

土木工程科技创新与发展研究前沿丛书

国家自然科学基金 ( 51108092、51578160 ) 联合资助

# 高层建筑结构

## 三维隔震与抗倾覆



颜学渊◇著

中国建筑工业出版社

土木工程科技创新与发展研究前沿丛书

国家自然科学基金 (51108092、51578160) 联合资助

# 高层建筑结构三维隔震 与抗倾覆



颜学渊 著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

高层建筑结构三维隔震与抗倾覆/颜学渊著. —北京:  
中国建筑业出版社, 2018. 12  
(土木工程科技创新与发展研究前沿丛书)  
ISBN 978-7-112-22913-0

I. ①高… II. ①颜… III. ①高层建筑-建筑结构-  
隔震-研究 IV. ①TU352.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 254634 号

本书以隔震结构为研究对象, 系统介绍了高层建筑结构三维隔震和抗倾覆的理论和技術。

本书依托国家自然科学基金项目 (51108092、51578160) 和福建省自然科学基金项目 (2011J05127), 总结了作者从事科研工作十余年来在高层建筑结构三维隔震和抗倾覆方向的研究成果。在理论上, 主要介绍了振动控制的分类、三维隔震抗倾覆装置的设计, 并采用了有限元数值模拟分析、力学性能试验、振动台试验等进行验证, 同时介绍了大高宽比结构的实际动力响应。在实际应用上, 讨论了隔震结构性能水准和设防目标、三维隔震结构性能指标的确定和量化, 以及隔震结构基于性能的设计流程, 并进行了实例验证。

本书理论分析与工程实践相结合, 可供从事结构抗震和防震减灾的科研人员、结构设计人员使用, 也可作为土木工程相关院校研究生等的辅助教材。

责任编辑: 赵 莉 吉万旺

责任校对: 王雪竹

土木工程科技创新与发展研究前沿丛书

高层建筑结构三维隔震与抗倾覆

颜学渊 著

\*

中国建筑业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 7 $\frac{3}{4}$  字数: 156 千字

2018 年 12 月第一版 2018 年 12 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-22913-0

(33011)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

## ■ 序 ■

青年学者颜学渊副教授师从国家级教学名师哈尔滨工业大学王焕定教授，在其攻读博士学位期间，从事结构隔震和减震方向科学研究，取得突出的研究成果。于2009年入职福州大学，在我的课题组继续从事结构隔震减震和防灾减灾等领域的科学研究。在这期间，他对工作非常敬业，对科学研究锲而不舍。近十年来，颜学渊副教授在结构隔震和减震相关科学问题的研究上做了不少有价值的工作，作为课题组的负责人和同事，对于他在研究工作中取得的进展和贡献我深感自豪和欣慰。

地震给人类社会造成巨大的生命财产损失，传统的抗震方法有效但不经济，或者在某些情况下可能造成更严重的损失；隔震技术性价比高，可以极大地提高建筑物的安全储备；随着建筑结构技术的发展，隔震技术越来越多地应用于高层建筑，加之考虑地震动的多维特性，抗倾覆是一个突出的问题。因此，开展该问题的研究具有重要的科学意义、前沿性和实用价值。

颜学渊副教授在攻读博士期间就高层建筑结构三维隔震与抗倾覆问题做了开创性研究，在其参加工作后仍坚持不懈地在这一方向开展科学研究，并在这一领域连续培养了多位硕士研究生，综合上述研究工作形成了《高层建筑结构三维隔震与抗倾覆》一书。该书层次分明，自成体系，详细阐述了三维隔震抗倾覆装置的工作机理、性能试验、理论设计方法和有限元数值模拟，介绍了三维隔震抗倾覆系统的振动台试验和动力响应，介绍了高层三维隔震结构基于性能的设计分析。颜学渊副教授在这一领域的开创性研究和长期不懈的坚持，实属难得，也正因为我对其在这一领域的研究工作非常了解，感到有必要向读者推荐，便欣然为序。

《高层建筑结构三维隔震与抗倾覆》一书特色鲜明，内容新颖。在承袭传统结构隔震理论与方法的基础上，凝聚了作者多年来在这一领域的最新研究成果。该书融理论与试验及数值分析于一体，是一本很值得一读的著作，它的出版必将为高层建筑结构隔震技术的应用和发展发挥重要作用。

祁 皓

2018年6月20日

## ■ 前 言 ■

隔震技术是一种机理简明、成本低、构造简单且易于维护的结构被动控制技术。其抵抗地震的有效性得到多次实际地震的检验。在中国,隔震技术自20世纪90年代以来逐步发展,2008年汶川地震后得到重视而迅速推广,国内目前已建设有不少于5000栋的隔震建筑。各种隔震相关的技术标准和规范正在编制或已实施,如:新修订的《建筑隔震橡胶支座》JG 118于2017年顺利通过审查,《建筑隔震设计标准(征求意见稿)》已向各单位征求意见。随着隔震技术的发展以及高层建筑的大量建设,高层建筑采用隔震技术将成为一个必然的趋势。地震动具有多维特性,对建筑物进行三维隔震是当前的一个研究热点;高层建筑采用隔震技术特别是三维隔震技术后,倾覆问题成为一个影响结构安全性和舒适性的重要因素。作者结合承担的国家自然科学基金项目的研究,较系统地总结了课题组在这一领域的研究成果,希望能对高层建筑结构的三维隔震和抗倾覆理论与技术的发展起到促进作用。

本书是作者在总结从事科研工作十余年以来在高层建筑结构三维隔震和抗倾覆方向研究成果的基础上编写而成的。全书共分为7章,第1章介绍了结构振动控制的分类及相关概念,叙述了基础隔震、三维隔震、隔震结构抗倾覆和隔震结构基于性能的研究进展。第2章介绍了3种三维隔震抗倾覆装置的构造、加工及功能,并进行了三维隔震抗倾覆装置的水平和竖向的分体和整体性能试验。第3章阐述了三维隔震抗倾覆装置的理论设计依据,介绍了三维隔震抗倾覆装置的有限元数值模拟分析。第4章叙述了安装有碟形弹簧三维隔震抗倾覆装置的高层模型钢结构的地震模拟振动台对比试验。第5章介绍了考虑三维隔震的大高宽比结构的实际动力响应。第6章介绍了隔震结构性能水准及设防目标、三维隔震结构性能指标的确定和量化,以及高层三维隔震结构基于性能的设计流程。第7章介绍了基于性能的高层三维隔震结构的设计分析实例。

本书集成了作者博士研究期间的部分成果和多位所指导研究生的研究成果,在取得这些研究成果过程中,作者得到了许许多多的帮助。在本书完稿之际,作者要感谢哈尔滨工业大学王焕定教授,广州大学张永山教授和魏陆顺教授,福州大学祁皓教授,感谢各位同门和课题组师生的付出和支持。

本书的完成得到以下项目的支持:国家自然科学基金项目(51108092、51578160),福建省自然科学基金项目(2011J05127),在此也表示衷心的感谢。

作者虽长期从事结构隔震减震的科学研究,但限于知识面的局限,且成书时间仓促,书中难免存在疏漏之处,敬请读者批评指正。

颜学渊

2018年6月

# ■ 目 录 ■

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....               | 1  |
| 1.1 引言 .....                 | 1  |
| 1.2 结构振动控制分类 .....           | 2  |
| 1.2.1 被动减震控制 .....           | 2  |
| 1.2.2 主动与智能控制 .....          | 4  |
| 1.2.3 半主动控制和混合控制 .....       | 5  |
| 1.3 基础隔震的研究进展 .....          | 6  |
| 1.4 三维隔震的研究进展 .....          | 6  |
| 1.5 隔震结构抗倾覆的研究进展 .....       | 8  |
| 1.6 隔震结构基于性能的研究进展 .....      | 9  |
| 第 2 章 三维隔震抗倾覆装置性能试验 .....    | 11 |
| 2.1 引言 .....                 | 11 |
| 2.2 三维隔震抗倾覆装置设计制作 .....      | 11 |
| 2.3 三维隔震抗倾覆装置水平向力学性能试验 ..... | 14 |
| 2.3.1 普通无铅芯橡胶支座性能试验 .....    | 14 |
| 2.3.2 铅芯橡胶支座性能试验 .....       | 15 |
| 2.3.3 三维装置整体水平性能试验 .....     | 18 |
| 2.4 三维隔震抗倾覆装置竖向力学性能试验 .....  | 18 |
| 2.4.1 普通橡胶支座竖向性能试验 .....     | 18 |
| 2.4.2 叠层厚橡胶支座竖向性能试验 .....    | 19 |
| 2.4.3 弹簧支座竖向性能试验 .....       | 22 |
| 2.4.4 三维装置整体竖向性能试验 .....     | 26 |
| 2.5 本章小结 .....               | 28 |
| 第 3 章 三维隔震抗倾覆装置设计与数值模拟 ..... | 29 |
| 3.1 引言 .....                 | 29 |
| 3.2 水平隔震子装置的设计 .....         | 29 |
| 3.2.1 竖向刚度 .....             | 29 |
| 3.2.2 水平刚度 .....             | 30 |
| 3.2.3 屈曲荷载 .....             | 31 |
| 3.2.4 钢丝绳的设计 .....           | 32 |
| 3.3 竖向隔震子装置的设计 .....         | 33 |

|       |                           |    |
|-------|---------------------------|----|
| 3.3.1 | 碟形弹簧支座 .....              | 33 |
| 3.3.2 | 环形弹簧支座 .....              | 35 |
| 3.3.3 | 厚橡胶层橡胶支座 .....            | 37 |
| 3.4   | 水平隔震子装置的数值模拟 .....        | 39 |
| 3.4.1 | 橡胶的数值模拟 .....             | 39 |
| 3.4.2 | 叠层钢板的数值模拟 .....           | 41 |
| 3.4.3 | 钢丝绳的数值模拟 .....            | 42 |
| 3.4.4 | 水平隔震子装置整体的数值模拟 .....      | 42 |
| 3.5   | 竖向隔震子装置的数值模拟 .....        | 44 |
| 3.5.1 | 单片碟形弹簧的模拟 .....           | 44 |
| 3.5.2 | 碟形弹簧组和外导套的数值模拟 .....      | 45 |
| 3.6   | 三维隔震支座整体的数值模拟 .....       | 48 |
| 3.7   | 本章小结 .....                | 49 |
| 第4章   | 三维隔震抗倾覆系统振动台试验 .....      | 50 |
| 4.1   | 引言 .....                  | 50 |
| 4.2   | 模型结构及其相似关系 .....          | 50 |
| 4.3   | 振动台试验方案 .....             | 52 |
| 4.4   | 单向地震动输入地震反应分析 .....       | 55 |
| 4.4.1 | 加速度反应 .....               | 55 |
| 4.4.2 | 基底剪力反应 .....              | 60 |
| 4.4.3 | 位移反应 .....                | 62 |
| 4.5   | 双向地震动输入地震反应分析 .....       | 64 |
| 4.5.1 | 加速度反应 .....               | 65 |
| 4.5.2 | 基底剪力反应 .....              | 68 |
| 4.5.3 | 位移反应 .....                | 70 |
| 4.6   | 三向地震动输入地震反应分析 .....       | 72 |
| 4.6.1 | 加速度反应 .....               | 72 |
| 4.6.2 | 基底剪力反应 .....              | 73 |
| 4.6.3 | 位移反应 .....                | 74 |
| 4.7   | 本章小结 .....                | 76 |
| 第5章   | 考虑三维隔震的大高宽比结构动力响应分析 ..... | 77 |
| 5.1   | 引言 .....                  | 77 |
| 5.2   | 数值计算方法 .....              | 77 |
| 5.3   | 模型概况 .....                | 80 |
| 5.4   | 相同高宽比下不同结构地震反应对比 .....    | 82 |

|                   |                                |            |
|-------------------|--------------------------------|------------|
| 5.5               | 三维隔震结构地震响应随高宽比变化 .....         | 87         |
| 5.6               | 本章小结 .....                     | 90         |
| <b>第6章</b>        | <b>三维隔震结构性能指标及设计流程 .....</b>   | <b>91</b>  |
| 6.1               | 引言 .....                       | 91         |
| 6.2               | 隔震结构性能水准和设防目标 .....            | 91         |
| 6.3               | 三维隔震结构性能参数的选择及量化 .....         | 93         |
| 6.3.1             | 加速度指标 .....                    | 94         |
| 6.3.2             | 倾角指标 .....                     | 94         |
| 6.4               | 隔震结构基于性能设计的条件及优点 .....         | 96         |
| 6.5               | 高层三维隔震结构基于性能设计的流程 .....        | 97         |
| 6.5.1             | 隔震结构的性能目标 .....                | 98         |
| 6.5.2             | 上部结构的概念设计 .....                | 99         |
| 6.5.3             | 隔震层的设计 .....                   | 99         |
| 6.5.4             | 隔震结构性能评估 .....                 | 100        |
| 6.6               | 本章小结 .....                     | 101        |
| <b>第7章</b>        | <b>基于性能的高层三维隔震结构设计分析 .....</b> | <b>102</b> |
| 7.1               | 引言 .....                       | 102        |
| 7.2               | 结构模型及参数 .....                  | 102        |
| 7.2.1             | 结构模型 .....                     | 102        |
| 7.2.2             | 三维隔震支座的参数 .....                | 104        |
| 7.3               | 高层三维隔震结构性能分析 .....             | 105        |
| 7.3.1             | 地震动的选取 .....                   | 105        |
| 7.3.2             | 结构水平加速度性能分析 .....              | 106        |
| 7.3.3             | 三维隔震支座压应力验算 .....              | 107        |
| 7.3.4             | 三维隔震支座水平位移验算 .....             | 108        |
| 7.3.5             | 不同竖向隔震刚度的隔震结构性能分析 .....        | 109        |
| 7.4               | 本章小结 .....                     | 111        |
| <b>参考文献 .....</b> |                                | <b>112</b> |

# ■第 1 章■

## 绪 论

### 1.1 引 言

对建筑来说,地震是一种外部作用,而导致灾害的发生是由于建筑本身存在不足,要减轻和消除灾害应从建筑本身来进行研究。传统抵抗地震的方法是通过加强结构的途径来提高结构的抗震能力,但是地震发生的概率不大、持续时间也短,用这种方法抵抗地震容易造成较大的浪费。在地震中建筑物由于承受过大的加速度、速度和变形,而造成破坏,难以维持建筑物的功能,导致了巨大的震后维修费用。各国学者和工程师经过不断的努力,开辟和发展了工程结构减震控制这一崭新的领域。结构减震控制体系通过调整结构动力特性,大大减小了结构在地震(或者强风)中的震动反应,从而保护结构以及结构内部的设备、仪器、网络和装饰物等不受损坏,或者在其他外干扰力作用下使结构满足更高的减震要求。该体系已越来越广泛地被应用于工程结构的抗震抗风和减震(振)等领域,显示出了显著的减震(振)效果、社会效益和经济效益。

隔震结构一般是在结构基础和上部结构之间设置隔震层,隔震层中设置隔震支座和阻尼器等装置。隔震支座能够稳定支承建筑物的重量,随建筑物的水平变形而发生设计容许范围内的变形,且具有一定的弹性恢复力;阻尼器能够吸收输入的地震能量。即使遭受罕遇地震,隔震结构也能维持上部结构的功能,确保建筑物内部财产不遭受损失,保障生命安全。由于地震动的多维特性,对一些位于高烈度区和震中附近的重要建筑和基础设施,考虑竖向地震分量并进行三维基础隔震是非常必要的。已有的研究表明,在三维地震动作用下,结构反应比仅考虑一维地震动作用的结构反应大得多<sup>[1]</sup>。各国学者都在不遗余力地进行三维基础隔震研究,试图解决这一难题。我国学者也提出了一些三维隔震装置,在相关方面也做了一些研究,总的来说这一方向的研究仍处于初步阶段;三维隔震的理论研究及其装置的研发将拓宽基础隔震的适用范围。

对于在高烈度区和大高宽比的隔震结构,隔震技术的推广受到了限制。地震中,隔震结构有发生倾覆的危险,倾覆问题是建筑结构设计的重要环节,结构抗倾覆力矩应大于倾覆力矩。通常验算倾覆的方法是先算出各层的水平地震力并对

底部倾覆点取矩得到倾覆力矩，再由建筑物的重力对倾覆点取矩得到抗倾覆力矩，并由此来研究各个地震烈度下隔震结构的高宽比限值。近年来已有这方面的相关研究和文献，但是仍然不能把隔震技术推广到大高宽比结构和高烈度区。基础隔震建筑通过设置隔震装置来保护上部结构不受损坏，但在长周期或强烈地面运动作用下会使隔震支座变形过大而导致隔震支座失稳破坏。在这种情况下，当通过建筑物的重力对倾覆点取矩得到的抗倾覆力矩不足以抵抗地震力对倾覆点取矩得到的倾覆力矩时，研究通过什么方法、采取什么样的方式增加抗倾覆力矩以确保建筑物不遭到破坏将会带来巨大的经济和社会效益。

《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010 作为结构设计的标准，把保障生命安全作为基本的设计目标，考虑的只是在地震中保证结构稳定以及人类生命的安全，却没有把大震甚至中小地震发生时，地震对结构造成的直接或者间接经济损失考虑其中，而这种对结构破坏造成的经济损失不仅超过了设计人员的预期，也超过了社会和人类所能接受的范围。就算是采用隔震技术来减小或者隔离地震对结构的损坏，对于结构内部设备的保护也考虑较少，且没有把地震发生时结构提供给人们的舒适性指标考虑其中。对于三维隔震高层结构，需要开展关于基于性能设计和分析的研究。提出结构性能的设计将具有重要的理论意义和实用价值。

## 1.2 结构振动控制分类

地震发生时，地面运动引起结构的地震反应。对于基础固结于地面的结构，其地震反应沿着高度从下到上逐层放大。由于结构遭受物某部分的地震反应（加速度、速度或位移）过大，使主体承重结构遭受严重破坏，甚至倒塌；或者虽然主体结构未破坏，但建筑饰面、装修或其他非结构配件等毁坏而导致严重损失；或虽然主体结构及非结构配件未损坏，但室内的昂贵仪器、设备的破坏导致更严重的损失和次生灾害。为了避免上述灾害，人们必须对结构体系的地震反应进行控制，并消除结构体系的“放大器”作用。结构振动控制能有效减轻结构在地震、风、海浪等动力作用下的反应和损伤，显著提高结构的抗震性能和抗灾能力，是结构抗震减震和防灾减灾积极有效的方法。其研究和应用大体上可以分为以下几个领域：被动减震控制、半主动控制和混合控制，以及主动与智能控制。

### 1.2.1 被动减震控制

结构被动减震控制一般是指不依赖外部能源，在结构的某个部位附加控制装

置或构件, 或者对结构自身的某些构件做构造上的处理以改变结构体系的动力特性。这种方法通过结构构件之间、结构与辅助系统之间相互作用而消耗振动能量, 从而达到减震的目的。被动控制由于无需外部能源或动力, 构造简单, 成本低廉, 易于维护而成为当前应用开发的热点。但是这种控制方法只对某种设定的地震动特征进行控制, 缺乏跟踪控制和调节的能力, 若输入地震动大大偏离预先设定, 控制效果将极大地减弱。

被动控制按照其减震机理可以分为: 隔震、耗能减震和吸振减震三大类。

### 1. 隔震

隔震即隔离地震。我们通常所说的隔震指的是基底隔震, 即在结构底部, 一般是在结构与基础之间, 设置由隔震器、阻尼器等组成的隔震层, 减少地震能量向上部结构的传递, 降低上部结构的地震反应。隔震层也可以设置在中间楼层或顶层形成层间隔震和屋顶隔震。

基底隔震是在“柔性底层结构”的基础上发展而来的, 一般适用于短周期的中低层建筑和刚性结构。随着经济社会的进步, 结构越来越向高层发展, 相对于中低层隔震建筑, 在隔震层造价增加不很显著的情况下, 高层隔震无疑具有更好的经济性。但是由于高层建筑结构高宽比较大, 进行基底隔震后更容易倾覆。所以如果要对高层建筑结构进行基底隔震, 尤其是在高烈度区, 需要设置相应的抗倾覆装置。基底隔震通常有以下几种方法: (1) 叠层橡胶垫隔震; (2) 滑动摩擦隔震; (3) 短柱隔震; (4) 滚珠滚轴隔震。

### 2. 耗能减震

耗能减震技术是把结构物中某些构件设计成耗能减震部件或在结构物的某些部位设置阻尼器。在风荷载和小震作用下, 耗能构件和阻尼器处于弹性状态, 结构体系具有足够的抗侧移刚度以满足正常使用要求; 在强烈地震作用时, 耗能构件或阻尼器率先进入非弹性状态, 大量耗散输入到结构中的地震能量, 使主体结构避免进入明显的非线性状态, 从而保护主体结构免遭破坏。耗能减震技术因其减震效果好、构造简单、造价低廉、适用范围广、维护方便等特点, 越来越受到各国学者和工程师的重视。耗能装置按其耗能机理不同可以分为: (1) 金属耗能器; (2) 摩擦耗能器; (3) 黏滞耗能器; (4) 黏弹耗能器。耗能减震技术既适用于新建工程, 也适用于已有建筑物的抗震加固、改造; 既适用于普通建筑结构, 也适用于抗震生命线工程。

### 3. 吸振减震

吸振减震技术是在主体结构中附加子结构, 使结构的振动发生转移, 即使结构的振动能量在原结构和子结构之间重新分配, 从而达到减小结构振动的目的。

吸振减震装置主要有: (1) 调谐质量阻尼系统 (TMD)。TMD 是目前高层建筑和高耸结构振动控制中应用较早的结构被动控制装置之一。TMD 系统是一

个由弹簧、阻尼器和质量块组成的振动系统。它对结构进行振动控制的机理是：当结构在外部激励作用下产生振动时，带动 TMD 系统一起振动，TMD 系统相对运动产生的惯性力反作用到结构上，调谐这个惯性力，使其对结构的振动产生控制作用，从而达到减小结构振动反应的目的。（2）调谐液体阻尼系统（TLD）。TLD 的减震原理与 TMD 颇为相似，不同的是 TLD 的响应通常由于液体晃动和阻尼孔的存在而表现为高度的非线性。将 TLD 安装在结构上，当结构受到载荷作用并产生振动时，TLD 中的液体发生振荡，继而将动水压力作用于刚性容器并传递给结构，从而对结构运动产生影响。（3）液压-质量控制系统（HMS）。（4）空气阻尼器和质量泵等。

## 1.2.2 主动与智能控制

### 1. 主动控制

主动控制就是应用现代控制技术，对输入地震动和结构反应实现联机实时跟踪和预测，再按照分析计算结果应用伺服作动器对结构施加控制力实现自动调节，使结构在地震过程中始终定位在初始状态附近，达到保护结构免遭损伤的目的。

主动控制的主要特点是应用现代控制技术和外部能源对结构施加控制力。由于实时控制的控制力可以随输入地震而改变，控制的效果基本上不依赖于地震动的特性。对于提高建筑物抵抗不确定性地面运动的能力，直接减少输入的干扰力，以及在地震发生时连续、自动调整结构动力特性等方面均优于被动控制。

结构主动控制理论的研究是以各种控制算法为主线，采用计算分析和模拟方法研究主动控制的可行性、结构在不同控制律控制下对不同输入的响应、控制系统的时滞效应和时滞补偿、控制参数对控制效果的影响、结构参数的不确定性及控制结构与结构的相互作用对控制效果的影响等问题。主动控制系统的算法是指控制系统的输入与结构体系的反应状态或控制系统的输出之间的关系。土木工程结构振动控制的主动控制算法有：极点配置、线性二次型经典最优控制、线性二次型 Gauss 最优控制、瞬时最优控制、模态控制、滑移模态控制、H2 和  $H_\infty$  控制以及模糊控制等。

主动控制系统主要由信息采集系统（传感器）、计算机控制系统（控制器）与主动驱动系统（作动器）等三部分组成。主动控制系统主要有：主动质量阻尼器、主动质量驱动器、主动拉索系统、主动挡风板和脉冲发生器等。

### 2. 智能控制

机敏结构最早由日本学者提出，它的特点是利用机敏材料例如压电材料、光纤纤维、电流变（ER）、磁流变（MR）、磁致伸缩材料和记忆合金（SMA）等

实现结构系统对环境的自适应能力。而智能结构的说法更早由美国学者提出和使用。与机敏结构类似,智能结构也是利用机敏材料特性、计算机技术、微电子和现代控制理论等对结构进行智能控制,使结构可以感知环境和自身特性,采用最优控制策略作出合理响应,目前更多的是使用智能结构的说法。

对智能控制的研究主要分为对控制器和驱动器的研究。控制器相当于人的大脑,是智能控制系统的神经中枢。由它根据结构的瞬时振动反应,依据一定的控制策略去调整驱动器的瞬时参数,以实现减小结构振动反应的目的。在结构振动控制领域的应用研究主要集中在神经网络控制、模糊逻辑控制、进化算法以及三者的相互结合上。驱动器相当于人的四肢,它可以根据智能控制算法的计算结果,由控制器发出对应的指令,从而对结构施加控制力或位移,以抵抗结构的动力反应。驱动器所选用的智能材料一般有压电陶瓷、形状记忆合金、磁致伸缩材料和电(磁)流变材料等。

### 1.2.3 半主动控制和混合控制

#### 1. 半主动控制

半主动控制兼有被动控制和主动控制的优点,它以被动控制为依托,以较小的能量对控制状态进行切换,来获得较好的控制效果。

被动控制具有构造简单、造价低、易于实现和高可靠性等优点,但控制效果有一定局限性;主动控制可以达到很好的控制效果,但技术要求高、造价也高,特别是需要输入大量能量,这往往很难在实际工程中实现。为此,提出了半主动控制。半主动和主动结构控制都是借助于一定外部能源输入以使控制系统产生动作而控制和修正结构的运动,但半主动系统与主动系统不同,其仅需要极小的能量来调节它们的力学特性,而且也不对结构输入能量。

半主动控制技术的关键是半主动控制装置和控制理论。半主动控制装置主要有:半主动变刚度控制装置(AVS)、半主动变阻尼控制装置(AVD)、半主动隔震装置以及可变摩擦控制装置等。半主动控制在理论上要解决的问题与主动控制类似,核心是控制算法的研究。目前采用的半主动控制算法可以分为两大类:一是直接采用主动控制算法,在施加作用力时,主动调节可变参数器,使其提供的控制力满足要求;二是根据半主动控制的特性直接提出控制算法。

#### 2. 混合控制

混合控制就是在结构中同时应用两种以上不同的控制方法,以减少结构在外部作用下的动力响应,提高结构的抗震、抗风能力。

混合控制充分发挥了各种控制方法的优点,使主动控制提供较小的控制力就可以有效地减小结构的振动,具有较好的控制效果,拓宽了控制系统的应用范围。目前提出的混合控制方法主要有同时采用AMD和TMD的混合控制系统、

主动控制和基础隔震相结合的混合控制系统、主动控制和耗能装置相结合的混合控制系统。

### 1.3 基础隔震的研究进展

隔震的本质作用就是使结构或部件与可能引起破坏的地震地面运动或支座运动分离,尽可能隔离震动源的能量向需隔震的系统传递。这种分离是通过增加系统的柔性和提供适当的阻尼来实现的。隔震在很大程度上减小了地震能量向上部结构或构件的传递,结构的加速度反应一般要比地面加速度小。阻尼装置又消耗掉一部分输入的地震能量,使传递到隔震结构上的能量进一步减小。

近年来由于技术的进步,隔震支座的竖向承载力有很大提高,扩大了隔震技术的应用范围。在 20 世纪 90 年代后期,专家学者逐渐对高层隔震结构、超高层隔震结构和塔型等大高宽比隔震结构体系进行了研究,隔震技术得到越来越广泛的应用。日本日建设计、藤田公司、竹中工务店等建筑公司先后进行高层或超高层隔震结构体系的相关研究并尝试在工程中进行应用。基础隔震结构已经纳入中国、美国、日本等许多国家的设计规范。我国《建筑抗震设计规范》GB50011—2010 中专门设置一章“隔震和消能减震设计”和颁布了《叠层橡胶支座隔震技术规程》和《建筑隔震橡胶支座》产品标准,这说明我国隔震技术的主要技术规范已基本形成,这对有序、健康地推动隔震技术发展起到了积极的保证作用。目前,我国正处在隔震技术的推广期,隔震建筑已达 5000 栋。

我国的隔震技术研究虽起步较早,但理论、试验研究与设计方法及工程应用严重脱节,多数成果集中在理论和试验研究阶段。目前,只有采用叠层橡胶隔震支座的基础隔震结构的成果较为系统,但隔震技术的应用范围受到严格限制,这使得隔震结构的优越性未得到充分发挥。我国《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010 规定隔震技术一般适用于Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类建筑场地的结构,虽然取消了要求结构自振周期小于 1.0s 的限制,但还是在其他多个方面对隔震结构的应用进行了限制。

### 1.4 三维隔震的研究进展

传统观点认为,水平地震力对结构的破坏起着决定性的作用,在一般的结构设计和计算中较少考虑竖向地震作用。但是地震震害现象表明,在高烈度地震区(尤其是震中区),核电站、生命线工程和高耸结构等一些重要或特殊建(构)筑

物,地震动竖向加速度分量对其破坏状态和破坏程度的影响不容忽视。如2008年的汶川卧龙地震动记录,地面的竖向加速度峰值几乎等于水平加速度峰值,这表明竖向地震动的破坏性是很严重的<sup>[2]</sup>。《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010规定“9度时和8度且水平向减震系数不大于0.3时,隔震层以上的结构应按设防烈度进行竖向地震作用的计算”。目前对隔震技术的研究主要集中在水平隔震上。由于结构竖向刚度大,其竖向固有周期与竖向地震卓越周期相近,因而结构的竖向振动特性值得关注和研究。因此,研究开发同时隔离地震动水平分量和竖向分量的三维隔震装置就显得极为重要和迫切。

Kitamura等试验研究了由普通橡胶支座和碟形弹簧支撑隔震器组成的隔震系统<sup>[3]</sup>。Kageyama等研发了钢丝加强型空气弹簧三维隔震系统,并进行了1:4.5模型的振动台试验研究<sup>[4]</sup>。日本清水于同一时期开发了由普通橡胶隔震支座和空气弹簧组成的新型三维基础隔震系统。该系统的特色是采用了油压系统来抑制结构的摇摆,并进行了振动台试验,试验证明采用该系统的隔震结构的摇摆角控制在千分之一以内<sup>[5]</sup>。

唐家祥在国内率先提出采用减少橡胶支座竖向刚度的途径来研究竖向隔震问题,但橡胶支座作为竖向支撑元件,须有足够的刚度保证结构的竖向变形在容许范围之内以及拥有足够的稳定性。鉴于此,橡胶支座的竖向阻尼性能较差,其竖向刚度也只能在有限的范围内调整减小其刚度,因而未对隔离竖向地震效果产生显著影响。

熊世树提出了一种由铅芯叠层橡胶支座和碟形弹簧支座串联而成的三维隔震支座。其中铅芯叠层橡胶支座用于水平隔震,碟形弹簧支座用于竖向隔震,并分别对该三维隔震支座的刚度和阻尼性能进行静力试验和动力试验<sup>[6]</sup>。魏陆顺等研究了由水平隔震支座、竖向隔震支座和连接件构成的新型三维隔震支座。竖向刚度和水平刚度的减小促使竖向基频和水平基频远离了地铁和铁路地震动的主频。该三维隔震支座应用在某一地铁平台上部结构中,并对该类型支座进行了竖向性能和水平性能的试验<sup>[7]</sup>。李雄彦设计了一种新型的“摩擦-弹簧三维复合隔震支座”,并利用振动台对支座的隔震性能进行研究,依据试验结果建立了理论计算模型,最后将其应用于三维地震响应较为强烈的大跨结构中<sup>[8]</sup>。赵亚敏等提出并设计了一种由铅芯橡胶支座和组合式碟形弹簧组合形成的新型组合式三维隔震支座,并对其进行了性能试验。采用不同地震动输入来研究该三维隔震模型振动台试验<sup>[9]</sup>。颜学渊等提出了本书应用的具有抗倾覆性能的三种三维隔震抗倾覆装置,并分别对该三维隔震抗倾覆装置进行了力学性能试验研究<sup>[10,11]</sup>。对一高层钢框架结构安装碟形弹簧三维隔震抗倾覆支座,进行了三向地震动激励的振动台试验研究,研究证明该装置都能够较好地减小结构的三向地震反应<sup>[12]</sup>。

三维隔震装置一般主要有两种形式,一种是整体式,例如采用厚橡胶层橡胶

隔震支座,利用小的竖向和水平向刚度进行三维隔震;另一种是组合式,水平向隔震采用普通叠层橡胶支座,竖向隔震采用承载力大的碟形弹簧,或者承载力较小时采用螺旋弹簧(也可用于设备隔震)等,再配置阻尼装置进行耗能。

## 1.5 隔震结构抗倾覆的研究进展

近年来人们逐渐将隔震技术应用于高层建筑中,随着隔震结构高度的增加,隔震结构的倾覆问题越来越突出,倾覆问题的存在限制了隔震技术在高层建筑结构中的推广应用。理论和实践表明,隔震结构的高宽比是影响隔震结构抗倾覆性能的重要因素。隔震结构的高宽比越大,结构的抗倾覆性能越差。目前橡胶垫隔震是应用最为广泛的,但是其存在竖向抗拉能力差的特点,因而对于大高宽比隔震结构,隔震层支座受拉进入屈服阶段,容易导致结构整体出现倾覆破坏。满足隔震层边缘橡胶垫不受拉力以及隔震层边缘橡胶垫所受压力不超过橡胶垫的极限抗压强度这两个条件,就可以保证在地震动荷载作用下整体结构不倾覆。由于隔震层刚度较小,在地震作用下,三维隔震结构竖向变形大,结构会有摇摆反应,随着地震动幅值的增大,结构更易于倾覆,这就要求三维隔震装置或结构体系必须具有一定的抗倾覆性能。

日本的 Takenaka 公司通过在橡胶中加入碳来生产具有很高抗压和抗拉能力的高强橡胶支座。该支座极大地改善了隔震结构的抗倾覆能力。日本的一座 93m 基础隔震建筑物就在隔震层四周布置了 26 个这种高强橡胶支座。Takenaka 公司提出了一种采用直线式滑动支座抵抗倾覆力矩的措施。这种支座具有上下两层方向正交的轨道,轨道的摩擦力很小,抗拉能力很强。日本东京一座 30 层建筑中安装了这种支座。熊仲明等研究了采用滑移隔震的隔震结构体系的抗倾覆稳定性,滑动面摩擦系数决定的惯性力是整个隔震体系倾覆的主要原因之一<sup>[13]</sup>。李宏男等分析和总结了场地条件、地震动峰值、上部结构刚度、隔震层刚度、橡胶垫布置等因素对隔震结构高宽比限值的影响<sup>[14]</sup>。在保证隔震结构不倾覆的前提下,祁皓等对采用橡胶支座的基础隔震结构的高宽比限值展开了深入细致的研究<sup>[15]</sup>。祁皓等采用添加竖向钢筋的构造措施来提高隔震结构的高宽比限值,并对该措施的可行性进行了详细、系统的论证和验证<sup>[16]</sup>。王伟刚等阐述了考虑竖向地震作用的结构高宽比限值的简化计算方法<sup>[17]</sup>。付伟庆等通过对高宽比为 5 的隔震结构的振动台试验研究为隔震设计提供了试验依据<sup>[18]</sup>。颜学渊等通过对三维隔震抗倾覆支座进行性能试验和结构振动台试验表明该装置具有较为理想的隔震和抗倾覆性能<sup>[10-12]</sup>。

《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010 中关于隔震的一般规定和设计要点中

并未涉及隔震结构抗倾覆的内容,因此进一步详细地研究这方面内容具有重要的理论和实践意义,可促进隔震技术在高层建筑结构的推广应用。

## 1.6 隔震结构基于性能的研究进展

根据设计规范来保证生命安全是当前抗震设计与房屋建设的基本目标,在地震作用下,结构也许不会出现严重损坏或者不会崩塌,因而确保了人类的生命安全。但是设计规范却没有重视地震破坏所带来的严重经济损失,或者这种损失给社会所带来的危害性以及对社会不良影响。美国相关的专家和学者已达成统一意见,认为当前用于结构设计的抗震规范应当进行改进和补充,并开始提出了在不同地震水平下,对应不同分类设防目标建立基于性能的设计思想。在 ATC-40 中规定,把基于性能的抗震设计思想正式纳入到 ATC-40 报告中,作为基于性能结构设计的理论依据。1995 年,日本遭受阪神和神户两个大地震的重大地震灾害,同年,日本推出了有关结构性态设计的基本框架,目的是建立一个重要的基于性能的结构设计方法,为后续的开发项目和结构设计做理论基础研究<sup>[19,20]</sup>。

在我国一些常用的设计或者技术规范中,仅《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010 对性能设计的方法有较简单的提及和粗略的介绍。针对结构性能设计而编写的《建筑工程抗震性态设计通则》CECS 160—2004 也并非是建筑设计中的强制性规范,仅仅作为性能设计的一个参考,影响力较小。我国的抗震设计规范中三水准的设防目标,其实已经包括了一些基于性能的抗震设计思想,如果按当前提出的基于抗震性能设计目标的高低来划分,抗震设计只能算是最低的功能标准,即仅仅是考虑结构安全和生命安全为目的制定的规范。

Ismail 等对安装一种新的 roll-n-cage 隔震支座的隔震结构进行性能分析,数值模拟得出新的隔震支座可以大幅度衰减结构设备的响应,从而使得隔震结构在运行的过程中表现强大的性能<sup>[21]</sup>。Abrishambaf 等研究了隔震支座阻尼和刚度对结构抗震性能的影响,对 3、6、9 层的隔震结构进行地震作用下的性能分析,旨在明确不同隔震支座刚度和不同阻尼对隔震结构抗震性能的影响<sup>[22]</sup>。郭永恒研究了隔震结构基于性能的设计方法,表明通过合理设置隔震层的各参数,对于一般建筑,实现基础隔震结构“多遇地震作用下达充分运行、设防地震作用下达基本运行、罕遇地震作用下达保证生命安全”或者高一级的“设防地震作用下确保结构达到充分运行、罕遇地震作用下确保结构达到基本运行”的设防目标是可以实现的<sup>[23]</sup>。赵玉成和朱海华分别对基于性能的隔震加固实用设计方法和基于性能的隔震结构非结构构件抗震性能做了研究,分别提出了在性能设计中相关的设计分析方法<sup>[24,25]</sup>。胡继友对基于性能的摩擦摆基础隔震结构的抗震性能做