

新型复合材料在雷达抛物面天线中的应用发展

葛永健

(南京大桥机器有限公司, 江苏 南京 211101)

摘 要 新型复合材料在雷达抛物面天线中的应用正逐渐成为提升天线性能的关键因素。随着科技的不断发展, 雷达抛物面天线在气象、通信等领域的应用日益广泛, 尤其是在对性能要求日益严格的背景下, 传统材料往往在重量、强度、电磁性能和耐环境性等方面存在一定局限性。基于此, 本文论述了新型复合材料, 尤其是碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料等在雷达抛物面天线中的应用, 通过分析其在轻量化、强度与刚性、电磁性能优化等方面的优势, 探讨了新复合型材料在提高雷达天线的性能和可靠性方面的作用, 旨在为促进新型复合材料在雷达抛物面天线中的应用提供有益参考。

关键词 新型复合材料; 雷达抛物面; 天线; 电磁性能

中图分类号: TM2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.006

0 引言

随着现代雷达技术的快速发展, 雷达抛物面天线在高精度探测、远距离通信和空间监测等系统中发挥着不可替代的作用, 其设计与制造材料的选择直接影响整体性能。传统金属材料虽然具有良好的反射特性和稳定性, 但在轻量化需求与长期服役环境中暴露出重量大、易腐蚀、热胀冷缩影响精度等问题, 使其在更高性能要求的雷达系统中逐渐面临局限性^[1]。为了满足现代雷达设备对高效率、高稳定性和长寿命的要求, 复合材料因其密度低、强度高、耐腐蚀、热稳定性强以及可设计性强等优点, 逐渐成为抛物面天线的重要候选材料。复合材料不仅能够显著降低天线整体重量, 提高机械结构的稳定性, 而且能够通过材料参数优化改善电磁波反射效果, 有助于提升天线的方向性和增益性能。近年来, 碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料及多功能纳米复合材料在天线制造领域的应用不断扩大, 实现了从结构轻量化向高性能电磁兼容性的拓展, 使得抛物面天线在复杂环境中的可靠性显著增强。由此可见, 材料技术的发展正推动雷达抛物面天线向更高精度、更高效率、更高可靠性方向迈进, 为现代雷达系统的综合性能提升提供了重要基础和发展空间。

1 雷达抛物面天线概述

1.1 雷达抛物面天线的基本原理

雷达抛物面天线是一类利用几何光学反射原理实现电磁波定向辐射的高增益天线, 其核心结构由抛物

面反射器和馈源构成。抛物面具有独特的几何特性, 即焦点到抛物面任意一点的路径长度相同, 因此当馈源位于焦点处时, 发出的电磁波经过抛物面反射后会形成相位一致、方向集中的平行波束, 从而得到高方向性与高增益输出。其工作原理基于反射定律, 要求入射波与反射波的夹角相等, 因此反射面的形状精度、表面平整度和材料特性直接影响波束的均匀性、方向性以及天线的整体性能^[2]。如果抛物面表面存在误差, 将导致副瓣增大、主瓣畸变以及增益下降, 影响雷达对远距离或微弱信号的探测能力。同时, 馈源结构的选择与布置方式也会影响天线的能量分布, 如采用喇叭馈源、相控馈源等不同形式会造成不同的辐射特性。在工程应用中, 抛物面天线通常需要在特定频段内保持稳定的反射特性, 因此材料的热性能、刚度和电磁特性也尤为重要。随着材料科学和制造技术的发展, 复合材料反射器因其可实现高精度成型与优异的力学性能, 可提升抛物面天线在各类复杂环境中的可靠性, 为雷达系统提供更高质量的信号输出。

1.2 雷达抛物面天线的应用领域

雷达抛物面天线凭借其高增益、高方向性、高稳定性等特征, 在众多民用及公共领域中具有广泛而重要的应用价值。其典型优势体现在能够实现远距离的高质量信号传输与接收, 因此在气象监测、航空航天通信、卫星地面站、海洋观测以及应急探测等方面发挥着核心作用^[3]。

作者简介: 葛永健 (1978-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机械设计与制造。

在气象领域,抛物面雷达天线可以实现对降水云团、风暴系统等气象目标的精细探测,通过高分辨率的扫描方式为天气预报、灾害预警和气象科研提供关键数据支持。

在民用通信领域,抛物面天线广泛应用于卫星通信地面站,能够实现稳定的长距离数据传输,支撑电视广播、远程数据交换、航空通信等业务需求。

在航空航天领域,抛物面天线既用于航天器测控系统,也应用于深空通信,通过高增益特性实现对遥远天体的探测和数据传输。

在海洋领域,抛物面天线可用于海洋浮标站、岸基观测站等设备,实现海面环境监测与实时通信。

此外,随着高精度雷达技术的发展,抛物面天线也在土地遥感、地质灾害监测、交通监测等领域发挥着越来越重要的作用,为社会公共服务和科学研究提供了稳定可靠的技术支撑。

2 新型复合材料概述

2.1 复合材料的基本定义与特性

复合材料是一类由两种或多种性能不同的材料经过有机组合后形成的新型工程材料,一般由基体材料和增强材料共同构成^[4]。基体材料通常起到黏结和支撑作用,它负责将增强材料保持在适当的位置,并在外部载荷作用下分配和传递应力;而增强材料则是复合材料性能的主要来源,通常由强度高、刚性大、耐疲劳性好的材料构成,如碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维等。这种“基体—增强体”结构使复合材料能够实现材料性质的互补融合,即将各自的优势有效结合,从而获得单一材料难以同时具备的综合性能。例如:碳纤维复合材料将碳纤维的高强度、高模量与树脂基体的轻量化、成型性好等特点融合,使材料在重量更低的情况下表现出优异的力学性能和环境适应能力。复合材料可通过改变纤维的铺层方式、体积分数、基体类型等方法实现性能可设计性,这也是其重要特征之一,使其能够根据不同工程需求进行定制化制造。在航空航天、交通运输、能源装备、电子信息等领域,复合材料因其高强度重量比、良好疲劳性能和耐腐蚀特性而被广泛采用。在雷达抛物面天线中,其独特的电磁特性尤为关键,复合材料不仅具有良好的电磁屏蔽能力,还可通过调整材料组成使其具备适宜的透波特性,有助于减少电磁干扰并确保反射面形状精确稳定^[5]。

此外,复合材料在温度变化较大的环境中仍能保持较小的热膨胀系数,有利于维持天线反射面的形状精度,避免因热变形而影响天线的方向性和增益。

2.2 新型复合材料的优势

新型复合材料相较于传统材料,其优势主要体现在轻量化、高强度、优异的电磁性能以及耐环境性等多个方面,这些特点使其在雷达抛物面天线等高性能设备中的应用越来越广泛。

首先,复合材料的密度通常低于金属材料,这使得它在减轻设备重量方面具有显著优势。在雷达天线的设计中,重量是一个至关重要的参数,天线的重量直接影响到系统的整体性能。复合材料的轻量化特性可以大大减轻天线的重量,从而减少对运载系统的负担,提升机动性并降低能源消耗。通过减轻天线的重量,复合材料为高效、灵活的雷达系统提供了重要支持,尤其是在动态和高机动性的操作中尤为突出。

其次,复合材料的强度和刚性在很多应用中超越了传统金属材料,这使得它能够承受更大的外部压力和风载荷。在恶劣气候条件下,如高风速或极端温度,复合材料可以有效保证雷达天线的稳定性与可靠性^[6]。特别是在一些高强度电磁环境下,复合材料的优异力学性能能够保证天线长期稳定运行,避免了传统金属材料在这些环境下可能出现的形变或损坏。新型复合材料的电磁性能也使其在雷达天线中得到了广泛应用。复合材料可以有效调节天线对电磁波的反射与吸收特性,优化天线的电磁辐射效率。许多复合材料能够在高频范围内表现出良好的透波性和低电导率,减少电磁干扰,提高信号传输的质量和效率。在雷达天线的应用中,这种性能优化可以大大提升天线的增益、分辨率和探测范围,确保雷达系统在复杂电磁环境中的优异表现。

3 新型复合材料在雷达抛物面天线中的应用

3.1 轻量化设计与性能提升

雷达抛物面天线的重量直接影响其安装、运输和操作性能,尤其是在航空、航天领域,天线的重量往往成为决定系统整体性能的重要因素。为了提升系统的机动性和适应性,减轻天线重量是提升其整体性能的关键一环。新型复合材料,尤其是碳纤维复合材料,由于其独特的轻量化特性,成为减轻雷达天线重量的理想选择。碳纤维复合材料的密度相对较低,但在强度和刚性方面的表现却非常出色。其高强度、低密度的特点使得在不增加重量的情况下,天线能够保持或提升其结构稳定性和刚性。这种轻量化设计的引入,使得雷达天线在各种运载系统中具备更强的适应能力,可以更灵活地安装并减少对其他系统的负担,特别是在空间受限或对重量有严格要求的环境中更为显著。

此外,轻量化不仅有助于提升机动性、降低能源消耗,还提高了天线的抗震性能。在高风速、高温或其他极端环境下,复合材料的轻质特性可以有效降低天线因环境因素造成的损坏,提升了雷达系统的整体可靠性与适应性。

3.2 强度与刚性提升

雷达天线的强度和刚性对其长期稳定性和可靠性至关重要,尤其是在极端气候条件和高负载环境下,天线需要承受较大的外力和应力。新型复合材料,尤其是碳纤维增强塑料(CFRP),因其具有比传统金属材料更高的比强度和比刚度,成为雷达天线制造中的首选材料。与金属材料相比,复合材料在相同重量下提供了更高的强度,使得天线能够在更大的外部负荷下保持稳定形态,尤其是在暴风、高温等极端环境中。碳纤维增强塑料具有较高的抗变形能力,即便在大风、强震等条件下,天线的形状和性能也能够保持稳定,不容易发生变形或损坏,从而避免了雷达系统性能的下降。

此外,复合材料的良好力学性能大大提高了天线的抗撞击能力,尤其在恶劣气候或复杂环境下,复合材料能够提供额外的结构支撑,增强天线的抗冲击性,从而延长天线的使用寿命。与传统金属材料相比,复合材料在耐久性、长期可靠性和低维护成本方面具有显著优势,这使得雷达天线能够在更长时间内稳定运行,减少了系统的维护频次和运营成本。

3.3 电磁性能优化

新型复合材料在电磁性能上的优化作用同样是其在雷达抛物面天线中广泛应用的关键优势之一。复合材料的电磁特性可以通过调节其成分和结构来显著改善雷达天线的工作性能。特别是碳纤维和玻璃纤维等复合材料,由于其较低的电导率和特有的电磁特性,使得天线对电磁波的反射、透射和吸收特性得到了优化。这种优化能够有效提高天线的辐射效率,减少电磁波的损耗,进而提升雷达系统的性能。与传统金属材料相比,复合材料能够更好地减少电磁干扰和杂散信号,保证雷达信号的清晰度和质量,特别是在高频段和复杂电磁环境中表现尤为突出。采用复合材料制造的抛物面天线能够有效减少外界电磁干扰,保证信号的传输效率,提升信号的清晰度和准确性。此外,复合材料的层结构和复合配置设计还能够进一步优化电磁波的传播路径,提高天线的接收和发射性能。通过这种优化设计,复合材料可以提升雷达天线的增益、分辨率等关键性能,使得雷达天线在复杂电磁环境中

的表现更加出色,进一步提升雷达系统的探测范围和精度,满足高精度雷达要求。

4 结束语

新型复合材料在雷达抛物面天线中的应用为现代雷达系统的性能提升带来了前所未有的机遇,其在轻量化、高强度、高稳定性以及优良电磁特性等方面所展现出的优势。得益于复合材料可设计性强、比强度高、热稳定性好、耐腐蚀性强等特点,雷达抛物面天线在保持结构精度的同时,显著降低了整体重量,提高了设备在复杂环境条件下的工作稳定性和寿命。此外,材料的电磁特性优化也使得天线表面对电磁波的反射更加精确,有助于增强波束方向性、提升增益并减少副瓣,从而改善系统的探测能力和信号质量。尽管如此,复合材料在工程应用中仍存在一些亟待解决的问题。例如:某些高性能复合材料的制造成本较高、加工工艺复杂、界面结合可靠性需要进一步加强,以及长期服役环境下可能出现的材料性能衰减问题。这些挑战在一定程度上限制了其在更大规模领域中的推广应用。然而,随着材料科学的发展、制造技术的成熟、智能制造与精密成型技术的融入,复合材料的性能稳定性和经济性正不断提升。未来,复合材料将在雷达天线设计中扮演更加关键的角色,特别是在航空航天探测、气象监测、卫星通信等对高稳定性与高精度要求日益提高的领域,其独特优势将得到更广泛的认可。可以预见,复合材料技术的不断进步将推动雷达抛物面天线朝着更高性能、更高可靠性、更强环境适应性的方向持续发展,为雷达系统整体能力的提升提供坚实的材料基础与技术支持。

参考文献:

- [1] 张迪,陆希贤,刘充.一种小口径低副瓣抛物面天线设计[C]//中国电子学会.2023年全国天线年会论文集(上).北京无线电测量研究所,2023.
- [2] 王楠楠,陆满君,高昂卓,等.无源毫米波成像雷达准光路及聚焦天线设计[J].制导与引信,2023,44(02):41-49.
- [3] 潘加松,陈伟,王申,等.抛物面天线自动倒竖/展收机构设计[J].雷达与对抗,2022,42(02):39-43.
- [4] 张彦峰.抛物面式天线雷达料位计在料位测量中的应用[J].水泥技术,2021(05):60-61.
- [5] 陈传志,董家宇,陈金宝,等.空间大型星载抛物面天线研究进展[J].航空学报,2021,42(01):133-153.
- [6] 高洋.某多馈源雷达天线系统结构设计与实现[D].成都:电子科技大学,2018.