

文章编号: 1674-9057(2012)03-0320-06

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2012.03.006

建筑结构防振设计

茅玉泉, 辛兰琴

(北方工程设计研究院有限公司, 石家庄 050021)

摘要: 建筑结构防振设计涉及到建筑物内部精密设备、仪器、仪表的精密性, 机械设备和操作的工作条件, 工作人员的舒适度, 建筑物的安全和耐久性, 以及不致影响其使用的容许振动防振指标。防振的主要措施: 通过厂址选择, 远离强振动、强噪声、强风沙、强电磁波辐射、有害气体液体等污染和不良环境; 厂区和车间的合理布置, 振源和精密设备相对集中、互相远离, 尽量满足允许振动的防振距离要求; 建筑结构本身要使得其基本频率避开共振区, 构造上要采取局部加强以减弱振动影响; 室内气流控制低速、门窗要求弹性密闭等。若还难以满足允许振动要求, 则需要采取对有害振源的隔振, 或对受振精密设备、仪器、仪表采取隔振(必要时采取同时隔振), 从而满足不同设备、人、建筑物的防振指标要求。

关键词: 振源和受振设备布置; 防振距离; 结构减振构造; 隔振; 防振设计; 防振指标

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

工业厂房中总是需要设有各种加工用机械动力设备, 包括在不同精密性条件下进行加工的各种不同类型精密设备, 还设有进行检测、测试和分析的精密仪器仪表。内外动力设备和精密设备同时使用时, 不可避免的振源设备振动总会对精密设备和仪器仪表使用发生不同程度的影响。其中振动影响可产生如下危害: (1) 对精密设备产品加工和检验产生不同程度的影响, 甚至不能满足精密性要求; (2) 对人的工作学习生活和操作发生影响, 严重时会影响身心健康; (3) 建筑物安全度和耐久性的降低; (4) 过大振动对机械设备本身和加工发生不良的影响。

建筑结构防振设计, 要根据受振对象的精密设备和仪器仪表、机械加工设备本身以及人、建筑物等不同特点需要采取相应的防振限制措施^[1-5], 以满足防振指标的容许振动量值要求: 首先要选择合适的外部周围环境, 基本无严重的有害影响; 其次是合理布置厂区, 内部振源与精密设备的加工、仪器仪表的检验相对集中和相互

远离, 将最高精密性的设备、仪器设在厂区受振动影响最小的区域; 再者, 建筑结构设计时, 要采取有效措施, 通过加强结构刚度, 使结构构件的基本频率避开振源干扰频率, 避免发生共振。当上述3步不能完全满足受振对象的要求时, 要相应采取对振源设备隔振, 或对精密设备仪器隔振, 必要时采取一主一辅同时隔振, 最终满足受振对象期望的容许振动值要求。

1 建筑结构防振设计的目标是满足受振对象的防振指标

建筑结构的防振设计, 主要是使建筑物内的各类受振对象, 应处在无害振动影响的防振指标容许振动微量值控制范围以内^[1]。容许振动的量值随科学技术发展而动态变化, 取决于: 不同精密设备的构造特点、精密性、灵敏度和不同产品精度的允许误差; 人的体质和舒适度要求; 机械加工设备的容许磨损、变形等限制要求; 建筑物对安全度、耐久性的要求和使用寿命。特别在当代

收稿日期: 2012-03-22

作者简介: 茅玉泉(1933—), 男, 教授级高级工程师, 工业民用建筑结构专业, 623747807@qq.com。

引文格式: 茅玉泉, 辛兰琴. 建筑结构防振设计[J]. 桂林理工大学学报, 2012, 32(3): 320-325.

科学技术的发展日新月异，高、精、尖技术的迅猛发展，各类机械设备加工的精密度，产品检验、分析的量和灵敏度等均有不同程度的提高，相应防振指标的容许振动量值也需要调整：目前容许振动位移为 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ ，容许振动速度为 $0.001 \sim 1.5 \text{ mm/s}$ ，容许振动加速度为 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-9} g$ (g 为重力加速度， $1g = 9.8 \text{ m/s}^2$)。随着产品向超高精度、超薄厚度、超高纯度、超微量度发展，相应精密设备和仪器的环境和支承结构要满足“超微量振动、超洁净度”要求，精密设备和仪器的容许振动要求均会相应有所提高。目前精密度正向纳米级方向发展。

2 合理布局内外振源

精密工业应选择在安静和洁净区，要求远离强振源、强噪声、强风沙、强电磁辐射，有害气体、液体等污染区，尽量不选择填土和软弱土等不良的地质条件，避开地震活动的断裂带和液化区。厂区内部和车间布置时，振源区亦要远离精密区。总之合理布局内外振源可以避免今后的不利影响。

2.1 精密工业区的选址

在城镇的发展规划中，应考虑适当调整布局，将城镇的精密工业专门设置一个区，使精密工业区内相对振动影响小，相对较洁净，并在主导风向上方、产生各种污染最小的区域。把振动大、噪声大的工业区和铁路、公路干线均相对远离，把空气、水质有污染的化工工业布局在主导风向的下方(图1)。

精密工业区选址要尽量避开不良地质区域，如河滩、湖泊、海边等软弱土地区，严寒的冰冻地

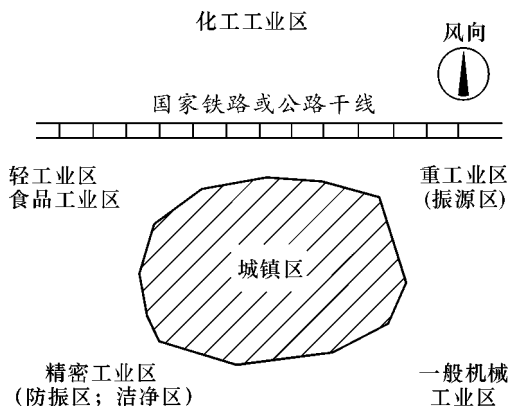


图1 城镇规划示意图

Fig. 1 City planning sketch

基地区，以及引起不均匀沉降后不易对地基进行处理。要尽量避开9度地震区，严禁选址在地震活动的断裂带和饱和砂土的液化区；避开强风暴、沙尘暴和多雷雨地。

2.2 厂区布置

厂区布置时，要把大或较大振源的锻锤、压力机、冲床和空压机相对集中在厂区最后边的振源区，一般机械加工设备中小振源应集中布置在厂区边缘一侧；物流运输繁忙的厂内道路主干线布设在振源加工区一侧，而人流道路布设在另一侧，靠近精密区，精密区布置要远离振源影响区(图2)；对精密度要求最高的设备或仪器，可经现场测试，设置在厂区综合叠加振动影响最小的区域，以便更好地保证产品精度和检验精度。对精密设备附近的道路，宜采用柔性的沥青路面或掺有20%左右废旧轮胎碎块的路面，在车辆通过时能吸收部分振动能量，减少振动对精密设备的影响。

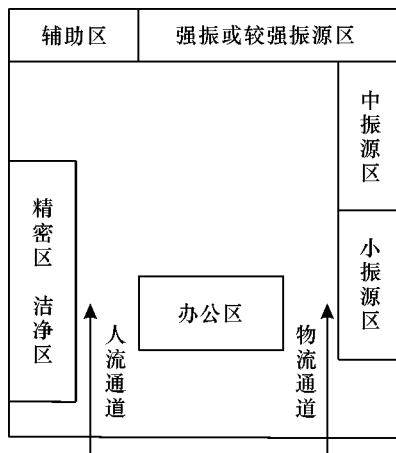


图2 厂区布置示意图

Fig. 2 Plant layout sketch

2.3 车间布置

由于车间的振源直接影响精密设备和仪器，因此需格外加以注意。

2.3.1 单层厂房布置 原则是要把机械设备振源相对集中布置在厂房的一端，而把精密设备和仪器集中布置在另一端，紧邻精密设备布置的振源宜为小型振源设备，且动平衡性能较好、产生振动小。避免大型设备与精密设备混杂在一起布置(图3a)。

2.3.2 多层厂房布置 多层厂房布置时，同样应一端布置振源设备，而另一端布置精密设备，在底层地面上布置大型振动设备，楼层上布置中小型

设备;当确因工艺流程需要在楼层上布置较大型设备时,可单独设构架式基础伸至楼层,并与楼层脱开,或采取隔振;楼层上的中型振源设备布置时,应尽量避免精密设备2~3个开间以上,并不应在上下同一个单元内。振源和精密设备、仪器分别布置在厂房沉降缝的两侧,可使振源振动通过土体阻尼和增加传递距离减弱振动影响(图3b)。

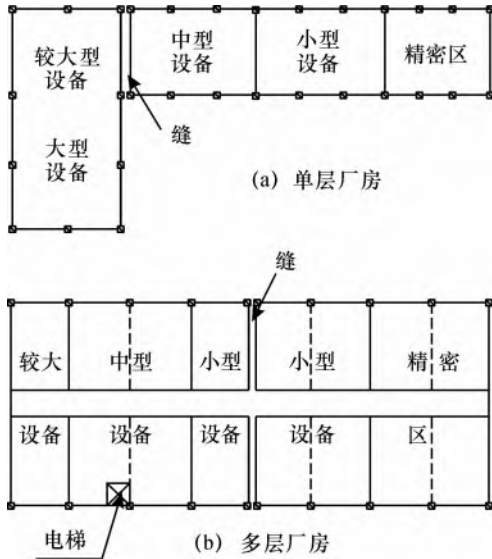


图3 厂房布置示意图

Fig. 3 Workshop design sketch

楼层上的振源设备应尽量设置在楼层刚度较大的板梁上,柱、墙边;将相同设备布置在一起时,其旋转运行方向尽量指向厂房刚度大的方向,并成对、呈反对称布置,避免振动同向、同相位叠加,使之在不同方向、不同相位上互相有所抵消,减弱振动对精密设备的影响。

楼层上的精密设备布置时,也应考虑尽量设在楼层刚度较大的板梁上,柱、墙边,并避开电梯振动影响的范围,以便减小对精密设备的影响。精密设备的支承结构或工作台必须具有一定刚度,避免采用柔性木质工作台造成弹性二级振动放大。

为了减少长管路的能量损失,多层厂房内的空调设备往往靠精密设备很近,其产生的振动影响显著。因此宜在厂房外单独另建空调楼,以便利用土体阻尼和距离衰减,减少振动影响。

多层厂房底层严禁在楼层梁下设悬挂式吊车和柱上设支承式吊车;确因生产需要,可在地面上设与多层厂房完全脱开的小型龙门式吊车,或采用立柱式小型单轨式或梁式吊车、摇臂式吊车。

2.4 振动叠加响应

厂内外的振源影响要考虑不同稳态、瞬态、随机多台振源的振动叠加响应,出现最大振动的叠加响应有两台振动叠加,或最大一台振动加上其他振源振动响应 D_i 的平方和开方($D = (\sum_{i=1}^n D_i^2)^{1/2}$);但只有瞬态振源时,由于瞬时消失,测不到与其他瞬态振源的振动影响,不论多少台可只考虑其中一台振动的最大响应的影响。

2.5 防振距离

防振距离^[1-5]可通过测试确定。表1给出了以往以中等土类粘土为代表,在无减振、隔振措施下,根据实测各类振源的衰减曲线,满足精密设备容许振动速度0.03 mm/s以上的要求而提供的防振距离 L_0 。其中容许振动速度 <0.03 mm/s时,由衰减曲线延伸外推确定。对于其他土类,其与粘土的差别之间的比值关系称土类系数 η ,此时防振距离 L (单位m)按下式计算

$$L = k\eta L_0. \quad (1)$$

根据实测对比,不同土类时的土类系数 η 取值:粘土取1;淤泥质土取2~3;桩基取0.8;松散土(包括卵石、砂层)取0.4~0.6,土体较密实时取小值;坚硬土取0.25~0.35,岩石类取小值。类型系数 k 取值:货列为1;客列为0.7;汽车类型系数 k 见表2;其他类设备 $k=1$ 。

3 建筑结构防振设计构造措施

对精密厂房进行建筑设计时,有影响的振源和有不同要求的精密设备宜相互远离,太近时要调整布置,地基基础和地面要加大、加厚、加强刚度,对结构加强整体和局部刚度,必要时设防振隔离缝,以及密闭控制气流等。

3.1 相互远离

防振设计中,有精密度要求的建筑物要远离厂区有影响的振源,这是最有效的方法;当场地有限时,要通过测试找到厂区内相对振动影响最小的区域。

3.2 加强地基基础和地面刚度

精密厂房和设备基础宜设置在具有较大刚度的地基上,软弱地基要采用硅化或注浆加固地基、复合地基、挤密桩、灌注桩以及预制桩基,必要时多台设备可采用联合基础或筏板基础,增加刚度

表1 防振距离 L_0
Table 1 Vibration prevention distance

振源类型		容许振动速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$										
		0.003	0.005	0.01	0.02	0.03	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	
随 机	国家铁路干线	2 000	1 600	1 150	850	700	560	420	300	250	200	
	列车											
	城市轨道交通(地铁)	800	500	360	260	175	102	80	50	36	28	
	厂区专用线	1 000	760	500	360	280	210	150	100	80	60	
	国家公路	柔性路面	400	300	200	125	100	72	48	31	24	18
		刚性路面	500	380	250	165	130	98	65	43	34	30
	汽车	城市道路										
		柔性路面	300	230	135	88	68	49	31	20	15	11
	刚性路面	340	250	160	105	82	60	38	25	19	14	
	厂区道路	柔性路面	180	130	82	50	40	28	18	11	8.5	6
刚性路面		250	170	110	69	52	37	23	15	11	8	
稳 态	空气压缩机											
	7L-100/8	800	600	470	350	300	240	180	130	110	90	
	18-60/8	600	460	340	240	200	150	110	78	64	50	
	5L-40/8	400	320	220	155	125	96	68	44	35	30	
	4L-20/8	300	240	150	98	80	60	40	27	21	16	
制 冷 压 缩 机	3L-10/8	200	150	100	66	52	38	26	16	13.5	10	
	8ASJ-17	100	82	65	50	42	35	28	21	18	15	
	6AW-12.5	80	65	50	37	32	26	19	15	12.5	10	
	2F、4F-108AS-10	60	48	36	27	23	18	14	10	8.5	7	
其 他 稳 态 振 源	LH48(6FW7B)	40	32	23	17	14	11	8.5	6	5	4	
	8(12)#风机	55(65)	46(56)	36(44)	27(34)	25(30)	20(30)	16(20)	11(14)	8(11.5)	7(9)	
	砂轮机	35	29	22	17	15	12	9.5	7.5	6.5	5.5	
瞬 态	水泵	30	25	18	14	12	10	7.5	5.5	5	4	
	锻 锤	16 t	2 500	2 200	1 700	1 400	1 250	1 100	880	720	640	540
		10 t	2 200	1 600	1 350	1 050	900	740	560	430	370	300
		5 t	1 700	1 360	1 000	630	600	480	360	270	240	180
		3 t	1 200	960	700	500	420	340	250	180	150	120
		2 t	1 000	800	520	420	350	270	190	140	115	90
		1 t	750	600	500	330	300	230	160	120	95	75
		0.75~0.4 t	700	520	360	250	200	150	105	75	60	46
	≤0.25 t	500	380	270	180	150	115	80	55	46	35	
	其 他	≥500 t	750	600	480	350	290	230	170	120	100	80
315		700	550	400	290	240	180	140	100	82	65	
250 t		550	400	340	240	200	150	110	90	78	65	
压 力 机		160 t	500	350	270	190	160	120	85	62	50	40
		100 t	300	280	210	150	125	95	66	48	38	30
		63 t	230	180	120	110	80	66	46	32	26	20
		50 t	240	180	135	88	70	52	33	25	20	15
30 t		220	170	110	75	60	44	30	20	16	12	
≤15 t		200	150	100	65	52	38	26	17	13.5	10	
拉 力 试 验 机		100 t	300	280	180	140	120	100	75	58	50	40
	30 t	220	170	130	96	80	65	50	38	32	26	
	牛头刨 B665(B690)	100(80)	80(65)	90(60)	46(68)	38(56)	32(46)	24(34)	18(26)	15(22)	12(18)	
龙 门 刨	80	65	50	36	32	25	20	15	12	10		

表2 不同类汽车调整系数 k

Table 2 Adjustment coefficient k of different automobiles

车型	≥8 t 车	4 t 车	大轿车	中型 卡车	面包车	小型 卡车	小轿车
k	1.3	1	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3

度和质量,有利于减小基础的弹性变形和振源的振动,经土体阻尼和距离衰减后,减少对精密设备的影响。精密间的地面宜适当加厚,厚度应为400~500 mm,可提高地面的整体刚度和压重,抵抗和压制由外界传来的有害振动的影响。

3.3 加大结构的整体刚度

对厂房结构、楼层和平台等支承结构进行动力设计时,要加强结构的整体刚度,增加竖向和水平支撑,适当加大支承结构断面和刚度,使其竖向和水平向的固有频率提高到与振源干扰频率远离,避免接近和共振,从而减少振源振动,减少对精密区的振动影响。加大支承结构的刚度,可采用加大、加厚板、梁、柱和基础的断面,或减小构件的跨度,达到减少构件的变形和振动量。

3.4 增加结构的局部刚度

在厂房内部的振源区和精密区,必要时对其支承结构部分局部加厚或增设防振墙或加设支撑,增加结构的竖向和水平纵横向的局部刚度,以便减少振源处的振动和振动输出,减少外界振动输入对精密设备的影响。增加局部刚度时,在地震区宜对称设置,以免地震时发生不利的扭转影响。

3.5 设缝、封闭和控制气流

精密厂房结构设防振缝,主要是为了隔离振动的直接刚性传递。设防振缝密缝时,不能使用具有一定刚性的物体封缝,应采用柔性泡沫等吸振材料。对厂房内外的门窗应采用防风密闭,嵌固柔性缓冲材料,以免开关门窗时和风吹动,发生撞击性振动。室内气流的控制需采用低速送风,限制空气密度变化率在10%以内,必要时可设置循环高效过滤器装置,以便过滤空气内含有的过量尘埃颗粒,避免送风时引起室内空气流动变化过大,减少波动和尘埃浮动等对精密设备产生的影响。

3.6 调平和更换设备

当振动设备使用年限已久,由于旋转轴支承磨损、弯曲而增大偏心,使得振动增加,要及时检修进行调平;无法调平时,要将有影响的设备更新。当原有设备选用时没有注意其动静态平衡,导致平衡性能较差,要更换、更新,更换时要选用动静态平衡性能好的设备,减少振动对精密设备的影响。

3.7 错开使用时间和迁移

若振源振动(包括车辆)对精密设备有影响又无法避开,应错开精密设备使用时间;当不能错开使用时,要设法迁移到无有害振动影响的区域。

4 隔振

当建筑结构在设计时采取合理选址和构造措施,以及厂区内外和车间内的振源区、精密区合

理布置后,尚不能满足精密设备和仪器精密度的容许振动要求;或在合理布置振源区和精密区时受到某些条件的限制而无法实现,均需要对振源设备或受振的精密设备和仪器分别采取隔振,必要时振源设备和受振精密设备均同时采取隔振。其隔振系统尽量使质心点、刚心点、扰力作用点三点合一,无法满足时要使其偏心距尽量的小。隔振设计应遵照现有国家标准《隔振设计规范》(GB 50463—2008)。

4.1 振源设备隔振

振源设备隔振,就是积极主动的减少振源振动的输出,减少对环境的振动影响。一般振源设备的隔振采用支承式,要求选用刚度低、强度高、阻尼大,但竖向和水平向阻尼比不应小于0.05,隔振效率要求达80%以上,或能满足精密设备对周围环境振动和支承结构的容许振动要求。振源干扰频率较高时,可采用橡胶垫、橡胶隔振器、叠层钢板橡胶隔振器;振源频率较低时,采用钢弹簧加阻尼(例铅芯)装置、阻尼钢弹簧隔振器或空气弹簧隔振器。对以水平振动为主的设备,可采用水平止振板结构。隔振器可尽量选用商品隔振器,也可自行设计制造,但均应进行检测,保证隔振器性能指标符合要求,且便于安装、使用和维护。

管道水平设置时,采用悬挂式隔振,竖向设置时采用支承式隔振。管道内输送的气体或液体,其波动的频带较宽、频率较高时,可采用橡胶、泡沫等弹性吸振垫隔振,亦可采用钢弹簧隔振;管道与设备之间的连接应采用柔性吸振式连接管道。

4.2 受振设备隔振

受振设备隔振,就是为了消极被动的减小外界振源输入的有害振动,使之满足受振设备的容许振动要求。一般采用支承式隔振,当外界影响振源频率较高时,可采用橡胶类隔振器;当外界振源频率较低时,可采用阻尼弹簧隔振器和空气弹簧隔振器。要求隔振系统阻尼比在0.08以上。对大型超长型设备台座,隔振时要考虑设备台座弹性变形的影响;当受振设备具有内扰力时,同时要考虑对隔振的影响;受振设备隔振后,仍无法达到精密设备容许振动要求,则需要进行两级有效隔振,或采用自带式隔振装置,必要时精密

设备本身应设有主动振动控制装置。若精密设备运行中其重量和重心发生变化, 该设备应选用带有倾斜校正机构的自动限倾装置。

5 精密设备使用管理中的调整和检修

在生产使用过程中, 要随时检查振源对精密设备的影响, 观察是否满足其容许振动要求, 检查隔振的效果。不能满足时, 要调整有关防振措施, 调整振源或精密设备的相对位置; 无法调整布置时, 对有影响的振源、有关精密设备加工, 仪器、仪表检验分析, 应互相错开使用时间、避免干扰。增加或改进建筑结构防振措施时, 地基可采用灌浆法、桩基法或化学法加固地基, 增大振源设备基础的刚度和质量, 将独立的振源设备基础改造成联合基础。调整振源设备动平衡时, 要检查清除其轴承变形、因磨损而增大的间隙, 达不到要求时, 要更换设备, 采用动平衡性能好的设备。调整精密设备时, 要将其移到厂区振动最小的区域或采取相应的隔振。

6 结束语

随着当今科学技术和生产力高速发展, 精密设备和仪器仪表的精度、建筑的安全度和耐久性

不断提高, 均要求环境振动处于较微小的状态, 必要时要采取防振、隔振措施, 使之满足其容许振动要求。同时要考虑到产品精度的不断提高, 相应检验、量度的要求提高, 以及未来周边环境和振源设备的变动, 也需要适当考虑对容许振动变化后的新的要求。相反, 有些产品本来要求不太高, 而容许振动指标定得过高, 通过实践确认后相应降低一些。

实际上容许振动量值随着需要是动态变化的, 而容许振动数值系列幅度范围是较大的, 要做到“该高则高、可低则低”, 还需要通过实践逐步完善, 根据产品精度变化, 在考虑防振、隔振措施时, 要作相应调整, 使之能更好地符合具体受振对象容许振动的需要。

参考文献:

- [1] 茅玉泉. 建筑结构防振设计及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [2] GB 50463—2008, 隔振设计规范 [S].
- [3] 中华人民共和国国家标准《建筑工程容许振动标准》(报批稿) [S]. 2012.
- [4] 中华人民共和国国家标准《电子工业防微振工程技术规范》(送审稿) [S]. 2012.
- [5] GB/T 50452—2008, 古建筑防工业振动技术规范 [S].

Vibrationproof Design for Building Structures

MAO Yu-quan, XIN Lan-qin

(North Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Vibrationproof design for building structures is important esp for precision equipment and instruments/meters in the building. Working conditions of mechanical equipment and operators, the safety and durability of buildings as well as vibrationproof index are required for allowable vibration. For the vibrationproof of building structures, such measures shall be taken: (1) Selecting proper site location, keeping away from regional intensified vibration, high level of noise, strong wind/sand, strong electromagnetic radiation, harmful gases/liquids, pollution and poor environment; (2) Design in plant/workshop layout rationally, grouping the vibration sources and precision equipment relatively and respectively and meeting the requirements of vibrationproof distance; (3) Consideration for the building structures, avoiding resonance zones; (4) Structural design in reinforcing the structure, keeping low indoor air speed and ensuring good tightness of doors/windows. If the vibrationproof requirements can not be satisfied, vibration isolation measures shall be taken to the vibration sources or to the precision equipment and instruments/meters subjected to vibration. All these measures are intended to meet the vibrationproof index for different precision equipment, personnel and buildings.

Key words: layout of vibration sources and equipment subjected to vibration; vibrationproof distance; vibration reduction and isolation of structures; design for vibrationproof; vibrationproof index