

基于改进粒子群算法的斜拉桥成桥索力优化

坎彬

(西南交通大学 桥梁工程系, 四川 成都 610031)

摘要:为了确定大跨度斜拉桥的合理成桥索力,以塔、梁拉压及弯曲应变能为目标函数,并根据合理成桥状态的要求对塔、梁、索的受力变形进行约束,建立索力优化数学模型。为了解决标准粒子群算法易早熟收敛、局部寻优能力差的问题,将基于局部邻域搜索的禁忌搜索算法与标准粒子群算法结合,提出一种改进的粒子群算法,并将其应用于工程实例,成功实现了斜拉桥成桥索力优化。研究表明:改进粒子群算法在收敛性能及寻优能力方面均得到明显改善,应用于大跨度斜拉桥索力优化中,结构的受力变形状态更为合理,优化效果显著。

关键词:斜拉桥;索力优化;拉压及弯曲应变能;罚函数法;改进粒子群算法

对于斜拉桥而言,其成桥恒载内力状态是衡量斜拉桥设计优劣的重要标志,由于斜拉索的可调性,合理的成桥状态可通过优化斜拉索索力获得。

目前,确定斜拉桥合理成桥索力的方法较多,根据优化思想与策略的不同,文献[2]将各种方法分为几大类,并分别讨论了各种方法的优缺点及使用范围。其中,结合智能优化算法对斜拉桥索力优化,可以对索、梁、塔等构件的力学行为施加限制,通过目标函数的最优求解使结构内力和线形达到最优,该方法适用范围广泛,且优化效果较好。

粒子群算法是受生物群体行为特性启发而提出的一种基于群体智能的全局随机搜索算法,其具有通用性好、鲁棒性强等特点。目前,已有一部分学者将该法运用到斜拉桥索力优化问题中,标准粒子群算法(PSO)在运行前期性能较好,收敛速度较快,但后期在接近最优解时,收敛速度降低,甚至可能停滞不前,且随斜拉索对数的增多易使算法陷入局部最优。

该文根据斜拉桥结构特点,建立相应的优化模型,并针对标准粒子群算法存在早熟收敛、局部寻优能力差的问题,提出一种改进算法,应用改进算法完成优化求解,实现斜拉桥成桥索力优化。

1 优化模型

1.1 目标函数

以结构拉压及弯曲应变能之和为目标函数进行优

化,能够全面反映斜拉索索力对结构的影响,优化结果更为合理。其应变能可表示为:

$$U = \int \left[\frac{M(s)^2}{2E(s)I(s)} + \frac{N(s)^2}{2E(s)A(s)} \right] ds \quad (1)$$

式中: $M(s)$ 、 $N(s)$ 为结构构件 s 位置处的弯矩、轴力; $E(s)$ 、 $I(s)$ 、 $A(s)$ 分别为构件该位置处的材料弹性模量、截面惯性矩、截面面积。

对于离散的杆系结构,式(1)可改写为:

$$U = \sum_{i=1}^n \left[\frac{L_i}{4E_i^L I_i^L} (M_i^L)^2 + \frac{L_i}{4E_i^R I_i^R} (M_i^R)^2 + \frac{L_i}{4E_i^L A_i^L} (N_i^L)^2 + \frac{L_i}{4E_i^R A_i^R} (N_i^R)^2 \right] \quad (2)$$

式中: n 为离散单元总数; L_i 为第 i 号单元的单元长度,上标 L 和 R 分别代表第 i 号单元的左端和右端截面。

将式(2)改写为矩阵形式:

$$U = \{M^L\}^T [B^L] \{M^L\} + \{M^R\}^T [B^R] \{M^R\} + \{N^L\}^T [C^L] \{N^L\} + \{N^R\}^T [C^R] \{N^R\} \quad (3)$$

式中:矩阵 $[B]$ 和 $[C]$ 为仅与各单元长度、材料和截面特性相关的对角矩阵。

根据影响矩阵概念可以建立起调索量 $\{x\}$ 与调索后各单元截面内力之间的关系,假定调索前各单元左右截面处弯矩和轴力向量为 $\{M_0^L\}$ 、 $\{M_0^R\}$ 和 $\{N_0^L\}$ 、 $\{N_0^R\}$,则调索后单元内力满足:

$$\begin{aligned} \{M^L\} &= \{M_0^L\} + [P^L] \{x\} \\ \{M^R\} &= \{M_0^R\} + [P^R] \{x\} \\ \{N^L\} &= \{N_0^L\} + [Q^L] \{x\} \\ \{N^R\} &= \{N_0^R\} + [Q^R] \{x\} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:矩阵 $[P^L]$ 、 $[P^R]$ 和 $[Q^L]$ 、 $[Q^R]$ 分别为索力对各单元左、右截面弯矩和轴力的影响矩阵。

将式(4)代入式(3)即可得到最终的目标函数,可表述为如下形式:

$$U = \{x\}^T [H] \{x\} + 2\{F\}^T \{x\} + D \quad (5)$$

式中: $[H]$ 、 $\{F\}$ 和 D 均为与索力调整量 $\{x\}$ 无关的项。

1.2 约束条件

结构应变能最小能综合考虑主梁和桥塔的受力状态,但由于未控制结构的其他状态量,优化结果很可能出现明显不合理的情况。为了使优化结果更为合理,需结合斜拉桥结构特点,对索力、变形及局部内力做相应约束。通常依据斜拉桥合理成桥状态的确定原则对结构各部分设定约束条件。

1.3 优化模型

根据上述原则确定目标函数及约束条件,则斜拉桥索力优化问题即为有约束的二次规划问题:

$$\begin{aligned} \min f(x) &= \{x\}^T [H] \{x\} + 2\{F\}^T \{x\} + D \\ \{T\}_{\min} &\leq \{T\} \leq \{T\}_{\max} \\ \{Y\}_{\min} &\leq \{Y\} \leq \{Y\}_{\max} \\ \{F\}_{\min} &\leq \{F\} \leq \{F\}_{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\{T\}$ 为优化后成桥索力列阵; $\{Y\}$ 为关注截面处节点变形列阵; $\{F\}$ 为关注截面处内力、应力或支反力列阵。

2 索力优化模型的求解

2.1 约束条件处理

针对有约束优化问题的求解,可通过外点罚函数法对约束条件进行处理,通过构造将约束条件与目标函数组合成辅助函数,从而转化为对辅助函数的无约束优化求解。将不等式约束条件统一为 ≥ 0 的表达形式,则优化模型数学表达为:

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ g_i(x) &\geq 0 \quad i=1,2,\dots,m \\ h_j(x) &= 0 \quad j=1,2,\dots,n \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $g_i(x)$ 为第 i 个不等式约束条件的代数表达式; $h_j(x)$ 为第 j 个等式约束条件的代数表达式。

构造如下辅助函数:

$$\begin{aligned} F(x) &= f(x) + \sigma \left\{ \sum_{i=1}^m [\omega_i \max\{0, \right. \\ &\quad \left. - g_i(x)\}]^2 + \sum_{j=1}^n [\omega_j h_j(x)]^2 \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: ω 为各约束条件的权重系数; σ 为罚因子,可取为趋向无穷大的严格递增正数列。

通过上述构造,当满足某个约束条件时,该约束项对目标函数不产生任何影响;当不满足时,则会根据偏离限值的大小对原函数增加一个较大的正数项,在最小化求解过程中会迫使迭代点逐渐进入约束范围内。

2.2 改进粒子群算法

为解决标准粒子群算法后期收敛效率低下、局部搜索能力差的问题,该文提出一种改进算法,由粒子群算法实现全局搜索,基于局部邻域搜索的禁忌搜索算法实现局部搜索功能,从而实现整体算法性能的提升。

改进算法利用粒子群算法前期收敛效率高的特点,先以粒子群算法做初步搜索,待算法收敛效率明显降低时再停止粒子群算法的搜索,将其当前解作为初始解进行局部邻域搜索。为使算法避免陷入局部最优,在局部邻域搜索法中引入禁忌思想,要求算法迭代过程中必须能够接受比当前解更劣的解,同时为避免迭代陷入重复循环,设置禁忌表来禁忌短期内已接受过的解,在迭代过程中只有不在禁忌表中的较好的解才被接受作为下轮迭代的初始解。

由此以禁忌搜索算法对当前解的邻域做进一步搜索,当在邻域范围内搜索到比当前历史最优解更优的解,则邻域搜索半径不变,若邻域中所有邻域解均劣于当前历史最优解,则扩大邻域搜索范围,同时增加邻域解生成数目。当连续扩大邻域半径数次后,仍未找到比当前历史最优解更优的解,即表明该局部区域为最优解区域,结束迭代,此时历史最优解即为算法所求优化结果。

局部搜索时邻域解从当前解的邻域范围内随机生成,当前解的邻域是指以当前解 x 为中心,邻域半径 r 为半径的圆形区域,对于邻域解各维度值均满足:

$$|x'_i - x_i| < r_i \quad (9)$$

式中: x'_i 为邻域解的第 i 个元素值; x_i 为当前解的第 i 个元素值。

关于禁忌对象的选取,文献[12]以目标函数值周围区域作为禁忌对象,可描述为:

$$|f(x) - f(x')| \leq \epsilon \quad (10)$$

式中: $f(x)$ 、 $f(x')$ 分别为当前解、邻域解的目标函数值; ϵ 为禁忌区域半径。

综合上文所述,改进算法有效利用了标准粒子群算法前期搜索效率高的优点,并通过引入禁忌搜索法弥补了其算法后期搜索效率低下、局部搜索能力差的缺点。改进算法流程如图1所示。

2.3 算法性能比较

为评价改进算法的优化性能,选择常用测试函数

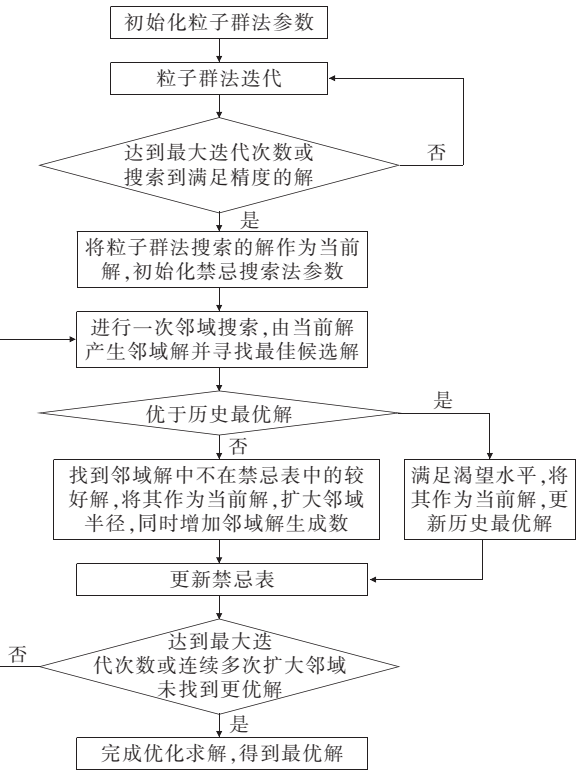


图1 改进算法流程图

Rastrigrin 函数进行测试。其函数表达式为：

$$\min f(x_i)=\sum_{i=1}^n[x_i^2-10\cos(2\pi x_i)+10]$$

$$x_i\in[-5.12,5.12]$$

(11)

式中： n 为优化问题维数。

该函数为多极值函数，存在大量局部极小值点，且已知在 $(x_1,x_2,\cdots,x_n)=(0,0,\cdots,0)$ 处取得全局最小值为0。性能测试选取维数 n 为12，分别采用标准粒子群法(PSO)和改进算法对该算例进行优化求解。为了便于对比，设定两者粒子群算法部分粒子总数及各项参数均相同，同时控制两者算法总的迭代次数相同。迭代结果对比情况如图2所示。

由图2可知：两种算法在运行前期收敛效率均较高，而进入算法后期，标准粒子群算法搜索效率明显降低，而改进算法依然有着良好的收敛效率，且相对于标准粒子群法，其最终收敛的值更接近最优解。综上所述，在多维寻优问题中，改进算法的收敛性能及寻优能力均较标准粒子群法更强。

3 工程算例

3.1 工程概况

该文以某双塔双索面钢桁梁斜拉桥为工程背景，

桥跨布置为(77.5+166.1+468+166.1+77.5) m，其总体布置如图3所示。全桥采用半漂浮体系，主梁为带副桁的桁架结构，标准节间长15.1 m，桁高11.0 m，全桥共63个节间，边跨6个节段因配重需要采用40 cm厚混凝土桥面板，其余桥面均采用正交异性钢桥面。斜拉索采用扇形布置，全桥共30对120根斜拉索，斜拉索采用镀锌镀层高强度低松弛钢丝。

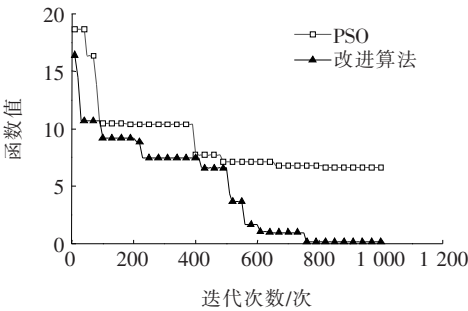


图2 PSO与改进算法的收敛曲线

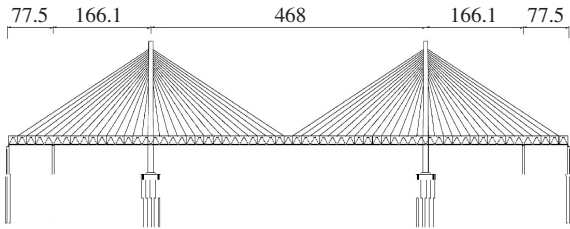


图3 全桥总体布置(单位:m)

3.2 索力优化

结合有限元模型的计算结果，提取索力影响矩阵等相关参数，构建目标函数。根据合理成桥状态的要求，设定如下约束条件：

- (1) 为保证索力的均匀性，约束索力满足内索索力小、外索索力大的基本规律，并限制相邻索力的索力差，防止索力突变。
- (2) 为保证斜拉桥在恒载作用下基本满足“塔直梁平”状态，且考虑结构能抵消一部分活载产生的变形。约束恒载作用下桥塔向岸侧变形，且不超过3 cm，主跨梁段竖向变形在0~8 cm以内，边跨和次边跨竖向变形分别限制在±6和±3 cm以内。

根据改进粒子群法的优化思路，完成编码，实现对上述索力优化模型的求解。

3.3 优化结果分析

以设计方案作为对比，综合索力、内力及变形状态，对优化结果进行分析评价。优化后索力分布如图4所示。

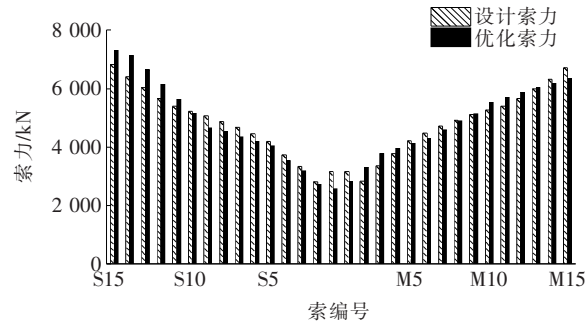


图 4 索力分布图

优化后成桥索力分布内索索力小,外索索力大,且索力变化均匀,无明显突变,严格满足预设要求。与设计索力相比,优化索力有一定幅度的变化,最大索力差达 747.3 kN,发生在岸侧 S14 号索。

对于桁架结构,其抗弯主要依靠上下弦杆轴力,且考虑到各桁架截面桁高一致,定义钢桁梁下弦杆与上弦杆的轴力差作为判别钢桁梁内力状态的指标。优化前后钢桁梁上下弦杆轴力差分布如图 5 所示,图中以主跨跨中为里程坐标原点。

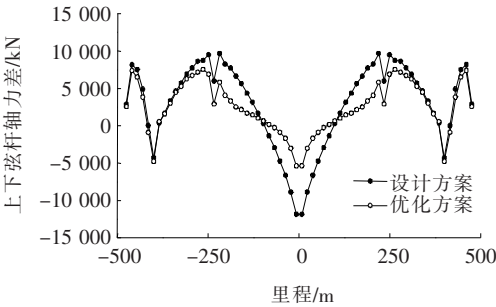


图 5 上下弦杆轴力差分布

由图 5 可知:索力优化后钢桁梁上下弦杆轴力差分布更为均匀,且有效降低了钢桁梁上下弦杆轴力差的极值,改善了钢桁梁的受力状态。

优化后主梁变形如图 6 所示。

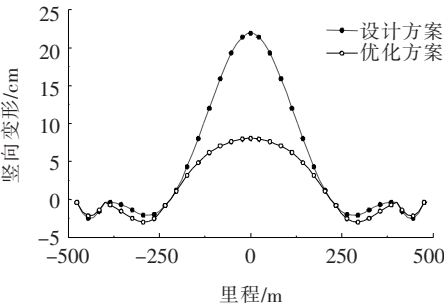


图 6 主梁竖向变形图

由图 6 可知:设计方案主梁最大竖向变形为跨中向上挠曲 22 cm,索力优化后主梁最大挠曲为 8 cm,主

梁线形更为平顺,且严格满足预设要求。

优化后其余各主要结构状态量汇总于表 1,表 1 中塔顶向江侧位移为正。

表 1 优化后成桥主要结构状态量

方案	塔顶位移/cm	塔底弯矩/(kN·m)	桁架最大应力/MPa	
			拉应力	压应力
设计	9.9	2.19×10^5	98.0	126
优化	-3.0	3.63×10^4	90.4	126

优化后桥塔向岸侧偏位,且塔顶最大为 3 cm,保证了桥塔留有承受活载作用的预偏量,并严格满足预设的约束条件。相比于设计方案,采用该文所述方法优化后桥塔最大弯矩明显降低,有效改善了桥塔的受力状态。综合上文对索、梁、塔受力变形状态的分析,优化后全桥结构状态更为合理,表明该文所述索力优化方法优化效果良好,性能优越。

4 结论

为了有效求解斜拉桥成桥索力优化问题,该文结合禁忌搜索法对粒子群法进行改进,提出了一种改进粒子群算法,并结合工程实例进行优化分析。得到如下结论:

- (1) 与标准粒子群法相比,提出的改进算法具有更好的后期收敛性能,且寻优能力更强,有效弥补了粒子群法后期迭代效率低下、易陷入局部最优的不足。
- (2) 以斜拉桥塔、梁拉压及弯曲应变能为目标函数,并综合考虑多种因素对塔、梁、索的受力变形状态施加约束条件,优化算例表明:采用该法优化后斜拉桥结构受力变形状态更优,优化效果显著。
- (3) 改进粒子群算法对目标函数的表达式无特别要求,其通用性较好,与有限元程序结合后,可有效实现斜拉桥的成桥索力优化,方法简便且富有成效。

参考文献:

[1] 颜东煌,文钰,刘光栋,等.斜拉桥的施工最优控制[J].国外公路,1999(3).
[2] 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(5).
[3] 刘华莹,林玉娥,王淑云.粒子群算法的改进及其在求解约束优化问题中的应用[J].吉林大学学报(理学版),2005(4).
[4] 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).