

1-20-2024

## Driving Method of Virtual Multi-person Disassembly and Assembly Task for Aeroengine

Qiuwei Zeng

*Guangdong Provincial Key Laboratory of Computer Integrated Manufacturing, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China, zqw96@163.com*

Zhaoyong Hu

*Guangdong Provincial Key Laboratory of Computer Integrated Manufacturing, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China, zhy.hu@gdut.edu.cn*

Zhile Wang

*Naval Aviation University Qingdao Branch, Qingdao 266041, China*

Ruilin Zhang

*Guangdong Provincial Key Laboratory of Computer Integrated Manufacturing, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

# Driving Method of Virtual Multi-person Disassembly and Assembly Task for Aeroengine

## Abstract

**Abstract:** To meet the needs of virtual multi-person collaborative disassembly and assembly system for different disassembly and assembly tasks, this paper proposes a data-driven method with configurable task sequence. Taking an aeroengine prototype as the research object, the paper studies the task elements of multi-person collaborative disassembly and assembly. It parameterizes and expresses the task based on JSON (JavaScript object notation) and drives the task sequence by JSON parametrical files, defining the interactive operation of each task step. The practice shows that this method is applied to the multi-person collaborative disassembly and assembly system, which makes the system configurable and can drive the task flow according to the user-defined task sequence. The method can effectively improve deployment efficiency when dealing with multiple terminals and large tasks.

## Keywords

virtual disassembly and assembly, multi-person collaboration, aeroengine, parametric model, task-driven

## Authors

Qiuwei Zeng, Zhaoyong Hu, Zhile Wang, Ruilin Zhang, and Gang Zou

## Recommended Citation

Zeng Qiuwei, Hu Zhaoyong, Wang Zhile, et al. Driving Method of Virtual Multi-person Disassembly and Assembly Task for Aeroengine[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(1): 220-231.

# 面向航空发动机的虚拟多人拆装任务的驱动方法

曾秋玮<sup>1</sup>, 胡兆勇<sup>1\*</sup>, 王志乐<sup>2</sup>, 张锐林<sup>1</sup>, 邹刚<sup>2</sup>

(1. 广东工业大学 广东省计算机集成制造重点实验室, 广东 广州 510006; 2. 海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041)

**摘要:** 为满足虚拟多人协同拆装系统不同拆装任务的快速开发需求, 提出一种可配置任务序列的数据驱动方法。以某型航空发动机样机为研究对象, 研究了多人协同拆装的要素, 对任务进行基于 JS 对象图谱 (JavaScript Object notation, JSON) 的参数化设计与表达, 以 JSON 参数化文件驱动任务序列, 定义每一步任务的交互操作。实践表明: 该方法运用于多人协同拆装系统中, 使系统具备可配置性, 能根据自定义任务序列驱动任务流程; 在多端大任务量的情况下, 有效提升部署效率。

**关键词:** 虚拟拆装; 多人协同; 航空发动机; 参数化模型; 任务驱动

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)01-0220-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1026

**引用格式:** 曾秋玮, 胡兆勇, 王志乐, 等. 面向航空发动机的虚拟多人拆装任务的驱动方法[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(1): 220-231.

**Reference format:** Zeng Qiuwei, Hu Zhaoyong, Wang Zhile, et al. Driving Method of Virtual Multi-person Disassembly and Assembly Task for Aeroengine[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(1): 220-231.

## Driving Method of Virtual Multi-person Disassembly and Assembly Task for Aeroengine

Zeng Qiuwei<sup>1</sup>, Hu Zhaoyong<sup>1\*</sup>, Wang Zhile<sup>2</sup>, Zhang Ruilin<sup>1</sup>, Zou Gang<sup>2</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Computer Integrated Manufacturing, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;  
2. Naval Aviation University Qingdao Branch, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** To meet the needs of virtual multi-person collaborative disassembly and assembly system for different disassembly and assembly tasks, this paper proposes a data-driven method with configurable task sequence. Taking an aeroengine prototype as the research object, the paper studies the task elements of multi-person collaborative disassembly and assembly. It parameterizes and expresses the task based on JSON (JavaScript object notation) and drives the task sequence by JSON parametrical files, defining the interactive operation of each task step. The practice shows that this method is applied to the multi-person collaborative disassembly and assembly system, which makes the system configurable and can drive the task flow according to the user-defined task sequence. The method can effectively improve deployment efficiency when dealing with multiple terminals and large tasks.

**Keywords:** virtual disassembly and assembly; multi-person collaboration; aeroengine; parametric model; task-driven

## 0 引言

航空发动机作为复杂设备的典型代表, 其零

件数量达到上万级别, 具有研发技术难度极高、研发周期长、研发费用高昂、学科交叉度大等特

收稿日期: 2022-08-30 修回日期: 2022-11-06

基金项目: 海军装备维修保障 2022 年度计划项目(海航保计 [2021] 1116 号)

第一作者: 曾秋玮(1996-), 男, 硕士生, 研究方向为虚拟现实仿真。E-mail: zqw96@163.com

通讯作者: 胡兆勇(1976-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为虚拟现实技术、计算机仿真。E-mail: zhy.hu@gdut.edu.cn

点。提升航空发动机维修质量和效率对降低发动机报废率, 延长使用寿命, 保障飞机飞行安全有重要意义。

虚拟维修训练相较于传统“一带一”的实训具有训练周期短、训练频次高、沉浸性好和人员与设备安全性高等诸多优点<sup>[1]</sup>, 可突破传统实训的时间和空间的限制、降低训练成本、规避损坏设备的风险<sup>[2]</sup>, 近年来国内外的维修培训过程从实体化转向虚拟化的倾向越来越明显。Wang 等<sup>[3]</sup>利用 Leap Motion 采集远程专家手部动作, 通过投影的方式对现场实操人员进行指导。张青等<sup>[4]</sup>利用诺亦腾惯性动捕设备实现航空发动机高压压气机放气活门虚拟拆装训练。向锦鹏等<sup>[5]</sup>利用 Xsens MVN 全身动捕开发了多人协同航空发动机的维护系统。秦志南<sup>[6]</sup>开发了沉浸式虚拟装配系统, 并进行了可用性研究。国内企业海航技术上线了飞机舱门滑梯包的 VR 拆装培训<sup>[7]</sup>。国外具有代表性的有洛克希德·马丁公司为 F-35A 战斗机开发的飞行和维修的训练系统<sup>[8]</sup>, 搭配多媒体等教学方式, 已在艾格林空军基地第 33 战斗机联队中使用, 能实现该战斗机 95% 的训练。魏士松等<sup>[9]</sup>设计开发了桌面虚拟显示设备的航天器维修仿真系统。邵绪强等<sup>[10]</sup>设计开发了面向电力变压器的虚拟装配系统。然而在虚拟维修系统方面涉及多人协同的研究较少, 主要局限于单人交互<sup>[4,7,9-10]</sup>, 缺乏可配置性<sup>[4,7,9-10]</sup>, 使系统复用性差。

目前, 虚拟维修系统的拆装过程模型主要是基于图论的过程模型如有向图模型<sup>[11-15]</sup>、AND/OR 图模型和 Petri 网模型<sup>[16-18]</sup>。其中有向图由节点与有方向的边组成, 能够直观表示拆装节点的串行、并行等先后约束关系。系统可配置性主要体现在拆装过程序列的灵活性, 意味着可根据不同操作规程具象化为对应的有向图结构。如朱国涛等<sup>[11]</sup>开发的某型弹药虚拟维修训练系统可进行规程编辑, 实现单机桌面的维修培训; 胡兆勇等<sup>[12]</sup>针对虚拟装配系统提供了图形界面编辑功能以编辑序列, 提高虚拟装配系统开发的效率; 孙淑铨等<sup>[13-14]</sup>

以 XML 文件定义拆装序列, 开发了多人协同拆装的虚拟实训系统; 李荣强等<sup>[15]</sup>针对航空装备虚拟维修训练提出了复杂设备虚拟实训的快速开发流程, 采用有向图描述维修流程, 使系统具有复用性。但是以上过程模型的具象化方式主要使用 XML 数据驱动<sup>[12-14]</sup>, 一方面, XML 文件的传输和解析需要较大的时间开销<sup>[19]</sup>, 另一方面, 已有的多人协同系统涉及任务量较小<sup>[12-14]</sup>, 在网络环境中应对多端、大任务量的情况应该选择更加轻量化、高效的方式, 提升部署效率。

当前虚拟拆装系统可配置性研究较少, 为应对大任务量下提升多端部署效率的需求, 本文设计了一种可配置任务的虚拟多人协同拆装任务的驱动方法, 对拆装任务序列进行基于 JSON (JavaScript object notation) 的参数化设计与表达。结合网络同步技术, 基于 Unity3D 平台设计并开发了航空发动机虚拟多人协同拆装系统。在该系统中, 借助包围盒与碰撞检测技术, 学员依据给定的拆装序列实现常见的协同操作如抓取、抽出、传递、拧和多人搬运等。进一步地, 为便于拆装任务的编辑, 本文设计了便捷的拆装序列编辑方法, 开发人员只需在操作简易的电子表格中针对不同故障编辑拆装任务序列, 使用工具解析为 JSON 参数化配置文件, 即可对各端进行部署, 使系统具备可配置性, 提升了多端的部署效率。

## 1 虚拟多人协同系统设计与实现

### 1.1 系统功能与框架

根据实际拆装任务需求, 航空发动机的实际拆装对手势有一定的要求, 因此本文设计虚拟多人协同拆装系统需要采集用户的手势, 整体硬件架构如图 1 所示, 用户端由参训人员、Leap Motion、HTC VIVE Pro2 和客户端主机构成, 客户端主机通过网络连接服务器, 采用主流开发引擎 Unity3D 进行系统开发, 实现多端协同操作。

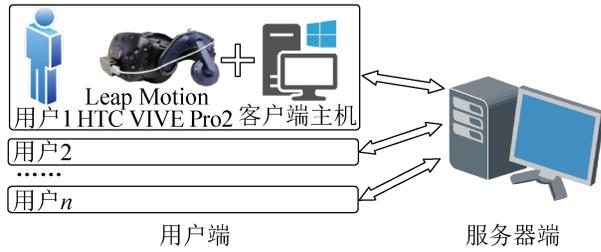


图 1 整体硬件架构  
Fig. 1 Overall hardware architecture

在系统设计中，为降低功能之间的耦合性，对主要功能进行模块化设计并封装。系统框架如图 2 所示，服务器和客户端均包含五大功能模块：

(1) 数据管理模块：数据管理模块是系统的基础模块，维修任务的进行必须以选择的参数化文件为基础，该模块主要用于管理参数化文件和场景资源。

(2) 网络模块：网络模块是系统的枢纽，建立服务端和多个客户端之间的通讯，以保证物体和用户的位姿同步、任务状态同步、手势状态的同步，其中任务状态的同步为从服务器到客户端的单向同步。

(3) 逻辑管理模块：逻辑管理模块是系统的核心模块之一，接收网络模块数据，提供解析 JSON 参数化文件功能、任务状态管理功能和人机交互功能，并向网络模块返回处理结果。

(4) 运动仿真模块：运动仿真模块是系统的核心模块之一，接收网络模块数据，负责对物体的重力、碰撞等物理特性计算求值，封装了物体的关键行为模型代码。

(5) 可视化模块：接收网络模块、逻辑管理模块和运动仿真模块的数据，对任务的指引、客户端操作和运动仿真进行可视化。

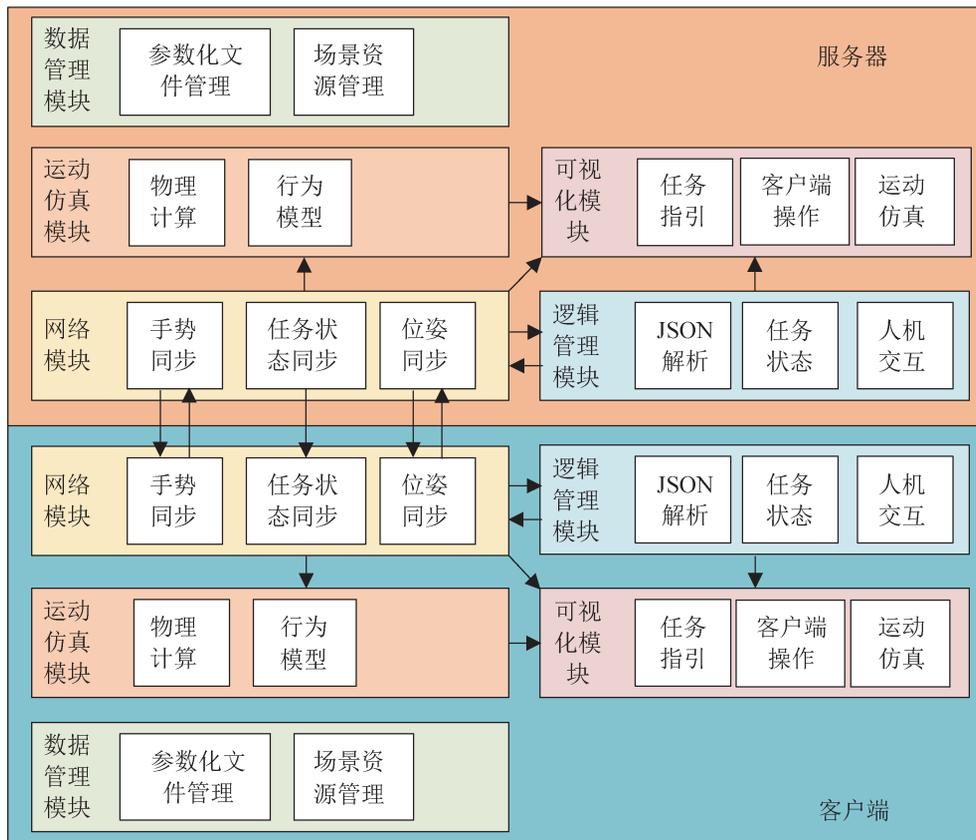


图 2 系统框架示意图  
Fig. 2 System framework

## 1.2 系统网络同步方案

目前基于Unity的主流网络框架主要有UNet、Photon、Normcore和Mirror。UNet易用性强,但性能和稳定性较差,且于2018年后缺乏维护,被Unity3D弃用;Photon和Normcore均为商用付费网络框架,无法自主部署服务器,就本文应用场景而言,无法保证安全性;Mirror基于UNet修复了大量问题并添加了新的特性,在保证易用性的基础上,显著增强了性能和稳定性,其开源的性质也利于检查、定制和拓展功能,可自主部署服务器,也保证了安全性。

综上所述,基于性能、稳定性和安全性的考虑,本文采用Mirror网络框架。从开发的的角度上看,Mirror网络框架特点是服务器与客户端使用同一套代码,其灵活性在于任一端均可选择作为服务器或客户端启动,使开发人员能够专注系统逻辑的实现,提升开发效率。Mirror提供了组件、方法特性和同步值类型。对于虚拟人的位姿同步,使用NetworkTransform、NetworkTransformChild组件,配合Final IK人体逆向动力学解算器实现虚拟人的位姿同步;对于拆装任务列表、手势标识等值类型,可在变量声明前使用“[SyncVar]”特性实现同步;对于方法调用,以“[ServerCallback]”标记只能在服务器运行的方法,以“[ClientRpc]”标记只能在客户端运行的方法,以“[Command]”标记客户端通知服务器执行的方法,使用OnStartServer和OnStartLocalPlayer等触发方法定义服务器和客户端的行为。

为了避免客户端与服务端之间脚本的相互影响,需要对逻辑对象做权限隔离(如图3),例如手势识别脚本、本地用户变换类脚本和本地UI面板对象等应当只在本地用户端上执行,只有本地客户端有权限;而物理计算仿真、任务推进逻辑和网络物体行为模型脚本等应当只有服务器拥有权限,通过服务器进行模拟、任务分配等运算。

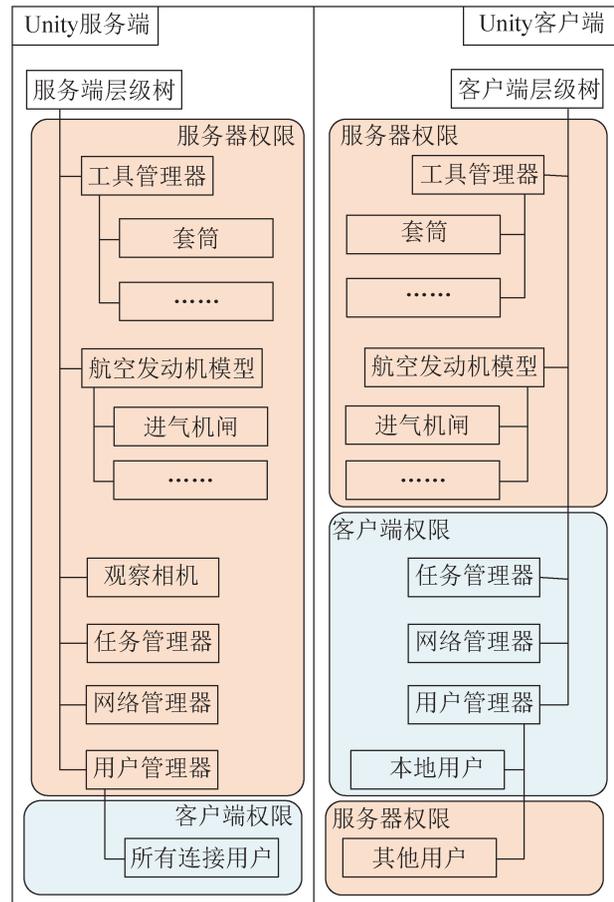


图3 系统权限隔离图

Fig. 3 System privilege isolation

## 2 基于JSON的任务驱动

面向航空发动机的虚拟多人协同拆装的每一步操作被看作一个工步任务,针对不同故障拆装的任务序列也不同,以文本代码的形式编辑特定故障的拆装任务序列有工作量大、程序高度专一化、复用性差的缺陷,明显不能满足多样化故障排除预演需求。因此,提升航空发动机拆装维修系统的可配置性具有重要意义。

数据驱动,指的是以一定的规则读取并解析外部参数化数据文件,从而达到驱动系统特定行为的目的。基于数据驱动的系统结构可减少大量重复代码,可有效降低驱动数据与系统行为的耦合性。以数据驱动的形式降低拆装任务的操作参数和系统行为之间的耦合度,将操作任务序列封装为参数化文件,以参数化文件驱动系统行为,

是提升系统的可配置性的有效路径。

数据驱动的数据源可以是函数外的数据集合、CSV表格、Excel表格、XML文件、JSON文件以及数据库等，从应用层面上看，以XML和JSON作为配置文件较为主流。相关研究<sup>[12-14]</sup>采用XML文件存储任务参数与序列，存在以下特点与可改进的方面：①在系统资源方面，系统遍历每一个XML节点以实现任务驱动，但是在任务序列长、单个任务涉及参数多时，其解析驱动过程较为占用系统资源；②在数据表达方面，参数一般可表达为“参数名称:参数值”形式的键值对，但XML文件仅仅针对任务属性进行标记，未能充分利用参数键值对表达的特性提升解析效率；③在系统开发方面，对XML的解析需要大量的判断和循环语句，导致开发代码冗长，对开发不够友好；④在多人操作方面，多端涉及网络传输，假设系统有50人进行虚拟训练，采用有效数据密集型的轻量化、反序列化速度快的配置文件是更好的选择。

JSON是一种轻量化、具有“自我描述性”的数据格式，具有序列化与反序列化速度快、便于网络传输、支持多种数据结构的优点<sup>[9]</sup>。与XML相比，JSON在轻量化上更具有优势，因而更适用于网络传输。JSON参数化数据包含键值对与列表的数据结构，无需像XML一样遍历所有节点逐个解析，可直接反序列化到对应属性，很好地对应了程序中的字典、列表等数据结构，可提升解析效率。

本文以JSON作为数据载体，在JSON中，将单一任务的参数名称和参数值结合表达为键值对，将每一个任务表达为一个对象，将所有任务对象的集合表达为一个列表，以此在数据层面实现任务的具体行为驱动和任务序列的驱动。

## 2.1 基于JSON的任务对象描述

单一任务的定义需要参考航空发动机的真实拆装维修操作，涉及拆装操作例举如表1所示，一个复杂的部件拆卸或安装的完整操作可视为若

干常见简单运动的组合，可抽象概括为公转、自转、平移、单手拾取、多手搬运5种运动类型。

表1 实际操作任务例举与分类

运动类型	操作对象	实际操作
公转	套筒	用套筒将螺栓拧松或拧紧
自转	高温合金螺栓	捏住对象使其自转
	反馈调整螺钉	用螺丝刀拧松/拧紧
平移	高温合金螺栓	插入或抽出螺栓孔
	转子叶片	从扇叶底座插入或抽出
单手拾取	转速传感器	单手控制对象位姿
	滑油回油管	
	滑油散热器	
	作动半环	
多手搬运	燃油喷嘴	多手共同控制对象位姿
	前整流锥	
	滑油箱	
	燃油总管	
	进气机闸	

真实拆装操作映射到程序中，以多个角度共同定义一个任务对象：①从任务本体看，应具备3个基本属性：任务序号、操作对象名称和操作对象同级对象关系。②从操作行为角度看，应当约束对象的操作方式，其操作方式可分为两类：自由移动的行为和带参数可调节的几何运动行为，其中自由移动的行为指单手抓取移动或多手协同控制位姿变换，应具备3个属性：操作模式、目标位置和手势；几何运动行为应具备5个属性：操作模式、轴向量、工具类型、工具轴向偏移量和目标值。③从运行时角度看，应具备3个运行时状态标识：碰撞体类型、触发器添加状态和完成状态。④从任务连贯性看，应具备2个序列属性：前序任务列表和后序任务列表。⑤从任务传达角度看，应具备2个操作提示属性：任务提示标题和具体信息。从操作行为角度出发，总结操作要素如表2所示。

在JSON参数化文件中以“{”和“}”组合表达一个对象，以“[”和“]”组合表达一个列表，以键值对的形式表达具体参数。所有任务集合

“Tasks”作为键,其值为由所有任务对象“Task”组成的列表,该列表中的每一个任务对象“Task”又由17个参数共同描述,因此JSON参数化文件

经读取解析为19个拆装序列参数,其名称及释义如表3所示。

表2 操作要素及执行效果  
Table 2 Operation elements and operation effect

抽象运动	所需参数	执行效果
公转	操作模式、公转轴、工具类型、工具轴向偏移值和目标值	使用指定工具根据公转轴和轴向偏移动态调节自然就位位姿,待手触发,使物体自转、工具绕公转轴旋转,一同达到目标角度
自转	操作模式、自转轴、工具类型、工具轴向偏移值和目标值	使用指定工具根据自转轴和轴向偏移动态调节自然就位位姿,待手触发,使工具和物体一同自转达到目标角度
平移	操作模式、移动方向、工具类型和目标值	使用指定工具,使物体根据移动方向平移目标距离
单手拾取	操作模式、目标位置、手势	为物体动态加载单手控制行为模型封装脚本,识别手势,实现单手自由控制物体位姿,放至目标位置
多手搬运	操作模式、目标位置、手势	为物体动态加载多手协同行为模型封装脚本,识别手势,实现多手协同控制物体位姿,放至目标位置

表3 拆装序列参数名称及释义  
Table 3 Name and interpretation of disassembly and assembly sequence parameters

运行时属性名称	数据类型	释义
Tasks	List<Task>	由所有任务组成的任务列表
Task	Task	自定义任务类
TaskID	int	任务序号
OperationalObject	GameObject	操作对象
OperationMode	(Enum) MoveType	操作模式
AbsAxis	Vector3	轴向量
TargetValue	float	目标值
ToolBias	float	工具轴向偏移量
DestinationTransform	Transform	目标位置
IsDone	bool	是否完成
IsMove_	bool	是否连带其他同级物体
OtherChildren		
ToolType	(Enum)ToolType	工具类型
PromptInfoTitle	string	任务提示标题
PromptInfo	string	任务具体信息
Gesture	(Enum)Gesture	手势类型
PreviousTaskIDs	List<int>	前序任务列表
NextTaskIDs	List<int>	后序任务列表
ColliderType	(Enum) ColliderType	碰撞体类型
TriggerBeAdd	bool	是否已添加触发器

## 2.2 任务驱动过程模型

任务的驱动包括激活任务、触发任务行为和检索后序任务3个步骤,涉及JSON配置文件中的Tasks、TaskID、TriggerBeAdd、ColliderType、PreviousTaskIDs和NextTaskIDs等属性。系统中需要定义总任务列表、未完成任务列表、可执行任务列表和已完成任务列表,四者可分别表达为数学集合 $U$ 、 $U_0$ 、 $U_1$ 、 $U_2$ ,集合内的元素均为任务序号。设某一任务序号为 $i$ ,任务数量为 $n$ ,则 $U$ 可表达为

$$U = \{1, 2, \dots, i, \dots, n\}, 1 \leq i \leq n$$

$U$ 、 $U_0$ 、 $U_1$ 、 $U_2$ 关系如下:

$$\begin{cases} U_0, U_1, U_2 \subseteq U \\ U_1 \subseteq U_0 \\ U_0 \cap U_2 = \emptyset \\ U_0 \cup U_2 = U \end{cases}$$

同理,每一任务包含预先定义的前序任务列表(PreviousTaskIDs)和后序任务列表(NextTaskIDs),两者也可表达为集合。前序任务集合用于判断任务是否满足激活条件。记第 $i$ 步的前序任务集合为 $P_i$ ,则 $P_i$ 的基数为 $|P_i|$ ,以 $d_i$ 表示任务 $i$ 对应的 $P_i$ 中已完成任务数量,则第 $i$ 步激活条件可表达为

$$d_i = |P_i| \quad (1)$$

记第  $i$  步的后序任务集合为  $N_i$ ，后序任务集合用于指向第  $i$  步完成后可激活的所有任务。基于前序任务集合和后序任务集合，设计了基于双序列的拆装过程有向图(图4)，该有向图的节点由  $i$ 、 $N_i$  和  $P_i$  共同组成， $i$  表示任务  $i$ ， $N_i$  用于指向节点  $i$  之后的节点， $P_i$  用于回溯  $P_i$  中完成节点个数以判定任务  $i$  是否可激活。

### 2.3 拆装任务的配置方法

为便于编辑拆装序列与操作过程，本文设计了 JSON 参数化文件获取的方法。在电子表格中将单个任务涉及所有 JSON 参数名定义为首行，其下每一行表示一个任务，依据第一列“TaskID”向下递增排列，如图 5 所示。解析工具以 Python 语

言编写，将表格内容提取为键值对后，借助关键指令 json.dumps 将表格内容存储为 JSON 配置文件。

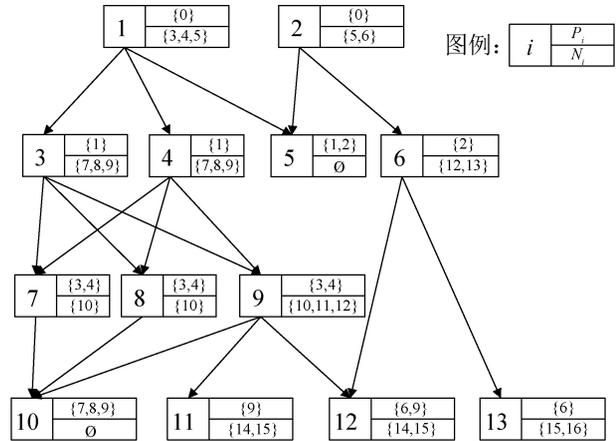


图 4 基于双序列的拆装过程有向图  
Fig. 4 Disassembly and assembly process based on double sequence

	A	B	C	D	E	F
1	TaskID	OperationalObject	OperationMode	AbsAxis	TargetValue	ToolType
2	1	进气机闸	MultiHandMove	null	0	Hand
3	2	传感器组	Move	null	0	Hand
4	3	五号传感器	Move	null	0	Hand
5	4	第一螺栓组螺栓	Rotate	left	50	TaoTong_R13
6	5	第一螺栓组	Translate	right	0.02	Hand
7	6	第一螺栓组	Move	null	0	Hand
8	7	第二螺栓组螺栓	Rotate	left	-50	Spanner
9	8	第二螺栓组	Translate	right	0.02	Hand
10	9	第二螺栓组	Move	null	0	Hand
11	10	第三螺栓组螺栓	Rotate	left	50	TaoTong_R13
12	11	第三螺栓组	Move	null	0	Hand
13	12	第四螺栓组螺栓	Rotate	left	50	Spanner
14	13	第四螺栓组	Move	null	0	Hand
15	14	第五螺栓组螺栓	Rotate	left	50	TaoTong_R13

图 5 电子表格中部分参数示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of some parameters of spreadsheet

### 2.4 任务序列的解析和驱动

C#提供的 File 类封装的 ReadAllText 方法可读取参数化文件，Unity3D 提供的 JsonUtility 类封装的 FromJson 方法可解析 JSON 参数化文件并反序列化为 Tasks 类，保留到内存中，完成任务部署。

任务序列的解析与驱动流程涉及关键数学表达如表 4 所示，根据本文任务驱动方法，系统任务驱动流程如图 6 所示。

针对本文拆装过程有向图(图4)，系统的任务驱动流程主要涉及以下 5 个步骤：

step 1: 多端联网请求 JSON 数据文件并解析，初始化  $U$ 、 $U_0$ 、 $U_1$ 、 $U_2$ 。

step 2:  $U_2$  中添加元素 0，以此为条件遍历所有任务，激活所有起始任务，为所有激活任务添加其 JSON 参数指定行为模型封装代码。

step 3: 任意任务  $i$  执行完成，更新  $U_0$ 、 $U_1$ 、 $U_2$ 。

step 4: 获取已完成任务  $i$  对应的  $N_i$ ，遍历  $N_i$ ，获取  $N_i[j]$  的前序任务集合，结合式(1)判断  $N_i[j]$  是否可激活。

step 5: 对可激活的任务进行激活, 赋予对应的行为模型封装代码, 提供正确的交互方式。

循环 step 3~5, 直至  $U_2=U$ , 表示所有任务已完成。

以图 4 中激活任务 9 为例, 任务 9 包含前序任务集合  $P_9$  和后序任务集合  $N_9$ , 集合  $P_9$  基数为 2, 则根据式(1), 任务 9 可激活的条件为

$$d_9=2$$

任务 9 激活后, 将根据此任务的 MoveType 参数对任务对象赋予可交互的行为模型封装组件, 借助碰撞检测技术检测完成情况。待任务 9 完成, 根据  $N_9$  检索任务 10~任务 12, 再对三者以式(1)分别判定是否可激活, 实现任务流程的

驱动。

表 4 任务驱动流程的关键数学表达

Table 4 Key mathematical expressions of task-driven processes

数学表达	含义	系统数据类型
$U$	总任务集合	List<int>
$U_0$	未完成任务集合	List<int>
$U_1$	可执行任务集合	List<int>
$U_2$	已完成任务集合	List<int>
$i$	任务序号	int
$P_i$	任务 $i$ 的前序任务集合	List<int>
$N_i$	任务 $i$ 的后序任务集合	List<int>
$P_i[k]$	任务 $i$ 的前序任务集合中第 $k$ 个任务	int
$N_i[j]$	任务 $i$ 后序任务集合中第 $j$ 个任务	int

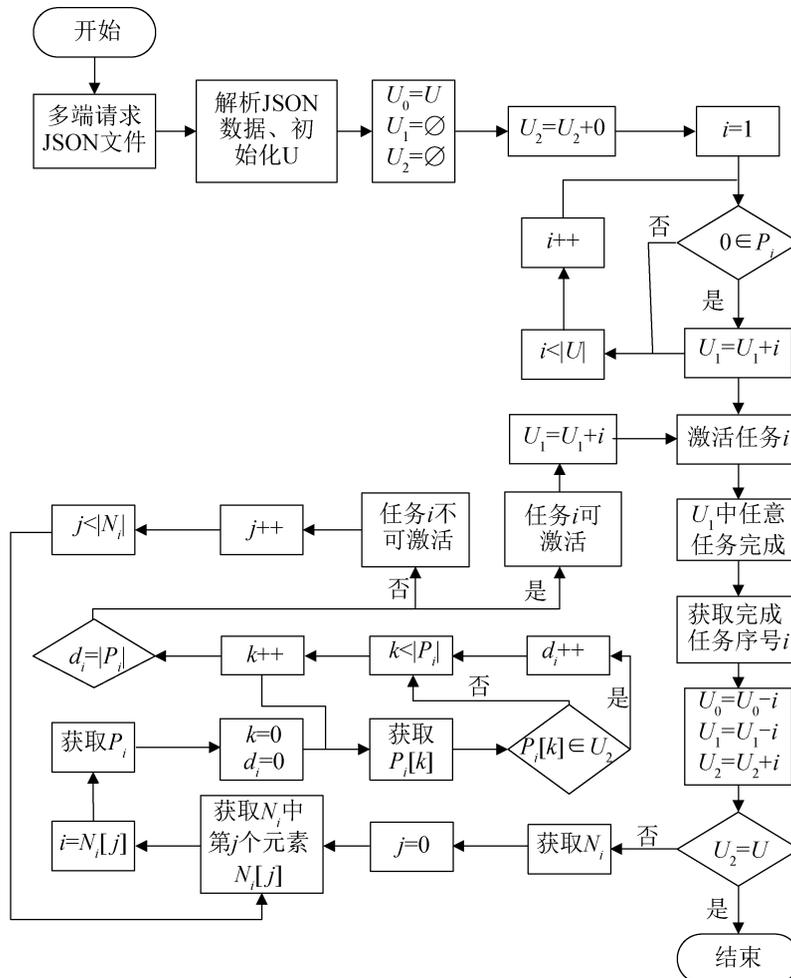


图 6 系统任务驱动流程

Fig. 6 Task-driven processes for system

### 3 任务驱动实例及实验验证

本文所展示模型为经轻量化处理的某型舰载机发动机样机，对拆装任务进行简化、合并，如同时拆装同级螺栓，最终简化为68个任务，以此样机的拆装系统开发与使用为例。根据本文参数化设计方法，在电子表格中对拆装过程参数进行编辑后，解析为JSON参数化文件，得到航空发动机拆装的JSON参数化文件实例如下：

```
{
  "Tasks": [
    {
      "TaskID": "1",
      "OperationalObject": "进气机闸",
      "OperationMode": "MultiHandMove",
      "AbsAxis": "null",
      "TargetValue": "0",
      "ToolBias": "0",
      "DestinationTransform": "进气机闸 des",
      "IsDone": "FALSE",
      "IsMove_OtherChildren": "FALSE",
      "ToolType": "Hand",
      "PromptInfoTitle": "拆除进气机闸",
      "PromptInfo": "使用多个手协同拆卸，并搬运到指定位置。",
      "Gesture": "Grasp",
      "PreviousTaskIDs": "0",
      "NextTaskIDs": "3,4",
      "TriggerBeAdd": "FALSE",
      "ColliderType": "Mesh"
    },
    .....
  ]
}
```

具体任务可转述为：该任务的序号为1，操作对象是进气机闸，该对象需要用多个手以抓握手势协同控制搬运至“进气机闸 des”位置，不受

轴、目标值和工具偏移值的影响，不需要对同级物体执行操作，提供了操作提示标题和操作提示信息，前序任务为0，后序任务包含3、4，行为触发器未添加，任务处于未完成状态，在系统中的碰撞体以精确多边形网格的形式设置。

系统经JSON数据驱动，对不同任务分配指定操作行为封装代码，为学员与操作对象提供人机交互操作，受驱动的任务交互过程效果如图7所示，任务执行效果如图8所示。

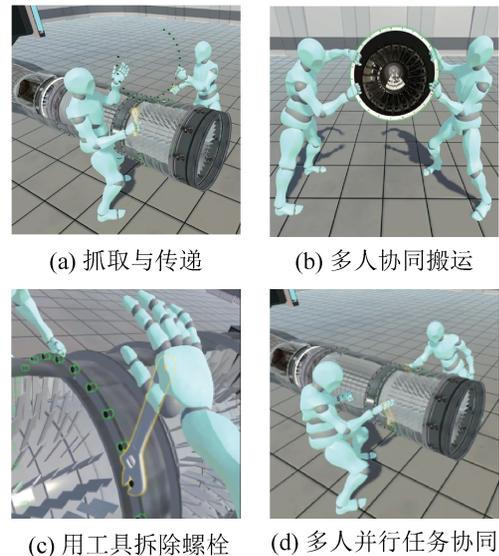


图7 任务交互过程效果图

Fig. 7 Effect drawing of task interaction process

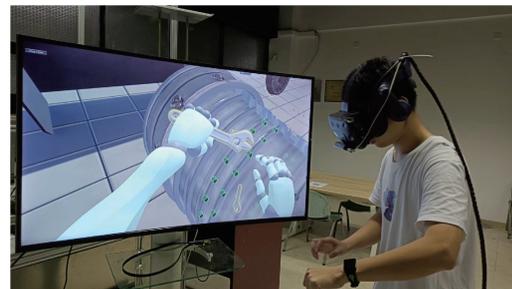


图8 任务执行效果图

Fig. 8 Effect drawing of task execution

在本系统的交互实时性测试过程中，以局域网为测试环境，测试计算机配置为 i7-11600KF CPU，16 GB RAM，NVIDIA GeForce RTX 3060Ti 显卡，HTC VIVE PRO2 头盔显示分辨率为 3 264×1 632。

往返时延(round-trip time, RTT)是衡量网络环境下的人协同操作多重要性能指标,表示从发送端发送数据开始,到发送端收到来自接收端的确认所经历的时延。本系统网络通信协议为TCP协议,经测试,本文系统交互过程RTT图如图9所示,RTT在8~16 ms,平均RTT为10.12 ms,拥有优良的多端即时协同性能。

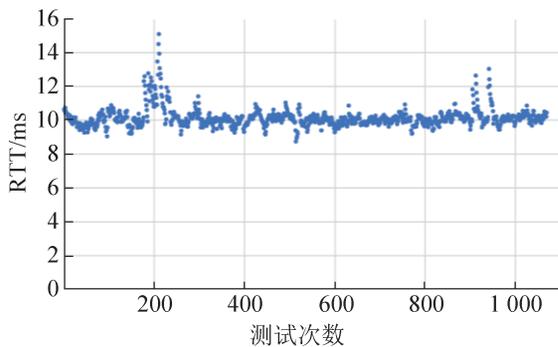


图9 系统交互过程RTT图

Fig. 9 RTT of system interaction process

画面每秒传输帧数(frame per second, FPS)为检测交互系统性能的重要指标, FPS越高则视感越流畅。经检测,系统FPS图如图10所示,在交互过程中, FPS最低为81.53,能稳定在89~91之间,具有优良的视感效果。

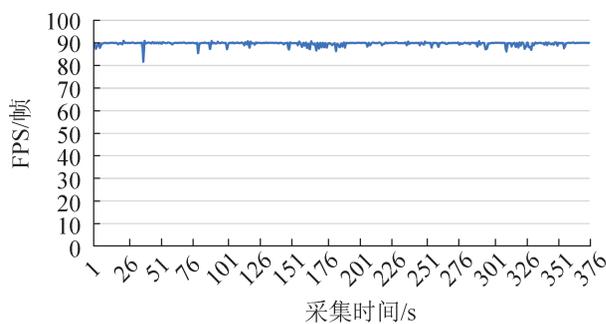


图10 系统交互过程FPS图

Fig. 10 FPS of system interaction process

针对大任务量的虚拟多人拆装训练,本文对比了包含了500、1 000、1 500、2 000个拆装任务的JSON和XML配置文件大小,结果如表5所示,对于本文任务配置文件,JSON文件体积平均比XML小28.10%,因而更适于网络环境下多端任务传输。

表5 大任务量拆装任务配置文件大小对比  
Table 5 Comparison of configuration file sizes with large tasks

任务数量	配置文件	占用空间/Byte	JSON较XML小/%
500	XML	271 795	27.98
	JSON	195 752	
1 000	XML	539 797	28.17
	JSON	387 754	
1 500	XML	811 535	28.10
	JSON	583 492	
2 000	XML	1 079 537	28.16
	JSON	775 494	

将包含1 000个任务的XML和JSON任务配置文件分别反序列化500次,进行反序列化时间对比,结果如图11所示,经统计,基于JSON的任务配置文件平均反序列化速度较XML快32.86%。

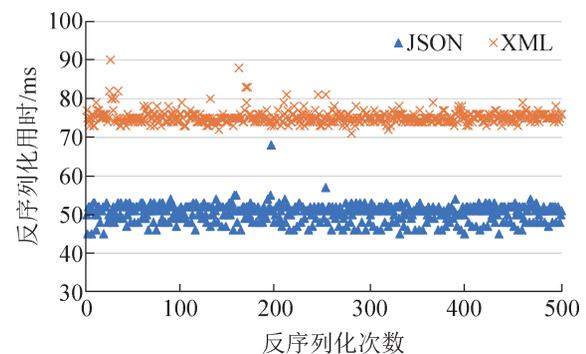


图11 任务配置文件反序列化时间对比图

Fig. 11 Comparison of task deserialization time

## 4 结论

本文设计了一种虚拟多人拆装任务驱动方法并集成于系统中。某型舰载机发动机的案例开发与使用证明了本方法能够使系统具备可配置性,能够实现多端任务部署与协同作业,系统交互性能良好。本文将操作任务描述为19个参数,存储为轻量化的JSON数据格式,相较于现有基于XML的任务驱动,更有利于多端的网络传输,减少反序列化时间,有利于大任务量的虚拟拆装维修任务部署,有效提升部署效率。

## 参考文献:

- [1] 罗智勇, 刘洁, 宋海方, 等. 虚拟训练在航空装备维修训练中应用的评估[J]. 航空维修与工程, 2020(11): 25-28.  
Luo Zhiyong, Liu Jie, Song Haifang, et al. The Evaluation of Virtual Training Application in Aviation Equipment Maintenance Training[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2020(11): 25-28.
- [2] 徐文胜, 武博, 蒋坚鸿. 武器装备虚拟维修训练系统行为树设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(7): 2722-2728.  
Xu Wensheng, Wu Bo, Jiang Jianhong. Design and Realization of Behavior Tree in Weapon Equipment Virtual Maintenance Training System[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(7): 2722-2728.
- [3] Wang Peng, Zhang Shusheng, Bai Xiaoliang, et al. 2. 5DHANDS: a Gesture-based MR Remote Collaborative Platform[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(5): 1339-1353.
- [4] 张青, 郑岩, 郭庆, 等. 航空发动机设备拆装快速装配仿真研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(3): 257-262.  
Zhang Qing, Zheng Yan, Guo Qing, et al. Simulation Research on Rapid Assembly and Disassembly of Aeroengine Based on Motion Capture Equipment[J]. Computer Simulation, 2018, 35(3): 257-262.
- [5] 向锦鹏, 赵斌, 张超智, 等. 多人协同航空发动机维护系统开发[J]. 科技资讯, 2021, 19(12): 51-53.  
Xiang Jinpeng, Zhao Bin, Zhang Chaozhi, et al. Development of Multi-person Cooperative Aero-engine Maintenance System[J]. Science & Technology Information, 2021, 19(12): 51-53.
- [6] 秦志南. 沉浸式虚拟装配系统的可用性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.  
Qin Zhinan. Usability Research of an Immersive Virtual Assembly System[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [7] 张焕然. 海航技术首推航空维修VR智能培训平台[J]. 航空维修与工程, 2019(4): 18-19.  
Zhang Huanran. HNA Technik Pioneers VR Platform in MRO Training[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2019(4): 18-19.
- [8] 吴思亮, 韩兵, 陈宇, 等. F-35A维修训练体系建设评析[J]. 航空维修与工程, 2018(4): 27-29.  
Wu Siliang, Han Bing, Chen Yu, et al. Analysis on F-35A MRO Training System[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2018(4): 27-29.
- [9] 魏士松, 周正东, 章栩苓, 等. 基于桌面虚拟现实技术的航天器虚拟维修训练系统[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(6): 1358-1363.  
Wei Shisong, Zhou Zhengdong, Zhang Xuling, et al. Virtual Training System for Spacecraft Maintenance Based on Desktop Virtual Reality[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(6): 1358-1363.
- [10] 邵绪强, 张浩伟, 冯小华. 面向电力变压器虚拟装配的多感官融合交互方法[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(10): 2244-2254.  
Shao Xuqiang, Zhang Haowei, Feng Xiaohua. Multi-sensory Fusion Method for Power Transformer Virtual Assembly[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(10): 2244-2254.
- [11] 朱国涛, 田涛, 王志乐. 某型弹药虚拟维修训练系统的设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(增1): 70-73.  
Zhu Guotao, Tian Tao, Wang Zhile. Design and Implementation for a Type of Ammunition's Virtual Maintenance Training System[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(S1): 70-73.
- [12] 胡兆勇, 何梓秋, 何汉武, 等. 虚拟装配系统开发中参数化模型表达与交互意图识别研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2021, 53(3): 113-121.  
Hu Zhaoyong, He Ziqiu, He Hanwu, et al. The Parametric Model Expression and Interactive Intention Recognition in the Virtual Assembly System[J]. Journal of South China Normal University(Natural Science Edition), 2021, 53(3): 113-121.
- [13] 孙淑铨, 胡兆勇, 吴悦明. 虚拟拆装训练产生式系统设计[J]. 装备制造技术, 2021(4): 1-7.  
Sun Shuquan, Hu Zhaoyong, Wu Yueming. Virtual Disassembly and Assembly Training Generative System Design[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2021(4): 1-7.
- [14] 孙淑铨. 虚拟实训中多人协同拆装的关键技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.  
Sun Shuquan. Research on the Key Technology of Multi-person Collaborative Disassembly and Assembly in Virtual Training[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.
- [15] 李荣强, 文爱兵, 花斌, 等. 航空装备虚拟维修训练仿真模型快速开发技术[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(5): 1167-1176.  
Li Rongqiang, Wen Aibing, Hua Bin, et al. Rapid Development Technology of Virtual Maintenance Training Simulation Model for Aviation Equipment[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(5): 1167-1176.
- [16] 张王卫, 苏群星, 刘鹏远. 虚拟维修拆卸序列智能规划研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(8): 1912-1918.  
Zhang Wangwei, Su Qunxing, Liu Pengyuan. Research on Virtual Maintenance Disassembly Sequence Intelligent Planning[J]. Journal of System Simulation,

- 2013, 25(8): 1912-1918.
- [17] 杨艳芳, 贺焕, 舒亮, 等. 基于时间Petri网的断路器虚拟装配系统研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(3): 310-317, 324.
- Yang Yanfang, He Huan, Shu Liang, et al. Research on Circuit Breaker Virtual Assembly Systems Based on Time Petri Net[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(3): 310-317, 324.
- [18] 钱文高, 马红岩, 耿宏. 动态重组子网的Petri网飞机虚拟维修过程建模与仿真[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(7): 93-99.
- Qian Wengao, Ma Hongyan, Geng Hong. Modeling and Simulation of Aircraft Virtual Maintenance Process Based on Petri Nets with Dynamic Reconfigurable Subnets[J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(7): 93-99.
- [19] 信俊昌, 王国仁, 李国徽, 等. 数据模型及其发展历程[J]. 软件学报, 2019, 30(1): 142-163.
- Xin Junchang, Wang Guoren, Li Guohui, et al. State of the Art Data Model and Its Research Progress[J]. Journal of Software, 2019, 30(1): 142-163.