

建筑结构试验

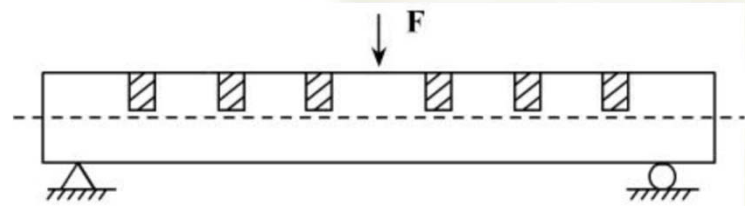
■ 结构工程科学的三大手段



结构试验是发展结构理论和解决工程问题的主要手段之一!

“路标试验”

- 17世纪初，伽利略提出截面应力均匀分布；
- 17世纪中，马里奥脱（法国）和莱布尼兹（德国）将其修正为三角形分布；
- 1713年，巴朗（法国）提出正确的应力分布型式，但未能进行试验验证；
- 1767年，容格密理（法国）提出“路标试验”（十字路口的路标）证明截面上部压应力的存在；



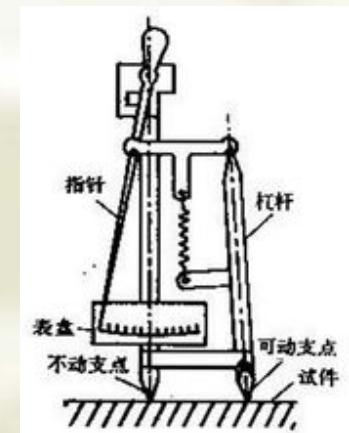
- 1821年，拿维叶（法国科学院院士）推导了受弯构件应力分布的计算公式；
- 1850年左右，阿莫历思（法国科学院院士）完成了试验验证。

结构试验在我国的发展历史

- 解放前，结构试验在我国几乎是空白；
- 1953年，长春市25.3m输电塔**原型**检验性试验（悬吊篮+铁块加竖向荷载，人工绞车加水平荷载，机械式引伸计，经纬仪）；
- 1957年，武汉长江大桥静载（静止载重卡车）和动载试验（不同车速跳过障碍物的载重卡车）；
- 1959年，北京火车站35m×35m双曲薄壳静力试验；
- 70年代后，上海体育馆、南京五台山体育馆网架模型试验；
- 1977年，湖北随州的**动态试验**（地下500tTNT炸药模拟动载，动态采集）；



酒杯形输电塔



杠杆式引伸计

结构试验在我国的发展历史

- 1991年东方明珠电视塔（464m）模型结构**拟动力**和**振动台**试验；
- 2003年上海音乐厅平移（5850t，南移66.46m）监测（长距离抗干扰的**光纤光栅传感**）；
- 2005年同济大学建筑结构试验室1千吨**随动结构试验机**；
- 2010年上海中心大厦结构模型振动台试验；
- 2013年同济大学**多点振动台**。

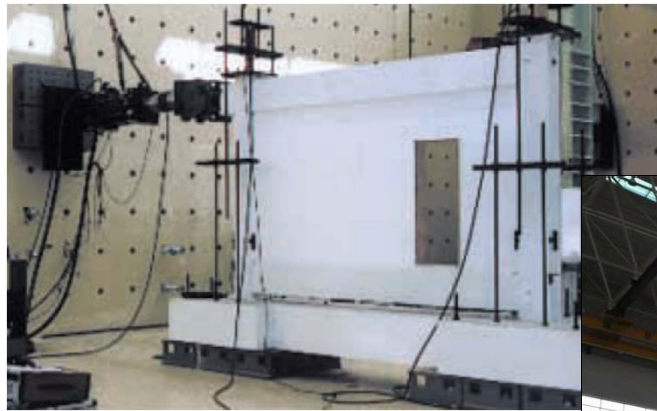


上海音乐厅



结构试验在我国的发展历史

内容	1977年以前	1977~1999年	2000以后
加载设备	重力加载、杠杆与砝码、水平拉绳、水槽、反力架与液压千斤顶	多点同步液压加载以进行拟静力加载、动力加载	电液伺服加载进行静载、拟动力、动力和模拟地震试验；风洞试验



结构试验在我国的发展历史

内容	1977年以前	1977~1999年	2000以后
传感器与检测设备	机械式测力环、机械式百分表、千分表、杠杆引伸仪、模拟式电阻应变仪	电测连接各类传感器（压强、位移、倾角、应变、速度、加速度）	高环境适应的传感器、无线传感器、自我识别传感器、激光传感器、光纤光栅传感器、散斑场应变测量、抗腐蚀传感器



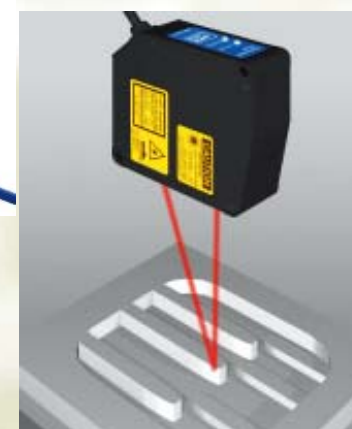
百分表



电桥式位移计



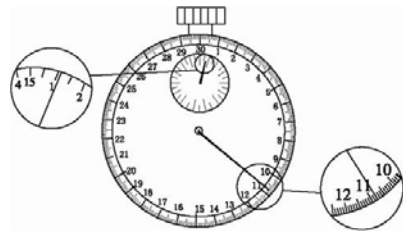
光纤光栅应变计



激光位移计

结构试验在我国的发展历史

内容	1977年以前	1977~1999年	2000以后
采集分析系统	人工读数、手工记录、磁带记录仪、人工计算	计算机进行参数设置、自动平衡、定时采集、软件基本分析	计算机实时采集、显示和分析、远距离采集、混合采集、同步采集、高环境适应能力的采集系统



人工读数



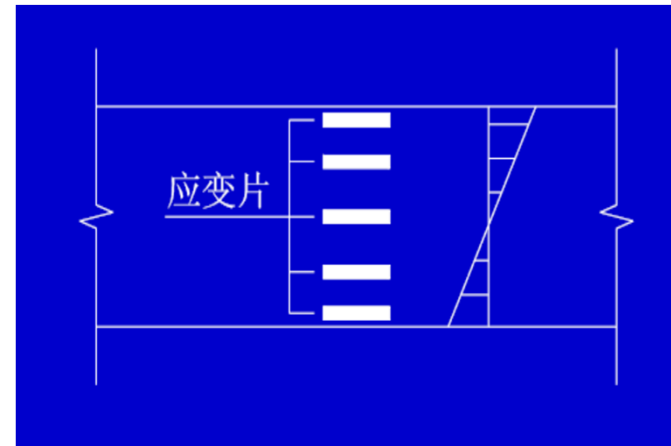
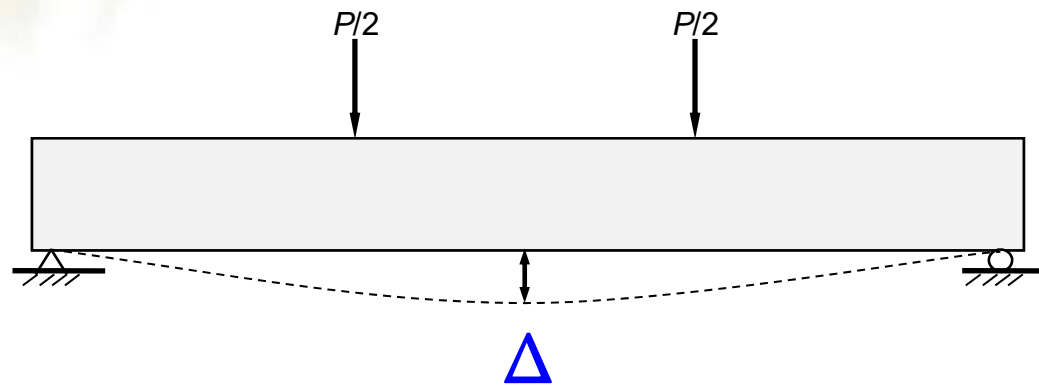
静态电阻应变采集箱



多机箱共享时钟和触发同步

结构试验的任务

■ 结构试验的任务



将结构理论
结合试验原
理、技术和
设备

地震作用
机械扰动
重力

极限荷载 P
挠度 Δ
裂缝宽度
截面应变

$M-\Phi$
 $P-\Delta$

平截面假定



结构试验的分类—第1章 概论

■ 生产性试验(检验性试验)

■ 特点：非探索性，试验一般对应有明确的性能合格指标，针对实际结构或构件

■ 应用场合

■ 检验新结构的设计和施工质量

结构一般指重要建筑结构，或采用新理论、新材料、新工艺的建筑物。如南浦大桥、杨浦大桥、秦山核电站安全壳等。

■ 检验已有建筑物的可靠性，推断剩余寿命

■ 检验改建或加固结构的实际受力性能

■ 为工程事故鉴定处理提供技术依据

■ 检验结构构件或部位的受力性能

如预制构件、构造复杂的结构部件（框架、网架节点等）

结构试验的分类

■ 科研性试验

- 特点：具有研究、探索、开发的性质，试验目的在于发现机理或验证理论，针对试件而不一定是具体结构。

- 应用场合

- 验证结构计算理论及有关假定、推断等

- 预应力结构抗震设计、组合结构平截面假定、材料的本构特性等。

- 为编制有关设计规范提供依据

- 推广应用新结构、新材料、新工艺。

- 如预应力结构、组合结构、FRP、材料本构、张弦梁等。

结构试验的分类

- 按试验对象：真型试验、模型试验
- 按荷载性质：静力试验、动力试验
- 按试验时间：短期荷载试验、长期荷载试验
- 按试验场合：试验室试验、现场试验
- 按破坏程度：破坏性试验、非破坏性试验

真型试验与模型试验

■ 真型试验

- 试验对象：实际结构或按足尺复制的结构或构件
- 优点：完全反映真实结构受力特性，试验结论可靠
- 缺点：费用高，加载难度大，试验周期长

■ 模型试验

- 试验对象：缩尺试件（几何相似、材料相似、力学相似）
- 优点：实施方便，费用低，多参数、多试件
- 缺点：严格的相似条件难以实现，尺寸效应的影响、初始缺陷

静力试验与动力试验

■ 静力试验

- 单调静力试验、低周反复静力加载试验（伪静力试验）
- 优点：加载设备简单，可逐步加载，试验观测方便
- 缺点：不能完全反映结构动力性能

■ 动力试验

- 振动台试验、疲劳试验、风载试验、抗爆抗冲击荷载试验等
- 优点：能真实反映结构的动力特性和动力响应
- 缺点：成本高、加载设备和测试手段复杂、相似条件有时难以实现、尺寸效应影响更大、初始缺陷

短期荷载试验与长期荷载试验

■ 短期荷载试验

- 一般试验全过程持续几分钟到几天
- 通常的结构试验绝大多数为短期荷载试验

■ 长期荷载试验

- 试验全过程持续几个月、几年到数十年
- 主要研究与时间有关的结构特性，如：混凝土的收缩、徐变，预应力筋的松弛，结构的耐久性能等

防腐→EP筋，九年

组合结构的收缩徐变微差分析→时随性能

混凝土的碳化

试验室试验与现场试验

■ 试验室试验

- 在试件设计、加载方法、测试设备等方面均比较精良，可突出主要研究因素，而且可加载至破坏
- 适用于科研性试验
- 今后结构试验的主要发展方向

■ 现场试验

- 试验比较简单，通常不会加载至破坏
- 优点是试件或结构的工作条件、结构型式等完全反映工程实际情况

破坏性试验与非破坏性试验

- 现场试验和长期荷载试验多为非破坏性试验
- 试验室试验与短期荷载试验多为破坏性试验

思考

借鉴“路标试验”的思想，并当时的时代为试验背景，试构想出纯弯梁截面应力分布更进一步的试验方法。

建筑结构试验的一般过程

结构试验目的

结构试验设计

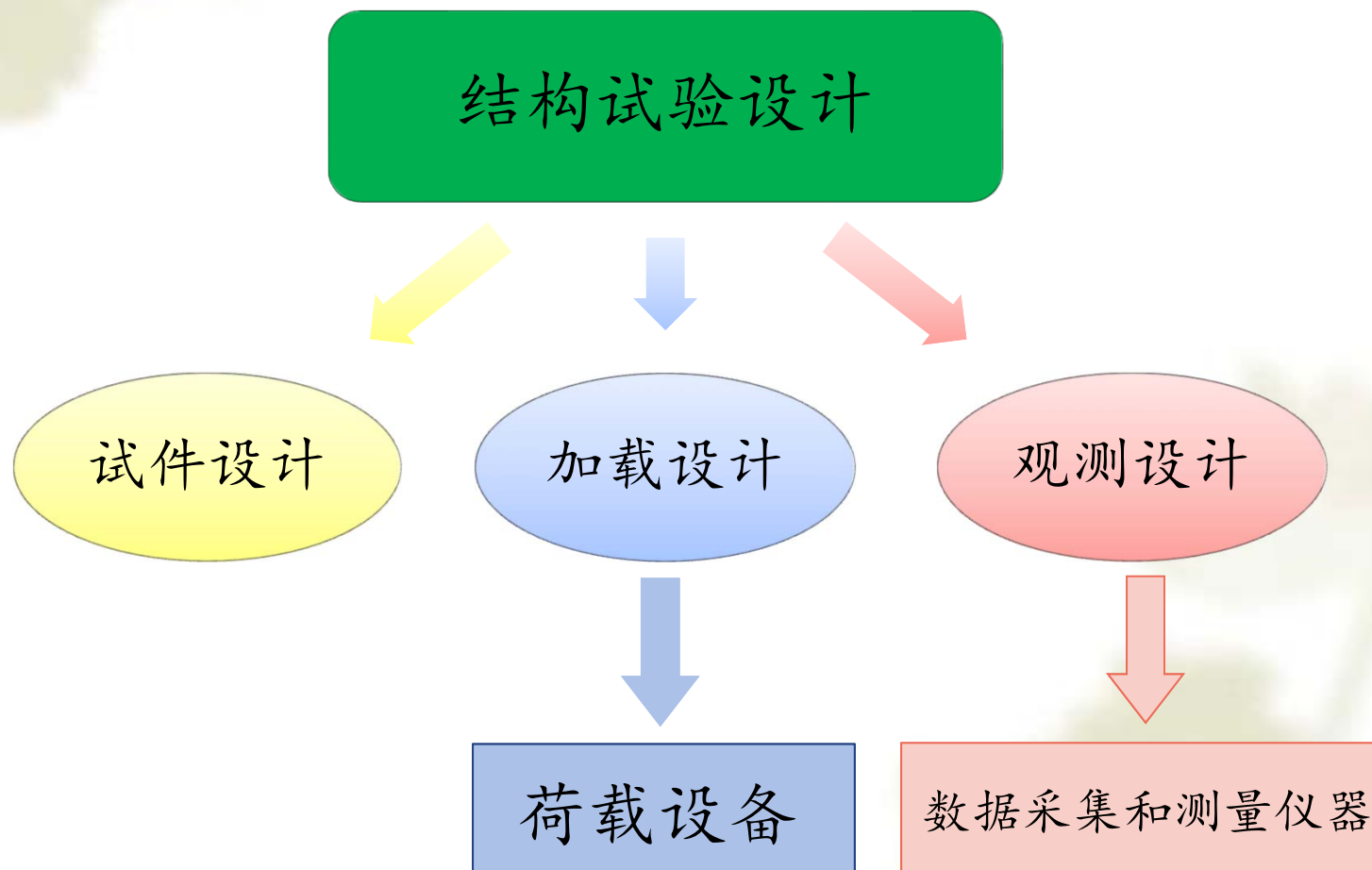
结构试验准备

结构试验实施

结构试验分析

结论

建筑结构试验设计



结构试验的荷载设备

■ 选择加载设备和方法的原则

第一原则：所施加荷载与实际或理想荷载一致或尽量一致

第二原则：经济安全（人力、物力和时间）

- 荷载稳定，不受时间、环境和结构变形等因素影响
- 加载装置安全可靠，满足刚度和强度要求
- 便于操作，包括加载、卸载、持载、控制荷载变化、控制多荷载协同作用

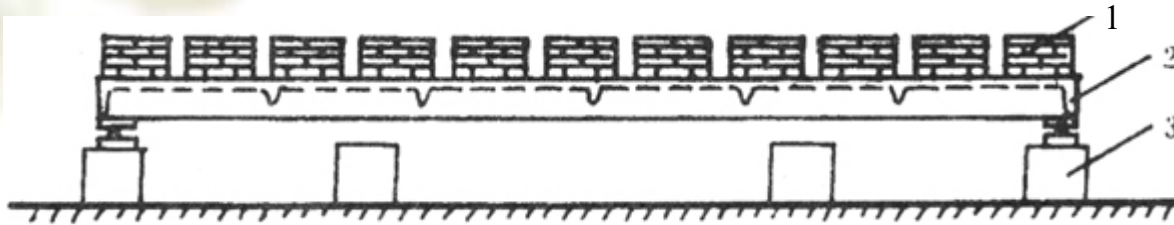
结构试验的荷载设备

■ 结构试验中加载方法

- 重力加载法
- 液压加载法
- 惯性力加载法
- 机械力加载法
- 气压加载法
- 电磁加载法
- 人激振动加载法
- 环境随机振动激振法

结构试验的荷载设备

■ 重力直接加载法



应注意避免因荷重块产生拱作用而改变荷载分布。

加载重物：固体（砂石、铁锭、铅锭等）、液体（水）

特点：可施加点荷载、线荷载、面荷载、空间荷载（液体）

优点：设备要求低，恒载（不受梁变形影响），方向恒竖直向下

缺点：人工多，无法自动卸载有断梁风险

适宜：小荷载的长期加载

结构试验的荷载设备

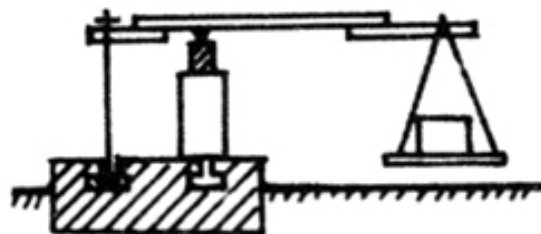
■ 重力直接加载法



预应力钢—混凝土组合梁长期荷载试验

重力加载法

■ 杠杆加载法



加载重物：铁锭砝码、铅锭砝码、其它

特点：用较小重物实现放大荷载加载（可达100倍）、集中荷载加载为主

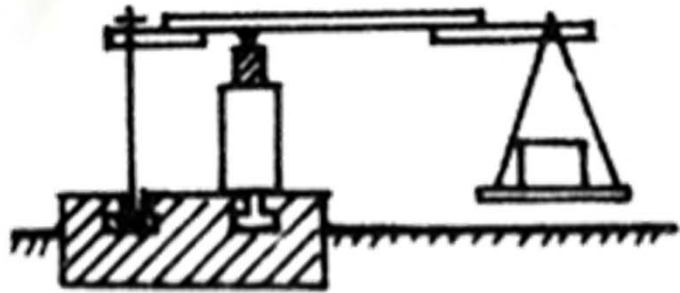
优点：设备要求不高，恒载（不受梁变形影响）

缺点：人工较少，无法自动卸载有断梁风险

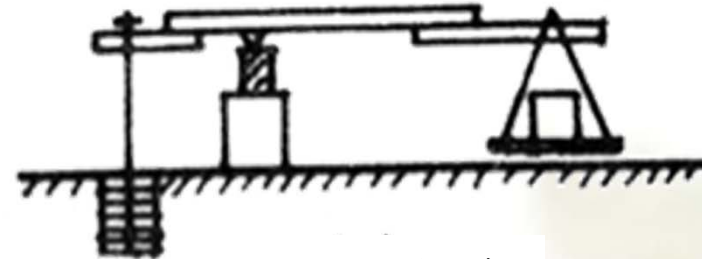
适宜：中荷载的长期集中荷载加载

重力加载法

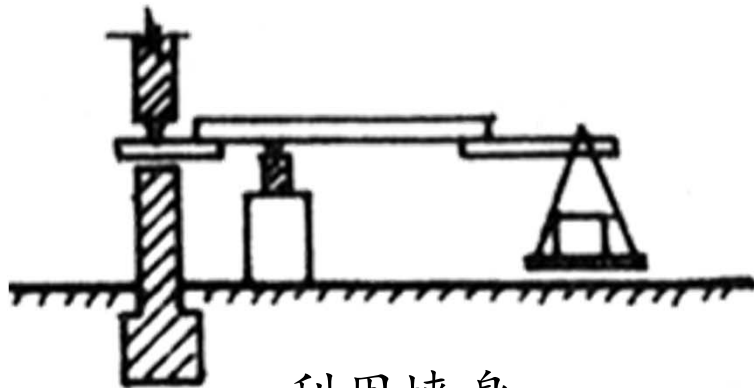
■ 杠杆加载法的实现方案



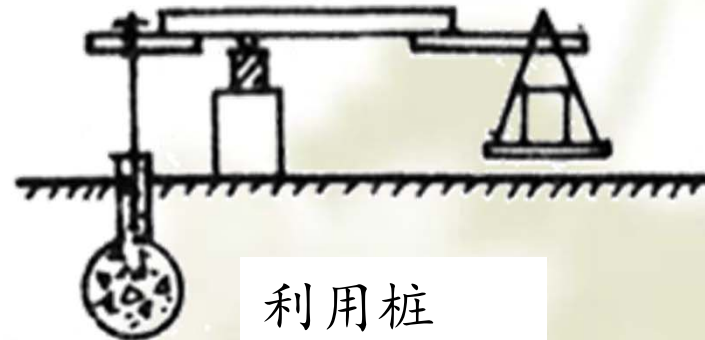
利用试验台座



利用平衡重



利用墙身



利用桩

结构试验的荷载设备

- 利用物体自重加载
- 静力荷载
- 既可模拟垂直加载，也可模拟水平加载（滑轮和拉索）
- 应避免试件弯曲变形而使荷载块产生拱作用，改变荷载分布
- 结构变形时荷载不会改变（优点）
- 当承载力不够时不能自行卸载而导致结构倒塌（缺点）
- 一定加载范围内简单易行，且经济（优点）
- 需较多人工（缺点）
- 适用于：荷载不大的中长期恒荷载加载

液压加载法

- 利用液体的流动和帕斯卡原理实现加载
- 可适用于静、动载试验（符合第一原则）
- 吨位可大、可小（符合第一原则）
- 点集中或多点集中加载（符合第一原则）
- 设备简单便宜、且使用安全（符合第二原则）
- 目前最常用、比较理想

液压加载器

■ 式手动液压加载器（非分离式）

- 手工操作，简易方便
- 但一人一台，难以同步加载



■ 单向作用液压加载器（分离式）

- 加载更方便、安全（相比非分离式）
- 只能单向加载

■ 分离式双向作用液压加载器（分离式）

- 还可施加反复荷载（拉或压、推或拉）

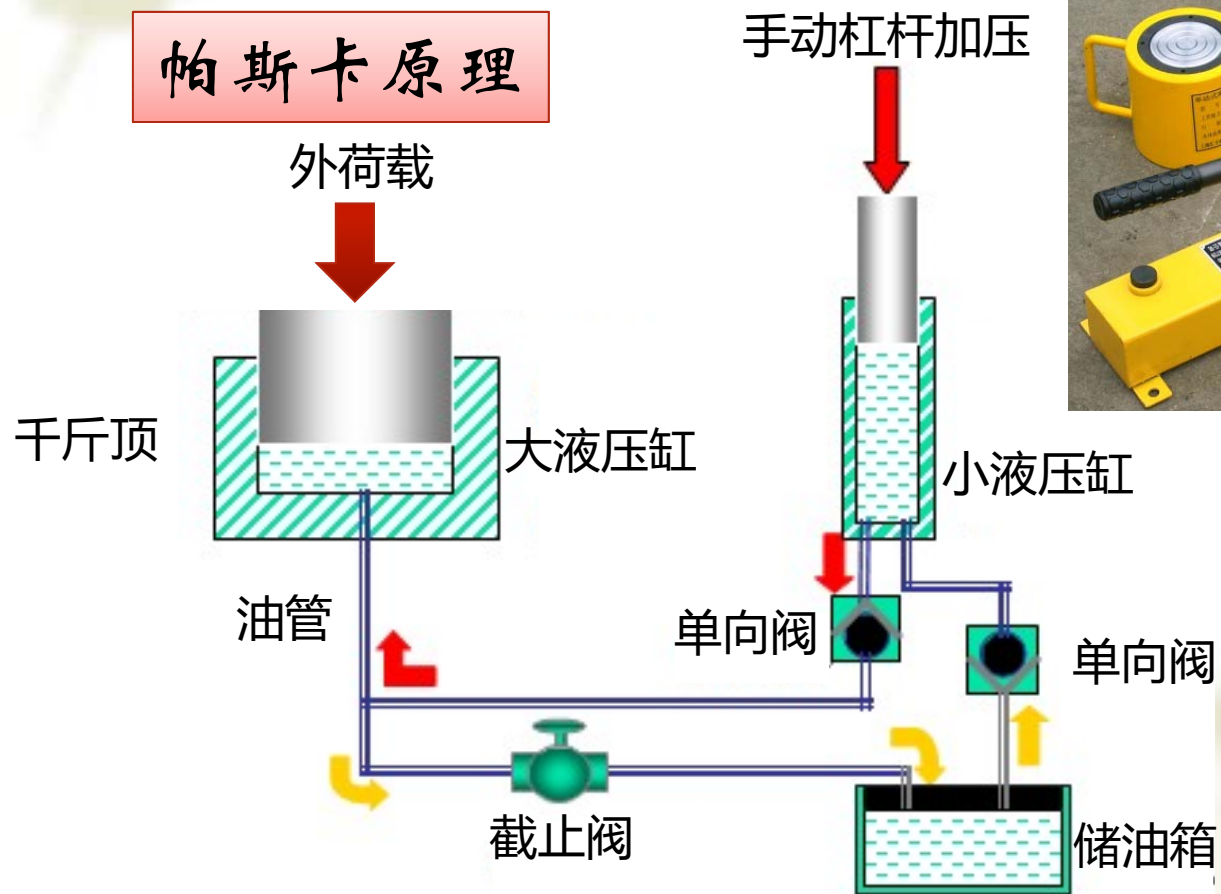
液压加载器

■ 单向作用液压加载器（分离式）



液压加载器

■ 单向作用液压加载器原理



通过加油、回油控制活塞伸出或回缩，可进行拉/压荷载试验

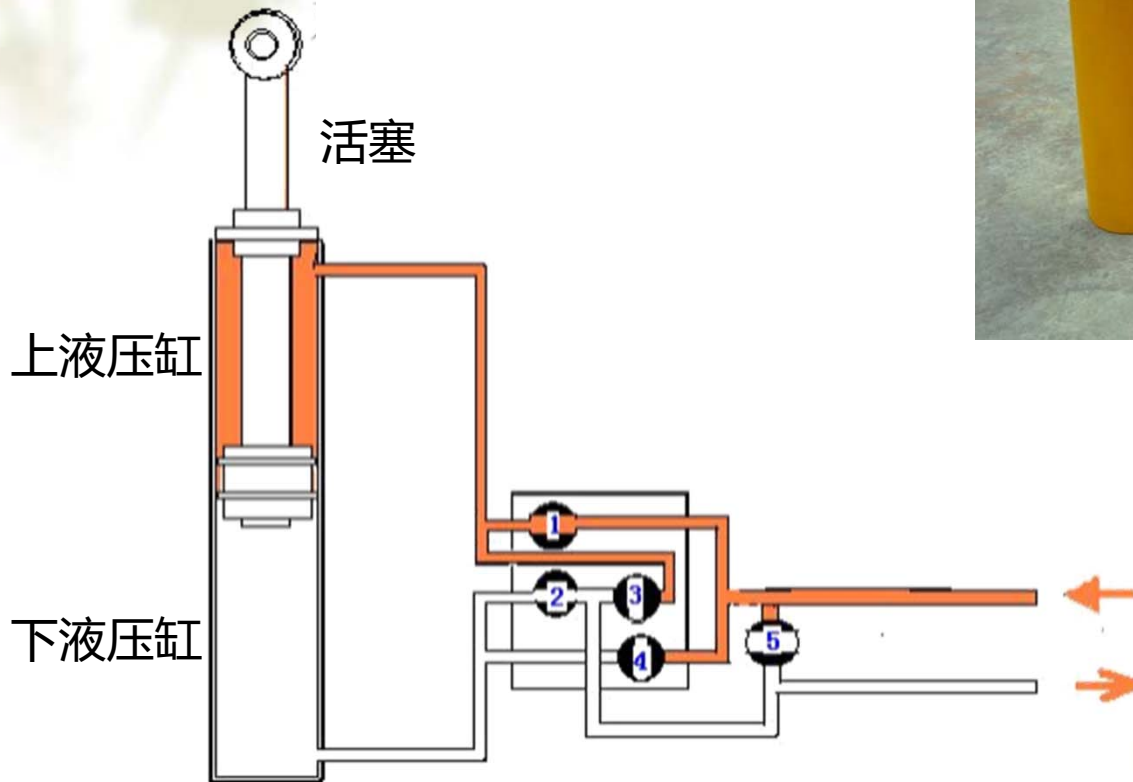
液压加载器

■ 双向作用液压加载器（分离式）



液压加载器

■ 双向作用液压加载器原理



电动泵

开关1和2打开，3和4关闭，5关闭，活塞伸出
反之，开关1和2关闭，3和4打开，5关闭，活塞回缩

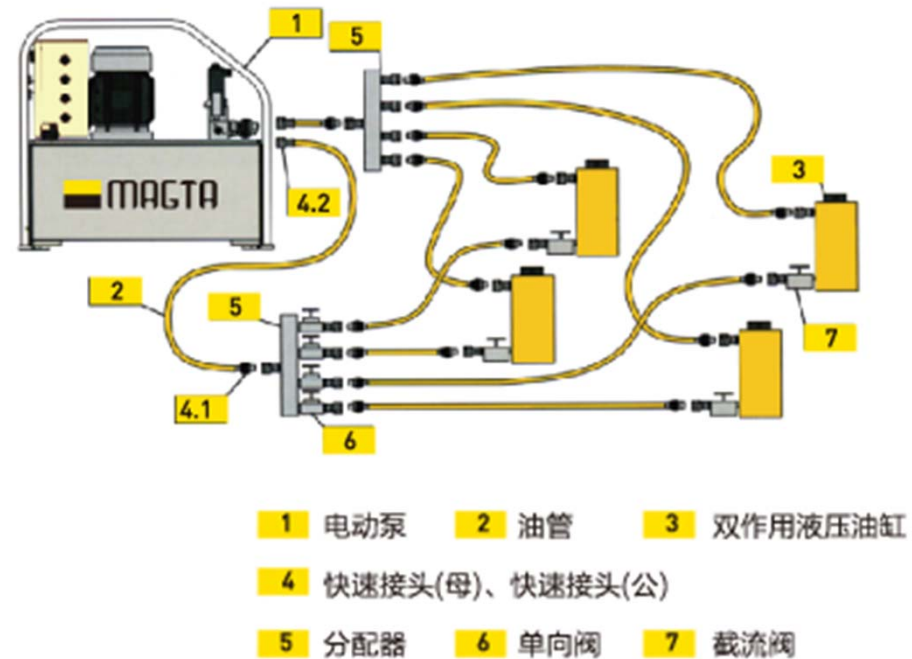
通过加油、回油和阀门选择，控制活塞伸出或回缩，可实现拉压双向反复荷载

液压加载器

■ 多加载器同步加载系统 (粗略的同步控制)



单向作用液压



双向作用液压

液压加载系统

■ 组成部分

■ 液压加载器



■ 液压控制台（给油、阀控制，还包括测力或油压）

■ 反力架

■ 台座

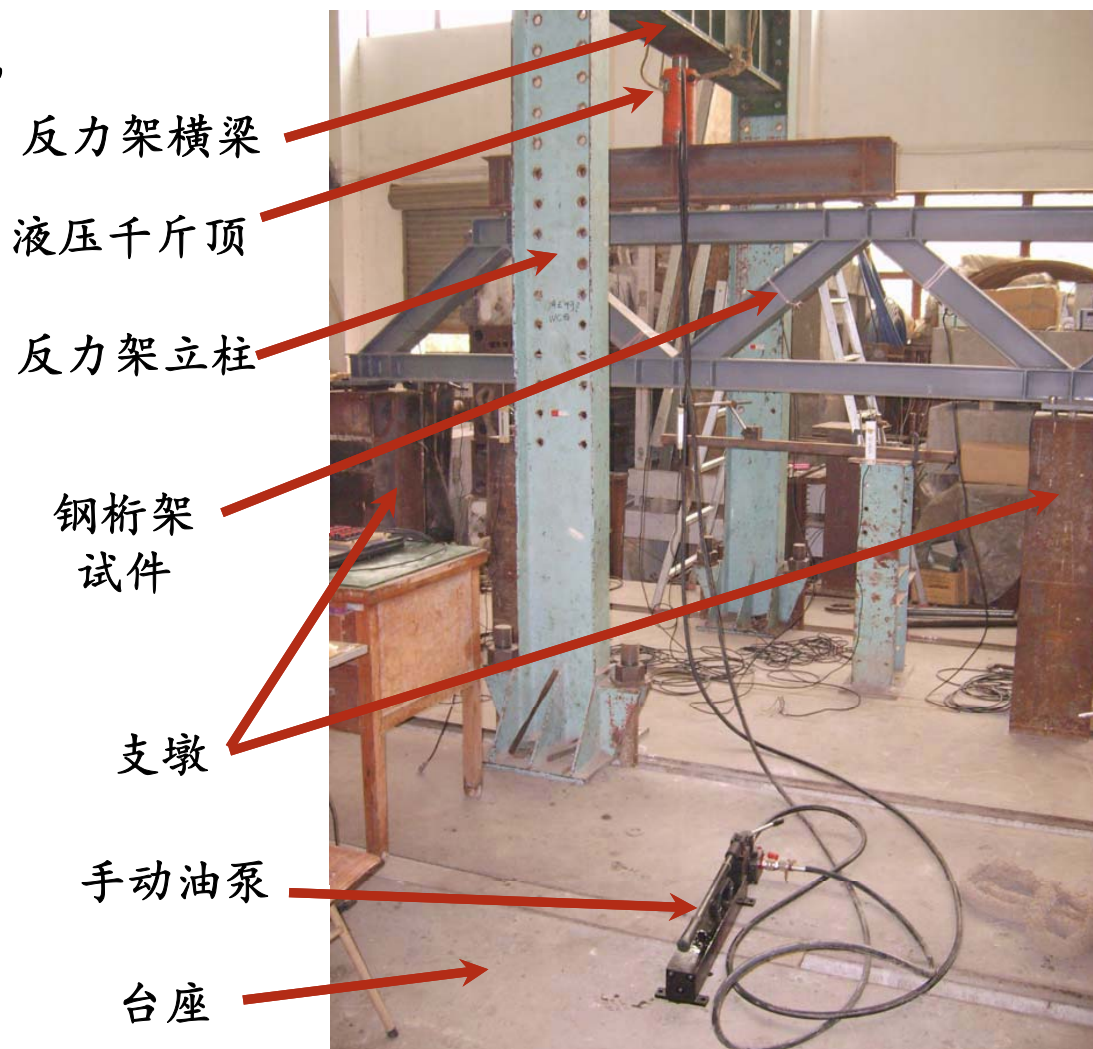


液压加载系统

■ 组成部分和特点

采用液压千斤顶系统加载的特点：

- 千斤顶活塞伸出受限才形成力作用；
- 施加的力与结构变形相关，难以人工控制以严格的加载力（或活塞伸出的位移）-时间曲线施加；
- 长期加载会因漏油而部分卸载。



5M钢桁架结构静力分析试验