



《中国工程物理研究院科技丛书》第006号

再入遥测技术

(上册)

谢铭勋 编著

俞大光 皮德忠 胡伟中 审校

国防工业出版社

《中国工程物理研究院科技丛书》第006号

再入遥测技术

(上册)

谢铭勋 编著

俞大光 皮德忠 胡伟中



国防工业出版社

(京)新登字106号

内 容 简 介

本书(上册)针对火箭、导弹(飞行器)在再入段飞行中的各种有关环境因素,全面、深入地论述再入遥测系统体制的优化及其应用技术,重点介绍再入遥测中传输缓变信号的基本理论和技术,主要是二元脉冲编码(PCM)和脉位键控(PPK)两种遥测系统的基本传输体制的基本理论和设计方法。它内容丰富、学术思想有独到之处,技术设计先进,也是多年科研实践的科学总结。全书共十章,包括概论,数字式遥测系统,数据采集,二元PCM信号射频传输及数据恢复,一种新的数字式脉位键控(PPK)系统及相关的脉位编码调制(PPCM)和PCM-PPK系统,以及PPK与其他传输体制,如ASK、FSK、PSK等的比较和分析,还有功率传输问题等。

本书可供从事测控技术(遥测、遥控、制导等)和无线电通信、导航、定位等专业的科技人员以及高等院校相关专业的师生参考。

再入遥测技术

(上册)

谢铭勋 编著

俞大光 皮德忠 胡伟中 审校

责任编辑 林秀权

*

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)

新华书店经售

*

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168毫米 32开本 印张12 311千字

1992年7月第一版 1992年7月第一次印刷 印数: 0001—1000册

ISBN 7-118-00970-7/V·77 定价: 11.70元

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，国防科工委于 1988 年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖，内容具体、实用，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下，国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版，随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金

第一届评审委员会组成人员

主任委员：冯汝明

副主任委员：金朱德 太史瑞

委 员：尤子平 朵英贤 刘琯德

(按姓氏笔画排列)

何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫梧生

曾 铎

秘 书 长：刘琯德

《中国工程物理研究院科技丛书》出版说明

中国工程物理研究院建院 30 年来，坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向，完成了国家下达的各项国防科研任务。通过完成任务，在许多专业学科领域里，不论在基础理论方面，还是在实验测试技术和工程应用技术方面，都有重要发展和创新，积累了丰富的知识和经验，造就了一大批优秀科技人才。

为了扩大科技交流与合作，促进我院事业的继承与发展，系统地总结我院 30 年来在各个专业领域里集体积累起来的经验，吸收国内外最新科技成果，形成一套系列科技丛书，无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科研工作的成果，内容涉及本院过去开设过的 20 多个主要学科。现在和今后开设的新学科，也将编著出书，续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍，经编委会审定后，也纳入本丛书系列。

谨以此套丛书献给 30 年来为我国国防现代化而献身的人们。

《中国工程物理研究院科技丛书》编审委员会

1989 年 1 月 25 日

《中国工程物理研究院科技丛书》

首届编审委员会

主 任 俞大光

副主任 章冠人

委 员 (以姓氏笔画为序)

丁厚本 于洞庭 水鸿寿 方乃相 王铁铮

刘庆兆 汤绍源 华欣生 吴宏志 杨成龙

张永昌 张寿齐 金行星 周正朝 罗诚鉴

赵维晋 姚景华 姚礼屏 贺仁辅 高天祐

徐锡申 徐清之 董海山 谢铭勋 曾启铭

赖祖武

本丛书编辑部

负 责 人 吴衍斌

本册编辑 吴衍斌

《中国工程物理研究院科技丛书》

已出版书目

001 高能炸药及相关物性能

董海山 周芬芬主编 科学出版社 1989年10月出版

002 光学高速摄影测试技术

谭显祥编著 科学出版社 1990年2月出版

003 凝聚炸药起爆动力学

章冠人等编著 国防工业出版社 1991年9月出版

004 线性代数方程组的迭代解法

胡家赣编著 国防工业出版社 1991年12月出版

005 映象与混沌

陈式刚编著 国防工业出版社 1992年6月出版

006 再入遥测技术 (上册)

谢铭勋编著 国防工业出版社 1992年7月出版

007 再入遥测技术 (下册)

谢铭勋编著 国防工业出版社 1992年12月出版

序

飞行器从外层空间再入稠密大气层时，会遇到恶劣的力学和热力学环境，如高于正常重力数十倍的惯性力、频谱很宽的随机振动、数千摄氏度的壳体温度和足以阻止微波传输的等离子体黑障，等等。为了准确了解飞行器系统在这种环境中能否正常工作，就要采用遥测手段来收集飞行过程中各种物理量。再入遥测已成为一个独立、强大的国家应该掌握的一门技术。

中国工程物理研究院在掌握再入遥测技术过程中，形成了一套独具特色的学术思想。例如：在传输体制方面，对传统的脉冲调位体制进行改造，发展了多元脉位编码体制；在克服等离子体造成的数据传输中断问题上，不用强行穿透的方法，而是利用廉价储存元件加上构思巧妙的软件，开辟了边记边发的技术途径；针对传统的自动跟踪方法容易丢失目标，采用了“多波束-多接收机-数据合成”技术；在待测物理量数据的编码上，也创造了独特的方法。上述研究成果，是周书年、高殿华、谢铭勋、葛俊新、杨大亮、张富堂、刘士彦、阎立群、丛江滋、齐宝英、吴根声、魏立志、李希华、甘翠英等同志与他们领导的各研究小组 20 多年共同努力的结果，曾获包括国家科技进步一等奖在内的多种国家级奖励。

本书作者谢铭勋同志在三年多时间里，对集体成果进行了整理、归纳与鉴别，结合自己长期从事遥测系统总体设计的丰富经验和深入的理论研究，完成了《再入遥测技术》（上、下册）这部专著，实现了我院研究工作者多年来的宿愿。我希望，这部书的出版能有助于促进国内外遥测技术的学术交流、有助于年轻一代的科技工作者创造出更多、更新的科研成果。

李幼平●

● 李幼平同志是中国工程物理研究院再入遥测科研工作的主要负责人。

前 言

本书是按照《中国工程物理研究院科技丛书》编写要求而编著，经丛书编委会审定的一本关于再入遥测技术的专著，是我院在再入飞行器遥测系统的设计、研制和应用等方面积累的大量实践经验之系统总结。其中有些理论和技术是遥测技术研究和应用的新发展。

本书分上、下两册出版。上册是再入遥测技术的基础部分，重点介绍再入遥测中传输缓变信号的基本理论和技术，共分十章。第一章是再入遥测概论。第二章概述再入遥测采用的数字式遥测系统的基本原理。二元脉冲编码 (PCM) 和脉位键控 (PPK) 是再入遥测中采用的两种基本传输体制。PPK 是在传统的脉冲位置调制 (PPM) 基础上，结合多年再入遥测实践发展起来的一种新的多元脉位编码传输体制，在再入遥测中有其独特的优点和应用。二元 PCM 遥测系统和 PPK 遥测系统在数据采集、同步理论等方面有着许多共同点和相似之处。第三章到第九章介绍了这两种遥测系统的基本理论和设计方法。第三章 (遥测数据采集系统) 介绍了再入遥测中应用固定程序数据采集系统的基本原理，它也是可编程序数据采集系统的基础。其内容不但适用于二元 PCM 遥测系统，而且也适用于多元脉位编码 PPCM 遥测系统。第四章 (二元 PCM 信号的射频传输)，分析比较了几种常用的二元编码遥测体制在恒参信道中的传输性能。虽然再入遥测信道属于变参信道，但这部分内容仍是设计再入遥测系统传输设备的重要基础。第五章 (PCM 数据恢复)，主要介绍码同步和帧同步技术。它不但是设计二元 PCM 遥测系统的基础，而且也是设计多元脉冲位置编码调制遥测系统的重要基础。第六、七、八、九章总结并发展了传统的脉冲体制遥测系统的基本理论和技术。在再入遥测中，

传统的模拟式 PPM 系统已为新的数字式 PPK 系统所取代。其中,第六章高精度时间信息的传输,介绍了脉冲体制传输高精度时间信息的基本原理。该章内容是 PPK 遥测系统的基础之一,同时也是研究特快信号传输的基础。第七章(脉位编码调制 PPCM),研究了 PPCM 的基本原理和编码、译码的基本方法。在再入遥测中,PPCM 有着十分重要的应用:特快信号的传输、PPK 系统的帧同步和再入等待接收站的遥控等。第八章(脉冲编码-脉位键控)遥测系统,介绍了实现脉冲体制数字化传输的基本理论和技术。第九章对 PPK 与常用的其他传输体制(ASK, FSK, PSK 等)在频宽系数和能耗系数两方面进行了比较和分析。第十章遥测系统的功率传输,研究了发射机输出端至接收机输入端之间功率传输的基本规律,它是再入遥测系统设计的重要内容之一。

下册部分较全面、系统、深入地论述了再入遥测的工程技术。例如再入存储遥测技术——记忆重发技术;分集接收——数据合成技术;数据压缩技术;特快信号遥测技术等等。

《再入遥测技术》上册书稿由中国工程物理研究院李幼平研究员初审,电子科技大学皮德忠副教授、中国工程物理研究院俞大光研究员和中国工程物理研究院电子工程研究所胡伟中高级工程师专审。参加上册审稿的还有刘士彦副研究员、杨帆副研究员、王立生高级工程师和郭先坤工程师等。他们为本书提出了许多宝贵的意见。本书插图由陶璧华工程师绘制。陶璧华工程师在协助作者整理书稿的过程中做了大量工作。胡伟中高级工程师在本书定稿阶段对全书文句及符号使用的统一作了全面修正。本书最后由丛书编委会俞大光主任审定。

在本书编著过程中,中国工程物理研究院各级领导和有关同志给予了很大的支持和关心。在此谨表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

目 录

第一章 概论	1
1.1 再入遥测的特点	1
1.2 再入遥测系统的组成与分类	3
1.3 再入遥测系统的技术要求	6
1.4 我国再入遥测技术的发展与应用	10
第二章 数字式遥测系统	13
2.1 引言	13
2.2 模拟信号的量化	14
2.3 二进制计数与二元编码	18
2.4 多元编码的概念	20
2.5 数字式遥测系统的优点及基本组成	22
第三章 数据采集	26
3.1 概述	26
3.2 信号匹配器	31
3.3 交换子	38
3.4 程序器	52
3.5 模/数 (A/D) 转换器	69
3.6 采样保持电路	73
3.7 内时统时间码	80
3.8 控制相加电路和数字信号的多路复用	82
3.9 码型变换	86
3.10 数据采集系统的其他考虑	89
第四章 二元 PCM 信号的射频传输	91
4.1 概述	91
4.2 匹配滤波器的概念	92
4.3 幅移键控 (ASK)	103
4.4 频移键控 (FSK)	119
4.5 相移键控 (PSK)	125

4.6	差分相移键控 (DPSK)	131
4.7	二元 PCM 调频 (PCM/FM)	136
4.8	相移键控/调相 (PSK/PM) 或差分相移键控/调相 (DPSK/PM)	142
4.9	各种二元 PCM 传输体制的性能比较	148
第五章 PCM 数据恢复系统		153
5.1	概述	153
5.2	码同步信号的提取	154
5.3	帧同步	184
5.4	字同步	206
5.5	PCM 信号的反变换	206
第六章 高精度时间信息的传输		212
6.1	概述	212
6.2	高精度时间信息传输系统模型	212
6.3	脉冲调制信号通过理想窄带滤波器	213
6.4	固定门限检测及检测误差	221
6.5	射频脉冲的前沿抖动	224
6.6	脉冲信号传输系统中的误脉冲和漏脉冲概率	225
6.7	数据完好概率与最佳判决电平	229
第七章 脉冲位置编码调制 (PPCM)		234
7.1	概述	234
7.2	PPCM 码的分类	235
7.3	PPCM 码的编码规则	237
7.4	PPCM 码的信号传输	239
7.5	PPCM 码的译码原理	240
7.6	PPCM 码信号传输的抗干扰性能	255
第八章 脉冲编码调制-脉位键控 (PCM-PPK) 遥测系统		262
8.1	PCM-PPK 遥测系统的组成和基本原理	262
8.2	PPK 信号的编码和译码	269
8.3	PPK 信号的检测	273
8.4	PPK 系统的同步技术	277
8.5	PCM-PPK 系统的能耗系数	298

第九章 PPK 与常用编码传输体制的比较	316
9.1 概述	316
9.2 理想传输系统	317
9.3 信息传输中频带和功率的交换	319
9.4 理论上评价数字传输系统的标准	321
9.5 常用数字传输系统的能量效率与频带效率的关系	324
9.6 PPK 的能量效率与频带效率的关系	331
9.7 实际系统和理想系统的性能	332
第十章 遥测系统的功率传输	335
10.1 功率传输系统的组成	335
10.2 天线的基本特性	337
10.3 再入遥测对发射天线的基本要求	341
10.4 接收的信号功率	343
10.5 大气损耗	343
10.6 功率在网络中的传输	344
10.7 理想的窄带噪声源	347
10.8 具有极窄频带的噪声网络	348
10.9 实际网络的噪声特性	350
10.10 遥测系统自由空间传播的作用距离方程	356
10.11 系统功率传输电平图和功率裕量的概念	359
主要符号一览表 (上册)	362
参考文献	367

第一章 概 论

1.1 再入遥测的特点

再入遥测技术主要是指对飞行器(如导弹弹头)在再入大气过程中的各种物理参数进行遥测的一项专门技术。它的基本原理与通常的遥测技术相同。但是,由于测量对象的特殊性,它在很多方面不同于一般遥测,相对而言,它比一般遥测困难得多。再入遥测技术具有一系列明显的特点。它的特殊性来自以下三个方面:第一,被测参数本身的特殊性;第二,特殊的弹头内部环境;第三,飞行器(弹头)再入大气层产生的环境条件。

再入遥测的主要特点可以归纳如下:

(1) 某些被测信号的频带很宽。再入遥测中遇到的一些特快信号具有很宽的信号频带,有些信号的频带可达 3 MHz 以上,这对再入遥测系统的接收机、发射机和记录设备将带来相应的要求。

(2) 特快信号要求高精度的时间测量。很多特快信号的信息量常常反映在时间的准确性上,例如:有些特快信号就是两个窄脉冲之间的时间间隔,其测量误差要求不大于 $100\sim 200\text{ns}$ 。触地信号测量及某些特快信号波形测量等也都要求相当高的时间测量精度。

(3) 特快信号的单次性。特快信号的另一特点是它的单次性,即它在试验过程中只出现一次。因此,首先要求可靠地传输这个单次宽频带信号,同时要采用特殊标记将它与其他信号区分开。此外,还需控制记录设备,以便准确捕获和记录这个信号。这样就给再入遥测系统带来一系列不同于常规遥测系统的特点。

(4) 弹上遥测部件要有良好的屏蔽、接地,地面遥测设备也应具有高的抗干扰性能。在弹头的再入遥测中,通常要涉及引

爆瞬间所产生的快速脉冲信号的测量问题。引爆过程中,除引爆装置点火可产生几千安培量级的高频杂乱的电流外,爆轰过程也产生强烈的干扰信号,并且这些干扰信号(包括电波和电流)还被弹壳封闭在一个有限的空间里。因此,被测信号很容易被干扰信号所破坏。这就要求遥测系统特别是弹上遥测部件具有高的抗干扰性能。

(5) 为了完成某些特快信号的测量,弹上遥测部件(包括电缆束)应保证在射频信号从弹上天线发出之前处于完好状态。遥测部件在弹上的布局应确保不被爆轰碎片或应力波等因素所破坏。

(6) 弹上遥测部件的体积要小、重量要轻。武器的小型化,对武器的各个组成部分在体积和重量上提出了严格要求。因此,对于试验中采用的弹上遥测部件,在体积和重量上也提出了相应的严格要求。

(7) 再入遥测系统是一个存储遥测系统。再入遥测一般都会遇到弹头再入大气层所引起的等离子体通信中断,即通常称为黑障。黑障区内通常有重要的测量参数。因此,要求再入遥测系统具有较强的记忆重发能力和较大的记忆重发容量。

此外,按照再入存储遥测的要求,应尽量加长弹头出黑障区后的信号接收时间,要求地面站遥测设备以最快的速度进入正常工作状态,尽量缩短捕捉信号的时间。这一要求对于地面天线的跟踪以及码位同步、帧同步等电路都提出了相应要求。

(8) 再入遥测信道是一个变参信道。再入遥测存在着明显的多径衰落。再入遥测信道是一个变参信道,因而在传输特性上也不同于一般遥测,特别是再入遥测的传输速率受到很大限制。这一由信道特性决定的特点与再入存储遥测要求较大的记忆重发容量相矛盾。

由于再入遥测信道上的特点,以下技术在再入遥测中有着重要应用:

1) 数据压缩技术;