

# 振动与结构动力学测试

# 议程

1. 结构动力学简介
2. 工作变形分析(Operating Deflection Shapes, ODS)
3. 试验模态分析(Experimental Modal Analysis, EMA)
4. 工作模态分析(Operating Modal Analysis, OMA)
5. 模型相关性分析(Model Correlation)

# 1. 结构动力学简介

## ◆ 是什么？

- 了解结构的实际动态行为和/或固有动态特性，以提高安全性、可靠性、性能、能耗和舒适性

## ◆ 在哪里使用？

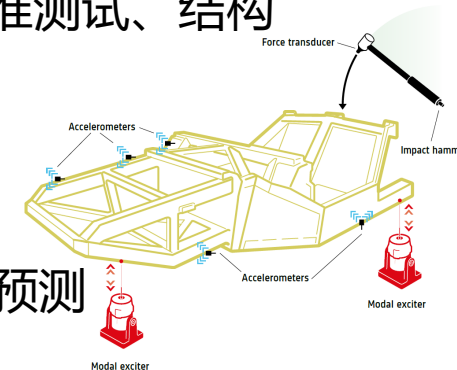
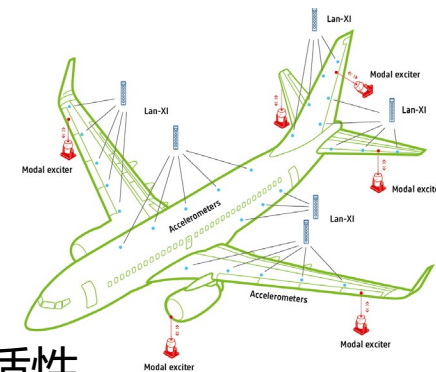
- 结构动力学分析用于设计验证、认证测试、故障排除、“假设”场景预测、装配分析、基准测试、结构健康监测等

## ◆ 分析如何进行？

- 基于测量(也称为实验测试)或基于计算机模拟(也称为仿真分析)
- 仿真结果通常与测试结果相关联，使用模型相关性来更新和改进仿真模型以提供更好的预测

## ◆ 测量如何进行？

- 结构受未测量的自然载荷(ODS、OMA)或在一个或多个自由度(DOF)上测量的作用力(模态分析)激励
- 力可以使用力锤来施加，该锤也测量施加的力，亦可以使用一个或多个模态激励器施加并使用力传感器测量施加的力
- 测量多个响应自由度的响应，通常使用单轴或三轴加速度计
- 测试从使用一个力锤和一个加速度计的双通道锤击测试到具有超过10个模态激励器和1000 个响应自由度大型模态测量



# 1. 结构动力学简介—测试

## ◆ 定义

- 通过实验手段(测试)获得结构特性和/或行为的表征

## ◆ 方法

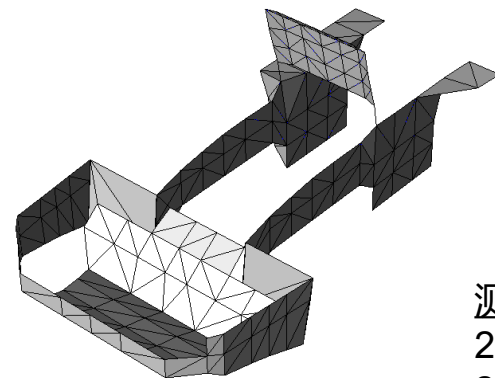
- 在(近似)真实激励和实际边界条件的运行状态下(原位)测量(例如ODS和OMA)
- 具有受控激励和受控边界条件的受控测量(实验室)(例如, 经典模态分析)

## ◆ 优点

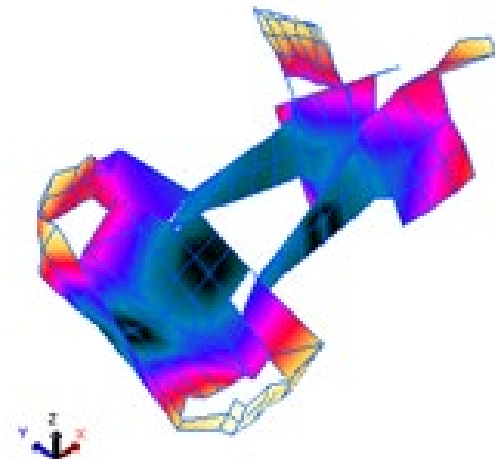
- 实际物理结构的表征 - 对结果有信心
- 轻松快速地执行测量和进行后分析
- 相对便宜的仪器 - 特别是对于较小的设置

## ◆ 缺点

- 需要可用的物理测试对象
- 如果需要进行多次修改, 则变得耗时且昂贵



测试模型  
209 节点  
288 单元



# 1. 结构动力学简介—仿真

## ◆ 定义

- 通过有限元仿真手段获得结构特性和/或行为的表征

## ◆ 方法

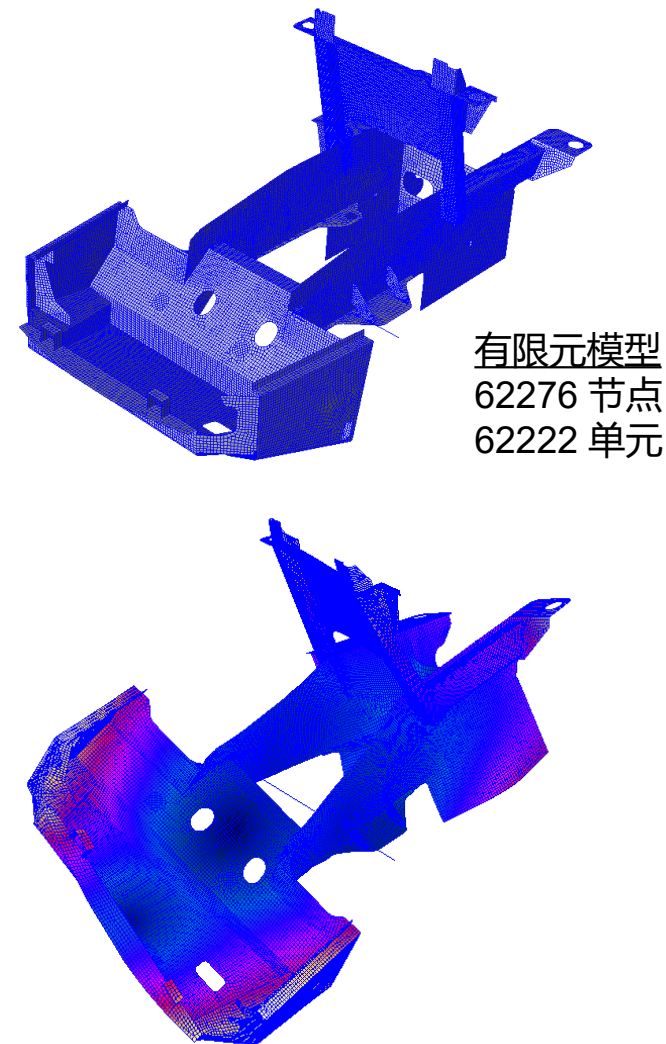
- 使用有限元分析(FEA)程序(例如, Nastran®、Ansys®、Abaqus®和 I-deas)分析用有限个单元离散化的数值模型

## ◆ 优点

- 缩短从概念到生产的时间
- 减少产品开发所需的原型数量

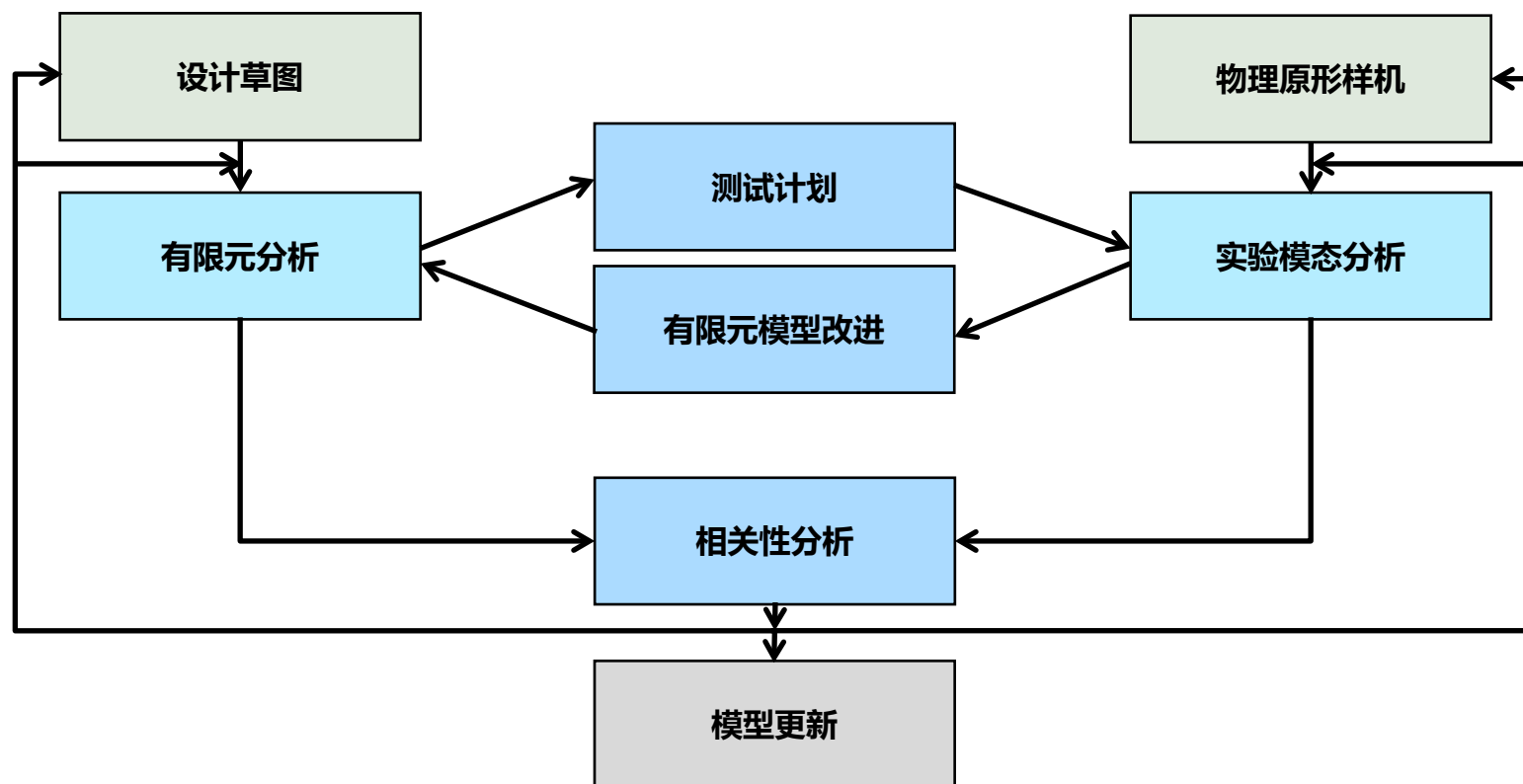
## ◆ 缺点

- 需要高度专业知识的昂贵系统
- 通常不包括(准确的)阻尼信息
- 初始模型的准确性往往不够
- 模拟往往非常耗时



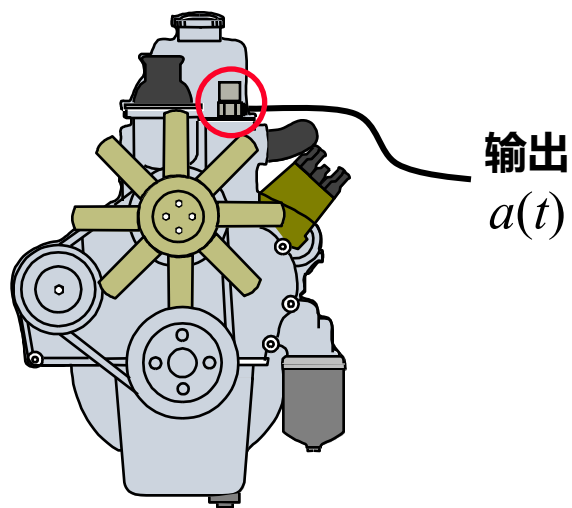
# 1. 结构动力学简介—测试-有限元集成

- ◆ 通过优化测试策略和改进有限元模型，缩短从概念设计到生产的周期

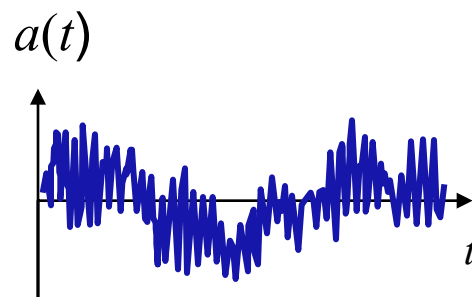


## 2. 工作变形分析 (Operating Deflection Shapes, ODS)

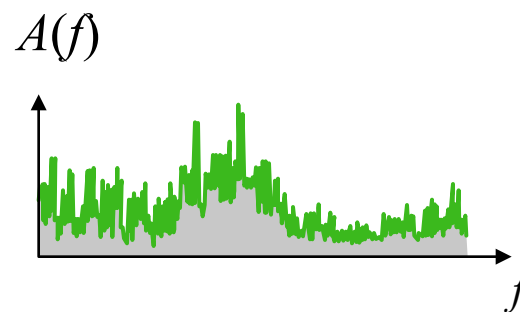
### 基于信号分析的ODS



时域信号



频谱



没有创建模型 – 仅仅观测输出！

## 2. 工作变形分析 (Operating Deflection Shapes, ODS)

### ◆ ODS定义

- 运行条件下结构振动模式的确定和可视化

### ◆ 运行条件

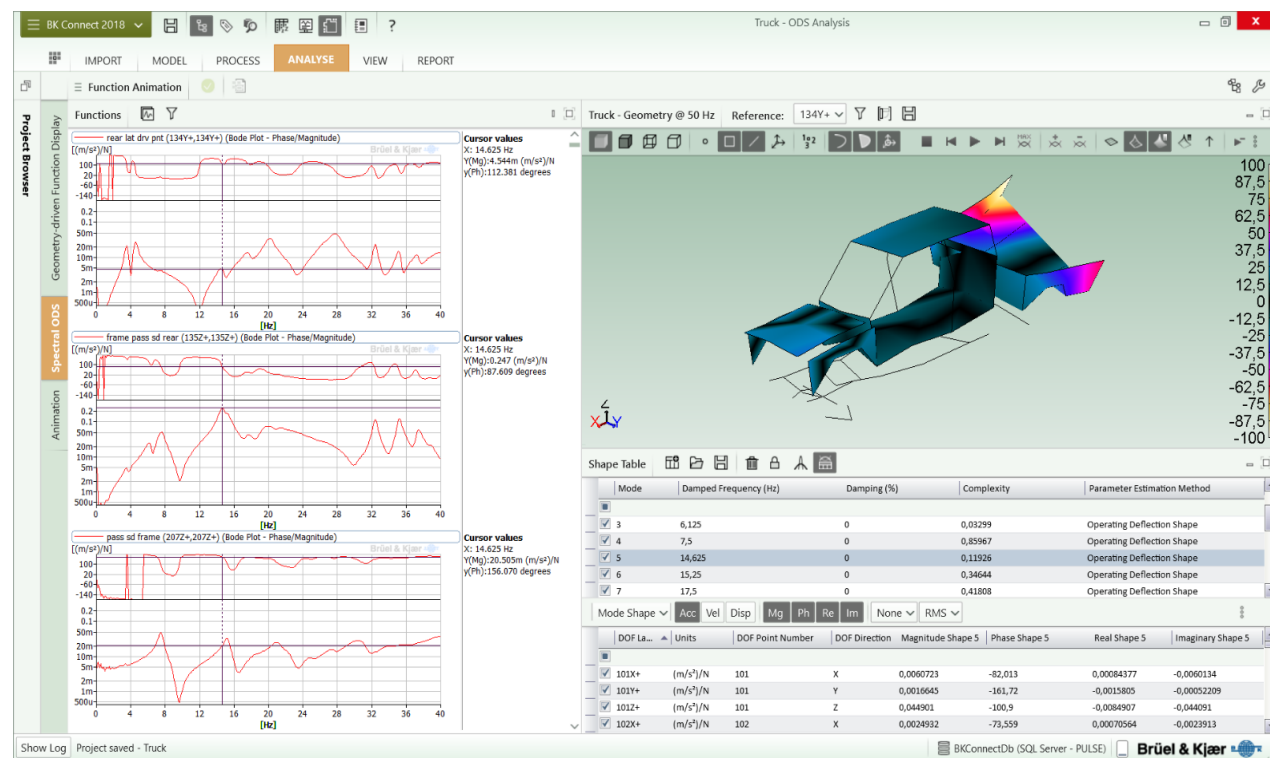
- 转速, 载荷, 温度, 压力, 流量, ...

### ◆ 振动信号

- 稳态
- 准稳态(速度或者激励水平轻微变化、升/降速)
- 瞬态

### ◆ 结果

- 几何动画
- 不同频率/阶次的强迫振型列表
- 不同时刻的变形模式列表



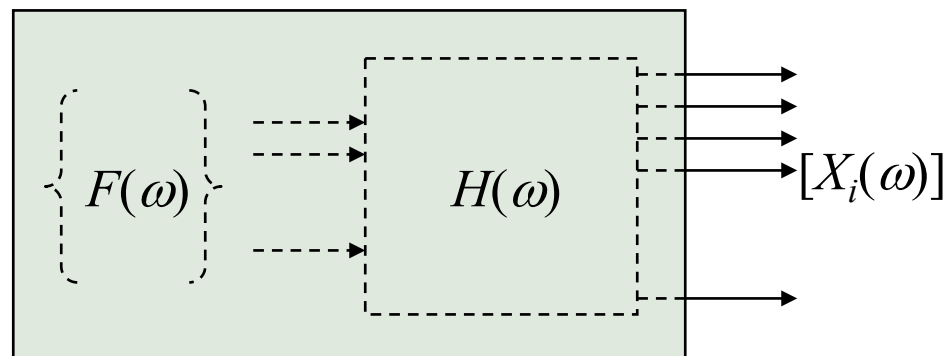
ODS分析回答如下问题:

- ① 结构实际上是如何振动的?
- ② 某一自由度相对于其它自由度的真实的绝对运动是怎样的?



## 2. 工作变形分析 (Operating Deflection Shapes, ODS)

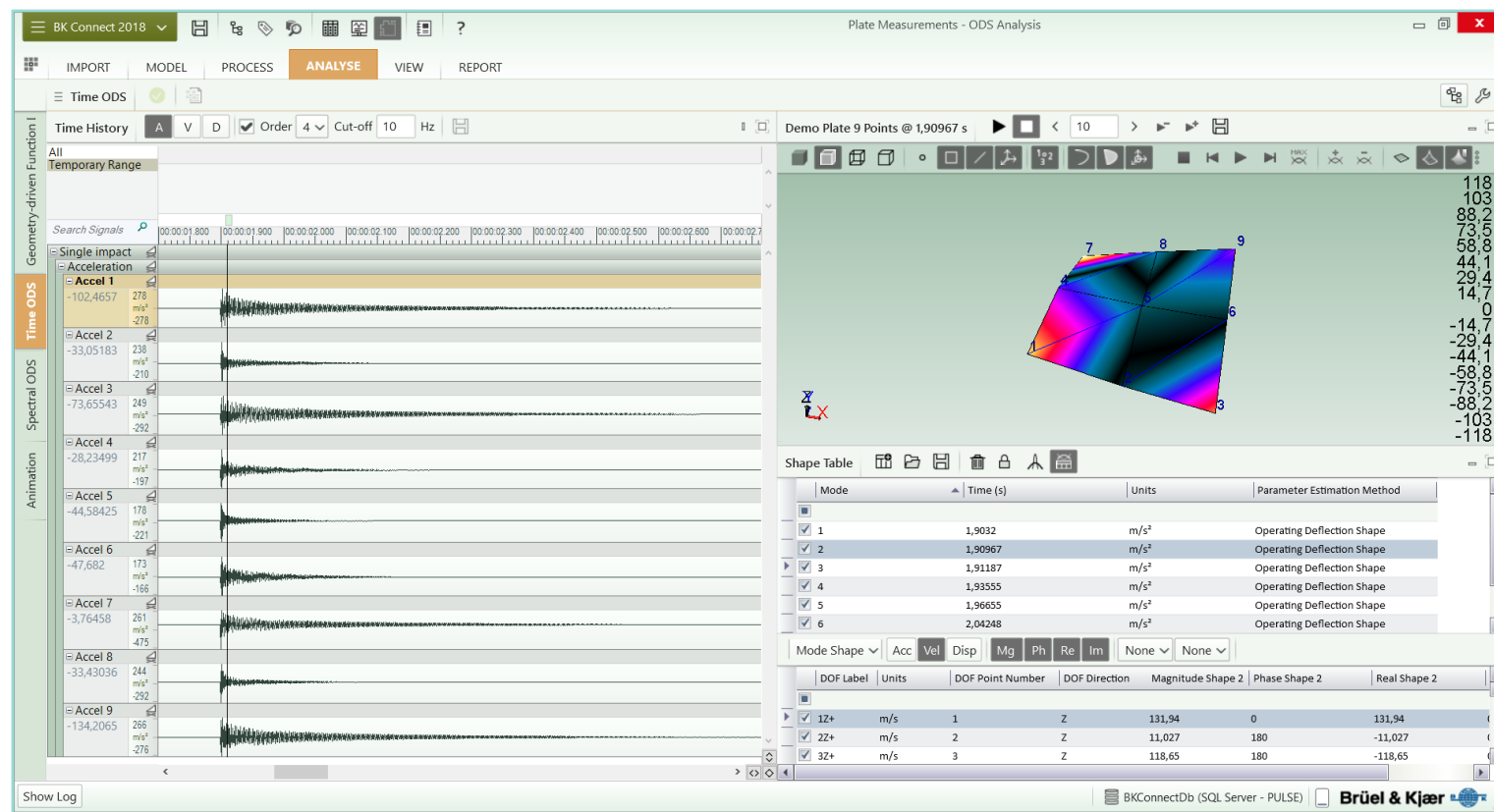
- ◆ 可视化不同自由度的强迫振动响应信号(强迫振型)
- ◆ 没有线性模型假设
- ◆ 没有输入载荷假设
- ◆ 实际工作载荷
- ◆ 真实边界条件
- ◆ 基于单一参考
- ◆ 属于信号分析，而非系统分析，故而没有模态模型，进而无法预测其它工作条件下的响应



## 2. 工作变形分析 (Operating Deflection Shapes, ODS)

### ◆ 类型一：时域ODS

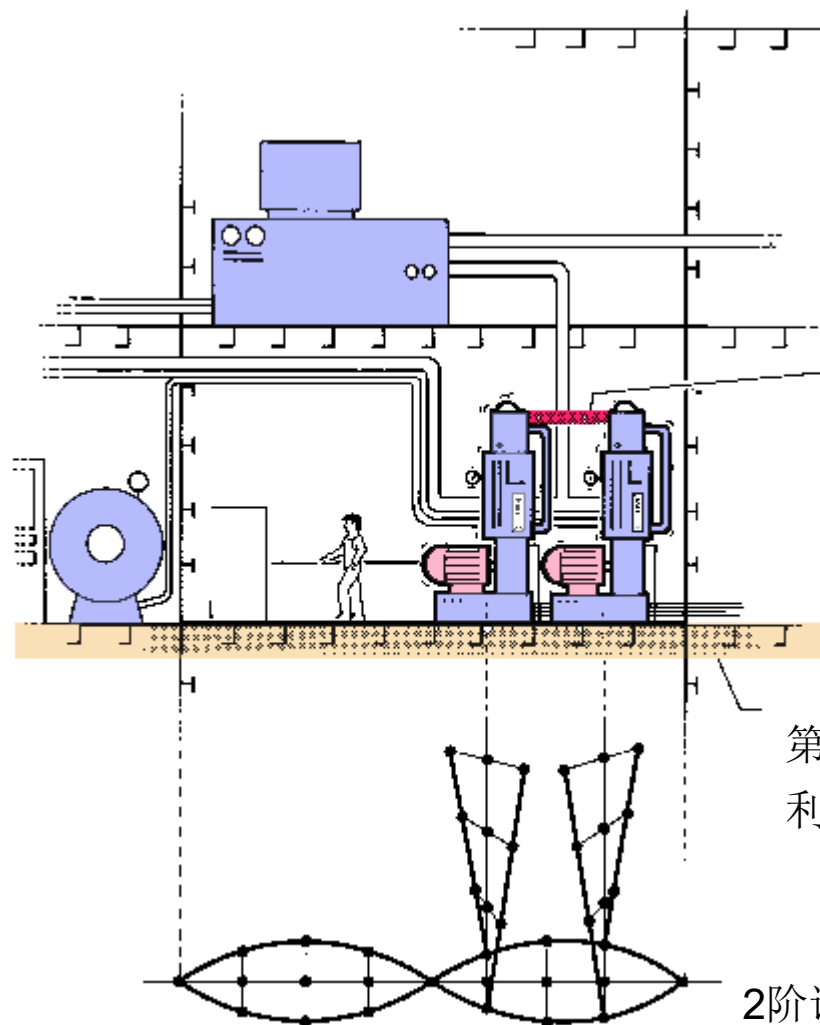
- 分析频率范围的振动模式被确定为时间的函数
- 包括分析频率范围内的所有频率，给出“整体”振动模式
- 通常，所有 DOF 都是同时测量的，因为重复触发条件非常困难
- 分析瞬态现象，例如关门、爆炸、发射和射击以及碰撞和跌落冲击
- 非线性系统分析和频率变化分析，例如发动机升/降速



## 2. 工作变形分析 (Operating Deflection Shapes, ODS)

### ◆ 类型二：频域ODS

- 用于确定特定频率或阶次分量的振动模式
- 离散频率(平稳信号)或阶次分量(速度略有变化)的 ODS
- DOF 可以同时或分批测量
- 分析运行在某一固定转速或者(由于工作条件改变引起的)微变化转速条件下的机器



优化改进:  
在发动机顶部增加连接杆

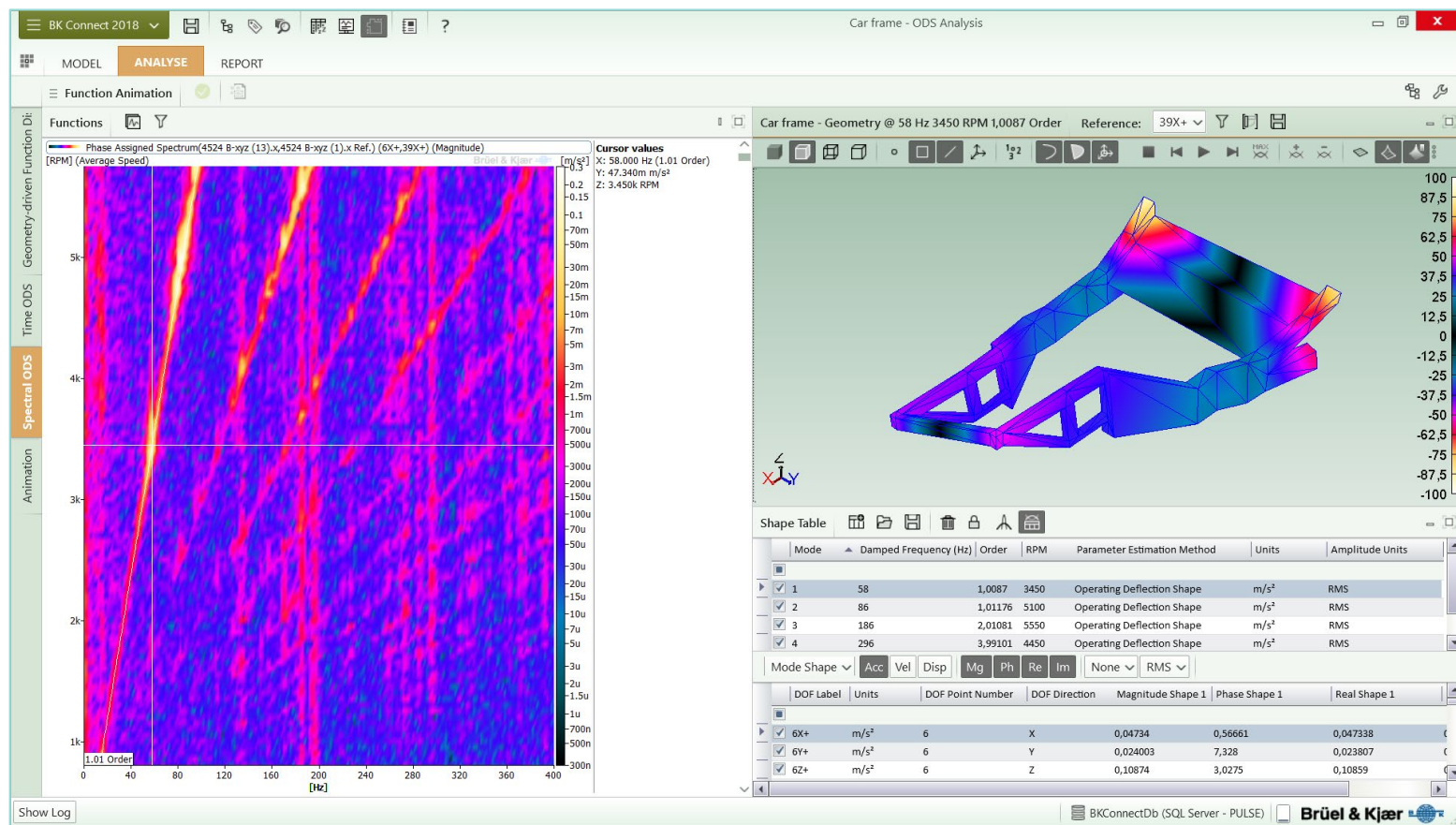
第一个修改建议  
利用10吨横向梁来加强甲板

2阶谐频的工作变形形状

## 2. 工作变形分析 (Operating Deflection Shapes, ODS)

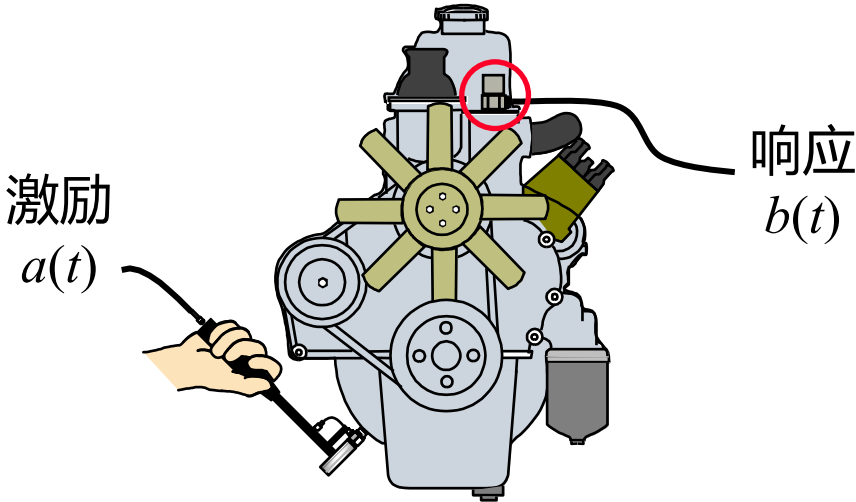
### ◆ 类型三：升/降速ODS

- 特定阶次分量的振动模式被确定为转速的函数
- 输出阶次分量ODS vs. RPM(预切片或后切片)
- DOF 可以同时或分批测量
- 分析与机器旋转和固定部件相关的噪声和振动行为

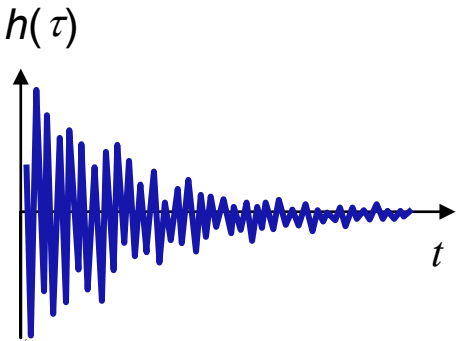


# 3. 实验模态分析 (Experimental Modal Analysis, EMA)

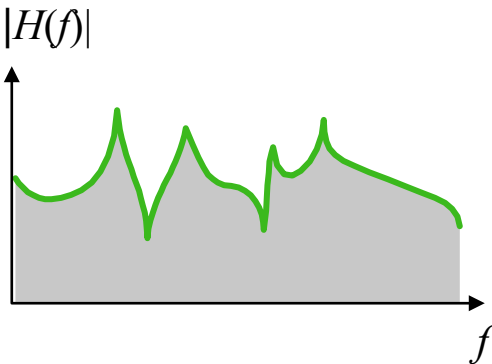
## 导纳测量



单位脉冲响应函数

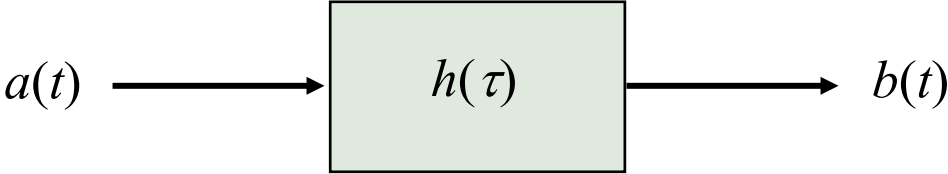


频率响应函数



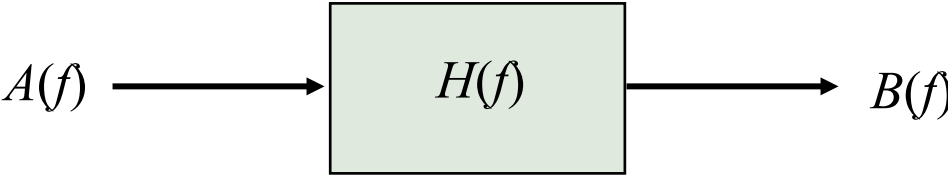
一个模型被创建 – 确定系统的固有特性!

单位脉冲响应函数



卷积 
$$b(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \cdot a(t - \tau) d\tau = h(t) * a(t)$$

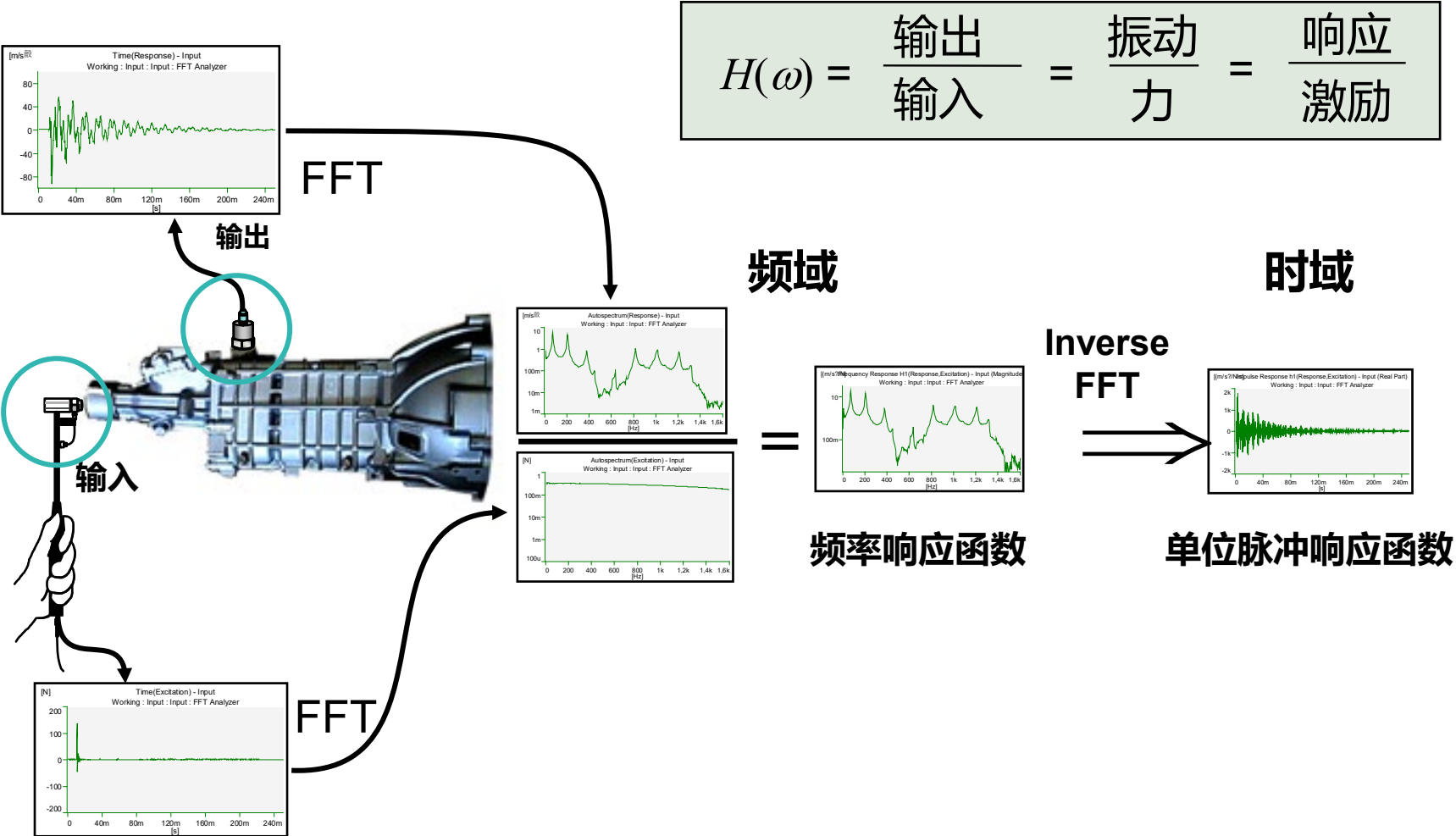
频率响应函数



乘积 
$$B(f) = H(f) \cdot A(f)$$
  
 $h(\tau)$  和  $H(f)$  是与涉及信号无关的系统描述符

# 3. 实验模态分析 (Experimental Modal Analysis, EMA)

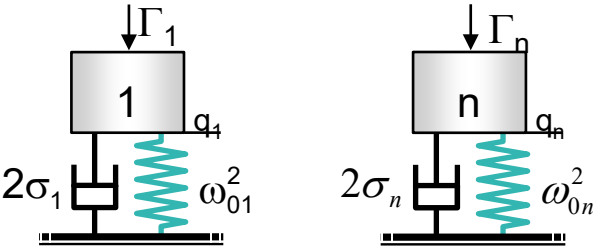
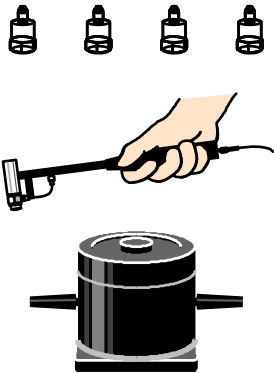
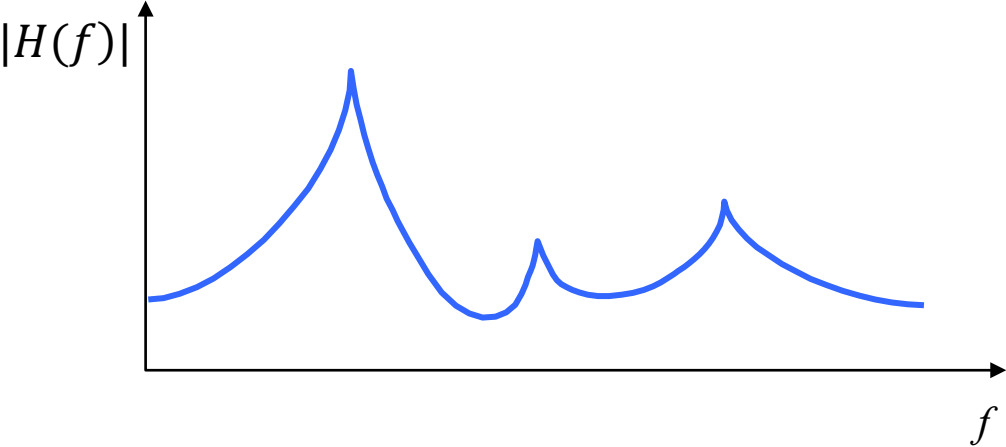
## 导纳测量



# 3. 实验模态分析 (Experimental Modal Analysis, EMA)

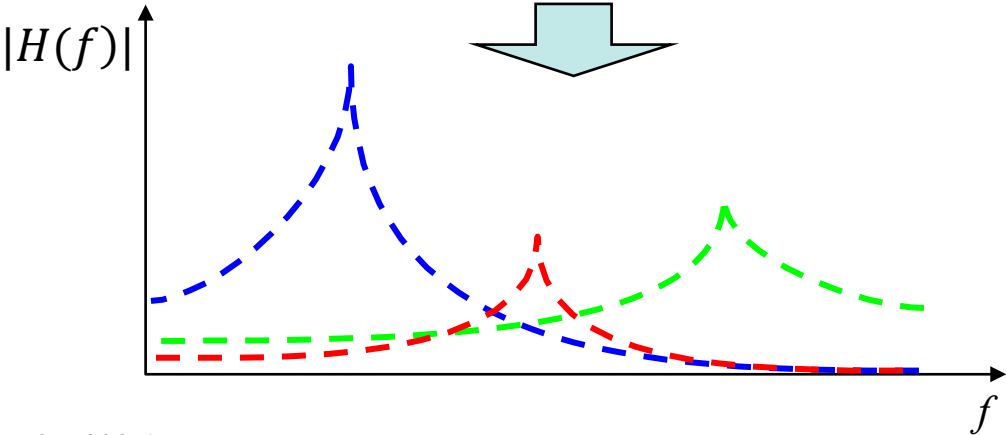
通过实验方法，采用力锤激励或激振器激励，来构造结构振动性质和行为的数学模型(基于导纳的实验模态)

测量



模态分析

曲线拟合  
(模态参数提取)





# 3. 实验模态分析 (Experimental Modal Analysis, EMA)

通过实验方法，采用力锤激励或激振器激励，来构造结构振动性质和行为的数学模型(基于导纳的实验模态)

## ◆ 受控测量

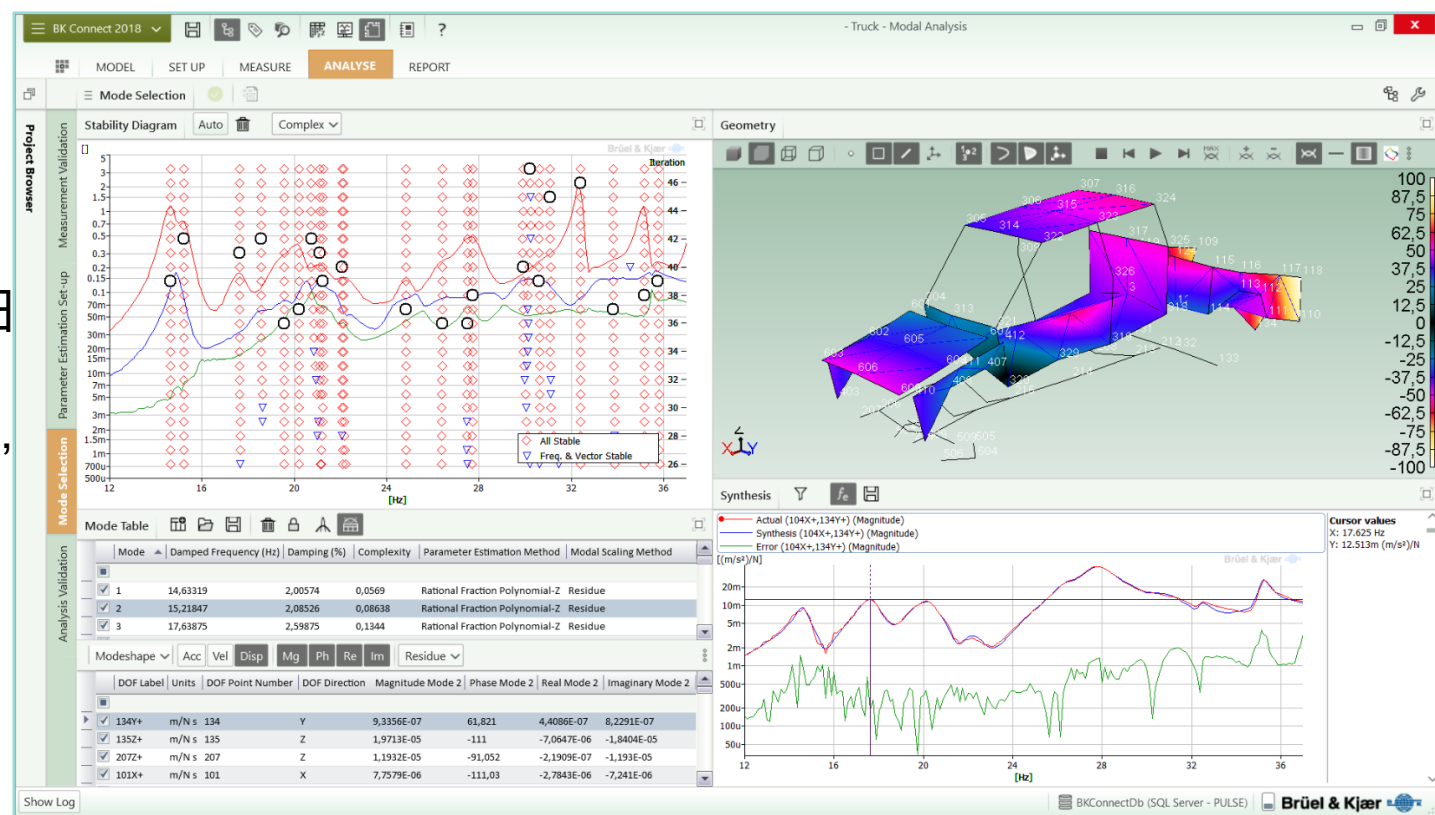
- 边界条件
- 激励信号
- 环境条件

## ◆ 激励信号

- 简谐正弦(固定, 扫描, 步进)
- 随机(连续, 猝发, 伪...)
- 瞬态(冲击)...

## ◆ 结果 – 模态参数

- 固有频率
- 模态阻尼
- 模态振型





### 3. 实验模态分析 (Experimental Modal Analysis, EMA)

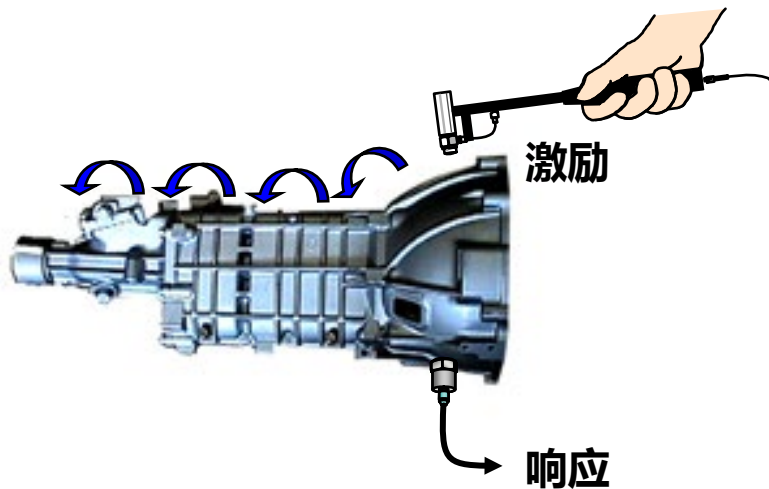
支持力锤激励：通常移动力锤、但也可以固定力锤

#### ◆ 优点

- 快速
- 无夹具
- 质量负载无变化(移动力锤)
- 便携
- 相对便宜

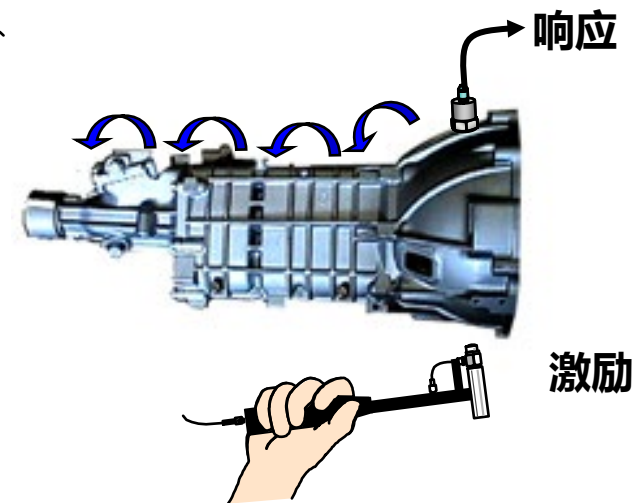
#### ◆ 缺点

- 高波峰因数可能会导致结构出现非线性行为
- 大型结构所需的高峰值力可能会导致局部损坏
- 高度确定性信号意味着没有线性近似



移动力锤=> 1行

$$[H] = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix}$$



固定力锤 => 1列

$$[H] = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix}$$

### 3. 实验模态分析 (Experimental Modal Analysis, EMA)

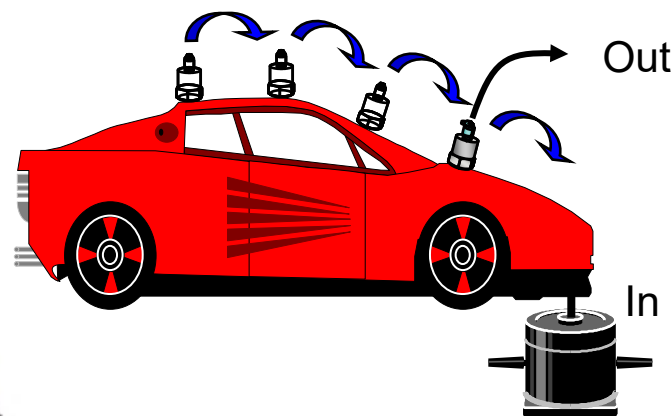
#### 支持激振器激励：通常固定激振器

##### ◆ 优点

- 可以优化众多测量参数(动态范围、信噪比、能量分布、波峰因数、线性度、泄漏等)
- 可使用广泛的激励信号(正弦(单、步进、扫频、多)、随机(连续、猝发、周期、伪)、脉冲等)
- 可进行MIMO测量
- 适用于固定的大型设置

##### ◆ 缺点

- 安装结构、激振器和力传感器
- 来自振动器和挺杆的潜在动载荷
- 激振器之间的潜在机械耦合(MIMO)
- 相对比较贵一些



固定激振器 => 1列

$$[H] = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix}$$

### 3. 实验模态分析 (Experimental Modal Analysis, EMA)

#### 支持MIMO测量及分析

##### ◆ 多输入

- 当存在重根(对称结构)或强耦合模态(复杂结构的密集模态)时, 获取模态参数
- 对于大型和/或复杂结构, 需要更多的振动器, 以便获得充分分布的激励能量、避免结构进入局部非线性

##### ◆ 多输出

- 同时测量输出以优化数据一致性及提高测试效率(往往提高量不显著, 因为传感器安装布置时间相当)

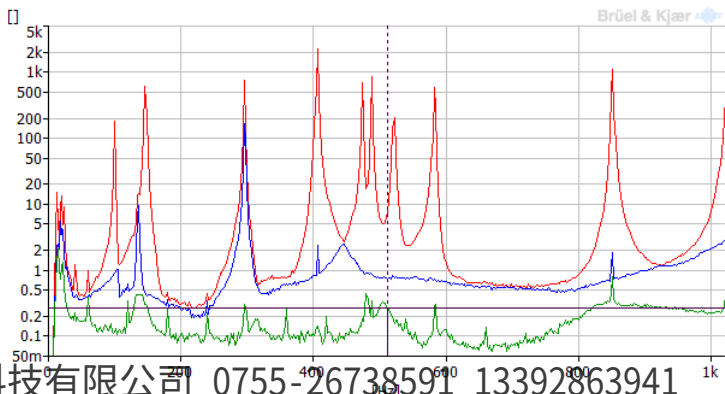
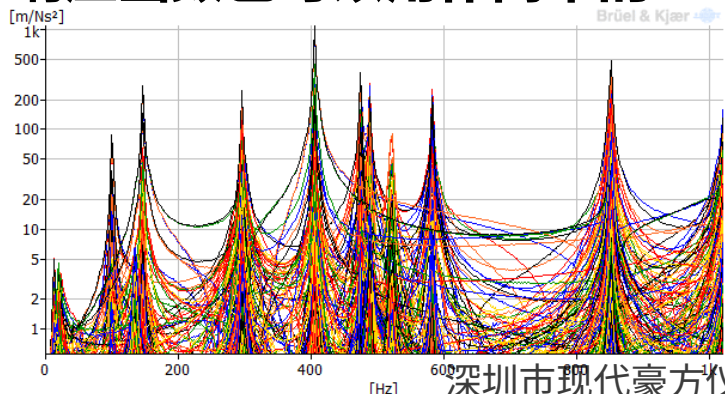


# 3. 实验模态分析 (Experimental Modal Analysis, EMA)

支持丰富的模态指示函数 (Mode Indicator Function, MIF)

- ◆ MIF通常是实值频域函数，在模态频率处表现出局部最小值或最大值
- ◆ 一些 MIF表现为单一函数，只能指示明显分离的模态
- ◆ 一些 MIF表现为对应于每个参考就存在一个函数，可以表示重根和强耦合模态
- ◆ BK Connect支持的MIF有
  - 功率模态指示函数 (Power Mode Indicator Function, PMIF)
  - 正则模态指示函数 (Normal Mode Indicator Function, NMIF)
  - **复模态指示函数 (Complex Mode Indicator Function, CMIF)**
  - 多变量模态指示函数 (Multivariate Mode Indicator Function, MMIF)
- ◆ 频率响应函数也可以用作简单的MIFs

| 函数  | 模态指示        |      |
|-----|-------------|------|
|     | 峰值          | 谷值   |
| 单参考 | PMIF        | NMIF |
| 多参考 | <b>CMIF</b> | MMIF |

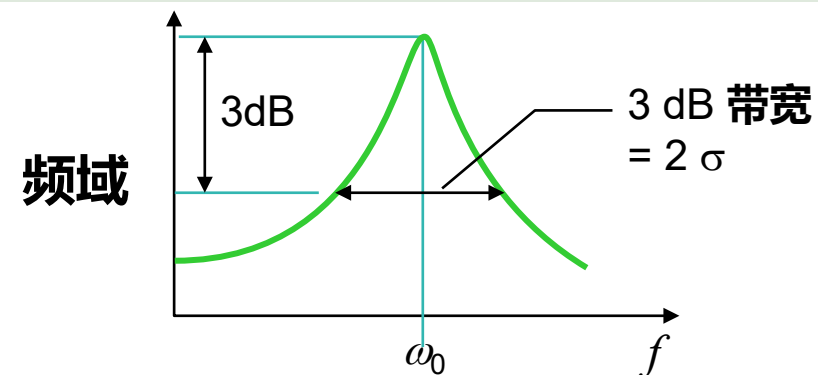
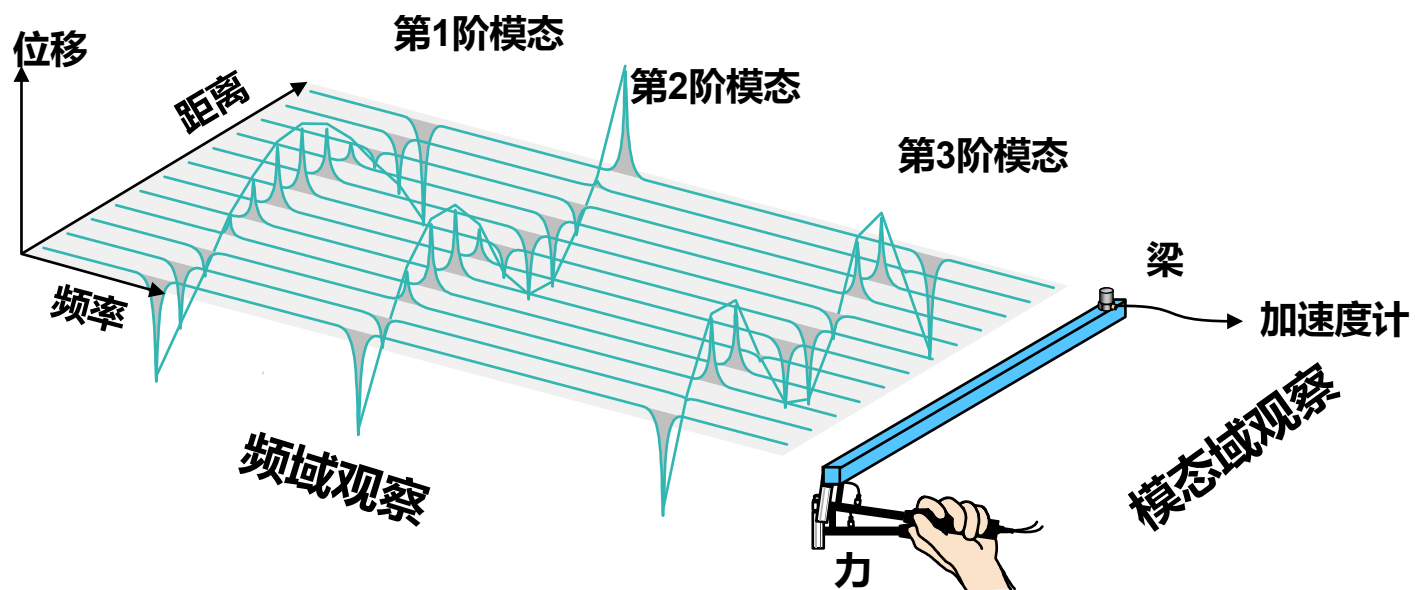


SVD:

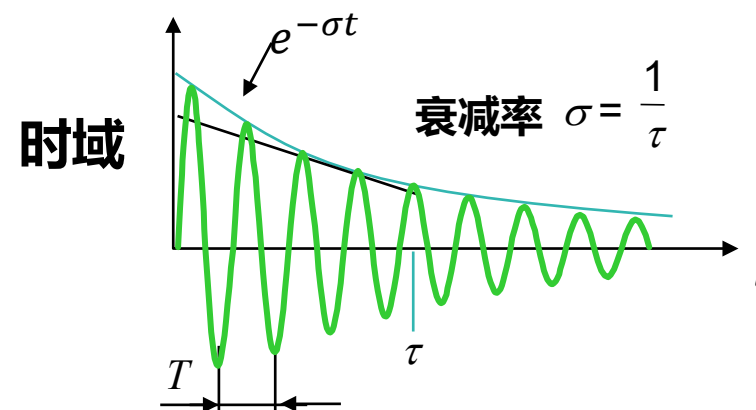
$$[H(\omega)] = [U(\omega)][\Sigma(\omega)][V(\omega)]^H$$

### 3. 实验模态分析 (Experimental Modal Analysis, EMA)

全局参数：固有频率和阻尼比；局部参数：留数(反映模态强度)



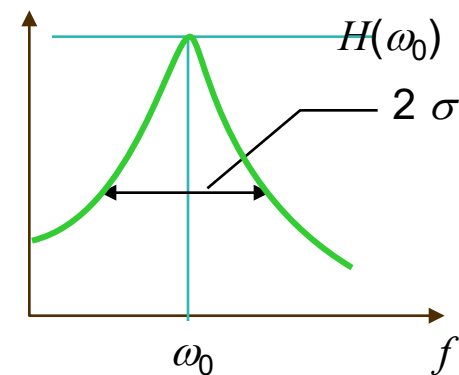
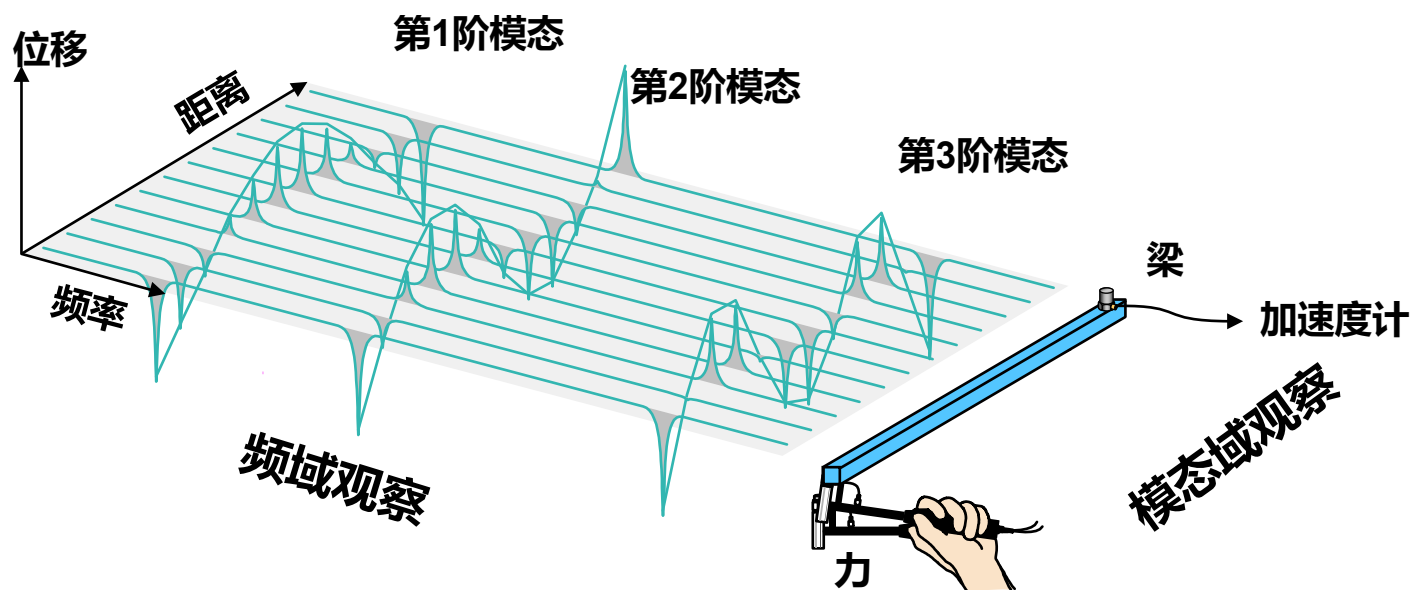
固有频率:  $\omega_0 = 2\pi f_0$  阻尼比:  $\zeta = \frac{\sigma}{\omega_0}$



固有频率:  $f_0 = \frac{1}{T}$  阻尼比:  $\zeta = \frac{\sigma}{\omega_0}$

### 3. 实验模态分析 (Experimental Modal Analysis, EMA)

全局参数：固有频率和阻尼比；局部参数：留数(反映模态强度)



留数:  $R = H(\omega_0) \cdot \sigma$

驱动点留数:  $R_{iir} = a \cdot \psi_{ir}^2$

一般留数:  $R_{ijr} = a \cdot \psi_{ir} \cdot \psi_{jr}$

驱动点留数用于缩放模态



### 3. 实验模态分析 (Experimental Modal Analysis, EMA)

#### 支持丰富的曲线拟合方法

- 用途：从获得的频率响应函数测量结果识别使用模态参数(固有频率，阻尼比和模态振形)描述的系统模型
- 曲线拟合是一个大数据的缩减处理，因此，不存在单一的理想曲线拟合器！
- 特定测量子空间和子空间内数据加权是各种模态参数估计技术之间的主要差异！

- 使用矩阵系数多项式模型的通用公式

$$H(s) = \frac{\beta_n(s)^n + \beta_{n-1}(s)^{n-1} + \dots + \beta_0}{\alpha_m(s)^m + \alpha_{m-1}(s)^{m-1} + \dots + \alpha_0}$$

- 模态频率和阻尼比(极点)从

$$[\alpha_m]s^m + [\alpha_{m-1}]s^{m-1} + \dots + [\alpha_0] = 0 \quad \text{频域}$$

$$[\alpha_m]z^m + [\alpha_{m-1}]z^{m-1} + \dots + [\alpha_0] = 0 \quad \text{时域}$$

- 极点数量由阶次 $m$ (高阶方法)和矩阵 $[\alpha]$ 维度(低阶方法)决定

- 所有方法均支持自动化

| 阶次 | 时域                                    | 频域                                                  |
|----|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 低阶 | <i>Eigensystem Realization (ERA)</i>  | <i>Polyreference Frequency (PFD)</i>                |
| 高阶 | <i>Polyreference Time (PTD, LSCE)</i> | <i>Rational Fraction Polynomial-Z (RFP-Z, LSCF)</i> |

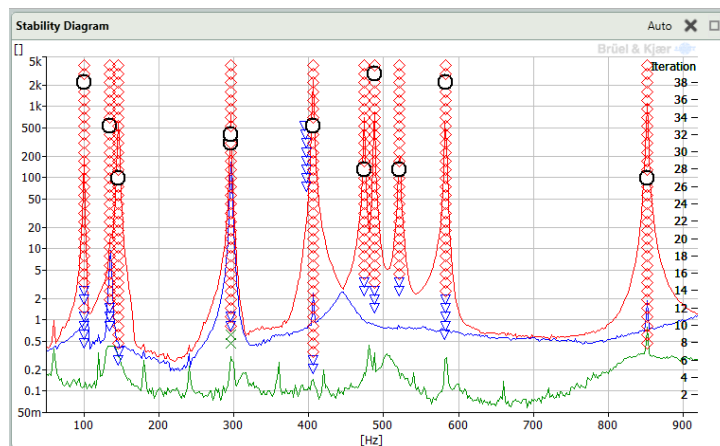


### 3. 实验模态分析 (Experimental Modal Analysis, EMA)

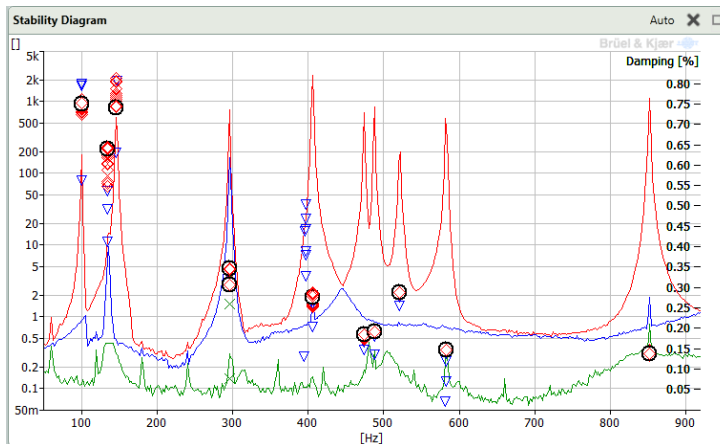
#### 提供强大的稳态图助力模态识别

#### 稳态图类型有

- (标准)稳态图
  - ✓ 节点稳定水平符号
  - ✓ 迭代 vs. 频率
  - ✓ 稳定模态以垂直线的形式出现
  - ✓ 全局曲线拟合时缺省使用
- 簇图
  - ✓ 节点稳定水平符号
  - ✓ 阻尼 vs. 频率
  - ✓ 稳定模态以簇的形式出现
  - ✓ 局部曲线拟合时缺省使用
- 密度图
  - ✓ 与簇图类似，但用颜色来表示密度



稳态图



簇图

Stability Symbols

|                       |                                     |                   |
|-----------------------|-------------------------------------|-------------------|
| All Stable            | <input checked="" type="checkbox"/> | Diamond           |
| Freq. & Vector Stable | <input checked="" type="checkbox"/> | Inverted Triangle |
| Freq. & Damp. Stable  | <input checked="" type="checkbox"/> | Asterisk          |
| Frequency Stable      | <input checked="" type="checkbox"/> | Cross             |
| New                   | <input type="checkbox"/>            | Plus              |
| Computational         | <input type="checkbox"/>            | Square            |
| Selected              | <input checked="" type="checkbox"/> | Circle            |
| Pole Legend           | <input checked="" type="checkbox"/> |                   |
| Load Symbol Set       | BK Symbols                          |                   |
| Save Symbols          | Save                                |                   |

Diamond

Plus

Diamond

Cross

Inverted Triangle

Asterisk

Square

Letter s

# 3. 实验模态分析 (Experimental Modal Analysis, EMA)

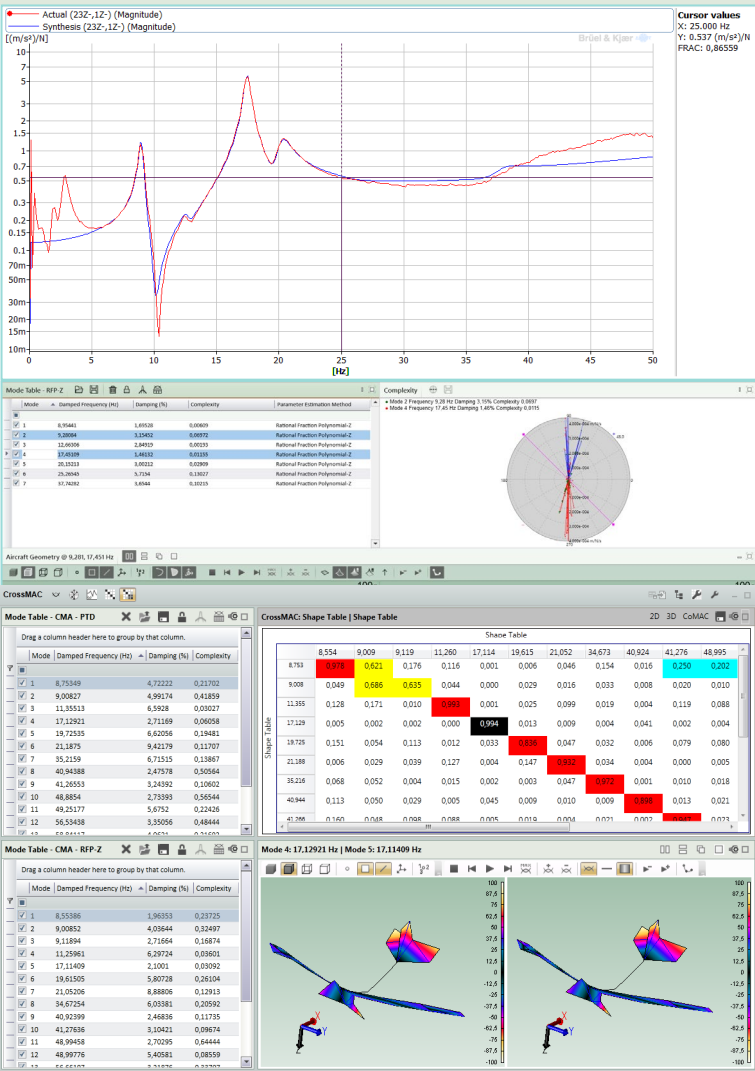
提供强大的模态识别结果验证工具

- 合成频率响应函数
  - ✓ 比较测量频响函数和合成频响函数
  - ✓ 分析从模态表中移除某个或某些模态产生的影响
- 模态振型动画
  - ✓ 单动画, 左右对比, 上下对比, 重叠对比, 差异 ...
  - ✓ 线框, 表面, 云图, 变形/不变形, 最大变形 ...

- 复杂性图
  - ✓ 模态复杂性的验证
  - ✓ 使用“角度指示器”进行模态正则化

$$MAC(\psi_r, \psi_s) = \frac{|\psi_r^H \psi_s|^2}{(\psi_r^H \psi_r)(\psi_s^H \psi_s)}$$

- AutoMAC和CrossMAC (MAC: Modal Assurance Criterion)
  - ✓ 定量对比分析模态振形对之间的线性性
  - ✓ 0-1的规则化结果 (1: 相同的振形; 0: 完全不同的振形)
- CoMAC (CoMAC: Coordinate MAC)
  - ✓ 基于DOF定量比较两组模态振形
  - ✓ 用于识别结构中低相关性的部分



# 3. 实验模态分析 (Experimental Modal Analysis, EMA)

## 基本概念和应用

### ◆ 只通过工作状态下响应测量来确定模态模型

- 现场测试或模拟自然环境测试
- 使用自然输入激励(环境或自生振动)
- 无需测量输入力
- 测量过程类似于运行变形分析(ODS)

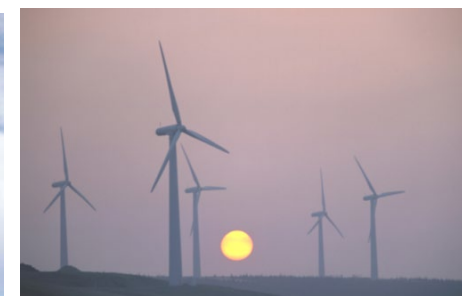


### ◆ 成功的应用于土木工程领域 (环境模态)

- 桥梁和建筑物
- 离岸月台等

### ◆ 在机械工程领域亦有广泛应用

- 旋转机械
- 路面测试和飞行测试等



## 4. 运行模态分析 (Operating Modal Analysis, OMA)

### 优点

#### ◆ 模态模型代表真实的工作条件

- 真边界条件
- 实际力和振动水平和频率范围

#### ◆ 可以测试不可能或难以人工激发的结构

- 大型或脆弱的结构
- 无法控制或准确测量具有内部或环境激励的结构
- 边界条件难以模拟的结构
- 非线性结构，例如复合材料

#### ◆ 不干扰或中断日常使用

- 使用自然激发原位进行测试
- 没有代价高昂的停机时间

#### ◆ 只需要自然随机或未测量的人工激励

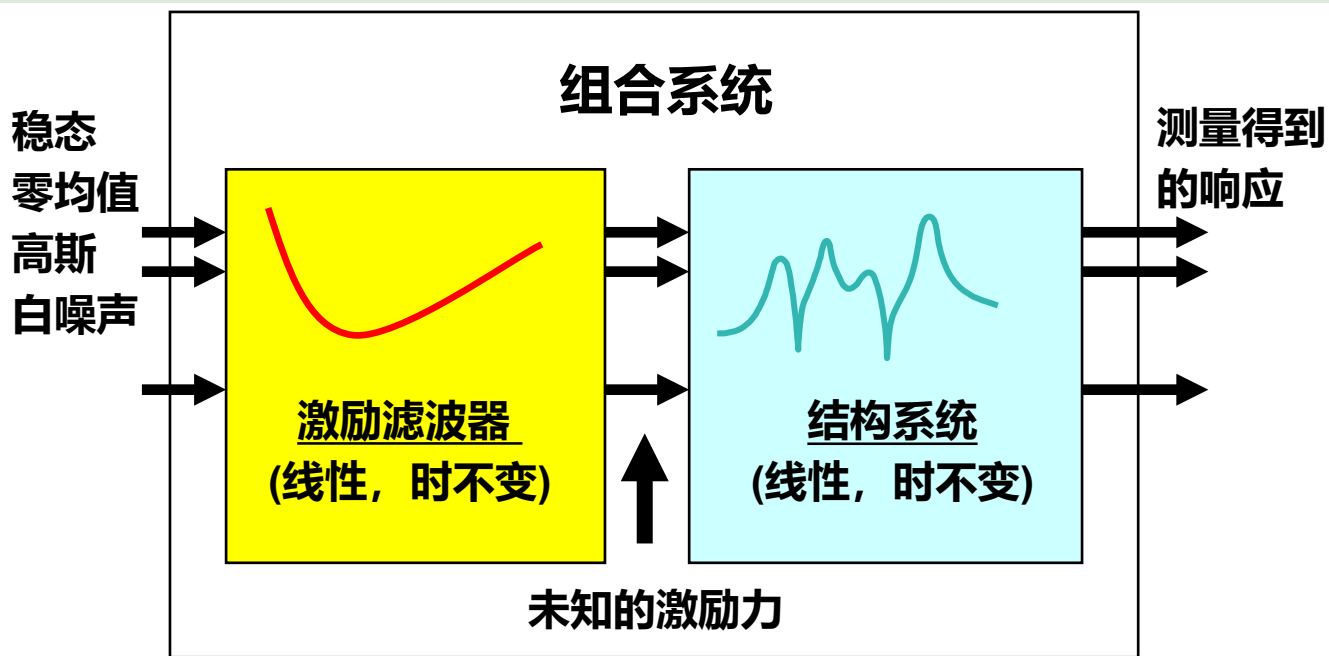
- 人工激励可以改善结果，但不需要测量输入





## 4. 运行模态分析 (Operating Modal Analysis, OMA)

### 假设和局限



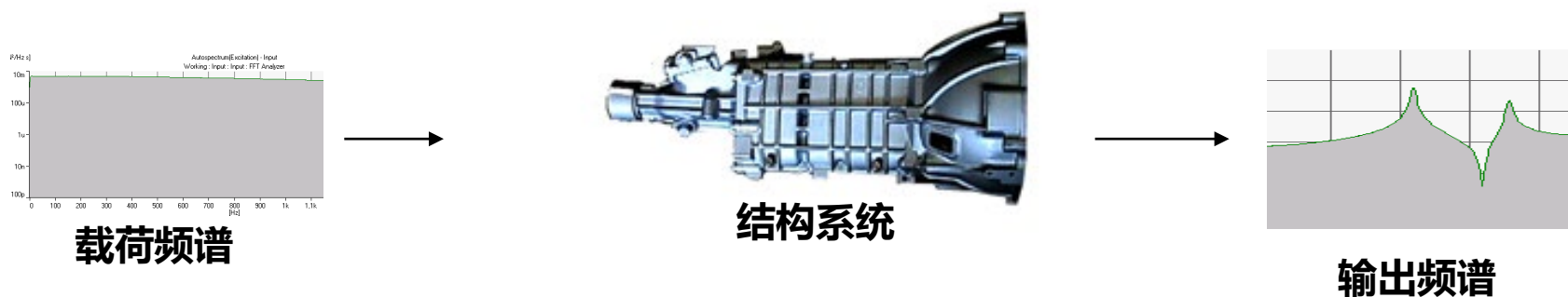
从组合系统的估计模型中提取结构系统的模态模型

- ◆ **数学假设：**通过滤波的零均值高斯白噪声，稳态的输入力信号能够被近似
  - 利用相关函数或自谱和互谱，信号能够被完全描述
  - 合成的和实测的功率谱密度函数和相关函数类似 (重要的验证工具)
- ◆ **实测假设：**
  - 宽带激励(所有感兴趣的模态能量足够，发动机的升/降速通常就足够)
  - 所有的模态必须被激励
- ◆ **局限**
  - 确定性信号可能会破坏结果，必须识别并消除其影响
  - 模态模型未缩放(未校准)，不可能进行绝对的强迫振动响应模拟

## 4. 运行模态分析 (Operating Modal Analysis, OMA)

### 组合系统

如果系统被白噪声激励，系统所有的模态均被同等激励，输出频谱中包含结构的完整信息



## 4. 运行模态分析 (Operating Modal Analysis,OMA)

### 组合系统

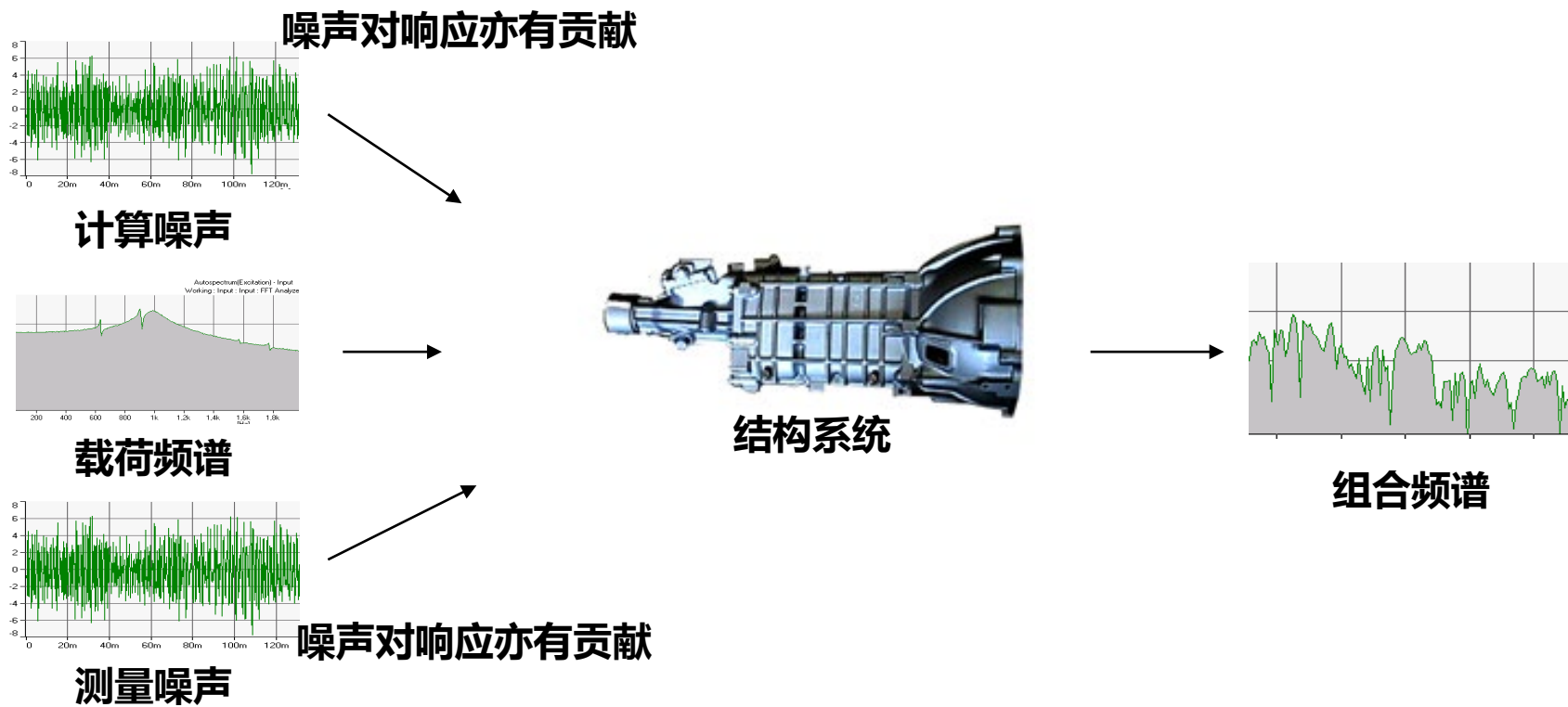
通常激励有频谱分布，模态将被激励频谱计权。来源于激励信号的“模态”和结构模态均会被包括在响应的“模态”中





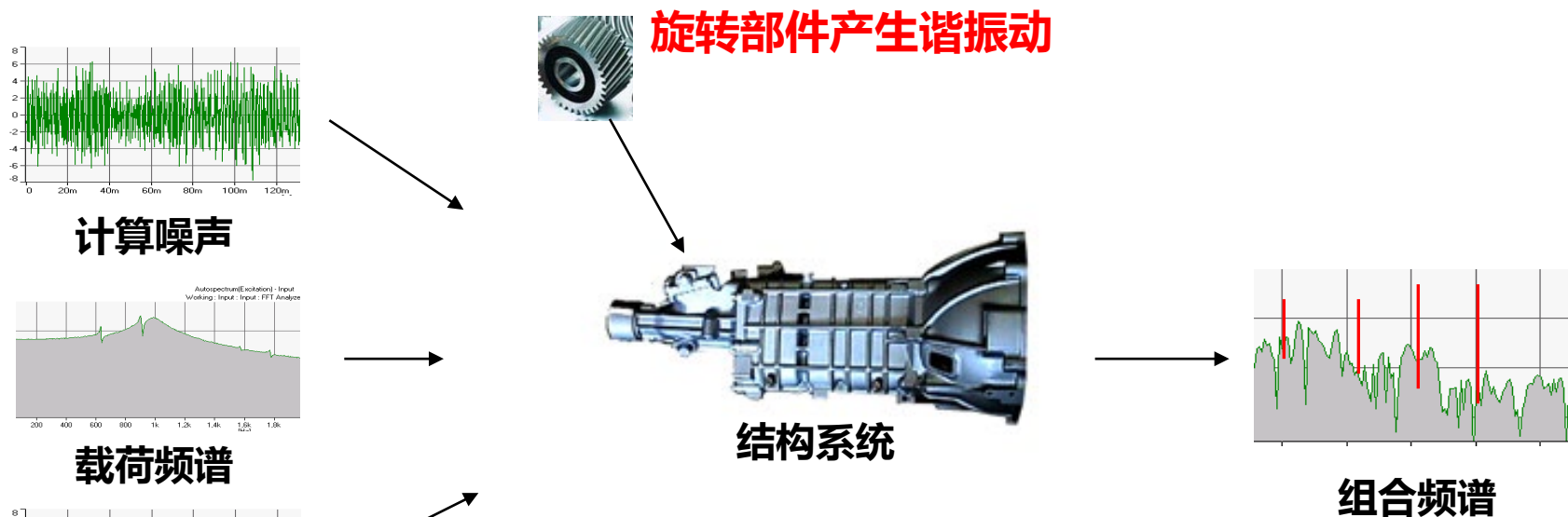
# 4. 运行模态分析 (Operating Modal Analysis,OMA)

## 组合系统



## 4. 运行模态分析 (Operating Modal Analysis, OMA)

### 组合系统



组合频谱中的“模态”包括

- 被测系统 (物理模态)
- 输入载荷 (非物理“模态”)
- 噪声 (非物理“模态”)
- 谐波 (非物理“模态”)

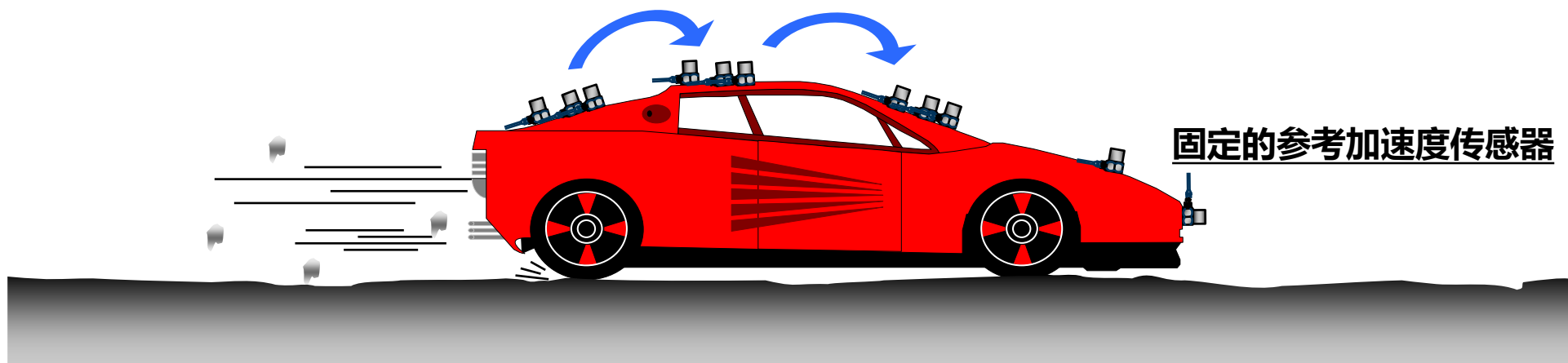
## 4. 运行模态分析 (Operating Modal Analysis, OMA)

### 数据采集

#### ◆ 测量过程非常类似于工作变形振型分析

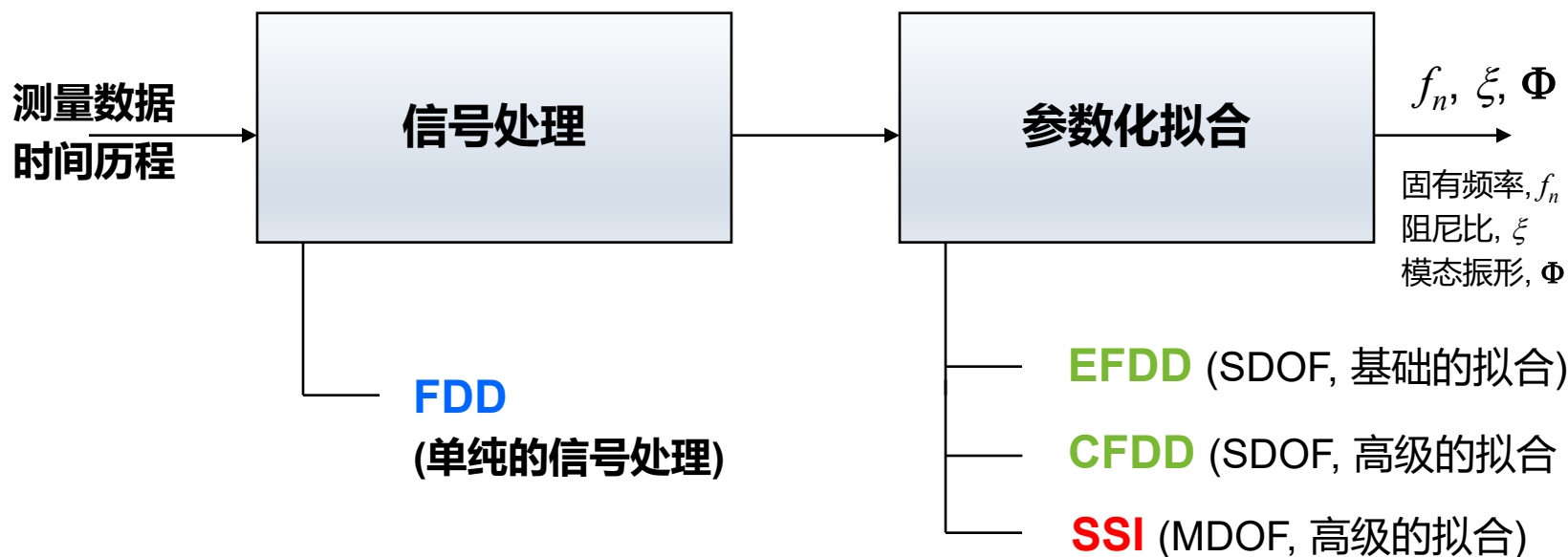
- 测量能够被一次完成(快速, 数据一致性)或者多次完成(受限于传感器的数量)
  - 一次测量(一个数据组): 不需要参考传感器
  - 多次测量(多个数据组): 对所有的数据组, 需要一个或者多个固定的 加速度传感器作为参考

在多个数据组中, 加速度传感器被移动



## 4. 运行模态分析 (Operating Modal Analysis, OMA)

### 支持丰富的模态参数识别方法



#### ▲ 非参数化方法

- Frequency Domain Decomposition, **FDD**

#### ▲ 参数化方法

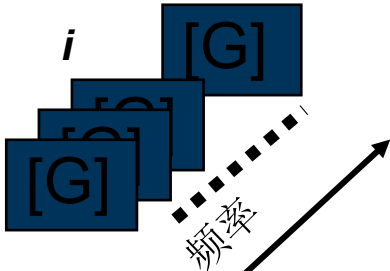
- Enhanced Frequency Domain Decomposition, **EFDD**
- Curve-fit Frequency Domain Decomposition, **CFDD**
- Stochastic Subspace Identification, **SSI**

# 4. 运行模态分析 (Operating Modal Analysis, OMA)

## FDD

### FDD的过程:

- 估计功率谱密度矩阵
- 功率谱密度矩阵的奇异值分解
- 从奇异值分解识别单自由度模型
- 从单自由度模型识别模态参数

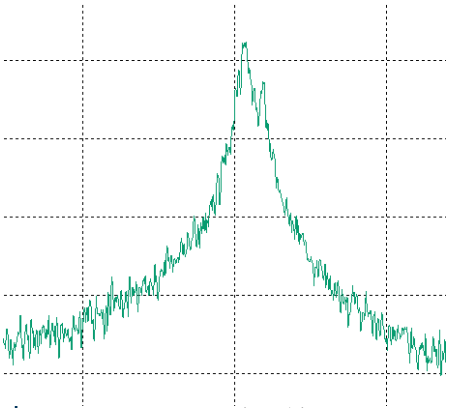


$$[A] = [V] [S] [V]^H = s_1 v_1 v_1^H + s_2 v_2 v_2^H + \dots$$

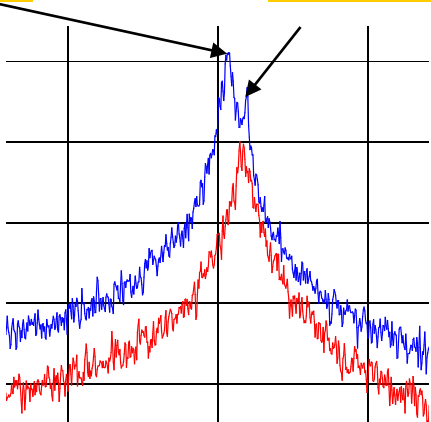
使用PSD 的SVD分解结果 提取模型参数

S<sub>1</sub>: 至少存在一个模态

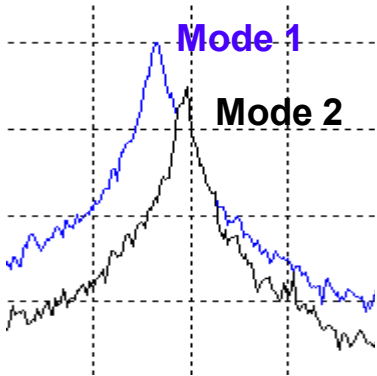
S<sub>2</sub>: 至少存在两个模态



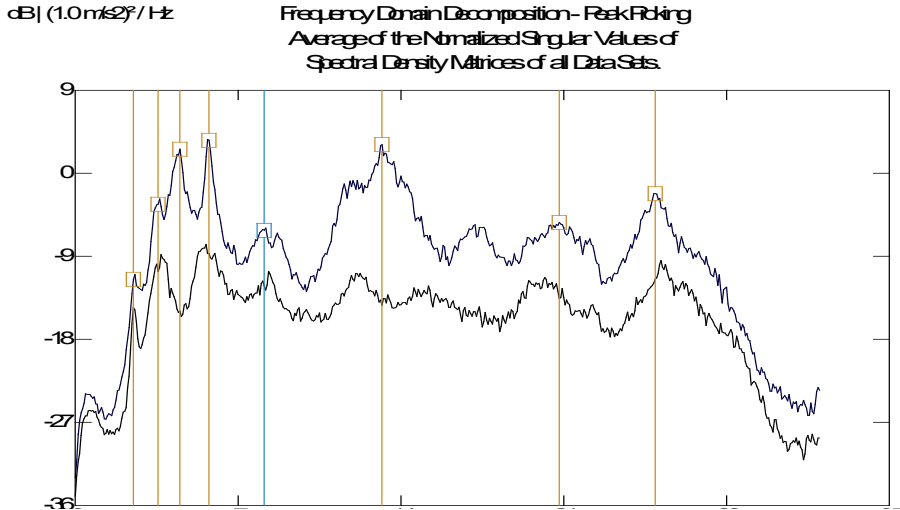
35 | PUBLIC PSD 幅值



PSD 矩阵的 SVD



解偶的模态



## 4. 运行模态分析 (Operating Modal Analysis, OMA)

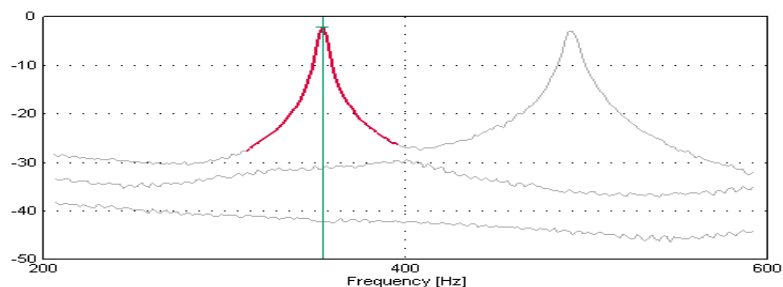
### EFDD

#### EFDD的过程:

- 对SVD谱函数执行IFFT变换来计算相关函数
- 从相关函数进行频率和阻尼估计
- 利用奇异矢量加权和估计模态振型

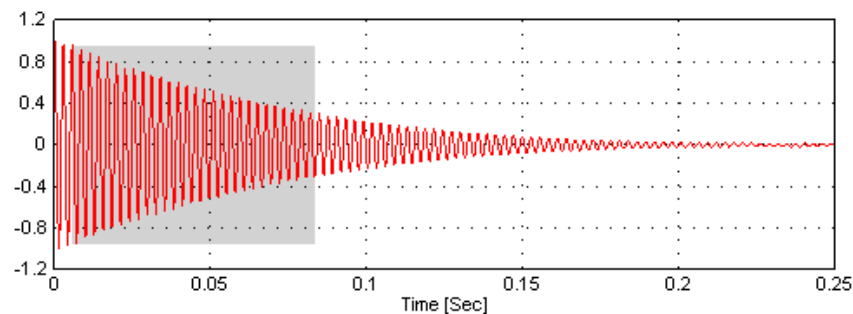
$$MAC = \frac{(\Phi_0^H \Phi_i)^2}{(\Phi_0^H \Phi_0) \cdot (\Phi_i^H \Phi_i)} \geq 0,8$$

[dB | (1 m/s<sup>2</sup>) 功率谱密度矩阵的SVD



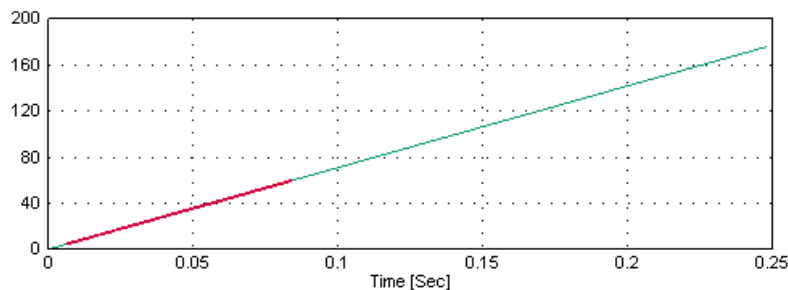
[Correlation]

归一化的相关函数



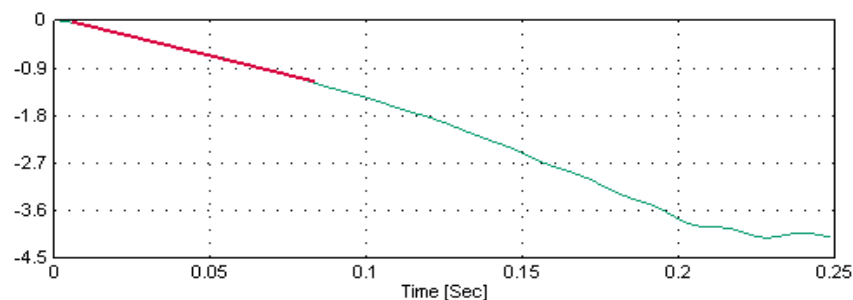
[Zero Crossing]

验证固有频率估计



[log(|Extreme Value|)]

验证阻尼比估计



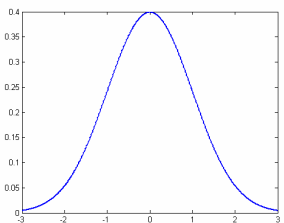


# 4. 运行模态分析 (Operating Modal Analysis, OMA)

## 基于峭度的谐波探测及移除

The **kurtosis**  $\gamma^*$  of a stochastic variable  $x$  provides a measure of how **peaked** or how **flat** the probability density function of  $x$  is

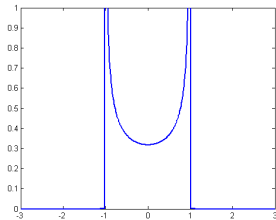
$$\gamma(x|\mu, \sigma) = \frac{E[(x - \mu)^4]}{\sigma^4}$$



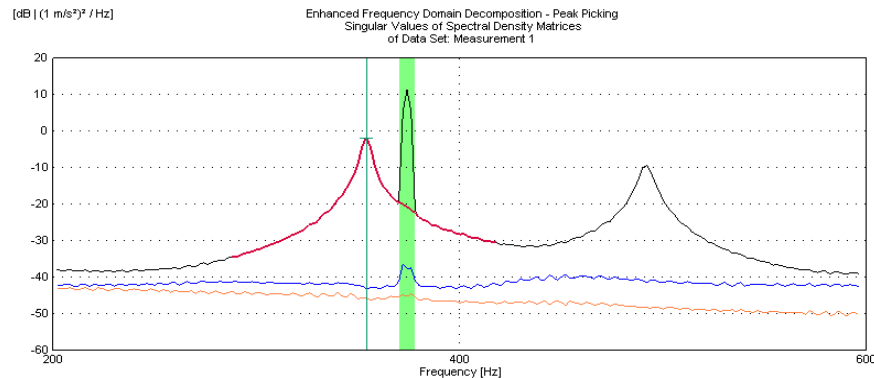
$\gamma > 3$ : Leptokurtic ("Peaked" and "fat tails")

$\gamma = 3$ : Mesokurtic (**Normal Distribution**)

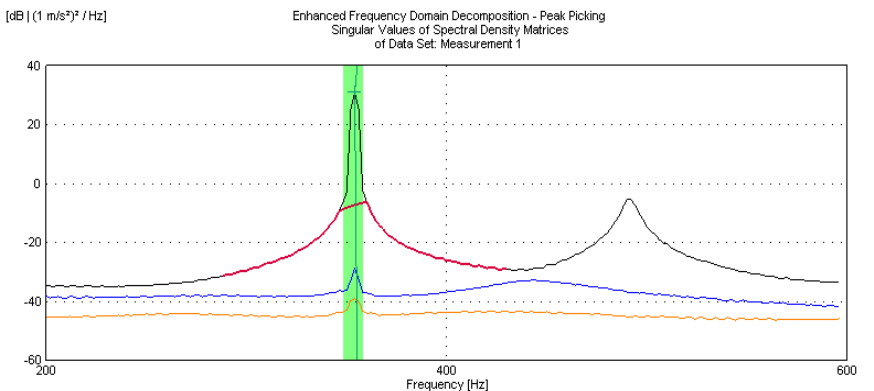
$\gamma < 3$ : Platykurtic (Less "peaked" and "thinner tails")



$\gamma = 1.5$  for a **sinusoidal component**



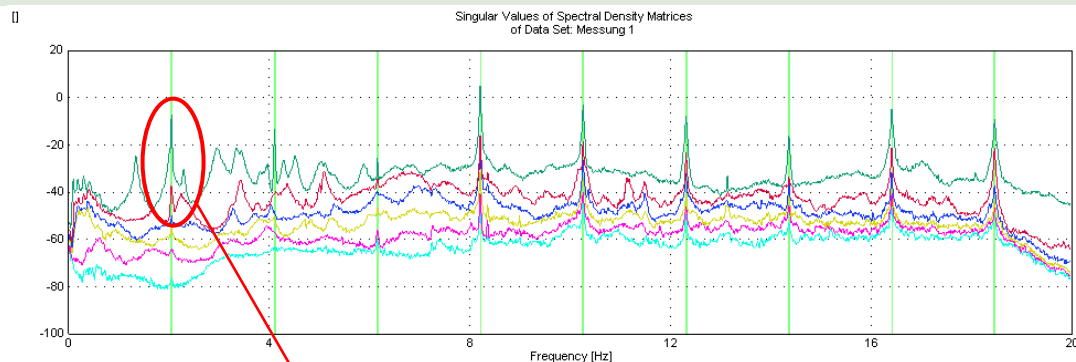
谐波能够有效移除



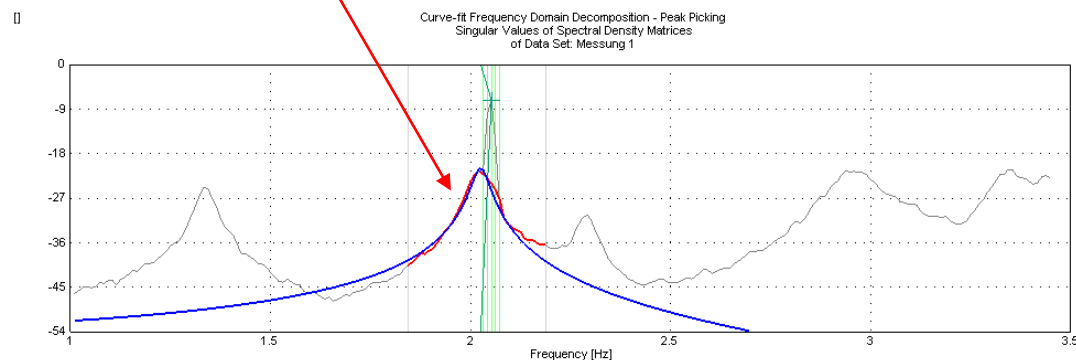
谐波移除导致阻尼过估计, 建议使用更高的  
分辨率或者**进行曲线拟合**

## 4. 运行模态分析 (Operating Modal Analysis, OMA)

### CFDD



2.05 Hz 及其倍频谐波



结构模态频率: 2.03 Hz; 谐波频率: 2.05 Hz



Internal Excitation

Fundamental frequency of main engine at 2.05 Hz

4-bladed propeller fundamental frequency at 8.2 Hz

Test

90 min; 16 channels;  $f_s = 128$  Hz

6 projection channels

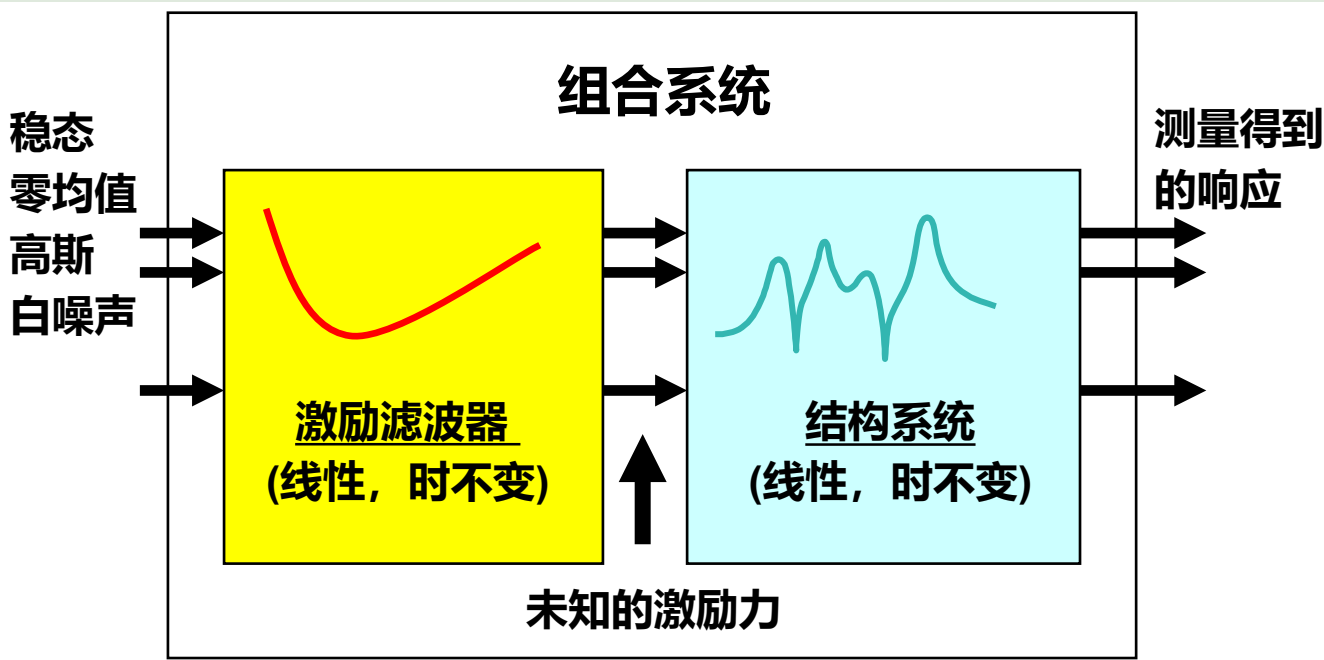
Fast Kurtosis Checking and CFDD

# 4. 运行模态分析 (Operating Modal Analysis,OMA)

## SSI的过程:

- 产生压缩的输入数据格式
  - 基于先验知识选择总模态(结构, 谐波, 噪声)数目
  - 选择识别类型
    - 主分量识别(Principal Components, PC)
    - 未加权主分量识别(Unweighted Principal Components, UPC);
    - 典型变量分析识别(Canonical Variate Analysis , CVA)
- 从稳态图估计参数
  - 选择候选模态阶次(使用SVD图)
  - 估计模型(调整误差准则)
  - 确定最优模型(使用验证工具)
- 在多个数据组之间选择和连接模态

SSI



从组合系统的估计模型中提取结构系统的模态模型

### 离散时域随机状态空间模型

状态方程  $\mathbf{x}_{t+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_t + \mathbf{w}_t$       系统的动力学模型

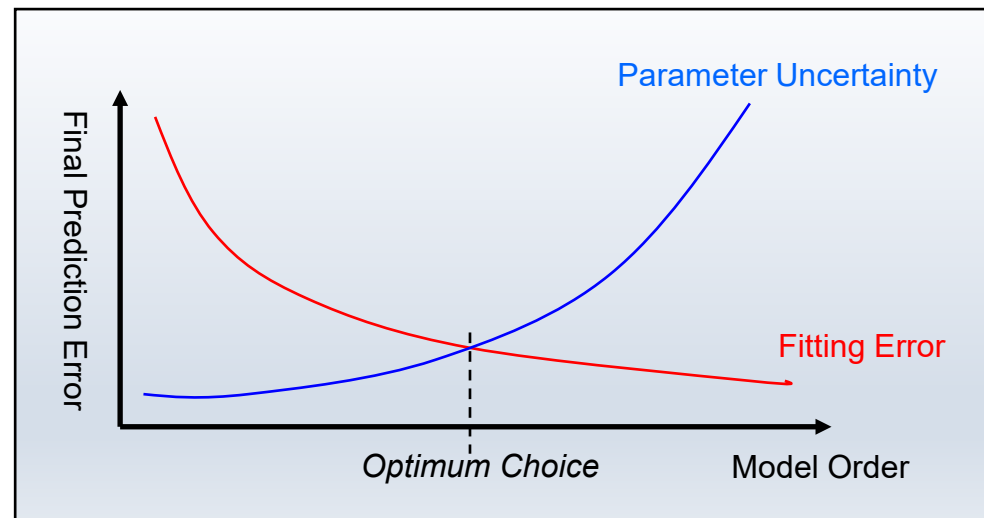
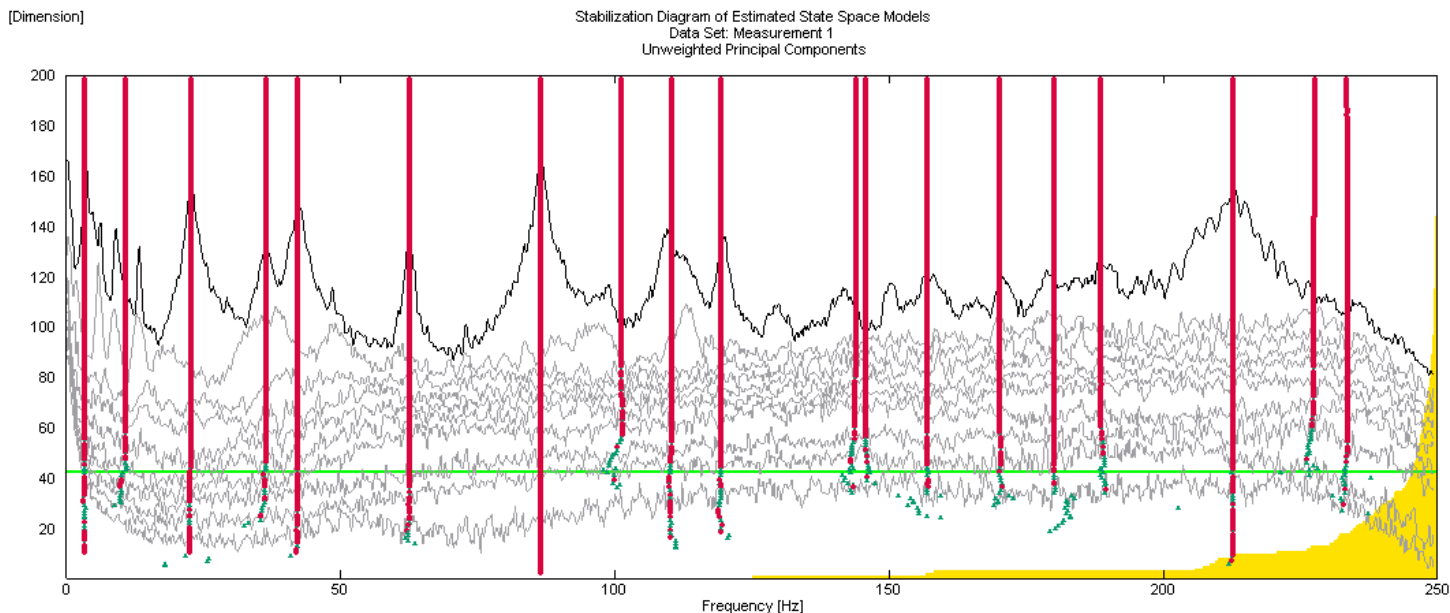
观测(输出)方程  $\mathbf{y}_t = \mathbf{C}\mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t$       系统的输出模型

$\mathbf{w}_t$ : 方法假定的噪声;  $\mathbf{v}_t$ : 测量噪声; 模型阶次:  $\mathbf{A}$ 的维数

深圳市现代豪方仪器仪表科技有限公司 0755-26738591 13392863941

## 4. 运行模态分析 (Operating Modal Analysis, OMA)

### SSI



### 离散时域随机状态空间模型

状态方程

$$\mathbf{x}_{t+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_t + \mathbf{w}_t$$

系统的动力学模型

观测(输出)方程

$$y_t = \mathbf{C}\mathbf{x}_t + v_t$$

系统的输出模型

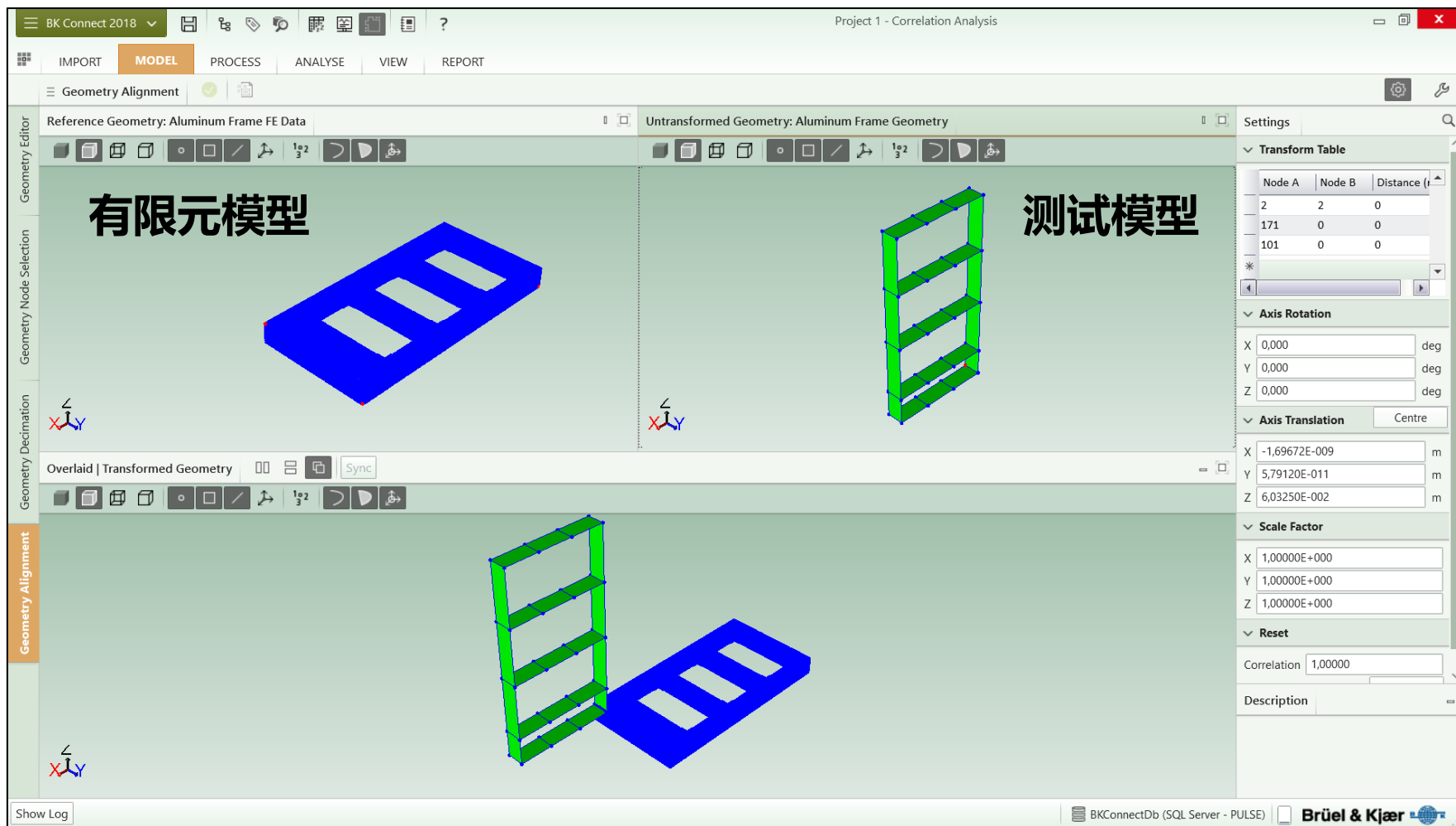
$\mathbf{w}_t$ : 方法假定的噪声;  $v_t$ : 测量噪声; 模型阶次:  $\mathbf{A}$ 的维数

深圳市现代豪方仪器仪表科技有限公司 0755-26738591 13392863941

## 5. 模型相关性分析 (Model Correlation)

强大且易用的测试-有限元的集成工具

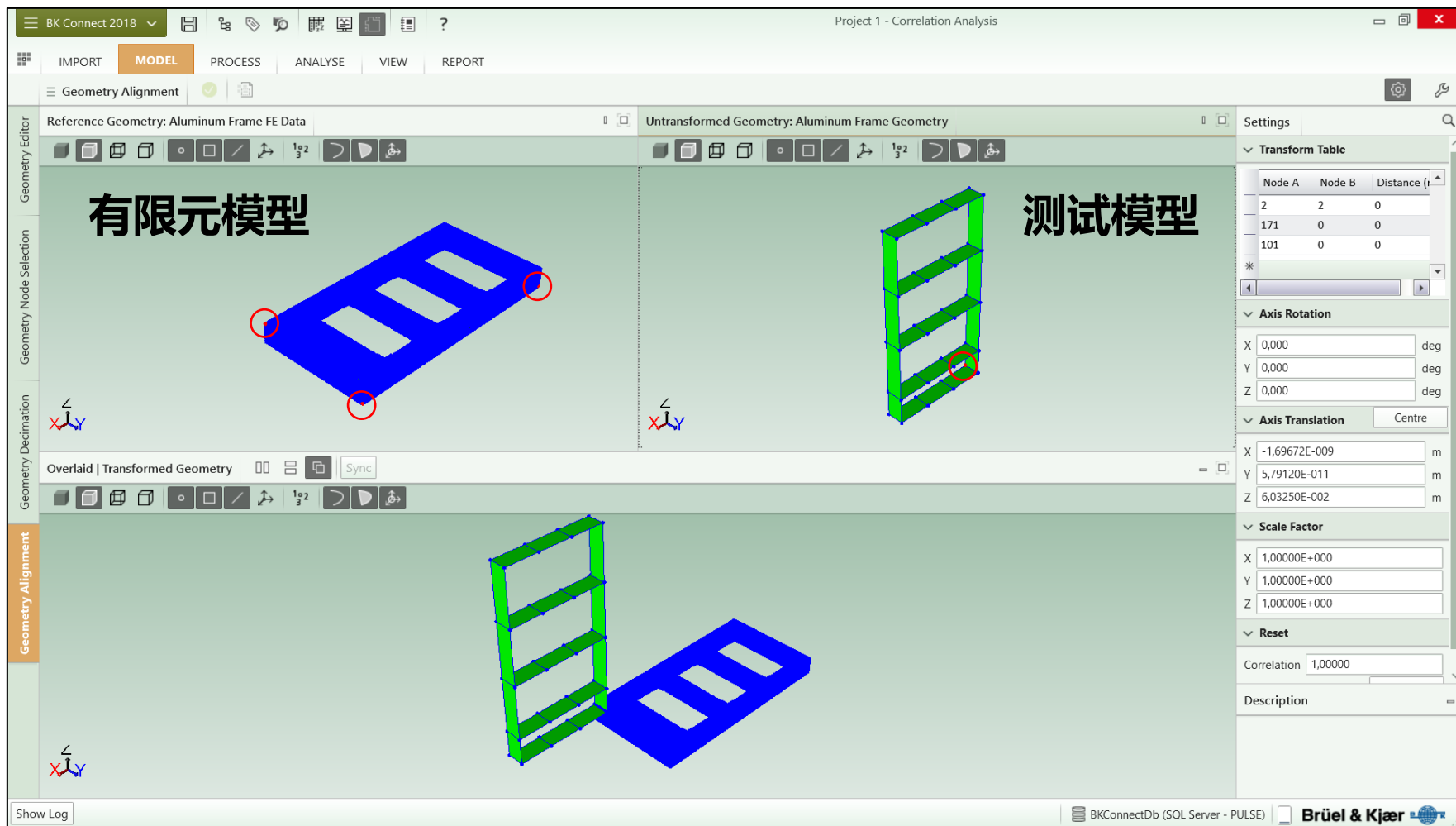
- 方便的几何匹配



## 5. 模型相关性分析 (Model Correlation)

强大且易用的测试-有限元的集成工具

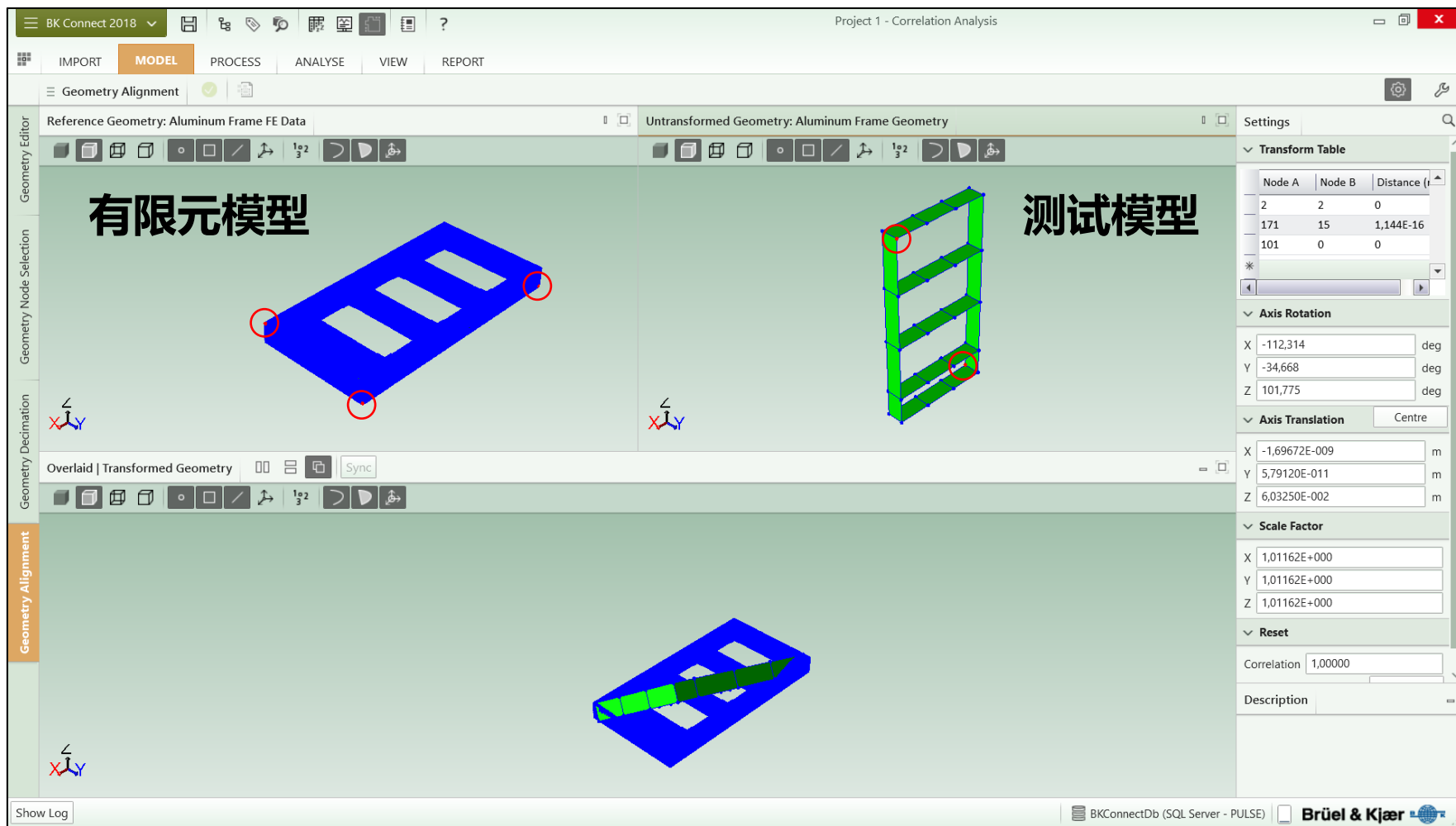
- 方便的几何匹配



## 5. 模型相关性分析 (Model Correlation)

强大且易用的测试-有限元的集成工具

- 方便的几何匹配

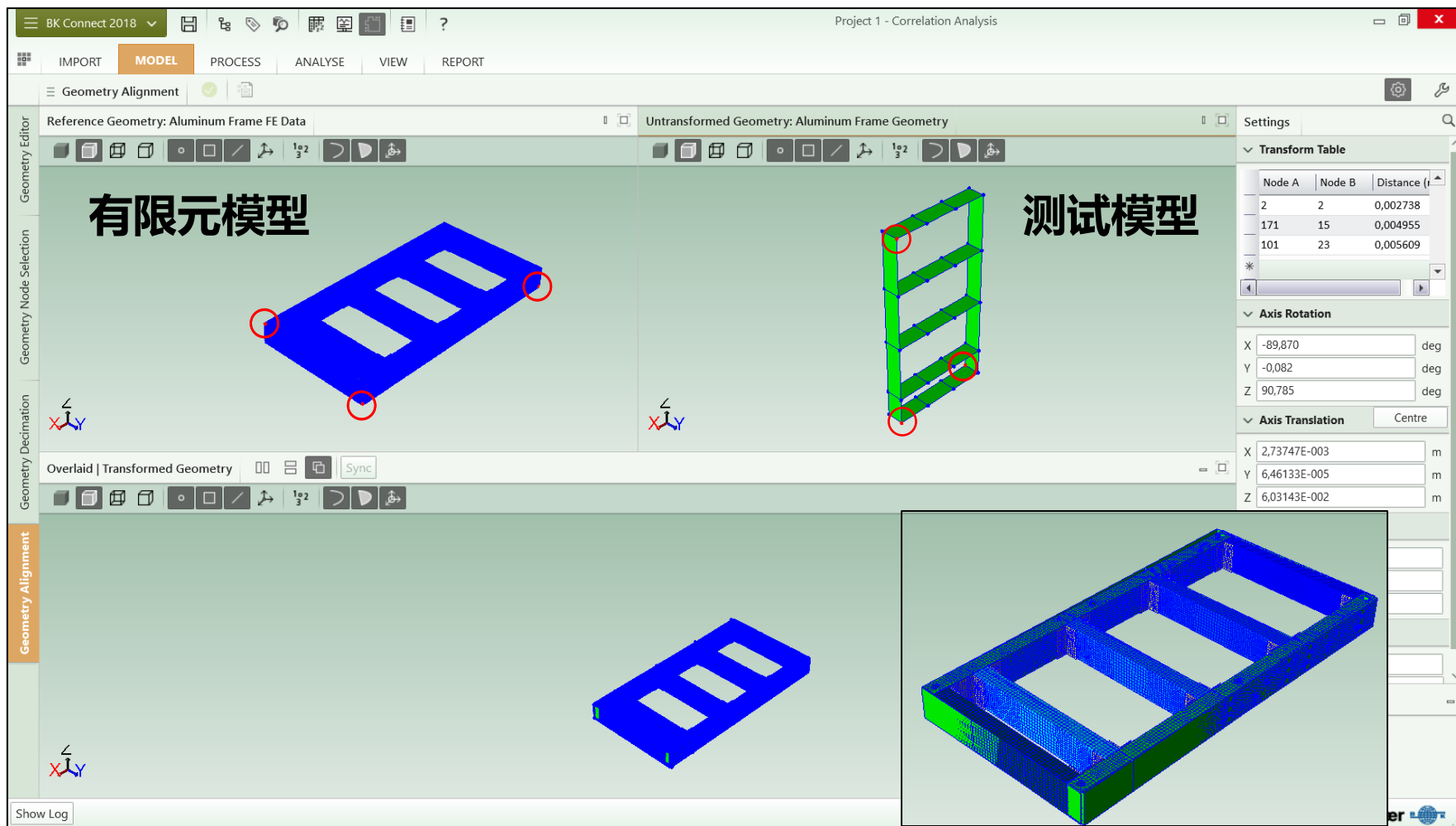




## 5. 模型相关性分析 (Model Correlation)

强大且易用的测试-有限元的集成工具

- 方便的几何匹配

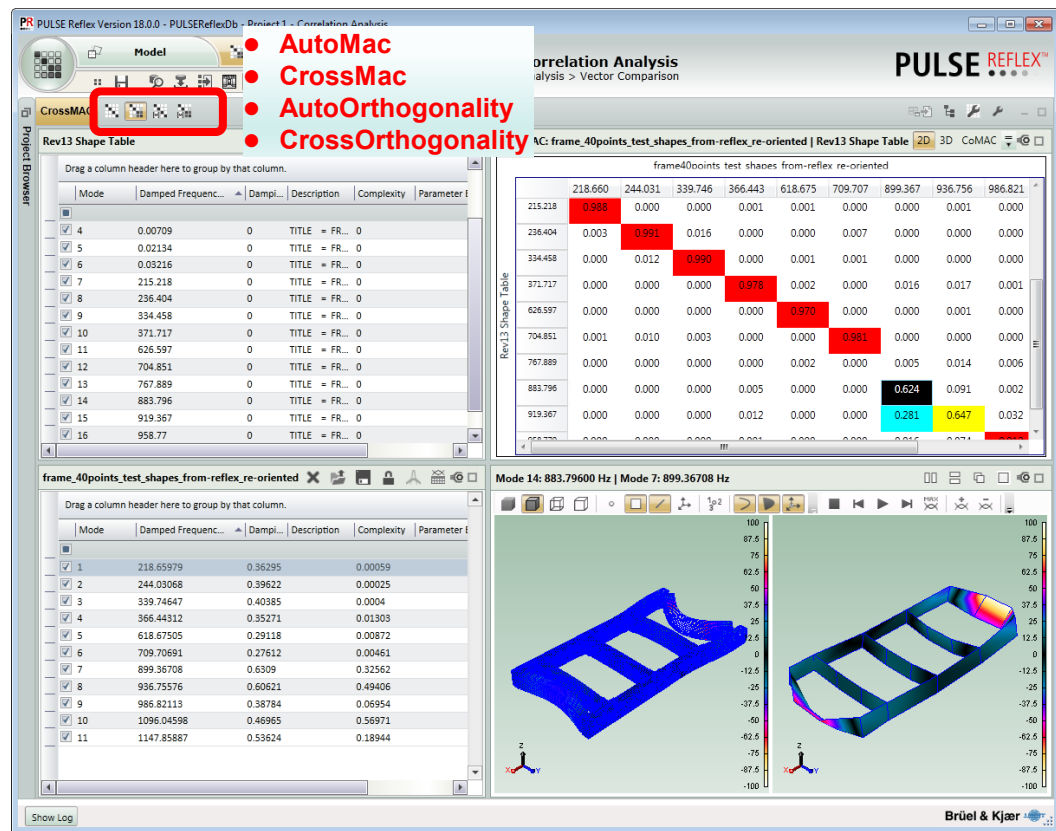
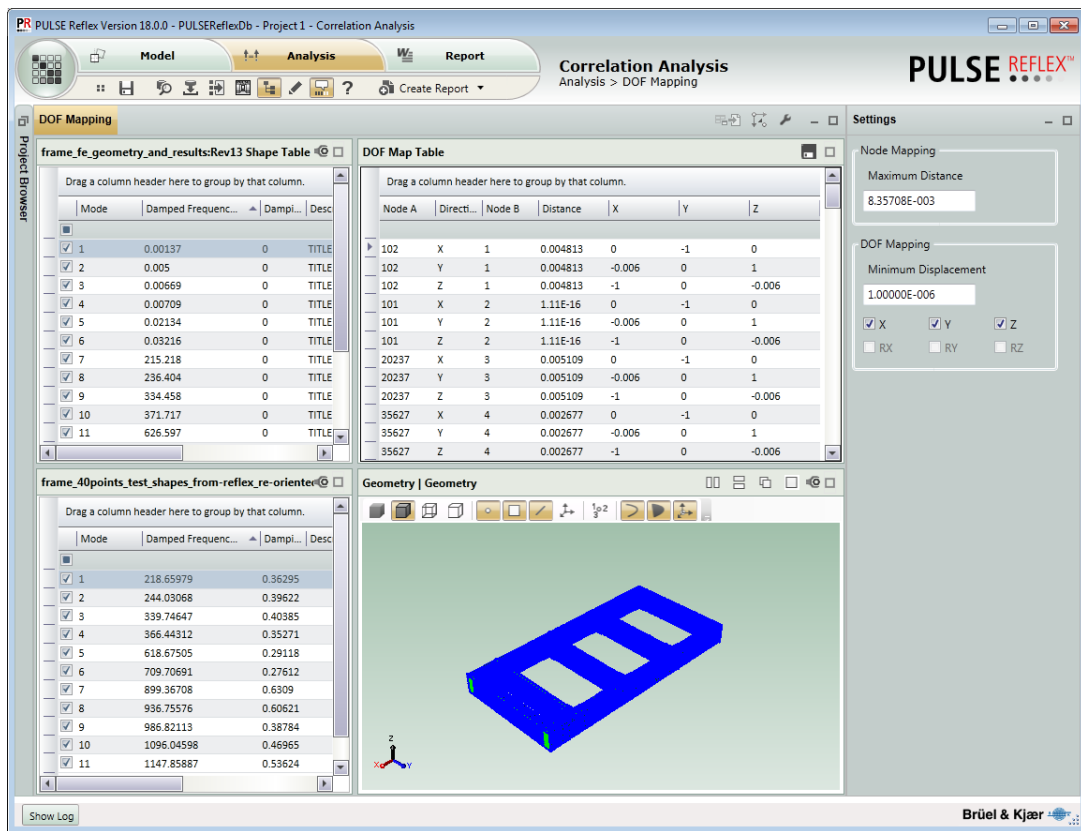


## 5. 模型相关性分析 (Model Correlation)

强大且易用的测试-有限元的集成工具

● 自动的自由度(DOFs)匹配

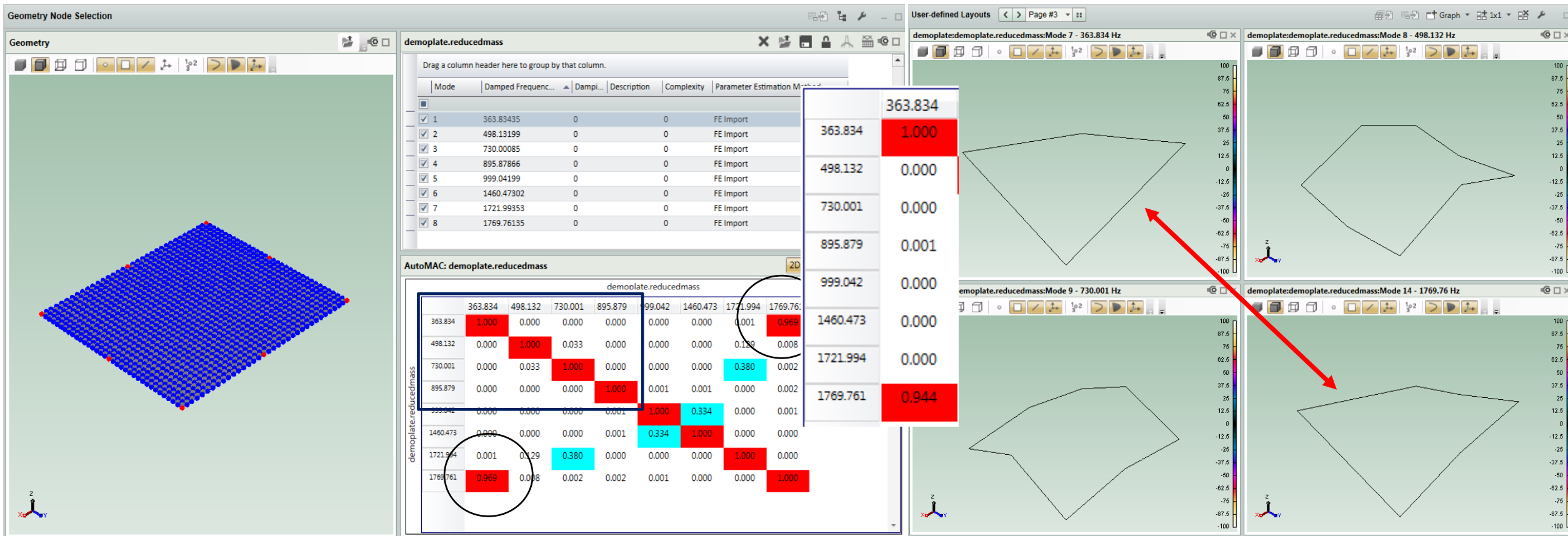
● 振型的定量比较和模态的自动匹配



# 5. 模型相关性分析 (Model Correlation)

强大且易用的测试-有限元的集成工具

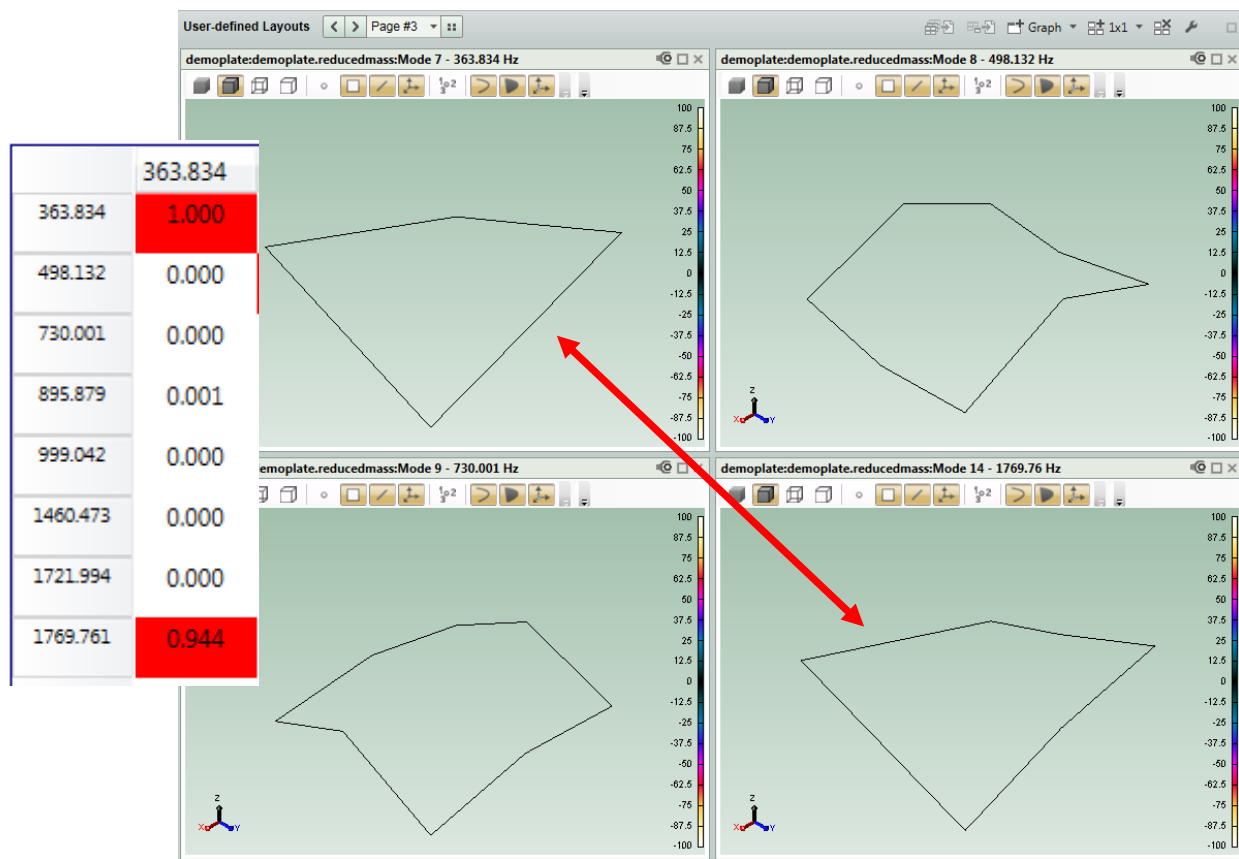
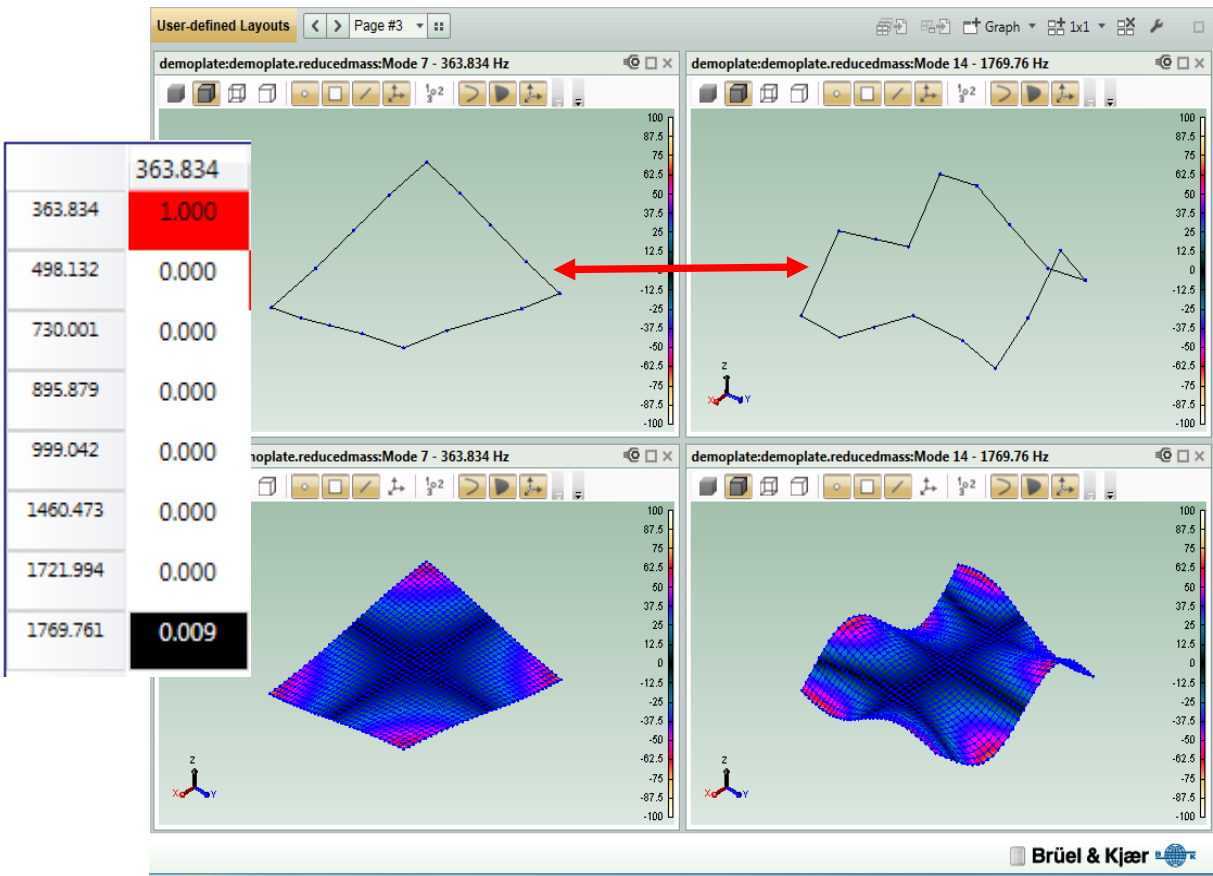
- 基于有限元模态结果的预实验



# 5. 模型相关性分析 (Model Correlation)

强大且易用的测试-有限元的集成工具

- 基于有限元模态结果的预实验(测点选择)



# 议程回顾

1. 结构动力学简介
2. 工作变形分析(Operating Deflection Shapes, ODS)
3. 试验模态分析(Experimental Modal Analysis, EMA)
4. 工作模态分析(Operating Modal Analysis, OMA)
5. 模型相关性分析(Model Correlation)