

基于改进遗传算法的斜拉桥运营期可靠度评估

李湘霞

(湖南省怀化市麻阳苗族自治县交通运输局, 湖南 怀化 419400)

摘要: 为研究复杂结构的可靠度计算方法,以某大跨度斜拉桥为工程背景,对传统遗传算法的种群生成、交叉、变异等操作进行改进,引入自适应调整策略,并以索力为变量构造计算斜拉桥可靠度的功能函数,采用改进遗传算法计算该桥的可靠度。结果表明,改进遗传算法能克服传统遗传算法在全局寻优能力上的不足,具有更好的全局适应度;相比传统遗传算法、蒙特卡罗法和一次二阶矩法,其可靠度计算结果更精确,收敛速度更快。

关键词: 桥梁;斜拉桥;可靠度;运营期;改进遗传算法

中图分类号:U441.4

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)02-0089-04

在桥梁服役过程中,由荷载、环境等因素变化造成的桥梁耐久性降低已成为桥梁运营阶段的突出问题,对在役桥梁开展可靠度评估,为桥梁运维养护提供科学决策依据具有重要意义^[1]。陈治邦等对斜拉桥拉索腐蚀损伤导致的抗力退化对可靠度的影响进行分析,提出了斜拉索损伤的概率传递模型,分析了拉索锈蚀疲劳对斜拉桥体系可靠度的影响^[2]。金聪鹤等提出一种服从平稳随机过程的关联荷载既有桥梁时变可靠度评估方法,并在某钢筋混凝土桥梁上进行了验证^[3]。李际贵使用聚类分析法对某连续刚构桥局部位置的监测数据进行时间段划分,分析各时段荷载效应对应的统计特征并将其应用于桥梁局部时变可靠度分析,取得了较好的效果^[4]。黄海新等使用贝叶斯动态更新技术,提出了基于微分等价递归算法的桥梁体系碳化耐久性动态评估模型并开发了可靠度评估程序^[5]。叶新一等基于结构时变可靠度的基本理论,使用泰勒级数展开将可靠度计算由传统的积分运算转化为代数运算,并通过实例验证了该方法的优越性和有效性^[6]。桥梁可靠度评估具有不确定性、随机性等特点,且桥梁结构越复杂、超静定次数越多,可靠性评估难度越大。本文以某斜拉桥为研究对象,对传统遗传算法进行改进并将其应用于斜拉桥运营阶段可靠度评估,验证该方法的适用性。

1 可靠度理论及遗传算法改进

1.1 可靠度理论及可靠度指标

可靠度是对结构可靠性的定量描述,是一种基

于概率论和概率统计的概率度量,在桥梁结构中一般采用极限状态对其服役状态的可靠性进行判定,包括承载能力极限状态和正常使用极限状态^[7-8]。表达式如下:

$$Z = g(X) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

式中: Z 为功能函数; $g(X)$ 表示当 $Z > 0$ 的函数; X_1, X_2, \dots, X_n 表示任意一组随机变量。

计入抗力、荷载效应时,式(1)可以改写为式(2)。式(2)为零时,结构达到极限状态,结构的极限状态方程见式(3)。

$$Z = g(R, S) \quad (2)$$

$$Z = g(R, S) = R - S = 0 \quad (3)$$

式中: R 表示结构抗力; S 表示荷载效应。

极限状态方程 < 0 时,结构失效。定义结构失效概率为 P_f ,可靠度用 P_r 表示,表达式如下:

$$P_f = P(Z < 0) = \iiint_{Z < 0} \dots \int f_x(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (4)$$

$$P_r = P(Z > 0) = \iiint_{Z > 0} \dots \int f_x(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (5)$$

式中: $f_x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为随机变量组 (x_1, x_2, \dots, x_n) 的联合概率密度函数。

由于联合概率密度函数极难求解,直接通过式(4)、式(5)计算结构的可靠度难度极大,根据现有研究成果,引入可靠度指标 β 。假定功能函数 Z 为正态分布, μ_Z 为功能函数的均值, σ_Z 为功能函数的方差,则可靠度指标 β 为^[9]:

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \quad (6)$$

根据式(1),可得:

$$\mu_Z = g(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}) \quad (7)$$

方差为:

$$\sigma_Z = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{\mu} \cdot \sigma_{x_i}^2 \right)^{1/2} \quad (8)$$

可靠度指标 β 为:

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{g(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n})}{\left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{\mu} \cdot \sigma_{x_i}^2 \right) \right)^{1/2}} \quad (9)$$

式(9)的几何意义可描述为:在可靠域内存在一点,它到极限方程形成的边界距离最小,其对应的 β 值即为最小可靠度。 β 值越小,结构可靠度越低。考虑到实际工程中往往以结构最小可靠度作为评估桥梁工作状态的重要依据,将可靠度求解转化为求解微分方程的极值问题。目前常用的极值问题求解方法有一次二阶矩法、JC 法、二次二阶矩法、蒙特卡罗法等^[10],将以上计算方法与遗传算法合理结合可极大减轻计算工作量,提高计算效率。

1.2 改进遗传算法

遗传算法一般分为编码、形成初始种群、构造适应度函数、选择、交叉、变异等步骤,由于传统遗传算法在以上步骤中不能实现自适应调整,容易陷入局部最优、运行不收敛等问题,对其进行改进。

传统编码手段主要为二进制编码和实数编码。为提高随机变量的适应度,改善种群的不良基因,同时兼顾种群的多样性,消除自然对数对随机变量的影响,提高变量的随机性和适应性,对二进制编码方式进行改进。对于某随机变量 x ,令其分别产生呈正态分布、对数正态分布、极值 I 型分布的随机变量,其中呈正态分布的随机变量为:

$$x_i = \mu_i + a\gamma_1\sigma_i\sqrt{-2\ln\gamma_2}\sin(2\pi\gamma_3) \quad (10)$$

式中: γ_i 为 $[0,1]$ 上相互独立的均匀分布随机数。

呈对数正态分布的随机变量为:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sigma_{\ln x} = \sqrt{\ln(1+\mu_x^2)} \\ \mu_y &= \ln\mu_x - 1/2\sigma_{\ln x}^2 = \ln \frac{\mu_x}{\sqrt{\ln(1+\mu_x^2)}} \\ y_i &= \mu_y + a\gamma_1\sigma_y\sqrt{-2\ln\gamma_2}\sin(2\pi\gamma_3) \\ x_i &= e^{y_i} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: a 为变量自适应参数,可根据失效概率进行调整。

呈极值 I 型分布的随机变量为:

$$x_i = \mu_i - 0.5\sigma_i - 0.7797a\gamma_1\sigma_i\ln(-\ln\gamma_2) \quad (12)$$

同时构建自适应调整函数对遗传算法的交叉和变异进行改进,公式如下:

$$P_c = \begin{cases} \frac{P_{c1}(f_{\text{avg}} - f') + P_{c2}(f' - f_{\min})}{f_{\text{avg}} - f_{\min}}, & f' \leq f_{\text{avg}} \\ \frac{P_{c2}(f_{\max} - f') + P_{c3}(f' - f_{\text{avg}})}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f' > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (13)$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{P_{m1}(f_{\text{avg}} - f') + P_{m2}(f' - f_{\min})}{f_{\text{avg}} - f_{\min}}, & f' \leq f_{\text{avg}} \\ \frac{P_{m2}(f_{\max} - f') + P_{m3}(f' - f_{\text{avg}})}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f' > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: P_c 、 P_m 分别表示交叉、变异的概率值; P_{c1} 、 P_{c2} 、 P_{c3} 和 P_{m1} 、 P_{m2} 、 P_{m3} 分别表示在 $(0,1)$ 范围内给定的交叉、变异概率; f_{\max} 、 f_{\min} 、 f_{avg} 分别表示种群的最大适应度、最小适应度、平均适应度; f' 表示种群中交叉的 2 个个体中较大的适应度值。

通过对遗传算法进行以上改进,改善种群中优秀个体筛选不全、局部最优、收敛速度慢的问题。

1.3 算法性能测试

为确定改进遗传算法的正确性,取文献[11]中的算例对其进行验证。功能函数为:

$$Z = 0.567X_1X_2 - 0.0005X_3^2$$

式中: $X_1 \sim N(0.6, 0.0786)$, $X_2 \sim N(2.18, 0.0654)$, $X_3 \sim LN(32.8, 0.984)$ 。

分别使用改进遗传算法和传统遗传算法计算可靠度,表 1 为采用式(10)~(12)生成的随机变量,表 2 为可靠度计算结果。

表 1 随机变量

变量类型	分布类型	均值	标准差
X_1	正态分布	0.60	0.131
X_2	正态分布	2.18	0.030
X_3	对数正态分布	32.8	0.030

表 2 可靠度计算结果

计算方法	可靠度指标 β		
	X_1	X_2	X_3
传统遗传算法	1.642 2	0.456 1	31.265 1
改进遗传算法	1.647 8	0.455 8	31.268 7

由表 2 可知:在同一功能函数下,采用改进遗传算法与传统遗传算法计算的可靠度指标基本一致,

改进遗传算法的计算精度达到 1‰级别,算法正确,可用于斜拉桥可靠度评估。

2 工程概况

以湖南南益(南县—益阳)高速公路南洞庭湖大桥为工程背景,运用上述基于改进遗传算法的桥梁可靠度评估方法对其可靠度进行评估。该桥主桥跨径为(181.9+450.0+181.9) m,为双塔三跨双索面半漂浮体系斜拉桥,设计荷载为公路-I 级。主梁标准断面为正交异性扁平钢箱梁,箱梁顶板厚度为 18 mm,顶板厚度为 14 cm。顶板设置 U 形加劲肋,肋板高 280 mm、厚 8 mm、间距 600 mm。采用花瓶形混凝土桥塔,混凝土设计标号为 C55。全桥共有 136 根斜拉索,均采用抗拉强度为 1 770 MPa 的高强平行预应力钢绞线。

3 可靠度计算结果

对于运营阶段的钢箱梁斜拉桥,其主要失效指标应考虑斜拉索失效,故从斜拉索索力限值的角度构造功能函数。根据规范要求,取正常使用极限状态下斜拉索最大索力构造以下功能函数:

$$Z = f_{\max} - \sum_{i=1}^n f(x)$$
 (15)

式中: f_{\max} 为斜拉桥运营阶段正常使用极限状态下索力限值; $f(x)$ 为随机变量对应的各节段最大索力值。

在不考虑环境因素的情况下,影响索力的主要因素包括斜拉索面积、斜拉索弹性模量、钢箱梁节段质量等。以上述 3 个参数作为不确定变量,不确定范围按照±10σ 选取。算法参数设置见表 3。

表 3 算法参数设置

参数	设置结果	说明
编码方式	二进制	采用本文中改进方式生成各随机变量后编码
种群样本/个	500	以索力作为种群样本参数
选择	轮盘赌+精英保留策略	—
交叉	0.90,0.60,0.25	采用本文中改进自适应交叉方法
变异	0.10,0.01,0.05	采用本文中改进自适应变异方法
迭代次数/次	1 000	—

采用上述改进遗传算法进行计算。为验证改进遗传算法的优越性,使用传统遗传算法进行对比,两种算法的进化过程对比见图 1。由图 1 可知:在进化前期,改进遗传算法具有更快的收敛速度。进行到进化中期时,由于需要兼顾全局寻优,改进遗传算法的计算速度有所下降;传统遗传算法的计算速度更快。种群样本满足最佳寻优条件时,改进遗传算法的计算速度加快,在 750 次迭代时达到最佳适应度值 0.22;传统遗传算法在进化过程中陷入局部最优,在 500 次迭代时结束进化,此时适应度值为 0.43。相比传统遗传算法,改进遗传算法更能兼顾种群的多样性,跳出局部最优的能力更强,计算精确度更高,种群的适应度更好。

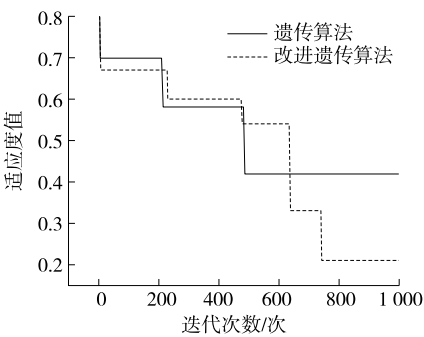


图 1 两种遗传算法进化过程对比

采用改进遗传算法计算该桥的可靠度,同时选取传统遗传算法、蒙特卡罗法、一次二阶矩法进行对比,结果见表 4。由表 4 可知:传统遗传算法由于存在“局部优解”问题,计算代数最少,计算所得可靠度指标比其他 3 种方法高;蒙特卡罗法和一次二阶矩法的可靠度指标计算结果较接近,其中一次二阶矩法的迭代次数较少;改进遗传算法不仅具有更快的计算速度,迭代次数较少,而且由于种群具有更好的适应度,计算结果更准确。

表 4 南洞庭湖大桥可靠度指标计算结果对比

计算方法	可靠度指标 β	迭代次数/次
改进遗传算法	3.985 6	750
传统遗传算法	5.112 3	500
蒙特卡罗法	4.169 2	1 100
一次二阶矩法	4.111 5	980

4 结论

本文以某斜拉桥为工程背景,通过引入自适应

调整的编码、交叉、变异手段对传统遗传算法进行改进,计算该桥的可靠度指标。结论如下:

(1) 传统遗传算法存在种群多样性不足、无法自适应调整等问题,在进行复杂结构可靠度计算时容易早熟、局部最优,通过在种群生成、交叉、变异等环节引入自适应调整机制的优秀基因保留策略,可以兼顾种群的多样性和全局最优。

(2) 改进遗传算法具有更好的适应度和全局寻优能力,相比常用的可靠度计算方法,其收敛速度更快,可靠度计算结果更准确。

参考文献:

- [1] 叶新颖.基于三阶矩法的桥梁结构时变可靠度分析[D].广州:广州大学,2022.
- [2] 陈治邦,鲁乃唯.斜拉索腐蚀损伤下斜拉桥体系可靠度研究[J].公路工程,2020,45(1):6-11.
- [3] 金聪鹤,钱永久,徐望喜,等.考虑关联荷载验证时变抗力的桥梁结构可靠度评估方法[J].振动与冲击,2021,40(15):146-155.

- [4] 李际贵.基于长期监测数据的桥梁局部时变可靠度分析[J].科学技术与工程,2021,21(31):13529-13535.
- [5] 黄海新,孙文豪,李环宇,等.基于微分等价递归算法的桥梁体系耐久性可靠度动态评估[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(6):80-88.
- [6] 叶新一,王草,李全旺.桥梁结构时变可靠度计算的新方法[J].工程力学,2018,35(11):86-91.
- [7] 唐翠兰,帅一师,雷顺成,等.基于 RBF 神经网络的随机结构动力可靠度分析[J].湖南交通科技,2021,47(4):108-112.
- [8] 张鹏,梁斌.小样本下基于代理模型隧道锚喷衬砌稳定可靠度求解[J].湖南交通科技,2017,43(2):261-265.
- [9] 郭洪超.基于支持向量机的宽幅大跨径斜拉桥可靠度分析[D].西安:长安大学,2019.
- [10] 胡超雄.考虑耐久性的斜拉桥钢主梁目标可靠指标的合理取值研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.
- [11] 桂劲松,康海贵.结构可靠度分析的全局响应面法研究[J].建筑结构学报,2004,25(4):100-105.

收稿日期:2022-11-16

(上接第 88 页)

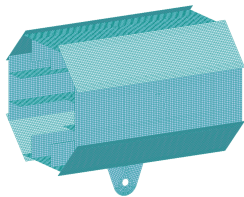


图 14 吊杆拱端锚固位置有限元模型

较小,不大于 100.0 MPa,最大应力出现在拱肋底板与横隔板相交位置及底板两道纵向加劲肋处,为 96.2 MPa,其他纵向加劲肋、拱肋顶板及腹板的应力均不大于 10.0 MPa。锚固位置拱肋横隔板为主要传力结构,板厚 20 mm,最大应力为 226.0 MPa,出现在拱肋底板纵向加劲肋及吊耳耳板过焊孔位置;横隔板应力整体分布情况是底部大于顶部,底部区域应力一般不大于 100.0 MPa,顶部区域应力一般不大于 40.0 MPa。

在施工图设计过程中,还对钢箱梁横隔板应力、吊杆应力、全桥变形、全桥抗震性能等进行了验算,均满足规范要求。限于篇幅,不再赘述。

5 结论

(1) 钢结构应用于景观要求较高的异形结构桥梁的技术成熟、可行,是解决空间异形、局部受力复

杂及施工工期短的不二选择。

(2) 在复杂结构体系中采用钢结构的桥梁应尽量避免钢结构特别是桥面构件产生局部应力集中而形成薄弱点导致疲劳损坏,设计计算时建议尽量考虑钢结构受力的合理性和相同构件的受力均匀性。

(3) 宽高比较大的钢箱梁受剪力滞的影响较大,设计中应充分考虑剪力滞对钢箱梁的影响。

参考文献:

- [1] 戴建国.城市景观桥梁设计中的彰显与融合[J].城市建筑,2021,18(35):192-195.
- [2] 励晓峰,包龙生.溧阳景詹沙河大桥空间异形钢拱桥设计[J].桥梁建设,2023,53(3):102-107.
- [3] 刘宇.基于 GSL&PS-PGSA 的钢拱架结构设计优化研究[J].公路与汽运,2021(3):110-113+118.
- [4] 吴用贤.空间三角钢拱桥关键节点设计[J].上海公路,2016(1):22-26.
- [5] 中交公路规划设计院有限公司.公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [6] 胡元峰.简析桥梁钢结构的疲劳设计原则与策略[J].科技创业月刊,2016,29(23):159-160.

收稿日期:2022-12-28