

重庆市工程建设标准

建筑结构动力特性及动力响应
检测技术标准

Technical specification for inspecting dynamic characteristics
and dynamic response of building structures

DBJ50/T-415-2022

主编单位:重庆市建筑科学研究院有限公司

重庆建工第十一建筑工程有限责任公司

批准部门:重庆市住房和城乡建设委员会

施行日期:2022年08月01日

2022 重 庆

重庆工程建筑

重庆市住房和城乡建设委员会文件

渝建标〔2022〕16号

重庆市住房和城乡建设委员会
关于发布《建筑结构动力特性及动力响应
检测技术标准》的通知

各区县(自治县)住房城乡建委,两江新区、重庆高新区、重庆经开区、万盛经开区、双桥经开区建设局,有关单位:

现批准《建筑结构动力特性及动力响应检测技术标准》为我市工程建设地方标准,编号为 DBJ50/T-415-2022,自 2022 年 8 月 1 日起施行。

本标准由重庆市住房和城乡建设委员会负责管理,重庆市建筑科学研究院有限公司负责具体技术内容解释。

重庆市住房和城乡建设委员会

2022 年 5 月 23 日

重庆工程建筑

前 言

本标准是根据应重庆市城乡建设委员会《关于下达 2017 年度重庆市工程建设标准制订(修订)项目计划(第一批)的通知》渝建【2017】451 号文的要求,标准编制组进行了广泛调查研究,认真总结实践经验,参考国内外有关先进标准,并在广泛征求意见的基础上,编制了本标准。

本标准共 7 章和 2 个附录,主要技术内容是:1 总则;2 术语和符号;3 基本规定;4 检测仪器设备;5 建筑结构动力特性检测;6 建筑结构动力响应检测;7 检测报告的编写;附录等。

本标准由重庆市城乡建设委员会负责管理,重庆市建筑科学研究院有限公司和重庆建工第十一建筑工程有限责任公司负责具体技术内容的解释。在执行过程中如有意见或建议,请随时反馈至重庆市建筑科学研究院有限公司(地址:重庆市长江二路 221 号,邮编:400042)。

本标准主编单位、参编单位、主要起草人和审查专家：

主编单位：重庆市建筑科学研究院有限公司

重庆建工第十一建筑工程有限责任公司

参编单位：重庆市建设工程质量检验检测中心有限公司

重庆设计集团有限公司

重庆市市政设计研究院有限公司

重庆市住房和城乡建设工程质量总站

重庆市渝北区建设工程质量检测所

健研检测集团重庆有限公司

重庆建工住宅建设有限公司

中冶建工集团有限公司

中冶检测认证(重庆)有限公司

重庆建筑工程职业学院

重庆万美建设工程有限公司

重庆华硕建设有限公司

重庆对外建设(集团)有限公司

主要起草人：钱少华 张京街 罗天菊 高峰 陈放

张超 田彬元 池海 刘新健 李英成

何依芮 杨娟 邱颜亮 张昆 王洁

税国利 范亚丽 李婷 王波 代金礼

廖姜 李昉罡 苏定勤 晏维江 张百乐

张意 常仕文 赵文莲 张银会 彭红

胡友聪 张学勇 王飞 戴雷

主要审查人：孔凡林 王自强 刘大超 陈益杰 孟祥栋

胡明健 廖新雪

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	基本规定	5
4	检测仪器设备	8
4.1	动态数据采集系统技术要求	8
4.2	动态数据采集设备维护	9
5	建筑结构动力特性检测	10
5.1	一般规定	10
5.2	检测方法	10
5.3	检测要求	11
5.4	检测数据的分析与判定	12
6	建筑结构动力响应检测	14
6.1	一般规定	14
6.2	检测方法	14
6.3	检测数据的分析与判定	16
7	检测报告的编写	18
附录 A	建筑结构动力检测原始记录表	19
附录 B	振动信号特征值	20
	本标准用词说明	23
	引用标准目录	24

条文说明 25
制订说明 27

重庆工程变更

Contents

1	General provisions	1
2	Terms and symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	3
3	Basic requirements	5
4	Testing instruments and equipments	8
4.1	Technical requirements of dynamic data acquisition system	8
4.2	Dynamic data acquisition equipment maintenance	9
5	Dynamic characteristic test of building structure	10
5.1	General equipments	10
5.2	Test methods	10
5.3	Test demands	11
5.4	Analysis and determination of test dates	12
6	Dynamic response detection of building structure	14
6.1	General equipments	14
6.2	Test methods	14
6.3	Analysis and determination of test datas	16
7	Requirement of testing report	18
Appendix A	The original record table of dynamic test for building structure	19
Appendix B	Eigen values of vibration signals	20

Explanation of wording in this standard 24
List of quoted standards 24
Explanation of provisions 25

重慶工程學院

1 总 则

- 1.1 为规范建筑结构动力特性和动力响应的检测方法和程序,保证检测方法的科学性、提高测试结果的可靠性,制订本标准。
- 1.2 本标准适用于新建及既有建筑结构的动力特性检测,以及不同振源对建筑结构振动影响的检测及评估。
- 1.3 建筑结构振动测试应委托具有相应检测资质的检测机构进行;检测人员应进行专业技术培训并具有相应的检测能力。
- 1.4 按本标准进行建筑结构振动检测时,除应遵守本标准的规定外,尚应符合国家与重庆市现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 动力特性 dynamic characteristic

表示结构固有特性的基本物理量,如固有频率、阻尼比和振型等。

2.1.2 动力响应 dynamic response

表示结构受动力输入作用时的输出,如位移响应、速度响应、加速度响应等。

2.1.3 频率特性 frequency characteristic

表示结构振动频率的基本物理量,如幅频特性和相频特性等。

2.1.4 频率范围 frequency range

传感器或测振系统正常工作的频带,在这个频带内输入信号频率的变化不会引起它们的灵敏度发生超出指定的百分数的变化。

2.1.5 相位差 phase difference

不同信号内相同频率对应两谐波分量之间的相位角之差。

2.1.6 信噪比 signal to noise ratio

表示放大器的输出信号的电压与同时输出的噪声电压的比,常用分贝数 dB 表示。

2.1.7 灵敏度 sensitivity

表示传感器信号输出幅值与被测信号的输入幅值之比。

2.1.8 动态范围 dynamic range

可测量的最大振动量与最小振动量之比,常用分贝数 dB 表示。

2.1.9 环境激励法 ambient excitation method

利用结构周围环境随机激励引起的振动进而来识别结构动力特性的一种方法。

2.1.10 奈奎斯特频率 nyquist frequency

为防止信号混叠需要定义最小采样频率,即 1/2 倍的采样频率。

2.2 符号

t —— 时间

T —— 周期

f —— 频率

ω —— 圆频率

a —— 加速度

v —— 速度

y —— 位移

k —— 刚度

m —— 质量

ζ —— 阻尼比

μ_x —— 均值

ϕ_x^2 —— 均方值

σ_x^2 —— 方差

$R_x(\tau)$ —— 自相关函数

$G_x(f)$ —— 自功率谱函数

$R_{x,y}(\tau)$ —— 互相关函数

$G_{xy}(f)$ —— 互功率谱函数

γ^2 —— 相干函数

φ —— 相位角

$H(\omega)$ —— 频响应函数

dB ——分贝

FFT ——快速傅里叶变换



3 基本规定

3.1 建筑结构动力特性及动力响应测试之前应编制检测方案，方案编制前应进行建筑结构的状况调查和资料收集，宜包括下列内容：

- 1 工程场地勘察报告、工程结构设计、施工及竣工资料；
- 2 建筑物实际使用条件和内外环境，包括建筑外观、平面布置、构件尺寸、使用荷载，建筑结构的性能状况等；
- 3 建筑场地及其邻近的振源分布状况；
- 4 已确定振源的振动属性及传播路径；
- 5 历年来结构检测、养护及维修资料。

3.2 建筑结构动力特性及动力响应检测方案宜包括下列内容：

- 1 检测目的；
- 2 检测依据；
- 3 检测设备及要求；
- 4 建筑结构的状况调查和资料收集；
- 4 检测内容及具体方法；
- 5 测点布置方案；
- 6 安全技术措施。

3.3 下列情况下建筑结构的检测方案应进行专门技术论证：

- 1 现行《高层建筑混凝土结构技术标准》规定的大跨度结构、复杂、混合结构以及平、立面不规则结构；
- 2 特殊及结构形式复杂的结构，尤其是古建筑结构；
- 3 遭受偶然作用（如地震、爆炸、火灾等）需进行安全评估的
建筑结构；
- 4 采用新型材料的建筑结构；
- 5 检测方案复杂或其他需要论证的建筑结构。

3.4 检测测点位置应符合下列规定：

- 1 应反映检测对象的实际状态及变化趋势；
- 2 测点的位置、数量应根据结构类型、设计要求、检测项目及结构分析结果确定；
- 3 测点的数量和布置范围应有冗余量，重要部位应增加测点；
- 4 可利用结构的对称性，减少测点布置数量；
- 5 应便于检测设备的安装、测读、维护和替代，并尽量减少对被检测对象正常使用的干扰；
- 6 测点的布置应尽量远离可能存在的偶发外部振源，避免干扰信号对测试结果的干扰。

3.5 检测仪器选择与检查应符合下列条件：

- 1 选择检测设备应满足测量精度要求；
- 2 检测设备应满足试验需要的量程和动态范围；
- 3 试验检测设备应经过计量检定/校准；
- 4 试验之前应对测量传感器和数据采集系统等进行检定校准。

3.6 建筑结构动力特性及动力响应检测应按照以下步骤进行：

- 1 根据检测对象及目的，选择合适的测量参数；
- 2 根据结构类别、结构形式和检测要求布置测点，测点的布置应符合第 5 章和第 6 章的相关要求；
- 3 根据检测要求选择并安装传感器。
- 4 连接导线，对整个测量系统进行调试；
- 5 合理设置测试参数，包括采样频率、采集时间、采集系统放大倍数、传感器灵敏度等；
- 6 根据检测目的和要求选择合适的激励方法；
- 7 采集数据并保存。

3.7 现场检测时，检测设备和仪器均应有防风、防雨雪、防晒、防振、防雷电、接地等保护措施；检测场地应避免外界干扰振源，测

点应避开地下管道、电磁场、噪声、射线等；对于爆炸、冲击等高危振动测试，应当有专门的防护技术措施。

3.8 现场检测记录应包括下列内容：

- 1 检测仪器：名称、型号、管理编号；
- 2 振源类型、触发时间、持续时间、外部干扰异常等记录；
- 3 结构几何特征、测点布置情况；
- 4 实测电子数据以及相关影像资料；
- 5 检测过程中的情况说明；
- 6 检测人员、校核人员、检测日期、检测单位。

4 检测仪器设备

4.1 动态数据采集系统技术要求

4.1.1 动态数据采集系统由激振系统、传感器、信号放大调理器、动态信号采集分析系统等组成。

4.1.2 强迫振动宜选择体积小、重量轻的激振设备,机械式激振设备应具备无极调频功能。

4.1.3 传感器的性能应符合下列要求:

1 传感器的实用量程宜为其满量程的80%左右,且最大工作状态点不应该超过满量程;

2 传感器应具有良好的线性度;

3 传感器应具有良好且稳定的灵敏度及信噪比;

4 传感器应具有良好的分辨率,且不低于检测结构参数的最小单位量级;

5 传感器应具有良好且稳定的重复性;

6 传感器的漂移应控制在允许范围内。

4.1.4 信号放大调理器应符合下列要求:

1 放大器应采用带低通滤波功能的多通道放大器;

2 多通道放大器各通道间应无串扰、相位一致、频响范围相同。

4.1.5 数据采集与记录应符合下列要求:

1 数据采集与记录宜采用多通道数字采集和存储系统;

2 A/D转换器位数应不小于16位,宜采用24bit或以上A/D转换器;

3 系统准确度不应低于0.5%。

4.2 动态数据采集设备维护

- 4.2.1 测试系统在投入使用前应进行校准。
- 4.2.2 在环境规定条件的现场使用,应注意避免酸、碱、盐、雾、雨淋及过强的幅射场、电场、磁场。
- 4.2.3 存放时,应将仪器盖好,防止灰尘污染。

5 建筑结构动力特性检测

5.1 一般规定

5.1.1 建筑结构动力特性检测参数包括结构的固有频率、阻尼比、模态振型等。

5.1.2 建筑结构动力特性,可根据结构的特点选择下列检测方法:

1 结构的基本振型,宜选用环境振动法、初位移法等方法进行检测;

2 结构平面有多个振型时,宜选用稳态正弦波激振法进行检测;

3 结构空间振型或扭转振型,宜选用多振源相位控制同步的稳态正弦波激振法或初速度法进行检测;

4 评估结构的抗震性能时,宜选用随机激振法或人工爆破模拟地震法。

5.1.3 在检测前,应对结构动力特性进行预估,以便选择相应的检测设备和检测方法。

5.2 检测方法

5.2.1 传感器的安装应遵循以下原则:

1 传感器的灵敏主轴方向应与测试的振动方向一致;

2 传感器附近应防磁防局部振动;

3 传感器应平稳地固定在平坦、坚实的基面上。

5.2.2 测点的布置应遵循以下原则:

1 平移振动的测点应布置在建筑物的刚度中心位置;

2 扭转振动的测点应布置在建筑物的 X 或 Y 坐标最远端,即建筑物的两侧,在一个楼层中成双成对的布置测点;

3 在结构突变处,宜布置一定数量的测点,如突出屋面的塔楼,突出屋面的高耸结构,旋转餐厅等;

4 测点布置应避开振型节点,并可充分显示结构的模态振型;

6 在建筑物基础两侧,宜布置竖向振动的测点,以观察基础是纯粹的垂直振动还是绕着某一位置上下转动;

7 在振动强烈的部位,宜布置测点。

5.2.3 古建筑结构动力特性检测的测点布置宜遵循以下要求:

1 测砖石结构的水平振动,测点宜布置在各层平面刚度中心或其附近;

2 测木结构的水平振动,测点宜布置在中跨的各层柱顶和柱底。

5.2.4 应根据检测目的,选择合适的检测方向。传感器宜沿结构纵向、横向和竖向三个方向布置。

5.2.5 应根据所需频率范围设置低滤波频率和采样频率,采样频率设定应符合奈奎斯特定理要求,宜为被测结构最高目标频率的 3~5 倍。

5.2.6 数据采集时,应注意对数据平稳性的要求。

5.3 检测要求

5.3.1 环境振动法的检测应符合下列规定:

1 检测时应避免或减小环境及系统干扰;

2 当检测振型和频率时,检测时间不应少于 5min,当检测阻尼时,检测时间不应少于 30min;

3 当需要多次检测时,每次检测应至少保留一个共同的参考点。

5.3.2 机械激振振动法的检测应符合下列规定：

- 1 选择激振器的位置应正确,选择的激振力应合理;
- 2 当激振器安装在楼板上时,应避免楼板的竖向自振频率和刚度的影响,激振力传递途径应明确合理;
- 3 激振检测中宜采用扫频方式寻找共振频率;
- 4 在共振频率附近检测时,应保证半功率带宽内的测点不少于5个频率。

5.3.3 施加初位移的自由振动检测应符合下列规定：

- 1 拉线点的位置应根据检测目的进行布置;
- 2 拉线与被测结构的连接部分应具有可靠传力的能力;
- 3 每次检测应记录拉力数值和拉力与结构轴线间的夹角;
- 4 量取波值时,不得取用突断衰减的最初2个波;
- 5 检测时不应使被测结构出现裂缝。

5.4 检测数据的分析与判定

5.4.1 在数据分析前,应对数据做以下预处理：

- 1 信号标定和变换。
- 2 消除趋势项。
- 3 重采样和滤波处理。

5.4.2 采用快速傅里叶变换(FFT)进行频谱分析前,宜对数据做以下处理：

- 1 为消除旁瓣干扰,信号应加窗函数处理;
- 2 对于环境激励信号,宜选全程数据进行频域平均,平均次数不宜小于32次,且重叠率宜大于1/2。

5.4.3 建筑结构动力参数的识别方法可分为频域识别法、时域识别法和时频域识别方法。

5.4.4 当采用频域峰值法确定结构动力特性时,应满足以下要求：

1 固有频率的判断:

- (1)FFT 自功率谱(幅值谱)的峰值处;
- (2)频响函数分析中,自振频率处相干函数接近等于 1;
- (3)对于相同方向的多个测点,各测点在同振频率处具有近似同相位或反相位的特点。

2 阻尼比在频率不密集时可按照半功率带宽法和 对数衰减法进行确定。

3 振型函数应该按照下列规定进行确定:

当各个模态的自振频率较分散,且结构阻尼比较小时,振型之比宜由下式得出:

$$\frac{G_{aa\,pk}(\omega_i)}{G_{aa\,pp}(\omega_i)} = \frac{\varphi_{ki}}{\varphi_{pi}} \quad (5.3.1)$$

式中: φ_{ki} 、 φ_{pi} 分别为自振频率对应的不同自由度的振型函数值,其正负号可由互功率谱在 ω_i 处的相位来确定。

5.4.5 当各个模态的自振频率较密集时,宜采用随机子空间识别方法(SSD)进行结构参数识别。

5.4.6 对于复杂结构,可采用时频域识别方法,包括小波分析法(WL)和基于希尔伯特黄变换(HHT)的模态参数识别方法。

6 建筑结构动力响应检测

6.1 一般规定

6.1.1 建筑结构动力响应检测前应了解振源类型及其特性,振动对建筑结构的影响。

6.1.2 建筑结构动力响应,应在振动源发出振动时进行检测。在进行动力响应检测时,宜测定振动源发出振动的特性。

6.1.3 动力响应检测过程中,宜根据不同的振源类型,测量不同的参数,具体见下表:

表 6.1.3 各振源类型对应的测量参数

振源类型	测量参数
交通运输	速度
爆破	速度
打桩	速度
室内机械	速度或加速度
室外机械	速度或加速度
人的活动	速度或加速度

6.1.4 动力响应检测前,应估计被测量参数的最大值,再调整分析仪器的量程,最大值宜落在量程的 $1/2 \sim 2/3$ 之间,以获得最大信噪比。

6.1.5 动力响应试验数据的采集记录,应保证所采集的信息波形不失真。

6.2 检测方法

6.2.1 传感器的安装应遵循以下原则:

- 1 传感器的灵敏主轴方向应与测试的振动方向一致；
- 2 传感器附近应防磁防局部振动；
- 3 传感器应平稳地固定在平坦、坚实的基面上。

6.2.2 外部地面振动源的振动特性检测,宜按现行国家标准《城市区域环境振动测量方法》GB 10071 的有关规定执行,其地面测点之一宜布置在离既有建筑 5m 范围内的平坦坚实地面上;当需要判定振动源相对准确的位置时,宜根据既有建筑与初步判定外界振动源的相对位置,增设布置近点和远点测点各一处。

6.2.3 对于偶发且已判定位置的外部地面振动源,可采取模拟振动或重复发振的方式。

6.2.4 测点的布置应遵循以下原则:

- 1 对于建筑结构内部的设备设施和撞击等振动源,动力响应的测点应布置在振动源附近;

- 2 对于外部地面振动源,动力响应的测点宜布置在建筑的首层,其余楼层可逐层或隔层布置测点;当有地下室时,宜在最底层的地下室底板布置测点;

- 3 各楼层的动力响应检测,宜在顺振源的方向上布置若干个测点;

- 4 结构构件的动位移、动应变的测点,宜布置在变形大、受力不利、动力效应大的控制位置上;

- 5 结构构件的振动加速度或速度动力响应测点,宜布置在 1/4 跨、跨中、3/4 跨位置等关键截面,应避开主振型节点。

6.2.5 受风或爆炸冲击波等影响的建筑结构,宜在迎向气流方向的轻型围护结构上布置动力响应的测点。

6.2.6 古建筑结构动力响应检测的测点布置应遵循以下要求:

- 1 测砖石结构的水平响应,测点应沿两个主轴方向分别布置在承重结构的最高处;

- 2 测木结构的水平响应,测点应布置在两个主轴中跨的顶层柱顶;

- 3 测石窟的响应,测点应布置在窟顶的径向、切向和竖向。
- 6.2.7 动力响应的各测点,宜布置两个水平方向和竖向的振动测试传感器。

6.3 检测数据的分析与判定

- 6.3.1 对采集数据按照本标准第 5.3.1 条进行信号预处理。
- 6.3.2 采集的数据应根据振动的类型选择不同的评价量:
 - 1 连续振动:取测试区间内响应信号幅值的平均值作为评价量;
 - 2 瞬态振动:取单次响应最大幅值或多次响应最大幅值的算术平均值作为评价量。
- 6.3.3 采集的数据宜进行频谱分析,并判断是否产生共振。
- 6.3.4 评定振动对建筑结构的影响,可按下列步骤进行:
 - 1 调查建筑和振源的状况;
 - 2 检测建筑结构的动力响应;
 - 3 确定建筑结构的容许评价量;
 - 4 综合分析评定。
- 6.3.5 振动源的振动与建筑结构的动力响应吻合时,可判定该振动源是造成建筑结构振动或晃动的因素。
- 6.3.6 结构动力响应的检测结果可用于振动影响的评价,评价方法应符合相应的标准、规范:
 - 1 各种振源引起的振动对建筑结构的影响应符合现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868 的规定;
 - 2 住宅建筑(含商住楼)室内振动限值应符合现行国家标准《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》GB/T 50355 的规定;
 - 3 建筑楼盖舒适度的振动限值应符合现行国家标准《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》JGJ/T 441 的规定;

4 城市各类区域铅垂向振级标准值应符合现行国家标准《城市区域环境振动标准》GB 10070 的规定；

5 爆破振动对建筑结构的影响应符合现行国家标准《爆破安全规程》GB 6722 的规定；

6 工业振动对古建筑结构的影响,应符合现行国家标准《古建筑防工业振动技术规范》GB/T 50452 的规定。

7 检测报告的编写

7.1 检测报告应至少包括以下内容：

- 1 工程概况：工程依据、目的和要求；地理位置和地形条件；开竣工日期、实际完成工作量等；
- 2 技术措施：检测仪器与检测方法；
- 3 现场检测情况：日期、天气、异常现象、环境情况和明显缺陷情况；
- 4 检测结果；
- 5 检测结论与建议；
- 6 附图与附表；
- 7 检测、审核、批准人员的签名。

7.2 检测报告应结论准确、用词规范、文字精炼。

附录 A 建筑结构动力检测原始记录表

工程项目					
检测依据					
振 源					
检测仪器		检测环境			
检测工况		测点数量			
检测地点		检测时间			
采集仪通道号	测点编号	传感器编号	检测位置	文件名	备注
测点位置示意图					
数据文件名及存储位置					
检测人员		校核人员		检测日期	

附录 B 振动信号特征值

B.1 均值

在时间历程 T 内的振动信号 $x(t)$ 所有值得算术平均值。即

$$\mu_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

离散量表达形式为

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

B.2 均方差

在时间历程 T 内, 振动信号 $x(t)$ 平方值的算术平均值, 即

$$\phi_x^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$$

离散量表达形式为

$$\phi_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2$$

B.3 方差

表示振动信号偏离均值的平方的平均值, 即

$$\sigma_x^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu_x]^2 dt$$

离散量表达形式为

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2$$

B.4 自相关函数

振动信号的自相关函数是描述一个时刻 t 的数据值与另一个时刻 $t + \tau$ 的数据值之间的依赖关系, 即

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t + \tau) dt$$

B.5 功率谱密度函数

功率谱是用以表示振动信号在某频段的能量成分,振动信号在时间历程 T 内的平均功率为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$$

振动信号在单位带宽 Δf 内的平均功率称为自功率谱密度函数 $G_x(f)$, 即

$$G_x(f) = \frac{1}{\Delta f} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t, f, \Delta f) dt$$

B.6 互相关函数

互相关函数 R_{xy} 是表示两个振动信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 相关性的统计量。其定义为

$$R_{x,y}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt$$

B.7 互功率谱密度函数

两组振动信号的互功率谱密度函数定义为相对应的互相关函数的傅里叶变换:?

$$G_{xy}(f) = \frac{1}{\Delta f} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t, f, \Delta f) y(t, f, \Delta f) dt$$

或者

$$G_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} G_{xy}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega$$

互相关函数不是偶函数,一般是复数形式,即

$$G_{xy}(f) = E_{xy}(f) - jQ_{xy}(f)$$

式中,实部 $E_{xy}(f)$ 称为共谱密度函数;虚部 $Q_{xy}(f)$ 称为重谱密度函数。

B.8 相干函数

相干函数也是一个在频域中描述两个振动信号相关特性的函数。其定义为

$$\gamma_{xy}^2(\omega) = \frac{|G_{xy}(\omega)|^2}{G_{xx}(\omega)G_{yy}(\omega)}$$

B.9 频响函数

设无阻尼振动系统受简谐激励 $f(t) = Fe^{j\omega t}$, 其中 F 为激励幅值阵列, n 阶, 则系统稳态位移响应 $x = Xe^{j\omega t}$, 其中 x 为稳态位移响应幅值阵列, n 阶。

根据式

$$(K - \omega^2 M)X = F$$

可得

$$H(\omega) = (K - \omega^2 M)^{-1}$$

称为无阻尼系统的频响函数矩阵, $n \times n$ 阶, 是实对称矩阵。

无阻尼振动系统频响函数的模态展式为

$$H(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i \varphi_i^T}{k_i - \omega^2 m_i}$$

B.10 脉冲响应函数

频响函数矩阵模态展式的傅氏逆变换即脉冲响应函数矩阵, 为 $n \times n$ 阶

实对称矩阵, 即

$$h(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i \varphi_i^T}{m_i \omega_{oi}} \sin \omega_{oi} t \quad (t \geq 0)$$

其中第 e 行第 f 列元素表示仅在第 f 个物理坐标作用单位脉冲力, 在第 e 个物理坐标产生的脉冲响应

$$h_{ef}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\omega_{oi} \omega_{oi}^T}{m_i \omega_{oi}} \sin \omega_{oi} t \quad (t \geq 0)$$

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1) 表示很严格,非这样做不可的用词:

正面词采用“必须”;反面词采用“严禁”。

2) 表示严格,在正常情况下均应这样做的用词:

正面词采用“应”;反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示稍有选择,在条件许可时首先这样做的用词:

正面词用“宜”或“可”;反面词采用“不宜”。

4) 表示有选择,在一定条件下可以这样做的:采用“可”。

2 条文中指定按其他有关标准、规范执行时,写法为“应符合的规定”。非必须按所指定的标准、规范或其他规定执行时,写法为“可参照”。

引用标准目录

- 1 《机械振动与冲击加速度计的机械安装》GB/T 14412
- 2 《机械振动与冲击 建筑物的振动 振动测量及其对建筑物影响的评价指南》GB/T 14124
- 3 《建筑工程容许振动标准》GB 50868
- 4 《古建筑防工业振动技术规范》GB/T 50452
- 5 《城市区域环境振动标准》GB 10070
- 6 《爆破安全规程》GB 6722
- 7 《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》GB/T 50355
- 8 《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》JGJ/T 441
- 9 《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344

重庆市工程建设标准

建筑结构动力特性及动力响应
检测技术标准

DBJ50/T-415-2022

条文说明

2022 重 庆

重庆工程建筑

制订说明

本标准是编制组对我市主要建筑结构检测单位在建筑结构动力特性及动力响应方面的试验检测情况进行了调查研究,收集了大量资料,总结了建筑结构动力特性及动力响应检测技术的研究成果和实践经验,同时参考借鉴了国内相关技术标准,通过广泛征求意见,反复修改后制订的。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定,《建筑结构动力特性及动力响应检测技术标准》编制组按章、节、条顺序编制了本标准条文说明,对条文规定的目的、依据,以及执行中需注意的有关事项进行了说明。

重庆工程建筑

目次

1	总则	31
3	基本规定	32
4	仪器设备	33
4.1	传感器的选择与布置	33
4.2	动态数据采集系统技术要求	33
5	建筑结构动力特性检测	34
5.1	一般规定	34
5.2	检测方法	34
5.3	检测要求	35
5.4	检测数据的分析与判定	35
6	建筑结构动力响应检测	39
6.1	一般规定	39
6.2	检测方法	69

重庆工程建筑

1 总 则

1.1 本条阐述了标准的编制目的。制定本标准的目的是为了规范动力检测这一新型检测技术在工程质量检测中的程序和方法,提高检测结果的可靠性,从而更好地促进该技术的应用和推广。

1.2 本条规定了标准的适用范围及意义。建筑结构动力特性包括固有频率、阻尼比和振型等,不同振源包括交通运输、爆破、冲击、施工振动等。构筑物的动力特性及动力响应也可参考此规程。

1.3 本条规定了动力检测的执行机构,以及对具体检测人员的要求。

1.4 阐述了本标准与其他相关标准的关系。应遵守协调一致、互相补充的原则,即无论是本标准还是其他相关标准,在进行动测法检测时都应遵守,不得违反。

3 基本规定

- 3.1 规定了制定检测方案前应该搜集的资料和状况调查。
- 3.2 规定了制定检测方案应该包括的内容。
- 3.4 规定了检测测点的布置原则。
- 3.6 规定了动力检测的一般步骤。在检测工作开始前应明确检测目的,用以确定测量仪器的精度和可靠性;同时,确定检测人员、成本、检测时间安排等。再根据测量的环境条件、振动的频率范围、幅值、动态范围以及理论方向的估计,合理选择测量设备,要求小信号不失真、大信号不超量程。

测点的布置和安装可参考 5.2.1、5.2.2、6.2.1 和 6.2.4 条。在数据的调试过程中,若记录曲线出现漂移情况,可从以下几点查找原因:检查电源是否正常、检查测线接头是否包好、检查振动传感器是否与被测点固定好、检查输入插座是否可靠。

传感器的具体安装方式可参考《机械振动与冲击加速度计的机械安装》GB/T 14412。

- 3.8 实测电子数据应保存完整,采用光盘等形式按相关规定存档,相关影像资料包括如现场图片、录像和高速摄像等。

4 仪器设备

4.1 传感器的选择与布置

4.1.1 ~ 4.1.3 规定了传感器的选型、性能要求。目的是为了
避免测量时可能因传感器的选择不当产生的误差。

4.2 动态数据采集系统技术要求

4.2.2 ~ 4.2.3 规定了动测设备采集系统的基本要求。目的是
为了避免测量时可能产生的误差。若检测仪器对测试系统质量
和刚度有明显影响,可通过修正方法予以消除。

5 建筑结构动力特性检测

5.1 一般规定

5.1.1 动力特性检测结果可与结构计算结果或原有试验结果对比,为建筑结构设计、抗震验算及安全性评价提供基本技术资料。主要应用于:验证理论计算;分析结构的振动现象,如扭转振动、鞭梢效应等;寻找减小振动的途径。

5.1.2 建筑结构动力特性检测一般采用环境激励法,对于仅需要获得结构基本模态的,可采用初始位移法、重物撞击法等方法。如结构模态密集,或者结构特别重要其条件许可,则可以采用稳态正弦激振方法,手段和适用范围可参照国家现行标准《建筑抗震试验方法规程》JGJ101。对于单点激励法测试结果,必要时可采用多点激励法进行校核。对于大型复杂结构宜采用多点激励方法。

5.2 检测方法

5.2.1 动力特性检测时,传感器测试方向如果安装不一致,其感应的振动分量就是会有差异,影响分析结果。传感器如果安装在一些容易产生局部振动的构件上,局部振动的信号会被感应进去,给分析带来麻烦。测量记录时,传感器不能随意翻看和移动。传感器附近不能有强磁场的干扰,以免影响传感器的正常工作。振动传感器的固定,常有三种方法:螺栓固定、磁力底座固定、黏接方式固定。

5.2.2 现场试验时,如刚度中心不易确定,平面位置的几何中心容易找到,传感器可放至几何中心。建筑物的扭转振动是整个建

筑物绕着结构的扭转中心在转动,因此越远离扭转中心,振动也就越大。结构在某一部位断面突然变化,引起刚度突然变化,或者质量变化,都有可能使结构的振动形态发生变化,故结构突变处应安放一定数量的传感器。

5.2.5 采样定理又称奈奎斯特定理,奈奎斯特频率 f_s 必须严格大于信号包含的最高频率的 2 倍。如果信号中包含的最高频率恰好为奈奎斯特频率,那么在这个频率分量上的采样会因为相位模糊而有无穷多种该频率的正弦波对应于离散采样,因此不足以重建为原来的连续时间信号。

5.3 检测要求

5.3.2 激振器的位置和激振力可引起被测结构的振型畸变。

5.4 检测数据的分析与判定

5.4.1 本条规定了对数据进行预处理的方法:

1 信号标定和变换。采集得到的数据首先需要进行标定变换,使之还原成具有相应物理单位的数字信号数据。

2 消除趋势项。采集到的振动信号数据,由于可能存在放大器随温度变化产生的零点漂移、传感器频率范围外低频性能的不稳定以及传感器周围的环境干扰等因素,大多都含有一定的趋势项;趋势项的存在,会使时域中的相关分析或频域中的功率谱分析产生很大的误差,甚至使低频谱完全失去真实性,所以必须将其消除。

3 重采样和滤波处理。通过数学运算从所采集的离散信号中选取感兴趣部分的信号,并通过数字滤波进行信号过滤;滤波的主要作用有滤除信号中的噪声或虚假成分、提高信噪比、平滑数据、抑制干扰、分离频率等。滤波器按频率范围分类有低通滤

波器(LPF)、高通滤波器(HPF)、带通滤波器(BPF)、带阻滤波器(BSF)和梳状滤波器;按照数学运算方式考虑,数字滤波又分为时域滤波方法和频域滤波方法。

5.4.3 本条规定为常用结构动力参数的识别方法。工程结构动力参数的识别方法具体有以下几种:

1 结构模态参数的频域识别法

结构模态参数的频域识别法,是基于结构传递函数或频率响应(简称频响函数)在频域内识别结构的固有频率、阻尼比和振型等模态参数的方法。频域法可分为单模态识别法、多模态识别法、分区模态识别法和频域总体识别法。对小阻尼且各阶模态耦合较小的系统,用单模态识别法可达到满意的识别精度。对模态耦合较大的系统,必须用多模态识别法。对于单自由度体系而言,宜采用幅值法、分量法以及导纳圆法;对于多自由度体系,宜采用 SISO 法和 SIMO 法。频域法的最大优点是利用频域平均技术,最大限度地抑制了噪声影响,使模态定阶问题容易解决,但也存在若干不足。

2 结构模态参数的时域识别法

结构模态参数的时域识别法是指在时间域内识别结构模态参数的方法。结构时域模态参数识别方法的研究与应用比频域方法要晚一些,是近年来随着计算机技术的发展而逐步发展起来的。时域法可以克服频域法的一些缺陷,特别是对大型复杂结构受到风、浪及大地环境激励的作用,它们在工作中承受的荷载很难测量,但响应信号很容易测得,直接利用响应的时域信号进行参数识别无疑是很有意义的。由于时域法参数识别技术只需要响应的时域信号,从而减少了激励设备,大大节省了测试时间与费用,这些都是频域法所不具有的优点。但同时由于不使用平均技术,因而分析信号中包含噪声干扰,所识别的模态中除系统模态外,还包含噪声模态。

如何区分和剔除噪声模态,一直是时域法中的重要课题。

3 时频域识别方法

实际工程中的很多环境激励是非平稳的随机过程,处理这种非平稳的时变信号需要能同时在时、频两域进行局部分析的方法和技术。联合时频域方法既有频域法的优点又有时域法的优点,既利用了直观的频率分布信息,又利用了包含丰富结构信息的时程响应数据。联合时频域方法将结构响应在时-频两域展开,有利于识别非线性响应结构的特征,是一种很有前途的动力学系统辨识方法。

基于小波变换以及基于希尔伯特黄变换(HHT)的模态参数识别方法是两种主要的模态参数时频域方法,后者需要与经验模态分解(Empirical Mode Decomposition,简称EMD)联合使用来识别模态参数,而EMD技术尚有许多问题需要解决。

基于小波变化或希尔伯特黄变换的联合时频域方法在处理非平稳激励下的模态参数识别方面得到了广泛的应用。基于小波的结构模态参数识别技术将信号变换到时-频域,这有利于识别结构的动态特征参数频率、阻尼和振型。可参考的结构模态参数识别方法及特点详下表:

表 5.4-1 参考的结构模态参数识别方法及特点

类型	激励方式	方法	特点
时域方法	人工激励	单参考点复指数法(SRCE)	不受阻尼大小、模态密集程度和噪声干扰影响
	随机激励	随机子空间法(SSI)	基于线性系统离散状态空间方程的识别方法,适用于平稳激励,对输出噪声有一定的抗干扰能力,计算量大
		特征系统实现法(ERA)	计算量小,识别精度高

续表 5.4-1

类型	激励方式	方法	特点
频域方法	人工激励	分量估计法	简单方便, 识别精度有限
		Levy 法	识别精度高, 计算量大
		最小二乘圆拟合法	基于图解法, 精度不高
		最小二乘复频域法 (LSCF)	基于频响数据, 可宽频带识别, 可识别密集模态、大阻尼结构
		分区模态综合法	适用于较大型结构
	随机激励	峰值拾取法	操作简单、识别速度快, 但难以识别密集模态, 阻尼比识别精度不高
		频域分解法 (FDD)	可以识别密集模态, 不能识别阻尼
		增强频域分解法 (EFDD)	对 FDD 方法的补充, 可以识别阻尼比
时频域方法	随机激励	小波分析	适用于非稳定信号
		HHT 变换	分辨率高, 可处理一类非线性问题

6 建筑结构动力响应检测

6.1 一般规定

6.1.1 规定了测试结果应包括的内容。不同振源类型其结构响应的特征可以参考《机械振动与冲击对建筑物振动影响的测量和评价基本方法及使用导则》GB/T14124。

6.2 检测方法

6.2.4 一般至少布置 4 个测点以上,才可以体现振动衰减的大致规律。当存在多个振动源时,应考虑它们之间的相互作用,即从距离、相位差等因素考虑振动源之间的影响。必要时,需要考虑大型设备与结构之间的动力相互作用。当振源为动力机器基础时,应将传感器置于沿振动波传播方向测试的基础轴线边缘上;当振源为公路交通车辆时可将传感器置于行车道沿外 0.5m 处,并沿振动传播方向布置;当振源为铁路交通车辆时可将传感器置于距铁路轨外 0.5m 处,并沿振动传播方向布置;当振源为锤击预制桩时可将传感器置于距桩边 0.3~0.5m 处,并沿振动传播方向布置。

重庆工程建筑