DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.036

基于非接触式微波测量的斜拉索振动测试研究

李海红[1]，王金权[2]

（1.同济大学，上海市 200092；2.宁波杭州湾大桥发展有限公司）

摘要：非接触式微波测量是一种采用雷达遥感和差分干涉测量的新型测试技术，它可以应用于结构的振动测量和微变形测量。该文对使用非接触式微波测试原理对斜拉索振动和索力测量进行了研究，测试结果表明：微波测量索力的精度不仅满足要求，且具有效率高、受干扰小等优点，可广泛应用于斜拉索的索力测试中。

关键词：非接触；微波测量；斜拉索；振动

斜拉索是斜拉桥非常重要的受力构件，它的振动特性对索力测试、拉索减振等工作都非常重要。以索力测试为例，传统的频率法是将传感器固定在拉索上，测试其振动特性，得到其频率，该方法虽然准确，但随着桥梁结构的快速发展，其应用越发凸显局限性。非接触式微波测量是一种全新的斜拉索振动测试方法，它是通过发射和接收雷达波来测量拉索的频率等振动特性参数，从而得出拉索索力等。其优点主要有：① 不需要在斜拉索上固定任何测试设备，属于非接触式测量，有较强的适用性；② 可同时测量多根拉索，极大地提高了测试效率；③ 测试设备简便，占用场地小，极大降低安全风险。

国外一些学者对该方法进行了研究，C.Gentile 等在西班牙的某桥使用该方法准确测试了悬索桥吊索的振动频率，而在中国的斜拉索测试应用领域，其研究相对较少。该文通过一个平行钢丝斜拉索和一个平行钢绞线斜拉索，对非接触式微波测量拉索索力进行对比分析研究。

1 微波测量振动原理

微波测量振动是基于雷达遥感和差分干涉测量技术，具体而言是指通过向被测量物体发射高频率雷达波，获得距离方向上的频率信息，再通过差分干涉测量技术，计算分析物体不同时刻反射回波的相位差，从而求出连续时间段内物体表面的高频微小形变信息，即物体振动的时域信号，再通过傅里叶变换，获得物体振动的频域信号，根据振动频谱分析获得基频结果。

雷达遥感技术目前主要采用步进频率连续波技术，该技术的基本原理是：雷达的距离分辨率 Δr 与单个雷达脉冲的持续时间 t 有以下关系：

$$\Delta r=\frac{ct}{2} \tag{1}$$

式中：c 为光速。

可以看出：要增加雷达的距离分辨率，可以减少 t。但减小 t，会造成脉冲波的频率增加，使得作用距离变短。为了保持一定的距离分辨率和一定的作用距离，采取步进频率连续波的发射方式，它是由一系列线性跳变的连续信号构成的，通过对其相干处理，可以得到合成的一维高分辨距离向影像。该方法具有在获得高分辨力的同时，降低对数字信号处理机的瞬时带宽要求的优点。

差分干涉测量技术是利用不同时刻物体回波信号的相位差来计算物体在雷达距离方向上的变形量 d。

$$d=\frac{\lambda}{4\pi}\Delta\varphi \tag{2}$$

式中：λ 为波长；$\Delta\varphi$ 为相位差。

微波测量振动系统主要技术参数如表 1 所示。

2 拉索索力测试原理

斜拉索索力测试目前基本采用频谱法进行。拉索的振动微分方程为：

$$EI\frac{\partial^4 y}{\partial x^4}-P\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}+m\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}=0 \tag{3}$$

式中：EI 为拉索的弯曲刚度；P 为索力；t 为时间；y 为拉索的振幅；x 为拉索的纵向坐标；m 为拉索单位长

收稿日期：2018－12－17

作者简介：李海红，女，大学本科，助理工程师，E－mail：466872121@qq.com

表 1　微波测量振动系统技术参数

技术参数	单位	技术指标
工作频段	GHz	24
检测范围	m/(°)	1 000/30
距离分辨率	m	0.25
采样频率	Hz	≤200
分辨率	mm	0.01
重量	kg	3.5
功耗	W	22
待机时间	h	4

度的质量。

假定索的两端为铰支，由式(3)可得：

$$P=4ml^2f^2/K^2-K^2\pi^2EI/l^2 \tag{4}$$

由于斜拉索细长比较小，在索力测试中，其弯曲刚度可以忽略不计，由此可得：

$$P=4ml^2f^2/K^2 \tag{5}$$

式(5)为斜拉索索力的计算公式，可以看出：频率 f 是斜拉索的索力计算中的重要参数，通过测试斜拉索的振动频率，即可换算得出斜拉索的索力；通过上述微波测量振动系统同样也可以测试出频率，并计算出斜拉索索力。

3　实桥测试及分析

3.1　测试概况

在两座斜拉桥上采用微波振动测量进行了测试，并使用加速度传感器的频率法进行了对比，对微波振动测量方法的测试结果精度、数据规律性、测试效率进行了分析比较。

测试时，将仪器架设在桥面通视条件较好的位置，向多根斜拉索发射微波，每根斜拉索会返回一个强反射信号和散射信号，根据强反射信号可确定斜拉索与测试仪器的距离，从而判断测试的斜拉索索号，由此找出对应斜拉索的散射信号，将振动时域信号通过傅里叶变换转化为频域信号，得到每根斜拉索的振动频谱图。

两座测试桥梁概况如表 2 所示。

表 2　测试桥梁概况

结构形式	跨径布置/m	斜拉索数量/根	斜拉索长度/m	类型
双塔钢箱梁斜拉桥	50+180+610+180+50	192	91～330	平行钢丝
三塔钢桁梁斜拉桥	90+160+2×616+160+90	264	33～337	平行钢绞线

3.2　测试结果分析

3.2.1　平行钢丝索测试结果分析

表 3 为双塔斜拉桥使用微波测量和加速度传感器两种方法的测试结果对比，由于数据量较大，此处列出典型拉索的测试结果，其中 ES1 为离主塔最近的斜拉索，长度 91 m，ES24 为离主塔最远的斜拉索，长度 330 m，ES21 和 ES3 为测试结果正负偏差最大的两根索。两种方法测试结果的偏差为－0.59%～6.36%，测试结果吻合性较好。

表 3　典型斜拉索测试结果对比

索号	加速度传感器测试基频/Hz	微波测量基频/Hz	偏差/%
ES24	0.467	0.468	0.21
ES21	0.471	0.503	6.36
ES3	1.195	1.188	－0.59
ES1	1.357	1.356	－0.07

表 4 为全桥斜拉索两种方法测试偏差范围统计，全桥 192 根斜拉索中，偏差在 1%以内占 42%，偏差 1%～5%占 51%，偏差 5%以上占 7%，表明微波测量与加速度传感器测试得到的结果绝大多数都能吻合，且偏差在 5%以上的，其偏差范围最大也仅 6.36%，说明微波测量方法结果可靠。

表 4　全桥斜拉索两种方法测试偏差范围统计

偏差	斜拉索数量/根	占总数量百分比/%
1%以内	78	42
1%～5%	99	51
5%以上	13	7

图 1 为典型斜拉索微波测量振动频谱图，和加速度传感器频率图一样，微波测量振动的频谱图符合斜拉索频率的等间距分布规律，峰值明显，容易判别。同时图 2 的斜拉索基频分布图表明：实测结果基本遵循了斜拉索索长越长、基频越低的规律。

3.2.2　平行钢绞线测试结果分析

表 5 为三塔斜拉桥使用微波测量和加速度传感器频率法两种方法的测试结果，两种方法测试结果的偏差为－1.58%～6.50%，测试结果吻合性较好。

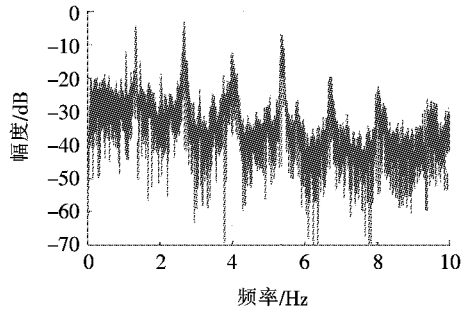

图 1 典型斜拉索微波测量振动频谱图

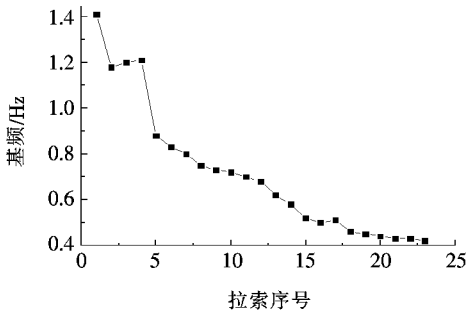

图 2 斜拉索基频分布图

表 5 典型斜拉索测试结果对比

索号	加速度传感器测试基频/Hz	微波测量基频/Hz	偏差/%
WS22	0.412	0.413	0.24
WS17	0.475	0.508	6.50
WS6	0.709	0.698	−1.58
WS1	0.821	0.817	−0.49

表 6 为 132 根斜拉索采用两种方法测试偏差范围统计，132 根斜拉索中，偏差在 1%以内占 48%，偏差 1%～5%占 46%，偏差 5%以上占 6%，表明微波测量与加速度传感器测试得到的结果绝大多数都能吻合，偏差在 5%以上的，其偏差范围最大也仅 6.50%，微波测量方法结果可靠。

表 6 全桥斜拉索两种方法测试偏差范围统计

偏差	斜拉索数量/根	占总数量百分比/%
偏差 1%以内	63	48
偏差 1%～5%	61	46
偏差 5%以上	8	6

3.3 测试效率分析

非接触式微波测量方法可同时测量多根拉索的索力，图 3 为雷达接收到的多根斜拉索的回波信号散射图，其中可以清楚看到多根斜拉索的振动信号，表明该方法用于同时测量多根斜拉索是可行的。

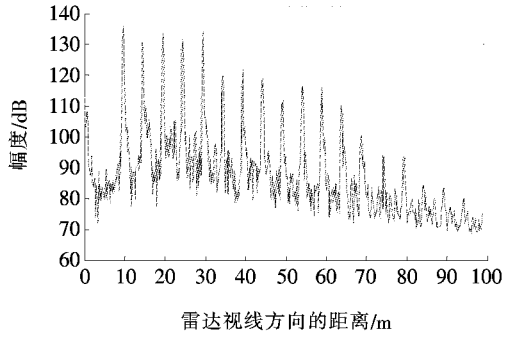

图 3 多根斜拉索雷达信号散射图

表 7 比较了微波测量方法和传统的加速度传感器的效率，微波测量方法相较传统方法在时效性上有着巨大的优势。

表 7 两种方法测试效率比较

项目		测试时间/h	测试人员数量/人
双塔钢箱梁斜拉桥	微波测量	6	2
	加速度传感器	96	4
三塔钢桁梁斜拉桥	微波测量	4	2
	加速度传感器	72	4

4 结论

（1）非接触式微波测量可应用于斜拉索索力的频率测试中，其测试结果与加速度传感器频率测试结果吻合性较高。

（2）非接触式微波测量可同时测量多根拉索振动信号，极大提高了测试效率；安全、便捷，设备轻便，极大降低了测试过程中的安全风险，有着较高的应用推广价值。

参考文献：

[1] 张卓杰，王荣辉，甄晓霞.平行钢绞线斜拉索索力测试方法评价[J].桥梁建设，2016(2).

[2] 闫维明，许晓建，李勇.基于振动频率法和优化功能的斜拉索索力测试研究[J].公路交通科技，2015(11).

[3] 希尔艾力·艾尔肯，黄其欢，岳建平.基于地基雷达的斜拉索环境振动测试研究[J].工程勘察，2017(1).

[4] C.Gentile，G.Luzi.Ambient Vibration Testing of the Ampostacable − Uspended Bridge by Microwave Remote Sensing，Proceedings of the 9th lntemational Conference on Structural Dynamics，2014.