

面向设计重用的柴油机数字样机构建技术

撰文 / 中国北方发动机研究所 杨维峰 姚亮宇 杨俊恩 张志军

为了实现柴油机的数字化设计制造一体化集成,本文研究了数字化技术的发展趋势,描述了柴油机数字样机的定义,阐述了主动地应用、创建设计重用资源,构建柴油机数字样机的关键技术,主要包括仿真模型的阶段性继承重用、自顶向下模块化设计方法、产品数据管理、知识工程以及软件系统集成等技术。

目前,美、德、日等发达国家通过采用先进的物联网技术,打造数字化工厂,实现了从采购、生产到销售和服务的全产业链的数字化,而我国在数字化制造领域尚缺乏自主知识产权的数字化制造技术,迫使我国加快工业转型升级的步伐,借鉴德国工业 4.0 计划,使工业化、信息化深度融合,力争在 2025 年从工业大国转型为工业强国。企业要进行产品结构调整和自主产品创新,通过产品设计手段与设计过程的数字化和智能化,应用数字样机技术,以全新的设计模式和开发体系,给设计过程加入数字化的验证手段,显著提高产品研发速度和研发质量,降低研发成本,不断提高企业的产品创新能力、快速反应能力、竞争能力和经济效益。

面向设计重用,就是主动地应用和创建设计重用资源(包括知识、技术和系统等)。构建柴油机数字样机是充分体现了设计重用思想的创新活动。

一、柴油机数字样机

随着虚拟产品开发(Virtual Product Development, VPD)和产品全生命周期管理(Product Lifecycle Management, PLM)等多种数字化技术的应用,产品创新领域引发了大变革,数字样机技术是各领域 CAX/DFX 技术的发展和延伸。在数字样机概念出现前期,国内外文献出现了数字化产品模型技术(Digital Mock-Up)或数字化样机(Digital Prototype)、功能虚拟样机(Functional Virtual Prototype)或虚拟样机(Virtual Prototype)、虚拟工厂仿真(Virtual Factory Simulation)或数字工厂(e-Factory)等概念,表明仿真在产品过程中的应用趋于协同化和系统化,而且越来越广泛而深刻,由原先的局部应用(单领域、单点)逐步扩展到系统应用(多领域、全生命周期)。

GB/T 26100-2010《机械产品数字样机通用要求》对数字样机(Digital Mock-Up, DMU)的定义是:对机械产品整机或具有独立功能的子系统的数字化描述,这种描述不仅反映了产品对象的几何属性,还至少在某一领域反映了产品对象的功能和性能。产品的数字样机形成于产品设计阶段,可应用于产品的全生命周期,这包括:工程设计、制造、装配、检验、销售、使用、售后

和回收等环节；数字样机在功能上可实现产品干涉检查、运动分析、性能模拟、加工制造模拟、使用者培训、宣传和维修规划等方面。

根据功能和应用对象，柴油机数字样机可以分为以结构样机、性能样机和功能样机等为主的设计信息样机，以及以制造样机、装配样机、展示样机和培训样机等为主的专用样机。

结构样机是用于描述柴油机几何形状的数字样机，是柴油机外形轮廓、基本结构等方面的数字化表达。除了柴油机内部和外部各零部件的几何形状外，结构样机还包含了柴油机重量、重心等信息，并支持零部件运动间隙、干涉检查和尺寸链等信息的获取。

性能样机是侧重于产品性能描述的数字样机，用于柴油机性能、子系统参数的设计与表达，支持燃烧过程分析与控制。通过从性能样机中提取结构及参数，可以进行供油系、进排气系（含增压）、冷却系和润滑系的参数设计和结构优化，支撑子系统间协调优化。性能样机还包含柴油机可靠性、维修性、保障性、安全性、测试性和环境适应性等方面的信息。性能样机允许按子系统（燃烧、供油、电控、进排气和冷却和润滑等）分别创建。

功能样机是侧重于产品功能描述的数字样机，用于柴油机零部件的设计与表达，可以进行曲轴连杆机构、传动机构和配气机构及其支撑、定位结构的分析，支持密封及紧固设计。通过从功能样机中提取结构及参数，可以进行运动机构刚度、运动状态及接触状态等的分析。除了柴油机运动过程中零部件的运动学信息（位移、速度和加速度等）和动力学信息（作用力、摩擦力及预紧力等）外，功能样机还能够表达柴油机各运动机构的协调关系。功能样机可按运动机构（曲轴连杆机构、配气机构和传动机构）分别创建，并可以支持运动机构间协调优化工作。

专用样机是为支持柴油机全生命周期过程中特殊用途而构建的柴油机数字样机，是实物样机用于制造、装配和使用的数字化表达。制造样机包含零部件的 CAM 及 CAPP 仿真分析，零部件的成型、加工过程，表面粗糙度要求，以及尺寸公差等信息；装配样机包含样机装配工装、装配路径、装配顺序以及装配过程中的人机工程学模拟信息；展示样机着重表达了柴油机的关键技术的零部件、子系统等，以及新材料、新工艺的应用信息；培训样机着重于表达柴油机操作过程，日常维护等信息。

二、构建柴油机数字样机的阶段性继承重用

数字化产品开发主要包括三维几何建模技术、产品数字化定义、数字化装配技术、数字化仿真分析以及产品的数字化加工等部分。在产品数字化定义的基础上，通过虚拟装配，协调各零件之间的间隙，排除各种不合理的设计和干涉，进行运动机构分析，模拟零部件安装、拆卸分析，功能、性能交互仿真分析，系统部件行为的交互模拟分析等一系列设计活动，最终形成数字样机。

柴油机数字样机研发过程中至少需要进行概念设计、方案设计和工程设计三轮样机构建。数字样机仿真是可演进的，上一阶段的数字样机是下一阶段设计的输入和依据，每一阶段数字样机都已经首先包含上一阶段数字样机的所有相关信息，不同阶段仿真模型是继承重用。具体如表所示。

表 各设计阶段包含的数字样机

数字样机		概念设计阶段	方案设计阶段	工程设计阶段
设计信息样机	结构样机	✓	✓	✓
	性能样机	✓	✓	✓
	功能样机		✓	✓
专用样机	制造样机			
	装配样机			
	展示样机			✓
	培训样机			

1. 构建概念设计阶段数字样机

柴油机概念设计阶段数字样机，用于描述柴油机的基本技术方案，确定柴油机外形，并完成各子系统结构及协调关系，对零部件外形及功能结构进行确认。概念设计阶段提交的数字样机至少包含结构样机和性能样机。

概念设计阶段的结构样机至少包含柴油机各部件、系统的基本结构和在柴油机内的布置，柴油机缸盖进排气道结构和三维形状，柴油机整机支撑布局及主要承力结构，柴油机外部轮廓限制尺寸，柴油机与台架、整机的主要接口。

概念设计阶段的性能样机至少包含柴油机单缸机试验及一维燃烧分析信息，供油系部件试验及分析信息，进排气道性能部件试验及分析信息，冷却系、润滑系一维分析信息，电控策略信息。

2. 构建方案设计阶段数字样机

柴油机方案设计阶段数字样机，用于定义柴油机的基本物理布局 and 重要结构尺寸，同时完成柴油机整机和部件级结构可靠性的分析和确认，并完成整机及零部件的设计仿真和优化。方案设计阶段提交的数字样机至少包含结构样机、性能样机和功能样机。

方案设计阶段的结构样机至少包含整机及关键零部件刚度三维仿真分析信息，柴油机主要附件布置，柴油机所有部件间结构划分和部件间的详细结构尺寸，零部件的主要结构，柴油机主要维护保养点所需结构，柴油机主要管路系统、电控系统及其连接，柴油机的初步轮廓和主要接口。

方案设计阶段的功能样机至少包含柴油机燃烧过程三维仿真信息，柴油机冷却、润滑、进排气和供油系统三维仿真信息。

方案设计阶段的功能样机至少包含柴油机整机及主要零部件刚度三维仿真信息，柴油机整机振动噪声三维仿真信息，柴油机运动机构机械运动仿真信息和运动学、动力学分析信息，柴油机紧固和密封设计信息。

3. 构建工程设计阶段数字样机

柴油机工程设计阶段数字样机，用于支持全生命周期的数字化设计、仿真分析、制造、装配、试验、使用及维护。工程设计阶段提交的数字样机包含结构样机、性能样机、功能样机和专用样机。

工程设计阶段的结构样机包含柴油机数字化预装配信息，柴油机所有零部件的详细结构尺寸，柴油机所有维护保养点所需结构尺寸，完整的管路、电控系统结构尺寸，柴油机所有外围接口。

工程设计阶段的功能样机包含柴油机可靠性、维修性、保障性、安全性、测试性和环境适应性等信息。

工程设计阶段的功能样机包含整机关键部位疲劳安全系数信息，关键零部件应力分析信息，关键运动件变形信息和接触及疲劳安全系数信息。

三、构建柴油机数字样机的自顶向下、模块化设计方法

数字样机的构建流程采用模块化设计方法，设计任务由总体到系统、部件逐级分解，由部件、系统到整机逐步组合，实现产品的并行设计，支持多专业人员的协同。

模型重用的基础是模块化，即每个可重用的模型必须以一个可分离的方式独立存在，通过标准的输入 / 输出接口定义实现模块功能和表现形式的独立性。模块化设计是在对一定范围内的不同功能或相同功能而不同性能和规格的产品进行市场预测、功能分析的基础上，划分并设计出一系列功能模块，通过模块的选择和组合构成不同的产品，以满足市场的不同需求的设计方法。重用已有的经过试验、生产和市场验证的模块，可以降低设计风险，提高产品的

可靠性和设计质量。构建数字样机只是实现了几何上的模块化，我们要实现产品研发过程的模块化。

模型结构的层次化是组织复杂模型的有效方法。数字样机构建过程中参数及接口传递按照自顶向下的顺序分层次构建，逐步细化。顶层通过参数文件和总体骨架模型，表达及协调设计参数、设计结构、外廓约束、部件间接口、联接、紧固和密封等，并以协调卡片和发布骨架的形式阶段性稳定设计状态。柴油机整机模型构建程序如图 1 所示。

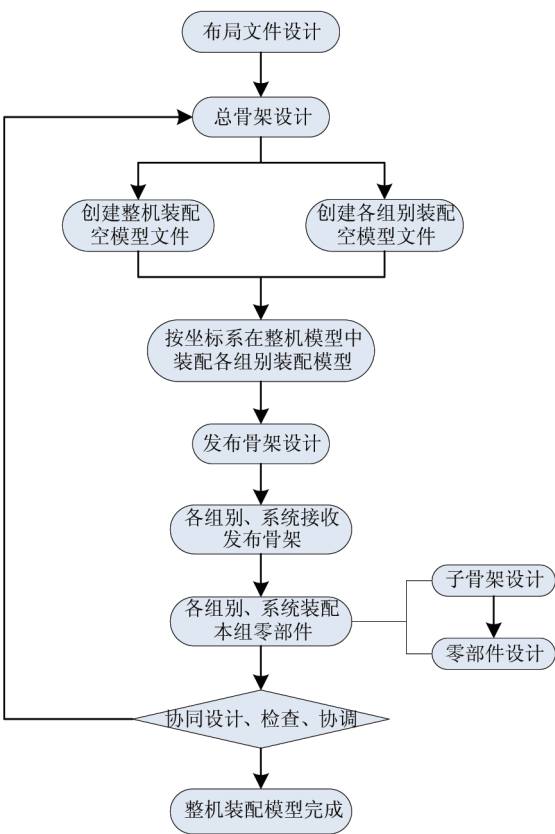


图 1

柴油机数字样机设计间、设计与仿真间、设计与工艺间协同方法和协同节点按照柴油机各阶段设计流程开展。数字样机包含柴油机的机械结构和子系统协调关系，以用于结构和性能分析。

四、构建柴油机数字样机的数据管理平台

数字样机是表达产品所有状态最根本的依据。完备的数字化产品模型，不仅是要描述产品整个生命周期某个过程的产品构成情况，而且对产品技术状态的标识、审核和控制都要求很高。数字样机是通过产品数据管理（Product Data Management, PDM）系统进行存储和管理的。将产

品在自顶向下建模设计过程中产生的与产品相关的设计、分析数据（包括骨架模型、三维模型、二维图样、运动机构仿真动画及虚拟装配动画、测试数据和仿真分析报告等），按研制阶段的不同应用要求提交到 PDM 系统，根据数据类型的不同分别进入产品、参数、试验和生产等数据管理系统进行统一的规划和管理。签入并确认有效性的数字样机数据在全生命周期内为单一数据源，数据的关联、提交、版本、更改和衍生应进行受控管理。应根据不同平台、不同阶段、不同单位和不同用途等情况，考虑数字模型的转换和合并，提出模型的交互格式要求。由于产品数据安全集中共享，设计人员可以很方便地查找、借用其它同类产品的设计经验，设计重用率大大提高。

PDM 管理的不仅是数据，设计重用的对象包括可重用的设计结果和设计方法、工具和过程等抽象知识。可重用的结果可以减少重复的零部件的设计；可重用的过程就是模块化封装的过程，可以减少设计过程中某一环节的重复。

数字样机的仿真分析需要结合实物试验数据。用数字样机技术进行仿真分析（含有简化和假设）的结果，只有重用并对比了企业积累的用实物样机进行产品开发的试验测试结果，如图 2 所示，才能建立对仿真分析的置信度，提高产品设计水平，实现原始创新。

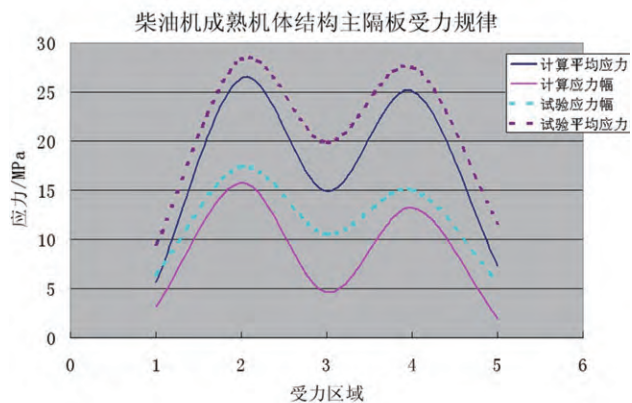


图 2

企业要有目的地建立和挖掘提取可重用设计资源，减少创新开发中的重复劳动。按参数化设计要求，构建产品需求的通用件、标准件库，而且通用件、标准件等模型库必须唯一，保证设计重用时的方便准确调用。

五、构建柴油机数字样机的知识工程

在柴油机全生命周期中，数字样机创建过程中的每

一步实质上都是知识应用和驱动的过程。应用知识工程 (Knowledge Based Engineering, KBE)，将知识、技能、经验、原理和规范等融合、重用到产品的设计开发环境中，构建了一个知识驱动的可回溯的迭代与进化过程，使得工程设计人员在自动或交互的复合环境中，只要输入工况参数或工程参数或应用要求，系统就能依据相关的知识（规则），自动推理构造出符合该特定要求下的产品零部件数字模型。

六、结语

数字化设计的关键是要实现仿真间的互操作，促进仿真资源（特别是模型资源）的重用。在产品数字化设计的全生命周期中，标准化的数据接口和模块化的、集成的平台非常重要。构建柴油机数字样机必须规范三维基础环境配置，统一仿真建模环境。为了实现厂所之间数字样机相关软件的模型重用和信息集成，从现在的互联到互通，直到互操作，车用动力数字化工程正在完善设计制造远程异地一体化协同平台，实现分布在不同地点的多个企业之间对数字样机的集成应用、互操作，实现设计制造并行。