

基于影响矩阵和粒子群算法的异形斜拉桥调索

黄琮¹, 赵文剑¹, 潘若妍^{2,3}, 张雷^{2,3}

(1. 华汇工程设计集团股份有限公司, 浙江 绍兴 312000; 2. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058;

3. 公路数智养护浙江省工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 斜拉桥的合理成桥索力的确定是斜拉桥设计和施工中的关键环节, 获取符合条件的初索力是建立桥梁的有限元模型、完成施工阶段的分析和施工索力监测的基础。异形斜拉桥的结构相对比较复杂, 其受力特点不同于常规的斜拉桥, 传统的迭代法或具有不适用性, 且迭代法需要进行多次试算, 过程较为繁琐。粒子群算法可以高效便捷地得到合理的成桥状态, 实现索力优化的自动化和智能化。为验证结合粒子群算法的索力优化方法的可行性, 以某异形斜拉桥项目为背景, 建立三维有限元模型, 结合影响矩阵法和粒子群算法编 MATLAB 程序对桥梁斜拉索的初始索力进行求解, 并与传统迭代法的优化结果进行比较, 验证该方法的可行性。结果表明: 传统迭代法在优化结构较复杂的异形斜拉桥时具有局限性, 基于影响矩阵和粒子群算法的索力优化方法能够用来自动化求解结构较为复杂的异形斜拉桥的初始索力群, 优化过程简便、高效。

关键词: 桥梁工程; 异形斜拉桥; 影响矩阵; 索力优化; 粒子群算法

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)04-0265-06

0 引言

斜拉桥是一种高次静定组合结构体系, 具有较大的跨越能力、抗风性能以及美观等优点。近年来, 为了满足人们的审美需求, 出现了很多造型新颖的异形斜拉桥。调整斜拉索的初始张力使桥梁达到合理的成桥状态是斜拉桥设计计算分析以及施工中的关键问题。获取符合条件的初索力是建立桥梁的有限元模型, 完成施工阶段的分析和施工索力监测的基础。学术界和工程界也提出了很多对斜拉桥进行索力优化的方法, 比如刚性支承连续梁法、零支反力法、内力平衡法、弯曲能量最小法、影响矩阵法等^[1]。传统的初始索力获取方法主要是迭代法, 通过多次迭代计算不断逼近目标, 此方法往往需要进行多次试算, 过程较为繁琐。

相较于普通的斜拉桥, 异形斜拉桥的受力结构更加复杂, 传统的索力优化方法存在不适用或者操作过程复杂和繁琐的问题。智能优化算法是数学优化法中的一种, 可以在没有人工干预的条件下自动寻找符合要求的最优解, 具有较强的适用性, 是一种

很好的解决这些大规模工程优化问题的工具。目前常用的智能优化算法主要有粒子群算法、遗传算法等。影响矩阵是影响向量的所有元素发生单位变化时, 引起被调向量变化依次排列成的矩阵, 描述了变量与目标条件之间的函数关系, 是结构力学体系的一种表达方式。因此, 影响矩阵是使用数学优化方法解决工程优化问题时的有效工具^[2]。使用影响矩阵确立优化的目标, 再结合智能优化算法进行求解, 可以实现索力优化的自动化^[3-6]。

本文结合实际工程, 基于影响矩阵和粒子群算法, 对某非对称异形斜拉桥进行自动调索, 并将结果与使用传统的差值迭代法的结果进行比较, 验证该方法解决异形斜拉桥调索问题的可行性和有效性。

1 粒子群算法

1.1 粒子群算法原理

粒子群算法 (Particle Swarm optimization, PSO) 是最早由 Kennedy 和 Eberhart^[7]提出的一种基于鸟群觅食行为的智能仿生算法。PSO 假定鸟群在某区域随机搜索食物, 初始位置与飞行速度均随机, 但每只鸟都不知道最佳觅食点。鸟群通过共享自己当前的位置距离食物的距离等信息, 互相学习, 结合自身的经验和种群传递的信息不断改变自身的速度与位置, 从而不断逼近最佳觅食点。

收稿日期: 2023-02-16

作者简介: 黄琮(1987—), 男, 学士, 高级工程师, 从事市政工程设计及管理工作。

通信作者: 潘若妍(2001—), 女, 研究生在读, 研究方向为桥梁与隧道工程。电子信箱: spanry@163.com

实际应用中,PSO把鸟群抽象为 m 个无质量无体积的粒子。 $X_i=(x_{i1},x_{i2},x_{i3}\cdots x_{in})$ 表示每个粒子在 N 维空间中的位置,取值范围为 $[X_{\min},X_{\max}]$; $V_i=(v_{i1},v_{i2},v_{i3}\cdots v_{in})$ 表示每个粒子的速度,位置范围为 $[V_{\min},V_{\max}]$ 。 $X_{\min},X_{\max},V_{\min},V_{\max}$ 根据具体问题取值。目标函数的适应度值 fitness 由每个粒子的位置决定。每个粒子通过迭代搜寻本身的最优适应度值,即个体极值 $P_b=(p_{b1},p_{b2},p_{b3}\cdots p_{bn})$ 和整个种群中找到的最优适应度值 $G_b=(g_{b1},g_{b2},g_{b3}\cdots g_{bn})$,根据 P_b 和 G_b 不断更新自己的位置和速度,从而完成逐渐逼近最优目标函数值的目标。粒子的速度和位置更新公式如下:

$$v_{ij}^{k+1}=wv_{ij}^k+c_1r_1[p_{ij}^k-x_{ij}^k]+c_2r_2[g_{ij}^k-x_{ij}^k] \quad (1)$$

$$x_{ij}^{k+1}=x_{ij}^k+v_{ij}^k \times t \quad (2)$$

式中: i 为粒子的个数, $i=1,2,3\cdots m$; j 为粒子的维度, $j=1,2,3\cdots n$; k 为迭代次数; w 为惯性因子; c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 之间的随机数; $V_{\max}$ 由用户定义,通常 $V_{\max}=aX_{\max}$, $V_{\min}=aX_{\min}$, a 取 $0.1\sim 0.2$ 之间的常数。

1.2 线性递减权重因子

速度更新公式由粒子的惯性、粒子的自我认知和社会认知共三部分组成,分别用 wv_{ij}^k 、 $c_1r_1[p_{ij}^k-x_{ij}^k]$ 、 $c_2r_2[g_{ij}^k-x_{ij}^k]$ 表示。惯性因子 w 表示粒子继承上一次迭代中的速度的能力,学习因子 c_1 、 c_2 代表了自身经验和社会经验在粒子搜寻最佳目标值中的权重。学习因子 $c_1=0$ 时表示粒子没有自我认知能力,容易陷入局部极值点; $c_2=0$ 时表示粒子没有社会信息的共享,此时的 PSO 算法是一个多起点的随机搜索。惯性因子 w 和学习因子 c_1 、 c_2 的取值无明确的规定和计算方法,一般由用户自行设定。惯性因子 w 的取值一般小于 1,学习因子一般取 $c_1=c_2=2$ 。

位置更新公式的含义为粒子第 $k+1$ 次的位置 = 第 k 次的位置 + 第 k 次的速度 $\times$ 运动的时间。运动时间一般取 1,也写作 $x_{ij}^{k+1}=x_{ij}^k+v_{ij}^k$ 。

Shi.Y^[8]在研究中指出,相较于较小的惯性因子,较大的惯性因子更有利于全局搜索。由于 w 的取值一般小于 1,当目标函数到达局部最优值附近时,速度更新公式中第一项 wv_{ij}^k 控制了粒子的速度的更新,这将导致粒子的速度越来越小,从而过早收敛。Shi.Y 提出了线性递减惯性因子来解决此问题,惯性因子用式(3)计算。线性递减惯性因子保证了搜索前期的全局搜索能力,避免陷入局部最优解的同时又增加了后期的局部搜索能力,能够更大程度上锁定最优解。

本文的惯性因子就采用式(3)的线性递减权重因子。

$$w=w_{\min}+(w_{\max}-w_{\min})\times\frac{G-g}{G} \quad (3)$$

式中: w 为惯性因子; G 为总迭代次数; g 为已迭代步数;通常取 $w_{\min}=0.4$, $w_{\max}=0.9$ 。

2 影响矩阵法概述

在斜拉桥索力优化中,影响矩阵是指在满足线性叠加原理的基础上,对斜拉索施加单位张力时,结构内力、位移、索力发生的变化量的矩阵。零支反力法等传统索力优化方法通常是对内力或位移的单一目标的优化,对结构受力体系更加复杂的斜拉桥未必实用。影响矩阵法可以实现多目标的优化,是研究更具普适性的索力优化方法的重要工具。

影响矩阵的计算前提为线性叠加原理,即各个荷载的影响可以线性叠加,可以用式(4)表示:

$$XC=Y \quad (4)$$

式中: X 为施调向量,是结构中实施调整以改变受调向量的若干个元素所组成的行向量; C 为影响矩阵; Y 为受调向量,是结构中被调整的若干元素所组成的行向量。

在正常荷载范围内的斜拉桥,结构基本符合线性叠加原理,可以采用影响矩阵法。在索力优化的过程中,施调向量 X 一般指索力,受调向量 Y 可以是截面内力、应力、位移和斜拉索索力,影响矩阵 C 决定了施调向量 X 与受调向量 Y 的关系。

影响矩阵法中,要使受调向量 Y 达到某个目标,关键在于影响矩阵 C 的求解。通常采用的方法是借助有限元软件,首先在有限元模型中对施调元素和受调元素进行编号, $i=1,2,3\cdots n$, $j=1,2\cdots m$ 。在模型上施加单位荷载,得到相应的荷载效应 C_{ij} ,再将约束目标对应的荷载效应按矩阵方式一一列出,即可得到影响矩阵 C 。

$$C=[C_{ij}] \quad (5)$$

在 Midas civil 软件中可以直接利用索控制模块中的未知荷载系数模块导出。

3 项目及模型概述

某非对称异形斜拉桥位于绍兴市锦帆路东段跨梅山江位置处,全长 129.73 m,跨径为 45 m+55 m+25 m,桥梁宽度为 20 m。

主梁采用钢箱梁,钢箱梁标准断面宽 22.5 m,中心梁高 1.8 m,共分为 20 个节段。箱梁顶、底板及腹

板厚 20 mm,横隔板厚 10 mm,拉索位置横隔板厚 16 mm,支点位置横隔板厚 20 mm。桥塔采用双圆拱结构,V 形斜塔塔身纵向向后倾斜 35°。斜塔为截面圆形的钢管,基座处 5 m 段为预埋段,内灌 C40 微膨胀混凝土。

拉索采用整束挤压钢绞线拉索,型号 GJ15-5、GJ15-12,外套 HDPE 管。桥梁的布索形式比较新颖,除了连接主梁与斜塔的斜拉索外,增加了交叉布置的连接两斜塔的斜拉索。桥梁共 21 组斜拉索,42 条斜拉索:边跨的斜拉索从起始端到桥塔依次编号为 T7~T1,梁上索距为 4 m;主跨的斜拉索从桥塔端到桥梁结束端依次编号为 L1~L7,梁上索距为 5 m;斜塔之间用 7 组拉索连接,塔间拉索的依次编号为 M1~M7,T1 和 L7 间的拉索编号为 M1,依次类推。斜拉索中除 L1、T1、M1、M7 拉索采用 GJ15-5 型号外,其余均采用 GJ15-12 型号。桥墩采用 V 形斜腿钢管混凝土柱墩,桥台采用壁式台,基础采用承台接群桩基础。桥梁立面见图 1。

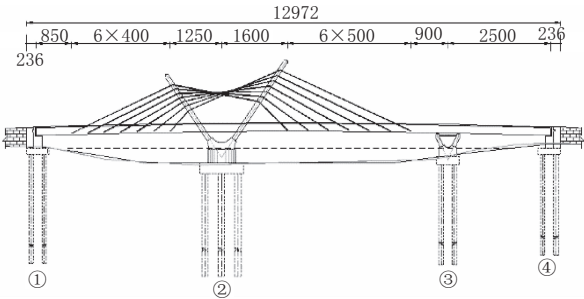


图 1 异形斜拉桥立面图(单位:cm)

使用 Midas civil 建立有限元模型。采用一般梁单元模拟主梁和斜塔,桁架单元模拟斜拉索。有限元模型见图 2,模型中共 433 个节点、140 个主梁单元、230 个斜塔单元和 42 个斜拉索桁架单元。由于本文侧重异形斜拉桥索力的影响和优化,建立有限元模型时对下部结构不进行表达,以一般支承表达主梁和下部结构的连接。荷载只考虑恒载,包括桥体和二期恒载。

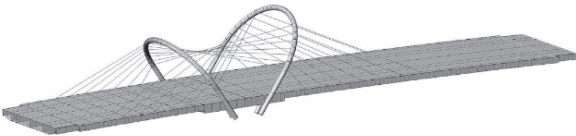


图 2 异形斜拉桥有限元模型

4 传统方法的索力优化

迭代法^[10-11]是用来进行索力优化的常用的方法,本文采用差值迭代法^[12],对异形斜拉桥进行索力优化。差值迭代法首先以目标成桥索力 $\{F\}$ 作为初索力

带入有限元软件中,计算得到成桥索力 $\{F_0\}$,得到差值:

$$\{\Delta F_0\}=\{F_0\}-\{F\}$$
 (6)

根据差值,选取另一组初索力

$$\{T_0\}=\{T_0\}-\{\Delta F_0\}$$
 (7)

将 $\{T_0\}$ 代入有限元模型中进行计算,得到成桥索力 $\{F_1\}$, $\{F_1\}$ 与目标成桥索力 $\{F\}$ 之间的差记为 $\{\Delta F_1\}$,即:

$$\{\Delta F_1\}=\{F_1\}-\{F\}$$
 (8)

重复进行以上步骤,反复迭代,直至达到相应的精度要求。

林桢楷^[9]用此方法对广州番禺沙湾特大桥进行了索力优化,经过两次迭代就可以得到满足精度要求的初索力,经过三次迭代得到了精度较高的结果。

本项目中的斜拉桥,在斜塔间添加了交叉布置的斜拉索,受力结构更加复杂,使用差值迭代法进行优化,结果如图 3 所示:共对斜拉桥进行了 8 次迭代,前 4 次迭代逐渐逼近成桥索力,从第 5 次迭代开始并不能逐渐得到更加精确的结果,反而逐渐发散,误差越来越大。

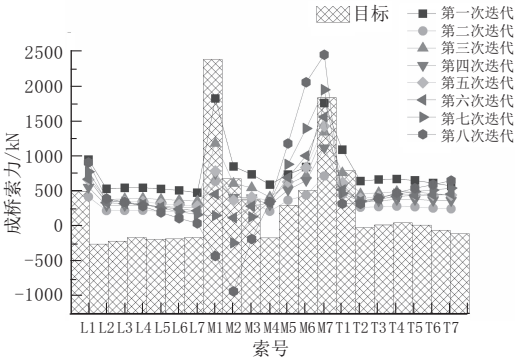


图 3 差值迭代法成桥索力对比图

选取最逼近目标成桥索力的第 4 次迭代结果进行分析,结果如图 4 所示:迭代所得的成桥索力与目标成桥索力的相对误差分布不均匀,L1、T7 达到了 1%,而 M1 的误差达到了 34%,M2、M3 都达到了 20%以上的误差,结果可靠性较低。

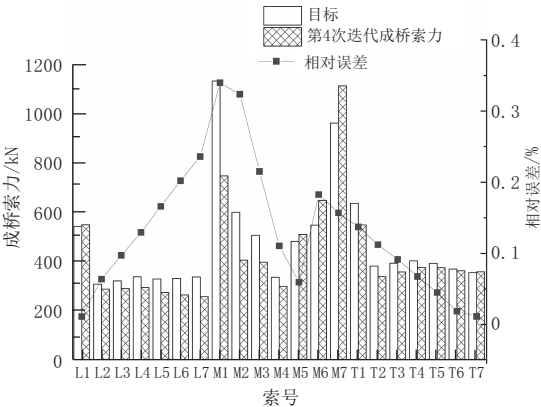


图 4 第 4 次迭代与目标成桥索力的对比和相对误差图

本文尝试使用引入影响矩阵的迭代法,建立平衡方程 $T_0 = C_T X + T_d$ 。其中 T_0 为目标成桥索力, C_T 为影响矩阵, T_d 为桥梁仅在恒载情况下的斜拉索索力。通过以上公式不停迭代使成桥索力不断逼近目标值。由于目标斜拉桥结构比较复杂,获得的影响矩阵接近奇异,最终优化的初索力矩阵 X 中的每组索力的数量级都达到了 10^5 N,不具有合理性,可信度较低。

以上计算结果说明,传统的迭代法对本项目中结构复杂的异形斜拉桥具有不适用性。且采用手工迭代试算方法,操作过程繁琐,耗费时间长。

5 基于粒子群算法的索力优化

5.1 计算模型

取斜拉索初拉力为 $\{S_1^0, S_2^0, \dots, S_n^0\}$, 目标成桥索力为 $\{S_1^T, S_2^T, \dots, S_n^T\}$, n 为拉索的数量, 上标 0 和 T 分别代表初始索力和目标成桥索力。对关键截面的位移控制点进行编号, $i=1, 2, 3, \dots, k$, 对弯矩控制点进行编号, $i=1, 2, 3, \dots, l$ 。 $\{f_1, f_2, \dots, f_l\}$, $\{F_1, F_2, \dots, F_l\}$ 分别为关键截面控制点的位移和弯矩。其中施调向量 X

$$X = \{S_1^0, S_2^0, \dots, S_n^0\} \quad (9)$$

影响矩阵 C 可以分为施调向量对弯矩、位移和成桥索力三部分, 分别记为 C_F 、 C_f 、 C_S 。

$$C = \begin{bmatrix} C_{0,1} & \cdots & C_{0,m} \\ \vdots & & \vdots \\ C_{n,1} & \cdots & C_{n,m} \end{bmatrix} = [C_F, C_f, C_S] \quad (10)$$

$C_{i,j}$ 由式(5)定义。受调向量 Y 可以分为弯矩、位移和成桥索力三部分, 分别记为 Y_F 、 Y_f 、 Y_S 。

$$Y = [Y_F, Y_f, Y_S] \quad (11)$$

在斜拉桥索力优化的过程中, 需要恒载的影响, 把恒载计算的结果记为 G 。 G_F 、 G_f 、 G_S 分别为弯矩、位移和成桥索力的计算结果。

$$G = [G_F, G_f, G_S] \quad (12)$$

根据式(4)可以建立如下关系:

$$XC + G = Y \quad (13)$$

展开形式如下:

$$\begin{cases} Y_F = \{F_1, F_2, \dots, F_l\} = X \cdot C_F + G_F \\ Y_f = \{f_1, f_2, \dots, f_l\} = X \cdot C_f + G_f \\ Y_S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\} = X \cdot C_S + G_S \end{cases} \quad (14)$$

不同的优化目标, 需要不同的目标函数。在明确成桥索力的时候, 获取初始斜拉索力, 应该使调索之后的成桥索力尽可能逼近目标值, 同时使关键截面的弯矩和位移在合理的范围内, 即

$$\begin{cases} \lim_{X \rightarrow X^{opt}} [S_{i1} - S_{i1}^T] = 0 \\ F_{min} \leq F_{i2} \leq F_{max} \\ f_{min} \leq f_{i3} \leq f_{max} \end{cases} \quad (15)$$

式中: opt 为最后优化结果; i_1 为斜拉索的编号, $i_1 = 1, 2, 3, \dots, n$; i_2 为关键截面弯矩控制点的编号, $i_2 = 1, 2, 3, \dots, l$; F_{min} 、 F_{max} 为关键截面允许的最大正弯矩和最大负弯矩; i_3 为关键截面位移控制点的编号, $i_3 = 1, 2, 3, \dots, k$; f_{min} 、 f_{max} 为关键截面允许的最小和最大的位移。

5.2 结合 PSO 进行优化

基于 PSO 的自动调索计算流程如图 5 所示。

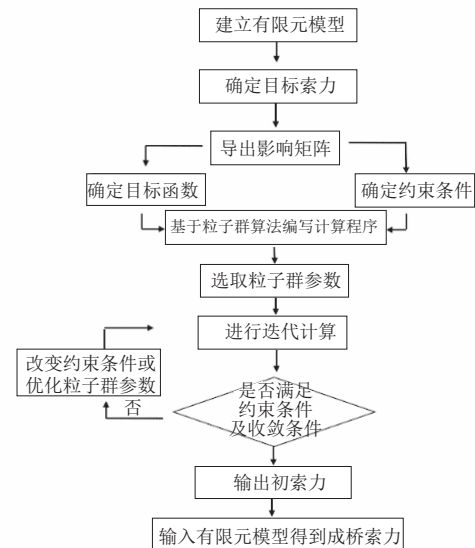


图 5 基于 PSO 的自动调索流程图

按照优化流程, 该项目的异形斜拉桥有 L1 ~ L7, T1 ~ T7, M1 ~ M7, 共 21 组索, 以项目施工监测报告中的最终成桥索力作为目标成桥索力。

根据本文 5.1 节的理论模型, 可以定义目标函数:

$$\min E(X) = \max_i \left| \frac{S_i - S_i^T}{S_i^T} \right| \quad (16)$$

约束条件表示为:

$$\begin{cases} \{F_{1min}, F_{2min}, \dots, F_{lmin}\} \leq X \cdot C_F + G_F \leq \\ \{F_{1max}, F_{2max}, \dots, F_{lmax}\} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \{f_{1min}, f_{2min}, \dots, f_{lmin}\} \leq X \cdot C_f + G_f \leq \\ \{f_{1max}, f_{2max}, \dots, f_{lmax}\} \end{cases} \quad (18)$$

该项目中, 结合桥梁的实际情况, 仅将 140 个主梁单元的弯矩作为目标控制量, 不单独考虑位移。在未调索时, 主梁的最大负弯矩为 $-36\ 000$ kN·m, 最大正弯矩为 $26\ 000$ kN·m, 于是约束条件确定为: F_{1min} , $F_{2min}, \dots, F_{lmin} = -35\ 000$ kN·m, F_{1max} , $F_{2max}, \dots, F_{lmax} = 24\ 000$ kN·m。

利用 MATLAB 自编粒子群算法程序, 在程序中

进行试算后取参数:以 21 组索的初索力作为未知量 $(x_1, x_2, \dots, x_{21})$, 种群数量取 40, 形成初始 40×21 的未知量矩阵。粒子群的学习因子 $c_1=c_2=1$, 最大速度为 $V_{\max}=2 \text{ m/s}$ 。考虑到斜塔与主梁的受力均匀性和施工的可行性, 规定初索力最大值为 500 kN, 最小值为 100 kN, 即 $X_{\max}=6, X_{\min}=1$, 总迭代次数 G 取 10 000。初始索力矩阵 X , 每个粒子代表的每组索的初始值均在 100 kN 与 500 kN 之间随机生成, 即 $1 < X_i < 5, i=1, 2, 3, \dots, 21$ 。初始速度矩阵 V , 每个粒子代表的每组索的初始速度均在 0 m/s 与 1 m/s 之间随机生成, 即 $0 < V_i < 1, i=1, 2, 3, \dots, 21$ 。

为避免局部收敛的情况, 惯性因子 w 的取值 $w = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min}) \times \frac{G-g}{G}$ 。根据经验取 $w_{\min}=0.4, w_{\max}=0.9$, G 为总迭代次数 10 000, g 为已迭代次数。

图 6 为程序某次运行得到的结果。 $E_{\min}$ 表示粒子群算法寻找到的结果和目标成桥索力之间的最小相对误差; gb 记录的是最小相对误差下的初索力。从图 6 中可以看到, 粒子群算法在前 500 次迭代中误差迅速缩小, 在迭代 2 000 次后逐渐趋向收敛, 得到一组可行的初索力, 使 21 组斜拉索的成桥索力与目标成桥索力的相对误差控制在 6.3% 以内, 且程序的整个运算过程耗时在 20 s 内。

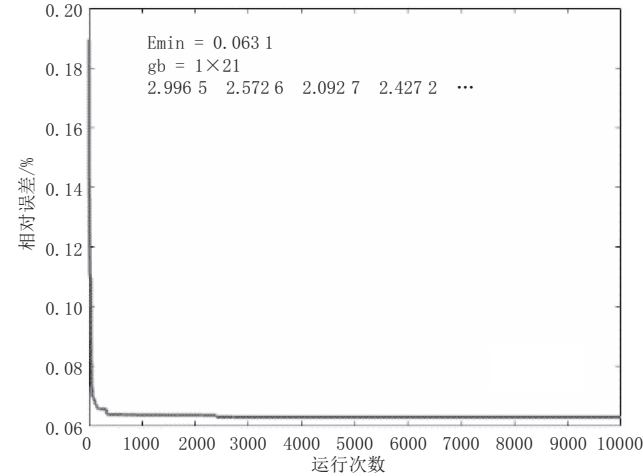


图 6 某次 PSO 程序运行结果

粒子群算法中, 初索力矩阵的生成及粒子群迭代寻优的过程均具有一定的随机性, 为验证粒子群算法的可行性和稳定性, 探究搜索结果的规律, 将程序运行 100 次, 得到 100 组初索力与相对误差, 进行数据分析。

由图 7 可见, 每次计算都在前 500 次迭代 z 中迅速向目标逼近, 收敛速度很快, 2 000 次后趋向收敛, 曲线近似直线。结合图 8 可知, 将程序运行 100 次所

得的最小相对误差基本上都分布在平均值 $\pm$ 标准差即 68.3% 置信区间内, 收敛至相近的水平, 说明该算法的计算结果具有一定的可信度。而且, 算法的相对误差最小可以达到 5% 以内, 验证了其在获取初始拉力群时的可行性。

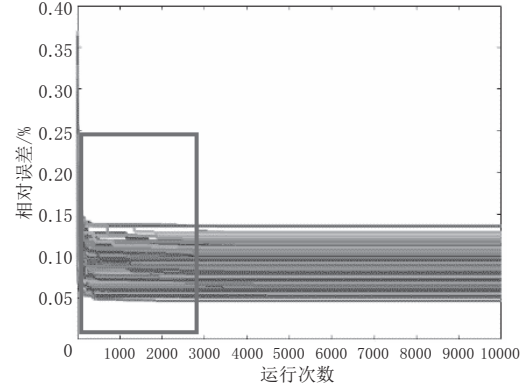


图 7 PSO 程序运行 100 次的收敛曲线

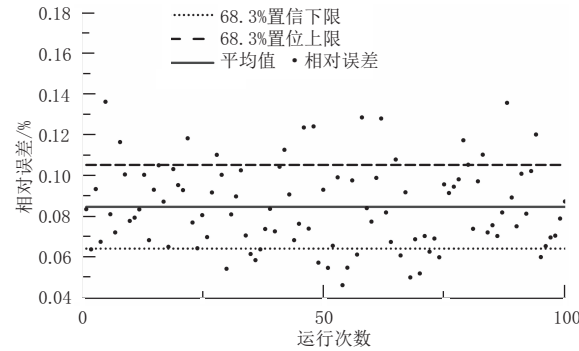


图 8 程序运行 100 次的相对误差分布

考虑到算法的随机性, 验证整体目标后还需要进一步考察对单组索力进行目标寻优的可信度。选取在程序运行 100 次获得的运算结果中, 索力标准差最大的 T1 和最小的 M4 单独进行统计分析。

根据图 9、图 10, 代表 T1、M4 的索力值点大部分都分布于 68.3% 的置信区间内。T1 的 100 次搜索结果的均值十分靠近目标值, 相对误差不到 1%; M4 的 100 次搜索结果中, 68.3% 置信下限十分靠近其目标值, 且相对误差不到 5%。T1 的 100 次搜索结果中的最大相对误差控制在 7% 以内, M4 因为目标索力值较小, 最大相对误差也在 10% 以内。总体来看, 搜索结果比较理想, 说明 PSO 算法对单个索的目标寻优也是比较可靠和稳定的, 验证了粒子群算法在寻找异形斜拉桥初索力群中的可行性。

将 100 次搜索结果中相对误差最小的一组带入有限元模型, 得到最终成桥索力, 与目标成桥索力进行对比, 结果如图 11, 全体 42 根斜拉索索力与目标索力都十分接近, 42 根斜拉索最终的寻优结果与目标值的相对误差均控制在 7% 以内, 在可接受的范围

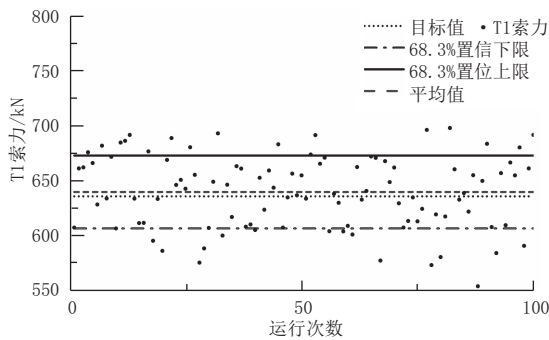


图9 程序运行100次的T1索力分布

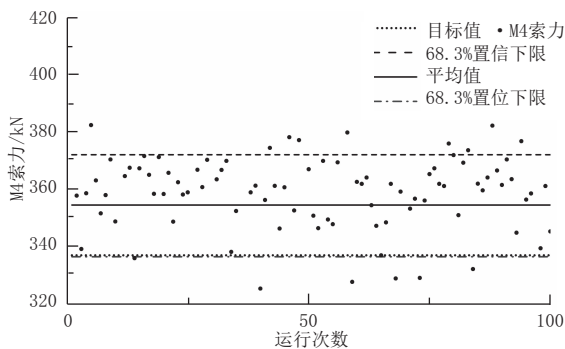


图10 程序运行100次的M4索力分布

内,进一步验证了基于粒子群算法求解异形斜拉桥初拉力的可行性和有效性。

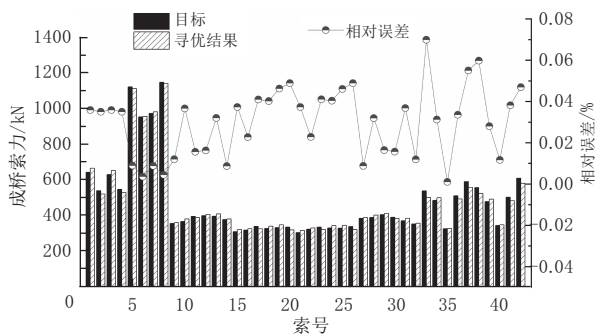


图11 成桥索力对比及相对误差图

6 结论

斜拉桥的索力优化是建立有限元模型和进行施工监测的关键环节,求解斜拉桥的初始拉力可以辅助建模和施工阶段的索力优化。采用影响矩阵可以便利地建立施调向量与受调向量之间的函数关系,确立优化目标,结合智能优化算法快速自动化地实

现初索力的求解。

结合工程实例的计算结果表明:该工程中的异形斜拉桥结构较为复杂,传统的迭代法具有不适用性,且迭代调索的过程复杂繁琐。结合粒子群算法编写 MATLAB 程序可以实现较复杂的异形斜拉桥结构的索力优化的自动化、智能化求解,求解所得的结果稳定可信。此方法避免了繁琐的试算过程,提高了调索的效率。在计算程序中改变优化目标和约束条件,即可获得不同约束条件或目标情况下的优化结果,是一种高效的索力优化方法。

参考文献:

- [1] 戴杰,秦凤江,狄谨,等.斜拉桥成桥索力优化方法研究综述[J].中国公路学报,2019,32(5):17-37.
- [2] 王桢,张劲泉,周建庭,等.基于影响矩阵的斜拉桥合理成桥状态索力优化[J].公路工程,2021,46(4):31-38,45.
- [3] 谈丹辉,杨通.基于影响矩阵及粒子群算法的斜拉桥自动调索[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(3):355-360.
- [4] 陈志军,刘洋,杨立飞,等.基于粒子群优化算法的独塔斜拉桥成桥索力优化[J].桥梁建设,2016,46(3):40-44.
- [5] 姜增国,朱标.基于改进粒子群的非对称斜拉桥成桥索力优化[J].公路工程,2018,43(6):117-121.
- [6] 占玉林,侯之瑶,邵俊虎,等.基于响应面法及粒子群算法的异形斜拉桥索力优化[J].桥梁建设,2022,52(3):16-23.
- [7] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. Perth, Australia: IEEE., 1995:1942-1948.
- [8] SHI Y, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer[C]// 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. Anchorage, AK:IEEE, 1998: 69-73.
- [9] 林桢楷.差值法确定矮塔斜拉桥的初张索力[J].科学技术与工程, 2010,10(16):4068-4070,4079.
- [10] 陈德伟,范立础.确定预应力混凝土斜拉桥恒载初始索力的方法[J].同济大学学报(自然科学版),1998(2):120-124.
- [11] D.W. ChEN, F.T.K. AU, L.G. ThAM, P.K.K. LEE.Determination of initial cable forces in prestressed concrete cable-stayed bridges for given design deck profiles using the force equilibrium method[J]. Computers & Structures,2000,74(1):1-9.
- [12] 梁鹏,肖汝诚,张雪松.斜拉桥索力优化实用方法[J].同济大学学报(自然科学版),2023(11):1270-1274.