

隔振设计手册

中国船舶工业总公司第九设计研究院
兵器工业部第六设计研究院
航空工业部第四规划设计研究院 编
兵器工业部第五设计研究院
电子工业部第十一设计研究院

中国建筑工业出版社

隔振设计手册

中国船舶工业总公司第九设计研究院
兵器工业部第六设计研究院
航空工业部第四规划设计研究院 编
兵器工业部第五设计研究院
电子工业部第十一设计研究院

中国建筑工业出版社

本手册目的在于提供隔振设计所需的数据资料、设计计算方法和工程实例。全书内容包括隔振设计总的原则、精密仪器仪表和设备的允许振动、动力设备的扰力、地面振动的衰减、积极隔振、消极隔振以及隔振材料和减振器等七章。各章均有大量数据图表和工程实例。可供土建专业师生及有关工厂防振设计工程技术人员参考使用。

隔 振 设 计 手 册

中国船舶工业总公司第九设计研究院
兵器工业部第六设计研究院
航空工业部第四规划设计研究院 编
兵器工业部第五设计研究院
电子工业部第十一设计研究院

★
中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

★
开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 21 字数: 508 千字

1986年7月第一版 1986年7月第一次印刷

印数: 1—12,300册 定价: 5.75元

统一书号: 15040·4967

前 言

八十年代以来，我国工业生产和科学技术以崭新的面貌迅速发展，老厂改造，设备更新，精密仪器和设备大量增加，而且精度不断提高，因而对防振提出了更高的要求。为了减少各种动力设备和地脉动对精密仪器和设备的影响，必须进行严格的隔振设计，以满足使用要求。我国迄今没有隔振设计规范，又缺乏综合的隔振设计资料，为方便广大设计人员，我们编写了这本手册。

手册中对隔振设计作了概括性的叙述；收集汇总和补充了精密仪器和设备的允许振动、各类动力设备扰力的计算公式和常用的扰力值；根据大量地面振动衰减的实测资料，提出了地面振动衰减的经验公式；提供了一些积极隔振和消极隔振的计算方法、设计步骤、构造做法，以及一定数量的隔振设计例题和工程实例，并详细介绍了定型生产的减振器、油阻尼器和隔振材料的动力性能和使用条件。

手册内基本上采用了我国法定计量单位制，只在部分产品规格及已采用的设计方案介绍中仍保留旧单位制，但在文前主要符号介绍中附上新旧单位的对照，以供参考。

本手册的编写工作由中国船舶工业总公司第九设计研究院和兵器工业部第六设计研究院负责。参加手册编写的有中国船舶工业总公司第九设计研究院刘霁帆（第一章，第七章第一、二、三、六、七、八、九节）、邵长荣（第二章第一～三节，第六章第一～七节），兵器工业部第六设计研究院茅玉泉（第三章第一、三节，第四章，及附录Ⅱ）、黎益仁（第三章第二节），兵器工业部第五设计研究院潘复兰（第五章及附录Ⅲ），航空工业部第四规划设计研究院赵贞福（第六章第八～十一节，第七章第四、五节），电子工业部第十一设计研究院宋盛余（第二章第四节，并校对了第五、六章部分计算公式）。

全书由邵长荣、茅玉泉和刘霁帆汇总。

编写过程中，经多次讨论修改，广泛征求意见，石沅同志对第五、六、七章，张宁华、王锡康、杨先健同志对第四章提出了宝贵的修改建议，并得到参加测试、制图和描图等工作的同志大力帮助，谨在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，缺点和错误难免，请读者指正。

编者

主 要 符 号

符号	物 理 量	GB 单位	CGS单位
A	体系振动振幅	μm	μ
A_0	地面振动振幅	μm	μ
$[A]$	允许振动振幅	μm	μ
A_r	距离振源 r 处的 振动振幅	μm	μ
a	振动加速度	mm/s^2	mm/sec^2
a_0	地面振动加速度	mm/s^2	mm/sec^2
$[a]$	允许振动加速度	mm/s^2	mm/sec^2
c	阻尼系数	$\text{N}\cdot\text{s/cm}, \text{kg/s}$	$\text{kg}\cdot\text{sec/cm}$
c_c	临界阻尼系数	$\text{N}\cdot\text{s/cm}, \text{kg/s}$	$\text{kg}\cdot\text{sec/cm}$
D	阻尼比	无量纲	无量纲
d	直径	$\text{m}, \text{cm}, \text{mm}$	$\text{m}, \text{cm}, \text{mm}$
E	动弹性模量	N/cm^2	kg/cm^2
E_s	静弹性模量	N/cm^2	kg/cm^2
E_0	打击能量	$\text{kN}\cdot\text{m}$	$\text{T}\cdot\text{m}$
e	撞击回弹系数	无量纲	无量纲
	偏心距	cm, mm	cm, mm
f	体系自振频率	Hz	Hz
f_0	强迫振动频率	Hz	Hz
G	动剪切模量	N/cm^2	kg/cm^2
G_s	静剪切模量	N/cm^2	kg/cm^2
g	重力加速度	9.8m/s^2	9.8m/sec^2
I	截面惯性矩	cm^4	cm^4
J	质量惯性矩	$\text{kg}\cdot\text{cm}^2$	$\text{kg}\cdot\text{cm}\cdot\text{s}^2$
k	弹性体动刚度	$\text{N/cm}, \text{kg/s}^2$	kg/cm
K_s	弹性体静刚度	$\text{N/cm}, \text{kg/s}^2$	kg/cm
K_ϕ	弹性体动角刚度	$\text{N}\cdot\text{cm}, \text{kg}\cdot\text{cm}^2/\text{s}^2$	$\text{kg}\cdot\text{cm}$
k	系数	无量纲	无量纲
$M(t), M$	干扰力矩	$\text{N}\cdot\text{cm}, \text{N}\cdot\text{m}$	$\text{kg}\cdot\text{cm}, \text{kg}\cdot\text{m}$
m	质量	kg	$\text{kg}\cdot\text{sec}^2/\text{cm}$
N, n	数量	无量纲	无量纲
n_0	转速	r/min	次/分
$P(t), P_0$	干扰力、干扰力幅	N, kN	kg
p	压力	N/cm^2	kg/cm^2
R	半径	cm, mm	cm, mm
$R(\tau)$	相关系数		
r	半径	cm, mm	cm, mm
r_0	当量偏心距	mm	mm
S	面积	$\text{m}^2, \text{cm}^2, \text{mm}^2$	$\text{m}^2, \text{cm}^2, \text{mm}^2$
$S(f_0)$	功率谱		
T	周期	s	sec

目 录

前言

第一章 隔振设计概述 1

- 一 厂址选择和总体布置 1
- 二 隔振措施 2
- 三 防振措施 2

第二章 精密仪器和设备的允许振动 6

- 一 概述 6
- 二 确定允许振动的方法 8
- 三 精密仪器和设备的允许振动表 10
- 四 精密机床的允许振动 12

第三章 动力设备的扰力 13

- 一 旋转运动设备 13
- 二 旋转往复运动设备 42
- 三 撞击运动设备 71

第四章 地面振动衰减 80

- 一 影响地面振动衰减的因素 80
- 二 交通运输车辆引起的地面振动衰减计算 80
- 三 压缩机引起的地面振动衰减计算 85
- 四 锻压设备引起地面振动衰减的计算 97
- 五 防振距离 105
- 六 目前国内外地面振动衰减的几个公式 107

第五章 积极隔振 108

- 一 积极隔振设计资料 108
- 二 隔振方案的选择 108
- 三 支承式隔振体系的计算假定和基本方程 109
- 四 自振频率计算公式 110
- 五 简谐干扰力作用下隔振台座计算公式 116
- 六 锻锤和冲床的隔振计算 121

七 隔振设计步骤 123

八 积极隔振设计例题和工程实例 126

第六章 消极隔振 161

- 一 消极隔振设计资料 161
- 二 消极隔振设计方案 161
- 三 支承式隔振体系的计算假定和基本方程 163
- 四 地面振动特性 164
- 五 隔振计算公式 166
- 六 隔振设计步骤 177
- 七 隔振设计例题 178
- 八 悬挂式隔振体系的计算 196
- 九 悬挂式隔振体系设计 201
- 十 悬挂式隔振体系的构造方案 202
- 十一 悬挂式隔振设计例题 204

第七章 隔振材料和减振器 209

- 一 概述 209
- 二 动力特性测定方法 209
- 三 橡胶减振块和橡胶制品减振器 210
- 四 钢弹簧减振器 224
- 五 油阻尼器 240
- 六 软木 248
- 七 乳胶海绵 252
- 八 玻璃纤维 254
- 九 空气弹簧减振器 256

附录 I 部分风机和电机的质量和质心 264

附录 II 地面振动衰减实测资料 288

附录 III 常用冷水机组、通风机、水泵隔振台座图 309

参考文献 328

第一章 隔振设计概述

工厂设计不论是新建还是改建，经常遇到精密仪器和设备的防振问题。因此，设计中，应在选择厂址、厂区总体布置和车间工艺布置时，避开有影响的振源，并尽可能利用有利地形，减少振动影响。在某些情况下，只要采取简易防振措施就能满足要求。但在多数情况下，则需要采取专门的积极隔振或消极隔振措施，才能满足精密仪器和设备的正常使用。不论采用何种措施，都必须做到技术可靠，经济合理。

一 厂址选择和总体布置

（一）本手册重点放在防微振设计方面。进行隔振设计前，必须对振源作详细了解，并充分考虑可能对精密设备有较大振动影响的一些主要振源，如锻锤、冲床、通风机、冷冻机、空压机、汽车和火车等。第三章叙述了对这些振源扰力的计算方法，列出了部分动力设备的扰力值，设计时可直接选用。对其它一些动力设备的扰力值，亦可参照提供的方法计算。选用动力设备时应尽量采用动、静平衡性能好、扰力小、转速高的动力设备。防微振设计时，尚应注意地面脉动的影响。地球表面在任何地方都始终处于运动状态，由海浪、潮汐、台风、大气环流、地球自转速率的改变，以及地壳内部的变化等而引起的地表振动，称为地面脉动。地面脉动的卓越频率除某些山区为20~50赫兹外，大多在2~5赫兹左右，振幅为0.1~2.0微米，因此对第二章表2-3和表2-4中的一、二级精密仪器和设备，地面脉动的影响是不可忽视的，设计中应予考虑。

（二）厂址选择时，应将精密仪表厂房远离铁路和公路交通干线，以及其它强烈振源。防振距离可按第四章有关公式计算，或参照防振距离表4-10布置，避免受振动的影响，特别是作为撞击振源的大型锻锤和作为线振源的火车，其振动能量大，传播距离远，对精密仪表的影响，是一个必须考虑的重要因素。对防振要求较高的精密仪器设备，尚应考虑远离由于海浪和台风影响而产生较大地面脉动的海岸，据国外资料报导，在同样地质条件下，海岸边地面脉动幅值要比距海岸200米处的脉动幅值大三倍以上，应予充分注意。

（三）厂址应选择在地质条件好，地下水位低的地区。例如，坚硬的火成岩和结晶质基岩的地脉动，仅为沉积岩和松散沉积层的地脉动的30~50%，振动周期亦较短（约0.1秒左右），对隔振比较有利。地下水是振动波传播的有效介质，如地下水位较高，对隔振是不利的，同时还要根据精密设备的允许振动控制指标（按振幅控制，还是按振动加速度控制）来选择地质条件。基岩振动的地脉动幅值较小，但频率较高，而软粘土比基岩脉动幅值要大，但频率较低；从满足振幅来说，基岩比软粘土较有利；从满足振动加速度来说，基岩比软粘土不利。究竟应选用哪一种地质条件，要看隔振台座由哪一种防振指标来控制，再通过具体分析决定。

（四）厂区总体规划时，应将振动较大的车间（如空压站和锻工车间等）布置在厂区的边缘地段，振动较大的设备（如冲床、刨床等）则合理地布置在距精密仪器和设备较远

的地方,并尽可能利用自然地形,如天然沟渠、河道和地形高差等,以减少振动的影响。车间布置时,应与工艺共同研究,将防振要求较高的精密设备相对集中,并与振源拉开一段距离,以减少相互干扰。有时,受厂区某些条件和使用功能的限制一些精密设备与振动设备需要布置较近。例如精密车间有恒温和恒湿的要求,为了减少空调设备能量的消耗,一般都将空调机房设在精密车间的附近等。这时候,这些冷冻机和通风机等动力设备的振动将会对精密设备产生影响。上述振源对精密设备的影响均可按第四章地面振动衰减公式的计算或参照表4-10防振距离布置;有条件时也可进行现场实测,确定布置距离。如距离无法满足,地面振动仍大于精密仪器和设备的允许振动时,应采取隔振措施。

二 隔 振 措 施

(一)隔振分两类:一类为积极隔振,另一类为消极隔振。所谓积极隔振,就是为了减少动力设备产生的扰力对支承结构和生产人员的有害影响,对动力设备所采取的隔振措施(即减小振动的输出)。所谓消极隔振,就是为了减小支承结构的振动对精密仪器和设备的影响,对精密设备采取的隔振措施(即减小振动的输入)。无论是积极隔振还是消极隔振,其主要方法是在动力设备或精密设备与支承结构之间设置减振器或减振材料。减振器可选用第七章所列的定型产品。隔振设计时必须经过计算,进行多方案比较,选择最佳方案。不经计算而采取隔振措施,有时会使隔振效率不高或不经济。处理不好,还可能会产生共振,不仅无益,反而有害。

(二)隔振设计的目的,在于采取一定的隔振措施后,使动力设备和精密仪器设备的振动控制在允许的范围内。动力设备采取积极隔振措施后,既要满足一定的隔振效果,又必须保证动力设备自身的振动小于允许振动值。动力设备的积极隔振可按第五章设计。精密仪器和设备的消极隔振可按第六章设计。消极隔振应根据被隔振设备对振动敏感性的不同要求,进行振幅或振动速度或振动加速度的计算,选择不同的振动参数,以保证其正常使用。采取隔振措施时,应注意选择合适的阻尼。隔振材料或减振器阻尼的测定方法和阻尼值的选用见第七章。

三 防 振 措 施

一般情况下,在设计中采取一些防振措施,而不用隔振元件,就能达到减小振动的目的。根据具体情况,采用的有效措施如下。

(一)将动力设备和精密仪器分别置于楼层中不同的结构单元内,如设置在伸缩缝(或沉降缝),抗震缝的两侧,这样振源的传递路线要比直接传递长得多,对振动有一定隔离效果。缝的宽度除应满足工程上的要求外,不得小于5厘米;缝中不需要其它材料填充,但应采取弹性的盖缝措施。

有吊车的厂房附设有对防振要求较高的控制室时,控制室应与主厂房全部脱开,避免吊车开动或刹车时振动直接传到控制室,影响使用。据调查,某厂初轧车间的全钢结构厂房,内设五台30吨硬钩吊车。主厂房边附设一控制室(电子计算机房),其屋面泛水和动力管道与主厂房相连。当三台吊车工作时,在同一标高泛水板的两侧测得控制室的振幅为

723微米，主厂房的振幅为419微米，将泛水板拆除后，控制室的振动由723微米降为 91 微米。这说明泛水板是传递振动的主要因素。

（二）多层厂房内的动力设备或精密仪器和设备，一般应尽可能布置在底层或地下室。布置在楼层上时，应尽可能放在刚度较大的柱边、墙边或主梁上。经对某厂有 8 吨冲床在楼面工作时的实测，主梁上的振动曲线如图1-1 a 所示，板中的振动曲线如图1-1 b 所示；主梁上的振动约为板中振动的20%左右。

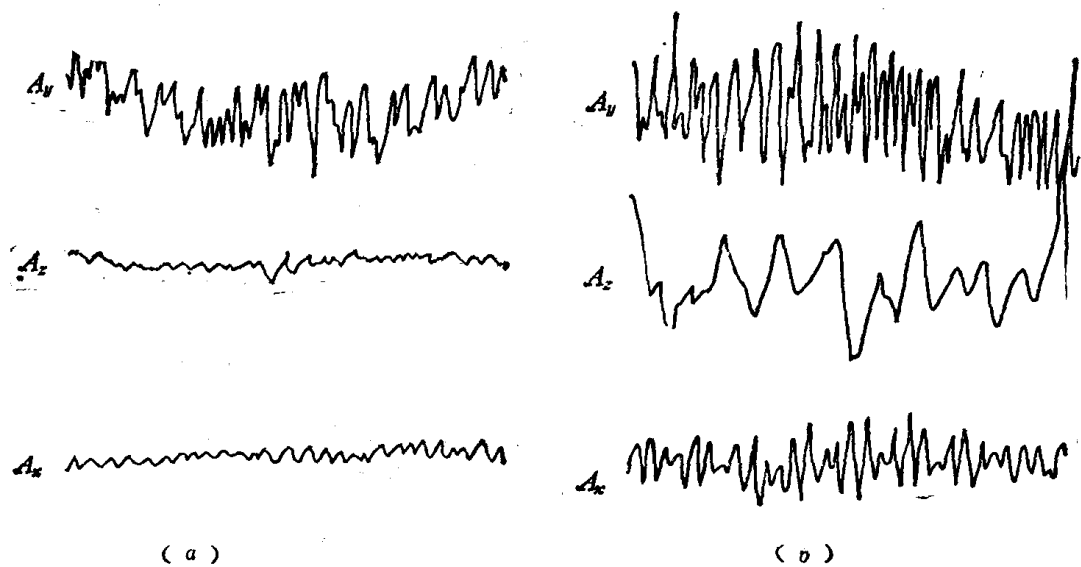


图 1-1 主梁和板中振动曲线
(a) 主梁中振动曲线；(b) 板中振动曲线

（三）楼层上布置动力设备时，要注意使其产生扰力的方向尽量与结构刚度较大的方向一致。某厂为三层钢筋混凝土框架结构，二层设有产生水平扰力的TY401型和PT402型印刷机共26台，三楼设有产生垂直扰力的TR80/A型印刷机31台。二楼中16台设备工作时，操作人员感到厂房振动很大，产生恐惧心理，被迫暂时停产。通过对厂房的实测，证明厂房横向振动是由二楼设备水平扰力沿厂房横向作用引起的，它使厂房横向振幅达300微米，影响结构强度；而纵向振幅不超过20微米；垂直向振幅最小，不超过10微米。将二楼产生水平扰力的12台印刷机转动90度方向，使水平扰力与厂房纵向一致后，测得厂房横向振幅为 82 微米，减小了70%左右，从而能正常使用。

（四）注意精密室的地坪设计。为了避免外界传来的振动和室内工作人员的走动影响精密仪器和设备的正常工作，有时为了使用上的灵活性，工作台要经常移动，因此一般采用混混凝土坪。必要时可采用厚度≥500 毫米的混混凝土坪。当 必须采用木地板时，应将木地板用热沥青与地坪直接粘贴，不应采用在木搁栅上铺木地板的架空作法。否则由于木地板刚度较小，操作人员走动时产生较大的振动，对精密仪器和设备的使用是很不利的。整体地坪的做法见图1-2。

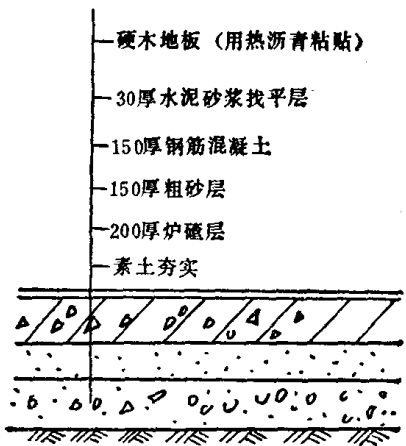


图 1-2 整体地坪做法

(五) 精密仪器和设备应采用钢筋混凝土制作的水磨石工作台，以保证工作台本身具有足够的刚度和质量，不宜采用刚度小、容易晃动的木制工作台。图1-3 a 为水泥地坪上的振动曲线，图1-3 b 为木制工作台上的振动曲线。由图可见，木制工作台上的振幅，除垂直方向外，振动速度和加速度都大大地增大。

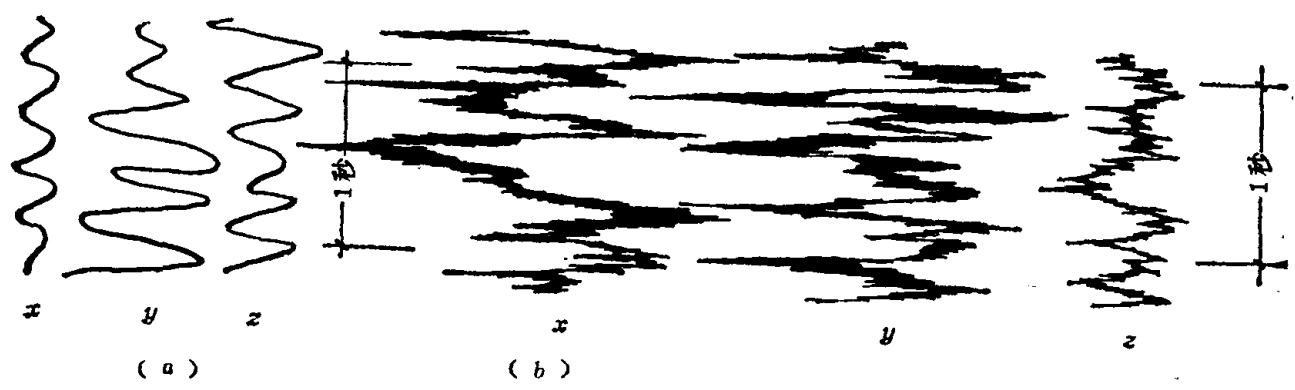


图 1-3 水泥地坪和木质工作台上的振动曲线
(a) 水泥地坪上的振动曲线；(b) 木质工作台上的振动曲线

(六) 管道采用柔性连接和弹性支承，可以减少振动的影响。如通风机的风管与风机的连接处，应采用柔性帆布软管接头，以防止振动的传出；风管与厂房支承处应与墙体脱开，并垫以弹性材料，以减小墙体的振动，其作法见图1-4。

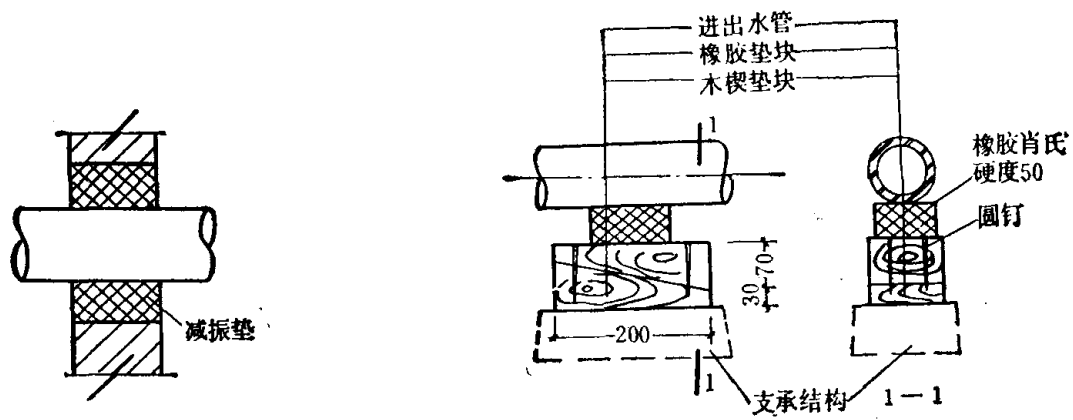


图 1-4 管道穿墙时的减振措施

图 1-5 水管的减振措施

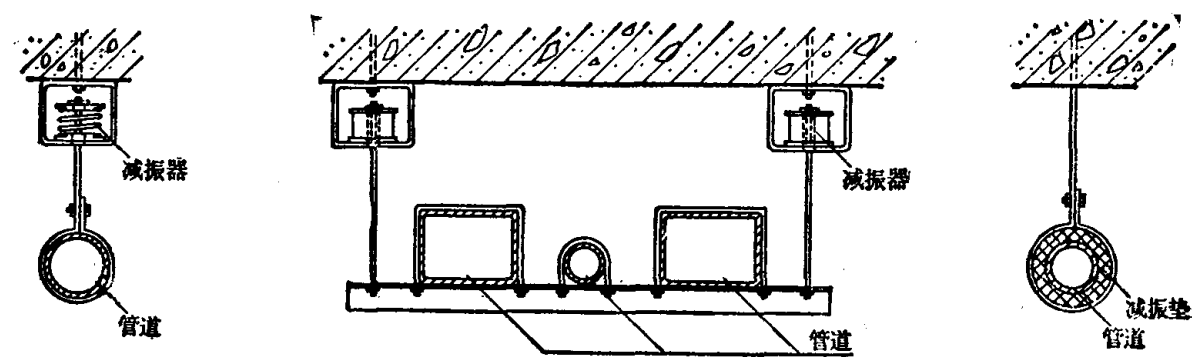


图 1-6 水平管道减振吊架

对于空调车间内水泵的进出水管道，由于水泵扰力和水流动而引起的振动，在水管与支承结构之间设置弹性橡胶垫，有明显的隔振效果，作法见图1-5。

（七）管道振动是由于动力设备隔振后，台座的振幅增大以及输送介质（气体、液体）的扰动而产生的。为了减少管道振动对周围建筑物的影响，应每隔一定距离设置减振吊架或减振支座。水平管道减振吊架和减振支座见图1-6和图1-7，垂直管道减振支座见图1-8。减振器如JG型、TJ₁型及VH型减振吊架等，可按第七章所列产品选用。

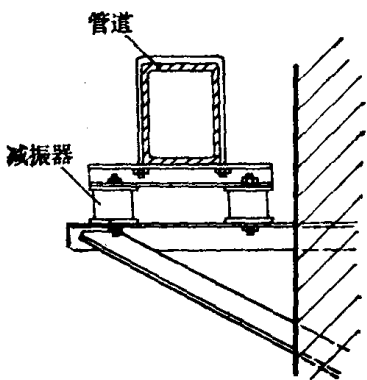


图 1-7 水平管道减振支座

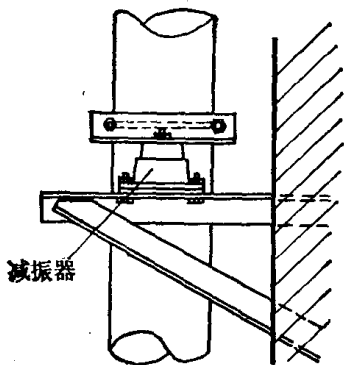


图 1-8 垂直管道减振支座

（八）对冲击振动或大于30赫兹的振动，做防振沟有一定的效果。试验资料表明，当沟深小于表面波长的30%时，对低频振动，几乎没有什么效果。一般在精密设备基础四周设置与基础同样深度，宽100~150毫米的防振沟，沟内不填或填以松散材料，也可作为一种防振措施使用。有条件时，利用地下连续墙作为隔振屏障，能起一定的防振作用。

（九）在动力计算中，改变地基刚度或楼层刚度，调整基础或楼层等支承结构的自振频率，避免共振。一般要求与干扰频率错开30%以上。改变基础和楼层支承结构自振频率的方法，可采用联合基础、打桩、换土、加固地基或调整板梁跨度及断面尺寸等方法来达到。

在隔振设计中，上述防振措施均应结合工程条件，灵活选用。此外，还可采取其它的防振措施。

第二章 精密仪器和设备的允许振动

一 概 述

精密仪器和设备的允许振动是一个较复杂的问题。目前国内外提出的一些精密仪器和设备的允许振动（有的称防振指标），除文献[1]外，大部分是实际工作状态时的振动或调查分析的结果，虽有一定的参考价值，但并不是真正的允许振动。同时，随着科学技术的发展，精密设备的精度日益增高（如电子工业必须的精缩机，医卫等系统必须的大倍率显微镜），种类越见繁显。因此，本章在收集和整理国内外有关精密仪器和设备的允许振动的基础上，又对电子显微镜、精缩机、光刻机、激光定位光栅刻线机等一些重要设备做了实测和分析，提出了一些精密仪器和设备的允许振动值。

（一）仪器和设备的允许振动，是指保证其正常工作条件下，设备的支承结构（台座或基础）上表面的极限允许振动考虑一个安全系数后的振动值。图2-1是200毫米光电光波干涉仪极限允许振动的实验结果。实线下面阴影部分为极限允许振动区，实线上面为不允许振动区。虚线下面为考虑安全系数后的允许振动区。

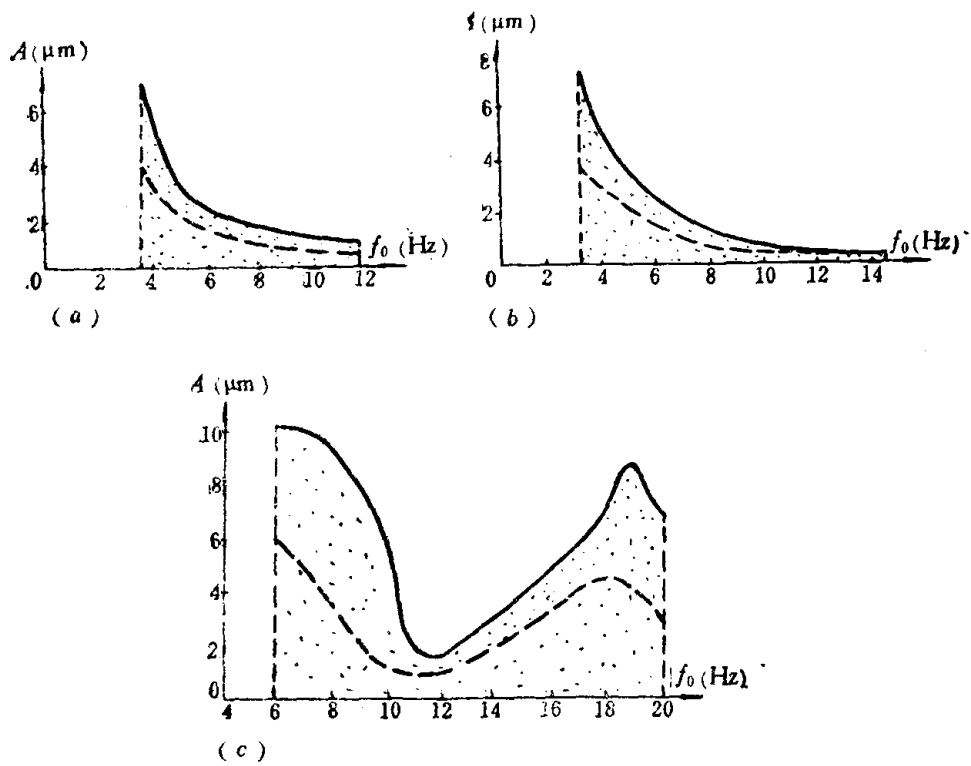


图 2-1 干涉仪允许振动曲线

（a）垂直于标尺方向水平振动；（b）平行于标尺方向水平振动；（c）垂直方向振动

（二）影响精密仪器和设备允许振动的因素很多，主要有以下几个方面：

1. 振动方向不一样，允许振动特性曲线和数值就不同；如图2-1中平行于标尺水平方

向和垂直于标尺水平方向的允许振动曲线基本相似,但垂直方向(图2-1 c)却差别很大。允许振动的数值以标尺水平方向为最小。因此,这一方向为设备允许振动的控制方向。

2.振动的频率与设备的允许振动关系很大;通常不同的干扰频率就有不同的允许振幅。如图2-1 b,干扰频率为3赫兹时,极限允许振幅为8.6微米;干扰频率为10赫兹时,极限允许振幅为0.6微米。通过对精密仪器和设备的允许振动测定和分析,可以证实:允许振动的物理量可能是位移,也可能是速度,以加速度控制是比较少的。

3.设备每一工作过程所需持续时间的不同,允许振动的差异较大;持续工作时间长,则允许振动小。

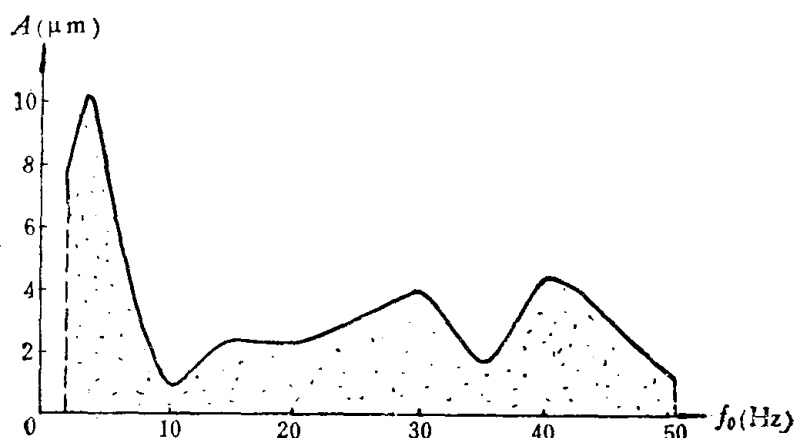


图 2-2 TG328B型天平允许振动

4.工作原理相同的同一类型的设备,其允许振动的物理量是相同的,但具体数值不一样。不同工作原理和精度的设备,允许振动的特性是不同的。如图2-2的特性曲线为天平的允许振动。它与干涉仪的特性曲线差别很大。

(三)精密设备的加工精度或测试精度,与允许振动是有本质区别的,两者不能混淆。所谓设备的精度是指其在工作过程中所能达到的最高精确程度。如图2-1的200毫米光电光波干涉仪的计量精度为 ± 0.03 微米,仅为允许振幅百分之二以下。在通常情况下,精度越高允许振动越小。如图2-3为干涉仪测量精度与振动速度关系曲线,速度越大,误差越大,即精度越低。

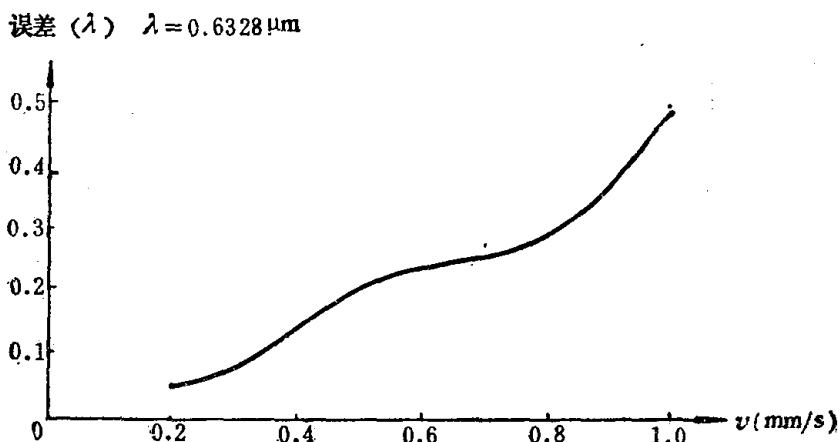


图 2-3 测量精度与振动速度关系曲线

(四)设备支承台座的振动必须小于设备的允许振动,否则其加工精度或测试精度,以及使用寿命会受到影响。若台座的振动大于设备的允许振动,这是不许可的;需要采取消极的隔振措施,使台座的振动小于设备的允许振动,以保证其正常工作。

(五)地球上任何地方始终处于振动状态中,精密仪器和设备也就在振动状态中工作。如果对精密仪器和设备的允许振动指标提得过高,将会造成经济上的浪费;提得过

低，会影响其正常工作。因此，合理地确定精密仪器和设备的允许振动值，是工厂设计中必须解决的问题。

二 确定允许振动的方法

(一)精密仪器和设备的种类繁多，构造各异，工作原理也不尽相同，故确定允许振动比较困难。对于大多数的设备，可以通过试验和应用随机函数平稳化理论来确定其允许振动，但不可能所有的仪器设备都通过试验来确定。对于某些设备的允许振动(如单晶炉)，需要通过长期的工作实践和普查得到。

(二)要得到某一种类型设备的允许振动，首先要选择一台有代表性的设备，对其进行不同频率下的激振，得到不同频率下的允许振幅。如图2-4中，激振频率为 f_1 时，极限允许振幅为 A_1 ；激振频率为 f_2 时，极限允许振幅为 A_2 ；激振频率为 f_i 时，极限允许振幅为 A_i 。根据不同频率下的不同极限允许振幅值，通过计算可以得到不同频率下的极限允许振动速度和加速度，并分别求出位移、速度和加速度的数学期望(m_A 、 m_v 、 m_a)、均方差(σ_A 、 σ_v 、 σ_a)，以及离散系数(σ_A/m_A 、 σ_v/m_v 、 σ_a/m_a)；取离散系数最小者为控制允许振动的物理量，具体数值为 $m-k\sigma$ 。 k 为保证概率系数， $k=1$ 时，保证概率84.1%； $k=2$ 时，保证概率97.7%；一般 k 值取1左右。当离散系数较大时，通常 k 可以取小一些，连续工作时间长的设备， k 可取大一些。

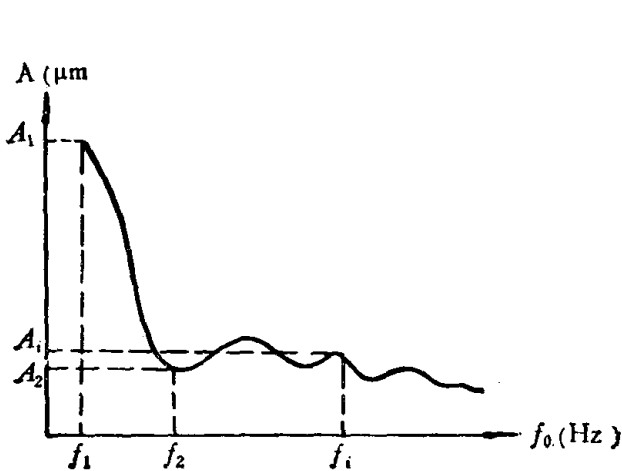


图 2-4 允许振动

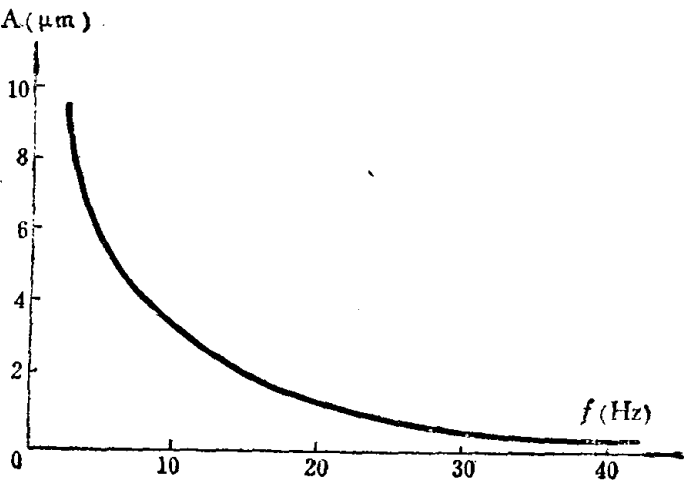


图 2-5 精缩机极限允许振动

(三)现以精缩机和TG328B型分析天平的允许振动确定方法为例，来说明确定允许振动的具体步骤和方法

1. 精缩机

(1)对精缩机进行激振试验，得到不同频率下的极限允许振幅，即频率振幅特性曲线，如图2-5所示。

(2)计算极限允许振动速度和加速度，列于表2-1。

(3)计算位移、速度和加速度的数学期望(m_A 、 m_v 和 m_a)，(这里相当于平均值)、均方差(σ_A 、 σ_v 、 σ_a)，以及离散系数(σ_A/m_A 、 σ_v/m_v 、 σ_a/m_a)。

$$m_A = \frac{9.2+5.3+3.4+1.7+0.8+0.5+0.4}{7} = 3.1\mu\text{m}$$

精缩机极限允许振幅、速度和加速度

表 2-1

激振频率(Hz)	2.5	5.0	10.5	17.0	25.0	33.0	42.0
极限允许振幅(μm)	9.2	5.3	3.4	1.7	0.8	0.5	0.4
极限允许速度(mm/s)	0.14	0.16	0.22	0.18	0.12	0.11	0.11
极限允许加速度(mm/s²)	2.2	5.1	14.8	19.5	19.5	22.8	27.7

$$m_v=\frac{0.14+0.16+0.22+0.18+0.12+0.11+0.11}{7}=0.15\text{mm/s}$$
$$m_a=(2.2+5.1+14.8+19.5+19.5+22.8+27.7)/7=16\text{mm/s}^2$$
$$\sigma_A=\{[(9.2-3.1)^2+(5.3-3.1)^2+(3.4-3.1)^2+(1.7-3.1)^2+(0.8-3.1)^2+(0.5-3.1)^2+(0.4-3.1)^2]/7\}^{\frac{1}{2}}$$
$$=3\mu\text{m}$$
$$\sigma_v=\{[(0.14-0.15)^2+(0.16-0.15)^2+(0.22-0.15)^2+(0.18-0.15)^2+(0.12-0.15)^2+(0.11-0.15)^2+(0.11-0.15)^2]/7\}^{\frac{1}{2}}$$
$$=0.038\text{mm/s}$$
$$\sigma_a=\{[(2.2-16)^2+(5.1-16)^2+(14.8-16)^2+(19.5-16)^2+(19.5-16)^2+(22.8-16)^2+(27.7-16)^2]/7\}^{\frac{1}{2}}$$
$$=8.6\text{mm/s}^2$$
$$\frac{\sigma_A}{m_A}=\frac{3}{3.1}=0.97 \quad \frac{\sigma_v}{m_v}=\frac{0.038}{0.15}=0.25 \quad \frac{\sigma_a}{m_a}=\frac{8.6}{16}=0.54$$

(4) 确定允许振动。由于 $\sigma_v/m_v=0.25$ ，所以精缩机的允许振动由速度控制，其值

$$[v]=m_v-k\sigma_v=0.15-0.038=0.11\text{mm/s}$$

这里 $k=1$ ，保证概率84.1%。

2. TG328B型天平

按照精缩机同样的步骤，TG328B型天平通过试验可以得到前面图2-2 的频 率振幅曲线和表（2-2）的极限允许振幅、速度和加速度。

TG328B型天平极限允许振幅速度和加速度

表 2-2

激振频率(Hz)	2	4	7	10	15	20	25	30	35	40	50
允许振幅(μm)	7.44	10.20	4.57	0.88	2.40	2.31	3.11	4.00	1.71	4.42	1.30
允许速度(mm/s)	0.093	0.256	0.201	0.055	0.226	0.29	0.492	0.755	0.376	1.110	0.408
允许加速度(mm/s²)	1.17	6.42	8.84	3.47	21.30	36.4	77.3	142.4	82.8	279.0	128.0

由表（2-2）可以求得

$$m_A=3.85\mu\text{m}, m_v=0.387\text{mm/s}, m_a=71.5\text{mm/s}^2$$
$$\sigma_A=2.68\mu\text{m}, \sigma_v=0.294\text{mm/s}, \sigma_a=81.4\text{mm/s}^2$$
$$\frac{\sigma_A}{m_A}=\frac{2.68}{3.85}=0.69, \frac{\sigma_v}{m_v}=\frac{0.294}{0.387}=0.76, \frac{\sigma_a}{m_a}=\frac{81.4}{71.5}=1.14$$

位移的离散系数 $\sigma_A/m_A=0.69$ ，比速度和加速度离散系数小。因此，TG328B天平的允许振动由位移控制，其值

$$[A]=m_A-k\sigma_A=3.85-0.69\times 2.86=2\mu\text{m}$$

由于离散系数都很大，这里 k 取0.69，保证概率75%。

因为 σ_A/m_A 与 σ_v/m_v 较接近，说明虽由位移控制，但速度也起很大的作用。同时，由表2-2可见，对小于5赫兹的振动，允许振幅可以增大。

（四）对于少数的设备，影响其正常工作的因素很多，振动只是其中的一个。这种设备的允许振动较难测定。如单晶炉，影响其拉晶质量的原因较多，首先在生产工艺上存在很多随机因素，其次与操作人员的技术水平有很大的关系等；即使外界振源全部关掉，产品的合格率也只有60~70%。如对某台单晶炉进行振动试验的结果所见，低频、小振幅对产品的影响反而比频率稍高，振幅稍大时的影响要大。只有当振动过大时（水压机、锻锤对其影响）才能明显看出对拉晶质量的影响。对于单晶炉这类设备，只能从多方面进行观察和分析研究，才能确定其允许振动值。

三 精密仪器和设备的允许振动表

表2-3是由振幅控制的精密仪器和设备的允许振动。表2-4是由速度控制的精密仪器和设备的允许振动。表2-5为速度、振幅换算表。

精密仪器和设备的允许振幅① 表 2-3

防振级别	允 许 振 幅 (μm)			仪 表 和 设 备 名 称
	<5Hz	<10Hz	≥10Hz	
1	1.8	0.6	0.3	元器天平* TG128型高精度天平(一级天平)
2	2.0	1.0	0.5	GZT3-2精密天平 TG335型高精度微量天平(三级天平)
3	4.0	2.0	1.0	石英钟* 比色光度计* TG332A型微量天平(三级天平) WT2A型微量天平(三级天平) AC9/5型检流计(精度 9.1×10^{-9})
4	5.0	3.0	2.0	TG328B型光学读数天平(三级天平) GT2A型光学读数分析天平(三级天平) 陀螺仪阻尼器试验台
5	7.0	5.0	3.0	T-100型单盘天平(四级天平) TG528型空气阻尼天平(五级天平)
6	8.0	7.0	5.0	TG628A型分析天平(六级天平) 陀螺仪摇摆试验台 陀螺仪偏转角试验器及阻尼试验台
7	10.0	10.0	10.0	光点反射检流计 示波检线器及动平衡机 102G气相层析仪(色谱仪)

① 表中带*号的精密设备是作者经过试验和分析得到的。其它沿用文献[1]。

精密仪器和设备的允许速度① 表 2-4

防振级别	允许速度 (mm/s)	仪 表 和 设 备 名 称
1	0.03	线纹比长仪* 激光定位光栅刻线机* 80万倍电子显微镜* 14万倍扫描电镜* 柯氏干涉仪(精度0.02μm) 光波干涉孔径测量仪(精度0.03μm) 双管乌氏光管测角仪(精度0.1μm)
2	0.05	光学分度头* 80万倍电子显微镜(自身带隔振器)* 14万倍扫描电镜(自身带隔振器)* 泰勒雪夫3型光洁度测量仪(精度▽13) MNN-4型干涉显微镜(精度▽14)
3	0.10	单晶炉* 精缩机*
4	0.20	TRG-1光刻机* 立式光学比较仪(精度1μm) 硬质金属毛坯压制机 测微仪扭簧比较仪 三座标测量机
5	0.30	万能工具显微镜(精度1μm) 杠杆齿轮比较仪
6	0.50	万能测长仪(精度1μm)

① 表中带*号的精密设备是作者经过试验分析得到的, 其它沿用文献[1]。

速 度 振 幅 换 算 表 表 2-5

频 率 (Hz)	速 度 (mm/s)							
	0.03	0.05	0.10	0.20	0.30	0.50	0.80	1.50
	振 幅 (μm)							
2	2.39	3.98	7.96	15.92	23.9	39.8	63.7	119.4
3	1.59	2.65	5.30	10.6	15.9	26.5	42.4	79.6
4	1.19	1.99	3.98	7.96	11.9	19.9	31.8	59.7
5	0.96	1.59	3.18	6.36	9.6	15.9	25.5	47.7
6	0.80	1.33	2.65	5.30	8.0	13.3	21.2	39.8
7	0.68	1.14	2.28	4.56	6.8	11.4	18.2	34.2
8	0.60	0.99	1.99	3.98	6.0	9.9	15.9	29.8
9	0.53	0.88	1.76	3.52	5.3	8.8	14.1	26.5
10	0.48	0.80	1.6	3.20	4.8	8.0	12.7	23.9
12	0.40	0.66	1.33	2.66	4.0	6.6	10.6	19.9
14	0.34	0.57	1.14	2.28	3.4	5.7	9.1	17.1
16	0.30	0.50	0.99	1.98	3.0	5.0	8.00	14.9
18	0.27	0.44	0.88	1.76	2.7	4.4	7.07	13.3
20	0.24	0.40	0.80	1.60	2.4	4.0	6.37	11.9
24	0.20	0.33	0.66	1.32	2.0	3.3	5.31	9.95
28	0.17	0.28	0.56	1.12	1.7	2.8	4.55	8.53
32	0.15	0.25	0.50	1.00	1.5	2.5	3.98	7.46
36	0.13	0.22	0.44	0.88	1.3	2.2	3.54	6.63
40	0.12	0.20	0.40	0.80	1.2	2.0	3.18	5.97
45	0.11	0.18	0.36	0.72	1.1	1.8	2.83	5.31
50	0.096	0.16	0.32	0.64	0.96	1.6	2.55	4.77

(一) 由振幅控制的设备允许振动, 由于没有频率的因素, 离散系数都较大。根据多年使用的实践情况, 建议将允许振幅按三个频段取用, 如表2-3。其中引用 文献[1]的振幅也改用三个频段表示。