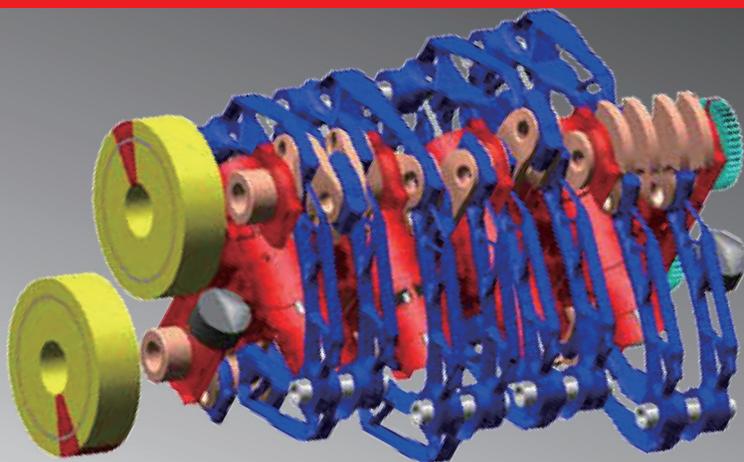


MSC 软件公司：案例研究——Achates 动力（有限）公司

## 通往更高燃油效率之路



Achates 动力（有限）公司正在开发一个重量轻、低排放、低油耗的二冲程、对动活塞柴油发动机，将其设计成为一个名为 A40 的模块化、可扩展的机械装置。Achates 动力（有限）公司利用最为先进的分析工具和方法，使建模与仿真成为实现该项目的重中之重。

结构动力学分析领域，焦点是整体动力学，例如扭振和弯曲振动，包括扭振减振器 (TVD) 和飞轮布置，以及（液力）轴承分析。重点是概念设计，以及关于整体尺寸及重量的结构和动力学改进等领域。在此利用了一种混合的方法，从而将多体仿真 (MBS) 和有限元分析 (FEA) 的优势有机结合起来。

### 本案例讨论了基于 MSC ADAMS 的结构动力学仿真关于如下方面的应用：

- 发动机缸体支撑结构灵敏度对于轴承负载的影响：由于在往复质量块的相对运动期间力被部分抵消，因此与峰值气缸压力相比，A40 对动活塞发动机具有相对较小的主轴承负载。这使得在保持轴承具有足够支撑的同时，大量优化支撑结构的重量。
- 缓解齿轮共振：该机械装置的两个曲轴由一套齿轮进行正时。在测试期间，运转速度范围内检测出齿轮共振，导致了相邻主轴承负载的大幅增加。通过对灵敏度的研究，找到了解决运转速度范围内共振的最佳解决方案。

### 关键字

行业

**achatesPOWER**

汽车制造业

挑战

开发一种重量轻、低排放、低油耗的柴油发动机

MSC 公司的解决方案

MSC Adams 以及基于 Adams 的 FEV Virtual Engine。

价值

- 证实结构完整
- 实现组件优化
- 减轻总体重量



“Adams 模型近期将会广泛用于参数研究，从而能够找出所观察到的齿轮共振的根本原因及解决方案”

Achates 动力（有限）公司 Christina Exner

## 引言

由于有限的石油供应以及对碳排放的限制，世界的根本需求是拥有提高燃油效率的更好的发动机。与目前市场上的传统发动机相比，对动活塞柴油发动机具有热力学方面的优势（气缸盖内部无热损失），其更低摩擦（无气门结构，活塞侧低负载），也具备大规模提高燃油效率的潜力。由于在保持传统的制造方法的同时降低了部件的数量，该发动机的一个最大的优势是成本的降低。除了热力学的优势外，因为对动活塞柴油发动机是一种两冲程发动机，具有低引擎机制复杂性的优势，与传统的发动机结构相比，自然重量更轻。为了在保持充分耐久性的同时进一步减轻重量，需要使用先进的分析方法，将多体仿真（MBS）、有限元分析（FEA）、优化和疲劳分析有机结合起来。

基于 Adams 的 FEV Engine 已经当作所

选的多体模拟软件，与部件模态综合（FEA 软件）结合使用，从而降低核心结合组件的自由度，例如保持几乎完整结构信息的曲轴和发动机缸体。该方法能够以合理的运行时间，在保持完全组件交互的同时大范围探究运行状况。

## 建模

对动活塞式发动机中，置于同一气缸的两个相对的活塞在上止点走到一起，发生燃烧后反方向移动。

对动活塞 A40 发动机架构，采用了创新的机制推动活塞。每个气缸之中的两个活塞通过六个连杆与两个曲轴连接，从而创建了一个纯粹的轴向活塞运动，在理想状态下不存在活塞侧向力。连杆具有张力，致使主轴承的反作用力输送至缸体而不是轴承盖。此外，A40 对动活塞的运动类型，使得燃烧力部分取消。以上两点使该发动机能够使用

一种轻量级的支持结构。两个曲轴通过一个齿轮传动系和一个单独的飞轮相连，安装在从动轴之上。图 1 为建立在弹性支撑结构上的 A40 四缸曲柄连杆机构模型以及齿轮传动系的后视图。该机械装置初看可能会显得十分复杂，但是实际上，它的组成部件数量仅为传统发动机一半。

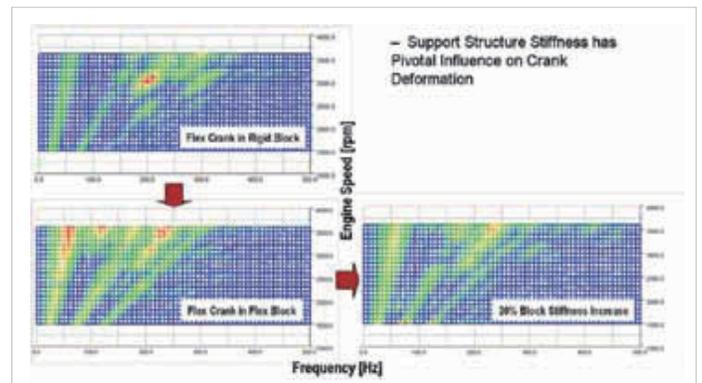
本研究中的论证结果将重点用于四缸 Achates 动力 A40 发动机。

利用 ADAMS 软件提供的不同层次细化建模，曲柄连杆机构从一个纯粹的具有刚性组件和约束轴承的运动组件模型变为一个由液力轴承支撑的全柔性体模型。Adams 可以方便地通过柔性部件替换任意刚性部件，从而提高分析的准确性。

该软件结合了具有发动机组件库的通用开放体系多体模拟（MBS）代码的各种优势。因此，针对如连杆、活塞和其他大量发动机具体组件提供了“按键式”的执行方式。因此，Adams 能够充分支持这种



Figure 1: FEV Virtual Engine (powered by Adams) Crank Train model with Flexible Components and Rear View of the Gear Train



多曲轴、单气缸内多个连杆机构的需求。

正时齿轮模块已被用于包括齿轮接触和间隙在内的齿轮传动系动力学建模，因此能够在该机构内进行完整的组件交互。齿轮刚度和冷却间隙已经实验确定，并作为提供值输入模型之中。基于齿轮的啮合点、材料组合和温度，已经得出运行温度条件下的间隙。间隙和啮合的错误可能会导致整个机械装置出现严重的冲击激励，因此准确地模拟这些参数是非常关键的。

## 方法

选定了一种多体模拟 (MBS) 和有限元分析的混合方法作为 A40 机械装置结构动力学分析的方法。该方法的第一步，是基于克雷格-班普顿方法 [1, 2] 确定曲轴和缸体的模态中性文件 (MNF)。该方法允许选择自由度 (DOFs) 的子集，该子集在模态缩减过程中受到保护，在 MBS 模型中被用作外连接节点。例如，在轴承安装位置定义这种自由度 (DOFs)，就能够在各种发动机运行条件下方便地监测轴承变形。

模态缩减后的好处是大大减少了自由度 (DOFs) 的数量，同时保持了近乎完整的连同模态应力在内的模态信息 (惯量和刚度张量)。

该方法的第二步，是将组件 MNFs 导入到 ADAMS 模型，以实现本机械装置结构刚度的最佳可能表示法。第三步牵涉边界条件设置，如爆压曲线、油粘度和温度，这一步骤在 Adams 中可以很容易地完成。最后，运行 MBS 分析，以分析发动机动态过程中的各个方面：扭振和弯曲振动、扭振减器 (TVD) 的效果和飞轮布置，以及针对轴承的分析。在本方案中，确定结构和动力学改进范围被作为特别强调的重点，因为这样才能整

体上缩减尺寸和重量。Achates 动力 (有限) 公司，将该混合的方法使用在开发的各个阶段，包括灵敏度研究和根原分析。该方法在组件优化和耐久性分析领域得到不断地改进和完善。此外，叠加模态应力和模态参与因子，进行模态应力恢复，并作为后续疲劳分析的基础。(在此不做描述)。

## 支撑结构灵敏度

在 A40 装置中，通过排气和进气连杆各自阶段产生端口正时。两个相对旋转的曲轴具有相同的对称性和相位。因此，燃烧的力量可部分取消。正如前面所提到的，对动架构使主轴承的力作用在缸体或曲轴箱上，而不是主轴承盖上。这两种作用能够帮助 Achates 动力 (有限) 公司实现一种相对于 PCP 的轻量级支撑结构。

早在测试中就明显得出，该结构重量降低的极限将取决于其支撑曲轴能力。曲轴的扭转和弯曲变形是耐久性、噪声和振动平顺性 (NVH) 的首要表征。分析以刚性缸体结构开始，随后由柔性体代替。增加了缸体细化的完全耦合分析曲轴弯曲结果，如图 2 所示

正如所料，缸体表述方法对曲轴扭转行为 (未显示) 几乎没有任何影响。然而，曲轴弯曲的影响却十分显著。对于刚性缸体，可以观察到伴随每分钟 3000 转转速下的共振的明显的第四阶激励。相比较而言，柔性缸体的响应显示了所有频率切换过程中的从第一阶到第四阶激励。尽管曲轴弯曲幅度满足 Achates 动力的要求，更强的缸体刚性能够进一步降低曲轴弯曲度。因此，为验证这种改进，缸体的刚度被人为地增加了 20% (见图 2)。

除了研究缸体刚性影响之外，该方

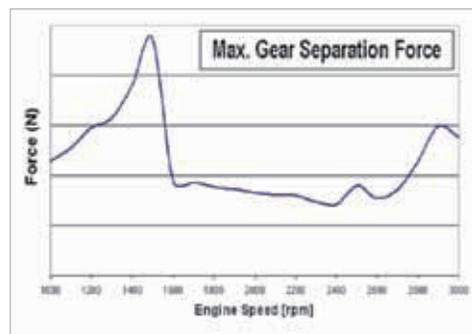


图 3 最大齿轮分离力与发动机转速关系

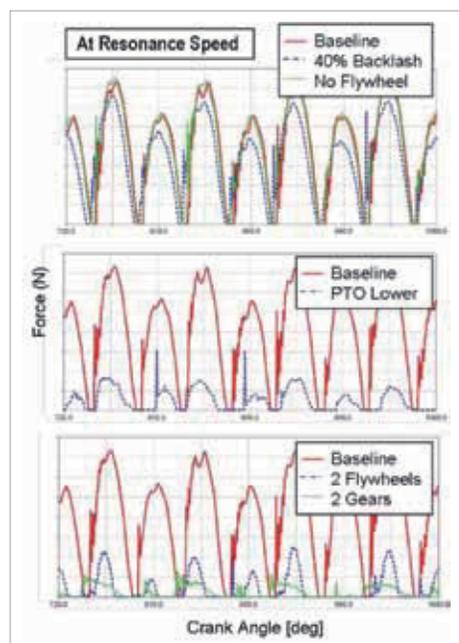


图 4 减轻齿轮共振研究所选用的解决方案

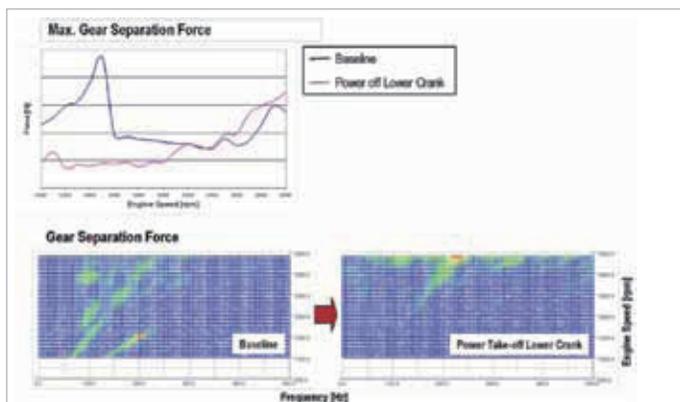


图 5 齿轮共振解决方案：取力器移至曲轴

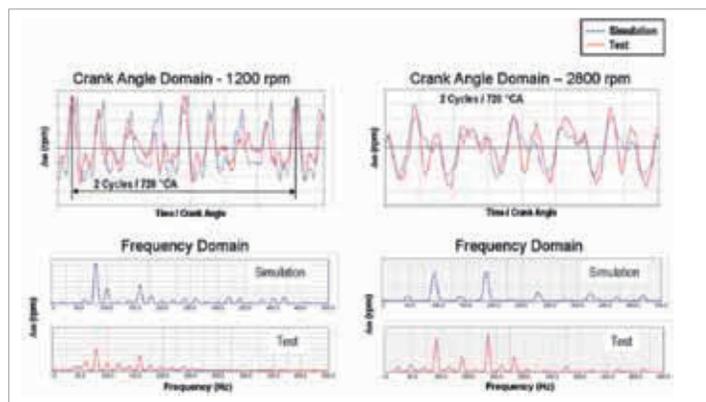


图 6 曲轴轴头速度波动的相关性

法还能用于指导保持重量下降同时，局部刚性提高的设计。

## 减缓齿轮共振

在早期的 A40 四缸机构测试阶段，就观察到了齿轮传动噪声 / 共振现象。虽然这个特殊的发动机只装有两个应变传感器，但是所测量的齿轮传动共振已由 Adams 虚拟发动机模型定性重现。其结果如图 3 所示。

ADAMS 模型随后用于执行大规模的参数研究，从而找到所观察到齿轮共振问题的根源和解决方案。在大量关于如何降低的齿轮共振的构想中，只选择一些结果在此进行讨论。将可能的解决方案分为三类：

- 对机构设计没有影响，或具有次要影响
  - 对机构设计有中等影响
  - 对机构设计有主要影响
- 第一类解决方案其中包括：减少齿轮间隙和飞轮转动惯量。从公差和可加工性角度来看，间隙可以减少到目前设计间隙的 40%，所带来的轴承负载仅仅降低了 20%，这是远远不够的。飞轮惯量降低至其初始值的 50%，或者完全将飞轮移除（零惯量），如果对共振特性有影响的话，其影响也微乎其微。有趣的是，动力学研究表明，发动机完全能够在无飞轮状态下运行，这能够减少 13.7 公斤的发动机总重量。

在第二类中，有两个解决方案涉及结

构变化，看似较有前途：将取力器移至曲轴或螺旋齿轮。前一种方法在结合 TVD 和飞轮惯量协调时显示出最佳的效果。该解决方案一直运行在设计层面，并未制造出相关硬件。此外，由于在任何给定负载状态下，存在的齿轮分离系数，以及对 NVH 效果的考虑，选择螺旋装齿轮作为首选解决方案。

第三类解决方案涉及重大的全新设计并对发动机总成产生冲击。例如，输出轴上的一个单独的飞轮可能被每个曲轴上设置的一个飞轮所取代，用两个大型齿轮取代四个齿轮，或者将 TVDs 移至曲轴后端。尽管上述修改都具有一定的前途，重新设计工作最好纳入到未来的发动机设计之中。

图 4 中每个图表显示了在每分钟 1500 转共振速度下的时域数据。

为了考虑次要的速度切换，针对每一种情况都运行了完全的速度扫描。图 5 显示了当共振转换超出当前每分钟 2800 转的速度限制时速度扫描的结果。

## 相关性

经过其他相关研究工作，通过一种曲轴角度编码器测量出了曲轴前端的速度波动。实际测试与仿真模拟的对比结果如图 6 所示。

图 6 显示了两种速度。一种速度低于齿轮的共振速度，而另一种高于发动机的速度范围（也可见于图 5 顶部）。除了第四阶

贡献略微超预期外，在每分钟 1200 转的仿真模拟与实际测试对比值已经非常完美。另外，在每分钟 2800 转时，频率与时间的相关性也非常好。

## 总结和结论

日益苛刻的排放和油耗标准不仅仅对性能预测是一种挑战，同时对发动机开发过程中的结构动力学领域也是一种挑战。

本案例研究概述了一个评估发动机体系结构可行性的合适方法。此外，以对 Achates 动力的 A40 结构提供支持为例，证明了在支撑结构改进、根源和解决方案分析方面的潜力。仿真结果表明了确定一个柔性支撑结构的各种影响，整合曲柄连杆机构和齿轮传动系动力学是十分重要的。

使用选定的方法能够评估在特定发动机工作条件下支撑结构和齿轮相互作用产生的影响，该方法也能够用于明晰基于分析结果的设计建议。

最为重要的是，分析证实了 Achates 动力（有限）公司的 A40 机构及其改变的结构完整性和设计合理性。

Achates 动力（有限）公司的 A-40 是一个可行的机构，对于提高对活塞式发动机的输出功率是一种有效的手段。

## 关于 MSC.Software 公司

MSC.Software 公司是全球多学科仿真解决方案的领导厂商，旗下的产品通过帮助企业设计并检验产品的方式，提高了产品质量、缩短了产品投入市场的时间同时压缩了产品成本。MSC.Software 公司和全球几千家公司一道，通过使用仿真技术、仿真软件和仿真服务，更快更好地开发新产品。目前，MSC.Software 公司在全球 20 个国家有 1000 名员工。更多有关 MSC.Software 产品和服务信息，请访问 [www.mscsoftware.com](http://www.mscsoftware.com)。

## 关于 Patran

Adams 是世界上应用最为广泛的多体动力学和运动分析软件。Adams 帮助工程师研究运动部件动力学特性，负载和力如何在整个机械系统进行分布，并改善和优化其产品性能。

传统的“构建 - 测试”的设计方法太昂贵，费时且费力，有时甚至无法实现。CAD 工具有助于评估诸如部件间的干涉及基本的运动学等问题，但忽视了真实的、以物理学为基础的复杂机械系统动力学。有限元分析能够完美的研究线性振动和瞬态动力学，但是在分析大位移和其他完整机械系统的高度非线性运动时效率太低。

Adams 的多体动力学软件使工程师能够轻松地创建和测试机械系统的虚拟样机，与创建和测试物理构建相比，虚拟样机创建和测试所需的时间和成本仅仅是物理样机的一小部分。与大多数 CAD 嵌入式工具不同，Adams 通过同时解决运动学、静态、准静态和动力学方程，展现出真实的物理环境。利用多体动力学解算技术，Adams 还能够在仅为有限元分析解决方案所需的一小部分时间中，运行非线性动力学。通过 Adams 进行负载和力计算，无论在任何的运动范围和操作环境中，都能够带来个优秀的评估结果，提高有限元分析的准确性。

请参阅 [www.mscsoftware.com](http://www.mscsoftware.com) 网站，获取更多的案例研究



此处引用的 MSC 软件公司商标，MSC 和 MSC 软件产品名称及其服务是商标或者在美国和 / 或其它国家注册的商标。其它所有商标归各自所有者所有。2011 所有版权归 MSC 软件公司所有。

### 北京

北京市海淀区中关村丹棱街 3 号中国电子大厦 B 座 1202 室  
电话：86-10-82607000  
传真：86-10-82607478  
[www.mscsoftware.com.cn](http://www.mscsoftware.com.cn)

### 上海

上海市长宁区延安西路 726 号华敏翰尊国际 12 楼 E-L  
电话：021-6332-6655  
传真：021-6332-1679  
邮编：200050

### 成都

成都市人民南路二段 18 号红照壁川信大厦 11 层 A-2 座  
电话：028-8619-9275  
传真：028-8621-9222  
邮编：610016

### 深圳

福田区金田路 3038 号现代国际商务大厦 3108B  
电话：0755-23811895  
传真：0755-23811896  
邮编：518048

### 台湾

台湾台北市中山北路二段 96 号嘉新每二大楼 N513 室  
电话：02-2542-9339  
传真：02-2523-1992  
邮编：104