

# 工程结构运维多场景的敏感服役指标智能识别

刘宇飞<sup>1,2</sup>, 齐 玉<sup>1</sup>, 李保罗<sup>1</sup>, 冯楚乔<sup>1</sup>, 丁一凡<sup>1</sup>, 聂 鑫<sup>1,2</sup>, 樊健生<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 随着我国土木工程行业由建造向运维逐渐转型, 工程结构服役安全保障需求陡增, 提质增效的结构智能诊断方法成为研究热点。结构服役性态指标是表征工程结构安全水平的要素, 是工程结构诊断养护技术体系以及结构健康监测研究的基础, 判断结构服役性态的敏感指标并进一步实现指标的智能识别是工程结构诊断智能化的首要任务。为此, 围绕工程结构运维公共建筑、地铁隧道、公路桥梁、公路路面等多个场景中的敏感服役指标的智能识别开展综述研究; 梳理关键敏感指标, 进一步对指标的智能化识别方法进行归纳总结。结果表明, 以深度学习为代表的新一代人工智能技术有效推动了结构服役敏感指标的感知识别研究与应用, 其中数字图像方法与深度学习算法在工程结构变形、表面病害智能识别中取得了良好的效果, 展现了全面的应用优势。

**关键词:** 工程结构; 结构诊断; 检测鉴定; 监测; 敏感指标; 智能识别

**中图分类号:** TU375 **文献标志码:** A

## Intelligent detection of sensitive service indicators in multiple scenarios of structural maintenance

LIU Yufei<sup>1,2</sup>, QI Yu<sup>1</sup>, LI Baoluo<sup>1</sup>, FENG Chuqiao<sup>1</sup>, DING Yifan<sup>1</sup>, NIE Xin<sup>1,2</sup>, FAN Jiansheng<sup>1,2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** With the gradual transformation of the civil engineering industry of China from construction to operation and maintenance, the demand for service safety assurance of engineering structures has increased sharply, and structural intelligent diagnosis methods that improve quality and efficiency have become a research hotspot. Structural service behavior indicator is the element to characterize the safety level of engineering structure and is the basis of structural maintenance systems and structural health monitoring research. Sensitive indicators for evaluating the service behavior of structures and further realizing the intelligent identification of indicators are the primary tasks of intelligent structural diagnosis. This paper focused on the intelligent identification of sensitive service indicators in various scenarios such as engineering structure operation and maintenance of public buildings, subway tunnels, highway bridges, and highway pavements. This paper sorted out key sensitive indicators, and further summarized the intelligent identification methods of indicators. The results show that the new generation of artificial intelligence technology represented by deep learning has effectively promoted the research and application of perceptual identification of structural service-sensitive indicators, and the digital image method and deep learning algorithm have achieved comprehensive application advantages in the intelligent detection of structural deformation and surface diseases.

**Keywords:** civil structure; structural diagnosis; testing and appraisal; monitoring; sensitive indicator; intelligent detection

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52192662, 51978376)。

**作者简介:** 刘宇飞, 出生于 1988 年, 男, 工学博士, 副研究员, 主要从事结构智能诊断研究。email: liuyufei@tsinghua.edu.cn

**通信作者:** 樊健生, 出生于 1975 年, 男, 工学博士, 教授, 主要从事组合结构研究。email: fanjsh@tsinghua.edu.cn

**收稿日期:** 2022 年 2 月

## 0 引言

我国土木工程逐步从集中建造向服役运维转型,城市发展转向内涵品质提升与存量为主的营造管理主题<sup>[1]</sup>,工程结构服役运维成为行业的潜力方向。自2000年以来,交通基础设施与城镇化提速发展,并呈集中建设的特点,使工程结构老龄化将在未来集中出现,服役运维压力陡增<sup>[2]</sup>;传统工程结构诊治养护体系将迎来巨大冲击,自动化、智能化等提质增效的诊断技术需求迫切<sup>[3]</sup>。

结构服役性态指标是表征工程结构安全水平的基础要素,是以检测、鉴定与评价为核心的在役工程结构现行诊断养护技术体系的评价依据,是结构健康监测所采集的数据来源。常见的工程结构服役性态指标包括变形与挠度、表面缺陷与病害、振动、应变、温度、界面与连接损伤、内部损伤(如缆索内部钢丝锈蚀、隧道衬砌与道路路面内部空洞等)、材料力学指标、材料耐久性指标、构件截面与尺寸偏差等。上述指标大多可以通过检测、监测技术准确检查并量化识别,服役性态指标的识别是工程结构科学养护的关键。

为此,文中围绕工程结构运维多个场景中的敏感服役指标的智能识别开展综述,对公共建筑、地铁隧道、公路桥梁、公路路面等多场景下工程结构诊断养护的关键敏感指标进行梳理,进而对指标的智能识别方法进行归纳总结。

## 1 诊断养护标准与敏感服役指标

通过对工程结构诊断养护技术标准以及有待关注的技术与实践问题等的讨论,对典型结构服役运维场景中的敏感指标予以梳理。

### 1.1 结构检测鉴定与健康监测

目前,我国已经初步建立以检测、鉴定与评价为核心的在役工程结构技术标准体系<sup>[4]</sup>,在役基础设施安全保障的工程实践以人工检测、检查以及基于规范标准的评分、评价等操作为主,能够实现结构安全、危险的判断以及安全状况分类,是桥梁隧道等基础设施养护以及工业、民用建筑结构诊治过程的“规定动作”。同时,对特大桥、大型体育场馆等重要建筑与基础设施布设结构健康监测系统,通过分析监测数据进行结构的状态评估并对异常状况进行预警。结构监测是动态掌握结构运行状况、防范化解重大安全风险、提升安全保障能力的重要技术手段。

在工程结构诊断养护技术标准体系中,针对部分常见的结构服役性态指标,如变形与挠度、表面缺

损与病害等,人工检测、检查主观性强、效率低下;受作业风险与管理水平影响,检测现场作业沦为“良心活”,“检不到”“检不出”等问题突出,检测质量难以得到保证。依靠人工作业的结构检测存在多方面现实问题,例如:通过人工手段检测混凝土结构表面病害存在测不准、高空多、效率低、记不全等缺点;难以对缆索内部与连接处病害、钢-混凝土组合结构界面脱空等损伤进行量化检测,对缺图、无图的混凝土结构进行配筋检查等;同时,在桥梁的梁底与高墩、工业厂房与高耸构筑物等高风险现场检测及承载力检测作业中,检测作业技术人员自身的安全事故屡有发生,如2015年湖北巴东长江公路大桥检测“4·10”事故、2019年广西南宁三岸邕江大桥检测“11·21”事故、2019年广东深圳深水田片区土壤压实度检测“10·23”事故等。

从20世纪80年代起,起源于航空航天领域的结构健康监测研究逐渐被研究人员推广至土木工程领域的海洋平台、大跨桥梁与大跨空间结构等场景。结构健康监测利用传感器监测信息与融合数据,以解决在役结构性态反演的反问题为核心内容,识别结构损伤并评价结构性能退化程度。相比传统人工检测与养护技术,结构健康监测具有信息化与自动化程度明显提升的优势,大量布设的传感器与实测得到的海量数据推动了监测传感器技术与数据-模型理论体系研究的发展,其全场监测、实时显示、整体把控的技术优势备受关注。在数十年的研究探索中,由于硬件与算法的桎梏,健康监测技术在重大基础设施领域的实践与应用受到限制,例如:接触式传感器测点稀疏且硬件难以与工程结构同寿,监测结果可靠性无法得到验证;振动等关键监测指标对复杂结构损伤不够敏感,监测系统难以独立提供可靠判断;服役性态反演过程难以解决数据不完备等理论问题。此外,结构健康监测技术与现行工程检测养护体系的结合与互相代替同样是技术应用过程的难题。

### 1.2 典型结构服役运维场景与敏感指标

结构检测鉴定与健康监测的技术问题,在感知、识别层面,归根结底是“测什么”与“怎么测”的问题,即哪些敏感指标最能反映结构服役安全状态,以及如何高效准确测量并识别敏感指标。同时,考虑到检测鉴定技术服务以及结构监测系统的经济性,优化选取测量内容与关键测点也至关重要。文中选择公共建筑、城市地铁隧道、公路桥梁、公路路面为典型结构服役运维场景,结合其针对性的检测、养护标准规范,对服役形态敏感指标进行归纳结果如表1所示。由表1可见,检测、养护的标准与规范重点关注了结构变形、表面病害以及关键构件受力、动力特征等敏感指标。关于敏感指标的准确识别,智能化

表 1 4 类典型结构服役运维场景与敏感指标

Table 1 Four typical structure service operation and maintenance scenarios and sensitive indicators

类型	序号	子类	主要技术标准名称	关键敏感指标
公共建筑	1	空间网格结构	GB/T 50621—2010《钢结构现场检测技术标准》 GB/T 50344—2019《建筑结构检测技术标准》 GB 50292—2015《民用建筑可靠性鉴定标准》	整体挠度、焊缝连接、杆件应力、杆件变形、涂装与锈蚀、节点与支座、动力特征等
	2	空间索膜结构	DGTJ08—2019—2007《膜结构检测技术规程》 GB/T 50621—2010《钢结构现场检测技术标准》 GB 50292—2015《民用建筑可靠性鉴定标准》	膜材性能、预张力、连接与节点、整体变形等
城市地铁隧道	3	结构部分	CJJ/T289—2018《城市轨道交通隧道结构养护技术标准》 GB/T39559.3—2020《城市轨道交通设施运营监测技术规范第3部分:隧道》	裂缝、压溃、剥落、渗漏水、钢筋锈蚀、错台;竖向与水平位移、净空收敛等
公路桥梁	4	混凝土梁桥	JTG5120—2021《公路桥涵养护规范》 JTGT-H21—2011《桥梁技术状况评定标准》	材料强度、表观病害、耐久性指标、预应力钢束、几何形态与变位、动力特征等
公路路面	5	沥青路面	JTG 5210—2018《公路技术状况评定标准》 JTGT-E61—2014《公路路面技术状况自动化检测规程》	裂缝(龟裂、块状、纵向、横向)、修补、沉陷、车辙、拥包、坑槽、松散、泛油等

的结构服役性态指标识别方法在实际工程中被重点关注并得到大量研究。以下针对表 1 中结构服役运维的 4 类典型场景进行详细讨论。

## 2 场景 1——公共建筑

公共建筑中的空间结构往往为了实现大跨度、复杂造型等功能需求,在设计中采用钢构件、索、膜等多种类型的受力构件,使得结构受力具有较强非线性。以表 1 中归纳的指标为例,对其中部分指标以及具备智能化识别条件的敏感指标予以综述。

### 2.1 空间网格结构

#### 2.1.1 构件锈蚀

大型空间结构使用的材料一般为低碳钢、低合金钢等耐腐蚀性较差的材料,在服役过程中,在长期的自然环境以及运营阶段荷载的多重作用下,钢构件易出现锈蚀、涂装破损等表观病害。构件锈蚀将导致其有效截面减小,构件刚度发生变化,进一步使结构受力性能发生改变,影响整体结构承载力、刚度。Cinitha 等<sup>[5]</sup>设计了角钢、圆钢管腐蚀压缩试验,发现轻度锈蚀不会显著降低构件的强度,但随着锈蚀程度增加,构件力学性能迅速下降。李欣荣等<sup>[6]</sup>对正放四角锥网架进行有限元分析,研究均匀锈蚀与非均匀锈蚀对结构受力性能和稳定性能的影响,结果表明随着锈蚀程度的增加,网架最大应力大致呈二次曲线增长,最大位移呈线性增长,稳定承载力显著降低。王小盾等<sup>[7]</sup>基于在役网架结构的检测数据,建立了吊顶网架锈蚀前后的数值模型,发现结构

最大应力及变形均与锈蚀厚度呈二次曲线关系。综上,轻度锈蚀对构件力学性能影响较小,而随锈蚀程度的增加其对构件力学性能的影响快速增加。

对于钢构件锈蚀,可以采用智能化方法进行识别,例如: Dalei 等<sup>[8]</sup>基于深度神经网络提出了新型锈蚀检测方法,通过对锈蚀图像进行语义分割实现锈蚀区域的检测与量化; Kim<sup>[9]</sup>等使用光学 3D 数字化系统对锈蚀的桥梁钢构件进行测量,得到了构件的剩余厚度,可用于构件承载力的计算。

#### 2.1.2 构件变形

构件变形主要表现为构件发生弯曲、偏心,在不当施工、极端荷载、温度效应、支座变形等情况下,细长杆件的弯曲变形初始缺陷进一步发展,成为弯曲变形损伤。对于薄壁构件,当弯曲变形较大时会出现局部凹陷等截面变形。诸如: Li 等<sup>[10]</sup>研究了节点抗弯刚度和构件随机初始弯曲度对双层网架承载力的影响,构件初始弯曲度对双层网架承载能力的影响与构件长细比密切相关。随着构件长细比的增加,极限荷载(表征承载力)降低幅度逐渐增大;此外,构件的随机初始弯曲度分布对双层网架的极限荷载有明显影响。Ghazijahani 等<sup>[11]</sup>对有局部凹陷的薄壁构件进行了试验研究,发现局部凹陷会降低构件承载能力,且当应力较高时缺陷对承载能力影响显著。

构件变形的传统识别方法中,一般采用大地测量仪器,可以达到较高的精度,但效率很低。基于数字图像<sup>[12]</sup>、三维激光扫描<sup>[13]</sup>等技术的方法也可用于结构变形的测量。如刘宇飞等<sup>[14-15]</sup>基于多视角几何三维重建法,获取 64 个不同视角下某网架结构弯曲杆件的数字图像并生成三维点云模型,拟合构件三

角形表面模型(图1)的中心轴变形曲线,基于此建立构件服役阶段的精细有限元模型,经过模型修正,用于评估结构安全性。Wei等<sup>[16]</sup>基于图像的三维重建,将多构件关键区域进行建模生成三维网格模型,提出了自动识别和提取结构构件形状、变形的AREAS算法(图2),通过试验验证,其与三维激光扫描变形测量结果差异在1mm内;进一步以试验实测结构竖向挠度及弯曲构件的弯曲形状为目标函数,建立网架结构有限元模型并完成修正,实现网架结构的安全性评估研究<sup>[17]</sup>。

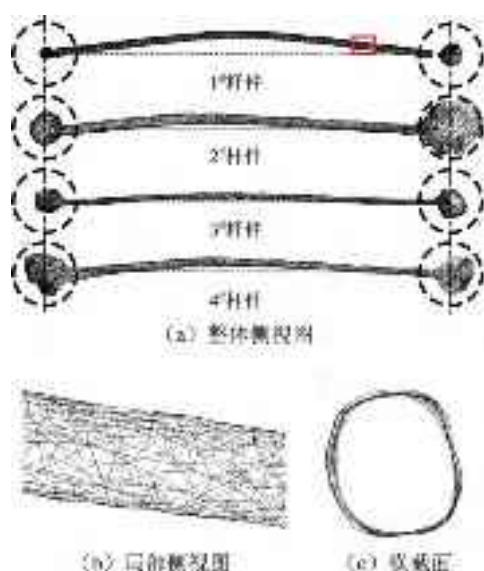


图1 三角形表面网格模型<sup>[15]</sup>

Fig. 1 Triangular surface mesh model<sup>[15]</sup>

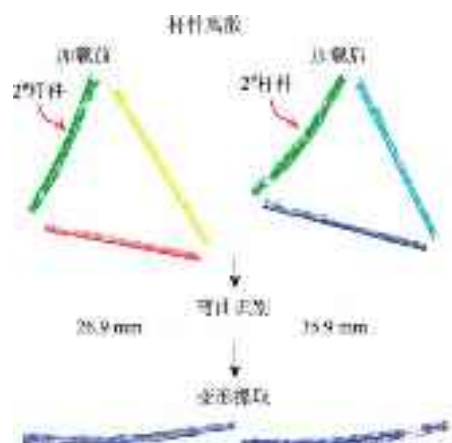


图2 AREAS 算法变形测量结果<sup>[16]</sup>

Fig. 2 Deformation measurements using AREAS<sup>[16]</sup>

### 2.1.3 节点损伤

根据工程中节点形成不同,节点损伤可分为焊接节点损伤和螺栓节点损伤两种类型。对于焊接节点,常见的缺陷包括焊缝裂纹、焊缝夹渣等,在焊接过程中节点内部产生残余应力,复杂受力状态下易

发生焊缝拉裂损伤。对于螺栓节点,在长期的结构振动与荷载作用下,出现螺栓松动。节点的损伤会影响节点刚度,进一步影响结构的内力分布。对于大型空间结构,由于节点数量众多,节点损伤的识别以及定位在实际工程中更为困难。有学者对此展开研究,诸如:张玉峰等<sup>[18]</sup>通过三单元组合建立连接杆模型并通过降低端部连接杆的刚度模拟网架结构节点损伤,发现与损伤节点相连的杆件端部应变变化较大,因此可使用杆端应变模态进行节点损伤识别。Wang等<sup>[19]</sup>对一双层网架结构进行了低周疲劳试验,网架采用螺栓球节点连接,发现当钢管变形较大时,螺栓弯曲,球节点受力机理发生变化,杆件全截面受压变为部分受压,因此可利用构件截面应力分布分析节点状态。综合来看,实际结构中的节点应力状态不明确,往往需要依赖杆件的应力应变状态间接地分析节点状态。

### 2.1.4 整体变形

网架结构的整体变形是施工控制的重要指标,是检验结构设计与施工质量的标准,也是服役阶段安全评估的重要指标。整体变形可能来自施工安装过程中的安装误差、结构自重、工作荷载、沉降等。结构发生损伤时,其宏观表现是整体变形,但映射关系并不明确。为此,王星等<sup>[20]</sup>建立了考虑焊接球节点刚度后的网架杆件单元刚度矩阵,通过有限元分析发现,网架挠度受节点刚度的影响较大。本文研究团队提出的基于杆件变形的模型修正方法中,同样考虑了整体变形的影响<sup>[17]</sup>,研究结果表明空间结构的整体变形指标类似于杆件弯曲,可以基于三维测量手段智能化提取。

### 2.1.5 振动特性

一般仅通过静力指标对结构的状态进行分析并不能满足结构状态评价需求,需要进一步对结构进行动力测试。结构的振动特性受自身质量、刚度、阻尼比等因素的影响,当结构发生损伤后,相关几何或材料参数随之变化,一般表现为局部刚度的降低,进而导致结构的动力特性发生变化。因此,动力特性是对网架结构进行服役性态评估时必不可少的一项指标。利用网架结构损伤前后的固有频率变化可对结构进行损伤识别,但对局部损伤并不敏感,存在较多局限性<sup>[21-22]</sup>。基于振型、应变模态等指标也可对结构进行损伤识别定位<sup>[23-24]</sup>。

## 2.2 空间索膜结构

### 2.2.1 索力

索膜结构属于张拉柔性结构,其整体位形、受力状态、刚度、空间稳定性均由施加了预应力的拉索保障。因此,索力是分析索膜结构服役性态的关键指标。索膜结构的索力与结构位形相互关联,在施工

阶段的预应力施加、运营阶段的预应力损失均会影响索膜结构的索力,进一步影响结构的整体位形、刚度,甚至影响结构的正常运营状态。如王廷廷等<sup>[25]</sup>对轮辐式索膜结构进行有限元分析,研究结果表明假设脊索发生损伤导致内力降低13%,结构内环节点将发生明显的位移,与之相邻的拉索索力均有较大变化。王树等<sup>[26]</sup>对类似于索膜结构的2008奥运会羽毛球馆弦穹顶结构进行了预应力损失分析,结果表明,预应力损失会使结构内力分布不均匀、结构整体稳定性下降。目前,索力识别应用最广泛的方法是振动法<sup>[27]</sup>,此外还有基于磁弹效应的方法<sup>[28]</sup>等。

### 2.2.2 整体变形

索膜结构的整体变形与索力相互关联,也是评估结构状态的重要指标。整体变形是结构内力变化的外在表现,如拉索损伤会导致明显的结构内力变化,引起结构位形变化。同时,由于索膜结构跨度较大,结构整体变形与内力受到温度影响较为明显<sup>[25]</sup>。通过基于位形指标的在役索膜结构有限元模型修正方法,采用三维激光扫描获取索膜结构的三维点云模型得到结构位形指标并构建目标函数,以预应力为优化参数对有限元模型进行修正,可使有限元模型的索力分析结果与实测值更为接近<sup>[29]</sup>。

### 2.2.3 振动特性

索膜结构的刚度由预应力拉索控制,因此,其振动特性与结构内力密切相关。通过对索膜结构的振动特性进行分析,得到其与结构内力的相互关系,有利于对结构的真实服役性态进行评估。为此,孙文波等<sup>[30]</sup>对轮辐式索膜结构自振特性进行分析,发现索膜结构自振频率分布密集,前几阶自振频率与预应力度近似呈线性关系。

## 3 场景2——城市地铁隧道

随着城市人口密集化以及地面空间资源趋于紧张,大规模的地铁线路在全球各大城市得到建设。我国自1965年7月在北京开通首条地铁线路以来,至2020年底,总共已有45座城市开通轨道交通线路,运营总里程达到8000公里<sup>[31]</sup>。隧道服役期间性能退化会影响到结构的安全性和耐久性,严重时甚至引发事故,定期检测或长期监测对保障结构安全具有重要意义。

地铁隧道的安全评估主要依赖于静力指标。例如林楠等<sup>[32]</sup>建立的地铁隧道安全评估指标体系包括渗漏水、纵向沉降、横向变形、管片背后空洞、材质劣化以及管片裂缝等。董飞等<sup>[33]</sup>通过分析北京地铁部分典型线路的主要病害,将地铁隧道病害分为盾构隧道变形超限、衬砌病害、渗漏水以及整体式道床病

害。总体上,隧道变形<sup>[34-35]</sup>与隧道裂缝<sup>[36-37]</sup>是最常见也是最严重的地铁隧道病害之一,对隧道结构安全性能影响显著。

### 3.1 隧道变形

隧道的纵向变形和横向变形是由隧道上方地表加卸荷载、隧道附近基坑开挖等原因<sup>[38]</sup>所致,可使隧道渗漏水甚至管片破坏,其检测方法可分为接触式检测和非接触式检测。其中,接触式检测成本高且效率低下,相关研究已趋于停滞。常见的非接触式检测技术包括光栅传感技术、数字图像处理技术以及激光测距技术等;其中激光测距技术通过三维激光扫描可以高密度、高分辨率获取三维点云,速度快且精度高,近年来在隧道变形监测领域得到广泛应用<sup>[39-43]</sup>。

关于三维激光扫描技术在地铁隧道的应用方面已有大量研究,诸如:简晓等<sup>[44]</sup>通过三次多项式插值曲面拟合隧道整体变形,并通过比较不同拟合曲线之间的高程,分析地铁隧道上方建筑施工的影响。李健等<sup>[45]</sup>基于点云法向量差异的点云分割算法,利用抽稀后的点云数据构建地铁隧道模型并进行整体分析。托雷等<sup>[46]</sup>通过随机采样一致性算法和最小二乘平差算法提取隧道中轴线,根据轴线信息调整隧道姿态后再通过局部曲面拟合来截取隧道断面。朱宁宁<sup>[47]</sup>、刘绍堂等<sup>[48]</sup>以及Delaloye<sup>[49]</sup>通过截取隧道横断面拟合椭圆来分析隧道的整体变形。上述研究聚焦于三维激光扫描点云数据的处理,为准确测量隧道变形以及评估隧道安全状况提供了解决方案。

### 3.2 隧道裂缝

隧道在服役运维期间受温度应力、环境变化等因素的影响难免产生裂缝<sup>[50]</sup>。隧道裂缝的产生和发展会导致严重的事故,威胁结构安全。常见的检测方法有地质雷达探测法、超声波检测法、声发射检测法、光纤传感检测法以及图像处理检测法等<sup>[51]</sup>。2012年以来,伴随地铁隧道图像采集系统<sup>[52-55]</sup>和计算机视觉技术的快速发展,图像处理检测法依赖于图像质量的问题逐渐得到解决。由于图像处理检测法具有效率高、便捷直观等优点<sup>[56]</sup>,该方法在地铁隧道裂缝检测中得到了广泛的应用。

针对隧道裂缝图像普遍存在的对比度低、光照不均匀、杂物干扰严重、连通性完整性差等问题(图3),已经发展了一系列裂缝识别算法。例如:王耀东等<sup>[51]</sup>采用全局与局部相结合的预处理算法,有效地改善了地铁隧道图像光照不均匀与对比度低对裂缝识别的影响。朱力强等<sup>[57]</sup>通过分析隧道表面图像中的成分,结合矩形模板、Hough变换、连通区域、SVM等算法分离纹理及噪声,在北京地铁1号线中测试,其裂缝识别准确率可达81%。廖江海<sup>[58]</sup>针对地铁隧道中裂缝普遍的不连续完整的问题,提出一种基于



邻域连接空间约束的深度卷积神经网络,扩大感受野,从全局感知裂缝并且提高网络对于裂缝连续性的表征能力。本文研究团队基于 yolov5 网络结构提出了一种针对地铁隧道场景的目标检测深度学习算法,在苏州、郑州、长春等地铁隧道裂缝识别中得到应用,能够有效地克服地铁隧道图像中存在的问题,准确检出裂缝(图4)。这些算法可以取代劳动力密集的人工识别,高效率、高精度地实现隧道裂缝的自动化、智能化识别,为地铁隧道安全评估提供可靠的数据来源。

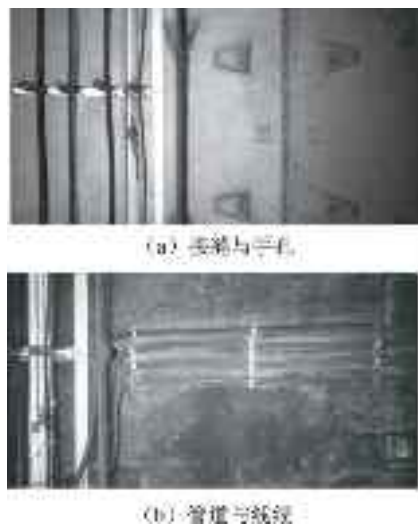


图3 典型地铁隧道图像

Fig.3 Typical subway tunnel images

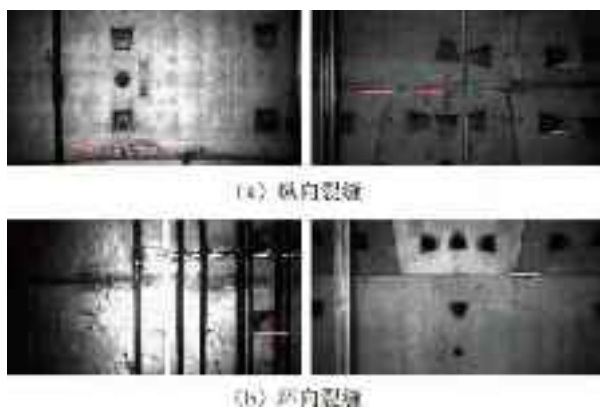


图4 隧道裂缝识别

Fig.4 Tunnel crack identification

## 4 场景3——公路桥梁

2000年以来,大规模的基础建设发展迅速,随之而来的是针对桥梁结构运维养护的迫切需求<sup>[59-60]</sup>。桥梁结构的敏感服役性态指标主要包括裂缝、变形、温度效应和模态参数等<sup>[61]</sup>。其中,裂缝在荷载及物理、化学作用下发生扩展,引起桥梁耐久性、刚度和

承载力的下降<sup>[62]</sup>;桥梁变形能够直接反映结构的刚度特征,是评估桥梁使用性能及安全性的重要指标之一<sup>[63]</sup>;温度效应则可有效协助评价桥梁变形与动力特征<sup>[64]</sup>;桥梁模态参数表征了桥梁的动力特性,是健康监测的经典指标<sup>[65]</sup>。本节中主要针对上述指标讨论对应的智能识别方法。

### 4.1 桥梁裂缝

桥梁在服役过程中,受到荷载、温度变化、收缩、基础沉降等因素的影响而产生裂缝,其中关键的结构性受力裂缝应得到及时的检测与处理<sup>[66]</sup>。传统的桥梁目视检查方法效率低、准确性差,且易形成安全隐患。随着智能化手段发展,软硬件技术的发展为桥梁裂缝检测提供智能识别方法。然而,与隧道、路面等基础设施不同,桥梁裂缝识别对精度的要求更为严苛,混凝土桥梁一般需要检出宽度为0.10~0.15 mm的裂缝,为智能化设备与方法带来挑战。图5所示为本文研究团队2021年于大广高速某混凝土桥梁采用无人机实拍的表面裂缝图像,图像幅宽覆盖的物理宽度约1.8 m,影像分辨率GSD约0.20 mm,在普通显示设备上图像需放大10倍后才可肉眼分辨出宽度0.10~0.15 mm的细小裂缝。

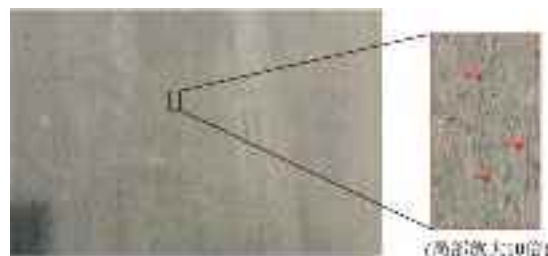


图5 混凝土桥无人机采集裂缝图像中的细小裂缝

Fig.5 Tiny cracks in crack images of concrete bridge captured by UAV

在数字图像的获取方面,国内外学者提出了一系列基于智能机器人的采集方法。如: Lee等<sup>[67]</sup>研发了桥梁数字图像远程采集机器人系统U-BIROS,将数码相机、照明设备及超声波测距仪等挂载于大型机械臂上,从而实现桥梁梁底图像的高分辨采集。Wang等<sup>[68]</sup>提出了基于系绳爬行无人机的桥梁梁底裂缝检测方法,将无人机附着于梁底进行遍历扫描,实现了对梁底细小裂缝的检测。近年来,基于无人机的桥梁病害检测方法发展迅速<sup>[69]</sup>,由无人机采集得到的数字图像能够用于桥梁裂缝的识别<sup>[70]</sup>。例如: Liu等<sup>[71]</sup>采用无人机实现铁路桥桥墩表面裂缝的检测,实现裂缝的识别、检出并投影表达于三维模型中,无人机拍摄的相机点位如图6所示;更进一步地, Morgenthal等<sup>[72]</sup>体系化地提出了基于无人机平台进行桥梁状态检测的框架,利用无人机获取桥梁数字

图像并生成三维模型,其无人机飞行路径如图 7 所示,飞行距离近、拍摄图像密集且重叠率高,实现较高的裂缝检测精度。



图 6 无人机拍摄点位<sup>[71]</sup>

Fig. 6 Shooting location of UAV<sup>[71]</sup>

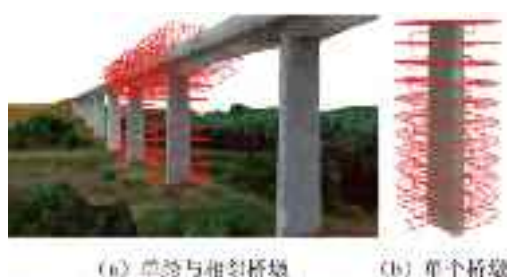


图 7 无人机飞行路径规划<sup>[72]</sup>

Fig. 7 UAV flight path planning<sup>[72]</sup>

在裂缝识别与提取方面,裂缝提取技术主要有阈值算法、边缘算法、区域算法、匹配算法及深度学习算法等<sup>[73]</sup>。针对不同算法对桥梁裂缝的识别,有学者进行了深入研究。例如: Abdel-Qader 等<sup>[74]</sup>比较了 FHT、FFT、Sobel 和 Canny 四种边缘检测算法在桥梁裂缝识别中的效果,将上述算法应用在 50 张混凝土桥梁表面灰度图上的裂缝检测中,发现 FHT 方法比其他三种具有更高的裂缝识别准确性。Yeum 等<sup>[75]</sup>在不控制拍摄位置和角度的情况下得到了数字图像,基于 Frangi 滤波器和 Canny 边缘检测算法,高精度地识别出了桥梁工字钢螺栓附近处的疲劳裂纹。除此之外,基于深度学习方法也能够实现裂缝的提取分割<sup>[76]</sup>与识别<sup>[77]</sup>。

#### 4.2 桥梁变形

变形检测是桥梁结构服役性态指标评估的重要环节,桥梁的挠度、沉降、支座滑移等变形指标能够直接反映桥梁目前的服役状态。荷载试验中,传统的桥梁变形检测常使用挠度计、位移传感器等设备<sup>[78]</sup>。

目前,桥梁变形的智能化检测、监测方法大多基于数字图像识别、遥感技术及三维激光扫描技术等,辅以无人机等智能机器人平台等实现。Sladek 等<sup>[79]</sup>基于多张数字图像的图像配准,得到了可靠的用于

桥梁挠度检测的方法。Jung 等<sup>[80]</sup>采用合成孔径雷达干涉技术 InSAR,在 4 年时间里对两座斜拉桥进行了位移监测,认为基于 X 和 C 波段的 SAR 传感器、运用时间序列干涉技术得到的观测数据能够用于估计桥梁的水平位移、垂直位移与热膨胀。2015 年来,三维激光雷达在位移检测方面取得了良好的应用效果,如:王勋<sup>[81]</sup>通过试验验证了三维激光扫描技术在桥梁挠度检测方面的可行性,认为其具有良好的应用前景。Cha 等<sup>[82]</sup>基于激光雷达扫描的方法进行桥梁位移检测,并利用八叉树的数据结构对获取的点云数据进行高效的分析处理。Erdenebat 等<sup>[83]</sup>以静载-挠度试验为基础,用无人机测量桥梁的变形,通过在无人机上搭载激光雷达与数码相机的方式获取桥梁挠度信息,进而通过变形面积差分法(DAD)评估桥梁结构损伤。上述研究表明,数字图像与激光雷达技术能够有效提高桥梁变形检测的效率与精度,为后续基于变形特征的受力分析奠定坚实的基础。

#### 4.3 桥梁温度效应

温度效应会对桥梁结构产生重要影响,具体表现为温度应变引起的桥梁开裂与变形。桥梁的温度效应主要通过温度传感器进行定量测量。Xu 等<sup>[84]</sup>通过安装在悬索桥不同位置的温度传感器得到了监测数据,分析了桥梁各部分有效温度与位移响应的关系,认为基于传感器数据确定的温度-位移线性关系能够有效预测桥梁位移响应的变化。

此外,温度效应往往会对桥梁动力特性、荷载引起的变形等指标的检测与监测结果造成干扰,需要基于测量所得数据对温度效应的影响进行智能识别与分离。为此,孙雅琼等<sup>[85]</sup>基于某斜拉桥主梁的温度监测数据,利用多元线性回归的方法得到温度效应的预测模型,并通过时变平均值法对温度效应进行了实时分离;吴海军等<sup>[86]</sup>针对大跨径箱梁截面桥,基于多元线性回归的方法,在实测桥梁总挠度中分离了由温度效应引起的跨中挠度。上述分析表明,分离温度效应后的监测数据能够有效排除干扰,从而精确地判断其他指标是否对桥梁结构的安全产生影响。

#### 4.4 桥梁模态参数

桥梁结构的模态参数包括频率、振型以及阻尼比等。对桥梁的模态参数进行长期监测,能够评估桥梁结构刚度、承载力的退化程度<sup>[87]</sup>,从而识别可能存在的损伤。桥梁模态参数识别方法众多,从检测角度,本节中仅对可快速检测并识别桥梁模态参数的方法进行总结。

桥梁模态参数可以通过车辆主动激振的方式进行测定<sup>[88]</sup>。如 Yang 等<sup>[89-90]</sup>提出了基于车辆响应的桥梁模态简介测量方法,即车辆扫描法,通过识别桥梁左、右频移项可间接得到桥梁的模态频率,进一步

通过 Hilbert 变换可以得到桥梁振型的相关信息。目前,有学者已开发出基于车辆响应的间接测量装置,主要由牵引车和测量车组成,通过分析前车和后车的加速度响应频谱,尽可能消除桥面不平整度的影响。这些装置中也有基于智能化设备的使用尝试,如 Kim 等<sup>[91]</sup>提出了一种车桥相互作用的无线监控系统,将无线传感器安装于车辆和桥梁上,记录二者间的动态相互作用;试验分析结果表明,该无线监控系统对于车桥响应的识别结果具有较高的可靠性和准确性。Sitton 等<sup>[92]</sup>通过智能手机上的传感器在车内记录实时加速度响应,并基于离散傅里叶变换(DFT)及多信号分类(MUSIC)算法得到车辆的加速度频谱,从而计算桥梁的自振频率;该方法以智能手机为载体,简化了数据采集的流程,同时达到了较高的识别精确度。基于桥梁模态参数的检测原理,开发出了上述一系列智能化检测设备,充分利用智能的识别判别与算法的优势,有效提高了检测的精度与效率。

## 5 场景4——公路路面

### 5.1 路面检测指标

公路路面检测可以获取道路的健康状况,为养护管理提供重要的信息和决策依据。依据 JTG 5210—2018《公路技术状况评定标准》<sup>[93]</sup>,路面检测的评价指标主要包括路面损坏、平整度、车辙、抗滑性能和结构强度等。在上述指标中,路面损坏检测是核心,且其检测内容多(表2、3),实现难度高,是目前工程界关注的主要研究方向。

表2 沥青路面损伤类别<sup>[93]</sup>  
Table 2 Asphalt pavement damage categories<sup>[93]</sup>

类别	表现形式
裂缝类	龟裂、横向裂缝、纵向裂缝、块状裂缝
变形类	沉陷、鼓包、坑槽
修补类	条状修补、块状修补
其他类	泛油、松散

表3 水泥路面损伤类别<sup>[93]</sup>  
Table 3 Cement pavement damage categories<sup>[93]</sup>

类别	表现形式
裂缝类	横向裂缝、纵向裂缝、斜向裂缝、角隅断裂、交叉裂缝、断裂板等
变形类	沉陷、胀起
接缝类	接缝填缝料损坏、纵向接缝张开、板底脱空、错台、接缝破碎等
表层类	磨损、漏骨、起皮

在路面损坏检测与评价中,需要获取各处损伤的类别、尺寸、严重程度和时空位置等,从而为道路管养决策提供依据。道路表面裂缝是道路路面结构退化的早期迹象之一,任由裂缝持续发展将加速路面破坏。检测判断裂缝的发展程度,是道路路面养护的重要依据<sup>[94]</sup>。目前,路面损坏检测技术主要分为两类:一类基于视觉传感器和图像处理技术,即首先对路面拍摄图片,通过图像处理技术获取裂缝类、修补类等损伤信息,其核心在于算法实现。另一类是基于激光传感器的位移测量方法,用于获取变形信息,其核心在于硬件设备,实现较为简单。因此,路面裂缝检测是路面损坏检测的核心。此外,鉴于国内高速公路以沥青路面为主,其自动化检测的公路检测车等硬件技术已较为成熟,下文聚焦沥青路面病害检测的智能化算法研究。

### 5.2 路面裂缝检测

深度学习方法是路面裂缝检测的主要技术之一。根据技术手段的不同,路面裂缝检测算法可以分为三种图像分类算法、目标检测算法、图像分割算法<sup>[95]</sup>。不同裂缝识别方法的输出形式如图8所示。

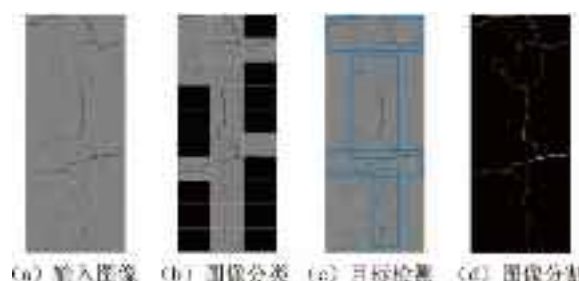


图8 不同裂缝识别方法的效果<sup>[66]</sup>

Fig. 8 Effect of different crack detection methods<sup>[66]</sup>

图像分类算法通常会将图像分成不同的 patch 输入模型当中,模型输出每个 patch 所属的类别<sup>[96-99]</sup>(图9)。采用 patch 而不是全图的原因有:1) 图像分辨率较高,而裂缝面积占比小,语义信息不明确,这与 imagenet<sup>[100]</sup>分类任务有显著区别,而基于 patch 的输入方式可以更关注局部信息;2) 基于 patch 的输入可以定位损伤位置;3) 基于 patch 的输入可以扩充数据集的数量。然而,基于 patch 的分类算法也有以下两点不足:一是模型的感受野局限在 patch 内部,无法获取周围信息,造成识别效果较差;二是基于 patch 的分类方法难以区分不同的裂缝类型。

目标检测算法是将整张图片输入模型当中,并在裂缝周围生成最小包围框(图10)。目标检测算法大致可以分为两类,即以 Faster RCNN<sup>[102]</sup>为代表的两阶段算法和以 SSD<sup>[103]</sup>、YOLO<sup>[104]</sup>为代表的单阶段算法。其中两阶段算法准确率更高,而单阶段算法



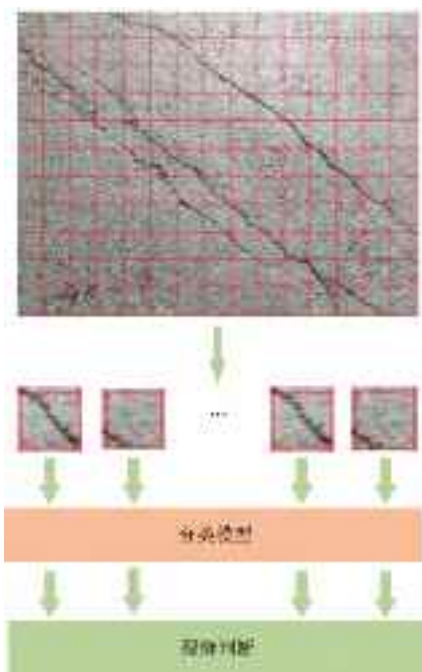


图 9 基于 patch 分类算法的算法架构<sup>[96]</sup>  
Fig. 9 Algorithm architecture based on patch classification algorithm<sup>[96]</sup>

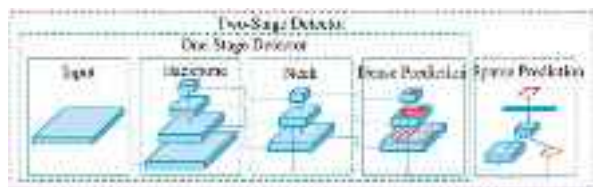


图 10 目标检测算法架构<sup>[101]</sup>  
Fig. 10 Architecture of object detection algorithm<sup>[101]</sup>

较快。在当前路面裂缝检测研究当中,单阶段<sup>[105]</sup>、两阶段算法<sup>[106-107]</sup>均有研究和应用。由于目标检测算法是将整张图像输入,可以通过周围的语义信息更好的分类和回归裂缝位置,但应用目标检测算法的挑战在于裂缝是典型的非刚体,物体之间的边界不明确,导致数据集标记和后处理困难。

而图像分割算法与前两种算法区别较大,是像素级别的预测(图 9)。语义分割领域常用的模型有 U-net<sup>[108]</sup>、Deeplab<sup>[109]</sup>等。其中语义分割算法也有相关应用<sup>[110-111]</sup>,但是由于图像分割算法的标记数据很难获取,其广泛应用受到阻碍。

本文研究团队开发了一种融合图像分类和目标检测的算法,可以同时输出每个网格的类别以及图像中裂缝的类别和定位信息(图 12)。该方法不需要建立大量的特征工程,效率高,并且具有更高的泛化性能,这也是其他深度学习算法相比于传统算法普遍具备的优势。深度学习克服了传统算法的

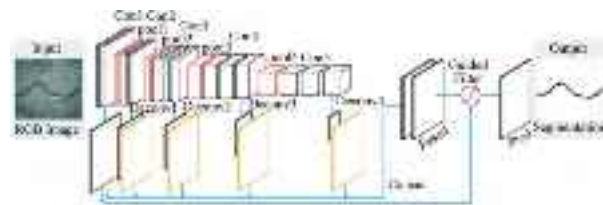


图 11 使用 Deeplab 进行语义分割<sup>[108]</sup>  
Fig. 11 Semantic segmentation with Deeplab



(a) 图像分类



(b) 目标检测

图 12 路面裂缝识别

Fig. 12 Pavement crack identification

诸多局限,在路面裂缝检测中正逐渐取代传统方法的地位。

## 6 结语

1) 判断结构服役性态的敏感指标并进一步实现指标的智能识别是工程结构诊断智能化的首要任务。在现行诊断养护与监测规范体系下,从结构安全服役真实场景需求出发的智能化交叉学科研究有利于解决实际工程问题。

2) 随着以深度学习为代表的新一代人工智能技术的发展,结构服役敏感指标感知识别的智能化交叉研究展示出更丰富的理论内涵与更全面的应用优势。

3) 检测、养护标准规范大量关注结构变形、表面病害以及关键构件受力、动力特征等敏感指标,结构变形、表面病害等对于服役结构的状态评估至关重要。

4) 数字图像方法与深度学习算法在工程结构运维多场景的变形、表面病害智能识别中取得良好效果,亟待应用推广。

5) 无人机、隧道检测车、公路检测车等平台载具有效扩大了数字图像、机器视觉类方法的应用范围,上述平台载体与智能化算法形成的软硬件系统有望提供病害检测的全套智能化解决方案。

#### 参 考 文 献

- [1] 王建国. 包容共享, 显隐互鉴, 宜居可期: 城市活力的历史图景和当代营造 [J]. 城市规划, 2019, 43 (12): 9-16. (WANG Jianguo. Inclusiveness and sharing, explicit and implicit mutual learning, livability predicted: historical prospect and contemporary creation of urban vitality [J]. City Planning Review, 2019, 43 (12): 9-16. (in Chinese))
- [2] 周加来, 周慧. 新时代中国城镇化发展的七大转变 [J]. 重庆大学学报 (社会科学版), 2018, 24(6): 15-21. (ZHOU Jialai, ZHOU Hui. Seven changes in China's urbanization in the New Era [J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2018, 24(6): 15-21. (in Chinese))
- [3] 钱永久, 杜彦良. 交通土建结构长寿命安全保障的途径分析 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(6): 6-11. (QIAN Yongjiu, DU Yanliang. Analysis on ways of guaranteeing the safety of civil structures in traffic systems during long service lives [J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(6): 6-11. (in Chinese))
- [4] 岳清瑞, 幸坤涛, 惠云玲. GB 50144《工业建筑可靠性鉴定标准》(报批稿)的修订及主要内容 [J]. 工业建筑, 2016, 46(11): 152-156. (YUE Qingrui, XING Kuntao, HUI Yunling. Revision and its main content for GB 50144 standard for reliability appraisal of industrial buildings and structures (draft for approval) [J]. Industrial Construction, 2016, 46(11): 152-156. (in Chinese))
- [5] CINITHA A, UMESHA P K, IYER N R. An overview of corrosion and experimental studies on corroded mild steel compression members [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(6): 1735-1744.
- [6] 李欣桀, 陈志华, 刘红波. 锈蚀后网架结构残余力学性能研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2020, 22(3): 83-91. (LI Xinlun, CHEN Zhihua, LIU Hongbo. Study on the residual mechanical properties of corroded grid structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(3): 83-91. (in Chinese))
- [7] 王小盾, 黄丙宁, 周婷. 在役升降网架结构的力学性能检测与评估 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2017, 50(增刊1): 53-58. (WANG Xiaodun, HUANG Bingning, ZHOU Ting. Detection and estimate of mechanical performance of lifting frame in service [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2017, 50(Suppl. 1): 53-58. (in Chinese))
- [8] DALEI W, PENG B, PAN Y, et al. Segmentation and quantitative analysis of corrosion images based on deep neural networks [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2018, 46(12): 121-127.
- [9] KIM I T, DAO D K, JEONG Y S, et al. Effect of corrosion on the tension behavior of painted structural steel members [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 133: 256-268.
- [10] LI H J, TANIGUCHI Y. Load-carrying capacity of semi-rigid double-layer grid structures with initial crookedness of member [J]. Engineering Structures, 2019, 184: 421-433.
- [11] GHAZIJAHANI T G, JIAO H, HOLLOWAY D. Experiments on dented steel tubes under bending [J]. Advances in Structural Engineering, 2015, 18(11): 1807-1817.
- [12] SCAIONI M, FENG T, BARAZZETTI L, et al. Image-based deformation measurement [J]. Applied Geomatics, 2015, 7(2): 75-90.
- [13] CHEN B, DENG K, FAN H, et al. Large-scale deformation monitoring in mining area by D-InSAR and 3D laser scanning technology integration [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(4): 555-561.
- [14] 刘宇飞, 樊健生, 孔思宇, 等. 多视角几何三维重建法识别工程结构缺损与变形 [J]. 工程力学, 2020, 37(9): 103-111. (LIU Yufei, Fan Jiansheng, KONG Siyu, et al. Detection of structural defect and deformation based on multi-view geometric three-dimensional reconstruction method [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(9): 103-111. (in Chinese))
- [15] LIU Y F, LIU X G, FAN J S, et al. Refined safety assessment of steel grid structures with crooked tubular members [J]. Automation in Construction, 2019, 99: 249-264.
- [16] WEI X C, FAN J S, LIU Y F, et al. Automated inspection and monitoring of member deformation in grid structures [J/OL]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2021. (2021-09-15) [2022-01-15]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/mice.12766>.
- [17] WEI X C, LIU Y F, FAN J S, et al. Safety assessment of existing pin-jointed grid structures with crooked members using static model updating [J]. Engineering

- Structures ,2021 ,247: 113107.
- [18] 张玉峰,丁阳,于顺泉. 大跨度空间结构节点损伤检测与定位研究 [C]//第五届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 北京《工业建筑》杂志社有限公司,2005: 483-489. ( ZHANG Yufeng , DING Yang , YU Shunquan. Research on joint damage detection and location of large-span spatial structures [ C ]// Proceedings of the 5th National Symposium on Modern Structural Engineering. Beijing: Industial Construction Magazine Agency Co., Ltd., 2005: 483-489. ( in Chinese) )
- [19] WANG X Y , LI H W , SONG X Y. Experimental investigation of failure mechanism of grid structure with bolted spherical joints [J]. Journal of Constructional Steel Research ,2022 ,188: 107033.
- [20] 王星,董石麟,完海鹰. 焊接球节点刚度对网架内力和挠度的影响分析 [J]. 空间结构,1996 ( 4 ): 34-40. ( WANG Xing , DONG Shilin , WAN Haiying. Analysis of influence of welding ball joint stiffness on internal force and deflection of grid [J]. Spatial Structures ,1996 ( 4 ): 34-40. ( in Chinese) )
- [21] HEARN G , TESTA R B. Modal analysis for damage detection in structures [J]. Journal of Structural Engineering ,1991 ,117( 10 ): 3042-3063.
- [22] DOEBLING S W , FARRAR C R , PRIME M B. A summary review of vibration-based damage identification methods [J]. The Shock and Vibration Digest ,1998 ,30( 2 ): 91-105.
- [23] DING B D , FENG D S , LV H L , et al. Damage detection in grid structures using limited modal test data [J]. Mathematical Problems in Engineering ,2017 ,2017: 1-11.
- [24] 丁阳,张玉峰,李忠献. 大跨度空间网格结构的损伤定位 [J]. 建筑结构学报,2006 ,27( 1 ): 16-23. ( DING Yang , ZHANG Yufeng , LI Zhongxian. Damage localization for long-span spatial lattice structures [J]. Journal of Building Structures ,2006 ,27( 1 ): 16-23. ( in Chinese) )
- [25] 王廷廷,王帆,吴波. 轮辐式索膜结构损伤监测研究 [C]//第七届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 北京《工业建筑》杂志社有限公司,2007: 987-992. ( WANG Tingting , WANG Fang , WU Bo. Research on damage monitoring of hub-spoke cable membrane structure [ C ]//Proceedings of the 7th National Symposium on Modern Structural Engineering. Beijing: Industial Construction Magazine Agency Co. , Ltd. ,2007: 987-992. ( in Chinese) )
- [26] 王树,张国军,葛家琪,等. 2008 奥运会羽毛球馆预应力损失对结构体系影响分析 [J]. 建筑结构学报,2007 ,28( 6 ): 45-51. ( WANG Shu , ZHANG Guojun , GE Jiaqi , et al. Influence of prestress loss on structural behavior of the badminton gymnasium for 2008 Olympic Games [ J ]. Journal of Building Structures ,2007 ,28( 6 ): 45-51. ( in Chinese) )
- [27] GEIER R , DE ROECK G , FLESCHE R. Accurate cable force determination using ambient vibration measurements [ J ]. Structure and Infrastructure Engineering ,2006 ,2( 1 ): 43-52.
- [28] 章鹏,刘小亮,陈伟民,等. 磁弹索力传感器设计方法研究 [J]. 仪器仪表学报,2010 ,31( 11 ): 2467-2473. ( ZHANG Peng , LIU Xiaoliang , CHEN Weimin , et al. Design method of magneto-elastic cable tension sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument ,2010 ,31( 11 ): 2467-2473. ( in Chinese) )
- [29] 丁一凡,刘宇飞,樊健生,等. 基于空间位形的在役索膜结构有限元模型修正与安全评估 [J]. 工程力学,2022 ,39( 5 ): 44-54. ( DING Yifan , LIU Yufei , FAN Jiansheng , et al. Finite element model updating and safety assessment of in-service cable-membrane structure based on spatial configuration [ J ]. Engineering Mechanics ,2022 ,39( 5 ): 44-54. ( in Chinese) )
- [30] 孙文波,王剑文,刘永桂,等. 车辐式大跨度张拉索膜结构的自振和静风作用分析 [J]. 工业建筑,2007 ,44( 增刊 1 ): 672-675. ( SUN Wenbo , WANG Jianwen , LIU Yonggui , et al. Research on natural vibration frequency analysis and static wind loads for a rung-shape tensile cable-membrane structure [ J ]. Industrial Construction ,2007 ,44( Suppl. 1 ): 672-675. ( in Chinese) )
- [31] 黑焕学. 城市轨道交通运营隧道病害辨识与结构健康状态评价 [D]. 北京: 北京交通大学,2021: 1-3. ( HEI Huanxue. Disease identification and structural health status evaluation of urban rail transit operation tunnels [ D ]. Beijing: Beijing Jiaotong University ,2021: 1-3. ( in Chinese) )
- [32] 林楠,黄宏伟. 地铁结构安全评估指标体系的初步研究 [J]. 现代隧道技术,2008 ,45( 增刊 1 ): 82-85. ( LIN Nan , HUANG Hongwei. Preliminary study on safety evaluation index system of subway structure [J]. Modern Tunnelling Technology ,2008 ,45( Suppl. 1 ): 82-85. ( in Chinese) )
- [33] 董飞,房倩,张顶立,等. 北京地铁运营隧道病害状态分析 [J]. 土木工程学报,2017 ,50( 6 ): 104-113. ( DONG Fei , FANG Qian , ZHANG Dingli , et al. Analysis on difects of operational metro tunnels in Beijing [J]. China Civil Engineering Journal ,2017 ,50( 6 ): 104-113. ( in Chinese) )
- [34] 刘冠兰. 地铁隧道变形监测关键技术与分析预报方法研究 [D]. 武汉: 武汉大学,2013: 1-13. ( LIU Guanlan. Study on the method of monitoring and data processing for metro tunnel deformation [D]. Wuhan: Wuhan University ,2013: 1-13. ( in Chinese) )
- [35] 徐万鹏. 隧道位移监测新方法的可行性探索 [J].

- 铁道工程学报, 2000, 17(2): 65-68. (XU Wanpeng. Feasible probing on new method displacement monitor of tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2000, 17(2): 65-68. (in Chinese))
- [36] 王平让, 黄宏伟, 薛亚东. 基于图像局部网格特征的隧道衬砌裂缝自动识别 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 991-999. (WANG Pingrang, HUANG Hongwei, XUE Yadong. Automatic recognition of cracks in tunnel lining based on characteristics of local grids in images [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 991-999. (in Chinese))
- [37] 苑玮琦, 薛丹. 基于机器视觉的隧道衬砌裂缝检测算法综述 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 3100-3111. (YUAN Weiqi, XUE Dan. Review of tunnel lining crack detection algorithms based on machine vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12): 3100-3111. (in Chinese))
- [38] 林永国, 廖少明, 刘国彬. 地铁隧道纵向变形影响因素的探讨 [J]. 地下空间, 2000, 20(4): 264-267. (LIN Yongguo, LIAO Shaoming, LIU Guobin. A discussion of the factors effecting on longitudinal deformation of subway tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2000, 20(4): 264-267. (in Chinese))
- [39] 托雷. 基于三维激光扫描数据的地铁隧道变形监测 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012: 3-7. (TUO Lei. Subway tunnel deformation monitoring based on 3D laser scanning data [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012: 3-7. (in Chinese))
- [40] 侯海民. 三维激光扫描仪在青岛胶州湾海底隧道的应用 [J]. 隧道建设, 2010, 30(6): 693-696. (HOU Haimin. Application of 3-D laser scanner in Jiaozhou Bay undersea tunnel in Qingdao [J]. Tunnel Construction, 2010, 30(6): 693-696. (in Chinese))
- [41] 史玉峰, 张俊, 张迎亚. 基于地面三维激光扫描技术的隧道安全监测 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(增刊2): 246-249. (SHI Yufeng, ZHANG Jun, ZHANG Yingya. Tunnel safety monitoring based on terrestrial laser scanning technology [J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2013, 43(Suppl. 2): 246-249. (in Chinese))
- [42] ISHIKAWA K, TAKIGUCHI J I, AMANO Y, et al. Tunnel cross-section measurement system using a mobile mapping system [J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2009, 21(2): 193-199.
- [43] SEO D J, LEE J C, LEE Y D, et al. Development of cross section management system in tunnel using terrestrial laser scanning technique [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, 36: 573-582.
- [44] 简晓, 童鹏. 基于地面激光雷达技术的隧道变形监测方法研究 [J]. 铁道勘察, 2011, 37(6): 19-22. (JIAN Xiao, TONG Peng. Tunnel deformation monitoring by surface lidar technology [J]. Railway Investigation and Surveying, 2011, 37(6): 19-22. (in Chinese))
- [45] 李健, 万幼川, 江梦华, 等. 基于地面激光技术的隧道变形监测技术 [J]. 地理空间信息, 2012, 10(1): 14-17. (LI Jian, WAN Youchuan, JIANG Menghua, et al. Tunnel deformation monitoring based on the terrestrial laser scanning technology [J]. Geospatial Information, 2012, 10(1): 14-17. (in Chinese))
- [46] 托雷, 康志忠, 谢远成, 等. 利用三维点云数据的地铁隧道断面连续截取方法研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(2): 171-175. (TUO Lei, KANG Zhizhong, XIE Yuancheng, et al. Continuously vertical section abstraction for deformation monitoring of subway tunnel based on terrestrial point clouds [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(2): 171-175. (in Chinese))
- [47] 朱宁宁. 三维激光扫描在地铁隧道形变监测中的应用 [J]. 测绘工程, 2015, 24(5): 63-68. (ZHU Ningning. Application of 3D laser scanning to the subway tunnel deformation monitoring [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2015, 24(5): 63-68. (in Chinese))
- [48] 刘绍堂, 潘洁晨. 一种隧道整体收敛变形的表达式 [J]. 现代隧道技术, 2013, 50(5): 34-37. (LIU Shaotang, PAN Jiechen. An expression relating the overall convergence and deformation of tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(5): 34-37. (in Chinese))
- [49] DELALOYE D. Development of a new methodology for measuring deformation in tunnels and shafts with terrestrial laser scanning (LIDAR) using elliptical fitting algorithms [D]. Kingston, Ontario, Canada: Queen's University, 2012: 1-4.
- [50] 李新. 隧道衬砌裂缝产生原因分析 [J]. 铁道建筑技术, 2005, 12(增刊1): 103-106. (LI Xin. Cause analysis of tunnel lining cracks [J]. Railway Construction Technology, 2005, 12(Suppl. 1): 103-106. (in Chinese))
- [51] 王耀东, 余祖俊, 白彪, 等. 基于图像处理的地铁隧道裂缝识别算法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1489-1496. (WANG Yaodong, YU Zujun, BAI Biao, et al. Research on image processing based subway tunnel crack identification algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(7): 1489-1496. (in Chinese))



- [52] 刘轩然. 基于面阵相机的隧道裂缝图像采集与检测技术 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 13-15. ( LIU Xuanran. Tunnel crack image acquisition and detection technology based on area scan camera [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019: 13-15. ( in Chinese) )
- [53] 高泰. 隧道裂缝图像采集与检测技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018: 12-13. ( GAO Tai. Research on tunnel crack image acquisition and detection technology [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018: 12-13. ( in Chinese) )
- [54] 吴晓军, 白韶红, 啜丙强, 等. 基于 CMOS 线阵相机地铁隧道裂缝快速检测系统 [J]. 路基工程, 2015 ( 3 ): 185-190. ( WU Xiaojun, BAI Shaohong, CHOU Bingqiang, et al. Fast detection system for metro tunnel crack based on CMOS line-scan digital camera [J]. Subgrade Engineering, 2015 ( 3 ): 185-190. ( in Chinese) )
- [55] 方恩权, 王耀东, 袁敏正, 等. 地铁隧道表面裂缝智能视觉采集系统 [J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16 ( 4 ): 1074-1080. ( FANG Enquan, WANG Yaodong, YUAN Minzheng, et al. Intelligent vision acquisition system of subway tunnel surface crack image [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16( 4 ): 1074-1080. ( in Chinese) )
- [56] 白彪. 地铁隧道表面图像裂缝识别算法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015: 2-3. ( BAI Biao. Research on identification algorithm of subway tunnel surface image [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015: 2-3. ( in Chinese) )
- [57] 朱力强, 白彪, 王耀东, 等. 基于特征分析的地铁隧道裂缝识别算法 [J]. 铁道学报, 2015, 37( 5 ): 64-70. ( ZHU Liqiang, BAI Biao, WANG Yaodong, et al. Subway tunnel crack identification algorithm based on feature analysis [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37( 5 ): 64-70. ( in Chinese) )
- [58] 廖江海. 隧道表观病害快速检测方法研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2020: 55-61. ( LIAO Jianghai. A research on rapid inspection of tunnel appearance defects [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2020: 55-61. ( in Chinese) )
- [59] OU J, LI H. Structural health monitoring in mainland China: review and future trends [J]. Structural Health Monitoring, 2010, 9( 3 ): 219-231.
- [60] QARIB H, ADELI H. Recent advances in health monitoring of civil structures [J]. Scientia Iranica, 2014, 21( 6 ): 1733-1742.
- [61] 廖威. 基于健康监测系统的桥梁结构承载能力评估关键问题研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 24-25. ( LIAO Wei. A study on key issues of bearing capacity evaluation for bridge structures based on health monitoring systems [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016: 24-25. ( in Chinese) )
- [62] 黄军生. 钢筋混凝土桥梁裂缝成因综述 [J]. 世界桥梁, 2002, 30 ( 2 ): 59-63. ( HUANG Junsheng. Review on the causes of cracks in reinforced concrete Bridges [J]. World Bridges, 2002, 30( 2 ): 59-63. ( in Chinese) )
- [63] 王磊. 大型桥梁健康监测中挠度测量技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006: 4-6. ( WANG Lei. Research of deformation surveying technology applied to health monitoring of long-span bridges [D]. Nanjing: Southeast University, 2006: 4-6. ( in Chinese) )
- [64] XU Z D, WU Z. Simulation of the effect of temperature variation on damage detection in a long-span cable-stayed bridge [J]. Structural Health Monitoring, 2007, 6( 3 ): 177-189.
- [65] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2014 [J]. 中国公路学报, 2014, 27( 5 ): 1-96. ( Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2014 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27( 5 ): 1-96. ( in Chinese) )
- [66] 刘宇飞, 樊健生, 聂建国, 等. 结构表面裂缝数字图像法识别研究综述与前景展望 [J]. 土木工程学报, 2021, 54( 6 ): 79-98. ( LIU Yufei, FAN Jiangsheng, NIE Jianguo, et al. Review and prospect of digital-image-based crack detection of structure surface [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54( 6 ): 79-98. ( in Chinese) )
- [67] LEE B J, SHIN D H, SEO J W, et al. Intelligent bridge inspection using remote controlled robot and image processing technique [C]//Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction ( ISARC ). Seoul, Korea: IAARC, 2011: 1426-1431.
- [68] WANG H F, ZHAI L, HUANG H, et al. Measurement for cracks at the bottom of bridges based on tethered creeping unmanned aerial vehicle [J]. Automation in Construction, 2020, 119: 103330.
- [69] JEONG E, SEO J, WACKER J. Literature review and technical survey on bridge inspection using unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34( 6 ): 04020113.
- [70] ZHONG X, PENG X, YAN S, et al. Assessment of the feasibility of detecting concrete cracks in images acquired by unmanned aerial vehicles [J]. Automation in Construction, 2018, 89: 49-57.
- [71] LIU Y F, NIE X, FAN J S, et al. Image-based crack assessment of bridge piers using unmanned aerial vehicles and three-dimensional scene reconstruction [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2020, 35( 5 ): 511-529.
- [72] MORGENTHAU G, HALLERMANN N, KERSTEN J,

- et al. Framework for automated UAS: based structural condition assessment of bridges [J]. Automation in Construction, 2019, 97: 77-95.
- [73] ZAKERI H, NEJAD F M, FAHIMIFAR A. Image based techniques for crack detection, classification and quantification in asphalt pavement: a review [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2016, 24(4): 935-977.
- [74] ABDEL-QADER I, ABUDAYYEH O, KELLY M E. Analysis of edge-detection techniques for crack identification in bridges [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2003, 17(4): 255-263.
- [75] YEUM C M, DYKE S J. Vision-based automated crack detection for bridge inspection [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2015, 30(10): 759-770.
- [76] AYELE Y Z, ALIYARI M, GRIFFITHS D, et al. Automatic crack segmentation for uav-assisted bridge inspection [J]. Energies, 2020, 13(23): 6250.
- [77] BHOWMICK S, NAGARAJAIAH S, VEERARAGHAVAN A. Vision and deep learning-based algorithms to detect and quantify cracks on concrete surfaces from UAV videos [J]. Sensors (Basel), 2020, 20(21): 6299.
- [78] 贺拴海, 赵祥模, 马建, 等. 公路桥梁检测及评价技术综述 [J]. 中国公路学报, 2017, 30(11): 63-80. (HE Shuanhai, ZHAO Xiangmo, MA Jian, et al. Review of highway bridge inspection and condition assessment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(11): 63-80. (in Chinese))
- [79] SŁADEK J, OSTROWSKA K, KOHUT P, et al. Development of a vision based deflection measurement system and its accuracy assessment [J]. Measurement, 2013, 46(3): 1237-1249.
- [80] JUNG J, KIM D J, PALANISAMY VADIVEL S K, et al. Long-term deflection monitoring for bridges using X and C-band time-series SAR interferometry [J]. Remote Sensing, 2019, 11(11): 1258.
- [81] 王勋. 基于三维激光扫描的桥面变形检测技术应用研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015: 81-82. (WANG Xun. Application research on the bridge deck deformation detection technology based on the 3D laser scanning [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015: 81-82. (in Chinese))
- [82] CHA G, PARK S, OH T. A terrestrial LiDAR-based detection of shape deformation for maintenance of bridge structures [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2019, 145(12): 04019075.
- [83] ERDENEBAT D, WALDMANN D. Application of the DAD method for damage localisation on an existing bridge structure using close-range UAV photogrammetry [J]. Engineering Structures, 2020, 218: 110727.
- [84] XU Y L, CHEN B, NG C, et al. Monitoring temperature effect on a long suspension bridge [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2010, 17(6): 632-653.
- [85] 孙雅琼, 赵作周. 桥梁结构动应变监测的温度效应实时分离与动荷载识别 [J]. 工程力学, 2019, 36(2): 186-194. (SUN Yaqiong, ZHAO Zuozhou. Real-time separation of temperature effect on dynamic strain monitoring and moving load identification of bridge structure [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(2): 186-194. (in Chinese))
- [86] 吴海军, 何立, 韦跃. 预应力混凝土梁桥挠度监测的温度效应分离方法 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(8): 66-71. (WU Haijun, HE Li, WEI Yue. Temperature effect separation method of deflection monitoring of prestressed concrete girder Bridges [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(8): 66-71. (in Chinese))
- [87] 杨永斌, 王志鲁, 史康, 等. 基于车辆响应的桥梁间接测量与监测研究综述 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(4): 1-12. (YANG Yongbin, WANG Zhilu, SHI Kang, et al. Reserch progress on bridge indirect measurement and monitoring from moving vehicle response [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(4): 1-12. (in Chinese))
- [88] MALEKJAFARIAN A, OBRIEN E J. Identification of bridge mode shapes using short time frequency domain decomposition of the responses measured in a passing vehicle [J]. Engineering Structures, 2014, 81: 386-397.
- [89] YANG Y B, LIN C W, YAU J D. Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 272(3/4/5): 471-393.
- [90] YANG Y B, LI Y C, CHANG K C. Constructing the mode shapes of a bridge from a passing vehicle: a theoretical study [J]. Smart Structures and Systems, 2014, 13(5): 797-819.
- [91] KIM J, LYNCH J P. Experimental analysis of vehicle-bridge interaction using a wireless monitoring system and a two-stage system identification technique [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 28: 3-19.
- [92] SITTON J D, RAJAN D, STORY B A. Bridge frequency estimation strategies using smartphones [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2020, 10(3): 513-526.
- [93] 公路技术状况评定标准: JTG 5210—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社. (Highway performance assessment standards: JTG 5210—2018 [S]. Beijing: People's Communications Publishing House. (in Chinese))

- [94] 马建, 赵祥模, 贺拴海, 等. 路面检测技术综述 [J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(5): 121-137. (MA Jian, ZHAO Xiangmo, HE Shuanhai, et al. Review of pavement detection technology [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(5): 121-137. (in Chinese))
- [95] HSIEH Y A, TSAI Y J. Machine learning for crack detection: review and model performance comparison [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2020, 34(5): 04020038.
- [96] WANG X, HU Z. Grid-based pavement crack analysis using deep learning [C]// International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). New York: IEEE, 2017: 917-924.
- [97] ZHANG L, YANG F, ZHANG Y D, et al. Road crack detection using deep convolutional neural network [C]//2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). New York: IEEE, 2016: 3708-3712.
- [98] PARK S, BANG S, KIM H, et al. Patch-based crack detection in black box images using convolutional neural networks [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2019, 33(3): 04019017.
- [99] CHA Y J, CHOI W, BÜYÜKÖZTÜRK O. Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(5): 361-378.
- [100] DENG J, DONG W, SOCHER R, et al. Imagenet: a large-scale hierarchical image database [C]//2009 IEEE conference on computer vision and pattern recognition. New York: IEEE, 2009: 248-255.
- [101] BOCHKOVSKIY A, CHIEN-YAO W, LIAO H Y M. YOLOv4: optimal speed and accuracy of object detection [J/OL]. arXiv: 2004.10934. (2020-04-23) [2022-01-23]. <https://arxiv.org/abs/2004.10934>.
- [102] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks [J]. Advances in neural information processing systems, 2015, 28: 91-99.
- [103] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot multibox detector [C]//European conference on computer vision. Cham: Springer, 2016: 21-37.
- [104] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection [C]//Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. New York: IEEE, 2016: 779-788.
- [105] CARR T A, JENKINS M D, IGLESIAS M I, et al. Road crack detection using a single stage detector based deep neural network [C]//2018 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS). New York: IEEE, 2018: 1-5.
- [106] YANG J, WANG W, LIN G, et al. Infrared thermal imaging-based crack detection using deep learning [J]. IEEE Access, 2019, 7: 182060-182077.
- [107] HACİEFENDİOĞLU K, BAŞAĞA H B. Concrete road crack detection using deep learning-based faster R-CNN method [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2021, 1: 1-13.
- [108] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-net: convolutional networks for biomedical image segmentation [C]//International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention. Cham: Springer, 2015: 234-241.
- [109] CHEN L C, PAPANDREOU G, KOKKINOS I, et al. Deeplab: semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected crfs [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 40(4): 834-848.
- [110] JENKINS M D, CARR T A, IGLESIAS M I, et al. A deep convolutional neural network for semantic pixel-wise segmentation of road and pavement surface cracks [C]// 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). New York: IEEE, 2018: 2120-2124.
- [111] LIU Y, YAO J, LU X, et al. Deepcrack: a deep hierarchical feature learning architecture for crack segmentation [J]. Neurocomputing, 2019, 338: 139-153.