

航天测量船 海上测控任务分析与设计方法

刘冰 傅敏辉 薛国虎 沐俊山 编著 I



国防工业出版社
National Defense Industry Press

航天测量船 海上测控任务分析 与设计方法

刘 冰 傅敏辉 薛国虎 沐俊山 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

航天测量船海上测控任务分析与设计方法/刘冰等
编著. —北京:国防工业出版社, 2015. 4

ISBN 978 - 7 - 118 - 09931 - 7

I. ①航… II. ①刘… III. ①测量船—海上测量—
研究 IV. ①U674. 82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 073997 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 8⁵/₈ 字数 246 千字

2015 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

《航天测量船海上测控任务分析与设计方法》 编审委员会

编著者 刘 冰 傅敏辉 薛国虎 沐俊山

主 审 张忠华

审 查 席震东 张海洋 周锦标 赵文华

程宇锋 叶建平

序

航天测量船是我国航天测控网的重要组成部分,承担了我国载人航天、月球探测、卫星导航、技术试验等重大航天工程航天器入轨段、早期轨道段海上测控任务,为我国航天事业发展做出了重要贡献。

与国外相比,我国的航天测量船在建设和使用上具有明显的中国特色,与陆上站相比,航天测量船也具有一些独特的技术特点。近几年来,从事航天远洋测控事业的工程技术人员比较注重试验理论的总结和发展,先后编著出版了以《航天测量船海上测控技术丛书》为代表的技术专著。《航天测量船海上测控任务分析与设计方法》从总体技术层面上阐述航天测量船海上测控任务及其实施过程,论述航天器海上测控任务分析与设计的要素、约束和方法,是对航天远洋测控试验理论的一种深化、丰富和补充。全书逻辑结构比较合理,论述层次上比较清晰,既有理论阐述,又有实践总结,反映了工程技术人员对航天测量船海上测控总体技术的理解和认识。

本书的使用对象为从事航天测控尤其是从事海上测控事业的工程技术人员、科技管理人员和高等院校相关专业师生。希望该书对广大读者理解和掌握航天测量船海上测控总体技术和系统分析方法能够起到实际的指导作用,有益于航天远洋测控学科建设和人才培养。

沈号骏

2014年9月

前 言

航天测量船海上测控任务分析与设计是一项重要的总体技术工作。测量船在海上是处于运动中的,在每一次实施航天测控任务前需要事先确定测量船测量工况和参试设备技术状态,分析完成海上测控任务的技术条件。即使在任务实施过程中,也可能因为气象海况、飞行异常、任务变化等因素主动地调整测量船测量工况来适应。

在《航天测量船海上测控技术概论》第7章“海上测控任务分析”中已经对海上测控任务分析与设计方法做了一定的阐述,但是编著者感到,作为一种系统分析方法,论述得不够全面和深入,有必要单独编著一本书,进行深化和补充。

本书主要围绕航天测量船海上测控任务的分析与设计方法,从航天器的轨道运动、跟踪几何分析、航天器姿态和天地信道分析出发,详细阐述海上测控的任务分析和设计的原理、方法。全书共分为7章,第1章为绪论,简要介绍了航天测量船的组成、海上测控任务主要环节和阶段划分,对海上测控任务的分析与设计进行界定。第2章阐述了航天器空间运动的轨道特性,重点介绍了各类航天器的发射飞行过程和轨道特性。第3章阐述了地面测控站对航天器跟踪时几何关系,介绍了地图投影、常用坐标系等知识,重点描述了地面设备与航天器相对的位置关系与分析方法。第4章阐述了根据目标的轨道和姿态分析天地之间的信道电平的方法,详细介绍了航天器姿态计算方法、地面测控站与航天器间的电平计算方法。第5章阐述了海上测控任务设计时需要考虑的约束条件,对船载测控设备跟踪性能、测控通信

天线视角、光学测量系统跟踪条件、航天器与通信卫星信号覆盖等主要约束条件进行深入分析。第6章阐述了海上测控任务设计的具体步骤,详细描述了航天测量船工况设计与评估、任务参数的确定、测量精度评估等方法。第7章阐述了海上测控任务分析与设计的结果进行仿真验证,介绍了基于STK开展计算机仿真验证的方法,介绍了通过天地对接、联调演练、任务数据分析与评估等海上测控任务仿真验证方法。第1章由刘冰编写,第2、4、6章由傅敏辉编写,第3章由沐俊山编写,第5、7章由薛国虎编写,全书由刘冰统稿。

本书在编写过程中得到中国卫星海上测控部及所属技术部领导、机关的关心、支持,倪晓秋、朱利伟等为本书编写做了资料整理等辅助工作,张忠华高工对全书进行了认真的审阅,提出了许多宝贵的修改意见,沈荣骏院士为本书做了序,在此一并深表感谢。也利用本书出版的机会,向长期从事航天测控总体技术尤其是航天海上测控总体技术的前辈专家表示敬意,本书正是在他们工作的基础上总结产生的。

由于水平有限,本书难免有错误和疏漏之处,诚请读者予以指正。

编著者

2014年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 航天测量船	2
1.1.1 船舶总体性能和布局	3
1.1.2 测控通信主要设备	4
1.1.3 主要应用特点	6
1.2 航天器海上测控任务	7
1.2.1 航天器海上测控任务类型	7
1.2.2 航天器海上测控任务阶段划分	8
1.2.3 航天器海上测控任务主要技术环节	9
1.3 海上测控任务分析与设计过程	12
第 2 章 航天器的运动	14
2.1 航天器的轨道	14
2.1.1 航天器轨道的基本定律	15
2.1.2 航天器轨道的 N 体问题	17
2.1.3 航天器轨道的二体问题	19
2.2 航天器的发射飞行	26
2.2.1 航天器发射程序	26
2.2.2 发射场与轨道关系	28
2.2.3 发射弹道	30
2.2.4 航天器发射窗口	31
2.3 航天器在轨飞行	33
2.3.1 静止卫星的轨道转移	33
2.3.2 航天器的受摄运动	35

2.3.3	摄动运动方程	38
2.3.4	轨道机动	38
2.4	航天器返回飞行	39
2.4.1	航天器再入	39
2.4.2	空气动力	40
2.4.3	弹道式再入	41
2.4.4	弹道-升力式再入	41
2.4.5	升力式再入	42
2.5	航天器轨道特性	42
2.5.1	太阳同步轨道	42
2.5.2	临界和冻结轨道	45
2.5.3	回归轨道	46
2.5.4	静止轨道	49
2.6	月球探测轨道	56
2.6.1	地月关系	56
2.6.2	地月运动轨道类型	56
2.6.3	地月运动轨道的计算方法	58
2.7	飞行程序	60
2.7.1	发射入轨段	60
2.7.2	转移轨道段	60
2.7.3	运行轨道段	61
2.7.4	返回轨道段	61
第3章	跟踪几何分析	62
3.1	地图投影	63
3.1.1	地图投影的分类	63
3.1.2	长度比、面积比和角度变形	66
3.1.3	等角、等面积、等距离投影	70
3.1.4	正轴圆柱等角投影	73
3.1.5	规则网和横断网	74
3.1.6	球面透视方位投影的性质	79

3.2	常用坐标系	81
3.2.1	地平坐标系	82
3.2.2	测站赤道坐标系	82
3.2.3	地心赤道坐标系(Ⅰ)——惯性坐标系	83
3.2.4	地心赤道坐标系(Ⅱ)——轨道混合坐标系	84
3.2.5	地心赤道坐标系(Ⅲ)——固定地球坐标系	84
3.3	测控分析的天球几何方法	85
3.3.1	地面相对空间几何	85
3.3.2	地面观察的卫星视运动	92
3.4	测控分析的直角坐标方法	96
3.4.1	星下点轨迹	96
3.4.2	跟踪参数的计算	100
3.5	日月的位置	101
3.5.1	日月的位置计算	101
3.5.2	日出、日落和地影计算	103
第4章	天地信道分析	107
4.1	航天器的姿态	107
4.1.1	运载火箭飞行姿态	107
4.1.2	航天器飞行姿态	108
4.2	运载火箭的跟踪天线角计算	111
4.2.1	坐标系定义	112
4.2.2	各坐标系转换	112
4.3	航天器的入轨姿态要求及计算	114
4.3.1	入轨姿态	115
4.3.2	入轨姿态的计算	118
4.4	航天器天线的覆盖	119
4.4.1	卫星天线波束宽度与覆盖范围	119
4.4.2	卫星天线偏置安装时的覆盖范围	120
4.5	无线测控信道的电平关系	123
4.5.1	接收机输入端的信噪比	123

4.5.2	无线信道参数的估算	124
4.5.3	信号损耗	125
4.5.4	接收机输入端噪声	128
4.5.5	接收机输入端信号功率与工作频率的关系	130
4.6	天地链路计算示例	131
4.6.1	雷达方程	131
4.6.2	链路分析	134
第5章	约束条件分析	136
5.1	跟踪性能约束	136
5.1.1	满足测控弧段覆盖要求	136
5.1.2	满足设备跟踪性能要求	138
5.2	视角约束	142
5.2.1	天线视角计算方法	144
5.2.2	口面天线间遮挡详细计算	145
5.3	日凌约束	148
5.3.1	日凌与星蚀产生的原因	148
5.3.2	日凌预报流程	149
5.3.3	测控日凌分析	153
5.4	其他约束条件分析	154
5.4.1	通信卫星覆盖范围分析	154
5.4.2	气象条件约束	156
第6章	海上测控任务设计	157
6.1	测量海域确定	157
6.1.1	单艘测量船的海上布站	157
6.1.2	测量船船队的联合布站	161
6.2	测量工况设计	168
6.2.1	单弧段测量工况设计	168
6.2.2	基于测量工况自动化设计技术的 多弧段工况设计	171
6.2.3	基于模糊综合评估的测量船工况	

设计优化技术	174
6.2.4 测量工况设计实例	184
6.3 任务参数确定	186
6.3.1 跟踪段次分析与参试系统工作策略确定	187
6.3.2 飞行偏差管道分析与引导捕获方案确定	191
6.3.3 船载测控通信设备抗浪性分析与 可测控海况等级确定	194
6.3.4 电磁兼容分析与锁相源频率设置	195
6.3.5 船位偏差要求分析	203
6.4 测量精度保证	204
6.4.1 四矢量误差系统控制法的提出	204
6.4.2 测量船的主要误差源	206
6.4.3 四矢量误差影响分析及仿真	209
6.4.4 测量精度保证	215
第7章 海上测控任务仿真验证与评估	217
7.1 基于STK的测控仿真验证	217
7.1.1 基于STK的仿真验证简介	218
7.1.2 基于STK的海上测控任务仿真与验证	227
7.2 海上测控过程的仿真与验证	246
7.2.1 天地接口验证	246
7.2.2 船内联调	251
7.2.3 测控网联调演练	254
7.3 任务数据的分析与评估	257
7.3.1 遥测数据的分析与评估	257
7.3.2 外测数据的分析与评估	257
参考文献	263

第1章 绪 论

航天任务是人类运用航天技术实现探索宇宙、开发太空、对地观测和卫星应用等目标的系统工程。经过几十年的航天实践,航天任务已经从近地空间科学探测扩展到深空探测和载人航天,延伸到通信、导航、遥感、气象等诸多应用领域。航天任务是一项涉及面十分广泛的工程,需要航天器与运载器、发射场、测控网和应用等系统相互配合,组成航天工程系统。航天任务是一个国家综合国力、科技水平的体现,涉及经济、科技、政治、军事等多种因素,包括航天器、运载器等工程子系统的研制建设以及发射、测控、运行管理、应用等诸多环节,涵盖了技术、进度、经费等多个剖面,可以分解为有机联系的航天工程子系统、分系统任务。

在航天工程系统中,航天器是完成航天任务的核心,运载器是实现航天活动的前提,运载器将航天器送入初始轨道。发射场是航天器和运载器从地球表面的出发港,测控网是航天器发射和运行过程的支持系统,从运载器发射起飞到航天器入轨、在轨运行直到其寿命结束,由测控网保持对运载器和航天器的跟踪、测量、控制和获取航天器的数据。航天测量船是航天测控网的重要组成部分,主要完成航天器飞经海洋上空时的测控支持任务。

航天测控网的基本任务是测量和控制航天器的运动状态和工作状况,为航天器从发射到任务使命结束提供支持服务。到目前为止,为了适应不同的航天任务,世界航天大国已经建立功能和性能区别明显、与其航天任务相协调的不同类型的航天测控网。从一般意义上来说,航天器的发射和早期轨道段需要建立一个覆盖发射轨道和早期轨道的测控网支持;近地航天器由于运行期间数据传输容量大、每天对地面站访问时间较短,因此采用中继卫星为主进行支持是理想的选择;深空航天器由于飞行

距离远、导航要求高,需要建立专门的深空测控网。我国的航天测控网是和我国航天中长期目标及航天工程使命任务相协调的统一的灵活的开放的测控网,主要由任务中心、中继卫星、导航卫星、陆基测控站和航天测量船构成。航天测量船主要承担航天器发射及入轨阶段、早期轨道阶段测控支持任务,对载人航天器来说,航天测量船往往承担入轨、运行和返回阶段关键段落的测控通信任务,在无中继卫星支持的情况下,还是提高轨道覆盖率的重要手段。

航天任务分析与设计是航天任务的顶层设计工作,是每一项航天工程开始阶段必须首先进行的工作,是根据航天器用户提出的任务目标,经分析、论证,在设定的经费、进度和各种约束条件下,将航天系统的诸多要素和任务剖面综合起来进行系统分析,提出若干个能够满足用户要求的备选方案,经过比较、择优后提出航天任务可行性总体方案,作为航天任务立项的基础和开展方案设计、关键技术预研攻关的依据。

航天测量船和陆基测控站、中继卫星一起在航天任务中心的统一组织和协调下完成航天测控任务。从本质上来说,航天测量船是一种可移动的承担航天器海上测控任务的测控站,既有和陆基测控站相同的功能,也具有明显区别的特点,这些特点决定了航天测量船完成海上测控任务独具特色的技术方法。本书从总体技术剖面阐述航天测量船海上测控任务及其实施过程,论述航天器海上测控任务分析与设计的要素、约束和方法。本章首先介绍我国“远望”号航天测量船的组成、主要功能、技术特点和使用特点,介绍海上测控任务及其分析和设计过程。

1.1 航天测量船

航天测量船属于特殊用途海洋船舶,是一个在海上活动的航天测控平台,它是船舶与测控通信设备的有机结合。测量船由船舶系统和试验装备系统两大部分组成。船舶系统就是船舶平台,是试验装备和人员在海上工作的载体。为了满足航天器海上测控任务,对船舶有一些特殊要求,但总体上还是要满足海洋船舶建造的各种规范,它的主要部分与普通海洋船舶相近,所以通常称为常规系统;试验装备系统是为完成各类海上

测控任务所配置设备的总称,它是一般船舶所不具备的特殊装备集合,所以称为特殊装备系统,简称特装系统。常规系统由船体、动力系统、航海系统、气象系统、常规通信系统组成。特装系统由测控系统和试验通信系统(简称通信系统)组成,也称为测控通信系统。关于航天系统工程以及我国航天测量船的组成、技术体制和特点,建议读者查阅参考文献[1],为了阅读本书的方便,这里只做简要的介绍。

1.1.1 船舶总体性能和布局

“远望”号航天测量船有较高的航海性能和船舶操纵性能,能在一年四季安全航行于三大洋南北纬 60° 以内的海域;6 级海况以下能进行有效测控,12 级风能安全航行;以 18 节航速航行时,续航力达到 18000nm;额定船员条件下,自持力达到 100 天。

为了提高船舶稳性选择了合适的波浪摇摆参数,设置了减摇鳍。船体结构刚度强、变形量小。选择的测量航速和航行航速,通常避开特装设备与主机振动的耦合。

测量船的总布置采用两层纵通甲板,两层平台甲板,长上层建筑,主机、辅机舱和驾驶室在船的两头,采用舯后机型,驾驶室靠船艏。特装大型天线沿船的纵中线依次布置在船舯前后范围,工作视角相对开阔,相应的工作舱室布置在对应系统天线的附近,甲板和舱室预留了扩展的空间。

测量船测控通信设备采用了各系统相对集中的总体布局原则,主要测控天线布置于船舶中间部位,在艏艉线上依次设置,船舶、通信、气象系统天线布置满足船舶设计规范要求,各种天线的布局要保证其工作视角,满足电磁兼容要求,满足测控系统的测量精度要求,同时要兼顾测量船整体美观。

舱内测控通信设备原则上按系统相对集中,惯性导航系统一般布置在全船稳性中心,无线电跟踪测控设备和船载卫通站舱内设备应在其天线的附近,发射机房和天线应尽可能靠近,以减少馈线损耗,测控、通信、气象设备应具备良好的工作环境。

甲板面布局时原则上特装天线应尽量远离烟囱、通气筒及上层建筑等金属物体。空间许可情况下,天线之间应尽量远离。同时工作的短波

发射天线之间的水平距离一般不小于其中较短天线的长度。大型天线朝天时口面基本在同一水平面上。大型测控天线在布局时要同时考虑它的海上标校问题。航天测量船的布局效果如图 1-1 所示。

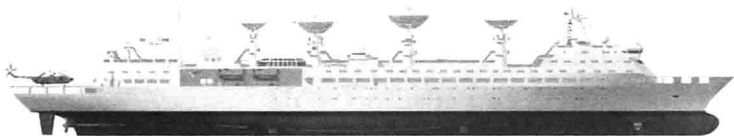


图 1-1 航天测量船布局效果示意图

1.1.2 测控通信主要设备

我国的航天测量船是采用单站定位体制的综合测量船,其测控通信能力是根据我国航天发射、测控总体规划和布局确定的,也随着航天任务的发展而不断得到补充和增强。测量控制设备是直接跟踪测控航天器的设备,它包括脉冲雷达,C 频段、S 频段、X 频段微波统一系统,遥测设备,光学测量设备等。

脉冲雷达的主要任务是完成运载火箭、航天器弹道测量,兼顾返回式航天器再入段目标回波特性的测量,其主要功能是单站对合作目标进行反射式和应答式精密跟踪和轨道测量,单站对非合作目标进行反射式精密跟踪和轨道测量,具有多台同频雷达对同一合作目标多站测量能力,具有自引导捕获能力,可实时提供被测目标的方位、仰角、距离。

统一载波测控系统(又称微波统一测控系统)是指一个载波调制若干个测控信号,以完成多种功能的综合无线电测控设备。它同时具有对航天器进行跟踪、测轨、遥测、遥控和通信等多种功能。S 频段测控系统(USB)既具备标准 TT&C 和扩频 TT&C 的相干测量体制,也具备扩频 TT&C 的非相干测量体制。和陆上 USB 设备的重要区别之一是船载 USB 设备还合建了 S 频段 PCM-FM 遥测的功能,具备测角、测距、测速、编码遥测、遥控、上行话音和数传等功能。C 频段统一测控系统(UCB)采用非相干测量体制,具备测角、测距、遥测(含编码遥测和模拟遥测)和遥控功能。和 USB 相比,UCB 具备自旋稳定卫星的同步控制功能。X 频段统一测控系统(UXB)采用相干测量方式,具备测角、测距、遥测和遥控功能。

配置在测量船上的光电经纬仪,除了通过测量恒星校准惯导设备航向等功能外,对光学可见的飞行目标也具备一定的角度测量功能,增装了中波红外功能的光电经纬仪同时具备对红外特征较明显的飞行目标进行红外光学测量,因此经纬仪可以作为光学测量设备具备对飞行目标进行中波红外景像测量和角度测量能力。

为了配合船载无线电和光学精密跟踪测量设备的跟踪测量,设置了船姿船位测量系统,同步测量船体的位置和姿态数据,为跟踪测量设备提供位置姿态基准。船姿船位测量系统由惯性导航设备(简称惯导)、卫星导航设备(简称卫导)、船体变形测量设备、标校经纬仪(光电经纬仪)组成。惯性导航设备主要用于测量船体在地理坐标系的船位(经、纬度)和地平坐标系的精密姿态,即航向、纵摇、横摇,惯导输出的船位,随时间积累漂移,所以要用卫导的船位进行修正。惯导的航向数据也是有漂移的,要用标校经纬仪测星确定的航向数据进行校准。测量船地平坐标系的原点为惯导的三轴中心,跟踪测量设备与惯导都有一定的距离,精密跟踪测量时船体不能被近似为一个刚体,所以跟踪测量设备基座与惯导基座间要用变形测量设备来测量三个方向的变形量。关于这些坐标系的定义和关系,可以参阅参考文献[1]。

为了对全船的无线电和光学跟踪测量设备和船姿船位测量设备的各种测量元素进行集中式实时和准实时处理,实时处理无线电测控设备接收的航天器遥测数据,实施遥控发令,对航天器飞行过程、任务实施状况、设备状态参数进行监视显示,还将各设备连接到一个有机的实时数据交换网络上,并配置集中式实时数据处理设备(即中心计算机系统)和监视显示设备。因此,测量船测控系统由无线电测量控制设备、光学测量设备、船姿船位测量设备和船中心计算机系统与监视显示设备组成。

测量船的试验通信主要承担实施海上测控任务时与航天任务中心的岸船通信任务,平时是与陆上航渡调度室通信;在载人航天飞行时完成海上天地通信任务,在载人飞船与航天测量船间传输双向话音和接收下行高速数据中的图像信息;承载船内测控数据传输和实现调度、电话、图像等业务,为测控系统提供标准时间和频率。

岸船通信的主要手段是卫星通信船载站。航天测量船一般配置三套