

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.03.16

信号调理器对动态测试的影响

蔡菁, 史博, 王辰辰

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 信号调理器是动态测试系统的重要组成部分, 带宽、放大倍数和滤波是衡量其性能的主要指标。动态测试系统的输出信号幅值和相位是表征测试结果的重要参数。本文研究信号调理器性能对动态测试系统输出信号幅值和相位的影响, 试验并分析带宽、放大倍数和滤波对输出信号幅值和相位造成的衰减。对提高动态测试结果准确度, 优化测试系统动态性能具有重要意义。

关键词: 信号调理器; 带宽; 放大倍数; 滤波; 幅值; 相位

中图分类号: TB93

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)03-0083-06

Influence of Signal Conditioner to Dynamic Measurement

CAI Jing, SHI Bo, WANG Chencheng

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Signal conditioner is a significant part of dynamic measurement system, the bandwidth, amplification and filtering are main indexes to evaluate its performance. The output signal amplitude and phase of the dynamic measurement system are main parameters for characterizing the test results. The influence of the dynamic performance of signal conditioner to the output signal amplitude and phase of the dynamic measurement system is studied in this paper. Experiments are conducted, and the attenuations of output signal amplitude and phase caused by the bandwidth, amplification and filtering are analyzed. Improving the accuracy of dynamic measurement results and optimizing the dynamic performance of measurement system are of the significance of this paper.

Key words: signal conditioner; bandwidth; amplification; filtering; amplitude; phase

0 引言

动态测试是为确定被测量的值在测试期间随时间变化所进行的测量过程。由于动态测试是对变化过程的实时测量, 测试结果不准确会造成严重后果。如导弹运动轨迹测量不准确导致发射偏离目标, 发动机进气道内动态压力测量不准确导致发动机失稳判断错误甚至机毁人亡, 病人血压测量不准确会导致医生诊治错误等。随着生产实践和科学技术的发展, 动态测试在航空航天、火箭导弹、高铁及医用等行业的需求越来越多, 对动态测试技术和测试系统也提出更高要求^[1-2]。理想测试系统是要无失真的复现被测信号^[3], 但在动态测试中被测信号通常是未知的, 所以对动态测试系统性能要求响应快、频带宽。

信号调理器是动态测试系统的重要组成部分。搜集国内外文献, 目前信号调理器的研究主要是针对其性能的设计与实现, 而无信号调理器对测试系统输出结果的影响研究。本文以信号调理器的性能指标——

带宽、放大和滤波为研究对象, 分析并验证信号调理器对动态测试系统输出信号的影响。

1 原理概述

常用动态测试系统构成如图1所示。传感器将感受到的被测量信息按一定的变换规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出。信号调理器^[4]对传感器输出信号进行调整和进一步变换, 是处理信号的重要部件。数据采集是从待测设备中采集电量或非电量的模拟或数字信号, 送到上位机进行分析处理的过程。经过动态测试系统的输出信号幅值和相位是表征动态测试结果的直接参数, 幅值^[5]用于衡量测试系统输出信号的大小, 相位用于描述输出信号的时域变化。

动态测试系统中, 传感器输出多为电信号^[6], 如电流或电压。对于没有集成信号处理的传感器, 输出电信号幅值较小(如 mV 级和 mA 级)。直接进行采集, 容易出现有效信号被噪声信号淹没等问题; 还有一些传感器输出为电荷量^[7], 数据采集无法直接采集电荷

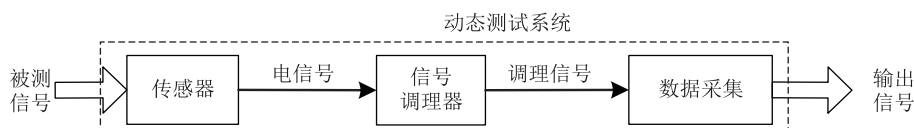


图1 动态测试系统构成

信号。信号调理器可对信号进行放大、滤波、调制解调等处理^[8-9]，如对小幅度电信号放大，对不必要的干扰信号滤波，传感器输出信号经过调理后成为通用性强、幅值适宜采集的电压或电流信号，以便进行数据采集。

众所周知，放大倍数与带宽相互制约。通常放大器的放大倍数可以在较大范围内进行调整，当被测信号频率接近或高于放大器带宽时，靠增加放大倍数也不会对调理信号的幅值有明显放大作用，甚至会抑制相应频率的信号幅值。

1.1 放大功能

理想的信号调理器将所有频率信号一视同仁地放大而不发生失真，但实际在动态信号测试时，无法避免噪声干扰，当有效信号幅值较小时，会出现干扰信号淹没有效信号等问题^[10-11]。实际使用中信号调理器只要做到在有限频带内不失真传输信号就可被认为是理想信号调理器了。

信号调理器带宽指能通过信号的频率范围，一般定义幅值下降 3 dB (即原幅值的 0.707 倍) 时，对应的频率范围为信号调理器的带宽，如图 2 所示。

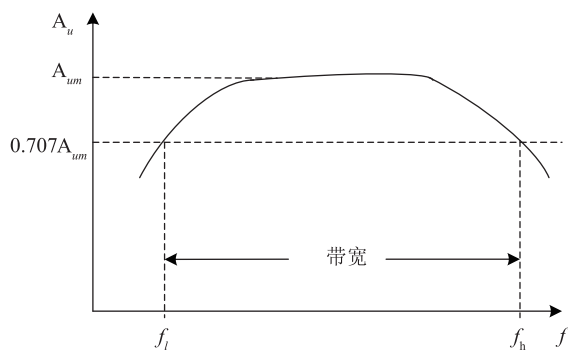


图2 带宽的定义

信号调理器输出与输入的比值称作放大倍数^[12]，单位是“倍”，当改用“分贝”作单位时，称之为增益，如图 3 所示。

电压放大倍数为 $A_u = U_o / U_i$

$$A_u(\text{dB}) = 20 \log(U_o / U_i)$$

电流放大倍数为 $I_u = I_o / I_i$

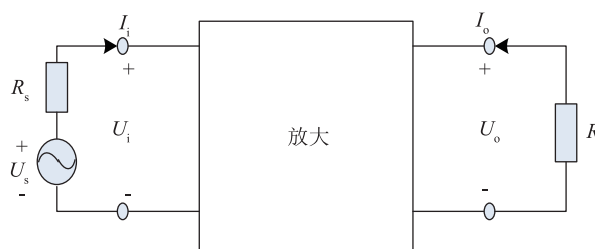


图3 放大倍数的定义

1.2 滤波功能

信号调理器能使有用频率信号通过且同时抑制无用频率信号。传感器用于将各种物理量的取值随时间变化的过程转换为电压或电流的时间函数，称之为信号。信号在产生、转换、传输的每一个环节都可能由于环境干扰的存在而畸变，甚至很多情况下，这种畸变很严重，以致信号及其所携带的信息被噪声淹没。

低通滤波器是当前各种应用型滤波器设计的基础。理想的低通滤波器能使所有低于截止频率的信号无损通过^[13-15]，而所有高于截止频率的信号被无限衰减，在频率特性曲线上呈现矩形，即矩形滤波器。但理想总是无法实现的，根据所选逼近函数不同，得到响应不同。巴特沃斯滤波器在通频带内频率响应曲线最光滑，具有最平坦的响应特性；切比雪夫响应滤波器具有更陡的衰减特性，与理想滤波器的频率响应曲线之间的误差最小，但在通频带内存在幅度波动。通常，滤波器阶数越高，在阻频带振幅衰减速度越快。

综上所述，在动态测试系统中使用信号调理器，一旦开启放大和滤波功能就会对被测信号造成幅值衰减和相位延迟作用。在信号调理器说明书中明确了放大倍数、带宽及滤波等参数，但并没有明确信号调理器开启上述功能会对测试结果产生的影响量。

信号调理器的带宽通常指幅值衰减达 -3 dB 时的有效频带范围。但对于动态测试系统而言，幅值衰减达 30% 的测量误差太大了，对保证动态测试结果准确度已失去意义。假设动态测试系统提出 5% 测试准确度要求，信号调理器的有效带宽是多少，放大倍数如何设置才能保证满足测试准确度要求。并且当动态测试系统用于测试频带复杂的信号时，如进行爆炸冲击波

毁伤性能评价时,冲击波信号频率范围宽,高达几兆赫兹,但信号调理器受电子元器件能力限制,带宽无法覆盖冲击波信号频率范围。此时,经过信号调理器的输出信号会出现怎样的有效信号频率遗漏和幅值改变,采集得到信息不完全的输出信号对动态测试结果带来的误差也是未知。因此,研究信号调理器对动态测试系统的输出信号影响,对于保证动态测试系统输出结果可靠性,提高动态测试准确度具有重要意义。

2 试验及结果分析

ENDEVCO 136 是典型的信号调理器^[16],本文以信号调理器 ENDEVCO 136 为试验对象,测试 ENDEVCO 136 的带宽、放大和滤波性能对输出信号幅值衰减和相位延迟的影响。

2.1 试验设计

图 4 为试验系统结构示意图,用信号发生器生成的正弦信号 S 作为输入信号,一路连接至 ENDEVCO 136,经过调理后输出信号记为 S1,另一路直接进入数据采集设备,记为 S。调节信号发生器改变正弦信号 S 的频率和幅值,设置 ENDEVCO 136 不同放大倍数和滤波,采集 S1 和 S,计算经过 ENDEVCO 136 调理后的输出信号幅值衰减和相位延迟。

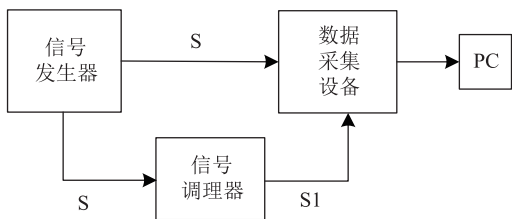


图 4 试验系统示意图

幅值衰减定义为

$$a = \frac{A_{s1} - A_{s0}}{A_{s0}} \times 100\%$$
 (1)

式中: a 为幅值衰减; A_{s1} 为经过信号调理器的输出信号幅值, mV; A_{s0} 为输出信号理论幅值, 等于输入信号幅值 A_s 与放大倍数相乘, mV。

相位延迟定义为

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_0$$
 (2)

式中: $\Delta\varphi$ 为相位延迟, (°); φ_1 为输出信号相位, (°); φ_0 为输入信号相位, (°)。

表 1 为模拟动态测试系统构成及其性能。

表 1 试验系统构成

设备名称	型号	性能参数
信号发生器	Agilent 33220	带宽: 20 MHz
信号调理器	ENDEVCO 136	带宽: 200 kHz(-3 dB), 放大倍数: 0 ~ 1000, 滤波: 10 kHz, 四阶巴特沃斯
数据采集设备	NI PCI 6115	采样率: 10 MS/s, 分辨力: 12bits

2.2 试验结果及分析

A_s 为输入信号幅值, A_{s1} 为经 ENDEVCO 136 后输出信号幅值。输入信号频率分别为 1, 5, 8, 10, 100 kHz 和 200 kHz。设置放大倍数分别为 10 倍, 20 倍, 50 倍, 100 倍, 200 倍。滤波设置为无滤波和开启滤波(10 kHz 低通)。由于 ENDEVCO 136 滤波设置档位只有 10 kHz 低通滤波, 所以开启滤波后输入信号频率最高为 10 kHz。

表 2 和表 3 分别为无滤波和开启滤波时, 在不同放大倍数下, 不同频率的输入信号经过信号调理器后的输出信号幅值测试结果。

表 2 无滤波时幅值输出

频率 /kHz	输出	幅值测试结果/mV				
		放大 10 倍	放大 20 倍	放大 50 倍	放大 100 倍	放大 200 倍
1	A_s	101.49	101.41	101.41	51.75	51.55
	A_{s1}	1010	2020	5010	5000	9990
5	A_s	101.62	101.67	101.96	51.93	52.08
	A_{s1}	1000	2000	5020	5000	10000
8	A_s	101.55	101.71	101.59	51.97	52.05
	A_{s1}	1000	2000	5000	5000	9990
10	A_s	101.5	101.42	101.33	51.91	51.89
	A_{s1}	1000	2000	5000	4990	9980
100	A_s	102.32	102.62	103.45	53.67	55.39
	A_{s1}	931.14	1860	4640	4570	9130
200	A_s	101.2	101.98	103.09	53.61	55.23
	A_{s1}	781.37	1560	3870	3660	7290

表 3 开启滤波时幅值输出

频率 /kHz	输出	幅值测试结果/mV				
		放大 10 倍	放大 20 倍	放大 50 倍	放大 100 倍	放大 200 倍
1	A_s	101.24	101.53	101.2	51.7	52.07
	A_{sl}	1000	2010	5010	5000	9990
5	A_s	101.67	101.63	101.7	52.18	51.91
	A_{sl}	1010	2030	5060	5050	10100
8	A_s	101.6	101.57	101.68	51.96	52.2
	A_{sl}	916.49	1830	4570	4570	9130
10	A_s	101.48	101.52	101.41	51.74	51.88
	A_{sl}	701.41	1400	3500	3490	6970

分析表 2 和表 3 数据得到如下结果：

1) 在相同放大倍数下，随着输入信号的频率增加，输出信号幅值的衰减增加。以无滤波、50 倍放大为例，输入信号频率为 1 kHz 时，输出信号幅值衰减达 -1.19%；频率为 10 kHz 时，输出信号幅值衰减达 -1.31%；频率为 100 kHz 时，输出信号幅值衰减达 -10.29%；频率为 200 kHz 时，输出信号幅值衰减达 -24.92%。

2) 相同频率的输入信号，随着放大倍数增加，输出信号幅值衰减增加。以无滤波、输入信号为 100 kHz 为例，在 10 倍放大时，输出信号幅值衰减达 -9%；20 倍放大时，幅值衰减达 -9.37%；50 倍放大时，幅值衰减达 -10.29%；100 倍放大时，幅值衰减达 -14.85%；200 倍放大时，幅值衰减达 -17.58%。

3) 相同频率的输入信号在开启滤波后，输出信号幅值衰减增加。图 5 为对表 2 和表 3 进行对比，得到无滤波和开启滤波后输出信号的幅值变化情况。以 10 倍放大为例，输入信号 1 kHz 的输出幅值衰减由无滤波时的 -0.48% 增加到开启滤波后的 -1.22%，输入信号 5 kHz 时的输出幅值衰减由无滤波时的 -0.66% 增加到开启滤波后的 -1.59%，输入信号 8 kHz 时的输出幅值衰减由无滤波时的 -1.53% 增加到开启滤波后的 -9.79%，输入信号 10 kHz 时的输出幅值衰减由无滤波时的 -1.48% 增加到开启滤波后的 -30.88%。

表 4 和表 5 分别为无滤波和开启滤波时，不同放大倍数下，不同频率的输入信号经过信号调理器后的输出信号相位测试结果。

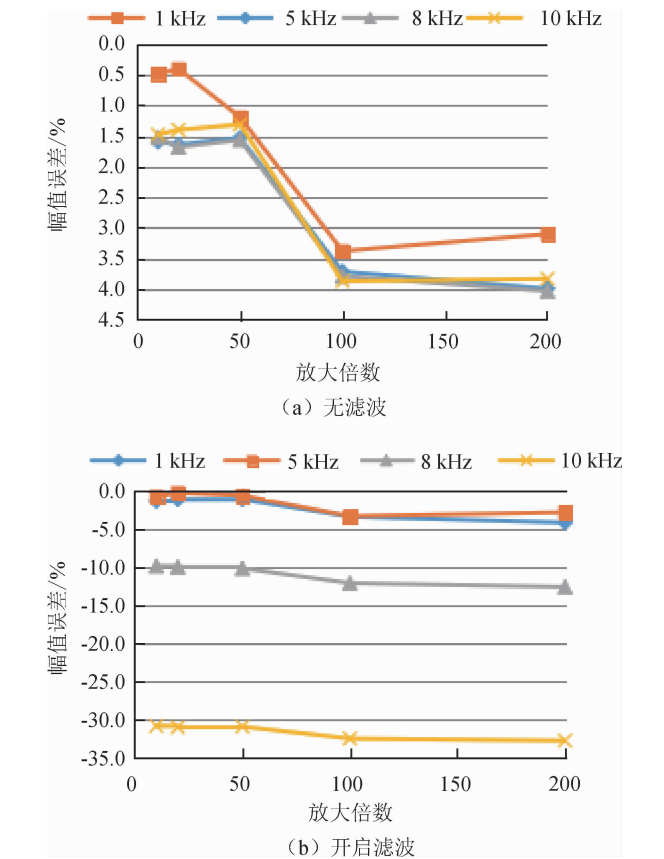


图 5 输出信号幅值对比

表 4 无滤波时相位输出

频率 /kHz	输出	相位测试结果/(°)				
		放大 10 倍	放大 20 倍	放大 50 倍	放大 100 倍	放大 200 倍
1	φ_0	92.92	34.37	142.34	92.35	20.08
	φ_1	92.71	34.11	142.15	91.8	20.18
5	φ_0	163.9	160.76	49.86	94.08	76.44
	φ_1	162.8	159.2	49.72	92.17	74.28
8	φ_0	56.44	-16.65	71.36	-164.93	164.43
	φ_1	54.2	-18.86	68.68	-168.24	161.16
10	φ_0	-22.25	-44.9	102.04	-172.6	65.4
	φ_1	-25.57	-47.94	98.74	-176.8	61.58
100	φ_0	-79.23	100.18	223.2	174.87	42.45
	φ_1	-108.34	70.69	192.6	133.49	1.18
200	φ_0	50.67	142.34	-9.98	36.03	7.3
	φ_1	-1.42	90.2	-63.58	-36.22	-65.26

表5 开启滤波时相位输出

频率/kHz	输出	相位测试结果/(°)				
		放大10倍	放大20倍	放大50倍	放大100倍	放大200倍
1	φ_0	-164.5	53.92	141.61	-132.1	153.71
	φ_1	-179.49	39.45	127.03	-147.06	139.39
5	φ_0	19.41	-83.03	7	-42.8	-170.48
	φ_1	-62.2	-164.95	-75.72	54.16	107.13
8	φ_0	-122.29	-51.37	-9.47	57.64	-119.81
	φ_1	93.06	164.17	-154.28	-88.53	94.23
10	φ_0	-105.65	11.4	-31.86	-138.33	105.15
	φ_1	67.46	-175.08	141.41	33.77	-83.08

分析表4和表5的数据可得：

1)无滤波时，相同放大倍数下，随着输入信号频率增加，相应输出信号的相位差增加。100倍放大时，输入信号频率1 kHz的输出信号相位差为-4.2°；频率为10 kHz时的输出信号相位差为-4.2°；频率为100 kHz时的输出信号相位差为-41.38°；频率为200 kHz时的输出信号相位差高达-72.25°。

2)相同频率的输入信号在相同的放大倍数下，开启滤波时输出信号的相位差远大于无滤波时输出信号的相位差。

图6为对表4和表5的进行对比，得到无滤波和开启滤波后输出信号的相位变化情况。例如，输入信号频率为1 kHz时，不同放大倍数下，无滤波时输出信号的相位差均在-1°左右。开启滤波后，输出信号相位差在-20°左右。很明显，滤波功能对输出信号相位差有很大影响。

3 结论与展望

本文阐述了动态测试系统中信号调理器的用途并介绍了主要性能参数，以典型的信号调理器 ENDEVCO 136 作为试验对象，通过试验分析信号调理器带宽、放大倍数和滤波对输出信号幅值衰减和相位延迟的影响。得出以下结论：

1)相同频率的输入信号，在不同放大倍数时输出信号幅值并不是随着放大倍数增加而线性增加的关系。这点需要特别注意，通常认为某固定频率的输入信号经过信号调理器时，随着放大倍数增加，其输出幅值会增加。但实际情况并不是这样，随着放大倍数增加，

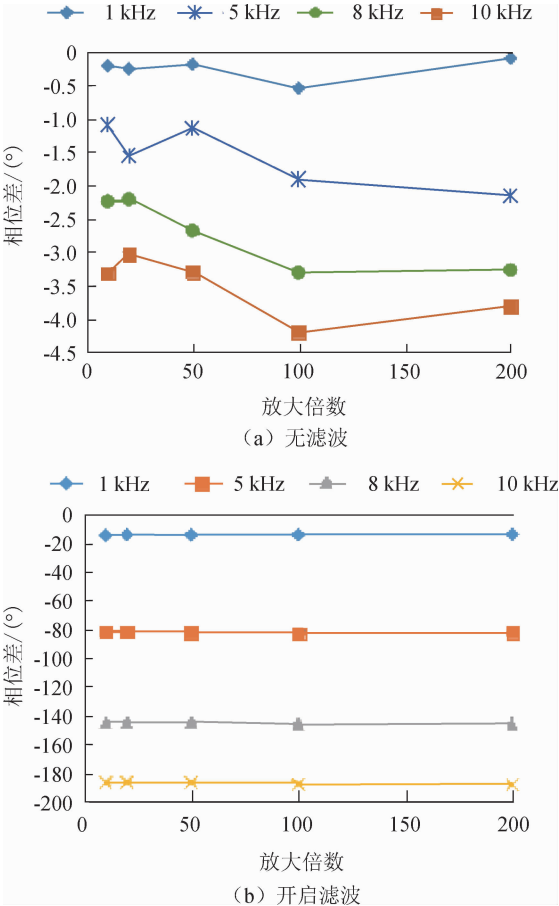


图6 输出信号相位对比

信号调理器有效带宽会减小，从而对输出信号幅值造成衰减影响。至于具体衰减量需要在不同放大倍数下进行专项测试。

2)相同放大倍数时，随着输入信号频率增加，输出信号幅值衰减和相位差都随着增加。开启滤波后，输入信号频率越接近10 kHz时，输出信号幅值衰减越大，并且相位差增加很多。因此，动态测试系统中信号调理器使用滤波功能时必须慎重，要考虑对输出信号的幅值衰减和相位延迟带来的影响。开启滤波功能时，必须对滤波作用产生的幅值衰减和相位延迟进行校准，得到具体的影响量值。

本文以 ENDEVCO 136 为试验对象，验证信号调理器带宽、放大倍数和滤波对动态测试输出信号的影响。随着科学技术快速发展，用于动态测试的传感器已相当成熟，响应时间达 μs 级，测量精度可达千分量级。数据采集设备也有采样率高达百兆赫，分辨力高达 24 bit，都可以保证动态测试准确度。但目前通用的信号调理器的技术指标仅能保证在带宽内衰减达-3 dB 的测试结果准确度，是动态测试系统性能提高的瓶颈。建议信号调

理器在使用前进行动态校准,尽可能详细的校准信号调理器在不同输入信号、不同放大倍数下和不同带宽时的输出信号幅值和相位数据或曲线,得到信号调理器在各频段、各放大倍数下使用时的测试结果准确度。通过信号调理器的动态校准结果,还可以研究用补偿或修正方法减小或消除信号调理器对动态测试输出信号幅值衰减与相位延迟的影响,对于提高动态测试结果准确度和保证动态测试可靠性具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 祖静, 马铁华, 裴东兴, 等. 新概念动态测试[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [2] 朱明武, 李永新. 动态测量原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [3] Zu Jing, Zhang Zhijie, Pei Dongxing, et al. New Concept Dynamic Testing and Calibration Technique[C]//MSC: National Institute of Standard and Technology. 2006.
- [4] 张力, 李程, 刘晶. JJG 624-2005 动态压力传感器检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2005.
- [5] 李永新, 吴健. 信号与动态测量系统[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- [6] 樊尚春. 传感器技术及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [7] JJG 338-2013 电荷放大器检定规程[S]. 北京: 中国质检出版社, 2013.
- [8] 朱明武, 李永新, 卜雄洙. 测试信号处理与分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [9] Nahvi M. Signals & Systems[M]. Business & Economics, 2014.
- [10] John G P, Dimitris G M. 数字信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [11] Carter Bruce, Mancini Ron. Op Amps For Everyone[M]. Third Edition. 2009.
- [12] 童诗白. 模拟电子技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [13] Couson A J. A Generalization of Nonuniform Bandpass Sampling[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(3): 694-704.
- [14] Schamann R, Valkenburg M E V. Design of Analog Filter. Oxford University Press[M]. New York: Oxford University Press, 2001.
- [15] Goyal V K. Theoretical Foundations of Transform Coding[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2001, 18(5): 9-21.
- [16] MEGGITT Corporation. INSTRUCTION MANUAL Model 136 DC AMPLIFIER[Z].

收稿日期: 2019-03-11

基金项目: 国家“十三五”技术基础项目(JSJL2015B016)

作 者 简 介



蔡菁(1986-), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向为动态压力测试与校准。2011年毕业于燕山大学电气工程学院, 同年到北京长城计量测试技术研究所工作至今。参与并完成技术基础科研课题多项, 获集团科技进步二等奖1项。已发表论文5篇, 参与国防计量检定规程编制1项。