

doi: 10.7690/bgzdh.2014.09.014

基于局部路径重连的多星测控调度遗传交叉算子

陈峰, 徐建华, 刘孝忠, 唐志坤

(国家飞行流量监控中心研究发展室, 北京 100094)

摘要: 为提高多星测控调度问题简单遗传算法的搜索精度, 设计一种基于局部分层路径搜索的交叉算子(local layering path-relinking crossover operator, LLPRCO)。分析多星测控调度问题的遗传算法编码特点, 得出解空间的复杂性和基因间较弱的相关性。借鉴路径重连的思想, 利用构成初始解和引导解要素的差异性, 构建从初始解出发的分层搜索邻域, 将邻域中满足模型约束的解作为交叉的结果, 并创建 2 个仿真场景进行验证。仿真结果表明, 该交叉算子与具备一定随机特性的交叉算子混合使用能明显提高遗传算法对问题的求解性能。

关键词: 多星测控调度; 遗传算法; 路径重连; 交叉算子

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A

Genetic Crossover Operator Based on Local Path Relinking for Multi-Satellite TT&C Scheduling

Chen Feng, Xu Jianhua, Liu Xiaozhong, Tang Zhikun

(Research & Development Department, State Air Traffic Flow Management Center, Beijing 100094, China)

Abstract: For improving the genetic algorithm searching precision used in the multi-Satellite TT&C (tracking telemetry and command) scheduling problem, a directed crossover operator based on local path layering relinking is proposed. The solution space complexity and weak correlation between genes are found by analyzing the GA encoding character. Based on path relinking, use the difference between initial solution and guiding solution to construct the layering neighborhood of initial solution, and take the solution in the neighborhood that meets the constraints of model as the crossing result, which is based on the idea of path relinking, then constructing two simulation cases to verify the method. Simulation result indicates that the proposed operator combined with a crossover operator possessing randomness and can improve algorithm performance significantly.

Keywords: multi-satellite TT&C scheduling; genetic algorithm; path relinking; crossover operator

0 概述

多星测控调度是指在地面资源一定的情况下, 采用合理算法对不同类型的多个卫星的跟踪、遥测、遥控、数传等各种类型测控活动进行管理和调度, 以最好地满足卫星测控需求^[1]。其实质是在时间窗口等约束下为任务需求配置测控资源。

在多星测控调度问题的众多求解算法中, 遗传算法(genetic algorithm, GA)以其优良的搜索性能取得较好的应用效果^[2-5]。但通常都需对所有可用可见弧段进行编码, 以确保解空间的遍历, 在问题规模较大时, 需调度的可用可见弧段数量巨大, 致使染色体过长, 采用一般的搜索策略效果较差。交叉算子是体现 GA 特性、影响性能的关键因素, 其基本标志是能够源于父个体产生一个新的搜索空间并能从该空间中找到可能的更优解^[6], 因此, 可在保证算子本质不变情况下, 根据问题特点对交叉算子进行改进。路径重连(path relinking, PR)是一种通

过对已有高质量解进行组合以获得更高质量解的搜索方法^[7-8], 目前在车间调度^[9-10]、设计^[11]、旅行商问题^[12]等领域的应用都取得了较好的结果。

对此, 笔者基于路径重连思想设计了一种突出邻域高质量解搜索的多星测控调度遗传交叉算子(local layering path-relinking crossover operator, LLPRCO), 以加强算法寻优能力、提高解的质量。

1 问题描述

多星测控调度问题的基本描述可参见文献^[5], 笔者只给出具体求解模型。

1.1 调度模型

$$\max \sum_{j=1}^{C_{\text{Req}}} \left[\prod_{i \in S_j} \text{met}_{ji} \cdot P_j \right] \quad (1)$$

s.t.

$$\text{met}_{ji} = \begin{cases} 0 & N_{\text{act}}^{ji} < N_{\text{req}}^{ji} \\ 1 & N_{\text{act}}^{ji} \geq N_{\text{req}}^{ji} \end{cases} \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

收稿日期: 2014-04-15; 修回日期: 2014-05-06

作者简介: 陈峰(1978—), 男, 浙江人, 博士, 从事系统分析与决策、飞行流量管理研究。

$$\text{met}_{j4} = \begin{cases} 0 & \Delta TA_{\min}^j < \Delta T_{\min}^j \\ 1 & \Delta TA_{\min}^j \geq \Delta T_{\min}^j \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{met}_{j5} = \begin{cases} 0 & \Delta TA_{\max}^j > \Delta T_{\max}^j \\ 1 & \Delta TA_{\max}^j \leq \Delta T_{\max}^j \end{cases} \quad (4)$$

$$[(i=2) \vee (i=3)] = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^{C_{\text{Req}}} P_j = 1 \quad (6)$$

式 (1) 中： C_{Req} 表示测控需求数量； P_j 表示需求 j 的优先级； S_j 表示需求 j 中被选择的子项集合； met_{ji} 表示需求 j 的第 i 个子项的满足率。式 (2) 中： N_{act}^{ji} ($i=1,2,3$) 表示实际分配的跟踪站数 (对应 $i=1$)、升轨跟踪次数 (对应 $i=2$)、降轨跟踪次数 ($i=3$)， N_{req}^{ji} 表示要求的跟踪站数、升轨跟踪次数、降轨跟踪次数。式 (3) 中： ΔTA_{\min}^j 表示分配的最小测控间隔时间、 ΔT_{\min}^j 表示要求的最小测控间隔时间。式 (4) 中： ΔTA_{\max}^j 表示分配的最大测控间隔时间、 ΔT_{\max}^j 表示要求的最大测控间隔时间。式 (5) 表示测控需求中必须包含测控活动。

从上述模型可知：多星测控调度的主要工作是在优先级、可见弧段冲突等约束下为每个测控任务需求分配可用时间窗口 ($R_j (R_j = N_{\text{req}}^{j2} + N_{\text{req}}^{j3})$) 等测控资源，以期最大化所有需求加权满足率。

1.2 调度方案的遗传染色体

编码：采用预设方法从待调度弧段池中不重复地选出弧段，ID 号依次排列，编成染色体，长度为弧段总数，记为 N_{Total} 。

解码可分为弧段分配和适应度计算 2 个阶段：

1) 按顺序将染色体基因代表的弧段分配给可服务的需求，同步对染色体后续基因对应弧段进行一次资源冲突消解，即将与已分配弧段同测控资源、同时时间段的弧段剔除。2) 当所有需求被分配了要求的弧段数或染色体的基因被遍历完毕时，应用式 (1) 进行计算并将其值作为该染色体的适应度。图 1 简要描绘了编码和解码过程。

从上可知，多条染色体可能对应同一适应度，解空间有复杂的“峡谷”现象。以某一弧段数为 88 的场景为例，有染色体 1.8548×10^{134} 个，随机抽样得到的适应度分布频率统计如图 2 所示，其中，横坐标任务满足率按式 (1) 计算，纵坐标频率是指横坐标对应任务率满足率出现的次数与抽样总次数

1×10^6 的比值。

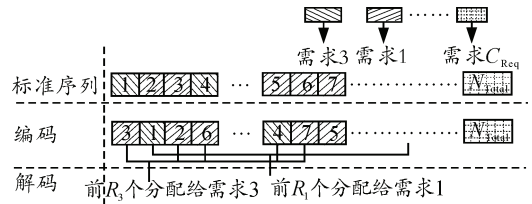


图 1 染色体的适应度计算示意图

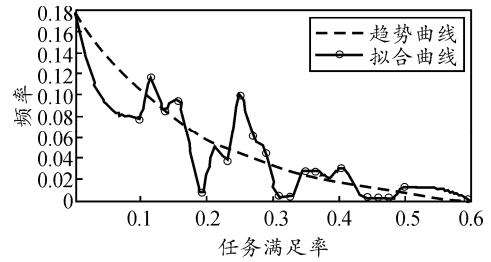


图 2 解分布抽样统计

2 路径重连主要思想

路径重连算法设计的基点是^[13]：解空间中连接优秀解的路径上存在更好的解。有整体独立使用^[8,14-15]和局部结合搜索^[10]2 种使用方式。其中，局部结合搜索的思想是：选择解空间中 2 个解，记为初始解和引导解，采用固定距离、每步最优和系统构建等方法^[15-16]，以初始解为基础，吸收引导解成分，形成新的解，当新解质量优于初始解时，将其作为新的初始解，逐步找出一条向引导解逼近的连接路径。

考虑多星测控调度模型和遗传编码所决定的搜索空间及解邻域有一定的启发式规律和先验信息，故采用系统构建方法，逐步吸收初始解中没有而引导解包含的元素来构建初始解搜索邻域，找出较优解。

3 基于局部路径重连的遗传交叉算子

笔者所设计的交叉操作在每个测控需求分配弧段后实施，此时，1 条染色体对应给所有需求的弧段之间没有冲突，为避免搜索空间过大，以需求为单位进行路径重连。

设 PRCh_j 和 PRCh_j 分别为初始解染色体和引导解染色体解码后需求 j 被分配弧段的集合，记 $\text{PRCh}_j = \{z_i^j | i=1,2,\dots, \text{MI}_j\}$ ， $\text{PRCh}_j = \{n_i^j | i=1,2,\dots, \text{MG}_j\}$ ；记 2 染色体未分配可用弧段集为 PSCh_i 和 PSCh_j ，包含于 PRCh_j 和 PRCh_j ，但不包含于 PSCh_i 中的元素的集合为 $A_j = \{x_j^i | (x_j^i \in \text{PRCh}_j) \cap (x_j^i \notin \text{PRCh}_j)\}$

$\cap(x_j^i \in \text{PSChI}_j, i=1,2,\dots, \text{MA}_j)$, 由 PRChI_j 和 PRChG_j 确定的点的距离定义为 $\text{Dis}(\text{PRChI}_j, \text{PRChG}_j) = \text{MA}_j$ 。

用 A_j 中的元素替换 PRChI_j 中的元素, 形成点 PRChI_j 的邻域 $\text{NBRChI}_j = \{\text{nbl}_{jk}^i | i=1,2,\dots, \text{MN}_j\}$, 其中 $\text{MN}_j = \sum_{k=1}^{\text{MA}_j} C_{\text{MA}_j}^k \cdot C_{\text{MI}_j}^k$, 根据邻域中的点与 PRChI_j 的距离, 将 NBRChI_j 分成 MA_j 层, $\text{NBL}_{jk}^i = \{\text{nbl}_{jk}^i | \text{Dis}(\text{nbl}_{jk}^i, \text{PRChI}_j) = k, i=1,2,\dots, (C_{\text{MA}_j}^k \cdot C_{\text{MI}_j}^k)\}$, $k=1,2,\dots, \text{MA}_j$ 。可知, k 值控制着 NBL_{jk}^i 包含点逐步向 PRChG_j 逼近。

然后, 逐层、逐需求计算包含点的 $\prod_{i \in S_j} \text{met}_{ji}$, 若 $\prod_{i \in S_j} \text{met}_{ji} = 1$, 则将该点基因赋给新染色体对应需求段位; 否则, 若所有点 $\prod_{i \in S_j} \text{met}_{ji} = 0$, 则将 PRChI_j 基因复制到新染色体相应段位。染色体其它 $N_{\text{Total}} - \sum_{j=1}^{C_{\text{Req}}} R_j$ 位基因从剩余基因随机不重复抽取。图 3 简要说明了邻域产生过程。

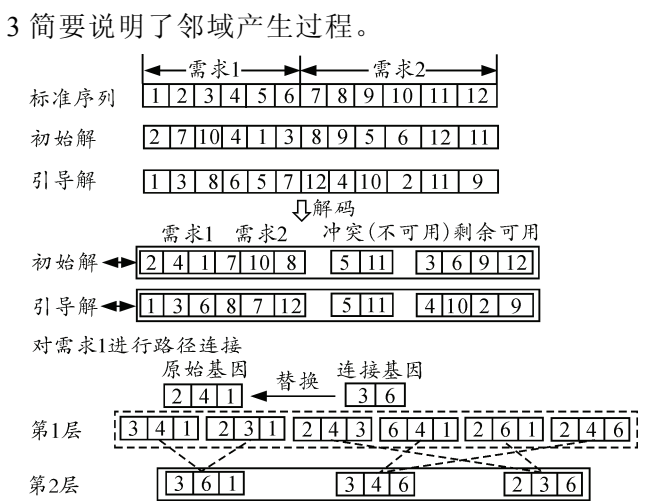


图 3 局部路径重连示意图

鉴于上述交叉算子具有较强定向性, 为确保效果, 一般与带有随机性的交叉算子结合使用。

4 仿真试验

4.1 想定设计

创建 2 个仿真场景: 场景 1 包含表 1 的 20 颗低轨卫星和表 2 前 5 个地面站, 场景 2 包含表 1 的 20 颗卫星, 表 2 的 7 个地面站, 卫星各配 1 架天线, 地面站各配 1 套设备, 频段匹配, 具体参数见表 1 (轨道根数: 半长轴 (S)、离心率 (E)、倾角 (I)、近地点

幅角 (A)、升交点黄经 (R)、平近点角 (T)) 和表 2。仿真时间: 2009\09\22 00:00:00 ~ 2009\09\23 00:00:00。运用 STK 软件仿真计算上述参数所设定的场景, 可得到卫星和地面站之间的可视窗口及升降轨等信息。

表 1 卫星基本参数

卫星	S/km	E/(°)	I/(°)	A/(°)	R/(°)	T/(°)
S1	7 078.1	0.0	98.2	0.0	265.8	0.0
S2	7 078.1	0.0	98.2	0.0	355.8	0.0
S3	7 078.1	0.0	98.2	0.0	85.8	360.0
S4	7 078.1	0.0	98.2	0.0	175.8	0.0
S5	6 878.1	0.0	97.4	0.0	30.0	360.0
S6	6 878.1	0.0	97.4	0.0	120.0	360.0
S7	6 878.1	0.0	97.4	0.0	210.0	0.0
S8	6 878.1	0.0	97.4	0.0	300.0	0.0
S9	7 278.1	0.0	99.0	0.0	310.0	0.0
S10	7 278.1	0.0	99.0	0.0	220.8	360.0
S11	7 278.1	0.0	99.0	0.0	130.8	360.0
S12	6 866.2	0.0	97.4	0.0	287.5	180.0
S13	6 939.2	0.0	97.6	0.0	287.5	180.0
S14	6 939.2	0.0	97.6	0.0	332.6	180.0
S15	6 939.2	0.0	97.6	0.0	295.0	180.0
S16	6 939.2	0.0	97.6	0.0	355.2	180.0
S17	6 939.2	0.0	97.6	0.0	264.9	180.0
S18	6 939.2	0.0	97.6	0.0	250.9	180.0
S19	6 939.2	0.0	97.6	0.0	180.6	180.0
S20	6 939.1	0.0	97.6	0.0	70.0	180.0

表 2 地面站基本参数

地面站	Longitude/(°)	Latitude/(°)	Altitude/m
F1	75.9	39.5	0
F2	109.5	34.5	0
F3	108.3	22.8	0
F4	118.1	24.5	0
F5	120.4	36.2	0
F6	69.9	23.1	0
F7	90.9	73.1	0

各卫星任务需求优先级 5 个 1 组, 4 组依次为 0.08、0.064、0.04、0.016, 各具体要求统一设置为: 2 站跟踪, 升、降轨测控各 2 次, 最小、最大测控间隔分别为 1 h 和 8 h, 每次测控持续时间 8 min。

4.2 算法要素设计

对 2 种交叉算子进行对比, 记: 1) LPRCO_S: LLPRCO 与 Syswerda 的基于位置的交叉算子^[17]相结合; 2) SCO: Syswerda 的基于位置的交叉算子。2 种交叉算子在排序选择算子^[17-18]、多点交换变异算子(随机确定若干位置并从前至后交换其基因)、30 的种群、0.8 的交叉概率、0.1 的变异概率、进化 50 代的条件下进行演化计算。

4.3 结果及分析

分析图 4 可以得到: 1) 在 2 个场景中, LPRCO_S 都比 SCO 的求解质量好, 优势较大。2) 2 个场景测控资源充裕度的较大差距也从一个侧面表明 LPRCO_S 性能优势对测控资源富足程度依赖性不大。3) 在待调度弧段数增多后(从 257 增加到

446), SCO 解的提高幅度明显没有 LPRCO_S 提高的幅度大, 这表明当染色体长度增加会较大减弱随机交叉算子 SCO 的搜索性能, 而对 LPRCO_S 的影响主要在增大了运算时间开销, 解质量基本能够确保。4) 在冲突消解条件下, 以解构成元素的相似度为依据建立邻域及搜索路径能够较好发现优秀解。

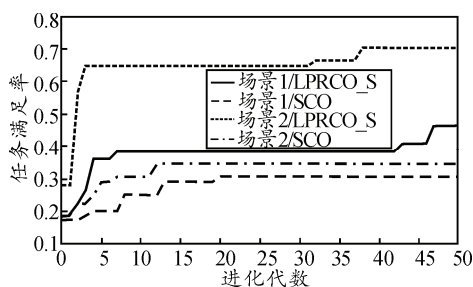


图4 2种交叉算子运算结果对比

从表3可知: 在算法的运行时间上, LPRCO_S 比 SCO 有一定的增加。LPRCO_S 中需要进行频繁邻域分层和局部评价是导致时间开销增大的主要原因, 尤其当资源增多后, 其开销将以较大幅度增长。

表3 算法运行时间

想定	SCO/S	LPRCO_S/S	CPU/内存
1	287	510	Dual 1.6G/1G
2	291	1 117	Dual 1.6G/1G

5 结论

笔者将路径重连的思想运用于多星测控调度问题遗传算法求解的交叉算子设计, 以增强算法搜索的导向性。试验结果表明, 该算子与具有一定随机特性的交叉算子混合使用能够以一定的时间开销为代价极大提高解的质量, 进一步验证了路径重连的局部搜索优势。

参考文献:

[1] 凌晓冬, 陈峰, 武小悦. 多星测控调度问题综述[J]. 飞行器测控学报, 2008, 27(2): 17-22.
 [2] 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.
 [3] 陈峰, 武小悦. 多星测控调度的遗传算法分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(5): 534-539.
 [4] 陈峰, 武小悦. 带局部交互的多星 TT&C 调度合作协同

进化[J]. 计算机工程, 2011, 37(6): 250-251.
 [5] 凌晓冬, 武小悦, 刘琦. 多星测控调度问题的禁忌遗传算法研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 2133-2139.
 [6] Hohn C, Reeves C. Are Long Path Problems Hard for Genetic Algorithms[C]. In Proceedings of the 4th Conference on Parallel Problem Solving from Nature, Berlin: Springer, 1996: 134-143.
 [7] Glover F, Laguna M. Tabu Search[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1997.
 [8] Glover F. A Template for Scatter Search and Path Relinking, in Lecture Notes in Computer Science, Hao J K, Lutton E, and Ronald E, Editors. Berlin, Springer, 1998: 13-54.
 [9] Zeng Rong-qiang, Basseur M, Hao Jin-kao. Solving Bi-objective Flow Shop Problem with Hybrid Path Relinking Algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(10): 4118-4132.
 [10] Vallada E, Ruiz R. Genetic Algorithms with Path Relinking for the Minimum Tardiness Permutation[J]. Omega, 2010, 38: 57-67.
 [11] Zhang G, Lai K. Combining Path Relinking and Genetic Algorithms for the Multiple-level Warehouse Layout Problem [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 169(2): 413-425.
 [12] 张晓霞, 童杰伟, 刘哲. 一种求解旅行商问题的混合路径重连算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(12): 122-124.
 [13] Glover F. Tabu Search and Adaptive Memory Programing-Advances, Applications and challenges, in Interfaces in Computer Science and Operations Research, Barr R S, Helgason R V, and Kennington J L, Editors. Boston, Kluwer, 1996: 1-75.
 [14] Glover F, Laguna M, Marti R. Fundamental of Scatter Search and Path Relinking[J]. Control and Cybernetics 2000, 29(3): 653-684.
 [15] Nowichi E, Smutnichi C. Some Aspects of Scatter Search in the Flow-shop Problem[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 169(2): 654-666.
 [16] Mauricio G C R, Celso C R. GRASP and Path-Relinking: Recent Advances and Applications, in Metaheuristics Progress as Real Problem Solvers, Toshhide I, Koji N, and Mutsunori Y, Editors. New York, Springer, 2003: 29-36.
 [17] Barbulescu L, Howe a E, Whitley L D. Understanding Algorithm Performance on an Oversubscribed Scheduling Application[J]. Artificial Intelligence Research, 2006, 27(1): 577-615.
 [18] Barbulescu L, Howe a E, Whitley L D. AFSCN Scheduling: How the Problem and Solution Have Evolved[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2006, 43(9-10):1023-1037.