

“十三五”国家重点出版物出版规划项目



载人航天出版工程

总主编：周建平  
总策划：邓宁丰



# 现代航天遥测技术 [上]

李艳华 李凉海 谌明 彭泳卿 编著



 中国宇航出版社

“十三五”国家重点出版工程



国家出版基金项目

载人航天出版工程

总主编：周建平  
总策划：邓宁丰

# 现代航天遥测技术（上）

李艳华 李凉海 谌明 彭泳卿 编著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

现代航天遥测技术：全2册 / 李艳华等编著. --北京：中国宇航出版社，2018.4

ISBN 978-7-5159-1464-0

I. ①现… II. ①李… III. ①空间遥测 IV. ①TP873

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 086863 号

责任编辑 侯丽平

封面设计 宇星文化

出版

发行 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路8号

(010)60286808

邮编 100830

(010)68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)60286888

(010)60286887

(010)68371900

(010)60286804(传真)

零售店 读者服务部

(010)68371105

承印 河北画中国画印刷科技有限公司

版次 2018年4月第1版

2018年4月第1次印刷

规格 880×1230

开本 1/32

印张 41.75

字数 1201千字

书号 ISBN 978-7-5159-1464-0

定价 368.00元

本书如有印装质量问题，可与发行部联系调换

## 《载人航天出版工程》总序

中国载人航天工程自1992年立项以来，已经走过了20多年的发展历程。经过载人航天工程全体研制人员的锐意创新、刻苦攻关、顽强拼搏，共发射了10艘神舟飞船和1个目标飞行器，完成了从无人飞行到载人飞行、从一人一天到多人多天、从舱内实验到出舱活动、从自动交会对接到人控交会对接、从单船飞行到组合体飞行等一系列技术跨越，拥有了可靠的载人天地往返运输的能力，实现了中华民族的千年飞天梦想，使中国成为世界上第三个独立掌握载人航天技术的国家。我国载人航天工程作为高科技领域最具代表性的科技实践活动之一，承载了中国人民期盼国家富强、民族复兴的伟大梦想，彰显了中华民族探索未知世界、发现科学真理的不懈追求，体现了不畏艰辛、大力协同的精神风貌。航天梦是中国梦的重要组成部分，载人航天事业的成就，充分展示了伟大的中国道路、中国精神、中国力量，坚定了全国各族人民实现中华民族伟大复兴中国梦的决心和信心。

载人航天工程是十分复杂的大系统工程，既有赖于国家的整体科学技术发展水平，也起到了影响、促进和推动着科学技术进步的重要作用。载人航天技术的发展，涉及系统工程管理，自动控制技术，计算机技术，动力技术，材料和结构技术，环控生保技术，通信、遥感及测控技术，以及天文学、物理学、化学、生命科学、力学、地球科学和空间科学等诸多科学技术领域。在我国综合国力不断增强的今天，载人航天工程对促进中国科学技术的发展起到了积极的推动作用，是中国建设创新型国家的标志性工程之一。

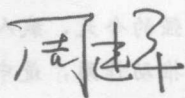
我国航天事业已经进入了承前启后、继往开来、加速发展的关键时期。我国载人航天工程已经完成了三步走战略的第一步和第二步

步第一阶段的研制和飞行任务，突破了载人天地往返、空间出舱和空间交会对接技术，建立了比较完善的载人航天研发技术体系，形成了完整配套的研制、生产、试验能力。现在，我们正在进行空间站工程的研制工作。2020年前后，我国将建造由20吨级舱段为基本模块构成的空间站，这将使我国载人航天工程进入一个新的发展阶段。建造具有中国特色和时代特征的中国空间站，和平开发和利用太空，为人类文明发展和进步做出新的贡献，是我们航天人肩负的责任和历史使命。要实现这一宏伟目标，无论是在科学技术方面，还是在工程组织方面，都对我们提出了新的挑战。

以图书为代表的文献资料既是载人航天工程的经验总结，也是后续任务研发的重要支撑。为了顺利实施这项国家重大科技工程，实现我国载人航天三步走的战略目标，我们必须充分总结实践成果，并充分借鉴国际同行的经验，形成具有系统性、前瞻性和实用性的，具有中国特色的理论与实践相结合的载人航天工程知识文献体系。

《载人航天出版工程》的编辑和出版就是要致力于建设这样的知识文献体系。书目的选择是在广泛听取参与我国载人航天工程各专业领域的专家意见和建议的基础上确定的，其中专著内容涉及我国载人航天科研生产的最新技术成果，译著源于世界著名的出版机构，力图反映载人航天工程相关技术领域的当前水平和发展方向。

《载人航天出版工程》凝结了国内外载人航天专家学者的智慧和成果，具有较强的工程实用性和技术前瞻性，既可作为从事载人航天工程科研、生产、试验工作的参考用书，亦可供相关专业领域人员学习借鉴。期望这套丛书有助于载人航天工程的顺利实施，有利于中国航天事业的进一步发展，有益于航天科技领域的人才培养，为促进航天科技发展、建设创新型国家做出贡献。



2013年10月

## 序

遥测作为现代航天测控的三大手段（即跟踪、遥测和遥控）之一，用途广泛，作用巨大。当代世界上的航天活动都离不开遥测和遥测系统，特别是作为航天器工作状态、航天器内外环境、航天员活动及其身体状况的主要信息源，遥测数据对于航天活动、航天器改进、航天员安全的作用显得尤为重要。

我国遥测技术的发展，也是从1956年航天遥测的起步开始的。50多年来，随着我国航天事业的蓬勃发展和几代航天遥测人的不懈努力，我国遥测技术的水平和规模，目前已跻身国际先进行列。进入21世纪以来，国外遥测技术在频段、体制、高码率、软件化、信道编译码等方面也有许多创新值得借鉴，《现代航天遥测技术》就是在这种背景下应运而生的。

本书是国内20多年来遥测业界内容崭新的一部著作，其作者长期在国家级航天遥测技术科研机构——北京遥测技术研究所工作，是从事遥测技术研究、遥测系统设计与设备研制以及航天测控领域研究的专家，具有扎实的理论基础和丰富的工程实践经验。作者站在系统设计的高度，以通观全局的眼光，从基础和专业两个层面出发，由浅入深，由表及里，全面、系统地介绍了航天遥测的基本概念、航天遥测的技术基础、航天遥测系统的总体设计、遥测传感器、数据采编与调制发射、天线与信道、遥测跟踪系统等，并对遥测基带、遥测数据记录、遥测数据处理、遥测系统软件、遥测信息安全、遥测系统测试、遥测标准等进行了详细分析和讨论。

本书涉及了近年来开发的遥测新技术和新的应用场合，如：扩频和扩频自跟踪、综合基带与软件解调、网络与图像传输等新技术以及临近空间遥测、深空遥测、天基遥测等新的应用场合。与以往

出版的同类专业书相比，本书更加突出了“现代”和“航天”两大特点。本书内容丰富，结构合理，语言流畅，可读性好。本书适合于航天遥测专业科研人员、高校相关专业师生、航天测控相关管理人员学习参考。可以预见，本书的出版将对我国航天遥测业界的技术发展起到推动和引领作用，对培养更多的优秀航天遥测专业人才也将发挥重要作用。

谨以此序共勉！

沈昌俊

2018年1月·北京

## 前 言

航天遥测技术是航天技术体系中不可或缺的重要分支。没有测量就没有科学；同样，没有航天遥测技术，就不能想象各种航天器的发展。

近 30 年，以载人航天工程、探月工程、北斗导航系统工程、新一代运载火箭等为代表的中国航天事业取得了巨大的成就，另一方面，世界电子信息技术迅猛发展，日新月异。与此同步，中国的航天遥测技术亦得到了跨越式的发展。遥测频段的显著提高、基于软件无线电技术的测控基带技术、深空天线组阵信号合成技术、速率达每秒数吉比特的数传技术、基于网络的遥测软件技术、基于 MEMS 和激光光纤应用的新型传感器技术、应用中继卫星的卫星/火箭数据传输技术、多星座卫星导航技术、相控阵天线在航天遥测系统中的应用、现代密码技术的应用、CCSDS 分包遥测标准的应用等是这一时期航天遥测技术进步的重要标志。北京遥测技术研究所作为中国航天遥测事业的主力军和国家队，在推动航天遥测技术跨越式发展的历史进程中作出了重要的贡献，发挥了创新引领作用。

本书就是以北京遥测技术研究所创新实践成果为基础编写的。推出本书的目的，一是总结过去，在新的起点上开始中国航天遥测事业发展的新征程，为实现“探索浩瀚宇宙、发展航天事业、建设航天强国”的中国航天梦贡献力量；二是与同行们交流互鉴，共同进步；三是为青年航天遥测人的学习和研究提供参考。

北京遥测技术研究所的很多同志先后参加了本书的编写和校对工作，主要人员还有孙甲琦、卢满宏、邹江波、刘昊、刘德喜、廖小海、徐松艳、关贵注、史永康、祝大龙、陈青松、张世名、张显辉、李连辉、王晓波、朱宏涛、王圆圆、丁兴文、孙向珍、马玉国、

胡剑平、董伟升、贾军、胡昊、钟育民、孙奕庭、于晓黎、赵静远、唐军芳、张媛等。谢求成、房鸿瑞、谭维炽、吕善伟、张晓林、刘建伟、袁嗣杰、宋宗炎等专家审阅了书稿并提出了很多宝贵的意见。中国航天科技集团有限公司、中国宇航出版社为本书的出版提供了大力支持和帮助。在此一并致谢！限于作者的学识水平，书中不妥之处在所难免，敬请广大专家、读者不吝赐教。

李艳华

2018年4月·北京

# 目 录

第1章 绪论 .....	1
1.1 航天遥测系统概念 .....	1
1.2 航天遥测发展历程 .....	2
1.2.1 遥测技术的发展 .....	2
1.2.2 我国遥测系统的发展 .....	4
1.2.3 遥测系统的未来发展 .....	5
1.3 现代航天遥测系统组成 .....	7
1.3.1 数据采集 .....	8
1.3.2 数据传输 .....	9
1.3.3 数据处理、显示及记录 .....	11
1.4 现代航天遥测系统分类 .....	11
1.5 现代航天遥测系统特点 .....	13
1.6 航天遥测系统作用 .....	14
参考文献 .....	17
第2章 航天遥测技术基础 .....	18
2.1 参数测量及数据采集 .....	18
2.1.1 信息与信息量 .....	18
2.1.2 信号的描述及分类 .....	19
2.2 信息论简述 .....	23
2.2.1 参数测量 .....	23
2.2.2 数据采集 .....	24
2.3 信息编码 .....	28

2.3.1	信源编码 .....	28
2.3.2	信源加密 .....	36
2.3.3	信道编码 .....	54
2.4	遥测传输链路基础 .....	67
2.4.1	传输方程 .....	67
2.4.2	噪声分析 .....	69
2.4.3	遥测传输链路设计 .....	75
2.5	信号调制与检测 .....	76
2.5.1	信号调制 .....	76
2.5.2	遥测信号复用 .....	97
2.5.3	遥测信号检测 .....	100
2.5.4	遥测信号同步 .....	108
	参考文献 .....	114
<b>第3章</b>	<b>现代航天遥测系统 .....</b>	<b>116</b>
3.1	概述 .....	116
3.1.1	航天遥测系统的发展演变 .....	116
3.1.2	现代遥测需解决的问题及未来发展趋势 .....	127
3.2	系统工作原理 .....	131
3.2.1	遥测发送端 .....	131
3.2.2	遥测接收端 .....	131
3.2.3	遥测系统信息传输模型 .....	137
3.3	系统总体设计 .....	139
3.3.1	航天器轨道与空间环境 .....	139
3.3.2	测量需求分析 .....	157
3.3.3	遥测数据率论证 .....	158
3.3.4	传输体制选择 .....	160
3.3.5	传输频率选择 .....	162
3.3.6	链路设计 .....	168
3.3.7	六性设计 .....	175

3.4 导弹火箭遥测系统 .....	209
3.4.1 导弹火箭遥测系统的作用 .....	210
3.4.2 导弹火箭遥测的特点 .....	211
3.4.3 测量与传输体制 .....	214
3.4.4 导弹火箭遥测系统组成和工作原理 .....	248
3.4.5 导弹火箭遥测系统设计中的若干问题 .....	249
3.4.6 再入遥测系统 .....	263
3.5 卫星飞船遥测系统 .....	276
3.5.1 卫星飞船遥测系统的作用 .....	277
3.5.2 卫星飞船遥测的特点 .....	277
3.5.3 遥测体制的选择 .....	278
3.5.4 系统组成和工作原理 .....	280
3.5.5 卫星飞船遥测系统设计中的若干问题 .....	286
3.6 临近空间遥测系统 .....	288
3.6.1 临近空间遥测系统的作用 .....	288
3.6.2 临近空间遥测的特点 .....	288
3.6.3 遥测体制的选择 .....	290
3.6.4 系统组成和工作原理 .....	296
3.6.5 临近空间遥测系统设计中的若干问题 .....	297
3.7 深空遥测系统 .....	302
3.7.1 深空遥测系统的作用 .....	302
3.7.2 深空遥测的特点 .....	303
3.7.3 深空遥测体制选择 .....	306
3.7.4 深空遥测系统组成及关键技术 .....	318
3.7.5 深空遥测系统的技术发展趋势 .....	328
3.8 天基遥测系统 .....	340
3.8.1 天基遥测系统的作用 .....	341
3.8.2 天基遥测系统的特点 .....	345
3.8.3 天基遥测体制的选择 .....	348

3.8.4	天基遥测系统组成和工作原理 .....	359
3.8.5	天基遥测系统设计中的若干问题 .....	364
3.9	航天遥测技术在无人机领域的应用 .....	364
3.9.1	无人机遥测系统的作用与特点 .....	364
3.9.2	无人机遥测系统的发展现状与趋势 .....	365
3.9.3	无人机系统设计中的若干问题 .....	366
	参考文献 .....	369
<b>第4章</b>	<b>遥测传感器 .....</b>	<b>373</b>
4.1	概述 .....	373
4.1.1	传感器的地位和作用 .....	373
4.1.2	传感器的分类 .....	376
4.1.3	传感器的静态特性 .....	376
4.1.4	传感器的动态特性 .....	378
4.2	航天遥测传感器和变换器 .....	380
4.2.1	液位传感器 .....	380
4.2.2	温度传感器 .....	398
4.2.3	加速度传感器 .....	419
4.2.4	压力传感器 .....	451
4.2.5	位移传感器 .....	468
4.2.6	热流传感器 .....	479
4.2.7	烧蚀传感器 .....	489
4.2.8	流量传感器 .....	498
4.2.9	噪声传感器 .....	516
4.2.10	信号变换器 .....	529
4.3	传感器在航天型号中的典型应用 .....	530
4.3.1	液位传感器典型应用 .....	530
4.3.2	温度传感器典型应用 .....	536
4.3.3	加速度传感器典型应用 .....	541
4.3.4	热流传感器典型应用 .....	542

4.3.5 烧蚀传感器典型应用 .....	543
4.3.6 相对行程传感器典型应用 .....	544
4.3.7 光学传感器典型应用 .....	545
4.4 遥测传感器的发展趋势分析 .....	546
参考文献 .....	549
<b>第5章 数据采编与调制发射 .....</b>	<b>552</b>
5.1 遥测数字信息的传输 .....	552
5.1.1 常规遥测信息传输 .....	552
5.1.2 图像信息传输 .....	567
5.1.3 内测弹道信息传输 .....	569
5.2 数据综合技术 .....	578
5.2.1 多路信号采集 .....	578
5.2.2 高速总线互联 .....	581
5.2.3 信号存储与处理 .....	604
5.2.4 遥测格式及生成 .....	608
5.3 调制与发射技术 .....	616
5.3.1 调前滤波 .....	616
5.3.2 载波调制 .....	622
5.4 数据压缩 .....	650
5.4.1 数据压缩指标 .....	650
5.4.2 无损压缩 .....	650
5.4.3 图像压缩标准 JPEG2000 工作原理 .....	650
5.4.4 视频压缩标准 H.264 工作原理 .....	652
参考文献 .....	654
<b>第6章 遥测天线 .....</b>	<b>655</b>
6.1 概述 .....	655
6.2 遥测天线基本参量 .....	656
6.2.1 天线方向图 .....	656

6.2.2	方向性系数 .....	660
6.2.3	天线增益 .....	662
6.2.4	天线阻抗 .....	663
6.2.5	天线极化 .....	665
6.2.6	天线效率 .....	667
6.2.7	天线带宽 .....	668
6.3	遥测天线类型 .....	669
6.3.1	地面遥测天线 .....	669
6.3.2	弹载遥测天线 .....	671
6.3.3	箭载遥测天线 .....	673
6.3.4	星载遥测天线 .....	675
6.4	遥测天线设计 .....	680
6.4.1	波导裂缝阵天线设计 .....	680
6.4.2	微带天线设计 .....	699
6.4.3	相控阵天线设计 .....	708
6.4.4	反射面天线设计 .....	733
6.5	新型遥测天线 .....	740
6.5.1	透镜天线 .....	740
6.5.2	可重构天线 .....	748
6.6	遥测天线的结构、热设计 .....	754
6.6.1	遥测天线的结构设计 .....	754
6.6.2	遥测天线的电、机、热一体化设计 .....	756
6.6.3	遥测天线的环境试验 .....	757
6.6.4	可靠性工作 .....	759
6.7	遥测天线的测量 .....	760
6.7.1	天线电参数测量 .....	760
6.7.2	远场测量技术 .....	761
6.7.3	紧缩场测量技术 .....	763
6.7.4	平面近场测量技术 .....	765

6.7.5	球面近场测量技术 .....	767
6.7.6	天线几何量测量技术 .....	767
	参考文献 .....	770
<b>第7章</b>	<b>遥测信道 .....</b>	<b>774</b>
7.1	概述 .....	774
7.2	主要参数 .....	775
7.2.1	增益 .....	775
7.2.2	1 dB 压缩点及饱和输出功率 .....	777
7.2.3	噪声系数 .....	777
7.2.4	幅频特性 .....	779
7.2.5	相频特性 .....	780
7.2.6	频率准确度与稳定度 .....	782
7.2.7	组合频率 .....	785
7.3	遥测信道主要组成部分 .....	788
7.3.1	低噪声放大器 .....	790
7.3.2	变频信道 .....	791
7.3.3	频率基准源及频率合成器 .....	793
7.3.4	功率放大器 .....	796
7.3.5	T/R 组件 .....	798
7.4	遥测信道测试方法 .....	800
7.4.1	噪声系数的测量 .....	801
7.4.2	同频增益的测量 .....	801
7.4.3	互调和交叉点的测试 .....	802
7.4.4	群时延及变频增益的测试 .....	803
7.4.5	相位噪声测试 .....	804
7.4.6	频率准确度测试 .....	805
7.4.7	功率测试 .....	806
7.4.8	自动化测试 .....	807
7.5	遥测信道新技术 .....	809

7.5.1	微波毫米波材料与工艺 .....	809
7.5.2	MIC 工艺 .....	812
7.5.3	CMOS 芯片技术 .....	815
	参考文献 .....	823
<b>第 8 章</b>	<b>遥测跟踪系统 .....</b>	<b>825</b>
8.1	概述 .....	825
8.1.1	遥测天线自跟踪系统的作用及特点 .....	826
8.1.2	系统组成、功能及主要技术指标 .....	827
8.2	跟踪体制 .....	830
8.2.1	圆锥扫描体制 .....	831
8.2.2	比相单脉冲跟踪体制 .....	834
8.2.3	比幅单脉冲跟踪体制 .....	835
8.2.4	高次模检出跟踪体制 .....	837
8.2.5	多波束跟踪体制 .....	838
8.2.6	各种跟踪体制的比较 .....	838
8.3	角跟踪误差解调 .....	839
8.3.1	圆锥扫描体制跟踪误差解调 .....	840
8.3.2	比相单脉冲跟踪体制跟踪误差解调 .....	840
8.3.3	比幅单脉冲跟踪体制跟踪误差解调 .....	842
8.3.4	高次模检出跟踪体制跟踪误差解调 .....	842
8.3.5	角误差标校 .....	843
8.4	天线座 .....	844
8.4.1	天线座的种类和用途 .....	844
8.4.2	风载荷计算 .....	845
8.4.3	驱动功率计算 .....	851
8.4.4	天线座设计中的若干问题 .....	853
8.5	伺服控制 .....	857
8.5.1	概述 .....	857
8.5.2	伺服系统设计 .....	870