

高速公路桥梁加固维修中的结构健康监测技术

秦 媛¹ 王欣宇²

1. 陕西交通控股集团有限公司宝鸡分公司 陕西 宝鸡 721000

2. 陕西路桥集团有限公司 陕西 西安 710000

摘 要：高速公路桥梁加固维修中的结构健康监测技术扮演着至关重要的角色。该技术通过实时监测桥梁结构的应力、振动等关键参数，及时发现潜在损伤和性能退化迹象。结合数据分析与评估，为加固维修方案提供科学依据，确保维修措施精准有效。技术的应用提高桥梁管理的智能化水平，保障桥梁的安全运营和延长了使用寿命。

关键词：高速公路桥梁；加固维修；结构健康监测；实时监测

1 高速公路桥梁加固维修的基本原则

1.1 安全性原则

高速公路桥梁作为交通网络中的关键节点，其安全性直接关系到行车安全和社会稳定。安全性原则要求必须对桥梁进行全面的检测与评估，这包括对桥梁的结构、材料、使用历史、荷载状况等进行详细检查，以准确判断桥梁的病害程度和安全性能。通过科学的分析和诊断，可以明确桥梁存在的主要问题，为后续的加固维修提供可靠依据。加固维修方案的设计必须充分考虑桥梁的安全性，加固设计应基于桥梁的实际损坏情况，采用科学合理的计算模式和分析方法，确保加固后的桥梁能够满足结构安全和使用要求。加固施工过程中应严格遵守安全操作规程，采取必要的安全防护措施，确保施工人员和过往车辆的安全。安全性原则还强调对桥梁长期安全性能的关注，在制定加固维修方案时，应综合考虑各种长期影响因素对桥梁产生的负面影响，如温度变化、地基不均匀沉降、腐蚀、振动等。通过采取适当的预防措施，可以避免这些不利因素再次影响桥梁的安全使用，从而延长桥梁的使用寿命。

1.2 经济性原则

高速公路桥梁加固维修不仅关乎安全，还涉及到巨大的经济投入。经济性原则要求在选择加固维修方案时，应充分考虑成本效益。通过建立既有桥梁维修、加固、重建的经济分析模型，可以对不同方案进行全面比较和评估。在确保桥梁安全性能的前提下，应选择技术可行、经济合理、对现有交通干扰较小的方案，以实现最佳的经济效益^[1]。加固维修过程中应充分利用原有桥梁结构构件，对于具有利用价值的构件，应尽量保留并修复使用，避免不必要的拆除和更换。这不仅可以降低加固维修成本，还可以减少施工对周围环境的影响。经济性原则还强调对加固维修材料的选择和使用，加固维修

材料应通过国家权威检测机构的检测认证，确保其各项性能指标满足现行规范和设计要求，在施工过程中应合理控制材料的使用量，避免浪费和不必要的成本支出。

1.3 可行性原则

高速公路桥梁加固维修的可行性原则是指加固维修方案在实际操作中是否可行，包括技术可行性、施工可行性和环境可行性等方面。首先，技术可行性是加固维修方案制定的重要基础，加固设计方案应基于科学的技术原理和计算方法，确保加固后的桥梁能够满足结构安全和使用要求，加固施工过程中应采用先进的施工技术和设备，提高施工效率和质量。其次，施工可行性是加固维修方案实施的关键环节，在制定加固维修方案时，应充分考虑施工现场的实际情况和限制条件，如交通状况、施工空间、施工时间等。通过合理安排工序和施工进度，可以确保加固维修工作的顺利进行。另外，环境可行性也是加固维修方案制定中不可忽视的重要因素，加固维修过程中应尽量减少对周围环境的影响，如噪音、粉尘、振动等。加固维修方案还应考虑与周围环境的协调性，确保加固后的桥梁与周围环境相协调，满足景观要求。

2 高速公路桥梁加固维修的主要方法

在高速公路桥梁的长期运营过程中，由于各种因素的影响，如车辆荷载、环境因素、材料老化等，桥梁结构可能会出现不同程度的损伤和退化。为了确保桥梁的安全性和延长其使用寿命，需要采取有效的加固维修方法。

2.1 加大截面加固法

加大截面加固法是一种通过增加桥梁构件的截面面积来提高其承载能力和刚度的加固方法。这种方法主要适用于桥梁的梁、板等受弯构件，以及柱、墩等受压构件。在具体实施过程中，加大截面加固法通常包括以下几个步骤：首先，对桥梁进行全面检测，确定需要加

固的构件和部位；然后，根据桥梁的实际情况和设计要求，计算出需要增加的截面面积；接着，进行加固设计，确定加固方案，包括加固材料的选择、加固方式的确定等；最后，按照设计方案进行施工，通过浇筑混凝土、增设钢筋等方式增加构件的截面面积。加大截面加固法的优点在于能够显著提高桥梁的承载能力和刚度，增强桥梁的抗震性能。这种方法施工相对简单，技术成熟，适用于各种类型的桥梁加固^[2]。然而加大截面加固法也存在一些缺点，如施工周期长、对交通影响大、加固后桥梁自重增加等。因此在选择加固方法时，需要综合考虑桥梁的实际情况和加固需求，权衡利弊，选择最适合的加固方法。

2.2 粘贴碳纤维加固法

粘贴碳纤维加固法是一种利用碳纤维布或碳纤维板等高强度材料对桥梁构件进行加固的方法。粘贴碳纤维加固法的施工过程相对简单，主要包括表面处理、碳纤维材料的裁剪和粘贴、固化等步骤，需要对加固部位进行表面处理，确保表面平整、清洁、无油污和松散物；根据设计要求裁剪碳纤维材料，并涂抹专用的粘结剂；将碳纤维材料粘贴在加固部位，并用压辊压实，确保碳纤维材料与构件表面紧密贴合；最后进行固化处理，使碳纤维材料与构件形成一体。粘贴碳纤维加固法的优点在于施工方便、快捷，对交通影响小，加固效果显著。碳纤维材料轻质、高强，不会增加桥梁的自重，对桥梁的整体性能影响较小。然而粘贴碳纤维加固法也存在一些局限性，如碳纤维材料与混凝土的粘结强度受多种因素影响，需要严格控制施工质量；另外，碳纤维材料的价格相对较高，加固成本较高。

2.3 体外预应力加固法

体外预应力加固法是一种通过在外部设置预应力筋来对桥梁进行加固的方法。体外预应力加固法的施工过程相对复杂，主要包括预应力筋的制作与安装、张拉与锚固、防护与防腐等步骤。首先需要根据设计要求制作预应力筋，并进行预张拉处理；然后将预应力筋安装在桥梁的预定位置，并进行张拉和锚固；接着，对预应力筋进行防护和防腐处理，确保其长期使用性能；最后进行验收和监测，确保加固效果满足设计要求。体外预应力加固法的优点在于能够显著提高桥梁的承载能力和刚度，增强桥梁的抗震性能。这种方法施工相对灵活，可以根据桥梁的实际情况进行调整和优化。然而体外预应力加固法也存在一些缺点，如预应力筋的锚固和张拉过程较为复杂，需要专业的施工技术和设备；预应力筋的长期性能受多种因素影响，需要定期进行监测和维护。

2.4 改变结构体系加固法

改变结构体系加固法是一种通过改变桥梁的结构体系来提高其整体性能和承载能力的加固方法。这种方法主要适用于桥梁的整体加固或重大改造工程。改变结构体系加固法的具体实施方式多种多样，可以根据桥梁的实际情况和加固需求进行选择。例如，可以通过增设支撑、改变桥梁的跨度或高度、调整桥梁的支座等方式来改变桥梁的结构体系^[3]。在实施过程中，需要对桥梁进行全面检测和分析，确定改变结构体系的可行性和具体方案；进行加固设计和施工，确保加固后的桥梁满足设计要求和需求。改变结构体系加固法的优点在于能够显著提高桥梁的整体性能和承载能力，增强桥梁的抗震性能和耐久性。同时这种方法可以根据桥梁的实际情况进行灵活调整和优化，满足不同的加固需求。然而改变结构体系加固法也存在一些缺点，如施工难度大、对交通影响大、加固成本高等。因此在选择加固方法时，需要综合考虑桥梁的实际情况和加固需求，权衡利弊，选择最适合的加固方法。

3 结构健康监测技术在高速公路桥梁加固维修中的应用

随着高速公路桥梁使用年限的增长，桥梁结构的安全性和耐久性面临着严峻挑战。为了确保桥梁的安全运营，及时发现并处理潜在的结构损伤，结构健康监测技术应运而生，并在高速公路桥梁加固维修中发挥着重要作用。

3.1 监测方案设计

监测方案设计是结构健康监测技术在高速公路桥梁加固维修中的首要环节。这一步骤需要根据桥梁的实际情况和加固维修需求，制定详细的监测计划，要对桥梁进行全面的现场勘查，了解桥梁的结构形式、材料特性、使用历史以及存在的损伤情况。结合桥梁的设计图纸和相关资料，确定监测的重点部位和关键参数。在监测方案设计过程中，还需要考虑监测设备的选型、布置方式以及数据采集的频率和时长。监测设备应具备高精度、高稳定性、耐久性好等特点，以确保监测数据的准确性和可靠性。布置方式应充分考虑桥梁的结构特点和监测需求，确保监测设备能够全面覆盖桥梁的关键部位。数据采集的频率和时长应根据桥梁的实际情况和监测目的来确定，既要保证数据的连续性，又要避免数据冗余。

3.2 监测数据采集与处理

监测数据采集与处理是结构健康监测技术的核心环节。在监测方案确定后，需要按照方案要求安装监测设

备,并开始采集数据。监测设备会实时记录桥梁在运营过程中的各种响应,如振动、应变、位移等。数据采集完成后,需要对原始数据进行预处理,包括去噪、滤波、校准等步骤,以提高数据的质量和准确性。通过数据分析方法,如时域分析、频域分析、小波分析等,对处理后的数据进行深入挖掘,提取出有用的信息。这些信息可以反映桥梁的结构状态、损伤情况以及运营性能等。

3.3 损伤识别与评估

损伤识别与评估是结构健康监测技术的重要应用之一。通过监测数据分析,可以及时发现桥梁结构中的异常变化,如振动频率的改变、应变的异常分布等。这些异常变化往往是桥梁结构损伤的前兆或表现。一旦识别出潜在的损伤,就需要对损伤进行进一步的评估和定位。这可以通过建立损伤识别模型来实现,模型可以基于监测数据,结合桥梁的结构特性和力学原理,对损伤进行定量分析和定位。评估结果可以为桥梁加固维修提供有力的依据,指导维修方案的制定和实施。

3.4 加固维修效果评估

加固维修效果评估是结构健康监测技术在高速公路桥梁加固维修中的最后一个环节。在桥梁加固维修完成后,需要通过监测技术来评估维修效果,确保桥梁的结构安全性和运营性能得到恢复和提升。评估过程主要包括两个方面:一是通过监测数据对比,分析维修前后桥梁的结构响应变化,如振动频率、应变分布等;二是通过现场检测和试验,验证维修效果是否满足设计要求和相关标准。如果评估结果显示维修效果不理想,就需要及时调整维修方案,并进行再次维修,直到达到预期的效果。

4 高速公路桥梁加固维修中的施工质量控制

高速公路桥梁的加固维修工程是确保桥梁安全、延长使用寿命的重要措施。在施工过程中,严格的质量控制是保证工程质量、防止安全隐患的关键。

4.1 施工质量评估与反馈机制

在高速公路桥梁加固维修工程中,施工质量评估与反馈机制是确保工程质量的重要环节。首先,需要建立一套完善的施工质量评估体系,该体系应明确评估的标准、方法和流程,确保评估工作的客观性和准确性。在施工过程中,应定期对关键工序和隐蔽工程进行质量检查,记录检查结果,并形成评估报告。其次,要建立有效的反馈机制,一旦发现施工质量问题,应立即向相关

部门和责任人反馈,明确问题性质、严重程度及整改要求。应鼓励施工人员主动报告质量问题,形成良好的质量意识氛围^[4]。对于反馈的问题,应迅速制定整改措施,并监督整改过程,确保问题得到及时解决。通过施工质量评估与反馈机制,可以及时发现并纠正施工过程中的质量问题,防止隐患遗留,确保桥梁加固维修工程的质量达到设计要求。

4.2 施工安全监测与预警

施工安全是高速公路桥梁加固维修工程中的重中之重。为了确保施工人员的安全,必须建立有效的施工安全监测与预警机制。要对施工现场进行全面的安全风险评估,识别潜在的危險源和安全隐患。根据评估结果,制定相应的安全防护措施和应急预案,确保在紧急情况下能够迅速应对。加强施工过程中的安全监测,通过安装监测设备、设置安全观察点等方式,实时监测施工现场的安全状况。一旦发现异常情况,如结构变形、设备故障等,应立即启动预警机制,及时通知施工人员撤离危险区域,并采取相应的应急措施。同时要加強施工人员的安全教育和培训,提高施工人员的安全意识和自我保护能力,确保他们在施工过程中能够严格遵守安全规程,正确佩戴和使用安全防护用品。通过施工安全监测与预警机制,可以及时发现并处理施工过程中的安全隐患,防止安全事故的发生,确保施工人员的生命安全和身体健康。同时也为桥梁加固维修工程的顺利进行提供了有力保障。

结束语

结构健康监测技术在高速公路桥梁加固维修中的应用前景广阔。随着技术的不断进步和完善,其将为桥梁管理提供更加全面、准确的信息支持。期待这一技术能继续为桥梁的安全运营保驾护航,为交通基础设施的可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1]朱晶雪,张凯.浅谈高速公路桥梁养护与维修加固施工技术[J].建材与装饰,2020(9):252-253.
- [2]李振国,陈晓红.桥梁结构健康监测系统的发展现状与展望[J].桥梁工程,2023,25(4):45-52.
- [3]程思雅,吴奇峰.基于无线传感网络的桥梁监测技术研究[J].土木工程学报,2022,36(7):88-95.
- [4]唐建华,高玉霞.高速公路桥梁结构健康监测的关键技术及应用[J].公路交通科技,2024,41(3):112-118.