

UDC

中华人民共和国国家标准



P

GB/T 50452-2008

古建筑防工业振动技术规范

Technical specifications for protection of historic
buildings against man-made vibration

2008-09-24 发布

2009-01-01 实施



1 5 1 1 2 1 6 6 8 6

统一书号: 15112 · 16686
定 价: 10.00 元

中华人民共和国住房和城乡建设部
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 联合发布



中华人民共和国国家标准

古建筑防工业振动技术规范

Technical specifications for protection of historic
buildings against man-made vibration

GB/T 50452-2008

主编部门：中华人民共和国住房和城乡建设部

批准部门：中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期：2009年1月1日

中国工业出版社

2008 北京

中华人民共和国国家标准
古建筑防工业振动技术规范
Technical specifications for protection of historic
buildings against man-made vibration

GB/T 50452 - 2008
中华人民共和国国家标准
古建筑防工业振动技术规范
Technical specifications for protection of historic
buildings against man-made vibration

GB/T 50452 - 2008

*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京西郊百万庄）
各地新华书店、建筑书店经销
北京红光制版公司制版
北京市密东印刷有限公司印刷

*

开本：850×1168 毫米 1/32 印张：1 $\frac{1}{4}$ 字数：50 千字
2008 年 12 月第一版 2008 年 12 月第一次印刷
定价：10.00 元
统一书号：15112·16686
版权所有 翻印必究
如有印装质量问题，可寄本社退换
（邮政编码 100037）
本社网址：<http://www.cabp.com.cn>
网上书店：<http://www.china-building.com.cn>

中华人民共和国住房和城乡建设部 公告

第 121 号

关于发布国家标准 《古建筑防工业振动技术规范》的公告

现批准《古建筑防工业振动技术规范》为国家标准，编号为 GB/T 50452-2008，自 2009 年 1 月 1 日起实施。

本规范由我部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

中华人民共和国住房和城乡建设部

2008 年 9 月 24 日

中华人民共和国国家标准

前言

根据建设部《1999 年工程建设国家标准制订、修订计划》(建标 [1999] 308 号) 的要求编制本规范。

本规范在编制前, 开展了《工业环境振动对文物古迹的影响及相应规范》课题的研究, 对主要的工业振源、全国有代表性的古建筑结构及古建筑材料等进行了现场测试和室内实验, 取得了大量可供分析的原始数据; 对古建筑结构的振动控制标准、结构的动力特性和响应等方面进行了理论研究和实际验证, 为制订规范提供了科学的、可靠的依据。

在编制过程中, 编制组以上述科研成果为依据、实践经验为基础, 对规范的主要内容和问题, 采取多种方式广泛征求有关单位和专家、学者的意见, 反复讨论、修改, 完成规范的送审稿和报批稿, 经全国审查会定稿。

本规范分 8 章、2 个附录。主要内容为: 古建筑结构的容许振动标准、工业振动对古建筑结构影响的评估、工业振源地面振动的传播、古建筑结构动力特性和响应的计算与测试、防振措施。

本规范由住房和城乡建设部负责管理和解释, 五洲工程设计研究院负责具体技术内容解释。在执行过程中, 请各单位总结经验, 积累资料, 如发现需要修改或补充之处, 请将意见和建议寄五洲工程设计研究院(地址: 北京市西便门内大街 85 号, 邮编: 100053), 以供今后修订时参考。

本规范主编单位: 五洲工程设计研究院(中国兵器工业第五设计研究院)

本规范参编单位: 中国文化遗产研究院
中国汽车工业工程公司

1 总则	1
2 术语和符号	2
3 容许振动标准	3
4 工业振动对古建筑结构影响的评估	4
5 工业振源地面振动的传播	5
6 古建筑结构动力特性和响应的计算与测试	6
7 防振措施	7
附录 A 古建筑结构振动测试方法	A
附录 B 古建筑结构振动控制标准	B

目次

1 总则	1
2 术语、符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	3
3 古建筑结构的容许振动标准	5
3.1 一般规定	5
3.2 容许振动标准	5
4 工业振动对古建筑结构影响的评估	8
4.1 一般规定	8
4.2 评估步骤和方法	8
4.3 评估意见	9
5 工业振源地面振动的传播	10
5.1 地面振动速度	10
5.2 地面振动频率	11
6 古建筑结构动力特性和响应的计算	12
6.1 一般规定	12
6.2 古建筑砖石结构	12
6.3 古建筑木结构	16
7 古建筑结构动力特性和响应的测试	21
7.1 一般规定	21
7.2 测试方法	21
7.3 数据处理	22
8 防振措施	23
8.1 一般规定	23
8.2 防振距离	23

8.3 振源减振	23
附录 A 弹性波传播速度的测试	25
附录 B 地面振动传播和衰减的计算	27
本规范用词说明	31
附：条文说明	33

1.0.1 为防治工业振动引起的地面振动对古建筑结构产生有害影响，保护历史文化遗产，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于：1 工业交通基础设施等布局中古建筑结构的保护；2 工业振动对古建筑结构影响的评估和防治。

1.0.3 工业交通基础设施等布局中古建筑结构的保护，应遵守《中华人民共和国文物保护法》和正确处理经济建设、社会发展与古建筑保护的关系，保护方案应经技术经济比较确定。

1.0.4 古建筑防工业振动，除应执行本规范外，尚应符合国家现行有关标准的规范。

1 总 则

2 术语、符号

2.1 术语

- 2.1.1 古建筑** historic buildings
历代留传下来的对研究社会政治、经济、文化发展有价值的建筑物。
- 2.1.2 古建筑结构** historic building structure
古建筑的承重骨架。
- 2.1.3 古建筑木结构** historic timber structure
以木材作为承重骨架的古建筑结构。
- 2.1.4 古建筑砖石结构** historic brick masonry structure
以砖、石砌体为承重骨架的古建筑结构。
- 2.1.5 殿堂** palatial hall
古代建筑群中的主体建筑，包括殿和堂两类建筑形式。
- 2.1.6 楼阁** storeyed building
古代建筑中的多层建筑。
- 2.1.7 塔** pagoda
高耸型点式的多层建筑。
- 2.1.8 工业振动** man-made vibration
铁路（火车）、公（道）路（汽车）、城市轨道交通（地铁、城铁）、大型动力设备、工程施工等工业振源产生的振动。
- 2.1.9 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。
- 2.1.10 动力响应** dynamic response
结构受动力输入作用时的输出，如位移响应、速度响应、加速度响应等。

- 2.1.11 速度时程** velocity time history
结构质点振动速度在时域内的变化过程。
- 2.1.12 综合变形系数** multi-transfiguration coefficient
结构弯曲变形、剪切变形、转动惯量等对固有频率影响的系数。
- 2.1.13 质量刚度参数** mass and stiffness parameter
结构总体质量和刚度的大小及其分布的参数。
- 2.1.14 动力放大系数** dynamic magnification coefficient
单质点结构在工业振动作用下最大速度响应与地面同方向最大速度的比值。
- 2.1.15 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。
- 2.1.16 振源减振** vibration absorption of source
通过采取措施以减小振源产生的振动。

2.2 符号

- 2.2.1 作用及作用效应符号**
- f_r —— 工业振源地面振动频率；
- f_j —— 结构第 j 阶固有频率；
- V_r —— 工业振源地面振动速度；
- V_{max} —— 结构最大速度响应。
- 2.2.2 几何参数和计算参数、系数符号**
- A —— 截面面积；
- b_0 —— 底面宽度；
- H —— 计算总高度；
- β —— 动力放大系数；
- γ —— 振型参与系数；
- α —— 综合变形系数；
- λ —— 固有频率计算系数；

ψ ——质量刚度参数。

2.2.3 材料性能及其他符号

E ——弹性模量；

$[v]$ ——容许振动速度；

V_p ——弹性纵波（拉压波）传播速度；

V_s ——弹性横波（剪切波）传播速度。

3 古建筑结构的容许振动标准

3.1 一般规定

3.1.1 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。

3.1.2 古建筑结构的容许振动速度，应根据结构类型、保护级别和弹性波在古建筑结构中的传播速度选用。

3.1.3 列入世界文化遗产名录的古建筑，其结构容许振动速度应按全国重点文物保护单位的规定采用。

3.2 容许振动标准

3.2.1 古建筑砖石结构的容许振动速度应按表 3.2.1-1 和 3.2.1-2 的规定采用。

表 3.2.1-1 古建筑砖结构的容许振动速度 $[v]$ (mm/s)

保护级别	控制点位置	控制点方向	砖砌体 V_p (m/s)		
			<1600	1600~2100	>2100
全国重点文物保护单位	承重结构最高处	水平	0.15	0.15~0.20	0.20
省级文物保护单位	承重结构最高处	水平	0.27	0.27~0.36	0.36
市、县级文物保护单位	承重结构最高处	水平	0.45	0.45~0.60	0.60

注：当 V_p 介于 1600~2100m/s 之间时， $[v]$ 采用插入法取值。

表 3.2.1-2 古建筑石结构的容许振动速度 $[v]$ (mm/s)

保护级别	控制点位置	控制点方向	石砌体 V_p (m/s)		
			<2300	2300~2900	>2900
全国重点文物保护单位	承重结构最高处	水平	0.20	0.20~0.25	0.25

续表 3.2.1-2

保护级别	控制点位置	控制点方向	石砌体 V_p (m/s)		
			<2300	2300~2900	>2900
省级文物保护单位	承重结构最高处	水平	0.36	0.36~0.45	0.45
市、县级文物保护单位	承重结构最高处	水平	0.60	0.60~0.75	0.75

注：当 V_p 介于 2300~2900m/s 之间时， $[v]$ 采用插入法取值。

3.2.2 古建筑木结构的容许振动速度应按表 3.2.2 的规定采用。

表 3.2.2 古建筑木结构的容许振动速度 $[v]$ (mm/s)

保护级别	控制点位置	控制点方向	顺木纹 V_p (m/s)		
			<4600	4600~5600	>5600
全国重点文物保护单位	顶层柱顶	水平	0.18	0.18~0.22	0.22
省级文物保护单位	顶层柱顶	水平	0.25	0.25~0.30	0.30
市、县级文物保护单位	顶层柱顶	水平	0.29	0.29~0.35	0.35

注：当 V_p 介于 4600~5600m/s 之间时， $[v]$ 采用插入法取值。

3.2.3 石窟的容许振动速度应按表 3.2.3 的规定采用。

表 3.2.3 石窟的容许振动速度 $[v]$ (mm/s)

保护级别	控制点位置	控制点方向	岩石类别	岩石 V_p (m/s)		
全国重点文物保护单位	窟顶	三向	砂岩	<1500	1500~1900	>1900
				0.10	0.10~0.13	0.13
			砾岩	<1800	1800~2600	>2600
				0.12	0.12~0.17	0.17
			灰岩	<3500	3500~4900	>4900
				0.22	0.22~0.31	0.31

注：1 表中三向指窟顶的径向、切向和竖向；

2 当 V_p 介于 1500~1900m/s、1800~2600m/s、3500~4900m/s 之间时， $[v]$ 采用插入法取值。

3.2.4 砖木混合结构的容许振动速度，主要以砖砌体为承重骨架的，可按表 3.2.1-1 采用；主要以木材为承重骨架的，可按表 3.2.2 采用。

4 工业振动对古建筑结构影响的评估

4.1 一般规定

- 4.1.1 评估工业振动对古建筑结构的影响,应根据工业振源和古建筑的现状调查、古建筑结构的容许振动速度标准以及计算或测试的古建筑结构速度响应,通过分析论证,提出评估意见。
- 4.1.2 古建筑结构速度响应的确定,宜采用计算法。当古建筑周边已有工业振源时,亦可采用测试法。
- 4.1.3 对古建筑进行现状调查和现场测试时,不得对古建筑造成损害。

4.2 评估步骤和方法

- 4.2.1 评估工业振动对古建筑结构的影响,可按下列步骤进行:
- 1 调查古建筑和工业振源的状况;
 - 2 测试弹性波在古建筑结构中的传播速度;
 - 3 确定古建筑结构的容许振动标准;
 - 4 计算或测试古建筑结构的速度响应;
 - 5 综合分析提出评估意见。
- 4.2.2 状况调查和资料收集应包括下列内容:
- 1 工业振源的类型、频率范围、分布状况及工程概况;
 - 2 古建筑的修建年代、保护级别、结构类型、建筑材料、结构总高度、底面宽度、截面面积等及有关图纸;
 - 3 工业振源与古建筑的地理位置、两者之间的距离以及场地土类别等。
- 4.2.3 弹性波传播速度的测试,应符合本规范附录 A 的规定。
- 4.2.4 古建筑结构的容许振动标准,应根据所调查的结构类型、保护级别和测得的弹性波传播速度按本规范第 3 章的规定确定。

- 4.2.5 古建筑结构速度响应的计算或测试,应分别按本规范第 6 章和第 7 章的规定进行。当计算值和测试值不同时,应取两者的较大值。

4.3 评估意见

- 4.3.1 工业振动对古建筑结构影响的评估意见应包括下列内容:
- 1 按本规范第 4.2.2 条规定的调查内容叙述工业振源和古建筑的基本情况;
 - 2 古建筑结构容许振动标准的确定及其依据;
 - 3 评估工业振动对古建筑结构影响所采用的方法及计算或测试结果;
 - 4 对计算或测试结果与容许振动标准进行分析、比较,做出工业振动对古建筑结构是否造成有害影响的结论;
 - 5 当工业振动对古建筑结构造成有害影响时,应提出防振方案和建议。

5 工业振源地面振动的传播

5.1 地面振动速度

5.1.1 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 5.1.1 选用。

5.1.2 对表 5.1.1 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，可按本规范附录 B 进行计算。

表 5.1.1 地面振动速度 V_r (mm/s)

振源类型	场地土类别	V_r (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 地铁的 V_r 值，当距离 r 等于 1~3 倍地铁隧道埋深 h 时，应乘 1.2；

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 地面振动频率

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

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频率，应按《地基动力特性测试规范》GB/T 50269 的规定进行现场测试。其测试数据应按本规范第 7.3 节的规定处理。

表 5.2.1 地面振动频率 f_r (Hz)

振源类型	场地土类别	V_r (m/s)	距离 r (m)								
			10	50	100	200	400	500	700	800	1000
火车	黏土	140~220	—	7.38	6.90	6.50	6.20	6.00	5.90	5.80	5.70
	粉细砂	150~200	—	5.80	5.30	4.90	4.50	4.30	4.20	4.10	4.00
	淤泥质粉质黏土	110~140	—	6.70	5.90	5.20	4.50	4.40	4.10	4.00	3.80
	汽车	粉细砂	150~200	—	7.10	5.90	5.00	4.20	—	—	—
地铁	黏土	140~220	13.40	12.50	12.40	12.30	12.20	—	—	—	—
城铁	黏土	140~220	—	13.65	10.95	10.85	10.05	—	—	—	—
强夯	回填土	110~130	—	7.56	6.23	5.19	4.25	3.97	3.61	—	—

6 古建筑结构动力特性和响应的计算

6.1 一般规定

6.1.1 本章适用于古建筑砖石结构和木结构动力特性和响应的计算。

6.1.2 古建筑结构动力特性和响应的计算,应根据本规范第4章的规定对古建筑进行调查和收集资料,确定计算简图及相关数据。

6.1.3 古建筑结构动力特性和响应的计算,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。

6.2 古建筑砖石结构

6.2.1 古建筑砖石古塔(图6.2.1)的水平固有频率可按式计算:

$$f_j = \frac{\alpha_j b_0}{2\pi H^2} \psi \quad (6.2.1)$$

式中 f_j ——结构第 j 阶固有频率 (Hz);
 α_j ——结构第 j 阶固有频率的综合变形系数,按表 6.2.1-1 选用;
 b_0 ——结构底部宽度(两对边的距离) (m);
 H ——结构计算总高度(台基顶至塔刹根部的高度) (m);
 ψ ——结构质量刚度参数 (m/s),按表 6.2.1-2 选用。

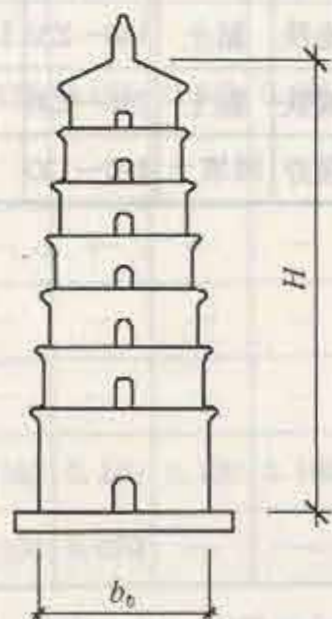


图 6.2.1 砖石古塔结构

表 6.2.1-1 砖石古塔的固有频率综合变形系数 α_j

H/b_m	b_m/b_0	0.60	0.65	0.70	0.80	0.90	1.00
2.0	α_1	1.175	1.106	1.049	0.961	0.899	0.842
	α_2	2.564	2.633	2.727	2.928	3.142	3.343
	α_3	4.348	4.637	4.939	5.580	6.220	6.868
3.0	α_1	1.414	1.301	1.213	1.081	0.987	0.911
	α_2	3.318	3.406	3.512	3.764	4.009	4.247
	α_3	5.843	6.239	6.667	7.527	8.394	9.255
5.0	α_1	1.596	1.455	1.326	1.162	1.043	0.955
	α_2	4.197	4.285	4.405	4.675	4.945	5.209
	α_3	7.867	8.426	9.004	10.160	11.297	12.409
8.0	α_1	1.678	1.502	1.376	1.194	1.068	0.974
	α_2	4.725	4.807	4.926	5.196	5.466	5.730
	α_3	9.450	10.135	10.826	12.171	13.477	14.740

注: b_m 为高度 H 范围内各层宽度对层高的加权平均值 (m)。

表 6.2.1-2 砖石古塔质量刚度参数 ψ (m/s)

结构类型	ψ	结构类型	ψ
砖塔	$5.4H+615$	石塔	$2.4H+591$

6.2.2 古建筑砖石钟鼓楼、宫门(图6.2.2)的水平固有频率

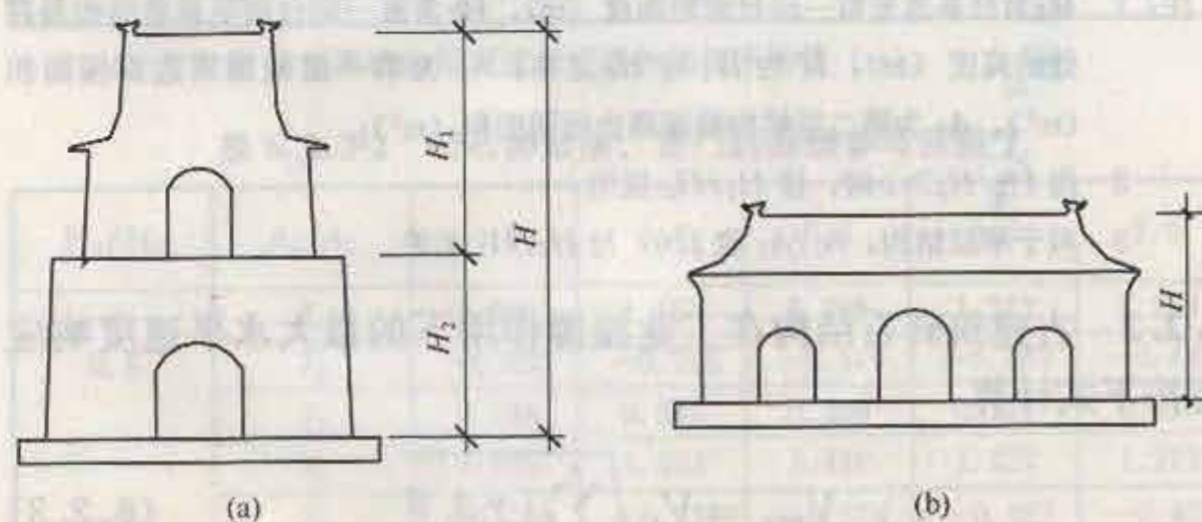


图 6.2.2 砖石钟鼓楼、宫门结构
(a) 钟鼓楼; (b) 宫门

应按下式计算:

$$f_j = \frac{1}{2\pi H} \lambda_j \phi \quad (6.2.2)$$

式中 f_j ——结构第 j 阶固有频率 (Hz);

H ——结构计算总高度 (台基顶至承重结构最高处的高度) (m);

λ_j ——结构第 j 阶固有频率计算系数, 按表 6.2.2 选用;

ϕ ——结构质量刚度参数 (m/s), 取 230。

表 6.2.2 砖石钟鼓楼、宫门的固有频率计算系数 λ_j

H_2/H_1	A_2/A_1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0.6	λ_1	2.178	1.958	1.798	1.673	1.571
	λ_2	4.405	4.528	4.611	4.669	4.712
	λ_3	7.630	7.704	7.763	7.813	7.854
0.8	λ_1	2.272	2.002	1.818	1.680	1.571
	λ_2	4.068	4.322	4.491	4.616	4.712
	λ_3	8.269	8.122	8.012	7.925	7.854
1.0	λ_1	2.300	2.012	1.824	1.682	1.571
	λ_2	3.982	4.268	4.460	4.601	4.712
	λ_3	8.582	8.296	8.107	7.965	7.854

注: 1 H_1 为台基顶至第一层台面的高度 (m), H_2 为第一层台面至承重结构最高处的高度 (m), H 为 H_1 与 H_2 之和; A_1 为第一层截面周边所围面积 (m^2), A_2 为第二层结构截面周边所围面积 (m^2);

2 当 $H_2/H_1 > 1$ 时, 按 H_1/H_2 选用;

3 对于单层结构, A_2/A_1 取 1.0, 与 H_2/H_1 无关。

6.2.3 古建筑砖石结构在工业振源作用下的最大水平速度响应可按式计算:

$$V_{\max} = V_r \sqrt{\sum_{j=1}^n [\gamma_j \beta_j]^2} \quad (6.2.3)$$

式中 $V_{\max}$ ——结构最大速度响应 (mm/s);

V_r ——基础处水平向地面振动速度 (mm/s), 按本规范第 5 章的规定选用;

n ——振型叠加数, 取 3;

γ_j ——第 j 阶振型参与系数, 古塔按表 6.2.3-1 选用; 钟鼓楼、宫门按表 6.2.3-2 选用;

β_j ——第 j 阶振型动力放大系数, 按表 6.2.3-3 选用。

表 6.2.3-1 砖石古塔的振型参与系数 γ_j

H/b_m	b_m/b_0	0.6	0.65	0.7	0.8	0.9	1.0
2.0	γ_1	2.284	2.051	1.892	1.699	1.591	1.523
	γ_2	-2.164	-1.693	-1.394	-1.046	-0.856	-0.738
	γ_3	1.471	1.054	0.817	0.561	0.426	0.344
3.0	γ_1	2.412	2.129	1.947	1.736	1.619	1.547
	γ_2	-2.484	-1.896	-1.541	-1.143	-0.929	-0.796
	γ_3	1.786	1.256	0.964	0.654	0.495	0.397
5.0	γ_1	2.474	2.164	1.972	1.753	1.634	1.559
	γ_2	-2.742	-2.054	-1.654	-1.216	-0.984	-0.841
	γ_3	2.192	1.510	1.145	0.767	0.575	0.459
8.0	γ_1	2.487	2.171	1.978	1.758	1.638	1.563
	γ_2	-2.812	-2.097	-1.687	-1.240	-1.004	-0.858
	γ_3	2.388	1.631	1.232	0.822	0.615	0.491

注: b_m 为高度 H 范围内各层宽度对层高的加权平均值 (m)。

表 6.2.3-2 砖石钟鼓楼、宫门的振型参与系数 γ_j

H_2/H_1	A_2/A_1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0.6	γ_1	1.686	1.494	1.388	1.321	1.273
	γ_2	-0.931	-0.706	-0.579	-0.489	-0.424
	γ_3	0.386	0.341	0.306	0.277	0.255
0.8	γ_1	1.875	1.553	1.410	1.327	1.273
	γ_2	-1.064	-0.731	-0.578	-0.487	-0.424
	γ_3	0.414	0.351	0.309	0.278	0.255

续表 6.2.3-2

H_2/H_1	A_2/A_1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1.0	γ_1	1.944	1.570	1.416	1.329	1.273
	γ_2	-1.122	-0.740	-0.579	-0.486	-0.424
	γ_3	0.522	0.382	0.318	0.281	0.255

- 注：1 H_1 为台基顶至第一层台面的高度（m）， H_2 为第一层台面至承重结构最高处的高度（m）， H 为 H_1 与 H_2 之和； A_1 为第一层截面周边所围面积（ m^2 ）， A_2 为第二层结构截面周边所围面积（ m^2 ）；
2 当 $H_2/H_1 > 1$ 时，按 H_1/H_2 选用；
3 对于单层结构， A_2/A_1 取1.0，与 H_2/H_1 无关。

表 6.2.3-3 动力放大系数 β_j

f_i/f_j	0	0.3~0.8	1.0	1.4~1.9	2.3~2.8	3.3~3.9	≥ 5.0
β_j	1.0	7.0	10.0	6.0	4.0	2.5	1.0

- 注：1 f_i 值可按本规范第5章的规定选用；
2 当 f_i/f_j 介于表中数值之间时， β_j 采用插入法取值。

6.3 古建筑木结构

6.3.1 古建筑木结构的水平固有频率可按下式计算：

$$f_j = \frac{1}{2\pi H} \lambda_j \psi \quad (6.3.1)$$

式中 f_j ——结构第 j 阶固有频率（Hz）；
 H ——结构计算总高度（单檐木结构为台基顶至檐柱顶的高度；重檐殿堂、楼阁和木塔为台基顶至顶层檐柱顶的高度）（m）；
 λ_j ——结构第 j 阶固有频率计算系数，按第 6.3.2 条的规定选用；
 ψ ——结构质量刚度参数（m/s），按表 6.3.1 选用。

表 6.3.1 木结构质量刚度参数 ψ （m/s）

结 构 形 式		ϕ
木塔		110
楼阁和两重檐以上殿堂		60
单檐和 两重檐殿堂	有围护墙的殿堂	52
	无围护墙的殿堂	33
	建造在城墙或城台上的殿堂	43

注：亭子按无围护墙的殿堂取值。

6.3.2 固有频率计算系数应根据古建筑檐数和层数分别按以下规定确定：

1 单檐木结构（图 6.3.2-1）， λ_1 取 1.571。

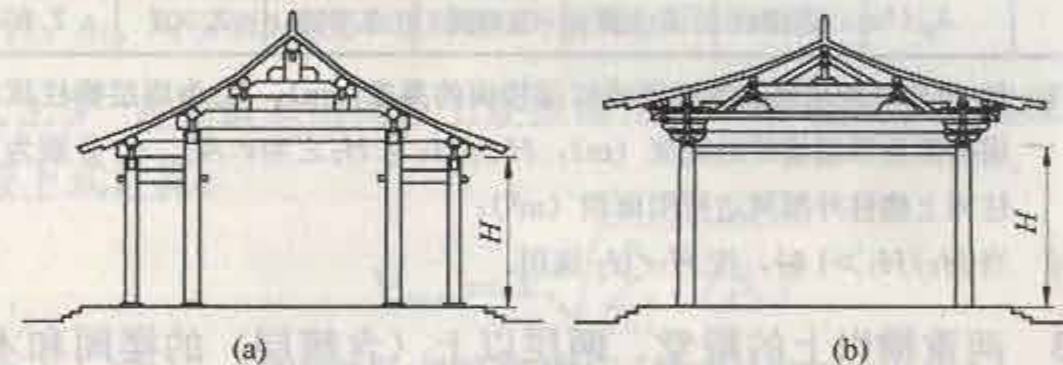


图 6.3.2-1 单檐木结构
(a) 无斗拱；(b) 有斗拱

2 两重檐的殿堂和两层楼阁（图 6.3.2-2）， λ_1 应按表 6.3.2-1 选用。

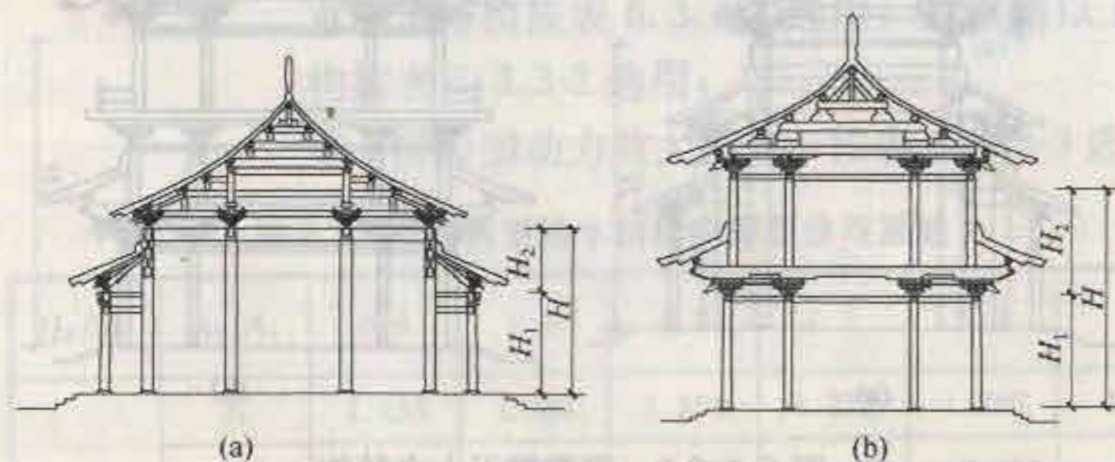


图 6.3.2-2 两重檐木结构
(a) 两重檐殿堂；(b) 两层楼阁

表 6.3.2-1 两重檐木结构的固有频率计算系数 λ_j

H_2/H_1	A_2/A_1	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.6	λ_1	1.873	1.798	1.732	1.673	1.619	1.571
	λ_2	4.574	4.611	4.642	4.669	4.692	4.712
	λ_3	7.735	7.763	7.789	7.813	7.834	7.854
0.8	λ_1	1.903	1.818	1.745	1.680	1.623	1.571
	λ_2	4.414	4.491	4.558	4.616	4.667	4.712
	λ_3	8.064	8.012	7.966	7.925	7.888	7.854
1.0	λ_1	1.911	1.824	1.748	1.682	1.623	1.571
	λ_2	4.373	4.460	4.535	4.601	4.660	4.712
	λ_3	8.194	8.107	8.032	7.965	7.907	7.854

注: 1 H_1 为台基顶至底层檐柱顶或二层楼面的高度 (m), H_2 为底层檐柱顶或二层楼面至顶层檐柱的高度 (m), H 为 H_1 与 H_2 之和; A_1 、 A_2 分别为下檐柱和上檐柱外围周边所围面积 (m^2);

2 当 $H_2/H_1 > 1$ 时, 按 H_1/H_2 选用。

3 两重檐以上的殿堂、两层以上 (含暗层) 的楼阁和木塔 (图 6.3.2-3), λ_j 应按表 6.3.2-2 选用。

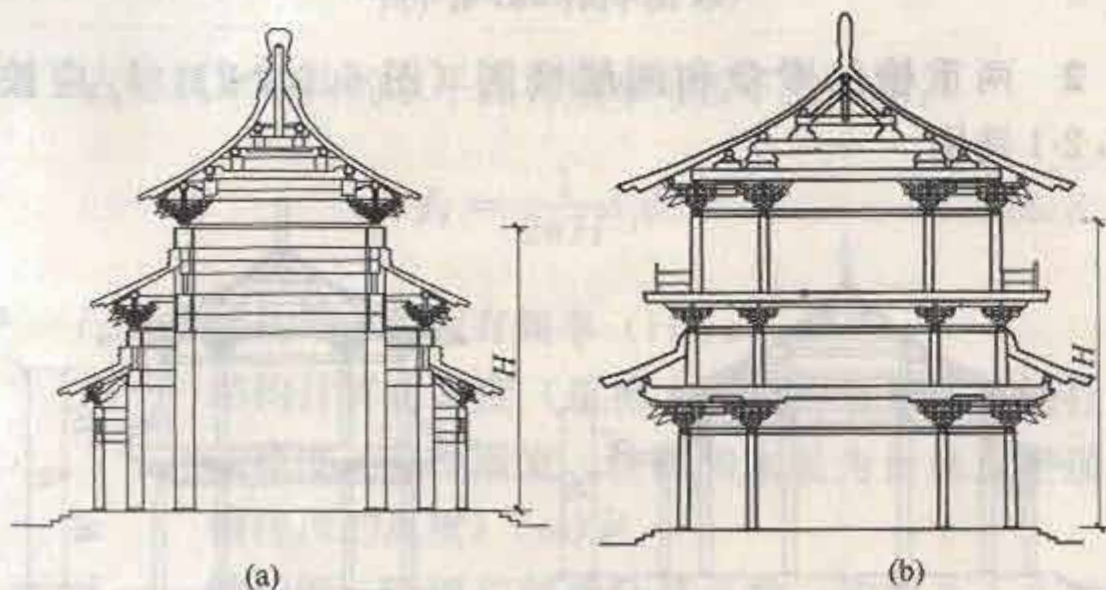


图 6.3.2-3 两重檐以上木结构
(a) 两重檐以上殿堂; (b) 两层以上楼阁和木塔

表 6.3.2-2 两重檐以上木结构的固有频率计算系数 λ_j

$\ln \frac{A_1}{A_2}$	λ_1	λ_2	λ_3
0	1.571	4.712	7.854
0.2	1.635	4.735	7.867
0.4	1.700	4.759	7.882
0.6	1.767	4.785	7.898
0.8	1.835	4.812	7.915
1.0	1.903	4.842	7.933
1.2	1.973	4.873	7.952
1.4	2.044	4.906	7.973
1.6	2.116	4.940	7.994
1.8	2.188	4.976	8.017

注: A_1 、 A_2 分别为底层和顶层檐柱外围周边所围的面积 (m^2)。

6.3.3 古建筑木结构在工业振源作用下的最大水平速度响应可按式计算:

$$V_{\max} = V_r \sqrt{\sum_{j=1}^n [\gamma_j \beta_j]^2} \quad (6.3.3)$$

式中 $V_{\max}$ ——结构最大速度响应 (mm/s);

V_r ——基础处水平向地面振动速度 (mm/s), 按本规范第 5 章的规定选用;

n ——振型叠加数, 单檐木结构取 1; 其他木结构取 3;

γ_j ——第 j 阶振型参与系数, 单檐木结构取 1.273; 两重檐木结构按表 6.3.3-1 选用; 两重檐以上木结构按表 6.3.3-2 选用;

β_j ——第 j 阶振型动力放大系数, 按表 6.3.3-3 选用;

表 6.3.3-1 两重檐木结构的振型参与系数 γ_j

H_2/H_1	A_2/A_1	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.6	γ_1	1.435	1.388	1.351	1.321	1.295	1.273
	γ_2	-0.638	-0.579	-0.530	-0.489	-0.454	-0.424
	γ_3	0.322	0.306	0.291	0.277	0.266	0.255

续表 6.3.3-1

H_2/H_1	A_2/A_1	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.8	γ_1	1.470	1.410	1.364	1.327	1.298	1.273
	γ_2	-0.644	-0.578	-0.528	-0.487	-0.453	-0.424
	γ_3	0.328	0.309	0.292	0.278	0.266	0.255
1.0	γ_1	1.480	1.416	1.367	1.329	1.299	1.273
	γ_2	-0.647	-0.579	-0.527	-0.486	-0.453	-0.424
	γ_3	0.345	0.318	0.297	0.281	0.266	0.255

注: 1 H_1 为台基顶至底层檐柱顶或二层楼面的高度 (m), H_2 为底层檐柱顶或二层楼面至顶层檐柱的高度 (m), H 为 H_1 与 H_2 之和; A_1 、 A_2 分别为下檐柱和上檐柱外围周边所围面积 (m^2);

2 当 $H_2/H_1 > 1$ 时, 按 H_1/H_2 选用。

表 6.3.3-2 两重檐以上木结构的振型参与系数 γ_j

$\ln \frac{A_1}{A_2}$	γ_1	γ_2	γ_3
0	1.273	-0.424	0.255
0.2	1.298	-0.464	0.281
0.4	1.325	-0.508	0.309
0.6	1.354	-0.555	0.340
0.8	1.384	-0.605	0.373
1.0	1.417	-0.660	0.411
1.2	1.452	-0.718	0.451
1.4	1.490	-0.781	0.496
1.6	1.529	-0.850	0.544
1.8	1.572	-0.923	0.597

注: A_1 、 A_2 分别为底层和顶层檐柱外围周边所围的面积 (m^2)。

表 6.3.3-3 动力放大系数 β_j

f_r/f_j	0	0.3~0.8	1.0	1.4~1.9	2.3~2.8	3.3~3.9	≥ 5.0
β_j	1.0	5.0	7.0	4.5	3.0	2.0	0.8

注: 1 f_r 值可按本规范第 5 章的规定选用;

2 当 f_r/f_j 介于表中数值之间时, β_j 采用插入法取值。

7 古建筑结构动力特性和响应的测试

7.1 一般规定

7.1.1 本章适用于古建筑砖石结构、木结构的动力特性 (固有频率、振型和阻尼) 和响应的测试以及石窟的响应测试。

7.1.2 古建筑结构动力特性和响应的测试, 当结构对称时, 可按任一主轴水平方向测试; 当结构不对称时, 应按各个主轴水平方向分别测试。

7.2 测试方法

7.2.1 古建筑结构动力特性和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^{-6}m/s ;

2 测试仪器应在标准振动台上进行系统灵敏度系数的标定, 并给出灵敏度系数随频率的变化曲线;

3 动力特性应在脉动环境下测试, 结构响应应在工业振源作用下测试; 测试时不得有任何机、电、人为干扰和一级以上风的影响;

4 传感器应牢固固定在被测结构构件上; 测线电缆应与结构构件固定在一起, 不得悬空;

5 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、测点位置、各测点对应的通道号、传感器编号、放大倍数以及标定值、各通道的记录情况等;

6 低通滤波频率和采样频率应根据所需频率范围设置, 采样频率宜为 100~120Hz; 记录时间每次不应少于 15min, 记录次数不得少于 5 次。

7.2.2 古建筑结构动力特性测试宜按以下要求布置测点:

1 测砖石结构的水平振动,测点宜布置在各层平面刚度中心或其附近;

2 测木结构的水平振动,测点宜布置在中跨的各层柱顶和柱底。

7.2.3 古建筑结构响应测试应按以下要求布置测点:

1 测砖石结构的水平响应,测点应沿两个主轴方向分别布置在承重结构的最高处;

2 测木结构的水平响应,测点应布置在两个主轴中跨的顶层柱顶;

3 测石窟的响应,测点应布置在窟顶的径向、切向和竖向。

7.3 数据处理

7.3.1 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。

7.3.2 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。

7.3.3 古建筑结构响应应分别按同一高度、同一方向各测点速度时程最大峰峰值的一半确定,并取5次的平均值。

8 防振措施

8.1 一般规定

8.1.1 工业振动对古建筑结构的影响超过本规范第3章规定的容许振动速度值时,应采取防振措施。

8.1.2 防振距离和振源减振的各种措施,可单独采用或综合采用。

8.1.3 采用防振措施,应根据防振效果、技术可靠程度、施工难易等进行技术经济比较。

8.2 防振距离

8.2.1 采用计算法时,防振距离可按下列步骤确定:

1 根据工业振源与古建筑结构之间的距离,按本规范第5章表5.1.1和表5.2.1分别选用或测试该距离处的地面振动速度和振动频率;

2 按本规范第6章的规定求出古建筑结构的最大速度响应;

3 当 $V_{\max} \leq [v]$ 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 $V_{\max} \leq [v]$ 。

8.2.2 采用测试法时,可按本规范第7章的规定测得古建筑结构的最大速度响应,当 $V_{\max} \leq [v]$ 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。

8.3 振源减振

8.3.1 铁路减振可采用以下措施:

1 轨道减振,包括浮置板、弹性支承块、高弹性扣件、道

碴垫;

- 2 无缝线路或重型钢轨;
- 3 减振型桥梁橡胶支座;
- 4 桥梁吸振器。

8.3.2 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;
- 4 采用减振型桥梁伸缩缝和桥梁支座。

8.3.3 大型动力设备减振,可按国家现行标准《隔振设计规范》的有关规定执行。

8.3.4 古建筑保护区内不得实施强夯;保护区外的采石工程作业,应控制装药量。

附录 A 弹性波传播速度的测试

A.1 一般规定

A.1.1 本附录适用于古建筑木结构、古建筑砖石结构和石窟的弹性波传播速度测试。

A.1.2 弹性波传播速度测试采用非金属超声检测分析仪,其声时测读精度不得低于 $0.1\mu\text{s}$ 。

A.2 测试方法

A.2.1 弹性波传播速度的测试应符合下列规定:

- 1 弹性波传播速度应采用平测法测试(即发射换能器和接收换能器均布置在构件同一平面内);
- 2 测点处的表面宜清洁、平整;
- 3 采用纵波换能器,换能器和测点表面间用黄油耦合;
- 4 用钢卷尺测量发射换能器和接收换能器两者中心的距离(以下简称测距),记录数据应精确到 1mm 。

A.2.2 木结构的弹性波传播速度测试尚应符合下列规定:

- 1 测试柱子和主梁的顺纹纵波传播速度;
- 2 测点应布置在靠近柱底、主梁两端和跨中以及柱和主梁上有木节、裂缝、腐朽和虫蛀处;布置测点的柱子(包括金柱、檐柱和廊柱)和主梁分别不应少于其总数的 20%;

3 测距宜选择 $400\sim 600\text{mm}$ 。

A.2.3 砖石结构的弹性波传播速度测试尚应符合下列规定:

- 1 测试砖石砌体的纵波传播速度;
- 2 测点应布置在承重墙底部和拱顶以及风化、开裂、鼓凸处;每层测点不应少于 10;
- 3 测距宜选择 $200\sim 250\text{mm}$ 。

A.2.4 石窟的弹性波传播速度测试应符合下列规定:

- 1 测试石窟岩石的纵波传播速度;
- 2 测点应布置在窟顶、侧壁和窟底以及风化、开裂处;每处测点不应少于 10;
- 3 测距宜选择 200~250mm。

A.3 数据处理

A.3.1 每处测点应改变发射电压,读取 2 次声时,取其平均值为本测距的声时。对于声时异常的测点,必须测试和读取 3 次声时,读数差不宜大于 3%,以测值最接近的 2 次平均值作为本测距的声时。

A.3.2 测距除以平均声时为该测点的传播速度;所有测点的平均传播速度即为该古建筑结构的弹性波传播速度。

附录 B 地面振动传播和衰减的计算

B.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,可按下列式计算:

$$V_r = V_0 \sqrt{\frac{r_0}{r}} \left[1 - \zeta_0 \left(1 - \frac{r_0}{r} \right) \right] \exp[-\alpha_0 f_0 (r - r_0)] \quad (\text{B.0.1})$$

式中 V_r ——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;

V_0 —— r_0 处地面振动速度 (mm/s);

r_0 ——振源半径 (m), 见第 B.0.2 条的规定;

r ——距振源中心的距离 (m);

ζ_0 ——与振源半径等有关的几何衰减系数, 见第 B.0.3 条的规定;

α_0 ——土的能量吸收系数 (s/m), 见第 B.0.4 条的规定;

f_0 ——地面振动频率 (Hz)。

B.0.2 振源半径 r_0 可按下列规定取值:

1 火车

$$r_0 = 3.00\text{m}$$

2 汽车

柔性路面, $r_0 = 3.25\text{m}$

刚性路面, $r_0 = 3.00\text{m}$

3 地铁

$$r \leq H, r_0 = r_m$$

$$r > H, r_0 = \delta_r r_m \quad (\text{B.0.2-1})$$

$$r_m = 0.7 \sqrt{\frac{BL}{\pi}} \quad (\text{B.0.2-2})$$

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);

δ_r ——隧道埋深影响系数。

$$\frac{H}{r_m} \leq 2.5, \delta_r = 1.30$$

$$\frac{H}{r_m} = 2.7, \delta_r = 1.40$$

$$\frac{H}{r_m} \geq 3.0, \delta_r = 1.50$$

4 打桩

$$r_0 = \beta r_p \quad (\text{B. 0. 2-3})$$

$$r_p = 1.5 \sqrt{\frac{F}{\pi}} \quad (\text{B. 0. 2-4})$$

式中 β ——系数, 淤泥质黏土、新近沉积的黏土、非饱和松散砂, $\beta=4.0$; 软塑的黏土, $\beta=5.0$; 软塑的粉质黏土、饱和粉细砂, $\beta=6.0$;

F ——桩的面积 (m^2)。

B. 0. 3 几何衰减系数 ζ_0 与振源类型、土的性质和振源半径 r_0 有关, 其值可按表 B. 0. 3-1~B. 0. 3-4 采用。

表 B. 0. 3-1 火车振源几何衰减系数 ζ_0

土 类	V_s (m/s)	ζ_0
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 B. 0. 3-2 汽车振源几何衰减系数 ζ_0

土 类	V_s (m/s)	ζ_0
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 B. 0. 3-3 地铁振源几何衰减系数 ζ_0

土 类	V_s (m/s)	r 与 H 的关系	r_0 (m)	ζ_0
饱和淤泥质粉质黏土	80~280	$r \leq H$	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	150~280	$r > H$	5.00	0.400
黏土及可塑粉质黏土			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 B. 0. 3-4 打桩振源几何衰减系数 ζ_0

土 类	V_s (m/s)	r_0 (m)	ζ_0
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

B. 0. 4 能量吸收系数 α_0 可根据振源类型和土的性质按表 B. 0. 4 采用。

表 B.0.4 土的能量吸收系数 α_0

振源	土 类	V_s (m/s)	α_0 (s/m)
火车	硬塑粉质黏土	230~280	$(1.15 \sim 1.20) \times 10^{-4}$
	粉细砂层下卵石层	220~250	$(1.23 \sim 1.27) \times 10^{-4}$
	黏土及可塑粉质黏土	200~250	$(1.85 \sim 2.50) \times 10^{-4}$
	饱和淤泥质粉质黏土	80~110	$(1.30 \sim 1.40) \times 10^{-4}$
	松散的粉土、粉质黏土	150~200	$(3.10 \sim 3.50) \times 10^{-4}$
	松散的砾石土	250	$(2.10 \sim 3.00) \times 10^{-4}$
汽车	硬塑粉质黏土	230~280	$(1.15 \sim 1.20) \times 10^{-4}$
	黏土及可塑粉质黏土	200~250	$(1.20 \sim 1.45) \times 10^{-4}$
	淤泥质粉质黏土	90~110	$(1.50 \sim 2.00) \times 10^{-4}$
地铁	硬塑粉质黏土	230~280	$(2.00 \sim 3.50) \times 10^{-4}$
	黏土及可塑粉质黏土	200~250	$(2.15 \sim 2.20) \times 10^{-4}$
	饱和淤泥质粉质黏土	80~110	$(2.25 \sim 2.45) \times 10^{-4}$
打桩	软塑的黏土	150~220	$(12.50 \sim 14.50) \times 10^{-4}$
	软塑粉质黏土、饱和粉细砂	100~120	$(12.00 \sim 13.00) \times 10^{-4}$
	淤泥质黏土	90~110	$(12.00 \sim 13.00) \times 10^{-4}$
	新近沉积的黏土	110~140	$(18.00 \sim 20.50) \times 10^{-4}$
	非饱和松散砂	150~220	

B.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。

本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待,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,在条件许可时首先应这样做的用词:

正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;

表示有选择,在一定条件下可以这样做的用词,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”。

中华人民共和国国家标准

古建筑防工业振动技术规范

GB/T 50452-2008

条文说明

本标准是根据2004年12月，住房和城乡建设部《关于印发〈2004年度工程建设国家标准制定、修订计划〉的通知》(建标[2004]162号)的要求，由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑科学研究院等单位共同编制完成的。本标准在编制过程中，广泛征求了有关单位和专家的意见，并进行了广泛的调研和论证，力求做到技术先进、经济合理、安全可靠、便于实施。

本标准适用于古建筑、工业与民用建筑、市政基础设施等工程。本标准在编制过程中，参考了国内外有关标准、规范和文献，力求做到技术先进、经济合理、安全可靠、便于实施。

本标准在编制过程中，参考了国内外有关标准、规范和文献，力求做到技术先进、经济合理、安全可靠、便于实施。本标准在编制过程中，参考了国内外有关标准、规范和文献，力求做到技术先进、经济合理、安全可靠、便于实施。

本标准在编制过程中，参考了国内外有关标准、规范和文献，力求做到技术先进、经济合理、安全可靠、便于实施。本标准在编制过程中，参考了国内外有关标准、规范和文献，力求做到技术先进、经济合理、安全可靠、便于实施。

项目	单位	标准值	备注
1. 振动加速度	m/s^2	0.1~0.2	0.1~0.2
2. 振动速度	mm/s	0.1~0.2	0.1~0.2
3. 振动位移	mm	0.1~0.2	0.1~0.2
4. 振动频率	Hz	0.1~0.2	0.1~0.2
5. 振动周期	s	0.1~0.2	0.1~0.2
6. 振动功率	W	0.1~0.2	0.1~0.2
7. 振动能量	J	0.1~0.2	0.1~0.2
8. 振动应力	MPa	0.1~0.2	0.1~0.2
9. 振动应变	$\mu\text{m/m}$	0.1~0.2	0.1~0.2
10. 振动位移	mm	0.1~0.2	0.1~0.2
11. 振动速度	mm/s	0.1~0.2	0.1~0.2
12. 振动加速度	m/s^2	0.1~0.2	0.1~0.2
13. 振动频率	Hz	0.1~0.2	0.1~0.2
14. 振动周期	s	0.1~0.2	0.1~0.2
15. 振动功率	W	0.1~0.2	0.1~0.2
16. 振动能量	J	0.1~0.2	0.1~0.2
17. 振动应力	MPa	0.1~0.2	0.1~0.2
18. 振动应变	$\mu\text{m/m}$	0.1~0.2	0.1~0.2
19. 振动位移	mm	0.1~0.2	0.1~0.2
20. 振动速度	mm/s	0.1~0.2	0.1~0.2
21. 振动加速度	m/s^2	0.1~0.2	0.1~0.2
22. 振动频率	Hz	0.1~0.2	0.1~0.2
23. 振动周期	s	0.1~0.2	0.1~0.2
24. 振动功率	W	0.1~0.2	0.1~0.2
25. 振动能量	J	0.1~0.2	0.1~0.2
26. 振动应力	MPa	0.1~0.2	0.1~0.2
27. 振动应变	$\mu\text{m/m}$	0.1~0.2	0.1~0.2
28. 振动位移	mm	0.1~0.2	0.1~0.2
29. 振动速度	mm/s	0.1~0.2	0.1~0.2
30. 振动加速度	m/s^2	0.1~0.2	0.1~0.2
31. 振动频率	Hz	0.1~0.2	0.1~0.2
32. 振动周期	s	0.1~0.2	0.1~0.2
33. 振动功率	W	0.1~0.2	0.1~0.2
34. 振动能量	J	0.1~0.2	0.1~0.2
35. 振动应力	MPa	0.1~0.2	0.1~0.2
36. 振动应变	$\mu\text{m/m}$	0.1~0.2	0.1~0.2
37. 振动位移	mm	0.1~0.2	0.1~0.2
38. 振动速度	mm/s	0.1~0.2	0.1~0.2
39. 振动加速度	m/s^2	0.1~0.2	0.1~0.2
40. 振动频率	Hz	0.1~0.2	0.1~0.2
41. 振动周期	s	0.1~0.2	0.1~0.2
42. 振动功率	W	0.1~0.2	0.1~0.2
43. 振动能量	J	0.1~0.2	0.1~0.2
44. 振动应力	MPa	0.1~0.2	0.1~0.2
45. 振动应变	$\mu\text{m/m}$	0.1~0.2	0.1~0.2
46. 振动位移	mm	0.1~0.2	0.1~0.2
47. 振动速度	mm/s	0.1~0.2	0.1~0.2
48. 振动加速度	m/s^2	0.1~0.2	0.1~0.2
49. 振动频率	Hz	0.1~0.2	0.1~0.2
50. 振动周期	s	0.1~0.2	0.1~0.2
51. 振动功率	W	0.1~0.2	0.1~0.2
52. 振动能量	J	0.1~0.2	0.1~0.2
53. 振动应力	MPa	0.1~0.2	0.1~0.2
54. 振动应变	$\mu\text{m/m}$	0.1~0.2	0.1~0.2
55. 振动位移	mm	0.1~0.2	0.1~0.2
56. 振动速度	mm/s	0.1~0.2	0.1~0.2
57. 振动加速度	m/s^2	0.1~0.2	0.1~0.2
58. 振动频率	Hz	0.1~0.2	0.1~0.2
59. 振动周期	s	0.1~0.2	0.1~0.2
60. 振动功率	W	0.1~0.2	0.1~0.2
61. 振动能量	J	0.1~0.2	0.1~0.2
62. 振动应力	MPa	0.1~0.2	0.1~0.2
63. 振动应变	$\mu\text{m/m}$	0.1~0.2	0.1~0.2
64. 振动位移	mm	0.1~0.2	0.1~0.2
65. 振动速度	mm/s	0.1~0.2	0.1~0.2
66. 振动加速度	m/s^2	0.1~0.2	0.1~0.2
67. 振动频率	Hz	0.1~0.2	0.1~0.2
68. 振动周期	s	0.1~0.2	0.1~0.2
69. 振动功率	W	0.1~0.2	0.1~0.2
70. 振动能量	J	0.1~0.2	0.1~0.2
71. 振动应力	MPa	0.1~0.2	0.1~0.2
72. 振动应变	$\mu\text{m/m}$	0.1~0.2	0.1~0.2
73. 振动位移	mm	0.1~0.2	0.1~0.2
74. 振动速度	mm/s	0.1~0.2	0.1~0.2
75. 振动加速度	m/s^2	0.1~0.2	0.1~0.2
76. 振动频率	Hz	0.1~0.2	0.1~0.2
77. 振动周期	s	0.1~0.2	0.1~0.2
78. 振动功率	W	0.1~0.2	0.1~0.2
79. 振动能量	J	0.1~0.2	0.1~0.2
80. 振动应力	MPa	0.1~0.2	0.1~0.2
81. 振动应变	$\mu\text{m/m}$	0.1~0.2	0.1~0.2
82. 振动位移	mm	0.1~0.2	0.1~0.2
83. 振动速度	mm/s	0.1~0.2	0.1~0.2
84. 振动加速度	m/s^2	0.1~0.2	0.1~0.2
85. 振动频率	Hz	0.1~0.2	0.1~0.2
86. 振动周期	s	0.1~0.2	0.1~0.2
87. 振动功率	W	0.1~0.2	0.1~0.2
88. 振动能量	J	0.1~0.2	0.1~0.2
89. 振动应力	MPa	0.1~0.2	0.1~0.2
90. 振动应变	$\mu\text{m/m}$	0.1~0.2	0.1~0.2
91. 振动位移	mm	0.1~0.2	0.1~0.2
92. 振动速度	mm/s	0.1~0.2	0.1~0.2
93. 振动加速度	m/s^2	0.1~0.2	0.1~0.2
94. 振动频率	Hz	0.1~0.2	0.1~0.2
95. 振动周期	s	0.1~0.2	0.1~0.2
96. 振动功率	W	0.1~0.2	0.1~0.2
97. 振动能量	J	0.1~0.2	0.1~0.2
98. 振动应力	MPa	0.1~0.2	0.1~0.2
99. 振动应变	$\mu\text{m/m}$	0.1~0.2	0.1~0.2
100. 振动位移	mm	0.1~0.2	0.1~0.2

从4.5 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。

本标准在编制过程中，参考了国内外有关标准、规范和文献，力求做到技术先进、经济合理、安全可靠、便于实施。本标准在编制过程中，参考了国内外有关标准、规范和文献，力求做到技术先进、经济合理、安全可靠、便于实施。

前 言

本规范在编制前,五洲工程设计研究院(中国兵器工业第五设计研究院)根据原国家计委高技术产业发展司计司高技函[1999]202号文批准《工业环境振动对文物古迹的影响及相应规范》立项的要求进行了以下主要工作:

在广泛调查、收集资料的基础上,论证了编制本规范的重要意义和必要性,并初步确定了为编制规范需要研究的课题和编制规范的主要内容。据此,提出了本项目的可行性研究报告,经建设部科技司于1999年10月在北京主持召开的专家论证会通过。

根据可行性研究报告和专家意见,于2000年开展课题研究。历时两年多,行程两万余公里,对130多处古建筑结构的动力特性、响应、弹性波传播速度等进行了现场实测和收集,共取得时程曲线11000多条;对火车、汽车、地铁等主要工业振动在土层中的传播和衰减进行了样本采集,测线总长达160km;对弹性波在古建筑材料中的传播速度、古建筑材料的动弹性模量、疲劳极限(设定疲劳次数为1000万次)等进行了390多个试件的室内实验(试件系从现场取回的古建筑材料),共获得曲线4100多条。

通过以上工作,对古建筑结构的动力特性、工业振动对古建筑结构的动力响应、容许振动的控制标准、波动理论在古建筑结构中的应用等方面进行了深入的研究,提出了《工业环境振动对文物古迹的影响及相应规范》研究报告。建设部科技司于2002年12月在北京主持召开鉴定会,对研究成果进行了鉴定,认为该研究成果达到了国际领先水平,其技术成熟程度和应用价值很高,可以作为编制规范的科学依据。

本规范编制组于2003年成立后,即根据上述研究成果,确定规范编写大纲,先后提出规范初稿和征求意见稿,广泛征求有关单位意见,并先后召开了6次小型座谈会,对征求意见稿进行修改,完成送审稿和报批稿,经全国审查会定稿。

本规范的重点内容和特点如下:

1 古建筑结构的容许振动标准

目前国内外的建筑结构容许振动标准是针对建筑结构本身的安全性制订的。由于古建筑的历史、文化和科学价值,更由于它是不可再生的,失去了就无法挽回,因此,不能和现代建筑一样,仅以安全性作为制订容许振动标准的依据,必须在考虑安全性的同时,还要考虑它的完整性。为此,本规范提出以疲劳极限作为古建筑结构容许振动标准的依据。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,将古建筑结构的最大动应力控制在疲劳极限以下,这样,即使经过长期往复运动,古建筑结构不会产生新的裂缝,已有的裂纹也不会扩展。这是本规范与国内外相关标准规范的根本不同之处。

本规范还根据我国古建筑多、跨越年代长、现状差异大等特点,按古建筑结构类型、所用材料、保护级别及弹性波在古建筑结构中的传播速度等规定了相应的容许振动值。这与国内外相关标准规范对“有特别保护价值的建筑”仅按长期振动和短期振动各规定一个容许振动值有所不同。

2 古建筑结构动力特性和响应的计算

1) 古建筑结构动力特性的计算

建筑结构动力特性的计算,关键在于建立符合实际的力学模型和准确求得结构的质量、刚度参数。目前常用的力学模型有:有限元模型、简化模型等。应用这些模型对大量古建筑结构进行了计算,发现计算结果与现场实测相差甚远,原因在于古建筑结构长期经受风雨侵蚀,其质量、刚度变化甚大,很难计算出准确的数值。为此,本规范根据130多座古建筑结构的实测、分析,

得出不同类型、不同材料、不同高度古建筑结构的质量、刚度参数,它反映了古建筑结构的体形特征、质量刚度分布和材料等对动力特性的影响,能较好地符合实际。

关于古建筑结构的力学模型,按材料的不同,可归纳为砖石结构和木结构两类。

就砖石结构而言,根据其高度、构造等分为砖石古塔和砖石钟鼓楼、宫门。对于砖石古塔,计算时采用变截面弯剪悬臂杆模型;对于砖石钟鼓楼、宫门,计算时采用阶形截面剪切悬臂杆模型。

就木结构而言,根据其檐数和层数分别建立计算模型。对于单檐木结构,计算时采用等截面剪切悬臂杆模型;对于两重檐殿堂和两层楼阁,计算时采用阶形截面剪切悬臂杆模型;对于两重檐以上的殿堂和两层以上的楼阁和木塔,计算时采用变截面剪切悬臂杆模型。

本规范按上述方法确定的质量、刚度参数和根据古建筑特点建立的力学模型计算出古建筑结构的动力特性,与实测结果基本吻合。

2) 古建筑结构响应的计算

古建筑砖石结构、木结构的响应计算,均采用振型叠加法。

国内外相关标准规范对古建筑结构动力特性和响应未提出计算方法。

3 古建筑结构现状的判断

对古建筑结构现状的判断,国外相关标准规范未作规定。国内有的以年代作为依据,有的规范采用静态的方法对古建筑结构的状况进行调查,以确定其残损程度或等级。本规范采用测试弹性波在古建筑结构中的传播速度,以此作为确定古建筑结构容许振动指标的依据之一。根据对不同年代、不同材料、不同环境的各类古建筑结构弹性波传播速度的大量实测,并与古建筑结构的现状进行了对比分析,结果表明:弹性波传播速度能反映古建筑结构的现状。在此基础上,制订了判断古建筑木结构、古建筑砖

石结构和石窟现状的弹性波传播速度范围。

4 工业振动对古建筑结构影响的评估

评估工业振源引起的振动对古建筑结构的影响,是为解决国民经济和社会发展规划中涉及古建筑结构保护的工业交通基础设施等的合理布局,以及为判断现有或拟建工业振源引起的振动是否对古建筑结构造成有害影响提供科学依据。

本规范规定了评估时确定古建筑结构速度响应的两种方法,即计算法和测试法,以及评估的依据和步骤。此外,还对弹性波传播速度的测试方法做了规定。

5 工业振动频率随距离的变化

国内外在进行地面振动衰减计算时,振源频率一般采用常量。理论和实测均证明:由于土质的非均匀性,振波在不同土层中的传播均存在频率随距离而变化的现象(即频散现象),这对于准确计算古建筑结构的动力响应十分重要。实测还表明:古建筑结构的固有频率(基频)一般在1~3Hz之间,而工业振源的频率(如火车),在振源处约为10~15Hz;在距振源1000m处约为4~6Hz。由此说明:在距振源一定距离处,振动强度虽然有所衰减,但振动频率却逐渐趋近于古建筑结构的固有频率,其动力响应有可能增大。因此,计算古建筑结构的动力响应时,必须考虑工业振源频率随距离的变化。本规范提出了火车、汽车等工业振源在黏土、淤泥质粉质黏土、粉细砂、砂砾石等土层上不同距离处振动速度和振动频率的统计数值和计算方法。

本规范对古建筑砖石结构、木结构和石窟分别规定的容许振动标准,涵盖了殿、堂、楼、阁、塔和石窟等古建筑结构类型。其他类型的古建筑,如牌楼、华表和影壁等的容许振动标准,有待今后进一步研究。

目次

1 总则	39
2 术语、符号	41
2.1 术语	41
2.2 符号	41
3 古建筑结构的容许振动标准	42
3.1 一般规定	42
3.2 容许振动标准	43
4 工业振动对古建筑结构影响的评估	44
4.1 一般规定	44
4.2 评估步骤和方法	44
4.3 评估意见	44
5 工业振源地面振动的传播	46
5.1 地面振动速度	46
5.2 地面振动频率	46
6 古建筑结构动力特性和响应的计算	47
6.1 一般规定	47
6.2 古建筑砖石结构	47
6.3 古建筑木结构	48
7 古建筑结构动力特性和响应的测试	50
7.1 一般规定	50
7.2 测试方法	50
7.3 数据处理	50
8 防振措施	52
8.1 一般规定	52
8.2 防振距离	52
8.3 振源减振	52

1 总则

1.0.1、1.0.2 随着我国建设事业的不断发展,铁路、公路、城市轨道交通(地铁、城铁)、大型动力设备等工业振源的迅速增加,对古塔、寺庙等古建筑的影响和危害也随之加剧,经济建设与古建筑保护之间的矛盾日益增多。如何保护古建筑不受工业振动的危害,国内外研究得不多,文献也很少,工程中碰到这类问题时,由于无章可依,常常束手无策。要实现经济和社会的可持续发展,必须在搞好经济建设的同时,保护好古建筑,这就需要制定一个科学的、符合实际的标准。

工业振动对古建筑的影响是个崭新的、跨学科的、难度很大的课题,各国学者研究较少,编制规范缺乏必要的资料和数据,故本规范编制前进行了专题研究。对主要的工业振源、有代表性的古建筑结构、各种古建筑材料等进行了现场测试和室内实验,取得了大量可供分析的原始数据,并从理论和实验等方面进行了全面系统地研究和分析,从而为制定规范提供了科学的、可靠的依据。

本规范制定的古建筑结构容许振动标准、工业振动对古建筑结构影响的评估、工业振源地面振动的传播、古建筑结构动力特性和响应的计算及测试等,可解决经济建设中涉及古建筑保护的工业交通基础设施等的总体规划和布局问题,以及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。

1.0.3 一方面,我国历史悠久,前人创造和留下了极为丰富而珍贵的文化遗产,保护好这些文化遗产具有极其重要的历史意义和科学价值。另一方面,我国人口众多,底子薄,是个发展中的大国,亟待大力进行建设,发展经济。因此,条文规定对工业交通基础设施等的布局 and 工业振动对古建筑结构有害影响的防治,

应遵守《中华人民共和国文物保护法》，正确处理经济建设、社会发展与古建筑保护的关系。

1.0.4 控制工业振动对古建筑的有害影响，除按本规范执行外，尚应符合国家及行业现行有关标准规范的规定，主要指振源减振的措施设计应按有关标准规范进行，例如：动力设备的减振，可按国家现行标准《隔振设计规范》设计；铁路和公路的减振措施，可分别按铁路和公路方面的有关标准规范设计。

2 术语、符号

2.1 术 语

2.1.1~2.1.16 对本规范中需要予以定义或解释的主要名词术语作了规定。凡规范条文中已作规定或意义明确不需解释的，则未列出。

2.2 符 号

2.2.1~2.2.3 所列符号为规范中的主要符号。为便于查阅，按“作用及作用效应”、“几何参数和计算参数、系数”、“材料性能及其他”分类列出，并依先拉丁字母、后希腊字母的顺序排列。

3 古建筑结构的容许振动标准

3.1 一般规定

3.1.1 古建筑结构容许振动标准的制订,是从两个基本点出发的:一,工业振动对古建筑结构的影响是长期的、微小的,而地震的影响则是短暂的、强烈的;二,现代建筑的容许振动标准是针对结构本身的安全性制订的,而古建筑结构,由于其历史、文化和科学价值,不能和现代建筑一样仅考虑安全性,必须在考虑安全性的同时,还要考虑它的完整性。据此,本规范提出以疲劳极限作为古建筑结构防工业振动的控制指标,从而达到保护古建筑结构完整性的目的。

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 $[\epsilon]$)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。

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、与弹性波的传播速度(V_p 、 V_s)成反比。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 $[\epsilon]$ 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。

3.1.2 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、保护级别和弹性波在古建筑结构中的传播速度选用。

3.1.3 由于世界文化遗产具有极高的历史、科学、文化和艺术价值,故规定列入世界文化遗产的古建筑,其结构容许振动速度应按全国重点保护单位的规定采用。

3.2 容许振动标准

3.2.1~3.2.4 表 3.2.1~3.2.3 中的容许振动速度值是根据上述原则,通过对不同古建筑材料 390 多个试件的室内实验、130 多座古建筑结构的现场测试以及理论分析确定的。表中保护级别的划分是根据《中华人民共和国文物保护法》第三条的规定,即依据古建筑的历史、艺术、科学价值确定为全国重点文物保护单位,省级文物保护单位,市、县级文物保护单位;弹性波在古建筑结构中的传播速度 V_p 系通过对不同年代、不同环境的各类古建筑弹性波传播速度的实测和分析加以规定的。测试和分析表明:弹性波传播速度能反映古建筑结构的现状。

4 工业振动对古建筑结构影响的评估

4.1 一般规定

4.1.1、4.1.2 评估工业振动对古建筑结构的影响，是为涉及古建筑保护的工业交通基础设施等振源的布局 and 解决文物保护与生产建设之间的矛盾提供科学依据。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在振动作用下的速度响应，然后与古建筑结构的容许振动标准比较。条文中规定了两种确定速度响应的方法，即计算法和测试法。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 and 拟建项目有工业振源的情况来说，虽能测得古建筑结构的固有频率，但不能测得结构响应，因此只能采用计算法。

4.1.3 为保护好古建筑，本条根据《中华人民共和国文物保护法》第九条的规定，做出了进行现状调查和现场测试时不得对古建筑造成损害的规定。

4.2 评估步骤和方法

4.2.1~4.2.5 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：现状调查和资料收集是评估的基础；容许振动速度值是评估的标准；计算或测试以及分析是评估的方法；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，要按条文的规定进行，以做到资料翔实，数据可靠，论证充分，结论正确。

4.3 评估意见

4.3.1 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。

5 工业振源地面振动的传播

5.1 地面振动速度

5.1.1、5.1.2 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。表 5.1.1 中所列不同距离处振动速度值是火车、汽车、地铁等工业振动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。

V_r 是由 4100 多条工业振动衰减曲线的包络值得出的。其原因有二:一,古建筑的历史、文化、科学价值不同于一般建筑物。二,同一名称的场地土,自然环境不同,其性质差异甚大。

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 $(1\sim 3)h$ 时,会出现振波叠加,故在这一范围内振动幅值相应增大。为此,规定当 $r=(1\sim 3)h$ 时, V_r 按表 5.1.1 中数值乘 1.2。

5.2 地面振动频率

5.2.1、5.2.2 由于土质的非均匀性,振动在不同土层中的传播均存在频率随距离而变化的现象,也就是频散现象,这对于准确计算古建筑结构的动力响应十分重要,因为随着距离的增加,振动强度虽逐渐减弱,但振动频率却逐渐趋近于古建筑结构的固有频率,其动力响应可能增大。表 5.2.1 列出了工业振动在未采取减振措施时不同场地土中传播的频率随距离变化的实测值。

6 古建筑结构动力特性和响应的计算

6.1 一般规定

6.1.2、6.1.3 本章对古建筑结构动力特性和响应的计算,是基于线弹性、小变形的假定,这与本规范第 3 章规定的古建筑结构容许振动速度所对应的动应变(约为 $10^{-6}\sim 10^{-5}$)相一致。

6.2 古建筑砖石结构

6.2.1、6.2.2 古建筑砖石结构根据其结构形式分为砖石古塔和砖石钟鼓楼、宫门。砖石古塔以弯剪振动为主,计算时采用变截面弯剪悬臂杆模型,公式(6.2.1)中不仅考虑了弯曲变形,还通过系数调整考虑了剪切变形等对结构频率的影响。砖石钟鼓楼、宫门以剪切振动为主,计算时采用阶形截面剪切悬臂杆模型,在表 6.2.2 只考虑剪切变形的影响。

由于砖石古塔沿高度方向尺寸收分的形式和量都不同,所以采用加权平均宽度 b_m 。表 6.2.1-1 中 H/b_m 反映结构高宽比的变化, b_m/b_0 反映截面的收分变化。砖石钟鼓楼、宫门截面的收分为阶形,表 6.2.2 表示结构的频率取决于高度 H 及二阶高度比 H_2/H_1 和截面面积比 A_2/A_1 ,而与截面的大小无关。当高度 H 和 A_2/A_1 之比不变时, H_1 与 H_2 互换,频率不变。

质量刚度参数 ϕ 与结构的质量刚度分布、截面尺寸和地基基础等有关。由于古建筑的地基基础情况往往未知,古建筑砖石结构的弹性模量和质量密度离散性较大,截面形式复杂,为了使理论计算能更好地符合实际,通过大量实测和统计、分析,得出砖石古塔和砖石钟鼓楼、宫门质量刚度参数的实用数值。

对有塔刹的砖石古塔,由于塔刹质量占古塔总质量的比重很小,因此整体频率计算(不包括塔刹局部的振动)时,可将塔刹

质量按比例分布在塔身。计算显示,这样简化误差不超过3%。

经对13个不同结构形式、不同高宽比、不同地区古建筑砖石古塔固有频率的实测和计算比较,二者基本吻合。

6.2.3 古建筑砖石结构在工业振动作用下的速度响应计算,采用振型叠加法。考虑到工业振源的主要频率通常比较接近于结构的第二、第三阶固有频率,因此除了基本振型外,还应考虑高振型的影响。

表6.2.3-1、6.2.3-2中的振型参与系数 γ_j 系以第 j 振型 H 高度处振型坐标为1进行归一化后之值。

表6.2.3-3中的动力放大系数 β_j 是根据不同振源、不同场地土、不同距离处振动的360条实测记录计算统计得出的包络值。计算时取结构阻尼比为0.03。

6.3 古建筑木结构

6.3.1、6.3.2 古建筑木结构屋盖层和铺作层(斗拱层)的水平刚度远远大于木构架的水平刚度;结构平面面积大,相对平面尺寸而言,柱高却较小,经对近100座古建筑木结构殿堂、楼阁和古塔的统计,90%的木结构高宽比小于1,最大不超过2;实测也表明木结构沿高度方向的振型曲线接近剪切振动,故将木结构简化为剪切悬臂杆模型。根据木结构的檐数和层数,将单檐木结构简化为等截面剪切悬臂杆,两重檐殿堂和两层楼阁简化为阶形截面剪切悬臂杆,两重檐以上的殿堂和两层以上(含暗层)的楼阁以及古塔简化为变截面剪切悬臂杆。

结构质量刚度参数 ψ 反映了结构类型、体型特征、地基基础等对结构频率的影响。表6.3.1中所列的 ψ 值,系经过对110多座古建筑木结构实测、统计、分析确定的。并根据不同结构类型,将质量刚度参数 ψ 划分为五类。

固有频率计算系数 λ_j 反映整体水平变形以剪切为主的古建筑木结构的几何尺寸(即结构周边所围面积沿高度变化)对频率的影响。根据结构周边所围面积沿高度的变化特点,将木结构固

有频率计算系数分为等截面、阶形截面和变截面剪切悬臂杆进行计算。表6.3.2-1中 λ_j 取决于高度 H 及二阶高度比 H_2/H_1 和截面面积比 A_2/A_1 ,与截面大小无关,当高度 H 和 A_2/A_1 之比不变时, H_2 与 H_1 互换,频率不变。

6.3.3 古建筑木结构在工业振源作用下的速度响应采用振型叠加法。

表6.3.3-1、6.3.3-2中的振型参与系数 γ_j 系以第 j 振型 H 高度处振型坐标为1进行归一化后之值。

表6.3.3-3中的动力放大系数 β_j 系根据不同振源、不同场地土、不同距离处振动的实测记录计算统计得出的包络值。计算时结构阻尼比取0.05。

7 古建筑结构动力特性和响应的测试

7.1 一般规定

7.1.1、7.1.2 对古建筑结构动力特性和响应的测试表明,水平方向速度响应最大,故规定按水平方向测试。

7.2 测试方法

7.2.1 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。

地脉动引起的结构振动一般很小,且频率较低,结构和工业振源的频带范围约为 $0.5\sim 30\text{Hz}$ 。按照采样定理,采样频率为所需频率上限的2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 $100\sim 120\text{Hz}$ 。

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。

7.2.2 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,振动测试时将传感器布置在中间跨的各层柱顶和柱底。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。

7.2.3 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,古建筑最高处的响应是结构的最大响应,因而木结构的测点位置为中跨的顶层柱顶,砖石结构的测点为承重结构最高处;石窟的最大响应为窟顶。

7.3 数据处理

7.3.1 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。

7.3.2 对动力特性实测记录进行自功率谱、互功率谱分析时,为了减少频谱的泄漏,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,干扰太大,不能确定该频率为结构振动频率。

8 防振措施

8.1 一般规定

8.1.1 工业振动对古建筑结构的影响超过第3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,应采取防振措施避免工业振动对古建筑结构的有害影响。

8.1.2、8.1.3 防振距离和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;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。

8.2 防振距离

8.2.1、8.2.2 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。

8.3 振源减振

8.3.1~8.3.3 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。