

基于轨道视觉检测技术的交互式科普教具设计与实践探索*

彭文娟** 周围

北京交通大学计算机科学与技术学院；北京交通大学大数据与人工智能教育部重点实验室
北京 100044

刘勃宏 周奕轩 严嘉图

北京交通大学
交通运输学院
北京 100044

北京交通大学电
子信息工程学院
北京 100044

摘要 本文针对现有科普教具技术滞后、交互不足等问题，研发了一种简易、轻便、易拼接的轨道视觉检测技术科普教具，在低成本条件下，实现了轨道视觉检测的科学普及。研究完成了检测装备模型、轨道设施模型、视觉检测算法的设计，并通过调研选择了适配的开发板、动力装置和其他配件，形成效果直观的交互式轨道视觉检测科普教具，实现了该前沿科技的科普转化。该教具现已应用于多场科普活动并深受好评。

关键字 科普教育，教具开发，轨道视觉检测，动态积木模型，工程实践

Design and Practical Exploration of Interactive Popular Science Teaching Aids Based on Track Visual Detection Technology

Peng Wenjuan * Zhou Wei

School of Computer Science and Technology;
Key Laboratory of Big Data & Artificial Intelligence in Transportation, Ministry of Education
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

Liu Bohong

School of Traffic and Transportation
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Zhou Yixuan Yan Jiatus

School of Electronic and Information Engineering
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract—To address the limitations of conventional science popularization tools, such as outdated technology and insufficient interactivity, this study developed a cost-effective, lightweight, and modular track detection-based teaching aids to facilitate the public understanding of track vision detection technology. The research encompassed the design of three key components: an detection device model, a modular track system, and a simplified computer vision algorithm model. Through systematic evaluation, an appropriate development board, drive mechanisms, and auxiliary components were selected to construct an interactive visual detection of track science teaching aids that effectively visualizes the underlying technology. This aids successfully bridges the gap between advanced track detection technology and science education, achieving intuitive knowledge transfer through hands-on operation. The proposed aids has been deployed in multiple science outreach activities with positive feedback from participants, demonstrating its effectiveness.

Keywords—Science Popularization Education, Teaching Aids Development, Track Visual Detection, Dynamic Building Block Model, Engineering Practice

1 引言

在建设科技强国的战略目标下，科普教育已成为提升全民科学素质、培育创新人才的核心抓手，我国发布多项政策大力支持科普教育工作。2021年，国务院印发《全民科学素质行动规划纲要（2021—2035年）》，明确科学素质是国民核心素养与国家战略资源，提出要通过强化科普教育“激发青少年科学兴趣与创

新能力，培育具备科学家潜质的后备人才群体^[1]”，将科学教育纳入国家教育体系核心框架^[2]。2024年教育部提出构建中小学人工智能阶梯式课程体系，要求中小学分阶段深化技术认知与实践能力，强调科普教育需与前沿技术深度融合，系统性地培养适应智能时代的创新人才^[3]。党的二十大报告亦将科普作为提高全社会文明程度的重要举措，强调要“加强国家科普能力建设”，通过政策支持、资源整合、技术创新构建覆盖全社会的科普生态^[4]。

* * 通讯作者 彭文娟 wjpeng@bjtu.edu.com 。

尽管政策推动力度显著，我国科普教育仍面临较多短板，比如：科普教师不足、专职教师偏少、实验室设备简陋等问题普遍存在^[5]；传统科普教育依赖静态展板与基础物理实验教具，难以适配高铁、航天、人工智能等前沿领域的技术普及需求^[5]；科普实验课开设率低、器材利用率不足，“重理论轻探究”现象突出，导致学生难以形成系统性工程思维^[6-8]等。

科普教具是弥合技术认知鸿沟、实现“做中学”理念的关键载体，精心设计的教具可以帮助学生更好地理解抽象难懂的科学知识，体验科学探究过程^[5]。研究表明，交互式教具可显著提升青少年科学探究兴趣与知识内化效率。当前科普教具开发虽逐步向数字化方向转型，但仍存在多个问题：如传统教具交互模式比较单一，无法支撑探究式学习；现有教具大多跟前沿科技有一定滞后性，缺乏与前沿科技的适配性转化^[5]等。

轨道检测技术是保障列车安全运行的核心手段，其技术迭代已逐渐迈入智能化阶段。以机器视觉、激光传感为代表的检测技术，可通过高精度数据采集与实时分析，实现轨道几何参数、表面损伤、接触网异常及道床状态的全面诊断。然而，该技术因涉及光学、计算机、机械控制等多学科交叉，存在一定认知门槛，传统讲授模式难以让学生理解技术关联性；相关教具多以静态模型^[9]、虚拟实验^[10-11]和讲解视频^[12]类为主，缺乏对检测流程的动态模拟和交互式呈现，无法很好地支撑该技术的科学普及。

针对上述问题，本研究提出“技术简化-虚实融合-分层实践”三位一体的轨道视觉检测科普实践内容设计方案，将轨道视觉检测技术进行技术简化，提取检测流程核心步骤，形成低门槛、高互动的动态积木模型式科普教具，推动科技资源的科普转化；通过构建的动态科普教具和自研的“面向高铁轨道巡检的视觉感知虚拟仿真实验系统”^[11]形成由浅到深、虚实融合的科普实践交互方案；最后针对不同年龄与技术层次的中小学生设计不同的分层实践内容，以满足学生能力的阶梯式增长，适配《义务教育科学课程标准》^[13]与《教育部部署加强中小学人工智能教育》^[3]等文件的要求，为前沿科技科学普及提供参考。

2 轨道视觉检测科普教具设计

2.1 轨道视觉检测技术

轨道视觉检测是一种融合机器视觉、深度学习与模式识别等技术的前沿检测手段，通过非接触式测量实现对轨道几何参数、表面损伤及关键部件状态的全天候、高精度监测。其技术核心在于将工业级光学设备（如线阵相机、面阵相机、激光雷达等）与智能检

测算法相结合，突破传统人工巡检效率低、主观性强、成本高、覆盖范围有限的瓶颈，是轨道交通智能化运维的重要组成部分。

虚拟仿真平台是信息时代重要的教学工具之一。针对轨道视觉检测场景，我校自研的“面向高铁轨道巡检的视觉感知虚拟仿真实验系统”^[11]，对轨道视觉巡检全过程进行了模拟仿真，可以让学生了解轨道部件的结构特点和视觉检测典型传感器的工作原理，还可让其掌握和理解与轨道伤损识别相关的图像处理和模式识别等知识，以及数据处理分析的方法。实验系统示例界面如图 1 所示，可有效支撑轨道检测科普教具的研发。

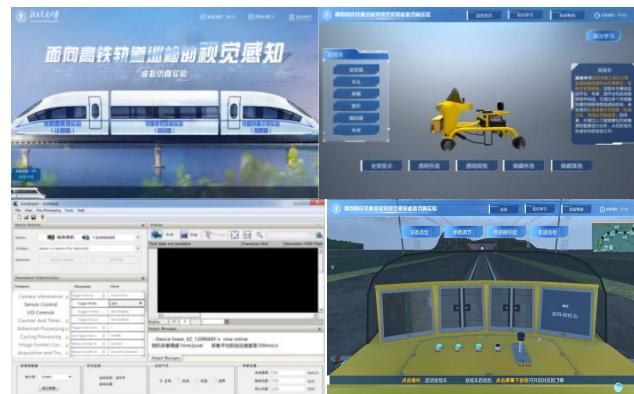


图 1 面向高铁轨道巡检的视觉感知虚拟仿真实验系统示例界面

为了适配科普教育与工程实践需求，提取轨道视觉检测技术的核心原理，可将其简化为数据采集、模型训练、伤损识别、结果反馈四个步骤。科普教具的检测工作流程设计也将围绕着该步骤展开，聚焦于检测过程的动态可视化表达。

2.2 科普教具的架构设计

为了实现轨道视觉检测技术的科普转化，需要将实际检测场景核心部件使用科普教具表示出来，即检测装备（含硬件、软件和运动平台）和轨道基础设施。将其进行归类梳理，可分为软件、硬件、机电结构三个部分，由此可得到如图 2 所示的科普教具整体架构设计。

教具硬件部分以 Maix-I 开发板和摄像头组成图像采集与处理单元，代替高性能服务器和工业相机；软件层面，放弃 ResNet 等大型复杂网络，选择微调后的 MobileNet_0.75 网络，实现快速检测；机电结构则包含运动平台——巡检车，以及轨道、动力装置和光源等。通过软件和硬件协同组成视觉检测系统，再联合机电结构部分，构成完整的轨道视觉检测场景，从而有效支撑轨道伤损检测任务。

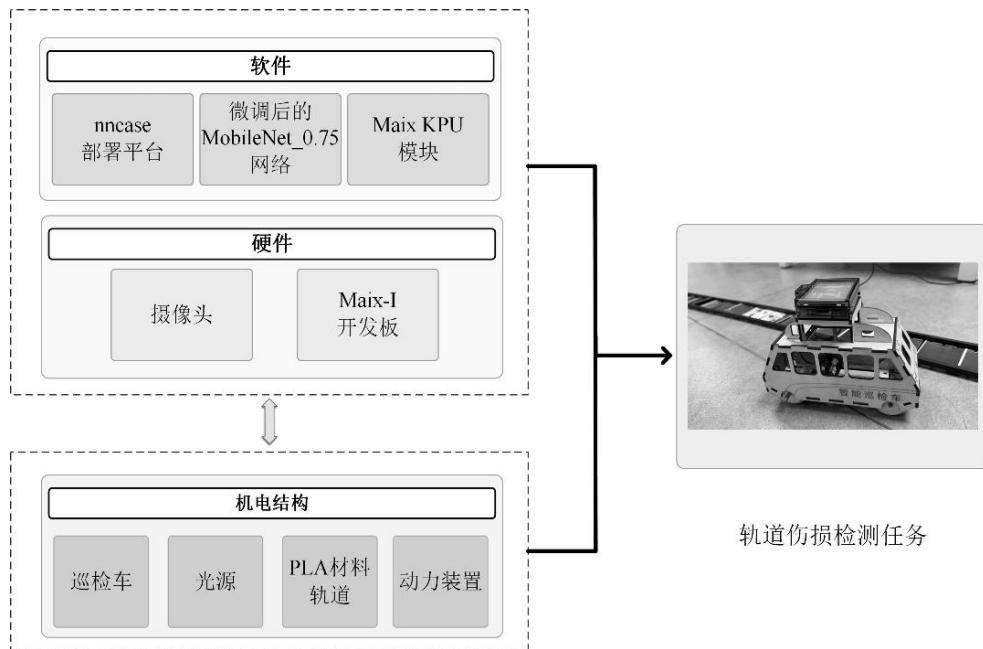


图 2 科普教具整体架构

2.3 科普教具的交互设计

根据对轨道视觉检测技术核心原理的提取和检测场景的简化，可梳理出轨道视觉检测动态科普工作流程。以轨道基础设施模型作为视觉检测对象，以检测装备模型作为动态检测装置，通过视觉传感器感知轨道状态采集数据，再通过算法处理设备训练视觉检测模型和识别轨道状态，从而实现整个轨道视觉检测动态科普过程。

该科普教具的整体交互逻辑设计主要可分为两大

类：其一，面向低年级学生，设计积木式模型拼接组装的交互方式，通过对检测装备模型和轨道设施模型的机械结构组装操作，帮助学生认识轨道设施和检测设备的基本结构；其二，面向高年级学生，设计视觉检测模型算法编程的交互方式，通过调试、复现视觉检测模型代码和动态检测过程，针对部分有编程基础的学生，还可通过自主设计算法模型实现伤损识别及报警等功能，帮助学生更好更直观地理解轨道视觉检测原理，实现“机械组装-程序处理-可视化输出”的完整认知链条。

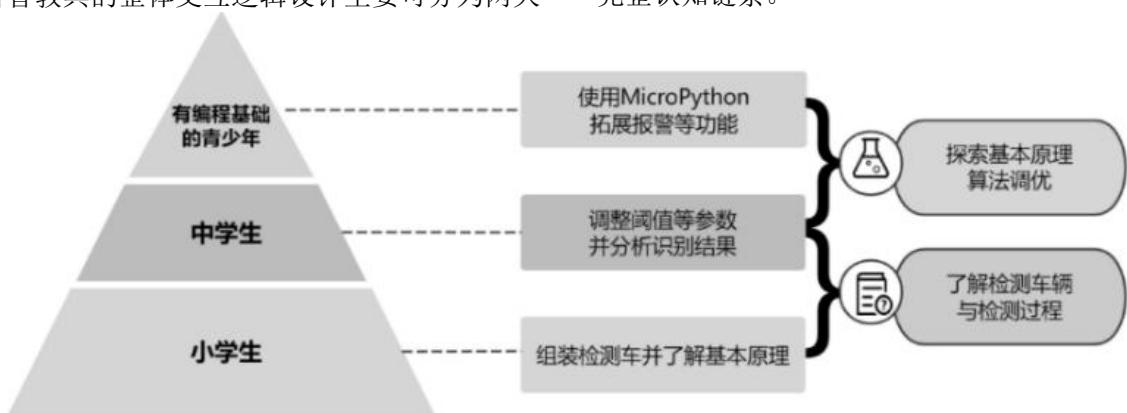


图 3 层次化科普内容设计

根据对教具的交互逻辑设计，为促进学生能力的阶梯式增长，如图 3 所示，针对不同年龄与技术层次的学生的认知特点，分层设计高交互性的科普内容：小学生通过完成积木式模型拼接建立，形成对模型机械结构和检测流程的直观认识；中学生则进一步参与算法调试，探究参数变化对检测结果的影响；有编程经验的青少年则可在代码层面进行扩展，通过设计个

性化检测算法模型，并使用 MicroPython 编程开发，实现伤损识别及报警等功能。

3 科普教具开发

3.1 教具机电结构

本教具的机电结构主要由检测装备运动平台模

型、轨道基础设施模型和动力装置三部分组成：检测装备运动平台是使用激光切割木板构件拼装而成的巡检小车积木模型，支持徒手快速拆装；轨道基础设施是采用模块化拼接设计的 PLA 材料模型；动力装置包含高扭矩电机和精密齿轮组，并搭配可调光源，在确保小车平稳运行的同时保证图像的采集质量。各组件协同为后续轨道检测提供了环境基础。

(1) 检测装备运动平台

“高铁黄医生”是高速铁路基础设施综合检测列车的代称，如图 4 所示，是一种典型的检测装备运动平台。因其黄色涂装和“诊断”轨道、接触网等设施健康状态的功能而得名，是保障高铁运营安全的核心监测装备。

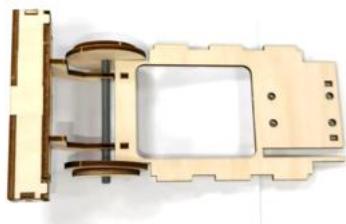


图 5 检测装备模型——巡检小车积木模型组装过程

(2) 轨道基础设施

本研究通过参数化设计实现了轨枕与边轨的模块化组装，如图 6 所示，优化后的接插结构公差配合精度达 0.2mm 以内，选取 PLA 材料使单节轨道重量控制在 200g 以内的同时显著提升耐用性，且携带方便、易于组装，可有效支持各类科普活动。当前模型限于平面直轨工况，后续可拓展弯轨和道岔等模块以丰富铁路场景模拟功能。



图 6 轨道设施模型

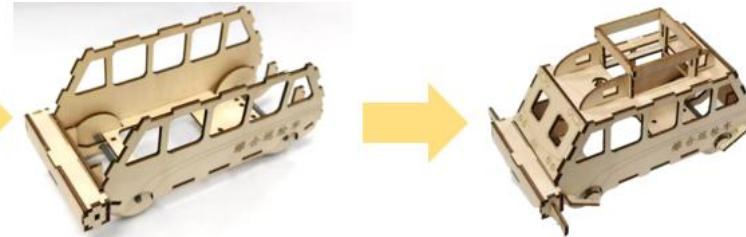
(3) 动力装置

动力装置包括动力系统和其他配件。其中，动力系统采用高扭矩电机配合定制齿轮组，实现低速运动以确保图像采集质量，同时还保障了教具使用的安全性。此外，动力装置搭配了可调光源模块，支持双模式照明切换以适应不同环境需求。整体机械结构采用全封闭设计，外露接口运用梯形排插等防误插结构，



图 4 “高铁黄医生”

为契合科普教育的实践需求，本研究参考“黄医生”车体外观，基于模块化设计理念开发了检测装备运动平台模型——巡检小车积木模型。小车外形由激光切割木板构件构成，如图 5 所示，采用开放式框架设计，学生可直接观察其内部结构，模型组件采取插接式结构，无需专用工具即可完成整体组装。



确保操作安全性。

3.2 视觉检测系统

针对工业级轨道视觉检测系统专业性强、成本高的问题，本研究提出一种面向科普教学的简化方案，即根据前文所提取的轨道视觉检测技术的核心原理进行视觉检测系统科普版本的开发。

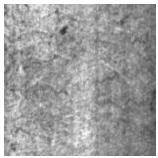
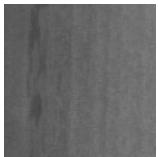
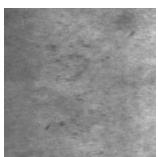
(1) 硬件基础

在硬件选型中，本研究基于算力性能、尺寸适配性和教学适用性等指标，选定 Maix-I 开发板作为核心处理器。该开发板搭载双核 RISC-V 处理器及 0.25TOPS KPU 加速器 ($64 \times 64 \times 21\text{mm}$)，既满足巡检小车模型安装空间限制又具备足够的视觉处理能力。其 MicroPython 编程环境降低了学习门槛，丰富的 I/O 接口支持传感器扩展。8MB 内存和 16MB Flash 存储满足轻量模型部署需求。该产品在性能、尺寸、成本和教育价值间取得了较好的平衡，可满足科普教具的应用需求。

(2) 轨面伤损识别实验

为实现轨道视觉检测任务，本研究以其核心任务轨面伤损识别为代表，采用开源轨面伤损数据集^[14]，选取区分度较高的正常、斑点和划痕三类样本进行模型训练。该数据集包含真实铁路场景的黑白图像，如表 1 所示，既能突出裂纹等伤损特征又可降低复现成本。

表 1 轨面伤损数据集^[14]

类别	示例图片	数据量
正常无伤损		500
裂纹		300
夹杂物		300
斑点		300
划痕		300
压入氧化铁皮		300

实验基于 MaixHub 平台对 MobileNet_0.75 模型进行微调(参数见表 2), 最终生成 1.8Mb 的 kmodel 文件。经测试模型推理延迟<120ms, 可在保证准确率的同时满足科普教具的实时性要求。

表 2 训练与测试配置

配置项	参数值
主干网络	MobileNet_0.75
迭代次数	100
批大小	32
学习率	0.001
标注框限制	10
部署平台	nncase

图 7 充分展示了模型的性能, 从模型的训练性能曲线可看出, 模型的损失曲线在前 40 次迭代呈现稳定

收敛趋势, 虽然中间出现了数据批次引起的波动但迅速恢复收敛; 验证损失曲线同步下降且波动幅度<5%, 表明模型未出现过拟合。最终得到的模型准确率和验证准确率均达到 98%以上, 验证了其优异的分类性能。

实验结果表明:

- (1) 数据集特征区分度良好;
- (2) MobileNet_0.75 模型能有效提取轨面伤损特征;
- (3) 系统满足科普教学演示的可靠性要求。但是, 由于检测环境中可能存在光照等其他因素影响识别效果, 实际应用中无法达到上述理想条件下的精度。

3.3 轨道视觉检测教具集成

在完成算法开发与模型训练后, 本研究将优化后的 MobileNet 网络通过 nncase 工具部署至 Maix-I 开发板, 构建了端到端的嵌入式视觉检测系统, 系统工作流程如图 8 所示, 再结合教具机电结构部分, 形成了完整的轨道视觉检测教具。该教具中的视觉检测系统在经过硬件初始化后, 利用固定视角摄像头采集图像, 然后基于轻量化 CNN 网络推理实现伤损分类, 并直接通过开发板的 LCD 屏幕显示检测结果。其中, 模型的置信度阈值可自主调节, 提升了系统的交互性; 而开发板的可视化报警界面和错误日志显示功能, 则有效提升了系统的可维护性。该系统在保留动态检测核心原理的同时显著降低了硬件成本, 并支持参数自由调整, 便于学生理解算法决策机制。

最终, 本研究所集成的轨道视觉检测科普教具实现了从图像采集、实时推理到可视化报警的完整闭环, 既验证了轻量化算法的工程适用性, 又通过错误日志显示功能解决了嵌入式 AI 系统透明度不足的问题, 为后续科普应用奠定了可靠的技术基础。

4 科普教具实践探索

4.1 教具应用测试

为确保教具可靠性, 在投入实践应用前, 先参照以下步骤开展运行测试: 搭建平整测试环境并组装轨道及巡检小车组件; 通过 CanMV IDE 连接开发板并固定于车体顶部; 调整摄像头位置确保轨道图像采集质量。测试过程中实时监测小车运动状态、开发板显示画面及上位机数据流(见图 9), 并对轨道伤损识别响应时间及准确率等关键参数进行了重点记录用于后续优化。

测试结果表明, 小车外壳坚固, 与轨道适配良好; 摄像头采集图像清晰, 驶过轨道伤损部分时能在 0.5s 内识别并触发报警, 检测算法模型运行正常, 可投入

实践应用。

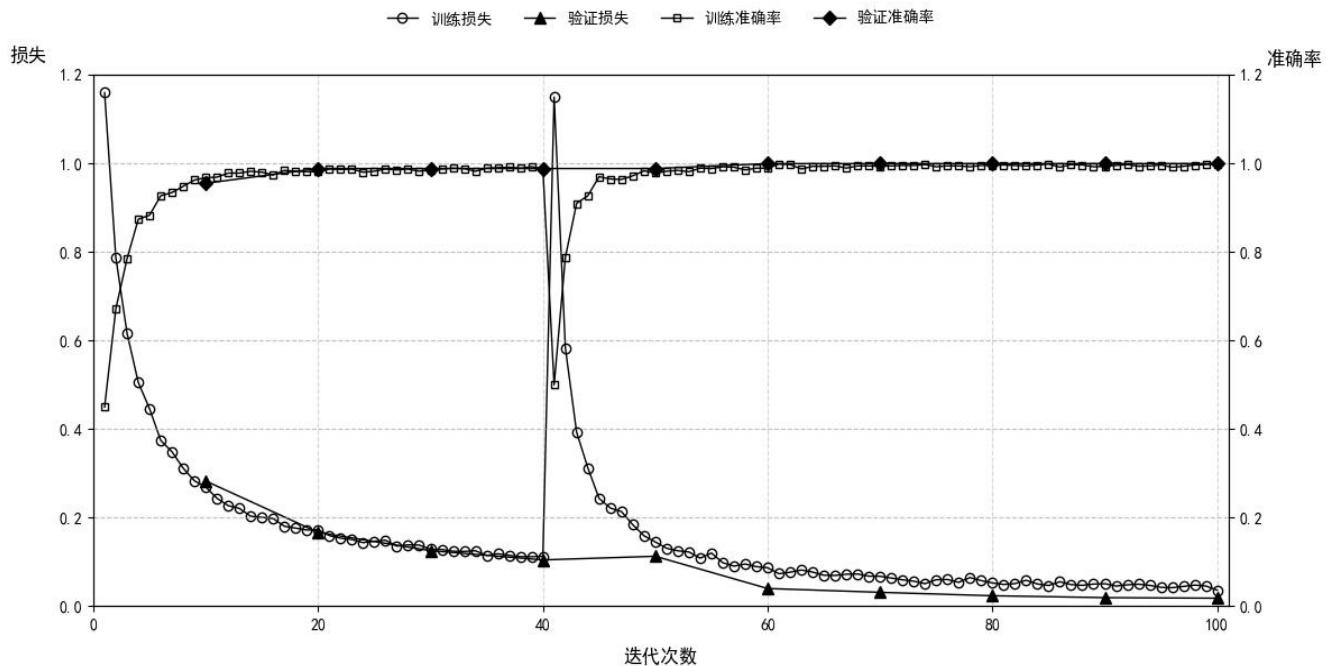


图 7 模型性能曲线

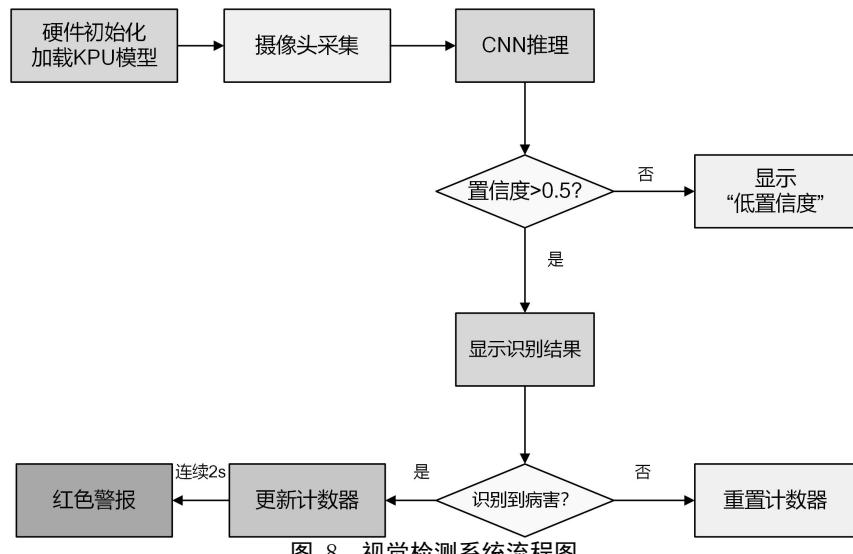


图 8 视觉检测系统流程图



图 9 科普教具应用测试

4.2 科普活动实践

本科普教具现已在全国科技周、科普日、中学生夏令营、少年宫等多项活动中使用，获得了青少年参与者的一致好评。下面，将以 2024 年 9 月的科普日中两个典型活动为例具体探讨本教具应用的实践探索。

(1) 全国科普日海淀会场科技展览

基于本科普教具以及自研的虚拟仿真实验系统^[11]和相关科普图文视频^[12]，本研究设计了包含四大功能模块的科普展示方案，并于 2024 年 9 月 20 日全国科普日海淀会场科技展览活动中开展了科普展示实践，如图 10 所示。



图 10 海淀会场科技展览活动现场

本次科普展示采用模块化设计理念，通过四个功能互补的展示区域构建完整的科普体验链：图文海报区采用信息可视化设计手法，通过轨道事故实例、实物剖面图和流程示意图等形式，简要说明了轨道基础设施智能运维的关键技术；视频展示区循环播放自主制作的科普小视频，系统阐述轨道视觉检测技术的原理及其在铁路安全监测中的应用价值；虚拟仿真实验区部署了我校自研的虚拟仿真系统，支持参观者自定义轨道检测环境、自选检测设备并进行参数调节，实时观察不同条件下的检测效果变化；实物演示区陈列完整组装的轨道检测教具，参观者可观察或亲自操控巡检小车沿预设轨道运行，并通过开发板 LCD 屏幕实时观测伤损识别过程及报警提示。

本科普展示实践活动最终形成了“图文-视听-虚拟-实物”的多维展示架构，该架构充分考虑了展会环境下参观者的认知特点：静态图文提供快速认知入口，动态视频深化理论理解，虚拟仿真实验实现参数化探索，动态科普教具实物操作则强化实践感知。

活动现场展示效果表明：首先，多模态信息分层呈现方式满足了差异化学习需求，适应了不同知识背景的受众；其次，虚实结合的递进式交互体验强化了认知效果，增加了受众的参与感和获得感；最后，通过将科研成果转化成强交互性的动态科普教具，实现了前沿科技的可视化与普适化传播，为工程前沿技术的科普教育提供了可借鉴的实施范式。

(2) 北京交通大学校友返校科普日活动

2024年9月21日，北交大人工智能与未来交通技术科普基地组织开展了面向返校校友及其子女的轨道检测技术专题科普活动，如图11所示，参与人数共计40人左右。活动采用理论讲解、实物观摩和实践操作相结合的递进式科普教学设计方案。

技术原理讲解环节由科普基地专业教师系统介绍轨道伤损检测技术的发展历程，并结合工程案例说明典型伤损特征及其识别方法，重点解析了视觉检测技

术在铁路运维中的应用现状。



(a) 实物参观体验

(b) 科普教具实操

图 11 北京交通大学科普活动现场

实物参观体验环节则展示了真实轨道检测车的硬件构成，并演示了其在轨道上的实际工作过程，让参与者能够近距离观察设备运行状态。

科普教具实操环节让参与者使用预制板材构件组装积木式巡检小车机械结构，并通过调试检测算法参数，如置信度阈值、报警条件等，观察不同参数下的决策边界变化。活动结果表明：低龄组主要关注模型拼装过程与检测效果的观察，而青少年组更倾向于算法调试实验。这种差异化互动验证了教具对不同年龄段的适应性特征^[3]。

整个活动采用“理论认知-实物感知-实践验证”的三阶段递进模式：技术讲座建立知识框架，实物参观强化感性认识，动手实践深化理解深度。这种结构化设计为中小学人工智能教育提供了可操作的实践范式。

本研究基于所开发的交互式科普教具探索了多种实践方案，并在多个科普活动中进行了实际应用，获得了众多参与者的积极反馈——小学生及家长表示该教具锻炼了其动手能力，并了解了轨道检测技术；中学生参与者表示该教具显著提升了他们对AI技术的理解兴趣并增进了对铁路现场工作的了解；有编程基础的青少年则表示该项目是很好的编程实践练习，有兴趣进行更多优化。从家庭亲子共同探索轨道检测技术奥秘，到初高中学子自主选择体验模块，不同群体在沉浸式互动过程中，切实感受到本教具在轨道检测技术科普实践中的专业性、趣味性和适应性。

5 总结与展望

本研究成功研制了一套基于轨道视觉检测技术的交互式科普教具，为中小学生提供了一种融合前沿科技与科普教育的创新学习工具，实现了先进科研成果的科普转化。针对传统科普教具技术滞后、交互性不足的问题，研究采用模块化设计理念开发了可拆装的轨道基础设施模型和检测装备模型。机电结构上运用积木拼装模型实现轻量化与低成本化；软件层面通过轻量化算法模型使视觉检测系统能在嵌入式平台稳定运行；硬件核心则采用 Maix-I 开发板平衡性能与科普

适用性，并通过参数可调设计帮助学生理解算法逻辑。实践表明，该教具在科普活动中有效提升了学生的参与度与理解深度，高交互性的动态积木模型使抽象的技术原理可视化。

未来我们将重点优化系统的交互反馈机制，并探索更具鲁棒性的轻量级网络架构，以进一步提升其在多变环境下的科普演示效果。研究成果为工程技术的科普转化提供了可推广的实施范式，对推动中小学人工智能教育具有积极意义。

参 考 文 献

- [1] 国务院. 全民科学素质行动规划纲要（2021-2035 年）[EB/OL]. (2021-06-03) [2024-12-20].
https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5623051.htm
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国科学技术普及法[EB/OL] (2024-12-25) [2025-5-3]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202412/content_6994555.htm
- [3] 中华人民共和国教育部. 教育部部署加强中小学人工智能教育[EB/OL]. (2024-12-02) [2025-5-3].
http://www.moe.gov.cn/jyb_xwfb/gzdt/s5987/202412/t20241202_1165500.html.
- [4] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[N]. 人民日报, 2022-10-26(1).
- [5] 科普平湖. 《科普法》宣贯 | 从软性规定到法定义务，《科普法》修订带来哪些改变？[EB/OL].
- [6] 李湘黔. 基于科学素养培育的中小学科普教育研究[J]. 湖南中学物理, 2024(4):1-5.
- [7] 光明日报. 课程课时不足、教材与科技进展脱节、科学实验室少——科学教育的源头活水从哪里来[N]. 光明日报, 2024-04-23(13).
- [8] 王嘉毅. 开辟新时代中小学科学教育新赛道[J]. 中小学科学教育, 2024(1):5-9.
- [9] 黄洪明, 刘卫庄, 吉胜旺. 一种基于 AI 图像识别技术的动态科普装备设计[J]. 设备管理与维修, 2023(1): 64-67.
- [10] 彭文娟, 李清勇, 周围, 等. 高铁智能运维虚拟仿真实验设计与应用[J]. 计算机技术与教育学报, 2022, 10(5):49-56.
- [11] 国家虚拟仿真实验教学课程共享平台. 面向高铁轨道巡检的视觉感知虚拟仿真实验[EB/OL]. (2023-05-15) [2025-5-3].
<https://www.ilab-x.com/details/page?id=12093>.
- [12] 北京交通大学计算机学院. 了解无人驾驶, 探秘人工智能[EB/OL]. (2024-10-17) [2025-5-3].
<https://cs.bjtu.edu.cn/kpjd/kphd/202314561.htm>
- [13] 中华人民共和国教育部. 义务教育科学课程标准（2022 年版）[S]. 北京：北京师范大学出版社, 2022.
- [14] 张德富, 宋克臣, 牛孟辉, 等. 基于一维卷积的生产线冷态重轨表面缺陷快速检测[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 276-281.