

# 有限元模型在发动机上的应用<sup>①</sup>

张云侠<sup>1</sup>, 申立中<sup>2</sup>, 毕玉华<sup>1</sup>, 沈颖刚<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学交通工程学院, 云南昆明 650051; 2. 昆明理工大学科技处, 云南昆明 650093)

**摘要** 有限元法是工程上一种十分有效的数值计算方法, 已被广泛地应用于各工程领域. 随着发动机设计要求的不断提高, 应用有限元方法在其主要零部件设计上, 能够符合复杂结构的设计要求. 利用现代 CAD 技术建立有效的有限元分析模型, 并在此基础上对其进行有限元模态分析. 应用有限元的力学模型对发动机主要零件进行静态和实际工况下应力和变形计算, 是当前发动机设计的主要手段.

**关键词:** 有限元; 发动机; 模型; 应用

中图分类号: U464.22 文献标识码: A 文章编号: 1007-855X(2001)03-043-04

## 0 前言

随着发动机技术的不断发展, 发动机的设计向着提高效率、增加可靠性、减轻质量、降低燃油消耗率以及降低排放等方向发展, 其强化指标不断增加, 导致热负荷和机械负荷不断增加. 发动机主要零部件的结构形状和工作载荷非常复杂, 使许多问题很难甚至不可能采用材料力学或弹性力学等经典理论进行解决. 有限元法作为现代 CAD/CAM/CAE 系统的核心理论, 其分析思想克服了经典理论的不足, 可用于解决复杂结构的场分布计算问题, 目前结构有限元分析在发动机设计领域中得到了广泛应用, 已有很多通用的商品化有限元软件和分析程序, 例如, NASTRAN、I-DEAS、ANSYS 等, 能基本满足设计计算要求. 应用于发动机主要零部件基本的有限元模型已经趋于成熟<sup>[1]</sup>.

## 1 活塞的有限元模型

活塞是内燃机的重要零部件之一, 其结构和所处的工作环境十分复杂. 在气体压力、往复惯性力等周期性载荷作用下, 活塞产生很大的机械变形和机械应力. 在灼热的燃气作用下, 还产生很大的热变形和热应力. 热应力与机械应力迭加可导致活塞破坏, 而热变形与机械变形迭加可导致拉缸. 因此, 用有限元法模拟活塞的温度场、应力场与变形, 对改进活塞设计、提高内燃机的性能与可靠性, 是十分重要的. 同时, 不同形式的活塞具有不同的有限元模型.

### 1.1 组合式活塞实体有限元模型

要模拟机械载荷和热负荷同时引起的活塞综合变形与应力, 则应按活塞的实体模型建立非轴对称的有限元模型才更符合实际. 对于组合式活塞, 为了深入探索整体活塞的综合力学性能, 改进产品设计, 可采用 I-DEAS 有限元分析软件建立一种三维的实体有限元模型. 用热、弹耦合方法处理活塞裙体与活塞头之间的接触边界条件, 模拟稳态下活塞的温度场, 以及气体燃烧压力、往复惯性力和热负荷共同作用下整体活塞的综合变形与应力<sup>[2]</sup>.

### 1.2 薄壁油冷活塞三维有限元模型

为了减轻活塞的重量, 近几年出现了一种箱体薄壁活塞, 材料采用高强度球墨铸铁. 这种活塞的重量是以往实体活塞的 50%, 而且在直径  $d > 200\text{mm}$  时, 比铝合金活塞还要轻. 由于这种活塞壁很薄, 从而对活塞的强度和刚度设计的合理性提出了更高的要求. 采用三维模型对活塞进行计算通过比较计算发现薄壁

① 收稿日期: 2000-10-16;

基金项目: 本文为云南省自然科学基金资助项目;

第一作者简介: 张云侠(1975~), 女, 在读硕士研究生, 主要研究内燃机设计.

活塞和厚壁实体活塞一样,其应力主要是由热负荷引起的.因此较薄的厚壁并不会导致机械应力的大幅度增加.对于这种薄壁油冷活塞,从活塞顶到环区的温降较大,使得环区的热膨胀相对于活塞顶较小,导致第一道活塞环槽的槽口收缩,根部产生很大的压应力,使得该处成为活塞的最危险点<sup>[3]</sup>.

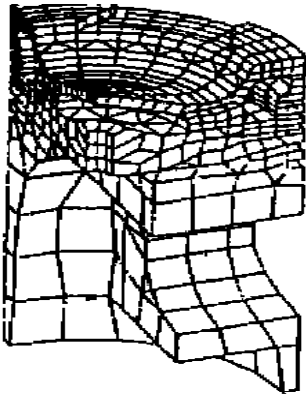


图 1 组合式活塞实体有限元网格

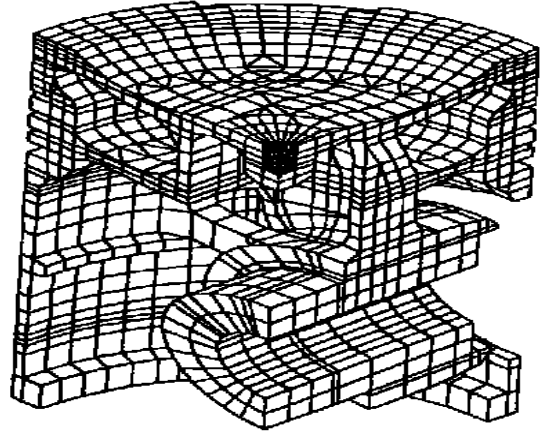


图 2 薄壁油冷活塞有限元网格

## 2 连杆的有限元模型

连杆是发动机的主要运动受力件之一,它在工作中所受的各种外载,如爆压和往复惯性力随工况的变化而变化.而且,即使是同一类型的连杆,每根连杆的物性参数、几何形状也存在差异.因此,在分析连杆的应力时,要考虑这些不确定因素,才能得到更符合实际的结果.

随机有限元法或称概率有限元法就是用于解决上述不确定问题的一种有效的数值方法.随机有限元法与传统的有限元方法相比其优点是可以计算复杂结构的随机响应.给定基本结构参数的随机性描述后,随机有限元法可以用来计算响应的统计量如均值、方差,并可通过解析或数值方法得到对基本随机变量的响应灵敏度,用以指出改进设计方向.随机有限元法分为两种:一种是非统计逼近的摄动随机有限元法,另一种是用于统计逼近的纽曼随机有限元法.考虑应用摄动随机有限元法比较容易求响应灵敏度,分析各基本随机量对响应的影响,故采用摄动随机有限元法对连杆进行应力分析.用摄动随机有限元法分析内燃机连杆应力,因为考虑了多种因素的不确定性,比传统的有限元模型更真实,因此所得结果也更符合实际情况.摄动随机有限元法与其它的随机问题分析方法如蒙特卡罗法相比有较高的计算效率;而且可以通过灵敏度分析,得到各随机量对应力的影响大小,从而有助于采取积极的、有针对性的设计改进措施.摄动随机有限元法可以与可靠性分析方法相结合,避开求应力响应的分布,直接得到结构的可靠性指标,是可靠性研究的一个新的方法<sup>[4]</sup>.

## 3 曲轴的有限元模型

曲轴是发动机重要的零件,它的尺寸参数不仅影响着发动机的整机质量,而且很大程度上影响着发动机的可靠性和寿命.曲轴在加工过程中的弯曲变形及应力集中将严重降低曲轴的弯曲疲劳强度,而曲轴的破损有可能引起发动机其他零件

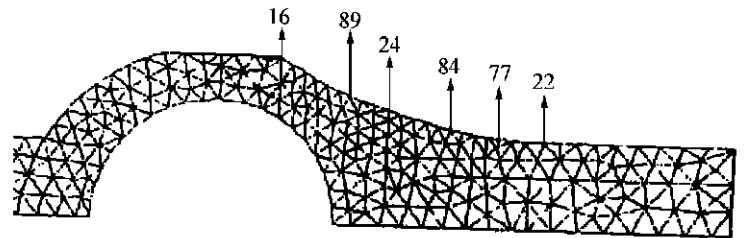


图 3 连杆有限元网格及部分节点编号

的严重损坏.随着发动机强化程度的提高,曲轴工作条件更加苛刻,曲轴在周期变化的气体压力、往复和旋转运动引起的惯性力以及它们的扭、弯矩共同作用下工作,使曲轴既扭转,又弯曲(弯曲载荷具有决定性意义);曲轴各轴颈在很高的比压下,以很大的相对速度在轴承中发生滑动摩擦,因油不纯,不能保证总为液体摩擦,所以摩擦表面必须有足够的承压面积,因此曲轴要求有较高的刚度和强度.

以前用有限元法对曲轴强度进行计算时, 都用截断法所得力作为边界条件, 不考虑各支撑弯矩的影响, 而整体式多缸全支撑曲轴, 其模型实际上简化为一连续静不定梁, 因此忽略弯矩将产生很大影响. 当前采用连续梁计算所得结果作为有限元的边界条件进行强度研究<sup>[5][6]</sup>.

#### 4 气缸盖的有限元模型

气缸盖结构复杂, 火力面温度较高, 而且温度分布很不均匀, 承受着机械负荷和热负荷双重作用, 是发动机承受负荷最大的零件之一.

为保证低散热气缸盖计算分析的准确性, 对气缸盖进行三维有限元网格划分时, 对主要结构不作简化, 复杂的水腔和气道都由零件三视图求出对应节点的准确坐标, 以保证计算模型的准确、有效. 气缸盖的有限元计算模型采用六面体等参元, 采用计算机分别自动生成了气缸盖的侧壁、顶板、底板和气道等部分, 最后

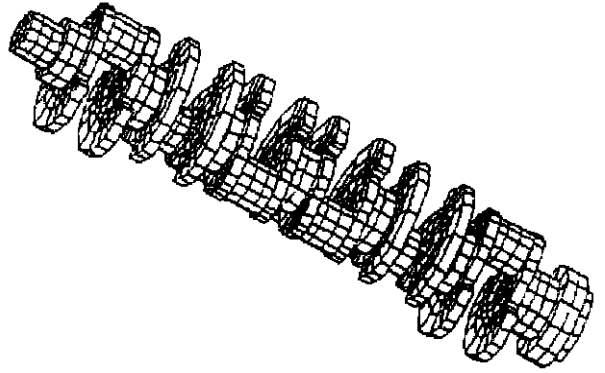


图4 曲轴的有限元网格

将各部分网格粘接成一个完整的气缸盖有限元分析网格. 由于发动机工作时气缸盖存在着燃气放热、液体冷却、各接触之间热传导及气缸盖外壁面与空气间热辐射等多种复杂的换热现象, 气缸盖三维温度场计算的传热边界条件的确定就成为气缸盖温度场分析的重点和难点. 由于气缸盖表面各部分所处的温度及换热状态较为复杂, 要想完全由理论计算来确定各处的换热系数是极为困难的. 因此在气缸盖温度场计算中, 换热系数的选取采用的方法是首先由经验公式初步确定, 再由类似机型测试结果和计算输出数据加以比较, 反复修改确定. 有限元综合应力分析时, 需要确定计算工况气缸盖边界上的载荷大小及分布状况. 因此热应力载荷的处理由计算出的温度场数据结果自动耦合计算; 燃气爆发压力的分布规律作均匀分布处理, 即假定燃气爆发压力沿燃烧室壁面均匀分布. 模型中不包括进、排气门和进、排气门座镶圈上承受的压力, 这些压力由进、排气门上承受的燃气压力计算. 考虑到每个气缸的气缸盖与气缸体接触面积较小, 而连接螺栓却有8个之多, 因此在确定螺栓预紧力边界条件时, 假定气缸盖与气缸体均匀接触, 即螺栓预紧力均匀分布在螺栓垫片与气缸盖的接触面上, 考虑到气缸盖的对称情况, 将两个对称面上的节点的Y向位移全部取0. 此外气缸盖的全部节点的旋转自由度也为0. 考虑到气缸盖进气侧和排气侧的对称性, 将气缸盖中心的某些节点的X向自由度取0. 当发动机工作时, 气缸盖上部加载, 而下部卸载, 气缸盖中部有某些点z向位移为0. 为简便起见, z向边界约束定在气缸盖底板的上表面(即水腔面)上, 将气缸盖底板上表面某一节点的z向自由度取为0<sup>[7]</sup>.

#### 5 机体的有限元模型

随着对环境要求的不断提高, 发动机振动和噪声问题越来越引起人们的注意. 由于机体结构复杂, 且与发动机诸多零部件相连接, 在发动机工作时承受着极为复杂的负荷, 使得机体的振动和噪声的预测工作变得困难. 利用有限元法进行机体的模态分析是一种比较理想的手段目前在国内外对机体所进行的模态有限元计算中, 大量地采用了板元或板、梁、实体元的组合方式, 这必然会对机体的结构作较大的简化这种简化的计算模型将带来一定的计算误差, 特别是对一些重要的局部区域, 其模态分析误差较大. 另一方面, 这种简化对随之要进行的三维应力分析, 时间历程响应分析带来更大的计算误差. 为此, 当

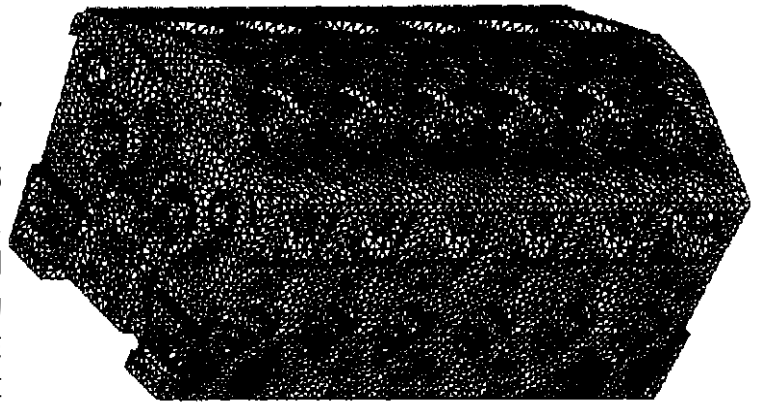


图5 机体的有限元计算网格模型

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

前研究全部采用三维 6 面体实体元来进行三维机体模态分析,为机体的结构分析和改进设计提供了更准确的参考依据.

由于在模态计算中无力的边界条件,在构造计算模型时作了适当的简化:(1)对安装机体附件凸台等进行了简化,或者省略.(2)对影响不大的小的螺孔、水孔和油孔等都不考虑.(3)为了使计算结果能与试验值相比较,按照试验时的状态,将轴承盖作为集中质量分别加载到各自的轴承螺栓上.由于机体结构相当复杂,采用网格自动生成十分困难,而全部采用人工划分的方法,工作量又太大.为此,采用了半自动生成的方法.根据此机体的结构特点,把机体从前端到后端分为 7 大块,其中的中间 5 块完全相同首先分别生成前端网格、中间的一块网格和后端网格,再在统一的坐标系下,把前端网格、5 块相同的中间网格和后端网格粘合起来,便可得到整个机体的网格,节点总数为 14650,单元点数为 9704,结论表明:(1)采用 3 维有限元法对大功率柴油机机体进行了模态分析,其计算结果与试验值相一致,表明此方法是进行发动机机体模态分析的最有效的方法之一.(2)通过计算发现机体的第 1 阶固有频率正好处在发动机发火频率的范围之内,在此频率处发动机机体极有可能发生共振.(3)采用三维 6 面体元进行机体模态分析的计算精度较高,但工作量随之增大.采用网格自动生成或半自动生成的方法可以使其工作量得到较大的减少,由此生成的网格可直接用于计算发动机机体的应力和结构噪声<sup>[8][9]</sup>.

### 6 结束语

应用有限元方法对发动机主要零部件设计,已经成为当前发动机设计的主要途径之一.有限元方法在发动机设计上的广泛应用,使发动机的性能不断的随着性能指标要求的提高而提高.有限元模型的建立是应用有限元方法关键的部分.本文所述的有限元模型为发动机的设计和分析提供了可靠的工程依据,也对其它领域的有限元建模具有参考价值.

#### 参考文献:

- [1] 廖日东等. 发动机零部件有限元技术应用的新进展[J]. 内燃机学报, 1999, 17(2).
- [2] 林宝阳. 组合式活塞的一种实体有限元模型与分析[J]. 内燃机工程, 1997, 18(1).
- [3] 朱宏顺等. 薄壁油冷活塞三维有限元计算及强度分析[J]. 内燃机工程, 1997, 18(3).
- [4] 王明武. 摄动随机有限分析连杆应力[J]. 内燃机学报, 1998, 16(2).
- [5] 尹建民. X6135 柴油机曲轴强度的三维有限元研究[J]. 内燃机工程, 1997, 18(2).
- [6] 耿学寨. 发动机曲轴加工工艺参数的优化[J]. 车用发动机, 1998, 4.
- [7] 张勇等. 车用发动机气缸盖的三维有限元结构分析[J]. 车用发动机, 1998, 7.
- [8] 李俊宝等. 柴油机刚体振动响应分析与结构修改[J]. 内燃机学报, 1997, 15(2).
- [9] 靳卫新等. 大功率柴油机机体三维模态分析[J]. 内燃机学报, 1997, 15(2).

## Application of Finite Element Models in Design of Engine

ZHANG Yun-xia<sup>1</sup>, SHEN Li-zhong<sup>2</sup>, BI Yu-hua<sup>1</sup>, SHEN Ying-gang<sup>1</sup>

(1. The Faculty of Communication Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China;

2. Department of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract** Finite Element Method is a very effective mathematical calculate method in engineering. It has been widely applied in various of engineering fields. With the constant improvement of engine design demands, the finite element method may be used in the design of major parts of engine and can meet the design needs of complex structures. The finite element modal analysis of an effective model has been done after building up its analytic model by applying modern CAD techniques. It is major way of current design of engine that the application of finite element mechanical model calculates stress and deformation in static state and real actual operation.

**Key words:** finite element; engine; model; application