

数字样机技术概述

产品的创新和快速开发是提高企业竞争力的关键,个性化的需求,快速多变的市场,以及日益加剧的市场竞争,都要求企业能够快速抓住市场需求的脉搏,快速提供能够满足市场需求的新产品,从而在第一时间获得丰厚的利润。数字样机技术为企业创造具有竞争力的产品提供了有利的工具和手段,在当今数字样机时代,产品设计变得更加轻松快捷。

1.1 数字样机的概念

1.1.1 数字样机的定义

数字样机是进入 21 世纪以来在制造业信息化领域中出现频率越来越高的专业术语,其对应的英文是 Digital Prototype(DP)或 Digital Mock-Up(DMU)。数字样机是相对于物理样机而言的,是指在计算机上表达的机械产品整机或子系统的数字化模型,它与真实的物理产品之间具有 1:1 的比例和精确的尺寸表达,其作用是用数字样机验证物理样机的功能和性能。

在数字样机概念出现前期,国内外文献大量出现虚拟样机(Virtual Prototype,VP)这一概念。按照美国前 MDI 公司总裁 Robert R. Ryan 博士的界定,VP 技术是面向系统级设计的、应用于基于仿真设计过程的技术,包含有数字物理样机(Digital Mock-Up,DMU)、功能虚拟样机(Functional Virtual Prototype,FVP)和虚拟工厂仿真(Virtual Factory Simulation,VFS)三个方面内容,如图 1-1 所示。其中,DMU 对应于产品的装配过程,用于快速评估组成产品的全部三维实体模型装配件的形态特性和装配性能;FVP 对应于产品分析过程,用于评价已装配系统整体上的功能和操作性能;VFS 对应于产品制造过程,用于评价产品的制造性能。

我国国家标准 GB/T 26100—2010《机械产品数字样机通用要求》对数字样机的定义采用英文 Digital Mock-Up(DMU),即,数字样机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。由此可见,产品的数字样机形成于产品的设计阶段,可应用于产品的全生命周期,包括工程设计、制造、装配、检验、销售、使用、售后、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、培训宣传和维修规划等方面。

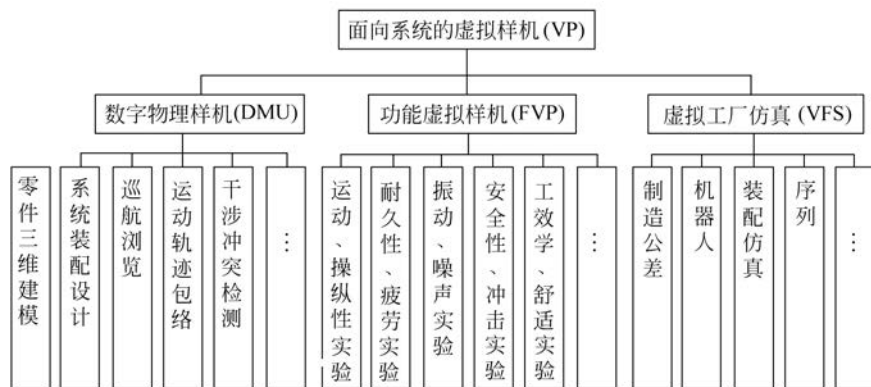


图 1-1 虚拟样机技术内容

随着世界著名计算机辅助设计(CAD)软件提供商 Autodesk、PTC、西门子 PLM(原UGS)和达索等提供的 CAD 软件能够创建精确的三维 CAD 模型,数字样机开发(Digital Prototyping)逐渐被明确提出。数字样机开发即建立机械产品整机或子系统数字化模型的过程。国际知名的研究机构 Aberdeen 公司最早比较正式地描述数字样机开发的概念,同时另一家研究公司 IDC 也发表了与数字样机开发相关的白皮书。Aberdeen 公司与主流的 CAD 厂商共同完成的一项研究表明:数字样机开发技术不仅能够大大减少物理样机的制作数量,从而降低成本,而且可以提高产品研发效率,缩短产品上市周期,降低产品研发的风险,使研发的产品更加适应市场需求。

Autodesk 公司则强调数字样机开发是超越三维的设计技术,如图 1-2 所示。数字样机开发在概念设计、结构设计、工程设计、电气设计、产品设计、数据管理甚至市场宣传的过程中实现高效的协同设计,并凭借仿真、分析和可视化等手段,对设计进行校验、优化和管理,在产品制造之前虚拟地体验产品功能。

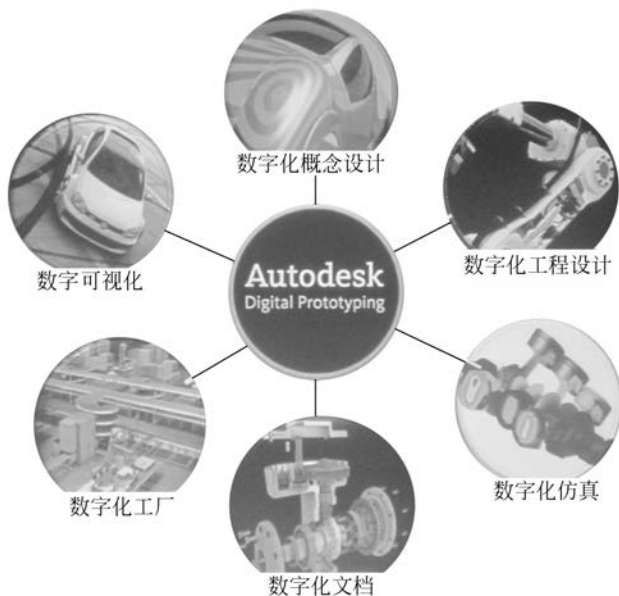


图 1-2 Autodesk 数字样机解决方案

由此可见,数字样机开发技术包含了创建和应用数字物理样机(DMU)的全过程,是基于三维或 DMU、又高于三维或 DMU 的一套完整的产品开发方法和技术体系。数字样机开发技术是在一般虚拟样机(VP)基础上发展起来的,是对功能虚拟样机技术(FVP)的进一步扩展。数字样机以机械系统运动学、动力学和控制理论为核心,融合了虚拟现实技术和仿真技术。它基于计算机的产品数字化描述,对产品设计、制造、装配、使用、维护、服务直至产品回收再利用等全部功能属性进行设计、分析与仿真,以取代或精简物理样机。

1.1.2 数字样机支撑技术

数字样机支撑技术以 CAX(如 CAD、CAE、CAM 等)和 DFX(如 DFA、DFM 等)技术为基础,向前延伸到工业设计阶段(机械美学和概念设计),向后延伸到市场宣传阶段(使用和维修动画设计)。数字样机开发是把一个创意变成一个可以向客户推销的数字化产品原型的全过程,而向客户推销时,并没有开始真实的制造过程,在获得了客户的认同或订单后,才真正开始进行物理样机的制造,这样会大大降低产品研发的风险。数字样机支撑技术体系的构成如图 1-3 所示,包括概念设计(工业设计、人机工程)、工程设计与分析(机械、电气 CAD、EDA、CAE)、工程制造(CAM、逆向制造)、数据管理(PDM、PLM)、渲染和动画(虚拟现实、三维动画)等技术。

工业设计和人机工程设计是以工学、美学、经济学、工效学为基础对工业产品进行的设计,是机械美学(工程与艺术结合)的核心。工程设计、工程分析与工程制造的理论基础是计算机图形学、多体系统动力学、结构有限元理论、其他领域物理系统建模与仿真理论,以及多领域物理系统混合建模与仿真实论,侧重于系统层次的性能分析与优化设计,用于解决产品的运动学、动力学、变形、结构、强度、寿命等问题,解决复杂产品机-电-液-控等多领域能量流和信号流的传递与控制问题。数据管理是进行有效数据收集、交换、存储、处理和应用的过程,涉及产品全生命周期的各种数据。而渲染和动画(也是机械美学的重要内容之一)在机械产品开发中也越来越重要,逐渐成为产品推广和抢占市场的有效手段。

在数字样机实现方面,针对图 1-3 中不同的特性内容,存在着不同的设计、分析和仿真系统。例如,在人机工程设计方面有 Manikin、CATIA、HumanCAD 等;在工业造型设计方面有 Alias、Rhino、MAYA 等;在产品几何建模方面有 CATIA、UG、Pro/E、Inventor 等三维 CAD 系统;在运动学和动力学特定分析和仿真方面,有 MSC/ADAMS、LMS/DADS、Simpack、RecurDyn 等;应力疲劳特性分析有 FE-Safe 等;非线性变形分析有 MSC/NATRAN、ANSYS、MSC/Marc、HKS/ABAQUS、Adina 等;振动与噪声分析方面有 Sysnoise、AutoSea 等;有限元热分析有 ANSYS、MSC/Nastran 等;大变形碰撞与冲击仿真有 LS-Dyna、MSC/Dytran 等;计算流体力学有 Star/CD、Fluent、Flow/3D、Moldflow 等;液压与控制方面有 Amesim、MATLAB 工具包、MSC/ADAMS 工具包等;支持多领域物理系统混合建模与仿真的有 MSC/EASY5、Dymola、MAESIM、ANSYS WorkBench 等;在产品市场推广与产品宣传方面有 3DMAX、MAYA 等。

1.1.3 数字样机的分类

按照数字样机反映机械产品的完整程度,可分为全机样机和子系统样机。全机样机包含整机或系统全部信息的数字化描述,是对系统所有结构零部件、系统设备、功能组成、附件

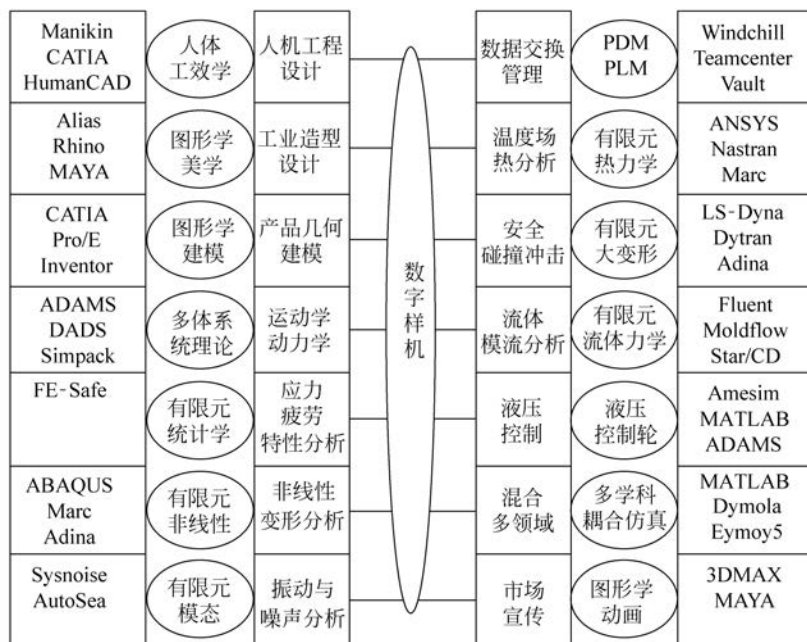


图 1-3 数字样机支撑技术体系的构成

等进行完整描述的数字样机；子系统样机是按照机械产品不同功能划分的子系统包含的全部信息的数字化描述，如动力系统样机、传动系统样机、控制系统样机等。

按照数字样机研制流程或生命流程阶段，可分为方案样机、详细样机和生产样机。方案样机指在产品方案设计阶段，包含产品方案设计全部信息的数字化描述；详细样机指在产品详细设计阶段，包含产品详细设计全部信息的数字化描述；生产样机指在产品生产阶段，包含产品制造、装配全部信息的数字化描述。

按照数字样机的特殊用途或使用目的，可分为几何样机、功能样机、性能样机和专用样机等。几何样机侧重于产品几何描述；功能样机侧重于产品功能描述；性能样机侧重于产品性能描述；专用样机能够支持仿真、培训、市场宣传等特殊目的。各种数字样机的关系和定位如图 1-4 所示。



图 1-4 各种数字样机的关系和定位

数字样机构建流程一般可按照方案样机、详细样机、生产样机的设计流程,进行自顶向下地逐层构建、逐层细化。一般设计过程包括:①明确产品的功能需求;②确定产品的实现原理与实现途径;③确定产品的总体布局;④划分各子系统所占空间,并确定各子系统间的接口尺寸和形状;⑤部件设计;⑥划分零件所占空间;⑦零件设计。

数字样机构建的进展情况可按照模型成熟度划分不同等级,新产品样机成熟度从0开始,到1为止。前一阶段提交的数字样机成熟度是下一阶段样机成熟度的起点。数字样机成熟度可根据研发的具体情况提升或降低。在发生重大设计变更时,应先降低数字样机的成熟度。对于研发的各个阶段,数字样机成熟度可分为3个阶段,即方案设计阶段,成熟度为 $0\sim 0.25$;详细设计阶段,成熟度为 $0.25\sim 0.85$;工艺设计阶段,成熟度为 $0.85\sim 1.0$ 。

1.2 数字样机的特点

1.2.1 数字样机模型要求

数字样机的模型特征应反映所设计产品的实际特征,包含全部零部件及其相关子系统的完整数字信息模型,可进行工程分析、优化、生产制造及其数据管理。考虑到计算、显示效率和经济性,数字样机可在一定程度上进行必要的简化设计和轻量化设计。在进行简化和轻量化设计时,应根据不同产品对象的特点,不同的应用阶段和不同的应用场合来确定。一般可将数字化模型设置为简化级表示、一般级表示和扩展级表示3个层次。简化和轻量化可能用于的场合包括方案或原理设计、大型装配设计、仿真与优化设计、工程图样的简化表达、某些特殊场合如封装处理等。

对于具有多种工作状态的机械产品,其数字样机模型通常在提交时应处于静止且稳定的状态。对于周期性运动的机械产品,提交的数字样机应处于一个周期内的原始零位,或在重力下保持稳定的状态。具有多种运动状态的数字样机模型,可从其处于静止状态的数字样机模型中派生得到,即用不同的位置表达形式展现产品不同的运动姿态,必要时进行适当的效果渲染。

数字样机中的零部件表示应满足统一性、唯一性、可读性、可扩展性的基本要求。统一性要求是指所有零部件应遵循统一的标识规定,标识规则可根据企业或行业特点自行拟定,但应有延续性,具有一定的命名规则和规律。唯一性要求是指所有零部件的标识应唯一、排他,以免数据存储、共享或发布中造成混乱,对于表达全生命周期的零部件信息,可以在标识中增加阶段性标识、应用场合标识等加以区分。可读性要求是指零部件标识名称应遵循行业或企业约定,提高标识的可读性。可扩展性要求是指零部件标识应可扩展,能根据不同应用增加新信息。

1.2.2 数字样机的虚拟性

数字样机从外观、功能和行为上均高度接近于物理样机,它具有虚拟性特点,包括设计方法的完全数字化、工作方式的并行协同化和产品表达的科学可视化3层含义。

1. 设计方法的完全数字化

产品在其生命周期内的数字化建模是现代产品设计方法的关键技术之一,在计算机上

完成产品的开发,通过对产品模型的分析,改进产品设计方案,在数字状态下进行产品的虚拟实验和虚拟制造,然后再对设计进行改进或完善的数字化产品开发技术变得越来越重要。设计方法的数字化包括:①对全局产品的信息定义,用计算机来支持产品生命周期的全过程;②产品的数字化工具,即广义的计算机辅助工具,它能将产品信息自动数字化;③产品数据管理,即用计算机对产品开发与生产全过程中的大量数字化信息进行全面的管理与控制。

2. 工作方式的并行协同化

现代产品开发要求有效地组织多学科的产品开发队伍,充分利用各种计算机辅助工具,并有效地考虑产品开发与生产的全过程,从而缩短产品开发周期,降低成本,提高质量,生产出满足用户需求的产品。产品开发工作方式要求在数据共享的基础上,采用团队工作模式,可在异地进行设计,有助于强强联合,优势互补。现代产品的开发不再采用传统的串行工作方式,而是在并行工程(Concurrent Engineering, CE)的支持下进行异地协同设计,即集中不同地点、不同行业的专家,几乎同时参与统一产品的开发设计工作,并且在产品设计的早期就全面考虑产品生命周期中的各种因素,尽可能减少重复,赢得时间,进而产生巨大的效益。要进行异地并行设计要解决数据交换问题,采用基于网络协议的交换标准一般具有以下几个特点:①符合国际 Internet 标准;②可满足产品开发全过程数据交换的要求,且具有可接受的传输速率;③具有可靠的版权保护措施。另外还需要建立一套有效管理这些分布数据的 PDM 系统。

3. 产品表达的科学可视化

在实体造型技术成为 CAD 技术发展的主流的同时,科学可视化(Scientific Visualization, SV)思想得到发展,即将信息转化成为图像,使“不可见的”变为“可见的”,让研究者能观察模拟过程与计算过程,获得更直观的研究效果。科学可视化思想使数字样机仿真技术不断完善和升级,逐渐集成有限元分析、运动学与动力学仿真等功能,赋予了数字样机技术更加广泛的意义。目前,多媒体技术和虚拟现实技术的介入,使得产品表达真正实现了数字可视化,一般的要求包括:①能够观察产品的性能,包括结构、质量、材料、装配、用途等;②提供适当的多媒体手段,表达或记录产品性能,如静态图、动态图、曲线图、录像、声音等;③具有进一步后处理数据接口,方便数字样机的进一步仿真。

1.2.3 数字样机的真实性

数字样机是“没有真实的真实”,其建模总体流程甚至具体过程,都应与实际设计思维和制造过程尽量一致。因此,数字样机具有真实性的特点,主要包括几何真实性、物理真实性和行为真实性 3 层含义。

1. 几何真实性

数字样机模型首先必须做到几何真实性,即与实际产品具有相同的几何结构与几何尺寸、相同颜色、相同材质与纹理,设计者能够真实地感知产品的几何属性。结构和几何尺寸的真实性由几何图形数据库(几何信息和拓扑信息)来保证,颜色、纹理与材质的真实性由概念设计数据信息来保证。几何真实性是物理真实性和行为真实性的前提,几何不真实则谈不到物理真实和行为真实,即数字样机模型如果与实际物理模型不吻合,则数字样机仿真结果没有应用参考价值。

2. 物理真实性

数字样机模型还必须具有物理真实性,即与实际产品具有相同或相近的材料、体积、密度和质量信息,能够方便地查询几何实体的惯性矩、重心等力学信息,具备运动学和动力学属性。虚拟环境中零件间的相互作用,反映了实际产品中零件间的相互作用。物理真实性由几何真实性和工程数据库来保证。物理真实性是行为真实性的必要条件,在数字样机仿真中表现出来的就是工程约束和边界条件。不真实的工程约束和边界条件,同样造成数字样机仿真结果没有意义。

3. 行为真实性

数字样机模型也要具有行为真实性,即在外部环境的激励下,数字样机能做出与实际产品相同或相近的行为响应,能够预先得知产品的运动行为、力学行为、强度(破坏)行为和工作特征行为等。行为真实性由几何真实性、物理真实性和工程数据库来保证。行为真实性是数字样机仿真结果的表现,只要几何模型正确,工程约束和边界条件准确,再加上统一的单位体系,则数字样机仿真的行为就与实际物理样机的行为相一致,其仿真结果就是实际物理实验结果的一种准确预报,具有可信性和可用性。

由于数字样机具有真实性的特点,研发团队使用一致的数字化模型,可以有效提升研发过程的沟通效率,从而使新产品更快投放市场。生产商可以使用数字样机观察、仿真产品在现实世界中的变化,减少对花费高昂的物理样机的依赖。用户可以从多角度、全方位的提前了解新产品的功能特点、可使用性、可维护性等。

1.3 数字样机的应用与发展

1.3.1 数字样机的应用

机械产品的数字样机作为企业的重要工程数据,能够为产品的研发、生产、市场等多个环节提供相应的支持。图 1-5 所示为基于数字样机技术的产品开发流程。

在产品研发阶段,数字样机模型能够支持总体设计、结构设计、工程分析、校核与优化、工艺设计等协同设计工作,能够支持项目团队的并行产品开发。结构方案设计、总体布置设计和生产详细设计从流程上是串行模式,但实施过程中是并行模式,这样有利于在设计初期做出正确判断,实现概念设计与详细设计的结合。

基于数字样机模型可以进行工程分析,通常包括空间结构分析、重量特性分析、运动分析和人机功效分析等。空间结构分析是分析数字样机模型是否具有正确的构型、尺寸、运动关系、公差信息等,确保能够支持产品的干涉检查、间隙分析等,使设计者能够直观地了解样机中存在的问题。重量特性分析是分析数字样机模型是否具备完整的位置、体积、质量等属性,以保证为设计提供正确的重量、重心、转动惯量等参数。运动分析是分析数字样机模型是否具备正确的运动副、驱动类型、负载类型、阻尼与摩擦系数等信息,以保证设计师能够正确仿真产品的运动轨迹、包络空间、死点位置、速度、加速度、受力状况等动力学特性。人机功效分析是分析数字样机模型是否具备该产品在使用中的人体姿态的相关信息,以保证该产品具有良好的人机性,包括产品使用时的操控性、舒适性和维修性等。

基于数字样机模型也可以为产品校核计算提供数据信息,通常包括几何属性、材料特

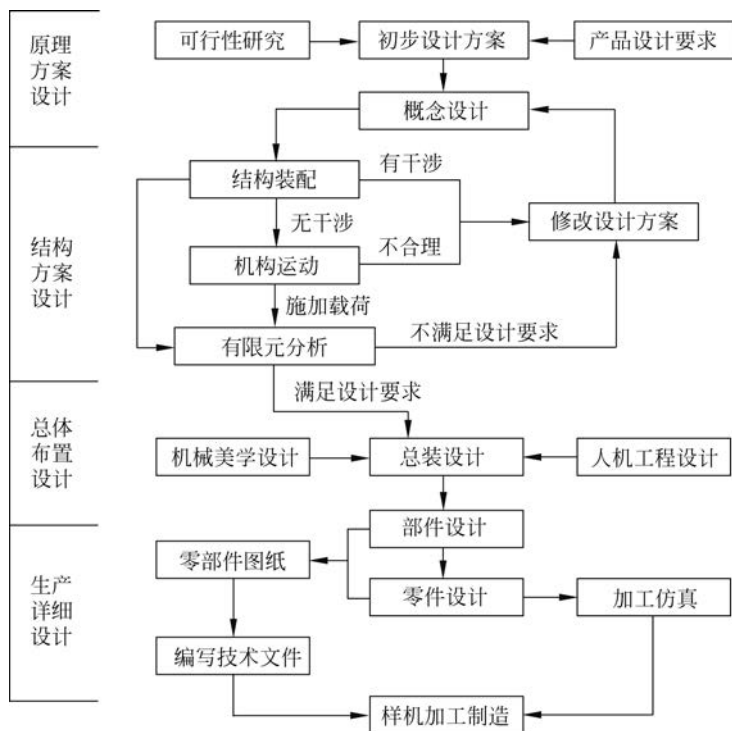


图 1-5 基于数字样机技术的产品开发流程

性、失效准则、边界条件、载荷属性、温湿度等,从而为产品的整机或局部进行静力学、动力学、液压、温控、自控、电磁等多个领域提供校核计算的基础数据。基于数字样机模型可进行产品整机、局部或原理模型的空间构型优化、机构优化、装配优化、多学科优化等,优化计算数据中包括优化目标、优化变量、边界条件、优化策略、迭代方式等。

在产品生产阶段,数字样机可以提供产品装配分析的数据信息,包括装配单元信息、装配层次信息等,以保证对产品的装配顺序、装配路径、装配时的人机性、装配工序和工时等进行仿真,进而验证产品的可装配性,为定义、预测、分析装配误差、技术要求提供必要的数据库。数字样机还可以为产品的工艺仿真和评估提供数据,包括加工方法、加工精度、加工顺序、刀具路径及信息等,从而实现对样机的 CAM 仿真和基于三维数字样机的工艺规划。

在产品销售阶段,数字样机可以为产品宣传提供逼真的动、静态产品数据,包括产品的渲染图片、产品结构、产品组成、工作过程、实现原理等宣传资料。数字样机也可以为产品培训提供分解视图、原理图等动、静态数据,甚至包括虚拟现实环境下的产品虚拟使用与维修培训。数字样机还能提供近似产品和快速变型与派生设计,以满足市场报价、快速组织投标和生产的需求。

1.3.2 数字样机的发展

20 世纪 90 年代后,人们讨论的热点是机械设计如何从二维设计转变到三维设计,并且加入了“数字化”和“仿真”的成分。航空、航天、汽车、船舶等行业已经为数字样机奋斗了数十年,它们希望整个生产流程从头到尾都实现数字化。其中,飞机制造是一项大工程,数字

样机技术能大大提升其效率,成为数字样机技术成功应用的行业典范。

美国波音公司从1991年开始用全三维数字样机技术研制波音777飞机,整个设计过程没有使用纸张绘图。工程师通过飞机数字样机可及早发现任何误差,并预先判定数以万计的零件是否配合妥当。在飞机实际制造中,各主要部件一次性成功对接,开发费用和时间节约40%以上,设计更改、返工率减少93%以上。我国在2000年飞豹改进型战机的研发中,同样采用了数字样机技术,在国内首次实现具有自主知识产权的全机无图纸设计和制造。目前,我国飞机制造实现了研制过程的工程协同、管理协同、沟通协同,全面采用全机数字样机技术,使得我国飞机生产准备周期缩短了75%,整个制造周期缩短了30%。这种高度协同的全机数字样机研发模式,把中国数字样机技术推向了前所未有的高度。

进入21世纪以来,除了飞机制造外的许多领域都在深入应用数字样机技术。工程师都想建立整个系统的全机数字样机,但是多数行业在建立100%的全机数字样机上仍存在很多问题。数字样机遇到的最大壁垒是如何解决从设计到制造的流程中断。通常,产品开发流程是从概念设计到功能设计再到生产制造。在整个流程中创意阶段接触的是一些工业设计工程师,工程设计阶段接触到的是机械或电子设计工程师,生产阶段接触到的是制造工程师和生产工人。当信息由一个阶段流向另一个阶段时经常会被中断,信息中断会使成本提高。要解决这种从设计到制造的瓶颈,就需要依靠数字样机技术将各个环节紧密结合,利用更新的科学技术手段,打通从设计到制造流程中断。

近年来提出的数字孪生(Digital Twin)技术,虽然在概念上来看也是以数字化方式创建物理实体的虚拟模型,从而借助数据模拟物理样机在现实环境中的行为。但其在此基础上还能够通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段为数字样机增加或扩展新的能力。数字孪生将促进数字样机技术实现贯穿产品的概念设计(工业设计)、工程设计、工程分析(虚拟仿真)的全过程。数字孪生技术强调将产品全生命周期的模型实现数字化,通过对产品开发过程的仿真试验与验证,对设备在生产制造中的运转进行模拟,对在维护时的故障点和故障概率进行预测,提高产品的可靠性,减少成本和风险。

在概念设计阶段,工业设计师可以借助数字样机草图把徒手画出的各种各样的创意和想法用数字化的信息表达出来,并且很容易地转变成三维模型。在工程设计阶段,机械工程师会利用数字样机的功能导向设计技术自动创建三维模型和工程图纸,甚至可以评估系统的动力学特性,检测所有结构的速度、运动曲线等,通过耦合仿真得到结构刚度和材料强度等,能很好地修改其设计确保在后期的仿真和制造中尽可能减少问题。电气工程师也会将电气系统与机械系统紧密结合,保证机电一体化产品整体系统正常工作。在产品制造阶段,借助数字孪生技术等将真实的工厂还原,将工厂内设备和工艺流程生动形象、立体直观地展现出来,将工厂设备运行状态实现线上虚拟可视化,支持操作人员进行判断、分析和优化等操作。

随着人工智能、物联网、云计算、大数据和5G等技术的发展,通过整合工厂现有信息系统的数据资源,实现面向产品全生命周期管理的物理实体和业务逻辑层面的全面信息融合连接,打造动态感知、协同高效、可视交互的现代智慧工厂运营管理新方式,数字样机技术将更有效地支撑现代机械制造和智能装备等产业蓬勃发展,实现更好、更快、更符合需求地制造出创新的产品。

1.3.3 Aberdeen 的研究

Aberdeen Group 成立于 1988 年,是面向全球企业高管、基于技术确定研究方向的研究机构。Aberdeen Group 研究员遍布于全球超过 36 个国家,参与市场中最全面的技术价值链研究。Aberdeen 通过研究发现,借助数字样机制造方法消除对于物理样机的需求,能够带来切实的成本和时间优势。其研究的成果不仅证实了在产品开发的概念设计、详图设计和测试阶段的发现,还表明多数产品仍然存在构建物理样机的需求。领先的制造商正在以创新方式应用物理样机,将其作为对于数字样机制造方法的补充。

Aberdeen 采用 5 个关键性能指标来评选一流的企业:满足产品创收目标、成本目标、质量目标、发布日期和开发成本目标的能力。在这些方面的表现排名前 20% 的企业被视作优秀(Best-in-Class)企业,而处于后 30% 的企业为落后(Laggard)企业,余下的企业处于行业平均水平(Industry Average)。

优秀企业利用高度逼真的曲面模型,通过“发送-接收”交互开始进行产品外观建模。这样的交互非常重要,因为工业设计师希望对模型进行有机操作,而不是使用以工程为导向的方法处理模型尺寸。此外,他们可以实时渲染模型,创建能展示产品美观效果的逼真图像。结合运用发送-接收交互方法和创建逼真渲染的能力,工业设计师能够使用出色的渲染工具修改设计,以取得想要的效果。优秀企业对于上述综合方法的使用率略高于行业平均水平企业和落后企业。而且,优秀企业还在模型开发和评估流程中发现、总结和重复使用最佳实践,从而为上述方法提供支持。

优秀企业的虚拟与物理集成战略开始于概念设计阶段(见表 1-1)。在物理实体模型创建流程中,他们采用数字方法来评估产品的美观性,并在最后的环节中应用扫描技术。

表 1-1 竞争框架——概念设计

企业排名等级		优秀企业	平均水平企业	落后企业
流程	通过逼真的数字模型来评估产品的美观性和风格	71%	63%	62%
	对产品的物理实体模型进行扫描和数字化	42%	28%	11%
	利用三维扫描数据,通过装配曲面创建产品三维模型	38%	34%	14%
知识管理	总结并重复应用开发和评估数字模型的最佳实践	47%	31%	19%
业绩衡量	计算从项目开始到设计阶段的用时	85%	67%	57%
技术	采用支持创建三维曲面模型的软件程序	95%	77%	76%
	采用三维扫描程序(硬件)	35%	28%	17%

除了以虚拟方式评估产品美观性之外,优秀企业还更加倾向于在最后环节创建物理概念样机,并对其进行数字化,这通过扫描物理概念样机的三维数据来实现。之后,他们将这些数据导入建模应用,并利用三维点云扫描数据来组合曲面。为何将麻烦的物理概念模型再次引入数字处理方法呢?首先,与设计产品内在功能的设计师和工程师进行协调和集成,需要以数字的方式表现产品的美观性。此外,优秀的企业还需要以数字方式表现产品的美观性,以支持设计的下游加工环节。仅通过数字表现方式,无法设计出高度逼真的模具和其他工具。如果模具和工具不具备高度的逼真性,在修改这些模具和工具进行多次迭代时,就会浪费成本高昂的加工材料。

数字样机技术和物理样机制造方法在概念设计阶段就开始集成渐成趋势,而且优秀企