

微弱信号检测的锁相放大电路仿真

朱艳生^{1,2}, 高勇³, 吕乙松^{1,2}, 袁世炯³

(1. 重庆移通学院 公共大数据安全技术重点实验室, 重庆, 401520; 2. 公共大数据安全技术重庆市重点实验室, 重庆, 401520; 3. 重庆移通学院 通信与信息工程学院, 重庆, 401520)

摘要: 在实际传感器检测领域中, 微弱信号通常被噪声信号所淹没, 为有效的获取微弱信号本身并将其放大测量, 设计了一种微弱信号检测的电路, 利用互相关原理将微弱信号提取, 同时去除噪声的干扰, 该微弱信号检测电路可在大量非相关噪声中检测出频率已知的确定信号, 经 Multisim 仿真表明, 系统在无噪声信号输入时, 完成了线性度较完好的, 且测试精度小于 4.2% 的微弱信号检测电路。

关键词: 微弱信号; 相敏检波; 锁相放大; 线性测试; 软件仿真

中图分类号: TN 98

文献标志码: A

文章编号: 1672-6146(2023)01-0020-06

Simulation of phase locked amplifier circuit for weak signal detection

Zhu Yansheng^{1,2}, Gao Yong³, Lv Yisong^{1,2}, Yuan Shitong³

(1. Key Laboratory of Public Big Data Security Technology, Chongqing College of Mobile Communication, Chongqing 401520, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Public Big Data Security Technology, Chongqing 401520, China; 3. College of Communication and Information Engineering, Chongqing College of Mobile Communication, Chongqing 401520, China)

Abstract: In the field of actual sensor detection, weak signals are usually submerged by noise signals. In order to effectively obtain weak signals themselves and amplify them for measurement, a weak signal detection circuit is designed. The weak signals are extracted by using the principle of cross-correlation, and noise interference is removed. The weak signal detection circuit can detect the determined signals with known frequencies in a large number of non-correlated noises. The Multisim simulation shows that when no noise signal is input, the system completes a weak signal detection circuit with good linearity and less than 4.2% test accuracy.

Key words: weak signal; phase sensitive detection; phase locked amplification; linear test; software simulation

在实际传感器检测领域中, 微弱信号通常被噪声信号所淹没^[1-2], 同时受微弱信号本身的大小变化和放大器噪声的影响, 测量系统的测量精度受到了限制^[3-4]。通常准确的测量微弱信号的方法是将微弱信号放大后测量。为此, 不同行业对微弱信号放大器电路展开了研究。宋思宇等^[5]设计的磁电传感信号放大器, 用于检测在噪声干扰中的微弱磁电信号, 将微弱的磁电信号从噪声中提取并放大, 从而实现对磁场的测量。喻尚等^[6]设计的基于跨步电压相敏微弱信号检测的电路, 用于地下线缆故障精确定位, 提高检测系统的信噪比, 精确检测出被噪声淹没的微弱有用信号。胡振德^[7]基于锁相放大原理设计的微弱荧光检测仪可实现微弱荧光信号的检测。

通信作者: 朱艳生, 762900048@qq.com。收稿日期: 2022-03-29

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究青年项目(KJQN202202401)。

检测微弱信号的方法大体可分为两种方法: 一是分析噪声产生的原因并隔离噪声源, 进而可对微弱信号加以测量; 二是研究被测信号的特点, 采用信号检测提取方法。通常是在隔离噪声源的基础上作信号检测提取处理。信号检测处理方法一般有: 窄带滤波法、同步累积法、双路消噪法以及相关检测法等^[8]。其中, 相关检测法是微弱信号检测最有效的方法之一^[9], 而锁相放大技术正是利用相关检测原理, 通过互相关方法使淹没在噪声中待测的微弱信号和相同频率的参考信号在相关器中实现互相关^[10], 将交流放大并转换成相应的直流信号, 供微处理器识别, 以此来检测出淹没在噪声中的微弱信号^[11-12]。

本文设计一种微弱信号检测的电路, 采用开关锁相放大原理^[13-15], 在大量非相关噪声中检测出有用的确定信号, 仿真电路中采用开关芯片 CD4066 作相敏检波, 最终设计出了较好线性度和较高测试精度的微弱信号检测电路。

1 微弱信号检测的原理

微弱信号通常被大幅值的噪声信号 $n_i(t)$ 淹没, 若已知淹没在噪声中确定信号 $y(t)$, 在接收端生成一个与确定信号频率相同的信号 $x_i(t)$ (也称为本地信号), 将其与混有噪声的输入信号 $y_i(t)$ 进行互相关^[16] (见图 1), 即可得到被测的确定信号, 除去了噪声的影响。

设输入信号: $y_i(t) = y(t) + n_i(t)$; 本地信号: $x_i(t)$, 则互相关函数为^[17]

$$R_{xy_i}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [y_i(t)x_i(t-\tau)]dt = R_{ym}(\tau) + R_{yn}(\tau), \quad (1)$$

$x_i(t)$ 与 $n_i(t)$ 互不相关, $R_{yn}(\tau)$ 为 0, 故除去了噪声的影响。

锁相放大技术利用上述互相关原理, 将微弱信号进行提取, 进而检测出所淹没的微弱信号。锁相放大器系统通常包含: 放大电路、相敏检波电路、低通滤波电路, 系统框图如图 2 所示。

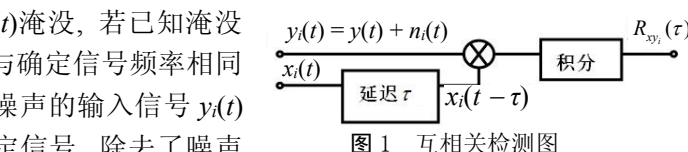


图 1 互相关检测图

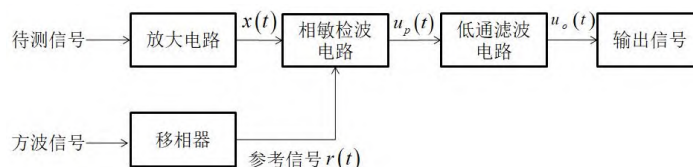


图 2 锁相放大器原理系统框图

输入信号为正弦波 $x(t)$, 参考信号可为同频率的方波信号 $r(t)$, 并将 $r(t)$ 展开成傅里叶级数的形式如式(3)。

$$x(t) = V_s \cos(\omega_0 t + \theta), \quad (2)$$

$$r(t) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos m\omega_0 t + \sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin m\omega_0 t, \quad m=0,1,2,\dots \quad (3)$$

式(2)、(3)中, V_s 为正弦信号的最大值, ω_0 为正弦信号的角频率, θ 为初相角。 a_0 、 a_m 、 b_m 为傅里叶系数, 因为方波信号为均值等于 0 的偶函数, 所以 $a_0 = 0$, $b_m = 0$ (此时 b_m 为奇函数),

$$a_m = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} r(t) \cos(m\omega_0 t) d(\omega_0 t) = \frac{4V_r}{m\pi} \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right). \quad (4)$$

当 m 为偶数时, $\sin(m\pi/2) = 0$; m 为奇数时, 令 $m = 2n-1$, $\sin(m\pi/2) = 1$ 或 -1 。于是 $a_m = \frac{4V_r}{\pi} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1}$,

$$n=1,2,3,\dots; \quad r(t) = \frac{4V_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos[(2n-1)\omega_0 t].$$

开关相敏检波后输出的信号

$$u_p(t) = x(t) \cdot r(t) = V_s \cos(\omega_0 t + \theta) \times \frac{4V_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos[(2n-1)\omega_0 t] = \frac{2V_s V_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos[(2n-2)\omega_0 t - \theta] + \frac{2V_s V_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos[2n\omega_0 t + \theta]. \quad (5)$$

将 $u_p(t)$ 经过低通滤波后, 除 $n = 1$ 的差频项保留外, 其余高频的和频与差频项均被滤除, 得到^[18]

$$u_o(t) = 2V_s V_r \cos \theta / \pi, \quad (6)$$

本相敏仿真采用开关相敏乘法器, V_r 为 1。

2 电路设计

微弱信号检测系统电路包括: 前置放大电路、带通滤波电路、放大倍数调节电路、方波移相电路、开关相敏检波电路和低通滤波电路, 电路设计框图如图 3 所示。

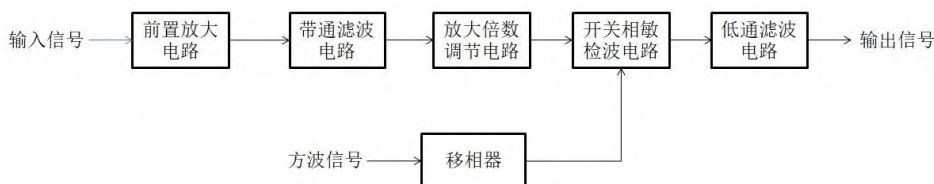


图 3 电路设计框图

2.1 前置放大电路

前级电路采用 INA128 电路作前置放大, 该芯片为低噪声、低功耗、高精度的通用仪表放大器, 具有低的偏置电压、低温漂(约 $0.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$)和高共模抑制等优点。电源电压供电范围为 $\pm 2.25 \sim \pm 18 \text{ V}$, 输入阻抗大于 $1 \text{ M}\Omega$ (足以获取微弱信号)。电路原理为: INA128 运算放大器同相端输入微弱信号, 反相端接 GND, 输出接带通滤波电路, 通过调节外部电阻 R_G 的大小就可调节放大器的放大倍数。当 R_G 取 500Ω 时, 放大倍数为 $G = 1 + 50000/R_G = 101$ 倍, INA128 放大电路如图 4 所示。

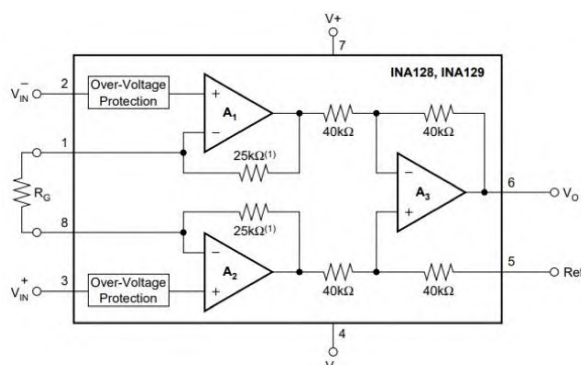


图 4 INA128 放大电路

2.2 带通滤波电路

传感器输出的信号中通常叠加各种频率噪声杂波信号, 带通滤波电路可初步将通带频率的信号从混有杂波的信号中分离出来, 为后续信号的相敏检波作输入信号。带通滤波电路为二阶低通滤波电路与二阶高通滤波电路级联而成。通过调节电容 C_{11} 和 C_{12} (在图中标识为 C_{11} 和 C_{12} , 下同)可以调节最高截止频率; 调节电阻 R_3 和 R_4 可以调节最低截止频率, 原理图如图 5 所示。

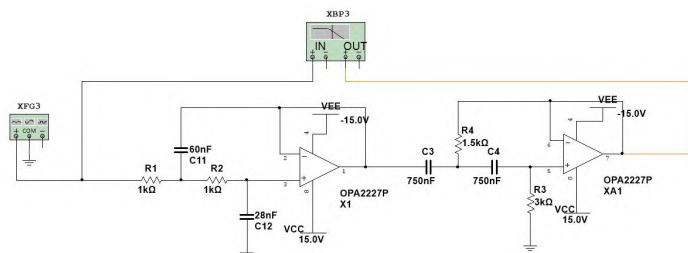


图 5 带通滤波器

用波特仪可以准确的测试出带通滤波电路的通带频率范围为 $100 \sim 1700 \text{ Hz}$, 在 1 kHz 处信号增益为约 0.019 dB , 即输入信号与输出信号大约相等。如图 6 所示。

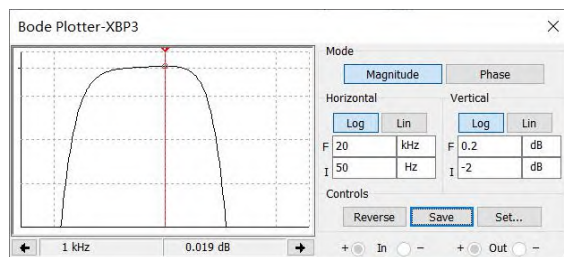


图 6 带通滤波器波特图

2.3 放大倍数调节电路

为保证系统最终输出电压能被常用微控制器 AD 转换接口识别, 即电压输出范围在 $0 \sim 3.3 \text{ V}$ 之间, 同时为减小测试误差, 设计采用 2 倍和 20 倍放大的测试档位, 例如, 测试幅值为 μV 级别的微弱信号, 可以采用 20 倍档放大; 测试幅值为 mV 级别的微弱信号, 可以采用 2 倍档放大, 以保证最终输出电压在几百 mV 至 3.3 V 内。待测原始微弱信号的幅值电压范围约为 $250 \mu\text{V} \sim 8.0 \text{ mV}$, 放大倍数调节电路如图

7所示(图中S1为放大倍数选择开关)。

2.4 方波移相电路

开关方波信号移相电路采用典型的运放移相电路,调节电位器 R_7 的阻值,可以实现方波相位 $0^\circ \sim 180^\circ$ 调整,电路设计中,要求 $(R_8/R_9)\omega CR \gg 1$ 才可以看到明显移相效果,参考信号可为同频率的方波信号 $r(t)$,电路图如图8所示。

2.5 开关相敏检波电路

开关相敏检波电路的设计,其所用模拟开关芯片和运放芯片的最高工作频率应该远大于输入信号的最大频率^[19]。模拟开关采用CD4066作开关芯片,该芯片是由正负电源供电,可控制双极性信号的通断,这点优于单电源供电的只能控制直流信号通断的模拟开关。CD4066开关芯片内部由4组双向独立模拟开关构成,原理图中仅采用了两组模拟开关,其中,信号输入端输入S1和S2(即反相后的S1),开关方波信号输入IN1和IN2(即反相后的IN1),原理图如图9所示。

2.6 低通滤波器(积分)电路

在相敏检波CD4066输出端设置低通滤波器电路,可将脉动直流转换为稳定直流信号,利用的是该积分电路的低通特性^[7, 20]。其通带的放大倍数 $-R_0/R_1=1$ 。根据 $f_0 = (2\pi R_0 C_7)^{-1}$,该电路中截止频率为约为1 Hz。输出 $u_o(t) = 2V_s V_r \cos \theta / \pi$,低通滤波(积分)电路如图10所示。

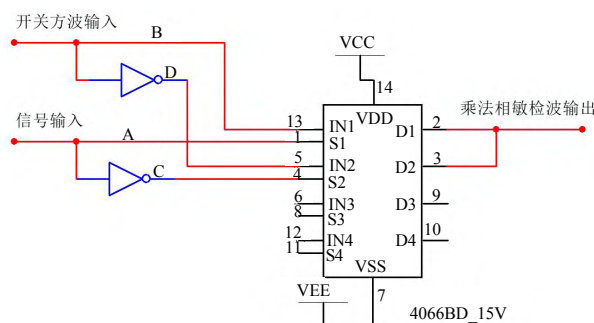


图9 开关相敏检波电路

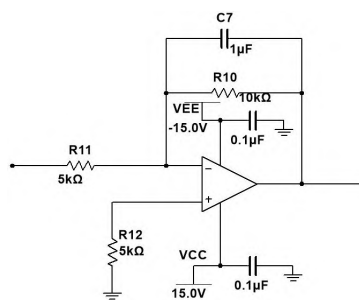


图10 低通滤波电路

3 仿真效果及结果分析

3.1 仿真效果

图9的A、B、C和D的4个测试点上的波形如图11所示,信号A与C相位相差 180° ,方波信号B与D相差 180° 。A与B同相,C与D同相,则式(6)中 $\theta=0$ 。图9中乘法相敏检波输出为脉动直流信号,如图12所示,再经低通滤波器(积分器)后,输出为直流电压信号,如图13所示。积分器的时间常数 $\tau=RC=0.1$ s,经过 $3 \sim 5\tau$ 后,直流电压输出趋于稳定, τ 越大,通频带宽度才会窄,抑制噪声能力强。电压范围在 $0 \sim 3.3$ V之间,可被微控制器直接测量。

3.2 结果分析

微弱信号检测的锁相放大电路整体的放大倍数包括:前置放大电路放大101倍,放大倍数调节电路放大2倍或20倍与低通滤波电路放大1倍,故整体电路放大倍数为202倍或2020倍可调放大。在无噪声叠加时,输入1 kHz正弦信号 V_{pp} 具体数据如表1所示,将参数带入式(6),令 $\theta=0$, $V_r=1$ 时,可

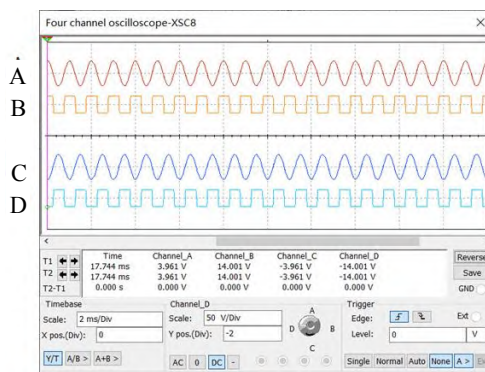


图11 相敏检波输入波形

算出 $u_o(t)$, 可得出低通输出信号理论值。

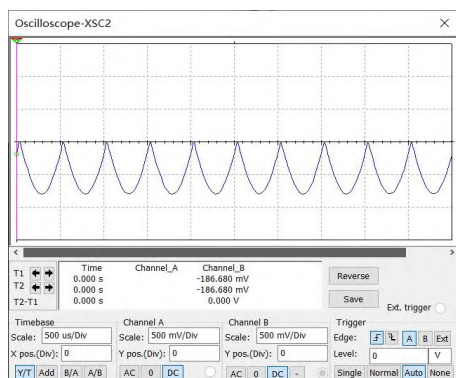


图 12 低通滤波输入与输出波形

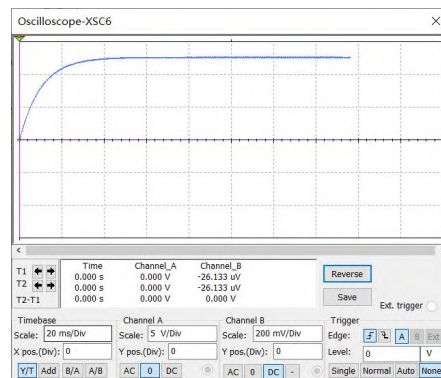


图 13 直流输出波形

输入信号 1~5 为峰峰值 V_{pp} 较小的信号, 采用 2 020 倍放大得到的数据供微处理器所识别; 信号 6~8 为峰峰值 V_{pp} 稍大的信号, 采用 202 倍放大得到的数据供微处理器所识别。仿真测试数据如表 1 所示。

表 1 1 kHz 微弱信号测试数据

信号	1 kHz 输入信号 $V_{pp}/\mu\text{V}$	相敏检波输入 A 或 C 点 V_{spp}/mV	系统输出 $u_o(t)$ 理论值/ mV	系统输出 $u_o(t)$ 实测/ mV	相对误差/%
1	248	499 (放大 2 020 倍)	158.9	152.2	4.2
2	495	998 (放大 2 020 倍)	317.8	316.1	0.5
3	989	1 992 (放大 2 020 倍)	634.4	631.9	0.4
4	1 978	3 995 (放大 2 020 倍)	1 273.1	1 243.1	2.3
5	3 948	7 991 (放大 2 020 倍)	2 544.6	2 455.0	3.5
6	7 916	1 599 (放大 202 倍)	509.6	490.1	3.8
7	15 834	3 198 (放大 202 倍)	1 015.9	991.7	2.3
8	31 637	63 924 (放大 202 倍)	2 035.2	1 973.2	3.0

为体现较好的曲线效果, 将放大 202 倍的数据再扩大 10 倍, 即得到线性度良好且测试误差较小的曲线图(见图 14)。由图 14 可知: 基于锁相放大理论得出的数据结果和微弱信号检测系统实际测试数据两者数据基本重合, 且均呈线性曲线, 理论计算结果和无噪声叠加的实测电压数据差异较小, 为后续微处理器实测电压数据提供了可靠的电路基础。

4 结论

本文设计了一种微弱信号检测的电路, 利用锁相放大原理, 设计开关相敏检波电路, 将微弱信号进行提取和放大同时提高了系统的信噪比, 在大量非相关噪声中检测出 1 kHz 确定信号, 从理论论证上和软件 Multisim 仿真上作出验证。仿真表明, 在无噪声叠加的情况下, 实现了线性度较好的, 且测试精度小于 4.2% 的微弱信号检测效果。该电路为后续微处理器实测电压数据提供了可靠的电路基础。

参考文献:

- [1] 李妙珍, 李舜酩. 强噪声下的微弱信号检测技术[J]. 电子技术与软件工程, 2020(4): 85-88.
- [2] 贺秋瑞, 张瑜. 基于混合系统的微弱信号检测方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(12): 3 141-3 142.
- [3] 李常青, 梅欣丽, 明奇. 微弱光信号检测电路的实现[J]. 应用光学, 2010, 31(5): 724-727.

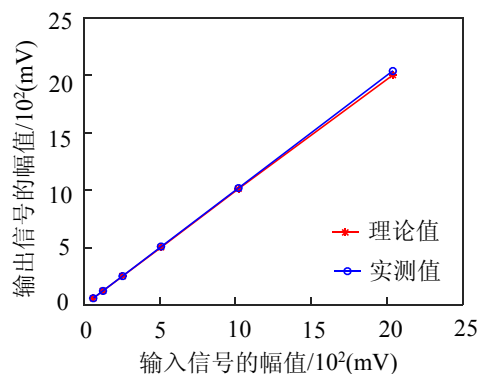


图 14 微弱信号检测电路测试曲线

- [4] 王江峰. 基于嵌入式的低频微弱信号检测系统研究[J]. 中国西部科技, 2015, 14(7): 42–44.
- [5] 宋思宇, 于向前, 余中辉, 等. 基于锁相放大原理的磁电传感信号放大器[J]. 仪表技术与传感器, 2021(12): 38–44.
- [6] 喻尚, 周凤星, 张智恒. 基于相敏检波的地下电缆故障精确定位系统[J]. 仪表技术与传感器, 2019(12): 56–60.
- [7] 胡振德, 管铁华, 谢建军, 等. 一种基于锁定放大的微弱荧光检测仪研制[J]. 无线通信技术, 2021(2): 50–55.
- [8] 孟浩玉, 王彦, 方挺, 等. 基于锁相放大原理的微弱光信号检测系统设计[J]. 光学与光电技术, 2014, 12(6): 88–91.
- [9] 王宁宁, 师奕兵, 李焱骏, 等. 一种微电阻率成像测井仪数字相敏检波新算法[J]. 测控技术, 2015, 34(7): 23–26.
- [10] 李健. 数字锁相放大器在微弱光电信号检测中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [11] Sikora A, Bednarz L. The implementation and the performance analysis of the multi-channel software-based lock-in amplifier for the stiffness mapping with atomic force microscope [J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences, 2012, 60(1): 83–88.
- [12] 邵文逸, 徐伟. 基于相敏检波的微弱信号检测系统设计[J]. 电子测试, 2020(11): 25–26.
- [13] 罗海军, 张晓华, 杨鹏. 基于电子开关式锁相放大器的微弱信号检测方法[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2016(6): 174–179.
- [14] 聂娅琴. 基于锁相放大器的微弱信号检测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [15] 李丹, 张学, 聪蔡静. 一种带移相功能的锁相放大电路设计及仿真[J]. 计量技术, 2020, 40(5): 22–24.
- [16] 郑远, 姚星星, 鲍德松, 等. 基于数字锁相放大器的电阻噪声特性研究[J]. 物理实验, 2021, 41(10): 11–18.
- [17] 麦麦提吐尔逊·努尔麦麦提. 锁相放大器的应用[J]. 佳木斯教育学院学报, 2012(10): 397–398.
- [18] 高晋占. 微弱信号检测: 第3版[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019: 191–203.
- [19] 胡仲秋. 一种相敏检波电路的研究与实验[J]. 内江师范学院学报, 2009, 24(2): 50–52.
- [20] 毕满清. 模拟电子技术基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 269.

(责任编辑: 张红)

(上接第7页)

- [3] Roitershtein A. A note on multitype branching processes with immigration in a random environment [J]. The Annals of Probability, 2007, 35(4): 1 573–1 592.
- [4] Bansave V. Cell contamination and branching processes in a random environment with immigration [J]. Advances in Applied Probability, 2009, 41(4): 1 059–1 081.
- [5] Liu J, Zhang M. Large deviation for supercritical branching processes with immigration [J]. Acta Mathematica Sinica, English Series, 2016, 32(8): 893–900.
- [6] Sun Q, Zhang M. Harmonic moments and large deviations for supercritical branching processes with immigration [J]. Frontiers of Mathematics in China, 2017, 12(5): 1 201–1 220.
- [7] Grama I, Liu QS, Miqueu E. Berry–Esseen’s bound and Cramer’s large deviation expansion for a supercritical branching process in a random environment [J]. Stochastic Processes and their Applications, 2017, 127(4): 1 255–1 281.
- [8] Wang Y J, Liu Z M, Li Y Q, et al. On the concept of subcriticality and criticality and a ratio theorem for a branching process in a random environment [J]. Statistics and Probability Letters, 2017: 97–103.
- [9] Gao Z. Exact convergence rate in the central limit theorem for a branching process in a random environment [J]. Statistics & Probability Letters, 2021: 109 194.
- [10] Zhang X, Hong W. Quenched convergence rates for a supercritical branching process in a random environment [J]. Statist Probab Lett, 2022: 109279.
- [11] Huang C, Wang C, Wang X. Moments and large deviations for supercritical branching processes with immigration in random environments [J]. Acta Math Sci Ser B (Engl Ed), 2022, 42(1): 49–72.
- [12] Durrett R. Probability: theory and examples[M]. Cambridge: Cambridge university press, 2019.

(责任编辑: 张红)