文章编号:1001 - 2486(2011)03 - 0038 - 06

基于拉格朗日松弛的航天测控调度上界求解算法※

康 宁,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:通过分析航天测控调度问题的测控需求,建立了航天测控调度 0 - 1 整数规划模型,运用拉格朗日松弛方法对模型中的设备约束和卫星约束进行了松弛,运用次梯度优化算法求得了拉格朗日对偶问题的上界。最后,通过对两个场景的试验分析,证明了运用次梯度优化算法求得的上界的有效性。

关键词:航天测控调度;拉格朗日松弛;拉格朗日对偶;次梯度优化
中图分类号:TP18 **文献标识码**:A

TT&C Scheduling Upper Bound Solution Algorithm Based on Lagrangian Relaxation

KANG Ning, *WU Xiao-yue*
(College of Information Systems and Management, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The TT&C demand of TT&C Scheduling problem was analyzed and a model of TT&C Scheduling 0-1 integer programming was constructed. The model's facility constraints and satellite constraints were relaxed by lagrangian relaxation method, and an upper bound of lagrangian dual problem by subgradient optimization algorithm was obtained. Finally, two examples were tested. The results demonstrate the validity of upper bound obtained by subgradient optimization algorithm.

Key words: TT&C scheduling; lagrangian relaxation; lagrangian dual; subgradient optimization

航天测控调度问题是指在给定测控资源配置下,采用合理模型和算法对各种类型卫星的跟踪、遥测、遥控等测控需求进行管理和调度,使场景卫星的测控需求收益最大化。卫星测控要通过卫星测控天线和地面站测控设备在几何可见时间窗口内建立通信链路来完成,由于测控设备数量有限,不能完全满足日益增多的卫星测控需求。因此,测控部门需要进行航天测控调度,尽可能多地满足卫星测控需求。航天测控调度问题是 NP 完全问题[1],具有领域知识复杂、解空间庞大的特点,使该问题的建模和求解都有一定的困难。很多文献[2-3]建立了该问题的约束满足问题模型,很多算法基于约束满足问题模型进行设计,如综合优先度算法[1]、迭代修正算法[4]、遗传算法[5]、蚁群算法[6]等。

评价上述算法优劣的一个标准是考察它所计算的可行解目标函数值同最优目标函数值的差别,评价当前场景配置合理性的一个标准是考察最优目标函数值同完全满足当前场景需求的收益值之间的差别,由于航天测控调度问题难度较大,求解最优目标函数值是非常困难的,一个有效方法是通过计算目标函数上界,利用上界和下界(可行解目标函数值)的差来评价启发式算法可行解的次优性,利用上界和完全满足需求收益值的差来评价当前场景配置的合理性。拉格朗日松弛(LR)算法就是求解上界的一种有效方法,其基本思想是:使用拉格朗日乘子向量,将造成问题难以求解的复杂约束[7]引入目标函数中,并使目标函数仍保持线性,形成另一个或一系列相对简单的松弛问题,其最优解即是原问题最优解的上界。文献[8]建立了卫星成像调度问题的 0 - 1 整数规划模型,并运用拉格朗日松弛方法获得了该问题的一个紧致上界,用来评价搜索算法所得到的最优目标函数值。本文将拉格朗日松弛方法引入到航天测控调度问题,构建了航天测控调度 0 - 1 整数规划模型,用拉格朗日松弛算法对该问题上界进行求解,用综合优先度(TSP)算法和遗传算法(GA)分别获得该问题的一个可行解,用来与所求上界进行比较。最后,通过仿真算例对算法的有效性进行了验证。

※ **收稿日期**:2010 - 10 - 12
基金项目:国家省部资助项目
作者简介:康宁(1979—),男,博士生。

1　航天测控调度问题模型

本文中卫星测控需求为抽象测控需求(简称"需求"),卫星及其需求集合为 $SAT=\{sat_1,\cdots,sat_S\}$,需求内容为:每天升轨测控任务数、每天降轨测控任务数、测控任务持续时间、测控任务最小间隔时间、需求收益值。每个卫星需求包括若干个升降轨测控任务(简称"任务"),需求的满足要通过其任务完成,因此需要将需求表示为任务。场景卫星任务集合为 $TASK=\{task_1,\cdots,task_I\}$,单颗卫星 sat_s 的任务集合为 $TASK(s)=\{task(s)_1,\cdots,task(s)_{I(s)}\}$。本文假定同一卫星需求的若干升降轨任务重要程度相同,将需求收益值平均分配到每个任务。设备集合为 $RES=\{res_1,\cdots,res_J\}$,根据 sat_s 的运行轨道和 res_j 的地理位置利用STK软件确定卫星与设备的几何可见时间窗口,该窗口即是卫星任务与设备的几何可见时间窗口。任务的几何可见时间窗口中有些是可用来为该任务进行测控服务的,称为任务可用时间窗口。

根据任务可用时间窗口可以得到任务可能开始时刻,即航天测控调度模型的决策变量。具体方法为:根据任务可用时间窗口得到任务可能开始时间区间,任务可能开始时间区间指任务在设备上开始执行可以导致任务被成功执行的时间区间。用1分钟对调度周期内的时间进行离散化,将一个周期(一天)分成 $T=1440$ 个时刻,任务可能开始时间区间则被离散化为任务可能开始时刻。任务可能开始时刻集合为 $X=\{x_{ij}^t \mid task_i\in TASK;res_j\in RES;t\in F_{ij}\}$,$F_{ij}$ 是任务 $task_i$ 在设备 res_j 上可以成功执行的时刻集合,$x_{ij}^t=1$ 表示 $task_i$ 在 res_j 上的 t 时刻开始执行,即 $task_i$ 被成功调度,反之,$x_{ij}^t=0$ 表示 $task_i$ 在 res_j 上的 t 时刻未开始执行,x_{ij}^t 的权重 ω_i 为对应 $task_i$ 成功执行的收益值。建立航天测控调度问题0-1整数规划模型,简称"IP":

$$Z_{IP}=\max\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{t\in F_{ij}}\omega_i x_{ij}^t \tag{1}$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_{j=1}^{J}\sum_{t\in F_{ij}}x_{ij}^t\leqslant 1,\quad task_i\in TASK \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{t\in R_{ijm}}x_{ij}^t\leqslant 1,\quad res_j\in RES,m\in G_j,$$
$$R_{ijm}=(m-last_i-setup_j,m]\cap F_{ij} \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^{I(s)}\sum_{j=1}^{J}\sum_{t\in S_{ijms}}x_{ij}^t\leqslant 1,$$
$$sat_s\in SAT,m\in H_s,$$
$$S_{ijms}=(m-last_i-min_s,m]\cap F_{ij} \tag{4}$$

$$x_{ij}^t\in\{0,1\} \tag{5}$$

式(1)为目标函数:最大化所有成功调度任务收益值。式(2)为任务约束:每个任务最多只能执行一次。式(3)为设备约束:每个设备某一时刻最多只能为一个任务服务,每个设备成功调度的任务满足设备最小切换时间要求。其中,G_j 为设备 res_j 上的可能冲突时刻集合,设备可能冲突时刻是指在该设备上可能违反设备约束的时刻。$last_i$ 是 $task_i$ 的执行持续时间,$setup_j$ 是 res_j 的设备最小切换时间,R_{ijm} 是 $task_i$ 在 res_j 的 $(m-last_i-setup_j,m]$ 区间内的可能开始时刻集合。两个设备约束的本质是同一设备的成功执行任务的开始时刻之间要大于一定间隔,约束一中该间隔为 $last_i$,约束二中该间隔为 $last_i+setup_j$。因此,约束一是约束二中 $setup_j=0$ 时的特例,可以用约束二来表示设备约束。式(4)为卫星约束:每颗卫星某一时刻最多执行一个任务,每颗卫星成功调度的任务满足该卫星测控任务最小间隔时间要求。其中,H_s 为卫星 sat_s 上的可能冲突时刻集合,卫星可能冲突时刻是指在该卫星上可能会违反卫星约束的时刻。min_s 是 sat_s 的测控任务最小间隔时间,S_{ijms} 是 sat_s 的 $task_i$ 在 res_j 的 $(m-last_i-min_s,m]$ 区间内的可能开始时刻集合。两个卫星约束的本质是同一卫星的成功执行任务的开始时刻之间要大于一定的间隔,约束一中该间隔为 $last_i$,约束二中该间隔为 $last_i+min_s$。因此,约束一是约束二中卫星 $min_s=0$ 时的特例,可以用约束二来表示卫星约束。式(5)为决策变量的取值范围。

2　拉格朗日松弛问题及其求解

若将 IP 中的设备约束(3)和卫星约束(4)去掉,则问题可在多项式时间内求得最优解。定义 $\mu=\{\mu_{jm}\mid \mu_{jm}\geqslant 0;res_j\in RES,m\in G_j\}$,$\nu=\{\nu_{sm}\mid \nu_{sm}\geqslant 0;sat_s\in SAT,m\in H_s\}$ 分别是松弛设备约束(3)和卫星约束(4)的拉格朗日乘子。对给定的 (μ,ν),定义 IP 对 (μ,ν) 的拉格朗日松弛问题,简称"$LR(\mu,\nu)$":

$$Z_{LR}(\mu,\nu)=\max\Big(\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{t\in F_{ij}}\omega_i x_{ij}^t+\sum_{j=1}^{J}\sum_{m\in G_j}\mu_{jm}\big(1-\sum_{i=1}^{I}\sum_{t\in R_{ijm}}x_{ij}^t\big)+\sum_{s=1}^{S}\sum_{m\in H_s}\nu_{sm}\big(1-\sum_{i=1}^{I(s)}\sum_{j=1}^{J}\sum_{t\in S_{ijms}}x_{ij}^t\big)\Big) \tag{6}$$

$$=\max\Big(\sum_{s=1}^{S}\sum_{i=1}^{I(s)}\sum_{j=1}^{J}\sum_{t\in F_{ij}}\omega_i x_{ij}^t-\sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{S}\sum_{i=1}^{I(s)}\sum_{m\in G_j}\big(\mu_{jm}\cdot\sum_{t\in R_{ijm}}x_{ij}^t\big)-\sum_{s=1}^{S}\sum_{i=1}^{I(s)}\sum_{j=1}^{J}\sum_{m\in H_s}\big(\nu_{sm}\cdot\sum_{t\in S_{ijms}}x_{ij}^t\big)+A\Big) \tag{7}$$

$$=\max\Big(\sum_{s=1}^{S}\sum_{i=1}^{I(s)}\sum_{j=1}^{J}\sum_{t\in F_{ij}}\omega_i x_{ij}^t-\sum_{j=1}^{J}\sum_{s=1}^{S}\sum_{i=1}^{I(s)}\sum_{t\in F_{ij}}\big(x_{ij}^t\cdot\sum_{m\in G_{ijt}}\mu_{jm}\big)-\sum_{s=1}^{S}\sum_{i=1}^{I(s)}\sum_{j=1}^{J}\sum_{t\in F_{ij}}\big(x_{ij}^t\cdot\sum_{m\in H_{ijts}}\nu_{sm}\big)+A\Big) \tag{8}$$

$$=\max\Big(\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{t\in F_{ij}}\big(\omega_i-\sum_{m\in G_{ijt}}\mu_{jm}-\sum_{m\in H_{ijts}}\nu_{sm}\big)x_{ij}^t+A\Big) \tag{9}$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_{j=1}^{J}\sum_{t\in F_{ij}}x_{ij}^t\leqslant 1,\quad task_i\in TASK,\quad x_{ij}^t\in\{0,1\} \tag{10}$$

当(μ,ν)给定后，$A=\sum_{j=1}^{J}\sum_{m\in G_j}\mu_{jm}+\sum_{s=1}^{S}\sum_{m\in G_s}\nu_{sm}$为常数项，式(7)和式(8)中，当 $task_i$ 和 res_j 确定后，$\sum_{m\in G_j}\big(u_{jm}\cdot\sum_{t\in R_{ijm}}x_{ij}^t\big)=\sum_{t\in F_{ij}}\big(x_{ij}^t\cdot\sum_{m\in G_{ijt}}u_{jm}\big)$，其中$R_{ijm}=(m-last_i-setup_j,m]\cap F_{ij}$，$G_{ijt}=[t,t+last_i+setup_j)\cap G_j$。$\sum_{m\in G_j}\big(u_{jm}\cdot\sum_{t\in R_{ijm}}x_{ij}^t\big)$的意义是 res_j 的每个可能冲突时刻 $m\in G_j$ 对应的变量 u_{jm} 与区间$(m-last_i-setup_j,m]$中的所有 $task_i$ 的可能开始时刻 $t\in F_{ij}$ 对应的变量 x_{ij}^t 分别相乘，然后所有的乘数再相加。等价于每个 $task_i$ 的可能开始时刻 $t\in F_{ij}$ 对应的变量 x_{ij}^t 与区间$[t,t+last_i+setup_j)$中的所有 res_j 的可能冲突时刻 $m\in G_j$ 对应的变量 u_{jm} 分别相乘，然后所有的乘数再相加，即$\sum_{t\in F_{ij}}\big(x_{ij}^t\cdot\sum_{m\in G_{ijt}}u_{jm}\big)$。同理可知，$\sum_{m\in H_s}\big(\nu_{sm}\cdot\sum_{t\in S_{ijms}}x_{ij}^t\big)=\sum_{t\in F_{ij}}\big(x_{ij}^t\cdot\sum_{m\in H_{ijts}}\nu_{sm}\big)$，其中 $S_{ijms}=(m-last_i-min_s,m]\cap F_{ij}$，$H_{ijts}=[t,t+last_i+min_s)\cap H_s$。

可以证明，对$\forall(\mu,\nu)\geqslant 0$，都有 $Z_{LR}(\mu,\nu)\geqslant Z_{IP}$，即 $Z_{LR}(\mu,\nu)$是 IP 的一个上界[8]。$Z_{LR}(\mu,\nu)$对应的 $LR(\mu,\nu)$的最优解称为“伪调度”，用 $SC(X)$表示。$SC(X)$通常不是 IP 的可行解，可能违反 IP 的设备约束和卫星约束。当$(\mu,\nu)\geqslant 0$ 给定后，定义 $p_{ij}^t=\omega_i-\sum_{m\in G_{ijt}}\mu_{jm}-\sum_{m\in H_{ijts}}\nu_{sm}$，由于 $Z_{LR}(\mu,\nu)$中的 A 为常数，因此，$LR(\mu,\nu)$可以通过解 KP 问题来得到

$$Z_{KP}=\max\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{t\in F_{ij}}p_{ij}^t\cdot x_{ij}^t \tag{11}$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_{j=1}^{J}\sum_{t\in F_{ij}}x_{ij}^t\leqslant 1,\quad task_i\in TASK,\quad x_{ij}^t\in\{0,1\} \tag{12}$$

KP 问题可以分解成 I 个子问题 $KP_1,\cdots,KP_I$，每个子问题对应一个任务 $task_i\in TASK$，定义子问题 KP_i 为

$$Z_{KP}(i)=\max\sum_{j=1}^{J}\sum_{t\in F_{ij}}p_{ij}^t\cdot x_{ij}^t \tag{13}$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_{j=1}^{J}\sum_{t\in F_{ij}}x_{ij}^t\leqslant 1,\quad x_{ij}^t\in\{0,1\} \tag{14}$$

找出 KP_i 问题中最大的 $p_{i^*j^*}^{t^*}$，如果 $p_{i^*j^*}^{t^*}<0$，则说明 KP_i 问题中所有 $p_{ij}^t<0$，此时最优解 $Z_{KP}(i)=0$，伪调度 $SC_i(X)$中所有 $x_{ij}^t=0$。如果 $p_{i^*j^*}^{t^*}\geqslant 0$，则最优解 $Z_{KP}(i)=p_{i^*j^*}^{t^*}$，伪调度 $SC_i(X)$中 $x_{i^*j^*}^{t^*}=1$，其它 $x_{ij}^t=0$。将所有 KP_i 问题求得的 $SC_i(X)$和 $Z_{KP}(i)$进行合并就得到 $Z_{LR}(\mu,\nu)$问题的 $SC(X)$和 $Z_{LR}(\mu,\nu)$，即得到了 IP 对应于给定乘子(μ,ν)的一个上界。

3 拉格朗日对偶问题及其求解

由于$\forall(\mu,\nu)\geqslant 0$ 对应的 $Z_{LR}(\mu,\nu)$都可以作为 IP 的上界，我们的目的是求与 Z_{IP} 最接近的上界，即希望找到使 $Z_{LR}(\mu,\nu)$尽可能小的乘子(μ,ν)。因此，需要求解 IP 的拉格朗日对偶问题，简称“LD”：

$$Z_{LD}=\min_{\mu\geqslant 0,\nu\geqslant 0}Z_{LR}(\mu,\nu) \tag{15}$$

次梯度优化算法就是根据 $Z_{LR}(\mu,\nu)$的分段线性而构造的求解 Z_{LD} 的一种有效方法，定义 $s(\mu_{jm})=1-\sum_{i=1}^{I}\sum_{t\in R_{ijm}}x_{ij}^t$，$s(\nu_{sm})=1-\sum_{i=1}^{I(s)}\sum_{j=1}^{J}\sum_{t\in S_{ijms}}x_{ij}^t$ 分别为乘子 μ_{jm} 和 ν_{sm} 对应的次梯度。由次梯度定义可知，次梯度可以表示当前 $SC(X)$中对应约束的满足情况；由于$\forall(\mu,\nu)\geqslant 0$，

由式(6)可知,次梯度同时可以表示对 $Z_{LR}(\mu,\nu)$的贡献情况。以 $s(\mu_{jm})$为例,$s(\mu_{jm})$在 $SC(X)$和 $Z_{LR}(\mu,\nu)$中的意义为:$s(\mu_{jm})=1$ 时,表示 res_j 在时刻 m 没有执行任务,过于满足 res_j 在时刻 m 的设备约束,$\mu_{jm}\cdot s(\mu_{jm})$为正值,对 $Z_{LR}(\mu,\nu)$有正贡献;$s(\mu_{jm})=0$ 时,表示 res_j 在时刻 m 执行了一个任务,正好满足 res_j 在时刻 m 的设备约束,$\mu_{jm}\cdot s(\mu_{jm})$为 0,对 $Z_{LR}(\mu,\nu)$没有贡献;$s(\mu_{jm})<0$ 时,表示 res_j 在时刻 m 执行了多个任务,不满足 res_j 在时刻 m 的设备约束,$\mu_{jm}\cdot s(\mu_{jm})$为负数,对 $Z_{LR}(\mu,\nu)$有负贡献。

因此,可以根据次梯度更新乘子,使 $Z_{LR}(\mu,\nu)$逐渐下降,同时使 $SC(X)$中被松弛约束逐渐倾向于正好满足。例如,根据 $s(\mu_{j^*m^*}^{(k)})$更新 $\mu_{j^*m^*}^{(k)}$ 的原理为:$s(\mu_{j^*m^*}^{(k)})=1$ 时,$\mu_{j^*m^*}^{(k+1)}$ 在 $\mu_{j^*m^*}^{(k)}$ 的基础上减小,使下次迭代时与乘子 $\mu_{j^*m^*}^{(k)}$ 对应的可能开始时刻$\{x_{ij^*}^t \mid task_i \in TASK, t \in R_{ij^*m^*}\}$的权重$(\omega_i - \sum_{m\in G_{ij^*t}} \mu_{j^*m} - \sum_{m\in H_{ijts}} \nu_{sm})$增大,$x_{ij^*}^t$ 倾向于被调度,res_{j^*} 在 m^* 时刻的设备约束倾向于正好满足,同时使 $\mu_{j^*m^*}^{(k+1)}\cdot s(\mu_{j^*m^*}^{(k+1)})$倾向于减小,$Z_{LR}(\mu^{(k+1)},\nu^{(k+1)})$倾向于减小;$s(\mu_{j^*m^*}^{(k)})=0$ 时,$\mu_{j^*m^*}^{(k+1)}=\mu_{j^*m^*}^{(k)}$,在下次迭代时对应 $x_{ij^*}^t$ 的权重没有影响,$Z_{LR}(\mu^{(k+1)},\nu^{(k+1)})$也不受其影响;$s(\mu_{j^*m^*}^{(k)})<0$ 时,$\mu_{j^*m^*}^{(k+1)}$ 在 $\mu_{j^*m^*}^{(k)}$ 的基础上增大,在下次迭代时对应 $x_{ij^*}^t$ 的权重减小,$x_{ij^*}^t$ 倾向于不被调度,res_{j^*} 在 m^* 时刻的设备约束倾向于正好满足,同时使 $\mu_{j^*m^*}^{(k+1)}\cdot s(\mu_{j^*m^*}^{(k+1)})$倾向于减小,$Z_{LR}(\mu^{(k+1)},\nu^{(k+1)})$倾向于减小。

定义$(\phi(\mu),\varphi(\nu))$为利用$(s(\mu),s(\nu))$更新(μ,ν)时的步长,$(\phi(\mu),\varphi(\nu))$的作用是在乘子更新时,调整乘子的变化幅度。由文献[9]可知,次梯度优化算法中的步长应收敛到 0,但收敛速度不能太快,否则 $Z_{LR}(\mu,\nu)$会陷入局部最优。同时,收敛速度也不能太慢,否则将造成算法时间开销增加。步长应根据每次迭代结果来进行调节,本文中步长设置为

$$
\phi(\mu_{jm}^{(k)}) = \frac{\pi^{(k)}(Z_{LR}(\mu^{(k)},\nu^{(k)}) - Z^*)}{\sum_{j=1}^{J}\sum_{m\in G_j} s(\mu_{jm}^{(k)})^2}
$$

$$
\varphi(\nu_{sm}^{(k)}) = \frac{\pi^{(k)}(Z_{LR}(\mu^{(k)},\nu^{(k)}) - Z^*)}{\sum_{s=1}^{S}\sum_{m\in H_s} s(\nu_{sm}^{(k)})^2} \tag{16}
$$

式(16)中,上标 k 代表次梯度优化的第 k 次迭代,$\pi^{(k)}$ 为步长因子,初始值设置为 $\pi^{(1)}=2$,其更新方法为:$\pi^{(k+1)}=0.98\pi^{(k)}$。$Z^*$ 为 IP 问题的目前已知最好可行解,$(Z_{LR}(\mu^{(k)},\nu^{(k)})-Z^*)$为对偶间隙,步长随对偶间隙的减小而减小。分母为次梯度的平方和,该值越大,说明各个次梯度绝对值越大,乘子的变化幅度为次梯度绝对值与步长的乘积,为避免次梯度迭代过程中乘子的变化幅度过于“振荡”,步长随该值的增大而减小。次梯度优化过程中乘子步长逐渐减小,保证了算法的收敛性。综上所述,乘子更新方法为

$$
\begin{aligned}
\mu_{jm}^{(k+1)} &= \max\{0, \mu_{jm}^{(k)} - \phi(\mu_{jm}^{(k)})\cdot s(\mu_{jm}^{(k)})\}\\
\nu_{sm}^{(k+1)} &= \max\{0, \nu_{sm}^{(k)} - \varphi(\nu_{sm}^{(k)})\cdot s(\nu_{sm}^{(k)})\}
\end{aligned} \tag{17}
$$

除非在次梯度迭代过程中得到一组(μ,ν),使 $Z_{LR}(\mu,\nu)$等于 IP 问题的一个目前最好可行解,否则无法证明次梯度优化算法所得上界的最优性。实际计算中最优上界可能无法求得,算法不可能迭代无穷多次,通常是设置一个次梯度迭代的停止准则,本文中规定得到最优上界或 $Z_{LR}(\mu,\nu)$在 300 次迭代后没有改善,算法停止。总结次梯度优化算法的基本步骤如下:

Step 1　初始化:$\mu_{jm}^{(0)}=0$, $res_j\in RES$, $m\in G_j$;$\nu_{sm}^{(0)}=0$, $sat_s\in SAT$, $m\in H_s$;$\pi^{(0)}=2$。

Step 2　根据给定的$(\mu^{(k)},\nu^{(k)})$求解 $Z_{LR}(\mu^{(k)},\nu^{(k)})$和$SC^{(k)}(X)$,并根据次梯度定义得到$(s(\mu^{(k)}),s(\nu^{(k)}))$。

Step 3　若满足停止准则,算法停止,否则转 Step 4。

Step 4　根据$(s(\mu^{(k)}),s(\nu^{(k)}))$得到更新的乘子$(\mu^{(k+1)},\nu^{(k+1)})$,转 Step 2。

通过上述次梯度优化算法可以得到一个最接近 Z_{IP}的 IP 上界,该上界可以用来评价启发式算法可行解的优劣和当前场景配置的合理性。

4　仿真算例

利用 STK 软件设计两个场景:场景 1 有 3 个设备 8 颗卫星,场景 2 有 3 个设备 18 颗卫星。设计了两种卫星测控需求,需求 1 为:收益值 30、跟踪时间 8min、升降轨任务数各 3 次、最小测控间隔时间为 0。需求 2 为:收益值 20、跟踪时间 10min、升降轨任务数各 2 次、最小测控间隔时间为 1。场景 1 和场景 2 的前一半卫星的测控需求设置为需求 1,后一半卫星的测控需求设置为需求 2。限于篇幅,本文只给出场景 1 的基本参数。设备和

卫星基本参数见表 1 和表 2,卫星对应的测控需求设置见表 3,调度周期设为 1 天:2009-12-20 00:00:00至 2009-12-21 00:00:00。

表 1 设备参数

Tab.1 Parameters of facility

地面站设备	经度/(°)	纬度/(°)	高度/m	最小切换时间/min
res_1	75.980000	39.480000	0.000000	0
res_2	108.330000	22.840000	0.000000	0
res_3	109.500000	34.520000	0.000000	0

表 2 卫星参数

Tab.1 Parameters of satellite

卫星	远地点高度/km	近地点高度/km	倾角/(°)	近地点角距/(°)	升交点赤经/(°)	真近点角/(°)
sat_1	700.000000	700.000000	98.192769	0.000000	265.847946	0.000000
sat_2	700.000000	700.000000	98.192769	0.000000	355.847946	0.000000
sat_3	488.053550	488.053550	97.361304	0.000000	287.470486	180.000000
sat_4	560.993769	560.993769	97.640155	0.000000	287.470486	180.000000
sat_5	593.000000	593.000000	97.764886	0.000000	18.181142	69.000000
sat_6	593.000000	593.000000	97.764886	0.000000	18.181142	0.000000
sat_7	800.000000	800.000000	98.607961	0.000000	0.000000	0.000000
sat_8	800.000000	800.000000	98.607961	0.000000	90.000000	0.000000

表 3 卫星测控需求参数

Tab.3 Parameters of TT&C requirement

卫星	收益值	跟踪时间/min	升轨任务数	降轨任务数	最小测控间隔时间/h
sat_1 ~ sat_4	30	8	3	3	0
sat_5 ~ sat_8	20	10	2	2	1

为验证用拉格朗日松弛算法(LR)得到的上界性能,用文献[1]给出的综合优先度算法(TSP)得到的可行解目标函数值和用遗传算法(GA)得到的可行解目标函数值分别作为问题的下界,调度结果如表 4 所示,优化度定义为:优化度 = $\frac{\text{可行解目标函数值}}{\text{拉格朗日松弛上界}} \times 100\%$。

表 4 调度结果

Tab.4 Scheduling result

场景		TSP(下界)/优化度	GA(下界)/优化度	LR(上界)	完全满足收益值
目标函数值	场景 1	155/88.57%	170/97.14%	175.000762	200
	场景 2	350/89.74%	375/96.15%	390.001971	450
运算时间(s)	场景 1	0.015	65.375	—	—
	场景 2	0.125	543.062	—	—

由表 4 可以看出,利用 LR 得到的目标函数上界可以评价可行解的优劣和场景配置的合理性。首先,场景 1 和场景 2 的 TSP 可行解目标函数值与上界分别相差 20.000762 和 40.001971,优化度分别为 88.57% 和 89.74%,说明 TSP 可行解目标函数值与最优目标函数值还有一定差距,还应进一步优化。场景 1 和场景 2 的 GA 可行解目标函数值与上界分别相差 5.000762 和 15.001971,优化度分别为 89.74% 和 96.15%,说明 GA 可行解目标函数值与最优目标函数值已非常接近,是个较优的可行解。同时也说明 LR 算法得到的上界与最优目标函数值非常接近,是性能较优的上界。

从运算时间上来看,GA 算法的运算时间要远远大于 TSP 算法的运算时间,说明 GA 算法得到较优可行解的同时,增大了时间开销。其次,可以看到场景 1 和场景 2 的上界与完全满足该场景需求的收益值相差分别为 24.999238 和 59.998029,说明在该场景需求配置下,即使得到最优解,也不能满足测控需求,若要满足测控需求,必须适当增加场景中的测控设备。

5　结束语

航天测控调度问题涉及的调度对象数量大,各种变量之间的关系复杂,应用当前的一些智能算法可以得到该问题一定程度的满意解,即下界。由于求解问题最优解有时是非常困难的,因此智能算法所求得的满意解与实际最优解的差距以及实际最优解能否满足当前测控需求均无法得知。本文运用拉格朗日松弛方法求得该问题的上界,利用上界和下界的差距及其上界和完全满足当前需求的收益值的差距,为评价算法优劣和当前场景配置的合理性提供了有效途径。

参 考 文 献:

[1] 凌晓冬.多星测控调度问题建模及算法研究[D].长沙:国防科技大学,2009.

[2] 刘洋, 贺仁杰, 谭跃进. 基于约束满足的多卫星调度模型研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(8): 1076 – 1079.

[3] 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):1118 – 1120.

[4] Monte Z, Eugene D, Brian D, et al. Scheduling and Rescheduling with Iterative Repair[J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1993, 23(6):1588 – 1596.

[5] Barbulescu L, Howe A, Whitley D. AFSCN Scheduling: How the Problem and Solution Have Evolved[J]. Mathematical Computer Modeling, 2006, 43(9 – 10):1023 – 1037.

[6] 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.

[7] 邢文训,谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社,2005.

[8] 靳肖闪,李军. 基于拉格朗日松弛与最大分支算法的卫星成像调度算法[J],宇航学报,2005, 29(2): 694 – 699.

[9] Fisher M L. The Lagrangian Relaxation Method of Solving Integer Programming Problems[J]. Management Science, 1981, 27(1): 1 – 18.

[10] Hsiao J Y. An Efficient Algorithm for Finding a Maximum Weight 2-independent Set on Interval Graphs[J]. Information Processing Letters, 1992.

[11] Marinelli F, Nocella S, Rossi F, et al. A Lagrangian Heuristic for Satellite Range Scheduling with Resource Constraints[R]. www.optimizationonline.org, 2005.

[12] Bell C. Scheduling Deep Space Network Data Transmissions: A Lagrangian Relaxation Approach[C]//Proceedings of Applications of Artificial Intelligence 1993: Knowledge-based Systems in Areospace and Industry. Pacific Grove, CA, USA. 1993: 330 – 340.

[13] Roberto C, Federico Gandellini. Solving the Swath Segment Selection Problem Through Lagrangean Relaxation[J]. Computers & Operations Research 35(2008) 854 – 862.

(上接第 17 页)

3　结 论

M6HQWT 是我国第一座高超声速静风洞,在设计和建设过程中形成的知识积累为今后发展类似设备提供了宝贵经验。目前系统已完成安装就位,正进行相关调试和试验工作。它将会给高超声速静风洞技术研究、高超声速湍流研究、边界层转捩研究等提供一个全新的实验平台。

参 考 文 献:

[1] Horvath T J, et al. Boundary Layer Transition on Slender Cones in Conventional and Low Disturbance Mach 6 Wind tunnels[R]. AIAA 2002 – 2743,2002.

[2] Beckwith I E. Aerothermodynamics and Transition in High-speed Wind Tunnels at NASA Langley[R]. Annu. Rer, Fluid Mech, 1990: 419 – 439.

[3] Beckwith I E. Comment on Setting Chamber Design for Quiet Blow Down Wind Tunnels[R]. NASA TM 84948,Marell 1981.

[4] Beckwith I E. Development of a High Reynolds Number Quiet Tunnel for Transition Research[R]. AIAA Paper, 74 – 0135, 1974.

[5] 周勇为,常熹钰.超声速静风洞的气动设计[J]. 流体力学实验与测量,2002,16(1):61 – 66.

[6] 周勇为. SWT – 120 风洞稳定段的性能测量[J]. 实验力学, 2007,22(1):85 – 89.

[7] 周勇为,易仕和.高超声速静风洞特点和发展概述[J]. 实验力学,2009,25(2):167 – 171.

[8] 陈植,易仕和,周勇为.基于喉部边界层抽吸高超声速静风洞喷管设计[C]//第十四届全国激波与激波管学术会议论文集, 安徽黄山,2010.

[9] 常熹钰,易仕和,邹建军,等. 超声速静风洞中的层流喷管研究[C]//空气动力学研究文集,1998,8:175 – 180.

[10] 张敏莉,易仕和,赵玉新. 超声速短化喷管的设计与实验研究[J].空气动力学学报,2007,25(4):500 – 503.