

山东省工程建设标准

DB

DB37/T 5025-2014

J 12891-2014

建筑结构动力性能检测技术规程

Technical Specification for Testing Dynamic

Performance of Building Structure

2014-12-15 发布

2015-01-01 实施

山东省住房和城乡建设厅

山东省质量技术监督局

联合发布

山东省工程建设标准

建筑结构动力性能检测技术规程

Technical Specification for Testing Dynamic

Performance of Building Structure

DB37/T 5025-2014

住房和城乡建设部备案号：**J 12891-2014**

批准部门：山东省住房和城乡建设厅
山东省质量技术监督局

实施日期：2015 年 01 月 01 日

青 岛 出 版 集 团

2014 济 南

前 言

为规范建筑结构动力性能检测方法，综合评估新建及既有结构在偶然作用下（地震、爆破、撞击等）及长期服役中的可靠性，编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国家相关标准和国外先进技术，并在广泛征求意见的基础上，编制了本规程。

本规程的主要技术内容包括：1.总则；2.术语和符号；3.基本规定；4.仪器设备；5.动力特性检测；6.动力响应检测；7.检测报告。

本规程由山东省住房和城乡建设厅负责管理，由青岛理工大学(临沂)负责具体内容的解释。

请各单位在执行本规程过程中，注意积累资料，总结经验，随时将有关的意见和建议反馈给青岛理工大学(地址：山东省临沂市费县东外环路 1 号，邮编 273400，电话 0539-5797018，E-mail: yangtzezh@163.com)，以供今后修订时参考。

本规程主编单位、参编单位、主要起草人和主要审查人员：

主编单位：青岛理工大学

参编单位：山东省建筑科学研究院

山东省建设工程质量监督总站
山东锦华建设集团有限公司
山东金城建设有限公司
山东省交通科学研究所
山东建筑大学
日照天泰建筑安装工程有限公司
临沂市建设安全工程质量监督管理处
日照市建设工程质量安全监督站
枣庄市建筑工程质量监督站
枣庄市建筑设计研究院
淄博市建筑工程质量安全监督站
济南市工程质量与安全生产监督站
青岛市建筑工程质量监督站
东营市建设工程质量监督站
青岛理工大学工程质量检测鉴定中心
诸城市建设工程质量安全监督站
高密市建设工程质量安全监督站

费县建筑工程质量监督站

费县交通运输局

主要起草人员：苗吉军 崔士起 赵长勇 宋瑞文 司纪伟
成 勃 刘才玮 张 毅 李旺新 赵考重
丁兆良 邵鲁江 丁元余 金跃衡 张 斌
王 伟 宋 超 刘延春 申永俊 王 晓
钟 军 孙 栋 马全安 荆兆晖 李进国
于素健 黄庆华 臧运锋 王 涛 兰可喜
秦国栋 朱传明 贾剑林 刘运生 贾世波
刘炳强 高子连 马 冲 吕俊利 王 涛
张树立 刘玮玮 尹晓文 吴 霞

主要审查人员：张伟平 张毅刚 陆伟东 王海超 徐承强
杨建平 王中民 李尊强 张在春 徐新生
张维汇 董全文 肖华锋

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.....	4
3.1	检测方案.....	4
3.2	检测步骤.....	4
3.3	检测环境.....	5
4	仪器设备.....	6
4.1	检测系统技术要求.....	6
4.2	检测系统维护.....	7
5	动力特性检测.....	8
5.1	一般规定.....	8
5.2	检测方法.....	9
5.3	数据处理.....	10
6	动力响应检测.....	12
6.1	一般规定.....	12
6.2	检测方法.....	13
6.3	数据处理.....	13

6.4 检测评定.....	14
7 检测报告.....	15
附录 A 检测记录表.....	16
本规程用词说明.....	17
引用标准名录.....	18
附：条文说明.....	20

1 总 则

1.0.1 为了统一建筑结构动力性能检测方法，使其技术先进、数据可靠，提高检测结果的可比性，保证检测结果的可靠性，制订本规程。

1.0.2 本规程适用于新建及既有建筑结构的动力性能检测。

1.0.3 建筑结构动力性能检测应委托具有相应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工作能力。

1.0.4 按本规程进行动力性能检测时，除应遵守本规程的规定外，尚应符合国家现行的有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 动力特性 dynamic characteristic

反映结构本身所固有的振动特性，如自振频率、阻尼比及振型等。

2.1.2 动力响应 dynamic response

反映结构受动力作用时的响应，如位移、速度、加速度等。

2.1.3 脉动法 pulsating method

利用结构周围环境激励引起的振动进而识别结构动力性能的一种方法。

2.1.4 人工激励法 artificial excitation method

通过某种激振装置对结构施加激励进而识别结构动力性能的一种方法。

2.1.5 频响范围 frequency response 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。

2.1.6 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。

2.1.7 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。

2.1.8 振动加速度级 vibration acceleration level

以分贝计，是加速度与基准加速度之比的以 10 为底的对数乘以 20。

2.2 符 号

f ——自振频率

FFT ——快速傅里叶变换(*Fast Fourier Transform*)

$G_x(f)$ ——自功率谱函数

$G_{xy}(f)$ ——互功率谱函数

PSD ——功率谱密度函数(*Power Spectral Density*)

ω ——自振圆频率

ϕ_{ni} ——振型函数值

3 基本规定

3.1 检测方案

3.1.1 现场检测前，宜准备下列资料：

- 1 所在场地的地质勘察资料；
- 2 工程的结构类型、高度、长度、宽度、建造年份等；
- 3 建筑结构设计文件；
- 4 建筑结构模态分析结果；
- 5 施工技术资料；
- 6 场地及其邻近的干扰振源资料。

3.1.2 检测方案宜包括下列内容：

- 1 检测目的；
- 2 检测设备及要求；
- 3 检测内容及方法；
- 4 测点布置方案。

3.2 检测步骤

3.2.1 建筑结构的动力性能检测宜按照下列步骤进行：

- 1 根据检测对象及目的，选择合适的检测参数及激励方式；
- 2 根据场地情况和检测要求布置测点；

- 3 仪器的安装与调试；
- 4 采集数据；
- 5 数据处理与分析；
- 6 撰写检测报告。

3.3 检测环境

3.3.1 检测场地宜避开外界干扰振源，测点宜避开地下管线、电磁场、噪声、射线等。

3.3.2 检测系统应具有防风、防雨雪、防晒、防摔等保护措施。

4 仪器设备

4.1 检测系统技术要求

4.1.1 检测系统可由激振系统、传感器、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，机械式激振设备宜具备无极调频功能。

4.1.3 传感器应采用低频传感器，频率下限应不大于 0.1Hz，频响曲线应平坦，传感器横向灵敏度宜小于 0.05。

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，低通滤波大于 24dB/oct。

2 放大器频响范围：低频应不大于 0.1Hz，高频应大于传感器上限频率，输入噪声水平应不大于 2 μ V。

3 多通道放大器要求各个通道间无串扰，各通道相位一致，频响范围相同。其振幅一致性偏差应小于 0.5dB@1kHz，相位一致性偏差应小于 0.2°@1kHz。

4.1.5 数据采集与记录宜采用多通道数字采集和存储系统，其 A/D 转换器位数应不小于 12 位，宜采用 16bit 以上 A/D 转换，幅度畸变宜小于 1.0dB。

4.1.6 信号分析仪应具有多通道，具有基本的数字信号处理功能，包括滤波、截取、时域幅值统计、*FFT*、自谱、互谱功能。

4.1.7 检测系统通频带应包括被测对象的目标频率，在应用时频响范围宜选择 0.1 Hz~100Hz，信噪比宜大于 80dB。

4.2 检测系统维护

4.2.1 检测系统应定期进行检定或校准。

4.2.2 检测设备应具有防尘、防潮性能，其工作温度宜在-10℃~50℃范围内。

4.2.3 检测设备在使用、运输和保管过程中应注意防水、防潮、防曝晒和防剧烈振动等。

5 动力特性检测

5.1 一般规定

5.1.1 下列建筑结构应进行动力特性检测：

- 1 超限高层建筑；
- 2 遭受偶然作用(如强震、爆炸、火灾、撞击等)需要进行安全评估的建筑；
- 3 进行健康监测的建筑结构。

5.1.2 下列建筑结构宜进行动力特性检测：

- 1 抗震设防烈度为 7 度(设计基本地震加速度为 0.15g)及以上地震区的高层建筑；
- 2 现行国家标准《混凝土结构设计规范》(GB50010)中要求进行竖向自振频率验算的混凝土楼盖；
- 3 大型公共建筑及历史保护建筑；
- 4 其他需要进行动力检测的结构。

5.1.3 动力特性检测方法宜采用脉动法或人工激励法。

5.1.4 动力特性检测应符合下列规定：

- 1 应同步测量多通道的时域曲线；
- 2 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；

3 采样时间：采用脉动法检测时应连续采集不少于 30min，宜设为 60min；采用人工激励法时应采集不少于 10 个完整波形；

4 结构动力特性检测应包括结构的固有频率、振型、阻尼比等参数。

5.1.5 检测记录内容可按照附录 A 执行。

5.2 检测方法

5.2.1 传感器的布置应遵循以下原则：

1 对于高层建筑结构，平动测点应布置在每层结构的质心附近，扭转测点应对称布置在楼层平面的尽端，层数较多时可参考模态分析结果选择适宜的楼层布置，且测点位置应避开人为干扰。

2 传感器布置的数量与拟测振型相关，测试前宜根据理论计算的振型合理布置测点。

3 当需要做多次测试时，可采用移动测点法测试。每次测试中应至少保留一个共同的参考测点，参考测点应选择在振动较大且远离振型的节点处。

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

5.2.3 根据目标频率范围设置低通滤波频率和采样频率。

5.2.4 数据采集时，应保证数据平稳。

5.3 数据处理

5.3.1 在数据分析前,宜采取下列措施对数据进行预处理:

- 1 标定;
- 2 消除趋势项;
- 3 平滑消噪;
- 4 滤波处理。

5.3.2 在采用快速傅里叶变换(FFT)进行频谱分析前,宜采取下列措施进行处理:

- 1 信号应加窗函数处理;
- 2 对于脉动信号,频域平均次数宜大于 32 次,且重叠系数宜大于 1/2;
- 3 采用功率谱峰值法进行分析时宜采用最大熵谱。

5.3.3 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法。

5.3.4 采用频域峰值方法确定结构动力特性应满足下列要求:

- 1 平均正则化功率谱应按照下列规定进行确定:

在测点较多的情况下,可以利用平均正则化功率谱来选取峰值以包含所有测点的功率谱密度信息,进行频率识别。按下式计算:

$$PSD(f_e) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \frac{PSD_i(f_e)}{\sum_{e=1}^n PSD_i(f_e)} \quad (5.3.3-1)$$

式中： f_e ——第 e 个频率；

PSD_i ——第 i 测点的功率谱密度函数；

l ——测点总数。

2 固有频率可采取下列方式进行判断：

1) 平均正则化功率谱(幅值谱)的最大峰值处；

2) 频响函数分析中，自振频率处相干函数近于 1；

3) 对于相同方向的多个测点，各测点在自振频率处具有近似同相位或反相位的特点。

3 阻尼比可按半功率带宽法、INV 阻尼计法或对数衰减法进行确定；

4 振型函数可按下式计算确定：

$$\frac{G_{aapk}(w_i)}{G_{aapp}(w_i)} = \frac{f_{ki}}{f_{pi}} \quad (5.3.3-2)$$

式中： ϕ_{ki} 、 ϕ_{pi} ——分别为第 i 阶自振圆频率 ω_i 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。

6 动力响应检测

6.1 一般规定

6.1.1 动力响应检测宜根据振源类型及其特性按表 6.1.1 确定测量参数。

表 6.1.1 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

6.1.2 动力响应检测应根据预估被测参数的最大值调整分析仪器的量程，宜使最大值落在量程的 $1/2 \sim 1/3$ 之间。

6.1.3 动力响应检测应根据振源类型选择不同频响范围的传感器。

6.1.4 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。

6.2 检测方法

6.2.1 测点布置应符合下列要求：

- 1 测点应根据振源的影响范围、传播方向及衰减大致规律确定。离振源近时测点间距小，离振源远时测点间距大；
- 2 测点宜布置在建筑物的不同高度，并同步测量；
- 3 测点宜在基础和室外地面同时布置，同步测量。

6.2.2 传感器的安装应符合下列要求：

- 1 传感器的灵敏度主轴方向应与测量的方向一致；
- 2 传感器应平稳地固定在平坦、坚实的基面上。

6.2.3 采集的数据应确保稳定，且不少于 20 个完整波形。

6.3 数据处理

6.3.1 采集的数据宜按本规程第 5.3.1 条进行预处理。

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：取单次响应的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 环境振动加速度级 VAL 通过下式确定：

$$VAL=20\lg(a/a_0)$$

式中： a ——振动加速度有效值(m/s^2)；

a_0 ——基准加速度， $a_0=10^{-6} \text{ m/s}^2$ 。

6.3.4 采集的数据宜进行频谱分析，并判断是否产生共振。

6.4 检测评定

6.4.1 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 计算或测试建筑结构的动力响应；
- 5 综合分析评定。

6.4.2 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。

6.4.3 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。

6.4.4 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。

6.4.5 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。

6.4.6 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

7.0.1 检测报告应包括下列内容：

- 1 工程概况：工程设计依据、目的和要求，地理位置、地形条件，开竣工日期等；
- 2 技术措施：作业的标准依据，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 检测结论与建议；
- 5 附图与附表；
- 6 主检、审核和批准人员的签名。

7.0.2 检测报告应结论准确、用词规范、文字简练，对于当事方容易混淆的术语和概念可书面予以解释。

附录 A 检测记录表

工程项目				
检测地点		检测时间		
测点个数		地面状况		
检测仪器			激振方式	
采集仪通道号	导线编号	传感器编号	检测位置/方向	备注
1				
2				
3				
4				
5				
6				
现场检测情况 (天气、异常现象、 环境情况和 明显缺陷情况)				
测点位置示意图				
检测单位				
检测人员		审核人员		

本规程用词说明

1 为了便于在执行本规程条文时区别对待,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”。

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”。

引用标准名录

- 1 《爆破安全规程》 GB 6722
- 2 《城市区域环境振动标准》 GB 10070
- 3 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
- 4 《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》 GB/T 50355
- 5 《古建筑防工业振动技术规范》 GB/T 50452
- 6 《建筑工程容许振动标准》 GB 50868

山东省工程建设标准

建筑结构动力性能检测技术规程

DBJ/T 5025-2014

J 12891-2014

条 文 说 明

目 次

1	总 则.....	22
3	基本规定.....	23
3.1	检测方案.....	23
3.2	基本规定.....	23
4	仪器设备.....	25
4.1	动力性能检测系统技术要求.....	25
4.2	设备维护.....	25
5	动力特性检测.....	26
5.1	一般规定.....	26
5.2	检测方法.....	27
5.3	数据处理.....	28
6	动力响应检测.....	38
6.1	一般规定.....	38
6.2	检测方法.....	38
6.3	数据处理.....	39
6.4	检测结果.....	40
7	检测报告.....	41

1 总 则

1.0.1 本条阐述了规程的编制目的。制定本规程的目的，是为了规范动力性能检测这一新兴检测方法在工程质量检测中的程序和方法，提高检测结果的可靠性，从而更好地促进该方法的应用和推广。

1.0.2 本条规定了规程的适用范围及意义。建筑结构动力性能包括固有频率、阻尼比和振型的测试及其在各种外部激励作用下的动力响应检测。构筑物的动力性能检测也可参考此规程。

1.0.3 本条规定了动力检测法的执行机构，以及对具体检测人员的要求。

1.0.4 阐述了本规程与其他相关标准的关系。应遵守协调一致、互相补充的原则，即无论是本规程还是其他相关标准，在进行动力性能检测时都应遵守，不得违反。

3 基本规定

3.1 检测方案

3.1.1、3.1.2 规定了制定检测方案前应该具有的资料及检测方案应该包括的内容。

3.2 检测步骤

3.2 本条规定了动力检测的一般步骤。一般情况下，在检测开始前需要有明确的检测目标，用以确定试验目的以及需要测量的物理量，包括要求的精度和可靠性。同时，还需要确定影响测量设备和测量技术选择的与仪器不相关的因素，包括测量人员的有效性、成本、测量需要的时间、时间安排表以及可行的数据分析、确认和显示技术。接下来要考虑的有测量的环境条件、振动的频率范围、幅值、动态范围以及理论方向的估计。需要这些信息作为选择合适测量设备的准则。根据检测要求选择并安装传感器，传感器的安装应与检测目的相一致；当对整个测量系统进行调试时，需注意连接导线(包括屏蔽线和接地线)的完好；合理设置检测参数，包括对采样频率、数据采集时间、数据采集系统放大倍数等参数进行设置。测点的布置可参考 5.2.1 条。在数据的调试过

程中，若记录曲线出现漂移情况，一般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。

4 仪器设备

4.1 动力性能检测系统技术要求

4.1.1~4.1.3 规定了动力性能检测设备的组成及基本要求，目的是为了
避免检测时可能产生的误差。低频传感器宜使用电磁式、
伺服式；放大器宜使用抗混淆滤波放大器。

4.1.2 本条中强迫振动的激振方式有：

1 张拉释放法：通过某种张拉装置使结构产生初始位移，然后迅速解除张拉，使结构产生自由振动。张拉释放法实质上是一种阶跃激励。

2 机械强迫振动法：通过机械装置使结构产生强迫振动。

3 火箭冲击法：采用火箭点燃后产生的冲击力使结构产生初始速度而自由振动，火箭加力法为脉冲激励。

4 撞击法：利用重锤敲击结构物所产生的冲量使结构产生初速度而引起自由振动，撞击法为脉冲激励。

4.2 设备维护

4.2.1~4.2.3 规定了动力性能检测系统在使用、运输和保管过程中的注意事项，是为了避免仪器损坏而给测量带来误差。

5 动力特性检测

5.1 一般规定

5.1.1 本条规定了应进行动力特性检测的建筑结构

1 超限高层建筑的定义详见二〇一〇年七月十六日住房和城乡建设部印发的《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》。

5.1.2 本条规定了宜进行动力特性检测的建筑结构

3 大型公共建筑一般指建筑面积 2 万平方米以上的办公建筑、商业建筑、旅游建筑、科教文卫建筑、通信建筑以及交通运输用房。

《建筑结构检测技术标准》(GB/T 50344-2004)规定：对于大型公共建筑和重要建筑宜在建筑工程竣工验收完成后，使用前和使用后分别进行一次动力测试，并宜在每隔十年左右再进行一次动力测试，对使用 30 年以上的建筑物宜 7 年左右再进行一次动力测试。这些测试应与工程竣工验收完成使用后的动力测试相比较，以确定建筑结构是否存在损伤及其损伤范围，为是否需要进行详细检测提供依据。

4 其他需要进行动力检测的情况，如：有干扰震源的建筑、

存在振动设备的工业厂房等。

5.1.3 动力特性检测结果可与结构计算结果、模型试验结果或原有检测结果进行对比，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。一般主要用于：修正理论计算；建筑结构健康监测评估；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。建筑结构动力特性检测一般采用环境激励法，根据结构形式的不同也可采用初始位移法、激振器激振法等。若结构模态密集，或者条件许可，可采用稳态正弦激振方法，手段和适用范围可参照《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101)。对于大型复杂结构，宜采用多点激励方法。

5.1.4 本条规定了建筑结构动力特性检测的具体要求

2 采样定理又称奈奎斯特定理，奈奎斯特频率 $f_s/2$ 必须严格大于信号包含的最高频率。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。

3 采样时间根据《建筑结构检测技术标准》(GB/T 50344-2004) 确定。

5.2 检测方法

5.2.1 本条规定了传感器的布置原则

1 当楼层较多或者传感器数量不足时,可选择合适的楼层进行布置,如隔层或者隔几层布置传感器。

5.3 数据处理

5.3.1 本条规定了对数据进行预处理的措施:

1 标定。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。由于经数据采集器得到的数据,有的是数字电压值,有的是以采集器分辨率为单位的整形数字量。对于数字电压量的数据,直接乘以传感器的标定值,即传感器的物理量与输出电压的比值,标定转换即可完成。对于整形数字量的数据,首先需要乘以采集器的分辨率以转换成电压数据,然后再进行物理单位的标定变换。

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 平滑消噪。通过数据采集仪得到的振动信号数据一般叠加有噪声信号,使得采集的离散数据绘成的曲线呈现许多毛刺,为了削弱干扰信号的影响,提高振动曲线的光滑度,需对数据信号

进行平滑处理。

4 滤波处理。滤波就是通过数学运算从所采集的离散信号中选取感兴趣部分信号的处理方法。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。

5.3.2 采用最大熵谱进行功率谱分析时需注意阶次的确定,可参考附录 B 中 *Akaike* 信息论(AIC)准则或最终预测误差(FPE)准则。

5.3.3 为常用结构动力参数的识别方法。一般而言建筑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。而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,一般采用幅值法、分量法以及导纳圆法,而对于多自由度体系,SISO 法和 SIMO 法被较多的采用。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。时域法所采用的原始数据是结构反应的时间历程，主要为结构的自由振动反应，有的也采用结构的脉动反应和强迫振动反应。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，但近年来随着计算机技术的发展而逐步发展起来。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、浪及大地脉动的作用，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。目前提出的结构模态参数的时域识别法主要有：SSI 法、ITD 法、STD 法、Prony 法、随机减量法和 ARMA 模型法等。

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。

基于小波变换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见表 1。

表 1 可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
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

		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）	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
时频域方法	随机激励	小波分析	适用于非稳定信号

5.3.4 本条规定了建筑结构动力特性的分析方法

4 当结构的模态比较稀疏，且阻尼比较小时，振型之比采用式(5.3.3-2)计算时精度较高，当结构的模态比较密集时，采用随机子空间法(SSI)进行模态识别时精度较高。

5.3 本条用到的信号基本知识：

1 均值

在时间历程 T 内的振动信号 $x(t)$ 所有值的算术平均值。即

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

离散量表达形式为

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

2 均方值

在时间历程 T 内，振动信号 $x(t)$ 平方值的算术平均值，即

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

离散量表达形式为

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

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

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

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

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

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：

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

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

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

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。

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

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

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 为激励幅值列阵， 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列阵， 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开式为

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

10 脉冲响应函数

频响函数矩阵模态展开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

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

11 最大熵谱定阶准则

1) Akaike 信息论(AIC)准则:

$$AIC(m) = \ln P_m + 2m / N$$

其中 m 为阶数， N 为信号的取样点数， P_m 为预测误差功率，可用随机过程的功率谱的方差来近似表示。由于 P_m 随阶次的增加而减小，并且当阶次 m 增加时 $AIC(m)$ 将出现一个最小值，此最小值所对应的阶便是最后确定的阶次；

2) 最终预测误差(FPE)准则:

$$FPE(m) = \frac{N+m+1}{N-m+1} P_m$$

各参数意义同前，对于上式， $FPE(m)$ 同样可以找到一个最小值，它所对应的阶就是要选择的阶次。

6 动力响应检测

6.1 一般规定

6.1.1 本章适用的振源类型包括交通运输、爆破、打桩、室内机械、室外机械以及人的活动等。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 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。

6.2 检测方法

6.2.1 测点的选择应具有代表性，能够使检测结果正确反映所代表区段的振动状况。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。传感器若无法避免置于草地、沙地、雪地或地毯等松软的地面上,可在松软的地面上打入一定深度的木桩。

6.2.2 规定了传感器安装的方法,以减少不必要的误差。规定传感器的安装方向,主要是为了避免传感器各安装位置上方向不一致而可能引起的误差,具体可参考《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;安置的基面一般指建筑的楼(地)面、屋面或筒壁以及室外坚实地面等。

6.3 数据处理

6.3.1 根据对象的不同以及相应评定标准的不同,可以选择不同的参数进行评定:加速度、速度及位移。当测试结果为其中一种时,可以通过相应的积分或者微分方法得到另外两种。积分方法可以采用时域积分或频域积分方法。

6.3.2 振动按系统响应时间分类如下:

连续振动,是指激振力对结构连续作用时间不少于 $5\tau_r$ 。

瞬态振动,是指激振力对结构连续作用时间少于 $5\tau_r$ 。

$$\tau_r = \frac{1}{2\pi\xi_r f_r}$$

式中:

τ_r ——结构共振响应的时间常数;

ξ_r ——共振时的阻尼比;

f_r ——基本固有模态的共振频率(Hz)。

稳态周期连续振动和瞬态振动宜采用时域分析法，并将测试信号中所有幅值在测试区间内进行平均；随机连续振动宜采用快速傅里叶变换分析或频谱分析。

6.4 检测评定

6.4.2-6.4.6 数据主要应用于评价振动对建筑结构安全的影响；评价振动对仪器设备的影响；评价振动对人体健康及舒适性的影响；分析振动现象并找出振动原因；分析振动在传递过程中的衰减规律。

7 检测报告

7.0.1 本条规定了检测报告应包含的基本内容。报告编写前，资料应进行全面梳理，做到各种数据准确无误，以保证最终成果的质量。检测报告应根据不同的工程类型、规模大小、繁简程度、专业特点、实施方法和条件等情况确定其繁简程度、书写格式等；检测报告应突出重点、文理通顺、表达清楚、结论正确。