

团 体 标 准

T/CCTAS XX—2023

桥梁结构变形毫米波雷达法测试技术规程

Technical specification for Deformation Inspection of Bridge using
Millimeter wave Radar

（征求意见稿）

2023 年 8 月 30 日

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中国交通运输协会 发布

目 次

前 言	II
引 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
3.1 毫米波雷达 millimeter wave radar	1
3.2 距离像 range profile	1
3.3 空间分辨率 spatial resolution	1
3.4 角反射器 corner reflector	1
3.5 直达波 direct wave	1
3.6 回波 echo	1
4 基本规定	2
4.1 一般规定	2
4.2 检测工作流程	2
4.3 检测方案	3
5 仪器设备	3
5.1 一般规定	3
5.2 毫米波雷达	3
5.3 角反射器	4
5.4 辅助设备	4
6 索力测试	4
6.1 一般规定	4
6.2 准备工作	4
6.3 现场检测	5
6.4 数据的处理与分析	5
7 静态挠度测试	6
7.1 一般规定	6
7.2 准备工作	6
7.3 现场测试	7
7.4 数据处理与分析	7
8 动态挠度测试	7
8.1 一般规定	7
8.2 准备工作	7
8.3 现场测试	8
8.4 数据处理与分析	8
9 检测报告编制	9
附录 A	11
附录 B	14
参考文献	16

前 言

本文件按照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》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国交通运输协会交通工程设施分会提出。

本文件由中国交通运输协会标准化技术委员会归口。

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。

引 言

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一直是桥梁管理单位和社会关注的重点。而桥梁结构的变形是反映桥梁结构健康状况的重要参数，毫米波雷达是具有非接触测量、全天候、不受外界环境的影响等优点，能很好地解决桥梁结构变形非接触式检测这一行业难点问题。目前毫米波雷达在桥梁结构中得到了广泛的应用，主要包括索力测试、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。为规范毫米波雷达在桥梁结构变形检测的操作方法，指导该技术的应用，提高测试的精度，在总结大量现场检测经验的基础上，通过广泛调研、征求意见，并参考国内相关标准，制定本文件。

本规程是土木工程领域首次提出毫米波雷达在桥梁结构变形的应用规程，并规范其应用，推荐给相关单位使用。在使用过程中，若有意见和建议，可递交至牵头编制单位北京路桥瑞通科技发展有限公司(地址：北京市石景山区八大处路10号，邮政编码：100144)提出，以便修订时参考。

桥梁结构变形毫米波雷达测试技术规程

1 范围

本文件规定了桥梁结构变形毫米波雷达法检测技术的基本规定、仪器设备、变形的测试方法、数据处理与分析 and 检测报告的编制。

本文件适用于公路、城市桥梁结构的变形检测，铁路、水利等其他桥梁可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

CJJ/T 233 城市桥梁检测与评定技术规程

JT/T 1037 公路桥梁结构监测技术规程

JTG/T J21 公路桥梁承载能力检测评定规程

JTG/T J21-01 公路桥梁荷载试验规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 毫米波雷达 millimeter wave radar

工作在毫米波段（波长1mm~10mm）的雷达，其雷达电磁波频率范围为30GHz~300GHz。

3.2 距离像 range profile

用宽带雷达信号获取的目标散射点复子回波在雷达射线上投影的向量和，可通过反射成像时间和位置确定距离像。

3.3 空间分辨率 spatial resolution

雷达设备能够识别的两个相邻目标的最小距离，是反映雷达设备性能和精度的一个重要指标。

3.4 角反射器 corner reflector

利用金属板材制作的适用变形测试的四角形反射装置（又称雷达反射器），通过电磁波在金属角的折射放大作用来提高雷达回波信号的强度。

3.5 直达波 direct wave

在桥梁变形测量中电磁波沿变形方向直接传播到目标点，利用回波信号得到形变信息。

3.6 回波 echo

从雷达目标反射回来的信号，或在雷达接收机的阴极射线管屏幕上由这个信号所产生的踪迹。

4 基本规定

4.1 一般规定

4.1.1 桥梁结构变形毫米波雷达法检测的主要内容包括桥梁结构的索力、静态挠度和动态挠度测试。

4.1.2 应根据检测内容的要求选择合适的毫米波雷达设备，根据精度要求和分析参数设置合理的采样参数，并应符合JTG/T J21-01的规定。

4.1.3 实施桥梁结构变形毫米波雷达检测的人员应具备相应桥梁检测的资格和能力。

4.1.4 毫米波雷达设备应定期进行检定或校准，开展检测前应对设备功能进行核查。

4.1.5 采用毫米波雷达技术对于桥梁变形测试时，应符合下列规定：

a) 测试时应保证雷达设备与目标之间的通视，不能被物体遮挡。

b) 采用一台雷达对多目标进行测试时，测点布设应根据最小分辨率保证不同测点目标能有效被识别。

c) 采用多台雷达进行桥梁变形进行动态测试时，宜保持各测点数据的同步采集。

4.1.5 现场测试应做好测试记录和数据存储。

4.2 检测工作流程

4.2.1 检测工作流程应包括试验准备、现场试验和数据处理与分析三个阶段，可按图1执行。

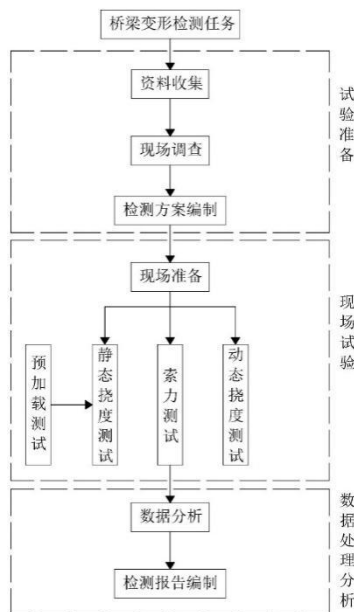


图 1 桥梁变形检测流程图

4.2.2 试验准备阶段工作包括资料收集、现场踏勘或调研、检测方案的编制。应该包括：

a) 资料收集。资料收集应根据变形测试的内容来确定，并符合JTG/T J21-01中3.2.2的相关规定。

b) 现场踏勘或调研。主要对桥梁结构变形测试（包括索力测试、静态挠度、动态挠度等）现场试验条件、桥梁状况以及实际交通状况等。

c) 检测方案编制。根据变形测试的要求，结合现场测试条件编制索力、静态挠度、动态挠度测试的检测方案，应包括测点布置、试验工况、加载位置及方法、测试方案等。

4.2.3 现场试验阶段的工作内容应包括：

- a) 现场准备。包括测点布置，仪器设备准备、试验组织，仪器设备安装调试等。
- b) 预加载试验。桥梁静载试验挠度测试时，为消除非弹性变形需要在正式试验前进行预加载试验。
- c) 正式试验。按照预定的试验方案进行相关试验，采集各测点的并收集数据。

4.2.4 数据处理阶段工作内容包括：

- a) 数据分析。对原始测试数据进行处理与分析，提取索力、静态挠度、动态挠度分析评估需要的参数信息。
- b) 编制报告。根据变形数据分析结果，结合理论计算按照JTG/T J21-01或CJJ/T 233的规定对试验结果做出判断与评价，形成检测报告。

4.3 检测方案

4.3.1 制定检测方案前,应根据变形测试内容收集桥梁基本信息、设计资料、竣工资料、历次检测及维修加固资料，必要时进行现场踏勘和调研。

4.3.2 桥梁结构变形毫米波雷达法应根据目的、内容以及要求制订检测方案，应包括但不限于以下内容：

- a) 桥梁概况：包括桥梁结构的基本信息、桥梁设计及竣工资料、历次检测及维修加固资料等。
- b) 桥梁检测目的、项目、技术要求和检测依据。
- c) 桥梁结构变形检测的范围、内容及毫米波雷达检测的方法。
- d) 检测仪器设备及辅助设备。
- e) 检测进度计划。
- f) 检测安全保证措施及交通组织方案。
- g) 质量保障措施。

5 仪器设备

5.1 一般规定

5.1.1 仪器设备一般包括毫米波雷达设备和角反射器、三脚架等辅助设备。

5.1.2 运输过程中应保证仪器设备安全，轻拿轻放，避免碰撞或强烈震动。

5.1.3 仪器设备需定期进行保养、维护、清洁。

5.2 毫米波雷达

5.2.1 毫米波雷达由控制模块、发射天线、接收天线、数据采集软件等组成。

5.2.2 毫米波雷达雷达传感器对监测目标区域进行连续采样，通过相邻采样信号间的干涉计算提取形变相位，计算桥梁目标测点形变量，见附录A。

5.2.3 桥梁结构变形测试时，为增强电磁波的回波能量可在目标点布设角反射器，角反射器规格根据测试距离进行选择。

5.2.4 利用直达波测试桥梁结构变形时或测试拉索索力时不必布设角反射器。

5.2.5 采用角反射器对桥梁挠度进行测试时，应记录雷达与角反射器的竖向距离 h 或径向距离 R 、水平距离 L ，见图2。

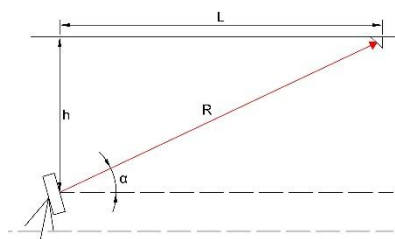


图2 雷达与角反射器位置关系

5.3 角反射器

5.3.1 形变测量的角反射器采用金属材料加工制作，采用四角形的结构形式，见图3。

5.3.2 角反射器安装时，应保证在测点位置与桥梁结构刚性连接，防止反射器的抖动影响测试精度。

5.3.3 应根据测试距离选择角反射器的规格尺寸，确保回波信号能量能满足测试精度的要求。

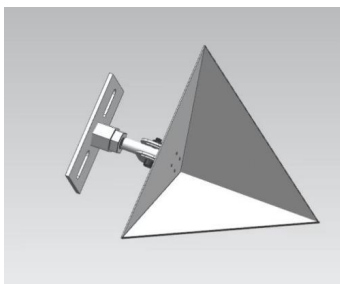


图3 角反射器示意图

5.4 辅助设备

5.4.1 测试三脚架由支腿、测试云台和角度可调节装置组成。

5.4.2 采用毫米波雷达进行形变测试时，应配备测距、测角的相关辅助测量工具。

6 索力测试

6.1 一般规定

6.1.1 毫米波雷达法索力测试采用频率法。

6.1.2 宜保持雷达发射、反射面与索体垂直，在雷达波束宽度覆盖范围内可同时对多根拉索进行索力测试。

6.1.3 雷达反射点位置宜布设在1/3~1/2索长的范围，避开端部受阻尼、减震装置等影响区域。

6.1.4 刚度较大的拉（吊）索测试时，可采用主动激励方式增强振动信号。

6.2 准备工作

6.2.1 进行桥梁拉索或吊杆索力测试前收集桥梁结构拉索的基本信息：包括索长、单位长度质量、拉索构造、施工监控以及历次索力测试等基本资料，并对现场检测条件进行现场探勘。

6.2.2 编制拉索或吊杆测试的专项测试技术方案。

6.2.3 进场前设备应在有效的检定或校准期内，并核查仪器设备功能是否正常。

6.2.4 毫米波雷达进行拉索索力测试时，应符合下列规定：

a) 测试时应保证雷达与测试拉索或吊杆之间的通视，不能被物体遮挡。

b) 斜拉桥拉索测试应选择合适的位置实现多根拉索索力同时测试，并能有效识别信号与拉索的对应关系。

c) 对吊杆索力测试时，因受雷达波束角的限制一般宜采用逐根进行吊杆测试，并按顺序记录吊杆的编号。

6.2.5 检测前应对设备的功能进行核查，设备近调试工作正常后方可开始检测。

6.3 现场检测

6.3.1 索力测试时，根据检测方案确定的位置安装三脚架，并在三脚架上安放雷达，通过调节装置调节雷达主机使其扇形波束宽度范围覆盖待测拉索。

6.3.2 将雷达主机通过数据线与采集控制电脑连接，可采用移动电源进行供电，通过采集控制系统进行调试，确保测试信号正常后才能开始测量。

6.3.3 根据雷达扇形波束宽度范围，从采集软件采集的拉索振动信号的距离参数来确定拉索与信号的对应关系，设置好采集参数后开始索力的测试。

6.3.4 索力测试时，应做好记录和数据存储，记录应包括拉索或吊杆编号、信号通道、数据存储信息等。

6.4 数据的处理与分析

6.4.1 毫米波雷达测试的振动数据，通过傅里叶变换提取拉索或吊杆的频率特征信息，利用拉索振动的频率特征计算分析拉索或吊杆的索力值，数据分析流程见图4。

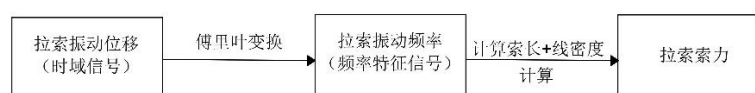


图4 索力数据分析流程图

6.4.2 应根据拉索或吊杆振动信号的频谱特征正确识别其各阶振动频率，可利用拉索振动的倍频关系来判断。

6.4.3 当拉索或吊杆的一阶基频信号特征显著时，可利用基频来计算索力；当基频特征信号不明显时，可根据多阶自振频计算频差差值，利用频率差值或多个频率差值的平均值代替基频计算索力。

6.4.4 应根据拉索或吊杆资料得到计算索力需要的参数，利用拉索的频率按照JTG/T J21-01-2011附录B的规定计算索力。

6.4.5 索力偏差率的计算可按照CJJ/T 233-2015中4.8.3的规定计算。

7 静态挠度测试

7.1 一般规定

7.1.1 静态挠度测试采样频率不应低于 1Hz。

7.1.2 中小跨径桥梁采用毫米波雷达进行静态挠度测试时，在桥下易于架设（如无水、地形平坦等情形）时宜采用无线分布式毫米波雷达测试系统进行测试；大跨径桥梁采用毫米波雷达测试静态挠度时，在桥下不易架设设备时，应在测点安装角反射器。

7.1.3 毫米波雷达法利用直达波进行静态挠度测试，应符合以下规定：

- a) 雷达利用直达波对挠度进行测试，每台雷达对应一个测点。
- b) 测试时雷达主机与目标间的视线方向与水平方向的夹角。

7.1.4 测点采用角反射器时，毫米波雷达测试应符合以下规定：

- a) 测点位置应在雷达设备波束角扇形区域内，一台雷达不能覆盖所有测点时应增加雷达数量。
- b) 角反射器应具有一定刚度且与测点进行刚性连接，避免角反射器的抖动会产生测量误差。
- c) 角反射器的喇叭口安装应朝向雷达主机方向，以获得较强的电磁波反射信号。
- d) 角反射器的大小与雷达与测点距离有关，随测试距离增大反射器尺寸可适当增大，以增强反射信号。

7.2 准备工作

7.2.1 毫米波雷达测试系统在进场前应进行调试，确保设备功能正常。

7.2.2 测点需要安装角反射器时，应根据测试距离准备好角反射器、安装配件及工具等。

7.2.3 角反射的安装应满足雷达设备最小空间分辨率的要求，测试断面两个测点的不能位于雷达同一个径向分辨单元，即两个测点径向差 Δr 应大于最小空间分辨率（雷达空间分辨率常采用0.5m）。

7.2.4 现场测点布设时，应根据最小空间分辨率调整雷达位置和角度，使两个测点间距为 ΔL 时，两个测点径向差 Δr 大于最小空间分辨率，见图5。

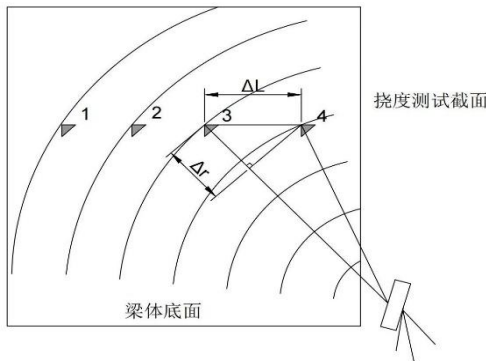


图 5 测点布设空间分辨率的要求

7.3 现场测试

7.3.1 加载测试前应通过测试软件确定测点位置，必要时通过其他测距设备进行校核。

7.3.2 桥梁静载试验预加载过程中应对加载前、加载过程及卸载的挠度数据进行测试，以检验桥梁结构和设备工作状态。

7.3.3 采用多台雷达测试挠度时，应符合以下规定：

- a) 确定雷达数量，合理配置测试系统。
- b) 安装好雷达，调整雷达发射、接收面使其垂直对准测点位置，并打开电源开关。
- c) 打开无线路由器，将雷达、无线发射模块、无线路由器和笔记本电脑通过无线局域网连接，调试系统使其进入正常工作状态。
- d) 系统调试完毕后，通过控制软件逐台对雷达进行参数设置并设定采样参数。
- e) 所有雷达设备参数设置后，调试使各测点数据工作正常，可进行静态挠度的测试。

7.3.4 采用角反射器对桥梁静态挠度测试时，参数设置步骤如下：

- a) 根据桥梁静载试验方案选择合适的位置安装毫米波雷达测试系统。
 - b) 调整雷达发射、接收面使静载挠度值测点在波束角范围内，且满足径向分辨率的要求，打开电源开关。
 - c) 现场对雷达测试系统调试使其进入正常工作状态。
 - d) 测试系统调试完毕，打开测试软件界面测试雷达进行通道配置，正确设置串口及配置参数。
 - e) 开始对雷达进行测试，根据电磁波能量较强的回波信号的距离像信息，点击确定测点。
 - f) 配置各测点采集参数，设置存储路径后，开始进行桥梁静载挠度的测试。
- 7.3.4 纤维抗火隔热带施工边缘应平顺、紧密、无重叠。

7.4 数据处理与分析

7.4.1 毫米波雷达测试数据处理时，当测试视线方向与桥梁挠度的形变方向不一致时，应通过转换获得桥梁结构的变形值，见附录B。

7.4.2 桥梁静载试验加载前、各级加载以及卸载后的数据应从雷达测试数据稳定部分提取。

7.4.3 根据各加载工况测试的挠度值，按相关规范计算桥梁挠度弹性值、挠度校验系数、残余变形。

7.4.4 根据各级加载的荷载效率绘制荷载-挠度变形曲线。

8 动态挠度测试

8.1 一般规定

8.1.1 桥梁动挠度毫米波雷达法主要用于桥梁动力特性和动力响应的分析。

8.1.2 利用测试数据分析桥梁动力响应时，采样频率应满足尼奎斯特定理；测试数据用于分析桥梁自振特性（自振频率和阻尼比）时，采样频率不宜小于分析频率的10倍。

8.1.3 桥梁动挠度的测点应根据需要测试分析的参数来确定，其测点布设应满足JTG/T J21-01-2011的要求。

8.2 准备工作

8.2.1 动态挠度测试时，除包括静态挠度测试的准备工作外，还应包括下列内容：

- a) 应根据动态测试的不同加载方式,准备加载车辆或激励设备等。
- b) 根据动态挠度测试方案,应确定动态测试车辆加载或激励设备的位置,并作出相应的标记。

8.2.2 编制桥梁动态挠度测试的专项技术方案。

8.3 现场测试

8.3.1 桥梁动态挠度测试时,应根据分析参数选择合适的激励方式,采集数据应包括整个动态测试过程。

8.3.2 利用跑车试验对桥梁进行激励时,试验前应封闭交通以保证能采集到初始状态的数据,在车辆激励引起的振动数据完全衰减后方可停止采样。

8.3.3 毫米波雷达测试桥梁动态挠度时,应做好现场记录和数据存储。

8.4 数据处理与分析

8.4.1 利用角反射器测试的动挠度的数据处理时需换算成竖向位移值,利用直达波测试动挠度时不需要进行换算。

8.4.2 利用毫米波雷达测试数据分析自振频率时,数据处理可采用波形分析法或频谱分析法。

8.4.3 利用毫米波雷达测试的数据分析结构自振频率时,应通过滤波的方法得到单一频率的波形,再进行波形分析。

8.4.4 波形分析法计算自振频率的主要步骤如下:

- a) 在动挠度时程曲线上截取合适的毫米波雷达动挠度数据。
- b) 按照JTG/T J21-01-2011中6.3.1的规定确定不同结构型式的桥梁需要分析频率的振动阶次。
- c) 根据桥梁结构需要分析的振动阶次以及对应的理论计算频率,选择合适的滤波器对振动信号进行滤波,得到仅含待分析频率的单一信号的振动波形。
- d) 在仅含待分析频率的单一振动信号提取多个周期波形的起、止时间坐标,计算待分析阶次的自振频率。

8.4.5 利用频谱分析法分析桥梁结构的自振频率时,应结合桥梁结构理论计算结果确定结构自振频率。

8.4.6 频谱分析的主要步骤如下:

- a) 在动挠度时程曲线上截取合适的毫米波雷达动挠度数据。
- b) 对截取的动挠度时程数据进行傅里叶变换,得到振动信号的频谱曲线。
- c) 根据桥梁结构理论计算的自振频率来从频谱信息中确定不同振动阶次对应的自振频率。

8.4.7 采用毫米波雷达测试数据分析桥梁结构阻尼比时,可采用波形分析法或半功率带宽法。

8.4.8 利用波形分析法分析桥梁结构的阻尼比时,应根据待分析阶次的振动频率对振动信号进行滤波,得到仅含该阶振动的单一频率振动信号,按照振动幅值的对数衰减法计算阻尼比。

8.4.9 波形分析法得到含有自振频率单一振动信号的时程曲线,按照动挠度振动幅值对数衰减的方法计算桥梁结构的阻尼比,见公式(1)。

$$D = \frac{1}{2\pi n} \ln \frac{A_i - A'_i}{A_{i+n} - A'_{i+n}} \quad (1)$$

式中：D——阻尼比；

n——参与计算的波的个数，不小于3；

A_i ——参与计算的首波峰值；

A'_i ——参与计算的首波波谷值；

A_{i+n} ——参与计算的尾波峰值；

A'_{i+n} ——参与计算的尾波波谷值。

8.4.10 利用半功率带宽法分析桥梁结构阻尼比的步骤如下：

a) 在动挠度时程曲线上截取合适的毫米波雷达动挠度数据，数据应截取车辆加载或其他激振方法激振后自由衰减的部分。

b) 对选取的动挠度测试数据进行傅里叶变换，得到振动的频谱图。

c) 根据桥梁结构理论计算的结果，结合待分析阶次阻尼在频谱曲线上对应的自振频率；

d) 在频谱图中利用半功率带宽法计算分析对应振动阶次的阻尼比。

8.4.11 冲击系数可以根据 JTG/T J21-01-2015 中 6.6.5 的规定利用单波形来计算，也可以采用推荐的多个波形来加权计算。

8.4.12 利用单波形进行冲击系数分析时，其计算按照 JTG/T J21-01-2015 中 6.6.5 的规定计算。

8.4.13 当采用单个波形对冲击系数计算误差较大时，可以对多个波形进行计算，采用加权的方法进行计算，计算图示见图 6，计算公式见公式 (2)。

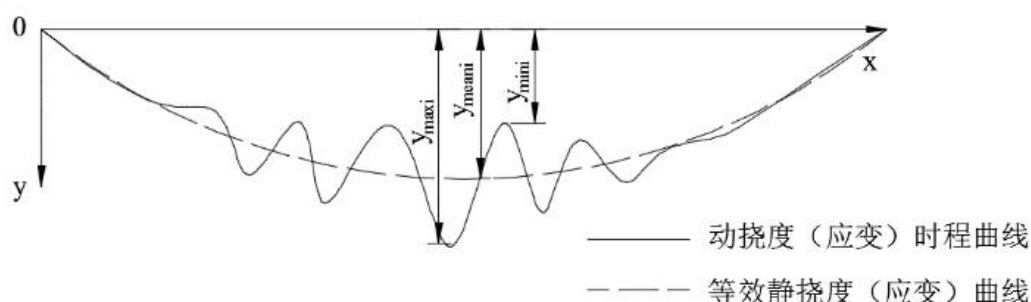


图 6 加权平均法计算冲击系数示意图

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i y_{\text{mean}i}}{\sum_{i=1}^n y_{\text{mean}i}} \quad (2)$$

式中： $y_{\text{mean}i}$ ——为动力效应时程曲线上第*i*个冲击系数 μ_i 处所对应的局部静态效应值（或局部最大值与最小值的平均值）；

n——时程曲线上出现的有规律的波形峰值个数。

9 检测报告编制

9.1 检测报告应结论明确、用词规范、文字简练，对于容易混淆的术语和概念，以文字解释或图例、

图像、图表说明。

9.2 毫米波雷达桥梁变形检测报告应包括但不限于以下内容：

- 1、项目概况；
- 2、桥梁结构变形检测目的、范围、内容、依据和方法；
- 3、检测人员；
- 4、毫米波雷达设备及其工作原理；
- 5、数据的处理与分析；
- 6、检测数据和结果的汇总，包括典型的测点布置、挠度时程和频谱图、检测结果汇总图表等；
- 7、检测结果的评定、结论及建议。

9.3 检测结果的评定应按照 JTG/T J21-01、CJJ/T 233 执行。

附录 A

(资料性)

毫米波雷达干涉测量原理

A. 1 雷达的基本概念

雷达意为“无线电探测与测距”，因此雷达是一种无线电装置，它通过无线电磁波来检测目标的位置。从广义上讲，雷达就是测量物体的位置和运动参数，以及确定物体的特性。由雷达硬件装置向天线输出的电磁波能通过天线向目标物体发射，再通过天线将目标物体反射回来的反射能量再传送给雷达的硬件装置。

A. 2 毫米波雷达

毫米波雷达是一种工作在毫米波段的雷达，通常毫米波是在30~300 GHz的频率范围内（波长为1至10 mm）的电磁波。毫米波雷达测试形变属于非接触式测量，同传统的测量方式相比具有非接触、远距离、全天候等特点，能够实现对结构物的多目标进行同步、实时动态的测量。毫米波雷达目前在桥梁索力、静载试验、动载试验以及桥梁健康监测等领域进行了广泛的应用。

A. 3 毫米波雷达的信号调制

毫米波雷达测量实现变形的高精度测量主要基于雷达信号调制技术、干涉测量技术和合成孔径雷达技术三项关键技术。

A. 3. 1 信号调制技术

毫米波雷达在微变形测试中主要采用频率步进连续波（Stepped Frequency Continuous Waveform, SFCW）和线性调频连续波（Linear Frequency Modulation Continuous Wave, LFM CW）两种调频技术。意大利IDS公司的IBIS系统是采用频率步进连续波（调频技术，国外和国内一些厂家的微波雷达或毫米波雷达有的采用线性调频连续波（Linear Frequency Modulation Continuous Wave, LFM CW）的调频技术。

a) 频率步进连续波

利用步进频率连续波和微波干涉技术，可以获得高时空分辨率、高精度的视线方向的一维形变图。在微波测量中，为了达到更高的测距精度，同时减小了对发射设备的要求，IBIS系统采用了步进频率连续波信号调频技术。步进频率连续波信号是一种由 N 个相继的频率序列组成的信号，它是根据 Δf 的步长而改变的，在图A. 1中可以看出，该信号具有一定的阶梯式变化。

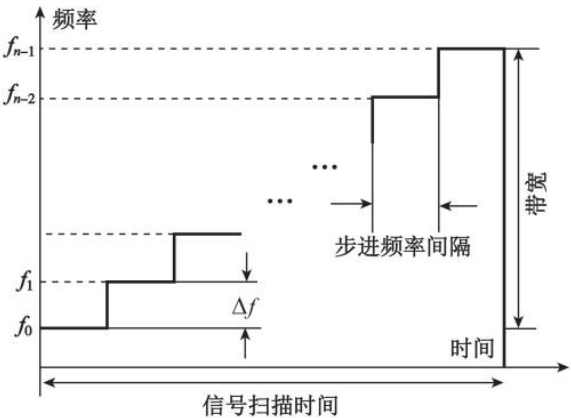


图 A. 1 步进频率连续波信号调制

b) 线性调频连续波

毫米波雷达采用LFMCW (Linear Frequency Modulated Continuous Wave, 线性调频连续波) 信号体制, 雷达发射信号为线性锯齿扫频信号, 反射回波信号也为线性锯齿信号, 见图A. 2。从图中可以看到, 除了在各个时间点的工作频率不同外, 雷达的发射信号和雷达回波的形式基本上是一致的。类似于“多普勒-脉冲”雷达的测距基本原理, 目标反射回波会有一定的延时, 但线性调频连续波 (LFMCW) 信号系统不再使用极易出错的数据—时间差来测距, 而是使用易于计算的频率差来计算距离。雷达发射频率的变化已知, 即按一定速度由低到高的频率差和单向不停地扫测, 图中“锯齿”形频率发生变化。

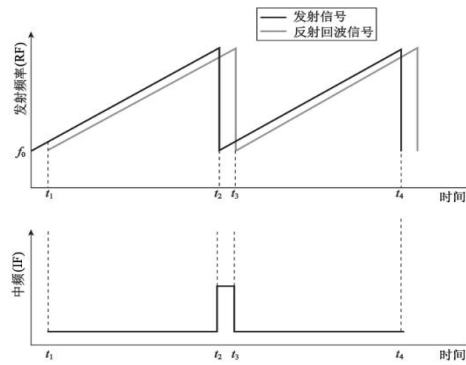


图 A. 1 线性调频连续波信号及回波信号

A. 4 雷达的干涉测量原理

微波干涉测量是由托马斯·杨提出的一种双缝干涉法, 在200多年的发展过程中得到了广泛的应用。毫米波雷达采用干涉技术可以准确地检测目标的位移, 这种方法主要是利用雷达的相位改变来完成。每次测量时, 传感器都包含了幅度和相位两个方面的信息。雷达首次发射、接收后, 得到了目标的位置及相位信息。在此基础上, 对目标进行了第二次发射与接收, 得到了目标第二次测量时的位置和相位信息, 并利用它的相位差来确定目标准确的位移变化量, 见图A. 3。

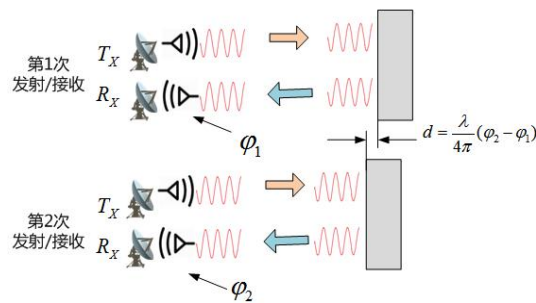


图 A. 3 雷达干涉测量原理

雷达传感器对监测目标区域进行连续动态的采集, 通过相邻采样信号间的干涉测量来提取形变相位, 进而计算形变量。雷达视线向 (light of sight, LOS) 的形变量 d_{los} 与形变相位 $\Delta\phi$ 满足以下关系:

$$d_{los} = -(\lambda/4\pi)\Delta\phi \quad (\text{A. 1})$$

式中： d_{los} —雷达视线方向上的变形量；
 λ —电磁波的波长；
 $\Delta\phi$ —两次测量形变的相位差。

附录 B

(资料性)

雷达法桥梁挠度计算方法

B.1 概述

毫米波雷达变形干涉测量原理可知，其测试的变形是在雷达波束角范围内目标体相对于雷达视线方向的变形量 d_{los} 。而桥梁挠度测试通常是测试桥梁在竖向方向的变形。采用毫米波雷达测试时得到的雷达视线方向的形变量需要通过数据的处理计算才能得到桥梁的挠度。测试时挠度换算应根据形变量的大小，采用合理的计算方法才能得到桥梁准确的桥梁挠度测试值。对于中小跨径桥梁，桥梁在荷载作用下的桥梁竖向挠度值相对较小，可以采用直接投影法进行直接计算；对于大跨径桥梁如斜拉桥和悬索桥，桥梁进行静载试验或正常运营过程中桥梁挠度值可能达到几十厘米，需要利用变形前后的几何关系进行计算；利用直达波测试的桥梁挠度值则不需要转换，雷达视线方向的形变量就是桥梁的挠度值。

B.2 直接投影法

采用毫米波雷达测试桥梁挠度时，通常将雷达测试设备安放在桥梁正下方的位置，为得到桥梁测试位置处的较强的电磁波反射信号需要在测试位置安装角反射器。当桥梁挠度值较小时，可以将视线方向的形变量 d_{los} 直接作为垂向形变 d 在雷达视线向的分量进行计算，由于垂直方向的形变量相对较小能保证换算的精度，见图B.1。

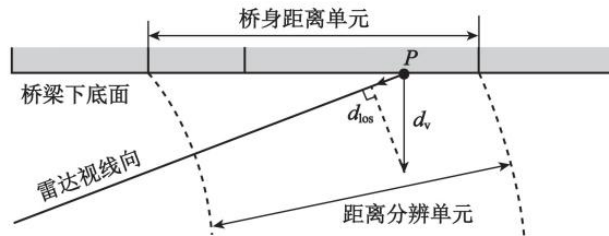


图 B.1

采用直接投影法计算桥梁在竖直方向的挠度值，见公式 (B.1)：

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi \frac{R}{h} \quad (\text{B.1})$$

上式中： λ 为雷达电磁波的波长； φ 为两次干涉测量的相位差； R 为观测点和雷达在雷达视线向上的距离； h 为观测点距雷达在垂直方向的距离。

B.3 几何关系法

当采用毫米波雷达测试桥梁竖向变形相对较大时，采用直接投影法计算的精度可能相对较低，则需要利用两次测量的几何关系进行计算才能保证挠度测试结果的精度。当桥梁挠度测点 P（见图B.2）位于某距离分辨单元内，且为该单元内最强的反射点。桥梁发生竖向形变发生后，P 点变动至 P_1 位置，

由于桥身水平向形变微小， P_1 点仍处于原分辨单元内，而雷达视线距离由 R 变为 R_1 ，其差值即是雷达探测到的形变值 d_{los} 。

由于桥梁测点水平方向的水平位移可以忽略不计，设雷达观测点到桥身下边缘的高度为 h ，那么 P_1 点处的雷达视线向形变 d_{los} 和垂向形变 d_v 满足下式：

$$(R - d_{los})^2 - (h - d_v)^2 = R^2 - h^2 \quad (\text{B. 2})$$

采用雷达对大跨径桥梁挠度较大时计算桥梁挠度时，按上式进行计算才能确保挠度值计算的精度。

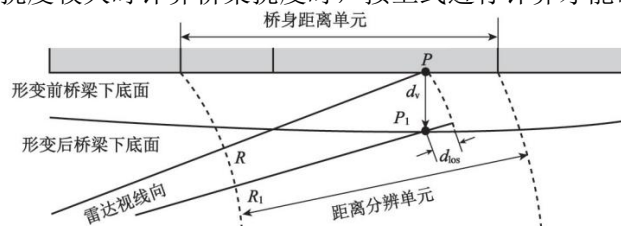


图 B. 2 雷达法测试桥梁挠度几何关系图

B. 4 直达波法

利用角反射器对桥梁挠度进行测试时，桥梁挠度值需要按照直接投影法将视线方向的变形量转换成桥梁挠度值（见图B. 3），此时桥梁挠度值按式（B. 1）计算。

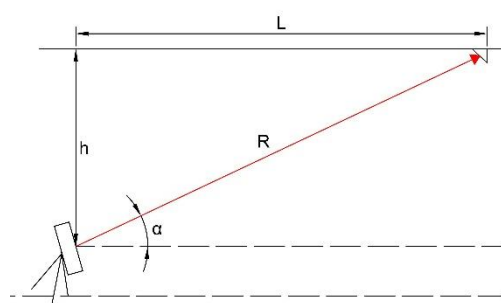


图 B. 3 挠度测试几何关系图

当雷达安放在桥梁测点正下方时，即 $\alpha = 90^\circ$ ，则雷达视线方向的形变与桥梁挠度值相同。由于 $h = R$ ，因此（B. 1）则可以改写成下式：

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi \quad (\text{B. 3})$$

利用直达波进行桥梁挠度测试时，可以在测点不安装角反射直接利用上式计算桥梁挠度值。

参考文献

- [1] 邵泽龙, 张祥坤, 李迎松, 任佳伟. 基于微波干涉雷达的悬索桥振动监测[J]. 现代电子技术, 2019, 42(16): 140-143+148. DOI:10.16652/j.issn.1004-373x. 2019. 16. 032.
- [2] 肖辉春, 周文欣, 肖涵. X 波段线性调频连续波雷达低相噪 PLL 源设计[J]. 信息通信, 2018, 32(03): 16-18.
- [3] 刁建鹏, 黄声享. 地面干涉雷达在建筑变形监测中的应用[J]. 测绘通报, 2009, 55(09): 45-47.
- [4] 张麟兮. 雷达目标散射特性测试与成像诊断 [M]. 北京:中国宇航出版社. 2009.
- [5] 徐亚明, 王鹏, 周校, 邢诚. 地基干涉雷达 IBIS-S 桥梁动态形变监测研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(07): 845-849. DOI:10.13203/j.whugis2013.07.001.
- [6] 希尔艾力·艾尔肯, 黄其欢, 马合木江·艾合买提, 董文明. IBIS-S 变形监测信号静杂波相位分量去除方法研究[J]. 工程勘察, 2017, 45(11): 49-52.
- [7] 徐亚明, 王鹏, 周校, 邢诚. 地基干涉雷达 IBIS-S 桥梁动态形变监测研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(07): 845-849. DOI:10.13203/j.whugis2013.07.001.
- [8] 朱尚清, 胡建新, 刘越等. 毫米波雷达在桥梁检测与监测中的应用[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.