



实验模态分析





1.绪论

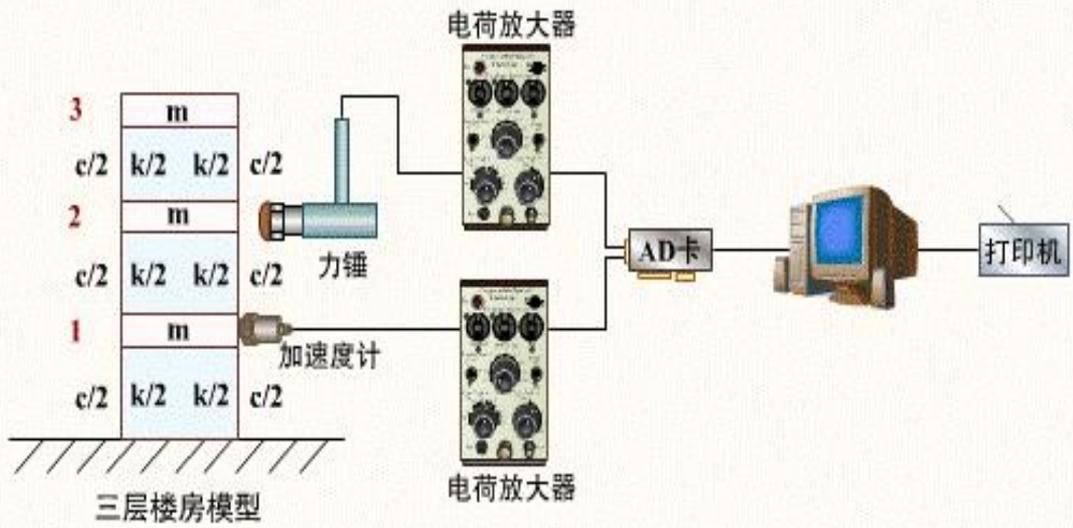
- **实验模态分析**是以振动理论为基础，综合动态测试技术、数字信号处理和参数识别等手段，以模态参数为目标的试验，属于振动试验的一个重要分支。模态分析试验在结构性能评价、结构动态修改和动态设计、故障诊断和状态监测以及噪声控制分析等方面有重要应用，尤其是对基于有限元的结构动态设计和动态修改具有重要意义。
- **模态**是机械结构的固有振动特性，每一个模态具有特定的固有频率、阻尼比和模态振型。这些模态参数可以由计算或试验分析取得，这样一个计算或试验分析过程称为**模态分析**。
- 这个分析过程如果是由有限元计算的方法取得的，则称为**计算模态分析**；如果通过试验将采集的系统输入与输出信号经过参数识别获得模态参数，称为**实验模态分析**。通常，**模态分析**都是指**实验模态分析**。



●模态分析试验是已知激励和响应，求系统的模态参数。进行模态分析试验时，必须先用激励装置给被测结构施加一个振动力，由传感器测量输入到结构的激振力；响应传感器测量被测结构的振动响应；分析系统将这些输入和输出信号进行离散化等一系列计算，并估计出模态参数。模态参数主要是指模态频率、阻尼和振型。

●模态分析试验的设备由以下三大部分组成：

- (1) 激振装置；通常有激振器和冲击锤
- (2) 拾振装置；包括力传感器、响应传感器、适调放大器
- (3) 数据采集与分析系统。





- 实验模态分析可分为两种不同的实验方法：

正则振型实验法(NMT)— 此法用多个激振器对结构同时进行正弦激励，当激振力矢量被调到正比于某一振型时，就可激励出某一纯模态振型，并直接测出相应的模态参数，不必再进行计算。该法的优点在于所得的结果精度高；但它需要高精度的庞大测试仪器和熟练的实验技能，费时长，成本高。

频响函数法(FRF)— 此法可只在结构的某一选定点处进行激励，同时在多个选定点依次测量其响应。将激励和响应的时域信号，经FFT分析仪转换成频域的频谱。因频响函数是响应与激励谱的复数比，对已建立的频响函数数学模型进行曲线拟合，就可从频响函数求出系统的模态参数。该法的优点在于可同时激励出全部模态，测试的时间短，所用仪器设备较简单，实验方便，在产业和科研部门得到了一泛的应用。



● 模态分析理论的基本假设

- 线性假设
- 时不变假设
- 可观测性假设

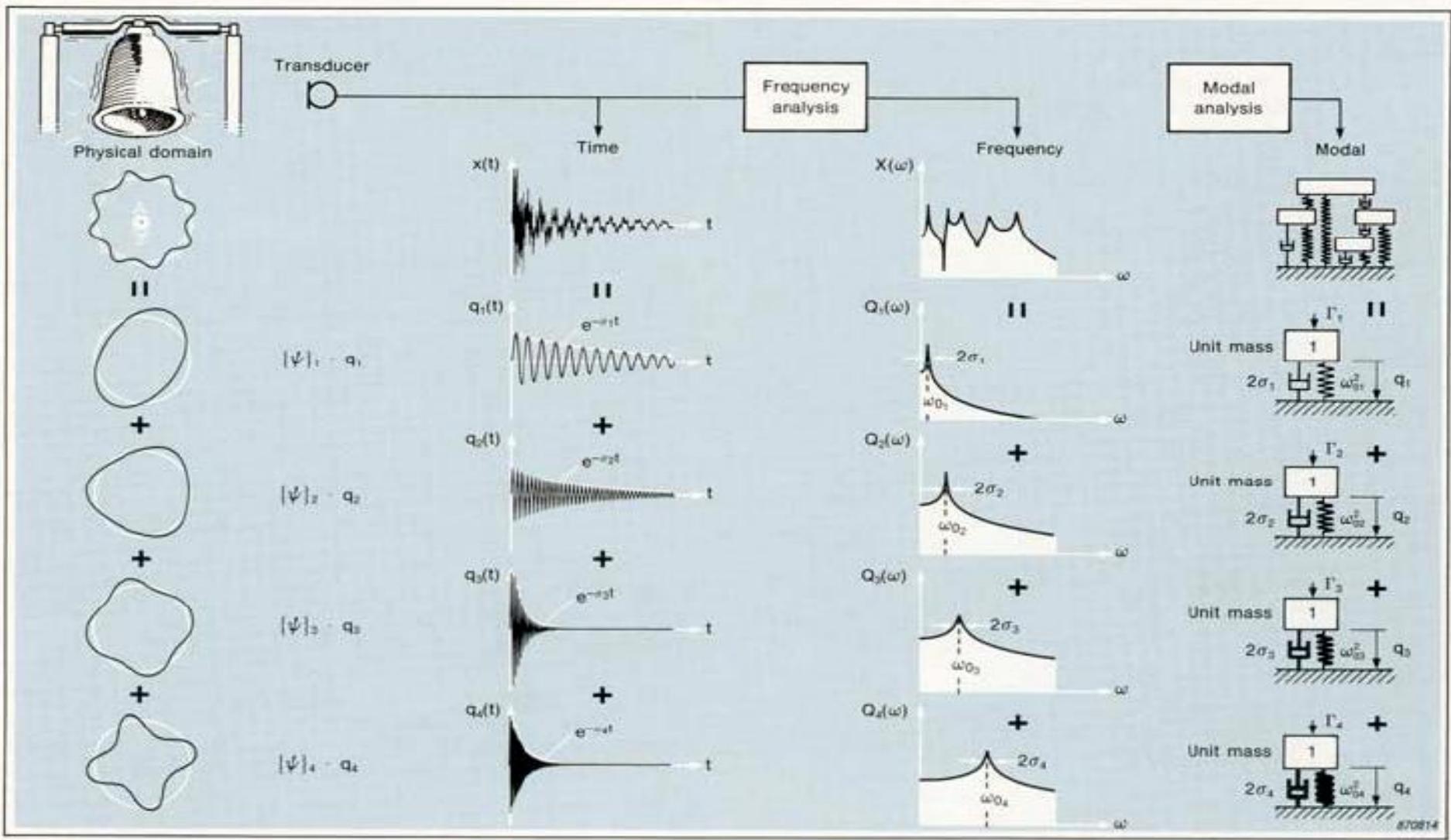
- 系统满足：
 - 线性叠加性
 - 一致性
 - 互易性

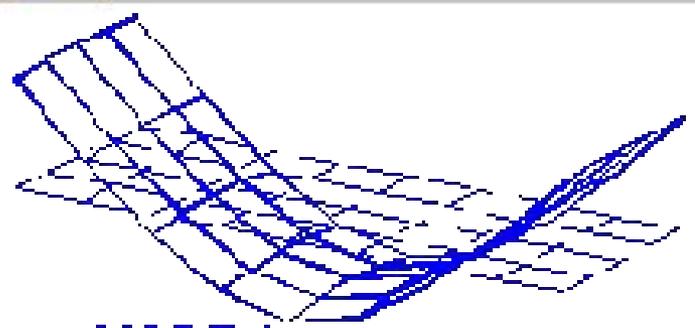
Superposition:

Homogeneity:

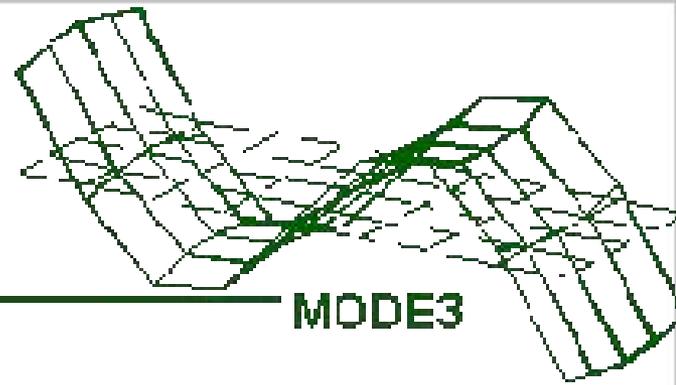
Reciprocity:

870816

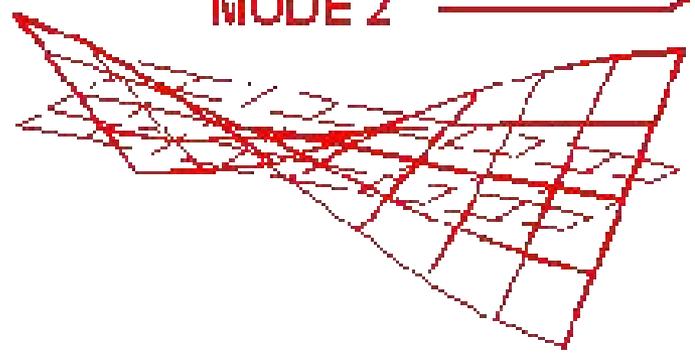
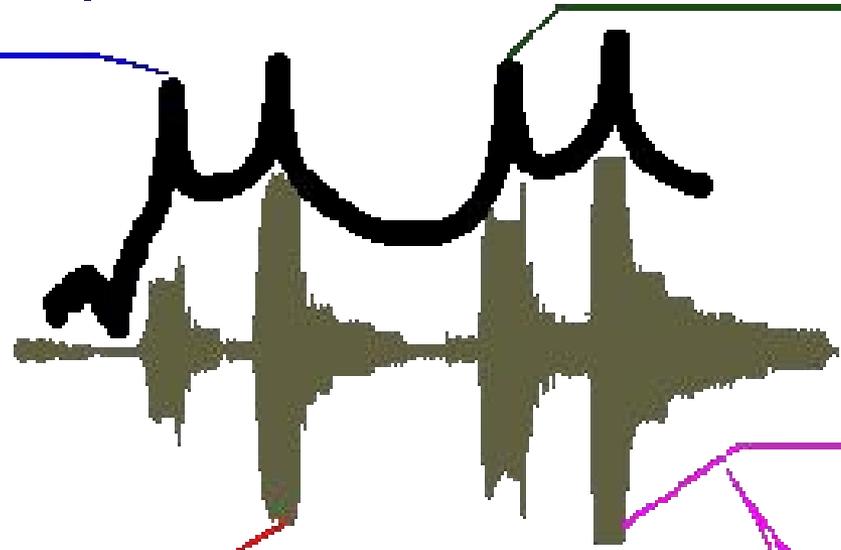




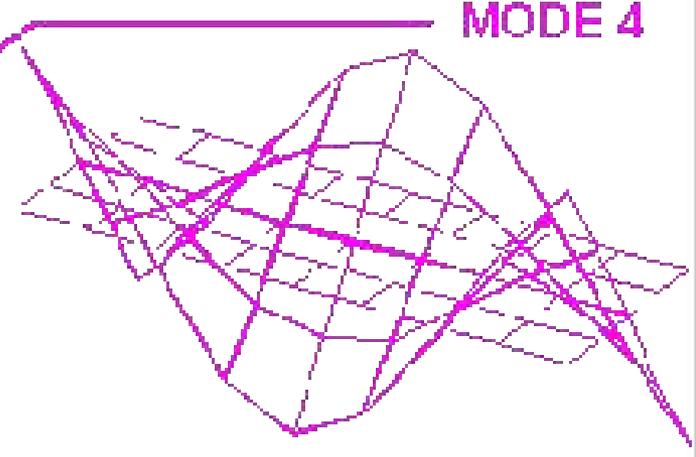
MODE 1



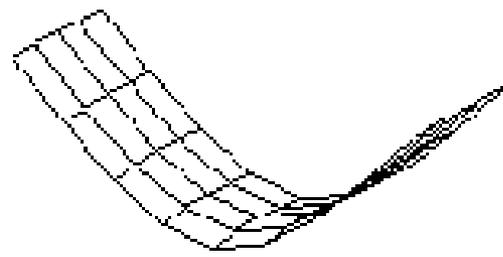
MODE 3



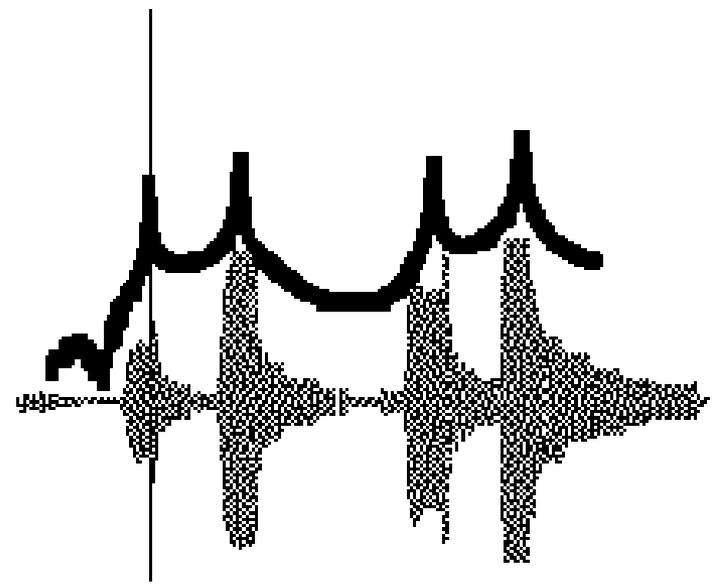
MODE 2



MODE 4



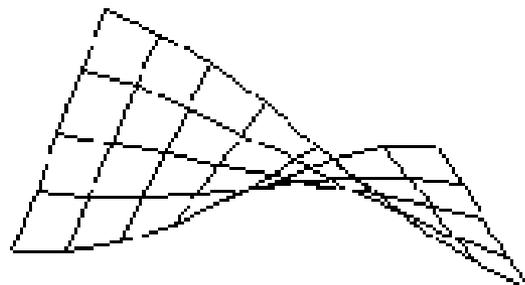
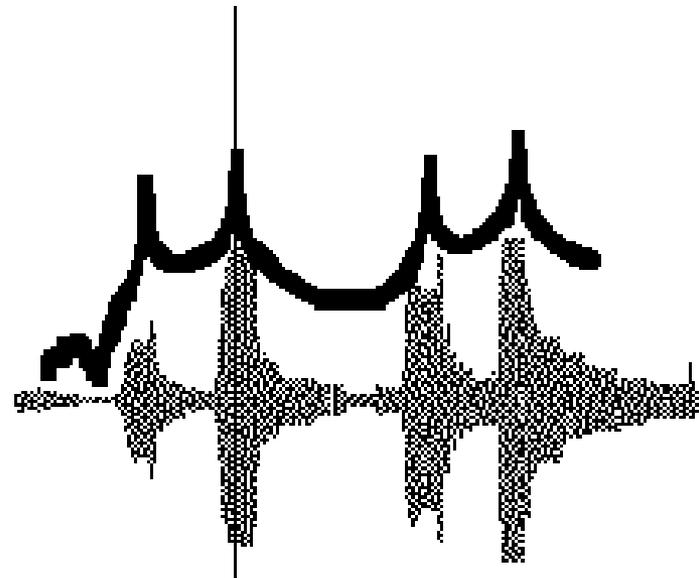
MODE #1

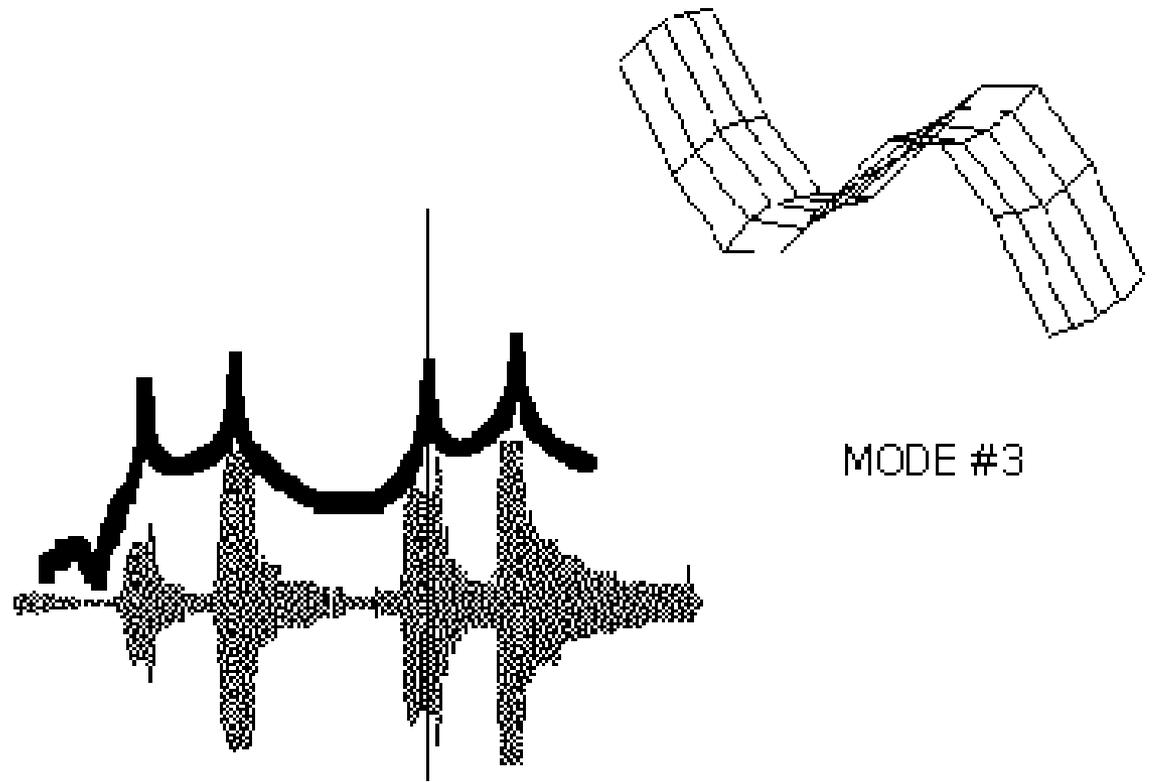




UNASS LGWELL - MODAL ANALYSIS and CONTROL LABORATORY - Peter Avitabile and Fabio Piergentili

MODE #2

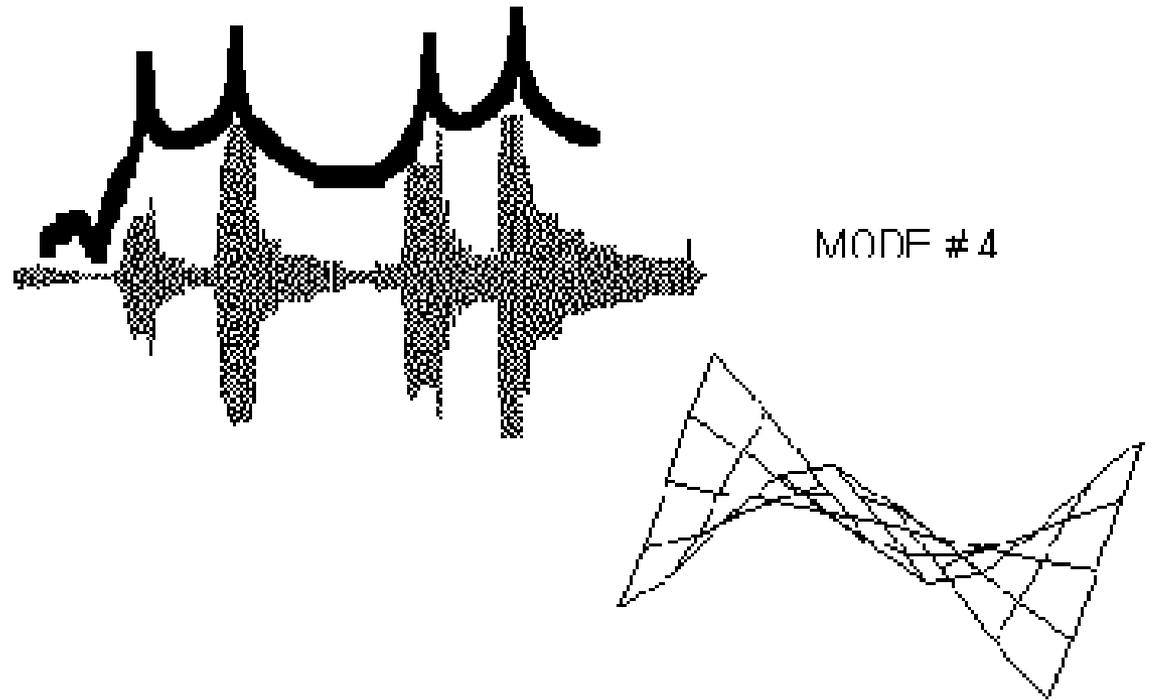




MODE #3



MASSLOWRII - MODAL ANALYSIS and CONTROL LABORATORY - Peter Avtobila and Fabio Piergentili



MODE # 4



2.实验模态的测试过程

不管是采用时域法还是频域法，进行实验模态分析的第一步，是获得被测结构激励和响应的时域信号，即时间历程。试验过程分为以下几个步骤。

- (1) 根据试验目的对被测结构进行网格划分，建立结构的几何模型；
- (2) 传感器标定；
- (3) 将试验结构以适当方式支撑起来；
- (4) 选择适当方式激励试验结构；
- (5) 通过拾振系统测量、记录下激励和响应的时间历程。



2.1 试验结构的支撑

试验的目的决定了试验的支撑条件。试验目的主要有三种情况：与有限元模型进行比较；在常规工作条件下测量试件的动态特性；对规定边界条件下的子结构进行试验研究，使之与整体结构相适应。

与试验目的对应的支撑条件一般有自由支撑、固定支撑和原装支撑三种。

(1) 自由支承(**Free-Free Support**)。

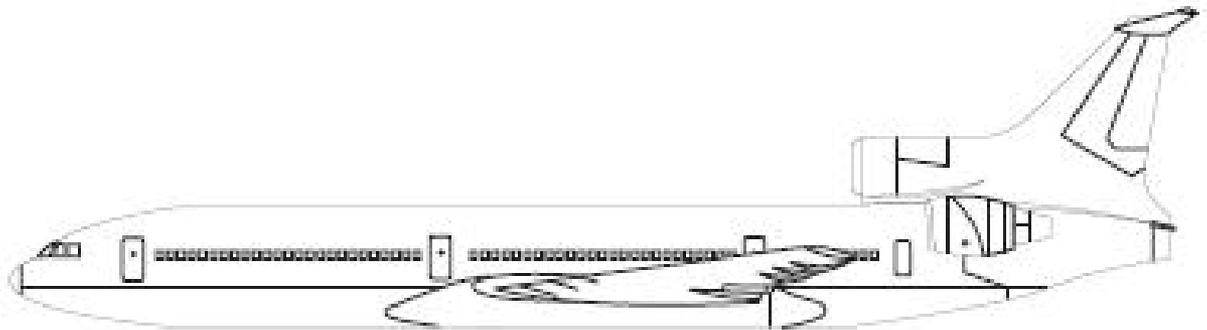
无约束条件对仿真计算容易实现，但需要进行移频处理。试验实现真正自由支承的方法有：气悬浮、磁悬浮、太空无重力环境、自由下落（失重）。



实际支承的最高刚体频率小于结构最低弹性频率的，即可减少基础模态（悬挂系统）对结构模态的影响，实现近似自由支承。因此对于低频模态（小于**1Hz**）要实现自由支承很困难，但对高频模态实现自由支承很容易。

主要方法有：

- 橡胶绳悬挂。要求橡胶绳足够长、足够软。
- 软弹簧支承。
- 海绵垫、橡胶垫支承。
- 空气弹簧。

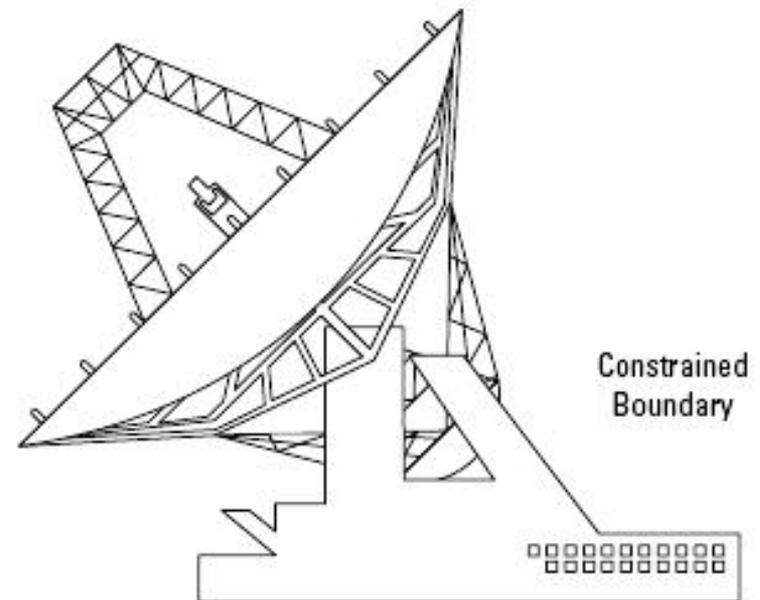


Free
Boundary



(2) 固支支承 (**Fixed-Fixed Support**)。又称地面支承。理论上容易实现，仿真计算时只需要将有关自由度约束即可。但实现起来有困难。由于实现固支条件的结构不可能是刚性的，有弹性。因此要实现固支支承，就必须要求支承结构的最低弹性体频率远高于试验结构的最高分析频率。因此要实现高频模态的固支支承是很困难的，一般情况下，中小结构能够实现的固支频率大约是**400Hz**，特殊条件下小结构固支有可能超过**1000Hz**，但对大结构要实现固支支承很困难。

(3) 实际工作状态支承。





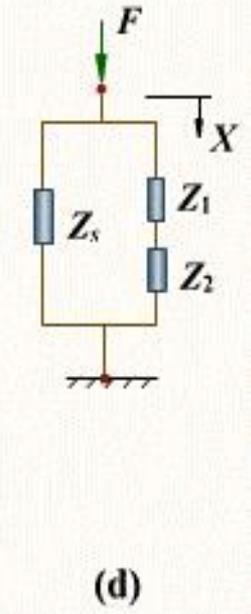
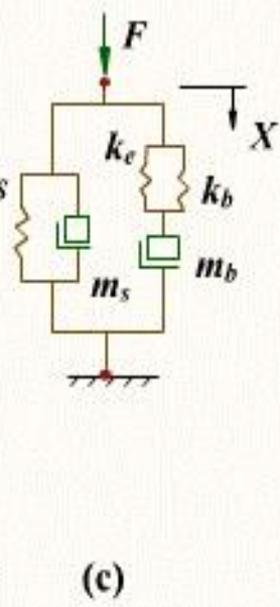
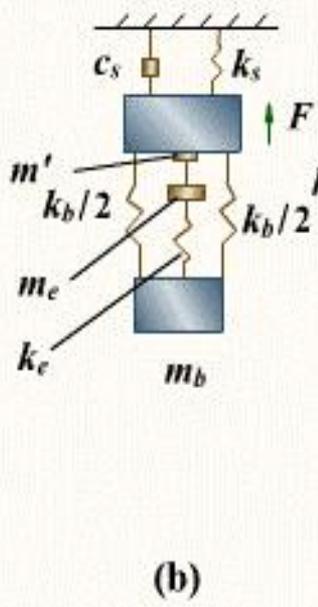
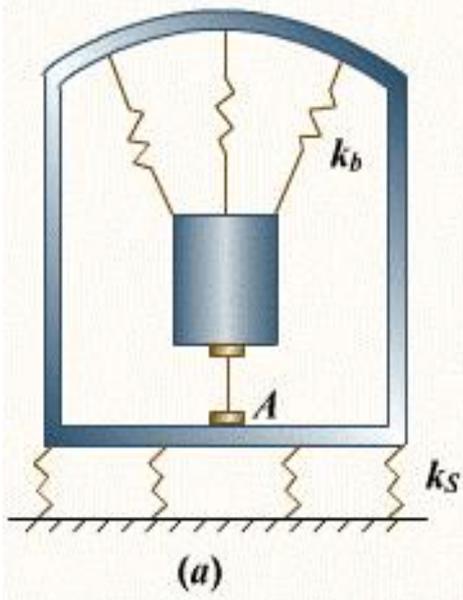
● 激振器的支撑:

(1) 固支在结构物外。

(2) 悬挂在结构物外 (低频)。

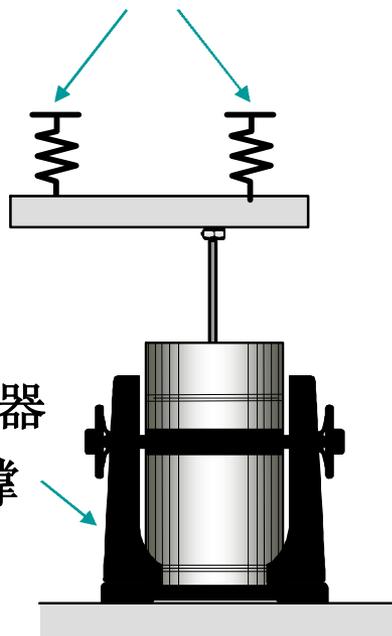
因使激振器悬挂系统的频率远低于结构的激励和弹性体共振频率。必要时可在激振器上附加大的质量块以进一步降低悬挂频率。

(3) 采用隔振悬挂在结构物内部。

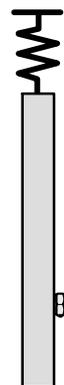




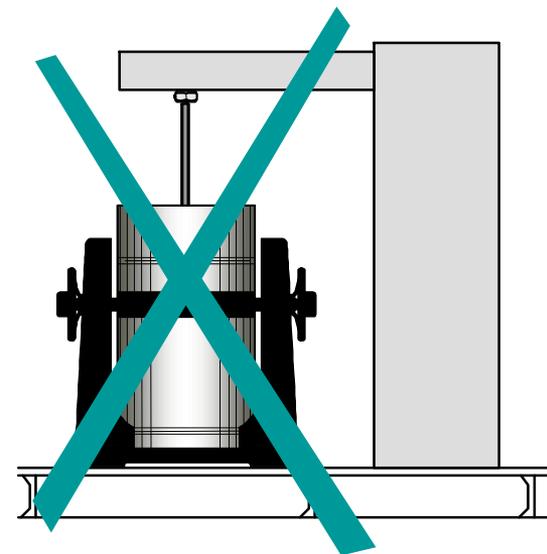
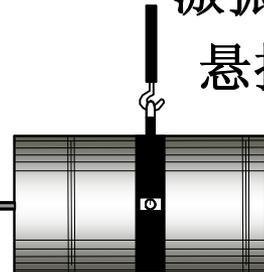
结构悬挂



结构
悬挂



激振器
悬挂





Courtesy DLR





2.2 激励方式

根据不同的试验对象，选用不同的模态参数识别方法，相对应的激励方式为单点激励和多点激励。

对中小型结构进行模态分析试验时，采用单点激励即可获得满意效果，它是指一次只激励试验对象一个点的一个方向，是最简单、最常用的激励方式。单点激励对应于**SISO**（单输入单输出）参数识别方法。

对大型、复杂结构，单点激励往往丢失模态，或由于激励能量有限而得不到有效的高信噪比的频响函数，有时甚至无法激起结构的整体振动，导致模态分析试验失败，因而常用多点激励法进行模态分析试验。它是指对对个点同时施加激励，多点激励对应于**MIMO**（多输入多输出）参数识别方法。它的优点是能更好地把输入能量分配到试验结构上，可以减少漏掉的模态。

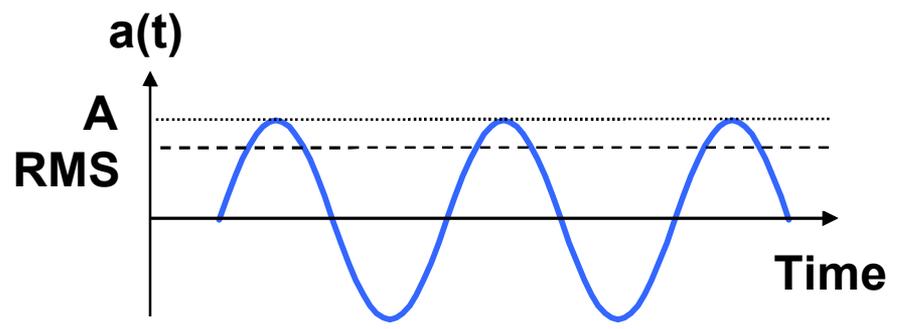


2.3 激励信号的选择

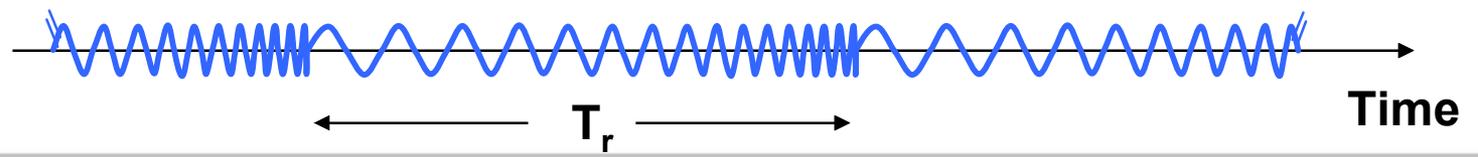
模态试验常用激励信号为扫描正弦信号、纯随机信号、伪随机信号、周期随机信号、快速扫描正弦信号、猝发随机信号和冲击激励信号等。

(1) 步进式正弦激励 (Step Sine Excitation)

单频率激励得到稳态响应。应该采取不等距步长的激励，在共振区，曲线变换剧烈，应该采用小步长，保证半功率点之间至少有3个采样点。在远离共振区，曲线变化平缓，可采用较大步长。



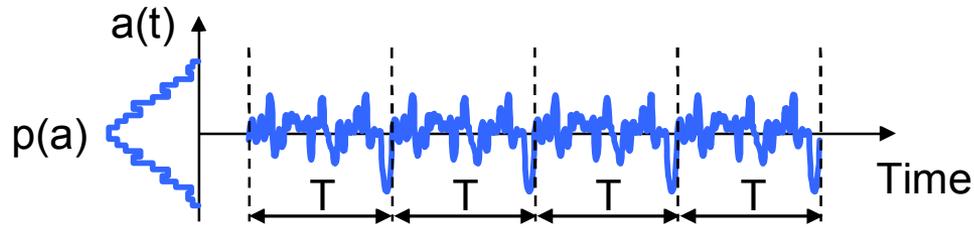
(2) 自动正弦扫描激励 (Auto-Swept Sine Excitation)





(3) 随机激励(Random Excitation)

- 纯随机(Random), 应采用汉宁窗(Hanning Window), 难免泄漏(Leakage)
- 伪随机(Pseudo Random周期随机), 矩形窗(Rectangular), 可无泄漏。



- 猝发随机(**Burst Random**), 占空比(**10%—100%**)可调, 与阻尼比有关。矩形窗, 可无泄漏。

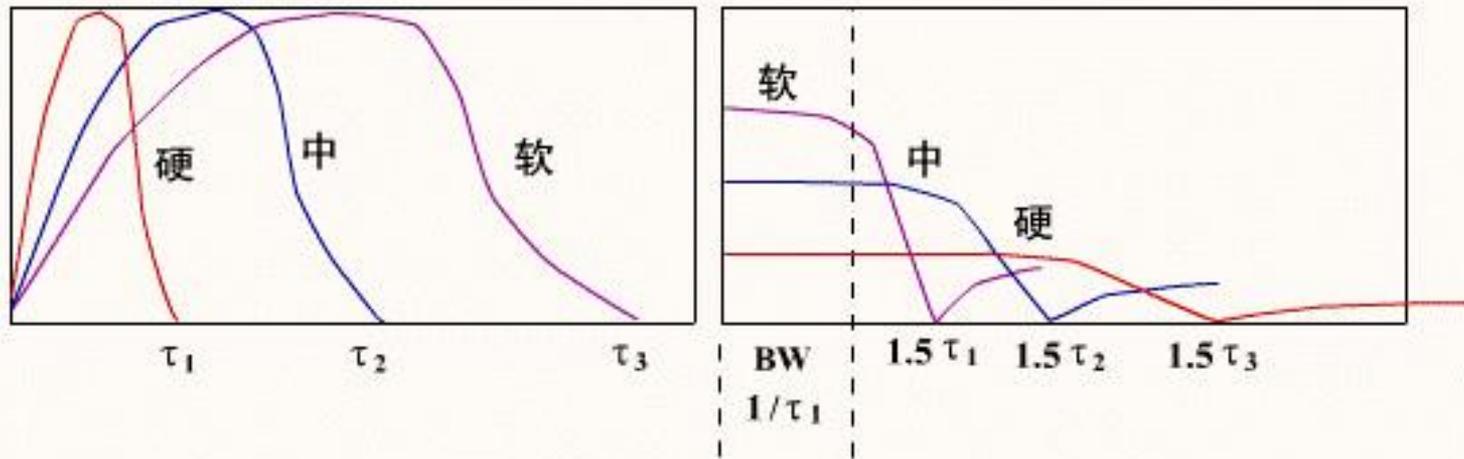




(4) 冲击激励 (Impact Excitation)

激励频率: DC~

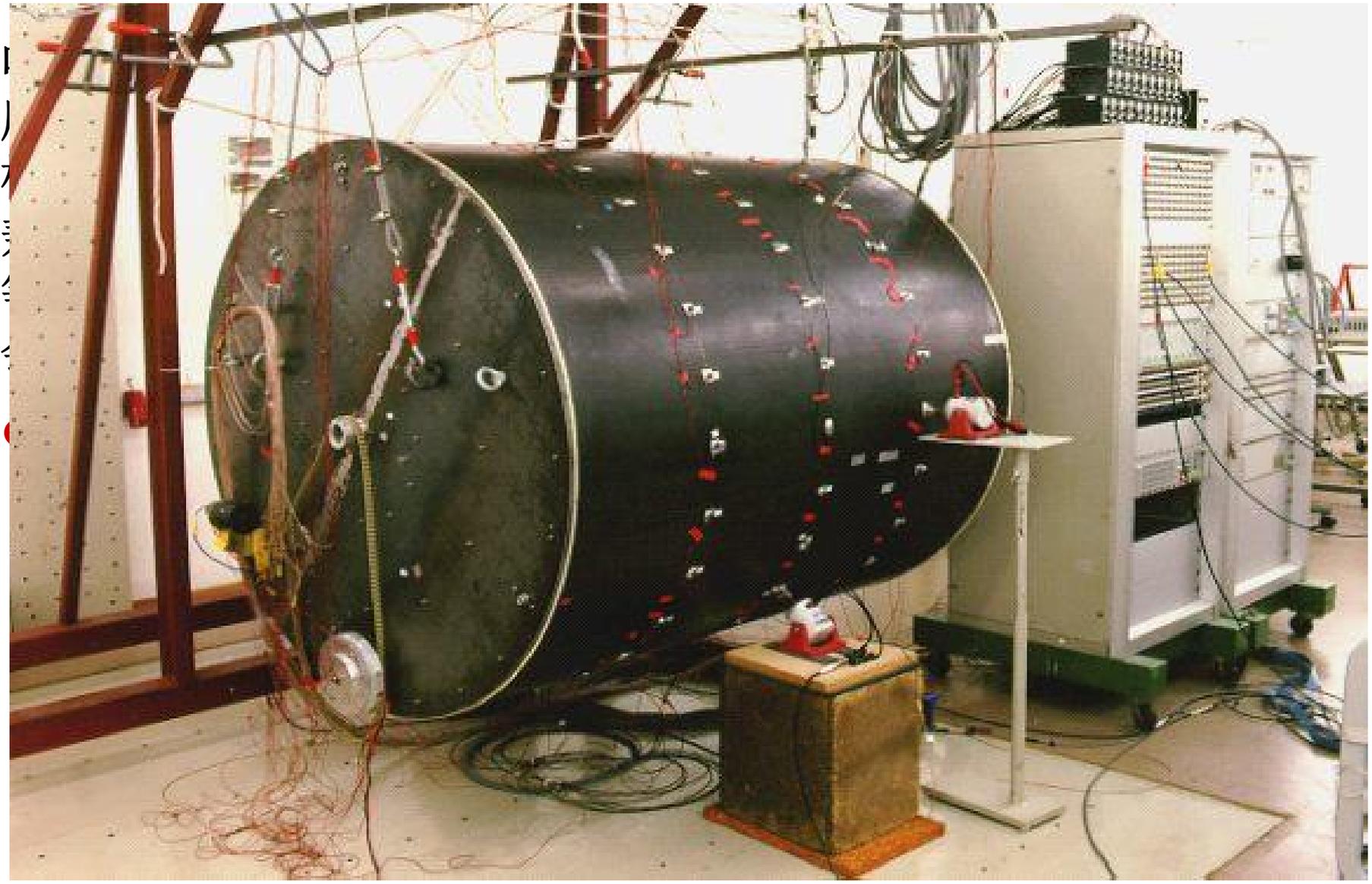
激励的时域波形近似半正弦, 如左图, 频谱如右图。



锤重	锤头硬度	冲击时间	BW带宽
力大	软	τ 长	BW窄
力小	硬	τ 短	BW宽



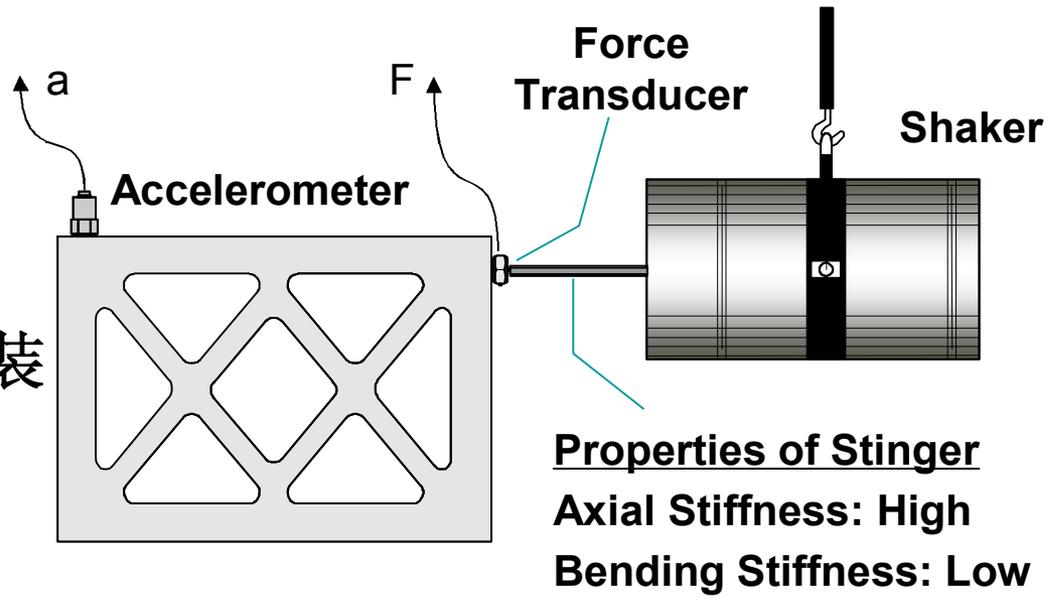
2.4 响应点





- 传感器安装
螺钉 **Stud**
粘接 **Cement**
蜂蜡 **Wax**
磁座 **Magnet**

- 力传感器和激振器安装
螺钉 **Stud**
连接杆 **Stinger**





- 测点布置

- (1) 能够较好地反映结构物的构型
- (2) 能够充分显示结构的模态振型

例：一个梁单元无法求解简支梁的**10**个模态。计算上一般要求至少**20**个单元，计算出的**20**阶模态，只有前**10**阶准确。

- 激励点

应避免节点节线。多点激励进行校核。

- 激励力的选择

在不破坏试件的情况下，尽可能大的激励力，有助于提高信噪比。

不同大小的激励力，可以定性考查结构非线性的程度



3. 动态测试后处理

通过试验得到的时域信号必须经过一定的后处理分析才能获得被测结构的非参数模型，动态测试后处理分为模拟式和数字式两种。

数字式频率分析系统使用的基本处理技术包括采样和量化、加窗、**FFT**、平均、数字滤波、细化等。涉及到的基本问题有采样速率、频率混淆、泄漏、功率谱估计、噪声影响等。



4. 系统（参数）识别

4.1 频域方法的模态参数识别

根据观测到的输入输出数据建立系统的数学模型，并要求这个数学模型按照一定准则，尽可能精确地反映系统动态特性，称系统识别。如果系统的数学模型能用一定数量的参数描述，那么系统识别便成为参数识别，有称参数辨识或参数估计。

模态参数识别的方法分为直接估计法和曲线拟合法。直接估计法认为系统的观测数据是准确的，没有噪声和误差，直接由观测数据求取系统的数学模型。



- 由于任何观测数据都有噪声和各种误差，所以现在的系统识别都是建立在最优控制原则上的，按照一定的最优控制准则和算法使实验数学模型和理论数学模型误差最小，从而得到反映系统特性的最优数学模型，这一含义下的模态参数识别称为曲线拟合法，即用理论曲线去拟合实测曲线，并使之误差最小。在模态参数识别的频域法中，应用最广泛的有最小二乘法（**LSE**）和加权最小二乘估计（**WLSE**），最小二乘直接估计的都是线性参数，对非线性参数的估计，需要辅以迭代法。
- 按输入输出方式，模态参数识别可分为单输入单输出（**SISO**）识别、单输入多输出（**SIMO**）识别和多输入多输出（**MIMO**）识别。
- 模态参数识别的频域法又可分为单模识别法和多模识别法。对各模态耦合较小的系统，前者可以达到满意的识别精度；而对模态耦合较大的系统，必须用多模态识别法。



4. 2时域方法的模态参数识别

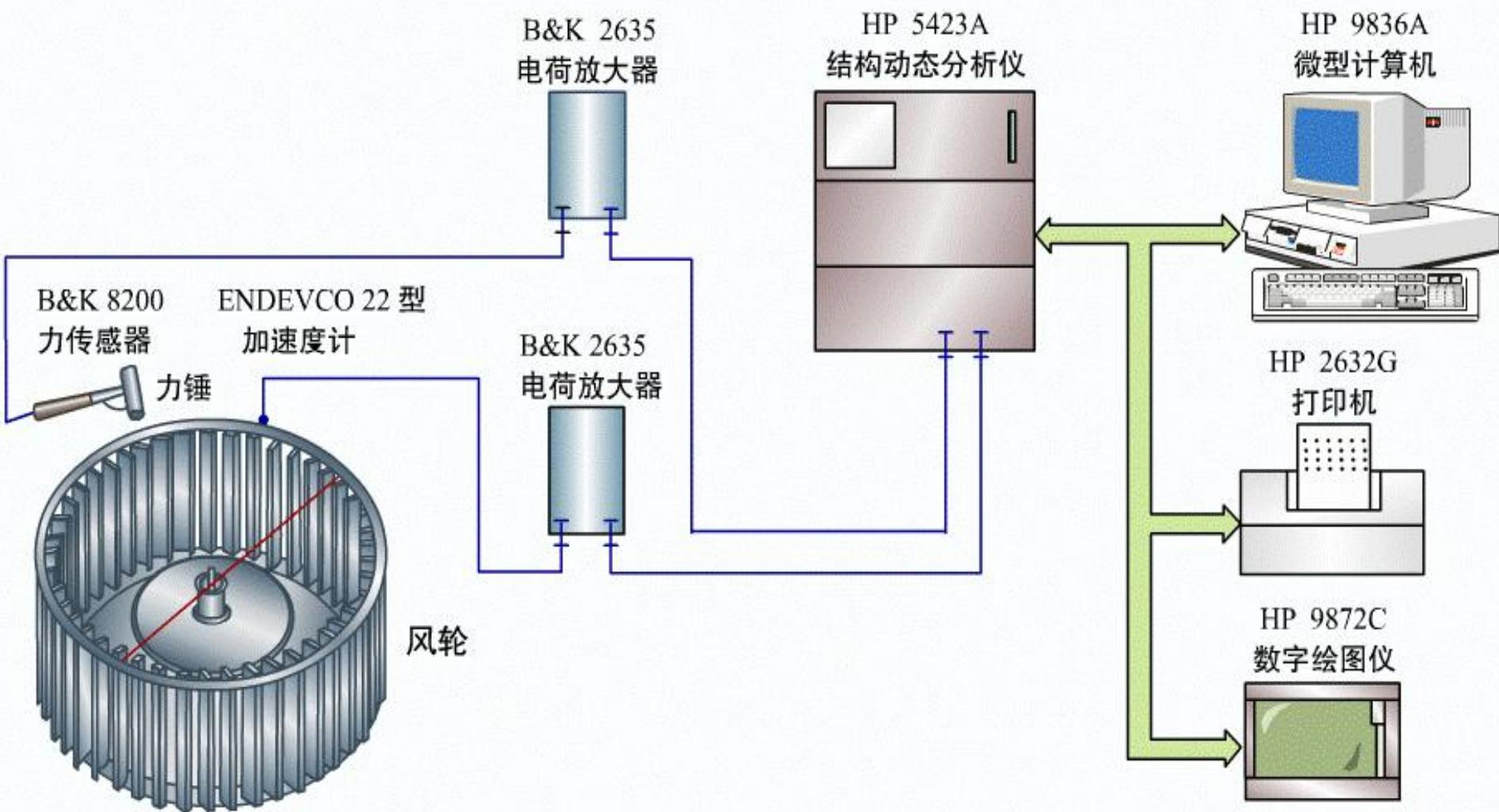
时域参数识别法的主要优点是可以使用实测响应信号，无需进行FFT分析，因而使用设备简单。

方法主要有：

- **Ibrahim** 时域法ITD、STD（70年代Ibrahim发展的方法）
- 特征系统实现算法ERA方法（NASA发展的方法）
- 多参考点最小二乘复指数法LSCE
- 时域直接参数识别TDPI

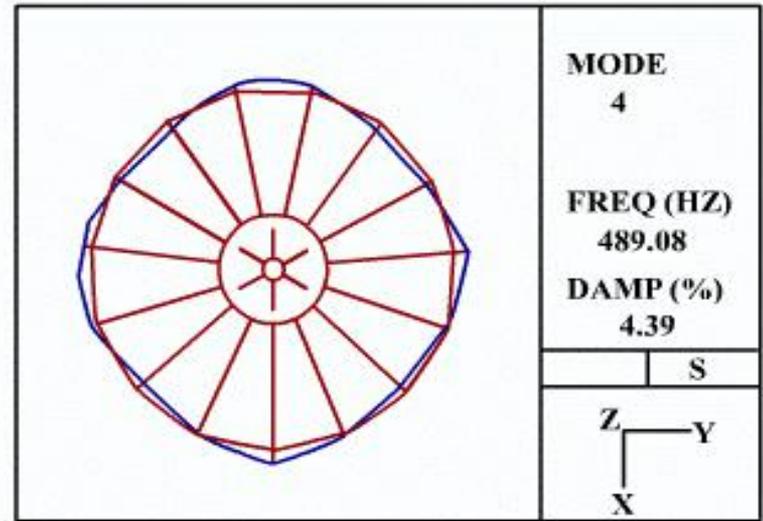
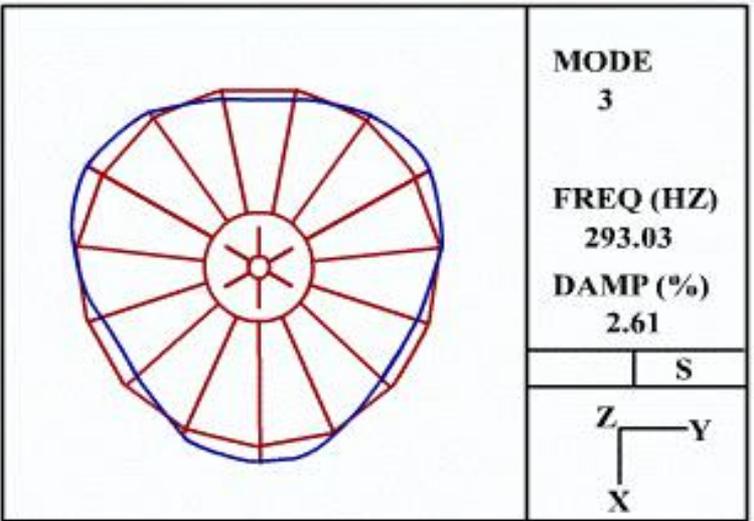
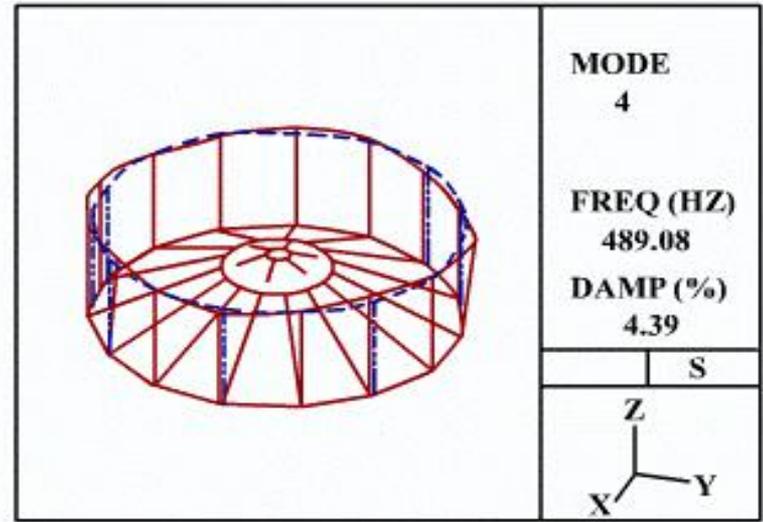
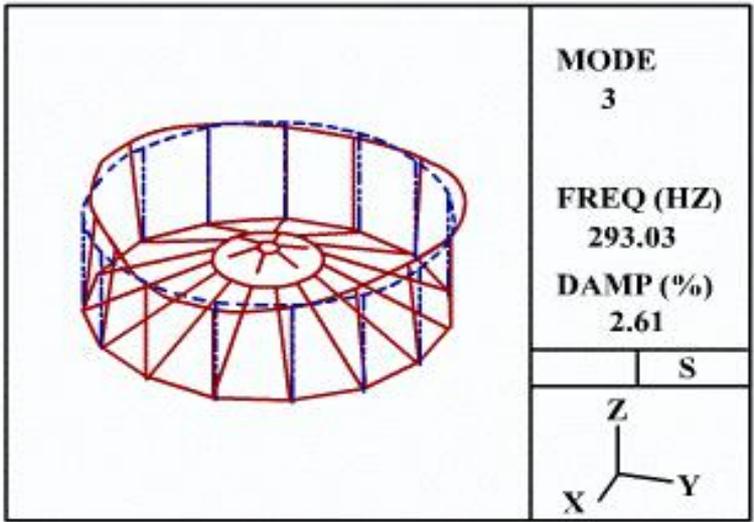


确定风轮系统动特性的实验系统——激励和响应





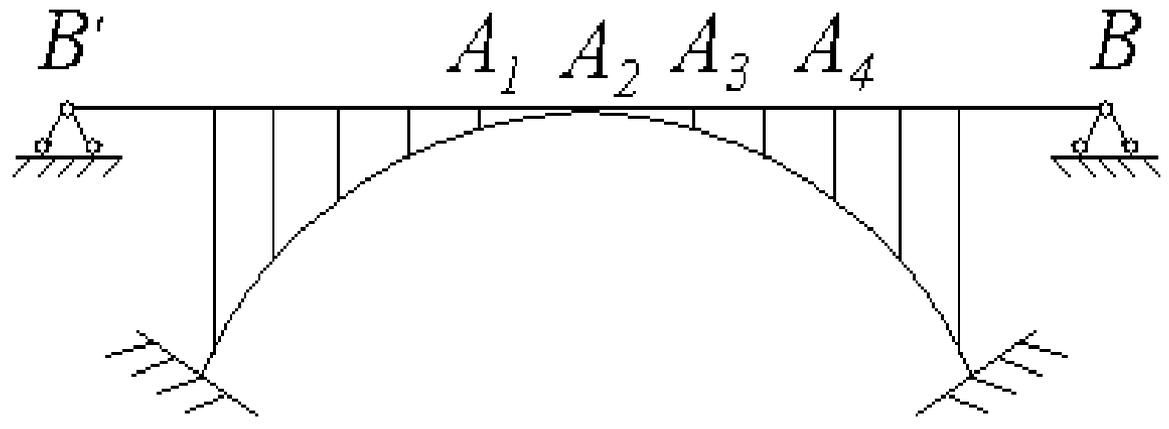
风轮系统的振型



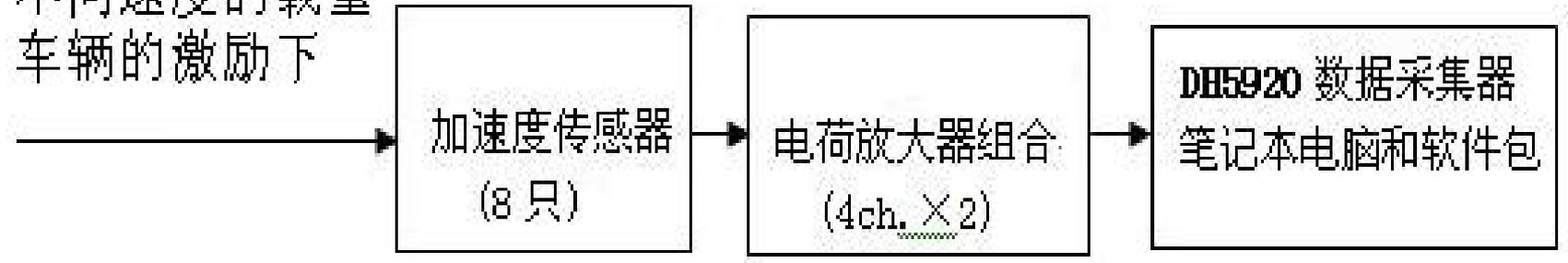


桥梁（自由振动响应试验）

秭归县三峡库区
一钢筋混凝土结
构转体施工拱桥
（主跨105米）
的成桥动力振动
响应试验。



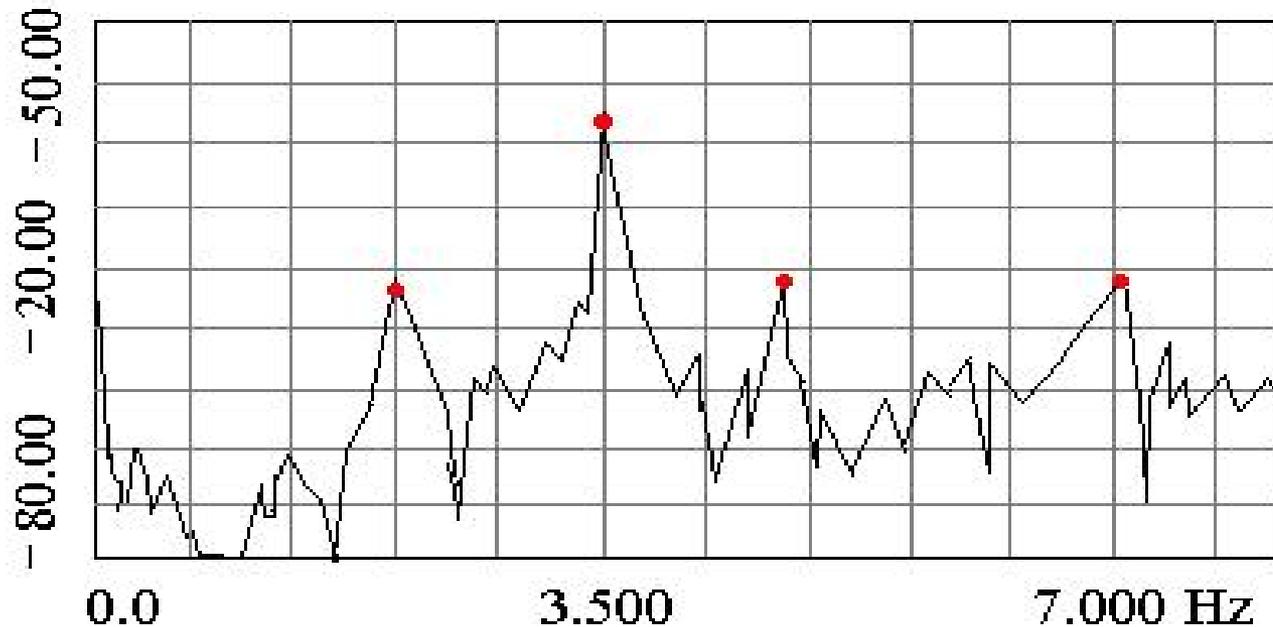
不同速度的载重
车辆的激励下





桥梁（自由振动响应试验）

A1点的加速度响应频谱



桥梁结构的第1至4阶固有频率分别识别为：
2.12Hz， 3.54Hz， 4.78Hz和7.44Hz



船体振动测试

1. 测试目的

在主机运转转速的范围内,测试船体总振动。检查本艇在**主机运行的转速内**是否会出现**共振峰值**。





船体振动测试

2. 测试位置 (8个点)

- 主甲板和艏封板交界处(中线面)的垂直和水平振动;
- 右主机机座的垂直振动;
- 发电机(主机舱) 机座的垂直振动;
- 上层建筑后舱壁和主甲板交界处(中线面)的垂直与水平振动
- 上层建筑前舱壁和主甲板交界处(中线面)的垂直、水平与纵向振动;
- 艇艏部(**Fr.- 4**)的垂直和水平振动;
- 炮座(主甲板**Fr.20**中线面)的垂直和水平振动;
- 蓄电池室 (驾驶甲板**Fr.43**中线面) 的垂直和水平振动。



船体振动测试

3.测试使用的仪器系统配置





船体振动测试

4. 船体振动测试过程

分别将加速度传感器置于主甲板和艏封板交界处，右主机机座处，发电机(主机舱)机座处，上层建筑后舱壁和主甲板交界处等测试位置，要求舰艇在海中航行一段距离，期间不断改变主机转速，在这过程中测试各处的垂直和水平振动。

5. 测试结果

从振动响应和主机(双机)转速的关系曲线中可见，当主机转速从860 r/min调速至 1718 r/min时，总的趋势是振动响应随着主机转速的递增而增加，无明显的共振峰出现。



船体固有频率、振型和阻尼测试

1. 测试内容

- X型舰艇是由X厂建造的，在试航期间，对该艇进行了船体固有频率、船体振型和阻尼的测试。

2. 测试用仪器设备

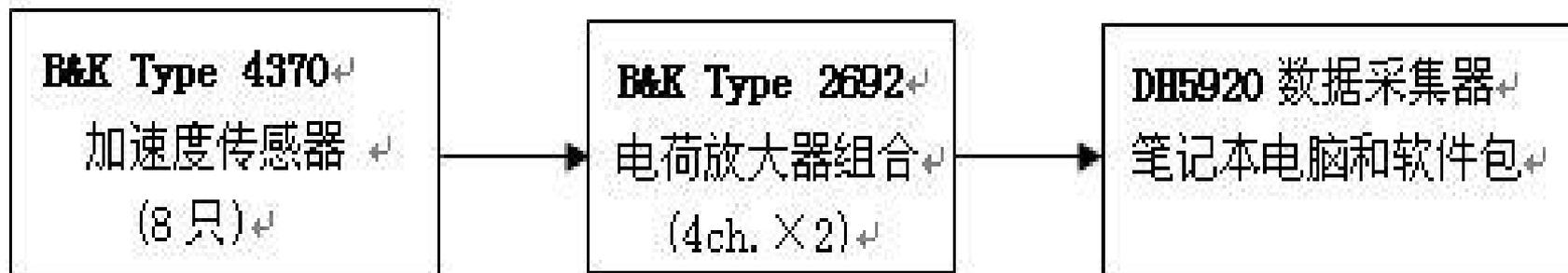
- **B&K Type 4370**（丹麦） 加速度传感器 (8只)
- **B&K Type 2692**（丹麦） 电荷放大器组合 (4ch.×2)
- **DH5920**（中国） 数据采集器 + 笔记本电脑和软件包
- **DH5903**（中国） 手持式测振仪

船体固有频率、振型和阻尼测试

3. 测试方法

利用抛锚激振法，来获取船体垂直方向各阶固有频率、振型和阻尼。抛锚中，锚链下放到**10**米左右时突然间刹车，保持原状**3**分钟。

4. 测试使用的仪器系统配置



船体固有频率、振型和阻尼测试

5. 测点布置

主甲板(中线面)： Fr.-4 , Fr.89

主甲板(左舷边)： Fr.8, Fr.28, Fr.44, Fr.53, Fr.64, Fr.78

6. 测点位置和仪器通道号的对应关系

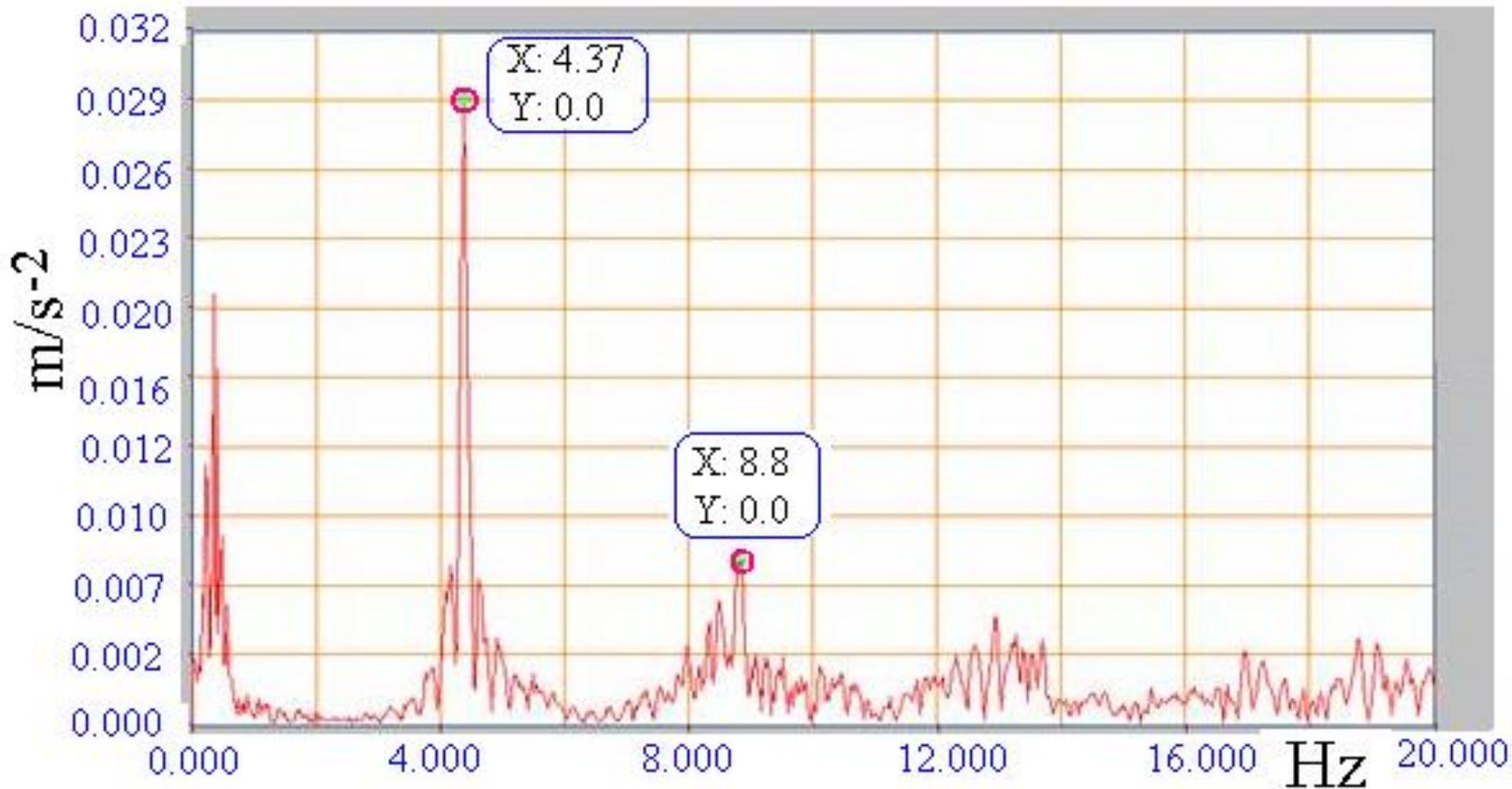
通道号	1	2	3	4	5	6	7	8
肋位号	89	78	64	53	44	28	8	— 4



船体固有频率、振型和阻尼测试

7. 测试结果

利用**抛锚激振法**，获得船体振动频响曲线如下图。通过参数识别船体垂直方向各阶固有频率，振型和阻尼。





船体固有频率、振型和阻尼测试

7.2 船体垂直方向各阶固有频率和阻尼

阶数	1	2
船体垂直方向 固有频率	4.37	8.80
阻尼比	1.91%	2.14%

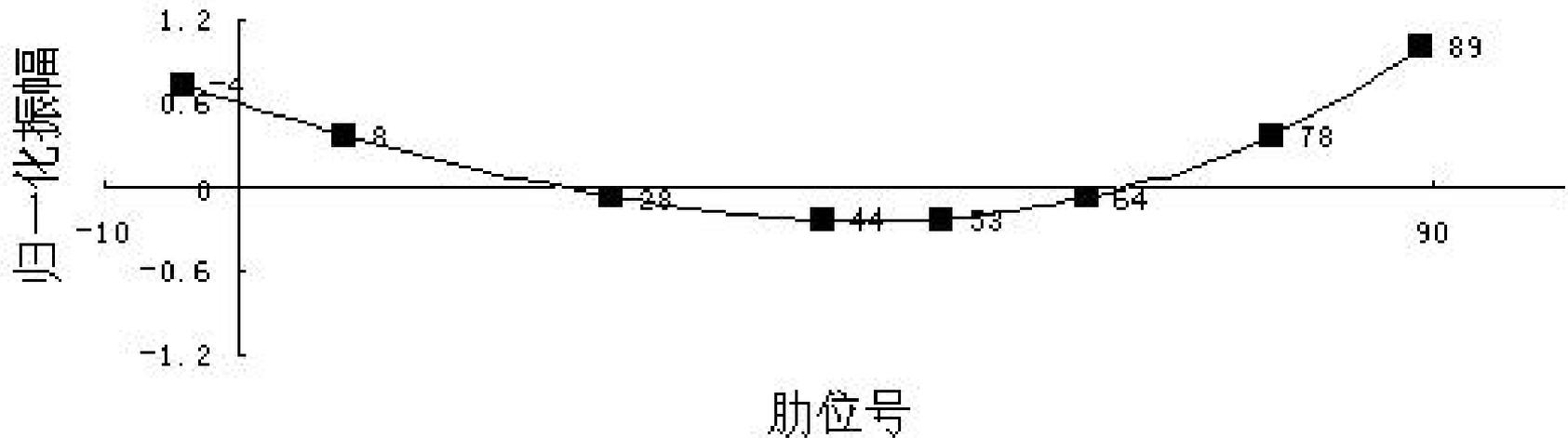
船体固有频率、振型和阻尼测试

7.3 船体垂直方向各阶振型

- 一阶固有频率：4.37 Hz的振型

肋位号	-4	8	28	44	53	64	78	89
归一振型值	0.73	0.38	-0.07	-0.24	-0.24	0.07	0.38	1.00

垂直方向 固有频率 $f=4.3\text{Hz}$

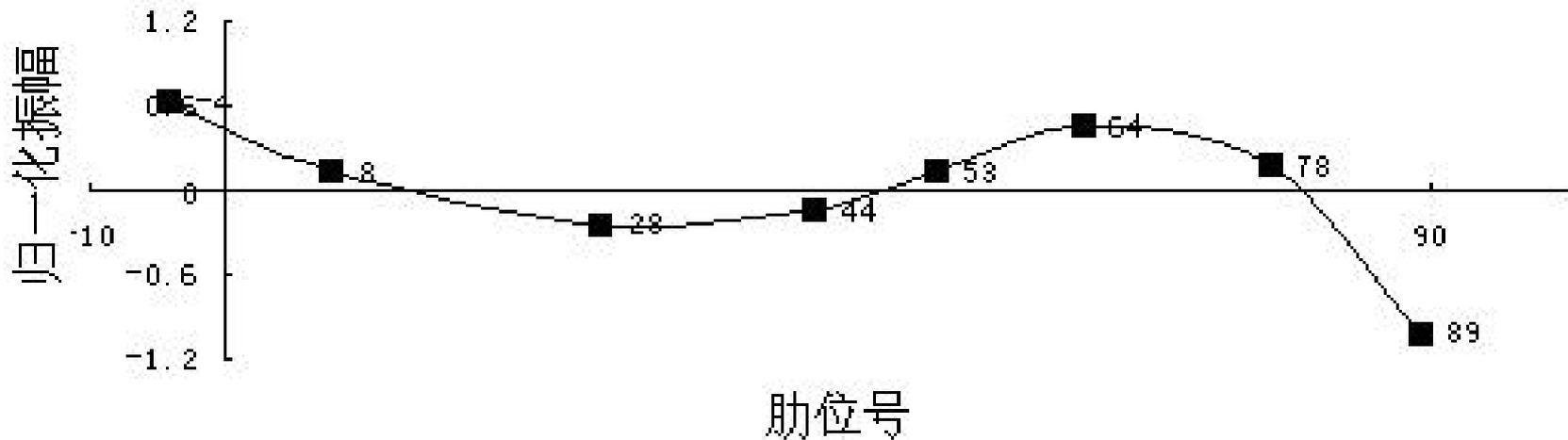


船体固有频率、振型和阻尼测试

7.3 船体垂直方向各阶振型

- 二阶固有频率：**8.80 Hz**的振型

垂直方向 固有频率 $f=8.8\text{Hz}$





- **汽车试验**

按照预定程序对汽车或其零部件、材料等进行的试验，用以判明汽车的技术特性、可靠性、耐久性和环境适应性。汽车在不同的道路、地理和气候条件下使用，它的性能、效率、可靠性和耐久性等不能只依靠计算，而必须经过试验证实。如果汽车在投入大量生产后，再发现因设计、工艺或采用的材料不当而出现普遍性的缺陷或损坏，工厂和使用者都会蒙受极大的损失。

- **汽车试验方法**

- 在实际使用环境中的试验
 - 专用试验场中的试验
 - 室内试验台的试验



汽车试验

- 除对整车进行试验外，各大汽车厂和专业生产厂还利用室内试验台对主要部件如**发动机、化油器、离合器、变速器、驱动轴、转向器、制动器**等进行性能、效率、可靠性、耐久性和其他项目的试验。
- 70年代后，由于模拟理论和计算机技术的发展，出现了由**电子系统控制的、模拟实际行驶情况的零部件试验台和整车试验台**，原来需要在试验场上试验的许多项目便可在试验室内进行，不但缩短了试验时间而且还能获得可靠的和可比性很高的试验结果。
- 由于汽车使用条件复杂，最终仍以实际使用的结果和使用者的反映为依据。因此，试验台、试验场试验必须与实际使用的结果相互验证，找出二者之间的当量值。



- 汽车试验类型
- 定型试验
- 检查性试验
- 发展与研究性试验



汽车试验

- **定型试验**
- 大量生产的汽车的定型试验在汽车或其主要部件正式生产前进行，借以考核汽车或部件的性能、效率、可靠性、耐久性和适应性，以保证产品符合使用要求。
- 这种试验一般先用3~8辆样车，一部分进行5~16万公里的性能、可靠性和耐久性试验，一部分进行适应性试验。
- 新车型在进行这种试验前往往还需要进行发展性试验。各样车及其部件的累积试验里程可达百万公里以上。在样车试验后，修改图纸，消除缺陷，再制造20~50辆进行更大规模的实际使用试验，以考核工艺的稳定性，然后才能投入生产。对于产量不大的汽车，如工矿用自卸车，因其主要部件大都是选用专业厂的现成产品，所以只对自制部件如车架进行台架应力测定和可靠性及耐久性试验，而整车的性能、适应性、可靠性和耐久性试验则在现场使用中进行。



- **检查性试验**
- 在汽车生产过程中借以抽查产品，以考核生产质量。从每批一定数量的产品中，或每年、或每半年抽几辆整车按照规定的程序进行检查性试验，以便发现工艺上或材料上的问题并及时改正。
- **发展和研究性试验**
- 借以对新型汽车包括新结构、新材料和新理论的开发研究、设计和试验。由于汽车设计和科学研究所用的方法与设施大体相同，汽车厂一方面从事产品的设计、改进；一方面进行一些基础性的研究，提供技术储备，这些工作常需要进行大量的试验。试验方法本身也常有创新。



- 汽车试验方法
- 汽车试验采用道路试验
- 适应性试验
- 试验场试验
- 试验台试验



- **道路试验和适应性试验**
- 在汽车上装设测试仪表和施加**模拟载荷**，按实际使用条件行驶至规定的里程。对各种路面的里程规定有一定的比例，对炎热、寒冷和高原等地区的试验时间也有一定的规定。这种方法是早期的汽车试验方法，因能反映用其他试验方法所不能发现的真实情况，仍在继续应用。



汽车试验

- **汽车试验场是试验**
- 汽车试验场是试验汽车的专用场地，在场中有测定车速、加速性、制动距离和燃料消耗量等的平直试验路；
- 进行平顺性、可靠性和耐久性试验的高速环形路、石块路、搓板路和其他典型路段；
- 坡道、弯道、尘灰室、盐水池、淋水室和试验涉水性能的水池以及试验转向特性用的圆形场地或专用广场等。
- 在有的试验场中还有撞车试验场或试验室、横向风装置和方向稳定性的试验场，以及模拟 $-40\sim 50^{\circ}\text{C}$ 气温和不同风速并装有转鼓试验台的全天候风洞试验室，无回声室和防电干扰室等。



汽车试验

- **试验台试验**
- 很多汽车零部件的工况，可以用专门设计的试验台模拟。在模拟的试验台上用**飞轮**代表汽车行驶时的惯性力，用以试验制动器的性能。用**水力或电力测功机**代表汽车行驶时的各种阻力，以试验发动机的功率和扭矩等。
- **40年代**建立累积疲劳损伤理论和**50年代**建立随机振动理论之后，试验方法又有创新。用仪器测定并记录代表各种道路不平度的**路面功率谱**，并将它们**放大、倍加或综合**后，输入试验台控制系统，便可以得到任意的强化倍数或任意的不同路面综合，以进行加速的模拟试验。这种方法和控制系统不但可用于零部件的试验，而且还可用于模拟道路振动情况的电控液压振动试验台。



汽车在振动试验台上试验时，各车轮下均装设可发出不同频率和振幅的液压振动头，模拟各种不同道路的随机输入。转鼓试验台分为单转鼓式和双转鼓式，它们都能模拟不同的车速和路面情况，以试验整车的动力性，还适用于汽车排气污染的测定。有的转鼓试验台还有施加侧向力的装置。





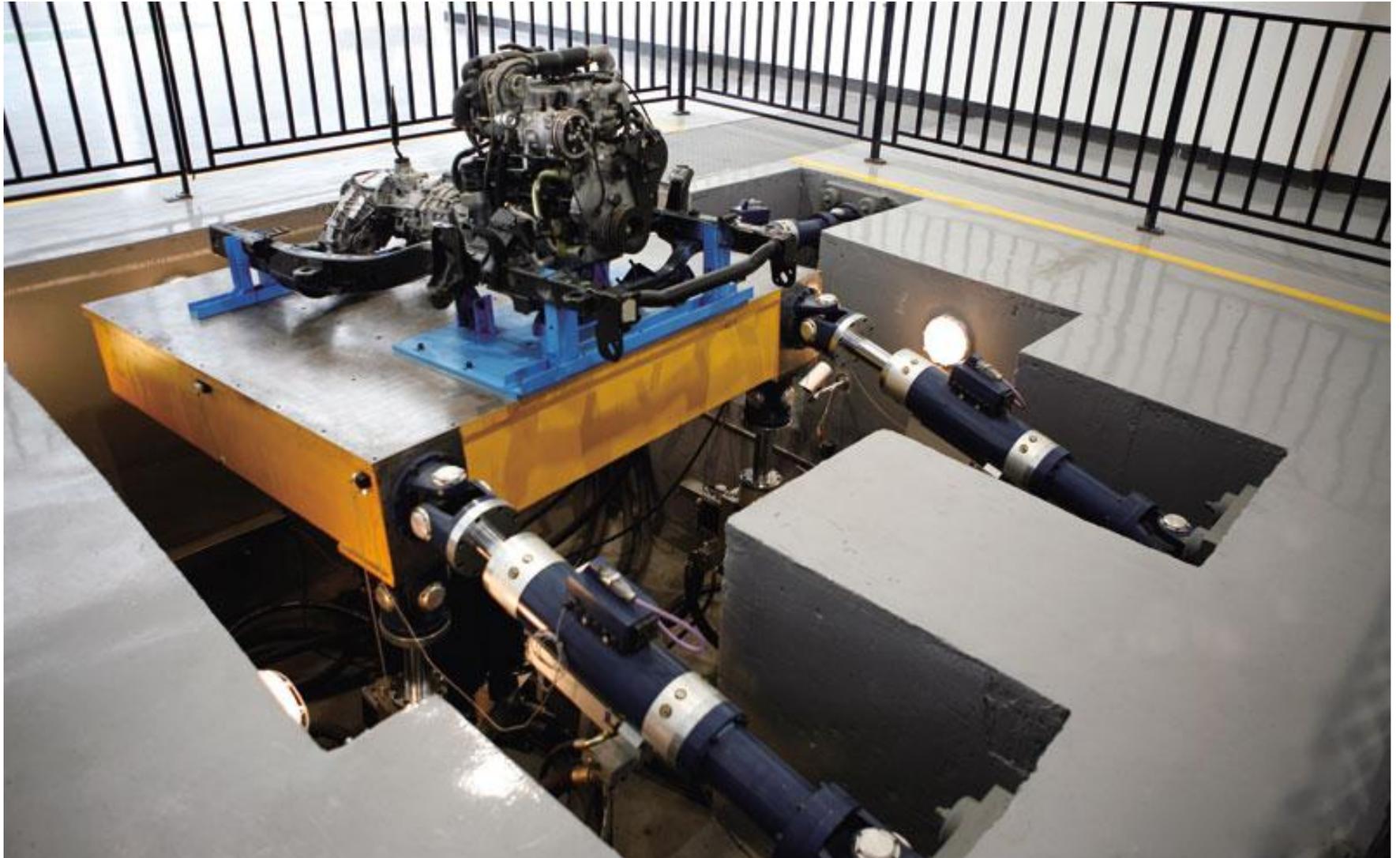
汽车试验

- 汽车在振动试验台上试验时，各车轮下均装设可发出不同频率和振幅的液压振动头，模拟各种不同道路的随机输入。转鼓试验台分为单转鼓式和双转鼓式，它们都能模拟不同的车速和路面情况，以试验整车的动力性，还适用于汽车排气污染的测定。有的转鼓试验台还有施加侧向力的装置。

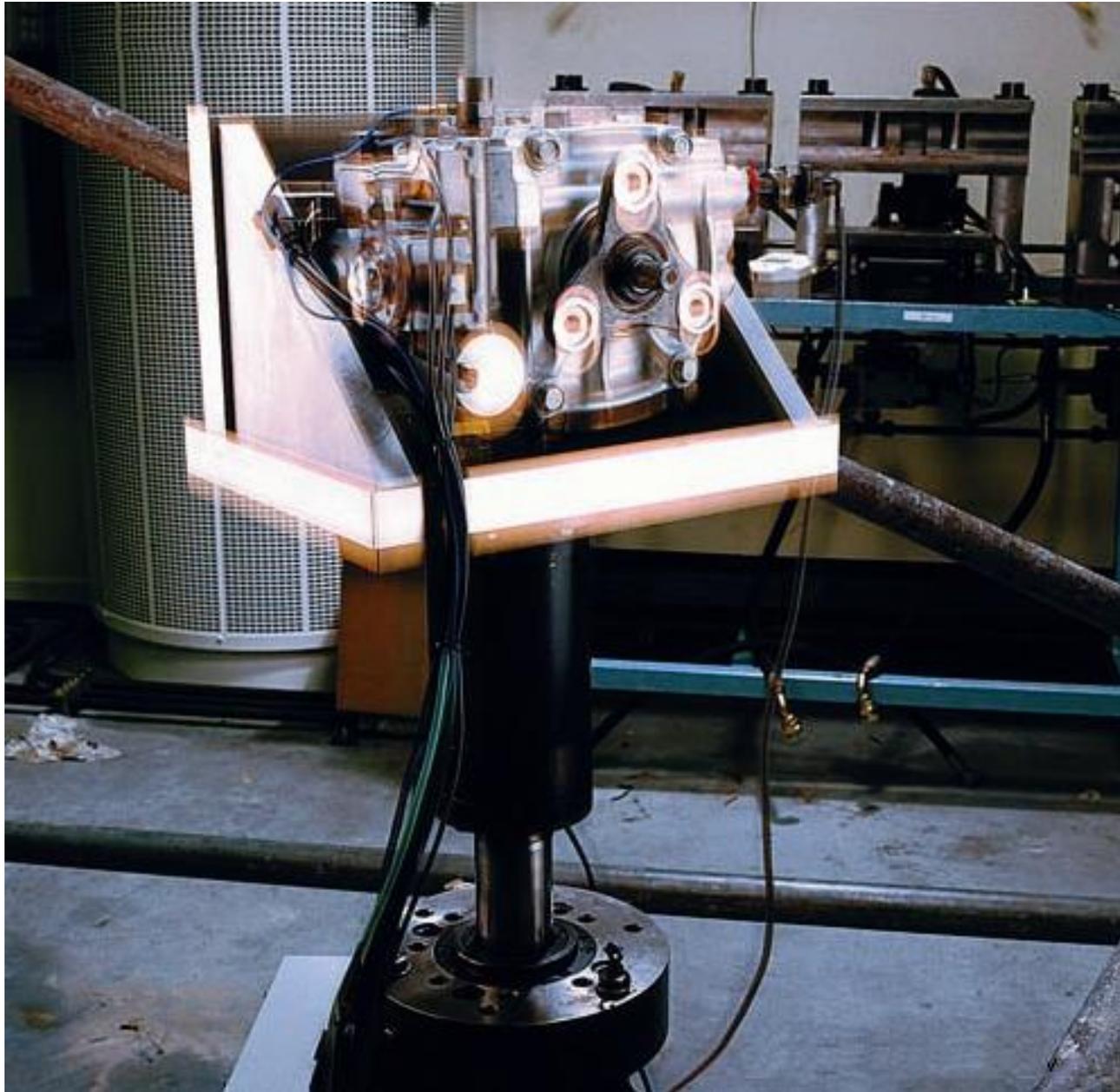


车辆零部件的台架试验

- 六自由度振动试验台



在振动实验台架上的Ha1dex LSC差速器





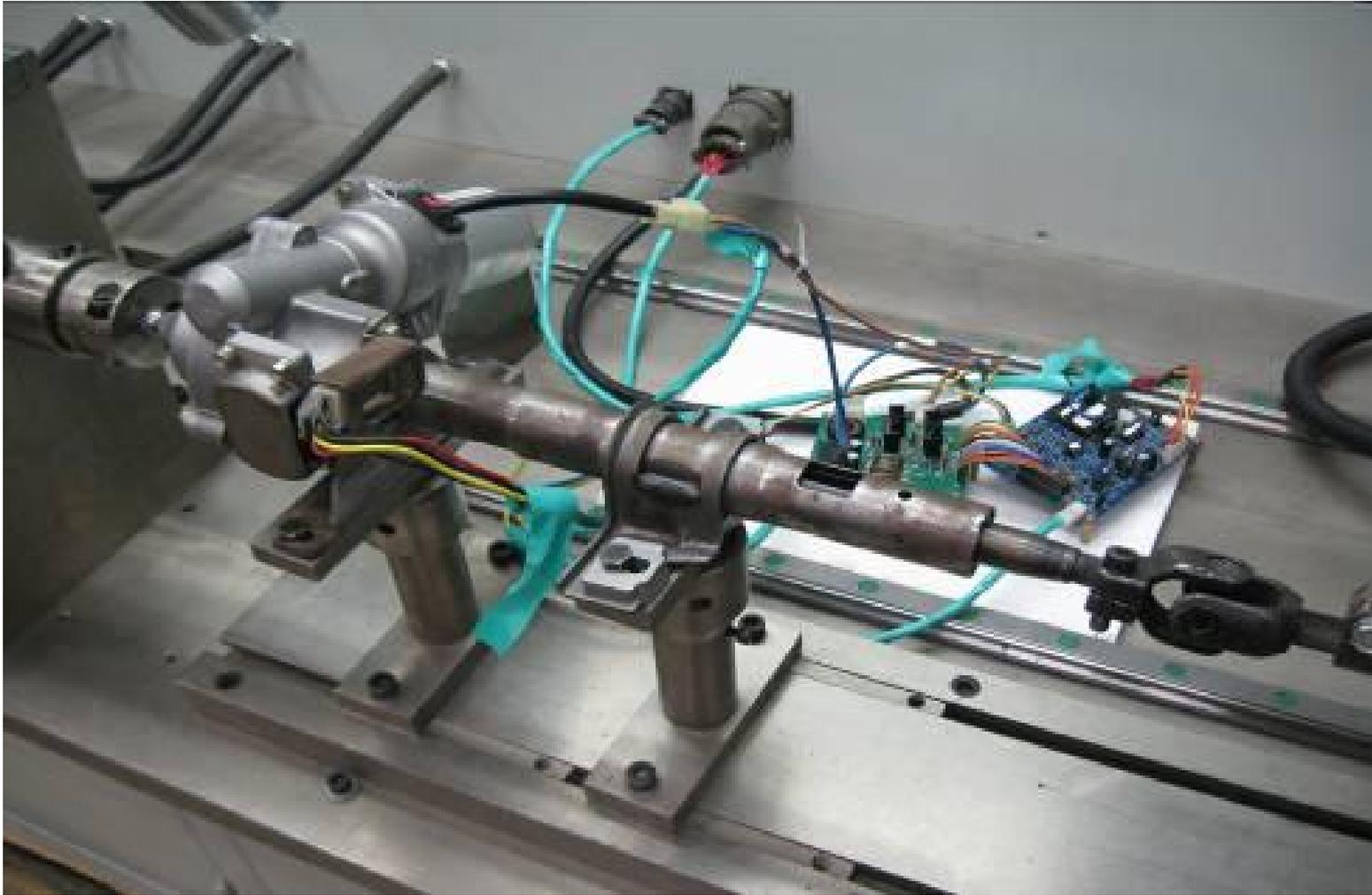
汽车电动转向器试验台

加载：
伺服电机



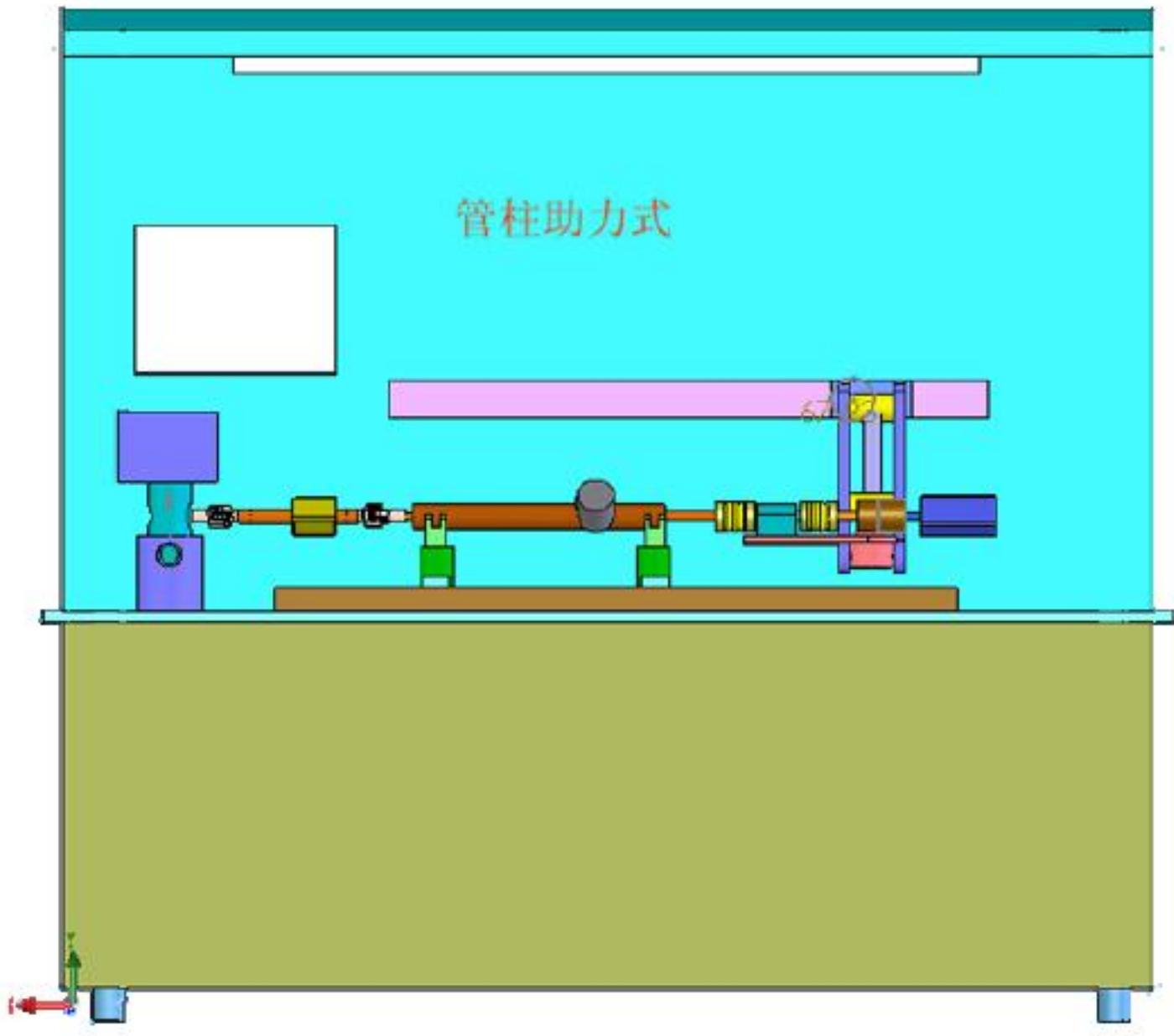


汽车电动转向器试验台





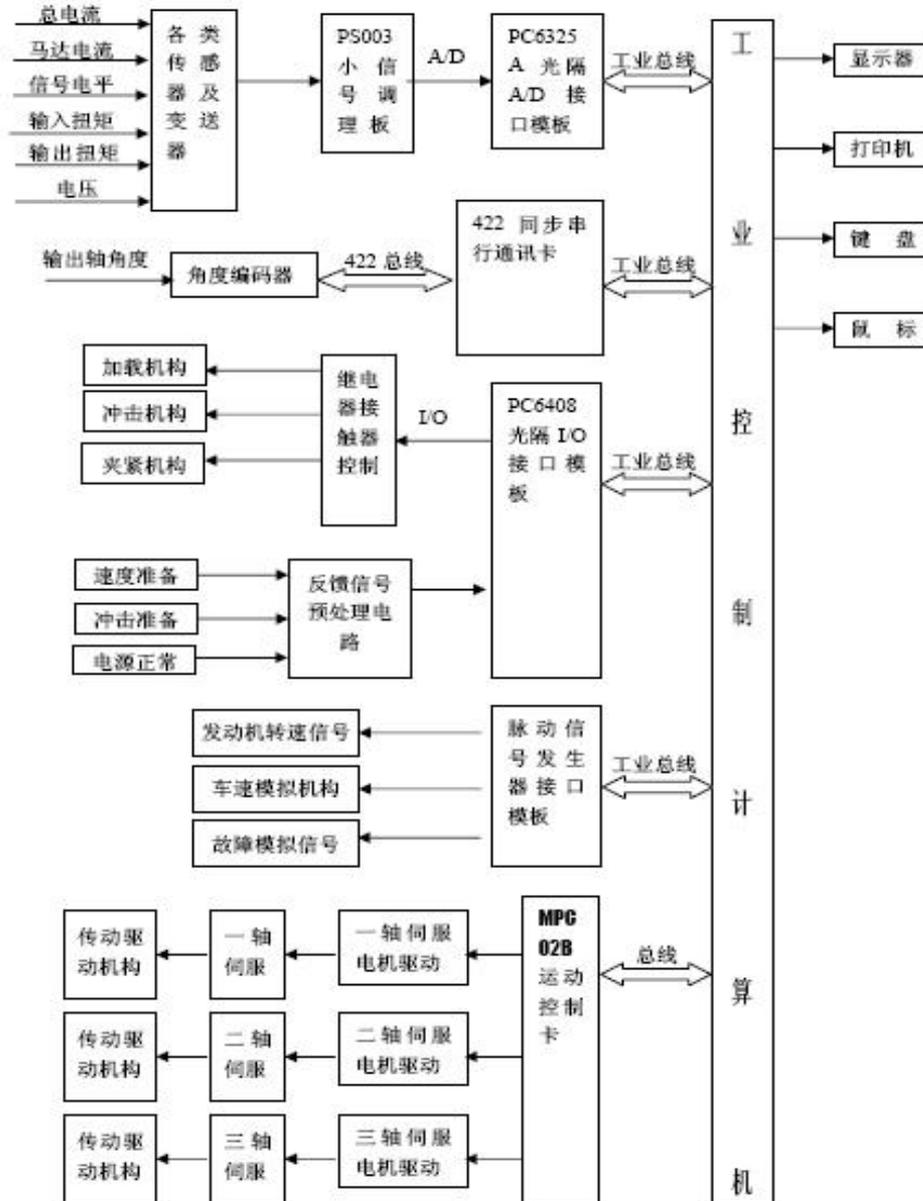
汽车电动转向器试验台





汽车电动转向器试验台

6.2 控制部分

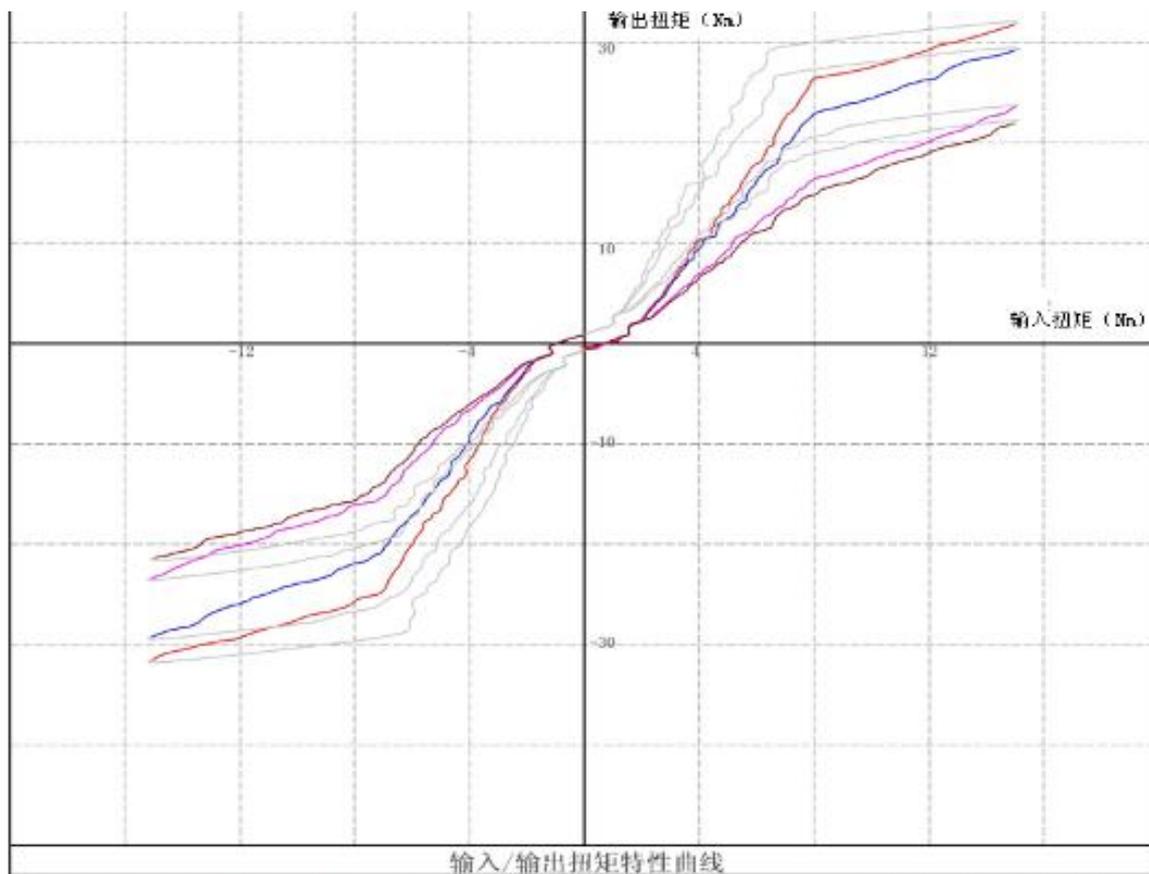




汽车电动转向器试验台

1. 转向器输入/输出转矩-速度特性试验

试验目的：测试不同车速条件下电动助力转向装置的助力特性并计算特性曲线的对称性。



● 0Km/h ● 20Km/h ● 60Km/h ● 80Km/h



2. 方向盘输入 转矩/吸收电 流-速度特性 试验

试验目的:

测试不同车速条件下电动助力转向装置的系统电流特性并计算特性曲线的对称性。

