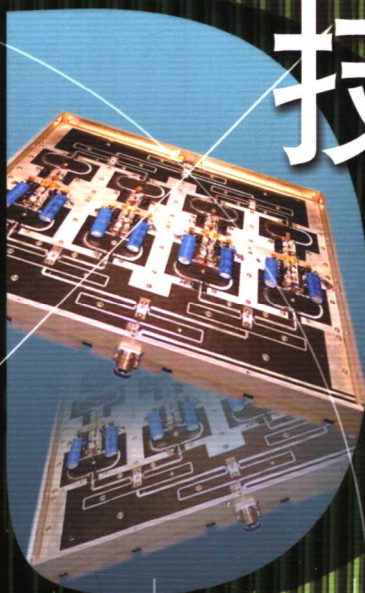


雷达技术丛书
<http://www.phei.com.cn>

“十一五”国家重点图书出版规划项目

雷达发射机 技术



郑新
李文辉 等编著
潘厚忠



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

雷 达 发 射 机 技 术

郑 新 李文辉 潘厚忠 等编著

電 子 工 業 出 版 社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

雷达发射机是雷达系统的重要组成部分,其性能和品质直接影响或决定着雷达整机的性能和品质。本书在全面、系统地论述真空管雷达发射机技术和固态雷达发射机技术及其相关技术,以及将基本原理介绍清楚的基础上,以工程实践为背景,力求帮助工程技术人员在掌握雷达发射机的设计原则、思路和方法的同时,了解和掌握近年来雷达发射机技术方面所取得的新成果和新技术。

全书共分10章,包括概论、真空管雷达发射机、固态雷达发射机技术、全固态雷达发射机的设计和实践、脉冲调制器、发射机电源、发射机特种元件、系统监控与可靠性、雷达发射机技术参数的测试和发射机冷却及电磁兼容的设计。

本书既可作为从事雷达发射机设计和研制人员的学习用书和设计手册,也可作为从事其他发射设备、雷达整机研制人员及雷达使用人员的参考书,同时也可作为高等学校相关专业的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

雷达发射机技术/郑新,李文辉,潘厚忠等编著. —北京:电子工业出版社,2006.9
(雷达技术丛书)

ISBN 7-121-03130-2

I. 雷… II. ①郑… ②李… ③潘… III. 雷达发射机 IV. TN957.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 101203 号

责任编辑:刘宪兰 特约编辑:李玉兰

印 刷:北京智力达印刷有限公司

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×960 1/16 印张:33.75 字数:556.5 千字

印 次:2006 年 9 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:77.00 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。

服务热线:(010)88258888。



“雷达技术丛书”编辑委员会

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

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

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 年前后出版了雷达技术丛书共 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

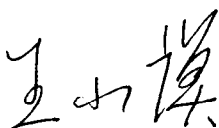
要读取其中一册或数册。希望此次出版的“丛书”能对从事雷达设计、制造的工程技术人员，雷达部队的干部、战士以及高校电子工程专业及相关专业的师生有所帮助。

“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 '王少群' (Wang Shaoqun), written in a cursive style.

前 言

随着社会需求的不断增长,雷达在国防建设和国民经济等多个领域得到了广泛应用,雷达发射机技术也取得了突飞猛进的进步。雷达发射机从它诞生之日起,就与新技术、新材料、新器件和新工艺的发展密切相关,每当出现与雷达技术有关的新材料、新工艺和新器件时,雷达发射机技术就会跃上一个新的台阶;同时,雷达发射机技术的不断发展,也牵引着新材料、新工艺和新器件的进一步发展。为了适应雷达技术的不断发展和满足日益增长的需求,雷达发射机技术应该在采用新技术、新材料、新工艺和新器件的基础上,快速提高雷达发射机的性能和可靠性,以达到现代雷达对发射机提出的更高要求,并获得自身的不断发展和进步。

今天的雷达,与其在第二次世界大战初诞生之时相比,已不可同日而语,雷达发射机也是如此,其性能和用途都有了根本性的提高和扩展。20 世纪 80 年代之前,国内外先后发表和出版了一些有关雷达发射机技术方面的书籍和文章,但现今已很少被广大读者所阅读。80 年代之后,国内外又先后出版了几本论述雷达发射机技术方面的专著,如 1982 年出版的《微带功率晶体管放大器》,1985 年出版的《现代雷达发射机的理论设计和实践》,1985 年出版的《Solid State Radar Transmitters》和 1994 年出版的《Microwave Tube Transmitters》等书籍。这些专著分别从不同的方面系统论述了雷达发射机的相关技术,因此一直是广大读者,特别是从事雷达发射机设计和研制的工程技术人员很好的参考书,对实际工作也起到了很大的指导和促进作用,即使是在今天,仍然如此。我们正是在通过学习和理解上述专著中的基本概念和理论的基础上,结合新的工程实践经验而编著了本书。

编著本书的目的是为了读者能系统、全面和快速地了解与掌握雷达发射机技术的基本概念和理论知识,了解和掌握雷达发射机的功能、基本原理、组成和特点,有针对性地学习和掌握雷达发射机设计和研制的知识、思路和具体设计方法以及一些特殊考虑。

本书是一本全面、系统地论述真空管雷达发射机和固态雷达发射机及其相关技术的书籍。

由于本书重点讨论的是现代雷达发射机的设计原则、思路和方法，且以所研制成功的雷达发射机为例，从实际工程经验中归纳总结出一些对以后的工程实践有指导意义的内容，力图反映近年来在雷达发射机技术方面所取得的新成果和新技术，因此对于雷达发射机技术的基础理论和基本知识我们只进行了简要的论述，更详细的理论知识，请读者参阅上面提到的相关著作。

全书共分 10 章，第 1 章概述了雷达发射机的发展史、功能和分类，讨论了雷达发射机的工作原理、组成和主要性能指标及要求；第 2 章介绍了真空管雷达发射机的工作原理、组成、性能和特点，讨论了其设计思路和方法；第 3 章和第 4 章主要介绍了固态雷达发射机的工作原理、组成、重要技术指标和特点，讨论了固态发射机所用功率管的特性和固态发射机的基本技术，重点阐述了用于实际工程中发射机的设计思路 and 具体设计方法及特殊考虑；第 5 章和第 6 章概述了脉冲调制器和发射机电源的工作原理、指标和作用，主要讨论了线型调制器、刚管调制器、栅极脉冲调制器、速调管电源，行波管电源和固态发射机电源的指标要求和设计考虑；第 7 章主要讨论了雷达发射机特种元件的参数计算和设计方法；第 8 章介绍了雷达发射机的检测、控制、保护和可靠性等方面的问题；第 9 章指出了雷达发射机技术参数测量的重要性，研究了技术参数的含义和测试方法；第 10 章讨论了雷达发射机冷却方式的选择与设计，以及电磁兼容设计方面的考虑。

本书是由直接从事雷达发射机设计和研制工作的工程技术人员编写的，由于作者大都研制成功过多部雷达发射机，具有相当的专业知识和丰富的实践经验，因此本书适合于从事雷达发射机设计和研制的人员参考，对从事其他发射设备和雷达整机的研制人员也应具有一定的参考价值，我们同时希望对高校相关专业的师生也能有一定的参考作用。

本书初稿的第 1 章、第 3 章、第 4 章、第 9 章由潘厚忠、郑新编写，第 2 章由李文辉编写，第 5 章由张建华、李文辉编写，第 6 章由汪军编写，第 7 章由钟惠斌编写，第 8 章由戴大富、黄军编写，第 10 章由刘湛、李文辉编写。全书由郑新统稿，并对全书的第 1 章～第 9 章进行了修改、补充和完善，全书由魏智研究员审稿。在本书的编写过程中，得到了中国工程院院士张光义的指导和帮

助，赵玉洁研究员对全书进行了审核和修改，邢靖、丁卫菊、靖江对本书初稿进行了绘图和文字录入工作，电子科学研究院的邱荣钦高级工程师和电子工业出版社的刘宪兰高级策划编辑为本书的编辑与出版付出了辛勤的努力，在此一并表示衷心的感谢。

我们编写本书的初衷是想为我国雷达事业的发展做出贡献，但鉴于水平和能力有限，难免存在错误和不足之处，敬请广大读者批评指正。

郑 新

2005 年 5 月 28 日

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 概述	(2)
1.2 雷达发射机的功能	(4)
1.3 脉冲雷达发射机的主要技术参数	(7)
1.3.1 工作频率	(7)
1.3.2 输出功率	(8)
1.3.3 脉冲波形	(9)
1.3.4 发射信号的稳定性和频谱纯度	(9)
1.3.5 发射机效率	(15)
1.4 脉冲雷达对发射机的要求	(15)
1.4.1 脉冲压缩雷达对发射机的要求	(15)
1.4.2 动目标显示雷达对发射机的要求	(22)
1.4.3 脉冲多普勒雷达对发射机的要求	(28)
1.5 常用的雷达发射机	(39)
1.5.1 地面雷达发射机	(39)
1.5.2 机载雷达发射机	(41)
1.5.3 星载雷达发射机	(42)
1.5.4 舰载雷达发射机	(42)
1.6 发射机应用一览	(43)
参考文献	(44)
第 2 章 真空管雷达发射机	(45)
2.1 概述	(46)
2.2 方案考虑	(46)
2.2.1 确定发射机类型	(46)
2.2.2 确定发射机组成形式	(47)
2.2.3 真空微波管的选择	(48)
2.2.4 指标分配与计算	(49)
2.3 常用真空微波管	(49)

2.3.1 常用真空微波管的结构及其功能·····	(50)
2.3.2 常用真空微波管的工作原理及性能·····	(54)
2.3.3 真空管发展展望·····	(66)
2.3.4 常用真空微波管的比较·····	(66)
2.4 高功率微波管发射机设计·····	(67)
2.4.1 阴极调制微波管发射机的设计·····	(68)
2.4.2 真空微波管发射机的功率合成·····	(78)
2.5 栅控微波管发射机·····	(81)
2.5.1 控制电极的调制形式及特点·····	(82)
2.5.2 工作状态控制·····	(85)
2.6 正交场管发射机·····	(87)
2.6.1 前向波管发射机的基本类型·····	(88)
2.6.2 前向波管发射机的设计要点·····	(92)
2.7 多注速调管发射机·····	(94)
2.7.1 多注速调管发射机稳定工作的条件·····	(94)
2.7.2 多注速调管的供电设计·····	(96)
2.8 微波功率模块·····	(97)
2.8.1 固态放大器的设计·····	(97)
2.8.2 真空功率放大器的设计·····	(98)
2.8.3 集成电源调整器的设计·····	(100)
2.8.4 组装设计·····	(102)
2.8.5 可靠性·····	(103)
参考文献·····	(104)
第3章 固态雷达发射机技术 ·····	(107)
3.1 概述·····	(108)
3.1.1 双极型微波功率晶体管·····	(109)
3.1.2 金属氧化物半导体场效应微波功率晶体管·····	(114)
3.1.3 砷化镓场效应微波功率晶体管·····	(116)
3.1.4 雪崩二极管·····	(119)
3.2 微波功率晶体管大信号S参数的表征和测试·····	(120)
3.3 阻抗匹配·····	(125)
3.3.1 微波功率晶体管的动态阻抗测试·····	(126)
3.3.2 阻抗匹配方法·····	(127)
3.4 微波功率晶体管放大器的指标要求和设计方法·····	(149)

3.4.1	晶体管放大器的稳定性	(149)
3.4.2	晶体管放大器的增益和输出功率	(154)
3.4.3	绝对稳定晶体管功率放大器的设计	(157)
3.4.4	潜在不稳定晶体管功率放大器的设计	(161)
3.4.5	宽带晶体管功率放大器的设计	(166)
3.4.6	宽带线性晶体管功率放大器的设计	(173)
3.4.7	宽带 C 类微波晶体管功率放大器的设计	(175)
3.4.8	平衡功率放大器的设计	(178)
3.4.9	最小结温功率放大器的设计	(180)
3.4.10	集电极负载等值线功率放大器的设计	(182)
3.5	全固态雷达发射机	(187)
3.5.1	全固态雷达发射机的类型	(188)
3.5.2	全固态雷达发射机的特殊设计考虑	(188)
	参考文献	(189)
第 4 章	全固态雷达发射机的设计和实践	(191)
4.1	概述	(192)
4.2	全固态雷达发射机的系统设计	(193)
4.2.1	全固态雷达发射机的功率合成技术	(194)
4.2.2	二进制功率合成法	(208)
4.2.3	串馈功率合成法	(213)
4.3	集中放大式高功率全固态雷达发射机	(216)
4.3.1	P 波段高功率全固态雷达发射机的设计与实例	(217)
4.3.2	L 波段高功率全固态雷达发射机的设计与实例	(220)
4.3.3	S 波段高功率全固态雷达发射机的设计与实例	(221)
4.4	有源相控阵雷达全固态发射机	(223)
4.4.1	有源相控阵雷达全固态发射机的设计与实例	(223)
4.4.2	有源相控阵雷达 T/R 组件功率放大器的设计与实例	(229)
4.4.3	行、列馈式有源相控阵雷达全固态发射机	(232)
	参考文献	(235)
第 5 章	脉冲调制器	(237)
5.1	概述	(238)
5.2	方案考虑	(238)
5.2.1	脉冲调制器的基本电路形式及其特点	(240)
5.2.2	调制器的方案选择	(243)

5.3	线型脉冲调制器的设计	(244)
5.3.1	线型脉冲调制器的设计考虑	(244)
5.3.2	对已知参数及技术要求的确认	(245)
5.3.3	放电回路的工程设计	(245)
5.3.4	反峰电路的设计	(254)
5.3.5	线型脉冲调制器的充电电路	(255)
5.4	栅极脉冲调制器的设计	(264)
5.4.1	常用浮动板调制器的主要类型	(266)
5.4.2	开关管的选择	(269)
5.4.3	栅极调制电源	(272)
5.4.4	浮动板调制器的控制与保护	(274)
5.5	刚管脉冲调制器的设计	(275)
5.5.1	刚管脉冲调制器的充电电路	(276)
5.5.2	固态刚管脉冲调制器	(280)
	参考文献	(287)
第6章	发射机电源	(289)
6.1	概述	(290)
6.2	发射机电源的特点	(290)
6.2.1	发射机常用的电源	(291)
6.2.2	发射机电源的技术指标	(292)
6.3	组合式大功率高压开关电源	(297)
6.3.1	设计要求和组合形式	(298)
6.3.2	高压电源变换器的电路形式	(298)
6.3.3	串联谐振高压电源变换器的设计和计算	(302)
6.3.4	设计的主要难点和解决方法	(304)
6.3.5	提高可靠性和减小干扰的方法	(306)
6.3.6	功率合成	(307)
6.4	带降压收集级的行波管放大器的开关电源系统	(308)
6.4.1	浮在高电位上的电源	(309)
6.4.2	高压电源	(311)
6.4.3	提高稳定性指标的方法	(315)
6.5	组合式大功率低压开关电源	(316)
6.5.1	设计的特点及难点	(316)
6.5.2	设计与计算	(317)

6.5.3 组合式大功率低压开关电源与组合式大功率高压开关电源的差异	(321)
6.5.4 提高效率、降低纹波的方法	(322)
6.6 电源的控制和保护电路	(323)
6.6.1 开关电源的控制方式	(323)
6.6.2 开关电源的闭环调节	(325)
6.6.3 检测与保护	(328)
6.7 电源稳定可靠工作的措施	(331)
6.7.1 软启动	(331)
6.7.2 正确选择、设计功率开关及关键元器件	(332)
6.8 电源的功率因数补偿	(334)
6.8.1 功率因数补偿的必要性	(334)
6.8.2 功率因数补偿的方法	(335)
6.9 电路拓扑的优化设计和仿真	(338)
参考文献	(339)
第 7 章 发射机特种元件	(341)
7.1 概述	(342)
7.2 充电电感及充电变压器	(343)
7.2.1 充电电感的工作原理	(343)
7.2.2 充电电感参数的计算	(344)
7.2.3 充电电感的设计	(346)
7.2.4 充电变压器	(349)
7.3 脉冲形成网络	(352)
7.3.1 脉冲形成网络的放电原理	(352)
7.3.2 脉冲形成网络的设计	(354)
7.3.3 多线并联脉冲形成网络的应用	(356)
7.3.4 Blumlein 脉冲形成网络	(356)
7.4 脉冲变压器	(358)
7.4.1 脉冲变压器的脉冲波形参数	(359)
7.4.2 脉冲变压器的等效电路分析及波形参数计算	(360)
7.4.3 脉冲变压器的铁芯	(365)
7.4.4 脉冲变压器的绕组	(372)
7.4.5 铁芯截面积的确定	(380)
7.4.6 脉冲变压器的具体设计	(380)
7.5 开关电源变压器	(386)

7.5.1	开关电源变压器的分类	(387)
7.5.2	漏感和分布电容	(388)
7.5.3	开关电源变压器的材料	(389)
7.5.4	双极性开关电源变压器的设计	(392)
7.5.5	单极性反激式开关电源变压器的设计	(398)
7.5.6	单极性正激式开关电源变压器的设计	(403)
	参考文献	(406)
第8章	系统监控与可靠性	(407)
8.1	概述	(408)
8.2	系统监控	(408)
8.2.1	发射机的开机和关机程序	(408)
8.2.2	发射机的工作状态指示	(413)
8.2.3	发射机参数检测及故障保护	(413)
8.2.4	发射机监控系统的电路设计	(427)
8.3	发射机的可靠性	(435)
8.3.1	发射机可靠性的数学模型与分析	(435)
8.3.2	可靠性指标的分配	(438)
8.3.3	发射机系统的可靠性设计	(439)
8.3.4	发射机的可靠性预计	(447)
8.3.5	故障模式影响及危害性分析	(449)
	参考文献	(451)
第9章	雷达发射机技术参数的测试	(453)
9.1	概述	(454)
9.2	雷达发射机技术参数的通用测试方法	(454)
9.3	雷达发射机主要技术参数的测试	(455)
9.3.1	雷达发射机所用微波管的参数测试	(456)
9.3.2	雷达发射机的输出功率测试	(459)
9.3.3	雷达发射机的放大器功率增益测试	(459)
9.3.4	雷达发射机的瞬时带宽测试	(460)
9.3.5	雷达发射机射频频脉冲检波包络的测试	(461)
9.3.6	雷达发射机频谱分布的测试	(461)
9.3.7	雷达发射机频谱纯度的测试	(461)
9.3.8	雷达发射机效率的测试	(462)
9.4	雷达发射机一些关键技术参数的测试	(462)