

# 一种便携式机载雷达罩外场电性能测试系统

李宝鹏, 谢洪森, 刘水, 吴春林  
(海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041)

**摘要:** 雷达罩在使用过程中可能会出现进水、蒙皮脱落、蒙皮穿孔等损伤, 这些损伤会影响着雷达罩的电性能; 针对外场条件下对机载雷达罩电性能测试需求, 设计了一种便携式、易操作的雷达罩电性能测试系统; 给出了透波率、插入相移、介电常数等雷达罩电性能参数测试方案, 并对雷达罩样品的电性能参数进行了测试; 结果表明: 该系统在外场条件下能够方便的测量雷达罩电性能参数, 测试结果真实有效。

**关键词:** 雷达罩; 透波率; 电性能; 测试系统; 雷达罩损伤

## A Portable External Field Electric Performance Test System for Airborne Radome

Li Baopeng, Xie Hongsen, Liu Shui, Wu Chunlin  
(Qingdao Branch, Naval Aviation University, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** In the use of radome, it may cause damage to cover body, skin shedding and skin perforation, which will affect the electrical performance of radome. Aiming at the requirement of electric performance test for airborne radome under external conditions, a portable and convenient radar performance test system is designed. The testing scheme of the radar cover electrical performance parameters, such as the penetration rate, the insertion phase shift and the medium constant, is given, the electrical performance parameters of radome samples were tested. Test results show that: the system can conveniently measure the electrical performance parameters of radome under external conditions, and the test results are real and effective.

**Keywords:** radome; penetration rate; electrical performance; test system; radome damage

### 0 引言

机载雷达天线罩(雷达罩)是一种重要的飞机功能结构部件,一方面它使飞机保持良好的空气动力学性能,另一方面它又是雷达波束的“电磁明窗”,使雷达天线系统发挥理想的电性能。但是,机载雷达罩由于其特殊的使用环境(如高空、高速、室外、复杂气象等),难免会受到雨水侵蚀、雷击、静电烧灼、机械冲击等因素影响,可能会造成雷达罩开裂、分层、穿孔、浸水等损害,这些损害不仅会影响雷达罩罩体的机械强度,带来飞机载体的飞行安全附加隐患,还会影响着雷达罩电性能,造成雷达探测能力的下降<sup>[1-3]</sup>。

为了确保雷达罩电性能的有效发挥,必须定期开展对雷达罩的电性能测试。目前,人们对雷达罩的电性能测试常采用的测试方法有搜零法、电子定标法、动态电轴跟踪法<sup>[4-6]</sup>,它们需要在微波暗室环境中进行,在有效控制收发

天线与雷达罩的相对位置前提下,通过搭建信号发射模块、天线控制模块、控制处理部分组成的测试系统进行参数测试,此类方法投入设备复杂、成本高,而且存在定标曲线拟合误差、接收天线寻零控制困难、测试范围角度受限等问题,同时需要专业人员进行调试操作。此类测试场景和技术要求,不适合外场维护人员进行操作。

所以,有必要研究外场条件对天线罩电性能快速测试的便携系统,在实际工程应用中,不需要将雷达罩搬运到微波暗室由专业人员进行测试,而直接由维修保障人员在工程现场测试,可节约宝贵的人力资源与测试时间。

### 1 系统设计

天线罩属于超大电尺寸对象,其等效曲率半径比雷达天线口径的线度大,天线罩壁和天线间距通常在 $\lambda/2\pi \sim 2D^2/\lambda$ 之间<sup>[7]</sup>( $\lambda$ 为电磁波波长, $D$ 为天线口径宽度),既天线罩壁处于天线的辐射近区场内,在雷达罩外场维修保障过程中,主要关注发生局部损伤部位的电性能改变情况,所以可以对将天线罩局部损伤部位等效成平板天线罩。通过测试损伤部位的透波率、插入相位移相、介电常数、损耗角等电性能参数,然后与正常区域电性能参数相比较来确定损伤对电性能的影响<sup>[8-9]</sup>。所以,可以直接在工程现场采用等效平板测试技术,利用透射法来测量损伤部位的电

收稿日期: 2018-05-23; 修回日期: 2018-10-31。

**作者简介:** 李宝鹏(1986-),男,山东德州人,讲师,主要从事航空雷达信号测试与处理方向的研究。

谢洪森(1966-),男,山东龙口人,教授,主要从事对空通信与导航设备测试方向的研究。

性能指标<sup>[10]</sup>, 然后与在同样工程条件下测得的完好状态的雷达罩电性能参数进行比较, 即可判断该部位的性能状态、损伤情况。

### 1.1 功能需求

- 1) 适合测试不同尺寸、形状、结构的常规机载雷达罩。
- 2) 测试系统可拼装组合, 在内场外场转运移动便携, 拆装方便。
- 3) 可以对雷达罩电性能参数透波率、插入相移、介电常数、损耗角进行测量及数据处理。
- 4) 可实现雷达信号发射天线、接收天线对准操作, 操作过程便捷。

### 1.2 模块组成

根据系统功能需求分析, 系统模组成如图 1 所示, 主要分为辅助系统和测试系统两部分。辅助系统主要包含天线罩支撑系统、天线旋转和对准系统、天线支撑系统, 辅助系统主要用来完成对雷达信号发射、接收天线、待测天线罩支撑固定与位置调整。测试系统主要包含雷达信号发生器、发射与接收天线、矢量网络分析仪、数据处理计算机, 测试系统主要用来产生、发射、接收雷达模拟信号, 测量雷达信号透过雷达罩前后的相关电磁波参数变化情况, 以此来推导出雷达罩电性能参数。图 2 为测试系统总体外形架构, 整个系统以可移动小车为安装平台, 以实现测试系统在内外场的转运, 小车上架设一对可移动滑轨, 方便调整收发天线位置, 系统各构成模块采用特殊机械连接结构, 可以方便进行拆卸及拼接。

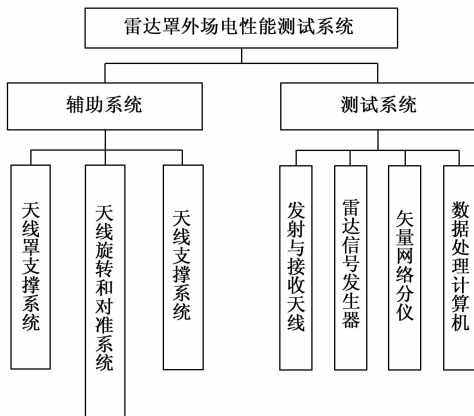


图 1 雷达罩外场电性能测试系统组成

#### 1.2.1 天线罩支撑系统

天线罩支撑系统主要用来支撑天线罩, 并对天线罩的空间位置进行调节, 以满足对天线罩不同部位的测试需求。如图 3 所示, 天线罩支撑系统采用双支架支撑, 系统的高度、距离均可进行调节, 并且系统可以在导轨上进行移动, 支撑的高度的调节范围为 1~1.5 m。因此, 可以固定和调节常见尺寸和形状天线罩, 且天线罩的位置可以在一定范

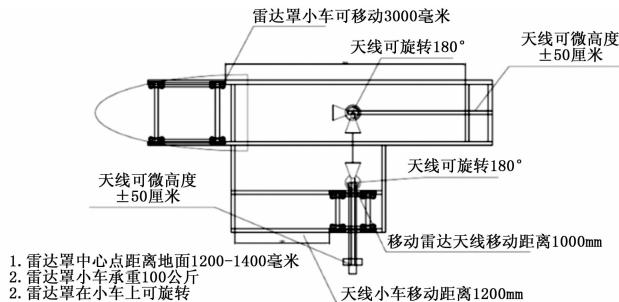


图 2 雷达罩外场电性能测试系统架构

围内进行调节。

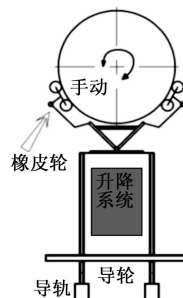


图 3 天线罩支撑系统设计图

#### 1.2.2 天线支撑系统

天线支撑系统主要用来支撑雷达信号发射天线和接收天线, 以及调节发射和接收天线的相对位置。在测试过程中, 雷达信号发射天线在雷达罩的内部, 可通过调节手柄进行水平旋转和竖直旋转, 接收天线在雷达罩的外部, 可以通过水平支撑杆进行水平旋转, 两者配合可实现对测试收发天线进行空间位置对齐调节, 从而减小实际测试误差。天线支撑系统主要用来固定天线支架, 初步调节雷达天线空间位置。通过给天线加载支架, 可以对天线进行上下、左右、俯仰调节。图 4 为天线对支撑系统结构。

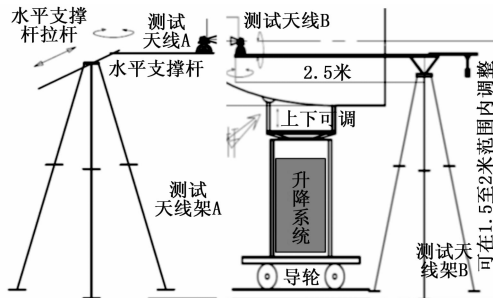


图 4 天线支撑系统示意图

#### 1.2.3 天线旋转和对准系统

天线旋转和对准系统主要完成对雷达发射和接收天线的精准位置调节。系统采用平面转台式设计, 天线可以在转台上安装拆卸并且可以进行 180 度旋转, 旋转精度为 2°, 以实现天线对准的粗调节。在测试过程中, 一个天线在雷达罩的内部, 一个天线在雷达罩的外部, 所以需要

天线进行对齐,从而减小测试误差,通过给天线加载支架,可以对天线进行上下、左右、俯仰进行调节。天线对准位置的精准调节,采用博世公司的激光对准笔进行辅助调节。

#### 1.2.4 矢量网络分析仪

测量雷达天线罩电性能参数仪器使用矢量网络分析仪,它是使用反射法或透射法检测反射系数相位变化的关键设备。矢量网络分析仪是一种能在宽频带内、高精度、快速实现微波器件多参数测量的精密仪器,被广泛应用于微波测试领域。考虑到本系统主要用于外场现地条件下的测试,所以矢量网络分析仪选用便携式的产品,适合于现场使用的便携式矢量网络分析仪市场厂已有成熟产品,系统采用安立公司生产的 MS2038C 型便携式网络分析仪,该设备具有雷达罩以及介电材料现场试验能力,因此可以作为现场电性能检测的测量设备之一。

## 2 测试方案设计

### 2.1 测试环境及仪器

#### 2.1.1 测试环境

测试系统使用环境为外场,不需要在微波暗室中进行。为了减小测试误差,应该选择场地较为开阔的区域进行测试,周围应该减小金属等的反射和其他雷达频段电磁信号干扰。

#### 2.1.2 测试仪器

矢量网络分析仪 1 台,喇叭天线 1 对,缆线 1 对,网络分析仪校准件 1 套,计算软件 1 台,雷达信号发生器 1 台,数据处理计算机 1 台以及相应的系统搭建所需的工具。

### 2.2 电参数测试方案

测试前需要对雷达发射、接收天线进行对准操作,并校准矢量网络分析仪。信号测量方式选用透射法,将被测雷达罩视为二端口网络,通过矢量网络分析测量二端口网络的散射参数 S11 和 S21 (幅值与相角),经过数据处理得到透波率和插入相移等电性能参数。测试方案如图 5 所示。

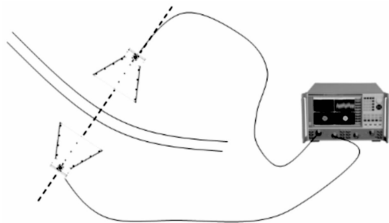


图 5 天线罩测试方案图

#### 2.2.1 透波率测试方法

透波率也称功率传输系数,是雷达罩透波性能设计的主要参数,它直接影响雷达天线波束的副瓣高度、波束宽度等,因此制约着雷达的工作距离。透波率与折射率、入射角、介电常数等因数有关。透波率等于电磁波透过天线罩在电场远区产生的最大场强值  $E_1$  与无天线罩时在电场远

区产生的最大场强值  $E_2$  之比的平方,透波率表达式如下:

$$T^2 = \frac{E_1^2}{E_2^2} \quad (1)$$

透波率通过以下方法测量:首先测量雷达天线信号透过雷达罩时和只有雷达天线时的 S21 参数 (dB),然后将前后两次测量 S21 参数相减,将 dB 形式换算为实数形式,并取平方,即可得到所需频段的透波率,如式 (2) 所示。

$$T^2 = (10 \lg \frac{P_r}{P_0})^2 \quad (2)$$

式中,  $P_r$  是接收天线接收到的电磁波透过雷达罩后的信号功率,它的变化是由于天线罩所引起的电磁波的反射、衍射、吸收、折射等原因造成的<sup>[9]</sup>,  $P_0$  是没有雷达罩时接收天线接收到的信号功率。

#### 2.2.2 插入相位测试方法

插入相位移又称插入相位延迟 (IPD—Insertion Phase Displacement),代表电磁波穿过天线罩任意一点的相位与天线罩摘下后电磁波穿过该点时的相位之差,IPD 的产生会导致天线增益下降、波束偏转等后果,因此也是天线罩电性能的基本参数之一。如式 (3) 所示,它主要与天线罩的物理厚度  $d$  和介电常数  $\epsilon$ 、波长  $\lambda$ 、入射角  $\theta$  有关,有时还需考虑天线罩多次反射的影响。

$$\text{IPD} = \varphi_1 - \varphi_2 = (2\pi d/\lambda) \cdot (\epsilon - \sin^2\theta)^{1/2} \quad (3)$$

插入相移通过以下方法测量:使雷达发射天线信号分别透过雷达罩读取和不透过雷达罩,直接从矢量网络分析仪上提取出有雷达罩和无雷达罩时每个频率对应的相位  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ ,将两者相位直接相减,即可算出所对应频段的插入相位移 IPD。

#### 2.2.3 介电常数与损耗角测试方法

雷达罩一般由多层材料组合而成,包括芯层、蒙皮以及胶膜等。每一种材料都对应不同的电磁参数,所以有必要研究雷达罩整体的等效电磁参数特性,而介电常数和损耗角正切能反映材料的电磁特性。

测试构成雷达罩的微波介质材料本文选用自由空间法。将电磁波等效为在自由空间传播的平面波,且线极化均匀,入射方向与被测材料板面视为垂直。被测材料可等效为二端口网络,电磁波对该网络将产生反射和透射。测得二端口网络的散射参数 S11 和 S21,然后根据麦克斯韦电磁波方程<sup>[11]</sup>,结合由式 (3) 换算出介电常数和损耗角。

## 3 系统测试

机载雷达罩常采用蜂窝式 A 夹层结构,第一层和第三层一般为树脂基碳纤维复合材料,第二层为泡沫类或蜂窝结构的复合材料,各层胶合在一起。制作 A 夹层结构的机载雷达罩实验样品,样品由芯层、蒙皮以及胶膜等多层材料组合而成,测试其正常情况下与受到损伤时的电性能参数变化情况,以验证测试系统测试的准确性。天线罩损坏类型采用穿孔损伤,对天线罩做穿透破坏,天线罩穿透孔

径半径设置为 18 mm, 通过矢量网络分析仪提取天线罩的 S11 参数和 S21 参数, 分别计算不同频率下的透波率、插入相位移、介电常数与损耗角, 并将测试数据送至数据处理计算机进行处理显示。

图 6 为完好天线罩与天线罩罩壁穿透半径为 18 mm 是透波率对比测试情况, 图 7 为完好天线罩与天线罩罩壁穿透半径为 18 mm 插入相位移对比测试情况。从测试结果可以看出, 当穿透半径为 18 mm 时, 透波率相比于完好天线罩的透波率下降了大约 10%, 相位移大约有 5° 的偏差, 这与实际情况相吻合, 透波率的下降是因为当穿透的孔径比较大时, 天线的一 3 dB 波束宽度会展宽, 从而造成透波率的下降。

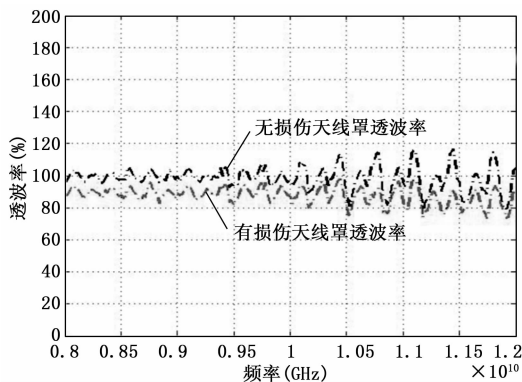


图 6 完好天线罩与天线罩罩壁穿透半径为 18 mm 透波率

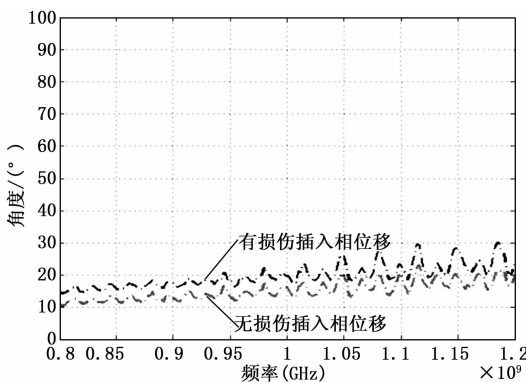


图 7 完好天线罩与天线罩罩壁穿透半径为 18 mm 插入相位移

综合以上测试结果, 可见当天线罩出现穿孔时, 当孔很小时, 天线罩的电性能几乎不变, 当孔的大小相比拟于天线的口径时, 透波率会下降, 这是因为天线的一 3 dB 波束宽度会展宽, 从而导致天线的增益降低, 这也与理论分析结果相对应。

将石英氧酸酯材料制成介质板, 将其作为测试样品, 首先在微波暗室中测试介质板在不同频率下的介电常数和损耗角, 如表 1 所示。然后, 利用便携式电性能测试系统测试介质板介电常数和损耗角, 并将测试数据送至处理计

算机进行显示, 如图 8~9 所示。

表 1 微波暗室测试介质板电性能数据

频率/GHz	介电常数	损耗角
4.619	3.731	0.0165
6.079	3.695	0.0152
6.834	3.685	0.0149

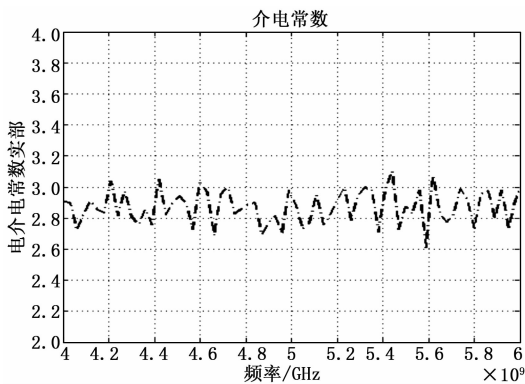


图 8 介电常数测试值

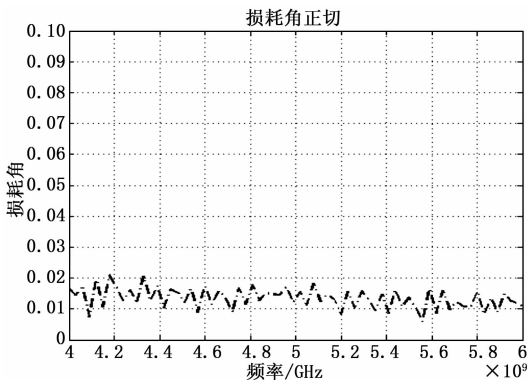


图 9 损耗角测试值

从测试结果可以看到, 测得的介电常数值在 2.9 左右, 损耗角正切值在 0.015 左右, 通过与标准值进行比较, 介电常数的测量误差大约在 19% 左右, 损耗角的值误差很小。这主要是由于喇叭天线辐射的不是平面波、天线辐射的电磁波从平板天线罩的边缘绕射以及矢量网络分析仪本身的误差造成的。

#### 4 结束语

本文研究了外场条件下机载雷达罩现场测试方法与技术实现手段, 设计构建了一种适用于多种尺寸机载雷达罩电性能测试系统, 系统可灵活转运、轻易拆卸以及天线对准操作方便, 雷达罩测试位置可随意调节。基于采用自由空间法研究了测试雷达罩电性能参数 (透波率、插入相位移、介电常数) 的测试方案, 并推导了相应的公式通过对试验天线罩的测试, 验证了系统可以方便的在工程现场条件实现雷达罩透波率和插入相移性的快速测量, 测量结果

准确。该系统若能够实现工程应用，可为节省人力物力成本，为机载雷达罩的维修保障提供新的思路和措施，提升机载雷达罩的维修保障能力。

**参考文献：**

[1] 王正刚, 夏卫卫, 赵兵, 等. 新舟飞机雷达罩蜂窝夹层进水 and 电性能研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2017 (5): 93-98.  
 [2] 吴磊, 房卫军, 张建凌. 雷达罩对机载脉冲多普勒雷达的性能影响分析 [J]. 火控雷达技术, 2015, 44 (1): 88-93.  
 [3] 王富生, 张灼然, 刘洋, 等. 复合材料雷达罩耐鸟撞和电磁性能综合优化设计 [J]. 振动与冲击, 2013, 32 (13): 93-98.  
 [4] 史维光, 王建, 张云祥, 等. AI-SI 法分析 X 波段机载雷达天线罩 [J]. 现代雷达, 2014, 36 (2): 67-70.  
 [5] 许群, 王云香, 徐京祥. 机载雷达罩动态电轴跟踪系统的设

计和实现 [J]. 测控技术, 2013, 32 (1): 117-120.  
 [6] 戎华, 杨美建, 吕明山, 等. 提高天线罩电性能仿真计算效率的几个措施 [J]. 飞航导弹, 2004 (6): 25-27.  
 [7] 许群, 王云香, 刘少斌. 搜零法在相控阵雷达罩电性能测试中的应用 [J]. 现代雷达, 2013 (4): 62-63.  
 [8] 王云香, 许群, 等. 试验天线对雷达罩传输效率的影响及分析 [J]. 现代雷达, 2016, 12: 65-69.  
 [9] 蔡承文, 赵永鹏, 李伟林. 一种 C 型夹层雷达天线罩损伤后修补区域电性能计算方法 [J]. 长沙航空职业技术学院学报, 2015, 15 (3): 48-5.  
 [10] 李欢, 刘钧, 肖加余, 等. 雷达天线罩技术及其电性能研究综述 [J]. 材料导报, 2012, 26 (15): 48-52.  
 [11] 董广宇. 从麦克斯韦方程组到电磁波方程 [J]. 现代物理知识, 2017, 29 (3): 51-54.

(上接第 19 页)

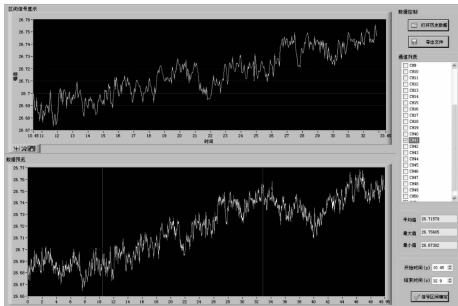


图 5 数据分析界面

**4 测试结果分析**

为压力测量通道提供 24 VDC 激励电压专门设计了电源隔离模块，对每一路电压输出进行了测试，其中一组测试数据如表 1 所示。

表 1 电源隔离模块测试数据

通道	数据	通道	数据
CH0	23.926	CH10	23.937
CH1	23.964	CH11	23.946
CH2	23.867	CH12	23.942
CH3	23.893	CH13	24.043
CH4	23.982	CH14	23.913
CH5	23.972	CH15	23.934
CH6	24.015	CH16	23.915
CH7	24.001	CH17	23.879
CH8	23.935	CH18	24.024
CH9	23.980	CH19	23.892

测试人员分别用标准传感器及信号发生器联入该系统进行了计量校准，压力各通道测量精度优于  $\pm 0.2\% FS$ ，温度测量通道 (E、T、K 型热电偶) 测量精度优于  $\pm 1 K$ 。

综上，系统主要功能和技术指标达到了设计要求，整

体运行正常，系统性能稳定、可靠，并采取了相应的抗干扰措施，具有较强的抗干扰性能，传感器支持热插拔，不会对系统造成影响，验证了相关技术的可行性。

**5 结束语**

本文构建了一种通用信号动态测试系统，抗干扰能力强。该系统有效解决了以往采集过程繁琐、实时性差、扩展性差的缺陷，实现了多路压力传感器和多路温度通道数据的同步采集和存储，采样率可自由设置，并采取了相应的抗干扰措施，验证了抗信号干扰的有效性，取得了较好的应用效果。该系统经过现场运行后，达到了预期的设计目标和控制效果，传输数据可靠，满足型号试验的测试需求。

**参考文献：**

[1] 于劲松, 鲍小明, 赵泉. 面向信号的通用自动测试系统建模与设计 [J]. 兵工学报, 2009, 30 (4): 471-475.  
 [2] 杨文, 黄文涛. 通用自动测试系统的软件设计与实现 [J]. 工业控制计算机, 2012, 25 (1): 79-80.  
 [3] 宋冬冬, 马玉泉, 林红举. 基于 GA-SVM 的多总线自动化测试系统故障诊断优化研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27 (2): 162-166.  
 [4] 武卉, 杨明绥, 王德友. 多动态参数同步测试系统构建及其应用 [J]. 航空学报, 2014, 35 (2): 391-399.  
 [5] Yu Jie, Liu Pengcheng, Shan Shaojie, et al. Performance analysis of high-speed parallel optical transmission module based on LabVIEW platform-based test system [A]. International Conference on Optoelectronics and Microelectronics [C]. 2015: 178-182.  
 [6] 康从会, 韩德宝, 薛冬新. 基于 LabVIEW 的橡胶动态特性的测试系统研究 [J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28 (1): 69-73.  
 [7] 史志辉, 林君, 周逢道. 基于虚拟仪器的高准确度同步采集系统 [J]. 中国测试, 2016, 42 (2): 67-70.  
 [8] 叶子, 吴桂初, 舒亮. 基于 LabVIEW 的智能交流接触器动态性能测试系统 [J]. 电子技术应用, 2013, 39 (3): 88-91.