

导弹与航天丛书
飞航导弹系列

激光雷达

 中国科学技术出版社

导弹与航天丛书
飞航导弹系列

激 光 雷 达

主 编 熊辉丰

副主编 王炳堂 温 忠 徐元凯



中国宇航出版社

·北京·

内 容 简 介

本书对激光雷达的设计做了较系统的论述,内容涉及激光雷达总体、发射、接收、跟踪测角、测距和制导各部分。

本书可供从事激光雷达、制导、测量方面的科技人员阅读,也可作为高等院校相关专业师生的参考书。

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

激光雷达/熊辉丰主编. —北京:中国宇航出版社,
1994.4(2009.8重印)

(导弹与航天丛书.第4辑,飞航导弹系列)

ISBN 978-7-80034-617-0

I. 激… II. 熊… III. 激光雷达 IV. TN958.98

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第084612号

责任编辑 张 芝 装帧设计 宇航数码

出 版 行 中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路8号

邮 编 100830

网 址 www.caphbook.com

经 销 内部发行

零售店 读者服务部

(010)68371105

(010)68522384(传真)

承 印 北京国中画印刷有限公司

版 次 1994年4月第1版

2009年8月第2次印刷

规 格 850×1168 开 本 1/32

印 张 12 字 数 307千字

印 数 1001~1800

书 号 ISBN 978-7-80034-617-0

定 价 60.00元

如有印装质量问题,可与读者服务部联系调换

《导弹与航天丛书》
编辑工作委员会

名誉主任 宋 健 鲍克明

主 任 刘纪原

副 主 任 任新民 孙家栋

委 员 屠守锷 黄纬禄 梁守槃 陈怀瑾
王 卫 权振世 谢昌年 赵厚君
曹中俄 张新侠 高本辉

办 公 室 宋兆武 史宗田 任长卿 孙淑艳

飞航导弹系列
编辑委员会

主任 梁守槃

副主任 易 生 姚绍福 王建民

委员 路史光 王树声 吴宝初 李世培
曹柏楨 沈世绵 袁英见 钟任华
沈伯南 张 哲 王连俊 王祖全
肖华山 常泊浚 于守志 刘兴洲
潘荣霖 詹有根 唐国富 戴威岭
熊辉丰 吕佐臣 吴玉祥 冯启宁

编辑部 张 哲 王连俊 肖华山 王祖康

《激 光 雷 达》
作 者 名 单

主 编 熊辉丰

副主编 王炳堂 温 忠 徐元凯

编 委 王炳堂 华喆年 孙宝举 温 忠
徐元凯 龚琰民 熊辉丰

作 者 (按姓氏笔画排列)

王本谦 孙宝举 华喆年 张永进
郑恩祺 徐元凯 黄 曜 温 忠
熊辉丰

重印版序

我国的航天事业在 50 多年的发展历程中，从无到有，从小到大，创造了以“两弹一星”、载人航天和绕月探测为重要里程碑的辉煌成就，构筑了专业齐全、功能配套、设施完备的航天科技工业体系，掌握了一大批具有自主知识产权的核心技术，积累了独具特色的航天工程管理经验和方法，造就了一支技术精湛、作风优良的航天人才队伍，孕育形成了具有鲜明时代特征的航天精神、“两弹一星”精神和载人航天精神，在世界高科技领域占有了一席之地，并在一些重要技术领域跻身世界先进行列，为维护国家安全、带动科技进步、推动经济发展、促进社会和谐和振奋民族精神作出了重要贡献。

回顾 50 多年的发展与建设，我国的航天事业，在创业中起步，在探索中发展，在改革中腾飞，走出了一条具有中国特色的创新发展之路，在取得辉煌成就的同时，通过无数航天科技工作者的探索与实践，也创造积累了十分宝贵的经验。为了将这些知识财富传承下来，用以指导新时期的航天重大工程实践，促进航天科技成果在更加广阔的领域推广应用，为推动国民经济建设和社会进步发挥更大的作用，自 20 世纪 80 年代起，数以千计的航天科技工作者历时 20 余年，从导弹武器、运载火箭和空间飞行器等航天产品的设计、研制、生产、试验等各个方面，系统总结了在实践中形成的理论、方法和工程经验，编纂了一部共 156 册、6500 余万字的鸿篇巨制——《导弹与航天丛书》，奉献给广大读者。

当前，面对世界格局多极化、全球经济一体化、科学技术突飞猛进以及新军事变革不断向纵深发展的新形势，航天科技工业

作为国家的战略安全基石以及科技进步、经济发展、社会和谐的重要推动力量，越来越凸现出其重要的战略地位。十七大以来，党和国家高度重视航天科技工业的发展，提出了富国强军的明确要求，部署了包括载人航天工程第二步、探月工程二期、高分辨率对地观测系统、新一代运载火箭在内的一系列国家重大工程和重大科技专项任务，可以说，航天科技工业正处于历史上任务最多、发展最快的重大战略机遇期，形势和任务对航天科技工业的发展提出了新的更高要求。如何抓住难得机遇，乘势而上，圆满完成国家任务，从而推动我国航天事业全面、协调、可持续发展，真正担负起富国强军、建设创新型国家和推动我国成为航天大国、强国的历史责任，是新一代航天科技工作者必须面对的重大考验。

因此，在新时期航天事业蓬勃发展和读者需求的强力推动下，重印《导弹与航天丛书》凸显了重要的现实意义和深远的历史意义。希望这部丛书能够使我国航天事业 50 多年的创新成果和实践经验，在新的历史时期彰显出无穷活力，给人以更加深刻的启示，从而推动更多的航天科技工作者在新的航天工程实践中，不断继承、完善、发展航天事业 50 多年形成的宝贵经验，积极探索新形势下航天科技工业发展的内在规律，努力建设航天科技工业新体系，使我国的航天事业在新的起点上不断谱写更加辉煌的历史篇章。

马兰瑞

2009 年 6 月

总 序

导弹与航天技术是现代科学技术中发展最快的高技术之一。导弹武器的出现，使军事思想和作战方式发生了重大变革；航天技术把人类活动的领域扩展到太空，使人类认识自然和利用外层空间的能力发生了质的飞跃。

导弹与航天工程是复杂的系统工程，它运用了现代科学技术众多领域的最新成果，是科学技术与国家基础工业紧密结合的产物，是一个国家科学技术水平和工业水平的重要标志。

中国人民经过 30 年的努力，依靠自己的力量，勇于开拓，坚韧不拔，在经济和科学技术比较落后的条件下，走出了自己发展导弹与航天技术的道路；造就了一支能打硬仗的技术队伍；建立了具有相当规模和水平的导弹与航天工业体系；形成了遍布全国的科研、生产协作网。这是党中央独立自主、自力更生方针的伟大胜利，是全国各地区、各部门大力协同，组织社会主义大协作的丰硕成果。

30 年来，我国已有多种型号经历了研究、设计、生产、试验、装备、使用的全过程，装备了各种射程的战略和战术弹道导弹、各种类型的防空导弹和飞航导弹，用多种运载火箭发射了不同轨道和用途的人造卫星。我国导弹与航天工业的这些重大物质成果，对增强我国的国防实力、促进经济发展、带动科技进步发挥了重要的作用。

我们不仅取得了丰硕的物质成果，而且积累了宝贵的实践经验。为了发展中国的导弹与航天事业，多少人投入毕生的精力，贡献了宝贵的智慧，付出了辛勤的劳动，备尝了失败的苦痛和成功的欢欣。付出高昂代价取得的实际经验，从书本上学不到，更

不可能从外国买来，只能靠自己在实践中总结。为了加速我国导弹与航天事业的发展，需要全面、系统地归纳以往研制过程中建立和应用的设计理论，总结其工程经验，用以指导今后的研制实践，并传授给导弹与航天事业一代又一代新生力量，使他们能在较高的起点上开始工作。为此，我们组织多年来从事导弹、人造卫星和运载火箭研制工作的专家与工程技术人员，编著了这套《导弹与航天丛书》。它以工程应用为主，力求体现工程的系统性、完整性和实用性，是我国导弹与航天技术队伍 30 年心血凝聚的精神成果，是多领域专业技术工作者通力合作的产物。

作为一项系统工程，要求参加导弹与航天工程研制工作的各类技术人员，不仅精通自己的专业，而且充分理解相关专业的要求和特点，在统一的总体目标下，相互协调、配合密切地工作。因此，本丛书也是导弹与航天技术队伍各专业间以及和其他有关人员进行技术交流的读物。

本丛书按液体弹道导弹与运载火箭（Ⅰ）、固体弹道导弹（Ⅱ）、防空导弹（Ⅲ）、飞航导弹（Ⅳ）、卫星工程（Ⅴ）等 5 个型号系列编排；对各系列共用的固体推进技术和空气动力学两种专业技术，将有关著作编为系列（Ⅵ和Ⅶ），其他共用专业技术则分别纳入 5 个型号系列中的一个系列，并供其他系列选用。

本丛书的各级编委会、各册的主编、副主编及各章节的作者是一个庞大的科学技术群体，为了编写好这部大型丛书，编著人员在组织和技术工作上都付出了巨大劳动。期望这套丛书能帮助人们加深对于导弹与航天技术的了解，促进中国的导弹与航天事业向更高的目标迈进。

《导弹与航天丛书》

编辑工作委员会

1987 年 8 月

飞航导弹系列

序 言

飞航导弹系列是《导弹与航天丛书》的系列之一。

我国的飞航导弹从引进仿制、改型提高到创新开发，经过了近 30 年的发展历程。按型号系统分类，进行研究、设计、试制、试验，并小批量生产，迄今已研制出了适应海防需要的近、中、远程三个导弹系列，走出了我国自己的道路。这三个系列是：以液体火箭发动机为动力的舰舰、岸舰和空舰导弹，衍生了十余个型号；以固体火箭发动机为动力的小型反舰导弹，被国外称为“中国飞鱼”，适于多种装载对象，已成为我国海防主要装备之一；以冲压发动机为动力的超声速飞航导弹，已有两种型号的飞行试验取得成功，表明我国的超低空、超声速飞航导弹的技术水平已跨入世界先进行列。这些导弹在主要战术技术指标上，已达到世界先进水平，为保卫祖国海疆、壮大国防力量发挥了重要作用。

在飞航导弹的研制工作中，广大科研人员、工人和各级领导干部，坚持自力更生、艰苦奋斗的方针，发扬团结协作和顽强拼搏的精神，依靠集体智慧，选准重点目标，狠抓预先研究，运用系统工程方法，实现了武器系统总体的优良性能。在基本型号研制成功的基础上，逐渐改进完善，创造性地开拓了我国的飞航导弹技术发展之路，为国防建设作出了自己的贡献。

飞航导弹的研制实践，锻炼出了一支理论基础扎实、实践经验丰富、善于攻克技术难关的优秀科研技术队伍。这是今后我国

飞航导弹事业赖以蓬勃发展的坚实基础。已有的理论和实践经验，是今后发展的重要基础，也是无处可买的宝贵财富。编写本系列图书的目的，在于把广大科技人员 30 多年来的科研成果和经验加以总结，作为后来者的工作参考。

飞航导弹系列图书按飞航导弹武器系统总体、分系统和专业技术三部分编写。总体部分是按型号的战术技术指标对分系统的设计要求以及从总体设计角度考虑来编写的。分系统和专业技术部分是按照总体设计要求、各分系统在导弹武器系统中的地位和作用，从原理、设计、制造、应用与技术发展等方面编写的。全系列包括飞航导弹总体设计、弹体结构、动力装置、控制系统、末制导装置、战斗部及引信、地面火控系统与发射装置、气动设计、电气系统设计、材料工艺与制造技术等共 24 册。

本系列图书以飞航导弹的研制技术为主，也简要论及了相关学科的技术问题，使其具有完整性、系统性。当前，科学技术发展日新月异，本系列图书中的某些论述，必然有其局限性，经过一定时间后，将结合新的情况，进行必要的修订和补充。

编写飞航导弹系列图书是一项艰巨的工作。由于我们首次尝试，知识水平和实践经验有限，书中难免有不足之处，欢迎广大读者批评指正。在编撰过程中，我们得到了各级领导、广大科技人员和宇航出版社众多同志的热情支持和多方面的有力协作，在此谨致以衷心的感谢。

飞航导弹系列
编辑委员会
1989 年 3 月

前 言

激光雷达是正在迅速发展的一项高新技术，属高科技领域。它的应用十分广泛，涉及科学研究、军事工程和国民经济许多部门。

本书重点介绍激光跟踪测距雷达、激光驾波束制导雷达的设计，其内容涉及：激光雷达总体和发射、接收、光学、跟踪、测角、测距、信息处理各分系统的设计。

激光雷达技术是一项综合性的工程技术，它应用了现代科学技术中诸多学科的新成就。它是激光器技术、光子探测器技术、微电子技术、精密机械和计算机技术相结合的产物。设计激光雷达需要各相关专业的理论知识和工程实践经验。撰写本书侧重于工程实际，许多重要资料来自于经验总结。书中有关理论方面的论述力求简明。

全书共8章，在章节的安排上既考虑到系统性、连贯性，又有独立性，读者可以根据自己的实际需要，有选择地阅读。

由于编者水平所限，又是首次编书，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

1992年12月

目 录

第 1 章 概论	熊辉丰
1.1 激光雷达发展概述	(1)
1.2 激光雷达的特点	(4)
1.3 激光雷达的基本组成及其功能	(5)
1.4 激光雷达的分类	(7)
1.4.1 按功能用途分类	(7)
1.4.2 按工作体制分类	(8)
参考文献	(9)
第 2 章 激光雷达距离方程	熊辉丰
2.1 激光在大气中的传输	(10)
2.1.1 激光大气传输效应	(10)
2.1.2 激光大气衰减	(11)
2.1.3 大气湍流对激光传输的影响	(16)
2.2 激光雷达目标特性	(24)
2.2.1 目标特性	(24)
2.2.2 典型物的反射率	(26)
2.2.3 激光雷达目标截面	(28)
2.2.4 目标闪烁与起伏	(30)
2.3 噪声计算与背景抑制	(34)
2.3.1 噪声计算	(34)
2.3.2 背景杂波抑制	(36)
2.4 激光回波信号的统计检测特性	(37)
2.4.1 激光回波的统计特性	(37)
2.4.2 探测概率虚警概率与信噪比	(38)
2.4.3 最小工作信噪比	(43)

2.5	激光雷达距离方程	(44)
2.5.1	激光雷达距离方程的一般形式	(44)
2.5.2	距离方程的几种应用形式	(45)
2.5.3	距离方程中几个因子的讨论	(47)
2.6	作用距离计算	(51)
2.6.1	外部条件的内容	(51)
2.6.2	雷达系统的主要性能指标及内部参数	(52)
2.6.3	作用距离计算步骤	(52)
	参考文献	(53)
第3章 激光雷达发射机		华喆年
3.1	概述	(55)
3.1.1	发射机的地位与作用	(55)
3.1.2	发射机的组成及其功能	(55)
3.1.3	激光雷达对发射机的基本要求	(58)
3.2	掺钕钇铝石榴石 (Nd: YAG) 晶体脉冲 激光器设计	(60)
3.2.1	Nd: YAG 晶体	(60)
3.2.2	激励光源	(64)
3.2.3	聚光器	(66)
3.2.4	冷却与滤光系统	(67)
3.2.5	光学谐振腔	(68)
3.2.6	Q 开关系统	(70)
3.2.7	固体激光器电源	(74)
3.3	二氧化碳 (CO ₂) 气体激光器设计	(78)
3.3.1	二氧化碳激光器	(78)
3.3.2	封离式电激发 CO ₂ 气体激光器	(80)
3.3.3	波导 CO ₂ 激光器	(85)
3.3.4	高气压横向激励波导 CO ₂ 激光器	(92)
3.3.5	稳频 CO ₂ 激光器	(94)
3.4	激光器检测	(103)
	参考文献	(106)

第 4 章 激光雷达接收机	孙宝举
4.1 概述	(108)
4.2 激光直接光电 (非相干或能量) 探测 技术	(109)
4.2.1 直接探测光电转换量之间的关系	(109)
4.2.2 直接探测的信噪比分析	(110)
4.3 激光相干检测技术	(113)
4.3.1 激光外差检测的基本原理	(113)
4.3.2 激光相干检测信噪比分析	(116)
4.3.3 光混频的空间要求	(122)
4.3.4 本机振荡器功率要求	(126)
4.4 激光雷达接收机的设计	(128)
4.4.1 直接检测接收系统的主要组成部分及 工作原理	(128)
4.4.2 前置放大器的设计	(130)
4.4.3 自动增益控制系统的设计	(136)
4.4.4 直接检测信息处理	(137)
4.4.5 激光相干检测系统的主要组成及特点	(139)
4.4.6 激光雷达外差检测系统的设计	(148)
4.5 激光雷达接收机性能评估	(153)
4.5.1 激光雷达接收机的灵敏度、噪声系数 及带宽	(154)
4.5.2 激光雷达接收机的恢复时间	(154)
4.5.3 激光雷达接收机的抗干扰能力	(155)
4.5.4 激光雷达接收机的动态范围	(155)
4.5.5 激光雷达接收机多通道的一致性	(155)
4.5.6 激光雷达接收机的稳定可靠性	(155)
参考文献	(156)
第 5 章 激光雷达光学系统	温 忠
5.1 概述	(157)
5.2 发射光学系统	(158)
5.2.1 发射光学系统的功能	(158)

5.2.2	发射光学系统的几种形式	(159)
5.3	接收光学系统	(162)
5.3.1	接收光学系统的功能	(162)
5.3.2	接收光学系统的基本要求	(163)
5.3.3	接收光学系统的几种形式	(166)
5.3.4	接收光学系统的自动增益	(168)
5.4	辅助光学系统	(169)
5.5	特殊光学元件	(174)
5.5.1	滤光片	(174)
5.5.2	衰减片	(175)
5.5.3	棱镜	(176)
5.6	光束的控制	(177)
5.6.1	光波波束角的控制——变焦距变波束 系统	(177)
5.6.2	光束的偏转和扫描	(179)
	参考文献	(187)
第6章 激光跟踪测距雷达		徐元凯
6.1	概述	(189)
6.2	总体系统分析	(190)
6.2.1	系统分析的目的	(190)
6.2.2	系统分析的基本内容	(190)
6.3	系统方案的初步选择	(192)
6.3.1	激光雷达工作波长的选择	(192)
6.3.2	捕获目标方式	(192)
6.3.3	角跟踪体制的选择	(193)
6.3.4	测距体制选择	(194)
6.3.5	激光雷达接收体制选择	(195)
6.3.6	主机结构形式	(200)
6.3.7	光学系统类型	(201)
6.3.8	跟踪控制系统	(203)
6.4	系统组成及主要参数选择	(204)
6.4.1	系统组成	(204)