

# 航天测量船任务航行工况优化设计技术

中国卫星海上测控部 茅永兴 张忠华 倪晓秋  
傅敏辉 黄凯 孙楠

**内容提要:**航天测量船的任务航行工况设计,不同于任务前后的航线设计。为确保作为移动测控站的航天测量船完成对各类航天器的跟踪测控任务,其任务航行工况设计时必须考虑诸多约束条件。本文以某重大航天发射任务为例,介绍了航天测量船任务航行工况需满足的约束条件与优化设计技术,并对设计结果进行了分析,为其它船舶执行类似特殊任务的航行工况设计提供一定的借鉴。

**关键词:**航天测量船 任务航行工况 约束条件 优化设计

## 0 引言

航天测量船的机动灵活性,使它被多个航天大国广泛用于各类航天发射任务。远望号测量船作为我国航天测控网的重要组成部分,已经为我国数十次航天发射任务提供了海上测控支持。然而,船载测控通信设备是安装在船舶这个动平台上的,它不同于陆上固定站,也不同于陆上机动站。为在航行中实施有效测控,必须在规定海域内,保证船体动平台的姿态可控和稳定(特别是航向稳定);为确保提供多个关键弧段的最佳测控支持,各弧段间有时还得实施船舶机动。因此,在任务前首先需要测控船的航行工况进行详细设计,规定其各任务弧段的布船区域、航速、航向、起止船位等。而在航行工况的设计时,必须考虑船舶的机动能力、船内测控天线和通信天线的视角遮挡、船舶航行的安全性以及经济性等多个制约因素。因此,对于多任务弧段连续测控的航行工况设计是一个非常复杂的过程,也是任务准备工作中非常重要、非常关键的一项工作。本文以某重大任务为例,简要介绍航天测量船的任务航行工况的约束条件和优化设计技术。

## 1 任务航行工况优化设计需考虑的约束条件

### 1.1 航天器关键测控弧段的测控需求对测量海域(布船区域)的约束

某航天器从发射到进入使命轨道,期间有多个关键的测控弧段,其中入轨段、几次近地点变轨段等关键测控弧段只有测量船能提供测控支持。因此,如何为这些关键测控弧段提供最佳海上测控支持,满足大总体对海上测控支持的需求,是在测量工况设计时首先应考虑约束条件。

以近地点变轨段测控为例,若要求轨控结束前提供6 min的变轨过程监视,轨控结束后提供6 min的测控,则由相关计算模型<sup>[1-3]</sup>可以得到这两个时刻卫星的空间坐标 $r_1^1$ 和 $r_2^1$ ,再由相关计算模型<sup>[4]</sup>分别可以得到满足测控条件的两个环形区域,它们相交的区域即是满足该关键测控弧段测控需求的测量船可布设区域。即在航天测量船任务航行工况的设计时,应满足任务中

提供该关键测控弧段的测控支持时测量船必须在该区域中航行。可布船区域如图1中黑色部分所示。

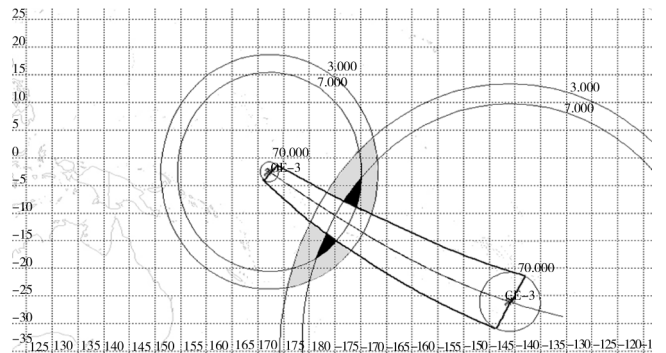


图1 卫星对测站布站区域示意图

### 1.2 测量船的机动能力对布船区域及航行工况的约束

测量船在完成入轨段任务后,为满足后续几次近地点变轨段的测控需求,须实施大范围的船舶机动,而测量船的机动能力是有限的,机动过程中还必须考虑任务弧段进入前的惯导校准航行工况以及任务航行工况的航速限制,考虑风和洋流对航速的影响等约束条件。例如,假设测量船入轨段任务结束后(任务结束点: $t_1, \lambda_1, \varphi_1$ )赶赴新海域(任务弧段前的4 h进入点: $t_2, \lambda_2, \varphi_2$ )参加第一次近地点变轨段的测控,两点间的距离为 $R$ ,船舶正常航速 $V$ ,航线洋流对船速的平均影响 $\Delta V_1$ ,最大风速对船速的平均影响 $\Delta V_2$ ,则必须满足以下约束条件:

$$R = \sqrt{(\lambda_2 - \lambda_1)^2 R_s^2 + (\varphi_2 - \varphi_1)^2 R_n^2} \leq (V - \Delta V_1 - \Delta V_2)(t_2 - t_1)$$

其中: $R_s = a_E \cos \varphi_1$ ;  $R_n = \frac{a_E}{\sqrt{1 - e_E^2 \sin^2 \varphi_1}}$ ;  $a_E$ 为地球赤道

平均半径。

### 1.3 测量船甲板布局对任务航行工况的航向约束

船载测控天线和通信设备的天线布设在甲板有限的空间上,它的视角不可避免地会受到一定的限制(船主桅、烟囱、其它测控通信天线对该测控天线的遮挡),因此,在任务航行工况设计时必须避开测控设备天线

对运动航天器的视角遮挡, 必须避开通信设备天线对通信卫星的视角遮挡。

根据甲板布局及有关数据, 可以计算给出各测控天线、通信天线的视角遮挡范围, 如某船某测控设备天线的甲板遮挡角为:

$$\begin{cases} -22^\circ \leq A \leq 22^\circ \\ 0^\circ \leq h \leq 17^\circ \end{cases} \text{ 和 } \begin{cases} 149^\circ \leq A \leq 210^\circ \\ 0^\circ \leq h \leq 34^\circ \end{cases}$$

某通信设备天线的甲板遮挡角为:

$$\begin{cases} -14^\circ \leq A \leq 14^\circ \\ 0^\circ \leq h \leq 33^\circ \end{cases} \text{ 和 } \begin{cases} 147^\circ \leq A \leq 213^\circ \\ 0^\circ \leq h \leq 25^\circ \end{cases}$$

因此, 由相关计算模型<sup>[2]</sup>计算得到的 USB 跟踪运动航天器的甲板角度( $A_j, h_j$ )和卫通跟踪通信卫星的甲板角度( $A_{WT}, h_{WT}$ )必须满足上述约束条件。如图 1 中的 3.000、7.000 为航天器的视角角度。

#### 1.4 惯导精度保障要求对任务航行工况的约束

船舶转向、加速和减速都会对惯导系统的航向和定位精度造成影响, 因此, 在任务航行工况设计时, 不仅要求任务弧段内必须保持匀速直线航行, 还应在任务弧段前设计一个 4 h 的“任务进入”航段, 任务弧段和“任务进入”段两段合一。即从任务弧段前 4 h(用于惯导校准)时刻  $t_1$  开始至该弧段结束时刻  $t_2$  止, 保持匀速直线航行。同时, 航速的选择还应考虑船舶航向的稳定性和可操纵性, 并避开船舶易产生共振的航速。对于内燃机组动力系统的某测量船, 在时间区间( $t_1 \sim t_2$ )其航速  $V$  和航向  $K$  需满足约束条件:

$$V = (12 \times 1.852) \times 1000 / 3600 (m/s)$$

$$K = \text{常数}$$

#### 1.5 船舶的安全性对任务航行工况的约束

在大洋中测控, 有时因任务需要只能将测量船布设在岛屿附近, 甚至在群岛区(该重大任务某船的测量海域就在图瓦卢群岛、托克劳群岛和菲尼克斯群岛区域), 而测量船的航行安全是完成任务的基础和前提。因此, 任务航行工况设计时必须考虑船舶航行的安全性, 远离海图标识的岛礁及碍航物一定的距离。安全距离的确定需根据海图比例尺和海域情况综合确定。如果岛礁或碍航物远离岛国且海图比例尺较小, 则安全距离应大一些; 如果岛礁或碍航物在岛国附近且海图比例尺较大, 则安全距离可小一些, 但这时还需考虑岛国的领海范围、附近是否有城市, 以免进入他国领海和受到大功率无线电信号干扰。因此, 通常为确保护航安全, 一般取安全距离为 5 ~ 10 n mile, 具体视不同情况综合考虑、区别对待。

例如: 假设某任务弧段的起止船位为  $A(\lambda_1, \varphi_1)$  和  $B(\lambda_2, \varphi_2)$ , 岛礁或碍航物位置为  $C(\lambda_3, \varphi_3)$ , 则任务航行工况设计时必须满足约束条件  $d$  ( $d$  为  $C$  点至  $AB$  的距离):

$$d = \frac{|A\lambda_3 + B\varphi_3 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \geq l$$

其中:  $A = \varphi_2 - \varphi_1$ ;  $B = \lambda_1 - \lambda_2$ ;  $C = \lambda_1(\varphi_1 - \varphi_2) + \varphi_1(\lambda_2 - \lambda_1)$ ;  $l$  为安全距离。

#### 1.6 航线的经济性对任务航行工况的约束

航天测量船的日消耗是相当可观的, 因此, 在任务航行工况设计时, 除考虑上述约束条件外, 还得适当考虑航渡期间(非任务航行工况)航行距离和时间, 以节约经费开支。假设启航点为  $A(\lambda_1, \varphi_1)$ , 第一测量点为  $B(\lambda_2, \varphi_2)$ , 任务结束点为  $C(\lambda_3, \varphi_3)$ , 返航终点为  $D(\lambda_4, \varphi_4)$ , 一艘测量船的航渡日消耗(包括燃油、水和人员消耗)为  $P$ , 则可以根据航渡航线计算出航行距离  $R_{AB}$ 、时间  $t_{AB}$  和距离  $R_{CD}$ 、时间  $t_{CD}$ , 航渡期间总消耗应满足下列约束条件:

$$P_{\text{总}} = \min \left\{ \frac{t_{AB} + t_{CD}}{24} \cdot P \right\}$$

航渡航行时间是由航渡航线航程和航速两个因素确定的, 因此应综合考虑。一般在经济航速下选择安全的最近航线为原则。由于这部分内容不属于任务航行工况, 这里不做详细分析。

### 2 基于知识规则的任务航行工况优化设计的软件开发

测量船任务航行工况的设计与优化过程, 就是利用上述约束模型, 对上述计算模型的计算结果进行一系列的推理、判断和决策的过程。为实现任务航行工况设计和优化的智能化和自动化, 结合电子海图技术, 开发了基于知识规则的任务航行工况设计与优化软件

我们采用了 J2EE 分布式计算平台建立基于规则的智能系统<sup>[9]</sup>, 对计算模型的计算结果和约束模型采用基于规则的知识表达方法, 以实现任务航行工况的设计约束、历史经验、领域知识的描述, 形成推理规则, 建立了推理规则知识库; 并利用智能推理引擎, 实现了规则判断和推理的自动化。基于知识规则的任务航行工况优化设计软件的设计策略流程图见图 2。

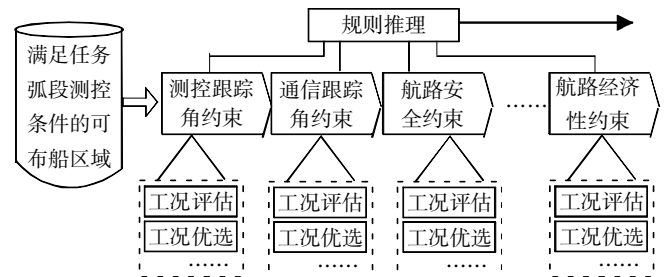


图 2 智能工况设计策略流程图

在某重大任务中, 某测量船任务航行工况的设计与优化工作中, 通过使用该软件系统极大地提高了任务航行工况设计的科学性、准确性、可靠性和工作效率。



### 3 实例分析

某重大航天发射任务中, 关键的人轨段测控和几次近地点变轨测控都在海上, 只有测量船可以提供测控支持。航天器轨道设计的特殊性决定了入轨点、几次近地点变轨点均不在同一位置, 距离跨度大; 各测量船不仅需要参加入轨段的测控任务, 还需参加入轨后至进入使命轨道前所有可见弧段的测控任务, 并确保关键的几次近地点变轨段的测控。对于几次近地点变轨段, 轨道偏心率越来越大、轨控时间越来越长, 要求轨控后提供的测轨弧段也越来越长。为提供最佳的海上测控支持, 确保任务的圆满, 测量船只能采用大范围机动的连续“追赶式”测控方式实施海上测控支持。

为了对该重大任务的测量船任务航行工况进行优化设计, 以提供最佳的海上测控支持, 我们建立了相应的计算模型和上述约束模型, 开发了基于知识规则的任务航行工况设计与优化软件, 实现了测量船复杂海域大范围连续机动测控的“追赶式”任务航行工况的优化设计。对应其三个发射窗口, 优化设计了相应的三个任务航行工况。实际任务使用了第一发射窗口, 即图 3 的任务航行工况优化设计方案得到了实战的检验。

该任务航行工况对航天器全部特定关键弧段的跟踪仰角满足全过程均处于  $7^{\circ} \sim 70^{\circ}$  之间的要求; 距离最近的碍航物大于 5 n mile, 远离岛国和城市; 任务结束点逼近返航靠港航线, 节省返航时间约 1 天, 减少航程约 400 n mile, 节约了经费开支; 各任务弧段匀速直线航行, 航速 12 kn, 航向满足测控天线和卫星通信天线视角可见, 无相互遮挡; 任务弧段进入前均有 4 h 的“任务进入”时间, 匀速直线航行, 航速航向同进入后的任务弧段, 满足惯导校准需要; 各任务弧段间(包括“任务进入”段)的机动航行段的航速不大于船舶最高航速的 80%, 满足机动航行要求。并且在卫星入轨段比总体要求多提供了 140 s 的测控支持, 为准确判断卫星入轨后的工作状态, 提供了宝贵的监视数据; 在关键的三次近地点变轨段比大总体要求分别多提供了 2、3、4 min, 大大提高了控后初轨计算精度。综上所述, 该任务航行工况设计结果的各项指标均优于总体要求, 满足

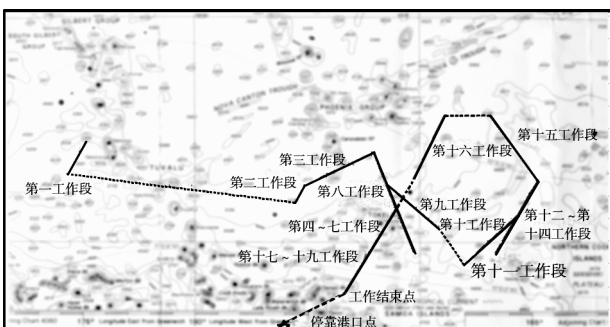


图 3 第一发射窗口某测量船任务航行工况设计结果

任务要求。

### 4 结束语

测量船任务航行工况的优化设计是任务准备过程中的一项很重要、也很复杂的工作, 航行工况设计结果的优劣, 将直接影响到任务完成的质量。对于只需要测量船提供单一弧段测控支持的某些任务, 其任务航行工况的设计相对比较简单, 但对于某些需要测量船连续提供多个弧段测控支持、各弧段的星下点位置跨度较大、海域复杂(如处于群岛区)的特殊任务, 任务航行工况的设计就相当复杂。本文是针对某特殊型号任务而研制的, 经任务实战检验, 模型正确、知识规则科学、软件设计灵活、操作使用方便, 提高了工作效率, 满足型号任务需要。

本文的设计思想和部分方法, 对其它船舶的航线设计, 特别是执行特殊任务的其它舰船有一定的借鉴作用。当然, 一个优良的设计方案是需要优秀的航海人去具体实现的。测量船任务航行工况的优化设计结果是作为测量船制定任务航行计划的依据。各船根据设计结果制作生成船舶自动驾驶系统的电子航行计划, 任务中可进行船舶自动驾驶。当然, 实际海域的洋流速度和流向、风的速度和风向与理论估计会有所差异, 甚至海图(包括纸制海图和电子海图)标识的碍航物或岛礁的位置与实际情况也不一定完全相同, 因此, 在驾驶时, 还得做好实时监控记录, 随时做好航行工况的实时微调(包括主机转速调整、舵角、航向调整等实时调整), 以确保按照设计的任务航线航行, 确保船舶的安全, 确保按计划准时准点到达任务进入点、任务起始点、任务结束点。航行过程中的航向调整范围和调整速度、航速调整速度等必须小于某规定的值, 以确保对航天器的正常跟踪和惯导输出精度。

在该型号的实时任务中, 气象水文资料收集全面, 分析正确, 参数适用准确, 任务中实际航行工况基本同设计方案, 航向偏差小于  $0.5^{\circ}$ , 同一时间节点的船位误差小于 200m, 满足了任务要求。

**致谢:** 在项目研究和论文的撰写过程中, 得到了不少专家和领导的帮助、指导和有关业务机关的大力协助, 张志兵船长、倪留国航海长等在项目的研究过程中提出了很多宝贵建议, 在此一并表示衷心的感谢!

\* 作者: 茅永兴, 中国卫星海上测控部 高级工程师 硕士  
张忠华, 中国卫星海上测控部 总工程师 高级工程师  
倪晓秋, 中国卫星海上测控部 工程师 硕士

#### 参考文献

- 1 刘林著, 航天器轨道理论, 北京, 国防工业出版社, 2000.
- 2 张玉祥编著, 人造卫星测轨方法, 国防工业出版社, 2007.
- 3 李济生, 人造卫星精密轨道确定, 北京: 解放军出版社, 1995.
- 4 陈芳允、贾乃华, 卫星测控手册, 北京: 科学出版社, 1993.
- 5 Michael Negnevitsky, Artificial Intelligence, ADDISON WESLEY, 2005.