

# 基于智能优化方法的斜拉桥索力优化

冯 阅, 罗立胜, 韩建刚

(海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228)

**摘要:**在运用弯曲能量最小法计算斜拉桥拉索初始索力时,为观察传统的基于导数信息的搜索算法和智能优化方法的效果,采用序列规划法并引入遗传算法、模拟退火算法和粒子群优化算法3种智能优化方法,以各拉索索力为设计变量、桥塔和主梁的加权弯曲应变能为目标函数、桥塔和主梁的位移和弯矩等为约束,建立优化模型。结合Matlab及Ansys编制了斜拉桥索力优化的计算程序。通过算例计算分析,验证了编制程序的有效性,并对比了几种方法的计算结果,结果显示采用遗传算法和粒子群优化算法的全桥结构内力较传统方法均匀,而模拟退火算法效果不太理想。

**关键词:**弯曲应变能;智能优化方法;斜拉桥;索力优化

## 1 概述

斜拉桥是高次超静定结构,是由塔、主梁和拉索3种基本构件组成的柔性结构体系,通过三者的受力分配,最终确定合理的成桥状态。斜拉索作为斜拉桥的一个重要组成部分,其施加的索力大小不仅改变自身的刚度,也影响其他构件的受力性能。因此,合理确定成桥索力是斜拉桥设计的一项重要工作。目前已有许多的成桥索力计算方法如刚性支撑连续梁法、零位移法、影响矩阵法和弯曲能量最小法等。这些方法都是在确定的结构体系和荷载作用下,寻找一组最优的拉索索力,使得斜拉桥中某种反映受力性能的目标达到最优,这也将斜拉桥合理受力状态确定的问题转化为拉索索力最优化问题。

弯曲能量最小法是以各拉索索力为设计变量、斜拉桥主要受力构件的弯曲应变能为目标函数、桥塔和主梁等的弯矩和位移为约束的一种索力优化方法。该方法将索力优化问题转化成数学优化模型,采用最优化理论和方法进行求解,在实际工程应用中备受关注。然而,实际斜拉桥中拉索数量大,意味着设计变量多,且弯曲应变能、应力和位移等系统响应一般是设计变量的隐式函数,非线性较强。在优化求解时,采用传统的基于导数信息的搜索算法,优化结果容易陷入局部最优解。相较而言,智能优化算法不需要目标函数和

约束的导数信息,往往能够跳出局部最优解,趋近或得到全局最优解,因而在全局收敛性和通用性方面具有较大的优势,这类方法也逐步应用于斜拉桥的成桥索力优化中。该文通过采用序列规划法,并引入遗传算法、模拟退化算法和粒子群优化算法3种智能优化方法,结合数学计算软件Matlab和结构分析软件Ansys,建立斜拉桥索力优化程序,通过算例分析计算验证优化程序有效性的同时,对4种方法的计算结果进行对比。

## 2 优化问题描述

### 2.1 设计变量

成桥拉索的初始索力是优化计算所求的未知量,通过初始索力的调整,使目标函数最优。假设斜拉桥全桥共有拉索 $n$ 根,则设计变量定义如下:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)^T \quad (1)$$

式中: $x_i$ 为第 $i$ 根索的初始索力。

### 2.2 目标函数

考虑到刚度大的构件可以多分担些弯矩,通过赋予桥塔和主梁不同的权重,将桥塔和主梁的加权弯曲应变能作为目标函数,使得在最优索力下全桥的弯曲应变能最小。

$$U = w_t \times \sum_{i=1}^{N_t} \left[ \frac{L_i}{4E_i I_i} (M_{ti}^2 + M_{ij}^2) \right] + w_g \times$$

收稿日期:2020-09-14

基金项目:海南省自然科学基金资助项目(编号:518QN216);海南大学科研启动基金(编号:kyqd1632)

作者简介:冯阅,男,博士,讲师,E-mail:315226445@qq.com

$$\sum_{g=1}^N \left[ \frac{L_g}{4E_g I_g} (M_{gi}^2 + M_{gj}^2) \right] \quad (2)$$

式中:  $\omega_t$  和  $\omega_g$  分别为桥塔和主梁的权重;  $N_t$  和  $N_g$  分别为桥塔和主梁的有限单元个数;  $L_t$  和  $L_g$  分别为桥塔和主梁单元的长度;  $E_t I_t$  和  $E_g I_g$  分别为桥塔和主梁单元的抗弯刚度;  $M_{ti}$  和  $M_{tj}$  分别为桥塔单元的左右两端弯矩,  $M_{gi}$  和  $M_{gj}$  分别为主梁单元的左右两端弯矩。

### 2.3 状态变量

为了得到合理的受力状态,考虑4种状态变量作为约束。拉索的初始索力限定在合理范围;拉索在主梁位置的竖向位移限定在合理范围;桥塔在纵桥向的水平位移限定在合理范围;主梁和主塔的弯曲应变能限定在合理范围。

$$\begin{aligned} x_{\min} &\leq x_i \leq x_{\max} \\ |\delta_i| &\leq \delta_{\max} (i=1, 2, \dots, n) \\ |u_j| &\leq u_{\max} (j=1, 2, \dots, m) \\ |M_t| &\leq M_{t, \max}; |M_g| \leq M_{g, \max} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $x_{\min}$  和  $x_{\max}$  分别为拉索索力的最大和最小值;  $\delta_i$  和  $\delta_{\max}$  分别为拉索在主梁位置的竖向位移和最大限值;  $u_j$  和  $u_{\max}$  分别为桥塔纵桥向水平位移和最大限值,  $M_{t, \max}$  和  $M_{g, \max}$  分别为主梁和桥塔单元两端弯矩的最大限值。

## 3 优化方法及程序

### 3.1 优化方法

序列规划法基于当前设计点及其导数信息构造原问题的局部近似模型并进行序列求解,是大规模结构优化问题中常用的求解方法。遗传算法基于生物进化理论,是一种具有全局优化性能、通用性强且应用较广的算法。算法首先通过随机方法产生初始种群,即编码和解码,其次,根据目标函数构造适值函数,依据适值函数的大小不断选择和繁殖,即通过交叉和变异操作不断更新种群,若干代后得到适值函数最大的个体即为最优解。模拟退火算法通过模拟热力学中的物理退火过程,从一个给定的初始高温开始,利用具有概率突跳特性的抽样策略在解空间中随机搜索,伴随温度的不断下降重复抽样过程,最终得到问题的最优解。粒子群算法通过模拟鸟类觅食过程中的迁徙和群聚行为,利用个体在搜寻食物的过程中与群体相互协作进行信息交换,使得群体朝目标逼近,直至群体都落在目标附近,得到问题的最优解。

智能优化方法在实际工程应用中,一般通过惩罚函数方法将约束引入目标函数中,将问题转化成无约束问题。以位移约束为例,惩罚函数构造如下:

$$F = OBJ \times (1 + C); C = \sum_{i=1}^{N_l} C_i^d \quad (4)$$

式中:  $F$  为惩罚函数;  $OBJ$  为需要最小化的目标函数;  $C$  为约束的惩罚项;  $C_i^d$  和  $N_l$  分别为位移约束的惩罚项和约束个数。

约束的惩罚项  $C_i$  定义如下:

$$\alpha_i = \frac{|S_i|}{|S_i^a|} - 1; C_i = \begin{cases} 0 & \alpha_i \leq 0 \\ \alpha_i^{1/2} & 0 < \alpha_i \leq 1 \\ \alpha_i^2 & \alpha_i > 1 \end{cases} \quad (5)$$

惩罚因子  $\alpha_i$  根据位移计算得到。  $S_i$  和  $S_i^a$  分别为第  $i$  个约束下桥梁的实际位移和相应的容许位移。当约束条件满足时,则惩罚项为0;否则,惩罚项是一个正实数,使目标函数值增大,约束违反的越多,惩罚因子越大。

### 3.2 计算程序

计算程序都通过结合数学软件 Matlab 和结构软件 Ansys 来构建。Matlab 作为主程序植入算法,在需要目标函数或约束函数等系统响应时调用 Ansys 进行有限元分析。算法流程如图1所示。

## 4 算例分析

图2为斜拉桥计算模型,该桥主跨70 m、两边跨30 m,共有12对索,主塔总高24 m,桥面以上高度18 m,梁受到竖向均布荷载50 kN/m作用。采用塔墩固结、主梁漂浮的计算模型。各构件的材料和几何特性见表1。采用图1中4种方法确定拉索初始索力。赋予桥塔和主梁相同的权重,设定桥梁总弯曲应变能最小为目标,拉索索力限定为1 000~3 000 kN,弯曲应变能最大值限定为5 000 kN·m。拉索在主梁位置的竖向位移限值取  $L/550$  ( $L$  为边跨或主跨跨径),桥塔纵桥向水平位移限值为  $H/550$  ( $H$  为桥塔高度)。收敛条件为前后两次迭代的目标函数值小于  $1 \times 10^{-3}$  或者调用有限元的次数达到1 000次。序列规划法和模拟退火算法的计算结果依赖于初始点的选取,采用索力为1 000、3 000 kN两个初始点分别计算;遗传算法和粒子群算法对种群大小依赖,采用种群大小为20、50分别计算。

以有限元分析次数为横坐标,桥塔和主梁的加权弯曲应变能为纵坐标,序列规划法(SQP)和模拟退火

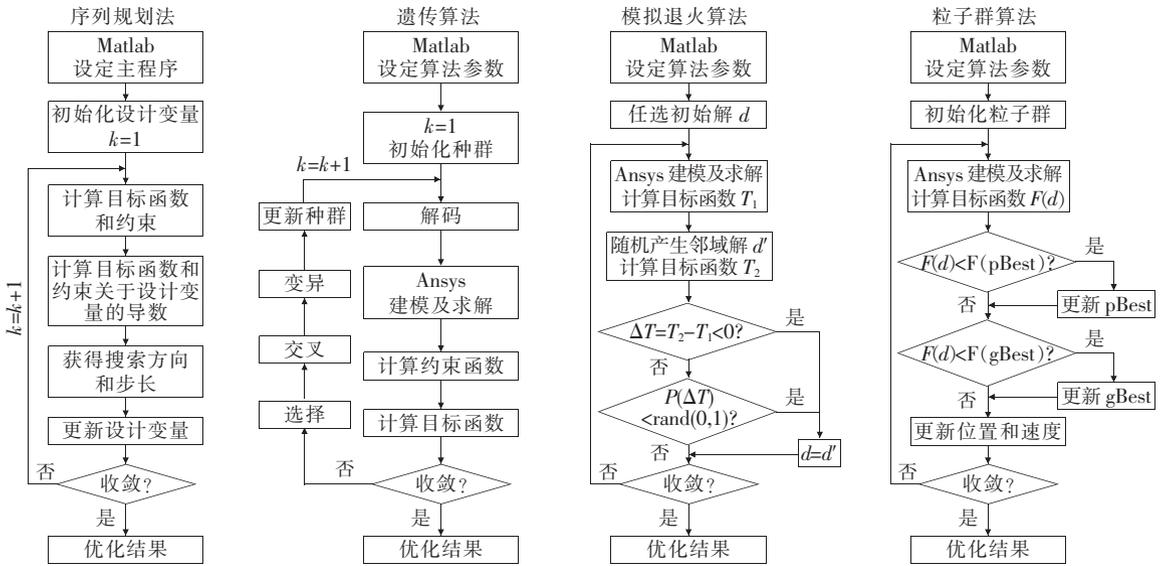


图 1 算法流程图

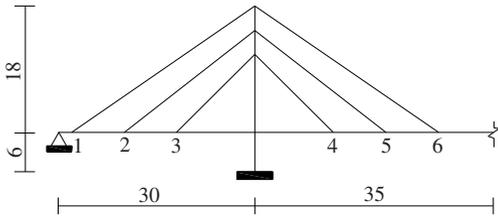


图 2 斜拉桥计算模型(单位:m)

算法(SA)不同初始点为 1 000、3 000 kN,遗传算法(GA)和粒子群算法(PSO)不同种群大小为 20、50 的迭代曲线示于图 3。

由图 3 可知:计算效率序列规划法最高,分别调用 112 和 294 次有限元分析后收敛,而智能优化算法进行了 1 000 次有限元分析。计算结果为遗传算法和粒子群算法结果最好,序列规划法次之,模拟退火算法最

表 1 构件材料几何特性

构件	材料	弹性模量/Pa	密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	截面面积/cm <sup>2</sup>	抗弯刚度/m <sup>4</sup>
桥塔	混凝土	3.50 × 10 <sup>10</sup>	2 500	160 000	21.33
主梁	钢材	2.06 × 10 <sup>11</sup>	7 850	40 000	1.33
拉索	钢材	2.06 × 10 <sup>11</sup>	7 850	50	0

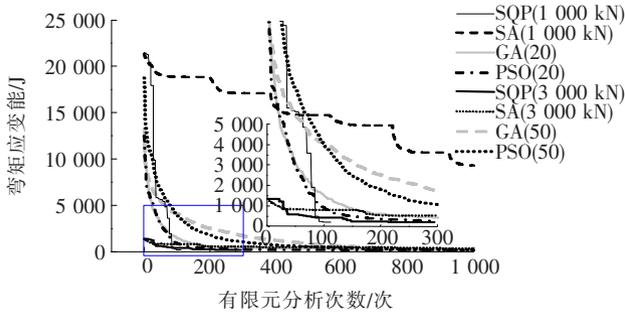


图 3 各算法迭代曲线

差,遗传算法种群大小为 20 和 50 时弯曲应变能分别收敛于 162.3、165.9 J;粒子群算法种群大小为 20、50 时分别收敛于 160.4、166 J。模拟退火算法对初始点选取依赖程度很高,初始点为 1 000、3 000 kN 时分别收敛于 9294.8、346.6 J;序列规划法对初始点也有一

定依赖,初始点为 1 000、3 000 kN 时分别收敛于 195.8、203.4 J。

取各算法中最好的结果,优化后的弯矩和索力示于图 4。

从图 4 可以看出:相比于序列规划法和模拟退火算法,采用遗传算法和粒子群算法可以获得更均匀的弯矩分布。模拟退火算法的主梁弯矩波动较大,最大值和最小值分别为 2 701、-3 408 kN · m,其他算法主梁的弯矩分布较为接近也更均匀,如粒子群算法最大值和最小值分别为 1 815、-2 812 kN · m。序列规划法桥塔的弯矩分布波动较大,最大值和最小值分别为 145、-3 818 kN · m,其他算法的弯矩分布较为接近也更均匀,如遗传算法最大值和最小值分别为 55、-1 594 kN · m。另外,遗传算法和粒子群算法优化

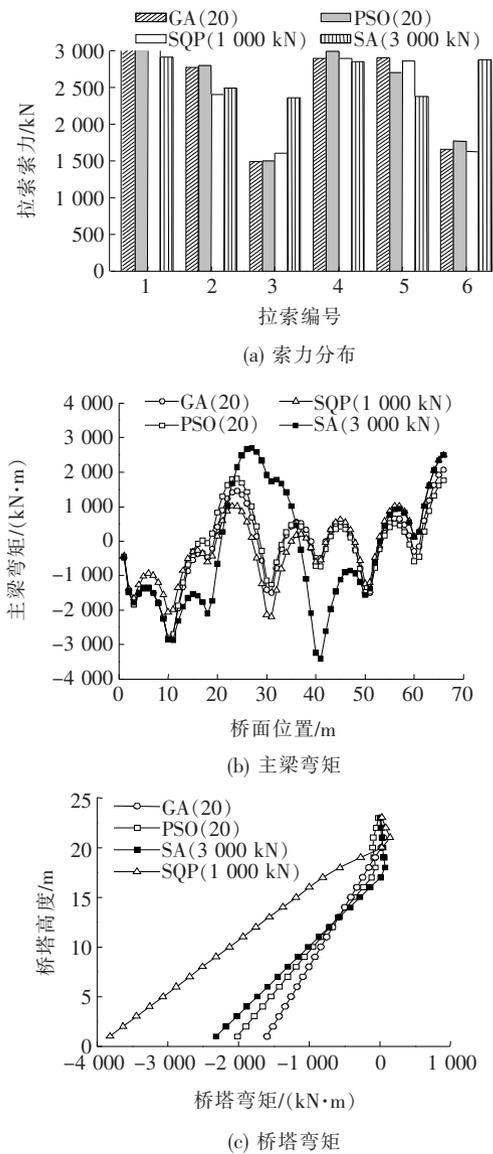


图4 优化后弯矩和索力

后的索力也较均匀,符合边索索力大、中索索力小的一般规律。结果有效验证了优化程序的有效性。

## 5 结论

为观察传统的基于导数信息的搜索算法和智能优化方法计算斜拉桥成桥索力的效果,以斜拉桥加权弯曲应变能最小为目标,结合 Matlab 及 Ansys 编制了斜拉桥索力优化的计算程序,并通过算例计算分析,得到以下结论:

(1) 各计算程序采用 Matlab 和 Ansys 编制,算法实现简单有效,实用性强。

(2) 传统的基于导数的优化方法计算效率高,容

易陷入局部最优解;智能优化方法往往需要成百上千次的有限元分析,对于大规模优化问题计算效率偏低,但遗传算法和粒子群优化算法优化后的全桥受力更均匀,索力更合理。

(3) 算例中在限定调用有限元次数的情况下,模拟退火算法对初始点的依赖较强,不同初始点得到的优化结果相差很大,且计算结果不太理想;遗传算法和粒子群算法对种群大小有依赖,种群大小超过一定值时依赖程度较小。

## 参考文献:

- [1] 刘士林,王似舜.斜拉桥设计[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [2] 严任苗.基于全对称悬拼施工的斜拉桥结构优化[J].中外公路,2019(6).
- [3] 肖汝诚,项海帆.斜拉桥索力优化的影响矩阵法[J].同济大学学报(自然科学版),1998(3).
- [4] SONG C, XIAO R, SUN B. Optimization of Cable Pre-Tension Forces in Long-Span Cable-Stayed Bridges Considering the Counterweight [J]. Engineering Structures, 2018, 172: 919-928.
- [5] 冯仲仁,杨亚磊,李伟.基于响应面法的连续刚构桥结构优化设计[J].中外公路,2018(3).
- [6] 杜建斌.结构优化及其在振动和声学设计中的应用[M].北京:清华大学出版社,2015.
- [7] 刘益铭,刘大洋,刘山洪.基于 Matlab 联合 Ansys 的斜拉桥恒载索力优化[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2013(6).
- [8] 吴霄,肖汝诚.基于遗传算法的大跨度混合梁斜拉桥索力优化[J].江苏大学学报(自然科学版),2014(6).
- [9] 淡丹辉,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(3).
- [10] 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(3).
- [11] 马昌凤.最优化计算方法及其 Matlab 程序实现[M].北京:科学出版社,2015.
- [12] 汪定伟.智能优化方法[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [13] BRISEGHHELLA B, FENU L, FENG Y, et al. Topology Optimization of Bridges Supported by a Concrete Shell [J]. Structural Engineering International, 2013, 23(3): 285-294.
- [14] BRISEGHHELLA B, FENU L, FENG Y, et al. Optimization Indexes to Identify the Optimal Design Solution of Shell-Supported Bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(3): 1-12.