



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 14124—2009/ISO 4866:1990  
代替 GB/T 14124—1993

## 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

Mechanical vibration and shock—Vibration of buildings—Guidelines for  
the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings

(ISO 4866:1990, IDT)

2009-04-24 发布

2009-12-01 实施

## 目 次

前言 .....	I
引言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 应考虑的和振源相关的因素 .....	1
4 与建筑物有关的因素 .....	2
5 需要测量的数据 .....	3
6 测量仪器 .....	4
7 传感器的位置和安装 .....	4
8 数据的收集、处理和分析 .....	5
9 数据评价的方法 .....	7
附录 A (资料性附录) 建筑物的等级划分 .....	10
附录 B (资料性附录) 根据质点速度峰值估计峰值应力 .....	14
附录 C (资料性附录) 随机数据 .....	15
附录 D (资料性附录) 预测建筑物的固有频率和阻尼 .....	16
附录 E (资料性附录) 结构的基础和土壤之间的振动相互作用 .....	20
参考文献 .....	24

## 前 言

本标准等同采用 ISO 4866:1990《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》及补充件 1:1994 和补充件 2:1996。

本标准做了如下编辑性修改：

- 用“本标准”代替“本国际标准”；
- 删去国际标准的前言。

本标准代替 GB/T 14124—1993《机械振动与冲击对建筑物振动影响的测量和评价基本方法及使用导则》。

本标准与 GB/T 14124—1993 比较主要技术变化如下：

- 上一版本为等效采用，本标准与 ISO 4866 一致性程度为等同采用；
- 根据补充件 1:1994 和补充件 2:1996 进行了修订，即增加了附录 D 和附录 E。

本标准的附录 A、附录 B、附录 C、附录 D、附录 E 均是资料性附录。

本标准由全国机械振动、冲击与状态监测标准化技术委员会(SAC/TC 53)提出并归口。

本标准起草单位：清华大学、郑州机械研究所、交通部公路科学研究所、大连理工大学。

本标准主要起草人：王宗纲、韩国明、何玉珊、刘文峰、朱彤。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB/T 14124—1993。

## 引 言

人们逐渐认识到建筑物一定会受到振动。在设计时,必须要考虑到结构的完整性、建筑的服务功能以及与环境的适应性,同时还要考虑到对历史建筑的保护。

建筑物的振动测量一般出于以下的目的:

——发现问题。

当建筑物的振动引起居住者表示担心的量级时,向居住者提供一份证实此振动量级是否会对结构完整性产生影响的报告就显得十分必要。

——有选择的测量。

当某个使用工况已设定好最大振动量级后,必须测量那些振动数据并提供相应的报告。

——记录。

设计中已考虑了动态载荷,为了检验预期响应进行测试,并且提供新的设计参数。可以使用环境激励或者其他强迫振动的加载方式。例如对结构施加强烈的振动就可以知道结构的地震响应对结构的使用是否有影响。

——诊断。

当确定振动量级的影响需要进一步调查时,可通过测量所得的振动数据进行诊断。

另一个诊断方法是通过结构对环境或者其他强迫振动荷载的响应,来得出结构的运行状态。

例如像地震那样的强迫振动。

如此多样的目的促使对许多从简单到复杂的测量系统,展开了各种形式的研究(见 9.2)。

许多对此感兴趣的单位需要关于最适合的测量方法、描述和评估那些振动对建筑物影响的适用的技术指导。这些既可应用于已经存在的建筑,它们可能会受到某些新的或者改变了激励条件的影响,也可应用于那些意义重大的建于可能受到强烈激励的环境中的建筑物的设计。通过计算也可以将振动的影响效果写进报告里去(见 9.1)。

尽管可以使用本标准的内容来评价结构的相对振动烈度,但是没有对任何量级的振动提出是否可以接受。本标准也未考虑经济与社会这些受国家体制影响的因素。

# 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

### 1 范围

本标准规定了评价振动对建筑物影响所需进行的测量和数据处理的基本原则。这里关心的除振源的动态范围、频率或其他参数以外,并不关心振源本身。结构振动的影响的评价主要是针对结构的响应,并且包括适当的分析方法,用以确定频率、持续时间和幅值。本标准只适用于结构振动的测量,不考虑声压及其他形式的压力波,但是需要考虑这些激励的响应。

这里定义的建筑物是地面上的且有人居住的,某些特定的厂房像柱、烟囱、井架、构筑物等不在考虑的范围,虽然他们经常有工作人员进出。

建筑物的结构响应与激励源有关,制定本标准的最终目的是检验建筑物受振源(即激励的频率、持续时间、幅值等)作用下的测量方法。我们关注的激励源主要有地震、爆炸、风压、声震、内部机器、交通、建筑施工等。

注:人工激励与地震是很不一样的,地震更剧烈且持续时间很长,而且比人工振源深得多。地震能在很远的距离内产生破坏,而且地震有大得多的能量释放,还会产生一些不同形式的波。因此,同样的参数值(如质点峰值速度)对建筑物的影响是不相同的。

### 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 2423.5—1995 电工电子产品环境试验 第二部分:试验方法 试验 Ea 和导则:冲击(IEC 60068-2-27;1987, IDT)

GB/T 13441.2—2008 机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第2部分:建筑物内的振动(1 Hz~80 Hz)(ISO 2631-2:2003, IDT)

GB/T 14412—2005 机械振动与冲击 加速度计的机械安装(ISO 5348:1998, IDT)

ISO 2041:1990 振动与冲击 术语

ISO 4356:1977 结构设计基础 在适用性极限状态的建筑物的变形

### 3 应考虑的和振源相关的因素

#### 3.1 建筑物振动响应的特性

振动的类型可以分为以下两类:

- a) 确定的;
- b) 随机的。

进一步分类见 8.2。

对于每种形式的振动,都必须给出必不可少的信息,以便给此种振动下定义,见 ISO 2041:1990。

#### 3.2 持续时间

动态激励力的持续时间是一个很重要的参数。在本标准中响应可以认为是连续的或瞬态的,它主要取决于激励的类型。响应的类型由与结构响应有关的时间常数和激励力函数形式之间的关系来确定。

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

式中：

$\xi_r$ ——表示阻尼的影响，取决于激励的种类(线性或非线性)；

$f_r$ ——共振频率。

这样两种情况(不管激励是确定的还是随机的)可以被定义为：

——连续的：如果施加在结构上的力持续时间超过  $5\tau_r$ ，那么就认为是连续的；

——瞬态的：如果施加在结构上的力持续时间少于  $5\tau_r$ ，那么就认为是瞬态的。

因为自然发生的力函数不经常表现，其响应不易归入哪一类。例如，即使有若干间隔的爆破也认为是瞬态的。

### 3.3 频率和振动强度的范围

我们关注的振动频率范围取决于激励频率范围内频谱成分的分布和建筑物的响应，这充分说明频谱成分的分布被视为振动输入的重要特征。简而言之，本标准涉及的频率范围为 0.1 Hz~500 Hz。这就包括了各类建筑物和建筑结构对自然振源(风和地震)以及人工振源(施工、爆破和交通)的响应。室内设备要求能够记录更高的频率。

人为的振源引起建筑物破坏的频率范围大多在 1.0 Hz~150 Hz 以内，而如同地震之类的自然振源，通常在 0.1 Hz~30 Hz 范围内。风激振产生的影响，频率范围大多在 0.1 Hz~2 Hz。

我们关心的振动量级从很小的到每秒几百毫米的范围内，其量级主要取决于频率。

## 4 与建筑物有关的因素

建筑物及其构件对动态激励的响应取决于其自身固有的特征(如固有频率、模态振型和模态阻尼)和激励的频谱曲线。尤其遇到高响应量级和长时间暴露时，需要考虑累积效应，此时有可能产生疲劳损伤。

### 4.1 建筑物的类型和边界条件

对于建筑物的定义，在第 1 章中已经说明。

为了恰当地表述振动对建筑物的影响和测量结果，并划分范围，需要给建筑物分类。本标准的分类详见附录 A。

### 4.2 固有频率和阻尼

建筑物或其部件的固有频率会影响其对激励的响应。固有频率可以由环境激励的低量级的响应谱分析或者使用激振器等方法求得。

当估算可能具有的振动烈度时，如果不进行应有的分析，则可以应用关于建筑物高度与基本周期的经验公式求得<sup>[3][4][5]</sup>。

通过实验表明，3 m~12 m 的低层建筑物的基本剪切频率范围为 4 Hz~15 Hz。阻尼特性通常与振动幅值有关。固定结构的固有频率和阻尼特性，将在本标准的附录 D 中说明。

### 4.3 建筑物的基底尺寸

地面波动产生的振动其波长从几米至几百米。较短波长激励引起的响应比较复杂，同时，地基也起到滤波的作用。除了频率特别高的振源(如岩石爆破)以外，一般民用建筑的基底尺寸都小于振源的特征波长。

### 4.4 土壤的影响

目前的地震工程研究中，需要考虑土壤的影响<sup>[3]</sup>。

这样的动力相互作用的评价有时候被认为靠人为振动来证实是要求测定地面材料的剪切波波速或动态刚度模量。经验的、数值的或分析的方法可以由一些资料得到<sup>[7]</sup>。

在软土和填充土上的地基可能由于遭受地面振动而沉降或者失去了承载能力。这种效应的危险程度随着土壤颗粒大小、密实度、饱和度、内应力状态及地面振动的峰值加速度和持续时间的不同而产生

不同的效果。松散、无黏性的饱和沙土特别容易受到破坏。在评价振动烈度及诊断有关震害时,这是必须要注意的<sup>[8][9]</sup>(见附录 A)。

## 5 需要测量的数据

真实的振动输入和响应的特性可能受到不同的位移、速度或加速度传感器的影响,传感器拾取速度或加速度运动,并能够提供振动的时程曲线记录。在掌握传感系统准确的传递函数后,每一种量都能通过积分或者微分的方法转换为其他的量。对传感器和整个仪器系统的振幅-相位响应,在较低的频率段进行积分时要更加细心(见第 6 章)。只要传感器满足物理量转换、数据处理和表示的要求(见第 6 章),就可以用所选择的量表述。根据经验建议在不同情况下优先的测量参量见下面的表 1。

表 1 在各种振源条件下结构响应的典型范围

振源类型	频率范围 Hz	幅值范围 $\mu\text{m}$	质点速度范围 mm/s	质点加速度范围 $\text{m/s}^2$	时间特征	测量
交通运输: 公路、铁路、地 面传播	1~80	1~200	0.2~50	0.02~1	C/T	pvth
爆破振动 地面传播	1~300	100~2 500	0.2~500	0.02~50	T	pvth
打桩 地面传播	1~100	10~50	0.2~50	0.02~2	T	pvth
室外机械 地面传播	1~300	10~1 000	0.2~50	0.02~1	C/T	pvth/ath
声响 交通运输、 室外机械	10~250	1~1 100	0.2~30	0.02~1	C	pvth/ath
外界气压	1~40				T	pvth
室内机械	1~1 000	1~100	0.2~30	0.02~1	C/T	pvth/ath
人的活动: a) 冲击	0.1~100	100~500	0.2~20	0.02~5	T	pvth/ath
b) 直接的	0.1~12	100~5 000	0.2~5	0.02~0.2		
地震	0.1~30	10~10 <sup>5</sup>	0.2~400	0.02~20	T	pvth/ath
风	0.1~10	10~10 <sup>5</sup>			T	ath
室内声响	5~500					

C——连续的,见 3.1 和 3.2;  
T——瞬态的,见 3.1 和 3.2;  
pvth——质点的速度时间历程;  
ath——质点的加速度时间历程。

注 1: 以上所给的范围是极端情况,而给出的值可能是经验的也可能是测试的。位移幅值和频率的极端范围不能用来推导质点的速度和加速度。

注 2: 给出的频率范围参照建筑物和建筑构件对具体激励形式的响应,仅是指导性的。

注 3: 在给定的范围内的振动值要予以重视。目前尚无某个标准能涵盖所有建筑物、及其状态和暴露持续时间的所有种类,但许多国家的法规将建筑物的基础上每秒几毫米的峰值点速度作为有明显效应的界限。质点速度峰值为每秒几百毫米时,产生损伤的可能性很大。对低于人们所能感觉的振动量级(见 GB/T 13441.2—2008),在精密的生产工业过程中可能要予以重视。

## 6 测量仪器

### 6.1 一般要求

通过测量得到的振动数据用于进行分析评价或诊断,或者是为了监测是不是达到了预先估计的某个界限值。为了评估的需要,必须满足第3章和第7章的规定,以及第9章中描述的评价方法。

单一的测量系统不可能满足本标准所指各类结构以及对结构输入的频率和动态范围的各项要求。

测量系统包括以下设备:

- 传感器(见6.2);
- 信号调理设备;
- 数据记录系统。

当它们连在一起使用时,需要对整个测量系统规定其频响特性(幅值和相位)。

所测量的运动是否接近真实运动的程度取决于检测系统的特性和使用的评价方法。

对9.2.2和9.2.3中的最低要求,是通过多次重复测量质点峰值速度来确定振动的特性。

对9.2.4中的最低要求,是记录足够长时间的振动时间历程,并且保证足够的精度建立其谱特性。振动时间历程采用模拟或数字的方法均合乎本章要求。

### 6.2 传感器的选择

传感器的选择对于正确评价振动是很重要的。通常,传感器按其线性输出的信号可以分为两类,即高于或低于传感器自身敏感元件的固有频率。广泛用于结构振动测量中的“速度传感器”或“地震检波器”是一种典型的工作频率高于自身固有频率的电磁式传感器。而压电式加速度传感器的工作频率,通常低于自身固有频率。有些电磁式传感器在低于自身的固有频率情况下工作,如广泛采用的强震仪。

在实践中,使用来自低频段工作的“速度”型传感器的相位信息时,应该谨慎对待。如果振幅和相位两者的响应是临界的,则应该确保整个测试系统的线性性能,最佳选择是仪器下限截止频率与所需测量的最低频率相差10倍。测量信号一般高出背景噪声5dB。

速度传感器能够输出较强的信号,可以简化整个测量装置。如果需要质点速度的话,在选择压电式加速度传感器时,就要对其输出信号进行积分。对于瞬态振动来说,还需要检验整个测量装置的响应。

### 6.3 信噪比

信噪比通常不应低于5dB。如果信噪比在5dB~10dB之间,应该修正(即减小)测试值,并且提出修正方法的报告。背景噪音是指所有不属于所研究现象的信号的总和。

## 7 传感器的位置和安装

### 7.1 位置

#### 7.1.1 总则

确定建筑物振动的固有特性需要一定数量的测点,这些测点的位置和建筑物的大小及复杂程度有密切的关系。

如果是监测强迫振动,较好的位置是在建筑物的基础上,当无法在基础上测量时,典型测点可以设置在基础底板主要承重外墙的底部。

由交通运输、打桩、爆破,特别是在远距离激振所引起的振动测量表明,振动在建筑物内可能会放大,并且与建筑物的高度成正比,因此有必要在建筑物内的几个测点进行同步测量。在基础和室外地面上的同步测试可以用来建立传递函数。

高于四层( $\approx 12$  m)的建筑物,应每隔四层和在顶层设置测点。

长度大于10 m的建筑物,应沿水平方向约每隔10 m设置一个测点。

由于用户和进一步观测的需要,可以增加测点。

分析方式的选择、测点位置的确定取决于所关注的模态。在大多数情况下,出于经济上的考虑,仅识别整体结构的基本模态和最大响应,并对如楼板、墙和窗等构件进行观测。



### 7.1.2 建筑物内的测量

在建筑物内,传感器的布置取决于所关注的响应。如在7.1.1所述,来自地面的振源作为建筑物的输入振动,最好通过基础上或其附近的测量值来评定。从整体来说,结构剧烈振动或者建筑物剪切变形的确定,需要直接在具有结构刚度的承重构件上测量,这通常是指互为直角的三个分量的测量,但也不排除其他的布置方法。

有时,所关注的楼板或者墙在跨中的振幅最大,虽然有时振动强烈,但通常与结构的整体性无关<sup>[11]</sup>。

在建筑物内,与振源有关的研究通常需要经历多次重复的探索试验。

在从事与设备有关的测量中,如监测对振动敏感的计算机、继电器和其他装置时,测量应反映输入的振动。测点应设置在基础或者设备的构架上。在此种情况下,如果可能,为了测量更准确,应关闭设备。

在进行与地面传播的振动有关的测量中,如研究地面振源,通常把振源和传感器之间的连线方向,作为传感器径向的定位方向,当研究结构对地面振动的响应时,根据结构的主轴和副轴定位比较实际。

在地面上或者地下所进行的振动测量可能受到变化的表面波振动幅度沿一定深度的影响,因此,建筑物基础可能处于一种与地面上所观测到的不同的运动,这取决于波长、基础深度和地质构造等条件。

关于风所引起的振动,垂直分量通常被忽略。测量仪器应按转动和平动模态布置。

## 7.2 传感器的安装

### 7.2.1 与结构构件的连接

振动传感器在振动结构构件或基础上的安装应该满足 GB/T 14412—2005 中对加速度传感器的要求。其目标是不引入附加响应,真实地再现结构构件或基础的运动。在三轴向传感器的安装中要小心谨慎,以避免传感器的摇摆或弯曲。

安装在建筑物构件上的传感器和监测单元的质量应不大于该建筑物或所测构件质量的10%,而且安装要尽可能做到坚固、轻巧。

应避免采用托架,最好将三个单轴向的传感器用螺栓或者高分子树脂牢固地安装在一个固定的金属立方体的三个面上。用膨胀螺栓将传感器的底座固定在建筑物的构件上,在轻质混凝土构件上应该选用石膏接合。

在特殊的环境下,可以用胶粘结或者磁座吸附传感器。对于室内水平表面上的测量,尽管机械式固定更好,但是在加速度低于 $1 \text{ m/s}^2$ 的情况下,也可以采用双面胶将传感器固定在坚硬表面的方法。

在具有柔性覆盖层的楼面上测量结果会失真,应该避免采用。如果必须采用这种方法,则需要对传感器安装件进行不同质量和连接条件的对比测试,以此来评价柔性覆盖层的影响。

### 7.2.2 与地面的连接

如果土壤的条件允许的话,可以将传感器固定在一根穿透地表松散层的刚性钢棒上(直径不小于 $10 \text{ mm}$ )。钢棒伸出地表面不超过几个毫米。必须注意确保钢棒与土的紧密接触。在预计加速度大于 $2 \text{ m/s}^2$ 的情况下,需要与地面稳固安装,以防滑移。

传感器必须安装在地面以下时,为了把结合的失真减小到最小,埋入深度至少为传感器的(包括安装装置)主要尺寸的三倍。也可以选择将它们固定在质量比 $(m/\rho r^3)$ ,其中 $\rho$ 为土壤密度, $m$ 为传感器和平板的质量, $r$ 是平板的等效半径)不大于2的具有刚性表面的平板上,例如可以是一块砌筑的平稳的铺路板,对大多数的土壤而言, $\rho$ 的范围是从 $1500 \text{ kg/m}^3$ 到 $2600 \text{ kg/m}^3$ 。

## 8 数据的收集、处理和分析

### 8.1 总则

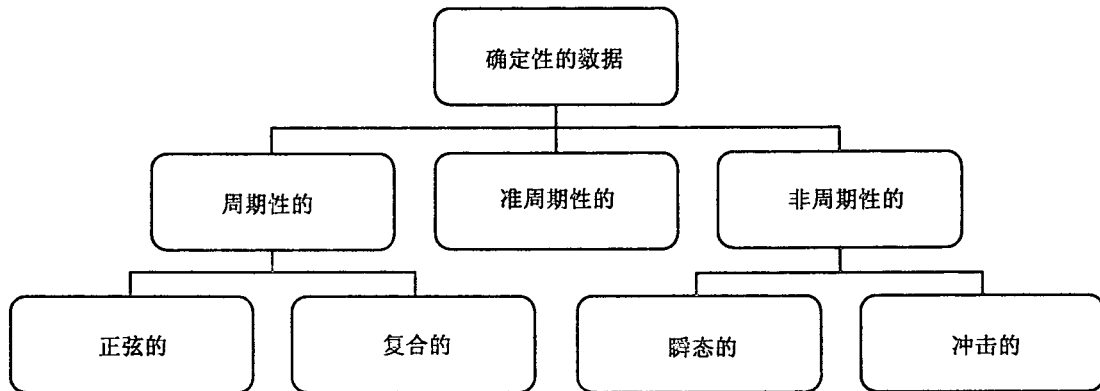
测试的目的是要获得充分的信息使按所选用的评价方法进行评价时具有足够的置信度(见第9章)。

确定振动特性所需的信息数量,随振动复杂程度的增加(如由简单周期性的至非平稳随机的和瞬态的运动)而适当增加。

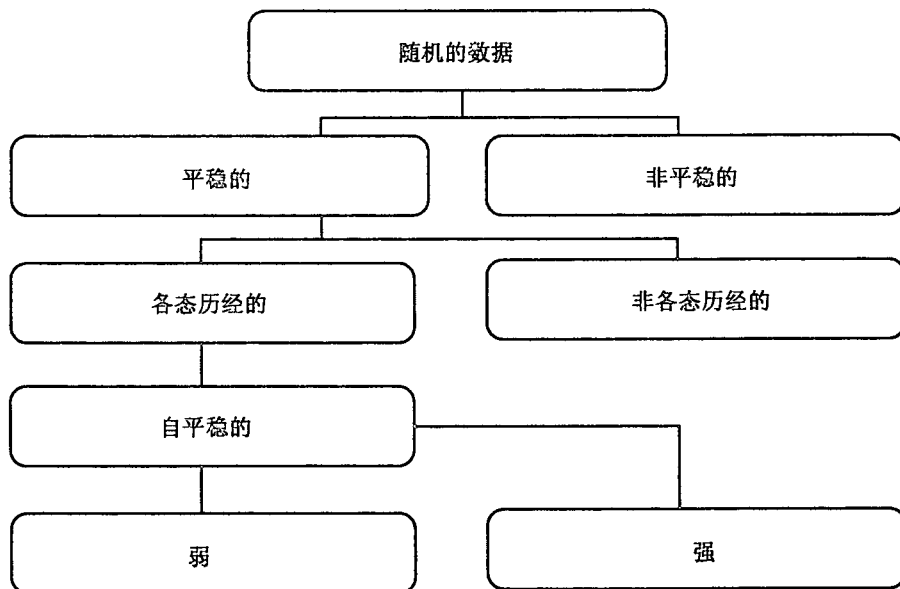
适用于确定某一特定频率范围内的周期性运动的数据收集系统,可能不适用于更为复杂的运动,甚至连单一参数的指标(例如质点速度峰值)也不能建立。

### 8.2 数据的描述

通过物理过程的观察得出的任何数据能被广泛地描述为确定的或者随机的数据。确定性数据是指那些能用明确的数学函数来描述的数据。图 1 给出了可能遇到的数据种类,每一种类的描述在 ISO 2041:1990中给出。



a) 确定性数据



b) 随机数据

图 1 数据的分类

### 8.3 数据分析方法

根据图 1 确定数据的种类后,分析的类型就可以确定。如果数据是确定性的,通常简单的分析(r. m. s.,峰峰值,均方根值)就能满足。

在非周期的确定性数据的特定情况下,确定峰值不需要经过预处理(虽然直流分量可以通过分析已捕捉到的记录信号前的数据加以补偿),详见参考文献[10]和[12]。通常,40 dB 的动态范围就够了,50 dB 则更好。

随机数据需进行平稳性检验(见参考文献[13])。如果认为数据是平稳的,则在附录 C 中所概述的方法是适用的,详见参考文献[10]、[12]、[13]和[14]。

## 9 数据评价的方法

### 9.1 总则

测量数据的评价既要反应测量的目的,又要反应研究的类型。

为了预估全部响应分析的结果,需有结构的详图和相关状态的信息,但通常不易全面获得。因此,研究人员要有适当的方法对与结构或构件有关的损伤概率的振动烈度进行评定。在评定中需要考虑以下的因素:

- a) 基本结构和构件(墙、楼板、窗)的共振频率;
- b) 基本结构和构件的阻尼特性;
- c) 建筑物的类型及其状态和材料性能;
- d) 频谱结构特性;
- e) 激励特性;
- f) 变形形式;
- g) 幅值响应的非线性度。

本标准虽然主要涉及到响应的评价和测量,但是进行评价时,要注意到振源、整个测试系统的通路和传递函数。

### 9.2 研究类型

列于 9.1 的 a)~g) 中关注的许多重要参数,能很快确定测量设备的选用、建筑物内测点的定位、记录装置类型、数据通道或所需测点的数量,对现象监测的持续时间和数据的收集速度等。在第 6 章和附录 C 中关于设备要求的概述中,已对仪器按不同情况提出的要求进行安排以便于选用。此外,指明研究中所采用的复杂程度也很重要。用单一的量描述振动环境的仪器,如那些用于人体反应和机器状态的仪器,只要考虑到有限的频率响应,即可用于初步测量。对本标准而言,已考虑到初步评定、检测程序、现场勘测和详细的工程分析。

#### 9.2.1 初步评定

通常在现场测量前,可能需要单凭室内研究对振动问题做出评价。若有振源的参数和建筑物的响应特性,诸如基频和阻尼等数据,就能用经验方法估计响应。

#### 9.2.2 初步探测

在一幢大楼或者一个区域内,只要进行有限的振动测量,就能指出需要进一步研究的问题。此时,误差通常是很大的(见 9.2.3)。

#### 9.2.3 现场测量

现场测量由有限数量的振动测点组成(见 7.1)。为了评定振动烈度,常与规范或者条例中规定的值作对比。

在有充分的时间能使振动再现的情况下,位于靠近振源的基础平面上保留一个参考点,其他不同的测点可以采用同一个传感器。

关于初步探测(见 9.2.2)和现场测量,其测量精度应与所采用的振动指标和经验关系式的不确定度接近。单一的参数指标,诸如质点速度峰值或质点加速度峰值及均方根值,在置信度为 68% 的情况下其误差一般在  $\pm 10\%$  以内。

#### 9.2.4 工程分析

当极为重要的复杂结构,遭受振动激励的量级达到了需要认真考虑其后果时,需要更为详细的方法来评定结构的性能。

应在一定数量的测点上安装监测时间历程的仪器,以确保振动不超过结构规定的限值。

如果需要获得地面对基础的传递函数,则应在基础上和基础外边的地坪上进行同步记录。基础上的测点位置设置在地下室承重墙上或基础的底层平面处。

测点的数量及位置要根据建筑物的特性、监测期间须重点观察的部位来确定和调整,并应尽可能的测量到建筑物的固有频率。

在振动时间持续比较长的条件下,应使用相同的传感器测试振源附近基础平面内不同的参考点。

对极其重要的结构,不但须进行响应分析,还应对结构的荷载进行评估。完整的工程分析要求系统所检测到的频率值达到1%和阻尼达到10%的精度。

### 9.3 监控工作的报告

报告格式应与研究的型式一致(见9.2),但至少应包括下列内容:

- a) 危害分析
  - 1) 振源描述;
  - 2) 按照附录A中说明建筑物型式和状况;
  - 3) 测量目的;
  - 4) 所采用的标准和研究类型。
- b) 测量
  - 1) 传感器的布置和连接方式。
  - 2) 传感器、信号调理装置和记录设备类型及组成。
  - 3) 仪器设备系统校准系数。
  - 4) 频率范围和线性度。
  - 5) 误差来源的评估。
  - 6) 对于监控或现场测量(见9.2.2和9.2.3),进行质点速度峰值的连续记录已经足够。对于进一步研究(见9.2.4),应采集足够长的时间历程记录。
- c) 建筑物的检查
  - 1) 在振动出现之前对建筑物进行检查,并用图表报告裂缝和其他损伤;
  - 2) 在振动出现之后对同一建筑物进行检查;
  - 3) 对所观察到的损伤进行评价。
- d) 参考其他相关的标准。

### 9.4 预测评估

现有的建筑物可能暴露于(内部或外部)新的振源,需要对预期的振动响应进行评估。给出关于输入特性和结构的充足的信息,一种或多种数值分析技术,如响应谱、傅里叶响应、时间步长积分等可以用于重要的建筑物的预评估<sup>[15]</sup>。另外,某一特性指标,如(位移、速度及加速度)运动量(见9.6),用适合于该建筑类型的经验数据,可以作为相对的预期性能<sup>[7]</sup>。

在频域内,表示振动的方便办法是工程中广泛应用的“响应谱”法<sup>[7]</sup>(见GB/T 2423.5—1995)。对无阻尼的特殊情况,它接近傅里叶幅值谱。

大多数情况下,虽然动态测试方法是有效的<sup>[7]</sup>,仅有结构的响应特性是不完全的。

### 9.5 现有建筑物振动研究的评价

对现有的建筑物振动状况的评价,可用不同于9.2中所描述的那样复杂的步骤进行。振动烈度可以用应力或者运动量来表达,在某些情况下,直接观察裂缝的开展或者延伸,可以提供有关响应的有价值的信息,并可以指出结构进一步恶化的情况<sup>[15][16]</sup>。

### 9.6 结构中作为振动烈度的指标的运动量

在过去几十年的研究表明,振动烈度与对结构直接影响的位移、速度和加速度峰值相关。

在构件上进行测量,如结构振动位移、速度和加速度峰值,能换算成应力来表达(见附录B),并且与结构的容许应力有关。当运动量涉及在某些选定位置所测得的整体结构响应、结构的响应频率和阻尼,

以及影响振动烈度的输入时间时,运动量可以作为一经验指标供该类建筑参考(见 3.3)。

上述部分参数包含于加速度谱峰值或者速度谱峰值当中,可作为用于低矮(一至三层高楼)和“整体”建筑物<sup>[16]</sup>响应的一种损伤指标<sup>[6][11]</sup>。

烈度的等级与建筑物的响应频率和激振频率的相关性可由经验关系式表示,该经验关系式严格局限在对应于建筑物的某段频率区间内,并且在不同的频带有不同的烈度等级。振动量级范围的概括性指南列于表 1。

### 9.7 概率评价方法

有关振动对建筑物的可察觉的影响(浅表性的、较小的和较大的损伤)的判据应采用概率的方法处理。

考虑建筑物的年限和状况两者可能出现的各种的组合,可能难以制定出一个经济的绝对下限。

特别是对一个在规定频率范围内地面运动的峰值(通常是质点速度),或者一峰质点速度响应谱情况,则需换算成加速度或者位移来作为灾害隐患的指标。通常以 95% 无影响的概率作为有影响的最小危害。

通过对局部应变或相对位移的测量(如裂缝监测),有助于对建筑物或者结构构件响应的评价。虽然这不属于振动状态的测量。但用所产生的动应力与设计准则比较来直接进行评价是允许的<sup>[17]</sup>。

### 9.8 疲劳因素

交变循环过多的重复应力会增加疲劳破坏的危险,对于钢构件的参考资料,可以作为设计规范,但不适用于混凝土、砖石和其他建筑材料,对这些材料的参考资料要进行进一步研究。对特殊结构、纪念碑等需考虑总计达  $10^{10}$  次反复荷载的长期、低量级的振动<sup>[17]</sup>。

### 9.9 损伤的描述

作为本标准的目的,损伤分为以下几类:

- 浅表性的,在清水墙表面上产生的发丝裂缝,在粉刷层或清水墙表面上有裂缝的发展;此外,在砖或混凝土砌块结构的灰逢中出现的发丝裂缝。
- 较小的,粉刷或清水墙表面产生较大的裂缝、松散和剥落,贯通砖或混凝土砌块的裂缝。
- 较大的,建筑物结构构件的损伤,承重柱的开裂,节点酥松,砖石裂缝的扩展等。

注:对损伤的描述在地震工作者所用的烈度等级中有相应的表达方式。

**附 录 A**  
(资料性附录)  
**建筑物的等级划分**

**A.1 一般规定**

本附录根据建筑物对地面传播的振动的响应,为建筑物等级划分提供简单而有用的指导。

对本等级划分而言,一个动力系统是由土壤和岩层、其中的基础(如果有的话),连同建筑物结构本身一起组成。

表 A.2 考虑了下列因素而给出十四个简化的等级:

- 构造的形式(如表 A.1 所规定的);
- 基础(见 A.5);
- 土壤(见 A.6);
- 政治上的重要因素。

**表 A.1 结构按建筑物的组别分类**

结构分类		建筑物组别(见 A.4)	
		1	2
抗振能力依次递减	1	大型多层工业建筑物 5 至 7 层高,包括抗震的; 大型结构,包括桥梁、堡垒、及防御构筑物	两至三层钢筋混凝土或钢结构的大型框架式工业建筑物。外培用护培板和(或)砌块和砖砌筑或预制的填充培,并具有钢、预制或现浇混凝土楼板,混合式钢和钢筋混凝土大型工业建筑物
	2	木构架大型公共建筑物,包括抗震的	5 层至 9 层(或更高的)公寓大厦、办公室、医院、钢筋混凝土或钢的轻型框架式工业建筑物,用砌块及砖砌筑或预制件的填充培,未按抗震设计
抗振能力依次递减	3	木构架单层或者二层住房和辅助用的建筑物,具有填充培和(或)维护培,包括抗震的	钢、铝、木或混凝土框架式单层中等轻型工业建筑物,用内部的纵横交错培支撑具有轻质护培和轻质填充培,包括抗震型的
	4	相当大多数的多层建筑物,用作介质仓库,或者 5 至 7 层甚至更高的住宅	两层民用住房和辅助用的建筑物,用配筋的砌块,砖砌或预制件建造,并具有配筋的楼板和屋面或全部是混凝土或类似结构,均为抗震型的
	5	四至六层住房和城市用的辅助建筑物,用砌块或砖砌块体建造,较大的承重培结构,包括大型住宅和小型宫殿式建筑	4 至 10 层民用和类似建筑物,主要用轻质承重砌块和砖砌体建造,大部分用相同材料的内培支撑,并且至少每隔一层楼用钢筋混凝土构件或者现浇楼板拉结
	6	2 层住房和辅助用的建筑物,用砌块、砖砌体或者更差的用土建造,用木质楼板和屋顶。 用石或者砖建造的塔,包括抗震型的	2 层民用住房和辅助用的建筑物,包括办公室;用砌块、砖砌体、预制件建造,用木质的、预制或现浇钢筋混凝土楼板和屋面结构

表 A.1 (续)

结构分类		建筑物组别(见 A.4)	
		1	2
抗振能力依次递减	7	高耸的教堂、大厅,类似用石或者砖等材料建造的拱形或绞结型结构,包括较小的拱型教堂和类似建筑物。 构造笨重、低矮、(无十字支撑)的框架式教堂和仓库型建筑,包括汽车库、低矮的工业建筑、市政厅、庙宇、清真寺和类似的具有相当重的木屋顶和楼板的建筑物	单层和两层及辅助用的建筑物,用轻质材料、预制和(或)现浇钢筋混凝土建造的较轻型结构
	8	损毁的及近于损毁的和其他均处于易损状态的建筑物。 上述所有7个等级中具有历史重要性的结构	

表 A.2 按建筑物的抗振能力和所能接受振动影响的容限划分建筑物的级别

建筑物级别		结构分类(见表 A.1)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		基础的种类(英文大写)和土壤的类型(英文小写)							
抗振级别依次降低	1	Aa							
	2	Ab	Aa	Aa	Aa				
	3		Ab Ba	Ab Ba	Ab	Aa Ab			
	4		Ac Bb	Bb	Ac	Ac Ba Bb			
	5		Bc	Ac		Bc	Ba		
	6		Af		Ad	Bd	Bb Ca	Ba	
	7			Af	Ae	Be	Bc Cb	Bb Ca	
	8						Be Cc	Bc Cb	
	9		Bf				Cd	Bd Cc	Aa
	10			Bf			Ce	Be Cd	Ab
	11				Cf	Cf		Ce	Ba
	12						Cf		Bc Ca
	13							Cf	Bd Cb Cc
	14								Cd Ce Cf

注: 级别数高=要求防护的等级高。

频率范围取 1 Hz~150 Hz(见 3.3),它包括了在工业生产、爆破、打桩和交通运输中所遇到的大多数事件。只包括直接作用在结构上的振动,不包括在一定距离范围内,由工业机械输入到结构中的冲击振动,也不包括打桩和爆破对结构所产生的冲击。本附录不涉及 10 层以上的结构。

## A.2 包括的建筑物

### A.2.1 在等级划分中包括下列结构:

- 用于居住和工作的所有建筑物(住宅、办公室、医院、学校、监狱、工厂等);
- 公用建筑物(西方的市政厅、教堂、庙宇、清真寺、较大的工业厂房式建筑物等);
- 具有建筑、考古和历史价值的较老的和古代的建筑物;
- 根据建筑物实用规程设计的较轻的工业建筑。

### A.2.2 在等级划分中不包括下列建筑物:

- 较大的结构、诸如核反应堆及其附属结构,其他大的发电厂、轧钢厂、较大的化学工程结构,所有类型的大坝,以及装液体和颗粒材料的容器结构,如水塔和水箱、石油库、谷仓和其他筒仓等;
- 所有的地下结构;
- 所有的海上结构。

## A.3 等级的确定(见表 A.2)

用一个维修完好的建筑物作为参照物来确定等级。参照的建筑物不应有任何构造上的缺陷,也不应遭受过地震等的意外损伤,如果构造上不满足这些要求,应归入较低的级别。

结构类型划分等级所排列的顺序取决于其抗振能力,也取决于在结构上对振动影响所能接受的容许限度,及其在建筑、考古和历史中所评定的价值。

在机械振动的影响下,涉及结构响应的三个重要因素为:

- 结构的种类(按 A.4 所规定的组别,初步划分的等级在表 A.2 中给出);
- 基础(见 A.5);
- 土壤的性质(见 A.6)。

## A.4 结构的种类

### A.4.1 第一组——古代的较老的建筑物或按传统建造的结构

本组中所考虑的建筑物型式可分为下列两个组:

- 较老的、老的或者古代的建筑物;
- 使用传统的材料、方法和工艺,按较老的传统风格建造的所有现代建筑物。

本组中建筑物由于使用软砂浆或熟石膏等原因,通常具有较重的结构和很高的阻尼系数。本组还包括地震区内按传统修复的结构。本组中建筑物很少超过六层。

### A.4.2 第二组——现代建筑和结构

本组中所考虑的建筑物型式是用各向连在一起的,用相对坚固的材料建造的所有现代结构,通常总体重量较轻,阻尼较小。

本组包括框架式建筑物,以及须经计算的承重墙式的建筑物。建筑物从单层到多层各式各样,包括各种型式的围护结构。本组还包括某些用现代的连接材料和阻尼材料建造的较为老式的建筑物。

## A.5 基础的分类

基础划分为在 A.5.1~A.5.3 中所述的三个等级。

### A.5.1 A 级

A 级包括下列基础类型:



- 钢筋混凝土桩和钢桩；
- 刚性钢筋混凝土筏基；
- 木质群桩；
- 重力挡土墙。

#### A.5.2 B级

B级包括以下基础类型：

- 桩顶不锚入承台内的钢筋混凝土桩(通常在桩帽标高处作构造连接)；
- 具有大放脚的墙基；
- 一般筏基。

#### A.5.3 C级

C级包括以下基础类型：

- 轻型挡土墙；
- 块石基础；
- 无基础(墙直接建在土壤上)。

#### A.6 土壤的类型

土壤划分为以下类型：

- a型——无裂隙或者相当坚硬的岩石,硬结的砂；
- b型——密实的水平分层的土；
- c型——不够密实的水平分层的土；
- d型——有潜在滑动面的斜坡；
- e型——松散的砂、砾石(无粘性)及饱和黏性土；
- f型——回填土。

附录 B

(资料性附录)

根据质点速度峰值估计峰值应力

如果在最大振动位移的位置上进行测试,在这种情况下,当梁或板内振动接近共振时能通过速度或者位移和频率的测量估算应力,此时边界条件和刚度不是必须的。

对具有实心矩形截面和等刚度、等荷载的梁,峰值应力与梁的长度、高度和宽度无关,与最大弯曲应力  $\sigma_{\max}$  和最大振动速度  $v_{\max}$  有关。

$$\sigma_{\max} \approx \sqrt{E_{\text{dyn}} \rho} \times \sqrt{3 \frac{G_{\text{tot}}}{G_{\text{beam}}}} \times k_n \hat{v}_{\max} \dots\dots\dots (\text{B.1})$$

式中:

$\hat{v}_{\max}$ ——沿梁长度上某测点的最大振动速度的幅值( $\omega$  是激励频率,近似等于梁的固有频率  $\omega_n$ ),

$$\hat{v}_{\max} = \hat{x}_{\max} \times \omega;$$

$E_{\text{dyn}}$ ——动弹性模量;

$\rho$ ——质量密度;

$\frac{G_{\text{tot}}}{G_{\text{beam}}}$ ——载荷系数,其中梁的应力是由其他的分布载荷加上梁的自重引起的,  $G_{\text{tot}} = G_{\text{beam}} + G_{\text{other}}$ ;

$k_n$ ——模态系数(无量纲),取决于边界条件和模态阶数(但影响很小),其值为 1~1.33。

详见参考文献[18]。

附 录 C  
(资料性附录)  
随 机 数 据

### C.1 总则

在实践中(风载、破碎机)可能遇到随机数据。谱分析技术能用来评估响应特性。评估的精度取决于结构特性(选择的模态频率和阻尼)和分析的精度要求<sup>[14]</sup>。包括偏移和方差两种误差<sup>[14]</sup>。记录持续时间选择取决于容许的选择误差。例如偏差是4%，方差是10%，记录持续时间 $T_r$ (s)可用式(C.1)计算：

$$T_r = \frac{200}{\eta f_n} \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

$\eta$ ——模态阻尼比；

$f_n$ ——考虑的第 $n$ 阶模态的固有频率，单位为赫兹(Hz)。

例如阻尼比 $\eta=1\%$ ， $f_n=1$  Hz，则按上面选择的偏移误差和方差必须20 000 s的记录持续时间。如果阻尼比是2%， $f_n=10$  Hz，则需要1 000 s的记录持续时间。如接受较高的误差可能减少需要的记录持续时间。

这些要求与分析采用的设备类型无关(通常使用磁带记录仪)。结构阻尼见附录D。非平稳随机数据呈现特殊的问题见参考文献[14]。

随机数据的分析在频率域或时间域处理，这些在C.2和C.3考虑。

### C.2 频域

在一般振动分析中，最常用的量是功率谱密度(PSD)。在结构振动分析中，谱密度幅值可以自行表示。在频域中其他分析类型包括传递函数、互功率谱密度、相干函数和正交谱密度。这些结果被表示成“物理量”的平方/Hz-频率，分别视作无量纲数和物理量的比。

### C.3 时域

在时间域可进行自相关、互相关和协方差分析。自相关是功率谱的逆，最常用。在时域许多量可以用确定性数据。可是更复杂的函数通常用随机数据。时域分析包含平均、均方根、峰值计数、过零计数以及概率密度、概率分布、偏斜度和峭度。

附录 D  
(资料性附录)

预测建筑物的固有频率和阻尼

引言

本标准规定了测量建筑物响应(包括基本固有频率)的方法。当遇到高阻尼、子结构共振或其他实际问题直接测量不能进行或实用受到限制时,评估固有频率和阻尼值变得必要了。

本附录提供评估基础固有频率和阻尼值的方法指南。注意到应该计入的、无论何处在测量或评估程序中用到的建筑物的基础固有频率的评估所包含的不确定性。

D.1 用经验法预测高层建筑物的固有频率

有很多预测基本平移模态的频率  $f$  或周期  $T$  的经验公式;最简单的是  $f=10/T$  Hz( $T=0.1Ns$ ), 其中  $N$  是层数。不同国家的规范给出各种其他的公式,它们可以分组成三类:

$$T = k_1 H \dots\dots\dots(D.1)$$

式中:

$H$ ——高度,单位为米(m);

$T$ ——周期,单位为秒(s);

$k_1$ ——范围从 0.14 s/m 到 0.03 s/m(见参考文献[24]到[27])。

$$T = k_2 H \sqrt{D} \dots\dots\dots(D.2)$$

式中:

$D$ ——与力平行的宽度,单位为米(m);

$k_2$ ——范围从 0.087 s/m<sup>-3/2</sup> 到 0.109 s/m<sup>-3/2</sup>(见[25]和[28])。

$$T = k_3 H \sqrt{D} \text{func}(H, D, I) \dots\dots\dots(D.3)$$

(见参考文献[29]的例子)

注 1:  $k_1$  单位为 s/m;  $k_2$  单位为 s · m<sup>-3/2</sup>。

后来的研究<sup>[30]</sup>考虑 163 座矩形平面的建筑物,基本平移模态推荐  $f=46/H$  Hz · m( $T=0.022H$  sm<sup>-1</sup>), 正交的基本平移模态推荐  $f=58/H$  Hz · m, 基本扭转模态推荐  $f=72/H$  Hz · m(63 个样本)。

注 2: 这些  $f$  公式是经验的,它们也可以视为当  $H$  的值是米时,推导  $f$  值(单位为 Hz)的数值等式,如  $f=46/H$ 。

图 D.1 表示曲线  $f=46/H$  Hz · m 对数据的拟合结果,并可意识到,很可能遭遇到大的误差。可以看到 ±50% 的误差并不普遍,而且用经验公式这样的准确度是能期望的。基于测量数据,看来高层建筑的基础模态的振型可用直线合理近似。

D.2 用计算机方法预测高层建筑的固有频率

长期以来认为,用简单的经验公式很可能发生相对大的误差,但通常又接受用标准的基于计算机的方法可以得到频率的统计估计。可是,建筑物是复杂的结构,处理一个精确的数学模型不是简单的任务;随之必须承认,这样的模型只能提供近似的预测。文献[30]的研究检验了已发布的证据表明,计算的频率和实测的频率的相关性实际上比用公式  $f=46/H$  Hz · m 预测的频率与实测值的相关性要差得多。这种不一致可归结于建筑物真实特性建模时的不恰当。因此,基本频率的预测需要谨慎处理。

对于具有核心筒的建筑<sup>[31]</sup>、剪切型建筑<sup>[32]</sup>、支撑框架和框架建筑<sup>[33]</sup>的分析,已开发了专门的方法,但重要的是任何方法都要用可靠的实验数据检验,并懂得会遇到什么误差。如果这一方法还没有证实,

则不能设想其准确度会比经验预测得到的高。仅讨论了基本频率,更高阶模态的频率预测会有相似或(很可能)更大的误差。这意味着,除了已经过实验结果修正的数学模型,许多计算模型的预测必须认为是不可靠的。

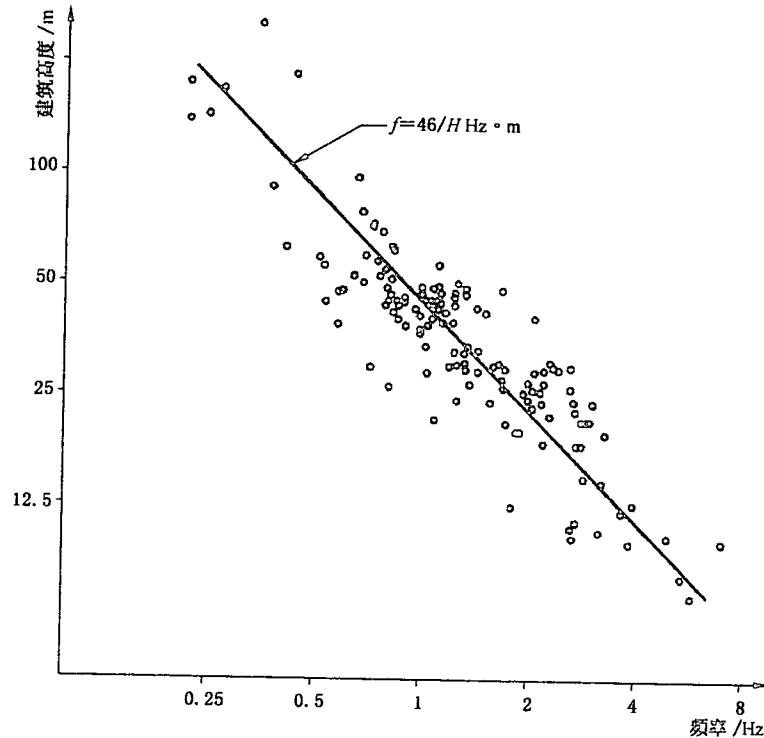


图 D.1 163 座矩形平面建筑物的高度对基本频率的关系图(对数坐标)

### D.3 高层建筑阻尼值的预测

在任意模型中的阻尼(或能量耗散率)仅限于某种模型中的运动。因此,为评估建筑物对给定载荷的响应需要评估和测量阻尼。还没有已证实可预测阻尼的方法,实测数据表明阻尼比可发生在 0.5%~2.1%(见图 D.2)。在土壤/结构相互作用显著的建筑也可能会遇到更高的值。简单的钢框架似乎有低得多的阻尼。预测阻尼的方法正在发展(见参考文献[34]和[35]),但还没有接近期望的精度。

图 D.2 表示参考文献[36]选择的建筑样本的阻尼对建筑高度的图。可以看出同样建筑的正交平移模态得到的阻尼有很大差别。关于阻尼的大小,部分认为是建造工序和施工质量的函数,而且不能准确预测。因此,评估误差大是必然的。

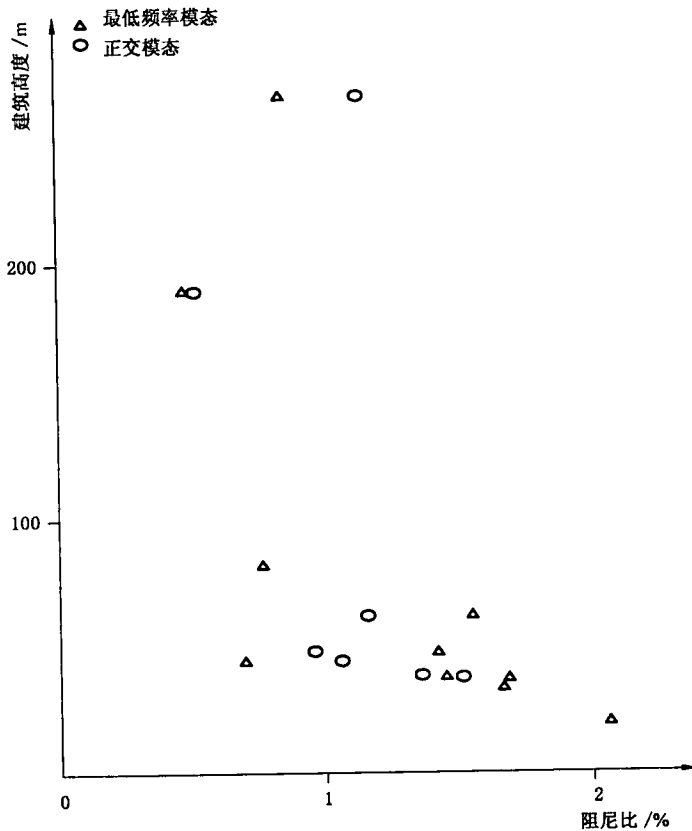


图 D.2 十座建筑物的基本平移模态对应的建筑高度对阻尼比图  
此处土-结构的相互作用被忽略(根据衰减测量)

#### D.4 低层建筑的固有频率和阻尼

98座低层建筑的特性发表在参考文献[37]和[38]中。这些建筑位于美国,是1层、1层半和2层的建筑,带地下室、部分地下室或步行通道的空间。数据表示平均测试的频率值随层高下降。

图D.3表示建筑物的数目与它们测得的频率的直方图。重要的是注意频率发生的范围和用经验预测包含的误差。频率随年限或房屋的位置的变化无明显趋势,频率与平面尺度不相关。

图D.4表示建筑物数目与其阻尼比的直方图。这里指出较高的建筑一般阻尼比较高,并显示可能遇到的阻尼值的范围。阻尼和建筑物的几何特性不存在明显关系。

#### D.5 非线性行为

前几章讨论每个模态的固有频率和阻尼,而且可能给人们一种印象,这些量是不变的。

可是它们都是随运动幅值变化的,这对地震分析可能是很重要的(尽管难以定量)。通常,风载引起小幅度运动(与大地震比较),在正常遇到的幅度范围固有频率和阻尼的变化很小。一座建筑经受从轻微的风到飓风的等效力的作用,记录其频率改变3%,阻尼变化30%<sup>[36]</sup>。这些变化也许不明显,而且设计中可以忽略不计。

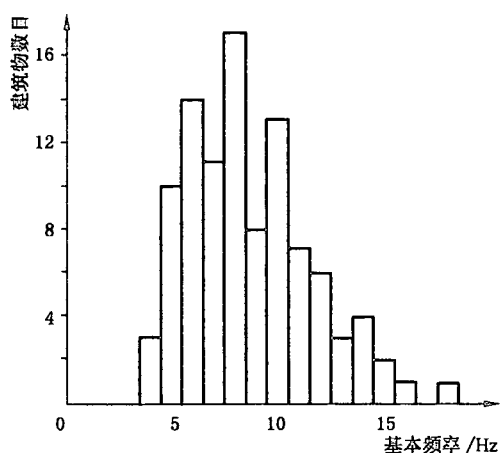


图 D.3 96 座低层建筑物测量的频率

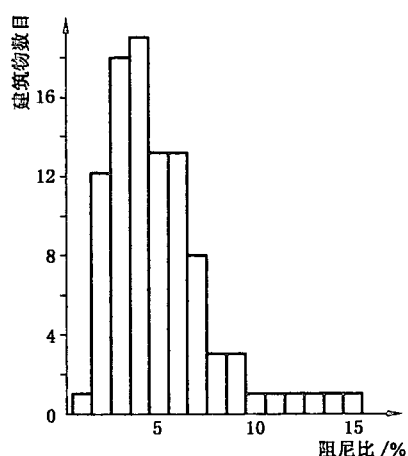


图 D.4 96 座低层建筑物测量的阻尼比

### D.6 最终评论

可以得到的一般结论是,理论预测似乎包括一定的不确定度。因此,理论分析应借助进行参数变更来考虑这些可能的不精确度,而且对于重要的结构当结构建成时,应用试验测量检验设计计算。

## 附录 E

(资料性附录)

### 结构的基础和土壤之间的振动相互作用

#### E.1 总则

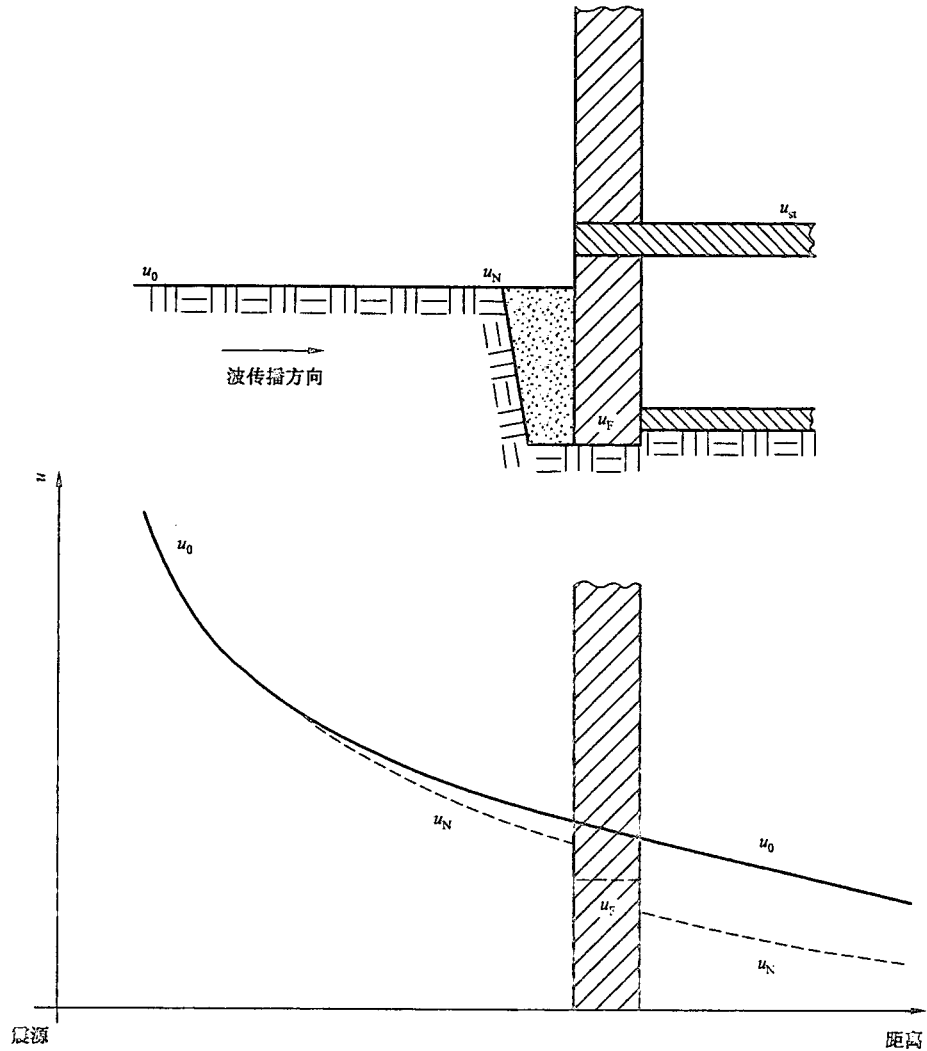
当振动测量不能在结构的基础上或建筑物内进行时,本标准允许在室外的地面上测量。或需要在建筑物还未建成之前预测响应。在这两种情况下有必要了解建筑物与地基间的动力相互作用。

在第一种情况,建筑物外最适合的测量位置以及该位置的信号与建筑物基础上的信号之间的关系需要建立。

在第二种情况,除非相互作用很显著,建筑物基础的响应可以预期很接近于与基础接触的地基的运动。本附录试图指示这种相互作用的性质,并且建议将它们计入的方法。

图 E.1 说明在本附录中用到的符号,行波穿过基础,其峰幅值为  $u$  ( $u$  可以是正弦波的位移、速度或加速度)。自由场的幅值记作  $u_0$ ,基础底部的幅值为  $u_F$ ,结构附近任意位置的幅值为  $u_{st}$ ,现存建筑临近土壤表面的幅值为  $u_N$ 。远离结构处  $u_N = u_0$ 。土壤-结构相互作用分析通常是涉及自由场运动与结构运动之间的关系,即  $u_{st}/u_0$ ,尤其是  $u_F/u_0 = r_0$ 。重要的比  $u_F/u_N = r_N$  由更复杂的步骤得出,这是土壤响应(包括振动幅值随深度的变化)问题的重点。





符号：

$u$ ——正弦波的位移、速度或加速度的幅值；

$u_0$ ——自由场的幅值；

$u_N$ ——现有建筑物附近土壤表面的幅值；

$u_F$ ——基础底部的幅值；

$u_{st}$ ——结构内任意位置的幅值；

$$r_0 = u_F / u_0$$

$$r_N = u_F / u_N$$

图 E.1 说明水平传播波的记号

## E.2 理论考虑

土壤-结构相互作用在某种程度影响所有结构的响应。只有连接在刚性地基上的刚性建筑会与地基同样响应。实际上,地基没有无限刚性,并且可提供能量辐射或损耗的机理。因此,它可以想象为弹簧和阻尼系统的作用,或是基础下面的一系列这样的系统。

土壤-结构相互作用的程度是结构响应取决于结构和地基的参数,尤其是结构的固有频率和地基的剪切刚度。当考虑相对刚性的建筑(低于 6 m 至 7 m)时,问题可以视为弹簧和阻尼器上的刚性质量的垂直响应,将地基视为半无限各向同性的均匀的弹性半空间的解析解。像这样简单的概念认为,在垂直

方向最大放大因子不大于 2。摇摆和滑动模式也可以相同的方式探索,并且在大多数情况下,理论上可以达到较高的放大因子。但垂直放大因子确实是有限的,因为输入到结构的波的能量部分被重反射入地基,从而衰减了结构响应幅值。

全面考虑土壤-结构相互作用应该计算土壤分层、剪切刚度随深度的变化、建筑载荷对土壤刚度的影响、剪切应变对土壤刚度的影响、基础的几何特性、基础的埋深、以及激励的频率成分。

土壤-结构动力相互作用是地震工程的核心问题之一,且最近二十年分析方法已经高度发展,由于是核工业的发展,提供了大量文献(见参考文献[39]至[45])。对风和人工荷载也已经细致分析,一些简化的法则已经导出(见参考文献[46]和[47])。

这些先进的分析方法可分组为两类:

- a) 直接法,土壤和结构统一处理;地基可用有限元、集中质量或两者(混合模型)表示;
- b) 子结构法,地基和基础作为分离的系统计算其响应,地基和基础之间有弹簧和阻尼器充当刚度函数作用。

另一种途径是广泛用于地震工程和其他冲击载荷的响应谱(见参考文献[48])。对在低刚性的土壤上的结构评估的固有频率下降;能用计算土壤-结构相互作用来适应。土壤响应的效应部分地能用设计响应谱扣除,设计响应谱随深度剖面的剪切模量变化。

通常,激励频率愈接近建筑物或建筑构件的固有频率,则响应愈大。频率为 0.5 Hz~8 Hz 的地震趋于激起建筑物较低的固有频率;人工激励一般频率较高,趋于激起结构构件的固有频率。此外,建筑部件的垂直频率的范围(6 Hz~40 Hz)在人工激励的范围内,以致从天花板可观察到相对较大的弯曲变形响应(见参考文献[49])。

### E.3 地表面振动与基础上的振动之间的关系

靠近建筑物的地基上测量有困难,例如:

- 测点经常离结构物内关注的位置很远;
- 传感器与地基的连接比把它固定在建筑物上更不可靠;
- 建筑物附近的土壤经常受扰动;
- 靠近建筑物的振动幅值随距建筑物的距离与波长成比例变化。

分析土壤-结构相互作用的直接法很昂贵,而且需要土壤特性的详细知识,可是,能给出下面一些关于影响  $r_N$  因素的一些指导。

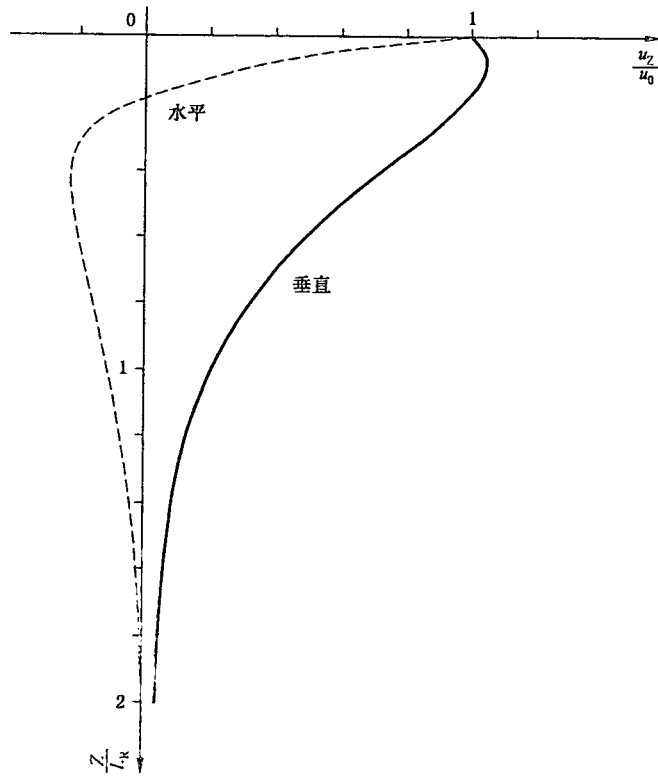
- a) 振动的幅值可能受基础前方(关于行波)的反射的影响,受后面的耗散和前边的反射而减小。这些影响取决于基础尺寸、深度、和激励波长。
- b) 像表面波的传播(用于远振源),幅值随深度减小(例如图 E.2 所示),所以较深的基础测得的运动更小。
- c) 强震运动通常模拟为垂传播的水平极化的剪切波,当波从高刚性向上传递时,幅值则增加。这样较深的基础可以测得较小的振动。

这样的复杂性妨碍权威对有关  $r_N$  和  $r_0$  的规则对结构和激励的特性归类,但测量(见参考文献[50])和理论研究表明:大多数人工激励情况下, $r_N$  基本为 1 或更小。调查研究<sup>1)</sup>的结果表明,不论频率大小, $r_N$  在 0.3~0.6 范围内。记录的最大的放大倍数是在水平响应,合计增加 13%。图 E.3 和图 E.4 给出调查统计的直方图。

在对连续振动有显著的摇摆响应的情况下,不进行基础垂直振动的降低与建筑物附近土壤表面的垂直振动的降低的对比。

作为靠近建筑物更好的测量位置,建议这些位置距建筑物的距离应小于 2 m 或小于主导波长的 1/10。

1) 调查包括各种地基条件以及不同类型的振动激励。



$L_R$ ——瑞利波长。

图 E.2 瑞利波的振动幅值  $u_z$  随深度  $Z$  的变化

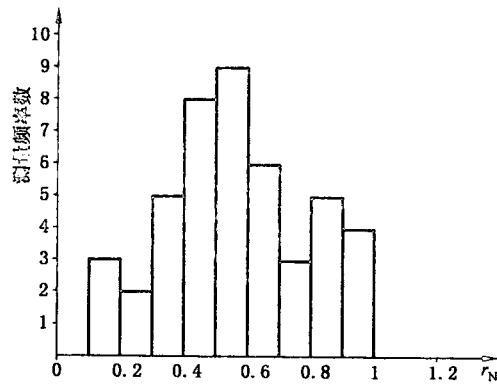


图 E.3  $r_N$  (垂直振动方向) 的频率分布

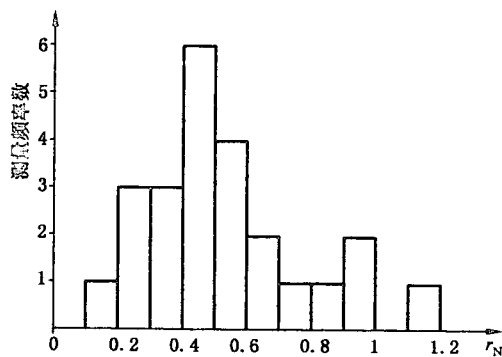


图 E.4  $r_N$  (水平振动方向) 的频率分布

参 考 文 献

- [1] BROCH, J. T. Mechanical Vibration and Shock. Brüel & Kjær, Nærum, Denmark, 1972.
- [2] JEARY, A. P. Private Communication. Building Research Establishment Note, 1980.
- [3] Applied Technology Council, Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings (ATC Special Publication 3.06; NBS Special Publication 510; NSF Publication 78.8,56; NSF Publication, 65-70; NSF Publication, 381-400), 1978.
- [4] DIN 4149-1 Bauten in deutschen Erbebengebieten; Lastannahmen, Bemessung und Ausführung unüblicher Hochbauten (Buildings in German earthquake areas; design loads, analysis and structural design; unusual buildings).
- [5] DIN 4150-1 Erschütterungen im Bauwesen; Grundsätze, Vorermittlung und Messung von Schwingungsgrößen (Vibrations in building; principles, predetermination and measurement of the amplitude of oscillations).
- [6] MEDEARIS, K. Development of rational damage criteria for low rise structures subject to blasting vibrations, K. M. Assoc. Report, 1976.
- [7] NEWMARK, M. and ROSENBLUTH, E. Fundamentals of earthquake engineering, Eaglewood Cliffs, New Jersey; Prentice Hall, 1973.
- [8] SEED, H. B. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquake. American Society of Civil Engineers, GT2, 1979, 201-25.
- [9] PYKE, R., SEED, H. B. and CHAN, C. K. Settlement of sands under multidirectional shaking. American Society of Civil Engineers, GT4, 379-39.
- [10] RABINER, L. R. and GOLD, B. Theory and Application of Digital Signal Processing, Eaglewood Cliffs, New Jersey; Prentice Hall, 1974.
- [11] SISKIND, D. E., STAGG, M. S., Kopp, J. W. and DOWDING, C. H. Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting; United States Bureau of Mines. Report of investigations No. RI, 8507. 1980.
- [12] OTNES, R. and ENOCHSON, L. Digital Time Series Analysis, New York; John Wiley & Sons, 1972.
- [13] BENDAT, J. S. and PIERSOL, A. G. Random data; Analysis and measurement procedures, New York; John Wiley & Sons, 1971.
- [14] OPPENHEIM, A. V. and SCHAFER, R. W. Digital Signal Processing, Eaglewood Cliffs, New Jersey; Prentice Hall, 1975.
- [15] FANG, H. Y. and KROENER, R. M. Soil-structure Interaction during blasting. International Symposium on Soil Structure Interaction, University of Roorkee, India, 1977.
- [16] DIN 4150-3 Erschütterungen im Bauwesen; Einwirkungen auf bauliche Anlagen (Vibrations in building; effects on structures).
- [17] CROCKETT, J. H. A. Piling vibrations and structures failure. Recent Development in the Design and Construction of Piles. Institution of Civil Engineers London, 1979.
- [18] GASCH, Elgnung der Schwingungsmessung zur Ermittlung der dynamischen Beanspruchung in Bautellen. Berichte aus der Bauforschung, 58, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1968.
- [19] DOUGLAS, B. Modal Damping Determinations from Resonance Spectral Shape Measurements. Journal of the Acoustical Society of America, 58, Suppl. No. 1, 1975.

- [20] PAOULLO, A. Suitability of existing vibration criteria for rail rapid transit system, Acoustical Society of America, Atlanta, Georgia, April 21 to 25, 1980.
- [21] Building Research Establishment (UK), Cracking in buildings. Digest No. 5, 1966 (reprinted 1975).
- [22] ISO 3010:1988 Bases for design of structures—Seismic actions on Structures.
- [23] GUTOWSKI, T. G. , WITTIG, L. E. and DYM, C. L. , Some aspects of the ground vibration problem. *Noise Control Engineering*, 10, No. 3, 1978.
- [24] KAWECKI, J. Empirical formulate used for calculating the natural periods of vibrations of buildings. *Czasopismo Techniczne, Z 7-B(129)*, 1969.
- [25] STEFFENS, R. J. Structural vibration and damage. Building Research Establishment Report, UK. , 1974.
- [26] BARKADZE, E. L. Problems of determining the results of instrumental measurements of natural periods of buildings. *Soobs AN Groz*, 39 (6), 1962.
- [27] NAKA, T. Structural design of tall buildings in Japan. ASCE-IABSE Joint Committee Report; Planning and design of tall buildings, Proc. 3rd Regional Conference, Tokyo, Sept. 1971.
- [28] ANDERSON, A. W. et al. Lateral forces of earthquake and wind. Proc. ASCE, 77 (Separate) No. 66, 1951.
- [29] Recommendations Association Francaise du Génie Parasismique-90. Presse des Ponts et Chaussées, Paris.
- [30] ELLIS, B. R. An assessment of the accuracy of predicting the fundamental natural frequencies of buildings and the complications concerning the dynamic analysis of structures. Proc. Inst. Civ.
- [31] ESDU 81036, Undamped natural frequencies of core buildings. ESDU, London, Nov. 1981.
- [32] ESDU 7905, Undamped natural vibration of shear buildings. ESDU, London, May, 1979.
- [33] ESDU 82019, Undamped natural vibration of sway frame buildings and frame structures. ESDU, London, Aug. 1982.
- [34] ESDU 83009, Damping of structures—Part 1: Tall buildings. ESDU, London, May, 1983.
- [35] JEARY, A. P. Damping in tall buildings—A mechanism and a predictor. *Earthquake Engineering and Structural Design*, 14, 1986.
- [36] ELLIS, B. R. Dynamic soil-structure interaction in tall buildings. Ph. D. Thesis. University of London, 1984.
- [37] MEDEARIS, K. The development of rational damage criteria for low-rise structure subjected to blasting vibrations. Report to National Crushed Stone Association, Washington DC, Aug. 1976.
- [38] SISKIND, D. E. et al. Structural response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. US Dept. of Interior, Bureau of Mines, RI 8507, 1980.
- [39] NEMARK, M. and ROSENBLUTH, E. Fundamentals of earthquake engineering. Prentice Hall, 1973.
- [40] RICHARD, F. E. , HALL, J. R. and WOODS, R. D. Vibrations of soils and foundations. Englewood Cliffs, NJ, 1970.
- [41] WOLF, J. P. Dynamic soil structure interaction. Prentice Hall, 1985.
- [42] CLOUGH, R. W. and PENZIEN, J. Dynamics of structures. McGraw Hill Corp. , New York, 1975.
- [43] WARBURTON, G. B. , RICHARDSON, I. D. and WEBSTER, J. J. Forced vibrations of two masses on an elastic half space. . *Transactions ASME*, March 1971.

[44] HOLZLÖHNER, U. Dynamically loaded buildings on the soil. Proc. XICSMFE, Vol. 3, Stockholm, 1981.

[45] ROESSET, J. M. and GONZALES, J. J. Dynamic interaction between adjacent structures. Proc. DMSR, Karlsruhe 1977, Vol. 1, Balkema, Rotterdam, 1978.

[46] ELLIS, B. R. Dynamic soil structure interaction in tall buildings. Ph. D. Thesis, University of London, 1984.

[47] AUERSCH, L. Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen—Ergebnisse von Modellrechnungen. BAM Research Report 108, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1984.

[48] FOSTER, G. A. Structural response and human response to blasting vibration effects—is there a connection? Vibra-tech report, 1985.

[49] AUERSCH, L., HEBENER, H. and RÜCKER, W. Erschütterungen infolge Schienenverkehr; Theoretische und meßtechnische Untersuchungen zur Emission, zur Ausbreitung durch den Boden und zur Übertragung im Gebäude. STUVA Report No. 19 (Series Verminderung des Verkehrslärms in Städten und Gemeinden, Teilprogram Schienennahverkehr). 1986.

[50] SISKIND, D. E. and STAGG, M. S. Blast vibration measurements near and on structure foundations. Report of investigations RI 8969, US Bureau of Mines, 1985.

---



中 华 人 民 共 和 国  
国 家 标 准  
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—2009/ISO 4866:1990

\*

中国标准出版社出版发行  
北京复兴门外三里河北街16号  
邮政编码:100045

网址 [www.spc.net.cn](http://www.spc.net.cn)

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷  
各地新华书店经销

\*

开本 880×1230 1/16 印张 2 字数 56 千字  
2009年7月第一版 2009年7月第一次印刷

\*

书号: 155066·1-38039 定价 30.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换  
版权专有 侵权必究  
举报电话:(010)68533533



GB/T 14124-2009