

本文引用格式: 王芳,叶玲,彭彪.基于 MBSE 的体系设计与仿真验证平台[J].自动化与信息工程,2022,43(5):23-29.

WANG Fang, YE Ling, PENG Biao. Architectural design and simulation verification platform based on MBSE[J]. Automation & Information Engineering, 2022,43(5):23-29.

基于 MBSE 的体系设计与仿真验证平台*

王芳 叶玲 彭彪

(中国电子科技集团公司第二十八研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 根据大型复杂信息系统设计需要,从系统组成、技术架构、选型部署、实现方式等方面进行分析,提出基于 MBSE 的体系设计与仿真验证平台。该平台基于模型贯通了“需求分析-体系设计-仿真试验-评估分析”各阶段,为大型复杂信息系统的设计提供高效支撑手段。

关键词: 基于模型的系统工程; 体系设计; 仿真验证

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1674-2605(2022)05-0005-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2022.05.005

Architectural Design and Simulation Verification Platform Based on MBSE

WANG Fang YE Ling PENG Biao

(The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210014, China)

Abstract: Aiming at the requirements for designing and developing the large complex information system, a integrated architectural design and simulation verification platform is proposed. The components, technology architecture, selection and deployment, application scenarios of this platform were researched. This platform connects the stages of "Requirements Analysis - Architectural Design - Simulation and Verification - Analysis and Evaluation" based on model, and offers efficient supporting means for designing and developing the large complex information system.

Keywords: MBSE; architectural design; simulation and verification

0 引言

随着信息系统的复杂性、规模、研制难度不断增大,基于文档开展信息系统设计的传统系统工作模式,逐渐暴露出理解不一致、成果难复用等问题。基于模型的系统工程(model-based systems engineering, MBSE)是一种形式化的建模方法,利用数字化建模取代文档编写,可提升信息系统设计的规范性和研发效率,是大型复杂信息系统研制模式发展的方向。

国外大型组织和企业,如 NASA、ESA、雷神公司、波音公司等,将 MBSE 理论方法及相关工具应用于大型装备的立项论证、方案设计、运用研究等环节,取得良好效果^[1]。国内对 MBSE 的研究和应用正快速发展。在航天航空、船舶等领域大型装备设计研制中,

MBSE 有效解决了各方描述语言不统一、理解认识不一致、跨领域数据模型传递困难等问题,如运用 MBSE 理念方法实现航天器创新研发、空空导弹系统架构建模、直升机研发设计流程落地等^[2-5]。在复杂信息系统领域,MBSE 研究应用还处于起步阶段,尚未形成完整的全流程解决方案与产品。

本文面向大型复杂信息系统设计需求,提出基于 MBSE 的体系设计与仿真验证平台,并详细分析平台的组成、架构、实现及应用流程,可支撑大型复杂信息系统体系分析设计以及设计成果仿真评估。

1 MBSE

MBSE 的概念由国际系统工程学会在 2007 年的

* 基金项目: 中国电科发展资金项目(XC2019ZN005)

《系统工程 2020 年愿景》中正式提出。它是一种建模方法的形式化、规范化应用，用于支持系统需求、设计、分析、验证和确认活动。与传统基于文档的系统工程方法不同，MBSE 方法强调模型在设计验证中的核心作用，从系统设计的需求分析到评估分析阶段，传递模型包括要素、关系、活动等信息。通过模型的不断增加、验证和完善，实现大型复杂信息系统的设计全过程。采用 MBSE 方法，可达到知识表达一致性、

模型可重用性、设计验证一体化等目标，解决了复杂系统带来的问题和挑战^[6]。

2 平台设计

2.1 平台组成

基于 MBSE 的体系设计与仿真验证平台由需求分析、体系设计、仿真试验、评估分析以及可视化等部分组成，如图 1 所示。

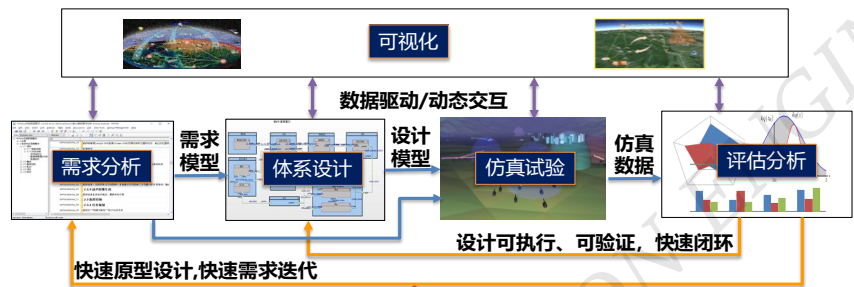


图 1 基于 MBSE 的体系设计与仿真验证平台组成

2.2 平台技术架构

基于 MBSE 的体系设计与仿真验证平台的技术

架构自下而上分别为资源层、服务层、应用层，如图 2 所示。



图 2 基于 MBSE 的体系设计与仿真验证平台技术架构

2.2.1 资源层

资源层为本平台提供运行所需的基础环境和资源库。平台采用国产操作系统、数据库及办公软件，汇集存储设计参考资源库、仿真模型库、知识库等各

类基础资源。

2.2.2 服务层

服务层包括基础服务和应用服务 2 部分。基础服务包含服务运行支撑、数据访问、分布式处理框架、

网络传输、日志管理等服务。其中，服务运行支撑按需对各类服务进行组织调度和运维管理；数据访问实现知识内容等数据资源的使用；分布式处理框架为多个用户并行处理提供支撑；网络传输为平台以及其他试验环境、物理系统、模拟器等提供网络传输；日志管理为平台提供日志记录服务。

应用服务包括通用应用服务、需求分析应用服务、体系设计应用服务、仿真试验应用服务、评估分析应用服务。其中，通用应用服务为上层各类应用服务提供通用支撑。可视化服务提供 GIS、体系结构视图、通用图表等呈现手段，可对平台分析设计过程、仿真试验过程以及评估分析结果进行呈现；资源管理提供设计参考资源和模型的统一管理及维护能力，提供基于元数据的建模和管理能力，支撑复杂信息系统从需求分析、体系设计、仿真试验各阶段建模和使用。需求分析、体系设计、仿真试验、评估分析等 4 类应用服务，为应用层不同的应用场景提供服务支撑。

2.2.3 应用层

应用层基于服务层提供的各类基础服务和应用服务，面向复杂信息系统论证、设计、评估等应用场景，进行体系设计和仿真验证活动。

3 平台实现

3.1 软硬件选型部署

基于 MBSE 的体系设计与仿真验证平台由 7 个前台席位、4 个后台服务器以及网络交换设备等构成，如图 3 所示。其中，前台桌面计算机、后台服务器、接入交换机、操作系统、数据库、办公软件等软硬件选型如表 1 所示。

表 1 平台软硬件选型表

软件/硬件	选型
前台桌面计算机	飞腾 CPU FT2000A，4 核，1.7 GHz
后台服务器	申威 CPU SW1621，16 核，1.7 GHz
接入交换机	迈普，24 个电接口、4 个光口
桌面操作系统	银河麒麟桌面版操作系统 V4.0.2
服务器操作系统	中标麒麟服务器操作系统 V5.0
数据库	达梦数据库管理系统 V7.0
办公软件	中标普华办公软件专业版 V6.0

桌面计算机按照功能设定分别部署需求分析、体系设计、仿真试验、评估分析、模拟器、实装系统等工具软件；服务器分别部署应用服务、基础服务、模型数据服务等。

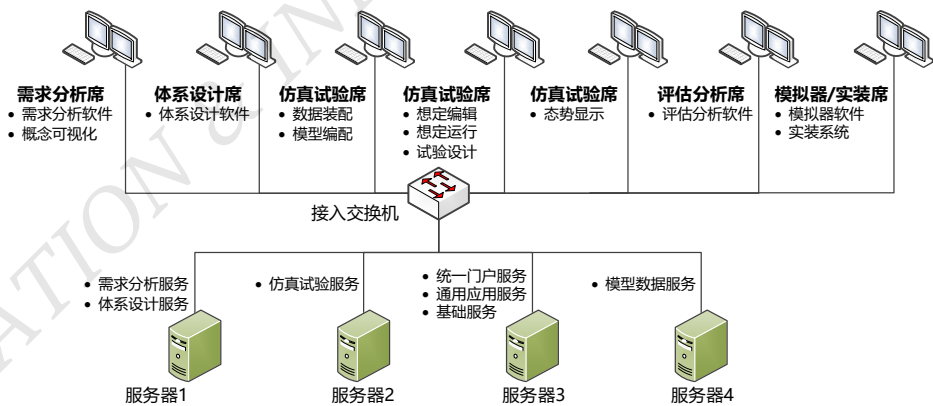


图 3 基于 MBSE 的体系设计与仿真验证平台软硬件部署

3.2 体系设计建模与验证实现

根据元模型理论，体系结构设计涉及元元模型层、元模型层和模型层 3 个层次，以及元建模过程和基于元模型建模 2 个过程^[7]，如图 4 所示。

元元模型层是对实体及其相互关系的基础描述，

为实体定义了数据结构规范，为关系定义了表示风格规范。复杂信息系统体系结构高层抽象的可视化模型由实体集和关系集构成。

元模型层是元元模型通过元建模过程对元元模型层的实体集和关系集中相关元素的实例化得到，对

体系结构各类模型元素的数据结构和表示风格进行定义。

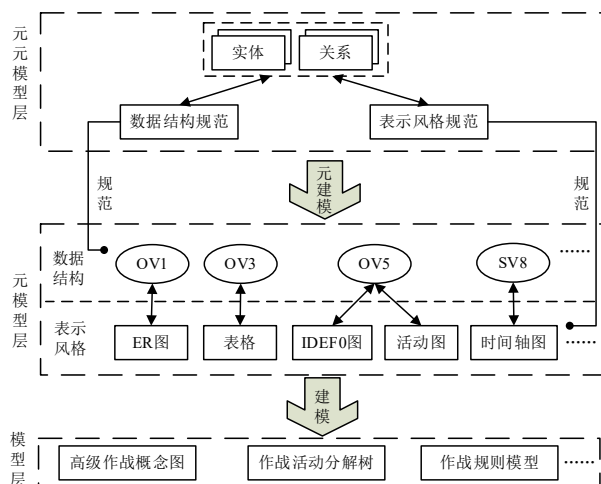


图4 核心实体之间的相互关系

模型层基于元模型建模得到，是面向用户的各种体系结构设计视图模型。在模型层，本平台借鉴美国国防部体系结构框架（department of defense architecture framework, DoDAF）2.0版^[8-9]，对全视图、能力视图、作战视图、系统视图等体系结构视图进行选用、修改、新增，满足大型复杂信息系统体系设计需要。

体系结构设计成果通过语法信息、语义信息和语用信息表示。体系结构设计中存在设计不规范、数据不一致、不能满足实际需求等问题，就是语法层、语义层和语用层的设计问题。本平台基于3层模型框架，从语法、语义、语用3个方面，对设计模型的数据、信息进行分析检查，验证模型设计是否完整、准确。其中，语法层主要验证设计内容是否完整、形式是否规范、描述是否准确，如设计某拦截弹接收指挥中心指令实施拦截的活动视图时，检查设计人员是否完整填写“拦截活动”所需的4个前提条件，若有遗漏或错误则给出相关提示；语义层主要验证设计结果的合理性，采用基于Petri网的流程合理性验证技术，将设计成果的信息流程、业务流程等相关模型转换为可执行仿真的Petri网模型，验证是否存在流程冲突、思索、重复循环等情

况；语用层主要验证设计对象的性能和效能是否满足需求，如分析体系中各单元的负载性、信息传输能力等。

3.3 设计与仿真模型传递实现

体系设计模型与仿真模型之间的差异较大，因此体系设计与仿真试验之间的数据贯通、模型传递是平台实现工具较链的难点。按照不同阶段模型描述抽象要求的不同，需求分析、体系设计阶段建立概念分析设计模型，成果是表征作战能力、作战活动、系统组成等视图模型；仿真试验阶段建立数字仿真模型，形成各类舰艇、作战飞机等实体装备模型，传感、通信、电子干扰等组件模型，以及机动、规避、拦截等行为模型。“体系设计-仿真试验”模型框架如图5所示。

模型驱动工程（model driven engineering, MDE）是一种围绕模型和建模技术的聚集或综合，提倡在整个开发过程中使用模型，基于UML标准框架，支持软件设计模型可视化、存储与交换^[10]。MDE的重要实现手段之一就是模型转换技术，将一个模型转换为同一个系统的另一个模型，包括模型到模型（M2M）的转换和模型到文本（M2T）的转换2大类。

在“体系设计-仿真试验”的模型转换过程中，本平台采用基于SysML的建模统一框架，设定“概念-仿真-算法”3类元模型，借助XML和M2M方法，实现模型要素的传递和交互，支撑设计成果向仿真传递和结构化数据追踪。通过体系设计与仿真试验功能模块之间基于模型和数据的较链，体系设计结果可仿真、验证、确认，能够将验证从研发后前移到研发前，达到提前暴露论证设计阶段问题的目的。

3.4 异构资源分布式仿真实现

在复杂信息系统仿真验证环节，涉及实况仿真（L）、虚拟仿真（V）、构造仿真（C）等不同类型的资源，这3类资源在软件形态、运行模式、技术体制、接口标准等方面均不相同。其中，“L”具备真实世界的系统或设备，人在环中的模拟仿真能力，提供逼真的业务处理能力；“V”具备虚拟装备，人在环

中的模拟仿真能力，以数字化模拟器形式提供典型装备模型；“C”具备虚拟装备，人不在环中的模拟仿真能力，提供算法级的传感器、作战平台、干扰机等

模型。

为支撑 L、V、C 这 3 类异构资源的集成运用，构建分布式仿真运行支撑平台，如图 6 所示。

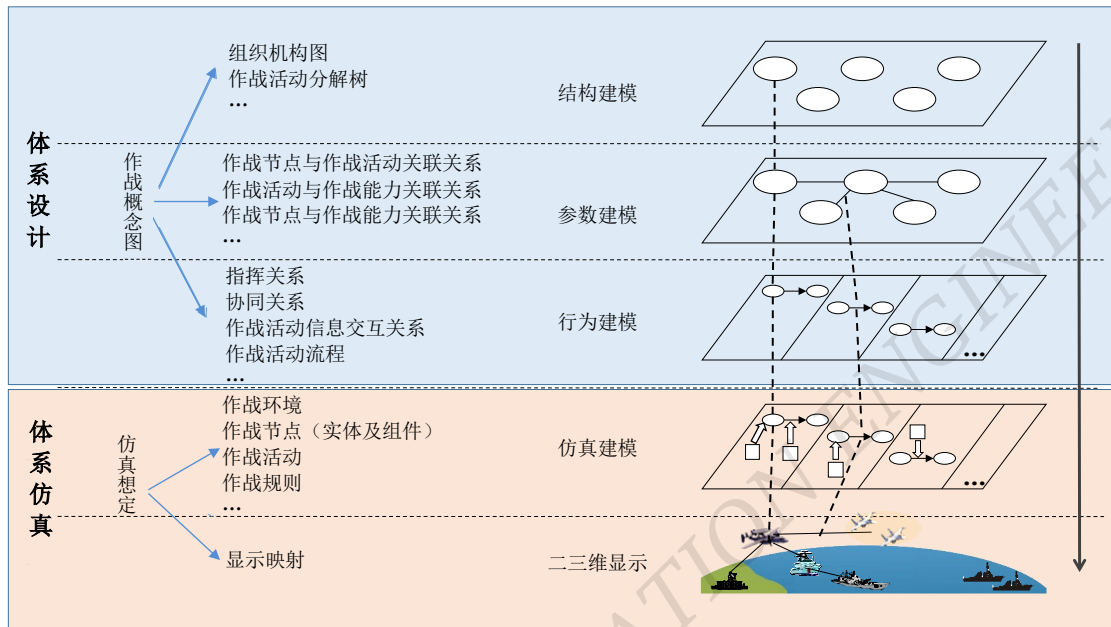


图 5 “体系设计-仿真试验”模型框架

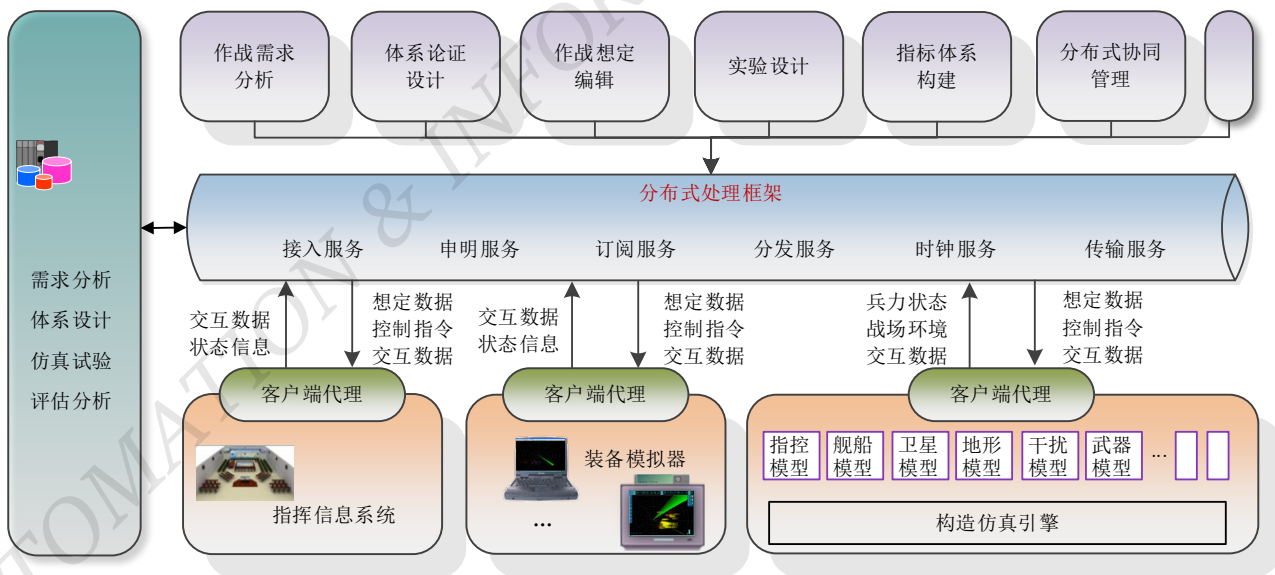


图 6 面向 LVC 集成的仿真运行支撑平台

面向 LVC 集成的仿真运行支撑平台提供分布式仿真集成服务，包括接入服务、订阅服务、分发服务、成员管理、时钟服务、传输服务等，为异构仿真资源

的集成提供公共支撑^[11]。基于分布式仿真运行支撑平台，能够开展“分布式虚拟仿真”和“构造式仿真”及其混合应用，具备“人在环中”、“超实时”等典

型仿真模式；能够提供体系级仿真推演所需的大规模、高复杂度的作战场景模拟功能。

4 平台应用

以某大型复杂信息系统论证设计方案为例，介绍基于 MBSE 的体系设计与仿真验证平台的具体应用

过程。某大型复杂信息系统作为整个业务场景的核心节点，对整体效能的发挥起关键作用。为确保该系统论证设计的合理性和有效性，指导后续研制开发，需要在设计阶段提前对成果进行验证评估，主要应用过程如图 7 所示。

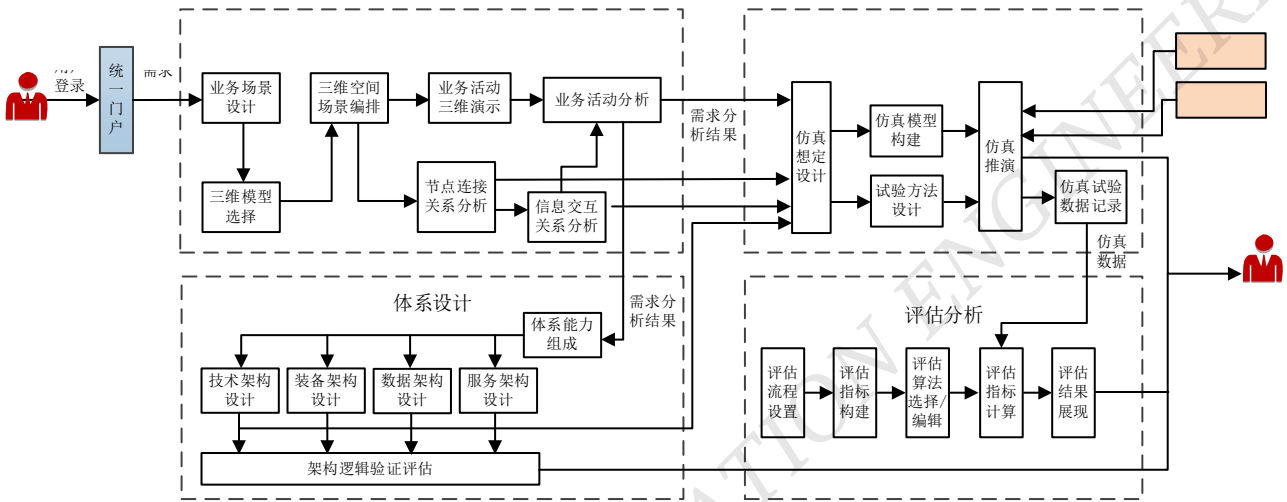


图 7 体系设计与仿真验证平台应用过程

用户通过统一门户登录平台，选择需求分析工具页面进行体系需求分析。概念可视化工具支持在三维数字空间设计系统运行的业务场景，对各装备的运行轨迹和活动顺序进行编排运行，便于用户确认业务场景概念。相关的场景节点及相互关系数据导入需求分析视图建模工具，生成节点连接关系视图模型。业务活动过程数据导入生成业务活动视图模型，进一步构建信息交互关系等视图模型，完成需求分析过程。

基于需求分析视图模型，采用体系设计工具分析得到体系能力组成，并开展系统技术架构、装备架构、数据架构、服务架构等视图模型构建；再对体系设计模型进行模型完备性、对象完备性、流程完备性、实例一致性、关联一致性等验证；根据验证结果调整优化体系设计模型。

需求分析和体系设计的相关视图模型，能够传递给仿真试验工具，作为仿真想定设计的基本输入和仿真推演的初始态势信息。根据仿真想定构建所需的仿真模型，集成其他物理系统和模拟器，按照仿真目的

进行试验方法设定和试验因子设计，构建试验样本库，进行多轮次仿真试验，得到仿真试验数据。

评估分析工具支持用户设置评估流程、构建评估指标，选择或编辑评估计算方法，依据仿真试验数据、其他实测数据、人工输入数据等进行评估计算，并图形化展示被评系统在体系中作用和能力的评估结果，辅助用户优化论证设计方案。

5 结论

面向大型复杂信息系统设计需求，本文提出基于 MBSE 的体系设计与仿真验证平台，分析了平台组成、技术架构、选型部署及具体实现，并给出了典型应用过程。本平台对提高大型复杂信息系统的论证、设计及验证水平，能够发挥重要作用。

参考文献

- [1] 王崑声,袁建华,陈红涛,等.国外基于模型的系统工程方法研究与实践[J].中国航天,2012(11):52-57.
- [2] 姬晓慧,陈国定.MBSE 方法论实施方法研究[J].中国新技术

- 新产品,2022(4):33-38.
- [3] 刘红杰,窦骄,沈鹏,等.一种基于 MBSE 的小卫星测控分系统建模设计方法[J].遥测遥控,2022,43(3):54-61.
- [4] 范海涛,刘霞,赵伶丰,等.运用 MBSE 理论和方法实现航天器创新研发[J].网信军民融合,2020(7):22-26.
- [5] 浦乐,王西超,杨艺.基于 MBSE 与 SysML 的空空导弹系统架构建模研究[J].航空科学技术,2020,31(2):54-59.
- [6] 陆法,占国熊.试析 MBSE 方法论及应用研究[J].电脑编程技巧与维护,2015(24):37-38.
- [7] 占国熊.基于 MBSE 的武器装备体系元建模与分析方法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2015.
- [8] 蔡骏,王超,马驰.基于 DoDAF 的陆军信息系统装备体系需求分析方法[J].指挥信息系统与技术,2021,12(2):55-59,69.
- [9] DoD Architecture Framework Working Group. The department of defense architecture framework(DoDAF) version 2.0[R]. Washington. D.C:2009.
- [10] 陈睿.基于 MDE 的分布式实时嵌入式系统分析[J].信息与电脑(理论版),2016(8):32-34.
- [11] 蔡继红,卿杜政,谢宝娣.支持 LVC 互操作的分布式联合仿真技术研究[J].系统仿真学报,2015,27(1):93-97.

作者简介:

王芳,女,1983年生,硕士,高级工程师,主要研究方向:联合作战指挥信息系统体系验证评估。E-mail: 13813968805@163.com

叶玲,女,1986年生,硕士,高级工程师,主要研究方向:联合作战指挥信息系统体系验证评估。

彭彪,男,1990年生,博士,工程师,主要研究方向:联合作战装备体系仿真验证。

(上接第16页)

参考文献

- [1] BOHADANA A B, PESLIN R, UFFHOLTZ H, et al. Potential for lung sound monitoring during bronchial provocation testing[J]. Thorax, 1995,50(9):955-961.
- [2] HARDIN J C, PATTERSON J L. Monitoring the state of the human airways by analysis of respiratory sound[J]. Acta Astronautica, 1979,6(9):1137-1151.
- [3] AHLSTROM C, HULT P, RASK P, et al. Feature extraction for systolic heart murmur classification[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2006,34(11):1666-1677.
- [4] NERSSISSON R, NOEL M M. Heart sound and lung sound separation algorithms: a review[J]. Journal of Medical Engineering & Technology, 2017,41(1):13-21.
- [5] SHAH G, KOCH P, PAPADIAS C B. On the blind recovery of cardiac and respiratory sounds[J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2015,19(1):151-157.
- [6] ZHANG Z, DONG Z, LIN H, et al. An improved bidirectional gated recurrent unit method for accurate state-of-charge estimation[J]. IEEE Access, 2021,9:11252-11263.
- [7] HINTON G, VINYALS O, DEAN J. Distilling the knowledge in a neural network[J]. arXiv preprint arXiv:1503.02531, 2015, 2(7).
- [8] 陈骏霖,张财宝.几种循环神经网络和时频掩码在心肺音分离中的应用[J].自动化与信息工程,2020,41(1):39-44.
- [9] PhysioNet. Classification of normal/abnormal heart sound recordings: the physionet computing in cardiology challenge 2016[DB/OL].(2018-08-13)[2019-01-26]. <https://physionet.org/content/challenge-2016/1.0.0/>
- [10] Welch Allyn. Student clinical learning [DB/OL]. (2019-01-26) [2019-01-26]. <https://diagnosis101.welchallyn.com/auscultation/educational-topics/sounds-pathologies/>

作者简介:

林家荣,男,1997年生,硕士研究生,主要研究方向:模式识别、机器学习、生物信号处理。E-mail:1440645304@qq.com

郑凯文,男,1994年生,硕士研究生,主要研究方向:模式识别、机器学习、生物信号处理。E-mail: kwenzheng@126.com

甘兆明,男,1995年生,硕士研究生,主要研究方向:模式识别、机器学习、生物信号处理。E-mail: 1803158832@qq.com

谢仕宇,男,1997年生,硕士研究生,主要研究方向:模式识别、机器学习、生物信号处理。E-mail: 398462377@qq.com

郑君锐,男,1997年生,硕士研究生,主要研究方向:模式识别、机器学习、生物信号处理。E-mail: 1016202705@qq.com