

前 言

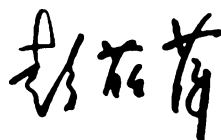
城市安全是国家整体安全的重要组成部分，是国家安全和社会稳定的基石。2018 年 1 月，中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《关于推进城市安全发展的意见》强调，要“健全公共安全体系，打造共建共治共享的城市安全社会治理格局”，这是在新的历史时期，正确分析判断城市安全出现的新情况而提出的重大任务。截至 2024 年底，全国累计共有 58 个城市开通轨道交通线路 362 条，运营里程为 12168.77km，地铁约占 76.27%。其中，2024 年新增轨道交通运营线路 953.04km。随着城市内地铁运营里程的增加，受车辆运行，外部施工、地层变化等影响，城市运营地铁隧道出现的管片背后空洞、裂缝、渗漏水等病害降低结构耐久和安全性，严重威胁城市地铁结构和运营安全。

城市地铁渗漏病害具有隐蔽性强、作业窗口小、检测和修复难的特点，面对城市地铁隧道健康运维对安全隐患检测的重大需求，如何全面、可靠、稳定、科学地对地铁隧道安全隐患进行检测和评估，是行业科研人员和地铁隧道运营维护工作人员面临的重要挑战。中国矿业大学（北京）研究团队专门从事工程地质与工程地球物理方面的研究已有 30 年，取得了系列创新性的成果装备和技术。2020 年成立的城市道路及地下空间安全检测与评价应急管理部重点实验室，已经成为我国应急管理部门的重要科技支撑力量。为解决当前地铁隧道检测精度低、检测效率低等问题，经过 10 余年的技术攻关，研发出了地铁隧道安全隐患综合检测技术和装备。

本书从地铁隧道安全隐患综合病害多个方面进行了详细分析和研究。全书共 10 章。第 1 章描述了地铁隧道安全隐患检测技术的研究现状，汇总了在地铁隧道检测应用领域的国内外研究现状，指出当前研究中的不足，依此提出本书的研究内容。第 2 章对于地铁隧道衬砌结构病害的检测，设计了注浆缺陷探测系统，根据隧道衬砌空洞病害雷达回波特征，采用深度神经网络对空洞病害进行智能识别。第 3 章为实现对地铁隧道衬砌表面裂缝检测，设计了一套用于采集地铁隧道表面的病害信息的同步采集控制系统，在对图像拼接和裂缝特征提取计算后，基于算法模型，实现在预处理后的图像中框选出裂缝目标。第 4 章为地铁隧道渗漏检测技术，该部分主要采用红外热像仪，对地铁隧道表观的渗漏点进行检测以及智能识别。此外，结合地铁隧道表观的渗漏点，使用探地雷达对地铁隧道渗漏通道进行检测和识别。第 5 章为地铁隧道形变及错台病害检测技术，运用移动三维激光扫描技术，将三维激光扫描仪安装于地铁隧道安全隐患综合检测车后侧，实现在检测车行驶过程对点云数据的采集，对地铁隧道形变信息进行检测。第 6 章为地铁隧道安全隐患综合检

测系统集成，提出了多通道探地雷达天线、线阵相机、三维激光扫描仪等设备的布置方案，实现对地铁隧道安全隐患检测的全覆盖，提出同步采集控制方法，实现多个采集设备的通信连接、参数设置与同步传输、数据实时显示与存储等功能。第7章为地铁隧道高精度导航地图构建技术，基于现有的移动式三维激光扫描仪技术，研究即时定位与地图快速构建技术，通过车载融合精度校正算法完成对导航地图的精度提升。搭建了适用于地铁隧道安全隐患综合检测车的三维点云实时采集系统，并提出了提升地铁隧道点云精度的方法，利用车载视觉相机实时识别控制点标志码，对测距轮里程计信息进行同步校正，为地铁隧道安全隐患的快速检测定位和安全运营提供了技术支撑。第8章为地铁隧道避障技术及路径规划，基于随机样本一致（random sample consensus, RANSAC）算法的隧道障碍物点云识别分割算法，实现障碍物尺度信息的快速提取，提出机械臂避障路径规划与优化方法，以实现天线“悬空距离”的微调控制。第9章为地铁隧道结构安全风险评估技术，分析渗漏水影响下地铁隧道结构安全风险因素，构建运营地铁隧道结构安全风险评估指标体系、三维地铁隧道结构和安全隐患信息管理平台系统，可实现地铁隧道安全探测多源数据综合分析、地铁隧道安全隐患一体化展示和查询功能。第10章为地铁隧道综合检测技术应用，主要为团队研究成果在国内城市的地铁隧道实际检测情况。

本书汇聚了团队在地铁隧道安全检测领域的最新研究成果与前沿技术，涵盖了检测装备研发、隧道安全隐患智能识别、隧道安全风险评估等多个方面，在国内多个地区得到了推广应用，展示了新技术在保障地铁隧道安全运营中的重要作用。我相信，该书的出版，将为广大工程师、技术人员及相关领域的专家学者提供参考与借鉴，推动地铁隧道检测技术的不断进步与发展。同时，期待更多的同仁能够加入到地铁隧道安全综合检测行列中来，共同为构建更加安全、高效、可持续的城市轨道交通安全保障体系贡献力量。书中尚有不妥之处，敬请各位读者批评指正。



2024年8月于北京

目 录

前言

第 1 章 地铁隧道安全隐患检测技术的研究现状	1
1.1 地铁隧道安全隐患检测的必要性	1
1.2 地铁隧道安全隐患检测技术的研究现状	2
1.3 地铁隧道安全隐患检测装备的研究现状	12
1.4 地铁隧道安全风险评价技术的研究现状	20
1.5 地铁隧道安全隐患检测的难题及发展趋势	21
参考文献	22
第 2 章 地铁隧道衬砌结构病害检测技术	29
2.1 空气耦合地质雷达天线	29
2.2 隧道衬砌检测多通道雷达系统	33
2.3 衬砌空洞智能识别	40
2.4 注浆缺陷探测系统设计与开发	93
第 3 章 地铁隧道衬砌表面裂缝检测技术	119
3.1 地铁隧道表面裂缝探测原理与采集设计	119
3.2 裂缝图像预处理及多相机图像拼接	132
3.3 裂缝智能检测算法	155
3.4 裂缝特征提取和计算	171
参考文献	180
第 4 章 地铁隧道渗漏检测技术	182
4.1 隧道渗漏水成因及类型分析	182
4.2 隧道渗漏水综合探测工作原理	183
4.3 隧道渗漏水病害联合检测系统开发与设计	193
4.4 隧道衬砌表观渗漏水病害智能识别方法	202
4.5 地铁隧道渗漏通道检测	222
4.6 试验分析	233

第 5 章 地铁隧道形变及错台病害检测技术	253
5.1 地铁隧道三维空间信息采集系统设计	253
5.2 隧道点云数据坐标校正方法研究	261
5.3 基于三维激光点云数据的隧道形变分析	267
参考文献	296
第 6 章 地铁隧道安全隐患综合检测系统集成	298
6.1 检测车采集系统构成	298
6.2 检测车同步采集控制与实现	305
第 7 章 地铁隧道高精度导航地图构建技术	319
7.1 建图场景分析与框架搭建	319
7.2 导航地图快速构建	321
7.3 地图精度提升方法	350
参考文献	360
第 8 章 地铁隧道避障技术及路径规划	362
8.1 避障场景分析与设计框架	362
8.2 车载点云数据采集及控制系统设计	369
8.3 导航地图构建与障碍物识别	375
8.4 避障路径规划与实验验证	390
第 9 章 地铁隧道结构安全风险评估技术	405
9.1 隧道结构风险评估	405
9.2 数据快速处理系统设计与研究	418
9.3 地铁隧道结构三维可视化管理平台研究与设计	426
参考文献	437
第 10 章 地铁隧道综合检测技术应用	438
10.1 北京地铁隧道营运环境	438
10.2 北京某地铁隧道病害检测分析	439

第1章 地铁隧道安全隐患检测技术的研究现状

1.1 地铁隧道安全隐患检测的必要性

随着我国城市化进程的不断加快，为提高城市容量、缓解城市交通、改善城市环境，不断加大了城市地铁隧道的建设。地铁运营里程的增加，对于地铁隧道维护的需求也在不断扩大。为保障地铁隧道正常使用，维护人民生命财产的安全，确保城市的安全稳定发展，减少因隧道安全问题使地铁运营停运情况的发生，对地铁隧道进行安全检测显得尤为重要。依据《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》《关于推进城市安全发展的实施意见》等国家重要文件，城市安全发展已成为我国深入改革和经济社会发展重大战略。新时代我国社会主要矛盾的转化要求牢固树立“以人民为中心”的发展理念，建立高效科学的隧道检测和地下空间安全应急管理体系，提升全社会抵御城市灾害风险的能力，满足人民对美好生活向往的需求。地铁隧道的安全关乎城市每一个人的出行。重如泰山，解决和预防地下空间安全隐患，已迫在眉睫。

地铁隧道作为城市公共交通的核心组成部分，在城市地铁隧道运营期间，受周边岩土体变化、车辆运行、外部施工、注浆不足等影响，隧道结构常出现形变过大、管片错台、渗漏水、空鼓、结构背后空洞等病害，使结构与围岩不能共同均匀承受外力，恶化结构受力条件，降低隧道结构的安全可靠度和稳定性，隧道结构发生灾难性破坏的概率大大增加，直接威胁地铁运营安全和结构安全。地铁隧道的安全隐患对于城市安全运行的影响体现在多个方面。

(1) 危害市民生命安全。地铁载客量大，地铁隧道空间相对封闭，人员疏散难度大，一旦发生安全事故，后果不堪设想，将给人民和国家带来极大的损失。

(2) 破坏城市公共交通系统。地铁作为城市公共交通的重要一环，其运营效率直接影响到城市交通的整体状况。地铁隧道的安全隐患若得不到及时有效的处理，可能导致地铁系统频繁出现故障或中断运行，加剧城市交通拥堵问题，影响市民的出行效率和城市的交通秩序。

(3) 引起不良的社会影响。地铁隧道安全问题的社会关注度高，社会影响力大，及时排除安全隐患问题，不易引发社会恐慌，有利于社会的和谐稳定。

(4) 影响城市经济的发展。地铁隧道作为城市基础设施的重要组成部分，其安全性和稳定性直接影响城市的形象和投资环境。保障地铁系统的正常运行对于城市的经济发展具有重要意义。高效、稳定、可靠的地铁系统，可以有效提升城市的吸引力和竞争力，助力城市的经济发展和产业升级。

(5) 地铁隧道安全隐患的检测具有隐蔽性高、探测难度大,检测时间窗口短等特点,采用人工方式对外观质量进行人眼尺量,效率低,识别精度低且容易漏检测。

近年来,随着科学技术的快速发展,探地雷达、机器视觉等探测手段逐渐应用在公路和铁路隧道安全隐患检测中,但是目前的检测技术仍难以满足实际需求。现有地铁隧道安全探测装备和技术水平(探测深度浅、探测速度慢、探测精度低)与超大城市安全治理及工程需求不平衡的矛盾,已经成为痛点,严重制约企业行业安全智能化水平的提高。应加大基础理论、关键技术、先进装备的攻关力度,通过二次开发、吸收引进、攻克破解难题,建立系统的地铁隧道安全隐患探测理论和设备,加快先进技术成果的推广应用,着力突破城市地铁隧道安全领域科技发展的瓶颈和体制机制障碍,最大限度地释放科技创新活力。

解决地铁隧道内部隐患,遏制城市地铁隧道重特大安全事故发生,降低事故造成的人民群众生命财产损失,提升城市安全综合保障能力为重点,提升城市安全综合治理与保障能力,是推进国家治理体系治理能力现代化的必然要求,也是适应国家高精尖经济结构调整,满足经济社会发展的迫切需求,为基本实现社会主义现代化和建设国际一流和谐宜居之都提供坚实的安全保障。

1.2 地铁隧道安全隐患检测技术的研究现状

地铁在运营过程中,地铁的安全面临着隧道空洞、裂缝、渗漏水以及内轮廓形变等多种病害的威胁。因此,对隧道定期进行全面检测,及时发现安全隐患,并对隐患进行针对性治理显得尤为重要。对隧道安全隐患进行全方位的检测,则要求对隧道不同的病害做针对性的研究分析,采用科学的指标对隧道的安全性进行客观和定量评价。

1.2.1 隧道衬砌结构病害检测技术现状

1. 无损检测方法

盾构施工因其安全性和高效性而被广泛应用于地铁建造过程中。在盾构施工过程中,盾构机同步进行隧道挖掘、管片衬砌安装及管片壁后注浆等工序。管片壁后注浆填充管片与岩土体之间的空隙,形成稳定的隔水层,防止隧道壁渗水,并且有利于周围土体和隧道整体受力的稳定,预防岩土体失稳,避免引发安全事故^[1]。注浆过程多依赖于施工人员经验来控制注浆压力和注浆量,注浆效果无法直接观察,会导致管片和围岩之间存在空隙,造成隧道整体受力不均匀,引发周围岩土体产生较大形变。因此,对管片背后注浆体进行检测,获取壁后注浆效果,指导壁后注浆缺陷的二次补浆,可以有效避免周围土体形变,保障隧道的安全稳定。

对于注浆体检测的无损检测(NDT)方法,有声波法、超声波法、弹性波法、微波法、红外热成像法、探地雷达法(GPR)、射线照相法和瞬变电磁法(TEM)等^[2]。不同的检测方法有各自的优势和局限性,如声波法、超声波法、射线照相法均属于接触式探测,这些方法会影响探测速度。

声波法是基于声波在不同介质中传播时的物理特性变化对浆缺陷检测,一般用于混凝土材料内部缺陷检测及其均匀性和结构强度评价。检测结果可靠性高,但是要求稳定的耦合条件,因此数据采集效率低。苏联学者索科洛夫(Sokolov)在1929年第一次提出利用超声波检测不透明材料内部缺陷的方法^[3]。因为超声波波长短,穿透能力弱,所以可以利用超声波对微小缺陷进行探测,但无法对体积大的物体进行检测,并且其检测结果受管片内部钢筋笼干扰强烈,其结果存在较大偏差^[4]。

弹性波法是利用隧道管片和注浆层中介质的弹性差异对注浆缺陷进行检测。该检测方法广泛应用于油气勘探、工程勘查和结构检测中,可采用钢球等作为震源,撞击结构表面,根据从结构内部反射回来的P波信号判断结构强度或缺陷位置^[5]。与探地雷达相比,该方法受钢筋的干扰小,且经济效益更为显著,但在注浆质量检测中效率偏低,无法快速实时地进行大范围检测。

瞬变电磁法(TEM)是基于地层电阻率差异的一种无损检测(NDT)方法。Ye等将瞬态电磁雷达(TER)用于模型试验中的管片注浆缺陷检测,分析了隧道盾构管片后灌浆层的不同接触状态时电阻率的变化^[6,7]。

近几十年来,探地雷达法经常用于混凝土结构检测,通过分析和接收信号的振幅、频率、相位、时间等,可以获取目标体的深度、大小和填充介质等^[8]。探地雷达法具有操作简单、效率高和分辨率高等优点,其处理方式简单快捷,成像技术愈加完善。但雷达波在遇到介电常数较高的物质时,表现出透射能力差和高反射性,所以探地雷达法用于钢筋较多的管片背后注浆检测时,会接收到较多的干扰信号。因此,进行数据处理的主要目的是抑制钢筋的散射干扰,放大注浆层和缺陷的反射信号,并使用成像方法将雷达信号转换为地下分布的图像。

此外,一些学者会采用综合物探方法对混凝土介质检测。例如,通过探地雷达法和地震成像法结合来检测管片后注浆层的质量,通过探地雷达法和弹性波法相互验证,确定输水隧道缺陷的位置等。

2. 探地雷达检测

探地雷达检测技术可对隧道背后衬砌和隧底质量进行检测。天线是探地雷达系统中的重要组成部分,负责将导波转换成自由空间中的电磁波。天线的性能影响着整个探地雷达系统的探测深度和探测分辨率。天线可分为地面耦合式天线和空气耦合式天线,地面耦合式天线检测时需要接触探测面,空气耦合式天线检测时可悬空一定高度,避免与隧道表面直接接触。地面耦合式天线检测方法得到的雷达图像质量较好,内部结构清晰,空气耦合式天线检测速度快、效率高,有利于快速、大面积地掌握隧道衬砌结构情况。

探地雷达天线类型多种多样,有喇叭天线、锥形槽天线、双锥天线、螺旋天线、蝶形天线等,可针对探地雷达法不同应用的需求选取相应的天线类型。喇叭天线的时域响应特性较好,与地面耦合探地雷达常用的平面天线(如蝶形天线等)相比,具有体积小、频带宽、方向性好等特点,但喇叭天线受地面影响较大,有波形拖尾振荡^[9]。锥形槽天线具有良好的带宽特性,但波形保真性差和色散强。双锥天线与盘锥天线类似,是一种全向天线,有稳定的方向图,但体积较大。螺旋天线的带宽较大,在脉冲信号的激励下产生较多

的振荡,且时域响应特性差^[10]。蝶形天线的末端常会因电流积聚而产生一定的回波损耗,使天线端口阻抗不匹配,需要通过加载电阻的方式解决该问题。蝶形天线因体积小、重量轻而被广泛应用到探地雷达系统中。

阵列式探测是探地雷达系统研发的一个重要发展方向。1980年,世界上第一台基于天线阵列的探地雷达由意大利的IDS GeoRadar (IDS)公司成功研制出,相比单通道雷达,其探测速度更快,分辨率更高。经过数十年的发展,意大利雷达已经在天线屏蔽技术、天线阵列技术和数据自动解译等方面占据领先地位。1998年,瑞典MALA公司生产了世界上第一台应用于商业的三维探地雷达系统。2001年,挪威3D-Radar公司推出了GeoScope三维探地雷达,实现了探地雷达三维展示,大大提升了探地雷达的操作性能。2008年,瑞典MALA公司研发的三维探地雷达系统MIRA问世,其采用斜向极化进行采集,探测结果非常直观,并且可以实现从三维数据采集、处理解释到出报告的无缝衔接。

三维探地雷达于2013年开始引入我国。许多研究人员将引进的三维探地雷达系统应用于市政工程领域,如地下管线探测和道路病害检测等,其在道路检测中主要应用于结构层厚度检测、沥青路面均匀性评价及内部结构物探测等。2016年,刘涛将三维探地雷达技术应用于沥青路面均匀性评价,提高了沥青路面的施工质量^[11]。

目前,我国一些科研机构做了大量实验研究,并自主研发了一些具有一定优点的雷达天线阵列系统。习建军研究了在极化平面波照射条件下的目标体形态特征,并利用一维和二维分布的收发天线阵列进行目标检测,结果证明,多极化综合特征分析方法可以改善目标检测的稳定性,提高信噪比^[12]。中国航天科工集团第三研究院三十五研究所在2018年成功研制出我国首个全阵列式三维探地雷达“鹰眼-A”,其管线检测准确率达到90%以上,代表着我国无损探地技术真正从二维跨越到三维。吉林大学对天线的极化特性进行长期深入研究,开发了全极化探地雷达数据采集系统,并将系统分别应用于路面塌陷和冰裂缝探测实验,均取得了不错的效果^[13]。一些研究人员还对地下病害的自动识别方法进行了研究。

3. 探地雷达数据处理

探地雷达在对隧道探测过程中容易受周围环境与设备的影响,导致回波数据中存在较强的噪声与杂波干扰。所以,提高探地雷达数据的质量和病害信息的准确性一直是研究的重点与难点,去噪也是探地雷达数据处理领域的经典问题之一。

自1980年以来,随着计算机的迅速发展,涌现出许多探地雷达数据处理方法,推动了探地雷达数据处理的进步。1999年,Carevic将卡尔曼滤波应用于探地雷达数据处理过程中,实现对检测目标与背景的分离,并且利用小波变换实现对杂波的抑制^[14]。2005年,Abujarad等利用奇异值分解方法对均值后的探地雷达数据进行奇异值分解,设定一个相关阈值实现对目标信号与杂波的分离^[15]。2010年,Khan和Al-Nuaimy提出了一种基于特征值的背景去噪方法,能够有效去除数据中的背景噪声^[16],但该方法会损失部分有效信号,并且不能处理复杂的噪声。2012年,冯德山等运用经验模态分解方法,对低信噪比的探地雷达数据进行分解,去除属于噪声部分的本征模态函数分量,实现对噪声的去除^[17],但该方法缺乏理论支撑,算法存在模态混淆。

目前,许多基于阈值智能化等非稳定信号的降噪技术层出不穷,如小波变换、曲波变

换等。2011年, Tang等利用曲波变换, 通过阈值化去除了随机噪声, 同时有效抑制了直达波^[18]。1994年, Donoho和Johnstone提出了小波阈值去噪算法^[19]。1995年, Donoho利用软硬阈值函数, 设定相应的阈值实现对目标检测信号与噪声分离^[20]。2004年, 邹海林等探讨了小波理论在探地雷达数据去噪领域中的应用, 并且对此做了重点分析^[21]。之后更多的学者将小波变换理论应用到GPR数据处理过程中。由于传统小波去噪后数据的信噪比较低, 阈值缺乏自适应性, 因此不少学者对此进行了改进。2019年, 邹根等从阈值选取和阈值函数两个方面对小波阈值进行优化, 使小波阈值的选取具有自适应性, 并且提高了去噪后数据的信噪比^[22]。2022年, 吴叶丽等设计了一种新的小波阈值函数, 具有连续性、灵活性的特点, 与传统方法相比具有更高的信噪比^[23]。

目前, 探地雷达数据处理的技术以小波阈值去噪、曲波变换、背景去噪为主。与常规滤波相比, 小波变换能够同时在时域和频域对信号进行分析, 能够更加有效地区分有效信号和噪声, 达到更好的效果。

4. 深度学习在雷达数据处理中的应用

深度学习(deep learning)是机器学习和人工智能研究领域的重点发展方向, 引领计算机视觉与机器学习等应用领域革命性进展^[24-26]。随着各种具有独特神经处理单元和复杂层次结构的神经网络不断涌现, 如卷积神经网络、循环神经网络、生成对抗网络等, 深度学习技术不断提高着各应用领域内人工智能技术性能的极限, 并在多个领域都取得了成功, 如语音识别、图像识别、视频检测等。

目前, 国内外研究学者陆续采用机器学习的方法对雷达数据进行处理, 根据对异常体雷达信号回波特征的分析, 实现对其自动识别^[27], 该方法主要应用于异常体双曲线的自动识别、钢筋及地下管线检测、混凝土的损伤检测等诸多方面^[28-30]。

为了实现对异常体双曲线的自动识别, 2017年, Dou等提出列连接聚类(C3)算法^[31], 2018年, Zhou等提出开放扫描聚类算法(OSCA), 两者都达到了针对复杂的雷达反射进行的双曲线参数拟合方法^[32]; 针对高噪声环境下, 相对较小的目标体识别困难的问题, 2018年, Harkat等提出使用机器学习的方法^[33], 此方法是在缩小双曲线敏感区域的基础上使用。针对地下目标体而言的智能分类方法, 2018年, Zhou等用支持向量机的方法和H-Alpha分解一起使用^[34]。

为了实现对钢筋及地下管线的自动识别, 2018年, Kafedziski等结合C3算法与霍夫变换, 在仿真数据的基础上实现了对空气中的金属物体以及地下埋藏塑料管线的检测^[35]; 2013年, El-Mahallawy和Hashim使用支持向量机分类器实现雷达图像中地下管线材料的自动识别, 其中利用离散余弦变换系数作为分类器特征^[36]; 2018年, Liu等为了自动识别混凝土中钢筋反射信号在雷达图谱中的位置, 运用自适应线性元素神经网络处理雷达信号^[37]。

为了实现对混凝土损伤的自动识别, 采用雷达检测路面的缺陷处, 得到缺陷处的数据信息, 与以往的数据处理方法不同, 在实现混凝土缺陷可视化过程中, Cotić等采用无监督聚类技术, 此技术是热成像相位对比所得到的数据和通过探地雷达采集到的数据进行有效结合^[38]。而在对空洞病害的识别中, Xie等对多种形状的空洞进行识别, 其采用的办法是支持向量机^[39]。

基于机器学习的数据处理方法已经在多个领域进行了验证,然而这种基于机器学习的处理方法具有需要进行手动设计的局限,影响其准确性,导致其普适性差。随着计算机硬件水平不断提升以及近年来大数据技术的蓬勃发展,在特征自动提取与非线性映射方面具有显著优势的深度学习技术,正受到领域内越来越多的关注^[40-44]。

由于探地雷达数据具有图像数据的共性特征,应用机器学习或深度学习的方法对数据进行处理,实现异常信息的提取、分类及定位。对于隧道衬砌结构的病害检测,由于病害类型的多样性以及病害的雷达反射特征的相似性,增加了探地雷达数据的隧道衬砌结构病害自动识别难度。此外,隧道衬砌内部钢筋网等结构对电磁波的强屏蔽作用,导致对钢筋后病害信息识别困难,实现钢筋下病害信息的有效识取是影响隧道衬砌病害识别效果的技术难题。

1.2.2 地铁隧道表观裂缝检测技术现状

1. 隧道裂缝检测技术

早在1839年,法国画家路易·达盖尔发明了照相机,19世纪60年代末期的法国和日本将相机用于道路检测。随着社会科学技术的不断进步,线阵相机和面阵相机的技术也在与时俱进,从19世纪90年代中期至今,逐步被运用到各种道路隧道的检测。

目前,针对于地铁隧道衬砌裂缝病害检测,有人工巡检和基于移动平台的数据图像技术的两种方式。人工巡检一般在地铁停运后,检测者使用探测测量仪器进行检测。人工巡检存在检测速度慢、效率低、主观性强、不确定性大、精度低等一系列问题。图1.2.2-1为以人工巡检为主的隧道检测。



图 1.2.2-1 以人工巡检为主的隧道检测

基于移动平台的数据图像技术则是通过线阵相机,对采集的隧道衬砌裂缝图像进行处理,提取裂缝信息。随着技术的发展和进步,基于移动平台的数据图像技术检测展现出了许多显著优势。

(1) 采用移动平台采集隧道图像数据,具有高精度和高效率的特点。多台设备可以实现隧道表面全面覆盖,且采集过程不会影响隧道的正常运营。

(2) 采集图像数据的过程不会对隧道造成任何损伤,实现了无损检测。同时,随着数字图像处理技术的发展和深度学习在图像检测方面的应用,算法对裂缝图像的处理已经初

具雏形。

(3) 基于移动平台的隧道检测系统自动化程度高、成本低、客观性强、可探测范围大。

2. 裂缝图像处理技术

裂缝是地铁隧道内比较常见的病害,具有明显的线性特征。随着国内外人员对隧道裂缝自动识别的不断深入,裂缝图像处理技术能够快速、准确地检测出裂缝,实现对裂缝的分类和定量化分析,其检测结果也更加科学和可靠。裂缝图像处理技术识别隧道衬砌表面裂缝的方法主要为数字图像处理和基于深度学习的图像处理。

在数字图像处理方面,2016年,Talab等使用了一种根据索贝尔(Sobel)算子对水泥墙上的裂缝检测方法^[45]。该方法运用Sobel算子对水泥墙上的裂缝边缘进行检测。为了提取疑似裂缝区域,该方法使用多个阈值将图像区别成前景和背景,然后再次使用Sobel算子进行裂缝边缘检测,最后使用最大类间分割算法将裂缝分割出来。该方法的创新之处在于,通过重复使用Sobel算子来进行边缘检测。

2016年,Rabih等使用通过分块最近路线的公路裂缝检测方法^[46]。这种方法识别裂缝时是将采集图像中灰度值最大的点确定为裂缝的起点,将灰度值突出的像素点作为开端点,用最近路线的思想连通临近像素点,最终提取出整条裂缝。该方法实现对裂缝长度和方向的约束,更好地适应现实情形,从而显著提高了该算法的通用性。该方法还创新了裂缝的后处理流程,用于消除噪点和灰度不均所导致的影响。

2009年,Fujita和Hamamoto提出了水泥墙体图像裂纹自动识别提取技术^[47],通过多个不同尺度的海森矩阵来寻找裂缝特征,同时抑制干扰物的影响。此外,还使用松弛过程来消除噪声。

2014年,Zalama等针对混凝土隧道的裂缝,提出了一种基于旋转不变性的加博尔(Gabor)过滤算法^[48],该算法具有裂缝不对称性质,并将这个性质进行描述,该算法可以检测横向纵向的裂缝,该算法对裂缝的检测率达到了89%。

2017年,西南交通大学的朱鑫等提出了一种电荷耦合器件(CCD)相机的衬砌裂缝快速检测系统采集裂缝图像^[49]。为了将裂缝区域与图像背景分离,该系统使用最大类间方差(Otsu)法进行分割处理。然而,由于传统Otsu法容易产生欠分割的问题,对于裂缝区域过小的图像,以及背景不单一或光照度不均匀的裂缝图像,可能会出现过分割的情况。为了解决这些问题,研究人员对Otsu法进行改进,以提高裂缝图像分割的效果。经过分割后,系统对裂缝进行形态学处理以去除不必要的干扰信息,并提取裂缝的长度、宽度等特征指标。该系统的快速检测能力为实现隧道裂缝检测提供了有力支持。

2017年,西南交通大学的王睿等对裂缝图像进行去噪处理,采用加权邻域平均算法降低噪声对裂缝识别的影响^[50],然后使用锐化算法突出裂缝边界,并利用坎尼(Canny)目标检测算法记录裂缝边界像素点。最后,通过连接算法将离散的裂缝边缘连接起来,得到完整的裂缝特征,并提取有效的裂缝特征值。这种方法能够有效地提高裂缝图像的分辨率和清晰度,从而提高裂缝的检测和识别准确性。

2018年,北京交通大学的王耀东等对裂缝图像的全局与局部特性相嵌合,通过分析裂

缝局部灰度的均值以及标准差计算裂缝的宽度^[51]。为了适应隧道地下空间情况，他们还提出了一种分块裂缝痕迹处理流程，将大型图像拆解成小块图像，然后对每个块进行单独的处理。这一改进使得裂缝检测精度大幅提高。

2021 年，Radhakrishnan 等针对混凝土墙的特性采用多种边缘检测算法对混凝土上的裂缝进行检测，从而提高了裂缝检测的稳健性和实用性^[52]；他们将图像的离散沃尔什（DWT）分解成多个频域以及基于最大相似的图像叠加算法，以获得更明显的裂缝边缘检测结果。

特征学习是一种基于机器学习的方法，用于从原始数据中提取出具有代表性的特征。深度学习是一种以特征学习为基础的机器学习方法，通过对大量数据的训练，可以将训练出的特征模型用于图像中的裂缝特征分类预测。与传统的数字图像处理技术不同，深度学习更加注重从图像中提取深层次的特征，这让深度学习在图像裂缝特征识别领域具有广泛的应用。

在深度学习方面，Jin 等提出了一种轻量级多元卷积神经网络的裂缝目标检测以及提取方法^[53]。该算法能够提高裂缝检测的准确率，通过多元特征提取的方法，从而实现对裂缝类型的识别与分割，接着根据提取和跟随骨架来实现对裂缝的特征提取。

2021 年，Bubryur 等提出判断隧道图像是否存在裂缝的算法，运用 LeNet-5 模型超过 40000 张的隧道图像来训练模型，采用了最佳的超参数，得到效果最好的训练模型，同时针对 LeNet-5 模型特点，精简了冗余步骤^[54]。LeNet-5 模型网络的优点在于结构简单、运算效率佳。

2023 年，Seungbo 等提出了基于编码器和解码器结构的检测方法实现对水泥墙面裂隙的智能识别^[55]。他们对 ResNet 语义分割网络进行了多处改良和创新。首先，为了提高语义分割网络的运行效率，去掉了传统语义分割网络中的解码步骤，使用简单的卷积神经网络作为子输出层来获取不同尺度的图像信息。这种方法大大减少了网络的计算量和计算时间，同时保持了对不同尺度信息的处理。其次，为了提高语义分割网络的检测效率，尝试使用轻量级编码器来改良语义分割结构，这种结构使得编码效率提升显著。自动编码器可以帮助网络学习得到更好的特征表示，提高分割效果。最后，网络在更新权重时会综合考虑，对所有尺度下的输出权重都进行更新，切实提升裂缝识别的准确性。

2022 年，Huang 等使用全卷积网络（FCN）提取特征，成功地识别地铁盾构隧道中的裂缝与渗漏水区域^[56]。利用全卷积网络进行自动检测和分类识别地铁盾构隧道中的病害，研究结果表明该方法具有很高的准确性和效率。

2017 年，浙江工业大学的汤一平等基于卷积神经网络研究裂缝的识别算法^[57]。该算法通过一系列的图像处理操作初步提取疑似裂缝区域，最后使用卷积神经网络进行分类识别，得到最终的裂缝区域。

2022 年，陈莹莹等提出了一种基于卷积神经网络的隧道衬砌图像快速筛查和裂缝区域定位方法^[58]。首先，通过基于网格的区域划分和卷积神经网络进行区域类别判断。然后，基于裂缝点间的关联信息构建裂缝骨架二叉树，并采用基于最大距离的节点筛查规则来修正裂缝骨架。最后，根据修正结果修正裂缝边缘。

1.2.3 地铁隧道渗漏水病害检测技术研究现状

地下水是地铁隧道渗漏水的直接来源，研究地下水的运移规律，可以精确预测隧道渗

漏的潜在风险,评估其发生的可能性和潜在损失,从而及时采取有效的监控和应对措施。关于地下水数值模拟的研究,1956年,国外学者 Stallman 初次通过数值方法求解地下水流动基本微分方程^[59]。1964年, Walton 第一个将地下水数值模拟与电子计算机相结合^[60]。1996年, Wood 通过建立有限元法处理时间长度的问题以及地下水流动态问题等^[61]。为了进一步提高模型的精准度,2002年, Mehl 和 Hill 提出二维有限差分法,将网格模型细化^[62]。2005年, Nastev 结合数字有限元模型开始建立地下水流三维数值模拟模型^[63]。2012年, Welch 和 Allen 通过结合概念地形图与实际地形图来构建地下水流三维数值模拟模型能反映具体的地形特性提出了饱和地下水流三维模型^[64]。2019年, Alvin 和 Datta 通过对渗透系数与孔隙度的变动分析,进一步精细了三维数值模型,解决了地下水成分、环境复杂等因素的干扰^[65]。

相较于国外,我国关于地下水数值模拟研究起步较晚。1974年,陈钟祥初次使用数值模拟进行了地层渗漏分析研究^[66]。1984年,刘明新和陈钟祥提出了一种克服数值弥散现象的数值模拟研究方法^[67]。1999年,宫辉力等通过搭建地下水数值模型,对未来三年地下水变化情况进行了预测分析并提出了应对方案^[68]。2005年,武强等开发研制了耦合模拟评价软件系统(SGS),该系统具备建立地表河流与地下水流耦合模拟评价模型的功能,能够模拟并评价复杂环境下的水文过程,为优化水资源管理和生态环境保护提供科学依据,对于我国干旱地区的水资源可持续发展具有重要意义^[69-71]。2007年,王仕琴等利用 MODFLOW 软件的源程序建立地下水流模型,进一步与地理信息系统(GIS)集成,可以形成一个功能强大的地下水资源实时评价系统,对地下水资源的可持续利用和生态环境保护提供决策支持^[72]。2017年,束龙仓等为了降低模型的不确定性,在 MODFLOW 软件的基础上,研发了 MODFLOW-Gslib 软件,创新地将地质统计学与数值模拟相结合,专门用于模拟非均质含水层中的参数变异性问题^[73]。2022年,谢一凡等为了降低有限元法的计算消耗以及效率,提出一种多尺度有限元法——三重尺度有限元模型^[74]。

地铁隧道因为其环境潮湿、阴暗、干扰性强,给隧道检测带来了挑战性。目前,隧道检测的主要方法有基于视觉的隧道检测、点云法、探地雷达法(GPR)以及红外热成像法。其中,基于视觉的隧道检测是最重要的方法之一^[75],可提供直接的特征信息,并且基于视觉方法的缺陷检测系统也有着广泛研究^[76],如2024年,周敏研究了一种基于管道内窥镜对隧道病害进行采集与分类的方法^[77]。点云法则是利用隧道表面渗水、裂缝等区域和背景区域之间反射强度的差异性,提取隧道管壁上的病害区域。GPR是一种使用电磁场探测根据隧道背后不同物体的不同介电系数的无损检测技术,在隧道中其主要用于检测隧道衬砌的内部富水、疏松、空洞等病害。例如,许献磊等运用探地雷达法对隧道衬砌的内部结构进行了检测^[78,79]。红外热成像法检测利用的是物体的热辐射特征实现对物体表面温度的测量,进而可以检测出存在温差特征的缺陷。

2011年,同济大学的豆海涛等研究人员针对隧道内渗漏水病害,通过红外技术研究渗漏区域温差、渗漏流量、渗漏位置以及衬砌表面材料等不同渗漏水的红外辐射特征影响因素^[80]。同时,对标准混凝土块进行注水来模拟不同缺陷下的隧道衬砌渗漏水,利用红外热像仪采集和分析其红外辐射特征,以此研究不同因素对渗漏水红外辐射特征的影响规律。2012年,岩土及地下工程教育部重点实验室针对隧道渗漏水病害,提出了一种基于图

像自动处理算法的隧道衬砌渗漏水自动识别技术，该技术可以有效地收集、分析和处理渗漏水信息，从而实现隧道渗漏水快速、准确地检测。研究表明，该技术具有高度准确性、精度和低误差。2023 年，深圳大学的周宝定使用激光雷达对隧道进行内部渗水检测^[81]，利用激光点云灰度图像中的渗水病害特征，建立了相应的数据集，并采用 Mask R-CNN 模型作为基准框架，结合滑窗变换器（shifted window transformer）网络实现了对隧道渗水病害的快速检测。

1.2.4 地铁隧道内轮廓形变病害检测技术现状

1. 隧道形变检测技术

隧道形变对隧道稳定性产生的不良影响可能由多种因素引起，如软弱地层的形变、地下水位的变化、温度等。关于地铁隧道形变检测，传统的测量方式是利用水平仪等设备检测隧道结构是否有倾斜或形变，或用测斜仪或形变传感器等设备测量隧道结构的形变情况等。这些传统技术通常采用的是单一传感器的监测方式，数据精度受外界条件影响较大，难以反映隧道的全局形变情况。此外，传统的隧道形变检测方法还缺乏智能化分析，其主要依赖人工对数据进行分析 and 判断，无法实现智能化分析和决策，容易忽略隧道形变的一些细微变化，从而影响隧道的安全性。图 1.2.4-1 为常规现场形变检测图。



图 1.2.4-1 常规现场形变检测图

目前，多种隧道形变检测技术为检测和监测隧道结构的变化提供了一系列选择，针对当前隧道形变检测的高效性需求，利用三维激光扫描技术探测隧道形变成为当前的热点。三维激光扫描作为一种高精度检测手段，能够快速准确地获取地下空间结构的三维信息，对地下空间结构进行检测。针对隧道使用期间的隧道会产生不同程度的形变，采用三维激光扫描技术能够获得隧道的形状、尺寸、高度等形态特征，实现对隧道多方位、多角度的实时监测，从而实现对隧道整体安全状况的准确评价，以及对隧道有无形变等问题的实时监测，为隧道的安全防护提供依据。

相比传统的地铁结构现状调查方法，三维激光扫描技术具有数据采集全面、数字化、