

天线罩电信设计方法

杜耀惟 著

国防工业出版社

374402

天线罩电信设计方法

杜耀惟 著

国防工业出版社

(京)新登字 106 号

内 容 简 介

本书系统地阐述天线罩的电信设计方法,给出各种类型天线罩的设计图表,结合实例说明选择设计方案的原则、步骤和所能达到的性能指标,并对空间滤波器、多频段天线罩、极宽频带天线罩以及用吸收材料隐身层的优化设计等作了较为详细的探讨。

本书共分十章,主要包括单层、A—夹层、C—夹层和七夹层等对称介质平板特性的分析,四端网络理论在天线罩电信设计中的运用,感应电流率理论,电波对天线罩入射角和极化角的计算,射线跟踪法和平面波谱——表面积分法预测壳体罩性能,空间滤波器、空间桁架天线罩以及吸收材料隐身设计等。

本书是天线罩设计工作者必备的专业书,也可供雷达总体、雷达隐身、微波天线、射电天文、微波通信和微波电磁窗等专业人员和高等院校相关专业师生参考。

DV16/2802

天线罩电信设计方法

杜耀雄 著

责任编辑 何曼庆

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

北京市飞龙印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 印张40 932千字

1993年10月第一版 1993年10月第一次印刷 印数: 001—800 册

ISBN 7-118-01103-7/TN·178 定价: 34.70元

科技新书目302-471

致 读 者

本书由**国防科技图书出版基金**资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖，内容具体、实用，对国防科技发展具有较大推动作用的专著，密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版，随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金
评审委员会

**国防科技图书出版基金
第一届评审委员会组成人员**

主任委员：冯汝明

副主任委员：金朱德 太史瑞

委员：尤子平 朵英贤 刘琯德
(按姓氏笔画排列)

何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫梧生

曾 铎

秘书长：刘琯德

前 言

进入 80 年代后,我国对天线罩(微波明窗)的需求量不断增加。在微波通信方面(如彩电中心和电视塔楼等),也急需宽频带的天线罩(又称微波透波墙)以提高工作质量,改善工作条件。近年来,国内外又在高质量的机载火控脉冲多普勒雷达天线罩、机载预警雷达天线罩和舰载雷达天线罩等方面开展了大量研制工作,与天线罩设计相类似的吸收材料隐身(微波暗窗)的研究也正在兴起。所以,这方面的技术人员迫切需要一本专门论述天线罩电信设计方法的书籍。按照国内这一实际需要,在搜集和阅读大量微波窗文献资料的基础上,根据本人近 30 年来直接参与国内 44 m 直径 A—夹层玻璃钢天线罩、10 m 和 8 m C 波段单脉冲跟踪雷达天线罩、潜艇和舰载雷达天线罩、北京彩电中心、中央电视塔楼、北京电视台微波透波墙以及目前正在从事的机载火控雷达天线罩、重庆电视台微波透波墙等研制工作的经验着手撰写此书的。

在写作过程中,力求做到理论联系实际,在系统地论述天线罩电信设计方法和设计步骤的前提下,详细地推导有关设计公式,并给出了大量可资运用的设计曲线。为了便于理解有关公式的含义和掌握其使用方法,每章均列举了实例。

为使本书具有一定的普适性,在阐述电动力学基本知识的基础上,运用现代数学方法探讨天线罩电信设计的一般规则、规律,力求把早期的设计方法和现代的设计方法纳入统一的体系,使本书描述的方法既适用于研制地面、机载、舰载和弹(导弹)载天线罩,也适用于研制微波电磁窗的其他分支,如空间滤波器、吸收材料隐身和宽带微波透波墙等。

本书除绪论外,共分十章:第一章为电磁场和微波天线基础知识;第二章阐述介质平板的特性;第三章是四端网络理论在天线罩设计中的运用;第六章介绍电磁波对罩壁入射角、极化角、罩表面切线场的计算问题,与第七章用射线跟踪法预测介质壳体天线罩的性能相结合,可预测天线罩对天线性能的影响,如传输衰减、主瓣增宽、副瓣电平升高、退极化效应、瞄准误差和闪烁瓣等;第五章的感应电流率理论用于加强肋和其他附件感应电流和扩散方向图的计算,与第九章空间桁架天线罩的设计相结合,可预测空间桁架天线罩的传输衰减、副瓣电平升高和瞄准误差等;第四章和第八章的平面波谱概念和由矢量积分导出的口径积分公式是现代天线罩设计的精确计算方法,与第三、六两章相结合,既可预测天线罩的性能,又能成为设计第四章所述空间滤波器和第十章所述吸收材料隐身层优化设计的重要理论基础。

本书有关章节曾请机电部第 14 研究所副总工程师林守远、主任黄经、研究员级高级工程师王典成和李浚沛等同志审阅;高级工程师丁燮华和吕康平同志对书稿提出了修改意见,并作了部分文字加工;作者助手张强同志对所有公式加以核对;张开信同志绘制了书中的全部插图;张开信、张强、黄漪和薛锋章等同志帮助搜集了大量资料,并计算了图中所绘制的设计曲线;张晓燕、徐敏华、刘秀兰和徐惠君等同志承担了全部书稿的抄写工作。在此,对上述同志一并致以衷心的感谢。

借此机会还想说明的是，本人于 1981 年患了鼻咽癌，并已转移。由于领导和同志们的关怀、医务工作者的积极治疗以及家人的精心护理，使我得以延长生命，从而有了撰写本书的时间。我真诚地将本书奉献给我的同行，愿她能对提高我国天线罩的设计水平起到抛砖引玉的作用，并以此表达我对社会主义祖国的热爱之情。

由于本人水平有限，而且时间仓促，书中难免有不妥和错误之处，敬请读者批评指正。

杜耀惟 1992. 6.

目 录

绪论	1
第一章 电磁场理论简介	9
一、各向同性介质空间麦克斯韦方程组	9
二、波动方程及平面波的特点	14
三、电磁场的边界条件	19
四、位论	20
五、柱面波的源与传播特性	23
六、等效原理与感应定理	30
七、天线衍射方向图的标量积分公式	33
八、天线衍射方向图的矢量积分公式	38
第二章 电介质的平板特性	46
一、电磁波斜入射在介质分界面上的反射与透过系数	46
二、单层平板的透过与反射	64
三、双层平板的透过与反射	82
四、A—夹层平板性能	93
五、B—夹层平板性能	109
六、对称C—夹层平板的性能	118
七、对称七层平板	129
第三章 四端网络理论在天线罩设计中的运用	131
一、均匀传输线的矩阵方程	131
二、单层介质平板场的确定	131
三、单层平板的透过系数与反射系数	136
四、多层平板的透过与反射	141
五、不对称双层平板互易性的探讨	146
六、分层介质平板中能量守恒的正确表示式	147
七、 $1/4$ 波长阻抗变换器的一般讨论	153
八、宽频带天线罩的设计	155
第四章 平面波谱与空间滤波器的设计	186
一、两层 $1/4$ 波长介质平板组成的空间滤波器	186
二、切比雪夫空间滤波器通角宽度的近似计算	197
三、双层空间滤波器的设计举例	222
四、三层介质平板空间滤波器的特性	226
五、对称四层介质平板空间滤波器的滤波性能	231
六、天线互易定理的证明	237
七、射线跟踪和标量积分公式引起的矛盾	242
八、平面波角谱的引入	246
九、天线与空间滤波器组合体的远区方向图	248

十、栅瓣级数与栅瓣的抑制	252
第五章 感应电流率理论	268
一、金属圆柱体的感应电流率	269
二、外套介质的导电圆柱体的感应电流率	277
三、各向同性介质圆柱体的感应电流率	283
四、各向同性介质圆柱外面套上不同材料的介质套筒的感应电流率	285
五、任意横截面的介质柱体的感应电流率	291
六、任意截面形状导电柱体的扩散场的点选配解法	319
第六章 电磁波对天线罩壁入射角和极化角的计算	336
一、天线罩的曲面形状	336
二、天线罩的曲面法线	342
三、电磁波入射线方程	345
四、天线与天线罩坐标之间的变换关系	346
五、入射线与天线罩壁的交点	350
六、入射电场的极化方向	355
七、入射线对罩壁的入射角	356
八、入射电场对入射平面的极化角	358
九、反射线的方向	360
十、反射线与罩壁的交点 N 、入射角 θ_{ON} 与极化角 ϕ_{ON}	361
十一、天线罩表面切线场的表示式	365
十二、天线罩对线极化天线去极化计算的直接投影法	367
十三、电波通过天线罩后线极化波退化为椭圆极化波的标准表示式	369
十四、圆极化波通过天线罩后的去极化效应	372
第七章 射线跟踪法预测介质壳体天线罩性能	380
一、壳体天线罩的设计准则	380
二、评价天线罩电性能的要点及其定义	381
三、单一平面波—射线跟踪法预测壳体罩性能	388
四、几何光学—射线跟踪法计算天线罩的闪烁瓣	391
五、设计举例	395
第八章 预测壳体天线罩性能的平面波谱—表面积分法	404
一、平面波谱公式计算天线罩内表面附近的场	405
二、用求和公式计算天线罩内表面附近的场分布	408
三、透过天线罩并在罩的外表面上切线场的分布	410
四、由天线罩外表面场分布求天线—天线罩综合体的远区辐射场	413
五、曲面积分方法的说明	416
六、曲面积分投影区域的确定	419
七、平面波谱—表面积分法计算正切卵形天线罩瞄准误差的实例	421
八、用于近场计算的口径积分(AI)方法	434
九、口径积分—表面积分法(AI—SI)用于预测壳体天线罩性能的实例	440
第九章 空间桁架天线罩的设计	457
一、一维平面肋阵的扩散方向图	463
二、球面三角学的基本知识	471

三、球面上单根肋的扩散方向图	475
四、空间桁架天线罩的分块方法	486
五、球面肋阵扩散方向图的计算	501
六、空间桁架天线罩传输系数的计算	509
七、空间桁架天线罩对天线边瓣的影响	518
八、空间桁架不连续元件引起的瞄准误差	524
九、肋的横截面形状、肋阵形式、衍射瓣及有关实例	534
第十章 吸收材料隐身的电信设计	538
一、吸收材料单层隐身设计的基础理论	540
二、垂直入射时无反射条件公式的简化	548
三、单层电损材料隐身层的复介电常数 ϵ_1 和层厚 (d_1/λ) 的确定	551
四、电磁混合损耗材料单层隐身的优化设计	554
五、单层吸收材料隐身的带宽	561
六、单层吸收材料隐身层极化特性的分析	572
七、吸收材料单层隐身的理想化条件	574
八、双层干涉型吸收材料隐身的性能	578
九、对称 A—夹层隐身层的设计	596
十、多层吸收体隐身层设计的经典理论	604
十一、多层隐身层反射系数 R 的精确计算方法	614
参考文献	627

绪 论

本书涉及微波电磁窗专业的各个领域，如雷达天线罩、空间滤波器、宽频带微波透波墙、相位校正透镜和吸收材料隐身层等。如果将吸收材料隐身层称为电磁暗窗（将照射其上的电磁波能量吸收掉），那么，其他就都是电磁明窗，使照射在其上的电磁波能透过去。

目前我国很多人对天线罩这类形式的电磁明窗比较熟悉。实际上，其他电磁窗口设计的基本公式与天线罩的设计公式有许多相同之处。本书主要论述天线罩的设计原理和方法。

天线罩可以定义为保护天线免受自然环境影响的外壳。天线罩一词是从英文 Rado-me (Radar dome) 翻译过来的。它是由天然或人造电介质材料制成的覆盖物，或是由桁架支撑的电介质壳体构成的特殊形状的电磁窗口。它用来保护天线或整个微波系统（包括雷达和通信系统）不受环境影响而损坏。用于雷达天线的罩有时又称为雷达罩；而供彩电中心、微波塔楼、微波中继站、保护通信天线及微波设备电磁窗口用的罩称为天线罩及微波透波墙；天线馈源和相位校正透镜用的罩称为馈源罩。上述雷达罩、天线罩、微波透波墙和馈源罩都是在透过电磁波的情况下用的，可统称为天线罩。近年来，为了缩小飞行器和舰艇等雷达的横截面积，减小城市高层建筑物对电视传播的影响以及满足微波暗室建筑的需要，又发展了微波吸收隐身层。这种吸收隐身层把照射其上的微波能量转化为热能，所以，它是不透过也不反射电磁波的器件。

80年代初期，研制成一种抑制天线宽角副瓣或栅瓣用的空间滤波器。它对天线主瓣是透明窗口，而对天线宽角副瓣或栅瓣又成了不透明窗口。

天线罩的发展史对微波天线的发展有很大的依赖性。1940年前后，天线口径的尺寸已经很大，而雷达工作波长日益变短，精度要求越来越高，于是保护天线用的天线罩就应运而生。较早期的天线罩是飞机上用的流线型罩。50年代开始出现了大型地面天线罩，如1946年，美国康耐尔（Cornell）航空实验室进行了充气天线罩的研制，生产了16.8 m直径的充气天线罩原型样品，并于1948年安装在美国纽约州西部的商港，到1955年，就有数百个这样的天线罩为美国陆军服务。为了克服充气天线罩结构上的不足，使之适应更恶劣的环境，1952年，美国开始研制刚性天线罩。1954年，直径9.5 m的3/4截球体增强塑料刚性天线罩开始使用。1955年，美国又在北极安装了直径为16.8 m的刚性天线罩，并于1956年完成了9.5 m直径金属桁架天线罩的模拟电信实验。这种金属桁架天线罩于1957年用于通信和雷达天线，1964年用于射电天文望远镜。到了70年代中期，美国将椭球形天线罩与相位校正透镜相结合，用于机载预警雷达，使天线罩的设计质量达到了高峰。

在我国，解放前没有能力设计和生产天线罩。解放初期，有几家飞机制造厂仿制了苏联的歼击机机头罩，少数研究所也开始生产小型舰载雷达天线罩和潜艇用的雷达馈源罩，当时还研制了导弹头天线罩。从1963年起正式研制直径20 m的频扫雷达天线充气

罩, 1965年正式研制迄今世界上最大的(直径44 m) A—夹层玻璃钢介质桁架 3/4 截球的天线罩供精密跟踪雷达用。1983年前后, 又生产了靶场精密跟踪雷达的 8.6 m 直径 A—玻璃钢夹层天线罩。1987年前后, 为了保护某些警戒兼引导雷达天线, 改善操作人员的工作条件, 相继研制了28 m直径的玻璃钢 A—夹层天线罩、20 m直径的金属桁架天线罩以及17 m直径单层介质桁架天线罩。我国已能独立自主地设计和制造半波长壁、A—夹层型、C—夹层型、陶瓷型机头鼻锥天线罩和导弹头锥等天线罩。1986年, 我国安装的毫米波天文望远镜也罩上了直径为20.3 m的金属桁架天线罩。80年代初, 我国对变厚度半波长壁、A—夹层、C—夹层进行了计算分析。1985~1989年, 北京彩电中心微波塔楼和中央电视塔上的微波房使用了刚性泡沫的微波透波墙。目前, 我国已经有天线罩的专业生产工厂和研究所, 并具备了一定的天线罩设计水平、实践经验和生产能力。

天线可看作一种精密仪器, 对其外形尺寸和表面精度要求都很高。任何一种天线, 其正确性、稳定性和可靠性都是很重要的性能指标。如果让天线暴露在大气中, 任自然界有害因素摆布, 那么, 天线性能很快就会变坏。在实际工作中经常会遇到这样的情况: 如, 对海搜索雷达, 遇到强台风时, 没有天线罩保护的天线很可能会被台风刮坏, 于是在听到台风警报后, 只能迫不得已预先倒下天线; 又如外露广播或电视天线, 在暴风雨袭击下, 由于其电缆接头松动、漏水, 广播或电视就可能中断; 建在山头上或沙漠地带的微波接力天线会因大雪、厚冰或砂粒覆盖而变形, 或使无线电波不能正常传送; 在海岸或海上, 盐雾会使天线锈蚀, 甚至使铝制天线表面粉化。

在战争状态下, 敌我双方往往都会利用恶劣的气候条件搞突然袭击。在这种情况下, 就特别需要天线能非常稳定的工作。可是, 如果天线没有天线罩保护, 往往最容易出故障。这样, 即使天线性能再好, 也会无所作为。

显然, 提高天线稳定性、可靠性的最佳办法是给天线加上一个罩。

在雷达总体和通信系统方案论证时, 会遇到要不要用天线罩的问题。这要从使用环境、天线精度要求、工作寿命、能源消耗和维护等诸因素出发全面考虑。对于装在飞机、导弹等飞行器上的雷达, 则一定要用天线罩; 而对于地面、舰载雷达和地面上的通信天线是否用天线罩, 必须通过综合分析解决。有人认为, 对于地面天线, 只要增强天线的结构, 以天线及天线座的重量和增加驱动功率为代价, 就可以不用天线罩, 但实际上, 有些高精度的天线在使用过程中仍经不住狂风、暴雨、盐雾和灰砂等的侵袭。就是一般要求的警戒兼引导雷达, 为了能全天候工作并改善操作人员的工作条件, 也可考虑采用天线罩; 至于大型精密跟踪雷达、大直径的射电天文望远镜以及大型相控阵天线, 则必须使用天线罩。

精心设计的天线罩不但具有保护性, 而且还有传导性。风、雨、雪、冰、雹、灰、沙、盐雾或过高过低的温度、昆虫、酸雨等腐蚀性化学物质和工业污染等对天线性能的影响, 都能被天线罩减到最低限度。

天线罩中的天线性能可以精确预测, 并使设计趋于理想化。由于不再受到气候变化的影响, 天线性能既稳定又可靠。

机载、弹载等飞行器上的天线罩有改善气动外形的作用。机载等天线会大大增加飞行阻力, 同时对天线的机械要求过高, 从而使机载天线、天线座、驱动装置过于笨重且

能源消耗过多,所以,飞行器上的天线都是使用天线罩的,即使是共形阵列,也需要有与飞行器外形相似的保护罩。还有些天线,如精密跟踪测量雷达、射电天文望远镜等用的天线,它们对瞄准精度的要求很严格,直接遭受风吹以及馈电设备、反射器和支撑杆上的冰雪负荷等都将使这些结构超出规定的偏离限度或承受力。这些部件里的温度差同样能引起瞄准误差。天线座迎阳与背阳面的温差也是一种瞄准误差源。使用天线罩以后,再配上好的空气循环系统,这些影响就可以基本消除。

在使用“迷彩”、伪装涂层等情况下,天线罩能对天线起“隐蔽”作用。经特殊加强设计的天线罩,甚至有抗轰炸的功能,在核战争环境中能使设备和工作人员免受或少受热辐射、射线的直接伤害,与构筑隐体相结合,还可防御反辐射导弹。天线罩本身还可以做成漂亮的工艺品。我国中央电视塔上200 m处的宫灯穗造型就是一例。

精心设计的现代高质量天线罩,尚有可能补偿天线口径分布的某些缺陷。如由喇叭照射的短焦距抛物面天线,采用天线罩后,能减小其平方律相差的影响;极化栅式的天线罩结构可以抑制天线的交叉极化分量;空间滤波器式的天线罩,有高度抑制天线宽角副瓣或减少较小扫描相控阵天线单元数、改善扫描性能和抑制栅瓣等作用。采用多层厚壁宽频带微波墙窗,可使雷达和通信设备具有抗轰炸能力,减少战争情况下的设备损坏程度和增强保密性。在城市彩电中心微波塔顶的微波房上使用透波墙,不仅能改善工作人员的工作条件和延长微波设备的使用寿命,而且还能使建筑物增添色彩,以进一步美化市容。

随着现代科技的发展,甚至可以做到天线罩本身就是一个天线主体。例如,对于金属桁架天线罩,若将肋沿球面连续地与地面成 45° 安置,则球相对两侧的肋互相垂直,这样,如果在球心放置一个馈源,其极化与照射一侧的肋平行,那么,必然与另一侧肋垂直。只要适当控制相邻而又平行的肋的间距,那么,天线罩一侧将成为球面反射体,另一侧就可将能量辐射出去。这种天线一天线罩综合体,只要旋转馈源,就能进行空间扫描,所消耗的驱动功率极小。再如在球面上布阵的相控阵天线,它有广角扫描特性,其阵列单元就可以直接放置在球形天线罩表面。飞行器头尾部分的共形阵列也可以直接布阵于鼻锥形或流线型罩壁上,于是天线罩就成了天线的支撑体。现代还有用频率选择表面材料做机载天线罩壁的,可以大大减小天线的散射截面,起到天线隐身的作用。

总之,设计优良的现代天线罩,除了具有保护性、传导性、可靠性、隐蔽性和装饰性功能外,采取特殊措施后,甚至还有进一步改善天线性能的作用。从经济效益考虑,一个设计合理的天线罩还有如下好处:

(1) 保护天线系统免受强风、酸雨、大雪、冰雹和烈日等破坏性影响。如恶劣气候条件下使用的卫星通信站、微波接力站等,在没有天线罩时,其无故障工作时间大约只有500 h,若用天线罩保护,则平均无故障工作时间可达1500 h以上。

(2) 延长整个系统各部分的寿命。例如,一个铝制反射网天线,在近海区域使用两年后,因盐雾腐蚀而需更换新的天线。如果用天线罩并对罩内空气进行净化,那么,天线使用寿命不难超过十年。在通常情况下,天线罩可使天线使用寿命至少延长1~2倍。

(3) 降低寿命成本和操作成本。例如,一个大型跟踪雷达天线,若直径为25 m,则要在55 m/s风速下保精度地工作,其自身重量将达100 t,座重量也相应增加,驱

动功率会大到 15kW。设计时若加天线罩,则天线自重可减至 50 t,因为无风雪负荷,所以,通常驱动功率只需 5 kW 就行。在这种情况下,轴承、马达的使用寿命得到了改善,天线的转动将更均匀,天线结构稳定性也相应提高。

(4) 保证天线表面和位置的精确度。例如,我国某精密跟踪天线的原设计指标为:当风速为 13.41 m/s 时,可以保精度工作;风速为 35.8 m/s 时则停转;而当风速为 53.6 m/s 时就可能被破坏。加上天线罩后,即使风速在 44.70 m/s 时,也能保精度工作,最大抗风能力可达 60 m/s 以上。

(5) 给天线操作人员创造良好的工作环境。例如,建在沙漠地区的野外微波接力站,冬季冻手冻脚,夏季晒得皮黑生疔。有了天线罩,就可像坐在办公楼一样地工作。而且日常工作所需要的人员也可成倍地减少。

总之,对于地面或某些舰载设备,从延长设备寿命、降低维护费用、改善使用环境、提高可靠性和简化设备等角度考虑,还是加天线罩为好。但是,从另一方面看,天线罩又将对理想天线的电磁辐射产生某些干扰,从而使理想的天线性能稍有降低。

天线罩壳体的反射与吸收、加强肋的扩散以及局部附件对天线口径的阻挡,都会使天线一天线罩综合体的最大增益低于没有天线罩时理想天线的增益,反射、散射、阻挡和天线罩的传输特性(场强透过系数和插入相位移随天线罩表面位置的不同而有所差异),会使理想天线的副瓣电平略有抬高,产生寄生的交叉极化瓣,也会使天线和波瓣的半功率点宽度略有增宽、差波瓣零深电平抬高以及差斜率稍降低。被天线罩耗散掉的能量有时还可能增加系统的噪声温度。

需要强调的是,上述天线罩对天线性能的有害影响是与加天线罩后的优点对照而言的。对于预先考虑采用天线罩的情况,天线的设计是在理想环境下进行的。天线一天线罩综合体的性能,是与这个理想条件下理想天线的性能相比较的结果。因此,在全面、辩证地分析以后可知,只有采用了天线罩,天线才有可能在恶劣气候条件下得到接近于理想的性能。

天线罩电信设计的任务,就在于尽量减小天线罩对天线理想性能的影响,既充分发挥其积极作用,又尽力抑制其消极作用。

根据不同的特点和用途,天线罩的种类也是千变万化的。下面按不同的标准对天线罩进行分类。

1. 按结构形式分类

根据结构特点,天线罩可分成空间桁架式和薄壳式两大类。

空间桁架式天线罩采用自行支撑式结构设计。整个结构为由一坚固的刚性骨架蒙上能透过电磁波的薄膜或其他多层蒙皮组成的自承结构。支撑骨架采用金属或介质材料。一般敷层由厚度为 0.5~1.0mm 的介质薄膜制成,特殊情况下,也有用其他多层剖面结构的。

空间桁架式天线罩往往做成大型的地面或舰载天线罩。工作波长低于 L 波段的常用介质桁架天线罩,高于 L 波段的常用金属桁架天线罩。

薄壳式天线罩采用均匀和近似于各向同性的电介质材料制成一个平滑、被截割的球体或其他形状。壳式天线罩可分为刚性或充气式两种。充气式天线罩的尺寸一般比较大,使用频带范围也广。纯刚性壳体天线罩(在电磁波照射范围内没有加强肋),除泡

沫天线罩外，尺寸一般较小。例如机头罩、导弹罩、小型舰艇罩、预警飞机旋罩、天线馈源罩和微波透波墙等。

2. 按罩壁横断面分类

大多数天线罩的罩壁横断面结构可分为均匀单层、变厚度单层、A—夹层、变厚度A—夹层、B—夹层、C—夹层、变厚度C—夹层和多层结构等。除了薄的外表涂层外，为了得到电学上的对称性和其他良好性能，罩壁一般由奇数层组成。

单层：均匀单层已在很多天线罩中使用。它的材料有玻璃纤维增强塑料、陶瓷、合成橡胶以及整块泡沫塑料等。

单层罩又可分为薄壁和半波长壁。薄壁是指壁的电气厚度小于 $\lambda/20$ 。半波长壁指壁的最佳电气厚度对应于相应入射角 θ_0 时在介质材料中接近于半波长的倍数。薄壁和半波长壁的反射系数都趋于零。薄壁多用于桁架天线罩、充气天线罩的蒙皮，而要求较高的飞行器上的天线罩，有时候用半波长壁结构。变厚度单层半波长壁是为了保证在一定入射角范围内有较大的透过系数和均匀插入相位移而采取的有效措施。

A—夹层：通常使用的罩壁，其横断面是A—夹层。它由两个比较致密、电气上很薄的蒙皮和一个较厚的低密度芯子组成。芯子的厚度应选择得使两外蒙皮的反射基本上互相抵消。A—夹层结构具有高的强度与重量比。其表皮一般是玻璃纤维增强塑料、高频陶瓷等，而芯子呈泡沫或蜂窝状。由于考虑电的因素，夹层结构的蒙皮通常做成对称的。为了校正插入相位移随入射角的变化效应，有的做成变厚度的。A—夹层多用于尺寸较小的飞行器上的鼻锥天线罩或流线型天线罩，也常与介质桁架一起做成高质量的地面雷达天线罩等。

B—夹层：与A—夹层相比，B—夹层是其芯子有比蒙皮高的介电常数的三层夹层。因为有较致密的芯子，所以，B—夹层比A—夹层重些。B—夹层由两个具有适当介电常数和适当厚度的外蒙皮及一个匹配的高介电常数芯子组成。事实上，外蒙皮好像是一个 $\lambda/4$ 变换器。B—夹层可以做成双波段的天线罩。

C—夹层：C—夹层是一个五层结构。它由外面的两个表皮、一个中心蒙皮和两个中间芯子组成。这种对称的C—夹层可以像是两个背靠背的A—夹层，它能进一步抵消独立的A—夹层的剩余反射、扩充频带或对大入射角范围增加适应性。当普通的A—夹层不能提供足够的强度或为获得某些特殊的电气性能时，就可以采用这种结构。C—夹层的透过性能较好，但插入相位移随入射角的变化剧烈，故常与相位校正透镜联合使用，美国的机载预警雷达E—3A天线旋罩就是一例。

多层结构：当需要很高的强度、很好的宽频带和很宽的入射角范围时，会考虑采用七层、九层、十一层以上的复合夹层。其中的一些将采用玻璃纤维板薄层和低密度芯子，以便在宽的频带范围内得到高的传输特性，有的则直接采用宽频带切比雪夫 (Чебышев, П. Л.) 滤波器的设计方法 (如微波透波墙等)，这种多层结构往往做成近于平板型的天线罩。

为了防止雨蚀、雷击、阳光照射、大气老化和热核辐射等，常在天线罩的外表面加敷层和薄膜涂层。例如：某些航空天线罩，使用抗浸蚀敷层来保护其免受雨水浸蚀，有时还用抗静电涂层来防止积蓄能量所引起的高电压的放电；地面天线罩一般覆盖白色敷层或薄膜以防止因紫外线穿透而引起的表面老化，对泡沫天线罩更需如此。当然，对于

地面天线罩,有时会出于伪装的需要而使用“迷彩”。从结构上,天线罩壁的横断面实质上是不对称的,但对电气厚度,也有可能因把涂层考虑在内而构成对称结构。

3. 按使用场合分类

天线罩在不同的电磁波辐射系统中得到了广泛的应用。根据使用场合不同,天线罩主要分类如下。

飞行器天线罩 根据飞行器的类型分,有飞机雷达天线罩、导弹天线罩和宇航飞行器天线罩等;根据机载仪器设备分,有末制导雷达天线罩、多普勒导航雷达天线罩、机载通信雷达天线罩和机载多普勒雷达天线罩等。用于航空、航天雷达的这类天线罩,包括从接近于平面镶嵌的法向入射结构(例如共形阵用的保护天线罩)到流线型大入射角的鼻锥形结构。

所谓法向入射的天线罩指用几何光学计算时电波对罩壁的入射角小于 30° 的一类天线罩。这类天线罩的电信设计较为简单,多数使用A一夹层来提供足够的强度,其重量轻,电性能好。

所谓大入射角的天线罩指为满足空气动力学要求而选用的流线型鼻锥或卵形的天线罩。在多数情况下,也采用A一夹层。由于A一夹层对极化很敏感,当垂直极化与水平极化有较大相位差时,A一夹层的传输特性将显著降低。大入射角天线罩的电信设计难度较大,往往会严重影响天线性能。

现代飞行器以超音速飞行时,要求天线罩有良好的气动外形、较高的结构强度和耐热性。有的情况下,由于鼻锥形天线罩要求承受很重的空气负荷,且温度条件很苛刻,故要考虑采用坚固的多层或C一夹层结构。在与现代极低副瓣天线相适应的设计中,有时使用变厚度的半波长、A一夹层和C一夹层。一般情况下,变厚度的C一夹层频带更宽。

高速飞机、导弹和宇宙飞船的出现,要求天线罩材料能经受更加恶劣的环境条件,尤其是高温,会引起天线罩材料的结构特性和电气特性发生变化。例如,超音速飞机的鼻锥形天线罩必须经得住 $260\sim 540^\circ\text{C}$ 的温度,用硅树脂、聚酰胺(PI)和聚苯咪(PBI)等有机树脂做成的分层板只能经受 $260\sim 375^\circ\text{C}$ 的温度;以玻璃纤维为增强材料或以磷酸铝为粘合剂组成的无机薄板允许在 $540\sim 650^\circ\text{C}$ 的温度条件下工作。

超音速导弹具有高温升速的特点,所以,天线罩容易因表面温度升至 870°C 而受热振动影响,玻璃陶瓷天线罩因有良好的热振阻力而在导弹中得到了应用。高超音速宇宙飞船在应用天线罩上出现了严重问题。在短时期高温升速率情况下可采用烧蚀材料,因为烧蚀过程产生了冷却效果。大量的热能可用来升华天线罩材料。典型的烧蚀材料是四氟乙烯和熔融硅。烧蚀降低了天线罩的厚度,并改变了材料的介电性能。典型航空天线罩的性能要求列于表0-1。但是对于特殊应用情况,如一些连续波多普勒天线罩,其反射功率要求在40dB以下。

地面及舰艇天线罩 虽然某些直接附在天线结构上的天线罩是平板(如平面相控阵天线罩)或圆锥形(如某些平板裂缝阵列天线的防尘天线罩)的,但地面和舰艇天线罩通常是切割的球体形状。对地面天线罩的典型要求是应在 $-54\sim +55^\circ\text{C}$ 和 $62.5\sim 75\text{m/s}$ 风速下能安全工作。

基于地面及舰艇天线罩的尺寸都比较大,所以,较多地使用金属或介质的空间桁架

表0-1 典型航空天线罩的性能要求

参 数		单 位	一般用途	炮火控制或制导
功率传输系数 (%)	平均		90	85~90
	最小		85	75~80
功率反射系数 (%)			2	2
瞄准误差		mrاد		2~4
瞄准误差率		mrاد/mrad		0.5~1.0
波束宽度变化 (%)			10	10
旁瓣电平增加 (-20dB时)		dB	3	3

天线罩、夹层结构天线罩，也有使用充气天线罩、硬薄壁天线罩和泡沫天线罩的。典型地面天线罩的工作特性列于表0-2。

表0-2 典型地面天线罩的工作特性

天线罩类型	直 径 (m)	频 段	传输系数 (%)	瞄准误差 (mrاد)	旁瓣电平 (dB)	加罩引起旁瓣 电平增加 (dB)
薄 壁	8.0	S	88	0.3	-30	2
泡 沫	5.2	K	88	0.0~0.6	-18	2.5
泡 沫	7.9	C	93~98	0.1	-18	2.5
泡 沫	7.9	X	94~97	0.2~0.4	-24	0.7
介质空间衍架	16.8	S	79~89	0.23	-24	2.0
A—夹层结构	16.8	S	87~94	0.25~2.0	-24	1.5
A—夹层结构	18.3	C	96	0.6	-30	2.7
A—夹层结构	42.7	UHF	98	0.1~0.3	-20	0.9
金属空间骨架	28.4	L	83	0.44	-21	0.8
金属空间骨架	33.6	UHF	87	0.1~0.3	-20	0.9
金属空间骨架	45.8	UHF	85	0.2	-30	6.3

微波透波墙 随着彩电中心、微波中继站和电视高塔的建立，微波房中的设备逐渐增加，所以，微波塔楼周围要用透过微波信号的介质材料围起来。微波透波墙既有墙体的抗风、挡雨、防灰沙等性能，又不会对彩电信号、通信内容产生可察觉的影响。在窄频带工作条件下，一般可用A—夹层、单层透明玻璃等材料；当使用频带较宽时，需要C—夹层；在特宽频带（2.0~18GHz）下工作时，若无需墙体承受屋顶压力，则可用带框架的刚性泡沫板，而在要求承载又需具有抗轰炸或防破坏能力的军事通信中，可采用最大平滑和切比雪夫多层介质平板。透波墙的一般性能指标要求：在2~18GHz范围内，功率透过系数 $|T|^2 \geq 90\%$ ，功率反射系数 $|R|^2 \leq 3\%$ ，插入相位移 $\eta(\omega)$ 、幅度