

数字样机在导弹系统中的应用现状与展望

梁旗, 何子路, 曹杰, 杨赞, 朱婧

(上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 为了适应各自应用环境与性能要求, 各种导弹越来越向着功能多样化、结构复杂化、模块集成化的方向发展, 使导弹物理样机的各种研制成本大大增加; 由于目前国际局势复杂且不稳定, 对导弹的产品设计、生产与维护提出了更高的要求; 在此背景下, 通过数字样机取代物理样机是适应未来发展的方向; 首先, 对数字样机的概念进行了论述, 总结了数字样机特点及其分类; 随后, 介绍了国内外导弹设计生产过程中对数字样机应用的发展现状; 针对各种导弹对数字样机的需求与实现途径, 阐述了构建数字样机的关键技术; 最后, 根据对导弹装备全寿命周期要求以及管理规范化分析, 对数字样机的发展趋势进行了展望。

关键词: 数字样机; 建模仿真; 导弹数字化; 导弹设计; 导弹制造

Application Status and Prospects of Digital Prototypes in Missile Systems

LIANG Qi, HE Zilu, CAO Jie, YANG Yun, ZHU Jing

(Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to meet various application environments and performance requirements, various missiles are increasingly developing in the directions of functional diversification, structural complexity, and module integration, which greatly increases the various development costs of missile physical prototype. Due to the current complex and unstable international situation, the higher requirements of the product design, production, and maintenance of missile products are put forward. In this context, it is the direction of future development for digital prototypes to replace physical prototypes. Firstly, the concept of digital prototypes is discussed, the characteristics and classification of digital prototypes are summarized. Subsequently, the application statuses of various missile digital prototypes at home and abroad are introduced. Aiming at the requirements and implementation approaches of various missiles for digital prototypes, the key technologies for constructing digital prototypes are described. Finally, based on the analysis of missile lifecycle and management standardization, the development trend of digital prototypes is prospected.

Keywords: digital prototype; modeling and simulation; missile digitization; missile design; missile manufacturing

0 引言

数字样机起源于20世纪90年代, 是一种用数字化模型代替实际物理样机进行仿真分析的技术。将实物通过数学仿真模型进行替换, 在数学模型上实现产品的性能分析、参数的优化设计等工作^[1-2]。数字样机因将产品的各种属性与功能数字化、参数化、模块化, 而具备贴近真实物理样机特性、多学科交融耦合、可重构以及能够应用于产品全寿命周期的特点。导弹由于内部系统繁多, 结构复杂, 制造成本高, 在对物理样机进行各种功能验证试验以及环境适应试验时需要花费大量的时间精力以及人力物力。然而通过构建导弹系统的数字样机, 评估在设计时是否考虑到功能的完善及适用性, 当产品状态更改时是否容易修正^[3], 可以快速模拟各种试验环境, 大大降低各种研制成本。本文主要针对导弹的发展需求, 总结将数字样机应用于导弹装备的研究现状以及数字样机的关键技术, 并提出了将来可能的发展趋势, 可为导弹设计生产数字化提供技术支撑。

1 数字样机概述

数字样机是将物理产品的结构外形、装配组合以及运

动特性按照相似原理映射到计算机上的一种数字化描述^[4], 如图1所示。这种描述至少在某一方面将对象产品的特性进行了反映^[5], 保证基于数字样机的仿真结果同物理样机实验结果在一定程度上吻合, 进而可以通过数字仿真代替物理实物实验。数字样机具有以下主要特点^[6]:

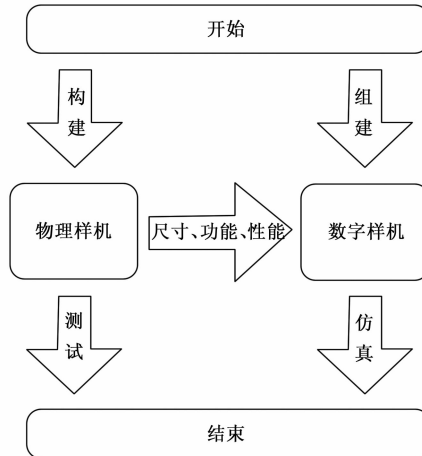


图1 数字样机和物理样机关系示意图

收稿日期: 2023-08-18; 修回日期: 2023-09-13。

作者简介: 梁旗(1988-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 梁旗, 何子路, 曹杰, 等. 数字样机在导弹系统中的应用现状与展望[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(11): 1-6, 15.

1) 真实性。数字样机是因取代或精简物理样机而存在的, 所以数字样机必须与物理样机在结构、功能、性能或其他特性上相当或一致, 使其能够通过仿真的方式来模拟物理样机的几何外观、物理特性以及行为特性。

2) 参数化。实际上, 数字样机是通过物理样机的各种参数将其映射到计算机中的。数字样机的每一个参数均代表了物理样机中一种实际的属性。各种支持参数建模的软件可以根据这些参数进行可视化建模甚至定制化仿真。这些软件通过内嵌物理模型与优化算法, 以数字样机参数作为输入, 能够使用户开展参数化仿真或调试等设计与开发手段以达到预期要求。

3) 模块化。需要构建数字样机的产品通常具有复杂的内部系统。此类系统根据结构或功能可以划分为不同的模块, 在分别构建模块的数字样机后通过拼接或装配等方式进行组合可以得到整体的数字样机。相邻模块之间具备接口, 实现两者结构或功能上的连通。根据实际情况可以对接口的数量、功能与属性进行增减或替换, 使其符合产品的实际情况。除了人机交互界面的可视化模块外, 软件内部封装好的功能函数模块也可以根据产品的实际功能按照逻辑关系进行编程调用, 从而使数字样机从内到外均能够模拟产品的实际状态。

4) 面向产品全生命周期。数字样机可以对产品的任一流程进行模拟, 并通过调整不同参数或应用不同流程进行仿真试验, 以获取产品在这一阶段的状态或评估其性能。

5) 多学科交叉性。导弹装备由于结构复杂、功能繁多且应用环境多样, 涉及大量关于力、热、电等多种物理领域。而各种物理环境之间也存在着交叉耦合的影响效应。在构建数字样机的过程中, 必须考虑上述影响因素, 才能模拟产品真实的运行情况, 进行准确的仿真分析, 满足预设的指标要求。

6) 可重构性。可重构性可以理解为对数字样机模型参数的可变性。通过调整模型的结构、属性等参数, 从而重置数字模型某些方面的性质, 称为面向对象的、可重构性。通过对功能模块进行划分、组合等方面的调整, 使数字样

机产生功能上的改变, 则称为面向功能的、可重构性。在数字样机的设计过程中, 需要不断调整模型属性与功能, 使其能够最大程度上满足用户需求。

用数字样机代替物理原型样机以进行结构和功能展示、性能仿真、测试和评估的数字化设计技术被称作数字样机技术^[7]。数字样机的构建与设计可以通过计算机完成, 体现出了综合集成、快速灵活和协同合作的特点。设计人员可以在数字样机构建过程的时期直观地进行参数调整、设计优化、性能测试、制造仿真和使用仿真^[8], 验证实际的物理样机能否达到预定的功能和性能, 并以此为依据进行反馈或重新调整样机^[9]。同时, 全体设计人员能够根据协议共享数字资源, 避免设计失误, 减少实物试验, 能够有效降低人力成本和资金成本并提高产品质量^[10]。

2 武器装备数字样机发展与应用现状

数字样机技术起源于国外, 已经广泛的应用于各专业领域, 在导弹设计制造领域当中, 数字样机常用于各单机分系统当中。导弹分系统主要包括导引头、战斗部、发动机、舵机等部分。南京电子技术研究所的徐红莲等人建立了雷达数字样机, 如图 2 所示, 验证了应用于复杂军工电子装备能力基线的技术可行性^[12]。该所的张道富通过分析雷达的性能, 提出了构建雷达数字样机的途径^[13], 从而为导弹导引头内的制导雷达实现数字样机构建奠定了基础。

针对导引头的设计, 北京遥感设备研究所的张阳总结了将数字虚拟样机应用于导引头设计的优势, 并提出了将其工程化的方法^[13]。西北工业大学的朱学平通过数字样机技术开发了一款红外成像导引头, 并通过单一指标测试、综合性能试验验证了该导引头的精度^[15]。北京航空航天大学的岳奎志等人应用 CATIA 软件建立了空空导弹和空面导弹的三维数字样机, 如图 2 (a) 和图 2 (b) 所示。通过有限元方法, 数值模拟出基于物理光学法和等效电磁流法的导弹 RCS 特性曲线^[16]。上海机电工程研究所的刘广等人使用数字样机构建了导弹双模导引头的模型, 可将其应用于动态校核、参数优化等一系列验证工序^[17]。西安电子科技大学的李祉涵在红外导引头成像数字样机仿真软件中实现

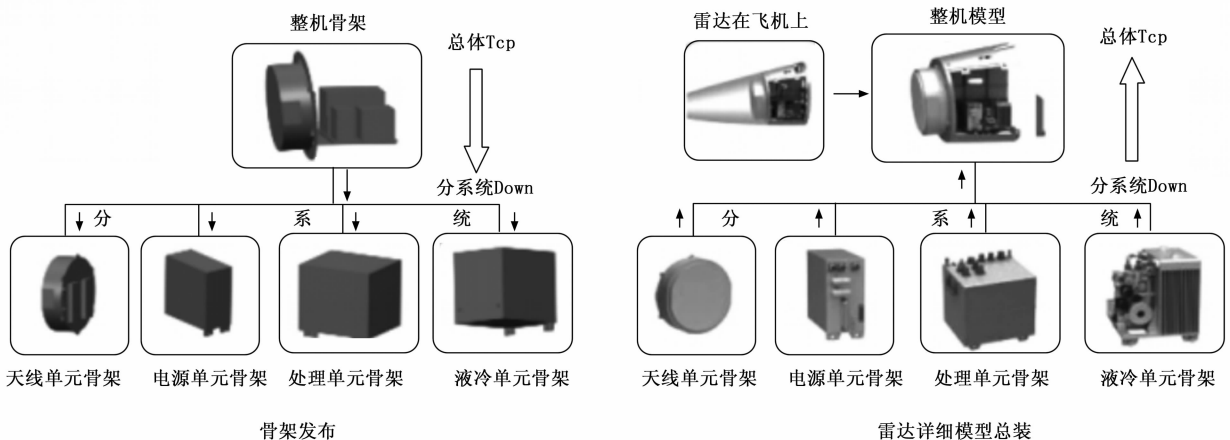


图 2 基于数字化样机的雷达设计

红外导引头视口下, 导弹成像制导追击目标动态过程的仿真, 对研究激光干扰武器以及导弹抗干扰能力双方提供了依据^[18]。北京航天自动控制研究所的邵学辉等人针对导引头三框架随动系统, 建立了随动系统机械、控制元件、控制回路数学样机模型, 并分析了影响随动系统性能的误差因素。按照模块化设计思想, 形成了通用的、参数可调的随动系统数字样机, 如图 3 所示^[19]。

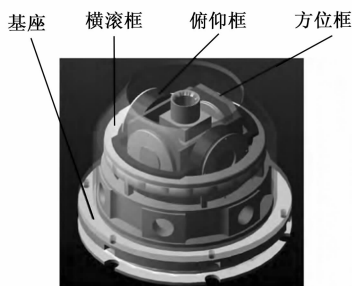


图 3 三轴随动系统机械结构实体模型

引信是导弹战斗部中的重要器件, 主要起到探测目标与引爆的功能。南京理工大学的刘晨曦在设计激光引信时通过三维数字样机建模获取了引信三维几何与表面材料模型, 如图 4 所示, 并以此为依据进行进一步的编辑^[20]。中国空空导弹研究院的李合新以三维数字样机为基础, 对战斗部参数进行优化, 对引信的整个工作流程进行了仿真^[21]。西安电子科技大学的王震在研究大功率脉冲无线电引信时通过构建数字样机进行了仿真验证与参数优化, 从而研制了空空导弹引信实物样机^[22]。

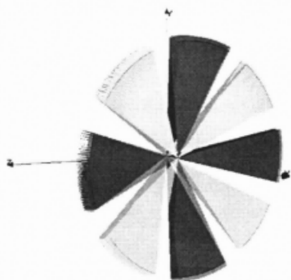


图 4 激光引信数字样机

发动机是为导弹提供飞行动力的部分, 由于内部燃料燃烧而通常承受较大的载荷, 因此在设计中需要进行结构力学分析。华中科技大学的李祥琴在研究某导弹用单室双推力固体发动机时通过数字样机技术绘制了发动机的装配图, 从而对内部固体力学进行分析^[23]。南京理工大学的张震构建了发动机壳体的数字样机, 通过有限元方法进行了模态分析。另外, 针对发动机推力偏心对导弹发射精度产生的影响同样可以用数字样机技术进行研究^[24]。上海机电工程研究所的刘广等人建立了发射筒与导弹的柔性体模型, 用以分析舰船摇摆对导弹出筒姿态的影响, 如图 5 所示^[25]。中国运载火箭技术研究院的钟洲等人则建立了车载导弹的刚柔耦合模型, 探究发动机推力偏心造成的导弹发射初始

扰动^[25]。

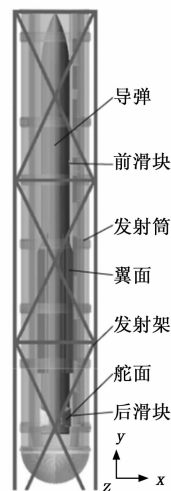


图 5 刚柔耦合动力学虚拟样机模型

电动舵机是在导弹飞行过程中调整方向的构件。在通常的设计中, 重点往往聚焦在数学模型与控制算法上。然而这些理论算法的效果需要通过物理样机进行验证, 提高了设计时间与成本。复旦大学的刘广针对舵系统研制过程中存在的展开、锁紧等操作过程中的技术难题, 构建了导弹舵系统数字虚拟样机, 并通过大量试验校正了该模型^[27]。中国科学院大学的刘断尘构建了舵机折叠翼的数字样机, 对叶片薄弱环节进行了优化^[28]。哈尔滨工业大学的范天祥将数字样机技术应用于导弹伺服系统, 对 PID 控制器与鲁棒控制器进行验证, 使导弹能够自适应地校正其飞行姿态^[29]。华中科技大学的谭辉桐所构建的舵系统数字样机包含了摩擦、阻尼、间隙等非线性环节, 能够对舵系统真实工作情况良好的反映, 其模型如图 6 所示^[30]。

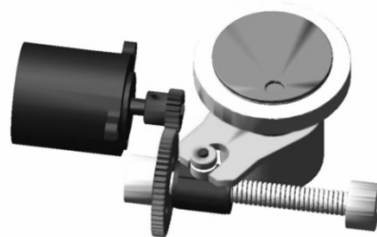


图 6 电动舵机内部结构图

除此之外, 随着数字样机大量应用于导弹等武器装备的研制流程, 关于数字化环境下的管理方式也纳入了研讨范围。南京电子技术研究所的刘昂等人针对数字化环境下雷达装备量产质量控制技术进行了探讨^[31]; 中国电子集团公司第 38 研究所的苏宁等人分析了军工电子行业三维数字化技术现状以及相关标准制定情况, 构建了军用电子装备三维数字化技术标准体系, 为雷达、数据链等单机系统或功能模块的数字化标准奠定了基础^[32]; 装备学院的刘国庆等人通过数字样机等技术, 提出了基于数字军工的装备质量监督模式^[33]。

数字样机技术因可缩短研究时长并有效降低研究成本,越来越被我国重要军工领域所接受,为导弹产品的研发提供了新途径,在今后的导弹装备科研研发、生产与制造等方面将占据越来越重要的地位。

3 数字样机关键技术

3.1 数字样机建模技术

数字模型是对现实物理世界中事物或者现象的抽象化表达。模型的三维参数可以通过图形的方式进行可视化以展示其外观与结构,而其他的属性参数也可以进行赋值以定量描述其不可视的性质。基于计算机辅助设计工具的数字建模方法的出现,因其具备可以全面、准确地描述产品全生命周期的特点,逐渐取代了通过模具建模的传统建模方法。在计算机上根据原型样机的结构尺寸、功能性能等参数建立能够映射实际情况的数字模型是构建数字样机的基础。根据数字样机的用途与分类可以将数字样机的建模方法分为几何建模、特征建模、知识建模等。在实际应用中,复杂的原型样机往往需要将其中几种不同的建模方法联合使用以满足需求^[34]。建模的准确度与逼真程度直接影响数字样机仿真的效果,从而关系到数字样机是否能够达到工程上对产品设计、制造等行为的预期要求。由于数字模型构建所需要的模块往往具有通用性、可重构性,可以通过相似的模板对模型进行构建,因此在建模时可以使用参数化、变量化的建模方法,即将原型样机的各个特征抽象成参数进行数字表示,并通过改变参数值来调整模型的结构或状态。根据所研究导弹产品的物理特性,产品相关的任何属性,包括几何尺寸、温湿度、电磁特性、材料本征特性等均可以作为上述参数进行赋值,具有灵活、多变且全面的特点。这种建模方法能够显著地提高建模的效率与准确度,也可以作为中间模型通过有限元分析方法应用于后续优化设计当中。

3.2 数字样机仿真技术

仿真技术是在计算机科学的基础上结合控制理论、相似理论以及数值模拟方法的一门综合性应用技术^[35],可以基于构建的数字模型根据导弹产品的各种物理特性动态灵活地以一定规律分析真实产品的实时状态,并具有相当的精确程度。仿真技术不仅可以模拟产品自身的状态,检测模态、应力等结构固有属性,还可以模拟周围环境对产品的影响乃至产品对周围环境的影响,能够及时发现和解决问题,提高导弹产品的研发效率,缩短形成战斗力的时间,在导弹工程研发当中已经有了广泛的应用。例如 Fluent、MODTRAN、multisim 等工程软件可以针对产品的单一领域如流场、红外辐射场以及电路等进行仿真,分析或预测产品在某一特定物理场影响下的状态。数字样机仿真技术则是在模拟物理原型样机的情况下,依靠仿真技术的特点,在多物理环境交叉耦合的背景下,将各方面因素对导弹产品的影响整合起来,充分考虑产品在这种背景下的变化。相比于分析单一物理场的作用,这种方式能够更加全面地评估产品在真实环境下的工作状态,并据此开展优化措施,

对产品的设计更具优势。ANSYS、ABAQUS、COMSOL Multiphysics 等多物理场仿真软件具备多样的模型库与强大的运算功能,能够通过可视化地建模调参,逼真地设置产品所处的物理场景,大大提升数字样机模型的置信度。然而,多物理场仿真软件强大的功能更需要专业的知识才能驾驭。在通过上述软件进行多物理场耦合仿真时,需要具备相关的物理理论基础、有限元与算法知识,才能构建出合适的模型,任何一个不合理的参数设置或算法选择都可能使仿真结果偏离实际甚至造成模型计算不收敛。

3.3 数据管理技术

在构建数字样机的过程中,除了能够反映原型样机物理状态的数据外,导弹产品结构的装配流程与建模顺序等数据同样需要保留。导弹产品的每一次迭代都会产生大量的流程数据,这些数据在系统中可以通过历史树实现。历史树保留的流程数据与物理数据结合纳入数字样机专门的数据生成管理系统。通过管理该系统内的产品数据可以保证数据的一致性并开放共享,有效提高了数字样机的数据利用率,并能够使所有设计人员一起监督数字样机数据,有效避免错误的产生^[36]。历史数据的保留也可以在后续引入机器学习进行人工智能优化时提供样本,补充导弹设计中相对匮乏的数据素材,避免在机器学习过程中生成过多无效数据,降低学习效率。

由于数字样机在设计过程中可能涉及多款软件系统,其输出的数据格式存在差异,在互相导入导出数据时难免出现不兼容的情况,因此在管理数据时,需要做好各软件系统的接口工作,使每一处节点的数据均能够快速转化成下一接口能够读取的格式。这样不仅可以大大提高数字样机设计效率,在设计出错时也可以迅速获取可用的中间数据进行调试,从而快速定位错误位置。除此之外,由于导弹数字样机涵盖了复杂的导弹系统及其设计流程,其数据量十分巨大,在存储与读取时需占用大量的硬件资源且耗费较长的存取时间。因此,通过稀疏矩阵等方式对大量数字样机数据进行压缩处理也是在数据管理过程当中需要考虑的地方。

3.4 可视化协同设计

由于数字样机的构建常常涉及到各个方向的研究人员共同的设计,在进行诸如导弹之类复杂系统产品的数字化时,数字样机的规模会迅速增大,对计算机的性能要求大大提高。为此,数字样机支持通过可视化协同设计技术对复杂装配进行处理,以分布式结构将不同地点的不同部件设计师的设计结果进行协同表达、设计和分析^[37]。

导弹是一个十分复杂的系统,由若干分系统组成,分系统又由许多结构件构成,而绝大多数零件都是实心零件。因此,在数字样机建模、仿真过程中对导弹系统合理可视化提出了许多要求。在导弹整体设计时,需要显示导弹的各个结构装配情况,监督导弹的结构参数是否合理;在进行物理场仿真时,有时需要考察实心结构件内部应力或温度场,应该对相应的结构件内部位置参数进行显示;导弹

飞行过程中, 可能需要考察蒙皮内外的温度场或电磁场, 确保内部系统能够在高温、强电磁干扰等恶劣环境下能够正常工作, 应该对蒙皮内部相应物理场分布进行显示。因此, 数字样机的可视化界面不仅需要具备常规的拖动、放大、缩小、旋转等基本功能以外, 还需要具有隐藏、透视、剖面、爆炸图等功能, 用以监测受到遮挡的部件情况。针对物理场分布的可视化, 通过在坐标轴内一维/二维/三维的截点、截线、截面并选取待监测物理量的方式, 可以获取导弹内外任意区域的数据。物理场分布图与矢量分布图能够直观地显示物理场的强弱与方向。另外, 进行物理场动态仿真与模态分析时还应具备按时间或频率截取的功能, 显示特定时间或频率下的物理场分布。

3.5 虚拟仪器技术

除了三维建模与物理场仿真以外, 数字化测试技术也是数字样机的重要组成部分。数字化测试系统实现了测试技术的软件化、数字化, 将众多硬件结构复杂、尺寸大且笨重、连线繁琐的测试仪器的功能集成于软件当中并嵌入工控机载体之内, 大大增强了测试系统的灵活性, 满足了测试系统小型化、轻量化的实际需求, 在转场过程中搬运便捷, 十分适用于针对复杂系统需要测量众多参数的场合。实际上, 虚拟仪器作为测试系统的数字样机, 可以凭借软件内集成的多种测试仪器模块与信号处理模块, 通过编程的方式自定义测试流程, 智能地对导弹进行半自动测试。虚拟仪器通过图形语言、接口通信协议以及版本更新功能, 为用户提供了可以编制仪器面板、实现指令控制、结果显示与数据分析处理的开发平台, 减少了对传统测试仪器维护、升级等工作。

虚拟仪器系提供了人机交互的软件平台, 便于设计人员针对导弹的实际情况搭建合适的数字测试系统。虚拟仪器主要分为数据层、处理层与应用层。数据层将待测信号进行采集并转换成为数字信号, 并进行数据的存储、调用与传输; 处理层封装了信号处理算法程序, 在处理数据时

调用相应的模块并输出结果; 应用层主要实现人机交互功能, 为操作者提供指令发送、仪器操作、结果显示等功能的界面^[38]。

4 导弹数字样机发展趋势与应用展望

长期以来, 由于导弹系统集成度过高, 结构过于复杂, 在对导弹产品设计生产或校验过程中稍有不慎, 就会导致成本高昂的导弹损坏甚至完全破坏。在新技术不完善的情况下, 大多数院所往往采取谨慎小心的保守态度进行管理与技术革新。然而, 随着数字样机的技术发展, 其在各民用领域的应用已经较为普遍, 技术的成熟与经济的进步也使各科研院所逐渐在各分系统中引入了数字样机技术。在导弹设计过程中, 数字样机可能将会有以下几种发展趋势。

4.1 从分布式设计发展为集中—分布式设计

在现行的导弹设计过程中, 通常将导弹拆分成各单机系统, 由分系统研究科室分别构建数字样机, 针对预定功能与性能指标进行分布式设计, 之后形成物理样机进行拼接与联合调试。这种方式从导弹底层同步构建分系统的数字样机, 能够提高设计效率, 而同时也存在设计时仅考虑本分系统, 忽视了与其他分系统之间联系的情况, 导致在各分系统设计完成后发生联调时彼此之间结构、接口、协议等不符, 仍需进行各方面的调整, 增加了许多不必要的工作。针对这一问题, 在各分系统设计之前构建集中式导弹整体数字样机, 能够根据整体要求规范各分系统, 避免各研究科室各自为战, 起到提纲挈领的效果, 如图 4 所示。然而, 各分系统在实现预定功能时可能互相存在影响与耦合, 在构建整体数字样机时要予以充分考虑, 才能避免总体设计时反而约束各分系统设计的反作用。

4.2 从自由化设计发展为规范化设计

由于不同导弹型号对各分系统的功能要求不同, 所以各导弹分系统大多数都是根据型号实际要求对数字样机进行设计的。尽管这种自由化设计具备灵活多变可调的优点,

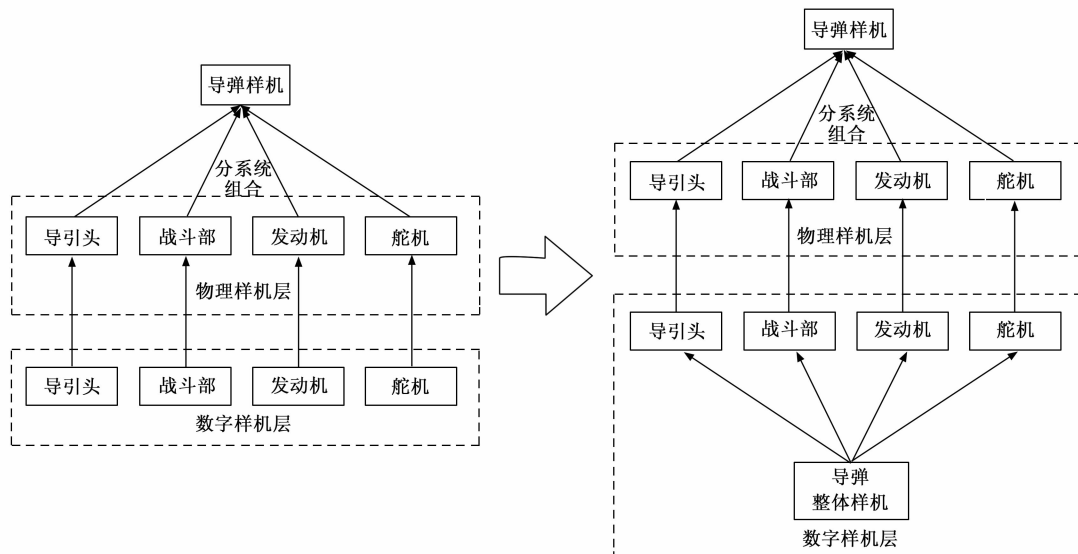


图 7 分布式数字样机发展趋势

但由于各单位以及设计人员水平良莠不齐,导致某些情况下设计出的数字样机不仅没有达到模拟或代替物理样机的效果,甚至由于其设计不合理而使对其进行的各种调参与试验均不具备参考价值,使得按该数字样机构建出的物理样机无法达到预期的设计要求。因此,将数字样机应用于各种产品产线的技术规范已受到越来越多的关注^[39-40],针对各分系统的数字样机设计标准及其规范随着武器装备数字化转型的进行而不断提出。在规范化设计的框架下,设计人员将通过相对固定的流程对标准化的导弹数字样机进行自适应修改,这样既可以保证数字样机模型的相对正确性,又可以最大限度地保留设计人员的设计自主权。

4.3 从数字样机技术发展为数字孪生技术

除了在实际应用上的推广外,在数字样机技术的基础上,派生出了数字孪生技术的概念。数字孪生技术是指在数字样机技术的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物理实体增加或扩展新的能力,是一种充分融合多学科以集成数据构建模型智能化技术^[41]。数字孪生技术除了具有数字样机模拟产品实体并进行优化的作用外,随着计算机、大数据、测试等技术的发展,更加优化了数字样机的静态与动态模型,甚至在与产品实体关联后可以与其交互、共生,从而对产品的调试、升级提供了保障。

由于数字孪生技术是在数字样机的基础上建立起来的,因而其相较于数字样机技术具有更加全面而广泛的应用范围。两者的关系就涉及范围来说,数字孪生已经基本涵盖了数字样机。通过这一技术上的更新迭代,将会迅速促进导弹装备仿真以及生产制造领域的发展。可以预见,在不久的未来导弹数字样机将在在很大程度上会被基于数字孪生技术的开发技术所取代。

5 结束语

随着导弹装备的功能多样化、结构复杂化、模块集成化趋势,对于低经济成本、低时间成本和低人力成本的需求不断提高。数字样机技术依靠其优点取代物理样机的试验调试步骤,可以快速准确地地在装备设计、研制、调试等各关键步骤发挥优势。通过数字样机构建并完善好的模型开发制作出来后经过简单的调整后即可快速投入生产或使用,符合导弹装备发展要求,对推动国防建设数字化具有重要意义。

参考文献:

[1] 刘 媛. 袋式除尘器半物理仿真集成数据处理及可视化研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2014.

[2] 尚宇晴, 付丽强, 刘 广, 等. 防御战车行进间发射虚拟样机建模与仿真 [J]. 空天防御, 2021, 4 (2): 74-81.

[3] 周 涛, 熊珍琦, 姚 为. 工装模型的成熟度评估方法 [J]. 计算机工程与设计, 2015, 36 (5): 1355-1361.

[4] 杜平安, 于德江, 岳 萍. 虚拟样机技术的技术与方法体系研究 [J]. 系统仿真学报, 2007 (15): 3447-3451.

[5] 何德雨. 基于虚拟样机的机电液系统故障安全分析方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2017.

[6] 蔺帅南. 电磁阀的数字样机技术研究及性能仿真 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.

[7] 杨建宇. 基于虚拟现实的数字样机若干关键技术研究与应用 [D]. 沈阳: 东北大学, 2010.

[8] 傅 云. 复杂产品数字样机多性能耦合分析与仿真的若干关键技术研究及其应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

[9] 史家顺. 基于数字样机的 3-TPS 混联机器人设计与控制的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2016.

[10] 高洪亮. 超磁致伸缩液压泵驱动器设计及其在折叠机翼变体飞行器中的应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

[11] 王 侃, 杨秀梅. 虚拟样机技术综述 [J]. 新技术新工艺, 2008 (3): 29-33, 1.

[12] 徐红莲, 陈知明. 基于能力基线的复杂军工电子装备技术状态管理 [J]. 产业与科技论坛, 2019, 18 (15): 55-57.

[13] 张道富, 王高飞. 雷达机械系统虚拟样机技术实现方法研究 [J]. 现代雷达, 2009, 31 (4): 87-90.

[14] 张 阳. 虚拟技术在导引头研制中的应用 [J]. 航天制造技术, 2002 (1): 45-48.

[15] 朱学平, 张晓峰, 杨 军, 等. 红外成像导引头虚拟样机设计与仿真系统 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (8): 1828-1830, 1833.

[16] 岳奎志, 孙 聪, 刘 虎, 等. 挂载导弹的作战飞机 RCS 特性数值模拟 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36 (1): 62-67.

[17] 刘 广, 姚诗忠, 吕建新. 虚拟样机技术在双模制导系统研制中的应用 [J]. 上海航天, 2005 (3): 29-33.

[18] 李祉涵. 激光干扰红外导引头成像制导性能仿真研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.

[19] 邵学辉, 吴盛君, 徐 力, 等. 导引头随动系统数字样机设计及实现方法研究 [J]. 应用科技, 2015, 42 (4): 8-14.

[20] 刘晨曦. 激光引信虚拟样机技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.

[21] 李合新. 基于虚拟样机的空空导弹引战模型 [J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31 (3): 15-18.

[22] 王 震. 大功率脉冲无线电引信探测系统及天线研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.

[23] 李祥琴. 某导弹用单室双推力固体发动机研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.

[24] 张 震. 带推力终止装置的固体火箭发动机设计与试验 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.

[25] 刘 广, 王琳娜, 张保刚, 等. 舰船摇摆对导弹发射出筒姿态的影响 [J]. 装备环境工程, 2019, 16 (8): 39-44.

[26] 钟 洲, 孟令涛, 曾 伟, 等. 车载导弹推力偏心初始扰动影响研究 [J]. 现代防御技术, 2018, 46 (1): 41-46.

[27] 刘 广, 郑铁生. 基于虚拟样机技术的舵系统动力学仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23 (3): 502-505.

[28] 刘断尘. 舵机折叠舵展开性能分析及试验 [D]. 长春: 中国科学院研究生院 (长春光学精密机械与物理研究所), 2015.

(下转第 15 页)