

第二十二届全国结构风工程学术会议暨第八届全国风工程研究生论坛

2025.07.27 · 重庆

国家自然科学基金青年学生基础研究项目 (524B2127)



# 大跨桥梁涡振非线性能量阱惯容控制 最优设计方法

谢瑞洪<sup>a, c</sup>, 许坤<sup>b</sup>, Muhammet Calayir<sup>c</sup>, Oya Mercan<sup>c</sup>, 韩廷枢<sup>a</sup>, 赵林<sup>a</sup>

<sup>a</sup> 同济大学 防灾减灾全国重点实验室

<sup>b</sup> 北京工业大学 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室

<sup>c</sup> 多伦多大学 土木与矿业工程系



# 汇报 提纲

01 | 研究背景

02 | 理论解析算法

03 | 最优设计模型

04 | 涡振控制性能

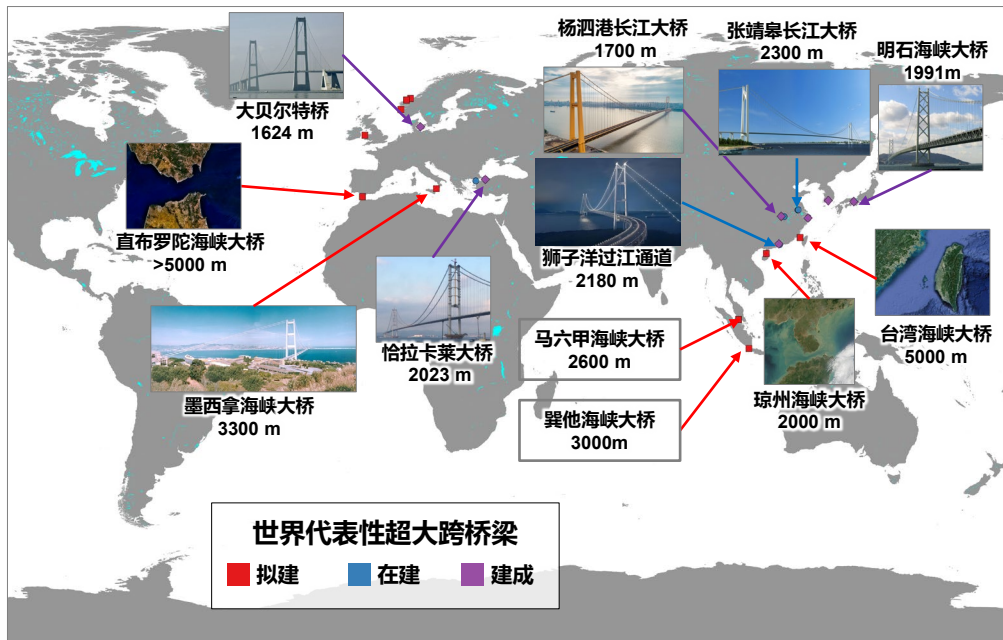
05 | 结论

—

# 研究背景



## 我国大跨桥梁建设与存量世界第一



排名	桥名	主跨	开通时间	国别
1	张靖皋长江大桥	2300m	2028	中国
2	狮子洋过江通道	2180m	2028	中国
3	加拉卡莱大桥	2023m	2022	土耳其
4	明石海峡大桥	1991m	1998	日本
5	燕矶长江大桥	1860m	2025	中国
6	双屿门特大桥	1768m	2027	中国
7	南京仙新过江通道	1760m	2024	中国
8	杨泗港长江大桥	1700m	2019	中国
9	南沙大桥	1688m	2019	中国
10	泸沽湖特大桥	1680m	2027	中国

**大跨桥梁持续发展是国家建设交通强国的重要支撑**

# 面临的挑战



- 桥梁风敏感性随**主梁跨度提升**、**断面钝化**显著提升
- 风致振动**危害桥梁与行车安全**

## 桥梁跨度提升



赵州桥跨度37米



张靖皋大桥跨度2300米

## 断面形式钝化



西堠门大桥开槽箱梁



狮子洋过江通道双层桥面板

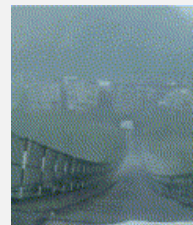
风敏感性提升



## 危害桥梁与行车安全



塔科马大桥颤振



牛角岩吊桥颤振



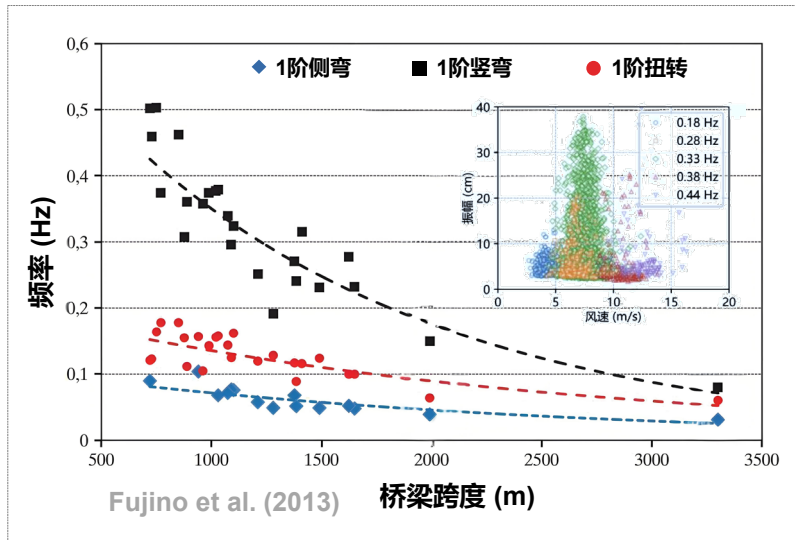
虎门大桥涡振



西堠门大桥涡振

# 大跨桥梁抗风性能亟需提升!

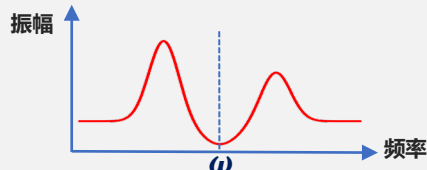
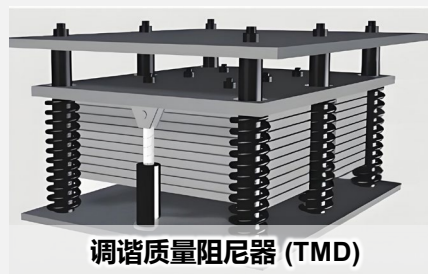
## 大跨桥梁风致振动控制的发展与瓶颈



**低频与多模态风致振动**



**气动措施：寻优困难 普适性弱**



振动频率 (Hz)	静力行程 (m)
0.1	25
0.2	6.25

**机械措施：鲁棒性差 静力行程远超许用值**

**亟需突破的科学难题：大跨桥梁低频与宽频风致振动控制**

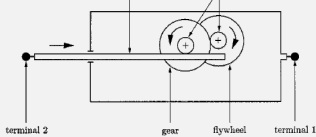
## 基于“惯容”的线性动力吸振器



Malcolm C. Smith

惯质**b**显著大于物理质量

$$f = b(\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2)$$



齿轮齿条式惯容

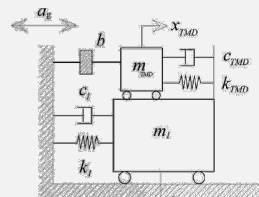
Malcolm C. Smith.  
2002

2002: 惯容提出

惯质**b**的引入使得TMDI轻量化



Agathoklis Giaralis



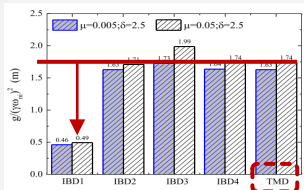
TMDI装置

Laurentiu Marian,  
Agathoklis Giaralis. 2014

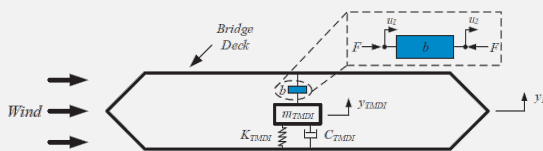
2014: 调谐质量惯容阻尼器 (TMDI) 提出

2019 - 至今: TMDI 桥梁风振控制

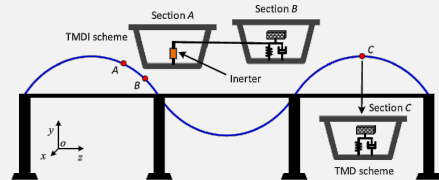
≈ 70% 静力行程削减!



Xu et al. 2020



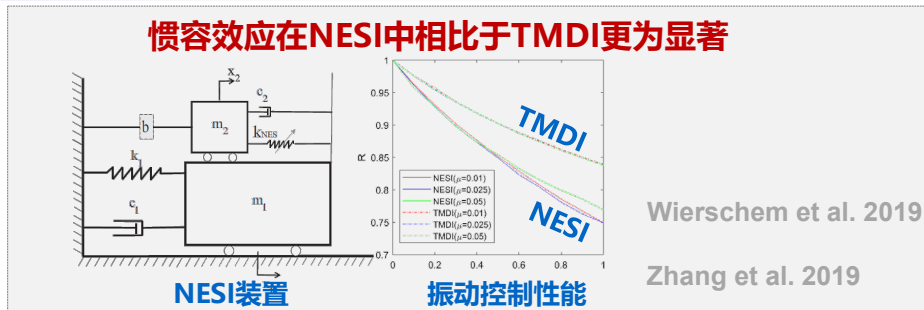
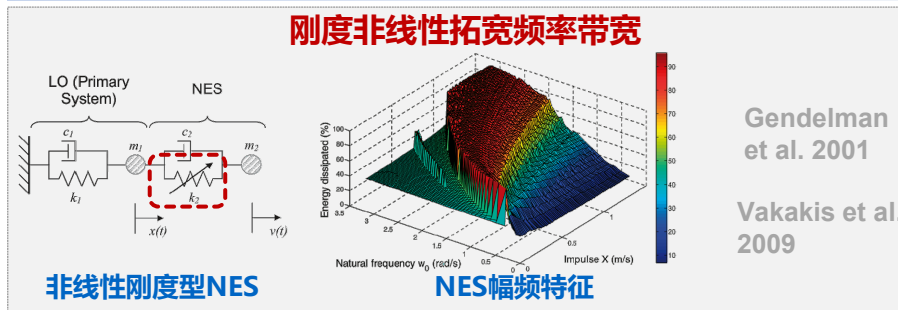
Xu et al. 2019



Dai et al. 2019

低频风振控制突破: 引入惯容大幅削减TMD静力行程

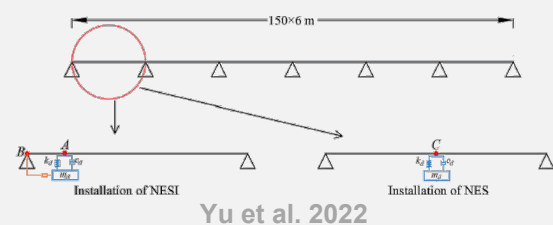
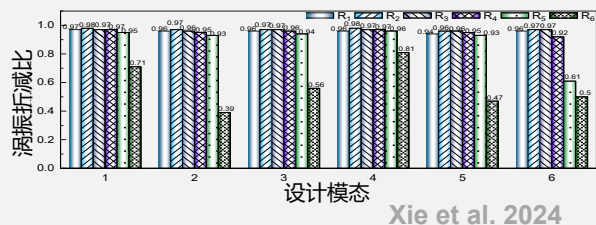
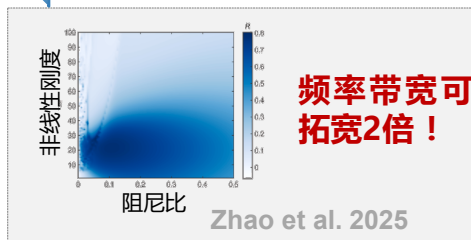
## 基于“惯容”的非线性能量阱



2001: 非线性能量阱 (NES) 发现

2019: 非线性能量阱惯容阻尼器 (NESI) 提出

2019 - 至今: NESI 桥梁风振控制



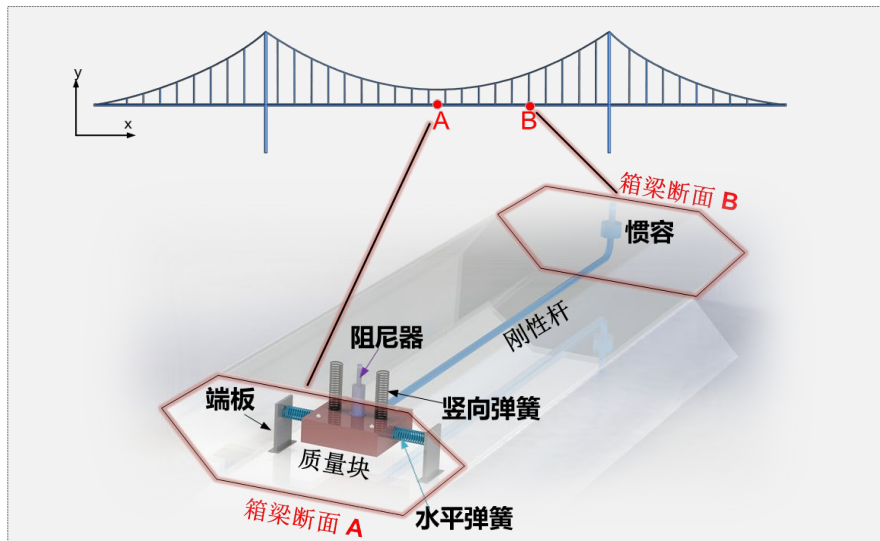
**NESI: 低、宽频抑振性能优异但缺乏参数设计策略**

二

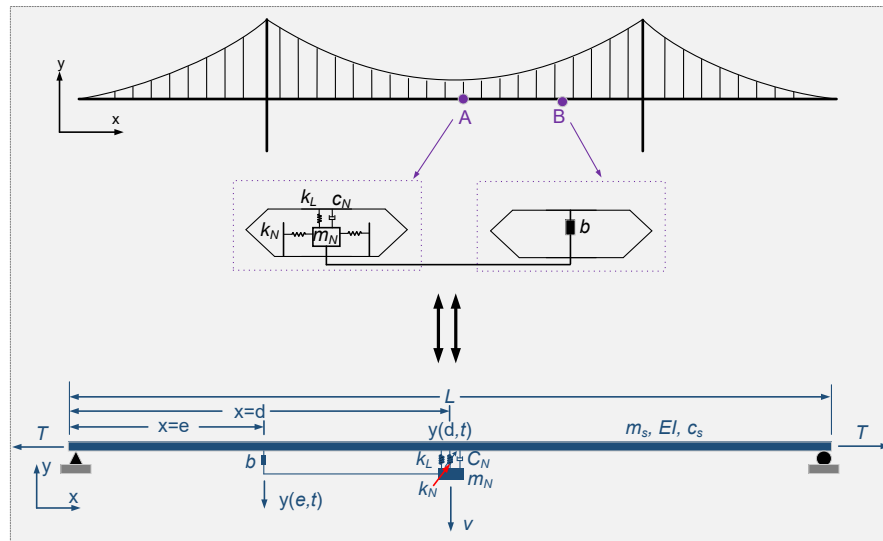
# 理论解析算法



## 控制系统物理与力学特征



大跨桥梁-NESI物理控制系统

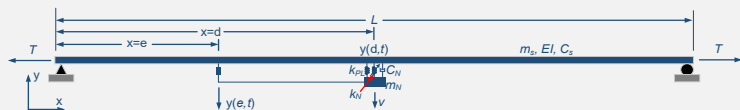


大跨桥梁-NESI等效力学系统

大跨桥梁-NESI耦合系统等效构建为张拉梁-NESI耦合系统

## 耦合系统广义动力学模型

### 桥梁-NESI风振控制理论框架



$$EIy_{xxxx}(x,t) + C_s y_t(x,t) + m_s y_{tt}(x,t) - T y_{xx}(x,t) + \{k_L[y(d,t) - v(t)] + k_N[y(d,t) - v(t)]^3 + c_N[y_t(d,t) - \dot{v}(t)]\}\delta(x-d) + b[y_{tt}(e,t) - \ddot{v}(t)]\delta(x-e) = F(x,t)$$

**Euler Bernoulli 梁模型**

$$m_N \ddot{v}(t) - k_L[y(d,t) - v(t)] - k_N[y(d,t) - v(t)]^3 - c_N[y_t(d,t) - \dot{v}(t)] - b[y_{tt}(e,t) - \ddot{v}(t)] = 0$$

$$F(x,t) = \frac{1}{2} \rho U^2 D \left[ Y_1 \left( 1 - \varepsilon \frac{\phi_v^2 a_v^2}{D^2} \right) \frac{\phi_v a_v}{U} \right]$$

**Scanlan 经验非线性模型**

VIV单模态振动



无量纲化

### 广义双自由度微分平衡通用动力学模型

$$A_p(\tau) - [\eta_1 - \eta_2 A_p^2(\tau)] \dot{A}_p(\tau) + \ddot{A}_p(\tau) + \{S_l[\phi_p(d)A_p(\tau) - V(\tau)] + S_n[\phi_p(d)A_p(\tau) - V(\tau)]^3 + 2\lambda[\phi_p(d)\dot{A}_p(\tau) - \dot{V}(\tau)]\} \phi_p(d) + \beta[\phi_p(e)\ddot{A}_p(\tau) - \ddot{V}(\tau)] \phi_p(e) = 0$$

**刚度非线性**

$$m \ddot{V}(\tau) - S_l[\phi_p(d)A_p(\tau) - V(\tau)] - S_n[\phi_p(d)A_p(\tau) - V(\tau)]^3 - 2\lambda[\phi_p(d)\dot{A}_p(\tau) - \dot{V}(\tau)] - \beta[\phi_p(e)\ddot{A}_p(\tau) - \ddot{V}(\tau)] = 0$$

$$\eta_1 = \frac{U_r}{4\pi m_r} \int_0^1 Y_1 \phi^2(lL) dl - 2\xi, \quad \eta_2 = \frac{U_r}{4\pi m_r} \int_0^1 Y_1 \varepsilon \phi^4(lL) dl$$

**Van der Pol 气动参数: 反映结构阻尼与气动阻尼**

# 大跨桥梁-NESI涡振控制耦合系统广义双自由度通用动力学模型

## 复变量平均 (CX-A) 法

引入复变量:  $\psi_1 = \dot{A} + jA$ 、 $\psi_2 = \dot{V} + jV$   
速度项 位移项

将复变量通过快-慢变量表征:  $\psi_1 = \underbrace{\varphi_1}_{\text{慢变量}} \underbrace{e^{j\tau}}_{\text{快变量}}$ 、 $\psi_2 = \varphi_2 e^{j\tau}$



主结构:  $A = \frac{\varphi_1 e^{j\tau} - \varphi_1^* e^{-j\tau}}{2j}$ ,  $\dot{A} = \frac{\varphi_1 e^{j\tau} + \varphi_1^* e^{-j\tau}}{2}$ ,  $\ddot{A} = \dot{\varphi}_1 e^{j\tau} + \frac{j}{2}(\varphi_1 e^{j\tau} - \varphi_1^* e^{-j\tau})$

NESI:  $V = \frac{\varphi_2 e^{j\tau} - \varphi_2^* e^{-j\tau}}{2j}$ ,  $\dot{V} = \frac{\varphi_2 e^{j\tau} + \varphi_2^* e^{-j\tau}}{2}$ ,  $\ddot{V} = \dot{\varphi}_2 e^{j\tau} + \frac{j}{2}(\varphi_2 e^{j\tau} - \varphi_2^* e^{-j\tau})$

将系统运动快慢分离: 快 (振荡项  $e^{j\tau}$ )、慢 (振幅项  $\varphi_1$ )

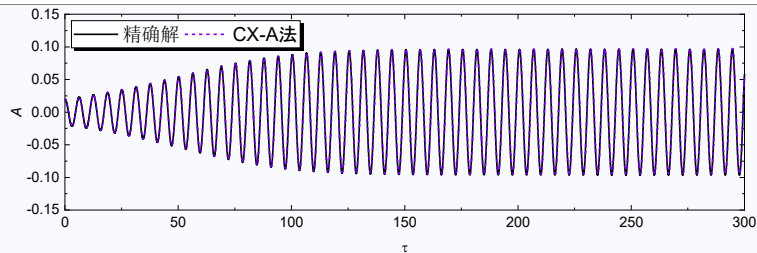
## 系统慢流动力学模型 (降阶模型)

$$\begin{aligned} & \left(1 + \beta\phi_e^2 - \frac{\beta^2\phi_e^2}{\mu + \beta}\right)\dot{\phi}_1 + \left(\frac{j}{2}\beta\phi_e^2 - \frac{\eta_1}{2}\right)\phi_1 - \frac{j}{2}\beta\phi_e\phi_2 + \frac{\eta_2}{8}\phi_1|\phi_1|^2 \\ & + \frac{\beta\phi_e}{\mu + \beta}\left\{\frac{j}{2}(\mu + \beta)\phi_2 - \frac{j}{2}\beta\phi_e\phi_1\right\} \\ & + \left(1 - \frac{\beta\phi_e}{\mu + \beta}\right)\left\{\left(\lambda - j\frac{S_l}{2}\right)(\phi_1 - \phi_2) - j\frac{3S_n}{8}(\phi_1 - \phi_2)|\phi_1 - \phi_2|^2\right\} = 0 \end{aligned}$$

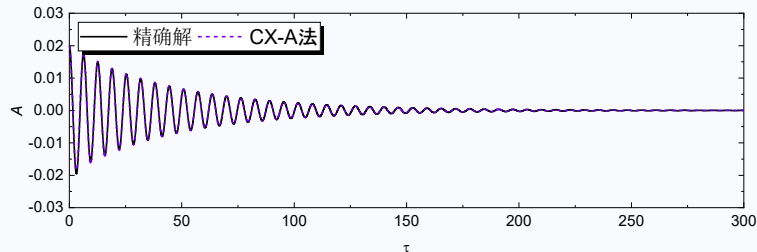
$$\begin{aligned} & \left(\mu + \beta - \frac{\beta^2\phi_e^2}{1 + \beta\phi_e^2}\right)\dot{\phi}_2 + \frac{j}{2}(\mu + \beta)\phi_2 - \frac{j}{2}\beta\phi_e\phi_1 \\ & + \frac{\beta\phi_e}{1 + \beta\phi_e^2}\left\{\left(\frac{j}{2}\beta\phi_e^2 - \frac{\eta_1}{2}\right)\phi_1 - \frac{j}{2}\beta\phi_e\phi_2 + \frac{\eta_2}{8}\phi_1|\phi_1|^2\right\} \\ & - \left(1 - \frac{\beta\phi_e}{1 + \beta\phi_e^2}\right)\left\{\left(\lambda - j\frac{S_l}{2}\right)(\phi_1 - \phi_2) - j\frac{3S_n}{8}(\phi_1 - \phi_2)|\phi_1 - \phi_2|^2\right\} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_e(\phi_1 e^{j\tau}) &= \dot{A}, \quad R_e(\phi_2 e^{j\tau}) = \dot{V} \quad \leftarrow \text{系统振动速度} \\ I_m(\phi_1 e^{j\tau}) &= A, \quad I_m(\phi_2 e^{j\tau}) = V \quad \leftarrow \text{系统振动位移} \end{aligned}$$

1阶微分平衡系统



涡振存续



涡振消除

**降阶模型能够准确捕捉原始动力系统响应**

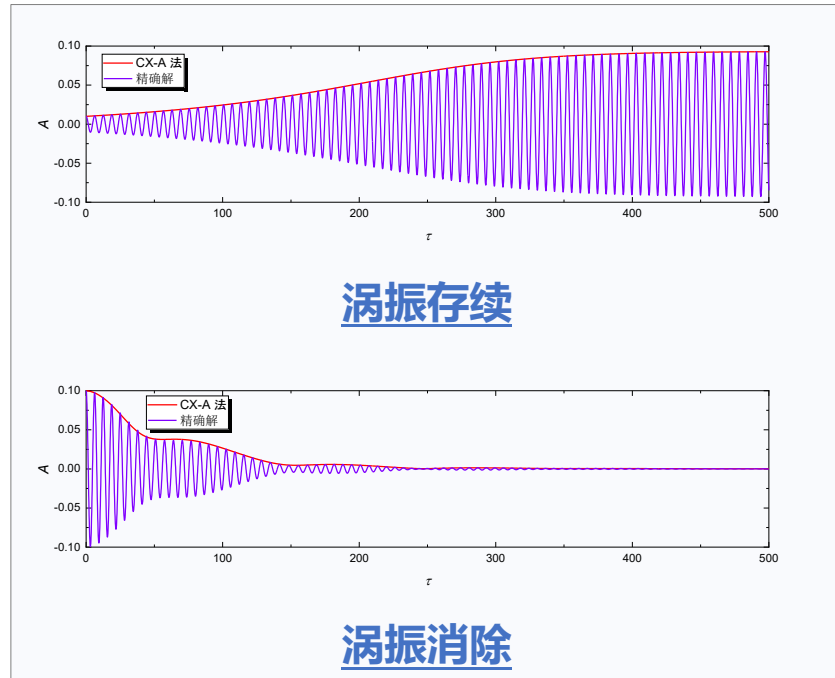
## 系统稳态动力学模型 (振幅识别)

$$\varphi_i = \alpha_i e^{j\theta_i}, \quad \alpha_i, \theta_i \in \mathbb{R}, \quad i = 1, 2 \quad \alpha_i: \text{振幅}; \theta_i \text{相位}$$
$$\Phi \equiv \theta_1 - \theta_2 \quad \Phi: \text{相位差}$$

$$\dot{\alpha}_1 = (a_2 - a_4 - a_3\alpha_1^2)\alpha_1 + a_4\alpha_2\cos\Phi - [a_5\alpha_2 + a_6\alpha_2(\alpha_1^2 + \alpha_2^2)]\sin\Phi + a_6\alpha_1\alpha_2^2\sin 2\Phi \quad \text{主结构}$$

$$\dot{\alpha}_2 = [b_3\alpha_1 - b_4\alpha_1^3 + b_5\alpha_1]\cos\Phi - b_5\alpha_2 + [b_2\alpha_1 + b_6\alpha_1 + b_7\alpha_1(\alpha_1^2 + \alpha_2^2)]\sin\Phi - b_7\alpha_1^2\alpha_2\sin 2\Phi \quad \text{NESI}$$

$$\alpha_1\alpha_2\dot{\Phi} = (a_5 - a_1 - b_6 + b_1)\alpha_1\alpha_2 + (b_2\alpha_1^2 + b_6\alpha_1^2 - a_5\alpha_2^2)\cos\Phi - (a_4\alpha_2^2 + b_3\alpha_1^2 - b_4\alpha_1^4 + b_5\alpha_1^2)\sin\Phi + (\alpha_1^2 + \alpha_2^2 - 2\alpha_1\alpha_2\cos\Phi)[a_6(\alpha_1\alpha_2 - \alpha_2^2\cos\Phi) + b_7(\alpha_1^2\cos\Phi - \alpha_1\alpha_2)] \quad \text{相位差}$$



稳态动力学模型能够准确捕捉系统振幅

三

# 最优设计模型



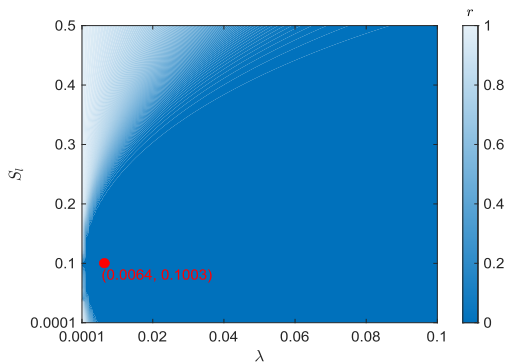
## 目标优化函数及参数演变规律

性能指标

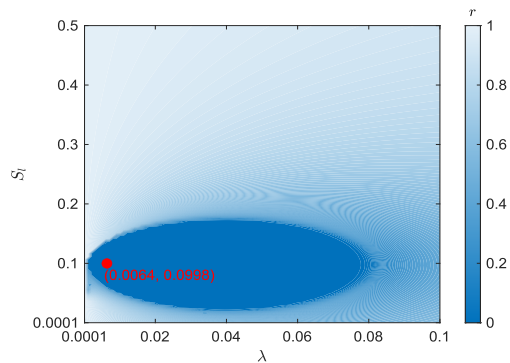
$$r = |\alpha_1^c|/|\alpha_1^u|$$

优化函数

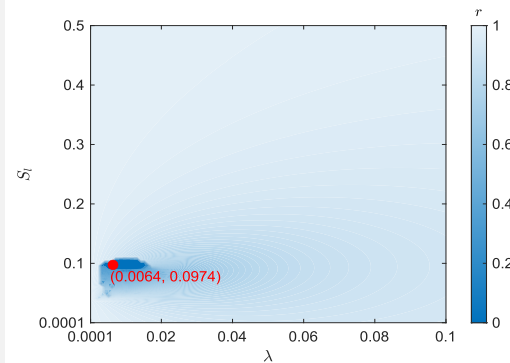
$$J = \begin{cases} \min(r) & r > 1e^{-6} \\ \min\left[\frac{RMS(A_1^c(\tau)) - RMS(A_1^u(\tau))}{RMS(A_1^u(\tau))}\right] & r \leq 1e^{-6} \end{cases}$$



(a)  $\eta_1 = 0.001$



(b)  $\eta_1 = 0.01$



(c)  $\eta_1 = 0.05$

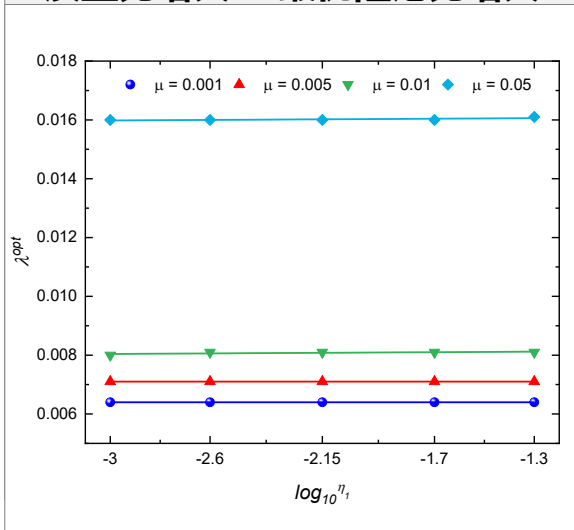
不同涡激强度下最优阻尼比与最优线性刚度系数

**最优阻尼比不受涡激强度变化影响，最优线性刚度呈递减趋势**

## 最优阻尼比——质量比、惯质比、模态差效应

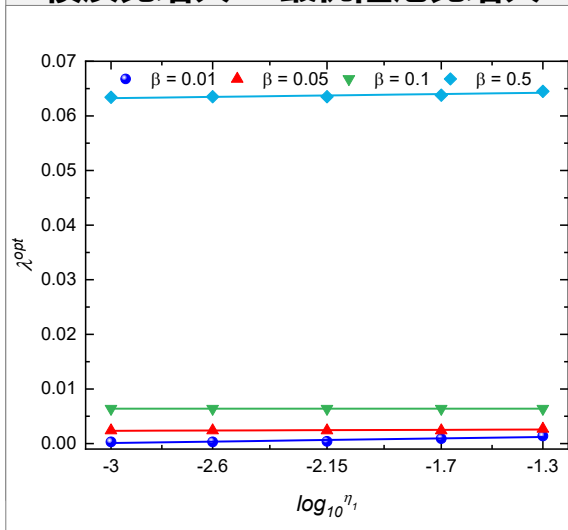
### 质量比效应

质量比增大→最优阻尼比增大



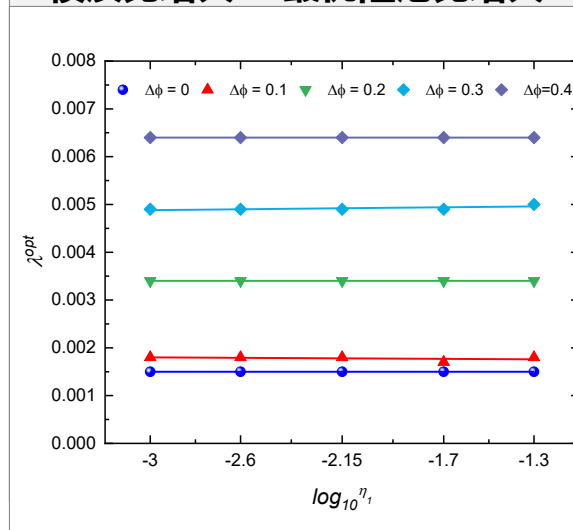
### 惯质比效应

惯质比增大→最优阻尼比增大



### 模态差效应

惯质比增大→最优阻尼比增大

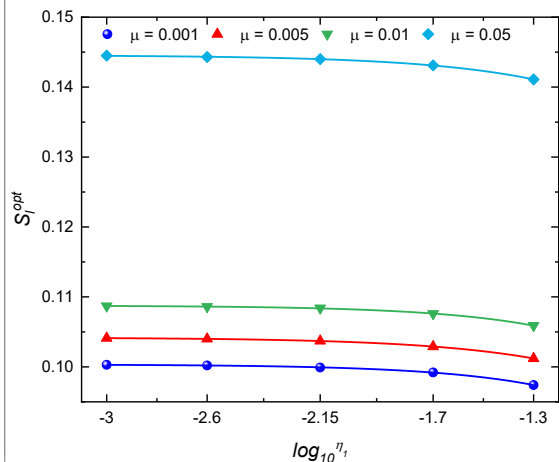


最优阻尼比随质量比、惯质比、模态差值提升而增大

## 最优线刚度——质量比、惯质比、模态差效应

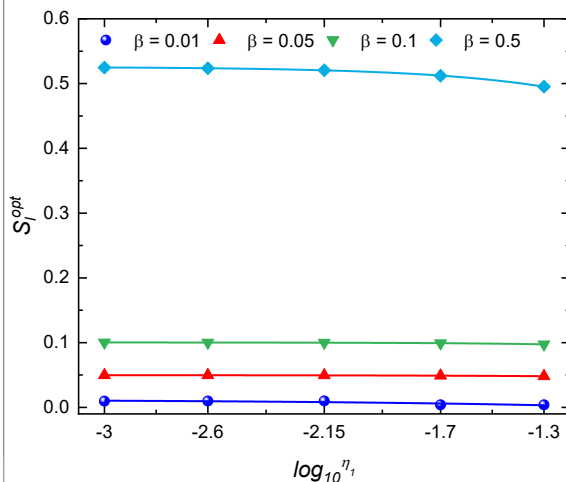
### 质量比效应

质量比增大→最优线刚度增大



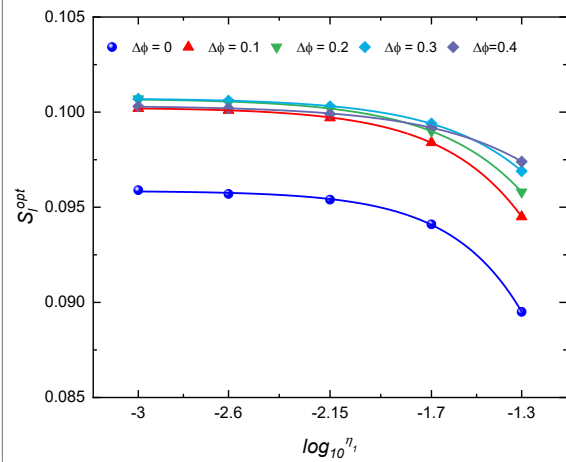
### 惯质比效应

惯质比增大→最优线刚度增大



### 模态差效应

惯质比增大→线刚度非线性演变



最优线刚度在模态差值提升过程中呈非线性演变趋势

## 经验设计模型

刚度

$$\begin{cases} S_l^{opt} = \alpha_0 + \alpha_1 e^{\log_{10}^{\eta_1} / \alpha_2} \\ S_n^{opt} = 100S_l^{opt} \end{cases}$$

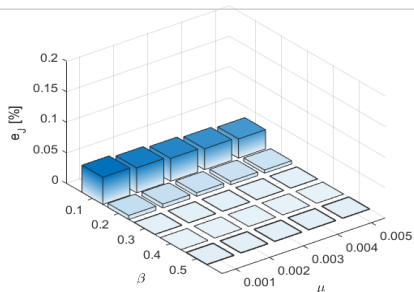
阻尼

$$\lambda^{opt} = 0.7104\mu\beta + 0.2348\beta\Delta\phi + 0.0416\beta^2 + 0.001$$

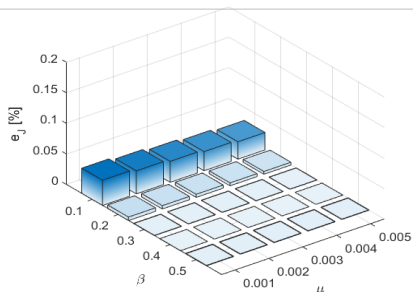
$$\alpha_0 = 0.9082\mu + 1.0305\beta$$

$$\alpha_1 = 0.5691\mu + 0.0806\beta - 5.0883\mu\beta - 0.1242\beta\Delta\phi - 1.4333\beta^2 - 0.0527$$

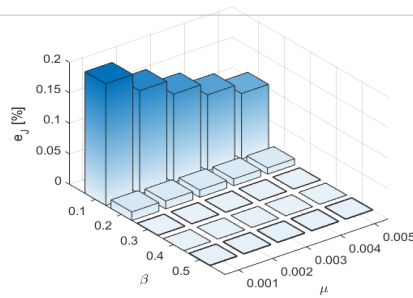
$$\alpha_2 = 0.8256\beta + 2.9279\mu\Delta\phi - 0.4800\beta\Delta\phi - 14.1041\mu^2 - 0.9080\beta^2 + 0.3740$$



(a)  $\eta_1 = 0.001$



(b)  $\eta_1 = 0.01$



(c)  $\eta_1 = 0.05$

经验设计模型相对误差

经验设计模型具有低相对误差，预测精度超过95%

四

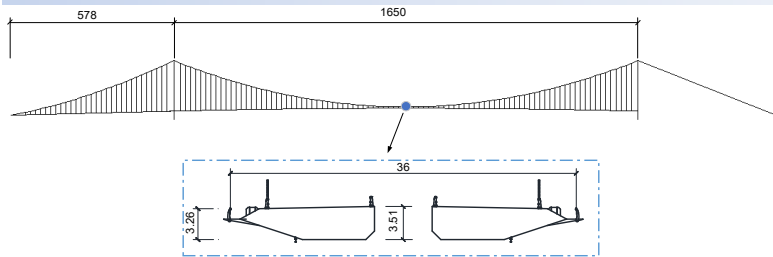
# 涡振控制性能



# 大跨桥梁涡振NESI控制性能

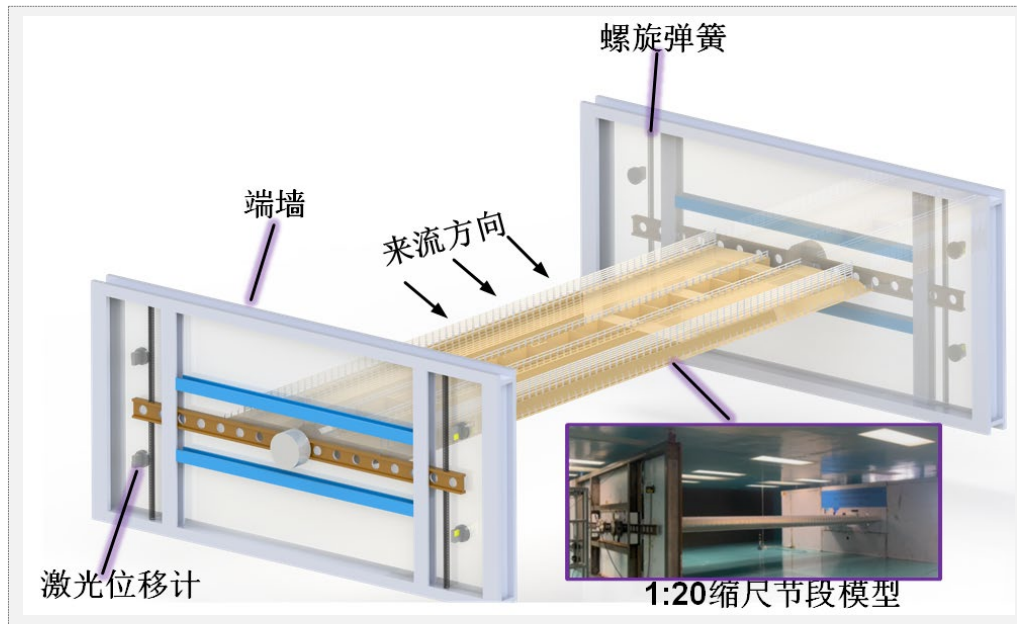


## 1:20节段模型风洞试验



西堍门大桥跨度特征及风洞缩尺参数

参数	数值
几何缩尺比	1:20
风速比	1:1
频率比	20:1
单位长度质量 (kg/m)	69.635
竖弯频率(Hz)	2.0
模态阻尼比	0.17%

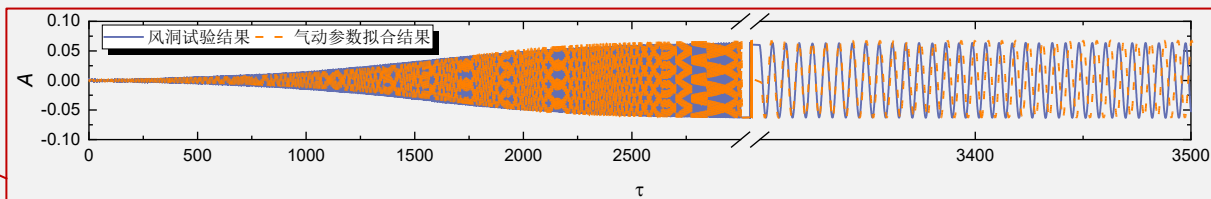
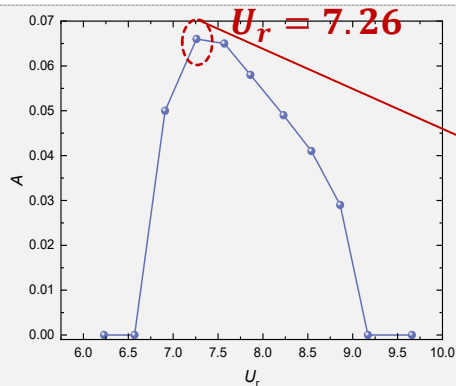


## 西堍门大桥1:20节段模型风洞试验

# 大跨桥梁涡振NESI控制性能

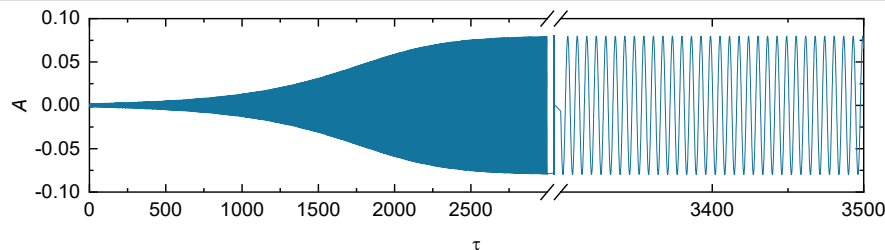
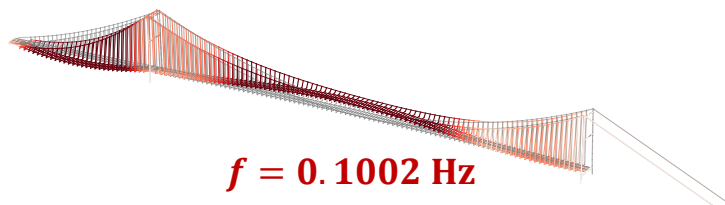


## 气动参数拟合及原型桥涡振响应



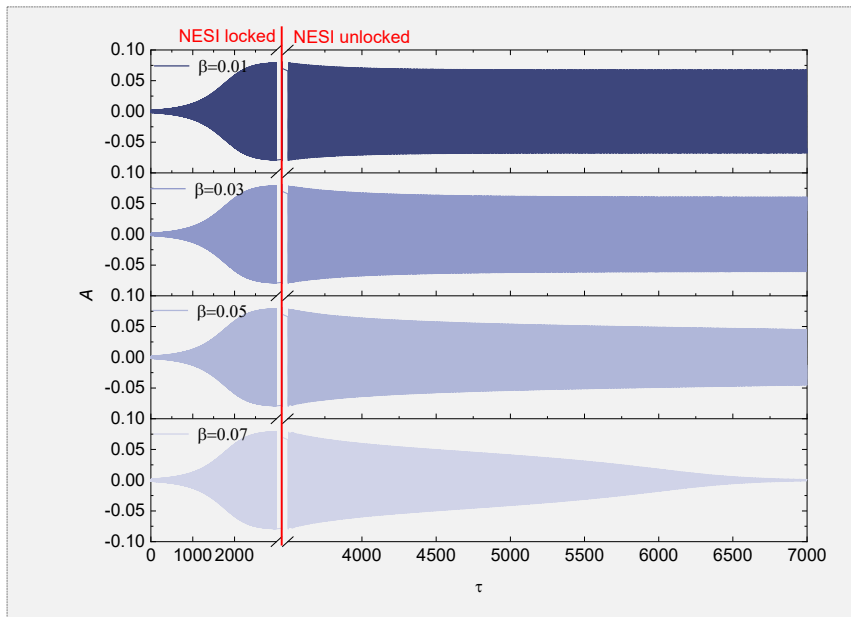
Parameters	$Y_1$	$\varepsilon$
Magnitude	18.63	601.63

## 风洞试验涡振气动参数识别

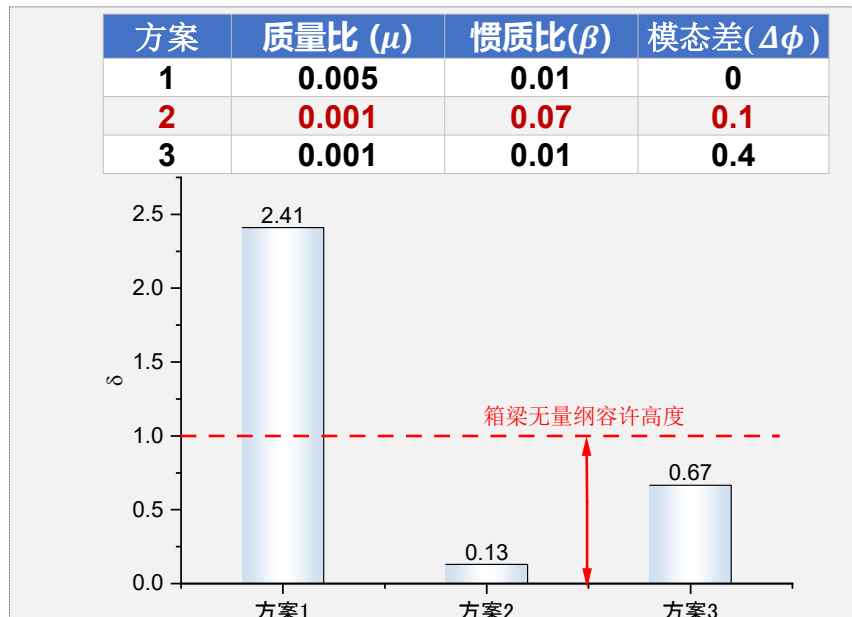


## 原型桥1阶竖弯涡振响应

## 最优参数NESI涡振控制性能



不同惯质比NESI涡振控制性能



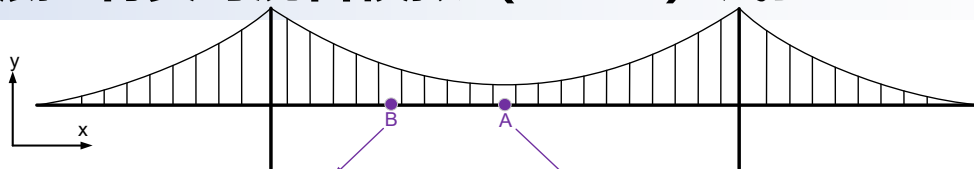
不同设计方案NESI静力行程

0.1Hz涡振模态静力行程仅占梁高10%，质量削减60%以上

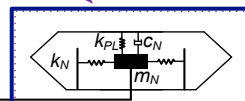
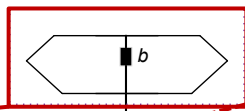
# 大跨桥梁涡振NESI控制性能



## 大跨桥梁-NESI涡振控制实时混合模拟 (RTHS) 试验



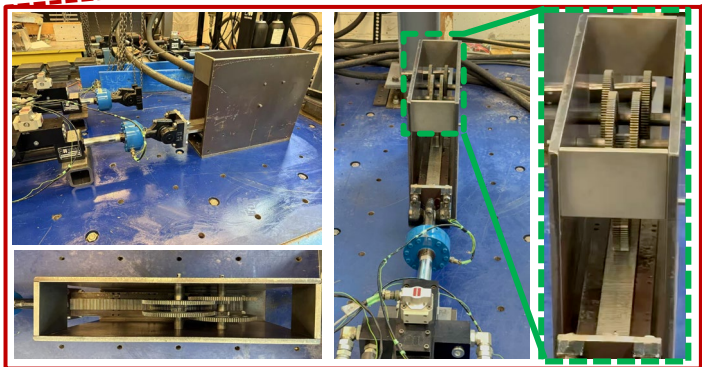
$$\beta = 0.182$$



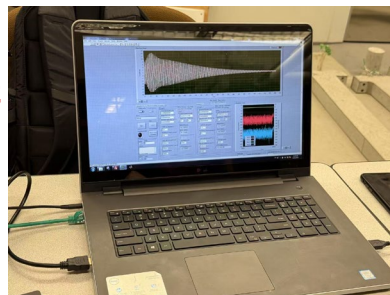
$$\mu = 0.001$$

$$\Delta\phi = 0.1$$

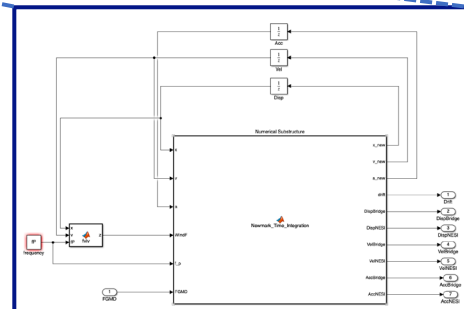
缩尺比	数值
几何缩尺比 $\lambda_L$	8
质量缩尺比 $\lambda_M$	512
时间缩尺比 $\lambda_T$	2



相对位移  
↔  
回复力



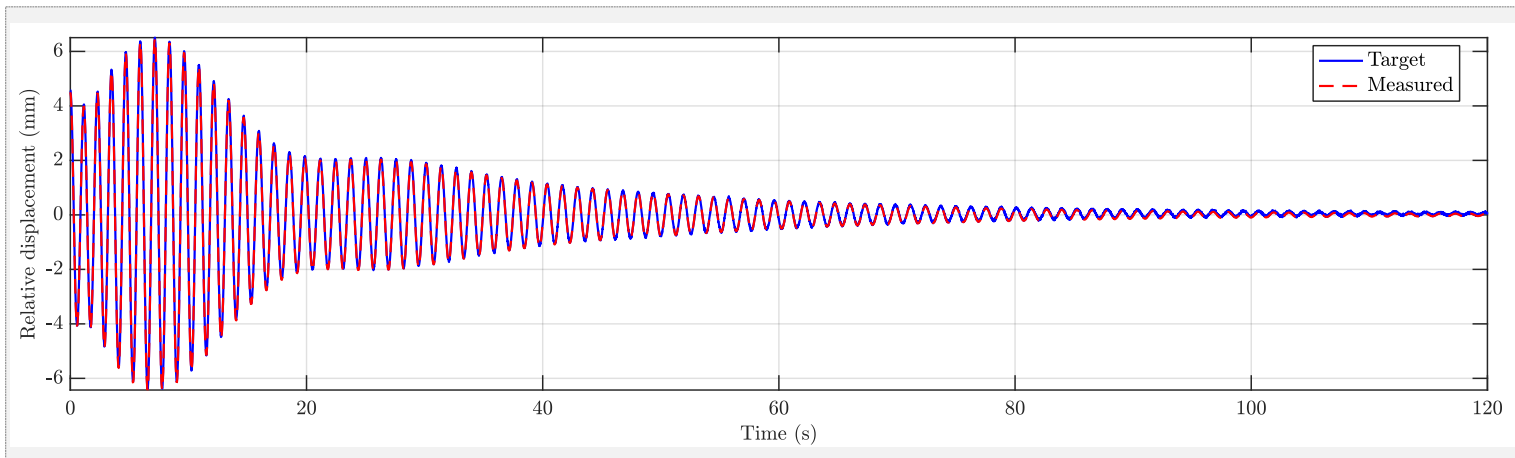
相对位移  
↔  
回复力



物理子结构: 齿轮齿条式惯容

数值子结构: 大跨桥梁-NES

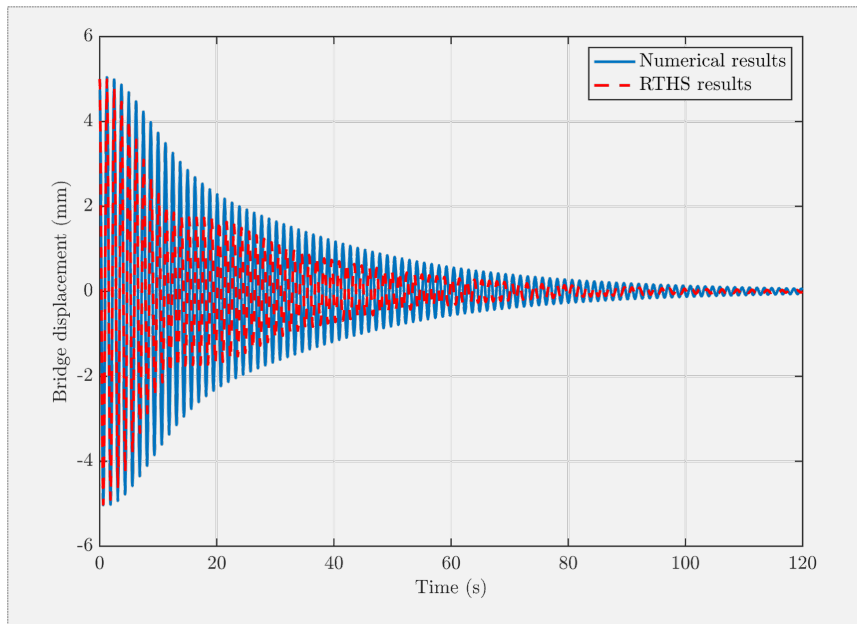
## 大跨桥梁-NESI涡振控制实时混合模拟 (RTHS) 试验



Index	Value
Tracking delay (J1)	2.00 ms
Normalized error (J2)	3.05 %
Max peak error (J3)	3.13 %

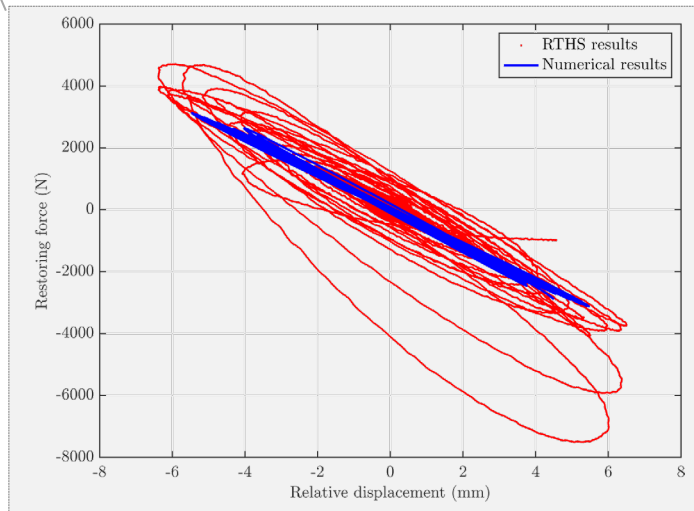
**实时混合仿真试验时滞与响应误差均较小!**

## 大跨桥梁-NESI涡振控制实时混合模拟 (RTHS) 试验



桥梁涡振控制位移时程

NESI参数来源于最优参数经验设计模型



惯容力-位移

**惯容非线性有益于强化NESI涡振控制性能!**

五

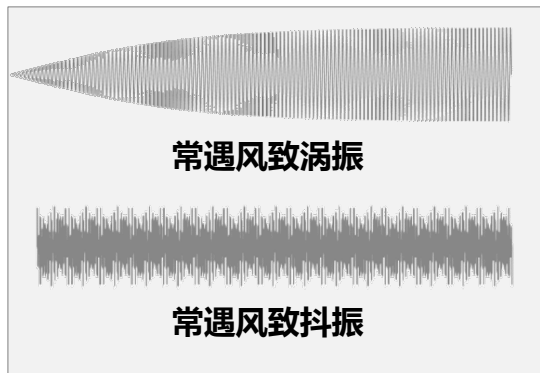
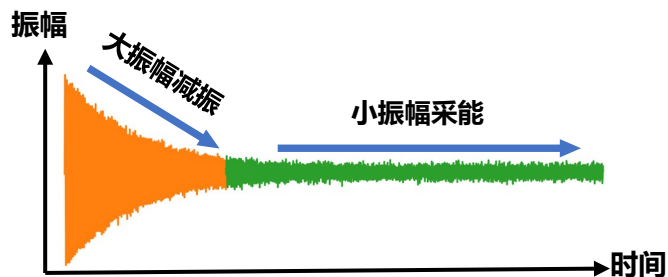
结论



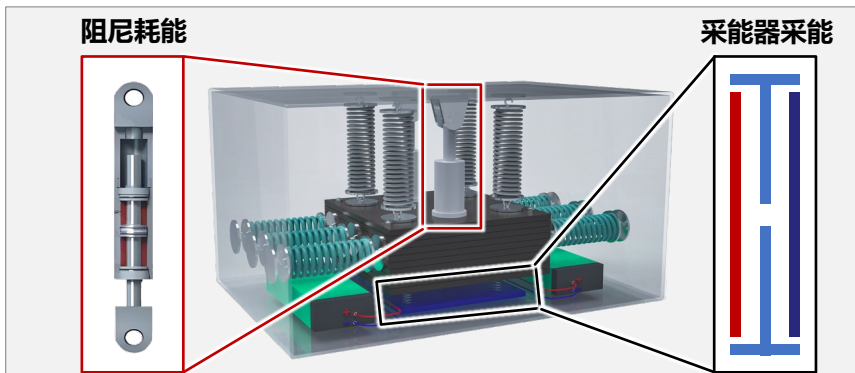
- 复变量平均 (CX-A) 法所建立的大跨桥梁-NESI涡振控制稳态动力学模型能够**精确地捕捉**系统稳态幅值响应;
- 经验设计模型表明, NESI最优阻尼比不随涡激强度变化, 所建立的经验设计模型预测精度在**95%以上**;
- 采用大惯质比方案能够实现最小NESI静力行程, **0.1Hz**涡振控制模式下静力行程不超过箱梁高度**10%**, 质量削减可达**60%**;
- 实时混合模拟试验表明, 惯容非线性效应**有益于**强化NESI涡振控制性能。

## 重大基础设施面临的绿色可持续发展挑战与机遇

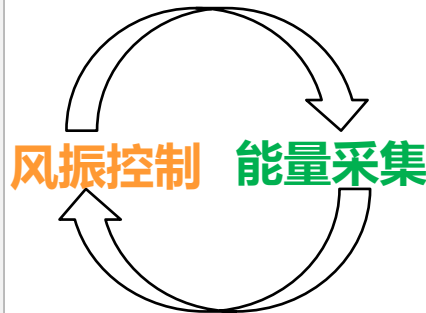
- 风致振动频发，大跨桥梁年平均风振**上百次**
- 其中，小幅风振占主导，占比可达**70%以上**
- 大跨桥梁小振幅瞬时振动能量可达 **$10^3 \sim 10^4$  (W)**



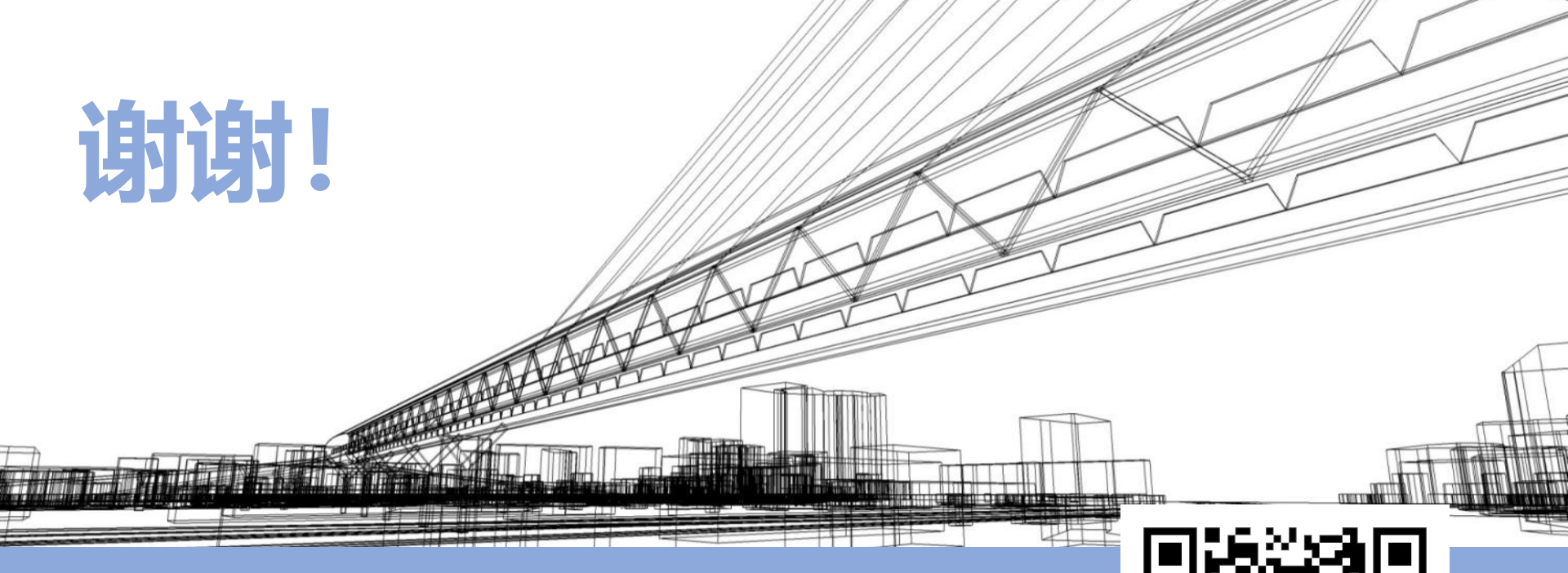
桥梁典型常遇风振



振动控制与能量采集一体化协同



# 谢谢!



*xrh@tongji.edu.cn*

关注“同济风工程”