

# 一种改进的遗传算法进化有限状态机

杨波<sup>1,2</sup>, 徐渊<sup>1,2</sup>, 朱明程<sup>1</sup>, 李广军<sup>3</sup>

(1. 深圳大学信息工程学院EDA中心 广东 深圳 518060; 2. 中国科学院半导体研究所微电子研发中心 北京 海淀区 100083;  
3. 电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

**【摘要】**提出了一种改进的遗传算法,针对有限状态机中输出矢量与状态转移相关的特性,将配置有限状态机的染色体分解为状态转移基因和输出矢量基因进行分阶段的进化实验。实验结果表明同传统的进化算法相比,这种分阶段进化的遗传算法降低了有限状态机进化过程中的复杂度,有效地提高了进化性能。

**关键词** 可进化硬件; 有限状态机; 基因; 遗传算法  
中图分类号 TN431.2 文献标识码 A

## An Improved Genetic Algorithm for Finite-State-Machine Evolution

YANG Bo<sup>1,2</sup>, XU Yuan<sup>1,2</sup>, ZHU Ming-cheng<sup>1</sup>, LI Guang-jun<sup>3</sup>

(1. College of Information Engineering, Shenzhen University Shenzhen Guangdong 518060;  
2. Institute of Semiconductor, Chinese Academic of Science Haidian Beijing 100083;  
3. School of Communication and Information Engineering, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

**Abstract** The Finite-State-Machine (FSM) evolution using Genetic Algorithm (GA) is a typical theme in Evolvable Hardware (EHW) research. In this paper, an improved GA is described for FSM evolution. According to the characteristic that output is relevant to state transition in FSM, this algorithm divides the chromosome representing FSM into state transition gene and output gene for stage-by-stage evolution. Experimental results indicate that this improved GA greatly decreases the complexity of FSM evolution and gets better performance.

**Key words** evolvable hardware; finite-state-machine; gene; genetic algorithm

遗传算法进化有限状态机是EHW中一个典型的研究模型,这是由有限状态机在数字电路设计方法学中的重要性所决定的。

所谓采用进化方法来实现有限状态机的电路功能是指,在进化过程中待进化有限状态机是一个黑盒子,其内部的状态转移方式都是未知的,可以利用的只有供做参考的输入输出序列。当从输入输出序列中选取一个给黑盒子的参考输入值时,黑盒子内部就会发生相应的状态转换,同时产生输出值,该输出值同输入输出序列中的对应参考输出值的匹配程度用来作为适应度函数的评估标准。黑盒子经过进化生成的有限状态机,在输入输出序列中所有的输入条件下产生的输出值,都应该与对应的参考输出值匹配,这就是遗传算法进化有限状态机的基本依据。

传统的遗传算法进化有限状态机具有进化时间过长的缺点,这是由于状态机进化时内部的状态转

移未知,而输出矢量直接受到状态转移的影响。针对此特点,本文提出了一种改进的遗传算法,其目的是将有限状态机的进化分割为状态转移基因进化和输出矢量基因进化,经过实验获得了较好的结果。

### 1 传统进化方法分析

#### 1.1 有限状态机的染色体编码方法

目前用得较多的是基于查找表的编码方法<sup>[1-3]</sup>,如表1所示。表中,状态转移基因编码为“0110”,输出矢量基因编码为“0111”,两者连接而成的二进制码组“01100111”就是表示这个有限状态机的染色体。这种编码方法能自然地体现有限状态机的特点,而且可以用基于查找表的FPGA方便地实现。

在传统的遗传算法进化过程中,组成染色体的每一位是被无区别地进行操作的<sup>[1-2,4]</sup>,例如交叉和变异操作,而没有考虑到染色体包含的状态转移基因和输出矢量基因之间的不同同性。实际上,输出

收稿日期:2005-04-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(69976020; 90209012)

作者简介:杨波(1978-),男,博士生,主要从事动态可重构技术方面的研究。

矢量是由输入矢量和当前状态决定,输出矢量基因的优劣直接受到状态转移基因的影响,它们之间存在着一种因果关系。由于这种关系的存在,使得遗传算法进化有限状态机显得格外困难。

表1 基于查找表的有限状态机编码

状态	输入	下一状态	输出
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	0	1

## 1.2 传统遗传算法进化分析

遗传算法在进化搜索中基本不利用外部信息,仅以适应度函数为指导。通常,适应度大的个体具有更适应环境的基因结构,再通过基因交叉重组和基因突变等遗传操作,就能保存较好的基因片段,使得遗传算法的搜索具有一定的方向性,可以不断缩小搜索空间<sup>[5]</sup>。因此,适应度值的分布直接影响到遗传算法的收敛速度以及能否找到最优解。以一个任意的有限状态机的进化实验为例,采用上述传统遗传算法,统计其解空间中最优解附近100个点的适应度值分布曲线,如图1所示。

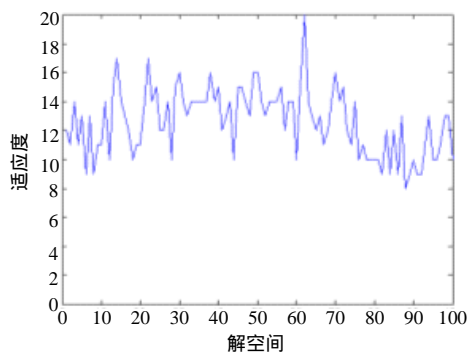


图1 解空间中部分适应度值的分布

从图可以看出,分布曲线在做不规则的随机高速震荡,这是由于状态转移基因发生即使非常微小的变化时,也会极大地改变状态转移的方向,使得原有状态转移条件下能很好匹配输入输出关系的输出矢量基因不能满足新的状态转移条件的需要,导致了相邻染色体之间的适应度值会产生突变。用这样的适应度曲线来指导遗传算法的寻优搜索是达不到很好效果的。

## 2 分阶段进化的遗传算法

分阶段进化的遗传算法针对上面的问题,将表示有限状态机的染色体分解为状态转移基因和输出矢量基因。根据状态转移与输出矢量之间的因果关

系,先用简单遗传算法仅对状态转移基因进行遗传操作,在状态转移基因的解空间中进化出最优解后,不再考虑其他状态转移基因以及它们对应的输出矢量基因解空间中用进化算法进行搜索,寻找最优的输出矢量基因,用这两个基因连接而成的染色体就是满足要求的最终进化结果。

### 2.1 分阶段进化的遗传算法流程

分阶段进化的遗传算法的具体操作步骤如下:

(1) 初始化种群A,种群A中的个体为状态转移基因S。设置运行的代数 $g=0$ ;

(2) 对于当前代的种群A中的个体进行遗传操作,如选择、交叉、变异等。计算个体的最大适应度值。对于经过遗传操作新生成的状态转移基因S,在其对应的输出矢量基因空间中寻找最佳的输出矢量基因O,使得S和O合并而成的染色体是该输出矢量基因空间中适应度值最大的染色体。其适应度值就是该状态转移基因S能达到的最大适应度值。

(3) 用新生成的个体替换上一代种群中最差的个体,完成一代的进化。

(4) 如果满足终止条件,那么结束状态转移基因的进化,输出寻找到的最优状态转移基因S',并继续执行步骤(5)进行输出矢量基因的进化。否则转到步骤(2)。

(5) 在S'对应的输出矢量空间中用进化算法搜索最优的输出矢量基因O',使得S'同O'连接而成的染色体就是能正确表示目标状态机的最终进化结果。输出该染色体并结束进化。

### 2.2 计算状态转移基因最大适应度值的方法

分阶段进化的遗传算法中的关键之处在于步骤(2),如果要对状态转移基因S与它所对应的输出矢量基因空间中的每个输出矢量基因O的组合都计算适应度值的话,计算量非常繁重。经过分析发现,对于状态转移基因而言,不一定要找出能与其组合得到最大适应度值的具体输出矢量基因,而只需统计该状态转移基因能达到的最大适应度值即可。因此,本文提出的算法解决方案如下:

(1) 根据给定的状态转移基因S,可以得出在输入测试矢量序列条件下的状态转移序列。以表2为例,输入/输出为输入输出测试矢量,其状态转移序列为“00030333303003300330”。同时初始化适应度值 $f_{fitness}=0$ 。

(2) 统计在相同输入测试矢量和当前状态条件下输出测试矢量为‘1’的次数m。以表2为例,输

入测试矢量为‘1’，当前状态为‘3’，输出测试矢量为‘1’的次数 $m=2$ 。统计同样条件下输出测试矢量为‘0’的次数 $n$ ，在表2中， $n=3$ 。

(3) 由于上述两种情况是不能并存的，即使遍历该状态转移基因所对应的输出矢量基因解空间也不

能两者兼顾，因此必须择优而录。若 $m>n$ ，则 $f_{fitness}=f_{fitness}+m$ ，反之则 $f_{fitness}=f_{fitness}+n$ 。

(4) 继续用这种互斥的方法统计其他具有相同输入测试矢量和当前状态的情况，最后累加得到的 $f_{fitness}$ 值即该状态转移基因所能达到的最大适应度值。

表2 给定状态转移基因和测试矢量序列条件下的状态转移序列

时钟	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
输入	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
输出	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
状态	0	0	0	3	0	3	3	3	3	0	3	0	0	3	3	0	0	3	3	0

### 2.3 分阶段进化的遗传算法性能分析

从分阶段进化的遗传算法的操作步骤可以看出，待搜索的解空间极大地缩小了，假设染色体长度为24，状态转移基因长度为16，输出矢量基因长度为8，则传统的遗传算法待搜索的解空间为 $2^{24}$ ，而分阶段进化的遗传算法要搜索的解空间仅为状态转移基因解空间的 $2^{16}$ 加上输出矢量基因解空间的 $2^8$ 。

把输出矢量基因从染色体中抽离出来单独考虑，同时使得状态转移基因解空间的适应度值分布较为平缓。因为状态转移解空间中的适应度值都是指定状态转移基因下的最大适应度值，相当于做了一次预处理，因此相邻基因的适应度值的变化不会太大。如图2所示。

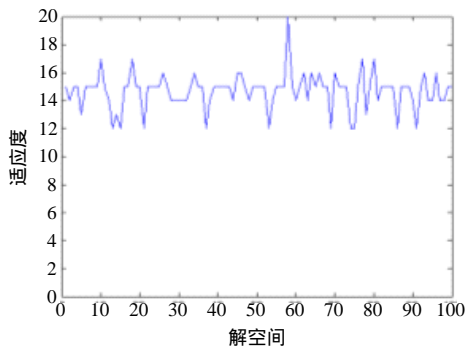


图2 状态转移基因解空间部分适应度值的分布

由于解空间适应度值的分布更加适合于搜索，而且极大降低了待求解的搜索空间，所以，分阶段进化的遗传算法在理论上具有极好的性能。下面的实验论证了这一点。

## 3 实验模型及分析

分阶段进化遗传算法实验以某一有限状态机为进化目标，其特性如图3所示。

实验所得出的每一代最大适应度值随进化代数

变化曲线如图4所示，A、B、C、D分别代表了不同的进化曲线。

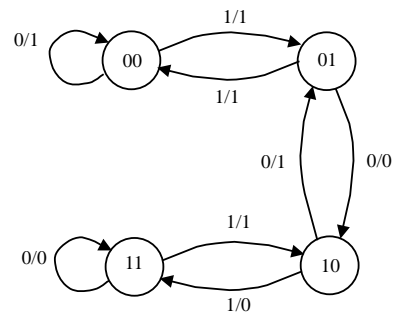


图3 待进化的有限状态机

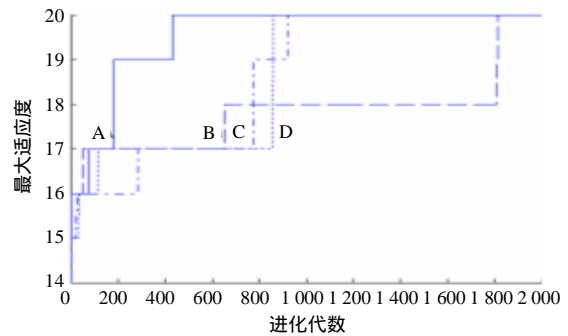


图4 最大适应度值进化曲线

从图中可以看出，多数情况下，状态机进化能在3 000代以内完成，且大部分是在1 000代以内找到最优解。而用传统的遗传算法进化，多数在10 000代左右才能完成。

进化性能的提高得益于把输出矢量基因从染色体中抽离出来单独考虑，使得状态转移基因解空间的适应度值分布较为平缓，如图2所示。在这样的适应度分布曲线帮助下，只要能采取有效措施跳出局部最优解，避免早熟，是能解决以往遗传算法进化的无序性，较好地指引进化方向的。而待搜索解空间的极大缩小，更进一步地提升了有限状态机进化的性能。

(下转第209页)

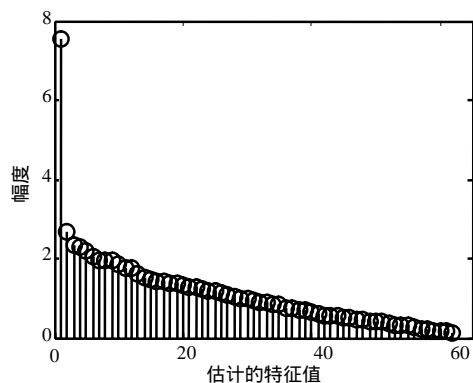


图3 自相关矩阵估计特征值

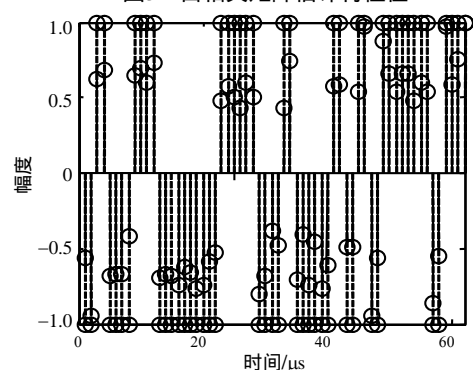


图4 估计PN码与真实PN码的比较

DS/SS信号盲同步算法在低信噪比情况下,可以有效地实现DS/SS信号的盲同步,并在此基础上利用特征分析法可精确估计出PN码序列。该算法简单、计算量小,利于硬件实时处理。

### 参考文献

- [1] 孙海燕, 魏平. 基于DDS技术的扩频信号发生器[J]. 实验科学与技术, 2006, 4(3): 115-117.
- [2] BUREL G, BOUDER C. Blind estimation of the pseudo-random sequence of direct sequence spread spectrum signal [C]//MILCOM 2000, 21st Century Military Communications Conference Proceedings, Los Angeles: IEEE Communication Society Publisher, 2000.
- [3] 张花国, 李立萍, 陈天麒. 一种改进的DS/SS信号PN码序列估计算法[J]. 信号处理, 2003, 19(增): 33-36.
- [4] 蒋长锦. 线性代数计算方法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- [5] DOUGLAS A H, JOHN B B. Carrier detection of PSK signals[J]. IEEE Transactions on Communications, 2001, 49(3): 487-496.
- [6] BUREL G. Detection of spread spectrum transmissions using fluctuations of correlation estimators[C]//ISPACS'2000. IEEE Int. Symp. on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Kitami: Kitami Institute of Technology, 2000.

## 3 结论

编辑 黄莘

由理论分析及计算机仿真可知,本文提出的

(上接第198页)

## 4 结束语

本文提出了一种分阶段进化的遗传算法,在进化过程中,充分考虑到了有限状态机状态转移和输出矢量之间的因果关系,将染色体中表示状态变化和输出矢量的基因分离开来分阶段进化。这样做的好处在于不论是状态变化基因还是输出矢量基因的解空间中适应度值的分布都更加适合于遗传算法的搜索,同时使得待搜索的解空间极大地缩小。经过进化实验分析,取得了比以往的遗传算法更好的进化结果。

### 参考文献

- [1] CHONGSTITVATANA P, APORNTEWAN C. Improving

correctness of finite-state machine synthesis from multiple partial input/output sequences[C]//In Proc. of the First NASA/DoD Workshop on Evolvable Hardware. Pasadena, CA: [出版者不详], 1999: 262-266.

- [2] MANOVIT C, APORNTEWAN C, CHONGSTITVATANS P. Synthesis of synchronous sequential logic circuits from partial input/output sequence[C]//In Proc. of Int Conf. on Evolvable Systems (ICES'98). Lausanne, Switzerland: [出版社不详], 1998: 98-105.
- [3] 赵曙光, 杨万海. 基于函数级FPGA原型的硬件内部进化[J]. 计算机学报, 2002, 25(6): 666-669.
- [4] 康立山, 何巍, 陈毓屏. 用函数型可编程器件实现演化硬件[J]. 计算机学报, 1999, 22(7): 781-784.
- [5] 王小平, 曹立明. 遗传算法理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.

编辑 刘文珍