

基于自适应遗传算法的钢筋混凝土桥墩抗震设计方法

卢明奇 曾风波

(北京交通大学, 北京 100044)

摘要: 为满足钢筋混凝土桥墩抗震设计中构件承载力和延性的要求, 常需依靠设计者经验, 对配筋方案进行反复调整, 这就在一定程度上增加了结构设计难度, 降低了工作效率。为解决这一实际问题, 对传统自适应遗传算法中交叉率和变异率的计算方法进行改进, 通过当前适应度值动态调整交叉率和变异率, 在此基础上提出基于自适应遗传算法的钢筋混凝土桥墩结构抗震设计方法, 实现对符合条件设计解的自动随机定向搜索, 提高求解的收敛速度, 并增强算法的鲁棒性。在对每一配筋方案的抗弯承载力和位移延性系数的计算中, 又提出基于自适应遗传算法的钢筋混凝土桥墩弯矩-曲率关系的计算方法, 提高求解效率。通过设计算例, 可见该方法快速有效, 计算过程无需人工干预, 实现钢筋混凝土桥墩结构抗震设计的人工智能化。

关键词: 桥墩; 自适应遗传算法; 位移延性; 交叉; 变异

中图分类号: U442.5⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2020)07-0073-05

Seismic design method for reinforcement concrete piers based on adaptive genetic algorithm

Lu Mingqi Zeng Fengbo

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To meet the strength and ductility demands of members in the seismic design of RC piers, reinforcement schemes are often modified by means of the experiences of designers, which will increase the difficulty of structures design and reduce the work efficiency. To solve this problem, the calculation method of the crossover and mutation rate in the general adaptive genetic algorithm was improved. The crossover and mutation rate was adjusted dynamically as the values of the fitness and the seismic design method for reinforcement concrete piers based on the adaptive genetic algorithm was proposed. Auto random orientation search was realized to get the solutions that match the design conditions. The method will be helpful to generate the new population modes. It can also prevent the calculation from local convergence in searching solutions and improve the robustness of the algorithm. In calculation on the flexural capacity and displacement ductility coefficient of each population individual, the method of moment-curvature relationship of RC piers based on the adaptive genetic algorithm was proposed to improve the solution efficiency. From the design examples, it can be seen that the method in the paper is fast and effective. The manual intervention is not needed in the calculation and artificial intelligence on the seismic design of RC piers can be realized.

Keywords: pier; adaptive genetic algorithm; displacement ductility; crossover; mutation

E-mail: mqlu@bjtu.edu.cn

引 言

钢筋混凝土桥墩除需满足承载力要求外, 还应

具备良好的延性, 以避免结构在强烈地震作用下发生倒塌^[1]。因此在抗震设计中, 延性应与承载力并重, 共同成为设计的控制性指标。目前, 国内外学者已对基于延性的抗震设计方法开展了一系列研究工作^[2-6], 所提出的设计步骤为: 首先根据桥梁在使用阶段所受荷载和常遇地震作用, 设计得到构件的截面和配筋, 然后再进行罕遇地震阶段的延性指标验算, 如果不能满足延性要求, 则需调整截面配筋, 重新计算。配筋方案的调整往往依靠设计者的经验,

基金项目: 国家自然科学基金(51978046)、国家自然科学基金广东联合基金(U1801254)

作者简介: 卢明奇, 博士, 副教授

收稿日期: 2019-12-26

并要经过多次试算才能得到设计解，这将大大降低设计效率。针对这一问题，本文提出了基于自适应遗传算法的钢筋混凝土桥墩结构抗震设计方法，可快速得到合适的配筋方案，自动实现了钢筋混凝土桥墩结构的抗震设计。

1 交叉率和变异率自适应调整方式的改进

在遗传算法中，交叉、变异算子负责产生新的种群个体，进而引导搜索方向，以提高种群的适应性，因此，交叉率和变异率的取值是影响遗传算法行为和性能的关键所在。标准遗传算法(SGA)采用固定的交叉率和变异率，导致其存在早熟以及收敛速度慢等不足，而且对于某一特定问题，合适的交叉率和变异率无法预知。传统的自适应遗传算法(AGA)在进化初期则常存在停滞现象，进化后期又易于陷入局部收敛，其鲁棒性存在问题。为此，在传统自适应遗传算法基础上，改进了交叉率和变异率的调整方式，在增强其搜索效率的同时，也保证了算法的鲁棒性。

由遗传算法的模式定理^[7-8]可知，具有低阶、短定义距及适应度高于种群平均适应度的模式在子代中呈指数增长。算法初期，模式集中在适应度较低的个体上，若采用较小的交叉率和变异率，种群很难产生出优秀的新个体。算法后期，模式开始朝高适应度的个体集中，若仍采用较大的交叉率和变异率，则容易破坏优良模式。因此，每一代种群所采取的交叉率 P_c 和变异率 P_m 取值，应随适应度值而变化。为此，根据种群的适应度值，本文提出了如下交叉率 P_c 和变异率 P_m 计算公式：

$$P_c = \begin{cases} k_1 + \frac{(k_2 - k_1)}{1 + (2x_1^2 + 1)^{\text{sign}(x_1)}} & f \geq \bar{f} \\ k_1 & f < \bar{f} \end{cases} \quad (1)$$

$$P_m = \begin{cases} k_3 + \frac{(k_4 - k_3)}{1 + (2x_2^2 + 1)^{\text{sign}(x_2)}} & f' \geq \bar{f} \\ k_3 & f' < \bar{f} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $x_1 = A \left(\frac{2f - f_{\max} - \bar{f}}{f_{\max} - \bar{f}} \right)$ ， $x_2 = A \left(\frac{2f' - f_{\max} - \bar{f}}{f_{\max} - \bar{f}} \right)$ ； f 为交叉运算中 2 个体适应度的较大值， f' 为变异运算中个体的适应度， f_{\max} 为种群当前适应度的最大值， \bar{f} 为种群当前适应度的平均值； A 为常数，取 4； k_1 、 k_2 为交叉率的最大值和最小值，分别取 0.8 和 0.6； k_3 、 k_4 为变异率的最大值和最小值，分别取 0.04 和 0.005；

$\text{sign}()$ 为符号函数。

由式(1)和式(2)，算法的交叉率和变异率自适应调整曲线可表示为如图 1 和图 2 所示的函数形式。由图 1 和图 2 可见，相较于标准遗传算法，本文提出的自适应遗传算法中，交叉率和变异率按照个体的适应度在平均适应度和最大适应度之间进行动态调整。当种群中个体的适应度与最大适应度接近时，其交叉率和变异率将降低，即表明算法将尽可能保留当前优秀的种群模式；若个体的适应度低于平均适应度或者与之接近时，此时的交叉率和变异率较高，从而有利于产生新的种群模式。相较于传统的自适应遗传算法，交叉率和变异率的自适应调整曲线在 \bar{f} 处缓慢改变，从而普遍提高适应度接近平均适应度的个体的交叉率和变异率。此方法还能保证算法演化后期的较优个体仍具有一定的交叉率和变异率，从而防止其陷入局部收敛，进而增加了算法的鲁棒性。

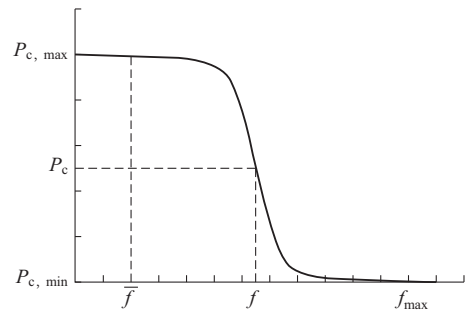


图 1 交叉率自适应调整曲线

Fig. 1 Adaptive adjustment curve of crossover rate

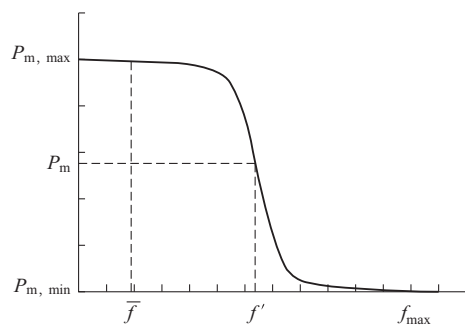


图 2 变异率自适应调整曲线

Fig. 2 Adaptive adjustment curve of mutation rate

2 基于自适应遗传算法的钢筋混凝土桥墩抗震设计方法

在本文的设计方法中，首先根据桥梁在使用阶段所受的荷载和常遇地震作用，选定构件截面，并

由结构内力分析计算相应的抗弯、抗剪承载力需求值 $[M]$ 、 $[V]$ 。根据罕遇地震作用，求得使结构仍保持弹性状态时的抗弯承载力需求值 $[M']$ 。由强度折减系数 R_μ 的定义^[9]，其可表示为：

$$R_\mu = \frac{[M']}{M_u} \quad (3)$$

式中： M_u 为钢筋混凝土桥墩的抗弯承载力，若 $[M'] < M_u$ ，则取 $R_\mu = 1$ 。由强度折减系数 R_μ 和位移延性系数 μ 的定量化关系^[10]：

$$[\mu] = \frac{e^{\beta \ln(R_\mu)} + a - 1}{a} \quad (4)$$

式中：参数 a 、 β 的取值见文献^[10]。在设计中，若已明确给出 $[\mu]$ ，也可直接按设计要求的位移延性系数限值进行后续设计计算。

在基于延性的抗震设计中，要求桥墩的抗弯承载力 M_u 、抗剪承载力 V_u 以及位移延性系数 μ 需同时满足如下 3 个条件：

$$M_u \geq [M] \quad (5)$$

$$V_u \geq [V] \quad (6)$$

$$\mu \geq [\mu] \quad (7)$$

以设计截面处纵筋配筋率 ρ_s 、箍筋体积配箍率 ρ_{sv} 为变量，构造设计变量 $\mathbf{X} = [\rho_s, \rho_{sv}]^T$ ，考虑到桥墩截面的形状。对于圆形桥墩截面， ρ_s 为全截面纵筋配筋率；对于矩形桥墩截面， $\rho_s = [\rho_{sb}, \rho_{sh}]^T$ 。其中， ρ_{sb} 为沿截面宽度方向的单边纵筋配筋率， ρ_{sh} 为沿截面高度方向的单边纵筋配筋率。其他常见截面形式，如环形截面可参照圆形桥墩截面定义 ρ_s ，圆端形截面可参照矩形桥墩截面定义 ρ_s 。

根据本节设计变量，并考虑桥梁类型（如公路或城市桥梁），分别依据相应设计规范^[11-12]中对桥墩纵筋配筋率和配箍率的要求，在适筋范围内采用二进制编码生成一定数量的初始种群，种群中每一个体对应一种配筋设计方案。

针对种群中的每一个体，分别计算其相应配筋方案下的抗弯承载力、抗剪承载力和位移延性系数。以式(5)~(7)作为目标函数，同时满足不等式(5)~(7)的配筋方案，即为设计解。在求解中，对于不能同时满足式(5)~(7)的解，定义种群适应度函数为

$$f = 1 / \min \left\{ \frac{|Y_i - [Y_i]|}{[Y_i]} \right\} \quad (8)$$

其中， Y_i 为 M_u 、 V_u 、 μ 中不满足式(5)~(7)的项， $[Y_i]$ 为相应的设计需求值 $[M]$ 、 $[V]$ 或 $[\mu]$ 。通过选择、交叉、变异操作，生成新一代种群，实现对符合条件设计解的随机定向搜索。当满足目标函数要求时，计算收敛，输出设计解。算法的计算流程如图 3 所示。

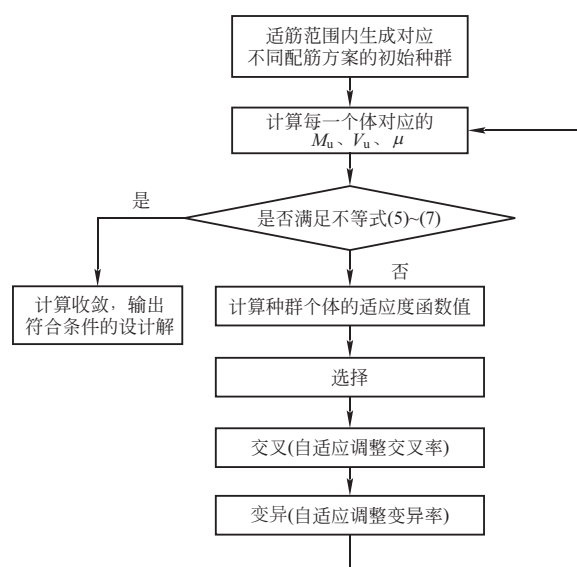


图 3 基于自适应遗传算法的钢筋混凝土桥墩抗震设计方法的计算流程

Fig. 3 Calculation process of seismic design method of RC piers based on adaptive genetic algorithm

3 基于自适应遗传算法的钢筋混凝土桥墩截面弯矩-曲率关系的计算

在第 2 节基于自适应遗传算法的钢筋混凝土桥墩抗震设计方法中，需针对每一个体计算在相应配筋方案下的弯矩-曲率关系，进而求得其抗弯承载力、屈服曲率、极限曲率以及位移延性系数。可采用纤维模型法进行计算，在这一方法中，受弯截面中和轴位置的确定是建立力和弯矩平衡方程的关键。文献^[1, 13]给出了利用纤维模型法计算钢筋混凝土构件截面弯矩-曲率关系的计算方法，该方法通过逐步累加试算以确定中和轴位置。若仅计算某单一截面的弯矩-曲率关系，采用该方法对于求解效率的降低并不明显，但如果将这一方法应用于上述截面选筋设计中，考虑到对每一代种群的每一个体均需计算其截面的弯矩-曲率关系，该方法将极大地降低求解效率，甚至可能造成计算机内存溢出，无法得到最终结果。为此，本文在纤维模型法的基础上，将第 1 节所提出的自适应遗传算法应用于对截面弯矩-曲率关系的求解中，具体方法如下。

(1) 截面曲率由零开始逐步递增至混凝土最外缘纤维达到极限压应变，对于截面曲率的每一步增量，以二进制编码形式生成中和轴位置的初始种群。

(2) 定义 $f = \frac{N_0}{|N - N_0|}$ 作为种群的适应度函数，以

$|N-N_0| \leq \gamma$ 作为种群优化的目标。其中, N_0 为桥墩轴力设计值; 通过纤维模型法计算各纤维应变、应力, 并由轴力平衡方程求得 N ; γ 为计算收敛容差。

(3) 通过选择、交叉、变异算子, 产生新一代种群。其中, 交叉率和变异率仍按照式(1)、式(2)根据适应度函数值进行自适应调整。

(4) 重复步骤(2)和(3), 直到找到符合轴力平衡条件的中和轴位置, 此时纤维累加产生的总弯矩即为给定曲率所对应的弯矩值。

(5) 随着截面曲率的递增, 可得到其截面弯矩-曲率关系, 并可据此求得截面抗弯承载力和位移延性系数。

4 设计算例

算例1: 某城市高架连续梁桥(3×22m), 桥墩采用钢筋混凝土矩形单墩形式, 截面宽度 $b=1.3\text{m}$, 截面高度 $h=2.8\text{m}$, 墩高 $l=11.7\text{m}$, 支座布置方式为顺桥向中间设一固定墩, 桥梁上部结构、盖梁和桥墩质量分别为 1035t、15.1t、112.9t, 固定墩所受支座反力为 3795kN, 混凝土强度等级 C40, 纵筋、箍筋均采用 HRB335 钢筋。该地区设防烈度 7 度(0.15g), 设计地震分组第三组, 场地类别二类, 为乙类桥梁。

采用本文所提出的设计方法, 利用 Matlab 编程, 分别对固定墩沿顺桥向、横桥向进行设计计算。得到的设计结果为 $\rho_{sb}=0.676\%$, $\rho_{sh}=0.406\%$, $\rho_{sv}=1.45\%$, 计算总用时 729s, 求解过程均由程序自动完成, 不需人工干预。按照计算结果进行配筋, 根据文献[12]验算塑性铰区斜截面抗剪强度, 利用 SAP2000 软件截面设计器计算 M_u 和 μ , 所得验算结果如表 1 所示。可见, 无论顺桥向还是横桥向, 均有 $M_u > [M]$, $V_u > [V]$, 说明采用本文方法得到的设计结果可满足钢筋混凝土桥墩对抗弯、抗剪承载力的要求, 同时, 顺桥向和横桥向均有 $\mu > [\mu]$, 这也表明: 在规范规定的罕遇地震作用下, 桥墩能满足其对延性的地震需求。根据文献[14]所建议的弯曲和弯剪破坏 2 种破坏模式的分界线公式可知, 该桥墩在罕遇地震作用下的破坏模式为弯曲破坏。

算例2: 某公路连续梁桥, 采用钢筋混凝土双柱式桥墩, 每一立柱截面为圆形, 直径 $D=1.6\text{m}$, 墩高 $l=7\text{m}$, 中墩设置固定支座, 混凝土强度等级 C30, 纵筋、箍筋均采用 HRB335 钢筋。该地区设防烈度 8 度(0.2g), 区划图上特征周期为 0.35s, 场地类别三类, 为 B 类桥梁, 按顺桥方向进行中墩的抗震设计。

采用所提出的设计方法和 Matlab 程序, 得到的最终设计结果为 $\rho_s=1.17\%$, $\rho_{sv}=1.91\%$, 计算总用时 611s。按照计算结果进行配筋, 根据文献[12]验算塑性铰区斜截面抗剪强度, 同样利用 SAP2000 软件截面设计器计算 M_u 和 μ , 所得验算结果如表 2 所示。可见, 设计结果能保证 $M_u > [M]$, $V_u > [V]$, 说明采用本文方法得到的设计结果可满足钢筋混凝土桥墩对抗弯、抗剪承载力的要求, 同时, $\mu > [\mu]$ 也表明: 在规范规定的罕遇地震作用下, 桥墩能满足其对延性的地震需求。根据文献[14]所建议的弯曲和弯剪破坏 2 种破坏模式的分界线公式可知, 该桥墩在罕遇地震作用下的破坏模式亦为弯曲破坏。

表 1 算例 1 设计结果

Table 1 Design results of example 1

	$[M]$ (kN·m)	M_u (kN·m)	$[V]$ (kN)	V_u (kN)	$[\mu]$	μ
顺桥向	4.24×10^3	7.31×10^3	1.19×10^3	6.93×10^3	2.15	2.51
横桥向	5.81×10^3	1.67×10^4	1.64×10^3	7.58×10^3	1.80	2.23

表 2 算例 2 设计结果

Table 2 Design results of example 2

	$[M]$ (kN·m)	M_u (kN·m)	$[V]$ (kN)	V_u (kN)	$[\mu]$	μ
设计结果	3.78×10^3	4.06×10^3	1.48×10^3	2.80×10^3	3.3	5.50

5 结 论

本文基于遗传算法, 提出了利用计算机自动选择截面配筋以满足钢筋混凝土桥墩结构抗震要求的设计方法。通过对传统自适应遗传算法中交叉率和变异率的调整方式进行改进, 加快了设计解的收敛速度, 增强了算法的鲁棒性。在对截面抗弯承载力和位移延性系数计算中, 提出了基于自适应遗传算法的钢筋混凝土桥墩弯矩-曲率关系计算方法。通过工程算例的检验, 可见所提出的方法快速有效, 计算过程无需人工干预, 可自动完成对钢筋混凝土桥墩结构的抗震设计。

参 考 文 献

- [1] 范立础, 卓卫东. 桥梁延性抗震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001
- [2] Mamaghani I H P. Seismic design and ductility evaluation of thin-walled steel bridge piers of box sections [J]. Transportation Research Record, 2008, 2050 (1): 137-142
- [3] 陆本燕, 刘伯权, 刘鸣, 等. 钢筋混凝土桥墩性能指标

- 量化研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(6): 49-57(Lu Benyan, Liu Boquan, Liu Ming, et al. Quantitative research on reinforced concrete performance index of reinforced concrete bridge column[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(6): 49-57 (in Chinese))
- [4] Xie Haiqing, Li Yadong, Yang Guojing. Simplified method for ductility-based seismic design of railway rectangular hollow pier [C]//Proceedings of the 2010 International Conference of Logistics Engineering and Management. New York: American Society of Civil Engineers, 2010
- [5] 黄峥, 白植舟. 钢筋混凝土主桥墩延性影响因素理论研究[J]. 桥梁建设, 2012, 42(4): 28-33(Huang Zheng, Bai Zhizhou. Theoretical study of factors affecting ductility of RC piers[J]. Bridge Construction, 2012, 42(4): 28-33 (in Chinese))
- [6] 周道传, 董作超, 邵建华, 等. 公路桥梁钢筋混凝土墩柱位移延性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(3): 62-67 (Zhou Daochuan, Dong Zuochao, Shao Jianhua, et al. Study on displacement ductility performance of RC highway bridge columns[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(3): 62-67 (in Chinese))
- [7] 雷英杰, 张善文. Matlab 遗传算法工具箱及应用[M]. 第二版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014
- [8] 韩瑞锋. 遗传算法原理与应用实例[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2010
- [9] Chopra A K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2012
- [10] 赵冠远, 王艳, 安明喆, 等. 基于强度折减系数谱的规则桥梁弹塑性地震反应分析方法[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(2): 48-55(Zhao Guanyuan, Wang Yan, An Ming zhe, et al. Method for the inelastic seismic response analysis of regular bridges based on strength reduction factor spectrum [J]. China Railway Science, 2011, 32(2): 48-55(in Chinese))
- [11] JTG/T B02-01—2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008 (JTG/T B02-01—2008 Guidelines for seismic design of highway bridges [S]. Beijing: China Communications Press, 2008(in Chinese))
- [12] CJJ 166—2011 城市桥梁抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011 (CJJ 166—2011 Code for seismic design of urban bridges[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011(in Chinese))
- [13] 谢旭. 桥梁结构地震响应分析与抗震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006 (Xie Xu. Seismic response and earthquake resistant design of bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2006(in Chinese))
- [14] Cai G C, Sun Y P, Takeuchi T, et al. Proposal of a complete seismic shear strength model for circular concrete columns[J]. Engineering Structures, 2015, 100: 399-409

卢明奇(1978—),男,博士,副教授。主要从事工程结构抗震方面的研究。

曾风波(1996—),男,硕士研究生。主要从事工程结构抗震方面的研究。