

丽江 2.4 米光学望远镜观测时间自动分配算法研究

Automatic Time Allocation for Lijiang 2.4m Optical Telescope

工程领域：计算机技术工程

作者姓名：刘 琪

指导教师：于 策 副教授

企业导师：崔辰州 研究员

天津大学计算机科学与技术学院

二零一五年十二月

摘要

随着天文领域的发展，对于天文设备的使用需求日益增长，而天文设备研发周期长，工艺复杂，造价昂贵，因此，天文设备的有效利用有着非常重要的意义。目前，很多天文望远镜的时间分配任务均由其管理员人工完成，这种方式耗时、低效，并且此类时间分配问题为具有多目标的 NP 难问题，当申请数据规模较大时，望远镜的管理员很难通过人工方式找到较优解。因此，实现望远镜时间分配的自动化有着举足轻重的意义。不同的望远镜有各自的特征，其时间分配问题也有不同的要求和限制。云南天文台丽江 2.4 米光学望远镜是东亚地区最大口径的通用光学天文望远镜之一，具有较高的分辨率和精确度以及良好的综合性能，其投入使用的几年中，每年都承载了数十项先进水平的天体物理观测课题和研究工作。本文的主要工作在于为丽江 2.4 米光学望远镜设计一套高效可行的时间分配方案，使其得到最大化的利用。

本文首先对 2.4 米望远镜的观测时间自动分配问题进行抽象和建模，通过形式化方法，将其表示为一个约束优化问题。首先，通过在经典的 Spike 系统框架下进行方法改进，求解 2.4 米望远镜时间分配问题。其后，又提出了一种混合启发式算法改进时间分配效果。该方法分为两个阶段。第一阶段基于遗传算法的思想搜索具有最大科学价值的时间分配方案，该阶段的设计主要有两个特色：第一是在构造初始种群时，采用贪心策略和权重随机策略，在尽量保证高科学价值的申请优先分配的基础上，提高初始种群的基因多样性；第二是本文设计的两种交叉方式，内部交叉和外部交叉，既促进了优质基因的结合，又为保持基因多样性提供了可能。第二阶段中，在保持最大科学价值的同时，为提高用户观测时间的平均连续性，采用了模拟退火算法，有效地避免陷入局部最优。本文分别基于丽江 2.4 米望远镜的真实观测申请数据和较大规模的模拟申请数据进行实验，对比和分析两种方法，并验证其可行性。

关键词： 时间分配，混合启发式，遗传算法，权重随机策略，模拟退火

ABSTRACT

With the development of astronomy, the demand for astronomical equipment is increasing rapidly. However, the equipment is sophisticated and expensive, thus the effective utilization of astronomical equipment is of great importance. So far, time allocation of optical telescopes is performed manually, which is time-consuming and inefficient. Moreover, time allocation of optical telescope is a NP-hard problem with multi-objective optimization. It is almost impossible for a human planer to find the optimum solution. So it is necessary for the automatic time allocation of optical astronomical telescope. Lijiang 2.4-meter telescope is one of the largest diameter general optical telescopes in East Asia, which has high resolution and precision in comprehensive performance. In this paper, we design a feasible and effective time allocation strategy for the 2.4-meter telescope to maximize its usage.

In our work, we model the time allocation problem of 2.4-meter telescope and formalize it as a constraint optimization problem. At first, we improve the algorithm under Spike framework according to the time allocation problem. Then we propose a hybrid heuristic algorithm, which can be divided into two stages, to improve the time allocation. In the first stage, genetic algorithm is used to search the scheme with maximal scientific value. There are two features in this stage. Firstly, the weighted random strategy and greedy strategy applied to initialization can promote the diversity and quality of the initial population. Secondly, the two designed crossover operations are combined in our algorithm. It encourages the incorporation of useful gene segments. In the second stage, simulated annealing algorithm is utilized to increase the average continuity of users' observation as well as to maintain the scientific value. This can effectively avoid trapping in local optimum problem. The experiments are performed on two datasets: the real application data from 2.4-meter telescope and the analogue data sets. The experimental result verifies the feasibility and effectiveness of our algorithm.

KEY WORDS: Time Allocation, Hybrid Heuristic, Genetic Algorithm, Weighted Random Strategy, Simulated Annealing

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
第一章 绪论.....	1
1.1 课题背景.....	1
1.2 国内外研究现状及发展趋势.....	2
1.3 主要工作和贡献.....	3
1.4 本文的内容和结构.....	5
第二章 相关启发式算法.....	6
2.1 遗传算法.....	6
2.2 模拟退火算法.....	8
第三章 问题形式化及基于 SPIKE 的初步求解.....	9
3.1 2.4 米望远镜时间分配问题定义.....	9
3.1.1 问题描述.....	9
3.1.2 形式化表示.....	10
3.2 SPIKE 系统简介.....	12
3.2.1 Spike 系统调度搜索方案.....	12
3.2.2 Spike 系统与哈勃空间望远镜调度.....	13
3.3 SPIKE 改进方案.....	14
3.4 方案不足.....	16
第四章 望远镜时间自动分配混合启发式算法的设计.....	18
4.1 启发式方法的选择.....	18
4.2 基于遗传算法构造最大科学价值解.....	19
4.2.1 初始种群构造.....	19
4.2.2 交叉操作.....	22
4.3 基于模拟退火算法提高用户观测平均连续性.....	25
4.4 时间分配系统的实现.....	28
第五章 实验结果及分析.....	30

5.1 实验设计	30
5.1.1 时间分配效果衡量标准	30
5.1.2 实验数据	30
5.1.3 参数选择	31
5.2 实验和结果分析	31
5.2.1 交叉方法	31
5.2.2 邻域搜索迭代次数	32
5.2.3 时间分配效果比较	33
第六章 总结与展望	39
6.1 本文总结	39
6.2 进一步工作	39
参考文献	41
发表论文和参加科研情况说明	44
致 谢	45

第一章 绪论

1.1 课题背景

近几年，天文观测和空间探测研究领域发展迅速。这极大地推动了天文望远镜的研究和开发，而它们所面向的用户数量和范围也不断扩展。传统的望远镜观测申请流程较为繁琐：用户需要到指定部门提交纸质的申请材料，然后由相关部门进行形式审批，并在管理员整理该季度申请后，由天文领域专家对各个申请进行科学价值的评定，最后由望远镜的管理员根据专家打分和申请的具体需求，进行观测时间的分配，并通知申请者最终的分配结果。在本实验室与国家天文台合作的中科院天文领域云的项目中，已经实现了一套望远镜观测提案自动化管理系统^{[1][2]}。实现了观测申请、审批、评分、时间分配流程的在线进行。这极大地方便了用户及管理人员，既简化了流程，方便了信息的整合、统计和处理，也为大规模的观测数据提供了统一的存储管理接口和共享平台，促进了天文领域的信息化。

面对日益增长的观测需求，仅仅流程上实现自动化是不够的。天文设备精度要求高，研发周期长，工艺复杂，造价昂贵，并且，对于天文设备的需求远大于供应。因此，天文设备的有效利用有着非常重要的意义。天文设备有效利用的主要目标在于，在一定时间内满足更多具有高价值的观测申请的需求。传统望远镜管理中，观测时间的分配往往由该望远镜的管理员人工进行，该方式耗时、低效，而且随着观测需求的不断增大，人工的分配方式不能找到较优的观测时间分配方案。因此，望远镜时间分配的自动化实现有着重大的意义。

由于天文望远镜类型、位置、配置等特征存在差别，不同望远镜的时间分配问题有着巨大的差异。因此，现存望远镜观测时间自动分配系统均为特定望远镜定制。2.4 米光学望远镜^[3]坐落于中国科学院云南丽江高美古天文观测站，高 8 米，通光孔径 2.4 米，重 40 余吨，是东亚地区最大口径的通用光学天文望远镜之一。其具有较高的分辨率和精确度，具有较好的综合性能，可以清晰地分辨出 300 公里以外一根蜡烛的火苗，主要用于对恒星和星系进行观测。其投入使用的几年中，每年都承载了数十项先进水平的天体物理观测课题和研究工作。随着这个望远镜的建成和使用，隶属于中科院云南天文台的丽江观测站已成为我国南方最重要的天文观测基地。近几年，申请使用 2.4 米望远镜的需求迅速增涨，并且，可以预见，在接下来的几年中，将会持续增涨。因此，最大化其利用率，使其可

以满足更多具有高科研价值的观测的需求，有着非常重要的意义，为 2.4m 望远镜设计一个高效的时间自动分配系统已成为一项重要的任务。2.4m 光学望远镜的时间自动分配问题主要需要考虑以下几个方面：

- **多目标**。针对光学望远镜的时间分配问题，首要目标是使得望远镜在一定时间内的总体观测价值最大化。而与此同时，单个申请的观测时间连续性也在很大程度上影响着用户的满意度。因此，在设计 2.4m 望远镜时间分配系统时，需要合理地平衡这两方面的因素，找出更加合理有效的时间分配方案。
- **NP 难问题**。该类时间分配问题为 NP 难问题，当申请数目较多时，可能存在的时间分配方式数目巨大。如果分别计算每种分配方式的优劣，消耗过于巨大，不能实现。因此，需要设计一种合理的启发式算法，在可行的计算成本之内，找到满意的时间分配方案。
- **观测的特征**。使用光学望远镜进行的观测往往需要较长的时间，可以分为几个不连续的时间段，并且各个时间段的长度不要求一致。这使得可能的分配方式大幅增多，增加了时间分配的复杂性，同时增大了找出最优分配方案的难度。
- **通用性**。现存望远镜时间自动分配系统通常是针对不同机构、不同的望远镜定制的。不同望远镜由于类型、物理特征的不同，观测目标也不同，从而具有不同的优化目标（如观测的总科学价值、每个观测者观测时间的连续性等等）和约束条件（观测时间限制，望远镜的旋转角度，空间望远镜的燃料限制等）。适用于不同望远镜的统一的解决方案是不现实的。但同种类型望远镜可能会存在一定的相似性，在为 2.4m 望远镜设计时间分配系统时，应尽可能地考虑到光学望远镜的相似性，并尽力为不同之处预留系统改进的接口，最大程度地简化后续光学望远镜时间分配系统的开发。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

国内外天文领域已有一些组织对于望远镜观测时间的自动分配问题进行了研究。最具代表性的是哈勃空间望远镜采用的 Spike 系统^{[4][5]}，它从 1990 年起投入使用，已经经过了 15 年实践验证。其核心算法为迭代修正搜索算法，该方法将望远镜时间分配问题抽象成一个约束优化问题^[6-10]，并分为三个步骤来求解该问题。首先，通过某种启发式算法构造初始解，该初始解可以存在约束违反或是资源过载，其使用的启发式算法可以根据具体需求进行选择，但启发式过程均基于对约束程度的量化并且选择容易计算的量化方式。然后，运用启发式的修正算法来减少约束的违反。最后，通过从时间分配表中去除存在冲突的活动来消除冲

突。该系统具有一定的通用性，其所使用的初始化策略和启发式修正策略，都提供了一些内置的调度方法，并提供了接口，使用户可以自定义调度策略。一些望远镜时间分配系统甚至其他领域的时间分配系统，使用 Spike 系统提供的功能，结合自身实际需求进行适配，选择或者定制合适的调度策略，形成适合其具体问题的时间分配算法。如韦伯太空望远镜^[11]，将 Generalized Differential Evolution 3 (GDE3, 广义差分进化方法) 和 Spike 整合在一起。GDE3^[12-14]作为多目标演化算法的驱动器，而 Spike 系统负责建模 JWST 时间分配问题。两部分相互合作，由 GDE3 为 Spike 提供决策向量，之后由 Spike 返回目标函数值。

但 Spike 系统的设计是为了解决哈勃空间望远镜的时间分配问题。哈勃空间望远镜的位置在地球的大气层之上，并且以 2.8 万公里的时速沿太空轨道运行，其约束条件与位于陆地的光学望远镜有着很大的区别。Spike 系统虽然具有一定的通用性，但其不可能考虑到所有种类的目标和约束。该系统所解决的时间分配问题中，观测通常是连续或者周期性进行的，且大多数观测所持续的时间较短。而采用光学望远镜进行的观测，通常需要在限定的日期和时间范围内，进行一定时长（较长时间）的观测，不要求绝对的连续性，而且，可以将整个观测分为多个长度不规则的阶段。因此，spike 系统的时间分配方法无法直接应用于光学望远镜的观测时间分配。

欧洲南方天文台另辟蹊径，于 2000 年，将当时多种调度技术分别应用于其具体的时间分配问题，并对分配效果进行比较，最终选择法国 ILOG 公司的 Solver/Scheduler 算法并基于该算法开发出 TaToo 系统进行望远镜的时间自动分配。之后致力于接口设计，使之成为一个用户友好的，交互的，半自动的系统^[15]。

广义上讲，望远镜观测时间自动分配问题是一个时间表问题^{[16][17]}。该类问题常被定义为约束优化问题，并且被广泛的探讨和研究，其中，群智能算法^{[18][19]}、演化算法^{[20][21]}、局部搜索算法^[22-24]等方法都被广泛运用。

1.3 主要工作和贡献

随着科技和天文领域的发展，使用天文设备进行观测的需求逐渐增长，天文设备的有效利用凸显其重要性。2.4 米光学望远镜是东亚地区最大口径的通用光学天文望远镜之一，具有较高的分辨率、精确度和较好的综合性能，其投入使用的几年中，每年都承载了数十项先进水平的天体物理观测课题和研究工作。为了使该望远镜充分发挥作用，本文为 2.4m 望远镜设计了两种时间自动分配的方案，并进行了对比，主要工作包含如下几项：

- 调研国内外天文望远镜所采用的时间分配方法以及类似的时间分配问题的求解方法。
- 对 2.4m 望远镜观测时间自动分配问题进行抽象和建模，通过形式化方法，将其表示为一个约束优化问题。
- 通过改进经典的望远镜时间分配系统 Spike，求解 2.4m 望远镜观测时间自动分配问题。
- 采用混合启发式算法，求解 2.4m 望远镜时间自动分配问题，并预留接口，尽可能为其他望远镜的时间分配问题提供扩展性。
- 对比和分析以上两种时间分配方案。
- 对工作进行总结，为未来工作方向提出建议。

2.4m 望远镜时间分配问题的抽象和建模，是将一个实际问题定义成一个形式化的问题，把对实际问题的求解转化为对具体约束优化问题的求解。该抽象过程是求解 2.4m 望远镜时间分配问题的基础和关键，只有恰当地对问题进行建模，才能构造出高效可用的时间分配系统。

改进经典的 Spike 框架中的方法来求解 2.4m 望远镜时间分配问题，是一种比较高效的方式。使用较少的工作量实现该系统与具体问题的适配，得到一套可用的方案。但在此框架下进行的适配，会有一些限制，从而不能达到效果的进一步优化。因此，我们设计了一种混合启发式算法来求解该问题，使时间分配效果进一步优化。

混合启发式算法，可以较为理想且高效的实现 2.4m 望远镜的时间自动分配。该方法分为两个阶段求解该问题。第一阶段中，采用遗传算法来搜索拥有最大科学价值的分配方案。在遗传算法的具体实现中，构造初始种群时，对于每个个体的构造，分别运用权重随机策略对观测申请进行排序，并使用贪心策略依次将各个申请分配到冲突少的时间片上，在尽量保证具有高科学价值的申请优先分配的基础上，提供了初始种群的多样性。对于交叉操作，本文设计了两种交叉方式，内部交叉和外部交叉，既可以最大限度的对优质基因片段进行利用，又为保持基因多样性提供了可能，有利于有用基因的组合，从而演化出更优的时间安排方案。在第二阶段，采用模拟退火策略提高用户观测的平均连续性。模拟退火策略的使用，有效的避免了算法陷入局部最优。该算法的实现，有效提高了 2.4m 望远镜时间分配的效果，具备可行性。

2.4m 望远镜时间自动分配系统的实现，改变了原来人工进行分配的方式，从而避免了人工分配耗费人力，在大规模申请时很难找到较优分配方案的缺点。其可以在合理的时间消耗范围内，找到一种较为优化的时间分配方案，具有可行性。并且，该系统预留了扩展接口，方便以后类似时间分配系统的开发。

1.4 本文的内容和结构

本文深入研究了现有的望远镜时间自动分配系统的框架和算法，针对 2.4m 望远镜时间分配问题的特点，采用两种不同的方法制定观测时间自动分配方案，并进行对比分析。本文的主要内容如下：

第一章为绪论，介绍了丽江 2.4 米光学望远镜观测时间自动分配问题的研究背景和研究意义，概述了望远镜时间自动分配问题的国内外研究情况和发展方向，以及本文的主要工作内容。

第二章介绍了时间分配算法设计的相关启发式算法。

第三章首先对丽江 2.4 米光学望远镜时间自动分配问题进行抽象和建模，然后基于 Spike 框架进行初步求解，并分析该框架下实现的方法对于求解 2.4m 望远镜时间分配问题的不足。

第四章提出一种混合启发式算法，结合使用遗传算法和模拟退火算法，求解 2.4m 光学望远镜观测时间自动分配问题。

第五章分别基于 2.4m 望远镜实际观测申请数据和更大规模的模拟申请数据对以上两种时间分配方法进行实验，对比和分析其效果。

第六章对本文的工作进行了总结，并对未来工作进行展望。

第二章 相关启发式算法

2.1 遗传算法^[25]

“适者生存”揭示了大自然生物进化过程中的一个规律：最适应自然环境的群体往往会产生更强大的后代群体。生物进化的基本过程如图 2-1 所示。

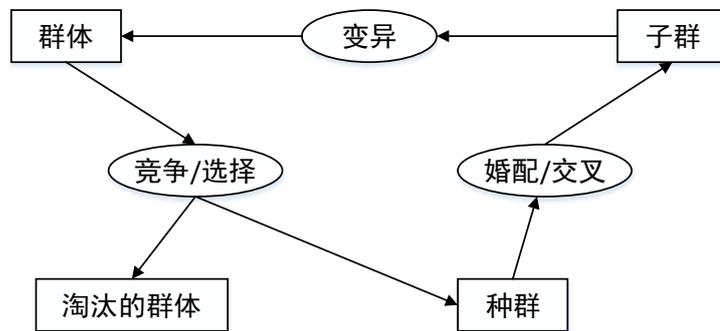


图 2-1 生物进化基本过程

这个循环圈以群体为起点，经过竞争后，一部分群体被淘汰而无法再进入这个循环圈，而另一部分则成为种群。优胜劣汰在这个过程中起着非常重要的作用，这在自然界表现得更加突出，由于自然环境恶劣和天敌的侵害，使得自然界中很多动物成活率非常低。即使在成活的群体中，还要通过竞争产生种群。种群通过婚配的作用产生子代群体。进化的过程中，可能会因为变异产生新的个体。在一个新的循环过程中，新的群体将取代旧的群体而成为循环的开始。

遗传算法主要借用生物进化中“适者生存”的规律，借鉴生物进化的一些特征，主要体现在以下几个方面：

- a) 进化发生在解的编码上。这些编码按生物学的术语称为染色体。由于进行了编码，优化问题的一切性质都通过编码来研究。编码和解码是遗传算法的一个重要主题。
- b) 自然选择规律决定了哪些染色体产生超过平均数的后代，遗传算法中，通过优化问题的目标而人为构造适应度函数，以达到好的染色体产生超过平均数的后代的目的。
- c) 当染色体结合时，父代的遗传基因的结合使得子代保持父代的特性。

d) 当染色体结合后，随机的变异会造成子代与父代的不同。

遗传算法包含以下处理步骤：

- 1) 对优化问题解的编码。我们称一个解的编码为一个染色体，组成编码的元素称为基因。编码的主要作用是优化问题解的表现形式和利于之后遗传算法中的计算。
- 2) 适应度函数的构造和应用。适应度函数依据优化问题的目标函数而定。适应度函数确定后，自然选择规律以适应度函数值的大小决定的概率分布来确定哪些染色体适应生存，哪些被淘汰。生存下来的染色体组成种群，形成一个可以繁衍下一代的群体。
- 3) 染色体的结合。双亲的遗传基因结合通过编码之间的交叉实现，进而产生下一代。新一代的产生是一个生殖过程，它产生了一个新解。
- 4) 变异。新解的产生过程中可能发生基因变异，变异使某些解的编码发生变化，使解更具多样性。

生物遗传基本概念及其在遗传算法中所起作用的对应关系如表 2-1 所示。

表 2-1 生物遗传基本概念及其在遗传算法中所起作用的对应关系

基本概念	在遗传算法中的作用
适者生存	在算法停止时，最优目标值的解有最大的可能性被留住
个体	解
染色体	解的编码
基因	解的每一个分量的特征
适应度	适应度函数值
群体	选定的一组解（其中解的个数为群体的规模）
种群	根据适应度函数值选取的一组解
交配	通过交叉操作产生一组新解的过程
变异	编码的某一个分量发生变化的过程

最优化问题的求解过程是从众多的解中选出最优的解，生物进化的适者生存规律使得具有生存能力的物种以最大的可能性生存。这样的共同点使得遗传算法能应用于优化问题中。

2.2 模拟退火算法

爬山法搜索算法从不“下山”，即不会向值比当前节点低的方向搜索，它肯定是不完备的，因为它可能停留在局部极大值上。与之相反，纯粹的随机行走（从后继集合中等概率地随机选一个后继，然后移动到这个选出来的后继）是完备的，但毫无效率可言。因此，试图把爬山法和随机行走以某种方式结合起来，同时得到效率和完备性的想法是合理的。模拟退火算法就是这样一个算法。^{[26][27]}

模拟退火算法来源于固体退火原理，将固体加温至充分高，再让其徐徐冷却。加温时，固体内部粒子随温度升高变为无序状，内能增大，而徐徐冷却时粒子渐趋有序，在每个温度都达到平衡态，最后在常温时达到基态，内能减为最小。根据 Metropolis 准则，粒子在温度 T 时趋于平衡的概率为 $e(\Delta E/(kT))$ ，其中 E 为温度 T 时的内能， ΔE 为其改变量， k 为 Boltzmann 常数。用固体退火模拟组合优化问题，将内能 E 模拟为目标函数值 f ，温度 T 演化成控制参数 t ，即得到解组合优化问题的模拟退火算法：由初始解 i 和控制参数初值 t 开始，对当前解重复“产生新解→计算目标函数差→接受或舍弃”的迭代，并逐步衰减 t 值，算法终止时的当前解即为所得近似最优解，这是基于蒙特卡罗迭代求解法的一种启发式随机搜索过程。退火过程由冷却进度表(Cooling Schedule)控制，包括控制参数的初值 t 及其衰减因子 Δt 、每个 t 值时的迭代次数 L 和停止条件 S 。

模拟退火算法的基本思路如下：

- a) 初始化：初始控制参数 t ，初始解状态 S ，每个 t 值的迭代次数 L 。
- b) 对 $k=1, 2, \dots, L$ 做第 c) 至第 f) 步。
- c) 产生新解 S' 。
- d) 计算增量 $\Delta E' = f(S') - f(S)$ ，其中 $f(S)$ 为评价函数，目标为最小化 $f(S)$ 。
- e) 若 $\Delta E' < 0$ 则接受 S' 作为新的当前解，否则以概率 $\exp(-\Delta E'/t)$ 接受 S' 作为新的当前解。
- f) 如果满足终止条件则输出当前解作为最优解，结束程序。（终止条件通常取为连续若干个新解都没有被接受时终止算法）
- g) 对 t 减少 Δt ，转第 b) 步。

第三章 问题形式化及基于 Spike 的初步求解

3.1 2.4 米望远镜时间分配问题定义

3.1.1 问题描述

概括来讲，望远镜时间分配问题的主要目的在于针对特定望远镜的观测申请情况，制定合理有效的观测计划，使得该望远镜获得更大的观测价值。

2.4m 望远镜半年为一个观测季，在每个观测季前，观测申请平台开放。在此期间，用户可以申请在下一个观测季使用 2.4m 望远镜进行观测。申请中，用户提供个人信息，所属机构，该观测所涉及的项目，观测目的和意义等，用以评估该观测的价值；同时，用户还会提供观测目标，可以进行观测的时间范围（可以进行观测的日期范围，此日期范围内每天可以进行观测的时段）以及该观测所需要的总时长等。用户进行观测申请后，管理员会进行形式审查。在申请阶段结束后，通过形式审查的申请会被提交给相应领域的专家，他们根据用户提供的各种信息对申请进行打分。每个申请会被多个专家打分，各专家给出的分数的加权平均值将被用来衡量该申请的科学价值。一般情况下，得分较高的申请，会被优先分配观测时间。

之后，进入 2.4m 光学望远镜的时间分配阶段。在进行时间分配之前，需要明确以下三方面因素。

2.4m 望远镜时间分配粒度。2.4m 望远镜为光学望远镜，在系统中进行观测申请时，对其可用时间范围、所需时长的约束通常以小时为单位，因此，在进行分配时，更细的时间粒度，并不能构造出更优的分配方案。而更粗的时间粒度虽然可以一定程度上，加快时间分配方案的搜索和选择，但可能会造成时间片的浪费。因此，选择小时作为时间分配粒度是最为合适的。

2.4m 望远镜时间分配目标。在为 2.4m 望远镜制定观测计划时，首要目标是使得利用该望远镜进行观测所获得的价值最大化。该价值由被分配了观测时间的申请的总科学价值来量化，其中，每个申请的科学价值是根据专家打分的结果按照一定规则计算得到的。另一个重要的目标是提高观测时间的连续性。2.4m 望远镜的观测申请限定在一定时间范围内进行一定时间长度的观测，不要求绝对的时间连续性。但是，在总体观测价值最大化的基础上，各个观测被分配的时间应当尽可能连续和规律，这样可以方便用户，提高用户的满意度。

2.4m 望远镜时间分配问题的约束。在为 2.4m 望远镜制定观测时间表时，有以下几点限制条件。

- a) 2.4m 望远镜同一时间只能为一个用户服务。也就是说，一个时间片只能被分配给一个观测申请。
- b) 观测被分配的时间必须在其申请的时间范围之内。用户在观测申请中，会列出该观测可以进行的时间范围，包括日期范围和每天可以进行观测的时间段。只有在限定的时间内，才具备进行该观测的条件，为其分配该时间片才有意义。
- c) 对于任何一个被分配了观测时间的申请，其被分配的时间长度必须与申请的时长相等。每个用户在进行观测申请时，需要说明完成该观测所需要的时间长度。如果被分配的时长不足，观测不能完成，则为其分配的观测时间片是没有意义的。因此，对于一个申请，如果为其分配观测时间，则一定要分配给它足够的时间片（即与申请的时间长度相等）。如空闲的可用时间片不足，则不进行分配。

2.4m 光学望远镜时间分配问题是一个约束优化问题，根据时间分配的目标，设定目标函数，在满足以上约束条件的前提下，优化时间调度表，使得目标函数值最大。

在自动生成观测时间表后，管理员可以根据实际情况进行局部的调整，生成最终的观测计划。

3.1.2 形式化表示

变量表示

表 3-1 变量表示

变量表示	变量含义
p_i	观测申请 i
$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$	观测申请集合
v_i	p_i 的科学价值
$grade(p_i)$	p_i 的平均得分
(d, h)	时间分配的单位时间片， d 表示日期， h 表示小时

对于望远镜时间自动分配系统,天文观测申请集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 是已知的,每个申请 p_i 对其可以进行观测的时间范围,所需要的观测时长进行说明。观测申请 p_i 进行观测的科学价值 v_i 是专家对其观测打分结果 $grade(p_i)$ 的函数,表示为 $v_i = f(grade(p_i))$ 。在望远镜观测时间分配过程中,小时是最小的时间分配单元。每个时间片表示为 (d, h) , d 代表天,用实际日期(年,月,日)来表示, h 代表小时,用24小时制表示。

目标函数表示

在自动生成2.4m望远镜观测计划时,首要目标是最大化望远镜该观测季的总观测价值,该目标从系统角度出发,是为了最大化整体利益。其次,在保证观测总价值最大化的同时,需尽量提高用户的满意度,使各个申请被分配的观测时间尽可能连续和规律。因此,从系统和用户两个不同的角度,可以分别设计目标函数。

首先,从**系统**的角度出发,最大化科学价值的目标函数可以被表示为如下形式:

$$\max \sum_{i=1}^k v_i * b_i \text{ 其中, } b_i = \begin{cases} 1, & \text{if } p_i \text{ 被分配观测时间} \\ 0, & \text{if } p_i \text{ 未被分配观测时间} \end{cases} \quad (3-1)$$

即累加被分配了观测时间的所有申请的科学价值,使总科学价值得到最大化。

从**用户**的角度出发,对于其申请 p_i 被分配的时间,会从以下几个方面进行考量:

- a) 观测需要持续的总天数。设该值为 s_i ,表示申请 p_i 被分配到的观测时间的第一天至最后一天,总共跨越的天数。若 p_i 被分配的第一个时间片所在的日期为 $date_1$,最后一个时间片所在的日期为 $date_2$,那么 $s_i = date_2 - date_1 + 1$ 。 s_i 越小,则 p_i 的观测连续性越高,从而减少额外的记录和准备时间,使观测者的精力更加集中,同时观测也得以更加高效高质量地进行。
- b) 实际进行观测的天数。设该值为 o_i 。用 $b_{i,d,h} \in \{0,1\}$ 表示是否 p_i 被安排在时间片 (d,h) 进行观测,则 $b_{i,d} = \bigcup_h b_{i,d,h}$ 表示是否 p_i 在日期 d 有观测安排,则 $o_i = \sum_d b_{i,d}$ 。因为光学望远镜的观测时间一般为夜间,所以科学用户更希望在较为集中的几个夜晚内完成观测,这样可以节省精力,减少准备工作。因此,对于具有相同 s_i 的时间分配方案, o_i 越小越合理。
- c) 进行观测的额外现场等待时间。设该值为 h_i ,由于某些观测时间限定非常严格,只能在观测夜的某个较短时段进行,而为了更高效地利用2.4m望远镜,可能将一些时段要求较低的观测安排在时段要求严格的观测的前

后，各分配一定的时间片。这就导致某些观测需要在一个观测夜完成部分观测后，等待时间要求更加严格的观测完成之后，才能进行接下来的观测。设 $h_{i,j}$ 表示 p_i 在第 j 天观测过程中，需要穿插进行其他观测的时间长度，则 $h_i = \sum_{j=1}^{s_i} h_{i,j}$ 。这种穿插其他观测的情况一方面会增加用户的额外现场等待时间，也会由于间断和额外的设备准备而降低观测效率。因此， h_i 越小，则用户的满意程度越高。

在保证科学价值最大化的前提下，需要从用户的角度出发，提高系统可用性，使用户观测时间尽量具有连续性。考虑以上几个因素，对观测时间的非连续性惩罚值进行如下量化，惩罚值越小，观测时间的连续性越高。

$$\text{penalty} = \sum_{i=1}^k w_1 * (s_i - d_{\min_i}) + w_2 * (o_i - d_{\min_i}) + w_3 * h_i \quad (3-2)$$

其中， d_{\min_i} 表示 p_i 在不考虑其他申请的情况下进行时间分配所需要的最小天数。 w_1 ， w_2 ， w_3 分别为相应的权值。

一个较好的时间方案应该具有较小的非连续性惩罚值。故优化用户观测时间连续性的目标函数为：

$$g = \min(\text{penalty}) \quad (3-3)$$

3.2 Spike 系统简介

3.2.1 Spike 系统调度搜索方案

Spike 系统^[4]是美国国家航空和宇宙航行局(NASA, National Aeronautics and Space Administration)为哈勃空间望远镜(HST, Hubble Space Telescope)的观测时间分配问题所开发的通用性调度框架。Spike 将调度问题看作是一个约束优化问题，使用一种基于启发式修正的调度搜索技术，算法分为如下几个步骤：

- a) 初始分配：基于启发式方法，对时间分配进行“初始的猜测”。这样的初始时间分配方案通常存在约束的违反或资源的过载。一个好的初始分配对于该算法是非常重要的，因此，该过程对于多种不同的变量和启发式方法的结合方式进行了大量的实验，以选出最有效的组合。其中最为有效的方法之一是将具有最多冲突的活动优先进行分配，并将其分配到冲突较少的时间片上。其他启发式方法也被一些问题所采用，它们考虑

的因素包括与该活动相关的活动的个数、任务优先级、最大适应度、相关联活动是否已被分配时间等。基于实际问题的差别，“初始猜测”阶段可以选择不同的启发式方法，值得注意的是，在此步骤中选用的启发式方法都是较为简单的，并且约束的衡量基于的标准都比较容易计算。

- b) 修正：采用启发式修正技术^[28]来减少约束违反，直到不存在约束违反或达到预设的条件，如足够迭代次数、运行时间或预期的修正效果。Spike 系统采用的启发式修正方法有效地利用冲突数信息，如：将活动调整到冲突较少的时间片上。理论分析和实验分别验证了该方法的有效性。并且，最大冲突数启发式方法可以进一步改进修正效果，即在修正过程中，选择冲突数最多的活动进行调整。在此过程中，分别对爬山和回溯的修正方法进行了尝试。
- c) 冲突消除：Spike 系统采用一种非常简单的方式消除冲突，即从存在冲突的时间安排表中移除一些活动，直到不存在冲突为止。那些具有低优先级或更多约束违反的申请会被首先移除。此步骤后，如果存在空闲时间片，则将未被分配观测时间的活动按优先顺序，依次尝试加入时间安排表。

针对具体问题，可以在初始猜测和修正阶段分别尝试不同的启发式方法，并从中选择效果最好的方式。Spike 系统还具有“随时性”的特征^[29]，在完成初始分配后的任意时间点，都可以通过简单的移除存在冲突的活动，来获得可行解。

3.2.2 Spike 系统与哈勃空间望远镜调度

Spike 系统最初是为哈勃空间望远镜所设计的时间分配系统，于 1990 年正式投入使用。哈勃空间望远镜更高层次的调度流程图如图 3-1 所示。

从宏观角度来看，哈勃空间望远镜时间分配问题分为两个阶段。第一阶段为计划和预安排阶段。此阶段中，需要使用哈勃空间望远镜进行观测的天文学者创建观测申请，在申请中详细描述需要进行的观测，并通过网络提交申请。远程申请提交系统(RPSS, Remote Proposal Submission System)和申请入口处理器(PEP, Proposal Entry Processor)对这些观测申请进行处理后，转换系统(Trans)将这些申请转化为时间分配系统可以理解的详细任务说明。

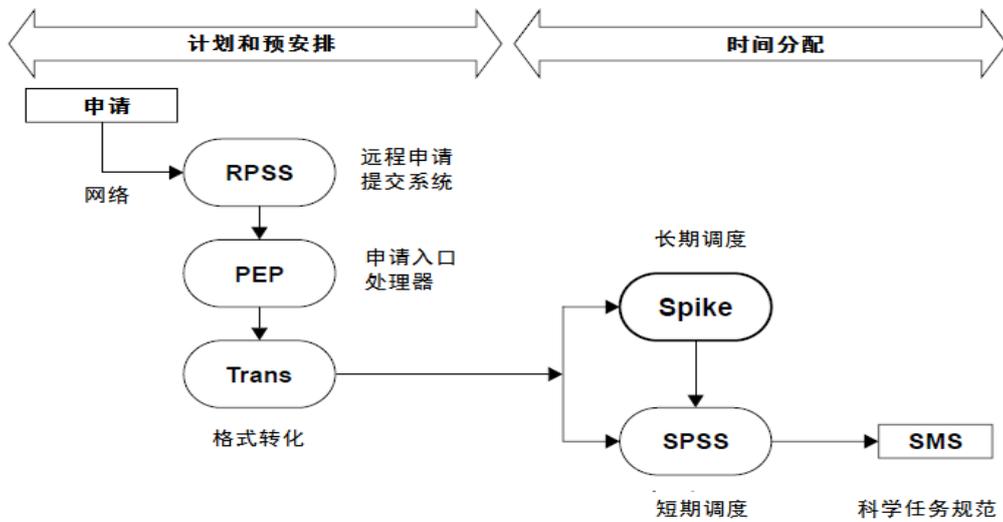


图 3-1 哈勃空间望远镜调度流程图^[5]

第二阶段为时间分配阶段。该阶段分为两个步骤，长周期时间分配和短周期时间分配。长周期观测时间分配将一年的观测任务分配到每一周或半周，由 Spike 系统完成。而短周期的时间分配将每周的观测任务进行最终的时间分配，由科学规划和调度系统(SPSS, Science Planning and Scheduling System)完成。分配完成后自动生成科学任务规划(SMS, Science Mission Specification)，并传输给哈勃空间望远镜的操作控制中心。

3.3 Spike 改进方案

Spike 系统最初是为了解决哈勃望远镜的时间自动分配问题而设计的。哈勃望远镜是空间望远镜，位于地球的大气层之上，并且以 2.8 万公里的时速沿太空轨道运行。丽江 2.4 米光学望远镜位于陆地，约束条件与空间望远镜有着很大的差别。Spike 系统所解决的时间分配问题中，任务通常是连续或者周期性进行的，而且通常持续的时间较短。而采用 2.4 米光学望远镜进行的观测，通常具有较长的周期，需要在一定的时间范围内，进行一定时长的观测，不要求绝对的连续性，而且可以将整个观测分为长度不规则的多次观测。与此同时，观测时间的连续性作为 2.4 米望远镜时间分配问题的一个附加目标。因此，Spike 系统的时间分配方法无法直接运用于 2.4 米光学望远镜时间分配问题。

但 Spike 系统具有一定的通用性，很多机构对其进行修改，来求解他们的天文设备的时间自动分配问题，一些非天文领域的的时间分配问题也尝试通过改进

Spike 系统来求解。按照该思路，本文也对 Spike 系统进行了改进，用以实现 2.4m 望远镜的观测时间自动分配。

结合 2.4m 望远镜时间自动分配问题的目标，将整个算法分为以下两个阶段，首先，尽可能为更多高科学价值的申请分配时间，以获得最大的总科学价值，而不考虑分配给各个申请的时间片的连续性；然后，调整每个申请所得到的时间片的位置，以提高观测时间的连续性，从而提高用户的满意度。

在第一阶段中，为了使观测的总科学价值最大化，按照以下方法在 Spike 框架下定制时间分配算法：按照 Spike 框架的三个基本步骤，在第一个步骤中，按照观测申请的科学价值从大到小的顺序，采用一种贪心的策略进行初始时间表的安排，申请依次被安排到具有较少冲突的时间片。在此步骤中，可以存在约束的违反，即可能出现将一个时间片分配给多个申请的情况。可供分配的每个小时都称为一个时间片，单个时间片上的冲突根据该时间片上已被分配的申请数目和可能被分配的申请的科学价值来计算。

对于已经分配在该时间片的申请，冲突值用分配在该时间片的申请个数来量化，表示如下：

$$CE_{d,h} = K * C \quad (3-4)$$

其中 K 表示当前已经被分配在时间片 (d, h) 的申请的个数， C 是一个常数，其值远大于可能被安排在该时间片的申请造成的冲突总和（即下文中 $CP_{d,h}$ 的值）。这样做可以使初始时间安排出现尽可能少的约束违反。

对于可能被分配在该时间片的申请，冲突值用后续可能被分配到该时间片的申请的科学价值以及被分配到该时间片的可能性来量化，表示为如下形式：

$$\begin{cases} CP_{d,h} = \sum_{i=1}^k r_i * v_i * b_{i,d,h} \\ r_i = n_i / S_i \end{cases} \quad (3-5)$$

其中， v_i 表示 p_i 进行观测的科学价值， $b_{i,d,h}$ 表示申请 i 后续是否可能被分配到时间片 (d, h) 上。如果时间片 (d, h) 在 p_i 申请的时间范围之内，并且 p_i 还没有被分配（对于已经被分配的 p_i ，已在 $CE_{d,h}$ 中予以考虑，在此处不重复计算），则 $b_{i,d,h}$ 值为 1，否则，该值为 0。此时， p_i 被分配到时间片 (d, h) 的可能性 r_i 根据该申请所需要的时间长度 n_i 和该申请可能进行观测的时间范围的总时间长度 S_i 计算得到。

对于时间片 (d, h) 的上冲突值，根据该时间片上已经分配和可能进行分配的申请造成的冲突值来计算：

$$C_{d,h} = CE_{d,h} + CP_{d,h} \quad (3-6)$$

这样可以使观测尽量被安排在没有约束违反或约束违反少的时间片上，而在约束违反情况相同时，会尽量安排在潜在冲突小的时间片上。

在第二个步骤中，采用爬山法对初始分配结果进行调整。循环地将各个时间片上的观测任务调整到当前冲突值最低的合理时间片，直到消除冲突或达到预设的循环次数。此时时间片上的冲突值根据已经被安排在该时间片的观测的科学价值计算，具体表示为以下形式：

$$C_{d,h} = \sum_{i=1}^k v_i * B_{i,d,h} \quad (3-7)$$

其中， v_i 表示 p_i 进行观测的科学价值， $B_{i,d,h}$ 表示当前时间片(d,h)是否被分配给申请 i（此时可能存在约束违反，一个时间片可能会被分配给多个申请）。

在步骤三中，将申请按照科学价值由低到高的顺序，依此移除当前与其他高分申请存在时间冲突的申请。其后，如果还存在空闲时间片，则将未被分配观测时间的申请，按照科学价值从高到低的顺序，依此尝试是否可以安排到空闲时间片上。

在第二阶段中，为了提高各个用户观测时间的平均连续性，采用 Spike 系统框架中第二个步骤的方式进行修正。修正过程基于爬山法，循环地将各个时间片上的观测任务调整到当前带来的连续性惩罚值最低的时间片，直到所有观测任务都不能再被调整或达到预设的循环次数。该连续性惩罚值由公式(3-2)计算得到。

经过上述两个阶段，可以得到初步的 2.4m 望远镜观测计划。图 3-2 较为清晰地描述了上述方法的基本流程。

3.4 方案不足

采用如上方式对 Spike 系统进行改进后，可以得到一套可行的 2.4m 光学望远镜时间自动分配方法。但是，该方法还存在着一些不足，在很多情况下不能得到足够优化的观测计划。一方面，在搜索最大科学价值的时间分配方案的过程中，消除冲突阶段可能因为局部的冲突而取消对某个申请的时间分配，而该申请在之前步骤中占用的其他时间片，影响了其他观测对于该时间片的利用，从而影响整个观测计划的制定，不能达到望远镜观测时间的最大利用率。另一方面，在提高观测时间连续性的过程中，Spike 系统分别尝试了爬山法和回溯法，但在 2.4m 望远镜时间分配问题上，这两种方法分别使时间分配的效率 and 效果中的一方面得到

优化，不能很好地对这两方面进行权衡，因此，均不能在可行的时间范围内最大限度地优化观测时间连续性。

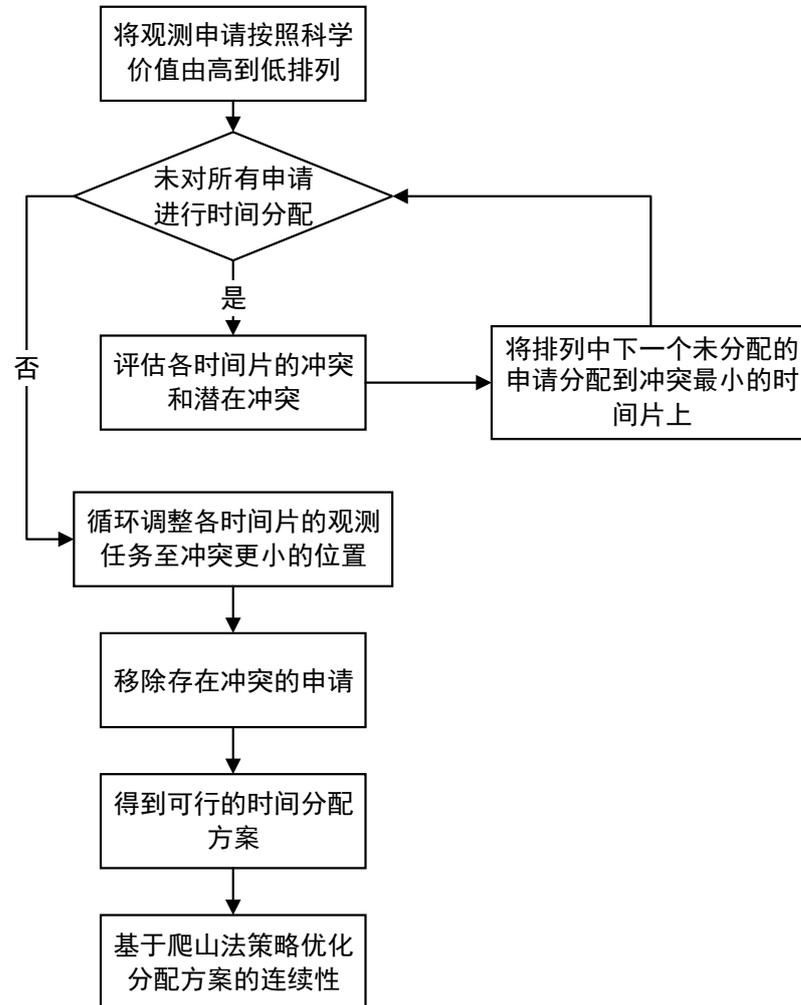


图 3-2 基于 Spike 的求解流程

第四章 望远镜时间自动分配混合启发式算法的设计

4.1 启发式方法的选择

2.4m 望远镜时间分配问题是一个多目标的约束优化问题^{[30][31]}，并且，是 NP 难问题。对它求解需要考虑两个主要的问题。

- 第一个问题是多个目标的协调与权衡。2.4m 望远镜的时间分配，从系统角度，需要最大化望远镜在指定观测季内进行的观测的总科学价值。从用户角度，需要尽量提高用户观测时间的连续性，从而提高用户的平均满意度。两个目标中，总科学价值的最大化是首要目标，在此前提下，尽量提高观测时间的连续性，其中，用户观测时间的连续性也要考虑多方面因素，具体由公式(3-2)定义的惩罚值来量化，该惩罚值越低，观测的连续性越好。
- 第二个问题是如何在合理的时间范围内求解此 NP 难问题。NP 难问题不能在多项式时间范围内找到最优解，因此需要设计合理的启发式方法，尽可能在合理的时间范围内逼近最优解。

针对该问题的两个目标，可以将时间分配算法分为两个阶段，第一阶段最大化系统的总科学价值，第二阶段在维持最大科学价值的同时，提高用户观测时间的连续性。针对这两个阶段，需要分别采用恰当的启发式方法进行求解。我们分别尝试了多种启发式方法，并进行对比和分析，最终选择了遗传算法和模拟退火算法的组合方式。

在第一阶段中，为了最大化望远镜观测的总价值，最先尝试了贪心无回溯的方法。该方法的一大优势是每一步都向着当前最有利的局势发展，可以快速找到较优的分配方案。该方法中，贪心策略的设计是一个非常重要的环节。我们对两种贪心策略进行了尝试，这两种方法都是将申请按照优先顺序，即科学价值由大到小，分配到潜在冲突小的时间片上。不同之处在于时间片上潜在冲突的量化方法。第一种根据可能分配到该时间片的申请的科学价值和可能性乘积的累加和来量化冲突。第二种方法中，时间片如果潜在可能被一个较高优先级的申请占用，则该时间片具有的冲突较大。在申请规模较小，冲突较少时，第二种方法较第一种方法取得了更好的效果，主要由于第一种方法基于科学价值来量化冲突，可能会同时占用多个科学价值相同的申请所需要的时间片，而使得它们都受到影响。而第二种方法，即使科学价值相同，也会对其优先顺序进行定义，会优先选择对最低优先级申请造成影响的时间片，影响范围相对集中。而当申请规模较大，冲

突严重时，两种方法都存在很大的优化空间。

为了优化分配效果，我们采用 A*算法进行了尝试。该方法中，将对各申请的时间分配划分为若干个阶段，每个阶段对一组申请进行时间分配，各阶段进行时间分配的申请按照申请的科学价值划分，从高价值申请开始分配。完成一个阶段的分配后，得到多个不完整的时间分配方案。采用函数 $f(x)$ 对方案的当前状态进行评估，并对较优的状态优先进行拓展。 $f(x) = h(x) + g(x)$ ，其中 $h(x)$ 为该方案已经安排的观测的科学价值之和， $g(x)$ 表示未尝试分配的申请中，此状态下可能进行分配的申请的科学价值总和(不考虑这些未尝试分配的申请之间的冲突)。未扩展的状态中，如果其 $f(x)$ 的值小于当前所有方案中最高的 $h(x)$ ，则直接丢弃该方案，不再进行扩展。最终得到的具有最大 $h(x)$ 的状态则为科学价值最大的时间分配方案。但采用 A*算法需要耗费大量的空间来存储临时分配状态，当申请规模扩大，问题复杂化时，空间消耗会随之增大，故需在搜索过程中抛弃大量较差的临时分配方案，从而可能会错过最终分配效果较优的方案。

鉴于以上两种方案的缺陷，我们设计了一种基于遗传算法的启发式策略。在构造初始种群的过程中，对于每个个体的构造，分别采用权重随机策略确定申请分配的优先顺序，并采用贪心的思想将其分配在冲突少的时间片上，在尽量保证高科学价值申请优先分配的基础上，提高了初始种群的基因多样性。在交叉过程中，本文设计了内部交叉和外部交叉两种方式，可以最大限度地对优质基因片段进行利用，又为保持基因多样性提供了可能，有利于促进有用基因的组合，从而演化出更优的时间分配方案。该算法的具体实现方式将在 4.2 节进行详述。

第二阶段需要在维持最大科学价值的前提下，最大化用户观测的平均连续性。最初采用爬山法，针对每个已经进行分配的时间片，尝试将其观测任务调到其他时间片。需要找到所有不会影响最大科学价值且不造成冲突的调整方式中，对于连续性提高效果最好的方式进行调整，循环调整各时间片上的任务，直至所有任务都不能找到一个更好的位置进行调整。但是，该方法很可能陷入局部最优，而找不到全局的较优解。因此，我们采用模拟退火的思想对该方法进行改进，使得调整后连续性不提高的方式，也有一定概率进行调整，这样的方法大大降低了陷入局部最优的可能性。具体方案将在 4.3 节进行详述。

4.2 基于遗传算法构造最大科学价值解

4.2.1 初始种群构造

对于遗传算法，初始种群是整个算法的起点，构造更优更具多样性的初始种

群是后续操作的基础，也是最终得到更好的解的重要条件。初始种群构造的流程如图 4-1 所示。

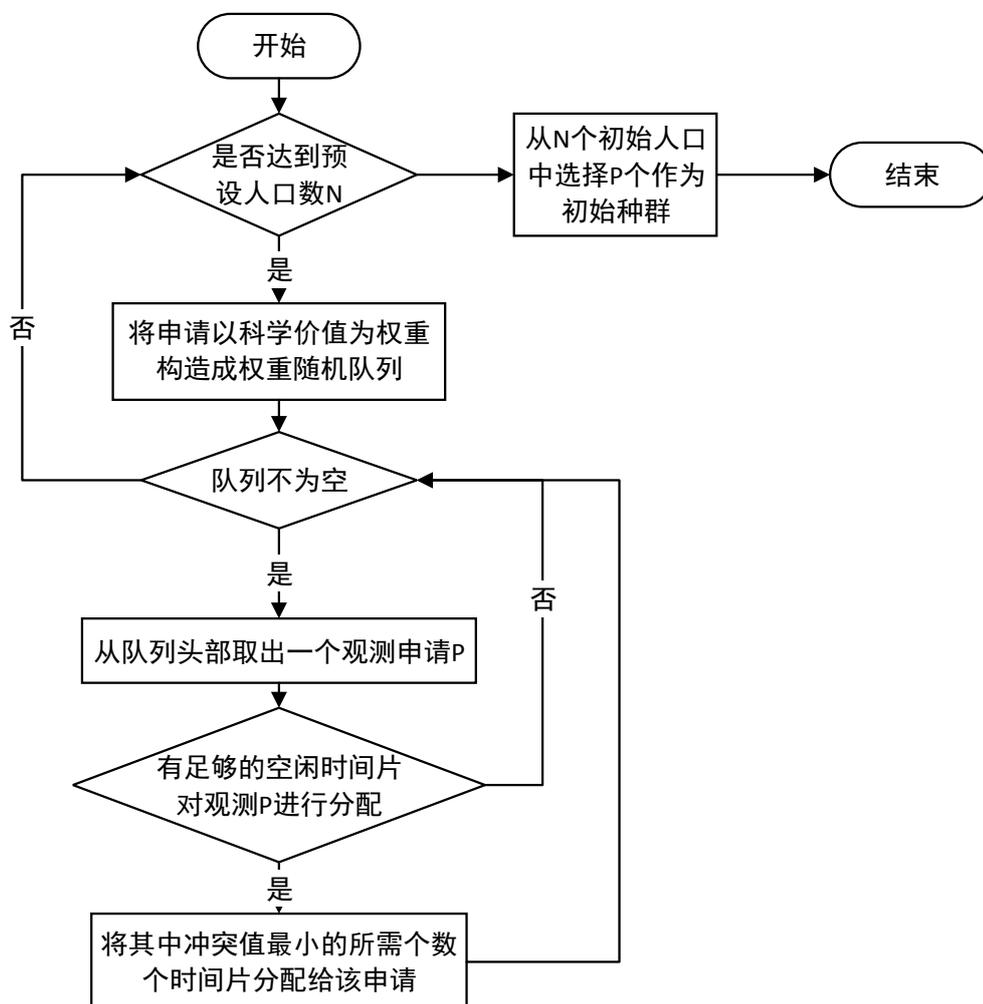


图 4-1 初始种群构造的流程图

为了构造更加“优质”的初始种群，在构造每个个体时，采用贪心的策略，使得优先级较高的申请优先分配到冲突值较小的时间片上。但为了构造出具有多样性的初始种群，申请的优先顺序不是单纯依照申请的科学价值由高到低确定的，而是采用了一种**权重随机策略**，将所有待分配的申请构造成一个权重随机队列，也就是说，该申请出现在队列靠前位置的概率跟它所具有的权重有关。此处，采用每个申请的科学价值作为队列的优先权重。

这相当于采用一种彩票机制。每个申请获得与其科学价值同样多的彩票，每次从彩票池中抽出一张，该彩票属于哪个申请，则将该申请放入队列。其后，将这个申请对应的所有彩票从彩票池中取出，继续从剩余的彩票中抽取，重复上述

步骤，直到将所有的申请加入队列。此时便得到了一个权重随机的优先队列。这样就使得具有更高科学价值的申请，更有可能被安排在队列的靠前位置。

其后，采用贪心策略，将申请按照之前确定的优先队列的顺序，分别安排到具有较小冲突值的时间片上。为了获得各个时间片的冲突值，需要构建一张冲突表，其定义方式如下：

$$\begin{cases} C_{d,h} = \sum_{i=1}^k r_i * v_i * b_{i,d,h} \\ r_i = n_i / S_i \end{cases} \quad (4-1)$$

其中， $C_{d,h}$ 表示时间片(d,h)的冲突值。 v_i 表示观测申请 p_i 的科学价值， $b_{i,d,h}$ 表示时间片(d,h)是否在 p_i 申请的时间范围之内，如果在该范围内，则 $b_{i,d,h}$ 值为1，否则 $b_{i,d,h}$ 值为0。 r_i 表示 p_i 被分配到时间片(d,h)的可能性，该值由 p_i 观测所申请的时间长度 n_i 与其所限定的可以进行观测的时间范围内时间的总长度相除得到。

在冲突表构造完成后，即可进入时间分配阶段。按照之前确定的权重随机优先队列中各申请的顺序，为各个申请 p_i 在其所申请的时间范围内选择冲突值最小的 n_i 个空闲的时间片，并将 p_i 安排在这 n_i 个时间片上进行观测。如果符合要求的空闲时间片不足 n_i 个，则不对 p_i 进行时间分配。此时，无论是否为 p_i 分配了观测时间，它对于后面进行分配的申请都不会存在潜在的冲突（只会存在确定性的影响，即因为占用了某些时间片，而使该时间片对于其他申请不可用），因此应该在冲突表中去除由于该申请可能被分配到某时间片，而带来的冲突值。更新操作具体表示如下：

$$C_{d,h} = C_{d,h} - r_i * v_i * b_{i,d,h} \quad (4-2)$$

依次对所有申请按照上述方式进行时间分配后，便得到了一个初步的时间安排表，计算此时被分配了观测时间的所有申请的总的科学价值，并记录这些申请的id，便构成了一个初始个体。

重复上述步骤 N 次，由于权重随机队列的构造具有随机性，每次调用可得到不同的申请队列，因此，便可以得到具有多样性的 N 个个体，而且，申请队列的排序采用了科学价值作为优先权重，这使构造出的初始方案具有较高的质量。其后，在得到的 N 个初始方案中选择科学价值较高的 P 个作为初始种群。构造初始种群的过程如算法 1 所示。

算法 1 初始种群构造算法**输入:**

用户观测申请集合;

-
- 1: **while** 没有达到预设个体数 N **do**
 - 2: 按照权重随机策略构造申请队列;
 - 3: 构造冲突表;
 - 4: **for each** 队列中的申请 **do**
 - 5: **if** 有足够的空闲合法时间片对该申请进行分配
 - 6: 将这些时间片中冲突值最小的所需个数的时间片分配给该申请;
 - 7: **end if**
 - 8: 更新冲突表;
 - 9: **end**
 - 10: **end**
 - 11: 从构造的 N 个初始个体中选择 P 个作为初始种群;
-

4.2.2 交叉操作

在遗传算法中,交叉操作有着重要的意义,其目的在于将父代的有用基因进行组合,得到更优的子代。但是,我们无法预先确定何为有用的基因片段。因此,针对 2.4m 望远镜时间分配这个具体问题,本文设计了两种交叉方式,内部分配和外部分配,并将其结合使用。

A. 内部交叉

内部交叉是指在两个来自当前种群的父代之间进行交叉操作。可以理解为,此时的两个父代均为具有较高质量的个体。采用如下方式进行内部交叉操作:首先,从当前种群中任意挑选两个个体作为交叉操作的父代,分别称为 $parent_1$ 和 $parent_2$ 。如果它们中的一个所进行了分配的申请是另外一个的子集,则重新进行选择。否则,选择其中一个作为模板,如 $parent_1$ 。找出在 $parent_2$ 进行了分配,而 $parent_1$ 没有进行分配的全部观测申请,依次尝试将这些申请在 $parent_2$ 中所占用的时间片段插入 $parent_1$,得到 $child_1$ 。如果上述插入操作有一个或多个成功,则用 $child_1$ 取代 $parent_1$ 放入种群,并从种群中移除 $parent_1$ 。其后,将 $parent_1$ 和 $parent_2$ 互换身份,采用 $parent_2$ 作为模版,重复上述操作。

B. 外部交叉

为了保证基因的多样性,本文还设计了另一种交叉方式,称为外部交叉。该交叉方式的父代只有一方来自当前种群,称其为 $parent_1$,而另一方需要按照 4.2.1

中的方式构造得到，称为 parent_2 。这样做在一定程度上提供了新的基因片段，防止种群在演化过程中，基因片段越来越相似。由此我们得到了两个父代，进入交叉阶段。此时分为三种情况。第一，如果 parent_2 所分配的申请是 parent_1 的子集，则重新选择和构造两个父代；第二，如果 parent_1 所分配的申请是 parent_2 的子集，则用 parent_2 取代 parent_1 放入当前种群中，而将 parent_1 从种群中移除；第三，如果它们所分配的申请相互不为子集，则分别采用两个父代作为模板进行基因插入操作。以 parent_1 作为模板时的基因插入操作与内部交叉相同。而采用 parent_2 作为模板时，由于其来自种群外部，不能保证其优质性，在得到 child_2 后的操作略有不同。只有在 child_2 所具有的科学价值大于当前种群各个体的科学价值的最小值时，才将其放入种群中。这种情况下，如果 child_2 的科学价值大于 parent_1 ，则将 parent_1 移出当前种群，否则将当前种群中科学价值最小的个体移出种群。

C. 基因插入操作

以上交叉方式的介绍中提到，将两个父代进行交叉时，如以 parent_1 作为模板，需要找出在 parent_2 进行了分配，而在 parent_1 没有进行分配的全部观测申请，依次尝试将这些申请在 parent_2 中所占用的时间片段插入 parent_1 ，得到 child_1 。此插入过程被称为基因插入操作。但是，该过程中， parent_2 中观测任务所需要插入 parent_1 的位置可能已经被其他观测占用，因此，不能直接插入，而需要根据具体的情况，采用特定的处理方式。具体操作如下。

首先，将 parent_1 的全部基因片段（即整个时间分配方案）拷贝给 child_1 ，然后找出所有在 parent_2 中进行了时间分配，而在 parent_1 中没有进行时间分配的申请集合 $\{p_{k_1}, p_{k_2}, \dots\}$ ，将集合中每个申请 p_{k_i} 在 parent_2 所占用的时间片依次插入到 child_1 。对于 p_{k_i} 在 parent_2 中占用的每个时间片段 (d, h) ，插入 child_1 的具体操作分为以下两种情况：

- a) 如果 child_1 中的 (d, h) 时间片为空，则将 child_1 中该时间片直接分配给 p_{k_i} ，插入成功。
- b) 如果 child_1 中的 (d, h) 时间片已经被分配给另一个观测申请 p_j ，则需要在 child_1 中为观测申请 p_j 寻找一个新的空闲合法时间片进行安排。如果找到，则把这个新的时间片分配给观测申请 p_j ，而将 child_1 的时间片 (d, h) 分配给 p_{k_i} ，插入成功。如果不能找到这样一个新的合法时间片，则插入失败。

如果 parent_2 中为 p_{k_i} 分配的每个时间片都被成功地插入 child_1 ，则整个基因插入操作成功。如果其中存在某个时间片插入失败，则整个基因插入操作失败，此时，需要对已经插入的基因片段进行还原。

下面用一个简单的例子来对基因插入操作进行展示。假如我们需要对观测申请集合 $\{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$ 进行时间分配，其中每个申请的具体限定条件如下：

- p_1 和 p_2 各申请进行长度为两小时的观测，限定时间范围均为 day_1 或者 day_2 。
- p_3 申请进行长度为两小时的观测，限定时间范围为每天的 $hour_2$ 。
- p_4 申请进行长度为两小时的观测，限定时间范围为 day_2 和 day_3 两天各自的 $hour_2$ 和 $hour_3$ 。
- p_3 申请进行长度为一小时的观测，限定时间范围为每天的 $hour_2$ 。

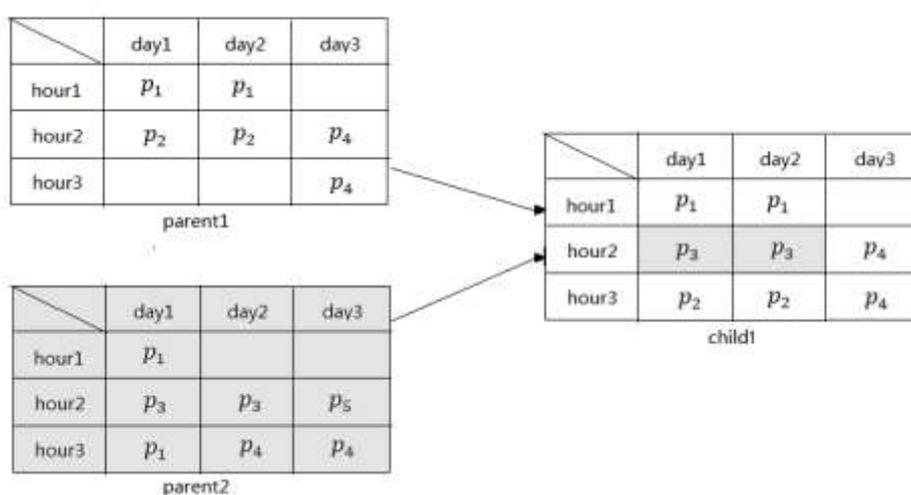


图 4-2 基因插入操作举例

假设当前两个父代的基因分布情况（时间分配情况）如图 4-2 中 $parent_1$ 和 $parent_2$ 所示，其中 $parent_1$ 已经对申请 $\{p_1, p_2, p_4\}$ 进行了时间分配， $parent_2$ 对申请 $\{p_1, p_3, p_4, p_5\}$ 进行了时间分配。采用 $parent_1$ 作为模板时，先将 $parent_1$ 拷贝至 $child_1$ 。然后找出在 $parent_2$ 进行了分配，而在 $parent_1$ 中没有进行分配的观测申请 $\{p_3, p_5\}$ ，依次尝试将它们 $parent_2$ 中占用的时间片位置插入 $child_1$ 。首先尝试插入 p_3 所占用的时间片，此时 $child_1$ 的对应时间片已经被观测申请 p_2 占用，故需要为 p_2 在 $child_1$ 中寻找新的合法时间片进行安排，此时找到这样的时间片， day_1 和 day_2 的 $hour_3$ ，故将 p_2 安排到该位置，而将 p_3 安排到原来 p_2 所占用的位置，即 day_1 和 day_2 的 $hour_2$ 。接下来尝试插入 p_5 所占用的时间片，此时， $child_1$ 的该时间片已经被观测申请 p_4 所占用，而在 $child_1$ 中不能为 p_4 找到新的空闲合法时间片，故插入失败。因此，父代 $parent_1$ 和 $parent_2$ 以 $parent_1$ 为模板进行基因插入操作后得到的子代如图 4-2 中 $child_1$ 所示。

D. 两种交叉方式的结合

内部交叉的两个父代均来自种群内部。种群在初始化时就进行了选优操作，而在后续交叉过程中也不断进行优化，因此每个个体都具有较高的质量。故内部交叉保持了较优的基因片段，并充分对其进行利用，有利于更高科学价值方案的演化。但是，仅仅使用内部交叉是不够的，在演化过程中，虽然保留了较优的基因片段，但会逐渐变得单一化，失去基因多样性，从而失去进一步优化的机会。

外部交叉的引入进一步解决了该问题。其父代有一方来自当前维护的种群之外，提供了更加多样的基因片段，而另一方来自种群内部，尽可能提高其后代的质量。

两种方式的结合既保证了整个种群的质量，充分保持和利用更优的基因片段，也提供了种群的多样性，充分地对时间分配方案进行优化。两者结合使用时，分别交叉一定次数，然后进行循环。根据实验，每次循环中内部交叉和外部交叉进行的次数在(1-5):1时，具有较好的效果。两者结合使用的交叉操作流程如图 4-3 所示。

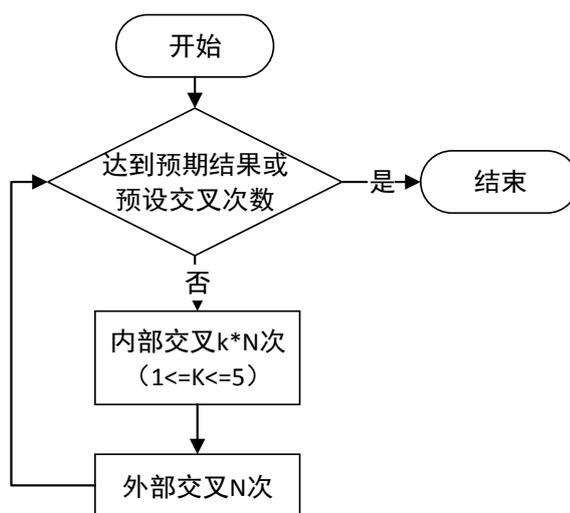


图 4-3 两种交叉结合方式示意图

4.3 基于模拟退火算法提高用户观测平均连续性

在最大化观测总科学价值之后，还需要尽可能提高用户的满意程度。即在维持时间分配的可行性以及观测的科学价值不受影响的前提下，进行邻域搜索，提高用户观测的平均连续性，此处引入模拟退火的思想，避免陷入局部最优。具体流程如图 4-4 所示。

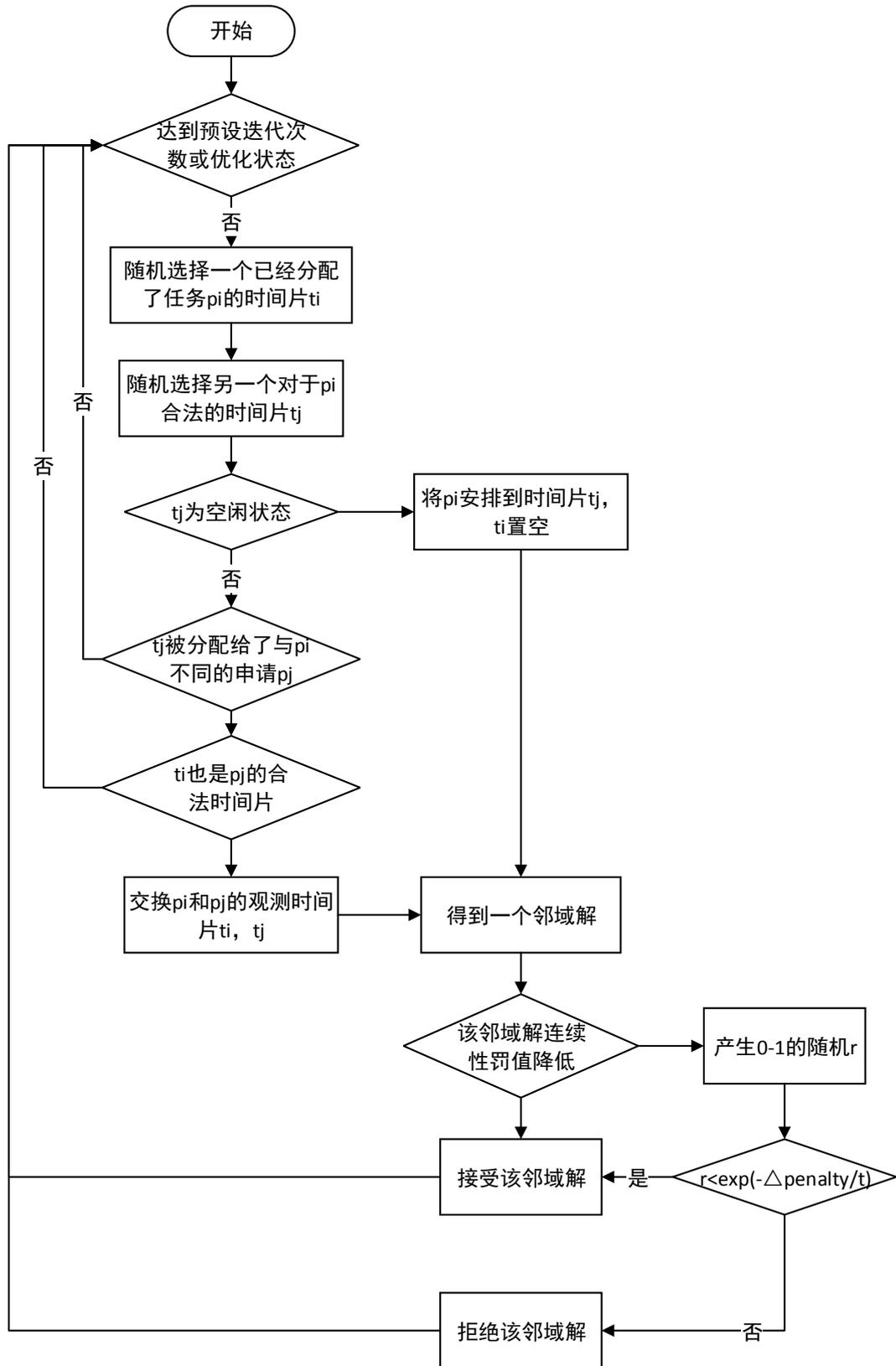


图 4-4 用户观测连续性优化流程图

在进行每次邻域搜索时,需要首先随机选择一个已经被分配了观测任务的时间片,并对其上分配的任务进行调整。在选择时间片时,为了便于实现且保证每个候选时间片以相等的概率被选中,采用如下方式将整个随机过程分为两个步骤:
 a.随机选择一个申请。每个申请所占的时间片数不相同,不能等概率地进行选择,故每个已经被安排了观测时间的申请,都以其所被安排的观测时间长度作为权重,然后按照权重随机的方式进行选择。
 b.对于选定的申请,随机选择一个其所占用的时间片,此步骤按照等概率随机选择。

假设随机选择的时间片为 t_i ,该时间片被分配给了 p_i ,接下来考虑为 t_i 时间片上的 p_i 任务调换时间。具体操作为在观测申请 p_i 的申请时间范围之内随机选择另一个时间片 t_j ,对于该时间片,存在以下的三种情况:

- 如果时间片 t_j 为空闲状态,直接将 p_i 安排到时间片 t_j ,将时间片 t_i 的状态设置为空闲。
- 如果时间片 t_j 也被分配给了 p_i ,则跳回前边步骤,重新选择 t_i 。
- 如果时间片 t_j 被分配给了另一个观测申请 p_j 。此时,如果 t_i 也是观测申请 p_j 的合法时间片,则将两个时间片上的观测任务互换。将时间片 t_i 分配给观测申请 p_j ,将时间片 t_j 分配给观测申请 p_i ;如果 t_i 不是观测申请 p_j 的合法时间片,则跳回前边步骤,重新选择 t_i 。

此时,便得到了一个邻域解,按照公式(3-2)计算该领域解的惩罚值,从而量化用户观测时间连续性,连续性越好,惩罚值越低,用户满意度越高。如果该邻域解的惩罚值小于变换之前,则接受该邻域解;如果该邻域解的惩罚值大于变换之前,则以概率 $\exp(-\Delta\text{penalty}/t)$ 接受该邻域解,其中, t 为模拟退火的控制参数,是一个预定义的常量。一次邻域变换的具体形式如图 4-5 所示。

	day1	day2	day3
hour1	p_1	p_2	
hour2	p_3	p_3	p_4
hour3	p_1	p_2	p_4

图 4-5 一次邻域变换距离

搜索具有更好观测连续性的解的过程就是不断拓展邻域解的过程。即重复以上步骤直至找到足够优化的解或达到预设的迭代次数。相对于爬山法中只接受更优的邻域解,基于模拟退火的方式以一定概率接受差解,扩展了邻域搜索的范围,

很大程度上避免陷入局部最优。基于模拟退火思想优化用户观测连续性的算法如算法 2 所示。

算法 2 用户观测连续性优化算法

输入:

最大科学价值的时间分配方案;

```

1: while 没有达到预设的迭代次数和优化状态 do
2:     以被分配时间长度为权重随机选择一个已被分配观测时间的申请 $p_i$ ;
3:     随机选择一个分配给观测申请 $p_i$ 的时间片 $t_i$ ;
4:     随机选择 $p_i$ 的另一个合法时间片 $t_j$ ;
5:     if  $t_j$ 处于空闲状态
6:         将 $p_i$ 安排至 $t_j$ ,  $t_i$ 置空;
7:     else if  $t_j$ 也被安排给 $p_i$ 
8:         返回步骤 2, 重新进行时间片选择;
9:     else if  $t_j$ 被安排给了另一个申请 $p_j$ 
10:        if  $t_i$ 也是 $p_j$ 的合法时间片
11:            交换 $p_i$ 和 $p_j$ 的观测时间片;
12:        end if
13:    end if
14:    if 连续性罚值降低
15:        接受该邻域解
16:    else
17:        按照 $\exp(-\Delta\text{penalty}/t)$ 的概率接受该邻域解
18:    end if
19: end

```

4.4 时间分配系统的实现

在为丽江 2.4m 望远镜设计了观测时间自动分配算法后, 需要进一步考虑其实际运用。目前, 本实验室与国家天文台合作的 China-VO 项目, 已经实现了一套望远镜自动化管理系统。实现了观测申请、审批、评分、时间分配流程的在线进行。这极大地方便了用户及管理人员, 既简化了流程, 方便了信息的整合、统计和处理, 也为大规模的观测数据提供了统一的存储管理接口和共享平台, 促进

了天文领域的信息化。但是，在该系统中，望远镜时间分配的具体操作依然由望远镜管理员人工完成。本文设计了一个自动时间分配模块，可加入到上述系统中，望远镜管理员可以通过在分配页面点击按钮，调用相应的时间分配算法，方便地进行 2.4m 望远镜的自动时间分配，并在时间分配完成后直观地查看分配结果。

望远镜管理员可以通过点击左上角的按钮，分别选择调用本文设计的两种时间分配算法，在点击方法按钮后，时间分配系统可能需要一定的时间来计算，页面左上角会显示相应的提示，具体显示如图 4-6 所示。在分配结束后，系统弹出窗口进行提示，并自动刷新页面显示分配结果，分配结果示意图如图 4-7 所示。在分配完成后，依然保留原系统中望远镜管理员添加、删除、修改观测安排的功能。使望远镜管理员可以更加灵活高效地进行 2.4m 望远镜的时间分配操作。

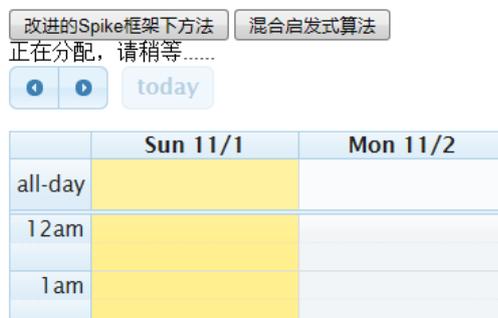


图 4-6 在进行分配的页面提示

	Sun 11/1	Mon 11/2	Tue 11/3
10am	10:00 - 11:00 120	10:00 - 11:00 120	10:00 - 11:00 94
11am	11:00 - 1:00 41	11:00 - 1:00 41	11:00 - 1:00 41
12pm			
1pm	1:00 - 5:00 129	1:00 - 5:00 129	1:00 - 4:00 129
2pm			
3pm			
4pm			4:00 - 10:00 186

图 4-7 间分配结果示意图

第五章 实验结果及分析

5.1 实验设计

5.1.1 时间分配效果衡量标准

2.4m 望远镜时间分配问题有两个目标，其中首要目标是使观测的总价值最大化。其后，在保持总价值最大的同时，优化用户观测时间的连续性，提升用户体验。在设计时间分配算法时，无论是基于 Spike 系统框架的改进算法还是混合启发式方法都将整个算法分为两个阶段，这两个阶段分别对 2.4 米望远镜时间分配问题的两个目标进行优化。在衡量和对比算法的效果时，也分别从这两个方面进行对比。观测的总价值由被分配了观测时间的申请的科学价值累加和来衡量，观测的总价值大的方案更优。在总价值相同时，比较用户观测时间的连续性，连续性由公式(3-2)定义的惩罚值来衡量，惩罚值越小，连续性越佳。

5.1.2 实验数据

2.4m 望远镜真实申请数据

为了验证 2.4m 望远镜时间分配算法的有效性，本文基于 2.4m 望远镜最新一个观测季的真实观测申请数据进行实验。

表 5-1 2.4m 望远镜观测申请数据样例

申请 ID	起始日期	终止日期	起始时间	终止时间	所需时长	专家打分
10001	2015 /9/22	2015/9/25	12	23	45	2.8
10002	2015/10/12	2015/12/31	18	24	118	2
10003	2015/10/10	2015/10/13	11	21	24	3.2
10004	2015/10/20	2015/10/20	18	22	4	3.875

该观测季的观测时间范围为 2015 年的下半年，共有 56 条观测申请。在每条申请记录中，分别指定了该观测可以进行的日期范围以及该日期范围内每天可以进行观测的时间范围。申请中还明确指出完成观测所需要的时间长度，在这个观

测季中, 各个申请所需要的观测时间长度从 1 小时到 396 小时不等。这些申请均经过多名专家打分, 并计算出平均得分。时间分配算法中需要的观测申请数据如表 5-1。

模拟数据

随着天文领域的发展, 对于天文设备的需求日益增长。每个观测季的申请数也会随之增多。本文基于较大规模的模拟申请数据, 来检验 2.4 米望远镜时间分配算法的有效性。模拟申请数据分为几组, 分别含有 100, 200, 400, 800 条申请。模拟数据集中, 各个申请的申请日期范围的大小, 每天可进行观测的时段的长度, 各观测完成所需要的时长以及它们的得分, 都服从与 2.4m 望远镜真实申请数据类似的分布。每个申请的观测时间范围的起始日期是随机确定的。

5.1.3 参数选择

根据 2.4m 望远镜在之前观测中的实际经验, 每个观测申请的科学价值由函数 $f_v = 10^{\text{grade}(p_i)}$ 确定。基于人工分配时管理员的相关经验, 在量化用户观测平均连续性的惩罚值时, 采用公式(3-2)的量化方式, 且其中各参数设定为 100, 100, 40。

5.2 实验和结果分析

5.2.1 交叉方法

在求解科学最大化方案的阶段中, 混合启发式算法主要基于遗传算法进行方法设计。该方法在完成初始种群的构造后, 进行个体之间的交叉操作。本文设计了两种交叉方法: 内部交叉和外部交叉。本实验的目的在于比较分别使用两种交叉方法以及将其结合使用, 对于求解具有最大科学价值分配方案的作用。在实验中, 为了保证公平性, 控制三种交叉方案(单独使用内部交叉, 单独使用外部交叉, 结合使用内部交叉和外部交叉)的交叉次数一定, 然后比较三种方案所得到的最大科学价值。由于交叉过程存在随机性, 每种交叉方案运行十次, 并取它们所得到的最大科学价值的平均值。该实验基于 2.4m 望远镜的真实观测申请数据, 实验结果如表 5-2 所示。

如果该申请数据集合中所有的申请都能进行观测, 根据公式(3-1), 其可达到的最大科学价值为 314145。但是, 在实际的望远镜时间分配问题中, 申请对于实际可以进行分配的观测时间来讲是超负载的。因此, 在各个申请之间存在着时间冲突, 如果其中一些申请被分配观测时间, 则另外一些申请必然不能进行观测。

表 5-2 交叉方式比较

交叉方案	最大科学价值（10 次实验平均值）
内部交叉	268762
外部交叉	268835
两种交叉方式相结合	268905

在上述针对各交叉方式进行的实验中，每种交叉方案得到的最大科学价值都是 268905，因此，可以认为采用该启发式算法对该组申请进行时间分配，所能得到的最大科学价值即为 268905。在结合使用两种交叉方式的 10 次实验中，所得到的最大科学价值均为 268905。而单独使用内部交叉或外部交叉时，只是在部分实验中达到了该最大值。因此我们可以看出，两种交叉方式相结合的方案更有利于找到具有最大科学价值的时间分配方案。

5.2.2 邻域搜索迭代次数

为了在保证最大科学价值不变的前提下，提高用户观测的连续性，本文设计的混合启发式算法采用了模拟退火的思想来进行邻域搜索。邻域搜索的迭代次数对于优化用户观测连续性的效率和效果有着重要的影响。基于不同的迭代次数，我们进行了一系列的实验，以找到最为合理的迭代次数。由于模拟退火算法具有随机性，因此，对于每一个迭代次数，都重复进行十次实验并记录平均值。对观测连续性的优化效果由公式(3-2)所定义的惩罚值来量化。我们选择上组实验得到的一个具有最高科学价值的时间分配方案来进行连续性的优化，优化前，该方案的连续性惩罚值为 133314。实验结果如表 5-3 所示。

表 5-3 不同迭代次数的优化效果比较

迭代次数	20000	40000	60000	80000	100000	120000
原方分配案惩罚值	133314					
优化后方案的惩罚值	121079	114778	110135	106180	105853	105608

实验结果显示，当迭代次数大于 80000 时，优化后的惩罚值趋于平缓。因此，选择迭代次数为 80000 是最为合理的。

5.2.3 时间分配效果比较

本文设计的两种 2.4m 望远镜时间分配算法都将整个算法分为两个阶段，在第一个阶段中找到具有最大科学价值的分配方案，第二个阶段在保持科学价值不变的前提下，提高用户观测的平均连续性。因此，我们分别基于这两个阶段的效果对本文设计的两种分配算法进行比较。每个阶段的实验都分别基于 2.4m 望远镜的真实观测申请数据和模拟申请数据进行。

5.2.3.1 求解最大科学价值分配方案

为了求解科学价值最大化的时间分配方案，在改进 Spike 系统框架方法时，采用启发式修正技术，而在混合启发式算法中采用遗传算法。我们首先基于 2.4m 望远镜的真实申请数据进行实验，对比两种方法在搜索最大科学价值解这一阶段的效果。实验结果如表 5-4。

表 5-4 基于真实申请数据集求解的最大科学价值

实验数据	2.4m 望远镜真实申请数据	
	启发式修正技术	遗传算法
所有申请总科学价值	314145	
被分配观测时间的申请的科学价值	246864	268095
分配比例	78.58%	85.34%

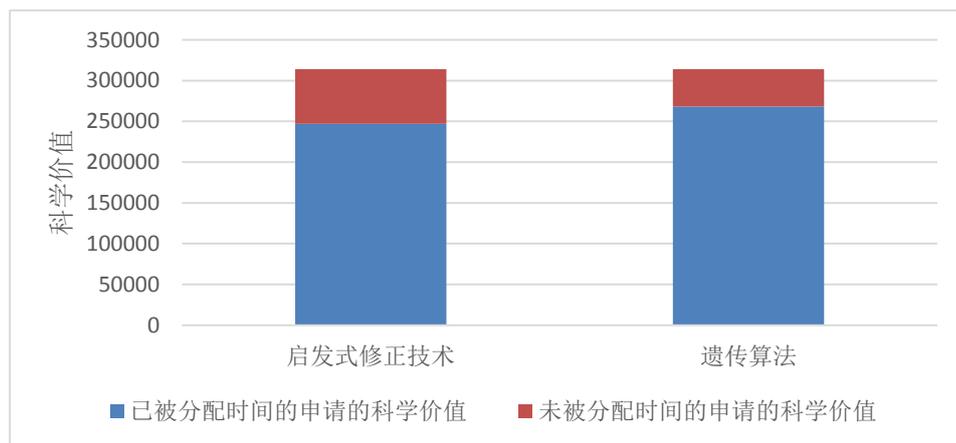


图 5-1 于真实申请数据搜索最大科学价值解的效果比较

表 5-4 的第 3 行数据给出了申请集中所有申请的总科学价值，第 4 行列出

了使用两种算法进行时间分配所得到的最大科学价值，第 5 行是被分配的申请的科学价值占总科学价值的比例。混合启发式算法中，采用遗传算法得到的解的最大科学价值相对于 Spike 框架下采用的启发式修正策略，将该比例提高了 6.76%。图 5-1 可以更直观地显示出该提升比例。

当申请数据规模增大时，最大观测价值解的生成难度也会提高，因此，我们基于较大规模的模拟申请数据集合进行上述实验，以验证时间分配算法的有效性，实验结果如表 5-5 所示。

表 5-5 基于模拟申请数据集求解的最大科学价值

实验数据	模拟申请数据	
	启发式修正技术	遗传算法
申请数	100	
所有申请总科学价值	677664	
被分配观测时间的申请的科学价值	587479	605744
分配比例	86.69%	89.39%
申请数	200	
所有申请总科学价值	1429088	
被分配观测时间的申请的科学价值	868195	875353
分配比例	60.75%	61.25%
申请数	400	
所有申请总科学价值	2671544	
被分配观测时间的申请的科学价值	1310157	1365078
分配比例	49.04%	51.10%
申请数	800	
所有申请总科学价值	5297878	
被分配观测时间的申请的科学价值	1666697	1689292
分配比例	31.46%	31.89%

表 5-5 展示了基于各规模的模拟申请数据集，采用本文提出的两种算法进行时间分配所得到的最大科学价值。相比之下，混合启发式算法中采用遗传算法的求解方式，在各个规模的申请数据集上都显示出更佳的效果。由图 5-2 和图 5-3 可见，当申请规模增大时，总观测价值会提高。但是，当对更多申请进行时间分配时，会出现更多的冲突，因此，被分配观测时间的申请的科学价值不会随着申

请数据规模的增大而成比例增加。但此时，会尽量为高科学价值的申请进行时间分配，因此，科学价值的提高速度，远大于时间片利用率的提高速度。

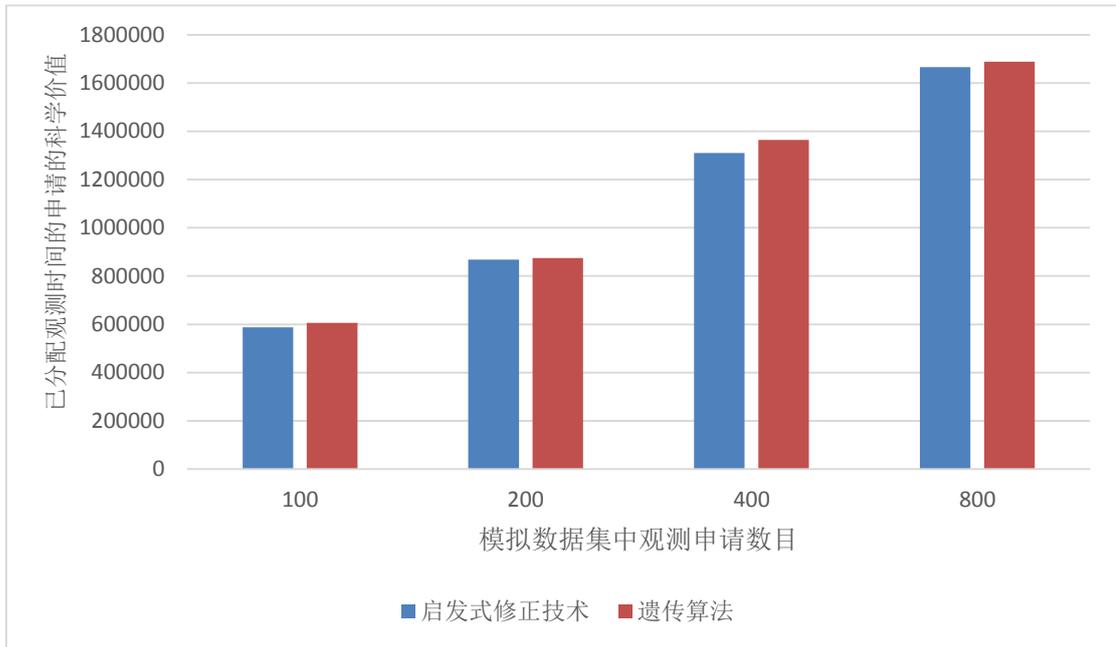


图 5-2 两种方法基于模拟数据得到的最大化的科学价值比较

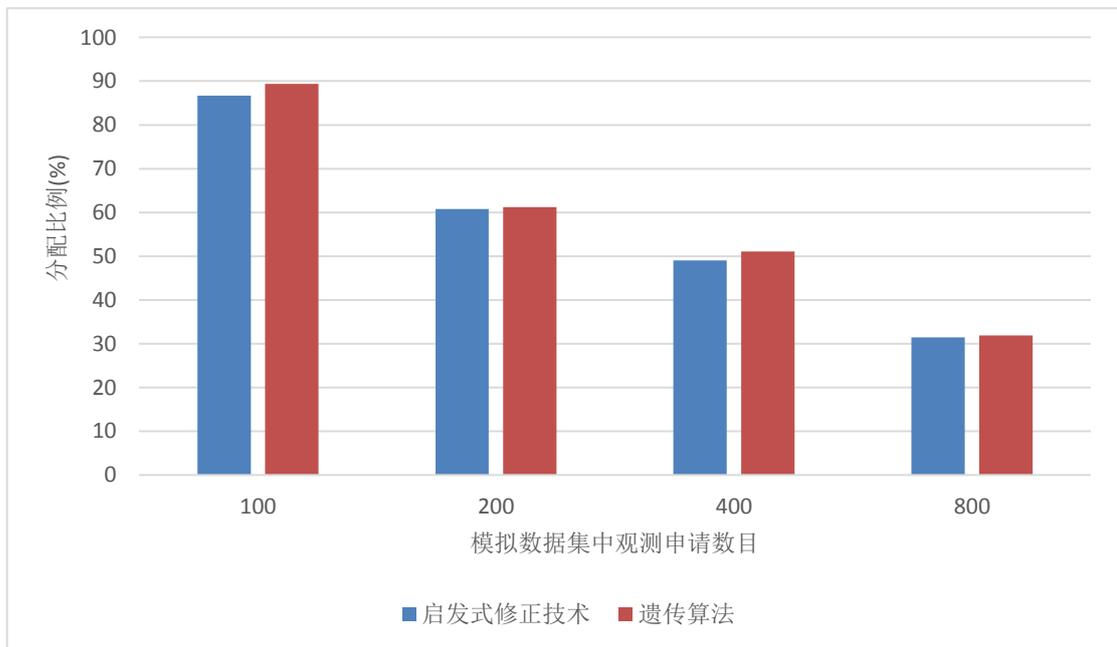


图 5-3 两种方法基于模拟数据得到的最大分配比例比较

5.2.3.2 用户观测连续性优化

在求得观测价值最大化的分配方案后,需要在保持此观测价值不变的前提下,提高用户观测时间的连续性。在 Spike 框架下进行方法改进时,基于爬山法进行连续性的优化,而混合启发式算法在此阶段采用了模拟退火的方法。在搜索具有最大科学价值的时间分配方案时,采用混合启发式算法的效果好于在 Spike 系统框架下进行方法改进,而最大化科学价值是时间分配的首要目标,因此,已经可以确定混合启发式算法较优。在本实验中,我们单独比较两种算法在优化用户观测时间连续性方面的效果,以确定是否需要结合 Spike 框架的方法来优化 2.4m 望远镜的观测时间连续性。为此,我们需要控制优化前的分配方案相同,本实验中,对由遗传算法得到具有最大科学价值的分配方案进行观测时间连续性的优化。基于 2.4m 望远镜真实申请数据的实验效果如表 5-6。

表 5-6 基于 2.4m 望远镜真实申请数据的连续性优化效果

实验数据	2.4m 望远镜真实申请数据	
	爬山法	模拟退火算法
优化连续性前方案惩罚值	133314	
优化后方案惩罚值	118114	106180
优化比例	11.40%	20.35%

表 5-6 的第 3 行是对用户观测时间的连续性进行优化前,其所具有的连续性惩罚值,该值由公式(3-2)计算得到。第 4 行中显示了分别采用两种方法对观测时间连续性进行优化后的时间分配方案具有的惩罚值。第 5 行为对应优化比例。

由于各观测所申请的时间范围相互重叠,为了维持分配方案的可行性和最大的科学价值,各申请很难被安排在一个非常理想,连续性很好的时间。混合启发式算法采用模拟退火策略,相对于爬山法,对惩罚值优化了 8.95%。而该惩罚值是对用户观测连续性的量化,因此可以说,采用混合启发式算法得到的时间分配方案,在观测时间连续性方面优化了 8.95%。

当用户申请增多时,各观测之间的时间冲突会更加严重,观测时间连续性的优化难度提高。因此,我们在较大规模的模拟申请数据上进行实验,来验证算法效果。具体的实验结果如表 5-7 所示。

实验分别基于申请数目为 100, 200, 400, 800 的模拟申请数据进行,统计数据表明,模拟退火方法在不同规模的申请数据集上都表现出一定的优势。图 5-4 直观地显示出该优化比例。

表 5-7 于模拟申请数据的连续性优化效果

实验数据	模拟数据结合	
	爬山法	模拟退火算法
申请数	100	
优化连续性前方案惩罚值	222900	
优化后方案惩罚值	191314	163894
优化比例	14.17%	26.47%
申请数	200	
优化连续性前方案惩罚值	191728	
优化后方案惩罚值	185614	177442
优化比例	3.19%	7.45%
申请数	400	
优化连续性前方案惩罚值	259236	
优化后方案惩罚值	252636	250218
优化比例	2.55%	3.48%
申请数	800	
优化连续性前方案惩罚值	225358	
优化后方案惩罚值	219034	216346
优化比例	2.81%	4.00%

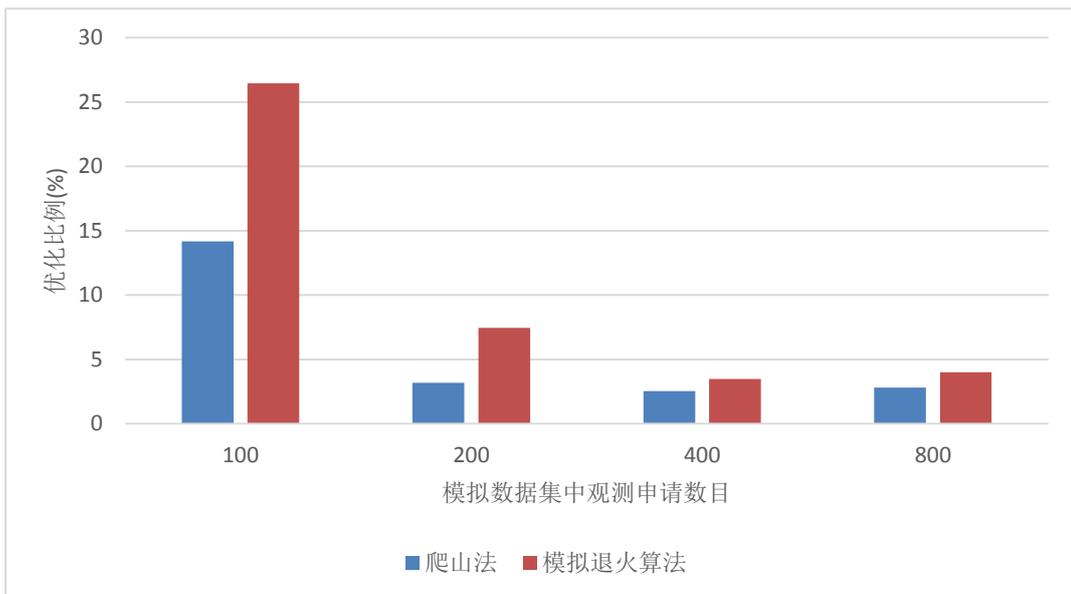


图 5-4 不同申请数目下优化连续性比例的比较

随着申请数目的增加，各观测申请时间范围重合度更高，对于用户观测连续性的优化也就越困难，优化的比例下降。但是，当申请数量不断增加，优化比例下降的趋势变缓，这是因为当观测数增大到一定程度时，时间的利用率很难继续增加，冲突程度也随之稳定。

上述几组实验可以说明，采用模拟退火的思路进行邻域搜索，在对不同规模的申请数据进行用户观测时间连续性优化时，效果均好于爬山法，很好的避免了局部最优。

第六章 总结与展望

6.1 本文总结

本文的目标在于为丽江 2.4m 光学望远镜设计一套时间分配算法，实现对观测申请的自动规划。首先，我们对与望远镜时间分配相关的国内外研究进行了广泛地调研。对 2.4m 望远镜时间分配问题进行了抽象和建模，将其表示为一个多目标优化问题。然后，在经典系统 Spike 下进行改进，来求解 2.4m 望远镜时间分配问题。最后，设计了一种混合启发式算法进一步优化时间分配的效果。在设计混合启发式算法的过程中，尝试了多种启发式方法，最终确定采用遗传算法来搜索具有最大科学价值的分配方案，之后，在维持科学价值不变的前提下，采用模拟退火的思想进行邻域搜索，提高用户观测的平均连续性。在遗传算法的具体实现中，初始种群的构造阶段采用了权重随机策略和贪心策略，在尽量保证高科学价值申请优先分配的基础上，提高了初始种群基因的多样性；对于交叉操作，本文设计了内部交叉和外部交叉两种交叉方式，既可以最大限度地对优质基因片段进行利用，又提高了基因多样性，有利于促进有用基因的组合，从而演化出更优的时间分配方案。在优化用户观测时间连续性时，采用了模拟退火的思路，一定程度上避免了局部最优。

本文实验分别基于 2.4m 望远镜真实申请数据和不同规模的模拟申请数据。对本文提出的两种时间分配算法进行了全面的比较。无论对于最大科学价值方案的构造还是用户观测连续性的优化，混合启发式算法都显示出更好的效果。

6.2 进一步工作

本文设计的 2.4m 光学望远镜时间自动分配算法，运行时间是在目标观测季全部观测申请和评估工作结束后，在这个观测季的观测工作开始之前。通过本文设计的时间分配算法，确定该观测季的具体观测计划。但是，在这个观测季的观测工作开始之后，可能会出现观测不能完全按照原定计划进行的情况，如受到恶劣天气影响或突来的观测机会抢占时间片等。此时，需要对后续的观测计划进行调整。观测计划的调整算法很大程度上影响着原计划最大科学价值的实现和用户的满意度，其研究有着重要的意义。

上述问题可以从以下几方面进行考虑。第一，观测季开始后，对已经确定的

观测计划进行局部调整，会带来负面的影响，这些负面影响可能包括：某原定计划被取消（此情况是最不希望发生的，其负面影响很大），观测时间的调整（当观测预定时间临近或调整幅度较大时，调整的负面影响较大）等。合理的对这些负面影响进行量化是优化观测计划调整方案的基础。第二，需要以最小化该不利影响为目标，设计合理的启发式方法，从而制定出最佳调整方案。

参考文献

- [1] 崔辰州, 赵永恒. 中国虚拟天文台研发策略与重点[J]. 天文研究与技术: 国家天文台台刊, 2004, 1(3): 203-209.
- [2] 崔辰州, 赵永恒. 中国虚拟天文台体系结构[J]. 天文研究与技术: 国家天文台台刊, 2004, 1(2): 140-151.
- [3] 陈东, 韦卡宁, 谌俊毅, 等. 2.4m 望远镜远程观测系统的初步系统设计[J]. 天文研究与技术: 国家天文台台刊, 2006, 3(4): 394-400.
- [4] Johnston M D, Miller G. Spike: Intelligent scheduling of hubble space telescope observations[J]. Intelligent Scheduling, 1994: 391-422.
- [5] Adorf, H-M. The processing of HST observing programs[J]. Space Telescope European Coordinating Facility Newsletter, Volume 13, 1990: 12-15.
- [6] Bertsekas D P. Constrained optimization and Lagrange multiplier methods[M]. Academic press, 2014: 96-157.
- [7] Bartak R. Constraint programming: In pursuit of the holy grail[J]. Proceedings of the Week of Doctoral Students, 1999, 6: 555-564.
- [8] Marriott K, Stuckey P J. Programming with constraints: an introduction[M]. MIT press, 1998.
- [9] Smiljanić M, Van Keulen M, Jonker W. Formalizing the XML schema matching problem as a constraint optimization problem[C]. Database and Expert Systems Applications. Springer Berlin Heidelberg, 2005: 333-342.
- [10] Murray K, Müller T, Rudová H. Modeling and solution of a complex university course timetabling problem[M]. Practice and Theory of Automated Timetabling VI. Springer Berlin Heidelberg, 2007: 189-209.
- [11] Giuliano M E, Johnston M D. Multi-objective evolutionary algorithms for scheduling the James Webb Space Telescope[C]. International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS), 2008, 8: 107-115.
- [12] Kukkonen S, Lampinen J. GDE3: The third evolution step of generalized differential evolution[C]. Congress on Evolutionary Computation. IEEE, 2005, 1: 443-450.
- [13] Abbass H. The self-adaptive Pareto Differential Evolution algorithm[C]. Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. IEEE, 2002, 1: 831-836.

- [14]Abbass H, Sarker R, Newton C. PDE: a Pareto-frontier Differential Evolution approach for multi-objective optimization problems[C]. Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation. IEEE, 2001, 2: 971-978.
- [15]ESO Observing Programme Information and Observing Schedules [EB/OL], <http://www.eso.org/sci/observing/teles-alloc.html>
- [16]Kristiansen S, Stidsen T R. A comprehensive study of educational timetabling-a survey[R]. Department of Management Engineering, Technical University of Denmark, 2013.
- [17]刘永凯. 课表安排问题的启发式算法研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2009.
- [18]Nothegger C, Mayer A, Chwatal A, et al. Solving the post enrolment course timetabling problem by ant colony optimization[J]. Annals of Operations Research, 2012, 194(1): 325-339.
- [19]Chen R M, Shih H F. Solving university course timetabling problems using constriction particle swarm optimization with local search[J]. Algorithms, 2013, 6(2): 227-244.
- [20]Lewis R M R, Paechter B. New crossover operators for timetabling with evolutionary algorithms[J]. In Proceedings of the 5th International Conference on Recent Advances in Soft Computing, 2004: 189-194.
- [21]Suyanto S. An informed genetic algorithm for university course and student timetabling problems[C]. Proceedings of the 10th international conference on Artificial intelligence and soft computing: Part II. Springer-Verlag, 2010: 229-236.
- [22]Ayob M. Using Tabu search with multi-neighborhood structures to solve University Course Timetable UKM case study (faculty of engineering)[C]. Proceeding of 3rd Data Mining and Optimization. IEEE, 2011: 208-212.
- [23]Kostuch P. Timetabling competition-sa-based heuristic[J]. In PATAT 2004: Proceedings of the 5th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling, 2004.
- [24]Minton S, Johnston M D, Philips A B, et al. Solving Large-Scale Constraint-Satisfaction and Scheduling Problems Using a Heuristic Repair Method[C]. Proceedings of the Eighth National Conference on Artificial Intelligence, 1990, 90: 17-24.
- [25]雷秀娟. 群智能优化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 109-119.
- [26]斯图尔特 罗素. 人工智能: 一种现代方法[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 88-94.
- [27]Malik Ghallab. 自动规划: 理论和实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 59-89.

- [28]Minton S, Johnston M D, Philips A B, et al. Minimizing conflicts: a heuristic repair method for constraint satisfaction and scheduling problems[J]. *Artificial Intelligence*, 1992, 58(1): 161-205.
- [29]Zweben M, Deale M, Gargan R. Anytime rescheduling[C]. *Proceedings of a Workshop on Innovative Approaches to Planning, Scheduling and Control*. 1990: 251-259.
- [30]Carreno Jara E. Multi-Objective Optimization by Using Evolutionary Algorithms: The-Optimality Criteria[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 18(2): 167-179.
- [31]Rigi M A, Mohammadi S. Finding a hybrid genetic algorithm-constraint satisfaction problem based solution for resource constrained project scheduling[C]. *International Conference on Emerging Technologies*. IEEE, 2009: 52-56.

发表论文和参加科研情况说明

软件著作权:

- [1] 刘琪, 于策, 肖健, 尹树成, 崔辰州. 天文望远镜时间自动分配系统. 软件著作权登记号 2015SR147208. 2015.

致 谢

本论文的工作是在我的导师于策老师和课题组的肖健老师、赵来平老师的悉心指导下完成的，三位老师严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。在此衷心感谢三位对我的关心和指导。

自加入实验室以来，于策老师在实验室的科研工作和日常生活中都给予了我很大的关心和指导，在我迷茫时开导我，在我受到挫折时鼓励我，在此向于老师表达最真诚的敬意与感谢。

同时课题组的肖健老师、赵来平老师，国家天文台的崔辰州老师对于我完成科研工作和论文都提供了很多帮助，在此表示衷心的感谢。

在实验室工作中，还要感谢同组的尹树成同学对于研究工作的讨论与改进，感谢洪智同学和袁子超同学的热心帮助，在此向他们表达我的感激之情。

另外也感谢舍友，朋友以及实验室的师兄师姐、师弟师妹在日常生活中的帮助与关心，感谢他们让我的研究生生活丰富多彩，感谢他们带来的欢声笑语。

最后感谢我的家人，他们的爱和支持使我能够在学校专心完成我的学业，也让我在前进的道路上更有动力。