

土 木 工 程 丛 书

Structure Vibration Control
in Civil Engineering

土木工程结构振动控制

彭 刚 张 国 栋 编 著

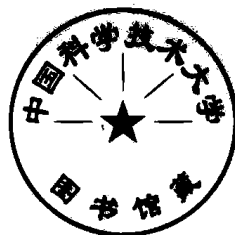
武汉理工大学出版社

土木工程丛书

Structure Vibration Control in Civil Engineering

土木工程结构振动控制

彭 刚 张国栋 编著



武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

图书在版编目(CIP)数据

土木工程结构振动控制/彭刚,张国栋编著. —武汉:武汉理工大学出版社,2002.5

ISBN 7-5629-1801-5

I. 土…

II. ① 彭… ② 张…

III. 土木工程-结构-振动-控制

IV. TU37

武汉理工大学出版社出版发行

(武汉市洪山区珞狮路122号 邮编430070)

各地新华书店经销

湖北省荆州鸿盛印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:9.25 字数:240千字

2002年5月第1版 2002年5月第1次印刷

印数:1~2000册 定价:16.00元

【内 容 提 要】

本书全面系统地总结了近三十多年来在土木工程领域中关于振动控制及其智能化方面取得的科研成果。在智能化方面着重论述了形状记忆合金的基本性能及其应用。

全书共分 10 章。第 1、2 章主要介绍了地震灾害的基本概况及减灾防灾的基本对策,工程结构振动控制技术的发展过程、基本方法、基本类型及其减震机理;第 3、4 章介绍了工程结构振动控制中智能材料的基本特征,详细地阐述了形状记忆合金、电/磁流变体材料、电/磁致伸缩材料、光导纤维和功能凝胶材料的性能以及在土木工程中的应用,论述了各种不同机理的工程结构振动控制器件及其性能;第 5、6 章阐述了工程结构的被动耗能控制技术,介绍了 TMD、TLD 及 HMS 等系统的控制理论,论述了工程结构的主动调节控制技术,讨论了各种不同类型的主动控制算法;第 7 章论述了人工神经网络技术、压电智能材料控制器及电/磁流变体智能阻尼器的基本性能及其在工程结构振动控制中的运用;第 8、9 章详细介绍了形状记忆合金的马氏体及热弹性马氏体相变的基本概念、形状记忆效应及相变伪弹性的基本原理,阐述了形状记忆合金的力学本构关系,讨论了形状记忆合金的被动控制技术;第 10 章介绍了人工地震波的产生。

本书为土木工程及相关专业本科高年级学生和研究生的教学参考书。同时可供从事土木工程结构振动控制的科研人员以及土建专业的其他工程技术人员参阅。

前 言

地震灾害严重威胁着人类的生存与发展,自有人类以来人们就为抗拒这种灾害而奋斗。随着科学技术的不断进步,预防与抵抗地震灾害的能力在不断提高。人们通过地震预报力图事先得知地震发生的地点、时间和大小,从而采用相应的措施来减小灾害损失;通过地震转移、分散把地震诱发到人口稀少的边远山区和远离大陆的深海区,从而避免灾害损失;通过工程技术来提高建、构筑物的地震抵御能力,从而降低灾害损失。目前,这种方法已成为土木结构工程的首选方案,通常称为结构抗震工程。

虽然结构抗震技术能够抵御设定地震烈度以下的地震对结构的破坏,但这一方法较大幅度地提高了构件的尺度、强度和刚度,使建筑造价居高不下,而且震后修复工作较为艰巨。于是,1972年美国学者 J. T. P. Yao 首次提出了结构振动控制的概念,引起各国学者的广泛关注和重视。30年来,诸多学者致力于这一领域的研究,取得了许多重大突破,目前已成为一门独立的新兴学科。这门学科是研究对结构动力响应进行控制的理论、方法和技术的综合性学科,是土木结构工程的高科技领域,成为土木结构工程的发展方向之一。

结构振动控制包括被动耗能控制、主动调节控制和自适应智能控制。就被动耗能控制和主动调节控制而言,已有许多成功的应用实例,而自适应智能控制目前尚处于研究开发的起步阶段。为了使读者能对结构振动控制有一个较为全面、系统的了解,书中从结构振动控制的基本方法开始,对结构振动控制中的智能材料、控制器件及性能、结构被动耗能控制技术、结构主动调节控制技术和结构智能化控制技术作了较为全面系统的介绍,并重点讨论了形状记忆合金智能材料及其在被动控制技术中的应用。为方便读

者进行有关地震方面的研究工作,书中最后还介绍了人工地震波的生成方法。

为了能对 30 年来国内外诸多学者在结构振动控制领域取得的科研成果进行全面总结,书中除介绍作者本人的成果外,更多地引用了其他学者的科研成果。在此,对国内外文献的作者们严谨的科学态度和巨大的科研成就表示崇高的敬意,并表示由衷的感谢。正是由于这些创造性的科研成果,为该书奠定了理论基础,提供了大量的编写素材。

在该书的撰写与出版过程中,三峡大学土木水电工程学院给予了大力资助。同时,还得到了湖北省教育厅技术创新项目基金和三峡大学重大项目预研基金的资助。在此表示衷心感谢。

罗先启博士、田斌博士、王康平副教授、王炎廷副教授和邹泽忠副教授对该书作者的科研工作给予了大力支持和帮助,并为该书的撰写和出版作出了巨大努力;责任编辑田道全副编审为本书的出版工作付出了辛勤的劳动。在此,表示衷心的感谢和崇高的敬意。

由于时间的仓促和水平的限制,书中可能存在不妥和错误之处,如有发现,恳请读者予以批评指正,本人表示衷心感谢。

作 者

2002 年 4 月写于三峡大学校园

目 录

1 概论	(1)
1.1 地震灾害概况	(2)
1.2 风灾及其危险性分析	(5)
1.3 减灾防灾的基本对策	(7)
参考文献	(10)
2 工程结构振动控制的基本方法	(11)
2.1 经验教训	(11)
2.2 减振技术的发展	(13)
2.3 工程结构振动控制的分类	(17)
2.4 与传统方法的比较	(20)
2.4.1 与传统方法的区别	(20)
2.4.2 振动控制方法的优越性	(21)
2.5 减震机理	(23)
参考文献	(24)
3 工程结构振动控制中的智能材料	(25)
3.1 智能材料与结构系统的基本概念	(25)
3.2 智能材料的基本特征	(26)
3.3 形状记忆合金(SMA)	(28)
3.3.1 SMA 主动控制方法的基本原理及其 SMA 作动器设计	(29)
3.3.2 SMA 被动耗能机理和耗能器的基本形式	(31)
3.4 电(磁)致流变流体材料	(32)
3.4.1 材料的基本概念	(32)
3.4.2 材料的组合成分及性能	(34)
3.4.3 材料的应用	(36)

3.5	电(磁)致伸缩材料	(37)
3.5.1	电致伸缩材料	(37)
3.5.2	磁致伸缩材料	(40)
3.6	光导纤维	(41)
3.7	功能凝胶	(45)
3.8	智能材料的未来发展	(45)
3.8.1	开发智能材料的战略意义	(45)
3.8.2	智能材料与材料科学的关系及其 发展趋势	(46)
	参考文献	(47)
4	控制器件及性能	(48)
4.1	电(磁)流变流体阻尼器	(48)
4.1.1	ER 流体阻尼器	(48)
4.1.2	MR 流体阻尼器	(50)
4.1.3	电(磁)流变流体阻尼器的力学模型	(50)
4.2	压电陶瓷控制器	(56)
4.2.1	压电陶瓷驱动器的基本性能	(56)
4.2.2	压电摩擦阻尼器的结构与性能	(59)
4.2.3	压电摩擦耗能器的设计实例	(62)
4.3	软钢耗能器	(64)
4.3.1	X 形钢板耗能器	(64)
4.3.2	环形钢板耗能器	(68)
4.3.3	软钢屈服型耗能器	(72)
4.3.4	双环软钢耗能器	(75)
4.3.5	软钢耗能器的可靠度分析	(82)
	参考文献	(88)
5	工程结构的被动耗能控制技术	(90)
5.1	调频质量阻尼器(TMD)系统	(90)

5.1.1	结构-TMD系统传递函数矩阵方程	(91)
5.1.2	结构-TMD系统动力放大系数 DMF 计算公式	(92)
5.1.3	TMD系统最优参数设计	(93)
5.1.4	结构-TMD系统的优化设计	(98)
5.2	调频液体阻尼器(TLD)系统	(99)
5.2.1	控制系统的数学模型及时域分析	(99)
5.2.2	TLD系统中晃动液体的控制力	(101)
5.3	液压质量控制系统(HMS)	(107)
5.3.1	液压质量控制系统	(108)
5.3.2	HMS系统的“刚性”分析模型	(108)
5.3.3	HMS系统的减振机理	(109)
5.3.4	HMS系统各参数对减震效果的影响	(113)
5.4	耗能减震体系的能量设计方法	(114)
5.4.1	耗能减震体系的地震能量反应方程	(114)
5.4.2	耗能减震体系的能量设计方法	(119)
5.4.3	耗能减震结构的设计原则和方法	(121)
	参考文献	(131)
6	工程结构的主动调节控制	(133)
6.1	结构主动控制的分类	(133)
6.2	主动控制系统的组成	(136)
6.3	主动控制的减震机理	(138)
6.4	结构振动主动控制算法	(139)
6.4.1	受控系统状态的数学描述	(140)
6.4.2	经典线性最优控制算法	(141)
6.4.3	极点配置法	(143)
6.4.4	瞬时最优控制算法	(144)
6.4.5	独立模态空间控制	(146)

6.4.6	H_{∞} 状态反馈控制	(147)
6.4.7	滑动模态控制	(148)
6.4.8	最优多项式控制	(149)
	参考文献	(150)
7	结构振动控制中的智能方法	(151)
7.1	结构振动控制中的人工神经方法	(151)
7.1.1	人工神经网络的基本结构与模型	(151)
7.1.2	BP 人工神经网络模型	(156)
7.1.3	人工神经网络在结构状态监测中的应用 ...	(162)
7.1.4	人工神经网络在主动控制系统中的应用 ...	(168)
7.2	压电智能控制器的振动控制方法	(176)
7.2.1	压电材料驱动器的力学性能	(176)
7.2.2	压电材料控制器的工作原理	(177)
7.2.3	压电材料控制器的控制力计算	(178)
7.2.4	结构系统控制方程	(178)
7.2.5	压电材料控制器的最优控制电压	(180)
7.2.6	实例与分析	(181)
7.3	电/磁流变体智能阻尼器的振动控制方法	(184)
7.3.1	ER/MR 智能阻尼器的力学模型	(185)
7.3.2	结构-ER/MR 智能阻尼器系统	(188)
7.3.3	半主动控制的策略	(190)
	参考文献	(191)
8	形状记忆合金及其特性	(194)
8.1	形状记忆合金及其在土木工程中的应用前景 ...	(194)
8.1.1	形状记忆合金的发展过程	(194)
8.1.2	形状记忆合金的基本特性在土木工程中的应用	(197)
8.2	马氏体及热弹性马氏体相变的基本概念	(206)

8.2.1 马氏体相变	(206)
8.2.2 热弹性马氏体相变	(214)
8.3 形状记忆效应的基本原理	(219)
8.3.1 具有形状记忆效应的基本条件	(220)
8.3.2 影响形状记忆效应的因素	(223)
8.4 相变伪弹性的基本原理	(224)
8.4.1 应力诱发马氏体相变	(224)
8.4.2 相变伪弹性	(226)
8.5 形状记忆合金的本构关系	(228)
8.5.1 本构关系的分类	(229)
8.5.2 单晶理论本构模型	(230)
8.5.3 唯象理论本构模型	(230)
8.5.4 细观力学本构模型	(239)
参考文献	(243)
9 形状记忆合金的被动控制技术	(247)
9.1 SMA 拉索被动控制结构地震响应的基本 原理和方法	(247)
9.2 SMA 拉索被动控制结构地震响应的热力学 运动方程	(251)
9.2.1 基本假定与模型	(251)
9.2.2 地震激励下结构的热力学运动方程	(251)
9.2.3 SMA 拉索的热力学方程	(258)
9.2.4 结构的被动控制力矢量	(263)
9.3 地震激励下结构的热力学运动方程的 求解方法	(265)
参考文献	(268)
10 人工地震波	(270)
10.1 基于白噪声的人工地震波	(270)

10.2 具有频率特性的人工地震波	(273)
10.3 非平稳人工地震波	(276)
参考文献	(280)

1 概 论

自有人类以来,人们为了谋求自我生存就开始了与大自然的抗争,抗拒灾害是人类自我保护的必然途径。

灾害包括自然灾害、次生灾害和人为灾害三类,这些灾害具有比较明显的共同特点:一是灾害的空间分布性;二是对结构和工程系统作用的动力特性;三是灾害发生的时间、空间和强度的随机性。自然灾害是指由于自然条件或环境突然发生剧烈的变化,致使人类生命和财产遭受损失,主要包括地震、洪水、风袭、泥石流、滑坡、岩崩、雪崩等;次生灾害主要是指由于发生自然灾害而引发的各类其它灾害,如火灾、电网崩溃、交通事故、毒气泄漏等;人为灾害是指在非自然灾害的正常情况下,由于人类本身不慎而引发的各类灾害,如火灾、各类交通事故、爆炸等。

地震是地球在运动和发展过程中,地壳和地幔上部的岩层相互作用而产生并向外释放能量的一种过程。当释放的能量超过一定限度后,就会对地表物体产生破坏,给人类带来损失,甚至于造成毁灭性的灾害。由于地震的发生带有很大的随机性,所以它对人类社会构成了严重的威胁,从而对地震的防御成为减灾防灾的主要课题之一。

风灾也是一种极具破坏性的自然灾害,它频率高、范围大。A. G. Davenport根据联合国的统计资料指出,约半数以上的自然灾害与风灾有关,而且风灾造成的损失巨大,并且近年来随着城市的发展呈现出增大的趋势,所以防御风灾也非常重要,不可懈怠。

1.1 地震灾害概况

我国地处世界上两个最活跃的地震带上,是世界上地震灾害最严重的国家之一。强烈地震给我国人民带来的灾难尤为严重,就全国范围而言,历史上的地震受灾面积已达国土面积的一半以上,伤亡人数触目惊心,1556年1月23日陕西省华县的8级大地震,死亡人数达83万余人,居世界地震历史上死亡人数之首。

回顾过去的100年,全球发生破坏性地震2600多次,其中震级大于7级的地震1200多次,我国仍为世界上遭受地震危害最重的国家之一。1920年12月16日宁夏海原的8.5级大地震,死亡20余万人,伤者更多;而在近代的大地震中,死亡人数最多的一次是于1976年7月28日发生在我国河北省唐山市的7.8级大地震,死亡24.2万余人,直接经济损失达几十亿元,灾害之严重,为世界地震史上所罕见。20世纪破坏性最严重的20多次地震中,共死亡45万人,占40%以上。特别是在地震灾害比较严重的20世纪70年代,世界上因地震而死亡的人数高达41.29万,其中仅中国就占了63.7%。

据有关统计资料显示,1989年美国洛马·普列塔(Loma-Prieta)地震造成的直接经济损失达150亿美元;1994年美国北岭(Northridge)地震的直接经济损失约为300亿美元;1995年日本阪神(Kobe)地震的直接经济损失高达1000亿美元,死亡人数为5438人,震后恢复重建工作花费了两年时间,耗资近1000亿美元,这充分说明了地震灾害对人类社会危害的严重性。

表1.1列举了20世纪在我国发生的8级以上的大地震,表1.2为新中国成立以来50年间发生的7级以上大地震灾害统计,表1.3给出了20世纪地震造成死亡人数超过5000人的记录。

目前,我国的地震基本烈度为6度及6度以上地区的面积占全国国土面积约60%,在全国的450个城市中,位于地震区的占74.5%,并且约有一半城市位于7度和7度以上地区。超过百万以上人口的大城市中,也有85.7%位于地震区。

由此可见,加强地震灾害的防御是不可忽视的重大科研课题。对土木工程而言,在地震作用时如何控制建筑物的振动,使其结构不受或减小破坏从而降低地震灾害,具有非常重要的政治意义和经济价值,目前已成为科研的热点。

表 1.1 20 世纪 9 次 M8 级以上强震统计表

序 号	发震时间	地 震 名 称	震级(M)
1	1902年8月22日	新疆阿图什	8.3
2	1906年12月23日	新疆马纳斯	8.0
3	1920年6月05日	台湾花连东南海中	8.0
4	1920年12月16日	宁夏海原	8.5
5	1927年5月23日	甘肃古浪	8.0
6	1931年8月11日	新疆富蕴	8.0
7	1950年8月15日	西藏察隅	8.5
8	1951年11月18日	西藏当雄	8.0
9	1972年1月25日	台湾新港东海中	8.0

表 1.2 中国大陆 M7 级以上强震灾害统计表

序号	地震名称	发震时间	震级 (M)	区别烈度	实际烈度	受灾面积 (km ²)	死亡人数 (人)	伤残人数 (人)	倒塌房屋 (间)
1	康定	1955年04月14日	7.5	10	9	5000	84	224	636
2	乌恰	1955年4月15日	7.0	9	9	16 000	18	—	200
3	邢台	1966年3月22日	7.2	6	10	23 000	7938	8613	1 191 643
4	渤海	1967年7月18日	7.4	—	—	—	9	300	15 290
5	通海	1970年1月5日	7.7	9	10	1777	15 621	26 783	338 456
6	炉霍	1973年2月6日	7.9	9	10	6000	2199	2743	47 100
7	永善	1974年5月11日	7.1	8	9	2300	1641	1600	66 000
8	海城	1975年2月4日	7.3	6	9	920	1328	4292	1 113 515
9	龙陵	1976年5月29日	7.6	8	9	—	73	279	46 700
10	唐山	1976年7月28日	7.8	6	11	32 000	242 769	164 851	3 219 186
11	松潘	1976年8月16日	7.2	6~9	8	5000	38	34	5 000
12	乌恰	1985年8月23日	7.4	9	8	526	70	200	30 000
13	澜沧	1988年11月6日	7.6	8	9	91 700	742	7751	224 000
14	丽江	1996年2月3日	7.0	8	9	4151	311	3706	480 000

表 1.3 20 世纪每次死亡人数超过 5000 人的地震

时 间	国家(地区)	震 级(M)	死亡人数(人)
1906 年 8 月 16 日	智利	8.6	20 000
1908 年 12 月 28 日	意大利	7.5	83 000
1920 年 12 月 16 日	中国	8.6	100 000
1923 年 9 月 1 日	日本	8.3	100 000
1927 年 5 月 22 日	中国	8.3	200 000
1932 年 12 月 26 日	中国	7.6	70 000
1935 年 5 月 31 日	印度	7.5	30 000
1939 年 12 月 26 日	土耳其	7.0	30 000
1962 年 9 月 1 日	伊朗	7.1	12 230
1970 年 5 月 31 日	秘鲁	7.0	66 794
1976 年 2 月 4 日	危地马拉	7.5	22 778
1976 年 7 月 28 日	中国(唐山)	7.8	242 000
1976 年 9 月 16 日	伊朗	7.7	25 000
1985 年 9 月 19 日	墨西哥	8.1	95 000
1988 年 12 月 7 日	亚美尼亚	8.9	50 000
1990 年 6 月 21 日	伊朗	7.7	37 000
1993 年 9 月 30 日	印度	6.4	7 600
1995 年 1 月 17 日	日本(阪神)	7.2	5 438

1.2 风灾及其危险性分析

风灾同地震灾害一样严重威胁着人类社会的安全。德国的统计资料指出,德国的风灾损失占本国总自然灾害损失的 40.5%,每年因风灾而造成的经济损失高达 100 亿美元。我国仅 1994 年浙江温州的一次台风(9417 号台风)造成的经济损失就达近 200 亿元,