

# 轨道交通设备远程运维辅助检修 孪生系统的设计及应用\*

姜良奎<sup>1,2</sup> 杨朝霞<sup>3</sup> 林 蓝<sup>2</sup> 韩 勇<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学设计艺术学院, 611731, 成都; 2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266111, 青岛;  
3. 中国海洋大学信息科学与工程学部, 266100, 青岛//第一作者, 正高级工程师)

**摘 要** 随着轨道交通技术的飞速发展,对轨道交通设备的运维方式和检修效率提出了更高的要求。轨道交通设备应结合“工业 4.0”的特点,与“智能制造”紧密结合,利用 AR (增强现实) 的三维注册、虚实融合显示、人机交互等技术,对其运维管理进行升级。基于 Uinity3D 软件与 Android (安卓软件系统) 混合架构,开发了轨道交通设备远程运维辅助检修孪生系统。该系统可支持智能眼镜和手机等远程用户端运行设备运维的智能化、移动化和信息化。用户可通过远程视频通话共享视角,与虚拟模型进行实时交互,进而提升设备的检修效率。该系统还开发了虚拟教学培训功能,支持对虚拟模型进行多次操作,可节省培训成本,减少误操作。

**关键词** 轨道交通; 设备智能运维; 增强现实技术; 人机交互; 远程运维辅助检修孪生系统

**中图分类号** U29-39

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2022.07.042

## Design and Application of Remote Operation and Maintenance Auxiliary Twin System of Rail Transit Equipment

JIANG Liangkui, YANG Zhaoxia, LIN Lan, HAN Yong

**Abstract** With the rapid development of rail transit technology, higher requirements are put forward for the operation and maintenance mode and efficiency of rail transit equipment. Rail transit equipment shall be combined with the characteristics of 'industry 4.0' and 'intelligent manufacturing', and its operation and maintenance management shall be upgraded by using AR (augmented reality) three-dimensional registration, virtual reality fusion display, human-computer interaction and other technologies. Based on the hybrid architecture of Uinity3D and Android, a remote operation and maintenance auxiliary twin system of rail transit equipment is developed. The system can support the intelligentization, mobility and informatization of e-

quipment operation and maintenance of remote users such as smart glasses and mobile phones. Users can share perspectives through remote video calls, interacting with virtual models in real time, so as to improve maintenance efficiency of the e-equipment. The system has developed virtual teaching and training function, which supports multiple operations of the virtual model, saving training cost and reducing mis-operation.

**Key words** rail transit; equipment intelligent operation and maintenance; augmented reality; man-machine interaction; remote operation and maintenance auxiliary twin system

**First-author's address** Department of Art Design, Southwest Jiaotong University, 611731, Chengdu, China

## 0 引言

目前,我国轨道交通智能制造的基础理论和技术体系建设较为滞后,亟需通过信息化、智能化手段改善设备运维管理现状。对于传统的轨道交通设备运维软件,国内外比较成熟的研究有:文献[1]提出基于 B/S (浏览器/服务器) 架构的设备 OSS (运维支撑系统),通过传感器在线数据检测及传输进行设备故障分析;文献[2]基于信息化技术手段开发了京沪高铁标准化作业平台,实现了移动端的基础数据共享,由后台进行综合管理;文献[3]提出基于 RFID (射频识别) 的列车运维系统,通过标签读取数据进行可视化分析。这些系统的后台大多采用了目前流行的移动互联网技术,但可视化手段单一,用户在客户端的操作感不足,体验感较差。

AR (增强现实) 技术的引入突破了传统的二维局限,通过加入三维动画、视频等可视化形式,更有助于用户对信息的理解。该技术通过跟踪用户佩戴的智能眼镜在现实世界中的位姿来判断用户的

\* 国家重点研发计划项目(2020YFB1710400);山东省科技重大专项(2017CXGC0608)

视线方向,并精确叠加虚拟信息,以增加信息交互的真实感。目前 AR 在轨道设备方面也有成功的应用案例,例如:文献[4]提出了基于 Open Frameworks 框架和改进 AR 码的轨道交通列车仿真系统,该系统实现了虚拟列车在真实的轨道模型上行驶的场景;文献[5]提出搭载在移动端的 AR 装配系统,用户可使用手指触屏拾取零件与真实设备的交互操作。但这些交互方式相对单一,没有具体针对轨道交通设备运维进行研发设计。

综上所述,传统的轨道交通设备运维软件主要存在以下问题:①在运维计划、实际作业、信息反馈之间没有健全的闭环机制,运维效率低下;②对技术人员的要求较高,各岗位技术职工分工独立明确,不同岗位运维人员难以进行有效沟通;③需要大量的人力、时间来支持这些运维软件的运作。

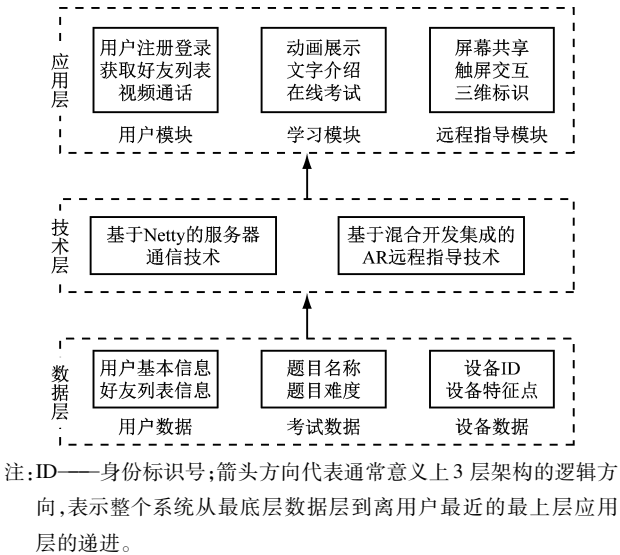
数字孪生是实现物理与信息融合的一种有效手段,而设备运维车间物理世界与信息世界的交互与融合是实现“工业 4.0”、“中国制造 2025”、工业互联网、基于 CPS(信息物理系统)的制造等目标的瓶颈之一。文献[6]阐述了数字孪生车间的系统组成、运行机制、特点、关键技术等,在此基础上探讨了基于车间孪生数据的车间物理世界和信息世界的交互与共融理论和实现方法。文献[7]为虚拟现实平台的搭建过程提供了清晰有效的建模思路及优化方法。文献[8]提到了 Netty(JBOSS 公司提供的—个基于客户端服务器的 java(计算机编程语言)开源框架)建立在 NIO(同步非阻塞)基础之上,对 NIO 进行封装优化,具有高性能、高可靠性、异步非阻塞、基于事件驱动等优点。

AR 与轨道交通设备的紧密结合,对轨道交通设备的智能化有着重要的意义。本文基于移动安卓平台,将 AR 与 VR(虚拟现实)技术混合,集成开发形成轨道交通设备远程运维辅助检修孪生系统,并重点对以下 3 个方面进行深入研究:①支持用户随时随地在线自我学习,通过局部虚拟三维动画进行教学操作指导,并研发在线自测模块;②将 AR 技术应用到技术人员的视频通话中,实现在虚拟模型上叠加实时三维标识工具,使不同岗位技术人员间的沟通更加形象、直观;③集成用户手势捕捉,更好地与虚拟模型交互。

## 1 轨道交通设备远程运维辅助检修孪生系统的架构

轨道交通设备远程运维辅助检修孪生系统采

用 C/S(客户端/服务端)架构,其系统架构如图 1 所示。



注:ID——身份标识号;箭头方向代表通常意义上 3 层架构的逻辑方向,表示整个系统从最底层数据层到离用户最近的最上层应用层的递进。

图 1 轨道交通设备远程运维辅助检修孪生系统的架构示意图

Fig. 1 Framework diagram of remote operation and maintenance auxiliary twin system of rail transit equipment

以动车组转向架的检修指导流程为例,现场检修人员借助移动设备或智能眼镜的摄像头扫描并识别出真实转向架的特征点,覆盖同等比例的虚拟模型后,可支持在线学习指导;现场检修人员也可通过视频通话方式,将现场检修第一视角共享给远程技术人员,此时远程技术人员通过点击移动设备屏幕触屏,在虚拟模型上叠加线条、箭头、扳手、锤子等标记,进行相关维修操作的三维指导动画展示,并实时传输给现场检修人员,以指导现场检修。轨道交通设备远程运维辅助检修孪生系统分为应用层、技术层和数据层 3 个层次。

1) 应用层。应用层的功能分为 3 个模块:①用户模块实现用户注册和登录,获取好友列表、视频通话功能;②学习模块实现在线观看设备 UI(用户界面)文字介绍、局部三维动画检修操作视频,并可通过在线操作考试检测其学习效果;③远程指导模块可基于视频通话实现双方屏幕共享,通过触屏交互在虚拟模型上实现维修指导操作。

2) 技术层。技术层的主要技术包括:①基于 Netty 的服务器通信技术,该技术结合 Spring 开源框架、Mybatis 开源框架构建了服务器端,可实现不同客户端之间信息的读取处理和数据交换;②基于混合开发集成的 AR 远程指导技术,其将 Android

Studio 集成开发工具的讯飞语音和声网通话服务打包成 aar 文件,并集成到 unity 平台进行开发操作,该技术结合 Vuforia 软件实现视频通话、模型识别操作,并导出支持 APK(Android 应用程序包)的文件,供用户使用。

3) 数据层。数据层的数据存储在 MySQL 数据库中,主要包括 3 种类型:①用户数据,用以存储用户 ID、用户名、密码等用户基本信息及好友列表信息;②考试数据,用以存储考试题目的名称、难度等;③设备数据,用以存储设备 ID 及设备特征点数据。数据存储采用 SQLite 数据库存储、Shared-Preferences 数据存储、文件存储 3 种方式。

## 2 轨道交通设备远程运维辅助检修孪生系统的关键技术

### 2.1 基于 Netty 的服务器通信技术

本系统基于 TCP(传输控制协议)的长连接实现可靠、高频率的双向实时通信,基于 Netty、Spring、Mybatis 的混合框架开发服务器将服务器端分为通信层、业务逻辑层、数据层。其中:通信层使用基于 Netty 的 NIO 框架,该框架是与用户进行数据交换的通道,主要负责客户端连接、消息读取、信息处理,并进行相应的业务分发;业务逻辑层接收来自通信层的消息,将不同类型的业务分配至对应的处理方式中;数据层采用 Mybatis 框架,该框架使用 DAO(数据访问对象)模式实现数据库接口,把业务逻辑和数据访问解耦,直接操作数据表。

由于 TCP 存在粘包问题,本系统可预先对消息包进行处理,将其分为消息头和消息体两部分,并在消息头中加入消息体的长度数据,以设计合适的消息协议栈。消息体分为消息长度、保留字节、消息类型 3 个部分,其大小分别为 2 字节、1 字节、1 字节,以尽量保证消息包的体积,有效解决粘包问题,提高序列化和反序列化的速率。将消息类型设计在消息头中,服务器端收到二进制文件后,将根据消息类型将其反序列化成 POJO(简单无规则 java 对象)。

通过 Netty 框架中的 IdleStateHandler 类进行客户端心跳检测,若 15 s 内客户端未向服务器端发起读写操作,则由服务器主动向客户端发送空闲心跳包,在 ConcurrentHashMap 类中设置空闲次数。若空闲次数超过 3 次,则断开 Channel 连接,以避免资源浪费。

### 2.2 基于混合开发集成的 AR 远程指导技术

#### 2.2.1 混合开发技术

由于 Unity3D 软件出色的渲染功能及多平台兼容的特性,本系统采用基于 Unity3D 和 Android(安卓软件系统)混合开发的模式。为保证系统布局的统一性,本系统的混合开发以 C#语言为主导,主要在 Unity3D 软件中开发,导入由 Android Studio 中视频通话等模块功能封装成的 aar 包,通过编写脚本实现系统的基本功能。本系统可导出在 Android 平台上安装的 APK 文件,将客户端搭载在手机移动端和智能眼镜端,其客户端框架如图 2 所示。

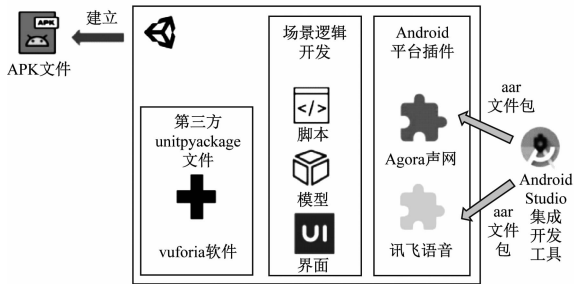


图2 轨道交通设备远程运维辅助检修孪生系统的客户端框架示意图

Fig.2 Client end framework of remote operation and maintenance auxiliary twin system of rail transit equipment

#### 2.2.2 视频通话技术

视频通话是远程 AR 交互的基础。由于移动设备自带的后置摄像头会与 Vuforia 软件的摄像头冲突,故采用 Vuforia 软件的摄像头进行画面传输共享,现场客户端通过截屏推流功能将用户视角共享至远程用户。

#### 2.2.3 坐标转换技术

现场用户需接收远程用户手指触屏数据的屏幕像素坐标,通过坐标转换将屏幕像素坐标绘制在世界坐标系上,并基于追踪算法实现 AR 效果。坐标轴转换的计算式如下:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

式中:

$Z_c$ ——相机坐标系下的 Z 坐标;

$u, v$ ——表示像素平面坐标;

$u_0$ ——图像的中心像素坐标和图像原点像素坐标之间相差的横向像素数;

$v_0$ ——图像的中心像素坐标和图像原点像素坐标之间相差的纵向像素数;

$d_x、d_y$ ——分别表示像素坐标系和图像坐标系之间的转换关系,即  $x$  方向和  $y$  方向下一个像素所占长度;

$f$ ——相机焦距;

$R$ ——旋转矩阵;

$T$ ——平移向量;

$0$ ——零向量;

$X_w、Y_w、Z_w$ ——分别为世界坐标系下的  $X、Y、Z$  三维坐标。

### 3 轨道交通设备远程运维辅助检修孪生系统的功能模块

#### 3.1 用户模块

##### 3.1.1 用户的注册和登录

如图 3 a) 所示,在初始界面输入用户名、密码,与已有数据库表进行匹配,实现登录功能。若系统内无该账户,点击注册按钮后将跳转至用户登录界面,如图 3 b) 所示,此时用户需填写基本信息。系统将检测数据库表中是否存在相同的数据,若不存在,则提示注册成功。

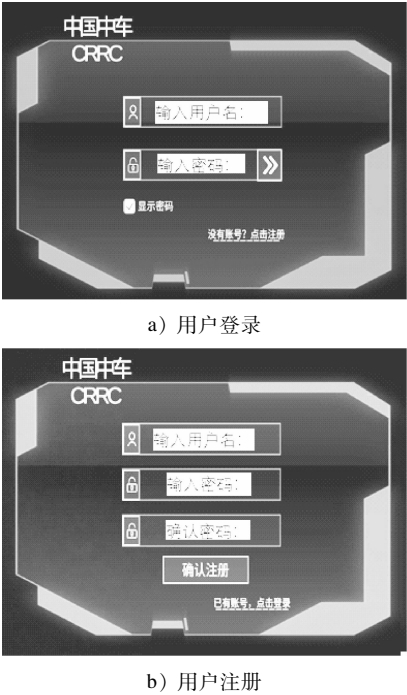


图 3 用户登录与注册界面截图

Fig. 3 User login and registration interface

##### 3.1.2 获取好友列表

用户登录后,可从系统的数据库中读取在线好友数据,并在列表中显示其基本信息。点击指定的好友对话框可发起一对一的视频通话请求,如图 4 所示。若对方点击同意,则可建立视频通话。



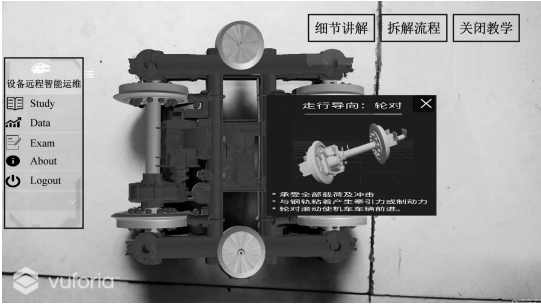
图 4 发送视频通话界面截图

Fig. 4 Screenshot of sending video call interface

#### 3.2 学习模块

##### 3.2.1 在线学习模块

用户在菜单栏点击“study”(学习)按钮,界面将呈现学习面板。系统弹出提示信息,提示用户将移动设备摄像头对准当前设备。系统将采用物体识别方式利用 Vuforia 算法提取场景内的特征点,并与 Vufoira 软件云存储库内的数据进行对比,匹配成功后则精准叠加同比例虚拟模型。点击“细节讲解”,可通过浮动 UI 面板查看设备指定部位的基本信息,如图 5 所示,此时指定部位模型将高亮显示。



注:Data——数据;Exam——考试;About——关于;Logout——注销。

图 5 设备的 UI 文字介绍界面截图

Fig. 5 Screenshot of UI text introduction interface of the device

如图 6 所示,点击“拆解流程”后,系统将以虚实结合的方式展示设备指定部位的相应维修操作分步指导动画,供用户反复观看。

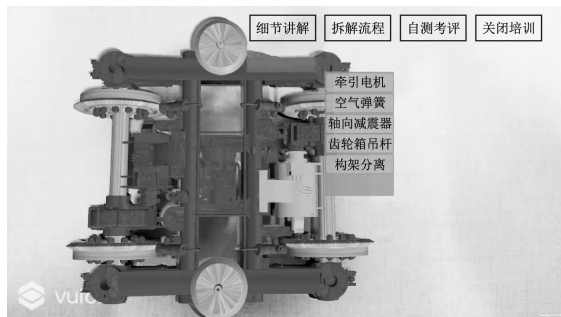


图6 设备的维修学习动画界面截图

Fig.6 Screenshot of equipment maintenance learning animation interface

### 3.2.2 在线考试模块

在普通用户登录模式下,点击“Exam”按钮,可从数据库随机抽取不同难度的考题,以 UI 面板的方式向用户展示“考试题目”及“考试难度”,用户可以选择“开始作答”或点击“下一题”切换题目,如图 7 所示。点击“开始作答”时,考试题目将以 UI 方式切换到右上方予以展示。若点击“下一题”,系统则随机抽取新题目供用户测试。

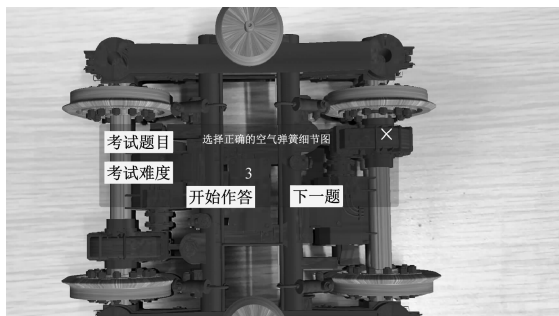


图7 普通用户的考试界面截图

Fig.7 Screenshot of the examination interface of ordinary users

若为管理员登录模式,点击“Exam”按钮,系统将跳转到题库后台的管理界面,支持查看所有题库数据,包括题目的编号、名称、难度等,并可对题目进行增加、删减、修改、查询等操作。

## 3.3 远程指导模块

### 3.3.1 屏幕共享模块

当用户双方建立起视频通话时,系统将跳转到用户角色选择界面,此时需根据用户角色先点击选择 UI 面板中的“现场维修”或“远程指导”。其中:现场维修端采用 Vuforia 软件自带的摄像头,可将当前设备画面共享至远程指导端;远程指导端则开启移动设备前置摄像头。若视频画面卡顿,可在左侧菜单栏调节当前画面的分辨率,系统默认的分辨

率为 2 560 像素 × 1 040 像素。

### 3.3.2 模型标记模块

远程指导端通过手指触屏点击“虚拟模型”,基于上文的坐标转换计算式,坐标转换在所点击的屏幕位置处精准添加指定标记(如线条、箭头等)来指示当前需检修部位,也可添加扳手、锤子等维修工具,给现场维修端实时展示维修动画,并提供维修技术指导。现场维修端的巡检人员可在屏幕右侧看到当前所使用的工具,如图 8 所示。

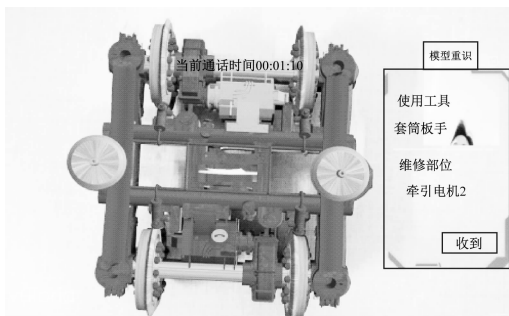


图8 添加三维标记指示设备检修部位

Fig.8 Adding three-dimensional marks to indicate the maintenance parts of the equipment

### 3.3.3 触屏交互模块

远程指导端通过手指触屏点击模型需维修部位,系统将循环展示设备局部维修的操作指导动画,需拆解部位的设备模型将高亮显示。现场维修端可在右侧对话框中点击“使用工具”和“维修部位”来查看相关信息。用户可使用两个手指触碰虚拟模型,系统将通过判断手指触屏个数和触屏点距离实现模型的放大、缩小、旋转等操作,如图 9 所示。



图9 现场维修端的触屏交互

Fig.9 Touch screen interaction on field maintenance end

## 4 结语

本文设计的轨道交通设备远程运维辅助检修孪生系统,引入了 AR、VR 技术,基于 Netty 服务器

通信技术和基于混合开发集成的 AR 远程指导技术,采用智能化、自动化的手段提高了轨道交通设备运维的指导效率和管理水平。该系统的主要创新之处在于:基于 AR 智能交互技术构建了以车辆转向架设备为例的轨道交通设备运维指导的可视化平台,支持技术人员进行远程诊断和操作指导,设备的检修效率大为提升;通过立体 UI 界面和局部模型覆盖的三维指导动画,很大程度给用户带来了虚实结合的观感,使技术人员与用户间的信息交流传递更加直观。

轨道交通设备远程运维指导系统虽然已经实现了其既定的基本功能,系统运行稳定,但仍然存在以下问题需要进一步改善:①基于物体识别的追踪技术,其识别效果和精度受光强的影响较大,应研究解决在不同光照条件下追踪算法的稳定性;②系统目前的应用范围仍较窄,只能为轨道交通车间的少数设备提供运维指导,在下一步的系统开发中应扩充至多个应用场景,实现对其他设备的智能运维。

## 参考文献

- [1] 常公平,刘捷涌,刘卫波,等. 高铁车站设备运维支撑系统的设计与实现[J]. 铁路技术创新, 2014(3):32.  
CHANG Gongping, LIU Jieyong, LIU Weiobo, et al. Design and implementation of high-speed railway station equipment operation and maintenance support system[J]. Railway Technology Innovation, 2014(3):32.
- [2] 王玲玲,祁敏,孙启良. 京沪高铁标准化作业管理平台及移动接入技术[J]. 铁道通信信号, 2016(3):32.  
WANG Lingling, QI Min, SUN Qiliang. Standardized operation

management platform and mobile access technology of Beijing-Shanghai High-speed Railway[J]. Railway Signalling & Communication, 2016(3):32.

- [3] KOUR R, KARIM R, PARIDA A, et al. Applications of radio frequency identification (RFID) technology with eMaintenance cloud for railway system[J]. International Journal of System Assurance Engineering & Management, 2014, 5(1):99.
- [4] 王伟明,何亚轩,任彬,等. 轨道车辆运行的增强现实仿真系统研究[J]. 图学学报, 2017(4):577.  
WANG Weiming, HE Yaxuan, REN Bin, et al. Research of railway vehicles working augmented reality simulating system[J]. Journal of Graphics, 2017(4):577.
- [5] 房顺沐. 移动增强现实产品装配三维交互方法[D]. 广州: 广东工业大学机电工程学院, 2016.  
FANG Shunmu. 3D interaction for mobile augmented reality assembly[D]. Guangzhou: School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, 2016.
- [6] 陶飞,张萌,程江峰,等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017(1):1.  
TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017(1):1.
- [7] 张威,荣佳. 高铁虚拟现实三维仿真场景优化方法的研究[J]. 电脑知识与技术, 2015(24):174.  
ZHANG Wei, RONG Jia. Research on optimization method of 3D simulation scene of high-speed railway virtual reality[J]. Computer Knowledge and Technology, 2015(24):174.
- [8] 龚鹏,曾兴斌. 基于 Netty 框架的数据通讯服务系统的设计[J]. 无线通信技术, 2016(1):46.  
GONG Peng, ZENG Xingbin. Design of the data communication service system based on Netty framework[J]. Wireless Communication Technology, 2016(1):46.

(收稿日期:2020-05-07)

## (上接第 205 页)

- XIE Xiongyao, LI Jun, WANG Qiang. Automatic monitoring and mobile data publishing system of ground settlement induced by shield tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016 (S2):788.
- [2] 刘杰. 盾构施工实时数据远程交互软件开发与应用[J]. 地下工程与隧道, 2016(2):19.  
LIU Jie. Development and application of remote real-time interactive data software of shield construction[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2016(2):19.
- [3] 张为民,马杰. 生产设备实时数据远程监测研究与实现[J]. 计算机应用与软件, 2018(9):126.  
ZHANG Weimin, MA Jie. Research and implementation of the real-time data remote monitoring for manufacturing facilities[J]. Computer Applications and Software, 2018(9):126.
- [4] 宋江健. 基于 OpenTSDB 的能源管理系统并行架构研究[D]. 广州:广东工业大学, 2019.  
SONG Jiangjian. Research on parallel architecture of energy

management system based on OpenTSDB [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.

- [5] 柴处处,韩庆敏,杜军钊. 基于 OPC UA 技术的实时数据服务的研究与应用[J]. 微型机与应用, 2017(22):5.  
CHAI Chuchu, HAN Qingmin, DU Junzhao. Research and application of real-time data service based on OPC UA technology [J]. Microcomputer & Its Applications, 2017(22):5.
- [6] 邱云,季振山,张祖超,等. 基于 OPC UA 技术的 Labview 与 PLC 通信[J]. 计算机系统应用, 2017(2):231.  
QIU Yun, JI Zhenshan, ZHANG Zuchao, et al. Communication between Labview and PLC based on OPC UA [J]. Computer Systems & Applications, 2017(2):231.
- [7] 单若琦. 一种基于 OpenTSDB 的海量实时数据存储系统[D]. 广州:华南理工大学, 2016.  
SHAN Ruoqi. A massive real-time data storage system based on OpenTSDB [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.

(收稿日期:2020-05-05)