DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)07-0087-06

基于虚拟现实技术的水电厂操作推演系统的设计与实现

江传宾, 陈 刚, 周显壤, 陈 玲
(向家坝水力发电厂,四川 宜宾 644600)

摘 要:为了观察水电厂操作特点,通常运用三维可视化技术建立操作推演模拟系统,面对特定环境和任务需要展开复杂计算,导致系统应用时连接时延较长。为了解决这一问题,提出基于虚拟现实技术的水电厂操作推演系统。硬件方面,完成了 360 度全景摄像头和大屏幕投影显示装置的设计。在软件方面,结合直方图均衡化算法和改进特征匹配算法,实现多帧水电厂操作现场图像的拼接,得到 360 度全景图。运用虚拟仿真技术,在虚幻引擎虚拟仿真平台内自动搭建水电厂仿真模型,将全景图映射到对应模型区域,并结合基于双向反射分布函数的优化模型,进一步渲染虚拟场景的光线环境。针对发电机、水轮机建立对应的设备运行数学模型,将其引入到虚拟场景中模拟设备正常操作。最后,建立包含人工指挥和人工智能智慧路径的推演交互操作模式,确保系统可以按照具体要求执行不同的推演动作。测试结果表明,在并发用户数量达到 450 时,系统连接时延仅为 0.71 s,满足了系统运行的实时性要求。

关键词:虚拟现实技术;全景图;虚拟场景;数学模型;水电厂;操作推演
中图分类号: TP391;TV737 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-7241(2026)07-0087-06

Design and implementation of hydropower plant operation inference system based on virtual reality technology

Jiang Chuanbin, Chen Gang, Zhou Xianrang, Chen Ling
(Xiangjiaba Hydropowe Plant, Yibin 644600, Sichuan, China)

Abstract: In order to observe the operational characteristics of hydropower plants, three-dimensional visualization technology is usually used to establish an operational deduction simulation system. Complex calculations are required for specific environments and tasks, resulting in long connection delays during system application. To address this issue, a hydroelectric power plant operation deduction system based on virtual reality technology is proposed. In terms of hardware, the design of a 360 degree panoramic camera and a large screen projection display device is completed. In terms of software, by combining histogram equalization algorithm and improved feature matching algorithm, multiple frames of images of hydropower plant operation site are concatenated to obtain a 360 degree panoramic image. Using virtual simulation technology, a simulation model of a hydroelectric power plant is automatically built within the virtual simulation platform of the unreal engine. The panoramic image is mapped to the corresponding model area, and combined with an optimization model based on bidirectional reflection distribution function, the lighting environment of the virtual scene is further rendered. Corresponding equipment operation mathematical models are established for generators and water turbines, and introduced into virtual scenes to simulate normal equipment operation. Finally, a deduction interaction operation mode is established that includes manual command and artificial intelligence intelligent path, ensuring that the system can execute different deduction actions according to specific requirements. The test results show that when the number of concurrent users reaches 450, the system connection delay is only 0.71 s, which meets the real-time requirements of system operation.

Keywords: virtual reality technology; panoramic view; virtual scenes; mathematical model; hydroelectric power plant; operational deduction

在水利水电领域,水电厂作为重要的能源供应基地,其安全、高效运行对于保障电力供应和推动社会经济发展具有重要意义。但水电厂的操作和管理涉及众多复杂的工艺流程和设备,对于操作人员的专业技能和应变能力提出了很高的要求。常规员工培训条件下,口头描述水电厂操作推演过程面临着诸多挑战,难以真实反映实际场景中的复杂性和不确定性。为了提高水电厂的操作效率和管理水平,设计并实现一套高效、智能的水电厂操作推演系统显得尤为重要。

近年来,已经有很多学者对水电厂操作推演系统的设计与实现进行了研究。例如,马小平等[1]提出基于数字孪生和 MBSE 的推演系统,以大量环境情况数据为基础,应用建模语言搭建系统逻辑架构,并运用孪生监控和情景仿真技术,得到动态操作推演结果。但是,数字孪生技术实

收稿日期:2025-02-25;**录用日期**:2025-04-28
基金项目:中国长江电力科技项目资助(Z422302007)
作者简介:江传宾(1970—),男,工程硕士,研究方向为水电站运行与管理。
引用本文:江传宾, 陈刚, 周显壤, 等. 基于虚拟现实技术的水电厂操作推演系统的设计与实现[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(7):87-92. (Jiang Chuanbin, Chen Gang, Zhou Xianrang, et al. Design and implementation of hydropower plant operation inference system based on virtual reality technology [J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(7):87-92.)

施所需的数据获取可能受到技术、设备和环境等因素的限制,导致数据不完整或存在误差,系统基于此给出的推演结果不准确。王喆等[2]提出基于 RIMER 的推演方法,明确各种系统运行影响要素之间的联系,生成基于叶斯拓扑结构的情景演化模型。对现场采集数据进行关联挖掘,筛选出部分有效数据输入模型中,自动推演出不同情况下的操作场景。但是,该系统中应用的算法在处理大规模或高复杂度数据时,需要完成经历众多计算步骤,使得系统实时性较差。王乐宁等[3]提出基于数字物理混合仿真技术的推演系统,明确水电厂内设备元件分布情况后,运用数字仿真技术构建对应的模拟场景,并应用数字物理混合仿真技术对模拟场景中的设备进行远程控制,使其与真实场景中设备运行状态无缝对接,基于此推演出设备后续操作状态。但是,该系统主要聚焦于特定的水电厂设备和场景,对于不同型号、不同规模的水电厂设备,可能需要重新构建仿真模型,证明其应用灵活性较差。Xie 等[4]综合决策者情绪、动态贝叶斯网络和 DS 证据理论设计的推演方法,将影响设备操作状态的主观因素和客观因素结合起来,开发出基于动态贝叶斯网络的情景演绎模型,再应用证据理论和情绪更新机制,优化模型在不确定环境下的演化特点,得到准确的操作推演结果。但是,将决策者情绪、动态贝叶斯网络和 DS 证据理论融合到一个模型中需要解决诸多技术难题,如何有效整合这些不同领域的知识和技术也没有定论,导致系统应用可靠性较差。

以 360 度实景图为基础,利用虚拟现实技术构建水电厂的虚拟环境,使操作人员能够身临其境地体验水电厂的运行过程。通过该系统,操作人员可以进行虚拟的操作推演,模拟各种工况下的操作流程和应急预案,提高应对突发情况的能力。同时,该系统还可以用于员工培训,通过模拟真实场景中的操作过程,使员工更加直观地了解水电厂的运行原理和设备操作方法,增强培训效果[5]。

1 水电厂操作推演系统

基于虚拟现实技术的水电厂操作推演系统,通过提供一个沉浸式、交互式的虚拟环境,为操作人员打造了一个高效、安全的培训平台。该系统利用 360 度全景图,让操作人员仿佛置身于真实的水电厂中,进行开关闸门、监控仪表、调整发电机参数等操作,并实时反馈操作结果,为水电厂的运营管理提供强有力的技术支持。具体的系统架构如图 1 所示。

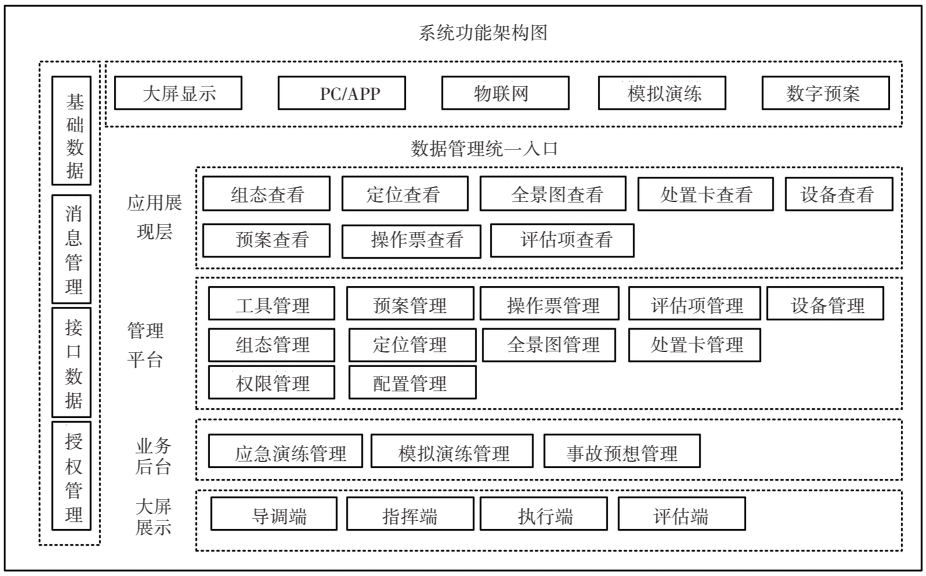


图 1 系统架构图

Fig. 1 System architecture diagram

2 水电厂操作推演系统硬件设计

2.1 360 度全景摄像头设计

为了获取水电厂内部现实图像,为操作推演系统的建立提供依据,在系统硬件设计阶段,研究一种可转动的 360 度全景摄像头,其具体结构如图 2 所示。

图 2 中,360 度全景摄像头包含球体、支架、安装座等多个组成结构,在球体外侧安装普通摄像头,通过支架和球体的转动改变摄像头拍摄角度,获取水电厂内目标场景的全景图像。

2.2 大屏幕投影显示装置设计

大屏幕显示装置是水电厂操作推演系统的另一个重要组成硬件,承担着将每个推演环节展示给观察人员的任务[6]。为了满足不断增长的系统可视化显示要求,在控制台和控制终端的共同作用下,获取网络计算机给出的水电厂操作推演结果,并在图像处理模块将其与实时监控信号、DVD 图像结合起来,将多路信息同步显示到大屏幕上,得到完整的系统输出内容。

水电厂操作推演系统实现所需的重要硬件设备搭建完成后,以此为基础展开后续软件设计。

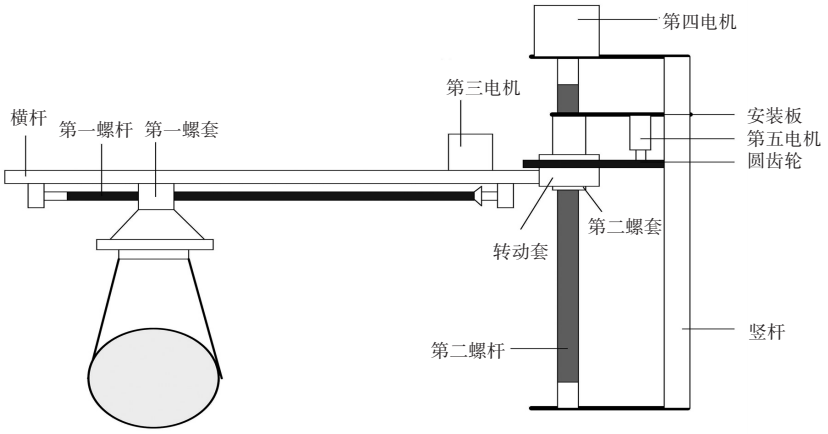


图 2　360 度全景摄像头结构

Fig. 2　360-degree panoramic camera structure

3　水电厂操作推演系统软件设计

3.1　建立水电厂全景图

由于 360 度全景摄像头采集的图像是以连续帧的形式存在的,想要得到水电厂全景图,需要先实现图像的拼接处理。图像拼接处理之前,考虑到环境光线带来的干扰影响,定义式(1)所示的直方图均衡化变换函数,通过该函数处理原始图像,输出质量更高的水电厂操作现场图[7]。

$$a_i^{'} = \sum_{i=1}^{L-1} \left(\frac{n_i}{m}\right) \tag{1}$$

式中,i 表示灰度级,$a^{'}$ 表示直方图均衡化变换后的像素灰度值,L 表示图像中出现的灰度级总数,n 表示某一个灰度级对应的像素数量,m 表示图像像素总量。

针对所有图像像素点完成均衡化变换处理,解决外界光照条件影响产生的图像亮度突变问题[8],得到预处理后的水电厂操作场景图像。随后,按照图 3 所示特征模板选取方式标注图像特征区域,找到不同图像上对应的特征子区域。其特征模板如图 3 所示。

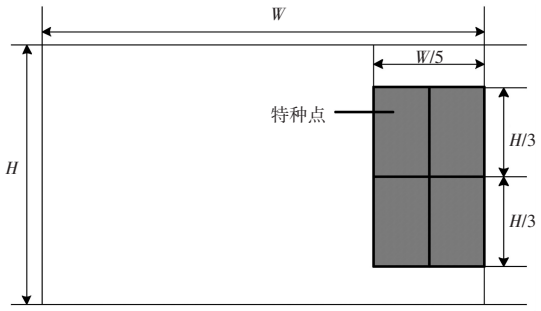


图 3　特征模板

Fig. 3　Feature template

根据特征模板选取结果,原始图像被划分为多个子区域,通过公式(2)计算灰度偏差值参数,基于此检索出灰度信息最明显的特征点。

$$\begin{cases} b_j = \mathrm{argmax}_u\left[\eta_{u,j}^2\right] \\ \eta_{u,j}^2 = \sum_{g=1}^{H} g^2 \times \tau_g - Q_{u,j}^2 \end{cases} \tag{2}$$

式中,u 表示分段,j 表示图像子区域,b 表示目标特征点灰度偏差值,argmax 表示最大值返回索引,η 表示分段的灰度偏差值,Q 表示灰度平均值,H 表示最大灰度级,g 表示目标灰度级,τ 表示满足目标灰度级要求的像素点数量。

找到每一幅水电厂现场图像的特征模板和代表特征点后,通过式(3)所示的评价函数,分析任意两幅图像特征点的匹配程度。

$$f = \sum_{j=1}^{J} \left(b_j - k_j\right) \tag{3}$$

式中,f 表示评价值,J 表示图像子区域数量,k 表示待匹配图像最明显特征点的灰度值偏差。

当评价函数取值最高,代表组合两个图像子区域特征点属于最佳匹配点[9],标注出所有特征匹配点后,将其重叠起来即可实现水电厂全景图拼接。

虚拟现实技术的水电厂操作推演系统在设计与实现方面具有诸多优势。在增强培训效果上,它能提供沉浸感体验,构建与真实水电厂相同的虚拟场景,让操作人员像置身于真实环境般熟悉布局和设备;还可提供安全的操作演练环境,操作人员能进行如开机、停机、故障处理等操作,操作失误也不会损害真实设备,同时可根据操作人员技能水平和需求提供个性化培训内容。在提高操作效率方面,其能将操作流程可视化,操作人员可直观看到操作步骤对应的设备动作和状态变化,并且操作能得到实时反馈与优化,有助于理解操作要点、减少操作时间。

3.2　技术构造虚拟操作场景

在三维仿真系统中,运用 3ds Max 工具执行虚拟现实技术,建立以 360 度全景图为基础的水电厂操作虚拟场景。实际虚拟操作场景构造过程中,利用渐入渐出融合法[10],对拼接后形成的全景图进一步展开融合处理,该阶段所应用的数学公式为

$$\begin{cases} R^{''} = dR + (1-d)R^{'} \\ G^{''} = dG + (1-d)G^{'} \\ B^{''} = dB + (1-d)B^{'} \end{cases} \tag{4}$$

式中,d 表示渐变因子,R、G、B 表示第一幅图像的红色值、绿色值和蓝色值,$R^{'}$、$G^{'}$、$B^{'}$ 表示第二幅图像的红色值、绿色值和蓝色值,$R^{''}$、$G^{''}$、$B^{''}$ 表示融合后图像的红色

值、绿色值和蓝色值。

图像重叠边界融合效果达到理想程度后,运用虚拟现实技术将其映射到水电厂基本场景模型上,得到包含细节信息的虚拟场景。随后,考虑到水电厂部分设备处于露天环境中,受到光照的影响物体表面产生光线反射[11],为了确保虚拟场景的真实性,借助于虚幻引擎虚拟仿真平台,设计式(5)所示的基于双向反射分布函数的优化模型,对虚拟场景的材质物理属性和光学属性进一步渲染。

$$\lambda(q,v)=\lambda_1(q,v)+\mu(q,v) \tag{5}$$

式中,λ 表示优化后的虚拟场景光线渲染模型,q 表示入射光线,v 表示反射光线,λ_1 表示漫反射模型,μ 表示微表面高光反射模型。

其中,

$$\lambda_1(q,v)=\frac{C}{\partial} \tag{6}$$

$$\mu(q,v)=\frac{F(q,v)\omega(q,v,\zeta)T(h)}{4(\partial\cdot q)(\partial\cdot v)} \tag{7}$$

式中,C 表示材质的散射反照率,∂ 表示法线,ζ 表示半角矢量,F 表示菲涅尔函数,ω、T 分别表示几何函数和法线分布函数。

面向水电厂虚拟操作场景,执行上述给出的优化渲染模型,得到更加贴合真实环境的虚拟环境。

3.3 设计设备运行仿真数学模型

依托于虚拟现实技术和 360 度全景图搭建水电厂操作虚拟场景后,为了模拟具体的操作推演行为,深入分析水电厂中发电机、水轮机这两个核心设备的运行模式,并给出对应的数学模型[12-15]。其中,发电机运行模型表示为三阶模型。

$$\begin{cases}\phi_1=X_2Z_2-\psi Z_1\\ \phi_2=E_2-X_1Z_1-\psi Z_2\end{cases} \tag{8}$$

$$T_1E_2=E'-E_2-(\bar{X}_1-X_1)Z_1 \tag{9}$$

$$J\frac{W}{t}=T''-\hat{T} \tag{10}$$

式中,ϕ_1、ϕ_2 分别表示 d 轴和 q 轴的电压,X_1、X_2 表示 d 轴和 q 轴同步电抗,Z_1、Z_2 表示 d 轴和 q 轴电流值,$\bar{X}_1$ 表示 d 轴暂态电抗,ψ 表示定子绕组电阻,T_1 表示 d 轴瞬态开路时间常数,E'、E_2 分别表示 q 轴瞬态电动势和励磁电动势,J 表示转子加速度,W 表示转速,t 表示发动机运行时间,T''、$\hat{T}$ 表示开始时间和停止时间。

在不考虑限幅环节的情况下,水轮机工作基本方程可以表示为

$$\begin{cases}\gamma_{t+1}=\gamma_t(A,D,\alpha,\Gamma)\\ \rho'=\rho(A,D,\alpha,\Gamma)\end{cases} \tag{11}$$

式中,γ 表示水轮机主动力矩,ρ、ρ' 表示动态更新前后的流量值,A 表示工作水头,D 表示水轮机工作转速,α、Γ 分别表示导水叶开度和轮叶转角。

将上述给出的数学模型代入到虚拟场景中,模拟水电厂的正常运行操作。

3.4 实现水电厂操作虚拟推演

考虑到水电厂操作推演系统需要实现与人员的互动,以便操作人员理解每个推演步骤。因此,在系统软件设计的最后一个环节,结合人工、人工智能两种操作方式,为水电厂操作推演系统下达命令,并确保系统可以按照水电厂操作推演交互操作模式如图 4 所示。

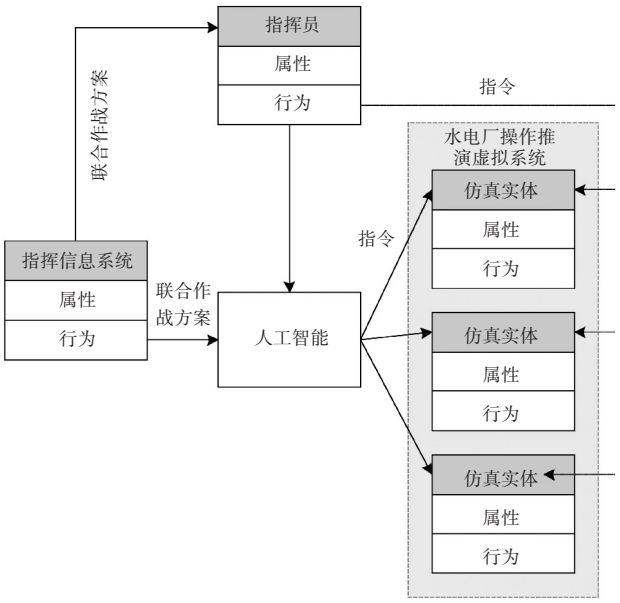


图 4 电厂操作推演交互操作模式

Fig. 4 Interactive operation mode for hydroelectric power plant operations

图 4 所示的推演交互操作模式中,虚线代表人工指挥方式,指挥员发出的每个指挥命令都会以文件的形式导出,下发到每个仿真实体中解析执行。而实线代表了人工智能交互操作方式,该路径下指挥信息会自动转换为推演指令,由控制器代替指挥员智能完成推演工作。在操作推演中,超宽带(ultra-wideband, UWB)人员定位技术扮演着关键角色,通过精确的位置信息支持指挥端、执行端和评估端的流程控制。指挥端负责任务分配与规划,实时监控并调整推演策略,同时通过通信系统与执行端保持紧密沟通。执行端接收任务指令,利用 UWB 定位系统进行精确操作,并通过智能语音系统与指挥端和其他执行端实时沟通,反馈执行情况。评估端则收集推演数据,进行分析评估,并生成报告提供改进建议。多方联动通过图像监控、UWB 定位、全景图和智能语音系统,确保推演现场的全面监控和信息的快速传递,从而提高推演的效率和准确性,实现各端协同工作和场景感知的最大化。

4 系统测试

4.1 测试环境

在完成对基于虚拟现实技术的水电厂推演系统设计后,为了确保其能够发挥预期的应用效果,需要完成大量系统测试工作。以某水电厂为背景,采集水电厂内设备运

行数据和操作现场全景图像,在三维虚拟仿真平台上开发对应的操作推演系统,通过测试该系统的功能和性能,判断上文研究内容是否有价值。

为了确保系统操作推演结果能够可视化呈现,按照系统硬件设计内容,现场制作大屏幕投影显示装置,该装置相关参数如表 1 所示。

表 1　大屏幕投影显示装置参数

Tab. 1　Parameters of large screen projection display device

项目参数	参数取值
大屏尺寸	2.5 m×1.5 m
显示尺寸	2.43 m×1.22 m
模块单点直径	3.75 m
模块单点间距	4.75 m
单元板点数	32×64
单元板显示面积	152 mm×305 mm
分辨率	41 000 点/m^2
可视角度	+60°
刷新频率	>60 帧/秒
消耗电力	550 W/m^2
环境温度	−20~65 ℃
环境湿度	5%~95%
通讯距离	≤100 m

除了大屏幕投影显示装置外,在测试环境中还需要准备多媒体 PC 设备、360 度全景摄像头等设备,以便生成可以正常投入使用的水电厂操作推演系统。

4.2　全景图处理

依托于 360 度全景摄像头采集大量水电厂操作现场图形,是实现操作虚拟推演的基础。按照系统软件设计给出的内容所示,先对每一帧现场图像进行直方图均衡化处理,得到图 5 所示的处理效果。

在图 5(a)、5(c)中,原始图像可能受到多种因素的影响,如光线分布不均、曝光不足或过度,以及图像中可能存在的颗粒状噪声,这些因素共同导致了图像细节的模糊和整体观感的欠佳。然而,在图 5(b)、5(d)中,经过直方图均衡化处理后的图像展现出了截然不同的面貌。图像的对比度得到了显著增强,使得原本在暗部或亮部难以分辨的细节变得清晰可见。这是因为直方图均衡化通过重新分配图像中像素值的分布,使得像素值更加均匀地分布在整个灰度级范围内,从而提高了图像的动态范围。并且图像的曝光问题得到了有效解决。在原始图像中,可能存在的过曝或欠曝区域在经过处理后得到了适当的调整,使得整个图像的亮度分布更加均衡,避免了因曝光不当而导致的细节丢失。



(a) 场景 1 处理前　(b) 场景 1 处理后

(c) 场景 2 处理前　(d) 场景 2 处理后

图 5　处理前后水电厂现场图像

Fig. 5　On-site images of the hydropower plant before and after processing

将大量预处理后的图像拼接起来,得到图 6 所示的 360 度全景图。

以水电厂 360 度全景图为基础,结合虚拟现实技术,在三维仿真平台上搭建具体的操作推演模拟场景。

4.3　操作推演系统可视化查询结果

水电厂操作推演系统应用实现后,点击虚拟操作页面即可进入主页,显示完整水电厂三维虚拟模型。随后,点击进入多个场景关卡,可以查询系统对每个水电厂运行场景的操作推演,得到图 7 所示的可视化查询结果。

从图 7 可以看出,新设计操作推演系统的应用,可以实现对水电厂运行环境的模拟,并通过交互执行各项操作推演动作,满足系统设计阶段给出的基本功能要求。

4.4　系统性能测试结果

将基于虚拟现实技术的水电厂操作推演系统应用到电

力人员培训工作中,可能面临着众多用户同时访问的情况[16-17]。近年来,系统连接时延成为衡量系统应用性能的重要指标,连接时延指的是用户向系统发出请求,到该请求执行花费的具体时间。在两个场景下,以并发用户数量50、100、150、200、250、300、350、400、450为例,分别在不同情况下观察系统平均连接时延,得到如图8所示的统计结果。



图6 水电厂360度全景图

Fig. 6 360-degree panoramic view of the hydropower plant

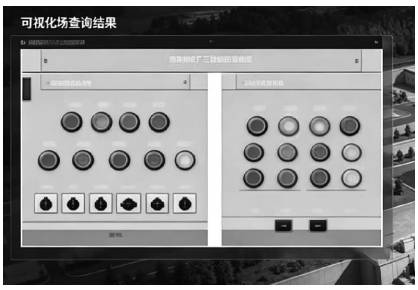


图7 操作推演系统可视化查询结果

Fig. 7 Visualized query results of the operation deduction system

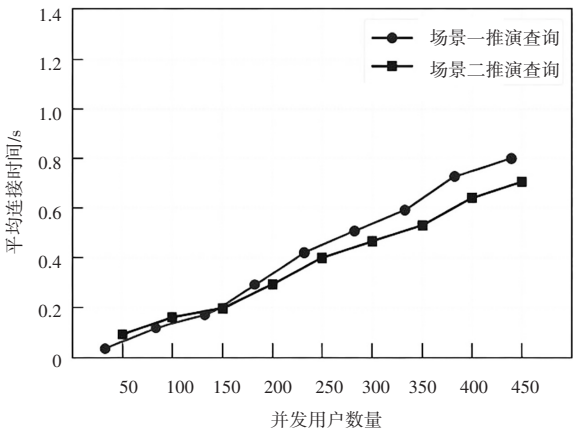


图8 不同并发用户数量下系统平均连接时延

Fig. 8 Average connection latency of the system under different concurrent user quantities

从图8的详细数据中,可以深刻洞察到水电厂操作推演系统在面对不同并发用户数量时的卓越表现,尤其是其在保持系统实时性方面的创新优势。在两个不同的测试场景下,随着并发用户数量的持续增多,系统所承受的压力也随之加剧,这是衡量一个系统在高并发环境下性能稳定性的关键指标[18-19]。尽管并发用户数不断攀升,直至达到450这一相对较高的阈值,水电厂操作推演系统的平均连接时延依然能够控制在0.8 s以内。这一数据不仅彰显了系统在高并发环境下的出色响应能力,更体现了其设计上的创新之处[20]。

5 结论

通过测试研究可知,基于虚拟现实技术的水电厂操作推演系统具有巨大的潜力和价值。不仅为水电厂操作人员提供了一个安全、高效的训练平台,而且显著提升了操作技能和应对复杂工况的能力。未来,期待通过进一步优化系统性能、拓展应用场景,将这一技术推向更广阔的领域,为水电行业的智能化、安全化运行贡献更多力量。

参考文献

[1]马小平, 王旭, 贾利民, 等. 基于数字孪生和MBSE的铁路防灾监测仿真推演系统设计[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(3):168-181.
[2]王喆, 罗梦柯, 刘丹, 等. 基于RIMER的台风灾害下城市供水系统失效情景推演研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(10):178-185.
[3]王乐宁, 邢奥斌, 张路, 等. 基于数字物理混合仿真技术的水电厂电气二次实训系统的研究[J]. 中国新技术新产品, 2022(9):37-40.
[4]Xie X, Tian Y, Wei G. Deduction of sudden rains torm scenarios: integrating decision makers' emotions, dynamic Bayesian network and DS evidence theory[J]. Natural Hazards, 2023, 116(3):2935-2955.
[5]张洪莉. 关于水电厂智慧电厂建设的思考[J]. 广西电业, 2020(3):30-32.
[6]徐小迪, 郭忠平, 王蕊. 基于动态推演的矿山采掘计划调控系统[J]. 煤矿安全, 2024, 55(2):228-234.
[7]梁艳, 徐希涛, 徐静波, 等. 基于数字孪生的智能水电厂建设初步研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2023, 9(6): 103-107.
[8]张伟, 张紫涵, 李斌, 等. 电厂锅炉实验虚拟仿真系统建设与应用[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(4):69-73, 98.
[9]张洁雄, 张杰, 穆永超, 等. 太阳能有机朗肯循环发电系统模拟优化研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(9):236-240.
[10]刘汇, 丁成林, 石玲, 等. 新型潮流能发电装置的水动力学特性模拟[J]. 可再生能源, 2023, 41(3):420-426.
[11]廖瑞金, 罗豪, 成立, 等. 面向数字孪生变压器的计算机辅助运维(CAM+)构架与关键技术[J]. 高电压技术, 2024, 50(3):924-940.
[12]王明月, 刘东, 魏力鹏, 等. 电动汽车参与虚拟电厂优化调控的状态推演策略研究[J]. 供用电, 2024, 41(1):14-25, 41.
[13]杨娜, 杨国华, 金旭荣, 等. 计及电动汽车与空调系统的虚拟电厂优化经济调度[J]. 电测与仪表, 2025, 62(12):108-114.
[14]邢媛媛, 周青云, 吴俊越, 等. 基于设备状态的智能变电站运行辅助决策模型构建方法[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(11):61-64.
[15]冯小峰, 冯霞山, 张正峰, 等. 基于最大似然法和决策树的智能电能表计量误差检测方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(12):205-211.
[16]邓正东, 雷宣念, 梁俊宇, 等. 基于多属性决策的SCADA系统轻量级安全防护措施决策模型[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(12):61-65, 167.
[17]冯前. 某水电厂信息网络安全防护浅析[J]. 广西电业, 2024(7):24-28.
[18]欧阳为民. 智慧水电厂建设应用研究[J]. 中国设备工程, 2024(增刊1):71-72.
[19]王鹏, 张勤, 季益俊. "双碳"目标下考虑多主体互动的虚拟电厂合作博弈鲁棒优化策略[J]. 电测与仪表, 2025, 62(10):85-95.
[20]刘炜程, 张欢, 杨晓林. 小水电调控风电功率波动的虚拟电厂构建方案研究[J]. 河南科技, 2025, 52(12):10-14.