

仿真技术在机械设计与制造中的应用

邵英武

天津技通机械设备有限公司 天津 300384

摘要: 仿真技术基于多学科理论, 通过建模模拟系统运行, 是机械设计与制造的关键技术。其分为物理、数学等类别, 常用软件有ANSYS、ADAMS等。在机械设计中, 用于结构、流体、接触分析仿真; 在机械制造中, 应用于数控加工、虚拟装配和制造过程优化。汽车发动机、航空发动机叶片、风力发电机组等案例表明, 仿真技术能提升性能、缩短周期、降低成本, 助力机械行业高质量发展。

关键词: 仿真技术; 机械设计; 机械制造

引言

在机械设计与制造领域, 传统研发模式面临成本高、周期长、风险大等挑战。随着科技发展, 仿真技术凭借其独特优势, 成为解决这些问题的有效手段。它无需搭建实体原型, 就能对系统运行状态进行重现、分析和预测, 为工程决策提供精准数据支撑。深入探讨仿真技术在机械设计与制造中的应用, 对提升行业竞争力、推动技术创新具有重要意义。

一、仿真技术概述

(一) 仿真技术的定义

仿真技术是基于系统论、控制论、计算机科学等多学科理论, 通过建立与实际系统结构和行为高度一致的数学模型或物理模型, 利用计算机软硬件资源模拟系统运行过程、预测系统性能指标的综合性技术。该技术通过将实际系统的动态特性转化为可计算的数值模型, 实现对系统运行状态的重现、分析和预测, 无需搭建实体原型即可完成对系统功能的验证。其核心价值在于以较低成本复现复杂系统的运行机制, 捕捉系统在不同参数组合下的响应规律, 为工程决策提供精准的数据支撑^[1]。从本质上讲, 仿真技术是连接理论设计与实体实现的关键桥梁, 通过数字化手段降低系统研发过程中的试错成本, 提升方案优化的效率和可靠性, 已成为现代工程领域不可或缺的核心技术之一。

(二) 仿真技术的分类

仿真技术可依据建模方式、运行环境和应用场景划分为多个类别, 不同类别在技术特点和适用范围上存在显著差异。按建模方式可分为物理仿真和数学仿真, 物理仿真是通过构建与原系统相似的物理模型实现模拟,

如机械结构的缩尺模型试验; 数学仿真则通过建立微分方程、统计模型等数学表达式, 借助计算机进行数值求解, 是当前应用最广泛的类别。按时间维度可分为实时仿真和非实时仿真, 实时仿真需严格遵循实际系统的时间进程, 多用于控制系统联调等场景; 非实时仿真可灵活调整计算步长, 适用于高精度分析。按学科领域可分为结构仿真、流体仿真、电磁仿真等, 分别对应不同工程问题的求解需求。按仿真规模还可分为单元仿真、系统仿真和全局仿真, 从单一组件到复杂系统形成完整的仿真层级体系。

(三) 常用仿真软件介绍

工程领域常用的仿真软件已形成覆盖多学科的产品体系, 各类软件凭借独特的功能优势占据不同应用场景。ANSYS作为通用有限元分析软件, 具备强大的结构静力学、动力学和热力学分析能力, 支持从零部件到整机的多物理场耦合仿真, 在机械、航空航天等领域应用广泛, 其参数化建模功能可实现多变量方案的快速迭代优化。ADAMS专注于多体动力学仿真, 能够精准模拟机械系统中零部件的运动轨迹、受力状态和碰撞响应, 可直接输出位移、速度、加速度等关键运动参数, 是机构运动分析和动力学性能验证的核心工具。Fluent作为专业流体力学仿真软件, 采用先进的数值计算方法求解纳维-斯托克斯方程, 可模拟湍流、相变、多相流等复杂流体现象, 在管道流动、热交换器设计等场景中表现突出。MATLAB凭借强大的数值计算和编程能力, 常作为自定义仿真模型开发的平台, 支持与其他专业软件进行数据交互。

二、仿真技术在机械设计中的应用

(一) 结构设计仿真

结构设计仿真通过对机械零部件和整机结构进行力

学性能分析,是确保产品承载能力和可靠性的关键环节。在设计阶段,工程师通过建立三维实体模型,施加与实际工况一致的载荷条件和约束边界,利用有限元法将结构离散为多个单元进行数值求解,可精准获取应力分布、变形量、固有频率等关键指标。针对悬臂梁结构,可通过仿真分析不同截面尺寸和材料属性下的最大挠度值,确定满足刚度要求的最优设计方案;对于承受循环载荷的传动轴,借助疲劳仿真模块计算应力循环次数和损伤累积程度,预测其使用寿命并优化过渡圆角等易疲劳结构。在大型机械结构设计中,如起重机主梁,通过整体结构仿真可发现局部应力集中区域,通过增加加强筋或优化截面形状等方式进行改进,避免实体样机试验中可能出现的结构失效问题,同时大幅降低设计周期和研发成本^[2]。

(二) 流体力学仿真

流体力学仿真在机械设计中主要用于解决流体流动与传热相关的设计问题,通过模拟流体与机械结构的相互作用提升产品性能。在液压系统设计中,利用仿真软件构建液压阀、管路等元件的三维模型,模拟液压油在不同工况下的流速分布、压力损失和温度变化,可优化阀口结构和管路布局,减少系统能耗和振动噪声。对于汽车散热器设计,通过仿真分析冷却液在散热管内的流动状态和空气在散热片间的换热过程,优化散热片间距和管排数量,提升散热效率以满足发动机热管理需求。在离心式风机设计中,通过模拟叶轮旋转时的气流场分布,分析叶片形状对风压、风量和效率的影响,调整叶片进口角和出口角等参数,实现风机气动性能的优化。另外,在密封结构设计中,通过仿真验证流体密封效果,预测不同压力下的泄漏量,为密封件选型和结构设计提供数据支撑。

(三) 接触分析仿真

接触分析仿真专注于模拟机械系统中不同零部件之间的接触行为,是解决磨损、应力集中和运动干涉问题的核心手段。在齿轮传动设计中,通过建立齿轮啮合的三维模型,设置齿面接触属性和摩擦系数,仿真分析啮合过程中齿面的接触应力分布、接触斑大小和位置,优化齿轮的模数、齿形系数等参数,减少齿面磨损和胶合失效风险。对于螺栓连接结构,通过接触仿真分析螺栓预紧力作用下接合面的压力分布,验证连接的密封性和刚度,确定合理的预紧力矩值,避免因预紧力不足导致的松动或过大导致的螺栓断裂。在导轨滑块机构设计中,仿真滑块在运动过程中与导轨的接触压力变化和摩擦力

分布,优化导轨截面形状和润滑方式,提升机构运动的平稳性和使用寿命。在离合器接合过程仿真中,可模拟摩擦片之间的接触压力变化和滑摩过程,为离合器设计提供接合平稳性和传递扭矩能力的验证数据。

三、仿真技术在机械制造中的应用

(一) 数控加工仿真

数控加工仿真通过构建数字化加工环境,模拟数控程序的执行过程,是提升加工精度和效率的关键技术。该技术基于零件三维模型和机床数字化模型,将编制的G代码导入仿真系统,可实时显示刀具运动轨迹、零件材料去除过程和刀具与夹具的相对位置关系^[3]。在复杂曲面加工中,如模具型腔加工,通过仿真可提前发现数控程序中的过切、欠切问题,优化刀具路径以保证加工精度;对于多轴联动加工,可验证各轴运动的协调性,避免因轴间干涉导致的机床碰撞事故。仿真系统还可模拟不同切削参数下的加工过程,分析切削力、切削温度对刀具磨损和零件加工质量的影响,通过对比不同切削速度、进给量组合的仿真结果,确定最优加工参数。通过数控加工仿真,可大幅减少试切环节的材料消耗和机床占用时间,缩短生产准备周期。

(二) 虚拟装配仿真

虚拟装配仿真基于数字化模型开展装配过程模拟与分析,可提前发现装配工艺中的问题并优化流程。该技术通过导入零部件三维模型,在虚拟环境中按照预定装配顺序进行装配操作,实时检测零部件之间的装配干涉、配合间隙等关键指标。在发动机装配过程仿真中,可模拟活塞、连杆、曲轴等关键部件的装配顺序,检测活塞与气缸套的配合间隙是否满足要求,避免因装配不当导致的运动卡滞问题;对于大型设备装配,如数控机床床身与立柱的装配,可通过仿真分析装配顺序对装配精度的影响,优化吊装方案和定位基准,提升装配效率。虚拟装配仿真还可用于装配工艺规划,通过模拟不同装配路径的操作难度和时间成本,确定最优装配流程,并生成可视化的装配指导文件,为现场操作人员提供直观的作业指导,减少装配过程中的返工率。

(三) 制造过程优化仿真

制造过程优化仿真通过模拟整个生产流程的运行状态,实现生产资源配置和工艺参数的精准优化。该技术基于生产系统的数字化模型,整合设备、物料、人员等生产要素信息,模拟工件在各工序间的流通过程、设备负载变化和生产瓶颈分布。在机械加工生产线设计阶段,通过仿真分析不同设备布局方案下的生产效率,优化机

床排列顺序和物料输送路径,减少工件搬运时间;对于批量生产过程,可模拟不同生产节拍下的设备利用率和产品合格率,确定合理的生产批量和调度方案,平衡设备负载。在冲压成型工艺中,通过仿真模拟板材在模具作用下的变形过程,分析冲压速度、压边力等参数对成型件质量的影响,优化工艺参数以减少褶皱、裂纹等缺陷;在焊接过程仿真中,可模拟焊接温度场分布和应力变化,优化焊接电流、电压和焊接速度等参数,减少焊接变形。

四、仿真技术应用案例分析

(一) 汽车发动机设计制造中的仿真应用

汽车发动机设计制造全过程中,仿真技术的深度应用大幅提升了产品性能和研发效率。在设计阶段,结构仿真用于发动机缸体、缸盖的力学性能分析,通过模拟发动机运行时的缸内压力和温度载荷,优化缸体壁厚和加强筋布局,提升结构强度的同时实现轻量化设计;流体力学仿真用于进气歧管和排气系统设计,模拟气流流动状态优化管道形状,提升进气效率和排气顺畅性,进而增强发动机动力性能。在制造阶段,数控加工仿真用于发动机曲轴、凸轮轴等精密零件的加工过程验证,优化刀具路径和切削参数,保证零件尺寸精度;虚拟装配仿真用于发动机总装流程规划,模拟活塞与连杆、气门与气门座等部件的装配过程,检测配合间隙和装配干涉,优化装配顺序。通过多环节仿真应用,发动机企业将研发周期缩短30%,新产品故障率降低40%,同时发动机燃油经济性提升8%,实现研发与生产的双重优化。

(二) 航空发动机叶片制造中的仿真应用

航空发动机叶片作为核心零部件,其制造过程对精度和性能要求极高,仿真技术在此过程中发挥着关键支撑作用。在设计阶段,结构仿真模拟叶片在高速旋转时的离心力和温度载荷作用,分析应力分布和变形情况,优化叶片叶型和榫头结构,确保在极端工况下的可靠性;流体力学仿真分析气流在叶片表面的流动状态,优化叶型曲线以提升发动机推重比。在制造阶段,叶片锻造过程仿真模拟高温状态下金属的塑性变形过程,优化锻造温度、压力和模具结构,避免出现裂纹、折叠等缺陷;数控加工仿真验证叶片复杂曲面的加工路径,通过多轴联动仿真确保加工精度满足设计要求,同时减少刀具损耗。对于叶片焊接工艺,仿真模拟焊接温度场和应力分

布,优化焊接参数以减少焊接变形。航空企业通过全面应用仿真技术,叶片制造合格率从75%提升至92%,研发周期缩短40%,显著提升了产品竞争力。

(三) 风力发电机组设计与制造的仿真应用

风力发电机组受野外复杂工况影响大,仿真技术在其设计与制造中实现了性能提升和成本控制。设计阶段,结构仿真针对风轮叶片、塔架等关键部件开展分析,模拟强风、阵风等载荷下的应力分布和振动特性,优化叶片长度和塔架截面尺寸,在保证结构安全的同时降低材料成本;流体力学仿真分析气流通过叶片的流动状态,优化叶型设计以提升风能转换效率^[4]。在制造阶段,叶片成型过程仿真模拟复合材料的灌注和固化过程,优化灌注压力和固化温度曲线,避免出现气泡、缺胶等缺陷;虚拟装配仿真用于发电机组整机装配规划,模拟机舱与塔架、叶片与轮毂的连接过程,检测装配精度和连接强度,优化吊装方案。制造过程优化仿真模拟零部件生产线运行状态,优化设备布局和生产调度,提升生产效率。风电企业应用仿真技术后,发电机组风能利用系数提升5%,叶片制造成本降低12%,整机故障率降低35%,为风电装备的高效研发和生产提供了有力支撑。

结束语

仿真技术在机械设计与制造领域的应用成效显著,从设计阶段的性能分析到制造环节的工艺优化,全方位提升了产品质量、研发效率和生产效益。汽车发动机、航空发动机叶片、风力发电机组等成功案例,充分证明了其强大作用。未来,随着技术不断进步,仿真技术将更深入融入机械行业,为行业创新发展注入源源不断的动力。

参考文献

- [1] 孔令宁. 仿真技术在机械设计制造中的应用研究[J]. 南方农机, 2022(6): 118-119.
- [2] 徐大帅. 仿真技术在机械设计制造中的应用[J]. 时代汽车, 2022(20): 131-133.
- [3] 马强, 戴琪. 仿真技术在机械设计制造中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2024(3): 224-226.
- [4] 谭展. 仿真技术在机械设计制造中的应用[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(12): 142-144.