

建筑结构被动控制 的理论与应用

吴波 李惠 著



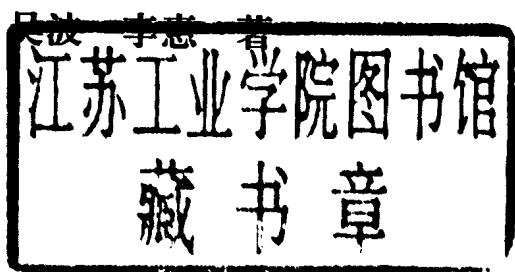
哈尔滨工业大学出版社

TU311.3

433444

W73

建筑结构被动控制的 理论与应用



哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

DE98/28 12

本书对二十多年来结构被动控制领域的研究成果作了一个比较系统的介绍,主要对调频质量阻尼器、调频液体阻尼器、液压质量控制系统、粘弹性阻尼器、粘滞阻尼器、摩擦阻尼器和软钢阻尼器等七种实用控制装置的工作原理、装置参数对结构振动控制的影响,以及装置的具体设计方法作了详细的介绍,最后讨论了高层建筑内电梯的抗震控制问题。

本书可供从事结构力学和结构工程研究的科技人员,以及土建专业的工程技术人员参考,也可作为有关专业研究生的教材。

建筑结构被动控制的理论与应用

Jianzhu Jiegou Beidongkongzhi De Lilun Yu Yingyong

吴波 李惠 著

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈工大节能印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 8.5 字数 220 千字

1997 年 2 月第 1 版 1997 年 2 月第 1 次印刷

印数 1—500

ISBN 7-5603-1214-4/TU·18 定价 12.00 元

序

土木工程结构正向着高耸、大跨、轻质和高强方向发展,结构的刚度和阻尼大大减小,在动荷载作用下,结构反应增大。传统的结构对策是依靠结构本身的性能,即结构的强度、刚度、变形能力和耗能能力达到抵御动荷载的目的,这是消极被动的结构对策。由于结构所受动荷载的不确定性,根据这种结构对策设计建造的结构很可能不能满足功能和安全性的要求。对结构施加控制系统,由其与结构共同抵御外动荷载的作用,以调谐和减小结构的动力反应,这种结构抵御外动荷载作用的途径称为结构振动控制(简称结构控制),这是积极主动的结构对策。结构控制对策是对结构对策的重大突破和发展,是结构工程发展的新的里程碑。

自从70年代初提出土木工程结构控制的概念以来,对该领域的研究已有很大发展,现在已经形成一门新兴的学科。这门学科是研究结构动力反应控制的理论、方法与技术的综合性学科,是土木工程的高科技领域。

二十多年来,各国学者对结构控制这一新兴学科领域进行了较广泛的研究,取得了一系列成果,有的研究成果已在实际工程中应用。但是,目前关于结构控制方面的著作却很少,与该学科领域的迅速发展是很不相适应的,一定程度上影响了该领域研究成果的系统总结和交流。本书作者是两位年轻博士,几年来孜孜不倦,锲而不舍,从事结构控制的研究工作,在该领域取得了具有创造性的成果。他们结合自己的研究工作,并参考了大量的国内外文献,对结构被动控制的研究成果进行了比较系统的综合和总结,撰写

成本书。相信这本书会对这门科学技术的发展起到促进作用,也定将受到读者的欢迎。

A stylized, cursive handwritten signature in black ink, likely belonging to the author or a reviewer.

1997年1月

前 言

自从美国学者 J. T. P. Yao 1972 年首次提出结构控制的概念以来,结构振动控制的研究和应用越来越得到人们的广泛关注和重视,目前已成为结构工程和结构力学领域最具前沿性的发展方向之一,并已在世界各国的实际工程中得到应用。我国对结构控制的研究始于 80 年代初。1981 年王光远院士在国内率先对高耸结构风振控制的研究现状作了综合评述,指出了在土木工程中应用结构控制的广阔前景,成为我国结构振动控制研究的奠基人。在此之后,国内一些大专院校和科研院所相继开展了结构振动控制的研究。经过广大学者十多年的努力,目前我国的研究水平已位居世界前列,其研究成果在实际工程中也陆续得到了应用,这为结构抗震抗风设计的发展开辟了一个崭新的领域。

结构振动控制一般可分为主动控制、被动控制和半主动控制三种。本书针对被动控制,对二十多年来该领域的研究成果作了一个比较系统的介绍。全书共分八章。第一章对国内外被动控制研究的现状进行了较全面的综述。第二章叙述了结构被动控制设计的基本理论。第三章到第七章分别对调频质量阻尼器(TMD)、调频液体阻尼器(TLD)、液压质量控制系统(HMS)、粘弹性阻尼器、粘滞阻尼器、摩擦阻尼器和软钢阻尼器等七种实用控制装置的工作原理、装置参数对结构振动控制的影响,以及装置的具体设计方法作了详细的介绍。第八章讨论了高层建筑内电梯的抗震控制问题。其中第一章是在作者与欧进萍研究员等合作完成的文献[1]的基础上改写的,第三章第四节、第五章、第六章第三节、第七章第五、六节和第八章也均是

作者所做科研工作的总结。在其它章节的撰写中,作者也尽量将国内外近年来散落在文献中的最新研究成果总结进去,以期使读者对结构被动控制有一个较全面的了解。但由于作者水平有限,片面和疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

最后,衷心感谢作者的导师王光远院士、刘季教授和欧进萍研究员多年来对作者的培养和帮助。

作 者

1996 年 12 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 建筑结构被动控制设计的基本理论	(13)
§ 2.1 传递函数算法	(14)
§ 2.2 准最优控制算法	(18)
第三章 调频质量阻尼器(TMD)的理论与应用	(26)
§ 3.1 调频质量阻尼器的工作原理	(27)
§ 3.2 调频质量阻尼器参数对结构风振控制的影响	(35)
§ 3.3 调频质量阻尼器参数对结构抗震控制的影响	(39)
§ 3.4 调频质量阻尼器对非对称空间结构动力反应的控制	(42)
§ 3.5 多个调频质量阻尼器对结构动力反应的控制	(51)
§ 3.6 悬吊质量摆对结构地震反应的控制	(56)
§ 3.7 调频质量阻尼器的设计	(62)
第四章 调频液体阻尼器(TLD)的理论与应用	(69)
§ 4.1 调频液体阻尼器的工作原理	(70)
§ 4.2 调频液体阻尼器参数对结构振动控制影响的试验研究	(77)
§ 4.3 第一类调频液体阻尼器参数对结构风振控制的影响	(80)
§ 4.4 第二类调频液体阻尼器参数对结构风振控制的影响	

.....	(86)
§ 4.5 第一类调频液体阻尼器的设计.....	(90)
§ 4.6 第二类调频液体阻尼器的设计.....	(93)
第五章 液压质量控制系统(HMS)的理论与应用	(102)
§ 5.1 液压质量控制系统的工作原理	(103)
§ 5.2 液压质量控制系统参数对结构抗震控制的影响	(112)
§ 5.3 液压质量控制系统的设计	(126)
§ 5.4 底层柔性结构控制体系的综合优化设计	(133)
§ 5.5 工程实例	(137)
第六章 粘弹性阻尼器和粘滞阻尼器的理论与应用.....	(142)
§ 6.1 粘弹性阻尼器的工作原理	(145)
§ 6.2 粘弹性阻尼器参数对结构振动控制的影响	(157)
§ 6.3 粘弹性阻尼器最优位置的确定方法	(161)
§ 6.4 粘弹性阻尼器的设计	(173)
§ 6.5 粘弹性阻尼器的实用设计方法	(176)
§ 6.6 粘滞阻尼器的工作原理	(180)
§ 6.7 粘滞阻尼器的实用设计方法	(189)
第七章 摩擦阻尼器和软钢阻尼器的理论与应用.....	(190)
§ 7.1 摩擦阻尼器的工作原理	(191)
§ 7.2 摩擦阻尼器参数对结构振动控制的影响	(194)
§ 7.3 摩擦阻尼器的设计	(198)
§ 7.4 软钢阻尼器的工作原理	(202)
§ 7.5 软钢阻尼器参数对结构振动控制的影响	(205)
§ 7.6 软钢阻尼器的设计	(209)

第八章 高层建筑内电梯的抗震控制	(212)
§ 8.1 电梯平衡重体系抗震控制的基本原理	(215)
§ 8.2 电梯平衡重体系的动力反应分析	(228)
§ 8.3 电梯平衡重体系的抗震控制设计	(236)
参考文献	(248)

第一章 绪 论

振动控制早在 20 世纪初就已应用于机械行业,而后又广泛应用于航天和运输工程中。在土木工程中的应用却相对较晚,至今只有二十多年的历史。但自美国学者 J. T. P. Yao 1972 年首次提出结构控制的概念以来,结构振动控制的研究和应用越来越得到人们的广泛关注和重视,目前已成为结构工程和结构力学领域最具前沿性的发展方向之一,并已在世界各国的实际工程中得到应用。

结构振动控制可分为被动控制、主动控制和半主动控制三种。被动控制是无外加能源的控制,其控制力是控制装置随结构一起振动变形,因装置自身的运动而被动产生的。主动控制是有外加能源的控制,其控制力是控制装置按某种控制规律,利用外加能源主动施加的。半主动控制一般为有少量外加能源的控制,其控制力虽也由控制装置自身的运动而被动地产生,但在控制过程中控制装置可以利用外加能源主动调整自身的参数,从而起到调节控制力的作用。这三种控制中,主动控制的效果最好,但由于建筑结构体型巨大,导致所需外加能源较大,加之控制装置比较复杂,因此其应用程度目前还逊色于被动控制和半主动控制。除上述三种控制形式外,近年来混合控制也日益成为结构振动控制领域新的发展趋势。所谓混合控制就是在结构上同时应用被动控制和主动控制,或者是同时应用不只一种的被动控制装置,从而充分发挥每一种控制形式和每一种控制装置的长处,克服它们的弱点,以获得更好的控制效果。

被动控制从广义上讲可分为基础隔震和耗能吸能减振两大类。其中基础隔震经过国内外学者多年的研究和大量工程应用,目

前已形成一个比较完整的体系。近年来,人们在提到基础隔震时常常将其视为一种独特的控制形式,而与主动控制等相提并论。这样,被动控制从狭义上讲,就只包含耗能吸能减振了。本书所指被动控制,就是针对其狭义而言的。

在过去的二十多年中,国内外学者提出了大量耗能吸能被动控制装置。从它们耗能和吸能的机理上看,主要可分为如下六类:调频质量阻尼器(TMD)、调频液体阻尼器(TLD)、粘弹性阻尼器、粘滞阻尼器、软钢阻尼器和摩擦阻尼器。下面在文献[1]的基础上,对上述六种阻尼器的研究现状做一比较全面的综述。有关它们的应用情况将在本书第三、四、六和七章中介绍。

一、调频质量阻尼器(TMD)

调频质量阻尼器对结构进行振动控制的机理是将结构振动的部分能量吸收到自己身上,转化成自身的动能和阻尼耗能,从而达到减小结构反应的目的。

文献[2]在1928年针对无阻尼结构分别研究了无阻尼TMD和有阻尼TMD对结构反应的影响,并给出了TMD最优参数的确定方法。在这之后,大批学者针对结构激励的不同形式(如地震和风荷载)和不同的控制目标(如结构的位移、速度和加速度),陆续对TMD最优参数(如质量比、频率比和阻尼比)进行了探讨,并给出了相应的确定方法或经验公式^[3~10]。在这些经验公式中,频率比和阻尼比常常是质量比的函数。实际应用中,质量比一般是预先确定的,这样利用有关公式就可方便地确定TMD的最优频率比和阻尼比。

研究结果表明^[11],当TMD的自振频率被调频到结构第一振型频率附近时,对结构第一振型反应有较好的控制效果,但对高阶振型反应的抑制较差。最近,文献[12]针对三种不同类型的结构,就TMD控制其地震反应的效果进行了计算和试验研究。结果表明,TMD对同一结构地震反应的控制效果随输入地震波的不同

有很大变化,同时,同一地震波作用下不同结构的减振效果也相差较大。有些工况控制效果很好,而另一些工况控制效果却很差。当输入地震波的卓越频率与结构的自振频率相差较大时,TMD(调频到结构的自振频率)对结构反应的减振效果较差。

文献[13]通过试验指出,除粘滞阻尼器之外,其它耗能装置(如粘弹性阻尼器和摩擦阻尼器等)也可用来为 TMD 自身提供阻尼。

由于 TMD 只有当其固有频率被调频到结构自振频率附近时,才会产生较好的控制效果,因此在设计 TMD 之前,准确把握结构的自频是十分必要的。可是在实际工程中,由于各种随机因素的影响,准确确定结构的自振频率有时是十分困难的,这无疑将影响 TMD 的设计和其建成后对结构的控制效果。为了克服上述不足,文献[14]提出了多个 TMD 的概念和相应的 TMD 参数优化步骤。所谓多个 TMD 就是在结构上布置多个质量较小的 TMD,其中每个 TMD 的固有频率均不相同,从而形成一个频率范围,这样即使结构自频的确定有所误差,一般也将落在该频率范围内,从而确保了多个 TMD 对结构有较好的控制效果。除此之外,文献[14~17]还分别对多个 TMD 的动力特性和设计进行了讨论,并给出了其最小频率范围的计算公式。

在过去二十多年中,人们根据不同结构的特点,提出了 TMD 的不同构造,如文献[18]针对高耸烟囱提出的环状摆和文献[19]提出的悬吊质量摆等。它们的形状虽然不同,但其控制机理却是相同的。

到目前为止,国内外学者对 TMD 的研究几乎都是考察它对平面结构模型动力反应的减振效果。但实际结构却都是空间结构,且其中相当一部分是无法用平面模型来描述的非对称空间结构。这使得实际结构的一些反应特性(如非对称空间结构的扭转反应),以及 TMD 在楼面上的安装位置对控制效果的影响等因素在讨论中无法考虑,从而在一定程度上限制了有关成果的适用性。针

对这一不足,文献[20]探讨了 TMD 楼面安放位置对降低非对称空间结构动力反应的影响,并针对不同安装位置和质量比确定了 TMD 的最优参数。

二、调频液体阻尼器(TLD)

调频液体阻尼器在结构振动控制中的应用始于本世纪 80 年代后期。它是利用调频液体阻尼器随结构振动过程中,液体对阻尼器箱壁产生的动压力差来作为结构控制力的,同时还将结构振动的部分能量转化成液体晃动过程中的阻尼耗能,从而达到减小结构反应的目的。

目前,TLD 主要分为两类。第一类 TLD 是一种矩形或圆柱形的水箱;第二类是一种具有 U 型形状的管状水箱。与 TMD 类似,为了充分发挥 TLD 的减振作用,其固有频率也应调频到结构的自振频率附近。

由于 TLD 中液体的运动具有强烈的非线性,因此要想精确建立 TLD 的计算模型是比较困难的。文献[21~26]对此进行了探讨,并针对第一类 TLD 给出了一些简单的线性和非线性分析模型。这些模型均是建立在浅水波理论基础上的,它们大致可分为三类:第一类是不考虑表面波破碎效应的线性模型;第二类是考虑了该效应的非线性模型;第三类是先将液体对 TLD 水箱壁的动压力用两个与箱体联结形式不同的等效质量块的振动效应来模拟,然后在此基础上建立的。无论是什么模型,液体的晃动频率(特别是基频)和阻尼均是其关键参数。利用线性浅水波理论,液体晃动的基频可以非常准确地求得,对此文献[25,27]通过试验进行了验证。而液体阻尼可利用文献[25~27]在试验基础上给出的半经验公式求取。对于轴对称结构(如电视塔、控制塔等)来说,由于其动力反应可以是任意方向的,显然圆柱形 TLD 更适合于它。虽然文献[25,28]在建立矩形 TLD 的分析模型时考虑了表面波破碎效应,但要在圆柱形 TLD 中考虑上述效应似乎是困难的。文献[29]

通过分析给出了第二类 TLD 的非线性计算模型。一般来说,第二类 TLD 只能控制一个方向的结构振动,可结构在风和地震作用下的反应却常常是两个方向的,针对这一问题,文献[30]提出了一种能控制结构双向振动的第二类 TLD。

与 TMD 类似,为了充分发挥 TLD 的减振作用,应对其参数(如液体质量、阻尼和频率)进行优化并依据优化结果设计 TLD。对第一类 TLD 来说,其液体晃动频率的调节可通过改变水箱的尺寸和水深来实现,而第二类 TLD 中液体晃动频率的调节可通过改变水箱中水中心线的总长度来达到。TLD 中液体的阻尼一般是液体粘性、水深和波浪状况等的函数。为改变液体阻尼,除调整上述各因素外,也可通过在水箱中加设滤网(针对第一类 TLD)或改变水箱中的隔板形式和开洞率(针对第二类 TLD)来实现。

为提高 TLD 的减振效果,文献[31]开展了复合 TLD 对结构振动控制的研究。所谓复合 TLD 就是将一个大水箱分为若干个小水箱,在每个水箱中注入不同深度的水,从而得到具有不同频率的多个小 TLD。在谐波荷载作用下,由于液体阻尼的非线性特性,当振动幅值较小时,复合 TLD 对结构的减振效果比液体质量与之总液体质量相等的常规 TLD 的控制效果更好,而在振动幅值较大时,二者的减振效果相似。

文献[27]通过设有 TLD 的三层结构的地震模拟振动台试验,对 TLD 控制结构地震反应进行了研究。试验结果表明:①TLD 对基频约小于 1 Hz 的柔性结构的地震反应控制是有效的,而对于基频为数赫兹的刚性结构,TLD 已不适用,因为自频达几赫兹的 TLD 将是水平断面很小的深水箱,难以发挥控制作用;②TLD 的减振效果与结构基频和地震动卓越频率之间的比值有关,当该频率比在 1.0 附近时,控制效果最好,在地震动卓越频率偏离结构基频时,减振效果相对减弱,但此时结构反应的绝对值也较低。除此之外,文献[33,34]通过将地面运动模拟成平稳和非平稳随机过程,也对 TLD 控制结构地震反应进行了研究。

三、粘弹性阻尼器

粘弹性阻尼器对结构进行振动控制的机理是将结构振动的部分能量通过阻尼器中粘弹性材料的剪切变形耗能耗散掉,从而达到减小结构反应的目的。

在结构振动控制中使用粘弹性阻尼器已有二十多年的历史。1972年建成的纽约 110 层世界贸易大厦,安装了一万个粘弹性阻尼器。另一幢安装粘弹性阻尼器的典型是美国西雅图的 76 层哥伦比亚大厦,共安设了 260 个阻尼器。它们安装粘弹性阻尼器的目的都是力图减小结构的风振反应。将粘弹性阻尼器用来控制结构的地震反应,只是近十年左右的事。

在结构振动控制中使用的粘弹性材料一般都是高分子聚合物。将上述材料粘贴在几块钢板之间就形成了最简单的粘弹性阻尼器。一旦钢板之间发生相对位移,其间的粘弹性材料就会产生较大的剪切变形,进而达到耗能的目的。粘弹性阻尼材料的耗能力一般与其变形频率和环境温度有关。变形过程中,剪应力 $\tau(t)$ 和剪应变 $\gamma(t)$ 的关系为^[35]

$$\tau(t) = G'(\omega)\gamma(t) + \frac{G''(\omega)}{\omega}\dot{\gamma}(t) \quad (1.1)$$

式中 $G'(\omega)$ 和 $G''(\omega)$ 分别是粘弹性材料的贮存弹性模量和损耗弹性模量。文献[36,37]在 Maxwell 模型基础上,分别给出了 $G'(\omega)$ 和 $G''(\omega)$ 的数学表达式。与此同时,文献[38]利用 Boltzmann 迭加原则也对 $G'(\omega)$ 和 $G''(\omega)$ 进行了讨论,并给出了相应的数学表达式。

根据式(1.1)所示本构关系,可得粘弹性阻尼器所受外力 $F(t)$ 与阻尼器变形 X 之间的关系为

$$F(t) = k_d(\omega)X + c_d(\omega)\dot{X} \quad (1.2)$$

式中 $k_d = \frac{AG'(\omega)}{\delta}$; $c_d = \frac{AG''(\omega)}{\omega\delta}$ 。其中 A 和 δ 分别是阻尼器中粘弹性材料的受剪面积和厚度。

从式(1.2)可以看出,一个线性结构安装上粘弹性阻尼器后仍保持其线性特征不变,阻尼器的作用只是相当于增加了结构的刚度和阻尼。这为分析有阻尼器结构的动力反应提供了方便。对单自由度线性结构,其反应分析可直接利用式(1.2)进行;对多自由度线性结构,文献[38]利用文献[39]所提模态应变能量法,给出了安装粘弹性阻尼器后受控结构振型阻尼比和振型频率的求解方法,由此即可方便地进行结构反应分析。

由于 $G'(\omega)$ 和 $G''(\omega)$ 均与粘弹性材料的变形频率有关,这就为安装有粘弹性阻尼器的结构的非线性反应分析增加了困难,因为此时有关频域分析方法对非线性结构已不再适用。为解决上述问题,文献[40~42]提出了粘弹性材料的复参数 Kelvin 模型,其中的模型参数均是复数,但与变形频率无关。在此基础上,上述文献还进一步提出了利用该模型进行结构动力分析的方法。

美国加州大学 Berkeley 分校对两个足尺粘弹性阻尼器进行了动力试验,同时还对六个小阻尼器进行了大应变(大于 300%)情况下的破坏试验。在中国也进行了一个五层原型结构的动力试验。由于强烈地震作用下,结构一般将进入非弹性工作状态,而此时结构的等效阻尼比已明显高于弹性时的振型阻尼比,因此,为了有效地降低结构的非弹性反应,由粘弹性阻尼器附加给结构的阻尼比应当有一个比较大的值(如 12%或更高)。综合国内外学者的研究成果可以看出,粘弹性阻尼器对钢结构和钢筋混凝土结构在任意地震作用下的反应均有良好的减振效果,同时由于阻尼器在钢筋混凝土结构的开裂阶段就已开始耗能,因此可以有效地降低钢筋混凝土结构损伤的进一步发展。

粘弹性阻尼器除用于新建结构的振动控制外,也可用于已有结构的抗震加固。对此已进行了一个 1:3 的三层钢筋混凝土结构模型的振动台试验和四个 3:5 模型的振动台试验。试验结果表明,在非延性钢筋混凝土结构中附加粘弹性阻尼器,能有效地改善结构在强震作用下的性能。