

# 第八章

## 隔震、减震与结构控制初步

# 减轻地震灾害的途径

“预”——地震预报

“防”——抗震措施

“控”——振动控制

# 第八章 隔震、减震与结构控制初步

- 8.1 结构抗震设计思想的演化与发展
- 8.2 隔震原理与方法
- 8.3 减震原理与方法
- 8.4 结构主动控制初步

# 8.1 抗震设计思想的发展

## 1) 刚性结构体系

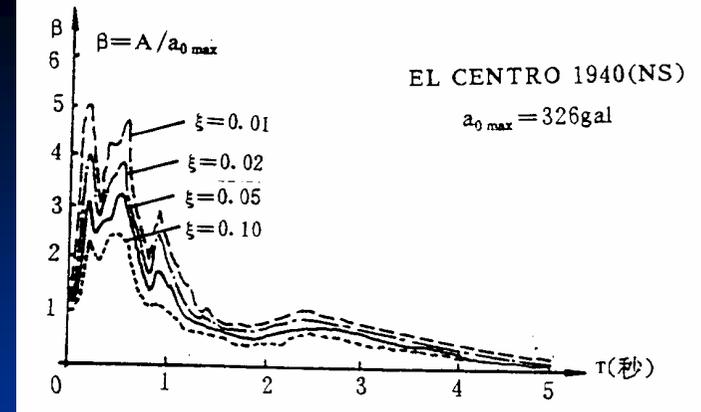
地震作用太大，结构像碉堡，材料浪费严重

## 2) 柔性结构体系

可以避免共振，地震作用小，但结构水平位移过大，影响正常使用。

## 3) 延性结构

在保证一定强度的前提下，具有足够的刚度、变形能力和耗能能力。



# 8.1 抗震设计思想的发展

## 4) 隔震技术

通过隔离装置将地震动与结构隔开，从而减小振动

## 5) 减震消能技术

通过采取一定的耗能装置或附加子结构，吸收或消耗地震传递给主体结构能量，从而减轻结构的振动。

## 6) 制震技术

通过自动控制系统主动地给结构施加控制力，改变结构的振动特性，从而达到减小结构振动的目的。

# 延性结构设计

**概念设计：**从总体上把握抗震设计的基本原则；

选择合适的场地、建筑体型，利用延性、设置多道防线等

**抗震计算：**为建筑抗震设计提供定量手段；

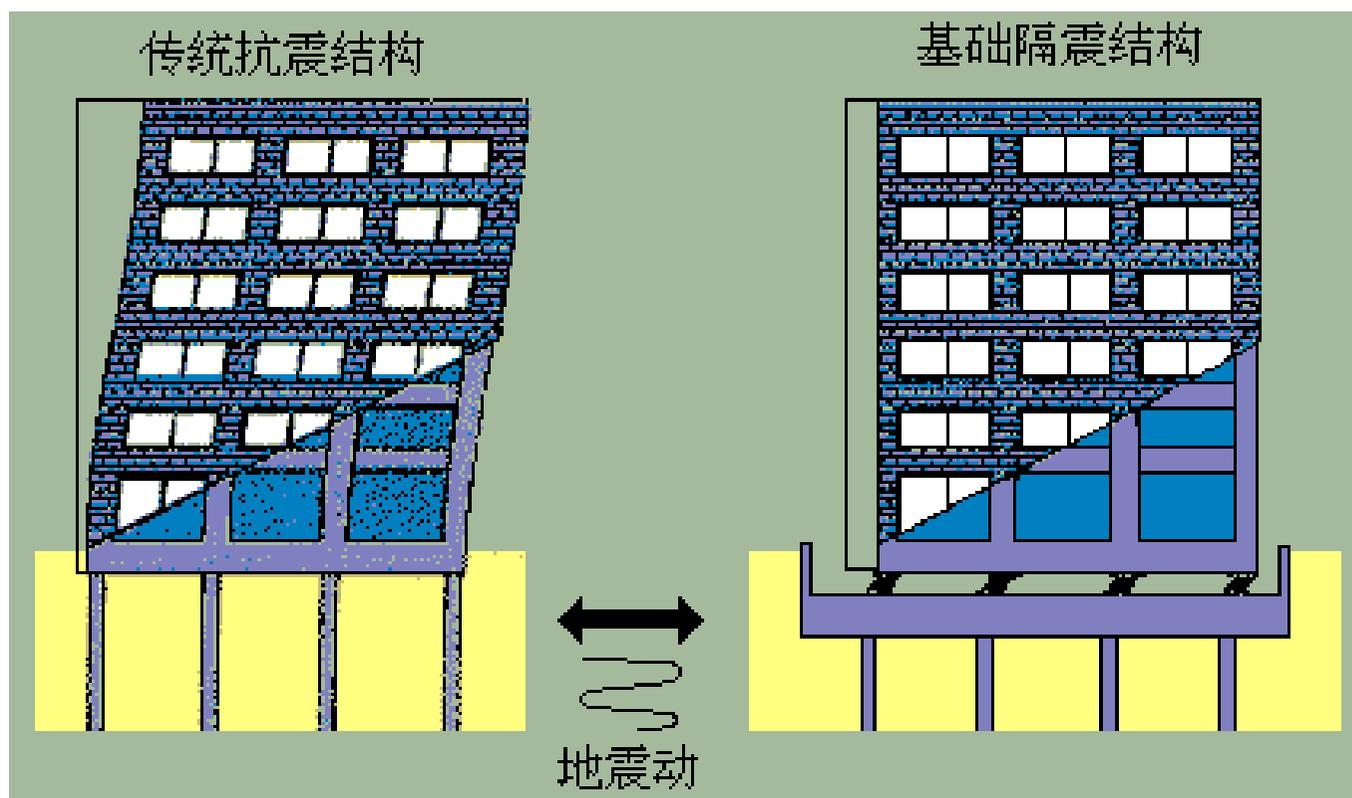
**构造措施：**保证结构整体性，加强局部薄弱环节，保证抗震计算结果的有效性。

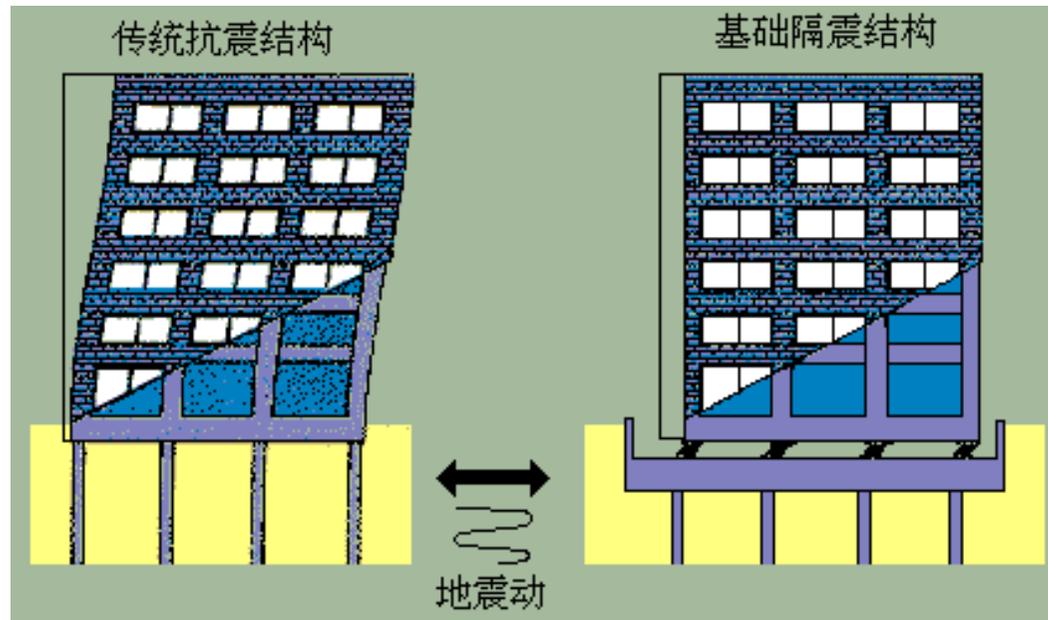
# 第八章 隔震、减震与结构控制初步

- 8.1 结构抗震设计思想的演化与发展
- 8.2 隔震原理与方法
- 8.3 减震原理与方法
- 8.4 结构主动控制初步

# 基底隔震技术

- 在建筑物上部结构与基础之间设置滑移层，阻止地震能量向上传递。





为达到明显减震效果，通常基础隔震系统需具备以下四种特性：

- (1) **承载特性**：具有足够的竖向强度和刚度以支撑上部结构的重量；
- (2) **隔震特性**：具有足够的水平初始刚度，在风载和小震作用下，体系能保持在弹性范围内，满足正常使用的要求，而中强地震时，其水平刚度较小，结构为柔性隔震结构体系；
- (3) **复位特性**：地震后，上部结构能回复到初始状态，满足正常的使用要求。
- (4) **耗能特性**：隔震系统本身具有较大的阻尼，地震时能耗散足够的能量，从而降低上部结构所吸收的地震能量。

# 分析模型

## ■ 单质点模型

当上部结构刚度远大于隔震层的水平刚度时，可将上部结构视为刚体，按照单质点模型进行分析。

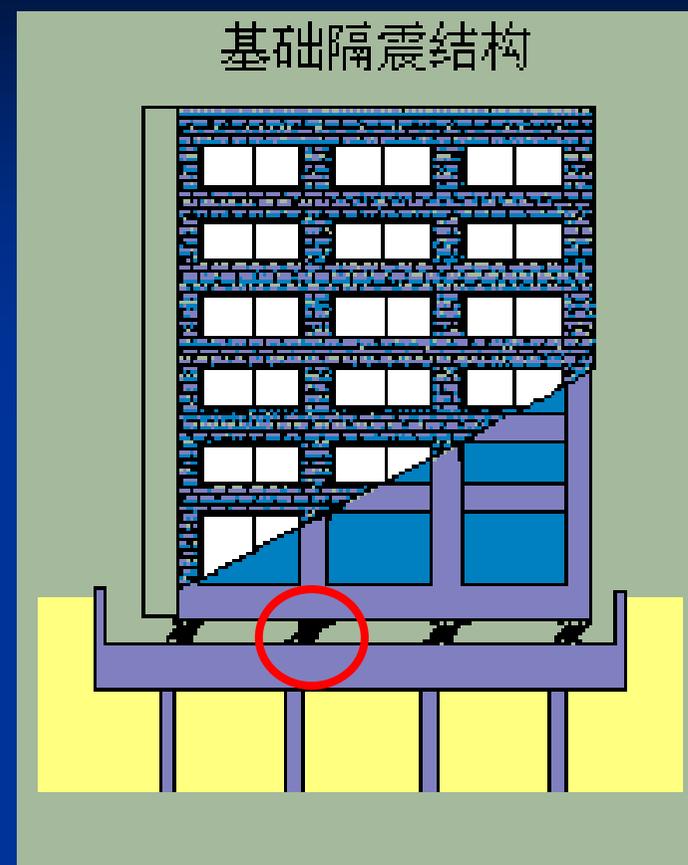
$$m\ddot{x} + C\dot{x} + K_h x = -m\ddot{x}_g$$

## ■ 多质点模型

多质点模型可视为在常规结构分析模型底部加入隔震层简化模型，按照反应谱法或时程分析法进行地震反应分析。

# 常用隔震装置

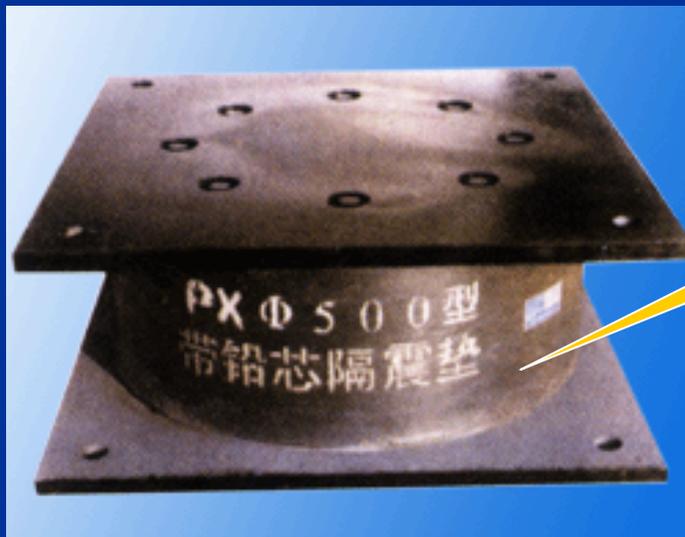
- 橡胶支座隔震
- 滚动隔震
- 滑动支座隔震
- 摇摆支座隔震



# 橡胶支座隔震系统



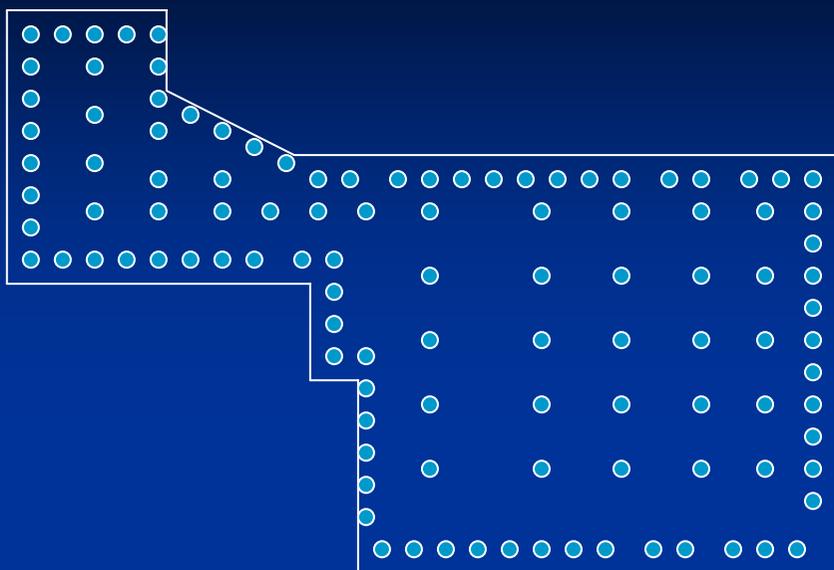
钢板叠层橡胶支座



阻尼增大

在天然橡胶中加入石墨也可以大幅增加阻尼。

# 工程实例



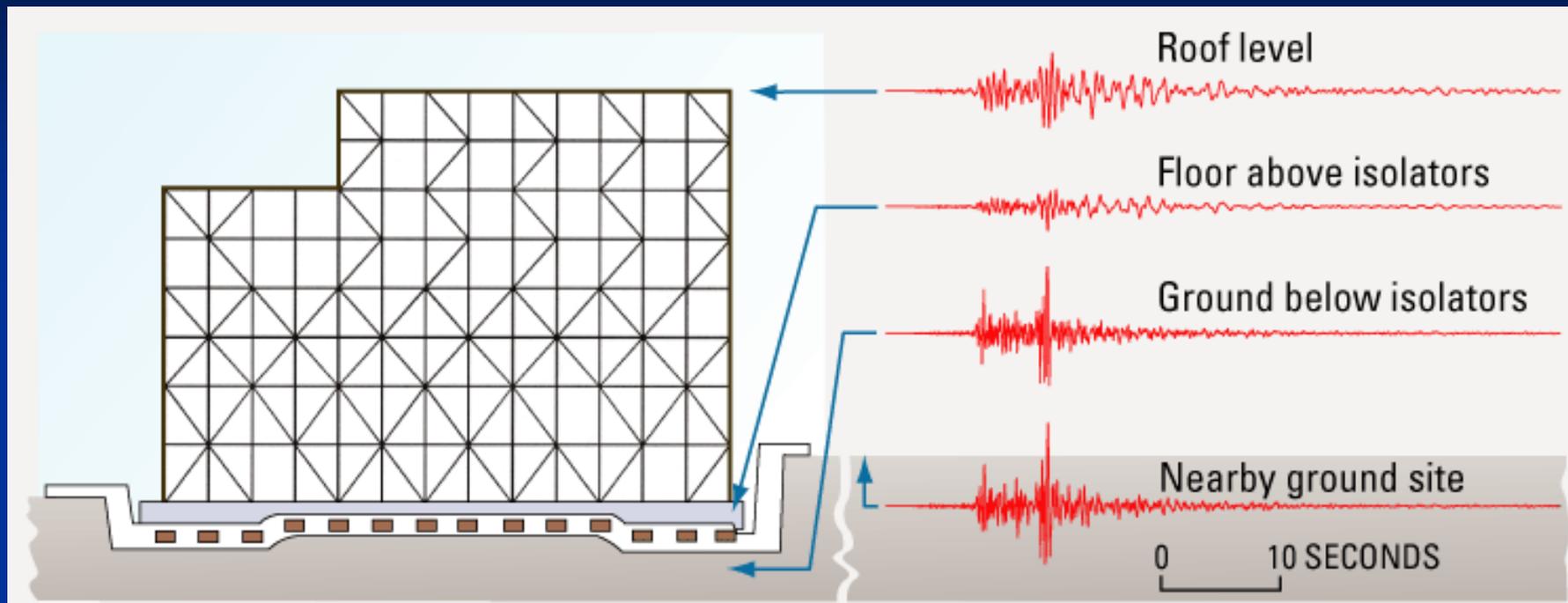
美国南加州大学医院

地下一层，地上7层，建筑面积：33000平方米；占地：4100平米；  
最高高度：36m；

设置**铅芯橡胶隔震器68个**，**钢板叠层橡胶隔震器81个**。

1994年1月17日，美国圣菲尔南多发生洛杉矶地震，震级M=6.7。

这栋八层医院基础加速度为  $0.49g$ ，而顶层加速度只有  $0.21g$ 。



南加州大学医院在这次地震及其其后的余震中，6-8英尺高的花瓶等没有一个掉下来，建筑物内的各种机器等均未损坏，医院功能得到维持，成为防灾中心，起到十分重要的作用。

# 北京地铁地面枢纽站大面积平台上隔震住宅楼



模拟地震振动台试验2+9层 不隔震房屋严重破坏, 几乎倒塌(0.3g)

模拟地震振动台试验 2+9层隔震房屋 完好无损(0.6g)

# 北京地铁地面枢纽站大面积平台上隔震住宅楼



北京地铁地面枢纽站RC平台上隔震房屋大RC平台（2000米x1500米）上建造48幢9层的隔震住宅楼隔震建筑面积 480,000M<sup>2</sup>，目前世界最大隔震建筑。

北京地铁地面枢纽站大面积隔震住宅楼技术经济效益：

- 1) 抗震安全度提高4倍
- 2) 平台的地震反应降为2/3，解决了已建平台抗震性能不足的设计“瓶颈”
- 3) 住宅面积增加近10万平方米（房屋从6层增加到9层）
- 4) 增创直接产值2.4亿元

# 常用隔震装置

- 橡胶支座隔震
- 滚动隔震
- 滑动支座隔震
- 摇摆支座隔震

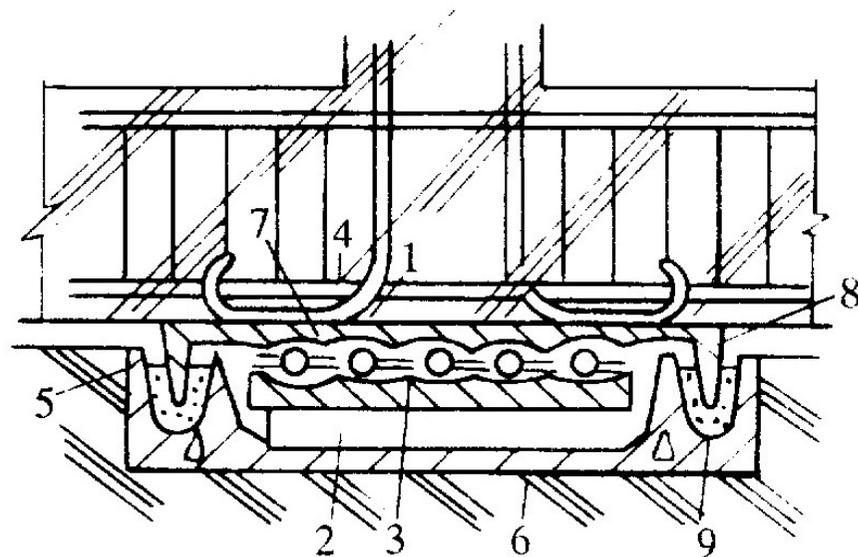
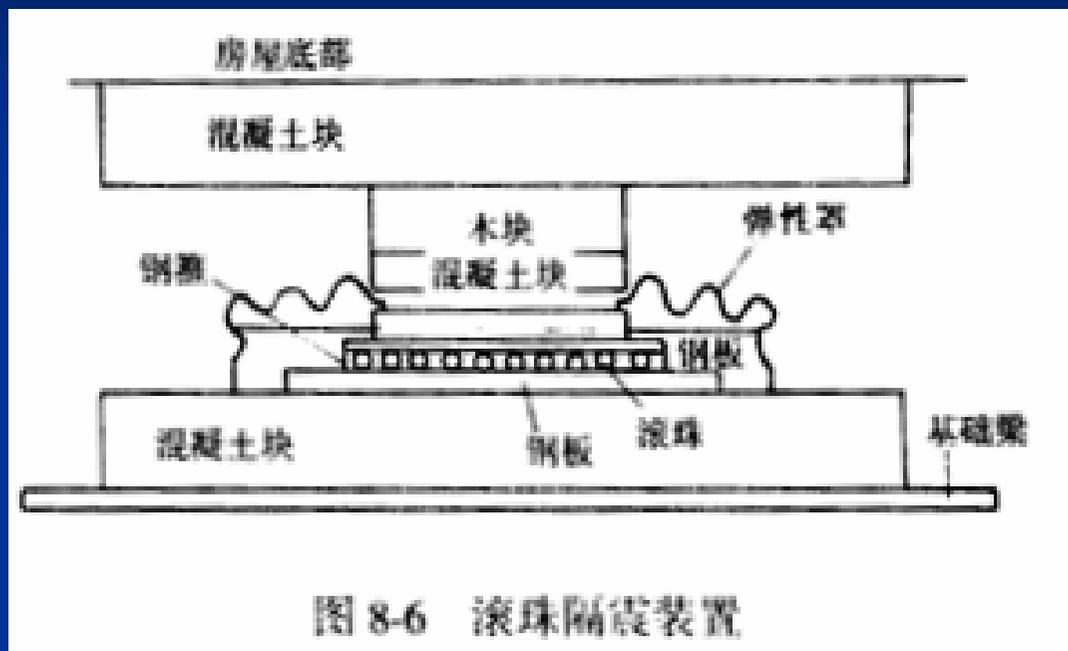


图 8-5 双排滚轴隔震装置

1—上部滚轴群；2—下部滚轴群；3—呈弧形沟槽的中间板；4—钢制连接件；5—销子；6—底盘；7—盖板；8—盖板向下突壁；9—散粒物

# 常用隔震装置

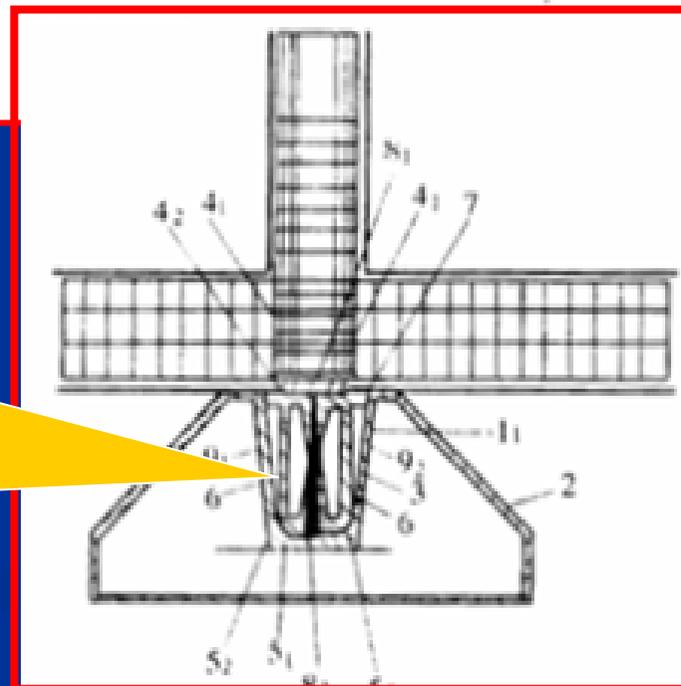
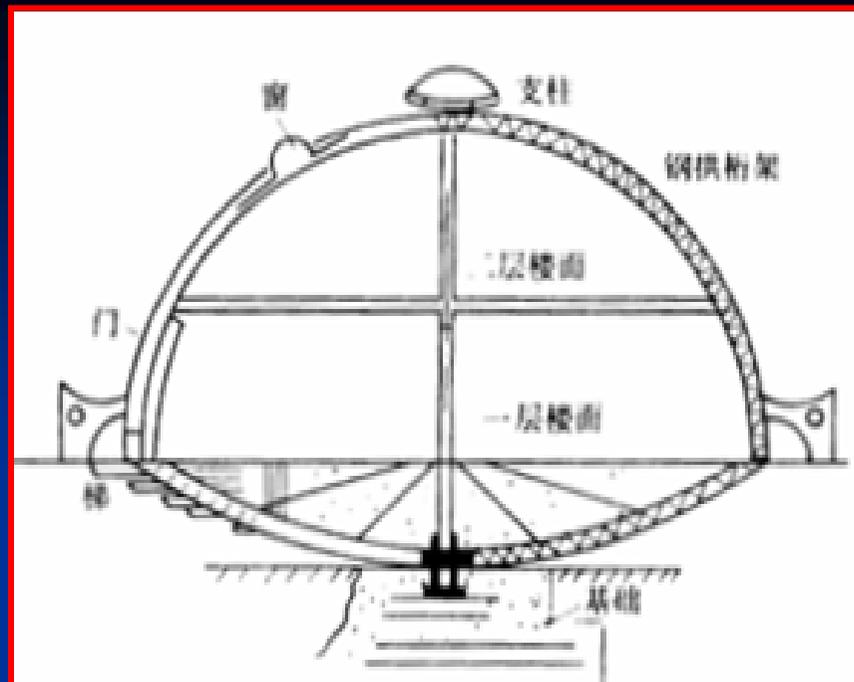
- 橡胶支座隔震
- 滚动隔震
- 滑动支座隔震
- 摇摆支座隔震



# 常用隔震装置

- 橡胶支座隔震
- 滚动隔震
- 滑动支座隔震
- 摇摆支座隔震

在杯形基础内设一个上下两端有竖孔的双圆筒摇摆体。竖孔内穿预应力钢丝束并锚固在基础和上部盖板上，起到压紧摇摆体和提供复位力的作用。在摇摆体和基础壁之间填以沥青或散粒物，可为振动时提供阻尼。



# 摇摆支座隔震

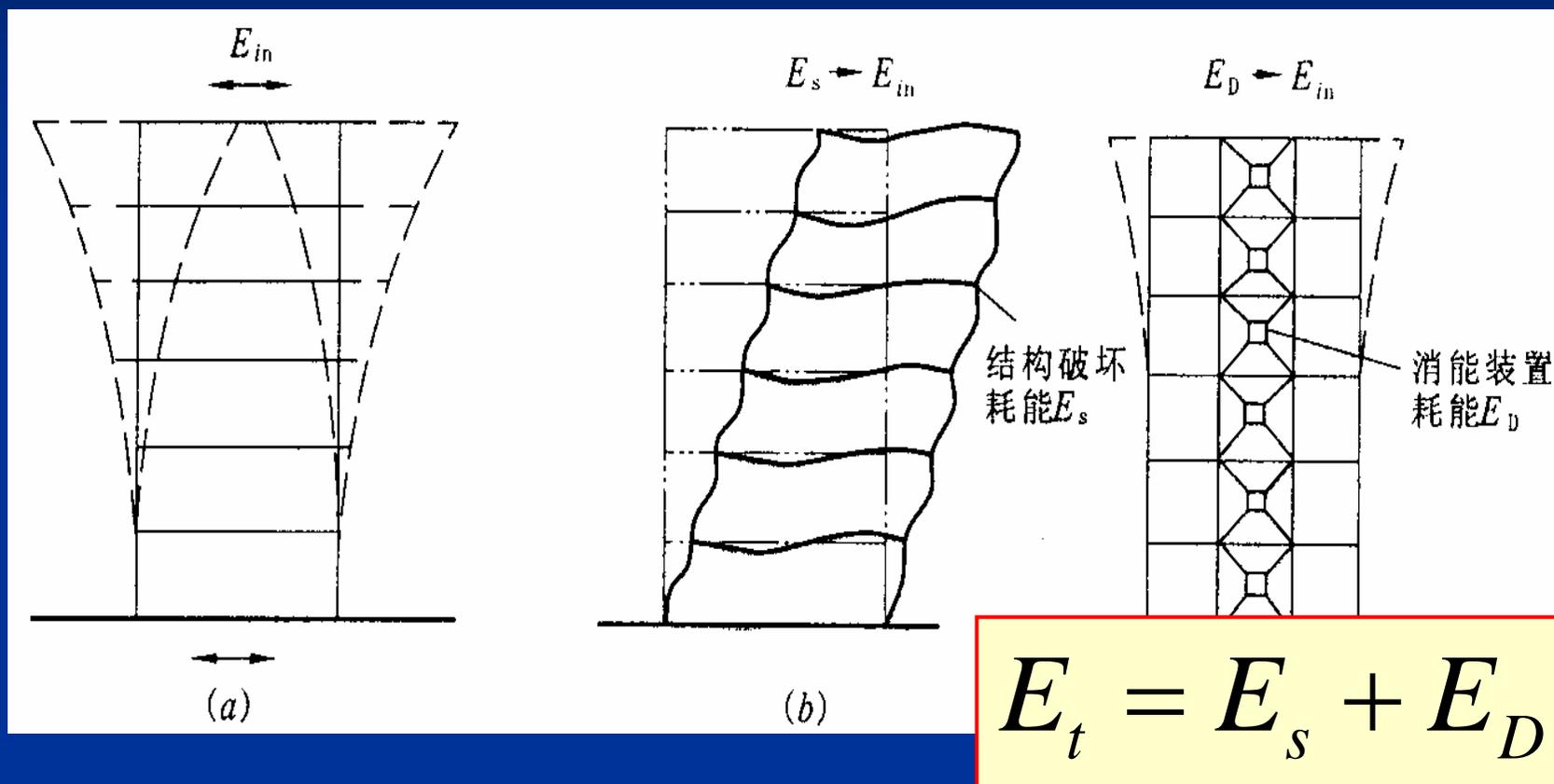
- 山西的悬空寺历经多次大震而完整无损
- 其支撑木柱可摆动隔震
- 木柱插入杯形基础内，内填粒状填充料，地震时木柱可在一定范围内摆动，减小地震作用



# 第八章 隔震、减震与结构控制初步

- 8.1 结构抗震设计思想的演化与发展
- 8.2 隔震原理与方法
- 8.3 减震原理与方法
- 8.4 结构主动控制初步

# 结构能量转换途径对比



a) 地震输入

b) 传统抗震结构

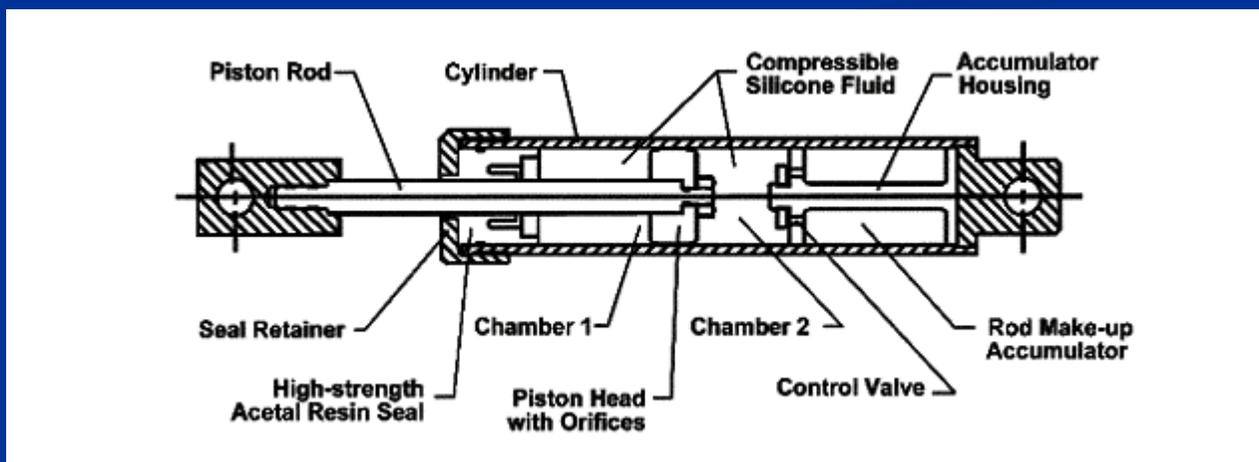
c) 消能减震结构

# 耗能减震原理

- 在传统的抗震结构中，结构构件在利用其自身弹塑性变形消耗地震能量的同时，构件本身将遭到损伤甚至破坏，某一结构构件耗能越多，则其破坏越严重。
- 在耗能减震结构体系中，耗能（阻尼）装置或元件在主体结构进入非弹性状态前率先进入耗能工作状态，充分发挥耗能作用，耗散大量输入结构体系的地震能量，则结构本身需消耗的能量很少，这意味着结构反应将大大减小，从而有效地保护了主体结构，使其不再受到损伤或破坏。

# 耗能減震裝置

- 阻尼器
- 耗能支撐
- 耗能牆



Taylor公司的50,000磅（22.7吨）液体粘滞阻尼器



**Sidney Lanier Bridge located in Brunswick, Georgia**  
**Four 225 MT Lock-up Devices used to control longitudinal earthquake movement while allowing free thermal movement**

美国乔治亚州 Sidney Lanier 桥



*Previous ...*

*Continue ...*



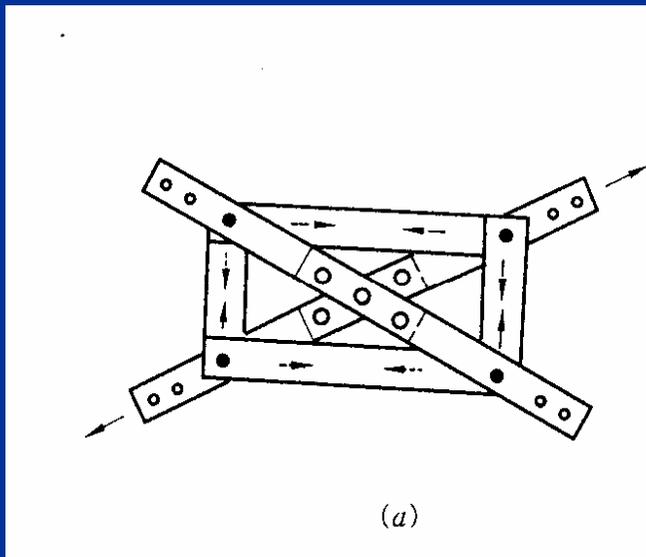
**BEIJING RAILWAY STATION**  
Located in Beijing, China  
32 Dampers used in Chevron Bracing  
Engineer: Blue Lake International



- 美国蓝湖公司和建研院抗震所一起在1999年北京站抗震加固中采用了泰勒公司先进的阻尼器。
- 因场地的限制，北京站大厅无法用传统的剪力墙抗震，经设计，采用每个方向16个130吨（300kp）非线性液体粘滞阻尼器，阻尼器可以使原结构的阻尼比从5%（一般钢筋混凝土结构）提高到了20%，从而把大震下的层向位移降低到弹性范围内。

# 耗能减震装置

- 阻尼器
- 耗能支撑

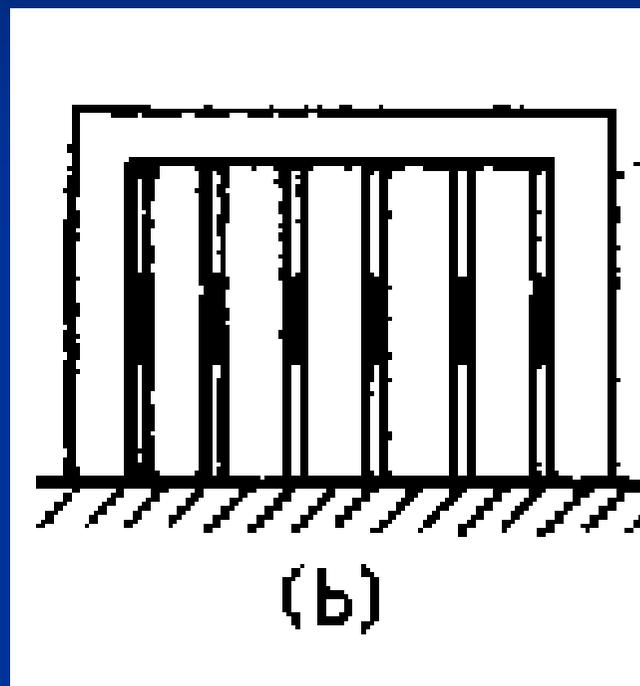


Pall型摩擦耗能器及典型滞回曲线

# 耗能减震装置

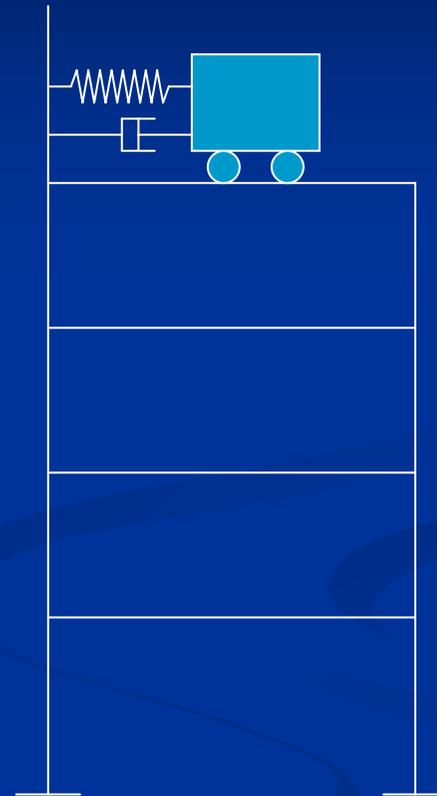
- 阻尼器
- 耗能支撑
- 耗能墙

摩擦耗能墙  
周边耗能墙



# 吸振减震技术

- 吸振是通过附加子结构使主结构的能量向子结构转移的减震方式
- 调频质量阻尼器
- 调谐液体阻尼器



主结构的阻尼越小，吸振装置的减震作用越大；质量比增大，减震作用增大。

# 第八章 隔震、减震与结构控制初步

- 8.1 结构抗震设计思想的演化与发展
- 8.2 隔震原理与方法
- 8.3 减震原理与方法
- 8.4 结构主动控制初步

# 振动控制

- **被动控制**：不需外部能源
- **主动控制**：利用外部能源，在结构受地震激励而运动的过程中，实时施加控制力，以减小结构地震反应。

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -m\ddot{x}_g + u(t)$$

- **半主动控制**：利用很少的外部能源，适时改变结构的动力特性，以减小结构地震反应。

# 半主动控制体系

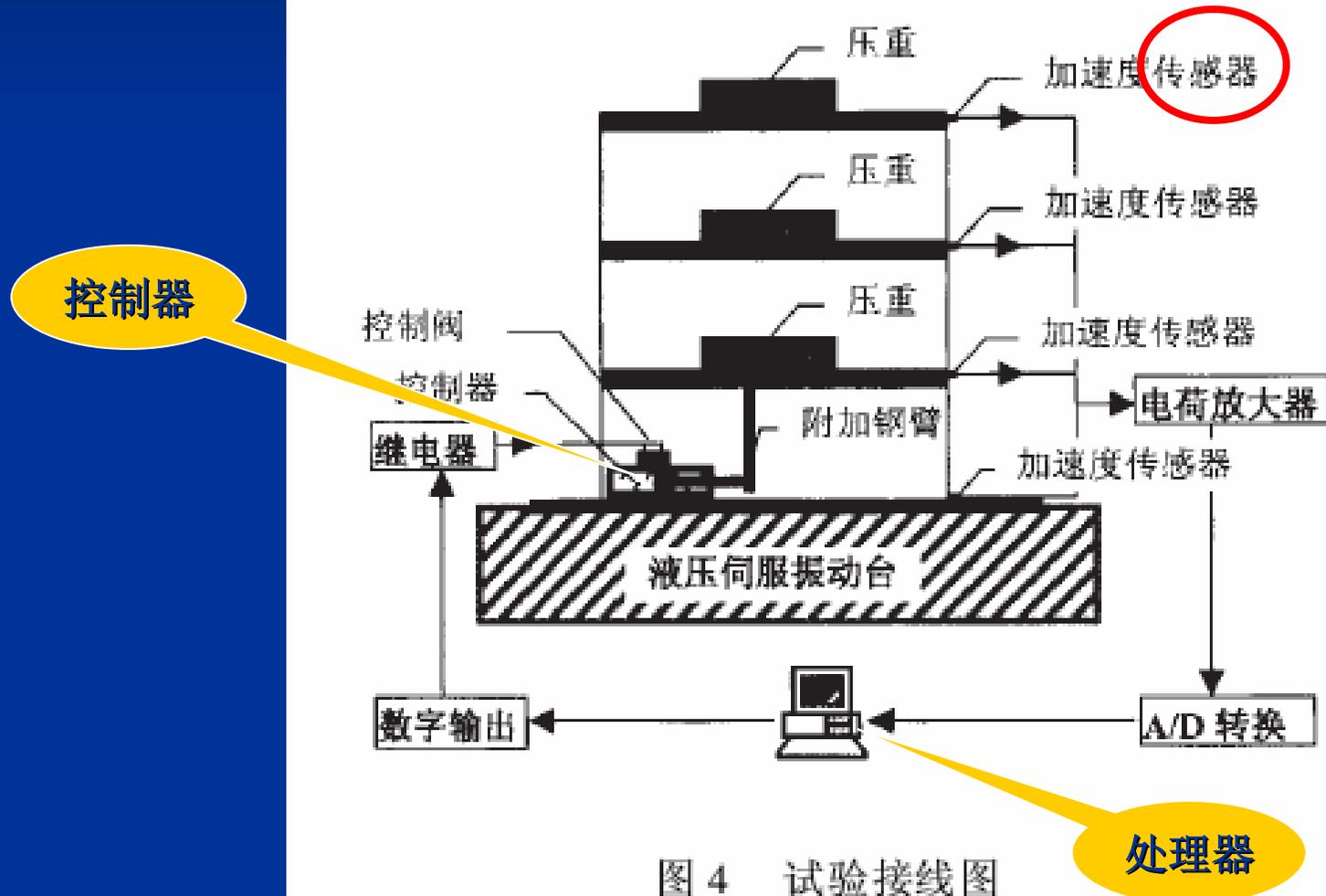
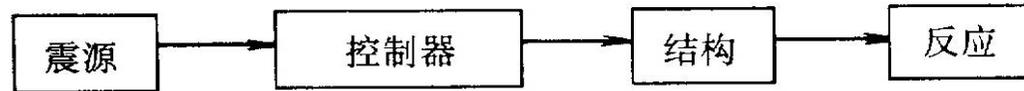
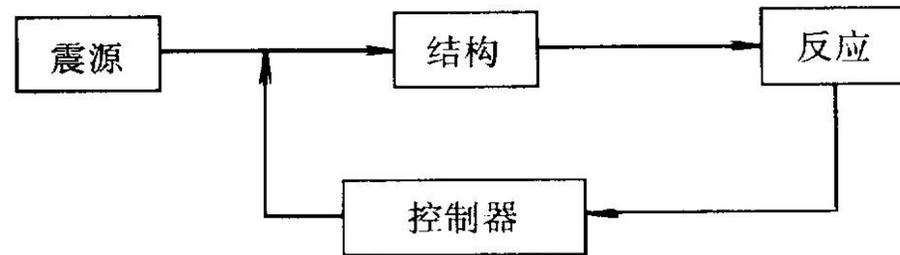


图 4 试验接线图

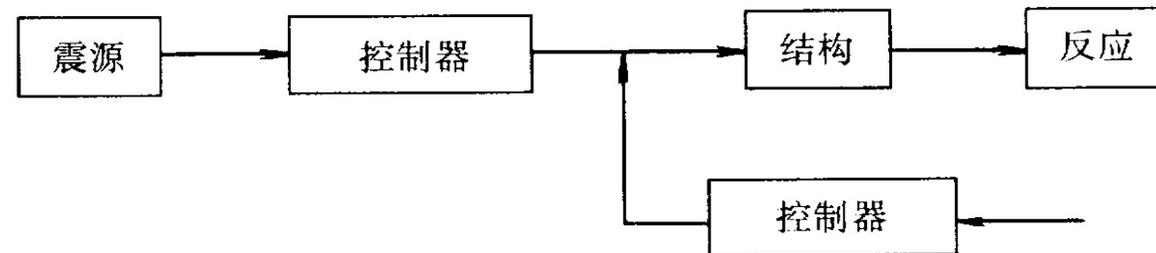
# 主动控制形式



(a) 开环控制



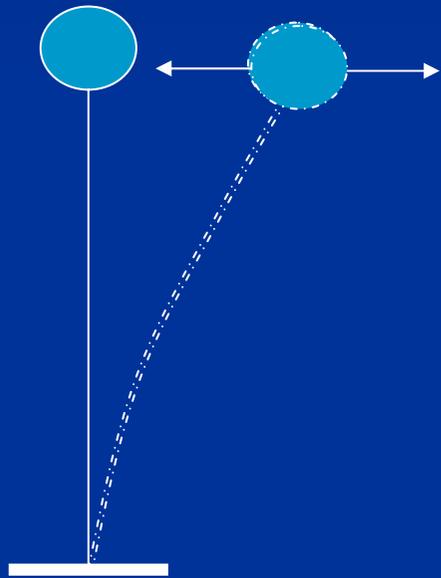
(b) 闭环控制



(c) 开闭环控制

图 8-21 主动控制形式

# 半主动振动控制原理



第一阶段:

位移与速度同向，刚度越大，离开平衡位置的位移越小

增加刚度

第二阶段:

位移与速度反向，阻尼越大，回复到平衡位置越快，下一阶段的速度相应越小。

增加阻尼

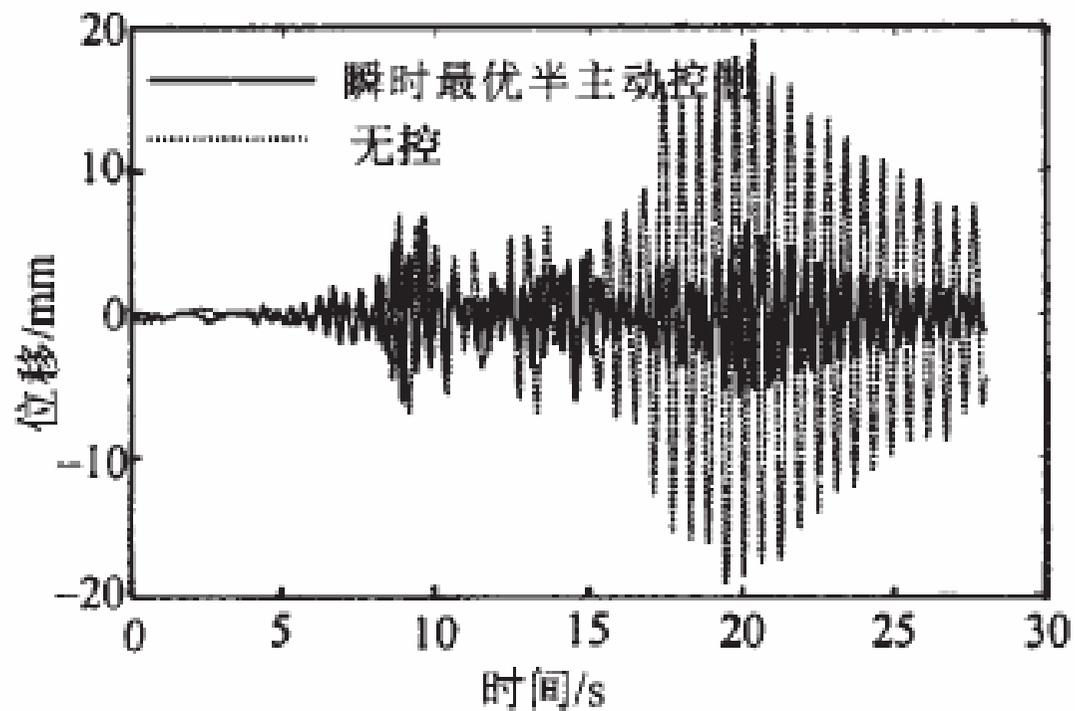


图 8 结构顶层位移在天津波(南北向)作用下控制效果图

主动变刚度变阻尼半主动控制试验

# 展 望

## “用震”技术

- 可以设想，今后的地球将被一个宏大的数字网络所包围，而且这个网络还将扩大到外层空间。所以地球的任何一个地点的任何变化都将被监视并转化为数码信号，而数码传播的速度达到光速，远远高于地面运动。
- 当地震来临时，地震波从震源到达设防目的地需要几分钟到十几分钟，这点时间对于处在数码网监视下的现代化城市已足以采取措施启动预警和应急响应系统。
- 这种系统的启动，不再是要人们紧急疏散，而是启动能量系统，将地震动能量转化为电、磁能量，使建筑物悬浮或悬挂起来；或启动结构控制系统，将结构振动减小，从而避免破坏。

- 这一切也许只是现代的幻想，但幻想是科学发明的动力，何况有些已经被现代科学家提出来并正在实现。
- 例如运用电脑启动电磁或液压系统进行结构控制的技术，就是一种很好的设想。
- 更进一步的设想是，利用强地震动能量来启动控制系统而不必依赖电能，因为电源系统可能早于控制系统破坏。

