

文章编号:1673-2049(2018)05-0086-07

# 基于自适应动态惩罚遗传算法的桥梁监测 无线测点优化研究

周广东,操声浪,刘定坤

(河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**针对桥梁监测的无线测点优化布置问题,提出一种基于自适应动态惩罚函数的改进广义遗传算法。首先针对无线传感器数量固定和通信距离有限的典型特征将桥梁监测无线测点优化布置表为约束优化问题,无线传感器的数量和极限传输距离作为优化问题的约束;其次构建了一种能够根据解的偏离程度和种群中高适应度个体数量自动调整惩罚力度的自适应动态惩罚函数;然后采用精英保存机制和末位淘汰策略对基于二重结构编码的广义遗传算法进行了改进;最后利用一大跨悬索桥对该方法进行了验证,并进一步讨论了自适应动态惩罚函数对解的有效性和收敛速度的影响。结果表明:提出的自适应动态惩罚函数能够根据种群的特征自动改变惩罚尺度,保证无线传感器之间的距离小于极限通信距离,同时将无线数据传输距离对桥梁监测信息获取的影响降到最低;改进的广义遗传算法具有很强的全局快速寻优能力,能够快速搜索到全局最优解,优化结果不仅能够满足无线传感网络数据传输距离的要求,还能最大化无线测点的信息获取能力。

**关键词:**结构健康监测;无线传感网络;测点优化布置;广义遗传算法;自适应动态惩罚函数

**中图分类号:**U441<sup>+</sup>.3

**文献标志码:**A

## Generalized Genetic Algorithm Integrating Self-adaptive Dynamic Penalty for Optimal Wireless Sensor Placement in Bridge Monitoring

ZHOU Guang-dong, CAO Sheng-lang, LIU Ding-kun

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

**Abstract:** An improved generalized genetic algorithm combining with self-adaptive dynamic penalty function was proposed for optimal wireless sensor placement in bridge monitoring. Firstly, the problem of optimal wireless sensor placement in bridge monitoring was modeled as a constrained optimization problem considering the number of wireless sensors and the limited data transmission distance. The number of wireless sensors and the data transmission distance were taken as two constraints. And then, the self-adaptive dynamic penalty function was established, which could adjust the penalty automatically according to the evolution generation and the population of good individuals. Thirdly, the generalized genetic algorithm based on dual-structure coding was improved by elite conservation strategy and worst elimination policy. Finally, numerical experiments were carried out using a long-span suspension bridge and the influences of the self-adaptive dynamic penalty function on the effectiveness of solutions and the convergence speed were discussed. The results indicate that the established self-adaptive dynamic penalty

收稿日期:2018-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51678218);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2018B14114)

作者简介:周广东(1982-),男,四川资阳人,副教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:zhougud@hhu.edu.cn。

function can minimize the influence of limited wireless data transmission distance on capturing bridge information. The improved generalized genetic algorithm has strong capability of exploring the global optimal solutions and can find the global optimal solution quickly and stably. The optimal wireless sensor configuration extracted by the method proposed can simultaneously meet the data transmission requirement of wireless sensor network and strengthen the capability of obtaining structural information.

**Key words:** structural health monitoring; wireless sensor network; optimal sensor placement; generalized genetic algorithm; self-adaptive dynamic penalty function

## 0 引言

近年来,桥梁设计和建造技术得到了空前的发展,一大批大跨桥梁结构在全国各地陆续建成。这些桥梁在几十年甚至上百年的服役过程中,持续环境作用、长期运营荷载、突发自然灾害、偶然人为破坏等因素的耦合将不可避免地导致结构和系统的损伤积累和抗力衰减,使得桥梁结构抵抗自然灾害、甚至正常使用荷载的能力下降,极端情况下还可能引发灾难性垮塌事故<sup>[1]</sup>。因此,对桥梁的性能进行实时监测,并通过监测数据对结构损伤状况进行评估,具有重要的现实意义。目前,基于动力指纹变化的损伤识别仍是桥梁结构状态评估的主要方法<sup>[2]</sup>,因此,振动监测成为桥梁健康监测系统的的重要组成部分。桥梁为一种直线型结构,采用有线加速度传感器进行振动监测时,需要大量的导线实现传感器和服务器之间的数据传输,大幅增加了监测系统的成本,据统计,韩国 Yongjong 大桥健康监测系统的线缆造价达总造价的 50%<sup>[3]</sup>。不仅如此,长距离的信号传输还将产生信号失真和难以去除的噪声干扰。无线传感网络采用无线传输、自组网和多跳技术,大大降低了监测系统的造价,使传感网络的安装和维护变得非常方便和快捷。同时,无线传感网络的分级成簇技术还可以实现监测数据的分布式处理,显著提高桥梁监测系统的数据处理效率<sup>[4]</sup>。目前,无线传感网络技术正越来越多地受到专家和学者的重视,已有数十座桥梁安装了基于无线传感网络的监测系统,包括 Golden Gate 大桥<sup>[5]</sup>、Yongjong 主桥<sup>[3]</sup>、Jindo 大桥<sup>[6]</sup>、New Carquinez 大桥<sup>[7]</sup>等。

桥梁振动监测总是希望能够得到尽量多的结构振动信息,然而在所有自由度均布置加速度传感器显然是不现实的,因此,传感器优化布置成为桥梁振动监测的重要课题。对于有线加速度传感器的优化布置,已经提出多种方法,如模态动能法、有效独立法、MinMAC 法、QR 分解法和猴群算法等<sup>[8-9]</sup>。对

于无线加速度传感器网络,由于传输距离有限、能量有限等固有缺陷,无线传感节点优化布置不仅要能获得最多的结构振动信息,还要满足无线传感网络数据传输距离的要求,因此,桥梁振动监测无线传感器优化布置是一个约束优化问题。然而,目前对桥梁监测无线传感网络优化布置的研究还较少。遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应概率性全局收敛优化算法,具有不依赖于问题模型、良好的全局搜索性能、鲁棒性和高效的并行计算能力等优点。遗传算法的群体搜索策略和不依赖梯度信息的计算方式使得它在处理约束优化问题时比传统搜索算法更为通用和有效<sup>[10]</sup>。虽然遗传算法为桥梁振动监测无线传感器优化布置提供了有效途径,但也存在后期收敛速度较慢的问题。

针对上述问题,本文建立了桥梁监测无线传感器优化布置问题的数学模型,构建了桥梁振动监测无线传感器优化布置的自适应动态惩罚函数,然后采用精英保存机制和末位淘汰策略对基于二重结构编码的广义遗传算法进行了改进,提出了桥梁振动监测无线传感器优化布置的改进广义遗传算法,最后采用一大跨悬索桥对本文方法进行了验证,并进一步对优化方法进行了讨论。研究结果可为桥梁振动监测无线传感网络布置提供有益参考。

## 1 数学模型

桥梁振动监测无线传感器优化问题主要考虑 2 个方面:一方面,无线传感器利用无线电波进行数据传输,且一般采用能量有限的电池供电,再加上无线传感网络生存寿命的要求和无线传感器硬件本身的限制,无线传感器之间的数据传输距离总是在一定范围之内;另一方面,桥梁振动监测总是希望能够获得尽量多的数据,但受到成本以及服务器数据处理能力的限制,加速度传感器的数量总是有限的。因此,桥梁振动监测无线传感器优化的目标就是在无

线传感器数量一定的情况下,通过选取最合理的布置位置,使数据传输链路上相邻无线传感器之间的距离小于无线传感器的极限传输距离,同时能够获得最多的桥梁振动响应信息。与传统传感器优化布置问题相比,增加了无线传感器之间距离的限制,故桥梁振动监测无线传感器的优化布置是一类带约束的特殊背包问题,其数学模型可以表示为

$$\left. \begin{array}{l} \max(f) \\ \text{s. t.} \\ \sum_{j=1}^{n_d} x_j = m \\ \max(g') \leqslant d_{\max} \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中: $f$ 为目标函数,对于遗传算法即为适应度函数; $x_j(j=1,2,\cdots,n_d)$ 等于 0 或 1,即  $x_j$  为 1 时,则将传感器布置于第  $j$  个自由度, $x_j$  为 0 时,则不将传感器布置于第  $j$  个自由度, $n_d$  为可选的自由度总数; $m$  为无线传感器的总数; $g'$  为数据传输链路上相邻传感器之间的距离; $d_{\max}$  为无线传感器的极限传输距离。

2 自适应动态惩罚函数

如前所述,桥梁振动监测无线传感器优化是一个约束优化问题,遗传算法求解约束优化问题常采用惩罚函数法。惩罚函数法是根据约束的特点构造某种惩罚函数,并将其融入适应度函数中,对违反约束的解给以一定的惩罚,使约束优化问题的求解转化为无约束优化问题的求解。惩罚函数法的关键在于惩罚函数的构造,既要满足约束条件,还要对原始优化目标影响小。

本文惩罚函数的构造主要考虑以下 2 个方面:第一,在遗传算法初期,总是希望提高种群的多样性,如果此时的惩罚压力过大,会使得大量不可行解被抛弃,种群的多样性急剧减少,导致种群过早收敛而陷入局部最优,在遗传算法的中后期,随着进化的进行,越来越多的高适应度个体出现,种群也开始向高适应度值个体收敛,这时应该减少不可行解的数量,使种群快速收敛到最优解上,因此,应采用惩罚压力随着进化代数增加而逐渐增加的自适应惩罚函数;第二,虽然无线传感器存在极限数据传输距离,但无线传感器的数据收发模块长期处于满负荷运转也会降低整个无线传感网络的可靠性,故无线传感器的最优传输距离为  $\lambda d_{\max}$  (系数  $\lambda < 1$ ),而无线传感器的高效传输距离应处于  $[0, \lambda d_{\max}]$  区间。因此,惩罚压力应随着传感器间的传输距离偏离最优传输距

离的程度而变化。从而,构造桥梁振动监测无线传感网络优化的自适应动态惩罚函数  $p(d,t)$  为

$$p(d,t) = \frac{-[d-s(t)]^{n(t)} + (d_u-d_0)^{n(t)}}{(d_u-d_0)^{n(t)}} \quad (2)$$

$$s(t) = s_0 + \alpha t \quad (3)$$

$$n(t) = n_0 + \beta t \quad (4)$$

式中:惩罚函数  $p(d,t) < 0$  时,取  $p(d,t) = 0$ ;  $d_u$  为放松惩罚后的最远传输距离; $\alpha, \beta, d_0$  为待定参数; $t$  为进化代数; $d$  为数据传输链路上相邻传感器之间距离的最大值。

设一种无线传感器的极限传输距离  $d_{\max}$  为 150 m,惩罚函数中的各参数取值如表 1 所示。假定进化代数达到 75 代时,种群中的高适应度个体已经非常多,此后惩罚函数不再随着进化代数的变化而变化。通过式(2)~(4)可以得到不同进化代数时的惩罚函数曲线,如图 1 所示。从图 1 可以看出:在进化初期,惩罚力度较小,即使无线传感器间距超过 200 m,惩罚函数值仍等于 1,与传感器布置评价函数相乘并不会改变评价函数的值;随着进化代数的增加,惩罚力度逐渐加大,当进化到第 75 代时,无线传感器间距大于极限传输距离时,惩罚函数值为 0,与评价函数相乘则会使得评价函数的值为 0,表明此种布置方式将会被抛弃。从图 1 还可以看出,在进化后期,无线传感器高效传输距离范围内的惩罚函数值均为 1,表明在无线传感器高效传输距离范围内,无线传感器之间的距离并不会影响传感器布置评价函数的值。也就说在此范围内,传感器的布置主要由传感器布置评价函数决定,最大限度地降低了无线传感器数据传输距离对振动监测数据获取的干扰。因此,本文提出的惩罚函数是一种可以根据解的偏离程度和种群特征而自动调整的自适应动态惩罚函数。

表 1 惩罚函数参数

Tab. 1 Parameters of Penalty Function

参数	$d_u$	$s_0$	$\alpha$	$n_0$	$\beta$	$d_0$
参数值	300	30	2	10	1.2	30

3 改进广义遗传算法

由于桥梁振动监测无线传感器优化问题的非凸性,传统的遗传算法在优化过程的后期容易发生近亲繁殖,造成单向爬坡和早熟收敛等问题。本文采用文献[11]提出的广义遗传算法,该算法以 Morgan 的基因理论及 Gould 与 Eldridge 的间断平衡理论为依据,同时融合了 Mayr 的边缘物种形成理论

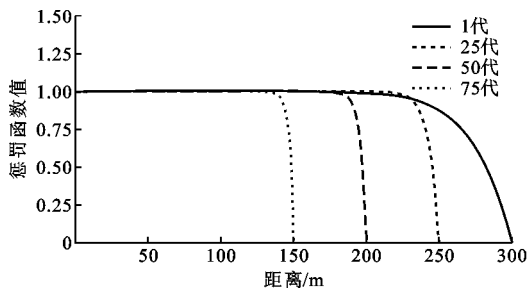


图 1 不同进化代数时的惩罚函数曲线

**Fig. 1 Values of Penalty Function for Different Generations**

和 Beralanffy 一般系统理论建立而成。广义遗传算法避免了经典遗传算法无谓的随机遍历搜索,采用定向演化和局部最优状态定向转移相结合的方法,能够实现全局最优化<sup>[12]</sup>。对于无线传感器优化这种复杂问题,仍然存在后期收敛速度较慢的问题。因此,本文以广义遗传算法为基础,针对广义遗传算法收敛速度较慢这一不足进行改进,以提高其全局优化速度。

### 3.1 适应度函数

适应度函数是遗传算法进行选择操作的惟一依据,通过适应度值的大小对种群中的个体进行优胜劣汰,因此适应度函数设置的正确与否直接关系到最终优化结果的合理性。将传感器配置于模态位移较大的自由度有利于模态参数识别。由于同一构件不同方向的刚度不同,不同构件的刚度也不同,导致不同方向上的位移分量有量级上的差异。为了寻找各方向、各部位测点的联合最优布置,采用变形能  $g$  作为传感器布置评价函数,该函数的值越大表示传感器布置策略越优<sup>[12-14]</sup>。变形能  $g$  的计算如下

$$g = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{r,s \in mr, s \in m} |\phi_{ri} k_{rs} \phi_{sj}| \quad (5)$$

式中:  $n$  为有限元模态分析的振型阶次;  $m$  为测点数;  $\phi_{ri}$  为第  $i$  阶振型第  $r$  个分量;  $\phi_{sj}$  为第  $j$  阶振型第  $s$  个分量;  $k_{rs}$  为第  $r$  点和第  $s$  点之间的刚度影响系数;  $r, s \in m$  表示  $r$  和  $s$  限于全部测点内。

参考 Yokota 等<sup>[15]</sup>提出的约束优化问题适应度函数建立方法,桥梁振动监测无线传感器优化布置的适应度函数  $f$  为

$$f = p(d, t)g = \frac{-[d - s(t)]^{n(t)} + (d_u - d_0)^{n(t)}}{(d_u - d_0)^{n(t)}} \cdot$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{r,s \in mr, s \in m} |\phi_{ri} k_{rs} \phi_{sj}| \quad (6)$$

### 3.2 编码

桥梁振动监测无线传感器优化时,无线传感器的数量一般预先选定且保持不变。如果采用传统的

二进制编码或浮点数编码,在进行交叉和变异操作时会改变传感器的数量。对此,本文采用二重结构编码来解决传感器数量固定的问题<sup>[16]</sup>。

二重结构编码由变量码和附加码 2 行组成,上行  $s(i)$  表示变量  $x_j$  的附加码,下行表示变量  $x_{s(i)}$  的变量码,如表 2 所示。具体来讲,上行  $s(i)$  表示传感器布置的备选自由度,下行变量  $x_{s(i)}$  表示备选自由度上是否布置传感器( $x_{s(i)}$  为 0 或 1)。上行  $s(i)$  可通过洗牌算法产生,下行变量  $x_{s(i)}$  可随机产生。由表 2 可知,在第 8, 9, 7 和 6 四个自由度上布置传感器。在进行交叉和变异时,只对附加码进行操作,变量码保持不变,这样可以有效保证生成的新个体传感器数量不变。

表 2 二重结构编码示例

Tab. 2 Dual-structure Coding Example

附加码	5	8	9	3	4	2	7	1	6	10
变量码	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0

### 3.3 精英保存和末位淘汰

遗传算子的不同是广义遗传算法区别于传统遗传算法的典型特征。广义遗传算法采用四分之二择优的方式进行进化,就是由 2 个父代经过交叉或变异产生 2 个新的子代,把这 2 个父代和 2 个子代按照适应度来进行选择和淘汰,留下最优的 2 个个体进入下一代。通过父代和子代同时竞争,只有那些适应度大于父代的个体才能替代父代,使每代均向着更优的方向发展,从而保证进化过程的稳定性和全局收敛性,但收敛速度较慢。

本文在具体操作中采用“群中群”策略,即在初始的  $M$  个个体的种群中选择适应度最大的  $N$  个互异个体形成一个规模较小的主群,剩下的  $M - N$  个个体形成配群。在每一次进化过程中,第 1 次选择时,采用轮盘赌方式从主群中选择一个父代,在配群中选择适应度最差的个体作为另一个父代,进行四分之二择优得到 2 个子代;以后的  $(M - N) / 2 - 1$  次采用轮盘赌方式从主群中选择一个父代,采用随机方式在配群中选择另一个父代,进行四分之二择优得到 2 个子代。这样,在每一次进化过程中,适应度最小的末位个体必然淘汰,提高搜索效率,并且主群中的优秀个体直接进入下一代,以实现精英保存。

### 3.4 进化过程、交叉和变异

进化过程采用渐进和骤变相结合的方式进行。当群首或群尾连续多次不变时,则表明算法达到一个局部最优,这时将算法转入骤变阶段,一旦群首变化则转换回渐进阶段。整个进化过程以渐进为主,

骤变为辅。渐进阶段以交叉为主,变异为辅;聚变阶段以变异为主,交叉为辅。渐进阶段突出了算法的局部搜索能力,骤变阶段则加强了局部最优解之间的转移能力,使得整个算法具有良好的全局最优搜索能力和良好的稳定性。

对于交叉操作,本文采用部分匹配交叉算子(PMX),PMX操作首先随机选取2个交叉点形成一个匹配段,根据2个父个体中的匹配段给出的映射关系生成2个子个体。PMX可以有效避免交叉产生的新个体附加码出现重复。

对于变异操作,考虑到渐进和骤变2种进化方式,这里分别采用对换变异和逆转变异。在渐进阶段,采用对换变异,即随机产生2个变异点,父个体变异点处的附加码交换顺序,该变异操作的变异度较小,局部优化精度较高;在骤变阶段,采用逆转变异,即随机产生2个变异点,父个体变异点间附加码按相反顺序重新排列,该变异操作的变异度较大,全局优化精度较高。

## 4 算例分析

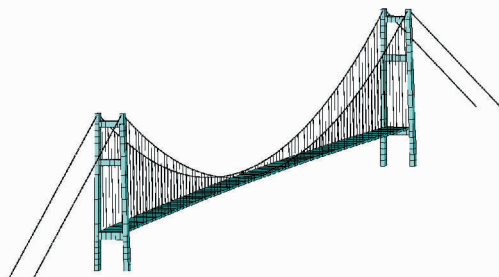
### 4.1 方法验证

选取润扬大桥悬索桥为例进行分析,该桥主跨跨度为1 490 m,目前排名中国第二,两边跨长为470 m,主跨矢跨比为1:9.96,见图2(a)。主梁采用全焊接流线型扁平钢箱梁,总长1 485.16 m。主缆采用预制平行索股,主缆中心距为34.4 m。主跨设有91对吊杆支承,吊杆与主缆和加劲梁的连接均采用销接连接。以结构动态特性分析为目标,建立了润扬大桥悬索桥的三维有限元模型,主梁划分为92个单元、93个节点,如图2(b)所示。对有限元模型进行修正并开展模态分析,选取前16阶竖向模态作为目标模态进行传感器优化布置。

由于桥梁为直线型结构,无线传感网络可布置成单线性网络,数据沿大桥轴向通过多跳传输至基站。桥梁振动监测无线传感网络传感器数量的确定不仅要考虑监测成本,还要考虑传感器的数据传输距离。假设选用的无线传感器极限传输距离为150 m,为了满足数据传输的要求,对于主跨为1 490 m的悬索桥来说,最少需要10个无线传感器。如果仅采用10个无线传感器,传感器必须均匀布置,这显然不能很好地满足结构振动监测模态分析的要求。因此,无线传感器的数量应多于根据极限传输距离确定的最少传感器数量,本文选取无线传感器数量为20、25和30个3种工况。设遗传算法中初始种



(a) 总体布置



(b) 有限元模型

图2 润扬大桥悬索桥

Fig. 2 Runyang Suspension Bridge

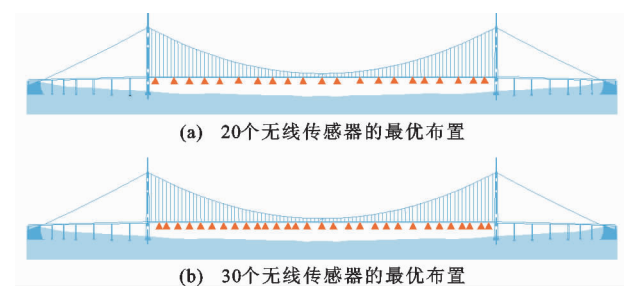
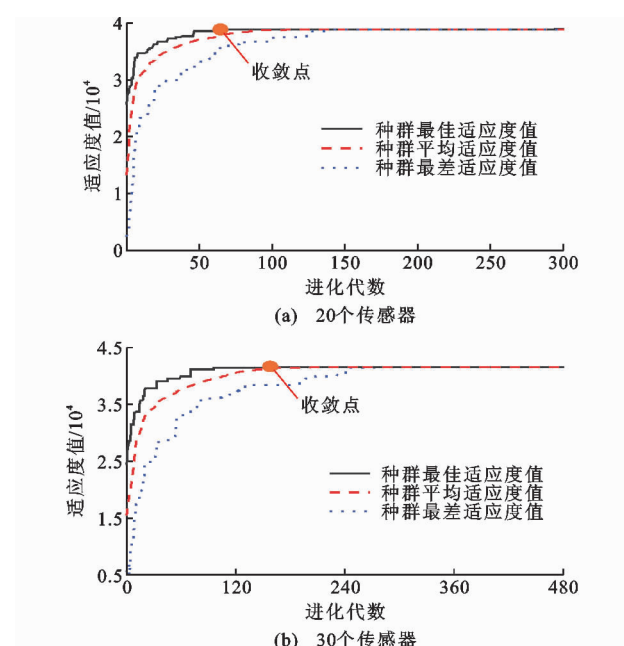
群数量为600,惩罚函数的具体参数如表1所示。对于无线传感器数量为20个的工况,本文提出的改进广义遗传算法的优化过程如图3(a)所示,经过62代进化即达到最优结果,种群中的最大、平均以及最小适应度值均稳定,快速地收敛于最优适应度值;此时无线传感器的最大间距为96.6 m,小于无线传感器的极限传输距离;最优无线传感器布置如图4(a)所示。

对于无线传感器数量为30个的工况,其优化过程如图3(b)所示;由于传感器数量增加导致可行解的个数增加,最优解的进化代数为152代,比20个传感器工况的迭代次数有所增加,但仍呈现出良好的收敛进程;无线传感网络中的最大传感器间距为80.5 m,最优无线传感器布置如图4(b)所示。可见,对于不同的工况,本文提出的结合自适应动态惩罚函数的改进广义遗传算法均具有较强的优化能力,优化结果能够很好地满足无线传感网络数据传输距离的要求。

### 4.2 方法讨论

针对第4.1节中的3种工况,采用考虑自适应动态惩罚函数和不考虑自适应动态惩罚函数2种模式,利用改进广义遗传算法对润扬大桥悬索桥进行无线传感器布置优化。每种工况的模式均进行10次计算,以消除初始种群的不同给计算结果造成的影响,10次的平均结果如图5所示。从图5中可以看出:

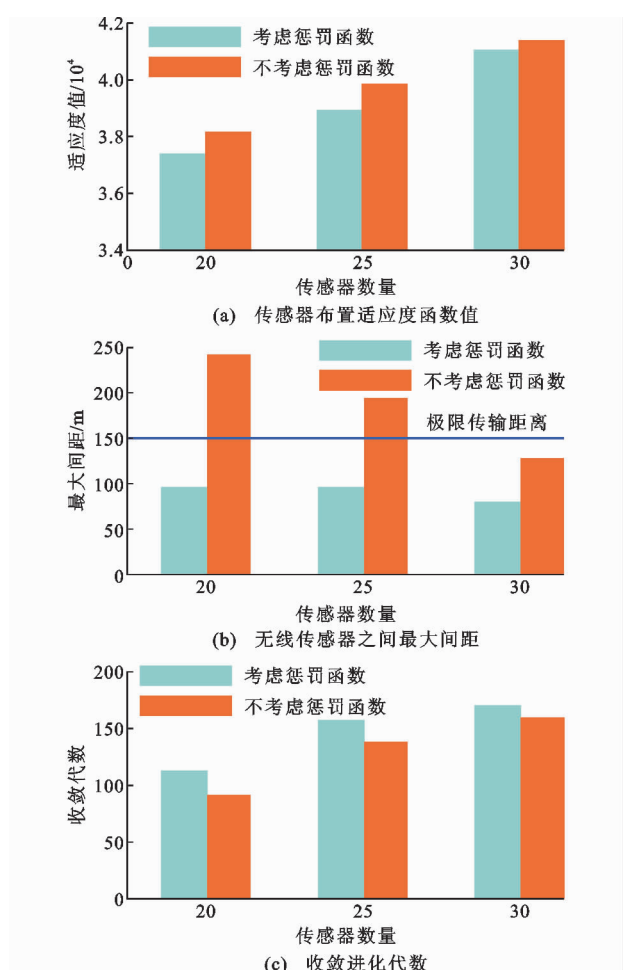




(1)在适应度函数值方面,由于选取的自适应动态惩罚函数只在无线传感器极限传输距离附近降低,对于传感器间距明显小于极限传感距离的情况并不实施惩罚,因此,惩罚函数的存在对适应度函数值的影响并不大,考虑自适应动态惩罚函数后的最优适应度只比不考虑自适应动态惩罚函数的最优适应度略小。

(2)在相邻无线传感器间距方面,由于惩罚函数对适应度函数的限制,即使传感器数量很少,传感器优化布置结果也能满足无线传感网络数据传输的距离要求。对于不考虑惩罚函数的情况,只有传感器数量很多的情况下,传感器优化布置结果才有可能满足无线传感器网络数据传输的距离要求。

(3)在进化次数方面,由于自适应动态惩罚函数的惩罚压力先松后紧,在进化初期,几乎与不设置惩罚函数的进化过程一致,因此,考虑自适应动态惩罚



函数的收敛进化次数只比不考虑自适应动态惩罚函数的收敛进化次数略有增加,大大地提高了约束优化的计算效率。

从以上的分析可知,本文提出的结合自适应动态惩罚函数的改进广义遗传算法能够快速得到传感器布置全局优化结果,优化结果不仅能够满足无线传感网络数据传输的要求,还能最大化振动信息获取量。

## 5 结 语

(1)桥梁监测无线传感器优化布置既要满足无线传感器数据传输距离的要求,还要尽可能多地获取结构振动信息,因此,桥梁振动监测无线传感器优化布置可以表达为带约束的优化问题,比有线传感器的优化布置更为复杂。

(2)提出的自适应动态惩罚函数既能根据解的偏离程度调整惩罚尺度,还能随着种群特征的不同

而改变惩罚尺度,确保约束条件对优化目标和收敛速度的影响较小,对桥梁振动监测无线传感器优化布置及类似的约束优化问题有很好的适用性。

(3)算例分析表明,本文提出的结合自适应动态惩罚函数的改进广义遗传算法对桥梁振动监测无线传感器优化布置问题具有良好的适用性,优化结果能够很好地满足无线传感网络数据传输的距离要求。对比分析表明,由于惩罚函数的自适应性和动态性,考虑惩罚函数后的优化结果在满足数据传输距离的前提下,振动信息获取量和迭代次数并没有大幅度的劣化,将约束条件的影响降到了最低。

## 参考文献:

## References:

- [1] AHMAD I, KHAN F U. Multi-mode Vibration Based Electromagnetic Type Micro Power Generator for Structural Health Monitoring of Bridges[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 275: 154-161.
- [2] BROWN JOHN J M W, AU S K, ZHU Y C, et al. Bayesian Operational Modal Analysis of Jiangyin Yangtze River Bridge[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 110: 210-230.
- [3] CHAE M J, YOO H S, KIM J Y, et al. Development of a Wireless Sensor Network System for Suspension Bridge Health Monitoring[J]. *Automation in Construction*, 2012, 21: 237-252.
- [4] JO H, SIM S, NAGAYAMA T, et al. Development and Application of High-sensitivity Wireless Smart Sensors for Decentralized Stochastic Modal Identification[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2012, 138(6): 683-694.
- [5] PAKZAD S N, FENVES G L, KIM S K, et al. Design and Implementation of Scalable Wireless Sensor Network for Structural Monitoring[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2008, 14(1): 89-101.
- [6] JANG S, JO H K, CHO S, et al. Structural Health Monitoring of a Cable-stayed Bridge Using Smart Sensor Technology: Deployment and Evaluation[J]. *Smart Structures and Systems*, 2010, 6(5/6): 439-459.
- [7] ZHOU G D, YI T H. Recent Developments on Wireless Sensor Networks Technology for Bridge Health Monitoring[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013: 947867.
- [8] YI T H, LI H N. Methodology Developments in Sensor Placement for Health Monitoring of Civil Infrastructures[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012: 612726.
- [9] YI T H, LI H N, ZHANG X D. A Modified Monkey Algorithm for Optimal Sensor Placement in Structural Health Monitoring[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(10): 1-9.
- [10] GEN M, CHEN R. *Genetic Algorithm and Engineering Design*[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1997.
- [11] 董 聪, 郭晓华. 广义遗传算法的逻辑结构及全局收敛性的证明[J]. *计算机科学*, 1998, 25(5): 38-42.  
DONG Cong, GUO Xiao-hua. Logic Structure of Generalized Genetic Algorithm and a Proof of Its Global Convergence[J]. *Computer Science*, 1998, 25(5): 38-42.
- [12] 伊廷华, 李宏男, 顾 明. 基于模型缩聚的广州新电视塔传感器优化布置研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(3): 55-61.  
YI Ting-hua, LI Hong-nan, GU Ming. Research on Optimal Sensor Placement of Guangzhou New TV Tower Based on Model Reduction[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(3): 55-61.
- [13] 李 戈, 秦 权, 董 聪. 用遗传算法选择悬索桥监测系统中传感器的优化布置点[J]. *工程力学*, 2000, 17(1): 25-34.  
LI Ge, QIN Quan, DONG Cong. Optimal Placement of Sensors for Monitoring Systems on Suspension Bridges Using Genetic Algorithms[J]. *Engineering Mechanics*, 2000, 17(1): 25-34.
- [14] 高维成, 徐敏建, 刘 伟. 基于遗传算法的传感器优化布置[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, 40(1): 9-11, 84.  
GAO Wei-cheng, XU Min-jian, LIU Wei. Optimization of Sensor Placement by Genetic Algorithms[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, 40(1): 9-11, 84.
- [15] YOKOTA T, GEN M, IDA K, et al. Optimal Design of System Reliability by an Improved Genetic Algorithm[J]. *Electronics and Communications in Japan*, 1996, 79(2): 41-51.
- [16] 刘 娟, 黄维平. 二重结构编码遗传算法在传感器配置中的应用[J]. *振动、测试与诊断*, 2004, 24(4): 281-284, 320.  
LIU Juan, HUANG Wei-ping. Application of Dualistic Coding Genetic Algorithms to Sensor Placement[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2004, 24(4): 281-284, 320.