

微波着陆系统模型试验环境模型的实现

苗 强^{1,2}, 吴德伟², 解 蕾³

(1. 94503 部队, 山东 济南 250017; 2. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 3. 西北大学公共管理学院, 陕西 西安 710127)

摘要 飞行检验仿真对实际飞行检验意义重大。根据微波着陆系统的技术体制和导航原理, 设计并建立了机场微波着陆系统基于缩比模型的激光模拟飞行检验半实物仿真系统。主要研究了微波着陆系统半实物仿真系统的环境模型的实现理论和技术, 以及机场典型环境模型材料的制备技术。以某机场为原型, 建立其模型试验系统, 并给出了试验结果。试验结果表明: 微波着陆系统模型试验系统可以模拟实际机场场地环境的对微波着陆系统的影响。

关键词 微波着陆系统; 飞行检验; 缩比模型; 半实物仿真; xPC 目标

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.06.012

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)06-0060-05

微波着陆系统作为一种具备先进技术体制的航空无线电导航系统, 具有提供多种进近路径、对场地要求低、工作波道数多、受电磁干扰影响小等优点。但是微波着陆系统的工作性能仍不可避免地受到机场场地环境的影响。对机载接收机来说, 从地面台站辐射的同一电波信号在信道传播过程中经过反射和绕射后将会形成多条来自不同方向、经过不同传播时延、不同反射次数的无线电波, 见图 1。这些来自多条不同路径电波在接收机内会以矢量方式合成, 造成接收合信号的电场强度快速急剧变化, 即进近着陆系统多径衰落现象。多径干扰是影响微波着陆系统(Microwave Landing System, MLS)导航精度的主要误差源之一^[1]。

现在, 国内外对进近着陆系统引导能力的鉴定和评估工作主要靠飞行检验来完成, 确定其所提供的导航信息的准确度和可靠程度, 指导机场的建设、导航系统的安装、布站等, 尽量消除多径等干扰对引导精度造成的影响。目前, 无线电导航系统飞行检验存在检验配备的设备比较落后、飞行架次繁多、航线复杂、技术要求高、检验费用昂贵、受气候条件影响等问题^[2]。与之相比, 飞行检验的仿真(数字和半实物仿真)具有很多优点, 特别是半实物仿真试验, 仿真结果置信度较高, 费用较低、周期较短、风险较小。

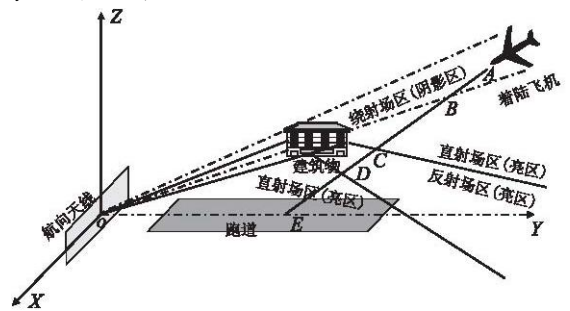


图 1 无线电着陆系统信道示意图

Fig. 1 Diagram of radio channel of landing system

1 ML 缩比模型仿真方案设计

1.1 缩比模型半实物仿真系统组成和功能划分

MLS 的测角原理是时间基准波束扫描测角。该半实物仿真系统由 2 台计算机(主控计算机、MLS 机载接收信号处理计算机)、方位台、仰角台、飞机模型(接收器)及机场环境组成, 见图 2。

* 收稿日期: 2011-03-18

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(SJ08F06)

作者简介: 苗强(1981-), 男, 山东滕州人, 博士, 主要从事导航系统建设与评估研究。

E-mail: mqmiaoqiang@126.com

主控计算机负责整个系统仿真进程的控制(开始、结束)的触发,以及对各功能单元的触发和飞机模型航线的预置,并在主机上建立 MLS 机载接收机的 SIMULINK 模型;

xPC 目标机为机载接收信号处理计算机,用来处理由数据采集卡送来的角度扫描脉冲的视频脉冲信号,得到角度引导信息;

方位台根据主控计算机命令按照预定角速度和扫描范围横向扫描;

仰角台根据主控计算机命令启动激光器按照预定角速度和扫描范围纵向扫描;

飞机模型只代表飞机的位置,由一弱反射材料的支柱支撑的激光接收器,接收器用来接收方位台和仰角台的角度扫描光脉冲,它的航线由主机控制;

机场环境按照实际机场的 1:1 000 比例缩小,主要考虑停机棚、停靠飞机、机场其它地面设备等主要干扰源,机棚、飞机(未涂覆隐形材料)可看作理想导体,模型用光滑良导体制作,表面做抛光处理。试验采用 MATLAB/RTW 快速原型化 xPC 目标环境,主机和目标机采用以太网连接方式。

仿真过程:由主机负责仿真进程的开始,设置飞机进近的航线,由 xPC 目标机输出的同步控制信号分别触发方位台和仰角台在不同的时隙工作,飞机和机载前端将处理过的扫描脉冲的视频信号送入 xPC 目标机的输入端进行角度处理,得出飞机的实时方位角和仰角,送入主机显示,也可在 xPC 目标机端显示,得到导航误差信息。在仿真过程中,可在主机端任意改变仿真参数。

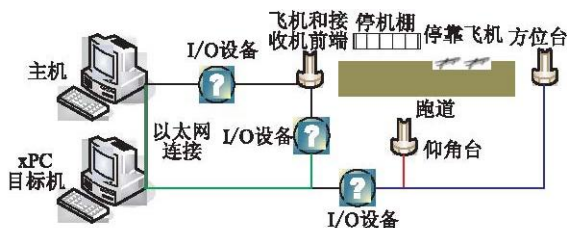


图 2 缩比模型半实物仿真连接示意图

Fig. 2 Diagram of MLS scale model test

2 缩比模型精确相似条件分析

表 1 为由经典电磁理论推导出的理想金属导体电磁系统的相似性条件^[3]。

设长度比例系数 c 为 1 000,所以理论上在缩比模型中激光波长应为 $\frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{5 \times 10^9 \text{ Hz} \times 1 000} = 60 \mu\text{m}$ 。在保持缩比模型与原型系统具有相同电尺寸的前提下,所选激光波长应为 $60 \mu\text{m}$,实现起来较困难,因此我们考虑使用常用的 650 nm 激光。经理论计算,得出以下结论:在 $60 \mu\text{m}$ 激光不易实现的情况下,改用常用的 650 nm 激光作辐射源,理论上可在较大程度上模拟原型系统的多径干扰影响。

表 1 理想金属导体电磁系统的相似性条件

Tab. 1 Similitude conditions of electromagnetic system

物理量	原型系统	模型系统(c 为长度缩尺)
长度	l	$l' = l/c$
时间	t	$t' = t/c$
频率	f	$f' = fc$
波长	λ	$\lambda' = \lambda/c$
波常数	k	$k' = kc$
电导率	σ	$\sigma' = \sigma c$
磁导率	μ	$\mu' = \mu$
介电常数	ϵ	$\epsilon' = \epsilon$
表面阻抗	η	$\eta' = \eta$

3 环境模型的实现

机场环境模型主要指机场各主要障碍物的物理缩比模型。缩比模型不仅是机场障碍物的几何缩比模型,它除了在外观、尺寸上要与机场实际的各种散射体保持一定的比例关系之外,实际是机场环境的物理等效模拟,模型材料的介电特性还必须满足特定的要求,由表 1 可知,模型材料的介电常数须与实物相等。

3.1 机场主要散射体散射特性

2008 年夏,实验室人员进行了机动微波着陆系统的飞行检验,经飞行检验结果的分析,认为:机场上的金属物体、大型建筑物、大片的树林等都会对微波着陆系统的导航精度产生不同程度的影响。

假设目标是光滑的无限大散射平面,电磁波以 θ 角入射,分析各种材料的散射体对电磁波的反射强度。菲涅尔反射公式表示为:

$$\text{垂直极化波: } r_{\perp} = \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}} \quad (1)$$

$$\text{水平极化波: } r_{\parallel} = \frac{\epsilon_r \cos\theta - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}}{\epsilon_r \cos\theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}} \quad (2)$$

表2为各种散射体在5 GHz典型介电常数及反射特性。

表2 5 GHz下各种材料的介电常数及反射特性

Tab.2 Permittivity and reflection factor of typical materials

材料	介电常数	垂直入射反射率/%
混凝土	5.5 - 0.18i	16
砖墙	3.5 - 0.3i	9
玻璃	6 - i	18.1
土壤	10 - 2i	27
植被	20 - 8i	42
金属		>90

3.2 模型材料的制备

3.2.1 金属散射体的模型制作

微波波段金属的电磁散射系数近似为1,而多数金属在频率远小于 10^{17} Hz时都可视为良导体,在可见光波段,通过查表,多种金属的反射率很高,近似为1。所以,可以选铝、铜、银等金属作为飞机、车辆、停机棚等金属散射体的模型材料。

3.2.2 混凝土散射体(跑道、建筑物)模型材料制备

利用高/低介电常数和高/低介电损耗的材料制备的理论和方法^[4-8],我们制备了混凝土墙在激光模拟试验系统中所需要的材料。混凝土在5 GHz频段的介电常数分别为: $\epsilon_1 = 5.5 - 0.18i$ 。它具有较低的介电损耗,稍高的介电常数。采用在聚合物基底中掺入具有较高介电常数的材料的方法制备其模型材料。

1) 基底的选择

M. Y. Koledintseva等人总结了含金属颗粒的混合介电材料的制备^[9]。文中利用聚甲基丙烯酸甲酯PMMA作为混合材料的粘合剂,PMMA的光频介电常数频域色散模型符合Debye模型,其Debye模型参数为: $\epsilon_s = 2.2, \epsilon_{\infty} = 1.9, \tau = 10^{-14}$ s。

其介电常数色散模型为:

$$\begin{cases} \epsilon'(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \\ \epsilon''(\omega) = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \end{cases} \quad (3)$$

图3为PMMA在0.5 - 5 μm 波段的介电常数色散曲线。

可以计算出PMMA在650 nm波段的介电常数 $\epsilon_p = 2.0 - 0.13i$ 。

2) 填料的选择

硅、锗等材料在650 nm波段具有较低的损耗,查表可以得知硅在所需频率的复折射率为: $n = 3.847 + 0.016i, \epsilon_{\text{Si}} = n^2 = 14.8 + 0.123i$ 。

假设填料硅为球形微小颗粒,尺寸小于242 nm,均匀分散在PMMA中。利用混合物有效介电常数Bruggeman模型,计算掺杂硅颗粒的PMMA复合材料的介电常数。设硅、PMMA的介电常数分别为 ϵ_1, ϵ_2 ,其占混合物的体积百分比为 f 和 $1-f$ 。假设复合材料的等效介电常数为 ϵ_{eff} ,则Bruggeman理论的有效介电常数方程为:

$$f \frac{\epsilon_1 - \epsilon_{\text{eff}}}{\epsilon_1 + 2\epsilon_{\text{eff}}} + (1-f) \frac{\epsilon_2 - \epsilon_{\text{eff}}}{\epsilon_2 + 2\epsilon_{\text{eff}}} = 0 \quad (4)$$

根据此方程可计算出 ϵ_{eff} ,见图4。

3) 制备方法

将PMMA和硅的粉末(平均粒径小于1 μm)按一定比例通过溶液混合法均匀混合,制成薄膜,测定其光学常数。

4) 制备步骤

步骤1 将PMMA粉末和三氯甲烷(CHCl_3)溶剂(分析纯,西安化学试剂厂)或者甲苯按1:10的比例混合,在磁力搅拌器上搅拌至PMMA粉末完全溶解,再经过过滤最终获得无色透明的PMMA溶胶。并且在加

热的条件下加入硅粉。通过控制溶剂的加入量,使 PMMA 和硅粉形成悬浮液,并具有适当粘度。使用超声波分散机,使溶液均匀混合。而后将溶液用流延的方法制成膜,除去残存溶剂后,用热压的方法将薄膜压制成片状材料。

步骤 2 用椭圆偏振光谱仪测试光学常数。

步骤 3 改变体积比例,重复步骤 1、步骤 2。直至介电常数接近目标值。

用美国 J. A. WOOLLAM 公司制造生产的 M-2000UI 型宽光谱变角度测量了所制的混合材料的光学常数。该设备的主要特点是偏振光入射角可变,测量光谱范围为 250-1700 nm。光学常数的平方即为介电常数。

图 5 为不同体积混合比例下,测得的混合物介电常数。

可以看到,在硅的体积份数占到混合物的 0.4-0.5 时,所测介电常数接近目标值 $\epsilon_1 = 5.5 - 0.18i$ 。在 0.4-0.5 区间,又以 0.01 的增量逐次试验,并测量介电常数。最终,我们得到在体积分数 $f = 0.47$ 时,所测介电常数 $\epsilon_1' = 5.5 - 0.09i$,最接近目标值。

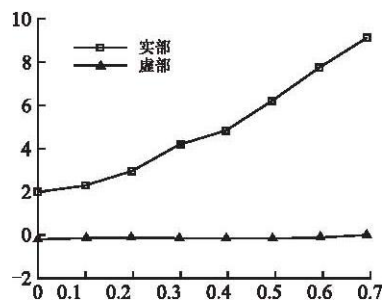
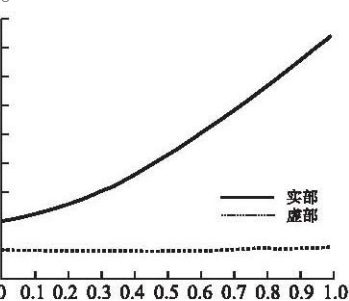
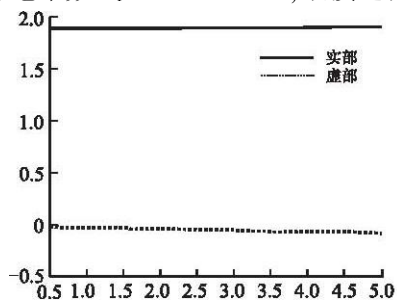


图 3 PMMA 在 0.5-5 μm 波段的介电常数色散曲线

图 4 PMMA 与硅混合的 Bruggeman 介电常数

图 5 实验测得 PMMA 与硅混合物的介电常数

Fig. 3 Permittivity dispersion of PMMA among 0.5-5 μm

Fig. 4 Bruggeman model of mixtures of PMMA and silica

Fig. 5 Permittivity of mixtures measured

4 试验及结论

我们以美国大西洋城国际机场的试验数据为参考,建立了其模型试验系统。1987 年,在美国联邦航空管理局技术中心和空间工程中心的合作下,对大西洋城国际机场的 04 号跑道进行了确定方位台关键区的试验。试验中以一架波音 727 作为散射体。实验目的是验证计算机仿真模型的可信度。试验中,以微波着陆系统方位台为坐标原点,波音 727 的机头和尾翼的二维坐标分别为(964, -106), (964, 27)^[10]。

图 6 是其试验结果,为飞行检验测量结果,为其计算机仿真的结果。

我们以该试验为原型,不考虑其他散射体的影响,建立了该机场的缩比模型试验场,并对方位台进行了模拟试验。试验中,模型飞机用金属铝箔覆盖。该试验为单点静态试验,试验中,将光电接收器放置在几处不同的接收位置,模拟飞机的运动。为便于比较,试验结果中也以 n mile 作为距离单位。试验结果见图 7。

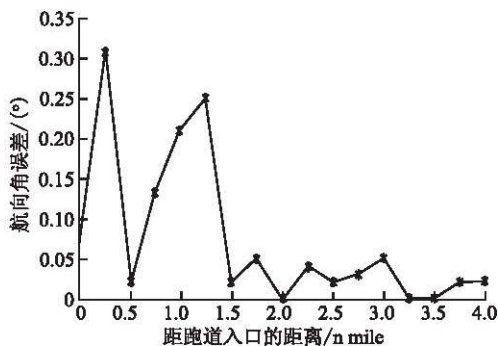
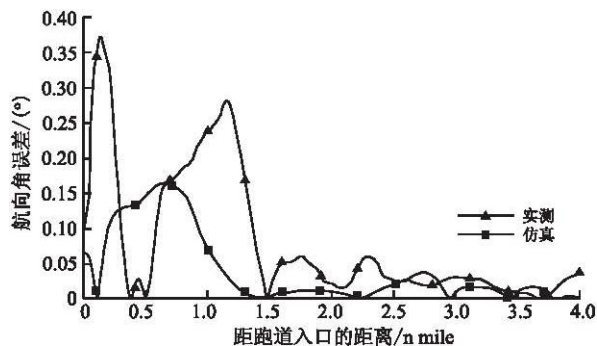


图 6 大西洋城国际机场实测和模型计算结果

图 7 微波着陆系统模型试验结果

Fig. 6 Results of measurement of atlantic city international airport

Fig. 7 MLS scale model test results

由试验结果可以看出,微波着陆系统的模型试验结果相比美国联邦航空管理局使用的计算机仿真,更接

近于实际飞行检验的结果,具有更高的可信度。从试验结果可以看出,模型试验的角度误差比实际飞行检验的误差要小5% - 10%,这主要是飞机模型的覆盖物铝的反射率比实际情况有所减小;而且在粘附铝箔时,飞机模型表面产生了褶皱,产生了非相干散射的缘故。

由试验结果,我们可以得出结论,微波着陆系统的模型试验能够模拟飞行检验,并能够给出可信的结果,可以作为飞行检验之前的参考。

参考文献:

- [1] 戴传金. 进近着陆系统信道环境预测与仿真[D]. 西安:空军工程大学,2007.
DAI Chuanjin. Channel prediction and simulation of approach and landing system [D]. Xi'an: University of air force engineering,2007. (in Chinese)
- [2] 苗强,吴德伟,解蕾,等. 航空无线电导航系统仿真研究. [J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2008,9(3):16-18.
MIAO Qiang, WU Dewei, XIE Lei, et al. Study of simulation of radio navigation system [J]. Journal of air force engineering university:natural science edition,2008,9(3):16-18. (in Chinese)
- [3] 庄钊文,袁乃昌,莫锦军,等. 军用目标雷达散射截面预估与测量[M]. 北京:科学出版社,2007.
ZHUANG Zhaowen, YUAN Naichang, MO Jinjun, et al. Calculation and measurement of radar cross section of military targets [M]. Beijing: Press of science,2007. (in Chinese)
- [4] Maxwell - Garnett J C. Color in metal glasses and metal films [J]. Philosophical transactions of the royal society of London, 1904, 203: 385 - 420.
- [5] Granqvist C, Buhrman R, Wyns J, et al. Far infrared absorption in ultrafine AL particles drude model versus Gor' Kov theory [J]. Journal of physics, 1977,38(C2): 93 - 96.
- [6] Jordi Sancho - Parramon, Salvador Bosch. Effective medium models for metal - dielectric composites: an analysis based on the spectral density theory [C]// Proceedings of SPIE 5963. Jena, Germany: Advances in optical thin films II,2005:1 - 10.
- [7] Merrill M M, Diaz R E, Lore M M, et al. Effective medium theory for artificial materials composed of multiple sizes of spherical inclusions in a host continuum [J]. IEEE transaction on antenna and propagation, 1999, 47(1): 142 - 148.
- [8] Meneghini R, Liao L. Effective dielectric constants of mixed - phase hydrometeors [J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2000, 17(5): 628 - 639.
- [9] Koledintseva M Y, DuBroff R E, Schwartz R W. A maxwell garnett model for dielectric mixtures containive conductive particles at optical frequencies [J]. Progress in electromagnetics research, 2006, 63: 223 - 242.
- [10] Michael Francis Dibenedetto. Development of critical area criteria for protecting microwave landing system azimuth and elevation antenna guidance signals [D]. Ohio: Ohio university, 1999.

(编辑:徐楠楠)

Simulation System of Flight Checking of Microwave Landing System Based on Scale Model and Realization of Experiment Model

MIAO Qiang^{1,2}, WU De - wei², XIE Lei³

(1. Unit 94503, Ji'nan 250017, China; 2. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 3. Institute of Public Administration, University of Northwest, Xi'an 710127, China)

Abstract: The simulation of flight checking is of an important value for the real flight checking. According to the technology system and navigation principle of the microwave landing system (MLS), a laser simulation flight checking hardware - in - the - loop simulation system of MLS based on scale model is designed and established. The realization theory and technology of the environment model of the simulation system are studied. The technology of preparation of some typical materials is researched. Finally, a scale model of a real airport is set up, and a model test is made. The test result indicates the validity of the model test system of MLS.

Key words: MLS; flight checking; scale model; hardware - in - the - loop simulation; xPC target