

**CECS XXX-202X**

# 中国工程建设标准化协会标准

**软土场地振动评估标准**

standard for vibration assessment of soft soil sites

（征求意见稿）

**研讨会建议名称修改为《场地振动影响评估标准》**

# 前言

本标准是根据中国工程建设标准化协会《关于印发﹤2019年第二批协会标准制订、修订计划﹥的通知》（建标协字[2019] 22号文）的要求，由天津大学会同有关设计、勘察、建设和教学单位共同编制而成。

在本标准编制过程中，编制组开展多项专题研究，进行了广泛且针对性的调查与分析，参考有关国际标准和国内相关标准，总结了我国在场地振动影响评估方面的相关研究成果，充分考虑我国技术和经济条件，并在广泛征求意见的基础上，编制了本标准。

本标准共分6章，主要内容包括：总则，术语和符号，基本规定，场地振动限值，场地振动影响评估，振动控制措施。

本标准由中国工程建设标准化协会建筑振动专业委员会负责管理，由天津大学负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送天津大学（天津市津南区雅观路135号，邮政编码300350）

本标准主编单位：天津大学

本标准参编单位：

本标准主要起草人员：

本标准主要审查人员：

# 目 录

[1 总则 1](#_Toc81145670)

[2 术语和符号 2](#_Toc81145671)

[2.1 术语 2](#_Toc81145672)

[2.2 符号 6](#_Toc81145673)

[3 基本规定 8](#_Toc81145674)

[4 场地振动限值 9](#_Toc81145675)

[4.1 一般规定 9](#_Toc81145676)

[4.2 建筑室内振动限值 10](#_Toc81145677)

[4.3 振动敏感设备振动限值 13](#_Toc81145678)

[4.4 建筑结构振动限值 13](#_Toc81145679)

[5 场地振动影响评估 20](#_Toc81145680)

[5.1 一般规定 20](#_Toc81145681)

[5.2 评估步骤和方法 22](#_Toc81145682)

[5.3 场地振动影响预测 27](#_Toc81145683)

[5.4 场地振动影响测试 29](#_Toc81145684)

[5.5 场地振动影响评估报告 33](#_Toc81145685)

[6 振动控制措施 35](#_Toc81145686)

[6.1 一般规定 35](#_Toc81145687)

[6.2 振动源减振措施 35](#_Toc81145688)

[6.3 传播路径减振措施 38](#_Toc81145689)

[6.4 评估目标减振措施 39](#_Toc81145690)

[附录A 多振动源振动响应叠加计算 42](#_Toc81145691)

[附录B 振动影响经验预测公式 43](#_Toc81145692)

[附录C 振动影响数值仿真预测要求 56](#_Toc81145693)

[附录D 振动评估测试记录表 59](#_Toc81145694)

[附录E 动力机器振动评估数据记录表 60](#_Toc81145695)

# Contents

[1 General provisions 1](#_Toc81145670)

[2 Terms and symbols 2](#_Toc81145671)

[2.1 Terms 2](#_Toc81145672)

[2.2 Symbols 6](#_Toc81145673)

[3 Basic requirement 8](#_Toc81145674)

[4 Site vibration limit 9](#_Toc81145675)

[4.1 General requirement 9](#_Toc81145676)

[4.2 Limits of vibration in the room of building 10](#_Toc81145677)

[4.3 Vibration limits of vibration sensitive equipment 13](#_Toc81145678)

[4.4 Vibration limits of building structures 13](#_Toc81145679)

[5 Site vibration impact assessment 20](#_Toc81145680)

[5.1 General requirement 20](#_Toc81145681)

[5.2 Assessment steps and methods 22](#_Toc81145682)

[5.3 Prediction of site vibration impact 27](#_Toc81145683)

[5.4 Site vibration impact test 29](#_Toc81145684)

[5.5 Site vibration impact assessment report 33](#_Toc81145685)

[6 Vibration control measures 35](#_Toc81145686)

[6.1 General requirement 35](#_Toc81145687)

[6.2 Vibration reduction measures for vibration source 35](#_Toc81145688)

[6.3 Vibration reduction measures for propagation path 38](#_Toc81145689)

[6.4 Vibration reduction measures for evaluation objects 39](#_Toc81145690)

[Appendix A Superposition calculation of vibration response of multiple vibration sources 42](#_Toc81145691)

[Appendix B Empirical prediction formula of vibration influence 43](#_Toc81145692)

Appendix [C Requirements for numerical simulation and prediction of vibration impact 56](#_Toc81145693)

[Appendix D Vibration evaluation test record 59](#_Toc81145694)

[Appendix E Dynamic machine vibration evaluation data record 60](#_Toc81145695)

# 1 总则

**1.0.1** 为规范场地振动对建筑物内人体舒适度、振动敏感设备、建筑结构的振动影响评估和振动控制工作，做到技术合理和经济适用，确保正常生产和环境要求，制定本标准。

【条文说明】

伴随现代工业的快速发展，城市轨道交通和铁路、动力机器、施工等工业振动源引起场地振动的影响问题愈显突出。如果场地振动过大，会造成人体舒适度降低、影响振动敏感设备正常工作甚至危害建筑结构安全等。如何对场地振动影响进行科学规范的评估并提出相应控制措施，国内外虽有一定的文献研究，但尚未有一本专门的标准。工程中遇到此类问题时，常常无章可依。本标准编写的目的便是为生产和生活中常见工业振动源引起场地的振动影响评估与控制提供可靠、规范的依据。

**1.0.2** 本标准适用于常见工业振动源（城市轨道交通和铁路、动力机器、施工等）引起的场地振动的影响评估和振动控制。

【条文说明】

本条规定了标准的适用范围，工业振动源指由工业生产产生的振动源，常见工业振动源通常包括铁路、公路、城市轨道交通、动力机器和施工等振动源，本标准主要针对城市轨道交通和铁路、动力机器、施工这几类常见振动源引起的场地振动的影响评估和振动控制展开研究。

**1.0.3** 场地振动影响评估和振动控制，除应符合本标准外，尚应符合现行有关标准的规定。

【条文说明】

场地振动影响评估和振动控制，除按本标准执行外，尚应符合下列现行有关标准的规定：《城市区域环境振动标准》GB 10070-88、《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013、《工业建筑振动控制设计标准》GB 50190-2020、《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》GB/T 50355-2018、《动力机器基础设计标准》GB50040-2020、《电子工业防微振工程技术规范》GB 51076-2015、《工程隔振设计标准》GB 50463-2019、《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》HJ 453-2018、《电子工业防微振工程技术规范》GB 51076-2015、《环境噪声与振动控制工程技术导则》HJ 2034-2013、《环境振动监测技术规范》HJ 918-2017。

# 2 术语和符号

## 2.1 术语

**·工业振动源** vibration source

城市轨道交通和铁路、动力机器、施工等引发振动的扰力发生源。

**·评估目标** evaluation objects

工业振动源邻近场地范围内需要保障振动达标的人体舒适度、振动敏感设备、建筑结构等。

**·场地振动影响** ground vibration influence

工业振动源对邻近场地中建筑物内的人体舒适度、振动敏感设备的正常工作、建筑结构损伤等可能产生的有害振动影响。

**·振动影响评估** vibration effect evaluation

采用预测或测试方法得到振动量值，进而同振动限值比较后进行分析、判断并得出结论的过程。

**·振动传播链**vibration propagation chain

将振动传播衰减视作由“振动源-传播路径-振动接受体”组成的单向“链式”衰减，由这三个子系统组成的传播衰减体系称为“振动传播链”。

**·评估量** assessment index

根据工业振动源与评估目标确定的振动评估指标，如Z振级、竖向四次方剂量值等。

**·速度峰值** peak particle velocity (PPV)

给定区间内质点振动速度时程的绝对值最大值。

**·均方根值** root-mean-square (RMS) value

对一组振动信号离散采样数据的平方和进行平均后，取其平方根。

**·振动加速度级** vibration acceleration level

加速度与基准加速度之比的以10为底的对数乘以20，记为VAL。单位为分贝，dB。

**·Z振级** Z-weighted vibration acceleration level

按铅垂向计权因子修正后得到的振动加速度级，简称Z振级，记作*VL*Z，单位为分贝，dB。

**·Z振级最大值** maximum Z-weighted vibration acceleration level

在规定的时间*T*内或对某一独立振动事件，计算或测得的Z振级最大值，记作*VL*Z,max，单位为分贝，dB。

**·Z振级等效值** equivalent Z-vibration level

指在规定测量时间T内Z振级的能量平均值，记为，单位为分贝，dB。

**·四次方振动剂量值** fourth power vibration dose value (*VDV*)

以计权加速度时间历程四次方作为计算平均基础的量值，记作*VDV*，单位为m/s1.75。

**·隔振** vibration isolation

采用弹性元件（常配有阻尼元件）或屏障以减小振动传播的措施。

**·减振** vibration mitigation

通过振动源扰力或系统的传递特性改变而使控制对象振动减小的方法。

**·屏障隔振** barrier vibration isolation

在振动传递路径中设置屏障以减弱地面振动传递的影响。

**·隔振沟** vibration isolation trench

在设备基础与环境振动源或动力机器基础与被保护对象之间设置的可以减小振动传递的连续沟槽，沟槽内可填充减少振动传递的材料。

**·隔振桩墙**vibration isolation pile wall

在设备基础与环境振动源或动力机器基础与被保护对象之间设置的可以减小振动传递的排桩或地下连续墙。

**·波阻板** wave impedance block （WIB）

一种用于在地基中阻断竖向振动传播的二维板状结构，水平设置在地基中的波阻板相当于地基介质中的异质体。

**·消能阻尼减振** vibration energy dissipation

又称为阻尼减振或耗能减振，是在结构某些部位（如支撑、剪力墙、连接缝或连接构件）设置耗能（阻尼）装置（或元件），通过该装置产生摩擦、弯曲（或剪切、扭转）弹塑性（或粘弹性）滞回变形来耗散能量或吸收振动输入结构的能量，减少受保护对象的振动反应。

**·调谐质量阻尼器** tuned mass damping （TMD)

通过调谐质量阻尼器与被控对象谐振起到降低被控对象动力响应的作用。

**·主动振动控制** active vibration control

主动振动控制指根据所检测到的振动信号，应用一定的控制策略，经过实时计算驱动作动器对控制目标施加一定的影响，达到抑制或消除振动的目的。

【条文说明】

本节所列术语均按现行标准《机械振动与冲击与状态监测 词汇》GB/T 2298-2010、《机械振动与冲击 人体暴露 词汇》GB/T 15619-2005、《工程振动术语和符号标准》GB/T 51306-2018、《城市区域环境振动测量方法》GB 10071-88、[《建筑工程容许振动标准](http://www.baidu.com/link?url=dj6ACqtizVGgBEe8GeWuBLMBfOf2ggMbhLZy5LZzhSsOyE7cqW9fBxN4WhMp0KO2AOm2bddw5ajzkZFmisSGqccrwA6tudK-X8bJN77-l_q)》GB 50868-2013、《城市轨道交通环境振动与噪声控制工程技术规范》HJ 2055-2018、《地铁噪声与振动控制规范》DB11/T838-2019等标准的有关规定，并结合本标准的专用名词编写。

振动可用多种参数进行描述，如振动的位移、振动的速度、振动的加速度等。针对本规范所采用的振动评估量，本节条文说明给出各个评估量的计算方法。

**·振动加速度级是描述振动强度的基本量，其计算方法：**

 （1）

式中：

*a*——振动加速度均方根值，单位为米每二次方秒，m/s2

*a*0——基准加速度，取10-6 m/s2

**·Z振级是描述人体全身振动环境的基本量，其计算方法：**

按Z轴W或Wk计权因子修正后得到的振动加速度级，简称Z振级，记作*VL*Z，单位为分贝，dB。

 （2）

式中：

*aw,τ*(*t*)——计权加速度运行均方根值，单位为米每二次方秒，m/s2

*aw*(*ξ*)——在*ξ*时刻的计权瞬时加速度，单位为米每二次方秒，m/s2

*τ*——时间计权常数，取1s

*t*——瞬时时间，单位为秒，s

在计算最大Z振级时，还需要考虑重叠系数。为了使离散数据的计算结果能真实反映连续振动过程，相邻两幅计算波形需要设置一定的重叠率，通常重叠系数不宜小于3/4。

**·Z振级最大值计算方法：**

在规定的测量时间*T*内或对某一独立振动事件，测得的Z振级最大值，记作*VL*Z,max，单位为分贝，dB：

 （3）

**·四次方振动剂量值计算方法：**

以计权加速度时间历程四次方作为计算平均基础的量值，记作*VDV*，单位为m/s1.75。

以竖向四次方振动剂量值为例，计算公式为：

 （4）

式中：

*azw*(*t*)——按现行国家标准GB/T 13441.1规定的基本频率计权Wk进行计权的瞬时竖向加速度，单位为米每二次方秒，m/s2

*T*——昼间或夜间时间长度，单位为秒，s

*t*——时间

**· Z振级等效值计算方法如下：**

根据定义，Z振级等效值表示为：

 （5）

式中：

——*t*时刻的瞬时Z振级，单位为分贝，dB

*T*——规定的测量时间段，单位为秒，s

其物理意义就是：在测量周期内，能量意义上的频率计权平均值。在实际测量中，总是等间隔地、随机地读取Z振动级，所以数据处理中使用下列式计算等效连续Z振动级：

 （6）

式中：

——等效连续Z振动级，单位为分贝，dB

——第i次读取的Z振动级，单位为分贝，dB

*N*——取样总数

对同一测点，在同一时段内（昼间或夜间）不同时间测量的两次或多次测量值求其平均Z振动级时，应采用能量平均运输的方法计算得出等效Z振动级（此处引用《环境振动监测技术规范》HJ918-2017-能量平均计算）。

## 2.2 符号

**2.2.1 振动计算和分析**

*VLzmax,0*——列车振动源强，单位为分贝，dB；

*CVB* ——振动修正项，单位为分贝，dB；

*CV* ——列车速修正，单位为分贝，dB；

*CW*——轴重和簧下质量修正，单位为分贝，dB；

*CR*——轮轨条件修正，单位为分贝，dB；

*CT* ——隧道形式修正，单位为分贝，dB；

*CD*——距离衰减修正，单位为分贝，dB；

*CB*——建筑物类型修正，单位为分贝，dB；

*CTD*——行车密度修正，单位为分贝，dB；

*v*——列车通过预测点的运行速度，km/h，列车参考速度应不低于预测点设计速度的75%；

*v0——*源强的列车参考速度，单位为千米每小时，km/h；

*w0*——源强车辆的参考轴重，单位为吨，t；

*w*——预测车辆的轴重，单位为吨，t；

*wu0*——源强车辆的参考簧下质量，单位为吨，t；

*w0*——预测车辆的簧下质量，单位为吨，t；

*r*——预测点至线路中心线的水平距离，单位为米，m；

*H*——预测点地面至轨顶面的垂直距离，单位为米，m；

*β——*土层的调整系数；

*Vs——*土层等效剪切波速，单位为米每秒，m/s；

*d0——*计算深度，取隧道轨顶面至预测点地面高度，单位为米，m；

*t——*剪切波在地面至计算深度之间的传播时间，单位为秒，s；

*di——*计算深度范围内第i层土层的厚度，单位为米，m；

*Vsi——*计算深度范围内第i层土层的等效剪切坡速，单位为米每秒，m/s；

*Ar*——距振动基础中心*r*处地面上的振动线位移，单位为米，m；

*A*0——振动基础的振动线位移，单位为米，m；

*f*0——基础上机器的扰力频率一般为50Hz以下对于冲击机器基础，可采用基础的固有频率，单位为赫兹，Hz；

*r*0——圆形基础的半径或矩形及方形基础的当量半径，单位为米，m；

*ξ*0——无量纲系数；

*α*0——地基土能量吸收系数，单位为秒每米，s/m；

*μf*——动力影响系数。

**2.2.2 振动传播和振动评价**

*a*0*——*基准加速度；

*VL*z——Z振级；

*VL*zmax——最大Z振级；

——Z振级等效值。

【条文说明】

本节列出本标准采用的主要符号，并给出解释。

# 3 基本规定

**3.0.1** 工业振动源对临近场地中建筑物内的人体舒适度、振动敏感设备的正常工作、建筑结构损伤等可能产生振动影响时，应进行场地振动影响评估。

【条文说明】

本条指出执行场地振动影响评估的前提。可能产生的振动影响，通常指场地周围振动环境存在潜在的风险源（存在城市轨道交通和铁路、动力机器或施工等工业振动源）或不利的变化（新建、改建或者扩建工业振动源或者目标建筑）时，可能对评估目标造成的振动影响。

**3.0.2** 评估场地振动影响，应从状况调查和资料收集、振动限值和评估量确定、预测或测试振动响应、综合分析提出评估意见等方面执行。

【条文说明】

本条规定了场地振动影响评估的步骤和方法。其中状况调查和资料收集是评估的基础；振动限值和评估量确定是评估的标准；预测或测试振动是通过确定合适的方法得到评估目标的振动响应；通过分析论证，提出评估意见是评估的目的。

**3.0.3** 采用经验预测公式、数值仿真或采用直接测试、类比测试的结果超出本标准规定限值时，应采取必要的振动控制措施。

【条文说明】

本条规定了评判场地振动影响是否达标的原则。并指出为避免有害影响，未达标情况应采取必要的振动控制措施，避免工业振动源对评估目标造成不利影响。

**3.0.4** 实施振动控制措施之前，宜采用类比测试或数值仿真的方法预测减隔振效果；实施振动控制措施之后，应通过直接测试的方法判定结果是否超出标准规定限值。

【条文说明】

本条规定了振动控制措施效果的检验方法。实施振动控制措施之前，采用类比测试或数值仿真的预测方法可对振动控制措施效果进行预测分析，检验振动控制效果。对已建成的振动控制措施，应直接进行现场测试以判断所采取的振动控制措施是否有效。

# 4 场地振动限值

## 4.1 一般规定

**4.1.1** 本标准限值包括场地振动引起的建筑室内人体舒适度振动限值、振动敏感设备振动限值、建筑结构振动限值。

**4.1.2** 建筑室内人体舒适度的振动影响应以加速度为基础，以Z振级作为评估量，城市轨道交通和铁路对建筑室内的振动影响应附加竖向四次方振动剂量值作为评估量；建筑结构的振动影响应以结构动应力为基础，以峰值振动速度作为评估量；振动敏感设备的振动影响应采用设备说明书中环境振动规定的评估量。

【条文说明】

建筑室内人体舒适度振动限值主要评价振动对人体舒适度的影响。人体对振动最敏感的物理量是加速度，人对不同频率成分的振动感知程度不同以及影响居民生活的主要因素是铅垂向振动，因此本标准以加速度为控制标准，以Z振级作为评估量。建筑室内振动限值依据《建筑环境通用规范》GB 55016-2021和《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013，采用Wk计权得到Z振级。

交通振动具有间歇性和长期性，采用以计权加速度均方根值为基础的评价方法可能会低估振动对人体舒适度的影响，因此交通振动对建筑室内人体舒适度的影响应附加1Hz~80Hz竖向四次方振动剂量值（竖向*VDV*）作为评估量。

根据有限弹性介质中波动方程的解得知，目标建筑上任一点的动应变与该处质点速度成正比，与弹性波的传播速度成反比。为便于使用，本标准建筑结构损伤以结构动应力为控制标准，以峰值振动速度作为评估量。

振动敏感设备振动控制标准与评估量应根据实际要求选取，这样更符合每种仪器和设备的实际情况。

**4.1.3**振动敏感设备的振动限值宜由设备制造厂家提供，以说明书为准；

【条文说明】

本条强调了振动敏感设备振动限值的确定方法。由于每种（每台）振动敏感设备的标准不同，应当按照振动敏感设备的说明书要求确定振动限值，这样更符合振动敏感设备的实际情况。

**4.1.4** 本标准中的昼间为6时至22时，夜间为22时至次日6时，地方人民政府有单独规定的除外。

【条文说明】

本条依据《中华人民共和国环境噪声污染防治法》第六十三条规定。

## 4.2 建筑室内振动限值

**4.2.1**考虑建筑室内人体舒适度振动须满足表4.2.1的限值要求。

**表4.2.1** **建筑室内振动限值 单位：dB**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 地点 | 连续振动、间歇振动和重复性冲击振动 | | 每天只发生数次的冲击振动 | |
| 昼间 | 夜间 | 昼间 | 夜间 |
| 医院手术室和振动要求严格的工作区 | 72 | | 72 | |
| 住宅 | 78 | 75 | 102 | 75 |
| 办公室 | 84 | | 108 | |
| 车间办公室 | 90 | | 111 | |

**注：1.** 住宅起居室执行昼间限值；

【条文说明】

表4.2.1中的振动限值是在《建筑环境通用规范》GB55016-2021中给出的居住房间室内振动限值（表1）的基础上，结合国际标准ISO 2631-2:1989和《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013中推荐的人体舒适度容许振动修正系数（表2），确定了医院手术室和振动要求严格的工作区、办公室以及车间办公室三类建筑区域室内的振动限值。具体实施时首先将住宅建筑的昼间容许振动修正系数设为1，然后将表1中限值转换为加速度并乘以表2中对应地点的修正系数得到各对应地点的加速度（表3），进而再通过振动加速度级转换公式得到各对应地点的振动限值。

表1 主要功能房间室内的Z振级限值（dB）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 房间的使用功能 | Z振级VLz(dB) | |
| 昼间 | 夜间 |
| 睡眠 | 78 | 75 |
| 日常生活 | 78 | |

表2 建筑物内人体舒适度容许振动修正系数

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 地点 | 连续振动、间歇振动和重复性振动 | | 每天只发生数次的冲击振动 | |
| 昼间 | 夜间 | 昼间 | 夜间 |
| 医院手术室和振动要求严格的工作区 | 0.5 | | 0.5 | |
| 住宅 | 1 | 0.7 | 15 | 0.7 |
| 办公室 | 2 | | 30 | |
| 车间办公室 | 4 | | 45 | |

表3 建筑物内人体舒适度加速度均方根限值（m/s2）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 房间名称 | 连续振动、间歇振动和重复性振动 | | 每天只发生数次的冲击振动 | |
| 昼间 | 夜间 | 昼间 | 夜间 |
| 医院手术室和振动要求严格的工作区 | 4.0×10-3 | | 4.0×10-3 | |
| 住宅 | 8.0×10-3 | 5.6×10-3 | 119.1×10-3 | 5.6×10-3 |
| 办公室 | 15.9×10-3 | | 238.3×10-3 | |
| 车间办公室 | 31.8×10-3 | | 35.7×10-3 | |

目前由于我国基于Z振级指标的振动限值与烦恼度之间暴露-响应关系的基础研究尚不完善。为了估算不同振动限值能够确保多大比例人群不受振动烦恼影响，通过指标换算和借鉴国外已有暴露-响应研究成果，北京交通大学针对城市轨道交通振动源给出了住宅室内基于Z振级最大值指标的暴露响应曲线估算公式，如下：

轻度烦恼：

一般烦恼：

高度烦恼：

式中，

*y*表示住宅室内受振动影响产生烦恼的人群比例（%）；

；*VL*z,max为Z振级最大值（dB）；*N*为待评估测点所在断面全天通过列车数；*R*为与计权因子有关的系数，采用1992版计权时*R*=3.278，采用2007版计权时*R*=2.234。

针对住宅室内振动控制限值，分别对应于烦恼度人群百分比间表4：

表4 烦恼度人群百分比

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 房间和时间 | 限值 | 轻微烦恼(%) | 一般烦恼(%) | 高度烦恼(%) |
| 起居室全天或卧室昼间 | 78 | 38.8 | 20.9 | 8.9 |
| 卧室夜间 | 75 | 33.4 | 17.0 | 6.8 |

以高度烦恼来对比评价，卧室昼间和夜间无法保证8.9%和6.8%居民的振动舒适环境，这与欧洲主要国家的最严格控制限值对应的比例（2.6~4%）基本近似。

**4.2.2** 考虑交通振动对建筑室内人体舒适度的影响，应附加采用竖向四次方振动剂量值，满足表4.2.2的限值要求

**表4.2.2 交通振动对建筑物内人体舒适度影响的振动限值 单位：m/s1.75**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 建筑物类型 | 容许竖向四次方振动剂量值 | |
| 昼间 | 夜间 |
| 住宅 | 0.2 | 0.1 |
| 办公室 | 0.4 | |
| 车间办公室 | 0.8 | |

【条文说明】

英国标准BS6472-1-2008给出了*VDV*取值范围与对振动负面评价的关系（竖向见表5），此外针对铁路建设与运营影响建议昼间和夜间的*VDV*限值分别为0.31m/s1.75和0.18m/s1.75，相比之下本标准引用《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013的竖向*VDV*限值较为严格。

表5 BS6472-1-2008评价振动对居民影响的*VDV*取值范围（m/s1.75）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 地点 | 时间 | 负面评价可能性小 | 可能出现负面评价 | 很可能出现负面评价 |
| 住宅  建筑 | 昼间（16h） | 0.2~0.4 | 0.4~0.8 | 0.8~1.6 |
| 夜间（8h） | 0.1~0.2 | 0.2~0.4 | 0.4~0.8 |

**注：1.** 办公室和车间昼间（16h）取值分别乘以系数2和4。

## 4.3 振动敏感设备振动限值

**4.3.1**振动敏感设备限值以说明书要求为准，如说明书直接采用VC振动标准时，相关数值见表4.3.1

**表4.3.1 VC振动标准限值及适用仪器**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 防振等级 | 允许振动量 | 适用仪器 |
| VC-A | 4~8Hz内加速度不超过2548μm/s2，8~80Hz速度不超过50μm/s | 放大倍率低于400的光学显微镜、精密天平、光学天平等 |
| VC-B | 4~8Hz内加速度不超过1274μm/s2，8~80Hz速度不超过25μm/s | 线宽3μm的照排设备 |
| VC-C | 1~80Hz内速度不超过12.5μm/s | 放大倍率低于1000的光学显微镜、1μm线宽的照排设备、薄膜场效应晶体管扫描设备 |
| VC-D | 1~80Hz内速度不超过6.25μm/s | 包括电子显微镜（扫描电镜、透射电镜）、E梁系统在内的众多精密仪器 |
| VC-E | 1~80Hz内速度不超过3.1μm/s | 较难达到的振动水平，可以满足对振动相当敏感的设备 |
| VC-F | 1~80Hz内速度不超过1.6μm/s | 难以达到的振动水平，通常用于振动环境非常严格的超净工作间等。F、G级别仅作评估、不作标准用 |
| VC-G | 1~80Hz内速度不超过0.78μm/s |

【条文说明】

VC曲线源自国际上使用最广泛的洁净室设计要点标准（即IEST-RP-CC 012.2），振动敏感设备振动限值除应满足上述VC标准外，相关内容还可参阅《机械振动与冲击 装有敏感设备建筑物内的振动与冲击 第2部分：分级》GB/T 23717.2-2009的相关分级规定。

## 4.4 建筑结构振动限值

**4.4.1** 建筑结构在城市轨道交通和铁路、打桩、振冲和强夯施工作用下的振动限值宜按表4.4.1的规定采用，爆破施工作用下的振动限值宜按表4.4.2的规定采用。

**表4.4.1建筑结构在城市轨道交通、铁路、施工活动作用下的振动限值 单位:mm/s**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 振动源 | 建筑物类型 | 顶层楼面处振动速度峰值限值 | 基础处振动速度峰值限值 | | |
| 1Hz~100Hz | 1Hz~10Hz | 50Hz | 100Hz |
| 城市轨道交通和铁路 | 工业建筑、公共建筑 | 10.0 | 5.0 | 10.0 | 12.5 |
| 居住建筑 | 5.0 | 2.0 | 5.0 | 7.0 |
| 对振动敏感、具有保护价值、不能划归上述两类的建筑 | 2.5 | 1.0 | 2.5 | 3.0 |
| 打桩、振冲等基础施工 | 工业建筑、公共建筑 | 12.0 | 6.0 | 12.0 | 15.0 |
| 居住建筑 | 6.0 | 3.0 | 6.0 | 8.0 |
| 对振动敏感、具有保护价值、不能划归上述两类的建筑 | 3.0 | 1.5 | 3.0 | 4.0 |
| 强夯施工 | 工业建筑、公共建筑 | 24.0 | 12.0 | 24.0 | - |
| 居住建筑 | 12.0 | 5.0 | 12.0 | - |
| 对振动敏感、具有保护价值、不能划归上述两类的建筑 | 6.0 | 3.0 | 6.0 | - |

**注：1.** 表中振动限值应按频率线性插值确定；

**2.** 当无法在基础处评价时，评价位置可取在最底层主要承重外墙的底部。

【条文说明】

本条依据《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013。建筑结构振动限值是针对时域内振动速度最大值而定的，即质点最大速度峰值（Peak Particle Velocity, PPV）。表4.4.1中不同频率是指测试或计算时程信号的峰值频率。在对标评价时，首先对时程信号进行傅里叶变换，在傅里叶谱中根据最大峰值对应的频率，结合表4.4.1确定振动速度峰值限值。

本条所称交通，是指公路、铁路和城市轨道交通的统称。建筑施工是指打桩、地基处理等，主要涵盖符合设计和施工质量相关技术标准的民用与工业建筑，不包括古代建筑，对室内外非结构性构件和各类悬挂物体等，由于其特性及受支承或约束的方式具有较强的不确定性，故其受施工振动的安全性评估不得套用本节规定。打桩、振冲等基础施工一般指采用锤击和振动法打桩、振冲法处理地基；强夯施工一般指采用强夯处理地基。表4.4.1给出的振动频率适用范围为1Hz～100Hz，峰值频率低于1 Hz 的振动会出现许多传递形式，并产生一些与较高频率完全不同的影响，不能简单地通过振动的强度、频率和持续时间来解释；频率高于100Hz的振动速度峰值限值规定按4.4.2条执行。

表4.4.1中的“对振动敏感、具有保护价值、不能划归上述两类的建筑”是指未核定为文物保护单位的不可移动，具有历史、艺术、科学价值且需要保护的古建筑、古文化遗址、古墓葬、古窟寺、石刻、壁画、近现代史迹和代表性建筑物等，主要包括住房和城乡建设部与国家文物局公布的中国历史文化名镇、中国历史文化名村，文化部和国家文物局公布的中国历史文化名街，省、自治区、直辖市和副省级市、地级市人民政府核定公布的优秀近代建筑、优秀历史建筑、历史文化街区、历史风貌保护区、旧城风貌区，民政部公布的全国重点烈士纪念建筑物保护单位等。

**表4.4.2建筑结构在爆破作用下的振动限值 单位:mm/s**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 建筑物类别 | 安全允许质点震动速度 | | |
| *f*≤10Hz | 10Hz≤*f*≤50Hz | *f*＞50 Hz |
| 1 | 土窑洞，土坯房、毛石房屋 | 1.5～4.5 | 4.5～9 | 9～15 |
| 2 | 一般民用建筑物 | 15～20 | 20～25 | 25～30 |
| 3 | 工业和商业建筑物 | 25～35 | 35～45 | 42～50 |

**注**：1. 表中质点振动速度为三分量中的最大值：振动频率为主振频率；  
2. 频率根据现场实测波形确定或按如下数据选取：硐室爆破*f*<20HZ；露天深孔爆破*f*=10～60HZ；露天浅孔爆破 *f*=40～100Hz；地下深孔爆破 *f*=30～100Hz；地下浅孔爆破 *f*=60～300Hz；  
3. 爆破振动监测应同时测定质点振动相互垂直的三个分量。

**4.4.2** 当建筑结构振动速度峰值出现在除顶层楼面和基础外的其他位置时，建筑结构振动速度峰值限值也应按表4.4.1的规定采用；当建筑结构振动峰值频率大于100Hz时，振动速度峰值不宜超过表4.4.1中顶层楼面处振动速度峰值限值。

【条文说明】

本条依据德国标准《Structural vibration. Part 3: Effects of vibration on structures》DIN 4150-3:1999。

**4.4.3** 对于未达到国家现行抗震设防标准的城市旧房和镇(乡)村未经正规设计自行建造的房屋的振动限值，宜按表4.4.1中居住建筑的70%确定。

【条文说明】

本条依据《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013。城市旧房是指设计建造时未考虑抗震要求或低于现行抗震设防标准的既有建筑，而镇（乡）村自建房屋绝大多数是未经正式设计、施工质量未受正规监督的，其整体性以及抵抗场地建筑施工振动的性能相对较差，因而应该降低它们的振动速度峰值限值。

**4.4.4**当打桩根数少于10根时，建筑结构振动限值可在表4.4.1中打桩、振冲等基础施工规定值的基础上适当提高，但不应超过表4.4.1中强夯施工的规定值。

【条文说明】

本条依据《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013。振动对建筑结构的影响具有累积效应。当振动作用次数较少、时间较短时，振动速度峰值限值可适当提高，但同时应该加强对受振建筑结构实际安全状况的观察。

**4.4.5** 对于处于施工期的建筑结构，当混凝土、砂浆的强度低于设计要求的50%时，应避免遭受施工振动影响；当混凝土、砂浆的强度达到设计要求的50%～70%时，其振动速度限值不宜超过表4.4.1中打桩、振冲等基础施工或强夯施工规定值和表4.4.1规定值的70%。

【条文说明】

本条依据《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013，是为了防止新浇混凝土和砌体砂浆在强度明显低于设计强度的情况下受振损伤，从而降低建筑构件的承载力和耐久性。对普通混凝土和砌体砂浆，在可施工气候环境条件下，浇筑后1天～2天内，应尽量避免遭受较为强烈的振动。

**4.4.6** 在按表4.4.2选定安全允许质点振速时，应认真分析以下影响因素：

1. 选取建筑物安全允许质点振速时，应综合考虑建筑物的重要性、建筑质量、新旧程度、自振频率、地基条件等；

2. 选取隧道、巷道安全允许质点振速时，应综合考虑构筑物的重要性、围岩分类、支护状况、开挖跨度、埋深大小、爆源方向、周边环境等；

3. 永久性岩石高边坡，应综合考虑边坡的重要性、边坡的初始稳定性、支护状况、开挖高度等；

4. 非挡水新浇大体积混凝土的安全允许质点振速按本表给出的上限值选取。

【条文说明】

本条依据《爆破安全规程》GB 6722-2014，以评估爆破对不同类型建(构)筑物、设施设备和其他保护对象的振动影响，来选择不同的安全标准。根据表4.4.2来确定爆破地点与人员和其他保护对象之间的安全允许距离，应按各种爆破有害效应(地震波、冲击波、个别飞散物等)分别核定，并取最大值。

**4.4.7** 对于通用机械基础在时域范围内的容许振动值，应该按照表4.4.3的规定确定。当通用机械转速低于600r/min时，基础在时域范围内的容许振动位移峰值应取0.1mm。

**表4.4.3通用机械基础在时域范围内的容许振动值**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 机械类别及分类 | | 容许振动速度峰值(mm/s) | |
| 普通基础 | 隔振基础 |
| 泵 | 功率≤75KW | 3.0 | 7.0 |
| 功率≥75KW | 5.0 | 10.0 |
| 风机 | 功率≤15KW | 3.0 | 7.0 |
| 15KW<功率<75KW | 5.0 | 10.0 |
| 功率≤75KW | 6.3 | 12.0 |
| 离心机、分离机、膨胀机 | | 5.0 | 10.0 |
| 电机 | 轴心高度<315m | 3.0 | - |
| 轴心高度≥315m | 5.0 | - |

**注**：表中数值适用于块体式基础和隔振基础或刚性台座，不适用于设置在楼面或平台上的通用机械。

【条文说明】

本条依据《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013、《动力机器基础设计规范》[GB50040-96](http://www.jianbiaoku.com/webarbs/book/12744/321814.shtml)，在通用机械基础容许振动值的确定中主要考虑两个原则：一是能保证机器本身正常的运转；二是动力设备基础所产生的振动波，在经过地面振动传播衰减后，对其他建筑物和操作人员不产生有害影响。

**4.4.8** 对于电动振动试验台基础在时域范围内的容许振动值，应该按照表4.4.4的规定确定。根据大量数据统计，国内外振动试验合主要试验频率区间是在0～200 Hz，并以1.0～30 Hz的激励为主；绝大多数振动试验合作动器的行程为300mm，振动试验的位移振幅控制范围为±150mm。

**表4.4.4电动振动试验台基础在时域范围内的容许振动值**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 激振力(kN) | 容许振动速度峰值(mm/s) | 容许振动加速度峰值(mm) |
| ≤6.0 | 6.3 | 0.5 |
| >6.0 | 10.0 | 0.8 |

**注**：电动振动试验台最大激振力不大于200kN，激振频率不超过2000Hz，最大加速度不大于1000m/s2，最大行程不大于55mm。

【条文说明】

本条依据《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013、《动力机器基础设计规范》[GB50040-96](http://www.jianbiaoku.com/webarbs/book/12744/321814.shtml)，振动试验台属于强力振动设备，在进行振动试验时，一方面，试验台作动器的推力较大，运动过程中可能会引起地基的振动响应；另一方面，外部环境振动过大，也会影响振动台的试验精度。因此，在地基基础设计时，除了要减少振动对周围环境的影响和避免对附近建筑安全的影响外，还要避免环境振动对试验精度的影响。

**4.4.7**活塞式发动机基础在时域范围内的容许振动值，应按表4.4.5的规定确定。

**表4.4.5活塞式发动机基础在时域范围内的容许振动值**

|  |  |
| --- | --- |
| 基础类型 | 容许振动速度峰值(mm/s) |
| 普通基础 | 10.0 |
| 隔振基础 | 20.0 |

**注：**1.对于惯性力和惯性力矩均已平衡的发动机基础、功率小于100kW的发动机基础，表中的容许振动值应降低30%；

    2.当地基为松散砂土、软土、饱和土和桩基时，应进行专门研究；

    3.当发动机或柴油发电机组所处场地的周边有振动控制要求时，发动机基础的容许振动值应由设备制造商或工艺专业提供，或通过振动衰减计算确定。

**4.4.7**活塞式发动机试验台基础在时域范围内的容许振动值，应按表4.4.6的规定确定。活塞式发动机自身的振动评级多个国家已有标准。均采用振动速度均方根值作为振动评级和验收的衡量指标。

**表4.4.6活塞式发动机试验台基础在时域范围内的容许振动值**

|  |  |
| --- | --- |
| 基础类型 | 容许振动速度峰值(mm/s) |
| 普通基础 | 3.2 |
| 隔振基础 | 6.3 |

**注**：对于振动有特殊要求的试验台，容许振动值应由设备制造厂家或工艺专业提供。

【条文说明】

本条依据《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013、《动力机器基础设计规范》[GB50040-96](http://www.jianbiaoku.com/webarbs/book/12744/321814.shtml)，考虑到与机器自身振动评级呼应，且振动速度与振动能量和振动产生的内应力直接对应，以及建筑行业采用峰值的习惯，本标准采用了时域内振动速度峰值作为发动机基础的容许振动值。该振动值是按与机器振动评级B的上限值对应的振动烈度值并留有余地确定的。由于发动机的功率大小和平衡性能相差很大，对平衡性能好或功率小的发动机，设计时容许振动值宜控制得严一些。发动机基础隔振后，不存在振动对地基和周围环境的影响，且隔振基础的振动更接近于设备自身的振动，故发动机隔振基础的容许振动值可以比地基上的基础大幅提高。

# 5 场地振动影响评估

## 5.1 一般规定

**5.1.1**场地振动影响评估应按照流程图5.1.1-1执行

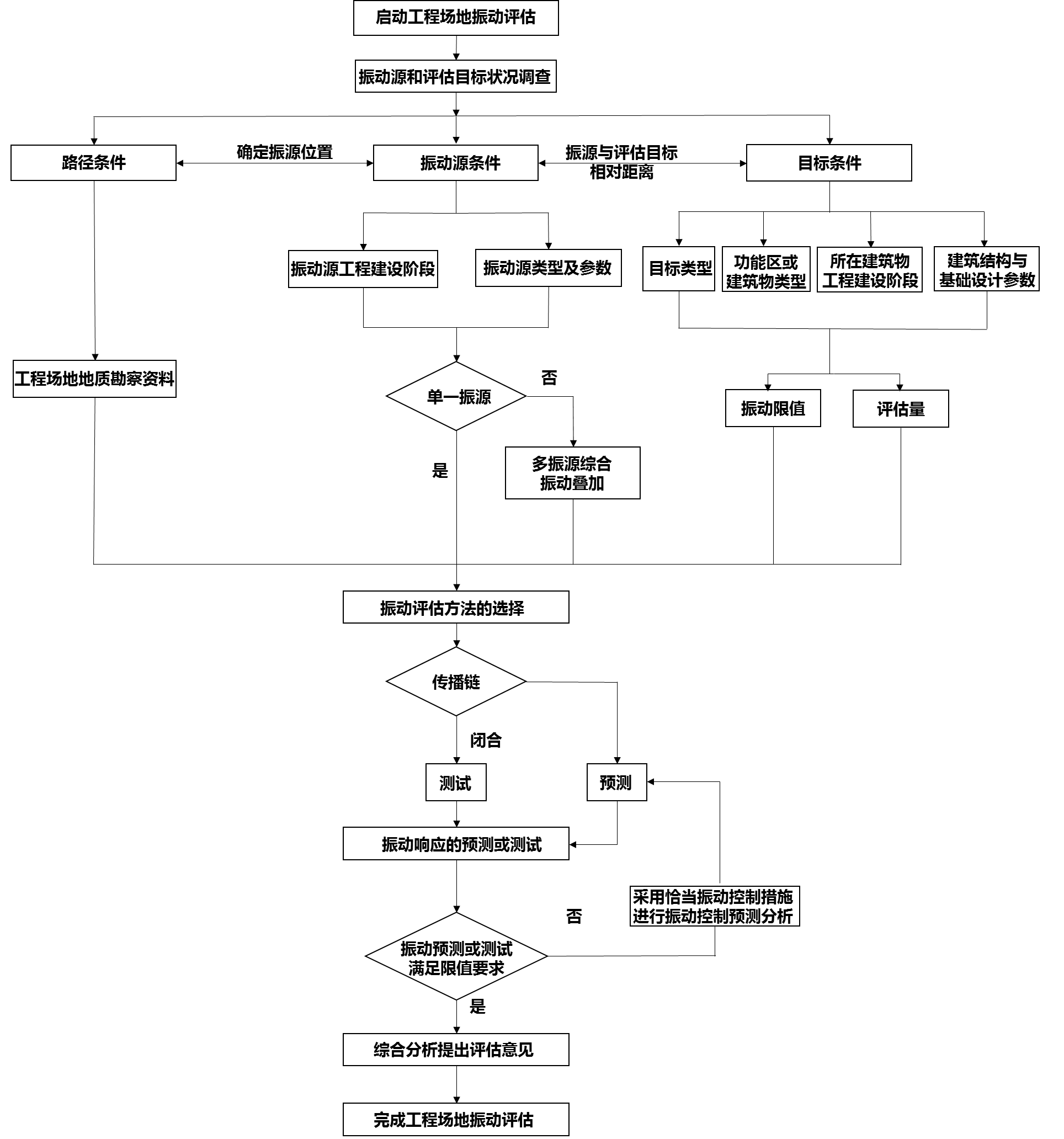


图5.1.1-1 场地振动影响评估的步骤和方法

**5.1.2** 状况调查和资料收集应从工业振动源、传播路径和评估目标三个方面开展，做好相关资料的收集和整理。

【条文说明】

工业振动源引起场地振动对评估目标的影响，从振动的产生、传播到激发目标振动是一个非常复杂的过程，受多方面因素影响。一般认为，这种传播过程可以拆解为单一方向的传播链，即包含工业振动源、传播路径和评估目标自身三个相互解耦的子系统（如图5.1.2-1）。为确定评估目标的振动限值和评估量、评估目标振动的确定方法以及其他所需的参数等，需针对振动体系中的上述三个子系统分别展开现状调查和资料收集。

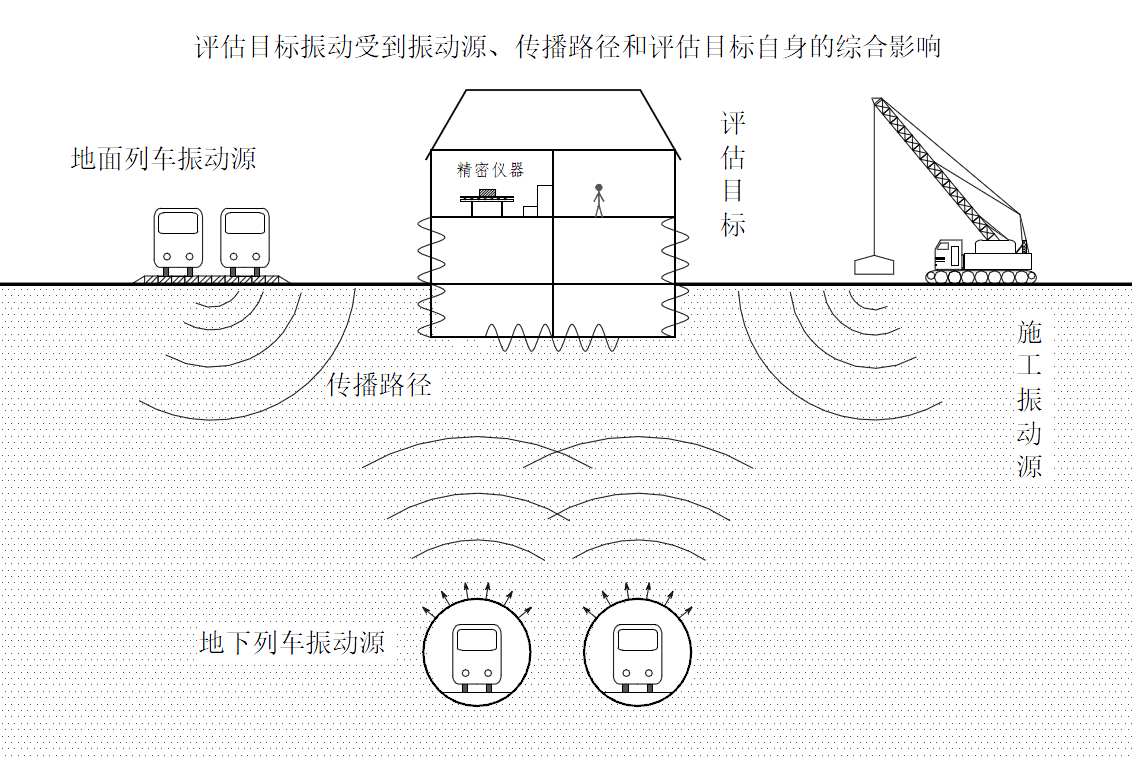


图5.1.2-1 振动体系示意图

**5.1.3** 评估方法宜依据工程建设阶段选择。振动传播链闭合时宜优先选用测试方法；振动传播链未闭合时宜结合工程建设阶段采用精准度与成本相适宜的预测方法，动态修正预测结果。

【条文说明】

场地振动影响问题可看作由“工业振动源”、“传播路径”和“评估目标”三个子系统组成。由于振动传播衰减基本上是单向链式衰减，因此将这三个子系统组成的传播衰减体系称为“振动传播链”。当且仅当工业振动源和目标建筑均建成投入使用且传播路径不发生变更时，传播链处于“闭合”状态。以城市轨道交通和铁路为例，如图5.1.3-1所示，此时振动传播链“闭合”，可在建筑物内实际测试得到真实的振动响应，因此对于传播链“闭合”的情况应优先选用测试方法进行评估。当工业振动源尚未建成投入运行、或当建筑物尚未建成、或当传播路径可能发生变更（如需评估传播路径隔振效果）时，均无法通过实际测试获取工业振动源引起建筑物内的最终振动响应，故应结合工程建设阶段采用精准度与成本相适宜的预测方法进行评估。

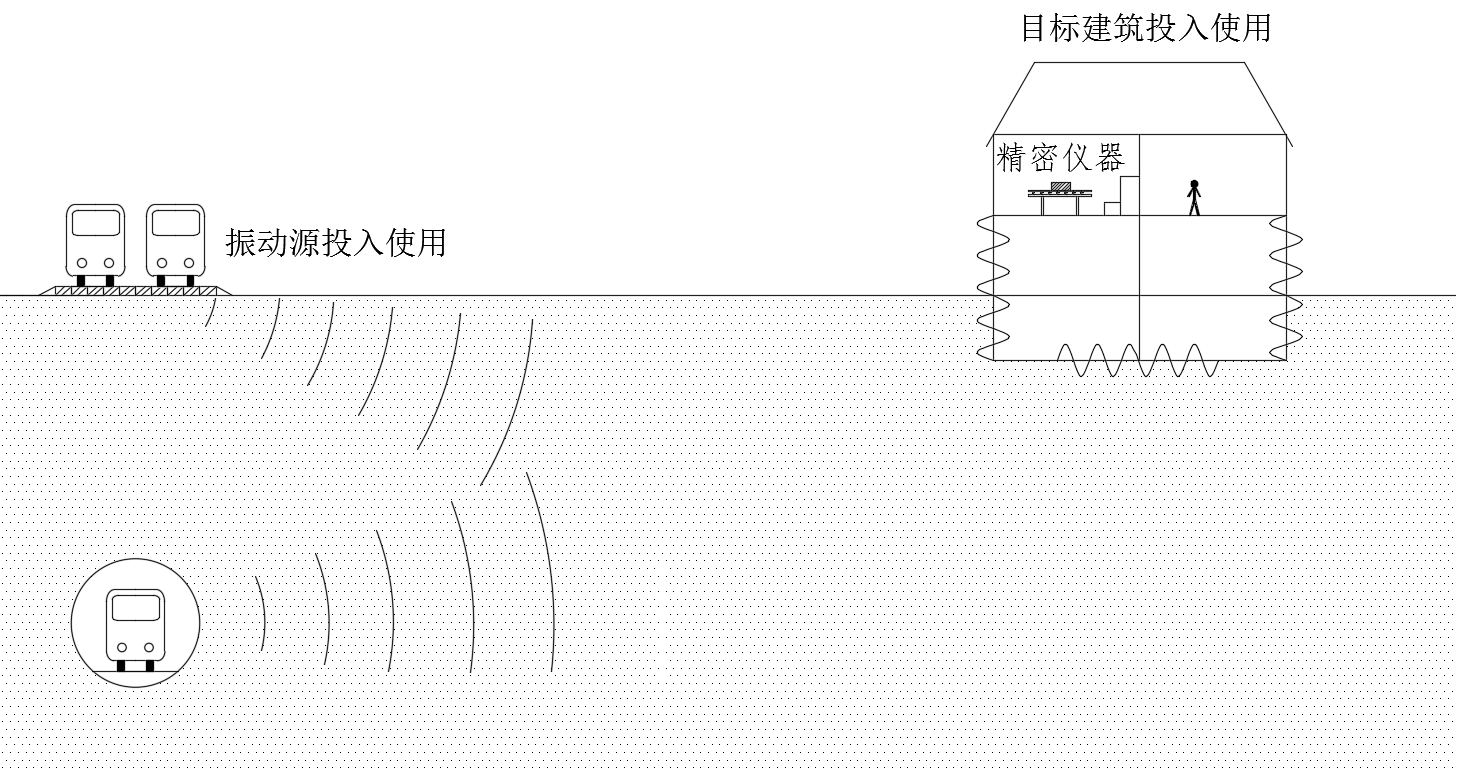


图5.1.3-1 振动传播链闭合示意图（以城市轨道交通为例）

**5.1.4** 采用类比测试时，应保证工业振动源条件、传播路径条件和评估目标条件相同或相似。

**5.1.5** 当场地附近存在多个工业振动源时，应考虑多个工业振动源共同作用的最不利影响，并通过测试确定，在无测试条件时，可按附录A计算。

【条文说明】

场地若受多个工业振动源影响，将改变振动体系的输入条件，构成多工业振动源的振动环境，需考虑多个工业振动源的振动叠加（如图5.1.5-1所示）。对于随机振动，多个振动源的叠加是基于能量叠加原理计算的。通常均方根的平方可表征能量特征。当振动评估量为幅值或振级时，应先将振动量转换为均方根值，完成能量叠加计算之后再反算回原评估量。

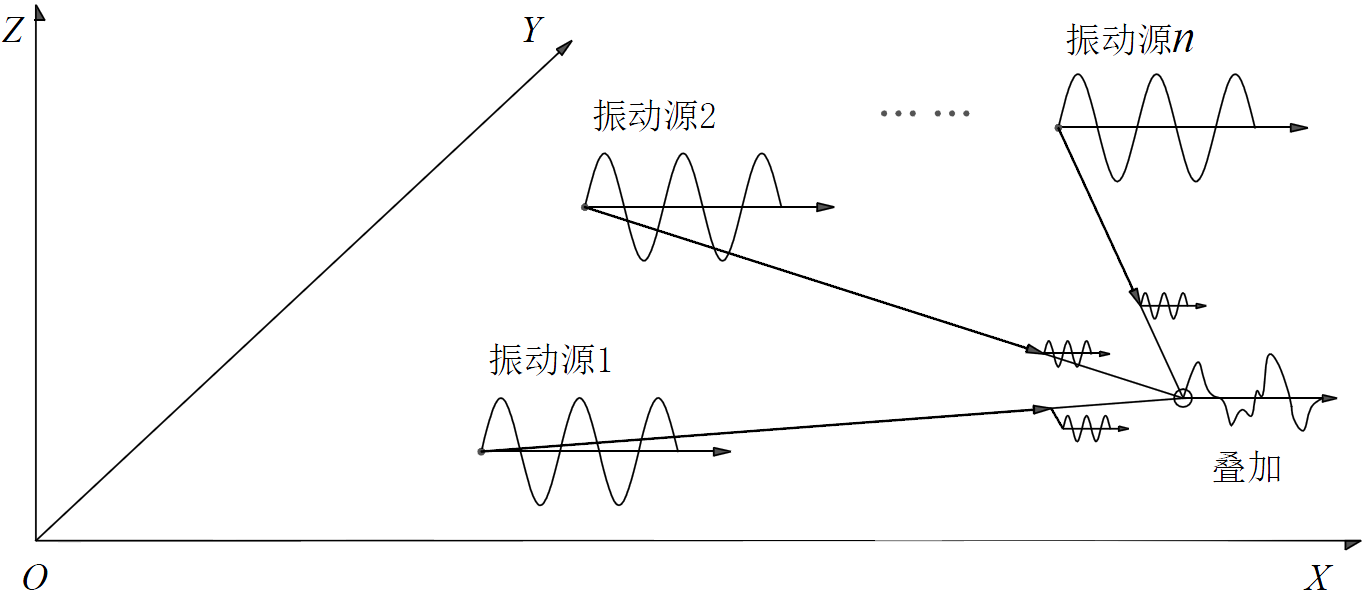


图5.1.5-1 振动叠加示意图（以多个简谐振动源叠加为例）

## 5.2 评估步骤和方法

**5.2.1** 场地振动影响评估，可按下列步骤进行：

**1** 获取整个振动传播链相关的状况和资料；

**2** 确定评估目标的振动限值和评估量；

**3** 预测或测试评估目标的振动；

**4** 综合分析提出评估意见。

【条文说明】

本条规定了场地振动影响评估的步骤和方法。其中获取整个振动传播链相关的状况和资料是振动影响评估的基础；确定评估目标的振动限值和评估量是评估的标准；预测或测试评估目标的振动是通过确定合适的方法得到评估目标的振动响应；综合分析提出评估意见是评估的目的。因此，场地振动影响评估应按条文规定进行，以做到资料详实，方法正确，论证充分，结论可靠。

**5.2.2**状况调查和资料收集应包括但不限于下列内容：

**1** 工业振动源：包括类型、相关参数、分布状况及工程概况；

**2** 传播路径：包括场地地质勘察资料、影响振动传播的建构筑物资料；

**3** 评估目标：包括类型、相关参数、分布状况及工程概况；

**4** 场地评估：包括目标与工业振动源的空间位置关系。

【条文说明】

本条针对振动传播链中的工业振动源、传播路径和评估目标分别列出对应的振动环境现状调查和资料收集要求。

1）针对城市轨道交通和铁路振动源，应取得以下参数：

a 列车类型及频率范围、列车编组数、行车密度、扣件支撑间距、转向架内轴距、转向架间距、车辆内轴距、车辆间轴距、行车速度、车身质量、转向架质量、轮对质量等；

b 隧道断面形状及施工方法、隧道埋深、隧道衬砌厚度、轨道类型及参数等；

2）针对动力机器振动源，应取得以下参数：

a 动力机器振动源荷载类型及频率范围；

b 基础形式、基础底面积等。

3）针对施工振动源，应取得以下参数：

a 施工振动源荷载类型及频率范围；

b 振动源半径等。

4）针对场地工程地质勘察资料，应取得以下参数：

a 场地地层分布及土质特征：土层名称、土层厚度、土质特征、分布状况等；

b 岩土物理力学性质指标：各层土剪切波速、密度、泊松比、阻尼比、饱和度、孔隙比等；

c 场地水文地质条件：地下水位等。

5）针对评估目标，应取得以下参数：

a 评估目标所处区域环境类别和结构类型；

b 目标建筑及其基础的设计图纸等。

**5.2.3**振动限值应依据评估的目的、工业振动源类型、评估目标的使用功能按本标准第4章的规定确定。

【条文说明】

本条指出振动限值的确定方法。根据评估的目的可确定评估目标的类型，进而根据工业振动源类型和评估目标的使用功能确定振动限值。

**5.2.4**当采用Z振级指标评估时，冲击振动、城市轨道交通振动以及铁路交通振动采用Z振级最大值，其他类型振动采用Z振级等效值。

【条文说明】

本条依据《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》GB/T 50355-2018，由于冲击振动、城市轨道交通、铁路交通振动每次振动事件之间存在较长的间隔，若采用等效值进行评价，会因为振动事件之间的间隔计入积分时长，导致数值偏低，且测量结果会随着振动事件之间的间隔变化而变化，为了保证测量结果的可复现性，对于此类振动类型，采用Z振级最大值作为评估量。

对于其他运行期间长期存在的振动，虽然可能由于采用变频方式导致振动幅值有波动，但是由于其运行期间振动长期存在，不属于突发的冲击振动，人在这种环境中，振动敏感度会下降，因此采用Z振级等效值作为评估量。

**5.2.5** 场地振动影响的预测或测试，应分别按本标准第5.3节和5.4节的规定执行。

**5.2.6** 工程建设处于可行性研究阶段时，可采用现行本标准和国家标准推荐的计算方法进行初步预测。

【条文说明】

本条指出工业振动源或目标建筑在工程建设的可行性研究阶段的评估方法。初步预测方法通常包括经验公式预测、数据库预测、传递函数解析预测和机器学习预测等方法，初步预测的预测效率高，适合大规模筛查敏感点，预测结果的准确度基本可以满足可行性研究阶段的要求。

**5.2.7** 工程建设处于初步设计阶段时，宜采用数值仿真的方法进行预测。应利用类比测试对数值模型准确度进行校核和验证。

【条文说明】

本条指出工业振动源或目标建筑在工程建设的初步设计阶段的评估方法。数值仿真预测方法可根据不同的实际工程情况建立分析模型，分析过程不受实际场地条件的限制。此外为确保数值模型的可靠性，确定最优化的分析参数，可对数值模型进行校核。校核方法如下：首先在所在城市已建成工业振动源（或土层条件具有可比性的其它城市已建成工业振动源）附近测试场地地表振动（实测响应）和源强振动响应（实测激励）；然后根据运营工业振动源的实际参数建立“校准模型”，并计算工业振动源强和地表场地的振动响应与测试结果进行对比。对有限元模型的网格划分方法、边界处理方法、荷载施加方法、地层阻尼参数等建模不确定因素逐一调试，直到数值结果与测试结果在准确度允许的条件下吻合良好（即完成“输入校准”和“输出校准”的两位校准工作）。然后应用相同的建模方法，根据预测场地的实际地层参数、工业振动源条件和评估目标等建立预测模型，从而保证预测结果的准确度基本可以满足方案设计阶段的要求。

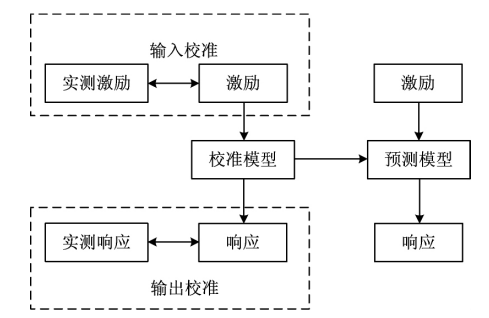


图5.2.7-1数值仿真预测“输入-输出”两位置校核方法示意图

**5.2.8** 工程建设处于施工图设计阶段时，宜在数值仿真预测的基础上辅助测试关键传播链的传递函数，进行精准预测和复核评估。

【条文说明】

本条指出工业振动源或目标建筑在工程建设的施工设计阶段的评估方法。对于需要重点评估的目标，当振动传播链局部闭合时，可测试已局部闭合传播链的传递函数，并与数值方法相结合形成“数值+测试”的混合预测方法，提高预测结果准确度。

以下以城市轨道交通地下线为例介绍辅助传递函数测试法的几种适用情况，其余类型振动源可类比执行。

假设建筑内振动响应*R*B（*f*）可以表示为车轮-钢轨处振动响应*R*Wr（*f*）与一系列传递函数的乘积：

 （5.2.7-1）

式中：

*H*B（*f*）——建筑室内和场地控制点两点间的传递函数；

*H*S（*f*）——场地控制点与隧道-地层接触点之间的传递函数；

*H*Tu（*f*）——隧道-地层接触点与轨道-隧道接触点之间的传递函数；

*H*Tr（*f*）——轨道-隧道接触点与车轮-钢轨接触点之间的传递函数；

在实际操作时，上述传递函数均是广义上的，既可以看做响应与响应之比，也可以看做响应与力之比。而上述四个传递函数可根据传播链局部闭合情况一次性测试其中一个或多个。

常见的使用实测传递函数预测方法（或实测关键传播链响应）的情况包括：

（1）在运营线路新建敏感建筑时，可仅建立建筑结构模型，实测待建建筑场地振动响应*R*S（*f*）并将其作为模型输入，即（*R*B（*f*）=*R*S（*f*）*H*B（*f*））；

（2）在既有建筑附近新建城市轨道交通线路时，可仅建立“车辆-轨道-隧道-地层”模型，预测建筑物楼外一点振动响应，再实测建筑物楼内、楼外的传递函数，将预测与实测相乘获得楼内一点振动响应；

（3）当具备现场钻孔锤击的条件时，可钻孔至轨面标高，利用深孔锤击法实测轨面标高点到场地（或建筑内）预测点的传递函数，再将列车荷载频谱乘以传递函数获得场地（或建筑内）的振动响应。采用该方法由于忽略了隧道结构对传递函数的影响，需要对此进行修正；

（4）当隧道已经建成但尚未铺设轨道时，可直接在隧道内锤击，获得隧道内一点到场地（或建筑内）预测点的传递函数，再将列车荷载频谱乘以传递函数获得场地（或建筑内）的振动响应。

采用实测地层传递函数方法时，由于采用的是“点源激励-点响应”的模式，与“列车线源激励-点响应”的模式有差异，应将“点源激励”换算为“列车线源激励”。美国FTA给出了基于传递率级TM指标的换算方法如下：

 （5.2.7-2）

## 5.3 场地振动影响预测

**5.3.1** 场地振动影响预测宜根据工程建设阶段以及评估目标的敏感程度，依据5.3.2~5.3.6规定的预测方法及其要求进行动态预测。

【条文说明】

由于不同工程建设阶段以及不同敏感度的评估目标对场地振动预测的精确性要求不同，使得选用的预测方法有所差异。经验预测公式等方法计算快捷，预测成本低，普适性较好，但精度有限，适用于可行性研究阶段以及评估目标敏感度低的初步预测；数值仿真方法预测精度高，但工作量大、增加预测成本，适用于方案设计阶段以及评估目标敏感度较高的确认预测；在数值仿真预测的基础上辅助测试关键传播链的传递函数预测精度最高，比较适合于施工设计阶段以及初始敏感度高的精准预测。

**5.3.2** 城市轨道交通、动力机器、振动台、打桩和爆破振动源的振动影响经验预测公式可参考附录B。若预测量和评估量不一致，宜采用类比测试方法确定预测量。

【条文说明】

城市轨道交通振动源经验预测公式参考《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》HJ 453-2018，动力机器振动源经验预测公式参考《动力机器基础设计标准》GB50040-2020，振动台振动源经验预测公式由防灾科技学院依据工程案例实测结果回归得出，打桩振动源经验预测公式参考《古建筑防工业振动技术规范》GB/T 50452-2008，爆破振动源经验预测公式参考《爆破安全规程》GB6722-2014。原则上经验预测公式应保证振动预测量和评估量一致，但现有经验公式未能完全满足本标准需要。若存在预测量和评估量不一致情况，建议选择与工业振动源和评估目标工程条件相近的项目进行类比测试。

**5.3.3** 采用预测公式估计评估量时，应考虑不利场地条件对评估量产生的放大作用。

【条文说明】

目前常见的预测公式多基于一般良好场地条件建立，当评估目标处于不利场地条件时（如古河道及其两侧、高坡等），应该考虑不利条件对振动量的放大效应。放大系数可通过经验预测公式、数值仿真和类比测试的方法确定。

**5.3.4** 数值仿真预测宜采用有限元法，预测流程如图5.3.3-1所示。

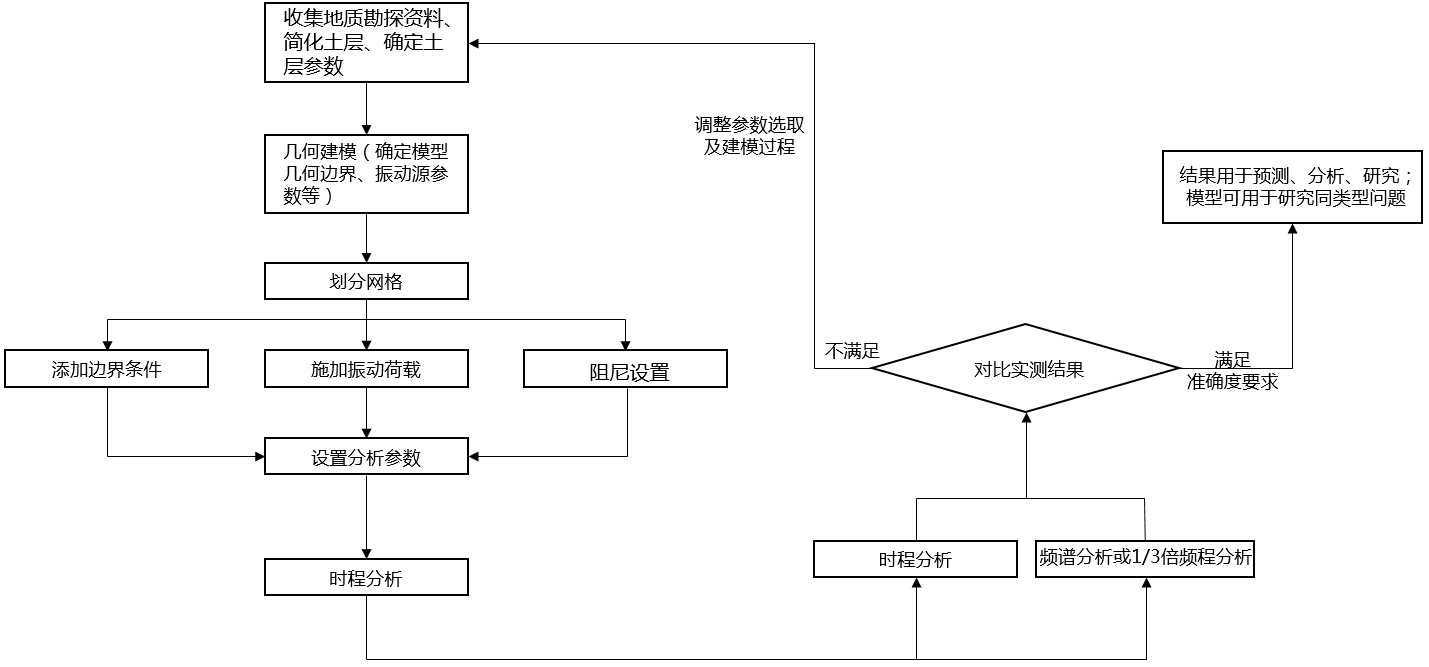


图5.3.3-1 数值仿真预测流程图

**5.3.5** 数值仿真预测应考虑计算模型的完整性，即模型中应涵盖工业振动源、传播路径和评估目标。在有可靠依据的条件下，亦可只针对部分传播链进行模型分析。

**5.3.6** 工业振动源、传播路径和评估目标参数应依据5.2.1节状况调查和资料收集确定，其他相关需求参考附录C。

**5.3.7** 数值仿真中应考虑地形起伏及不均匀地质条件（新填土、古河道、夹杂体、溶洞等）的影响。在松软沉积层表面、凸起地形顶部、陡坎、边坡坡顶等，振动幅值存在显著的局部放大效应，应建立符合实际场地特征的地层波速模型和几何模型。

## 5.4 场地振动影响测试

**5.4.1 测试仪器**

**1** 振动测试系统及其测试仪器的性能技术指标应符合国家现行有关标准的规定。

【条文说明】

振动测试系统及其测试仪器的性能技术指标应主要依据国家现行有关标准《人体对振动的响应 测量仪器》GB/T 23716-2009、《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013对相关内容的规定。

**2** 振动测试时，应根据测试对象的振动限值采用的物理量、频率范围、幅值大小、灵敏度要求选择相应的传感器。

**5.4.2 测试要求**

**1** 振动测点和测振方向选择应符合下列规定：

**a** 对于建筑室外人体舒适度振动测试，测点应置于建筑物室外0.5m以内振动敏感处，测振方向为竖向，振动测点不宜少于5个。

【条文说明】

本条依据《城市区域环境振动测量方法》GB 10071-88，测点数量依据《电子工业防微振工程技术规程》GB 51076-2015。城市区域环境振动测试一般应不少于5个测点，以便于摸清场地环境振动的强弱分布，对于某些重要的点、线振动源，尚可通过测试摸清其距离增加而振动衰减的规律。

**b** 对于建筑物内人体舒适度振动测试，测点应置于房间内人员主要活动区域地面振动敏感位置，当振动敏感位置无法确定时宜选择室内地面中央，注意避免测点在梁、柱附近，测振方向为竖向。对于面积不大于20m2的房间，可以只布设1个测点；对于面积大于20m2的房间，应均匀布设至少3个测点。

【条文说明】

本条依据《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》GB/T 50355-2018，对于建筑室内振动测试，普通房间如卧室通常不大于20m2。对于这类房间，可以在可察觉的振动敏感处选择一个测点，如果房内有多个振动敏感位置，可增加测点。对于大于20m2的房间，受梁柱等构造影响，房间地面可能非匀质，应增加测点数量。通常，楼板靠近梁、柱附近的位置，振动不易激发，选择测点应注意避免选择在梁、柱附近。

**c** 对于振动敏感设备振动测试，独立基础振动测点应置于基础顶面质心处及长边、短边中点和角点；对于楼层结构，测点应置于振动敏感设备的安装位置处，或布置于结构主梁、次梁及跨板中，测振方向根据振动敏感设备的要求确定。

【条文说明】

本条依据《电子工业防微振工程技术规程》GB 51076-2015，给出了振动敏感设备独立基础和所处楼层结构的振动测点与测振方向要求。

**d** 对于建筑结构振动测试，测点应置于建筑物顶层楼面中心位置和建筑物基础位置。顶层楼面中心位置的测振方向应为水平两个主轴方向，基础位置的测振方向应为竖向和水平向两个主轴方向。受简谐振动影响的建筑结构，振动测点可布置在各楼层楼面中心，或根据结构动力学计算确定最大反应楼层进而对该楼层进行测试。

【条文说明】

本条依据《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013，给出了建筑结构的振动测点与测振方向要求。受简谐振动影响的建筑结构振动测点布置依据德国标准《Structural vibration. Part 3: Effects of vibration on structures》DIN 4150-3:1999。

**2** 振动测试时，振动信号的采样频率应满足奈奎斯特采样定理的要求，采样频率与所关注的最高频率的比值宜取3.0~6.0；振动数据采集时，在信号进行模拟转换前应经过抗混滤波器处理。

【条文说明】

本条依据《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013。一般实际应用中，采样频率常为所关注的最高频率的5.0~10.0倍为宜。3.0~6.0倍考虑到宽带无规振动和冲击振动的问题，建议采样频率取所关注的最高频率的3.0~6.0倍。规定的采样频率在信号模拟转换前需经过抗混滤波器处理，是为了提高测试信号的准确性，避免频率混淆现象发生。

**3** 振动测试方法应符合下列规定：

**a**对于不同时段振动影响差异显著的情况应在受振动影响最大的时段测量；对于不同时段振动影响随机变化的情况，测试时段应覆盖整个昼间或夜间，相关标准有特殊规定的除外。测试过程中，工业振动源应保持正常运行状态，且应尽量避免其它环境因素对振动测量产生干扰。

【条文说明】

本条依据《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》GB/T 50355-2018，应根据工业振动源特性、振动频次和振动时长的不同合理选择振动测试时间，对于施工振动源，测试时段应覆盖施工期振动影响最大的时段；对于动力机器振动源，测试时段应覆盖设备开启且振动影响最大的时段；对于城市轨道交通振动源（早晚高峰），测试应覆盖整个昼间（或夜间）并记录所有通过列车引起的振动响应。

**4** 振动测试次数选择应符合下列规定：

a 建筑室外人体舒适度振动测试时，对于稳态振动，每个测点测试1次振动事件；对于重复出现的冲击振动，每个测点至少测试10次振动事件；

b 建筑物内人体舒适度振动测试时，对于每小时冲击次数不超过2次的冲击振动，每个测点至少测试2次振动事件；对于每小时冲击次数超过2次的冲击振动，每个测点至少测试5次振动事件，测试结果取算术平均值。

**c** 振动敏感设备振动测试时，对于同类冲击振动引起的振动，每个测点至少测试5次振动事件，测试结果取算术平均值。

d 建筑结构振动测试时，每个测点至少测试3次振动事件。测试结果取算术平均值。

【条文说明】

a-d条分别依据《城市区域环境振动测量方法》GB 10071-88、《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》GB/T 50355-2018、《电子工业防微振工程技术规程》GB 51076-2015和《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013给出各个测点记录振动测试事件的次数。

**5** 对于城市轨道交通和铁路，如果基于单趟列车通过时段进行统计分析，通过列车数应不低于20次；当全天通过列车不足20次时，应将全天所有通过列车进行统计分析，并对统计分析的所有样本取平均值。当行车线别引起评估目标振动响应有显著差异的，仅统计引起较大振动的响应样本。

**5.4.3 测试数据处理**

**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。

**2** 稳态周期振动宜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。

**3** 随机振动宜对随机信号的平稳性进行评估，对于平稳随机过程以采用总体平滑的方法提高测试精度。

【条文说明】

2、3条依据《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013，每个样本的记录长度是根据数据分析的要求决定的。对于采用快速傅里叶变换（FFT）分析的数据，每个数据帧应为2n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、随机误差和过失误差。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查工作。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量的要求，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3。

**表3 随机数据的统计误差**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 平滑段数 | 10 | 20 | 32 | 40 | 100 |
| 统计误差 | 0.316 | 0.244 | 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剧增加。考虑到测试的现实条件以及信号本身的特点，制订相应的数据平滑段数要求;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，其统计精度可达95%以上。

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，应当按照特定的评价指标（例如*VDV*）分析评估。

**4** 当被测房间内选有多个测点时，对每个测点测得的多次振动测试结果分别计算算数平均值，并应以各测点算数平均值中的最大值作为测试评估量。

【条文说明】

本条依据《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》GB/T 50355-2018，若房间内选取多个测点，对于诸如轨道交通产生的振动，每个列车通过过程测得的数值，应采取算术平均法给出平均值。对不同测点的平均值，应选用其中最大值作为限值评估量。不同测点的平均值，不能再通过平均来评估。否则，当一个测点平均值远高于其他测点平均值时，且远超过限值评估量，不同测点平均值再平均的话，完全可能低于相应限值，导致评估错误。

**5** 对于Z振级振动数据处理**，**采用以下参数设置：重叠系数宜采用7/8，加窗滤波宜采用汉宁窗。

**5.4.5 测试评估数据记录**

**1** 测试评估数据记录应包括下列内容：

**a** 测试地点、测试日期及测试单位、人员；

**b** 工业振动源类别、评估量及限值要求；

**c** 测试仪器型号、编号及其校准记录；

**d** 测点位置关系图示或描述；

**e** 测试环境及测定结果；

**f** 其他应记录事项。

【条文说明】

本条规定了在振动测量时，应对测量原始信息进行准确和详尽的记录。

**2** 测试评估数据记录表可参考附录D，锻锤、压力机和电机等设备对场地振动影响的记录可按附录E的形式填报。

## 5.5 场地振动影响评估报告

**5.5.1** 场地振动影响评估报告应包含以下内容：

**1** 评估的任务来源与编制依据

**2** 工程概况或简介

**3** 场地振动影响评估

**a** 状况调查和资料收集

**b** 依据的法律法规和标准

**c** 评估目标的限值和评估量

**d** 评估方法

**e** 评估目标的振动预测或测试值

**4** 评估结论及建议

【条文说明】

本部分规定了场地振动影响评估报告应包括的主要内容。评估的任务来源包括项目背景和评估的目的，编制依据包括振动影响评估委托书和除本标准外的其他所需标准；工程概况或简介包括项目名称和工程内容简介；状况调查和资料收集主要指按本标准第5.2.1条规定的调查内容叙述工业振动源、传播路径和评估目标的基本情况；评估结论及建议主要指按本标准第4章场地振动限值要求，对振动预测或测试结果进行分区、分类、分级、分阶段的分析、比较，得出工业振动源对评估目标是否造成不利影响的结论。并且当工业振动源对评估目标造成不利影响时，提出应采取振动控制方案的建议，并对所建议措施给出控制效益预测及评估。

# 6 振动控制措施

## 6.1 一般规定

1. 当预测或测试表明，评估目标的振动超过本标准第4章规定的振动限值时，应采取合适的振动控制措施。

【条文说明】

场地的有害振动超过本标准第4章规定的振动限值时，有可能造成人体舒适度降低、振动敏感设备无法正常工作、建筑结构损伤，所以需要采取有效减振措施，将有害振动降低到允许振动限值内。

1. 振动控制措施可从工业振动源、传播路径和评估目标三方面实施。不同振动控制措施可单独采用或综合采用。

【条文说明】

场地振动的产生包括三个方面：振动源的产生、振动通过介质的传播、介质与工程结构（振动防护对象或振动敏感设备）的相互作用。场地振动控制可以从空间上分为振动源减振措施、振动传播路径减振措施和工程结构减振措施三大类型。当一种振动控制措施不能满足要求时，可采取两种或三种措施能够取得更好的减隔振效果。

1. 振动控制措施应根据工业振动源类型、场地条件及评估目标的特征，综合考虑经济性和技术可行性，经多方案比选后确定。

【条文说明】

振动控制合理的方法需要综合考虑技术可行性、先进性和经济性，当单一措施难以达到理想效果时，可采取两种或两种以上综合措施。

1. 振动控制措施应对完整的振动体系进行动力分析，评估振动控制措施的有效性。振动控制应使预测或测试结果不超过本标准规定的限值。

【条文说明】

考虑减振措施的技术发展成熟度，对于采取振动控制措施的实际减振效果，可以通过动力计算进行效果评估，或者直接进行现场测试，以确保实际减振效果满足振动限值要求。

1. 若振动源控制措施受到很大局限甚至无法实施的情况下，可在传播路径上采取有效减隔振技术手段及综合治理措施，以抑制振动的传播。

【条文说明】

振动传播路径减振措施，是指在振动源至受控体（建、构筑物）之间的大地中设置屏障，阻碍振动的传递，减小地传振动。不同的工程地质条件，采取相适应的控制措施，才能达到比较好的效果。

1. 在对振动源或传播路径均难以采用有效振动控制措施的情况下，应对振动防护对象进行减振防护。

【条文说明】

本条对振动防护对象减振措施的使用条件进行了限定，一般而言，通过振动源和传播路径进行减振控制是更为根本和更为有效的措施，只有在难以采用振动源和传播路径减振的情况下，应对振动防护对象采取减振防护措施。

## 6.2 振动源减振措施

1. 城市轨道交通和铁路宜优先通过合理选线和埋深设计，尽量远离振动敏感目标。

【条文说明】

对于新建城市轨道交通和铁路工程，应当在规划阶段充分考虑可能产生的振动影响，如果沿途存在振动敏感目标，应在选线时尽量避开，或适当增加埋深，以尽量远离振动敏感目标，从而减小可能造成的振动影响。

1. 城市轨道交通和铁路车辆宜通过优化悬挂系统、车体轻量化、减小簧下质量等措施，以减小环境振动。
2. 城市轨道交通和铁路在运营过程中应对钢轨进行定期打磨，提高轨道平顺性，对车轮进行镟修，降低轮轨相互作用。
3. 城市轨道交通的振动源减振应符合《工程隔振设计标准》GB 50463-2019、《城市轨道交通环境振动与噪声控制工程》HJ 2055-2018、《环境影响评价技术导则 城市轨道交通技术规范》HJ 453-2018、《环境噪声与振动控制工程技术导则》HJ 2034-2013的相关规定，并综合考虑城市轨道交通的可靠性、可用性、可维修性和安全性；减振轨道不应削弱轨道结构的强度和稳定性，列车运行安全性和平稳性应符合相关标准。减振措施可采用扣件减振、轨枕减振、道床减振等。
4. 爆破振动控制应根据《爆破安全规程》GB 6722-2014来控制，并且符合《城市轨道交通环境环境振动与噪声控制工程技术规范》HJ 2055-2018的相关规定，减振措施分为：主动减振、被动减振和阻尼吸振等；隔振措施分为：主动隔振、被动隔振和阻尼隔振等。根据允许振动速度及《爆破安全规程》GB 6722-2014中的爆破振动安全允许距离控制公式来确定允许距离，并安排人员撤离；若建筑物与爆源距离小于安全允许距离，需根据现场情况，选择主动隔振措施。
5. 扣件减振措施所用材料及其技术要求应符合我国各类扣件的现行标准及技术规范要求，扣件的振动衰减性能应满足敏感建筑物减振需求。
6. 轨枕减振措施主要包括梯形轨枕、弹性支承块（弹性短轨枕）、弹性长轨枕等，其材料和技术要求应符合国家及行业有关标准的要求。

【条文说明】

轨道振动控制工程中，常用的减振措施主要为轨道减振措施，轨道减振措施根据减振效果进行分类，可分为中等减振措施，高等减振措施和特殊减振措施；按照弹性部件使用位置不同，可分为钢轨振动控制、轨下减振、枕下减振和道床下减振4类。目前控制钢轨振动的措施主要包括钢轨重型化和无缝化、钢轨维修，钢轨吸振器、埋入式钢轨。轨下减振是控制钢轨振动向下传递。普通扣件都具有一定的弹性，减振扣件的目的是进一步降低道床的振动。枕下减振措施包括弹性短、长轨枕和梯形轨枕等。弹性短轨枕（弹性支承块/LVT）轨道较早用于轨道减振中，但其对减振部件尺寸、混凝土预制的精度要求较高。弹性长轨枕比弹性短枕稳定性好，且弹性垫板容易更换。不足之处在于轨枕之间的沟槽会影响紧急疏散效率。梯形轨枕是在预应力纵向长梁下设置弹性聚氨脂高弹支垫，使其浮于混凝土基础之上，达到减振效果。在此基础上的改型产品为纵向轨枕。

1. 道床减振措施主要包括钢弹簧减振器浮置板轨道、橡胶隔振器浮置板轨道、浮筏浮置板轨道等道床式减振措施。道床减振区段应预留足够的轨道结构高度，并尽可能不设置过轨管线，浮置板轨道应符合《浮置板轨道技术规范》CJJ/T 191-2012、《城市轨道交通浮置板橡胶隔振器》CJ/T 285-2008等相关要求。

【条文说明】

传统减振技术在减振降噪方面因减振效果有限，列车运行经过时产生的振动和噪声仍会直接影响到人们的生活和健康，对周围环境在一定程度上也造成了不良影响，因此在减振要求高的特殊地段传统减振技术显然已不再适用。钢弹簧浮置板减振轨道是将具有一定质量和刚度的混凝土道床板浮置于钢弹簧隔振器上，距离基础垫层顶面30mm或40mm，构成质量-弹簧-隔振系统。隔振器内放有螺旋钢弹簧和粘滞阻尼，钢弹簧隔振器内的粘滞阻尼使钢弹簧具有三维弹性，增加了系统的各项稳定性和安全性，且能抑制和吸收低频声。作用在钢轨上的力传递给浮置于钢弹簧隔振器上的道床板，道床板可以提供足够的惯性质量来抵消车辆产生的动荷载，只有静荷载和少量残余动荷载会通过弹性支承传递到基础垫层中去。道床板受力后，在惯性作用下将受到的力经过重新分配后传递给固定在基础垫层上的隔振器，再通过隔振器传递到基础垫层，在此过程中由隔振器进行滤波、吸收能量，达到隔振减振的目的。

1. 动力机器振动控制应根据设备振动特性及工程地质条件，合理选择有关动力参数，进行合理的基础设计。动力基础减振设计一般遵循低频振动增大地基及基础刚度，高频振动增大基础质量，中频（不能避开基础自振频率）加大基础阻尼的设计方法来增强振动控制措施。
2. 动力机器及施工的振动源减振应符合《工程隔振设计标准》GB 50463-2019、《电子工业防微振工程技术规范》GB 51076-2015和《古建筑防工业振动技术规范》GB/T 50452-2008、《环境噪声与振动控制工程技术导则》HJ 2034-2013的相关规定。
3. 在对建筑结构等评估目标附近，不宜进行强夯施工，桩基施工宜采用减小地面振动的打桩工艺。
4. 岩土工程爆破作业，应准守《爆破安全规程》GB6722-2011有关爆破振动安全距离规定，爆破振动控制可采取调整炸药种类、控制装药量及微差爆破、预裂爆破等减振措施。
5. 矿山或石料开采、人防工事、修路筑坝等工程中，因工效较高且经济而经常采用爆破施工，爆破引起的振动问题对周围环境有较大影响，《爆破安全规程》GB6722-2011对爆破作业环境及振动安全距离均有明确规定，经评估振动限值超过本规程第4章要求的，可通过爆破设计采取进一步的振动控制措施。

## 6.3 传播路径减振措施

1. 传播路径减振措施主要包括空沟、填充沟、隔振桩墙、排桩、波阻板等屏障隔振措施，应重点关注场地卓越波长、长波波长在屏障区端部和底部的绕射，当设置隔振沟时应避免填入密实性材料。

【条文说明】

传播路径减振措施主要包括空沟（应避免填入密实性材料）、填充沟（可填充泡沫材料或废弃轮胎等）、隔振墙、排桩（可为单排桩或多排桩）、波阻板、高聚物墙等屏障隔振措施，应重点关注场地卓越波长、长波波长在屏障区端部和底部的绕射。

1. 传播路径减振措施，应根据地质及距离条件，分别采用隔振沟、隔振桩（墙）隔振。

【条文说明】

隔振沟虽是理论上可行，但是很多工程隔振效果较差，地传振动与地传噪声有关的长波会从沟的两端和底部绕射，特别是中软土场地，振动频率很低，对应的波长很长，可用于场地条件比较开阔的施工振动减振措施。对于一般设备基础，条件限制隔振沟减振效果很差，仅对于中高频振动，才有一定的效果。

1. 对于中低频振动，根据被隔振物及地基条件，经过功能及经济分析，可采用波阻板方式隔振，也可采用并联屏障隔振。

## 6.4 评估目标减振措施

1. 新建工程结构在选址时应对周边环境振动进行充分评估，在条件允许的情况下应尽量避开或远离强工业振动源。

【条文说明】

环境振动的场地衰减效应明显，在新建工程结构的选址阶段避开强工业振动源是最简单、最经济、最可靠避免环境振动影响的办法，对于新建工程结构，经评估当场地振动会产生可能的有害影响时，应首先考虑远离强工业振动源。当综合评估必须在振动超限的场地条件下新建结构时，再选择必要的减隔振措施。

1. 应综合考虑基础隔振、消能阻尼减振和调谐质量阻尼器等措施确定减隔振方案。

【条文说明】

目前应用于减隔振技术发展相对成熟，装置型号、类别较为丰富，也取得了很理想的应用效果，然而对于环境振动而言，一方面其振动幅度普遍不大，振动形式以频率较高的竖向振动为主，其对结构安全性影响的可能性较小，当进行环境振动隔离和减振时，应当结合实际工程情况对隔振、消能减振和调谐质量阻尼器等措施进行比选，以确定最合适的减振方案。

1. 新建工程结构应优先采用基础隔振措施，在采用建筑物基础隔振时，应重点关注建筑物竖向固有频率和建筑物的抗倾覆能力。

【条文说明】

隔振技术尤其水平隔振是最为成熟可靠的隔振技术，当隔振措施可以满足环境振动隔振要求时，应当优先采用。考虑环境振动竖向传播为主的特性，要重点关注建筑物的竖向固有频率，在隔振设计时也要充分考虑建筑物的抗倾覆能力。

1. 当振动以竖向振动为主时，宜在结构内部设置阻尼消能减振装置。

【条文说明】

分析计算表明，提升工程结构的整体阻尼水平可以显著降低环境振动引起的结构振动响应，调谐质量阻尼器对于特定频率的振动具有良好的减振能力，因此对于结构自身的减振，应以提升结构整体阻尼水平为主要目标。对于竖向振动，由于竖向承载的需要，隔振手段在技术实现上相对难以实现，尚有一些技术问题有待解决。

1. 现有工程结构环境振动引起建筑物的振动无法满足舒适度要求时，宜优先采用钢弹簧、空气弹簧等浮筑楼板隔振措施。

【条文说明】

采用楼板隔振、局部设备隔振等措施是一种代价最小的减振措施，在环境振动治理中应当优先采用。

1. 当环境振动引起建筑物的振动无法满足振动敏感设备的振动限值要求时，应优先针对振动敏感设备采取更高级减隔振措施，必要时可采用主动振动控制措施。

【条文说明】

对于振动敏感设备的环境振动控制问题，最直接方便的措施是直接对振动敏感设备采取减隔振措施，这是代价最小最容易实施的振动控制措施。不过，当振动敏感设备数量较多的情况下，应综合考虑振动源减振、传播路径隔振和建筑减隔振的控制效果、技术可行性、经济性等指标，以采取最为理想的减隔振措施。

1. 隔振装置宜按结构或设备主轴方向均匀布置，应便于检查、维护和更换，设计文件中应注明隔振装置使用环境、检查和维护要求。

【条文说明】

隔振装置按主轴方向均匀布置可保证隔振装置刚心与结构的质心和重心基本重合，受力均匀且避免产生不必要的扭转效应，此外由于隔振装置存在检修更换的客观需求，在布置时应当考虑检查、维护和更换的需要，并且在设计中应当对其使用环境、检查和维护要求做出说明。

1. 采用阻尼消能减振方案时，应保证阻尼装置具有合适的行程、刚度、阻尼参数和可靠性，阻尼装置不应存在漏油现象，不应释放环境有害物质。

【条文说明】

用阻尼消能减振是抑制环境振动的有效措施，然而依据地震消能减振的技术现状，由于阻尼装置参数设置或性能不合理等原因，往往导致无法达到预期的减振效果，在附加阻尼形式、阻尼装置布置位置、数量、阻尼参数取值等还存在一些尚未解决的技术问题，因此本条对阻尼装置的行程、刚度、阻尼参数和可靠性提出一般性要求，同时针对阻尼装置常见的漏油问题、有害金属的使用问题做出了规定。

1. 工程结构的减隔振装置，其性能参数应通过试验测试确定。

【条文说明】

考虑减隔振装置的非线性特征和装置的定制性特点，在分析计算时应当选择试验测试结果做为依据。

## 附录A 多振动源振动响应叠加计算

**A.1.1** 当多个周期性振动荷载或稳态随机振动荷载组合时，振动荷载均方根效应组合值，宜按下式计算：

 (A-1)

式中：*S*vσ——*n*个振动荷载均方根效应的组合值；

*S*vσ*i* ——第*i*个振动荷载效应的均方根值；

*n*——振动荷载的总数量。

**A.1.2** 当两个周期性振动荷载作用时，振动荷载效应组合的最大值，宜按下式计算：

 (A-2)

式中：*S*vmax——两个振动荷载效应组合的最大值；

*S*v1max——第1个振动荷载效应的最大值；

*S*v2max——第2个振动荷载效应的最大值。

**A.1.3** 当冲击荷载起控制作用时，振动荷载效应组合，宜按下式计算:

 (A-3)

式中：*S*vp——当冲击荷载控制时，在时域范围上效应的组合值；

*S*vmax——冲击荷载效应在时域上的最大值；

*α*k——冲击作用下的荷载组合系数，可取1.0。

## 附录B 振动影响经验预测公式

**B1.城市轨道交通振动影响经验预测公式**

【条文说明】

城市轨道交通振动影响经验预测公式引用自《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》（HJ 453-2018）。

**B1.1** 列车运行振动预测按式（D.1）计算：

 （B-1）

式中：*VLZ*max——预测点处的*VLZ*max，dB；

*VLZ*0max——列车运行振动源强，确定方法详见《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》（HJ 453-2018）的附录B；

*C*VB——振动修正项，dB；

**B1.2** 振动修正项*CVB*按下式计算：

 （B-2）

式中：*C*V——列车速修正，dB；

*C*W——轴重和簧下质量修正，dB；

*C*R——轮轨条件修正，dB；

*C*T——隧道形式修正，dB；

*C*D——距离衰减修正，dB；

*C*B——建筑物类型修正，dB；

*C*TD ——行车密度修正，dB。

**B1.3** 列车速度修正，*C*V

1）当列车运行速度v≤100km/h时，速度修正*C*V按式(C-3)计算。

 （B-3）

式中：*v*——列车通过预测点的运行速度，km/h，列车参考速度应不低于预测点设计速度的75%；

*v0*——源强的列车参考速度，km/h。

2）当列车运行速度*ν*>100km/h时，速度修正*C*V通过类比测量或符合工程实践的研究成果得到。

**B1.4** 轴重和簧下质量修正，*C*W

当车辆轴重和簧下质量与源强车辆给出的轴重和簧下质量不同时，其轴重和簧下质量修正*C*W按式(B-4)计算。

 （B-4）

式中：*w*0——源强车辆的参考轴重，t；

*w*——预测车辆的轴重，t；

*w*u0——源强车辆的参考簧下质量，t；

*w*0——预测车辆的簧下质量，t。

**B1.5** 轮轨条件修正，*CR*

轮轨条件的振动修正值见表B1

表B1 轮轨条件修正值

|  |  |
| --- | --- |
| 轮轨条件 | 振动修正值*C*R/dB |
| 无缝线路 | 0 |
| 有缝线路 | ±5 |
| 弹性车轮 | 0 |
| 线路平面圆曲线半径≤2000m | +16×列车速度(km/h)/曲线半径(m) |
| 注:对于车轮出现磨耗或扁疤、钢轨有不均匀磨耗或钢轨波浪形磨耗、固定式辙叉的道岔、交叉或其他特殊轨道等轮轨条件下，振动会明显增大，振动修正值为0~10dB。 | |

**B1.6** 隧道型式修正，*C*T

隧道型式的振动修正值见表B2。

表B2 轮轨条件修正值

|  |  |
| --- | --- |
| 隧道型式 | 振动修正值*C*T/dB |
| 单线隧道 | 0 |
| 双线隧道 | -3 |
| 车站 | -5 |
| 坚硬土、岩石隧道（含单线隧道和双线隧道） | -6 |

**B1.7** 距离衰减修正，*C*D

距离衰减修正*C*D与工程条件、地质条件有关，地质条件接近时，可选择工程条件类似的既有城市轨道交通线路进行实测,采用类比方法确定修正值。如不具备测量条件，其距离衰减修正按式(B-5)~式(B-7)计算。

1、地下线线路中心线正上方至两侧7.5m范围内

 （B-5）

式中：*H*——预测点地面至轨顶面的垂直距离，m；

*β——*土层的调整系数，由表C3选取。

线路中心线正上方两侧大于7.5m范围内：

 （B-6）

式中：*r*——预测点至线路中心线的水平距离，m；

*H*——预测点地面至轨顶面的垂直距离，m；

*β——*土层的调整系数，由表C3选取；

*a、b、c——*由表B3选取

式B-5、式B-6中的*a、b、c*建议采用类比测量并通过《环境影响评价技术导则 城市轨道交通技术规范》HJ 453-2018附录E中复合回归计算得到，如不具备测量条件，可参考表B3选取*a、b、c*。

表B3 *β、a、b、c*参考值

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 土体类别 | 土层剪切波波速*Vs*（m/s） | *β* | *a* | *b* | *c* |
| 软弱土 | *Vs*≤150 | 0.42 | -3.28 | -0.13 | 3.03 |
| 中软土 | 150<*Vs*≤250 | 0.32 | -3.28 | -0.13~0.06 | 3.03 |
| 中硬土 | 250<*Vs*≤500 | 0.25 | -3.28 | -0.04 | 3.09 |
| 坚硬土 | 500<*Vs*≤800 | 0.22 | -3.28 | -0.03 | 3.09 |
| 岩石 | *Vs*>800 | 0.20 | -3.28 | -0.02 | 3.09 |
| 1）剪切波波速*V*s依据GB/T 50269、GB 50011进行测试和计算。多层土层应按下列公式计算等效剪切坡速*V*s：      式中：*V*s——土层等效剪切波速，m/s；  *d*0——计算深度，取隧道轨顶面至预测点地面高度，m；  *t*——剪切波在地面至计算深度之间的传播时间，s；  *d*i——计算深度范围内第*i*层土层的厚度，m；  *V*si*——*计算深度范围内第*i*层土层的等效剪切坡速，m/s；  *n——*计算深度范围土层的分层数。  2）剪切波波速*V*s越快，*b*取值越大，按照剪切波波速*V*s线性内插值计算*b*。 | | | | | |

2、地面线和高架线

 （B-7）

式中：*r*——地面线为预测点至线路中心线的水平距离，高架线为预测点至邻近单个桥墩纵向中心线的水平距离，m。

式(C-7)中的*a、b、c*建议尽量采用类比测量并通过中复合回归计算得到，当土体类别为中软土，且不具备测量条件时，参考表B4选取*a、b、c*。

表B4 *a、b、c*的参考值

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 类型 | 土体类别 | *a* | *b* | *c* |
| 地面线 | 中软土 | -8.6 | -0.130 | 8.4 |
| 高架线 | -3.2 | -0.078 | 0.0 |

**B1.8** 建筑物类型修正，*C*B

建筑物越重，大地与建筑物基础的耦合损失越大，建议尽量采用类比测量法，如不具备测量条件，可将建筑物分为六种类型进行修正，见表B5。

表B5 建筑物类型的振动修正值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 建筑物类型 | 建筑物结构特性 | 振动修正值*C*B/dB |
| Ⅰ | 7层及以上砌体(砖混)或混凝土结构(扩展基础) | -1.3×层数(最小取-13) |
| Ⅱ | 7层及以上砌体(砖混)或混凝土结构(桩基础) | -1×层数(最小取-10) |
| Ⅲ | 3~6层砌体(砖混)结构或混凝土结构 | -1.2×层数(最小取-6) |
| Ⅳ | 1~2层砌体(砖混)、砖木结构或混凝土结构 | -1×层数 |
| Ⅴ | 1~2层木结构 | 0 |
| Ⅵ | 建筑物基础坐落在隧道同一岩石上 | 0 |

**B1.9** 行车密度修正，*C*TD

行车密度越大，在同一断面会车的概率越高，因此宜考虑地下线和地面线两线行车的振动叠加，振动修正值见表B6。

表B6 地下线和地面线行车密度的振动修正值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 平均行车密度TD/(对/h) | 两线中心距离*d*t/m | 振动修正值*C*TD/dB |
| 6 < TD ≤ 12 | *d*t ≤ 7.5 | +2 |
| TD > 12 | +2.5 |
| 6 < TD ≤ 12 | 7.5 < *d*t≤ 15 | +1.5 |
| TD > 12 | +2 |
| 6 < TD ≤ 12 | 15 < *d*t≤ 40 | +1 |
| TD > 12 | +1.5 |
| TD ≤ 6 | 7.5 < *d*t≤ 40 | 0 |
| 注：平均行车密度修正宜按照昼、夜间实际运营时间分开考虑。 | | |

**B2.动力机器振动影响经验预测公式**

**B2.1** 当动力机器基础为竖向或水平向振动时，距离基础中心*r*(m)处地面土的竖向或水平向的振动线位移，应由现场试验确定当无条件时，可按下列近似公式计算：

 （B-8）

对于方形及矩形基础：

对于圆形基础：

式中：*u*r——距振动基础中心*r*处地面上的振动线位移；

*u*0——振动基础的振动线位移；

*f*0——基础上机器的扰力频率（Hz）一般为50Hz以下对于冲击机器基础，可采用基础的固有频率；

*r*0——圆形基础的半径（m）或矩形及方形基础的当量半径；

*ξ*0——无量纲系数，可按表B7采用；

*α*0——地基土能量吸收系数（s/m），可按表B8采用；

*μf*——动力影响系数，可按表B9采用。

距基础中心*r*处场地振动速度和振动加速度可按下式计算：

 （B-9）

 （B-10）

【条文说明】

施加在弹性半空间表面的圆形基础上的竖向简谐振动作用力，会使得基础附近产生近源位移波动场，这样的波动场的运动成分较为复杂。计算和试验证明：近场振动的体波较为复杂，是P波、S波和R波等的组合。通过土介质传播的振动能量，P波、S波和R波经过一定距离后的衰减各有不同。远场三种波辐射出去的能量分配大约是：R波占67%、S波26%、P波7%。可见远场地面振动主要是R波。

由弹性半空间表面在竖向谐和振动的圆形基础作用下的理论与工程实用分析，近源波动场与远源波动场做工程评估时可采用下列公式：

 （B-1）

当小于上式时为近场波动，大于上式时为远场波动。

对于一般机器基础：

 （B-2）

式中：机器基础当量半径，按波源能量大小取式中高低值。

当*r*较小，为近场波动时，其波动随*r*增加的衰减主要表现为以体波（P、S波）为主包含R波几何衰减，土材料能量吸收对其影响甚小。当*r*较大，为远场波动时，其波以R波为主包含P、S波并与土材料特性密切相关的传播介质能量吸收衰减。

振动面源传给地基土介质的能量，是体波（P、S波）和面波（R波）相应传播的组合，将上述两种波叠加起来，可得距波源中心处自由地面振幅为：

 （B-1）

当忽略体波和面波之间的相位差的影响，即可得到（B-8）式，详细推导过程参见《工程隔振设计指南》一书。

为将计算峰值与均方根值之间转换，将简谐振动的峰值因数定为，两个简谐振动叠加情况下的峰值因数定为2，一般稳态随机振动的峰值因数定为3~5。

前述计算的是振动位移幅值，对于振动速度和振动加速度可根据周期振动关系估算。

**B2.2** 无量纲系数*ξ*0与地基土的性质和振动基础的底面积大小有关，其值可按表B7采用

表B7 系数*ξ*0参考值

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 土的名称 | 振动基础的半径或当量半径*r0* (m) | | | | | | | |
| 0.5及以下 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | 6.0 | 7及以上 |
| 一般粘性土、粉土、砂土 | 0.70~0.95 | 0.55 | 0.46 | 0.40 | 0.35 | 0.26~0.30 | 0.23~0.30 | 0.15~0.20 |
| 饱和软土 | 0.70~0.95 | 0.50~0.55 | 0.40 | 0.35~0.40 | 0.23~0.30 | 0.22~0.30 | 0.20~0.25 | 0.10~0.20 |
| 岩石 | 0.80~0.95 | 0.70~0.80 | 0.65~0.70 | 0.60~0.65 | 0.55~0.60 | 0.50~0.55 | 0.45~0.50 | 0.25~0.35 |

注：1）对于饱和软土，当地下水深1m及以下时，*ξ*0取较小值，1~2.5m时取较大值，大于2.5m时取一般粘性土的*ξ*0值；2）对于岩石覆盖层在2.5m以内时，*ξ*0取较大值，2.5~6m时取较小值，超过6m时，取一般粘性土的*ξ*0值。

**B2.3** 地基上的能量吸收系数*α*0值，根据地基土的性质，可按表B8采用

表B8 地基上的能量吸收系数*α*0 参考值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 地基土名称及状态 | | *α*0(m/s) |
| 岩石(覆盖层1.5~2.0m) | 页岩、石灰岩 | (0.358~0.458) ×10-3 |
| 砂岩 | (0.580~0.775) ×10-3 |
| 硬塑的粘土 | | (0.385~0.525) ×10-3 |
| 中密的块石、卵石 | | (0.850~1.100) ×10-3 |
| 可塑的粘土和中密的粗砂 | | (0.965~1.200) ×10-3 |
| 软塑的粘土、粉土和稍密的中砂、粗砂 | | (1.255~1.450) ×10-3 |
| 淤泥质粘土、粉土和饱和细砂 | | (1.200~1.300) ×10-3 |
| 新近沉积的粘土和非饱和松散砂 | | (1.800~2.050) ×10-3 |

注：1）同一类地基土上，振动设备大者(如10t、16t锻锤)，*α*0取小值，振动设备小者取较大值；2）同等情况下，土壤孔隙比大者， *α*0取偏大值，孔隙比小者，*α*0取偏小值。

**B2.4** 动力影响系数*μ1*值，可按表B9采用

表B9 动力影响系数*μ1*参考值

|  |  |
| --- | --- |
| 基础底面积A(m2) | *μ1* |
| A≤10 | 1.00 |
| 12 | 0.96 |
| 14 | 0.92 |
| 16 | 0.88 |
| A≥20 | 0.80 |

**B3.振动台振动影响经验预测公式**

**B3.1** 依据工程案例实测结果回归方法

 （B-11）

式中：*A*r—评测点的振动速度（或加速度）

*A*0—振动基础边缘的振动速度（或加速度）

*R*—评测点到振动基础边缘的距离（m）

*R*0—评测点分区距离，分50米和100米两档

—评测点振动的衰减指数，与场地土层条件、被测方向相关，按表B10取值。

表B10 振动衰减系数参考值

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 测点距    方向  土层特性 | 50m | | 100m | |
| 水平向 | 垂直向 | 水平向 | 垂直向 |
| 中软土层 | 0.50~0.60 | 0.35~0.45 | 0.40~0.50 | 0.25~0.35 |
| 软弱土层 | 0.55~0.65 | 0.40~0.50 | 0.45~0.55 | 0.30~0.40 |

注：（1）中软土层：稍密的砾、粗、中砂，除松散外的细、粉砂，的黏性土和粉土，的填土，可塑新黄土，土层剪切波速范围为，单位为m/s；

（2）软弱土层：淤泥和淤泥质土，松散的砂，新近沉积的黏性土和粉土，的填土，流塑黄土，土层剪切波速范围为，单位为m/s。

**B3.2** 近似计算法

振动台对周边场地的振动影响计算分两步走，第一步计算振动台基础的振动幅值，第二步振动台基础视为刚性块体，以基础边缘的振动幅值作为衰减的始发点，按照经验公式计算场地评测点的振动幅值。

振动台运行时台面是振动源，通过作动器传给振动台基础，基础通过地基和周边土体将振动传到周边场地上。当振动台基础质量不大于振动台可动质量（包括台面质量、作动器质量、负载质量）50倍时，基础变形可忽略不计，当质量比大于50倍时，按照50倍计算。

以最大幅值运行的振动台作为振动源，振动源与基础二者的相互作用遵循牛顿定律，即作用力等于反作用力

 （B-12）

 （B-13）

、—分别为振动台工作时基础受到的水平、竖向反作用力

—振动台可动质量（包括台面质量、作动器质量、负载质量）

、—振动台台面水平、竖向峰值加速度

**振动台工作过程中基础的动力计算**

忽略地基阻尼作用，基础在通过其重心的竖向扰力作用下，竖向振动峰值加速度可按下式计算：

 （B-14）

 （B-15）

忽略地基阻尼与扭转作用，基础在水平扰力作用下，水平向振动峰值加速度可按下式计算：

 （B-16）

 （B-17）

**地基动力特性参数的确定**

天然地基的抗压刚度系数值，可按下列规定确定：

（1）当基础底面积不小于20 m2时，可按表B11采用；

（2）当基础底面积小于20 m2时，抗压刚度系数可采用表中数值乘以地面修正系数，修正系数值可按下式计算：

 （B-18）

式中 ——底面积修正系数；

A ——基础底面积（m2）。

B11 天然地基的抗压刚度系数*C*z值（kN/m3）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 地基承载力的标准值  *f*k（kPa） | 土的名称 | | |
| 黏性土 | 粉 土 | 砂 土 |
| 300 | 66000 | 59000 | 52000 |
| 250 | 55000 | 49000 | 44000 |
| 200 | 45000 | 40000 | 36000 |
| 150 | 35000 | 31000 | 28000 |
| 100 | 25000 | 22000 | 18000 |
| 80 | 18000 | 16000 |  |

基础底部由不同土层组成的地基土，其影响深度可按下列规定取值。

（1）方形基础可按下式计算：

 （B-19）

式中：——影响深度（m）；

——方形基础的边长（m）。

（2）其它形状的基础可按下式计算：

 （B-20）

天然地基的抗弯、抗剪、抗扭刚度系数可按照下列公式计算：

 （B-21）

 （B-22）

 （B-23）

式中：——天然地基抗弯刚度系数（kN/m3）；

——天然地基抗剪刚度系数（kN/m3）；

——天然地基抗扭刚度系数（kN/m3）。

天然地基的抗压、抗弯、抗剪、抗扭刚度应按下式计算：

 （B-24）

 （B-25）

 （B-26）

 （B-27）

式中：——天然地基抗压刚度（kN/m）；

——天然地基抗弯刚度（kN/m）；

——天然地基抗剪刚度（kN/m）；

——天然地基抗扭刚度（kN/m）；

*I* ——基础底面通过其形心轴的惯性矩（m4）

*I*z ——基础底面通过其形心轴的极惯性矩（kN/m）

**B4.打桩振动影响经验预测公式**

【条文说明】

打桩振动影响经验预测公式引用自《古建筑防工业振动技术规范》（GB/T 50452-2008）。

距施工中的打桩等工业振动源中心*r*处地面的竖向或水平向振动速度，可按下列近似公式计算：

 （B-28）

式中：*v*r——距振动基础中心*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；

*v*0——*r*0处底面振动速度（mm/s）；

*r*0——振动源半径（m）；

*r*——距振动源中心的距离（m）；

*——*与振动源半径等有关的几何衰减系数，可按表B11采用；

*α*0——土的能量吸收系数（s/m），可按表B12采用；

*f*0——地面振动频率；

**B4.1**振动源半径*r*0可按下列规定取值

 （B-29）

 （B-30）

式中：*β*——系数，淤泥质黏土、新近沉积的黏土、非饱和松散砂，*β*=4.0；软塑的粘土，*β*=5.0；软塑的粉质黏土、饱和细粉砂，*β*=6.0；

*F*——桩的面积（m2）

**B4.2**几何衰减系数与振动源类型、土的性质和振动源半径*r*0有关，其值可按表B12采用

表B12 打桩振动源的几何衰减系数*ζ*0

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 土类 | *V*s（m/s） | r0（m） | *ζ*0 |
| 软塑的粘土  软塑的粉质黏土  饱和细粉砂 | 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 |

**B4.3**能量吸收系数α0可根据振动源类型和土的性质按表B13采用

表B13 土的能量吸收系数*α*0

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 振动源 | 土类 | *V*s（m/s） | *α*0（s/m） |
| 打桩 | 软塑的粘土 | 150~220 | (12.50~14.50) ×10-4 |
| 软塑的粉质黏土、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 | (18.00~20.50) ×10-4 |

**B5.爆破振动影响经验预测公式**

【条文说明】

爆破振动衰减经验预测公式引用自前苏联科学家萨道夫斯基经验所得和《[水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》（SL47-94](http://www.jianbiaoku.com/webarbs/book/55675/1005162.shtml)）。

（B-31）

式中：——地面点安全允许下的质点振动速度（cm/s）；

——与介质和爆破条件因素有关的系数，可按表B14采用；

——与振速 值相对应的最大一段起爆量，炸药量（齐爆时为总装药量，延迟爆破时为最大一段装药量）（kg）；

*R*——测点到起爆中心的直线距离（m）；

*α*——与地质条件有关的地震波衰减系数，可按表B14采用；

——比例药量。

表B14 与介质和爆破条件因素有关的系数、与地质条件有关的地震波衰减系数

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 岩性 |  | *α* |
| 坚硬岩石 | 50~150 | 1.3~1.5 |
| 中硬岩石 | 150~250 | 1.5~1.8 |
| 软岩石 | 250~350 | 1.8~2.0 |

当爆源处于低位时，如在高边坡底部爆破，爆破振动波的振动强度随着地面垂直高差的增加而呈放大趋势。

（B-32）

式中：——地面点安全允许下的质点振动速度（cm/s）；

——与介质和爆破条件因素有关的系数，可按表B14采用，但是由于是经验公式，最好由爆破实验确定；

——与振速 值相对应的最大一段起爆量，炸药量（齐爆时为总装药量，延迟爆破时为最大一段装药量）（kg）；

*R*——测点到起爆中心的直线距离（m）；

*α*——与地质条件有关的地震波衰减系数，可按表B14采用，但是由于是经验公式，最好由爆破实验确定；

——高层影响系数，由爆破试验确定。

## 附录C 振动影响数值仿真预测要求

**C1.** 数值仿真预测基本要求：

1. 模型尺度由计算所需最低频率决定。振动源距离边界的最小尺寸*L*应大于介质的最大半波长：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （C-1） |

式中，*c*s为土层剪切波速，为所分析的最低频率。

1. 除特殊复杂网格外，三维实体单元应尽量采用六面体映射网格。网格的划分应能模拟出波的形状才能获得较准确的结果。根据研究经验，有限元模型网格的最大尺寸*L*应小于最小波长的1/6：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （C-2） |

【条文说明】

本条介绍网格单元类型和网格尺寸的选取原则，其中，网格最大尺寸的选取原则参考杨永斌院士论文《Frequency-independent infinite elements for analysing semi-infinite problems》中对网格尺寸的要求。

1. 采用瑞利阻尼假设时，设定频率的上限值和下限值应涵盖计算关心频率范围。地震分析时设定的频率上、下限值通常取前两阶模态频率，但对工业振动源分析时不宜采用这种方法，以免造成过阻尼而无法求得关心的较高频率响应。
2. 根据振动源振动形式及计算能力综合确定土体材料特性，兼顾计算精度及计算效率。轨道交通和动力机器扰力导致的土体动应变一般较小，土体基本处于弹性变化范围，可采用弹性动力模型；施工振动具有力集中，脉冲能量密集等特性，故其周边土体应充分考虑塑性变形影响，可采用能准确模拟岩土体塑性变形的高级弹塑性本构模型。
3. 数值仿真预测模型四周边界应设置粘性边界、粘弹性边界等人工边界条件，消除模型边界应力波反射产生的计算误差。

**C2.** 数值仿真预测工业振动源要求：

1. 城市轨道交通和铁路振动源模拟可采用两阶段法。第一阶段计算出列车荷载，第二阶段将荷载加载在地层或地层-结构模型中。当有条件时，宜优先利用车辆-轨道耦合模型计算列车荷载，或通过实测法直接或间接获得列车荷载。列车荷载包括准静态分量和参数激励分量两部分组成。其中参数激励分量的主要频率*fi*由车速*v*和特征波长*Li*共同确定。应考虑轨枕间距、车辆轴距、轨道长波和短波不平顺等特征波长的影响。
2. 当获得列车荷载时程（如轮轨力、扣件支撑反力、钢弹簧浮置板下弹簧支反力等）后，可将列车荷载施加在有限元模型中的相应节点位置，通过调整加载初始时间来模拟“荷载移动”效应。在加载时网格尺寸和移动通过速度*v*之间会形成一个人为设定的频率*f*=*v/*，这与实际情况是不符的。为避免这一问题，有条件的情况可在不同节点加载考虑相位差异的不同的列车荷载时程。
3. 当评估目标对振动要求不高时，动力机器基础模型可采用等质量等体积的块体模型进行简化，采用集中力加载模拟动力机器动力振动。
4. 根据动力机器类型确定振动源加载类型。旋转式机器扰力可以用三个正交方向的简谐激振进行简化模拟，往复式机器扰力可根据理论分析得周期性动力解析式作为振动源激振力，冲击式机器产生的冲击荷载可以在一定的简化假定条件下求解出脉冲冲击荷载。
5. 振动台各方向的最大激振力等于振动台台体与最大承载质量之和乘以振动台各方向的最大加速度。
6. 由于振动台台体设计、内部作动器数量和排布较为复杂，数值仿真预测宜在基础模型中去除振动台台体部分，于作动器根部位置简化分布面荷载模拟振动台的动力加载。
7. 在数值仿真预测分析中，应充分考虑振动台常规加载、扫频加载、白噪声加载等多种加载工况，对比分析确定最不利加载工况。
8. 地基处理施工中常见的强夯措施，在数值仿真中可考虑将振动源简化为单脉冲荷载，推荐简化为单一瑞利子波函数形式。采用集中力模拟夯锤的重力冲击作用，其幅值及频率特性结合落锤高度及夯锤质量综合确定。
9. 采用数值模拟预测预制管桩锤击沉桩过程对场地的振动影响，可采用周期性脉冲荷载进行简化。采用集中力模拟夯锤的重力对桩身的冲击作用，其幅值及频率特性结合夯锤质量、落锤高度及锤击频率等因素综合确定。

**C3.** 数值仿真预测场地要求：

1. 可将地层简化成水平成层，选择现场直接测试法或场地地质勘察资料获取地层动力参数。若土体采用动弹性模型，当测得地层弹性波速*c*s或*c*p、质量密度和泊松比*v*时，动弹性模量可由下式计算：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （C-3） |
|  | （C-4） |

1. 数值仿真预测应考虑场地地形以及不均匀地质体条件对振动传播的影响。

**C4.** 数值仿真预测目标建筑要求：

1. 数值仿真预测中场地中建筑物模型参数应依据建筑物设计资料并结合实际情况综合确定。建筑物有限元模型可进行适当合理的简化，尽量采用梁、壳、实体单元相结合的方式进行分析。

## 附录D 振动评估测试记录表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测试日期 |  | | | 测试地点 | |  | | | |
| 振动源类别 |  | | | 记录人员 | |  | | | |
| 评估目的 |  | | | 对标标准及评估量 | |  | | | |
| 测点布置图 |  | | | | | | | | |
| 测点编号 |  |  | | |  | |  | |  |
| 传感器编号 |  |  | | |  | |  | |  |
| 数采通道编号 |  |  | | |  | |  | |  |
| 测试记录 | | | | | | | | | |
| 序号（工况号） | 时间 | | 振动源描述 | | | | | 备注 | |
| 1 |  | |  | | | | |  | |
| 2 |  | |  | | | | |  | |
| 3 |  | |  | | | | |  | |
| … |  | |  | | | | |  | |

## 附录E 动力机器振动评估数据记录表

**E1.** 锻锤设备基础振动引起的附近场地振动及其振动的传播数据（振动峰值）汇总表：

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 距离, m  规格, t | 5 | 10 | 20 | 40 | 80 | 160 | 320 | 640 | 1280 |
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 8 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 10 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 16 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 18 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

**E2.** 压力机基础振动引起的附近场地振动及其振动的传播数据（振动峰值）汇总表：

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 距离, m  规格,t | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | 250 | 500 | 1000 | 2000 |
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 8 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 10 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 16 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

**E3.** 通用机器（电机、水泵、风机等）基础振动引起的附近场地振动及其振动的传播数据（振动峰值）汇总表：

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 距离, m  规格 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | 250 | 500 | 1000 | 2000 |
| 小型 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 中型 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 大型 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

注：1）为了合理的评估场地振动状况，本标准例举了几种场地评估的表格模板，横轴为与振动源设备的距离，纵轴为振动设备的规格，中间为填写的振动指标。振动指标应根据振动控制对象的要求确定，可以是振动位移，振动速度，或振动加速度等。可以是幅值，峰值，或振动级等；2）表中评估数据可现场实测得到，当无法进行振动测试时，可按本章提供的公式计算，也可以采用数值方法计算。计算方法需经过验证有效后采用。