

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.01.020

结构功能一体化雷达天线变形检测方法研究*

钟剑锋^{1,2}, 蔡建国³

(1. 中国电子科技集团公司第十四研究所, 江苏 南京 210039; 2. 天线与微波技术国防科技重点实验室, 江苏 南京 210039; 3. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210008)

摘要:为解决传统结构仅用作支撑和力传递,功能较为局限,以及服役中一体化天线与载荷高度耦合引起变形的问题,提出了一种兼具天线电磁功能和结构承载能力的新型结构功能一体化天线。将变形检测技术应用到一体化天线中,建立了机电耦合模型实施性能补偿;开展了光纤原理和结构分析,建立了光纤光栅形变量与天线结构形变量之间的关系,提出了一种基于三芯光纤光栅传感器串法网络的雷达天线结构变形检测方法,解决了变形检测难度大、精度低的问题;在一体化天线变形检测实验平台上对光纤光栅测量方法的准确度进行了评价,进行了光纤光栅测量与摄影测量结果的对比试验。研究表明:光纤光栅测量的位置误差,除个别点误差较大之外,其他均在10%以内,在可接受的误差范围,满足后续天线性能补偿要求。

关键词:雷达天线;变形检测;光纤光栅;结构功能一体化

中图分类号:TP24;V214.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)01-0100-04

Distortion detection method for structurally integrated antenna of radar

ZHONG Jian-feng^{1,2}, CAI Jian-guo³

(1. The 14th Research Institute of CETC, Nanjing 210039, China; 2. National Key Laboratory of Antenna and Microwave Technology, Nanjing 210039, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract: In order to solve the problems that a traditional structure is only used for supporting and force transmitting and the problems that deformation occurred in service due to the coupling between the structure and the outside load, a new type of structurally integrated antenna of radar with a dual function of antenna and load-carrying capacity was proposed. The deformation detection technology was applied to the structurally integrated antenna, electromechanical coupling model was then constructed and the deformation was compensated. After the analysis of principle and structure of optical fiber, the relationship between the deformation of fiber grating and antenna structure was established. A method was presented to detect the deformation of structurally integrated antenna based on the serial network of triple-core fiber grating sensors. The accuracy of fiber grating measurement was evaluated on the integrated antenna testing system. The comparison of fiber grating measurement and photogrammetry was tested. The experimental results show that the deformation error of the fiber grating measurement, except for a few points, is within 10% error, which is acceptable and can satisfy the antenna performance compensation in the future.

Key words: radar antenna; distortion detection; fiber grating sensors; structurally integrated antenna

0 引言

结构功能一体化雷达天线(structurally integrated

antenna of radar)是一种兼具天线电磁功能和结构承载功能的新型天线结构。天线可以融入武器平台的外部结构中,在实现天线电性能的同时,得到光滑平顺的结构,不影响武器平台的气动性能,并有利于隐身。如美

收稿日期:2018-05-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51490664);国防基础科研重点项目(JCKY2013210B004)

作者简介:钟剑锋(1967-),男,浙江宁波人,研究员,主要从事有源相控阵雷达技术方面的研究。E-mail:zhongjianfeng712@163.com

国全球鹰无人机,机头上方安装有卫星通讯用的小型反射面天线,导致了明显的隆起,不但增加气动阻力,耸立的天线还破坏了隐身效果。如果使用一体化天线代替反射面天线,安装于机翼上,可在实现减阻隐身的同时,还可充分利用机翼面积以增大天线孔径,获得更远的作用距离。因此这种新型天线引起了国内外学者的广泛关注^[1-2]。

本研究提出一种兼具天线电磁功能和结构承载能力的新型结构功能一体化天线。

1 一体化天线结构

天线结构主要功能是支撑和传递力,而结构功能一体化天线则是将结构功能、电功能、热控功能、环境保护等制造集成在一起,实现天线的功能综合化。该结构设计是将天线单元及其支架、电连接器、传输电缆、热控等辅助部件集成为一体,最大限度嵌入结构的复合材料中,并使有源模块与结构件直接接触的新型结构,淘汰了传统天线的骨架、面板及其连接电缆。

一体化天线通常是一个多层结构体,其典型结构如图 1 所示。

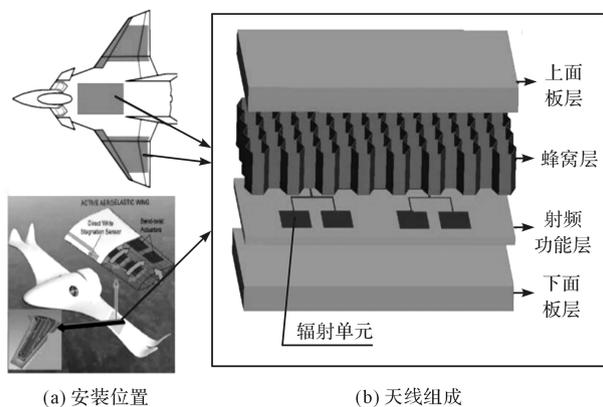


图 1 典型一体化天线内部结构示意图

主要包含两部分:(1)透波天线罩体部分(上面板层+蜂窝层),承受外部载荷保护内部天线;(2)内部天线部分(射频功能层+下面板层),实现电性能。两部分通过热压、粘接的方式连接,构成一体化天线。天线罩体部分包括外部的介质一体化(如玻璃钢)和内部的填充芯层(如蜂窝、泡沫)。内部天线部分包括辐射单元(如微带天线阵列或平面螺旋天线阵)和分配网络等,天线层压后还有散热通道(如液冷微通道)和 T/R 电路等^[3]。

一体化天线是一个典型的机电热集成的电子装备结构件,需要同时实现结构承载、电性能两个方面的功能特性:

(1)结构承载:一体化天线安装在武器平台的外表面,必须要能承受一定的载荷,满足平台一体化的整体结构刚度要求。

(2)电性能:一体化天线首先是一个天线,其次才是一个结构件,所以必须能够实现各项电性能指标。

一体化天线的设计是一个典型的机电综合设计问题。但因为两个功能特性同时存在于一个结构件中,是相互影响、相互制约、相互耦合的。如罩体部分在实现结构承载的同时,还必须有较好的透波特性;天线阵面在实现电磁辐射的同时,还必须考虑结构承载的要求。

2 一体化天线变形检测的重要性

一体化天线平台通常工作在高速、振动、冲击的环境中,动载荷会引起天线结构的振动和变形,这些动载荷会使得天线辐射单元物理位置发生演变。一体化天线变形引起辐射单元位移的示意图如图 2 所示。

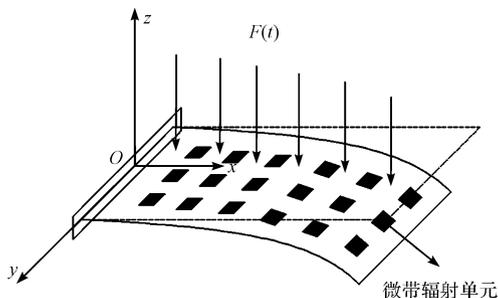


图 2 一体化天线变形引起辐射单元位移

辐射单元阵列和对应的微波电路组成,每个辐射单元的位置影响着天线的电磁辐射性能。尽管可以通过测试修正电性能减少结构变形的影响,然而这些修正是在静态变形下通过测量天线电性能发现的,他们并没有获得动载荷下天线电性能的变化。并且,现有的电磁测量仪器也不能实时测试动态结构变形情况下天线的辐射性能。

在实际的应用中,为了获得动载荷对天线电性能影响,实时修正天线的机电耦合模型,必须对一体化天线进行变形测量。

3 基于光纤传感器系统的变形检测

自 20 世纪 70 年代,第一根短周期光纤光栅(即布拉格光纤光栅—FBG)问世以来,光纤光栅的制作技术有了很大的提高。光纤光栅传感器具有其独特的优势,例如径细、质软、重量轻等^[4-5]。

3.1 基本结构和原理

光纤传感器系统的基本原理如图 3 所示。

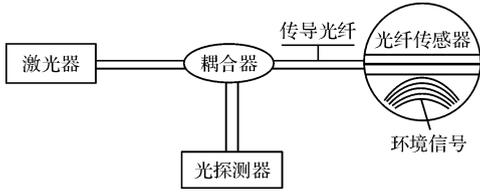


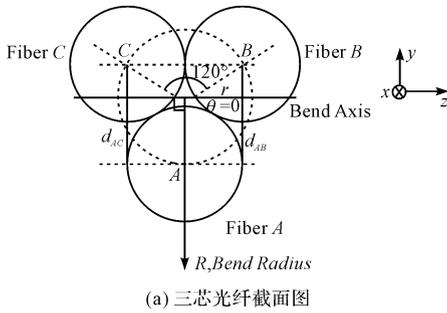
图 3 光纤传感器系统示意图

激光器发出的光在传感域受环境信号的调制以后经过耦合器进入光探测器,解调之后得到的环境信号。传导光纤与传感光纤为一根光纤,布拉格光栅光纤传感器在传感光纤部分形成一个或者数个芯内体光栅,使得其中对某一个或几个特定波长的光敏感^[6]。

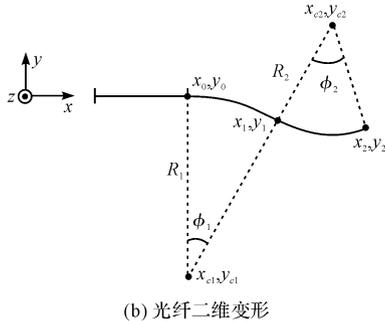
光纤测量技术以瑞利散射现象为基础。一般采用光时域反射(OTDR)结构来实现被测量的空间定位。本研究利用分析光纤中后向散射光的方法测量因散射、吸收等原因产生的光纤传输损耗和各种结构缺陷引起的结构性损耗,通过显示损耗与光纤长度的关系来检测外界信号场分布于光纤上的扰动信息。

3.2 一体化天线变形检测方法

本研究选择光纤测量方式,采用三芯光栅串法可测量出结构的应变。三芯光栅串法测量原理图如图 4 所示。



(a) 三芯光纤截面图



(b) 光纤二维变形

图 4 三芯光栅串法测量原理图

在一体化天线内同时预埋 3 根光纤,在天线变形状态下,同一截面处 3 个光栅测得的应变分别为 ϵ_A , ϵ_B , ϵ_C 。在二维变形中,应变差值为:

$$\Delta\epsilon_{AB} = \epsilon_B - \epsilon_A \quad (1)$$

$$\Delta\epsilon_{AC} = \epsilon_C - \epsilon_A \quad (2)$$

而应变差可表示为:

$$\Delta\epsilon = d/R \quad (3)$$

式中: d —两个光纤中心距; R —弯曲半径。

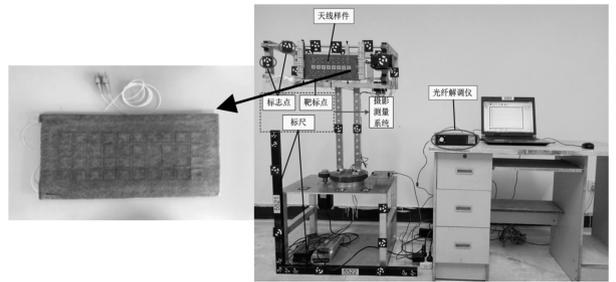
将三芯光纤的每根光纤同长度段的应变进行处理和反推积分计算,即可得到三芯光纤的变形形状,从而确定该位置的位移。

4 试验验证

4.1 试验平台的搭建

为了验证三芯光纤光栅串法测量一体化天线变形能否满足工程应用,笔者制作了一体化天线实物和试验系统。其中,感知层中嵌入的光纤光栅应变传感器不仅能够实时监控天线结构的健康状况,而且可以作为未来天线结构和电性能调控的信息来源。

试验系统如图 5 所示^[7-9]。



(a) 光纤测量变形实验系统



(b) 三维摄影测量系统

图 5 一体化天线样品变形测量实验系统

该系统由变形实验装置使实验样品产生变形,并利用内嵌光纤光栅及光纤解调仪得到对应位置处的应变,然后通过应变-位移转换矩阵计算实验样品的形变,利用三维摄影测量系统对靶标点处的位移进行测量,对比形变重构结果,以验证形变重构实验的正确性和可行性。

4.2 试验加载

加载方式:拟静力加载曲线,如图 6 所示。

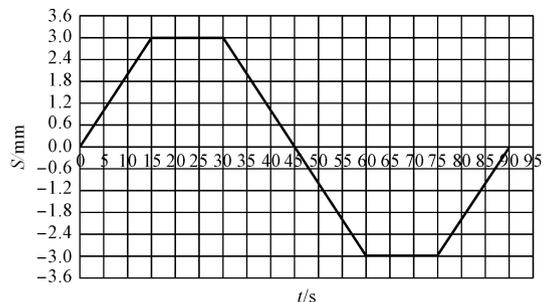


图 6 拟静力加载

15 s 加到 3 mm, 在 3 mm 处停 15 s 之后, 15 s 回到初始位置, 接着 15 s 加到 -3 mm, 在 -3 mm 停 15 s, 最后 15 s 回到 0。

数据记录: 本研究采用光纤光栅测量相应测点的应变; 采用三维摄影测量系统记录一体化天线相应测点的挠度。

4.3 结果分析

本研究在一体化天线上随机选取 10 个数据点, 提取向上位移 3 mm 时的测量数据, 通过光纤光栅测量的应变数据计算位移与三维摄影测量系统测量的实际位移进行比较。两种测量的对比结果如表 1 所示。

表 1 两种测量的对比表

点编号	x/mm	y/mm	实测位移	计算位移	相对误差
			/mm	/mm	/%
1	176.5	152.9	1.28	1.15	-10.3
2	182.7	295.3	1.10	1.27	15.25
3	175.5	375.7	1.31	1.23	-6.31
4	177.6	496.2	1.37	1.32	-3.83
5	262.2	21.6	1.95	1.80	-7.62
6	261.7	79.2	1.88	1.84	-2.34
7	264.5	151.5	1.92	1.92	-0.33
8	263.4	301.8	1.91	2.01	5.00
9	263.3	375.5	2.00	2.05	2.36
10	264.7	424.3	2.45	2.13	-13.0

对于光纤光栅测量的位置误差, 除个别点误差较大之外, 其他均在 10% 以内, 在可接受的误差范围, 满足精度要求。说明在集中荷载下, 7 阶挠度形函数能够满足拟合精度的要求。

5 结束语

本文提出了一种兼具天线电磁功能和结构承载能力的新型结构功能一体化天线。作为新型天线结构必须要解决其变形测量问题, 但基于光纤形变测量方案还存在如下不足, 需进一步开展深入研究:

(1) 光纤光栅形变测量离不开解调仪, 受平台载重影响的制约, 多通道光纤光栅解调仪的小型化、轻量化问题亟待解决;

(2) 光纤形变测量方案首先测得各测试点的应变值, 然后经过积分反推得到各测点的形变值。测点越多, 需要处理器进行的计算量就越大, 特别是三芯光栅串法测量对实时测量提出了更高的要求。

参考文献 (References):

- [1] 唐宝富, 钟剑锋, 顾叶青. 有源相控阵雷达天线结构设计 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2016.
- [2] 周金柱, 宋立伟, 杜雷刚, 等. 动载荷对结构功能一体化天线电性能的影响 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(9): 1-11.
- [3] 王从思, 韩如冰, 王伟, 等. 星载可展开有源相控阵天线结构的研究进展 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(5): 107-123.
- [4] 芦吉云. 光纤光栅在智能结构动态监测中的应用研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学民航学院, 2009.
- [5] 杨兴, 胡建明, 戴特力. 光纤光栅传感器的原理及应用研究 [J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2009, 26(4): 101-105.
- [6] 吴祖堂, 陈志军, 邹虹, 等. 采用光纤光栅传感器测量模型材料应变的原理和应用 [J]. 机械设计与研究, 2012, 28(1): 82-84.
- [7] 孟利波, 金观昌, 姚学锋. DSCM 中摄像机光轴与物面不垂直引起的误差分析 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(11): 1930-1932.
- [8] SUTTON M A, MCNEILL S R, HELM J D, et al. Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [9] ZHOU Jin-zhu, HUANG Jin, HE Qing-qiang, et al. Development and coupling analysis of active skin antenna [J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(2): 1-17.

[编辑: 张豪]

本文引用格式:

钟剑锋, 蔡建国. 结构功能一体化雷达天线变形检测方法研究 [J]. 机电工程, 2019, 36(1): 100-103.

ZHONG Jian-feng, CAI Jian-guo. Distortion detection method for structurally integrated antenna of radar [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(1): 100-103.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>