



航天测控系统工程

□ 于志坚 主编 □



国防工业出版社

National Defense Industry Press

本书得到总装备部“1153”人才工程专项经费资助

航天测控系统工程

于志坚 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

航天测控系统工程 / 于志坚主编. — 北京: 国防工业出版社, 2008. 8

总装备部研究生教育精品专业教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 05030 - 1

I. 航… II. 于… III. 航天 - 测量系统: 控制系统 - 研究生 - 教材 IV. V448

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 145450 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 880 × 1230 1/32 印张 19 1/8 字数 568 千字

2008 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 50.00 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

《航天测控系统工程》编写组

主 编 于志坚

撰写人 (按姓氏笔画排序)

王建军 王俊峰 邢强林 刘世勇

刘延利 刘保国 刘胜利 李 明

李玉书 李海涛 杨会钦 吴 岭

张卫东 张纪生 陆晓明 周大仓

周友德 郑汝花 赵大鹏 赵宗印

荆树超 高 昕 唐 嘉 黄 英

彭利文

秘 书 杨 健 侯利明 王 南

前 言

航天测控系统是航天工程的重要组成部分,其作用是对各飞行阶段航天器进行跟踪、测量与控制,保证航天器按预定的状态和计划完成航天任务。

随着我国航天事业的发展,各种科学卫星、试验卫星、应用卫星、载人航天器和深空探测器逐年增加,它们对航天测控网的测量精度、测控通信覆盖率、天地数据传输速率、可靠性等提出了更高要求。星座型、编队型和分布型卫星系统要求多目标测控;载人航天任务要求高覆盖、长弧段天地通信;卫星长期管理要求尽量降低测控费用;特殊卫星要求测控系统具有较强的抗干扰和抗摧毁能力。为满足这些要求,在使用成熟技术的同时,航天测控系统要不断采用新技术、新方法和新体制。

本书对航天测控系统工程进行了全面系统的论述。第1章、第2章介绍了航天工程分类,航天测控系统的地位、作用和组成,航天器轨道、航天器姿态等基础知识;第3章论述了地基测控网、天基测控网、深空探测网基本组成、技术特点和作用,航天测控站、航天测量船、中继卫星、导航卫星在航天测控系统中的应用;第4章至第7章,论述了无线电测控系统、光学测量系统、通信系统和航天测控中心;第8章论述了航天测控总体方案设计的方法和步骤;第9章对航天测控的新技术与发展趋势做了展望。

本书根据作者所掌握的基础理论知识和专业理论知识,结合长期的工作实践经验,对航天测控系统工程的方方面面进行了论述。其主要特点是理论与实际相结合,内容全面,工程性强。

由于编写时间紧促,加之编者水平有限,书中难免有错误或疏漏之处,诚请读者批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 航天工程	1
1.1.1 航天工程分类	1
1.1.2 航天工程组成	8
1.2 航天测控系统	15
1.2.1 地位和作用	15
1.2.2 系统组成	16
思考题	19
第 2 章 航天测控技术基础	21
2.1 概述	21
2.2 航天器轨道	21
2.2.1 航天器轨道基础	21
2.2.2 航天器轨道确定	37
2.2.3 航天器轨道控制	41
2.3 航天器姿态	46
2.3.1 姿态动力学基础	46
2.3.2 航天器姿态测量和确定	49
2.3.3 航天器姿态控制	53
2.4 航天器观测常用算法	56
2.4.1 最大斜距、观测弧段及作用范围	56
2.4.2 卫星非过顶情况下观测弧段长度的计算	57
2.4.3 卫星轨道上两点之间的弧段长度	58
2.4.4 观测站观测卫星的方位角和俯仰角计算方法	59
2.4.5 静止卫星观测的计算	60

2.4.6	天线方向图对地面观测的限制	62
2.4.7	进出地平线的时间	64
2.4.8	进出站初始仰角不为零时的计算公式	66
2.5	无线电测控技术基础	66
2.5.1	引导与捕获	66
2.5.2	角度测量	69
2.5.3	距离测量	78
2.5.4	速度测量	86
2.5.5	遥测	91
2.5.6	遥控	103
2.6	光学测量系统技术基础	105
2.6.1	光学测量系统探测条件	105
2.6.2	探测系统作用距离分析方法	106
2.6.3	在轨航天器的光学观测	112
2.7	通信系统技术基础	112
2.7.1	信息与基带电信号的转换技术	113
2.7.2	信源编码技术	113
2.7.3	加密技术	113
2.7.4	纠错编码技术	113
2.7.5	数字基带传输技术	113
2.7.6	调制解调技术	114
2.7.7	发送(射)和接收技术	114
2.7.8	复用技术	114
2.7.9	同步技术	115
2.7.10	网络技术	115
	思考题	115
第3章	航天测控网	117
3.1	概述	117
3.1.1	测控网建设原则	117
3.1.2	测控网功能	118

3.1.3	测控网设计	119
3.1.4	测控网布局	119
3.1.5	测控网测控体制	121
3.1.6	测控网常用频段	121
3.2	中、低轨道航天器测控网	123
3.3	同步轨道卫星测控网	124
3.4	深空探测网	126
3.5	地基测控网	129
3.5.1	地面测控站	129
3.5.2	航天测量船	136
3.5.3	航天测控中心	152
3.6	天基测控网	154
3.6.1	数据中继卫星系统	154
3.6.2	导航卫星系统	163
3.7	时间统一系统	185
3.7.1	时间统一系统的概念	185
3.7.2	时间统一系统在航天测控系统中的作用	185
3.7.3	时间统一系统的基本原理	186
3.7.4	航天测控系统对时间统一系统的主要技术要求	187
3.7.5	时间统一系统的组成	188
3.7.6	时间统一系统的接口与测试	195
3.7.7	发展趋势	199
3.8	信息传输协议和规程	200
3.8.1	协议分层模型	200
3.8.2	HDL C 协议	200
3.8.3	TCP/IP 协议	208
	思考题	216
第4章	无线电测控系统	218
4.1	概述	218
4.1.1	无线电测控系统作用	218

4.1.2	无线电测控系统组成	219
4.1.3	无线电频段划分	219
4.2	航天器载测控设备	221
4.2.1	信标发射机	221
4.2.2	脉冲应答机	222
4.2.3	干涉仪应答机	225
4.2.4	微波统一系统应答机	231
4.2.5	航天器遥测设备	233
4.2.6	航天器遥控设备	239
4.3	地面测控设备	245
4.3.1	引导仪	245
4.3.2	脉冲测量雷达	248
4.3.3	干涉仪系统	256
4.3.4	遥测系统	266
4.3.5	遥控系统	274
4.3.6	微波统一系统	281
	思考题	288
第5章	光学测量系统	290
5.1	光学测量系统概述	290
5.1.1	光学测量系统的地位和作用	290
5.1.2	光学测量系统的分类和组成	291
5.2	光学测量设备	294
5.2.1	弹道测量类设备	294
5.2.2	实况记录类设备	321
5.2.3	物理特性参数测量类设备	337
	思考题	343
第6章	通信系统	344
6.1	概述	344
6.1.1	通信与通信系统	344
6.1.2	通信在航天测控中的任务	344

6.1.3	航天测控对通信的要求	345
6.1.4	通信设备与测控设备的接口	345
6.1.5	航天测控通信系统的构成及特点	351
6.2	信道	352
6.2.1	卫通信道	352
6.2.2	光纤信道	362
6.2.3	天地超短波信道	365
6.3	传输平台	367
6.3.1	基于 SDH 的数字传输平台	367
6.3.2	基于 TCP/IP 的传输平台	371
6.4	通信业务系统	373
6.4.1	指挥调度通信系统	373
6.4.2	数据传输系统	377
6.4.3	图像通信系统	384
6.4.4	保密通信系统	391
6.4.5	天地超短波通信系统	398
6.5	通信系统方案的设计和实施	400
6.5.1	需求分析	400
6.5.2	方案设计	401
6.5.3	方案实施	401
	思考题	403
第7章	航天测控中心	405
7.1	概述	405
7.1.1	测控中心的地位与作用	405
7.1.2	测控中心的技术特点	407
7.2	系统构成	411
7.2.1	测控网计算机系统结构	411
7.2.2	测控中心的设备组成	412
7.3	任务指控中心	414
7.3.1	数据处理系统	414

7.3.2	监控显示系统	422
7.3.3	专用外部设备	435
7.3.4	事后数据处理设备	447
7.4	测控网网管中心	448
7.4.1	网管中心的作用与要求	448
7.4.2	网管中心的信息接口	448
7.4.3	网管中心各部分的构成	449
7.5	系统软件	449
7.5.1	通用系统软件	449
7.5.2	实时系统软件	457
7.6	测控应用软件	462
7.6.1	测控软件的作用与要求	462
7.6.2	测控软件的组成	463
7.7	软件工程化管理	471
7.7.1	软件可行性论证	472
7.7.2	软件需求分析	472
7.7.3	软件设计	473
7.7.4	软件测试	474
7.7.5	软件验收、移交	476
	思考题	477
第8章	航天测控系统总体设计	478
8.1	概述	478
8.2	测控总体设计的依据与原则	478
8.2.1	测控总体设计的依据	478
8.2.2	测控总体设计的原则	479
8.2.3	测控总体设计的主要任务	480
8.3	运载火箭和几种典型航天器的任务特点	481
8.3.1	运载火箭	481
8.3.2	近地轨道卫星	482
8.3.3	地球同步卫星	484

8.3.4	载人航天任务	486
8.3.5	月球探测任务	488
8.4	测控系统总体设计工作内容	490
8.4.1	测控需求分析	490
8.4.2	测量精度设计	493
8.4.3	测控系统体制选择	499
8.4.4	测控站布局	506
8.4.5	实时信息传输	509
8.4.6	测控保障系统设计	511
8.4.7	可靠性设计	512
8.5	运载火箭测控系统总体方案设计	517
8.5.1	系统组成	517
8.5.2	场区间信息交换	525
8.5.3	方案评估	525
8.6	卫星测控系统总体方案设计	527
8.6.1	测控任务与要求	527
8.6.2	发射入轨段测控方案设计	531
8.6.3	运行段测控方案设计	532
8.6.4	返回段测控方案设计	537
8.6.5	故障对策	538
8.6.6	小卫星测控特点及测控管理实施	540
8.7	载人航天测控系统总体方案设计	541
8.7.1	测控任务与要求	541
8.7.2	上升段测控系统总体设计	543
8.7.3	运行段测控系统总体设计	547
8.7.4	返回段测控系统总体设计	549
8.7.5	信息交换	551
8.8	深空探测测控系统总体方案设计	551
8.8.1	深空探测的测控体制	551
8.8.2	深空站布局	552

思考题	566
第9章 航天测控新技术与发展	568
9.1 深空探测新技术和发展趋势	568
9.1.1 单向测速与再生测距技术	569
9.1.2 下一代 VLBI 技术(FSR/VSR)	569
9.1.3 CEI 测量技术	570
9.1.4 同波束干涉技术	571
9.1.5 飞行器对飞行器的跟踪技术	572
9.1.6 低温制冷超低噪声放大器	574
9.1.7 研制更高稳定度的时间和频率标准	574
9.1.8 GPS 的应用	574
9.1.9 天线组阵技术	574
9.1.10 深空光通信技术	575
9.1.11 火星网	575
9.1.12 深空中继通信	576
9.1.13 行星际网络	577
9.2 航天测控网和技术的发展	577
9.2.1 地基测控向天基测控发展	577
9.2.2 毫米波和激光通信技术	580
9.2.3 测控设备软件化	581
9.2.4 极区站发挥更大作用	582
9.2.5 高速数传技术	582
9.2.6 空间电子对抗技术	583
9.2.7 降低航天任务的测控费用	585
9.2.8 标准化	589
思考题	591
附录 名词索引	592
参考文献	596

第1章 概 论

1.1 航 天 工 程

航天工程是指人类从事和航天有关的一些工程项目和计划,包括空间探测和空间利用。空间探测是指为了一定科学目的,人类对空间环境和天体进行的一种探测活动,包括近地空间探测、月球探测、火星探测等深空探测;空间利用是指为了科学研究和应用,发射一个或多个航天器,直接或间接地为人类提供服务,所用航天器包括人造地球卫星、航天飞机、载人飞船、空间站等。

1.1.1 航天工程分类

航天工程种类繁多,按其功能和特点大致可分为人造地球卫星工程、载人航天工程、深空探测工程等。

1.1.1.1 人造地球卫星工程

人造地球卫星也叫人造卫星,由运载火箭送入空间轨道并能环绕地球多圈运行的无人航天器。人造地球卫星是目前发射数量最多、用途最广的一种航天器。按运行轨道可分为低轨道卫星、中高轨道卫星、地球同步卫星等;按任务性质通常可分为科学卫星、技术试验卫星和应用卫星。

1. 科学卫星

科学卫星是指用于科学研究和空间探测的人造地球卫星。科学卫星主要包括空间物理探测卫星和天文卫星,它使用望远镜、光谱仪、电离计、压力测量仪和磁强计等仪器研究地球、太阳、其他天体及其周围环境。

2. 技术试验卫星

技术试验卫星是指用于航天新技术、新材料和新概念试验或为应用

卫星进行先期试验的人造地球卫星。这类卫星的试验内容广泛,例如生物对空间环境适应性试验,载人飞船的生命保障系统和返回系统的验证试验,交会对接试验,空间拦截试验,离子推进器试验,卫星自主技术试验,激光空间通信试验等。为降低空间技术试验成本,一般单项技术试验卫星将以小卫星为主,多项试验项目共用一个卫星平台。

3. 应用卫星

应用卫星是指直接为国民经济和军事服务的人造地球卫星,其发射数量和种类最多。按卫星用途可分为通信卫星、侦察卫星、中继卫星、导航卫星、资源卫星、气象卫星、校准卫星等;按服务对象可分为军用卫星、民用卫星和军民两用卫星。

1) 通信卫星

通信卫星是用作无线电通信空间中继站的人造地球卫星。通信卫星是卫星通信系统的空间部分,由它转发无线电信号实现地球站之间或地球站与航天器之间的通信。采用地球静止通信卫星时,一颗星即可覆盖约 $1/3$ 左右的地球表面,故在地球静止轨道上等间距配置 3 颗通信卫星,即可实现除南、北极局部区域外的全球通信。通信卫星具有通信距离远、传输容量大、覆盖区域广、通信质量好、可靠性高、灵活机动和经济效益高等优点,已成为现代通信的重要手段。当使用近地轨道卫星时,可大大缩短通信距离,用户设备和星上通信载荷简单,易于小型化,但需要用多星组网,才能保持全球连续覆盖和不间断通信。通信卫星包括民用通信卫星、军用通信卫星、海事通信卫星、广播电视卫星等。

2) 侦察卫星

侦察卫星是装有光电遥感器、无线电接收机等侦察设备用于获取军事情报的人造地球卫星。利用侦察卫星从空间对目标实施侦察、监视和跟踪,并将侦察设备收集到的目标的情报和信息,通过地面站接收或经数据中继卫星系统转发,送至信息汇集中心,经处理加工,提取有价值的情报。侦察卫星具有侦察面积大、范围广、速度快、效果好、可定期或连续监视特定地区,不受国界和地理条件限制,能获取其他手段难以得到的情报等优点。侦察卫星包括照相侦察卫星、电子侦察卫星、海洋监视卫星和预警卫星等。

3) 中继卫星

中继卫星 (TDRS) 是跟踪与数据中继卫星系统 (TDRSS) 的核心单元, TDRSS 是一种利用地球同步 (高轨) 卫星转发功能完成对中低轨道航天器高覆盖率测轨、遥测、遥控和高速数据传输任务的测控系统。TDRSS 的典型配置包括两颗经度相隔 130° 的地球同步卫星、一个地面终端站以及用户航天器上的转发器。由于利用了地球同步轨道卫星, 两颗工作中继卫星可覆盖中、低轨道航天器 85% 以上的轨道段, 地球同步轨道卫星位于距地面 36000km 的高轨道上, 中、低轨道航天器要与它们维持通信则需要发射很大的有效辐射功率。加上中继卫星系统要为数颗用户星服务, 其中许多用户星需要传送数百兆比特每秒的数据, 因而中继卫星必须采取一系列高新技术。例如, 大口径星载可展开式天线, 高频段 (近毫米波) 工作链路, 高效调制、解调体制, 星载相控阵天线, 星间捕获与跟踪技术等。但该系统具有高轨道覆盖率、高实时性、高速率数传能力和高效费比等特性, 使其成为航天事业发展必需的重要基础设施之一。

4) 导航卫星

导航卫星是发射无线电信号和高精密导航信息, 为地面、海洋、空中和空间用户导航定位的人造地球卫星。通常由多颗导航卫星构成的导航星座、用户导航设备和地面控制部分组成卫星导航定位系统。导航卫星按导航方法分为多普勒导航卫星和测距定时导航卫星; 按用户是否向卫星发射信号可分为主动式导航卫星和被动式导航卫星。导航卫星具有精度高、全天候、能覆盖全球和用户设备简便等优点。

5) 资源卫星

资源卫星是监测和研究地球资源与环境的人造地球卫星。资源卫星利用所载的可见光、红外和微波遥感器, 获取陆地和海洋目标辐射与反射的电磁波信息, 并发送给地面。卫星轨道一般采用太阳同步轨道兼回归轨道, 轨道高度约为 500km ~ 900km, 轨道倾角为 $97^\circ \sim 99^\circ$, 降交点时间选取星下点当地时间上午 9 时 30 分至 10 时 30 分 (光照条件有利时间)。

6) 气象卫星

气象卫星是从空间对地球及其大气层进行气象观测的人造地球卫星。气象卫星是卫星气象观测系统的空间部分。通过星上遥感器, 可以

采集地球及其大气层的可见光、红外与微波辐射信息,并将它们传送到地面,经复原和处理得到各种气象资料。气象卫星具有观测地域宽广、观测时间长、观测数据汇集快速和气象预报质量高等特点。气象卫星按轨道可分为太阳同步轨道气象卫星和地球静止轨道气象卫星。前者观测分辨力高,覆盖区域小;后者分辨力低,覆盖区域大,并能与地面最终用户保持不间断通信。两者相结合的系统可互相补充,多国气象卫星系统联合可完成整个地球气象的及时、不间断监测。

7) 校准卫星

校准卫星是装有雷达和光测合作目标,有时也装有导航卫星接收机,能精密确定轨道而校准地面跟踪测量设备的近地轨道卫星。校准卫星可以是专用卫星,也可以是符合上述要求的卫星搭载载荷。利用卫星来校准地面测量雷达和测控设备具有下列优点:① 轨道高,速度快,可较好仿效雷达的实际测量环境;② 每天都可校准测量设备,除得设备精度外,还可统计其他参数;③ 可利用轨道约束方程和多圈次测量值得到精密轨道,提高比较标准自身的精度;④ 既可作同站设备测量精度硬比对,又可利用精密轨道进行精度软比对;⑤ 卫星长期运行可校准国内航天测控站、海上测量船乃至全球多台套设备,效费比高。

1.1.1.2 载人航天工程

顾名思义,载人航天工程是指有人参与空间飞行的一类航天工程。由于有航天员参与飞行,给航天科学试验带来很大的方便性和灵活性,但也使航天工程更为复杂,载人航天工程必须配备保障航天员生活和工作环境控制与生命保障系统并保持长时间的与地面通信。载人航天器按飞行和工作方式可分为载人飞船、航天飞机、空间站等。

1. 载人飞船

载人飞船是能保障航天员在外层空间生活和执行航天任务并安全返回地面的航天器,又称宇宙飞船。是一种在空间运行时间较短、容积较小,仅能一次使用的返回型载人航天器。载人飞船可以独立进行航天活动,也可作为往返于地面和空间站之间的“渡船”,给空间站或其他航天器运送人员和物资。

我国研制的“神舟”号飞船由三舱组成,即返回舱、轨道舱和推进舱,