

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.03.023

高速传输电连接器差分阻抗优化^{*}

梁云忠 李 红 伍 权 徐卫平 胡圣波
(贵州师范大学 机械与电气工程学院 贵阳 550001)

摘 要:针对高速传输电连接器研发样机中存在差分阻抗偏小及不连续等问题,基于信号完整性理论提出了更换介质材料和修改接触件及介质尺寸的优化方案。采用 HFSS 高频电磁场仿真软件优化了接触件引脚直径 W_1 和引脚与介质的配合长度 L_1 , 仿真结果表明当引脚直径 $W_1 = 1.1\text{ mm}$ 时,此时连接器差分阻抗仿真值为 $100 \pm 10\ \Omega$,且介质体配合长度 L_1 对连接器差分阻抗仿真值影响较小。对优化前后的连接器进行了样机加工及差分阻抗测试,测试结果表明改进前连接器差分阻抗范围为 $84.46 \sim 90.68\ \Omega$,改进后为 $92.6 \sim 105.3\ \Omega$,改进后的连接器差分传输眼图满足典型高速传输电连接器信号完整性传输要求。

关键词: 差分阻抗;电连接器;高速传输;阻抗优化

中图分类号: TN702;V240.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Differential impedance optimization of high speed electric connector

Liang Yunzhong Li Hong Wu Quan Xu Weiping Hu Shengbo
(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: In order to resolve the differential impedance of electric connector is relatively small and discontinuous at the R & D stage, the optimization scheme which is composed of the replacement of the dielectric material and the modification of the contact and the medium size based on the theory of signal integrity are proposed. The HFSS high frequency electromagnetic field simulation software was used to optimize the contact pin diameter(W_1) and fit lengths of contact and dielectric (L_1). When the pin diameter is 1.1 mm , the simulation value of the differential impedance of connector is $100 \pm 10\ \Omega$ and L_1 has little influence on the simulation value of differential impedance of connector. The improved connector was processed and the differential impedance test was carried out. The test results show that the differential impedance range of connector is from 84.46 to $90.68\ \Omega$ before improvement and from 92.6 to $105.3\ \Omega$ after improvement, differential transmission eye diagram meets typical high-speed transmission electric connector signal integrity transmission requirements after improvement.

Keywords: differential impedance; electric connector; high speed transmission; structure optimization

1 引 言

随着电子行业的飞速发展,电子电路的时钟频率越来越高,信号传输速率越来越大,高速传输系统设计已经进入到 Gbps 时代。高速传输系统传输速度的提升对构成高速电路的印制电路板、电子元器件以及其组装工艺提出了新的挑战^[1-3]。电连接器作为连接高速传输系统

各部分的基本元件,其阻抗匹配对整个高速传输系统的信号完整性有重大的影响。在低频时代,我国电连接器的研究主要关注电连接器的机械性能、耐环境性能及低频下的电气性能^[4-7]。随着整机系统的传输速率不断提高,对连接器产品的高速传输性能提出了新的要求^[8-12]。近年来,国内相关科研及企事业单位对连接器高速传输性能的测试系统平台进行了搭建,并就电连接器产品的高速传输性能的测试标准进行了探讨,目前正处于标准

收稿日期:2016-06 Received Date: 2016-06
^{*} 基金项目:贵州省自然科学基金(黔科合 LH 字[2014]7043 号)资助项目

统一阶段。但是以仿真,测试结果为起点,更改产品结构以优化电连接器高速传输性能的研究较为少见,本文就某高速电连接器在样机研发过程中存在的阻抗偏小且不连续的问题,根据信号完整性理论提出相应改进措施,对改进前后的连接器进行了差分阻抗仿真对比分析,并根据最终的产品对比测试结果验证了结构优化的可行性。

2 差分阻抗的偏小和不连续问题

2.1 高速传输电连接器的基本结构

如图 1 所示为某高速电连接器研发样机插头与插座插合时的对接示意图。插头端尾部端子为弯插高速 PCB 结构,插座端尾部端子为直插高速 PCB 结构。插头介质体界面与插座介质体界面对接,插头与插座的介质体均采用日本宝理的塑料材料 PPS(型号 6165A4,相对介电常数为 5.1(1 MHz))。插座与插头插合使用时有相关锁紧装置,保证电连接器的信号可靠接触。

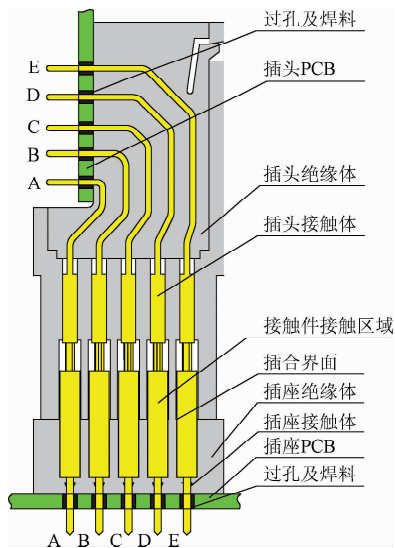


图 1 高速电连接器插合示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high speed electric connector

2.2 高速电连接器差分信号定义

高速传输电连接器接触件的排列间距为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,信号传输形式采用差分对传输形式,其信号定义如图 2 所示。连接器的信号传输速率为 3.125 Gps,差分阻抗要求满足 $100 \pm 10\ \Omega$ 。

2.3 高速电连接器初始阶段样机差分阻抗测试

根据 2.2 节所述的高速传输性能要求,经过结构设计、仿真设计、零部件加工及组装等过程得到了初始阶段样机。采用对应的高速连接器测试背板,通过泰克 TDR 测试设备所得的连接器差分阻抗如图 3 所示。

从图 3 可见,当测试信号上升沿时间为 100 ps 时,连

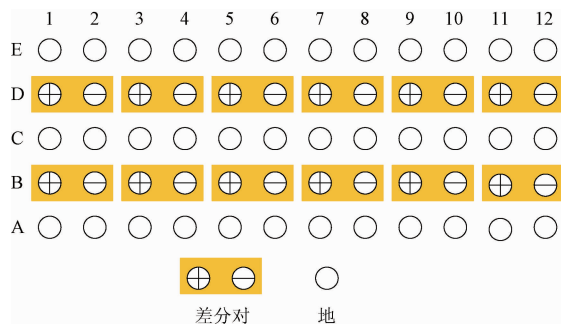


图 2 高速传输电连接器差分信号定义

Fig. 2 Definition of differential signal of high speed transmission electric connector

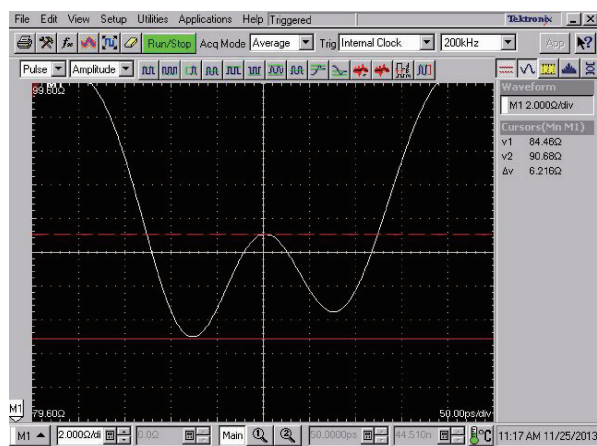


图 3 阶段样机的阻抗测试图

Fig. 3 Impedance test diagram of the stage prototype

接器初始阶段样机的差分阻抗测试值为 $84.46 \sim 90.68\ \Omega$,阻抗值相对 $100\ \Omega$ 标准值偏小,且该样机的阻抗测试曲线出现了较大的幅度波动,差分阻抗不连续性较为显著。

3 机理分析和差分阻抗优化步骤

3.1 机理分析

由于高速传输电连接器的主要功能为控制高速数字信号的导通及断开,其结构的设计必须兼顾机械插拔性能、环境性能、电气性能以及高速传输性能。作为高速连接器信号完整性的基础指标,差分阻抗的精确设计是极为关键的。然而,随着高速连接器结构的复杂化及小型化,差分接触件阻抗的精确设计是极为复杂的,通常是采用理论初步设计、仿真优化并结合最终的测试进行改进,以满足最终的产品性能要求。从图 1 和 2 可见,该电连接器内部结构与 PCB 板的带状线结构较为相似,因此,在连接器的阻抗分析时,可以参考 PCB 板的差分带状线

阻抗计算公式来进行初步设计,计算公式如式(1)、(2)所示^[8,9]。

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\varepsilon_r + 1.41}} \ln\left(\frac{5.98H}{0.8W + T}\right) \quad (1)$$

$$Z_{\text{diff}} = 2Z_0[1 - 0.37\exp(-2.9s/h)] \quad (2)$$

式中: Z_{diff} 为差分阻抗(Ω), Z_0 为未耦合时的单端阻抗(Ω), s 为差分信号线的边沿间距(mm), h 为地平面间的介质厚度(mm), ε_r 为介质层的介电常数, W 为传输信号线的宽度(mm), T 为传输信号线的厚度(mm)。

由式(1)、(2)可知,差分阻抗的影响因素是多方面的。但是,由于电连接器机械性能、电气性能及环境性能要求的限制,可以进行优化的参数通常为介电常数 ε_r 、信号线的宽度 W 、信号线的厚度 T 。在连接器内部结构中,信号线不是扁平的金属线,而是机械加工的圆形针,因此信号线的宽度及信号线的厚度相等。在不影响连接器机械性能、电气性能、环境性能的基础上,可进行优化的设计要素有绝缘材料(即介质材料)、针体直径及介质体尺寸3个方面。

3.2 差分阻抗优化步骤

根据机理分析,对于高速传输电连接器阻抗存在偏小及不连续情况,提出如下优化措施。

1) 根据式(1)、(2),采用更换低介电常数的材料,使差分阻抗增大。选择的介质材料需满足电连接器耐压、绝缘电阻及相关的耐环境功能,因此将原有的 PPS 材料更换为介电常数更小的 LCP 材料。

2) 样机测试中出现的差分阻抗不连续变化显著的情况,在焊接过孔及接触件与介质体配合处,采用更改插针直径、插针尾端在介质体中的配合长度等方法,减小差分阻抗的不连续。

3) 采用 HFSS 软件进行阻抗仿真,以确定最优的接触件插针直径及其在介质体中的配合长度。

4) 依据更换介质材料和仿真结果仿真确定的接触件直径及其在介质体中的配合长度制造改进样机,通过测试改进前后样机的差分阻抗及差分传输“眼图”,验证阻抗优化是否满足要求。

4 基于 HFSS 的差分阻抗仿真分析

4.1 HFSS 仿真模型构建

因高速电连接器具有结构复杂、形式多样、传输速率高等特点,上文的理论分析计算方法仅能在连接器设计初期对其性能进行粗略估算,产品结构的真实性能需进一步通过仿真分析甚至是实测进行验证。

高速连接器的仿真分析包括仿真模型构建、模型仿真和结果分析3个部分。其中,模型构建应根据相关软件所用的数值计算方法,对连接器结构进行综合评估,合

理忽略连接器中不影响产品高速性能的微小结构或是辅助零件结构,以减小计算机内存的耗用,提高仿真速度,增强仿真的可行性^[13-15]。采用 HFSS 建立的连接器仿真模型如图4所示。

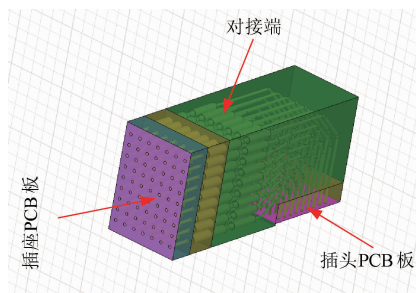


图4 连接器 HFSS 仿真模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of HFSS simulation model of connector

4.2 连接器差分阻抗仿真

为确定插头及插座与印制电路连接处的引脚直径及引脚直径 W_1 在基座中的长度 L_1 尺寸,本文对插座结构进行了简化,设置了如图5所示的仿真模型。

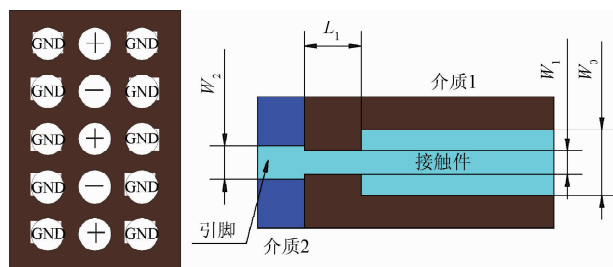


图5 差分阻抗仿真模型

Fig.5 Differential impedance simulation model

图5中,介质体1为更改后的介质体 LCP(日本宝理公司,介质相对常数 3.1,1 MHz),介质2为高速 PCB 介质,材料为 Rogers 4350B(美国,介质相对介电常数为 3.66,10 GHz)。

W_0 为接触件接触区域的尺寸,它是保证连接器可靠接触的关键,该尺寸不可更改。但是,接触件尾端引脚过介质体1的部分导体,其长度为 L_1 ,直径为 W_1 可优化。 W_2 为 PCB 过孔尺寸,一般由 W_1 加上 0.3~0.6 mm 的焊锡间隙。因此仿真时取 L_1 及 W_1 为可变尺寸,分别选取 W_1 最小值为 0.8 mm,最大值为 1.5 mm,按间隔 0.1 mm 进行步进仿真; L_1 选取 2.4、6.8 mm 进行阻抗及波形仿真。

图6所示为 L_1 为 2 mm 时,不同长度的 W_1 下的连接器差分阻抗,当 $W_1 = 0.8$ mm 时,连接器的差分阻抗为 111.2 Ω ,超过差分传输阻抗 $100 \pm 10 \Omega$ 的要求;当 W_1 尺寸在 0.9~1.4 mm 时,连接器差分阻抗最大值逐渐降低,

且最大值和最小值均落在 $100 \pm 10 \Omega$ 的范围内;当 $W_1 = 1.5 \text{ mm}$ 时,其差分阻抗最大值满足要求,但是其差分阻抗最小值下落太快,因此 W_1 尺寸在 $0.9 \sim 1.4 \text{ mm}$ 选取,由图可知当 $W_1 = 1.1 \text{ mm}$ 时,其差分阻抗最大值 108Ω ,最小值 99Ω ,其偏差为 $\delta = 9 \Omega$,为满足差分阻抗中偏差最小者,因此确定接触件尾端直径为 1.1 mm 。

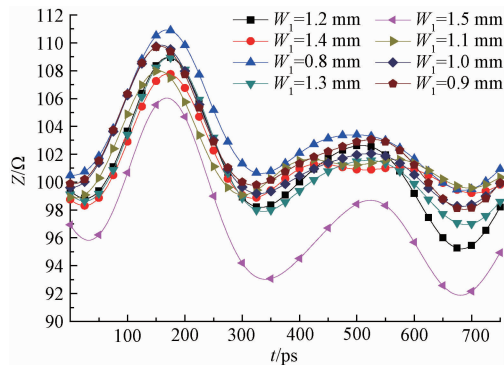


图 6 不同 W_1 尺寸的差分阻抗

Fig. 6 Differential impedance of different W_1 sizes

如图 7 所示为当 $W_1 = 1.1 \text{ mm}$ 时,选取不同 L_1 值得到的差分阻抗仿真图,由图 7 可知,当 $W_1 = 1.1 \text{ mm}$ 时, L_1 长度从 2 变化至 8 mm 时,连接器的差分特征阻抗变化不明显,均满足 $100 \pm 10 \Omega$ 的要求。

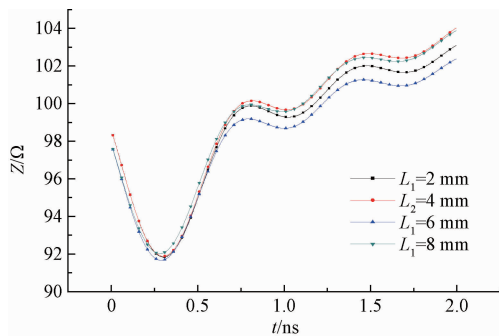


图 7 不同 L_1 尺寸的差分阻抗

Fig. 7 Differential impedance of different L_1 sizes

通过以上仿真分析可知,更改介质材料后,通过调整 W_1 的尺寸可以优化连接器的差分传输阻抗,使连接器在 3.125 Gbps 的传输速率下,理论上提高了连接器的高速差分信号传输性能,满足典型的差分传输指标要求。

5 信号完整性对比测试分析

为了验证优化后的高速传输连接器的整体性能,根据连接器的结构特点,搭建了对应的连接器测试平台。对于高速传输连接器,必须制作专用的 PCB 测试板才能对其进行精确的信号完整性测试。同时,为了匹配测试

设备的射频电缆,需在测试夹具上安装高性能的 SMA 接口,通过采用泰科公司的 TDR 测试设备所测得的差分特性阻抗,如图 8 所示。

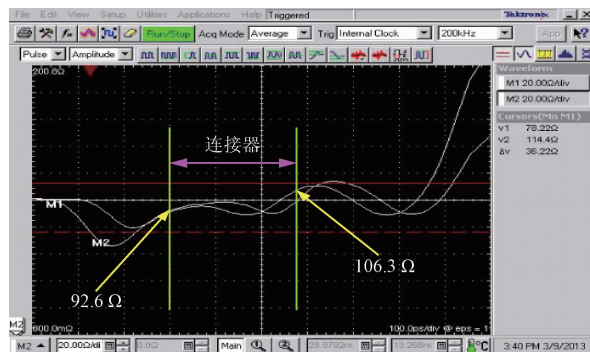


图 8 连接器差分阻抗测试结果

Fig. 8 Test results of differential impedance of connector

从图 8 可知,采用 TDR 所测得的高速连接器差分阻抗为 $92.6 \sim 105.3 \Omega$,满足产品设计指标要求。

图 9 所示为连接器改进前的差分“眼图”测试结果,由图可知改进前的连接器由于整体阻抗一致性差,导致插损和回波损耗增加,眼图张开度较小。在 1 V 的输入电压条件下,连接器差分接触件输出端的眼高仅为 300.32 mV,信号传输质量较差。

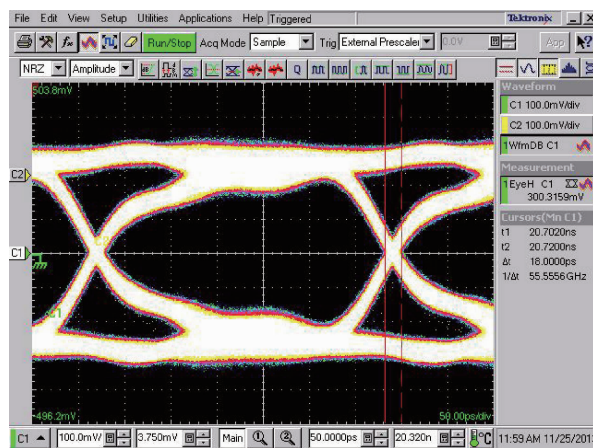


图 9 改进前差分传输眼图

Fig. 9 Differential transmission eye diagram before improvement

图 10 所示为连接器改进后的差分“眼图”测试结果,当对连接器进行阻抗优化和结构改进后,连接器的差分信号眼高达到了 658.3 mV,满足典型差分信号幅度要求。

6 结论

针对电连接器过程样机中存在的差分阻抗偏小及不连续情况,将 PCB 高速传输理论用于电连接器内部结构

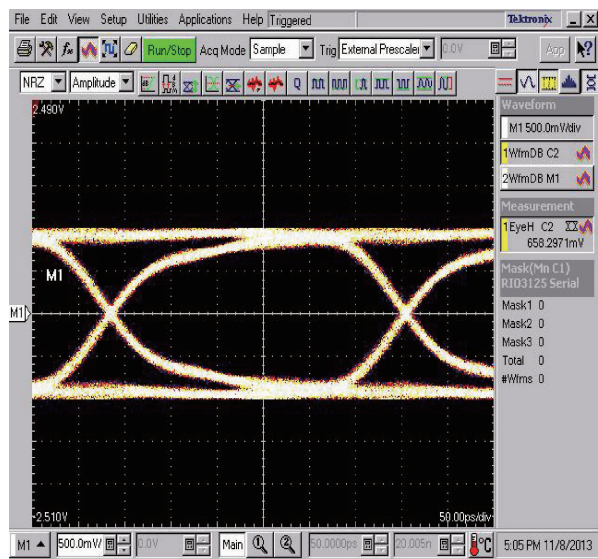


图10 改进后差分传输眼图

Fig. 10 Differential transmission eye diagram after improvement

的阻抗分析。

根据 PCB 高速传输理论公式,在不影响电连接器电气性能、机械性能以及耐环境性能的前提下。提出了更改绝缘基座材料及优化接触件尺寸、基座尺寸的方法优化电连接器的阻抗。

采用 HFSS 优化了接触件尺寸、基座(介质体)尺寸,并通过改变尺寸优化了电连接器差分阻抗的仿真值。

对材料更改及结构更改前后的电连接器进行了阻抗及差分传输眼图的对比试验,通过试验验证了更改优化方案的可行性。

参考文献

- [1] ONG C J, WU B, TSANG L, et al. Full-wave solver for microstrip trace and through-hole via in layered media[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2008, 31(2):292-302.
- [2] LIU Y M, CAO Y SH. Analysis and simulation of via in high-speed PCB[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(3):713-715.
- [3] WU J. Simultaneous computation of wide-angle and wide-band base on asymptotic waveform evaluation[C]. 2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE), 2012(2):359-362.
- [4] 杨奋为. 军用电连接器的应用与发展[J]. 机电元件, 2007, 27(3):42-49.
YANG F W. Application and development of military electrical connector[J]. Electromechanical Components, 2007, 27(3):42-49.
- [5] CHEN W H, LIU J, GAO L, et al. Accelerated degradation reliability modeling and test data statistical

analysis of aerospace electrical connector [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(6): 957-962.

- [6] 梁云忠, 乔玉鹏, 金波, 等. 毛刷电接触对的插拔力研究[J]. 工程设计学报, 2015, 22(3): 290-294.
LIANG Y ZH, QIAO Y P, JIN B, et al. Study on insertion-extraction force of the brush electrical contact[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2015, 22(3):290-294.
- [7] SAWCHYN I, SPROLES E J. Optimizing force and geometry parameters in design of reduced insertion force connectors [J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1992, 15(6): 1027-1031.
- [8] 陈毓彬. 连接器高速传输性能测试技术研究[D]. 广州:华南理工大学, 2013:10-15.
CHEN Y B. The connector high-speed transmission performance test technology research [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013:10-15.
- [9] 余文志, 李晓磊, 吴柏昆, 等. 微带线阻抗不连续性的补偿研究[J]. 仪表技术与传感器, 2015(8):88-91.
YU W ZH, LI X L, WU B K, et al. Analysis of compensation of microstrip line impedance discontinuity[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(8):88-91.
- [10] 赵宇萍, 刘治国. 基于 TDR 技术的连接器高速传输性能测试[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2012(S1): 134-137.
ZHAO Y P, LIU ZH G. High speed transmission performance test of connector based on TDR technology [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2012(S1):134-137.
- [11] 邹翔, 彭清华. 连接器行业最新发展趋势分析[J]. 机电元件, 2014, 34(5):45-48.
ZOU X, PENG Q H. Analysis on the latest development trend of connector industry [J]. Mechanical and Electrical Components, 2014, 34(5):45-48.
- [12] 易茂祥, 陶金, 吴友杰, 等. 一种基于电力线的现场总线设计与仿真[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(02):258-264.
YI M X, TAO J, WU Y J, et al. Design and simulation for a power lines based fieldbus[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(2):258-264.
- [13] 任庆芳, 宋智, 薛严冰. 基于 AD8302 的简易阻抗测量仪[J]. 电子测量技术, 2016, 39(2):106-110.
REN Q F, SONG ZH, XUE Y B. Simple impedance meter based on AD8302 chip [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(2):106-110.
- [14] 严冬, 汪朋, 李帅永, 等. 2.45 GHz 印刷倒 F 天线的研究与实现 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10):

2372-2380.

YAN D, WANG P, LI SH Y, et al. Research and realization of 2.45 GHz printed inverted Fanenna [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10): 2372-2380.

- [15] 尤嘉, 宣银良. 矢量网络分析仪校准和验证的常见误区[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(4): 1-6.

YOU J, XUAN Y L. Correcting some common misunderstandings on VNA calibration and verification[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(4): 1-6.

作者简介



梁云忠, 2006 年于哈尔滨工程大学获得学士学位, 2008 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 现为贵州师范大学讲师, 主要研究方向为电连接器设计、可靠性及电接触理论。

E-mail: 290263424@qq.com

Liang Yunzhong received B. Sc. from Harbin Engineering University in 2006 and M. Sc. from Harbin Institute of Technology in 2008, respectively. Now he is lecturer in Guizhou Normal University. His main research interest includes electrical connector design, reliability and electrical contact theory.



胡圣波 (通讯作者), 1985 年于东南大学获得学士学位, 1992 年于解放军电子工程学院获得硕士学位, 2006 年于重庆大学获得博士学位, 现为贵州师范大学教授, 主要研究方向为微波及航天通信。

E-mail: hsb@nssc.ac.cn

Hu Shengbo (Corresponding author) received B. Sc. from Southeast University in 1985, M. Sc. from Electronic Engineering Institute in 1992, and Ph. D. from Chongqing University in 2006, respectively. Now he is professor in Guizhou Normal University. His main research interest includes microwave and aerospace communications.