

数字孪生模型在产品构型管理中应用探讨

于 勇¹, 范胜廷¹, 彭关伟², 戴 晟¹, 赵 昱¹

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 西安现代控制技术研究所, 西安 710065;)

[摘要] 针对 MBD 技术的深层次应用, 论述了数字线和数字孪生定义的概念和应用, 指出数字线和数字孪生模型技术实施的重点和核心问题。指明全三维产品研制模式下对产品构型管理的新需求, 探讨了基于数字孪生模型的产品构型管理方法和包含产品构型信息的产品数字孪生模型本体表达, 为全三维研制模式下的产品构型管理提供了可行的技术解决方案。

关键词: 数字孪生; 数字线; 构型管理; 基于模型定义

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.07.041



于 勇

博士、讲师、硕士生导师, 长期以来与航空航天企业和设计院所合作, 一直追踪国内外航空航天企业的数字化技术应用情况, 主要关注产品构型管理、复杂产品数字化设计制造以及产品全生命周期管理等相关技术的研究。

基于模型定义 MBD (Model Based Definition, MBD) 技术是将产品的所有相关设计定义、工艺描述、属性和管理等信息都附着在产品三维模型中的先进的数字化定义方法。基于模型定义的技术自波音 787 飞机首次引入并向其他行业进行推广已经日趋成熟, 其效益已经被国内外知名公司和机构反复验证。目前国外相关研究的重点是实现面向产品生命周期全过程全要素的制造信息集成共享和协同环境, 最终建立基于模型的企业 MBE (Model Based Enterprise)。在此基础上, 美国开展了数字线 DT (Digital Thread) 技术研究, 进而又提出了数字孪生 DT (Digital Twin) 的概念。数字孪生概念的产生和应用是 MBD 技术的进一步发展, 使数字化设计制造技术迈向了一个新的台阶, 是实现智能制造的基础^[1-3]。目前, 我国制造企业已经较好地实现了二维

研制模式下的产品构型管理和控制过程, 然而, 随着 MBD 技术的发展和深入应用, 如何实现全三维模式下的产品构型管理又成为产品构型管理领域中的新议题, 数字孪生相关技术的产生和应用为全三维研制模式下产品构型管理提供了一个可借鉴的技术方案。

数字线与数字孪生的概念与应用

数字线最早是由洛克希德·马丁公司提出的^[1], 他们在生产 F-35 中将 MBD 数据直接输入计算机数控机床加工成零件, 或通过编程系统完成复合材料的敷设, 并将这种新的工作模式称之为“数字线”。“数字线”为 F-35 的 3 种构型节省了 6000 套工装, 还省去了这些工装的管理和与零件相互配置的时间, 以及工装的配送和向机床上装夹所花费的时间。数字线产生的背景建立

* 基金项目: 工信部 2016 民用飞机专项科研技术项目资助。

在“模型为中心”的基础上,这里的模型是具备信息完整丰富、按照统一的开放标准建立的、规范的和语义化的数字化模型,并且可被机器(或系统)稳定无歧义地读取。在此基础上,数字线集成并驱动现代化的产品设计、制造和保障流程,使各环节的模型都能够及时进行关键数据的双向同步和沟通。其原理如图1所示。可以看到,在设计与生产的过程中,仿真分析模型的参数传递给产品定义的全三维几何模型和数字化生产线加工成真实的物理产品,然后通过在线的数字化检测/测量系统反映到产品定义模型中,进而再反馈到仿真分析模型中,从而实现了—个数据的双向传递过程^[4]。数字线的核心就是如何搭建一个涵盖产品研制全过程的协同环境,使统一的模型在产品研制各个阶段实现数据的双向流动、重用和不断丰富

的过程。数字孪生也被称为数字镜像、数字双胞胎和数字化映射^[5-6]。数字孪生是MBD技术的深入发展和应用,其根源在于企业在实施基于模型的系统工程MBSE(Model Based System Engineering)过程中,产生了大量的基于物理的、数学的模型被忽视。由此,最早的数字孪生思想由密歇根大学的Michael Grieves命名为“信息镜像模型”(Information Mirroring Model),而后扩展为“数字孪生”的术语^[7-9]。2012年NASA公布的技术路线图中给出了数字孪生的概念描述^[10]:数字孪生是指充分利用物理模型、传感器、运行历史等数据,集成多学科、多尺度的仿真过程,它作为虚拟空间中对实体产品的镜像,反映了相对应物理实体产品的全生命周期过程。

随后,美国国防将数字孪生应用于航空航天飞行器的健康维护与保障中。其目的是在数字空间建立真实飞机的模型,并通过传感器实

现与飞机真实状态完全同步,这样每次飞行后,根据结构现有情况和过往载荷,及时分析评估是否需要维修,能否承受下次的任务载荷等。随后数字孪生的概念被扩展到制造领域,美国国防采办大学对数字孪生的定义是充分利用物理模型、传感器、运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映相对应实作产品的全生命周期过程。其中实作产品(As-built Product)模型的内容可包括物理产品构型、材料微观结构、瑕疵、制造异常等。图2为飞机产品的数字孪生示例^[11-12]。

可以看到飞机的数字孪生模型与飞机物理产品建立了一对一的映射,不仅包括传统的几何模型,还包括材料属性、生产、检验、力学分析、空气动力、健康维护以及试飞等物理实现环节所反馈的一系列数据。这些数据通过数据线建立的双向通道向研制的上游和下游不断反馈、解析和利用,从而形成了设计制造的智能闭环。也可以说数字孪生是虚拟制造和数字样机技术的深入和拓展,从定义范围来看,其不仅仅进行了产品的数字化定义,而是扩展了包含产品研制的所有实体装备的数字化定义;从涉及范围来看,其向后延拓至生产研制的终端——实作产品的数字化

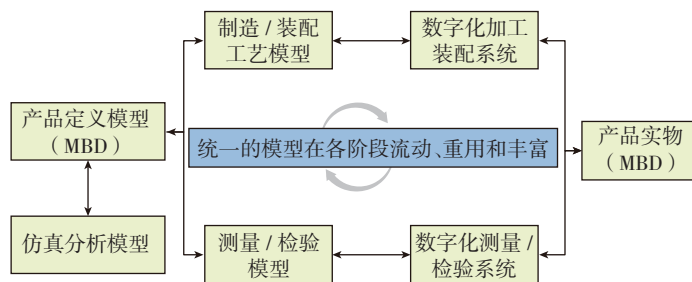


图1 数字线原理
Fig.1 Principle of digital thread

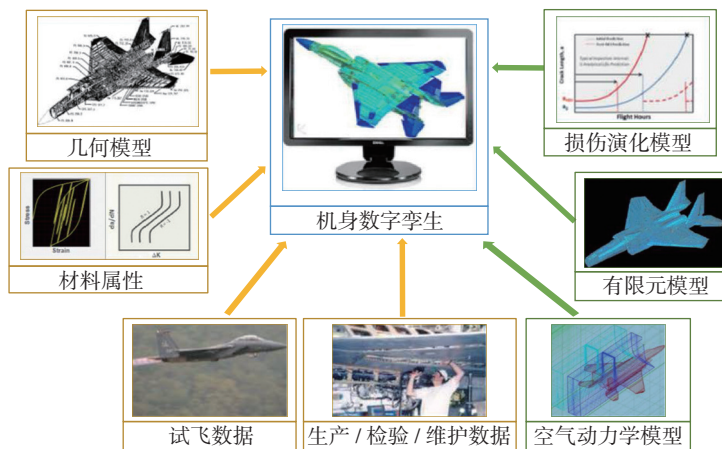


图2 数字孪生定义示例
Fig.2 Example of digital twin definition

表1 数字样机与数字孪生区别

	数字样机	数字孪生
定义	描述产品设计者对产品的理想定义(包含几何/功能/性能)	在虚拟空间反映相对应实体装备的数字化定义过程
目标	用于指导产品理想状态下产品的定义、功能性能分析和制造过程	反映真实产品系统的准确情况

定义,两者的定义和应用目标如表 1 所示。

由此可以看到,数字孪生的核心问题是如何定义包含产品研制全过程的全要素产品模型,如何为研制全过程提供数据准备或者反馈,从而实现“基于模型驱动”的产品研制模式。

全三维研制模式下 产品构型管理

构型管理是一种面向产品全生命周期的,以产品结构为组织方式,将各阶段产品数据关联起来并对其进行管理和控制,从而保证产品数据一致性和有效性的产品数据管理技术,有些行业也称之为技术状态管理和配置管理。构型管理通过 5 个关键要素,即构型管理计划、构型标识、构型更改控制、构型纪实、构型审核和验证,建立起一套科学的、可靠的产品质量保障体系。总的来说,实施构型管理的主要目的包括以下几点:

(1) 从宏观上把握大型复杂产品的整体结构,建立产品整体结构,并充分利用已有的设计成果,缩短产品的设计周期;

(2) 协调更改,建立产品完整的更改历史记录,进行有效的版本管理和控制,维护产品数据的全部有用版本,确保在各个阶段能够获得产品的完整的技术描述;

(3) 控制、检查、调整交付状态构型要求与真实生产后的构型偏差,确保产品的性能、功能特性和物理特性与产品的需求、设计和使用信息之间的一致性。

目前来看,大多制造企业在实施构型管理过程中,已经改变了原来基于图纸的构型管理模式,逐步建立了基于零件或模块的构型管理模式,即通过产品数据管理系统建立产品结构,并以之为主线建立产品各环节和各组成部分的关联,进行产品的构型

管理和控制。但在构型纪实、构型验证和审核验证环节中,其本质和还是沿用了传统模式下的构型管理机制,尤其是在物理构型的审核环节,其分为功能构型审核和物理构型审核,功能构型审核是检查构型项是否实现了需求定义的性能、功能和接口特性要求;物理构型审核是检查物理构型项是否与图纸或模型、技术规范、技术数据、质保数据和试验记录等的一致性要求。其最终目的是为了保证最终的物理产品构型与需求、设计、制造和交付整个生命周期的闭环。现有的构型管理方法往往是通过对于研制过程中的文件、产品和记录(包括构型清单、规范、二维图样、三维模型、操作检验记录等)的逐项检查,以及对各种程序、流程和操作系统的评估,来检验产品的设计是否满足性能和功能要求,以及产品的状态是否已被准确地记录在文件之中^[13]。基于这种工作模式,虽然有产品数据管理等系统的辅助,技术人员和构型审核人员也需要花费大量的时间聚焦在产品图纸、产品模型和各种数据报表之间的比对和维护当中,效率极低且容易出错。

随着全三维研制模式和智能制造技术的发展和深入应用,对产品构型管理提出了更高的要求:

(1) 客户个性化需求增强,产品的设计构型多变,产品构型管理过程需要动态响应;

(2) 智能化设备的大量采用,要求产品研制过程中构型数据的快速收集、提取和实时反馈;

(3) 产品研制的全生命周期过程中,产品构型数据需要进行全面分析和维护,以改善设计和制造工艺过程,改善产品质量。

显然传统的构型管理方法已不能适应当前构型管理的高效的动态响应要求,因此需要一种高效可控的构型数据管理和控制机制,来实现产品研制全生命周期过程中产品

构型数据的快速收集、提取和高效追溯。

基于数字孪生模型的产品构型管理

数字孪生通过在虚拟空间中构建真实物理世界中的产品模型,通过物理系统向赛博空间数字化模型的反馈,实现了闭环的研制过程。数字孪生的关键技术包括数字化定义、数据检测与采集、大数据分析、多物理场建模等诸多技术,其中最基础也是关键的是如何构建一个包含产品全生命周期全过程的全要素的产品模型,这个产品模型能够实现与物理真实世界的一一映射。这样包含了产品物理研制全过程全要素的产品模型,则可以在产品构型验证和审核的过程中,建立与相关研制数据之间的关联,省去了原来传统构型纪实和构型验证审核过程中人工进行模型和研制数据之间的对比工作,大大增加了审核效率和一致性判断。同时,产品数字孪生模型中包含了产品的构型状态数据也为也为构型更改控制过程中实现快速动态响应,预见产品质量和制造过程、推进设计和制造的高效协同、确保设计和制造的准确执行提供了基础。基于产品数字孪生模型的产品构型数据定义与反馈过程如图 3 所示。构型项在研制的全生命周期过程中,一般会经历设计、工艺规划、生产制造、检验检测等全过程,相关的构型数据会在产品不断演变和向后拓延的过程中,不断丰富和完善,相应的产品设计和研制数据与模型特征建立关联,从而实现模型驱动的产品研制过程。针对构型管理过程中的构型标识、构型控制、构型纪实、构型审核与验证而言,也恰恰实现了模型驱动的产品构型数据的收集、采集和实时反馈的过程。

在基于数字孪生的产品构型数据定义与反馈过程中,一个非常重要的关键技术就是需要实现基于语

义的产品模型表达。所谓的本体是为了描述真实世界中客观对象所隐含的语义信息而诞生的。W3C 推荐采用 OWL 语言作为一种本体描述语言,其具有统一语法格式、明确语义。对于特定领域和应用范围,根据领域知识,利用 OWL 本体语言,

可以定义 OWL 类及 OWL 属性,实现领域本体构建。在基于本体的产品数字孪生模型建模过程中,可以构建以设计模型为父类,几何特征和构型数据为子类的组织形式,其中几何特征子类用来描述模型的实体信息和尺寸与公差信息;构型数

据子类描述产品的构型技术状态信息。图 4 为包含构型数据的零件数字孪生模型的本体表达框架。

几何特征子类的本体表达抽取了 5 类常见特征作为研究对象,包括凸台(Pad)、凹槽(Pocket)、旋转体(Shaft)、加强筋(Stiffener)和孔(Hole),建立了基于草图的特征本体分类及数据属性。以“Hole”类为例,可将其分为简单孔(Simple-Hole)与复杂孔(Complex-Hole)。对于“Simple-Hole”类,包括两个属性:

- 孔深度(has-Holedepth);
- 孔直径(has-Holediameter)。

对于“Complex-Hole”,以沉头孔(Counterbored-Hole)为例,包括 4 个属性:

- 沉头直径(has-Boreddiameter)
- 沉头深度(has-Boreddepth)
- 孔直径(has-Holediameter)
- 孔深度(has-Holediameter)

构型数据子类包括设计数据(Design-Data)、制造数据(Manufacture-Data)和检测数据(Inspection-Data)。以“Inspection-Data”的检测反馈(Inspection-Spaceholder)子类为例,可包括 3 个属性:

- 内容(has-Content)
- 链接(has-URL)
- 对象关联(has-reliance)

其中内容(has-Content)属性用来描述检测反馈的数据,链接(has-URL)用来描述检测用到的外部链接;对象关联(has-reliance)属性用来描述特征与构型反馈数据之间的关联关系。由此,构建的基于本体的产品数字孪生模型可以与相应的构型数据关联在一起,实际的物理产品研制过程中的相关技术状态数据也可以与之建立关联关系,从而可以基于产品数字孪生模型实现构型数据的纪实,进而实现全三维研制模式下模型驱动的构型数据快速追溯和快速响应。

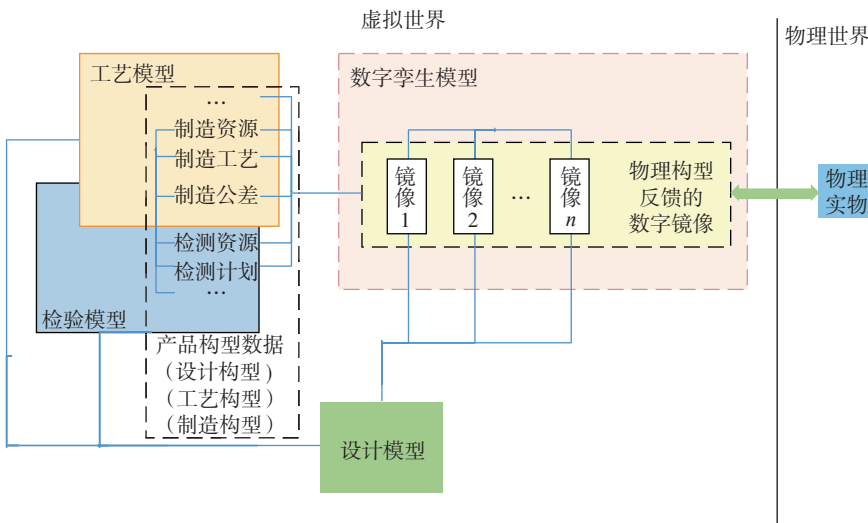


图3 基于数字孪生模型的构型数据定义与反馈过程

Fig.3 Configuration data definition and feedback based on digital twin model

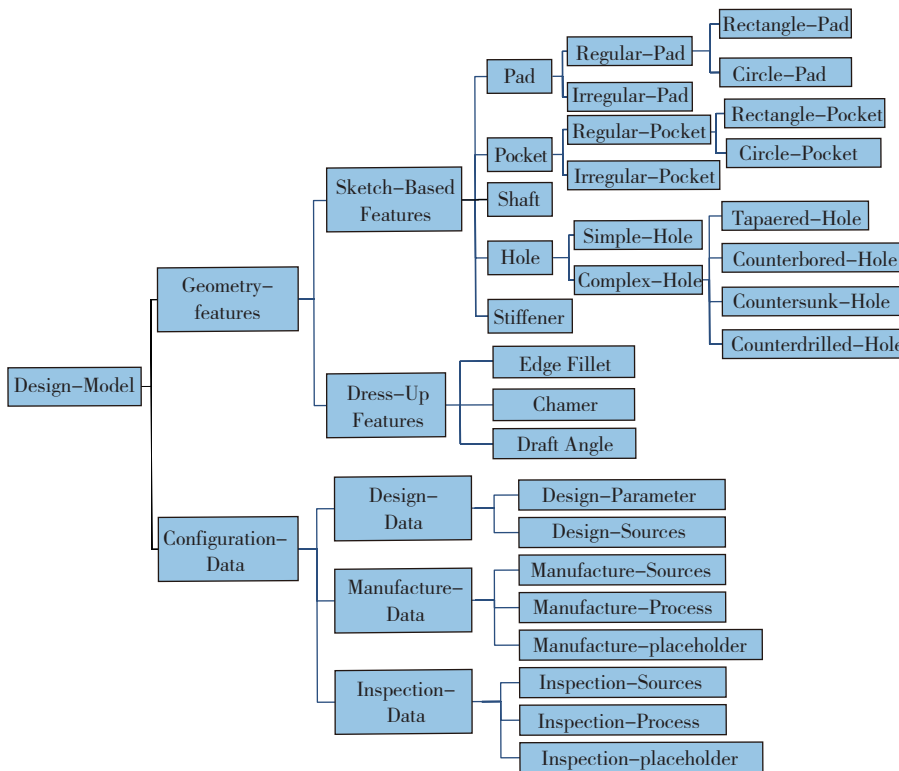


图4 包含构型数据的数字孪生模型本体表达

Fig.4 Digital twin ontological model with configuration data

结束语

全三维研制模式下对产品的构型管理提出了更高的要求和挑战。产品数字孪生模型能持续积累产品设计、制造和检验全生命周期过程的相关数据和知识,并可以不断地实现重用和改进,其通过动态感知、存储和呈现产品全生命周期的构型信息,从而可以实现产品构型数据的管理、追踪和一致性维护,实现产品构型在全生命周期过程中的可视化和透明化。本文目前仅探索了一种包含产品构型信息的产品数字孪生模型的构建框架和基于本体的表达方式,期为全三维研制模式下的产品构型管理提供一个可行的技术解决方案。随着研究的逐步深入,基于产品数字孪生模型的构型管理方法不仅可以高效实时地记录和反映产品的构型状态,而且可以基于反馈回的产品构型数据进行大数据统计和分析,从而改进产品研制流程,提高产品设计质量。

参考文献

[1] LEE J, BAGHERI B, KAO H A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems[J]. *Manufacturing Letters*, 2015,3:18-23.

[2] PIASCNIK B, VICKERS J, LOWRY D, et al. Technology area 12: materials, structures, mechanical systems, and manufacturing roadmap[M]. Washington: NASA Headquarters, 2010.

[3] MINTCHELL G. GE, the digital thread, the digital twin, the digital company[EB/OL]. (2015-10-07)[2017-02-08]. <http://themanufacturingconnection.com/2015/10/ge-the-digital-thread-the-digital-twin-the-digital-company/>.

[4] 工四100术语编写组. 数字主线(编号301)[EB/OL]. (2016-03-31)[2016-11-04]. http://www.360doc.com/content/16/0331/22/22368478_546927596.shtml.

Editing Group for Terminology of Industry 4.0. Digital thread (NO.301)[EB/OL]. (2016-03-31)[2016-11-04]. http://www.360doc.com/content/16/0331/22/22368478_546927596.shtml.

[5] Digital twin[EB/OL]. [2017-01-04]. https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_Twin.

[6] 工四100术语编写组. 数字孪生(编号308)[EB/OL]. (2016-03-31)[2016-11-04]. <http://www.hysim.cc/view.php?id=81>.

Editing Group for Terminology of Industry 4.0. Digital twin (NO.308)[EB/OL]. (2016-03-31)[2016-11-04]. <http://www.hysim.cc/view.php?id=81>.

[7] GRIEVES M. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. *International Journal of Product Development*, 2005, 2(1-2):71.

[8] GRIEVES M. Product lifecycle management - driving the next generation of lean thinking[M]. New York: McGraw-Hill Companies,

2006.

[9] GRIEVES M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[EB/OL]. [2017-03-06]. http://innovate.fit.edu/plm/documents/doc_mgr/912/1411.0_Digital_Twin_White_Paper_Dr_Griev.pdf.

[10] SHAFTO M, CONROY M, DOYLE R, Glaessgen E, et al. NASA technology roadmap: modeling, simulation, information technology & processing roadmap technology area 11[EB/OL]. 2012-04. https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-ID_rev4_NRC-wTASR.pdf.

[11] TUEGEL E J, INGRAFFEA A R, EASON T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011,2011:1-14.

[12] KRAFT E M. The US air force digital thread/digital twin-life cycle integration and use of computational and experimental knowledge[C]//Proceeding of 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. San Diego, California, USA, 2016.

[13] 赵艳丽, 宋启明, 赵静, 等. 民机机载成品系统的制造构型审核及验证[J]. *航空制造技术*, 2014(4):77-80.

ZHAO Yanli, SONG Qiming, ZHAO Jing, et al. As-built configuration audit and verification methodology of airborne system for commercial aircraft[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014(4):77-78.

通讯作者: 于勇, E-mail: yuyong@buaa.edu.cn。

Study on Application of Digital Twin Model in Product Configuration Management

YU Yong¹, FAN Shengting¹, PENG Guanwei², DAI Sheng¹, ZHAO Gang¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China)

[ABSTRACT] The concept and application of digital thread and digital twin are discussed for the deep application of model based definition technology. Key points of implementation of digital thread and digital twin are given. The new demands for product configuration management in full three-dimensional product development mode are indicated. The method of product configuration management based on digital twin and the digital twin ontological model are studied. A realistic technical solution for product configuration management in full three-dimensional development mode is provided.

Keywords: Digital twin; Digital thread; Configuration management; Model based definition

(责编 叶枫)