

# 基于 BIM 技术的轨道工务运维智慧信息平台研发

胡赵磊<sup>1</sup>, 宋鑫<sup>2</sup>, 徐蕴航<sup>1</sup>, 张鹏飞<sup>1</sup>, 张洪<sup>1</sup>, 余路<sup>1</sup>

(1 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 佛山市地铁运营有限公司, 广东 佛山 528000)

**摘要:**【目的】为推动轨道工务运维信息化、智慧化, 提高检修效率。【方法】基于 Revit 二次开发和 Unity3D 平台, 研发了铁路轨道工务运维智慧信息平台。平台采用数据层、应用层和界面层三层构架, 集成了人机交互、运维信息管理和技术信息查阅三大模块, 可实现 AR 扫描、BIM 模型漫游展示、复杂设施拆装作业动画模拟、轨道几何形位波形图绘制、TQI 值计算、检修记录查阅、技术规章和 CAD 图纸查询等功能, 具有实用性高、便携性好、可操作性强的特点。【结果】经工务现场应用测试, 平台性能良好, 各功能均能稳定运行, 达到了研发预期目的。【结论】平台的构建和研发为推动铁路轨道工务运维信息化、智慧化提供了一种新思路。

**关键词:** 铁路工务; BIM 技术; 智慧信息平台; 移动增强现实; 人机交互

中图分类号: U216

文献标志码: A

## Research and development of intelligent information platform for operation and maintenance of track maintenance based on BIM technology

HU Zhaolei<sup>1</sup>, SONG Xin<sup>2</sup>, XU Yunhang<sup>1</sup>, ZHANG Pengfei<sup>1</sup>, ZHANG Hong<sup>1</sup>, Yu Lu<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Performance Monitoring Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Foshan Metro Operation Group Co., Ltd., Foshan 528000, China)

**Abstract:** 【Objective】 To promote the informatisation and intelligence of railway engineering operation and maintenance, and to improve the efficiency of maintenance. 【Method】 Based on the secondary development of Revit and Unity3D platform, a railway track engineering operation and maintenance intelligent information platform is developed. The platform adopts a three-layer structure of data layer, application layer and interface layer, integrates three modules of human-computer interaction, operation and maintenance information management and technical information access, and can realize functions such as AR scanning, BIM model roaming display, animation simulation of complex facilities disassembling and assembling operation, drawing of track geometric waveform, calculation of TQI, access to maintenance records, querying of technical regulations and CAD drawings, etc., which is of high utility, high portability, and strong operability. It has the features of high practicality, good portability and strong operability. 【Result】 The platform performs well in the field application test of public works, and all functions can run stably, which achieves the expected purpose of research and development. 【Conclusion】 The construction and development of the platform provides a new way of thinking to promote the informatisation and intelligentisation of railway engineering operation and maintenance.

**Key words:** Railway engineering; BIM technology; Intelligent information platform; Mobile augmented reality; Human-computer interaction

收稿日期: 2024-01-15

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB2602201), 国家自然科学基金项目(52178425, 52368063), 2022 年江西省科技专项, (20223AEI91004), 江西省高层次高技能领军人才培养工程项目资助(1600223003)

**【研究意义】**轨道结构检修是维护线路正常运营必不可少的环节,随着我国铁路运营里程的不断增加,现场静态检查数据、维修计划、整治方案、质量验收数据等工务运维信息激增,这些信息通常以离散形式保存,如纸质资料、Excel或Word文件,难以方便地查询和统计,不仅对后期查询检索与统计分析造成困难,还会为检修人员夜间天窗期检修材料的使用带来不便。因此,开发铁路运维信息共享与管理平台对提高线路检修效率具有重要意义。

**【研究现状】**近年来,建筑信息模型(Building Information Model, BIM)技术在轨道交通基础设施领域得到了越来越广泛的应用,国内外学者开展了大量的研究工作并取得了丰硕的成果。王万齐等<sup>[1]</sup>以通用数据环境为核心,基于openBIM标准形成了铁路工程建设协同工作模式,并应用在京张高速铁路工程中。李思宇等<sup>[2]</sup>研究了基于Oracle数据库的无砟轨道监测数据信息管理平台,对轨道板进行监测和管理。卢春房等<sup>[3]</sup>融合BIM、AI、IoT、GIS等技术,建立了线路设备空天车地一体化检测监测平台,提出了平台应用层的主要技术功能,为重载铁路线路设备智能运维提供支撑。王同军<sup>[4]</sup>根据智能高速铁路的现有研究成果,构建了三维智能高速铁路体系架构模型。闫立忠<sup>[5]</sup>针对铁路四电工程的BIM应用,提出了一种覆盖协同设计到施工管理的全过程技术路线,利用BIM模型完成铁路四电工程的拓展应用。万伟明等<sup>[6]</sup>开发了铁路车站改扩建工程资料管理系统,实现了改扩建工程资料5D可视化管理。刘惊灏等<sup>[7]</sup>基于B/S架构,通过监测物联网体系中的传感器,搭建了铁路运维管理数据系统,将可视化BIM技术应用在铁路运维中。任星辰<sup>[8]</sup>结合各平台BIM软件,开发BIM插件,对装配式建筑进行了三维可视化协同设计。刘珍珍<sup>[9]</sup>建立了以BIM技术为支撑的铁路信号专业运维管理模式,提出了专业-工程单元-系统-设备四级模型结构树构建方法。韩德志等<sup>[10]</sup>针对城市轨道交通工程建设,通过建立建设阶段与运维阶段的数据映射关系,实现建设与运维的顺畅衔接。陈东生等<sup>[11]</sup>利用移动互联网和云计算技术,开发了一款铁路工务智能移动终端系统,系统通过Android平台发布,能够为工务现场提供完整的辅助检修服务。赵铁柱等<sup>[12]</sup>研究了基于GIS技术的高铁维修数据标准,开发了高铁综合维修设施工艺智能设计系统,提升了设计效率与设计标准化程度。Min Shi-Ping<sup>[13]</sup>结合英国干线铁路网络上的工程案例,基于BIM与GIS技术,提出了

一种铁路养护投资评价方法,确定了更经济的铁路养护策略。Hyunjoo等<sup>[14]</sup>将BIM模型中的信息以IFC标准存储,并在此基础上开发了设备管理系统。Hassanain等<sup>[15]</sup>基于IFC标准定义运维信息,提出了设备运维管理模型,以描述设备运维工作中的检查和维修信息。Riaz等<sup>[16]</sup>通过可视化呈现BIM模型,对监测传感器接收到的数据进行实时分析,以避免在建筑工地密闭空间中工作的工人遇到紧急情况。

**【关键问题】**现有研究大多集中于轨道运维平台功能性的研发,虽在一定程度上降低了工人劳动量,提高了运维效率,但在提高平台便携性、实用性等方面的研究还相对较少。

**【创新特色】**为推动轨道工务运维信息化智慧化,提高检修效率,本文以某高校轨道交通实验中心轨道为研究对象,针对轨道的构造特点,基于Revit二次开发和Unity3D平台,研发了轨道工务运维智慧信息平台,通过人机交互、运维信息管理和技术信息查阅三大功能,为推动轨道工务运维数字化、信息化、智慧化提供了一种新思路。

## 1 轨道 BIM 模型自动构建

构建轨道 BIM 模型是轨道工务运维智慧信息平台功能实现的基础。本文通过对 CAD 二次开发和 Revit 二次开发实现了轨道 BIM 模型的自动建立,其设计思路如图 1 所示。

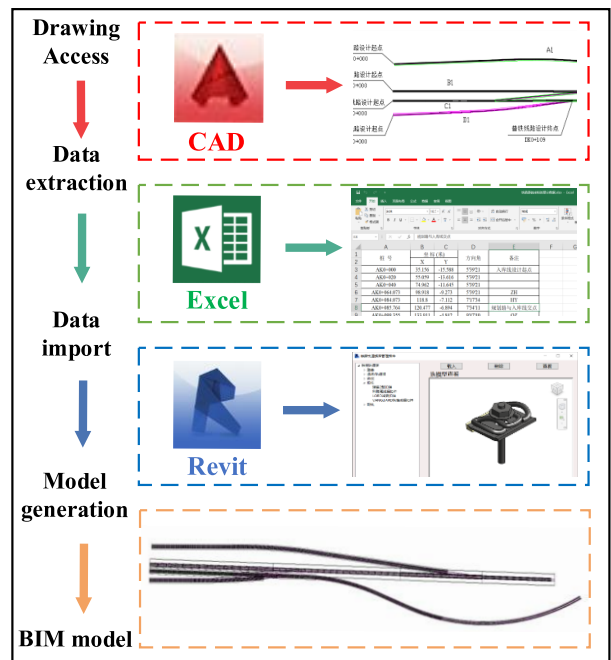


图 1 轨道 BIM 模型自动构建设计思路  
Fig.1 Design idea of automatic construction of track BIM model

### 1.1 轨道构件族创建及族库插件开发

目前 Revit 软件主要应用于房屋建筑工程中, Revit 的系统构件族多为墙、柱和梁等,并不适用于轨道构件的创建。因此需要利用 Revit 族编辑器,选择合适的族样板,结合轨道构件的特点,创建轨道构件族。

基于 Revit 软件,通过 Revit 二次开发扩展软件功能对构件族进行管理,族库根据《铁路工程信息模型分类和编码标准》<sup>[17]</sup>以树结构形式对构件族进行分类,通过调用 RevitAPI 来执行族文件载入、族文件删除和族模型查看等操作。

### 1.2 Revit 二次开发及模型的建立

先获取 CAD 图纸中所有多段线,然后计算每个数据所在方格的最大点和最小点,得到所需二维数据,最后把读取到的二维的坐标加上对应构件的控制点相对坐标和高程数据即可得到对应构件的三维坐标。

对 Revit 进行二次开发,通过提取出的数据,自动创建轨道结构中路基、道床、轨道板、轨枕、扣件、钢轨等构件 BIM 模型,最终建立轨道 BIM 模型。轨道 BIM 模型构建流程图如图 2 所示。

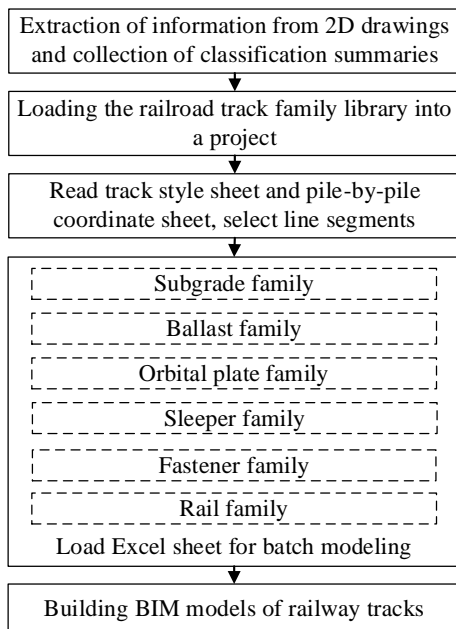


图 2 轨道 BIM 模型构建流程图  
Fig.2 Railway BIM model construction flow chart

## 2 轨道工务运维智慧信息平台开发

### 2.1 平台需求分析及主要功能

现场检修过程中,复杂结构的检修需要进行多器械、多工序作业,是工务维修的重点和难点。工务现场累积了大量的纸质和电子资料,储存形式的

不同,导致难以系统地查询和统计。此外,现场作业需要设备台账和历史检修数据支持,纸质资料不方便携带,也不便于在夜间天窗期使用。所以,可以利用先进的技术手段,研发基于 BIM 技术的铁路轨道工务运维智慧信息平台,提供便捷的辅助维修服务。根据需求分析,本文所研发的平台拟实现以下功能。

#### 1) 人机交互功能

基于 BIM 和移动增强现实技术,针对轨道部件开发人机交互功能,展示构件的 BIM 模型以及模拟构件拆装作业。在轨道工务维修过程中使用移动设备识别工务现场的设施设备,通过放大、缩小和上下左右滑动屏幕等操作,观察构件的细部结构,展示相关设施设备的拆装作业模拟过程,为轨道工务检修提供参考,增加本平台的实用性。

#### 2) 运维信息管理功能

运维信息管理功能能够集成设备的名称、型号、数量和编码等信息,实现各系统间信息的关联;展示铁路轨道的结构和空间位置排布,记录主要设施设备的检修故障数据;通过载入轨道几何形位检测数据,可以绘制轨道几何形位波形图,计算各段线路轨道质量指数(Track Quality Index, TQI)<sup>[18]</sup>,为铁路轨道工务运维检修决策提供参考。

#### 3) 技术信息查阅功能

可在平台中查看铁路轨道的工务维修规范和相关设施设备 CAD 图纸等技术信息,现场工务人员通过移动端即可查询所需的检修资料,提高铁路轨道工务运维检修效率。

### 2.2 平台开发环境及架构设计

本轨道工务运维智慧信息平台开发环境:

- 1) PC 操作系统: Windows 10 操作系统
- 2) PC 开发平台: Unity3D 2017.3.0f3
- 3) 开发环境: .NET Framework 4.7
- 4) 开发工具: Vuforia SDK, JDK
- 5) 开发语言: C#(Visual Studio 2017)
- 6) 应用运行平台: Android 端

平台架构采用了经典的三层架构设计,如图 3 所示。

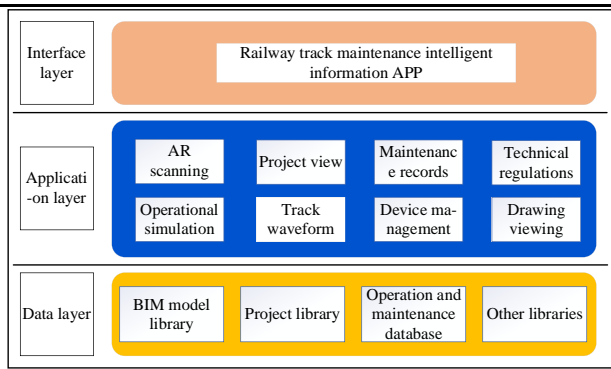


图3 平台架构

Fig.3 Platform architecture

界面层主要是通过轨道工务运维智慧信息APP对平台应用功能进行展示，方便使用。应用层主要基于Unity3D平台定制相应功能，共分为三个功能模块，分别为人机交互模块、运维信息管理模块和技术信息查阅模块，通过相应的功能程序与数据层建立联系，实现数据的存储与提取。数据层主要由BIM模型库、运维数据库和技术信息库构成。

### 2.3 人机交互功能实现

#### 1) 移动增强现实技术实现

该技术实现流程主要分为以下几个步骤：采集目标图片提取特征点，打包成数据集；然后与摄像机的视频帧进行对比，通过三维跟踪注册技术实现现实世界中的跟踪和定位；将虚拟世界的元素添加到现实世界中进行人机交互。移动增强现实技术实现流程如图4所示。

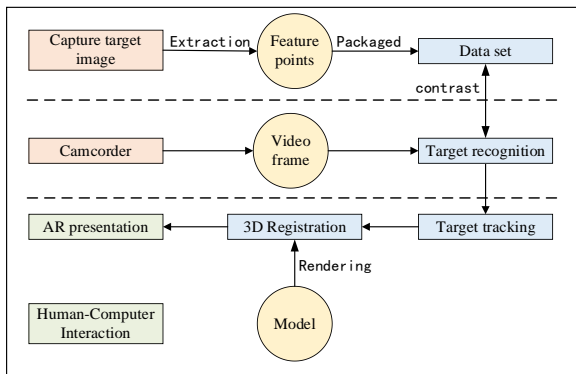


图4 移动增强现实技术实现流程

Fig.4 Mobile augmented reality technology implementation process

#### 2) 构件BIM模型展示功能实现

使用移动增强现实技术识别到构件后，在屏幕上展示构件BIM模型，并添加交互功能，如模型旋转、放大、缩小，以及触发按钮等。实现这些交互功能，需要判断交互所使用的手指数量及其触摸状态，并根据不同的情况调用相应的控制指令。单指滑动屏幕旋转模型，双指滑动屏幕根据两点滑动相

对距离实现模型的放大和缩小，双击模型跳转到构件拆装作业模拟场景，点击退出按钮退回到平台首页场景。实现模型旋转、放大、缩小、跳转功能的程序逻辑如图5所示。

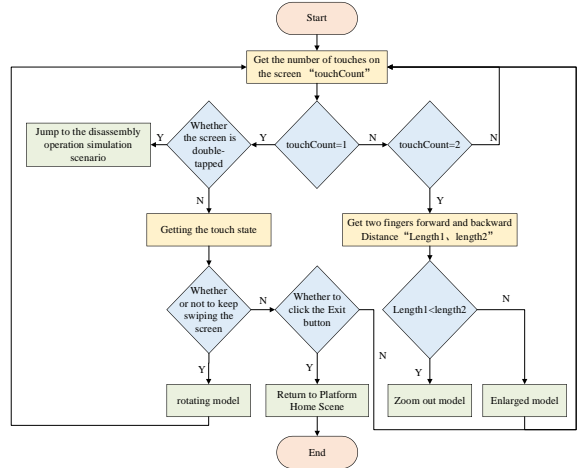


图5 BIM模型展示功能实现逻辑

Fig.5 BIM model display function realization logic

#### 3) 构件拆装作业模拟功能实现

在展示构件BIM模型的基础上，添加Animator组件，模拟复杂设备拆装作业动画。设置“上一步”和“下一步”按钮，以便对每一步动画进行控制，并添加相应的文字说明。相应的动画控制逻辑如图6所示。

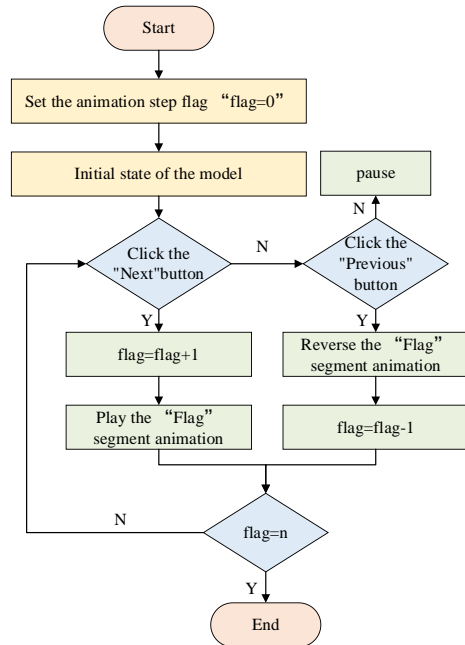


图6 动画控制逻辑

Fig.6 Animation control logic

### 2.4 运维信息管理和技术信息查阅功能实现

TQI是指200m单元区段内轨道的左高低、右高低、左轨向、右轨向、轨距、水平和三角坑7项不平顺的标准偏差之和，通过将全线分为若干个单

元进行计算后得到 TQI 的平均值, 以表示线路的整体状态, TQI 在轨道区段质量状态评价中发挥了巨大的作用。

TQI 值的计算公式如(1)-(3)。

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2} \quad (2)$$

$$TQI = \sum_{i=1}^7 \sigma_i \quad (3)$$

n: 采集点的个数 (200m 单元区段中 n=800);

$x_{ij}$ : 指 200m 单元区段中各项几何偏差的幅值,

$i=1, 2, \dots, 7; j=1, 2, \dots, n$ ;

$\sigma_i$ : 各项几何偏差的标准差;  $i=1, 2, \dots, 7$ ;

分别为: 左高低、右高低、左轨向、右轨向、轨距、水平、三角坑。

通过导入轨道几何形位检测数据文件, 将轨道的左高低、右高低、左轨向、右轨向、轨距、水平和三角坑数据按测点导入到对应设备模型中, 可在对应轨道模型上显示轨道几何形位波形图, 计算并显示该段轨道的 TQI 值。

基于 Unity3D 平台开发检修记录和设备管理界面, 该界面可编辑并保存如基本数字、字符串、照片等多种格式的信息, 实现运维信息管理功能。

将铁路轨道的工务维修规范和相关设施设备 CAD 图纸等技术信息录入平台, 实现技术信息查询、查询功能。

### 3 平台功能测试

#### 3.1 测试环境

当前以智能手机为代表的移动智能终端设备在性能表现上呈现跨越式发展, 本次测试所使用的移动设备配置参数见表 1。

表 1 移动设备参数

Tab.1 Mobile device parameters

项目	参数
CPU	骁龙 870
运行内存/G	12
屏幕分辨率/dpi	2340×1080
操作系统	MIUI 13.0.6 稳定版

#### 3.2 测试过程

为检验轨道工务运维智慧信息平台的功能, 进

行了工务现场应用测试。测试主要包括页面测试、人机交互功能测试、运维信息管理功能测试和技术信息查询功能测试。本平台发布于 Android 平台, 打开 App 进入平台主界面, 如图 7 所示。

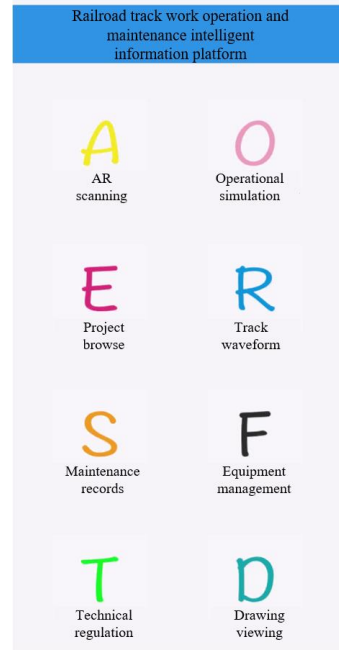


图 7 平台主界面

Fig.7 The main interface of the platform

平台主界面设置了八个功能按钮, 包括“AR 扫描”、“作业模拟”、“工程浏览”、“轨道波形”、“检修记录”、“设备管理”、“技术规章”和“图纸查看”。平台模块共分为人机交互模块、运维信息管理模块和技术信息查询模块。人机交互模块由“AR 扫描”和“作业模拟”按钮进入, 运维信息管理模块由“工程浏览”、“轨道波形”、“检修记录”和“设备管理”按钮进入, 技术信息查询模块由“技术规章”和“图纸查看”按钮进入。

页面测试主要是各页面按钮的功能性和 UI 显示效果测试, 经现场测试效果表明, 各页面按钮的功能性和 UI 显示均能达到预期的效果。



图 8 移动增强现实识别功能测试

Fig.8 Mobile augmented reality recognition function test

点击“AR 扫描”按钮，进入移动增强现实功能页面，调用移动智能终端的摄像机，在工务作业现场进行扫描识别，屏幕显示相应设备的三维模型于设备上方，如图 8 所示。

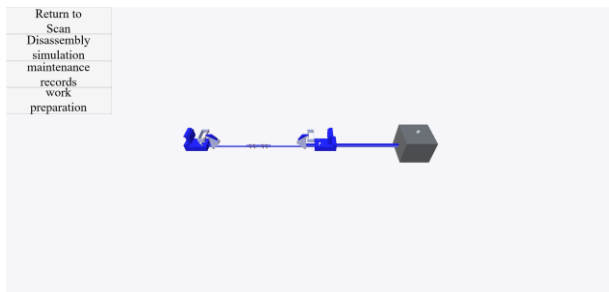


图 9 BIM 模型展示测试

Fig.9 BIM model demonstration test

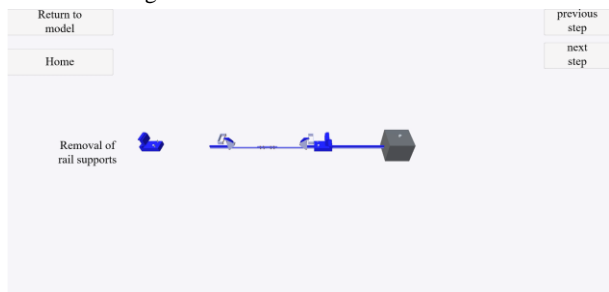


图 10 拆装作业模拟测试

Fig.10 Assembly-disassembly operation simulation test

可通过滑动或点击屏幕进行人机交互，双击三维模型进入构件 BIM 模型展示场景，如图 9 所示，通过放大、缩小、上下左右滑动屏幕等操作，观察模型的细部结构。点击“拆装模拟”按钮，可进入构件拆装作业模拟场景，点击“上一步”和“下一步”按钮拆装转辙器，如图 10 所示，如需查看相应构件具体维修作业信息，可通过“技术规章”按钮进入技术信息查阅模块查阅。

通过点击平台主界面的“工程浏览”按钮，进入工程浏览界面，双击构件三维模型，即可显示相关设施设备详细参数信息，如图 11 所示。

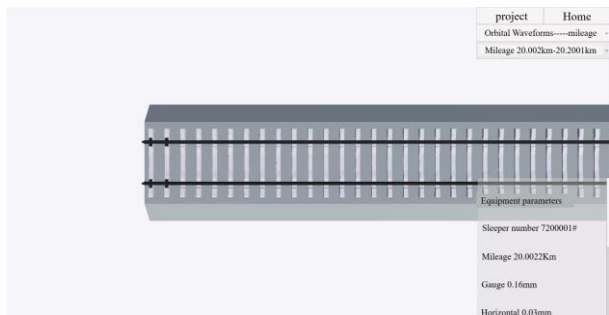
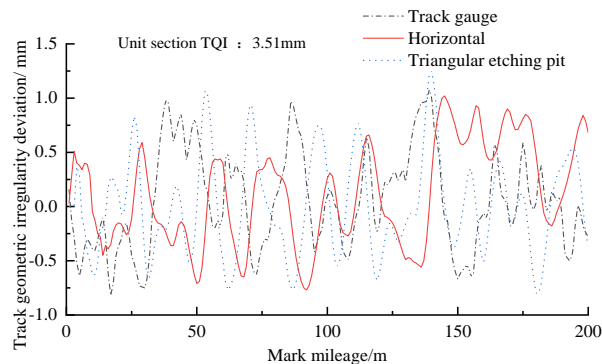


图 11 设备参数查看测试

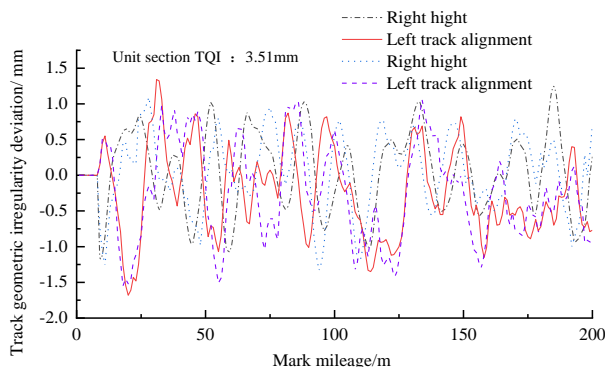
Fig.11 Equipment parameters view test

在工程浏览界面点击“轨道波形图——选择标

示里程”或主界面“轨道波形”按钮，进入轨道几何形位波形图界面，可在轨道模型上方查看对应标识里程轨道几何形位波形图及该段轨道的 TQI 值，也可将数据从系统中导出，由使用者自行绘制轨道几何形位波形图，以某高校轨道交通实验中心其中一段为例，计算标示里程 BK0+000-BK0+200 区段的 TQI 值，如图 12 所示。



(a) 轨距、水平、三角坑波形图



(b) 右高低、右轨向、左高低、左轨向波形图

图 12 轨道几何形位波形图显示测试

Fig.12 Track geometry waveform display test

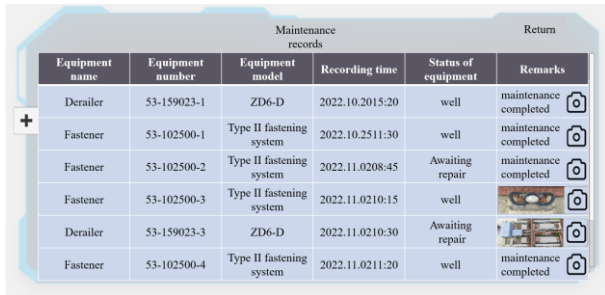
通过点击平台主界面“设备管理”按钮进入设备管理界面，在表格中按照相应的编号、名称、型号、数量、单位和现状录入设施设备信息，点击“+”按钮可增加表格的行，如图 13 所示。

Device management						Return
Number	Name	Model	Quantities	Units	Present situation	
1	Track inspection trolley	GPR1000	1	a	well	+
2	hydraulic track puller	YQB—15	1	a	well	
3	Digital torque wrench	TZCEM	5	a	well	
4	torque wrench	410—530	15	a	well	
5	Electric tamper	DZG—350	4	a	well	
6	Jack	YCW250	2	a	well	

图 13 设备管理录入测试

Fig.13 Equipment management input test

通过点击平台主界面的“检修记录”按钮或点击模型展示界面的“检修记录”按钮进入检修记录界面,在表格中按照相应的设备名称、设备编号、设备型号、记录时间、设备现状和备注录入检修记录,点击相机图标可以拍照记录设备现状,点击“+”按钮可增加表格的行,如图 14 所示。



Equipment name	Equipment number	Equipment model	Recording time	Status of equipment	Remarks
Derailer	53-159023-1	ZD6-D	2022.10.2015:20	well	maintenance completed
Fastener	53-102500-1	Type II fastening system	2022.10.2511:30	well	maintenance completed
Fastener	53-102500-2	Type II fastening system	2022.11.0208:45	Awaiting repair	maintenance completed
Fastener	53-102500-3	Type II fastening system	2022.11.0210:15	well	
Derailer	53-159023-3	ZD6-D	2022.11.0210:30	Awaiting repair	
Fastener	53-102500-4	Type II fastening system	2022.11.0211:20	well	maintenance completed

图 14 检修记录录入测试

Fig.14 Maintenance record entry test

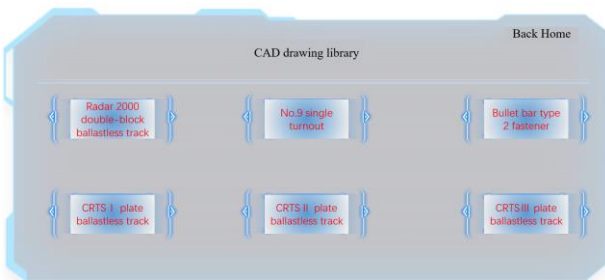


图 15 CAD 图纸库界面测试

Fig.15 CAD drawing library interface test

通过点击平台主界面的“技术规章”按钮进入技术规章界面,可选择查看设备标准、修理要求及设备修理主要作业要求。通过点击平台主界面的“图纸查看”按钮进入 CAD 图纸库界面图 15 所示,点击对应按钮,可以展示铁路轨道主要设施设备的 CAD 图纸。

通过工务现场应用测试,人机交互功能、运维信息管理功能和技术信息查阅功能均能正常使用,且都能达到预期目的。

当前,工务运维平台主要分为网站型平台和 APP 型平台,如孙雷等<sup>[19]</sup>基于 B/S 设计了铁路工务维修辅助平台,张超等<sup>[20]</sup>基于 Unity3D 平台开发了高速铁路工务智能维修移动应用程序。相比于其他工务运维平台,本平台在实用性和可操作性上具有明显优势。

相比于网站型平台,本平台运行更加流畅、稳定,同时所有功能均能离线使用,可避免在偏远山区工务维修现场由于网络不畅而导致平台不能正常使用的问题。

相比于 Windows 端应用,本平台为移动应用程序,便携性大大提高。和同类型的移动端平台相比,本平台内存大小仅 80M,对移动设备配置要求不高,平台界面简洁,操作简单,能有效满足工务现场辅助维修的需要。

## 4 结论

以某高校轨道交通实验中心轨道为研究对象,基于 Revit 二次开发和 Unity3D 平台研发了轨道工务运维智慧信息平台,详细地阐述了平台的构建过程及功能实现。主要结论如下:

1) 基于 Unity3D 开发平台,采用三层架构模型,研发了轨道工务运维智慧信息平台,并根据平台需求分析,实现了人机交互功能、运维信息管理功能和技术信息查阅功能。

2) 本平台能够漫游展示轨道的结构和空间位置排布;在维修过程中,可以识别现场的设施设备,直接提供相关设施设备的三维可视化模型和拆装作业模拟动画;导入轨道几何形位检测文件和轨道几何形位数据,可绘制轨道几何形位波形图并计算 TQI 值;可以查阅检修记录、设备管理资料、技术规章和 CAD 图纸等。相比于其他工务运维平台,本平台的实用性和可操作性大大提高,能有效提升工务现场的维修效率。

3) 本平台集成了多个独立功能,以标准化的检修场景为驱动,通过移动终端提供轨道工务运维信息,携带方便,可进一步提升轨道工务运维的智能化水平,对推动轨道工务运维向信息化、智慧化方向发展具有重要的参考价值。

## 参考文献:

- [1] 王万齐,李达燊,李飞.基于 openBIM 的铁路工程建设协同模式研究及应用[J].铁道运输与经济,2022,44(09):130-138.  
Wang Wanqi, Li Dashuang, Li Fei. Research and application of railway engineering construction collaborative model based on openBIM [J].Railway transportation and economy,2022,44(09):130-138.
- [2] 李思宇,李再玮,何越磊,等.无砟轨道监测数据信息管理系统的设计与实现[J].铁道标准设计,2019,63(09):28-33.  
Li Siyu, Li Zaiwei, He Yuelei, etc. Design and Implementation of Ballastless Track Monitoring Data

- Information Management System [J]. Railway Standard Design,2019,63(09):28-33.
- [3] 卢春房,马战国,蔡超勋.重载铁路线路设备智能感知体系框架研究[J].铁道建筑,2022,62(08):1-6.  
Lu Chunfang, Ma Zhanguo, Cai Chaoxun. Research on the framework of intelligent perception system for heavy haul railway line equipment [J]. Railway building,2022,62(08):1-6.
- [4] 王同军.中国智能高速铁路体系架构研究及应用[J].铁道学报,2019,41(11):1-9.  
Wang Tongjun. Research and Application of Intelligent High-speed Railway System Architecture in China[J].Railway Journal,2019,41(11):1-9.
- [5] 闫立忠.基于青连铁路四电工程 BIM 技术的应用研究[J].铁道标准设计,2019,63(04):141-147.  
Yan Lizhong. Research on the Application of BIM Technology Based on the Four Electric Engineering of Qinglian Railway [J].Railway Standard Design,2019,63(04):141-147.
- [6] 万伟明,何越磊,程岩,等.铁路车站改扩建工程资料管理可视化研究 [J]. 土木工程与管理学报,2019,36(06):156-160+165.  
Wan Weiming, He Yuelei, Cheng Yan, etc. Visualization research on data management of railway station reconstruction and expansion project [J].Journal of Civil Engineering and Management,2019,36(06):156-160+165.
- [7] 刘惊灏,苏谦,陈俊杰,等.基于 WebGL 扩展模型的铁路运维可视化研究 [J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(04):892-900.  
Liu Jinghao, Su Qian, Chen Junjie, etc. Research on visualization of railway operation and maintenance based on WebGL extended model [J].Journal of Railway Science and Engineering,2022,19(04):892-900.
- [8] 任星辰.装配式 BIM 技术在建筑全生命周期中的应用[J].铁道工程学报,2022,39(06):90-94.  
Ren Xingchen. Application of prefabricated BIM technology in the whole life cycle of buildings [J].Journal of Railway Engineering,2022,39(06):90-94.
- [9] 刘珍珍.铁路信号运维阶段 BIM 模型交付及数据标准研究[J].铁道标准设计,2021,65(04):144-148+154.  
Liu Zhenzhen. Research on BIM model delivery and data standard in railway signal operation and maintenance stage [J].Railway standard design,2021,65(04):144-148+154.
- [10] 韩德志,李博,华福才,等.面向城市轨道交通运维阶段的 BIM 模型建设[J].都市轨道交通,2022,35(04):182-187.  
Han Dezhi, Li Bo, Hua Fucui, etc. BIM model construction for urban rail transit operation and maintenance stage [J].Urban fast rail transit,2022,35(04):182-187.
- [11] 陈东生,徐贵红,陶凯,等.铁路工务智能移动终端系统的设计与实现[J].铁道建筑,2016(03):118-121.  
Chen Dongsheng, Xu Guihong, Tao Kai, et al. Design and Implementation of Intelligent Mobile Terminal System for Railway Engineering [J].Railway Building, 2016(03):118-121.
- [12] 赵铁柱,崔万里,孟庆宇,等.高速铁路综合维修设施工艺智能设计系统的开发与应用 [J]. 中国机械工程,2019,30(03):306-309.  
Zhao Tiezhu, Cui Wanli, Meng Qingyu, et al. Development and application of process intelligent design system for comprehensive maintenance facilities of high-speed railway [J]. China Mechanical Engineering, 2019,30(03):306-309.
- [13] Min Shi-Ping; Zhao Ling-Liang. Whole life cycle of railway[J]. Journal of Railway Engineering Society,2014,10:15-20.
- [14] Hyunjoo K. Intelligent facilities applicability and flexibility of open BIM standards for operations and maintenance[J]. 2014 ITcon,2007,(2):347-362.
- [15] Hassanain M, Froese T, Vanier D. Development of a maintenance management model based on IAI standards[J]. Artificial Intelligence in Engineering,2001,15(2):177-193.
- [16] Riaz Z, Arslan M, Kiani A K, et al. Co SMO S: A BIM and wireless sensor based integrated solution for worker safety in confined spaces[J]. Automation in Construction,2014,45:96-106.
- [17] 中国铁路 BIM 联盟. 铁路工程信息模型分类和编码标准(1.0 版)[M]. 铁路技术创新.2015,(01),8-111.  
China Railway BIM Alliance. Classification and Coding Standards for Railway Engineering Information Models ( Version 1.0 ) [M]. Railway Technology Innovation.2015,(01),8-111.
- [18] 许玉德,吴琰超,魏子龙,等.基于放大系数和权重组合的无砟轨道 TQI 计算 [J]. 华东交通大学学报,2021,38(05):101-109.  
Xu Yude, Wu Yanchao, Wei Zilong, etc. TQI calculation of ballastless track based on amplification factor and



weight combination [J].Journal of East China Jiaotong University,2021,38(05):101-109.

- [19] 孙雷,余朝刚,冯超等.铁路工务维修辅助平台的研究与应用[J].计算机与数字工程,2020,48(04):974-979.

Sun Lei, Yu Chaogang, Feng Chao et al. Research and Application of Railway Maintenance Auxiliary Platform [J].Computer and Digital Engineering,2020,48(04): 974-979.

- [20] 张超,何越磊,路宏遥.基于 BIM+移动增强现实的高速铁路工务智能维修技术研究 [J].铁道标准设计,2021,65(12):44-49.

Zhang Chao, He Yuelei, Lu Hongyao. Research on intelligent maintenance technology of high-speed railway engineering based on BIM + mobile augmented reality [J].Railway standard design,2021,65(12):44-49.

第一作者: 胡赵磊(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事轨道交通 BIM 技术方面的研究, Email: [2075839595@qq.com](mailto:2075839595@qq.com).



通信作者: 张鹏飞 (1975-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 国家自然科学基金获得者; 研究方向为桥上无缝线路设计理论与关键技术。E-mail: [zhangpf4236@163.com](mailto:zhangpf4236@163.com)。