

在完成数据误差剔除后，为防止低频信号的干扰，首先对数据进行去趋势处理并按照谱线数为8192截断成为若干段，得到图(a)所示的信号。使用Matlab函数命令Xcorr分别计算各测点相对于测试工况中参考点的互相关函数如图(b)所示。取互相关函数数据的一半并对按照谱线数截断的若干段数据所形成的互谱进行平均，加与前文所述相同的指数窗后得到图(c)所示的互谱。通过参数的互谱与自谱的比值得到一次测试的伪频响函数如图(d)所示。

3.5.2 CMIF 方法数据后处理过程

在 CMIF 方法完成模态参数识别的过程中，首先应根据各次子结构测试中形成的虚拟频响函数矩阵，按照测点的排列顺序形成整体结构的频响函数矩阵。在此基础上，根据整体频响函数矩阵的输入点和输出点个数、输出点编号、模态测试采样频率以及每段数据的谱线数，并选定需要求解的模态参数上下限（本文统一取为 0~10Hz）生成 CMIF 模态提取图。通过手动提取奇异值曲线上的峰值点，以及曲线拟合完成识别。在来华大桥桥面竖向振动数据的工作模态分析过程中，模态参数提取图的曲线拟合过程如图 3.4 所示，模态参数求解过程中 MAC 值的分析结果可见于图 3.5。

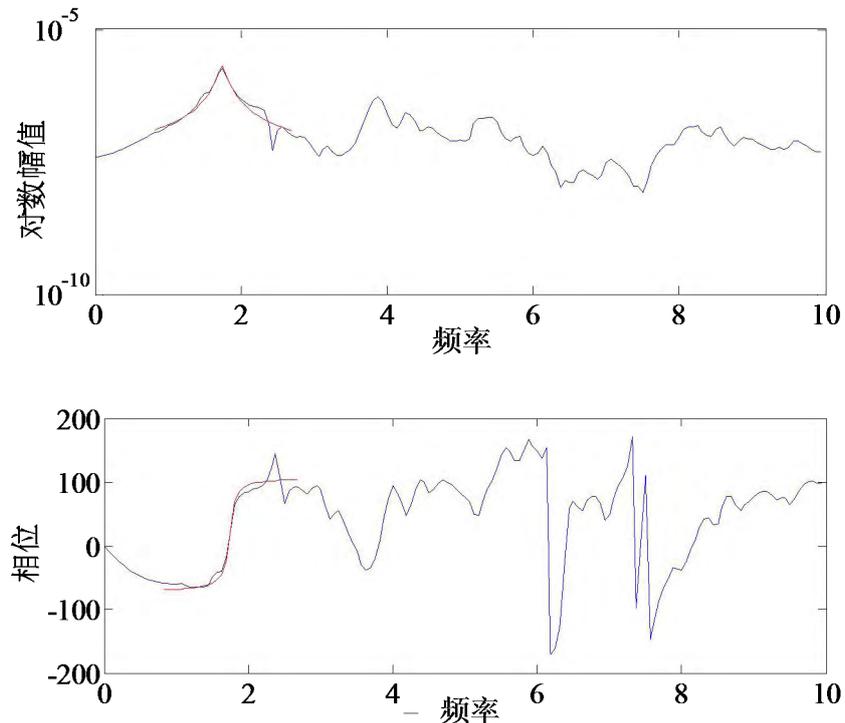


图 3.4 CMIF 方法识别过程中频响函数以及相位的曲线拟合图示

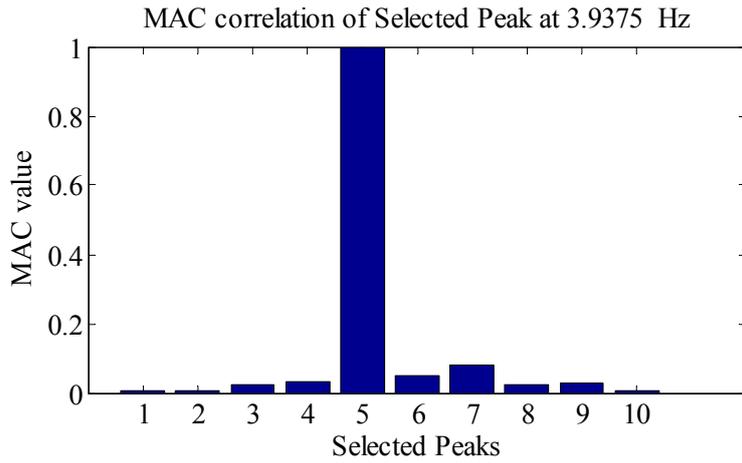
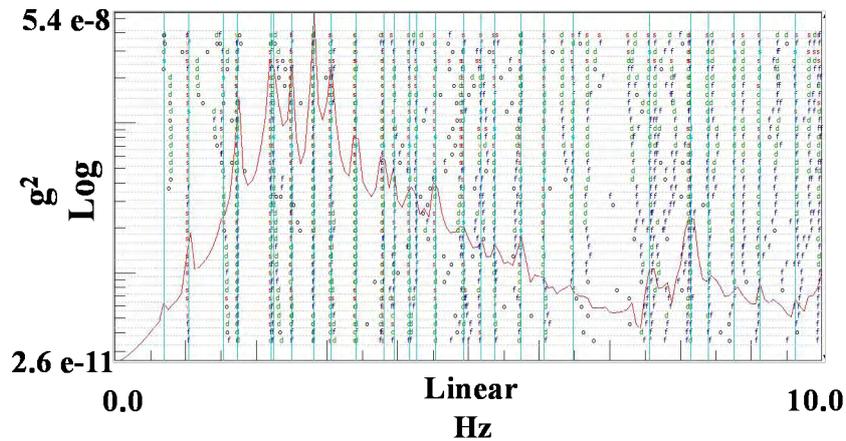


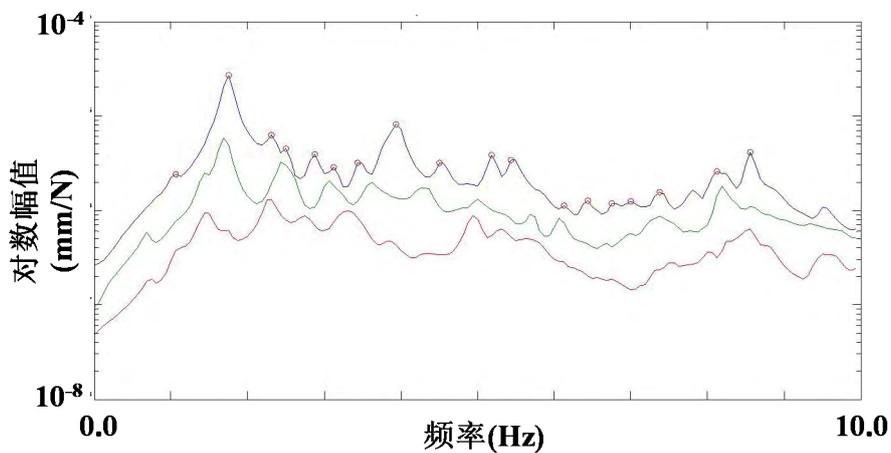
图 3.5 CMIF 方法数据后处理过程中的模态置信准则 (MAC) 图示

3.5.3 模态参数识别

桥面竖向振动的模态参数分析的结果可见于图 3.6。SSI 方法识别的稳态图中，出现峰值点且高频出现 s 的位置预示被识别的模态。CMIF 方法得到的模态提取图中，需要手动提取的模态极点如图所示，完成手动提取后，由曲线多项式拟合的方法系统的模态参数。经过 SSI 方法和 CMIF 方法识别的模态参数统计于表 3.1。



(a)



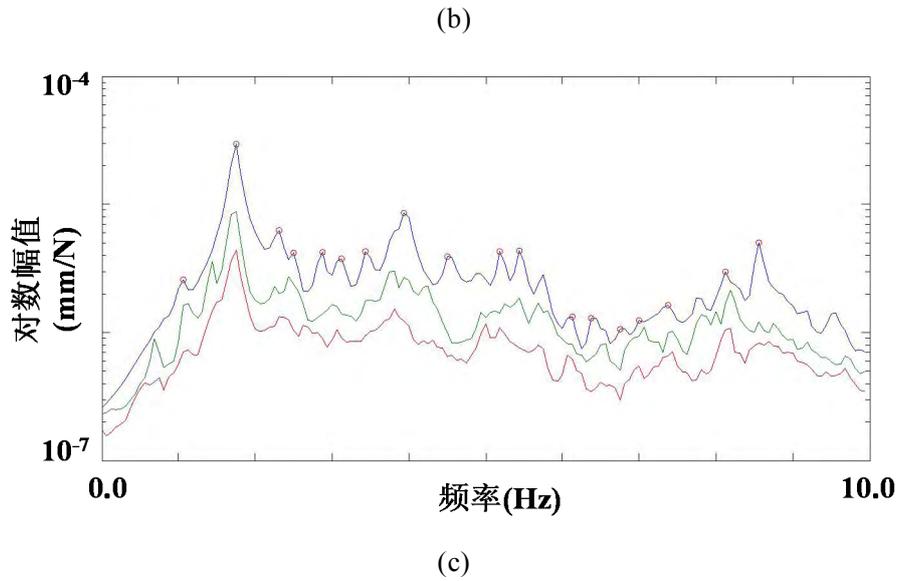


图 3.6 桥面板竖向振动 (a) SSI 方法稳态图 (b) 基于互相关函数的 CMIF 方法模态提取图
(c) 基于随机减量技术的 CMIF 方法模态提取图

根据两种方法的模态提取图，SSI 方法与 CMIF 方法识别得到的峰值模态非常一致，而且由于 SSI 方法自身的特点，稳态图识别出的感兴趣频带内的模态峰值十分明显。在 CMIF 方法使用两种数据前处理方式识别的过程中，使用随机减量技术结合 CMIF 方法识别的峰值模态更加清晰。

表 3.1 桥面竖向振动模态参数识别结果

模态阶数	频率识别结果(Hz)				
	SSI	CC+CMIF	阻尼比(%)	RD+CMIF	阻尼比(%)
1	0.694	0.695	3.283	0.695	2.198
2	1.040	1.064	3.647	1.061	3.139
3	1.730	1.751	3.597	1.749	3.185
4	2.243	2.314	2.699	2.312	2.604
5	2.503	2.509	6.837	2.504	6.679
6	2.808	2.875	4.036	2.870	0.861
7	3.060	3.125	6.705	3.125	3.601
8	3.406	3.438	0.347	3.432	0.111
9	3.949	3.937	1.844	3.936	1.087
10	4.536	4.502	1.638	4.504	1.270
11	5.176	5.184	7.420	5.188	1.670
12	5.373	5.438	1.022	5.501	5.441
13	6.069	6.125	6.300	6.127	1.481
14	6.482	6.378	9.614	6.438	2.634

15	/	6.751	10.168	6.753	7.473
16	/	7.013	5.062	7.008	6.053
17	/	7.376	2.972	7.375	0.323
18	8.142	8.124	1.901	8.126	0.701
19	8.394	8.561	1.779	8.563	1.789

桥面横向振动的模态参数分析的结果可见于图 3.7。经过两种前处理方法和 CMIF 方法识别的模态参数统计于表 3.2。据 CMIF 图所示，使用互相关函数作为数据预处理方法的识别结果清晰，峰值模态明显。在使用随机减量技术进行数据预处理的基础上同样可以识别出横向振动的峰值模态，然而在不相关的频段出现了大量的虚假模态，对识别的结果可靠性产生较大干扰，加大了后续分析中对于虚假模态筛除的工作量。

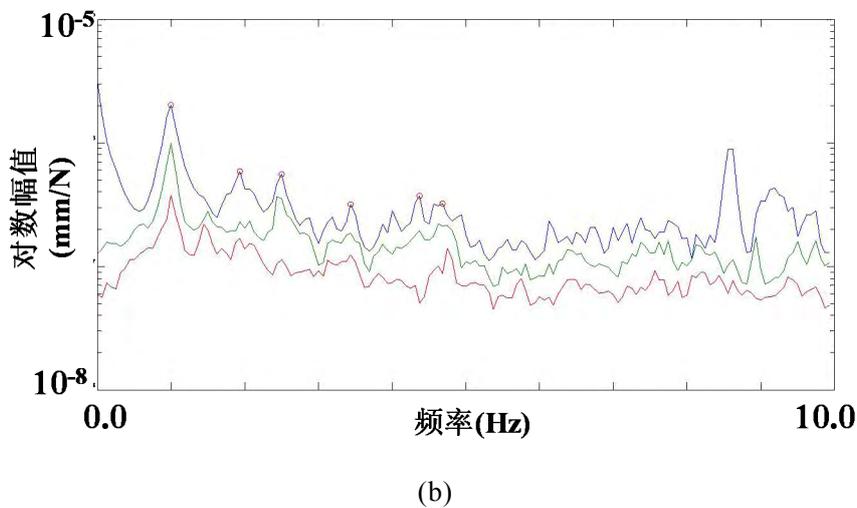
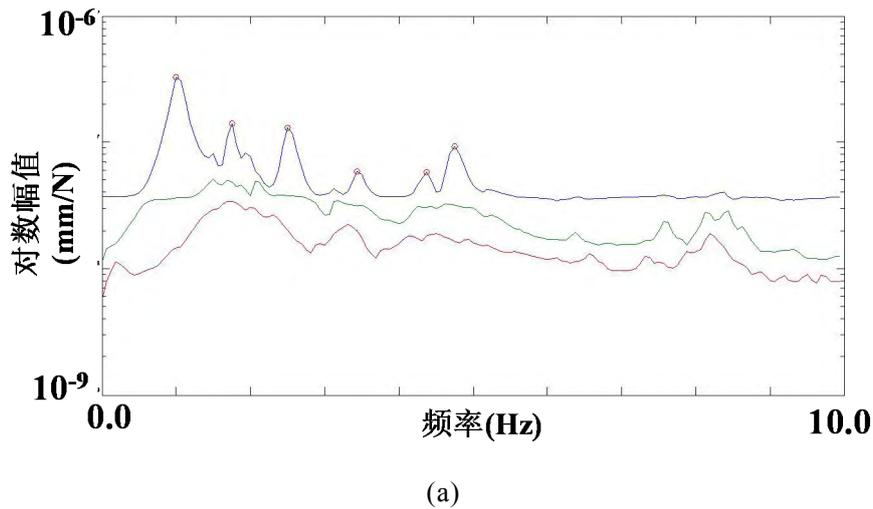
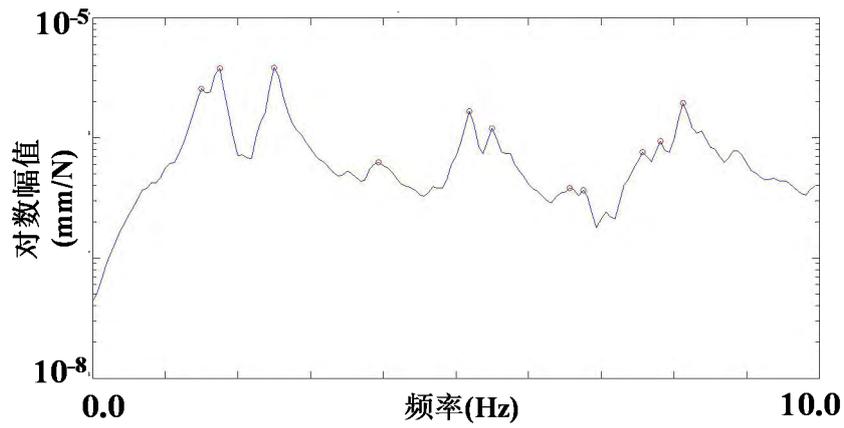


图 3.7 桥面板横向振动模态提取图 (a) 基于互相关函数的 CMIF 方法 (b) 基于随机减量技术的 CMIF 方法

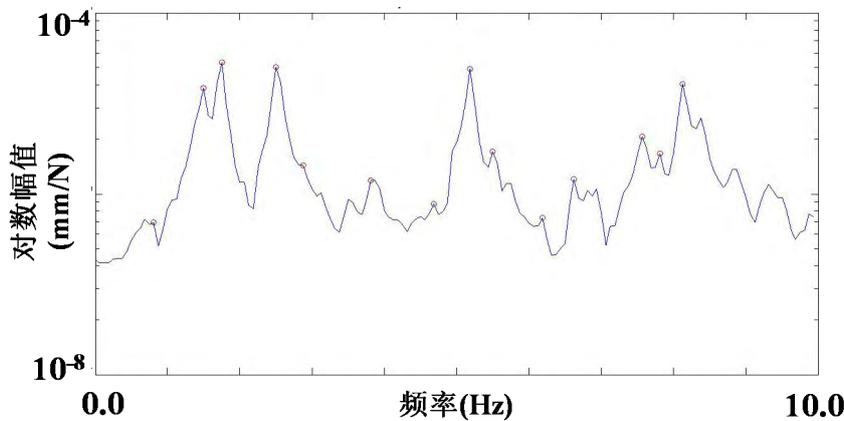
表.3.2 桥面横向振动模态参数识别结果

模态阶数	频率识别结果(Hz)			
	CC+CMIF	阻尼比 (%)	RD+CMIF	阻尼比 (%)
1	0.999	10.637	1.004	12.460
2	1.938	3.058	1.942	5.076
3	2.500	8.385	2.503	5.590
4	3.438	3.027	3.439	2.540
5	4.375	2.325	4.377	1.168
6	4.752	3.798	4.689	1.801

拱肋竖向振动的模态参数分析的结果可见于图 3.8。经过两种前处理方法和 CMIF 方法识别的模态参数统计于表 3.3。与前文所述类似，在使用 CMIF 方法识别钢拱竖向振动模态参数的工作中，经过互相关函数方法处理的数据识别出了稳定的模态，而随机减量技术进行数据处理后的识别结果出现了部分虚假模态。



(a)



(b)

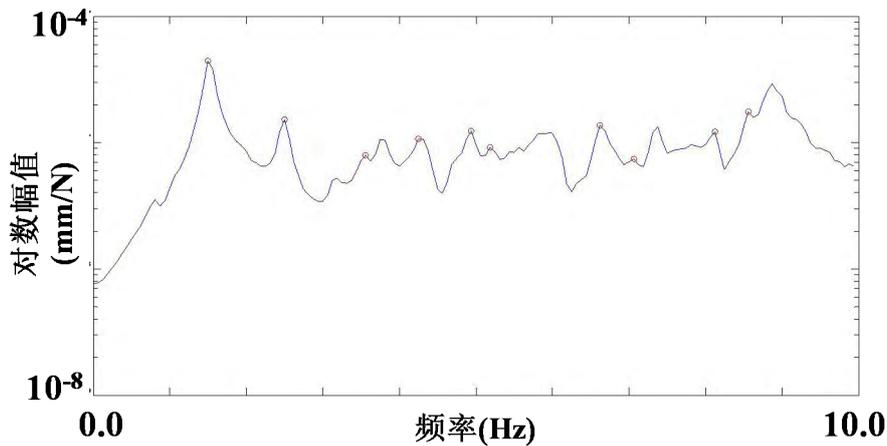
图 3.8 钢拱竖向振动的模态提取图 (a) 基于互相关函数的 CMIF 方法 (b) 基于随机减量技

术的 CMIF 方法

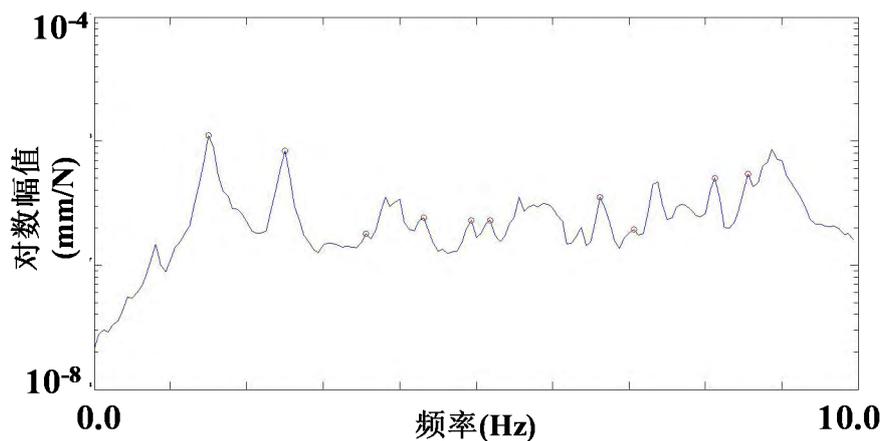
表 3.3 拱肋竖向振动模态参数识别结果

模态阶数	频率识别结果(Hz)			
	CC+CMIF	阻尼比(%)	RD+CMIF	阻尼比(%)
1	1.061	9.074	1.064	9.078
2	1.505	3.072	1.503	3.063
3	1.751	12.129	1.751	12.155
4	2.508	1.274	2.503	1.206
5	2.876	4.034	2.876	4.011
6	3.938	1.537	3.874	1.526
7	5.187	2.971	5.126	2.734
8	5.501	3.799	5.564	3.655
9	6.376	1.245	6.375	1.248
10	8.125	1.250	8.128	1.250

拱肋竖向振动的模态参数分析的结果可见于图 3.9。经过两种前处理方法和 CMIF 方法识别的模态参数统计于表 3.4。据图可知，使用两种方法均准确地识别出 3 Hz 以内的 2 阶模态。然而在较高的频段范围内，两种方法的识别结果均存在较多的虚假模态，需要在后续的分析过程中予以剔除。



(a)



(b)

图 3.9 钢拱横向振动的模态提取图 (a) 基于互相关函数的 CMIF 方法 (b) 基于随机减量技术的 CMIF 方法

表 3.4 拱肋横向振动模态参数识别结果

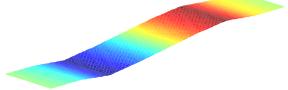
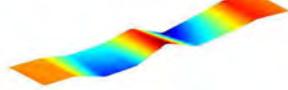
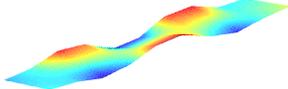
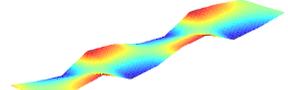
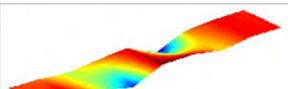
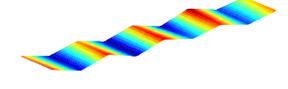
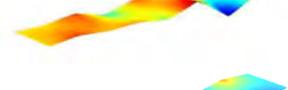
模态阶数	频率识别结果(Hz)			
	CC+CMIF	阻尼比	RD+CMIF	阻尼比
1	1.504	4.221	1.506	3.996
2	2.503	8.961	2.508	7.030
3	3.563	8.872	3.562	14.848
4	4.313	5.706	4.312	10.022
5	4.938	5.677	4.938	4.164
6	5.188	2.439	5.125	0.505
7	6.627	3.419	6.624	2.904
8	7.062	3.444	7.063	1.310
9	8.124	1.455	8.125	1.243

3.6 模态振型与模态耦合现象

3.6.1 模态振型结果

在数据后处理阶段，由 CMIF 方法通过伪频响应函数识别结构的模态振型，通过两种数据前处理方法得到的振型向量相同。本文对来华大桥的研究中，使用 CMIF 方法以及 SSI 方法识别得到的前 10 阶桥面竖向振动的模态振型统计于表 3.5。

表 3.5 工作模态分析与有限元计算模态分析桥面板竖向振型对比

模态	有限元模态	SSI 模态振型	CMIF 模态振型
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

3.6.2 模态耦合

模态耦合现象普遍存在于大跨度拱桥结构中，根据表 3.1 和表 3.2 总结的钢拱与桥面在竖向和横向的 2 维模态，部分频段存在明显的模态空间耦合作用，钢拱与桥面板在部分模态处存在两个方向上共同振动的特征。大跨度拱桥由于其结构的复杂性，传统的平面模态测试方法识别的结构信息趋于不完备。在本文的研究中，来华大桥的桥面板与钢拱在较多模态处均存在耦合作用，其中以 2.503 Hz 处的模态耦合最为明显，两种构件在两个方向上均存在明显的振动模态，部分低

阶模态的耦合见于表 3.6，相应的振型耦合云图可见于图 3.10。

表 3.6 桥面与拱肋的模态空间耦合现象

模态阶数	桥面竖向振动 (Hz)	桥面横向振动 (Hz)	拱肋竖向振动 (Hz)	拱肋横向振动 (Hz)
1	1.040	/	1.064	/
2	1.531	/	1.503	1.506
3	1.730	/	1.751	/
4	2.503	2.503	2.503	2.508
5	2.808	/	2.876	/

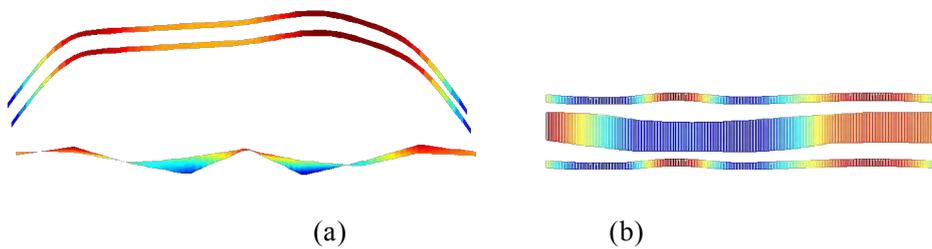


图 3.10 桥面与钢拱在 2.503 Hz 处的模态耦合现象 (a) 模态立面图 (b) 模态俯视图

3.7 本章小结

本章简要介绍了工作模态分析方法 (SSI 和 CMIF) 以及两种数据预处理方法 (RD 和 CC)。而后通过 SSI 方法完成桥面板竖向工作模态分析并分别使用基于 RD 和 CC 技术的 CMIF 方法完成了桥面与钢拱的两个方向模态分析。全面获取了来华大桥环境振动的模态参数并相互对比较核了三种方法的分析结果。SSI 与 CMIF 方法均能可靠地识别系统模态参数，主要峰值模态出现的频段非常一致，且 SSI 的识别运算时间较长，识别的模态参数也相对稳定，稳态图中的峰值模态清晰且容易辨认，对于进行模态密集区域的参数识别有较好的效果。基于 CC 技术的 CMIF 识别方法稳定可靠，多次进行模态求解结果非常一致。基于 RD 技术的 CMIF 方法识别的模态提取峰值谱图清晰，模态数量较多，且 CMIF 值略大于基于 CC 技术的相应结果。然而，该方法稳定性稍差，两次识别的模态参数有略微差异，而且识别过程易引入虚假模态，加大后续模态筛选工作的工作量。分片子结构测试中使用测试工况的参考点数据作为计算互谱均可识别主要模态参数，然而部分感兴趣的频段可能会随所使用的工况数据的不同导致虚假模态的识别。此外，对于大跨度拱桥结构，由于其空间跨度大、自身结构形式复杂，主要构件受环境振动导致的模态耦合现象明显。

第 4 章 基于遗传退火混合算法的单模型桥梁结构识别

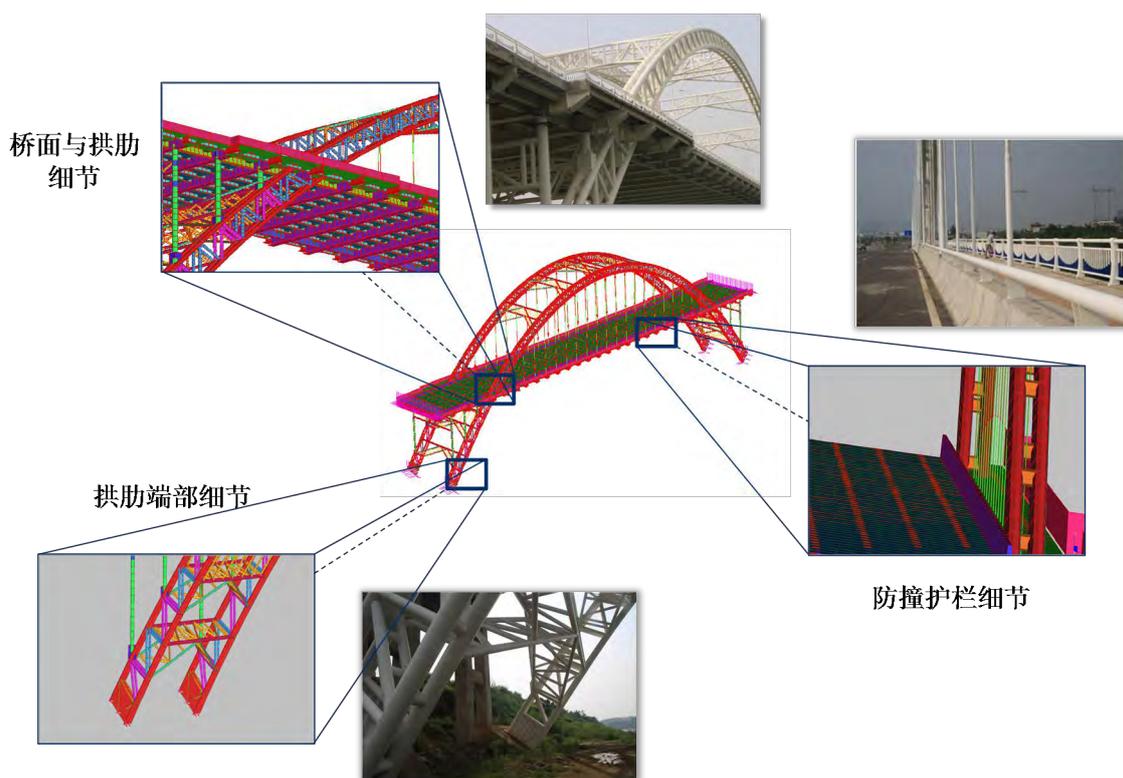
4.1 引言

在进行了来华大桥环境振动信号处理与工作模态分析的基础上，本章通过精确建立来华大桥的有限元模型进行结构的模拟与响应预测，有限元建模过程根据现场的勘查结果考虑了大量的结构细节，大幅降低了有限元模型与真实结构的几何参数误差。由于模型中的大量无法通过设计资料明确的不确定性参数，本章通过基于模态频率和振型的目标函数实现有限元模型的校验与参数识别。为了验证参数识别方法的可靠性，本章引入了一个简单的简支梁数值仿真，并依据该方法对人为施加的损伤进行了识别，并在此基础上完成了来华大桥的参数识别研究。

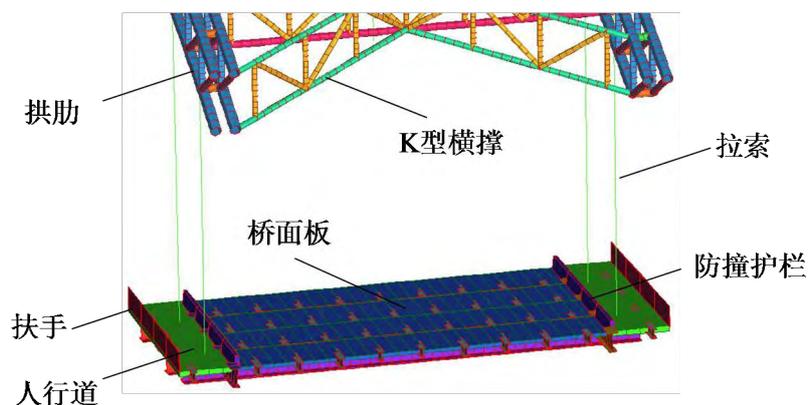
4.2 有限元建模方法

在完成现场静动力试验后，笔者使用有限元软件 Strand7 建立了来华大桥模型。Strand7 是澳大利亚私人有限公司开发的大型模拟仿真系统，在土木工程领域有广泛的应用，且曾效力于“水立方”的结构分析过程。其强大的求解功能涵盖线性系统静力加载计算、计算模态分析、系统温度瞬态与稳态分析、温度应力计算等。Strand7 具备安装过程简捷、计算效率高等优点且其网络版本可供同一区域多人同时联网进行有限元计算，相比于其他大型有限元软件的经济价值较高。

为了消除建模不确定性因素的影响，所有单元的几何特征和物理参数都按照设计资料和现场勘查结果确定。模型的主要构件包括拉索、纵梁、横梁、桥面板、钢拱、防撞护栏、栏杆、横撑、立柱等。桥面板以及人行道由 4 节点的 plate 单元组成，纵横梁、立柱、人行道栏杆、防撞护栏、拱肋等由 2 节点 beam 单元模拟，K 型横撑由 link 单元模拟。拉索由 61 根 PES-7-061 高强应力钢绞线相互缠绕而成，在模型中按照截面等效的原则将其模拟为仅承受拉力的 cable 单元。为避免建模过程引入的误差，所有实际结构细节在模型中均通过不同的单元予以考虑。实际结构中，横梁为变截面构件，在有限元模型中通过使用不同截面高度的工字横梁进行模拟。拱两端的钢管内灌注 C50 混凝土并通过 20mm 厚的钢板联接。立柱下端通过方形钢管混凝土承台架设在 4 片拱肋上，在模型中通过 brick 单元模拟。车道护栏为 C30 混凝土结构，并根据截面积等效的原则在模型中通过梯形截面的混凝土 beam 单元予以考虑。有限元模型共由 19004 个节点、3108 个梁单元和 2232 个板单元组成。模型以及部分细节模拟如图 4.1 所示，实际结构以及有限元模型中的边界条件见于图 4.2。



(a)



(b)

图 4.1 (a) 来华大桥有限元模型及部分实物细节模拟 (b) 有限元模型细节

4.2.1 拱肋模拟

由于拱肋为钢管混凝土结构，承载性能复杂，在有限元建模过程中，笔者分别考虑两种方式完成拱肋的模拟（如图 4.2）。第一种方法是使用钢管混凝土统一模型理论，将钢管与内部灌注的微膨胀混凝土统一模拟为一种等效材料，根据钢材与混凝土等级以及构件的体积含钢率确定等效材料的物理参数（弹性模量、剪切模量等）^[86]。第二种方法是采用传统的方法将构件截面模拟为两种材料的组合。为了对比两种模拟方法的可行性，笔者分别对比了两种模型在静载卡车试验工况 15（桥梁主跨 1/4 位置放置 5 台卡车）中的桥面变形结果，并将其与试验结果对

照（见于图 4.3）。

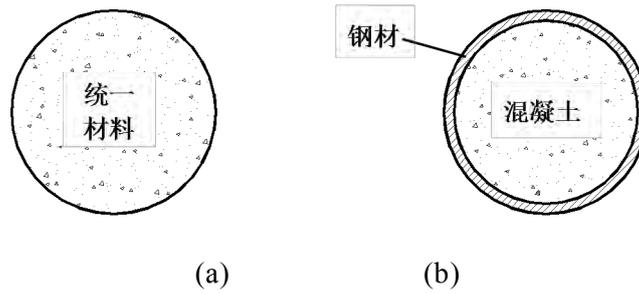


图 4.2 (a) 基于统一模型理论的拱肋截面模拟 (b) 基于传统建模理念的拱肋截面模拟

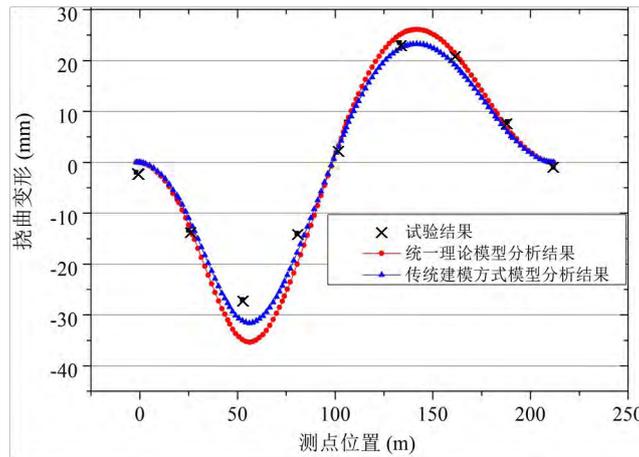


图 4.3 两种建模方式静载变形对比

根据两种模型的静载变形预测结果，由统一理论模拟模型静载预测结果大于相应的传统模型。然而，使用传统建模理念模拟拱肋的有限元模型计算结果与现场试验数据更为一致。因此后续灵敏度分析以及模型修正均采用由混凝土与钢材两种材料模拟拱肋的来华大桥有限元模型。

4.2.2 灵敏度分析

灵敏度分析是分析目标函数相对于设计参数的敏感程度的过程，传统的分析方法中通常选取目标函数对于变量的偏导数。由于导数方法依赖于所选取的自变量，无法获取目标函数在整体自变量空间内的敏感性，灵敏度分析的概念在研究过程中被逐渐扩大，国内外诸多学者开始在灵敏度分析中考察模态参数随不确定性参数在自变量空间范围内变化的波动。在模型修正过程中，准确的灵敏度分析对快速提取重要不确定性参数，提高目标函数收敛速度与参数识别精度均有较大影响。基于灵敏度分析的模型修正通过研究对于模型输出敏感的各个建模参数，通过迭代循环的方法实现结构不确定参数的准确识别。通常在大型结构的灵敏度分析中，选取模型主要单元的密度、弹性模量等作为不确定性参数^[97]。本文所选取的灵敏度分析参数统计如下：

(1)混凝土拱肋、桥面板、人行道板、立柱以及防撞护栏的混凝土构件弹性模

量

- (2) 钢拱和拉索等钢构件弹性模量
- (3) 桥面板的竖向边界条件

通常，灵敏度分析参数的选取要具备认知不确定性并对于模型响应输出的目标函数有较明显的影响。本文分别使用两种数据（静载变形数据和工作模态分析结果）构成的目标函数完成分析，可见于公式(4.1)和公式(4.2)

$$F(x,i) = \sum_{i=1}^n d_{ai} - d_{ei} \quad (4.1)$$

其中， d_{ai} 表示有限元模型中桥面测点相应位置的挠曲变形预测结果； d_{ei} 表示现场静载卡车试验测点的挠曲变形； x 指代不确定性参数并且 i 表示测点的编号。

$$F(x,i) = \sum_{i=1}^n \frac{f_{ai} - f_{ei}}{f_{ei}} \times 100\% \quad (4.2)$$

f_{ai} 和 f_{ei} 分别表示有限元模型预测的模态频率和由SSI方法进行工作模态分析得到的模态频率； x 指代不确定性参数，并且 i 表示进行分析的第 i 模态。本文通过模态置信准则（Modal Assurance Criterion,MAC）完成有限元模态和工作模态的匹配（如公式 4.3），MAC 值越接近于 1，说明两种振型向量的相关系数越大。

$$MAC_i = \frac{(\varphi_{ai}^T \phi_{ei})^2}{(\varphi_{ai}^T \varphi_{ai})(\phi_{ei}^T \phi_{ei})} \quad (4.3)$$

φ_{ai} 和 ϕ_{ei} 分别表示有限元模型预测的模态振型向量和环境振动测试工作模态分析得到的振型向量； i 表示进行分析的第 i 模态。

本文的灵敏度分析主要针对模型中 8 个明显不确定性参数展开（如图 4.4），其中，图(a),(c),(e)为不确定性参数基于静载挠曲变形的灵敏度分析，图(b),(d),(f)为不确定性参数基于模态频率的灵敏度分析。由图，两种方法识别出的灵敏参数非常一致且两种目标函数随桥面板边界条件的变化趋势十分一致，说明原始模型中将边界条件假定为固定铰支座合理地模拟了实际结构。其中，桥面板边界的竖向刚度上限选择介于 1.6×10^{13} 之间任何数值时，两种目标函数中任何参数均不再发生变化，因而可将其认定铰支座支撑并选为灵敏度分析的参数上限。其余不确定性参数灵敏度分析的上下限均基于经验结合工程实际选取，本文中上下界限分别选为相应不确定性参数设计值的 0.6 倍和 1.5 倍。综合考虑两种目标函数的灵敏度分析结果，来华大桥有限元模型中的关键不确定性参数为：混凝土拱的弹性模量、钢拱的弹性模量、桥面板的弹性模量、人行道板的弹性模量、人行道板的厚度以及桥面板两端的支座刚度。

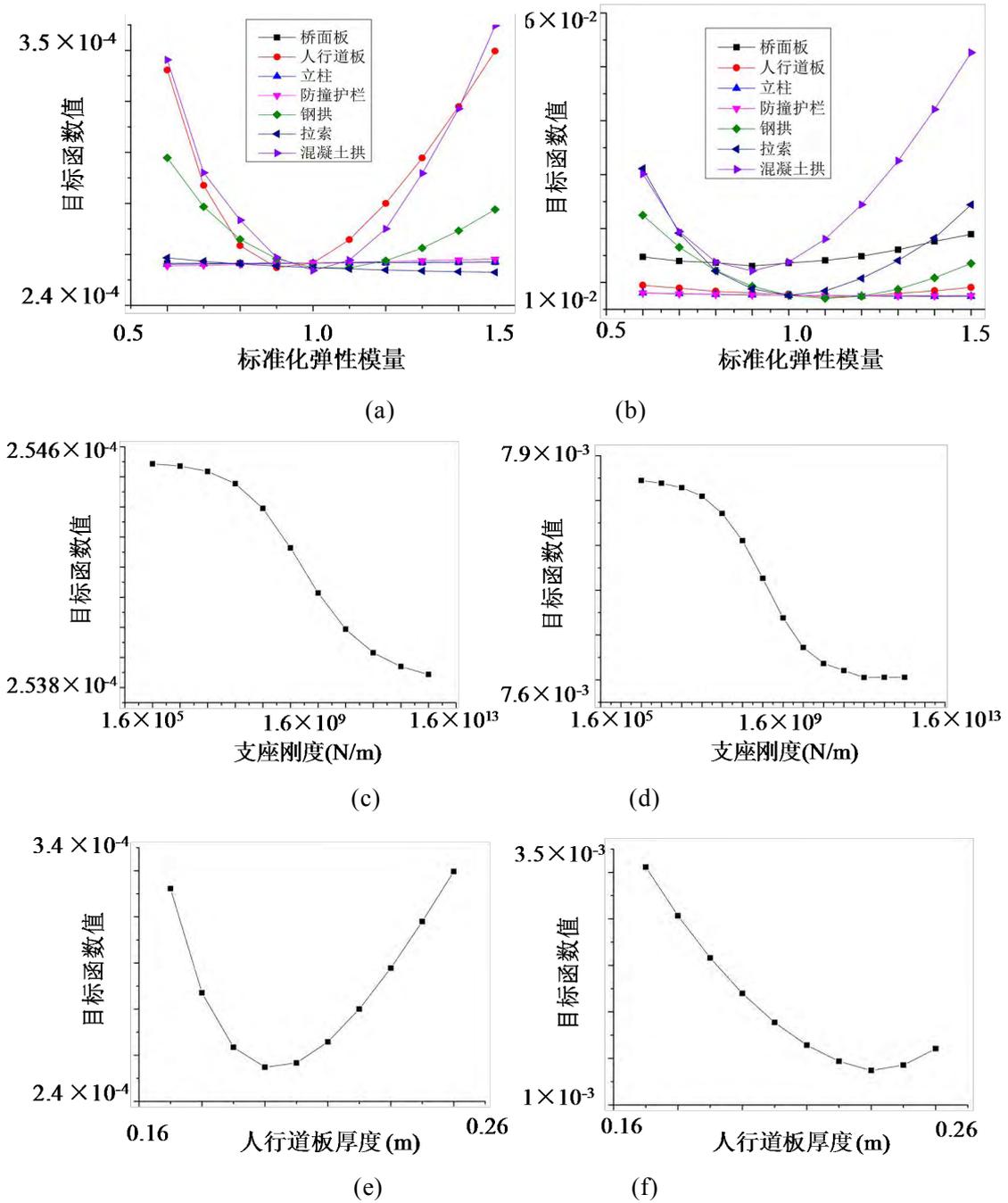


图 4.4 灵敏度分析曲线图 (a), (b)标准化的弹性模量 (c), (d)边界条件 (e), (f)人行道板厚度

4.2.3 程序应用交互访问技术

本文的模型修正过程通过应用程序交互访问技术 (Application Programming Interface, API) 实现编程软件 Matlab 和有限元软件 Strand7 之间的数据交互访问和命令调用。Strand7 所特有的 API 功能模块可通过 Matlab 编程语言由动态链接库将命令传达至 Strand7, 完成有限元模型的参数修改、静载以及模态运算、导出计算结果等。实际应用中需要将 Matlab 和 Strand7 两个软件放置于系统环境变量的路径中, 并将 St7APICall.h 以及 St7APICConst.m 放置于 Matlab 的当前目录内。API 模块的另一个优势在于可将有限元运算与 Matlab 强大的智能算法工具箱结合

(如遗传算法、模拟退火算法等),通过人工智能算法实现大型结构有限元模型的自动迭代运算寻优,极大简化了模型不确定性参数的修正过程。Matlab 与 Strand7 API 模块的交互功能流程可见于图 4.5。

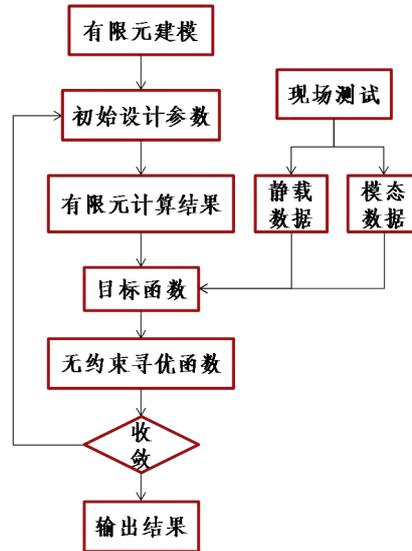


图 4.5 Srand7 API 模块技术流程图

4.3 基于遗传算法的模型修正

4.3.1 遗传算法

遗传算法是一种模拟生物进化的人工智能算法^[87],它启迪于进化论、物种选择学说以及群体遗传学说等。其基本思想是对一组种群个体进行适应度运算、遗传与变异,并在父代向子代的遗传中筛除适应度较差的个体,直到种群实现收敛。该方法是一种基于过程搜索的近似最优解的方法,并适用于各种类型的显函数与隐函数,且搜索过程不受先验知识和导数的控制。由于种群的选择和优化方向有一定随机性,优化结果可能并不一定找到目标函数的绝对全局最优解。但是通过适当的编码跳过汉明悬崖,并选择合适的遗传、交叉、变异算子和代沟,通常遗传算法能够找到足够接近于绝对全局最优解的近似最优解。因此,遗传算法在工程控制、非线性问题多目标寻优、计算科学等领域有广泛的应用(如空间桁架问题、机器人轨迹规划问题和车辆路径问题等)^[88-90]。遗传算法拥有很强的并行运算搜索能力,但是该方法仍旧存在一些缺陷,如局部搜索能力差、种群过早收敛等,如何提高遗传算法的解空间全面搜索能力和种群收敛的稳定性是该方法未来的发展方向。

4.3.2 计算模型验证

为了验证基于遗传算法的目标函数最优化方法在结构识别中的适用性。本文以一跨钢筋混凝土简支梁为例,对其中人为施加的单元损伤进行了识别。试件尺

寸为 3600mm×150mm×300mm，混凝土强度等级为 C30，保护层厚度为 30mm。按钢筋混凝土密度 $\rho=2450\text{kg/m}^3$ 计算得知梁自重为 0.4 t。有限元模型采用 beam 单元建立，通过将梁单元按区域划分为 10 个单元，总共 36 个 beam 单元。梁端部通过固定铰支座和滚动铰支座形成简支体系，两端各有 100mm 悬臂长度（单元 10）。简支梁两支座间长度为 3400mm，由 8 个单元区段模拟，分别命名为单元 1~8 且每个单元均沿长度平均划分为 4 个 beam 单元。纯弯区段的长度为 900mm，由单元 4 和单元 5 表示。两段长度为 1350mm 的剪弯区段分别由单元 1、2、3 和单元 6、7、8 表示。静载试验中竖向力施加在单元 3 与单元 4 之间以及单元 5 与单元 6 之间的节点上，梁端边界条件模拟为弹簧单元（单元 9）。简支梁仿真的有限元模型以及相应的测点划分示意如图 4.6 所示。

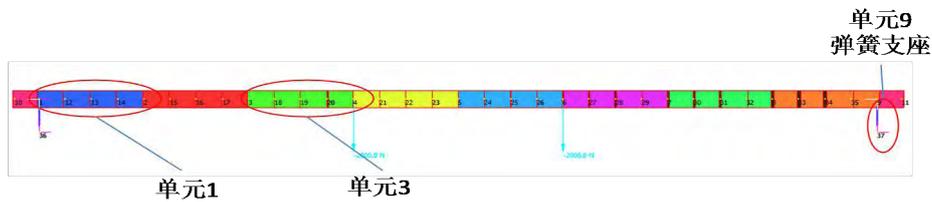


图 4.6 简支梁构件有限元模型示意图

4.3.3 损伤模型

仿真过程中，通过对确定的梁单元弹性模量施加损伤因子模拟实际结构的损伤和裂缝。本文在验证遗传算法在简支梁数值仿真应用的可靠性的过程中，分别对单元 2 和单元 4 施加其标准化弹性模量 42% 的损伤，可见于图 4.7。通过对损伤状态的简支梁进行静载运算和模态运算求解，并将其结果拟定为试验数据，通过遗传算法对目标函数在解空间内寻找最优值实现各个单元参数的修正。

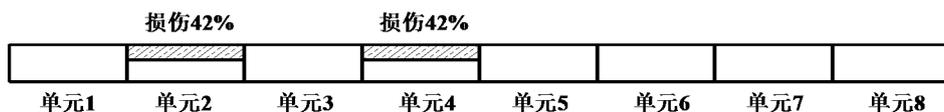


图 4.7 损伤模型示意图

4.3.4 参数识别结果

为了克服传统优化算法在识别简支梁结构损伤中陷入局部最优解的问题，本文引入基于遗传算法的识别。仿真过程采用图 4.4 所示的简支梁模型，针对简支梁 2 个单元的损伤以公式 4-2 和公式 4-3 为目标函数进行了各个单元的标准化弹性模量（迭代过程中各单元的弹性模量相对于初始设计状态弹性模量的比值）的修正。初始种群个体为 80，最大遗传代数为 80，代沟为 0.9，选择算子采用随机遍历抽样方法，采用多点交叉且变异概率为 0.07。种群收敛过程以及种群繁殖结束后所有个体的目标函数值可见于图 4.8，遗传算法收敛最终得到的各单元标准化弹性模量的结果统计于表 4.1。