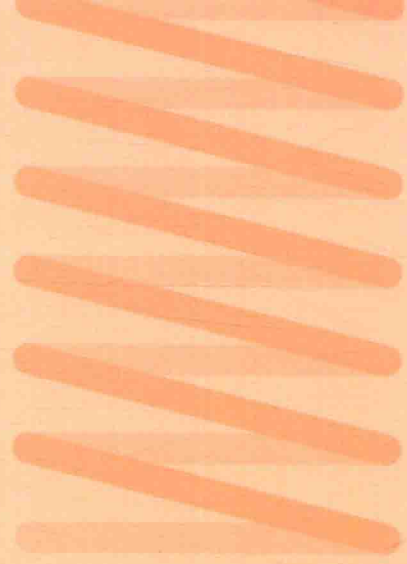




# 负刚度减震系统 理论与试验

Theoretical and Experimental Studies On Vibration Control  
System with Negative Stiffness Device



孙彤◎著

中国建筑工业出版社

非外借

# 负刚度减震系统理论与试验

Theoretical and Experimental Studies On Vibration Control  
System with Negative Stiffness Device

孙 彤 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

负刚度减震系统理论与试验/孙彤著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 11  
ISBN 978-7-112-22844-7

I. ①负… II. ①孙… III. ①建筑结构-防震设计 IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 240038 号

本书利用负刚度装置和 SMA 阻尼器的特性, 设计了负刚度减震系统, 并对其在楼房和桥梁中的控制效果进行了模拟研究。主要包括: 绪论; 新型轨道式负刚度装置设计和建模; 轨道式负刚度装置振动台研究及数值模拟; 负刚度减震系统中的 SMA 阻尼器; 基于 Benchmark 模型的负刚度减震系统控制研究; 结论与展望等。

责任编辑: 杨 杰

责任设计: 李志立

责任校对: 焦 乐

负刚度减震系统理论与试验

Theoretical and Experimental Studies On Vibration Control  
System with Negative Stiffness Device

孙 彤 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文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 字数: 141 千字

2019 年 1 月第一版 2019 年 1 月第一次印刷

定价: 78.00 元

ISBN 978-7-112-22844-7

(32964)

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)

# 前 言

在众多结构振动控制方式中,被动控制以其可靠的控制效果、维护要求低、无需外部信号和能源输入等特点受到工程师和研究人员的广泛关注,是目前实际应用最多的振动控制技术。目前被动控制方案大多会增加结构刚度,对结构位移响应控制效果较好的同时牺牲了对加速度响应的控制。此外,现有的被动控制还存在着一些明显不足,例如残余变形、震后维护、阻尼器耐久性、安装后对结构产生附加荷载等问题。负刚度控制能够有效降低结构刚度,对剪力响应和加速度响应都有较好控制效果,负刚度控制增加的位移可以通过安装适当的阻尼器进行控制。形状记忆合金(Shape Memory Alloys)具有许多优越的性能,如形状记忆效应、超弹性、耐腐蚀等,是制作高性能阻尼器的理想材料。本书利用负刚度装置和 SMA 阻尼器的特性,设计了负刚度减震系统,并对其在楼房和桥梁中的控制效果进行了模拟研究,主要工作包括以下几个方面:

(1) 提出了一种新型轨道式负刚度装置,并通过振动台试验对其力学性能进行了研究。通过循环加载得到不同弹簧预压缩量下负刚度装置的滞回曲线;通过扫频试验测试了负刚度装置的频响性能。提出了负刚度装置的设计方法,建立了轨道式负刚度装置的理论模型,并对其滞回性能进行了数值模拟,试验结果与模拟结果吻合较好。

(2) 提出了一种新型多维 SMA 阻尼器,并在万能试验机上对其力学性能进行了测试。20℃室温环境中,在不同加载频率和不同幅值的正弦激励下,分别测试了 SMA 丝不同初始应变时阻尼器的滞回性能。对阻尼器扭转性能也进行了测试。建立了多维 SMA 阻尼器的理论模型,并对其在周期荷载下的力学性能进行了数值模拟,不同幅值下的模拟结果均与试验结果吻合较好,验证了理论模型的有效性。将轨道式负刚度装置和多维 SMA 阻尼器配合使用,构成负刚度减震系统,提出了负刚度减震系统的优化设计方法。

(3) 针对第二阶段 Benchmark 高速公路桥模型设计了负刚度减震系统,采用 Simulink 程序编制了模拟程序,研究了其在 Benchmark 高速公路桥问题中的控制效果。结果表明,在 6 条地震波作用下,负刚度减震系统的控制效果与半主动控制的效果相当,以被动的方式实现了半主动的控制效果。

(4) 针对智能隔震 Benchmark 楼房问题设计了负刚度减震系统,并研究了其对 Benchmark 隔震模型的控制效果。研究了负刚度系统在七条地震波下的控制效果,并与被动、半主动和主动控制效果对比,结果表明负刚度控制对位移、加速度和基底剪力等响应的控制效果均明显优于其他三种控制方案。

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 1 绪论                    | 1  |
| 1.1 研究背景与意义             | 1  |
| 1.2 负刚度控制理论基础           | 3  |
| 1.2.1 负刚度控制简介           | 3  |
| 1.2.2 负刚度控制机理           | 4  |
| 1.2.3 负刚度控制研究现状         | 6  |
| 1.3 形状记忆合金及其特性及应用       | 8  |
| 1.3.1 形状记忆合金特性          | 8  |
| 1.3.2 形状记忆合金在结构控制中的研究进展 | 10 |
| 1.3.3 形状记忆合金在其他领域应用     | 14 |
| 1.4 本书研究内容              | 15 |
| 2 新型轨道式负刚度装置设计和建模       | 16 |
| 2.1 引言                  | 16 |
| 2.2 轨道式负刚度装置设计及工作原理     | 16 |
| 2.3 轨道式负刚度装置理论模型        | 17 |
| 2.4 负刚度装置设计方法           | 18 |
| 2.4.1 强化点确定             | 19 |
| 2.4.2 虚拟屈服点设计           | 20 |
| 2.4.3 NSD 出力幅值设计        | 20 |
| 2.5 轨道式 NSD 模型数值模拟      | 21 |
| 2.6 本章小结                | 23 |
| 3 轨道式负刚度装置振动台研究及数值模拟    | 25 |
| 3.1 试验装置                | 25 |
| 3.2 轨道式负刚度装置振动台试验       | 27 |
| 3.2.1 拟静力试验             | 27 |
| 3.2.2 动力试验              | 28 |
| 3.3 试验结果与分析             | 29 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 3.3.1 拟静力试验                    | 29 |
| 3.3.2 动力试验                     | 29 |
| 3.4 本章小结                       | 32 |
| 4 负刚度减震系统中的 SMA 阻尼器            | 33 |
| 4.1 引言                         | 33 |
| 4.2 形状记忆合金本构模型                 | 35 |
| 4.2.1 Tanaka 本构模型              | 35 |
| 4.2.2 Liang&Rogers 本构模型        | 37 |
| 4.2.3 Brinson 本构模型             | 38 |
| 4.2.4 Graesser-Cozzarelli 本构模型 | 39 |
| 4.3 多维 SMA 阻尼器构造及工作原理          | 40 |
| 4.3.1 多维 SMA 阻尼器构造             | 40 |
| 4.3.2 多维 SMA 阻尼器工作原理           | 41 |
| 4.3.3 功能特点                     | 41 |
| 4.4 多维 SMA 阻尼器试验及数值模拟          | 42 |
| 4.4.1 试验概况                     | 42 |
| 4.4.2 考察指标                     | 43 |
| 4.4.3 试验结果及分析                  | 44 |
| 4.4.4 理论模型                     | 47 |
| 4.4.5 数值模拟                     | 49 |
| 4.5 负刚度减震系统的优化设计               | 51 |
| 4.5.1 受控结构运动方程                 | 51 |
| 4.5.2 目标函数                     | 52 |
| 4.5.3 受控结构模型                   | 52 |
| 4.5.4 优化过程及结果                  | 53 |
| 4.6 本章小结                       | 55 |
| 5 基于 Benchmark 模型的负刚度减震系统控制研究  | 57 |
| 5.1 引言                         | 57 |
| 5.2 高速公路桥 Benchmark 模型的负刚度控制   | 58 |
| 5.2.1 Benchmark 模型介绍           | 59 |
| 5.2.2 评价指标                     | 61 |
| 5.2.3 地震输入                     | 64 |
| 5.3 负刚度减震系统参数设计                | 66 |

|       |                                   |    |
|-------|-----------------------------------|----|
| 5.4   | 控制效果·····                         | 68 |
| 5.5   | 八层智能隔震 Benchmark 楼房模型的负刚度控制 ····· | 74 |
| 5.5.1 | Benchmark 楼房模型 ·····              | 74 |
| 5.5.2 | 隔震系统模型·····                       | 76 |
| 5.5.3 | 评价指标·····                         | 78 |
| 5.5.4 | 地震输入·····                         | 79 |
| 5.6   | 负刚度减震系统参数设计·····                  | 80 |
| 5.7   | 控制效果·····                         | 81 |
| 5.8   | 本章小结·····                         | 89 |
| 6     | 结论与展望 ·····                       | 91 |
| 6.1   | 结论·····                           | 91 |
| 6.2   | 创新点·····                          | 92 |
| 6.3   | 展望·····                           | 93 |
|       | 参考文献·····                         | 94 |

# 1 绪 论

## 1.1 研究背景与意义

地震是诸多自然灾害中对人类生命财产威胁最大的一种。其特点是突发性强, 堪比核聚变的巨大能量在几十秒时间内转化为地壳动能, 造成大量房屋和桥梁倒塌、人员伤亡以及交通、供电、供水等生命线工程瘫痪。仅 2000 年以来, 全球 7.0 级以上地震就发生了 80 次, 其中 2004 年 12 月 26 日, 印度尼西亚苏门答腊岛附近海域发生里氏 9.3 级强烈地震并引发海啸, 波及多个国家, 共造成 22.6 万人死亡或失踪, 数十万人无家可归<sup>[1]</sup>。2008 年 5 月 12 日, 中国四川省汶川县发生里氏 8.0 级地震, 统计显示, 地震造成约 69000 人遇难, 逾 37 万人受伤, 经济损失超过 1000 亿美元<sup>[2]</sup>。2010 年 1 月 12 日, 海地发生 7.3 级地震, 地震造成 27 万人死亡, 48 万人无家可归, 370 多万人受灾<sup>[3]</sup>。2010 年 2 月 27 日, 智利发生 8.8 级特大地震, 并引发强烈海啸, 灾难造成 802 人死亡, 近 200 万人流离失所, 经济损失达 300 亿美元<sup>[4]</sup>。2011 年 3 月 11 日, 日本发生里氏 9.0 级强震, 并引发海啸, 造成 14063 人死亡、13691 人失踪<sup>[5]</sup>。2010 年 4 月 14 日, 中国青海省玉树藏族自治州玉树县发生剧烈地震, 最高震级 7.1 级, 造成 2698 人遇难<sup>[6]</sup>。图 1.1 为地震中受到损毁的基础设施。

随着经济的发展, 城市化进程加快, 建筑结构的发展日益趋向大跨度、超高层。复杂的结构形式也层出不穷, 地震灾害损失呈加速增长的趋势。许多复杂结构对特定构件的变形有严格要求, 例如允许构件进入非线性状态, 或者对非线性变形幅度有特定限制。“小震不坏, 中震可修, 大震不倒”的传统抗震设防原则<sup>[7]</sup>已经满足不了人们对安全性的要求, 更加高效、智能的抗震手段成为各国学者的研究热点。

传统的抗震手段主要有两种: 一是通过增加构件截面、采用高强度材料等方式增加结构刚度和强度; 二是通过某些构件的变形乃至破坏来消耗能量。这两种抗震手段的成本较高而且抗震效果并不好。1972 年 Yao 教授首次在土木工程领域提出结构控制的概念<sup>[8]</sup>。经过 40 多年发展, 结构控制领域已经结出丰硕成果, 并广泛应用于实际工程当中。

结构控制方式主要包括被动控制、主动控制、半主动控制和智能控制<sup>[9~12]</sup>。其中被动控制具有不需要外部能源输入、装置简单可靠和易于维护等特点, 因此

受到广泛应用。被动控制从控制机理上分为三大类：基础隔震<sup>[13~22]</sup>、吸能减震<sup>[23~42]</sup>和耗能减震<sup>[43~71]</sup>。隔震系统能够隔离基础和上部结构，减少能量传递，目前的应用有铅芯橡胶隔震支座<sup>[19]</sup>、摩擦摆隔震支座<sup>[17]</sup>等；吸能减震是通过在结构上附加与主结构自振频率相近的子结构，利用子结构振动吸收能量，目前主要应用有调谐液体阻尼器<sup>[47][54]</sup>和调谐质量阻尼器<sup>[53][55]</sup>；耗能设备能够耗散一部分地震能量，达到保护上部结构的目的，目前主要的耗能装置有黏滞阻尼器<sup>[33]</sup>、黏弹性阻尼器<sup>[36]</sup>、金属阻尼器<sup>[41]</sup>和摩擦阻尼器<sup>[51]</sup>等。

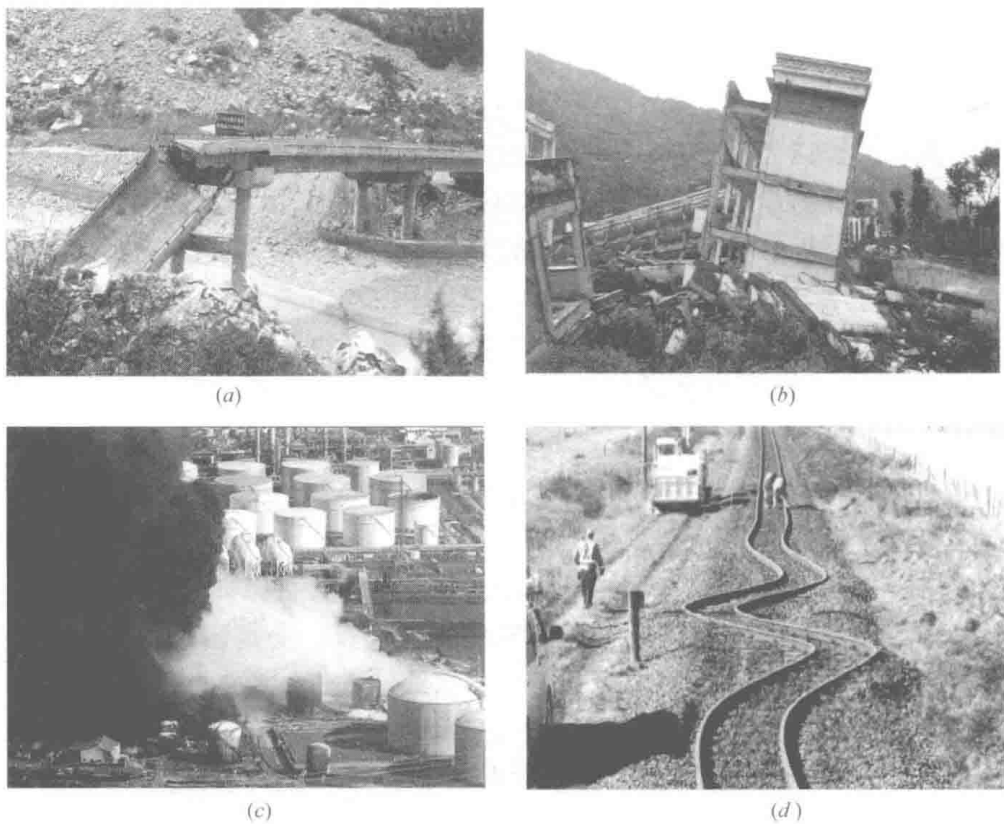


图 1.1 地震中损毁的基础设施

(a) 桥梁；(b) 楼房；(c) 核电站；(d) 铁路

Fig. 1.1 Infrastructure destroyed in earthquake

(a) building; (b) bridge; (c) nuclear power station; (d) railway

主动控制系统一般由传感器、计算系统、作动器三部分构成，由于对外部能源、响应速度和日常维护要求较高，其应用范围受到较大限制。

半主动控制是一种以少量外部能源输入改变控制器参数，从而达到控制振动效果的技术。半主动控制系统克服了主动控制耗能巨大的缺点，却能提供与之相当的控制效果。目前半主动控制实现方式主要有变刚度控制系统和变阻尼控制系统两种。

智能控制系统包括算法智能和装置智能两种实现方式。智能算法包括遗传算法<sup>[72]</sup>、蚁群算法<sup>[73]</sup>、神经网络<sup>[74]</sup>等内容。智能装置是指用压电材料、磁流变液体和形状记忆合金等智能材料制造的控制装置<sup>[75]</sup>。智能控制系统是一种仿生结构体系,具有自监控、自诊断的特征,能够自动判断环境情况并做出相应调整以适应不同荷载工况。

相比其他控制方式,被动控制以其构造简单可靠、无需外部能源和信号采集等特点获得广泛应用。单一的被动控制手段有各自的局限性:隔震系统虽然能够大大降低上部结构受力,却要以巨大的基底位移为代价;耗能装置能够限制位移,又会增加结构刚度,这将造成结构的自振频率增大,受到的剪力增加。日本学者 Iemura<sup>[76]</sup>把负刚度概念引入结构控制领域,利用负刚度装置抵消阻尼器增加的刚度,能够达到既降低结构剪力又限制位移的良好控制效果。目前负刚度装置的设计普遍较为复杂,限制了其实际应用。与负刚度装置配合的阻尼器也以黏滞阻尼器为主,存在加工制作较难、液体容易渗漏等缺点,且二者配合使用时均凭经验设置,没有进行系统的优化研究。

## 1.2 负刚度控制理论基础

### 1.2.1 负刚度控制简介

负刚度的概念由 Molyneaux 于 1957 年首次提出,随后 Trimboli<sup>[77]</sup>和 Platus<sup>[78]</sup>提出正负刚度弹簧并联的机械隔震装置。Mizuno<sup>[79]</sup>首次提出用于设备隔震的串联正负弹簧主动隔震器。Iemura<sup>[80]</sup>研制了负刚度阻尼器,与普通橡胶隔震支座并联形成隔震系统,振动台试验表明该系统可以有效降低结构高频部分地震反应。张建卓<sup>[81]</sup>把正负刚度弹簧并联用于超低频精密仪器隔震,试验证明负刚度弹簧把系统频率降低了 87.5%。Sarlis<sup>[82]</sup>提出一种框架式负刚度装置,利用杠杆和失稳产生负刚度,传力明确但结构略显复杂。振动台试验证明该装置能够有效降低结构峰值剪力和峰值位移。

传统抗震设计主要依靠增加结构延性,允许结构在大震中出现强非线性行为,以变形来消耗地震能量,达到减小地震反应的目的。这种方法的劣势在于结构经历大震后会伴随出现大位移、永久变形和结构功能受损等问题。Reinhorn 和 Viti<sup>[83]</sup>提出了弱化结构的概念,通过引入外加的黏性阻尼器来降低瞬时加速度和层间位移。然而,弱化会导致结构强度降低,变形增大,甚至出现永久位移,本质上是把结构的屈服阶段提前。为解决以上问题,Nagarajaiah 和 Pasala<sup>[84]</sup>提出“模拟屈服”的控制理念,并研制了自适应负刚度装置,通过在指定位移引入负刚度达到“虚拟弱化”的效果。

为了直观说明负刚度装置对结构的作用,考虑图 1.2 (a) 所示力-位移关系。其中,长虚线为普通线性结构的力-位移关系,点虚线为阻尼器滞回曲线,实线为负刚度设备的力-位移曲线。当把负刚度装置加入结构后,如图 1.2 (b) 所示,  $u_2$  和  $F_2$  是线性结构在特定激励下的最大位移和对应恢复力。 $u_3$  和  $F_3$  是加入负刚度装置后整体在同样激励下的最大位移和对应恢复力。灰色实线代表整体力-位移曲线,其结构的恢复力有明显降低,但峰值位移相比未加入 NSD 的结构自身位移有所增加。 $u_y$  处刚度下降,出现类似屈服的力-位移曲线,其刚度减少值与负刚度值相等。由于结构弱化而增大的位移反应,可以通过引入适当的阻尼装置进行控制,如图 1.2 (c) 所示,  $u_3' < u_2$ 。这样由负刚度装置和阻尼器构成的控制系统,能够在控制位移的前提下模拟结构屈服,达到同时控制结构剪力响应和位移响应的效果。

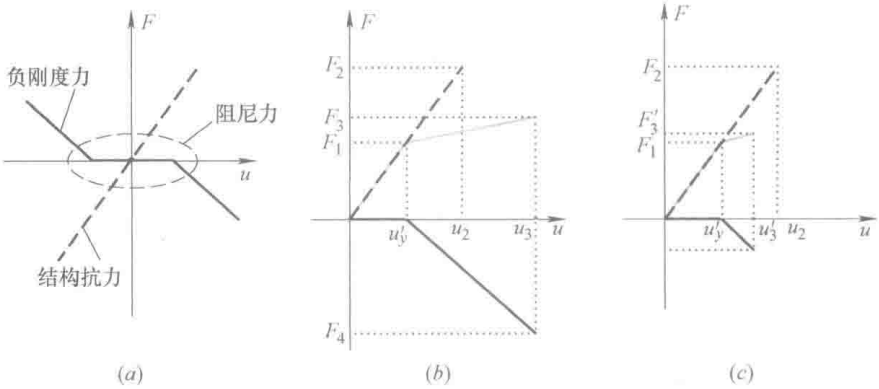


图 1.2 负刚度减震系统工作原理<sup>[84]</sup>

(a) 系统各组成力; (b) 结构+NSD; (c) 结构+NSD+阻尼器

Fig. 1.2 Working principle of negative stiffness control system

1.2.2 负刚度控制机理

粘弹性阻尼器是常见的被动控制装置,经过多年的研究和工程应用,证明其控制效果明确、有效。研究发现<sup>[85]</sup>在外部激励频率较高、温度较低、结构变形较小等情况下黏弹性阻尼器的附加刚度效应会比较明显。结构的侧向刚度变大会导致更多的地震能量传导到上部结构,造成剪力增加甚至构件破坏的后果。

负刚度装置的加入能够有效解决这一问题。如图 1.3 所示,单自由度系统自身刚度为  $K_p$ , 负刚度装置刚度为  $K_n$ , 系统阻尼为  $C$ , 结构质量为  $m$ 。该系统受到幅值为  $P$ , 圆频率为  $\omega$  的正弦激励时,其运动方程为:

$$m\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + (K_p + K_n)x(t) = P\sin\omega t \tag{1.1}$$

上式可变形为:

$$\ddot{x}(t) + \frac{C}{m}\dot{x}(t) + \frac{K_p + K_n}{m}x(t) = \frac{P}{m}\sin\omega t \tag{1.2}$$

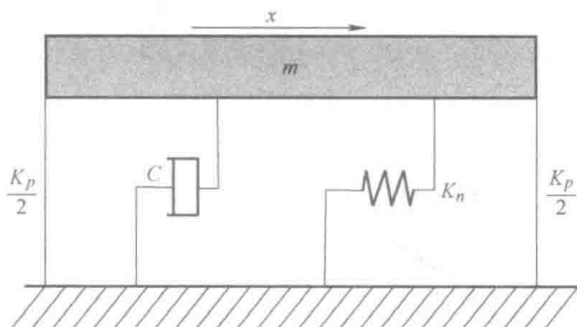


图 1.3 单自由度负刚度减震系统

Fig. 1.3 SDOF negative stiffness system

系统固有频率为：

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_p + K_n}{m}} \quad (1.3)$$

频率比  $\beta$  定义为激励频率与固有频率的比，即

$$\beta = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (1.4)$$

动力放大系数  $D$  定义为响应振幅与激励幅值的比值，即

$$D = [(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2]^{-0.5} \quad (1.5)$$

最大基底剪力和激励作用力之比定义为传导比  $TR$ ：

$$TR = D \sqrt{1 + (2\xi\beta)^2} \quad (1.6)$$

可以看出，由于负刚度  $K_n$  的加入，系统固有频率会有所降低，即频率比  $\beta$  会增大，阻尼比  $\xi = \frac{C}{2m\omega_n}$  会增大。稳态振动时动力放大系数变化情况如图 1.4 所示，激振频率和系统固有频率之比越接近 1，动力放大系数  $D$  也越大，当频率比

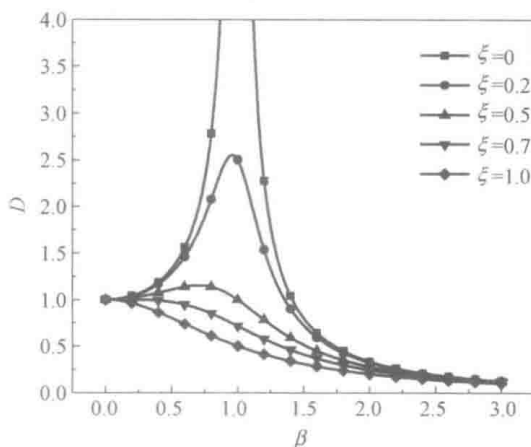
图 1.4 动力放大系数与频率比阻尼比的关系<sup>[86]</sup>

Fig. 1.4 Dynamic amplification coefficient against frequency ratio and damping ratio

高于 1 时，动力放大系数随频率比增加而降低，所以负刚度减震系统能够有效降低结构在高频激励下的响应。降低结构固有频率即增大频率比  $\beta$  对降低高频激励响应有显著效果。阻尼比的增大则能够大大降低动力放大系数峰值。

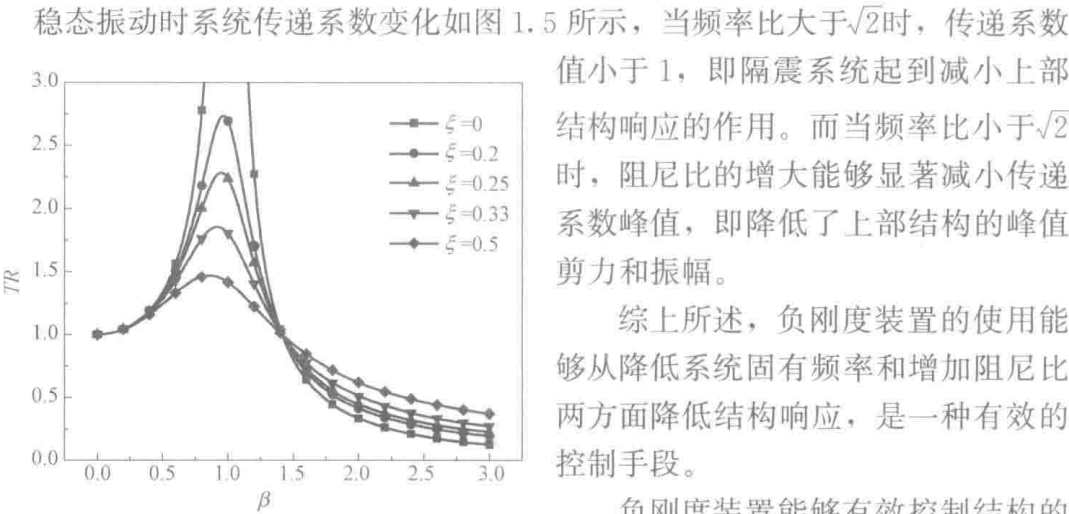


图 1.5 传递系数与频率比阻尼比的关系<sup>[86]</sup>

Fig. 1.5 Transmit ratio against frequency ratio and damping ratio

对于传统的阻尼器只能控制位移反应，负刚度装置和阻尼器构成的控制系统能够对位移和加速度产生更优秀的控制效果。不仅如此，由于轨道型负刚度装置具有连续变化的刚度，位移和加速度谱不会有明显的峰值，且其反应谱的幅值也被大大压缩。

为了达成前述功能目标，负刚度减震系统应具备以下特征：

(1) 为了保证系统初始刚度，在设定的小位移范围内，负刚度装置处于待机状态，不参与结构控制。这样的设计也能够避免结构在风荷载等小荷载作用下出现不必要的大位移反应。为此，需要在 NSD 中设置一段“待机区间”，位移没有超出该区间范围时，NSD 不会产生负刚度。

(2) 为了产生拟弱化（apparent weakening）的效果，负刚度装置需要在模拟屈服点到结构真实屈服点之间提供负刚度，在位移超过结构真实屈服点之后应该提供正刚度，防止位移过大。这就要求 NSD 能够提供连续的、变化的刚度。

(3) 负刚度装置降低结构体系整体刚度，势必带来位移响应变大的后果。需要在控制系统中加入被动阻尼器以控制位移。

### 1.2.3 负刚度控制研究现状

负刚度控制最早应用于精密机械隔震，国内外许多学者在这方面做了大量研究。Platus<sup>[88]</sup>对负刚度机制进行了研究，发现负刚度可以降低受控结构振动频

率。Mizuno<sup>[89]</sup>提出了一种新型负刚度隔震系统,并进行了试验研究,证明了负刚度隔震的有效性。Carrella<sup>[90]</sup>用一个单自由度振子的隔震说明了负刚度降低振动频率的机理,并提出了一种静力刚度高,动态刚度低的变刚度装置,试验表明,该装置不但对机械的振动控制有效,还能一定程度防止装置被细小扰动误触发。国内彭献<sup>[91]</sup>、陈树年<sup>[92]</sup>、纪晗<sup>[93]</sup>等也都对负刚度隔震的原理和应用做了一些探索。在机械隔震方面的大量研究证明,负刚度理论对振动控制有显著效果。

由于其在机械隔震领域的广泛应用,近年来土木工程领域也对负刚度控制给予大量关注,国内外许多学者对负刚度装置在土木工程中的应用进行了大量理论和试验研究。其中,日本京都大学的 Iemura 等<sup>[94]</sup>提出了利用主动或半主动液压装置来产生负刚度力的拟负刚度系统,结果表明,负刚度装置的滞回曲线与结构本身的正刚度滞回曲线叠加后,能够产生良好塑性特性。Igrashi<sup>[95]</sup>等对基于 Skyhook 控制系统的负刚度控制进行了一系列性能评估,论证了负刚度对降低结构响应的有效性。Nagarajaiah<sup>[96]</sup>等提出一种自适应负刚度装置,如图 1.6 所示,其刚度随位移变化而变化,故称“自适应”。该装置利用预压缩弹簧的弹力提供小车水平运动的助力从而提供负刚度,装置中的非线性阻尼器用来控制由于负刚度导致的位移增大。随后, Sarlis 等<sup>[97]</sup>将其改进,提出一种“集成式”负刚度装置(图 1.7),该装置无需向结构施加任何附加荷载,且能够通过降低结构刚度在较小位移处提前模拟屈服,从而保护主体结构。该装置依赖复杂的机械结构产生负刚度力,通过修改构件参数能够改变装置力学性能,但其过程繁琐,不易操作。Iemura 等<sup>[98]</sup>提出一种基于摩擦的被动负刚度阻尼器,如图 1.8 所示,该阻尼器利用不锈钢曲面在聚四氟乙烯材料的摩擦板上相对运动的摩擦力来耗散振动能量,振动台试验证明,该装置能够在降低结构绝对加速度响应的同时,限制位移响应。该装置工作时会产生竖向运动,影响结构的安全性和舒适性。综上所述,研制结构简单、出力高效的负刚度装置具有重要意义。

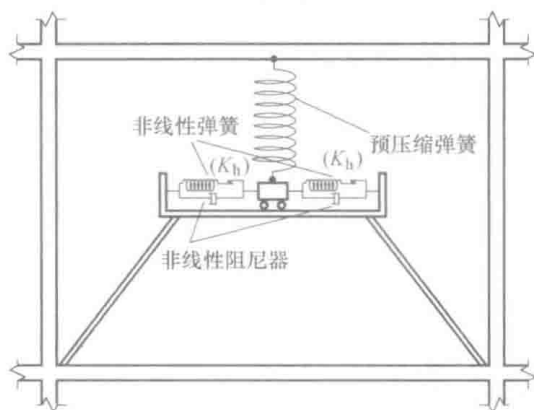


图 1.6 自适应负刚度装置示意图<sup>[96]</sup>

Fig. 1.6 Concept of ANSS/Negative Stiffness Device

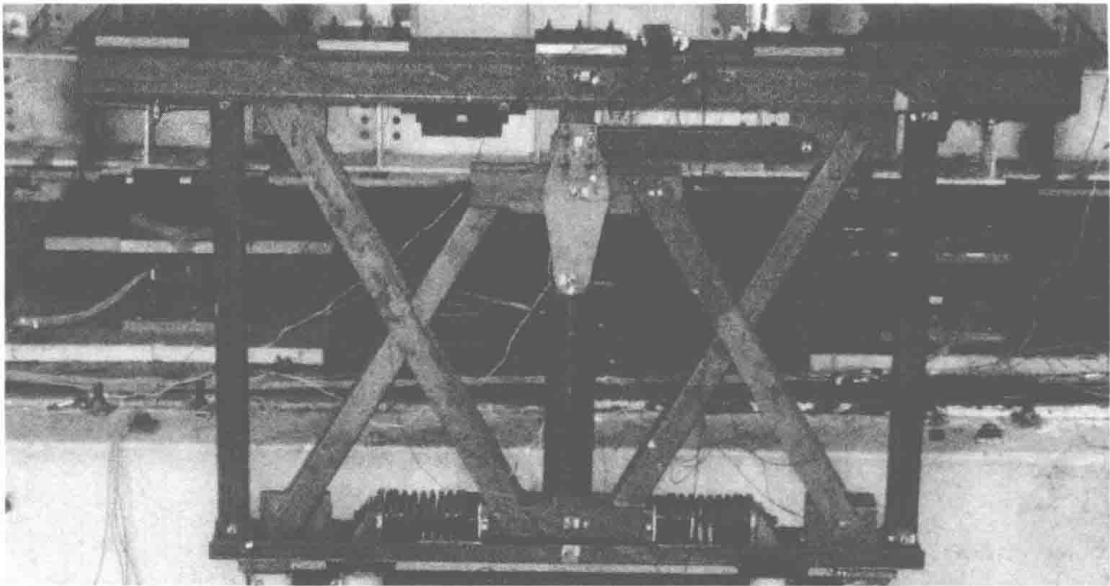


图 1.7 “集成式”负刚度装置示意图<sup>[97]</sup>  
Fig. 1.7 “Package” Negative Stiffness Device

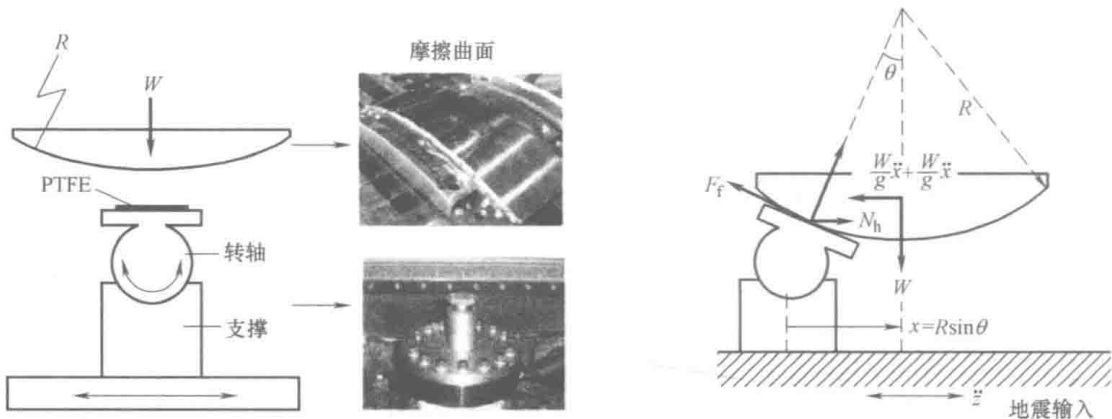


图 1.8 被动摩擦负刚度阻尼器<sup>[98]</sup>  
Fig. 1.8 Friction-based passive negative stiffness damper

1.3 形状记忆合金及其特性及应用

1.3.1 形状记忆合金特性

形状记忆合金（Shape Memory Alloy，简称 SMA）是近年来最受人们重视的一种智能材料。SMA 能够在荷载或者温度作用下发生晶体结构相变，大幅度改变其力学性能。SMA 具有两种结构状态：奥氏体相（Austenite phase）和马

氏体相 (Martensite phase)。奥氏体具有立方晶体结构且在高温状态下稳定；马氏体具有单斜晶体结构且在低温状态下稳定。当奥氏体相的 SMA 被冷却到转换温度以下时，将转化为马氏体相，称为马氏体正相变 (Forward Martensitic Transformation)；同理，当处于马氏体相的 SMA 被加热到其转换温度以上时，它将转化为奥氏体相，称为马氏体逆相变 (Inverse Martensitic Transformation)。低温下马氏体有两种存在形式，分别为孪晶马氏体 (Twinned Martensite) 和去孪晶马氏体 (Detwinned Martensite)，其中孪晶马氏体是马氏体的初始或者自然状态。当在低温马氏体状态下受到外力荷载作用时，宏观上 SMA 会发生变形，微观上材料会发生去孪晶化反应。弹性应变在卸载后恢复，要消除应力引发马氏体相变导致的残余应变，需要加热 SMA 直到马氏体逆相变发生，材料才会恢复初始形状，其微观相变过程如图 1.9 所示。

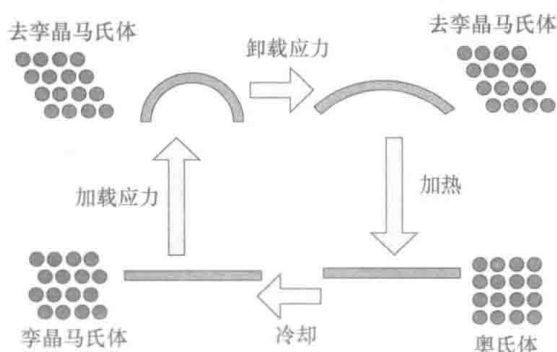


图 1.9 SMA 形状记忆效应及对应晶体结构改变

Fig. 1.9 Diagram detailing the effects of stress, heating and cooling on SMA and how the material geometry can be reset by heating

独特的微观结构使得 SMA 在作为阻尼器耗能材料上有独一无二的优势。首先，顾名思义，形状记忆合金具有形状记忆效应。传统金属发生超过塑性变形后，需要施加反方向的力使其回到初始状态。而当 SMA 变形超过其弹性阶段，卸载后仍然能够在没有施加任何外力的情况下回到初始状态。这种形状记忆效应来自 SMA 内部晶体结构的剪切式改变，且具有可逆特性，称为马氏体相变<sup>[99]</sup>。马氏体相变按诱发原因可分为温度诱发马氏体相变和应力诱发马氏体相变。形状记忆效应由前者引起。图 1.10 给出形状记忆效应的应力应变关系及相应的微观结构变化过程。

其次，与传统金属材料不同，SMA 具有两种微观结构状态：高温相奥氏体相 (Austenite phase) 和低温相马氏体相 (Martensite phase)。这种特殊的晶体结构让 SMA 具有与众不同的滞回曲线。传统金属必须经历塑性变形才能够出现滞回现象，所以经过一定数量的循环之后，传统金属会被破坏。在超过弹性极限的变形下，SMA 能够通过相变代替塑性变形来耗散能量，晶体结构的改变不会

给材料本身带来不可逆的破坏，这就使 SMA 具有了更长的工作寿命。这种通过晶体结构改变来延伸弹性变形范围，并能够在卸载后完全恢复非线性变形的能力称为超弹性（Superelasticity）。这种超弹性应变范围可达到 6%~8%。图 1.11 给出超弹性效应的应力应变关系曲线，以及对应的相变过程。

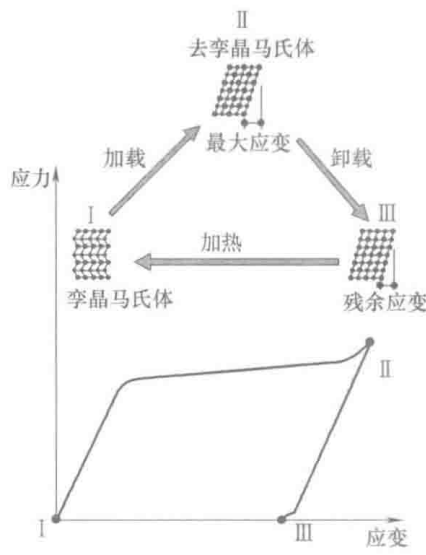


图 1.10 形状记忆效应<sup>[107]</sup>  
Fig. 1.10 Shape memory effect

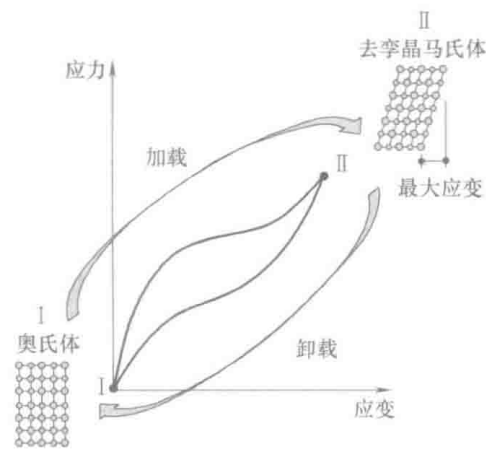


图 1.11 超弹性效应<sup>[107]</sup>  
Fig. 1.11 Superelastic effect

1.3.2 形状记忆合金在结构控制中的研究进展

近十几年来，如何利用 SMA 优良性能进行结构振动控制受到研究人员高度关注。SMA 的微观相变效应使得其具有超弹性和高阻尼性，适合用来制作各式各样的阻尼装置。Graesser 和 Cozzarelli<sup>[100]</sup>最早提出在结构抗震中使用 SMA 材料作为控制和耗能单元。自此开始，国内外许多学者相继研发并测试了众多 SMA 阻尼器。Robert 等<sup>[101]</sup>研制了一种中心抽头 SMA 阻尼器（center-tapped device, CT），该阻尼器在温控环境下进行了性能试验，结果表明，该阻尼器耗能能力稳定且具有优秀的抗疲劳特性。加州大学伯克利分校的 Johnson<sup>[102]</sup>研制了一种 SMA 被动阻尼器（图 1.12），该阻尼器由固定在两根刚性柱的多组 SMA 丝耗散能量，阻尼器在不同初始应变、不同加载频率和不同温度下进行了性能测

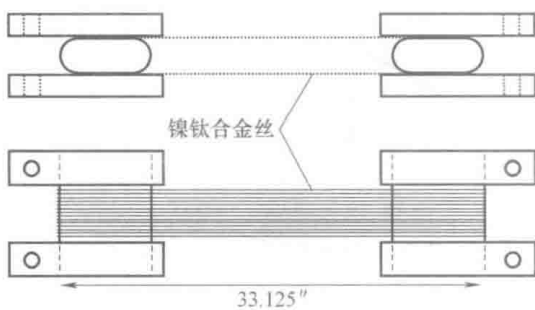


图 1.12 SMA 阻尼器示意图<sup>[102]</sup>  
Fig. 1.12 Schematic of SMA damper

量，阻尼器在不同初始应变、不同加载频率和不同温度下进行了性能测