

基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发框架与关键技术

文章来源：计算机集成制造系统

作者：李浩¹、陶飞²、王昊琪¹⁺、宋文燕³、张在房⁴、樊蓓蓓⁴、武春龙⁵、李玉鹏⁶、李琳利^{7,8}、文笑雨¹、张新生⁹、罗国富¹

1. 郑州轻工业大学 河南省机械装备智能 制造重点实验室，河南 郑州 450002;
2. 北京航空航天大学 自动化科学 与电气工程学院，北京 100191;
3. 北京航空航天大学 经济管理学院，北京 100191;
4. 上海大学 机电工程与自动化学院，上海 200444;
5. 河北工业大学 国家技术创新方法与实施工具 工程技术研究 中心，天津 300130;
6. 中国矿业大学 矿业工程学院，江苏 徐州 221116;
7. 浙江大学 机械工程学院 浙江省先进制造技术重点实验室，浙江 杭州 310027;
8. 西门子（中国）有限公司 郑州分公司，河南 郑州 450007;
9. 机械工业第六设计研究 院有限公司，河南 郑州 450007

摘要：

数字孪生是实现物理信息深度融合的一个重要抓手，复杂产品设计和制造信息物理融合是其中最重要的环节，为最终智能制造的落地提供了有效途径。当前，针对数字孪生技术的研究与应用主要集中在车间运行和产品运维等方面，而将数字孪生技术应用于复杂产品设计与制造融合的研究较少。产品设计是智能制造的第一个环节，也是产生数字孪生体的第一个环节，研究基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发对实现后续的智能加工、装配和运维等具有重要影响。

为此，分析了基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发内涵，提出了基于数字孪生的复杂产品环形设计框架；基于所提出的框架，从需求分析、概念设计、个性化配置设计、虚拟样机、多学科融合设计和数据管理等方面，探索了基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发中的关键技术；通过两个典型应用案例，展示了数字孪生关键技术复杂产品设计制造一体化开发中的应用场景。

关键词：数字孪生；智能制造；复杂产品设计；设计制造一体化；虚拟样机；个性化设计中

引言：

复杂产品设计和制造的深度信息物理融合是实现智能制造的关键。近年来，随着大数据、云计算、物联网、移动互联网等新一代信息技术在传统制造业中的快速应用，客户大规模个性化需求越来越迫切，智能制造这一生产模式的落地应用进程也不断加快^[1]。在此背景下，各

国出台了相应的先进制造发展战略，具有代表性的是德国“工业4.0”和美国“工业互联网”。2015年，我国国务院也正式颁布了《中国制造2025》作为中国未来10年实施制造强国战略的行动纲领，以及未来30年建成引领世界制造业发展强国的基石。这些先进制造战略的核心目标之一是实现信息物理深度融合，复杂产品设计和制造信息物理融合是其中最重要的环节，也是实现客户个性化需求的关键环节^[2]，设计是智能制造的第一个阶段，设计和制造的信息物理融合能够为后续智能加工、装配、运维等环节提供重要支持。

但是，当前复杂产品设计与制造之间存在脱节，造成设计信息可重用性低，制造数据不能有效支撑产品的优化设计，这种脱节导致产品设计与制造的虚实映射、循环迭代和一体化开发无法实现。

数字孪生是实现智能制造目标的一个重要抓手，为复杂产品设计与制造一体化开发提供了一种有效途径^[3-4]。数字孪生这一概念在2003年被首次提出，直到2011年才引起国内外学者的高度重视，并连续在2016~2018年被世界最权威的信息技术咨询公司Gartner列为当今顶尖战略科技发展方向。世界最大的武器生产商洛克希德马丁公司在2017年11月将数字孪生列为未来国防和航天工业6大顶尖技术之首；2017年12月中国科协智能制造学术联合体在世界智能制造大会上将数字孪生列为世界智能制造十大科技进展之一。

至今，被工业界广泛认可的数字孪生定义是由Glaesegen和Stargel在2012年给出的：“一个集成了多物理性、多尺度性、概率性的复杂产品仿真模型，能够实时反映真实产品的状态”^[5]。从该定义中可以延伸出：数字孪生的目的是通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段，为物理实体增加或扩展新的能力。作为一种充分利用模型、数据、智能并集成多学科的技术，数字孪生面向产品全生命周期过程，发挥连接物理世界和信息世界的桥梁和纽带作用，提供更加实时、高效、智能的服务^[6]。

为实现基于数字孪生的复杂产品设计与制造信息物理融合，首先要建立设计与制造一体化开发框架。该框架能够描述和管理复杂产品结构、工艺设计、加工、装配和检测等不同阶段产生的异构、多态、海量数据。目前数字孪生的研究大多集中在车间的生产管理和产品运维方面，例如数字孪生车间、设备寿命预测、产品状态监测与故障诊断、预测性维护等^[7-8]，基于数字孪生进行复杂产品设计与制造一体化集成的研究相对较少。复杂产品的设计除遵循需求获取、概念设计、详细设计、仿真验证等一般过程外，更需要考虑加工、装配和检测等制造信息，具有交叉学科多、个性化定制显著、求解和配置过程复杂等特点^[9-10]。经典的复杂产品设计理论包括系统化设计(Systematic Design, SD)、发明问题解决理论(TRIZ)、公理化设计(Axiomatic Design, AD)、质量功能展开(Quality Function Deployment, QFD)等。

其中，SD涵盖了从机会识别、产品规划、概念测试到产品原型化等主要阶段，强调设计过程的可操作性^[11]；TRIZ理论成功地揭示了创造发明的内在规律和原理，更加关注技术的发展演化规律，以此构建整个设计与开发过程^[12]；AD则将设计信息组织到用户域、功能域、物理域和过程域，将设计过程看作这4个设计域之间的“之”字映射，并使用独立公理和信息公理将设计问题科学化^[13]；QFD的设计过程是由用户驱动的，通过“做什么”和“如何做”将用户需求、偏好和期望设计到产品生命周期过程，是系统工程在产品设计的实际应用^[14]。

但是，这些经典的设计理论并不能完全满足智能制造背景下复杂产品的设计制造一体化开发

要求。主要存在以下问题:

(1) 设计并不能有效地支持产品

加工和装配经典的设计理论虽然体现了并行设计与闭环设计的理念,但是最终的交付物只是物理产品及部分装配信息,并没有强调通过产品虚拟模型来驱动物理产品的加工、装配和检测等实际制造过程执行,预测制造过程中可能出现的故障,为制造阶段提供更好的服务。目前理想化的产品定义并不能真实反映复杂产品实际的加工、装配、检验等状态变化。例如,理想设计定义了产品自上而下的功能分解结构和自底向上的装配结构,但是没有描述动态的装配过程,以及记录不同装配阶段零部件的实际状态,因此很难有效指导实际制造过程。

(2) 产品实际制造数据的实时动态回馈能力不足

车间数字孪生系统会产生大量的加工和装配等数据,目前这些实时制造数据难以动态反馈到产品设计模型中。虽然理论上产品生命周期管理系统能够覆盖复杂产品设计和制造的数据,但实际上产品生命周期管理系统的作用到制造后期就很小了,产品设计数据难以随着真实加工、装配和检测等真实制造状态实时更新,大量在实际加工、装配和检测过程中发生的工程变更无法及时反馈给设计师,从而导致产品设计缺陷在生产的后期,甚至用户使用过程中才被发现,延长了复杂产品开发周期。因此,产品制造数据实时动态回馈设计阶段的能力急需提高。

(3) 产品信息建模方法有待完善

数字孪生理论强调对产品真实状态的描述,传统的产品数据管理系统(Product Data Management, PDM)虽然能够记录、共享、管理设计图纸、模项和文档,但建立的是静态、理想化的产品信息模型,与每个产品的实际加工、装配和检测等动态实例数据存在偏差。如何建立基于数字孪生的产品信息模型,来准确描述并管理每个实例产品的真实制造数据,与设计出的理想化的产品信息模型有机融合是亟待解决的问题。

数字孪生理论的出现为复杂产品设计制造一体化提供了有效途径,因为数字孪生的核心就是建立虚拟世界与真实世界的“桥梁”,保证理想虚拟产品设计和真实物理产品制造之间的同步。与传统的复杂产品设计方法有较大不同的是,如何利用高保真建模、高实时交互反馈、高可靠分析预测等数字化手段对复杂产品的理想设计信息与其实际加工、装配和检测等真实制造信息进行一致表达,使得产品设计能够有效支持加工和装配、产品设计制造数据能够实时动态回馈设计、建立精确反映产品制造状态的信息模型是基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发要解决的核心问题,也是本文的研究重点。

总之,本文在分析国内外研究现状后,提出基于数字孪生的复杂产品环形设计框架;基于所提出的框架,从需求分析、概念设计、个性化配置设计、虚拟样机、多学科融合设计、产品数据管理等角度,探索了基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发中的关键技术;最后,结合典型案例分析,并总结数字孪生在复杂产品设计制造一体化开发中的应用前景和有待突破的关键问题,为未来开展数字孪生的进一步落地应用提供理论和方法参考。

1 基于数字孪生的产品设计方法研究进展

1.1 基于数字孪生的产品设计方法

最早定义数字孪生(Digital Twin)的是美国密歇根大学的 Michael Grives 教授^[15],他在 2003

年提出”与物理产品等价的虚拟数字化表达“，并提议将数字孪生与工程设计进行比对，来更好地理解产品的生产与设计，在设计与执行之间形成紧密的闭环。

当前时代是数据的时代，数字孪生技术的提出为复杂产品数字化设计提供了新的方向。数字孪生衍生于产品全生命周期管理，最初被定义为“与物理产品等价的虚拟数字化表达”^[16]。数字孪生技术可有效实现产品全生命周期中多源异构动态数据的融合与管理，实现产品研发生产中各种活动的优化与决策。庄存波等^[3]对数字孪生技术在产品设计阶段的实施可能性进行了分析，认为首先要有一种自然、准确、高效，能够支持产品设计各阶段的数据定义和传递的数字化表达方法，而基于模项的产品定义(Model-based Definition, MED)技术的出现和成熟为此提供了可能；其次高精度3D建模技术、准确实时的多学科协同仿真技术及模型轻量化技术可有效支持复杂产品设计阶段的仿真验证与设计迭代决策。Tao等^[17-18]对数字孪生设计框架进行了初探，包括任务规划与识别、概念设计、具体化设计、详细设计及虚拟验证等阶段。Victor^[19]等给出了工程设计中数字总线的数学定义，用于进行设计决策。Moneer等^[20]提出了基于标准建模规范的数字总线，用于连接基于数字孪生的设计与制造。

1.2 复杂产品多学科优化

复杂产品通常由多个子功能系统构成，其研发通常需要多个学科协同合作才能完成，合理协调多学科之间的耦合关系已成为产品研发的关键环节。在上述背景下，1982年，美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)高级研究员 Sobieski 首次提出了多学科设计优化的概念(Multidisciplinary Design Optimization, MDO)^[21]。1991年，美国航空航天学会发表了MDO现状的白皮书，说明了MDO的必要性和迫切性，标志着MDO作为一个新的研究领域正式诞生^[22]。1994年，NASA对9个主要航空航天领域的工业公司作了关于MDO必要性的调查，结果表明航空航天工业界对MDO的研究和应用有着广泛的兴趣和支持^[23]。经过近30年的发展，当今MDO的理论与方法已经逐渐成熟，其内容主要包括复杂系统的分析与建模、近似方法、灵敏度分析法、优化方法、求解策略以及软件实现^[24]。这些研究内容相互融合、相互支撑形成了MDO研究的整体框架。国内学者也对MDO进行了深入研究。潘尚能等^[25]通过对涡轮多学科优化的分析，提出基于叶栅特征参数和贝塞尔函数的二维叶栅参数化造项方法；孙亚东等^[26]提出了基于本体元模项的数字化样机构建方法，用于实现复杂产品研发过程中不同学科的信息共享，消除系统集成、协同仿真和系统优化的障碍；刘成武等^[27]集成了近似灵敏度技术与功能测度法和两级集成系统综合策略，提出一种能同时处理随机和区间不确定性的序列化多学科可靠性设计优化方法；俞必强等^[28]提出基于随机搜索法的多学科设计优化策略，来解决多学科各子系统间的耦合问题。但总体来说，国内关于MDO的理论研究和工程应用比较零散，尚未形成系统化的理论。目前，多学科设计优化研究集中在概念设计、总体设计阶段的多学科耦合分析和多学科设计协调，以避免复杂产品研发过程中因设计冲突引起的大面积的设计迭代和设计返工。

1.3 虚拟样机技术

20世纪90年代，工程设计领域已经开始学习和应用虚拟样机技术，目前被广泛接受的虚拟样机定义是由美国国防部仿真办公室给出的：“虚拟样机是一个与物理原型具有功能相似性的系统或者子系统进行的基于计算机的仿真；通过使用虚拟样机代替物理样机，对候选设计方案的某一方面特性进行仿真测试和评估的过程”。21世纪之后，随着计算机技术、信息技术等的迅猛发展，数字化制造愈加成熟，国内外对虚拟样机的研究和应用也更加广泛。

在国外，Aromaa等^[29]将虚拟样机技术定义为包括了虚拟现实和其他计算机技术的建立数字

样机的相对较新的技术；Li 等^[30]将虚拟样机定义为通过软件技术对整个研发周期中研发人员、设计产品以及人员产品交互的仿真过程；Johnston 等^[31]认为虚拟样机就是通过计算机技术构建的替代物理样机的模型，它包括了各种几何仿真以及人参与和不参与的功能仿真。在国内，熊光楞等^[32]认为虚拟样机技术是基于计算机、网络技术的新的设计理念，它不单是先进的设计技术，同时也是先进的管理技术；范文慧等^[33]认为虚拟样机技术是计算机辅助技术(CAX) 和面向产品生命周期的设计(DFX)技术的发展和延伸，进一步融合先进建模 / 仿真技术、现代信息技术、先进设计制造技术和现代管理技术；李伯虎等^[34]提出面向新型人工智能系统的建模与仿真技术的含义，探讨了新项人工智能系统仿真对虚拟样机技术的新挑战。

与虚拟样机技术相似的是数字样机，但它们侧重点不同。虚拟样机强调对产品的“可视化建模”和“虚拟仿真”，而数字样机更强调对产品进行数字化定义，以及面向多阶段和多学科领域的统一模型，例如空客公司分别提出了可配置的数字样机^[35]功能化数字样机^[36] 面向工厂的数字样机^[37]。数字样机的定义更加宽泛，不仅包含产品结构、力学、工艺等机械相关领域定义，同时扩展到对电、热、控制等多个学科领域的描述，因此数字样机将复杂产品数字模型的定义变得更为完善。

根据分析与比较，总结出**虚拟样机的特点**：

- ① 具有与物理样机相同或相似的性质，可以代替物理样机进行测试和评价产品的几何外形、产品性能、可加工性、可装配性和可操作性等，有利于“协同设计”；
- ② 具有真实”沉浸感“，与物理系统相似，在与外界交互时具有视觉和听觉等真实感受，有利于学习、测试和培训；
- ③ 可用于系统全生命周期的研发，在产品的需求分析、方案设计、详细设计、工程设计阶段以及产品的测试、运行、维护阶段对虚拟样机有着不同的要求，因此，虚拟样机有利于实现“并行工程”。

但是，虚拟样机目前还没有一个公认的、完整的理论和技术组成框架。在智能制造背景下，**以虚拟样机为基础的复杂产品设计仍然存在一些问题**^[38]：

- ① 虚拟样机技术强调在虚拟世界中定义理想化的产品，然而这种“理想化”并不能真实反映产品实际的运行状态，例如在实际飞行过程中，飞机的重量会随着油耗下降，其性能与理想状态下的仿真数据有偏差；
- ② 虚拟样机虽然能够描述产品静态的设计、制造、运行等信息，但是缺乏对动态过程信息的表达，例如，虚拟样机定义了产品自上而下的功能分解结构和自底向上的装配结构，但是没有描述动态的装配过程，以及记录不同装配阶段的产品状态。这些不足是虚拟样机固有的理想化特性所决定的。

2 基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发内涵

传统的设计方法经过虚拟样机验证，设计师将设计模型、图纸和相关文档交至制造部门后，一个设计过程就完成了，面向制造的设计、面向装配的设计、面向维护维修的设计等都是设计阶段完成的。基于数字孪生的复杂产品设计与传统设计方法有较大不同，这需从数字孪生的概念进行分析。

Michael Grives 教授^[15]认为数字孪生是在设计与执行之间形成紧密的闭环。空中客车公司提出了工业数字样机(industrial Digital Mock-Up,iDMU)的概念,指出 iDMU 是产品虚拟制造的完整定义与验证,它包含可交互的产品设计、工艺设计与制造资源的数据^[37-38]。基于上述两个概念的分析,本文提出基于数字孪生的产品设计是在设计与制造阶段形成紧密闭环,并可向用户交付产品和实际设计制造数据的一种设计与制造一体化的方法。图 1 给出了基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发过程,该过程从分析用户需求,到面向功能/性能的产品设计;同时,还需要将设计模型、文档等传递到制造阶段,经过加工装配后,形成实例产品实际尺寸、装配参数和次品信息等反馈回设计阶段。可交付给客户实例产品及其唯一的产品设计参数和模型等,形成满足用户需求的大规模个性化定制。

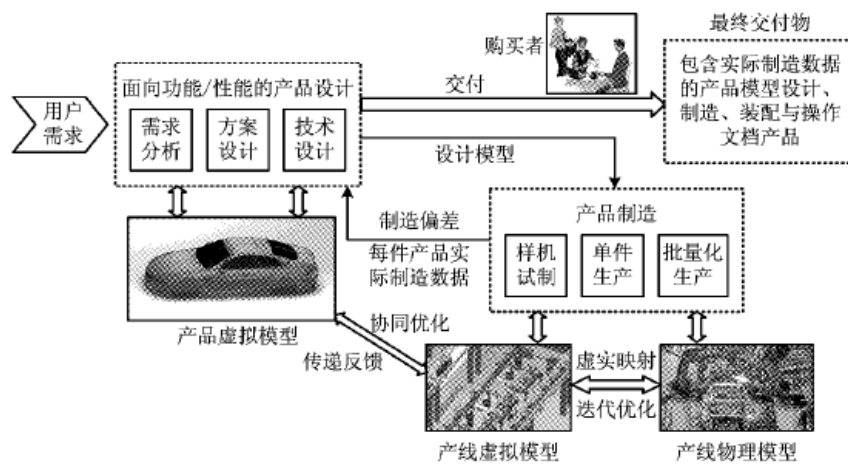


图 1 基于数字孪生的产品设计制造一体化开发过程

面向数字孪生的产品设计方法在设计关注点、设计过程、设计与制造跨阶段提交物、设计周期和交付用户资料等方面都与传统设计方法存在不同,如表 1 所示。

表 1 基于数字孪生的复杂产品设计方法与传统设计方法的关系

主要设计方法	设计关注点	设计过程	设计与制造跨阶段提交物	设计周期	交付用户资料
传统设计方法学	功能/性能	产品设计阶段串行迭代优化	设计向制造提供图纸和轻量化三维模型。	用户需求、方案设计、技术设计等阶段串行或并行设计。	产品主要设计参数,安装与操作手册
基于数字孪生的复杂产品设计方法	客户需求	虚实迭代,循环迭代	提供完整的设计数字孪生体,并融入到制造数字孪生体中	在传统设计阶段基础上,扩展到样机试制和产品制造阶段。设计与制造之间形成紧密的闭环,形成设计制造的一体化协同	单件实例化的交付物;产品设计、工艺设计、制造参数的数据,操作手册等

基于以上分析比较,基于数字孪生的复杂产品形成虚实交互设计制造一体化开发内涵可以归结为以下几点:

(1) 基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发是一种面向客户大规模个性化需求的设计方法,可以向用户提交独一无二的单件实例产品。实例产品包括实例产品、虚拟样机、工艺信息、实例产品的实际制造参数,操作手册等。

(2) 产品加工装配完成后，实际制造数据返回设计数字孪生体后，才完成了基于数字孪生的复杂产品设计。它实现了设计与制造的一体化协同，在设计与制造阶段之间形成紧密闭环回路。

(3) 基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发是一个虚实迭代、循环优化的设计过程。

(4) 设计阶段后，向制造阶段提供完整的设计数字孪生体，包括高保真度的虚拟样机，并融入到制造阶段的加工、工艺和产线等的数字孪生体中，实现设计虚拟模型与制造虚拟模型的协调运行。

3 基于数字孪生的复杂产品设计制造开发框架

3.1 基于数字孪生的复杂产品环形设计框架

基于数字孪生的复杂产品设计制造开发框架由产品生命周期环、数字孪生体环和设计方法环 3 个环构成，如图 2 所示。产品生命周期环包括用户需求、方案设计、技术设计、样机试制、产品制造、产品运维和产品退役等阶段；数字孪生体环包括需求数字孪生体、设计数字孪生体、车间全要素数字孪生体和运维数字孪生体等孪生体；设计方法环包括面向功能/性能的设计、面向制造的设计和面向服务的设计方法等。在基于数字孪生的复杂产品三环设计框架中，产品生命周期环为物理环，数字孪生体环为虚拟环，它们在产品生命周期各个阶段形成虚实交互迭代优化；设计方法环为核心环，支撑数字孪生体环的实现和产品生命周期环的运行。因此，三环之间互为映射并协同运行，支撑基于数字孪生的产品设计、制造与运行。

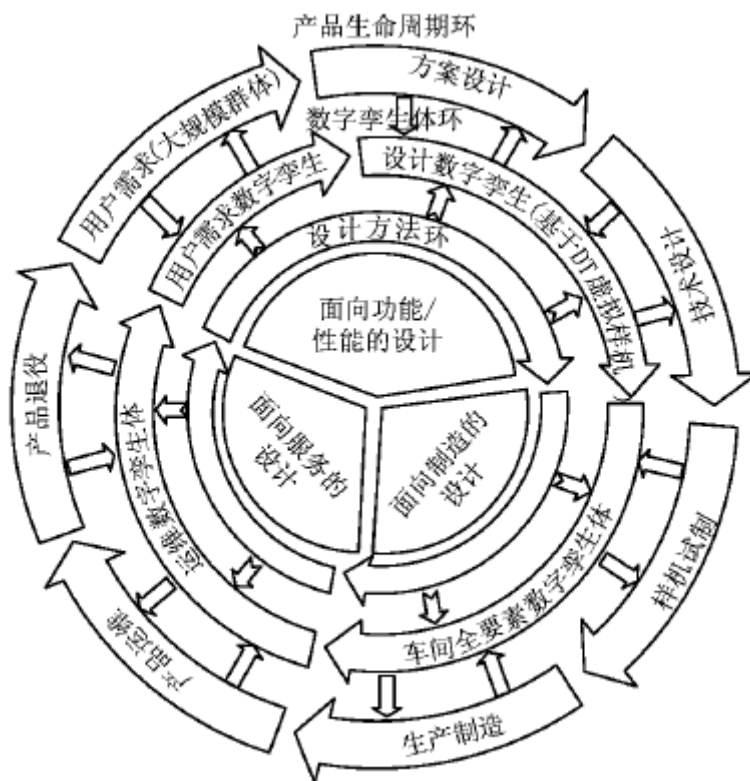


图 2 基于数字孪生的复杂产品 3 环设计框架

3.2 产品生命周期环

产品生命周期环是传统的设计环路，包括用户需求、方案设计、技术设计、样机试制、产品制造、产品运维和产品退役。产品生命周期环与设计方法环的关系如图 3 所示，产品生命周期中的用户需求、方案设计和技术设计等阶段基本上确定了产品的功能和性能；面向制造的产品优化设计主要在生命周期的样机试制和生产制造等阶段完成，向设计工程师提供几何尺寸合理性、模块间干涉、装配关系及过程、制造偏差、单件产品实际加工几何数据等，以提升产品功能和性能，同时提供单件产品实际制造尺寸。产品运维阶段是面向服务的优化设计，支撑对复杂产品运行状态、故障和性能的判别或预测，可支持对下一代或下一批次产品的优化设计。

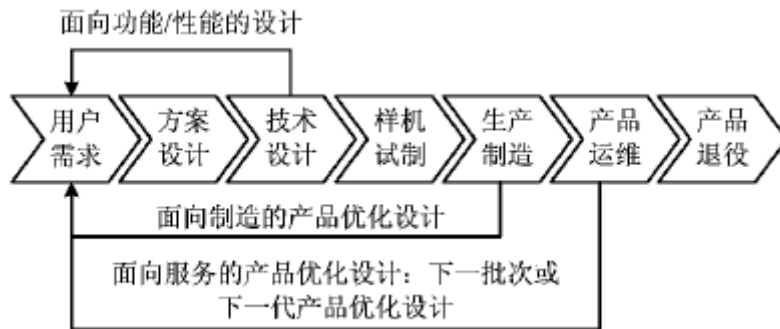


图 3 产品生命周期环与设计方法环的关系

3.3 数字孪生体环

数字孪生体是指与现实世界中的物理实体完全对应和一致的虚拟模型，可实时模拟自身在现实环境中的行为和性能，也称为数字孪生模型^[2]。数字孪生体环为虚拟环，与产品生命周期环对应并相互映射。数字孪生体在用户需求阶段建立的虚拟空间和模型称为需求数字孪生体；在产品方案阶段建立的虚拟空间和模型称为设计数字孪生体或产品数字孪生，主要体现在产品虚拟样机；庄存波等提出产品数字孪生体是指产品物理体的工作进展和工作状态在虚拟空间的全要素重建及数字化映射，是一个集成的多物理、多尺度、超写实、动态概率仿真模型^[2]。在车间制造设计阶段建立的虚拟空间和模型称为车间全要素数字孪生体，包括生产装备虚拟模型、工艺装备虚拟模型、物料虚拟样机、物流运输系统虚拟模型、人力资源虚拟模型和产品虚拟样机等车间全要素的虚拟模型，这些虚拟样机需要互相兼容和协调运行，才能支撑车间生产线的有效运行；在产品运维服务阶段，产品虚拟样机和制造阶段产生的单个产品实例几何尺寸和制造参数，共同提交用户，形成运维数字孪生体，支撑对复杂产品运行状态的分析与判断，对产品故障进行判别并对性能进行预测。

3.4 设计方法环

设计方法环包括面向功能/性能的设计、面向制造的设计和面向服务的设计等一系列方法，支撑产品在生命周期中的运行；同时，也基于需求数字孪生体、设计数字孪生体、车间全要素数字孪生体和运维数字孪生体进行产品优化设计和满足用户的大规模个性化。面向功能/性能的设计是通过用户对用户市场和群体进行细分，通过个性化推荐等方法获取用户个性化需求，进行个性化的产品性能和功能配置设计，同时进行多学科融合设计，以提升产品性能。

面向制造的设计是基于数字孪生的产品设计过程不可缺少的重要组成部分，不仅是为了提高

产品的可制造性和可装配性，更重要的是将单件实例产品制造信息传输回设计阶段，向用户提供独一无二的、具有实际单件产品制造信息和仿真信息的个性化产品。面向服务的优化设计主要基于用户的运维数字孪生体和运维阶段物理产品之间建立的实时管控系统进行产品故障和性能分析，以确定产品设计的薄弱环节，为面向下一批次或下一代的优化设计提供建议。

3.5 基于数字孪生的复杂产品设计与制造协同开发框架

基于数字孪生的复杂产品环形设计框架中，虚拟世界的设计过程和物理世界的制造过程通过产品设计数字孪生体进行交互，为此构建了基于数字孪生的复杂产品设计与制造协同开发框架，如图 4 所示。

在图 4 中，整个设计与制造融合过程遵循基于模型的系统工程(Model based Systems Engineering, MBSE) 经典的“V”字形模型，左边是自上而下的虚拟产品设计过程，右边是自下而上的实际产品制造过程，还包括设计域的生成、设计模项的建立以及产品设计数字孪生体的组成。其中，虚拟设计过程包括需求分析、功能分析和设计综合，分别对应公理化设计(Axiomatic Design, AD) 的用户域、功能域和结构域，新的“行为域”作为连接静态功能和实现功能的详细结构的桥梁，并使用独立公理(independence axiom) 选择最优的结构设计方案；实际制造过程包括零部件加工、测量和装配，分别对应公理化设计的加工域、测量域和装配域，它们都是工艺域的子集；每个过程之间存在频繁的信息交互；每个活动的信息都可以使用系统建模语言(SysML) 的需求图、活动图、用例图、块定义图、内部模块图或者参数图中的一种进行统一描述，得到对应的模型，这些统一模型组成完整的产品设计数字孪生体。

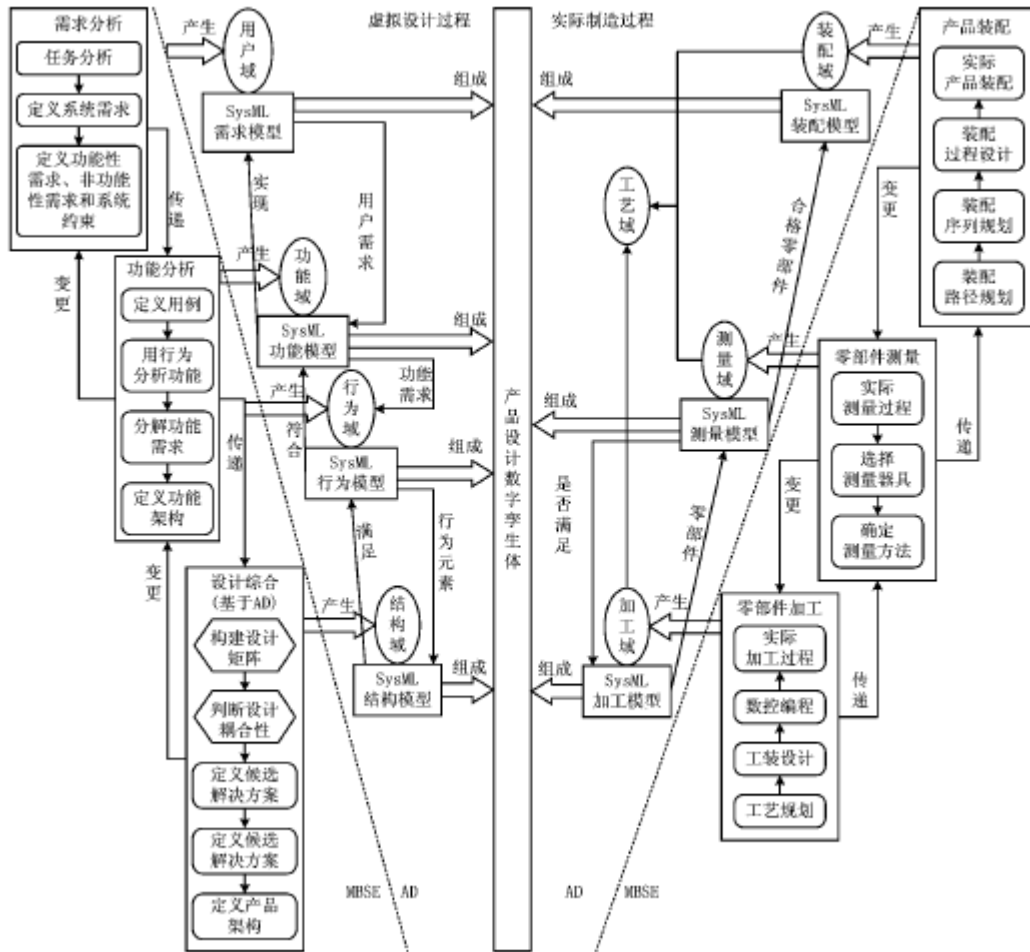


图 4 基于数字孪生的复杂产品设计与制造协同开发框架

4 基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发关键技术

4.1 基于数字孪生的需求获取与个性化体验方法

产品的数字孪生本质上是系统级的数据闭环赋能体系，通过全生命周期数据标识、产品状态精准感知、数据实时分析，以及模型科学决策，实现产品系统的模拟、监控、诊断、预测和控制，从而解决产品设计、制造、服务闭环过程中的复杂性和不确定性问题。基于数字孪生的需求获取与个性化体验是在对产品全生命周期状态和使用场景进行精准刻画的基础上，基于数字孪生技术实现客户需求的快速识别、功能映射和市场预测，从而为个性化的产品设计提供实时决策支持。

如图 5 所示，在基于数字孪生的需求识别阶段与映射阶段，可以实现个性化实时交互，预测产品全生命周期不同阶段产品特定行为对需求的满足情况，使得设计工程师提前掌握用户及产品需求的可能变化。然后进行快速的产品运行状况“假设”分析和生命周期推演，避免不可预知的设计更改带来的延期和成本增加。设计人员还可以基于产品数字孪生体进行数值模拟、概念分析和产品概念的可视化表达，构建基于产品数字孪生的工程特征数据库，实现产品需求向产品工程特征的有效传递、共享及概念方案的优选。最后，通过数字孪生全面整合后续工艺、制造、市场、服务等真实数据，在数字孪生空间实现虚实合并叠加，解决产品设计需求间的潜在冲突。

在基于数字孪生的需求分析与预测阶段，产品数字孪生体中所有的产品状态都将在数字空间拥有对应的虚拟映射，产品使用也将从实体向数字化转变，每个用户的产品使用行为轨迹都会被数字孪生体精准映射，形成“用户-产品”的大数据集。然后，通过大数据分析挖掘，可以得到用户的产品使用偏好、产品使用环境等信息。根据这些产品使用行为特征，在数字空间中进行高置信度的仿真分析，预测用户产品偏好迁移规律、推演未来的产品使用场景、评估产品新功能的影响等。



图 5 基于数字孪生的需求获取与个性化体验

在此基础上，企业可以通过智能人机交互、智能服务推送等形式，实现面向用户的个性化产品与服务，包括个性化定制、维保、节能、升级改造、回收等的实时交互与个性化提供，提升用户的个性化体验。

基于数字孪生的需求获取与个性化体验亟需解决的科学问题包括：

- ①产品全生命周期的数字孪生场景表达：考虑产品特征的设计、制造、运营维护、回收处置等阶段需求数据的规范化数字孪生场景表达方法；
- ②考虑虚实空间融合的产品设计需求冲突识别与解决：基于产品数字孪生体的产品设计需求冲突可视化识别与消解策略；
- ③数字孪生空间中用户—产品—环境交互行为轨迹建模：基于虚实映射的用户—产品—环境交互行为洞察与分析方法。

4.2 基于数字孪生的概念设计方法

产品的概念设计（创新设计）流程可以概括为设计意图生成、方案原理功能结构设计、寻找原理解最优组合，以及模块划分与结构设计。但在传统的问题解决流程中，设计人员更注重定性分析，忽略了对实例产品真实数据的收集和运用，这在一定程度上限制了解决问题的效率。

数字孪生作为虚拟世界中对物理世界实际产品的全要素实时模拟，贯穿产品的全生命周期，为设计人员提供了一种可行技术实现方式。基于数字孪生的概念设计方法如图 6 所示，在传统的概念设计过程中，基于模块化设计进行方案决策和模块划分，并基于数字孪生大数据平台管理结构化孪生数据和非结构化孪生数据。数字孪生驱动下，不仅顾客充分参与产品方案规划，企业也能够通过虚拟社区与顾客互动，从而跨越了地理空间障碍，参与时间更长，也提高了效率。

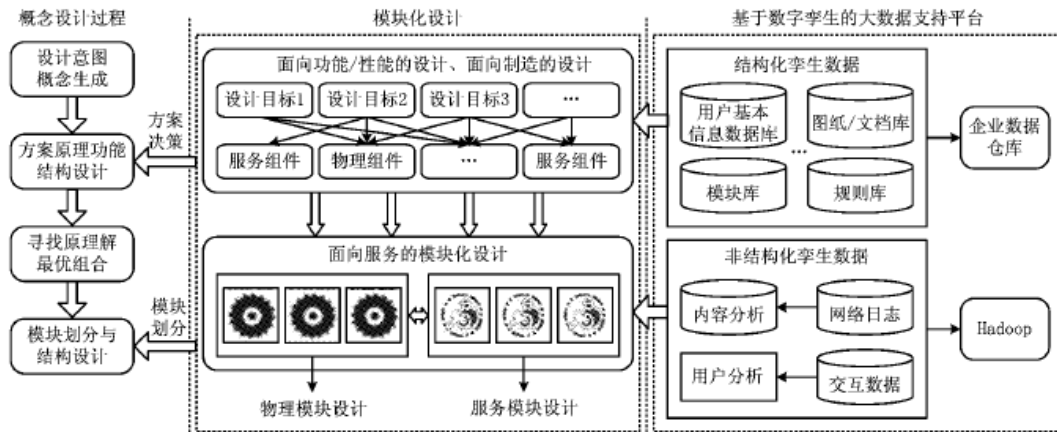


图 6 基于数字孪生的概念设计方法示意图

基于数字孪生的概念设计方法特点如下：

①在设计意图概念生成阶段，数字孪生具有的真实用户数据、产品功能数据及历史设计数据能够为设计人员确定产品系统层次、扩充问题解决思路提供依据；

②模块化设计支持概念设计的方案决策和模块划分，由两个层次构成，即面向功能/性能的设计、面向制造的设计和面向服务的模块化设计。面向功能/性能的设计、面向制造的设计通过寻找服务组件和物理组件来满足不同的设计目标，通过组合规划这些组件需求，可以得到用户满意度最高，同时制造商利润最大的方案；面向服务的模块化设计主要是根据最优需求方案，在配置设计系统里配置出制造成本最低的产品与服务，它由尽可能多的、能满足特定细分市场需求的物理模块与服务模块组成。

③利用基于数字孪生的大数据支持平台，数字孪生积累了海量的数据（例如用户基本数据库、图纸文档库、模块库和规则库等结构孪生数据），有助于设计人员确定产品的元件组成及元件间的相互作用，预测和避免导致问题发生的有害作用，大大提升需求分析的效率和质量，增强需求分析结果的可靠性；同时，通过分析数字孪生中的产品实际运行数据，能够帮助设计人员探究问题本质，确定问题产生的根本原因和解决问题的主要途径。

基于数字孪生的产品概念设计（创新设计）亟需解决的科学问题：心高保真度的数据收集、存储及处理技术的实现方式心）不同数字孪生数据中有效信息的提取与综合；物理实体与其对应数字孪生体间的迭代优化规则的确定。

4.3 基于数字孪生的个性化配置设计技术

产品个性化配置是根据预定义的零部件集合，或根据需求新设计模块以及它们之间的相互约束关系，通过合理可行的组合或创新设计，来满足客户个性化需求的一种设计方法。

如图 7 所示，基于数字孪生的产品个性化配置设计更强调服务方案的个性化推荐、用户个性化体验与服务商模块主从决策优化和基于情感认知的个性化模块再设计，包括需求获取层、个性化推荐层、个性化服务方案层、模块配置提供层、情感设计层。在全生命周期孪生数据的驱动下，将物理空间的模块化零部件映射到虚拟空间中，利用数字孪生作为已有物理产品与虚拟产品在配置过程交互与协同的媒介，并通过统计分析、智能计算、深度学习等算法对

产品的隐性需求进行挖掘，生成包含性能、结构、参数、配置规则等多方面的产品描述，在虚拟空间中进行约束求解，得到若干可行配置方案，并进行验证优化与智能决策，最终得到更符合客户需求的个性化配置方案。

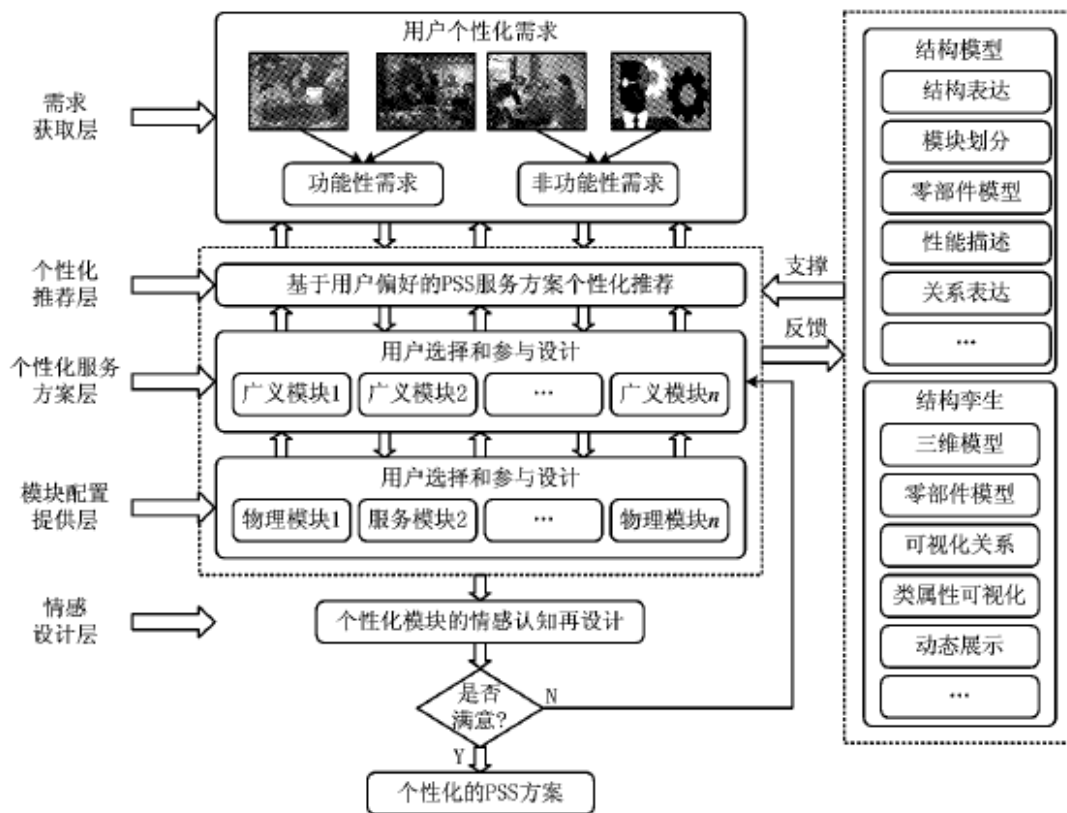


图7 基于数字孪生的个性化配置

基于数字孪生的产品个性化配置设计的特点是：

- ①自适应性、个性化极致体验和系统参与方的高满意度；
- ②在需求获取阶段，根据需求孪生模型，客户与工程师之间的交互方式由过去“意图式”的交互变为基于“需求孪生模型”的个性化、可视化交互；
- ③在功能配置阶段，实现由“清单式”的功能协同设计到基于“功能孪生模型”的显性化协同设计的转变；
- ④在模块配置提供阶段，实现由“图表式”的配置过程到基于“结构孪生模型”的直观化协同设计的转变。总之，基于数字孪生的配置过程能够根据个性化的客户需求，通过多阶段孪生模型的交互，配置出需求方案和功能方案，进而获得精准化的结构方案，并通过高度保真的虚拟孪生模型验证方案的可行性。

基于数字孪生的个性化配置设计的核心就是在用户需求难以准确描述的前提下，通过构建需求孪生模型与具有不同属性的产品设计孪生模型，即需求孪生—功能孪生—结构孪生模型，进行产品模块化智能配置。亟需解决的科学问题有：心建立孪生模型的统一表达与协同次序

性演化机制，确保全生命周期内由单一数据模型来驱动设计，缩小设计产品和“需求”产品之间的差距；@产品个性化配置过程涉及工程知识、过程模拟、产品标准规范等异构信息，导致数字孪生数据的隐匿性、碎片化和低质性，需要基于制造大数据相关技术，研究抽象分散信息与知识的表达、具象与集成方法，实现配置设计过程的质量可追溯；基于多阶段数字孪生模项的多级递进式配置设计求解策略与技术，提高产品配置方案的精准性。

4.4 基于数字孪生的虚拟样机技术

虚拟样机是能够反映物理样机真实性的数字模型，工程师可以通过虚拟样机描述产品的几何、功能和性能等信息，在实际物理产品生产之前就可以对产品进行数字化定义。基于数字孪生的虚拟样机以 3 维 CAD 模型为核心，在综合考虑机械、电子、控制等多学科知识，并集成产品的技术数据和管理数据的基础上，能够实时映射物理世界中产品实际加工、装配、运行、维护等真实状态，从而为复杂产品的设计与制造一体化开发提供虚拟平台。

为实现上述功能，基于数字孪生，虚拟样机不仅需要实现设计对象在虚拟世界中的数字化复制，并建立正向的产品设计、工程分析、加工、装配、检验等信息模型，更重要的是能够描述物理世界中产品实际制造、运行、维护等信息的反馈。例如，在加工过程中，真实的加工顺序、不同工序所消耗的资源、所用的夹具、所需的时间等。

图 8 给出了实现基于数字孪生的虚拟样机所需的技术框架。数字孪生使得虚拟样机技术形成了一个完整的闭环。通过基于数字孪生的虚拟样机，提高了复杂产品设计与后续的制造、检验、运行、维护、报废之间的并行和协同，虚拟世界的产品从物理世界中得到高实时性的数据，经过高保真的建模仿真和分析，能够反过来监控、诊断和预测物理世界产品的可能状态，最终实现信息物理的高度融合。

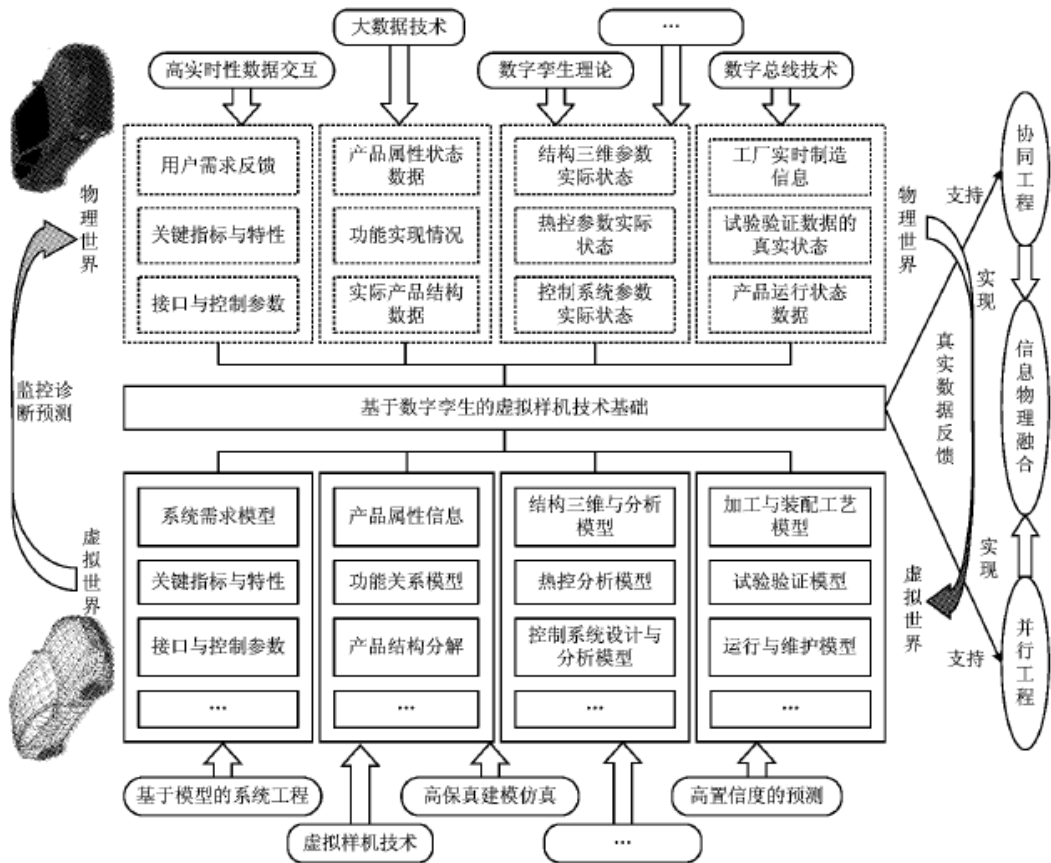


图 8 基于数字孪生的虚拟样机技术框架

基于数字孪生的虚拟样机的优点在于能够从多个角度描述复杂产品的静态定义模型和动态过程模型，根据复杂产品设计研发周期长、多学科交叉、个性化需求显著、求解及配置过程复杂等特点，将基于数字孪生的虚拟样机分为**面向生命周期、产品结构、学科领域和成熟度** 4 个角度的虚拟样机：

- ① 生命周期角度包括系统虚拟样机、几何虚拟样机、制造虚拟样机、测试试验虚拟样机、运行维护虚拟样机等；
- ② 产品结构角度包括产品虚拟样机、子系统样机、零部件虚拟样机等；
- ③ 学科领域角度包括机械虚拟样机、电气虚拟样机、热控虚拟样机、控制虚拟样机等；
- ④ 成熟度角度包括一级虚拟样机（最低成熟度）、二级虚拟样机（中级成熟度）、三级虚拟样机（高成熟度）、四级虚拟样机（最高成熟度）。

这 4 个角度的虚拟样机相互关联，如图 9 所示。例如，产品结构角度 虚拟样机以抽象到具体的层次展开，经历了生命周期角 度中从系统、几何虚拟样机到制造、运维虚拟样机的不同阶段。

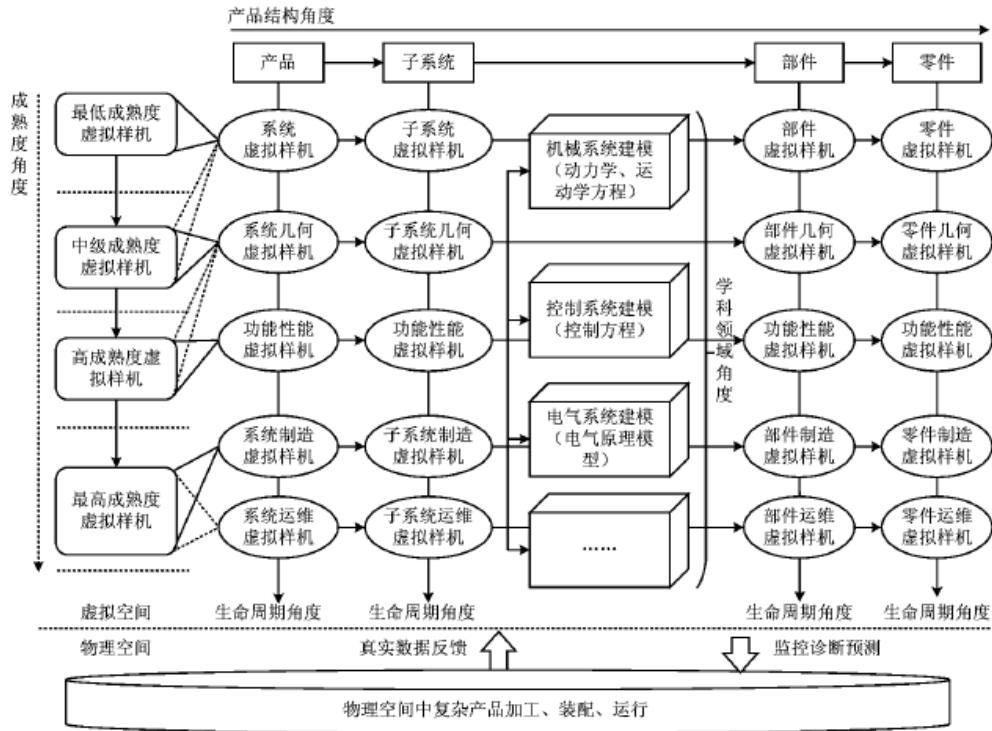


图 9 基于数字孪生的多角度虚拟样机

基于数字孪生的虚拟样机还有以下关键科学问题亟需解决：

- ① 标准化多学科交互接口，基于产品模型数据交换规范建立连接机械、电子、控制等不同领域产品设计数据的数字总线；
- ② 设计信息全生命周期高置信追踪，基于区块链技术连接虚拟样机和产品生命周期管理系统，保证设计信息在全生命周期被可靠追踪；
- ③ 高逼真度的性能分析，使用基于物理的高保真模型建立虚拟样机，对产品加工、装配、运行和维护不同阶段的主要性能进行有效预测。

4.5 基于数字孪生的多学科融合设计技术

产品多学科协同设计建模是对复杂产品多学科、多领域系统（对象、方法及技术）的本质特征和相互关系的完整描述，通过对模型的模拟仿真实验和多学科设计优化，从而缩短设计周期、降低项目管理的复杂性。基于数字孪生的产品多学科协同设计建模是基于系统工程理论和方法，在对产品的机械、电气、自控、液压、气动等系统全要素、超写真设计建模的基础上，把对模型仿真优化和管理扩展到生产制造、工程调试、运行维护等阶段，实现产品信息模型与物理实体全生命周期的数据和服务深度融合，从而为设计者和使用者提供设计优化决策和主动服务支持。

基于数字孪生的产品多学科协同设计建模与虚拟工程具有以下优势：

- ① 产品的多学科多领域设计仿真在同一平台上进行，有效降低了协同难度和管理复杂性；

②产品多学科设计仿真向虚拟调试、生产 制造、运行服务扩展，提高了实体开发进度和运行服务质量；

③产品全生命周期统一的数据管理平台，有利于多版本管理、模型重用、知识共享和产品创新。

基于数字孪生的产品多学科协同设计建模与虚拟工程亟需解决：

①人机交互与体验式需求分析技术。主要包括产品数字孪生模型、物理实体和人 3 体深度交互与体验式需求分析转化技术，产品物理和半物理式高仿真技术，沉浸式体验技术，客户体验数据实时采集与分析技术，客户个性化需求主动式推荐技术等；

②功能结构虚实映射与优化迭代技术。研究功能结构的信息表达建模方法，语义解析和虚实映射接口技术，虚拟调试阶段机械结构虚拟模型运行关键参数反馈技术，复杂产品多层次多目标优化迭代设计技术。

③基于模项的产品数字孪生分布式设计建模、仿真和集成技术。主要研究基于高层体系结构 /COREA/Web/云计算等的分布式建模技术和基于元模型工具/XM L/HLA/多 Agent/虚拟现实 AR 等模型集成技术。

④多学科知识融合优化与冲突消解技术。研究机械、电气、自动化、信息等多学科统一平台、统一标准的模型信息表达和知识融合技术以及多元优化和冲突消解策略与算法。

4.6 数字孪生体的数据建模与管理技术

产品数据建模方法是设计阶段产品数据管理(Product Data Management, PDM) 系统的核心技术，有效合理的数据模型是实现产品在生命周期各阶段有效管理的关键^[9]。数字孪生体的数据管 理包括需求数字孪生体、设计数字孪生体、车间全要素数字孪生体和运维数字孪生体等的管理。传统的产 品 数据模型仅支持对物理产品的设计、工艺等的图纸、模型和文档的管理，而基于数字孪生的设计过程，将传统设计扩展到面向功能/性能的设计、面向制造的设计和面向服务的设计等产品全生命周期的一体化协同设计。

数字孪生体的数据建模与管理具有以下优势：

①建立需求数字孪生体、设计数字孪生体、车间全要素数字孪生体和运维数字孪生体等的统一数据模型，支持不同类型数字孪生体的管理；

②支持数字孪生体的建立、完善、复制和演化等生命周期管理；

③基于数字孪生体进行产品快速设计、车间快速定制设计、产品个性化配置和产品运行维护。

基于数字孪生的数据建模与管理有以下关键科学或技术问题亟需解决：

①数字孪生体的数据建模原理，基于传统的产数据元模项，需要对需求数字孪生体、设计数字孪生体、车间全要素数字孪生体和运维数字孪生体等的的数据模型建模原理进行研究，这

是数字孪生体生命周期管理的基础理论；

②不同数字孪生体之间的映射机制，需求、设计、车间和运维等阶段数字孪生体具有多类型、多样化、动态性和继承性等特征，需要建立从需求到运维各阶段不同类型的数字孪生体之间的映射模型，分析数字孪生体的继承特性与方法。实现不同类型数字孪生体之间的映射和协调运行；

③数字孪生体的演化与控制，数字孪生体处于动态变化中，如设计数字孪生体一直在不停更新中，如何分析数字孪生体的生命周期演化特性，并提出孪生体演化控制机制与方法，使得数字孪生体能有效支撑快速设计、车间定制生产和服务运维是个难题。

5 典型应用

5.1 应用案例：西门子多学科融合设计

当前基于传统物理样机的复杂机械产品开发模式普遍存在需求不精准、设计协作难且返工多、样机试制周期长且成本高、样机性能无法及时反馈和验证等问题，这些都严重影响了企业的产品创新和市场开发。数字孪生的理念为复杂产品设计提供了一种新的思路，以建立产品的数字孪生模型为目标，在设计阶段就采用多学科协同的设计理念，在统一平台上实现产品的机械、电气、自动化的协同设计和同步仿真，及时反馈和修正数字孪生模型，并通过虚拟调试对设计结果进行虚拟验证和方案优化。

基于数字孪生，在产品还没有生产出来之前，就在虚拟环境中完成了产品的所有设计和大部分调试工作，有效减少了返工次数和开发时间，通过可视化交互和虚拟验证，实现了基于需求的精准开发和持续优化，从而提高了新产品研发成功率和产品质量。另外，虚拟空间的设计成果，例如机械模型和零件清单、电器元件清单、自控程序等，可以直接应用于实际生产、调试和产品运行，从而加快产品投放市场。

基于以上理念，设计了数字孪生驱动的复杂机械产品多学科协同设计开发平台，如图 10 所示。基于西门子公司机电一体化协同设计平台(Mechatronics Concept Designer, NX MCD)在产品概念设计阶段即建立产品初级的概念模型、功能模型和行为规则模型。基于概念设计结果，同步推进机械设计、电气设计和自动化设计进程。NX MCD 通过统一的数据库平台 Teamcenter 提供的接口实现了西门子机械设计平台 NX CAD、电气设计平台 Eplan/Eplan Pro、自动化设计平台 TIA Portal、Sizer、Selection Tools 等的信息集成和数据交互，通过对集成电气和自动化元件的设备模型进行仿真，快速验证设计结果并及时反馈，持续改进和优化设计阶段的设备数字孪生模型。

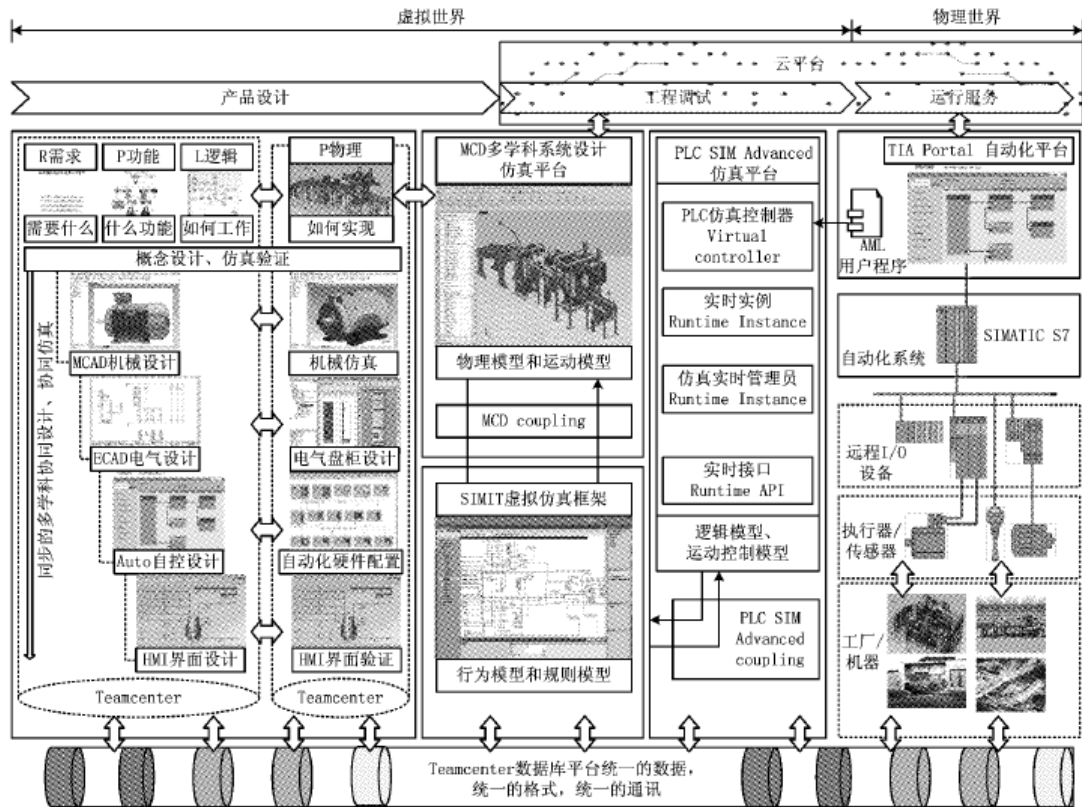


图 10 数字孪生驱动的复杂机械产品多学科协同设计开发平台

例如，在伺服电机选项时。首先，根据西门子机械设计平台 NX MCAD 中的机械结构模型在 NX MCD 进行机械特性曲线、凸轮轮廓曲线仿真。然后根据仿真结果，可以在电机驱动选型软件 Sizer 的现有库中初步选出伺服电机/驱动器的型号和参数，例如功率、输出扭矩、尺寸和三维模型等。进而，将伺服电机/驱动器的几何模型和物理模型导入到 NX MCAD 中与机械机构模型进行集成装配，在多次仿真和选型验证后，最终选出合适的伺服电机和驱动器。

在电气设计阶段。将西门子电气设计平台(Eplan/Eplan Pro, ECAD) 中的电气原件清单和集成接线的 3D 电气布局模项导入到 NX MCD 中，与机械模型进行装配集成，实现电器元件符号名称与三维模项的关联对应，为后续自动化设计和虚拟调试做准备。

(1) 自动化设计阶段。首先将 NX MCD 仿真得到的机械操作顺序图转化为 PLC Open XML 格式的文件，导入自动化开发环境 TIA Portal Step 7 中，生成自动化编程语言，加速可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC) 程序开发。然后，基于 NX MCD 中的设备模型开发人机接口界面(Human Machine Interface, HMI) 和程序。

(2) 虚拟调试阶段。首先，通过西门子工厂级仿真平台 SIMIT 模拟分布式 I/O 站、电机、阀门、气缸、仪表等实际现场设备的信号和状态，并通过电器元件符号名称将这些信号和状态与 NX MCD 中机械设备模项的物理行为和运动过程相关联。然后，在 PLC 仿真器 PLC SIM Advanced 中装载已经开发好的 PLC 编程，并连接人机接口真界面。然后，运行 HMI 仿真界面和 PLC 仿真器，在 NX MCD 中验证设备动作和运行过程，通过持续的设计改进和仿真优化，最终获得最佳的复杂机械产品数字孪生模型。

(3) 设备装配完成后, 切换到实际环境进行精准调试, 将真实的 HMI 和 PLC 与真实的分布式 I/O 站、伺服驱动器、阀门、气缸和仪表等相连接, 基于测试好的程序进行实物联机调试和运行验证。因为在设备制造出来之前, 设计结果在虚拟环境中进行了多次模拟测试, 绝大部分故障和错误已经被更早地解决, 所以基于数字孪生的多学科设计理念可以提高产品研发进度和成功率。

(4) 在产品运行阶段。通过物联网传感器和边缘计算机采集产品性能和运行状态等实时数据, 同步反馈给虚拟空间的产品数字孪生模型, 实现信息物理融合。同时, 能够将采集到的数据上传至云平台, 进行基于产品性能、运行状态、能耗等数据的挖掘和分析, 并基于大数据分析结果对产品数字孪生模型和设计方案进行持续改进。

5.2 应用案例: 波音飞机设计与制造协同

波音公司使用美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST) 提出的基于产品模型数据交互规范(Standard for the Exchange of Product Model Data, STEP) 的数字总线, 改善了已有虚拟样机, 构建了面向制造的数字孪生设计模型, 初步实现了设计和制造之间的协同^[20]。

如图 11 所示, 基于 STEP 标准的数字总线开始于设计阶段, 产品设计师在设计过程中除了考虑产品几何信息之外, 还需要从工艺师的角度出发考虑产品制造信息(Product Manufacturing Information, PMI), 例如公差、加工步骤、刀具要求、走刀轨迹、测量要求等。根据所需 PMI 信息, 使用 STEP AP238 和 AP242 等标准建立带有这些制造信息的设计模型。然后, 通过数字总线传入制造阶段。使用数控机床加工零件或使用三坐标测量仪检测关键尺寸时, 对应的 PMI 真实数据通过数字总线实时更新设计模型, 得到当前零件加工和检测的数字孪生。产品设计师和工艺师等通过该数字孪生协同工作, 他们能够使用数字孪生监控实时加工状态、测试不同加工方案、在线测量加工质量, 再将优化后的加工计划、检测策略通过数字总线传给数控机床或者测量仪, 形成数字孪生驱动的设计制造协同。

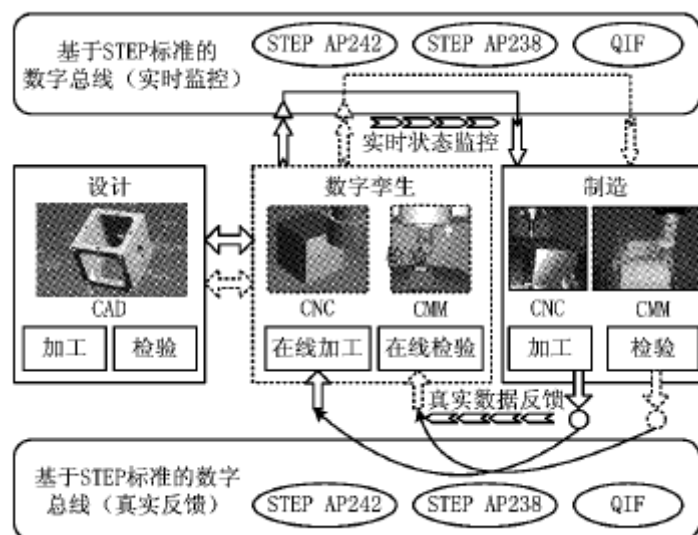


图 11 基于 STEP 标准的数字总线

6 结束语

大规模个性化产品是客户追求的理想目标,因此,大规模个性化设计成为产品设计师和产品提供商的设计目标。数字孪生是集成了多物理性、多尺度性、概率性的复杂产品仿真模型,能够实时反映真实产品的状态,是实现复杂产品设计和制造信息物理融合的关键途径,能够给客户完全个性化的产品和精准制造信息,目前已经得到了工业界和学术界的广泛关注。与此同时,数字孪生技术也对智能制造背景下的复杂产品设计和制造一体化开发提出了新的挑战。而传统的设计方式由于没有形成良性的闭环设计,理想设计信息和真实加工、装配、检测等制造信息脱节,产品实际制造数据的实时动态回馈能力不足,以及产品信息建模方法有待完善,已经不能满足复杂产品设计制造一体化开发要求。

在数字孪生理念下,本文探索了基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发的框架及其关键技术。在分析国内外基于数字孪生的产品设计研究现状后,总结了当前研究进展;在此基础上,提出基于数字孪生的复杂产品环形设计框架,包括产品生命周期环、数字孪生体环、设计方法环;基于所提出的框架体系,从需求分析、概念设计、个性化配置设计、虚拟样机、多学科融合设计和数据管理等方面探索了基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发关键技术;最后,给出典型的案例分析,并总结了数字孪生在复杂产品设计制造一体化开发中的应用前景和有待突破的关键问题,希望能够为将来开展数字孪生的进一步落地应用提供理论和方法参考。

参考文献:

- [1] LI Hao, TAO Fei, WEN Xiaoyu, et al. Modular design of product-service systems oriented to mass personalization[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29 (18) : 2204-2214, 2249 (in Chinese). [李浩,陶飞,文笑雨,等. 面向大规模个性化的产品服务系统模块化设计[J]. 中国机械工程, 2018, 29 (18) :2204-2214, 2249.]
- [2] LI Hao, JI Yangjian, CHEN Liang, et al. Bi-level coordinated configuration optimization for product-service system modular design[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Systems, 2017, 47(3), 537-554.
- [3] ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 753-766 (in Chinese). [庄存波,刘检华,熊辉,等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4), 753-768.]
- [4] ZHANG Xinsheng. Design and implementation of workshop management and control system based on digital twins[D]. Zhengzhou, Zhengzhou University, 2018: 6-10 (in Chinese). [张新生. 基于数字孪生的车间管控系统的设计与实现[D]. 郑州: 郑州大学, 2018, 6-10.]
- [6] TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop, a new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23 (1): 1-9 (in Chinese). [陶飞,张萌,程江峰,戚庆林. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1):1-9.]
- [7] TUEGEL E J. The airframe digital twin: some challenges to realization[C]// Proceedings of

the 53rd AIAA/ASME/AHS/ASC Structures, Dynamics and Materials Conference. Reston, sessment and direction for advancement-an opinion of one Va. , USA,AIAA,2012,1812

[8] TUEGELE J, INGRAFFEA A R, EASON T G, et al. Reengmeenng aircraft structural life prediction using a digital twin [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011, DOI: 10.1155/2011/154798.

[9] LI Hao, JI Yangjian, LUO Guofu, MI Shanghua. A modular structure data modeling method for generalized product[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016,84(1/2/3/4): 197-212.

[10] ULRICHK T, EPPINGER SD. Product design and develop- ment[M]. New York,N. Y., USA,McGraw Hill Higher Ed ucation,2016.

[11] PAHL G. et al. Engineeing design, a systematic approach[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2007.

[12] TERNINKO J, ZUSMAN A, ZLOTIN B. Systematic inno- vation,an introduction to TRIZ(theory of inventive problem solving) [M]. Boca Raton, Fla., USA,CRC Press,1998.

[13] SUHN P. Axiomatic design theory for systems[J]. Research m Engineering Design,1998,10(4),189-209.

[14] AKAO Y, MAZUR G H. The leading edge in QFD, past, present and future [JJ. International Journal of Quality & Reliability Management,2003,20(1),20-35.

[15] GRIEVES M. Virtually perfect, driving innovative and lean products through product lifecycle management [M]. Ann Arobr,Mich., USA,NCMS,2011.

[16] GRIEVES M. Digital twin: manufacturing excellence throu- gh virtual factory replication [EB/ OL] .[2018-12-30].http://www.aprison.com/library/Whitepaper_Dr_Grievess_DigitalTwin_ManufacturingExcellence.php. 2014.

[17] TAO F, SUI F, LIU A, et al. Digital twin-driven product design framework[J] . International Journal of Production Research,2018. DOI, 10. 1080/00207543. 2018. 1443229.

[18] TAOF, CHENG J, QI Q, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9/10/11/12) :3563-3576.

[19] VICTOR Singh, WILLCOX KE. Engineering design with digital thread[J]. AIAA Journal, 2018, 56(11): 4515-4528.

[20] HELU M, JOSEPH A, HEDBERG J T. A standards-based approach for linking as-planned to

as-fabricated product data[J]. CIRP Annals,2018,67(1),487-490.

[21] SOBIESZCZANSKI S J, HAFTKA R T. Multidisciplinary aerospace design optimization: survey of recent developments [J]. Structural Optimization, 1997,14(1):1-23.

[22] GIESING J, BARTHELEMY J M. A summary of industry MDO applications and needs, an AIAA white paper[C]//Proceedings of the 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Reston, Va.,USA,AIAA,1998,2-4.

[23] DUDLEY J. Multidisciplinary optimization of the high-speed civil transport [J] / Proceedings of the 33rd AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reston, Va., USA,AIAA, 1995: 95-124.

[24] AGTE J, DEW O, SOBIESZCZANSKI SJ, et al. MDO: assessment and direction for advancement-an opinion of one international group[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization,2010,40(1/2/3/4/5/6),17-33.

[25] PAN Shangneng, LUO Jianqiao. Aerodynamic design technology in multidisciplinary optimization for turbine[J]. Journal of Aerospace Power,2012,27(3),635-643(in Chinese). [潘尚能, 罗建桥. 涡轮多学科优化中的气动设计技术探讨[J]. 航空动力学报, 2012, 27(3), 635-643.]

[26] SUN Yadong, ZHANG Xu, NING Ruxin, et al. Integrated modeling method oriented to multi-disciplinary collaborative development domain[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2013,19(3): 449-460(in Chinese) .[孙亚东, 张旭, 宁汝新, 等. 面向多学科协同开发领域的集成建模方法[J]. 计算机集成制造系统, 2013,19(3), 449-460.]

[27] LIU Chengwu, LI Liansheng, QIAN Linfang. Sequential- Multidisciplinary reliability design and optimization based on approximate sensitivity method under random and interval uncertainties[J]. Journal of Mechanical Engineering,2015,51 (21):174-184(in Chinese). [刘成武, 李连升, 钱林方. 随机与区间不确定下基于近似灵敏度的序列多学科可靠性设计优化[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21),174-184.]

[28] YUBiqiang, YANG Xiaonan, LI Wei. Research on multidisciplinary stochastic search optimization method based on Lsight [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2019,25(3),743-751(in Chinese). [俞必强, 杨晓楠, 李威. 基于 Lsight 的多学科随机搜索优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(3): 743-751.]

[29] AROMAA S, VAANANEN K. Suitability of virtual prototypes to support human factors/ergonomics evaluation during the design[J]. Applied ergonomics,2016,56:11-18.

[30] LI Z, YAN X, YUAN C, et al. Virtual prototype and experimental research on gear multi-fault diagnosis using wavelet- autoregressive model and principal component analysis method[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25 (7) : 2589-2607.

[31] JOHNSTON B, BULBUL T, BELIVEAU Y, et al. An assessment of pictographic instructions derived from a virtual prototype to support construction assembly procedures [J]. Automation in Construction,2016,64,36-53.

[32] XIONG Guangleng, LI Bohu, CHAI Xudong. Virtual prototyping technology [J]. Journal of System Simulation, 2001 (1),114-117(in Chinese) .[熊光楞, 李伯虎, 柴旭东. 虚拟样机技术[J]. 系统仿真学报, 2001(1),114-117.]

[33] FANWenhui, XIAO Tianyuan, GUO Bin. Study on HLA/DEVS-based distributed simulation of integrated logistical supporting system[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(2),299-303(in Chinese) .[范文慧, 肖田元, 郭斌. 基于HLA和DEVS的综合保障分布式仿真的研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(2), 299-303.]

[34] LI Bohu, CHAI Xudong, et al. Preliminary study of modeling and simulation technology oriented to new-type artificial intelligent systems[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2) :349-362(in Chinese). [李伯虎, 柴旭东, 等. 面向新型人工智能系统的建模与仿真技术初步研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(2), 349-362.]

[35] GARBADE R, DOLEZAL WR. DMU @ Airbus-evolution of the digital mock-up(DMU) at Airbus to the centre of aircraft development[C] //Proceedings of the 17th CIRP Design Conference. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2007: 3-12.

[36] FUKUDA S, LULIC Z, STJEPANDICJ. FDMU—functional spatial experience beyond DMU? [C]//Proceedings of the 20th ISPE International Conference on Concurrent Engineering. Clifton, Va., USA, IOS Press,2013,431-440.

[37] MASF, MENENDEZ J L, OLIVA M, et al. Collaborative engineering: an airbus case study[J]. Procedia Engineering, 2013, 63: 336-345.

[38] DAI Sheng, ZHAO Gang, YU Yong, et al. Trend of digital product definition,from mock-up to twin[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018, 30 (8) : 1554- 1562(in Chinese) .[戴晟, 赵照, 于勇, 等. 数字化产品定义发展趋势: 从样机到孪生[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(8),1554-1562.]