

JIANZHU JIEGOU FANGZHEN

SHEJI YU YINGYONG

建筑结构防振 设计与应用

茅玉泉 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



建筑结构防振设计与应用

茅玉泉 编著



机械工业出版社

序

关于建筑结构防振设计；从问题的提出到对其重要性的认识，从学习国外经验到经过自己实践提高和创新，我国建筑工程界进行了卓有成效的工作，解决了建筑结构设计 and 生产中许多振动问题，总结出自己的经验，并在此基础上制定了我国建筑工程环境振动影响及防振方面的规范标准，取得了丰硕成果。

20 世纪 50 年代初期我国开始了大规模的经济建设，工业建设也得到了蓬勃发展，当时设计任务极其繁重，生产中的振动影响问题虽已引起注意，但尚未得到足够的重视。在设计中对机器设备的振动影响，大多简化为静力问题处理或乘以动力系数后按静力的方法进行计算，这种计算方法没有考虑机器设备的振动扰力频率和共振的影响，对加工、计量、检验和分析设备等防振问题未提出严格要求。简化为静力计算后可能出现两种结果：一是当外界振动频率远离结构自振频率时，则动力影响很小，过多考虑动力的影响使安全度过大；二是当外界振动频率和支承结构自振频率接近或一致时，则发生共振现象，动应力将急剧上升，不是采用某一个动力系数计算所能满足的，这将严重地影响结构安全。因此，到了 20 世纪 50 年代末期，许多已投产的工厂出现了振动的影响，其中最突出的有四个方面：一是振动影响建筑的安全和使用，如：单层厂房受到锻锤、落锤、空气压缩机等的振动影响，使厂房发生不同程度的晃动或损裂，钢筋混凝土屋架端节点出现开裂，设备基础和附近厂房柱基发生不均匀沉降，起重机卡轨，严重时厂房不能正常使用；二是火车、汽车等交通工具运行时，其振动影响到周围机器设备的正常加工，仪器、仪表的正常工作和使用寿命；三是制冷压缩机、风机、水泵、电动机、机床等上楼后，引起楼板振动，它将波及多层厂房的各个楼层，导致机器设备的加工精度普遍降低，仪器、仪表无法正常工作；四是影响人们的正常生产和身体健康。振动问题因此才引起了广泛的重视。

20 世纪 60 年代初，全国有关勘察设计单位、科研院所和高等院校对工程中出现的振动问题积极开展研究。一方面学习国外的先进经验和规范标准，另一方面自己进行调查研究和实测试验，较广泛地探讨了有关的振动影响问题，在防止振动方面逐步取得了大量的成果。

在动力机器基础设计和地基的动力特性研究方面，确定了我国各类地基动力特征参数，如：天然地基的刚度，不同土层组成地基土的综合刚度，土体竖向和水平向的阻尼比、泊松比，桩基周边土的抗剪刚度，桩基的当量抗压刚度及基础深度的影响，桩基的阻尼比，以及振动对地基沉陷的影响等，对各类动力机器基础的计算和构造提供了实用的设计方法，在此基础上制定了国家标准《动力机器基础设计规范》(GB 50040—1996)，以后经过多次修订，使之不断趋于完善。在实测试验的基础上，制定了国家标准《地基动力特性测试规范》(GB/T 50269—1997)。

在地面振动传播衰减方面，在广泛实测试验的基础上，根据我国的土体情况，对地面振

动传播衰减计算公式在三个方面进行了修正,一是对不同土体提出了不同的能量吸收系数;二是提出了地面荷载对振动传播衰减的修正系数;三是对于远近的体波和面波分界给予分别计算。在进一步实测试验的基础上,提出了振动理论的近似解,考虑了不同距离内体波、面波的矢量合成,提出了统一的地面振动传播衰减公式,并列入我国《动力机器基础设计规范》中。同时区分了稳态振源的气体压缩机、制冷压缩机,瞬态振源的锻锤和压力机,随机振源的火车、汽车,根据其扰力作用的方式不同,考虑到振动的三个向量和不同传递方向,在大量实测的基础上,采用数理统计方法,从不同的地基动力特性,求得地面振动传递衰减的经验公式。

对于防振和隔振措施方面,进行了积极的探索,经过大量的理论研究和工程实践,对旋转式机器、曲柄连杆式机器、冲击式机器、随机振动机器等振源隔振,精密仪器设备和精密机床的受振隔振,提出了实用的设计方法。隔振器包括圆柱螺旋钢弹簧隔振器、碟形与迭板弹簧隔振器、橡胶隔振器、空气弹簧隔振器、组合隔振器、钢丝绳隔振器等,在不同情况下选择使用。目前我国在隔振设计方面已逐步成熟,取得不少成功的实践经验,在此基础上编制了我国国家标准《隔振设计规范》(GB50463—2008),该规范的实施将对建筑工程的隔振起到积极的指导作用。

多层厂房的振动计算在国外已有多种近似方法,但在我国工程实践中发现,其防振的计算并不符合实际测试结果。因此我国对多层厂房防振问题开展了专题研究,通过理论研究和数十个厂房的试验,对多层厂房楼盖的动力特性、厂房振动的计算方法、振动在楼层平面传播和层间空间传递的规律、多层厂房频率密集和其共振不可避免的振动特征、厂房楼盖的阻尼比和动弹性模量、合理的楼盖形式和构造措施等提出建议,这些成果已被国家标准《多层厂房楼盖抗微振设计规范》(GB50190—1993)所采纳。

古建筑的防振是近几年提出的一个新课题,国内研究的学者不多,五洲工程设计研究院潘复兰教授级高工对工业振源影响古建筑的研究取得了可喜的成果,根据研究的成果,国家颁发了《古建筑防工业振动技术规范》,这对保护古建筑将起到重要作用。

虽然我国在建筑结构防振设计和应用方面做了大量的工作,也有多本国家标准和行业标准可供设计时使用,但该方面的专著在国内还不多见。茅玉泉教授级高级工程师长期以来在振动工程的研究和实践工作中,积累了丰富的经验,作出了突出的贡献,是国家标准《多层厂房楼盖抗微振设计规范》(GB50190—1993)的主要起草人之一,曾担任中国工程建设标准化协会建筑振动委员会的委员,《建筑结构防振设计与应用》一书是茅玉泉教授级高工几十年来从事振动研究成果的结晶。该书内容丰富,实用性强,书中的资料对科研和工程技术人员具有很大的应用价值,该书的出版发行一定会受到读者的欢迎。

中国机械装备集团公司副总裁
中国工程建设标准化协会建筑振动委员会主任委员

祁建

前 言

建筑结构工程设计中,对各类机械设备引起的振动影响需要进行必要的振动计算和采取避免振动影响的各种减振、隔振措施,可统称为防振设计。防振设计在工程设计中是一项不可缺少的重要环节。

根据多年来的实践,环境振动问题普遍存在于生产过程之中。当它影响严重时,将危害结构安全,影响精密设备加工精度,影响计量、理化的检验和分析,以及影响其他精密仪器、仪表工作,影响精密设备的使用寿命,甚至影响人们的身心健康。因此振动问题颇受人们的关注。为了解决振动问题的影响和危害,在工程设计之初,对凡受环境振动影响的地方,就应注意这个问题,以免造成许多不必要的损失和不良的后果。

环境振动影响问题宜从选址和可行性论证开始,首先从宏观上评价周围环境振动问题的影响程度,合理地选择一个理想的周围环境,要求该环境存在的振动影响最小,或使之在容许范围以内;然后合理布置厂区内部的振源,减少其振动干扰,同时在车间布置时,亦需要考虑将精密设备远离有害的环境振源,并采取必要的防振措施。

目前考虑环境振动影响时,一般动力荷载已不再采用等代静荷重法计算,只有对某些机械设备因存在一些不确定因素,在充分考虑频率的前提下,而采取动力系数法进行动力计算;有条件时,不再未经严格计算就进行防振设计,及随意采用某种隔振材料进行隔振,以免系统的频率接近于振动的干扰频率而出现共振,发生严重的不利影响,这是要引以为鉴的。

我国工程设计中对振动影响和防振设计,已有比较成熟的经验,初步形成了具有我国自己特色的动力设计系列规范。本书在建筑结构防振设计所进行的试验研究和应用实例方面做些补充,主要内容如下。

第一章防振设计概述,指出防止环境振动影响首先要选择一个相对良好的环境,合理布局,弄清不同环境的各类振源对建筑物,对精密加工设备、精密仪器仪表,对人体健康存在的影响及其所产生的危害,防振设计需要从总体和局部等各个方面采取措施。防振设计和振动事故的处理,应遵循一定程序,以免考虑不周,不能圆满地解决有关振动问题,防振设计尚应注意振动控制与优化。

第二章常用机器设备动力荷载。各类环境振动影响问题的解决,首先要计算出常用动力设备所产生的干扰力作为动力荷载。当无现存的扰力计算公式或依据时,可直接从有关表中查得参考值,或必要时进行扰力试验来确定。

第三章防振指标。防止振动影响,进行防振设计的目的是要使机械设备本身能正常运行,将外界环境振动影响限制在容许振动极限值的防振指标范围内,满足结构安全,满足精密加工设备、精密仪器仪表的精密要求,满足人们正常的生产和生活要求。

第四章地面振动传播衰减和防振距离。在计算振源设备基础的振动时,要使基础振源振动既不超过动力设备自身的振动要求。又在传播衰减后对环境不造成有害的振动影响。

考虑在不采取任何隔振措施的情况,周围环境的各种振源在不影响精密设备精度时的防

振距离,满足容许振动极限的防振指标。这就需要对地面振动传播衰减进行估算。必要时可以通过测定来确定其防振距离,应满足最精密的设备设置在环境综合振动影响最小的区域内。

第五章设备基础隔振设计。上述估算或测定,不能满足要求,又无法避开时,需要考虑对振源设备采取振源主动积极隔振,或对精密设备采取受振被动的消极隔振,必要时采取综合性的防振措施加以解决。在采取隔振时,应注意选用适当的隔振方案、隔振器材料、隔振器和阻尼装置,以便有效地达到预期的隔振效果。

第六章单层厂房防振。振动对单层厂房的影响,属于强度和稳定问题,一般振动较大、很大或强烈振动的车间,应进行必要的动力分析和采取必要的构造措施,以便保证生产厂房和生产设备的正常工作,保证满足建筑物容许振动的要求。

第七章多层厂房防振。在机床、制冷压缩机、风机、水泵和发电机安装在楼层上后,对多层厂房发生振动是显而易见的,但这种振动一般大多属于影响精度问题,且以垂直振动影响为主。由于这种振动虽小,但可以波及整个厂房上下各层,在楼层平面内传播,在层间上下传递,必要时要进行估算,包括综合叠加的影响限制在容许振动范围内。因此,要合理布局,加强构造措施。如确无把握时,要测定其影响程度和范围,以免精密设备受到不应有的危害。

第八章古建筑防振防护。我国是一个历史悠久的文明古国,古建筑已经成为中华民族精粹的一部分,由于建设事业的兴起,工业发展,古建筑可能受到不同振源的长期影响。因此,需要根据古建筑的特点和历史、现状,进行有效的维修、加固和保养,同时要采取必要的防振措施。

第九章振动问题和事故处理。当设计时未考虑或未充分考虑设备自身振动和对环境振动影响时,就有可能发生某种不良环境的振动问题和事故,它可能使建筑物开裂,产生不均匀沉降,造成结构不安全,影响机械设备的正常运行,影响到精密设备使用,影响工人的正常操作。由于振动影响发生事故后,要弄清楚发生事故的原因,针对问题进行必要的治理,无法治理时,要迁移或改变用途。

第十章环境振动测试和分析。解决振动问题,有条件时,需要配备一整套测试仪器系统,或委托有资质的测试机构以便有目的地进行必要的测定,取得振动的有关参数。但在测定中要合理布置测点和测定方向,以便对测试结果作出有效的分析。通过测试使问题得到圆满的解决。

在附录中列出了压缩机扰力(矩)计算公式的推导、复合回归法、多层厂房振动试验测试数据和有关防振的主要术语,以便更好地为解决工程防振设计中有关环境振动问题服务。

本书承蒙徐建教授级高级工程师的审阅,提出了宝贵意见;黎益仁高级工程师给予了部分协助,在此一并表示感谢。

目 录

序

前言

第一章 防振设计概述 1

第一节 环境振动及其危害 1

第二节 防止环境振动影响的方法 ... 4

第三节 防振设计程序 9

第四节 环境振动问题和事故 处理程序..... 10

第五节 振动控制和优化设计..... 12

第二章 常用机器设备动力荷载..... 14

第一节 概述..... 14

第二节 风机、电动机和水泵 的扰力..... 15

第三节 制冷压缩机、空气压缩机 和发动机的扰力..... 20

第四节 锻锤和压力机的扰力..... 43

第五节 机床设备的扰力..... 53

第三章 防振指标..... 59

第一节 概述..... 59

第二节 精密设备的防振指标..... 61

第三节 机械设备的防振指标..... 76

第四节 人文环境的防振指标..... 81

第五节 建筑物的防振指标..... 83

第四章 地面振动传播衰减和防振距离 ... 87

第一节 概述..... 87

第二节 火车、汽车引起的地面振动 特性、传播、衰减和防振 距离..... 97

第三节 压缩机引起地面振动特性、 传播、衰减和防振距离 ... 114

第四节 锻压设备引起的地面振动 特性、传播、衰减和防振 距离 134

第五章 设备基础隔振设计 146

第一节 概述 146

第二节 隔振系统构造和计算 147

第三节 汽锤基础空气弹簧隔振 ... 164

第四节 压力机、冲床基础隔振 ... 169

第五节 发动机试验室的隔振 171

第六节 机床基础隔振 179

第七节 刻线机基础隔振 185

第八节 精密设备基础隔振 190

第六章 单层厂房防振 196

第一节 概述 196

第二节 单层厂房动力特性 197

第三节 锻锤车间 200

第四节 落锤车间 206

第五节 空气压缩机车间 208

第七章 多层厂房防振 213

第一节 多层厂房防振问题的 发展概况 213

第二节 多层厂房防振设计步骤 ... 215

第三节 多层厂房振动特性 219

第四节 多层厂房振动简化计算 ... 223

第五节 多层厂房动力特性参数 测试 241

第六节 多台振源设备引起的振动		第三节 振源点和测点设置	269
综合叠加	247	第四节 振动方向、向量和	
第八章 古建筑防振防护	249	物理量	272
第九章 振动问题和事故处理	255	第五节 测试方法	272
第一节 概述	255	第六节 测试结果分析	276
第二节 环境振动引起的危害	256	附录 A 压缩机扰力（矩）计算	
第三节 振动事故处理步骤、方法		公式推导	282
和实例	258	附录 B 复合回归方法	289
第十章 环境振动测试和分析	265	附录 C 多层厂房振动试验测试数据 ...	291
第一节 概述	265	附录 D 防振术语	321
第二节 振源模拟	266	参考文献	330

第一章 防振设计概述

当代高新技术的发展,促使产品超高精度、超薄厚度、材料超高纯度和超微量度的不断提高,同时人们的生活质量和舒适度的要求也不断提高,因此对其所处的环境条件提出了不断改善的要求。振动属于环境条件中的重要问题之一,要改善和提高环境质量,就要对建筑结构考虑防振设计,进行有关振动和隔振计算,采取必要的防振措施,控制振动量,这是客观需要解决的重要课题。

第一节 环境振动及其危害

一、环境振动的种类

由外界各种不同振动源所引起周围环境的振动,具有不同频率谱效应的规则和不规则随时间而变化的振动,均可称之为环境振动。引起环境振动的振源有两类,一是人为由机械运动引起的振动,一是自然现象引起的振动,其危害程度随着振动特性、振源布局和环境条件不同而异。

1. 机械引起的环境振动

由于人们生产、生活需要所采用的机械设备,在运行过程中引起的环境振动,根据其振动特点,大致可分三种,分别是稳态性振源、瞬态性振源和随机性振源,不同振源引起的环境振动影响各不相同。

稳态性振源。主要有空气压缩机、振动筛、制冷压缩机(冷冻机)、发电机、发动机、风机、水泵和电动机等。这些振源属于有规律周期性反复作用,其中以空气压缩机振动能量为最大,频率较低,在土体介质中振动传播衰减较慢,影响环境范围较广,在不同土体内最大可达80~300m,以淤泥土中影响最远。振动筛直接悬挂在结构上,其动力直接影响结构安全。至于其他振源一般振动能量较小、频率较高,在土体介质中传播衰减较快,因此影响环境范围较小;但当设备布置在楼层上,特别是制冷压缩机、风机往往因空调需要而布置在靠近精密仪器设备区域,对其振动影响是不可忽视的。

瞬态性振源。主要有锻锤、落锤、压力机和冲床等,这些振源属于脉冲式撞击作用,其振动能量一般很大,频谱带较宽,在土体介质中传播得很远,影响环境范围很广,在不同土体中最大可达750~1500m,同样是在淤泥土中影响最远,是环境振动中发生危害最为突出的振源。

随机性振源。主要有火车、汽车、起重机、机床类和管道振动,这些振源受概率支配,其振动过程则可假设为平稳随机过程。其中以火车振动能量为最大,频谱带较宽,但其影响大多在较低频率段,在土体介质中传播得很远,可达500~1000m,也是在淤泥土中影响最远;厂内外汽车振动能量虽较小,但当道路靠近建筑物布置时,则与精密设备相距较近,有时对环境振动影响亦甚明显;起重机支承在柱和吊车梁上,振动对结构作用直接,有时影响

到与厂房相接的精密设备间；机床的振动能量一般虽较小，但当布置在楼层上时，振动可能影响到周围的精密设备；管道振动能量很小，但通过精密设备间的墙和楼板，影响也相当直接。

上述振动源，有些机械设备本体振动能量虽小，但由于布置和使用不当，或缺少应有的检修，部件磨损，偏心和不平衡性增大，从而扰力增加，因而环境振动影响增大，亦会发生对周围环境的危害。

2. 自然现象引起的环境振动

自然现象引起的环境振动，其中地震可以说是毁灭性的，但持续时间较短，且建筑物已作抗震设计，对各类设备亦应考虑抗震措施，这里不作论述。至于由于气候变化引起的地脉动，如因温度的变化，风持续地按一定速度作用，引起海浪冲击等环境地脉动，亦属随机性振源，其地脉动频率沿海较低，平原至山区逐步提高，其振动有时亦有一定影响；海浪对沿海岸的冲击，可能发生较大的环境破坏，往往不能忽视。

二、环境振动的危害

环境振动的危害，可以影响到结构的安全，影响到产品生产的精度，影响到人们的生产操作和身心健康，所以对有害的环境振动应充分考虑。

（一）危及结构安全

机械设备在运转过程中，产生不平衡的扰力，结构在这种动荷载的作用下，将引起结构的动应力，动力疲劳，应力集中，严重时发生整体或局部的动力失稳，地基产生液化，基础产生下沉或不均匀下沉，墙体构件产生裂缝，建筑物倾斜，甚至局部损坏。

1. 产生动应力 在实际生产中，大型机械设备将引起结构较大的动应力，例如：0.56t 及以上的锻锤、1000t 以上的水压机、40/8 型及以上的空气压缩机，以及振动筛，当其动力荷载作用到支承结构或基础上，通过地基或支承结构传递或直接作用到厂房结构，各个部位将产生动应力。根据以往对 5t 锻锤、100t—m 落锤等振动对厂房屋架的测定表明：在附近 30m 范围内屋架构件引起的动应力约在 5%~15% 以内，个别构件可大于 15%，因此，设计时对 5t 以下与大于 5t 锻锤分别取动应力 10% 和 15%。其振动的影响，还往往引起屋架斜拉杆，上弦端节点，特别是端节点虎口处因应力集中而出现裂缝，引起构件连接处松动甚至破坏，引起梁、柱、墙、围护结构以及装饰板的裂缝，甚至脱落，引起管道接头松动或断裂，造成漏油、漏气和漏水等，因此除考虑动应力影响外，在构造上也需要采取一定的措施。

较大型（≥40/8 型）的空气压缩机，由于干扰频率分别为 4~6Hz 和 10~15Hz，则与厂房结构的水平方向固有频率 3~5Hz 和屋盖垂直方向的固有频率 10~15Hz 相接近或一致，而发生共振和“拍”的现象，其所引起的动应力将增加数倍，导致墙体开裂、屋盖掉物、连接松动、门窗晃动，严重地危及结构安全。

装置在楼层上 8 号及以上的风机，如叶片磨损，扰力增大，有时发生锚固螺栓断裂情况，甚至危及结构安全。冷冻机、发电机等平衡性能较好，但其干扰频率处于 15~25Hz 居多，易与楼盖垂直振动的固有频率接近或发生共振，也会使结构产生一定的动应力。

2. 产生动力疲劳 动力荷重作用下的结构，在应力幅度变化较大的反复作用下，动力疲劳的影响程度可达动应力的 3 倍之多。焊缝和混凝土在动力疲劳状态下，强度可降低一半左右。总之，在动力疲劳作用下，所引起的局部损坏会导致内力重分布，严重时促使结构产

生局部或整体性破坏。因此,设计时要考虑因疲劳而降低材料强度,进行疲劳强度验算。

3. 使基础下沉,建筑物开裂和倾斜 在动力荷载作用下,地基承载力随着振动加速度的增大而减小,1t 和 1t 以上锻锤其地基承载力将降低 10%~20%,同时使土体的凝聚力和内摩擦减小,引起土体颗粒的移位和增密;当地下水位较高时,不但振动传递的影响范围扩大,还可能造成粉砂层地基的局部液化,从而造成设备基础及附近建筑物基础的下沉或不均匀下沉,引起建筑物的开裂和倾斜,严重时建筑物将不能正常使用。为了防止基础的不均匀沉降,设计锻造车间时,对砂土、粘土和黄土的柱基,其容许振动加速度宜分别控制在 $\leq 0.1g$, $\leq 0.15g$, $\leq 0.3g$, 否则应对锻锤基础采取必要的措施,如采用桩基等提高地基刚度,减少锤基振动,减小对厂房结构的影响;或降低地基承载力加大锤基,此时地基动力降低系数 $\alpha = 1 / (1 + \beta_h \alpha / g)$, β_h 为土动力沉降影响系数, α 为锤基振动加速度。

(二) 影响精密设备正常使用

机械设备在运转过程中,其振动通过土体介质传播出去,将影响到精密加工、计量和理化分析,影响其使用寿命。

1. 降低精密加工精度 由于各类精密加工设备对不同的加工精度,有其不同的容许振动要求,其容许振动速度控制指标一般在 0.03~1.0mm/s 范围内,当外界传递来的振动超过其容许振动速度的控制指标,就会对产品的光洁度、波纹度、圆度、垂直度或尺寸精度等的积累误差造成不良的影响。由测定表明:振动对楼层上的精密车床、磨床、镗床、铣床等设备的加工精度可能降低 1~2 级,甚至达不到合格要求,严重时还会使精密设备降低使用寿命,甚至损坏。

2. 影响精密仪器、仪表的检验 各类精密计量、理化分析及其他检验的仪器、仪表,均有其相应正常检验测试精度的条件,其容许振动速度的控制指标一般在 0.03~1.0mm/s 范围内,当外界传递来的振动超过其容许振动速度控制指标时,则精密仪器、仪表的检验测试系统发生晃动或颤动,致使无法判定指示值,造成检验测量系统误差,甚至无法工作。严重时,造成某些仪器和刀口损坏,指针失灵,内部机构松动或损坏而报废。

因此,许多工厂在生产过程中,常将精密加工设备、精密仪器、仪表的使用时间与有影响的振源设备交替错开,改在夜间使用,造成使用上的不便。

(三) 影响生产操作和身心健康

由于外界环境振动的影响,超过了生产操作条件和人们身心的承受条件,致使降低工作效率,影响身体健康。

1. 造成操作误差 为了保证正常的生产操作条件,其受振影响在相应条件下的容许振动速度应控制在 3.2~6.4mm/s 范围内,否则由于操作区的过大振动,易造成操作误差,致使产品质量下降,生产效率降低,甚至无法操作。

2. 损害身心健康 正常工作和生活的环境振动要求比操作区严格得多。对不同使用特点的容许振动速度差别较大,要求最高的为 0.13~0.25mm/s。一般在 0.5~1.0mm/s 范围内,车间范围内的办公区则可放宽到 2.8mm/s。当超过容许振动值时,使人烦躁,将降低工作效率,影响居民的正常休息和损害人们的身心健康。

第二节 防止环境振动影响的方法

防止环境振动的影响,首先要从选择一个理想的环境入手,合理的布局,然后考虑减少振源振动的输出,减少外界振源传递过来的振动输入和放大。

一、理想的环境,合理的布局

1. 理想的环境 精密加工生产的工厂,其理想的环境,要从选厂和可行性论证开始,从宏观上对环境进行综合性评价,评价时,根据产品精度和防振的具体要求,远离有影响的环境振源,使精密类工厂设在一个相对无强振动干扰、无污染(强噪声、强电磁波、有害气体、强风尘埃雷雨)和不良地质条件影响的环境内。在许可的情况下,选择一个有利于减小振源振动和传播衰减的地形和地质条件,并在城市远郊主导风向上风区有计划地形成一个精密生产工业区,以减少区域性的不利环境和振动的影响,见图 1-1。从而造就一个比较理想能够相对安静、洁净的厂址环境。

2. 合理的布局 在厂区范围内,合理布局是减少振动设备对精密设备干扰最为经济可靠的办法。一个工厂根据生产需要总要配备各种大小不同的振源设备。有些工厂由于对振源设备和精密设备未作全局考虑,而任意布局,分散在全厂各个部位或混杂在一起,因而生产使用后,发生了严重的振动干扰,有的只能不合理的凑合使用,有的被迫停产,调整布局,从而造成许多不必要的损失。因此必须合理布局。

在布置厂区振源时,对大型振源设备,如锻锤、空气压缩机、厂内火车等应尽可能布置在厂区的一端或边缘,形成一、二个振源区,并与精密区保持必要的距离,见图 1-2。此时,防振距离可根据振源设备特性,通过地面振动传播衰减的计算或已有地面振动传播衰减的实测资料进行估计见第四章;有条件时,还可通过实际测定确定最佳的防振距离,满足精密设备容许振动的防振指标要求。在具体布置振源时,要尽量利用有利地形,尽量将振源设备的旋转方向和水平往复运动的指向,不针对精密设备的区域,并与厂房结构水平刚度较大的方向一致。

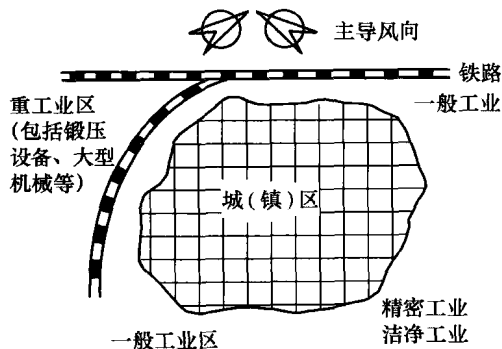


图 1-1 理想区域规划

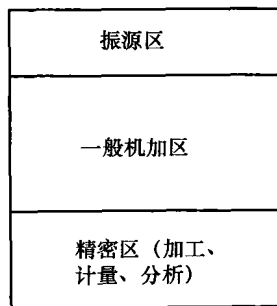


图 1-2 理想厂区规划

布置车间内部的振源时,宜把振源设备和精密设备尽可能分别布置在相互远离的厂房两端(见图 1-3)。在厂房内布置振源时,应注意尽量将机械设备重量 $\geq 50\text{kN}$ 、抗力 $\geq 1\text{kN}$ 的

振源不设置在楼层上,而布置在底层地面上。确因生产工艺流程需要,而又影响精密设备时,可单独设构架式基础与楼层脱开或采取隔振措施。凡布置在楼层上的中小型设备,应尽量避免与精密设备布置在同一个单元(缝区域)的同层及上下各楼层内,尽可能将其产生扰力的方向与结构刚度较大的方向一致,并尽可能布置在梁上,柱边或墙边等楼板刚度较大的区域。对同类设备布置时,宜将其振动方向成对地对称或反对称布置,避免多台同时运行时处于同向同频率状态,以便使其振动在不同相位上互相有所抵消,从而减少振动影响。

对振源较大的独立空调设备系统,可单独建造空调楼,将制冷压缩机、风机等完全与精密设备区域分开,以防止振动的干扰。在精密设备的多层厂房内,不允许在柱子上设置支承式起重机,也不允许在楼盖梁下设置悬挂式起重机,确因生产需要,可在底层地面上设置与厂房脱开的龙门起重机,或另立柱子支承梁式起重机,摇臂起重机或悬挂起重机,见图1-4。

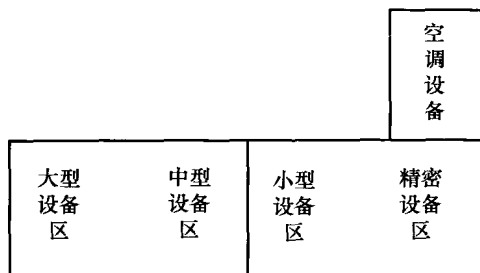


图 1-3 理想单层或多层厂房布置

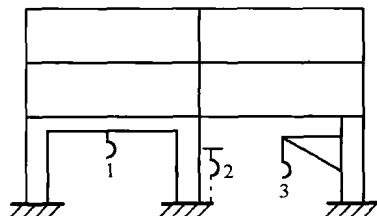


图 1-4 起重机设置

1—门式吊 2—单轨吊 3—摇臂吊

各类精密设备布置时,应尽量集中布置,形成精密区,远离振源区,有条件时,通过普测,将精密设备布置在一个受振动干扰最小的区域。精密设备在多层厂房内布置时,应尽可能放在底层地面上或地下室,以便充分利用土体阻尼及深度的减振作用,减弱振动的影响;而在楼层上布置时,也应沿楼层刚度较大的区域,在柱边、梁上、靠墙边设置,不宜在楼板中布置,并充分利用楼梯、伸缩缝、抗震缝、沉降缝,可对振动起到减弱和隔离作用。在楼层平面和层间布置时,宜采取隔二跨以上布置。另外,精密设备布置时,不宜设置在厂区内的火车或重型汽车通过的主干道附近。

二、减少振动的输出

减少振源振动的能量传出去。除了选择动平衡性能好的机械设备外,尚应在结构造型和构造上使之有利于防振,并采用刚性和柔性的隔振方法,达到减少振动能量输出的目的。

1. 合理选择设备和定期维修或更换 在选择设备时,首先应选用动平衡性能好的机械设备,使之扰力最小,从而减少设备振动能量的输出。并在使用中,应定期对机械设备进行检修,调整连接处的间隙,使之恢复其良好的动平衡性,特别在发现设备的动态不平衡性增加后,要及时检修。如因长期运行引起传动部件的磨损,而不断增加偏心距和扰力,应及时将该部件加以更换,在设备已陈旧无法检修调整时应予更新。

2. 合理结构构造 从防振角度合理结构构造,主要是提高结构刚度和增加结构阻尼。如减小结构跨度,加大构件断面,使之提高结构自振频率,尽可能地避开共振区。

3. 提高地基刚度,加大设备基础 提高地基刚度,可采用桩基,亦可采用复合地基、硅化或灌注水泥浆胶结松散地基,使设备基础建造在一个比较稳固的地基上,达到有效的减

少基础振动, 见图 1-5。

加大设备基础, 应根据减少不同向量的振动, 区别考虑, 当需减少垂直振动为主时, 可以扩大底面积, 加深基础; 减少水平振动为主时, 则应加大基础上部面积, 或加强地面与设备基础上部的整体连接, 见图 1-6a、b。

对同类设备在一起时, 还可把两台或多台的设备基础联合起来, 即可提高地基刚度, 又可以扩大基础底面积和增加基础质量, 降低基底应力, 从而达到减少振源基础的振动, 见图 1-6c、d, 例如: 三台 60/8 型空气压缩机基础联合设置, 在水平回转振动下, 测得联合基础比单独基础时的垂直振动和水平振动, 平均减小达 40% 以上。

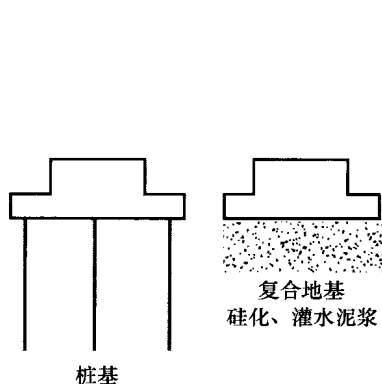


图 1-5 加固地基

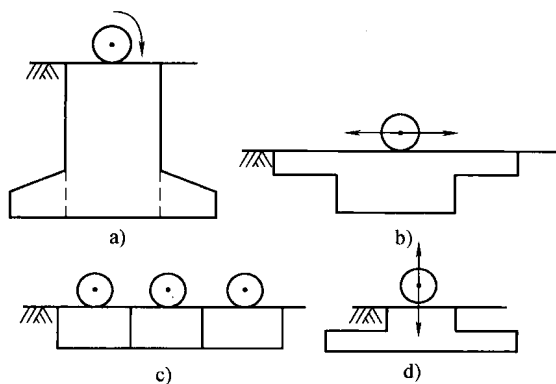


图 1-6 基础减振

- a) 加深加宽基础 b) 加大上部支承面积
c) 联合基础 d) 加大下部支承面积

4. 隔离振源 隔离振源, 就是采取振源隔振措施, 减少振源振动能量的输出。在机械设备较少, 干扰明显的情况下, 宜采用振源隔振或将振源迁移到较远的地方达到无影响的目的。但对抗力较大的机械设备, 由于其振动影响大且范围广, 无法避开, 或该设备因生产流程的需要, 无法改变, 而增大支承结构刚度又不经济时, 应采取振源的隔离措施, 并经过严格的隔振计算, 以便取得满意的效果。例如某厂由于工艺需要将 2.5kN 的空气锤布置在多层厂房的底层, 为了解决对相距 35~40m 处三层楼上精密设备的影响, 空气锤基础采用了空气弹簧的隔振措施后, 经测试, 在离开空气锤操作的基坑外, 地面上的垂直振动仅 $0.51\mu\text{m}$, 说明已对精密设备无影响, 见图 1-7。又如: 某研究所为检测发动机试验其本体振动和噪声, 采用钢弹簧空气阻尼隔振, 从而隔离了外界振动和噪声的干扰。对于干扰频率较高的电动机、水泵, 采用橡胶垫隔振, 而起到良好的效果, 此时, 橡胶垫不能整块设置, 并应注意系统自振频率与干扰频率远离。

火车轨道采用浮置板、橡胶或弹性扣件和无缝长钢轨, 达到减少振动; 汽车振动的影响, 则可将周围的路面设计为柔性路面, 并适当加厚掺有废轮胎碎片的沥青层, 吸收振动能量, 减小振动的影响, 必要时还可限速减弱振动, 或限时运行, 避开干扰时间。

对管道 (气流或液流) 脉动对附近精密设备影响时, 可将管道穿过墙或楼板的支承处, 采用弹性衬垫隔离, 管道的其他吊点采用弹性吸振器, 管道之间的连接处采用柔性软管连接, 从而消除管道高频脉动对精密设备的影响。如风机出口与风管的连接处采用帆布或其他柔性连接, 压缩机 (空气压缩机和制冷压缩机) 可采用软管接头和弯头, 当管内压力较高时,

可将橡胶软管与金属管连接加工成波形，用箍卡紧，亦可用蛇形管，螺旋形管减振，见图 1-8。

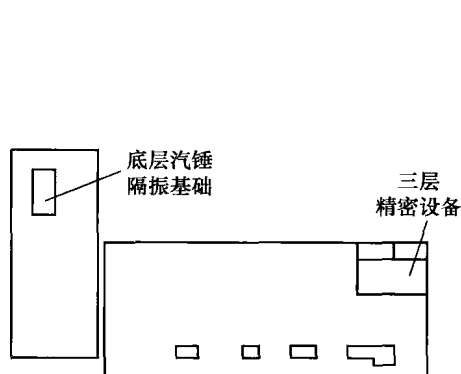


图 1-7 某厂汽锤隔振

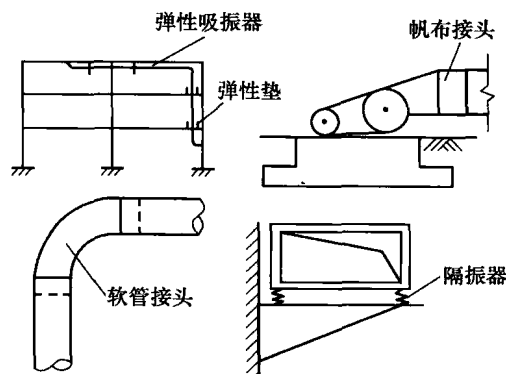


图 1-8 管道减振

至于门窗开关时撞击引起的振动干扰，特别是被风吹动，将引起墙和楼板的突然性撞击而产生强烈振动，严重影响精密设备的正常使用。因此在设有精密设备的计量、理化室，及其附近房间的门窗，应在其四周采用弹性密闭衬垫，例如橡胶、海绵、毛毡等可以避免这种影响，见图 1-9。

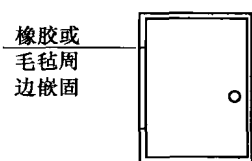


图 1-9 门窗周边缓冲

三、减少外界振动的输入和放大

振源通过支承结构和土体介质的传播衰减后，环境振动仍然干扰周围精密设备和人们的正常工作和休息。当振源设备较多，不可能全部消除这些振动影响时，除远离振源外，有必要对少量精密设备采取减少振动输入的各种有效措施，使之满足要求。

1. 远离振源 当受到外界振动干扰时，首先要考虑把精密设备远离受振影响区以外，这是一种最简易、经济的有效方法。根据外界环境的不同振源和不同精密设备的容许振动要求，通过振源的地面振动传播衰减计算或实地测定，确定不受影响的合理布置。

2. 增大地面刚度和质量 对于周围机械设备振动能量虽较小，但引起的振动足以对精密设备构成影响时，可将精密设备间的混凝土地面设计成厚地面，其厚度应在 500mm 以上，并与建筑物设缝加以分隔，利用大块体增加地面刚度和大质量的惯性作用，达到减小外界振动的影响。必要时还可在大块体地面下铺设 200~300mm 厚的砂垫层，达到减少对精密设备受振动影响的目的，见图 1-10。亦可在精密设备基础下采用桩基或复合地基提高地基刚度，改变并提高基础固有频率，远离外界干扰频率，从而达到减少外界振动影响。

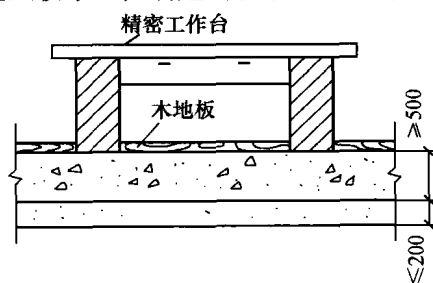


图 1-10 刚性减振

另外，精密设备不允许直接设置在架空式的木地板上，因为木地板刚度很小，人走动时，就可以引起精密仪器、仪表的晃动。因此，精密间的地面要做成刚性的混凝土或水磨石地面。然后在工作台四周地面上再铺地毯或橡胶布或木地板，可以有效地避免由于操作人员走动所引起的振动影响，见图 1-10。

3. 采用刚性工作台 以往许多工厂出现的精密仪器、仪表的受振影响，不少是由于其

支承结构是木制工作台, 由于木制工作台质量轻, 具有一定弹性, 当受外界振动干扰时, 经常出现振动放大现象。实测表明: 木制工作台上的振动比支承它的地面或楼面的振动放大 2~3 倍。因此, 设计时宜采用水磨石刚性工作台, 可明显地降低外界振动的干扰, 使台面上的振动基本上能恢复到与地面、楼面差不多的振动状态。

4. 设置防振沟 精密设备受外界机床、高速切削机床的影响, 由于其干扰振动的频率高, 波长较短, 采用防振沟是减少这类环境振动影响的有效方法之一。但防振沟的深度必须超过干扰振动波长的 $2/3$ 以上, 才能起到一定的减振作用, 因此有时过深, 而不经济。防振沟可以设置在精密间的周围, 亦可设在精密设备基础的四周; 但对具有较大内扰力的镗床、螺纹磨床、铣床等精密加工设备, 防振沟不宜设在其基础四周, 因无水平约束, 以免自身的水平扰力而增大基础回转及摇摆振动。对较低频率的振源, 由于其波长较长, 往往振动绕过防振沟底部而传过去就起不到减振作用。见图 1-11。

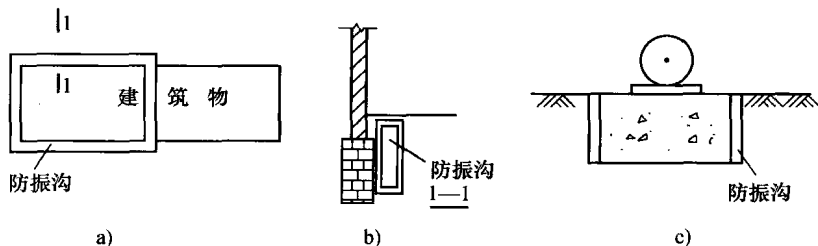


图 1-11 防振沟设置

a) 防振沟平面图 b) 1-1 剖面图 c) 防振沟剖面图

5. 隔离输入振动 当精密设备无法避开外界振源的影响时, 在不同特性的外界振动干扰下, 可对精密设备采取相应的受振隔振措施, 以便有效地吸收外界的振动能量, 隔离输入的振动。

防止外界振动的输入, 可采取支承式和悬挂式两种, 见图 1-12。以支承式隔振居多, 只有在精密设备自动控制、调节的情况或管道悬挂时, 才考虑悬挂式隔振。其所采用的隔振材料和组合的隔振器, 应考虑到弹性模量低, 弹性好, 刚度小, 承载能力大, 强度高, 阻尼比较大 (可外加阻尼), 性能稳定, 不因外界温度、湿度的变化而引起弹性或其他物理、化学性能的明显变化, 抗酸、碱、油的侵蚀性能好, 耐久性强, 取材方便, 经济实用, 加工制作、维修和更换方便。例如钢弹簧加阻尼装置、剪切型橡胶减振器和空气弹簧隔振器。隔振设计要经过严格计算, 才能取得良好的效果, 否则可能不但起不到减振作用, 反而增大振动影响。

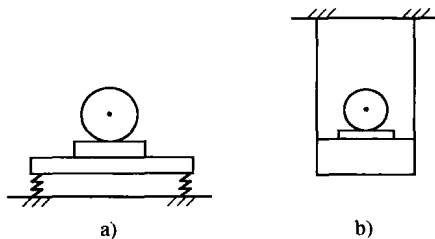


图 1-12 隔振方案

a) 支承式 b) 悬挂式

总之, 对振动的影响, 在工程设计开始就要介入, 并予以妥善解决, 事后处理既影响生产、生活, 又增加费用, 造成许多不合理。设计时要经过充分分析, 当采用单一的减振措施不能解决环境振动问题时, 可采用多种综合措施, 采用减少振动输出为主, 减少振动输入为辅; 或以减少振动输入为主, 减少振动输出为辅。但减振措施都要尽可能做到“简易可行、效果显著、满足要求、经济合理”。

对有害环境的振动防振，而采取减振措施确有困难或不经济时，应另选建设场址，或限制使用条件，如把振源设备运行转速控制在不起共振或接近于共振的危害范围内，或互相避开使用时间，或改变用途。

第三节 防振设计程序

防振设计，要遵循一定程序，以便全面考虑所有影响因素，避免考虑不周，达不到圆满解决环境振动影响的目的。防振设计程序见图 1-13。

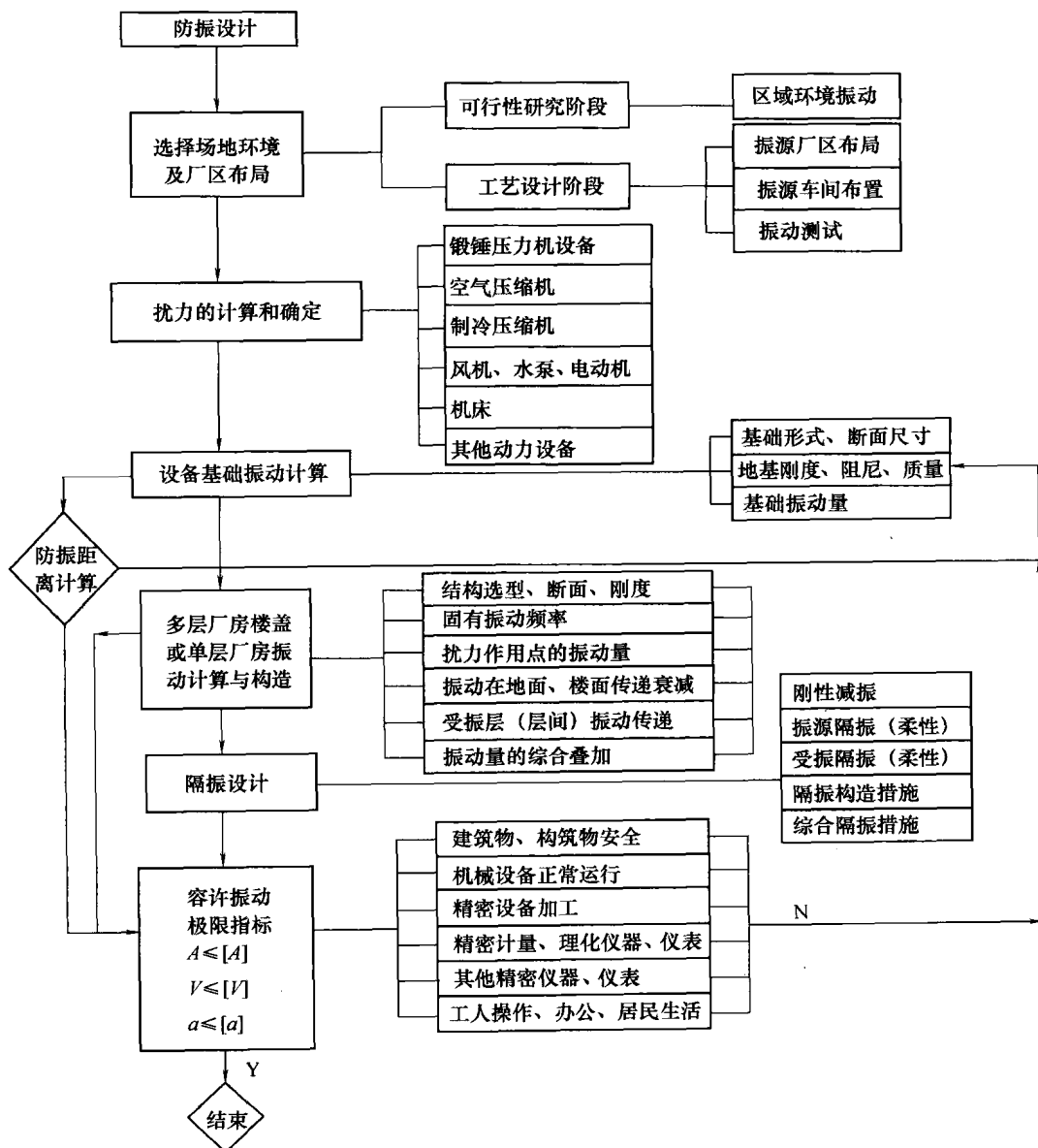


图 1-13 防振设计程序