

# 复杂产品数字化协同设计 技术发展

## Digital Collaboration Design Technology for Complex Product

清华大学自动化系国家 CIMS 工程技术研究中心 范文慧 刘博元



范文慧

博士,清华大学自动化系教授,博士生导师,研究方向为系统仿真与虚拟制造。

随着现代信息技术、现代控制技术、系统工程技术等相关学科的不断发展,先进产品系统设计技术得到了飞速的发展,各种新思想和新技术也不断涌现。自 20 世纪 70 年代以来,CAx 技术在制造企业中得到了广泛的应用,使企业摆脱了传统的工作方式,设计开发能力得到了极大的提高;20 世纪 80 年代初,以信息集成为核心的计算机集成制造系

从设计过程的发展历程来看,CAx 独立应用阶段注重设计工具的实施,并行工程阶段注重 CAx/DFx 工具之间的协同,局部协同阶段强调多领域工具并行协同,全局协同阶段强调多领域工具实时并行协同,重视设计、仿真、优化与试验一体化技术的应用。

统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)开始受到普遍重视并得到广泛实施,在 CIMS 技术发展的带动下,设计技术开始从局部应用转向系统应用,即将原有的 CAx/DFx 等技术集成起来解决问题;20 世纪 80 年代末,以过程集成为核心的并行工程(Concurrent Engineering, CE)理念的提出使设计信息化水平得到了进一步的提高,出现了 PDM 思想,用来对设计技术过程集成和管理;进入 20 世纪 90 年代以后,随着理论研究的不断深入以及各种支撑技术的不断完善,许多新的思想和概念陆续被提出,典型的如虚拟制造(Virtual Manufacturing, VM)、敏捷制造(Agile Manufacturing, AM)、虚拟企业(Virtual Enterprise, VE),设计方法中更加强调协同设计(Collaboration Design)、协同仿真(Collaboration

Simulation)以及基于 PLM 的设计信息集成。

21 世纪初,随着产品设计技术的不断发展和社会对产品功能需求的不断提高,各种产品日趋复杂化。尤其是航天器、飞机、车辆、舰船、复杂机电产品等典型的复杂产品,是多个子系统通过复杂的耦合关系集成的产物。如航空飞行器,在设计过程中需要用到机械、电子、液压、控制等多学科、多领域知识,如果要进一步细分,就会涉及到更多的子系统设计问题。复杂产品设计,要求设计出来的产品除了满足单领域所需求的各种功能要求外,更要求其必须满足系统耦合后全系统的行为要求。能否满足这些行为要求往往将直接决定所设计出来的产品能否成功。复杂产品设计方法更加强调系统性与整体性,出现了协同设计、

协同仿真与协同优化(Collaboration Optimization),而且仿真优化也越来越成为复杂产品设计必不可少的手段。

### 以单领域为核心的独立应用阶段

自20世纪50年代开始,随着信息技术的发展,各种计算机辅助工具开始出现并逐步应用到产品设计过程中,典型的如各种CAD、CAE、CAPP、CAM等工具。这些工具的应用表明制造业已经开始利用现代信息技术来改进传统的产品制造过程,标志着产品设计信息化的开始。然而,在经过一段时间的发展之后,人们发现,由于各种计算机辅助工具只注重于解决本领域的问题,忽视了彼此之间的联系,导致设计过程和制造过程中出现了大量的信息孤岛,严重阻碍了信息化的进一步发展。

因此,企业在产品开发过程中大量采用了计算机辅助工具,并注重各个系统间信息集成的实现,使得企业的新产品开发能力得以极大的提高,市场竞争能力也随之增强。然而,由于产品开发仍然采用传统的串行开发模式,致使设计的早期阶段不能很好地考虑产品生命周期中的各种因素,不可避免地造成较多设计返工,这促使企业在实现了内部信息集成之后,开始逐渐关注过程集成的问题,并由此发展出并行设计理念。

### 以过程为核心的集成应用阶段

并行设计是对传统的串行产品开发方式的一种根本性改进<sup>[1]</sup>。并行设计的核心是过程集成。1986年,美国国防部先进计划局DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)制定了一项为期5年的并行工程启动计划DICE(DARPA Initiative in Concurrent Engineering)。系统化方法是并行设计的核心。系统

工程的方法强调时、空两方面的整体性,而并行设计更侧重于时间上的协同。从内涵上看,并行设计将一系列在时间上分散的但彼此之间相互作用的过程基于时间轴看作一个统一的系统,进而采用系统工程的思想对这个系统进行整体分析与优化。图1显示了串行产品设计过程与并行产品设计过程在信息流动关系上和上市时间上的区别。这一阶段,出现了大量DFx(Design For X)技术,如DFM——面向制造的设计、DFA——面向装配的设计、DFC——面向成本的设计等,并以PDM(产品数据管理)为集成平台,将这些应用系统集成

的限制,在设计阶段获取的产品的各类相关信息极为有限,设计人员对详细设计方案的仿真和评估也很有限,很难保证设计中没有差错。由于产品的复杂程度加大,很少有人能够在开始阶段全面细致地了解整个系统。对于那些成本很高的产品,一旦出现难以弥补的设计错误,就会造成极大的损失。为了减少这种风险,通常需要一个等同于真实产品的物理样机,以获得产品的机械、物理、外观以及可制造性、可装配性等的全面信息反馈,从而更好地消除设计阶段难以发现的重大设计错误。但是复杂产品系统的物理样机通常造价昂贵,

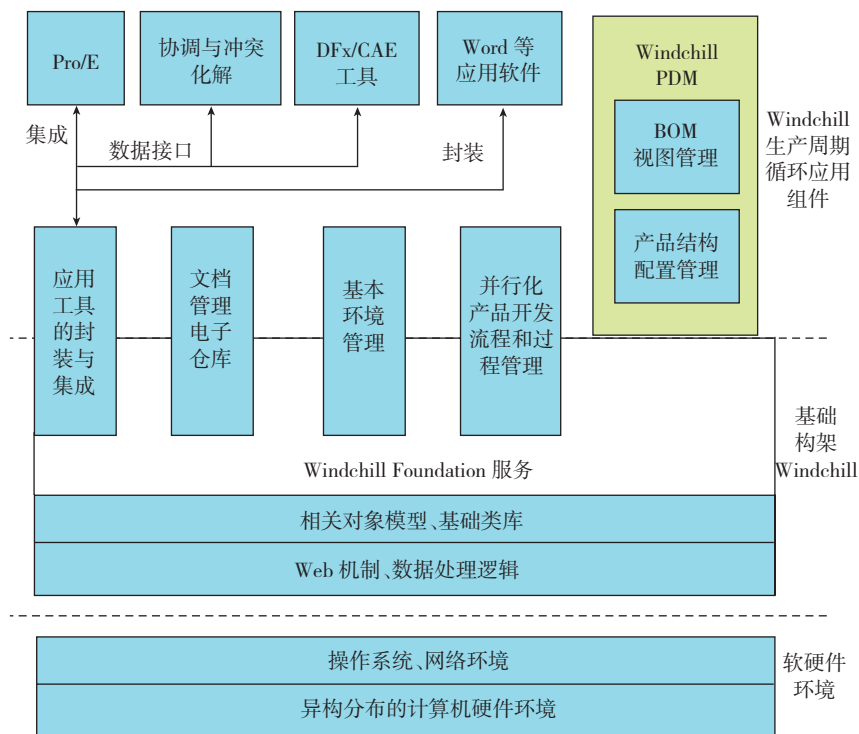


图1 典型的并行开发过程的比较<sup>[2]</sup>

一个整体,同时,对产品设计过程及组织形式加以改进,以便在设计早期尽可能做出正确决策。

### 以互操作为核心的协同应用阶段

传统新产品的开发通常要经过设计、样机试制、工业性试验、改进定型和批量生产几个阶段。由于技术

而且耗时长久。在迭代的设计过程中,一旦设计方案有重大修改,就需要重新建立物理样机,导致设计成本的增加和设计周期延长。为了解决这些问题,出现了以仿真技术为基础的虚拟样机技术。

虚拟样机是由分布的、不同工具开发的、甚至异构的子模型组成的模型联合体,主要包括:产品的CAD

模型、产品的外观表示模型、产品的功能和性能仿真模型、产品的各种分析模型(可制造性、可装配性等)、产品的使用和维护模型以及环境模型等<sup>[2]</sup>。借助虚拟样机,设计人员可以通过成熟的三维计算机图形学,模拟在真实环境下产品的各种运动和动力特性,并能根据仿真结果优化产品的设计方案。

虚拟样机技术是一种基于产品的计算机仿真模型的数字化设计方法,这些数字模型即虚拟样机(Virtual Prototype,VP)能从视觉、听觉、触觉及功能、性能和行为上模拟真实产品<sup>[3-4]</sup>。虚拟样机技术是一种基于虚拟样机的产品设计方法,是一门基于先进建模技术、多领域仿真技术、信息管理技术、交互式用户界面技术和虚拟现实技术的综合应用技术,它不仅包括构造虚拟样机的过程,还包括将虚拟样机放到综合虚拟环境中进行仿真分析的活动<sup>[5-8]</sup>。虚拟样机技术本质上属于一种基于并行工程理念的设计开发方式,为并行工程理念的实现提供了一条可行的实现途径。与传统产品设计技术相比,虚拟样机技术强调系统的观点、涉及产品全生命周期、支持对产品的全方位测试、分析与评估、强调不同领域的虚拟化的协同设计。

### 以一体化为核心的多领域并行协同应用阶段

由于复杂产品对象本身十分复杂,工程设计人员必须使用仿真工具对产品设计进行仿真分析,并根据分析结果优化设计方案,形成基于仿真的优化过程。复杂产品高性能仿真往往涉及多个领域,需要不同的仿真软件,而基于仿真的优化也需要专业的优化软件。为了使优化过程能够自动进行,不同的科学家、工程师、计算专家需要协同工作。

由于航空航天领域的产品相对更加复杂一些,对成本和性能的

要求都很高,因此,多学科设计优化(MDO)最早是在航空航天领域发展起来的。MDO技术诞生后,在世界上尤其是美国得到了飞速的发展。目前国际上普遍认可MDO算法的主要有:多学科可行方法(MDF)、一致性优化方法(AAO)、单学科可行方法(IDF)、并行子空间优化算法

识含量的有效手段。协同设计是基础、协同仿真是提升、协同优化是目标、协同试验是验证。如图2所示复杂装备多领域融合协同创新研发的体系结构图。其中,PLM为产品生命周期管理,SDM为仿真数据管理,ODM为优化数据管理,TDM为试验数据管理。

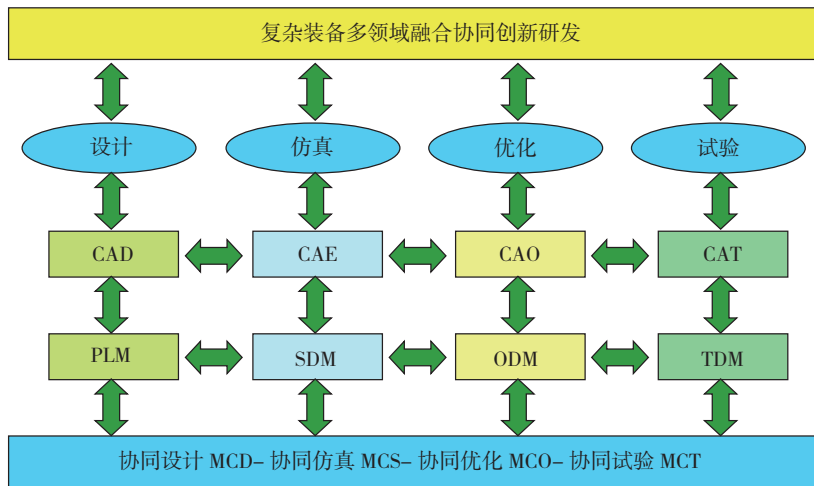


图2 复杂装备多领域融合协同创新研发的体系结构<sup>[10]</sup>

(CSSO)、协同优化算法(CO)和两级集成系统综合方法(BLISS)。根据这5种算法结构的不同,分为单级优化算法和多级优化算法两类。其中MDF、IDF、AAO属于单级优化算法,CSSO、CO、BLISS属于多级优化算法。

随着MDO技术在工程设计界的不断发展,出现了许多支持MDO技术的应用软件和工具。NASA Langley Research Center提出了针对MDO软件工具的框架要求,符合这些框架要求的主要有以下软件工具:iSIGHT, ModelCenter, DAKOTA (Design Analysis Kit for OpTimizAtion)等<sup>[9]</sup>。

协同是现代复杂装备研发发展的必然要求,系统能否发挥协同效应是由系统内部各子系统或组分的协同作用决定的,协同得好,系统的整体性功能就好。协同设计、仿真、优化与试验是复杂装备研发创新不可缺少的重要方法,也是提升产品知

### 结 论

从设计过程的发展历程来看,CAx独立应用阶段注重设计工具的实施,并行工程阶段注重CAx/DFx工具之间的协同,局部协同阶段强调多领域工具并行协同,全局协同阶段强调多领域工具实时并行协同,重视设计、仿真、优化与试验一体化技术的应用。

虽然复杂产品协同仿真优化领域尚不十分成熟,没有建立起完整的科学理论和应用体系。但是,目前在国内外有许多学者纷纷将注意力投入这一领域,并取得一定的进展,我相信未来协同设计、协同仿真、协同优化、协同试验必将是复杂产品设计与研发的不可缺少的手段。

本文共有参考文献10篇,因篇幅所限未能一一列出,如有需要请向本刊编辑部索取。(责编 深蓝)