

VR与云技术融合的船用柴油机诊断拆检系统

王永坚, 吴怡婷, 魏 旻, 蔡杭溪

(集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为解决轮机员适任考试实操训练与评估过程中故障问题不易设置、主观因素影响大等问题, 根据轮机员适任考试实操评估要求, 融合虚拟现实(VR)和云技术优势, 采用B/S架构, 运用3DSMax等建模工具, 搭建人机交互功能强的船用柴油机故障诊断拆检操作场景。以Visual Studio为开发环境, Ajax为通信手段, 综合运用C++编程语言和可扩展标记语言XML, 研发柴油机故障诊断拆检在线训练评估系统, 从系统的结构设计、仿真场景搭建、评估试题编辑平台开发、基于模糊综合评判的自动评估模块设计等方面详细分析设计开发过程。经过实际试题测试和学员应用, 结果表明, 该系统具有较好的适用性。

[关键词] 船用柴油机; 云技术; 虚拟现实(VR); 故障诊断; 拆检操作; 仿真评估

[中图分类号] TK 427

Research and Development for Fault Diagnosis and Overhaul Operation System of Marine Diesel Engine by VR and Cloud Techniques

WANG Yongjian, WU Yiting, WEI Min, CAI Hangxi

(School of Marine Engineering, Jimei University; Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to solve the problems of the difficulty in fault setting, the influence of subjective factors on the practical train and evaluation of marine engineer's competency examination, a marine diesel engine fault diagnosis and overhaul simulating operational scene with interactive features was established by employing 3DSMax and other modeling softwares based on the B/S architecture which takes into account the requirement of the practical operational evaluation, the advantage of virtual reality and cloud technology. Visual Studio was adopted as developing environment, Ajax, C++ and Extensible Markup Language (XML) programming language were comprehensively applied to develop the practically operational training and evaluating system online for marine diesel engine fault diagnosis and overhaul simulating operations. The design and development process of this simulating system was analyzed through the system construction's design, the simulating scene was modeled, and the compiling platform for evaluating testing items was also developed, the design of automatic judging system was finally set up by using fuzzy comprehensive evaluation approach. It suggests that the system has good applicability after practical titles' test and student's application.

Keywords: marine diesel engine; cloud technology; VR(virtual reality); fault diagnosis; overhaul operation; simulating evaluation.

[收稿日期] 2021-08-29

[基金项目] 福建省自然科学基金资助项目(2020J01687; 2021J01849); 福建省教育厅科技项目(JAT200279)

[作者简介] 王永坚(1972—), 男, 教授/高级轮机长, 主要从事轮机仿真技术与船舶动力装置智能故障诊断技术研究。E-mail: wangyongjian@jmu.edu.cn

0 引言

“海船船员培训大纲”(2021 版)和“中华人民共和国海船船员适任考试和发证规则”等与船员适任考试与评估有关的法规对各等级轮机员取得相应适任证书提出了更高要求^[1]。当前,轮机员适任实操训练与评估大部分采用实物设备,训练中存在诸如受训人数与设备台套数不匹配、故障问题设置不易等问题^[2],影响训练效果和培训质量^[3]。为解决当前轮机员适任实操训练和评估中存在的问题,本文结合轮机员适任评估项目,融合虚拟现实(VR)和云技术等现代信息技术,以 wärtsilä 6L20 柴油机故障诊断和损坏部件的拆检为仿真对象,融合 VR 与云技术,开发具备远程实时人机交互功能、高逼真度、沉浸感强,适用于轮机员适任实操训练与评估的柴油机故障诊断拆检系统。

1 系统开发环境与整体结构设计

1.1 系统开发环境

本系统融合 3D Studio MAX 建模软件与 Visual Studio 2017 的技术优势^[4],搭建二/三维仿真场景,实现:柴油机故障现象三维呈现;故障参数实时显示;运行状态设置;故障查找与应急处理;损坏部件拆检顺序与操作逻辑;工具选择;操作步骤文字和声音提示以及人机交互方式等。将 C++ 语言作为仿真系统操作逻辑的程序编写工具,可扩展标记语言 XML(extensible markup language)作为故障部件拆检操作状态变量设置、事件绑定、参数定义和变量参数存储等文档管理工具。在 C++ 程序解析 XML 文件时,采用文档对象模型 DOM(document object model)作为解析器,通过树状结构,将柴油机故障诊断拆检实操试题“XML 文件”加载到数据内存中,并设置与之相对应的节点树(node tree)^[5],根据场景对象装配位置和拆装顺序设置节点间父子、邻居逻辑关系,使用 DOM 解析器读取各节点信息及其操作逻辑,获得每道实操试题的全部数据信息^[5]。

1.2 系统功能及整体结构设计

该系统采用 B/S 架构设计,在 VR 环境中搭建仿真场景,将云技术应用于柴油机主要部件和拆检工具的三维模型数据、实操试题编辑信息、操作逻辑关系、交互信息的实时存储与提取,能实现全景 VR 漫游,学员可通过 Internet 或局域网,使用 3D 头盔等交互工具,在虚拟仿真场景内,完全模拟实际操作环境开展柴油机故障诊断、问题排查和应急处理,以及损坏部件拆检仿真训练与评估。系统的设计基于“中华人民共和国海船船员适任考试大纲”(以下简称“12 评估大纲”)规范以及“动力设备拆装”等实操科目规定的实训内容和评估要素,从方便学员训练与评估员考核、便于试题编辑人员出题、客观评价学员训练效果和提高考务管理效率等方面考量进行系统设计。

整个系统由开发者平台、仿真操作平台两大部分组成,各有 3 个模块,如图 1 所示。为便于试题编辑人员进行评估题的编辑和平台的 OTA(OVER the Air Technology)动态更新,系统将声音、图片、模型等素材设置为共用模式。

1) 开发者平台用于实现场景设计与评估试题的编辑,由平台管理、控制程序模块、试题编辑子平台组成。①平台管理提供账号、项目以及各类素材的管理;②控制程序模块用于输出相应的程序命令和管理指令,实现初始状态设置、模型文件配置、试题编辑信息存储与更新、自动评判管理等任务;同时,实操仿真平台三个模块上述类似任务所需的程序命令和数据管理指令均来自该模块;③试题编辑子平台(TDuVRDirector)用于试题编辑人员新增评估题或对原有试题进行修改、编辑。

2) 仿真操作平台由用于提供账号、资源、题库、成绩等管理的平台管理模块、用于实现二/三维模型、动画等数据导出和实时渲染的场景驱动模块(TDuVRExporter),以及用于学员操作训练与评估的操作界面(TDuVREngine)组成。

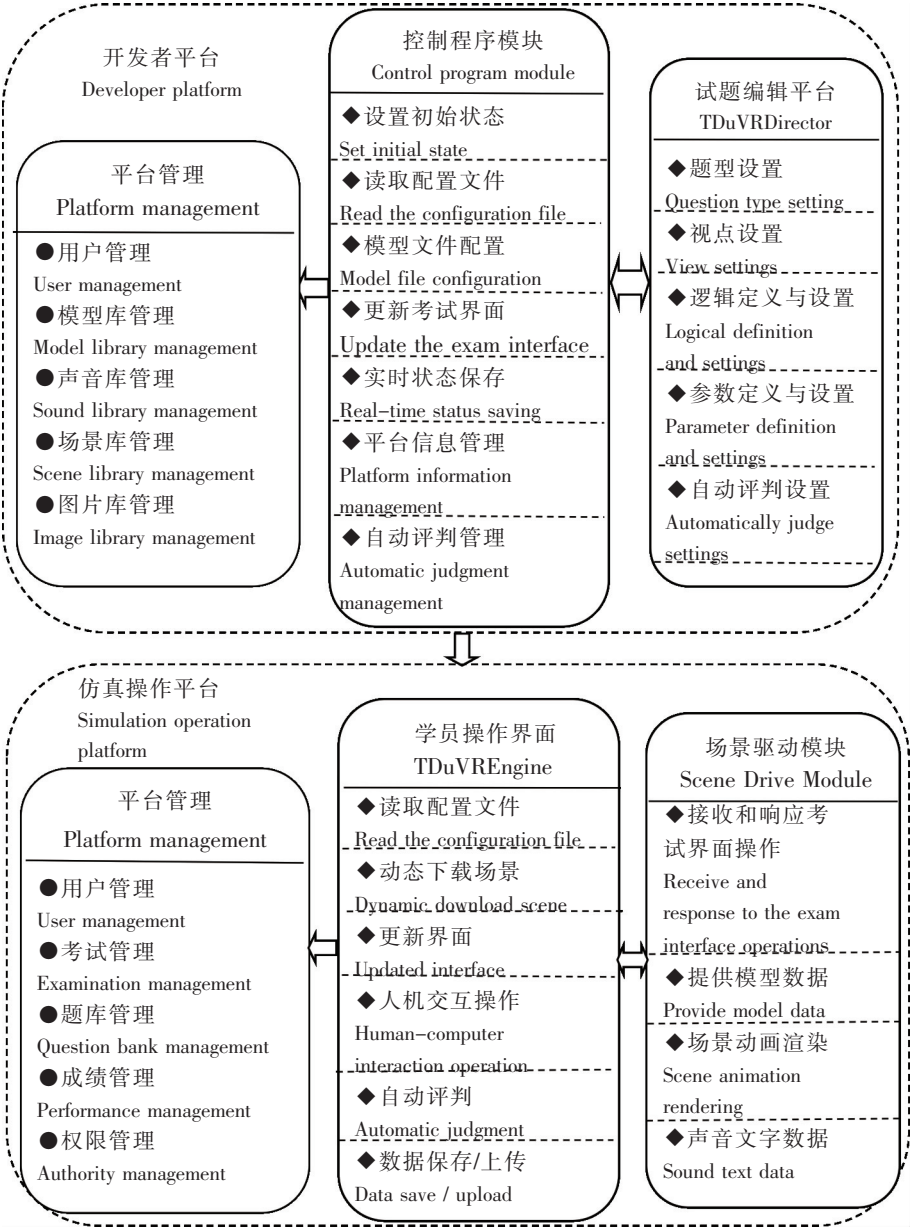


图 1 仿真系统整体结构设计

Fig.1 Overall structure design of the simulation system

2 仿真场景的设计与搭建

仿真场景的设计与搭建包括两方面内容：用于设置和显示柴油机故障现象、故障查找与应急处理的二维仿真操作界面，如图 2 所示；用于解决故障问题、拆检损坏部件三维仿真操作场景界面，如图 3 所示。建模步骤：母型船机舱现场取景；柴油机及其附属系统二/三维场景模型的搭建与渲染；模型优化；场景对象动画设计与操作逻辑设置等。

2.1 场景模型搭建与渲染

根据母型船机舱副机层实际设备布置，以及发电柴油机及其附属系统现场图片拍摄和相关技术资料分析，综合运用 Photoshop 的图片、文字、色彩处理能力，以及 3DSMax、ProE 高逼真度二/三维仿

真场景建模优势，完成副机层、发电柴油机各组成部件及其附属系统、副机操控及报警系统等 VR 场景的搭建，为提升场景模型的逼真度，在 3DSMax 环境下，使用烘焙、灯光投射和抗锯齿功能键实现模型逼真度的提升，并将模型数据输出格式设为（* tbd）专用格式^[5]；使用专用图形渲染工具 TDuExpertor 将模型转换为 3D 仿真引擎的专用优化格式，供学员操作界面（TDuVREngine）加载使用。

2.2 模型的优化

为减少场景模型数据量，提升模型渲染速度，使用 TDuExpertor 渲染工具^[5]，在 3DSMax 中，通过贴图优化、减少重复贴图与改进贴图方式等手段对模型进行优化^[6]，可获得与网页中使用的 Jpeg 图片大小相等，数据量为 0.1 ~ 1.5 M 的场景模型。

2.3 场景对象动画设计与操控逻辑设置

为便于评估员使用该系统子模块“评估试题编辑平台”（如图 4），通过配置文件（XML）设置柴油机故障问题与现象、故障排查程序和故障部件拆检步骤和逻辑，在 3DSMax 中对场景内船用柴油机故障状态显示、各组成部件拆检、附属系统液体流动状态、检修工具使用、声光报警显示等进行动画设计。如在故障诊断操作界面（参见图 2），采用变量类型 Loop 灯光闪烁命令，设置故障出现时声光报警提示；参数指示仪表采用柱状指示命令（变量类型 Var），设置故障发生时的参数显示等。在拆检操作场景界面（参见图 3），采用动作命令（变量类型 Step），设置活塞 - 连杆吊装操作、易损件更换等操作逻辑。

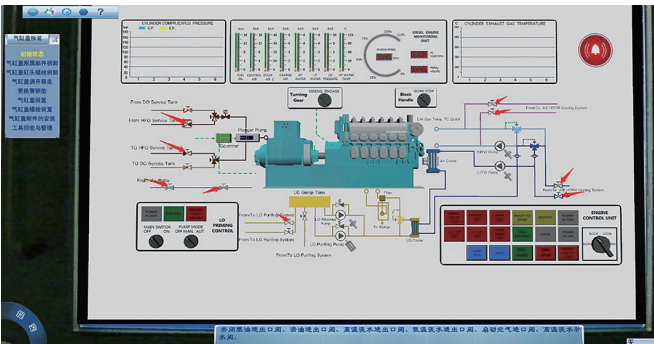


图 2 用于柴油机故障诊断与应急处理的仿真操作场景界面
Fig.2 Simulation operational scene interface for diesel engine fault diagnosis and emergency treatment

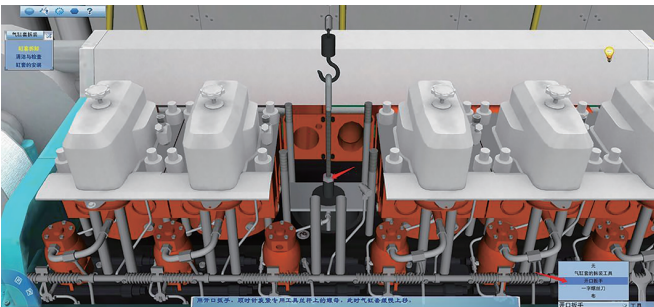


图 3 用于解决故障问题/拆检损坏部件三维仿真操作场景界面
Fig.3 3D simulation operation scene interface for troubleshooting fault problems and dismantling damaged parts

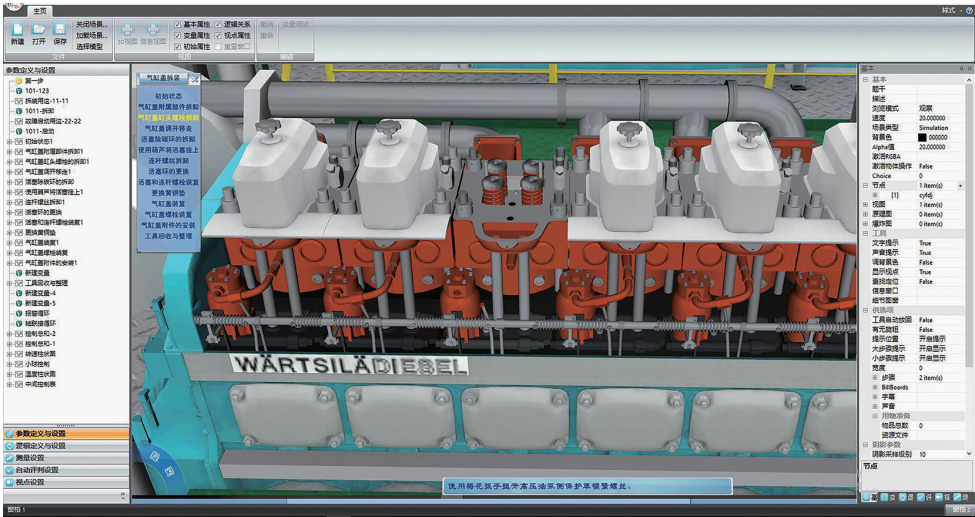


图 4 评估试题编辑平台界面
Fig.4 Editing platform interface for evaluating test questions

3 评估试题编辑平台

为便于评估员在柴油机故障诊断拆检系统中, 利用具有动画效果的场景对象进行评估试题编辑, 该系统开发者平台设计有“评估试题编辑子平台”, 如图 4 所示。通过编辑平台提供的可视化编辑界面, 评估员可便捷地完成不同故障问题下柴油机拆检操作试题的编辑工作, 可对原有试题参数变量、逻辑关系、评判分值等进行修改或重置, 完成试题设置保存后便可重新生成一道评估试题, 同时可对设置好的试题进行模拟测试。

3.1 平台的设计及其功能

该编辑平台包含三大模块(参见图 4), 各模块的设计及功能如下。

1) 变量定义模块位于界面左侧, 采用父子节点结构。该模块包括: 用于设置场景对象变量参数范围、前置条件、后置动作的参数定义与设置子模块; 用于编辑场景各逻辑变量间数学模型关系的逻辑定义与设置子模块; 基于模糊综合评判法的自动评判子模块, 用于仿真操作中快速切换视点界面的视点设置子模块。

2) 仿真场景渲染区位于界面中部, 使用 TDuExpertor 渲染, 根据“变量定义子模块”选定的评估试题, 在其界面区域加载相应的操作场景, 通过“视点设置”模块设置不同视点画面和“属性编辑子模块”新增或重置评估试题状态参数值或操作逻辑等, 为试题编辑人员实时查看场景对象状态提供可视化界面。

3) 属性编辑模块与“变量定义模块”各功能模块的设置相匹配, 可进行相关数据的调整与设定。在调试过程中, 试题编辑人员可根据实际需要修改试题参数、变量以及故障点的设置等, 经程序刷新后, 在仿真场景渲染区中显示相应的变化。

此外, 该编辑平台还设有新建、打开、保存文件, 以及加载场景等功能。

3.2 自动评判模块的设计

3.2.1 模糊综合评判法与自动评判设计过程

自动评判模块是柴油机故障诊断拆检系统的重要组成部分, 通过编辑平台“自动评判设置”实现相关功能设置。该系统根据评估规范分值设置要求, 结合柴油机故障诊断和设备拆检特点, 采用模糊综合评判法对每道评估试题的分值、评分规则、自动评判方式和机制等进行设置。评判要素包括评价因素集和考核评判集两方面^[7]。

1) 评价因素集和评判集指的是对评判对象进行评价各方因素的集合, 评判集是评判者对评判对象进行考核时做出的各种评判因素的集合。根据“12 评估规范”评估要素和“船员培训大纲(2021)”中“实践技能与要求”相关规定, 结合设备拆检惯例, 选定: 1) 每道评估试题的评价因素集 $U = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$ 及评价规则。其中: u_1 表示故障问题查找准确性和熟练性, 查找准确为 1, 否则为 0; u_2 表示拆检操作准确性和熟练性, 按超出规定操作次数和时间的百分比确认; u_3 表示工具的正确选择, 按超出规定工具选择次数的百分比确认; u_4 表示操作完成时间, 按超出规定操作时间的百分比确认; u_5 表示操作完成与否, 完成操作为 1, 否则为 0。2) 每道评估试题的评判因素集 $V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$ 。其中: $v_i (i=1, 2, \cdots, 5)$ 表示操作熟练程度。 v_1 代表 100 分; v_2 代表 80 分; v_3 代表 60 分; v_4 代表 40 分; v_5 代表 20 分。

2) 单因素评判矩阵 R_i 与权重向量 A 的确定单因素评判矩阵 $R_i = (r_{ij}, \cdots, r_{im}), r_{ij} (i=1, 2, \cdots, n; j=1, 2, \cdots, m)$ 表示某个被评价对象从因素 u_i 角度对评判 v_j 等级的隶属度。 r_{ij} 越大, 表明 u_i 和 v_j 之间关联越密切^[7]。单因素评判矩阵是以各单因素评判集的隶属度为行组成的矩阵, 即

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}。$$

(1)

①隶属度确认本系统 r_{ij} 数值按上述评价因素集 U 的评价规则确认。系统通过“自动评判子模块”的设置程序进行分值和评价机制设置,并根据每道评估试题学员最终完成每操作步骤,对应因素集 u_i 的完成质量自动赋值隶属度。

②权重向量 A 反映各因素的重要程度,由各权重组成权重集 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 。通过 15 位评估专家的问卷调查统计确认,本系统各评估试题评价因素集的权重 $A_{故障} = (0.3, 0.3, 0.1, 0.1, 0.2)$ 。

3) 模糊评判模型确定单因素评判矩阵 R_i 和权重向量 A 后,建立评分模糊评判模型 $B = A \cdot R = (b_1, b_2, \dots, b_m)$,本系统评估试题自动评判模块取 $b_j = \sum_{i=1}^m a_i r_{ij}, (j = 1, 2, 3, 4, 5; m = 5)$,其中, b_j 为模糊综合评判指标,根据实际评估情况,取 b_j 为权数,对各个评判集元素进行加权平均计算,得出综合评判的最终结果为:

$$N = \sum_{j=1}^n b_j V_j \bigg/ \sum_{j=1}^n b_j. \quad (2)$$

3.2.2 测试与验证

为验证自动评判模块设计的合理性和适用性,通过评估试题 1 “船用柴油机活塞环过度磨损故障诊断及其拆检操作”进行实际测试验证。评估过程中,某学员在规定时间内完成故障问题诊断与查找,操作完成时间 22 min (规定时间 30 min),工具选择共计 86 次 (规定工具选择次数 70 次),学员共计操作 105 步,其中 29 步重复操作或与本题无关,学员完成操作。基于上述评价机制,可得到该试题单因素评判矩阵:

$$R_{活塞环} = \begin{bmatrix} 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 \\ 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式中各行数值为评价因素集 $u_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 的隶属度。已知权重集 $A_{活塞环} = (0.3, 0.3, 0.1, 0.1, 0.2)$ 及式 (3),则 $B = A \cdot R = (b_1, b_2, \dots, b_m) = (0.3, 0.22, 0.16, 0.10, 0.30)$,将 B 及评价集 $V = (100, 80, 60, 40, 20)$ 带入式 (2),可得学员该题的最后得分为 $N_{活塞环} = 67.2$ 分,取 67 分。该分值与学员的操作完成质量基本匹配,验证了自动评判模块设计的合理性和适用性。

3.3 实操评估试题的设置

根据“12 评估大纲”中与柴油机故障诊断、应急处理和拆装检修相关评估项目训练内容和评估要素,通过“评估试题编辑平台”相关功能模块可完成评估试题编辑工作。如在前述评估试题 1 的编辑过程中,在编辑平台进行如下操作后自动生成新的评估题。1) 故障现象显示和故障问题排查编辑与设置。使用“变量定义子模块”、“属性编辑子模块”等编辑模块,通过设置显示仪表柱状条高低值来呈现柴油机活塞环发生过度磨损时缸内故障现象,设置声光报警触发条件和声光报警,设置应采取的应急处理措施与故障排查操作顺序和步骤。2) 柴油机损坏部件拆检过程的编辑。在拆装场景内设置柴油机吊缸拆检、活塞环更换所需的操作步骤、顺序及其逻辑关系,以及吊缸过程中专用工具、普通工具的选用次数与准确性等仿真操作动作。3) 分值设置。通过“自动评判设置”,根据各操作步骤的重要性、操作顺序、工具的选择和正确使用、操作完成时间、操作熟练性等,基于模糊评判法设置各操作步骤分值和自动评判机制。编辑过程中,每种参数、动作逻辑的设置效果均可在“仿真场景渲染区”实时呈现。基于上述试题编辑方式,整个仿真系统共设置“单缸供油过大,排温过高故障诊断拆检操作”等 15 道评估试题。由于篇幅限制,不再一一阐述。

4 故障诊断拆检智能化评估的实现

故障诊断拆检系统评估终端可根据需要设置在各培训机构实操仿真考试云平台上, 评估员和学员利用互联网/局域网使用账号和密码实时访问云平台, 可以不限时间、地域进行远程训练与考核评估。

4.1 评估试题的设置

评估员根据实际需要, 在每次适任评估之前通过“试题编辑平台”修改原有试题库评估题, 也可利用场景资源库和试题资源库编辑评估试题, 操作过程如图 5 所示。启动仿真系统, 完成各功能模块的初始化设置, 根据获取的评估试题信息, 通过 Ajax 通信加载试题资源库和仿真模型资源库, 新增试题或修改原有试题后保存确认, 新试题的所有数据信息通过 Ajax 通信存放试题资料库, 评估试题设置过程详见前述, 不再累述。

4.2 远程仿真训练与智能化评估的实现

该系统分为仿真操作训练模式和考核评估模式, 具体流程如图 5 所示。

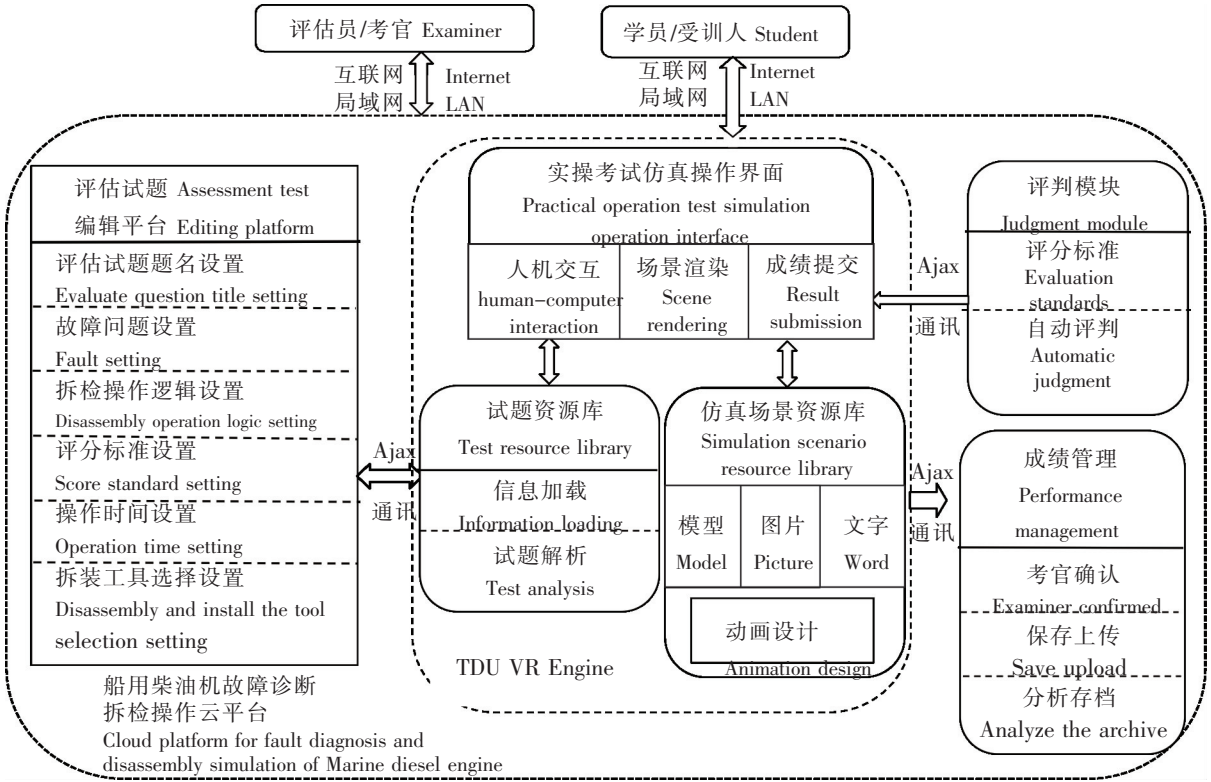


图 5 基于 B/S 架构船用柴油机故障诊断拆检操作云平台及考核评估流程图

Fig.5 Cloud platform and evaluation flow chart for marine diesel engine fault diagnosis and disassembly simulation operation based on B/S architecture

1) 远程操作训练模式。①学员通过互联网或局域网远程实时访问系统考试终端, 点击加载相应评估试题, 进入操作场景, 在二维故障诊断与排查场景内相关仪表显示试题编辑人员设定的与故障相关的故障现象, 并发出声光报警, 学员根据仪表显示的参数信息和报警信息进行故障问题评判, 确认故障原因并进行故障排除或应急操作后, 在三维仿真场景内可完全模拟真实拆检环境完成故障部件拆检操作。图 6 为 wärtsilä 6L20 船用柴油机吊缸检修仿真操作界面。在进行拆检操作时, 操作界面左上侧可实时显示学员当前的操作步骤, 界面底部通过声音和文字显示当前操作内容并通过高亮闪烁提醒下一步操作对象, 这种操作方式让学员直观地完成拆检操作。②仿真拆检过程中, 故障诊断和排查、操作步骤、顺序和逻辑关系、完成时间、工具选择、操作是否完成等均通过 Ajax 通信方式实时受自动评判模块监控。③学员完成操作后, 点击“提交”, 考试终端对学员拆检操作过程自动评分, 对每操作步骤进行评价, 并最终给出成绩。

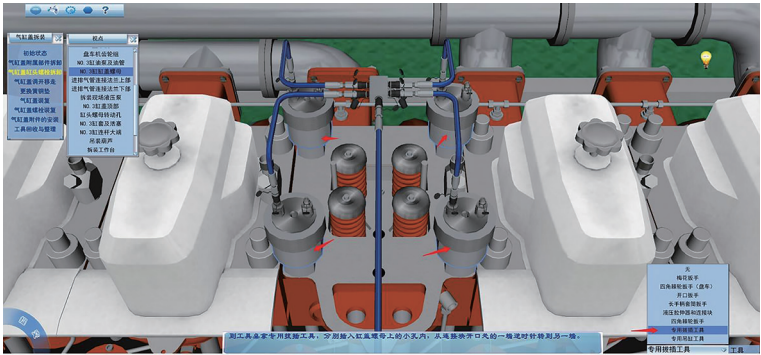


图 6 wartsila 6L20 船用柴油机吊缸检修仿真操作界面
Fig.6 Simulation operation interface for wartsila 6L20 marine diesel engine cylinder maintenance

2) 评估模式。①评估开始, 学员通过互联网或局域网登入考试终端, 考试界面自动出现两道不同评估内容的评估题, 分别点击加载相应试题, 学员仿真操作过程类似于训练模式, 不同之处在于操作过程中不会有操作步骤声音、文字和下一操作对象闪烁提示。②每道试题操作完成后, 点击“提交”或规定考试时间到, 系统给出每道题成绩并取均值, 形成最终的评估成绩。考试结果经评估员和主考官确认后, 数据上传云平台, 通过云平台打印、存档保存。学员如有异议, 可进行成绩查询和溯源。

5 结语

根据国际公约和国内船员法规对各等级轮机员适任考试实操评估提出的新要求, 开发该仿真系统, 经实际测试和学员应用, 该系统具有较好的适用性, 在方便船员适任考试和提高考务管理效率的同时, 还可以帮助轮机学员提升分析问题、解决问题的能力。此外, 系统可作为船员实操评估项目智能化考试系统的一部分, 其开发设计过程可为考试系统的研制提供技术参考。

[参 考 文 献]

[1] 姚文兵, 孙培廷. 再论中国海员培训和发证制度改革 [J]. 航海教育研究. 2018(2): 01-05.
[2] 席朝飞. 万箱船舶机模拟器的虚拟设计及通信实现 [D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
[3] 东昉, 毛洪鑫. STCW 公约马尼拉修正案解读 [J]. 中国海事. 2012(5): 07-10.
[4] KIM Y. Rendering speeds of dynamic and static objects with tangent space normal mapping on 3D game [J]. Journal of Theoretical & Applied Information Technology, 2017, 95(17): 4165-4172.
[5] 王永坚, 陈丹, 陈景锋. 基于 XML 的船舶防污染设备实操评估智能仿真系统开发 [J]. 中国航海, 2016, 39(3): 26-30.
[6] 梁艳霞. 3ds Max 三维建模基础教程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2019: 25-163.
[7] 王智勇, 郑志强, 郭凤仪. 基于模糊结构元的栓接电缆接头松动故障综合评判 [J]. 电器与能效管理技术, 2016(15): 70-71.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)