

文章编号: 1001- 2486(2010) 02- 0017- 06

## 天地测控资源调度的两阶段递进遗传算法\*

陈 峰, 武小悦

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 为对天地测控资源调度进行高效求解, 设计了两阶段递进遗传算法对其进行优化调度。鉴于问题的目标具有一定的可分性, 以时间为依据将被调度弧段划分成两个部分, 在对第一部分形成种群并作进化求解的基础上, 将其最优解与第二部分弧段组合, 并作进一步的进化求解。为了缓解两阶段优化的局部搜索特性, 在第一阶段个体适应度计算中, 以一定概率设定虚拟弧段, 保留具有潜在全局优势的个体。仿真表明该方法能在确保求解质量的前提下明显减少运算时间。

**关键词:** 调度; 优化; 遗传算法; 测控

**中图分类号:** TP18      **文献标识码:** A

## Two-stage Successive Genetic Algorithm for Space and Ground TT&C Scheduling

CHEN Feng, WU Xiaoyue

(College of Information Systems and Management, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A two-stages successive genetic algorithm was used to optimize the scheduling of TT&C (Tracking Telemetry and Command) resource from space and land. Because the object was somewhat separable, the scheduled time windows were separated into two sections. After the population from first section was evolved, the gained optimized solution was combined with the second section, and then the evolution of second phase goes further. For lessening the local searching limitation, virtual time windows were set with some probability in the fitness computation process of first phase, which could retain the individuals that might be the component of overall optimization solution. Simulation demonstrates the proposed method can get good solution at the cost of less time.

**Key words:** scheduling; optimization; genetic algorithm; TT&C

天地测控资源调度是为高中低轨等各类卫星的测控任务需求分配天基或地基测控资源及执行时间, 以使需求的整体满足性最好。当调度场景中加入中高轨卫星和中继星资源后, 需调度可见弧段数量迅速增加, 是一个大规模的调度问题。

对于大规模的调度问题, 目前的研究主要致力于获得问题的满意解或者可行解, 主要有基于问题分解的方法、拉格朗日松弛/分解法和智能优化算法 3 类<sup>[1]</sup>。虽然可以采用一般启发式算法对问题进行较快速的求解, 但无法确保解的可行性和质量, 而将遗传算法与启发式算法结合进行求解则效果较好, 文献[2- 4]通过启发式方法将问题划分成子问题, 然后对子问题采用遗传算法进行求解; 文献[5- 6]通过模糊聚类等方法将被调度对象分成不同的子系统, 对子系统采用遗传算法进行优化, 前者在子系统优化的基础上考虑了子系统之间的耦合作用, 并通过反复分解协调获得全局解; 文献[7]则针对遗传算法在解决大规模生产调度问题时染色体太长的情况, 提出了动态相似度参数零件族编码, 该编码方法通过零件工艺相似性、零件自身相似基因比动态划分零件族, 大大减少了编码长度和求解时间。

上述研究针对各自问题背景展开, 整体思想是将原始问题分解成小规模问题, 然后用遗传算法进行求解, 但由于是通过专门的启发式方法对问题进行分解, 移植性差。天地测控资源调度工程时效性要求高, 调度对象之间耦合性强, 当问题规模增大后, 如何确保解的质量和减少运算时间是算法设计的难点

\* 收稿日期: 2009- 09- 29

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 陈峰(1978-), 男, 博士生。

所在。为此,本文设计了基于微分思想的遗传编码,并结合问题的特点,将整个问题分成两阶段递进进化,在强调局部搜索的同时,概率地兼顾搜索的全局性,在保证求解质量的基础上减少算法的运行时间。

## 1 问题描述

天地测控资源调度问题由包含卫星和天地测控资源的场景及与卫星对应的测控任务需求两大要素组成,此处的天基测控资源指中继星。对问题的具体描述可参见文献[8](注:中高轨卫星的具体测控要求与低轨卫星的稍有不同,但用该文献上的描述不影响对算法的研究),此处只给出求解模型。

$$\max \sum_{j=1}^{C_{Req}} (Sat_j \cdot Pr_j) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } Sat_j = \sum_{i=1}^5 w_{ji} \xi_i met_{ji} / \sum_{i=1}^5 w_{ji} \xi_i \quad (2)$$

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

$$met_{j4} = \begin{cases} 1 & \Delta TA_{min}^j \geq \Delta T_{min}^j \\ e^{-\left(\Delta TA_{min}^j / \Delta T_{min}^j\right)} & \Delta TA_{min}^j < \Delta T_{min}^j \end{cases} \quad (4)$$

$$met_{j5} = \begin{cases} e^{-\left(\Delta TA_{max}^j / \Delta T_{max}^j\right)} & \Delta TA_{max}^j > \Delta T_{max}^j \\ 1 & \Delta TA_{max}^j \leq \Delta T_{max}^j \end{cases} \quad (5)$$

式(1)和(2)中:  $Pr_j$  为第  $j$  个需求的优先级;  $w_{ji}$  为第  $j$  个需求的第  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) 个具体测控要求子项在整个具体测控要求中所占的权重;  $\xi_i$  表示第  $j$  个需求的具体测控要求的第  $i$  个子项是否被用户要求;  $met_{ji}$  为需求  $j$  的具体测控要求的第  $i$  个子项的满足程度。式(3)中:  $N_{act}^{ji}$ 、 $N_{req}^{ji}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 分别表示每天实际的和要求的跟踪站数、升轨跟踪次数、降轨跟踪次数,记  $R_j = N_{req}^{j2} + N_{req}^{j3}$ 。式(4)中:  $\Delta TA_{min}^j$ 、 $\Delta T_{min}^j$  分别表示每天实际的和最小的测控间隔时间。式(5)中:  $\Delta TA_{max}^j$ 、 $\Delta T_{max}^j$  分别表示每天实际的和最大的测控间隔时间。

## 2 遗传编码及解码

调度按以下方法进行:首先,把测控需求的卫星名称、最早测控开始时间、最晚测控结束时间、每次测控最短持续时间  $TL_j$  等信息和通过可见性分析软件获得的卫星可见弧段进行结合,得到每个需求的每天可用可见弧段集合,每个弧段包含起止时间,需求号,卫星及天线,测控站及设备等信息;然后,从这些弧段中选择(低轨卫星与地面测站间的短可见弧段)或截取  $R_j$  个弧段(中高轨卫星与地面测站的长可见弧段和中继星与其可测卫星间的长可见弧段)分配给各需求并进行冲突消解。

中高轨卫星、中继星对应的长弧段的分配是天地测控资源调度一个难点,本质是在连续弧段上截取一个长度并分配给相应任务需求,截取位置的不同将影响到当前需求的满足、弧段的利用,同时也会影响到测控资源的冲突,即间接影响其它需求的满足。因此,编码要能够反映截取位置在长弧段上的遍历性。鉴于此,设计如下编码及解码规则:

(1) 基于微分思想的弧段划分:将中高轨卫星弧段和中继星弧段以某一微小单位长度  $\Delta t^*$  进行划分,该微小长度的若干倍等于弧段对应需求的最短测控持续时间。

(2) 对所有弧段的 ID 号按图 1 所示进行全弧段编码,形成染色体。图中,  $s_1$ 、 $s_2$  是低轨卫星,  $g_1$ 、 $g_2$  是地面测站,  $g_3$ 、 $g_4$  是中继星。

对染色体依据以下规则从左至右依次操作,生成适应度。

(1) 如果弧段对应的是低轨需求,且测控资源为地面测站,则该弧段能独立完成需求的一个测控活动。

(2) 如果当前弧段对应的是中高轨需求或测控资源为中继星, ID 号为  $CurrentID$ , 则从该弧段开始向

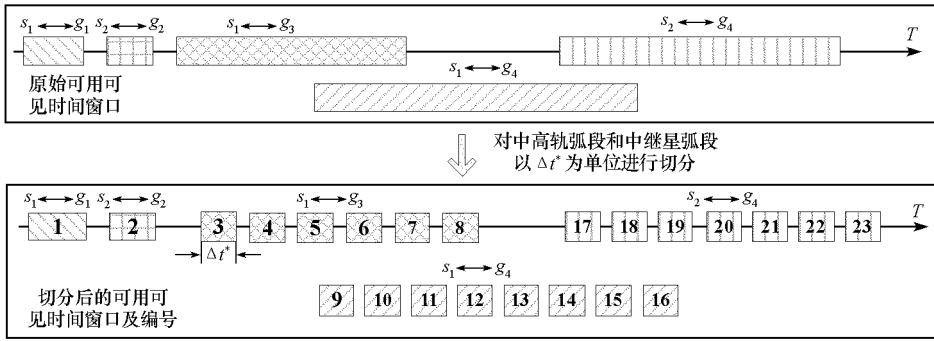


图 1 长弧段划分和确定 ID 号

Fig. 1 Long time window partition and ID determination

右搜索, 寻找 ID 号为:  $CurrentID + 1, CurrentID + 2, \dots, CurrentID + (TL_j / \Delta t^*) - 1$  的子弧段。如果能找到这  $(TL_j / \Delta t^*) - 1$  个弧段, 则将这些子弧段拼接到当前弧段形成一个较长弧段, 其能够满足该需求每次测控最短持续时间的要求。否则当前弧段将不被利用。

(3) 对经过拼接重组的染色体从左至右进行弧段分配, 如图 2 所示: 依次将染色体每个基因对应的可用可见弧段分配给相应需求, 在此过程中, 每对一个弧段进行分配后(表明该时间段内的某资源被某需求占用), 要对染色体剩下所有基因位进行一次冲突消解。

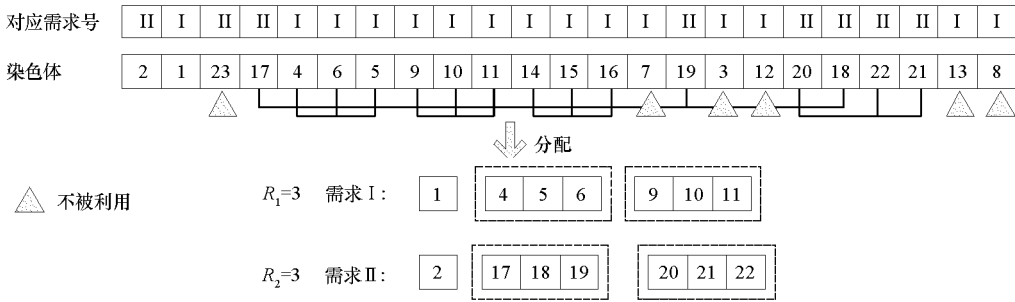


图 2 子弧段拼接和弧段分配示意图

Fig. 2 Child time window connection and time window allocation

(4) 计算适应度(测控需求加权满足度)。

该编码方式决定了染色体计算的开销主要在子弧段的拼接, 时间复杂度为  $O(n^2)$ , 而且其中的冲突消解过程, 时间复杂度也为  $O(n^2)$ ,  $n$  表示染色体基因的个数, 而 GA 对该类问题惯用的交叉、变异等算子的时间复杂度为  $O(n)$ , 因此染色体适应度的计算决定了算法求解的时间消耗。

### 3 两阶段进化策略

从问题描述可以看出, 如果将待调度弧段按照某种方式(如时间顺序)机械地分开, 然后进行局部搜索, 会造成局部的资源紧缺和冲突, 从而影响目标值中最小测控间隔时间、升降轨和跟踪站数分量的值, 这样会导致某些具备全局最优性的解丢失; 同时, 考虑到跟踪站数、升降轨要求的满足情况具有可累加性, 而且最优解中各需求被分配的弧段大部分应该在某一范围内(能够满足最大最小测控间隔时间), 所以, 可以在兼顾全局的前提下, 分阶段递进搜索最优解。总体如下: 将所有弧段按时间顺序分成两部分, 两部分独立编码形成各自种群, 对第一部分独立进化后, 将其中的最优个体与第二部分中每个个体分别串接, 然后对其进行进化操作, 产生最终解。这样, 每个阶段的进化还能够处理本阶段包含弧段的冲突问题。算法的整体流程见图 3。

#### 3.1 两阶段弧段划分

染色体计算时间复杂度为  $O(n^2)$ , 若将一天内所有弧段均分成两部分并分别编码, 可使两部分的染色体计算时间之和最小, 但减小局部搜索劣势的难度也较大。综合考虑弧段数划分比例与个体适应

度计算的时间开销及求解的全局性之间的关系,以最大测控间隔时间为依据,对弧段进行划分,如图4所示。

记  $TW$  为一天 24 小时内所有待调度弧段的集合,且按弧段起始时间升序排列,  $NT_i$  为待调度弧段总数;  $P_1$  为第一阶段调度的弧段集合,弧段数为  $NT_1$ ;  $TWSch$  为第一阶段最优解对应的弧段集合,  $NT_s$  为其总数,显然,  $TWSch \subset P_1$ ;  $P_2$  为第二阶段调度的弧段集合,弧段数为  $NT_2$ 。

如果  $\max_{j \in REQ}(\Delta T_{max}^j) \leq 6$ , 则  $P_1$  包含时间轴上  $(12 + \Delta T_{max}^j)$  以前的所有弧段,  $P_2$  包含第一阶段进化的最优解对应的弧段加上时间轴上  $(12 + \Delta T_{max}^j)$  以后的弧段。

如果  $6 < \max_{j \in REQ}(\Delta T_{max}^j) \leq 24$ , 则  $P_1$  包含时间轴上 18 以前的所有弧段,  $P_2$  包含第一阶段进化的最优解对应的弧段加上时间轴上 18 以后的弧段。

### 3.2 各阶段适应度的计算

在第一阶段的进化中为了防止某些具有“全局最优”潜能的解的丢失,对染色体适应度的计算融入一个贪婪性的启发式规则。定义某需求的虚拟弧段为这样的一些弧段:存在于全部弧段除去第一阶段弧段后的弧段集  $(TW \setminus P_1)$  中,能够与该需求第一阶段被分配的弧段相配合以满足要求,不会造成需求目标函数值的损失。假定每个需求在  $(TW \setminus P_1)$  中存在  $V_j = [((NT_i - NT_1)/NT_i) \cdot R_j]$  个虚拟弧段,其中  $[\cdot]$  表示向下取整,即认为由当前  $(R_j - V_j)$  个弧段决定了该需求的不满足程度。

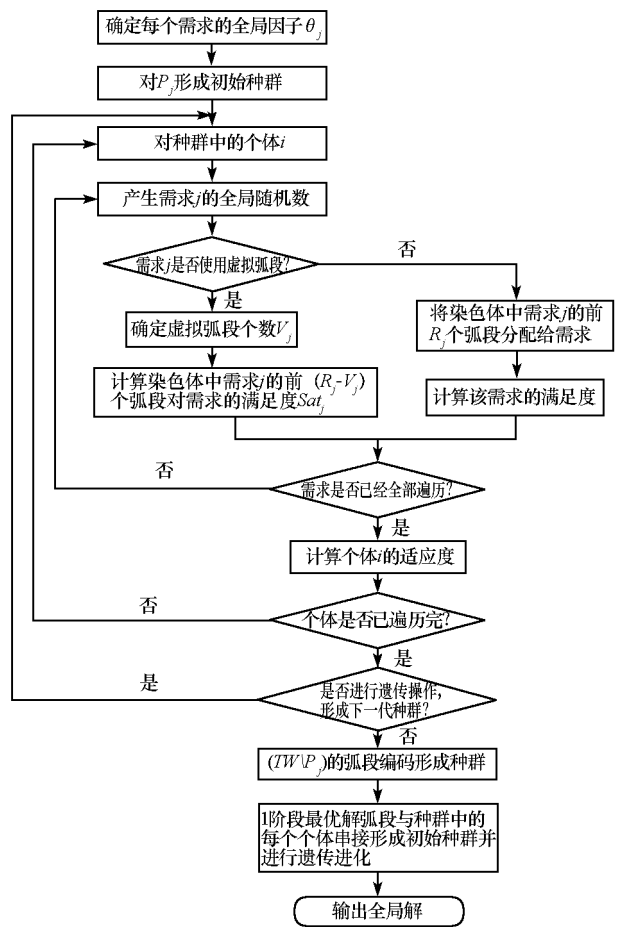


图3 算法整体流程图

Fig. 3 Algorithm process

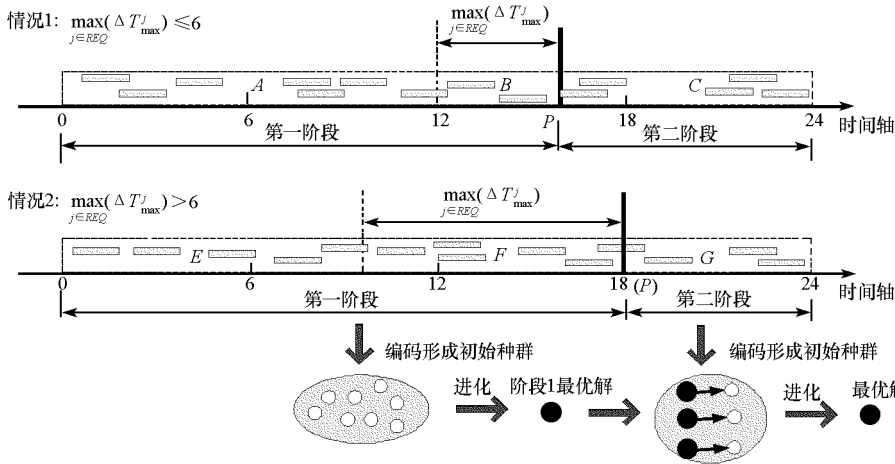


图4 阶段包含弧度划分示意图

Fig. 4 Stage partition

为了保证第一阶段的局部搜索,每个需求以一定的概率  $\theta$  (称为全局因子) 确定是否使用虚拟弧

段。对某个需求,如果不使用虚拟弧段,则将染色体中前  $R_j$  个该需求的弧段分配给该需求,其任务满足度  $Sat_j$  的计算用(2)式进行;如果使用虚拟弧段,则只将染色体中前  $(R_j - V_j)$  个弧段分配给该需求,其任务满足度  $Sat_j$  计算方法如下:

将此  $(R_j - V_j)$  个弧段根据其对应的测站分成  $K$  个集合  $S_1, S_2, \dots, S_K$ , 各集合拥有弧段个数  $NS_1, NS_2, \dots, NS_\varphi, \dots, NS_K$ , 其中  $NS_t > 1 (t = 1, 2, \dots, \varphi)$ , 则该需求的满足度为

$$Sat_j = 1 - [ \lambda_1 w_{j1} \xi_1 (1 - (R_j - \sum_{i=1}^{\varphi} NS_i + \varphi) / N_{req}^{j1}) + \lambda_2 w_{j2} \xi_2 ((N_{act}^{j3} - N_{req}^{j3}) / N_{req}^{j2}) + \lambda_3 w_{j3} \xi_3 ((N_{act}^{j2} - N_{req}^{j2}) / N_{req}^{j3}) + \lambda_4 w_{j4} \xi_4 (1 - e^{-\left(\frac{\Delta T_{min}^j}{\Delta TA_{min}^j}\right)}) + \lambda_5 w_{j5} \xi_5 (1 - e^{-\left(\frac{\Delta TA_{max}^j}{\Delta T_{max}^j}\right)}) ] / \sum_{i=1}^5 \lambda_i w_{ji} \xi_i \quad (6)$$

式(6)中,指示变量  $\lambda_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ , 在需求的当前  $(R_j - V_j)$  个弧段已经表明不能满足各具体要求时为1, 否则为0。特别的是,当其中的最右端弧段的结束时间处于图4所示的A区和E区时,则加入虚拟弧段后也必然不能满足最大测控间隔时间的要求,此时  $Sat_j$  计算的第5部分  $\Delta TA_{max}^j$  设定为该弧段的结束时刻和阶段分割点P之间的距离。 $Sat_j$  的计算假定了第二阶段可以寻优到能最好满足要求的虚拟弧段,其值代表了当前  $(R_j - V_j)$  个弧段所可能具备的“最佳性能”。

第二阶段进化中,对  $(TW \setminus P_1)$  中的弧段依据编码规则进行编码,然后将第一阶段最优解对应的弧段序列串接到每个染色体的左边,形成初始种群;适应度的计算依照(2)式进行。

## 4 仿真分析

创建两个仿真场景:35颗低轨卫星,3颗中轨卫星,场景一包括两个地面测站、一个中继卫星测站,场景二包括两个地面测站、两个中继卫星测站,卫星各配置一架天线,测站各配置一套设备,频段匹配,具体参数见表1(用参数半长轴  $S$ (km)、偏心率  $E$ 、轨道倾角  $I$ (°)、近地点幅角  $A$ (°)、升交点赤经  $R$ (°)、真近点角  $T$ (°)表示)和表2。仿真时间:2009\06\14 00 00 00~2009\06\15 00 00:00。各卫星任务需求优先级相同,各子项权重  $w_{ji}$  都为0.2,全局因子  $\theta_j$  都为0.15,其它具体要求统一设置如表3所示,调度结果如表4所示。

表1 卫星基本参数  
Tab.1 Basic parameter of satellite

卫星	$S$	$E$	$I$	$A$	$R$	$T$	卫星	$S$	$E$	$I$	$A$	$R$	$T$
S1	7078.1	0.0	98.2	0.0	265.8	0.0	S21	6939.1	0.0	97.6	0.0	340.0	180.0
S2	7078.1	0.0	98.2	0.0	355.8	0.0	S22	7478.1	0.0	63.4	270.0	91.6	0.4
S3	7078.1	0.0	98.2	0.0	85.8	360.0	S23	7478.1	0.0	63.4	270.0	91.6	0.4
S4	7078.1	0.0	98.2	0.0	175.8	0.0	S24	7478.1	0.0	63.4	270.0	91.6	359.6
S5	6878.1	0.0	97.4	0.0	30.0	360.0	S25	7478.1	0.0	63.4	270.0	91.6	359.6
S6	6878.1	0.0	97.4	0.0	120.0	360.0	S26	7478.1	0.0	63.4	270.0	92.5	359.6
S7	6878.1	0.0	97.4	0.0	210.0	0.0	S27	7478.1	0.0	63.4	270.0	92.5	359.6
S8	6878.1	0.0	97.4	0.0	300.0	0.0	S28	7635.3	0.0	100.7	0.0	272.4	180.0
S9	7278.1	0.0	99.0	0.0	310.0	0.0	S29	7635.3	0.0	100.7	0.0	355.1	180.0
S10	7278.1	0.0	99.0	0.0	220.8	360.0	S30	6971.1	0.0	97.8	0.0	18.2	69.0
S11	7278.1	0.0	99.0	0.0	130.8	360.0	S31	6971.1	0.0	97.8	0.0	18.2	0.0
S12	6866.2	0.0	97.4	0.0	287.5	180.0	S32	7178.1	0.0	98.6	0.0	0.0	0.0
S13	6939.2	0.0	97.6	0.0	287.5	180.0	S33	7178.1	0.0	98.6	0.0	90.0	0.0
S14	6939.2	0.0	97.6	0.0	332.6	180.0	S34	7178.1	0.0	98.6	0.0	180.0	0.0
S15	6939.2	0.0	97.6	0.0	295.0	180.0	S35	7178.1	0.0	98.6	0.0	270.0	0.0
S16	6939.2	0.0	97.6	0.0	355.20	180.0	S36	17420.1	0.0	97.6	0.0	312.5	180.0
S17	6939.2	0.0	97.6	0.0	264.9	180.0	S37	16420.1	0.0	97.6	0.0	312.5	180.0
S18	6939.2	0.0	97.6	0.0	250.9	180.0	S38	16020.1	0.0	97.6	0.0	312.5	180.0
S19	6939.2	0.0	97.6	0.0	180.6	180.0	SD1	42164.1	0.0	0.0	0.0	0.0	320.8
S20	6939.1	0.0	97.6	0.0	70.0	180.0	SD2	42164.1	0.0	0.0	0.0	0.0	31.3

表2 地面站基本参数

Tab. 2 Basic parameter of facility

地面站	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)
F1	109.5	34.5	0
F2	118.1	24.5	0

表3 卫星测控任务需求设置

Tab. 3 Setting of TT&amp;C requirement

卫星类型	每天跟踪站数 (不同的站)	每天升/降轨 测控次数	最小大测控 间隔时间 (h)	最短 持续时间 (min)
低轨卫星	3	2	6	8
中轨卫星	3	—	6	20

表4 调度结果

Tab. 4 Scheduling result

场景	算法运行时间(s)		求解结果(任务满足率)		
	两阶段	全弧段	FCFS	GA	
				两阶段	全弧段
场景一	9015.60	16760.20	0.716	0.785	0.803
场景二	28633.60	60911.57	0.703	0.907	0.912

GA 采用轮盘赌选择、Syswerda 序列交叉算子<sup>[9]</sup>和多点交换变异算子<sup>[10-11]</sup>;两种进化策略下种群规模都为 20,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.1,终止条件为进化 20 代。

从调度结果可以看出,采用两阶段递进调度,对待处理弧段数达 7512 的场景一和 14412 的场景二,算法运行时间比对整个问题的所有弧段进行编码分别要减少 46.2% 和 53.0%。由于一般的交叉、变异、选择等遗传算子的时间复杂度为  $O(n)$ ,且一些变量,如交叉位数,一般也根据染色体长度作近似线性的变化,这些开销与个体适应度计算花费的时间相比要少得多,所以采用两阶段进化的整个算法在时间上比对所有弧段进行编码的算法会有很大提高。同时,从求解质量来看,两阶段算法比全弧段算法稍差,其中场景二比场景一的差距要稍小,从理论上讲,场景二的资源比场景一的要充沛得多,因此,两阶段划分的两个弧段集合之间的耦合性会自然减弱,而且本文提出的方法在局部搜索上也有相对优势,这与仿真结果相符。另外,为了说明采用遗传算法进行求解的优势与劣势,与文献[10]所述的 FCFS 算法求解结果作了对比,虽然 FCFS 算法的求解时间只需要几秒,与 GA 算法求解时间相比有非常大的优势,但是其求解结果与 GA 相比有较大差距。

## 5 结束语

天地测控资源调度问题涉及的调度对象数量大,变量与目标之间铰链关系复杂,对此问题如果用遗传算法和启发式算法针对不同轨道高度的卫星进行联合求解,可以取得一定程度的满意解,但对启发式的要求高,尤其当目标函数中各权重系数不一样时,很难在各要素分量间取得平衡。本文设计的遗传编码方式在机理上能确保编码空间与问题解空间映射的完备性,整个算法求解效果较好,但也还需要对其搜索效率作进一步的研究,以期在一定的时间开销下得到更好的解。

## 参考文献:

- [1] 金锋,吴澄.大规模生产调度问题的研究现状与展望[J].计算机集成制造系统,2006,12(2):161-168.
- [2] Samomiya N, Ima H. Genetic Algorithm Approach to an Optimal Scheduling Problem for a Large-scale Complex Manufacturing System[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics, NJ, USA, 1999: 622-627.
- [3] Zhang R, Wu C. Decomposition and Immune Genetic Algorithm for Scheduling Large Job Shops[J]. Evolutionary Computation, 2008, 1(6):33-39.
- [4] 张瑞,吴澄.求解大规模车间调度问题的一种分解优化算法[J].计算机集成制造系统,2008,14(8):1559-1565.
- [5] 娄山佐,史忠科.基于分解协调原理的大规模动态车辆调度[J].系统仿真学报,2006,18(4):998-1001.
- [6] 郝井华,刘民,吴澄,等.基于工件聚类的并行机调度算法及其应用[J].计算机集成制造系统,2006,12(12):2062-2073.
- [7] 梁旭,王佳,黄明.解决大规模生产调度问题的一种新编码方法[J].计算机集成制造系统,2008,14(10):1974-1977.
- [8] 陈峰,武小悦.基于协同进化的航天测控资源优化调度[J].系统工程与电子技术,2009,31(11):2672-2676.
- [9] Barbulescu L, Howe A E, Whitley L D. Understanding Algorithm Performance on an Oversubscribed Scheduling Application[J]. Artificial Intelligence Research, 2006(27):577-615.
- [10] 李云峰.卫星-地面站数传调度模型及算法研究[D].长沙:国防科技大学,2008.
- [11] 钟求喜,陈火旺.任务分配与调度中遗传算子的设计[J].国防科技大学学报,2000,22(3):34-38.