

前 言

根据住房和城乡建设部《关于印发〈2005 年工程建设标准规范制订、修订计划(第二批)〉的通知》(建标〔2005〕124 号)的要求,标准编制组经广泛调查研究,认真总结实践经验,参考有关国际标准和国外先进标准,并在广泛征求意见的基础上修订本标准。

本标准的主要技术内容是:总则、术语和符号、基本规定、结构振动计算、单层工业建筑振动控制、多层工业建筑振动控制、多层工业建筑楼盖微振动控制、工业建筑振动测试、既有工业建筑振动控制措施等。

本次修订的主要技术内容是:

1. 增加了正常使用、承载能力两种不同极限状态结构振动控制设计的规定;
2. 增加了结构振动计算要求以及数值计算规定;
3. 增加了单层工业建筑整体水平振动控制及屋盖竖向振动控制设计的规定;
4. 增加了多层工业建筑整体水平振动控制、楼盖竖向振动控制设计的规定;
5. 增加了工业建筑振动测试的规定;
6. 增加了既有工业建筑振动控制设计的规定;
7. 增加了提升结构振动控制性能的方法、措施等规定,包括结构体系、结构构造、刚度及阻尼调整等;
8. 删除了与其他相关国家标准重复性内容,包括振动荷载、振动容许值等。

本标准中以黑体字标志的条文为强制性条文,必须严格执行。

本标准由住房和城乡建设部负责管理和对强制性条文的解释,由中国机械工业集团有限公司和中国中元国际工程有限公司

负责具体技术内容的解释。执行本标准过程中如有意见或建议，请寄送中国机械工业集团有限公司（地址：北京市海淀区丹棱街 3 号，邮编：100080）或中国中元国际工程有限公司（地址：北京市海淀区西三环北路 5 号，邮编：100089）。

本标准主编单位：中国机械工业集团有限公司

中国中元国际工程有限公司

本标准参编单位：中国汽车工业工程有限公司

同济大学

大连理工大学

隔而固（青岛）振动控制有限公司

中国电子工程设计院有限公司

北方工程设计研究院有限公司

华北电力设计院工程有限公司

中国寰球工程有限公司

中国昆仑工程有限公司

中冶建筑研究总院有限公司

中国铁道科学研究院铁道建筑研究所

洛阳拖拉机研究所有限公司

秦皇岛玻璃工业研究设计院有限公司

本标准主要起草人员：徐 建 张同亿 万叶青 吕西林

李宏男 尹学军 陈 骝 张 松

黎益仁 胡明祯 周建军 余东航

黄 伟 王永国 李永录 杨 俭

杨宜谦 鲁 正 石 诚 高星亮

邵晓岩 王建立 宫海军 张翠红

马素云 孙黎明 黄尽才 祖晓臣

本标准主要审查人员：周福霖 陈政清 王立军 范 重

任书考 黄世敏 苏经宇 曾 滨

邹 宏

目 次

1	总 则	(1)
2	术语和符号	(2)
2.1	术语	(2)
2.2	符号	(2)
3	基本规定	(4)
3.1	一般规定	(4)
3.2	工业建筑选址及设备布置	(5)
3.3	结构选型及布置	(5)
3.4	结构振动验算	(6)
4	结构振动计算	(8)
4.1	一般规定	(8)
4.2	结构振动分析数值计算方法	(9)
5	单层工业建筑振动控制	(11)
5.1	一般规定	(11)
5.2	结构振动计算	(11)
5.3	构件内力计算	(14)
5.4	振动控制构造措施	(15)
6	多层工业建筑振动控制	(16)
6.1	一般规定	(16)
6.2	结构振动计算	(17)
6.3	结构振动控制措施	(20)
7	多层工业建筑楼盖微振动控制	(22)
7.1	一般规定	(22)
7.2	楼盖微振动计算	(23)

7.3 楼盖微振动控制措施	(32)
8 工业建筑振动测试	(33)
9 既有工业建筑振动控制措施	(35)
附录 A 多层工业建筑楼盖微振动位移传递 系数简化计算	(36)
本标准用词说明	(43)
引用标准名录	(44)

Contents

1	General provisions	(1)
2	Terms and symbols	(2)
2.1	Terms	(2)
2.2	Symbols	(2)
3	Basic requirements	(4)
3.1	General requirements	(4)
3.2	Site selection and equipment layout for industrial buildings	(5)
3.3	Structure selection and layout	(5)
3.4	Verification regulations for structural vibration	(6)
4	Structural vibration calculations	(8)
4.1	General requirements	(8)
4.2	Numerical calculation methods for structural vibration analysis	(9)
5	Vibration control for single-layer industrial buildings	(11)
5.1	General requirements	(11)
5.2	Structural vibration calculations	(11)
5.3	Internal force calculations of components	(14)
5.4	Vibration control construction measures	(15)
6	Vibration control for multi-story industrial buildings	(16)
6.1	General requirements	(16)
6.2	Structural vibration calculations	(17)

6.3	Structural vibration control measures	(20)
7	Micro-vibration control of multi-story industrial building floors	(22)
7.1	General requirements	(22)
7.2	Floor micro-vibration calculations	(23)
7.3	Floor micro-vibration control measures	(32)
8	Vibration test for industrial buildings	(33)
9	Vibration control for existed industrial buildings	(35)
Appendix A	Simplified calculations of micro-vibration displacement transfer coefficient of multi-story industrial buildings	(36)
	Explanation of wording in this standard	(43)
	List of quoted standards	(44)

1 总 则

1.0.1 为在工业建筑结构振动控制中贯彻国家相关法律法规及技术经济政策,确保工业建筑在振动荷载作用下满足结构安全、正常生产及环境要求,做到技术先进、经济合理,制定本标准。

1.0.2 本标准适用于工业建筑在机械振动荷载作用下结构振动控制设计,不适用于地震、风等其他激励作用下结构的振动控制。

1.0.3 工业建筑振动控制设计除应符合本标准外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

- 2.1.1 建筑振动** building vibration
由振动荷载引起的建筑结构振动。
- 2.1.2 容许振动值** allowable vibration value
受振对象振动指标的限值。
- 2.1.3 水平振动** horizontal vibration
与地面平行的振动,用 x 轴、 y 轴表示两个正交方向。
- 2.1.4 竖向振动** vertical vibration
与地面垂直的振动,用 z 轴表示。
- 2.1.5 第一频率密集区** first frequency compact zone
振动荷载作用下,多跨连续结构在幅频特性曲线上首先出现的频率密集区。
- 2.1.6 振动控制** vibration control
对振动荷载源、振动传递路径或者建筑结构本身采取降低结构的振动响应的措施。
- 2.1.7 隔振** vibration isolation
采用弹性元件、阻尼元件或屏障减小振动传递的措施。

2.2 符 号

2.2.1 作用和作用效应:

- u ——振动位移;
 v ——振动速度;
 a ——振动加速度;
 F_v ——振动荷载;

F_{v0} ——振动荷载幅值；
 R ——结构构件的抗力设计值；
 S ——效应设计值；
 C ——设备与仪器正常使用的效应限值；
 δ ——单位力作用下构件变形。

2.2.2 计算指标：

K ——体系或构件刚度；
 m ——构件均布质量；
 E ——材料弹性模量；
 f ——结构自振频率；
 f_0 ——设备振动荷载频率；
 $f_{e,\min}$ ——扫频区频率最小值；
 $f_{e,\max}$ ——扫频区频率最大值；
 ϵ ——扫频计算参数；
 ω ——振动圆频率；
 ζ ——阻尼比。

2.2.3 几何参数：

A_0 ——设备基础面积；
 B ——山墙间距；
 H ——单层工业建筑柱顶高度；
 I ——构件截面惯性矩；
 L ——结构横向跨度、构件跨度；
 r_0 ——设备基础折算半径。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 工业建筑的振动控制,应满足设备与仪器正常使用要求以及结构与构件承载力要求。

3.1.2 工业建筑振动控制设计应具备下列资料:

- 1 工程规划总图及工艺平面布置图;
- 2 设备与仪器平面布置图、设备名称、型号、外形及底座尺寸;
- 3 动力设备的振动荷载;
- 4 受控设备与仪器的容许振动标准;
- 5 结构平面图、剖面图;
- 6 建筑场地岩土工程勘察报告;
- 7 建筑周边的动力设备及环境振动资料,对振动控制有较高要求的建筑及人群分布资料。

3.1.3 工业建筑振动控制设计应符合下列规定:

- 1 振动荷载应按现行国家标准《建筑振动荷载标准》GB/T 51228 的有关规定确定;
- 2 容许振动标准应按现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868 的有关规定确定;
- 3 采取隔振措施时,应符合现行国家标准《工程隔振设计标准》GB 50463 的有关规定。

3.1.4 工业建筑结构的自振频率应避开振动荷载频率。

3.1.5 工业建筑结构在大型动力设备振动作用下,当振动控制不能满足正常使用要求时,应采取减小动力设备振动输出或隔振减振的措施。

3.2 工业建筑选址及设备布置

3.2.1 当工业建筑内设备及仪器对振动环境要求较高时,建筑选址宜远离有较大振动的振源。

3.2.2 当工业建筑动力设备振动荷载较大时,厂址的选择宜避开软土、填土、液化土等不良地质;当无法避开时,应进行地基处理。

3.2.3 工业建筑工艺设计时,有较大振动的设备应与精密仪器和加工设备分区布置,普通加工设备宜与精密加工设备分区布置。

3.2.4 动力设备的布置应符合下列规定:

1 自重较大且振动荷载较大的设备、冲击式机器宜布置在建筑的底层;

2 楼层上的动力设备宜沿楼盖主、次梁布置,竖向振动较大的设备宜布置在主梁端部区域;

3 建筑物的附属振动设备,宜集中布置在对精密加工和精密仪器振动影响较小的区域。

3.3 结构选型及布置

3.3.1 工业建筑的结构选型应满足生产工艺和建筑功能的要求,并应符合下列规定:

1 承受振动荷载的工业建筑,宜采用钢筋混凝土结构、组合结构或钢结构;

2 工业建筑抗侧力结构的布置应与振动荷载作用方向协调;

3 结构的平面和竖向布置宜规则,传力路径应明确、合理;

4 多层工业建筑宜采用混凝土楼盖或组合楼盖。

3.3.2 当工业建筑设置振动荷载较大的动力设备时,动力设备宜单独设置基础并与主体结构隔开。

3.3.3 振动控制要求较高的多层工业建筑内不宜设置起重机;当需要设置时,应设置独立的支承结构并与主体结构隔开。

3.3.4 承受振动影响的工业建筑,当天然地基不能满足振动控制

要求时,应进行地基处理或采用桩基础。

3.3.5 承受振动荷载的工业建筑结构,混凝土的强度等级不应低于 C30。

3.4 结构振动验算

3.4.1 工业建筑振动控制设计时,结构的正常使用极限状态应符合下式要求:

$$S_v \leq C_v \quad (3.4.1)$$

式中: S_v ——正常使用极限状态振动荷载效应设计值;

C_v ——设备与仪器正常使用的效应限值。

3.4.2 工业建筑振动控制设计时,结构的承载力极限状态应符合下式要求:

$$\gamma_0 S \leq R \quad (3.4.2)$$

式中: γ_0 ——结构重要性系数;

S ——承载力极限状态下作用组合的效应设计值;

R ——结构或构件的抗力设计值。

3.4.3 结构构件在振动荷载作用下的疲劳验算,应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定执行,荷载标准值应按本标准第 3.4.7 条的规定确定。

3.4.4 工业建筑承受振动荷载作用时,结构和构件的变形设计值应按下式计算:

$$u = u_s + u_v \quad (3.4.4)$$

式中: u ——结构和构件的变形设计值;

u_s ——结构和构件在静力荷载作用下的变形值;

u_v ——结构和构件在振动荷载作用下的变形幅值。

3.4.5 工业建筑钢筋混凝土构件在振动荷载作用下的拉应力及裂缝验算时,构件截面内力组合设计值应按下式计算:

$$S = S_s + S_v \quad (3.4.5)$$

式中: S ——结构构件内力组合设计值;

S_s ——结构构件在静力荷载作用下内力组合设计值。

3.4.6 工业建筑构件承载力验算时,结构构件的振动荷载作用效应与其他静力荷载效应的基本组合应按下式计算:

$$S = S_s + 1.5 S_v \quad (3.4.6)$$

3.4.7 工业建筑构件疲劳验算时,结构构件的振动荷载作用效应与其他荷载效应的标准值组合应按下式计算:

$$S = S_{ks} + S_v \quad (3.4.7)$$

式中: S_{ks} ——构件在静力荷载作用下内力组合的标准值。

3.4.8 工业建筑正常使用极限状态计算时,多振源振动荷载作用效应组合应符合下列规定:

1 当两个周期性振动荷载作用时,振动荷载作用效应组合值宜按下式计算:

$$S_v = S_{v1} + S_{v2} \quad (3.4.8-1)$$

式中: S_{v1} 、 S_{v2} ——第1个、第2个振动荷载作用效应。

2 当多个周期性振动荷载或稳态随机振动荷载组合时,振动荷载作用效应组合值宜按下列公式计算,并取两者中较大值:

$$S_v = \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{vi})^2} \quad (3.4.8-2)$$

$$S_v = S_{vmax1} + S_{vmax2} \quad (3.4.8-3)$$

式中: S_{vi} ——第 i 个振动荷载作用效应值;

n ——振动荷载的总数量;

S_{vmax1} ——振动荷载作用效应的第一较大值;

S_{vmax2} ——振动荷载作用效应的第二较大值。

3 当冲击荷载起控制作用时,振动荷载作用效应组合值宜按下式计算:

$$S_v = S_{vp} + \sqrt{\sum_{i=2}^n (S_{vi})^2} \quad (3.4.8-4)$$

式中: S_{vp} ——最大冲击荷载效应值。

4 结构振动计算

4.1 一般规定

4.1.1 工业建筑结构的振动控制设计时,可对整体结构的水平振动与竖向振动分别计算。

4.1.2 结构水平向动力特性和振动响应的计算应符合下列规定:

1 宜采用数值分析方法并计入结构空间作用影响;

2 对于平面及竖向布置规则、结构质量及刚度分布均匀、楼盖刚度较大、振动荷载偏心小的结构,可按本标准第5章、第6章规定中简化方法的要求计算;

3 当振动荷载频率大于对应方向结构二阶频率时,可取振动荷载幅值的等效静力荷载进行计算。

4.1.3 楼盖及屋盖的竖向动力特性和振动响应计算应符合下列规定:

1 宜采用数值分析方法;

2 当符合下列条件时,可简化为单榀结构,按本标准第5章~第7章规定的方法进行竖向振动分析:

1) 单层工业建筑屋盖竖向受力无空间协同作用时;

2) 多层工业建筑楼盖的刚度和质量分布较均匀,各跨跨度最大相差不超过20%,且机器转速小于1500r/min时。

4.1.4 结构动力特性和振动响应计算时,建筑重力荷载代表值应取结构和构配件自重标准值和各可变荷载组合值之和;可变荷载的组合值应符合下列规定:

1 计算结构整体自振频率、振动响应时,楼面活荷载可采用与主梁设计相同的荷载,并计入准永久值系数进行组合;

2 计算楼盖整体自振频率、竖向振动响应时,楼面活荷载宜

采用与次梁设计相同的荷载,并计入准永久值系数进行组合;

3 计算楼盖局部自振频率、竖向振动响应时,楼面活荷载宜按实际情况计入。

4.1.5 结构振动计算时的阻尼比宜符合表 4.1.5 的规定。

表 4.1.5 结构振动计算时采用的阻尼比

结 构 类 型	阻 尼 比
混凝土结构	0.05
钢结构	0.02
组合结构	0.035

4.1.6 结构振动计算时,混凝土、钢筋和钢材的材料强度、弹性模量、泊松比取值应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定执行。

4.1.7 结构振动分析时,构件刚度的计算宜符合下列规定:

1 现浇楼盖及装配整体式楼盖,梁有效翼缘计算宽度宜按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定确定;楼板上的砂浆面层可计入厚度的 1/2 计算;

2 当设备基础与楼板有可靠连接时,宜计入基础对楼盖刚度的影响。

4.1.8 在单一周期性荷载作用下,结构的振动速度和振动加速度可按下列公式计算:

$$v = u\omega \quad (4.1.8-1)$$

$$a = u\omega^2 \quad (4.1.8-2)$$

式中: v ——振动速度(m/s);

a ——振动加速度(m/s²);

u ——振动位移(m);

ω ——振动荷载圆频率(rad/s)。

4.2 结构振动分析数值计算方法

4.2.1 采用数值计算方法进行结构振动分析时,应符合下列

规定:

1 在谐波、周期性或频段较集中的振动荷载作用下,可在频域内采用传递函数方法进行结构振动分析;

2 在非稳定、非周期或频率成分比较复杂的振动荷载作用下,以及对受力复杂的结构进行动力分析,宜在时域内采用动力时程分析方法进行结构振动分析。

4.2.2 计算结构振动响应时,宜在振动荷载扫频区范围进行计算,并应符合下列规定:

1 当结构主导振型频率在扫频区范围内时,振动荷载频率取值间隔不宜大于 0.5Hz,并应涵盖所有扫频区范围内的结构频率;

2 当结构一阶振型频率高于扫频区频率最大值时,振动荷载频率可取扫频区频率最大值;当结构主导振型最高频率低于扫频区频率最小值时,振动荷载频率可取扫频区频率最小值。

4.2.3 振动荷载扫频区频率最大值和最小值应按下列公式计算:

$$f_{e,\min} = f_e(1 - \epsilon) \quad (4.2.3-1)$$

$$f_{e,\max} = f_e(1 + \epsilon) \quad (4.2.3-2)$$

式中: $f_{e,\min}$ ——扫频区频率最小值(Hz);

$f_{e,\max}$ ——扫频区频率最大值(Hz);

f_e ——设备的振动荷载频率(Hz);

ϵ ——扫频参数,按表 4.2.3 确定。

表 4.2.3 扫频参数 ϵ

扫频参数	计算楼盖屋盖竖向振动	计算结构整体水平振动
ϵ	0.2	0.3

4.2.4 结构动力特性和振动响应的数值分析可采用有限单元法,计算单元的选取应符合下列规定:

1 结构整体水平振动应取独立结构单元进行计算,建筑物与附属建筑或构筑物相连时,应计入附属结构的影响;

2 楼盖竖向振动计算应取独立结构单元进行计算;当不计入层间传递时,可取振动荷载作用的楼层分别计算。

5 单层工业建筑振动控制

5.1 一般规定

5.1.1 当单层工业建筑屋盖设置动力设备时,应验算屋盖水平向及竖向振动荷载作用下的振动响应;当屋盖竖向振动速度超过 20mm/s 时,应进行屋盖在振动荷载作用下的承载力和疲劳验算。

5.1.2 单层工业建筑采用天然地基时,基础容许振动加速度宜按表 5.1.2 确定。

表 5.1.2 基础容许振动加速度

地基土类别	砂土	黏土	黄土
容许振动加速度(m/s^2)	1.0	1.5	3.0

5.1.3 当锻锤、压力机、落锤、破碎机、磨机等动力设备的振动对单层工业建筑的基础有影响时,地基基础设计采用的地基土承载力特征值应计入振动影响折减系数,折减系数可按下式计算:

$$\alpha_f = \frac{1}{1 + 0.3 \frac{a}{g}} \quad (5.1.3)$$

式中: α_f ——建筑结构基础地基土承载力特征值振动影响折减系数;

a ——动力设备基础振动加速度最大值(m/s^2);

g ——重力加速度(m/s^2)。

5.2 结构振动计算

5.2.1 工业建筑的屋盖在竖向振动荷载作用下,设备作用点处的

竖向振动位移可按下式计算：

$$u_v = \frac{F_{v0}}{K} \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f_0}{f_{v1}}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{f_0}{f_{v1}}\right)^2}} \quad (5.2.1)$$

式中： u_v ——屋盖上动力设备作用点处的竖向振动位移(m)；

F_{v0} ——屋盖上动力设备的振动荷载幅值(N)；

K ——屋盖动力设备处的抗弯刚度(N/m)；

ζ ——工业建筑屋盖的阻尼比；

f_0 ——设备振动荷载频率(Hz)；

f_{v1} ——屋盖一阶竖向自振频率(Hz)。

5.2.2 工业建筑的屋盖在水平振动荷载作用下，屋架下弦的水平振动位移可按下式计算：

$$u = u_0 \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f_0}{f_{h1}}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{f_0}{f_{h1}}\right)^2}} \quad (5.2.2)$$

式中： u ——结构屋架下弦水平振动位移(m)；

u_0 ——结构在振动荷载幅值作用下产生的静水平位移(m)；

f_{h1} ——结构一阶水平自振频率(Hz)。

5.2.3 单层工业建筑横向一阶自振频率可按下列公式计算：

$$f_{h1} = \frac{1}{\phi_1 \phi_2 (0.37 + 0.0002 \phi_3 L \sqrt{H^3})} \quad (5.2.3-1)$$

$$\phi_2 = 1.48 - 0.0006 L \sqrt{H^3} \quad (5.2.3-2)$$

式中： f_{h1} ——单层工业建筑横向一阶自振频率(Hz)；

L ——建筑横向跨度(m)；

H ——建筑屋架下弦高度(m)；

ϕ_1 ——山墙影响系数，按表 5.2.3-1 确定；

ϕ_2 ——侧墙类型影响系数；

ϕ_3 ——屋盖类型影响系数，按表 5.2.3-2 确定。

表 5.2.3-1 山墙影响系数

L/B	0.85	1.00	1.50	≥ 2.00
山墙影响系数 ϕ_1	0.80	0.85	0.90	1.00

注:1 B 为山墙间距;

2 当 L/B 为中间值时,山墙影响系数可采用线性插入法确定。

表 5.2.3-2 屋盖类型影响系数

屋盖类型	混凝土屋架	钢屋架
屋盖类型影响系数 ϕ_3	1.00	0.85

5.2.4 大型动力设备作用于地面时,结构柱基础的竖向振动位移可按下列公式计算:

$$u = 0.55 \frac{r_0}{r} u_0 \quad (5.2.4-1)$$

$$r_0 = \sqrt{\frac{A_0}{\pi}} \quad (5.2.4-2)$$

式中: u ——柱基础的振动位移幅值(m);

u_0 ——设备基础的振动位移幅值(m);

r ——柱基中心至设备基础中心的距离(m);

r_0 ——设备基础折算半径(m);

A_0 ——设备基础面积(m²)。

5.2.5 大型动力设备作用于地面时,结构柱顶的竖向振动位移可按下列公式计算:

$$u_c = \eta_c u \quad (5.2.5)$$

式中: u_c ——结构柱顶竖向振动位移幅值(m);

η_c ——柱顶振动传递系数,按表 5.2.5 确定。

表 5.2.5 柱顶振动传递系数

H/r_c	≤ 40	≥ 60
η_c	1.0	0.8

注:表中当 H/r_c 为中间值时,柱顶振动传递系数可采用线性插值法取值; r_c 为柱回转半径(m),可取为 $\sqrt{A_c/\pi}$; H 为柱的高度(m); A_c 为柱截面积(m²)。

5.2.6 大型动力设备作用于地面时,屋架的竖向振动位移可按下列

列公式计算：

$$u_v = \bar{u}_c \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f_0}{f_{v1}}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{f_0}{f_{v1}}\right)^2}} \quad (5.2.6-1)$$

$$\bar{u}_c = \frac{u_{cr} + u_{cl}}{2} \quad (5.2.6-2)$$

式中： \bar{u}_c ——屋架支撑柱顶的振动位移平均幅值(m)；

u_{cr} ——屋架支撑右柱柱顶振动位移幅值(m)；

u_{cl} ——屋架支撑左柱柱顶振动位移幅值(m)。

5.3 构件内力计算

5.3.1 单层工业建筑内安装锻锤、落锤、压力机及空气压缩机等振动较大的动力设备时，结构构件的承载力验算应计入振动荷载作用的影响。

5.3.2 单层工业建筑在振动荷载作用下，结构内力可按本标准第4.2节的规定计算，对于非轻质屋盖结构，也可采用本节动应力放大系数方法进行简化计算。

5.3.3 单层工业建筑在振动荷载作用下，动应力放大系数应符合下列规定：

1 屋盖结构动应力放大系数，宜按本标准第5.3.4条～第5.3.7条确定；

2 吊车梁动应力放大系数，可取1.05；

3 柱可不考虑动应力放大系数。

5.3.4 锻锤振动对屋盖结构动应力的放大系数可按表5.3.4确定。

表 5.3.4 锻锤振动对屋盖结构动应力的放大系数

锻锤下落部分的公称质量(t)	≤1.0	5.0	16.0	25.0
屋盖结构动应力的放大系数	1.05	1.10	1.15	1.20

注：当锻锤下落部分的公称质量为表中中间值时，屋盖结构动应力的放大系数可采用线性插入法确定。

5.3.5 落锤振动对屋盖结构动应力的放大系数可按表 5.3.5 确定。

表 5.3.5 落锤振动对屋盖结构动应力的放大系数

落锤冲击能量(kJ)	≤600	1200	≥1800
屋盖结构动应力的放大系数	1.15	1.20	1.25

注:当落锤冲击能量为表中中间值时,屋盖结构动应力的放大系数可采用线性插入法确定。

5.3.6 空气压缩机振动对屋盖结构动应力的放大系数可按表 5.3.6 确定。

表 5.3.6 空气压缩机振动对屋盖结构动应力的放大系数

空气压缩机基础垂直振动位移(μm)	50	100	200
屋盖结构动应力的放大系数	1.05	1.10	1.15

注:当空气压缩机基础垂直振动位移为表中中间值时,屋盖结构动应力的放大系数可采用线性插入法确定。

5.3.7 压力机振动对屋盖结构动应力的放大系数可按表 5.3.7 确定。

表 5.3.7 压力机振动对屋盖结构动应力的放大系数

压力机公称压力(kN)	≤16000	18000	>18000
屋盖结构动应力的放大系数	1.05	1.10	1.15

注:当压力机公称压力为表中中间值时,屋盖结构动应力的放大系数可采用线性插入法取值。

5.4 振动控制构造措施

5.4.1 单层工业建筑屋盖设置动力设备时,宜设置上弦支撑等加强屋盖整体水平刚度,可设置纵向支撑等加强屋盖之间的空间协同作用。

5.4.2 单层工业建筑内设置锻锤、落锤、压力机及空气压缩机等振动较大的动力设备时,墙体与柱应设置拉结措施,柱间宜设置垂直支撑。

5.4.3 单层工业建筑内设置落锤时,结构柱顶应设置联系横梁等拉结措施。

6 多层工业建筑振动控制

6.1 一般规定

6.1.1 多层工业建筑的振动控制设计宜按下列程序进行:

- 1 确定振动荷载值和容许振动标准;
- 2 设定楼盖结构竖向自振频率目标值,当楼层上设置低频动力设备时,设定结构整体水平自振频率目标值;
- 3 确定抗侧力结构体系,当楼层上设置低频动力设备时,进行结构水平自振频率计算,直至满足设定目标;计算结构水平振动响应,并满足容许振动标准的要求;
- 4 确定楼盖体系,进行楼盖截面设计并计算楼盖竖向自振频率,直至满足设定目标;计算楼盖的竖向振动响应,并满足容许振动标准的要求。

6.1.2 当楼层上的动力设备转速较低、振动荷载较大时,宜采用框架-剪力墙结构、框架-支撑结构。

6.1.3 承受振动荷载的工业建筑宜采用梁板式楼盖,梁最小高跨比宜符合表 6.1.3 的规定。

表 6.1.3 梁最小高跨比

振动荷载(kN)	≤ 1.0	3.0
次梁高跨比	1/12	1/10
主梁高跨比	1/10	1/8

注:当振动荷载为表中中间值时,梁最小高跨比可采用线性插入法确定。

6.1.4 工业建筑楼盖承受振动荷载时,板厚不宜小于板跨的 1/20,且不应小于 120mm;不宜采用悬臂结构。

6.1.5 当楼盖结构上布置振动荷载为 3kN ~ 15kN 的动力设备时,宜采取隔振措施;振动荷载超过 15kN 的动力设备,不宜布置

在楼盖结构上。

6.1.6 动力设备设置于楼层或屋盖上,当符合下列条件之一时,支承结构可不进行振动荷载作用下的承载力、疲劳和裂缝验算:

1 当机器振动荷载不大于 100N 时;

2 当机器振动荷载不大于 300N 且振动荷载频率远离结构共振区时。

6.1.7 当建筑结构的振动不满足容许振动标准或结构承载力要求时,应采取隔振或减振措施。

6.2 结构振动计算

I 结构水平振动计算

6.2.1 工业建筑结构水平振动的计算模型应符合下列规定:

1 假定楼盖在平面内为刚性;

2 假定结构质量集中在楼盖标高处;

3 假定基础为刚性;

4 计入填充墙的作用。

6.2.2 水平振动的计算可采用振型分解法,可取振动效应方向的前两阶振型进行计算。

6.2.3 结构在每个振源作用下的水平振动响应可按下列公式计算:

$$u_k = \sqrt{\left(\sum_j B_{jk}^s \cos \theta_j\right)^2 + \left(\sum_j B_{jk}^s \sin \theta_j\right)^2} \quad (6.2.3-1)$$

$$\theta_j = \arctan \left[2\zeta \frac{f_e/f_j}{1 - (f_e/f_j)^2} \right] \quad (6.2.3-2)$$

$$\text{对于平动振型: } B_{jk}^s = Y_j^s \beta_j X_{jk} \quad (6.2.3-3)$$

$$\text{对于扭转振型: } B_{jk}^s = Y_j^s \beta_j X_{jk} d \quad (6.2.3-4)$$

$$Y_j^s = \frac{\bar{F}_j}{\bar{m}_j (2\pi f_j)^2} \quad (6.2.3-5)$$

$$\beta_j = \frac{1}{\sqrt{(1 - f_e^2/f_j^2)^2 + (2\zeta f_e/f_j)^2}} \quad (6.2.3-6)$$

$$\bar{F}_j = \sum_{k=1}^n X_{jk} F_k \quad (6.2.3-7)$$

$$\bar{m}_j = \sum_{k=1}^n X_{jk}^2 m_k \quad (6.2.3-8)$$

式中: u_k ——第 k 层控制点的位移幅值(m);

B_{jk}^s ——振型 j 在折算振型荷载 \bar{F}_j 作用下,第 k 层控制点产生的动位移(m);

θ_j —— j 振型的滞后角(rad);

Y_j^s ——振型 j 在折算振型荷载 \bar{F}_j 作用下产生的振型静位移(m);

β_j —— j 振型的传递系数;

X_{jk} —— j 振型第 k 层的振型向量;

d ——控制点在垂直于振动荷载作用方向上与结构质心的距离(m);

ζ ——结构的阻尼比;

f_c ——振动荷载的计算频率(Hz);

f_j —— j 振型的自振频率(Hz);

\bar{F}_j —— j 振型的折算振型荷载(N);

\bar{m}_j —— j 振型的折算振型质量(kg);

F_k ——作用于第 k 层上的振动荷载(N);

m_k ——第 k 层的有效质量或转动惯量(kg 或 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$)。

II 结构竖向振动计算

6.2.4 楼盖在振动荷载作用下,振动荷载作用点的竖向振动响应可采用计入梁端约束条件的单跨梁模型进行简化计算。

6.2.5 采用单跨梁模型计算振动响应时,可采用下列规定进行计算假定:

1 柱可作为主梁的刚性支座;

2 主梁在振动荷载作用下静挠度小于次梁在振动荷载作用下静挠度的 1/10 时,主梁可视为次梁的刚性支座;

3 结构第一阶频率小于振动荷载频率时,主次梁节点可采用刚接模型;结构第一阶频率大于振动荷载频率时,主次梁节点可采用铰接模型;

4 采用刚接模型时,梁端支座刚度应乘以刚度降低系数,刚度降低系数可取 0.95。

6.2.6 单跨梁的一阶自振频率应符合下列规定:

1 非弹性支座刚接主梁的一阶自振频率可按式计算:

$$f_1 = \frac{3.573}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \quad (6.2.6-1)$$

式中: E ——梁的弹性模量;

I ——梁的截面惯性矩;

L ——梁的跨度;

\bar{m} ——梁上单位长度的等效均布质量,可按本标准第 6.2.7 条的规定计算。

2 弹性支座铰接次梁的一阶自振频率可按式计算:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\frac{L^5}{30EI} + L^2(\delta_L + \delta_R)}{\bar{m} \left[\frac{L^9}{2926(EI)^2} + \frac{L^3}{3}(\delta_L\delta_R + \delta_L^2 + \delta_R^2) + \frac{L^6}{60EI}(\delta_L + \delta_R) \right]}} \quad (6.2.6-2)$$

式中: δ_L 、 δ_R ——梁两端支座在单位力作用下的竖向变形。

3 弹性支座刚接次梁的一阶自振频率可按式计算:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\frac{L^3}{360EI} + L^2\delta}{\bar{m} \left[\frac{L^9}{181440(EI)^2} + \frac{L^6\delta}{360EI} + \frac{L^3\delta^2}{2} \right]}} \quad (6.2.6-3)$$

式中: δ ——梁端支座在单位力作用下竖向变形。

6.2.7 梁上单位长度的等效均布质量可按式计算:

$$\bar{m} = m_u + \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n k_i m_i \quad (6.2.7)$$

式中： m_0 ——梁上单位长度的质量；

m_i ——梁上第 i 点的附加集中质量；

k_i ——质量换算系数，按表 6.2.7 确定。

表 6.2.7 质量换算系数

α_i	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
k_i	0.191	0.691	1.310	1.810	2.000

注： α_i 为第 i 个集中质量与较近支座的距离与梁跨度之比。

6.2.8 单跨梁的振动位移 u 可按下式计算：

$$u = u_0 \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f_0}{f_1}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{f_0}{f_1}\right)^2}} \quad (6.2.8)$$

式中： u_0 ——振动荷载幅值作用下梁产生的静竖向位移；

f_0 ——设备振动荷载频率。

6.3 结构振动控制措施

I 结构水平振动控制措施

6.3.1 水平振动作用较大的设备宜布置在较低楼层，设备振动荷载作用点宜与结构抗侧刚度中心重合；当水平振动设备布置在较高楼层时，结构抗侧刚度宜沿结构高度均匀布置。

6.3.2 为减小结构水平振动响应，对动力设备应采取下列措施：

1 动力设备振动荷载频率与结构自振频率接近时，宜对动力设备采取隔振减振、降低振动荷载等措施；

2 宜将动力设备水平振动荷载较大方向布置在结构水平自振频率与振动荷载频率相差较大的方向。

6.3.3 为减小结构水平振动响应，可采取下列措施：

1 增加剪力墙、支撑等抗侧力构件；

2 合理利用填充墙刚度，将刚性填充墙设置在对减小楼盖水平旋转振动最有效的位置上，并加强填充墙与主体结构的连接；

3 当工艺不允许增加抗侧力构件时，调整结构跨度或者增大

构件截面；

4 当工业建筑与附属构筑物相连时,将附属构筑物配置在建筑的对称轴线上；

5 合理设置减振耗能部件或装置。

II 结构竖向振动控制措施

6.3.4 动力设备在楼盖上的布置应符合下列规定：

1 动力设备宜布置在楼盖梁上；

2 上下往复运动的设备应布置在结构的竖向构件附近；

3 水平往复运动的设备宜布置在跨中部位,并使较大振动荷载与梁同向。

6.3.5 当设备布置在单根梁上时,应采取措施避免梁产生扭转振动。

6.3.6 楼盖上的动力设备不应与主体结构竖向结构构件直接连接。

6.3.7 结构楼盖自振频率与振动荷载频率接近时,应采取措施调整楼盖结构的自振频率,亦可对动力设备采用隔振、减振措施。

7 多层工业建筑楼盖微振动控制

7.1 一般规定

7.1.1 多层工业建筑在振动荷载小于 600N 的中小型机床、制冷压缩机、电机、风机或水泵等设备作用下,楼盖结构振动响应计算和振动控制设计应符合本章的规定。

7.1.2 当楼盖上设置加工表面粗糙度较粗的机床,且楼盖单位宽度的相对抗弯刚度不小于表 7.1.2 的规定时,可不做竖向振动计算。

表 7.1.2 楼盖单位宽度相对抗弯刚度 (N/m^3)

楼盖横向 跨数	板梁相对抗弯 刚度比	机床分布密度 ($\text{m}^2/\text{台}$)		
		≤ 10	11~18	> 18
1	≤ 0.4	240	200	170
	0.8	280	220	180
	1.6	330	270	220
2	≤ 0.4	230	180	160
	0.8	270	200	180
	1.6	300	240	200
3	≤ 0.4	220	170	150
	0.8	260	200	170
	1.6	280	220	190

注:1 机床分布密度为机床布置区的总面积除以机床台数;

2 板梁相对抗弯刚度比、楼盖单位宽度、相对抗弯刚度按本标准第 7.2.2 条的规定计算。

7.1.3 次梁间距不大于 2m、板厚不小于 80mm 的肋形楼盖和预制槽板宽度不大于 1.2m 的装配整体式楼盖,其梁和板截面最小

尺寸应符合表 7.1.3 的规定。

表 7.1.3 梁和板截面最小尺寸

结构构件		控制项目	控制指标
楼盖	肋形楼盖	板高跨比	1/18
		次梁高跨比	1/15
	装配整体式楼盖	现浇面层厚度(mm)	60
		板肋高跨比	1/20
		板厚(mm)	50
主梁		高跨比	1/10

7.2 楼盖微振动计算

7.2.1 楼盖的竖向微振动计算模型宜符合下列规定：

- 1 振动荷载作用在主梁或次梁上时,宜沿主梁或次梁方向将楼盖视为彼此分开的单跨或多跨连续 T 形梁；
- 2 柱可作为主梁支座,主梁可作为次梁支座；
- 3 当连续梁超过 5 跨时,可按 5 跨计算；
- 4 楼盖的周边支承条件宜取简支。

7.2.2 楼盖的板梁相对抗弯刚度比宜按下列公式计算：

$$\alpha = \frac{K_p}{K} \quad (7.2.2-1)$$

$$K_p = \frac{E_p I_p}{cl^3} \quad (7.2.2-2)$$

$$K = \frac{EI}{l_y^4} \quad (7.2.2-3)$$

式中： α ——板梁相对抗弯刚度比；

K_p ——楼盖单位宽度相对抗弯刚度(N/m²)；

K ——主梁相对抗弯刚度(N/m²)；

E ——主梁的弹性模量(N/m²)；

E_p ——次梁的弹性模量(N/m²)；

- l ——次梁的跨度(m);
 l_y ——主梁的跨度(m);
 I ——主梁的截面惯性矩(m^4);
 I_P ——次梁或预制槽形板的截面惯性矩(m^4);
 c ——次梁间距(m)。

7.2.3 楼盖第一频率密集区内的最低和最高自振频率宜按下列公式计算:

$$f_{1l} = \phi_l \sqrt{\frac{D}{\bar{m}l_0^4}} \quad (7.2.3-1)$$

$$f_{1h} = \phi_h \sqrt{\frac{D}{\bar{m}l_0^4}} \quad (7.2.3-2)$$

计算主梁时:

$$D = EI \quad (7.2.3-3)$$

计算次梁或预制槽形板时:

$$D = E_P I_P \quad (7.2.3-4)$$

式中: f_{1l} ——楼盖第一频率密集区内最低自振频率(Hz);

f_{1h} ——楼盖第一频率密集区内最高自振频率(Hz);

\bar{m} ——楼盖构件上单位长度的等效均布质量(kg/m), 当有集中质量时, 应按本标准第 7.2.4 条的规定计算;

l_0 ——楼盖构件的跨度(m);

ϕ_l 、 ϕ_h ——自振频率系数, 按表 7.2.3 确定。

表 7.2.3 自振频率系数

自振频率 系数	梁 的 跨 数				
	1	2	3	4	5
ϕ_l	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57
ϕ_h	1.57	2.45	2.94	3.17	3.30

7.2.4 当楼盖构件上有均布质量和集中质量时, 宜将两种质量按下式换算成等效均布质量:

$$\bar{m} = m_u + \frac{1}{nl_0} \sum_{j=1}^n k_j m_j \quad (7.2.4)$$

式中: m_u ——楼盖构件上单位长度的均布质量(kg/m);

m_j ——楼盖构件上的集中质量(kg);

n ——梁的跨数;

k_j ——集中质量换算系数,按表 7.2.4 确定。

表 7.2.4 集中质量换算系数 k_j

跨度数	跨度序号	自振频率	α_j									
			0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
1	1	f_{11}	0	0.191	0.691	1.310	1.810	2.000	1.810	1.310	0.691	0.191
	2	f_{1h}	0	0.311	1.070	1.863	2.267	2.088	1.456	0.720	0.208	0.018
2	1	f_{1h}	0	0.018	0.208	0.720	1.456	2.088	2.267	1.863	1.070	0.311
	2	f_{1h}	0	0.226	0.756	1.243	1.381	1.100	0.601	0.183	0.011	0.006
	3	f_{1h}	0	0.160	0.951	2.380	3.803	4.400	3.803	2.380	0.951	0.160
3	1	f_{1h}	0	0.006	0.011	0.183	0.601	1.100	1.381	1.243	0.756	0.226
	2	f_{1h}	0	0.164	0.540	0.863	0.913	0.670	0.312	0.062	0.000	0.018
	3	f_{1h}	0	0.192	1.044	2.440	3.646	3.903	3.046	1.639	0.504	0.046
	4	f_{1h}	0	0.457	0.504	1.639	3.046	3.903	3.646	2.440	1.044	0.192
4	1	f_{1h}	0	0.018	0.000	0.062	0.312	0.670	0.913	0.863	0.540	0.164
	2	f_{1h}	0	0.122	0.397	0.623	0.641	0.448	0.188	0.026	0.004	0.022
	3	f_{1h}	0	0.170	0.914	2.070	2.992	3.072	2.260	1.104	0.278	0.012
	4	f_{1h}	0	0.106	0.841	2.367	3.992	4.693	3.992	2.367	0.841	0.106
	5	f_{1h}	0	0.142	0.278	1.104	2.260	3.072	2.992	2.070	0.914	0.170
5	1	f_{1h}	0	0.022	0.004	0.026	0.188	0.448	0.641	0.623	0.397	0.120

注: α_j 为第 j 个集中质量与本跨左边支座间的距离与 l_0 之比。

7.2.5 当楼盖上设备转速均低于 600r/min 时,可仅计算楼盖第一频率密集区内最低自振频率。

7.2.6 计算楼盖的竖向振动响应时,楼盖的自振频率计算值宜按下列公式计算:

$$f_1 = 0.8 f_{11} \quad (7.2.6-1)$$

$$f_2 = 1.2f_{1h} \quad (7.2.6-2)$$

式中: f_1 ——楼盖第一频率密集区内最低自振频率计算值(Hz);

f_2 ——楼盖第一频率密集区内最高自振频率计算值(Hz)。

7.2.7 楼盖竖向微振动位移应符合下列规定:

1 当 $f_0 < f_1$ 时,可按下列公式计算:

$$u_0 = \phi \left[\frac{1 - 2\zeta\eta_1}{1 - 2\zeta} u_{st} + \frac{\eta_1 - 1}{1 - 2\zeta} u_1 \right] \quad (7.2.7-1)$$

$$\eta_1 = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{f_0^2}{f_1^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{f_0}{f_1}\right)^2}} \quad (7.2.7-2)$$

$$u_{st} = k_{st} \frac{Fl_0^3}{100D\epsilon} \quad (7.2.7-3)$$

$$u_1 = k_1 \frac{Fl_0^3}{100D\epsilon} \quad (7.2.7-4)$$

$$\epsilon = \frac{l_0}{3c} \quad (7.2.7-5)$$

2 当 $f_1 \leq f_0 \leq f_{11}$ 时,可按下列公式计算:

$$u_0 = \phi \frac{u_1}{2\zeta} \quad (7.2.7-6)$$

3 当 $f_{11} < f_0 \leq f_2$ 时,可按下列公式计算:

$$u_0 = \phi \left[\eta_2 u_1 + \left(\frac{1}{2\zeta} - \eta_2 \right) u_2 \right] \quad (7.2.7-7)$$

$$\eta_2 = \frac{1}{2\zeta} \frac{f_2 - f_0}{f_2 - f_1} \quad (7.2.7-8)$$

$$u_2 = k_2 \frac{Fl_0^3}{100D\epsilon} \quad (7.2.7-9)$$

式中: u_0 ——振动荷载作用点处楼盖的竖向振动位移(m);

u_{st} ——振动荷载作用点处楼盖的静位移(m);

f_0 ——振动荷载频率(Hz);

F ——振动荷载(N);

u_1 ——振动荷载频率 f_0 与楼盖第一频率密集区最低自振频

率计算值 f_1 相同,且不考虑动力系数 η 时的竖向振动位移(m);

u_2 ——振动荷载频率 f_0 与楼盖第一频率密集区最高自振频率计算值 f_2 相同,且不考虑动力系数 η 时的竖向振动位移(m);

k_{st} 、 k_1 、 k_2 ——位移计算系数,可按本标准第 7.2.9 条确定;

ζ ——楼盖的阻尼比;

ε ——空间影响系数,当计算主梁的振动位移时,可取 1;

η_1 、 η_2 ——动力系数;

ϕ ——振动荷载作用点位置修正系数,应按本标准第 7.2.8 条的规定采用。

7.2.8 振动荷载作用点位置的修正系数 ϕ 取值应符合下列规定:

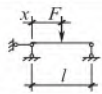
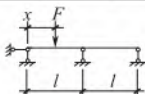
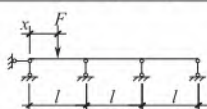
1 当振动荷载作用点位于主梁上及三跨或两跨边跨的跨中板条上时,可取 1;

2 当振动荷载作用点位于三跨中跨的跨中板条上时,可取 0.8;

3 当振动荷载作用点位于单跨的跨中板条上时,可取 1.2。

7.2.9 位移计算系数 k_{st} 、 k_1 、 k_2 可按表 7.2.9 确定。

表 7.2.9 位移计算系数 k_{st} 、 k_1 、 k_2

计算简图	k_{st}			k_1			k_2		
	$\frac{x}{l}$			$\frac{x}{l}$			$\frac{x}{l}$		
	0.25	0.50	0.75	0.25	0.50	0.75	0.25	0.50	0.75
	1.172	2.083	1.172	1.042	2.054	1.042	—	—	—
	0.942	1.497	0.723	0.578	1.101	0.541	0.362	0.513	0.138
	0.928	1.458	0.693	0.461	0.861	0.412	0.160	0.193	0.054

续表 7.2.9

计算简图	k_{st}			k_1			k_2		
	$\frac{x}{l}$			$\frac{x}{l}$			$\frac{x}{l}$		
	0.25	0.50	0.75	0.25	0.50	0.75	0.25	0.50	0.75
	0.620	1.146	0.620	0.379	0.747	0.379	0.185	0.460	0.185
	0.927	1.456	0.691	0.428	0.792	0.373	0.108	0.126	0.043
	0.613	1.121	0.597	0.326	0.625	0.309	0.139	0.303	0.107
	0.927	1.455	0.691	0.424	0.781	0.366	0.089	0.103	0.040
	0.612	1.119	0.595	0.312	0.590	0.286	0.110	0.228	0.082
	0.590	1.096	0.590	0.269	0.523	0.269	0.107	0.268	0.107

7.2.10 当振动荷载不作用在跨中板条上时,作用点的竖向振动位移(图 7.2.10)可按下列公式计算:

$$u'_{01} = 0.6 u_{01} \quad (7.2.10-1)$$

$$u'_{02} = 0.65 u_{02} \quad (7.2.10-2)$$

$$u'_{03} = 0.65 u_{03} \quad (7.2.10-3)$$

$$u'_{04} = 0.70 u_{04} \quad (7.2.10-4)$$

式中: u_{01} 、 u_{02} 、 u_{03} 、 u_{04} ——跨中板条上各振动荷载作用点的竖向振动位移(m);

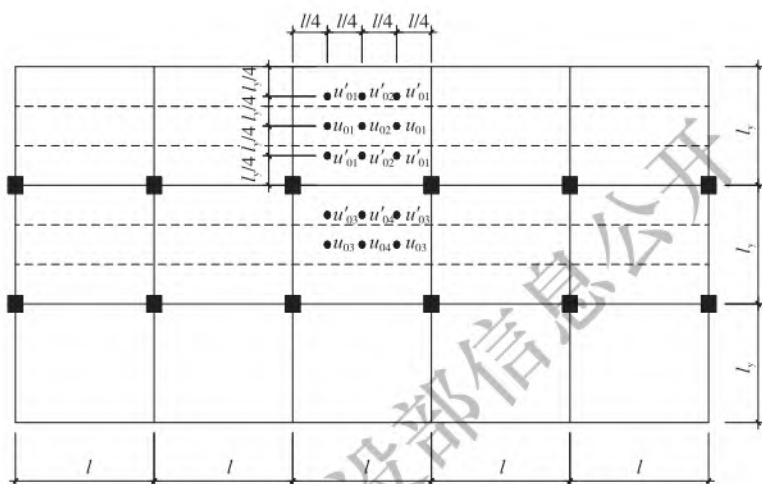


图 7.2.10 振动荷载作用点平面位置图

u'_{01} 、 u'_{02} 、 u'_{03} 、 u'_{04} ——跨中板条以外的各振动荷载作用点竖向振动位移(m)。

7.2.11 计算楼盖竖向振动位移时,振动荷载的频率可取楼盖第一频率密集区内最低自振频率。

7.2.12 同一层楼盖上,振动荷载作用点以外各验算点的竖向振动位移可按下式计算:

$$u_r = \gamma u_0 \quad (7.2.12)$$

式中: u_r ——同一楼层上振动荷载作用点以外各验算点的竖向振动位移(m);

γ ——振动位移传递系数,应按本标准附录 A 确定。

7.2.13 不同层楼盖上,第 i 受振层各验算点的竖向振动位移可按下式计算:

$$u_{ri} = \alpha_r u_r \quad (7.2.13)$$

式中: u_{ri} ——第 i 受振层上各验算点的竖向振动位移(m),验算点位置应符合本标准附录 A 第 A.0.3 条的规定;

α_r ——层间振动传递比,按表 7.2.13 确定。

表 7.2.13 层间振动传递比 α_n

扰力点 作用位置	验算点 位置	受振层	验算点位置								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
二层 梁中	本跨	三层	0.30	0.42	0.52	0.60	0.68	0.75	0.82	0.86	0.90
		四层	0.35	0.49	0.60	0.68	0.75	0.81	0.83	0.88	0.90
	邻跨或 隔跨	三层	0.50	0.58	0.66	0.72	0.77	0.82	0.85	0.88	0.90
		四层	0.60	0.68	0.74	0.79	0.83	0.86	0.88	0.89	0.90
二层 板中	本跨	三层	—	0.35	0.51	0.63	0.72	0.79	0.80	0.88	0.90
		四层	—	0.40	0.58	0.70	0.77	0.83	0.87	0.89	0.90
	邻跨或 隔跨	三层	—	0.50	0.63	0.73	0.80	0.83	0.88	0.89	0.90
		四层	—	0.51	0.64	0.73	0.79	0.84	0.85	0.88	0.90
三层 梁中	本跨	二层	0.30	0.45	0.57	0.66	0.74	0.79	0.84	0.87	0.90
		四层	0.40	0.52	0.62	0.70	0.76	0.82	0.85	0.89	0.90
	邻跨或 隔跨	二层	0.60	0.68	0.75	0.80	0.82	0.86	0.88	0.89	0.90
		四层	0.65	0.72	0.76	0.81	0.84	0.87	0.88	0.89	0.90

续表 7.2.13

扰力点 作用位置	验算点 位置	受振层	验算点位置								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
三层 板中	本跨	二层	—	0.35	0.51	0.62	0.70	0.77	0.82	0.87	0.90
		四层	—	0.45	0.58	0.68	0.75	0.82	0.85	0.87	0.90
	邻跨或 隔跨	二层	—	0.50	0.60	0.68	0.75	0.84	0.84	0.87	0.90
		四层	—	0.55	0.64	0.71	0.76	0.81	0.85	0.88	0.90
四层 梁中	本跨	二层	0.60	0.68	0.74	0.79	0.84	0.86	0.88	0.89	0.90
		三层	0.65	0.71	0.76	0.80	0.84	0.86	0.88	0.89	0.90
	邻跨或 隔跨	二层	0.65	0.70	0.75	0.80	0.83	0.85	0.87	0.89	0.90
		三层	0.70	0.75	0.80	0.84	0.86	0.88	0.89	0.89	0.90
四层 梁中	本跨	二层	—	0.40	0.51	0.60	0.68	0.75	0.81	0.89	0.90
		三层	—	0.45	0.56	0.66	0.74	0.79	0.84	0.89	0.90
	邻跨或 隔跨	二层	—	0.70	0.76	0.81	0.84	0.86	0.88	0.89	0.90
		三层	—	0.80	0.84	0.86	0.88	0.89	0.89	0.89	0.90

7.3 楼盖微振动控制措施

7.3.1 当多层工业建筑有微振控制要求时,设备的布置应符合下列规定:

- 1 强烈振动的设备,应布置在建筑的底层;
- 2 较大振动的设备或对振动敏感的设备 and 仪器,应靠近承重墙、框架梁及柱等楼盖局部刚度较大的部位;
- 3 同时布置较大振动的设备和对振动敏感的设备、仪器时,应分类集中、分区布置,并宜设置分隔缝;
- 4 对振动敏感的设备 and 仪器,应远离产生较大振动的设备;
- 5 有水平振动荷载较大的设备时,振动荷载方向与结构水平刚度较大的方向宜一致。

7.3.2 设置在楼盖上的牛头刨床、砂轮机、制冷压缩机和水泵等设备,宜采取隔振措施。

7.3.3 动力设备与管道之间,宜采用弹性连接;管道应采取楼盖支承或悬挂,不得直接支承在墙、柱等竖向构件上;振动管道与建筑物连接部位应采取隔振、减振措施。

8 工业建筑振动测试

8.0.1 工业建筑结构振动测试应包括设计前、结构竣工后及设备安装调试后三阶段测试。

8.0.2 工业建筑设计前,应根据工业建筑的使用功能、内部设备使用环境要求,进行潜在振源调查并确定其影响程度,对工业建筑环境振动进行测试并评价环境振动水平。

8.0.3 工业建筑结构竣工后及设备安装调试后,应对振动敏感区域进行测试。

8.0.4 工业建筑振动测量仪器的选择应符合下列规定:

1 当以精密设备为振动测试目标时,应采用倒摆式拾振器或对低频微幅振动较为敏感的传感元件;

2 当以普通设备为振动测试目标时,可采用磁电式拾振器或对中低频微幅振动较为敏感的传感元件;

3 当以大型设备为振动测试目标时,可采用磁电式和微机电系统式拾振器或对中高频大幅振动较为敏感的传感元件。

8.0.5 振动荷载测试应符合下列规定:

1 振动荷载测试宜采用直接测试法;

2 除有特殊要求外,振动荷载测试点应取振动设备的支承点或振动荷载作用点。

8.0.6 工业建筑结构动力特性和响应的测试应符合下列规定:

1 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;

2 精密装备微振动测试时,监测点应设在精密装备底部、支撑结构顶部或底部。

8.0.7 振动响应测试应符合下列规定:

- 1 对于超低频振动,宜测量振动位移和速度;
 - 2 对于低频振动,宜测量振动速度和加速度;
 - 3 对于中高频振动和高频振动,宜测量振动加速度。
- 8.0.8** 拾振器的安装应符合下列规定:
- 1 拾振器的灵敏度主轴方向应与测量方向一致;
 - 2 拾振器应进行水平向和竖直向校平;
 - 3 拾振器应与测量目标紧密连接。
- 8.0.9** 振动测量过程中应保持振源处于正常工作状态,并应避免其他振源和环境因素对振动测量的干扰。
- 8.0.10** 振动测量应在振动响应最大时段进行,环境振动测量尚应在昼间和夜间分别进行。
- 8.0.11** 振动测试采样频率宜为扫频区频率最大值的 3 倍,建筑物测试采样频率不应低于 256Hz。
- 8.0.12** 环境振动测量的测点数量不宜少于 3 个;楼板振动测试面积不大于 20m^2 时应至少选取 1 个测点,测试面积大于 20m^2 时应至少选取 3 个测点。
- 8.0.13** 振动测试的时长应根据振动响应特征确定,并确保主要振动响应信息、数据分析结果等数据真实反映振动特征。
- 8.0.14** 每个测点有效记录不得小于 3 次,测试结果宜取 3 次测试数据的平均值。
- 8.0.15** 建筑结构的传递率分析,宜采用多点同步测试结果。

9 既有工业建筑振动控制措施

9.0.1 当既有工业建筑的振动不能满足容许振动标准要求时,可采取下列措施:

- 1 降低振源产生的振动荷载;
- 2 改变结构刚度;
- 3 增加结构阻尼;
- 4 设备隔振与减振。

9.0.2 降低振源产生的振动荷载可采取下列措施:

- 1 减小设备的偏心距,改善设备动平衡性能;
- 2 调整设备布置方向或布置区域;
- 3 动力设备主动隔振。

9.0.3 改变结构刚度可采用调整跨度、设置支撑、改变构件截面、施加体外预应力等措施。

9.0.4 增加结构阻尼可采取下列措施:

- 1 增设隔墙等非结构构件;
- 2 设置调频质量阻尼器;
- 3 增设消能部件。

附录 A 多层工业建筑楼盖微振动位移传递系数简化计算

A.0.1 工业建筑跨数少于或等于 3 跨的现浇钢筋混凝土肋形楼盖或带现浇钢筋混凝土面层的预制槽形板楼盖,当板梁相对抗弯刚度比在 0.4~3.0 范围内时,楼盖微振动位移传递系数宜按本附录的规定进行简化计算。

A.0.2 振动位移传递系数的计算应符合下列规定:

1 当 $f_1 \leq f_0 \leq f_{1r}$ 时,应按下列规定计算:

1) 当振动荷载作用点在梁中或板中、振动验算点也在梁中或板中时,振动位移传递系数 γ 可按下式计算:

$$\gamma = \gamma_1 \quad (\text{A.0.2-1})$$

式中: γ_1 ——振动荷载作用点在梁中或板中,机器振动荷载频率不小于楼盖第一频率密集区域内最低自振频率计算值,且不大于楼盖第一频率密集区内最高自振频率时,楼盖上其他梁中或者板中某验算点的振动位移传递系数,可按本附录第 A.0.3 条的规定确定。

2) 当振动荷载作用点不在梁中或板中、振动验算点在梁中或板中时,振动位移传递系数可按下式计算:

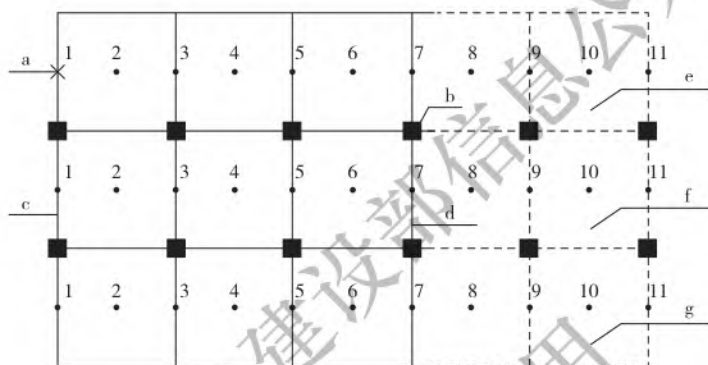
$$\gamma = \rho \gamma_1 \quad (\text{A.0.2-2})$$

式中: ρ ——振动荷载作用点位置换算系数,可按本附录第 A.0.4 条的规定确定。

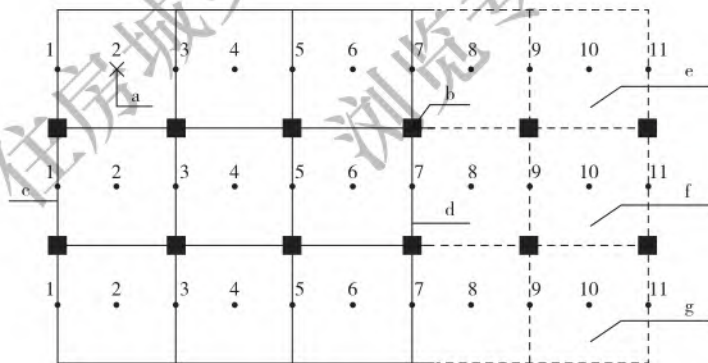
3) 当振动验算点不在梁中或板中时,振动位移传递系数可按本附录第 A.0.5 条的规定确定。

2 当 $f_0 < f_1$ 时,振动位移传递系数可按本附录第 A.0.6 条的规定确定。

A.0.3 振动荷载作用点在梁中或板中,振动荷载频率不小于楼盖第一频率密集区内最低自振频率计算值,且不大于楼盖第一频率密集区内最高自振频率时,楼盖的其他各梁中或板中振动验算点(图 A.0.3)的振动位移传递系数 γ_1 可按表 A.0.3 确定。



(a) 梁中激振



(b) 板中激振

图 A.0.3 振动荷载作用点和振动验算点位置图

a—振动荷载作用点;b—柱;c—边端或中间主梁;

d—主梁;e—本跨;f—邻跨;g—隔跨

表 A.0.3 振动位移传递系数 γ_1

振动荷载 作用点 位置	振动 验算点 所在跨	振动验算点位置						
		1	2	3	4	5	6	7
板 中	本跨	—	1.00	$0.55+0.03\alpha-0.1\alpha^{-1}$	$0.50+0.02\alpha-0.12\alpha^{-1}$	$0.30+0.03\alpha-0.1\alpha^{-1}$	$0.18+0.04\alpha$	$0.05+0.03\alpha$
	邻跨	—	$0.30+0.08\alpha$	$0.20+0.08\alpha$	$0.15+0.08\alpha$	$0.08+0.05\alpha$	$0.06+0.05\alpha$	$0.04+0.02\alpha$
	隔跨	—	$0.12+0.06\alpha$	$0.10+0.05\alpha$	$0.08+0.05\alpha$	$0.06+0.04\alpha$	$0.04+0.04\alpha$	$0.03+0.01\alpha$
梁 中	本跨	1.00	$0.90+0.2\alpha^{-1}$	$0.36+0.08\alpha$	$0.32+0.06\alpha$	$0.10+0.08\alpha$	$0.13+0.04\alpha$	$0.05+0.02\alpha$
	邻跨	0.75	$0.60+0.15\alpha^{-1}$	$0.29+0.06\alpha$	$0.27+0.05\alpha$	$0.10+0.06\alpha$	$0.10+0.04\alpha$	$0.03+0.02\alpha$
	隔跨	0.50	$0.40+0.1\alpha^{-1}$	$0.18+0.04\alpha$	$0.17+0.03\alpha$	$0.08+0.04\alpha$	$0.08+0.03\alpha$	$0.03+0.01\alpha$

注：8点、9点的振动位移传递系数按6点、7点相应数值乘以0.8，10点、11点的振动位移传递系数按6点、7点相应数值乘以0.6。

A.0.4 振动荷载作用点位置换算系数 ρ ,可按下列规定计算:

1 当振动荷载作用点在梁上,振动验算点位于A区时(图A.0.4),振动荷载作用点位置换算系数 ρ 可按表A.0.4-1确定;

表 A.0.4-1 振动荷载作用点在梁上的 ρ 值

振动验算点所在区	振动荷载作用点位置		
	1	2	3
A 区	1.40	1.00	1.40

2 当振动荷载作用点在板上,根据振动荷载作用点和振动验算点的位置,对所计算的楼盖进行分区(图A.0.4);其中:C区为振动荷载作用点所在区,A区为距振动荷载作用点(4点、5点、6点)较近一侧的区域,B区为距振动荷载作用点(4点、5点、6点)较远一侧的区域,D区为与C区在同一跨的区域,单跨楼盖无D区。

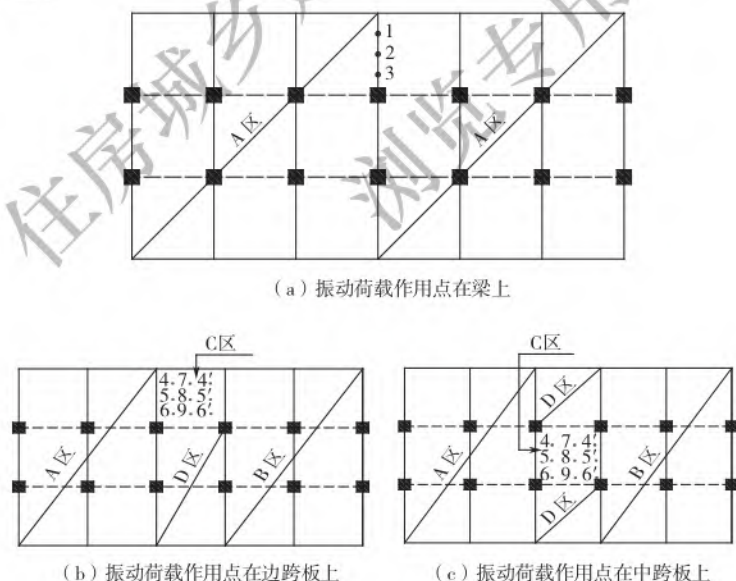


图 A.0.4 楼盖分区图

- 1) 当振动荷载作用点在板上, 振动验算点位于 A 区、B 区、C 区时, 振动荷载作用点位置换算系数 ρ 可按表 A. 0. 4-2 确定;

表 A. 0. 4-2 振动荷载作用点位置换算系数 ρ 值

振动验算点位置	振动荷载作用点位置					
	4	5	6	7	8	9
A 区	1. 80	1. 50	1. 80	1. 10	1. 00	1. 10
B 区	1. 20	1. 10	1. 20	1. 10	1. 00	1. 10
C 区	1. 20	1. 10	1. 20	1. 05	1. 00	1. 05

注: 1 当振动荷载作用点在 4 点、5 点、6 点时, 靠近振动荷载点的主梁, 其振动荷载作用点位置换算系数可采用 A 区的数值乘以 0. 9;

2 当振动荷载作用点在 4' 点、5' 点、6' 点时, A 区与 B 区 ρ 值互换。

- 2) 当振动荷载作用点在板上, 振动验算点在 D 区时, 振动荷载作用点位置换算系数 ρ 可按 A 区、B 区的数值, 由线性插入法计算。

A. 0. 5 振动验算点不在梁中或板中时, 振动位移传递系数 γ 应按下列规定确定:

1 当振动验算点与振动荷载作用点在不同区格时, 可先求出振动验算点所在区格梁中的振动位移传递系数 γ_a 和 γ_c 、板中的振动位移传递系数 γ_b , 再计算振动验算点的振动位移传递系数(图 A. 0. 5);

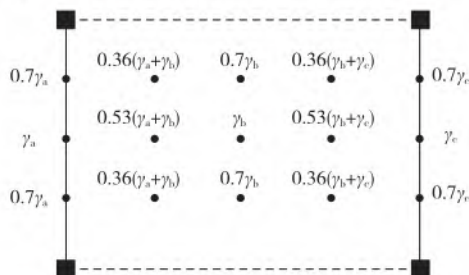


图 A. 0. 5 振动验算点与振动荷载作用点在不同区格时的位移传递系数

2 当振动验算点与振动荷载作用点在同一区格时,振动验算点的振动位移传递系数可按表 A.0.5 计算。

表 A.0.5 振动验算点与振动荷载作用点在同一区格时振动位移传递系数

振动荷载 作用点位置	振动验算点位置							
	4	5	6	7	9	4'	5'	6'
4	1.00	0.69η	0.49η	1.15	0.91	0.56η	0.64η	0.44η
5	0.42η	1.00	0.42η	0.80	0.80	0.38η	0.58η	0.38η
6	0.50η	0.69η	1.00	0.90	1.15	0.44η	0.60η	0.56η
7	0.52η	0.53η	0.38η	1.00	0.80	0.52η	0.53η	0.38η
9	0.38η	0.53η	0.52η	0.80	1.00	0.38η	0.53η	0.52η

注:表中 η 取为 $1.55 + 0.03\alpha - 0.1\alpha^{-1}$ 。

A.0.6 机器振动荷载频率 f_0 小于楼盖第一频率密集区内最低自振频率计算值 f_1 时,振动位移传递系数 γ 可按下列公式计算(图 A.0.6):

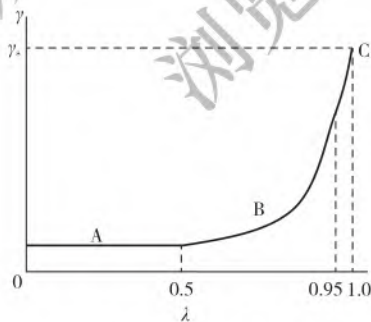


图 A.0.6 γ - λ 关系曲线

当 $0 < \lambda \leq 0.5$ 时:

$$\gamma = 0.133F_{\lambda}\gamma_s \quad (\text{A.0.6-1})$$

当 $0.5 < \lambda \leq 0.95$ 时:

$$\gamma = \frac{0.1\phi_{\lambda}}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (0.1\lambda)^2}} \gamma_s \quad (\text{A.0.6-2})$$

当 $0.95 < \lambda \leq 1$ 时:

$$\gamma = [0.735\phi_{\lambda} + (1 - 0.735\phi_{\lambda})(20\lambda - 19)]\gamma_s \quad (\text{A.0.6-3})$$

式中: λ ——机器振动荷载频率与楼盖第一频率密集区内最低自振频率计算值的比值;

γ_s ——机器振动荷载频率与楼盖第一频率密集区内最低自振频率计算值相同时的振动位移传递系数;

ϕ_{λ} ——调整系数,按本附录第 A.0.7 条的规定确定。

A.0.7 调整系数 F_{λ} 可按表 A.0.7 确定。

表 A.0.7 调整系数 ϕ_{λ}

振动荷载 作用点 位置	振动 验算点 所在跨	振动验算点位置				
		1	2	3	4	5
板 中	本跨		1.00	10.80-10.00 λ	3.80-2.85 λ	3.20-2.25 λ
	邻跨		2.70-1.80 λ	2.90-2.05 λ	1.35-0.40 λ	0.09-0.15 λ
	隔跨		0.82	1.60-0.75 λ	0.55+0.20 λ	1.60-0.75 λ
梁 中	本跨	1.00	12.30-11.5 λ	4.65-3.60 λ	3.30-2.55 λ	
	邻跨	4.90-4.00 λ	3.20-2.25 λ	1.20-0.25 λ	1.10-0.35 λ	
	隔跨	1.25-0.40 λ	0.82	0.50+0.30 λ	0.10+0.60 λ	

注:1 本表计算简图见图 A.0.3;

2 当 λ 小于 0.5 时, λ 取 0.5。

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1)表示很严格,非这样做不可的:

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:

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:

正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;

4)表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

《混凝土结构设计规范》GB 50010

《钢结构设计标准》GB 50017

《工程隔振设计标准》GB 50463

《建筑工程容许振动标准》GB 50868

《建筑振动荷载标准》GB/T 51228