



中航工业首席专家
技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写

刘晓春 编著

雷达天线罩 电性能设计技术

RADOME ELECTRICAL
PERFORMANCE DESIGN
TECHNOLOGY

航空工业出版社

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

雷达天线罩电性能 设计技术

刘晓春 编著

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

全书介绍了雷达天线罩电性能设计、仿真和优化方面涉及的知识、理论、内容和方法；重点论述了传统罩壁结构电性能挖掘的抓手——变厚度设计技术，介绍了窄带半波壁雷达天线罩轴向变厚度设计、宽带夹层结构雷达天线罩双向变厚度设计技术及应用；重点论述了宽带和隐身雷达天线罩设计的抓手——频率选择表面（FSS）、小型化单元频率选择表面（MEFSS）及电抗加载等罩壁结构的构建、设计与优化方法，描述了带有金属含物罩壁结构的基本机制、设计与仿真技术；还介绍了双频、超宽带、梯度等功能结构的电性能特性与设计分析方法；兼顾未来技术发展，对共形阵电磁智能蒙皮和超材料天线罩进行了概念与要素论述以及设计与性能探讨。

本书适用于从事航空航天雷达系统和雷达天线罩设计的人员使用，也可供相关专业科技人员和高等院校师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

雷达天线罩电性能设计技术 / 刘晓春编著. -- 北京：
航空工业出版社，2017.1

（中航工业首席专家技术丛书）

ISBN 978 - 7 - 5165 - 1158 - 9

I. ①雷… II. ①刘… III. ①雷达—天线罩—性能—
工程设计 IV. ①TN957.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 007408 号

雷达天线罩电性能设计技术

Leida Tianxianzhao Dianxingneng Sheji Jishu

航空工业出版社出版发行

（北京市朝阳区北苑 2 号院 100012）

发行部电话：010 - 84936597 010 - 84936343

北京世汉凌云印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2017 年 1 月第 1 版

2017 年 1 月第 1 次印刷

开本：787 × 1092 1/16

印张：36.75

字数：941 千字

印数：1—2000

定价：248.00 元

总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从2009年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人才中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人才技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展作出更大的贡献。

21世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。



中国航空工业集团公司董事长

前言

本书的内容属于微波电磁窗专业领域。雷达天线罩 (radome) 一词, 是于 20 世纪 40 年代第二次世界大战期间, 由 radar 与 dome 两字组合生成的术语。它的一般定义是指用于保护天线免受自然环境的影响, 使其电性能不致明显蜕化或受干扰最小的介质覆盖结构, 因此, 称“天线罩”更具一般性, 而用于“雷达”天线的罩则常称为“雷达罩”。在天线罩技术发展的历史长河中, 由于其性能依赖于所使用的介质材料, 所以早期的天线罩问题主要是材料问题。天线罩发展的里程碑是与材料科学技术的成就联系在一起的。即使是现在, 研发应用于现代天线罩的新型高性能材料仍旧是热点研究课题。当然, 天线罩的电性能与罩壁结构密切相关, 包括电抗加载、频率选择表面、超材料等带有金属含物的介质复合结构。

天线罩在地面、舰载、机载、弹载、星载等多种平台的 antennas 上发挥着重要保护作用, 机载尖锥天线罩的设计具有复杂度和典型性。凡是安装雷达天线的飞机上都必须使用天线罩, 如战斗机的流线型机头火控雷达罩, 预警机背驮的圆盘形预警雷达罩, 侦察机的合成孔径雷达罩, 运输机和民航客机机头的鼻形气象雷达罩, 还有轰炸机、武装直升机、电子战飞机、无人机上的各式天线罩。飞行器上的天线罩, 既要维持气动外形, 承受气动载荷和工作环境, 又要满足天线电磁波的传输性能要求。从飞行器天线罩的基本功能出发, 天线罩应满足气动力学、热力学、力学、无线电电磁学等不同条件下、复杂而相矛盾的要求。现代战术飞机上的鼻锥形天线罩, 为改善气动性能, 提高机械强度和热力学性能, 而采用大迎角流线型外形。这种外形与雷达天线的电性能要求相矛盾, 导致天线罩的透波性能恶化, 天线方向图畸变加剧, 结果是降低了雷达作用距离, 严重地影响到雷达探测性能和跟踪精度。与现代飞行器上功能性能不断发展的雷达系统相关联, 天线罩的研究与设计一直是十分重要而迫切的课题。

通常, 天线罩的设计主要分为两部分, 即天线罩的电性能设计与力学性能设计。在电性能设计要求下, 天线罩犹如一个电磁透明窗口, 应在规定的频率范围及扫描角范围内使天线电磁能量良好地、尽量无畸变地传输。力学性能设计, 包含的不只是结构设计, 还有天线罩适应环境条件的能力、重量限制、寿命以及可靠性等设计。

如果把雷达天线比作飞行器的“眼睛”, 天线罩则是保护“眼睛”的“眼镜”, 只有“眼镜”与“眼睛”相匹配, 才能使雷达成为“千里眼”。即使将来发展使用了共形天线, “眼睛”的所遭受恶劣环境仍需要“眼镜”来抵挡, 只是要将分立式的“框架眼镜”做成“隐形眼镜”。电性能是天线罩设计的灵魂。天线罩与天线的适配主要来自电性能设

计。我们常把“电性能设计”比作天线罩设计的“龙头”，因为罩壁结构的设计、材料（介电性能）的选取、罩壁结构参数的确定及其制造公差要求首先出于电性能设计，材料和工艺技术要去满足和实现电性能设计的要求。这就是“龙头”摆，“龙身”动，反映了天线罩电性能设计的责任和重要。本书主要阐述天线罩电性能设计、仿真与优化技术。

随着现代局部战争的需求变化和飞行器与雷达技术的发展，对天线罩电性能设计的要求越来越高。从 F-22、F-35 战斗机来看，就现代战斗机的火控雷达来说，发生了以下变化：一是从窄带到宽带。国际上三代机装备的机械扫描脉冲多普勒（PD）火控雷达，典型频带宽度在 200 ~ 300 MHz；四代机雷达的工作频段为 X 波段，宽带相控阵天线罩研发面临新的技术突破。二是透波兼具隐身。三代机天线罩仅对电磁透明性能指标有要求；四代机还提出了隐身（低雷达截面）的要求，即天线罩要对雷达天线舱的强散射起到屏蔽作用。实现宽带透波和带外抑制需采用频率选择表面（FSS）技术。FSS 天线罩已不同于原来的介质结构透波天线罩的概念，它是一种空间滤波器，让机载雷达天线通带内的电磁波过去，而把通带外的电磁波挡住，对抑制飞机三大散射源之一的雷达天线舱的雷达截面（RCS）起着重大作用。三是火控兼具电子战。孔径综合是飞机实现低 RCS 的重要方面，机头天线罩内的 X 波段孔径兼具雷达和电子战功能，具有脉冲多普勒火控雷达和双高（HGESM, HPECM）电子战系统的综合效能，这使得天线罩的电性能设计难度更大，性能分析更加复杂。四是天线罩气动外形出现新特征。四代机隐身、气动稳定性和阻力的改进确定了大长细比、带边条特征的尖削机头天线罩外形，更加需要采用数字化建模及全波方法来设计分析。

笔者从事天线罩技术与工程设计 30 多年，参与、组织及主持了多个国家重点型号项目机载、弹载天线罩的型号研制和预先研究工作；提出并研究了一些新技术、新方法并付诸实践，与多所高校合作开展课题研究并取得许多理论成果。经历了二代机单脉冲火控雷达罩、三代机脉冲多普勒火控雷达罩、四代机宽带相控阵隐身火控雷达罩的研制历程，深刻领会天线罩设计技术对雷达系统以及载机的重要作用，在天线罩总体设计、电性能设计与仿真、变厚度设计、电抗加载宽带结构设计、频率选择表面与隐身设计、超材料等方面开展了大量研究和探索工作，积累了丰富的工程实践经验。

本书可作为航空航天领域从事雷达系统和天线罩研发，以及从事相关预先研究的科技人员和高校研究生的参考书。

全书共 13 章，第 1 章至第 4 章主要介绍了天线罩电性能设计、仿真与优化涉及的基本理论、内容和方法；第 5 章和第 6 章主要介绍了传统壁结构火控雷达罩的设计与电性能特性，重点介绍了变厚度设计和挖掘的性能；第 7 章至第 9 章主要为频率选择表面、小型化单元频率选择表面（MEFSS）及电抗加载等带有金属含物罩壁结构的机理、特性、设计和仿真方法；第 10 章和第 11 章主要介绍了双频、超宽带等功能结构的机理、特性、设计与分析方法；第 12 章和第 13 章主要对目前研究热点和今后发展应用的共形阵电磁智能蒙皮和超材料天线罩的概念、内涵、要素、特征、构型与设计进行了探讨和分析。

第 1 章为导论，主要介绍了天线罩的基本概念、技术发展历程和电性能要求与设计基本方法。

第2章为天线罩电性能仿真计算方法,主要介绍了以几何光学法和物理光学法为代表的高频方法,以及矩量法、有限元法和时域有限差分法等低频方法。

第3章为天线罩电性能设计,主要介绍了介质罩壁结构的参数方程、天线罩/天线系统电特性分析方法、天线罩电性能参数表征及计算方法、飞机天线罩外形函数或模型构建和电性能设计方法。

第4章为优化设计基本理论与方法,主要介绍了优化设计的基本理念,数值迭代法、遗传算法、粒子群算法、免疫克隆算法以及混合优化算法等。

第5章为窄带雷达罩变厚度设计,主要介绍了窄带半波壁结构轴向变厚度设计技术,进行了等厚度设计与变厚度设计的性能比较与分析,给出了设计示例。

第6章为宽带雷达罩变厚度设计,主要介绍了常用壁结构的带宽特性,C型夹层结构双向变厚度设计方法,进行了等厚度设计与变厚度设计的性能比较与分析,给出了设计示例。

第7章为频率选择表面天线罩设计,主要介绍了频率选择表面的滤波机理、分析方法,单层/多层、宽带频率选择表面的设计方法以及FSS天线罩的RCS分析。

第8章为小型化单元频率选择表面天线罩设计,主要介绍了MEFSS理论与机制、实现途径及设计与优化方法。

第9章为电抗加载天线罩设计,主要介绍了电抗加载结构理论、设计分析和遗传算法优化方法,通过设计示例反映了其性能特点。

第10章为双频天线罩设计,主要介绍了无截止频段和有截止频段两类双频天线罩的实现途径和设计方法。

第11章为超宽带电子战天线罩设计,主要介绍了常规夹层结构的带宽特性,功能梯度结构的机理、宽带特性与GA设计方法,通过示例说明了超宽带天线罩的设计和仿真过程。

第12章为共形阵电磁智能蒙皮设计探讨,主要介绍了电磁智能蒙皮的概念及内涵、构成要素和特征,共形天线阵电磁智能蒙皮的设计要素、特征以及有源FSS自重构设计技术。

第13章为超材料天线罩设计探讨,主要介绍了超材料基本理论与电磁参数反演方法,对基于典型双负/双正组合对消罩壁结构、基于等效介质理论的超材料频率选择结构进行了设计探讨和性能分析。

文中提及的三代机或四代机(按目前国内的习惯)对应美国、俄罗斯等西方国家的所谓四代机或五代机,如美国的F-22战斗机、俄罗斯的T50战斗机美俄称之为五代机,国内称为四代机。

本书的撰写来自笔者工程实践经验的提炼总结和与高校课题合作的研究成果,得到了高校教授和中航工业济南特种所同事们的大力帮助,在此表示衷心地感谢!

感谢西北工业大学万伟教授和万国宾教授;东南大学徐金平教授、徐欧博士和王文博博士,以及毫米波国家重点实验室华光教授;南京大学伍瑞新教授;北京航空航天大学白明教授和金铭博士;空军工程大学屈绍波教授、王甲富副教授、闫明宝博士等,感谢与他

们课题合作取得的成果和撰写中提供了大量资料和宝贵帮助。感谢特种所孙世宁、张文武、张清、王茜高级工程师，房亮、郭万振、庞晓宇工程师在书稿资料整理、制图、编辑等大量烦琐的工作中给予的支持和帮助；感谢李天宇高级工程师在组织协调方面的工作；感谢郝静、宋毅、周原等同志在照相、排版、打印等方面的细致工作；同时，感谢张明习、轩立新、王志强研究员在本书编写中给予的关心、指导和支持。

随着电磁计算学和计算机技术的不断发展，为天线罩电性能仿真分析提供了更好的工具和条件。优秀的天线罩设计师还是需要具有一定的理论功底、思想方法、经验积累和创新精神，设计和优化工作不可能完全交给计算机及软件自动地、智能地完成，设计师的工作是不可能用机器来替代的。本书力求给出天线罩电性能设计的知识与理论框架、设计与优化技法、先进技术发展趋势。由于作者水平有限，书中难免存在不足、疏漏甚至谬误，恳请广大读者给予批评指正。

刘晓春
2016 年 10 月

目 录

第 1 章 导论	(1)
1.1 雷达天线罩基本概念	(1)
1.1.1 天线罩的功能与用途	(1)
1.1.2 天线罩的分类	(4)
1.2 天线罩发展历程	(10)
1.2.1 天线罩的历史沿革	(10)
1.2.2 天线罩技术发展历程	(12)
1.3 天线罩电性能要求与设计的基本内容	(15)
1.3.1 天线罩电性能指标定义及其影响因素	(15)
1.3.2 天线罩电性能计算分析与设计的基本内容	(19)
第 2 章 天线罩电性能仿真计算方法	(23)
2.1 麦克斯韦方程组	(24)
2.2 几何光学法	(26)
2.2.1 几何光学法的基本理论	(26)
2.2.2 射线跟踪法计算分析天线罩电性能	(30)
2.2.3 射线跟踪法的局限性	(37)
2.3 物理光学法	(37)
2.3.1 平面波谱 - 表面积分法计算分析天线罩电性能	(38)
2.3.2 口径积分 - 表面积分法计算分析天线罩电性能	(43)
2.4 矩量法	(46)
2.4.1 矩量法基本原理	(47)
2.4.2 积分方程	(48)
2.4.3 积分方程的矩量法求解	(52)
2.4.4 多层快速多极子技术	(59)
2.5 有限元法	(64)
2.5.1 有限元基本原理	(65)
2.5.2 矢量有限元法	(67)
2.6 时域有限差分法	(70)
2.6.1 Yee 格式时域有限差分方程	(70)
2.6.2 边界条件	(72)
2.6.3 时域有限差分方程的迭代求解过程	(76)

2.6.4 稳定性条件与数值色散	(77)
第3章 天线罩电性能设计	(78)
3.1 概述	(78)
3.1.1 天线带罩后引入的问题	(79)
3.1.2 天线罩电性能基本要求	(81)
3.2 介质罩壁结构的参数方程	(81)
3.2.1 多层介质平面结构上电磁波的反射和透射	(81)
3.2.2 天线罩壁结构形式及其参数方程	(87)
3.3 天线罩电性能的计算分析	(100)
3.3.1 理论与基本公式	(101)
3.3.2 罩尖部和楞边处的分析建模	(107)
3.4 天线罩电性能参数表征及计算	(113)
3.4.1 天线近场穿过罩壁的传输	(113)
3.4.2 远场方向图的计算	(116)
3.4.3 传输系数	(119)
3.4.4 天线罩引入的天线方向图畸变	(120)
3.4.5 瞄准误差和瞄准误差变化率	(129)
3.5 飞机天线罩几何外形模型与交点的计算判定	(131)
3.5.1 飞机天线罩的几何外形模型	(131)
3.5.2 天线罩外表面曲面方程的拟合	(132)
3.5.3 天线罩内表面方程的建立	(134)
3.5.4 天线罩表面法线方向数的确定	(135)
3.5.5 天线射线与罩表面交点的求解	(135)
3.5.6 罩内表面上的点是否处于天线前半空间的判别	(136)
3.5.7 罩内表面上的点位于明区或暗区的判定	(137)
3.6 天线罩电性能设计	(137)
3.6.1 电性能设计准则	(137)
3.6.2 电性能设计的主要技术措施	(138)
3.6.3 电性能优化设计	(141)
第4章 优化设计基本理论与方法	(146)
4.1 优化设计的基本概念	(146)
4.1.1 优化设计的含义	(146)
4.1.2 优化技术的发展与作用	(146)
4.1.3 优化的基本方法和流程	(147)
4.1.4 优化设计问题的要素	(148)
4.1.5 最优化问题的数学模型	(148)
4.2 数值迭代法	(151)

4.2.1 一维探索(线性探索)方法	(151)
4.2.2 多目标最优化方法	(154)
4.3 遗传算法	(155)
4.3.1 概述	(155)
4.3.2 遗传算法研究进展	(156)
4.3.3 标准遗传算法	(157)
4.3.4 自适应遗传算法	(162)
4.4 粒子群算法	(163)
4.4.1 概述	(163)
4.4.2 粒子群优化算法研究进展	(164)
4.4.3 基本粒子群优化算法	(165)
4.4.4 标准粒子群优化算法	(167)
4.4.5 粒子群优化算法参数分析	(167)
4.4.6 改进的 PSO 算法	(169)
4.5 免疫克隆算法	(172)
4.5.1 概述	(172)
4.5.2 克隆选择原理与应用	(173)
4.5.3 免疫克隆算法	(175)
4.6 混合优化算法	(177)
4.6.1 混合优化算法简介	(177)
4.6.2 天线罩电性能遗传/模拟退火混合算法	(183)
第5章 窄带雷达罩变厚度设计	(192)
5.1 概述	(192)
5.2 等厚度设计方法	(193)
5.3 变厚度设计方法	(193)
5.3.1 设计重点分析	(193)
5.3.2 壁厚分布的初步设计	(195)
5.3.3 壁厚分布优化设计	(198)
5.4 雷达罩电性能的仿真计算	(202)
5.5 设计示例	(204)
5.5.1 设计条件	(204)
5.5.2 等厚度设计及其仿真结果	(206)
5.5.3 变厚度设计及其仿真结果	(215)
5.5.4 等厚度设计与变厚度设计的性能比较与分析	(222)
第6章 宽带雷达罩变厚度设计	(225)
6.1 概述	(225)
6.2 常规壁结构的带宽特性	(226)

6.2.1	薄壁的带宽特性	(226)
6.2.2	A 型夹层结构的带宽特性	(226)
6.2.3	C 型夹层结构的带宽特性	(226)
6.3	夹层结构的等厚度设计方法	(228)
6.4	夹层结构的变厚度设计方法	(234)
6.4.1	综合设计准则的建立	(235)
6.4.2	夹层结构的双向变厚度设计方法	(236)
6.5	设计示例与性能比较	(240)
6.5.1	入射角计算与基本参数设计	(240)
6.5.2	C 型夹层结构雷达罩的等厚度设计	(241)
6.5.3	C 型夹层结构雷达罩的轴向变厚度设计	(248)
6.5.4	C 型夹层结构雷达罩的双向变厚度设计	(253)
6.5.5	不同厚度分布设计性能的比较与小结	(259)
第 7 章	频率选择表面天线罩设计	(261)
7.1	概述	(261)
7.1.1	频率选择表面简介	(261)
7.1.2	频率选择表面的滤波机理	(262)
7.1.3	频率选择表面的分类及基本单元类型	(265)
7.1.4	频率选择表面机载天线罩应用	(267)
7.2	频率选择表面设计分析方法	(268)
7.2.1	近似分析方法	(269)
7.2.2	全波分析法	(271)
7.2.3	智能优化算法	(275)
7.3	单层 FSS 的设计	(278)
7.3.1	等效电路模型的建立	(279)
7.3.2	等效电路模型的参数分析	(281)
7.4	多层 FSS 级联结构的设计	(286)
7.5	FSS 的介质加载设计	(291)
7.6	宽带 FSS 天线罩设计	(293)
7.6.1	宽带 FSS 设计要素	(293)
7.6.2	大入射角范围谐振频率的稳定性设计	(295)
7.6.3	两种极化条件下的宽带及其稳定性设计	(296)
7.6.4	FSS 结构的栅瓣控制	(297)
7.6.5	宽带多层 FSS 结构构型设计	(298)
7.6.6	宽带 FSS 设计示例	(300)
7.7	频率选择表面天线罩的 RCS 计算分析	(305)
7.7.1	RCS 基本概念	(305)
7.7.2	FSS 天线罩的隐身效能	(306)

7.7.3 FSS 天线罩的 RCS 仿真	(307)
第 8 章 小型化单元频率选择表面天线罩设计	(311)
8.1 小型化单元频率选择表面概述	(311)
8.2 小型化单元频率选择表面的滤波机理	(312)
8.3 小型化单元频率选择表面的设计实现方式	(316)
8.3.1 弯折型 MEFSS 单元设计	(316)
8.3.2 集总元件加载型 MEFSS 单元设计	(326)
8.3.3 内禀电容电感型 MEFSS 单元设计	(328)
8.4 小型化单元频率选择表面的优化设计	(333)
8.5 小型化单元频率选择表面天线罩设计示例	(338)
8.6 本章小结	(345)
第 9 章 电抗加载天线罩设计	(346)
9.1 概述	(346)
9.2 电抗加载结构的电性能分析	(347)
9.2.1 二维有限元法分析	(347)
9.2.2 传输矩阵法分析	(354)
9.3 电抗加载结构的遗传算法 (GA) 优化	(363)
9.3.1 电抗加载结构天线罩等效平板 GA 优化算法基本组成	(363)
9.3.2 电抗加载实心半波壁的 GA 优化	(364)
9.3.3 电抗加载 A 型夹层结构的 GA 优化	(371)
9.3.4 电抗加载 C 型夹层结构的 GA 优化	(389)
9.3.5 设计优化结果中金属丝直径大小的影响	(406)
9.4 设计仿真示例	(406)
9.4.1 示例天线罩概况	(407)
9.4.2 电抗加载壁结构构型	(407)
9.4.3 罩体材料及其介电性能	(408)
9.4.4 设计准则	(408)
9.4.5 等效平板设计与性能计算	(408)
9.4.6 天线罩仿真与测试性能	(413)
第 10 章 双频段天线罩设计	(415)
10.1 概述	(415)
10.2 无截止频段的双频天线罩设计	(417)
10.2.1 双通带的分立设计	(418)
10.2.2 双通带的宽带覆盖设计	(423)
10.3 有截止频段的双频天线罩设计	(426)
10.3.1 双频点谐振的设计方法	(427)

10.3.2	双宽频 FSS 的设计方法	(442)
10.3.3	说明与小结	(448)
第 11 章	超宽带电子战天线罩设计	(449)
11.1	概述	(449)
11.2	超宽带天线罩常规介质结构的设计	(451)
11.2.1	超宽带天线罩电性能设计的基本方法	(451)
11.2.2	典型壁结构的超宽带设计与电性能分析	(453)
11.3	超宽带天线罩功能梯度结构的设计	(461)
11.3.1	功能梯度结构的基本构型	(461)
11.3.2	功能梯度结构设计	(461)
11.4	设计仿真示例	(467)
11.4.1	示例天线罩概况	(467)
11.4.2	等效平板设计	(468)
11.4.3	天线罩电性能仿真	(471)
第 12 章	共形阵电磁智能蒙皮设计探讨	(476)
12.1	概述	(476)
12.1.1	智能蒙皮的概念及内涵	(476)
12.1.2	电磁智能蒙皮的发展概况	(477)
12.1.3	电磁智能蒙皮的主要研究方向	(477)
12.2	电磁智能蒙皮共形天线	(478)
12.2.1	战机智能蒙皮中的共形天线系统	(478)
12.2.2	电磁智能蒙皮关键技术	(481)
12.3	机载共形天线罩设计的基本要素	(487)
12.3.1	共形天线罩对辐射特性的影响	(487)
12.3.2	共形天线罩设计基础	(495)
12.4	基于有源 FSS 的共形天线/天线罩可重构设计	(501)
12.4.1	通带可调有源 FSS	(502)
12.4.2	吸波结构的有源 FSS 设计	(506)
12.4.3	基于有源 FSS 的可重构天线/天线罩系统	(508)
12.4.4	双极化兼容设计	(511)
第 13 章	超材料天线罩设计探讨	(515)
13.1	超材料简介	(515)
13.1.1	超材料的基本概念	(515)
13.1.2	超材料的起源与发展简况	(518)
13.1.3	影响超材料电磁特性的基本要素	(519)
13.1.4	超材料研究和在天线罩方面的设计应用方向	(521)

13.2 超材料电磁参数反演	(523)
13.2.1 反演问题	(523)
13.2.2 电磁参数反演算法	(523)
13.2.3 反演相位模糊性问题的处理	(525)
13.2.4 反演厚度谐振问题的处理	(526)
13.2.5 超材料电磁参数测量方法	(526)
13.3 基于典型双负双正组合的罩壁结构性能分析	(528)
13.3.1 基本分析	(528)
13.3.2 双正双负材料及其组合结构的传输特性与机理分析	(529)
13.3.3 结论	(536)
13.4 基于等效介质理论的超材料频率选择天线罩设计	(537)
13.4.1 超材料与频率选择表面的区别	(537)
13.4.2 超材料频率选择性能设计原理	(538)
13.5 超材料及其天线罩设计优化方法	(543)
13.5.1 HFSS – Matlab – Api 脚本介绍	(544)
13.5.2 基于遗传算法与 HFSS 的超材料天线罩优化	(545)
参考文献	(548)

第1章 导 论

1.1 雷达天线罩基本概念

为了保护雷达天线能在恶劣环境条件下正常工作,工程师们设计出了集电磁波透明性与结构防护性为一体的功能性复合材料壳体,并罩在雷达天线上,称为雷达天线罩(Radome)。雷达天线罩为电磁透明结构,是天线辐射电磁波的透明窗口,故学术上又称“电磁窗”。雷达天线罩、雷达罩、天线罩是同义词。对于地面雷达,雷达天线罩可将包括天线在内的雷达均罩在其中;对于机载雷达,雷达天线罩仅将天线覆盖、保护在其中。本书中,将火控雷达、预警雷达、气象雷达、合成孔径雷达等的雷达天线罩称为“雷达罩”,如第5章、第6章因是主要针对火控雷达的雷达天线罩,就使用了“雷达罩”名词;将非雷达系统的电子战天线、告警天线、卫星通信天线、敌我识别询问天线等的保护罩称为“天线罩”。一般情况下,或在包含以上两种情况的叙述中,使用“天线罩”一词。

1.1.1 天线罩的功能与用途

天线罩将天线与外界环境形成物理隔离,能够保护天线免受恶劣的环境条件,如风霜、雨雪、冰雹、尘雾、烈日或者过高过低的温度对雷达天线系统的影响或破坏,大大降低了天线承受的载荷,简化了天线及其驱动系统结构,为雷达天线系统的稳定工作提供一个相对安全的工作环境,使天线全天候工作,延长了天线的使用寿命。天线罩通常是由天然或者人工复合材料制作而成,作为雷达天线系统的一个重要组成部分,它被称为雷达系统的“天线窗口”,其难度在于对雷达天线系统的正常工作起到保护作用的同时,还具有优良的电磁波通透性。天线罩对改善雷达天线馈线伺服系统的使用环境,延长雷达系统的使用寿命,提高其工作可靠性,降低寿命周期费用有积极的、重要的作用。

天线罩在国防和民生建设中起着重要的作用,被广泛地应用于军事和民用。例如,①用于雷达天线的天线罩;②供彩电中心、微波塔楼、微波中继站、保护通信天线及微波设备的微波墙;③用于天线馈源和相位校正透镜的馈源罩等。对于地基、舰载、车载雷达而言,天线罩使雷达能够在各种恶劣气候条件下高精度工作,极大地提高雷达的可靠性和使用寿命,减少维护和维修成本。特别当天线罩应用于飞机、导弹飞行器上时,不仅需要保护内部天线系统、提供尽量透明的电磁窗口,还需要保持飞行器的气动外形,在现代先进飞行器上还要实现平台的隐身性能要求。由于机载、弹载天线罩更具特点和难度,因此本书主要阐述机载、弹载天线罩(简称空载天线罩)的设计技术。

凡是安装雷达天线的飞机上都必须使用天线罩,如战斗机机头的流线型火控雷达罩、预警机背驮的圆盘形旋转雷达罩、运输机和民航客机机头的“鼻”形气象雷达罩,还有轰炸机、武装直升机、电子侦察机等飞机上的各式天线罩。天线罩无论与何种雷达天线匹配,无论安装在飞机或导弹的任何部位,都是作为雷达天线的电磁透明窗口,保证雷达天