



低温环境下实验数据可视化的高铁制动摩擦 虚拟仿真平台开发

张 训, 黄勇智, 张梅仙, 闫兆鑫, 马 蕾*

(西华大学 机械工程学院, 成都 610039)

摘要: 随着计算机虚拟仿真技术的高速发展, 虚拟仿真技术运用到高铁、交通、车辆等实验相关领域的需求日益增加。为解决高铁制动实验成本过高、实验安全及数据不具备可视性等问题, 该文以 Unity3D 为开发平台, 设计了一套不同环境温度下高铁制动盘摩擦磨损虚拟仿真实验平台。研究内容以 SolidWorks、3dsMax 等模型设计软件为基础搭建实验场景与机械结构, 而 Unity3D 引擎用于 UI 设计并结合 C# 语言进行逻辑编写与功能实现, 从而实现了一个高铁制动摩擦仿真实验数据可视化平台, 使用户能够直观地分析不同环境条件下的制动盘磨损情况。

关键词: 数据可视化; 虚拟仿真; Unity3D; 高铁制动盘; 磨损实验

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230343

Development of Visualization Platform for Virtual Simulation Experiment Data of Brake Friction of High-speed Rail in Low Temperature Environment

ZHANG Xun, HUANG Yongzhi, ZHANG Meixian, YAN Zhaoxin, MA Lei*

(School of Mechanical Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: With the rapid development of the computer virtual simulation technology, the demand for applying the virtual simulation technology to high-speed rail, transportation, and vehicle testing fields is increasing. In order to address issues such as the high cost of high-speed rail braking tests, lack of test safety, and non-visibility of data, this study utilizes Unity3D as the development platform to design a virtual simulation experimental platform for high-speed rail brake disc friction and wear under different environmental temperatures. The research involves building the test scenes and mechanical structures based on modeling software such as SolidWorks and 3dsMax, and the Unity3D engine is employed for the user interface (UI) design, and C# language was used for logical programming and functionality implementation. Thus, a high-speed train braking friction simulation and data visualization platform is realized, enabling users to intuitively analyze the wear conditions of brake discs under different environmental conditions.

Key words: data visualization; virtual simulation; Unity3D; high-speed rail brake disc; wear test

铁路交通一直是我国重要的运输运载方式, 如今高铁技术发展愈发迅猛, 已成为我国经济体系中不可缺失的重要部分^[1]。我国的京哈线、哈大线是知名的高寒地区高铁线, 其恶劣的天气环境给我国高铁技术的发展带来了不小的挑战。而制动盘作为高铁制动系统中的核心部件, 受极端天

气下的影响是不可忽视的^[2]。制动盘位于高铁的制动系统中, 一般是在车轴上固定 2~4 个制动盘, 或者是两端的车轮一部分作为制动盘, 卡钳控制闸片抱住制动盘, 摩擦发热, 使动车的动能转换成热能, 达到减速的目的。在高寒地区, 随着环境温度的降低, 温度对制动盘的磨损问题已成为

收稿日期: 2023-07-13; 修回日期: 2024-01-25

基金项目: 四川省自然科学基金青年基金(2022NSFSC1972); 西华大学人才引进项目(RZ2000001415); 西华大学研究生示范课程教学改革项目(RC2300001180); 教育部产学研合作协同育人项目 2022 年第二批(22107077125449)。

作者简介: 张训(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事虚拟仿真方向研究。

*通信作者: 马蕾(1987-), 女, 博士, 副教授, 主要从事虚拟仿真开发、摩擦学方面的研究。E-mail: sheshuyuan@163.com

影响铁路运输安全方面的重要因素之一^[1]。目前,国内高校的实验课,多存在设备老化、实验需求增加、场地老旧、设备不足等诸多问题,造成了实验课教学开展不顺利,并且由于学生人数多,大大增加了老师的工作量,因此许多高校都开设虚拟仿真课程用于教学^[3-4]。此外许多研究人员也开始考虑将游戏引擎重新设计为模拟器,以利用其更大的灵活性、可扩展性和图形逼真度^[5]。在传统的制动盘摩擦磨损实验中,需要昂贵的实验设备,且设备数量有限,若操作不当还可能造成损坏,在低温条件下也存在一定的危险性^[6]。虽然虚拟仿真技术在诸多领域都得到了广泛应用,但针对高铁制动盘在温度变化影响下的仿真系统还鲜有报道^[7],因此设计一套高交互性的虚拟制动盘摩擦磨损实验系统具有一定的意义。

虚拟实验利用仿真技术模拟出逼真的实验环境,能让使用者更直观、更具体地了解到实验的内容、步骤以及注意事项,且虚拟实验具有高交互性和开放性等特点^[8-9]。虚拟制动盘摩擦磨损实验系统结合了图像图形学、三维建模、天气系统和粒子系统等诸多领域的相关技术,通过 Unity3D 开发引擎,利用传统实验室设备,将得出的数据输入到软件中,模拟出高铁在极端天气环境下,制动盘摩擦的演变规律,以及制动盘损伤数据图等结果,使用户更直观地了解制动盘在低温环境下的磨损状况。

1 高铁制动虚拟仿真实验系统总体设计

该系统主要分为4个板块,分别为登录注册板块、场景搭建板块、实验内容板块以及打包导出板块。系统研发主要采用 Unity3D 开发平台,登录注册板块的设计采用 Mysql 数据库进行用户账号密码的存储和验证,确保用户信息的安全性。在场景模型与机械零部件的建模及加工渲染方面,系统利用了多种建模软件,包括 SolidWorks、3dsMax、Blender 等^[10]。SolidWorks 主要用于机械零部件的精细建模,保证模型的准确性和真实感。3dsMax 和 Blender 则在场景模型的创建和处理上发挥作用,通过这些软件可以实现更加复杂的场景布局和模型渲染。而场景搭建模块主要依托于上一步构建的模型利用 Unity 对模型进行布局和排放,以打造真实且直观的虚拟环境。以上模块均作为实验内容模块的运作基础,实验内容板块通过 C#脚本实现各种操作业务逻辑,

以构建该实验系统的完整流程。该流程以传统实验室数据为基础,模拟高铁制动盘在实验数据状态下的实际情况。最终,高铁制动摩擦虚拟仿真系统实现了数据的可视化展示以及数据对比,为用户提供了全面而深入的实验体验。该系统的设计旨在结合实验室数据,通过编写 C#脚本,模拟高铁制动盘在真实数据状态下的性能表现,同时强调数据可视化,使实验结果更加清晰和易于理解。最后通过 Unity3D 平台进行打包导出成 exe 软件包。系统整体架构如图1所示。

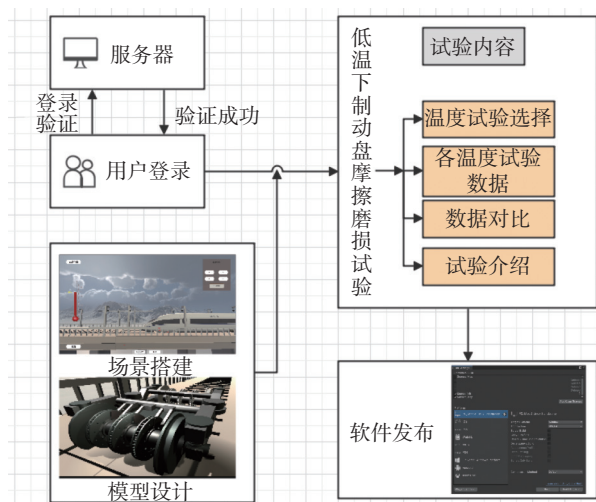


图1 高铁制动虚拟仿真实验系统整体架构图

2 高铁制动模型的建立与场景搭建

2.1 模型设计

以制动盘与闸片作为实验对象,二者的模型构建为整个软件开发中的重要环节^[11]。根据对市场不同制动盘以及闸片的参考与分析,获取了相关模型数据。通过 SolidWorks 依照其特定尺寸绘制出三维模型,由于 Unity3D 引擎并不支持 SolidWorks 导出 SLDPRT 格式,并且 SolidWorks 绘制的模型存在高面数的问题,直接导入 Unity3D 中可能导致卡顿影响软件运行帧率,所以必须预先进行优化处理以减少面数等操作^[12]。而 3dsMax 能同时解决这两点,所以将绘制好的模型导入 3dsMax,通过 3dsMax 内置的 MultiRes 修改器进行减面优化,最终导出 Unity3D 支持的 FBX 格式。

在模型建立的过程中,由于 3dsMax、SolidWorks 等建模软件与 Unity3D 默认尺寸并不一致,且在操作时中心点位置可能发生更改,所以需要注意模型坐标系与尺寸的设置,并且在 SolidWorks 建模时原点位置也需要设置为整个装配体

的中心点,若在后续的开发过程中坐标系不统一,模型组件的运动功能则可能会受到很大影响^[13]。制动盘与闸片模型设计如图 2 所示。

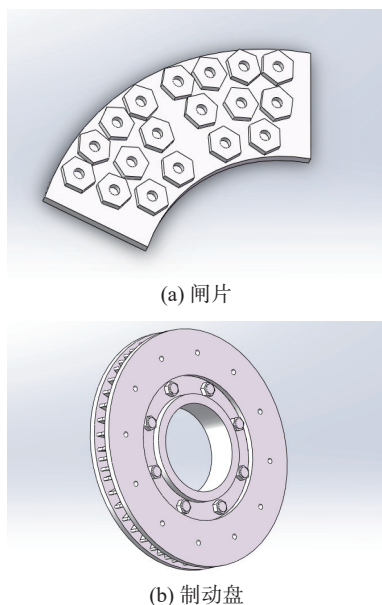


图 2 制动盘与闸片模型图

2.2 场景搭建

逼真的虚拟场景对整个实验至关重要,不仅能增强整体的氛围感,更能大大提高用户的沉浸感。场景的搭建涉及多项 Unity3D 技术,包括光照渲染、地形绘制、贴图、材质纹理、天空盒等。本次实验采用双场景切换设计,主场景作为实验场景,需要实现高寒地区的地貌特征。Unity3D 具有一套强大的地形编辑器 Terrain,支持以笔刷的方式精细雕刻出山脉、峡谷、平原、盆地等地形,同时还包含了材质纹理、动植物配置等功能。通过 Terrain 对高山地貌进行拉取,并对山脉表面进行贴图处理,利用表面贴图和法线贴图使雪山看起来更有质感,最后将铁路、列车、制动系统等模型导入,从而完成主场景的搭建。导入电脑、实验房等模型构建出实验室子场景,以便于用户更好地进行数据观察。场景模型如图 3 所示。

2.3 场景渲染

场景的灯光无疑非常重要,不仅能起到照亮的作用,更能渲染现场氛围,使场景效果更加逼真。但由于光照和阴影等会带来极大的性能开销,造成卡顿、内存消耗大等问题,因此合理利用光照烘焙至关重要。高铁在高寒地区运行时,经常会在风雪等极端天气下行驶,由于降雪天气会使云层变厚,这会导致阳光无法穿透云层,使

整个场景变得昏暗,温度越低,风雪越大则能见度越低。为实现该光照效果,本文基于 Unity3D 自带光照烘焙系统对场景进行烘焙处理,能对场景中所有物体实现现实光线中反射、折射、衍射等效果的模拟。

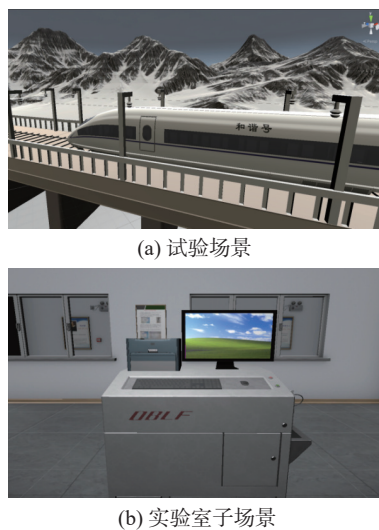


图 3 场景模型图

不同的场景环境有不同烘焙方法,由于本实验场景存在移动元素,进而采用在静态光照下对动态物体进行光照烘焙的方式进行渲染烘焙,既能充分地减少内存资源的消耗又能实现预期的效果,具体操作流程为:首先将场景中主光源的光照模式设置为 Mixed 混合模式,这样既有实时光照数据也有烘焙光照数据;然后开启 lighting 组件烘焙全局光照选项,以实现场景中静态物体烘焙效果,并将光照模式改为 shadowmask 阴影遮罩,从而使实时光照的阴影较好地和烘焙阴影融为一体;最后需要为运动的物体设置 LightProbeGroup,即光探测器组,用以收集运动物体可能到达处的环境光照数据,从而保证物体的光照效果始终处于正确位置。在场景中需要将不动的物体勾选上 static 属性,代表静态物体,在进行光照烘焙时 Unity3D 会记录下当前静态物体烘焙时的光照数据,并形成光照贴图,从而达到光照效果并降低性能开销。

3 虚拟实验设计

3.1 软件开发框架

本研究采用 Unity3D 软件中的以太(Ethernet, ET)开发架构,即基于 Unity3D 的客户端、服务端双端架构,使用实体-组件-系统(entity-component-

system, ECS)组件式开发思想,遵循组合优于继承的原则。项目中的每一个基本单元都是一个实体,每一个实体又由多个组件组成,系统则是不同组件的逻辑处理。ET将该思想结合,不同的组件实现不同的功能结构,本研究将使用ET服务端架构进行编程。

3.2 虚拟实验设计

本文基于低温下制动盘摩擦磨损实验结果,设计了一套制动摩擦磨损实验数据可视化虚拟仿真系统,使实际应用与研究成果有机结合,方便用户在更直观地感受高铁的制动过程的同时,更加深入地了解摩擦磨损实验分析成果的应用价值实验。

为确保整个流程步骤正确有效地进行,本研究使用了有限状态机技术。有限状态机拥有有限数量的状态,每个状态可以通过配对自身的条件表进行迁移,条件的改变决定执行相关状态的迁移。相比于通过使用多个 Bool 值控制软件流程,有限状态机更为清晰,可更好地管理系统流程的排版布局。本研究利用 Excel 绘制了状态条件的对应关系,使用 EP 读取 Excel 数据并编写成 JSON 文件导入 Unity3D。然后,通过使用 JsonUtility.FromJson 反序列化,完成对系统流程状态的配置。在 Unity3D 脚本的生命周期函数 Update 中,每帧判断当前状态的所有条件节点是否满足,满足则切换状态,不满足将继续执行,从而保证了整个系统的流畅运行并具有极高的容错率。数据可视化实验流程图如图4所示。

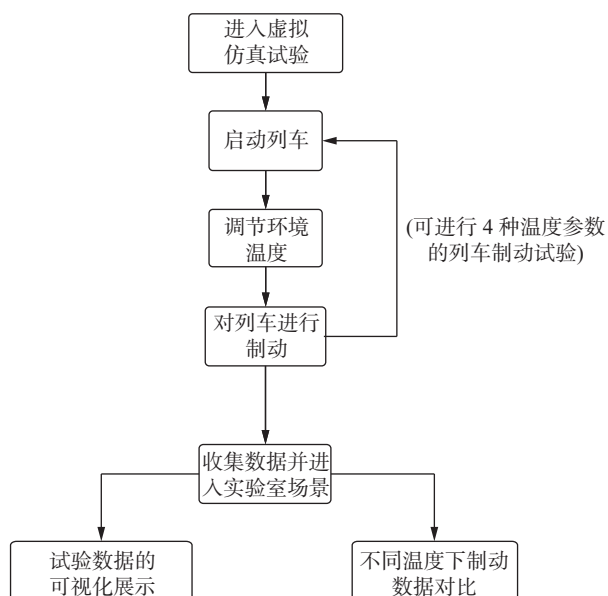


图4 数据可视化实验流程图

4 功能实现

4.1 UI交互功能实现

UI即UserInterface,是用户与系统之间传递信息进行交互的重要媒介,使用户能够方便有效地操作硬件或软件以达到双向交互的目的。Unity3D中具有一套完整且强大的UI开发系统——UGUI,它能使开发人员在Canvas画布上任意部署软件需要的交互板块,以更便捷地实现用户与系统间的人机交互。本文展示了在Unity3D中设计的用户界面,通过用户界面引导,使用户能清晰地观测到实验数据的变化^[14]。

1) 登录界面

在进入实验前需要用户进行登录与注册,本研究通过Unity3D自带的UGUI搭建出软件登录与注册界面,如图5所示^[15]。在软件进入时将自动与服务器连接,客户端与服务器之间主要通过传输控制协议(transmission control protocol, TCP)进行通信。将登录按钮上“button”组件的“OnClick”事件方法进行注册,当用户点击该按钮时,它便会响应用户注册的方法或者内容。用户名与密码输入框使用的是“inputField”UI组件,它能获取用户输入的内容,将“inputField”中输入的Text传入“button”组件所注册的方法中,进行通信协议的组装赋值,再点击登录按钮将协议发送给服务器。服务器与Mysql数据库、服务器收到客服端发来的登录协议后,通过Json反序列化便可获得用户的账号和密码,经Mysql数据库进行数据验证。如果验证成功就将该登录协议返回给客服端,并将登录协议类中的int类型result成员赋值为0,如果失败就赋值为1,客服端收到协议后查看协议中的成员变量result是否为0,若是便进入软件。



图5 登录与注册界面

2) 根据不同的温度范围进行实验模拟
实验界面中显示了以下 3 个功能模块。

① 实验介绍模块

包括实验的目的、背景、过程和结果展示等相关内容,旨在让用户能够快速了解实验的全貌。

② 温度控制参数模块

提供了可调节的温度按钮,用户可以通过点击按钮来设置实验温度范围,该范围从常温到低温均可覆盖。

③ 制动模块

制动盘在不同温度下的摩擦磨损状况将会通过数据动态显示,这对于研究制动盘的耐磨性能非常有帮助。

在实验开始前,用户可以根据不同的温度参数进行实验模拟,实验数据通过交互界面实时展示制动盘在不同温度下的摩擦磨损状况。界面上显示了当前温度数值的文本框,该文本框的内容通过 Update 生命周期函数进行逐帧更新。启动实验的按钮通过 Onclick 事件函数进行注册实验任务,点击该按钮后,实验开始,界面中的温度参数被激活并开始变化。当温度到达预定值后,制动操作开始。同时,界面上也提供了制动等控制按钮,用户可以通过点击按钮进行操作。温度变化程序图如图 6 所示。

3) 实验数据可视化

本文采用了“XCharts”插件来呈现制动盘在不同温度环境下的相关数据,如制动盘摩擦中心温度曲线等。在实验过程中,用户可以通过点击

按钮来调用 `chart.setActive(true)`生成折线图,并通过“XCharts”插件提供的多种图表类型来展示实验数据。此外,温度分布云图、应力云图和制动盘损伤图等数据图则是通过对“Image”组件中的 Sprite 成员变量进行赋值展示。具体来说,不同的数据图片被转换为 Sprite 的材质类型,并通过 `IPointerClickHandler` 接口方法中的事件参数 `PointerEventData` 的成员属性 `PointerClick.name` 获取当前按钮的名称,再通过名称加载对应的数据图进行赋值即可展示出结果。

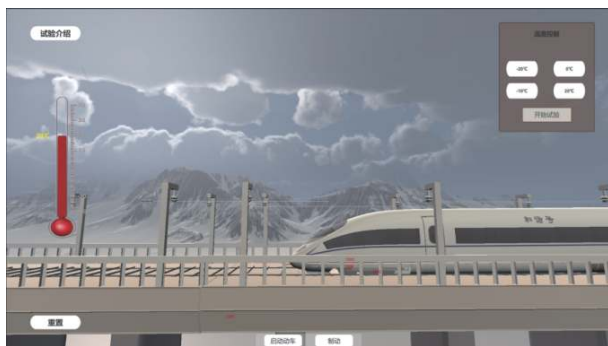
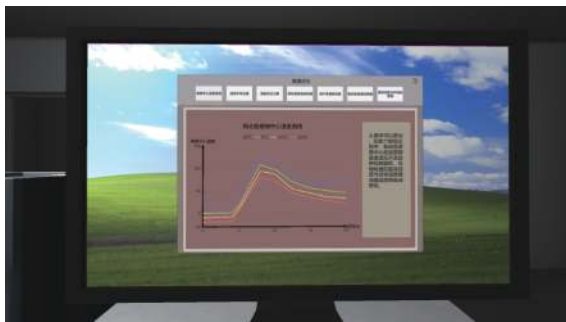


图 6 温度变化程序图

为方便数据分析,实验系统在高铁制动结束后会自动保存当前温度下制动盘磨损数据,待所有温度实验测试结束后,可进入实验室场景从电脑中的数据分析软件上查看实验数据。通过输入不同的温度信息,可以获取对应温度列车运行时的数据图,如制动盘中心温度分布云图、制动盘轮廓损伤图和闸片轮廓损伤图等。实验数据显示图如图 7 所示。



(a) 单组试验数据图



(b) 多组试验数据对比图

图 7 实验数据显示图

4.2 相机功能实现

为了让用户更加清晰直观地观察制动盘与闸片的制动过程,本文采用了 Unity3D 官方自带的插件 Cinemachine 虚拟相机。Cinemachine 能够方便

地实现特定摄像机效果,如摄像机追踪、推动镜头、分镜等效果,使用户拥有更流畅的相机切换效果。

在我们的研究中,当制动任务进行到制动环

节时,我们通过 GetComponent 方法获取到虚拟相机上的 CinemachineVirtualCamera 组件,并通过设置该组件上的 priority 成员变量的数值,来实现相机在轨道上的平滑滑动。每个虚拟相机都是在相机轨道的固定点,通过设置 priority 值来控制相机的滑动,值越大优先级越高。这种方式使得相机在不同的视角下更加流畅地跟随制动盘与闸片的制动过程,同时也使用户能够更加直观地观察到制动盘与闸片的运动状态。虚拟相机组件设置如图 8 所示。

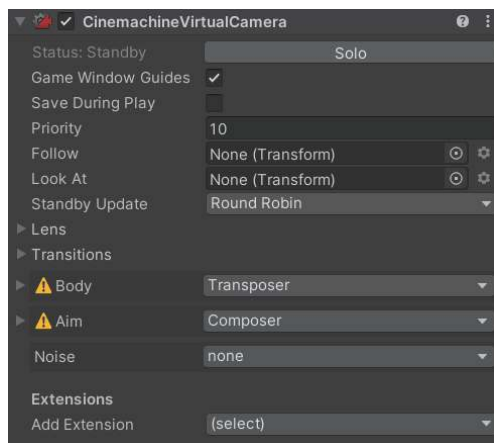


图 8 虚拟相机组件设置图

4.3 高铁运动功能实现

在仿真模拟实验中,用户需要进行动车启动、制动等操作,操作的前提条件是动车在可视范围内一直向前开动。为实现该效果,本研究将两条铁轨模型进行拼接,通过 Unity3D 的 API 模块,利用 Vector3 类中的 Move Towards 方法指定一个 Vector3 向量坐标,使模型在 Update 脚本生命周期中逐帧移动。当其中一个铁轨模型通过用户确定可视范围后,便将模型上的 Transform 组件的 Position 三维坐标赋值,使其回到初始位置,从而达到高铁一直向前运动的效果。

4.4 制动盘制动功能实现

用户在任务中会跟随摄像机视角聚焦到制动盘上,近距离观察制动盘的制动过程。在高铁制动中,主要是通过闸片抱住制动盘,摩擦生热,使动车将动能转换成热能散去,从而达到减速的效果。制动盘是高速运动状态下的关键部件,其制动效果直接影响列车的安全和运行效率。因此,制动盘的摩擦磨损是高速列车制动系统研究中的关键问题之一。制动盘的磨损会影响制动性

能和寿命,同时还会导致制动盘表面温度升高,进而影响列车的安全和运行稳定性。

在本研究中,我们实现了高铁仿真系统中的运动和制动功能。通过 Unity3D 引擎的移动和动画功能,我们可以使高铁运动逐帧地向前移动,同时使用动画状态机来实现闸片的移动抱死效果,让制动盘的制动更加自然顺滑。在此基础上,我们还使用了 ET 框架的 HighLightCom 组件来实现制动盘的高光效果,使用户可以更清晰地观察到制动盘的制动过程。制动场景如图 9 所示。

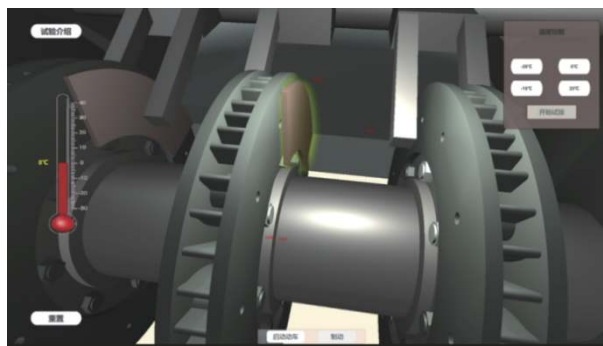


图 9 制动场景图

4.5 天气系统功能实现

对于常年在高寒地区服役的动车来说,低温环境会给制动盘的磨损带来不小的影响。在系统中为模拟出不同的环境温度以及不同的温度所带来的气候变化,本文使用 UniStorm 插件成功实现了动车运行途中天气的实时变化、白昼黑夜交替等功能,使得系统更加真实可靠。

UniStorm 中提供了 WeatherTypeAPI 和 UniStormManagerAPI,为本研究实现天气变化等功能提供了有力的支持,天气效果场景如图 10 所示。未来可以进一步优化天气系统,如增加更多的天气类型和气象变化,提升用户体验。



图 10 天气效果场景图

5 结束语

该高铁制动摩擦虚拟仿真实验数据可视化平台采用 Unity3D 引擎、Mysql 数据库、C# 编程等技术, 实现了不同环境温度下高速铁路制动盘摩擦磨损的仿真模拟实验数据显示。仿真软件的开发, 使用户更好地了解制动盘制动过程, 以及在极端低温气候下制动盘的摩擦磨损状况。在设计过程中充分地考虑了理论知识与实验操作的结合, 实现了实验数据的直观可视化, 更有利于实验研究的应用与科普价值实现, 为后续理论研究提供便利的学习平台。此实验平台不仅适用于相关工程领域的学生, 也可为诸如机械工程、铁路工程等专业的学生提供有价值的实践教学。通过深度融合理论知识和实验操作, 该平台为学生提供了一个综合性的学习工具, 使他们能够更好地掌握相关专业知识, 培养实际操作技能。这不仅有助于课程的教学效果, 还为学生的综合素质提升提供了有力的支持。

参考文献

- [1] 丁思源, 马蕾, 石含波, 等. 低温环境对高速列车制动盘材料疲劳裂纹扩展性能影响研究[J]. 机械强度, 2022, 44(5): 1082-1090.
- [2] 石含波. 低温环境下高速列车制动材料摩擦磨损特性分析[D]. 成都: 西华大学, 2022.
- [3] 郝夜奇, 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.
- [4] ZHENG Q S, LI K. Design and development of virtual simulation teaching resources of "safe electricity" based on Unity3D[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2173(1): 012012.
- [5] PLATT J, RICKS K. Comparative analysis of ROS-Unity3D and ROS-gazebo for mobile ground robot simulation[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2022, 106(4): 80.
- [6] 孙琴, 邓自康, 刘欣, 等. 基于 Unity3D 的气动顺序回路虚拟仿真实验系统开发[J]. 电子测试, 2022(19): 8-11.
- [7] 卢绪迪, 郭艳利. 基于 Unity3D 的自升式海洋平台虚拟现实系统[J]. 江苏船舶, 2021, 38(5): 5-7.
- [8] 卓莉, 万里. 基于 Unity3D 的液塑限含水率虚拟实验设计与实现[J]. 实验科学与技术, 2022, 20(5): 29-34.
- [9] LI Y X, LUO H, ZHOU Y R. Design and implementation of virtual campus roaming system based on Unity3d[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2173(1): 012038.
- [10] SHEN B, CHEN B Q, WANG Y W. Virtual simulation of lathe machining training based on Unity3D[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1634(1): 012074.
- [11] 王建祥, 慈翠荣, 刘贤喜, 等. 玉米果穗收获机虚拟收获设计与仿真实验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(5): 7-13.
- [12] 宋辛辛, 陈永当, 顾金芋, 等. 基于 Unity3D 的液压元件虚拟拆装实验系统[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(7): 7-11.
- [13] 殷民艇, 董磊, 张星, 等. 基于 Unity3D 的机床加工系统设计与实现[J]. 制造技术与机床, 2022(5): 164-168.
- [14] WNOROWSKI J, LEBKOWSKI A. Verification of the system for ship position keeping equipped with a set of anchors in Unity3d[J]. *Sensors*, 2022, 22(19): 7421.
- [15] 邓恭建. 基于 Unity3D 的海上平台柴油发动机三维监控系统[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(12): 95-97.

编辑 王燕