

雷达技术丛书
<http://www.phei.com.cn>

“十一五”国家重点图书出版规划项目

制导雷达技术



黄 槐
齐 润东
文 树梁

编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

“十一五”国家重点图书出版规划项目
雷达技术丛书

制 导 雷 达 技 术

黄 槐 齐润东 文树梁 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

制导雷达是武器系统的重要组成设备,负责完成对来袭目标的探测、跟踪和识别,同时对拦截导弹实施全过程控制,直至摧毁来袭目标。

本书从制导雷达系统工程设计要求出发,提出了制导雷达系统的设计方法,讨论了选择雷达工作体制、确定系统组成、分析计算系统性能、确定系统各部分的技术指标等关键问题。本书还专门讨论了制导雷达系统的精度分析、总体设计、可靠性维修性设计和系统试验技术等内容。作为应用实例,本书针对两种典型的中近程防空导弹武器系统的制导雷达和中远程防空导弹武器系统的多功能相控阵跟踪制导雷达,介绍了它们的设计原理、系统组成,系统工作过程和各主要分系统的关键技术,并讨论了固态有源相控阵技术和新一代防空导弹武器系统研制过程中的主要关键技术问题。

本书总结了作者多年制导雷达研究工作中的工程设计经验,对于从事该雷达研究工作的工程技术人员具有很高的实用价值,本书也可以作为高等学校相关专业高年级本科生和研究生的教材或参考书。

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

制导雷达技术/黄槐,齐润东,文树梁编著. —北京:电子工业出版社,2006.10
(雷达技术丛书)
ISBN 7-121-03290-2

I. 制… II. ①黄… ②齐… ③文… III. 制导雷达 IV. TN959.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 121121 号

责任编辑:刘宪兰 张濮 特约编辑:李玉兰

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:787×960 1/16 印张:24.25 字数:421 千字

印 次:2006 年 10 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:68.00 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,联系电话:(010)68279077;邮购电话:(010)88254888。

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

服务热线:(010)88258888。



丨“雷达技术丛书”编辑委员会丨

主 任：王志刚

副 主 任：王小谟 张光义 徐步荣 左群声 王 政 文宏武

委 员：（以下按姓氏笔画为序）

于景瑞 弋 稳 王德纯 平丽浩 匡永胜 李文辉 吴顺君

吴曼青 张祖稷 张润逵 张德斌 周文瑜 金 林 郑 新

柯建波 保 铮 贺瑞龙 贲 德 梅晓春 黄 槐 黄培康

董庆生 焦培南 薛海中

主 编：王小谟 张光义

编辑部主任：邱荣钦

编辑部副主任：刘宪兰 赵玉洁 赵启成

编 辑：李玉兰 毛 宏 李盛沐 王炳如 黄昭华

出版说明

“雷达技术丛书”是由中国工程院王小谟院士和张光义院士倡导并担任主编、中国电子科技集团公司负责组织、电子工业出版社负责出版的一套大型设计性系列丛书。这套“雷达技术丛书”(以下简称“丛书”)共16册,是我国雷达界多个单位的知名专家学者集体智慧的结晶,是他们长期实践经验的总结,是一套理论与实践相结合的佳作。

这套“丛书”的内容十分丰富,概括地说包括了3个主要方面的内容:一是介绍了影响雷达性能的目标特性和环境特性,包括目标(含隐身目标)的频率特性、散射特性、极化特性和起伏特性,地杂波、海杂波和气象杂波特性,噪声与干扰特性,大气与电离层传播特性等;二是介绍了雷达各分系统的设计,包括面天线与阵列天线、微波网络与微波传输线、固态与电子管发射机、频率源与模数接收机、信号处理与数据处理的基本原理、技术指标、设计方法和性能测试,还介绍了雷达系统与分系统的结构设计与制造工艺,包括微组装与柔性制造工艺,可靠性、可维性、环境适应性设计以及传动、架拆与运输规范的设计等;三是介绍了典型雷达系统的设计,包括各种二坐标与三坐标防空雷达、有源与无源相控阵雷达、机载预警与火控雷达、多普勒与相控阵制导雷达、脉冲与连续波精密跟踪测量雷达、合成孔径与逆合成孔径成像雷达、天波与地波超视距雷达等的基本原理、技术体制、战技性能、设计方法和联试与试飞等。

这套“丛书”的定义准确,原理清晰,语言简练,图文并茂,公式齐全,数据丰富,集设计性、实用性、新颖性于一体,是雷达科技工作者的设计指南,是雷达部队培训的良好教材,是高校电子工程专业及相关专业师生不可多得的教材和参考书。

“雷达技术丛书”编辑委员会编辑部

2004年12月29日

序

雷达在第二次世界大战中得到迅速发展，为适应战争需要，交战各方研制出从米波到微波的各种雷达装备。战后美国麻省理工学院辐射实验室集合各方面的专家，总结二战期间的经验，于 1950 年前后出版了雷达丛书共 28 本，大幅度推动了雷达技术的发展。我刚参加工作时，就从这套书中得益不少。随着雷达技术的进步，28 本书的内容已趋陈旧。20 世纪后期，美国 Skolnik 编写了雷达手册，其版本和内容不断更新，在雷达界有着较大的影响，但它仍不及麻省理工学院辐射实验室众多专家撰写的 28 本书的内容详尽。

我国的雷达事业，经过几代人 40 余年的努力，从无到有，从小到大，从弱到强，许多领域的技术已经进入了国际先进行列。总结这些成果，为我国今后的雷达事业发展做点贡献是我长期以来的一个心愿，在出版社的鼓励下，我和张光义院士倡导并担任主编，由中国电子科技集团公司负责组织编写了这套“雷达技术丛书”（以下简称“丛书”）。它是我国众多专家、学者长期从事雷达科研的经验总结，具有较好的系统性、新颖性和实用性。

雷达技术发展之快，使得传统的雷达观念、体系结构不断更新，在 20 世纪 50 年代的接收、发射、天线、显示典型的分机基础上，又发展到现在的雷达数据处理和信号处理分系统。本“丛书”就是按此体系进行了分册。随着微电子技术的发展，数字化还在不断前移，天线收发已经并继续不断引入了数字处理内容，信号和数据处理的界限越来越模糊，雷达体系正从流程型向网络型转变，由于目前其技术都尚未成熟，本“丛书”只在现有的体系中把这些新的内容进行了分别叙述。

“丛书”内容共分 3 个部分 16 分册：第一部分主要介绍雷达的目标特性和环境，第二部分介绍了雷达各组成部分的原理和设计，第三部分按典型应用雷达系统的分类对各雷达系统作了深入浅出的介绍。“丛书”各册著者不同，写作风格各异，但其内容的科学性和完整性是不容置疑的，通过对各分册结构和内容的审定，使各分册之间既具有较好的衔接性，又保持了各分册的独立性，读者可按需

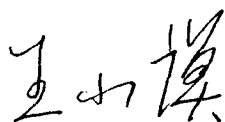
要读取其中一册或数册。希望此次出版的“丛书”能对从事雷达设计、制造的工程技术人员，雷达部队的干部、战士以及高校电子工程专业及相关专业的师生有所帮助。

“丛书”是从事雷达技术领域各项工作专家们集体智慧的结晶，是他们长期工作成果的总结与展示，专家们既要完成繁重的科研任务，又要在百忙中抽出时间保质保量地完成书稿，工作十分辛苦，在此，我代表“丛书”编委会向各分册作者和审稿专家表示深深的敬意！

“丛书”的出版，得到了中国电子科技集团公司、电子科学研究院、南京电子技术研究所、华东电子工程研究所等各参与单位领导的大力支持，得到了电子工业出版社领导和参与编辑们的积极推动，得到了“丛书”编辑部各同志的热情帮助，借此机会，一并表示衷心的感谢！

中国工程院院士

中国电子科技集团公司科技委副主任

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王小华' (Wang Xiaohua), written in a cursive style.

前 言

防空导弹武器系统发展到今天已经过了半个多世纪，制导雷达是武器系统的重要组成设备。制导雷达的主要任务是：完成对来袭目标的探测、跟踪和识别，同时对拦截导弹实施全过程控制，直至摧毁来袭目标。本书从制导雷达系统的工程设计要求出发，根据防空导弹武器系统的作战对象和各种组成结构，提出了制导雷达的系统设计方法。

制导雷达技术研究的主要内容包括：根据武器系统的作战要求选择雷达的工作体制，确定系统的组成，分析计算系统的性能，提出系统中各组成部分的技术指标和制导雷达系统的试验方法，还包括研究针对雷达可靠性、维修性和电磁兼容性的设计方法。

按照近代防空导弹武器系统的功能及特点，制导雷达可分为中远程防空导弹武器系统和近程防空导弹武器系统。中远程防空导弹武器系统用于区域防空，近程防空导弹武器系统用于重要地点的防御。作为制导雷达系统设计的应用实例，本书介绍两种典型的近程防空导弹武器系统的制导雷达，以及中远程防空导弹武器系统的多功能相控阵跟踪制导雷达的设计原理、系统组成、系统工作的过程和各主要分系统的关键技术。本书最后讨论了固态有源相控阵技术在未来的防空导弹武器系统中的应用前景，提出了新一代防空导弹武器系统研制过程中的主要关键技术问题。

全书由黄槐统稿，匡勇、罗中省、郭世岭、秦忠宇、文树梁、严荣祥、王永清、蔡庆宇参加了第3章、第4章的编写，杨旗、齐润东研究员完成了第6章、第7章的编写。齐润东研究员和文树梁研究员负责了本书的审定工作。参加编著本书的人员都从事过制导雷达的研制，有着丰富的工程设计经验。因此，相信本书作为从事该领域工作的工程技术人员和高等学校研究生的参考书将是有益的。

在本书撰写过程中，雷达技术丛书的主编王小谟院士和张光义院士对本书的主要章节内容给予了指导。陆林根研究员和吴顺君教授在百忙中承担了本书的审

校工作，安洁在本书编著过程中负责了大量的组织工作，电子科学研究院的邱荣钦高级工程师、电子工业出版社的刘宪兰高级策划编辑和张濮编辑为本书的编辑出版付出了辛勤的劳动，特此表示感谢。

黄 槐

2006 年 9 月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 概述	(2)
1.2 制导雷达发展回顾	(2)
1.3 武器系统的工作体制	(7)
1.3.1 指令制导	(7)
1.3.2 寻的制导	(8)
1.3.3 复合制导	(10)
1.4 防空导弹武器系统的任务及组成	(10)
1.4.1 目标指示雷达	(11)
1.4.2 跟踪制导雷达	(13)
1.4.3 指挥控制中心	(13)
1.4.4 数字通信系统	(14)
1.4.5 导弹发射控制车	(15)
1.4.6 导弹及其制导控制系统	(16)
1.5 防空导弹武器系统对制导雷达的要求	(22)
1.5.1 作战对象	(22)
1.5.2 雷达目标的散射特性	(26)
1.5.3 作战空域	(29)
1.5.4 作用距离	(30)
1.5.5 目标容量	(32)
1.5.6 精度	(32)
1.5.7 分辨率	(33)
1.5.8 反应时间	(33)
1.5.9 工作环境	(33)
1.5.10 可靠性	(35)
1.5.11 维修性	(36)
1.5.12 机动性	(37)
1.5.13 其他特殊要求	(37)

1.6 新一代制导雷达的展望	(38)
1.6.1 未来防空导弹武器系统对制导雷达的要求	(38)
1.6.2 新一代制导雷达的设计途径	(39)
参考文献	(41)
第2章 制导雷达系统的设计	(43)
2.1 概述	(44)
2.2 制导雷达系统的组成及设计特点	(44)
2.2.1 制导雷达系统体制的选择	(44)
2.2.2 雷达主要性能参数的选择	(45)
2.3 制导雷达系统对各主要分系统的要求	(51)
2.3.1 天线的参数要求	(51)
2.3.2 发射机的参数要求	(54)
2.3.3 接收机的参数要求	(57)
2.3.4 信号处理器的参数要求	(61)
2.3.5 雷达数据的处理	(77)
2.3.6 控制指令的计算 ^[6]	(81)
2.4 制导雷达的抗干扰性设计	(87)
2.4.1 无源杂波干扰	(88)
2.4.2 制导雷达的抗干扰技术	(96)
2.5 制导雷达的电磁兼容性设计	(108)
2.5.1 机内电磁兼容性设计	(108)
2.5.2 多雷达组成的制导雷达系统的电磁兼容性考虑	(110)
2.6 制导雷达性能的估算	(112)
2.7 制导雷达系统的仿真设计技术	(113)
2.7.1 制导雷达的数字式仿真技术	(113)
2.7.2 制导雷达的半实物仿真技术	(115)
参考文献	(117)
第3章 中近程防空导弹武器系统中的雷达	(119)
3.1 概述	(120)
3.2 目标指示雷达	(120)
3.2.1 目标指示雷达系统的技术性能指标	(120)
3.2.2 系统工作体制的选择及系统组成	(121)
3.2.3 系统性能的计算与分析	(128)
3.3 跟踪制导雷达	(132)

3.3.1	跟踪制导雷达系统的技术性能指标	(132)
3.3.2	跟踪制导雷达系统的组成及功能	(134)
3.3.3	跟踪制导雷达系统的工作过程	(138)
3.3.4	跟踪制导雷达的系统软件	(144)
3.3.5	主要分系统的组成及技术要求	(149)
参考文献		(177)
第4章	中远程防空导弹武器系统中的跟踪制导雷达	(179)
4.1	概述	(180)
4.2	多目标相控阵跟踪制导雷达	(180)
4.2.1	任务及技术指标要求	(180)
4.2.2	多功能相控阵跟踪制导雷达的组成	(181)
4.2.3	工作过程	(182)
4.2.4	相控阵雷达的全空域工作	(185)
4.3	相控阵跟踪制导雷达主要分系统的设计	(187)
4.3.1	相控阵天线	(187)
4.3.2	相控阵雷达的波束控制	(201)
4.3.3	发射机	(203)
4.3.4	接收机	(212)
4.3.5	信号处理器	(212)
4.3.6	雷达显示控制系统	(219)
4.3.7	相控阵制导雷达的软件	(220)
4.4	新型固态有源相控阵跟踪制导雷达	(228)
4.4.1	固态有源相控阵雷达	(228)
4.4.2	反导技术中的关键问题	(231)
参考文献		(242)
第5章	制导雷达系统的精度分析	(243)
5.1	概述	(244)
5.2	基本概念及定义	(244)
5.2.1	精度的定义	(244)
5.2.2	潜在精度	(244)
5.2.3	雷达精度分析中常用的概率分布函数	(246)
5.2.4	平稳随机过程	(249)
5.3	跟踪制导雷达的角度测量	(249)
5.3.1	相位比较单脉冲雷达的测角原理	(249)

5.3.2	幅度比较单脉冲雷达的测角原理	(250)
5.3.3	幅度比较单脉冲雷达的角误差信号提取	(251)
5.3.4	单脉冲雷达的角误差信号提取模型	(254)
5.3.5	单脉冲跟踪制导雷达的偏轴测量方法	(256)
5.3.6	单脉冲天线在角度测量中的特性	(258)
5.4	单脉冲跟踪制导雷达的角度测量精度	(261)
5.4.1	与雷达设备有关的误差	(261)
5.4.2	与目标有关的误差	(263)
5.4.3	坐标传递和工具方法误差	(265)
5.4.4	多路径误差	(266)
5.4.5	与电磁波传播有关的误差	(270)
5.4.6	干扰条件下的精度	(272)
5.4.7	角度测量误差的综合估计	(273)
5.5	多功能相控阵跟踪制导雷达的角度测量精度	(276)
5.5.1	天线单元的幅度和相位误差对指向精度的影响	(276)
5.5.2	数字式移相器的量化误差对指向精度的影响	(277)
5.5.3	移相器的频率和温度特性、驱动电路电压不稳定等因素的影响	(278)
5.5.4	相控阵雷达的角跟踪算法	(279)
5.6	跟踪制导雷达的距离测量精度	(279)
5.6.1	与雷达设备有关的误差	(281)
5.6.2	与目标有关的误差	(283)
5.6.3	与电磁波传播有关的误差	(284)
5.6.4	与雷达有关的传递误差	(285)
5.6.5	距离测量误差的综合估计	(286)
5.7	跟踪制导雷达的速度测量精度	(287)
5.7.1	与雷达设备有关的误差	(290)
5.7.2	与目标有关的误差	(291)
5.7.3	与电磁波传播有关的误差	(292)
5.7.4	工具方法引起的误差	(293)
5.7.5	速度测量误差综合估计	(293)
参考文献		(294)
第6章 制导雷达结构的总体设计		(295)
6.1	概述	(296)
6.2	系统总体对雷达结构的要求	(296)

6.3 车载制导雷达的结构设计	(299)
6.3.1 电子设备的装载设计	(299)
6.3.2 装载设计的特点	(299)
6.3.3 总体布局设计	(300)
6.4 制导雷达系统的热设计	(301)
6.4.1 热设计的目的与定义	(301)
6.4.2 冷却方式的分类	(302)
6.4.3 冷却方案的选择	(303)
6.4.4 热设计的基本原则	(304)
6.4.5 设计方法及参数选择	(304)
6.5 结构设计中的仿真技术	(309)
6.5.1 三维动态仿真技术	(310)
6.5.2 CIMS 在结构设计中的应用	(311)
参考文献	(312)
第 7 章 制导雷达的可靠性与维修性设计	(313)
7.1 概述	(314)
7.2 制导雷达的可靠性设计	(314)
7.2.1 可靠性模型	(314)
7.2.2 可靠性指标的分配	(317)
7.2.3 可靠性预计	(320)
7.3 制导雷达的维修性设计	(321)
7.3.1 维修性的定量指标要求	(322)
7.3.2 维修性指标的分配	(323)
7.3.3 维修性预计	(325)
7.3.4 维修性设计的基本准则	(326)
7.4 制导雷达的可靠性试验	(327)
参考文献	(330)
第 8 章 制导雷达系统的试验技术	(331)
8.1 概述	(332)
8.2 制导雷达系统的性能测试及标定	(332)
8.2.1 主要分系统的性能测试	(332)
8.2.2 系统性能的标定	(336)
8.2.3 角跟踪系统的性能测试	(337)
8.2.4 控制指令的测试	(340)

8.2.5 数据传输系统的性能检查	(340)
8.2.6 红外位标器的性能测试	(340)
8.2.7 其他辅助功能的测试	(341)
8.3 精度检验飞行试验	(341)
8.3.1 雷达威力检查	(341)
8.3.2 跟踪典型目标的精度检验飞行试验	(342)
8.3.3 跟踪制导雷达的精度检验飞行试验	(346)
8.3.4 跟踪制导雷达试验的数据处理	(348)
8.4 跟踪制导雷达的可靠性评估	(356)
8.4.1 定时截尾试验法	(356)
8.4.2 序贯试验法	(357)
8.4.3 可靠性试验结果的处理方法	(359)
8.5 跟踪制导雷达的其他性能试验	(359)
参考文献	(362)
附录 A 常用符号说明	(363)
附录 B 外文名词缩写对照表	(367)

第 1 章

概 论

