

基于 Kriging 法的大跨度斜拉桥有限元模型修正

李栋¹ 张朋² 汪辰³ 肖宏笛² 陈志军^{2,4}

1 中国市政工程中南设计研究总院有限公司

2 武汉华中科大检测科技有限公司

3 中信建筑设计研究总院有限公司

4 华中科技大学 土木与水利工程学院

DOI:10.32629/btr.v9i2.5128

[摘要] 本文提出基于代理模型的大跨度混合梁斜拉桥局部精细化有限元模型修正方法。先建立桥梁整体杆系模型,对钢混结合段等关键区域构建局部精细子模型,通过节点耦合与刚性域组合形成多尺度模型,兼顾计算效率与局部分析精度。引入Kriging代理模型替代反复有限元运算,提升修正效率;运用NSGA-II多目标算法优化结构参数,缩小实测与模拟响应差值。依托鸭池河特大桥成桥静、动载试验开展实例验证。结果证实,该多尺度建模及Kriging辅助多目标修正方法有效,具备工程实用价值。

[关键词] 有限元模型修正; 大跨度斜拉桥; Kriging代理模型; 多目标优化

中图分类号: U446 文献标识码: A

Finite Element Model Updating of Long-Span Cable-Stayed Bridges Based on Kriging Method

Dong Li¹ Peng Zhang² Chen Wang³ Hongdi Xiao² Zhijun Chen^{2,4}

1 China Municipal Engineering South China Design & Research General Institute Co., Ltd.

2 Wuhan Huazhong University of Science and Technology Testing Technology Co., Ltd.

3 CITIC Design Research General Institute Co., Ltd.

4 School of Civil Engineering and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology

[Abstract] This paper proposes a method for local refined finite element model updating of long-span hybrid beam cable-stayed bridges based on surrogate models. First, an overall truss model of the bridge is established, and local detailed sub-models are created for critical regions such as the steel-concrete composite sections. A multi-scale model is then formed by combining node coupling with rigid domains, balancing computational efficiency and local analysis accuracy. A Kriging surrogate model is introduced to replace repetitive finite element calculations, enhancing the updating efficiency. The NSGA-II multi-objective optimization algorithm is employed to refine structural parameters, minimizing discrepancies between measured and simulated responses. The method is validated through static and dynamic load tests conducted on the Yachi River Bridge. Results confirm that the proposed multi-scale modeling approach combined with Kriging-assisted multi-objective parameter calibration is effective and holds practical engineering value.

[Key words] finite element model updating; long-span cable-stayed bridge; Kriging surrogate model; multi-objective optimization

引言

当前大跨度桥梁精细化模型修正^[1,2]研究仍存在明显局限: 现有修正大多仅依托桥梁整体动力特性开展, 联合全局位移、局部应力多维度实测数据同步校准模型的研究较为匮乏, 千米级混合梁斜拉桥多尺度精细化建模与修正体系更是有待完善^[3,4]。此外, 有限元模型修正本质属于多目标优化问题, 传统修正手段多采用单目

标优化或加权求和型多目标优化: 单目标优化仅能保证单一力学指标最优, 无法同步兼顾桥梁整体刚度与局部应力状态; 加权多目标优化的权重系数缺乏统一确定标准, 人为选取的权重极易导致修正结果偏离真实工况, 难以实现全局、局部响应同步优化。

针对上述问题, 本文提出一套基于Kriging代理模型^[5]的大跨度混合梁斜拉桥局部精细化有限元模型修正方法:

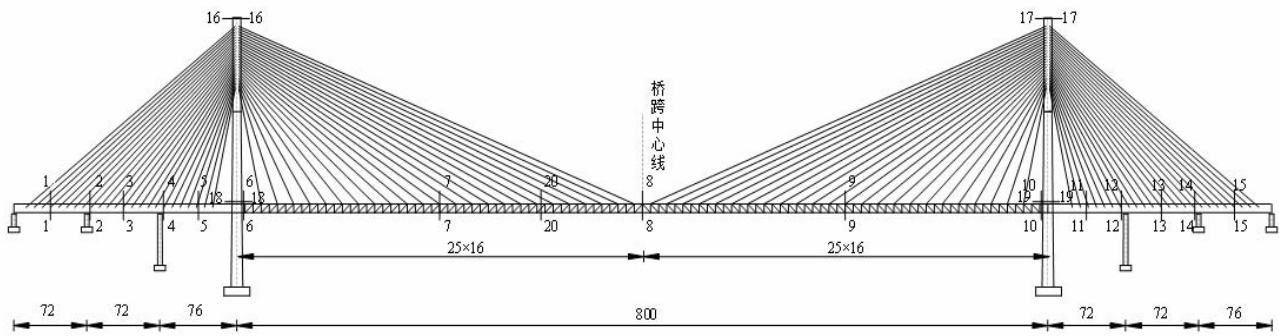


图1 鸭池河大桥主桥静态应变实验控制截面图(单位: m)

(1)采用多尺度建模思路,杆系单元模拟全桥整体结构,实体/板壳单元精细刻画钢混结合段等应力集中区域,通过刚性耦合实现多尺度模型协同传力;

(2)构建Kriging代理模型拟合结构参数与力学响应间的隐式非线性关系,替代反复迭代的有限元计算,降低优化计算成本;

(3)以实测频率、整体位移、局部应变与数值计算结果的残差构建多目标函数,采用NSGA-II非支配排序遗传算法完成无权重多目标参数优化,同步修正桥梁全局与局部力学响应;

(4)以鸭池河特大桥为工程实例,结合成桥静、动载试验数据完成模型修正,并对比实测与模拟结果验证方法的可行性与精度。

1 局部精细化有限元模型修正方法

1.1 Kriging代理模型基本理论

Kriging法本质是一种插值模型,它包含了线性回归部分和非参数部分,其中的线性回归部分也称为全局趋势模型;非参数部分被视作随机分布的实现,提供了模拟的局部近似。因此,kriging模型组成如下:

$$y(x)=f^T(x)\beta+z(x) \quad (1)$$

式中: $y(x)$ 为待求解隐式响应函数; $f(x)=[f_1(x), \dots, f_q(x)]^T$ 为多项式函数向量, $\beta=[\beta_1, \dots, \beta_q]^T$ 为回归系数向量, $z(x)$ 为均值为零的高斯随机分布过程,高斯随机过程的存在就是kriging法与传统响应面法的不同之处。

1.2 基于NSGA-II多目标优化的模型修正原理

有限元模型修正的核心思路是调整结构关键物理、几何参数,最小化数值模拟与现场实测动静力学响应的残差。对于混合梁斜拉桥局部精细化模型,优化目标需同时覆盖全局整体响应(自振频率、主梁挠度、塔顶位移)与局部细部响应(钢混结合段应变、构件应力),属于典型多目标优化问题。因此待修正参数同时包含全局参数(塔、梁、拉索弹性模量、密度)与局部敏感参数(钢混结合段钢材、混凝土等效刚度)。

本文采用第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解Pareto最优解集,无需人为定义权重,具备收敛速度快、解集分布均匀、对不连续、不可微多变量优化问题适应性强等优势。整体计算框架以MATLAB为主控程序后台调用ANSYS完成多尺度有限元建模与响应求解,耦合Kriging代理模型与NSGA-II算法实现自动化多目标模型修正。

1.3 局部精细化有限元模型修正实施流程

整套修正体系分为两大核心模块:

(1)Kriging代理模型构建模块:通过少量样本有限元计算得到参数-响应样本库,训练代理模型替代海量迭代有限元计算;

(2)NSGA-II多目标优化模块:基于代理模型预测力学响应,迭代更新结构参数,输出Pareto最优修正参数组合。

2 工程算例

2.1 桥梁工程概况

鸭池河大桥为国内首座双塔双索面半漂浮体系钢桁混合梁斜拉桥,桥梁总长1466.5m,跨径组成为72m+72m+76m+800m+76m+72m+72m,主跨800m采用钢桁主梁,两侧边跨为预应力混凝土箱梁;钢-混结合段总长14m,由4m混凝土内伸钢板段+6m钢箱过渡段+4m钢桁连接段组成。结合段箱梁四周、腹板布设纵向预应力钢绞线,保证结合面持续均匀受压;承压板、钢箱梁顶底板焊接剪力钉实现钢板与填充混凝土协同受力。钢箱过渡段设置渐变U型顶板加劲肋、变高度T型内肋、倒T型底板加劲肋与横向腹板加劲肋,平滑实现混凝土梁与钢桁梁刚度过渡。

2.2 多尺度局部精细化有限元建模

为兼顾全桥整体分析与钢混结合段局部应力求解精度,采用多尺度耦合建模方案:

(1)主梁、桥塔、横梁大尺度构件采用Beam188梁单元模拟;钢桥面板采用Shell163板壳单元,与梁单元共用节点等效模拟剪力连接件;钢桁梁加劲肋简化为二期恒载施加于节点,通过后续参数修正校准整体刚度。

(2)受力复杂、应力集中的钢混结合段采用Solid45实体单元+Shell163板壳单元精细化离散;整体杆系模型与局部精细子模型通过刚性域耦合节点,保证荷载、变形连续传递。

(3)斜拉索采用仅受拉杆单元Link10,输入初始索力应变,同时修正弹性模量计入拉索垂度效应。

(4)桥塔、桥墩底部全固结;斜拉索与塔、主梁之间通过刚臂单元连接。

最终建成全桥多尺度精细化有限元模型,单元总数约1000个。模型自由度规模大、待修正参数多,直接迭代优化计算成本极高,因此引入Kriging代理模型压缩计算耗时。

2.3成桥静动载现场试验

为了检验桥梁设计和施工质量,把握鸭池河特大桥的结构健康状态,并对该桥成桥状态进行评估,在该桥通车之前进行了一系列静动载荷载实验。根据桥梁结构受力特性及计算分析,对鸭池河特大桥主桥选取1、2、3、4、5、6、7跨进行荷载实验,主要工况下主梁关键截面的应变测点、主梁挠度测点和塔顶位移测点见图1。

其中钢混结合段处刚度变化明显,传力复杂,因此在结合段对面的截面6-6处共布置90个应变测点,在上弦杆、下弦杆、腹杆布置沿杆件轴向的测点主要用来测量相应的构件轴向应变情况。

(1)在边跨最大变形处布置竖向变形测点,即截面布置图中1-1、3-3、5-5截面,各测试截面横桥向共设置3个竖向变形测点;

(2)在主跨选取L/4、L/2、L3/4截面进行竖向变形观测,即截面布置图中7-7、8-8、9-9截面,各测试截面横桥向共设置3个竖向变形测点(采用静力水准仪检测);

(3)主塔塔顶水平变位测点布置在3#、4#主塔顶部(16-16、17-17截面),每个主塔顶部各设置1个变形测点(采用全站仪检测)。

2.4待修正模型参数筛选

有限元初始模型与实桥的偏差来源于材料参数、装配刚度、边界条件简化,需筛选对频率、位移、应力响应高敏感的参数作为优化变量。结合工程经验与参数灵敏度分析,最终确定16项全局修正参数,涵盖桥塔、混凝土主梁、钢桁各杆件、斜拉索、正交异性桥面板的弹性模量与材料密度。

3 模型修正结果与分析

3.1多目标优化函数构建

选取25组实测力学响应构建多目标优化函数,包含前6阶实测自振频率、多工况主梁竖向位移、钢混结合段局部应力;第7~9阶频率作为验证样本,用于评估修正模型泛化能力。优化目标为同步最小化三类响应残差:

$$F_1 = \sum_i \left| \sigma_i^{FE} - \sigma_i^{test} \right| / \left| \sigma_i^{test} \right|, \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (2)$$

$$F_2 = \sum_j \left| u_j^{FE} - u_j^{test} \right| / \left| u_j^{test} \right|, \quad j = 9, 10, \dots, 16 \quad (3)$$

$$F_3 = \sum_k \left| f_k^{FE} - f_k^{test} \right| / \left| f_k^{test} \right|, \quad k = 16, 17, \dots, 22 \quad (4)$$

$$\text{优化目标} \min F(x) = \{F_1(x), F_2(x), F_3(x)\} \quad (5)$$

subject to $x_1 \leq x \leq x_u$

式中: σ_i^{FE} 和 σ_i^{test} 分别为计算和实测的应力; i 为应变测点编号; μ_j^{FE} 和 μ_j^{test} 分别为计算和实测的位移; j 为位移测点编号; f_k^{FE} 和 f_k^{test} 分别为计算分析和实测的频率; k 为模态阶数。约束各参数在初始值±20%区间内取值。

表1 结构模态频率

模态阶数	实测频率	初始模型计算频率/Hz	初始相对误差/%	修正后频率/Hz	修正后相对误差/%
1	0.24	0.21	-12.50	0.22	-8.33
2	0.34	0.36	5.88	0.33	-2.94
3	0.51	0.45	-11.76	0.44	-13.73
4	0.61	0.52	-14.75	0.58	-4.92
5	0.68	0.64	-5.88	0.68	0.00
6	0.83	0.75	-9.64	0.70	-15.66
7	1.05	0.94	-10.48	0.93	-11.43
8	1.51	1.39	-7.95	1.42	-5.96
9	2.05	1.85	-9.76	1.76	-14.15

表2 各测点典型工况下的位移

编号	实测位移/mm	初始模型计算位移/mm	初始相对误差/%	修正后位移/mm	修正后相对误差/%
1	1.18	1.63	38.14	1.12	-5.08
2	1.01	1.45	43.56	0.99	-1.98
3	1.23	0.78	-36.59	1.18	-4.07
4	289.70	288.68	-0.35	276.53	-4.54
5	596.60	539.44	-9.58	598.56	0.33
6	101.00	125.69	24.45	102.25	1.24
7	115.00	123.18	7.11	118.33	2.89

表3 各测点典型工况下的应力

编号	实测应力/MPa	初始模型计算应力/MPa	初始相对误差/%	修正后应力/MPa	修正后相对误差/%
1	-47.4	-42.8	-9.70	-45.3	-4.43
2	-47.8	-49.6	3.77	-45.8	-4.18
3	-31.8	-35.3	11.01	-29.8	-6.29
4	9.0	12.6	40.00	9.6	6.67
5	-36.2	-39.3	8.56	-36.5	0.83
6	-35.0	-29.6	-15.43	-37.2	6.29
7	-40.2	-36.1	-10.20	-42.3	5.22
8	-11.0	-7.5	-31.82	-11.9	8.18

3.2修正结果数据汇总

(1)自振频率对比(表1)。初始模型前9阶频率最大相对误差14.75%;修正后位移、应力精度大幅提升,受多目标冲突影响,频率最大误差升至15.66%,但验证用第7~9阶频率最大误差仅

11.43%, 整体吻合度良好。

(2) 主梁位移对比(表2)。修正前位移最大相对误差43.56%; 修正后全部测点位移误差控制在5.08%以内, 整体刚度匹配精度显著提升。

(3) 局部应力对比(表3)。钢混结合段测点初始应力最大误差40.00%; 修正后应力最大误差仅8.18%, 局部应力集中区域模拟精度得到有效改善。

4 结论

本文将Kriging代理模型与NSGA-II多目标进化算法相结合, 建立了一套适用于大跨度混合梁斜拉桥的局部精细化有限元模型修正方法, 依托鸭池河特大桥成桥试验完成方法验证, 工程实例结果表明: 经本文方法修正后的基准有限元模型, 全局位移最大误差控制在5.08%, 局部应力最大误差8.18%, 能够可靠反映桥梁真实整体刚度与局部应力分布, 可为长期健康监测、承载力评估、损伤识别提供高精度数值载体; 后续可融合桥梁长期实时监测数据, 持续迭代更新、优化基准模型。

[参考文献]

[1] 肖祥, 鄢宇, 何佳, 等. 大跨度斜拉桥局部精细化有限元模型及其修正[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 120-127.

[2] 王浩, 李爱群. ANSYS大跨度桥梁高等有限元分析与工程实例[M]. 中国建筑工业出版社, 2014.

[3] 罗霞. 基于Kriging法的单索面斜拉桥静力可靠度分析[D]. 华南理工大学, 2012.

[4] 方志, 张国刚, 唐盛华, 等. 混凝土斜拉桥动力有限元建模与模型修正[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 77-85.

[5] 姚拴宝, 郭迪龙, 孙振旭, 等. 基于Kriging代理模型的高速列车头型多目标优化设计[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(2): 186-200.

作者简介:

李栋(1993—), 男, 汉族, 湖北省汉川市人, 硕士研究生, 职称: 中级, 从事的研究方向: 道路桥梁设计。