

doi: 10.7690/bgzdh.2018.05.001

低轨预警系统传感器调度层次分析方法

何晓垒¹, 金志标², 朱守中³

(1. 中国电子科技集团公司第三十四研究所, 广西 桂林 541004; 2. 南昌陆军学院一大队二队, 南昌 330100;
3. 长沙无源定位工程技术研究院, 长沙 410001)

摘要: 为了实现低轨卫星预警系统对目标的全程跟踪并提高传感器的调度效率, 提出了基于层次分析方法的传感器调度方法。分析了目标可见性和传感器调度问题, 总结出影响传感器调度的约束条件, 运用层次分析法构建了传感器实时调度模型, 最后利用 STK 软件进行仿真分析。仿真结果表明: 该算法可以有效地减少传感器调度所需的时间以及目标交接的次数, 具有较好的性能。

关键词: 中低轨预警系统; 层次分析法; 动态任务规划

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Analytic Hierarchy Process for Sensors Scheduling of Early Warning System of Low Earth Orbit

He Xiaolei¹, Jin Zhibiao², Zhu Shouzhong³

(1. No. 34 Institute of China Electronics & Technology Group Corporation, Guilin 541004, China;
2. No. 2 Team, No. 1 Group, Nanchang Army College, Nanchang 330100, China;
3. Changsha Institute of Passive Location Engineering Technology, Changsha 410001, China)

Abstract: In order to solve the problem of whole course tracking of ballistic missile in the early warning system of low earth orbit (LEO), and improve the scheduling efficiency of sensors, introduce a sensor scheduling method based on Analytic Hierarchy Process (AHP). This paper analyzed the visibility of the target and the sensor scheduling problem, summarizes the constraints of sensors in the low orbit early warning satellites, constructed real-time sensor scheduling model based on Analytic Hierarchy Process, and finally carried on the simulation analysis with the STK software. The simulation experiments show that, this model can effectively reduce sensor scheduling for the time and target handoff times and it has a good performance.

Keywords: early warning system of low earth orbit (LEO); analytic hierarchy process (AHP); dynamic task planning

0 引言

天基预警系统的主体是外空间的多层预警卫星星座组网, 在多预警任务条件下, 通过多预警卫星的资源调度获得弹道导弹的到达角等测量信息, 从而实现对来袭弹道导弹进行监视、跟踪、弹道估计与预报等功能, 为地面指挥和作战单元提供预警信息。天基预警系统的星座构成一般包含高、低轨 2 层。高轨卫星主要作用是迅速发现助推段的目标; 低轨卫星的在轨高度低, 具有良好的分辨率, 能够在目标飞行的全程(助推段、中段和再入段)进行捕获、判别和追踪。

随着弹道导弹技术的发展, 以及现代国土防御对弹道导弹预警需求的不断提高, 需要系统能高效地调度预警卫星上的探测器资源完成弹道导弹的预警和跟踪任务^[1]。在预警卫星数量相对固定且有限的情况下, 如果多个目标同时或相继出现, 就必

须找到合理分配有限的卫星传感器资源的方法。目标的分配是低轨预警系统任务规划中的一个核心问题。另外, 由于导弹发射的突发性及时间、地点、数量的不可预测性, 对每一个目标的发现和跟踪任务都是动态的, 这就要求系统能够动态地分配传感器资源, 随时快速地生成预警监视任务。国内外学者对卫星系统任务规划调度的研究主要集中在侦察卫星、成像卫星等, 对天基预警系统的资源调度研究较少。文献[2-5]建立了天基预警系统资源调度问题的数学模型, 并利用模拟退火、遗传算法、禁忌搜索等人工智能算法求解, 但过程较为复杂; 文献[6]研究预警卫星系统动态重规划策略, 但没有给出求解问题的具体方法。

笔者深入分析低轨预警系统对目标探测的影响因素, 得出中低轨预警卫星资源调度的约束条件, 并利用层次分析法将这些约束条件建模, 从而

收稿日期: 2018-02-24; 修回日期: 2018-04-09

作者简介: 何晓垒(1983—), 男, 河南人, 学士, 工程师, 从事光信号与信息处理研究。

实现低轨预警系统资源的高效调度。

1 低轨预警系统资源调度约束分析

1.1 目标可见性分析

以一个面阵传感器为研究对象，通过空间剖面图来研究其空域覆盖特性。假设跟踪传感器位于点 S ，目标位于点 T ，两者之间距离为 R 。由于跟踪传感器的探测性能约束，其探测距离和探测指向角度存在极值。探测距离极值为最大探测距离 R_{max} 和最小探测距离 R_{min} ，探测指向角度范围的极值为 γ ，则可以得出跟踪传感器的探测距离约束条件为 $R_{min} \leq R \leq R_{max}$ 。以 S 点和地心 O 的连线作为参考系的纵轴，假设跟踪传感器下视指向角与纵轴的夹角为 α ，上视指向角与纵轴的夹角为 β ， γ 即为 β 与 α 的差值。 θ 为跟踪传感器和目标连线与纵轴的角度，则容易得知角度覆盖约束条件为 $\alpha \leq \theta \leq \beta$ 。令 h 为卫星轨道高度， R_e 为地球的半径。根据以上参数设置，中低轨跟踪传感器对导弹目标的覆盖特性如图 1 所示。

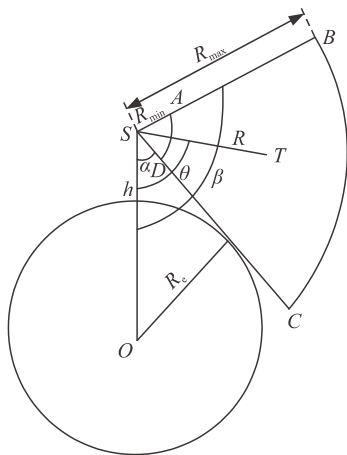


图 1 跟踪传感器空间覆盖剖面图

综上所述，可以得出跟踪传感器对于中段目标能够实现覆盖探测的约束条件为：

$$\left. \begin{matrix} R_{min} \leq R \leq R_{max} \\ \alpha \leq \theta \leq \beta \end{matrix} \right\} \quad (1)$$

在空间剖面图中，扇面“ $ABCD$ ”即为跟踪传感器的覆盖区域，将其围绕纵轴旋转一周便能得到其立体探测区域。在实际情况中，由于导弹弹体在中段飞行时其红外辐射接近于地球表面和大气层，故跟踪传感器在执行任务时其下视角必须大于其与地球的切向角，即要以地球临边和深空为背景。当跟踪传感器与目标的连线与地球有交点时，即跟踪任务以地球为背景，则会导致跟踪传感器在执行

任务时检测不到目标。

1.2 传感器调度问题分析

传感器资源调度对应的集合一般包含资源集和任务集这 2 个必不可少的集合。资源集里包含的元素是完成任务需要的各种资源，比如卫星平台和传感器资源等，是等待被调度分配的对象。任务集里包含的元素是传感器调度所需要完成的任务，也是调度的对象。根据已经确立的任务，传感器调度问题的求解就是在满足系统中各种约束的条件下，为各个任务分配资源并确定执行时间节点，从而使调度问题模型的目标函数值达到最优^[7]。

约束满足问题 (constraint satisfaction problem, CSP) 可以从数学的角度合理地解释传感器资源调度问题。约束满足问题由一个变量集合 $\{X_1 \sim X_n\}$ 和一个约束集合 $\{C_1 \sim C_m\}$ 组成。变量集合中每个元素 X_i 的值域都非空。约束集合中每个元素 C_j 确定了变量集合 $\{X_1 \sim X_n\}$ 中一个或多个变量的赋值范围。传感器调度过程就是将现有的资源条件，按时间分配给对应的任务。而传感器调度的根本目的是在基于各种约束条件下，给对应任务确定各个时段的资源分配，并且提供执行指令，使得调度问题模型的目标函数值达到最优，故调度问题能够用 CSP 表示。

根据考虑因素，传感器调度问题一般可分为 2 大类，分别是时间分配问题和资源分配问题。时间分配问题是根据已经确定好完成跟踪所用的资源，安排每个任务所需的执行时长。资源分配问题是根据已经确定好各个任务的执行时间，划分各个任务所需的资源。一般情况下，传感器调度问题都包含上述 2 种分配问题，笔者所研究的内容也一样。

1.3 传感器调度约束分析

中低轨预警卫星传感器在执行调度任务的过程中，会遇到许多约束因素，主要包括可见观测性、跟踪性能、跟踪时长等。经过综合考虑后，笔者主要研究以下几个约束关系：

1) 覆盖约束。

由于中低轨预警星座的轨道高度一般在 1 000~2 000 km，所处的高度较低；因此，在跟踪传感器对目标执行跟踪任务时，卫星的跟踪时间有限，很可能出现目标脱离卫星传感器覆盖范围的现象。只有当目标所处位置在预警卫星上跟踪传感器的覆盖范围之内，才能实现捕获跟踪，这个时段通常被称作“时间窗口”。每个跟踪传感器相对独立工

作，对于同一个目标，各个跟踪传感器都有相对应的时间窗口，而传感器资源调度就是在具有时间窗口的一个或者多个传感器中进行最优选择，从而实现跟踪。

2) 传感器性能约束。

当天基预警系统面对多个来袭目标时，单个传感器由于自身性能的原因，在跟踪任务中通常只能对限量目标进行跟踪；因此，针对实际情况，要充分考虑调度的最优选择，做好任务规划和调度。

3) 时间约束。

在进行传感器调度时，指令信息和引导信息的传输会有一定的延迟，当单个传感器在短时间内多次交接任务，很有可能会导致预警系统不稳定和跟踪精度低等现象；因此，要单个传感器不能短时间内多次交接任务，确保传感器对导弹至少要持续跟踪一段时长，这就存在一个传感器调度的时间约束。当多个传感器协同完成同一任务时，传感器进行交接任务时的时间间隔，必须大于传感器资源交接的时间和调度计算时间之和，以保证一定的跟踪精度，这就存在一个任务交接的时间间隔约束。

2 基于层次分析法的传感器调度

2.1 层次分析法的基本原理

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是美国运筹学家 T. L. Saaty 教授在 20 世纪 70 年代初提出的一种有效的多准则决策方法^[8]，在天基预警系统中被广泛运用。在天基预警系统调度环境中，往往会存在大量复杂的影响因素和约束关系，进行资源调度时，必须对其做好充分考虑，建立合理的调度模型，以到达有效的调度任务。

2.1.1 层次分析法的基本方法和步骤

AHP 通过一定的原则把抽象的问题分解为若干个子问题，并对所有子问题做条理化处理，从而建立起具有相互支配关系的多层次结构。之后根据预设的准则对同一个层次上的元素进行两两比较，经一定的数学运算，得出元素相较于上一层支配元素的相对重要性权重，从而得到所有子问题相较于总目标的权重值，并进行排序。

AHP 的一般步骤为：

1) 根据一定的规则，将系统中的影响因素实现归类划分，从而构建出层次结构；

2) 根据预设的准则对同一个层次上的各元素与上层对应的准则的相对重要性进行比较，并构建

出比较矩阵；

3) 对判断矩阵进行一致性检验，在符合检验条件下，通过对比较矩阵的计算，得到所有比较元素对该准则的权重；

4) 通过计算得到各层元素对于系统目标的总排序权重。

2.1.2 层次结构的建立

层次分析法最关键的步骤就是对层次结构的构建。在构建的过程中，首先要把问题所含有的因素按属性进行分类，分成多个组别，并划分出多个层次，以最高层(目标层)、中间层(准则层)、最底层(方案层)的 3 层排列。层次之间存在准则关系的元素之间拥有支配关系，同一层次元素之间没有支配关系，上层的准则元素对下层一个或者多个元素有支配作用，而下层的元素受到上层一个或者多个准则元素的支配。通常情况中，最高层(目标层)只含有一个元素，是需要进行处理的预定目标或结果；中间层(准则层)一般含有多个元素，是在实现目标的过程中，必须考虑的准则或者子准则；最底层(方案层)的元素是最终为达成目标提供可选择的各种措施和决策方案。

2.2 传感器调度模型

通过 1.3 节对约束的分析，传感器调度问题的模型可以转化为约束最优化问题，表示为：

$$\begin{aligned} \min \{ & f(\text{Coef}_1, \text{Coef}_2, \dots, \text{Coef}_n) \} \quad \text{or} \\ \max \{ & f(\text{Coef}_1, \text{Coef}_2, \dots, \text{Coef}_n) \}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \forall m, \tau_m & \leq \tau_{\max}, m=1, 2, \dots, M \\ C_{mn} & \in \{0, 1\} \\ tc_{mno} & \geq tc_{mn} \\ x_{mn} & \in \{0, 1\} \\ t_o & \leq tc_{\text{sup}}, o=1, 2, \dots, T \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

式中： f 是调度问题的优化目标函数； $\text{Coef}_1, \text{Coef}_2, \dots, \text{Coef}_n$ 为调度问题中的参数； m 为传感器的序号； M 为系统中传感器的总数目； n 为目标的序号； N 为系统中跟踪任务总数目； τ_m 为第 m 个传感器处理的任务数目； τ_{\max} 为第 m 个传感器能够跟踪的任务数目上限。文中规定所有传感器最多只能处理一个任务，即： τ_{\max} 值等于 1； C_{mn} 代表在 t 时间第 m 个跟踪传感器与第 n 个目标的覆盖参数，当 C_{mn} 值为 1 时，表示在 t 时间第 n 个目标在第 m

个跟踪传感器的覆盖地域内，否则为 0； tc_{mno} 为第 m 个跟踪传感器跟踪对第 n 个目标所观测的连续时间， tc_{mn} 为观测的时间下限； x_{tmm} 为在 t 时间跟踪传感器的使用情况，当其值为 1 时，代表在 t 时间第 m 个传感器负责跟踪第 n 个任务，当其值为 0 时，代表在 t 时间第 m 个跟踪传感器没有负责跟踪第 n 个任务； t_o 为第 o 次传感器调度的转换时间； tc_{sup} 为调度的计算时间的最大阈值。

第 1 个约束关系代表每个传感器的性能约束，即所能处理的目标数量上限；第 2 个约束关系代表了传感器对目标的覆盖约束，即传感器与目标之间的覆盖状况；第 3 个约束条件代表了任务交接的时间约束，即每次跟踪任务必须保证一定的持续时间；第 4 个约束条件代表了传感器的占有状态；第 5 个约束条件代表了资源调整的时间约束，即每次任务交接调整的时间必须小于系统规定的上限。

2.3 基于 AHP 的传感器调度方法

中低轨预警卫星系统在天基预警卫星系统中的主要功能是对导弹目标中段弹道的跟踪与监视。如果按照定量分析法建立优化模型，由于系统的复杂性以及目标位置和出现时间的随机性，使得模型的建立需要非常大的计算量，并且误差较大。针对上述缺点，笔者采用层次分析法，通过综合考虑多个相关因素，构建基于权重分析的传感器调度结构。

2.3.1 目标层

目标层代表的是系统所需要完成的任务。对于中低轨预警卫星上传感器调度所需要完成任务而言，目标层就是系统所需要跟踪的目标。

2.3.2 准则层

准则层所代表的是系统中存在的约束条件。文中的准则层主要考虑如下几点。

1) 距离。

由于在整个系统中，目标的运动和卫星平台的运动互不关联，跟踪传感器与目标的相对距离是实时变化的。跟踪传感器由于自身的设计性能约束，其探测距离存在极限值；因此，跟踪传感器与目标之间的距离不同，将直接影响跟踪传感器的探测性能和截获概率。

2) 已跟踪时间。

在进行传感器资源调度时，为了确保系统的稳

定性，必须避免频繁的传感器交接，即要确保跟踪传感器在执行跟踪任务时有一定的持续时间。已跟踪时间代表了跟踪传感器在执行跟踪任务时持续的时长。已跟踪时间越长，表明该传感器跟踪性能越稳定，当目标一直处于传感器视场内，则更加倾向于使其继续执行跟踪任务。

3) 预期跟踪时间。

预期跟踪时间指的是在进行传感器资源调度前，根据传感器与目标之间的几何位置关系和覆盖特性，求解出传感器对于目标可以跟踪的最大时长。时长越长表明传感器的覆盖特性更好，更加倾向于让该传感器交接跟踪任务。

2.3.3 方案层

方案层是层次分析模型的最底层，是为了完成任务而提供的各种决策选择项。方案层的元素是在中低轨天基预警系统中可供调用的所有跟踪传感器组合，而最终的决策选项就是从所有传感器组合中做出最优选择来实现目标跟踪任务。

根据层次分析法以上的结构分析，可以建立跟踪传感器调度的层次结构，如图 2 所示。

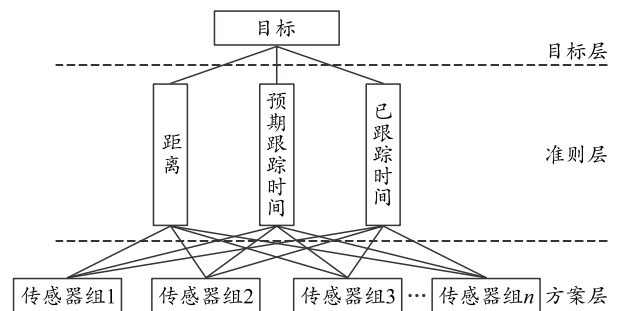


图 2 传感器调度层次结构

3 算法仿真与结果分析

卫星平台的运动具有较强的规律性，可通过轨道根数推演得到各个时刻的位置；导弹目标在飞行中段轨迹可以用抛物线近似。笔者采用 STK 软件建立星座和导弹的模型，进而分析提出算法的性能。

3.1 星座配置

文中仿真的典型场景设置为 4 个轨道面，每个轨道面上拥有 7 颗卫星，每个星座轨道参数取 $28/4/2/1596/77.8^{[9]}$ 。仿真时预估弹道的量化步长取 50 s，传感器观测间隔为 1 s，视线测量误差 $90 \mu\text{rad}$ 。仿真实验在配置为 Cuo2 E8400 CPU，4 G 内存的台式机运行，共 50 次的 Monte Carlo 实验。

3.2 弹道设置

弹道的发射点和落点的位置对于星座的覆盖特性有很大的影响。经纬度不同的地区，星座对其的覆盖率也不尽相同。笔者设置的弹道轨迹避免了过高的经纬度，使实验结果具有普遍性。具体的弹道参数如表 1 所示。

表 1 导弹弹道参数

发射点	落点	弹道高度/km	中段起止时间/s	弹道特点
N24°E78°	N38°E116°	1 400	110~1 400	中纬度

3.3 调度结果分析

针对上述场景，利用第 3 章提出基于层次分析法的调度结构分析各因素之间的关系，在中段开始时通过预测得到整个弹道，而后给出整个低轨红外探测与跟踪系统对弹道的调度交接策略，也就是调度方案，然后进行跟踪分析。为了方便比较，笔者引入随机选择资源调度方法与本实验进行比较分析。设置目标的轨迹如图 3 所示，星座对设置目标的中段全程覆盖随时间变化的情况如图 4 所示。跟踪传感器的调度结果如表 2 所示。表中 S_i 为跟踪卫星的编号，取值范围为 1~28。

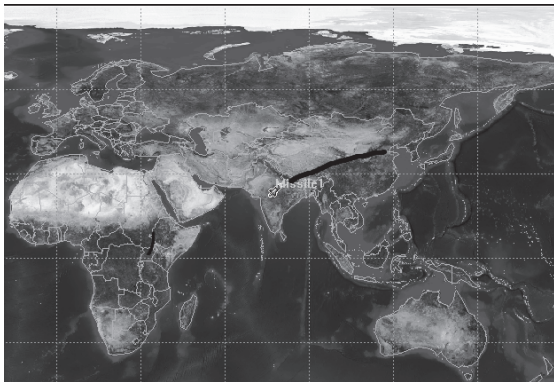


图 3 设置目标的轨迹

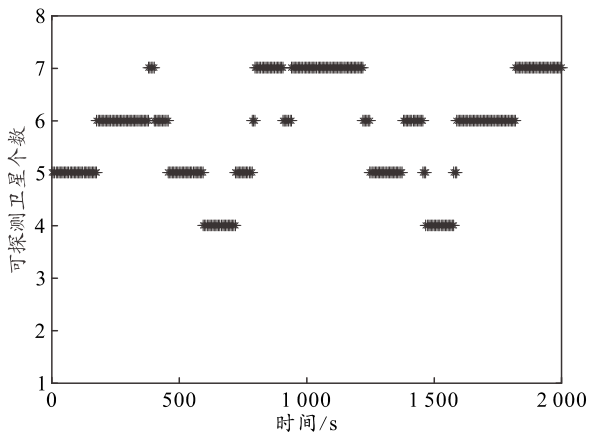


图 4 星座对目标的中段全程覆盖数目统计

表 2 跟踪传感器分配结果

权重分析		随机选择 1	
时间段/s	探测卫星	时间段/s	探测卫星
110~243	S5, S16	110~162	S8, S16
244~962	S5, S23	163~285	S8, S15
963~1 400	S20, S23	286~478	S15, S23
		479~841	S18, S15
		842~1 256	S18, S23
		1 257~1 400	S14, S23

通过 50 次蒙特卡罗实验，得到对设置目标位置估计性能仿真结果，如图 5 所示。

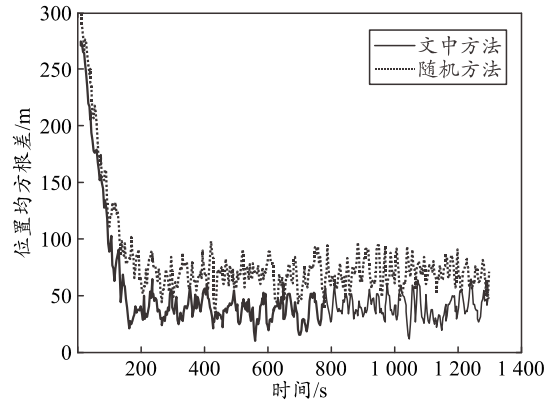


图 5 星座对目标的位置估计性能对比

图 5 为传感器调度方法与随机选择传感器调度方法跟踪性能对比的仿真结果。从图中可以看出：在对目标调度的位置跟踪的精度上，笔者所采用的基于权重分析的跟踪传感器调度方法相较于随机选择法有一定的提高；在收敛速度上，2 种方法基本一致。

表 3 给出了交接次数和最小交接间隔的对比结果。从表中可以看出，文中方法调度次数相对较少，并且最小交接时间间隔也远大于随机选择法，有效避免了短时间内多次交接传感器的可能，能有效保证系统跟踪的稳定性。

表 3 传感器调度性能对比

调度方法	交接次数	最小交接间隔/s
层次分析	2	133
随机选择	5	52

4 结束语

笔者分析了低轨预警系统对目标探测的影响因素，利用覆盖、性能、时间 3 个约束条件，通过层次分析法建立了中低轨预警卫星资源调度模型。通过 STK 软件仿真分析，验证了模型和算法的有效性。该调度方法能高效地调度低轨卫星，具有跟踪精度高、计算时间短、交接次数少和调度间隔大等优点。

针对单位企业多、单位人员少，出现的质量监督从以前的“定点”变为现在的“走场”现象，要求每名军代表都要有全面过硬的素质。首先要通过参加培训班、单位传帮带和自学等形式系统掌握法规标准。其次要通过岗位学习、岗位调讲、岗位轮换等形式不断提高专业对话能力。最后要培养立足岗位甘于奉献的职业道德和树立严、慎、细、实的工作作风。

4) 逐渐破除军民壁垒。

一是破除军民标准壁垒，可以选用先进适用的民用标准和国际先进通用标准充实到军用标准中，同时可逐步改换废军用标准；二是破除军民信息壁垒，在军代表发挥桥梁纽带作用同时，装备采购信息网可以适度扩大军用招标信息发布范围、延长投标时间；三是协调帮助优秀民营企业争取国家科研经费及技改经费，不断优化检测能力和参与预研项目广度，使民营企业与国营企业在同一起跑线上。

4 结论

在分析民参军企业质量管理和监督面临的问题的基础上，笔者从相关政策制度、民营企业和质量监督队伍 3 个方面提出了应对措施和建议。随着军民融合不断深入推进，民参军企业数量、类型不

(上接第 5 页)

参考文献：

- [1] 简平, 邹鹏, 熊伟, 等. 天基低轨预警系统任务规划问题研究[J]. 空军工程大学学报(军事科学版), 2011, 11(4): 26-29.
- [2] GABREL V, MURAT C. Mathematical Programming for Earth Observation Satellite Mission Planning[C]// Operations Research in Space and Air. Springer US, 2003: 103-122.
- [3] 陈慧中, 王钧, 李军, 等. 卫星成像规划调度系统中的可视化决策支持研究与实现[J]. 计算机工程与科学, 2007, 29(7): 58-61.
- [4] GLOBUS, CRAWFORD J, LOHN J, et al. Scheduling earth observing satellites with evolutionary algorithms[C]. In Proceedings of International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology, 2003.

断的丰富，势必会出现更多的新情况，如何能够将优秀民营企业吸引进来、待得下去和发挥优势，将是下一步需要深入研究的方向。

参考文献：

- [1] 庞博. 从强化体系监督入手严把民营企业装备质量关[J]. 海军装备, 2012(3): 6-7.
- [2] 赵兰. 对涉军中小民企加强质量监督的对策[J]. 长缨, 2015(7): 79-80.
- [3] 王立功, 尹安治. 地区军代室配套产品质量监督工作探讨[J]. 中国军转民, 2012(11): 70-72.
- [4] 金波, 刘崇军, 赵刚, 等. 对当前民营企业装备生产质量监督方法的探讨[J]. 中国军转民, 2013(1): 42-44.
- [5] 鲁益青, 邹燕, 刘中军. 积极引导注重帮促加强民营企业质量监督工作[J]. 陆军装备, 2015(4): 36-37.
- [6] 胡禹. 初探目标管理在民营企业军工产品质量监督工作中的应用[J]. 中国军转民, 2013(6): 50-53.
- [7] 陈志文, 白凤凯, 庞博文, 等. 装备承制单位资格日常研究[J]. 兵工自动化, 2017, 36(2): 18-22.
- [8] 苏飞新. 从布坎南“俱乐部理论”看制约武器装备领域军民融合发展的体制性障碍[J]. 陆军装备, 2015(6): 18-19.
- [9] 胡禹. 对民营企业建立健全武器装备质量管理体系的思考[M]. 北京: 新时代认证, 2013: 21-26.
- [10] 上海拉曼国际消防装备有限公司. 防化装备科研生产军民融合发展的思考[J]. 陆军装备, 2015(4): 57-58.
- [5] 李菊芳, 谭跃进. 卫星观测系统整体调度的收发问题模型及求解[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(12): 65-71.
- [6] TANG S X, YI X Q, LUO X S. Research on early-warning detecting tasks re-scheduling and sensor resources allocation strategy of midcourse maneuverable ballistic targets[C]. 2010 Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications, Venice, Italy, 2010: 357-362.
- [7] XIONG N, SVENSSON P. Multi-sensor management for information fusion: issues and approaches[J]. Information Fusion, 2002, 3(2): 163-186.
- [8] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990: 127-134.
- [9] MICHAEL J, CANTELLA. The infrared & electro-optical systems handbook[Z]. Washington USA: SPIE Press, 1993: 159-205.