

文章编号: 1000-8055(2004)05-0593-05

基于协进化的管路系统智能寻径

樊 江, 马 枚, 杨晓光

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 在航空发动机外部管路敷设过程中, 多条管路路径之间存在相互影响, 并最终影响管路的整体最优路径。本文在遗传算法的基础上采用协进化的思想研究多条管路同时敷设的方法, 提出各条管路分别以遗传算法进行路径寻优, 管路之间以协作度衡量管路系的质量的方法。并在二维凸多边形障碍物的情况下验证了算法的可行性。

关键词: 航空、航天推进系统; 遗传算法; 协进化; 管路敷设

中图分类号: V 233. 7

文献标识码: A

Path Planning in Pipe System Based on Coevolution

FAN Jiang, MA Mei, YANG Xiao-guang

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China)

Abstract: In the process of aero-engine pipe laying design, it is important to solve the problem of interference among pipes. Genetic Algorithms (GAs) were used to put forward a multiple path planning method based on coevolution concept. Between any two pipes in the pipe system, the cooperative function was used to measure the fitness of pipes. A validation of the 2D path planning using this method is presented.

Key words: aerospace propulsion system; Genetic Algorithms (GAs); coevolution; pipe routing

管路系统的敷设在航空航天、汽车、石油等领域都有着重要的作用, 对于产品在性能和可靠性等方面的影响越来越大。随着计算机技术和智能计算技术的发展, 目前人们已经在逐步采用计算机辅助的管路敷设方法解决这个问题。

管路敷设方法可资借鉴的是机器人的路径规划方法。目前常见的解决方法有 4 种: 骨架法、单元分解法、人工势能法和数学优化法。在数学优化法中, 目前遗传算法在管路敷设中的应用逐渐引起研究者的关注。

国外关于管路敷设的研究^[1, 2]大多是针对一

条管路的敷设, 并不能很好地解决管路系统整体的最优化。一般的管路系统通常由很多条管路构成。管路之间彼此影响, 形成一个管路系统。只针对一条管路进行计算, 得到这条管路的最优解(或次优解)。但对于整个管路系统, 每条管路的最优解并不代表全局的最优解。要得到整个管路系统的最优解, 本文提出以协进化的思想来解决管路系统的整体敷设, 对每条管路都生成一个种群, 这样整个管路系统构成一个多种群的生态系统, 各种群之间通过彼此合作与竞争, 最终形成一个稳定的生态环境, 从而得到整个管路系统的最优解。

收稿日期: 2003- 10- 22; **修订日期:** 2004- 07- 02

作者简介: 樊江(1973-), 男, 四川永川人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院博士后, 主要从事航空发动机 CAD/CAE/PDM 及多学科优化研究

1 遗传算法及协进化

1.1 遗传算法

遗传算法 (GA s: Genetic A lgorithm s) 是模拟自然界生物进化过程的一种随机优化方法。它作为一种新的全局优化搜索算法, 以其简单通用和鲁棒性强等优点成为应用广泛的一种关键智能计算方法。

在遗传算法中, 染色体对应的是数据或数组。染色体也叫基因型个体。一定数量的个体组成了种群。种群中个体的数目成为种群的大小, 也叫种群规模。而各个个体对环境的适应程度叫做适应度 (fitness)。

遗传算法是具有“生成+ 检测”的迭代过程的搜索算法。基本流程如图 1。

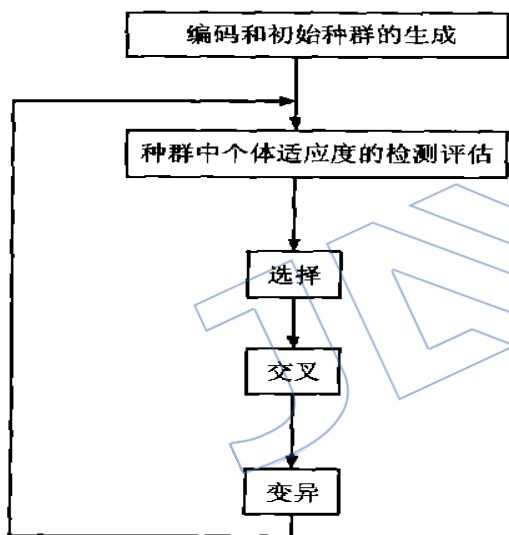


图 1 遗传算法的基本流程

Fig 1 Genetic A lgorithm s flow

由图 1 可见, 遗传算法是一种群体型操作, 该操作以群体中的所有个体为对象。选择、交叉和变异是遗传算法的 3 个主要操作算子, 它们构成了所谓的遗传操作, 使遗传算法具有了其它传统方法所没有的特性。遗传算法包含如下 5 个基本要素: (1) 参数编码; (2) 初始种群的设定; (3) 适应度函数的设计; (4) 遗传操作的设计; (5) 控制参数设定 (主要指群体的大小和使用遗传操作的概率)。这 5 个要素构成了遗传算法的核心内容。

1.2 协同进化

传统的遗传算法存在一些内在的问题^[3]:

(1) 传统的遗传算法中的物种群体具有很强的收敛性, 这导致算法最后只保留了最“强壮”的

个体, 这对于那些需要给出更多信息而不只是峰值的问题就无能为力。

(2) 每个个体都代表了所要求解的完整解决方案, 而且个体之间是彼此孤立的。由于没有建立群体成员之间的交互模型, 十分不利于群体产生共同适应环境的行为。在自然界中, 各种生物和物种共存于一个生态系统中, 每个物种都在这个生态环境中有自己的生存环境 (生境)。在生态环境中只有有限的资源, 各物种需要通过竞争与合作才能获得自己生存所需要的资源。通过竞争与合作作为动力, 各物种不断进化和改变, 相互影响彼此的进化过程, 这个相互适应的过程称为协同进化 (Coevolution)。

为了克服传统遗传算法的不足, 解决一类更为广泛的机器学习、共同适应问题, 人们提出协同进化计算 (CEC, Coevolutionary Computation)^[4] 的思想来模拟自然界的协同进化机制。在协同进化计算中, 通常存在多个物种种群, 每个物种种群都有自己的物种个体类型, 各个物种群体都采用遗传算法实现进化过程, 而在对个体进行适应度评价时, 则加入对群体间交互协调的处理。对有利于群体间协调的个体赋予较高的适应度, 而不利的则赋予较低的适应度, 这样各个群体就会向着有利于相互协调适应的方向进化, 从而产生协调行为。

管路系统敷设过程就类似于这样一个生态系统。为此本文研究发展了一种协进化的机制用于管路的敷设。

2 管路敷设的遗传算法

2.1 个体的编码方法

管路与障碍物的间隙问题采用扩大障碍物边界的方式来解决。这样就只考虑管路中心线路径与障碍物的关系。一条管路路径是从起点位置到终点位置, 由若干条线段组成的折线。线段的端点称为节点 (用平面坐标 (x, y) 表示), 一条路径上的节点个数是变化的。绕过了障碍物的路径为可行路径。

一条路径对应种群中的一个个体 (染色体) p , 用路径上的节点坐标 (x, y) 和状态量 b 组成的表来表示。状态量 b 用来刻画节点是否在障碍物内以及本节点与下一节点组成的线段是否与障碍物相交。个体 p 可表示如下:

$$p = \{(x_1, y_1, b_1), (x_2, y_2, b_2), \dots, (x_n, y_n, b_n)\}$$

其中: $(x_1, y_1), (x_n, y_n)$ 是固定的, 分别表示起始位置和终止位置。

个体按随机的方式产生, 预先给定个体的最大长度 M , 随机产生区间 $[2, M]$ 内的一个整数 n 作为个体 p 的长度, 再按随机的方式产生 $n-2$ 个坐标点。种群的大小预先给定常数 P_0 。

2.2 适应度函数

适应度函数的选择相当重要, 对于具有约束性能指标的最优问题, 可以取性能指标或性能指标的变换作为适应度函数。本文讨论的是求全局最短路径系, 约束条件是路径与障碍物不交, 且路径与路径不交, 而且保留一定的安全距离。遗传算法是求解最大值问题的算法。对有约束的最小值问题要转换为有罚函数的最大值问题。所以适应度函数取为:

$$Fit(p) = \frac{1}{dist(p) + rQ(p) + \alpha Y(p) + c\Phi(p)} \tag{1}$$

其中 $dist(p), Q(p), \Phi(p)$, 和 $Y(p)$ 的定义如下:

$$dist(p) = \sum_{i=1}^{n-1} d(m_i, m_{i+1})$$

表示路径的总长, $d(m_i, m_{i+1})$ 表示相邻两节点 m_i, m_{i+1} 之间的距离。

$$Q(p) = \sum_{i=1}^{n-1} C_i$$

表示与障碍物的相交程度, 其中 C_i 定义如下:

$$C_i = \begin{cases} A & \text{if interference} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

如果相邻两节点 m_i, m_{i+1} 之间的线段与障碍物相交, C_i 取 A (一个较大的常数), 否则取 0 。

$$Y(p) = \sum_{i=1}^{n-2} K_i$$

表示个体 p 满足加工性能的程度, 其中 K_i 的定义如下:

$$K_i = \begin{cases} C_{\max} & \alpha > 90^\circ \\ 0 & \alpha < 90^\circ \end{cases}$$

α 表示两直线段 (m_i, m_{i+1}) 和 (m_{i+1}, m_{i+2}) 之间的夹角。如果夹角大于 90° , K_i 取一个较大的常数 $C_{\max}$, 否则取 0 。

$$\Phi(p) = \frac{\sum_{i=1}^N Fit(p_i)}{N}$$

表示协作程度, 其中 $Fit(p_i)$ 表示另一对应种群中个体 i 的适应度, N 为另一个对应种群的规模。协

作度的具体计算方法见 3.5。式(2)中 r, c 和 a 为权系数, 需要根据问题的量纲以及其它具体情况进行试算。

2.3 交叉算子和变异算子

交叉算子采用非对称单点交叉策略。非对称指进行杂交的路径个体染色体长度不必相等, 杂交点不必在同一位置。在路径 p_1 中随机选择杂交点 i_{10} 。在路径 p_2 中随机选择杂交点 i_{20} 。互相交换 $i_k (k=1, 2)$ 之后的路径部分, 得到两个新的路径个体。如图 2(a) 交换 A, B 点之后的路径。

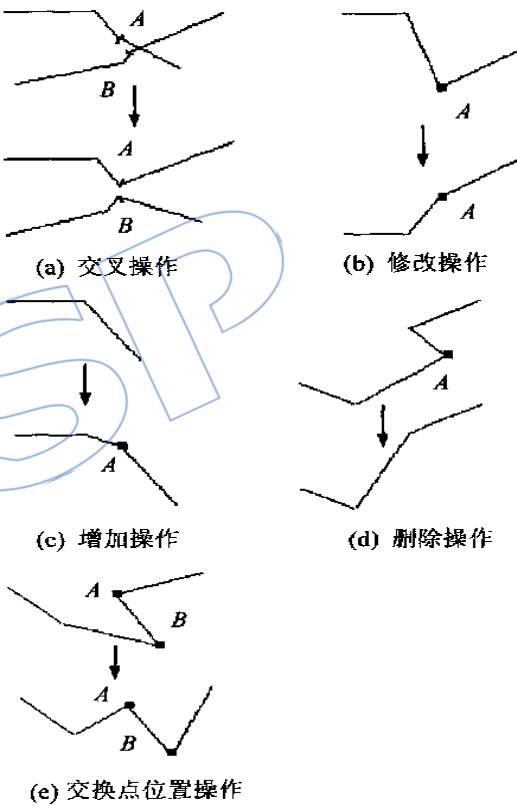


图 2 遗传操作示意图

Fig. 2 Genetic operate

变异算子采用了 4 种形式: 修改一个点, 增加一个点, 删除一个点, 和交换点位置。

修改操作: 在路径上随机选择一个点(非起始节点和终止节点), 用随机产生的 x 和 y 值替代原来的点。如图 2(b) 中的 A 点。

增加操作: 随机生成一个点, 插入到路径的一个随机位置上。如图 2(c) 增加点 A 。删除操作: 在路径上随机选择一个点, 进行删除。如图 2(d) 删除点 A 。

交换点的位置: 交换相邻两个节点的相互位置。如图 2(e) 先 B 后 A , 交换后为先 A 后 B 。

2.4 终止代数或终止条件

本算法的运行结束条件既使用终止代数,同时结合终止条件。终止条件是最优个体的适应值连续五代不变化,而且连续 5 代个体平均适应值的差异小于某一个极小的阈值。

2.5 管路路径协进化方法

具体的算法步骤如下(以并行敷设两条管路 PA, PB 为例):

(1) 初始化

种群 PA : 规模为 N_1 个体编码如前文所示。确定交叉概率和变异的概率。

种群 PB : 对应于种群 PA 中的第 i 个个体, 均匀随机产生一个规模为 N_2 的种群 B_i 。个体编码同前, 障碍物中增加 PA 的第 i 个个体, 确定交叉概率和变异概率。这样共有 N_1 个种群 $B_i (i=1, 2, \dots, N_1)$

(2) 算法迭代

for $k=1, 2, \dots, \text{max-cycles}$

对应于种群 A 中的第 B_i 个个体, 确定种群 B_i 的环境, 这将影响 A 中个体的适应值。

for $i=1, 2, \dots, N_1$

for $j=1, 2, \dots, \text{max-gen-b}$

按前文所示的遗传算法
进化种群 B_i 。种群 B_i 进化固定的代数。

End

End

进化种群 PA , 其协作度为:

$$\Phi(p) = \frac{\sum_{i=1}^N \text{Fit}(p_i)}{N}$$

End

3 算例验证与结论

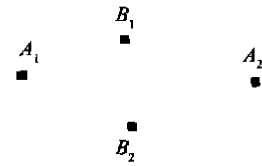
采用一般顺序敷设的算法, 通常会由于敷设顺序的不同造成最后结果的不同。如图 3 所示。求解 (a) 中 (A_1, A_2) , (B_1, B_2) 两条管路路径, 由于敷设的顺序不同, 敷设的结果有 (b) 和 (c) 两种。显然 (b) 中的结果并不是最优解。如果环境中存在障碍物, 情况就变得更复杂, 采用顺序敷设的困难就更大。

如果采用协进化的方法, 则问题可以较满意地得到解决。本文在 PC 机上用 Visual C++ 开发了一个基于协进化的验证程序, 结果见图 4。可以看到, 结果是比较满意的。

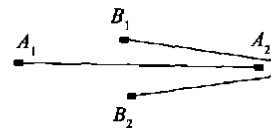
本文的算法在应用到三维环境中时, 只需要

把式(1)中个体的编码改为:

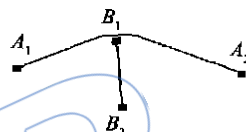
$$p = \{(x_1, y_1, z_1, b_1), (x_2, y_2, z_2, b_2), \dots, (x_n, y_n, z_n, b_n)\}$$



(a) 问题的初始情况



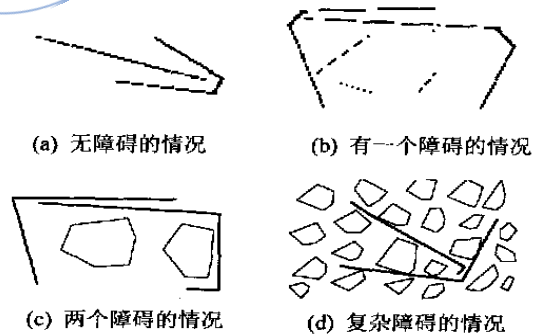
(b) 先 A_1, A_2 后 B_1, B_2



(c) 先 B_1, B_2 后 A_1, A_2

图 3 二维顺序路径寻找

Fig 3 2-D ordered path finding



(a) 无障碍的情况

(b) 有一个障碍的情况

(c) 两个障碍的情况

(d) 复杂障碍的情况

图 4 二维实例验证图

Fig 4 2-D demonstration

相应的适应度函数的计算采用三维环境下的计算, 即可推广到三维环境中。

本文通过分析管路系统的敷设问题, 提出以协进化的思想进行管路的智能并行敷设, 并给出算法, 这不同于以往只注意一条管路敷设的做法, 可大大提高管路系整体敷设的效率。

参考文献

- [1] Hisup Park, Soo Hong Lee, Mark R Cutkosky. Computational Support for Concurrent Engineering of Cable Harnesses[R]. CA: CDR Technical Report, 1992
- [2] Sunand Sandurkar, Wei Chen. GA PRU S-Genetic Algorithm

Based Pipe Routing Using Tessellated Objects[J]. *Computers in Industry*, 1999, 38: 209- 223

研究综述[J]. *机器人*, 2001, 23(1): 85- 90

[3] 薛宏涛, 叶媛媛, 沈林成, 等. 多智能体系统结构及协调机制

[4] Paredis J. Coevolutionary Computation [J]. *Artificial Life*, 1995, 2(4): 355- 375

作者更正: (1) 19 卷第 4 期 542 页右下方公式:

$$\frac{dp_1}{dt} = - \mu \pi d h p_1 \frac{V}{n R T_2} \sqrt{\frac{M}{R T_2}} \sqrt{K \left(\frac{2}{K + 1} \right)^{\frac{K+1}{K-1}}}$$

中的 $\frac{V}{n R T_2}$ 项应该为 $\frac{n R T_2}{V}$ 即方程变为:

$$\frac{dp_1}{dt} = - \mu \pi d h p_1 \frac{n R T_2}{V} \sqrt{\frac{M}{R T_2}} \sqrt{K \left(\frac{2}{K + 1} \right)^{\frac{K+1}{K-1}}}$$

(2) 此文中图 2、图 4、图 6~ 图 8 中纵坐标压强 p_2 值均减少 10 倍(即压强从 0~ 1.6 M Pa)。