

基于多目标优化的多塔特大斜拉桥索力优化研究

孙鹏¹, 肖军^{2,3}, 李松²

(1. 中交二公局第一工程有限公司, 湖北 武汉 430014; 2. 中交第二公路工程局有限公司;
3. 中交公路长大桥建设国家工程研究中心有限公司)

摘要:为探究在多参数作用下多塔斜拉桥索力优化方法,基于多目标优化理论,构建了以主梁弯曲应变能和主塔纵向水平位移为目标函数,使用界限构造法建立了迭代过程中适应度函数,联合改进遗传算法和RBF神经网络对索力进行了优化求解,并将计算结果与单目标优化的主梁弯曲应变能和主塔纵向水平位移进行了对比。结果表明:改进遗传算法具有良好的泛化能力和全局寻优能力,主梁弯曲应变能和主塔纵向位移均有一定程度下降,与单目标优化相比,虽然弯曲应变能相比提高,但是主塔纵向位移得到了有效控制。改进遗传算法联合RBF神经网络的索力优化方法确保了结构处于全局最优状态。

关键词:多塔斜拉桥; 多目标优化; 改进遗传算法; RBF神经网络; 弯曲应变能; 主塔纵向水平位移

斜拉桥是一种桥面系受压,主要支撑体系受拉的压弯结构体系,受力特点突出,随着材料和施工工艺的进步,斜拉桥跨径也有了大幅提高。斜拉桥受力性能不仅与结构形式密切相关,塔梁连接方式、桥塔刚度、斜拉索刚度及分布均对其力学性能有显著影响。与其他结构形式的桥梁相比,斜拉桥可通过调整斜拉索索力来调控主梁内力。

目前,已有很多学者在斜拉桥调索方面开展了研究,并取得了多项研究成果。李炎等基于无应力状态法,以设计状态为目标,采用无应力索长作为控制变量对全桥施工过程索力进行迭代求解,得到了满足设计要求的索力值;戴杰等总结了斜拉桥成桥索力优化方法,对不同优化方法的优缺点进行了对比研究;范仁安等以斜拉桥一定初拉力为初始参量,将各索力增量作为主调参数,建立目标函数和约束条件求解了关心截

面内力和位移增量效应矩阵,并将该项研究成果成功应用于某主跨518 m的跨长江斜拉桥索力调整中;张玉平等基于MOPSO算法,通过增加外部储备集和优化更新策略,以某独塔斜拉桥为工程背景,提出了一种多目标多约束的索力调整算法。综合目前研究成果,斜拉索索力优化方法不同,所得出的优化结果也不尽相同,同时目前大部分索力优化方法均应用于独塔或双塔斜拉桥中。对于三塔以上的多塔斜拉桥,其受力特征与独塔或双塔斜拉桥有一定差异,并且多塔斜拉桥斜拉索数量多,优化过程冗长,基于正装法的索力优化方法费时费力,计算效率低下,因此有必要开展多塔斜拉桥索力优化方法研究。该文以克罗地亚佩列沙茨大桥为工程背景,基于多目标优化理论,对该六塔斜拉桥索力进行优化,相关研究成果可为多塔斜拉桥索力调整提供参考。

[7] 刘鉴霆. 基于灰色系统与时间序列理论의连续梁桥健康监测数据预测研究[D]. 沈阳建筑大学硕士学位论文, 2019.

[8] Ding F, Chen T. Identification of Hammerstein Nonlinear ARMAX Systems[J]. Automatica, 2005, 41(9): 1 479-1 489.

[9] Gul, M.. Investigation of Damage Detection Methodolo-

gies for Structural Health Monitoring, in Civil, Construction and Environmental Engineering [D]. University of Central Florida: Orlando, 2009.

[10] Zaurin, R. Structural Health Monitoring with Emphasis on Computer Vision, Damage Indices and Statistical Analysis[D]. Ph. D., University of Central Florida, Orlando, FL, 2009.

收稿日期: 2020-12-06(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(编号: 51708465); 中国交建特大科技研发项目(编号: 2019-ZJKJ-07)

作者简介: 孙鹏, 男, 大学本科, 高级工程师。

1 工程概况

佩列沙茨大桥位于克罗地亚南端、亚得里亚海西侧 Malostonski(马里斯顿)海湾保护区,所在地区与波斯尼亚黑塞哥维那(波黑)接壤,桥梁两侧分别为 Pelješac 半岛和大陆。桥梁全长 2 440 m,接线道路总长 1 500 m,结构形式为六塔中央单索面钢混组合梁矮塔斜拉桥,共 14 个墩台,桥跨组成为(84+108+108+189.5+5×285+189.5+108+108+84) m,其中两岸陆上布置有 4 个墩台,其余 10 个墩塔均在水中。主梁以上索塔高 40 m,为钢筋混凝土结构,该桥除每个主塔索塔区 7.76 m 主梁为预应力钢筋混凝土梁外,其余均为钢箱梁,钢箱梁总长度约为 2 361.84 m。每个索塔 10 对斜拉索,斜拉索在梁上的间距为 12 m,有索标准梁段长 12 m,斜拉索最小长度 33 m,最大长度 137 m,单根由最少 55 根、最多 109 根钢绞线组成 6 个塔共 120 个有索梁段,有索梁段总长约为 1 432.8 m,无索梁段总长约为 929.04 m,钢绞线张拉强度为 1 860 MPa。桥型效果图见图 1。



图 1 佩列沙茨大桥全桥效果图

钢箱梁为正交异性板结构,单箱三室构造,钢箱梁顶面宽 22.5 m,梁底部水平,宽度为 8.1 m,梁高为 4.5 m,主跨钢箱梁纵向内腹板间距为 3.5 m,引桥跨钢箱梁纵向内腹板间距为 8 m。标准节段钢箱梁截面示意图见图 2。

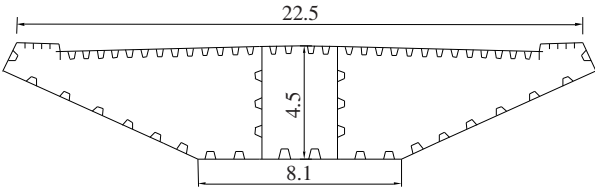


图 2 标准节段钢箱梁横截面构造示意图(单位:m)

2 多目标优化理论的索力优化方法

多塔大跨斜拉桥斜拉索数量多,施工阶段多,索力

影响矩阵庞大,若基于正装法对每个施工阶段索力进行逐次修正,迭代过程将极其复杂且容易出错。因此需采用数学优化方法对索力进行调整,目前,一般优化算法均以主梁、主塔弯曲应变能最小作为目标函数,该法可较快求解得到一组与设计状态下较为接近的成桥索力结果,但是由于目标函数与约束条件单一,对结构其他指标可能造成不利影响。索力调整后不仅主梁和主塔的应力需达到目标要求,同时主梁线形也应满足要求,故该文以主梁、主塔弯曲应变能和桥塔水平纵向位移两项指标作为目标函数,建立基于多种群遗传算法的优化模型。

斜拉桥成桥后,理论上总有一组索力使得结构在荷载作用下达达到最优的受力状态,基于最小弯曲应变能和塔顶最小纵向位移两项控制指标即可对主梁和主塔的受力状态进行约束,以达到优化目标。建立的目标函数如下:

$$M_1(X) = \min \sum_{i=1}^n (U_1, U_2, U_3, \dots, U_n) \tag{1}$$

$$M_2(X) = \min \sum_{i=1}^m u_i \tag{2}$$

式中: $M_1(X)$ 、 $M_2(X)$ 分别为目标函数 1、2, U_n 为第 n 个单元的弯曲应变能,可表示为 $U = \int_s \frac{M^2(s)}{EI} ds + \int_s \frac{Q^2(s)}{EI} ds$; u_i 为主塔第 i 个单元的纵向水平位移。

在索力调整过程中,应使得扣索索力满足安全要求,根据相关规范,其安全系数取 2.5,同时在整个施工过程中,钢箱梁的最大竖向变形应满足线形要求,混凝土部分应力应满足应力要求,故约束条件为:

$$\sigma_n \leq 744 \text{ MPa}, u_i \leq u_{con}, \sigma_m \leq \sigma_{con} \tag{3}$$

式中: σ_n 为第 n 号斜拉索的最大拉应力; u_i 为第 i 个钢(混)节段的最大竖向变形, u_{con} 为各节段变形控制限值,根据设计图纸中节段长度及规范选取; σ_m 为混凝土节段最大应力, σ_{con} 为混凝土应力限值,根据材料标号和规范选取。

在遗传算法优化过程中,适应度函数的构造是重要环节,适应度函数主要用于种群中个体优劣的评价,直接决定了算法的搜索速度和收敛能力。对于类似该文中的最大最小极值问题,一般采用界限构造法建立适应度函数,相比于传统的以目标函数为适应度函数的方法,界限构造法通过事先设定上限,能有效克服非负、差异性大等缺陷。针对该文目标函数极小问题,构造以下适应度函数:

$$fit_1(x) = \frac{1}{1+c-M_1(x)}, fit_2(x) = \frac{1}{1+c-M_2(x)} \quad (4)$$

式中: c 为目标函数保守估计值, 可根据有限元计算结果初步确定。

传统遗传算法存在局部最优、寻优能力不足等问题, 该文使用改进的遗传算法对最优索力进行寻优。考虑到该桥斜拉索数量多, 种群变量大, 因此在生成初始种群时, 将所有变量均转到 $[0, 1]$ 范围内以提高寻优速度, 采用二进制编码生成变量, 其编码长度可按式 (5) 确定。选取合适的精度并计算适应度函数获取最优解后, 采用式 (6) 对字符串进行解码。

$$l = \lceil \log_2 \left(\frac{ubound - lbound}{h_{\min}} + 1 \right) + 1 \rceil \quad (5)$$

式中: l 为编码长度; $\lceil \cdot \rceil$ 为取整函数; $ubound$ 、 $lbound$ 分别为设计变量上、下限; h_{\min} 为最小搜索精度。

为增强其编码的可读性, 设置随机变量上下限 $[a, b]$, 其中 a 为设计索力下限值, b 为设计索力上限值。根据改进遗传算法, 将二进制编码表示为如下形式:

$$x = a + \gamma(b - a) \quad (6)$$

式中: γ 为在 $[0, 1]$ 上满足均匀分布的随机样本。

使用有限元软件建立该六塔斜拉桥仿真分析模型, 主梁、主塔使用梁单元建模, 斜拉索使用桁架单元并考虑仅受拉, 根据垂度公式修正扣索弹性模量, 扣索与主梁之间建立刚性横梁形成联系, 每个主塔对称设置抗风缆绳, 风缆使用桁架单元建模并考虑仅受拉, 按照设计文件建立施工阶段模拟其施工过程, 有限元模型见图 3。

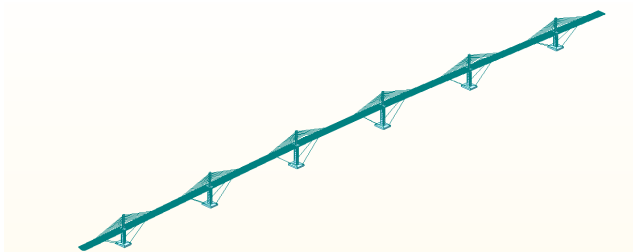


图 3 全桥有限元模型

使用改进的遗传算法对该斜拉桥成桥索力进行修正, 目标函数、设计变量及适应度函数按上文所述选取。对于六塔斜拉桥, 设计样本数据庞大, 极易陷入局部最优。为解决此问题, 该文引入 RBF 神经网络法, 相比于传统神经网络法, 其泛化能力强, 迭代逼近精度更高, 无局部最优问题。利用改进的遗传算法和 RBF

神经网络相结合, 为改善对最优个体保留不利的问题, 引入精英策略保留策略。使用 DPS 对参数进行均匀设计, 将对应的目标函数值结果作为输入, 使用 RBF 神经网络对数据样本进行训练, 再使用遗传算法对训练结果进行优化, 算法主要参数见表 1。

表 1 改进遗传算法各参数取值

项目	说明
编码方式	二进制
初始种群数	100
选择方式	轮盘赌
交叉方式	多点交叉(四点)
自适应交叉概率	0.9/0.6/0.25
自适应变异概率	0.1/0.01/0.05
迭代代数	100

3 优化结果

由于遗传算法在进行全局寻优时需保证各参数的连续性, 因此有限元结果无法直接调用, 使用神经网络对有限元数据样本进行拟合。通过适应度函数检验目标结果, 使得其不断逼近最优解。图 4 为迭代过程中目标函数平均适应度与最佳适应度的关系曲线, 由图 4 可知: 平均适应度在 75~100 次迭代时已经逼近最佳适应度, 说明算法选取参数较为精准, 对迭代代数的控制基本合理。

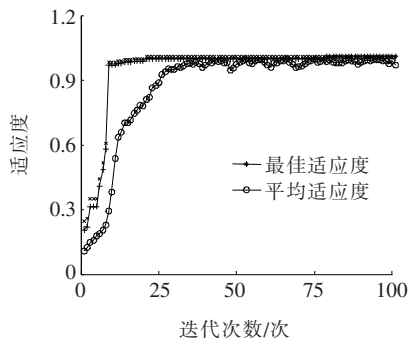


图 4 迭代过程

3.1 索力优化结果

表 2 为优化前后索力对比结果, 为节约篇幅, 表中仅给出 S5 桥塔两侧斜拉索索力值, 斜拉索编号分别为 $101^\# \sim 110^\#$ 及 $151^\# \sim 160^\#$, 见图 5。优化计算结果表明: 在改进的遗传算法和 RBF 径向基神经网络相结合算法优化下, 斜拉索短索 ($101^\# \sim 104^\#$ 、 $151^\# \sim 154^\#$) 索力有一定程度增大, 增幅为 4%~10%, 中长

表 2 索力优化对比结果

扣索编号	成桥索力值/kN		变化幅度/ %
	优化前	优化后	
101 [#]	3 596	3 843	6. 87
102 [#]	4 229	4 439	4. 97
103 [#]	4 559	4 866	6. 73
104 [#]	5 091	5 314	4. 38
105 [#]	6 507	6 313	−2. 98
106 [#]	7 091	6 889	−2. 85
107 [#]	7 666	7 421	−3. 20
108 [#]	9 479	9 173	−3. 23
109 [#]	9 846	9 586	−2. 64
110 [#]	10 209	10 058	−1. 48
151 [#]	3 939	4 326	9. 82
152 [#]	4 394	4 714	7. 28
153 [#]	4 663	4 968	6. 54
154 [#]	5 076	5 327	4. 94
155 [#]	6 414	6 186	−3. 55
156 [#]	6 913	6 755	−2. 29
157 [#]	7 413	7 311	−1. 38
158 [#]	9 123	8 742	−4. 18
159 [#]	9 431	9 136	−3. 13
160 [#]	9 759	9 649	−1. 13

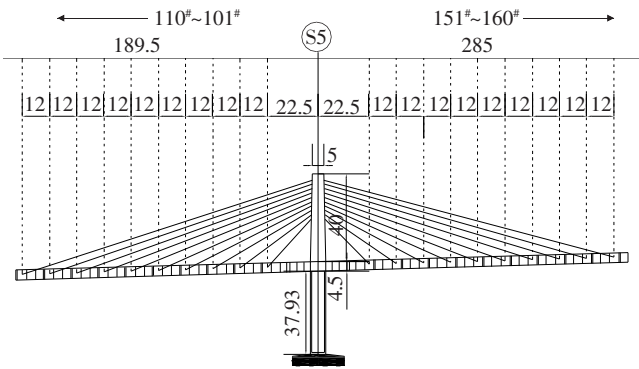


图 5 S5 桥墩斜拉索布置示意图(单位:m)

索索力则有一定程度减小,但减小幅度不大,为 1%~3%。索力在纵桥向发生重分布,各斜拉索索力之间差值有所降低,索力均匀性得到改善。

3.2 目标函数优化结果

为验证优化结果的有效性,以 S5 主墩及右侧主梁为例,将优化后索力输入至有限元模型中,获取主梁弯曲应变能结果及主塔纵向水平位移结果见表 3。

由表 3 可知:优化前(设计状态)S5 主塔右侧主梁弯曲应变能为 4 259 227 J,优化后该主梁节段弯曲应变能降至 4 161 163 J,降幅 2.31%,优化后主梁弯曲应变能降幅并不显著,但 S5 主塔纵向水平位移有大幅降低,除个别位置外,其余大部分位置位移降幅均为

表 3 目标函数优化结果

节段号	S5 主塔右侧主梁			S5 主塔		
	对应扣索	应变能/J		位置	纵向水平位移/mm	
		优化前	优化后		优化前	优化后
1	151 [#]	286 354	291 633	H/10	11. 5	9. 2
2	152 [#]	302 585	303 154	2H/10	14. 6	12. 8
3	153 [#]	343 698	348 217	3H/10	17. 2	14. 7
4	154 [#]	391 239	391 863	4H/10	21. 8	16. 7
5	155 [#]	436 554	421 988	5H/10	28. 7	22. 4
6	156 [#]	462 135	445 128	6H/10	34. 9	26. 8
7	157 [#]	484 188	471 324	7H/10	39. 3	31. 7
8	158 [#]	503 265	488 523	8H/10	45. 2	35. 9
9	159 [#]	519 743	496 588	9H/10	51. 7	40. 5
10	160 [#]	529 466	502 745	H	57. 6	44. 1

注:H 为塔高。

20%左右,如优化前塔顶位置最大纵向水平位移为 57.6 mm,优化后降至 44.1 mm,降幅达 23.44%。说明基于全局寻优的改进遗传算法与 RBF 神经网络相

结合的索力优化方法取得了良好的效果。

3.3 与单目标优化结果对比

为进一步验证改进遗传算法的优化效果,构建另

一索力优化模型。该模型以主梁弯曲应变能为单一优化目标函数,约束条件不变,适应度函数同样按界限构造法建立,算法参数与表 1 取值相同。得到该优化模

型下主梁弯曲应变能结果和主梁纵向最大水平位移结果,以 S5 主塔及对应主梁为例,结果对比见表 4。

表 4 两种算法结果对比

算法	S5 主塔右侧主梁 弯曲应变能/J	混凝土节段最大 弯矩/(kN·m)	钢箱梁节段最大 弯矩/(kN·m)	塔顶纵向水平 位移/mm
多目标算法	4 161 163	62 741	126 639	44.1
单目标算法	3 259 886	39 522	91 336	76.7

由表 4 可知:采用单目标优化理论时主梁弯曲应变能有明显降幅,以 S5 主塔右侧主梁为例,其弯曲应变能降幅达 21.66%,混凝土节段和钢箱梁节段最大弯矩降幅分别为 37%、27.88%。但是由于目标函数仅考虑了主梁弯曲应变能,导致其主塔纵向水平位移有大幅提升,其塔顶位移峰值达到了 76.7 mm。由此可看出,不同的目标函数设置得到的结果不尽相同,在进行优化时,需在全局角度考虑多参数耦合作用的影响,不能以单一目标作为最终的寻优结果。

4 结 论

以国外某六塔斜拉桥为例,构建了以主梁弯曲应变能和塔顶纵向位移的双目标数学模型,基于改进的遗传算法和 RBF 神经网络相结合的方法对斜拉桥索力进行了优化,并与单目标函数状态下的结构力学状态进行了对比。得到以下结论:

(1) 构建以主梁弯曲应变能和主塔纵向水平位移为双目标函数的数学模型,基于界限构造法建立对应适应度函数,采用[0,1]范围内的二进制编码手段设计初始样本种群,通过 RBF 神经网络对样本数据进行训练供遗传算法进行寻优,可以有效避免局部最优的问题,样本参数具有较好的连续性。

(2) 经该算法全局寻优后,S5 主塔右侧主梁弯曲应变能和塔顶最大纵向水平位移有所降低,以 S5 主塔右侧主梁为例,相比于设计状态,两项指标降幅分别为 2.31%、23.44%。主梁弯曲应变能降幅并不明显,但是最大塔偏控制效果显著。

(3) 索力调整不能仅考虑主梁的受力状态,应从主梁、主塔等多方面进行全局最优考虑,在该文中,虽

然单目标优化法对主梁弯曲应变能控制效果更为明显,但是塔偏达到了 76.7 mm,相比于多目标优化增幅达 73.9%,属于典型的局部最优,而采用多目标优化后,主梁内力与塔偏均控制在合理范围内,进行优化时应考虑多因素共同影响。

(4) 采用 RBF 网络优化算法时,对网络参数的选取至关重要,不同参数对结果影响显著,且训练样本的数量对结果的影响效应也不能忽略,在后续研究中应当开展各参数对 RBF 网络精度的影响。

参考文献:

[1] 李炎,陈常松,董道福.斜拉桥施工控制张拉力的计算方法研究[J].中外公路,2019(2).

[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] 苑仁安,秦顺全,肖海珠.一种斜拉桥目标状态索力快速精准确定的方法[J].桥梁建设,2020(2).

[4] 张玉平,刘雪松,李传习.基于 MOPSO 算法的斜拉桥索力优化分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2020(2).

[5] 周银,张雪松.基于最小弯曲能的结合梁斜拉桥恒载索力优化计算方法[J].中外公路,2018(4).

[6] 李秉穹.基于 RBF 神经网络的曲线斜拉桥不确定性模型修正[D].西南交通大学硕士学位论文,2018.

[7] 刘扬,鲁乃唯,殷新锋.基于体系可靠度的钢桁梁结构优化设计[J].中南大学学报(自然科学版),2014(10).

[8] 张建仁,刘扬.遗传算法和人工神经网络在斜拉桥可靠度分析中的应用[J].土木工程学报,2001(1).

[9] 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).

[10] 刘扬,鲁乃唯,汪勤用.基于混合算法的大跨度斜拉桥可靠度评估[J].公路交通科技,2014(7).