

高等学校“学历教育合训”系列教材

航天无线电 测控原理与系统

Space Radio TT & C Fundamental and System

周智敏 陆必应 宋 千 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等学校“学历教育合训”系列教材

航天无线电测控原理与系统

Space Radio TT&C Fundamental and System

周智敏 陆必应 宋 千 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书系统讲述航天无线电测控的原理、技术和系统,主要内容分三部分:航天测控的概念、原理。重点介绍航天无线电测控信号基本理论、信号调制与解调技术;统一载波测控系统,重点分析外测系统、遥测系统、遥控系统的结构、组成、工作原理;天基测控系统与测控新技术,重点分析中继卫星系统组成与工作原理,全球定位系统及其在航天测控中的应用。

本书可作为测控、雷达、导航、电子侦察等领域工程技术人员的参考书,也可以作为相关专业高年级本科生的教学用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

航天无线电测控原理与系统/周智敏,陆必应,宋千编著. —北京:电子工业出版社,2008.7
(高等学校“学历教育合训”系列教材)

ISBN 978-7-121-06471-5

I. 航… II. ①周…②陆…③宋… III. 航天—无线电遥控—高等学校—教材 IV. V556.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 095338 号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉

印 刷:北京市天竺颖华印刷厂

装 订:三河市金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:16.25 字数:416 千字

印 次:2008 年 7 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:28.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

航天测控技术是航天技术的重要组成部分,航天测控系统是航天工程系统的重要分系统,实现对航天器的飞行轨道、姿态以及有效载荷的跟踪测量与控制,保障航天器的正常运行。

随着航天技术的飞速发展,航天测控技术也在发生着巨大变化,各种新的、先进的测控技术和测控系统不断涌现。为全面介绍航天测控技术的新发展,对原《现代航天测控原理》一书作了全面的调整、修改与充实,形成本书。将原书的第4、5章以及第7章角度测量的内容压缩成航天外测系统一章,删除了有关系统设计方面的内容。将遥测与遥控的内容分别扩展成两章,详细地介绍了遥测与遥控的基本理论与采用的新技术,增加了分包遥测与分包遥控等内容。中继卫星系统独立成一章,详细介绍了其原理、技术与系统。完善了全球定位系统的内容,重点突出了其在航天测控中应用的最新进展。增加了航天测控新技术一章,重点介绍了深空测控技术、小卫星与多星测控技术、高级在轨系统等内容。

本书共分10章,第1、2章介绍航天测控的概念、原理与预备知识;第3章介绍航天无线电测控信号基本理论、信号调制与解调技术;第4~6章分别介绍了航天外测、航天遥测和航天遥控分系统的结构、组成、工作原理;第7章介绍统一载波测控系统;第8章、第9章分别介绍中继卫星系统和全球定位系统两种天基测控系统;第10章介绍测控新技术。其中,第1章、第3章、第5章和第7章由周智敏教授撰写;第2章、第4章、第9章和第10章由陆必应副教授撰写;第6章和第8章由宋千副教授撰写;全书由周智敏教授统稿。

本书在编写过程中得到了作者所在单位国防科学技术大学电子科学与工程学院的大力支持,李贵林参谋对本书的编写和出版给予了极大的关注和支持。陈波、王华硕士研究生为本书的编写、校对做了大量有益的工作;国防科技大学航天与材料工程学院的李国中教授、理学院的朱巨波教授、中国船舶工业总公司第722研究所的宋鹤翔高工对书稿提出了许多宝贵的建议;电子工业出版社陈晓莉编辑为本书编辑和出版付出了大量辛勤劳动。作者在此一并深表感谢。

本书可作为有关专业高年级本科生教材,也可作为从事航天测控事业的工程技术人员的参考书。由于作者水平有限,书稿中难免有疏漏与错误,敬请读者批评指正。

作 者

2008年3月于长沙

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 引言	1
1.2 航天系统	2
1.3 航天测控系统	4
1.3.1 测控系统分类	4
1.3.2 航天测控系统的功能与组成	5
1.3.3 航天测控网	7
1.4 航天测控技术的发展历程与发展趋势	9
1.4.1 航天测控技术发展历程	9
1.4.2 航天测控技术发展趋势	10
思考题	12
第 2 章 航天测控基础	13
2.1 近地空间环境	13
2.1.1 大气层结构	13
2.1.2 电离层	14
2.1.3 太阳电磁辐射	14
2.1.4 带电粒子辐射	15
2.2 航天器运行轨道	16
2.2.1 常用天文术语	17
2.2.2 导弹飞行弹道	18
2.2.3 卫星轨道	19
2.3 空间坐标系统与时间系统	21
2.3.1 常用坐标系	22
2.3.2 坐标系转换	23
2.3.3 时间系统	24
2.4 空间定位几何	25
2.4.1 空间位置参量的几何意义	25
2.4.2 常用定轨方法	27
思考题	29
第 3 章 测控信号的调制与解调	30
3.1 引言	30
3.2 常用测控基带信号	31
3.3 信号调制	34

3.3.1 基带信号对载波的调制	34
3.3.2 N 个正弦与 M 个方波副载波对载波的调角信号	36
3.3.3 调角信号的带宽	39
3.3.4 数字信号对副载波的调制	40
3.4 锁相接收机	43
3.4.1 锁相接收机中的载波跟踪环	43
3.4.2 信号调制对载波跟踪环的影响	51
3.4.3 锁相接收机主要技术指标	53
3.5 信号的相干解调	56
3.5.1 相干接收与相干解调的概念	56
3.5.2 调相信号的相干解调	57
3.5.3 调频信号的相干解调	61
3.5.4 数字信号对副载波调相信号的解调	64
附录 3.1 随机脉冲序列的功率谱公式推导	68
附录 3.2 ASK 信号的功率谱密度	71
附录 3.3 公式(3.95)推导	73
附录 3.4 关于 $\overline{\cos\theta_s(\tau)}$ 的计算	74
思考题	75
第 4 章 航天外测系统	76
4.1 航天测速	76
4.1.1 多普勒测速	76
4.1.2 双频测速技术	81
4.2 测距原理	82
4.3 侧音测距	84
4.3.1 侧音测距原理及测距精度	84
4.3.2 准最优距离估计器	86
4.4 伪码测距	87
4.4.1 伪码的基本概念及其性质	87
4.4.2 m 序列	92
4.4.3 复合伪随机码	101
4.4.4 伪码(PN)距离跟踪接收机	111
4.5 角度测量	117
4.5.1 圆锥扫描雷达测角原理	118
4.5.2 单脉冲雷达测角原理	118
附录 4.1 特征多项式与序列周期的关系	122
思考题	125
第 5 章 航天遥测系统	127
5.1 遥测系统概述	127
5.1.1 遥测系统作用	127

5.1.2 遥测系统组成和基本工作原理	128
5.1.3 遥测系统的发展	128
5.2 遥测信号调制基本理论	129
5.2.1 脉冲调制	130
5.2.2 基本数字调制	132
5.3 信道编码与扩频调制	134
5.3.1 信道编码	134
5.3.2 扩频调制	137
5.4 多路复用体制与常用遥测系统	138
5.4.1 多路复用体制	138
5.4.2 几种典型的遥测系统	139
5.5 PCM-PSK 遥测系统	141
5.5.1 系统的组成和工作原理	141
5.5.2 PCM 系统同步技术	144
5.6 分包遥测	148
5.6.1 分包遥测概念	149
5.6.2 源包与传输帧结构	150
思考题	152
第 6 章 航天遥控系统	153
6.1 遥控系统概述	153
6.2 遥控系统的组成和工作原理	154
6.2.1 遥控系统的组成	154
6.2.2 遥控系统工作原理	155
6.3 差错控制技术	156
6.3.1 差错控制机制	156
6.3.2 纠错码与检错码	157
6.4 遥控数据保护	158
6.4.1 数据加密	158
6.4.2 加密认证	159
6.4.3 PCM 遥控数据的格式	159
6.5 遥控系统主要技术指标	160
6.6 分包遥控	161
6.6.1 数据管理业务	162
6.6.2 数据路由业务	164
6.6.3 信道业务	166
6.6.4 分包遥控特点	167
思考题	167
第 7 章 统一载波测控系统	168
7.1 引言	168

7.2 系统组成与工作原理	168
7.2.1 系统的基本组成	168
7.2.2 地面测控站的工作原理	170
7.3 统一载波测控系统举例	172
7.3.1 统一 S 波段系统的组成、工作原理	172
7.3.2 “阿波罗”统一 S 波段系统信号	175
7.4 统一载波测控系统的新发展	179
7.4.1 数字化中频锁相接收机	179
7.4.2 数字化综合基带	180
思考题	182
第 8 章 跟踪与数据中继卫星系统	183
8.1 概述	183
8.1.1 天基测控系统与中继卫星系统	183
8.1.2 中继卫星系统的发展	184
8.1.3 系统组成	185
8.1.4 系统特点	187
8.2 TDRSS 的跟踪测轨技术	187
8.2.1 常规定轨方法	188
8.2.2 基于 TDRSS 信息的卫星自主定轨技术	188
8.2.3 测轨原理	189
8.3 TDRSS 的数据中继	192
8.3.1 TDRSS 信号调制技术	192
8.3.2 TDRSS 通信链路信号形式	194
8.4 TDRSS 星间链路建立与信号捕获	197
8.4.1 天线捕获与角度跟踪	197
8.4.2 信号捕获与跟踪	198
8.5 TDRSS 的应用	199
思考题	200
第 9 章 全球定位系统及其在航天测控中的应用	201
9.1 卫星导航定位系统概述	201
9.1.1 GPS 系统	201
9.1.2 GLONASS 系统	204
9.1.3 GALILEO 系统	205
9.1.4 北斗卫星导航定位系统	205
9.2 GPS 卫星信号	206
9.2.1 GPS 卫星信号构成	206
9.2.2 GPS 信号捕获与跟踪	207
9.3 GPS 测量定位原理	210
9.3.1 伪距测量定位原理	211

9.3.2 伪距定位解算	212
9.3.3 载波相位测量定位	214
9.4 GPS 相对定位	216
9.4.1 差分定位原理	217
9.4.2 伪距差分定位解算	218
9.5 航速测定与时间测定	221
9.5.1 航速的测定	221
9.5.2 利用 GPS 测定时间	223
9.6 全球定位系统在航天测控中的应用	223
9.6.1 星载 GPS 卫星轨道确定	223
9.6.2 基于 GPS 的卫星姿态测量	227
9.6.3 GPS 在航天测控中的其他应用	229
思考题	231
第 10 章 测控新技术	232
10.1 深空航天器测控技术	232
10.1.1 深空测控技术	232
10.1.2 典型深空测控系统	233
10.2 小卫星与多星测控技术	235
10.3 自主测控技术	237
10.4 高级在轨系统	238
10.4.1 CPN 结构与业务模型	238
10.4.2 CPN 端一端业务	240
10.4.3 SLS 及其业务	241
思考题	244
参考文献	245

第1章 概 论

1.1 引 言

人类的活动范围经历了从陆地到海洋,从海洋到大气层,从大气层到宇宙空间的逐渐拓展过程。自古以来,人类就没有停止过探索宇宙空间的遐想和努力。

在地球大气层以外的宇宙空间内的飞行称为航天,与之相应的飞行器称为航天器。各类航天飞行器的设计、制造、发射和应用技术称为航天技术。

航天飞行的历史从火箭技术开始。火箭由中国劳动人民在宋代发明,近代火箭技术发展于19世纪末20世纪初。俄国的齐奥尔科夫斯基、美国的戈达德和德国的奥伯特作为先驱者为现代航天事业的发展做出了奠基性工作。

齐奥尔科夫斯基是现代航天事业的开拓者,他在1903年发表的论文《利用喷气工具研究宇宙空间》论证了火箭用于星际航行的可能性;推导了火箭在无引力场和真空中飞行速度公式;提出了多级火箭的概念;指出液体燃料火箭是航天器最合适的工具。

戈达德在1919年发表的著作《到达极大高度的方法》中阐述了火箭运动的基本数学原理,讨论了用火箭把有效载荷送往月球的可能方法。他还于1926年3月研制并发射了世界上第一枚液体火箭,飞行高度12m,时间2.5s。

奥伯特出生于罗马尼亚,后入德国籍。奥伯特在1929年发表的著作《通向航天之路》一书,论述了火箭在宇宙空间工作的基本原理,提出了许多关于火箭结构和飞行的新观点。

现代航天事业的开端是在第二次世界大战末期,以德国于1942年10月3日发射成功V—2火箭为标志的。1957年10月4日前苏联发射成功第一颗人造地球卫星,把人类带进一个广阔无垠的太空时代。1961年4月12日前苏联发射成功第一个载人航天器,宇航员尤阿·加加林绕地球飞行一圈后安全返回,首次实现了人类遨游太空的梦想。1969年7月20日美国阿波罗载人飞船登月成功,人类足迹第一次踏上了地球之外的另一个天体。

到2004年,俄罗斯(前苏联)、美国、欧空局、日本、中国、印度等国家和地区先后研制成功80多种运载火箭,修建了10多个航天发射场,建立了完善的测控网,发射了5600多个航天器。

新中国成立后,中国的航天事业有了巨大发展。20世纪50年代中期开始发展导弹事业,1958年党中央提出“我们也要搞卫星”。1970年4月24日中国第一颗人造卫星——“东方红一号”发射成功。至今为止,我国已用自行研制的“长征”系列运载火箭发射了50多颗卫星,包括科学卫星、遥感卫星、通信卫星、气象卫星等,并于2003年10月15日成功发射“神州五号”载人飞船,航天员杨利伟绕地球14周后于16日成功着陆。

这些航天器在科学研究和国民经济的发展中起着重要的作用,如卫星通信、卫星导航、气象观测、大地测量、卫星遥感等,已成为国民经济中不可缺少的技术手段。在军事上,航天技术更显示出巨大的威力,部署在太空的各类侦察卫星可将地面军事设施及部队调动情况一览无

余,卫星通信和卫星导航为部队的指挥调动、精确定位提供了技术保障。各种战略导弹则是现代化战争中远程精确打击的主要手段。在第一次海湾战争中,以美国为首的多国部队动用了几十颗卫星为其军事行动服务,为确保作战胜利起了重要作用。这表明,外层空间已成为继陆地、海洋和空中之后的第四战场,今后的战争,将是海、陆、空、天四维一体的战争。

通常将航天技术划分为航天运载器技术、航天器技术和航天测控技术三大组成部分。本书以测控技术为研究对象。航天测控是保证航天器正常飞行所必不可少的技术手段,航天测控系统是指在航天飞行器飞行的各个阶段完成对其测量和控制两大任务的技术系统。航天测控系统的基本任务包含测量、控制和通信三个方面。

测量分成“外弹道测量”和“内弹道测量”两种。“外弹道测量”简称“外测”,主要内容是精密测量导弹与航天飞行器的飞行轨道参数,如坐标、速度、加速度等;“内弹道测量”简称“内测”,又称遥测,主要内容是测量导弹和航天飞行器内部的工作状态、宇航员的生物学参数、各种工程参数等。从测量手段来看,有无线电测量和光学测量之分。

飞行器的控制也分为两类:一类是一次性控制,如飞行器在试验中发生故障,需从地面发出使故障弹“自毁”的安全控制指令,简称“安控”。另一类控制是飞行器运行的指令控制,如飞船的姿态控制、变轨、交会、对接、停靠及回收等各种机动控制。这类指令控制称为遥控。

通信系统为地面指挥系统提供监视和显示,为应用系统提供有关的数据,在现代航天测控系统中占据越来越重要的地位。

航天测控技术是随着航天技术的发展而发展的,它与航天运载器技术、航天器技术的发展相辅相成。若从前苏联于1957年发射第一颗人造地球卫星算起,航天测控技术已经历了50年的不断发展和变迁,从目前来看,航天测控技术的发展呈现两大明显趋势:一是各国航天测控网联网合作,这样可充分发挥各国测控资源的作用,降低航天任务的测控保障费用。二是向天基测控系统发展。以往的航天测控网都是在地球表面设立大量测控站,称之为地基测控系统。为了适应航天事业的发展,近年来出现了利用地球同步轨道卫星转发进行测量的天基测控网——中继卫星系统,其中尤以美国和俄罗斯(前苏联)在天基测控技术方面处于领先地位。

1.2 航天系统

人类为探索、研究、开发和利用地球大气层以外宇宙空间,以及地球以外天体的航天活动而建立的工程系统称为航天工程系统,简称航天系统。航天系统按用途可分为用于科学研究的航天系统、用于空间探索的航天系统和为国防、国民经济服务的应用航天系统。应用航天系统按应用领域的不同又可分为卫星通信系统、卫星导航系统、卫星气象系统、卫星侦察系统、载人航天系统和空间武器系统等。按是否载人,航天系统又可分为无人航天系统和载人航天系统。无人航天系统由航天器、航天运输系统、航天发射场、航天测控系统和航天应用系统五大分系统组成。载人航天系统除有上述五大分系统之外,还包括航天着陆场系统和航天员系统。

航天运输系统是运送有效载荷到预定轨道的航天运输工具,可分为运载器和运输器两类。运送航天器进入预定轨道的称为运载器;为在轨航天器接送人员、装备、物资和进行在轨维修、补给等服务的称为运输器。运载器通常为运载火箭,运输器由推进器和轨道器构成。推进器一般为运载火箭,轨道器进入预定轨道,既可能带动力,也可能不带动力。

航天发射场系统是装备有专门设施,采用运载火箭从地面发射航天器的特定场区系统,一

般由技术区、发射区、发射指挥控制中心、航区测控站和勤务保障设施等部分组成。发射载人航天器的发射场还包括航天员区。航天器发射除利用运载火箭从发射场发射外,还可以从空中和海上发射。

航天应用系统是直接执行航天使命,为科学研究、技术实验、国民经济建设和军事目的服务的系统。航天应用系统由有效载荷、有效载荷共用设备、有效载荷应用中心和应用终端系统四部分组成。其中前两部分装载在航天器上,后两部分为地面系统。

航天员系统是选拔培训合格航天员,对航天员实施医学监督与医学保障,设计合理的人工环境并研制相应的专用设备,以保证在轨航天员的生命安全、生活条件和工作能力的系统。一般由航天员选拔训练分系统、航天员医学监督与医学保障分系统、航天服分系统、航天营养与食品分系统、失重生理效应与特殊原因防护分系统、航天器拟人载荷与医学评价分系统、地面模拟设备分系统、飞行训练模拟器分系统和航天器工程设计的医学、工效学要求与评价分系统组成。

航天着陆场系统是提供航天器返回着陆场区、对返回着陆后的航天员及其着陆器实施搜索救援与回收、并对返回轨道出现黑障后部分进行跟踪测量的系统。返回着陆场区一般分为主着陆场、副着陆场和应急返回着陆区三类。主着陆场是航天器正常返回的着陆场;副着陆场为主着陆场的气象备用着陆场;应急返回着陆区是在出现危及航天员生命安全的异常情况下,航天器应急返回的着陆区。

航天器是指在地球大气层以外宇宙空间、基本上按照天体力学规律运动的,具有满足特定要求所需功能的人造天体。航天器又称为空间飞行器,是航天系统的核心组成部分。

按照是否载人,航天器分为无人航天器和载人航天器两大类,各种用途的人造地球卫星、空间平台和空间探测器均属无人航天器,载人飞船、空间站、轨道间飞行器和航天飞机则为载人航天器,按功能分类如图 1.1 所示。

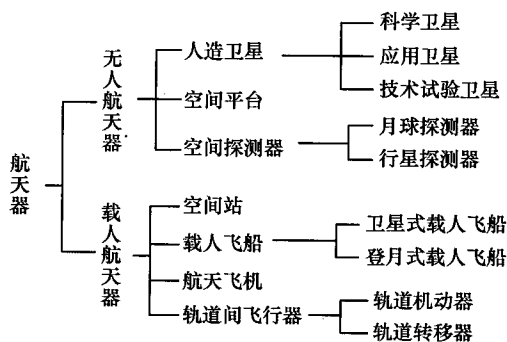


图 1.1 航天器分类

人造地球卫星是迄今为止发射数量最多、用途最广的一类航天器。按功能可分为科学卫星、应用卫星和技术试验卫星。科学卫星又称科学探测卫星,用于科学探测与研究,包括空间物理探测卫星和天文卫星。技术试验卫星是进行新技术试验或为应用卫星进行先期试验验证的卫星。应用卫星是航天技术发展的最主要成就,直接为国防和国民经济服务。应用卫星按照其功能的不同又可分为气象卫星、地球资源和海洋卫星、通信卫星、导航卫星、跟踪和数据中继卫星、测地卫星以及专门为军事应用服务的侦察卫星、预警卫星等。

空间平台是一种可接受在轨定期维修、补给和有效载荷替换,以及产品回收的大型组合式

航天器。空间平台可为多种有效载荷提供结构、电源、通信、热控制、数据管理、姿态和轨道控制、机动等功能。空间平台是卫星技术的全面继承和发展,可以克服卫星工作寿命短、任务单一、费用高的弱点,必将是未来天基系统的几个基本组成部分之一。

空间探测器是对月球和月球以外的天体和空间进行探测的无人航天器,又称深空探测器。空间探测器包括月球探测器、行星和行星际探测器、太阳和恒星际探测器三大类。

载人航天是航天领域的一个重要组成部分。载人飞船分为环绕地球飞行的卫星式载人飞船和飞往月球的登月式载人飞船。载人飞船一般由轨道舱、返回舱、推进舱以及对接机构等组成,登月飞船还有登月舱。空间站是具有一定试验或生产条件,可供多名航天员生活和工作的,长期在空间运行的大型载人航天器。航天飞机是可重复使用的载人航天器。轨道间飞行器主要用于在航天飞机和空间站之间转移人员或物资。

航天技术通常根据航天器的不同划分为三大领域:人造卫星、载人航天和空间探测。

关于航天技术与航天系统更详细的信息可参看文献^[3]。

1.3 航天测控系统

航天测控系统是对航天器飞行轨道、姿态及其各分系统工作状态进行跟踪测量、监视与控制的技术系统。测控系统包含三种基本的功能:第一是跟踪(Tracking),是指对航天器跟踪、观测,以获得其相对于地面的运动信息,借以了解、预报航天器的轨迹和运行情况;第二为遥测(Telemetering),利用各种传感器获取航天器内部工程技术参数,借以了解航天器各部件的工作状态;第三为控制(Command),即对航天器进行必要的指令控制,按照任务需要改变其轨迹、姿态及安全控制等。因此,国际上一般将测控称为 TT&C。航天器转入应用阶段后,通信功能更为重要,一般来说测控系统中还包含天地语音、电视和用户数据等通信功能,因此又将测控系统称为航天测控与通信系统(T&C),本书中仍简称为航天测控系统。

航天测控系统是航天系统不可缺少的重要分系统,它是卫星工程的五大分系统之一,是载人航天工程的七大分系统之一,还是导弹试验工程的三大分系统之一,是完成航天任务不可缺少的支持系统。其在航天任务中的地位和作用主要体现在三个方面:首先,航天测控系统是航天系统中天、地两大部分联系的窗口。通过地面站建立地面与航天器之间的天地无线电链路,实施对航天器的跟踪测轨、遥测、遥控和天地通信数传业务。其次,航天测控系统是综合技术分析和信息交换中枢。再次,航天测控系统为各相关系统提供分析和应用处理所需的基准信息。航天测控系统在飞行任务的各阶段及飞行任务完成后,提供关于航天器轨道、姿态、遥测、遥控信息及相关信息处理结果,为系统实时监控或事后分析与技术改进提供基准信息。

1.3.1 测控系统分类

航天测控系统可以按作用距离进行分类,分为靶场测控系统、近地卫星测控系统、高轨卫星测控系统和深空测控系统。更为通用的是按照测控的航天器类型不同进行分类。按测控对象不同,航天测控系统可分为:导弹测控系统、卫星测控系统、载人飞船测控系统和深空测控系统四大类,如图 1.2 所示。

导弹测控系统的主要设备通常布置在导弹试验靶场,并在适当地点分设测控站,包括海上

测控船,执行导弹飞行试验的测量与控制任务。为导弹飞行试验成功提供必要的技术保障,同时还提供飞行试验过程中的全部资料数据,以鉴定导弹的战术技术性能、总体设计方案与各分系统设计方案的合理性,以及正确判断飞行试验的故障等。这些数据也是修改设计的基本依据。



图 1.2 测控系统分类

卫星测控系统是指在卫星发射、运行以及回收过程中完成各种测量、控制任务的技术系统。它的作用除了在整个飞行过程中提供全部资料数据及安全控制外,还要对卫星进行姿态控制和各种必要的机动控制。由于卫星担负的任务比导弹要复杂,且在空间停留的时间长,还要有各种各样的控制:如星上电源开关,轨道数据注入,各种星上设备的动作,姿态发动机点火等。与导弹测控系统相比,卫星测控系统的控制功能显然要复杂得多。

载人航天测控系统为载人航天器的发射上升、在轨运行和离轨返回提供测控服务。与前两种测控系统相比,载人航天测控系统更复杂、更庞大,其控制任务更多。因为载人飞船的运行轨道需要变轨,有时还有交会、对接、停靠等要求,另外还需增加宇航员的生物医学参数测量、空间和地面通信对话等。载人航天测控系统的突出特点是测控和通信的覆盖率要求高。

深空测控系统为月球、行星和恒星际空间的各种探测器进行测控。其突出特点是为达到超远程测控、通信的目的,要求地面站装备大口径天线和高灵敏度接收系统。

不同测控系统的特点如表 1.1 所示。

表 1.1 不同测控系统特点比较

测控系统 特性要求	导弹测控系统	卫星测控系统	载人航天测控系统	深空测控系统
测轨精度	高	中	中	低
作用距离	几千千米	卫星轨道决定	航天器轨道决定	宇宙深空
测控时间	几小时以内	几年	从几天到几年	探测器寿命
测控内容	遥测、遥控	遥测、遥控、数传	遥测、遥控、数传、语音	遥测、遥控、数传

1.3.2 航天测控系统的功能与组成

航天测控系统包含跟踪测轨、遥测、遥控、天一地通信与数据传输 4 个主要功能。相应的有实现上述功能的 4 个分系统。为实现上述功能,还具有数据处理、监控显示、地—地通信和时间系统等相关辅助支持分系统。

1. 跟踪测轨

测控系统的第一个功能是跟踪测轨。跟踪测轨是指利用无线电和光学设备精密测量导弹和航天飞行器的飞行轨道参数,如坐标、速度、加速度等,称为外弹道测量,简称“外测”。从测量手段上来说,有无线电测量和光学测量之分。

光学测量设备包括可见光设备、红外设备和激光设备等。光学测量的优点是测量精度高,航天器载设备简单,但观测条件苛刻、作用距离近、不易实现测速,因此不适合在全球范围内长期运行的航天器的测轨要求,而较多应用于导弹起飞和弹头再入段测量。

无线电跟踪测轨系统包括脉冲雷达系统和连续波雷达系统。脉冲跟踪测轨系统发射脉冲射频信号,其优点是设备简单,连续波跟踪测轨系统发射连续波射频信号,其优点是作用距离远,可方便地将测轨与遥测、遥控、通信等功能有机地结合在一起,在航天测控中获得了广泛应用。无线电跟踪测轨具有全天候、全天时、作用距离远、信号易于综合传输和实时处理等优点,是航天外测系统的主体,本书重点研究无线电外弹道测量技术。

2. 遥测

测控系统的第二个功能是遥测。遥测是指利用各种技术手段测量导弹和航天飞行器内部的工作状态、工作参数、宇航员的生物学参数、各种工程参数、侦察参数和环境参数,然后将这些参数转换成无线电信号,传输到地面测控站的接收设备,再进行分析、处理,这种测量称为“内弹道测量”,简称“内侧”。遥测是测控系统的重要组成部分,对导弹、卫星的发射和运行有着举足轻重的作用。

遥测系统按遥测参数信号形式的不同,分为编码遥测与模拟遥测。目前大部分遥测系统采用编码遥测体制,传感器获得的模拟参量经模/数转换后进行编码传送。

3. 遥控

测控系统的第三个功能是遥控。其含义是指对航天器进行远距离实时控制。测控系统按用途的不同分成两类:一类是一次性控制,如在飞行器试验中发生故障,需要从地面发出控制指令使故障弹“自毁”,这称为“安全控制”,简称“安控”。另一类是对航天飞行器的运行进行指令控制,使航天器的仪器设备改变工作状态,开机和关机,完成规定的操作。

航天遥控广泛采用脉冲编码(PCM)遥控系统。发往航天器的二进制数据和二进制编码遥控指令经码型变换后进行载波调制,再发送至航天器。航天器对接收到的信号进行解调、译码、确认后执行相应的控制指令。

上述三个功能统一综合在测控系统中,相辅相成地共同构成一个具有信息反馈的控制系统,去完成测控任务。其中,跟踪测轨和遥测完成数据的采集和反馈,遥控完成控制。在执行指令前和执行指令后都利用遥测将飞行器收到的指令送回地面测控中心进行对比、校验,以保证测控的绝对安全。

4. 天—地数传通信

测控系统的另外一个重要功能是天—地数传通信。主要完成航天器和地面之间的语音、电视、图像和特种数据的传送,在载人航天和某些卫星测控系统中有广泛应用。

5. 辅助系统

测控系统作为一个整体,除实现上述4个功能的4个分系统外,还包含数据处理、监控显示、地面通信、时间统一以及气象保障、大地测量等辅助系统。

数据处理分系统是进行测量数据加工、计算、分析,产生控制指令、注入数据,完成信息交换和对测控系统设备进行管理的系统。监控显示系统是将数据处理系统处理后送出的、指挥控制人员关注的信息进行汇集、加工和显示,为分析决策和指挥控制提供依据的系统。地面通信系统是连接测控中心和测控站以及测控系统中心和航天系统其他系统中心,用以传递数据、语音和图形等信息的系统。时间统一系统是为测控系统提供统一的标准时间信号和标准频率信号的系统。

1.3.3 航天测控网

航天测控系统按照其系统结构,可看作是由若干个位置合理布局的测控单元构成的网络。有两类基本的测控单元,即航天控制中心和航天测控站。具体来讲,航天测控系统是由测控中心和若干在不同地域分布的测控站,通过通信系统和时间系统连接构成的一个有机整体,形成一个信息沟通、时间统一的航天测控网。

1.3.3.1 航天控制中心

航天控制中心是航天器飞行的指挥控制机构。它的任务是:实时指挥和控制航天测控站,收集、处理和发送各种测量数据,监视航天器的轨道和姿态以及设备的工作状态,实时发送控制指令,确定轨道参数,发布轨道预报等。

航天控制中心由数据处理系统、软件系统、通信系统、指挥监控系统和时间统一系统组成。数据处理系统包含多台大型高速计算机和软件系统,实时处理或事后处理由各测控站汇集来的数据;软件系统包括管理程序、信息和数据处理程序等,控制中心通过计算机软件实施对整个测控系统和航天器的控制和管理;通信系统包括地面通信和空间(卫星)通信系统,由各种通信设备和数传设备组成,它负责控制中心与各测控站、发射场、回收区之间的通信联系和数据传输;指挥监控系统由各种监控台、屏幕显示等设备组成,其功能是直观地显示各测控站的设备工作状态、航天器运行情况,使指挥控制人员随时掌握航天器的运行情况,并实时下达指挥命令和发出控制指令;时间统一系统由高精度时钟,标准时频信号源及相应的接口设备组成,为控制中心和各测控站提供标准时间和频率。图 1.3 为航天控制中心的简化功能图。

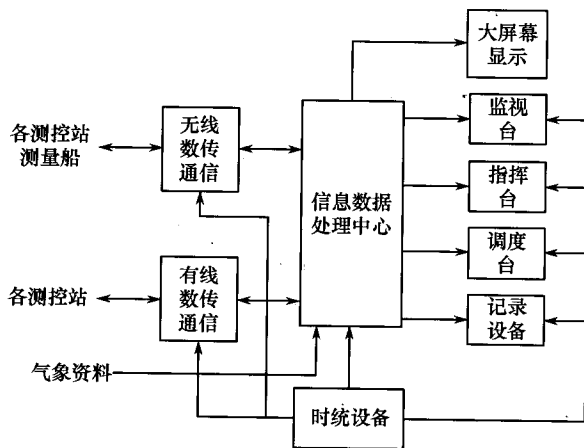


图 1.3 航天控制中心的简化功能图

1.3.3.2 航天测控站

航天测控站的任务是直接对航天器进行跟踪测量、遥测、遥控和通信等,将接收到的测量、遥测信息传送给航天控制中心,根据航天控制中心的指示与航天器通信,并配合控制中心完成对航天器的控制。测控站也可以根据规定的程序独立实施对航天器的控制。航天测控站设备

包括外测系统、遥测系统、遥控系统、通信系统、电视系统、时控系统、计算机系统以及辅助设备。其中外测系统是测控站的主体部分,其任务是对航天器进行跟踪测量,获取航天器的运动参数,确定航天器的轨道和位置。遥测系统的任务是接收从航天器发送出来的关于航天器上设备工作情况、空间环境参数和宇航员的生理信息等。电视系统则接收有关载人航天器的动态作业情况,观察宇航员在航天器内和舱外空间的情况。图 1.4 为测控站的功能图。

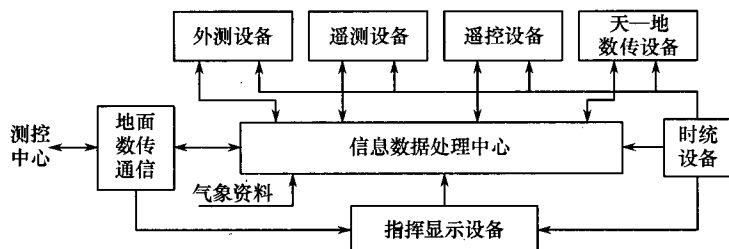


图 1.4 测控站功能图

航天测控站根据其位置不同,分为天基测控站、空基测控站、地面测控站。天基测控站即运行于地球同步轨道上的跟踪与数据中继卫星,简称中继卫星(TDRS)。空基测控站即测量飞机,是一种空中机动测控站。主要用在载人航天器的入轨段和返回段,保障天地间双向语音通信,接收和记录遥测信息,必要时向航天器发送遥控指令。地面测控站有陆上固定站、陆上机动站和海上测量船。根据测控区域的要求,测控站分布在很广的范围,其布站可在国土境内,也可在全球适合的地点。目前我国的测控站(固定站)基本上都布置在国内。

1.3.3.3 中国航天测控网

我国目前有 3 个航天发射基地,1 个航天测控中心,5 个固定测控站,以及机动回收站和 3 艘远望号测量船。3 个发射基地分别为西昌卫星发射中心、酒泉卫星发射中心和太原卫星发射中心,测控中心为西安卫星测控中心;5 个固定测控站分别为长春站、闽西站、南宁、渭南站和喀什站。

图 1.5 则是前苏联的“联盟”号宇宙飞船与美国“阿波罗”号宇宙飞船交会对接测控系统协同示意图。在飞行控制中心的大厅内装有各类显示设备,指挥控制人员可从大屏幕显示器上观察飞船在各个飞行阶段上的轨迹及飞船的运动情况。测控中心的信息计算装置把经过计算得到的有关控制飞船机动的参数送到测控站,由测控站发出指令,使飞船完成交会对接过程。

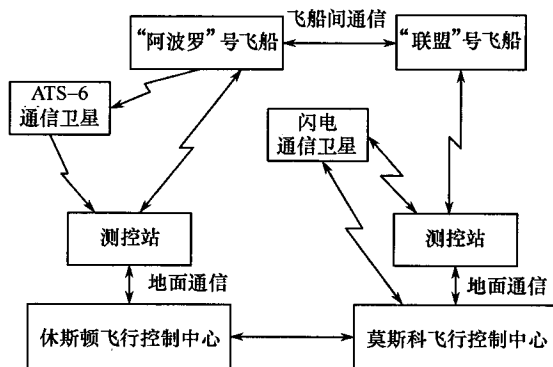


图 1.5 “联盟”号与“阿波罗”号宇宙飞船交会对接测控系统示意图