

doi: 10.7690/bgzd.2022.08.003

无人预警机雷达系统关键技术分析

徐振华^{1,2}, 郭琳^{1,2}, 万康^{1,2}, 陈章鑫³

(1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 合肥 230088;

2. 孔径阵列与空间探测安徽省重点实验室, 合肥 230088; 3. 电子科技大学, 成都 611731)

摘要: 无人预警机系统代表了下一代预警机的发展趋势, 以其独特的性能优点越来越受到世界各国的广泛关注。相比有人预警机雷达系统, 无人预警机雷达系统受制于平台的气动外形、工作环境和资源供给等方面, 面临着很多特殊的技术难题。阐述无人预警机的优势特点, 从工程设计角度分析无人预警机雷达系统当前面临的技术难题, 针对系统轻量化设计、阵面构型设计、高效环控设计和宽带高速可靠数据链传输技术等方面进行论述, 并给出其关键技术的初步实施路径和解决方案。

关键词: 无人预警机; 雷达系统; 轻量化设计; 阵面构型设计; 高效环控设计; 宽带高速数据链传输技术

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Key Technology Analysis of Radar System for Unmanned Early Warning Aircraft

Xu Zhenhua^{1,2}, Guo Lin^{1,2}, Wan Kang^{1,2}, Chen Zhangxin³

(1. No. 38 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China;

2. Key Laboratory of Aperture Array and Space Application, Hefei 230088, China;

3. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Unmanned early warning aircraft system represents the development trend of the next generation of early warning aircraft. With its unique performance advantages, it has attracted more and more attention all over the world. Compared with the manned early warning aircraft radar system, the unmanned early warning aircraft radar system is subject to the aerodynamic shape, working environment and resource supply of the platform, and faces many special technical problems. This paper analyzes the advantages and characteristics of UAV, analyzes the current technical problems faced by UAV radar system from the perspective of engineering design, expounds the system lightweight design, array configuration design, high-efficiency environmental control design and broadband high-speed and reliable data link transmission technology, and gives the preliminary implementation path and solution of its key technologies.

Keywords: unmanned early warning aircraft; radar system; lightweight design; array configuration design; high-efficiency environmental control design; broadband high-speed data link transmission technology

0 引言

预警机作为“空中情报站”与“空中指挥平台”, 其作用不可替代, 随着未来无人机平台的不断发展以及其自身的优势, 以无人机为平台实现预警机功能将成为可能^[1-2]。无人预警机不仅可实现长航时, 而且不会直接造成人员伤亡, 便于前突作战, 抵近探测, 同时使用效费比高, 有利于实现有人/无人、无人/无人组网协同感知。与有人预警机相比, 无人预警机具有以下优势:

1) 无人预警机在初始设计中可考虑传感器平台一体化设计, 无需考虑人员的辐射防护等问题, 匹配设计较容易。

2) 无人预警机研发成本和维护费用相对低廉, 可一定程度上替代高价值有人预警机应用于复杂战

场环境, 执行预警探测任务。

3) 无人预警机续航时间可达数十小时以上, 作战半径和留空时间远超有人机, 可实现全天时、大范围空域覆盖和探测感知。

4) 无人预警机可升空工作在 15 km 左右, 甚至更高, 像太阳能无人机可工作在平流层(20 km 以上), 并连续留空, 较有人预警机高出数千米, 对应视距探测距离可达 600 km 以上, 有利于发现远距离低空超低空目标。

5) 无人预警机其整体外形可考虑隐身设计, 雷达散射截面积小, 不易被对方雷达发现, 具备低可探测性。

笔者将分析无人预警机雷达系统设计面临的技术难题, 探讨并给出关键技术的解决方案, 以期进

收稿日期: 2022-04-08; 修回日期: 2022-05-28

作者简介: 徐振华(1985—), 男, 山东人, 博士, 高级工程师, 从事无人机电载雷达系统设计研究。E-mail: xzh985@163.com。

一步推动无人预警机雷达系统的技术发展。

1 系统轻量化设计技术

轻量化设计既可以降低雷达系统设备的体积和重量，又能减轻无人机的载重负担，进而提高航时和航程，极大地拓展无人预警机的战术应用范围。

无人预警机和有人预警机相比，提供给载荷的重量、功耗和安装空间更为有限，这就要求机载雷达应该尽可能做到体积小和重量轻。然而，雷达系统重量轻和大威力通常存在矛盾，一方面雷达威力与系统功率孔径积密切相关，大的功率孔径积通常要求大阵面和高功耗，而大阵面和高功耗通常意味着较多收发通道数，增加了雷达系统的重量。要想实现轻量化设计，面临诸多技术挑战，主要解决途径有以下方面：

1) 采用片式收发组件代替传统砖式收发组件，提高收发组件设计集成度，实现模块轻量化设计。相对于砖式组件，片式收发组件利用高密度、高集成组装技术与新型盲配互联技术，大幅度减小纵向高度、重量与成本，将多个相同功能的芯片或模块集成在数个平行放置的瓦片上，然后垂直互联，构成薄而紧凑的“三明治”结构，适应机载平台使用^[3]。另外，基于微系统设计思想，通过一体化多通道芯片设计和先进 3D 封装集成工艺，实现基于射频微系统的超薄有源天线总体集成架构，可进一步减小系统结构尺寸，降低射频前端重量，减少系统损耗，提高系统效能。

2) 采用新材料、新工艺减轻电子设备结构件重量。

高强度的不锈钢材料、镁、铝合金材料以及其他的复合材料是目前实现轻质加工的优选材料，其优点在于能够实现雷达系统重量的轻量化。

比如采取镁铝合金代替传统铝材质加工壳体，可减重 1/3。需要注意的是，镁铝合金电化学性质活泼，易腐蚀，通过阳极氧化、激光辅助表面处理、有机涂层保护、热喷涂等常见的表面处理方法可提升镁合金的耐蚀耐磨性能^[4]。在工程实施过程中，为了避免设备表面不被腐蚀，经常采取在镁铝合金表面进行镀镍处理的方法。

3) 采用结构与功能一体化设计理念，可以大大减少零部件数量，提高结构件复用率，能有效降低雷达系统模块的总重量。例如，将有源阵面、环控系统或与平台结构一体化设计，实现蒙皮有源阵面一体化，可有效减轻系统重量，目前国内外的研究

开发热点“智能蒙皮”就是其典型的高级形态。“智能蒙皮”的 2 个特征是“蒙皮”和“智能”。“蒙皮”实现天线的一体化共形和结构承载功能，“智能”实现天线阵列的自适应认知功能，即能够根据外界的电磁环境产生所需要的辐射/散射特性，一般认为“智能蒙皮”能够实现雷达的全探测功能，具有轻量化、高集成和智能化的特点。

4) 系统整机线缆主要有供电电缆、射频信号电缆、控制信号电缆和光缆组件，对于通道数比较多的相控阵雷达系统来说，上述线缆的重量占系统总重量的比重不可忽视，目前在工程实践中通常根据使用环境和传输损耗的需要，从线缆、光缆以及连接器的材质和规格等方面综合考虑，选择轻量化的光缆和电缆，有效降低系统总重量。

2 阵面构型设计技术

由于机载预警雷达主要应用于远程预警，其天线孔径通常较大，雷达天线阵面(或者天线罩)的安装位置、气动外形对雷达的性能以及平台的气动性能均有很大的影响。通过分析国内外各型预警机可知，当前有人预警机雷达的天线阵面基本通过外加透波天线罩来实现结构加装，透波天线罩外形主要有机腹鼓包形、背鳍形、圆盘形和共形^[5]。

最早采用机腹鼓包形雷达天线罩的是 TBM-3W 预警机，另外美国 E-8 预警机同样采用这种气动外形的雷达罩。背鳍形雷达罩又称为“平衡木”，典型的有我国的 KJ200 预警机和瑞典的“爱立眼”。圆盘形雷达罩能够充分利用载机上方的设备安装空间，获得较大的天线孔径，实现雷达波束扫描范围覆盖 360°，显著提升雷达的预警探测性能。典型的有美军的 E-2 系列舰载预警机、俄罗斯的 A50 和我国的 KJ2000 预警机^[5]。另外，以色列“费尔康”和“湾流”预警机采用了准共形雷达天线罩设计技术，在机身两侧安装有保形的天线罩。

无人预警机需要具备长航时、长航程和一定隐身性的特点，其设计需要围绕预警雷达天线的阵面构型来进行。为避免雷达天线对飞机空气动力性能的影响，雷达天线的安装空间受到明显限制，目前常用的解决办法有以下 3 种：

1) 在无人预警机顶部加装天线(罩)。

采用背驼圆盘形或平衡木形天线罩是现役有人预警机的常用天线安装方式，如图 1、2 所示。理论上来讲是可以借鉴用于无人预警机设计，但这种安装方式不仅降低了平台的有效升阻比，而且对平台

的操纵性和稳定性有不良影响, 另外受飞机气动性能制约, 通常预警雷达天线的外形和尺寸受到限制, 因此, 目前一般不采用这种天线安装方式。



图 1 顶部加装圆盘形天线罩方式



图 2 采用顶部加装平衡木天线罩方式

如图 3 所示, 在无人预警机机腹部加装天线吊舱是一种常用的天线阵面安装方式。俄罗斯喀琅施塔得公司最近推出了一款无人预警机采用的就是这种方式, 如图 4 所示。

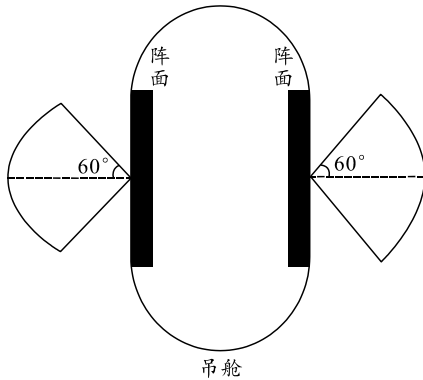


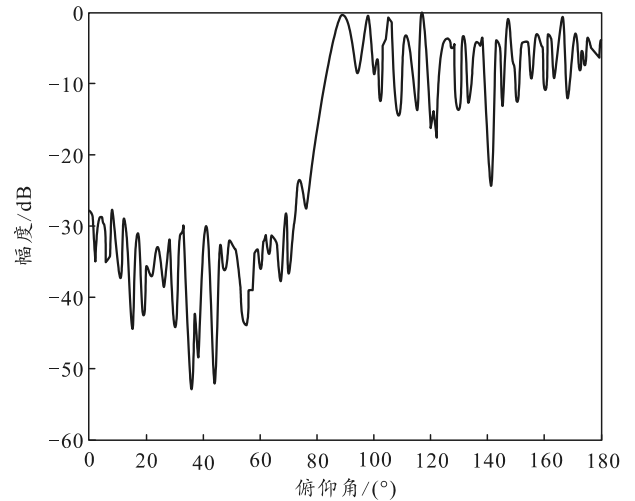
图 3 吊舱阵面布局



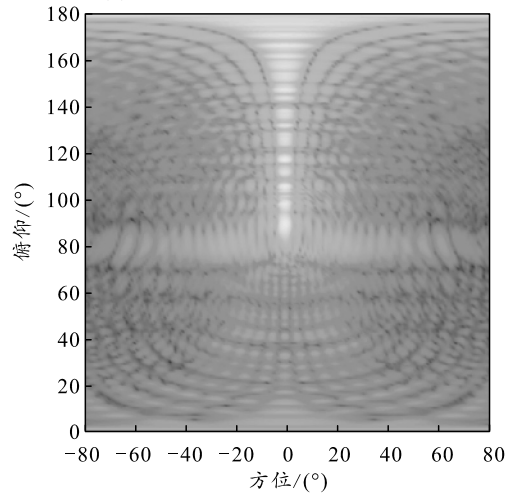
图 4 俄罗斯无人预警机

2) 在无人预警机机腹部加装天线吊舱。

相比在无人预警机顶部加装天线(罩), 这种安装方式对无人机平台气动性能影响较小, 并且对平台结构改动要求也很低, 但受起落架高度和飞机机体宽度等方面的影响, 吊舱大小通常会根据平台的具体类型受到相应的限制。另外天线波束在机腹部扫描时易受机翼和尾翼的遮挡, 尤其当扫描角度变大时, 这种影响比较明显, 会造成扫描波束的畸变, 使得副瓣抬高, 增益下降, 影响系统的探测性能。在实际工程设计中, 这种遮挡影响程度与机体结构、频段选择和功能需求密切相关, 一般来说, 高频段雷达系统由于波束宽度相对较窄, 波束遮挡影响较小。图 5 为机翼遮挡对某吊舱安装阵面扫描波瓣影响的示意图(俯仰向上扫描 10°), 可以看到由于受机翼遮挡, 俯仰向上扫描时波瓣副瓣恶化严重, 增益下降。总体来说, 在无人预警机机腹部加装天线吊舱可以应用于较高频段、小阵面的设计场合。



(a) 俯仰扫描 10°(向上扫描)



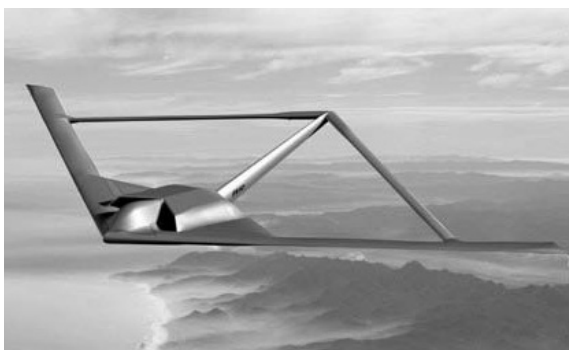
(b) 俯仰面立体波瓣

图 5 天线方向图

3) 传感器平台一体化设计。

传感器平台一体化设计是“传感器飞机”的核心设计理念，与传统无人机相比，无人预警机在初始设计阶段即与传感器载荷密切交互，可以最大程度消除飞行器平台本身对传感器载荷性能的负面影响。而且通过这种一体化设计，达到了系统整体的最优化，从而具有长航时、长航程等多种优势。围绕传感器平台一体化设计的应用需求，美国空军开展了“共形承重阵列”项目的研究。从上个世纪 90 年代初开始，主要由美国空军试验室承担研究任务，先后开展了“灵巧蒙皮结构(S3TD)”“射频多功能共口径结构(MUSTRAP)”“低波段结构天线(LOBSTAR)”和“结构一体化 X 波段阵列(SIXA)”等项目的研究^[6]。

图 6 为国外无人传感器飞机的几种布局形式。



(a) 联翼布局



(b) 飞翼布局



(c) 平直翼构型

图 6 国外无人传感器飞机布局形式

传感器平台一体化设计从阵面安装角度可分为天线罩共形和蒙皮天线共形 2 种，天线罩共形是指机体与天线罩一体化设计，雷达天线安装于机身的内凹结构上，基本不改变飞机气动外形，但由于阵面是内埋安装，对无人机结构空间提出了较高要求；蒙皮天线共形是指雷达天线与机体蒙皮共形，实现了结构与功能一体化设计，蒙皮既是天线电件也是承载结构件^[7-8]。蒙皮天线一体化设计不改变飞机气动外形，能够增大天线的有效口径并提高天线增益，且能够实现方位 360° 完全覆盖^[9-10]，但由于蒙皮天线一体化设计的天线阵面为曲面共形阵，其电磁空间分布特性与平面阵有较大差异，也带来很多技术挑战，比如由于共形天线阵面各天线单元之间的相对位置没有平面阵的线性比例关系，而是分布在 3 维曲面空间中，要实现低副瓣共形天线设计是一个难题，当前大多采用优化算法对阵元幅度和相位参数进行寻优来实现低副瓣和高增益，而通常来说这种寻优处理很难得到最优解，尤其对于不规则 2 维曲面阵列^[11-19]，其波瓣图的副瓣水平通常很难达到等效投影平面阵的超低副瓣值。图 7 为某共形阵面波瓣测试结果，可以看出由于不规则曲面的影响导致波瓣图副瓣出现畸变；另外，在共形天线设计方面，目前的设计带宽有限，还不能满足超宽带综合射频系统的需要，需要针对宽带共形天线设计技术开展进一步的研究；当前的蒙皮天线设计工艺水平还不能满足超超音速飞行器和弹载平台导引头等特种飞行器在高速气动加热、加载以及雨滴冲击等严峻环境时的使用要求，需要研究基于陶瓷材料等特种材质的蒙皮天线一体化设计集成加工技术。

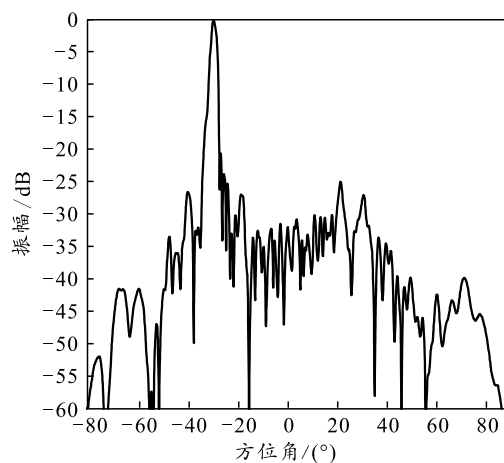


图 7 共形阵面波瓣测试结果

3 高效环控设计技术

雷达设备热控(冷却)水平直接影响到系统的工

作性能和使用寿命。随着微波模块的组装、集成密度越来越高以及工作环境的严苛,功耗和发热量急剧增加给系统热设计带来很多难题,目前电子设备热密度已经增加到 200 W/cm^2 ^[20]。无人预警机由于阵面孔径尺寸相对有限,通常需要增大收发组件功率以实现大威力探测性能;另外无人预警机通常需要在高空长航时持续性工作,比如,太阳能无人预警机工作在平流层(20~25 km)续航时间可达半年,而平流层为低温低气压环境,常规环控设计技术(包括热传导技术、风冷技术和液冷技术等)很难满足高热密度有源阵面散热的需要,因此有必要寻求一些新型散热技术解决无人预警机高热密度环控设计难题。目前机载预警雷达环控技术的发展主要包括低能耗、高性能前端冷却系统设计,包括两相流系统、射流和微通道等,新材料的运用研究(如石墨烯散热技术)等^[21]。

随着 5G 通讯时代的到来,民用电子设备的集成功能逐渐增加并变得复杂化,而设备本身的尺寸不断缩小,逐渐趋于轻薄化、多功能化,从而导致其功耗和发热量大大增加,这对电子设备的热处理技术提出了更高的要求。为了应对这一挑战,利用石墨烯、热管和均温板实现高效散热近年来得到应用。无人预警机雷达系统可借鉴这些新型高效散热技术以实现高集成度、高热密度电子设备的环控设计。众所周知,导热系数越高,越有利于热量的扩散。石墨烯导热系数可达 1500 W/mK ,而一般的纯铜导热系数是 380 W/mK ,可见石墨烯具有优良的导热性能,可用于传导散热。另外,热管和均温板的导热系数是石墨材料的近十倍,而均温板又比热管导热系数更高,可作为无人预警机雷达系统高效环控设计的选择手段。图 8 为某收发模块利用石墨烯膜散热的热电偶温度趋势图数据。

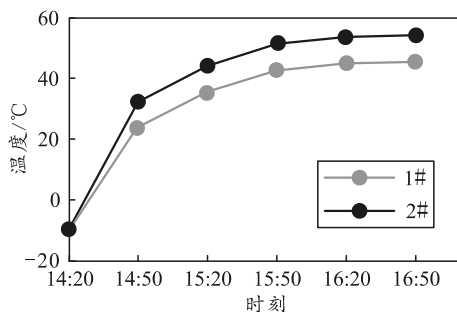


图 8 有无石墨烯试验的热电偶温度趋势

对比有石墨烯膜 1# 和无石墨烯膜 2# 试验数据,可以看出:石墨烯膜散热效果显著,具有广阔的应用前景。

4 宽带高速可靠数据链传输技术

无人预警机有别于有人预警机的一个典型特征是控制指令通过地面控制站或其他平台发出,探测数据需要无线下传至地面方舱或者空中其他指挥平台,而指令和数据传输都需利用数据链实现空空和空地通信。随着军事需求的发展,无人预警机需要具备多功能和智能化目标感知能力,另外无人预警机的一个重要应用方向是与其他无人机或有人机组网实现分布式协同探测,在某些应用场合需要向地面控制站或其他空中平台传输原始回波数据,此时就需要数据链具备大带宽、超高速、高可靠传输能力,确保探测数据或者协同信息实时稳定可靠地传输给其他平台。

5 结论

笔者分析了无人预警机的优势特点,从无人预警机雷达系统设计的角度分析了当前面临的技术难题,主要包括阵面构型设计、系统轻量化设计、高效环控设计和宽带高速可靠数据链传输等。针对上述技术难题,探讨了多种技术实施路径,分析比较了各自优缺点。由于当前无人预警机正处于技术飞速发展阶段,本文中仅是从工程实施的角度对无人预警机雷达系统相关关键技术的实施途径给出了分析和思考,希望能够推动无人预警机雷达系统的技术发展,为系统的研制奠定技术基础。

参考文献:

- [1] 邓大松. 无人机雷达载荷发展浅析[J]. 飞航导弹, 2010(12): 76-79.
- [2] 刘亮, 吉波. 无人机电载雷达现状及发展趋势[J]. 现代导航, 2014(3): 227-230.
- [3] 唐亮, 陈兴国, 李佩. 瓦片式数字阵列模块研制[J]. 电子技术与软件工程, 2021(11): 2-5.
- [4] 苏志海, 孙秀玉, 杨彤, 等. 镁合金的微弧氧化: 轻量化材料评述[J]. 应用技术学报, 2021, 21(2): 6-10.
- [5] 李玉峰, 秦昆. 机载预警雷达结构总体技术研究[J]. 现代雷达, 2013, 35(8): 4-8.
- [6] 徐振华, 杨江洪, 牛利民, 等. 传感器飞机国内外研究进展和作战使用模式分析[J]. 传感器世界, 2020, 26(9): 5-8.
- [7] 许群, 王云香, 刘少斌, 等. 飞行器共形天线技术综述[J]. 现代雷达, 2015, 37(9): 50-54.
- [8] 朱松. 共形天线的发展及其电子战应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2007, 2(6): 562-567.