

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.03.020

引用格式:李卓越,刘建,董创文.基于改进遗传算法的独塔钢桁梁斜拉桥索力优化[J].公路与汽运,2024,40(3):95-99.

Citation:LI Zhuoyue, LIU Jian, DONG Chuangwen. Cable force optimization of single-tower steel girder cable-stayed bridge based on improved genetic algorithm[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(3): 95-99.

基于改进遗传算法的独塔钢桁梁斜拉桥索力优化^{*}

李卓越, 刘建, 董创文

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 钢桁梁斜拉桥刚度大、稳定性高、可设置的车道数多,应用越来越广泛。为了达到合理的成桥状态,设计中必须确定合理成桥索力。文中采用改进遗传算法进行恒载成桥索力优化。以某独塔对称双层钢桁梁斜拉桥为背景建立 ANSYS 一次成桥有限元模型,提取相关影响矩阵数据;选择主梁弯曲及拉压应变能作为目标函数,将拉索应力、主梁应力、主梁位移等以惩罚函数的形式作为约束条件构建索力优化模型;采用改进遗传算法,编写 MATLAB 程序进行斜拉桥成桥恒载索力优化。结果表明,相比于传统遗传算法,改进遗传算法的收敛能力提高,所得结果满足实际工程的计算要求;相较于传统索力确定方法,改进遗传算法索力优化程序减少了后期调索工作量,优化后成桥索力分布均匀,整体受力更合理。

关键词: 桥梁;独塔钢桁梁斜拉桥;索力优化;应变能;改进遗传算法

中图分类号:U441.5

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)03-0095-05

合理成桥索力确定是斜拉桥设计施工的重要内容。确定斜拉桥合理成桥索力的方法有多种,如零位移法、刚性支承连续梁法、最小弯曲能量法、影响矩阵法等,这些方法均有一定的适用范围和局限性^[1]。智能优化算法具有运算能力强、全局收敛性较好的优点,被应用于斜拉桥成桥索力优化中。刘益铭等采用 MATLAB 工具箱的遗传算法功能进行密索斜拉桥恒载索力优化,该方法调用 ANSYS 进行批处理运算,突破了 ANSYS 中设计变量最大个数的限制,优化效果比 ANSYS 一阶算法更好^[2]。吴霄等采用分步算法,以斜拉桥最小弯曲应变能为目标函数,运用改进遗传算法确定了混合梁斜拉桥成桥索力^[3]。陈志军等将节点位移作为优化函数,运用粒子群优化算法进行了独塔混合梁斜拉桥成桥索力优化^[4]。李晓林等在粒子群算法的基础上引入自适应变异算子和非线性自适应惯性权重因子对斜拉桥索力进行了优化^[5]。马广将模拟退火思想融入遗传算法最优个体选择中,对不同构件设置相应优化权重,实现了四线钢桁梁斜拉桥的索力优化^[6]。坎彬将局部邻域搜索的禁忌搜索算法与标准粒子群算法结合,对双塔双索面钢桁梁斜拉桥的索力进行

了优化^[7]。本文根据独塔钢桁梁斜拉桥的受力特点,以某独塔对称双层钢桁梁斜拉桥为背景建立索力优化模型,运用改进遗传算法对钢桁梁斜拉桥的成桥索力进行优化。

1 索力优化模型

1.1 设计变量

成桥索力优化是通过调整索力大小,使斜拉桥的内力和线形最优。选取斜拉桥索力作为设计变量,向量表达式如下:

$$\mathbf{T} = (T_1, T_2, \dots, T_n)^T \quad (1)$$

式中: T_n 为第 n 对斜拉索的索力。

1.2 目标函数

现代斜拉桥多为密索体系,成桥索力多采用结构弯曲能量作为目标函数。对于钢桁梁,结构的轴力不可忽略,选取结构的弯曲和拉压应变能之和作为目标函数更能体现结构整体受力状态。函数表达式如下:

$$U = \int \left(\frac{M^2}{2EI} + \frac{N^2}{2EA} \right) ds \quad (2)$$

式中: U 表示结构构件的弯曲和拉压应变能; M 、 N

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778069)

分别为结构构件的弯矩、轴力; E 、 I 、 A 分别为结构构件的弹性模量、截面抗弯惯性矩、截面面积。

将结构离散为杆系单元,可写成:

$$U = \sum_{i=1}^n \left[\frac{L_i (M_{Li}^2 + M_{Ri}^2)}{4E_i I_i} + \frac{L_i (N_{Li}^2 + N_{Ri}^2)}{4E_i A_i} \right] \quad (3)$$

式中: n 为离散单元个数; L_i 、 E_i 、 I_i 、 A_i 分别为单元 i 的长度、材料弹性模量、截面抗弯惯性矩、截面面积; M_{Li} 、 M_{Ri} 和 N_{Li} 、 N_{Ri} 分别为单元 i 左右两端的弯矩和轴力。

1.3 约束条件

实际工程中仅以最小应变能作为目标函数还不够,需要综合考虑索力大小、索力均匀性、关心节点位移、应力等因素。可以根据优化目标,加入恰当的约束条件,使优化结果更加合理,满足结构的实际工程状态。为满足斜拉索张拉的安全性,斜拉索应力应约束在容许范围内,同时要求索力总体分布均匀、相邻索力没有相差过大的情况。可根据式(4)定义索力均匀系数 F_i 来判断索力总体分布情况。相邻索力相差越小,索力均匀系数越小,索力更均匀。同时为保证结构线形和内力合理,对主梁位移和应力进行约束。公式如下:

$$F_i = \left| \frac{T_{i-1} + T_{i+1}}{2} - T_i \right| \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} T_{\sigma \min} \leq T_{\sigma i} \leq T_{\sigma \max} \\ F_{\min} \leq F_i \leq F_{\max} \\ D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max} \\ \sigma_{\min} \leq \sigma_i \leq \sigma_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $T_{\sigma \max}$ 、 $T_{\sigma \min}$ 分别为拉索应力的上下限值; F_{\max} 、 F_{\min} 分别为索力均匀系数的上下限值; D_{\max} 、 D_{\min} 分别为关心节点位移的上下限值; σ_{\max} 、 σ_{\min} 分别为关心截面应力的上下限值。

1.4 优化模型

根据上述目标函数和约束条件构建索力优化数学模型:

$$\begin{cases} \min f(T) \\ \text{s.t. } g_i(T) \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, h) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $f(T)$ 为目标函数; $g_i(T)$ 为第 i 个约束函数; h 为约束函数个数。

将上述约束运用惩罚函数进行处理,将有约束目标优化问题转化为无约束目标优化问题,公式如下:

$$F(T) = f(T) + \alpha \left[\sum_{i=1}^n \max\{0, g_i(T)\}^2 \right] \quad (7)$$

式中: $F(T)$ 为结合惩罚函数的无约束优化目标函数; α 为惩罚因子。

对于满足条件的个体,约束项为零;对不满足条件的个体,加上一个较大值进行惩罚,从而使优化个体逐渐收拢于约束范围内。

2 基于改进遗传算法的索力优化

2.1 改进遗传算法

传统遗传算法存在收敛速度慢、局部搜索能力差、容易陷入“早熟”陷阱等问题^[8],实际运用中往往不能满足计算要求。为此,对遗传算法进行改进,使其满足实际工程需要^[9]。

2.1.1 编码策略

传统遗传算法采用二进制编码,有一个编码、解码的过程。实数编码则没有这个过程,它以实数进行遗传操作,可节省优化的运算时间。同时二进制编码存在“海明悬崖”效应,而实数编码可以避免这一问题,在算法优化中精度更高。本文采用实数编码,以斜拉索索力为染色体进行操作。

2.1.2 混沌优化初始化种群

传统遗传算法一般是随机产生初始种群。本文利用 Logistic 混沌映射生成初始种群,具有良好的遍历性,能提高初始种群的质量,减小算法陷入局部解的可能性^[10]。迭代公式如下:

$$\beta_{t+1} = \mu \beta_t (1 - \beta_t) \quad (8)$$

式中: β_t 为迭代 t 次的混沌变量; μ 为控制参数。

当 $0 < \beta_t < 1$, $\mu = 4$ 时, Logistic 公式将处于完全混沌状态。

2.1.3 交叉和变异操作

传统遗传算法采用固定的交叉和变异概率,收敛效率不高。本文采用自适应的交叉和变异概率,能随适应度情况动态变化,从而提高算法的收敛能力。自适应概率如下:

$$P_c = \begin{cases} P_{c \max} - \frac{(P_{c \max} - P_{c \min})(f_1 - f_{ave})}{f_{\max} - f_{ave}}, & f_1 \geq f_{ave} \\ P_{c \max}, & f_1 < f_{ave} \end{cases} \quad (9)$$

$$P_v = \begin{cases} P_{v \max} - \frac{(P_{v \max} - P_{v \min})(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{ave}}, & f \geq f_{ave} \\ P_{v \max}, & f < f_{ave} \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_{cmax} 、 P_{cmin} 和 P_{vmax} 、 P_{vmin} 分别为自适应交叉、变异数值的上下限值; f_1 为两交叉个体适应度较大值; f 为当前个体的适应度; f_{max} 、 f_{ave} 分别为种群中最大适应度和平均适应度。

2.1.4 父代参与竞争选择

传统遗传算法一般是将遗传操作筛选后的子代作为新一代种群,上一代中适应度高的个体可能会被淘汰,不利于筛选出优质个解。改进遗传算法允许父代参与后代的竞争,将父代和产生的后代根据适应度从高到低进行排序,筛选出最优个体,组成新一代继续操作。

2.2 优化流程

索力优化程序采用 MATLAB 软件编写。先将 ANSYS 一次成桥恒载模型计算所得相关数据的影响矩阵导入 MATLAB 程序中,由改进遗传算法多次筛选淘汰,选出最优个体和解;然后将最优索力重新代入 ANSYS 模型进行计算,验证计算结果的可靠性,并提取所需成桥索力、应力等数据。改进遗传算法程序是整个优化过程的核心。算法流程(见图 1)如下:

(1) 设置种群规模、最大迭代次数、交叉率、变异率等初始参数,采用 Logistic 混沌映射生成初始种群。

(2) 计算初代种群中个体的适应度,对个体进行交叉、变异等遗传操作,通过父代参与竞争筛选出优质的子代。

(3) 重复操作,直至满足终止条件,记录每一代的最优个体及相应适应度,筛选出最终的最优个体和解。

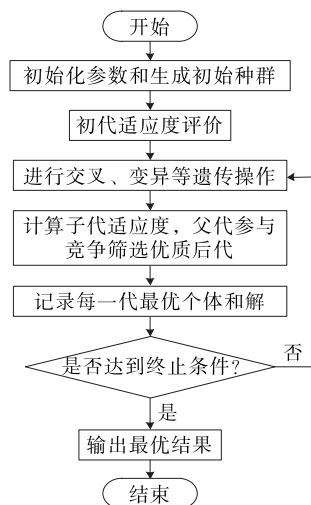


图 1 改进遗传算法的流程

3 工程算例

3.1 工程概况

以某独塔对称双索面钢桁梁斜拉桥为工程背景,采用改进遗传算法进行索力优化。该桥采用半漂浮体系,整体跨径布置为 $2 \times 206 \text{ m} = 412 \text{ m}$ 。主梁采用三角桁架双层钢桁梁。全桥共有 60 根斜拉索,呈扇形布置(见图 2)。斜拉索采用标准强度为 1 860 MPa 的平行钢丝,有 LPES7-163、LPES7-199、LPES7-211、LPES7-233 4 种规格。

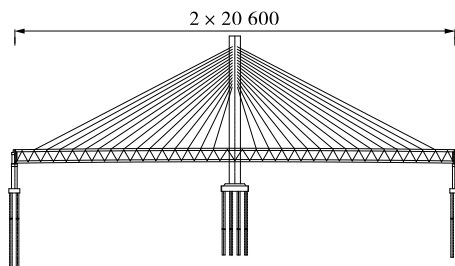


图 2 某独塔钢桁梁斜拉桥(单位:cm)

该桥纵向、横向皆对称,不考虑塔的应变能。成桥索力优化以主梁为主要研究对象,采用 1/4 主梁进行分析,ANSYS 模型见图 3。主梁、主塔采用 Beam 188 单元模拟,斜拉桥采用 Link 10 单元模拟,斜拉索和主梁通过刚臂连接。

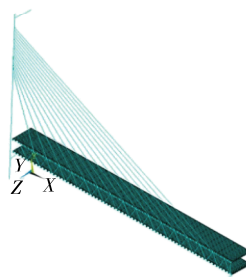


图 3 1/4 斜拉桥主梁计算模型

3.2 索力优化分析

通过改进遗传算法程序进行索力优化计算。改进遗传算法参数如下:初始种群数为 500 个,遗传迭代次数为 300 次,交叉率为 0.6~0.9,变异率为 0.05~0.10。约束条件如下:拉索应力为 $0.25f_{pk} \sim 0.35f_{pk}$ (f_{pk} 为拉索抗拉标准强度);主梁最大位移在 0.03 m 以内。

为验证改进遗传算法的优化性能,采用传统遗传算法和改进遗传算法进行索力优化收敛对比。传统遗传算法交叉率和变异率取改进遗传算法的平均值,其他参数和改进算法相同。两算法的收敛曲线

见图 4。由图 4 可知:传统遗传算法跳出局部的能力较弱,导致结果收敛于局部最优解,在迭代次数为 76 次左右时优化便停滞不前;改进遗传算法的收敛能力更强,在迭代过程中最优解不断突破,在迭代次数为 210 次左右时结果趋于稳定,接近于全局最优解。改进遗传算法能很好地筛选出优质结果,满足索力优化计算要求。

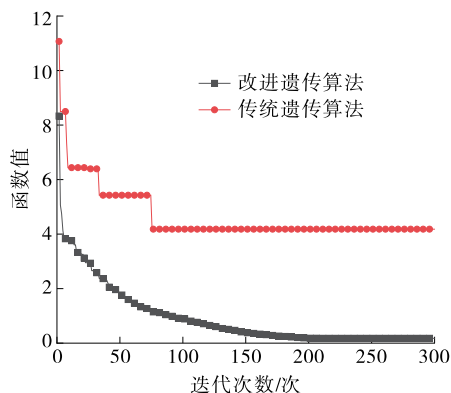


图 4 改进遗传算法和传统遗传算法的收敛情况对比

为验证改进遗传算法索力优化方法的可靠性及优越性,分别采用刚性支承连续梁法和最小弯曲能量法确定恒载成桥索力,并将其计算结果与改进遗传算法优化结果进行对比^[11]。不同优化方法确定的索力见图 5。从图 5 可以看出:改进遗传算法所得索力整体分布均匀,没有突变的情况,最大索力为 5 593.2 kN,最小索力为 4 461.7 kN。由于近塔端和过渡墩附近梁段无索区节段较长,质量较大,这部分恒载作用对索力的影响较大,为满足刚性支承条件,刚性支承连续梁法优化后的 L1 和 L15 斜拉索索力明显偏大,最大索力达 9 068.2 kN;由于没有添加相应约束,采用最小弯曲能量法确定的索力中出现负索力 -20 393.8 kN。这两种方法确定的索力均出现超限的情况,同时近塔端和靠近过渡墩处相邻索力均匀性较差。

不同方法优化索力下主梁应力分布见图 6、图 7,上下弦杆应力最值见表 1。

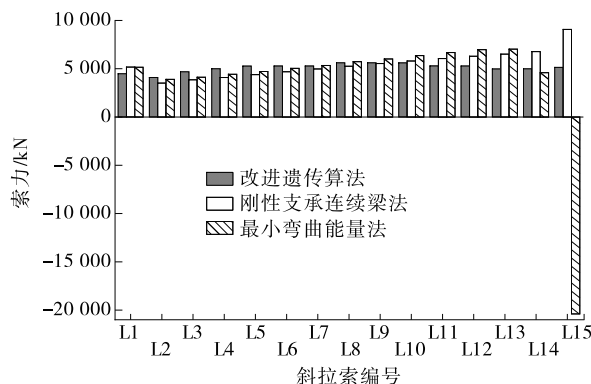


图 5 不同优化方法确定的索力

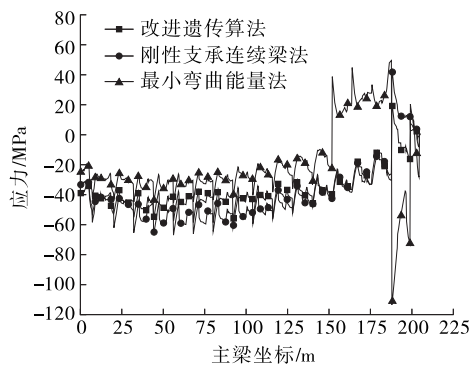


图 6 不同方法优化索力下上弦杆应力分布

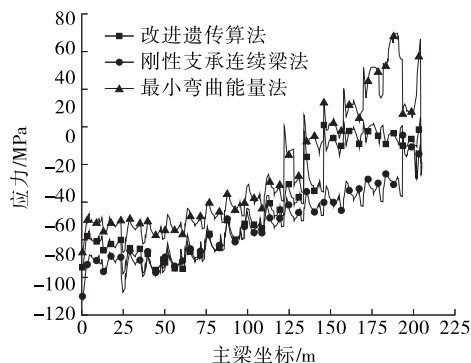


图 7 不同方法优化索力下下弦杆应力分布

表 1 不同方法优化索力及上下弦杆应力比较

索力优化方法	最大索力/kN	最小索力/kN	上弦杆最大应力/MPa		下弦杆最大应力/MPa	
			拉应力	压应力	拉应力	压应力
改进遗传算法	5 593.2	4 461.7	20.6	58.6	24.9	58.0
刚性支承连续梁法	9 068.2	3 511.5	43.9	67.0	15.5	71.5
最小弯曲能量法	7 026.7	-20 393.8	49.4	113.5	69.8	47.0

由图 6、图 7、表 1 可知:改进遗传算法优化索力下上下弦杆最大拉应力分别为 20.6 MPa、24.9 MPa,最大压应力分别为 58.6 MPa、58.0 MPa,

与刚性支承连续梁法相比,上弦杆最大拉应力下降 53.1%、最大压应力下降 12.5%,下弦杆最大拉应力有所增大、最大压应力下降 18.9%;与最小弯曲能量

法相比,上弦杆最大拉应力下降 58.3%、最大压应力下降 48.4%,下弦杆最大拉应力下降 64.3%、最大压应力有所增大。采用最小弯曲能量法确定索力会出现索力突变的情况,局部应力变化很大。虽然刚性支承连续梁法应力分布较均匀,但整体应力水平偏大。采用改进遗传算法优化索力,上下弦杆应力较合理,大致处于上述两种方法的中间,应力变化较平缓。

4 结论

(1) 相比于传统遗传算法,改进遗传算法的寻优能力更强,能有效跳出局部解,搜索到满足约束条件的最优成桥索力。

(2) 由于刚性支承连续梁法和最小弯曲能量法仅考虑某方面或缺少约束条件,计算结果不符合实际状态,仅可作为成桥索力的初始状态,仍需要进行调整。改进遗传算法综合考虑了实际工程中多种约束条件,灵活性高,确定的索力具有良好的可靠性。同时能通过优化算法程序直接获取最优索力,运算速度快,精度高,操作方便,减少了调索工作量。

(3) 采用改进遗传算法确定的索力较均匀,主梁应力较合理,成桥状态合理,符合工程实际要求。

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] 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),2013,32(6):1111-1114+1194.
- [3] 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),2014,35(6):722-726.
- [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] 李晓林,邓洁.基于改进粒子群算法的斜拉桥索力优化方法[J].公路与汽运,2021(5):106-110.
- [6] 马广.基于混合遗传算法的四线钢桁斜拉桥索力优化研究[J].铁道标准设计,2020,64(增刊 1):85-89.
- [7] 坎彬.基于改进粒子群算法的斜拉桥成桥索力优化[J].中外公路,2021,41(1):133-137.
- [8] 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),1998,26(3):235-240.
- [9] 边霞,米良.遗传算法理论及其应用研究进展[J].计算机应用研究,2010,27(7):2425-2429+2434.
- [10] 王森,程春田,武新宇,等.自适应混沌整体退火遗传算法在水电站群优化调度中的应用[J].水力发电学报,2014,33(5):63-71.
- [11] 李冠.铁路钢桁梁斜拉桥索力优化研究[D].成都:西南交通大学,2011.

收稿日期:2022-11-24

(上接第 94 页)

5 结论

复杂互通立交设计中应对桥梁总体方案及桥梁具体设计进行多方面考虑和优化,结论如下:

(1) 选择互通立交桥梁方案时,在保证方案合理的前提下,综合考虑平曲线指标和变宽幅度,尽可能选择与主线跨径一致的预制装配式构件,以方便施工、降低造价、缩短工期。

(2) 互通立交中非标准路基宽度的预制装配式桥梁设计难度大,可根据等宽预制装配式小箱梁通用图编制参数化预制装配式小箱梁图纸和参数化预制装配式小箱梁表格,以提高预制装配式小箱梁设计速度。芦荻山互通的应用情况表明,采用该方法至少可节省 60% 的设计时间,同时减少设计错误,具有极大的工程应用价值。可以将 30 m 预制装配式小箱梁参数化设计经验推广至其他跨径的预制装

配式小箱梁及预制装配式 T 梁,以全面实现预制装配式桥梁的参数化设计。

(3) 对于互通立交中非标准跨径的预制装配式桥梁,应从合理受力和便于施工的角度确定边跨比和结构形式。

参考文献:

- [1] 李长洙,李丽丽.从莞高速互通区变宽曲线桥梁设计[J].公路交通科技(应用技术版),2011,7(6):151-153.
- [2] 曾锋,周东东,孙一方.高速公路混凝土预制梁智能制造技术研究[J].公路与汽运,2023(2):122-126.
- [3] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司.装配式预应力连续小箱梁上部构造通用图[Z].长沙:湖南省交通规划勘察设计院有限公司,2019.

收稿日期:2023-03-02