

# 遗传算法的编码理论与应用

余有明<sup>1,2</sup> 刘玉树<sup>1</sup> 阎光伟<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(北京理工大学计算机科学与工程系,北京 100081)

<sup>2</sup>(北京石油化工学院计算机系,北京 102617)

<sup>3</sup>(华北电力大学计算机系,北京 102206)

E-mail:yuyouming@bupt.edu.cn

**摘要** 编码是遗传算法求解问题的前提,文章分析了二进制编码、格雷码编码、实数编码、符号编码、排列编码、二倍体编码、DNA 编码、混合编码、二维染色体编码或矩阵编码等编码的实质内容,在树编码和可变长编码基础上阐述了自适应编码的基本理论,提出了基于相似度的可变长编码和基于结构的 agent 编码方式,给出了函数优化、TSP、KP、JSP、机器人路径规划、图的划分和倒立摆等典型优化问题的编码方案。

**关键词** 遗传算法 遗传编码 智能体编码

文章编号 1002-8331-(2005)35-0086-04 文献标识码 A 中图分类号 TN919.81;TP301.6

## Encoding Theory and Application of Genetic Algorithm

Yu Youming<sup>1,2</sup> Liu Yushu<sup>1</sup> Yan Guangwei<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(Computer Science and Engineering Dept.,Beijing Institute of Technology,Beijing 100081)

<sup>2</sup>(Computer Dept.,Beijing Institute of Petrochemical Technology,Beijing 102617)

<sup>3</sup>(Computer Dept.,North China Electric Power University,Beijing 102206)

**Abstract:** Encoding is Genetic algorithm's premise to solve problems.This paper analyzes binary encoding mechanism of binary coding,Gray coding,real coding,symbol coding,rank coding,diploid coding,DNA coding,hybrid coding,2-D chromosome coding or matrix coding and others,expatiates basic theory of adaptive encoding based on tree coding and length changeable coding,puts forward encoding methods of length changeable coding based on similarity degree and agent coding based on structure description,and presents some encoding plans for typical optimization problems of functions optimization,TSP,KP,JSP,robot route layout,graph partition and headstand pendulum.

**Keywords:** genetic algorithm,genetic encoding,agent encoding

### 1 引言

遗传算法(Genetic Algorithm,GA)自 20 世纪 70 年代初提出以来,在许多领域的理论与工程实践中都有成功的应用。其编码方法也在不断地改进,最基本的是二进制编码,其它的编码方法有格雷码、实数编码、符号编码、多参数编码和 DNA 编码等,并在相关领域的优化应用中取得了很好的效果<sup>[1]</sup>。本文系统地分析了目前比较成熟的编码方法,并提出基于自适应思想的编码方案,论述了不同问题应该采用的编码类型,为智能化求解复杂问题的编码提供了参考方案。

### 2 遗传算法的编码原则

关于遗传编码的原则,Balakrishnan 等比较全面地讨论了不同编码方法的特性,针对不同的应用,为设计和选择编码方法提供了指南,主要有以下的 9 个特性:完备性(completeness)、封闭性(closure)、紧致性(compactness)、可扩展性(scalability)、多重性(multiplicity)、个体可塑性(flexibility)、模块性

(modularity)、冗余性(redundancy)与非冗余性(no redundancy)和复杂性(complexity)<sup>[2]</sup>。

### 3 遗传算法的基本编码理论

#### 3.1 二进制编码

遗传算法中常用的编码方法是二进制编码,它将问题空间的参数用字符集{0,1}构成染色体位串,符合最小字符集原则,便于用模式定理分析,但存在映射误差。

对于  $n(n \geq 1)$  维连续函数  $f(x)$ ,  $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $x_i \in [u_i, v_i]$ ,  $(i=1, 2, \dots, n)$  采用定长二进制编码,建立位串空间。各维变量的二进制编长为  $l_i$ , 那么  $x$  的编码从左到右依次构成总长度为  $L = \sum_{i=1}^n l_i$  的二进制编码位串。相应的 GA 编码空间为  $S^L = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ ,  $K=2^L$ 。该空间上的个体位串结构为:

$$a_k = (\overset{1}{a_{k1}}, \overset{1}{a_{k2}}, \dots, \overset{1}{a_{kl_1}}, \overset{2}{a_{k1}}, \overset{2}{a_{k2}}, \dots, \overset{2}{a_{kl_2}}, \dots, \overset{i}{a_{k1}}, \overset{i}{a_{k2}}, \dots,$$

基金项目:国家部委科技“十五”预研项目

作者简介:余有明(1968-),男,博士生,主要研究方向有进化计算、人工智能等领域。刘玉树(1941-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为人工智能、多媒体技术、分布式信息系统等。阎光伟(1971-),男,博士生,主要研究方向有智能计算、图像处理、人工智能等领域。

$$a_{k1}^i, \dots, a_{k1}^n, a_{k2}^n, \dots, a_{k1}^n, a_{k1}^i \in \{0, 1\}$$

对于给定的二进制编码位串:

$$s_k = a_{k1}^1 a_{k2}^1 \dots a_{k1}^1 a_{k2}^2 \dots a_{k1}^2 a_{k2}^2 \dots a_{k1}^i a_{k2}^i \dots a_{k1}^i a_{k2}^n \dots a_{k1}^n a_{k2}^n$$

位段译码函数  $\Gamma^i: \{0, 1\}^k \rightarrow [u_i, v_i]$  的形式为:

$$x_i = \Gamma^i(a_{k1}^i, a_{k2}^i, \dots, a_{ki}^i) = u_i + \frac{v_i - u_i}{2 - 1} \left( \sum_{j=1}^i a_{kj} 2^{i-j} \right), i=1, 2, \dots, n$$

其中  $a_{k1}^i, a_{k2}^i, \dots, a_{ki}^i$  为个体位串  $s_k$  的第  $i$  段。那么整个  $s_k$  的译码函数为  $\Gamma = \Gamma^1 \times \Gamma^2 \times \dots \times \Gamma^n$ 。

例如,对于  $x \in \{0, 1\}^{1023}$ ,若用 10 位长的二进制编码来表示该参数的话,则符号串  $X:0010101111$  就可表示一个个体,它所对应的参数值是  $x=175$ 。此时的编码精度为  $\delta=1$ 。

## 3.2 格雷码编码(Gray coding)

格雷码编码是二进制编码的一种变形,与二进制编码的精度相同。格雷码连续两个整数对应的编码值之间只有一位编码不同,增强了遗传算法的局部搜索能力,便于连续函数的局部空间搜索<sup>[9]</sup>。十进制数 0~15 之间的二进制码和相应的格雷码分别编码如下。二进制编码为:0000,0001,0010,0011,0100,0101,0110,0111,1000,1001,1010,1011,1100,1101,1110,1111;格雷码编码为:0000,0001,0011,0010,0110,0111,0101,0100,1100,1101,1111,1110,1010,1011,1001,1000。

假设有一个二进制编码为  $B=b_m b_{m-1} \dots b_2 b_1$ ,其对应的格雷码为  $G=g_m g_{m-1} \dots g_2 g_1$ 。由二进制码到格雷码的转换公式为:

$$\begin{cases} g_m = b_m \\ g_i = b_{i+1} \oplus b_i, i=m-1, m-2, \dots, 1 \end{cases}$$

由格雷码到二进制的转换公式为:

$$\begin{cases} b_m = g_m \\ b_i = b_{i+1} \oplus g_i, i=m-1, m-2, \dots, 1 \end{cases}$$

在这两种转换公式中,  $\oplus$  表示异或运算符。

例如,对于区间  $[0, 1\ 023]$  中两个邻近的整数  $x_1=175$  和  $x_2=176$ ,若用长度为 10 位的二进制编码,可表示为  $X_{11}:0010101111$  和  $X_{12}:0010110000$ ,而使用同样长度的格雷码,它们可分别表示为  $X_{21}:0010101111$  和  $X_{22}:0010101000$ 。

## 3.3 实数编码

实数编码是指个体的每个基因值用某一范围内的一个实数来表示,个体的编码长度等于其决策变量的个数。因为这种编码方法使用的是决策变量的真实值,所以也叫真值编码方法。例如,若某一个优化问题含有 5 个变量  $x_i (i=1, 2, \dots, 5)$ ,每个变量都有其对应的上下限  $[U_{\min}^i, U_{\max}^i]$ ,则:  $X=[5.30, 4.70, 3.40, 4.80, 5.70]$  就表示一个体的基因型,其对应的表现型是:  $x=[5.30, 4.70, 3.40, 4.80, 5.70]^T$ 。

实数编码是遗传算法中在解决连续参数优化问题时普遍使用的一种编码方式,具有较高的精度,在表示连续渐变问题方面具有优势,不存在海明悬崖问题。

## 3.4 符号编码

符号编码也称为大字符集编码,是指个体染色体编码串中的基因值除了取字符集  $\{0, 1\}$  之外,还选取无数值含义而只有

代码含义的符号集。这个符号集可以是一个字母表,如  $\{A, B, C, D, \dots\}$ ,也可以是一个数字序号表,如  $\{1, 2, 3, 4, 5, \dots\}$ ;还可以是一个代码表,如  $\{A1, A2, A3, A4, A5, \dots\}$  等等,如旅行商问题等。对于使用符号编码的遗传算法,需要认真设计交叉、变异等遗传操作,以满足问题的各种约束要求,才能提高算法的搜索性能。

## 3.5 排列编码

排列编码也叫序列编码,是针对一些特殊问题的特定编码方式。排序编码使问题简洁,易于理解。该编码方式将有限集合内的元素进行排列,若集合内包含  $m$  个元素,则存在  $m!$  种排列方法,当  $m$  不大时,  $m!$  也不会太大,穷举法就可以解决问题。当  $m$  比较大时,  $m!$  就会变得非常大,穷举法失效,遗传算法在解决这类问题上具有优势。解决 TSP 问题、作业调度(job scheduling)问题及资源调度(resource scheduling)问题时,用排列编码自然、合理。

## 3.6 二倍体编码

二倍体编码是对生物体二倍体基因遗传方式的直接模拟。前述编码方式都是单倍体遗传(monoploid genetics)方式,属简单生物体的染色体形式,信息含量少,而复杂生物体多是基于双倍体遗传(diploid genetics),信息含量非常大,常由一对染色体或多对同源染色体(homologous chromosomes)构成。每个染色体含有相同物理性状的信息,形成了冗余结构<sup>[9]</sup>。

双倍体位串中,从基因型到表现型具有一定显性规律。设双倍染色体位串的基因型为:  $\begin{cases} 1: AbCDe \\ 2: aBCde \end{cases}$ ,其中每个基因位包含两个等位基因,分别用大小写字母表示,如“A”或“a”。每个等位基因决定了不同的表现特征,如“B”表现棕色眼睛,而“b”则表现蓝色眼睛。当双倍体位串上等位基因彼此不同时,服从支配显性遗传操作(dominance),体现了生物遗传学上的遗传规律。

## 3.7 DNA 编码

DNA 是重要的基因物质,携带生物的遗传信息。DNA 的基本元素是核苷酸,核苷酸因为结构不同划分为四类碱基(bases):腺嘌呤(A)、鸟嘌呤(G)、胞嘧啶(C)和胸腺嘧啶(T)<sup>[6-9]</sup>。DNA 编码通过模拟染色体中的 ACGT 的编码方式,在遗传算法中使用如下形式的编码:AAATGTCCK,这种编码方式在遗传计算中使用广泛。遗传信息以 A、T、C、G 在核苷酸中的排列顺序而体现,排列序列的多样性构成了丰富的遗传信息。

基于 DNA 编码方法的遗传操作设计比较简单,可直接采用单点交叉和同类碱基替换变异。总而言之,DNA 编码方法具有知识表达方式灵活、编码存在冗余和重叠、染色体长度可变、遗传操作设计方便等特点。

## 3.8 混合编码或多参数编码

混合编码可分为多参数级联编码和多参数交叉编码,是将各参数分别以某种码制编码,然后再按一定顺序联接起来组成表示全部参数的个体编码。参数编码码制可以是二进制、格雷码、实数编码或符号编码等,各参数的上下界可以不同,码长或编码精度也可有所不同。例如,假设一种个体含有  $n$  个参数,每个参数用  $l_i (i=1, 2, \dots, n)$  位的二进制编码,则该个体可表示为:

$$\underbrace{b_{11}b_{12}\cdots b_{1i}}_{x_1} \underbrace{b_{21}b_{22}\cdots b_{2i}}_{x_2} \cdots \underbrace{b_{n1}b_{n2}\cdots b_{ni}}_{x_n}$$

该编码串的总长度为:  $l = \sum_{i=1}^n l_i$ 。这是多参数二进制级联编码的一种通用形式。

多参数交叉编码,是对各参数的分组编码。假设有  $n$  个参数,每个参数都采用码长  $m$  的二进制编码,取各参数编码串中的最高位联在一起,作为个体编码的前  $n$  位编码,再取次高位联在一起作为个体第二组  $n$  位编码,……,再取最后一位联在一起作为编码的最后  $n$  位。这样组成的长度为  $m \times n$  位的编码串就是多参数的一个交叉编码串。各参数的编码如下所示:

$$\underbrace{b_{11}b_{12}b_{13}\cdots b_{1m}}_{x_1} \underbrace{b_{21}b_{22}b_{23}\cdots b_{2m}}_{x_2}$$

则个体编码串为:

$$b_{11}b_{21}\cdots b_{n1} \mid b_{12}b_{22}\cdots b_{n2} \mid$$

### 3.9 二维染色体编码或矩阵编码

在许多应用场合,问题的解呈二维或多维表示,采用多维编码简单易行,如图像恢复。图像恢复是指把一个被干扰的图像尽量恢复到它的原始面目。显然,图像恢复处理所求的解是一个图像。用遗传算法来进行图像恢复,一个染色体就代表一个图像。若图像为二值图像,则染色体就可表示成二维的二值数组,图1给出了一个  $8 \times 8$  的二值图像编码,其中每个基因对应一个像素。利用二维染色体编码,相应的交叉操作不同于一般的交叉操作,可采用纵横交叉和窗口交叉的方法<sup>[9]</sup>。

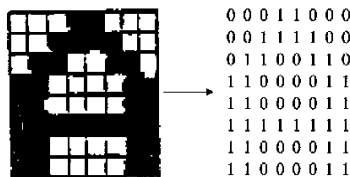


图1 图像基因的编码

## 4 遗传算法的自适应编码理论

编码对遗传算法的搜索效果和效率影响很大,让编码本身适应环境以便让遗传算法更好地完成进化过程,是自适应编码的最终目标,也是系统结构表示法的适应性描述<sup>[9]</sup>。

目前自适应编码方面的研究主要是在编码长度上做文章,或是编码方法的融合上有所改进,主要有树编码等,也有基于结构的 agent 编码。

### 4.1 树结构编码

树结构是图的一种特殊形式,常见的有二叉树和多叉树。问题结构编码常用多叉树来表示。下面定义树距离的概念和对树进行的4种操作。

树  $T_1$  和  $T_2$  的距离定义如式(1):

$$d(T_1, T_2) = \min\{\#(M) \mid M \in \{\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2\}^* \wedge M(T_1) = T_2\} \quad (1)$$

式中,  $\#(M)$  表示系列  $M$  的长度。  $M(T)$  表示由  $M$  的算子对  $T$  进行变换所得到的树。  $d(T_1, T_2)$  是把树  $T_1$  变换为  $T_2$  的最小系列的长度。  $d$  满足距离公理,即  $d(T, T) = 0, d(T_1, T_2) = d(T_2, T_1), d(T_1, T_2) + d(T_2, T_3) \geq d(T_1, T_3)$ 。此距离的计算复杂度是树节点

数  $n$  的函数,即  $O(n^3)$ 。

树和树之间的操作有4种,  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$  和  $\beta_2$ , 如图2所示。  $\alpha_1$  是父子分割操作;  $\beta_1$  是父子合并操作;  $\alpha_2$  是兄弟分割操作;  $\beta_2$  是兄弟合并操作。  $\alpha_1$  操作把从  $b_i$  到  $b_{k+i}$  部分树接到新的节点  $c$  下。  $\beta_1$  是  $\alpha_1$  的逆操作。  $\alpha_2$  操作是把以  $b$  为根的部分树分割为以  $b$  和  $b'$  为根的两个部分树。  $\beta_2$  是  $\alpha_2$  的逆操作。显然  $\alpha_1$  和  $\beta_1$  分别对应中间概念的生成和删除操作,  $\alpha_2$  和  $\beta_2$  分别对应通过事例合并形成概念或消除概念的操作。

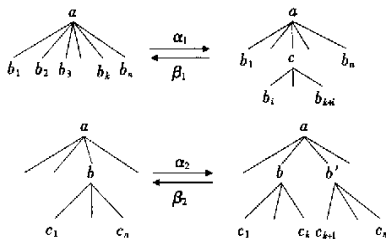


图2  $\alpha$ - $\beta$  操作

树编码是非定长编码模式,在搜索过程中树可自由地生长,但不便形成更具有结构化和层次性的问题解,实际应用中往往加以限制。把遗传算法的基本理论扩展到树编码的尝试还处于初期阶段<sup>[4,6,7]</sup>。

### 4.2 Messy GA 可变量长编码

Messy GA(mGA)编码,克服了标准 GA 对于非线性问题(骗问题)处理的弱点。下面给出遗传算法的 mGA 的编码描述<sup>[9]</sup>:

正确指定:  $\{(a1)(b4)(c3)\}$

过剩指定:  $\{(a1)(b4)(c3)(a3)\}$

缺省指定:  $\{(a1)(c3)\}$

在 mGA 中,个体编码为表的形式。以个体  $\{(a1)(b4)(c3)\}$  为例,可解释为  $a$  值为 1,  $b$  值为 4,  $c$  值为 3。与标准 GA 不同, mGA 不一定要把所有的信息都用基因表现出来,染色体长度是可变的。设表示的基本字符集为  $\{a, b, c\}$ , 染色体长度取 3, 则正确的个体表示或编码对应 mGA 编码描述中的“正确指定”。染色体长度为 4 或为 2 的表示对应其中的“过剩指定”和“缺省指定”形式。这 3 个染色体的长度分别为 3、4 和 2。mGA 在计算适应度时把表形式表示的个体转换成规定长度的字符串形式,对于过剩指定,把多余的指定除去;对缺省指定,用竞争模板补足缺省。因此计算适应度后,所有个体的染色体长度都相等。但经过交叉后,新群体的染色体长度又会不等。若两双亲个体长度均为 8, 如: Parent1: 1 1 1 1 1 1 1 1 和 Parent2: 0 0 0 0 0 1 0 0, 则在“1”位置经过切断和拼接的交叉操作后形成了染色体长度分别为 6 和 10 的两个子代个体, 即: Child1: 1 1 1 0 0 0 和 Child2: 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1。

### 4.3 基于相似度的可变染色体编码

相似度是一种染色体的分类度量值。令种群数目为  $N$ , 编码长度为  $L$ 。若种群中第  $i$  位为 0 的位串个数为  $M_{i,0}$ , 为 1 的个数为  $M_{i,1}$ , 则定义个体第  $i$  位的相似度为:  $\theta_i = \max(M_{i,0}, M_{i,1})/N$ ,  $i=1, 2, \dots, L$ 。种群的相似度  $\theta$  为:  $\theta = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \theta_i$ 。

显然,相似度的值域为  $0.5 \leq \theta \leq 1$ , 当种群完全随机产生时

$\theta=0.5$ , 当种群完全收敛时  $\theta=1$ 。交叉率越大, 变异率越小, 适应度函数越有利于优秀个体的繁殖, 种群收敛越快, 相似度越大。相似度接近 1 时, 种群中的基因缺乏多样性, 可通过增大码长解决遗传效率低的问题。选择一个相似度阈值  $\theta_0$ , 当种群的相似度大于阈值时, 在每个位串后补 0 或 1, 将编码长度增大为  $L+1$ 。推荐的阈值为  $\theta_0=(0.95\sim0.99)-P_m$ , 当然也可以通过实验, 取交叉操作提高个体品质的概率足够低时的相似度为阈值<sup>[9]</sup>。

#### 4.4 Agent 编码

Agent 编码是在简单遗传算法的基础上, 用智能体 agent 结构代替编码串来表征问题。agent 是指驻留在某一环境下, 能持续、自主地发挥作用, 具备驻留性、反应性、社会性、主动性等特征的计算实体。在 Agent 编码的遗传算法中, agent 的所有操作都是在环境中进行的, 环境是 agents 生存或存在的空间。不同的复杂优化问题可表示成不同的 agents, 它们之间在环境中进行交互和操作。环境影响和约束着 agents 的行为。环境因素有很多, 如空间位置、空间距离、障碍、属性值等。一般的 agent 生存环境可用一个三维坐标和坐标上的  $k$  个函数值来表示, 如式(2)所示:

$$E=(x,y,z,f_1(x,y,z),\dots,f_k(x,y,z)) \quad (2)$$

$$x \in R, y \in R, z \in R, k \in N$$

agent 的个体结构对遗传算法的功能影响很大, 各种问题, 特别是复杂系统的复杂性、适应性、智能都要通过 agent 的结构、规则、行为、智能度来体现。因此, 每个智能体一般可以用一个六元组来描述:

agent={标识, 类型, 知识库, 规则集, 属性, 参数}

自适应遗传编码是今后研究的方向和热点之一, 把元组级联编码的 agent 结构和面向对象编程技术结合起来, 发展和完善 agent 编码理论是解决编码自适应问题的切实可行和有效的方法之一。

#### 5 遗传编码的应用

遗传算法的应用非常广泛, 最为成功的应用主要有函数优化、背包问题、旅行商问题、图的划分问题、机器人路径规划问题、作业调度问题和倒立摆问题和图像处理等。

函数优化问题编码: 对于 DeJong 提出的 5 个测试函数, 属实值参数, 选用二进制编码。

背包 KP 问题编码: 采用下标子集  $T$  的二进制编码。串  $T$  的长度等于  $n$  (问题规模),  $T_i=1 (1 \leq i \leq n)$  表示该物件装入背包,  $T_i=0$  表示不装入背包。

旅行商 TSP 问题编码: 多采用遍历城市次序的排列编码或采用边组合编码。

图的划分问题编码: 采用二进制编码。例如个体 01011101 表示将顶点集合 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 划分为 1, 3, 7 和 2, 4, 5, 6, 8 两个子集。解决图的划分问题一般是将遗传算法与最小分割法结合构成混合遗传优化算法。

机器人路径规划问题编码: 在离散空间以机器人的运动路

径的栅格离散化坐标用 4 位二进制数连接表示, 或使用栅格序号法直接编码。在连续空间对链接图中的最短路径  $P_0P_1P_2 \dots P_nP_{n+1}$ , 取其中  $P_i$  点, 由参数方程式中的  $t_i$  来决定:  $P_i=P_{i-1}+(P_i-P_{i-1})t_i, t_i \in [0, 1], i=1, 2, \dots, n$ , 所以个体编码为:  $P=t_1t_2 \dots t_n$ 。

作业调度 JSP 问题编码: 采用  $m \times n$  的矩阵  $Y$  描述,  $Y=[y_{ij}]$ ,  $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$  ( $m$  为从加工开始的天数,  $n$  为工件的优先顺序)。  $y_{ij}$  表示工件  $i$  在第  $j$  日的加工时间<sup>[9]</sup>。

倒立摆问题编码: 采用多参数编码。把每个参数二值编码为子串, 将子串级联构成完整染色体。若小车位置  $X$  的编码为 0011, 速率  $\dot{X}$  的编码为 01011, 摆角度  $\theta$  的编码为 010 和角速率  $\dot{\theta}$  的编码为 11101, 则倒立摆的 4 个参数优化控制问题的一个染色体编码组成为:

$$X+\dot{X}+\theta+\dot{\theta}=00110101101011101$$

#### 6 结论

遗传算法能否求解问题的前提是对求解问题的合理编码。本文分析了遗传算法中染色体的编码原则, 比较了二进制编码、格雷码编码、实数编码、符号编码、排列编码、二倍体编码、DNA 编码、混合编码、二维染色体编码或矩阵编码等编码的实质性行为, 在树编码和可变长编码基础上阐述了自适应编码的基本理论, 提出了基于相似度的可变长编码和基于结构的 agent 编码方式, 并分别就典型的智能优化问题如函数优化、TSP、KP、JSP、机器人路径规划、图的划分和倒立摆等的遗传算法求解给出了编码方案。具体的实际应用表明这些编码方法是实用和高效的<sup>[10]</sup>。(收稿日期: 2005 年 4 月)

#### 参考文献

1. 吉根林. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用与软件, 2004; (2)
2. 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
3. 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999
4. 李敏强, 寇纪淦, 林丹等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002
5. 杨业华. 分子遗传学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001
6. 刘丹杰. 遗传算法的编码研究[J]. 甘肃科技, 2004; (6)
7. 葛志远等. 基于二叉树结构编码的遗传算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000; (10)
8. Smith J. Self-adaptation of mutation rates in a steady state genetic algorithm[C]. In: proceedings of the third IEEE conference on Evolutionary Computation, Piscataway: IEEE Press, 1996: 318-323
9. 陈国良, 王煦法, 庄镇泉等. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996
10. S. Baskar. Performance of hybrid real coded genetic algorithms[J]. International Journal of Computational Engineering Science, 2001; 2(4): 583-601

作者：[余有明](#)，[刘玉树](#)，[阎光伟](#)，[Yu Youming](#)，[Liu Yushu](#)，[Yan Guangwei](#)  
作者单位：[余有明, Yu Youming \(北京理工大学计算机科学与工程系, 北京, 100081; 北京石油化工学院计算机系, 北京, 102617\)](#)，[刘玉树, Liu Yushu \(北京理工大学计算机科学与工程系, 北京, 100081\)](#)，[阎光伟, Yan Guangwei \(华北电力大学计算机系, 北京, 102206\)](#)  
刊名：[计算机工程与应用](#)[ISTIC](#)[PKU](#)  
英文刊名：[COMPUTER ENGINEERING AND APPLICATIONS](#)  
年，卷(期)：2006, 42 (3)  
被引用次数：152次

## 参考文献(10条)

1. [吉根林](#) [遗传算法研究综述](#)[期刊论文]-[计算机应用与软件](#) 2004(2)
2. [王小平](#); [曹立明](#) [遗传算法-理论、应用与软件实现](#) 2002
3. [周明](#); [孙树栋](#) [遗传算法原理及应用](#) 1999
4. [李敏强](#); [寇纪淞](#); [林丹](#) [遗传算法的基本理论与应用](#) 2002
5. [杨业华](#) [分子遗传学](#) 2001
6. [刘丹杰](#) [遗传算法的编码研究](#)[期刊论文]-[甘肃科技](#) 2004(6)
7. [葛志远](#), [王永县](#), [南兰](#), [刘清](#) [基于二叉树结构编码的遗传算法](#)[期刊论文]-[清华大学学报（自然科学版）](#) 2000(10)
8. [Smith J](#) [Self-adaptation of mutation rates in a steady state genetic algorithm](#) 1996
9. [陈国良](#); [王煦法](#); [庄镇泉](#) [遗传算法及其应用](#) 1996
10. [S Baskar](#) [Performance of hybrid real coded genetic algorithms](#) 2001(04)

## 本文读者也读过(1条)

1. [乐天](#) [遗传算法中二值编码与多值编码的比较](#)[期刊论文]-[科技信息](#) 2010(31)

## 引证文献(107条)

1. [陈瑛琦](#), [赵蕾](#), [邓林](#) [基于模拟退火遗传算法的自动组卷系统的研究](#)[期刊论文]-[电脑知识与技术](#) 2010(11)
2. [易胜秋](#), [王国军](#) [基于模拟退火遗传算法的自动组卷系统研究](#)[期刊论文]-[计算机工程与设计](#) 2008(17)
3. [王珊珊](#) [遗传算法的理论基础及应用](#)[期刊论文]-[科协论坛（下半月）](#) 2008(09)
4. [林锡彬](#) [各种常见自动组卷方法的研究](#)[期刊论文]-[福建电脑](#) 2010(03)
5. [马江涛](#) [基于遗传算法的医药配送路径规划](#)[期刊论文]-[电脑知识与技术](#) 2010(11)
6. [李博](#), [施霖](#) [混合编码遗传算法及其应用](#)[期刊论文]-[科技广场](#) 2009(09)
7. [张雷](#), [黄奕宏](#), [翁胜龙](#) [基于GA-DS的多神经网络故障诊断方法](#)[期刊论文]-[电子设计工程](#) 2015(10)
8. [刘青凤](#), [李敏](#) [基于遗传算法的TSP问题优化求解](#)[期刊论文]-[计算机与现代化](#) 2008(02)
9. [邵峰](#) [遗传算法在图像拼接中的应用](#)[学位论文]硕士 2007
10. [张拥华](#) [基于遗传算法的多配送中心运输调度研究](#)[期刊论文]-[湖南工业职业技术学院学报](#) 2009(03)
11. [申时凯](#), [吴绍兵](#), [申浩如](#) [获取模糊规则的遗传编码方法](#)[期刊论文]-[计算机工程与设计](#) 2008(05)
12. [欧阳鑫玉](#), [杨曙光](#) [基于势场栅格法的移动机器人避障路径规划](#)[期刊论文]-[控制工程](#) 2014(01)
13. [王辉](#) [用遗传算法求解TSP问题](#)[期刊论文]-[计算机与现代化](#) 2009(07)
14. [王云飞](#), [凌玉华](#), [谢炎彬](#) [铝电磁铸轧复合磁场智能控制器的设计](#)[期刊论文]-[电气技术](#) 2008(01)
15. [姜三义](#), [代真真](#), [李阳](#), [周爱民](#) [基于内存映射文件的进化算法数据存储引擎](#)[期刊论文]-[计算机工程与应用](#)

16. 饶磊, 汤小春, 侯增江 [服务器集群负载均衡策略的研究](#) [期刊论文] - [计算机与现代化](#) 2013(01)
17. 富震, 潘伟 [基于自适应遗传约简算法的雷达故障诊断](#) [期刊论文] - [控制与决策](#) 2010(04)
18. 莫愿斌, 刘贺同 [优化算法的信息原理与群搜索](#) [期刊论文] - [计算机工程与设计](#) 2008(04)
19. 刘欣, 严洪森, 沈博 [基于窗口的某航空发动机装配车间动态调度](#) [期刊论文] - [计算机技术与发展](#) 2013(12)
20. 吴玫, 陆金桂 [遗传算法的研究进展综述](#) [期刊论文] - [机床与液压](#) 2008(03)
21. 李杰, 刘弘 [基于遗传算法的分形艺术图案生成方法](#) [期刊论文] - [山东大学学报\(工学版\)](#) 2008(06)
22. 何娟, 涂中英, 牛玉刚 [一种遗传蚁群算法的机器人路径规划方法](#) [期刊论文] - [计算机仿真](#) 2010(03)
23. 金玉琴, 周金海, 张兴德, 司峻峰 [人工萤火虫的混合算法实现医药配送中的最佳规划](#) [期刊论文] - [计算机科学](#) 2014(02)
24. 张策 [一种遗传算法通用ActiveX控件的开发](#) [学位论文] 硕士 2008
25. 枝切法与曲面拟合结合的InSAR相位展开算法 [期刊论文] - [西安电子科技大学学报\(自然科学版\)](#) 2012(05)
26. 曲晓燕, 温德宏, 谢勇 [遗传算法在舰载机弹药转任务优化配置中的应用](#) [期刊论文] - [计算机与现代化](#) 2012(03)
27. 苏荣 [遗传算法在相位解缠中的应用](#) [学位论文] 硕士 2007
28. 李奕铭 [基于人工势场法的移动机器人避障研究](#) [学位论文] 硕士 2013
29. 常靖宇 [基于演化计算的多峰函数研究](#) [学位论文] 硕士 2010
30. 符卓, 聂靖 [求解带装载能力限制的开放式车辆路径问题的遗传算法](#) [期刊论文] - [系统工程](#) 2008(02)
31. 代向歌, 彭高明 [BP-GA算法对斗轮堆取料机回转平台的结构优化](#) [期刊论文] - [机械设计与研究](#) 2012(01)
32. 王延伟, 宋旭坤, 温瑞智, 丰彪 [智能优化算法在结构损伤识别中的应用](#) [期刊论文] - [世界地震工程](#) 2011(04)
33. 吕远方 [UTP中一种分阶段求解算法](#) [期刊论文] - [计算机工程与科学](#) 2009(06)
34. 贺志涛, 尚维, 于渤, 谢安石 [基于有效议价区间的谈判协调模型及求解](#) [期刊论文] - [南京理工大学学报\(自然科学版\)](#) 2008(04)
35. 赵泽睿 [基于多层次遗传编码技术机械产品整体方案的三维设计](#) [学位论文] 硕士 2007
36. 姜晨, 行鸿彦 [基于遗传算法的自动气象站气象数据预测](#) [期刊论文] - [湖北农业科学](#) 2013(20)
37. 赖志柱 [长模式遗传算法及其应用](#) [学位论文] 硕士 2008
38. 李元, 司明明, 张成 [基于GA特征选择和BP神经网络的模拟电路故障检测](#) [期刊论文] - [计算机测量与控制](#) 2014(09)
39. 易胜秋 [智能化网络教学系统的研究与设计](#) [学位论文] 硕士 2008
40. 刘京京 [多目标遗传优化及其在机器人路径规划中的应用](#) [学位论文] 硕士 2007
41. 巩蓓蓓 [基于FPGA的动态可重构系统分析](#) [学位论文] 硕士 2011
42. 孙涛 [遗传算法在商业银行信用风险评估中的应用](#) [学位论文] 硕士 2010
43. 孙明强 [基于遗传算法的电弧炉供电曲线的优化](#) [学位论文] 硕士 2008
44. 王悦 [车辆性能分析、配件辅助决策支持系统——系统结构研究与设计](#) [学位论文] 硕士 2007
45. 田东平 [一种结合混沌搜索的自适应遗传算法](#) [学位论文] 硕士 2007
46. 李娟 [基于神经网络的心盘螺栓故障识别算法研究](#) [学位论文] 硕士 2011
47. 陈绍宽, 毛保华, 郭谨一, 贾文峥 [基于GA\\_GSQP算法的设备维修计划优化模型](#) [期刊论文] - [系统工程学报](#) 2009(06)
48. 戴志晃 [一种基于熵量守恒的改进演化算法的研究](#) [学位论文] 硕士 2009
49. 曹步清 [基于GA进化BP神经网络的货币识别研究](#) [学位论文] 硕士 2007
50. 邹金欣 [一种宽波束卫星天线的并行演化自动设计](#) [学位论文] 硕士 2011

51. [周燕](#) [人工智能算法在构件检索中的应用](#)[学位论文]硕士 2011
52. [宋乐辉](#) [基于进化算法的微分方程演化研究及应用](#)[学位论文]硕士 2009
53. [周世龙](#) [精炼炉钢水成分的预报及终点控制](#)[学位论文]硕士 2008
54. [朱颖合](#) [自适应模糊PID控制器的研究与应用](#)[学位论文]硕士 2010
55. [徐小华](#) [干线运输车辆调度问题研究](#)[学位论文]硕士 2007
56. [姚佳茵](#) [CG项目中进度优化算法的研究与实现](#)[学位论文]硕士 2008
57. [张文霞](#) [船舶动力定位系统控位能力计算算法研究与实现](#)[学位论文]硕士 2008
58. [许江东](#) [基于演化计算的天线优化仿真模型研究](#)[学位论文]硕士 2007
59. [何然](#) [基于遗传算法的船舶辅助抗沉系统实现](#)[学位论文]硕士 2013
60. [何喜辉](#) [基于遗传模拟退火算法的精馏分离序列优化综合](#)[学位论文]硕士 2009
61. [马红霞](#) [基于神经网络的织物起毛起球客观评价](#)[学位论文]硕士 2008
62. [王文](#) [基于遗传蚁群算法的软件测试用例自动生成的研究](#)[学位论文]硕士 2010
63. [聂靖](#) [带装载能力限制的开放式车辆路径问题及其遗传算法研究](#)[学位论文]硕士 2007
64. [朱天宇](#) [移动机器人路径规划的研究](#)[学位论文]硕士 2014
65. [黄锷](#) [大学课程表问题中的算法研究与应用](#)[学位论文]硕士 2008
66. [谭慧琳](#) [基于遗传算法的知识推理研究](#)[学位论文]硕士 2011
67. [王慧妮](#) [客运专线列车运行调整模型及算法研究](#)[学位论文]硕士 2006
68. [刘曰强](#) [半潜式平台动力定位系统推力分配优化算法研究](#)[学位论文]硕士 2009
69. [姜明洋](#) [基于遗传算法的移动机器人路径规划方法的研究](#)[学位论文]硕士 2007
70. [邢强](#) [轨道交通引起的环境振动的振源参数虚拟反演](#)[学位论文]硕士 2007
71. [陈桂强](#) [仿人智能控制器的参数优化与结构自动设计](#)[学位论文]硕士 2007
72. [张蓉蓉](#) [神经网络在交通噪声预测中的应用研究](#)[学位论文]硕士 2010
73. [王中华](#) [基于遗传算法的港口船舶调度优化问题研究](#)[学位论文]硕士 2007
74. [赵彩霞](#) [基于多元受限的多机场联合放行问题研究](#)[学位论文]硕士 2012
75. [王建强](#) [载货汽车动力传动系优化匹配研究](#)[学位论文]硕士 2010
76. [何玲](#) [电弧炉供电曲线的综合优化](#)[学位论文]硕士 2009
77. [何娟](#) [动态不确定性环境下移动机器人路径规划的研究](#)[学位论文]硕士 2008
78. [蒋卓强](#) [基于遗传模拟退火算法的静态路径规划研究](#)[学位论文]硕士 2007
79. [李全](#) [基于改进遗传算法的动力总成悬置系统优化设计](#)[学位论文]硕士 2013
80. [易荣贵](#) [基于GIS的混合业务车辆调度问题研究](#)[学位论文]硕士 2008
81. [郭肇禄](#) [一种基于自适应迁移策略的并行遗传算法](#)[学位论文]硕士 2009
82. [武娟](#) [人脸表情的特征提取和识别算法研究](#)[学位论文]硕士 2008
83. [吴尚尉](#) [多波叠前AVA反演中的混沌遗传优化方法研究](#)[学位论文]硕士 2011
84. [黄颖生](#) [电磁连续铸轧改进型复合磁场控制系统的设计与研究](#)[学位论文]硕士 2007
85. [刘昱](#) [基于LMD和SVM的动力机械故障诊断方法研究](#)[学位论文]硕士 2012
86. [李杰](#) [基于遗传算法的分形艺术图案生成方法的研究](#)[学位论文]硕士 2009
87. [张伟华](#) [基于APDL的三次样条线型拱坝体形优化设计研究](#)[学位论文]硕士 2007
88. [宋通](#) [资源调度算法的研究与应用](#)[学位论文]硕士 2011



89. [许亮](#) [基于遗传算法的农业非点源最佳管理措施多目标优化研究](#)[学位论文]硕士 2010
90. [陈晋音](#) [生物启发计算若干关键技术与应用研究](#)[学位论文]博士 2009
91. [曹玮](#) [城市轨道交通与接运公交换乘模型优化研究](#)[学位论文]硕士 2013
92. [冯玉婷](#) [基于遗传算法的模式匹配系统优化技术](#)[学位论文]硕士 2011
93. [吴星雨](#) [基于GA-BP网络模型在短期气候预测中的应用——以四川省盐亭县为例](#)[学位论文]硕士 2009
94. [周雪倩](#) [基于遗传神经网络的水质评价模型优化及应用](#)[学位论文]硕士 2008
95. [莫愿斌](#) [粒子群优化算法的扩展与应用](#)[学位论文]博士 2006
96. [莫愿斌](#) [粒子群优化算法的扩展与应用](#)[学位论文]博士 2006
97. [宋乐辉](#) [基于进化算法的微分方程演化研究及应用](#)[学位论文]硕士 2009
98. [张文霞](#) [船舶动力定位系统控位能力计算算法研究与实现](#)[学位论文]硕士 2008
99. [陈得宝](#) [进化计算中的若干问题及应用研究](#)[学位论文]博士 2007
100. [胡选子](#) [基于人工免疫系统的移动机器人路径规划研究](#)[学位论文]博士 2008
101. [何娟](#) [动态不确定性环境下移动机器人路径规划的研究](#)[学位论文]硕士 2008
102. [吴星雨](#) [基于GA-BP网络模型在短期气候预测中的应用——以四川省盐亭县为例](#)[学位论文]硕士 2009
103. [郭继孚](#) [城市道路网络功能评价理论与方法研究](#)[学位论文]博士 2007
104. [高强](#) [远程多管火箭炮电液位置伺服系统辨识与控制策略研究](#)[学位论文]博士 2008
105. [李洪丞](#) [机械制造系统碳排放动态特性及其碳效率评估优化方法研究](#)[学位论文]博士 2014
106. [赵凤遥](#) [水电站厂房结构及水力机械动力反分析](#)[学位论文]博士 2006
107. [林开平](#) [人工神经网络的泛化性能与降水预报的应用研究](#)[学位论文]博士 2007

引用本文格式: [余有明](#). [刘玉树](#). [阎光伟](#). [Yu Youming](#). [Liu Yushu](#). [Yan Guangwei](#) [遗传算法的编码理论与应用](#)[期刊论文]-[计算机工程与应用](#) 2006(3)