

# Design and Fabrication of a Scaled Cable-Stayed Bridge Demonstrative Model for SHM Purpose

Ye Xia<sup>1\*</sup>, Xudong Jian<sup>1</sup>, Kun Qian<sup>2</sup>, Limin Sun<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, Berkeley, CA, USA

<sup>3</sup>State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Email: \*yxia@tongji.edu.cn

Received: Feb. 8<sup>th</sup>, 2019; accepted: Feb. 26<sup>th</sup>, 2019; published: Mar. 5<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

This paper summarized the design logic and fabrication process of a cable-stayed bridge structure model for bridge health monitoring, and the final design scheme is presented. Afterwards, key points and difficulty of fabrication were analyzed, which includes the production of main components, connection method, simulation of cable, and damage simulation method. Finally, the structural properties of the model were tested by experiments, and the results were found to be in good agreement with the finite element model.

## Keywords

Cable-Stayed Bridge, Structural Health Monitoring, Scaled Model, Design and Fabrication, Minpu Bridge

---

# 斜拉桥健康监测演示试验模型的设计与制作

夏 焯<sup>1\*</sup>, 简旭东<sup>1</sup>, 钱 昆<sup>2</sup>, 孙利民<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>同济大学桥梁工程系, 上海

<sup>2</sup>加州大学伯克利分校土木工程系, 伯克利, 加利福尼亚, 美国

<sup>3</sup>同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海

Email: \*yxia@tongji.edu.cn

收稿日期: 2019年2月8日; 录用日期: 2019年2月26日; 发布日期: 2019年3月5日

---

\*通讯作者。

文章引用: 夏焯, 简旭东, 钱昆, 孙利民. 斜拉桥健康监测演示试验模型的设计与制作[J]. 土木工程, 2019, 8(2): 244-252. DOI: 10.12677/hjce.2019.82030

## 摘要

本文总结了用于结构健康监测研究的缩尺斜拉桥模型的设计逻辑和制作过程, 详细描述了其关键点与难点, 包括模型主要部件的制作、构件连接方式、斜拉索等效模拟以及损伤模拟的实现方法, 并对比可选方案。最后, 利用监测系统对制作完成的缩尺模型进行了动力测试, 模型动力性能与设计预期吻合良好。

## 关键词

斜拉桥, 结构健康监测, 缩尺模型, 设计和制作, 闵浦大桥

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来, 随着我国桥梁建设事业的发展, 众多已建成桥梁的管养维护成为了一个重要的议题, 促使桥梁结构健康监测技术成为国内外学术界与工程界关注的热点[1]。目前, 桥梁结构健康监测虽已推广, 但核心技术尚未成熟, 仍有很多研究工作亟待开展。

结构模型试验是仿照真实结构, 按照一定的相似关系制作出模型, 对模型进行试验。模型试验具有诸多优点: 可控制性强、针对性强、实用性强、外界干扰小等[2]。因此, 探究与发展桥梁结构健康监测技术, 模型试验是很好的选择。

在此背景下, 本文以闵浦大桥为工程背景, 论述了面向桥梁健康监测试验的斜拉桥缩尺模型设计与制作的流程。通过独立设计的健康监测系统, 对制作完成的模型进行了动力测试。这一模型今后可进一步用于损伤识别、模式识别等桥梁健康监测理论的研究。

## 2. 模型设计

### 2.1. 工程背景

为了能够使模型设计有所依据, 本模型选取上海闵浦大桥作为原型结构, 在此基础上进行缩放与简化。闵浦大桥全长 1212 m, 主桥采用主跨 708m 的钢桁架斜拉桥, 跨径组成为 $(4 \times 63) + 708 + (4 \times 63) = 1212$  m。主塔采用直柱式 H 形塔, 边跨设 2 个辅助墩, 全塔共计  $4 \times 22$  对索[3]。模型设计的简化工作包括:

- 1) 根据模态频率相似, 模态形状相同的原则, 将密索体系简化为共 16 根拉索的稀索体系;
- 2) 根据主梁最大挠度相似的原则, 将双层桁架主梁简化为梯状双主梁, 并且将变截面简化为等截面;
- 3) 根据模态形状相似的原则, 将辅助墩数量减少至 1 个。

值得注意的是, 制作模型的目的并非研究闵浦大桥的特性, 仅是借用这一实桥背景把握模型结构的合理性。简化得到的模型立面如图 1 所示。

### 2.2. 相似理论

为准确地模拟实际桥梁的力学性能, 试验模型的缩放应遵从结构相似理论。相似理论主要研究

工程界各种物理过程相似原理[4]。用于结构健康监测研究的模型主要进行振动测试,因此需要满足 Froude 数相似,即惯性力与重力之比相似。在几何相似关系的基础上,本缩尺模型与实际桥梁在刚度、质量等方面的相似关系如表 1 所示。

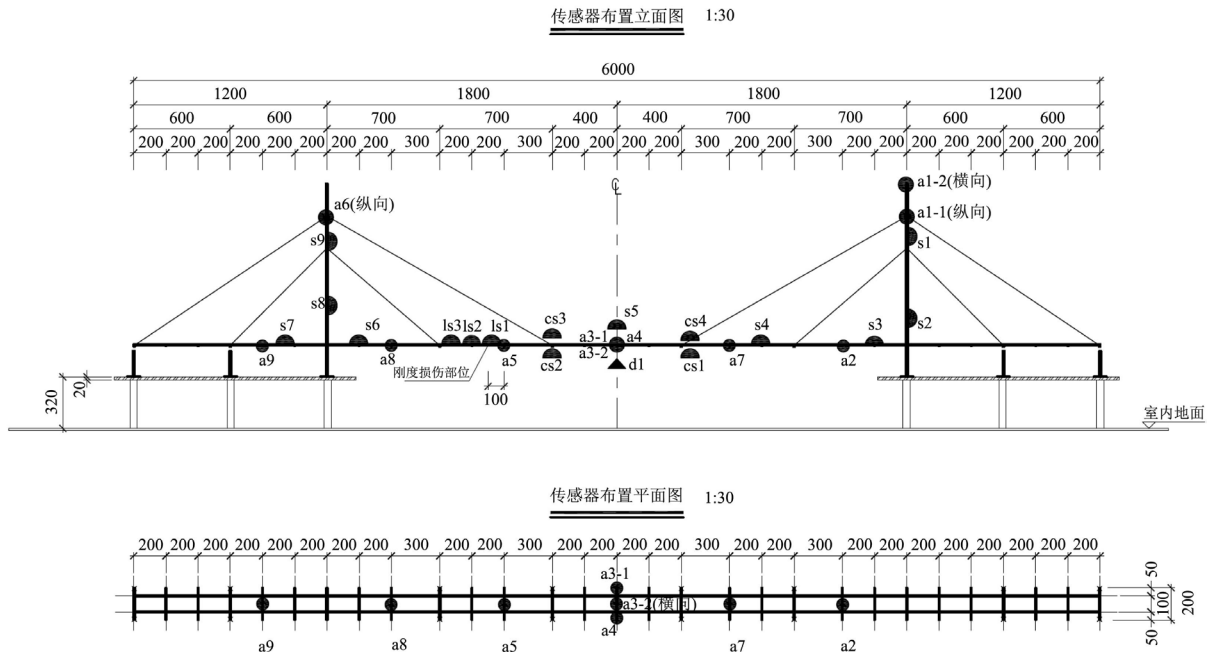


Figure 1. Dimension diagram of the scaled model  
图 1. 缩尺模型尺寸图

Table 1. Similarity relations  
表 1. 相似关系

参数名称	符号	相似关系表达式
几何尺寸	$l$	$\lambda_l = l_p / l_m = 200 : 1$
挠度	$\Delta$	$\lambda_\Delta = \Delta_p / \Delta_m = \lambda_l$
质量	$m$	$\lambda_m \approx \lambda_l^3$
密度	$\rho$	$\lambda_\rho = \rho_{\text{混凝土}} / \rho_{\text{铝合金}} = 0.944$
弹性模量	$E$	$\lambda_E = E_p / E_m$
抗拉刚度	$EA$	$\lambda_{EA} = \lambda_l^2$
抗弯刚度	$EI$	$\lambda_{EI} = \lambda_l \lambda_l^4$
荷载	$F$	$\lambda_F \approx \lambda_l^3$
模态频率	$f$	$\lambda_f = f_p / f_m = 1 / \sqrt{\lambda_l}$

从表 1 可以看出,几何相似比是其他相似关系的基础,需要首先确定。由于试验室空间限制,本研究选择 200:1 作为缩尺的几何相似比。确定几何相似比后,可进一步根据刚度相似原则,即相似荷载作用下模型的变形与实际桥梁相似,通过在有限元软件中不断试算及调整,确定模型各主要构件的几何尺寸。本模型各主要构件的截面形式与尺寸如表 2 所示。

一般而言,受模型制作材料密度的限制,满足刚度相似的缩尺模型往往无法直接满足质量相似,此时需要通过增加配重块的方式来满足质量相似。配重块的质量可由质量相似关系进行计算,在满足动力特性相似的基础上不断调整局部配重,最后得出配重方案为:

**Table 2.** Section type and dimension of structure components  
**表 2.** 构件截面形式与尺寸

截面名称	截面形式	截面尺寸(mm)
主梁	铝方管	15 × 15 × 1.2
主塔	铝方管	15 × 15 × 2
普通横梁	铝排	4 × 4
加劲横梁	铝排	8 × 8
墩柱	铝方管	15 × 15 × 2
墩柱横梁	铝排	12 × 12
索 14	钢丝	直径 0.5
索 23	钢丝	直径 0.4

1) 除跨中横梁外, 每根横梁均布 1 kg 配重, 共 28 kg;

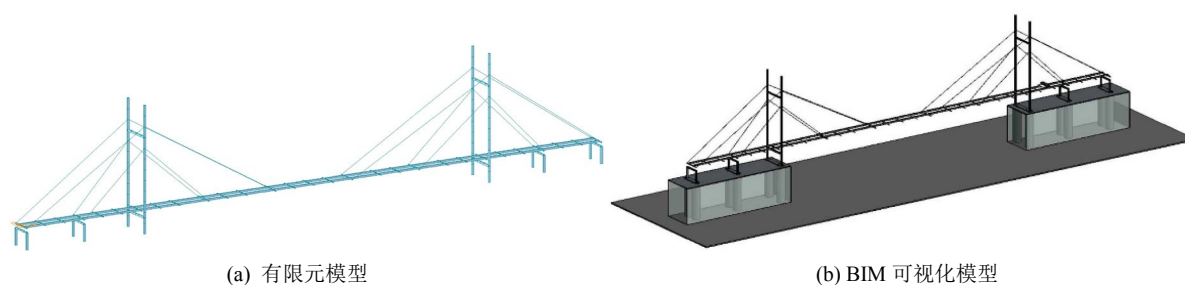
2) 塔柱上每间距 10 cm 放置一个配重块。塔柱高 1.2 m, 顶部 4 个配重块质量为 0.2 kg, 其余 8 个配重块质量为 0.4 kg。单个塔上配重共计 8 kg;

3) 无配重模型总质量 5.2 kg, 有配重模型总质量 49.2 kg。

根据相似理论, 缩尺模型的边界条件必须与实际桥梁保持一致。本研究中的斜拉桥原型闵浦大桥为半漂浮体系, 故其边界条件为: 约束所有塔 - 梁、墩 - 梁连接处的横桥向与竖向位移。塔、墩与承台的连接处固结。

### 2.3. 数字建模与可视化

为了在指导模型的设计与制作、验收制作完成后的模型以及进行后续的健康监测试验, 建立了缩尺模型结构的数字模型。采用 Midas Civil 软件建立了缩尺模型的有限元模型, 用于受力分析。在整个结构的模拟中采用了两类单元: 空间梁单元、空间只受拉桁架单元。空间梁单元用于模拟塔、梁、墩, 空间桁架单元模拟斜拉索。全桥共有节点数量 246 个, 单元数量 285 个, 刚性连接与固定约束各 12 个。同时, 本研究亦使用 Autodesk Revit 建立了缩尺模型的 BIM 模型, 用于指导模型的加工制作。有限元模型和 BIM 模型分别如图 2(a)和图 2(b)所示。



**Figure 2.** Digital model and visualization  
**图 2.** 数字模型与可视化

### 3. 模型制作

缩尺模型需考虑相似比关系, 将模型整体划分为由铝合金零件组成的不同构件, 再将制作好的构件拼装成完整模型。本研究在制作过程中将模型分为塔与墩、梁、索、配重块、基础与承台共 5 部分, 分别制作。最后制作完成的缩尺模型如图 3 所示。



Figure 3. Scaled cable-stayed bridge demonstrative model  
图 3. 缩尺模型图示

### 3.1. 构件加工

首先, 缩尺模型的承台使用钢方管与上下两块钢板焊接制成。下部钢板开孔, 通过螺栓与试验室预埋的地锚固定。模型的桥塔和桥墩则与上部钢板焊接。上下两块钢板之间, 由钢方管支撑的空间可用于放置缩尺模型传感系统的数据采集仪与传感器接线。

桥塔、桥墩与主梁由采购得到的铝合金管材焊接而成, 是缩尺模型的主要受力构件。为保证主梁的力学性能与设计一致, 纵梁选用 2 根 6 m 通长的铝方管, 梁上设有损伤模拟部位。主梁的横梁选用铝排, 焊接在 2 根纵梁的下方, 共同组成梯状双主梁, 同时用于安装配重块与斜拉索。由于索-梁连接处作用力较大, 对该部位的横梁进行加强。加工得到的模型桥墩与主梁如图 4 所示。

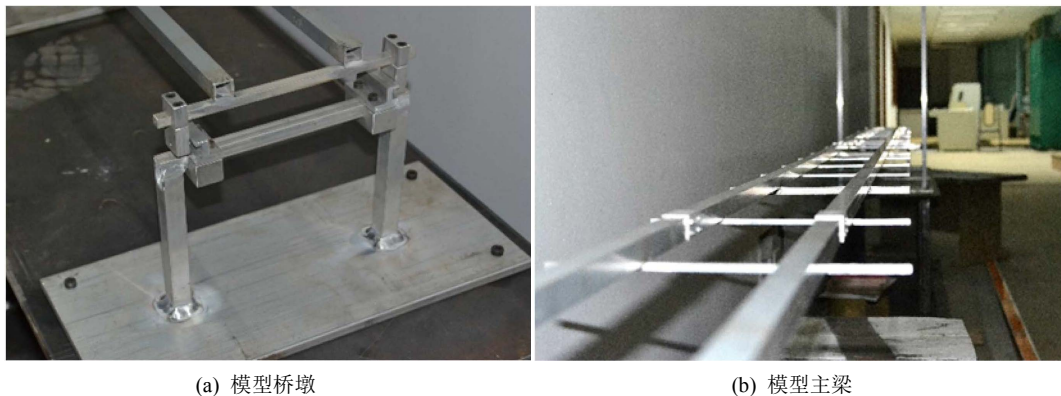


Figure 4. Flexural members of the scaled model  
图 4. 缩尺模型的受弯构件

斜拉索是斜拉桥的标志性构件。表 3 对比展示了模型试验中用于模拟斜拉索的两种方案。其中, 钢丝方案即使用直径与设计值相同的钢丝模拟斜拉索, 弹簧方案即利用弹簧模拟斜拉索刚度, 钢丝仅起到连接作用。

虽然两种方案在理论上都可以用来模拟斜拉索, 但是考虑到以下几个关键因素, 本研究认为弹簧方案更适合用于缩尺模型的斜拉索模拟。

- 1) 钢丝方案所使用的钢丝的刚度比较大, 调节索力时难以精确控制钢丝伸长量, 造成索力调节的误差较大。弹簧方案完全用弹簧模拟斜拉索的刚度, 可以通过精确控制弹簧的伸长量来调节索力;
- 2) 弹簧刚度容易通过试验测量, 有准确数值, 钢丝方案中钢丝性能具有变异性, 难以通过实验准确



确定其刚度值；

**Table 3.** Comparison of cable simulation methods

**表 3.** 斜拉索模拟方案比较

方案名称	优势	劣势
钢丝方案	① 概念直观 ② 制作简便，不用制作复杂的连接零件 ③ 模型斜拉索的实际刚度更接近设计值	① 抗松弛性能不如弹簧 ② 钢丝可能受压，而斜拉索只能受拉 ③ 不便于调节索力
弹簧方案	① 采用弹簧方案可确保斜拉索只受拉不受压 ② 弹簧较钢丝而言不易松弛，模型可长期使用 ③ 弹簧可根据需要裁剪长短调整刚度	① 需额外制作拉索和其他构件连接零部件 ② 需计算并挑选刚度合适的弹簧

3) 经过数天时间观测即可发现，钢丝方案所使用的钢丝松弛现象非常明显，而弹簧的松弛相比于钢丝小得多。

弹簧方案中，模拟拉索的弹簧可选用 L 型拉簧。弹簧圈数应大于 10 圈，使得弹簧进入线弹性工作段。弹簧进入线性的初始拉应力应该小于最小索力，丧失线性的拉力应该大于最大索力。

根据弹簧设计手册[5]，弹簧的抗拉刚度由弹簧的圈数决定，其圈数计算公式如下

$$n = \frac{Gd^4}{8D^3P} \quad (1)$$

式中， $P$  为弹簧抗拉刚度； $n$  为弹簧圈数； $d$  为弹簧线径； $D$  为弹簧中径，即弹簧外径减去一个弹簧线径； $G$  为弹簧材料的切变模量。

本研究根据刚度要求剪出相应圈数的弹簧后，为提高试验的精确程度，应逐一测量了所制得 16 根弹簧的刚度，并对其真实刚度进行记录。测试结果表明加工得到的弹簧刚度与根据上式计算出的刚度吻合得很好。

为减小构件尺寸，配重块采用材料密度较高的铅块。铅块加工成“凹”字形，块上开孔，通过螺栓将两块铅块拧紧，固定在被配重的铝方管上。铝方管从铅块的凹槽中穿过。

由于损伤识别是结构健康监测研究的主要目标之一，故本研究在缩尺斜拉桥模型上设计了多种可恢复的模拟损伤。本研究认为，缩尺试验模型的模拟损伤的主要原则为在不毁坏模型的前提下，尽可能地易于识别。根据这一原则，本研究设置了以下模拟损伤：

1) 主梁刚度损伤：在双主梁 1/4 主跨位置处的两根铝方管上开槽。为了保证损伤表现明显，损伤段长度为 1 cm，截面面积被削弱了 1/4，竖向弯曲刚度减小 40%左右，具体构造如下图 5(a)和图 5(b)所示。由于本模型需要多次重复并且长期使用，故要求模拟的损伤可恢复。为恢复模拟损伤，本研究采用小型栓钉使套管与原结构可靠连接的构造以弥补损伤模拟处的刚度损失，该构造如图 5(c)所示。

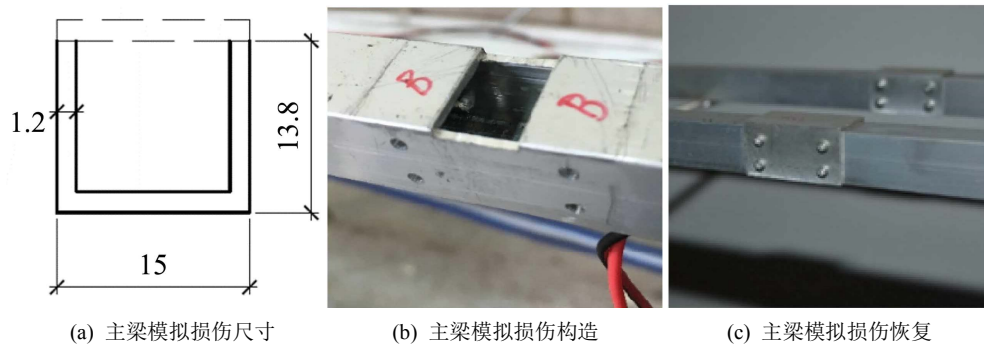
2) 拉索刚度损伤：通过拆卸模型拉索的钢丝或更换模型拉索的弹簧实现。

3) 结构质量损伤：通过拆卸安装于模型结构上的配重块实现。

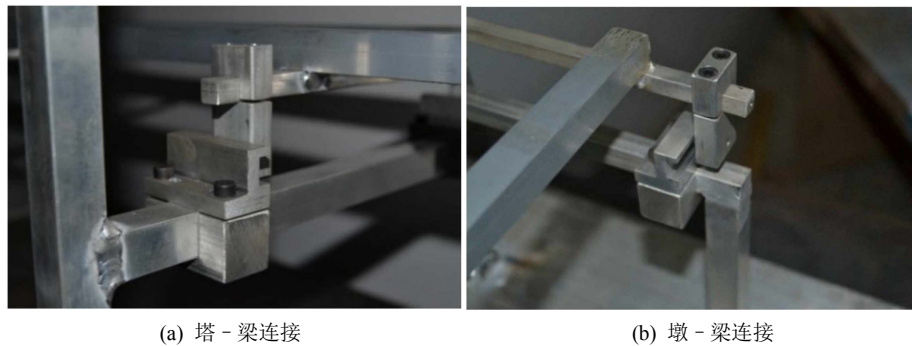
### 3.2. 构件组装

模型各部分加工完后，需通过连接件实现塔墩与梁、斜拉索与梁以及斜拉索与桥塔之间的连接，以满足设计约束条件。

关于塔墩与梁之间的连接，本研究利用滑轮实现主梁沿纵桥向的自由滑动，通过设置固定壁限制主梁在横桥向与竖向的运动。扭转约束则通过横向设置两处轴向限位实现。其构造如图 6 所示。



**Figure 5.** Stiffness damage simulation on the beam  
**图 5.** 主梁的刚度损伤模拟



**Figure 6.** Connections of flexural members  
**图 6.** 受弯构件的连接

关于桥塔与斜拉索之间的连接，本研究使用弹簧与钢丝的组合来模拟实桥的索，根据加工简便的要求，将弹簧与主梁连接，钢丝与索塔连接。由于钢丝较细，且与铝合金方管直接连接时加工较为困难，因此通过在索塔上钉入螺钉，在螺钉上嵌套连接件的方式实现与钢丝的连接。其构造如图 7(a) 所示。



**Figure 7.** Connections of cables  
**图 7.** 斜拉索的连接

索-梁连接方式与索-塔连接基本相同，但是此处弹簧与主梁相连接，因此需要加装调节索力的装置，同时也需要贴应变片来测量索力。索力调整可通过旋转螺纹套筒实现。其构造如图 7(b) 所示。

### 3.3. 模型动力测试

目前的结构健康监测试验侧重探究结构的动力学特性，因此结构验收的主要思路是通过振动试验测

试真实结构的各阶模态频率与相应的模态形状，再与有限元模型进行比对[6][7]。

由于结构的模态频率由结构自身刚度和质量分布决定，因此通过对比模态频率可以判断结构实际结构的刚度与质量分布是否与设计模型相吻合。若两者吻合较好，则说明实际结构的刚度以及自重与有限元模型；若实测模态频率与理论值有较大偏差，则应分析造成偏差的原因，并对有限元模型进行修正。

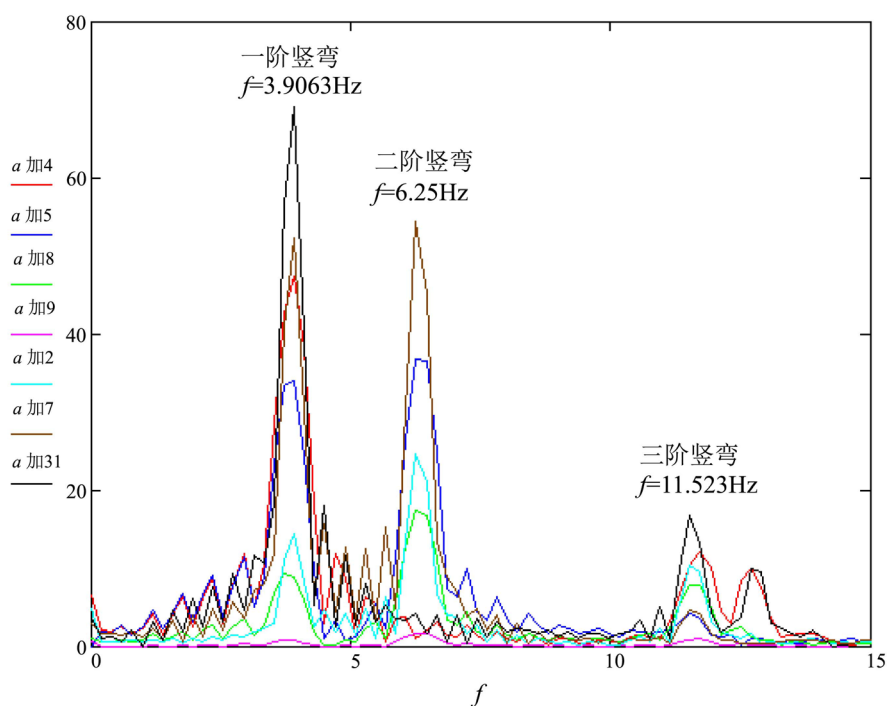
验收振动试验采用自由振动法，即对结构施加初始强迫位移，使得结构发生自由振动，然后对采集到的加速度数据进行功率谱分析，通过拾峰法识别结构的模态频率。为识别出结构的多阶模态频率，需要在结构的不同位置施加强迫位移，试验工况如表 4 所示。

**Table 4.** Modal test scenarios

**表 4.** 模态试验工况

工况编号	试验方案	试验目的
1	主梁跨中竖向强迫位移	梁正对称竖弯
2	主梁 1/4 跨竖向强迫位移	梁反对称竖弯
3	主梁跨中横向强迫位移	梁正对称侧弯
4	主塔纵、横向强迫位移	梁纵飘、塔纵弯/侧弯

限于篇幅，本文只展示主梁竖向加速度数据的功率谱。模拟斜拉索的钢丝方案与弹簧方案的功率谱分别如图 8 所示。从功率谱中可以明显识别出峰值，每一个峰值对应模型的某一阶模态。



**Figure 8.** Power density spectrum of vertical acceleration

**图 8.** 缩尺模型主梁竖向加速度功率谱

进一步将所有识别出的模态频率整理如下表 5 所示。通过模型实测模态频率与有限元模型计算得到的模态频率相对比，可以认为缩尺模型的刚度分布与质量分布与有限元模型吻合得很好，缩尺模型的加工制作符合设计预期。



**Table 5.** Measured modal frequency of the scaled model  
**表 5.** 缩尺模型的实测模态频率

阶数	模态描述	有限元模型频率(Hz)	实测缩尺模型频率(Hz)	误差(%)
1	纵漂	1.59	1.56	-1.68
2	梁对称竖弯	3.67	3.91	6.50
3	梁对称侧弯	4.12	4.10	-0.53
4	梁反对称竖弯	6.25	6.25	-0.05
5	塔反向侧弯	7.27	7.23	-0.58

#### 4. 结论

目前用于科研的缩尺桥梁模型已较为常见,但专门用于结构健康监测研究的模型平台仍然较少。本文以上海闵浦大桥为原型,设计并制作了一个面向结构健康监测的缩尺斜拉桥模型,将设计与制作完整流程的重点与难点总结如下:

1) 相似理论的应用:用于桥梁健康监测研究的缩尺模型设计应遵循 Froude 数相似原则,即惯性力与重力之比相似。保证 Froude 数相似能够保证缩尺模型的动静力特性与实际桥梁相同,在此前提下其他相似准则可适当放宽;

2) 斜拉索模拟方案选择:本模型比较了两种模拟实桥斜拉索的方案,并分析了两者的可行性。尽管从一次试验数据分析来看,两种方案都是可行的,但是综合各种因素,弹簧方案更适用于健康监测试验模型;

3) 索力调节方法:本模型通过旋转索梁连接处的螺纹套筒调整索力,通过应变片监测索力的变化。合理的成桥索力可由有限元程序计算得出,然后通过量测主梁线形来判断索力调整是否合理;

4) 损伤模拟及细部构件制作:为使模型边界条件符合设计要求,本文提出了几种可行的细部构造制作方法,可供相关研究者参考。

总而言之,缩尺模型与设计预期吻合得很好,这为今后的损伤识别、模式识别等桥梁结构健康监测研究内容的继续进行奠定了良好的基础。

#### 致 谢

本文感谢国家重点研发计划(2018YFC0809606)与上海市科委(18DZ1201200)的资助。

#### 参考文献

- [1] 张启伟. 大型桥梁健康监测概念与监测系统设计[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2001, 29(1): 65-69.
- [2] 吴孙尧. 面向健康监测的斜拉桥试验模型设计及其损伤分析[D]. [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [3] 马磊, 颜爱华, 邓青儿. 上海闵浦大桥设计与构思[J]. 上海建设科技, 2010(5): 1-4.
- [4] 中华人民共和国交通部. JTG/T D60-01-2004 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [5] 汪曾祥. 弹簧设计手册[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1986.
- [6] Coleman, R.E., Allemang, R.J. 试验结构动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [7] 宋泰宇, 沈殷, 李国平. 缩尺结构模型的相似荷载优化设计[J]. 结构工程师, 2015, 31(4): 92-99.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)