

基于自动测试系统的小信号 模拟量测量方法研究

雷江妮, 成鹏展, 聂同攀

(航空工业第一飞机设计研究院, 西安 710089)

摘要: 针对自动测试系统在测量某型组合接收机时出现的测量结果偏差较大的问题, 结合组合接收机模拟量小信号测量原理, 采用定量试验和工程经验相结合的方法对可能导致自动测试系统“小信号模拟量测量超差”的影响因素逐条展开验证, 排除次要影响因素分析得到组合接收机的音频输出功率测量偏差主要为系统误差引起, 航向航道电路测量和下滑航道电路测量误差主要为电源谐波引起; 基于此提出在自动测试系统中采用集成电源滤波器和软件滤波的组合方法对模拟量小信号测量误差进行修正的解决措施; 采用该方法对某组合接收机复检, 试验测试结果与出厂相近, 且在某型号外场保障已验证其可行。

关键词: 自动测试系统; 小信号模拟量; 测试

Research on Small Signal Analog Measurement Method Based on Automatic Test System

Lei Jiangni, Cheng Pengzhan, Nie Tongpan

(AVIC First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: The paper do a research on the problem that the automatic test system has a large test deviation in measuring a type of combined receiver, combining the small signal analog measurement of the combined receiver, verifying the factors that may cause the “out-of-tolerance of small signal analog test” in automatic test system with quantitative experiment and engineering experience, it is found that the measurement deviation of combined receiver’s audio output power is mainly caused by system error, the deviation of course channel circuit and down channel circuit are mainly caused by power harmonics. Based on this conclusion, a solution to correct the measurement error is purposed, which is using integrated power filter and software filter in automatics test system. Adopting the method in a certain type of combined receiver’s reinspection, it shows that the test results are close to appearance data, also which is a feasibility method verified by an outfield support.

Keywords: automatic test system; small signal analog; test

0 引言

在航空装备自动测试系统(自动测试系统)领域, 由于机载设备实际运行环境复杂, 受电源干扰和电磁干扰较大、测量线路冗长、开关级联较多、自动测试系统输出供电电源纹波较大等外在影响因素, 准确测量模拟量小信号是一个难点, 采用自动测试系统基本配置测量机载设备小信号模拟量时, 其测量准确度无法满足测试需求。本文基于组合接收机小信号测量误差处理经验, 在分析多种因素对测量结果的影响的基础上, 通过试验排除次要影响因素, 提出了在自动测试系统中集成电源滤波器和软件滤波的组合方法对模拟量小信号测量误差进行修正, 并通过外场试验验证证实该方法可行。

1 问题描述

在某型自动测试系统研制过程中, 采用自动测试系统直接检测某组合接收机。通过测试结果显示 8 项指标不合

格, 与出厂测试偏差过大, 超出测试合格范围。具体数据见表 1 所示。

表 1 某组合接收机部分测试项目测试结果

序号	测试项目	mV/mW		
		合格范围	出厂测试	自动测试系统测试
1	下滑航道中心指示精度检查-76 dBm-模拟量	[-5,5]	1.3	7.178
2	下滑航道中心指示精度检查-56 dBm-模拟量	[-5,5]	1.7	7.195
3	下滑航道中心指示精度检查-33 dBm-模拟量	[-5,5]	1.7	7.195
4	航向航道中心指示精度检查-79 dBm-模拟量	[-5,5]	0.8	6.824
5	航向航道中心指示精度检查-53 dBm-模拟量	[-5,5]	0.5	6.813
6	航向航道中心指示精度检查-33 dBm-模拟量	[-5,5]	0.4	6.825
7	ILS 音频输出检查	[50, 100]	69 mW	103.8 mW
8	MLS 音频输出检查	[50, 100]	69 mW	105.96 mW

收稿日期: 2019-12-19; 修回日期: 2020-03-12。

作者简介: 雷江妮(1994-), 女, 陕西韩城人, 助理工程师, 工学硕士, 主要从事测试性技术方向的研究。

通过表 1 可看出, 采用自动测试系统测量该型组合接收机, 存在 8 项测试结果不符合要求。结合产品电路特征, 对以上测试结果进行分析, 可将问题归类为以下 3 个方面:

- 1) 下滑航道中心指示模拟量测量偏差;
- 2) 航向航道中心指示模拟量测量偏差;
- 3) 音频输出测量偏差。

针对这 3 个方面存在的测量偏差, 测量原理进行深度分析。

2 测量原理

组合接收机的下滑航道数据接收机输出、航向数据接收机输出、音频输出为独立功能电路。针对以上特征, 设计相应的测量电路。

2.1 下滑航道电路测量原理

自动测试系统内置航空无线电综合测试设备发出标准下滑载波射频信号, 通过射频电缆直接加载到组合接收机下滑航道信号输入接口, 进入产品内部下滑航道解调电路, 再经信号调理电路后由 CPU 中央处理控制电路进行数据处理、计算和转换, 通过 CPU 数据口输出并口数字量。

CPU 输出的并口数据同时发给 3 个通道: D/A 转换电路、1553B 总线信号转换电路、429 总线信号转换电路。本质上讲三路信号是同源信号, 其输出量应是一致的。

自动测试系统采用 34 401 数字万用表毫伏档测量 D/A 转换后输出的模拟量直流电压信号;

自动测试系统采用内置 1553B 通信卡测量 1553B 总线信号输出;

自动测试系统采用内置 429 通信卡测量 429 总线信号输出。

下滑航道电路测量原理见图 1 所示。

2.2 航向航道电路测量原理

自动测试系统内置航空无线电综合测试设备发出标准

航向载波射频信号, 通过射频电缆直接加载到组合接收机航向航道信号输入接口, 进入产品内部航向航道解调电路, 再经信号调理电路后由 CPU 中央处理控制电路进行数据处理、计算和转换, 通过 CPU 数据口输出并口数字量。

自动测试系统采用 34 401 数字万用表毫伏档测量 D/A 转换后输出的模拟量直流电压信号;

自动测试系统采用内置 1553B 通信卡测量 1553B 总线信号输出;

自动测试系统采用内置 429 通信卡测量 429 总线信号输出。

航向航道电路测量原理见图 2 所示。

2.3 音频电路测量原理

MLS 音频电路测量和 ILS 音频信号测量方法是一样的, 只是输出通道不一样, 输入来源也不同。

自动测试系统内置航空无线电综合测试设备发出标准音频载波射频信号, 通过射频电缆直接加载到某组合接收机相应信号输入接口, 进入产品内部解调电路, 再经信号调理电路后, 通过自反馈放大器输出音频信号, 输出音频信号的大小由自反馈放大器偏置电路中的输出调整电位器的位置决定。测量时一般输出标准 1 k 正弦波信号, 测量负载为 600 Ω 直流负载。

音频电路测量原理见图 3 所示。

组合接收机在出厂测量时, 通过监测负载电阻两端电压值反复调整“输出调整电位器”, 达到出厂设定输出功率折算的电压值时, 用密封胶封固“输出调整电位器”。

组合接收机在出厂测量时用某型交流数字毫伏表测量 600 Ω 负载两端电压。

自动测试系统通过内置示波器采集 600 Ω 负载电阻两端正弦波信号峰值, 然后计算出端电压。

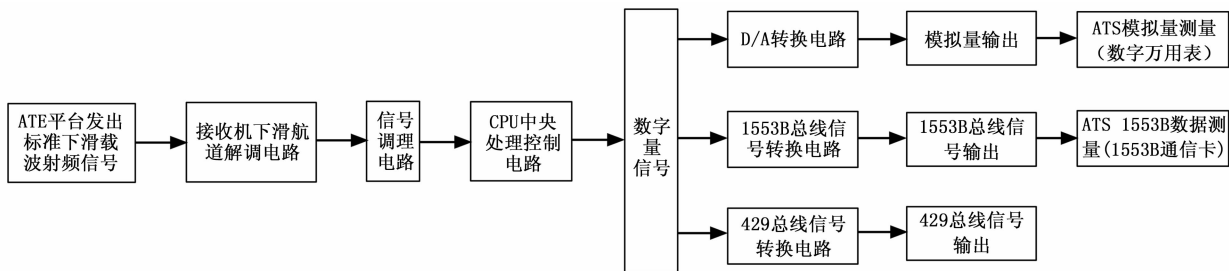


图 1 下滑航道电路测量原理

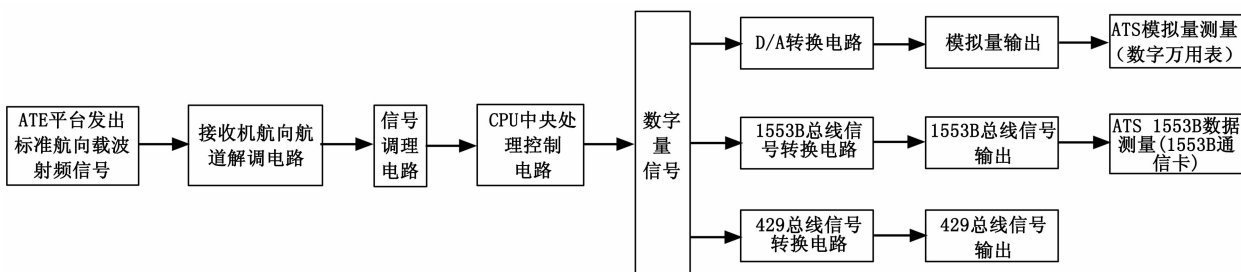


图 2 航向航道电路测量原理

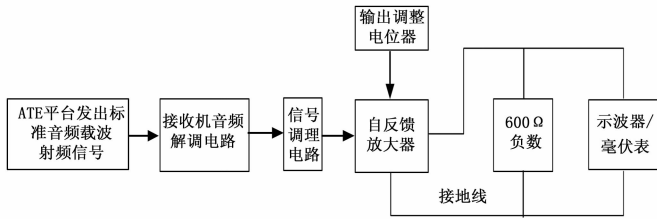


图 3 音频电路测量原理

3 问题分析

3.1 下滑航道电路测量偏差分析

理想情况下，不同调制度下，模拟量输出应和数字量输出相同。结合图 1 下滑航道电路测量原理图和表 1 测量结果 1、2、3，可知在同源输入的情况下，模拟量测量值出现偏差。为了验证数字量输出的正确性，首先验证了总线数据输出与输入数据一致，排除了总线问题。

分析模拟量测量出现偏差，一般有以下 4 种原因。

1) 测量线路对模拟量小信号测量结果影响分析：

某组合接收机出厂测量直接在测量电缆引出端上测量，ATS 测量时要通过测量电缆、适配器转接、矩阵开关转接、内部电缆等连接到测量仪器的测量端。ATS 测量相比出厂测量的线路要复杂。

但定量验证结果表明，测量线路对测量结果几乎没有影响。

2) 不同测量仪器对模拟量小信号测量结果影响分析：

采用交、直流标准源，交流数字毫伏表和自动测试系统内置数字万用表对某组合接收机分别进行测量，测量结果见表 2。

表 2 模拟量测量

序号	mV		
	直流激励	交流数字毫伏表测量值	数字万用表测量值
1	0	0	0.000 817
2	1	1	0.996 870
3	2	2	1.997 017
4	5	5	4.995 717
5	-5	-5	-5.002 028
6	-2	-2	-2.002 249
7	-1	-1	-1.003 426
8	1.3	1.3	1.297 348
9	1.7	1.7	1.697 307
10	0.8	0.8	0.796 553
11	0.5	0.5	0.496 552
12	0.4	0.4	0.397 743 4

表 2 定量验证结果表明，测量仪器对模拟量测量无影响。

3) 电磁环境对模拟量小信号测量结果影响分析：

小信号测量常常受电磁环境影响，特别是射频信号测量和交流小信号测量时受电磁环境影响较大；但直流电压信号测量受电磁环境影响相对较小，特别是电磁场功率不大的情况下可以忽略不计。

电磁环境影响测量结果还有一个显著特征：测量数值

变动，测量数值与某种电磁频谱的发射关联较大，测量结果偏离理论值也较大。但表 1 中，自动测试系统测量值比较稳定，基本维持在 7.1 ~ 7.2 mV 之间。

基于以上分析，下滑航道模拟量测量结果受自动测试系统电磁环境影响较小，可以忽略不计。

4) 输出电路 D/A 转换寄生电压对模拟量小信号测量结果影响分析：

采用 T 型电阻解码网络数模转换电路大多存在寄生电压。T 型电阻解码网络 D/A 转换寄生电压存在机理：这种电路原理是基于一个标准电源 V_{REF} ，二进制数的每一位 d_i ($d_i=0, 1, 2$) 对应一个电阻 $2R$ ，并由一个二进制值 d_i 控制一个双向电子开关 k_i ，当 $d_i=0$ ， k_i 接地，当 $d_i=1$ 时 k_1 接通运算放大器求和点。当 $D=d_2d_1d_0=111$ 时，相应开关 k_2 、 k_1 、 k_0 接通，3 个运算放大器求和点构成虚地求和点。此时测量输出电压时，由于运算放大器虚地求和点并不是真实接地，虚地和实地之间存在电压差，通常称为寄生电压。

寄生电压的明显特征：所有测量的输出电压数值都比理论值增加恒定值。

此次测量偏差分析验证过程中，项目组通过输入一组线性数据，测量的模拟量输出基本都是在理论值基础上有恒定偏差，基本可以判断，寄生电压可能影响模拟量小信号测量结果。

5) 电源谐波对模拟量小信号测量结果的影响：

自动测试系统供电采用的是 220 V/50 Hz 的交流电源，给测试设备及仪器供电的直流电源是经过 220 V 交流电源变换而来的二次电源，二次电源中含有 100 Hz、150 Hz 等 50 Hz 多次谐波叠加的纹波，谐波分量会对毫伏级测量产生较大影响。

3.2 航向航道电路测量偏差分析

航向航道电路原理与下滑航道电路原理相似，模拟量出现偏差的原因分析类似，此处不再赘述。

3.3 音频电路测量结果偏差分析

按照 GJ/T 9001-1998《声频放大器测量方法》和 GJ/T 12060.3-2011《声系统设备第三部分：声频放大器》等标准的描述，影响音频量测量结果主要有以下 5 个方面，下面逐项分析。

1) 电源不稳定引起测量结果偏差分析：

产品出厂检查设备，其测量特性应符合量值传递规定，一般情况应是线性电源，输出稳定，纹波小，指标符合计量要求。

自动测试系统给设备供电采用可控开关电源，输出稳定但纹波会大些，但信号源内部电源有滤波电路，提供给恒流源的电源也应是稳定的、纹波小、指标符合计量要求。

基于以上分析，双方测量用电源应该不会引起测量结果有较大差异。

2) 输出负载不同引起测量结果差异分析：

受检组合接收机出厂检测负载为 600 Ω 电阻，自动测

试系统测试时所加负载也是 600 Ω 电阻, 两者一致, 也符合 GJ 9001—1998 要求;

3) 测试预热时间不一致引起的测量结果差异分析:

产品出厂检查记录没有标注预热时间, 自动测试系统测试也没有设定产品预热时间, 这方面双方测试结果可能有差异, 但用自动测试系统连续进行过两次测试, 测量结果是一致的, 因此可以判断, 受检组合接收机产品预热时间对测量结果影响不大, 可以忽略。

4) 测量方式不同引起的差异分析:

组合接收机出厂检测采用交流数字毫伏表测量其音频输出;

自动测试系统采用示波器测量音频正弦波峰峰值, 通过计算得出音频输出电压, 间接完成对组合接收机的测量。

使用音频信号源输出 1 020 Hz 正弦信号作为标准源, 分别使用组合接收机的出厂检测设备和 ATS 测量, 测量结果见表 3。

表 3 音频测量结果

序号	V				备注
	激励信号 V _{p-p}	毫伏表测量的有效值	ATS 测量的有效值	相对误差(ATS 相对于毫伏表的测量值)	
1	4	2.600	2.66	0.023 076 923	激励信号为频率 1 020 Hz, 峰值为第二列所示的正弦波信号。
2	5	3.250	3.33	0.024 615 385	
3	6	3.901	3.98	0.020 251 218	
4	7	4.551	4.65	0.021 753 461	
5	8	5.201	5.30	0.019 034 801	
6	9	5.851	5.98	0.022 047 513	
7	10	6.501	6.64	0.021 381 326	

由表 3 数据可知, 自动测试系统测量的结果相对毫伏表测量结果的相对误差小于 0.022 V, 该误差可通过算法得到修正。

5) 音频输出特性变化引起差异分析:

分析图 3 音频测量原理图, 音频输出功率(或电压)的大小由调整电位器决定, 如果产品运输使用过程中, 调整电位器内部触点有位移, 其分压偏置就发生变化, 直接影响输出功率或输出电压的大小。

由于无法验证受试件返厂后调整电位器是否有偏移, 这个影响因数只能作为分析。

4 解决措施

音频输出功率或电压测量偏差, 主要是测量系统误差引起, 误差分布均匀、方向一致, 可通过算法减小误差。具体方法: 通过自动测试系统激励发出一组线性航向信号或下滑信号, 将模拟量信号和 1553B 总线测得的数字量信号分别做斜线, 模拟量拟合的斜线和数字量拟合的斜线两条直线之间的距离认为是系统误差。

航向航道电路和下滑航道电路模拟量测量偏差, 主要原因可能是二次电源引入纹波造成的。解决方法分两步: 首先采用数字滤波方法, 减小误差; 为了消除纹波的影响,

可在自动测试系统直流 28 V 电源输出端增加电源滤波器, 彻底消除谐波影响。

采用以上措施对某组合接收机进行复检, 结果如表 4 所示。

经过对比表 4 试验数据, 自动测试系统测量结果与出厂检测结果接近。另外, 在某型号外场保障中采用了该方法, 外场试验结果同样显示该方法可行。

表 4 某组合接收机复检结果

序号	测试项目	mV/mW		
		合格范围	出厂测试	自动测试系统测试
1	下滑航道中心指示精度检查 -76 dBm-模拟量	[-5,5]	1.3 mV	1.257 mV
2	下滑航道中心指示精度检查 -56 dBm-模拟量	[-5,5]	1.7 mV	0.674 mV
3	下滑航道中心指示精度检查 -33 dBm-模拟量	[-5,5]	1.7 mV	0.680 mV
4	航向航道中心指示精度检查 -79 dBm-模拟量	[-5,5]	0.8 mV	0.478 mV
5	航向航道中心指示精度检查 -53 dBm-模拟量	[-5,5]	0.5 mV	0.678 mV
6	航向航道中心指示精度检查 -33 dBm-模拟量	[-5,5]	0.4 mV	0.677 mV
7	I LS 音频输出检查	[50,100]	69 mW	71.4 mW
8	M LS 音频输出检查	[50,100]	69 mW	71.89 mW

5 结束语

音频输出功率测量偏差主要为系统误差, 可通过软件算法修正测量结果, 降低测量误差。

航向航道电路测量和下滑航道电路测量误差, 主要由电源谐波引起, 可采用通过数字滤波和在自动测试系统配置电源滤波器的方法降低测量误差。

参考文献:

[1] 郭迎福, 等. 测试技术与信息处理 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.

[2] 费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[3] 申忠如, 郭福田, 丁 晖. 现代测试技术与系统设计 [M]. 西安: 西安交通大学, 2006.

[4] 黎 红, 田 冕. 自动测试系统在装备保障工作中的应用 [J]. 机械管理开发, 2009, 24 (5): 105-106.

[5] 徐 涛, 姜本清. 提高自动测试系统测量精度的方法 [J]. 仪器仪表用户, 2009, 16 (2): 85-87.

[6] 寇小明, 郭恩全, 高天德. 提高 ATS 测量精度的数字滤波与频域修正方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2007, 21 (1), 11-13.

[7] Tanja C H ofner, Defining and testing dynamic ADC parameters, Microwaves&RF [J]. 2000, 39 (11): 75-81.

[8] 王昌明, 孔德仁, 何云峰. 传感与测试技术 [M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2005.

[9] 王 伟, 长 泉. 基于最小二乘曲线拟合的信号调理电路误差补偿方法 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (11): 2286-2291.

[10] 盛 旺, 刘文彦. 动态测量误差的软件处理方法 [J]. 自动化仪表, 2003, 24 (11): 20-23.