

SPACEFLIGHT

郝岩 编著



航天测控网

郝岩 编著

国防工业出版社

• 北京 •

图书在版编目(CIP)数据

航天测控网/郝岩编著. —北京:国防工业出版社,
2004.1

ISBN 7-118-03297-2

I. 航… II. 郝… III. 航天器—测量控制网
IV. V556

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 096631 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 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 14 $\frac{1}{2}$ 383 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

钱学森致郝岩的一封信

(代序)

郝岩同志：

您编著的《航天测控网》书稿我已收到。

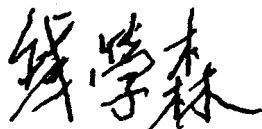
我国的导弹、航天事业从创建至今，走过了45年的光辉历程。我们当年开创这一事业，走的是独立自主，自力更生的道路。用今天的话说，就是我们从中国的实际出发，走出了一条中国特色的航天之路。

航天测控网是航天系统工程的重要组成部分，许多技术上的创新也是有中国特色和时代特征的。您多年从事航天测控工作，并有建树。今天能将航天测控网的各种技术综合集成起来，再加上您多年的感性经验知识，编写成这本《航天测控网》的技术读物，是一件十分有意义的事情。

您身体不好，还努力完成这部著作，我要向您表示祝贺。

此致

敬礼！



2003年1月16日

前 言

1967年初,笔者有幸调入中国西安卫星测控中心从事技术工作,并经历了几十次航天飞行任务。西安卫星测控中心是一个集航天测控网设计、建造、管理和使用为一体的技术单位,汇集了与航天测控技术有关的各学科专业人才,是一个有开拓精神、有创造力的集体。

“863”计划倡导者之一,已故科学院院士陈芳允直至上世纪80年代初一直是这个单位的技术带头人。航天测控网中,测控系统许多重大项目的论证、顶层设计工作都是由陈芳允院士牵头完成的。

航天测控网是航天工程的组成部分。几十年的航天工程实践,造就了一批航天测控工程人才,也取得和积累了适应飞行任务需求的航天测控工程技术成果和感性经验。其中许多技术成果,由于历史的原因,有别于西方航天机构的技术途径,具有独创性、原创性。

多年来,笔者一直设想将西安卫星测控中心技术群体的技术成果和感性经验,加以归纳,形成一本航天测控专业的技术性读物,这一设想直到今天才得以实现。

在这本读物中,为说明航天测控网在航天工程中的作用和航天测控网所依赖的相关技术,第1章概要地介绍了航天工程,第2章介绍了航天测控基础技术。第3章至第6章阐述了航天测控网的集成技术、航天测控网运行机理以及航天飞行任务的组织实施等问题。这4章内容,是笔者对西安卫星测控中心技术群体多年工程实践的总结。毫无疑问,对笔者来说,由于知识面局限,完成这样一本读物是有困难的,因此,疏漏之处在所难免,敬请读者批

MAH 12/01

评指正。

在此特别应提到的是,凡跨越性航天工程实践,笔者都曾得到著名科学家钱学森的指导和鼓励,借此深表谢意。

另外,还要感谢北京航天指挥中心席政主任,本书所用星下点和观测几何计算软件是由他完成的。还要感谢装备指挥技术学院秦晏豪教授,本书轨道测量技术参考了他的授课资料。

郝岩

2002年6月18日

内 容 简 介

本书是一部从航天系统工程角度撰写的航天测控网专著,着重论述航天测控网的集成技术和运行技术,其中的航天器上行操作模式和航天测控网运行模式是我国航天工作者独创的技术方法。全书共分6章。第1章和第2章简要地介绍航天工程和设计航天测控网的基础技术;第3章论述航天测控网的功能、结构、布局和对航天器的测控方法等问题;第4章论述航天测控网的运行技术;第5章分析星网故障类型及对策;第6章介绍飞行任务的实施等问题。后4章的内容是作者多年工程实践的总结,其显著特点是实用性。

本书可供从事航天测控专业的系统设计人员借鉴、使用,也可作为高等院校航天测控专业的教材和研究生的参考书。



目 录

引言	1
第 1 章 航天工程	4
1.1 结构要素及工程结构	4
1.2 结构要素	7
1.2.1 航天器	7
1.2.2 运载器	13
1.2.3 航天发射场	15
1.2.4 航天测控网	19
1.2.5 有效载荷管理系统	21
1.2.6 用户终端/应用系统	22
1.2.7 着陆场	23
1.2.8 航天员系统	25
1.3 结构要素间的接口	25
1.3.1 结构要素的相关矩阵	26
1.3.2 接口关系的基本内容	27
第 2 章 航天测控基础技术	31
2.1 坐标系	31
2.2 时间计量系统	33
2.2.1 恒星时、太阳时和世界时	34
2.2.2 历书时	35
2.2.3 原子时和协调世界时	35
2.3 时间统一系统	38
2.3.1 时间服务系统	38
2.3.2 航天测控网的时统	40

2.4 卫星轨道.....	41
2.4.1 卫星轨道表示方法.....	41
2.4.2 轨道参数间关系.....	45
2.4.3 卫星运动的摄动力.....	46
2.4.4 摄动力对卫星运动的影响.....	57
2.4.5 不同类型卫星运动的摄动因素.....	71
2.4.6 轨道机动.....	72
2.5 卫星的姿态.....	81
2.5.1 姿态测量器件及测量信息.....	81
2.5.2 自旋卫星姿态的确定.....	84
2.5.3 三轴稳定卫星姿态的确定.....	88
2.5.4 卫星姿态机动.....	89
2.6 航天测控体制.....	91
2.6.1 测控基带信号.....	91
2.6.2 载波和副载波.....	93
2.6.3 调制/解调体制.....	94
2.6.4 测控体制分类.....	101
2.7 航天测量体制.....	103
2.7.1 测控站测量元素.....	103
2.7.2 测量体制及其选择因素.....	105
2.7.3 测量体制及其线性误差.....	108
2.8 航天器轨道测量技术.....	118
2.8.1 锁相接收技术.....	118
2.8.2 测距技术.....	121
2.8.3 测角技术.....	139
2.8.4 测速技术.....	147
2.9 航天遥测技术.....	158
2.9.1 频分多路.....	159
2.9.2 时分多路.....	159
2.10 航天遥控技术.....	164

第3章 航天测控网	170
3.1 测控网建造原则	170
3.2 测控网的功能	171
3.2.1 轨道测量	172
3.2.2 遥测信息接收	173
3.2.3 上行控制	173
3.2.4 信息处理	175
3.2.5 支援航天员的航天活动	176
3.3 测控网的结构及特点	177
3.3.1 测控网的结构	177
3.3.2 测控网的特点	179
3.4 测控站测控几何条件	181
3.4.1 卫星天线波束宽度与覆盖范围	181
3.4.2 观测几何条件	183
3.4.3 近地卫星的测控条件	184
3.4.4 地球同步卫星的测控条件	185
3.5 测控站/测控船布局	186
3.5.1 入轨段测控站/测控船的布局	187
3.5.2 转移轨道段测控站/测控船的布局	191
3.5.3 运行轨道段测控站/测控船的布局	195
3.5.4 返回段测控站/测控船的布局	204
3.5.5 测控网节点选址条件	205
3.6 测控透明与非透明	207
3.6.1 上行控制信息的透明与非透明传输方式	207
3.6.2 下行信息的透明与非透明传输方式	208
3.6.3 透明与非透明传输方式的约束条件与比较	209
3.7 航天测控中心	210
3.7.1 测控中心的设计因素	211
3.7.2 测控中心的任务	212
3.7.3 测控中心的功能结构	213

3.7.4	通信系统	214
3.7.5	信息处理系统	218
3.7.6	任务指挥中心	227
3.7.7	模拟系统	232
3.7.8	时间统一系统	236
3.7.9	辅助系统	236
3.8	航天测控站	237
3.8.1	测控站的任务	237
3.8.2	测控站的类型和功能结构	238
3.8.3	卫星模拟器	243
3.9	测控网对航天器的操作	246
3.9.1	测控网对航天器的操作链路	246
3.9.2	测控网对航天器的操作方法与操作方式	247
3.9.3	遥控指令及发送模式	249
3.9.4	遥控指令链及发送模式	253
3.9.5	遥控指令发送模式与操作方法	259
3.9.6	遥控指令链的应急生成	260
3.10	测控网信息传输协议和规程	260
3.10.1	协议用的编码表	263
3.10.2	信息传输协议	263
3.11	多星测控问题	264
3.11.1	多星测控的含义	264
3.11.2	多星测控问题的解决途径	266
3.12	测控软件	266
3.12.1	测控软件的类型	267
3.12.2	测控软件中“秒”的含义	269
第4章	航天测控网的运行	270
4.1	航天测控网运行的方式	270
4.1.1	人工调度方式	271
4.1.2	自动调度方式	271

4.2 测控过程	271
4.2.1 测控区间及特征点时刻	272
4.2.2 测控过程分析	275
4.3 测控事件	290
4.3.1 测控事件分类	290
4.3.2 测控事件的属性	308
4.3.3 相关测控事件	310
4.4 测控计划描述文件	327
4.4.1 测控计划描述文件的类型	328
4.4.2 构建测控计划描述文件的规则	330
4.4.3 测控计划描述文件的格式	332
4.5 测控计划	339
4.5.1 测控计划的类型	339
4.5.2 单星标称测控计划生成	343
4.5.3 单星测控计划生成	348
4.5.4 多星测控计划生成	355
第5章 星网故障对策	365
5.1 星网故障对策特点	365
5.2 测控网故障及对策	366
5.3 卫星故障及对策	368
第6章 飞行任务的实施	370
6.1 飞行任务指挥序列	370
6.2 指挥协同程序	371
6.2.1 测控网指挥协同程序	372
6.2.2 测控站指挥协同程序	374
6.3 专业人员分工与协同	374
6.4 技术文档	377
结束语	378
附录 A 各类航天器的首次发射时间	379
附录 B 航天器型谱	381

附录 C	发射场作业模式	382
附录 D	与航天员相关的设施、设备	384
附录 E	通用频段划分和国际电联第 3 区域频段分配表	386
附录 F	跟踪数据中继卫星的覆盖率	398
附录 G	关于测量轨道短周期摄动的布站分析	406
附录 H	关于测轨数据时标及其修正	407
附录 I	测控软件	409
附录 J	计算用常数	443
附录 K	太阳及行星参数	445
附录 L	技术文档	451
参考文献		455

引 言

人类驾驭高技术工具体系探索宇宙并加以利用的航行活动统称为宇航。宇宙浩瀚无垠,宇航的第一阶段是航天。航天这个概念是由我国著名科学家钱学森提出的,其含义是指人造航天器在太阳系内部范围^①中的航行活动。

通常,人们将地球大气层以外至 3.6 万 km 的空间称为近地空间^②。太阳系以内的空间分为行星空间和行星际空间。行星引力作用范围的空间称为行星空间,如火星空间,相对于太阳其对航天器的引力范围为 12.9 万 km;太阳系行星之间的空间称为行星际空间。太阳系以外的空间用恒星际空间、恒星系空间和星系空间等加以区分。

进入 20 世纪中叶后,美国、前苏联和欧空局等经济强国和国际组织都制定了庞大的航天计划。中国也提出了“我们也要搞人造卫星”的计划。

随着社会经济实力的增强,科学技术的不断进步,特别是社会需求和军事需求的拉动,各种用途的实用近地空间航天器竞相问世,与此同时,行星际探测^③活动也拉开了序幕,并取得了举世瞩目的成就^④。通信、遥感和导航等航天工程已形成了产业,并取得了巨大的社会效益和经济效益。

① 距太阳 60 亿 km 范围内。

② 有的文献将近地空间的下限定为 100km(国际宇航联合会),上限定为地球对太阳的作用球半径,为 93 万 km(前苏联)。

③ 探测月球的航天活动,通常称为深空探测。从地球出发探测太阳系其他行星的航天活动称为行星际探测,也称为空间探测。

④ 美国、前苏联和中国各类航天器的首次发射时间见附录 A。

迄今为止,载人和不载人的航天活动,占主导地位的仍然是在近地空间进行的。在轨和不在轨的近地空间航天器已达数千颗(艘)之多。目前又掀起了第二次空间探测热潮,人类再次登月并建造月球基地和踏上火星的计划更是雄心勃勃^①。

至于飞出太阳系的宇宙探测活动——航宇,目前还处在天文观测从地面走向近地空间的阶段。特别是 20 世纪 90 年代初,美国建造的轨道天文台——哈勃空间望远镜,增进了人类对宇宙的了解。

宏伟而复杂的航天活动,不是航天器孤立进行的,必须有各种庞杂的技术支持系统与之配合才能完成。航天测控网就是技术支持系统之一。

每次航天活动,人们获得的通常是航天器进入了预定轨道、仪器工作正常,或者是定点成功、返回预定地区等信息。但如何知道航天器进入了预定轨道、如何使其仪器工作正常、如何使其定点成功以及如何使其在预定地区着陆等等,却很少引起人们的关注。事实上,航天器上述状态的实现,是个十分复杂的过程,其中既有航天器自主控制,又有航天测控网的支持。特别是关键控制信息,都是在航天测控网获取了航天器的状态信息后,依据目标参数由航天测控网计算、生成控制信息并发送给航天器的。到目前为止,还没有一种航天器在航行的各阶段都能脱离航天测控网的支持而自主完成全部航行任务的。

从确定航天器的运动状态(轨道、姿态)和工作状况,到对航天器的运动状态进行控制、校正和建立航天器的正常工作状态,以及航天器运行状态下的长期管理,是航天工程对航天测控网功能的基本要求,也是航天测控网对航天器支持的基本内容。

航天测控网的功能实现,基于时间计量技术、空间数学、无线电测量技术、无线电遥测遥控技术、计算机技术和数字通信技术

^① 美国、俄罗斯、日本和欧空局都制定了面向 21 世纪的月球探测计划,在月球上建造无人或有人永久性基地。美国计划在 21 世纪 30 年代建成火星基地。

等。航天测控网运用了上述技术学科的理论成果和物化成果,而将上述技术学科的理论成果和物化成果,用于解决航天测控中的问题,则是航天测控网的集成技术。伴随航天工程实践,航天测控网的集成技术逐步完善,同时也产生了航天测控网专用的“新生词语”,即航天测控术语。

第1章 航 天 工 程

航天测控网是航天工程的组成部分。要阐述航天测控网及其在航天工程中的作用,首先概要地介绍航天工程是必要的。

人类进行航天活动,必须借助一套庞大的高技术工具体系。设计、建造和管理使用这套高技术工具体系的工程实践称为航天工程。支撑航天工程的技术学科群则称为航天技术或空间技术。

正如人类从事的其他工程一样,航天工程也是逐步形成和发展起来的,并随着工程实践的扩展不断深化和完善。航天工程成为20世纪对人类社会影响最大的综合工程之一。

航天工程,按航天器所抵达的空间可区分为近地空间航天工程和深空、行星际空间航天工程。

航天工程是个抽象的顶层工程概念,通常都是根据某项航天工程的性质,界定其次阶结构要素及工程结构的。

1.1 结构要素及工程结构

航天工程,从其次阶层面分析,它是由若干个不同功能的组分(系统或部分)组成的多层次整体。次阶“不同功能的组分”称为其结构要素。航天工程的结构是指构成航天工程的次阶(同层次)结构要素的组合。

航天工程发展至今,确定某一航天工程的结构要素并不困难。通常是由应用系统提出应用或探测需求,由航天工程设计单位对工程性质和总需求进行分析、确认,定义工程的各项功能、用途并结合成本等因素论证、选择实现各项功能、用途的技术途径,同时