

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

雷达结构与工艺

(下册)



平丽浩
黄普庆 等编著
张润達



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

雷达技术丛书

雷 达 结 构 与 工 艺

(下 册)

平丽浩 黄普庆 张润逵 等编著

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

雷达是一个复杂的电子机械机构,因此雷达的结构和工艺技术在雷达研制中占有极为重要的地位。结构和工艺不仅是雷达研制中不可或缺的技术支撑,而且是雷达性能和质量的重要保证。随着雷达技术的不断发展,结构和工艺在雷达研制中的作用和地位将越来越重要。

本书共 13 章,分上、下两册。上册包括概论、结构总体设计、热设计、天线及雷达罩结构、馈线结构和天线座结构等 6 章;下册包括雷达伺服机械传动装置、雷达发射机结构、雷达机箱、机柜及其附件、特种机电装置、环境适应性设计、雷达制造中的特种工艺和先进制造技术在雷达中的应用等 7 章。全书主要介绍雷达(重点是军用地面雷达和测控雷达)结构设计方法和制造技术,不仅包括理论分析、设计依据、设计原则、制造工艺,而且有具体的设计方法、设计计算公式、设计参考数据及图表,还有典型的应用实例。全书内容综合性和针对性强,可以成为雷达结构和工艺工作者的一本很好的参考书和设计指南。

本书是“雷达技术丛书”中的一册。其主要读者对象为从事雷达结构和工艺技术工作的研究、设计、制造、使用、操作、维护等方面的科研人员、工程技术人员和部队官兵,同时也可作为高等学校相关专业的教科书或参考书。

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

雷达结构与工艺.下册/平丽浩等编著. —北京:电子工业出版社,2007.4
(雷达技术丛书)

ISBN 978-7-121-03939-3

I. 雷… II. 平… III. ①雷达—结构 ②雷达—制造 IV. TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 028162 号

责任编辑:王 纲

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

开 本:787×960 1/16 印张:29.75 字数:571.2 千字

印 次:2007 年 4 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:126.00 元(上、下册)

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 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@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

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参与编著、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、战术技术性能、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心愿，在出版社的鼓励下，我和张光义院士倡导并参与编著，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”各册编著者不同，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

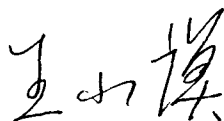
要读取其中一册或数册。希望此次出版的“丛书”能对从事雷达设计、制造的工程技术人员，雷达部队的干部、战士及高校电子工程专业及相关专业的师生有所帮助。

“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 '王小模' (Wang Xiaohu), written in a cursive style.

前 言

雷达是一个复杂的电子机械设备，因而雷达结构和工艺在雷达研制中占有极为重要的地位。结构和工艺不仅是雷达研制中不可或缺的技术支撑，而且也是雷达性能和质量的重要保证。随着雷达技术的不断发展，结构和工艺在雷达研制中的作用和地位越来越重要。为了促进我国雷达事业的发展，并在雷达结构和工艺的发展中发挥一些作用，在丛书中安排了《雷达结构与工艺》的内容。

从我国的雷达开始自行设计到现在已经 40 余年。在这 40 余年中，随着一些基础理论和雷达结构设计的紧密结合，已使得应用在雷达结构设计的这些基础理论越来越明显地显示出它的特性和专业性，也使雷达结构和其他相关电子机械结构一起形成了一门年轻而独立的学科——电子机械结构，并有了设计这些电子机械结构的原理和方法。当然，随着科学技术的发展，电子机械结构（工艺）的设计原理和设计方法还会进一步发展和完善，以便适应电子工业的发展需求，这是必然的规律。

雷达结构（工艺）专业在我国还是一个年轻的专业。这些年来，虽然在雷达结构设计、制造技术方面有不少的专著和文章，但系统地介绍雷达结构设计和工艺技术的专著至今还没有看到。为了便于从事这方面工作的人员能系统地了解雷达结构设计和工艺技术工作的主要内容，以便对他们正在从事的技术工作有所帮助，是本书的目的。

《雷达结构与工艺》是《雷达技术丛书》的一个分册，该分册分为上、下两册。

本书不仅全面介绍了雷达，特别是军用地面雷达的结构设计和主要结构件的制造工艺，而且和整套丛书的编写目标一样，本书的内容也是论述雷达结构的设计方法和制造技术，不仅包括理论分析、设计依据、设计原则，而且有具体的设计方法、设计计算公式、设计数据与图表，还有典型设计的应用实例。由于全书内容综合性和针对性强，所以，它是雷达结构和工艺工作者的一本很好的设计指南和参考书。

本书的几位主要作者，长期从事雷达的结构设计和工艺技术工作，具有深厚的理论基础和丰富的实践经验。他们将多年来的研究成果、实践经验和心得体会加以总结和提高，尽可能地融化在本书中。在总结成熟经验的同时，也做到尽可能将目

前雷达结构和工艺技术方面的新技术反映在书中，力争体现本书的先进性。

本书的内容包括雷达结构的总体设计、热设计、天线及雷达罩结构、馈线结构、天线座结构、雷达伺服机械传动装置、雷达发射机结构、雷达机箱机柜及其附件、特种机电装置、环境适应性设计等。为了使结构设计和工艺制造技术密切结合，书中另外有两章专门介绍雷达制造中的特种工艺和先进制造技术在雷达中的应用，并将雷达各主要结构件的制造技术也都汇入相关章节内。另外，为了便于雷达结构设计人员的设计方便，书中还专门介绍了雷达的环境条件及防护措施，也介绍了雷达结构常用的工程材料及选用原则。

本书由中国电子科技集团公司第十四研究所和第三十八研究所的有关同志编著。参加编写的人员有张润逵、平丽浩、戚仁欣、张树雄、黄普庆、邱敬之、吴兴祖、陈建平、杭礼元、孙光权、王建峰、肖洪保等同志；参加部分章节编写工作的人员有黄安海、鞠金山、龚光福、曹立荣、胡江华、管美章、蔡克宇、谭贵红、李孝平、王振收、赵克俊、宋士劼、周建华、瞿亦峰、魏忠良、程望东、夏艳、束瑛、陈国平、张柳、易克平、杨滨、陈亚良、黄日晶、张其政、薛羽、燕飞、姚茂明、符人兴、蔡志清、冯艳、杨维生、张炜、宋小军、冯杏梅、禹胜林、沈强等同志。全书由张润逵、戚仁欣、张树雄、平丽浩、黄普庆进行审校，最后本书的上、下册分别由张润逵和平丽浩负责统稿。

本书在编写过程中，得到了作者所在单位中国电子科技集团公司第十四研究所和第三十八研究所领导的大力支持，在此表示感谢。

由于编著者水平有限，又缺少编著经验，书中难免存在不足之处，衷心希望读者批评指正。

编 著 者

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 and 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 7 章 雷达伺服机械传动装置	(1)
7.1 概述	(2)
7.1.1 伺服系统与机械结构的关系	(2)
7.1.2 机械结构因素对伺服性能的影响	(2)
7.1.3 伺服机械传动装置的作用	(6)
7.2 驱动系统典型负载分析	(8)
7.2.1 风负载	(8)
7.2.2 惯性负载	(11)
7.2.3 摩擦负载	(11)
7.2.4 综合负载力矩的特性	(11)
7.3 传动机构和各级传动比的选择	(12)
7.3.1 伺服驱动元件的种类及相匹配的机械传动装置	(12)
7.3.2 总传动比的计算及各级传动比的分配	(13)
7.3.3 精密传动齿轮减速箱及其应用	(15)
7.3.4 标准减速器的结构及其选用	(17)
7.3.5 其他形式的传动机构	(19)
7.4 渐开线圆柱齿轮副传动精度	(20)
7.4.1 传动误差和传动回差的定义	(20)
7.4.2 渐开线圆柱齿轮传动误差的计算实例	(22)
7.4.3 渐开线圆柱齿轮的传动回差	(24)
7.5 位置检测装置	(25)
7.5.1 光电轴角编码器	(26)
7.5.2 旋转变压器式轴角编码器	(35)
7.5.3 感应同步器	(39)
7.6 伺服机械传动装置加工工艺与性能参数检测	(44)
7.6.1 伺服机械传动装置加工工艺	(44)
7.6.2 伺服机械传动装置性能参数检测	(47)
参考文献	(48)

第 8 章 雷达发射机结构	(49)
8.1 概述	(50)
8.2 雷达发射机结构设计的基本方法	(55)
8.2.1 发射机热设计	(55)
8.2.2 发射机机械结构设计	(64)
8.2.3 高压绝缘设计	(77)
8.2.4 发射机的安全设计	(85)
8.3 电真空管发射机结构设计和加工工艺	(91)
8.3.1 速调管发射机结构设计	(92)
8.3.2 陶瓷四极管发射机结构设计	(96)
8.3.3 真空管发射机加工工艺	(103)
8.4 固态发射机的结构设计和加工工艺	(109)
8.4.1 分布式固态发射机结构设计	(110)
8.4.2 集中式固态发射机结构设计	(115)
8.4.4 固态发射机加工工艺	(120)
参考文献	(128)
第 9 章 雷达机箱、机柜及其附件	(129)
9.1 概述	(130)
9.2 造型、色彩、人机工程的基本概念及其应用	(133)
9.2.1 人机工程	(133)
9.2.2 造型与色彩	(154)
9.3 雷达机箱和机柜的模块化、系列化设计	(167)
9.3.1 技术标准简介	(167)
9.3.2 机柜指示面板	(168)
9.3.3 机柜	(168)
9.3.5 插箱	(172)
9.3.6 插件	(176)
9.3.7 其他附件	(180)
9.3.8 计算机模块图库的创建	(183)
9.4 显控柜的设计	(183)
9.4.1 显控柜的设计要求	(183)
9.4.2 显控柜的布局、形式、基本尺寸	(184)
9.4.3 显控柜设计实例	(186)
9.5 机箱、机柜的工艺性	(189)

9.6 机箱、机柜的安装设计	(194)
9.6.1 方舱内电子设备的安装	(194)
9.6.2 室内固定设备的安装	(196)
9.6.3 机载雷达机柜的安装	(197)
9.7 机载雷达机箱结构设计	(198)
9.7.1 机载雷达机箱的尺寸	(198)
9.7.2 机载雷达机箱内印制板尺寸及结构形式	(201)
9.7.3 机载雷达机箱的热设计	(202)
9.7.4 机载雷达机箱的典型安装形式	(204)
参考文献	(205)
第 10 章 特种机电装置	(207)
10.1 概述	(208)
10.1.1 分类	(208)
10.1.2 特点	(209)
10.2 自动调平系统	(209)
10.2.1 调平原理	(210)
10.2.2 机电式调平	(211)
10.2.3 液压式调平	(219)
10.2.4 调平方式的选定	(221)
10.2.5 仿生支腿	(222)
10.3 天线升降与折叠	(224)
10.3.1 天线升降装置	(225)
10.3.2 天线展开/折叠系统	(230)
10.3.3 升降与折叠方式的综合与选定	(236)
10.4 汇流环	(237)
10.4.1 原理与分类	(237)
10.4.2 典型产品及性能	(244)
10.4.3 汇流环主要零部件的加工工艺	(246)
10.5 旋转关节	(258)
10.5.1 功能及分类	(259)
10.5.2 设计要点	(260)
10.5.3 典型设计实例	(261)
10.5.4 旋转关节的加工工艺	(261)
10.6 稳定平台	(268)

10.6.1	功能与分类	(268)
10.6.2	性能指标	(269)
10.6.3	设计要点	(270)
10.6.4	安装接口	(276)
10.7	可靠性	(277)
10.7.1	机电设备的失效规律分析	(277)
10.7.2	提高可靠性的措施	(278)
10.7.3	失效分析	(279)
10.7.4	实验验证	(279)
	参考文献	(280)
第 11 章	环境适应性设计	(281)
11.1	概述	(282)
11.1.1	环境条件分类	(282)
11.1.2	典型的环境类型	(283)
11.1.3	金属腐蚀	(288)
11.1.4	非金属老化	(291)
11.1.5	霉菌生长及其危害	(292)
11.1.6	一些环境因素对微波传输性能的直接影响	(293)
11.2	三防设计	(294)
11.2.1	三防设计的基本概念	(294)
11.2.2	三防设计技术	(296)
11.3	减振与缓冲	(308)
11.3.1	减振缓冲的一般方法	(308)
11.3.2	减振与缓冲原理	(311)
11.3.3	常用减振器的结构及性能	(324)
11.3.4	减振系统的设计及应用实例	(326)
11.3.5	减振效果的测量及评价	(335)
11.3.6	雷达设备振动控制新技术简介	(340)
11.4	电磁兼容设计	(343)
11.4.1	电磁兼容性定义	(343)
11.4.2	电磁兼容设计的目的和基本内容	(344)
11.4.3	电磁骚扰源	(345)
11.4.4	电磁骚扰的耦合途径	(346)
11.4.5	电磁兼容性测试技术	(346)

11.4.6 电磁兼容设计实例	(347)
11.5 环境试验	(351)
11.5.1 环境试验的必要性	(351)
11.5.2 环境试验要求和内容	(351)
参考文献	(353)
第 12 章 雷达制造中的特种工艺	(355)
12.1 特种焊接技术	(356)
12.1.1 真空铝钎焊	(356)
12.1.2 盐浴钎焊	(361)
12.1.3 保护气氛炉中钎焊	(364)
12.1.4 真空电子束焊	(368)
12.1.5 激光软钎焊	(374)
12.1.6 激光熔焊	(378)
12.2 电子电路装联工艺	(382)
12.2.1 装联工艺的特点	(382)
12.2.2 微组装及表面安装技术	(385)
12.2.3 多芯片组件和立体组装技术	(389)
12.3 特种元件制造工艺	(397)
12.4 微波印制电路板制造工艺	(407)
12.4.1 微波印制电路板制造工艺的特点	(407)
12.4.2 微波印制电路板制造工艺	(410)
12.4.3 金属芯基板的加工	(418)
12.5 特种涂镀工艺	(421)
12.5.1 特种涂装工艺	(421)
12.5.2 特种电镀工艺	(427)
参考文献	(435)
第 13 章 先进制造技术在雷达中的应用	(437)
13.1 高速铣削技术的应用	(438)
13.1.1 高速铣削的定义	(438)
13.1.2 高速铣削技术应用	(439)
13.1.3 高速铣削在雷达研制中的应用	(440)
13.2 柔性制造系统的应用	(441)
13.2.1 柔性制造系统的定义	(442)
13.2.2 柔性制造系统的基本组成	(442)

13.2.3	柔性制造系统的分类	(443)
13.2.4	柔性制造系统的应用	(443)
13.2.5	柔性制造系统的发展趋势	(445)
13.3	设计制造一体化系统的应用	(446)
13.3.1	设计制造一体化系统的定义	(447)
13.3.2	设计制造一体化系统的基本组成	(447)
13.3.3	设计制造一体化系统的分类	(448)
13.3.4	设计制造一体化系统的应用	(448)
13.3.5	设计制造一体化系统的发展趋势	(451)
13.4	网络化制造	(452)
13.4.1	网络化制造的定义和作用	(452)
13.4.2	网络化制造系统的总体框架	(453)
13.4.3	网络化制造的关键技术	(454)
13.4.4	网络化制造系统的组织机构和运行机制	(456)
13.4.5	网络化制造技术在雷达制造业中的应用前景	(456)

第 7 章

雷达伺服机械传动装置

