) 发动机排气系统稳态流通性能分析：主要针对发动机排气歧管、三元催化器进行流动特性的分析。
- 4) 发动机排气系统稳态温度场分析：与有限元分析软件进行耦合以对排气系统部件进行热应力、温度场的计算，评价其热负荷性能。

### 3.5 发动机主要零部件的有限元分析<sup>[15]</sup>

在发动机产品的详细设计中，有很多零部件（缸体、缸盖、曲轴、连杆、活塞、排气歧管、高压燃油喷射系统结构件和各种支架等）都需要进行有限元分析。除了概念设计中已经进行的曲轴和有限元分析需要深化以外，缸体和缸盖等其它主要零部件的有限元分析有其与一般结构件不同的特点。发动机零部件形状往往比较复杂，只能用十节点四面体单元来建模，另外外载荷和热负荷往往要用其它分析软件（譬如多体动力学和三维 CFD 热流体软件）来决定。譬如缸盖和排气歧管的热固耦合问题以及燃油高压喷射系统结构件的流固耦合问题增加了有限元分析的难度。因为发动机零部件很多，所以在下面仅叙述其中的缸盖缸体轴承座整体结构有限元分析的主要内容。

缸盖缸体轴承座是最重要的主体结构部件，它们的强度、耐久性和可靠性直接影响整个发动机的性能。缸盖缸体轴承座整体有限元分析的主要内容包括：

- 1) 水套热流体分析：通过水套的热流体分析：得到水套中冷却液流动计算结果和对流传热系数等。
- 2) 缸盖缸体整体温度场分析：将部分热流体分析结果作为输入条件施加到结构分析的有限元模型中，计算缸体和缸盖的温度场分布。
- 3) 缸盖缸体整体结构分析：基于温度场的分析结果和载荷进行有限元分析，主要包括以下工况：（1）螺栓预紧工况；（2）轴瓦过盈工况；（3）热负荷工况；（4）轴承动压工况。通过对这些工况的有限元分析，对缸盖缸体的强度、耐久性、缸孔变形以及缸垫密封性进行评估。

### 3.6 主要零部件的生产工艺分析中的成型流动分析<sup>[16]</sup>

发动机的缸体和缸盖都是铝合金铸造而成，必须对铸件充型过程、凝固过程进行数值模拟技术分析，对铸件进行铸造工艺分析。在结构的详细设计阶段对铸铝件的凝固分析、流动分析以及流动和传热耦合进行计算分析，可以预测铸件缩孔缩松缺陷的倾向、改进和优化工艺，提高产品质量，降低废品率、减少浇冒口消耗，提高工艺出品率、缩短产品试制周期，降低生产成本、减少工艺设计对经验的依赖，保持工艺设计水平稳定等诸多方面都有明显的效果。

铸铝件成型流动分析软件有德国的 MAGMASOFT、美国的 ProCAST 软件、韩国的 Anycasting、国内清华的 FTStar、华中理工大学的华铸 CAE 等。

## 4 性能试验验证阶段的 CAE 技术

#### 4.1 CAE 计算精度的提高

根据设计图纸制作发动机样机以后,一般要按照试验标准和方法对样机的性能进行测试。为了确立正确的计算方法和提高 CAE 计算精度,把试验结果和 CAE 计算结果进行对比分析,探讨 CAE 计算方法的正确性非常重要。在试验方案确定之时,CAE 技术人员要与试验人员一起进行测试方案讨论,有利于试验结果和计算结果的比较。只有与试验结果认真比较,才可改善 CAE 计算方法。总的来说,有试验结果支撑的 CAE 分析结果才是可靠的。

#### 4.2 发挥 CAE 计算的作用,促进性能试验验证的顺利开展

因为 CAE 计算所用条件有时与实际情况有一定差异,发动机的实际性能可能与预期的结果不同。为了查明原因,可以积极利用 CAE 技术定性预测趋势比较有效的特点,对多方案进行性能预测,优化设计方案,达到发动机开发的性能要求。

### 5 发动机 CAE 技术发展的对策

发动机 CAE 技术在东风汽车公司还属于一个起步不久的专业领域,为了加快发动机 CAE 技术领域的发展进程,提高 CAE 专业水平,我们提出了以下对策。

- 1) 积极利用和整合世界发动机技术的先进资源,利用与发动机技术领先的工程技术公司合作的机会,做到 CAE 技术的引进消化吸收和再创新的相结合,还要加强与大学研究所,CAE 软件公司和海内外汽车公司的交流,提高发动机 CAE 技术水平。
- 2) 要做好发动机 CAE 工作,必须做到发动机设计理论和 CAE 分析实践相结合,用发动机设计理论来指导 CAE 分析工作。发动机 CAE 技术各领域的成员在开展 CAE 分析工作中,积极查阅大学和各大汽车公司发表的技术文献,开拓思路,提高发动机 CAE 技术的发展速度。另外,大力加强 CAE 结果的试验验证工作,促进各种计算方法的精度提高和建立完备的试验验证数据库,建设和 CAE 相关的零部件试验台架。
- 3) 在大力提高发动机 CAE 技术能力的基础上,加强发动机 CAE 技术在各个发动机项目开发中的应用,推动发动机产品设计水平的提高,在 CAE 技术应用中不断完善各类发动机 CAE 仿真的技术能力。
- 4) 发动机 CAE 的各个领域内容复杂,需要多专业的共同配合,我们在发动机 CAE 部门既有相对的专业分工,又强调协调配合,特别是 3 维 CFD 的热流体分析和结构有限元分析的配合,曲柄连杆机构动力学仿真和结构有限元分析的配合,1 维热力学性能仿真和 3 维 CFD 分析的配合等。另外,还提倡发动机 CAE 专业人员到设计试验部门去短期工作,加强专业人员的相互沟通 and 了解,鼓励年轻技术人员参加各种学术会议,写论文投稿促进他们提高各自的学术水平和技术发表的表达能力。
- 5) 发动机主机厂需要在基于对发动机 CAE 技术发展趋势掌握的基础上,制定 CAE 核心技术开发计划,并与供应商进行技术对话,引导供应商也开展 CAE 分析,提供性能设计依据。只有这样才能真正保证发动机主机厂的 CAE 技术创新能力和核心竞争力。

## 6 结论

随着各类发动机计算理论和数值仿真技术的快速进步,以及逐渐成熟完善的商品化仿真软件的广泛应用,CAE 技术已经遍及发动机产品开发的各个领域,如发动机性能预测和方案优化,基于 3 维 CFD 技术的燃烧开发,曲柄连杆机构配气机构和附件系的机构动力学仿真,主要零部件的有限元分析和铸铝件成型流动分析等。但是,各类 CAE 技术的方法尚不十分完备,计算精度尚未完全确认,包含热疲劳强度在内的材料强度试验数据库还没有很好建立等,实现汽油发动机的高精度高效率的 CAE 分析为发动机产品开发提供强有力的支持还需要解决很多问题并为之付出巨大努力。

## 7 参考文献

- [1] 史春涛,王韬,孙立星,国内内燃机数字化仿真技术应用现状,拖拉机与农用运输车,第 6 期,2005 年 12 月。
- [2] 周舟,面向企业发动机开发的 CAE 分析,CAD/CAM 与制造业信息化,第 2-3 期,2007 年。
- [3] 蒋炎坤.CFD 辅助发动机工程的理论与应用[M],北京:科学出版社,2004 年。
- [4] 詹樟松,张小燕,应用 GT-POWER 设计发动机可变长度进气歧管,2006 年 CDAJ 中国区用户年会论文集。
- [5] 张晓冬等,GDI 热力学性能仿真,中国内燃机学会第八届学术年会论文集,2007 年。
- [6] 周龙保,内燃机学,机械工业出版社,1999 年。
- [7] 王长荣,内燃机动力学,中国铁道出版社,1990 年。
- [8] 段秀兵,郝志勇,岳东鹏,宋宝安,汽车发动机曲轴扭振的多体动力学分析,汽车工程,第 27 卷,第 2 期,2005 年。
- [9] 徐中明,牟笑静,彭旭阳,基于有限元法的发动机曲轴静强度分析,重庆大学学报,第 31 卷,第 9 期,2008 年 9 月。
- [10] 刘德新,李丹,冯洪庆,于吉超.四气门汽油机进气道气流运动的三维数值模拟研究[J],内燃机工程,第 27 卷,第 2 期,2006 年。
- [11] 索文超,韩树,张晶,CFD 技术在内燃机设计中的应用,车辆与动力技术,第 101 期,2006 年。
- [12] 詹樟松,陈小东,应用 CFD 技术对发动机冷却水套进行优化设计[J],汽车工程,第 27 卷,第 5 期,2005 年。
- [13] 夏兴兰,王胜利,陈大陆,计算流体力学在发动机冷却水套设计中的应用[J],现代车用动力,2006 年 4 月。
- [14] 谷芳等,排气系统的数值模拟及优化设计,汽车工程,第 29 卷,第 11 期,2007 年。
- [15] Naohisa Mamiya, Takafumi Masuda and Yasushi Noda, Thermal Fatigue Life of Exhaust Manifolds Predicted by Simulation, SAE Paper 2002-01-0854.
- [16] 柳百成,李永保,熊守美,并行工程中铸造 CAD / CAE 技术的研究,汽车工艺与材料,1996 年 04 期。