

DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.220212002

引用格式:崔嵩.测量船工况技术船位研究与优化[J].电讯技术,2023,63(4):550-555.[CUI S. Ship position of TT&C ship working condition technology:research and optimization[J]. Telecommunication Engineering, 2023, 63(4):550-555.]

测量船工况技术船位研究与优化*

崔 嵩

(中国电子科技集团公司第十四研究所,南京 210039)

摘 要:测量船工况规划是执行海上测控任务的基础。在测量船工况船位、船向和船速的规划中,船位的规划尤为重要。介绍了测量船测量工况的总体业务流程,提出了各种情况下船位的计算方法,包括针对高轨和低轨空间目标提出不同的船位规划方法,满足在测量过程中避开岛礁陆地等不可部署区域,以比较有利的位置和测量仰角获取空间目标跟踪弧段。同时研究了多船多目标场景的测量船工况船位规划,提出了两种设计思路,为测量船工况规划复杂场景提供了解决问题的思路与方法。

关键词:测量船;测量工况;船位规划;多船多目标

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



微信扫描二维码
听独家语音释文
与作者在线交流
享本刊专属服务

中图分类号:TN95;V556

文献标志码:A

文章编号:1001-893X(2023)04-0550-06

Ship Position of TT&C Ship Working Condition Technology: Research and Optimization

CUI Song

(The 14th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210039, China)

Abstract: The planning of TT&C ship conditions is the basis for execution of maritime TT&C tasks, in which the planning of ship positions is more important than directions and speeds. This paper introduces the overall operation process of TT&C ship measurement conditions, and then focuses on the calculation method of ship position in various situations. It includes proposing different ship position planning methods for high-orbit and low-orbit space targets, so as to avoid non-deployable areas such as islands, reefs and lands in the measurement process, thus obtaining space target tracking arc segments for favorable positions and measurement elevation angles. At the same time, the ship position planning of the TT&C ship condition of multi-ship multi-objective scenario is studied, and two design ideas are proposed to provide ideas and methods for solving problems in the complex scene of TT&C ship condition planning.

Key words: TT&C ship; measurement condition; ship position planning; multi-ship and multi-target

0 引 言

执行航天任务是一项十分巨大且复杂的工程,地面测控中心须时刻监控航天器的飞行参数,因此必须对航天器进行全过程监控^[1]。目前航天器的飞行范围很广,仅仅依靠非全球布控的地面测控站

去采集测量参数已远远不能够达到全程监控的目的,因此需要依靠海上测量船的机动部署来监测获取到海域范围内的轨道弧段,在特殊航天任务情况下甚至需要依靠国外的测控站,用以增加测量和控制网络覆盖范围。

* 收稿日期:2022-02-12;修回日期:2022-06-08
通信作者:崔嵩

航天测量船的机动灵活性,使它被多个航天大国广泛应用于各类航天发射任务,在海上执行任务过程中保障航天测量任务顺利完成^[2]。在到达指定海域前,出海过程中也可以收集空间目标的轨道信息,获取陆地测站不能够收集到的测量数据,以丰富扩展或更新空间目标编目信息^[3]。测量船的机动性决定了其应用灵活,一次出航可以在不同海域完成多个不同任务,也可以根据特定需要调整其布设位置,完成特殊的应急测控任务^[4]。对航天测量船的测量工况进行合理规划和设计,可以为测量船提供最优的技术实施方案。文献[5]提出了基于模糊理论的测量船工况设计评定方法;文献[6]提出了基于遗传算法的测量船船位优化方法,提供了船位设计的客观性,但是限制了约束条件,算法的局限性可能导致某些船位不符合实际工作;文献[7]结合运筹学方法,通过 TOPSIS 价值函数模型建立了测量船工况设计评价体系;文献[8]以某运载火箭发射任务为例,阐述了海上测量船测量工况约束条件和设计方法,对其他航天发射任务具有一定的借鉴意义。

本文提供了一种测量船工况船位规划方法,考虑了对高轨、低轨等不同空间目标的不同处理方法,且考虑了实际海上测量船如何避开岛礁、陆地等不可部署区域,保证了测量船执行任务时间段内的船位是合理的。对多船多目标的场景提供了最短航程法和网格法两种船位规划方案,在工程应用中取得了良好的效果。

1 测量船工况规划总体业务流程

测量船工况规划总体考虑因素包含满足任务观测要求的测量最佳仰角、装备探测威力覆盖、风力、风向、浪涌、岛礁陆地、禁航区、航运繁忙等不可部署区域。一般的分析过程是研究了航天测量船海上测控任务的约束条件后,然后根据任务需求,最优选择测量船的测量海域及其航行工况,进而确定船载测控设备的主要任务参数,并分析评估各船载设备的测量精度是否满足任务要求。

测量工况是指测量船实施任务时的船位、航向、航速等工作状态^[4]。为确保提供多个关键弧段的最佳测控支持,各弧段间有时还需要实施船舶机动。因此在任务前首先需要对测量船的工况进行详细设计,规定其各个任务弧段的船位、船速、船向等信息,设计时考虑因素很多,既要保证船舶安全又要合成风较小,同时测量起始点的选择应使得测量任务弧段尽量具有较好的跟踪几何等。

总结起来,测量工况要满足四点要求:满足测量弧段覆盖要求;确保测量船安全;满足设备跟踪性能要求;满足测量精度要求。规划的时候通过各类约束条件限制,基本就能满足上述四点要求。具体测量船工况规划的流程可以按定船位、定船向、定船速三个步骤来完成^[5]。根据任务输入弧段,考虑船上各个装备之间的遮蔽关系,测量船工况规划的定船位、船向、船速的业务流程如图 1 所示。

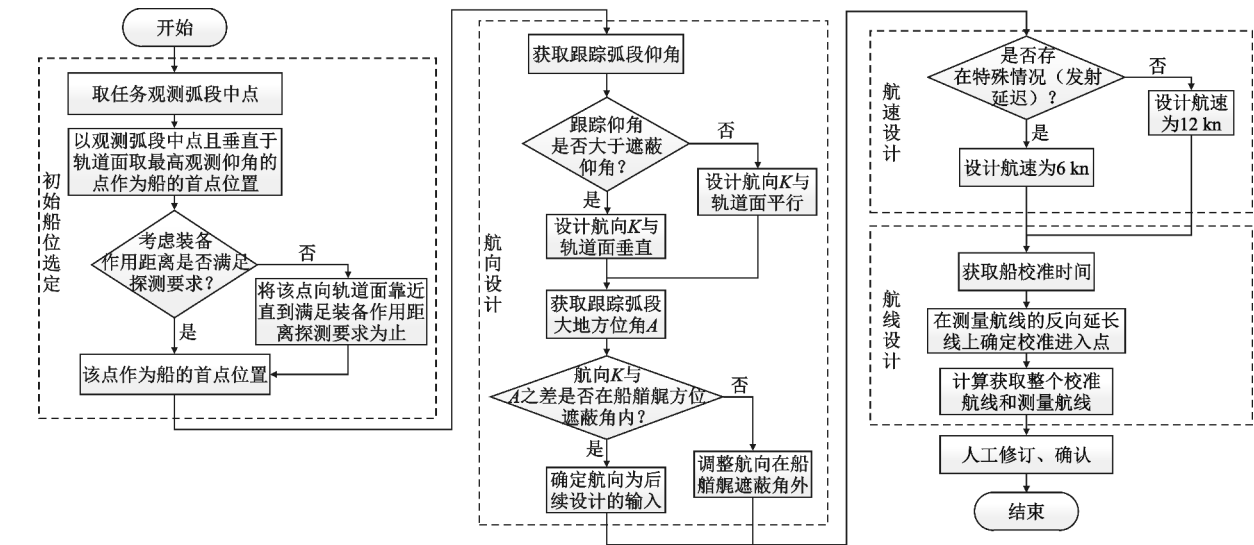


图 1 测量工况规划业务流程图

图 1 中,关于遮蔽的计算和变航向的考虑分别在文献[9]和文献[3]中详细阐述设计,在此不再赘

述。本文研究的重点内容是测量船工况的初始船位计算方法。

2 船位规划方法

2.1 区域管理

为了使船在测量过程中避开岛礁、航运繁忙等区域,在设计时需要一个区域管理模块,该模块负责对各类型的区域进行增删改查等区域管理,提供规则和不规则区域图形的数据管理功能。区域管理的具体功能设计简要描述如下:

维护一个区域列表,提供区域信息维护,区域信息包含基本信息和其他附属信息,基本信息包含区域名称、区域状态、重要等级、高度层范围、敌我属性、国家地区、战区、区域用途;其他附属信息包含活动时间、时段、备注等。区域点提供维护功能,提供区域形状、区域类型的选择。这些区域的维护为后续船位规划避开不可部署区域提供基础。

2.2 高、低轨卫星的处理方法

无论观测对象是高轨卫星还是低轨卫星,测量船自动工况规划的总体流程是不变的——计算船位、船向、船速。高轨卫星和低轨卫星的测量船工况规划处理的不同之处在于计算初始船位时所用的方法,具体方法如下:

通过低轨卫星的目标轨迹和任务要求的探测弧段大致确定出船初始所在的位置。可用任务要求的弧段向前向后各推 T s,为装备观测引导留有时间余量。找出两端的位置,找出观测弧段的中点位置,弧段剖面垂直的船位选定原理如图 2 所示^[9]。图 2 中, SE 为任务弧段, A 、 B 分别为任务弧段向前推 T s、向后推 T s 的位置, M 为任务弧段中点, MO 为任务弧段剖面上垂直于海平面的线段。根据测量仰角要求,找到一点 P ,使得 $AP=BP$ 且 P 点与观测任务弧段中点 M 的角 θ 满足最高测量仰角要求,即 $\theta=\angle MPO$ 。这样的 P 点有两个,分别位于任务弧段剖面的两侧,两个初始船位均可。

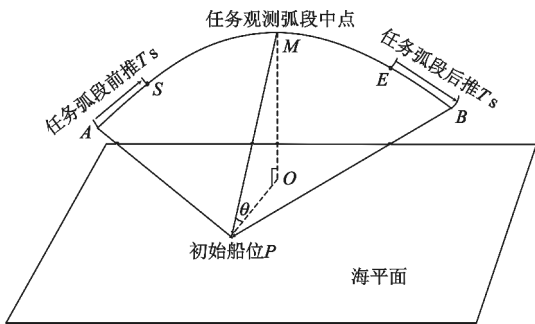


图 2 对低轨卫星观测的工况船位规划示意图

若观测对象为类似通信卫星的高轨卫星(一般通信卫星为地球同步轨道卫星,高度在 40 000 km 左右),因卫星高度大于地球半径,如果按照低轨的计算船位方法,会导致初始船位不在地球上,因此对于观测对象是高轨卫星,其初始船位寻找的方法如图 3 所示。

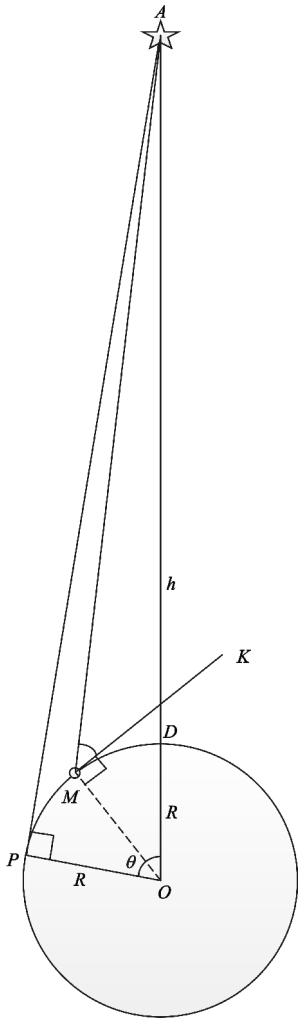


图 3 对高轨卫星观测的工况船位规划示意图

图 3 中,高轨卫星高度为 h ,地球半径为 R ,地心为 O ,卫星位置为 A 。在地球上找一点 P ,使得 AP 为地球切线,连接 AO ,与地球之间的交点 D ,找到 PD 中点 M ,做 MK 为地球切线,则根据弧长公式,

$$\angle AMK=\frac{\pi}{4}, \text{ 则 } \angle AMO=\frac{3\pi}{4}。$$

因

$$\angle AOP(\theta)=\arccos \frac{R}{R+h},$$

$$\angle MAO=\pi-\angle AMO-\theta/2,$$

则

$$\angle MAO = \frac{\pi}{4} - \arccos \frac{R}{R+h} / 2。$$

再利用图 1, 求出初始船位 M , 即

$$AD=h, \angle MAD = \angle MAO = \frac{\pi}{4} - \arccos \frac{R}{R+h} / 2,$$

$$\tan \angle MAD = MD / AD,$$

可求出 MD 距离, 即

$$MD = AD \cdot \tan \angle MAD = AD \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \arccos \frac{R}{R+h} / 2 \right)。$$

已知一点 D (星下点经纬度)、 MD 距离、 MD 方向, 求出 M 点的经纬度即为初始船位。

2.3 避开不可部署区域的工况设计方法

自动计算测量船工况初始船位时, 如何避开陆地等不可部署区域位置的方法可以通过粒子群或者遗传算法等优化计算, 通过给定一个优化函数, 计算满足条件的解, 但是有可能局限于局部最优解或者计算时间较长。下面给出一种方法, 能够较好地实现以最佳的工况观测目标且避开不可部署区域, 计算时间和求出的船位能够满足任务测量要求。

Step 1 传入目标、装备、观测要求等信息, 开始计算测量工况。

Step 2 找到任务观测弧段的中点位置, 记为 M ; 在观测弧段的剖面上, 观测弧段中点为端点引垂线到地球表面, 该垂线与地球表面的交点记为 O ; 以 O 为端点, 在地球表面引一条线 OP , 使得 OP 垂直于任务弧段剖面, 且 MPO 为观测要求的最高仰角。

Step 3 进入船位 P 的周围点是否穿过陆地循环判断, 判断该初始船位是否可行。

Step 4 可行则直接使用, 不可行则通过先将 M 点向任务弧段两端移动寻找 P 点, 再通过外扩观测仰角寻找 P 点的方法, 进行两层遍历。

Step 4.1 以 P 点为中心、船速乘以目标飞行时间为半径的一个圆, 10° 为一个步长, 判断圆圈上的点是否在陆地上;

Step 4.2 所有点都不穿越陆地则直接使用这个初始船位 P , 跳出循环; 其中有一个点穿越陆地, 则寻找下一个初始船位 (P)、船向、船速, 进行循环迭代。 P 点寻找方法如下:

Step 4.2.1 移动任务弧段 M 点, 以间隔 5 s 向两边移动, 判断 M 是否已经达到边缘位置 (M 以

间隔 5 s 移动时, 如果当前位置到边界的时间已不足 5 s , 则认为已经移动到最边缘位置), 如果是, 则进入 Step 4.2.2; 如果没有, 则进入 Step 4.3;

Step 4.2.2 判断测量仰角是否已达到观测要求下限, 如果是, 则没有符合要求的工况, 使用初始工况; 如果没有, 则将 M 移回任务弧段中心, 更新测量仰角为当前测量仰角 -3° , 然后进入 Step 4.3。

Step 4.3 根据此时的 M 点和测量仰角, 按照 Step 4.2 的方法求解此时的初始船位。

Step 5 找到初始船位 P , 该船位对应的卫星点 M 以及与 M 相邻的点之间的方向作为船向, 船速默认为 12 kn 。

Step 6 根据初始船位船向船速计算任务时间段内的测量航线。

以上避开不可部署区域的寻找初始船位 P 点的方法过程如图 4 所示。

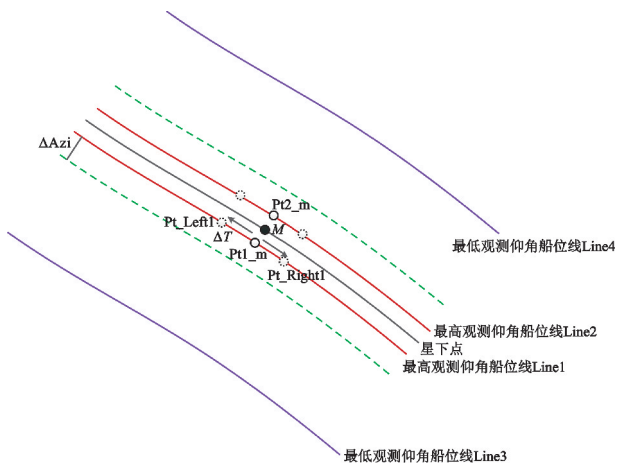


图 4 测量工况自动规划船位避开陆地等不可部署区域功能示意图

2.4 多船多目标的船位规划方案

对于多船多目标的场景, 要想找到合适的船位, 理论上应用遗传算法、粒子群等智能算法, 制定好目标函数和约束条件, 也可以获得较好的规划船位^[6,9]。但在实际应用过程中, 算法的计算时间长, 以及有可能局限于局部最优解的可能性较大, 因此本文提出两种多船多目标船位规划方法——最短航程法和最佳网格圈定的排列组合法^[10], 获得了较好的应用效果。

最短航程法计算速度快, 可以快速找到一个能观测到目标的船位和船向, 给出自动布船结果。最短航程法的计算逻辑如图 5 所示。

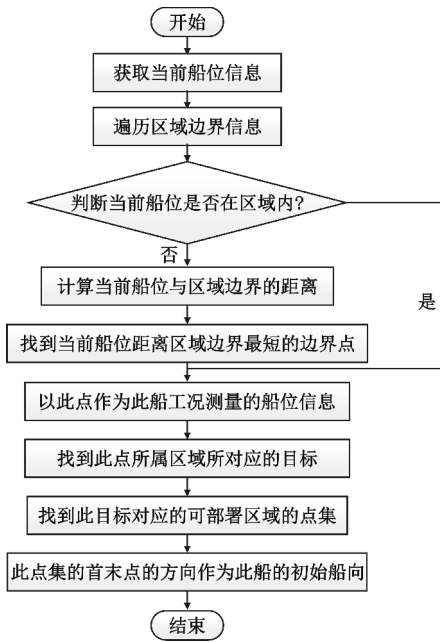


图 5 最短航程法计算逻辑图

最佳网格圈定的排列组合法考虑的因素主要有能观测到的目标数目以及最短观测时长,能观测到的目标数目越多且满足最短观测时长的位置是最佳网格圈定法最终要达到的目的,根据可部署海域计算,生成多个可部署的区域。已知信息有两个:一是所有目标的轨迹;二是可部署区域边界点信息,梳理成目标 ID 和对应的可部署区域的 map。根据以上已知条件,进行多船布站。布站方法如下:

Step 1 将所有可部署区域进行离散化网格划分,每个网格都进行编号,一个网格 ID 对应一个网格区域点信息 map。

Step 2 挑出来 N 个网格用于部署船位。遍历网格,统计能观测到的目标个数(取网格中心点为站点,这个可见计算只需要满足俯仰约束即可,不需要带入距离,目标轨迹跳跃为最短观测时长的秒数,能看见一个点即可跳出循环)最多的前 N 个网格(N =船个数);如果 $N>$ 船个数,则对这 N 个网格按照目标编号进行分类,可分为 M 类(对应 M 个目标),如果 $M=N$,则从每类网格中随机拿出一个网格来,共拿出 $M(N)$ 个网格作为部署船位;如果 $M>N$,则根据目标优先级取出 N 个,从每类网格中随机拿出一个网格来。

Step 3 这 N 个网格随机给 N 艘船的初始船位,船向为该船对应的目标的飞行方向。

该方法给出的部署船位结果能够尽量满足观测目标数目最多且观测时长最短的条件约束,计算时长与可部署区域离散化的网格个数有关,结合应用

选择合理的网格划分颗粒度,能够获取选择较好的观测船位和船向的测量船工况规划结果。

3 工程应用效果

根据以上设计方法,计算生成的观测低轨卫星避开不可部署区域的船位与低轨卫星位置三维示意图如图 6 所示,图中计算结果使用的最高测量仰角为 75° 。

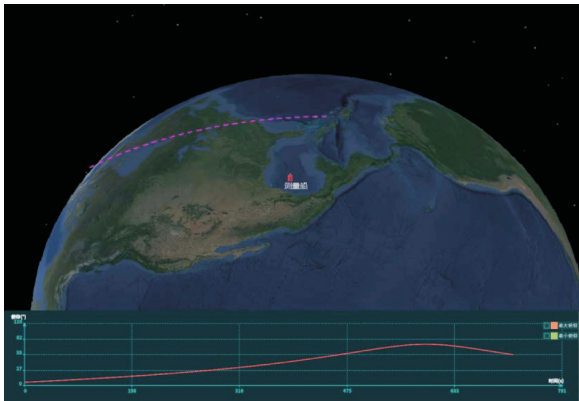


图 6 观测低轨卫星避开不可部署区域的船位和仰角变化图

观测高轨卫星避开不可部署区域的船位与卫星位置三维示意图如图 7 所示。

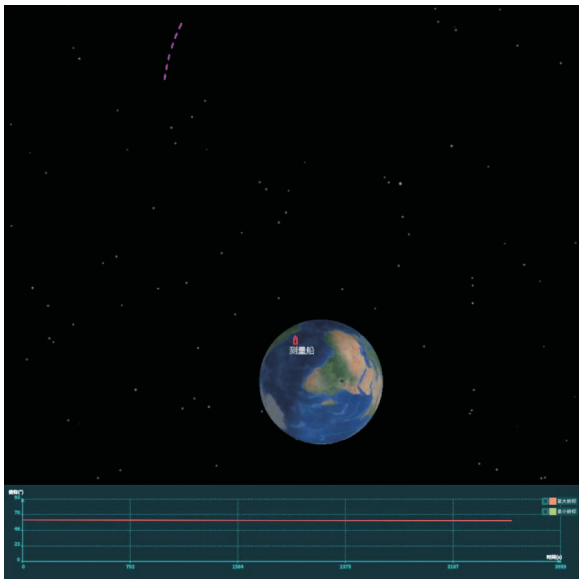


图 7 观测高轨卫星避开不可部署区域的船位和仰角变化图

多船多目标的测量船工况规划仿真,以 2 船 2 目标为例,根据最短航程法计算出的多船多目标的船位和卫星位置二、三维示意图如图 8 所示,图中粉色虚线为卫星轨迹,黄色实线为可部署海域,红色船标为船部署位置。

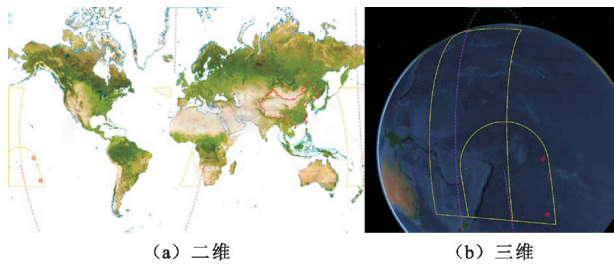


图 8 最短航程法计算出的船位部署二、三维图

2 船 2 目标场景的网格法计算出的多船多目标的船位和卫星位置二、三维示意图如图 9 所示。

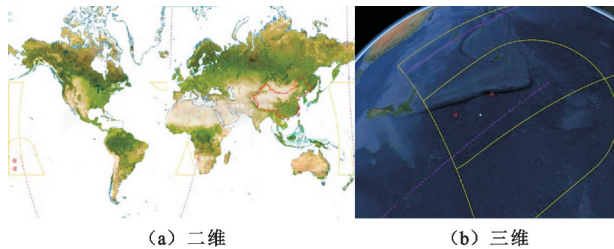


图 9 网格法计算出的船位部署二、三维图

通过工程实践,自动工况避开不可部署区域的方法计算时间取决于区域大小和所取的步长,一个目标飞行时长决定了这个目标可部署海域的大小,目标时长越长可部署海域越大。一般情况下,上述场景中,任务观测目标时长不超过 2 h 情况下,应用主流计算机计算:最短航程方法的多船多目标测量船工况规划方法计算时间较短,在 10 ms 以内;网格法计算多船多目标工况船位的时间取决于区域和网格大小,取 10 km×10 km 网格大小,计算时间在 300 ms 左右。网格越小,计算结果越精确,耗时越长。以上计算结果均为蒙特卡洛法统计的均值数据。

针对以上场景采用网格法计算的时间随网格边长变化的曲线如图 10 所示。

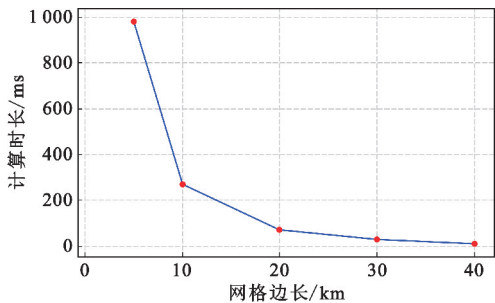


图 10 网格边长与计算时间关系统计图

4 结束语

本文在测量船工况规划初始船位计算方面进行了比较全面的分析,能够为实际测控任务提供比较具体的参考,有一定的借鉴意义。下一步将综合分析后续航天测控任务规划,在测量船工况规划现有基础上,依据任务要求、船上各个装备的数据采集能力和特点、装备作用距离、多任务关键弧段、数据采集要求等对测量船工况规划的影响,并合理引入气象、水文、海况等数据来进一步优化测量船工况规划方案,同时根据具体工作特点进一步研究海上测控方案设计的智能化策略。

参考文献:

- [1] 黄亮. 航天测量船工况优化设计方法与实现[D]. 成都:电子科技大学,2014.
- [2] 何剑伟,苏春梅,李永刚,等. 新一代航天测量船测控仿真系统设计与实现[J]. 现代雷达,2019,41(12): 80-85.
- [3] 崔嵩. 船载空间目标观测系统的任务规划[J]. 电讯技术,2021,61(12):1514-1520.
- [4] 刘冰. 航天测量船海上测控任务分析与设计方法[M]. 北京:国防工业出版社,2015.
- [5] 李红艳,刘冰,周江. 航天测量船工况设计的模糊综合评估方法[J]. 电讯技术,2007,47(1):199-202.
- [6] 倪晓秋,黄凯,茅永兴,等. 基于遗传算法的测量船工况优选方法[J]. 电讯技术,2009,49(7):13-17.
- [7] 戴婷婷,周大尉,王少林. 基于航海模拟视景仿真系统的测量工况优化设计[C]//2013年“苏浙闽粤桂沪”航海学会学术研讨会论文集. 广州:上海航海学会,2013:31-39.
- [8] 茅永兴,张忠华,朱伟康,等. 航天发射任务测量船应急测控海域设计方法[J]. 飞行器测控学报,2009,28(5):5-8.
- [9] 崔嵩,孙家平. 航天测量船测量工况规划方法研究与设计[J]. 中国电子科学研究院学报,2020,15(11): 1117-1122.
- [10] 李赞,程承,徐得珍,等. 一种基于网格的航天测量船船位布设方法:CN110988789A[P]. 2020-04-10.

作者简介:

崔嵩女,1988 年生于辽宁盖州,2014 年获硕士学位,现为高级工程师,主要研究方向为航天测控领域任务规划。