

# 基于实测数据的电缆桥架有限元模型修正

胡服全<sup>1</sup>, 杨培勇<sup>1</sup>, 朱翊洲<sup>2</sup>, 高文军<sup>3</sup>, 何铮<sup>1</sup>

(1. 国核华清核电技术研发中心有限公司, 北京 102209;

2. 上海核工程研究设计院, 上海 200233; 3. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

**摘要:** 对电缆桥架有限元模型中螺栓连接的复杂结构进行了简化处理, 基于实测数据对电缆桥架有限元模型进行了修正。应用 ANSYS 有限元分析软件对电缆桥架结构进行模态分析, 提取了 X、Y 向整体振型的第 1 阶模态频率。为验证模型, 设计了白噪声激励试验, 利用随机子空间法进行模态识别, 得到结构的实测频率。采用虚拟材料弹性模量对螺栓参数进行修正。修正前有限元模型模态频率与实测频率的相对误差 X 向为 1.3%、Y 向为 26.7%, 修正后有限元模型模态频率与实测频率的相对误差 X 向为 0.04%、Y 向为 2.2%。采用修正后的电缆桥架模型进行时程分析, 并对模拟结果与实测结果进行了比较, 结果表明修正后的有限元模型模拟结果与实测结果吻合较好, 能更真实地反映结构动力特征。

**关键词:** 电缆桥架; 有限元模型; 振动试验; 模型修正

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)04-0088-05

## Modification of Finite Element Modeling of Cable Tray Based on Measured Data

HU Fuquan<sup>1</sup>, YANG Peiyong<sup>1</sup>, ZHU Yuzhou<sup>2</sup>, GAO Wenjun<sup>3</sup>, HE Zheng<sup>1</sup>

(1. State Nuclear Power Technology Research & Development Centre, Beijing 102209, China;

2. Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai 200233, China;

3. China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China)

**Abstract:** The complex bolted structure of cable tray in the finite element model have been simplified, the cable tray finite element model is modified based on the measured data. The modal analysis of cable tray structure is carried out by ANSYS finite element analysis software, X and Y to the overall vibration of the first order modal natural frequencies is extracted. In order to validate the model, the white noise excitation experiment is designed, and the modal identification was carried out by using the stochastic subspace identification, and measured data of the structure was obtained. The bolt parameters are corrected by using virtual material. The relative error of the modal frequencies and measured frequency is 1.3% in X direction, and it is 26.7% in Y direction before modification. Similarly, the relative error of the modal frequencies and measured frequency is 0.04% in X direction, and it is 2.2% in Y direction after modification. The modified cable tray model is used for process analysis, the results of simulation and experimentation are compared, the results shows that the modified finite element model simulation results are in good agreement with the experimental results, it can be more truly reflect the structural dynamic characteristics.

**Key words:** cable tray; finite element modeling; vibrate experimentation; model modification

电缆桥架结构种类多应用广泛, 在核电站中电缆桥架也是重要的设备。核电站用的电缆桥架属核安全三级、抗震 I 类设备, 必须具有良好的抗震性

能, 这是核电站在地震安全运行或安全停堆的重要条件。但研究核电站抗震安全性主要集中在主体结构上, 对电缆桥架的研究较少。我国核电站抗震设计规范中涉及电缆桥架抗震的设计内容也比较少, 所以有必要开展核电站电缆桥架方面的抗震研究<sup>[1]</sup>。

采用有限元理论建模分析结构抗震研究是一个重要手段, 因此需要建立一个既能满足工程精度要求、又能反映结构力学特性的精准有限元模型。通

收稿日期: 2015-11-01

基金项目: 国家重大科技专项经费资助项目(2012ZX06004-012)

作者简介: 胡服全(1978), 男, 江西玉山人, 工程师, 博士, 主要从事核电设备力学分析、抗震分析等研究工作(e-mail) hufuquan@mail.snptc.com.cn。

常理论建模依据设计图纸, 且隐含了多种理想化假定或简化, 理论分析结果与实测识别结果之间不可避免地会存在一定的偏差。基于动力实测结果识别结构的模态参数, 利用有限元模型修正技术, 修正初始有限元模型, 可以使理论分析模态和试验识别模态之间的误差达到最小<sup>[2-3]</sup>。

有限元模型的误差往往是由于某些局部理想化假定或简化所造成的, 若对模型的所有物理参数进行修正, 不仅计算量大, 且效果不一定理想。利用动态测试数据, 仅对模型中简化处相关的部分物理参数修正, 使模型与实验具有尽可能一致的动态参数<sup>[4]</sup>。

本文中的电缆桥架试验模型通过辅助支座固定在地震台面上。辅助支座与地震台面采用高强度螺栓进行连接固定。因为螺栓连接中存在摩擦、接触、拧紧等问题<sup>[5]</sup>, 动力学特性比较复杂。电缆桥架有限元模型对螺栓进行了简化处理, 是主要不确定因素来源。

### 1 试验模型与有限元模型

实际试验模型结构见图 1, 电缆桥架试验模型为 Q235 钢结构, 底板固定螺栓为 M27, 材料 40Cr, 10.9 级高强度螺栓。



图 1 试验模型照片  
Fig. 1 Photo of Experiment Model

采用 ANSYS 软件建立了有限元模型, 建模过程进行了适当简化处理, 电缆桥架模型中托板及底座采用 SHELL63 单元, 立柱与横档采用 BEAM4 单元, 螺栓采用 BEAM188 单元。有限元模型节点 22 594 个, 单元 21 729 个, 电缆桥架有限元模型及螺栓分布见图 2, 材料特性见表 1。

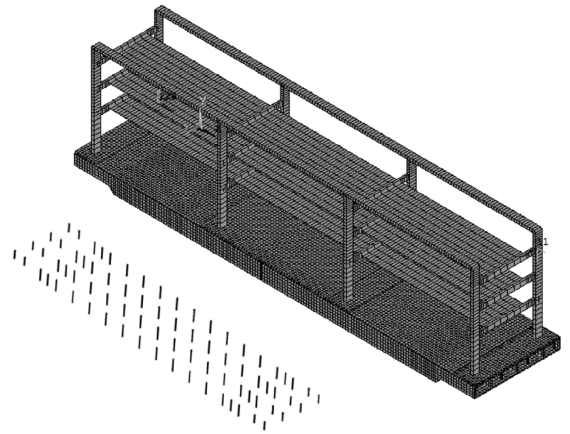


图 2 电缆桥架有限元模型及螺栓  
Fig. 2 Finite Element Modeling of the Cable Tray

表 1 材料特性  
Table 1 Parameters of Material Properties

材料型号	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(t/m <sup>3</sup> )
螺栓钢	211	0.277	7.87

### 2 模态参数识别与有限元模态分析

#### 2.1 模态参数识别

电缆桥架结构模态试验方法为白噪声激励, 通过白噪声激励, 采集各测点加速度信号, 利用随机子空间法进行模态识别, 确定频率和阻尼比。

电缆桥架立柱顶部均布置了三向加速度传感器见图 3, 用以测量模型结构在 X、Y、Z 三个方向的动力响应。电缆桥架立柱顶部均布置了位移传感器, 用以测量模型结构的振动位移。在电缆桥架立柱根部均布置了应变片, 用以测量模型结构的应变。基于实测的加速度时程数据, 利用随机子空间法进行模态参数识别。

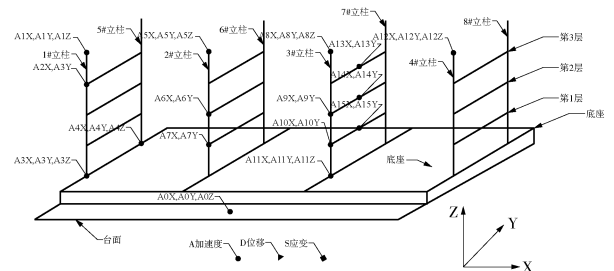


图 3 加速度传感器测点布置  
Fig. 3 Measurement Point Arrangement of Acceleration Sensor

对于白噪声激励的线性系统其随机状态空间模型可表示为<sup>[6-9]</sup>:

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + w_k \\ y_{k+1} = Cx_k + v_k \end{cases} \quad (1)$$

$$E \left[ \begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix} (w_p, w_p) \right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (2)$$

式中： $E$ 是数学期望； $\delta$ 表示 Kronecker delta 函数。

随机子空间算法的本质是把将来输入的行空间投影到过去输出的行空间上，投影结构模态参数识别理论、实现与应用的结果保留了过去的全部信息，并用此来预测未来。随机子空间方法适合各种结构系统参数识别，能够比较准确地识别结构的模态参数。

试验中的白噪声峰值加速度为 0.8 g，分加别进行 X、Y 向输入，采用随机子空间分析方法得桥架 X 向整体振型第一阶频率为 7.31 Hz，Y 向整体振型第一阶频率为 13.23 Hz。

## 2.2 有限元模态分析

模态分析采用 Block Lanczos 法计算电缆桥架结构 200 阶自振频率及振型，并对计算得到频率与实测频率进行了比较。通过模态分析得到电缆桥架整体振型的模态结果如下：

X 向：第 19 阶，即桥架整体振型的第 1 阶，频率为 7.213 Hz，X 向平动，见图 4。

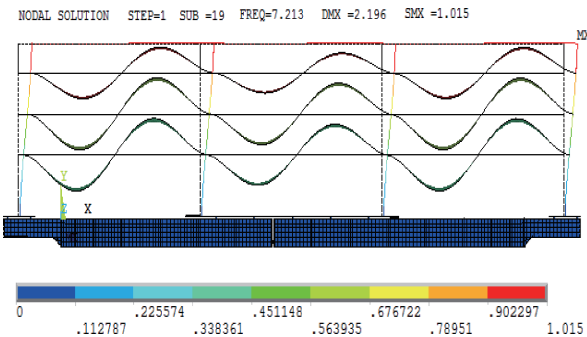


图4 电缆桥架 X 向第 1 阶整体振型

Fig. 4 The First Modal of Cable Tray to X

Y 向：第 30 阶，即电缆桥架整体振型第 1 阶，频率为 9.698 Hz，Y 向平动，见图 5。

电缆桥架整体振型第 1 阶模拟频率与试验频率对比见表 2，其中差值为模拟值与试验值差的绝对值，误差为差值与试验值的比值百分比。可知 X 向整体振型第 1 阶频率相对误差较小，Y 向整体振型第 1 阶频率相对误差较大。需要对有限元模型进行修正，以减小结构模拟频率与试验频率的偏差。

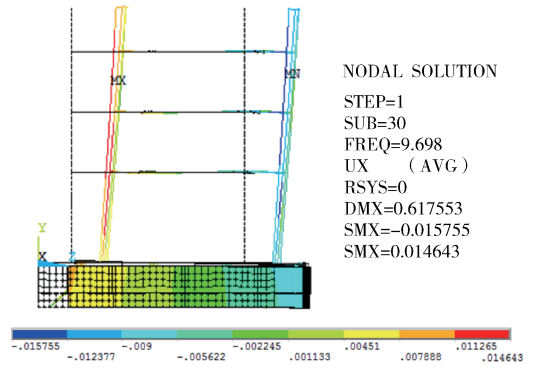


图5 电缆桥架 Y 向第 1 阶整体振型

Fig. 5 The First Modal of Cable Tray to Y

表2 模拟频率与试验频率比较

Table 2 Comparison Between Simulated Frequency and Test Frequency

类型	X 向频率/Hz	Y 向频率/Hz
试验频率	7.310	13.230
模拟频率	7.213	9.698
差值	0.097	3.532
误差	1.3%	26.7%

## 3 电缆桥架结构有限元模型修正

电缆桥架有限元模型对螺栓进行了简化处理，采用梁单元建模，X 向 15 排螺栓，Y 向 4 排螺栓，忽略螺栓连接中存在摩擦、接触、拧紧等问题。不确定性来源主要是螺栓连接部分。因为桥架尺寸比较大，加工偏差对结构频率影响很小。由表 2 可知 X 向频率模拟值与试验值偏差较小，Y 向频率模拟值与试验值偏差较大。因为 Y 向螺栓只有 4 排，只凭螺栓自身的弹性模量不能完全反映 Y 向的刚度，所以通过调整螺栓虚拟弹性模量<sup>[10]</sup>进行模型修正。

电缆桥架支座与地震台面连接部分螺栓虚拟材料弹性模量样本，在不同工况的模态频率见表 3。表 3 的螺栓弹性模量与 X、Y 向频率关系见图 6~图 7。

从图 6 可知，随着螺栓弹性模量增大，X 向模态频率也增大，但增值比较小。当弹性模量达到一定值后，X 向频率趋于平稳且小于 7.36 Hz。说明螺栓弹性模量对 X 向频率影响比较小，因为 X 向螺栓较多，虽然对螺栓进行了简化处理，但刚度仍达要求。从图 7 可知，随着螺栓弹性模量增大，Y 向模态频率也增大，且增幅比较大。由此可知螺栓

弹性模量对 Y 向频率影响比较大, 当弹性模量达到一定值后, Y 向频率趋于平稳且小于 17.5 Hz。

表 3 虚拟材料弹性模量对应的模拟频率

Table 3 Simulation Frequency to Different Elastic Modulus of Virtual Material

虚拟材料弹性模/GPa	X 向频率/Hz	Y 向频率/Hz
211	7.213	9.689
422	7.306	12.850
460	7.310	13.241
480	7.312	13.430
490	7.313	13.521
500	7.314	13.609
520	7.315	13.778
530	7.316	13.858
2 110	7.340	16.697
21 100	7.349	17.220
211 000	7.351	17.290

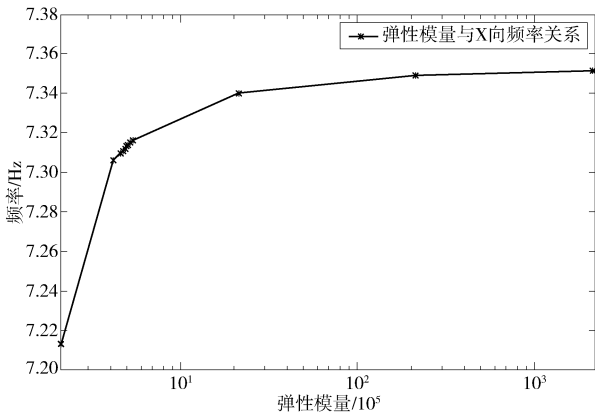


图 6 螺栓弹性模量与 X 向模态频率关系曲线

Fig. 6 Relationship Between the Elastic Modulus of the Bolt and the X Mode Frequency Curve

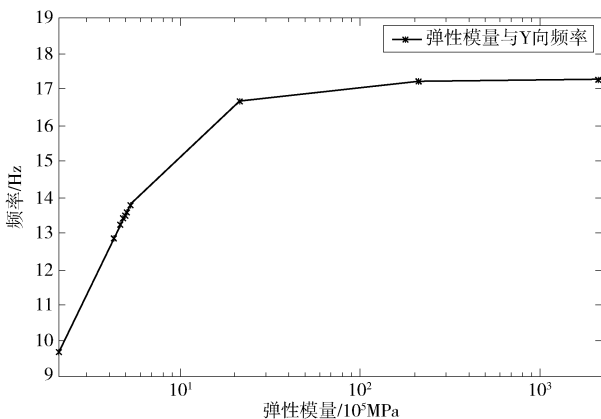


图 7 螺栓弹性模量与 Y 向模态频率关系曲线

Fig. 7 Relationship Between The Elastic Modulus of The Bolt and The Y Mode Frequency Curve

多次试验的 Y 向频率结果分布范围在 13.0 ~ 13.6 Hz 之间, 只有螺栓的弹性模量为 490 GPa 的结果显示参与系数比较大的模态频率均在 13 Hz 以上。所以选取螺栓的弹性模量 490 GPa, 得到模态频率结果见表 4, 电缆桥架的第 1 阶整体振型见图 8 ~ 图 9。

从表 4 可知, 模型修正后 X 向频率模拟值与试验值误差只有 0.04%, Y 向频率模拟值与试验值误差从 26.7% 降到 2.2%。

表 4 模型修正后的模拟频率与试验频率比较

Table 4 Comparison Between Simulated Frequency and Experimental Frequency of Modified Model

类型	X 向频率/Hz	Y 向频率/Hz
试验频率	7.31	13.23
模拟频率	7.313	13.521
差值	0.003	0.291
误差	0.04%	2.2%

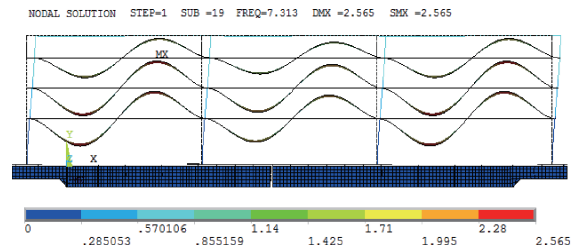


图 8 电缆桥架模型修正后 X 向第 1 阶整体振型

Fig. 8 The First Modal of Electric Cables Ladder Frames to X

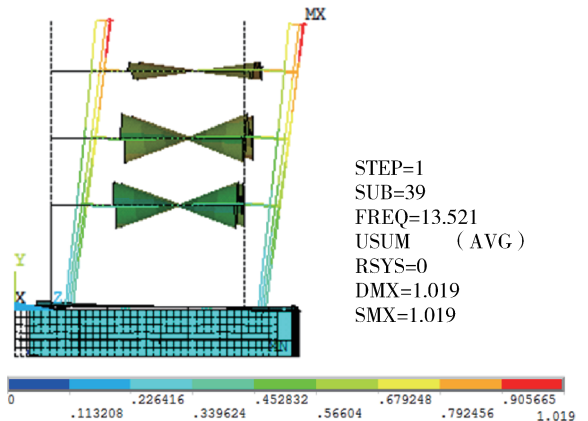


图 9 电缆桥架模型修正后 Y 向第 1 阶整体振型

Fig. 9 The First Modal of Electric Cables Ladder Frames to Y

### 4 模型修正后的时程结果分析

将修正后的电缆桥架有限元模型进行动力学仿

真分析, 结构阻尼比由试验得到, 阻尼比值为 5.3%。模拟输入时程为地震台面测得的加速度时程, X 向输入。时程分析结果最大值与试验结果最大值比较见表 5。

表 5 时程分析位移、应变最大值与试验最大值比较

Table 5 Time History Analysis of Displacement, Strain and the Maximum Value of the Test Results

类型	X 向位移/Hz	Z 向弯曲应变/Hz
试验值	8.09	292.77
模拟值	7.78	294.95
差值	0.31	2.18
误差	3.83%	0.74%

由上表 5 可知, X 向位移模拟最大值与试验最大值误差为 3.83%, Z 向弯曲应变模拟最大值与试验最大值误差为 0.74%。修正后的模型模拟得到位移与弯曲应变最大值与试验最大值结果相符。

模拟得到 1#柱顶点位移时程结果与试验得到 1#柱根部弯曲应变时程结果比较见图 10, 模拟得到 1#柱根部弯曲应变时程结果与试验得到 1#柱根部弯曲应变结果比较见图 11。

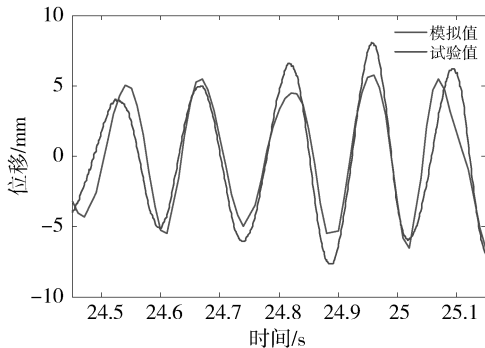


图 10 模拟与试验位移时程比较

Fig. 10 Comparison Between Simulation and Test Displacement

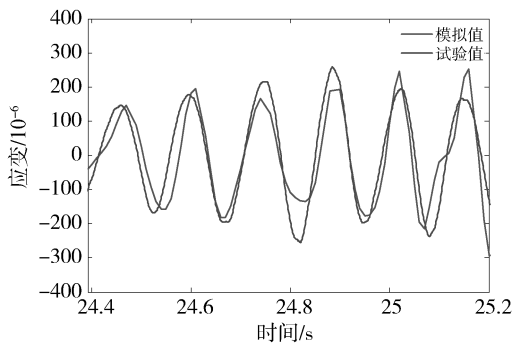


图 11 模拟与试验弯曲应变时程比较

Fig. 11 Comparison Between Simulation and Bending Strain

从图 10 和图 11 可知, 模拟得到的位移时程与试验得到的位移时程趋势基本一致, 模拟得到的弯曲应变时程与试验得到的弯曲应变时程趋势也基本一致, 说明修正后的电缆桥架模型与实际结构相符。

## 5 结论

本文基于试验实测数据对电缆桥架有限元模型进行了修正。修正后的模型 X 向模态频率相对试验频率的误差由 1.3% 变为 0.04%, Y 向模态频率相对试验频率的误差由 26.7% 变为 2.2%, 将修正后的有限元模型与实测数据进行比较, 发现修正后的电缆桥架振动特性与实际试验情况相符。表明螺栓采用虚拟弹性模量对模型进行修正分析电缆桥架结构整体振动是可行的。简化的有限元模型更有利于工程应用。

### 参考文献:

- [1] 杨德生, 孙柏涛, 胡少卿. 核电站用钢制梯架式电缆桥架抗震性能研究 [J]. 世界地震工程, 2008, 24(2): 54-59.  
YANG Desheng, SUN Baitao, HU Shaoqing. Seismic Behavior of Steel Electric Cables Ladder Frames in Nuclear Power Station [J]. World Earthquake Engineering, 2008, 24(2): 54-59.
- [2] 韩建平, 董小军, 周伟. 基于振动台试验的 RC 框架模型修正及模拟损伤识别 [J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(5): 87-92.
- [3] 张德文, 魏阜旋. 模型修正与破损诊断 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [4] 张徐静, 董雁, 李静敏, 等. 有限元模型修正法在结构动态设计中的应用 [J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2001, 20(2): 139-142.
- [5] BICKFORD J H. An Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints [M]. CRC, 1995.
- [6] 任伟新. 环境振动系统识别方法的比较分析 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2001, 29(6): 80-86.
- [7] 肖祥, 任伟新. 实时工作模态参数数据驱动随机子空间识别 [J]. 振动与冲击, 2009, 28(8): 148-153.
- [8] 管晓明, 傅洪贤, 王梦恕, 等. 基于 OMA 试验模态参数的砌体结构有限元建模及修正 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(14): 181-210.
- [9] 张笑华, 任伟新, 禹丹江. 结构模态参数识别的随机子空间法 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2005, 33(Supp): 46-49.
- [10] 陈学前, 肖世富, 刘信恩. 不确定性因素结构的有限元建模与确认 [J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(5): 26-29.