



# 大跨斜拉桥超长拉索多模态振动控制研究

汇报人：狄方殿

邮箱：fangdiandi@njtech.edu.cn

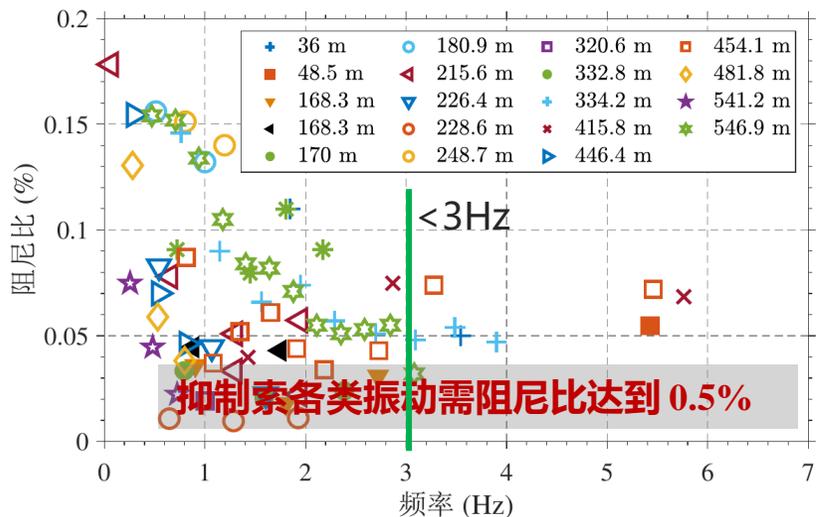
2022年12月29日

- **背景介绍**
- **多点分布阻尼器减振**
- **分布式辅助索及阻尼器减振**
- **总结展望**

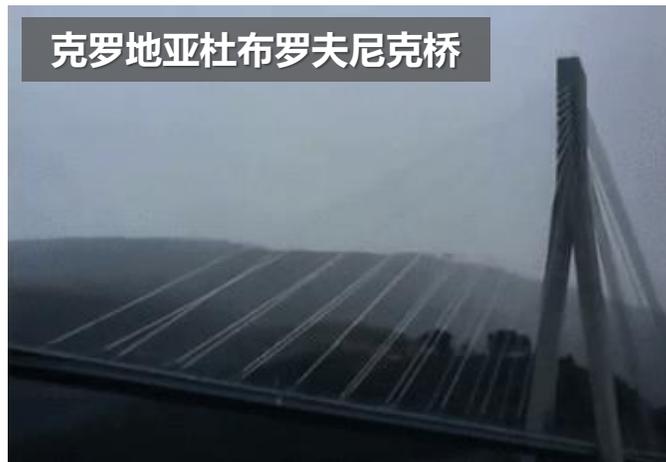
# 一、背景介绍

## 斜拉索振动

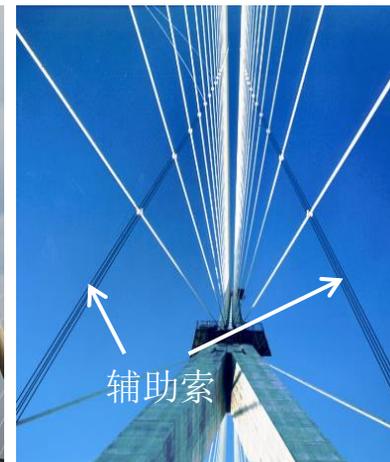
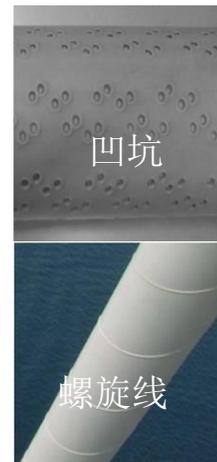
- 拉索自身**阻尼低**、**横向刚度小**、**质量轻**，易受环境激励作用而振动
- 常用减振措施：**气动措施**、**阻尼器措施**及**辅助索措施**（满足中短长度拉索减振需要）



斜拉索自身阻尼比统计



斜拉索振动现象



斜拉索减振措施

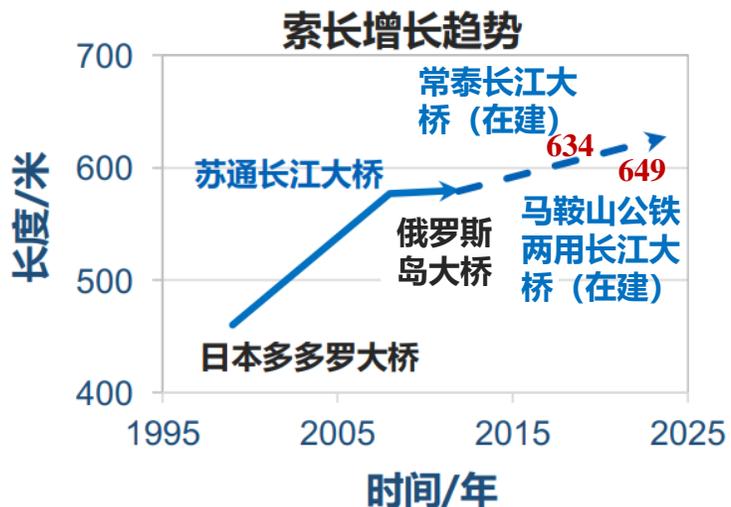
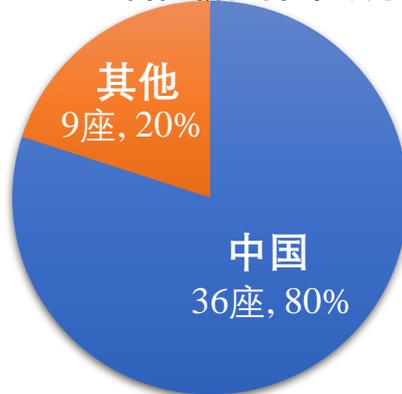
# 一、背景介绍

## ➤ 超长斜拉索振动

- 超长斜拉索振动呈现出**多模态**特征（基频 0.2Hz 附近，低阶需控模态超10阶）
- 超长斜拉索振动呈现出**多机理**特征（风雨振、涡激振动、**高阶涡振**）
- 传统减振方案难以满足超长斜拉索**宽频减振**需要



2021~2025 年世界主跨 500m 斜拉桥国内外对比



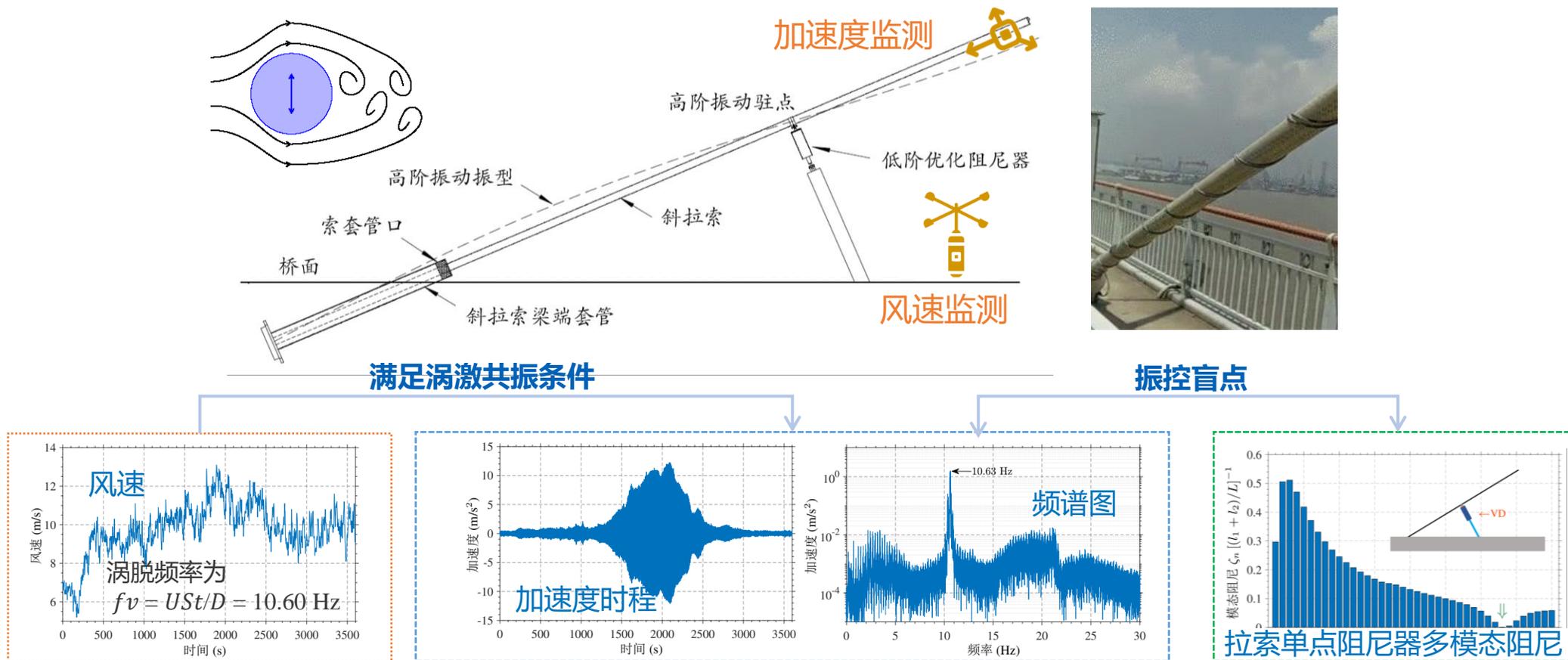
斜拉桥发展及拉索长度的变化



斜拉索高阶涡激振动

# 一、背景介绍

## ➤ 超长斜拉索高阶涡振



斜拉索高阶涡激振动机理分析

## 二、多点分布阻尼器减振

### 研究现状

- 仅关注低阶振动
- 基于简化模型（张紧弦模型）

拉索双点分布阻尼器系统研究文献总结

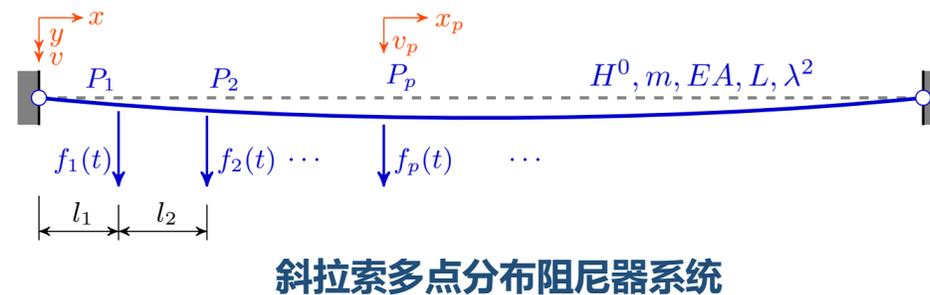
研究作者	年份	索模型	阻尼器模型	布置	研究手段
米田昌宏等	1995	张紧弦	弹簧+阻尼器/双阻尼器*	同端	理论
Takano 等	1997	张紧弦	弹簧+阻尼器/阻器+阻尼器*	同端	理论+试验
Main 等	2003	张紧弦	弹簧+阻尼器	同端	理论
Caracogolia 等	2007	张紧弦	双阻尼器	任意	理论
Fujino 等	2008	张紧弦	双阻尼器/阻尼器+HDR阻尼器	同/异端	理论
Zhou 等	2014	张紧弦	阻尼器+弹簧	任意	理论
Cu 等	2015	张紧弦	阻尼器+TMD	任意	理论
Cu 等	2015	张紧弦	双HDR阻尼器	任意	理论
Sun 等	2018	垂索	双非线性阻尼器	异端	理论（数值）
Wang 等	2019	张紧弦	双IMD	同/异端	理论

注：阻尼器-粘滞模型；阻尼器\*-Kelvin Voigt 模型

# 二、多点分布阻尼器减振

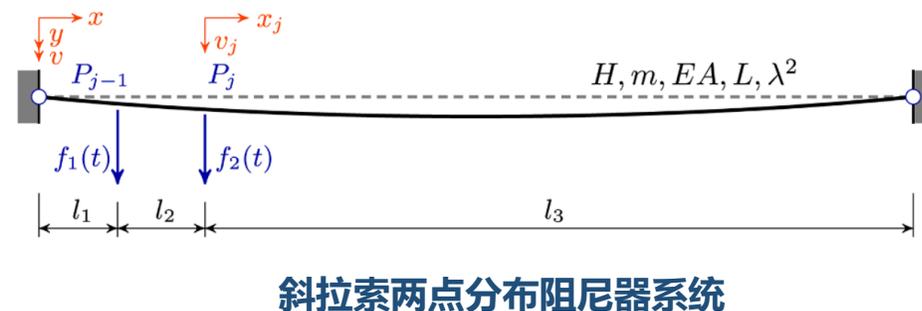
## 理论模型

- 考虑斜拉索垂度效应
- 采用复模态分析方法建立拉索多点分布阻尼器系统通用模型
- 构建了模型数值和解析求解方法
  - 推导拉索-双阻尼器系统特征频率方程 (数值求解)
  - 推导系统前几阶模态阻尼比计算的解析公式



## 动力特性分析

- 阻尼器同端安装
- 阻尼器异端安装

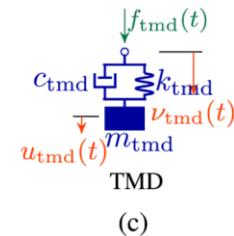
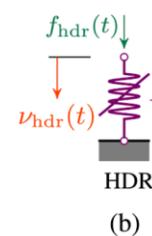
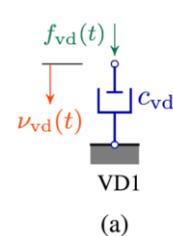
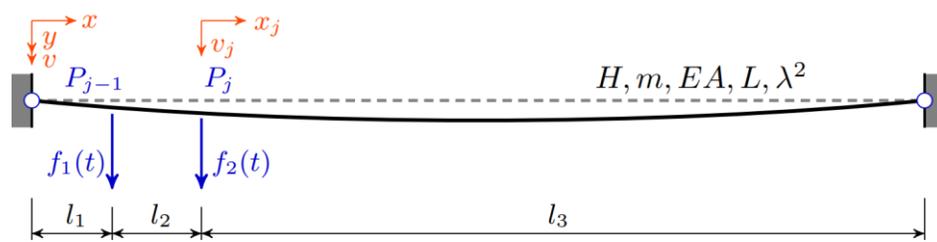


Di F, Sun L, Chen L. Suppression of vortex-induced high-mode vibrations of a cable-damper system by an additional damper. *Engineering Structures*, 2021, 242: 112495.

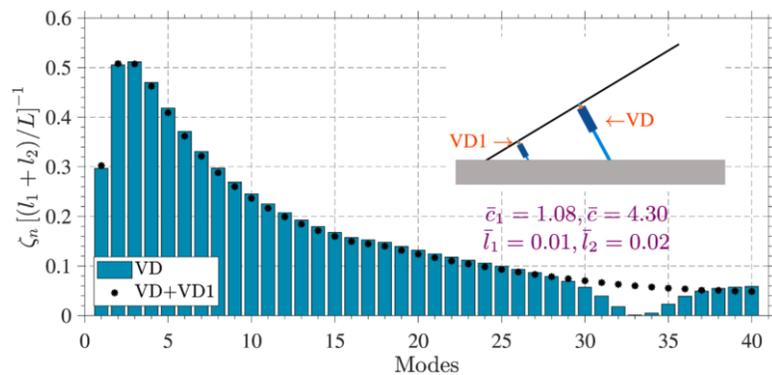
Di F, Sun L, Chen L. Cable vibration control with internal and external dampers: Theoretical analysis and field test validation. *Smart Structures and Systems*, 2020, 26(5): 575-589.

# 二、多点分布阻尼器减振

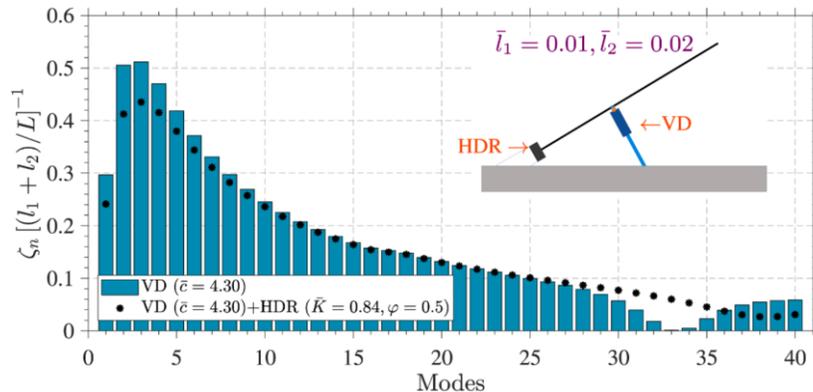
## 多模态减振



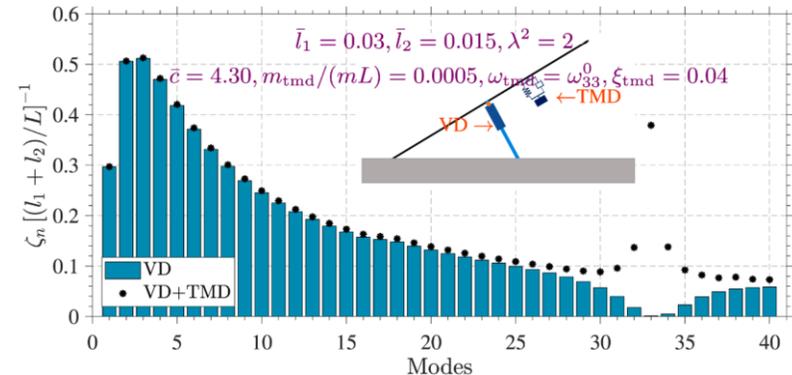
斜拉索-双阻尼器系统模型



双粘滞阻尼器



粘滞阻尼器+HDR阻尼器



粘滞阻尼器+TMD

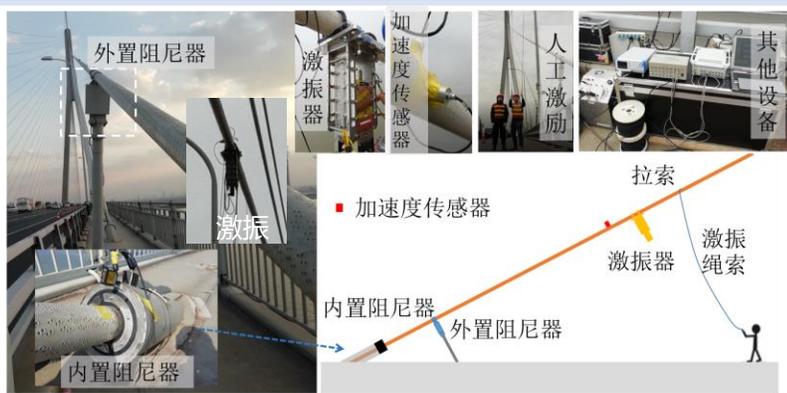
斜拉索-双阻尼器系统多模态阻尼分布

# 二、多点分布阻尼器减振

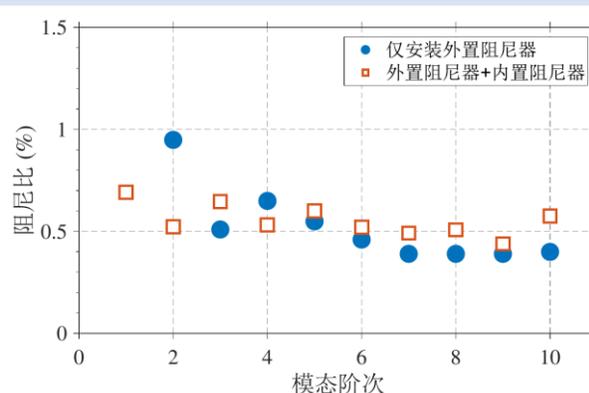
## ➤ 试验研究—振动自由衰减测试



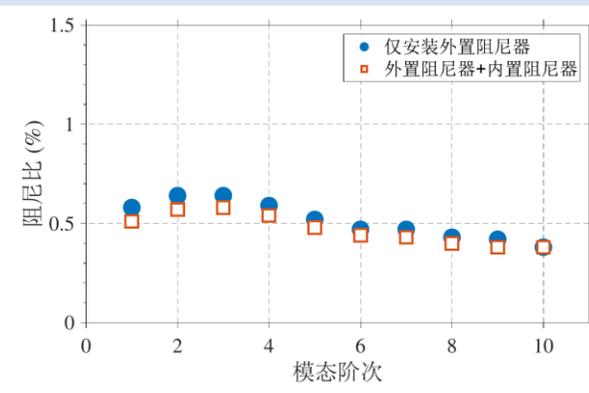
阻尼器单体试验



斜拉索内外置阻尼器系统实桥试验



试验结果

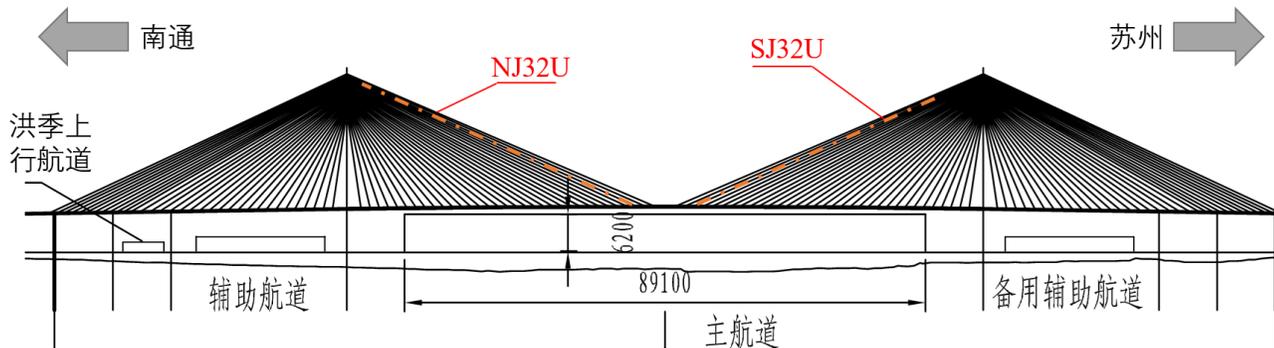


理论结果

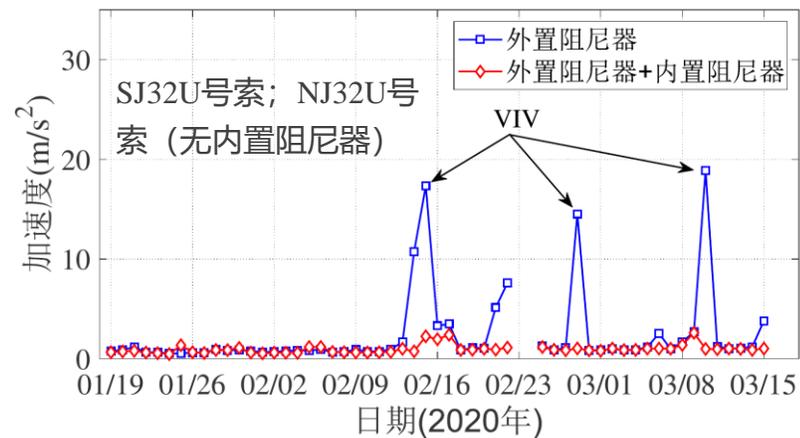
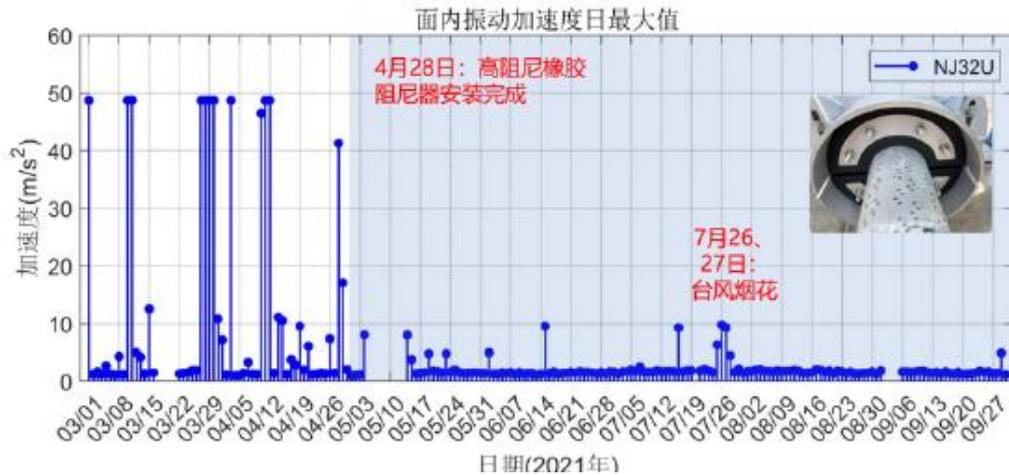
# 二、多点分布阻尼器减振

## ➤ 试验研究—振动监测

监测拉索布置



监测结果



## 二、多点分布阻尼器减振

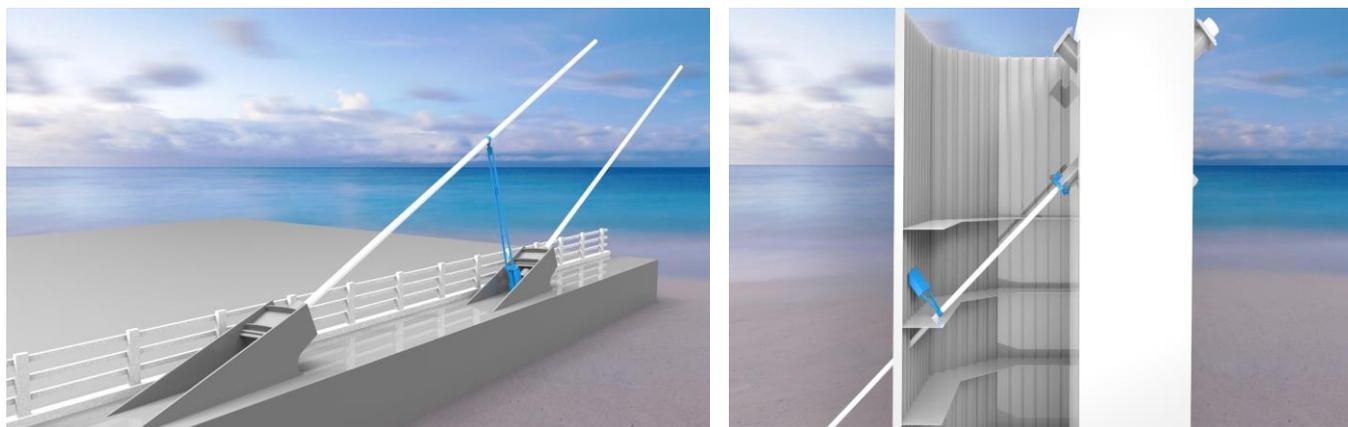
### ► 工程应用



苏通长江大桥



沪苏通长江大桥



常泰长江大桥 (在建)

# 三、分布式辅助索及阻尼器减振

## 研究现状

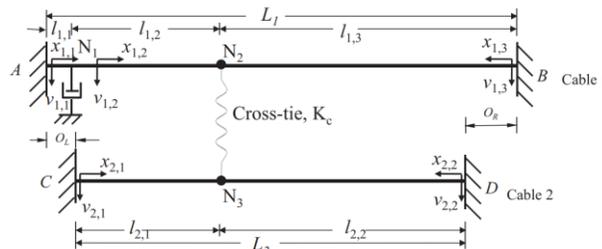
### 工程问题

- 梁端或塔端多阻尼器**安装困难**
- 索**锚拉板**形式锚固导致端部阻尼器**支架高**
- 索网易出现**局部振动** (Fred Hartman 桥)

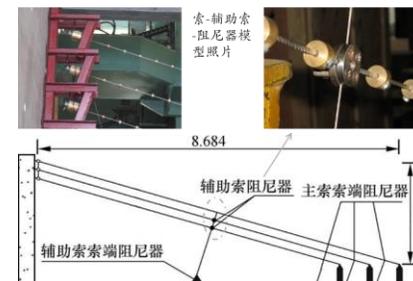


### 研究现状

- 缺少精细化、高效、通用型理论模型
- 缺少试验研究，特别是足尺试验
- 尚无针对复杂系统减振优化设计方法



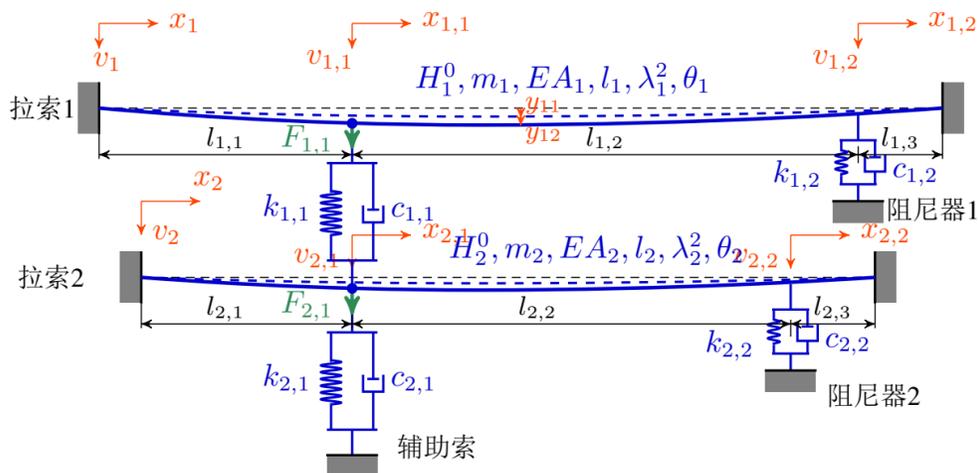
简化模型



缩尺试验

# 三、分布式辅助索及阻尼器减振

## 理论模型—复模态方法



双索分布式辅助索及阻尼器系统模型

复模态方法

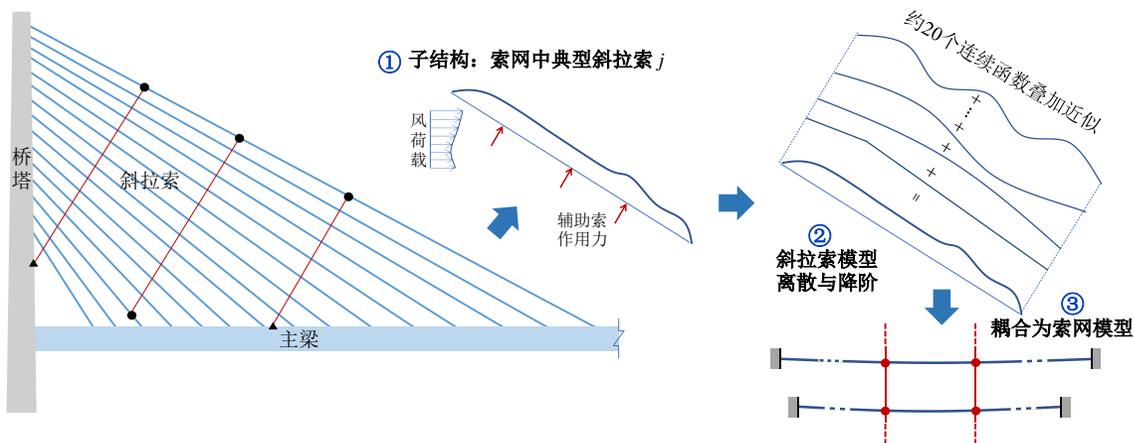
系统的特征频率方程

$$\begin{aligned}
 0 = & \theta_1 \theta_2 + 2(\theta_1 \Xi_{2,1} \rho + \theta_2 \Xi_{1,1}) \xi_{1,1} + 2\theta_2 \Xi_{1,3} \xi_{1,2} + 2\theta_1 \Xi_{2,1} \xi_{2,1} \\
 & + 2\theta_1 \Xi_{2,3} \xi_{2,2} + 4(\Xi_{1,3} \Xi_{2,1} \rho + \theta_2 \Lambda_1) \xi_{1,1} \xi_{1,2} + 4(\Xi_{1,1} \Xi_{2,3} + \theta_1 \Lambda_2 \rho) \xi_{1,1} \xi_{2,2} \\
 & + 4\Xi_{1,1} \Xi_{2,1} \xi_{1,1} \xi_{2,1} + 4\Xi_{1,3} \Xi_{2,1} \xi_{1,2} \xi_{2,1} + 4\Xi_{1,3} \Xi_{2,3} \xi_{1,2} \xi_{2,2} + 4\theta_1 \Lambda_2 \xi_{2,1} \xi_{2,2} \\
 & + 8\Xi_{2,1} \Lambda_1 \xi_{1,1} \xi_{1,2} \xi_{2,1} + 8(\Xi_{1,3} \Lambda_2 \rho + \Xi_{2,3} \Lambda_1) \xi_{1,1} \xi_{1,2} \xi_{2,2} \\
 & + 8\Xi_{1,1} \Lambda_2 \xi_{1,1} \xi_{2,1} \xi_{2,2} + 8\Xi_{1,3} \Lambda_2 \xi_{1,2} \xi_{2,1} \xi_{2,2} + 16\Lambda_1 \Lambda_2 \xi_{1,1} \xi_{1,2} \xi_{2,1} \xi_{2,2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \theta_j = & \sin \frac{\beta_j L_j}{2} \left\{ \sin \frac{\beta_j L_j}{2} - \left[ \frac{\beta_j L_j}{2} - \frac{4}{\chi_j^2} \left( \frac{\beta_j L_j}{2} \right)^3 \right] \cos \frac{\beta_j L_j}{2} \right\} \bar{k}_{1,1} = \frac{k_{1,1} L_1}{H_1^0}, \bar{c}_{1,1} = \frac{c_{1,1}}{\sqrt{m_1 H_1^0}}, \bar{k}_{2,1} = \frac{k_{2,1} L_2}{H_2^0}, \bar{c}_{2,1} = \frac{c_{2,1}}{\sqrt{m_2 H_2^0}} \\
 \Xi_{j,1} = & \sin \frac{\beta_j (L_j - l_{j,1})}{2} \sin \frac{\beta_j l_{j,1}}{2} \left\{ \sin \frac{\beta_j L_j}{2} - \cos \frac{\beta_j l_{j,1}}{2} \cos \frac{\beta_j (L_j - l_{j,1})}{2} \left[ \frac{\beta_j L_j}{2} - \frac{4}{\chi_j^2} \left( \frac{\beta_j L_j}{2} \right)^3 \right] \right\} \\
 \bar{k}_{1,2} = & \frac{k_{1,2} L_1}{H_1^0}, \bar{c}_{1,2} = \frac{c_{1,2}}{\sqrt{m_1 H_1^0}}, \bar{k}_{2,2} = \frac{k_{2,2} L_2}{H_2^0}, \bar{c}_{2,2} = \frac{c_{2,2}}{\sqrt{m_2 H_2^0}} \\
 \xi_{1,1} = & \frac{\bar{k}_{1,1}}{\beta_1 L_1} \frac{1}{1 + \bar{h}_1} + i \bar{c}_{1,1} \frac{1}{\sqrt{1 + \bar{h}_1}}, \xi_{1,2} = \frac{\bar{k}_{1,2}}{\beta_1 L_1} \frac{1}{1 + \bar{h}_1} + i \bar{c}_{1,2} \frac{1}{\sqrt{1 + \bar{h}_1}} \\
 \xi_{2,1} = & \frac{\bar{k}_{2,1}}{\beta_2 L_2} \frac{1}{1 + \bar{h}_2} + i \bar{c}_{2,1} \frac{1}{\sqrt{1 + \bar{h}_2}}, \xi_{2,2} = \frac{\bar{k}_{2,2}}{\beta_2 L_2} \frac{1}{1 + \bar{h}_2} + i \bar{c}_{2,2} \frac{1}{\sqrt{1 + \bar{h}_2}} \\
 \rho = & \frac{H_1 \beta_1}{H_2 \beta_2} \\
 \Lambda_j = & \prod_{p=1}^3 \sin \frac{\beta_j l_{j,p}}{2} \left\{ \sin \frac{\beta_j L_j}{2} + \prod_{p=1}^3 \sin(\beta_j l_{j,p}) - \left[ \frac{\beta_j L_j}{2} - \frac{4}{\chi_j^2} \left( \frac{\beta_j L_j}{2} \right)^3 \right] \prod_{p=1}^3 \cos \frac{\beta_j l_{j,p}}{2} \right\}
 \end{aligned}$$

# 三、分布式辅助索及阻尼器减振

## 理论模型—数值方法



### ① 单索模型

$$m_j \ddot{v}_j(x_j, t) - H_j v_j'(x_j, t) + \frac{\chi_j^2 H_j}{L_j^3} \int_0^{L_j} v_j(\xi_j, t) d\xi_j = f_j(x_j, t) + \sum_{p=1}^{N_f(j)} f_{j,p} \delta(x_j - x_j^i)$$

辅助索预张力改变拉索刚度：静索力  $H_j$  和索垂度  $\chi_j^2$

### ② 模型降阶

$$v^{(j)}(\bar{x}_j, \bar{t}) \approx \sum_{n=1}^{N_m^{(j)}} \phi_{m,n}^{(j)}(\bar{x}_j) q_{m,n}^{(j)}(\bar{t}) + \sum_{p=1}^{N_c^{(j)}} \phi_{cor,p}^{(j)}(\bar{x}_j) q_{cor,p}^{(j)}(\bar{t})$$

拟静力修正保证精度 模态截断实现自由度缩减

### ③ 索网模型

$$\tilde{M} \ddot{q} + \tilde{C} \dot{q} + \tilde{K} q = f + g$$

子结构间连接力  
索网系统振动项 风荷载

### ④ 状态空间模型

$$\dot{Z} = AZ + G(f+g)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\tilde{M}^{-1} \tilde{K} & -\tilde{M}^{-1} \tilde{C} \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{M}^{-1} \end{bmatrix}$$

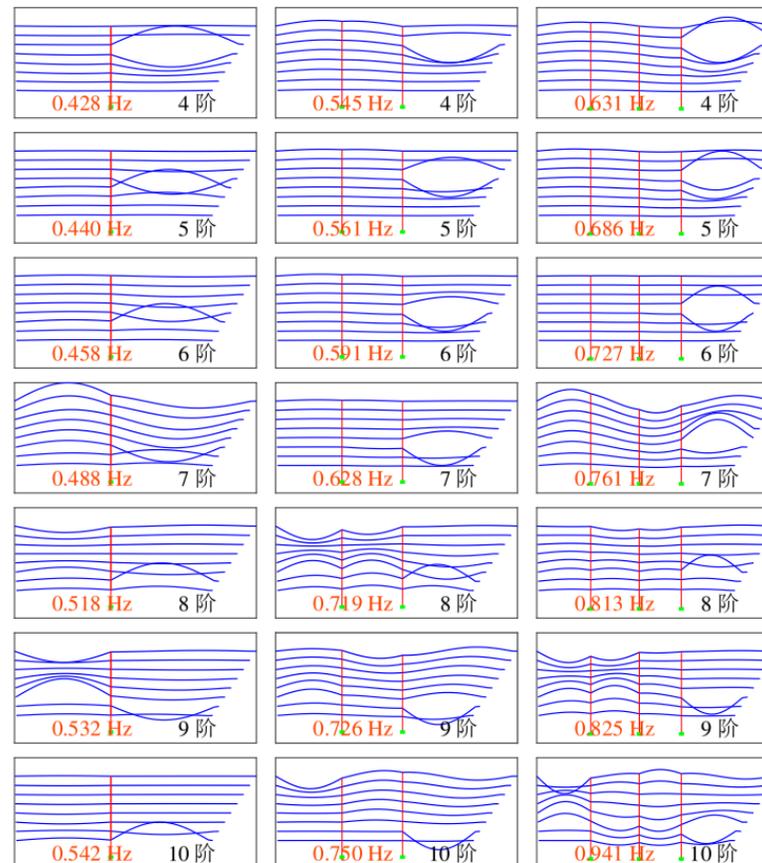
### ⑤ 求解

#### • 自由振动分析

状态矩阵 A  $\xrightarrow{\text{特征分析}}$  模态频率、阻尼和振型

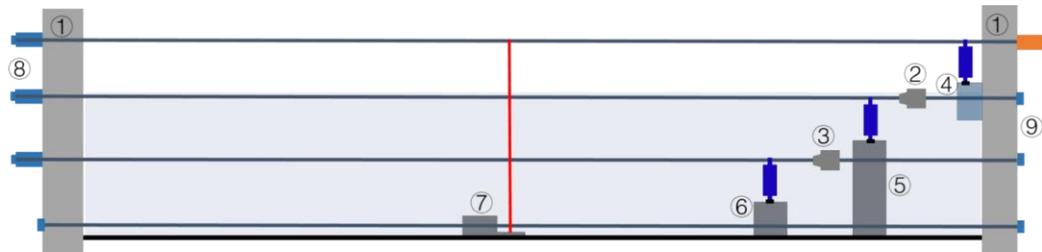
#### • 强迫振动分析

状态方程  $\xrightarrow{\text{数值积分}}$  受迫振动响应分析



# 三、分布式辅助索及阻尼器减振

## 足尺试验研究



试验布置



① 拉索支架



② 索2钳固横撑



③ 索3钳固横撑



④ 阻尼器1支架



⑤ 阻尼器2支架



⑥ 阻尼器3支架



⑦ 辅助索接地横撑



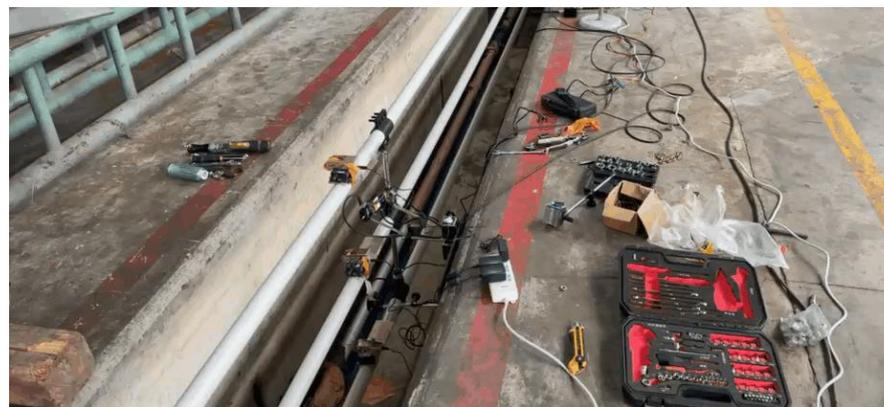
⑧ 索力计



⑨ 索张拉千斤顶

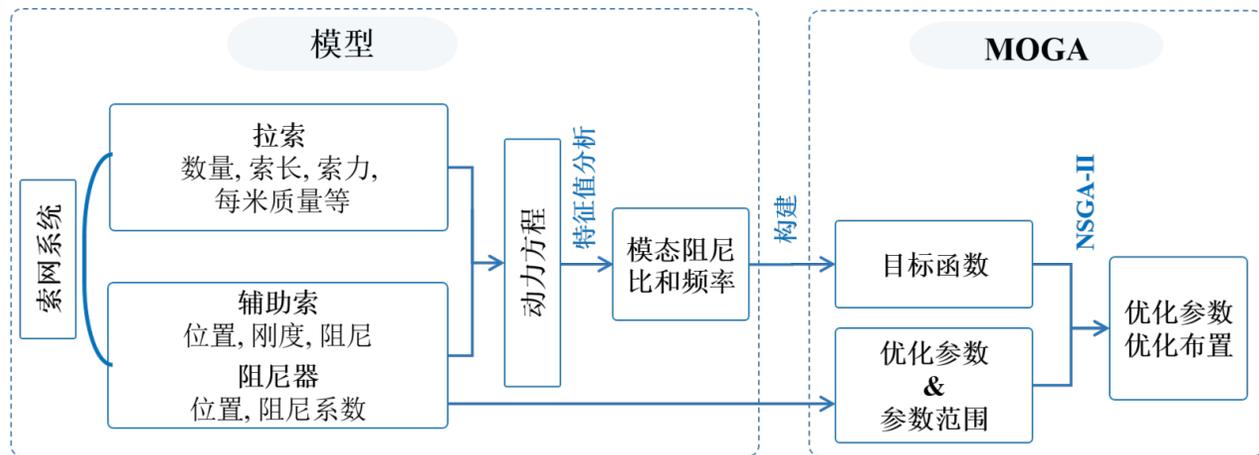
- 拉索水平张拉，锚固于支架①
- 通过嵌固横撑实现拉索的不同长度②和③
- 索端阻尼器采用支架安装④、⑤和⑥
- 辅助索接地横撑⑦

试验现场



# 三、分布式辅助索及阻尼器减振

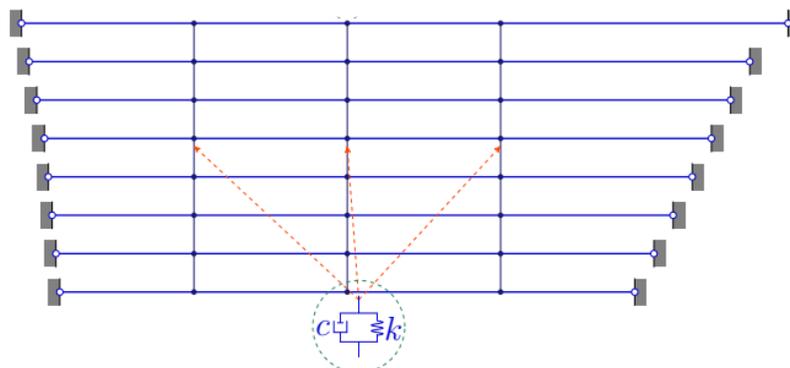
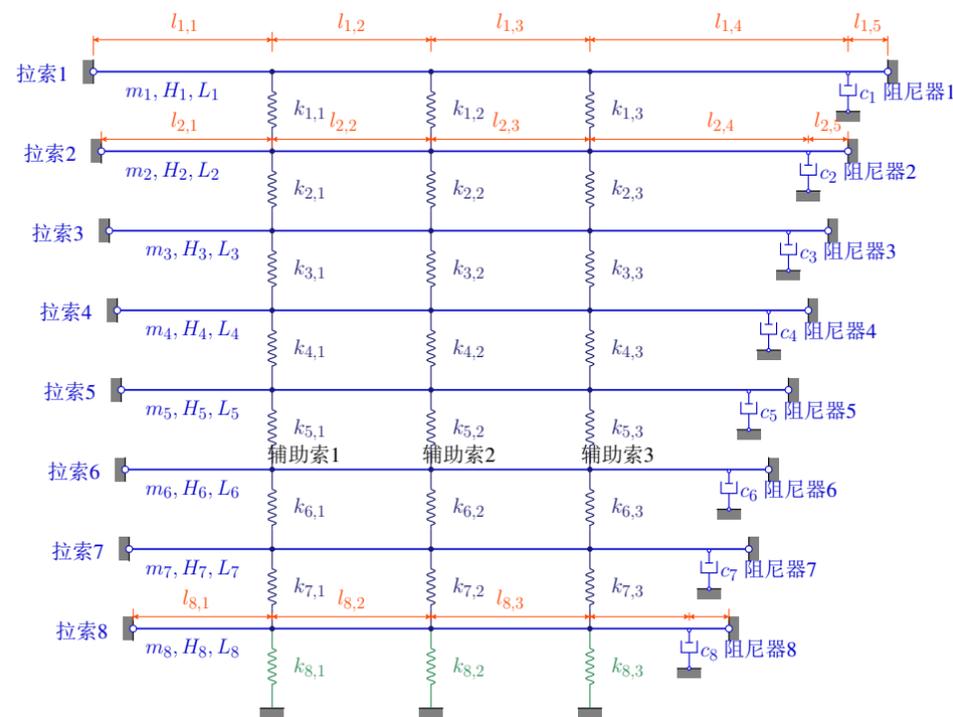
## 优化设计



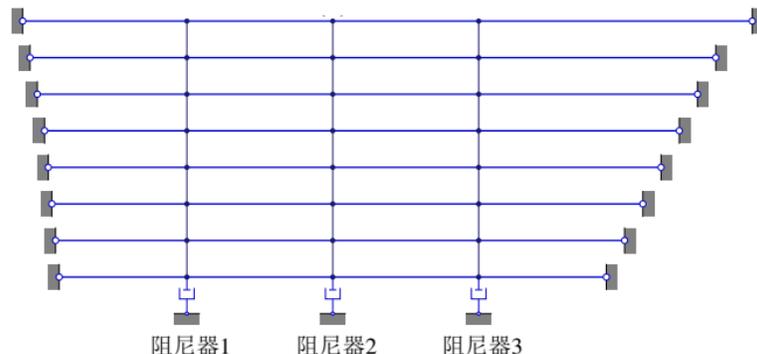
基于 MOGA 方法的优化流程图

Di F, Sun L, Chen L. Optimization of hybrid cable networks with dampers and cross-ties for vibration control via multi-objective genetic algorithm. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 166: 108454.

## 八索辅助索索端阻尼器系统布置



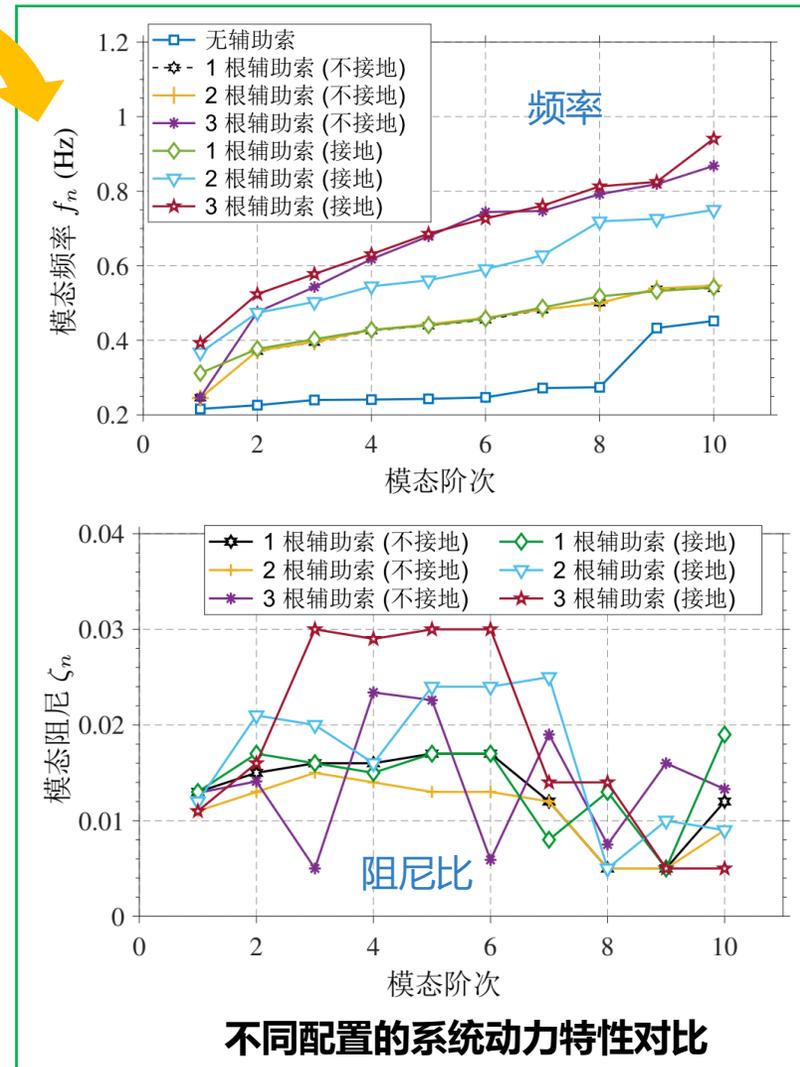
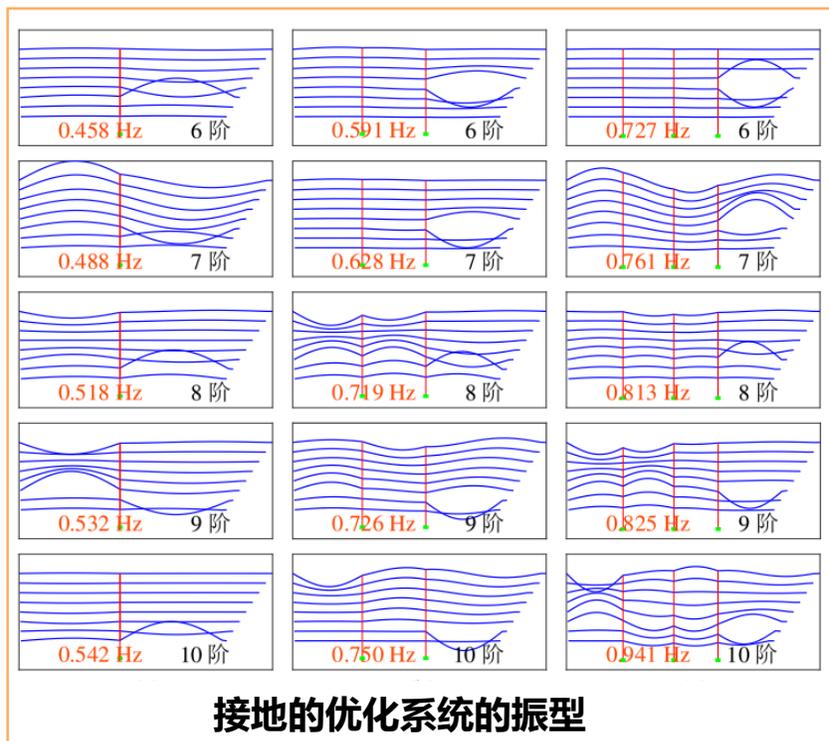
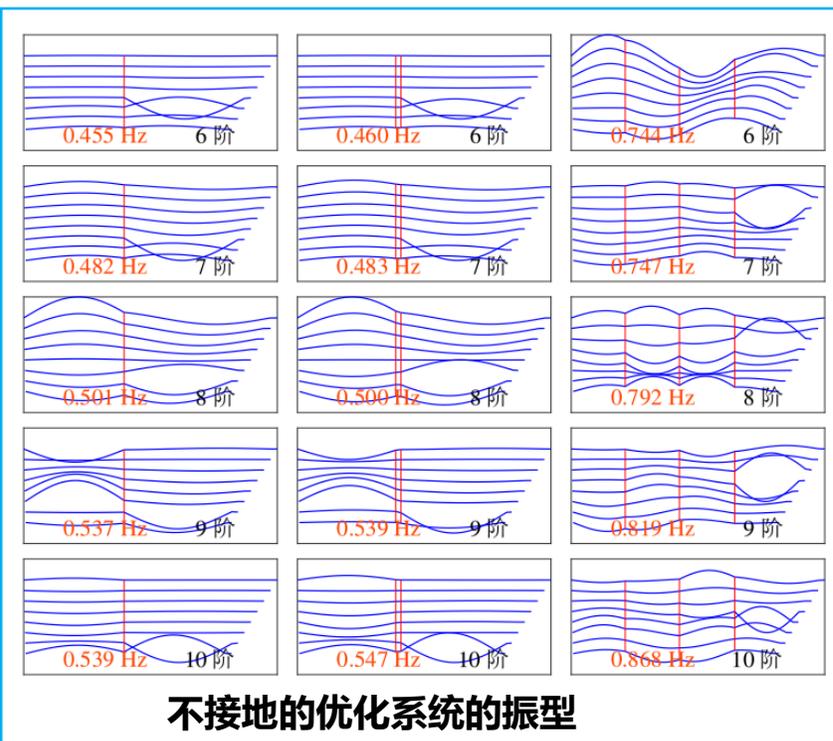
粘弹性辅助索



辅助索连接接地阻尼器

# 三、分布式辅助索及阻尼器减振

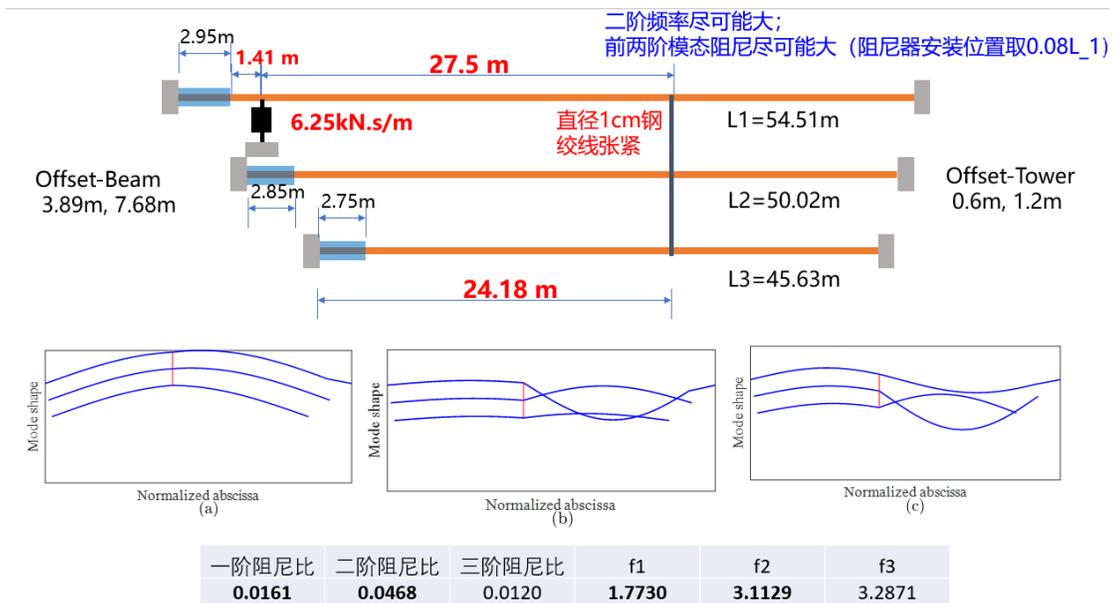
## 优化设计



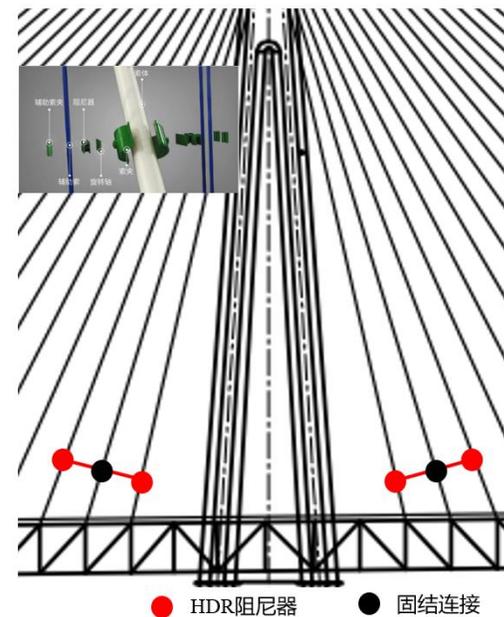
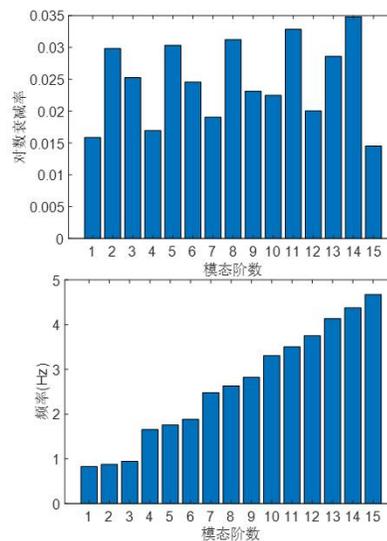
- 增加辅助索数量有助于提升系统频率
- 辅助索接地对系统基频影响较大
- 辅助索数量越多，局部振动模态增加，各阶模态阻尼波动越大

# 三、分布式辅助索及阻尼器减振

## 工程应用



- 采用住友HDR阻尼器，一个连接点安装4个
- 辅助索安装在S3号索梁端0.1L处，垂直各索连接



# 四、结论与展望

## ➤ 主要结论

- 斜拉索**双点分布阻尼器**可以有效解决斜拉索-阻尼器系统**高阶涡激振动**
- **分布式辅助索及阻尼器**方法对于超长斜拉索减振具有优势

## ➤ 研究展望

- 辅助索与斜拉索连接处安装阻尼装置

不同辅助索减振措施存在的主要问题

措施	主要存在问题
传统辅助索	提供阻尼不足、局部振动频发
辅助索和索端阻尼器	对未安装阻尼器索段振动无法控制
辅助索以阻尼器锚固	对复杂索网系统局部索段振控困难
高耗能辅助索	尚无合适材料
辅助索串联阻尼器	实际应用存在辅助索断开的风险
辅助索与主索连接处安装阻尼装置	研究不足



# 谢谢！请大家批评指正！

汇报人：狄方殿

2022年12月29日