工艺参数对频率选择表面传输特性试验研究

吕明云 王焕青 武 哲

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 制造加工曲面频率选择表面 FSS(Frequency Selective Surface)的工艺参数不同会产生 FSS 中心谐振频率漂移以及传输系数降低. 以有限大平板 FSS 试件为基础,利用矢量网络分析仪 PNA 8363B 组成的测试系统,研究了在相同条件下加工工艺、FSS 附加导电层以及 FSS 表面电阻率对有限大平板 FSS 传输性能的影响规律. 结果表明,不同加工方法使得平板 FSS 的中心谐振频率产生漂移,该差异可能是 FSS 单元边缘毛刺影响的结果,该影响对 FSS 在各种入射角条件下的传输损耗等性能也略有影响;导电层表面电阻率对 FSS 的传输系数有较大影响,方块电阻越大传输系数越低,且 FSS 中心谐振频率也有差异;附加导电层对 FSS 传输特性的影响不大.

关 键 词: 频率选择表面; 传输特性; 工艺参数; 试验测试

中图分类号: TN 015

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)06-0713-03

Experiment on influence of machining on transmission properties of frequency selective surfaces

Lü Mingyun Wang Huanqing Wu Zhe

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The machining technics affect the resonant frequency and transmission ratio of FSS (frequency selective surface). Effects on the transmission properties of FSS were explored by experiments to the machining method, surface conductivity and additional conductive coating under the same condition respectively, based on planar FSS of finite extent and PNA 8363B test system. The experimental results show that the resonant frequency of planar FSS is moved by the machining method, the edge burr of FSS cell may effect the property, and may also effect the transmission ratio for different incidence angles. FSS surface conductivity also effects transmission ratio of planar FSS, transmission ratio reduces with the increase of sheet resistance value. The transmission properties are hardly changed by the additional conductive coating.

Key words: frequency selective surface; transmission properties; machining parameters; experimental investigation

频率选择表面 FSS(Frequency Selective Surfaces)结构是在金属薄膜上有规律地刻蚀孔径单元或粘贴金属贴片单元,形成“电振子结构”,从而对电磁波具有按频率呈现带通(开孔型)或带阻(贴片型)的特性. FSS 技术和雷达罩复合可以形成 FSS 雷达罩,能够有效减缩空天飞行器的雷达散射截面,对空天飞行器的雷达隐身有重要作用[1-2]. 在大型复杂曲面上设计加工 FSS 比较复杂,必须要考虑 2 个方面的问题:一是在复杂曲面上如何精确定位并加工 FSS 振子结构及加工工艺对 FSS 传输性能的影响;二是在复杂曲面介质上金属化工艺对 FSS 传输性能的影响.

5 自由度刻铣机器人曲面加工法数控操作,是一种新的曲面 FSS 加工工艺[3]. 为检验该加工

收稿日期: 2005-04-28

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(90305026)

作者简介: 吕明云(1969-),男,湖北公安人,讲师, lv503@buaa.edu.cn.

系统的有效性,并掌握其工艺参数对加工 FSS 传输性能的影响规律,本文以平板 FSS 试件为基础进行了对比试验研究. 掌握加工工艺参数对平板 FSS 试件传输性能的影响规律,对设计加工曲面 FSS 雷达罩具有工程意义.

1 FSS 传输响应测试系统概述

图 1 为微波暗室内配备用于测量 FSS 试件传输响应的测试系统. FSS 试件放置在透波测试窗内,发射波经反射面板转化为平面波,经透波测试窗被接收天线接收. 接收天线距 FSS 试件 800 mm,FSS 试件大小为 400 mm×400 mm. 通过转台控制可以调整 FSS 试件对电磁波的入射角度,矢量网络分析仪为 Agilent 公司的 PNA 8363B,暗室测试背景-40 dBsm 以下,测试频率范围 8 ~ 18 GHz.

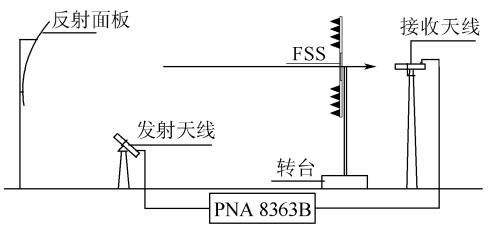

图 1 FSS 试件传输响应测试系统示意图

2 加工工艺对 FSS 传输性能影响

电路板腐蚀法加工的平板 FSS 振子几何尺寸和设计尺寸基本一致,但不适应于加工曲面 FSS 试件,曲面 FSS 加工只能采用机器人刻铣方法[3]. 通过比较电路板腐蚀法和机器人刻铣法加工的平板 FSS 的传输性能的差异,从而定性评价加工工艺对 FSS 传输性能的影响,对设计加工曲面 FSS 雷达罩具有指导意义.

采用电路板腐蚀法和机器人数字化加工法加工的 2 块平板 FSS 试件材料参数、FSS 振子单元尺寸及排列方式均相同. 加工的平板为覆铜板,介质板的介电常数 $\varepsilon_r = 5.2$,介质板厚度 $h = 0.928$ mm,单面铜箔厚度为 38 μm. 加工的 FSS 振子单元为圆环孔径,孔径内半径 $R_1 = 3.325$ mm,缝隙宽度 $W = 0.45$ mm,圆环孔径单元的排列方式为正方形排列,单元周期间距为 $d_x = d_y = 13$ mm. 图 2 所示为 TE(Transverse Electromagnetic)波极化条件下电路板腐蚀工艺加工的平板圆环孔径 FSS 传输响应特性测试曲线;图 3 所示为 TE 波极化条件下机器人数字化加工的平板圆环孔径 FSS 传输响应测试曲线;图 4 所示为 0°入射角时 2 种加工工艺平板圆环孔径 FSS 频率传输特性比较.

从图 2 和图 3 可以看出,用 2 种方法加工的平板圆环孔径 FSS 试件均有较好的频率传输响应特性. 图 4 表明用 2 种不同方法加工的平板圆环孔径 FSS 的传输响应特性有差异,机器人加工的平板圆环孔径 FSS 试件的中心谐振频率比电路板腐蚀法加工试件的中心谐振频率偏高,该差异可能是机器人刻铣 FSS 单元边缘毛刺影响的结果,该影响对 FSS 在各种入射角条件下的传输损耗等性能也略有影响.

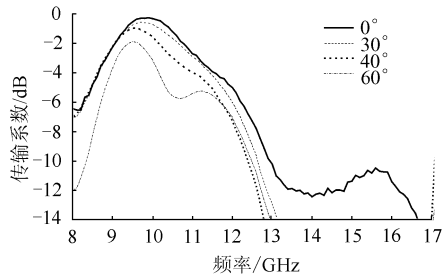

图 2 腐蚀工艺 FSS 传输响应特性测试曲线

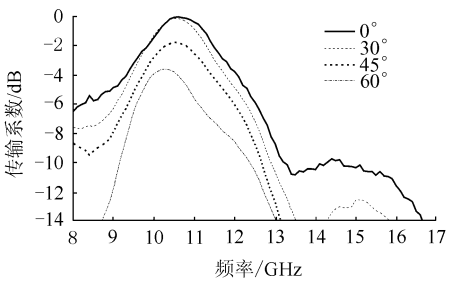

图 3 机器人加工 FSS 传输响应特性测试曲线

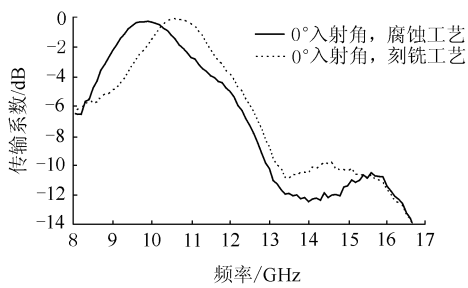

图 4 不同加工工艺 FSS 传输性能比较

3 附加导电层对 FSS 传输性能影响

在原理性研究曲面 FSS 雷达罩频率选择特性时,机器人加工工艺中先将曲面介质金属化,然后镀铜. 而设计曲面 FSS 振子单元和排列分布时一般以平板 FSS 为基础,实验常用的平面覆铜板在结构上比镀铜板少一层附加导电层. 因此有必要掌握镀铜板和覆铜板 FSS 频率选择特性的差异.

2 种工艺加工的平板介质材料相同,介质板介电常数 $\varepsilon_r = 4.9$,介质板厚度 $h = 1.522$ mm,铜箔厚度为 38 μm. 加工的 FSS 振子结构为六边形孔径单元,孔径中线边长 $L_1 = 3.80$ mm,缝隙宽度

$W=0.30$ mm,FSS 单元为正方形排列,单元周期间距为 $d_x=d_y=15$ mm. 图 5 所示为 TE 波极化条件下刷镀平板六边形孔径 FSS 传输响应特性测试曲线;图 6 所示为 TE 波极化条件下平面覆铜板六边形孔径 FSS 传输响应特性测试曲线;图 7 所示为 0°入射角时刷镀板和覆铜板六边形孔径 FSS 传输响应特性比较. 从图 5 和图 6 可以看出,在机器人加工工艺条件下平面刷镀板和覆铜板 FSS 的传输响应特性略有差异,但差异不大.

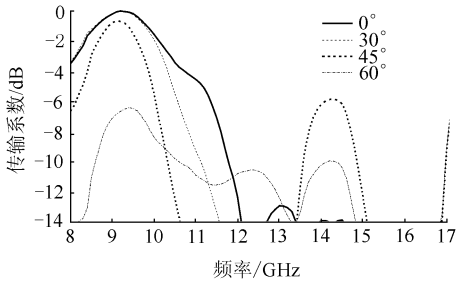

图 5　刷镀板 FSS 传输响应特性测试曲线

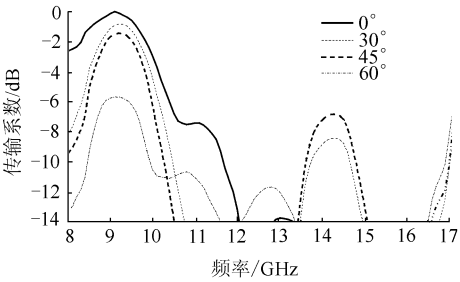

图 6　覆铜板 FSS 传输响应特性测试曲线

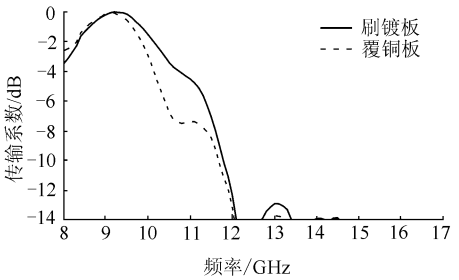

图 7　刷镀板和覆铜板 FSS 传输响应特性比较

4　电阻率对 **FSS** 传输性能影响

为研究导电层电阻率对 FSS 传输响应特性的影响,测试比较了介质板表面不同方块电阻对 FSS 传输响应特性的影响.

加工的介质板为表面是导电银层的平板圆环孔径单元 FSS 试件,比较的平板 FSS 试件除介质表面电阻率不同外其余条件均相同. *A* 板表面的方块电阻为8.0 Ω/□, *B* 板表面的方块电阻为 0.25 Ω/□,试件大小均为 400 mm×400 mm,介质板介电常数 $\varepsilon_r=4.6$,介质板厚度 $h=1.522$ mm. 2 种板的 FSS 振子结构均为圆环形孔径单元,圆环孔径外半径 $R_1=3.725$ mm,内半径 $R_2=3.275$ mm,缝隙宽度 $W=0.45$ mm,单元的排列方式为正方形排列,单元周期间距 $d_x=d_y=10.5$ mm. 图 8 所示为表面导电银层不同电阻时圆环孔径 FSS 频率响应特性比较(TE 极化).

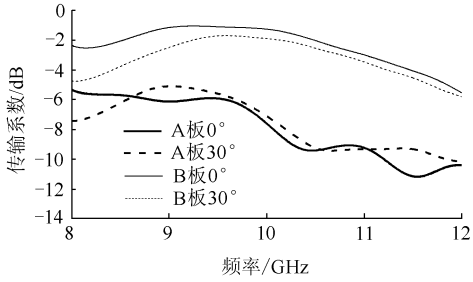

图 8　电阻率对 FSS 频率响应特性影响

测试结果表明:在加工工艺、单元几何尺寸及排列方式相同条件下平板 FSS 表面金属的方块电阻对 FSS 的频率响应特性有较大影响,表面电阻越低,FSS 的传输系数越高,且表面电阻不同时 FSS 的中心谐振频率也有差异.

5　结 束 语

试验结果表明,不同加工方法使平板 FSS 的中心谐振频率产生漂移,该差异可能是 FSS 单元边缘毛刺影响的结果,该影响对 FSS 在各种入射角条件下的传输损耗等性能也略有影响;导电层表面电阻对 FSS 的传输系数有较大影响,方块电阻越大传输系数越低;附加导电层对 FSS 传输特性的影响不大. 在设计曲面 FSS 试件时要考虑实际工艺参数对 FSS 中心谐振频率漂移和传输损耗等性能产生的影响,通过适当调整 FSS 单元振子的几何尺寸使得中心频率与设计一致.

参考文献 (**References**)

[1] Munk B A. Frequency selective surfaces: theory and design [M]. New York:John Wiley,2000

[2] Vardaxoglou J C. Frequency selective surfaces:analysis and design[M]. New York: John Wiley,1997

[3] 吕明云,祝明,王焕青,等. 复杂空间曲面 FSS 加工系统研究[J]. 航空学报, 2005,26(4):524-527
Lü Mingyun, Zhu Ming, Wang Huanqing, et al. Digital machining system of complex curved-surface FSS[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005,26(4):524-527(in Chinese)

(责任编辑:彭　徽)