

数字化设计技术在机械产品开发中的应用与发展

姚振泽

开鲁县农机化技术推广服务站 内蒙古通辽 028400

摘要: 伴随着信息技术和工业自动化程度的提高,数字化设计技术成了当前机械产品的关键驱动因素。本文对数字化设计技术在机械产品全生命周期中的重要应用进行了系统性研究,涵盖了三维建模与参数化设计、计算机辅助工程(CAE)仿真分析、虚拟现实(VR、增强现实(AR)辅助设计、基于模型的系统工程(MBSE)以及数字孪生等)。文章具体分析了这些技术是如何在数字领域中完成设计、分析、验证和优化的循环过程,从而极大地提升了机械产品设计的精确度、速度以及创新水平,并且有效地缩减了开发时长,减少了物理试制及试错所带来的巨大开销。本文对数字化设计技术未来的发展方向做了详细的预测,并着重分析了由人工智能驱动的创成式设计、云协同设计平台普及及学科间融合等内容,以期给机械工程领域的数字化转型以及智能制造水平提升带来理论支撑与实际帮助。

关键词: 数字化设计;机械产品开发;三维建模;仿真分析;创成式设计

引言

作为现代工业体系的重要支柱,机械产品的研发质量和速度直接关系到国家制造业的核心竞争能力。传统的设计流程以二维图纸为驱动基础,其特点主要是高度依赖设计师的经验判断,并通过反复制作物理样机以及人工调试的方式来实现目标设定,这就使得整个研发周期变得十分漫长、成本高昂且不确定因素增多。进入21世纪之后,在计算机图形学、高性能计算平台技术、物联网技术以及人工智能算法等前沿领域迅猛发展的影响下,数字化设计技术作为现代设计领域的重要发展方向,其在工业领域的应用已经十分广泛^[1]。数字化设计技术以数字化信息为基础,其本质是围绕产品全生命周期构建一条贯穿始终的“数据链”,利用标准化的数据格式将几何模型、功能属性、性能参数、材料信息和工艺路线等内容进行整合处理,最终达到从概念产生直至报废为止的所有环节都能做到全面的信息集成与动态管理的目标效果。全球智能制造战略框架之下,“工业4.0”与“中国制造2025”的深入发展推动数字化设计技术逐渐成为涵盖设计、分析、优化、验证及协同功能的综合工程体系,这既给机械产品性能改善、可靠度提升以及迅速应对市场变化赋予了关键技术依托,又明显加强了个

性化定制服务的实际应用效果。

一、数字化设计技术在机械产品开发中的关键应用

数字化设计在设计、生产机械产品的应用,能降低设计的时间,提升设计的精确性,使机械产品能更快地被生产从而产生工业价值^[2]。如今,数字化设计技术已构建起一个全面覆盖机械产品开发流程的数字生态系统,其在不同阶段发挥着无可替代的核心作用。

(一) 三维建模与参数化设计

三维实体建模作为所有数字设计活动的起点以及基本依据,依靠准确的几何学计算及拓扑构造,在计算机中创建出来的是一个与实物完全相同的一种虚拟模型来代替过去传统的二维视图表示方法。这种高保真的三维模型不仅仅包含了产品的形状和尺寸信息,而且还可以嵌入产品的材料、公差配合、表面粗糙度等非几何信息,构成了产品的数字定义。在此基础之上,参数化设计技术进一步增强了模型的智能与灵活性。设计人员可以对模型的几何特征间建立各种约束关系以及定义驱动参数,在此基础上实现根据参数值的变化自动且精确地对模型做出相应的调整和修改操作。比如改变一个轴的直径参数,所有和它配合的孔、键槽、装配关系等都会跟着自动修改。

(二) 计算机辅助工程(CAE)仿真分析

计算机辅助工程(CAE)作为数字化设计体系里保

作者简介: 姚振泽(1996-),男,汉族,内蒙古通辽,初级职称,本科,主要研究方向:机械工程,农业机械。

证产品性能、可靠性的重要组成部分，通过有限元法（FEM）、计算流体力学（CFD）、多体动力学（MBD），对三维模型做各种复杂的物理效应仿真分析。通过对产品制造之前进行全部，多种工况的性能评估，在数字域中找出设计缺陷比如局部应力集中，共振危险或者不合适的流动阻力。CAE仿真可以预测产品性能极限，但更重要的是能够帮助设计者进行设计优化，在满足功能需求的基础上，利用敏感度分析和迭代计算等手段实现产品的结构轻量化、能耗最小化或性能最大化。采用仿真驱动设计的方式从根本上改变了传统上制造—测试—修正所导致的高昂试错过程，大大缩短了研制周期、减少物理样机及试验投入。

（三）虚拟现实（VR）与增强现实（AR）辅助设计与评审

VR与AR技术的引入，使得机械产品设计不再局限于传统的电脑屏幕。虚拟现实（VR）能够创建一个完全沉浸式的三维环境，设计人员可以“走进”等比例的虚拟样机，进行近乎真实的交互式设计评审、装配可行性分析和人机工程学评估。例如，在大型机械设备或复杂管路系统的设计中，VR可以直观地检查空间布局、操作可达性和维护通道，极大地提高了设计缺陷在早期阶段被发现的概率。增强现实（AR）则将虚拟模型信息实时叠加到现实环境中，实现了虚拟信息与物理实体的融合。在产品开发阶段，AR可以辅助进行物理样机与数字模型的实时比对，检查制造偏差；在生产制造环节，AR可提供装配、焊接、检测的实时指导；在售后维护环节，AR能为现场工程师提供叠加在设备上的数字维修手册和故障诊断信息。VR和AR技术的应用，使得设计信息的传达更加直观、准确和高效，尤其在涉及复杂空间和人机交互的场景中，展现出巨大的应用价值。

（四）基于模型的系统工程（MBSE）

由于当代机械产品正向着智能化、机电软一体化的方向发展，所以产品的系统结构变得越来越复杂。传统的基于文档的系统工程方法很难处理好多学科、多需求、多约束之间的关系。基于模型的系统工程（MBSE）作为一个范式转换，把形式化、结构化的模型当作系统信息的唯一的“单一可信源”。MBSE用统一建模语言（例如SysML）实现从需求分析、功能定义、逻辑结构到物理实现的全过程中都是以模型驱动的方式来完成。机械产品开发过程里，MBSE可以把机械结构、电子控制以及嵌入式软件这些部分的接口关系和交互逻辑描述得非常

清楚，并保证各个子系统的工程方案不会出现违背顶层设计方案的情形^[3]。它提高了整个开发团队的协作效率，具备了很强的可追溯性以及变更管理能力，能够很好地解决复杂巨系统（高铁、航空发动机、智能机器人）在开发过程中所面临的跨学科集成与验证等挑战。

二、数字化设计技术的发展趋势与前沿探索

数字化设计技术正以前所未有的速度向前推进，与前沿信息技术的深度融合正在催生新的设计模式。

（一）人工智能驱动的创成式设计

创成式设计（Generative Design）是在数字化设计领域里最具革命性发展走向的一种，把设计流程从传统“设计师手工制作几何形状”变成“设计师给定目标，AI自动生成最佳几何”。这项技术的关键点就是借助先进的AI算法，像进化计算，机器学习还有拓扑优化这些方法，在预先设定好的性能目标（最大刚度，制造限制条件（3D打印），铸造，材料属性以及边界情况等形成的庞大设计空间当中执行快速的搜索与选择。AI算法可以摆脱人类设计师的经验和传统思维的限制，产生出拥有极高的材料利用率以及仿生特征的复杂自由曲面结构。这样的结构往往可以提高设计效率和精度，缩短开发周期，降低制造成本，并在产品优化、质量控制和生产自动化方面发挥重要作用^[4]。创成式设计，不仅让设计效率得到提高，而且更重要的是，它把重心由“如何做出形状”转移到了“如何定义功能与性能”上来，在此情况下，机械产品就可以用更快、更高效的方式去更新改进到最佳性能方案上。

（二）数字孪生（DigitalTwin）与全生命周期管理

数字孪生（DigitalTwin）技术是数字化设计理念的最高级，也是最完善的应用，它代表了设计数据从静态的产品描述，发展到与物理世界实时互动的智能映射。数字孪生是整个生命周期内与物理对象进行实时联系并互相映射且动态同步的一个虚拟模型。其搭建不只是三维几何模型，更是融合了多物理场仿真模型、控制逻辑模型、故障预估模型及从IoT传感器、边缘计算系统获取的实时运行数据。机械产品开发当中，数字孪生给予了设计改良一种前所未有的回路反馈机制，在产品投入应用之后，运转时的数字孪生体可以及时检测到性能退化情况，还能预估可能出现的故障，模仿各种不同的工作状态下的运行情形，并把这诸多宝贵的“使用数据与洞察”立刻回馈给最初的产品设计模型。这种持续的、根据实际运行数据反馈形成的闭环使得工程师可以准确地

发现并修正设计的缺陷，指导下一代产品有针对性地做改善，从而实现了从“一次性设计”到“不断优化设计”的转变，提高了产品的寿命、可靠性以及运营效率。

（三）云端协同设计与平台化

全球化制造与复杂产品高效的开发需要对设计协同有更高的要求，从而促使数字化设计平台走向云端。云端协同设计平台用上了云计算基础设施的无限弹性计算资源，摆脱了传统桌面CAD/CAE软件受制于本地硬件性能的问题，在云端实现大规模、高精度多物理场仿真的高效并行运算和复杂的优化计算。更重要的是一套云平台给所有参与者提供一个统一的，可以严格控制版本的中央数据仓库及管理环境。也就是说，就是给所有的参与方提供了一个唯一可信的数据来源。打破地域和组织的界限，各个地区各个部门的工程师、供应商、制造商、客户的实时同步设计评价批准都建立在最新的统一的数据之上。采用统一标准接口及提供开放式的API，使云平台能快速接入其他外部第三方软件或者企业内的各种软件系统，并由此构建出一个开放式的架构模式来实现产品全球研发工作的高效率运转与灵活操作，在一定程度上也提高了对整个市场供应体系的应变能力。

（四）跨学科、跨领域技术的深度融合

现在机械产品发展成为包含机械、电子、控制、软件和材料等诸多子系统的复杂集成体。未来数字化设计的技术必然要打破原有学科界限，允许这样的跨学科融合，即机电软一体化设计。这就意味着，数字化的设计工具要从传统几何中心转移到系统中心上来，把机械结构的设计同嵌入式系统的软件设计，电子硬件的安排以及先进功能材料的性能模型实现无缝衔接并且协同仿真的状况出现。比如机器人，智能装备这些复杂产品，开发的时候，设计平台得能同时对机械臂的运动学和动力学，伺服电机的控制算法，传感器数据的处理逻辑等等，做耦合建模，还要进行虚拟验证^[5]。这种多物理场、多学科的联合建模与仿真，需数字化设计软件有着十分开放的架构，很强大的数据集成功能接口以及统一的系统建模语言（比如MBSE），这样才能保证不同专业的设计模型

和分析结果能在同一个数字环境里进行精准无歧义的交流，从而做到复杂系统的功能，性能及物理实现最适配的协同。

三、结论与展望

数字化设计技术是驱动机械产品开发模式创新的核心技术，它用构建完整的产品数字主线的方式实现产品全生命周期信息流的连续、一致。从基本的三维参数化建模发展到高性能CAE仿真，直至前沿MBSE、数字孪生以及基于人工智能技术生成式设计等技术出现，这些都构成了当前机械产品快速高质发展的基石。核心价值就在于把高昂的物理试验错误转移到成本低、效率高的数字领域之中，从本质上改变产品创新的速度和可靠程度。

未来的数字化设计技术将沿着智能化、集成化、生态化的方向继续深入发展，人工智能会贯穿整个设计环节之中，在更高层次上完成设计自动化与优化；数字孪生能促成从设计到运作的完整闭环过程，使产品逐步向着更加自我适应的趋势转化；云端平台将重构世界范围内协作的方式，并促使设计资源的相互利用以及设计经验的总结沉淀下来。在全球制造业竞争日益激烈，个性化需求急剧膨胀的情况下，机械工程领域必须更加积极地接受数字化设计技术，加大对人才、工具和理论的培养力度来获得智能制造战略制高点。

参考文献

- [1] 李云霞. 数字化设计技术在农业机械设计中的应用[J]. 南方农机, 2025, 56(08): 148-150.
- [2] 吴敏娇, 蒲为国. 机械产品数字化设计及关键技术应用与研究[J]. 中国设备工程, 2020, (23): 201-202.
- [3] 司开妹. 数字化设计在化工机械中的应用与挑战[J]. 塑料工业, 2024, 52(11): 177-178.
- [4] 申林林. 数字化设计在机械制造中应用实例分析[J]. 农机使用与维修, 2024, (09): 109-111.
- [5] 曾德惠, 杨春雷, 范奎, 等. 新工科背景下机械数字化设计能力培养体系的构建与实践[J]. 湖北民族大学学报(自然科学版), 2023, 41(04): 553-560.