

# 伪并行遗传算法及其在桥梁维修管理优化中的应用<sup>①</sup>

王砚如 王桂萱 (大连大学 土木工程技术与开发中心 辽宁 大连 116622)

**摘要:** 遗传算法(Genetic algorithms,简称 GA)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全局优化概率搜索算法。但该算法有时存在着早熟现象,导致搜索过早收敛,无法得到全局最优解。为此,分析伪并行遗传算法的优缺点,探讨用伪并行遗传算法(pseudo parallel genetic algorithm,简称 PPGA)求最优桥梁维修管理计划的解的可能性,并用于桥梁维修管理计划的优化。实验结果验证了该方法的有效性和 GA 相比,具有较快的收敛速度,为桥梁维修管理提出了新的方法。

**关键词:** 桥梁管理; 维修管理计划; 伪并行遗传算法; 约束多目标优化

## Pseudo Parallel Genetic Algorithm and Its Application to Optimization of Maintenance Planning for Existing Bridges

WANG Yan-Ru, WANG Gui-Xuan

(Department of Civil Engineering Technology Research and Development Center, Dalian University, Dalian 116622, China)

**Abstract:** Genetic algorithm(GA) is an algorithm used to find approximate solutions to difficult problems through the application of the principles of evolutionary biology to computer science. It can do a global search quickly. But premature phenomenon still exists in application. As a result, the searching converges earlier and the solution of the optimization cannot be got. Therefore, this paper analyzes the merits and demerits of the pseudo parallel genetic algorithm(PPGA) and discusses the optimum possibility by using PPGA, and at last, applies it to the optimization of maintenance planning for existing bridges. The experimental result has confirmed the validity of this method. Contrast to SGA, PPGA is quick in convergence. It provides a new method for existing bridges' maintenance plan.

**Keywords:** bridge management; maintenance plan; pseudo parallel genetic algorithm; constrained multi- objective optimization

## 1 引言

遗传算法<sup>[1,2]</sup>有时也称基因算法(Genetic algorithms,简称 GA),是一种借鉴生物自然选择思想和自然遗传机制的全局随机搜索算法,由于其优化过程与具体问题无关,只需要目标函数是可计算的,对于复杂优化问题只需选择、杂交、变异三种遗传运算,反复迭代,就能得到优化解,已经在工程领域得到了广泛的应用。但遗传算法其本身存在一些缺陷,主要是局部搜索能力差和存在未成熟收敛等问题。这就使得在计算中往往需要很长时间才能找到最优解,而且很

容易陷入局部极值。目前已经提出了许多解决这一问题的方法,如适应度缩放、采用变参数的遗传算法、将遗传算法和局部搜索算法相结合,采用并行机制等

本文根据桥梁维修管理计划优化的要求和模型,在基本遗传算法中引入伪并行机制,采用伪并行遗传算法,信息交换采用岛屿模型,最后将算法应用于桥梁维修管理计划的优化,并和简单遗传算法进行比较,以检验算法的收敛性能。结果表明,该算法能以较快的收敛速度和较大的机率获得已知最优解,并明显提高了遗传算法的运行速度,从而证明了该算法在桥梁

<sup>①</sup> 基金项目:日本文部科学省科学研究项目(10450169)

收稿时间:2009-09-09;收到修改稿时间:2009-10-14

维修管理计划优化问题上可行的。

## 2 伪并行遗传算法

### 2.1 简单遗传算法

Holland 提出的遗传算法<sup>[3,4]</sup>(SGA)又被称为简单遗传算法,以区别于其它后来的改进版本。尽管如此,简单遗传算法仍然是很多优化研究首选的基础算法。简单遗传算法包括 3 个主要算子,分别是选择、杂交和变异算子,它们共同对给定的种群中的个体(或称为染色体)进行遗传优化,实现“优胜劣汰”的过程。基于对自然界中生物遗传与进化机理的模仿,针对不同的问题,很多学者设计了许多不同的编码方法来表示问题的可行解。由不同的编码方法和不同的遗传算子,即选择、杂交和变异算子,就构成了各种不同的遗传算法。

### 2.2 遗传算法的并行性

遗传计算的本质并行性<sup>[5]</sup>表现在两个方面:一是遗传计算的内在并行性(Inherent Parallelism),即遗传算法本身非常适合大规模并行。最简单的并行方式是让多台计算机各自进行独立种群的遗传计算,到运算结束时再通信比较,选取最佳个体。二是遗传算法的隐含并行性(Implicit Parallelism)。由于遗传算法采用种群的方式组织搜索,可同时搜索解空间内的多个区域,并相互交流信息,使遗传计算能以较少的计算来获得较大的收益。目前已经有大量关于使用遗传算法进行并行优化的研究成果<sup>[6,7]</sup>,这为本文算法的性能分析与比较提供了良好的实验基础。

### 2.3 伪并行遗传算法的引入

基于遗传算法的并行性,很多学者认识到了对其进行并行处理的可能性,从而基于各种并行计算机或局域网,开发出了多种并行遗传算法(PPGA),主要目的是为了提高遗传算法的运行速度,同时可以维持种群多样性,抑制早熟现象的发生。这就有利于解决实际工程问题,因为比较大的工程计算一般都比较耗费机时。实现并行遗传算法的方法大体分为实现并行遗传算法的方法大体分为如下两类:标准型并行方法(Standard Paralled Approach)和分解型并行方法(Decomposition Parallel Approach)。本文研究的就是分解型并行方法。具体是在简单遗传算法中利用并行计算的思想,将群体划分为一些子群体,各子群体按一定的模式分别进行独立进化,在适当的时候,

某一些子群体之间交换一些信息。这样可以维持群体的多样性,从而达到抑制早熟现象的效果。子群体之间的信息交换模型有岛屿模型、踏脚石模型、邻居模型。但由于这些子群体并未在不同的处理机上独立进化,仍是在单个处理机上串行地执行,故称其为伪并行遗传算法<sup>[8,9]</sup>(Pseudo-Parallel Genetic Algorithms,简称 PPGA)。由不同的信息交换模型也就构成了不同的伪并行遗传算法。

### 2.4 岛屿模型

这个模型也叫做粗粒度并行遗传算法(Coarse-grained PGA),基于该模型的遗传算法也称为分布式遗传算法(distributed genetic algorithm, DGA)。该模型每个子种群所含个体的数量多于 1,各个子群体并行独立地运行简单遗传算法,并且以随机的时间间隔、在选择子种群之间交换个体信息。通过子群体之间交换信息的算子,即迁移策略(migration),可以加快好个体在群体中的传播,提高收敛速度。一般的迁移策略是将子种群中最好的个体发给其它的子种群,可以一传多,也可以一传一。个体的迁移结构有三种:网络拓扑、环状拓扑和邻集拓扑。根据具体的问题,选取适当的迁移策略和迁移结构。

### 2.5 算法流程

伪并行遗传算法(PPGA)流程描述如下:

#### ① 遗传建模

通过编码将问题的候选解变换成遗传空间中的基因型串结构数据,确定标准适应函数。遗传代数计数器初始化,  $t \leftarrow 0$ 。

#### ② 随机初始化种群

由确定的遗传建模,随机产生各种各样的要素个体,组成随机初始化种群  $P(t)$ 。并按信息交换模型划分  $P(t)$  为子群体:

$$p(t) = \{p_1(t), p_2(t), \dots, p_i(t), \dots, p_n(t)\}$$

其中,  $n$  为分组数。

#### ③ 分组计算个体适应度

分组计算各  $P_i(t)(i=1,2,\dots,n)$  中个体的适应度。

#### ④ 对各 $P_i(t)(i=1,2,\dots,n)$ 进行分组独立进化:

由选择算子进行复制操作:  $p_i'(t) \leftarrow \text{selection}[P_i(t)]$ ; 由交叉算子进行交叉操作:  $p_i''(t) \leftarrow \text{crossover}[p_i'(t)]$ ; 由变异算子进行变异操作:  $p_i'''(t) \leftarrow \text{mutation}[p_i''(t)]$ 。

#### ⑤ 分组计算个体适应度

分组计算各  $p_i^{m}(t)$  ( $i=1,2,\dots,n$ )中的个体适应度。

⑥ 信息交换

由信息交换模型进行各  $P_i(t)(i=1,2,\dots,n)$ 之间的信息交换,得到下一代群体:

$$P_i(t+1) \leftarrow \text{exchange} [ p_1^m(t), p_2^m(t), \dots, p_i^m(t), \dots, p_n^m(t) ]。$$

子群体之间信息交换模型采用孤岛模型、踏脚石模型和邻居模型中的一种。

⑦ 终止条件判断

若不满足终止条件,则:  $t \leftarrow t+1$ ,转向④;若满足终止条件,则:输出优化结果,算法结束。

具体的流程图见图 1。

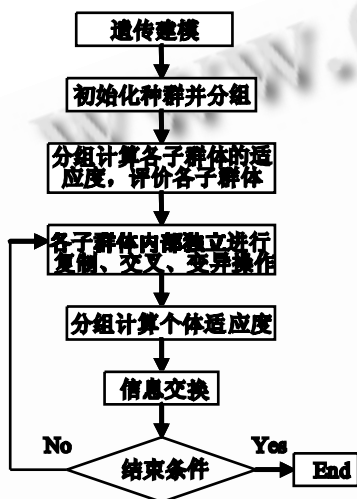


图 1 PPGA 的基本算法

### 3 桥梁维修管理优化问题

#### 3.1 桥梁管理系统

桥梁管理系统(BMS)<sup>[10]</sup>是关于桥梁基本数据、桥梁检测、状态评估、结构退化预测、维护对策和计划以及经济分析的计算机信息系统。桥梁数据库中存储主要来自桥梁检测的桥梁信息,管理系统然后对其进行详细的分析,得出桥梁的当前状况,并对结构的将来状况、维修对策及相关费用进行预测分析,从而制订出当前及将来一定时期内的桥梁维护计划。

大连大学与日本山口大学联合开发了钢筋混凝土桥智能决策辅助系统<sup>[11-13]</sup>,该系统利用神经网络、模糊评判、遗传算法及免疫算法等最新信息处理技术,

开发了内容包括数据库管理系统、老化评价系统(根据桥梁老化评价结果进行桥梁老化预测,并考虑经济和质量两方面因素制订桥梁维修管理计划)、以及根据桥梁老化原因选择维修管理对策的系统等。其中的维修管理计划优化系统根据对桥梁各构件经年老化的评价及预测结果,结合桥梁维修对策的经济性指标,建立了考虑桥梁维护管理经济性和质量指标的维修加固模型,并使用简单遗传算法(SGA)进行优化求解。

#### 3.2 维修加固计划的模型化

桥梁维修管理计划的制定受到很多因素的制约,其中最重要的两个是经济因素和品质因素。这两个因素在某种程度上又是相互矛盾的。对于桥梁管理者来说,其最终目标是用最小的资金投入取得最优的品质。为了解决这一问题,系统分两个阶段对维修管理计划进行优化:

① 首先,仅考虑经济性因素,以桥梁维修管理费用最小为目标进行第一阶段的优化。此时的目标函数和约束条件如下式所示:

$$\text{目标函数: } F = \sum_{t=t'}^{T-1} C_{ij} \rightarrow \text{Min} \quad (1)$$

$$\text{约束条件: } \left. \begin{aligned} f(t) > 0 \\ 0 < t < T \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中:  $t$ ——桥龄(年);  
 $t'$ ——评价时的桥龄(年);  
 $T$ ——桥梁设计使用寿命(年);  
 $j$ ——可选择的对策方法种类( $j=1 \sim 9$  or  $10$ );

$f(t)$  ——桥龄  $t$  年时耐荷性的平均健全度;

$C_{ij}$ ——桥龄  $t$  年时进行的  $j$  号维修加固对策及桥梁检查所必需的费用。

$j$  号维修加固对策费种类视桥梁的构件是主梁、桥面板还是下部结构而变化,系统中考虑主梁的维修管理对策有 10 种,桥面板对策有 9 种,下部结构也有 10 种。系统把由上述过程(1)式求出来的维修管理计划费用用  $\text{cost}_1$  来表示。

② 其次考虑质量的最大化来进行二次优化。考虑质量指标的目标函数,参考由(1)式目标函数求得的费用  $\text{cost}_1$ ,桥梁管理者在预算允许范围内确定费用的可能增幅  $\alpha$ ,再把  $\text{cost}_1$  和  $\alpha$  的和作为总费用的上限。此时的目标函数和约束条件如下式所示:

$$\text{目标函数: } F = \sum_{t=t'}^T \{f(t) + g(t)\} \rightarrow \text{Max} \quad (3)$$

$$\sum_{t=t'}^{T-1} C_{ij} \rightarrow \text{Min} \quad (4)$$

$$\text{约束条件: } \left. \begin{aligned} f(t) > 0 \\ g(t) > 0 \\ 0 < t < T \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中,  $g(t)$ : 桥龄  $t$  年时耐久性的平均健全度。

③ 调整费用的可能增幅  $\alpha$ , 反复进行第②步的计算, 就可以给出各种各样的维修、加固计划。

### 4 仿真研究

桥梁最终维修管理计划的制定过程也就是方程(1)~(5)的求解过程。这一过程事实上是包含资金、材料、施工方法、环境条件等诸多内容的多目标组合优化问题, 本文采用了伪并行遗传算法(PPGA)进行优化组合, 从而给出一定时间内的最优维修管理计划。如前所述, 实际的维修管理计划的优化按经济性和质量分两阶段进行, 但仅以费用为例来进行分析。

下面以我国境内一座钢筋混凝土桥——通远铺河桥为例说明运用 PPGA 制定桥梁维修管理计划中表现得性能。

#### 4.1 维修管理对策的变量编码

本文采用的是二进制编码。二进制的编码规则具体可以表述为: 若变量  $x$  的取值区间为  $[a, b]$ , 要求变量的精度为小数点后  $n$  位, 则染色体串  $v$  的长度  $m$  应为:

$$2^{m-1} < (b-a) \times 10^n < 2^m - 1 \quad (6)$$

二进制  $v$  对应的十进制编码  $x'$  的转换公式为:

$$v = [v_m v_{m-1} v_{m-2} \dots v_0] = \left( \sum_{i=0}^m v_i \cdot 2^i \right) = x' \quad (7)$$

十进制编码与实数变量的转换公式为:

$$x = a + \frac{(b-a)x'}{2^m - 1} \quad (8)$$

本文以主梁为例来说明系统在制定维修管理计划时, 所采用的二进制编码。在系统中染色体用来表示维修管理对策(决策变量), 个体表示维修管理计划。主

梁的维修管理对策共 10 种(见表 1)。所以, 变量  $x$  取值范围是  $[1, 10]$ , 系统中的变量只是选择维修管理对策方法的种类, 因此, 对变量小数点后的精度没有要求, 即  $n=0$ 。由(6)式可得, 系统在制定桥梁下部结构维修管理计划时, 所需的染色体串的长度为  $m=4$ 。然而, 当染色体长度为 4 时可以表示的对策数有  $2^4=16$  种组合, 因而不能将对策一对一地表现出来。由于在计算中需要频繁使用对策 1(不进行维修加固), 所以系统把多余的组合全部与对策 1 项对应。表 1、表 2、表 3 分别给出主梁、桥面板和下部结构维修管理对策的编码。

表 1 主梁维修管理对策

编码	主梁的维修管理对策	费用 (U)
0110	②环氧树脂注入 or 环氧树脂注入+断面修复	A) 23.8 B) 33.6
	③玻璃纤维+环氧树脂注入 or 玻璃纤维+环氧树脂注入+断面修复	A) 44.8 B) 54.6
1101	④压力喷浆+环氧树脂注入 or 压力喷浆+环氧树脂注入+断面修复	A) 33.6 B) 43.4
	⑤玻璃钢 4 块粘结 (钢板)+环氧树脂注入 or 玻璃钢 4 块粘结 (钢板)+环氧树脂注入+断面修复	A) 132.1 B) 141.9
0100	⑥玻璃钢 2 块粘结 (钢板)+环氧树脂注入 or 玻璃钢 2 块粘结 (钢板)+环氧树脂注入+断面修复	A) 97.6 B) 107.4
	⑦体外预应力拉杆	150.0
0111	⑧体外预应力拉杆+环氧树脂注入 or 体外预应力拉杆+环氧树脂注入+断面修复	A) 169.6 B) 179.4
	⑨体外预应力拉杆+玻璃纤维+环氧树脂注入 or 体外预应力拉杆+玻璃纤维+环氧树脂注入+断面修复	A) 190.6 B) 200.4
0011	⑩体外预应力拉杆+压力喷浆+环氧树脂注入 or 体外预应力拉杆+压力喷浆+环氧树脂注入+断面修复	A) 179.4 B) 189.2
	其它 ①不进行维修加固	0

表 2 桥面板维修管理对策

编码	桥面板的维修管理对策	费用 (U)
0110	②环氧树脂注入 or 环氧树脂注入+断面修复	A) 23.8 B) 33.6
	③玻璃钢 4 块粘结 (钢板)+环氧树脂注入 or 玻璃钢 4 块粘结 (钢板)+环氧树脂注入+断面修复	A) 94.6 B) 104.4
0100	④玻璃钢 2 块粘结 (钢板)+环氧树脂注入 or 玻璃钢 2 块粘结 (钢板)+环氧树脂注入+断面修复	A) 71.6 B) 81.4
	⑤加设横梁	44.3
1011	⑥加设横梁+环氧树脂注入 or 玻璃钢 2 块粘结 (钢板)+环氧树脂注入+断面修复	A) 63.9 B) 73.7
	⑦桥面板加厚	43.0
1000	⑧桥面板加厚+环氧树脂注入 or 桥面板加厚+环氧树脂注入+断面修复	A) 62.6 B) 72.4
	⑨更换桥面板	45.0
其它	①不进行维修加固	0

表 3 下部结构维修管理对策

编码	下部结构的维修管理对策	费用 (U)
0110	②环氧树脂注入, 断面修复	33.6
1000	③扩大基础加固法	95.0
1101	④加桩法 (打入桩或就地灌注水泥混凝土桩)	46.2
0010	⑤减轻荷载法	32.7
0100	⑥顶升法	58.6
1100	⑦支撑法或加宽加厚法 (处理墩台变位)	44.2
0111	⑧用钢筋混凝土套箍 (或护套) 加固墩台	59.4
1001	⑨抛石法	60.0
0011	⑩其它加固方法 (旋喷法、砂桩法等)	45.0
其它	①不进行维修加固	0

注: 1) 表中当耐久性的平均健全度大于 50 时选 A), 小于 50 时选 B)。

2) 表中费用单位是(U)约为¥100 元 / m<sup>2</sup>

### 4.2 计算个体的适应度

由于个体本身代表一个维修计划, 该计划需要的总费用可根据表 1 和表 2 计算出来。考虑按桥梁构件的经济性指标进行优化时, 由公式(1)的目标函数 F 可以求出费用的最小值, 该计划的适应度函数取费用最小值的倒数。同样考虑按构件的品质指标进行优化时, 把由公式(3)确定的合计值作为个体的适应度。这里对不满足条件的个体施加惩罚数, 使其作为后代父代的机会减少, 罚则如下:

① 不满足式(2)、(5)的约束条件, 也就是说桥梁构件的耐荷性或耐久性的平均健全度在 0 以下时, 在总费用中加上 5000(U);

② 由(4)式确定的总费用超过维修管理者确定的额度时, 将适应度改为 0。

### 4.3 PPGA 的参数选择

本研究中运用 PPGA 求解时, 各参数的设定遵照一般的约定, 通过试算求出。表 4 列出了各参数的选择。

表 4 SAGA 参数

项目	参数取值及方法
个体数	30
迭代代数	300
突然变异率	10 %
选择方法	适应度比例方法
交叉方法	1 点交叉
交叉率	100 %
结束条件	迭代代数 = 迭代代数

### 4.4 分组及信息交换

本研究中把种群分为 3 组, 每组 10 个个体, 信

息交换采用的是岛屿模型, 迁移模型采用网络拓扑。具体实现时, 本文设计了两种信息交换策略, 并且在每代都进行信息交换, 一种是每个子群体中找出最好的个体, 迁移到其他子群体, 替换其最差的个体, 称这种信息交换的算法为 PPGA1。另一种称为 PPGA2, 是把其中一个种群中的最好个体迁移到其他两个子种群中, 替换其最差的一个个体。这两种都是岛屿模型。

### 4.5 仿真结果

表 5 给出了用 2 方法(SGA、PPGA1)计算 10 次 50 年维修计划的最优解比较, 表 6 给出了用 2 方法(SGA、PPGA2)计算 10 次 50 年维修计划的最优解比较, PPGA1、PPGA2 都可以得到维修费用最小的解, 并且解的平均值最小, 最接近理想解, PPGA2 明显比 PPGA1 的结果更优, 说明对于桥梁维修管理计划的优化问题来说, 采用把其中一个种群中的最好个体迁移到其他两个子种群中, 替换其最差的一个个体的信息交换的方法更好。由表可以看出, PPGA 的平均值低于遗传算法, 这说明 PPGA 提高了遗传算法收敛到最优解的概率, 因此, PPGA 不仅能找到更优的结果, 而且收敛的速度也较快, 是一种有效的算法。

表 5 制定 50 年维修管理计划的平均值比较(PPGA1)

计算方法	平均值	求出的优化解	理想解
SGA	262.03	228.4, 233.8, 242.4, 254.8, 256.2, 266, 268.6, 270.8, 280.9, 318.4	200.4
PPGA1	257.69	226.6, 232.4, 236.4, 245, 254.8, 257.6, 268.3, 280.6, 294.6	200.4

图 2、3 分别给出了 PPGA1 和 PPGA2 制定 50 年维修管理计划的最优解随迭代代数的变化。从图中可以看出, PPGA2 比 PPGA1 的效果更好, 两者都可以求得更小(更优)的解, 且在较早的代数就收敛到最优解, 比 GA 有更快的收敛速度。从图 3 中可以看出, GA 在后期的搜索效率较低, 容易产生早熟收敛问题, 而 PPGA2 由于在子群体间进行了信息交换, 维持了群体的多样性, 明显抑制了早熟现象的发生。也正是因为如此, PPGA 能更快地寻找到全局最优值, 从而提高了遗传算法的运行速度。仿真结果为: GA 运行 10 次的平均时间为 13661 ms, PPGA2 运行 10 次的平均时间为 14145.5 ms。

表6 制定50年维修管理计划的平均值比较(PPGA2)

计算方法	平均值	求出的优化解	理想解
SGA	257.06	222.6, 226.6, 228.4, 232.4, 237.8, 239.6, 278, 282, 307.6, 315.6	200.4
PPGA2	239.28	218.6, 225.8, 232.4, 237.8, 239.6, 243.6[2], 247.6[2], 256.2	200.4

[]中的数字是计算10次得到该解得频率。

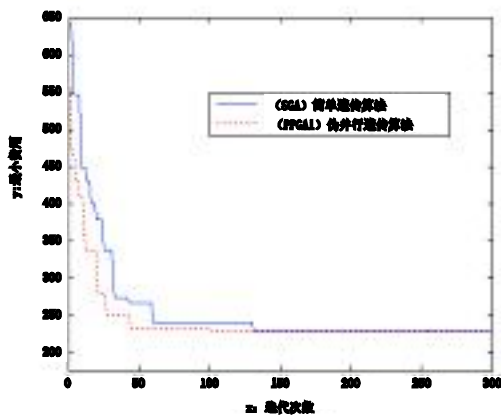


图2 50年维修管理计划的最优解的变化(PPGA1)

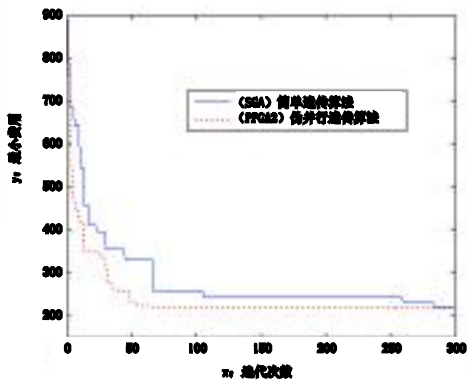


图3 50年维修管理计划的最优解的变化(PPGA2)

## 5 结论

本文的研究内容是大连大学与日本山口大学联合开发的桥梁智能决策辅助系统中的桥梁维修管理计划优化系统部分。考虑遗传算法的“早熟”现象，引入伪并行机制，提出一个基于伪并行遗传算法(pseudo parallel genetic algorithm, 简称 PPGA)的桥梁维修管理计划优化的方法。研究分析表明，应用伪并行遗传算法求解问题收敛性能更好，既维持了群体的多样

性，又抑制了“早熟”现象，同时提高了收敛速度，对于桥梁维修管理计划的优化来说有一定的优势，该算法具有较好的性能。但是它在运行速度上，只比 GA 快了五百毫秒左右，提高的不是很快，可作为下一步改进的方向。

## 参考文献

- 1 杨晓华,沈珍瑶.智能算法及其在资源环境系统建模中的应用.北京:北京师范大学出版社,2005.
- 2 郭栋,时银水,朱岩.一种模拟退火伪并行遗传算法.指挥控制与仿真,2007,6:37-40.
- 3 关晓颖,胡晓敏,张军.降维式自主迁移伪并行遗传算法.计算机工程与设计,2009,30(1):158-163.
- 4 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用.北京:国防工业出版社,1999.
- 5 Holland JH. A daptation in Natural and A rtiificial Sys2tems. University of M ichigan Press, Ann A rbor. 1975.
- 6 Cantú-Paz E, Goldberg DE. Modeling idealized bounding cases of parallel genetic algorithms. Proc. of the 2nd Annual Conference on Genetic Program-ming. San Francisco,CA. 1997. 353-361.
- 7 Cantú-Paz E, Goldberg DE. Predicting speedups of idealized bounding cases of parallel genetic algorithms. Proc. of the 7th International Conference on Genetic Algorithms. EastLansing,MI. Michigan State University, 1997. 113-121.
- 8 张大斌,王婧,刘桂琴,朱侯.基于伪并行遗传算法的聚类分析方法.计算机工程与设计,2009,30(1):171-174.
- 9 刘军,王介生.旅行商问题(TSP)的伪并行遗传算法.控制理论与应用,2007,4:279-282.
- 10 陈雅琴.桥梁管理系统研究[硕士学位论文].西安:长安大学,2000.
- 11 王桂莹,中村秀明,晏班夫,宫本文穗.基于模糊神经网络的桥梁诊断辅助系统研究.中国公路学报,2004,1:45-50.
- 12 王桂莹,宫本文穗,晏班夫,中村秀明.桥梁智能决策辅助系统的开发.公路交通科技,2004,9:70-73.
- 13 王桂莹,中村秀明,晏班夫,宫本文穗.利用遗传及免疫遗传算法进行桥梁维修管理计划的优化.土木工程学报,2005,8:128-134.