

文章编号 1004-924X(2008)09-1767-06

四极质谱检测中复合放大器的低噪声高带宽设计

吴保军¹, 江游¹, 高印寒², 方向³

(1. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 吉林大学 测试科学实验中心, 吉林 长春 130025; 3. 中国计量科学研究院, 北京 100013)

摘要: 四极质谱峰信号是 $10^{-11} \sim 10^{-6}$ A 级的微弱电流, 并且快速变化, 所以在大动态范围内实现放大器的低噪声和高带宽是设计关键。本文设计了一种开环增益可调整的同相输入复合跨阻抗放大器, 并分析了开环增益对信号和噪声的影响。在较低放大倍率时, 改变开环增益后放大器会降低自身产生的噪声, 实现低噪声; 在较高放大倍率时, 改变开环增益后放大器能扩展被极高阻值的反馈电阻和寄生电容降低的信号带宽。实验结果表明: 与反相输入复合放大器相比, 同相输入复合放大器在 $10^6 \sim 10^7$ V/A 放大时能降低 5%~30% 噪声, 在 10^8 V/A 放大时可扩展带宽 1.8 倍并提高 10%~15% 质谱峰强度。在 $10^6 \sim 10^8$ V/A 大动态范围内, 同相输入复合放大器可降低噪声和扩展带宽, 提高了四极质谱峰的信噪比、灵敏度和分辨率。

关键词: 四极质谱; 跨阻抗放大器; 低噪声; 高带宽

中图分类号: TH843 **文献标识码:** A

Low-noise and wide-band design of composite preamplifier in quadrupole mass spectrometer

WU Bao-jun¹, JIANG You¹, GAO Yin-han², FANG Xiang³

(1. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. Centre of Test Science, Jilin University, Changchun 130025, China;

3. National Institute of Metrology P.R. China, Beijing 100013, China)

Abstract: To measure the ultra low current in a quadrupole mass spectrometer (QMS) by a preamplifier, low noise and wide bandwidth is the key to this system for its current is from 10^{-11} A to 10^{-6} A and varies quickly. So a Non-inverting Input Composite Preamplifier (NIICP) is designed, and the effect of the open-loop gain on optimizings the frequency responses of signal and noise is analyzed. NIICP can optimize the open-loop gain to reduce intrinsic noise in the lower magnification and to recover high frequency signal damped down by the low pass transfer function of large feedback resistance and parasitic capacitance in the higher magnification. Compared with Inverting Input Composite Preamplifier (IICP) in the commercial QMS, the NIICP can reduce noise by 5%~30% in the $10^6 \sim 10^7$ V/A magnification, and can expand signal bandwidth by 1.8 times and increase MS peak amplitude by 10%

收稿日期: 2007-12-28; 修订日期: 2008-02-24.

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目 (No. 2004BA210A04)

~15% in the 10^8 V/A magnification. Experimental results show that the wide-band low-noise NIICP improves the signal-to-noise ratio of MS peak in large dynamic range of $10^6 \sim 10^8$ V/A.

Key words: quadrupole mass spectrometer; composite preamplifier; low noise; wide bandwidth

1 引言

四极(四极杆和四极离子阱)质谱中不同分析方式有 $10^{-11} \sim 10^{-6}$ A 不同数量级的谱峰电流,且快速变化,必须在大动态范围内用具有低噪声和高带宽的跨阻抗放大器放大后,才能采集到信号^[1]。跨阻抗放大有单级放大、级联放大和复合放大等方法,但单级放大直流输出的温度漂移较高^[2],级联放大的噪声较大^[3]。复合放大结合了 FET 型放大器的低噪声和电流放大器的强驱动能力等优点^[4],商业四极质谱仪器通常采用反相输入复合放大。在检测较高的谱峰电流时采用低放大倍率,反相输入放大器不能抑制自身产生的噪声,降低了信噪比;在检测较低的谱峰电流时采用高放大倍率,但高阻值的反馈电阻和寄生电容会降低该放大器带宽^[5],降低了灵敏度和分辨率。

本文设计一种开环增益可调整的同相输入复合放大器。在较低放大倍率时,改变开环增益后电路能降低自身的噪声;在较高放大倍率时,改变开环增益后电路能扩展信号带宽。在大动态范围内,放大器能降低噪声并提高带宽,提高质谱峰的信噪比。

2 复合放大器的低噪声和高带宽设计

从运算放大器的实际等效模型^[6]出发,分析推导同相输入复合放大器的信号与噪声的频率特性,计算出内部噪声的有效值。在低于 10^7 V/A 放大时,减小开环增益后放大器会降低对噪声有重要影响的电压噪声,在滤除噪声的同时不影响信号带宽。在高于 10^7 V/A 放大时,利用开环增益产生的尖峰增益,放大器能提高被极高阻值的反馈电阻和寄生电容降低的信号增益,从而扩展信号带宽。

2.1 信号与噪声的频率特性

复合放大器的输出电压为 $V_o = R_f(I_{in} - I_B) + V_{os}$,式中 I_B 为偏置电流, V_{os} 为输入失调电压。

通常选择 I_B 和 V_{os} 都较低的 FET 型放大器作复合放大器的前级,可降低输出直流误差。因为 FET 型放大器的 I_B 会随着温度增加呈指数规律增加,FET 型放大器不直接驱动负载,抑制了器件温度变化引起的输出直流漂移。

噪声分为外部噪声和内部噪声两种。外部噪声通常在亚 pA 到几百 pA 范围内,通常采取屏蔽、退耦和低噪声电源等措施抑制,但不能被消除。复合放大器有多种内部噪声源,包括放大器的电压噪声 e_n 和电流噪声 i_n 、反馈电阻热噪声 i_R 等^[7]。其中 e_n 和 i_n 由白噪声和粉红噪声混合而成,与频率有关; i_R 为白噪声,与频率无关,表达式为 $i_R = (4kT/R_f)^{0.5}$ 。式中: $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K,为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度,室温时 $T = 290$ K。

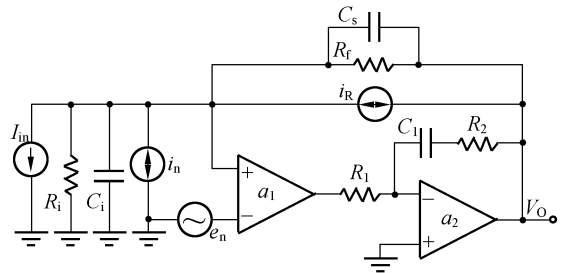


图 1 同相输入复合跨阻抗放大器的噪声模型

Fig. 1 Noise model of the NIICP

图 1 为同相输入复合跨阻抗放大器的噪声模型,其中 R_i 和 C_i 代表电子倍增器和前级放大器的复合电阻、复合电容, C_s 代表反馈电阻 R_f 的补偿电容。信号增益 $A_s = V_o/I_{in}$ 的稳定性非常重要,为了避免临界振荡,通常选择较小电容 C_s 加在反馈电阻 R_f 上达到合适的相位裕度。计算出复合放大器的信号增益 A_s 为:

$$A_s = -R_f \frac{1}{sR_f C_s + 1} \cdot \frac{1}{1 + 1/\alpha_c \beta} = -R_f \frac{1}{(1 + jf/f_p)(1 + jf/f_c)}, \quad (1)$$

式中,开环增益为:

$$\alpha_c = a_1(sR_2 C_1 + 1)/sR_1 C_1, \quad (2)$$

信号带宽为:

$$f_p = 1/(2\pi R_f C_s), \quad (3)$$

噪声带宽为:

$$f_c = f_x R_2 / R_1 = f_i R_2 / (R_1 A_{nh}), \quad (4)$$

反馈系数为 β , 其中 $1/\beta = 1 + (R_1 // 1/sC_i) / (R_f // 1/sC_s)$; 高频区的噪声增益为 $A_{nh} = 1 + C_i / C_s$ 。同样推导出复合放大器的噪声增益 A_n 为:

$$A_n = \frac{sR_f(C_s + C_i) + 1 + R_f/R_i}{sR_f C_s + 1} \cdot \frac{1}{1 + 1/\alpha_c \beta} = (1 + \frac{R_f}{R_i}) \frac{1 + jf/f_z}{(1 + jf/f_p)(1 + jf/f_c)}, \quad (5)$$

式中噪声增益的起始点为 $f_z = 1/(2\pi(R_f // R_i) \cdot (C_s + C_i))$ 。

反馈电阻热噪声 i_R 和电流噪声 i_n 都与信号增益 A_s 相乘为输出噪声。输出电流噪声为 $E_i = i_n A_s$, 前级用 FET 型放大器可忽略此噪声^[8]; 输出反馈电阻热噪声为 $E_R = i_R A_s$ 。电压噪声 e_n 与噪声增益 A_n 相乘为输出电压噪声 $E_n = e_n A_n$ 。由等效噪声带宽和典型噪声相切定理得, 电压噪声为 $E_n = i_R R_f (\pi f_c / 2)^{0.5} = (kT / C_s)^{0.5}$, 反馈电阻热噪声为 $E_R = e_n A_{nh} (\pi f_c / 2 - f_p)^{0.5}$ 。同相输入复合放大器内部噪声的输出有效值为:

$$E_{noise} = \sqrt{E_R^2 + E_n^2 + E_i^2} = \sqrt{e_n^2 (1 + C_i / C_s)^2 (\pi f_c / 2 - f_p) + kT / C_s}. \quad (6)$$

2.2 较低放大倍率时低噪声的设计

放大器在放大质谱峰微弱电流的同时, 自身会产生噪声, 降低内部噪声可实现低噪声放大。在内部噪声源中, 电压噪声 e_n 最复杂并且对内部噪声有重要的影响, 其中高频区的影响最大^[9]。分析式(5)可知电压噪声的频率特性, 减小开环增益 a_c 后, 复合放大器可以滤除电压噪声的高频部分, 极大地降低内部噪声。图 2 中阴影为被抑制的电压噪声高频部分。

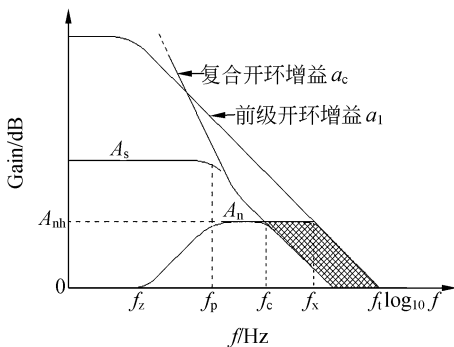


图 2 同相输入复合放大器的信号增益和噪声增益

Fig. 2 Frequency responses of signal and noise of NIICP

因为噪声带宽远远大于信号带宽, 通过减小开环增益 a_c , 同相输入复合放大器可降低噪声带宽却不影响信号带宽。由式(2)得出在高频区的开环增益为 $a_c = a_1 R_2 / R_1$, 调整 $R_2 < R_1$, 电压噪声带宽可从 f_x 降低到 f_c 。只要调整后的噪声带宽 f_c 大于信号带宽 f_p , 就不会影响信号带宽。如放大器带宽 f_p 超过质谱峰带宽, 可适当继续降低开环增益来降低 f_p 。

2.3 较高放大倍率时扩展带宽的设计

在高于 10^7 V/A 放大时, 极高阻值的反馈电阻和寄生电容组成一阶低通滤波器, 大大降低了信号带宽。由式(1)知, 开环增益 a_c 对信号带宽有一定作用。当信号带宽 f_p 和交叉频率点 f_c 临近时, 信号增益 A_s 的误差函数 $1/(1 + 1/a_c \beta)$ 在 f_c 处会出现尖峰增益。同相输入复合放大器可利用尖峰增益提高被寄生电容降低的信号增益, 来扩展信号带宽。

通过 Pspice 仿真验证扩展带宽, 选择 $R_f = 100$ M Ω 和寄生电容 $C_s = 85$ fF, 由式(3)计算出带宽为 20 kHz。选择噪声带宽 f_c 为两倍信号带宽 f_p , 由式(3)和式(4)计算 R_1 与 R_2 比值并调整 C_1 , 可扩展信号带宽。计算出 $R_1 / R_2 = 2.5$, 选择反馈参数 $R_1 = 2.5$ k Ω 、 $R_2 = 1$ k Ω 和 $C_1 = 10$ nF, 扩频后的信号带宽为 37 kHz, 信号带宽扩展了 1.8 倍。扩频带宽前后的仿真结果如图 3。

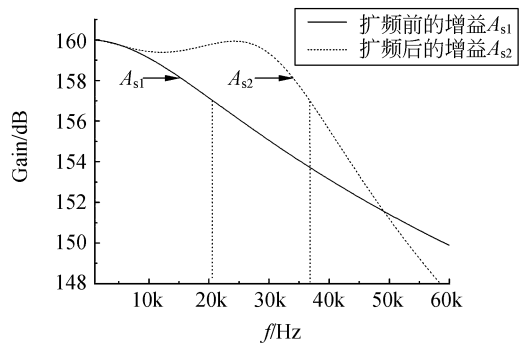


图 3 $R_f = 100$ M Ω , $C_s = 85$ fF 时, 同相输入复合放大器扩展带宽前后的仿真结果对比

Fig. 3 Comparison of simulation results before and after bandwidth expansions of the NIICP when $R_f = 100$ M Ω and $C_s = 85$ fF

3 性能测试和分析

复合放大器的前级为 FET 型放大器

OPA627,有超低偏置电流 5 pA 和超低电压噪声 $4.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (在 10 kHz 处); 后级为电流反馈型放大器 THS3061, 压摆率为 $7\,000 \text{ V}/\mu\text{s}$, 带宽为 300 MHz。放大后的信号由 16 bit, 195 kHz 采样率的 $\Sigma\Delta$ 型 ADC 器件 AD7722 采集。电路板为聚四氟乙烯材料加工, 采用接地良好的铝盒屏蔽外部噪声, 电磁兼容性良好^[10]。

在相同的条件下, 对比两种复合跨阻抗放大器: 商业四极质谱仪器 PolarisQ 采用的反相输入复合放大器和本文设计的同相输入复合放大器。

3.1 较低放大倍率时低噪声的测试

测试 $10^6 \sim 10^7 \text{ V/A}$ 放大时复合放大器的噪声, 选择反馈放大电阻 R_f 为 1、2、5 和 10 M Ω , 附加电容 C_s 为 250、500、1、1.5、2 和 3 pF 等。选择同相输入复合放大器反馈参数为 $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$ 、 $R_2 = 1.5 \text{ k}\Omega$ 和 $C_1 = 1 \text{ nF}$ 。

采用正弦拟合法测试噪声的有效值。输入微弱正弦电流信号, 经被测系统放大采集, 数据上传到 PC 计算出信噪比 (SNR)。因已知信号幅度, 由式 (7) 可计算出噪声有效值。

$$\text{SNR} = 20 \lg(\text{signal}_{\text{RMS}}/\text{noise}_{\text{RMS}}) \quad (7)$$

对比测试上述两种电路, 当反馈电阻 R_f 相同时, 随着电容 C_s 增加噪声会降低。同相输入复合放大器在 $R_f = 1 \text{ M}\Omega$ 时降低 5%~10% 噪声; 在 $R_f = 2 \text{ M}\Omega$ 时降低 10%~15% 噪声; 在 $R_f = 5 \text{ M}\Omega$ 时降低 15%~25% 噪声; 在 $R_f = 10 \text{ M}\Omega$ 时降低 20%~30% 噪声, 如图 4。

分析测试结果, 噪声测试值远远大于内部噪声理论值, 是式 (6) 计算出的内部噪声理论值的 3.4~5 倍。因为噪声测试值包含了放大器的内部噪声、外部噪声和 ADC 采集的量化噪声等多种噪声, 其中仅仅 ADC 量化噪声的测试值就有 $157 \mu\text{V}$ 。

随着反馈电阻 R_f 增加, 同相输入复合放大器能降低更多的噪声。 $\Sigma\Delta$ 型 ADC 内含的数字低通 FIR 滤波器能滤除 100 kHz 以上噪声。反馈电阻 R_f 较小时, 噪声带宽的起始点 f_p 通常 $> 50 \text{ kHz}$, 经滤波后电压噪声带宽被大大降低或消除。反馈电阻 R_f 较大时, 噪声带宽的起始点 f_p 通常 $< 50 \text{ kHz}$, 经滤波后仍保持较大的电压噪声带宽。同相输入复合放大器主要滤除对噪声有重要

影响的电压噪声。当反馈电阻 R_f 增加时, 电压噪声的带宽越大, 对噪声的影响也越大, 同相输入复合放大器越能有效滤除噪声。

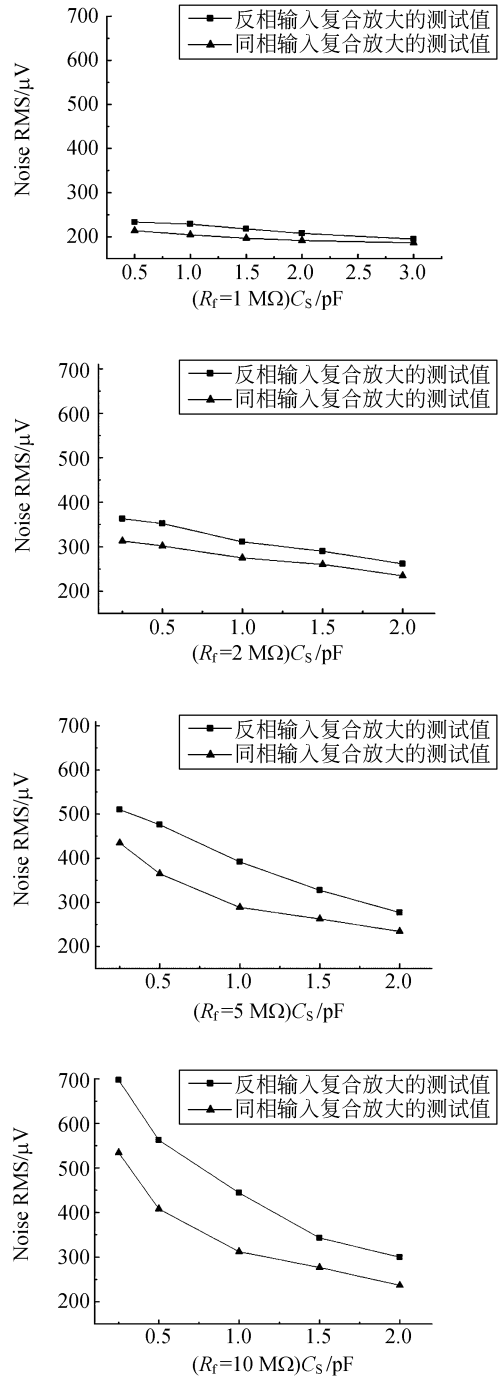
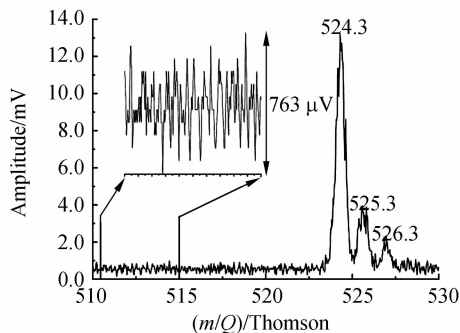


图 4 $R_f = 1, 2, 5, 10 \text{ M}\Omega$ 时, 反相输入复合放大器和同相输入复合放大器的噪声有效值

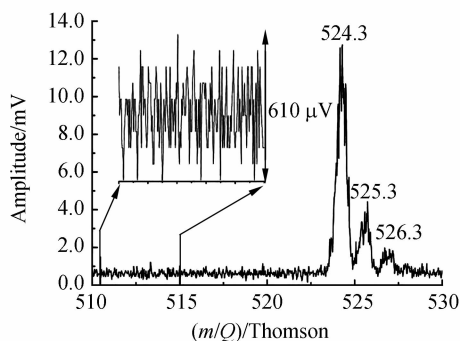
Fig. 4 RMS noise test results of IICP and NIICP when $R_f = 1, 2, 5$ and $10 \text{ M}\Omega$

用这两种放大器在中国计量科学研究院研制的 ESI-RIT(电喷雾源-矩形离子阱)型 Mspec-LC-T 质谱仪上检测 MRFA 样品。在 $R_f = 10\text{ M}\Omega$ 和 $C_s = 0.5\text{ pF}$ 时,同相输入放大器降低了 20% 噪声峰峰值,如图 5。



(a) 反相输入复合放大器检测 MRFA 样品的质谱峰

(a) MRFA's MS obtained with the NIICP



(b) 同相输入复合放大器检测 MRFA 样品的质谱峰

(b) MRFA's MS obtained with the NIICP

图 5 当 $R_f = 10\text{ M}\Omega$ 、 $C_s = 0.5\text{ pF}$ 时 Mspec-LC-T 检测的质谱峰

Fig. 5 MS obtained by a Mspec-LC-T when $R_f = 10\text{ M}\Omega$ 、 $C_s = 0.5\text{ pF}$

3.2 更高倍率下扩展带宽测试

频率响应反映了复合放大器对不同频率输入正弦电流的输出响应。测试高于 10^7 V/A 放大时的扩展带宽,选择 $R_f = 100\text{ M}\Omega$ 无附加电容。测试反相输入复合放大器的信号带宽为 20 kHz,通过式(3)计算出反馈电阻 R_f 上的寄生电容为 85 fF。反馈参数已在仿真中给出,扩展信号带宽到 37 kHz,带宽扩展了 1.8 倍。扩频前后的信号增益测试如图 6,与仿真相符。

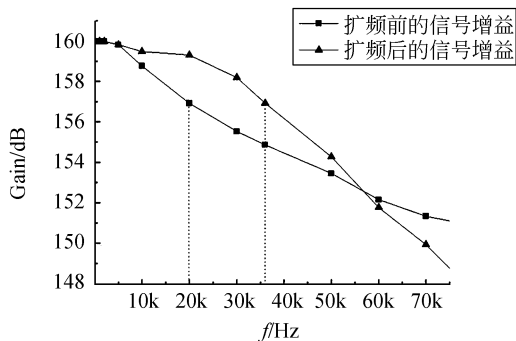


图 6 $R_f = 100\text{ M}\Omega$ 时同相输入复合放大器的扩展带宽测试

Fig. 6 Test results of bandwidth expansion of NI-ICP when $R_f = 100\text{ M}\Omega$

对比测试上述两种电路,在 Mspec-LC-T 质谱仪上检测 MRFA 样品。扩频后的同相输入复合放大器采集的质谱峰高为 524.3、525.3、526.3,平均质谱峰高分别有 15%、14% 和 10% 的提高。更高放大倍率下的信号带宽扩展,能恢复质谱峰的高频成分,提高质谱峰的信号幅度,从而提高信噪比。

4 结 论

设计了一种开环增益可调整的同相输入复合跨阻放大器,分析了开环增益对信号与噪声的频率特性影响。在低于 10^7 V/A 放大时,减小开环增益后放大器会降低对内部噪声有重要影响的电压噪声,在不影响信号带宽的同时降低噪声。在高于 10^7 V/A 放大时,利用开环增益产生的尖峰增益,放大器可提高被极高阻值的反馈电阻和寄生电容降低的信号增益,从而扩展信号带宽。实验结果表明:与反相输入复合放大器相比,同相输入复合放大器在 $10^6 \sim 10^7\text{ V/A}$ 放大正弦电流时降低 5%~30% 噪声,在四极质谱仪器上 10^7 V/A 放大时降低 20% 噪声;在较高的 10^8 V/A 放大时,扩展信号带宽 1.8 倍并提高 10%~15% 质谱峰幅度。同相输入复合放大器在 $10^6 \sim 10^8\text{ V/A}$ 大动态范围内实现了降低噪声和提高带宽,提高了四极质谱峰的信噪比。

参考文献:

- [1] PATTERSON G E, GUYMON A J, RITER L S, *et al.*. Miniature cylindrical ion trap mass spectrometer[J]. *Analytical Chemistry*, 2002, 74(24): 6145-6153.
- [2] FRANCO S. *Design With Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits*[M]. 3rd ed. San Francisco: McGraw-Hill, 2001: 310-353.
- [3] KIM D J, KOO J Y. A low-noise and wide-band ac boosting current-to-voltage amplifier for scanning tunneling microscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(2): 023703-1-4.
- [4] KALTHOFF T, WANG T, STITT R M. Classical op amp or current-feedback op amp? This composite op amp gives you the best of both worlds [Z]. *Burr-Brown Application Bulletin*, 1991.
- [5] ACHARYA Y B. Current conveyor based electrometer [J]. *AEU- International Journal of Electronics and Communications*, 2005, 59(7): 413-416.
- [6] HIGA H, IWAKI J, NAKAMURA I. A basic study on noise source modeling for a very low-level DC current amplifier [J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2005, E88-A (6):1401-1407.
- [7] 付有余. 激光测距与跟踪系统低噪声电子设计方法[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(3): 250-253.
FU Y Y. Low noise electronic design method for laser range finding and tracking system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 250-253. (in Chinese)
- [8] WRIGHT P, OZANYAN K B, CAREY S J, *et al.*. Design of high performance photodiode receives for optical tomography [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, 5(2): 281-288.
- [9] GRAEME J G. *Photodiode Amplifiers-Op Amp Solutions* [M]. New York: McGraw-Hill, 1995: 107-128.
- [10] 付有余. 高频、宽带放大器整机电磁兼容性设计[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(3): 79-84.
FU Y Y. The overall electromagnetic compatibility design of high frequency wideband amplifier [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(3): 79-84. (in Chinese)

作者简介:吴保军(1982—),男,博士研究生,研究方向为测试计量技术及仪器、微弱信号检测等。E-mail: wubaojun@gmail.com

高印寒(1951—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为先进制造技术及装备、测控技术及仪器等。E-mail: gaoyinhan@sohu.com

●下期预告

发动机连杆裂解槽激光加工机床的加减速控制

林宝君,杨慎华,郑祺峰,寇淑清

(吉林大学 锻研所,吉林 长春 130025)

提出了一种对激光机床的加减速进行预处理的方法,并将处理的结果与程序相结合,编制出新的NC加工程序。对激光切槽后得到的连杆进行了裂解,经过工具显微镜检测后表明,对于各种型号的连杆,切割出来的裂解槽在深度上基本保持一致(裂解槽上各个点的槽深度公差为 ± 0.02 mm),完全没有过切及残留。说明该方法的使用大大提高了该连杆裂解槽激光加工机床的稳定性及精度。