

基于地震面波勘探的道路无损检测技术研究

谢卓诚¹ 王畅龙²

1 广东白云学院, 广东省广州市, 510900;

2 揭阳产业转移工业园建设工程质量检测有限公司, 广东省揭阳市, 515527;

摘要: 道路作为重要的交通基础设施, 其运行状态对车辆行驶的安全性、道路的服役年限有很大的影响。截至 2023 年底, 我国高速道路的通车里程达到 18.36 万公里, 位居世界第一, 且城市道路的覆盖范围已经达到 98.8%。但在使用期间, 由于受到重载、高温和降雨等不利因素的影响, 易出现车轮车辙、坑洼、松动等早期损伤, 不但会降低道路的使用年限, 而且会加大日后的养护与保养费用。为此, 开展道路路基的健康检测工作具有十分重大的意义。近年来, 随着道路无损检测技术的不断发展, 地震面波勘探已逐渐应用于道路检测领域。在此背景下, 本文概述了地震面波勘探技术基础, 分析了地震面波勘探在道路无损检测中的应用, 针对技术挑战提出了相应的解决方案, 并展望了未来发展趋势, 仅供参考。

关键词: 地震面波勘探; 道路路基; 无损检测

DOI:10.69979/3041-0673.25.05.024

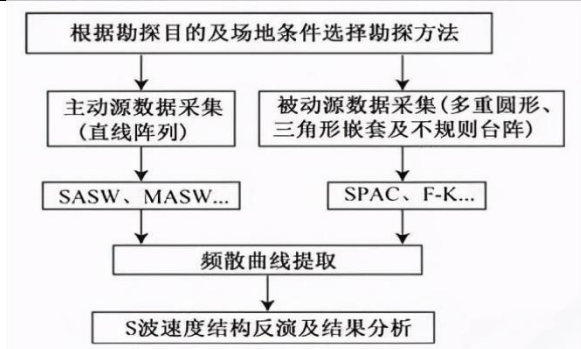
道路对我国经济发展起到了很大的推动作用, 可以推动贸易和物流业的发展, 增加就业机会, 也可以提高交通便利度, 促进农村发展与区域的一体化发展。但是, 在运营期间, 不可避免地会产生类似脱空、沉降等各种损伤, 从而严重影响道路的正常运营, 甚至危及人民的人身和财产。因此, 道路路基的健康检测显得尤为重要。地震面波勘探是一种新兴的物探手段, 在道路无损检测方面具有很好的发展潜力。该技术通过记录地面上的地震面波信号获取地下结构信息, 具有速度快、非破坏性、适用性广、信噪比高、抗干扰能力强、易于识别及浅层分辨率高等优点, 利用该技术可以精确定位路面病害的位置、范围及性质, 为后续修复工作的开展奠定基础。随着科学技术的不断发展, 地震面波勘探技术在道路无损检测领域将扮演越来越重要的角色, 助力道路基础设施的健康、可持续运行。

1 地震面波勘探技术基础

地震面波勘探技术是根据地表和地下界面在地震波传播特性来进行检测的一种新方法。地震面波主要包括瑞利波 (Rayleigh Wave) 和乐夫波 (Love Wave), 瑞利波同时具有纵、横波两种特征, 仅发生在接近地表的地方, 且其幅度随着水深的增大而减小; 乐夫波是由与地层垂直的震动波在介质中相互干扰、重叠而形成的一种波动, 其幅度随着地层厚度的增大而减小。面波通过媒质时, 存在着频散特性, 也就是相速度随频率变化。面波勘探根据地震波在地表与地下界面之间的传输特

性, 对其地震面波成分进行记录与分析, 从而获得地层中的各种信息。面波是由纵横波在地面上碰撞后所激发而形成的, 其传输过程受地层物性及地质条件的影响。在地震勘探中, 面波沿地震波的方向以反射、折射等方式传播, 并经地表或海底检波器接收, 以达到对深部构造的有效检测。地震面波勘探是利用地震仪器和传感器进行数据收集, 通过排列组合以及各种激发方式 (包括稳态面波法、地震面波谱分析方法等) 来获得地震波信号。在数据处理方面, 利用滤波、频谱分析及反演算法等方法, 从而获得地下介质的信息。比如, 根据瑞雷波的频散特征, 采用反演方法获取浅层 S 波的速度分布, 从而为该地区的抗震安全评估奠定基础。因此, 地震面波勘探作为一种高效、准确的浅层地表勘探手段, 在矿产勘查、矿产开采等方面有着广阔的发展空间^[1]。

地震面波勘探的基本原理是根据表面波在地表与地下界面间的传播特性来进行的, 面波勘探基本流程如图一所示。面波作为地震波穿过地下介质传播后, 所形成的一种低频、长波长的特殊波形, 面波勘探通过记录并分析面波的传播路径和波形特征, 能够获取地下介质的低频信息, 如地下结构、岩性、孔隙度等。



图一：面波勘探基本流程

2 地震面波勘探在道路无损检测中的应用

2.1 道路结构层析成像

地震面波勘探技术进行道路无损检测具有明显的优越性，利用路面构造层析方法，可以准确获取路面各层面波的波速分布。这种微小的速度差别，就像道路内部的“声音”一样，为我们揭开了路面每一层面的厚度和材质特性的奥秘。层析成像技术就像是一面“透视镜”，将道路的结构和情况尽收眼底。该方法不但可以清楚地反映路面的层次，而且可以精确地分辨出每一层的裂缝、脱空和材料不均一性，而这些问题，常常是导致道路性能下降，安全隐患增多的罪魁祸首。利用层析成像技术进行路面病害检测具有十分重要的意义，将为道路维修部门提供及时准确的检测结果，并为道路工程的设计和建造提供有价值的信息，指导新材料和新技术的推广，提高道路的综合品质和耐用性^[2]。

以某城市主干道为例，在长时间的荷载作用下，路面产生了大量的开裂、凹陷等病害，常规的检测手段很难准确判断病害位置与程度。利用地震面波勘探和道路结构层析成像的方法，检测团队在不影响交通的前提下，对路面进行了一次完整的探测。层析成像能清楚地反映出沥青面层以下的各个层次的构造，如基层脱空、沥青层厚薄不一和隐蔽裂纹等，尤其是找出了一段用普通方法很难探测到的深层土壤松动区域。依据检测结果，维修部门及时制定了整改计划，并加固问题区域，消除了安全隐患，为类似城市道路的维护管理提供了成功经验与示范。

2.2 路基稳定性评估

利用地震面波勘探技术对路基内的地震波进行研究，可实现对路面结构的非破坏性检测，这种方法在地基稳定性评估中具有无可比拟的优越性。当正面波经路

堤软弱层、空区或有不均匀下沉地带时，其波速、幅值和频率都会有较大的改变，通过对地震波的精细测量和处理，可以直接反演地基的内部构造状态，进而准确评价地基的稳定程度。建立基于地震面波勘探技术的道路路基稳定性评价方法，将地震波传播理论与路基工程特性和实测数据相结合，可以更精确的预报路基危险区。大量工程实例研究表明，面波勘测技术不但可以准确地确定路基内部的薄弱部位，而且可以量化评估路基的非均匀沉降，为道路养护和养护管理工作提供重要的基础数据。因此，利用地震面波勘探技术检测机理新颖、数据分析效率高等优点，在道路无损检测工程，尤其是路基稳定性评估中具有良好的发展潜力，随着技术的不断发展与进步，该技术将在道路建设中发挥更加重要的作用。

2.3 路面质量监测

地震面波勘探技术作为一种高效的非破坏性检测方法，在道路工程建设中具有很好的应用前景。在此基础上，通过对地震波场的精细化解析，实现路面老化、裂缝和分层等早期损伤的精确识别，为道路维修和运营管理提供理论基础。实时监测路面质量，建立一套以地震面波为基础的道路交通监控系统，采用高精度传感器、数据采集和处理、智能化的分析方法，实现面波信号的实时采集与分析。通过设置合适的阈值，建立相应的报警机制，使该系统可以在较短的时间内检测出路面的不正常情况，并将实时的道路状况反馈给管理人员^[3]。

例如，某市的交通主干道，由于长期承受重荷载，路面已出现不同程度的老化和开裂。为了更好地监测路面质量的变化，当地交通管理部门引进了地震面波勘探技术。将一系列高精度的地震波传感器部署在公路沿线的重要位置，以连续采集路面下的表面波信号。利用智能化数据分析平台，对路面表面波信号进行实时处理和分析，实现对路面多种潜在分层、微裂纹的识别。在某一段测得面波信号异常时，系统立即启动报警装置。施工单位对此反应迅速，现场勘查后发现路面下有空洞，并立即予以修补，有效防止路面塌方。

3 技术挑战与解决方案

3.1 技术挑战

基于地震面波勘探的道路无损检测技术，存在的挑战主要包括以下几个方面：首先，由于其复杂的数据获

取和处理过程的复杂度,使得这种方法很难实现。面波检测要求使用高精度的地震仪采集地表微弱运动,而在实际路面检测过程中,由于环境噪声和交通干扰等原因,测量结果受到了很大的干扰。为了从路面构造状态中抽取有用的信息,还需要进一步处理与分析所收集的地震数据,对测试人员的技术水平及数据的处理水平提出了更高的要求。其次,地震面波检测方法的适用领域受到限制。尽管这种方法可以比较精确的评价路面的密实度、均匀性等特征,但是在路面上出现的裂缝、坑洼等细小病害时,其识别结果往往不尽如人意。在工程实践中,为了综合评价路面状态,应将地震面波检测与其他检测方法联合使用。此外,成本也是影响地震面波检测方法普及的重要因素。高精密度地震仪器的购置、维护和数据分析软件的研制,都是一笔巨大的投资,且检测人员的培养费用也不可忽略。因此,在道路无损检测中,地震面波勘探技术是一种有效的方法,如何降低检测成本、提高检测效率,是今后的研究重点^[4]。(如表二)。

表二: 技术挑战分析表

挑战方面	具体描述
数据获取与处理复杂	高精度地震仪需采集地表微弱运动; 环境噪声和交通干扰影响测量结果; 需要高水平的数据处理与分析技术
适用领域受限	精确评价路面的密实度、均匀性; 对于裂缝、坑洼等细小病害识别效果不佳; 需与其他检测方法联合使用以综合评价路面状态
成本高昂	高精密度地震仪器购置与维护费用高; 数据分析软件研发投入大; 检测人员培养费用不可忽视

3.2 解决方案

3.2.1 优化数据采集与处理技术

为了提高检测的准确性和有效性,需要对基于地震面波勘探的道路无损检测技术进行改善,可通过优化数据采集与处理技术入手: 首先,在获取过程中,需要对节点布局进行合理的布局,使其在满足路网重点地区的前提下,不需要进行多余的布设,从而减少系统的开销。采用高精度、高灵敏度的传感器,有效改善测量结果的精度与稳定性。根据路面材料、结构特征和道路路况等因素,选择合适的取样频次和取样时间,保证所获得的地震面波信号能真正反映路面状态。在数据处理上,要注意对数据进行去噪、滤波等前处理,以排除外界条件及设备噪声等对数据的影响。采用时频分析和小波分析等现代信息分析方法,深度分析路面地震面波,并从中

抽取与路面构造状态紧密关联的特征参量。利用深度学习等方法,对采集到的图像进行智能化分析,实现对路面缺陷的自动识别和分类,从而提升路面缺陷的自动识别和分类能力。最后,构建完整的数据处理和分析体系,实现对数据采集、处理、分析和结果的整个过程的信息化管理,为下一步的维护和运营管理提供科学依据,确保检测结果的准确性。

3.2.2 融合多种检测技术以提高识别精度

由于采用单个的地震面波检测方式会受地质条件、路面材质、测试仪器等诸多因素的制约,使得检测成果具有较大的不确定性。如何将各种检测手段相结合,以提升路面损伤诊断的准确性和可信度,是解决这一问题的重要途径。首先,将地震面波勘探与地质雷达方法结合。地面雷达是利用电磁辐射及接收回波进行地下构造检测的技术,其对地表浅埋地层及道路以下的隐性损伤极为敏感,该方法可以弥补二者在检测距离、检测精度等方面的各自优点,实现对道路路面病害的精确定位。其次,引入红外热像技术。利用红外热像技术可以获取道路表面的不同温度场,从而发现由于材料老化、渗水或埋地管道渗漏等原因造成的热异常区。在此基础上,结合地面反射波、地面雷达等数据,提高路面病害种类及空间分布的判定水平。最后,结合机器学习算法综合分析多源数据,实现特征提取和模式识别,预测其发展方向。通过这种智能化的数据分析方法,在提升检测效率的同时,进一步提升识别的可靠性与精确性,提升道路养护与管理工作的水平^[5]。

3.2.3 降低成本与提高经济性

优化设备配置,选择高效低耗的地震面波检测仪器,并对测点进行适当的布设,既能确保数据的准确性,又能降低设备的投资与运行费用。同时,由于其模块化的结构,便于对其进行更新与维修,从而大幅提高其服役年限,减少后期投资。提升数据的处理效率,采用高精度的计算方法及并行处理方法,加快对地震面波数据的分析、成像,以达到缩短检测周期、降低人力、物力的目的。研发智能的数据处理系统,实现对故障点的自动定位,提升故障诊断的准确性,降低由于错误报警和漏报警所带来的额外成本。此外,云计算业务和应用的普及也是一种降低成本的方法。将地震面波检测数据上载到云平台,进行远距离的存取与分析,既节约局部的内存与管理开销,又有利于资源的共享与协同,提升整体

检测效率与经济效益。最后,构建长期监测与养护管理体系,并利用已有的检测结果对其进行评估,预警道路老化趋势,从而实现对道路病害的有效防治。

4 未来发展趋势

基于地震面波勘探的道路无损检测技术,未来将向着多样化、智能化和高精度的方向发展。随着物联网、大数据和人工智能等技术的深入发展,该技术能够实现更为实时的道路状态监测与评估,通过布设更加密集的传感网,采集大量的地震面波数据,并利用深度神经网络等方法,实现对地下结构异常、孔洞、裂缝等潜在的安全风险的精准识别,从而提升检测的速度与精度。此外,结合自适应滤波、时频分析等先进信号分析方法,降低外界噪声的影响,提高检测精度。同时,通过多学科交叉,融合地质学、材料学等多学科的理论和方法,提高对不同路面材料、路面结构特征的辨识水平。最终,这一技术的发展将推动我国城市的智慧化建设,为相关管理人员的日常养护管理工作提供科学决策支持,提高城市公共交通的安全性和舒适性,构建更加安全、绿色、高效的城市交通系统^[6]。

5 结语

综上所述,地震面波勘探技术在道路无损检测中具有明显的优势,可以有效地识别道路内部结构损伤,为公路健康监测与养护提供重要依据。然而,这一技术仍然面临着数据处理复杂、成本高和对微小病害识别能力不足等问题。通过优化数据采集与处理技术、融合多种

检测技术以提高识别精度、降低成本与提高经济性等一系列行之有效的策略,能够进一步提高其应用效果。未来,随着物联网、大数据、人工智能等技术的深入融合,地震面波勘探技术将向智能化、精细化、高效率的方向发展,为我国城市交通系统智慧化建设提供有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 温世英. 道路桥梁检测中的无损检测技术及其应用简述[J]. 汽车周刊, 2025, (03): 35-37.
 - [2] 刘德林. 基于无损检测技术的道路施工起重设备检验方法[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(10): 20-22.
 - [3] 谷秀娟. 无损检测技术在道路桥梁检测中的应用研究[J]. 运输经理世界, 2024, (18): 69-71.
 - [4] 孙红林, 刘铁华, 刘铁, 张占荣, 陈支兴. 多源频率域地震勘探技术及应用[J]. 物探与化探, 2024, 48(03): 618-628.
 - [5] 李家棒, 黄仕茂, 袁星虎, 崔乐宁. 不同地震勘探方法在工程勘查中的应用[J]. 石油物探, 2023, 62(S1): 179-184.
 - [6] 徐吉祥, 张晓亮, 李潇, 王继明, 薛爱民, 舒律. 地表浅部地震勘探方法在城市隐伏活动断裂调查中的应用[J]. 城市地质, 2022, 17(01): 79-84.
- 作者简介: 谢卓诚(2003—), 男, 汉族, 广东揭阳人, 在读本科, 研究方向: 土木工程。