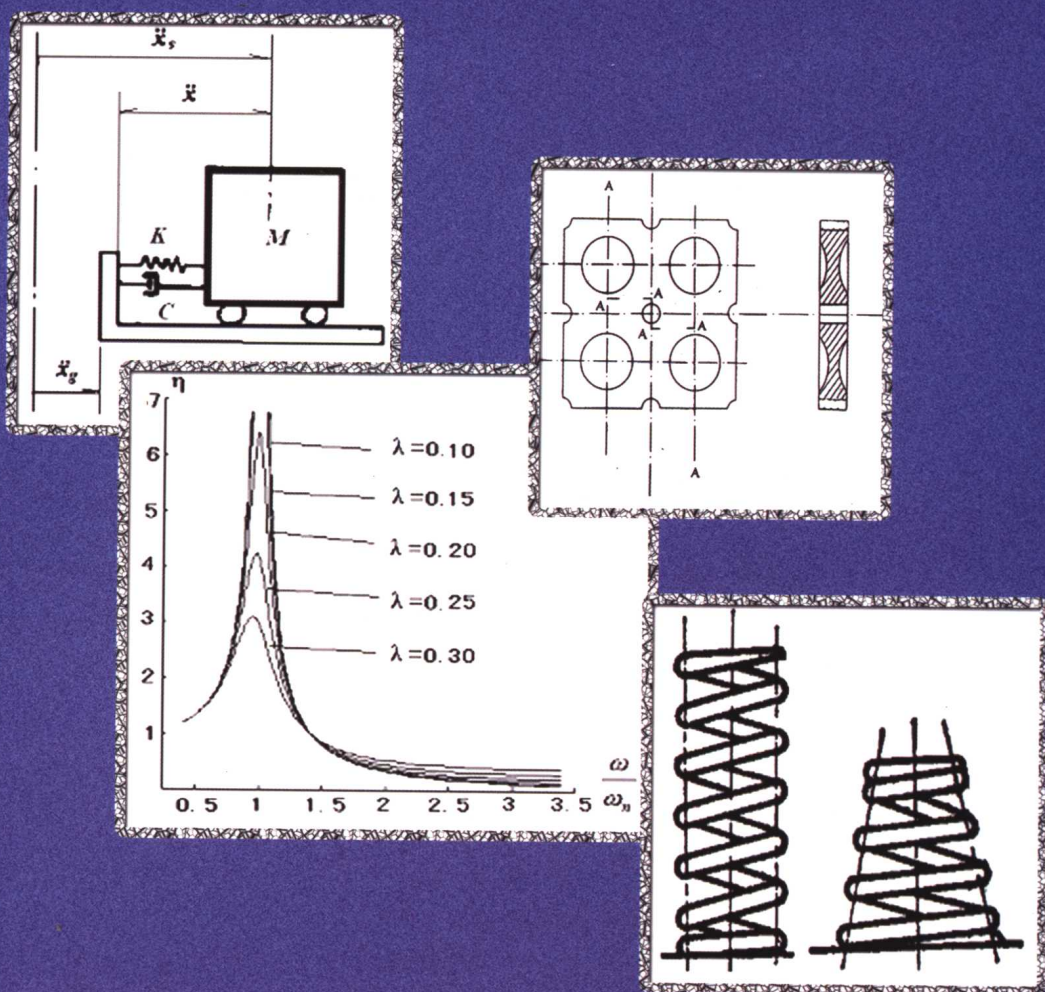


设备隔震设计

黄永林 编著



地震出版社

设备隔震设计

黄永林 编著

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

设备隔震设计/黄永林编著. —北京: 地震出版社, 2006. 9
ISBN 7-5028-2873-7

I. 设… II. 黄… III. 工业生产设备-抗震设计 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 069908 号

地震版 XT200400228

设备隔震设计

黄永林 编著

责任编辑: 张晓波

责任校对: 张晓梅

特邀编辑: 连小力

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京大华山印刷厂

版 (印) 次: 2006 年 9 月第一版 2006 年 9 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 166.4 千字

印张: 6.5

印数: 0001~1000

书号: ISBN 7-5028-2873-7/P·1294 (3572)

定价: 30.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

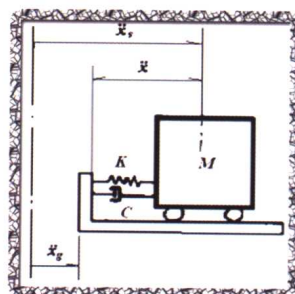
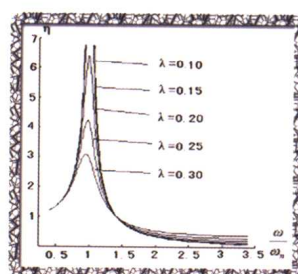
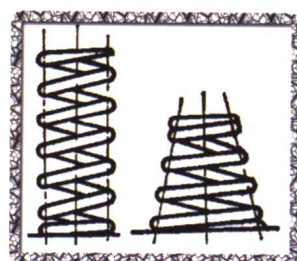
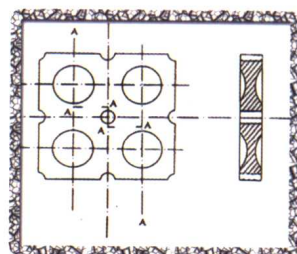


作者简介

黄永林，1987年毕业于大连工学院计算结构力学专业，获硕士学位；1994年毕业于南京大学地质系，获博士学位。1997年5月至1998年5月在新西兰皇家科学院地质与核研究所做访问学者，目前为江苏省地震工程院副研究员，从事地震工程的开发与研究工作。

责任编辑：张晓波

封面设计：曾 薇



前 言

作者从1987年起参加江苏省地震局工程隔震技术研究中心和中国石油天然气总公司联合进行的浮放设备隔震研究。1996年,在国家教委出国留学资金的资助下,在新西兰地质与核研究所做了一年结构隔震方面的研究工作,回国后继续从事隔震技术的研究与工程开发工作。

目前,设备的机械振动隔离和建筑物的隔震都是成熟的技术,与之相关的著作也出版了很多。但是,与上述的两项技术相比,设备隔震有自己的特点。设备隔震的设计方法和理论可以借鉴机械振动隔离和建筑物的隔震,但应当根据设备的特点进行专门的设计。

在工作中,作者感到应当有一本设备隔震方面的专门书籍,帮助不同专业的工程技术人员尽快掌握这门技术。在中国地震联合基金的资助下,本书得以完成并出版。

本书的绪论简介了隔震技术的发展过程、技术特点和发展趋势;第一章主要叙述了确定设备隔震输入设计地震动参数的方法和设备的防震能力评估技术;第二章设备隔震的概念设计从整体上确定了设备隔震层的力学参数;第三章叙述了设备隔震装置的主要类型与结构,以及这些装置的设计参数;第四章介绍了设备隔震设计的相关规范,叙述了应用相关规范进行隔震设计的方法;第五章叙述了隔震系统的设计方法;第六章叙述了设备隔震设计与应用的成功实例。本书的读者对象主要是从事设备隔震设计的有关技术人员,并可作为从事设备隔震研究的人员的参考资料。不同的读者可以根据自己的知识背景对阅读内容进行取舍。大部分从事设备隔震设计的技术人员具有相对丰富的机械设计知识,因此本书在地震输入参数和隔震装置的设计上叙述较为细致,对于相关机械设计方面的知识基本没有提及。

感谢中国地震联合基金对出版本书的资助;感谢国家教委出国留学资金资助作者去新西兰做访问学者一年;还要感谢新西兰地质与核研究所为作者在新西兰的合作研究提供了良好的工作条件;感谢江苏省地震工程研究院为

本书写作提供了便利，并为本书的出版提供了部分资金。

作者深切感谢将我带入隔震技术的张雪亮先生，从1987~1997年间作者一直在先生的指导下从事相关的研究与技术开发工作。感谢原中国石油天然气总公司抗震办公室主任王优龙先生，多年来他作为专家型领导对设备隔震技术的研究与开发做出了特别的贡献，本书的部分内容含有他的研究成果。

感谢江苏省地震局工程院的章熙海、杨伟林和孔建国等同志的帮助使笔者完成本书许多基础工作。

感谢新西兰地质与核研究所赵兴权先生为作者在新西兰进行访问研究期间提供的帮助。

黄永林

2006 年

目 录

绪 论	1
0.1 设备的震害	1
0.2 设备隔震技术应用的特点	3
0.3 隔震技术的发展过程	4
0.4 设备隔震技术的发展趋势	8
第一章 设备隔震的概念设计	10
1.1 概念设计阶段的隔震结构运动方程	10
1.2 隔震结构的运动方程解在概念设计中的意义	11
1.3 隔震层总体刚度估计	12
1.4 用隔震技术实现设备的地震安全性目标	13
1.5 隔震装置的基本设计要求与参数特点	14
第二章 设备隔震设计的基本参数	16
2.1 设备根据隔震设计要求的分类	16
2.2 设备允许振动	26
2.3 隔震设计的设计地震动参数	30
2.4 设备隔震中与地震动有关的概念	32
2.5 近场强地面运动与隔震结构的反应	35
第三章 设备隔震装置的材料与结构	38
3.1 橡胶	38
3.2 钢	48
3.3 铅	50
3.4 聚四氟乙稀支座	58
3.5 石墨与滑动摩擦阻尼	59
3.6 硅油与液压阻尼器	60
3.7 有机粘弹性阻尼材料与阻尼器	61
3.8 隔震装置力学参数的确定	62
3.9 不同隔震部件的组合使用	63

第四章 隔震设计规范与设备隔震设计	65
4.1 《石油浮放设备隔震设计标准》(SY/T0318—98) 与应用	65
4.2 《隔振设计规范》(JBJ22—91) 在设备隔震设计中的应用	70
4.3 《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001) 在设备隔震设计中的应用	72
第五章 设备隔震设计与计算	75
5.1 简单隔震系统与单质点系统计算模型	75
5.2 滑动摩擦隔震系统的计算模型	77
5.3 滚动隔震系统设计与分析计算	81
5.4 串联多质点隔震系统模型与分析计算	82
5.5 一般隔震系统与分析计算模型	83
第六章 设备隔震设计与应用实例	85
6.1 隔震楼板	85
6.2 电容器贮架的隔震设计	90
6.3 日本的码头吊车隔震	91
6.4 精密浮放设备的隔震	92
6.5 架空管道的隔震与加固	94
参考文献	98

绪 论

地震中各种工业设备的破坏是十分常见的现象。随着现代化步伐的加快,大量昂贵复杂的工业设备与设施、生命线工程和智能建筑正在建造,或已投入使用。它们有些直接安装在建造于地面的基础上,有的则安装在楼层上。在遭受破坏性地震时,作用于设备的地震加速度可以到达一定的量级,设备由此可能在地震中损坏。

近年来建筑的抗震能力有了明显的提高,安装设备的建筑在地震中一般不会倒塌。但是,剧烈的振动能使设备的易损部位破坏,丧失精度,或是因滑动、跌落等原因丧失使用功能,影响整个生产线或制造系统的工作。修复这些设备往往是困难的,特别对无备件的设备更是如此。在中国唐山地震、美国洛杉矶地震及日本阪神地震等地震中,重要工业设备的损毁及随之产生的严重次生灾害造成了极大的经济损失。所以,应该注意保证重要工业设施的关键设备,生命线工程的关键部位,以及其它重要精密设备的地震安全性,努力提高重要工业设备的抗震能力,防止发生严重次生灾害,为抗震救灾和灾后的恢复生产打下良好的基础。

0.1 设备的震害

国际上对设备抗震的研究是从20世纪60年代开始的。在20世纪60年代的一系列地震震害中,设备震害及次生灾害是严重问题之一。我国对设备抗震研究是在唐山地震后开始的。在总结唐山地震后设备震害的基础上,各工业系统对设备开始进行抗震加固工作,并于1979年颁布《工业设备抗震鉴定标准》。目前仍然适用的设备抗震鉴定规范与标准有:

《室外煤气热力工程设施抗震鉴定标准》(GBJ43—82);

《室外给水排水工程设施抗震鉴定标准》(GBJ43—82);

《工业构筑物抗震鉴定标准》(GBJ117—88);

《冶金工业设备抗震鉴定标准》(YB/T9260—98);

《石油化工设备抗震鉴定标准》(SH3001—92)。

20世纪80年代以来,随着工业现代化的发展和智能化建筑的出现,集成化的工业系统和精密仪器设备、现代化控制与计算设备、大规模的存贮设备和人工智能控制系统等普遍应用。地震中各种工业设备的破坏是十分常见的现象。与建筑相比,设备常常为金属结构,强度储备较大。地震振动产生的设备自身损毁其直接损失相对于建筑而言较小。但是,由于设备损毁可能产生的火灾和有害物质的泄漏等各种次生灾害,或者影响整个生产线、或制造系统的工作,导致的后果可能比较严重,可能造成更大的人员财产损失。这已经在许多现代发生的地震中得到证明。

根据历次地震中设备损毁的经验,地震中设备的损毁主要有以下四种原因(刘恢先,

1986; 韩精忠等, 1989; 孙柏涛等, 2000)。

(1) 易损部件破坏导致设备损坏。

在强烈的地震动下, 设备破坏从抗震能力最弱的部位开始。常见的有以下几种情况。

① 设备中比较脆弱的玻璃或陶瓷部件容易在地震中被震坏。如变电站设备中的陶瓷部件, 现代光电仪器中的玻璃或陶瓷部件等。这些部件往往同时也是设备的核心, 它们被破坏意味着设备功能的丧失。

② 地震中设备不同部件间的连接件和各种管线容易被拉断破坏。如设备与基础的固定部件易于被拉断, 然后设备会倾倒。大型成套设备在地震中经常发生这种震害。唐山地震后天津市一轻局中心试验所的大型投影仪由于横向工作台错位, 光路系统相对位置改变, 精度受损。

③ 地震中强度储备不足的部件容易损坏。如设备中细长轴的弯曲或折断, 设备承重构件中的杆件与薄壁构件部分可能会屈曲; 精密设备中高精度部件的变形超过允许值使精度丧失而报废。现代化的高精度机械加工设备就可能会产生这种类型的破坏。

④ 储液罐之类的薄壁容器在地震中常常由于承受不了液体动压力而屈曲破坏。若贮存的是油料会因油料流出引起火灾; 若贮存的是有害物质则会因容器破坏产生泄漏引起更严重的后果。

(2) 浮放设备在地震中移动、倾倒或跌落后损毁。

浮放设备指不与基础固定的设备, 浮放设备由于设备本身使用的流动性, 不能将其固定。一旦遭受破坏性地震, 它们就可能因倾倒, 跌落或强烈的振动而损坏。许多精密设备, 特别是轻型设备常常采用浮放的工作方式。这些设备中的智能设备还会产生严重的次生灾害。高灵敏度的计算机硬磁盘可能因振动损坏, 丢失重要的数据资料, 产生难以估计的次生灾害损失。浮放设备地震时位移和倾倒可以使浮放设备易损部分损坏, 精度丧失, 内贮的有害、有毒物质外泄使设备腐蚀报废。

(3) 设备基础损毁导致设备损坏。

在软弱地基或是产生砂土液化的地基上, 设备可能因不均匀沉降引起破坏。这对具有长基础的精密设备, 占地较大的大型设备有产生此类破坏的较大危险性。

(4) 建筑物的倒塌将室内的设备砸毁。

建筑物的倒塌砸毁室内的设备是地震中最常见的现象。地震中多层建筑倒塌产生的设备震害特别严重。即使是单层工业厂房中的设备也常常会在地震中被砸毁。历次大地震后的震害调查报告上都有建筑物的倒塌砸毁放置在建筑物内的设备的记载, 即使是坚固的设备也难以保存下来。因此, 建筑物的完好或裂而不倒是设备隔震研究的前提。

在中等强度的地震中, 设备也可能产生破坏。1996年5月3日11时32分46秒, 我国内蒙古自治区包头市西北部发生了 M_s 6.4破坏性地震。在这次地震中, 尽管工业建筑倒塌很少, 没有因建筑倒塌而砸坏工业设备和仪器仪表的震害发生, 但地震冲击作用仍然造成设备震害, 多表现为仪器设备精度降低, 操作失灵或局部损坏等。如内蒙古第一机械厂的1s422插齿机、ZSTE63003磨齿机和数控镗铣床等, 在地震后精度普遍降低, 需进行大修以恢复生产。核工业总公司202厂的隧道窑, 震后窑体变形, 液压系统操作失灵, 5根支架、13根硅碳棒震断, 2.0 m光栅光谱仪震后光栅损坏, 计算机系统失灵。类似的

震害很多,多数经一般修理即可恢复正常,个别需要大修(孙柏涛,1998)。

近年来建筑结构的抗震问题得到高度重视,建筑的抗震能力有了明显的提高,安装设备的地基基础稳定性也得到重视。由后两种因素引起破坏的可能性已经降低。但是,除特殊用途的抗恶劣环境设备之外,设备自身的防震问题仍未能引起足够的重视。我们曾在全国范围内对近40家电子、机械、仪器仪表的生产厂家进行调查。结果表明,除考虑设备包装状态下运输问题和环境振动影响设备正常工作的高精密设备之外,生产厂家一般不考虑设备投入使用后振动与抗震问题。进口设备也存在同样的问题。

0.2 设备防震技术应用的特点

传统抗震设计方法是以增加结构强度的方法抵御地震,采用连结、固定等方法,防止设备在地震中倾倒、跌落或滑移。但是,设备本身部件的功能要求与制造材料的限制,常常不能有效地增加设备易损部件的强度。浮放的设备也不可能采用固定的方法进行加固。这时,采用防震技术可以收到更好的效果。

与在建筑上的应用一样,防震技术在重要工业设备防震的应用已经有了不少的成果。用防震技术处理重要工业设备的防震问题已经开始显示出强大的生命力。

防震技术首先被应用到核电厂设备的地震防护上(Frederik, 1990)。法国的Framatome核电建设公司为南非建设的一座核电厂就建设在防震基础上,该公司核电厂设备的设计抗震能力为 2 m/s^2 峰值加速度,在Koeberg这个地方,防震设防标准超过了这个值,只有采用防震技术以保证核电厂的安全运行。该套系统采用了层合的合成橡胶支座,每个支座的顶上用青铜—不锈钢滑板。为满足设备安全要求,滑板的摩擦系数取为0.2。这意味着地震加速度大于 $0.2g$ 时滑板将开始滑动。该系统的造价很高,但可以用这项技术在任何地方使用标准的核电厂设备建造电厂而无需增加重新设计的费用。该电厂已于1985年建成投入使用。目前美国、日本和欧洲的一些先进的核电厂都开始采用类似的防震设计方案。

防震设计也在重要的工业设备上开始应用。新西兰的海沃兹HVDC变电站用橡胶支座加滞变阻尼的防震系统对交流滤波电容器组进行了加固(Skinner, 1993)。该变电站建在惠灵顿断层的边上,设计地震加速度是1940年埃尔森特罗地震的两倍。由于结构很轻,所用的橡胶支座是经特殊设计的,这种支座在钢板的四角粘上小橡胶片,这样既可以降低橡胶的受剪面积,又可以保证其稳定性。

在中国,中国石油天然气总公司及其所属的西安石油仪器厂、江苏石油勘探局、长庆油田管理局,与原江苏省地震局地震工程研究所一起,于1990年9月组成了浮放设备防震攻关组,开始了用防震技术解决浮放设备防震问题的研究工作,联手攻关完成了浮放设备防震技术研究,并已在石油系统内部推广示范。在浮放设备防震技术研究和推广应用的基础上,中国石油天然气集团公司抗震办公室和江苏省地震局工程防震研究中心合作编制了《石油浮放设备防震技术标准》(SY/T0318—98)。该标准于1999年3月公布,1999年10月开始实施。这是世界上第一部关于设备防震的技术标准。标准针对浮放设备的特点用简便的方法解决从地震参数确定到防震结构设计的问题,这使标准的条文简便、实

用、合理，可操作性强，体现出技术上的先进性。该标准适用于设防烈度为Ⅵ～Ⅺ度地区浮放设备的隔震设计及安装，不仅适用于石油浮放设备，对其它的同类设备也同样有很好的适用价值。该标准的公布与实施标志着我国设备隔震技术的研究与应用已经处于世界领先的地位，更为用隔震技术解决重要工业设备防震问题打下了良好的基础。

和建筑的隔震设计相比，设备的隔震设计有自己的特点。主要有以下 5 个方面。

(1) 设备隔震设计的地震输入。与建筑的设计地震动参数不同，设备的设计地震动参数与设备安放的位置有关。当设备安装在楼层上时，结构对地震波有放大与滤波作用，破坏性地震时作用于设备的地震加速度可以达到较大的量级。设备更容易在地震中损坏。因此，设备可能经受的地震动要在考虑楼层或台面的放大作用后由场地设计地震动计算得出。

(2) 设备的防震能力评估。在设备的隔震设计中需要对设备的抗震能力进行评估。这一点与建筑的隔震设计是不同的。建筑的抗震能力可以由结构设计者确定。设备的隔震设计者通常不能控制设备的抗震能力，而设备由于自身的结构特性，其抗震性能往往不能进一步增加。设备隔震装置只能根据设备的抗震能力和安放处的地震动参数进行设计。

(3) 设备隔震设计结构动力学分析方法。设备隔震设计依据的基本理论依然是结构动力学理论。由于设备的结构类型复杂，分析问题的结构模型需要有一定的经验与结构动力学基础。有几个特别需要注意的地方。

要根据设备的结构确定分析计算模型。在对立式设备进行隔震设计时，注意是否需要考虑水平向运动与垂直向运动的耦连；

为考虑浮放设备地震中的滑移和上抛运动，要建立浮放设备在地震中产生滑移或上抛运动方程，并给数值解的方法。这是解决设备受震运动分析与数字仿真技术应用的基本理论公式。

在设备隔震的设计中，在一定的条件下，可以根据地震动峰值附近的主频将地震动简化成正弦振动，将设备隔震问题简化成单质点体系的振动问题分析。在进行理论推导和分析后给出相应的条件。

(4) 设备隔震装置的设计。强烈地震造成的位移都较大，设备隔震装置应有较大的允许位移才能达到隔震的目的。大多数需要隔震的设备质量都不是很大，相应的惯性力也不大。为在较小的动力下就产生较大位移，隔震装置的材料和结构要特殊设计。研究新型的隔震材料和合理设计隔震装置是设备隔震的重要而基本的问题。

(5) 隔地震与隔微震的综合考虑。需要隔震的设备一般对振动都比较敏感，在提出隔震要求的同时经常也会有隔离隔微的要求。有些设备还会有在微振下也能正常工作的要求。但是，隔震的设计中要设立屈服限来防止隔震装置在常时微振动下产生的疲劳。这同时也意味着隔地震的装置通常不能隔微振。因此，对特殊精密设备要统筹考虑隔地震与隔微振的设计问题。

0.3 隔震技术的发展过程

基础隔震技术是一项现代防灾技术。它通过在结构与基础之间安装隔震层把结构与地

基基础分开,地震时建筑的基础可以有很大的运动,隔震层的变形隔离了传向结构的地震动力,大大减小结构的动力变形,保护结构免遭地震破坏。

基础隔震的理论的完善和技术实现是在 20 世纪后期完成的 (Kelly, 1996; 黄永林, 2000)。但是,应用基础隔震原理的建筑很早就出现了。在我国现存的许多古建筑中好多采用的是竖立在柱石上的梁柱结构。在地震时,木柱和柱石间的摩擦可以降低传向结构的地震力。结构中的斗拱在振动中产生的阻尼消耗了传给结构的能量。建于北魏后期的“悬空寺”与现代的“柔性桩”隔震设计达到的防震效果是一致的,其建筑思想比现代的“柔性桩隔震”设计要早 1500 年。目前它仍是恒山八景之一,立于山西省浑源市的翠屏山上,历经多次大地震仍然不倒。

Frank Lloyd Wright 是第一个成功地把隔震原理用于现代建筑工程的。1921 年他主持设计建造了东京的帝国饭店。这个建设场地的地表土层有良好的承载力,厚度约为 2.5 m。在该层的下面是一层软弱淤泥层。他设计了特殊的短桩基础,以地表土层为持力层,把紧密排列的短桩打入持力层到达软弱淤泥层的表面。软弱层被用作地基下的软垫,隔离东京地区地震动作用的影响。建在短桩基础上的建筑就像浮在海洋上的船一样浮在软弱淤泥层上。这是与当时的占主流的抗震设计思想完全不同的。这个建筑的隔震设计是十分成功的。1923 年的关东大地震中,该饭店显示了良好的隔震性能。这次地震中其它建筑的上部结构一般都受到严重破坏,而该建筑完好无损。

现代用于隔震的橡胶支座由橡胶片和薄片增强钢板粘合硫化加工而成,容易采用现代橡胶化工技术制造。它的水平向刚度较低,而垂直向刚度则很高。这种形式的橡胶支座首先在桥梁上使用。建筑与桥梁所用的橡胶支座结构基本相同,有类似的结构动力学要求,也同样具有耐久性、可靠性和包括防火在内的环境耐受性问题。橡胶支座可以隔离地震荷载作用下水平向的运动分量并在垂直向保持不动,也可以隔离由于地铁或公共交通产生的高频振动,保护结构免受地震或其它振动的伤害。

法国曾在靠近 Marseilles 一个名叫 Lambesc 的小镇上用这种橡胶支座隔震基础建造了一个三层楼的学校,包括三座建筑物,相互间用宽 100 mm 的地震沟隔开。该校的原设计为预应力钢筋混凝土结构,就在开工建造之前该地区的设计规范修改了,修改后的规范提高了抗震要求。为满足新规范的要求只有采用隔震结构才可以在不改变原上部结构设计条件下满足新规范的要求。该学校的建筑物采用的橡胶支座直径为 300 mm,共用了 152 个橡胶支座,建筑物没有用附加构件增加阻尼。隔震后的周期约 1.70 s。设计地震相当于Ⅶ度。这个隔震设计的动力试验在斯坦福大学 A. Blume 地震工程研究所的振动台上进行。这所学校完工以后,隔震系统的设计者 Giles Delfosse 在邻近地区建造了三座房屋。这些房屋都是瓦顶的砖混结构。用 15 cm 直径的天然橡胶支座支承。

橡胶支座的缺点是阻尼不够。为增加隔震基础的阻尼有人使用高阻尼橡胶制造支座,也有的用附加阻尼的方法采用其它材料制作阻尼器,如各种钢滞变阻尼器、铅挤压阻尼器和高分子材料制作的摩擦阻尼器等。这些阻尼器可以在各种隔震设计中使用。日本的大林组建设发展公司高技术研究和发展中心就是采用橡胶支座加钢棒阻尼器建造的。这是一座五层高钢筋混凝土结构的楼房,建成于 1986 年 8 月,共用了 14 个承载能力为 200 吨的橡胶支座和 96 个直径为 32 mm 的钢棒阻尼器。该建筑还安装了摩擦阻尼器作为附属的阻尼

器。1989 年的茨城县地震中, 该建筑表现了良好的隔震效果, 顶层的加速度减少了 90%。

铅芯橡胶垫是对橡胶支座的一大改进。在橡胶支座中心钻孔并插入一个铅芯后, 支座的临界阻尼比从 3% 增加到 10%~15%, 这样, 即使不使用其他的阻尼器也可以满足隔震设计的阻尼要求。这个重要的设计是由新西兰人 Bill Robinson 在 1980 年完成的。在为惠灵顿威廉克雷顿大楼设计隔震层时, Bill Robinson 等人首先设计的是铅阻尼器。在见到叠层橡胶支座后, 马上想到铅芯橡胶垫的设计方法, 并很快做出样品并完成了必要的试验。惠灵顿威廉克雷顿大楼就成了世界上首座使用铅芯橡胶垫的建筑。这是一座四层高的钢混结构办公楼, 紧靠惠灵顿断层, 该建筑的上部结构仍然是采用了抗震设计方法, 这反映了当时结构工程师对隔震设计的保守观念。

铅芯橡胶垫不仅满足了隔震设计的要求, 而且具有价廉的优势。如今采用铅芯橡胶垫的优点已得到广泛的认同, 许多国家都采用这项技术设计建造了楼房, 桥梁等建筑物。20 世纪 80 年代联合国工业发展组织 (UNIDO) 将它列入了发展中国家低价格住房天然橡胶隔震系统研究项目, 在中国广东的汕头、印度尼西亚的爪哇岛、意大利的 Reggio Calabria 和智利的圣地亚哥各建成一所示范性房屋。其中中国的一所为 8 层民用住宅楼, 是这个项目中面积最大、高度最高的。

用铅芯橡胶垫隔震技术建造的结构经受了强地震的考验。1994 年 Northridge 地震中, 采用铅芯橡胶垫隔震的南加州大学完好无损, 地震后立即可以使用, 类似结构的 Olive-View 医院由于强烈的地震动使顶层水管破裂而临时关闭。地震记录表明, 在 Olive View 医院楼顶地震加速度被放大到地面加速度的 250%, 而南加州大学医院的楼顶地震加速度则缩小到 35%。1995 年日本的阪神地震中, 西日本邮政储蓄计算机中心的两座对比性建筑的类似数字则分别是 300% 与 30%。在 1994 年加州 Northridge 地震和 1995 年日本 Kobe 地震中隔震建筑上的宝贵地震记录为基础隔震技术的设计理论与实践进行总结提供了第一手资料, 也是基础隔震技术成熟的标志。

铅芯橡胶垫还被用于已有建筑物的加固。美国犹他州盐湖城政府大楼是一所建于 1894 年的五层无配筋砖石结构建筑, 离 Wasatch 断层只有 3 km, 很容易为地震破坏。经过对比选择, 采用了在基础下组合安装合成橡胶支座与铅芯橡胶支座隔震的方案。共安装了 443 个隔震支座。带铅芯的隔震支座安装在建筑的周围, 用来提高对扭转的阻尼, 减轻扭转振动反应, 此外还安排了隔震沟, 安装了缓冲系统等, 保证结构的安全。另一个用铅芯橡胶垫加固建筑物的重要例子是新西兰议会建筑物的加固, 加固的议会建筑物包括旧议会大厦和议会图书馆。在建筑的基础与混凝土梁上安装了共 514 个铅芯橡胶支座和大阻尼橡胶支座。建筑可以在地震时水平移动 300 mm。现在基础隔震已经是该建筑的特色之一, 参观新西兰议会建筑物的人可以深入地下实地观看。

柔性桩结构是另一种隔震设计方案。这种设计采用立在套管中的长端承桩来隔震, 桩顶安有铰结点使桩在水平向具有一定的柔性, 套管与桩之间有一定的间隙使桩可以在套管中运动, 将结构与可能发生有害地震运动的土层分开, 桩顶安装合适的阻尼器, 构成一套有效的隔震基础系统。对于地表存在软土层的结构, 这是可采用的为数不多的隔震系统之一。建成于 1983 年的新西兰奥克兰工会大厦是世界上首座采用这种技术建造的建筑。另一座柔性桩结构建筑是惠灵顿中心警察局。该建筑距离著名的惠灵顿断层很近。

在各种隔震系统中，摩擦隔震的方法是最经济的，建造的技术也不复杂，当基础的摩擦系数确定以后，隔震的参数也就确定了，传向结构的加速度就限制为摩擦系数与重力加速度的积。这种技术首先在中国得到使用。1976年唐山大地震的震灾调查中发现，那些钢筋混凝土框架不与基础相连的建筑震害反而较轻，这些建筑在地表出现了一条水平的裂缝。这提示了把上部结构与基础分开可以减震。在这个基础上李立提出了砂垫层隔震的设计方法。在地基与底部圈梁之间垫一层经选择的砂层，使得上部结构在地震时可以产生一定的滑动，限制地基传给上部结构的力。在振动台上进行的动力试验证明这种方法确实可以达到隔震目的。李立主持用这种方法建造了几幢试验性楼房，其中有几幢目前仍在在使用。现如今摩擦隔震的方法在中国得到了继续发展，中国建筑科学院周锡元用PTFE和钢棒阻尼相结合的基础隔震办法在新疆独山子炼油厂建成了示范性建筑。

近年来有为数可观的改进隔震支座功能研究，并研究出不少的可用于隔震系统的新材料新部件。如主动隔震的动力控制系统，运用纳米材料的电磁阻尼器等。新型材料的使用使隔震技术的应用更可靠，更简便。进一步的研究结果表明，良好设计的隔震基础都可以达到隔震的效果，包括纯摩擦系统（P-F），层合橡胶系统（LRB），弹性摩擦系统（R-FBI），法国电力公司的核电厂摩擦隔震系统（EDF），新西兰的铅芯橡胶系统（NZ）和滑动加弹性摩擦系统（SR-F）等。

现代隔震技术的实用化是现代科技进步，特别是地震工程研究的成果促成的。特定场址地震反应谱分析技术的发展使人们可以相当准确地提出用于结构动力分析的地震动参数；用计算机进行结构动力反应分析的技术使设计人员可以对所设计的结构进行各种模拟分析，从而获得结构的和隔震层的动力反应，正确选择各项设计参数；能量消散装置和高质量的层合弹性支座设计制造与试验技术为隔震层的设计与建设提供有广泛范围的隔震设计部件；振动台试验技术使结构在完成前就对其进行实验验证，提高设计的可靠性。隔震技术在这些现代科学技术基础上发展起来，成为一项实用可靠的现代技术。

在工业技术已经相当发达的今天，人们已经能够设计制造出各种各样的橡胶支座用于隔震设计。设计良好安装正确的支座可以有效地隔离包括地震在内的各种振动，结构隔震技术已经成熟实用化，成为结构控制技术的一个重要部分。相对于复杂的主动控制而言，基础隔震是一种容易掌握的结构被动控制技术。因此，基础隔震设计方法已经写进了一些国家的设计规范，成为一种实用的结构设计建造方法，采用隔震技术建造的建筑物和桥梁经受了地震的考验，有了成功的经验。现代隔震技术的应用扩大了结构工程师选择结构形式的范围，在同等造价的条件下可以选择更安全的隔震结构形式，在原先比较难以进行抗震设计的地区可以很容易也很安全地建设各种建筑物与构筑物，在设计中同时考虑建筑物及其各项设施的安全问题。这就改变了我们原先仅保护结构内人的生命这一传统的建筑设计思想，基础隔震技术将会对未来的建筑设计思想产生深远的影响。

设备隔震还可能有利于地震保险业的发展。财产保险是分散地震灾害的好方法。但是，地震造成的巨大财产损失会使保险公司无利可图。从而扼杀了地震险的生命力。以美国1994年1月17日北岭地震为例，地震损失超过200亿美元。这次地震中保险公司共赔付了100亿美元。在加州大约有25%的房主和10%的商业企业购买地震保险。加州在过去25年中的地震险保费总共才34亿美元。这对保险业是一个沉重的打击，有可能造成地

震保险的市场关闭。采用隔震技术降低地震损失对地震保险业的发展是一个极大支持。

总之,隔震是一项有效的减灾措施。采用这项技术可以大幅度提高设备的地震安全性。

0.4 设备隔震技术的发展趋势

提高设备抵御地震灾害的能力是提高全社会地震灾害防御的能力的一个重要内容。随着对设备震害防御技术的重视,设备隔震技术将会得到更广泛的应用并进一步发展。从近年来国际上发表的论文和科技成果来看,设备隔震研究的重点和今后的发展方向将主要集中在以下几个方面。

1. 设备隔震系统的统筹设计

设备隔震系统的统筹设计指从设备设计应用的各个环节综合考虑,合理应用隔震技术,从用隔震技术提高设备自身抗震能力和隔离传向地震的地震力这两个方面有效地提高设备抵御地震灾害的能力。

将隔震技术用于提高设备自身抗震能力从设备的结构设计开始。在综合考虑设备成本之后,通常用于抗恶劣环境的隔震技术将会在普通的设备上得到应用。在用隔震技术保护设备的易损部分之后设备的抗震能力可以大大提高。例如,在计算机的 CDROM 中采用悬吊隔震结构以后,不仅提高了 CDROM 读盘的稳定性,也消除了 CDROM 在地震中损坏的可能性,CDROM 的抗震能力可以超过 $1.0g$ 。

在 1995 年阪神地震以后,日本用隔震技术设计出新型的集装箱港口吊车。这种新型的集装箱港口吊车的底部分别安装了滑动构件、恢复部件、消能部件和触发部件。在地震力超过一定值后隔震机制产生作用。在采用隔震技术后,集装箱港口吊车再经受 1995 年阪神地震那样的地震时应不会损坏,震后可以立即工作。隔震设计同时还降低了吊车传向港口地基的地震反力,从而保护了港口的地基。

研制新型的隔震材料和合理的隔震装置结构设计制作更加有效的隔震装置,这是设备隔震系统的统筹设计的另一个方面,研究的热点集中在新型阻尼器的研究上,如何使阻尼器在小位移下就可以有效地产生所需的阻尼。用于制作阻尼器的材料已经从传统的橡胶与高分子材料、水和油等液体发展到电磁材料、智能材料和纳米材料上。新型阻尼器必定带来相应的设计方法的变化,推动隔震技术在结构隔震设计、结构加固设计等领域的发展。

此外,主动隔震设计很快也会引入设备隔震装置设计。通过发展精确结构控制技术,设计建造自动反馈-调正结构动力反应系统,以得到在大震时也能安全工作的超级安全系统,为像核反应堆这样的具有高安全性要求的工程提供安全保证。主动隔震设计在建筑隔震设计中已有了应用,将其用在设备上在技术上是相同的。在军事装备上主动隔震设计的应用已经比较广泛,民用的主要障碍是应用成本。在进一步降低成本后,有可能在对振动有特殊要求的场合采用主动隔震的技术。

设备隔震技术发展另一个方向是发展更简单、更方便、更经济实用的隔震系统,大位移条件下的隔震装置设计等。预计将会发展出更多更好的隔震系统用于实际的设备隔震应用。