基于 Kriging 和 NSGA2 的大型混凝土 W 异形柱结构模型修正研究

冯伟[1]，凌小宝[2]，陈愿[3]，曾涛[1]，林春涞[1]，王召来[1]，李鹏鹏[1]

（1. 中建三局集团有限公司，湖北 武汉 430000；2. 华中科技大学 土木工程与水利工程学院，湖北 武汉 430074；3.中国铁路上海局集团有限公司杭州铁路枢纽工程建设指挥部 浙江 杭州 311500）

摘 要：随着建筑施工技术的不断发展，现代工程中的结构越来越趋于复杂和高维。因此，针对此类结构进行结构模型修正往往面临着求解难度高、计算量大的挑战。针对这一问题，提出了一种基于 kriging 和 NSGA2 算法结合的模型修正方法，用于大型混凝土 W 异形柱结构。首先，将 W 异形柱划分为五段柱进行模拟，通过 MIDAS FEA NX 软件建立 W 异形柱的有限元模型，选取五段柱的弹性模量、容重、截面积 i 以及截面积 j 作为模型修正参数，采用拉丁超立方采样法(LHS)生成模型修正参数组合，计算 W 柱在不同参数组合下的南北两侧沉降量。将模型参数组合作为输入，南北两侧沉降量作为输出，建立 kriging 有限元代理模型。同时，以实测 W 柱南北两侧沉降量与有限元计算结果之间的误差最小建立目标函数，结合 NSGA2 多目标优化算法进行参数寻优，最终更新 W 柱模型的修正参数。通过验证，修正后的 W 柱南北两侧沉降量分别为 203.0745mm 和 203.0748mm，与实际测量的 217mm 和 218mm 结果接近，证明了所提方法的实用性。

关键词：大型混凝土 W 异形柱；结构模型修正；kriging 代理模型；NSGA2 多目标优化算法；W 柱沉降

中图分类号： **文献标识码：** **文章编号：**

Research on Model Revision of Large Concrete W-shaped Column Structure Based on Kriging and NSGA2

Feng Wei[1], Ling Xiaobao[2], Chen Yuan[3], Zeng Tao[1], Lin Chunlai[1], Wang Zhaolai[1], Li Pengpeng[1]

(1. China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd, Wuhan 430074, China; 2. School of Civil Engineering and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Hangzhou Railway Hub Construction Command Headquarters of China Railway Shanghai Group Co., Ltd, Hangzhou 311500)

Abstract: With the continuous development of construction technology, the structures in modern engineering tend to be more complex and high-dimensional. Therefore, the structural model modification for such structures often faces the challenges of high solution difficulty and large amount of calculation. To solve this problem, a model modification method based on the combination of kriging and NSGA2 algorithm is proposed for large concrete W-shaped column structures. Firstly, the W-shaped column is divided into five segments for simulation, and the finite element model of the W-shaped column is established by MIDAS FEA NX software. The elastic modulus, bulk density, cross-sectional area i, and cross-sectional area j of the five segments are selected as the model modification parameters, and the Latin hypercube sampling method (LHS) is used to generate the combination of model modification parameters, and the settlement of the north and south sides of the W-shaped column under different parameter combinations is calculated. Taking the combination of model parameters as the input and the settlement of the north and south sides as the output, a kriging finite element surrogate model is established. At the same time, the objective function is established by minimizing the error between the measured settlement of the north and south sides of the W-shaped column and the finite element calculation results, and the NSGA2 multi-objective optimization algorithm is used for parameter optimization, and finally the modified parameters of the W-shaped column model are updated. Through verification, the settlements of the north and south sides of the modified W-shaped column are 203.0745mm and 203.0748mm, respectively, which are close to the actual measured results of 217mm and 218mm, which proves the practicability of the proposed method.

Key words: Large concrete W-shaped columns; Structural model correction; Kriging proxy model; NSGA2 multi-objective optimization algorithm; Settlement of W-columns.

0 引 言

混凝土异形柱作为结构工程中重要的承载构件，其在高层建筑、桥梁、核电站等领域中具有广泛的应用。然而，由于其复杂的几何形状和非均匀的材料性质，混凝土异形柱在制作和使用过程中容易受到各种外部力学和环境因素的影响，导致结构发生损伤和性能退化。在内力作用下，结构可能产生裂缝和沉降，进而影响结构的安全

性。为了及时发现和识别混凝土异形柱结构的潜在损伤，并采取有效的维护和修复措施，对结构进行模型修正是首要任务[1-3]。



图 1 W 柱南北两侧的裂缝

Fig. 1 Cracks on the north and south sides of the W-column

结构工程领域的研究者们一直在探索各种损伤识别和结构健康监测的方法。柳振海等[4]提出了一种考虑参数不确定性的海上风电结构模型修正方法，其假设待修正参数和结构动力响应特征服从高斯分布，将不确定模型修正问题转化为均值和标准差的修正问题，并结合 Kriging 模型和优化算法求解待修正参数的均值和标准差，完成了海上风电结构数值模型进行模型修正。唐和生等[5]基于 Berman-Baruch 法修正了一油阻尼器钢框架结构有限元模型的质量和刚度矩阵，通过分析发现修正后的有限元模型响应与实测的结构响应拟合程度很好。祁泉泉等[6]提出了一种改进的 Berman-Baruch 法，通过定义合理的目标函数，改进后的 Berman-Baruch 法克服了对质量归一化模态振型的要求，并且修正后的模型具有明确的物理意义和带状特性。Vikas Arora 等[7]提出了一种新的有限元模型修正方法，该方法将阻尼模型假定为非粘性非比例模型，并采用参数指数型无粘性阻尼模型对动力系统中的阻尼进行建模，通过频响函数(FRF)对动态系统中的非粘性非比例阻尼矩阵进行更新。Qin 等[8]在标准粒子群优化（PSO）中引入了两个额外的算子，一个双角算子和一个多子群算子，提出一种多亚群粒子群优化（MSPSO）来进行结构模型的修正更新。Chen 等[9]为消除复杂预应力对连续结构计算规模和计算精度的影响，建立了以具有和不具有复杂预应力分布的有限元模型之间固有频率参数的残差值为目标函数。最后，以焊接残馀应力分布的薄圆柱壳结构进行模型修正，验证了所提方法的可行性和有效性。秦世强等[10]提出了一种改进的稳态遗传算法，用于获取结构模型修正的局部最优解和全局最优解。

在当前背景下，以 Kriging 模型和 NSGA2[11-13]为基础的结构模型修正方法正逐渐成为学术界关注的焦点。Kriging 模型作为一种统计学插值方法，通过对已知数据进行拟合，构建出对未知数据的预测模型。相较于传统插值方法，Kriging 模型不仅可以预测目标函数，还能够估计预测的不确定性，因此在结构优化领域具有良好的适用性。另一方面，NSGA2 是一种多目标优化算法，通过模拟自然选择和遗传机制，在结构设计空间中搜索出非支配解集合，从而解决多目标结构优化问题。NSGA2 算法通过维护一个种群，并通过交叉、变异等遗传操作来不断进化种群，以逼近或发现最优解的近似集。

因此，本研究旨在探索基于 Kriging 模型和 NSGA2 算法的大型混凝土异形柱结构模型修正方法。首先，基于 MIDAS FEA NX 软件建立 W 型混凝土异形柱结构的有限元模型，并采用拉丁超立方采样选取 W 柱的模型参数样本，计算样本对应的南北两侧有限元模型的沉降值。然后，以 W 柱模型参数为输入、南北两侧沉降量为输出，建立 Kriging 有限元代理模型。最后，以有限元模型的南北两侧沉降值与实测的 W 柱南北两侧沉降值之间的误差最小作为目标函数，引入 NSGA2 多目标优化算法，实现 W 柱结构模型修正，为大型混凝土异形柱的结构结构模型修正提供了相应的解决方案。

1 工程概况

1.1 项目概况

杭衢高速铁路建德段主线全长 130km，设计时速 350km，衢州西站位于中间，站中心里程 DK97+450，具体位置在浙江省衢州市柯城区姜家山乡。站房共三层，其中出站层为地下一层，距离站台层 10m，站台层与地面广场基本相平，高架候车层相对于站台层高出 10m。该站的主要支撑结构采用 W 型柱，图 2 显示了 W 柱的立面以及南侧五段柱的划分。W 柱采用六边形变截面的钢筋混凝土构造，混凝土强度等级为 C50，端部结构面标高为 24.978m。W 柱的基础位于 9.570m 高的结构板上，该结构板厚度为 200mm，采用的混凝土强度等级为 C40。W 柱的支撑架体设置在结构板的上部。

将 W 柱划分为 5 段，五段柱编号及其初始的　　模型参数如下表 1 所示：

表 1 初始 W 柱模型参数设计表

Table 1 Design table of the initial model parameters of the W-column

柱子编号	弹性模量 $E(N/mm2)$	容重γ(N/mm^3)	截面积 $i(mm^2)$	截面积 $j(mm^2)$
1	34554	2.3365×10^{-5}	1508600	1025513.6
2	34554	2.3365×10^{-5}	2749600	1508645.55
3	34554	2.3365×10^{-5}	4414200	2749602.17
4	34554	2.3365×10^{-5}	5099500	4414152.12
5	34554	2.3365×10^{-5}	7240800	5099548.55

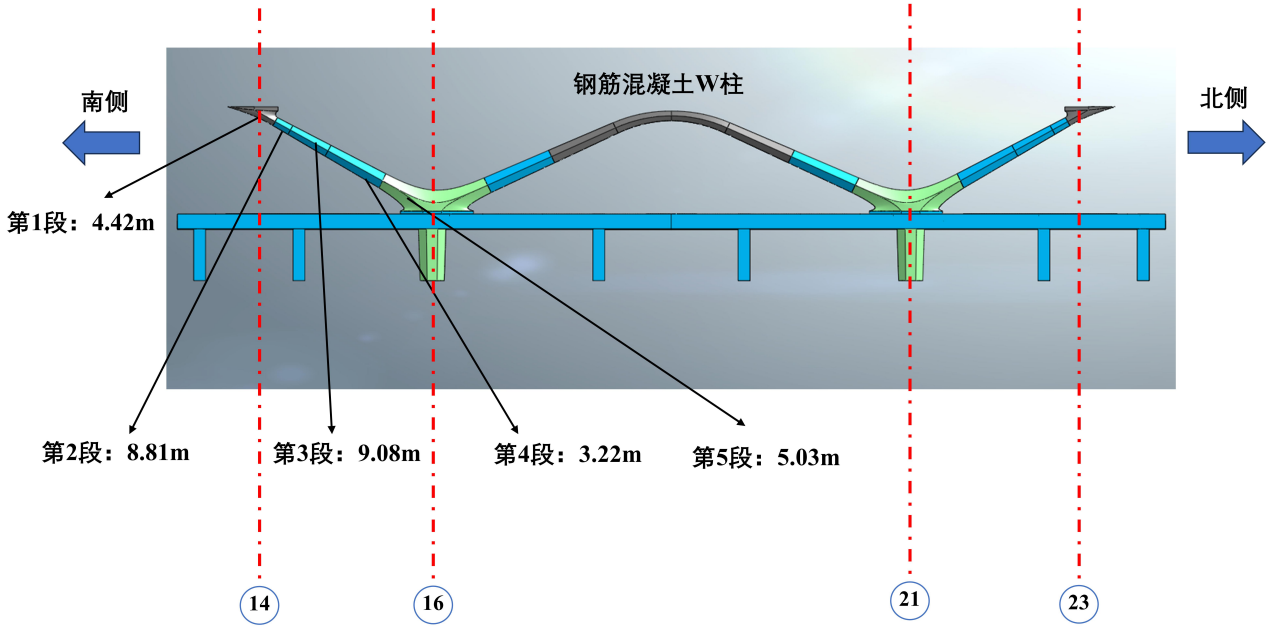


图 2 W 柱五段柱划分图

Fig. 2 Division diagram of the five-segment column of the W-column

2 kriging 模型的提出

为了提高模型的分析和计算效率，避免费时的有限元计算，提出了一种有限元代理模型的方法，用于在有限元模型中估计未知点上的响应。该方法采用了 Kriging 插值方法，这是一种基于最小二乘法的插值方法，可以有效地估计空间数据的趋势，并考虑数据的噪声和不确定性。

在有限元模型中，常常需要估计一些未知点上的响应，比如节点上的位移、应力等。直接对这些未知点进行插值可能会导致插值函数在某些区域内的局部误差较大，从而影响估计结果的准确性。为了解决这个问题，我们采用 Kriging 方法构建有限元代理模型，以提高估计结果的精度。该方法的核心思想是在估计未知点上的响应时，不仅考虑已知点上的数据，还考虑这些数据的不确定性。因此，Kriging 方法能够有效地估计未知点上的响应，并同时给出这些响应的不确定性估计。

Kriging 模型表示如下：

$$y(x)=\sum_{i=1}^{k}\beta_i f_i(x)+z(x) \tag{1}$$

其中，$f_i(x)$ 表示第 i 个功能函数；β_i 为第 i 个功能函数对应的回归参数；$z(x)$ 表示为随机过程，对任意两个 $z(x_i)$ 和 $z(x_j)$ 之间的协方差为：

$$E(z(x_i),z(x_j))=\sigma^2 R(\theta,x_i,x_j) \tag{2}$$

$R(x_i,x_j)$ 为参数 θ 的相关模型，包括多项式类型、指数类型、线性类型、高斯类型等。在此选用指数类型函数。θ 是 kriging 模型的相关参数。

则 kriging 模型在样本点 x' 处，其预测值 $\hat{y}$ 可表示为：

$$\begin{cases}\hat{y}=f^T\beta^*+r^T(x')R^{-1}(Y-F\beta^*)\\ \beta^*=(F^TR^{-1}F)^{-1}F^TR^{-1}Y\\ r^T(x')=[R(\theta,x',x_1),R(\theta,x',x_2),...,R(\theta,x',x_{n_0})]^T\end{cases}$$

(3)

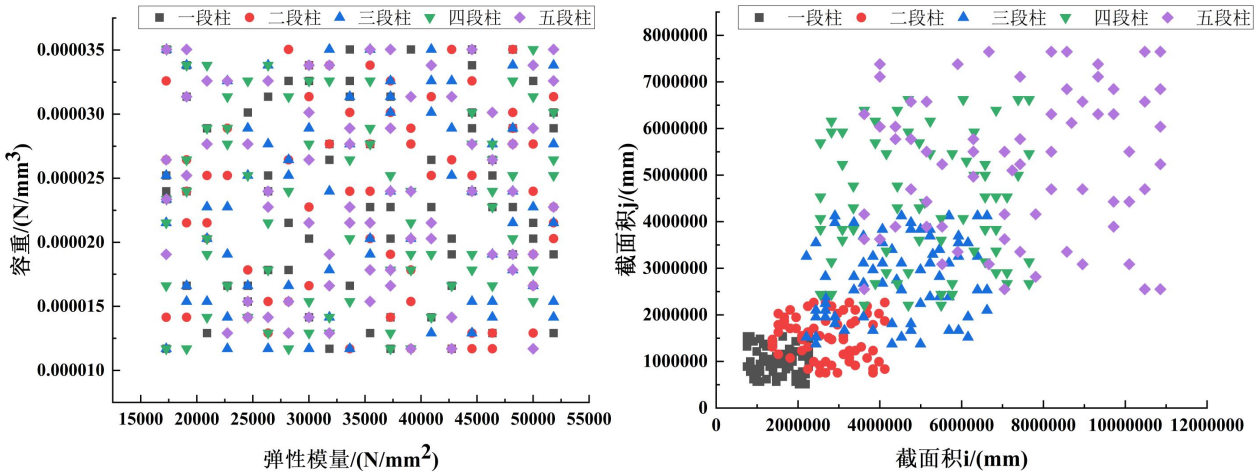
式中，R 表示为沿对角线正定的协方差矩阵；F 表示为含有 n_0 个分量的列向量；n_0 是每个样本点对应的响应值；Y 为响应值 n_0 对应的列向量。

根据 Kriging 模型预测未知点 x' 处均方误差 s^2 ，即：

$$\begin{cases}s^2(x')=\hat{\sigma}_2(1+\mu^T(F^TR^{-1}F)^{-1}\mu-r^TR^{-1}r)\\ \hat{\sigma}_2=(Y-F\beta^*)^TR^{-1}(Y-F\beta^*)/n_0\end{cases}\quad(4)$$

在上式中，$\mu=F^TR^{-1}r-f$ ，$s^2(x')$ 是 kriging 代理模型与有限元模型实际响应之间的预测偏差[14]。

采用拉丁超立方采样，收集了五段柱的弹性模量、容重、截面积 i 以及截面积 j 数据，采样范围为初始值的上下偏差±50%。根据五段柱参数的采样空间，生成了 75 个样本，样本分布图如图 3 所示。通过软件计算后，得到了 W 柱南北两侧的沉降量。将这些样本作为输入、W 柱南北两侧沉降量作为输出，构建 kriging 有限元代理模型。根据图 3，可以观察到，由于初始值和采样范围相同，因此五段柱的弹性模量和容重的分布空间大致相似，取样也相对均匀；而五段柱的截面积 i 和截面积 j 由于是变截面，随着高程的不断降低，截面积也增大，但根据图 3(b)可见，取值仍然相对均匀。



(a) LHS 样本五段柱弹性模量和容重分布图 (b) LHS 样本五段柱截面积 i 和截面积 j 分布图

(a) Distribution of elastic modulus and unit weight of the five-segment column of the LHS sample

(b) Distribution of cross-sectional area i and cross-sectional area j of the five-segment column of the LHS sample

图 3 拉丁超立方采样模型参数分布图

Fig. 3 Distribution diagram of model parameters of Latin Hypercube Sampling

3 融合 NSGA2 的 W 柱模型修正

3.1 目标函数的建立

NSGA2 是一种用于解决多目标优化问题的进化算法。所谓多目标优化问题是指同时优化两个或多个冲突的目标函数，这种情况下通常不存在一个单一的最优解，而是存在一组被称为帕累托最优解的解集。NSGA2 的主要特点包括非支配排序、拥挤度计算、选择、交叉和变异、以及精英策略等。

在非支配排序中，算法会对种群进行快速非支配排序，将种群划分为不同的等级，每个等级中的个体不会被其他等级中的个体所支配（即在所有目标上都不劣于其他个体）。

在拥挤度计算阶段，针对每个非支配层，会计算个体之间的拥挤度，用以评估个体周围的拥挤程度。拥挤度考虑了个体在目标函数空间的分布，有助于保证解的多样性。

在选择、交叉和变异过程中，通过二元锦标赛从当前种群中选择、交叉和变异操作生成新的种群。选择过程首先基于非支配层次进行，然后在同一层次内基于拥挤度进行。

NSGA2 采用精英策略来保持父代和子代中的最佳个体。它将当前种群和生成的子代合并，并再次进行非支配排序和拥挤度计算，从合并的种群中选择最优的个体构成新的种群。该算法特别适用于解决目标函数多、约束条件多、变量维度高的复杂优化问题。与其前身 NSGA 相比，NSGA2 算法的参数设置更少，这大大减少了需要设定的参数数量，能更有效地逼近真实的帕累托前沿，并且保持了前沿上解的多样性，使得该算法更易于实践应用，在工程设计、经济学、水资源管理等领域得到了广泛的应用和认可。

在对 W 柱结构模型修正中，通过定义南北两侧沉降量偏差最小建立目标函数，构造的目标函数如下：

$$F_1 = \min[\frac{(x_1^a - x_1^b)}{x_1^a}] \quad (5)$$

$$F_2 = \min[\frac{(x_2^a - x_2^b)}{x_2^a}] \quad (6)$$

式中，x_1^a、x_1^b 分别为 W 柱南侧实际沉降值和 kriging 代理模型计算沉降值；x_2^a、x_2^b 分别为 W 柱北侧实际沉降值和 kriging 代理模型计算沉降值。

此外，NSGA2 算法相关参数设置为：种群个数 100，迭代次数 200 代，交叉概率 0.9，突变概率 0.05，五段柱累计 20 个模型参数的寻优范围及相应搜索步长如表 2 所示。

表 2 W 柱模型参数步长和寻优范围

Table 2 Step size and optimization range of the model parameters of the W-column

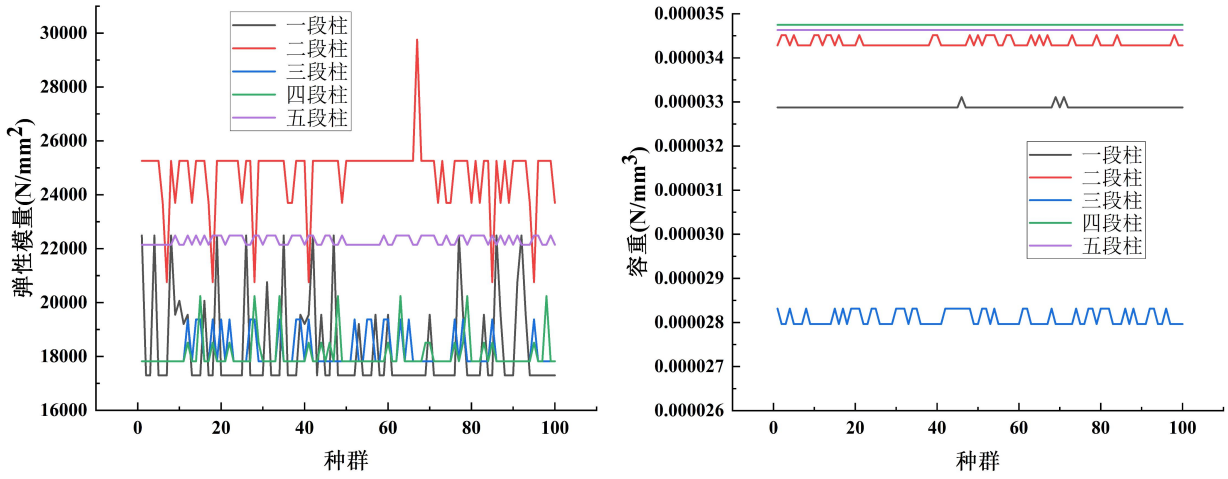
模型参数	步长	单位	寻优范围
一段柱弹性模量 E_1	173	N/mm^2	[17300, 51800]
一段柱容重 γ_1	1.17×10^{-7}	N/mm^3	$[1.17\times10^{-5}, 3.5\times10^{-5}]$
一段柱截面积 i	7540	mm^2	[754000, 2260000]
一段柱截面积 j	5130	mm^2	[513000, 1540000]
二段柱弹性模量 E_2	173	N/mm^2	[17300, 51800]
二段柱容重 γ_2	1.17×10^{-7}	N/mm^3	$[1.17\times10^{-5}, 3.5\times10^{-5}]$
二段柱截面积 i	13700	mm^2	[1370000, 4120000]
二段柱截面积 j	7540	mm^2	[754000, 2260000]
三段柱弹性模量 E_3	173	N/mm^2	[17300, 51800]
三段柱容重 γ_3	1.17×10^{-7}	N/mm^3	$[1.17\times10^{-5}, 3.5\times10^{-5}]$
三段柱截面积 i	22100	mm^2	[2210000, 6620000]
三段柱截面积 j	13700	mm^2	[1370000, 4120000]
四段柱弹性模量 E_4	173	N/mm^2	[17300, 51800]
四段柱容重 γ_4	1.17×10^{-7}	N/mm^3	$[1.17\times10^{-5}, 3.5\times10^{-5}]$
四段柱截面积 i	25500	mm^2	[2550000, 7650000]
四段柱截面积 j	22100	mm^2	[2210000, 6620000]
五段柱弹性模量 E_5	173	N/mm^2	[17300, 51800]
五段柱容重 γ_5	1.17×10^{-7}	N/mm^3	$[1.17\times10^{-5}, 3.5\times10^{-5}]$
五段柱截面积 i	36200	mm^2	[3620000, 10900000]
五段柱截面积 j	25500	mm^2	[2550000, 7650000]

3.2 帕累托解的选取

NSGA2 算法迭代 200 次后，100 个种群个体对应的五段柱弹性模量、容重、截面积 i 和截面积 j 如图 4 所示。

根据图 4 可知：五段柱的弹性模量、容重、截面积 i 以及截面积 j 均在一个特定的数值范围内上下波动，这表明修正结果具有一定的稳定性。对于弹性模量而言，第二段柱的弹性模量经修正后达到最大值，而第一段柱的弹性模量最小；对于容重而言，第四段柱的容重修正后达到最大值，而第三段柱的容重最小；对于截面积而言，第五段柱的截面 i 经修正后最大值，而第一段柱的截面 j 最小。

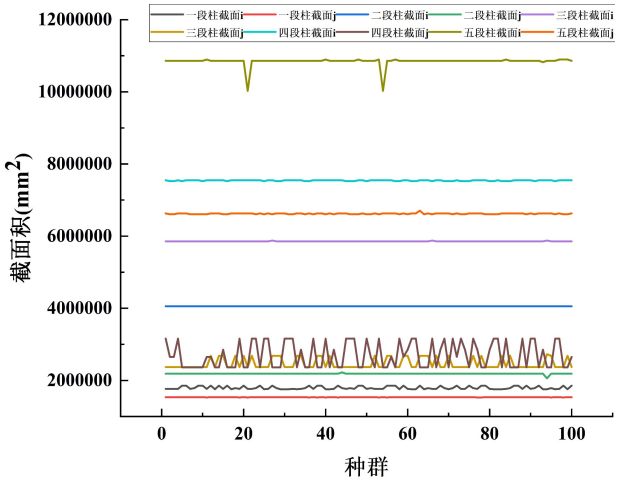
根据最后一次迭代的结果，选取 100 个种群个体五段柱的弹性模量、容重、截面积 i 和截面积 j 的平均值作为最终模型参数的修正值，具体数值见表 3。



(a)NSGA2 最后一次迭代 100 个种群五段柱的弹性模量　　(b) NSGA2 最后一次迭代 100 个种群五段柱的容重

(a) Elastic modulus of the five-segment column of 100 populations in the last iteration of NSGA2

(b) Unit weight of the five-segment column of 100 populations in the last iteration of NSGA2



(c) NSGA2 最后一次迭代 100 个种群五段柱的截面积 i 和截面积 j

(c) The cross-sectional area i and cross-sectional area j of the five-segment column of 100 populations in the last iteration of NSGA2

图 4 100 个种群五段柱的弹性模量、容重、截面积 i 和截面积 j

Fig. 4 Elastic modulus, unit weight, cross-sectional area i, and cross-sectional area j of the five-segment column of 100 populations

表 3 W 柱模型参数修正值及其比较

Table 3 Modified values and comparisons of the model parameters of the W-column

模型参数	修正值	初始值	相差	单位
一段柱弹性模量 E_1	18322.43	34554	-46.97%	N/mm^2
一段柱容重 γ_1	3.2884×10^{-5}	2.3365×10^{-5}	40.74%	N/mm^3
一段柱截面积 i	1795123.2	1508600	18.99%	mm^2
一段柱截面积 j	1533203.1	1025513.6	49.51%	mm^2
二段柱弹性模量 E_2	24768.41	34554	-28.32%	N/mm^2
二段柱容重 γ_2	3.4340×10^{-5}	2.3365×10^{-5}	46.97%	N/mm^3
二段柱截面积 i	4055200	2749600	47.48%	mm^2
二段柱截面积 j	2185695.2	1508645.55	44.88%	mm^2
三段柱弹性模量 E_3	18177.11	34554	-47.40%	N/mm^2

三段柱容重 γ_3	2.8100×10^{-5}	2.3365×10^{-5}	20.27%	N/mm^3
三段柱截面积 i	5857163	4414200	32.69%	mm^2
三段柱截面积 j	2468192	2749602.17	-10.23%	mm^2
四段柱弹性模量 E_4	18092.34	34554	-47.64%	N/mm^2
四段柱容重 γ_4	3.4749×10^{-5}	2.3365×10^{-5}	48.72%	N/mm^3
四段柱截面积 i	7539840	5099500	47.85%	mm^2
四段柱截面积 j	2696863	4414152.12	-38.90%	mm^2
五段柱弹性模量 E_5	22306.62	34554	-35.44%	N/mm^2
五段柱容重 γ_5	3.4632×10^{-5}	2.3365×10^{-5}	48.22%	N/mm^3
五段柱截面积 i	10846244	7240800	49.79%	mm^2
五段柱截面积 j	6620565	5099548.55	29.83%	mm^2

4 修正结果验证

为了验证基于kriging和NSGA2结合的修正方法对五段柱模型参数修正结果的正确性，将五段柱修正前后的模型参数输入到MIDAS FEA NX软件中进行分析，通过该软件计算得到了南北南侧的沉降量，W柱沉降量的位移云图如图5和图6所示。

根据图5和图6我们得知：在进行W柱模型修正之前，W柱南北两侧的沉降量分别为62.6563mm和62.6564mm；而在模型修正之后，W柱的南北两侧沉降量分别为203.0745mm和203.0748mm，与实际测量的W柱南北两侧沉降217mm和218mm的结果相比较，修正后的W柱模型在一定程度上能够准确反应实际结构当前的状态。这进一步证实了基于表kriging和NSGA2结合的修正方法的有效性和可行性。

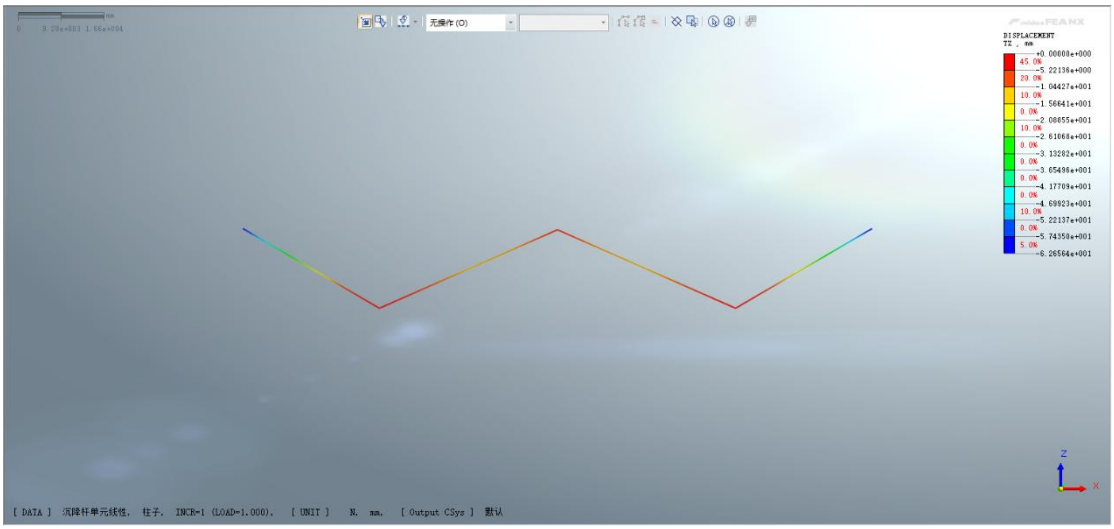


图5 初始W柱有限元模型南北两侧沉降量

南侧柱顶端沉降62.6563mm，北侧柱沉降62.6564mm

Fig. 5 The settlement of the north and south sides of the initial finite element model of the W-column

The settlement at the top of the south column is 62.6563mm, and the settlement of the north column is 62.6564mm.

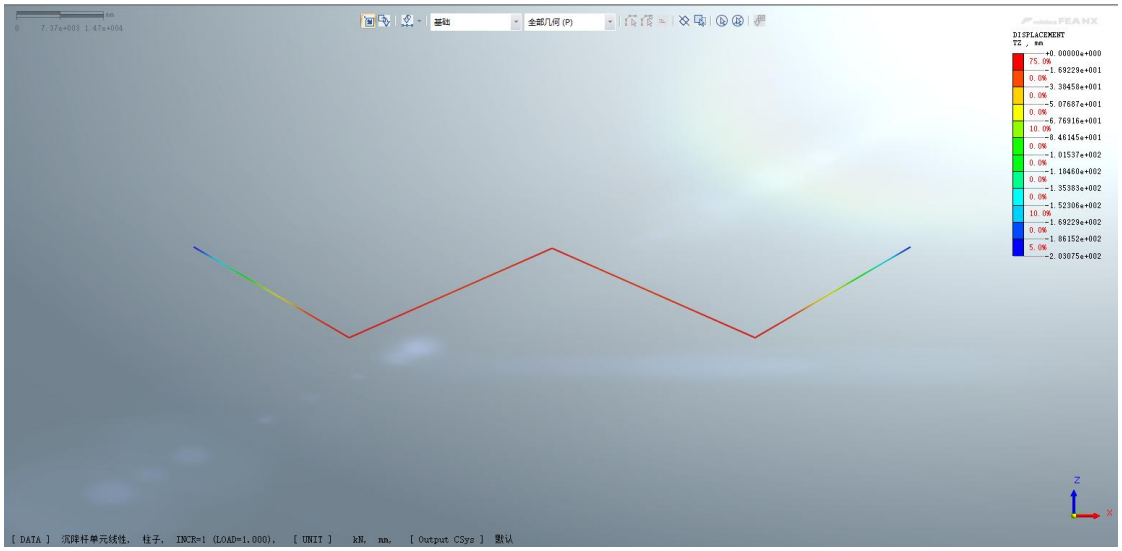


图 6 W 柱修正后有限元模型南北两侧沉降量

南侧柱顶端沉降 203.0745mm，北侧柱沉降 203.0748mm

Fig. 6 The settlement of the north and south sides of the finite element model of the W-column after modification

The settlement at the top of the south column is 203.0745mm, and the settlement of the north column is 203.0748mm.

5 W 柱修正前后内力分析

W 柱作为一种典型的大型混凝土异形柱，进行结构模型修正前后的内力分析是非常重要的[15-18]，其必要性包括以下几个方面：

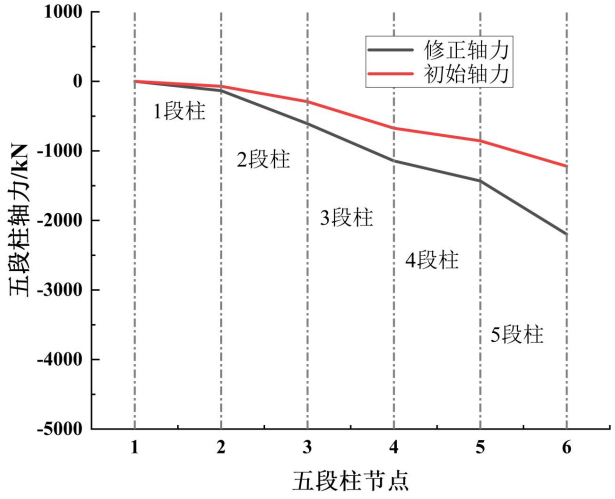
准确性评估：结构模型修正前后的内力分析可以帮助评估修正方法对内力分布的准确性。结构模型通常是根据假设和简化来建立的，无法完全反映实际结构的复杂性和非线性行为。通过修正前后内力的分析，可以评估修正方法对内力分布的改善程度，从而提高模型的准确性和可靠性。

结构性能预测：准确的内力分析对于预测结构性能至关重要。内力分布直接影响结构的强度、刚度和稳定性等性能指标。通过修正前后的内力分析，可以更准确地评估结构的承载能力、变形行为和破坏机制，为结构的设计优化和安全评估提供基础。

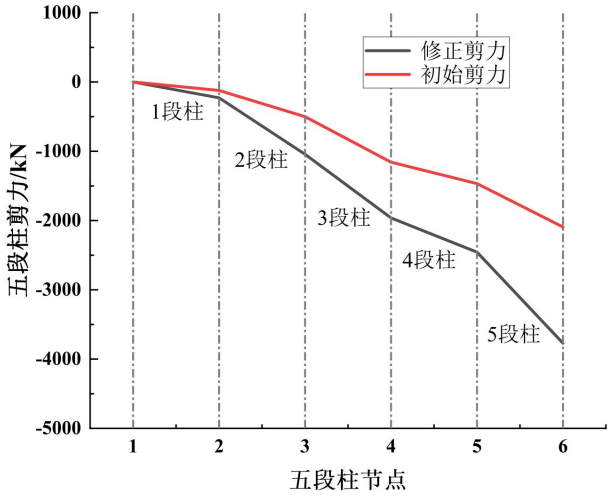
模型验证：进行结构模型修正前后的内力分析是验证修正方法有效性的重要手段。通过与实测数据进行对比，可以验证修正后模型的准确性和可靠性。如果修正后的模型能够更好地拟合实测数据，说明修正方法是有效的，可以提高对结构性能的信任度。

工程应用：准确的内力分析对于结构工程实践至关重要。在结构设计和评估阶段，了解结构各部分的内力分布情况有助于工程师制定合理的设计方案和控制措施。此外，修正前后的内力分析还可用于损伤识别和健康监测等领域，提高结构的可持续性和安全性。

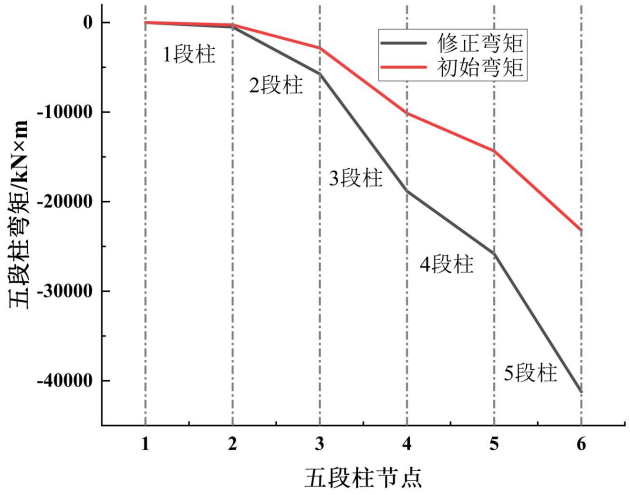
本章节将修正后的有限元模型与初始有限元模型的轴力、剪力、和弯矩等内力进行对比分析。鉴于 W 柱南北两侧具有对称性，两侧内力值基本相同，因此只提取一侧进行内力分析。结构模型修正前后 W 柱南侧柱各节段的轴力、剪力、弯矩如图 7 所示。



(a) 结构模型修正前后五段柱轴力对比



(b) 结构模型修正前后五段柱剪力对比



(c) 结构模型修正前后五段柱弯矩对比

图 7 结构模型修正前后 W 柱南侧柱有限元模型的不同节段的轴力、剪力、弯矩图

Fig. 7 Axial force, shear force, and bending moment diagrams of different segments of the finite element model of the south column of the W-column before and after the structural model modification

根据图 7 可知：W 柱自上而下，轴力、剪力和弯矩不断增加。同时，修正后的 W 柱模型与修正前进行对比，发现五段柱的轴力、剪力和弯矩均有所增加。南侧柱 1 至 5 段，平均轴力增加的百分比分别为：87.56%、104.48%、81.35%、68.43%、74.98%；平均剪力的增加的百分比分别为：87.56%、104.48%、81.35%、68.43%、74.98%；平均弯矩增加的百分比分别为：94.25%、101.91%、89.51%、82.42%、78.53%。具体而言，平均轴力增加最大的是第二段，由初始的 181.613kN 增加至 371.355kN，增幅为 104.48%，最小的是第 4 段，由初始的 764.784kN 增加至 1288.130kN，增幅为 68.43%；平均剪力增加最大的是第二段，由初始的 311.539kN 增加至 637.020kN，增幅为 104.48%，最小的是第 4 段，由初始的 1311.910kN 增加至 2209.650kN，增幅为 68.43%；平均弯矩增加最大的是第二段，由初始的 1545.480kN·m 增加至 3120.420kN·m，增幅为 101.91%，最小的是第 5 段，由初始的 18776.900kN·m 增加至 33521.700kN·m，增幅为 78.53%。

综上所述，W 柱模型修正前后内力增加结果能解释实际结构的当前状态，即 W 柱南北两侧出现 217mm 和 218mm 沉降，这在很大程度上是由结构内力的显著增加导致的。

6 结论

本研究针对大型混凝土 W 异形柱，提出了一种基于 kriging 和 NSGA2 结合的结构模型修正方法，并通过验证证明了所提方法的有效性。主要结论总结如下：

1、初始 W 柱有限元模型的南北两侧沉降量

分别为 62.6563mm 和 62.6564mm，与实际测量结果存在较大偏差。结合 W 柱现场裂缝的观察，初步判断 W 柱发生一定程度损伤，因此需要对 W 柱结构进行模型修正。

2、W 柱有限元模型修正后，南北两侧的沉降量分别为 203.0745mm 和 203.0748mm，与实测结果的 217mm 和 218mm 接近，验证了研究所提出的修正方法的正确性。

3、W 柱有限元模型修正后，五段柱内力均有一定程度的增加。其中，平均轴力、平均剪力和平均弯矩增加百分比最高的都为第二段，增幅分别为 104.48%、104.48%和 101.91%，这些内力的增加一定程度上导致了南北两侧 W 柱的沉降。

参 考 文 献

[1] 周林仁,叶文许.空间桁架结构特征响应信息对模型修正的影响机理分析[J].振动与冲击,2023,42(17):1-8.DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2023.17.001.

Zhou Linren, Ye Wenxu. Analysis of the influence mechanism of characteristic response information of spatial truss structure on model modification [J]. Vibration and Shock, 2023, 42(17): 1-8. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.17.001.

[2] 何子豪,吴邵庆.结合 SVR 响应面与粒子群优化的有限元模型修正[J].振动与冲击,2023,42(15):163-172+240.DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2023.15.020.

He Zihao, Wu Shaoqing. Finite element model modification combining SVR response surface and particle swarm optimization [J]. Vibration and Shock, 2023, 42(15): 163-172+240. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.15.020.

[3] 陈伟明.隔震结构贝叶斯有限元模型修正及动力可靠度分析方法研究[D].广州大学,2023.DOI:10.27040/d.cnki.ggzdu.2023.000008.

Chen Weiming. Research on Bayesian finite element model modification and dynamic reliability analysis method of isolated structures [D]. Guangzhou University, 2023. DOI: 10.27040/d.cnki.ggzdu.2023.000008.

[4] 柳振海,李刚,刘博,等.考虑参数不确定性的海上风电结构模型修正方法[J].电力勘测设计,2024(03):6-11+27.DOI:10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2024.03.002.

Liu Zhenhai, Li Gang, Liu Bo, et al. Model modification method of offshore wind power structure considering parameter uncertainty [J]. Electric Power Survey and Design, 2024(03): 6-11+27. DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2024.03.002.

[5] 唐和生,王泽宇,陈嘉缘.基于数字孪生和深度学习的结构损伤识别[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(01):110-121.

Tang Hesheng, Wang Zeyu, Chen Jiayuan. Structural damage identification based on digital twins and deep learning [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering (in Chinese and English), 2024, 46(01): 110-121.

[6] 祁泉泉,辛克贵.改进的 Berman-Baruch 法在非比例阻尼有限元模型修正中的应用[J].工程力学,2012,29(07):1-5.

Qi Quanquan, Xin Kegui. Application of improved Berman-Baruch method in non-proportional damping finite element model modification [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(07): 1-5.

[7] Vikas A ,Sondipon A ,Kiran V .FRF-based finite element model updating for non-viscous and non-proportionally damped systems[J].Journal of Sound and Vibration,2023,552

[8] Shiqiang Q ,Yazhou Z ,Hongyou C , et al.Identification of multiple alternative solutions in structural model updating using multiple subswarm particle swarm optimization[J].Engineering Optimization,2023,55(2):271-290.

[9] Luyun Chen,Xichun Huang,Hong Yi. Structural model updating study in consideration of complex pre-stress distribution[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control,2021,40(3).

[10] 秦世强,张亚州,康俊涛.基于改进稳态遗传算法的桥梁有限元模型修正[J].中山大学学报(自然科学版),2020,59(04):79-88.DOI:10.13471/j.cnki.acta.snus.2019.06.20.2019b062.

Qin Shiqiang, Zhang Yazhou, Kang Juntao. Bridge finite element model modification based on improved steady-state genetic algorithm [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2020, 59(04):

79-88. DOI: 10.13471/j.cnki.acta.snus.2019.06.20.2019b062.

[11] Zhijie C ,Wei Z ,Kun Z , et al.Multi-objective optimization of proton exchange membrane fuel cells by RSM and NSGA-II[J].Energy Conversion and Management,2023,277

[12] 项雄标,张新娜,周康康,等.基于响应曲面法和 NSGA2 的凸轮轴磨削参数优化[J].金刚石与磨料磨具工程,2023,43(03):348-354.DOI:10.13394/j.cnki.jgszz.2022.0141.

Xiang Xiongbiao, Zhang Xinna, Zhou Kangkang, et al. Optimization of camshaft grinding parameters based on response surface method and NSGA2 [J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2023, 43(03): 348-354. DOI: 10.13394/j.cnki.jgszz.2022.0141.

[13] 卜康正,赵勇,郑先昌.基于 NSGA2 遗传算法的地铁隧道上方基坑工程优化设计[J].铁道科学与工程学报,2021,18(02):459-467.DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200287.

Bu Kangzheng, Zhao Yong, Zheng Xianchang. Optimization design of foundation pit engineering above subway tunnel based on NSGA2 genetic algorithm [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(02): 459-467. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200287.

[14] 董青,陈钰浩,刘永刚,等.基于优化加点代理模型的桥架结构疲劳寿命预测方法[J].机械强度,2023,45(03):729-742.DOI:10.16579/j.issn.1001.9669.2023.03.031.

Dong Qing, Chen Yuhao, Liu Yonggang, et al. Prediction method of fatigue life of bridge structure based on optimized interpolation surrogate model [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(03): 729-742. DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2023.03.031.

[15] Halicka A ,Zięba J .Influence of the subsoil model on the safety and eco-efficiency of reinforced concrete structure of rectangular liquid tank founded beneath the terrain surface[J].Engineering Structures,2024,303117571-.

[16] 孟啸.深基坑地下结构逆作施工内力变形试验与数值分析[J].铁道建筑技术,2024,(03):171-175.

Meng Xiao. Experimental and numerical analysis of internal force and deformation of underground structure during top-down construction of deep foundation pit [J]. Railway Construction Technology, 2024, (03): 171-175.

[17] 张斌,陈孝湘,龚建伍.复合地层大口径顶管管道结构内力影响因素分析[J].电力勘测设计,2023,(S2):40-45.DOI:10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2023.S2.008.

Zhang Bin, Chen Xiaoxiang, Gong Jianwu. Analysis of influencing factors of internal force of large diameter pipe jacking pipeline structure in composite stratum [J]. Electric Power Survey and Design, 2023, (S2): 40-45. DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2023.S2.008.

[18] 黄慎江,昌洋.基于拆除构件法的大跨度预应力网架屋盖-框架结构的内力重分布分析[J].建筑结构,2023,53(S2):552-556.DOI:10.19701/j.jzjg.23S2522.

Huang Shenjiang, Chang Yang. Analysis of internal force redistribution of long-span prestressed grid roof-frame structure based on the method of removing components [J]. Building Structure, 2023, 53(S2): 552-556. DOI: 10.19701/j.jzjg.23S2522.