

遗传算法在桥梁有限元模型修正中的应用

谢海龙

(山西省交通科学研究院, 山西 太原 030006)

摘要:遗传算法是一种模拟自然选择和遗传机制的优化算法,在自动控制、图像处理等方面有着广泛的应用,本文将遗传算法应用于桥梁有限元模型修正,并与L-M算法的优化结果进行对比,二者优化结果基本一致,并总结出遗传算法与L-M算法在桥梁有限元模型修正中的优缺点。

关键词:遗传算法;桥梁荷载试验;有限元模型修正;最优化

中图分类号:U448.21 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2018)01-0033-06

0 引言

桥梁荷载试验是评价桥梁承载力最直接有效的方法,荷载试验结果揭示的是实测值与理论值的偏差关系,并以此进行桥梁结构承载力评定。事实上,桥梁荷载试验中实测值与理论值之间总会存在一定的偏差。这种偏差主要是由于理论计算刚度与桥梁刚度不同所造成的,桥梁结构的混凝土开裂及性能劣化、混凝土浇筑质量、预应力损失、桥面铺装层是否参与受力等因素均会造成桥梁实际刚度与理论计算刚度存在差别。因此人们通常采用有限元模型修正技术获得桥梁结构实际的刚度,从而能够更加准确地评价其承载力^[1-2]。

桥梁有限元模型修正技术的关键在于优化算法,即根据实测数据,构造目标函数,依照最优化算法进行迭代计算,最终确定出一组桥梁结构的待识别参数,使得目标函数的收敛误差在容许范围之内。

遗传算法是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型,是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法^[3]。常规的优化算法是从单个初始值迭代求最优解的,而遗传算法则是从给定的区间开始搜索,搜索范围大,能够避免出现局部最优解。其次,遗传算法采用适应度函数值进行个体评估。适应度函数定义域可以任意设定,且不需连续可微。这样使得遗传算法的应用范围大大扩展。另外,遗传算法还具有自学习和自适应的特性。在搜索过程中,能够根据获得的信息自行选择适应度大的个体,从而获得更适应环境的新基因。

1 有限元模型修正技术^[4-7]

有限元模型修正技术是以荷载试验实测结果为已知参数,求解结构模型的待识别参数(通常为结构单元刚度)。首先从基本力学方程(1)入手

$$[K]\{\Delta\} = \{F\} \quad (1)$$

式中, $[K]$ 为结构总体刚度矩阵; $\{\Delta\}$ 为位移向量; $\{F\}$ 为荷载向量。求出

$$\{\Delta\} = [K]^{-1}\{F\} \quad (2)$$

便得到了所有节点位移的表达式,由于实测值较少,将位移向量 $\{\Delta\}$ 按照测量值 U_a 和未测量值 U_b 分开表示,则可以表示为

收稿日期:2016-09-23 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2018.01.07

基金项目:山西省交通科技项目(2013-1-9)

作者简介:谢海龙(1978—),男,高级工程师,主要研究方向为桥梁检测、桥梁施工监控、桥梁健康监测。E-mail: 474295412@qq.com

谢海龙.遗传算法在桥梁有限元模型修正中的应用[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2018,31(1):33-38.

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [K^{-1}]_a \\ [K^{-1}]_b \end{bmatrix} \{F\} \quad (3)$$

这样很容易求出

$$[U_a] = [[K^{-1}]_a] \{F\} \quad (4)$$

由此便可构造出目标函数

$$[e] = [F][[K^{-1}]_a] - U_m \quad (5)$$

确定一组待识别参数值即各单元刚度,使得式(5)计算结果尽可能接近于 0,这样,有限元模型修正便转化为最优化问题。常规的优化方法一般采用 L-M 算法进行优化。本文则采用遗传算法进行优化计算,并与 L-M 算法进行对比。

2 遗传算法原理

遗传算法将问题的任何一个解采用二进制进行编码,表示成染色体(待识别参数的解),根据适应度函数值的概率(即有限元模型优化中的目标函数)来选择染色体,使适应性好(即与目标函数的解接近)的染色体有较高的概率选择机会。在算法中体现的是以二进制编码的一组字符串。遗传算法的运算过程为,首先随机给出一群染色体,每个染色体都是一组随机的二进制位,对于桥梁有限元模型修正,每个染色体代表一种可能的待识别参数的解,也即是假设解。然后,按照适应度函数计算出这群假设解的适应度函数值。从中选择出适应度较高的染色体进行复制,再通过交叉、变异,从而产生更适应环境的新一代染色体群。对这个新种群进行下一轮进化,直至最适合环境的值,具体步骤如下:

(1) 检查每个染色体(待识别参数),计算其相应的适应性分数(计算目标函数值,按照与迭代容许值偏差大小计算相应的适应性分数)。

(2) 赋予不同适应性分数的选择概率,通常适应性分数越高,选择概率也就越高。从而选择出适应性高的成员(也就是较接近目标函数的待识别参数值)。常用的概率方法有轮盘赌选择法和赌轮选择法。

(3) 按照预先设定的杂交率,从每个选中的两个二进制染色体的一个随机的点上进行杂交(即两个二进制相对应点位进行交换)。

(4) 按照预定的变异率,把被选染色体的某个位置上的二进制位实行翻转(即 0 变为 1,1 变为 0)。

(5) 重复步骤(2),(3),(4),直到每个成员的新群体被创建出来。

3 工程应用

3.1 荷载试验结果

依托一座 4×30 m 先简支后连续预应力混凝土箱梁桥的荷载试验,试验选择第 1 跨、第 2 跨进行加载,采用 4 辆 40 t 双后轴的三轴车进行加载,加载方案为:

工况一:边跨最大正弯矩加载(偏载),工况二:中跨最大正弯矩加载(偏载),加载方案及挠度布置见图 1~图 5。

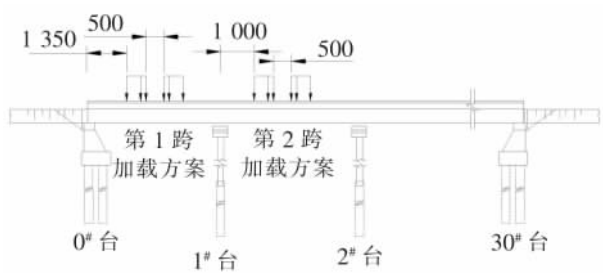


图 1 加载车纵向布置(单位:cm)

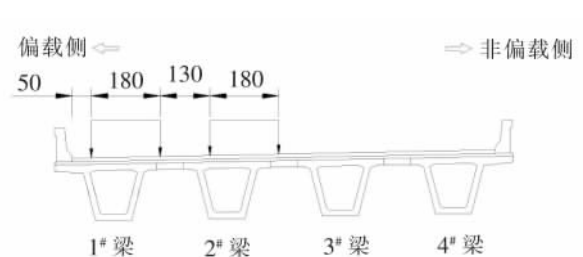


图 2 加载车横向布置(单位:cm)

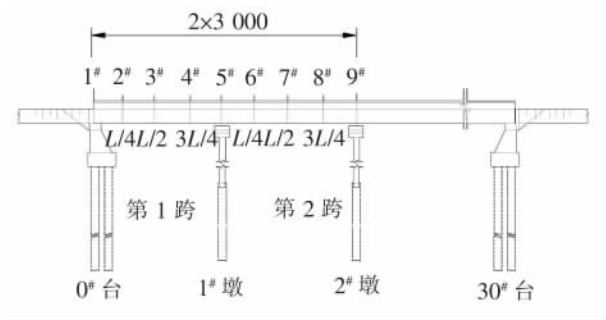
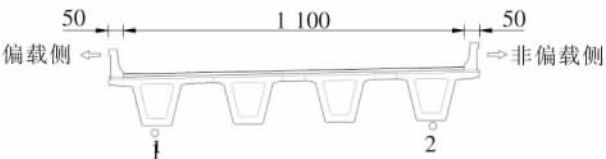
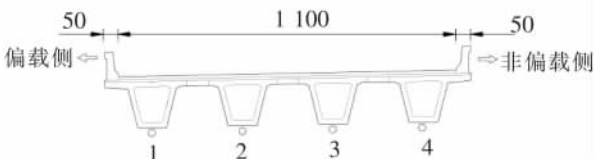


图 3 挠度测试断面布置图(单位:cm)



注:图中“o”表示挠度测点布置。

图 4 1#、2#、4#、5#、6#、8#、9# 断面
挠度测点布置图(单位:cm)



注:图中“o”表示挠度测点布置。

图 5 3#、7# 断面挠度测点布置图(单位:cm)

在工况一和工况二作用下实测挠度与理论挠度对比见表 1~表 3。

表 1 不同工况下 1# 梁挠度测试结果表 mm

测试断面	工况一			工况二		
	实测值	计算值	校验系数	实测值	计算值	校验系数
0# 台	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
L/4	-3.94	-7.19	0.55	0.79	2.22	0.36
L/2	-5.95	-10.2	0.58	1.33	3.66	0.36
3L/4	-3.53	-6.48	0.54	1.03	3.24	0.32
1# 墩	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
L/4	0.92	3.43	0.27	-3.12	-5.41	0.58
L/2	1.12	3.55	0.32	-4.8	-7.74	0.62
3L/4	0.49	1.88	0.26	-2.77	-4.79	0.58
2# 墩	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 2 工况一第 1 跨跨中横向各点挠度测试结果 mm

梁号	实测值	计算值	实测横向分布系数	理论横向分布系数
1# 梁	-5.95	-10.2	0.66	0.6
2# 梁	-5.45	-9.05	0.61	0.54
3# 梁	-4.03	-7.87	0.45	0.47
4# 梁	-2.57	-6.66	0.29	0.39

表 3 工况二第 2 跨跨中横向各点挠度测试结果 mm

梁号	实测值	计算值	实测横向分布系数	理论横向分布系数
1# 梁	-4.8	-7.74	0.68	0.6
2# 梁	-4.24	-6.87	0.6	0.54
3# 梁	-3.2	-5.97	0.45	0.47
4# 梁	-1.87	-5.05	0.27	0.39

3.2 优化计算

选择两个工况下第 1 跨及第 2 跨 1# 梁所有挠度测试结果作为已知位移,采用实际车辆总重按照实测横向分布系数(取两个工况平均值 0.67)计算分配至 1# 梁的荷载值,构造位移向量和荷载向量,选择各单

元刚度作为待识别参数。根据上述有限元模型修正技术构建目标函数,采用 Matlab 编写相应的函数表达式。

由于目标函数为实测值与计算值的误差,存在正误差和负误差,无法进行最小值计算,因此选择目标函数向量的模作为适应函数,这样便可利用遗传算法求解最小值问题。

利用 Matlab 优化工具箱中的 GA(遗传算法),识别参数的上下界取 $0.4B \sim 2.8B$, B 为截面的抗弯刚度计算值。种群规模取 100,选择模型为轮盘赌,交叉概率 0.8,变异概率 0.03。经过 50 代种群循环,基本趋于稳定,计算的挠度差的模为 0.000 9 mm,相应的挠度误差为 0.36 mm,能够满足工程应用。

3.3 遗传算法与 L-M 方法计算结果比较

L-M 算法(Levenberg-Marquardt),是基于迭代计算解决非线性最小二乘最常用的方法。首先设定参数的初始值,计算迭代步长,然后将初始值加上迭代步长,代入目标函数,如果不收敛,则继续计算迭代步长,对参数进行修正,直至最终目标函数收敛。L-M 算法的关键在于迭代步长的确定,其计算公式如下^[8]

$$d_k = -(J_k^T J_k + \mu_k I)^{-1} + J_k^T F_k \quad (6)$$

式中, d_k 为迭代步长也称为迭代因子; F_k 为目标函数, J_k 为目标函数的梯度,即: $J(x) = F'(x) = (\nabla F_1(x), \dots, \nabla F_m(x))^T$; μ_k 为阻尼因子,其计算方法如下

$$\mu_{k+1} = \begin{cases} 0.1\mu_k, & \text{当 } \eta_k > 0.75; \\ \mu_k, & \text{当 } 0.25 \leq \eta_k \leq 0.75; \\ 10\mu_k, & \text{当 } \eta_k < 0.25. \end{cases} \quad (7)$$

$$\eta_k = \frac{\Delta f(d_k)}{\Delta q(d_k)} = \frac{f(x_{k+1}) - f(x_k)}{(J_k^T F_k)^T d_k + \frac{1}{2} d_k^T (J_k^T J_k) d_k} \quad (8)$$

同样,以工况一和工况二各测点挠度差值组成位移残差向量,取该向量的模作为目标值,各单元的抗弯刚度作为待识别参数,采用 L-M 进行优化,将各单元抗弯刚度理论计算值作为参数初值,同时设置 μ 的初值为 0.001(求解非线性最小二乘问题, μ 应取得小些),当循环次数达到 20 次以上时,已基本收敛。计算的挠度最大误差为 0.3 mm,与遗传算法计算结果较为接近。二者的计算结果进行对比见图 6~图 7。

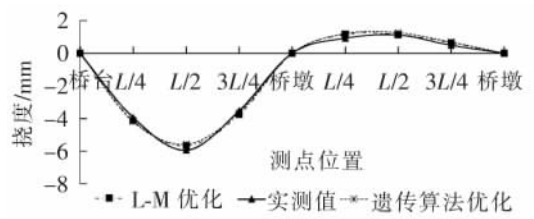


图 6 工况一优化后的挠度对比(单位:mm)

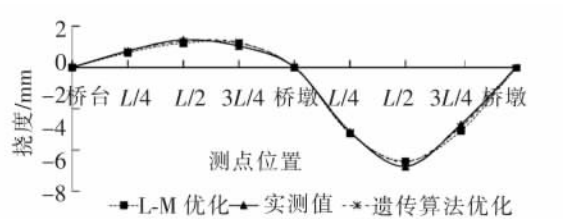


图 7 工况二优化后的挠度对比(单位:mm)

从图可以看出,采用遗传算法与 L-M 算法最终的计算结果基本一致,二者优化后的挠度与实测值误差均在 0.3 mm 左右。

两种方法识别出的各单元实际刚度与理论刚度比见图 8,限于荷载试验及测点布置在第 1 跨和第 2 跨范围内,因此也就仅能识别出这两跨测试范围内的单元实际刚度,即图 8 中的矩形框内的单元刚度。总体来看,两种方法识别的单元刚度趋势基本一致,即在距 0# 台 30 m 附近(1# 墩墩顶附近),桥梁结构的实际刚度最低,该部位为装配式桥梁的湿接头位置,混凝土浇筑质量低于预制梁的浇筑质量。

3.4 刚度识别结果分析

从上述计算结果可知,除了墩顶附近刚度为 $0.5B$ 左右,矩形框内其余部位的刚度在 $1.5B \sim 2.7B$ 之间。通过工况一的挠度校验系数即实测值与理论值的比值分析,第 1 跨在 $0.55 \sim 0.58$ 之间,而第 2 跨则在 $0.26 \sim 0.32$ 之间。假定结构实际刚度均匀分布,引起实测值与理论值偏差的因素仅为材料弹模,则实际刚度与理论计算刚度的比值为 $1/0.55 \sim 1/0.58$ 即 $1.82 \sim 1.72$ 之间;其次,在同一荷载工况下,两跨的校

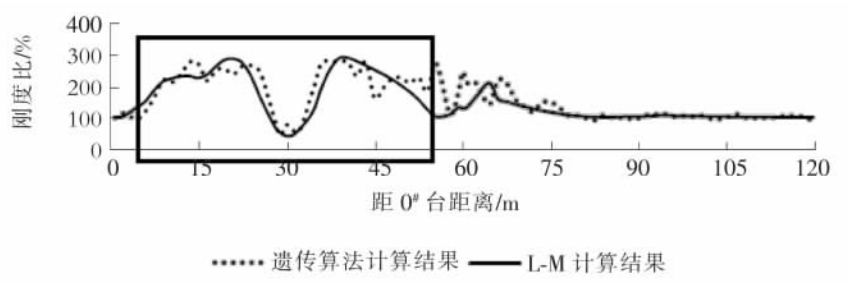


图 8 两种方法识别刚度对比

验系数应该基本接近,实际上第 2 跨的校验系数明显小于第 1 跨校验系数。从实测挠度曲线图看,在墩顶附近挠度曲线并不平顺,说明了墩顶附近截面刚度可能存在突变。

识别出的实际刚度是考虑到刚度不均匀分布,除去墩顶部位,其余位置的实际刚度平均为 $2.1B$ 左右,如果考虑墩顶刚度薄弱部位刚度,与均匀刚度假定下的比值基本是较为接近的,同样墩顶附近刚度薄弱与挠度曲线图中拐点位置也是相符的。总体而言,识别的刚度结果基本符合桥梁结构的实际情况。

3.5 遗传算法与 L-M 方法计算特点

(1)两种算法都需要进行有限元计算,L-M 算法调用有限元计算次数要少些。

(2)遗传算法属于有约束优化,L-M 算法为无约束优化。遗传算法需要设置参数的上下界限,而不需设置参数初始值;而 L-M 算法不需设置上下界限,但需要设置参数的初始值。

(3)遗传算法是通过大量种群依照生物进化方法进行计算,L-M 算法则依据经典的非线性最小二乘法。遗传算法不需要进行灵敏度计算,而 L-M 算法则需要进行灵敏度计算,即在计算迭代步长 d_k 时,需要首先计算目标函数的梯度 J_k ,本文采用有限差分法计算 J_k ,并将计算结果存储为梯度矩阵在迭代中调用。相比遗传算法,L-M 优化算法编写较为复杂些。当目标函数为非连续函数,无法进行灵敏度计算时,也就无法采用 L-M 算法,但仍可采用遗传算法,因此,遗传算法应用范围要广些,对目标函数要求不高。

(4)遗传算法迭代计算耗时较长,而 L-M 算法耗时较短。以笔者所用电脑为例,本文中遗传算法计算时间约为 3 min,采用 L-M 算法所需时间不到 1 min。随着计算机性能的提升,两种算法耗时差别也将缩小。

4 结语

本文系统阐述了遗传算法的原理,并将其应用在桥梁结构有限元模型修正中,通过与 L-M 算法的比较,两种方法优化结果基本一致,均能满足实际的工程应用。系统总结出了两种方法的计算特点,实际应用中可根据问题的特点,选择合理的优化算法。

本文仅围绕有限元模型修正技术进行了深入阐述,如何将识别的实际刚度与结构开裂、预应力损失等桥梁检测结果之间建立相关关系,更好地为桥梁检测服务,仍需要进一步大量深入地研究。

参 考 文 献

- [1]李义强,张彦兵,王新敏.基于参数识别的钢筋混凝土简支梁桥静力模型修正技术[J].石家庄铁道大学学报,2006,19(3):48-51.
- [2]张晓刚.钢筋混凝土简支箱梁桥承载能力评定分析[J].山西交通科技,2016,240(3):55-58.
- [3]李敏强.遗传算法的基本理论与应用[M].北京:科学出版社,2002.
- [4]宗周红,任伟新.桥梁有限元模型修正和模型确认[M].北京:人民交通出版社,2012.
- [5]邓苗毅,任伟新.基于静力荷载试验的连续箱梁桥结构有限元模型修正[J].福州大学学报:自然科学版,2009,37(2):261-266.
- [6]赵世英,李延强.基于粒子群优化支持向量机的斜拉桥主梁损伤识别研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(1):17-21.

- [7] 彭沉彬,李延强.斜拉桥主梁损伤对车激索力响应的影响研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(4):11-15.
[8] 薛毅.最优化原理与方法[M].北京:北京工业大学出版社,2001.

Application of Genetic Algorithm in Bridge Finite Element Model Updating

Xie Hailong

(Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Genetic algorithm is a kind of optimization algorithm simulating natural selection and genetic mechanism, which has been widely used in aspects such as automatic control and image processing, etc. This paper applies the genetic algorithm to bridge finite element model, and compare it with L-M algorithm optimization. The optimization results of the two algorithms are basically identical. This paper also summarizes the advantages and disadvantages of the genetic algorithm and the L-M algorithm in the bridge finite element model.

Key words: genetic algorithm; bridge load test; the finite element model updating; optimization

~~~~~  
(上接第 26 页)

## Analysis of Influence of Concrete-filled Length on Mechanical Property of Partially Concrete-filled Steel Truss Girder Bridge

Liu Deyun, Li Yanqiang

(Department of Engineering Mechanics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** As a new form of bridge structure, partially concrete-filled steel truss structure is used in composite large span steel truss girder bridge. In this paper, taking the partially concrete-filled steel truss girder bridge across Haihe river in Tianjin for instance, the large finite element software ANSYS is used to establish the model of steel truss girder bridge. The concrete-filled coefficient is defined as the ratio of concrete-filled length to mid-span length. The influence of concrete-filled coefficient on the displacement, stress and dynamic characteristics of steel truss bridge are systematically analyzed. The results show that partially filled concrete can reduce the vertical displacement of steel truss bridge and the stress of bottom chord, and increase the stiffness and carrying capacity of the steel truss girders. The influences of concrete-filled coefficient on the displacement, stress and dynamic characteristics are different, therefore the concrete-filled length should be chosen with comprehensive considerations in the design of the bridge.

**Key words:** partially filled concrete; steel truss girder; mechanical characteristic; the concrete-filled length