

基于模型系统工程的飞控半实物测试系统设计

王雁来¹, 陶贞吉², 钱航¹, 武国军¹

(1. 上海烜翊科技有限公司, 上海 201101;

2. 上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 针对飞行器在各种极端飞行过程中所遇到的异常和复杂情况, 需要建立基于真实业务场景下的外部激励环境, 才能有效验证系统功能和性能; 和传统的半实物测试验证系统相比, 基于模型的系统工程将飞控系统在需求定义和系统设计阶段中的全流程使用场景通过模型传递的方式建立系统测试外部环境激励; 在用户使用场景模型的约束下, 系统使用基于时空域的推演数字化仿真模拟真实业务场景下的飞行环境, 针对飞行器实际飞行技术参数进行系统建模, 从而模拟实际业务环境以及对应使用场景; 利用实际业务场景环境数据, 使用基于光学成像的传感器仿真提供机载视角的载荷图像模拟, 通过航电总线按照接口协议规范发送给飞控计算机, 并接收飞控计算机返回的飞控指令实时参与时空域推演, 从而实现基于硬件在环和人在环的飞控系统全流程测试验证系统; 系统试验表明, 基于模型系统工程所设计的飞控半实物测试系统能够利用虚实结合的仿真技术, 有效模拟用户实际业务场景下的飞行环境, 提供真实业务数据交互, 从而有效提高飞控系统的全业务流程功能验证效果。

关键词: 飞行控制; 基于模型的系统工程; 硬件在环; 系统测试; 数字化仿真

Design of Flight Control Hardware-in-the-Loop Verification System Based on Model System Engineering

WANG Yanlai¹, TAO Zhenji², QIAN Hang¹, WU Guojun¹

(1. Shanghai Sharee Technology Co., Ltd., Shanghai 201101, China;

2. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to simulate the abnormal and complex situations encountered by aircraft during various extreme flights, it is necessary to establish an external simulation environment based on real business scenarios to effectively verify the system functions and performance. Compared with traditional hardware in the loop verification systems, the model-based system engineering establishes the system test external environment by transferring the full-process usage scenario model of the flight control system during the requirements definition and system design stages. With the constraints of the user scenario model, the time-space domain-based deduction digital simulation can be used to setup the flight environment with the actual user scenarios. Modeling the actual flight technical parameters of the aircraft to simulate the actual user environment and corresponding usage scenarios, Using the environment data in the user scenario, the sensor simulation based on optical imaging is used to provide the payload image from the airborne perspective, which is sent to the flight control computer through the avionics bus according to the interface protocol specification, and the flight control instructions returned by the flight control computer are received to participate in the time-space domain deduction in real time, thereby realizing the full-process test and verification system of the flight control system based on hardware-in-the-loop and human-in-the-loop. System experiments show that the flight control hardware-in-the-loop testing system based on model system engineering can utilize the virtual-real simulation technology to effectively simulate flight environment under the user scenarios and provide real business data interaction, thereby effectively improving full operational process functional verification effect of the flight control system.

Keywords: flight control; hardware-in-the-loop; model based system engineering; system verification; digital simulation

收稿日期: 2024-12-25; 修回日期: 2025-02-10。

作者简介: 王雁来(1976-), 男, 工学硕士, 研究员。

引用格式: 王雁来, 陶贞吉, 钱航, 等. 基于模型系统工程的飞控半实物测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(6): 1-8, 17.

0 引言

基于硬件在环的半实物仿真测试系统已经在基于控制的业务系统和平台的功能验证和集成测试技术领域应用较为成熟^[1]。通过半实物仿真测试环境建立外部仿真激励环境,模拟飞控设备运行外部交联环境,完成对飞控系统的集成测试。随着飞行器使用环境越来越复杂,飞控设备的功能也相应地逐渐随之复杂化,从而对半实物构建的仿真环境要求也逐渐提高^[2-3]。但是针对飞行器的半实物仿真主要侧重于半实物仿真节点本身,包括系统交联、仿真数据处理的实时性以及飞行器物理接口类型的多样化等。

随着半实物测试系统应用场景的复杂化,传统单一化的半实物硬件在环系统逐渐无法满足系统验证需求,系统集成验证测试逐渐开始进行多领域系统协同与联合仿真验证,并提供相应的系统训练环境^[4-5]。这类仿真系统开始添加了用户业务应用因素,给原有的半实物仿真系统的接口数据激励提供了一定的逻辑关联性,通过人在环的方式完成系统性的训练流程实践。但是这些系统并没有完全按照真实业务场景构建全套的数字化仿真环境。为了实现虚实结合的多领域系统联合协同仿真,常规采用传统的 DIS (Distributed Interactive Simulation) 协议^[6]或者目前较为主流的 DDS (Data Distribution Service) 协议实现系统之间的协同数据交互^[7-9]。通过 DIS 协议或者 DDS 协议,能够实现多领域仿真节点之间的数据通信,但是针对虚实结合的多领域融合仿真系统仅仅解决了模型直接的数据通信,并没有引入用户典型业务场景的全流程操作过程。

但是目前主流使用硬件在环的半实物仿真环境主要针对飞控设备的具体功能进行集成验证,而很少从系统层面上验证飞控设备在全流程飞行过程中的功能验证。如果在系统层面上缺失验证环节,必然会影响飞控系统验证效果。

随着系统复杂性越来越高,为了能够确保飞控设备的系统功能和工作逻辑符合用户使用需求,需要进行基于模型的系统工程设计^[10-11]。在系统建模设计阶段,IBM 公司的 Hoffmann 提出了 Harmony SE 系统建模流程^[12]。利用 SysML 建模语言对系统行为和功能进行分析和拆分,确保系统工作逻辑符合既定的需求^[13-14]。因此基于模型的系统工程建模逐渐成为航天航空行业系统设计的主流设计手段和工程实践方法。

为了能够在半实物验证测试环节中尽量覆盖被测设备的全流程使用环节,通常将系统模型工程设计阶段的设计成果直接平滑移植到半实物仿真机中,确保设计成果在验证阶段也能符合系统设计需求^[15-16]。但是这些技术思路主要针对数字化模型的功能测试和逻辑验证进行

了尝试和探索。为了能够扩展基于模型的系统验证范围,基于模型的测试技术也开始在半实物测试系统中逐渐开始广泛应用^[17-18]。通过将数字化模型和半实物仿真系统相结合,实现虚实结合的系统验证。但是这些验证方法依然针对模型功能进行集成和验证,尽管建立了虚实结合仿真系统,但是并没有引入用户典型的业务场景和操作流程,依然是接口功能的测试和验证。

但是如果系统需求分析和建模过程没有和系统测试与验证环节紧密结合而导致技术传递脱节的话,会导致被测系统验证的业务场景不全面,从而造成飞控设备的功能和性能无法被充分验证,尤其是在一些极端情况下的应用效果无法保证。系统设计阶段所设定的业务场景如果能够平滑迁移到系统集成验证环节中,将能够基于业务场景对飞控系统进行功能和性能验证,确保极端条件下的设备性能。因此,确保系统设计成果能够无缝传递到系统集成测试验证环节,尤其是保持系统设计过程中的业务场景描述,逐渐成为系统集成验证测试的研究热点。

1 系统结构及原理

1.1 系统架构

随着飞行器在飞行过程中遇到的各种异常情况越来越复杂,而传统的半实物测试环境主要提供系统集成和功能接口验证,无法提供基于典型用户场景下的飞控系统测试环境。基于模型系统工程的飞控半实物测试系统将系统正向设计的系统模型直接传递到系统测试环节,确保设计思路准确全面地传递到系统验证环节,真实再现模拟用户的实际业务场景输入,从而覆盖设计阶段所考虑的各种飞控使用场景。

系统首先基于 SysML 规范建立飞控设备的外围交互模型,针对飞控设备的全流程业务模型明确数据交互关系以及数据交换内容。然后基于所设计的系统逻辑进行时空域的推演仿真想定构建,从而构建全流程的业务逻辑数据交互。在此基础上,引入基于光学反射的传感器任务载荷仿真,提供基于飞行视角的任务载荷图像,用于人在环控制和测试。

系统建立了基于 DDS 的传感器仿真和时空域的推演仿真的数据交互,并对所有仿真数据进行时空一致的任务载荷融合,确保传感器仿真图像数据和飞行推演过程的飞机视角数据同步、三维坐标同步以及所有仿真模型的仿真步长耦合,然后基于航电总线接口数据规范将推演态势数据以及传感器仿真数据发送给飞控设备,并接收飞控设备经过计算后的飞控指令反馈,从而验证飞控设备在不同场景下的功能,实现硬件在环的飞控半实物测试系统。

系统各组成部分之间的关系如图 1 所示。

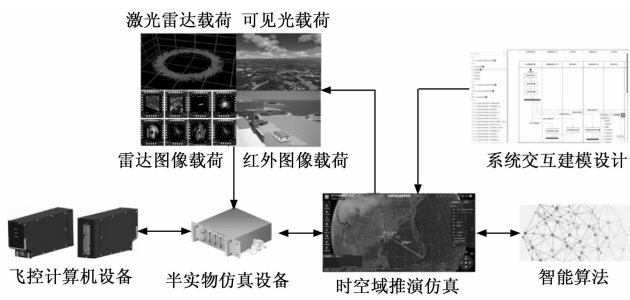


图 1 系统架构

1.2 系统流程

根据上述的系统组成关系，系统中各个组成模块之间的数据交互关系和工作流程如图 2 所示。

图 2 中，每个系统占用一个泳道，具体执行顺序和流程如下：

- 1) 智能飞控系统协同建模环境：按照飞控设备的需求，构建设备使用场景和对应的交互逻辑模型，确定飞控设备的外部交互逻辑和数据交互关系；
- 2) 时空域推演仿真：根据体系模型构建推演想定逻辑，包括特定业务场景下的飞行环境特征和行为逻辑构建以及相应的模型实体创建。运行推演过程中，输出当前的态势数据；

3) 传感器任务载荷仿真：根据业务场景下的装备实体材质构建对应的光学反射模型，并接收时空域推演仿真的态势数据，构建时空一致的传感器任务载荷仿真图像，具体包括可见光/红外图像、SAR 雷达图像以及激光雷达点云数据。

4) 半实物接口激励仿真：接收时空域推演仿真的态势数据以及对应的传感器任务载荷图像数据，并按照飞控设备接口规范进行数据封装，发送给飞控设备。飞控设备接收仿真数据进行智能决策后，返回相应的飞控指令，从而实现硬件在环的飞控设备回环测试和功能验证。

1.3 系统外部环境构建

在常规的硬件在环飞控系统集成测试验证环境中，提供飞控系统的交联环境接口仿真。为了增加业务真实性，交联环境一般采用数字化或者半实物的仿真设备配合功能逻辑模型实现基于特定业务环节下的数据模拟激励和数据通讯。系统外部环境如图 3 所示。

但是常规基于模型的仿真设备没有外部环境场景模拟，只能通过人在环或者硬件在环实现外围交联设备的基本功能和接口数据仿真，无法提供典型业务场景下的功能仿真。缺乏基于业务场景下的环境模拟，例如恶劣

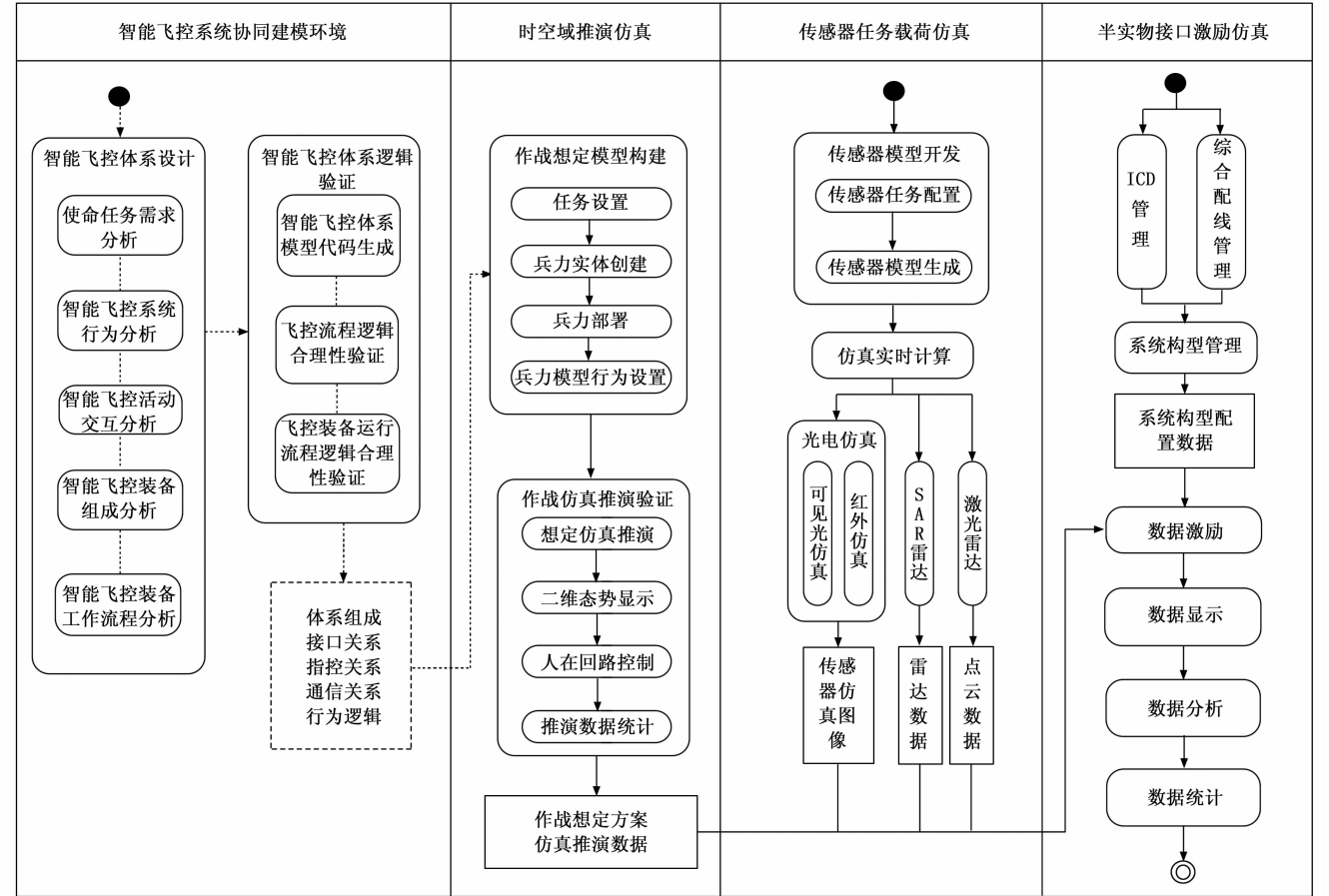


图 2 系统业务流程

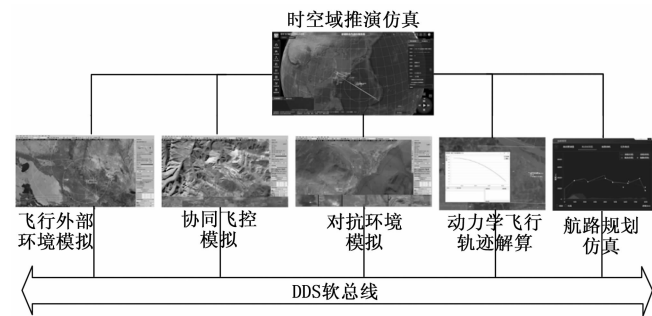


图 3 系统外部环境仿真架构

环境、四季天气、红蓝对抗等特殊环境。这些业务场景的缺失，导致很多仿真功能无法和业务紧密结合，从而无法验证飞控系统在真实业务场景下的运行功能。

系统利用时空域的推演仿真系统，构建典型业务场景，通过配置地理位置和天气环境，提供外部环境的仿真模拟；通过配置红蓝双方的对抗策略，提供对抗环境下的数据仿真；通过配置航路，提供特定飞行动力轨迹。

通过时空域的推演仿真系统能够提供特定业务场景的环境仿真数据，并配合系统设计模型，实现飞控系统的真实业务环境仿真模拟。

由于多个仿真节点实现了多领域的环境模拟，所以需要进行时空一致性任务载荷融合，确保每个仿真节点提供的数据输入能够有效激励飞控系统。为了确保时空一致性，首先确保三维模型的数据源统一，并将各个节点的坐标系进行统一转换从而实现空间统一。然后对 DDS 总线上的所有节点提供时钟同步机制，利用单位时间对不同仿真步长的耦合处理确保时间统一。

1.4 系统软件设计

针对系统中的各个软件模块，通过 DDS 软总线实现数据通讯。由于基于 DDS 的数据通讯软件相对比较成熟，因此针对每个软件模块，只需要构建对应的 DDS 中间件，并完成数据订阅与发布即可实现数据通讯。

系统各个软件模块之间的通讯关系如图 4 所示。

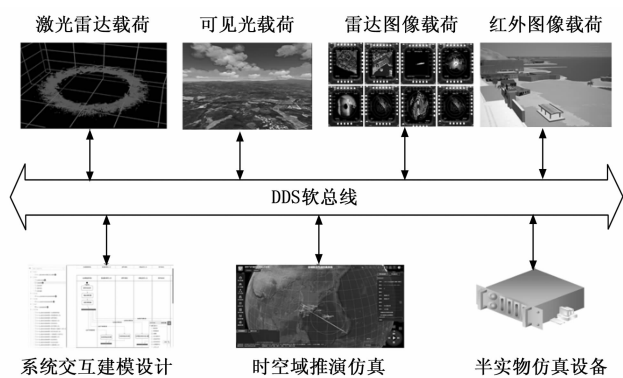


图 4 系统软件架构

软件模块发布和订阅的数据如表 1 所示。

表 1 软件模块数据发布与订阅列表

软件模块	数据内容	数据发布订阅类型
智能飞控系统协同建模环境	飞控操作指令	数据发布
	任务载荷图像	数据订阅
	推演态势数据	数据订阅
	当前飞行环境数据	数据订阅
时空域推演仿真	推演态势数据	数据发布
	当前飞行环境数据	数据发布
	飞行器飞行姿态参数	数据发布
	飞控操作指令	数据订阅
传感器任务载荷仿真	任务载荷图像	数据发布
	激光点云数据	数据发布
	当前飞行环境数据	数据订阅
	飞行器飞行姿态参数	数据订阅
半实物接口激励仿真	飞控操作指令	数据发布
	推演态势数据	数据订阅
	当前飞行环境数据	数据订阅
	飞行器飞行姿态参数	数据订阅

系统各个软件基于表 1 中的数据发布和数据订阅内容进行数据通信，完成系统交互。

2 时空一致性任务载荷融合

时空一致性主要包括空间表达一致和分布仿真时间一致两个方面。多传感器仿真时空一致性是决定传感器任务载荷数据融合的关键因素，没有空间一致性融合时就会目标匹配的误差；与此同时，时间一致性也决定融合结果，时空是相关的，时间上的误差对运动物体会带来空间的误差，进而造成多元融合误差。

由于时空域的作战推演过程中，需要密切和传感器仿真配合，尤其是飞机的任务载荷在飞行过程中需要在当前时刻仿真相应位置的探测图像，如果图像时间轴错位，将直接导致飞行器所在位置和方位所对应产生的传感器任务载荷图像的偏差，从而导致任务执行过程的判断错误，无法有效验证飞控设备功能。

系统采用的可见光传感器仿真模型、红外载荷仿真模型、SAR 雷达传感器仿真模型、激光雷达传感器仿真模型都需要使用同一类型的三维目标模型和三维场景模型文件。与此同时，各个传感器仿真模型的坐标系以及支持的数据通信协议也应保持一致性。

在仿真开始前，传感器仿真模型根据特定业务场景下的时空域推演仿真想定加载同一套三维地形和三维目标模型；仿真开始后，基于 DDS 的数据通信协议接收系统发送的飞行态势数据驱动场景渲染，这样就保证了光电、红外、雷达、激光雷达仿真之间的时空一致性。

通过将态势信息与传感器信息进行时空一致性约束下的仿真与显示，能够从多角度多维度多层面观察和分析当前飞行器的飞行环境及态势的变化，得到更完善、准确的信息，从而支撑智能飞控设备做出准确的判断和

决策。

2.1 时间一致性融合

时间一致性融合需要确保所有参与仿真的各个子系统的时间一致性,所有参与推演的各个系统模块使用同一个时钟源,并提供时钟同步控制机制,确保不同传感器生成的仿真场景时间方面统一^[19]。

由于时间一致性融合是贯穿在整个仿真测试过程的,随着用户场景的复杂化,时间会越来越长。为了避免在长时间推演过程中,采用的时间同步触发所产生的累计误差,利用迭代重加权最小二乘法(IRLS, iterative reweight least square)进行误差消除。该方法主要用于解决具有 p 范数形式的目标函数的优化问题:

$$\operatorname{argmin}_{\beta} \sum_{i=1}^n |y_i - f_i(\beta)|^p \quad (1)$$

采用迭代法,其中每个步骤可以等价变形为加权最小二乘问题:

$$\beta^{(t+1)} = \operatorname{argmin}_{\beta} \sum_{i=1}^n \omega_i(\beta^{(t)}) |y_i - f_i(\beta)|^2 \quad (2)$$

其中: β 为需要求解的参数集, $\beta^{(t+1)}$ 为当前迭代步骤的解, ω 是权重的对角矩阵,初始值为1。

对于仿真步长较短的节点赋予较大的权重,对于仿真步长较长的节点赋予较小的权重,从而确保长时间仿真推演过程中的每个迭代过程都能通过权重估值达到准确同步。

仿真时钟控制模块根据仿真工程的步长持续向仿真时间同步模块发送同步信号。

如图5所示,仿真时钟控制工作流程为:

- 1) 仿真时间同步模块(协同仿真模块)发送运行命令,仿真时钟收到运行命令后启动时钟,给参试的各个节点发送第1周期时钟信息;
- 2) 节点收到第1周期时钟信息后,开始运行1个时钟周期,运行完成后等待第2周期时钟;
- 3) 仿真时钟发送第2个周期时钟信息;
- 4) 节点收到第2周期时钟信息,继续运行一周期完成后,等待第3周期时钟……以此类推,到第 n 周期;
- 5) 仿真时间同步模块发送停止命令,仿真时钟随之停止仿真时钟运行。

整个仿真系统中不同模型的仿真步长不同,需要根据各个模型的仿真步长控制仿真的时钟同步推进。仿真时间同步模块利用时钟同步信号,统一调度参与联合仿真的各软件/平台。在每个仿真节拍,通知各个节点从数据软总线上读写数据,并在每个同步周期对系统所有模块的时序进行同步,保证整个协同仿真时序的正确性。

2.2 空间一致性融合

为了实现传感器任务载荷空间表达的一致性,通过

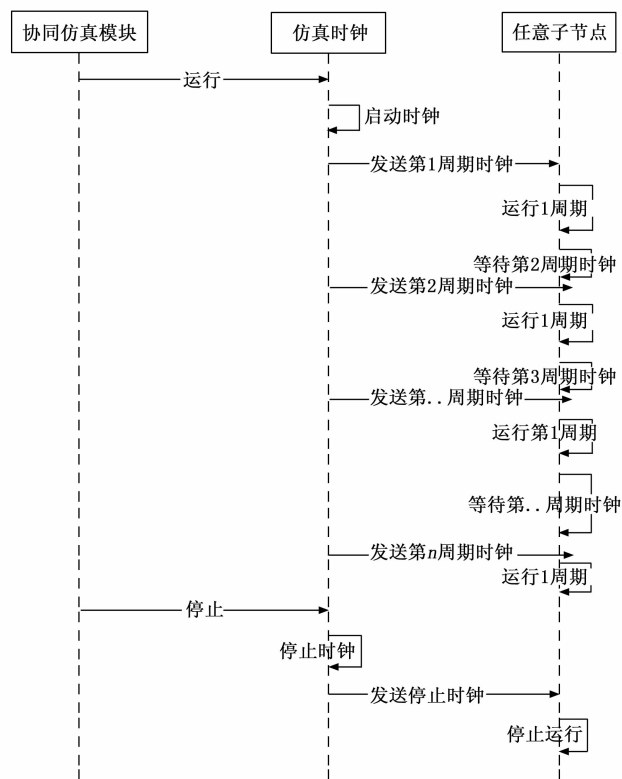


图5 系统时钟同步控制流程

时空域推演仿真模块和传感器任务载荷仿真采用统一的环境模型,确保整个仿真环境系统中的所有实体都在统一的虚拟飞行环境进行飞行仿真。

由于不同的飞行器在不同环境下的特定业务场景中,对仿真环境模型的粒度要求不同,所以也需要配套使用对应的地形环境数据。例如,低空飞行的无人机需要完成地面建筑、微小目标以及树木等物体的细节特征信息,这类场景下所需要的传感器探测视场角较小,但是所对应的地形数据需要高分辨率。对于高空飞行器的扫描覆盖上百公里范围,因此需要配套大范围的地形数据,但数据分辨率可以相对降低。

系统为了能够兼容不同业务场景下的任务载荷仿真,需要确保同时使用不同分辨率的地形数据,通常对地形数据和三维模型进行统一建模,从而使得传感器任务载荷所扫描的飞行环境能够在数据兼容的前提下保证空间一致性。

系统通过提供统一的地形数据服务和对应的三维模型,实现了地形数据和目标反射数据的空间一致性。系统根据当前业务场景下对数据的不同精度要求,实现分层分片加载地形数据。此外,对当前所模拟的飞行环境下的所有目标根据模型的材质进行分类,然后利用材质数据计算光学反射结果,从而实现针对材质类型和传感器特征进行仿真计算生成相应特征的仿真图像。

由于在三维模型构建所需要的位置描述在不同的环

境下可能所用的参考坐标系是不同的。即使系统使用的环境模型数据是完全一致的,同一位置的坐标表达可能也有差异。为了确保系统使用完全一致的坐标系,需要对所使用的数据源和三维模型进行坐标系转换,确保位置表示方法统一。该类技术目前较为成熟^[20-21],因此直接将环境数据常规所使用的大地坐标系和仿真实体常规所使用的实体坐标系进行数据统一。

大地坐标系匹配真实世界,属于右手笛卡尔坐标系,可以和 GIS 数据源相兼容。坐标系的原点是地心, X 的正半轴在赤道通过子午线, Y 的正半轴在赤道通过东经 90°线, Z 的正半轴通过北极。

传感器任务载荷安装在载机上,为了描述传感器的挂载相对位置和传感器的运动姿态,还需引进传感器载机相联系的机体坐标系,如图 6 所示。该坐标系也是一个右手笛卡尔坐标系。机体坐标系的原点是载机的机体中心, X 正半轴指向载机机头方向, Y 正半轴指向机体右侧, Z 正半轴指向载机正上方。

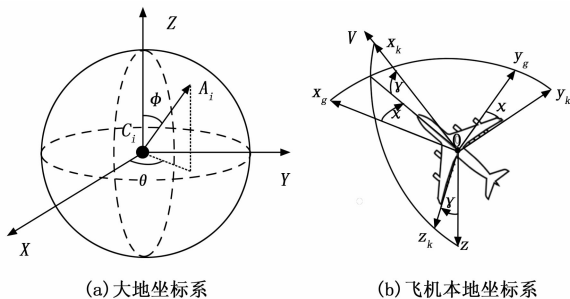


图 6 不同数据坐标系比较

从飞机本体坐标系转换到大地坐标系的欧拉角, 3 个坐标轴分别旋转的基元公式如下:

$$\mathbf{R}_x(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_y(\theta_y) = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_z(\theta_z) = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: $\mathbf{R}_x$, $\mathbf{R}_y$, $\mathbf{R}_z$ 分别对应坐标轴 θ 为旋转角度。在三维环境下, 基于 x 、 y 、 z 三个坐标轴分别旋转进行基元转换, 从而实现两类坐标系中各个实体的坐标位置数据统一。

3 实验结果与分析

3.1 仿真方法

为了量化比较基于 MBSE 系统工程技术的测试平

台和传统的半实物飞控系统测试平台, 选用飞控系统影响因子数量和设计传递效果两种比较方式进行对比分析。

系统直接使用系统设计阶段所用的数字模型, 对多领域模型进行集成, 从而建立数字化仿真环境。系统数字化模型具体包括时空域推演模型、6 自由度飞控模型、基于光学的传感器任务载荷模型、航电总线半实物接口以及人在环的飞行操控手柄。系统接入真实的飞控系统进行基于业务场景的集成测试, 实现从设计成果到测试环境的平滑无缝传递。

系统接收到场景推演仿真模块在当前场景下的推演态势数据以及传感器任务载荷仿真数据后, 进行时空一致性融合, 然后将对应的数据按照系统接口协议格式 (ICD, interface control document) 从航电总线接口输出。

系统实现的数据流转关系如图 7 所示。

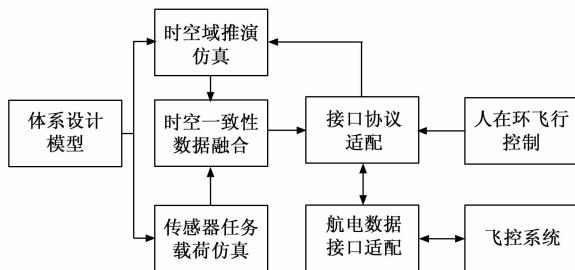


图 7 系统数据流转关系原理图

经过了接口协议适配后的数据内容包括:

- 1) 飞控接口: 传递飞行姿态信息, 如航向、俯仰和横滚角等;
- 2) 传感器接口: 传递传感器获取的图像数据, 包括红外图像、雷达图像或激光雷达图像;
- 3) 时间接口: 传递系统仿真的时间信息, 通过确保多领域仿真模型之间的时间同步, 能够实现精确的数据交互和协同操作;

为了能够说明基于模型的设计传递对飞控系统功能验证测试的影响, 系统场景建模设计了一个较为简单的对抗过程。飞机从起飞巡航, 发现对方目标, 飞机急速下降进行对抗。通过场景模型传递, 测试系统输出数据以及对飞控系统功能验证的影响。

在测试过程中, 推演场景模型定义了一架飞机从发现敌情, 快速起飞并抵达对抗地点, 然后进行速降和变轨, 完成空中对抗后进行平飞。整个飞行过程通过 6 自由度的飞控模型以及人在环的控制下完成时空域推演。推演过程实时采集飞行数据, 包括飞行轨迹、飞控参数等。

图 8 展示了基于上述场景下的飞控航路轨迹, 可以看到在图中的右下角以及中上的位置有两个明显的快速锐角变轨过程, 而常规飞行不会出现类似的明显航路变

化。该轨迹是在试验过程中通过人在环完成的航路规划。通过这类用户设计的业务场景中直接进行飞控测试, 可以完成满足设计定义的极限性能测试。

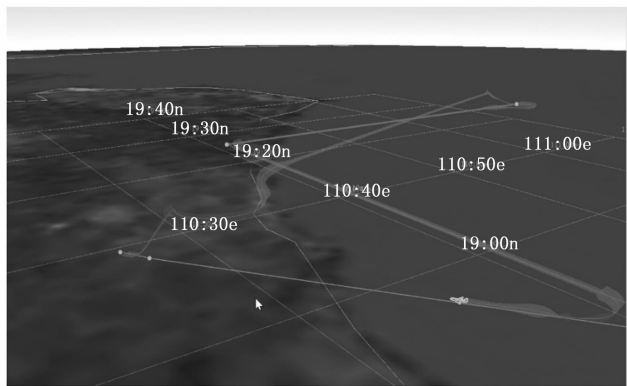


图 8 系统测试过程飞行轨迹

基于模型系统工程的飞控半实物测试系统在执行测试过程中, 由于使用数字模型驱动, 所以能够提供基于飞行包线的数据激励, 业务数据可以覆盖从起飞到降落的全过程, 能够准确基于业务场景提供数据激励, 确保飞控系统的业务逻辑符合性。

3.2 实验数据、曲线图等

系统采用 50 ms 的数据间隔对基于数字模型驱动的飞行器飞行过程进行数据采样, 分别采集了飞控设备测试过程中所需要的油耗、推力、俯仰、过载因子、升力、阻力、滚转、速度和高度等参数数据。飞行器从起飞到降落的全过程数据变化如图 9 所示。

由于系统测试过程中, 所有的飞行数据基于场景模型实现输出。本场景模拟了一个较为简单的对抗场景, 飞行过程中设计了一次有效对抗, 所以从上图的所有子图中可以看到有两次数据突变, 第一次数据突变是起飞急速升空, 第二次数据突变是由于双方对抗, 飞机急速下降。

3.3 结果分析

从图中可以看到, 和传统的半实物集成测试系统相比, 由于引入了数字化系统功能模型, 所以系统能够提供飞行器过程全包线的过程数据, 包括对抗过程的飞控数据。由于业务数据是真实反映飞行过程逻辑流程, 而不仅仅是设计极限数据, 能够从实际业务角度提供数据之间的依赖关系, 可以完全覆盖测试飞控设备的功能验证和性能边界测试。

基于模型系统工程的飞控系统测试平台直接使用系统设计的想定逻辑模型, 并配合典型业务场景构建飞行环境和航路规划, 因此和其他飞控系统测试平台的区别在于不仅可以提供更多的飞控参数配置, 而且数据内容和飞行场景密切相关, 因此飞控系统能够在业务场景下测试相应的功能和性能。

表 2 展示了本系统可以提供的基于业务场景的参数仿真集合, 并提供了与传统飞控系统测试平台的仿真参数的对比结果。

表 2 飞控系统仿真参数对比

参数名称	常规飞控系统测试平台	基于 MBSE 的飞控系统测试平台
业务想定 场景描述	不提供	提供, 从系统设计结果中迁移加载
纬度	提供, 需要单独构建业务场景	提供, 配合业务场景
经度	提供, 需要单独构建业务场景	提供, 配合业务场景
高度	提供, 需要单独构建业务场景	提供, 配合业务场景
偏航角	提供, 需要单独构建业务场景	提供, 配合业务场景
俯仰角	提供, 需要单独构建业务场景	提供, 配合业务场景
横滚角	提供, 需要单独构建业务场景	提供, 配合业务场景
速度	提供, 需要单独构建业务场景	提供, 配合业务场景
空间域	不提供	提供, 配合业务场景
损伤因子	不提供	提供, 配合业务场景
过载因子	不提供	提供, 配合业务场景
升力	不提供	提供, 配合业务场景
阻力	不提供	提供, 配合业务场景
燃料	不提供	提供, 配合业务场景

4 结束语

区别于传统的半实物测试系统, 本文研究了基于模型系统工程的飞控半实物测试系统设计。利用正向设计阶段所完成的系统模型直接传递到硬件在环的半实物仿真环境, 并以此建立模拟真实业务场景下的数字仿真环境, 从而尽可能在半实物测试系统中引入真实业务场景。

通过提供飞控设备的协同开发和集成验证环境, 建设系统正向设计和系统功能验证环境, 提升从感知层、中间层到任务层的协同飞控与导航设计及研发验证能力, 从而提高系统研发质量和研发进度, 进一步优化研发效率。

1) 通过基于模型的系统工程对飞控系统的外部应用场景进行分析和设计, 覆盖飞控系统的全流程业务交互模式, 确保飞控设备在验证环境下的正确业务数据交互。

2) 通过引入时空域推演仿真系统能够仿真模拟飞行器在飞行全过程的业务环境, 从而验证飞控设备在飞行全过程的功能和性能。

3) 通过基于时空一致的协同仿真和数据激励, 在飞行全过程的载荷仿真能够和具体业务场景保持一致, 从而验证飞控设备在复杂飞行环境下的功能和性能。

4) 通过推演仿真系统外接智能算法, 实现基于智能的飞控设备训练和测试, 从而提高飞控设备设计研发效能。

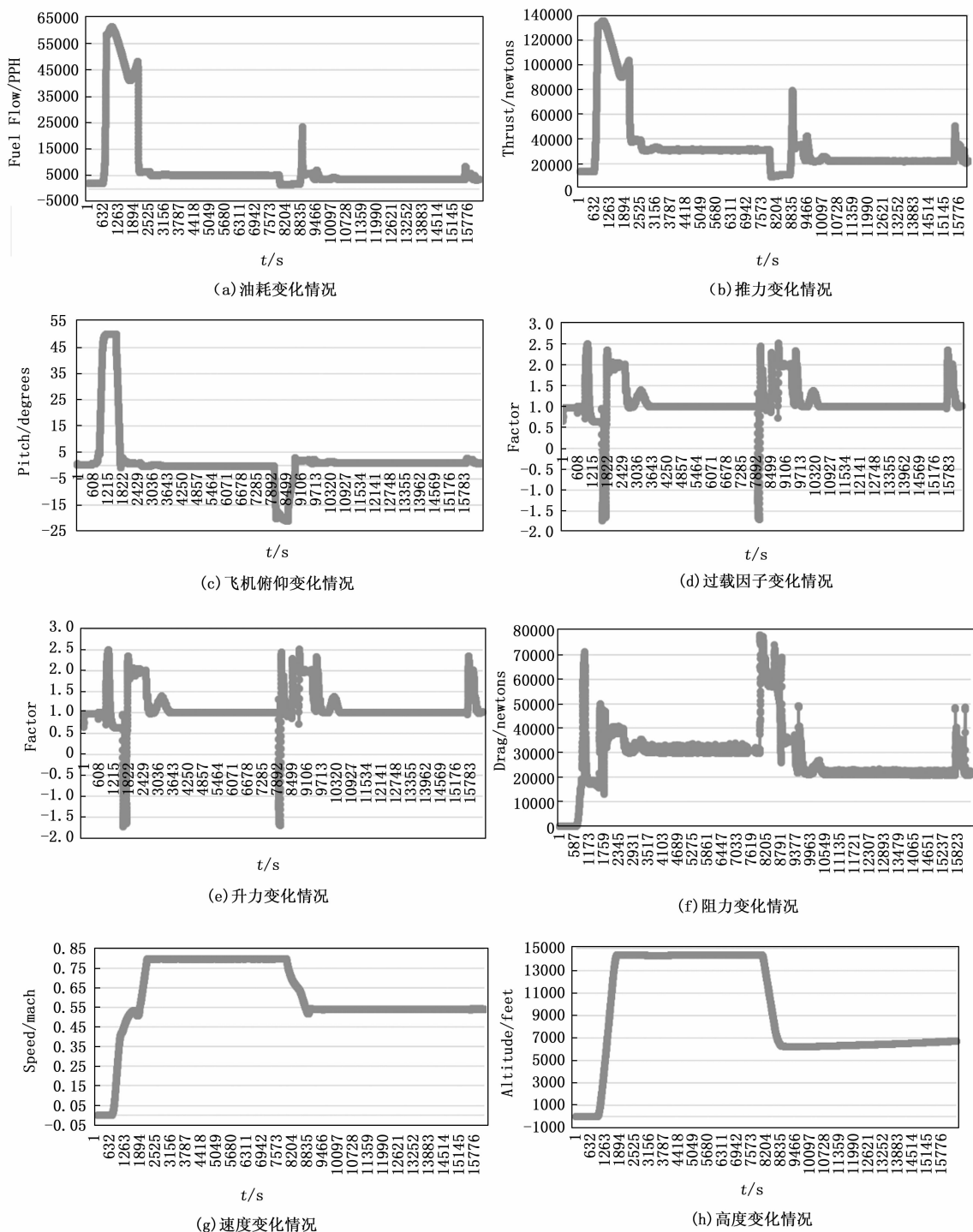


图 9 系统测试过程飞控参数对比

5) 为使本文提出的系统具备柔性扩展能力, 需要后续系统提供基于接口协议规范的数据适配工作, 确保系统能够适配不同型号的飞控设备, 并按照所要求的接口规范与飞控设备进行数据通信。

参考文献:

[1] 郑 国, 杨锁昌, 张宽桥. 半实物仿真技术的研究现状及

发展趋势 [J]. 舰船电子工程, 2016, 36 (11): 8-11.

[2] 黄瑞松, 李海凤, 刘 金, 等. 飞行器半实物仿真技术现状与发展趋势分析 [J]. 系统仿真学报, 2019, 31 (9): 1763-1774.

[3] 杨宝庆, 马 杰, 姚 郁, 等. 飞行器半实物仿真装备研究进展与展望 [J]. 宇航学报, 2020, 41 (6): 657-665.

(下转第 17 页)