

文章编号: 1001-2486 (2000) 01-0056-04

利用遗传算法和模糊逻辑进行系统可靠性优化分配*

王 浩, 郁文贤, 庄钊文, 胡卫东

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 提出一种使用遗传算法和模糊逻辑相结合进行系统可靠性优化分配的新方法。该方法使用模糊逻辑对系统研制初期可靠性设计中所存在的不精确限制条件和设计目标进行数学建模, 然后利用遗传算法对数学模型进行求解。该方法充分利用了模糊逻辑的建模效率和遗传算法的搜索效率, 大大提高了系统可靠性分配的效率和精度。本文首先以两单元串联系统的可靠度优化为例进行说明, 然后将算法扩展至多单元系统的可靠度及冗余度优化问题的求解。数值仿真实例显示了算法的性能和可行性。

关键词: 遗传算法; 模糊逻辑; 可靠性分配

中图分类号: TP202+.1; TP301.6 文献标识码: A

Optimal Apportionment of System Reliability with Genetic Algorithm and Fuzzy Logic

WANG Hao, YU Wen-xian, ZHUANG Zhao-wen, HU Wei-dong

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A new method to perform the apportionment of system reliability with Genetic Algorithm (GA) and Fuzzy Logic (FL) is presented. We employed FL to model the uncertainty within the limits and designing aims during the initial stages of the conceptual design of engineering system, and use GA to find the solution for it. This method boosts the efficiency and precision of system reliability apportionment through exerting the ability of GA&FL. The simulation result shows the performance and feasibility of the new method.

Key words: genetic algorithm; fuzzy logic; reliability apportionment

长期以来, 可靠性分配问题一直是系统可靠性设计的重要组成部分, 为解决这个问题, 提出了许多方法, 如等分配法、AGREE 法等等^[1]。这些传统方法虽然针对许多不同设计阶段有着良好的效果, 但是却无法适应在系统研制初期的不精确限制条件及设计目标下进行系统可靠性优化分配的情况, 针对该问题, 许多学者试图应用模糊逻辑来解决, 相应提出了模糊可靠性优化分配的思想和方法。^[2~5, 9]

但是, 文献中提出的模糊可靠性优化分配方法多数有自身的局限性。例如, 早期的方法只能单独解决可靠度分配和冗余度优化两个问题^[2, 4], 无法解决可靠度和冗余度同时进行优化分配的混合整数优化问题。后期, 一些方法^[3, 5]虽然提出了对此问题的解, 但是其启发式算法无法保证结果的精度, 而且算法受初始值影响较大, 稳健性不强。

遗传算法是由 John. Holland 于 1973 年提出的一种优化算法^[6], 被广泛应用在复杂、多维、多模空间的问题求解中。遗传算法可以用来创造、改进和更新模糊逻辑系统^[7], 在本文提出的方法中, 它主要用来改善模糊优化方程的解。

在上述思想的启示下, 本文提出了一种使用遗传算法和模糊逻辑相结合进行系统可靠性优化分配的新方法, 充分利用了模糊逻辑的建模效率和遗传算法的求解效率。

1 可靠性分配中的模糊优化及遗传算法的应用

1.1 系统可靠性分配

* 收稿日期: 1999-06-20

基金项目: 国家部委项目资助 (19.6.2.5)

作者简介: 王 浩 (1974-), 男, 博士生。

为落实系统可靠性指标，必须逐级把它分解到各不同层次。可靠性分配就是将系统可靠性指标转化为对下一个功能级或对更低一级分系统（或设备）的具体的可靠性定量要求，使各级设计师明确所研制的产品的可靠性设计要求，为各部件、各设备或分系统的可靠性设计和元器件、原材料的选择以及产品验收提供重要依据^[1]。

要进行可靠性分配，必须明确要求和限制条件。但是，在系统研制初期，特别是概念性设计阶段，多数设计限制都不十分明确，加之设计目标中所存在的模糊特性（例如：“尽可能”），都需要引入模糊方法来解决制约可靠性优化分配的瓶颈问题。

1.2 模糊优化

设 $\bar{D}, \bar{O}_i, \bar{L}_j$ 分别为可靠性分配过程中的模糊决策、模糊设计目标和模糊限制条件。其关系为

$$\bar{D} = \bar{O}_1 \cap \dots \cap \bar{O}_k \cap \bar{L}_1 \cap \dots \cap \bar{L}_m \quad (1)$$

k, m 分别为设计目标数和设计条件数。

设 X 是系统可靠度和冗余度所构成的解向量。根据模糊逻辑^[8]，则可靠性优化分配问题即可建模如下式：

$$\begin{aligned} & \text{Find } X^* \\ & \text{subject to } \mu_{\bar{D}}(X^*) = \max_{X \in D} \min_{i,j} [\mu_{\bar{O}_i}(X), \mu_{\bar{L}_j}(X)] \quad (2) \\ & 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq k. \end{aligned}$$

该式所包含的问题是一个混合整数多目标非线性优化问题，为了提高该类问题的求解精度和效率，可以引入遗传算法。

1.3 遗传算法

遗传算法的概念是由 Holland 提出并逐渐完善的^[6]。它通过模拟自然世界的进化选择和优胜劣汰机制来进行随机优化问题的求解。其思路如下^[6,10]：首先选定初始种群（可随机抽取，也可按照一定准则），然后从中选出一部分适值（fitness）较高的进入交配池（mating pool），通过复制（reproduction）、交叉（crossover）和变异（mutation）产生后代，这些后代和其双亲一起组成下一代，下一代再根据上述过程继续进化，反复循环，直到某一代的特性达到终止条件。具体流程见图 1。

遗传算法之所以可以与模糊逻辑相结合并应用于可靠性优化分配问题中，主要是由于它具有以下两个主要特点：

- (1) 隐并行机制。遗传算法通过模拟多个个体的同时进化来改进求解方向，这里所隐含的并行性有利于混合整数优化问题的求解，克服了启发式修正算法求解精度不高的缺陷。
- (2) 全局优化特性。遗传算法的全局优化性可以保证对 (2) 式模糊方程的求解不至于陷入局部最小，同时也减少了算法对初始解的依赖性，增强了算法的稳健性。

本文正是在上述特点的启发下，通过引入遗传算法来求解 (2) 式方程，提高计算精度的。为验证理论探讨的可行性和实际效果，我们进行了新方法的数值仿真研究。

2 数值仿真研究

2.1 两单元串联系统的可靠度优化分配

设系统由 A, B 串联而成，其可靠度分配任务可以表述为：“在系统费用尽可能低于 100 元的前提下，使系统可靠性尽可能接近 1”。问题的数学模型如下：

$$\begin{aligned} & \max : y = x_A \cdot x_B \\ & \text{subject to } : z = 100x_A^2 + 200x_B^3 \leq 100, \mu_{\bar{R}}, \mu_{\bar{C}}(z) \text{ 分别为模糊可靠性和费用的隶属度函数} \quad (3) \end{aligned}$$

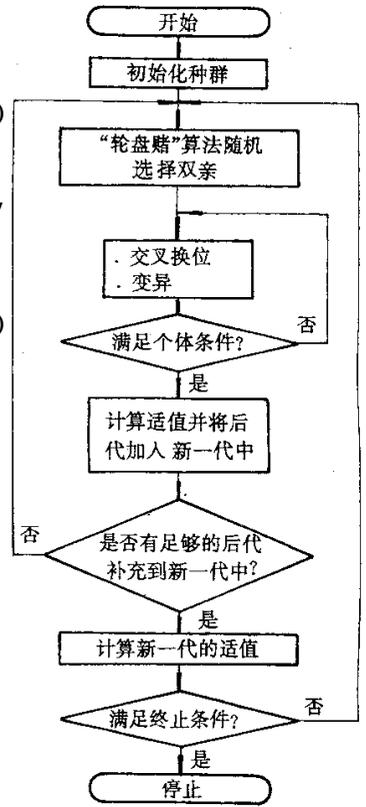


图 1 遗传算法的基本流程
Fig.1 The basic flow of GA

$$0 \leq x_A \leq 1, 0 \leq x_B \leq 1.$$

设解向量 $X = (x_A, x_B)$ 根据模糊逻辑, 优化问题就是求解这样的解向量 X^* :

$$X^* = \max_X \mu_{\bar{D}}(X) = \max_X \{\min[\mu_{\bar{R}}(X), \mu_{\bar{C}}(X)]\} \tag{4}$$

根据精度要求, 选择 8 位位串长度编码, 对上式求解。其它仿真计算的参数见表 1。

表 1 遗传算法的基本参数

Tab.1 The basic parameter of GA

参 数	值
适值度 (fitness value)	$fitness = \mu_{\bar{D}}(X)$
种群尺寸 (population size)	50
最大代数 (max generations)	500
交叉率 (crossover rate)	1
变异率 (mutation rate)	0.0033
终止条件 (terminate value)	0.0001
位串长度 (string length)	8

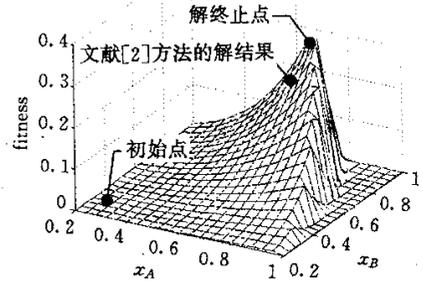


图 2 种群个体的适值分布及解的位置

Fig.2 Fitness distribution and the location of solution

选择初始值 $X (x_A = 0.3, x_B = 0.3)$, 经过 29 代进化, 算法收敛, 计算结果为 $x_A^* = 0.9569, x_B^* = 0.7020$ 。该算法对最大适值的逼近程度远比使用文献 [2] 方法计算出的结果 ($x_A^* = 0.8721, x_B^* = 0.6833$) 逼近程度高, 见图 2, 这充分说明新方法在计算精度上有较大的提高。

2.2 三单元串联系统的可靠度及冗余度优化

模糊逻辑与遗传算法相结合应用于可靠性分配的另一个特点就是它能够较好的解决多目标非线性混合整数优化问题。作者针对该特点, 参考文献 [3] 相关内容, 以三单元串联系统为例, 使用新方法 & 文献 [3] 提供的方法对其进行了可靠度和冗余度优化, 并将优化结果进行了对比。

设某一在研系统由 3 个子系统组成, 研制初期, 设计方案要求“系统在保证满足体积、重量、成本费用的限制条件下, 尽可能保证系统可靠度越大越好”。并且在设计初期各限制无法精确给出, 具体限制及设计参数总结如表 2。使用模糊逻辑对分配任务建模, 即

$$X^* = \max_X \mu_{\bar{D}}(X) = \max_X \{\min[\mu_{\bar{R}}(X), \mu_{\bar{C}}(X), \mu_{\bar{W}}(X), \mu_{\bar{V}}(X)]\} \tag{5}$$

其中 $X = (x_1, x_2, x_3, n_1, n_2, n_3)$ 为可靠度和冗余度的联合矢量, $0 \leq x_i \leq 1, \bar{R}, \bar{C}, \bar{W}, \bar{V}$ 为模糊目标及模糊限制。

表 2 系统方案设计具体限制及设计参数 ($t = 1000$ h)

Tab.2 System design limit and parameter ($t = 1000$ h)

体积 V (m^3)	重量 W (kg)	成本费用 C (百元)	系统可靠度 R	系统组成单元	$a_i (\times 10^5)^*$	b_i^*	各单元体积 (m^3)	各单元重量 (kg)
大约 15 m^3 左右, 最多不能超过 40 m^3	大约 25 kg 左右, 最多不能超过 4 kg	系统造价要保持在 6 万元以内, 超支不过 1 万	系统的可靠度要越大越好, 且不得低于 0.9	1	1.0	1.5	1	6
				2	2.3	1.5	2	6
				3	2.3	1.5	3	8

* a_i, b_i 为限制条件的建模系数, 使用方法参见文献 [3]

数学模型建立后, 使用遗传算法对优化问题 (5) 进行求解, 仍然取模糊决策的隶属度为适值。编码时可靠度的编码长度根据计算精度的要求安排 (这里选 8 位)。编码示意如下:

$$00 \mid 01 \mid 01 \mid 01 \mid 00101101 \mid 00111100 \mid 10010001 \mid$$

$$\text{第 2 分系统的冗余度} = 2 \quad \text{第 2 分系统的可靠度} = 0.988$$

因此位串长度为 $(8+2) \times 3 = 30$ 位。遗传算法的其余参数选取与上例相同, 见表 1, 计算结果及其与文献 [3] 方法的比较列于表 3 中。

表 3 FL&GA 方法和文献 [3] 方法的优化结果比较

Tab.3 The comparison of optimal result using FL&GA method and method from doc [3]

		FL&GA 方法			文献 [3] 方法		
优化分配结果	分系统	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
	冗余度	1	2	2	2	2	1
	可靠度	0.972 5	0.937 3	0.921 6	0.959 3	0.953 5	0.959 9
	系统可靠度	0.962 8			0.956 2		
	总重量	17.976 4 kg			15.408 3 kg		
	总体积	21 m ³			15 m ³		
	总成本	4.3 万元			5.92 万元		
	综合隶属度	0.859 2 (= fitness)			0.835 96		
算法性能		·进化代数：159 代 ·耕时：107 s ·初始值：(1 , 1 , 1 , 0.3 , 0.3 , 0.3)			·优化迭代次数：201 次 ·耗时：15 s ·初始值：(1 , 1 , 1 , 0.3 , 0.3 , 0.3)		

注：仿真试验所用机型为 Pentium 120.

2.3 关于算法的几点说明

(1) 遗传算法虽然是全局搜索算法，但也可通过附加局部条件而只进行局部优化。

(2) 遗传算法一定程度上降低了计算速度，但提高了计算精度。

(3) 对精确限制来说，模糊建模将损失部分信息，但是在限制条件为定性信息的情况下，模糊建模反而能够避免盲目追求精确所带来的信息损失^[8]，使最优解不至于丢失。总而言之，本文方法不是普适的最优解，而是适用于特定条件下的优化方法。

3 结论

本文提出利用模糊逻辑和遗传算法相结合进行系统可靠性优化分配的方法。模糊逻辑保证了建模的直观、简洁，遗传算法保证了问题求解的高效、准确，两者相结合，避免了以往算法中存在的稳健性差、计算结果精度低等不足，克服了系统可靠性、冗余度同步准确优化的困难，是系统在不确定限制条件下进行准确的可靠性分配的好方法。

参考文献：

- [1] 陆廷孝, 郑鹏洲. 可靠性设计与分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1992: 120-135.
- [2] Kyung S P. Fuzzy apportionment of system reliability [J]. IEEE Trans. on reliability, 1987, R-36.
- [3] Anoop K D. Optimal Apportionment of reliability & redundancy in series system under multiple objectives [J]. IEEE Trans. on reliability, 1992, 41.
- [4] Utkin L V. A method to solve fuzzy reliability optimization problem [J]. Microelectron. on Reliab, 1995, 35(2).
- [5] Utkin L V. Redundancy optimization by fuzzy reliability and cost of system components [J]. Microelectron on Reliab, 1994, 34(1).
- [6] Holland J H. Genetic algorithm and the optimal allocation of trial [J]. SIAM J. Computing, 1973, 2: 32-35.
- [7] Sanchez. Genetic algorithm and fuzzy logic systems [M]. World Scientific Press, 1997.
- [8] 郭桂蓉, 庄钊文. 信息处理中的模糊技术 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1993.
- [9] Luus R. Optimization of system reliability by a new nonlinear integer programming procedur [J]. IEEE Trans. Reliability, 1975, R-24.
- [10] Golgberg D E. Genetic algorithms: principles of natural selection applied to computation [J]. Science, 1993, 261.

