



## 船用电机启动控制电路故障诊断虚拟仿真实验

杨少龙<sup>1,2</sup>, 向先波<sup>1,2</sup>, 李志恒<sup>1,2</sup>, 王 迪<sup>3</sup>, 侯延岫<sup>4</sup>

(1. 华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 船舶和海洋工程水动力湖北省重点实验室, 武汉 430074;  
3. 大连海事大学 船舶电气工程学院, 大连 116026; 4. 大连惠风教育技术有限责任公司, 大连 116026)

**摘要:** 三相异步电动机控制电路故障排查是实验教学的重难点。实物教学存在故障设计排查成本高、强电操作危险大、电路分析验证难等弊端, 且商业电气设计仿真软件又不适合学生入门学习。因此, 设计船用电机启动控制电路故障诊断虚拟仿真实验。逼真呈现船舶管系运行场景、电控柜及电器元件组成, 着重还原真实故障电路状态与排查过程, 实现故障随机模拟与任意节点电压电阻自主测量等。该虚拟仿真实验已成功应用到本科实验教学, 起到了良好的实验教学效果。

**关键词:** 三相异步电动机; 虚拟仿真; 实验教学; 星三角启动; 训练考核; 随机模拟

中图分类号: TM343

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20200546

## Virtual Simulation Experiment on Fault Diagnosis of Ship Motor's Starting Control Circuit

YANG Shaolong<sup>1,2</sup>, XIANG Xianbo<sup>1,2</sup>, LI Zhiheng<sup>1,2</sup>, WANG Di<sup>3</sup>, HOU Yanshen<sup>4</sup>

(1. School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;  
2. Hubei Key Laboratory of Naval Architecture & Ocean Engineering Hydrodynamics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. School of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;  
4. Dalian Huifeng Education Technology Co., Ltd, Dalian 116026, China)

**Abstract:** Troubleshooting of a three-phase asynchronous motor's control circuit is a critical knowledge point for experimental teaching. However, object teaching faces with challenges of high cost of fault design and detection, high risk of high voltage at live working, and hard verification of circuit analysis. Besides, commercial electrical design simulation software is not suitable for students to learn as elementary course. Therefore, a virtual simulation experiment of the fault diagnosis of the ship motor's control circuit is designed. It could simulate real piping system working scenario, control cabinet and electrical parts in a three-dimensional virtual reality model. By restoring running status and troubleshooting process of the circuit under faults, students could experience random simulation of faults, and measure voltage and resistance of any node. The virtual simulation experiment designed in this paper has been successfully applied to undergraduate experimental teaching, which received excellent teaching outcomes.

**Key words:** three-phase asynchronous motors; virtual simulation; experimental teaching; star-delta starting; training and assessment; random simulation

随着新一代信息技术与船舶工业的跨界融合, 船舶工业的高质量发展迫切需要培养适应产业智能化转型升级的“新工科”卓越创新人才。进入新时代, 海洋强国建设与一流本科建设已成为高校船舶与海洋工程(简称船海)高等教育的立

足点和出发点。面向智能船舶与海工装备的行业发展趋势, 虚拟仿真技术与船海高等教育的深度融合已成为提升船海本科实验教学质量的重要手段<sup>[1-3]</sup>, 也是船海虚拟仿真实验教学一流课程的必然要求。

收稿日期: 2020-11-09; 修回日期: 2021-07-09

基金项目: 教育部高等教育司产学研协同育人项目(201902044047); 华中科技大学创新研究院“双一流”建设交叉学科研究生高水平课程项目(2019); 华中科技大学船舶与海洋工程学院教学研究项目(2019)。

作者简介: 杨少龙(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要从事智能船舶控制、船舶数字孪生等方面的研究。

通信作者: 向先波(1978-), 男, 博士, 教授, 主要从事智能船舶、海洋机器人方面的研究。E-mail: [xbxiang@hust.edu.cn](mailto:xbxiang@hust.edu.cn)

船舶电力系统与装置是面向船舶及海工装备实际电气系统的核心课程,主要讲授船舶电站及系统、船舶电器设备等原理、设计及应用。课程是理论教学、实验教学和课程设计三者的结合。三相异步电动机,作为一种典型的电能转化成旋转运动机械能的动力设备,是本课程重要的课堂教学和实验教学对象。传统的物理实验教学及专业实习现场教学过程,考虑人身安全、实验时间、设备资源、师资力量、现场生产作业等限制,难以做到让全部学生利用真实电机控制箱进行启动和故障排查训练。

当前,国际上已有许多面向电气系统开发的电路仿真软件,如 Proteus、Multisim、MATLAB。尽管商业化的电路设计仿真软件功能强大、仿真置信度高,但是这些软件开发初衷却是向工程师提供更高效、快捷的设计辅助工具。面向电气系统虚拟仿真教学,这些复杂的电路仿真软件并不能满足学生入门和实现教学目标的需求。现阶段,国内外已有大量学者开发了基于已有商业软件的电气系统虚拟仿真实验教学平台<sup>[4-5]</sup>,但这种二次开发却限制了仿真试验的可运行环境。如文献[6]基于 Proteus 的 VSM Models 技术进行虚拟器件开发,构建了虚实结合的数字电路实验平台。文献[7]利用 MATLAB 工具箱建立了简易转子断条电机故障仿真模型。为适应浏览器轻量化交互需求,基于 WebGL 技术的虚拟仿真教学平台逐渐兴起。近年来,基于虚拟仿真技术的机电产品虚拟拆装实验系统<sup>[8]</sup>、铁路机车驾驶与调度实训系统<sup>[9]</sup>以及船厂大型结构物制造虚拟仿真教学系统<sup>[10]</sup>等在工程类专业实验教学中均取得了良好效果。然而,这些早期的虚拟仿真实验设计通常是标准化操作流程的演示,存在交互步骤按部就班、超出标准操作范畴程序无法执行等弊端。为此,考虑实际电气系统的故障发生随机性以及故障排查步骤的自由组合,文献[11]通过重构电气系统三维模型节点,在 Delphi ActiveX 支持下实现了对电气系统故障诊断与维修的虚拟训练,但树型结构却难以表达复杂电路网络拓扑关系。

为此,面向电气系统故障模拟随机性、用户交互操作自由组合、线上训练的轻量化访问等实验教学需求,本文设计了一套船用电机启动控制电路故障诊断虚拟仿真实验教学系统。按照《虚拟仿真实验教学课程建设指南》相关要求,本实

验旨在建设虚实结合、以虚补实的实验教学平台,实现“网上做实验”和“虚拟做真实验”,解决本课程物理实验教学“做不到”“做不了”“做不上”的问题。

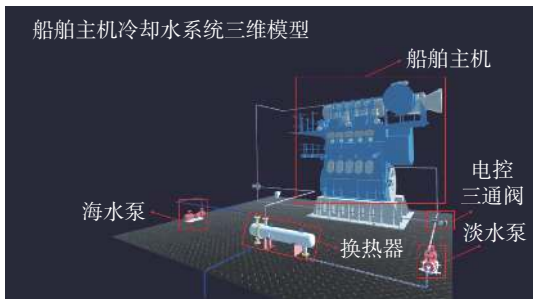
本虚拟仿真实验利用电路网络拓扑图论模型与电路网络拓扑着色算法,解决三相异步电动机复杂控制电路的故障随机设定与自由排查,任意电路节点间带电电压和断电电阻测量等实验教学需求。同时,基于 Unity WebGL 技术实现学生虚拟实验轻量化访问,建设在线开放式课程虚拟仿真实验平台,覆盖“基础、综合、创新”3个层次的教学目标。通过虚拟仿真实验训练,提高学生面向行业工程应用的新工科综合素质。

## 1 虚拟仿真实验系统开发原理

依据实验教学大纲,以星三角启动控制电路为例,本文设计如图1所示的三相异步电动机控制电路故障诊断虚拟仿真实验系统。本系统前端开发先利用 3D 建模软件建立机舱漫游虚拟场景和船用电机应用典型场景——主机冷却水管路系统,具体模型包括三相异步电动机、本地控制柜(内含控制电路元器件)、电缆、万用表等。接着,利用如图2(a)所示的 Unity 平台开发人机交互界面,以及核心的故障自由设定及用户排查操作评分算法。后台算法根据电路特点(含主电路和控制电路)实现电路运行拓扑结构更新、交互逻辑判断和测量参数计算等功能。本文建立星三角启动控制电路网络拓扑图论模型,如图2(b)所示,将原始电路图简化为只包括节点(代表线缆,图示黑色数字编号)和支路(代表元器件,图示红色字母编号)的非线性网络。将所有物理连接在一起的线缆和接线端子用一个节点描述,每条支路两端有一进一出节点,由此可用无向图拓扑网络模型代替原始电路图中部件连接关系。程序后台运行中,利用学生对接线端子和元器件的操作触发网络支路通断状态变化,进而改变电路网络拓扑结构。通过深度优先搜索策略,可实时更新电路网络拓扑结构。基于网络拓扑着色算法<sup>[12-13]</sup>,实现任意测量节点间电阻和电压计算,满足学生实训故障诊断自主测量需求,同时后台记录学生操作步骤。最后,通过 WebGL 技术发布成网页版,学生无需任何插件或桌面客户端支持即可轻量化交互访问。



(a) 机舱漫游场景设计

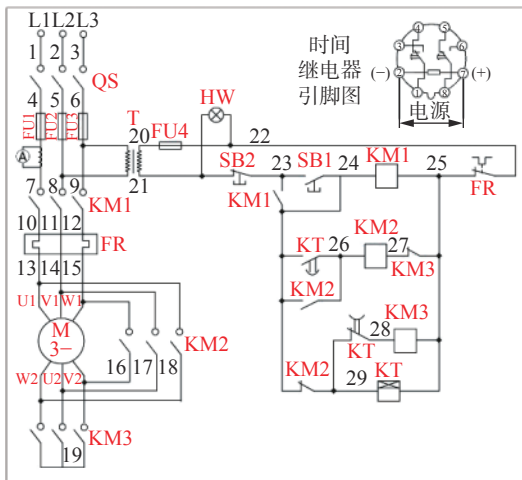


(b) 主机冷却水管路系统简化模型

图 1 船用电机运行场景及工作流程漫游模拟



(a) 船用电机控制柜及控制电路虚拟仿真交互界面



(b) 星三角启动控制电路网络拓扑图论模型

图 2 船用电机星三角启动系统电气故障诊断虚拟实验开发

## 2 虚拟仿真试验系统组成与特点

对标实验教学大纲，在需求分析基础上，本

文设计的船用电机星三角启动控制电路故障诊断虚拟仿真系统主要围绕船用电动机开展不同类型星三角启动控制电路的设计和电气故障排查的训练与考核。相比已有电路虚拟仿真实验教学系统<sup>[14-15]</sup>，本系统具有如下 4 个突出特点：

1) 学生交互不受“标准化操作流程”约束，可对电控柜中任意接线端子自由拆装，并可测量任意端子间电压或电阻，并获得对应真实故障相似的测量示数反馈；

2) 结合电路原理图，学生或老师可以进行自由设定手动故障或随机故障，极大丰富了故障排查训练的模拟场景；

3) 还原真实电气故障排查过程，学生根据故障现象及电路分析确定故障源，替换元器件后，可获得故障排查前后的电路运行状态，提高了电路理论分析能力；

4) 支持 WebGL 技术，学生通过浏览器即可轻量化访问开展虚拟仿真实验，且通过训练与考核两个版本实现教学目标。

学生在相对逼真的电控柜环境下进行电路逻辑分析、电气元器件认识、电气故障排查等在线虚拟仿真实验，提高对三相异步电动机控制电路的设计、分析和排查电气故障的能力。此外，本文的开发方法与系统架构还可为其他继电器控制电路为主的电气实训实验提供设计方案支撑，如三相异步电动机的顺序启动、磁力启动、正反转控制、双位控制等故障实训与考核。

## 3 星三角启动控制电路电气故障诊断实验步骤与评价

以三相异步电动机星三角启动控制电路电气故障诊断虚拟仿真试验为例，介绍本系统故障诊断实验步骤与评价。如图 1(a)所示，以大型集装箱商船冷却海水系统中主海水泵及其本地控制柜为试验典型场景，学生可通过虚拟漫游方式熟悉实船机舱布置、管路系统以及设备铭牌参数。参考实船真实电控柜模型建立如图 2(a)所示星三角启动电路虚拟仿真操作面板，学生找到对应电控柜并打开后，即可开展电气故障虚拟仿真诊断训练。

训练模式操作一般流程如图 3 所示，整个实验内容划分为基础训练、综合训练和创新训练 3 个层级。学生既可以按照顺序从基础到创新依次训练，也可以直接跳转到任意层次进行实验训练。以依次训练为例，首先，学生熟悉三相异步



电动机的星形和三角形接线原理与实操,如图4(a)所示,通过二维原理图与三维场景的交互,提高学生对星三角接线的基本原理认知。其次,学生进行电气符号与电气实物的连线训练,熟练掌握常见电气符号,如图4(b)所示。接着,学生将开展指定电气故障排查的综合训练。本系统内预设缺相运行和点动运行两类典型故障,学生需要根据故障现象进行分析,找出损坏元器件,更换后确保电动机启动恢复正常。最后,学生进一步开展自主探究创新实验,既可以手动设定任意故障点,也可以系统随机生成1~5个故障点。

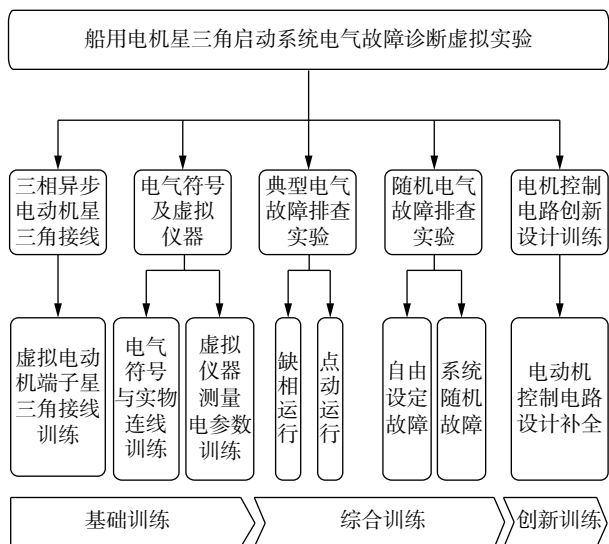
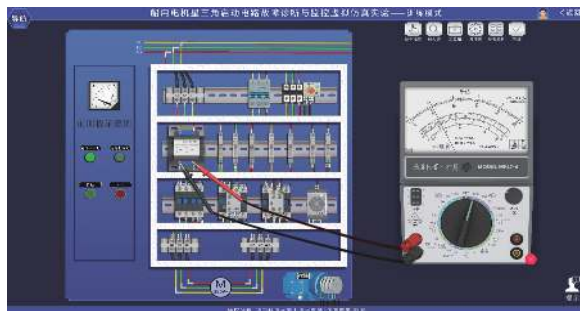


图3 电气故障诊断操作流程



(a) 电动机虚拟仿真逼真场景



(b) 虚拟仪器测量操作界面

图4 三相异步电动机启动系统电气故障诊断虚拟仿真实训

结合流程图3,对使用本系统开展电气故障诊断一般思路进行描述。学生先打开星三角启动控制电路原理图进行电路逻辑分析,并对照原理图符号熟悉电控柜实物对象。在理论课堂教学掌握电路原理基础上,试运转启动电动机查看是否存在故障。若存在,则借助工具箱内万用表、螺丝刀进行电路状态测量和原因分析,如图5所示。学生对表1测试各个接触器线圈通断状态、指示灯亮灭、电压和电流示数等。



图5 万用表测量电路状态

以三相异步电动机点动运行故障为例,通常是由于交流接触器KM1不能自锁导致(即KM1常开辅助触点断路)。如图6所示,在综合训练故障设置栏点击对应故障内容进入实验主界面。学生通过鼠标单击点击启停按钮观察实验现象(如图7中红色圈所示),鼠标持续按住启动按钮SB2电机可运转,松开SB2,学生可观察到电机立刻停转。根据该故障现象测量分析,记录结果至表1。然后,学生确定故障点并更换故障元器件,完成后再次试运转三相异步电动机。若星三角启动电机正常,则说明故障排查成功。学生点击提交完成实验,系统会弹窗提示本次实验故障排查是否成功,并显示故障原因,以便学生获得及时的训练评价反馈。当完成某次电气故障排查实验后,学生从故障现象、电压电阻测量记录、故障排查分析以及故障处理方法4个方面总结形成实验报告文档。本系统后台对实验操作规范性和实验记录表1的正确性自动评分,任课教师通过管理平台对学生实验报告结果手动评分,两个分数相加形成学生考核结果的科学评价。

除点动运行故障外,本系统还可设置缺相故障、用户指定故障/系统随机故障等,不同故障状态下,根据电路网络拓扑关系实时计算系统响应状态。如图8所示,缺相故障运行电动机会有异响振动提示,电流表指示增大,且还能观察到继电器触点动作情况等。配合万用表测量触点电压获取更丰富的电路运行状态数据,从而分析确定故障源。



图 6 综合训练故障设置界面

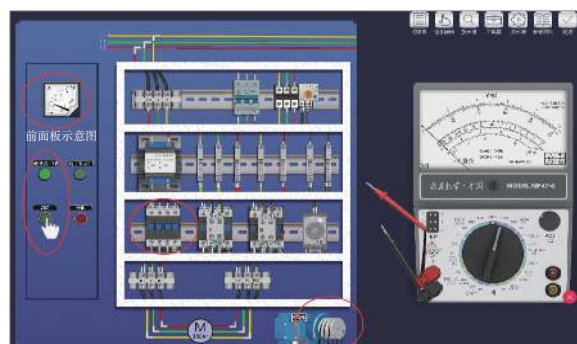


图 7 点动运行故障实验状态结果

表 1 三相异步电动机星三角启动电气故障诊断实验记录表(点动运行故障为例)

| 试验编号     | 线圈通电/断电 |     |     |    | 亮/灭 |    | 数值记录   |                        |          |
|----------|---------|-----|-----|----|-----|----|--------|------------------------|----------|
|          | KM1     | KM2 | KM3 | KT | HW  | HG | 电流示数/A | 相电压/V<br>(U12=U13=U23) | 控制电路电压/V |
| 通电(QS闭合) | 断       | 断   | 断   | 断  | 亮   | 灭  | 0      | 376.5                  | 220      |
| 按下SB2    | 通       | 通   | 断   | 断  | 亮   | 灭  | 2.5    | -                      | -        |
| 松开SB2    | 断       | 断   | 断   | 断  | 亮   | 灭  | 0      | 376.5                  | 220      |
| (KT)延时t后 | 断       | 断   | 断   | 断  | 亮   | 灭  | 0      | 376.5                  | 220      |

注：控制电路电压指图2(b)电路原理图中变压器T副边的接线柱20和21之间的电压。

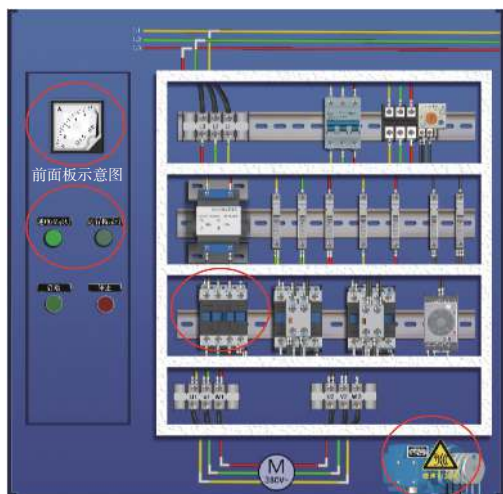


图 8 缺相运行故障实验状态结果

#### 4 控制电路故障诊断虚拟仿真实验训练与考核

本系统面向船海类相关专业学生，按照“以虚补实、虚实结合”的原则，建设虚拟仿真实训系统，与船舶电站实物配合，巩固学生对典型控制电路组成、工作原理及故障排查方法等船舶电气自动化基础知识的掌握，提高学生运用电路理论知识解决实际电气故障的能力。本系统分为训练模式与考核模式，训练模式主要用于学生

自学练习用，对三相异步电动机的星三角启动控制电路，系统均可设置无故障正常电路、指定一至多个故障点排查场景、随机故障点排查场景3种类型的训练。对每一次具体故障案例实训，学生按照第3节中描述步骤进行实训，填写实验记录表1，分析确定故障点，更换故障元器件。系统后台记录学生实训过程且学生提交后弹窗评价，如图9所示。此外，本系统还设计考核模式用于线上考核，如图10所示，教师手动设定故障点，考察学生对特定电器元件功能及其失效故障的掌握情况，教师也可借助系统随机生成指定数量的故障点。对于考核，本系统从3个方面进行学生综合成绩评定。

1) 基本实验操作规范，教师可对实验操作要点设置不同打分标准，具体包括是否带电测电阻(可能损坏万用表)；是否带电更换元器件(违反用电安全操作规程)；是否更换所有损坏元器件(确保故障全部排除)；是否更换未损坏元器件(避免学生更换所有元器件暴力排除故障)。

2) 系统根据当前故障状态对学生填写的实验记录表结果进行自动打分。

3) 教师在线评阅学生实验报告，给定成绩。

由此，本系统实现了训练与考核的双重功效，通过线上综合成绩全面反映了学生对实验教



学知识点的掌握程度和电气故障排查能力的锻炼情况。



图9 系统自动弹窗评分

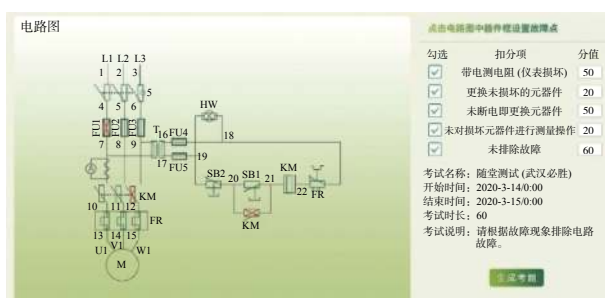


图10 考核模式故障点设置及评分占比设置

## 5 结束语

本文以船舶电力系统与装置实验教学的重难点三相异步电动机的启动控制电路设计与分析为虚拟仿真开发对象,设计了一套船用电机星三角启动控制电路故障诊断虚拟仿真实验系统。利用主流虚拟仿真技术,结合电路网络拓扑图论模型、遍历搜索与着色等理论算法,本系统实现了学生可在轻量化浏览器进行实验训练,具有测量交互自由组合、还原真实故障现象及电气特征、模拟故障场景手动或随机生成等特点,解决了传统虚拟仿真实验存在的“标准化操作流程”“交互步骤按部就班”等弊端。本系统教学分基础训练、综合训练和创新训练3个层级,以及训练与考核2个模式,全面科学地评价学生虚拟实验学习效果。通过船用电机星三角启动控制电路故障诊断虚拟仿真实验的锻炼,学生能够巩固对电动机典型控制电路组成、工作原理及故障排查方法等船舶电气自动化基础知识,提高运用电路理论知识分析解决实际电气故障的能力,锻炼面向行业工程应用的新工科综合素质。

## 参考文献

- [1] 冯峰,孙聪,曲先强. 船海虚拟仿真实验教学中心的建设与发展[J]. 实验技术与管理, 2014, 31(1): 11-14.
- [2] 孙聪,郭春雨,冯峰,等. 船海虚拟仿真国家级实验教学中心建设浅谈[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(8): 167-170.
- [3] HERNANDEZ-DE-MENENDEZ M, MORALES-MENENDEZ R. Technological innovations and practices in engineering education: a review[J]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2019, 13(2): 713-728.
- [4] LI Z, LI X, JIANG D, et al. Application of multisim simulation software in teaching of analog electronic technology[J]. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2020, 1544: 012063.
- [5] 王巧兰,林育兹. 基于虚拟仪器技术的传感器仿真实验软件开发[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(2): 112-115.
- [6] 殷金曙,杜世民. 虚实结合数字电路实验平台开发[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(1): 108-112.
- [7] 郝晓红,王慧敏. 基于Matlab的异步电动机故障运行状态的仿真[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(2): 98-101.
- [8] WANG Y, ZHOU Z, ZHOU P, et al. Research on virtual assembly simulation system for aircraft flight control system based on unity3D[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2020, 887: 012034.
- [9] 郝孜奇,张文胜. 基于Unity3D的铁路实训虚拟仿真系统开发[J]. 计算机仿真, 2020, 37(6): 99-103.
- [10] 朱安庆,胡安超. 基于Unity 3D的船舶制造虚拟仿真实教学系统构建[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(6): 117-120.
- [11] 刘正春,王勇,解璞,等. 某高炮电气虚拟维修系统的设计与实现[J]. 火炮发射与控制学报, 2013(3): 45-48.
- [12] HUANG H, GAO Z, DAI J P, et al. Power grid modeling and topology analysis based on graph database conforming with CIM/E[C]//International seminar of purple mountain forum academic forum. Beijing: Springer, 2019.
- [13] 武森,林叶锦,黄朝明. 基于网络拓扑着色的虚拟电路阻抗辨识方法[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(11): 94-98.
- [14] 王永慧,程知群,马学条,等. 电子信息类专业虚实结合实验教学项目建设与实践[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(6): 184-188.
- [15] 肖君,廖中熙,王智东,等. 电路与电子技术实验线上平台的构建[J]. 电气电子教学学报, 2020, 42(2): 151-154.

编辑 张莉