

敏捷卫星调度的时间约束推理方法

廉振宇, 谭跃进, 严珍珍

(国防科学技术大学信息系统与管理学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 敏捷卫星机动能力的增强带来观测机会的增多和观测时间窗口的增长, 具有很大的应用潜能。但管控中由于观测开始时间是一个具有连续值域的变量, 传统非敏捷卫星调度问题的组合优化建模方法不再适用。介绍了敏捷卫星的时间依赖、可控与不可控事件混合、资源过度受限等特性; 给出了时间约束网络概念及敏捷卫星调度中的时间约束推理问题描述; 分析了时间约束网络与距离图的等价性, 借鉴 Johnson 算法对稀疏网络的特殊处理, 采用重赋权技术, 提出针对敏捷卫星调度的改进循环检测算法检查时间约束; 建立了分支剪枝搜索算法, 以约束规划方式获得时间一致解。最后通过实例验证所提方法的有效性, 实验结果表明该方法能够较好地实现敏捷卫星调度的时间约束的一致性检验和搜索求解。

关键词: 调度; 时间推理; 循环检测; 敏捷卫星; 时间依赖; 简单时间网络

中图分类号: TP 181

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2013.06.13

Temporal reasoning technology for AEOS scheduling

LIAN Zhen-yu, TAN Yue-jin, YAN Zhen-zhen

(School of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The agile earth observation satellite (AEOS) is a new type of satellite with high application potential for its added observation opportunities and flexible time window from enhanced maneuverability. However, as the start time of observations is a continuous variable, traditional combination optimization modeling methods for non-agile satellites are not usable for it. The characteristics of temporal dependence, the mix of controllable and uncontrollable events, and resource's over-subscribed are introduced. The temporal constraint network concept and the temporal reasoning problem of AEOS are presented. The equivalence character of temporal constraint network and distance graph and the Johnson algorithm for sparse networks are analyzed. Then, an improved cycle checking algorithm for AEOS scheduling based on re-evaluating is proposed, and a branch-prune algorithm based on constraint programming way is used to get a consistent solution. Finally some experiments are presented to prove the validity of the method. The results show the efficiency and validity of the method in consistent checking and searching of temporal constraints in AEOS scheduling.

Keywords: scheduling; temporal reasoning; cycle checking; agile earth observation satellite (AEOS); temporal dependence; simple temporal network (STN)

0 引言

从 20 世纪 60 年代末, 人们就开始考虑将卫星应用于侦察、跟踪和监视^[1]。随着卫星技术的发展, 敏捷对地观测卫星应运而生, 其敏捷能力的增强带来了更大的效益和能力。未来航天发展中, 敏捷卫星是一个重要的发展方向^[2]。敏捷卫星^[3]与传统非敏捷卫星的本质区别在于其具有

滚动、俯仰、偏航三轴姿态机动能力, 而传统卫星仅能星下点成像或仅具有滚动能力。机动能力的增强带来观测机会的增多和观测时间窗口的增长。对于一个地面目标而言, 敏捷卫星对其观测的开始时间(表示为 *start*)在一个时间窗口^[3](表示为 *TW*)范围内, 传统非敏捷卫星的开始时间是一个点, 因此在敏捷卫星对地观测问题中, 观测开始时间是一个具有连续值域的变量, 无法使用传统非敏捷卫星调度

收稿日期: 2012-04-16; 修回日期: 2012-12-24; 网络优先出版日期: 2013-05-09。

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20130509.1831.003.html>

基金项目: 国家自然科学基金(61203180, 70801062, 70971131, 71031007, 71071156, 71101013, 71101150, 71201171); 湖南省研究生创新项目(CX2011B023); 国防科学技术大学博士创新项目(B110504)资助课题

问题的组合优化建模方法^[1]。

这种连续时间区间的推理问题在项目调度^[4]、电力调度^[5]、飞机调度^[6]、协同目标分配^[7]等领域同样存在。为解决上述问题中的时间约束推理问题，文献^[8]提出了时间约束网络(temporal constraint network, TCN)概念，将时间约束映射到网络图中的节点和边的关系，以图论思想解决该问题。文献^[9]应用上述思想解决了卫星调度，但该应用以时间点为基础，不适用于连续时间区间。文献^[10]引入区间概念，应用时间约束网络解决了火星机器人调度问题。文献^[11]将该方法应用于 workflow 调度中，这种带有区间的时

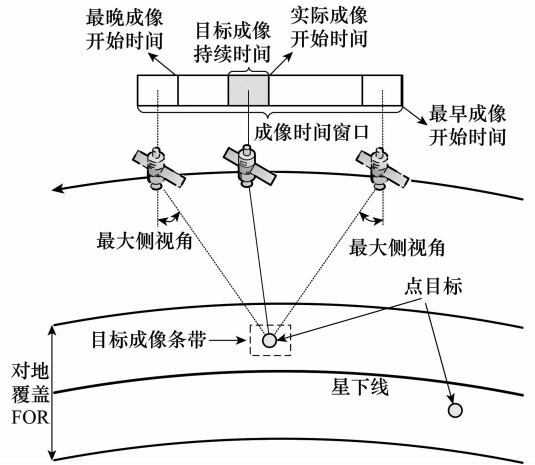


图 1 敏捷卫星的时间窗口扩展

1 敏捷卫星调度的时间约束特点

敏捷卫星调度中其他约束特点与非敏捷卫星类似，不做深入阐述，本文仅就敏捷卫星时间约束开展研究。敏捷卫星时间约束具有如下特点：

(1) 时间依赖特征

如前所述，非敏捷卫星成像活动在同一轨道上如果被选定，则该活动的开始时间和姿态角度是确定的。然而，敏捷卫星的成像活动在同一轨道上被选定后，其开始时间仍不确定，如图 1 所示。

由于其姿态角度跟开始时间是相关的(表示为函数 $F1$)，因此姿态角度也不确定。图 2 给出了敏捷卫星对某一目标在某一轨道的时间窗口范围内姿态角度的变化。4 个子图分别表示 4 种典型的目标布局，虚线范围为可见时间窗口，而在时间窗口内选择不同时间，对应的姿态不同。因而相邻成像目标不同，要求卫星的姿态不同，因此活动之间需要姿态的转换活动(表示为 *Slewing*)。该姿态转换活动的持续时间(表示为 dur)是由前后两个活动的姿态角度(表示为 $angle$)决定(表示为函数 $F2$)，且姿态转换活动与成像活动存在分离约束。

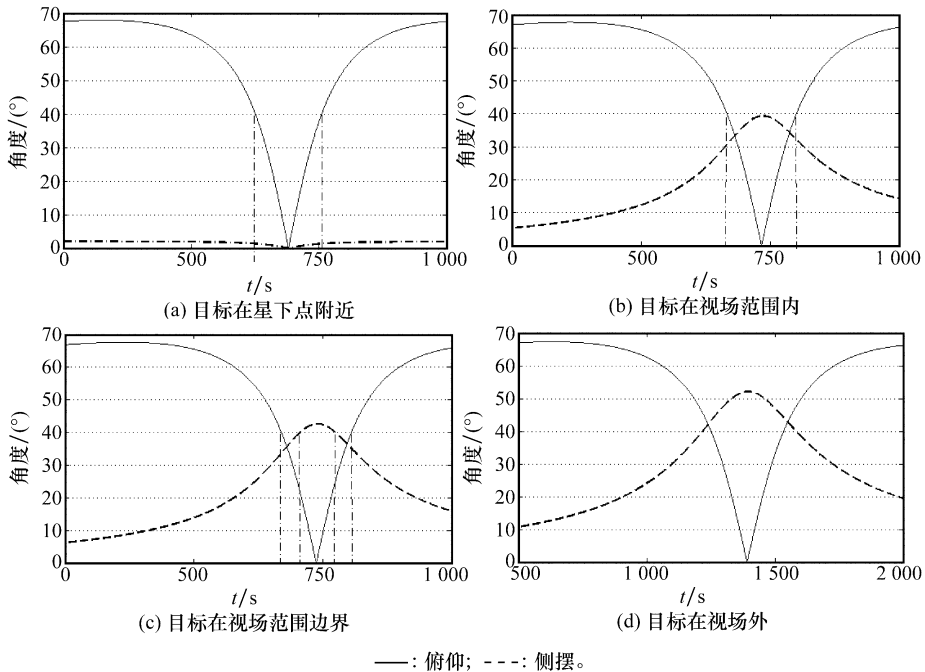


图 2 敏捷卫星对 4 种典型目标在某一轨内的姿态角度变化示意图

当相邻成像活动选择不同的开始时间时，姿态转换活动的持续时间也不同，不恰当的决策可能导致两活动的转换时间不足，不能满足时间约束，导致任务无法被安排。这

种活动时间的决策影响到其他活动，而其他活动进一步影响更多的活动，甚至是自身开始时间的选择，在此定义为时间依赖问题^[3]。这种时间依赖特征使得在时间推理上存在

潜在的迭代效应。

(2) 可控与不可控事件混合的网络特征

为卫星安排任务和活动过程中,不仅要考虑卫星本身的约束,而且要考虑地面站、阳照区/地影区时间等不可控的约束。虽然卫星轨道是可以预报的,这些不可控事件的绝对时间是确定的,但任务或活动与这些不可控事件的时间关系需要在求解过程中确定。因此本文针对该特性提出改进的一致性检查算法,以提高计算效率。

(3) 过度受限调度特征

卫星资源属于稀缺资源,只能部分满足用户需求,不同于传统规划调度中任务确定的特性,需要在搜索中选择最优的任务组合,以达到综合效益最优。而在搜索中,需要不断增删任务,增删任务造成各种活动的增删,因此需要避免因局部的调整而重新计算整个时间网络的一致性。

2 敏捷卫星调度问题的时间模型

2.1 时间约束网络

文献[12]归纳出任意两个区间之间的 13 种关系,而文献[8]提出时间约束网络,标准化解决区间关系的求解和一致性问题。时间约束网络的区间表示特性使其可以处理连续变量之间的关系,即对时间约束的推理。该方法被广泛应用并被不断改进,如简单时间网络管理算法^[13]、不确定定量时态规划^[14-15]等。

简单时间网络(simple temporal network, STN),如图 3 所示,是时间约束网络的一种简化形式,表示为一个二元组 (X, C) ,其中 X 表示具有连续值域的时间点变量 tp_i (其中 tp_0 表示虚拟开始时间点变量), C 中存在一元和二元两种约束以表示 X 中时间点的窗口、持续时间、间隔时间、完

成期限等时间约束。时间约束网络中的事件(节点)分为可控和不可控两类,约束推理的过程,就是通过调整可控事件可能发生的时间,满足相对非可控事件(时间点)的约束,以消解计划中的时间冲突的过程。

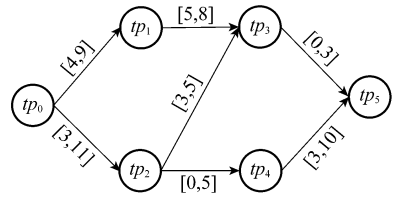


图 3 简单时间网络示意图

2.2 敏捷卫星时间描述

对于相邻两个观测活动 $(T_1, T_2, T_1 < T_2)$ 来说,目标为找到活动的一致性时间赋值,本文不区分不同的赋值的优劣,可以建立约束满足模型如下:

约束条件为

$$start(T_2) \geq start(T_1) + dur(T_1) + dur(Stewing(T_1, T_2))$$

姿态角度计算函数为

$$dur(Stewing(T_1, T_2)) = F2(angle(T_1), angle(T_2))$$

$$angle(T_1) = F1(start(T_1))$$

$$angle(T_2) = F1(start(T_2))$$

时间窗口约束为

$$start(T_1) \in TW(T_1)$$

$$start(T_2) \in TW(T_2)$$

其中 $F1, F2$ 为非线性函数或者近似梯形函数。更直观地可以表示为图 4 所示的表示形式。实际上,两个活动之间是容易求得最优解的,然而级联效应造成很难求得多个活动整体的最优。

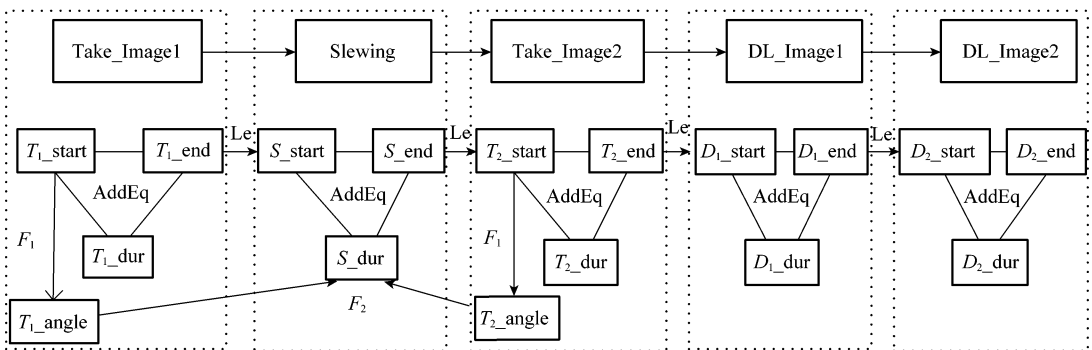


图 4 敏捷卫星时间依赖的约束表示

借鉴资源受限的项目调度问题中活动表示为活动图上的点的方法,将敏捷卫星调度中成像活动 Take_Image、数传活动 DL_Image 作为活动图的节点,则构成调度问题的活动图表示。活动的开始时间点 $start$ 、结束时间点 end 作为时间约束网络中的可控事件点,气象、进出地影属于不可控事件。边表示这些时间点之间的约束,构建时间约束网络,如:绝对时间窗口约束, $Imaging_{start} \in$

$[TW_{start}, TW_{end}] \Rightarrow TW_{start} \leq Imaging_{start} - T_0 \leq TW_{end}$ 添加边界 $T_0 \xrightarrow{[TW_{start}, TW_{end}]} Imaging_{start}$, 得到如图 5 所示的时间约束网络,其中成像必须在进地影点之前完成,而回传与该点存在互斥关系,存在两个区间关系。这是一个典型的时间约束网络,将回传的两个关系分别处理,得到两个简单时间网络,分别应用一致性检验和求解。

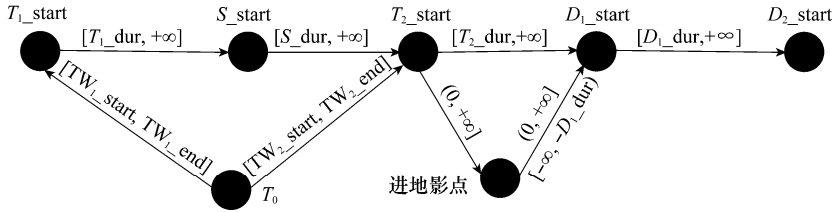


图 5 调度中活动的时间约束表示

3 敏捷卫星调度时间约束推理方法

3.1 一致性检验

给定一个约束网络,首要关心的是判断其一致性。如果网络是一致的,希望得到一些特定解,每一个解表示一个可能的场景。

定义 1 距离图,一种加权有向图 $G_d(V, E)$,其中点集 V 表示时间点 $t p_i$ 集合,边集 E 表示时间点之间的时间距离约束集合,边上权重表示两点之间的最长距离。

STN 的所有活动的起止时间点、不可控事件时间点和虚拟开始时间点共同构成了距离图 G_d 中的点集,活动持续时间约束、活动间的距离约束和次序约束编码为距离约束。STN 中每一个约束表达为距离图中时间点之间的差的上界, $a_{ij} \leq t p_j - t p_i \leq b_{ij}$,即 G_d 中两个加权边为 $t p_i \xrightarrow{b_{ij}} t p_j$ 和 $t p_j \xrightarrow{-a_{ij}} t p_i$,表示二元约束不等式 $t p_j - t p_i \leq b_{ij}$,时间窗口约束即可表示为 $t p_0 \xrightarrow{TW_{end}} t p_i$ 和 $t p_i \xrightarrow{-TW_{start}} t p_0$ 。

定理 1 给定简单时间网络 STN,STN 的一致性等价于 STN 对应的距离图 G_d 没有回路^[8]。

STN 通过计算路径来推理时间关系。若 T_i 到 T_j 有一条长为 $l(T_i, T_j)$ 的路径,则它们需满足 $t(T_j) - t(T_i) \leq l(T_i, T_j)$,称最短路径长 $d(T_i, T_j)$ 为时间距离,代表 T_i 和 T_j 之间最紧凑的约束,任意两点的时间距离可由 Floyd-Warshall 算法等得到。若存在一个执行方案 $\{t(T_0), t(T_1), \dots, t(T_n)\}$ 满足所有时间距离约束,称 STN 是一致的,它表明计划的时间约束是可满足的;否则表明计划中存在时间冲突。

3.2 改进的循环检测算法

对于稀疏网络,Johnson 算法可在 $O(V^2 \lg V + VE)$ 时间内完成,在渐进意义上优于 Floyd-Warshall 算法。敏捷卫星调度问题的时间约束网络属稀疏网络,采用类似于 Johnson 算法的方式实现,能够快速检测时间网络的一致性。运用重赋权技术,将负权边以新的权值替代计算等价的最短路。利用斐波那契最小优先队列,该算法的运行时间复杂性为 $O(V^2 \lg V + VE)$ 。算法伪代码如图 6 所示。

伪代码中 q 为斐波那契最小优先队列,以路径长度变化的负为优先级,按照最小优先的顺序存储和取出。这样每次取出的都是路径长度变化最大的节点,以此为新起点更新其他节点的最短路。 d 表示节点到初始节点的距离,

depth 表示计算路径深度。改进的循环检测方法中 p 即为重赋权。算法执行后得到每对顶点间最短路径的权值矩阵,或者报告输入图 G 中存在一个负权值回路。

```

DetermineConsistency(G)
q=initPriorityQueue();
for each node v∈V[G]
    d[v]=p[v];
    p[v]=0;
    depth[v]=0;
    q.insert(v,-d[v]);
while(q.NotEmpty)
    v=q.popMin();
    for each edge(v,u)
        d'=p[v]+w(v,u);
        if d'<p[u]
            p[u]=d';
            depth[u]++;
            if depth[u]>or u equals v
                return false;//存在循环
            q.insert(v,d'-d[u]);
    
```

图 6 改进的循环检测算法伪代码

3.3 分支剪枝搜索算法

时间约束网络是一种特殊的约束满足问题,本文采用经典的缩减值域和传播策略求解该问题。采用深度优先搜索访问图中节点,对这些节点分支,约束传播后进行一致性检查,剪去不合理分支,继续搜索。伪代码如图 7 所示。这里给出的是迭代的实现方式,变量排序以值域小的优先,即优先分支可能值域少的变量;值排序以自定义函数 *SelectValueFromDom* 选择变量赋值。设 D 为变量的最大值域,从理论上讲,该算法的最坏完成时间为 $O(D^V)$,最好完成时间为 $O(V)$,在实际应用中约束传播会大幅缩减搜索空间,一致性检验可以剪去不合理分支,因此该方法是非常实用的。

```

DFS-Branch & Cut(G)
Propagation();
if DetermineConsistency(G)is false
    return false;
SortNodes();//按照节点值域升序排列
for each node v∈V[G]//按照顺序访问节点
    if visited[v]=false && dom[v].NotEmpty;
        v=SelectValueFromDom[v];
        visited[v]=true;
        if DFS-Brach & Cut(G)is true
            return true;
        Backtrack();
        visited[v]=false;
return false;
    
```

图 7 分支剪枝搜索算法伪代码

4 实例验证

本文在实验中采用的数据是按照敏捷卫星 IKONOS^[16] 的轨道和姿态性能,由 STK^[17] (Satellite Tool Kit) 软件仿真得到的。本文提出的敏捷卫星调度中的时间约束推理是一个约束满足问题模型,目标是找到满足约束的一致性时间赋值。因此对于不同方法而言,求解时间是算法优劣的重要指标,具体解的优劣在本文不做区分。计算结果如图 8 所示,图 8(a)给出了本文提出的改进的循环检测算法与经典 Floyd-Warshall 算法在节点数量不断增长的情况下计算时间的比较,可以得到本文方法在节点数目少的情况下,两算法差别不大,但随着节点数目的不断增多,本文方法在计算时间增长的速率上明显优于 Floyd-Warshall 算法。图 8(b)给出了本文的分支剪枝算法随着活动数量不断增长,计算时间的变化情况。算例中的变量最大值为 300,平均值为 100,限定求解时间为 100 s,与分支不剪枝算法比较。分支不剪枝算法最多能够支持到 21 个节点;分支剪枝算法表现良好,拟合得到算法的复杂性为 $O(2^{0.085V})$ 。

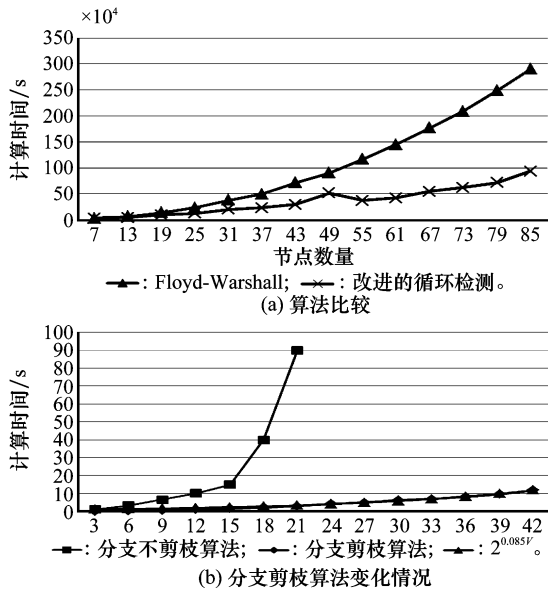


图 8 算法性能比较分析

5 结束语

根据敏捷卫星特点,其调度中的时间约束具有时间依赖特点,其推理方法需要做针对性的设计。时间网络中存在可控和不可控事件,且过度受限的资源使得求解中需要不断改变活动组合,每次都重新计算一致性和求解带来计算开销过大的问题。因此,本文设计了类似于 Johnson 算法的增量式循环检测算法和分支剪枝的搜索算法。通过仿真实验证明本文提出的方法是可行且高效的。

本文提出的算法是敏捷调度过程中对于时间分析的重要环节,对于敏捷调度的求解具有重要意义。

参考文献:

- [1] He R J, Li J F, Yao F, et al. *Mission planning techniques of earth observation satellites* [M]. Beijing: Science Press, 2010. (贺仁杰, 李菊芳, 姚峰, 等. 成像卫星任务规划技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.)
- [2] Lian Z, Xing L. A heuristic approach to dynamic rescheduling of AEOS system[C]// *Proc. of the 3rd International Conference on Computer and Network Technology*, 2011.
- [3] Lian Z, Tan Y, Xu Y, et al. Static and dynamic models of observation toward earth by agile satellite coverage[C]// *Proc. of the International Workshop on Planning and Scheduling for Space*, 2011.
- [4] Liu S X, Guo Z, Tang J F. Constraint propagation for cumulative scheduling problems with precedences[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(4): 603-609. (刘士新, 郭哲, 唐加福. 具有优先关系的累积调度问题的约束传播算法[J]. 自动化学报, 2010, 36(4): 603-609.)
- [5] Guo W X, Wen F S, Liao Z W, et al. An analytic model for power system on-line alarm processing based on temporal constraint network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 21(8): 36-42. (郭文鑫, 文福拴, 廖志伟, 等. 基于时序约束网络的电力系统在线警报处理解析模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 21(8): 36-42.)
- [6] Chen R, Yan J G, Ji L C. Air formation coordinated operation against ground based on bellman-ford algorithm[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2012, 31(9): 24-26. (陈榕, 严建钢, 吉礼超. 基于 Bellman-ford 算法的空中编队协同对岸打击[J]. 兵工自动化, 2012, 31(9): 24-26.)
- [7] Zhang J Y, Yao P Y, Wang X, et al. Multiple platforms coordinated target assignment method based on time restraint[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(6): 1287-1292. (张杰勇, 姚佩阳, 王欣, 等. 基于时间约束的多平台协同目标分配方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(6): 1287-1292.)
- [8] Dechter R, Meiri I, Pearl J. Temporal constraint networks[J]. *Artificial Intelligence*, 1991, 49(1): 61-94.
- [9] Rabideau G, Chien S, Mann T, et al. Interactive, repair-based planning and scheduling for shuttle payload operations[C]// *Proc. of the Aerospace Conference*, 1997: 325-341.
- [10] Frank J, Jonsson A. Constraint based attribute and interval planning[J]. *Journal of Constraints*, 2003, 8(4): 339-364.
- [11] Zhang W, Wang L, Wang N, et al. Handling temporal constraints in workflow model for planning and scheduling[C]// *Proc. of the 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, 2010: 467-471.
- [12] Allen J F. Maintaining knowledge about temporal intervals[J].

Communications of the ACM, 1983, 26(11): 832–843.

- [13] Cesta A, Oddi A. Gaining efficiency and flexibility in the simple temporal problem[C] // *Proc. of the 3rd International Workshop on Temporal Representation and Reasoning*, 1996.
- [14] Dubois D, Prade H. Processing fuzzy temporal knowledge[J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1989, 19(4): 729–744.
- [15] Khatib L, Morris P, Morris R, et al. Temporal constraint reasoning with preference[C] // *Proc. of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 2001.
- [16] Zhang Y. Research on image geometrical models of IKONOS stereo images[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (张燕. IKONOS 立体影像成像几何模型研究[D]. 成

都: 西南交通大学, 2009.)

- [17] Analytical Graphics Inc. Systems Tool Kit 9.2.0 Users Manual[EB/OL]. <http://www.stk.com/products/literature>.

作者简介:

廉振宇(1985–),男,博士研究生,主要研究方向为航天器任务规划与调度、系统优化与综合集成。

E-mail:zhenyulian@gmail.com

谭跃进(1958–),男,教授,博士研究生导师,硕士,主要研究方向为航天器任务规划与调度、系统优化与综合集成。

E-mail:yjtan@nudt.edu.cn

严珍珍(1988–),女,硕士研究生,主要研究方向为航天器任务规划与调度、系统优化与综合集成。

E-mail:yanzhenzhen8@gmail.com