

不同偏压下红外探测器噪声测试系统的设计

田 广,徐庆安,杨 宇,吕志强,李 慧

(北京控制工程研究所,北京 100094)

摘 要:热敏电阻型红外探测器是红外地球敏感器的核心元件,其质量决定整个卫星姿态测量精度。热敏电阻型红外探测器元件制造过程工艺复杂,技术难度大。由于该类器件的失效主要表现为噪声失效,因此,需要研究新的噪声测试方法来剔除失效器件。针对以锰钴镍氧化物作为灵敏元的红外探测器的特点,在分析其噪声模型的基础上,研究了不同偏压下噪声测试方法,并提出了相应测试系统的设计方案。通过测试验证,该系统本底噪声小于 $100 \text{ nV/Hz}^{1/2}$,测试精度也满足要求,可以利用该测试方法进一步剔除存在疑点的探测器,提高红外探测器筛选有效性。该系统将为热敏电阻型红外探测器不同偏压下噪声筛选提供实验平台,并为进一步分析和研究不同偏压下噪声变化机理的研究奠定了基础。

关键词: 红外探测器; 不同偏压下噪声; 测试系统

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0304001

Design of noise testing system for infrared detector in different bias voltages

Tian Guang, Xu Qing'an, Yang Yu, Lv Zhiqiang, Li Hui

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Thermistor type infrared detector is the key element of the infrared earth sensor, which plays an important role in measuring precision of satellite attitude. The manufacturing process of the thermistor type infrared detector is complex, and the technical difficulties are great. Owing to the failure of these devices is mainly caused by noise, it is necessary to study new noise testing method to eliminate the failure devices. According to the structural characteristics of infrared detector based on thermistor of ternary Mn-Ni-Co oxide, the noise models were discussed in detail, and the noise test method based on infrared detector in different bias voltage was studied, then the corresponding testing system was designed. Test results show that the local noise and test accuracy of the system meet the requirements. The system will provide an experimental platform for the research of noise screening in different bias voltages, and lay a foundation for further analysis and research on the mechanism of noise variation in different bias voltages.

Key words: infrared detector; noise in different bias voltages; testing system

收稿日期:2018-10-13; 修订日期:2018-11-22

基金项目:国家自然科学基金(61076106)

作者简介:田广(1986-),男,工程师,硕士,主要从事红外探测器设计及测试、光电器件电路设计方面的研究。

Email: tianguangok@126.com

0 引言

红外探测器是红外地球敏感器的核心元件,其质量决定整个卫星姿态测量精度,用于将入射的红外辐射转换为另一种可测量的物理量。其质量是决定整个卫星姿态测量精度的核心要素,尤其是长时间在轨工作的质量及可靠性^[1-2]。由锰、钴、镍氧化物制成的负温度系数热敏电阻型红外探测器是一种温度敏感器件。当热辐射投射到热敏电阻材料上时,引起材料温度升高,材料电阻阻值随之下降^[3]。

热敏电阻型红外探测器元件制造过程工艺复杂、技术难度大、可靠性要求严格,之前针对该类器件的研究主要集中在器件结构、薄片制作工艺与电气特性等方面^[4],但由于该类器件的失效主要表现为噪声失效,因此,近年来噪声机理及测试方法逐步受到更多关注^[5]。

目前,国内研究的测试平台多采用通用仪器设备来搭建,在红外探测器工作偏压下提取红外探测器噪声点频值或观察噪声时域均方根值和峰峰值。在实际使用过程中,对该种探测器失效模式进行分析可知,低频噪声的突然增大是该类红外探测器主要失效模式^[6-7],且噪声变大与热敏电阻薄片内引极界面存在接触缺陷或晶格缺陷有关,可以利用不同偏置电压下噪声测试方法进一步剔除界面区存在接触缺陷的红外探测器。

为此,文中提出了一种热敏电阻型红外探测器不同偏压下噪声测试系统设计方案。基于虚拟仪器技术,采用模块化设计方案,不仅实现了噪声时域信号的准确测试(每秒可测 200 000 个数据点),显示噪声均方根值和峰峰值,而且可以精确分析低频噪声频域信号,提取范围内带频噪声、点频噪声、爆裂噪声的幅度、特征频率等信息,也可以切换不同偏置电压,进行不同偏压下噪声的测试分析。

1 热敏电阻型红外探测器及其噪声分析

热敏电阻红外探测器是红外地球敏感器的核心部件,其内部结构图如图 1 所示。两片阻值相近的锰钴镍氧化物薄片浸没在锗透镜上,其中吸收红外辐射的敏感元主片浸没在透镜中心,起环境温度补偿作用的补片通过隔离层阻挡红外光。热敏电阻薄片

电极通过内引线与外电极相连,实现电气连接。

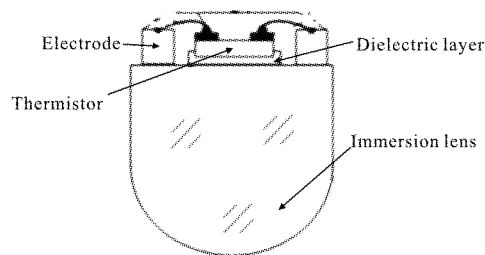


图 1 热敏电阻型红外探测器的内部结构图

Fig.1 Internal structure image of the thermistor type infrared detector

热敏电阻型红外探测器工作电路如图 2 所示,两个薄片的公共极为信号输出端,薄片另外两极分别为正负偏置电压的输入端,两个薄片构成桥式电路。当没有红外辐射时,信号输出端理论值为 0,当有红外辐射入射到探测器主片时,由于其负温度系数特性,其阻值减小,信号输出端会输出一个与红外辐射相关的信号。

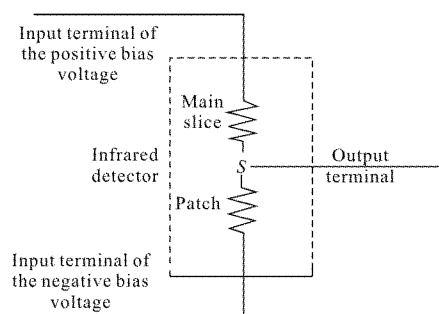


图 2 热敏电阻型红外探测器原理框图

Fig.2 Schematic diagram of the thermistor type infrared detector

红外探测器噪声性能主要由热敏电阻薄片决定,热敏电阻薄片噪声包含热噪声和电流噪声,其中,热噪声由热敏电阻薄片阻值决定,电流噪声包括两个部分:第一部分为热敏电阻薄片自身产生的电流噪声;第二部分为热敏电阻薄片本体与其两端金电极薄膜连接界面处所产生的电流噪声。

$$S_B(f) = S_T(f) + S_S(f) \quad (1)$$

从红外探测器噪声频谱来看,噪声主要为低频噪声,噪声的功率谱密度与频率成反比,即 $1/f$ 噪声。已有的研究证明,在表面或界面等处的局域电子态,通过对载流子的俘获-发射等随机过程,引起载流子的数目或迁移的涨落形成 $1/f$ 噪声^[7]。

对于噪声性能稳定的热敏电阻薄片体,在一定温

度下符合薄膜电阻器噪声特性规律,热敏电阻薄片体噪声电压功率谱密度近似符合以下经验公式(2)^[9]:

$$S_T(f) = S_j(f) + S_i(f) = 4kTR + K_1 \cdot R \cdot \frac{U^2}{f} \quad (2)$$

式中: S_j 为热敏电阻薄片体热噪声功率谱密度分量, V^2/Hz ,与频率无关; $S_i(f)$ 为热敏电阻薄片体电流流过时 $1/f$ 噪声功率谱密度分量, V^2/Hz ; K_1 与热敏电阻体的致密度、裂纹等微观结构相关, $1/\Omega$; U 为施加在热敏电阻薄片两端的偏置工作电压; R 为热敏电阻薄片阻值(室温下阻值约 250 k Ω); k 为波耳兹曼常数; f 为频率,Hz; T 为热力学温度。

热敏电阻薄片体-金电极界面噪声功率谱密度数值关系符合如下经验公式(3):

$$S_s(f) = K_2 \cdot \frac{(J)^\alpha}{f^\mu} = \frac{K_2}{(RA)^\alpha} \cdot \frac{(U)^\alpha}{f^\mu} \quad (3)$$

式中: K_2 为对界面噪声的影响幅度,与界面区的缺陷程度相关; J 为流过薄片体-金电极界面接触界面区的电流密度,近似为 $UI/(R \cdot A)$, A 为界面区有效接触面积, R 为热敏电阻薄片阻值; α 为热敏电阻薄片体-金电极界面对 $1/f$ 噪声的影响因子; μ 为 $1/f$ 噪声因子,与界面区的缺陷程度、流过界面区的电流密度大小相关。

根据公式(1)~(3),红外探测器噪声电压功率谱密度与所施加的偏置电压符合如下经验公式关系为^[9-10]:

$$S_B(f) = S_T(f) + S_s(f) =$$

$$\left(4kTR + K_1 \cdot R \cdot \frac{U^2}{f} \right) + \frac{K_2}{(RA)^\alpha} \cdot \frac{(U)^\alpha}{f^\mu} \quad (4)$$

由上可知,红外探测器本身薄片阻值不同将产生不同的热噪声,为此,采用归一化的噪声参量“噪声系数”,即在选定的频段内探测器加偏压总噪声与热噪声的比值。目前,红外探测器筛选过程中是选取固定偏置工作电压(由不同种类探测器工作电压确定)下噪声系数 NF 作为主要的技术指标,只是反映了某个固定偏置工作电压下红外探测器噪声水平,不能全面反映噪声性能。

对于薄片内引极界面区接触良好的红外探测器,随着偏置电压的增加,噪声系数 NF 应呈现近似线性递增的规律,递增的斜率与热敏电阻体微观结构相关;对于薄片内引极界面区存在接触缺陷的红外探测器,随着偏置电压的增加、流过界面区的电流密度增加,可能会出现噪声系数 NF 近似线性递增但递增斜率较大,或者呈现非线性递增趋势。因此需要增加不同偏压下的噪声测试。

2 测试系统设计

文中建立的测试系统是由适配器、放大电路、数据采集卡和噪声测试软件组成噪声测试系统,此系统主要目的是实现不同偏置电压下噪声信号时域与频域的采集与分析,测量系统结构如图 3 所示。

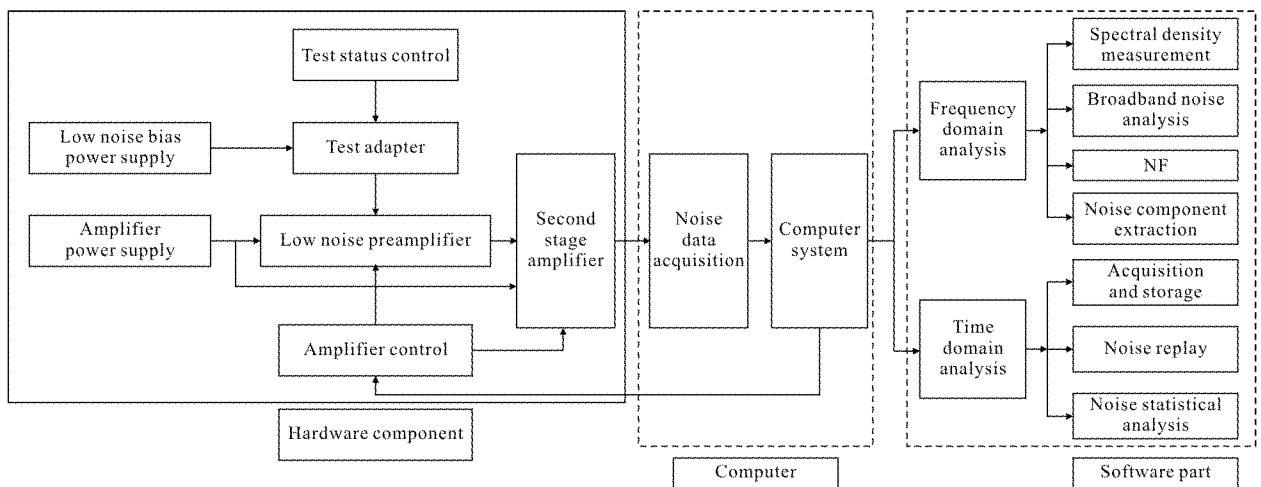


图 3 系统原理框图

Fig.3 Schematic diagram of the system

2.1 适配器

被测器件适配器为待测热敏电阻红外探测器提

供测试接口,并提供偏置激励,激发出探测器的低频噪声,实现多个热敏电阻红外探测器噪声同时测量。

具体的适配器结构图如图 4 所示。

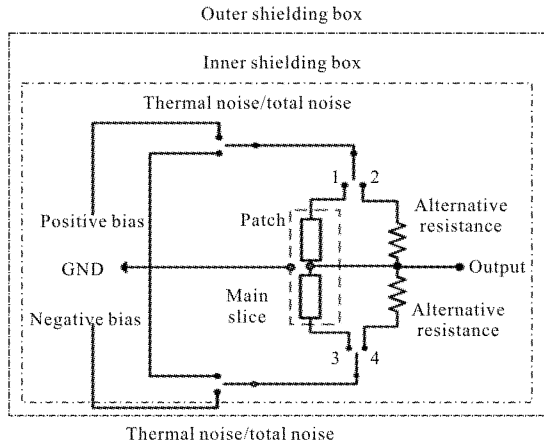


图 4 适配器结构框图

Fig.4 Structure diagram of adapter

为避免外界温度变化、电磁干扰、振动干扰对器件噪声性能的影响，特为适配器制作了多层屏蔽外壳。偏置电源不能为探测器带来更多的噪声，要选用自身噪声低的电池，又考虑到设备使用过程中不需更换、操作方便，最终选用了极低噪声的镍氢电池作为偏置电源，为待测探测器供电。

通过开关控制，可将正负电源输入端接地、主片或补片被替代电阻代替，以实现热噪声、补片噪声、主片噪声、总噪声的测试功能。其中，替代电阻为 250 kΩ 极高精度线绕电阻；热噪声为探测器两输入端接地状态下信号输出端输出的噪声信号；主片（补片）噪声为通电状态下，补片（主片）被替代电阻代替后，探测器输出端输出的噪声信号；总噪声为不同偏压下，如图 2 所示电气连接情况下，探测器输出的噪声信号。

2.2 放大电路

文中系统放大电路采用低噪声前置放大器模块和主放大器相结合的方式，其中低噪声前置放大电

路是实现本系统测试精度和灵敏度的关键部件，为保证高输入阻抗、低噪声引入、多通道集成等技术指标要求，选用超低噪声运算放大器 AD743 为前放核心器件，放大倍数 500 倍，5~100 Hz 内等效输入噪声电压小于 0.3 μV。考虑到测试的便捷和准确性，外部主放大器选用 Stanford 公司的 SIM910 JFET 型低噪声放大器。可实现放大倍数的程序控制，并将输出信号供后端采集。

2.3 噪声采集分析系统

噪声采集分析系统硬件采用 NI 公司 16 通道 16 bit 数据采集卡，满足系统使用要求。软件部分包含噪声频域分析和时域分析两大功能模块，可以准确测试红外探测器噪声时域信号和频域信号，提取范围内带频噪声、点频噪声、爆裂噪声的幅度、特征频率等信息，也可以切换不同偏置电压，进行不同偏压下噪声的测试分析^[10-11]。

3 测试结果与分析

3.1 测试系统的验证

测试系统的验证包括两个方面：(1) 本底噪声，即对 1、10、30、100 Hz 频率时的本底噪声进行测试，如表 1 所示；(2) 测试精度，即对频域不确定度和幅度不确定度的测试，如表 2 所示。

表 1 本底噪声测试结果

Tab.1 Test result of local noise

	Test value/nV			
	1 Hz	10 Hz	30 Hz	100 Hz
Measured results	61.7	18.0	13.3	5.1
Maximum required value	100 nV/ √Hz	30 nV/ √Hz	20 nV/ √Hz	15 nV/ √Hz

表 2 系统测试精度测试结果

Tab.2 Test result of system test precision

Frequency	Measured results of the frequency precision			
	Test value of this system/Hz	Test value of 35 670 A/Hz	Uncertainty	Maximum required value
10 Hz	10	10.0	0	
100 Hz	100	100.1	0.1%	±2%
1 kHz	1 000	1 001.3	0.13%	

续表 2
Continued Tab.2

Gain	Measured results of the gain precision			
	Test value of this system/mV	Test value of 35 670 A/mV	Uncertainty	Maximum required value
1 000	989.9	1 000.3	1.03%	±5%
10 000	9 815.7	9 999.5	1.84%	

由表 1、表 2 测试结果可见：文中所建立的测试系统本底噪声与测试精度均满足使用要求。

3.2 不同偏压下噪声的测试

不施加偏置工作电压 ($U=0\text{ V}$)，即无电流流过热敏电阻薄片时，红外探测器表现出薄片热噪声 (公式(4)中 4 kTR 项)，噪声电压功率谱密度为白噪声 (噪声幅值与频率无关)，如图 5 所示。

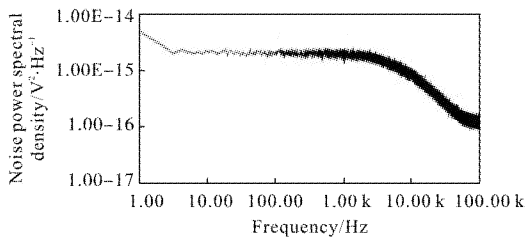


图 5 红外探测器不施加偏压时热噪声电压功率谱密度
Fig.5 Noise power spectral density of the infrared detector by 0 V bias voltage

施加偏置工作电压 ($U \neq 0\text{ V}$ ，如 9、13、17、21、26 V)，即有电流流过热敏电阻薄片时，红外探测器表现为典型 $1/f$ 噪声特征 (受公式(4)中三项影响)，噪声电压功率谱密度随频率的降低而增大，如图 6 所示。

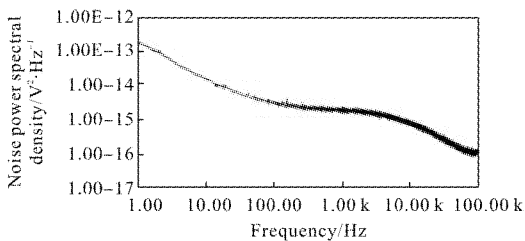


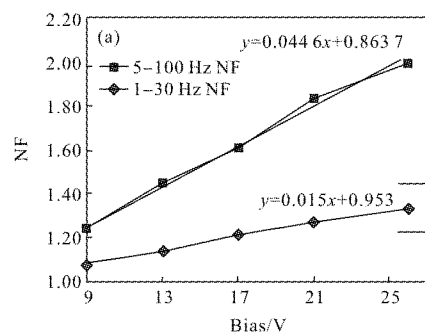
图 6 红外探测器施加偏压时总噪声电压功率谱密度
Fig.6 Noise power spectral density of the infrared detector by applied bias voltage

为了更好地分析不同偏压下噪声的变化规律，文中测试了不同偏置电压下的噪声谱密度曲线，如图 6 所示。

选取多批次器件进行不同偏压下 (9、13、17、21、26 V) 噪声的测试，并选取 5~100 Hz 和 1~30 Hz 两个频段计算噪声系数。绝大多数探测器的噪声系数随偏压线性递增，且递增斜率较小；也有个别噪声合格的探测器噪声系数随偏压呈非线性递增趋势。

3.3 测试结果讨论

$1/f$ 噪声为平稳遍历型随机信号，由公式(4)可知，它的大小应与偏置电压成正比，符合线性变化规律。图 7(a)为大多数被测器件的测试结果，符合公式(4)的 $1/f$ 噪声规律，即平稳遍历特征，也反应了红外探测器的性能参数长时间稳定性良好；同时该测试结果也表明：1~30 Hz 频段的噪声系数要比 5~100 Hz 的噪声系数更好地反映探测器的噪声与偏压关系，这也在图 7(b)、(c)进一步得到了验证。图 7(b)、(c)的测试反应了探测器性能参数长时间稳定性差的两种噪声偏压变化非线性规律，其中，图 7(c)表明：9~17 V 噪声系数与 21~25 V 噪声系数呈现两个斜率不同的变化趋势，且在 17~25 V 区间内出现突变，反应了随着偏置电压的增加，探测器噪声从热敏电阻薄片基础上，叠加了电阻薄片与金电极界面的噪声，后者急剧增大了探测器噪声系数，但图 7(b)比图 7(c)的变化更加剧烈，在 25 V 内仍然急剧增大，表明图 7(b)被测探测器比图 7(c)被测探测器性能更差。



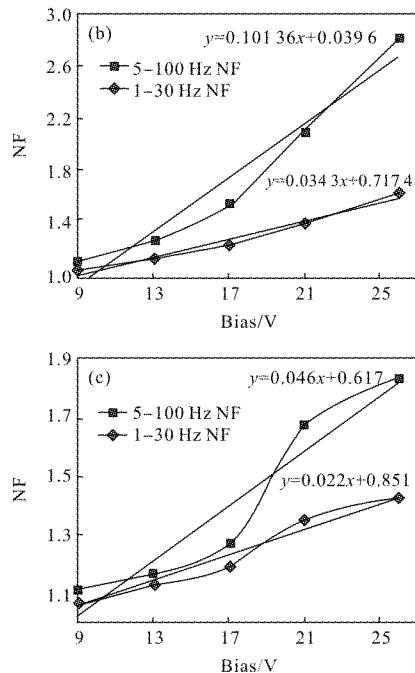


图7 典型器件(a)非典型器件(b)、(c)的噪声系数随偏置电压变化趋势

Fig.7 Variation of the NF with the bias voltage of typical detector (a), atypical detector (b) and (c)

$1/f$ 噪声是电子器件中普遍存在的低频涨落,因此非平稳遍历特征的噪声偏压变化规律,也反映了器件特性的不稳定性,因此,在航天等型号设备中应用时,需要通过严格的噪声测试与筛选剔除,因为其内部界面区存在的接触缺陷导致了随着偏置电压的增加,流过界面区的电流密度增加, $1/f$ 噪声分量电压谱密度斜率相对较大,甚至出现非线性特性。

4 结论

针对负温度系数锰、钴、镍氧化物热敏电阻型红外探测器,在详细讨论其噪声机理基础上,提出其不同偏压下噪声的测试方法,并设计了对应的测试系统。该系统可以准确测试红外探测器噪声时域信号和频域信号,提取范围内带频噪声、点频噪声、爆裂噪声的幅度、特征频率等信息,也可以切换不同偏置电压,进行不同偏压下噪声的测试分析。通过对本底噪声和频域、幅度不确定度的测试,表明设计的测试系统精度和噪声都满足要求。

通过用该系统对一批器件进行不同偏压下噪声

测试,绝大多数探测器的噪声系数随偏压线性递增,且递增斜率较小,与 $1/f$ 噪声理论相符;少数器件出现呈线性递增但斜率相对较大或出现非线性递增情况,存在使用隐患,可以利用该测试方法进一步剔除存在疑点的探测器。文中结果将为热敏电阻型红外探测器不同偏压下噪声筛选提供实验平台,并为进一步分析和研究不同偏压下噪声变化机理的研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] Yu Fei, Ren Xifeng, Li Sujun. Analysis of noise for infrared focal plane array in low temperature background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0304003. (in Chinese)
余菲, 任栖峰, 李素钧. 低温背景下红外焦平面阵列的噪声分析 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(3): 0304003.
- [2] Gao Y Q, Huang Z M, Hou Y, et al. Structural and electrical properties of $Mn_{1.56}Co_{0.96}Ni_{0.48}O_4$ NTC thermistor films [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2016, 185(7): 74-78.
- [3] Karanth S, Sumesh M A, Shobha V, et al. Infrared detectors based on thin film thermistor of ternary Mn-Co-Ni-O on micro-machined thermal isolation structure [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009(153): 69-75.
- [4] Huang Meng. A low frequency noise test system for thermistor infrared detectors [J]. *Computer Measurement & Control*, 2016(2): 318-320. (in Chinese)
黄萌. 一种热敏电阻红外探测器低频噪声测试系统 [J]. 计算机测量与控制, 2016(2): 318-320.
- [5] Ma Ning, Liu Sha, Li Jiangyong. Analysis on spatial noise and temporal noise of IR thermal imager [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(6): 717-721. (in Chinese)
马宁, 刘莎, 李江勇. 红外热像仪的空间噪声和时间噪声分析 [J]. 激光与红外, 2017, 47(6): 717-721.
- [6] Gino Giusi, Felice Crupi, Calogero Pace. A procedure for extracting $1/f$ noise from random telegraph signals [J]. *Transactions on Electron Device, IEEE*, 1989, 36(12): 1773-1782.
- [7] 技术标准出版社. 电阻器[M]. 北京:技术标准出版社,1981.
- [8] Zhuang Yiqi, Sun Qing. Noise as tool to characterize electron device reliability [J]. *Acta Eelectronica Sinica*, 1996, 24(2): 82-87. (in Chinese)
庄奕琪, 孙青. 电子器件可靠性的噪声表征方法 [J]. 电子

- 学报, 1996, 24(2): 82-87.
- [9] Wu Yong, Ma Zhongfa, Du Lei. Thin-film resistor reliability characterization based on low frequency noise [J]. *Electronic Science and Technology*, 2014(12): 100-104, 107. (in Chinese)
吴勇, 马中发, 杜磊. 基于低频噪声的薄膜电阻器可靠性表征方法[J]. 电子科技, 2014(12): 100-104, 107.
- [10] Chen Kunfeng, Wang Yongzhong, Ying Chengping. Research of the ultra-low-noise test system [J]. *Journal of Jiamusi University(Natural Science Edition)*, 2017, 35(5): 825-827. (in Chinese)
陈坤峰, 汪永忠, 应承平. 低噪声测试系统的研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2017, 35(5): 825-827.
- [11] Dai Yisong, Ding Hong, Zhang Xinfu. The measurement and analysis system of low frequency noise spectrum in the temperature range of 77-300 K [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1995, 16(3): 231-236. (in Chinese)
戴逸松, 丁宏, 张新发. 77~300 K 低频噪声谱测量及分析系统[J]. 仪器仪表学报, 1995, 16(3): 231-236.