

# 带预估选择的 Memetic 算法求解 多星测控资源调度问题

张雁, 党群, 黄永宣

(西安交通大学系统工程研究所, 710049, 西安)

**摘要:** 针对当前多星航天测控资源调度系统模型描述复杂、求解算法不适合大型算例的问题, 利用系统约束条件的二元化特点建立了多星测控资源调度系统在一类特殊图上的最大独立集模型, 进而针对该模型解空间结构多峰密布、欺骗性强的问题, 提出了一种带预估选择机制的改进型 Memetic 算法. 在分析交叉操作可达域的基础上, 设计了一种能快速预估交叉操作最大收益的预估算子, 通过预估运算, 每个个体从几个待选交叉对象中可选择出最有利的一个对象, 以在有希望区域间实现搜索的转移. 大型 Benchmark 算例上的仿真结果表明, 所提预估选择机制能减弱原模型欺骗性的影响, 使 Memetic 算法的性能平均提高了 17%.

**关键词:** 航天测控; 资源调度; 最大独立集; Memetic 算法

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)10-0037-05

## A Memetic Algorithm with Predictive Selection for Multi-Satellite TT&C Resources Scheduling Problems

ZHANG Yan, DANG Qun, HUANG Yongxuan

(Systems Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Focusing on the problems that the model description of the multi-satellite spacecraft tracking, telemetry and command (TT&C) resources scheduling systems are commonly complicated and that the existing solution algorithms are usually not appropriate to large scale instances, the multi-satellite TT&C resources scheduling system is converted into a maximum independent set (MIS) problem in a special class of graphs by exploiting the binary-structure of the system constraints. Then a new Memetic algorithm with predictive selection is proposed to solve the strong deceptive problem that comes from highly multi-peak distributed structure of the MIS. An efficient and fast predictive operator is designed based on the analysis of the reachable domains. The operator can predict the maximum accessible profit of the crossover operation with different objects, and selects the best crossover object from several candidate ones, thereby searches for promising solutions. Simulation results on large scale benchmark graphs show that, the predictive selection strategy reduces effects of the deceptive problem and that the performance of Memetic algorithm is improved at an average of 17%.

**Keywords:** spacecraft TT&C; resource scheduling; maximum independent set problem; Memetic algorithm

多星测控资源调度问题是一种基于约束的资源 优化问题, 它的主要任务是在不违反运行约束的条

件下,将测控资源分配给测控任务,使整个测控网提供的测控支持数量达到最大.国内关于这个问题的研究已有不少报导,采用的模型包括扩展 Petri 网模型<sup>[1]</sup>、CSP 模型<sup>[2]</sup>、约束规划模型<sup>[3]</sup>等,求解方法包括 ES 法<sup>[4]</sup>、变邻域禁忌搜索法<sup>[3]</sup>、启发式规则<sup>[1]</sup>、遗传算法<sup>[5]</sup>等.国外在这方面公开的文献较少,根据文献<sup>[6]</sup>的结论,对于多星测控资源调度问题,在例子规模较大时,遗传算法的寻优能力优于传统的优化算法.随着星多站少、测控资源争用态势的进一步加剧,更高效的调度方法将是多星测控系统在未来一个阶段内持续追求的目标<sup>[7]</sup>.

本文将图论引入到多星测控资源调度中,从而将该问题转化为一个  $K^m O^0$  结构图上的最大独立集问题<sup>[8]</sup>,到目前为止最大独立集问题求解性能最好的一个是由 Wayne Pullan 提出的 PLS 算法<sup>[9]</sup>. 本文将 PLS 算法的局部搜索技术嵌入到 Memetic 算法的群智能全局优化结构中,并针对最大独立集问题的多峰密布、欺骗性强等特点,提出了一种带有预估选择机制的新型 Memetic 算法——PS-Memetic 算法.通过预估与不同对象交叉的最大可能收益,每个个体为自己选择出最有利的交叉方向,以实现在有希望区域间的搜索转移.

## 1 多星测控资源调度问题的数学模型

### 1.1 多星测控资源调度问题的数学描述

受过境时间限制,中低轨道卫星只能在相对地面设备可见时执行测控任务,如何利用有限的可见弧段资源完成更多的卫星测控任务是多星测控资源调度的核心问题.记  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$  为任务集合,其中  $m$  是任务数.对  $i \in \{1, 2, \dots, m\}$ ,记  $W_i = \{\omega_{i,1}, \omega_{i,2}, \dots, \omega_{i,n_i}\}$  为  $T_i$  可用的可见弧段资源集合,其中  $n_i$  是  $T_i$  可用的可见弧段总数.如果弧段  $\omega_{i,j}$  所属的卫星号为  $c_{i,j}$ ,设备号为  $q_{i,j}$ ,对应的开始和结束时间分别为  $s_{i,j}$  和  $e_{i,j}$ ,则多星测控资源调度问题的数学描述为

$$\max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} x_{i,j} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} x_{i,j} \leq 1 \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (2)$$

$$x_{i,j} + x_{i',j'} \leq 1 \quad \text{当 } s_{i,j} < e_{i',j'} + t_r \quad (3)$$

$$\text{或} \quad s_{i',j'} \leq e_{i,j} + t_r \quad \text{且 } c_{i,j} = c_{i',j'} \quad (3)$$

$$x_{i,j} + x_{i',j'} \leq 1 \quad \text{当 } s_{i,j} < e_{i',j'} + t_r \quad (4)$$

$$\text{或} \quad s_{i',j'} \leq e_{i,j} + t_r \quad \text{且 } q_{i,j} = q_{i',j'} \quad (4)$$

$$x_{i,j} \in \{0, 1\} \quad (5)$$

式中:  $x_{i,j}$  是任务决策变量,代表可见弧段  $\omega_{i,j}$  是否用来提供测控支持.如果  $T_i$  在  $\omega_{i,j}$  执行,则  $x_{i,j} = 1$ , 否则  $x_{i,j} = 0$ . 可见:式(1)是多星测控资源调度的目标,即最大化测控网提供的测控支持数量;式(2)是任务分配约束,表示对  $T_i$  从  $W_i$  中任选一个  $\omega_{i,j}$  就可以完成  $T_i$ ;式(3)是卫星独占性约束,表示一颗卫星在同一时刻只能由一套地面设备提供测控支持,式(3)的条件部分代表同一颗卫星的 2 个  $\omega_{i,j}$  在时间上出现了交叠,其中  $t_r$  是从一个任务转换到另一个任务所需的最小时间;式(4)是测控设备的独占性约束,即一套设备一次只能为一个卫星任务提供测控支持,式(4)的条件部分代表同一地面设备上的 2 个  $\omega_{i,j}$  发生了时间上的交叠.本文沿用文献<sup>[5]</sup>的假设,即卫星过境可见时间与任务执行所需时间大致相等,对  $\omega_{i,j}$  只能选择用或不用,不存在通过  $\omega_{i,j}$  内移动服务时间解决冲突的可能性.

### 1.2 $K^m O^0$ 图上的最大独立集模型

由式(5),式(2)可等价于

$$x_{i,j} + x_{i',j'} \leq 1 \quad \forall j, j' \in \{1, 2, \dots, n_i\} \quad (6)$$

可以看出,多星测控资源调度的所有决策变量都是 0-1 变量,所有约束都是 2 个决策变量间的二元冲突关系,这样的约束结构可容易地用图论中点与边的关系来描述.

构造包含  $n = \sum_{i=1}^m n_i$  个顶点的无向图  $G = (V, E)$ ,其中  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  是图  $G$  的顶点集合,  $E$  是图  $G$  的边集合,  $E = \emptyset$ . 令  $V$  中所含顶点与  $X$  中所含变量间有一一对应关系:  $v_k = g(x_{i,j})$ . 对式(3)、式(4)、式(6)中的每一个约束  $x_{i,j} + x_{i',j'} \leq 1$ ,在图  $G$  中可添加相应的边  $(g(x_{i,j}), g(x_{i',j'}))$ ,即  $E \leftarrow E \cup \{(g(x_{i,j}), g(x_{i',j'}))\}$ . 于是,式(1)~式(5)的每一个可行解就对应于图  $G$  的一个无边相连的顶点子集,这样的顶点子集在图论中被称为图  $G$  的独立集<sup>[10]</sup>,而图  $G$  的所有独立集中包含顶点数最多的一个就对应于式(1)~式(5)的最优解.那么,求解式(1)~式(5)就等价于求图  $G$  的最大独立集<sup>[10]</sup>.

对图  $G$  的结构进行分析:  $\forall i \in \{1, 2, \dots, m\}$ , 令  $K_i = \{g(x_{i,1}), g(x_{i,2}), \dots, g(x_{i,n_i})\}$ ,从图  $G$  中抽取出顶点子集  $K_i$  及边子集  $E \cap K_i \times K_i$ ,记其为  $G(K_i)$ . 根据式(6),子图  $G(K_i)$  中的边可两两相连,这样的图在图论中被称为团<sup>[10]</sup>. 又因  $K_1 \cup K_2 \cup \dots \cup K_m = V$ ,且对任意的  $\forall i, j \in \{1, 2, \dots, m\}$ ,  $K_i \cap K_j = \emptyset$ ,所以图  $G$  的顶点集  $V$  可以划分为  $m$  个顶点子集  $K_1, K_2, \dots, K_m$ ,而且每一个子图  $G(K_i)$  都

是一个团. 具有这种结构的图在图论中被称为  $K^m O^0$  结构图, 其中  $K$  代表团,  $O$  代表独立集. 于是, 多星测控资源调度问题就转化为一个  $K^m O^0$  图上的最大独立集问题<sup>[8]</sup>.

### 1.3 问题复杂性分析

最大独立集问题是图论中的一个著名问题, 很早就被证明为 NP 难问题<sup>[11]</sup>, 到目前为止还没有多项式时间的最优算法. 文献[8]研究了  $K^p O^q$  结构图上求解最大独立集的计算复杂度, 并给出结论: 对于  $n$  个顶点的  $K^p O^q$  结构图, 若  $q \leq 2$ , 则寻找到的最大独立集的计算复杂度至少为  $O(n^{6p+2})$ . 这一结论显然适用于  $p=m, q=0$  的  $K^m O^0$  结构图. 所以, 对于  $K^m O^0$  结构的多星测控资源调度问题, 随着任务数  $m$  的增长, 计算复杂度将呈指数级增长.

## 2 基于预估选择的 Memetic 算法

$K^m O^0$  结构图上的最大独立集问题属于 NP 难的组合优化问题, 其解空间结构具有多峰密布的特征, 并具有很强的欺骗性. 遗传算法的全局优化组织结构在这类问题上往往表现欠佳, 而为个体增加了局部搜索能力的 Memetic 算法在性能上则有了大幅提升, 可见个体智能的增加在一定程度上可以弥补全局智能的削弱, 使算法的全局优化性能得到提升. 在此思路引导下, 本文尝试进一步增强个体的智能, 使个体不仅具有局部搜索的能力, 还具有方向选择的能力.

### 2.1 基于预估选择的 PS-Memetic 算法

基于预估选择的 PS-Memetic 算法流程如图 1 所示. 该算法的终止准则是, 当找到大小为  $m$  的最优解, 或者基本搜索次数  $S$  超过了预设的最大允许值  $\max S$ .

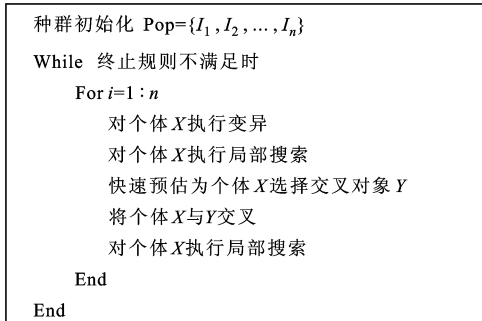


图 1 PS-Memetic 算法流程

### 2.2 编码与初始化

PS-Memetic 算法采用顶点直接编码, 个体  $X$

直接用顶点子集表示, 即  $X = \{v_1, v_2, \dots, v_{l_i}\} \subseteq V$ , 同时它将搜索限制在可行域内. 这样, 每个个体  $X$  都是图  $G$  的一个独立集, 个体适应值  $f(X)$  就是独立集的大小  $|X|$ . 初始化过程是生成一组在解空间中均匀分布的解(独立集), 每个初始个体用贪婪策略生成.

### 2.3 局部搜索

局部搜索采用文献[9]中的方法, 该搜索使得每个个体至少是一个极大独立集<sup>[10]</sup>. 每加入一个点或替换一个点的操作称为一个 step, 文献[9]的 PLS 算法使用 step 次数衡量算法的计算复杂度. 为方便对比, 本文也采用这一度量来衡量算法的性能. 局部搜索深度对应于文献[9]中的 random-interval.

### 2.4 变异算子

当局部搜索过程陷入停滞时, 使用变异操作作为局部搜索引入一个扰动. 变异操作按如下方法进行: 对个体  $X = \{v_1, v_2, \dots, v_{l_i}\}$ , 从  $V \setminus X$  中随机选取一个点  $v_j$  加入到  $X$  中, 即  $X \leftarrow X \cup v_j$ , 并从  $X$  中移除与  $v_j$  相连的点, 即  $X \leftarrow X \setminus V_{\text{out}}$ , 其中  $V_{\text{out}} = \{v | v \in X \text{ and } (v, v_j) \in E\}$ .

### 2.5 预估选择算子

系统选出当前种群中所有适应值最大的个体构成备选交叉对象集合  $C_{\text{SET}}$ , 每个个体通过预估计算, 从  $C_{\text{SET}}$  中选出预估值最大的一个作为交叉对象, 使搜索向有希望的区域转移.

设个体为  $X$ , 交叉对象为  $Y$ , 交叉操作为  $C$ , 交叉后结果为  $X'$ , 则有  $X' = C(X, Y) \subseteq X \cup Y$ , 即交叉的结果是图  $G(X \cup Y)$  的一个顶点子集. 由于  $X$  与  $Y$  都为独立集, 所以图  $G(X \cup Y)$  为一个二部图<sup>[10]</sup>, 可记为  $G(X, Y, E)$ . 于是, 交叉操作的可达域为二部图  $G(X, Y, E)$  的任意独立集, 而二部图  $G(X, Y, E)$  的独立集数  $\alpha(G)$ <sup>[10]</sup>(最大独立集的大小)就是交叉结果  $X' = C(X, Y)$  所能获得的最大收益.

任意图的最大独立集问题虽然是 NP 难的, 二部图的最大独立集问题却是 P 类的, 存在求解它的多项式时间最优算法(如 Augmenting Path Algorithm)<sup>[10]</sup>, 但算法的复杂度高, 对需要进行大量预估计算的 Memetic 算法来说并不合适. 为使预估选择能在 Memetic 算法中大规模使用, 且不增加过多的时间开销, 本文开发出一种新的能快速估计二部图独立集数的预估算子. 该算子能用较小的时间代价估计出二部图的独立集数  $\alpha(G)$ , 虽然有一定误差, 但对于基于概率机制的 Memetic 算法已经足够了. 令  $x, y$  为图  $G$  中任意 2 个不同顶点,  $d(x)$ 、

$d(y)$ 分别为顶点  $x$  与  $y$  的度,则预估计算式为

$$P_F(G) = |V| - \sum_{(x,y) \in E} \frac{1}{\max(d(x),d(y))} - \frac{1}{2} \sum_{\substack{d(y) \neq 1 \\ (x,y) \in E}} \left| \frac{1}{d(x)} - \frac{1}{d(y)} \right| \quad (7)$$

## 2.6 交叉算子

为使交叉操作不破坏解的可行性,本文设计了均衡交叉策略,即在不破坏  $X'$  独立集性质的前提下,轮流从  $X$  与  $Y$  中挑选度最小的顶点加入到  $X'$  中,直到无一个顶点可加入为止.

## 3 仿真实验

### 3.1 最大独立集 Benchmark 图上的仿真

选用的 Benchmark 图来源于 <http://www.nlsde.buaa.edu.cn/~kexu/benchmarks/graph-benchmarks.htm>. 表 1 中给出了基于预估选择的 PS\_Memetic 算法与 Memetic 算法在不同 FRB 图例上的性能比较. 参数: 局部搜索深度为 50,  $\max S = 10^8$ ; 成功率是算法运行 100 次成功找到最优解的次数,  $\text{step}$  数( $s$ )是所有成功运行时基本搜索次数的平均值; CPU 时间( $t_{\text{CPU}}$ )是所有成功运行时计算时间的平均值,每秒的  $\text{step}$  数( $\gamma$ )是每秒进行的  $\text{step}$  次数的平均值,  $\bar{R}$  是按照文献[12]计算得到的算法平均偏离距,提高比是算法性能提高程度的度量. 当算法成功率为 100% 时,提高比按照 CPU 时间相对减少的百分比计算;当算法成功率小于 100% 时,提高比按照成功运行次数相对增加的百分比计算.

表 1 PS\_Memetic 算法与 Memetic 算法性能比较

| 图例名称       | Memetic 算法 |             |                           |                        |           | PS_Memetic 算法 |             |                           |                        |           | 提高比   |
|------------|------------|-------------|---------------------------|------------------------|-----------|---------------|-------------|---------------------------|------------------------|-----------|-------|
|            | 成功率/%      | $s$         | $t_{\text{CPU}}/\text{s}$ | $\gamma/\text{s}^{-1}$ | $\bar{R}$ | 成功率/%         | $s$         | $t_{\text{CPU}}/\text{s}$ | $\gamma/\text{s}^{-1}$ | $\bar{R}$ |       |
| frb30-15-1 | 100        | 27 629      | 0.13                      | 206 821                | 0         | 100           | 28 273      | 0.14                      | 195 822                | 0         | -0.08 |
| frb35-17-1 | 100        | 1 825 157   | 7.70                      | 237 024                | 0         | 100           | 1 585 926   | 6.76                      | 234 762                | 0         | 0.12  |
| frb40-19-1 | 100        | 1 078 779   | 5.45                      | 197 760                | 0         | 100           | 1 067 137   | 5.42                      | 196 724                | 0         | 0.01  |
| frb45-21-1 | 100        | 12 516 900  | 71.87                     | 174 167                | 0         | 100           | 9 750 568   | 57.08                     | 170 810                | 0         | 0.21  |
| frb50-23-1 | 86         | 299 909 487 | 1 918.34                  | 156 338                | 0.14      | 97            | 294 040 081 | 1 958.33                  | 150 147                | 0.03      | 0.13  |
| frb53-24-1 | 8          | 510 652 171 | 3 751.71                  | 136 112                | 0.92      | 11            | 534 042 425 | 3 952.02                  | 135 132                | 0.89      | 0.38  |
| frb56-25-1 | 16         | 677 765 132 | 5 305.32                  | 127 752                | 0.84      | 23            | 545 903 369 | 4 335.71                  | 125 909                | 0.77      | 0.44  |

### 3.2 多星测控资源调度问题应用实例

下面是一个 10 颗卫星在 6 个地面设备上的测控资源调度问题实例,弧段数据均为使用 STK(Satellite Tool Kits)软件生成. 图 2 给出了所有可以执行卫星测控任务的可用弧段分布图. 入选条件为:  $3^\circ$  弧长时间大于 5 min 且最高可视仰角大于  $10^\circ$  的弧段. 用  $\zeta_1 \sim \zeta_{10}$  分别代表分属于不同卫星的可见弧段分布,为清晰起见,同一个设备上的可用弧段分 3 层刻画. 调度时间段为 1 d,即在  $[0, 1\,440]$  min 之内. 调度时间段内 10 颗卫星在 6 个不同地面设备上的可用弧段总数为 243. 图 3 给出了最终的调度结果图,转换时间  $t_r = 6$  min. PS\_Memetic 算法找到的解包含了 75 个无冲突的可用弧段,经多种算法运行比较,这已经是最优解了.

## 4 结论与展望

多星测控资源调度问题是空间资源管理的重要

内容之一. 本文针对测控资源分配中存在的冲突问题,以最大化提供测控支持总数为目标,将实际问题转化为一个  $K^m O^0$  图上的最大独立集问题进行求解. 进而,根据此问题的多峰密布和复杂欺骗性特点,设计了一种带有预估选择策略的 PS\_Memetic

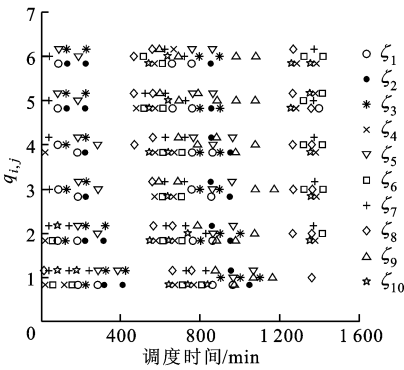


图 2 卫星在设备上的可用弧段分布图

内容之一. 本文针对测控资源分配中存在的冲突问题,以最大化提供测控支持总数为目标,将实际问题转化为一个  $K^m O^0$  图上的最大独立集问题进行求解. 进而,根据此问题的多峰密布和复杂欺骗性特点,设计了一种带有预估选择策略的 PS\_Memetic

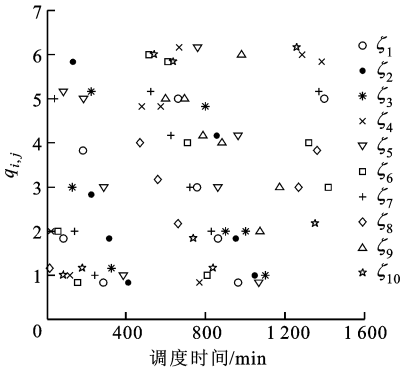


图 3 可用弧段分配结果图

算法. 预估选择通过预估交叉操作所能带来的最大收益,从待选交叉对象中选出最有利的一个对象, 实现在有希望区域间的搜索转移. 典型复杂算例上的仿真结果表明,该算法的性能超过了当前国际上求解最大独立集问题最好的 PLS 算法.

参考文献:

[1] 王远振,赵坚,聂成. 多卫星-地面站系统的 Petri 网模型研究 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(2): 7-11.  
WANG Yuanzhen, ZHAO Jian, NIE Cheng. Study on Petri net model for multi-satellites ground station system [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2003, 4(2): 7-11.

[2] 金光. 卫星地面站测控资源调度 CSP 模型 [J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(7): 1117-1120.  
JIN Guang. CSP model for satellite and ground station TT&C resource scheduling problems [J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29 (7): 1117 - 1120.

[3] 陈英武,方炎申,李菊芳,等. 卫星任务调度问题的约束规划模型 [J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(5): 126-132.  
CHEN Yingwu, FANG Yanshen, LI Jufang, et al. Constraint programming model of satellite mission scheduling [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2006, 28(5): 126-132.

[4] 杨永安,樊恒海,冯祖仁,等. 一种基于 ES 法的卫星测控资源调度仿真及实现 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(4): 982-985.  
YANG Yongan, FAN Henghai, FENG Zuren, et al. Simulation & realization of satellite TT&C resources scheduling based on event scheduling method [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(4): 982-985.

[5] WU Bin, LI Yuanxin, HUANG Yongxuan. Optimal scheduling of TT&C network resources based on genetic algorithm [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27 (6): 1132-1136.

[6] BARBULESCU L, WATSON J P, WHITLEY L D, et al. Scheduling space-ground communications for the air force satellite control network [J]. Journal of Scheduling, 2004, 7(1): 7-34.

[7] 邢立宁,陈英武. 基于混合蚁群优化的卫星地面站系统任务调度方法 [J]. 自动化学报, 2008, 34(4): 414-418.  
XING Lining, CHEN Yingwu. Mission planning of satellite ground station system based on the hybrid ant colony optimization [J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(4): 414-418.

[8] ALEKSEEV V E, LOZIN V V. Independent sets of maximum weight in  $(p, q)$ -colorable graphs [J]. Rutor Research Report, 2003, 265(1/3): 351-356.

[9] PULLAN W. Phased local search for the maximum clique problem [J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2006, 12(3): 303-323.

[10] DIESTEL R. Graph theory [M]. Berlin, Germany: Springer, 2005.

[11] CORMEN T H. Introduction to algorithms [M]. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press, 2001.

[12] 高强,吕文芝,杜小山,等. 遗传算法优化性能评价准则研究 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(7): 803-806.  
GAO Qiang, LU Wenzhi, DU Xiaoshan, et al. Evaluation for genetic algorithm performance [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(7): 803-806.

(编辑 苗凌)