

# 基于遗传算法的火灾环境下建筑内 人员安全疏散可靠度计算

汪金辉, 陆守香

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

**[摘要]** 将遗传算法(GAs)引入火灾环境下建筑内人员安全疏散的可靠度分析领域,并初步探讨了这一算法的具体实现过程,遗传算法可以方便地对式子复杂和难以求导的功能函数进行优化计算。算例分析的结果表明,遗传算法不仅可以实现人员安全疏散可靠度计算,而且获得了很高的计算精度,为人员安全疏散可靠度研究提供了新的有效方法和途径。

**[关键词]** 遗传算法;火灾;人员疏散;可靠度

**[中图分类号]** TU2; X94 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)03-0058-04

## 1 引言

在大型公共建筑的性能化防火设计中,保护人员生命安全是最重要的防火目标。由公安部修订的《消防监督检查规定》把火灾后人员逃生放在第一位<sup>[1]</sup>。我国目前的人员安全疏散评估大多应用“ASET-RSET $\geq 0$ ”的疏散准则<sup>[2]</sup>,其中ASET和RSET分别通过火灾动力学模型和人员疏散模型的模拟计算得到。但这一准则难以处理人员疏散过程中的不确定性问题(如人员疏散的时间、火灾增长速率、结构的耐火极限等均为随机变量<sup>[3]</sup>),无法评估人员安全疏散的可靠性。为了能定量评价火灾时建筑内人员疏散安全性,国内外有关研究人员运用可靠概率作为人员疏散的可靠性指标,主要进行了以下研究:文献[4]首次把可靠性指数方法引入人员安全疏散研究领域,并做了基础性工作;文献[3]运用一次二阶矩中心点法(FOSM)对建筑火灾人员安全疏散可靠性进行了评价;文献[5]应用改进的验算点法(AFOSM)对火灾环境下人员安全疏散可靠性进行了研究。但一次二阶矩理论受到诸如极限状态方程必须可导等条件的约束,当极

限状态面的形状和 $n$ 维超平面偏离较大时,上述算法的计算误差将显著增大,而且无法估计误差的界<sup>[6]</sup>。为解决这一问题,笔者运用遗传算法(genetic algorithms,简称GAs)进行优化求解,并给出基本的求解方法。计算结果表明,这一算法能得到足够的计算精度,对火灾环境下人员安全疏散可靠性评估提供了新的思路和技术途径。

## 2 遗传算法的应用原理<sup>[7]</sup>

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搜索算法。它最早由美国密执安大学的J. H. Holland教授提出,起源于20世纪60年代对自然和人工自适应系统的研究。它模拟了生物界“生存竞争,优胜劣汰,适者生存”的机制,用逐次迭代法搜索寻优。GAs操作的是一组可行解,称为种群(population),它通过种群的更新迭代来搜索全局最优解。种群的迭代通过选择(select)、杂交(crossover)和变异(mutation)等具有生物意义的遗传算子来实现。笔者利用遗传算法计算火灾环境下的室内人员安全疏散的可靠性指标,具体步骤如下:

**[收稿日期]** 2004-12-14; **修回日期** 2005-06-13

**[基金项目]** 国家重点基础研究发展计划“九七三”资助项目(2001CB409600)

**[作者简介]** 汪金辉(1981-),男,安徽桐城市人,中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室博士研究生

1) 定编码方案, 一般选择二进制或浮点型对解空间进行编码, 每一串编码称为一个染色体, 其表现形代表解空间的一个可行解。

2) 生成初始群体, 在解空间中随机生成一个初始群体。

3) 定义适应度函数, 并对群体中的每个个体进行适应度计算和评价, 且适应值大的个体有较高的被选概率。

4) 控制参数的选取, 包括种群规模, 算法执行的最大代数, 选择、交叉、变异概率等。

5) 依据个体的适应度, 对群体的个体进行选择、交叉和变异操作, 并生成新一代群体。

6) 确定算法终止规则, 一般预先规定最大演化代数或多少代后适应度函数值变化小于误差控制量, 即终止迭代。

7) 按照以上步骤编程后运行, 即可按照遗传算法的结构程序对问题进行求解。

### 3 遗传算法计算人员安全疏散可靠度的数学模型

参照文献 [4] 的基本思想, 针对人员聚集的大型公共建筑, 给出如下的人员安全疏散的功能函数:

$$G = S - D - R - E \quad (1)$$

其中:  $G$  为安全时间裕量;  $S$  为危险来临时间;  $D$  为探测器探测报警时间;  $R$  为室内人员反应和动作时间;  $E$  为人员疏散时间; 且针对具体的建筑结构和室内人员特征,  $S, D, R, E$  为不同形式的函数关系式, 所包含的变量服从一定类型的概率分布。

当  $G > 0$  时, 系统为安全状态;  $G < 0$  时, 系统处于危险状态;  $G = 0$  为临界状态, 此时即得到系统极限状态面方程为

$$S - D - R - E = 0 \quad (2)$$

先对变量进行标准正态化转化, 假设式 (2) 的完整形式为  $g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ , 若  $x_1, x_2, \dots, x_n$  均为服从正态分布的随机变量, 则转化到标准正态化空间可按照下面公式:

$$u_i = \frac{x_i - m_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \quad (3)$$

其中  $m_{x_i}, \sigma_{x_i}$  分别为变量  $x_i$  的均值和标准差。如果各个随机变量服从的是一般分布, 可以进行高斯变换, 将一般分布当量成正态分布。具体可参见文献 [8], 极限状态面方程为

$$g(u_1\sigma_{x_1} + m_{x_1}, u_2\sigma_{x_2} + m_{x_2}, \dots, u_n\sigma_{x_n} + m_{x_n}) = 0 \quad (4)$$

根据可靠指标  $\beta$  的几何意义, 由一次二阶矩理论可知, 对于独立正态分布的变量, 在极限状态方程为线性时, 可靠度指标  $\beta$  在标准正态坐标系中等于原点到极限状态平面 (或直线) 的最短距离<sup>[8]</sup>, 求解可靠指标  $\beta$  的问题转化为求解含有约束条件的函数最小化问题:

$$\beta = \min(U^T U)^{1/2}$$

s. t.

$$g(u_1\sigma_{x_1} + m_{x_1}, u_2\sigma_{x_2} + m_{x_2}, \dots, u_n\sigma_{x_n} + m_{x_n}) = 0 \quad (5)$$

式中  $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$  为转化到标准正态化空间后的变量向量。

笔者所研究的函数优化问题含有一个等式约束条件, 计算表明, 在进化过程中产生的变量一般很难满足等式约束条件, 会导致遗传算法运行的失败, 得不到最优解, 故采用以下策略: 选择变量中的某一个变量不进行编码, 仅对其余的  $(n-1)$  个变量进行编码, 进化过程中未编码的  $u_i$  可以由  $g(u_1\sigma_{x_1} + m_{x_1}, u_2\sigma_{x_2} + m_{x_2}, \dots, u_n\sigma_{x_n} + m_{x_n}) = 0$  求出, 即  $u_i = h(u_1, u_2, \dots, u_{i-1}, u_{i+1}, \dots, u_n)$ , 那么向量  $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$  就自然满足了等式约束条件。

遗传算法求解约束优化的核心是如何满足约束条件, 对于变量  $u_i$  超出其取值区间  $[\min_i, \max_i]$  的情况, 常用的方法是在目标函数后面添加惩罚项。其本质是通过惩罚不可行解, 将约束问题转化为无约束问题。在约束算法中, 惩罚技术用来在每一代的种群中保持不可行解, 使遗传搜索分别从可行域和不可行域两边逼近最优解。构造带有惩罚项的适值函数通常可采用加法和乘法两种形式。笔者采用的是加法形式  $val(x) = f(x) + p(x)^{[9]}$ , 这里的  $f(x)$  为适应度函数,  $p(x)$  为罚函数。

### 4 火灾案例和结果分析

算例取自文献 [5]。某购物中心一层, 占地面积  $800 \text{ m}^2$ , 顶棚高度  $3 \text{ m}$ , 厅内总体能见度很好, 安全出口 (门) 3 个, 出口总宽度  $6 \text{ m}$ , 场内装有水喷淋, 烟气探测器设备, 商场内部任意位置到最近出口的最大距离为  $30 \text{ m}$ 。

危险时间  $S$  假定为从火灾发生到烟气充满室

内危险高度以上整个空间的时间：

$$S = \frac{(H - H_{lim}) \cdot A}{V_g}$$

根据 Detact - t2 模型针对此特定火灾场景，模拟得到探测时间，将  $D$  拟合成关于火灾增长速率  $\alpha$  的函数，如下式所示： $D = 46.7\alpha^{-0.3}$ 。

疏散时间有两部分组成，一部分是人员行走至安全出口处的时间，另一部分是人员从安全出口疏散的时间：

$$E = \frac{qA}{f \cdot W} + \frac{L_{max}}{v}$$

假定前述各式中的变量为正态分布，数值详见表 1。

表 1 相关参数描述

Table 1 Description list for all parameters

参数	符号	单位	取值 (或分布)
出口门的总宽度	$W$	m	6
场内面积	$A$	$m^2$	800
高度	$H$	m	3
危险高度	$H_{lim}$	m	1.8
人的反应时间	$R$	s	$N(100, 90)$
门的涌流能力	$f$	人数/m·s	$N(1.3, 0.6)$
火灾增长速率	$\alpha$	$kW/s^2$	$N(0.042, 0.00076)$
烟气生成速率	$V_g$	$m^3/s$	$N(1.2, 0.4)$
人员密度	$q$	人数/ $m^2$	$N(0.8, 0.3)$
室内离出口最远距离	$L_{max}$	m	30
人在水平通道的速度	$v$	m/s	$N(3, 0.7)$

由式 (1) 可知，此火灾环境下人员安全疏散的功能函数为：

$$G = \frac{960}{V_g} - 46.7\alpha^{-0.3} - R - \left( \frac{800q}{6f} + \frac{30}{v} \right)$$

根据式 (2)，即得极限状态面方程为：

$\frac{960}{V_g} - 46.7\alpha^{-0.3} - R - \left( \frac{800q}{6f} + \frac{30}{v} \right) = 0$ ，然后将式中的  $V_g, \alpha, R, f, v$  按照式 (3) 分别转换到标准正态化空间，再代入极限状态方程即得

$$\frac{960}{1.2 + 0.6325u_1} - 46.7(0.046 + 0.0276u_2)^{-0.3} - (100 + 9.4868u_3) - \frac{400(0.8 + 0.5477u_4)}{3(1.3 + 0.7746u_5)} - \frac{30}{+ 3 + 0.8367u_6} = 0。$$

为了避免等式约束条件，可以从上式中选取

$u_3$  用其他变量来表示，然后根据  $u_3$  的取值范围  $[-1, 1]$ ，对超出此范围的个体进行惩罚，即对其适应度函数后面添加罚函数  $p(x)$ 。

按照本文 2 的遗传算法计算步骤，在 Matlab 里运用遗传算法工具箱进行编程计算，而且工具箱里对具体应用有详细说明，笔者对变量采用的是浮点型编码。遗传算法的进化计算过程如图 1 所示。

最终得到的  $\beta$  值为 1.5586，对应的可靠概率  $P_r = \Phi(\beta) \approx 94.03\%$ ，即此环境下，人员全部安全疏散的概率为 94.03%。不同计算方法的计算结果比较列于表 2。

表 2 不同计算方法的结果比较

Table 2 Results based on four different methods

计算算法	FOSM	AFOSM	GAs	Monte - Carlo
Reliability	0.8721	0.9170	0.9403	0.9464

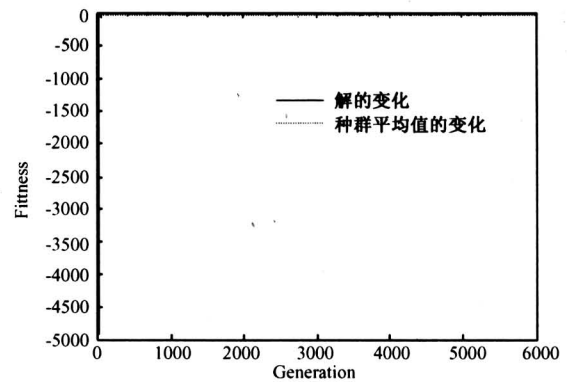


图 1 GAs 程序的进化过程和运行结果

Fig.1 Evolutionary process of GAs program and its results

Monte - Carlo 模拟的结果通常被认为是准确结果<sup>[8]</sup>，从表 2 中可以看出，基于 GAs 方法的计算结果与 Monte - Carlo 模拟的结果很接近，比 FOSM 和 AFOSM 法精度要高很多。而且，从文献 [5] 来看，对于这种功能函数比较复杂的情况，运用一次二阶矩验算点法求解涉及到很多函数繁杂的求导运算，而遗传算法可以避免这一繁杂的工作。

## 5 结论

依据笔者建立的火灾环境下人员安全疏散的功能函数，考虑了影响人员疏散中的随机因素，以概率分布来描述这些影响变量，根据现有的可靠性指数  $\beta$  法，运用有遗传算法对疏散的临界状态方程

进行求解  $\beta$ , 得到人员疏散的可靠概率, 可得出以下结论:

1) 遗传算法直接以目标函数值作为搜索信息。这对很多目标函数是无法或很难求导的函数, 或者导数不存在的函数优化问题提供了解决途径; 对于求解功能函数复杂或难于求导的人员安全疏散可靠度问题, 它为人员安全可靠性评价提供了新的有效手段。案例分析表明, 采用遗传算法可以成功地计算人员安全疏散的可靠度。

2) 遗传算法的强大寻优功能可以很好地适应可靠度计算的要求。由遗传算法计算得到的可靠度与 Monte-Carlo 法得到的值非常接近, 而且, 遗传算法与 FOSM, AFOSM 法计算结果相比较, 误差明显减小。

#### 参考文献

- [1] 消防监督检查规定. <http://www.mps.gov.cn/webpage/showfaq.asp?ID=931>[EB/OL]
- [2] 霍然等. 建筑火灾安全工程导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999
- [3] 蒋济同, 李华军, 焦桂英. 火灾时人员安全疏散可靠性评估[J]. 火灾科学, 1997, 6(1): 7~11
- [4] Magnusson S E, Frantzich H, Karlsson B, Sardqvist S. Determination of safety factors in design based on performance[A]. Fire Safety Science Proceedings of the 4th International Symp IAFSS[C]. Gaithersburg, 1994. 937~948
- [5] 陆守香, 汪金辉, 王福亮. 火灾时建筑内人员安全疏散可靠性的数值计算[J]. 火灾科学, 2004, 13(4): 231~234
- [6] 董聪, 刘西拉. 非线性结构系统可靠性理论及其模拟算法[J]. 土木工程学报, 1998, 31(1): 33~42
- [7] Goldberg D E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning [M]. Massachusetts: Addison-wesley, 1989
- [8] 张建仁, 等. 结构可靠度理论及其在桥梁工程中的应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003
- [9] 飞思科技产品研发中心. Matlab6. 5 辅助优化设计与计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003

## Evacuation Reliability Calculation in Case of Building Fire Based on Genetic Algorithms

Wang Jinhui, Lu Shouxiang

(State Key Laboratory of Fire Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

[Abstract] The risk of people under building fire is expressed by genetic algorithms (GAs) reliability index  $\beta$ . Elementary program of genetic algorithm is basically discussed. This method is convenient to calculate evacuation reliability when performance function of evacuation is complex and difficult to get differential coefficient. Being compared with the result based on Monte-Carlo, the result of case analysis shows its efficiency, and genetic algorithm can be used to calculate the evacuation reliability with high precision. GAs can give a good new way to study the reliability of evacuation in case of building fire.

[Key words] genetic algorithms; fire; evacuation; reliability