

文章编号: 1001-0920(2002)03-0378-03

遗传算法在系统可靠性优化中的应用

张铁柱¹, 滕春贤¹, 韩志刚²

(1. 哈尔滨理工大学 系统工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 黑龙江大学 应用数学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 研究在造价、体积和重量约束条件下, 多级串联系统和桥式网络系统可靠性优化问题, 使用遗传算法对该问题进行求解, 利用基于排名的选择方法和最优保存策略, 改善了遗传算法的收敛性能。计算机仿真实验结果表明, 用遗传算法求解该问题是有效的。

关键词: 遗传算法; 系统可靠性; 最优化

中图分类号: O 232 **文献标识码:** A

Application of genetic algorithms to system reliability optimization

ZHANG Tie-zhu¹, TENG Chun-xian¹, HAN Zhi-gang²

(1. Institute of System Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080,

China; 2. Institute of Application Mathematics, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: A reliability optimization problem of multilevel serial systems and bridge network systems, with the constraints of cost, volume and weight, is a nonlinear mixed integer programming problem, which has a large number of local extreme values. GA is adopted to solve the system reliability optimization problem and a more optimal solution than other algorithms is obtained. In the application of GA, rank-based model and elitist model are adopted, which improve the convergence performance of GA.

Key words: genetic algorithm (GA); system reliability; optimization

1 引 言

系统可靠性优化是在一定的资源约束条件下寻求一种最佳设计方案, 使系统获得最高的可靠度, 或在满足一定可靠性指标要求的条件下使投资最少, 以取得最大的经济效益。在某些系统可靠性优化问题中, 假定部件可靠度是固定的, 每一级的冗余数是在满足系统约束条件下确定的。许多最优化技术已

成功地用于求解这类问题^[1]。然而, 更一般的问题则要同时确定最优的可靠度和最优冗余数, 以使整个系统的可靠性为最优。这是一个混合整数非线性规划问题。

一般说, 这类问题用普通的最优化技术来求解(例如拉格朗日乘子法、无约束极小化法、广义既约梯度法)是很困难的。因为这些方法不能提供整数解, 而有效的整数规划法又难保证给出最优解。近年

收稿日期: 2000-06-20; 修回日期: 2000-10-11

基金项目: 机械工业局自然科学基金项目(98250631)

作者简介: 张铁柱(1972—), 男, 黑龙江伊春人, 讲师, 博士生, 从事智能优化、非线性系统辨识等研究; 韩志刚(1934—), 男, 河北乐亭人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统的建模、预报、智能控制等研究。

来,人们提出一些不依赖于具体问题的直接搜索法,遗传算法(GA)便是其中的一种,并在许多领域得到广泛的应用。本文采用 GA 来解决上述具有混合类型变量的系统可靠性优化问题,并与文献[2,3]中其它算法的优化结果进行比较。计算结果表明采用 GA 求解该问题更为有效。

2 问题描述

对于一个给定系统,在满足一定的系统约束条件下,通过同时确定最优的部件可靠度和最优冗余度,使系统的可靠度最大,即

$$\begin{aligned} \max R_s(R, X) \\ \text{s t } \prod_{j=1}^n g_{ij}(R_j, X_j) < b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (1)$$

式中, R_s 为系统的可靠度; R_j 和 X_j 为第 j 级部件的可靠度和冗余度, R_j 全是 0 和 1 之间的实数, X_j 全是正整数。

3 用 GA 求解系统可靠性优化问题

1) 编码: 本文采用实数编码, 每个染色体由可行解向量 (R, X) 的元素列表 $(R_1, R_2, \dots, R_n; X_1, X_2, \dots, X_n)$ 表示, 则相应染色体 $V = (R_1, R_2, \dots, R_n; X_1, X_2, \dots, X_n)$ 。

2) 初始化过程: 定义整数 pop-size 为染色体的个数, 根据约束条件随机产生 pop-size 个初始可行染色体 $V_1, V_2, \dots, V_{\text{pop-size}}$ 。

3) 评价函数: 评价函数 $\text{eval}(V)$ 用来对种群中每个染色体 V 设定一个概率, 使该染色体被选中的可能性与种群中其它染色体的适应性成比例。设参数 $a \in (0, 1)$ 给定, 定义基于序的评价函数 $\text{eval}(V_i) = a(1-a)^{i-1} (i = 1, 2, \dots, \text{pop-size})$, 其中 a 为最好染色体的选择概率。

4) 选择: 本文采取基于非线性排名的选择策略。选择过程如下:

对每个染色体 V_i 计算累积概率

$$\begin{cases} q_0 = 0, & q_i = \sum_{j=1}^i \text{eval}(V_j) \\ i = 1, 2, \dots, \text{pop-size} \end{cases} \quad (2)$$

从区间 $[0, \text{pop-size}]$ 中产生一个随机数 r ;

若 $q_{i-1} < r < q_i$, 则选择第 i 个染色体 V_i ($i \in \text{pop-size}$);

重复 和 共 pop-size 次, 这样可得到

pop-size 个复制的染色体。

5) 交叉: 本文采用整体算术杂交算子。首先定义参数 P_c 作为交叉概率, 为确定交叉操作的父代, 从 $i = 1$ 到 pop-size 重复以下过程: 从 $[0, 1]$ 中产生随机数 r , 如果 $r < P_c$ 则选择 V_i 作为父代, 用 V_1, V_2, \dots 表示上面选择的父代, 并把它们随机配对。设 (V_i, V_j) 为一个父代对, 首先从 $(0, 1)$ 中产生一个随机数 c , 然后按下式

$$\begin{cases} V_i = cV_i + (1-c)V_j \\ V_j = (1-c)V_i + cV_j \end{cases} \quad (3)$$

在 V_i 和 V_j 之间进行交叉操作, 产生 V_i' 和 V_j' 。分别对 V_i' 和 V_j' 中的 X_1, X_2, \dots, X_n 进行取整, 生成两个后代 V_i'' 和 V_j'' ; 根据约束条件检验每一个后代的可行性, 如果两个后代均可行, 则用他们代替其父代, 否则, 保留其中可行者, 并产生新的随机数 c , 重新进行交叉操作, 直到得到两个可行的后代或者循环给定次数为止。

6) 变异: 定义参数 P_m 作为变异概率, 类似交叉操作中选择父代的过程, 用 V_1, V_2, \dots 表示选择的父代。设 V_i 为一个父代, 在 R^n 中随机选择变异方向 d , 使 $V_i = V_i + Md$, 并对 V_i 中的 X_1, X_2, \dots, X_n 进行取整生成后代 V_i' 。若 V_i' 是不可行的, 则置 M 为 $0 \sim M$ 之间的随机数, 直到其可行为止, 其中 M 为一个足够大的数。如果在预先给定迭代次数之内没有找到可行解, 则置 $M = 0$ 。

7) 最优保存策略: 当前群体中适应值最大的染色体不参与交叉和变异, 而是用来替换本代群体中经交叉、变异等遗传操作后产生的适应值最小的染色体。此外, 最好的染色体不一定出现在最后一代, 所以开始时必须把最好的染色体保留下来, 记为 V_0 。如果在新的种群中又发现更好的染色体, 则用它代替 V_0 。在进化完成之后, V_0 便可看作优化问题的解。

4 实例计算

4.1 实例 1

一个 5 级串联系统的可靠性优化问题

$$\begin{aligned} \max R_s(R, X) &= \prod_{j=1}^5 [1 - (1 - R_j)^{X_j}] \\ \text{s t } \sum_{j=1}^5 \alpha_j \left(\frac{-t}{\ln R_j} \right)^{\beta_j} (X_j + \exp(X_j/4)) &< C \\ \sum_{j=1}^5 \omega X_j \exp(X_j/4) &= W \\ \sum_{j=1}^5 P_j X_j^2 &= P \end{aligned}$$

$$0 < R_j < 1, \quad j = 1, 2, \dots, 5$$

其中, t 是第 j 级部件无失效运行时间, α_j 和 β_j 为常数

$$\alpha = (2.33 \times 10^{-5}, 1.45 \times 10^{-5}, 5.41 \times 10^{-6}, 8.05 \times 10^{-5}, 1.95 \times 10^{-5})$$

$$\beta = (1.5, 1.5, 1.5, 1.5, 1.5), \quad t = 1000$$

$$\omega = (7, 8, 8, 6, 9), \quad p = (1, 2, 3, 4, 2)$$

$$C = 175, \quad W = 200, \quad P = 110$$

GA 的参数设置是使用正交试验的方法确定不同的参数组合, 然后对每种不同的组合执行 GA 以比较它们的性能, 并在其中选择最优的组合为 $m = 200$, $P_c = 0.3$, $P_m = 0.5$. 终止条件是相邻两代间的离线性能差小于 1.0×10^{-7} . GA 搜索到的最佳个体为

$$R = (0.779724, 0.871814, 0.903210, 0.711091, 0.787879)$$

$$X = (3, 2, 2, 3, 3)$$

其对应的系统可靠度 $R_s = 0.93168$, 资源耗费用 $P_s = 83$, $C_s = 174.999$, $W_s = 192.481$.

4.2 实例 2

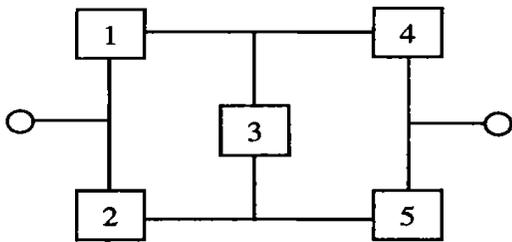


图 1 桥式网络系统

如图 1 所示, 一个桥式网络系统可靠性优化问题

$$\max R_s(R, X) =$$

$$R_1R_2 + R_3R_4 + R_1R_4R_5 + R_2R_3R_5 -$$

$$R_1R_2R_3R_4 - R_1R_2R_3R_5 - R_1R_2R_4R_5 -$$

$$R_1R_3R_4R_5 - R_2R_3R_4R_5 + 2R_1R_2R_3R_4R_5$$

$$s.t. \quad \sum_{j=1}^5 \alpha_j \left(\frac{-t}{\ln R_j} \right)^{\beta_j} (X_j + \exp(X_j/4)) \leq C$$

$$\sum_{j=1}^5 \omega_j X_j \exp(X_j/4) \leq W$$

$$\sum_{j=1}^5 P_j X_j^2 \leq P$$

$$0 < R_j < 1, \quad j = 1, 2, \dots, 5$$

参数设置同例 1. GA 搜索到的最佳个体为

$$R = (0.817687, 0.869152, 0.858196, 0.709730, 0.748766)$$

$$X = (3, 3, 3, 3, 1)$$

系统可靠度 $R_s = 0.999889$, 资源耗费用 $P_s = 92$, $C_s = 174.9997$, $W_s = 195.7352$.

5 算法的对比与讨论

为说明 GA 的有效性, 现将试验结果与以下结果进行对比: 1) 用替代约束法^[2] 计算结果; 2) 用 XKL 法^[3] 计算结果.

5.1 对实例 1 计算结果的比较

不同算法对实例 1 的优化结果如表 1 所示. 由表 1 看出, GA 与替代约束法和 XKL 法相比, 可搜索到系统可靠度 R_s (目标) 的更大值.

表 1 不同算法对实例 1 的优化结果

| | GA | XKL | 替代约束 |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|
| X | (3, 2, 2, 3, 3) | (3, 2, 2, 3, 3) | (3, 2, 2, 3, 3) |
| R_1 | 0.779724 | 0.77939 | 0.777143 |
| R_2 | 0.871814 | 0.87183 | 0.867514 |
| R_3 | 0.903021 | 0.90288 | 0.896696 |
| R_4 | 0.711091 | 0.71139 | 0.717739 |
| R_5 | 0.787879 | 0.78779 | 0.793889 |
| R_s | 0.931682 | 0.93167 | 0.931363 |

5.2 对实例 2 计算结果的比较

不同算法对实例 2 的优化结果如表 2 所示. 由表 2 看出, GA 与替代约束法相比, 可搜索到系统可靠度 R_s (目标) 的更大值.

表 2 不同算法对实例 2 的优化结果

| | GA | 替代约束 |
|-------|-----------------|-----------------|
| X | (3, 3, 3, 3, 1) | (3, 3, 2, 3, 2) |
| R_1 | 0.817687 | 0.814483 |
| R_2 | 0.869152 | 0.821383 |
| R_3 | 0.858196 | 0.896151 |
| R_4 | 0.709730 | 0.713091 |
| R_5 | 0.748766 | 0.814091 |
| R_s | 0.999889 | 0.999789 |

6 结 语

本文将遗传算法应用于系统可靠性工程, 成功地解决了系统可靠性复合最优化问题. 文中使用基于排名的选择策略和最优保存策略, 改善了遗传算法的收敛性能. 仿真实验结果表明, GA 比 XKL 和替代约束算法更为有效. 对于本文所讨论的系统可靠性优化问题, GA 不失为一种更优的候选方法.

(下转第 384 页)

振已经消除。

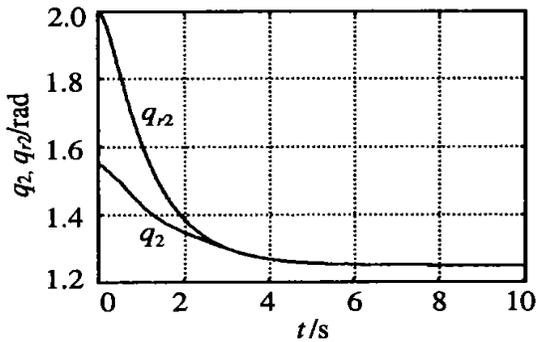


图2 无抖振控制时关节2的跟踪输出信号

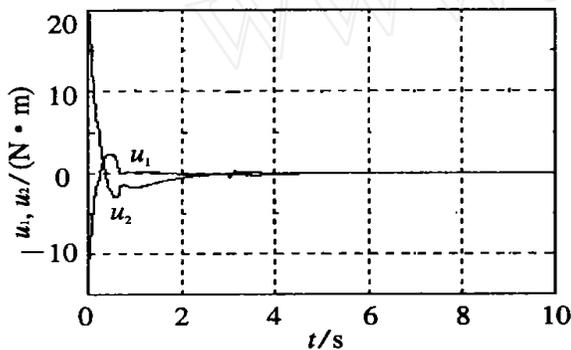


图3 无抖振控制时关节1和2的控制输入信号

6 结 论

本文设计了刚性机械手的快速终端滑模鲁棒控制器,采用优化方法分析了系统的稳态跟踪精度和用于消除抖振的饱和函数宽度之间的关系,推导出数学表达式。可根据给定的跟踪精度指标,设计出整个机器人控制系统。通过计算机仿真验证了本文提出的控制方法的有效性。

参考文献(References):

- [1] Yu X, Wu Y, Man Z. On global stabilisation of nonlinear dynamical systems[A]. Variable Structure Systems, Sliding Mode and Nonlinear Control: Lecture Notes in Control and Information Science[C]. NY: Springer-Verlag, 1999: 109-122.
- [2] Man Z, A P Paplinski. Robust tracking control for rigid robotic manipulators[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(1): 154-159.
- [3] Spong M W. On the robust control of robot manipulator[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1992, 37(11): 1782-1786.
- [4] Yu T. Terminal sliding mode control for rigid robots[J]. Automatica, 1998, 34(1): 51-56.

(上接第374页)

参考文献(References):

- [1] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to control[J]. IEEE Trans on SMC, 1986, 15(1): 116-132.
- [2] Liu Haifa, Wei Qingfu. Identification and optimization of T-S fuzzy model[A]. Proc of 14th IFAC World Cong[C]. Beijing, 1999.
- [3] Martin Fischer, Oliver Nelles, Rolf Isemann. Predictive control based on local linear fuzzy models[J]. Int J System Science, 1998, 29(7): 679-697.
- [4] 刘忠信,陈增强,袁著祉.基于T-S模型的局部递推辨识及广义预测控制[J].清华大学学报(J of Tsinghua Univ), 2000, 40(S2): 100-104.
- [5] Miyamoto S. Fuzzy sets in information retrieval and cluster analysis[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1990.
- [6] 王翼,王秀峰.现代控制论基础[M].北京:高等教育出版社, 1995: 402-406.

(上接第380页)

参考文献(References):

- [1] Tiltman F A, Hwang C L, Kuo W. Optimization of system reliability[M]. New York: Marcel Dekker, 1980.
- [2] Hikita M, Nakagawa Y, Narihisa H. Reliability optimization of system by a surrogate-constraints algorithm[J]. IEEE Trans on Reliability, 1992, 41(3): 473-480.
- [3] Xu Z K, Kuo W, Lin H H. Optimization limits in improving system reliability[J]. IEEE Trans on Reliability, 1990, 39(1): 51-60.