



航天测量船海上测控技术丛书

航天测量船 船姿船位测量技术

主编 潘良



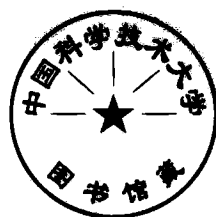
国防工业出版社

National Defense Industry Press

航天测量船海上测控技术丛书

航天测量船 船姿船位测量技术

主编 潘良



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

航天测量船船姿船位测量技术 / 潘良主编. —北京:国防工业出版社, 2009. 1

(航天测量船海上测控技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 05918 - 2

I. 航... II. 潘... III. 航天 - 测量船 - 技术测量 IV. V556

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 129223 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 8¼ 字数 230 千字

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 26.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

《航天测量船船姿船位测量技术》 编审委员会

主任委员 简仕龙

副主任委员 郭裕芳 张忠华

委 员 周朝猛 陈一兵 席震东 费加兵

程宇锋 朱伟康 姜 良 董 杰

赵文华

秘 书 徐一新 陈小进 张 伟

《航天测量船船姿船位测量技术》 编 写 组

主 编 潘 良

副主编 陈嘉鸿

编著者 刘新明 王 珏 黄晓娟

主 审 江文达

序

在我国航天事业走过半个世纪、取得举世瞩目的巨大成就之际，我国的航天远洋测控事业也经历了 30 年的风风雨雨。

30 年来，从事航天远洋测控事业的广大科技人员，自力更生，严谨求实，开拓创新，团结奋斗，自行设计、研制建造了 6 艘“远望”号测量船，先后 50 多次远征太平洋、印度洋、大西洋，圆满完成了 60 余次各类航天器发射的海上测控任务，为我国航天事业的发展做出了重大贡献，成为我国航天测控网不可缺少的重要组成部分。

回顾 30 年来走过的建设与发展道路，我国航天远洋测控技术水平逐步提高，试验能力不断增强，在圆满完成各类航天器发射海上测控任务的同时，取得了一个又一个的跨越；几代工程技术人员投入毕生的精力与智慧，付出辛勤的劳动与汗水，积累了丰富的实践经验，建立了比较完善的航天远洋测控试验体系，并取得了丰硕的科技成果。为了系统、全面地总结航天远洋测控理论和实践成果，培养和造就年轻人才，巩固和推进航天远洋测控事业又好又快发展，值此 30 周年之际，编写一套《航天测量船海上测控技术丛书》，具有十分重要的意义。

这套丛书共 8 册，包括《航天测量船海上测控技术概论》、《航天测量船测控通信设备船摇稳定技术》、《航天测量船船姿船位测量技术》、《航天器轨道确定的单位矢量法》、《航天测量船船姿数据处理方法》、《航天测量船气象保障技术》、《航天测量船航海保障技术》和《航天测量船测控通信设备标校与校飞技术》。丛书系统、全面地介绍了航天测量船海上测控通信和航海气象保障的理论基础、相关技术和最

新成果,注重分析测量船完成航天远洋测控任务特有的技术体制、技术途径和技术环节,既概略介绍了一般基础理论和航天远洋测控全貌,又着重讨论了具有海上测控特色的技术内容,具有系统全面、侧重技术、体现特色、注重实用的特点。

丛书的使用对象是从事各类航天器测控包括海上测控事业的广大工程技术人员和科技管理人员。希望这套丛书能够对广大读者了解和掌握航天海上测控技术起到实际的指导作用,不断提高海上测控科研试验技术水平,促进航天远洋测控事业人才培养工作,为推进我国航天事业又好又快发展发挥有益的作用。

沈奇骏

二〇〇八年二月廿八日

前 言

《航天测量船船姿船位测量技术》是《航天测量船海上测控技术丛书》中的一个分册,主要论述航天测量船船姿船位和船体变形测量的相关技术问题。船姿船位和船体变形测量是航天测量船与一般陆上测控站不同的主要特点之一,也是影响海上测控精度的主要因素。

全书共7章,约20余万字。第1章绪论从海上测控对船姿船位和船体变形测量的需求分析入手,介绍了船姿船位和船体变形测量的相关技术,以及航天测量船船姿船位系统的组成——以惯性导航系统为核心设备的组合导航系统。第2~4章分别介绍惯性导航、组合导航和船体变形测量相关技术。第5章主要介绍航天测量船惯导系统的使用特点及其误差控制技术。第6章介绍信息融合技术、GPS测姿技术和静电陀螺监控器等新技术在船姿船位系统中的应用。由于装备了静电陀螺监控器的新测量船惯性导航设备的精度鉴定目前还没有国军标可以参考,特别安排第7章给予介绍。

本书第4章由陈嘉鸿编写;第3章中的天文导航及光学经纬仪相关内容由刘新明编写,卫星导航相关内容由黄晓娟编写;第7章及第6章静电陀螺监控器技术相关内容由王珏编写;其余章节内容编写及全书统稿工作由潘良完成。

中国卫星海上测控部资深老专家江文达对本书进行了多次认真审核,并提出许多宝贵的修改意见,在此表示衷心感谢。

本书的编著工作是在中国卫星海上测控部领导下进行的,得到了

试验技术部、远望号测量船等单位的大力支持,在此一并表示感谢!

由于我们的水平有限,错误之处在所难免,请读者批评指正。

编著者

2008 年 3 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 海上测控对船姿船位和船体变形测量需求	1
1.1.1 船姿船位测量元素	1
1.1.2 船体变形测量元素	4
1.1.3 航天测量船对船姿船位系统的精度要求	5
1.2 船姿船位系统概述	7
1.2.1 船姿船位测量相关技术	7
1.2.2 船姿船位系统的基本组成	10
1.2.3 船姿船位系统的发展过程	11
第2章 惯性导航技术	16
2.1 概述	16
2.1.1 惯性导航技术的发展简史	16
2.1.2 惯性导航技术现状	17
2.1.3 我国惯性导航技术的发展水平	18
2.1.4 惯性导航技术发展趋势	19
2.2 惯性导航基本工作原理	21
2.2.1 惯性导航简化原理	21
2.2.2 实现惯性导航的技术关键	22
2.2.3 惯性导航系统的类型	24
2.2.4 固定方位半解析式惯性导航系统基本原理	25
2.3 航天测量船惯性导航系统	31
2.3.1 惯性平台	31
2.3.2 电子机柜	37
2.3.3 显示控制台	46

2.4	无阻尼惯性导航系统分析	48
2.4.1	惯性平台各环节的传递函数	48
2.4.2	舒勒调整条件的应用	54
2.4.3	无阻尼惯性导航系统方程	60
2.5	外水平阻尼惯性导航系统	67
2.5.1	内水平阻尼	68
2.5.2	外水平阻尼惯性导航系统	72
2.6	惯性导航系统的初始校准	75
2.6.1	初始校准的原理	75
2.6.2	平台姿态粗校准	77
2.6.3	水平精校准	78
2.6.4	方位精校准	81
2.7	惯性导航系统的综合校准	83
2.7.1	OE PQ 坐标系和 Ψ 误差方程	83
2.7.2	两点校方案	87
2.7.3	三点校方案	92
第3章	组合导航技术	101
3.1	概述	101
3.2	计程仪测速系统	104
3.3	卫星导航定位系统	106
3.3.1	GPS	106
3.3.2	GLONASS	116
3.4	天文导航	118
3.4.1	天文导航的常用天球坐标系	118
3.4.2	天文导航的计算方法	121
3.4.3	天文导航在航天测量船的应用模式	128
3.5	光学经纬仪	128
3.5.1	标校经纬仪的系统组成	129
3.5.2	标校经纬仪的主体结构和总体布局	130
3.5.3	标校经纬仪的接口关系	132

3.6 经纬仪测星校航向精度分析	133
3.6.1 经纬仪测星校航向的数学模型	133
3.6.2 经纬仪测星校航向的误差分析	136
第4章 船体变形测量技术	139
4.1 概述	139
4.1.1 船体变形角的定义	139
4.1.2 变形测量设备的布局	139
4.2 变形测量方法和基本原理	141
4.2.1 变形光电测量的基本原理	141
4.2.2 挠曲变形测量和扭曲变形测量	143
4.2.3 变形大钢管的安装措施	144
4.3 变形测量设备组成	146
4.3.1 机械部分	146
4.3.2 光电测量部分	147
4.3.3 光电转换和数据采集部分	148
4.4 变形测量数据的使用	152
4.4.1 变形角及正负号规定	152
4.4.2 欧拉角与坐标变换	153
4.4.3 变形角与欧拉角的关系	155
4.5 船体变形测量误差分析	158
第5章 船姿船位系统误差控制技术	161
5.1 船姿船位系统误差影响分析	161
5.1.1 对引导数据的影响	161
5.1.2 对外测精度的影响	162
5.2 影响船姿船位精度的主要因素	163
5.2.1 影响船位精度的因素	163
5.2.2 影响姿态角精度的因素	165
5.2.3 船体变形影响因素及船舶压载调整	168
5.3 船姿船位系统的误差控制	170
5.3.1 航天测量船惯性导航的使用特点	170

5.3.2	惯性导航海上启动的保障条件和对准精度	171
5.3.3	陀螺漂移逐次启动误差和稳定时间	173
5.3.4	陀螺漂移的航向效应	173
5.3.5	船舶机动对惯导系统的影响	174
5.3.6	惯性导航校准流程安排和航行保障条件	176
第6章	新技术在船姿船位测量中的应用	179
6.1	信息融合技术	179
6.1.1	概述	179
6.1.2	联邦卡尔曼滤波理论	184
6.1.3	信息融合技术在船姿船位测量中的应用	198
6.2	GPS 测姿技术	202
6.2.1	GPS 测姿的基本原理	202
6.2.2	GPS 测姿技术现状与发展方向	207
6.2.3	工程应用可行性分析	209
6.2.4	GPS 测姿技术在测量船的应用	211
6.3	静电陀螺监控器技术	214
6.3.1	静电陀螺仪	214
6.3.2	静电陀螺导航/监控器系统	219
6.3.3	测量船静电陀螺监控器系统简介	223
第7章	惯性导航设备精度鉴定	231
7.1	保障条件	231
7.1.1	惯性导航设备工作环境	231
7.1.2	精度鉴定设备	232
7.1.3	对系统外部信息的要求	232
7.1.4	船舶航行工况要求	232
7.2	试验项目及方法	234
7.2.1	系泊状态的精度鉴定试验	234
7.2.2	码头启动方式的动态精度鉴定试验	238
7.2.3	海上启动方式的动态精度鉴定试验	238
7.2.4	赤道海区系统性能试验	240

7.3 精度评定方法	242
7.3.1 位置精度评定方法	243
7.3.2 姿态角精度评定方法	244
7.3.3 速度精度评定方法	244
参考文献	246

第 1 章 绪 论

1.1 海上测控对船姿船位和船体变形测量需求

1.1.1 船姿船位测量元素

航天测量船是一座海上活动测控站,在辽阔的海洋上对导弹、航天器进行跟踪、测量和控制。

我国大部分测量设备是使用极坐标的单站定位体制,主要的三个测量元素为 R 、 E 、 A ,其中 E 为俯仰角, A 为方位角, R 为外测设备三轴中心到目标的径向距离。图 1-1 为陆基单站极坐标体制示意图, R_c 、 E_c 、 A_c 为空间目标 S 在测量坐标系 $O_c - x_c y_c z_c$ 中的某一时刻实测值, x_c 、 y_c 、 z_c 为其直角坐标。

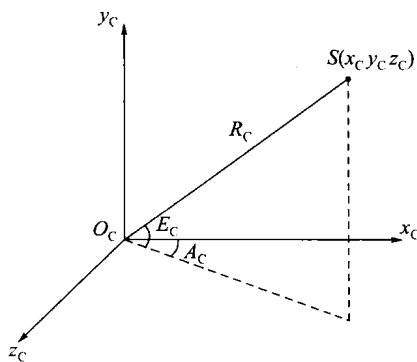


图 1-1 单站极坐标定位体制

R_c 、 E_c 、 A_c 和 x_c 、 y_c 、 z_c 之间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_c \cos E_c \cos A_c \\ R_c \sin E_c \\ R_c \cos E_c \sin A_c \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

在导弹航天器测控数据处理时,航区各测量设备需要经过“测量坐标系→地平坐标系→地心固连坐标系”之间的坐标转换与发射点建立联系。

测量坐标系到地平坐标系之间的坐标变换,需要知道设备测量坐标系相对地平坐标系三个轴之间的三个旋转量 γ 、 α 、 β , γ 、 α 、 β 为测量坐标系到地平系的三个欧拉角。“测量坐标系→地平坐标系”之间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

式中 x_D 、 y_D 、 z_D ——地平坐标系的坐标值;

C ——测量坐标系到地平坐标系的转换矩阵。

$$C = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}$$

陆基测控站在设备安装时尽量将这三个旋转量控制得很小,即测量坐标系尽量向地平坐标系靠齐,即在设备安装时尽量将基座调整到当地水平面,方位基准指向正北方向。剩余误差用基座的大盘不水平度和方位零位来表示,并在数据处理中加以修正。

地平坐标系到地心固连坐标系的坐标变换,需要知道测控设备三轴中心的地理位置信息 λ 、 φ 、 h , λ 为地理经度, φ 为地理纬度, h 为高程(相

对地球参考椭球面的高度)。“地平坐标系→地心固连坐标系”之间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

式中 x_G, y_G, z_G ——地心固连坐标系的坐标值;

D ——地平坐标系到地心固连坐标系的转换矩阵。

$$D = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ \cos\lambda & \sin\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}$$

式(1-3)中, x_0, y_0, z_0 是设备三轴中心在地心固连坐标系的位置坐标,用下式算出:

$$\begin{cases} x_0 = (N + h) \cos\varphi \cos\lambda \\ y_0 = (N + h) \cos\varphi \sin\lambda \\ z_0 = [N(1 - e^2) + h] \sin\varphi \end{cases}$$

式中 N ——测控站所在位置卯酉圈的曲率半径。

$$N = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}$$

式中 a ——地球椭球赤道半径;

e^2 ——地球偏心率平方。

陆站测控设备三轴中心的地理位置可以通过大地测量精确获得,并且是固定不变的。

上述的坐标变换过程表明,陆站测控设备除了 R_c, E_c, A_c 三个测量元素外,还隐含6个已知的测量元素: γ, α, β 和 λ, φ, h 。

与陆站测量不同,航天测量船执行海上测控任务是在动态条件下进