

引用格式: 李尚宇, 冯杭, 陈俊全, 等. 一种数字孪生的设计架构和概念建模方法[J]. 航空学报, 2025, 46(19): 531118. LI S Y, FENG H, CHEN J Q, et al. A design architecture and conceptual modeling approach for digital twins[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(19): 531118 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2024.31118

飞行器数字孪生技术专刊

一种数字孪生的设计架构和概念建模方法

李尚宇¹, 冯杭^{1,2}, 陈俊全¹, 陈彬³, 梅丹^{1,*}

1. 海军工程大学 电磁能技术全国重点实验室, 武汉 430033

2. 海军工程大学 基础部, 武汉 430033

3. 海军工程大学 舰船综合试验训练基地, 武汉 430033

摘要: 随着工业4.0与智能制造的兴起,数字孪生技术日益得到重视并快速发展。以构建复杂系统的数字孪生为研究目的,提出了一种数字孪生的设计结构和一种数字孪生的概念建模方法。提出的数字孪生设计架构基于数字孪生的三维模型,详细描述了目标实物、数据和模型之间的双向映射关系以及数字孪生模型的演化过程。在对象过程方法的基础上,拓展了对象与过程的性质,构建了数字孪生的最小通用本体。以飞行器电推进系统为例,构建了该系统的概念模型并详细描述了该系统的组成、行为、性能等,取得了良好的效果。

关键词: 数字孪生设计架构; 基于模型的系统工程; 对象过程方法; 概念建模; 电推进系统

中图分类号: V37

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2025)19-531118-10

随着信息技术与制造业的深度融合,中、美、德等国相继提出智能制造、工业4.0等战略。作为工业4.0的核心,数字孪生(Digital Twin, DT)提供了一种将物理世界和信息世界互联互通的潜在有效途径。数字孪生可以提供用于测试和模拟不同场景的数字框架,来实现虚拟空间对现实世界的精确映射^[1-2]。数字孪生是指在虚拟空间中对现实世界的物理实物建立多领域、多尺度、多概率的仿真模型,其范围涵盖了所关注物理实物及其全生命周期^[3]。相比于传统建模方法,数字孪生具有全面性、高效率、智能化、服务化等特点。

数字孪生的概念最早于2002年由美国密歇根大学的Michael Grieves在产品生命周期管理课

程上提出,其定义为“与物理产品等价的虚拟数字体”^[4]。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)在文献[5]中详细描述了航天器数字孪生的概念和功能,将数字孪生定义为“一种面向飞行器或系统的高度集成的多物理场、多尺度、多概率的仿真模型”。Grieves^[6]在关于数字孪生的白皮书中明确提出了数字孪生的基本概念模型,该模型包括3个主要部分:现实空间的物理实物、虚拟空间的数字孪生体、物理实物和数字孪生体之间的双向连接。该模型从本质上揭示了数字孪生与传统建模方法的区别。陶飞等^[7]在Michael Grieves的数字孪生三维模型基础上提出了数字孪生五维模型,增加了孪生数据和服务两个维度。随后,陶飞等又提出

收稿日期: 2024-08-30; 退修日期: 2024-10-17; 录用日期: 2024-11-21; 网络出版时间: 2024-12-05 13:35

网络出版地址: <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2025/V46/I19/531118>

基金项目: 国家自然科学基金(5197216)

* 通信作者: E-mail: may1380@163.com

了数字孪生成熟度模型^[8]和数字孪生评价指标^[9],建立了数字孪生模型的量化评价体系。该评价体系从8个方面提出了19项评价指标,对数字孪生模型进行了全方位评价。鲍劲松等^[10]研究了基于模型的系统工程(Model-Based Systems Engineering, MBSE)中多个数字孪生的演进行为,并提出了数字工程中协同进化的数字孪生。2023年,国内外分别发布了数字孪生的参考性标准^[11-12],分别提出了数字孪生的参考架构,如图1所示。数字孪生的三维模型指出了数字孪生的最小本体,但对虚拟模型的构建并不完整。数字孪生的五维模型虽然能够较为全面地构建虚拟模型,但其结构复杂且难以实施。此外,国内外标准提出的概念模型虽然在一定程度上完善了对物理实物的表达并简化了数字孪生的结构,但并未提出构建概念模型的方法。

数字孪生的核心是模型。目前,大多数研究所采用的建模方法主要分为基于知识的机理建

模、数据驱动建模和机理与数据融合建模。

基于知识的机理建模的核心思想是根据已知的数学定律或物理规律,对目标实物构建相应的数学或物理模型。李瑾岳等^[13]基于数字孪生技术构建了装配界面的肤面模型,实现了装配界面变动对装配精度影响的综合分析。Yue等^[14]对某535 kV直流断路器供电的变压器建立了数字孪生电场模型,采用静电场等效方法对模型降阶,从而实现了快速求解和低延迟交互。Ibrahim等^[15]构建了电动汽车用永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)的分析性能模型,该模型基于 $d-q$ 数学模型,在微控制器中进行实时数据交互。基于知识的机理建模能够充分把握目标事物的内在规律,建立人类对目标事物的认知。但该方法只适用于已知本质的目标事物,当目标事物的内在本质未知或不完全了解时,该方法难以对目标事物进行合理建模。

数据驱动建模的核心思想是从已有试验数据中,通过信号处理或人工智能的方法提取有关目标事物的特征,建立该事物特定的模型。与基于知识的机理建模不同,数据驱动建模往往不具有普适性,每个目标事物都需要建立或训练特定的数据驱动模型。田阔等^[16]基于梯度提升树算法和Stacking算法构建了结构静力监测的预训练模型和残差模型,有效提高了结构静力监测的全局、局部预测精度以及融合效率。Yang等^[17]基于D-S证据理论建立了110 kV电力变压器的数据驱动模型,根据变压器运行数据不断更新数据驱动模型中的系数,实现了对变压器的实时监测。Booyse等^[18]采用无监督深度学习的策略,结合发动机变速箱、轴承试验数据,构建了涡扇发动机的数据驱动模型。Kharlamova等^[19]采用具有门控循环单元的循环神经网络建立了电池储能系统的数据驱动模型,实现了电池充电状态的准确预测。数据驱动建模方法可以对黑盒子或灰盒子状态的目标事物进行有效建模,准确判断目标事物的状态并预测其未来的行为。同时,使用合适的数据驱动建模方法可以很好地降低模型求解的复杂度,实现模型降阶。但数据驱动模型本身在揭示目标事物内在的物理规律方面,其可解释性较低。

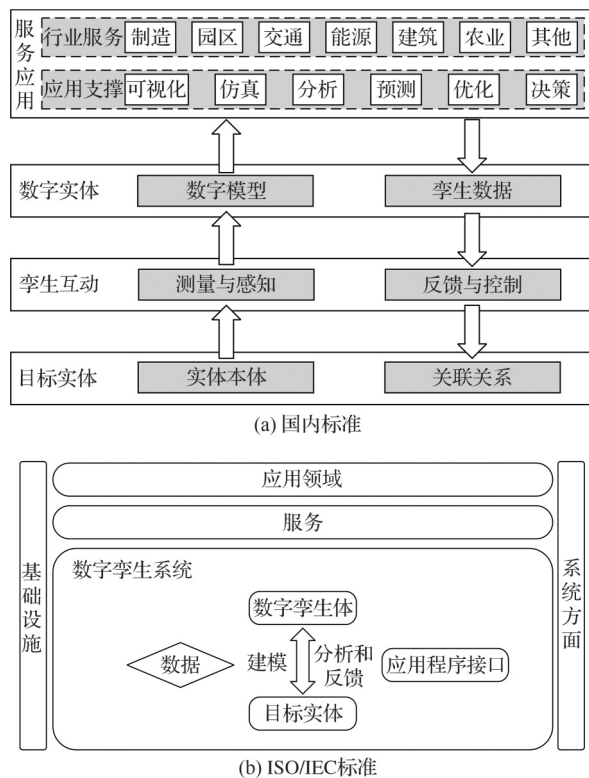


图1 国内外标准提出的数字孪生参考架构

Fig. 1 Reference architecture for digital twins as proposed by both Chinese and international standards

机理与数据融合建模的核心思想是根据目标事物内在的规律和实际测试的试验数据,对目标事物的机理模型进行参数辨识和修正。Guo等^[20]提出了一种具有双环结构的永磁同步电机数字孪生框架;该框架通过建立永磁同步电机的多物理场耦合模型,并采用递归最小二乘法辨识参数,实现机理与数据融合,从而准确评估电机健康状态并进行预测性维护。李春华等^[21]基于HPT叶片寿命管理模型和多模态运维数据,构建了数据和模型融合驱动的服役HPT叶片寿命数字孪生模型,有效提高了HPT叶片寿命数字孪生模型的保真度。郭丞皓等^[22]建立了起落架系统的物理和行为双维度数字孪生模型,利用强化学习算法更新数字孪生模型参数,并设计基于事件的故障诊断和基于粒子滤波的故障预测方案。Piltan和Kim^[23]将基于数学的轴承振动信号模型和基于自回归技术的数据驱动算法结合,使用卡尔曼滤波器、高阶变结构技术和自适应神经模糊方法相结合提高信号建模的性能,从而实现轴承的异常检测和裂纹尺寸识别。黄熠玮等^[24]融合仿真与实测应变数据构建结构多方向数字孪生应变场,提出考虑多方向应变的模态坐标求解和变形反演方法,相对误差小于0.8%,绝对误差小于0.09 mm,相比传统方法误差分别降低7%和12%。对于处于白盒子或灰盒子状态的目标事物,机理与数据融合建模方法既能够反映事物内在的物理规律,又可以实现模型与试验数据的充分交互。但这种建模方法涉及的技术较多,建模难度较大。

针对上述问题,首先,基于数字孪生的三维模型提出一种数字孪生的设计架构;其次,根据提出的设计架构,采用MBSE方法中的对象过程方法(Object Process Method, OPM)构建数字孪生的概念模型,将OPM实例化为概念建模方法;最后,以飞行器电推进系统为研究对象,构建该系统的概念模型并说明概念模型与机理模型、数据驱动模型的区别。

1 数字孪生的设计架构

数字孪生最基本的目标是建立能够精确映射现实事物的模型。为了实现这一目标,根据

Michael Grieves提出的数字孪生三维模型^[7]以及国内外参考标准中的数字孪生参考架构^[11-12],提出了一种构建数字孪生的设计框架,如图2所示。

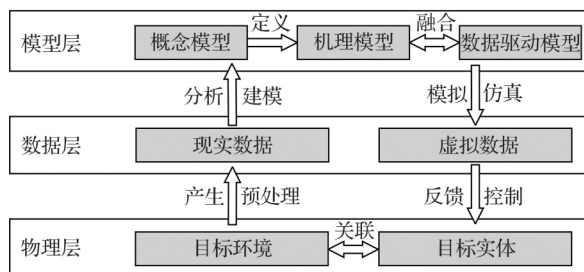


图2 数字孪生的设计架构

Fig. 2 Design architecture for digital twins

提出的数字孪生设计框架顶层包括物理层、数据层和模型层3部分。在提出的数字孪生设计框架第1层级中,物理层包括目标实体和目标环境,数据层包括现实数据和虚拟数据,模型层包括概念模型、机理模型和数据驱动模型。与图1中的数字孪生框架相比,本文在物理层、数据层和模型层的基础上,引入OPM中的概念模型并提出了3层架构内部的组成部分以及各部分之间的耦合关系。提出的数字孪生设计框架中,概念模型的构建继承了MBSE中的OPM方法,并根据数字孪生需求增加了事物的本质。

如图2所示,物理层中的目标实体主要指数字孪生的目标事物,目标环境主要指数字孪生目标事物所处的环境,两者相互关联。数据层主要包括现实数据和虚拟数据。现实数据是由目标实体和目标环境产生、描述目标实体和目标环境产生过去经历或正在经历的过程数据;虚拟数据是由模型层产生、模拟目标实体和目标环境产生过去经历、正在经历或未来经历的过程数据以及相关控制指令。模型层主要包含概念模型、机理模型和数据驱动模型。概念模型是描述系统相关知识的模型,是对系统服务、性能、功能、结构、行为、规则等诸多物理和信息属性综合描述的一种蓝图。根据对象过程方法,机理模型是描述系统各部分所遵循的自然或社会规律的模型。数据驱动模型是根据过去或当下产生的现实数据和虚拟数据,提取特征后建立的模型。在模型层

中,概念模型定义了机理模型和数据驱动模型在系统中的属性,机理模型和数据驱动模型相互融合以描述系统的各个部分。

所提数字孪生设计架构的交互过程可分为两步,第1步是物理层产生现实数据并发送给模型层,第2步是模型层产生虚拟数据并发送给物理层。在第1步中,目标实体和目标环境中的感知部分(通常由传感器组成)将采集的现实数据进行预处理,并通过API接口、通信协议、物联网等发送到模型层。数据的预处理包括数据的分类、清洗、边缘计算等。在第2步中,模型层通过云计算、机器学习等技术分析预处理后的现实数据,提取相关数据特征。对于完全了解或部分了解机理的目标实体,采用机理与现实数据融合方式建模并仿真,获得虚拟数据;对于完全不了解机理的目标实体,采用数据驱动建模并仿真,获得虚拟数据。概念模型则通过定义机理模型和数据驱动模型的属性(性能、行为、规则等),将各个模型的结果整合成系统的虚拟数据并发送给目标实体。目标实体的控制部分依据虚拟数据对目标实体进行反馈和控制。

根据提出的数字孪生设计框架,构建目标系统实物和数字孪生体的具体算法实现如算法1~算法3所示。根据OPM,系统功能是系统设计的起点,故目标系统实体与目标系统数字孪生体随系统功能演化。数字孪生建模过程主要分为3个子过程:初始化、同步和演化。在初始化过程中,根据目标系统功能构建概念模型和

机理模型,对模型进行模拟仿真产生虚拟数据;分析虚拟数据并迭代模型,当满足系统功能时,制造目标系统实物。在同步过程中,运行目标系统实物,产生现实数据;根据现实数据构建数据驱动模型,将数据驱动模型与机理模型融合;对比现实数据与虚拟数据差异,对目标系统数字孪生体修改迭代,直至现实数据与虚拟数据差异低于阈值。在演化过程中,对迭代后的目标系统数字孪生体模拟仿真,产生新的虚拟数据;判断现实数据与虚拟数据是否满足系统功能,如满足则输出目标系统实物和数字孪生体,

算法2 同步数字孪生体与系统实物

输入:目标系统数字孪生体 M ,目标系统现实数据 D_S

输出:目标系统初始数字孪生体 M

```

1: Function Synchronized(序列 $M$ , 序列 $D_S$ )
2:    $D_M = \text{Simulate}(M)$ 
3:   if  $|D_S - D_M| < \text{设定值}$  then
4:     return  $M$ 
5:   else
6:      $\text{Modify}(M)$ 
7:      $\text{Synchronized}(M, D_S)$ 
8:   end if

```

算法3 数字孪生体与系统实物协同演化

输入:目标系统的功能序列 F_S

输出:目标系统实体 S ,目标系统数字孪生体 M

```

1: Function Evolved(序列 $F_S$ )
2:   if  $m_C == \text{null}$  then
3:     // 创建功能序列 $F_S$ 的概念模型 $m_C$ 
4:      $m_C = \text{ConceptionModeling}(F_S)$ 
5:     // 在 $M$ 中添加 $m_C$ 
6:      $M.add(m_C)$ 
7:   end if
8:    $S, M, D_M = \text{CreateInitModel}(M)$ 
9:    $D_S = \text{Operate}(S)$  // 运行 $S$ 并产生现实数据 $D_S$ 
10:  if  $m_D == \text{null}$  then
11:    // 创建数据驱动模型 $m_D$ 
12:     $m_D = \text{DataModeling}(D_S)$ 
13:     $M.add(m_D)$ 
14:  end if
15:   $M = \text{Synchronized}(M, D_S)$ 
16:   $D_M = \text{Simulate}(M)$ 
17:  if  $D_S$ 满足功能 &  $D_M$ 满足功能 then
18:    return  $S, M$ 
19:  else
20:     $\text{Evolved}(\text{序列 } F_S)$ 
21:  end if
22: Function main(序列 $F_S$ )
23:    $S, M = \text{Evolved}(\text{序列 } F_S)$ 
24:   output  $S, M$ 

```

算法1 创建目标系统实体和初始数字孪生体

输入:目标系统数字孪生体 M

输出:目标系统实体 S ,目标系统数字孪生体 M ,目标系统虚拟数据 D_M

```

1: Function CreateInitModel(序列 $M$ )
2:    $D_M = \text{Simulate}(M)$  // 产生虚拟数据 $D_M$ 
3:   if  $D_M$ 满足系统功能要求 then
4:     if  $S == \text{null}$  then
5:       // 制造实际目标系统 $S$ 
6:        $S = \text{CreateSystem}(M, D_M)$ 
7:     end if
8:   else
9:     // 修改目标系统数字孪生体 $M$ 
10:     $\text{Modify}(M)$ 
11:     $\text{CreateInitModel}(\text{序列 } M)$ 
12:   end if
13:   return  $S, M, D_M$ 

```

否则从初始化过程开始重新迭代,直至满足系统功能要求。

2 数字孪生的概念建模

数字孪生的核心是模型。根据提出的数字孪生设计架构,数字孪生所需的基本模型有3类:概念模型、机理模型和数据驱动模型。下面将介绍数字孪生中概念模型的建模方法。

2.1 数字孪生过程的概念模型

数字孪生的目标实体通常是一个复杂巨系统。从人的认知过程来看,人对于复杂巨系统的认知起点是复杂巨系统的概念,即该系统的相关知识。因此,数字孪生建模的第一步是构建概念模型。

目前,MBSE中有许多构建概念模型的方法,其中比较著名的方法有Dori的对象过程法、INCOSE面向对象的系统工程方法(Object-Oriented Systems Engineering Method, OOSEM)、IBM Rational Telelogic的Harmony-SE、IBM系统工程统一流程(Rational Unified Process for Systems Engineering, RUP-SE)等^[25]。其中,Dori的对象过程法基于系统概念建模的最小通用本体——对象、过程和关系,加以缩放机制,可以对任何领域的任何复杂系统进行建模^[26]。数字孪生的概念建模方法本质是将MBSE方法实例化。基于OPM,数字孪生最小通用本体的对象过程图(Object Process Diagram, OPD)和对象过程语言(Object Process Language, OPL)如图3所示。在OPM方法的基础上,对对象和过程

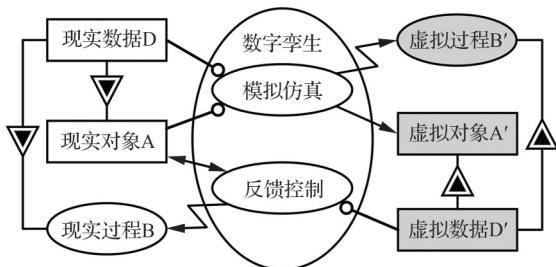


图3 数字孪生最小通用本体的对象过程图和对象过程语言

Fig. 3 Object process diagram and object process language of minimum general-purpose ontology of digital twin

增加了一种性质——存在。对象与过程的存在性质定义为在现实空间的存在或是在虚拟空间的存在。在对象过程图中,现实空间中对象与过程底色为白色,虚拟空间中对象与过程底色为灰色。

数字孪生过程所连接的两端同为对象或同为过程。根据OPM中结构链接的定义,数字孪生过程可以抽象为一个新的结构链接,称为孪生链接。孪生链接表示了现实事物与虚拟事物之间的孪生关系,这种孪生关系被定义为一种结构关系,表示在虚拟空间中等价于现实事物的虚拟事物,即现实事物在虚拟空间中的映射。孪生关系的OPD定义如图4所示。

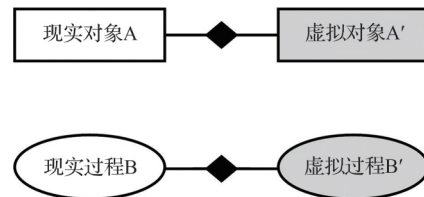


图4 孪生关系的OPD定义

Fig. 4 Definition of OPD for twins' relationship

为了使复杂系统的OPD尽可能简化,在对复杂系统进行概念建模时,孪生关系通常隐藏,现实事物和虚拟事物通过划分不同区域进行区分,如图5所示。通过划分现实空间和虚拟空间,能实现对实物和管理的管理,区分与现实事物相关的状态变化、数据和与虚拟模型相关的状态变化、数据。对比现实事物与虚拟模型的状态及产生的数据,可以明确两者之间的差异并采用图3所示的数字孪生最小通用本体进行协同演化。根据OPM方法,构建数字孪生概念模型的算法如算法4所示。

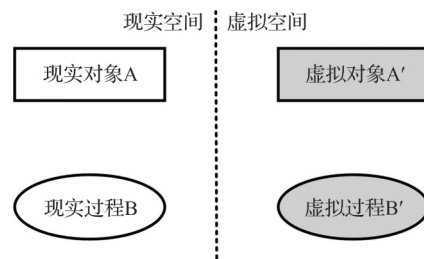


图5 OPD中现实事物和虚拟事物的不同区域

Fig. 5 Different areas of real and virtual things in OPD

算法4 构建数字孪生概念模型

输入: 目标系统的功能序列 F_S

输出: 目标系统数字孪生概念模型 m_C

```

1: Function Conception Modeling(序列  $F_S$ )
2:    $m_C = \text{OPM}(F_S)$ 
3:   for  $f$  in  $F_S$  do
4:     if  $f$  不包含子功能序列 then
5:       // 创建功能序列  $f$  的概念模型  $m_{Cf}$ 
6:        $m_{Cf} = \text{OPM}(f)$ 
7:        $m_C.add(m_{Cf})$ 
8:     else
9:       ConceptionModeling(序列  $f$ )
10:    end if
11:  end for
12:  return  $m_C$ 
  
```

2.2 飞行器电推进系统的数字孪生概念模型

飞行器电推进系统由电力设备、机械结构和旋翼组成,如图6所示。其中,电力设备包括电源、逆变器和推进电机,机械结构包括减速器、旋翼转轴和机械传动机构,旋翼包括桨毂和桨叶。根据数字孪生的概念建模方法,分两个

层级对电推进系统进行概念建模。电推进系统OPD的系统框图(System Diagram, SD)如图7所示,电推进系统的1级OPD(SD1)如图8所示。

电推进系统的系统框图(SD)描述了电推进系统所涉及的设备以及能量转换的情况。电推进系统的1级OPD(SD1)描述了电力推进系统的工作过程、每个设备在不同过程中的作用以及能量变化的具体形式。通常情况下,一个系统概念模型只需要建立在对所涉及机理模型和数据驱动模型抽象的基础上,即概念模型的颗粒度应大于等于对应机理模型和数据驱动模型的颗粒度。当需要对某个事物的内在机理或数据特征进行深入研究时,需要将该事物看作一个子系统,并采用同样的方法进行概念建模。例如,研究驱动过程中推进电机将电能变换为机械能的实际过程时,从整个系统的角度看只需要对推进电机及驱动过程建立机理或数据驱动模型,而非下一个层级的概念模型。对于整

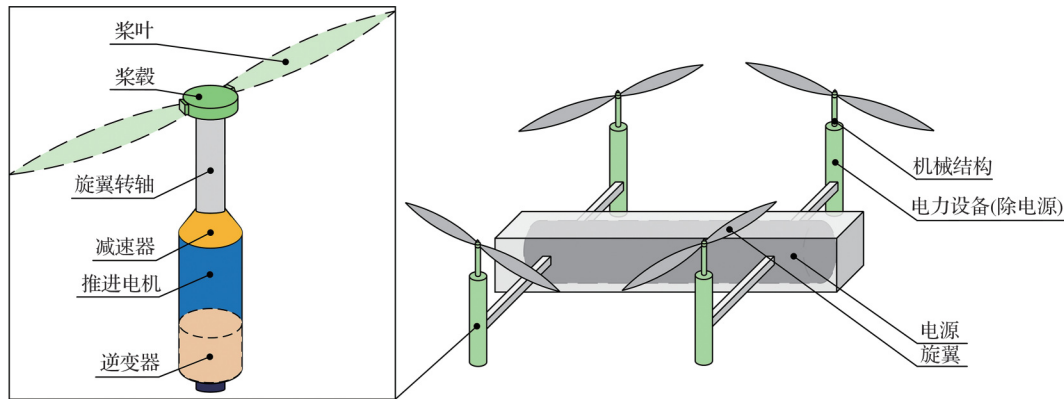


图6 飞行器电推进系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram for electric propulsion system of aircraft

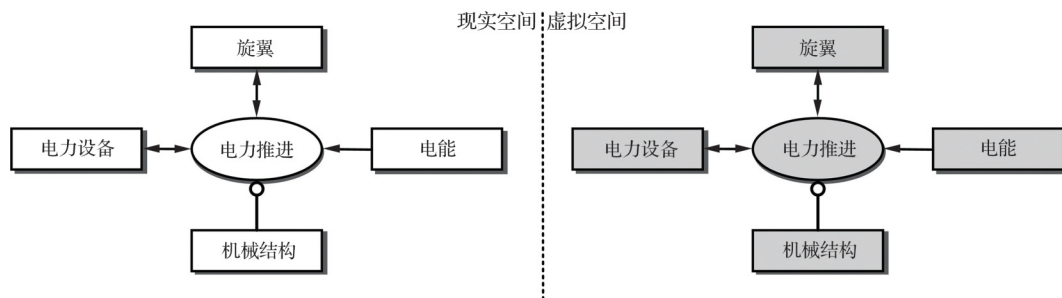


图7 电推进系统OPD的系统框图(SD)

Fig. 7 System Diagram (SD) of OPD for electric propulsion system

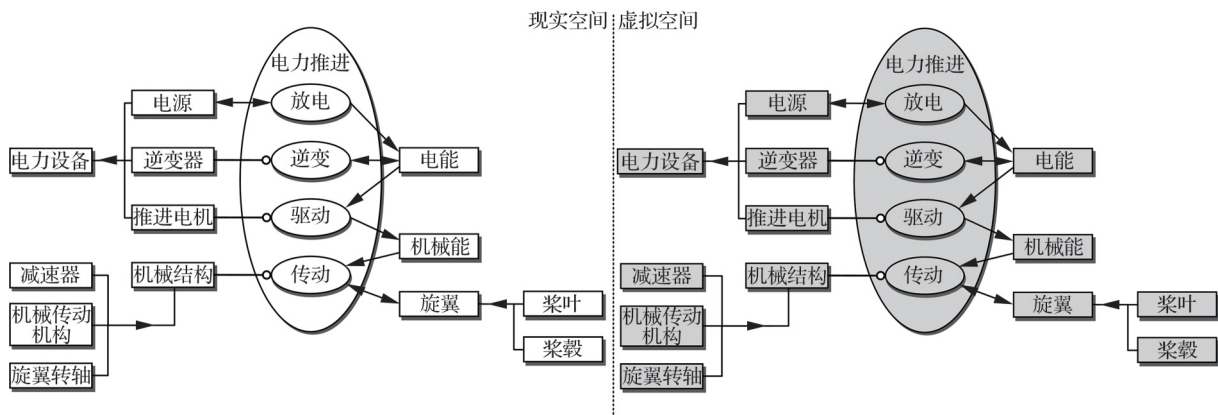


图 8 电推进系统的1级OPD(SD1)

Fig. 8 Level 1 OPD for electric propulsion system (SD1)

个系统的关注者而言,复杂系统对象过程图树的叶子节点为系统所涉及的各个机理模型和数据驱动模型。建立了电推进系统概念模型后,需要对电推进系统概念模型所涉及的各个事物建立机理或数据驱动模型。

2.3 飞行器电推进系统能量计算与分析

在电推进系统数字孪生概念模型的基础上,计算了电推进系统在3种典型飞行过程中能量消耗情况,如表1~表3所示。

表 1 第1种典型飞行过程中电推进系统能量消耗计算

Table 1 The first calculation of energy consumption of electric propulsion system during typical flight

序号	模式	过程	用时/s	总平均电功率/kW	本过程耗电量/kWh	累计耗电量/kWh	电池放电深度/%
1	A	1	43 200.00	3.438	41.260	41.260	1.481
2	B	2	50.00	3.438	0.048	41.308	1.483
3	B	3	60.00	5.333	0.089	41.397	1.486
4	C	4	7.50	470.733	0.981	42.377	1.521
5	C	5	5.00	502.800	0.698	43.076	1.546
6	C	6	8.75	501.667	1.219	44.295	1.590
7	D	7	32.00	510.433	4.537	48.832	1.753
8	E	8	110.00	362.333	11.071	59.903	2.150
9	D	9	27.50	270.367	2.065	61.969	2.224
10	C	10	15.00	461.433	1.923	63.891	2.294
11	C	11	120.00	507.433	16.914	80.806	2.901
12	C	6	8.75	501.667	1.219	82.025	2.944
13	D	7	32.00	510.433	4.537	86.562	3.107
14	E	8	25.00	362.333	2.516	89.079	3.198
15	D	9	27.50	270.367	2.065	91.144	3.272
16	C	10	15.00	461.433	1.923	93.067	3.341
17	C	11	120.00	507.433	16.914	109.981	3.948
18	C	12	7.5.00	457.667	0.953	110.934	3.982
19	C	13	7.5.00	457.667	0.953	111.888	4.016
20	F	14	45.00	1.833	0.023	111.911	4.017
21	F	15	50.00	3.438	0.048	111.959	4.019

表 2 第 2 种典型飞行过程中电推进系统能量消耗计算

Table 2 The second calculation of energy consumption of electric propulsion system during typical flight

序号	模式	过程	用时/s	总平均电功率/kW	本过程耗电量/kWh	累计耗电量/kWh	电池放电深度/%
1	C	4	7.50	470.733	0.981	0.981	0.035
2	C	5	5.00	502.800	0.698	1.679	0.060
3	C	6	8.75	501.667	1.219	2.898	0.104
4	D	7	32.00	510.433	4.537	7.436	0.267
5	E	8	140.00	362.333	14.091	21.526	0.773
6	D	9	27.50	270.367	2.065	23.592	0.847
7	C	10	15.00	461.433	1.923	25.514	0.916
8	C	18	7.50	457.667	0.953	26.468	0.950
9	C	19	7.50	457.667	0.953	27.421	0.984

表 3 第 3 种典型飞行过程中电推进系统能量消耗计算

Table 3 The third calculation of energy consumption of electric propulsion system during typical flight

序号	模式	过程	用时/s	总平均电功率/kW	本过程耗电量/kWh	累计耗电量/kWh	电池放电深度/%
1	C	4	7.50	1.833	0.023	0.023	0.001
2	C	5	5.00	3.438	0.048	0.071	0.003
3	C	6	8.75	3.438	27.220	27.291	0.980
4	D	7	32.00	3.438	0.048	27.339	0.981
5	E	8	140.00	5.333	0.089	27.427	0.985

3 种典型飞行过程涉及多个子过程,不同模式下飞行器电推进系统各组成部分消耗能量均不同。因此,基于电推进系统数字孪生概念模型,计算了单个子过程中电推进系统的平均电功率,结合子过程持续时间,计算了整个飞行过程中电推进系统累计耗电量以及电池放电深度。

3 结 论

1) 基于数字孪生三维模型,提出了一种数字孪生的设计架构,揭示了数字孪生中实物、数据与模型之间的双向映射关系。

2) 采用 OPM 构建了数字孪生的最小通用本体,并通过拓展 OPM 中对象与过程的性质,构建了适用于数字孪生的 MBSE 概念建模方法。

3) 以飞行器电推进系统为例,根据数字孪生的概念建模方法,构建了该系统的概念模型,详细展示了该系统的组成、行为、性能等。此外,还区分了飞行器电推进系统的概念模型与该系统的机理模型和数据驱动模型的颗粒度。

4) 基于电推进系统数字孪生概念模型,计算了 3 种典型飞行过程中飞行器电推进系统的能量

消耗以及电池放电深度。

参 考 文 献

- [1] 陶飞,程颖,程江峰,等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1603-1611.
TAO F, CHENG Y, CHENG J F, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603-1611 (in Chinese).
- [2] 陶飞,张萌,程江峰,等. 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.
TAO F, ZHANG M, CHENG J F, et al. Digital twin workshop: A new paradigm for future workshop [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 1-9 (in Chinese).
- [3] 李琳利,李浩,顾复,等. 基于数字孪生的复杂机械产品多学科协同设计建模技术[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1307-1319.
LI L L, LI H, GU F, et al. Multidisciplinary collaborative design modeling technologies for complex mechanical products based on digital twin [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1307-1319 (in Chinese).

- [4] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]// *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. Cham: Springer International Publishing, 2017: 85-113.
- [5] SHAFTO M, CONROY M, DOYLE R, et al. Draft modeling, simulation, information technology & processing roadmap[J]. *Technology Area*, 2010, 11: 1-32.
- [6] GRIEVES M. Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication[J]. *White Paper*, 2014, 1: 1-7.
- [7] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(1): 1-18.
TAO F, LIU W R, ZHANG M, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 1-18 (in Chinese).
- [8] 陶飞, 张辰源, 戚庆林, 等. 数字孪生成熟度模型[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(5): 1267-1281.
TAO F, ZHANG C Y, QI Q L, et al. Digital twin maturity model[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022, 28(5): 1267-1281 (in Chinese).
- [9] 张辰源, 陶飞. 数字孪生模型评价指标体系[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(8): 2171-2186.
ZHANG C Y, TAO F. Evaluation index system for digital twin model[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(8): 2171-2186 (in Chinese).
- [10] TONG X D, BAO J S, TAO F. Co-evolutionary digital twins: A multidimensional dynamic approach to digital engineering[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2024, 61: 102554.
- [11] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 信息技术 数字孪生第1部分: 通用要求: GB/T 43441.1—2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Information technology—Digital twin: Part 1: General requirements: GB/T 43441.1—2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023 (in Chinese).
- [12] ISO/IEC. Digital twin—Concepts and terminology: ISO/IEC 30173: 2023 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2023.
- [13] 李瑾岳, 张鹏飞, 郭跃成, 等. 基于数字孪生的航空发动机配合界面装配分析[J]. *航空学报*, 2024, 45(21): 629800.
LI J Y, ZHANG P F, GUO Y C, et al. Assembly analysis of aero-engine mating interface based on digital twin [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(21): 629800 (in Chinese).
- [14] YUE G H, DU Z Y, XIU L C, et al. Electric field equivalent method for AC/DC hybrid electric equipment adapted to digital twin with low latency[J]. *Electric Power Systems Research*, 2022, 213: 108799.
- [15] IBRAHIM M, RJABTŠIKOV V, JEGOROV S, et al. Conceptual modelling of an EV-permanent magnet synchronous motor digital twin[C]// *2022 IEEE 20th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*. New York: IEEE, 2022: 156-160.
- [16] 田阔, 孙志勇, 李增聪. 面向结构静力试验监测的高精度数字孪生方法[J]. *航空学报*, 2024, 45(7): 429134.
TIAN K, SUN Z Y, LI Z C. High-precision digital twin method for structural static test monitoring[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(7): 429134 (in Chinese).
- [17] YANG Y, CHEN Z, YAN J, et al. State evaluation of power transformer based on digital twin[C]// *2019 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI)*. Piscataway: IEEE, Press 2019: 230-235.
- [18] BOOYSE W, WILKE D N, HEYNS S. Deep digital twins for detection, diagnostics and prognostics[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 140: 106612.
- [19] KHARLAMOVA N, TRÆHOLT C, HASHEMI S. A digital twin of battery energy storage systems providing frequency regulation[C]// *2022 IEEE International Systems Conference (SysCon)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-7.
- [20] GUO H Y, WANG S P, SHI J, et al. Dynamically updated digital twin for prognostics and health management: Application in permanent magnet synchronous motor[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37(6): 244-261.
- [21] 李春华, 孙见忠, 陆纪龙. 面向运维的HPT叶片寿命数字孪生建模方法[J]. *航空学报*, 2024, 45(21): 629385.
LI C H, SUN J Z, LU J L. Maintenance-oriented approach for HPT blade life digital twin modeling[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(21): 629385 (in Chinese).
- [22] 郭丞皓, 于劲松, 宋悦, 等. 基于数字孪生的飞机起落架健康管理技术[J]. *航空学报*, 2023, 44(11): 227629.
GUO C H, YU J S, SONG Y, et al. Application of digital twin-based aircraft landing gear health management technology[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(11): 227629 (in Chinese).
- [23] PILTAN F, KIM J M. Bearing anomaly recognition using an intelligent digital twin integrated with machine learning[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(10): 4602.

- [24] 黄熠玮, 耿一斌, 高天贺, 等. 数字孪生驱动的结构全场变形高精度反演方法[J]. 航空学报, 2025, 46(19):530967.
HUANG Y W, GENG Y B, GAO T H, et al. Digital twin driven high precision reconstruction method for full-field deformation of structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(19): 530967 (in Chinese).
- [25] HENDERSON K, SALADO A. Value and benefits of model-based systems engineering (MBSE): Evidence from the literature [J]. Systems Engineering, 2021, 24(1): 51-66.
- [26] DORI D. Model-based systems engineering with OPM and SysML[M]. Cham: Springer New York, 2016.

(责任编辑: 范真真)

A design architecture and conceptual modeling approach for digital twins

LI Shangyu¹, FENG Hang^{1,2}, CHEN Junquan¹, CHEN Bin³, MEI Dan^{1,*}

1. National Key Laboratory of Electromagnetic Energy, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

2. Department of Basic Courses, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

3. Ship Comprehensive Test and Training Base, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: Amid the emergence of Industry 4.0 and intelligent manufacturing, significant attention has been garnered, and swift advancement has been undergone by the technology of digital twin. A design framework for digital twins, along with a conceptual modeling approach tailored to this technology, is presented. The proposed digital twin design architecture is anchored in the 3D model, and a comprehensive elaboration is offered of the bidirectional mapping relationship between the target object, pertinent data, and the model, as well as the evolutionary trajectory of the digital twin. Leveraging the object-process methodology, the attributes of objects and processes are extended, and ultimately the minimal general ontology for digital twins is formulated. To illustrate the approach, the UAV electric propulsion system is employed as a case study. Through this lens, a conceptual model of the system is established, and an in-depth account is provided of its composition, behavior, and performance. Promising outcomes are obtained.

Keywords: digital twin design architecture; model-based systems engineering; object process method; conceptual modeling; electric propulsion system

Received: 2024-08-30; **Revised:** 2024-10-17; **Accepted:** 2024-11-21; **Published online:** 2024-12-05 13:35

URL: <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2025/V46/I19/531118>

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (51977216)

* **Corresponding author.** E-mail: may1380@163.com