

无人机天线的可靠性设计及应用

周 瑾

陕西烽火通信集团有限公司 陕西 宝鸡 721006

摘要：随着无人机技术在各个领域的广泛应用，无人机天线作为无线通信系统中数据传输和信号接收的关键部件，其可靠性直接影响整个无人机的飞行安全和任务执行效果。本文分析了无人机天线在复杂飞行环境中面临的挑战，从天线类型选择、结构设计优化、材料选取、防护技术及可靠性测试验证等多方面开展无人机天线可靠性设计工作，并结合实际案例阐述设计方法及其应用效果，验证了所提出设计方法的有效性，为无人机天线可靠性提供理论支持和实践指导。

关键词：无人机天线；可靠性设计；结构设计；材料选择

1 引言

无人机凭借其灵活、高效等特点，在航拍测绘、物流运送、农业植保、应急救援、军事应用等领域发挥着重要作用。通信和导航系统是无人机正常运行的核心，而天线则是这些系统实现信号交互的关键设备。无人机飞行环境复杂，面临着强风、振动、温度剧烈变化、电磁干扰等多种恶劣因素，这些对天线的可靠性提出了极高要求。在各种复杂的应用环境中，无人机天线需要具备良好的抗干扰、抗腐蚀、抗机械损伤等能力，以确保其长期稳定的工作。一旦天线出现故障，可能导致无人机与地面控制终端通信中断、导航信号丢失，进而引发飞行事故，造成巨大损失。因此，展开无人机天线的可靠性设计研究具有重要的现实意义。

2 无人机天线的工作原理

无人机天线是一种将电磁信号与空间电磁波相互转化的装置，用于接收和发射无线电信号。当无人机天线发射信号时，无人机的发射电路产生高频交变电流，通过天线形成电磁波向周围空间辐射。当无人机天线接收信号时，空中的电磁波达到天线，感应出交变电流被天线接收，并传输到无人机的接收电路，再经信号处理电路还原信息。

3 影响无人机天线可靠性的因素

3.1 环境因素

温度、湿度、盐雾、沙尘等环境条件会对天线的性能产生影响。例如，高温可能导致天线材料的性能下降，改变天线的介电常数，增加传输损耗；低温可能导致天线材料变脆，降低其机械强度；湿度过大会引起天线表面形成凝露，引发金属零件腐蚀，降低天线的导电性和可靠性；盐雾或沙尘会对天线造成腐蚀，破坏天线防护层，影响性能。

3.2 电气性能因素

天线的阻抗匹配、增益、带宽等电气性能参数的稳定性对可靠性至关重要。如果阻抗匹配不佳或元器件失效，会导致信号传输效率降低。

3.3 机械因素

天线在安装和使用过程中可能会受到振动、冲击等机械力的作用。不合理的结构设计可能导致天线部件松动、断裂。另外，在无人机起降或飞行过程中，天线可能会受到发动机运转、螺旋桨转动或遇到突发气流等因素的影响，产生天线内部焊点松动、元器件断裂、零部件疲劳损坏甚至断裂等，严重影响其性能。

3.4 电磁干扰因素

无人机在飞行过程中会受到来自自身通讯设备产生的电磁噪声及周围环境的电磁干扰，会对无人机天线的正常工作产生影响，导致信号传输误码率增大、信号失真。

4 无人机天线可靠性的设计方法

4.1 天线类型的确定

无人机天线有很多种类，常见的类型有以下几种：

1) 杆状天线：杆状天线通常由辐射体、阻抗匹配网络和支撑结构组成。辐射体一般由铜、铝等金属材料制成，其作用是将无人机的射频信号转换为电磁波辐射到周围空间，或是接受空气中的电磁波转换为射频信号传输给无人机的通信设备。阻抗匹配网络顾名思义进行射频信号阻抗的匹配，保证信号的传输效率。支撑结构通常采用高强度、轻重量的非金属材料制成，如碳纤维材料、玻璃纤维复合材料、聚四氟乙烯材料等，用于固定辐射体和阻抗匹配网络，保证天线的外形和工作状态不受环境的影响。

杆状天线通常在水平方向上能良好的接收或发射信号，性能稳定。其特点是结构简单轻便、易于安装、生产成本低、通用性强。但是其增益相对较低，抗干扰能

力较弱，在远距离通信方面表现略逊一筹。

2) 刀形天线：刀形天线通常由辐射体、馈电结构、支撑结构、射频接口、天线底板和天线罩组成。辐射体一般采用铝制材料，用于电磁波的发射与接收。馈电结构一般采用铜质材料，用于连接辐射体与射频接口，确保信号良好传输。支撑结构多为尼龙材料、PMI材料等非金属材料，用于支撑辐射体或其他天线结构，增强天线抗振动、冲击的能力。射频接口多为铜材料或不锈钢材料的射频连接器，用于传输射频信号。天线底板多为铝制材料，对内用于固定辐射体、支撑结构和射频接口等，对外用于与无人机机体连接。天线罩多为ABS、PPS等塑料材料，具有良好的透波性，坚固耐用，保护天线内部免受外界环境的影响。

刀形天线的极化方式为垂直极化和水平极化，极化方式灵活。其特点是流线形外观减小风阻、结构坚固。但是其增益容易受物理尺寸影响，增益相比定向天线较低。

3) 共形天线：共形天线通常由辐射体、馈电匹配网络和天线罩组成。辐射体的形式可以设计成微带贴片、缝隙结构等多种形式，用于发射和接收电磁波。馈电匹配网络需要保证信号的幅度和相位，使信号有效传输。天线罩用于保护天线内部结构免受外界环境的影响，并且要求透波率要高，减少对电磁信号的影响。

共形天线能够与无人机机体表面贴合，气动性能好，空间利用率高，可以与无人机的蒙皮进行一体化设计，提高无人机的可靠性。但是设计和制造难度大，对天线的性能要求高、成本高。

4.2 天线材料的选取

1) 金属材料：为适应轻量化设计及耐腐蚀的要求，无人机天线要选用具有良好耐候性、导电性和机械性能的金属材料，比如铜合金、铝合金等。这些材料不仅有优异的导电性能，能够高效的辐射和接收电磁波，而且在恶劣的环境中有较好的抗腐蚀能力，可以延长天线的使用寿命。另外，当天线中有不同金属材料且彼此之间直接接触时，要合理选择金属材料，避免化学电位相差大的两种金属紧密接触，防止产生电化学腐蚀。

2) 非金属材料：无人机天线所用非金属材料需根据使用要求选用耐高、低温性能好，吸湿性低，透湿性小，抗霉菌性能好，具有所需的机械强度、绝缘强度、阻燃性能的材料。比如天线罩需要具备良好的透波性，而且要承受机械和环境的双重考验。常用的天线罩材料有玻璃纤维复合材料、聚四氟乙烯材料、增强尼龙材料等，这些材料透波率高、介电常数低、有较高的强度和耐候性，能有效保护天线内部结构不被侵蚀。

3) 表面处理材料：为满足耐腐蚀的要求，无人机天线的金属零部件均须进行氧化、镀涂等化学或电化学表面处理，提高其抗蚀性能，为进一步提高防盐雾腐蚀能力，凡暴露在室外大气的表面均涂覆“三防”油漆。比如铝合金材料进行导电氧化处理，不锈钢材料进行钝化处理，天线外表面喷涂聚氨酯油漆等。

4) 紧固件材料：天线所用紧固件应最大程度选用符合国家标准的不锈钢材料，并合理地减少紧固件的品种规格。

4.3 天线结构的优化

1) 优化无人机天线的结构，采用高强度的材料制作天线外壳，提高其抗机械损伤能力。

2) 采用适当增加关键部位的壁厚或者增加加强筋的方式来增加无人机天线的刚度稳定性，提升天线抗振动和抗冲击的能力。

3) 设计合理的散热结构和散热方式，以应对高温环境或产品自身散热，避免因散热问题造成性能下降或失效。

4) 避免尖锐边角设计，尽量采用大圆弧过渡、光洁平面，应消除残余应力，以减少应力腐蚀和磕碰引起的早起腐蚀。

5) 无人机天线内部的元器件、导线、电缆等要合理采取加固措施，比如采用机械固定、胶粘固定、局部灌封固定等方式。

6) 无人机天线使用的紧固件和电连接器应有防松措施，保证连接可靠。比如采用螺纹连接并涂覆螺纹锁固剂，或者使用带自锁结构的连接器，确保其连接牢固，避免在振动和冲击作用下出现松动，保证电气连接的可靠性。

4.4 天线三防的实现

1) 在零部件设计上外壳结构尽量消除缝隙结构，防止水、灰尘和盐雾的沉积。

2) 避免不同类型金属接触，以防止电化学腐蚀。

3) 容易产生腐蚀和不容易维护的部位选择耐腐蚀性能高的材料或者耐霉材料。

4) 选择非金属材料需具有低的吸潮性，不长霉，在所需要的频率范围和整个温度范围内能保持性能的稳定。

5) 元器件、导线、接插件的选择及电缆的设计应考虑“三防”要求。

6) 金属零部件均须进行氧化、镀涂等化学或电化学表面处理，提高其抗蚀性能。

7) 印制电路板要求印制阻焊膜，组装调试结束后其两面喷涂“三防”涂料。

8) 需要加固的元器件、飞线用硅橡胶加固。

9) 采取密封设计,在天线的缝隙和接口采用密封胶进行密封,确保防护效果。

4.5 天线电磁屏蔽的设计

1) 优化结构布局,将无人机内部的电子敏感设备与天线分开,采取局部屏蔽的措施,尽量减小天线与其他设备的距离,减少电磁干扰。

2) 进行良好的接地设计,降低接地电阻,最好使用指直接接地的方式,通过安装孔、安装面或连接器壳体接地,提高接地效果,保证天线正常工作所需的电磁环境。

4.6 天线工艺方法的控制

1) 无人机天线的电路和结构设计应具有良好的工艺性和经济性,有根据天线特点制定的工艺规范指导生产。

2) 装配件都应具有合格证明文件,外观应无机械损伤和锈蚀现象。

3) 严格控制天线的制造工艺,确保焊接质量、表面处理质量、装配质量等。例如:采用已有的、成熟的组装技术,保证天线各部件之间的电气连接良好,不允许产生影响天线机械、电气性能的破坏性损伤;表面镀涂层应粘附牢固,颜色均匀,无明显的缺陷,不起泡、不起层、不开裂、无划伤、色差等明显缺陷。^[1]

4) 对天线生产中的关键过程和特殊过程进行控制,确保加工质量。

5) 进行有效包装和防护,防止产品磕碰、划伤、表面破损。

4.7 天线可靠性测试的验证

1) 环境试验:通过对天线进行高温、低温、温度冲击、湿热、盐雾、振动、冲击、加速度、太阳辐射等环境试验,模拟无人机在各种实际工作环境下的工作情况,检验天线的电气性能和环境适应性能否满足实际使用需求。

2) 可靠性试验:通过对天线进行可靠性试验,模拟无人机在实际使用中执行典型任务剖面时,受到综合环境(包括电应力、振动应力、温度应力和湿度应力)作用下的工作情况,检验天线的电气性能和可靠性能否满足实际使用需求。

3) 电磁兼容性试验:通过对天线进行电磁兼容性测试(包括天线的抗干扰能力测试和对外界的电磁辐射测试等),确保天线在复杂的电磁环境中能够正常工作,并且对无人机的其他设备不会产生干扰。^[2]

5 设计实例与验证

以一款用于中继通信的小型无人机为例,该无人机主要用于军事组网,对频率覆盖范围和可靠性要求较高。在方案设计初期,选用了普通的杆状天线,但在实际的飞行过程中易产生摇摆导致接口松动,对信号的稳

定性产生影响,通信效果较差。经过分析,对天线进行了重新设计。

1) 更换天线类型:将杆状天线更换为刀形天线,利用刀形天线流线型外形,有效降低气动阻力,同时提高天线增益,增强通信效果。

2) 优化结构设计:在不改变天线接口情况下,采用优质铝合金材料制作天线底板,局部增加加强筋,提高天线底板的抗振动冲击能力。同时,改进了天线的射频连接器,增加保险螺钉防止接口松动。天线罩采用玻璃纤维复合材料,适当增加天线罩底部圆角处的尺寸和厚度,提高天线的强度和刚性,从而提高天线的可靠性。天线内部使用密封胶进行密封,提升天线整体稳定性,避免天线在无人机飞行过程中剧烈摇摆导致电气性能下降。

3) 提升防护性能:对天线整体进行三防性能升级,天线内部使用密封胶灌封,能够有效减缓冲击、振动对天线的影响,提高天线的抗振动冲击能力。天线罩外表面涂覆氟聚氨酯油漆,天线底板进行导电氧化处理,尽量降低环境(如暴晒、雨淋、风沙、冰雪等)的影响。天线整体采用了密封设计,能够隔离盐雾环境,能够保证防湿热、防霉菌、防盐雾能力。

天线采用上述可靠性设计方法改进设计后,进行了环境试验验证,能够满足天线技术协议中的电气性能要求和环境适应性要求。天线装机后又进行了飞行试验验证,和杆状天线相比,极大地改善了通信效果,也未出现晃动或接口松动的现象,极大地提高了天线的可靠性,得到了用户的认可,验证了可靠性设计方法的有效性。^[3]

6 结论

无人机天线的可靠性设计是一个系统工程,需要综合考虑飞行环境的各种因素,从天线类型选择、结构设计、材料选取、防护技术及可靠性测试等多个方面入手。通过合理的设计策略,可以有效提高无人机天线在复杂环境下的可靠性,确保无人机通信和导航系统的稳定运行,为无人机在各个领域的广泛应用提供坚实的技术保障。随着无人机技术的不断进步和应用场景的日益拓展,未来还需要进一步研究天线可靠性设计技术,以满足更高的性能要求和风复杂的使用环境。

参考文献

- [1]基于深度学习的无人机航拍目标检测算法研究尹帅;哈尔滨理工大学;2024
- [2]基于MEMS传感器的多信息源组合导航方法研究杨凯峰;北京化工大学;2024
- [3]基于MEMS传感器的多信息源组合导航方法研究杨凯峰;北京化工大学;2024