

**CECS ××× : 20××**

中国工程建设标准化协会标准

古建筑振动控制技术标准

Technical standard for vibration control of historic buildings

# （征求意见稿）

中国计划出版社

# 前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2019年第一批协会标准制订、修订计划〉的通知》”（建标函[2019]12号）的要求，由机械工业勘察设计研究院有限公司会同有关设计、科研生产以及教学单位组成规范编制组，编制组经深入的专题研究，广泛的调查分析，并在借鉴国内外相关标准，总结古建筑振动控制工程领域科研成果和实践经验，制定本标准征求意见稿。

本标准共分7章。主要内容包括：总则、术语和符号、工业振动对古建筑影响评估、古建筑结构动力特性和振动响应测试、古建筑振动响应预测、古建筑结构的容许振动标准、古建筑防振措施。

本标准的组织单位：中国工程建设标准化协会建筑振动专业委员会。

本标准的主编单位：机械工业勘察设计研究院有限公司

本标准的参编单位： \*\*

本标准主要起草人员：\*\*

目 次

[1 总则 1](#_Toc81837340)

[2 术语和符号 2](#_Toc81837341)

[2.1 术语 2](#_Toc81837342)

[2.2 符号 3](#_Toc81837343)

[3 工业振动对古建筑影响评估 4](#_Toc81837344)

[3.1 一般规定 4](#_Toc81837345)

[3.2 评估步骤和方法 5](#_Toc81837346)

[3.3 评估报告 5](#_Toc81837347)

[4 古建筑结构动力特性和振动响应测试 7](#_Toc81837348)

[4.1 一般规定 7](#_Toc81837349)

[4.2 测试方法 7](#_Toc81837350)

[4.3 数据处理与分析 8](#_Toc81837351)

[5 古建筑结构振动响应预测 9](#_Toc81837352)

[5.1 一般规定 9](#_Toc81837353)

[5.2 经验法 9](#_Toc81837354)

[5.3 数值计算法 10](#_Toc81837355)

[6 古建筑结构的容许振动标准 12](#_Toc81837356)

[6.1 一般规定 12](#_Toc81837357)

[6.2 容许振动标准 12](#_Toc81837358)

[7 古建筑减振隔振措施 14](#_Toc81837359)

[7.1 一般规定 14](#_Toc81837360)

[7.2 振源减振 14](#_Toc81837361)

[7.3 防振距离 15](#_Toc81837362)

[7.4 传播路径隔振 15](#_Toc81837363)

[7.5 古建筑本体加固 15](#_Toc81837364)

[附录A 地面振动传播和衰减的计算 17](#_Toc81837365)

[本标准用词说明 21](#_Toc81837366)

[引用标准名录 22](#_Toc81837367)

附：条文说明  [23](#_Toc81837367)

Contents

[1 General Provision 1](#_Toc81837340)

[2 Terms and Symbols 2](#_Toc81837341)

[2.1 Terms 2](#_Toc81837342)

[2.2 Symbols 3](#_Toc81837343)

[3 Impact Assessment of Industrial Vibration on Ancient Buildings 4](#_Toc81837344)

[3.1 General Requirements 4](#_Toc81837345)

[3.2 Assessment Steps and Methods 5](#_Toc81837346)

[3.3 Assessment Report 5](#_Toc81837347)

[4 Dynamic Characteristics and Vibration Response Test of Ancient Buildings 7](#_Toc81837348)

[4.1 General Requirements 7](#_Toc81837349)

[4.2 Test Method 7](#_Toc81837350)

[4.3 Data Pocessing and Analysis 8](#_Toc81837351)

[5 Prediction of Vibration Response of Ancient Building Structures 9](#_Toc81837352)

[5.1 General Requirements 9](#_Toc81837353)

[5.2 Empirical Method 9](#_Toc81837354)

[5.3 Numerical Method 10](#_Toc81837355)

[6 Allowable Vibration Standard for Ancient Building Structures 12](#_Toc81837356)

[6.1 General Requirements 12](#_Toc81837357)

[6.2 Allowable Vibration Standard 12](#_Toc81837358)

[7 Vibration Reduction and Isolation Measures for Ancient Buildings 14](#_Toc81837359)

[7.1 General Requirements 14](#_Toc81837360)

[7.2 Vibration Absorption at Aource 14](#_Toc81837361)

[7.3 Vibration-Proof Distance 15](#_Toc81837362)

[7.4 Vibration Isolation on the Propagation Path 15](#_Toc81837363)

[7.5 Reinforcement of Ancient Buildings 15](#_Toc81837364)

[Appendix A Calculation of Ground Vibration Propagation and Attenuation 17](#_Toc81837365)

[EXplanation of Wording in this Standard 21](#_Toc81837366)

[List of Quoted Standards 22](#_Toc81837367)

Addition：Explanation of provisions [2](#_Toc81837367)3

# 1 总则

**1.01** 为加强城市建设中对古建筑的保护，消除工业振源引起的振动对古建筑结构产生有害影响，制定本标准。

**1.02** 本标准适用于古建筑在工业振源作用下的振动测试、预测、评估及振害防治。

**1.03** 古建筑振动控制，除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

# 2 术语和符号

### 2.1 术语

2.1.1 古建筑 historic buildings

运用传统材料、传统技术修建的具有历史、艺术、科学、社会和文化价值的建筑物和构筑物。

2.1.2 古建筑结构 historic building structure

古建筑的承重体系。

2.1.3 古建筑木结构 historic timber structure

以木材作为承重体系的古建筑结构。

2.1.4 古建筑砖石结构 historic brick masonry structure

以砖、石砌体为承重体系的古建筑结构。

2.1.5 安全性 safety

古建筑在正常使用条件下，承受可能出现的各种作用的能力，以及在偶然事件发生时和发生后仍然保持必要承载能力和整体稳定性的能力。

2.1.6 工业振动 man-made vibration

轨道交通车辆、公路交通车辆、动力设备、工程施工等工业振源产生的振动。

2.1.7 动力特性 dynamic characteristic

表示结构动态特性的基本物理量，如固有频率、振型和阻尼等。

2.1.8 动力响应 dynamic response

结构受动力输入作用下的输出，如位移、速度、加速度以及动应变等。

2.1.9 速度时程 velocity time history

结构质点振动速度在时域内的变化过程。

2.1.10 动力放大系数 dynamic magnification coefficient

结构某点在振动作用下最大速度响应与地面同方向最大速度的比值。

2.1.11 振源减振 vibration absorption at source

通过采取措施以减小振源产生的振动。

2.1.12 防振距离 vibration-proof distance

将引起地面振动的振源远离古建筑结构，使之不受振动的有害影响所需的最小距离。

### 2.2 符号

**2.2.1** 作用及作用效应符号

*Cf*—波峰因子；

*V*—工业振源下结构振动速度响应值；

*V*0—工业振源下*r*0处地面振动速度；

*V*e—工业振源下结构振动速度有效值；

*V*m—地脉动下振动速度测试值；

*V*p—工业振源下结构振动速度峰值；

*V*r—工业振源下*r*处地面振动速度；

*f*0—地面振动频率；

**2.2.2** 几何参数和计算参数、系数符号

*A*—桩的面积

*B*—地铁隧道宽；

*H*—隧道底深度；

*L*—牵引机车车身长；

*l*—数值模型边界距离振源的尺寸；

Δ*l*—数值模型单元尺寸；

*r*—距振源中心的距离；

*r*0—振源半径；

*β*—动力放大系数；

*γ*—材料属性影响系数；

*δ*r—隧道埋深影响系数；

*ζ*0—几何衰减系数；

**2.2.3**  材料性能及其他符号

*Cs*—介质剪切波波速；

[*v*]一容许振动速度；

*α*0—土的能量吸收系数。

# 3 工业振动对古建筑影响评估

### 3.1 一般规定

**3.1.1** 在下列情况下，应进行工业振动对古建筑振动影响评估：

**1** 在既有动力机器振动、交通振动、施工振动等工业振动影响范围内的古建筑；

**2** 在计划新增动力机器振动、交通振动、施工振动影响范围内的古建筑。

**3.1.2** 评估工业振动对古建筑的影响，应根据工业振源和古建筑的安全性等级调查、古建筑结构的容许振动速度标准以及古建筑结构振动速度响应，通过分析论证，提出评估意见，形成评估报告。

**3.1.3** 当古建筑周边已有工业振源时，宜采用测试法确定古建筑结构振动响应速度；当测试法无法获取振动响应数值时，应采用计算法进行预测。

**3.1.4** 当古建筑附近存在多种振动源，应综合考虑多种振源作用，宜采用振动叠加的方法，多种振源共同作用引起结构控制点振动响应速度可按下式计算：

 （3.1.4-1）

 （3.1.4-2）

 （3.1.4-3）

式中 *V*e,*i*——振源*i*引起结构控制点振动速度的有效值（mm/s）；

*V*p,*i*——振源*i*引起结构控制点振动速度的峰值（mm/s）；

*n*——振源数量；

*V*e——振动叠加速度有效值（mm/s）；

*V*p——振动叠加速度峰值（mm/s）；

*Cf*——波峰因子，取所有振源单独作用时结构控制点振动速度峰值*V*p与有效值*V*e比值中的最大值；当无法通过测试方法获取某振源单独作用时下的波峰因子时，简谐振源的*Cf*取1.41，随机振源的*Cf*取4或5（对振动敏感性较高的古建筑取5）。

### 3.2 评估步骤和方法

**3.2.1**  评估工业振动对古建筑结构的影响，可参照图3.2.1的步骤进行：



图3.2.1 工业振动对古建筑影响评估的基本步骤框图

**3.2.2** 古建筑和工业振源的初步调查包含下列内容；

**1** 工业振源的各种类型、频率范围、分布状况及工程概况；

**2** 古建筑的历史、保护级别、结构类型、建筑材料、图纸资料、历次修缮资料以及现状评估的安全性等级；

**3** 工业振源与古建筑的地理位置、两者之间的平面、立面距离以及场地土类别等。

**3.2.3** 古建筑结构的容许振动标准，应根据所调查的结构类型以及结构现状评估的安全性等级，按本标准第6章的规定确定。

**3.2.4** 古建筑结构振动速度响应的测试或计算，应分别按本标准第4章和第5章的规定进行。

### 3.3 评估报告

**3.3.1**  工业振动对古建筑结构影响的评估报告应包括下列主要内容：

**1**  按本标准第3.2.2条规定的工业振源以及古建筑的基本情况；

**2**  评估目的及工作内容；

**3** 评估所采用的方法、测点以及计算过程；

**4**  使用的仪器及仪器校验或计算模型校验；

**5**  数据处理的方法和结果；

**6**  对测试或计算结果与容许振动标准进行分析、对比，做出工业振动对古建筑是否造成有害影响的结论；

**7** 当可能造成潜在有害影响时，宜提出减振隔振的方案和建议；

**8** 对提出的减振隔振方案再次进行振动响应的计算，按照上述方法评估，作出结论。

# 4 古建筑结构动力特性和振动响应测试

### 4.1 一般规定

**4.1.1** 本章适用于古建筑结构的动力特性（振型、固有频率和阻尼）和振动响应的测试。

**4.1.2**  古建筑结构动力特性和动力响应的测试，当结构对称时，可按任一主轴方向测试；当结构不对称时，应按各个主轴方向分别测试。

### 4.2 测试方法

**4.2.1** 古建筑结构动力特性和振动响应的测试应符合下列要求：

**1**  测试仪器应满足低频、微幅的要求，其低频起始频率不应高于0.5Hz，测振系统的分辨率不应低于10-3mm/s；

**2** 测试仪器应在有效的检定或校准期内，测试前应对仪器设备检测调试；

**3** 动力特性应在脉动环境下测试，结构振动响应应在工业振源作用下测试；测试时应避免外界干扰振源；

**4** 每一个测点的传感器应按照测试的方向摆放一致，传感器应牢固固定在被测主体结构构件上，测线电缆应与结构构件固定在一起，不得悬空；

**5** 振动测试时传感器宜采用竖向和水平向的速度型传感器，其通频带宽为1Hz~80Hz，并应严格密封防水；

**6** 采样频率宜为100~120Hz，动力特性测试记录时间不应少于30min，振动响应测试记录时间每次不应少于15min，记录次数不宜少于5次；

**7** 测试时应详细记录测试日期、周边环境、风向风速、测试次数、记录时间、测试方向、测点设置、各测点对应的通道号、传感器编号以及标定值、各通道的记录情况等。

**4.2.2** 古建筑结构动力特性测试宜按以下要求布置测点：

**1** 砖石结构测点宜布置在各层平面刚度中心或其附近；

**2** 木结构测点宜布置在中跨的各层柱顶和柱底；

**3** 测点布置数量较多时，可进行优化布置；需要多次测试时，每次测试应至少保留一个共同的参考点。

**4.2.3** 古建筑结构振动响应测试应按以下要求布置测点：

**1** 测点宜布置在古建筑的基础及结构顶层，其余楼层可逐层或隔层布置测点，每个古建筑的振动测点不少于3个。

**2** 各测点宜在竖向和两个水平向布置振动测试传感器。

### 4.3 数据处理与分析

**4.3.1**  数据分析前，应对实测原始记录信号去掉零点漂移和干扰，并对电信号干扰进行带阻滤波，处理波形的失真。

**4.3.2**  古建筑的动力特性测试应获得结构固有频率、振型以及阻尼比等。

**4.3.3** 古建筑结构动力特性应按下列方法确定：

**1** 对处理后的记录进行自功率谱、互功率谱和相干函数分析，同时宜加指数窗，平均次数宜为100次左右；

**2** 结构固有频率和振型应根据自功率谱峰值、各层测点间的互功率谱相位确定，测点间相干函数不得小于0.8；

**3** 模态阻尼比可由半功率带宽法确定。

**4.3.4**  古建筑振动响应测试数据应按下列方法确定：

**1**  稳态周期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，测试结果亦可采用幅值谱分析的数据。每个样本数据不应少于1024个，并应进行加窗函数处理，频域上的总体平均次数不应少于20次。

**2**  随机信号分析时，应对随机信号的平稳性进行评估；对于平稳随机过程宜采用总体平滑的方法提高测试精度；当采用快速傅里叶变换分析或频谱分析时,每个样本数据不应少于1024个，并应进行加窗函数处理，频域上的总体平均次数不应少于32次。

**3** 振动响应幅值应分别按同一高度、同一方向各测点速度时程最大峰峰值的一半确定，并取5次有效记录的平均值。

# 5 古建筑结构振动响应预测

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 古建筑结构振动响应的预测，包括振动荷载计算、地面振动速度预测以及结构振动控制点响应预测。

**5.1.2** 古建筑结构振动响应的快速预测，可采用经验法；当需要较准确的获取振动响应数值时，宜采用数值计算的方法。

**5.1.3** 当结构对称时，可按任一主轴水平方向计算；当结构不对称时，应按各个主轴水平方向分别计算。

### 5.2 经验法

**5.2.1** 工业振源引起的不同距离处的地面振动速度，可根据振源类型和场地土类别，按表5.2.1选用。

**表5.2.1 地面振动速度*V*r（mm/s）**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 振源类型 | 场地土类型 | *V*s（m/s） | 距离r（m） |
| 10 | 50 | 100 | 200 | 400 | 500 | 700 | 800 | 1000 |
| 火车 | 黏土 | 140~220 | — | 0.655 | 0.385 | 0.225 | 0.125 | 0.100 | 0.060 | 0.040 | 0.025 |
| 粉细砂 | 150~200 | — | 0.825 | 0.435 | 0.220 | 0.110 | 0.085 | 0.050 | 0.035 | 0.020 |
| 淤泥质粉质黏土 | 110~140 | — | 0.755 | 0.470 | 0.340 | 0.175 | 0.125 | 0.075 | 0.045 | 0.035 |
| 汽车 | 粉细砂 | 150~200 | — | 0.230 | 0.110 | 0.050 | 0.025 | — | — | — | — |
| 地铁 | 黏土 | 140~220 | 0.418 | 0.166 | 0.072 | 0.056 | 0.044 | — | — | — | — |
| 城铁 | 黏土 | 140~220 | — | 0.206 | 0.113 | 0.030 | 0.020 | — | — | — | — |
| 打桩 | 砂砾石 | 200~280 | — | 1.100 | 0.640 | 0.370 | 0.220 | 0.180 | 0.140 | 0.120 | 0.100 |
| 强夯 | 回填土 | 110~130 | — | 11.870 | 3.130 | 1.000 | 0.433 | 0.150 | 0.070 | — | — |

注：1 汽车的*V*r值，当汽车载质量大于7t时，应乘1.3；小于4t时，应乘0.5；

2 地铁*V*r值，当距离r等于1~3倍地铁隧道埋深h时，应乘1.2；当采用钢弹簧浮置板道床时，应乘0.5；

3 打桩的*V*r为桩尖入土深度22m时之值；

4 强夯的*V*r为夯锤质量20t、落距15m时之值。

**5.2.2** 对表5.2.1中未做规定的振源和场地土，其不同距离处的地面振动速度，应按《地基动力特性测试规范》GB/T 50269的规定进行现场测试。无条件时，可按本标准附录A进行计算。

**5.2.3**  通过地面振动速度计算古建筑结构振动速度响应值，可采取以下方法：

1 当古建筑现场具备测试条件时，古建筑在工业振源作用下的各结构层水平速度响应值可按下式计算：

 （5.2.3-1）

 （5.2.3-2）

式中 *Vi*——工业振源下古建筑第*i*层结构速度响应值（mm/s）；

*V*r——工业振源下古建筑基础处水平向地面振动速度（mm/s），按表5.2.1或5.2.2条结果选用；

*β*——古建筑第*i*层结构动力放大系数；

*V*m,*i*——地脉动下古建筑第*i*层结构速度响应测试值（mm/s）；

*V*m,*r*——地脉动下古建筑基础处水平向地面振动速度测试值（mm/s）。

**2** 当不具备测试条件，可按照《古建筑防工业振动技术规范》（GB/T 50452）中的规定计算。

### 5.3 数值计算法

**5.3.1** 采用数值计算方法预测古建筑结构控制点的振动响应，可优先考虑建立“地层-古建筑基础-古建筑结构”的整体模型。当古建筑为木结构等复杂结构时，宜采取两步建模方法：

1 建立“地层-古建筑基础”模型，基础顶面应附加上部结构的自重荷载，计算得出古建筑结构基础顶面的动力响应。

2 当古建筑现场具备测试条件时，宜按5.2.3条的规定，采用实测结构动力放大系数代替古建筑结构有限元模型。当不具备测试条件，可单独建立古建筑有限元模型，将基础顶面计算结果作为荷载条件输入模型，计算古建筑结构的振动响应。

**5.3.2** 工业振源的振动荷载，当现场具备测试条件时，宜通过测试分析的方法获得；当不具备测试条件时可根据《建筑振动荷载标准》GB/T 51228进行取值。

**5.3.3** 工业振源引起的不同距离处地面振动强度预测，可利用“地层-古建筑基础”有限元模型分析地层动力问题，可参照图5.3.3的步骤进行。



图5.3.3 土层动力问题有限元建模分析一般流程

1 建模时宜将实际土层简化为水平成层的土层，当不同土层的动力参数和土性相近时，可以将相邻土层合并为一层土进行建模分析。

2 模型边界距离振源最小尺寸*l*应大于介质的最大半波长，可按下式计算：

 （5.3.2-1）

式中 CS——土层剪切波速（m/s）；

 *f*min——分析最小频率（Hz）。

3 振源附近以及所关心的控制点范围内的网格尺寸按照下式计算的要求划分，远离振源的单元逐渐放宽单元尺寸要求；划分单元宜选用高次单元。

 （5.3.2-2）

式中 *f*max——分析最大频率（Hz）。

# 6 古建筑结构的容许振动标准

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 古建筑结构的容许振动应以结构的最大动应变为控制标准，以振动速度表示。

**6.1.2** 古建筑结构的容许振动标准，应根据结构类型、结构安全性等级选用。

**6.1.3** 确定古建筑结构的容许振动标准之前，宜先对古建筑的整体结构现状进行安全性评估或鉴定。

1 当砖石结构的整体结构安全性等级为四级（重损）以及木结构的结构体系安全性等级为D级（重损），应分别按照《古建筑砖石结构维修与加固技术规范》GB/T 39056和《古建筑木结构维修与加固技术标准》GB/T 50165的规定立即进行加固处理。

2 当不具备对古建筑的整体结构现状进行安全性性评估或鉴定的条件，古建筑结构的容许振动标准宜按表6.2.1和表6.2.2中结构安全等级的中损标准执行。

### 6.2 容许振动标准

**6.2.1** 古建筑砖石结构的容许振动速度应按表6.2.1的规定采用，整体结构的安全性等级应按国家标准《古建筑砖石结构维修与加固技术规范》GB/T 39056执行。

**表6.2.1 古建筑砖石结构的容许振动速度[υ]（mm/s）**

| 保护级别 | 控制点位置 | 控制点方向 | 安全性等级 |
| --- | --- | --- | --- |
| 一（健康） | 二（轻损） | 三（中损） |
| 全国重点文物保护单位 | 各层承重结构最高处 | 水平 | 0.30 | 0.20 | 0.15 |
| 省级文物保护单位 | 0.50 | 0.35 | 0.25 |
| 市、县级文物保护单位 | 0.75 | 0.55 | 0.40 |
| 未列入文物保护单位 | 1.00 | 0.80 | 0.65 |

**6.2.2** 古建筑木结构的容许振动速度应按表6.2.2的规定采用，结构体系的安全性等级应按国家标准《古建筑木结构维修与加固技术标准》GB/T 50165执行。

**表6.2.2 古建筑木结构的容许振动速度[υ]（mm/s）**

| 保护级别 | 控制点位置 | 控制点方向 | 安全性等级 |
| --- | --- | --- | --- |
| A（健康） | B（轻损） | C（中损） |
| 全国重点文物保护单位 | 各层承重结构最高处 | 水平 | 0.30 | 0.22 | 0.18 |
| 省级文物保护单位 | 0.40 | 0.30 | 0.25 |
| 市、县级文物保护单位 | 0.55 | 0.40 | 0.30 |
| 未列入文物保护单位 | 0.75 | 0.55 | 0.40 |

**6.2.3** 砖木混合结构的容许振动速度，主要以砖砌体为承重体系的，可按表6.2.1采用；“砖表土芯”的城墙古建筑的容许振动速度，可按表6.2.1采用；主要以木材为承重体系的，可按表6.2.2采用。

# 7 古建筑减振隔振措施

### 7.1 一般规定

**7.1.1**  工业振动对古建筑结构的影响超过了本标准规定的容许振动速度值时，应采取减振隔振措施；减振隔振实施完成后，应进行古建筑振动响应测试，评价是否满足容许振动的要求。

**7.1.2** 振源减振、防振距离和传播路径隔振、本体加固的各种措施，可单独采用或综合采用。

**7.1.3** 采用减振隔振措施，应根据数值计算效果、技术可靠程度、施工难易等进行技术经济比较。

**7.1.4** 选用传播路径隔振和古建筑本体加固等减振措施，在施工过程中应采取有效措施避免损坏古建筑。

### 7.2 振源减振

**7.2.1** 轨道交通减振可采用以下措施：

1 轨道减振，包括钢弹簧浮置板道床、弹性垫层、高弹性扣件、道砟垫、无缝线路或重型钢轨；

2 路基减振，减少路基不平顺。

3 限制行车速度，在古建筑保护区内降低行车速度。

**7.2.2** 公路减振可采用以下措施：

**1** 加强养护维修，提高路面平整度，保持道路良好的技术状况；

**2** 采用沥青混凝土路面；

**3** 限制行车速度，并在一定范围内限行重型车辆；

**4** 采用减振型桥梁伸缩缝和桥梁支座。

**7.2.3** 大型动力设备减振，可按国家现行标准《工程隔振设计标准》GB 50463的有关规定执行。

**7.2.4** 古建筑保护区内不得实施强夯、锤击打桩等振动影响大的施工；保护区外的采石工程作业，应控制装药量和酌情采取微差爆破技术。

### 7.3 防振距离

**7.3.1**  采用测试法时，可按第4章的规定测得古建筑结构的最大速度响应，当*V*max≤[*v*]时，则工业振源与古建筑结构之间的距离满足防振要求；当*V*max>[*v*]时，则应采取防振措施。

**7.3.2**  采用预测法时，防振距离可按下列步骤确定：

**1**  按第5章的规定求出古建筑结构的最大速度响应；

**2**  当*V*max≤[*v*]时，则该距离满足防振要求；当*V*max>[*v*]时，则应调整距离，继续按以上步骤进行计算，直至*V*max≤[*v*]。

### 7.4 传播路径隔振

**7.4.1** 在工业振源传播路径中设置隔振屏障进行隔振，可采用以下措施：

**1**  空沟隔振，主动隔振时，隔振沟应环绕振源设置；被动隔振时，应首先评估空沟开挖对古建筑的安全影响。隔振沟的深度不宜小于场地瑞利波波长的1/2，沟的开挖截面宜为梯形，开挖形成边坡应符合现行国家标准《建筑边坡工程技术规范》GB 50330、行业标准《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120的规定。

**2** 排桩隔振，主动隔振时，排桩应环绕振源设置；被动隔振时，排桩宽度应大于古建筑的宽度。排桩的深度不宜小于场地瑞利波波长的2倍，且排桩底部应深于地下振源3m以上。排桩可采用单排，双排或多排，桩距宜为桩直径的1.5倍；当排桩为双排和多排时，两排之间的距离可取桩直径的2.5倍。排桩的桩径宜为0.4m~1.0m，可采用强度等级不低于C20的混凝土，排桩的设计和施工应符合现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94的相关规定。

### 7.5 古建筑本体加固

**7.5.1** 古建筑结构的加固，应符合下列规定：

1 在对古建筑结构残损现状全面勘察测绘及安全性评估基础上制订加固方案；

2 古建筑结构的加固设计，应在不改变文物原状的原则下提高其结构的承振能力；

3 古建筑的加固设计，应经专项论证后确定。

# 附录A 地面振动传播和衰减的计算

**A.0.1** 距火车、汽车、地铁、打桩等工业振源中心r处地面的竖向或水平向振动速度，可按下式计算：

 （A.0.1）

式中 ——距振源中心r处地面振动速度（mm/s），当其计算值等于或小于场地地面脉动值时，其结果无效；

——*r*0处地面振动速度（mm/s）；

*r*0——振源半径（m），按A.0.2条的规定；

*r*——距振源中心的距离（m）；

——与振源半径等有关的几何衰减系数，按A.0.3条规定选用；

——土的能量吸收系数（s/m），按A.0.4条规定选用。

——地面振动频率（Hz），应按《古建筑防工业振动技术规范》GB/T 50452的规定进行取值。

**A.0.2** 振源半径*r*0可按下列规定取值：

1 火车

*r*0=3.00m

2 汽车

柔性路面，*r*0=3.25m

刚性路面，*r*0=3.00m

3 地铁

*r*≤*H*，*r*0 = *r*m

*r*＞*H*，*r*0 = *δ*r *r*m （A.0.2-1）

 （A.0.2-2）

式中 *B*——地铁隧道宽（m）；

*L*——牵引机车车身长（m）；

*H*——隧道底深度（m）；

——隧道埋深影响系数。

≤2.5，=1.30

=2.7，=1.40

≥3.0，=1.50

4 打桩

 （A.0.2-3）

 （A.0.2-4）

式中 *γ*——材料属性影响系数，淤泥质黏土、新近沉积的黏土、非饱和松散砂，*γ*=4.0；软塑的黏土，*γ*=5.0；软塑的粉质黏土、饱和细粉砂，*γ*=6.0；

*A*——桩的面积（m2）。

**A.0.3** 几何衰减系数与振源类型、土的性质和振源半径*r*0有关，其值可按表A.0.3-1~ A.0.3-4采用。

**表A.0.3-1 火车振源几何衰减系数**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 土类 |  |  |
| 硬塑粉质黏土 | 230~280 | 0.800~0.850 |
| 粉细砂层下卵石层 | 220~250 | 0.985~0.995 |
| 黏土及可塑粉质黏土 | 200~250 | 0.850~0.900 |
| 饱和淤泥质粉质黏土 | 80~110 | 0.845~0.880 |
| 松散的粉土、粉质黏土 | 150~200 | 0.840~0.885 |
| 松散的砾石土 | 250 | 0.910~0.980 |

**表A.0.3-2 汽车振源几何衰减系数**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 土类 |  |  |
| 硬塑粉质黏土 | 230~280 | 0.300~0.400 |
| 黏土及可塑粉质黏土 | 200~250 |
| 淤泥质粉质黏土 | 90~110 |

**表A.0.3-3 地铁振源几何衰减系数**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 土类 |  | r与H的关系 | r0（m） |  |
| 饱和淤泥质粉质黏土 | 80~280 | r≤H | 5.00 | 0.800 |
| 黏土及可塑粉质黏土 | 6.00 | 0.800 |
| 硬塑粉质黏土 | ≥7.00 | 0.750 |
| 硬塑粉质黏土黏土及可塑粉质黏土 | 150~280 | r＞H | 5.00 | 0.400 |
| 6.00 | 0.350 |
| ≥7.00 | 0.150~0.250 |
| 饱和淤泥质粉质黏土 | 80~110 | r＞H | 5.00 | 0.300~0.350 |
| 6.00 | 0.250~0.300 |
| ≥7.00 | 0.100~0.200 |

**表A.0.3-4 打桩振源几何衰减系数**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 土类 |  | r0（m） |  |
| 软塑的黏土软塑粉质黏土、饱和粉细砂 | 100~220 | ≤0.50 | 0.720~0.955 |
| 1.00 | 0.550 |
| 2.00 | 0.450 |
| 3.00 | 0.400 |
| 淤泥质黏土新近沉积的黏土非饱和松散砂 | 80~220 | ≤0.50 | 0.700~0.950 |
| 1.00 | 0.500~0.550 |
| 2.00 | 0.400 |
| 3.00 | 0.350~0.400 |

**A.0.4** 能量吸收系数可根据振源类型和土的性质按表A.0.4采用。

**表A.0. 4土的能量吸收系数**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 振源 | 土类 |  |  |
| 火车 | 硬塑粉质黏土 | 230~280 | （1.15~1.20）×10-4 |
| 粉细砂层下卵石层 | 220~250 | （1.23~1.27）×10-4 |
| 黏土及可塑粉质黏土 | 200~250 | （1.85~2.50）×10-4 |
| 饱和淤泥质粉质黏土 | 80~110 | （1.30~1.40）×10-4 |
| 松散的粉土、粉质黏土 | 150~200 | （3.10~3.50）×10-4 |
| 松散的砾石土 | 250 | （2.10~3.00）×10-4 |
| 汽车 | 硬塑粉质黏土 | 230~280 | （1.15~1.20）×10-4 |
| 黏土及可塑粉质黏土 | 200~250 | （1.20~1.45）×10-4 |
| 淤泥质粉质黏土 | 90~110 | （1.50~2.00）×10-4 |
| 地铁 | 硬塑粉质黏土 | 230~280 | （2.00~3.50）×10-4 |
| 黏土及可塑粉质黏土 | 200~250 | （2.15~2.20）×10-4 |
| 饱和淤泥质粉质黏土 | 80~110 | （2.25~2.45）×10-4 |
| 打桩 | 软塑的黏土 | 150~220 | （12.50~14.50）×10-4 |
| 软塑粉质黏土、饱和细粉砂 | 100~120 | （12.00~13.00）×10-4 |
| 淤泥质黏土 | 90~110 | （12.00~13.00）×10-4 |
| 新近沉积的黏土 | 110~140 | （18.00~20.50）×10-4 |
| 非饱和松散砂 | 150~220 |

**A.0.5** 动力设备引起的地面振动衰减，可按《动力机器基础设计规范》GB 50040计算。

# 本标准用词说明

**1** 为了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）表示允许稍有选择，在条件许可时首先这样做的用词：

正面词采用“宜”；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** 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

# 引用标准名录

1 《古建筑砖石结构维护与加固技术规范》GB/T 39056

2 《建筑结构设计术语和符号标准》GB/T 50083

3 《工程结构设计基本术语和通用符号》GB 50132

4 《古建筑木结构维护与加固技术规范》GB 50165

5 《建筑结构检测技术标准》GB 50344

6 《古建筑防工业振动技术规范》GB/T 50452

7 《建筑工程容许振动标准》GB 50868

8 《古建筑结构安全鉴定技术规范第一部分：木结构》DB11/T 1190.1

9 《古建筑结构安全鉴定技术规范第二部分：石质构件》DB11/T 1190.2

10 《文物建筑抗震鉴定技术规范》DB11/T 1689

11 《西安市城市轨道交通工程检测技术规范》DBJ 61-98

12 《木结构现场那检测技术规范》JGJ/T 488

中国工程建设标准化协会标准

古建筑振动控制技术标准

# （条文说明）

# 编 订 说 明

本标准制订过程中，编制组进行了大量的调查研究和科学试验工作，总结了我国振动工程领域的实践经验，同时也参照了国外先进技术法规和技术标准。

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够准确理解和执行条文规定，《古建筑振动控制技术标准》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，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。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1 总则 26

3 工业振动对古建筑影响的评估 28

3.1 一般规定 28

3.2 评估步骤和方法 29

3.3 评估报告 30

4 古建筑结构动力特性和响应的测试 31

4.1 一般规定 31

4.2测试方法 31

4.3数据处理与分析 32

5 古建筑结构振动响应预测 34

5.1 一般规定 34

5.2 经验法 34

5.3 数值计算法 35

6 古建筑结构的容许振动标准 37

6.1 一般规定 37

7 古建筑减振隔振措施 39

7.1一般规定 39

7.2振源减振 40

7.3防振距离 41

7.4传播路径隔振 41

7.5古建筑本体加固 41

# 1 总则

1.0.1 古建筑是社会历史发展的见证，人类宝贵的文化遗产，属于不可再生的人文资源，具有极高的历史、文化、艺术和科学价值。古建筑建造年代久远，并长期遭受自然灾害的影响，存在地基沉降、结构裂缝、材料风化及腐蚀等病害，现状不容乐观，安全性面临着许多因素的威胁。其中，随着工业化和城市化的迅速发展，轨道交通、公路交通、动力设备、工程施工等工业振源迅速增加，其振动对周边的古建筑的影响和危害是一个无法回避的问题。

交通振动对邻近古建筑的研究始于20世纪中叶。从1964年起，捷克科技大学Bata教授带领的研究团队较早地开始着手研究公共交通引起的振动对邻近建筑，尤其是石砌建筑和历史建筑的影响，并提出为避免建筑受到疲劳破坏，应该发展古建保护与现代交通相协调的前瞻性理念。在意大利，Colonnetti等对法尔内西纳山庄受周边路面交通影响进行了试验；随后1971年，山庄邻近公路设置由1000块橡胶轴支撑的混凝土格栅，这是“欧洲乃至世界上首次为了保护历史遗址不受交通振动影响而进行的路面维修”。不过Clemente等进行现场测试结果显示，无论在时域还是频域，抗振路面并没有起到很好的作用。

20世纪80年代末，在我国焦枝铁路修建复线要通过龙门石窟的保护区，这是我国较早关注交通荷载对文物保护产生环境影响问题的一个实例。有研究认为，在过去30年内龙门石窟受到的振动影响已经超过了历史上1000~1500年振动影响的总和。到1995年为了保护石窟，铁路线路东移700m。近年来，各大城市城市轨道交通建设如火如荼。尤其在北京、西安、南京、洛阳等历史文化名城，如何准确评估城市轨道交通与已有路面交通的振动叠加对临近古建筑的影响，如何做到城市建设和古建筑保护的协调发展，是一个亟需解决的难题，这就需要制定一个科学、可靠，并符合国情的标准。

 在此背景下，国内的专家学者和科研团队开展了一系列的研究和实践，五洲工程设计研究院主编了《古建筑防工业振动技术规范》（GB/T 50425）在2008年9月正式发布。在此基础上，本标准编制单位进行了广泛调研、现场勘查及测试、试验、数值分析、理论研究和工程实践等方法，对古建筑振动传播及响应、容许振动标准、振动控制措施等进行了系统的研究和实践，总结出更加科学、系统的技术内容，从而制定出本标准。

1.0.2 本标准制定的古建筑结构动力特性和响应测试、振动响应预测、容许振动标准、工业振动对古建筑影响的评估、减振隔振措施等，可解决经济建设中现有和拟建工业振源引起的振动对古建筑结构影响的评估和防治。

# 3 工业振动对古建筑影响的评估

### 3.1 一般规定

3.1.1 工业振动对古建筑物产生的是一个长期的、每天均持续很长时间的过程，即使不会像地震产生瞬间巨大破坏力，不足以在短时间内对建筑物产生明显的影响；但是，振动长期作用会导致古建筑裂缝扩张、基础沉降、材料疲劳等问题，疲劳效应最终会降低建筑结构的强度，影响建筑物的正常使用甚至危害结构安全。针对古建筑周边已有工业振源的情况，宜对实际的振动进行测试评估，准确掌握古建筑振动响应的实际情况。在古建筑影响范围内，如果有拟建交通基础设施、或者拟建项目有工业振源等，在工程可行性分析阶段宜进行古建筑振动影响专项预测与评估，提供合理的减振隔振建议，为这类项目布局以及解决文物保护与生产建设之间的矛盾提供科学依据。

3.1.2 评估工业振动对古建筑结构的影响，首先要确定古建筑结构现状及安全性等级，结合古建筑安全性等级得出容许振动标准，与测试或者预测的在工业振源作用下的速度响应进行比较。

3.1.3 条文中规定了两种确定速度响应的方法，即测试法和预测法。这两种方法，对古建筑周边已有工业振源来说，均可采用；对于工业交通基础设施等的布局和拟建项目有工业振源的情况来说，只能测得古建筑结构的动力特性，但不能测得结构响应，因此只能采用预测法。

3.1.4 在实际的古建筑振动影响评估中，经常会碰到存在多种振动源的情况，为有效地预测多种振源共同作用下古建筑的振动响应数值，可采用振动叠加的方法。具体步骤及方法如下：

（1）通过数值计算或者实测，得到不同振源引起结构控制点振动速度峰值和有效值。

（2）根据振动能量叠加原理，计算该控制点不同振动叠加情况下的速度有效值，计算公式为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （式1） |

（3）利用波峰因数*Cf*，联系峰值与有效值，计算得到测点在不同振源叠加情况下的速度峰值.

|  |  |
| --- | --- |
|  | （式2） |

根据文献的研究结果，对于随机振动响应可以看做均值趋近于0、方差为σ2的平稳窄带高斯过程（即近似服从瑞利分布），其信号样本序列的均方根值为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （式3） |

即均方根值与其信号样本序列的标准差相等。对于高斯分布，以均值为中心，*nσ*为半径涵盖样本出现的几率为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （式4） |

即波峰因数*Cf*取3、4和5时分别可以满足99.9700%、99.9937%和99.9999%的保证概率。对于重要古建筑，计算时波峰因数水平向振动取5。

### 3.2 评估步骤和方法

3.2.1 条文规定了评估工业振动对古建筑结构影响的步骤和方法。其中：初步调查是评估的基础；计算或测试以及分析是评估的方法；容许振动速度值是评估的标准；工业振动对古建筑结构是否造成有害影响是评估的目的。因此，评估工业振源对古建筑结构的影响时，应按图3.2.1规定程序进行，以做到资料翔实，数据可靠，论证充分，结论正确。

3.2.2 初步调查是评估工业振动对古建筑结构影响的前提，只有依据可靠的基础资料作为依据，才能科学而有效的工作。因此，在实际工作中，要尽量全面的获得这些资料。

3.2.3 古建筑的营造材料和方式决定着结构安全性与耐久性，所以不同类型的古建筑承振能力有所区别。即使同一古建筑承振能力也不是一成不变的，在自然环境因素和人为因素影响下，构件的损伤、疲劳极限降低等都会引起承振能力的下降。因此，在按照国家现行标准《古建筑木结构维修与加固技术标准》（GB/T 50165）和《古建筑砖石结构维修与加固技术规范》（GB/T 39056）确定结构安全等级，再此基础上确定制订不同类型古建筑的振动容许标准是科学、合理的。

### 3.3 评估报告

3.3.1 本条规定了工业振动对古建筑结构影响的评估意见应包括的内容。其中，评估结论，即工业振源引起的振动对古建筑结构是否造成有害影响，是为协调生产建设与古建筑保护之间的矛盾提供依据；处理意见和建议，则是提出可供选用的处理方案。评估报告的格式可根据具体需要自行设计，但应包括本条规定的全部内容，以保证评估报告的质量。

# 4 古建筑结构动力特性和响应的测试

### 4.1 一般规定

4.1.1 在研究古建筑结构抵御动荷载的性能和能力时，都应进行结构动力特性测试，以了解结构的动力特性，分析结构的振动现象，避免振动作用下产生共振，寻找减小振动的途径。

### 4.2测试方法

4.2.1 本条主要规定了对测试仪器、测试环境以及测试操作的基本要求。

测试时，传感器测试方向如果摆放不一致，其感应振动分量就会有差异，影响分析结果。测试时，传感器不能随意移动，以免影响传感器的正常工作。

地脉动引起的结构振动响应一般很小，且频率较低，结构和工业振源的频带范围约为0.5~30HIz。按照采样定理，采样频率为所需频率上限的2.56倍即可，但实际工作中，最低采样频率通常取分析上限频率的3~5倍；考虑到频域分析中频率分辨率的要求条文中提出采样频率宜为100~120Hz。

为了减小干扰的后期处理，提高采集、分析数据的准确性，对测试环境和测试记录做了规定。

4.2.2 测砖石结构水平振动时，为避免扭转振动的影响，将传感器布置在各层平面刚度中心。

古建筑木结构平面一般为正方形或矩形，两端有山墙、前后有槛墙和纵墙，为了获得较好的动力特性测试结果，测试时将传感器布置在中间跨的各层柱顶和柱底。

当传感器数量不够时，可以分若干次进行测量，先若干个楼层作为基准楼层，其他楼层的测试结果可以与其进行比较，一般把顶层作为基准层，另外也可在适当部位选取1~2个楼层作为基准层。这几个基准层的测点一直固定，中间分次测量时不变动，其他楼层可以分几次测量，与这些基准层分析比较。

4.2.3 响应测试的测点位置是依据反映整体承重结构最大响应的原则确定的。一般来说，振动在建筑物随着高度会放大，古建筑最高处的响应往往是结构的最大响应。实测表明，由于古建筑形制的特殊性，古建筑的最大振幅并不一定发生在结构顶部,中间“反弯点”处的振动反而更大。所以振动响应测点建议逐层布置，条件不允许时可隔层布置，以免漏测。

### 4.3数据处理与分析

4.3.1 现场实测时应尽量避开机、电和人为干扰，调整零点漂移，但实际情况仍会或多或少的有一些干扰。因而数据分析前，应检查记录信号，通过去直流、删除干扰区段、对电信号进行带阻滤波等方法处理波形的失真。

4.3.2 结构的自振频率、阻尼比和振型是反映结构本身动力性能重要的参数，对这些动力特性参数的量测是结构动力测试的基本内容。

4.3.3 对动力特性实测记录进行自功率谱、互功率谱分析时，为了减少频普的泄漏，需要加窗函数。同时为了减小干扰，提高分析精度，平均次数不宜太少：平均次数太多又导致实测记录时间太长，综合上述的影响，平均次数宜为100次左右。

确定结构的频率和振型时，除了自功率谱的峰值和互功率谱的相位符合要求外,还要求测点间的相干函数不小于0.8。相干函数小于0.8时，干抗太大，不能确定该频率为结构振动频率。

4.3.4 每个样本的记录长度是根据数据分析的要求定的。对于采用快速傅里叶变换（FFT)分析的数据，每个数应为2n个。最常用的数据量为512、1024和2048等。为了确保分析精度，本标准建议取不少于1024个点。

测试误差通常是难免的。测试误差包括系统误差，随机误和过失误差。系统误差主要依靠系统标定和测试仪器的内在质量来保证，同时也要验证振动测试方法的准确性和精确度。在测试过程中测试人员对测试参数档位的设置要正确。对于过失误差，则需要加强测试人员的责任心和进行必要的校核检査工作。而这两条要求在频谱分析中的总体平均次数是为了减少信号的随机误差。在一些现行标准中规定了不同的随机数据样本总体平滑数重的要求，常用的平滑段数有20、32、40、100。对于随机数据而言，不论取多少段平均，随机误差总是存在的，即使取了100段数据平均，也存在10%的随机误差可能性。随机误差与总体平滑数量的关系见表1。

|  |
| --- |
| 表1 随机数据的统计误差 |
| 平滑段数 | 10 | 20 | 32 | 40 | 100 |
| 统计误差 | 0.316 | 0.224 | 0.177 | 0.158 | 0.100 |

随着总体平滑数量的增加,测试和分析工作量也急增加。考虑到测试的现实条件以及信号本身的特点，制订相应的数据平段数要求；同时，提出了进一步测试要求，以确保数据精度。对于稳态周期振动，如果数据中的随机信号或噪声干扰部分的振动能量不超过总能量的10%，采用20段数据平滑，其统计精可达95%以上。对于周期或随机振动，在振动信号分析之前，应当先对数据进行周期性或稳态性检验，只有符合周期性或稳态性条件，才能运用相应的数据分析方法分析数据。此外，对于周期或随机振动，本标准绝大多数指标适用于波峰因数小于或等于9的情形。当波峰因数大于9时，应当照特定的评价指标分析评估，或进行专项研究。

本标准规定了每个测点记录有效振动数据的次数不得少于5次，是为了确保振动测试数据的可靠和精确。

# 5 古建筑结构振动响应预测

### 5.1 一般规定

5.1.1 工业振源产生振动后，经由土体传至建筑物内。通常沿着这个传播路径，可以把振动的预测分为三个部分，即振动荷载、地面振动值以及振动接收建筑的振动响应。用于预测古建筑结构的振动响应可以从这三个部分出发，分别建立每一个对象的预测模型以及各对象之间的相互耦合关系，也可以建立包含所有对象的整体模型。

5.1.2 通常的预测模型振动方法有经验法和数值法。从便捷上考虑，经验法是获取定量结果的最简单的手段。然而由于工业振动问题的复杂性，在处理工程问题时进行了大量的简化，简化后的计算方法有些能够满足工程计算的要求，有些则无法准确分析和计算，但经验法仍然是进行定性分析和影响评估的重要手段。随着计算机技术的发展，在电脑上进行数值计算已经成为快速、准确的解决工程计算和实验的重要工具。这些数值分析工具也同样广泛运用于振动控制领域。

5.1.3 当结构对称时，结构两个主轴水平方向的动力特性相同，对于同一振源产生振动的响应也相同，因此可以只计算任一主轴水平方向的振动响应值。

### 5.2 经验法

5.2.1、5.2.2 工业振源引起的振动，通过土层以波动形式向外传播。在传播过程中，其幅值随距离增加而逐渐减小，并与振源类型、场地土类别有关。本标准采用了《古建筑防工业振动技术规范》（GB/T 50452）中火车、汽车、地铁等工业振动在所列不同距离处振动速度值，这些值是在未采取减振措施时不同场地土中传播的实测资料分析后得出的。同时，根据本标准编制单位近些年在北京、西安一些地铁线路的实测资料分析，补充了地铁线路采用钢弹簧浮置板减振道床时地面振动速度的经验值。

由于地铁振源在地下一定深度（*h*）处，振动传播过程与火车等地表振源不同，在地面距离*r*为（1~3）*h*时，会出现振波叠加，故在这一范围内振动幅值相应増大。为此，规定当*r*=（1~3）*h*时，按表5.2.1中数值乘1.2。

5.2.3 动荷载作用下结构的动力放大系数与频率比（自振频率、荷载频率）、阻尼比有关。工业振源引起结构的振动一般是微振动，短时间内不会对结构造成损伤，因此结构的自振频率和阻尼比一般也不会发生改变。当振源荷载以及结构类型确定时，结构的动力放大系数一般不会发生改变，结合地面的振动响应值计算结构振动响应值所得的结果相对比较准确，更有利于实际工程的应用。

### 5.3 数值计算法

5.3.1 数值计算的方法的优势在于可以根据不同的实际工程情况建立分析模型，得到一定工程精度的数值解答。计算模型和参数选取的不确定性将直接影响结果的准确性。为了提高结构振动响应的预测精度，结合振动测试，提出了动力放大系数替代的方法。实际工程中，可以根据研究对象模型的复杂程度选用其中一种方法，也可以两种方法皆采用，然后比选两种方案，确定最优结果。

5.3.3 利用有限元建模分析地层-古建筑基础动力问题，包括参数选取、建模、计算分析、结果分析、实测校核等几个关键步骤。

实际地层往往是近似成层分布的，建模时可以将实际土层简化为水平成层的土层。根据地质勘探提供的土层资料和实验参数，仔细分析比较不同类型土层的分布及各自的动力参数（动弹性模量或波速），当不同上层的动力参数和土性相近时，可以进行将相邻层合并为一层土进行建模分析，合并后的上层参数可取合并前相邻层参数的加权平均值。一般土层层数以3-8层为宜，层数过少难以反映出土层参数渐变递增的性质；层数过多在计算时会出现较多的波动反射与折射，人为制造了许多不确定性因素。

进行几何建模时，由于有限元模型必然存在人工截断边界，因此确定模型三个方向的几何尺至关重要。几何模型确定后，进行网格划分。网格划分有许多技巧，需要在练习和实践中摸索，该部分内容可以详细参见不同有限元计算软件的指导手册。

网格划分好后，同其他有限元分析类似，需要施加荷载和边界。由于人工截断边界的存在，弹性波在边界处会产生反射，这会造成土层中的波场失真。动力问题的边界条件，主要是尽可能消除截断边界的反射效应。

当计算完成后，需要综合分析拾振点的振动响应。为了使模型能够进行定量预测及相关问题的分析研究，需要将拾振点计算得到的（计算值与现场能够获得的实测结果）振动响应相比较。当计算结果与实测结果差异较大时需要返回检查建模方法和建模参数。当某一变量受到若干因素控制时，可以采用正交实验的方法，找出控制性变量。为了获得与实测相吻合的数值结果，应重点关注有效值、频谱中的主要贡献频带、三分之一倍频程中最大有效值及其对应的频率。

用于校准的振动指标应根据预测要求选取。如需在时域内预测，则只需进行内振动量校准；如需进行与频率相关的预测，则需在频域或三分之一倍程内进行振动量校准。输入、输出的校核误差应控制在最终振动响应预测容许误范围内。

# 6 古建筑结构的容许振动标准

### 6.1 一般规定

6.1.1 本标准以疲劳极限作为古建筑结构防工业振动的控制指标。疲劳是材料或结构在往复荷载作用下由变形累积到一定程度后所导致的破坏。引起材料或结构疲劳破坏的下限值就是疲劳极限，当最大往复应力小于疲劳极限时，此应力的变化对材料或结构疲劳不起作用，也就是说当最大往复应力小于疲劳极限时，无论往复多少次，材料或结构的变形达到一定值后就不再继续增长，也不会产生疲劳破坏。根据这一特性，将古建筑结构承受的最大容许动应力（或动应变[*ε*]）控制在疲劳极限以下，这样即使经过无限多次往复运动，古建筑结构也不会产生新的裂缝，已有的裂缝也不会扩展。标准编制组开展了针对古建材料（古木、古砖）的疲劳试验，通过大量的试验获得了古建材料的典型的疲劳曲线，得到材料的最大容许动应力。通过建立古建筑结构的整体模型，输入不同的振动荷载，得到古建筑发生疲劳破坏的最大容许动应力（或动应变[*ε*]），从而对应的输入振动速度极为古建筑结构的容许振动阈值。鉴于古建筑结构既有病害现状及承振能力退化，在对振动速度阈值进行一定的修正得到容许振动标准。

工业振源产生的振动，通过土层以波动的形式传至古建筑结构，从而引起结构的动力反应。根据有限弹性介质中波动方程的解得知：古建筑结构上任一点的动应变（*ε*）与该处质点速度（*v*）成正比。在工业振动作用下，当古建筑结构的动应变*ε*小于容许动应变[*ε*]时则认为工业振源产生的振动对古建筑结构无有害影响。为便于使用，容许振动标准以质点振动速度[*v*]表示。

6.1.2 鉴于我国古建筑众多，其结构类型、所用建材及保护现状不尽相同，历史、科学价值也各异，故本规范规定古建筑结构的容许振动速度应根据其结构类型、保护级别和安全性等级选用。

6.1.3 古建筑的承振能力不是一成不变的，在自然因素和人为因素的影响下，构件损伤会引起承振能力的下降。与古建筑承振能力密切相关的是其保存状态，因此可按照国家标准《古建筑砖石结构维修与加固技术规范》（GB/T 39056）和《古建筑木结构维修与加固技术标准》（GB/T 50165）对古建筑的安全性进行科学评估，确定结构所处的安全性等级，进而采取相应的标准。

当古建筑结构处在重损的状态时，已经无限接近结构的倒塌阈值，严重威胁建筑结构的安全，任何外部的扰动都有可能造成结构完全破坏的后果，包括工业振动，因此最重要的是采取相应抢险加固措施提高结构的安全性。

古建筑的安全性性鉴定是较复杂的过程，在进行工业振动对古建筑影响评估前，针对重要的古建筑，应进行专项的安全性评估。对于不具备进行安全性评估的古建筑，建议按中损情况下的标准取值，即最严苛的限值。

6.2.1~6.2.2 表中保护级别的划分综合考虑了历史文化内涵、艺术价值、珍稀程度、建筑重要性等不同因素，但却不能反映古建筑对振动的敏感程度。一个严重损伤有倒塌风险的市级文物与一个保存完好的全国重点文物，前者对振动的敏感程度明显高于后者，如果仅按照文物的保护级别来确定文物振动是片面的，因此引入古建筑的安全性等级，其能较准确的反映古建筑的承振能力以及对振动的敏感程度。

对古建筑的安全性鉴定，由于涉及整个结构所有构件之间的连接、拉结、锚固和支撑等是否系统、有效可靠；而其所引起的作用，又是使整个结构体系具有足够的延性和冗余度。因此，有必要以此为目标对结构体系进行鉴定评级。

砖石结构古建筑整体结构安全性评估分为两级评估，整体结构的第一即安全评估为II级、III级的，应进行第二级评估，并由第二级评估给出最终结论，第二级评估分为四个等级，分别为健康（一）、轻损（二）、中损（三）、重损（四）。

木结构古建筑结构体系的安全性鉴定包含四个安全等级，分别为为健康（A）、轻损（B）、中损（C）、重损（D）。

# 7 古建筑减振隔振措施

### 7.1一般规定

7.1.1 工业振动对古建筑结构的影响超过第6章规定的容许振动值时，将对古建筑结构造成有害影响。为了保护古建筑，应采取相应的减振隔振措施避免工业振动对古建筑结构的危害。

7.1.2、7.1.3 防振距离和传播路径隔振、振源减振是分别针对传播路径和工业振源而采取的防振措施；本体加固是提高古建筑自身承振能力的措施。具体使用时，应根据防振效果、工程条件、技术难易程度等单独采用或综合采用。

西安地铁二号线从钟楼绕行通过时，为了减少地铁长期运行对钟楼建筑的振动影响，就采用了振源减振、平面绕行、传播路径隔振的多道防线综合技术。在钟楼保护区域轨道采用了钢弹簧浮置板道床，路线尽量远离钟楼台基，在钟楼台基周围设置了一圈隔离排桩，见图1。通过后期的振动监测表明，经过综合的减振隔振措施后，在地铁和路面交通振动叠加影响作用下，钟楼结构的最大振动速度幅值低于0.20mm/s，综合减振效果达到70%以上。

7.1.4 为保护好古建筑，本条根据《中华人民共和国文物保护法》的规定，做出了进行减振措施施工时不得对古建筑造成损害的规定。



图1 钟楼隔离排桩设置示意图

### 7.2振源减振

7.2.1~7.2.3 条文中对铁路和公路的减振分别列出了可供采用的措施，具体设计尚需按相应的国家和行业标准、规范进行；对大型动力设备的减振,规定按国家现行标准《隔振设计规范》的有关规定执行。

### 7.3防振距离

7.3.1、7.3.2 防振距离为工业振源引起的地面振动对古建筑结构不产生有害影响的最小距离。条文对防振距离的确定，按获得古建筑结构速度响应的计算法和测试法分别做了规定。前者既可用于工业交通基础设施等的布局，也可用于评估工业振动对古建筑结构的影响；后者仅用于古建筑周边有工业振源的评估。

### 7.4传播路径隔振

7.4.1 沟式主动隔振，可用于尺寸较小且独立的振源，如动力机器基础，围绕振源设置封闭屏障，能有效减少振动波的输出。沟式被动隔振，为保证良好的隔振效果，沟式屏障设置尽量靠近隔振对象。因此沟式被动隔振实施前，必须谨慎，确保空沟的开挖和使用对古建筑没有影响。

在振源与古建筑之间设置一系列周期性分布的桩（孔）。其原理与沟式屏障类似，不同之处在于其非连续性。其工程可行性优于沟式屏障。当干扰频率较低需要设置很深的隔离屏障时，采用沟式屏障遇到施工技术和安全等方面的困难，或者对于地下轨道交通等地下振源的隔振，在这种情况下，可以考虑选用排桩式隔振屏障。

### 7.5古建筑本体加固

7.5.1 对古建筑本体进行加固应按照现行国家标准《古建筑木结构维护与加固技术标准》GB/T 50165、《古建筑砖石结构维护与加固技术规范》GB/T 39056执行。