

桥梁结构变形毫米波雷达法测试技术规程

（征求意见稿）

编制说明

标准起草组

2023 年 8 月 30 日

一、任务来源、起草单位、协作单位、主要起草人

桥梁结构是土木工程中重要的基础设施，历来被称为“生命线工程”，其结构的健康及安全运营问题一直是桥梁管理单位和社会关注的重点。桥梁结构检测的主要方法包括日常检查、定期检查、特殊或专项检测以及桥梁的静动载试验等。桥梁结构的承载能力评估及安全监测需要对桥梁结构的挠度进行测试，而桥梁结构挠度测试尤其是动挠度的测试一直是行业的难点问题。为推动我国桥梁动挠度测试技术的发展以及标准化建设，北京路桥瑞通科技发展有限公司牵头在中国交通运输协会申报了本标准的立项。2022年4月22日中国交通运输协会组织召开了立项评审会，4月25日中国交通运输协会发布的“中国交通运输协会关于2022年度第一批拟立项团体标准项目的公示”，公示本标准通过立项。标准编制组起草了标准的草案，2022年7月24日组织召开了大纲评审会，编制组提交的文件通过了标准的大纲评审。编制组根据大纲评审会专家修改意见对标准进行修改和调整，并吸纳毫米波雷达在桥梁索力测试、静载试验和动载试验的应用成果，于2023年7月编制完成本标准的征求意见稿。

2023年8月15日中国交通运输协会标准化技术委员会在北京组织召开了《毫米波雷达桥梁测试技术规程》征求意见稿草案审查会议。标准编制组针对专家提出修改意见对草案进行修改，于2023年8月30日完成《桥梁结构变形毫米波雷达法测试技术规程》的修改，形成征求意见稿。

本文件起草单位：北京路桥瑞通科技发展有限公司、北京市政路桥管理养护集团有限公司、中交路桥检测养护有限公司、中交路建交通科技有限公司、中公智联（北京）科技有限公司、北京科技大学、北京中德建基路桥工程技术有限公司、上海市建筑科学研究院有限公司、中诚云检（北京）科技有限公司、山东高速集团有限公司、重庆特盾工程检测技术有限公司。

本文件主要起草人：朱尚清、张强、郭河、胡建新、车功健、刘越、白震、陈勇、刘旒、孙文丽、王开军、张福建、杨亮亮、李金鹿、亓兴军、张文武、余洋。

二、制订标准的必要性和意义

必要性：

桥梁挠度测试是桥梁静动载试验测试的关键技术参数，静载试验通过桥梁挠度的测试对桥梁的静力刚度进行评价，动载试验通过动态挠度测试对桥梁的动刚

度以及冲击系数、桥梁的行车性能进行综合评价。由于桥梁结构是跨越河流、山谷等地貌地形的构造物，桥下净空的高度以及桥下河流等对桥梁挠度测试的方法的选择都有一定的限制，考虑到挠度测试方法的适用范围、影响测试精度的因素等，桥梁试验中应选择合适的方法对桥梁挠度测试，才能提高测试的精度确保试验结果的评定准确。

桥梁挠度测试的方法按照静动态进行分类可以分为静态挠度的测试和动态挠度的测试两大类。静态挠度测试的方法按照测试原理可以分为：机械式挠度测试、电子式挠度测试、电阻式挠度测试、光学类挠度测试、图像式挠度测试、激光类挠度测试、GPS 挠度测试以及雷达类挠度测试等。机械式挠度测试方法最典型的是机械式百分表、千分表等测量方法；电阻式挠度测试采用电阻式位移计利用静态采集系统进行挠度测试；光学类挠度测试仪器传统的有精密水准仪、全站仪等测量设备，此外还有基于光电成像的桥梁挠度仪等；激光类挠度测试主要是利用激光测距的原理，通过激光位移计对桥梁静态度进行测试；图像式桥梁挠度测试方法有基于图像的桥梁挠度仪；GPS 挠度测量主要是基于全球定位系统 GPS 对大跨径桥梁挠度进行静态差分进行静态挠度的测试；雷达类挠度测试主要是利用毫米波雷达对桥梁挠度进行测试。

桥梁动挠度测试一直是桥梁检测行业的一个难点问题，动挠度也是桥梁动载试验中评定桥梁结构的一个重要参数。目前桥梁动挠度测试主要方法有光学类桥梁挠度仪、图像式桥梁挠度仪、电阻式挠度计、GPS 和毫米波雷达等。

通过对比分析桥梁静动态挠度测试的方法，毫米波雷达基于雷达信号调制技术、雷达干涉测量以及合成孔径雷达（SAR）技术等关键技术，在雷达波束角范围能实现对桥梁结构多个目标进行动态的精确测试。毫米波雷达动挠度测试技术同其它检测技术相比，解决了桥梁动挠度测试的行业难题具有广阔的应用前景。

毫米波雷达微变形测试技术近年来一直是行业研究的热点问题，在桥梁检测、监测领域中有广泛的应用。毫米波雷达在桥梁中应用主要是基于微变形测试这一关键技术来实现的：通过拉索的微振动利用频率法实现拉索索力的测试；通过对桥梁静载试验过程中测点挠度的连续测试，提取不同加载工况静态挠度提取实现桥梁静力性能的评价；通过桥梁动载试验中多目标的动态挠度时程曲线分析可以提取桥梁结构动力特性及动力响应，从而实现对桥梁动力性能和动力响应的评价；通过对桥梁结构动挠度的测试可以提取桥梁结构的影响线，实现对桥梁结构承载

能力的快速评价；通过对桥梁结构安装毫米波雷达可以实时在线对桥梁结构进行健康监测等。

毫米波在桥梁变形测试中的有广泛应用前景，目前我国桥梁检测、监测的规范中缺少相关的技术规范的支撑，为进一步推动该技术在桥梁变形测试中的应用，有必要制定相关的测试规程进行指导。

意义：

桥梁结构是土木工程中重要的基础设施，历来被称为“生命线工程”，其结构的健康及安全运营问题一直是桥梁管理单位和社会关注的重点。桥梁结构检测的主要方法包括日常检查、定期检查、特殊或专项检测以及桥梁的静动载试验等。桥梁结构的承载能力评估及安全监测需要对桥梁结构的挠度进行测试，而桥梁结构挠度测试尤其是动挠度的测试一直是行业的难点问题。

毫米波雷达干涉测量技术是通过计算两次回波信号的相位差，来提取结构在观测期间的高精度形变信息。毫米波雷达干涉测量技术以非接触测量、全天候、不受外界环境的影响等优点，能很好的解决桥梁动挠度测试这一行业难点问题。

毫米波雷达最早在国内的应用多数是基于意大利的 IBIS 雷达开展的研究，由于设备体积大、价格昂贵，毫米波雷达在桥梁工程中的应用受到了一定的限制。随着国内雷达技术的发展，国内毫米波雷达设备生产商在提高测试精度的同时，使设备逐渐轻量化、成本也有了大幅的降低。

目前雷达在桥梁结构中得到了广泛的应用，主要包括拉索索力测试、桥梁静载试验、动载试验以及桥梁健康监测等领域。但目前国内还没有相关的标准和规范，使毫米波雷达测试这项新技术的应用受到很大的限制。

本文件的制定对于毫米波雷达技术在桥梁变形测试中的应用具有规范和指导的作用，同时对推动桥梁检测和评估技术的发展有重要意义。

三、主要工作过程

主编单位于 2022 年初开始组织相关单位着手成立标准编制工作起草小组，编制立项申报书向中国交通运输协会申请标准的立项。作为主要起草单位，北京路桥瑞通科技发展有限公司 2022 年上半年一直积极收集有关本标准的各类信息，与北京市政路桥管理养护集团有限公司、中交路桥检测养护有限公司、中交路建交通科技有限公司、中公

智联（北京）科技有限公司、北京科技大学、北京中德建基路桥工程技术有限公司、上海市建筑科学研究院有限公司、中诚云检（北京）科技有限公司、山东高速集团有限公司等单位紧密联系，反复对毫米波雷达桥梁变形测试技术进行验证和试验。2022 年 3 月底完成了团体标准《毫米波雷达桥梁变形测试技术规程》的立项申请材料的编写，正式提交中国交通运输协会标准委员会。2022 年 4 月 22 日，中国交通运输协会组织行业专家在北京召开立项审查会议，对标准立项报告进行审核，通过了标准项目的编制申请，并提出一些合理化的建议。立项申请获批后，标准编制组加快标准编制工作节奏，明确任务分工及各阶段进度时间节点，着手编制标准工作大纲和相关文件。同时，标准起草工作组成员认真学习了 GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》，结合标准制定工作程序的各个环节，进行了探讨和研究。标准编制组于 2022 年 7 月完成了《毫米波雷达桥梁变形测试技术规程》大纲评审的标准草案和相关文件。2022 年 7 月 20 日组织召开了大纲评审会，编制组提交的文件通过了标准的大纲评审。大纲评审后，标准起草工作组经过技术调研、咨询，收集、消化有关资料，并结合毫米波雷达技术、变形检测要求、数据处理与分析以及应用实际经验的总结，于 2023 年 7 月底写完成了团体标准《毫米波雷达桥梁变形测试技术规程》的征求意见稿草案和相关文件的编制。2023 年 8 月 15 日中国交通运输协会标准化技术委员会在北京组织召开了《毫米波雷达桥梁测试技术规程》征求意见稿草案审查会议。专家提出的审查意见：（1）将标准名称修改为《桥梁结构变形毫米波雷达法测试技术规程》；（2）进一步优化章节结构和标准内容；（3）对标准文件进行编辑性修改。

根据专家审查意见，编制组进行了对规范条文进行逐条修改，于 2023 年 8 月 30 日完成《桥梁结构变形毫米波雷达法测试技术规程》的修改，形成征求意见稿。

主要修改的内容包括：（1）将标准名称修改为《桥梁结构变形毫米波雷达法测试技术规程》；（2）在术语和定义部分增加了雷达相关的术语，仪器设备部分增加相关内容，调整了附录相关内容；（3）针对规范条文进行逐条核对，按照专家意见进行仔细推敲和文字、图表等进行了调整和修改。

2023 年 8 月 30 日完成《桥梁结构变形毫米波雷达法测试技术规程》的修改，计划于 2023 年 8 月底完成《桥梁结构变形毫米波雷达法测试技术规程》（征求意见稿）提交中国交通运输协会，公开征求意见。计划 2023 年 9 月底完成征求意见的梳理和标准的修改，计划于 2023 年 10 月上旬提交协会进行专家评审。根据专家意见对标准进行进一步的修改完善，计划于 2023 年 10 月底完成《桥梁结构变形毫米波雷达法测试技术规程》

（报批稿），报中国交通运输协会评审。根据评审意见对报批稿进行修改完善，报中国交通运输协会标准委员会批准。

四、制订标准的原则和依据，与现行法律、法规、标准的关系

本文件主要规定的是毫米波雷达桥梁微变形测试的技术规程，与国家和行业相关标准是一种衔接关系。本文件仅规定拉索索力测试、静载试验、动载试验等方面测试技术方面及数据处理方面规定，其相关索力计算、静载、动载相关检测结果数据处理方法采用国家和行业的相关标准进行处理与评定。

本文件与有关法律法规、国家强制性标准、国家推荐性标准、行业标准、地方标准的关系如下：

1、《公路桥梁荷载试验规程》（JTG/T J21-01-2015）规定了公路桥梁静载、动载以及索力数据处理方法、结果的评定；

本文件采用毫米波雷达数据处理方法与《公路桥梁荷载试验规程》（JTG/T J21-01-2015）中处理方法一致，评定参照执行。

五、主要条款的说明，主要技术指标、参数、实验验证的论述

本文件规定的毫米波雷达微变形测试技术，适用于公路、市政、轨道交通、铁路、水利等各类桥梁微变形检测、监测。

本文件的主要技术内容包括以下几个部分：

- 1、范围 主要规定本规程使用范围、毫米波雷达检测总体技术规定等。
- 2、规范性引用文件 规范引用的规范列表。
- 3、术语和定义 主要规定标准中涉及的主要技术术语。
- 4、基本规定 主要规定毫米波雷达微变形测试技术的基本规定、技术要求、工作流程和技术方案。
- 5、仪器设备 对毫米波雷达检测一般规定、毫米波雷达系统和辅助设备。
- 6、毫米波雷达索力测试 主要包括毫米波雷达在索力测试一般规定、准备工作、索力现场测试及数据处理与分析等内容。
- 7、桥梁静载挠度测试 主要包括毫米波雷达在桥梁静载挠度测试的一般规定、准备工作、桥梁静载的现场测试及数据处理与分析等内容。
- 8、桥梁动载测试 主要包括毫米波雷达在桥梁动载试验测试的测试方法一般规定、准备工作、桥梁动载现场测试及数据处理与分析等内容。
- 9、成果报告的编写 主要包括毫米波雷达微变形检测报告编写进行规定。

附表：主要规定毫米波雷达测试检测各种记录表格、结果整理表格。

条文说明：对标准重要条文进行说明。

本文件主要参编单位对于毫米波雷达在桥梁拉索索力测试、静载试验、动载试验等方面进行了系统研究，主要研究成果如下：

1、拉索索力测试

毫米波雷达是基于干涉测量技术实现测试斜拉桥、悬索桥和吊杆拱桥等线缆体系桥梁拉索、吊杆受力状态的一款检测设备。测量时，微波雷达发射微波信号，遇到拉索后反射回来，得到相位变化；通过不断发射、反射得到一系列变化相位，从而计算出拉索的振动变化位移，经过快速傅立叶变换(FFT)，得到频域特征值。位移时程曲线经过时频变换计算出振动频率或倍频特征，从而计算拉索索力，见图1和图2。

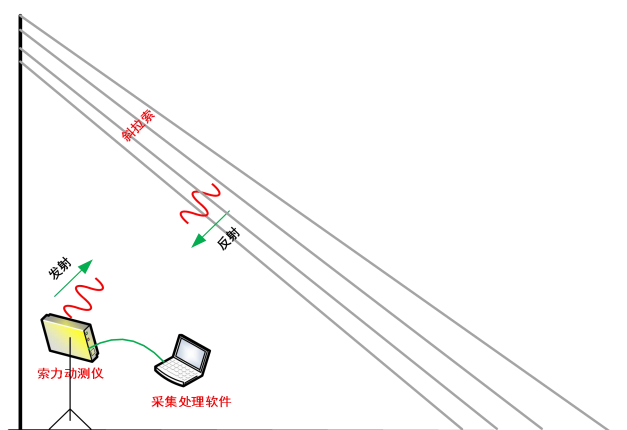


图1 毫米波雷达索力测试示意图

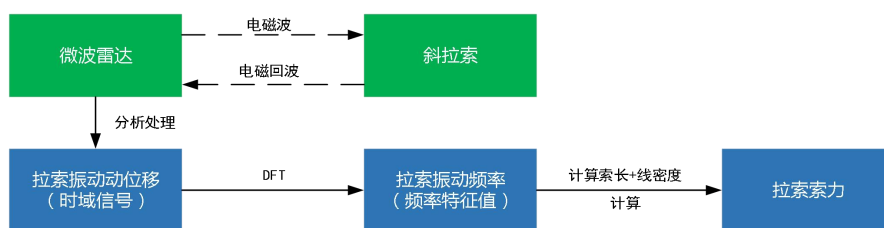


图2 拉索索力测试分析流程

2、桥梁静载试验

毫米波雷达系统具有全天候、受环境因素干扰小、精度高、采样频率高等优点，能同时实现对波束角范围内多目标进行实时动态位移的测试，使该技术在桥梁静载试验中得到了广泛的应用。

在利用毫米波雷达测试系统对桥梁在加载过程中挠度进行测试时，试验加载前应对测试系统进行调试，系统调试正常设置好测试各项参数。在桥梁静载加载前封闭交通后开始进行采样，整个加载、卸载过程均需要对桥梁静载挠度进行连续测试，直到试验结

束。毫米波雷达测试的数据能够反映桥梁整个桥梁静载过程中挠度的动态变化，根据动态测试曲线分析各级荷载下的挠度值，典型测试曲线见图 3。

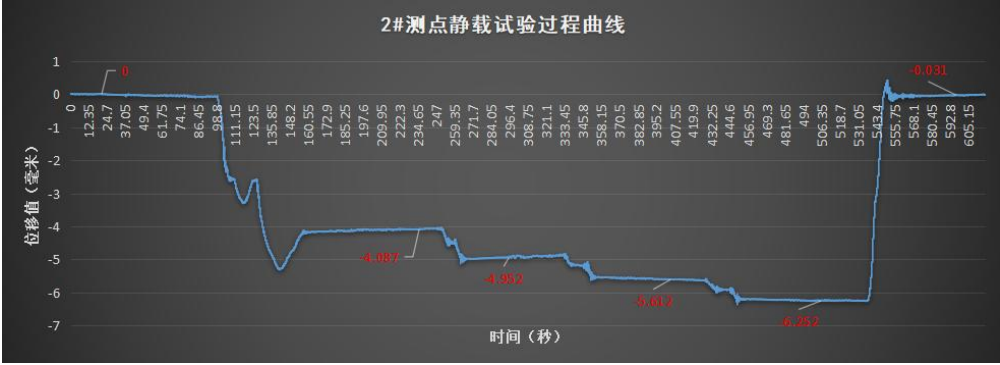


图 3 桥梁静载试验毫米波雷达挠度测试曲线

3、桥梁动载试验

桥梁动载试验包括桥梁动力特性及动力响应测试两个方面的内容，利用毫米波雷达可以对桥梁在动载试验过程中的动挠度进行动态测试，利用测试曲线分析桥梁结构的动力特性及动力响应参数。桥梁动载试验典型挠度时程曲线见图 4，桥梁阻尼分析见图 5。

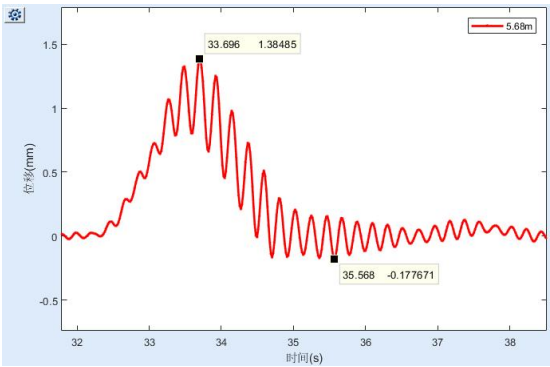


图 4 桥梁动载试验典型挠度曲线

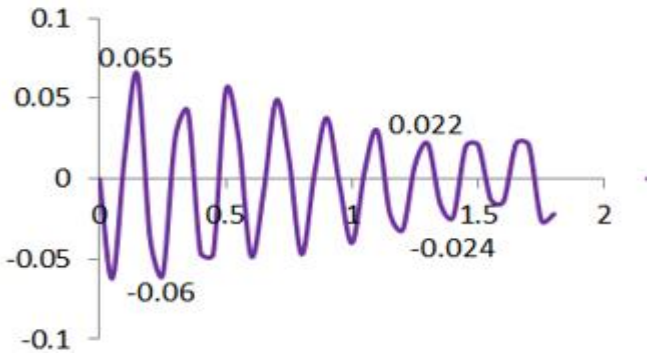


图 5 毫米波雷达滤波后用于阻尼分析的波形图

4、桥梁挠度影响线

利用桥梁挠度影响线的概念，可以通过毫米波雷达对桥梁结构的挠度影响线进行提取（见图 6），从而用于桥梁结构承载能力的快速评定。

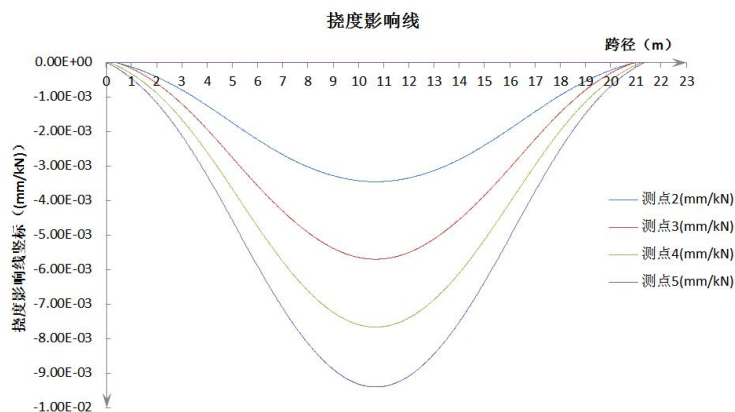


图 6 毫米波雷达测试数据提取挠度影响线

六、重大意见分歧的处理依据及结果

本标准制订过程中尚未发生过重大意见分歧。

七、采用国际标准和国外先进标准的，说明采标程度，以及与国内外同类标准水平的对比情况

本标准未采用国际标准和国外先进标准。

八、作为推荐性标准建议及其理由

目前雷达在桥梁结构中得到了广泛的应用，主要包括拉索索力测试、桥梁静载试验、动载试验以及桥梁健康监测等领域。但目前国内还没有相关的标准和规范，使毫米波雷达桥梁变形测试这项新技术的应用受到很大的限制。

鉴于以上情况，有必要在交通行业内编写完整的毫米波雷达桥梁变形检测技术规程，为使用单位提供有保证的测试标准，满足桥梁测量的基本需要。

本项目为毫米波雷达桥梁变形测试技术规程。毫米波雷达干涉测量技术以非接触测量、全天候、不受外界环境的影响等优点，能很好的解决桥梁挠度测试尤其是动挠度测试这一行业难点问题。

九、贯彻标准的措施建议

(1) 精心组织安排，开展宣贯培训。建议由行业主管部门统一安排，召开标准宣贯会，对涉及的交通建设、监理、设计、施工等单位开展标准实施培训和宣贯普及。明确毫米波雷达桥梁变形测设的要求、施工工艺、检测方法、质量验收、养护管理等方面的具体要求，指导监测工程的实施，有效推动贯标工作的开展及落实。

(2) 组织相关人员到施工现场参观学习，直观展示毫米波雷达桥梁变形测试的效果及具体实施方法；

(3) 定期组织科研、生产、应用、检验各环节人员进行技术交流，不断对毫米波雷达桥梁变形测试技术标准进行改进。

十、其他应说明的事项

暂无。