

基于数字样机技术的柴油机设计优化

撰文 / 中国北方发动机研究所 杨维峰

一、引言

随着车用动力强化水平的提高和装备对高可靠性动力产品的需求,高性能、高紧凑和高可靠之间的矛盾越来越突出。运用总体设计理论与方法(包括集成方法、仿真模拟方法和综合比较方法等),将柴油机作为若干分系统有机结合的整体来设计,顶层规划、系统覆盖、综合协调、折衷权衡和反复迭代,以求得总体最优方案。总体设计过程集中体现在解决先进技术应用与工程实现的矛盾,采用先进方法及其支撑技术,改进产品结构、增加对产品性能的了解,使得其产品获得最短的开发周期、最低的成本和最高的性能。数字样机的创建是一个自上而下全相关的总体设计。

柴油机使用以知识工程为依托、CAD / CAE 集成技术为基础、多种学科技术为手段的基于数字样机技术的现代产品设计方法,制定完善的现代流程和规范方法,进行柴油机曲轴、连杆、凸轮轴、机体和气缸盖等关键件的结构优化

设计以及进排气、冷却和润滑等系统的优化匹配,在建立物理样机前通过对数字模型进行仿真、分析和产品优化,提前进行产品性能的预测和评估,减少物理样机阶段的研究工作,节省了研制时间和费用,提高了柴油机产品的质量和可靠性,完成了从依靠个人“经验设计”到基于企业核心能力“预测设计”的转变,使车用动力的研发逐步向“一次成功”方向发展。

二、数字样机技术

数字样机技术是以 CAX (以计算机为辅助手段的各种技术)/DFX (面向产品生命周期各环节的设计)技术为基础,以机械系统运动学、动力学和控制理论为核心,融合三维图形处理和造型技术、多领域仿真技术以及虚拟现实技术,将产品设计开发和分析过程集成在一起,使产品的设计者、制造者和使用者在产品的早期可以直观形象地对数字化产品原

考虑,对于可展曲面用 DEFORM 直接展开,而对于不可展曲面需用 CREATE 沿原曲面的两条边界线构造符合要求的可展曲面,再用 DEFORM 展开。此功能局限性较大,不适用于双曲面曲面的近似展开计算。

(2) 用 FLATPATTERN 功能展开计算。

首先需要把待展曲面网格化,然后选择一组等参数线(U、V)作为展开基准即曲面坐标系的两个轴,再以此曲面坐标系展开网格,最后把表面上的零件结构特征信息映射

到展开网格上以达到零件的展开。该功能适用于双曲面曲面的展开计算。

四、结语

本文论述基于零件中性层理论的钣金零件展开,适用于普通钣金、航空钣金和飞机等直段蒙皮;双曲面飞机蒙皮以及飞机整流外形蒙皮的展开、长桁和双曲面整体壁板。

型进行设计优化、性能测试、制造仿真和使用仿真，为产品的研发提供全新的数字化设计方法。

数字样机技术的研究核心是利用计算机辅助分析技术进行机械系统的动力学和运动学分析，运动学着重于分析产品机构的可动性和运动轨迹，通过动力学分析获得产品机构在运动过程中各运动副的动反力是强度分析的基础。完整的柴油机数字样机是最终产品的真实数字仿真，可进行工程分析、优化，确定最佳设计结构和参数值，获得最佳综合性能。

(1) 运动分析。验证曲轴连杆机构、传动机构和配气机构在空间运动过程中物理位置的准确性，分析各机构运动过程中的运动间隙，运动协调性等，对运动过程中几何元素或运动质点的位移、速度和加速度等进行数值分析。

(2) 性能参数匹配分析。结合试验数据，利用数字化分析工具，开展柴油机工作过程中各性能参数的匹配分析，进行进排气、冷却、润滑和供油等子系统的参数匹配。

(3) 空间结构分析。实施干涉检查、间隙检查、关键截面分析和测量空间分析，使设计者能够直观地了解到样机中存在的问题，如通过设定柴油机各零部件的热物理参数，计算柴油机不同状态下的间隙变化。

(4) 装配分析。按照物理样机的装配工艺、工装，模拟其装配过程，动态检测零件及其装配工装在装配和拆检过程中是否干涉，并分析装配间隙；分析柴油机整机的结构及其在装配过程中的空间要求，验证装配顺序、装配路径，为定义、预测和分析零件加工公差、技术要求提供数据支撑；确认部件、组装过程中各零件的装配顺序和位置保证的优先级等，并提出关键要素和措施的保证手段和检验准则；模拟柴油机部件级整机安装及拆卸过程，减少因设计考虑欠缺造成的改进或返工；按照物理样机维护、测试要求，模拟其维修、测试过程。

(5) 工艺性评估。评估数字样机构建工艺性，包括样机在台架的协调、面向制造的设计 (Design for Manufacturing, DFM)、面向装配的设计 (Design for Assembly, DFA) 和容差分析等。

(6) 设计优化。考虑零部件制造方法、材料属性，进行以下几方面的设计优化：通过刚强度分析、流场分析、温度场分析、疲劳寿命分析等对零部件、子系统的内部结构、重量和外形进行优化；通过运动学、动力学分析对运动机构运动行为进行分析，优化运动件的重量、形状及负荷；在装

配分析的基础上给出优化的装配顺序、装配路径，提高装配效率和人机有效性，改善维修性和测试性。

(7) 制造分析和数字化制造。按照相关规范建立柴油机零部件模型，使模型包含完整的、与实物零部件一致的制造过程信息，支持以下几方面的制造分析和制造：零部件模型在数字化制造过程中的直接使用，如几何形状、形位公差检查、模具制造和加工尺寸提取等；零部件制造 CAM 仿真及制造过程优化、工艺 CAPP 编制及优化。

三、CAD/CAE 集成技术

CAD 是人与计算机紧密配合的问题求解技术，各自发挥所长使其工作优于每一方，为应用多学科方法的综合性协作提供了可能。广义的 CAD 是指 CAD/CAE/CAM 的高度集成，包括二维绘图设计、三维几何造型设计、产品数字化装配、有限元分析 (FEA) 及优化设计、动态模拟、数控加工编程 (NCP) 及产品数据管理 (PDM) 等内容。

现代复杂产品的设计是一个跨越多学科的高度迭代的过程，涉及到多专业信息的集成、多学科团队的协同设计，涉及到多个不同子系统。子系统之间的互操作包括数据互操作和功能互操作，是指异构环境中两个或两个以上的子系统，尽管它们实现的功能、执行的环境和所基于的数据模型不同，各子系统之间有交互耦合作用，但可以进行相互通信和协作，共同组成完整的功能系统，完成某一特定的产品开发活动。数据互操作主要是传统意义上的几何数据交换，可以通过标准格式的转换形式传输数据文件，比如 IGES 和 STEP 等标准化的结构几何模型数据文件或者 CAD 系统的专用文件格式 (如 AutoCAD 的 dxf 或 dwg 文件、Pro/ENGINEER 的 prt 等)；而功能互操作是指系统的某些功能可以被其它系统所共享和直接调用，能够实现更加紧密的异构系统功能集成。基于应用系统间的、完全的且可以实现双向数据传递的集成方式是集成技术未来的发展趋势。

参数化的 CAD/CAE 集成和参数化动态 CAE 建模和分析技术，可以将参数化的造型技术引入到结构有限元分析或者优化设计中，CAE 系统可以直接调用三维 CAD 系统的参数化造型功能，分析的结果会对原有部件自动进行修改，从而实现反复迭代的设计优化过程。在设计阶段早期快速地对不同方案和设计变动进行数字化仿真、分析与验证，适应现代产品设计的动态特性，如系列化设计、模型修改与重分

析的要求，为快速响应设计提供有力的技术工具。

目前，ANSYS、NASTRAN 和 MARC 等大多数有限元分析软件已经实现了 CAD/CAE 的集成。ANSYS 可以进行结构静力学分析和结构动力学分析，能与多数计算机辅助设计软件接口，实现数据的共享和交换。多物理场耦合 ANSYS Workbench 的分析功能较为全面，通过 ANSYS Fatigue Module 模块进行疲劳分析，ANSYS Design Explorer 进行多目标快速优化。利用 ANSYS CFX 流场计算分析软件进行 CFD 流场计算，获得零件表面动态的压力场、温度场分布；在复杂空间流固耦合分析软件（集成 CFD 流场和结构强度耦合计算）把各个场分布动态载荷施加到计算零件上，然后用 ANSYS 结构分析软件进行强度计算和可靠性分析，并可以通过 Workbench 将结构受力变形结果直接施加到 ANSYS CFX 中，以得到结构变形对流体结果的影响。在同一环境下同时实现结构、热、流体分析及结构-热-流体多物理场耦合分析，把流场计算、温度场计算、结构强度分析以及三者结合的流固、温度应力耦合分析等仿真分析技术应用于产品的研发过程中。

复杂产品的建模与仿真正朝着多领域统一建模与协同仿真的方向发展。数字样机多学科建模仿真将是机械、控制等多个不同学科领域的模型相互耦合成为一个更大的模型，通过将不同学科但相互关联的仿真分析软件集成起来，规范多学科设计优化模型和算法的接口标准，各个不同领域仿真软件之间以中间文件的形式或利用 SDK 进行二次开发的方式，进行整体的仿真和分析。典型的数据格式，如用于控制机构一体化仿真以及其它仿真的动态链接库文件（dll），该文件中包含采用变量表示的函数信息；用于刚弹耦合分析的模态中性文件（mnf）中包含采用 [M]、[K]、[X] 和振型矩阵表示的弹性体信息。

四、优化设计技术

产品建模与仿真分析的最终目的是实现产品的优化设计，优化设计技术与数值仿真的结合是该领域的重要趋势。优化设计（Optimal Design）是在满足设计要求的众多设计方案中选出最佳设计方案的设计方法。优化设计的基本思想是以数学中的最优化（Design Optimization）理论为基础，把设计人员的判断决策能力与计算机程序依据某种最优化算法自动寻找最优设计的功能相结合，根据已知的给定参数，

在可行设计域进行搜索，求出满足全部约束条件并使目标函数取最小值的设计变量的解，使产品的指标或性能达到最期望的目标。

柴油机设计是典型的复杂机电系统设计，设计过程涉及结构、流体、燃烧、热和电控等多个学科领域，大多是多物理场、多学科耦合过程，计算分析内容较多，需要引入多学科设计优化的思想方法。多学科设计优化（Multidisciplinary Design Optimization, MDO）是一种通过充分探索和利用工程系统中相互作用的协同机制来设计复杂系统和子系统的方法论。其主要思想是在复杂工程系统的整个设计过程中，利用各个学科（子系统）之间的相互作用所产生的协同效应，从整个系统的角度优化设计复杂的产品系统，实现整体最优性能。美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）美籍波兰裔科学家 J·Sobieszcanski-Sobieski 在大型结构优化问题求解中首次提出多学科设计优化这一设想。MDO 有以下几项研究和实施的内容。

（1）设计表达与分解。包括系统需求和功能方案的确定、问题的定义与设计问题的目标函数描述、参数化几何模型的建模技术、子系统的划分和组织优化技术等。复杂产品设计问题首先经过问题描述，建立问题的数学优化模型，再经过系统分解，将复杂系统分解为多个学科级子问题。

（2）分析能力与近似方法。包括设计的广度和深度要求、逼真度的分析和试验有效集成、近似与修正的方法、面向设计的分析和灵敏度的计算能力等。每一个学科的子优化模型，应用各自的分析工具（如仿真工具）对问题进行学科分析。学科分析所用分析模型是比较精确的，要反复进行。在整个的系统优化过程中，往往使用近似模型替代学科分析中较精确模型，采用有效的近似方法来处理多领域学科间的耦合关系。对于一些连续变量的特殊问题，可以使用灵敏度分析来协调求解系统优化。

（3）信息管理与处理。包括 MDO 框架与体系结构、数据库、计算需求、人机接口界面及集成环境等。大多采用多级优化框架来求解系统优化问题。不管是系统级还是学科级优化求解策略，使用各种优化算法在设计空间中搜索优化解，进行结果分析。

（4）MDO 的管理与文化实施。柴油机多学科优化设计过程如图 1 所示。

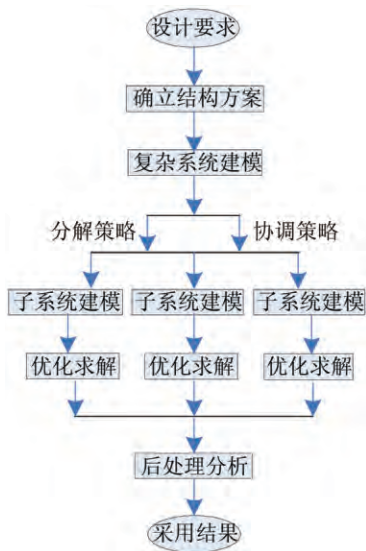


图 1

五、柴油机产品研发数字化技术平台

天舟 COMAN 是国内用于复杂产品开发的自动化平台，可以为复杂产品生命周期中的关键设计环节（如总体方案设计、部件原理设计、详细设计、基于数字样机的分析仿真等）提供管理工具。2008 年，研究人员以天舟 COMAN 为基础，封装集成数十种柴油机设计、仿真和计算工具软件，嵌入上百种多学科专业设计 / 仿真流程，容纳数十种专业设计规范等设计知识，融合、继承专业产品的设计方法和设计理念，构造出支持柴油机多学科设计 / 仿真的专业集成设计环境和自主创新研发核心能力平台。

在柴油机产品研发技术平台中，数字化仿真技术的应用分为关键零件快速设计分析系统和复杂系统多场耦合分析系统。关键零件快速设计分析系统主要应用于柴油机概念设计阶段，可以同时完成最多 10 个设计方案的快速仿真，实现多方案择优。计算完成后自动生成计算结果及分析报告，提交到仿真数据库中。复杂系统多场耦合分析系统求解是把一个复杂的系统问题分解为多个子问题，使用不同的软件对这些子问题进行分析和计算，而且封装成可重用的组件通过网络发布，使用系统客户端从服务器中访问这些组件，并通过图形界面连接，建立起各个组件之间的数据关联，使其装配成一个能解决复杂系统问题的 workflow，利用数据在各个组件间的自动传递，实现复杂问题的自动仿真过程。

CAE 作为产品开发和优化的标准手段应该与工程经验

数据库集成。仿真过程中产生的仿真模板、仿真参数、仿真模型和仿真结果等数据，应根据制定的模板和相应的技术要求进行管理。仿真模板指从成熟仿真流程和任务中提取出来的规范化仿真实施流程，是具体仿真任务的知识积累。针对特定的仿真模板，给出具体任务的几何模型和边界条件，可生成任务的仿真模型，并依据规范化的流程获得仿真结果。通过模板管理实现流程管理和知识重用，可以方便快捷地扩充快速仿真和复杂仿真功能，而不需要对软件进行源代码开发。因此，仿真模板是为开展流程化快速仿真和复杂仿真开发的脚本，以文件形式存在；仿真参数是仿真模型中涉及的几何模型信息、材料性能、载荷和约束信息等相关参数，以文本或数据的形式存在；仿真模型是进行仿真分析建立的物理模型、数学模型及软件模型，以文本或文件的形式存在；仿真结果是仿真计算分析的结果文件、分析报告等，均以文件形式存在。

六、柴油机优化设计流程

优化设计一般包括总体方案优化和设计参数优化。总体方案优化（总体布局、结构或系统模型的优化）的主要任务是建立和处理知识模型，进行基于专家系统的复杂机械产品设计方案非数值知识的优化处理，通过人工智能、专家系统、模糊评判和决策等方法进行推理获得合理的设计；设计参数优化（产品零件结构、工艺参数的优化等）的主要任务是建立正确的优化数学模型，设法求得最优值。柴油机的设计参数 CAD/CAE 联合优化过程如图 2 所示，通常需要经过以下步骤来完成，而且自动化程度越来越高。

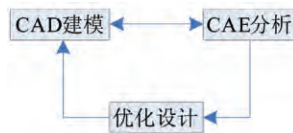


图 2

1. 准备阶段

根据实际问题近似确立产品结构方案。应根据仿真任务目标，确定仿真问题类型、仿真模型简化程度、仿真模型载荷和约束条件等。仿真模型是根据具体仿真任务建立的数字化模型，包括几何模型、边界条件、初始条件和计算设置等内容。几何模型指与柴油机结构相关的 CAD 模型，可以是一维、二维或三维模型，可以采用多种 CAD 建模工具创建。

几何模型为仿真模型指定具体的计算区域和边界位置。

2. 参数化建模

将机械设计实际问题抽象成为优化设计的数学模型，把将要参与优化的数据（设计变量）定义为模型参数，为以后软件修正模型提供可能。应根据仿真任务要求，进行建立数学模型、确定计算域和边界条件以及设置计算参数等工作。

(1) 建立有限元模型。导入通过 CAD 软件造型功能建立的实体模型，也可以直接在有限元分析软件中建模。初始的几何模型需要遵守仿真对模型的技术要求，突出主要问题，忽略次要附属件。对整个复杂的工程结构连续体问题区域进行分解，每个子区域都成为通过指定节点相互连接的简单部分（有限元），习惯上称单元划分为有限元网格划分。建立有限元模型时对单元类型选取和网格划分应统一考虑，开展网格收敛性分析，网格的划分密度要保障几何体形状不致太过失真，依据计算能力和水平进行网格划分和求解规模限制。通常在模型加密到一定程度时，计算结果的变化范围已经小于一定的百分比（如 5%），此时继续对模型进行加密并不能带来计算精度的进一步提升，此时的网格尺寸就是合理的。

(2) 材料设置。依据仿真模型要求和结构材料特性进行设置，如结构静力分析设置材料弹性模量和泊松比。

(3) 设置边界条件。结构分析主要包括载荷边界和约束边界条件。约束边界条件包括位移约束边界条件（有位移约束，对称约束等）和接触边界条件。结构承受载荷应依据模型实际工作条件和简化方法进行设置：①集中力，施加于模型节点的集中载荷；②表面载荷，施加于某个表面上的分布载荷；③体积载荷，体积的或场载荷；④惯性载荷，由物体惯性引起的载荷，如重力加速度，角速度和角加速度；⑤耦合场载荷，以上载荷的一种特殊情况，从一种分析得到的结果用作另一分析的载荷。

(4) 设置求解器。实现数字样机运动学动力学性能分析的关键，在于运动学动力学仿真计算和高效求解器的实现。根据不同类型的求解问题和计算软件，选择对应的求解器。设定不同的接触摩擦求解类型，疲劳寿命预估算法以及根据结果后处理需求设定仿真输出参量和形式。

3. 求解

应用最优化计算方法的程序在计算机上求解参数化 CAD 模型。针对具体任务，以命令流或文件方式提交分析

软件进行计算求解，并以命令流或窗口交互方式对计算过程进行监控。

4. 后处理

对仿真结果进行处理和分析，利用有限元分析软件后处理的图形功能，显示温度分布图、变形图和应力分布图，从中找出最高温度，最大变形、最大应力以及寿命最低区域，根据相应的评价准则进行评估，以图片或表格形式汇总，并依据应用要求提供仿真分析报告。

5. 优化参数评价

优化处理器根据本次循环提供的优化参数（设计变量、约束条件及目标函数等）与上次循环提供的优化参数作比较之后确定该次循环目标函数是否达到了最小，或者结构是否达到最优，如果达到最优，则完成迭代，推出优化循环圈。否则，根据已完成的优化循环和当前优化变量的状态修正设计变量，重新投入循环。

七、柴油机多学科仿真分析

基于数字样机技术的柴油机研发，需要进行概念设计阶段的柴油机热力学分析、曲柄连杆机构运动学分析、动力学分析等，方案设计阶段的柴油机刚度分析、振动噪声分析、性能分析和可靠性分析等，还要进行内部冷却液体及外部循环分析、润滑液体流场分析以及进排气系统空气流场分析等。柴油机结构仿真是指利用柴油机整体或零部件物理、数学模型，通过数值计算方法获得柴油机工作状态下位移、应力、应变等的过程。柴油机关键件（以气缸盖为例）结构仿真一般分为刚强度分析、模态分析、热分析和疲劳分析。

(1) 刚强度分析（也称静力学分析）包括线性和非线性分析，用于求解静力载荷（或准静态载荷）作用下结构的应力、位移和变形等。

比如，分析气缸盖在螺栓预紧力、气门座圈装配过盈力和最大燃烧压力作用下的应力和变形情况，对气缸盖水腔、气道壁和鼻梁区等关键位置的强度进行评估，并对气缸盖底板和气门座圈变形进行刚度评估。

(2) 模态分析用于确定结构或零部件的内禀振动特性，即结构的固有频率和振型，同时，也可以作为其它动力学分析问题的起点，包括瞬态动力学分析、谐响应分析和谱分析等。

对于整体式气缸盖，要分析其自由模态频率和振型等

基础动力学特性，为气缸盖动力学响应分析和动态特性优化设计提供基础数据。

(3) 热分析主要是指根据流场计算给定的换热边界条件或经验公式换热边界条件，对机体和气缸盖的温度场进行分析，为其它的结构仿真分析提供热边界条件。

要分析气缸盖在高温燃气、冷却液及外界环境影响下的温度和热应力分布，评估气缸盖在机械载荷和温度载荷共同作用下的结构强度，并可为疲劳仿真提供温度场和应力场。

(4) 疲劳分析是指对结构件在交变载荷作用下的疲劳强度和寿命进行分析和预估，可根据材料疲劳破坏前所经历的循环次数 N_f 不同，分为高周疲劳 ($N_f > 1 \times 10^5$) 和低周疲劳 ($N_f < 1 \times 10^4 \sim 10^5$)；或根据载荷工况和工作环境的不同分为机械疲劳、热疲劳和热-机耦合疲劳等。

首先对气缸盖进行机械疲劳仿真，评估气缸盖在单纯机械载荷作用下的疲劳强度和寿命是否满足设计要求；然后开展热-机耦合疲劳仿真，重点评估气缸盖火力面鼻梁区抵抗热-机耦合疲劳破坏的能力。

八、几点体会

在柴油机的数字化设计过程中，无论是数字样机的自顶向下模块化设计，FEA 的有限元离散法，还是 MDO 的系统分解，都体现着“集成/分解”的理念。用先进的优化方法和算法搜索、选择最优设计方案，用基于 CAD/CAE 的集成技术，结合柴油机数字样机进行多学科设计优化，不仅提高了柴油机设计水平，还可以优化设计流程和设计环境。

(1) 通过数字样机自动化设计流程，设计过程系统化，采用多目标机制平衡学科间影响，探索整体最优解，使所有设计参与人员都了解到其它学科的约束要求和优化目标，在设计初始树立全局观点。学科协同和并行设计能够将单学科（领域）的分析优化与整个系统中相互耦合的学科分析优化结合起来，采用优化策略对多学科设计空间进行搜索和整体权衡考虑，集成地进行多学科分析，减少了计算复杂性。并行协同地设计优化数字样机，可以方便地实现上下游并行设计和多专家协同设计，有效地降低了设计组织复杂性，保证了数字样机的模拟仿真精度。

(2) 通过引入网络化、信息化技术，建立柴油机研发信息网络、数据管理系统，实现柴油机在 CAD/CAE 之间

的数据统一标准和数据共享，进行完整产品定义数据的快速交换，避免了产品描述等重复性工作，有效地解决了柴油机行业中的资源重复配置和信息孤岛问题，为在计算机网络环境下实施远程异地设计制造提供有效的技术支持，有利于应对大数据时代带来的新挑战。

(3) 学科（子系统）集成既可以把可靠性、维修性、保障性、安全性、测试性以及环境适应性贯穿到整个系统设计过程中，又能有效地组织和管理整个优化过程，是一种很有潜力的系统综合设计技术。

九、结语

现代设计和优化技术有力地推动了系统集成和匹配研究的深入开展，大幅度提高了动力装置的功率密度和系统总成之间的优化匹配。高功率密度柴油机是在高功率的基础上进行高紧凑的总体结构设计，采用高应力材料进行整体式系统集成设计，减少无效空间，实现了功率最大、体积最小、质量最轻、成本最低。通过对柴油机各组成成分系统进行集成化、系列化、模块化的优化设计，达到整个装备的高紧凑性、高机动性的要求，使柴油机的单位体积功率、单位排量功率达到最高水平，加快了产品研发周期，降低了研发成本和技术风险，提高了市场竞争能力。IM