

用于 ADS 次临界反应堆 K_{eff} 测量 微电流放大器的设计

于 涛¹ 史永谦² 罗璋琳² 欧炳才¹ 秦 欢¹

1 (南华大学核科学技术学院 衡阳 421001)

2 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 设计了一种基于噪声分析方法,利用反应堆堆芯中子涨落特性测量加速器驱动洁净核能系统 (Accelerator driven system, ADS) 次临界反应堆动态参数的微电流放大器,并且根据需要设计了微电流源,运用 Protel 实时电路仿真工具对放大器进行仿真调试,使其达到设计要求。

关键词 噪声分析法,加速器驱动洁净核能系统 (ADS),次临界反应堆,微电流放大器

中图分类号 TL8, TN72

ADS (Accelerator driven system, 即加速器驱动的次临界系统) 是致力于嬗变放射性核废物、有效利用核资源及产出核能量的装置^[1], 已被列入“国家重点基础研究发展规划项目”(973 计划)。该系统包括中能强流质子加速器、外源中子产生器和次临界堆。

噪声分析法^[2,3]测量反应堆次临界的 K_{eff} , 就是把电离室输出的直流电流上的电流起伏分离出来, 再进行频谱分析, 由频谱与 K_{eff} 的关系实现对反应堆的在线监测和控制。研究表明, ADS 系统电离室出来的信号频率是 100 Hz 到 10 Hz 甚至更低, 且从次临界反应堆堆芯测量电离室出来的电流为 10^{-14} — 10^{-11} A 的微弱噪声信号。

在实验室条件下对 10^{-14} — 10^{-11} A 低频微弱噪声信号进行放大, 从设计与调试上有相当的困难, 所以我们使用现有的成熟电路设计软件 Protel 设计了用于微电流放大器的微电流源, 并利用其对微电流放大器的功能进行了仿真调试。

1 反应堆核噪声分析对微电流放大器的要求

堆噪声分析, 首先要将堆内中子信号转换为电信号, 然后再进行分析处理^[2,3]。通过探测器中产生的 (n, α) 或 (n, f) 等核反应, 由 α 粒子或裂变碎片电离探测器内的气体收集带电离子, 给出平均直流电流 (或电压), 在平均直流上分析其信号。

堆内中子噪声信号很微弱, 如果外来噪声信号进入测量系统, 将干扰被测量的噪声。因此注意屏蔽、防止电干扰是很重要的。有时为了提高测量系统的抗干扰能力, 要让信号先经过放大器放大, 再由长电缆 (50—100 m) 输送到记录系统。

整个信号采集分析系统 (包括探头、电缆、放大器和记录分析仪) 都有频率响应问题。对一座次临界实验反应堆进行核噪声分析时, 分析的频率范围由测量目的所决定。如对瞬发中子特性有兴趣, 就分析高频 如对缓发中子特性有兴趣就分析低频。整个核噪声分析的频率范围可由传递函数估计。以用铀-235 为燃料的轻水慢化零功率堆为例, 传递函数有 7 个时间常数, 1 个是瞬发中子, 6 个是缓发中子先行核衰变时间常数 $\lambda_j, j=1, 2, 3, 4, 5, 6$, 其中最小值 $\lambda_6 = 0.012 \text{ s}^{-1}$, 6 组的平均值 $\bar{\lambda} = 0.077 \text{ s}^{-1}$ 。设 $l = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 缓发临界时瞬发中子时间常数 $\alpha_0^{-1} = \Lambda/\beta$ (Λ : 中子代时间; β : 缓发中子份额), 则核噪声分析的频率范围 f_1 — f_2 可以估计出:

$$f_1 \geq \frac{\beta}{2\pi l} \cong 100 \text{ s}^{-1}, f_2 \leq \frac{\lambda_6}{2\pi} \cong 0.002 \text{ s}^{-1}$$
一般说, 整个

测量分析系统的频率响应特性应该在随机中子场中 (例如反应堆热中子场中) 或用强 γ 源进行模拟测定。核噪声分析所涉及的仅仅是低频问题, 仪器的频率响应特性要求容易满足。且根据 973 项目组 2003 年会讨论结果, ADS 系统电离室出来的信号频

国家重点基础研究项目的研究内容之一, 课题号 G1999022602

第一作者: 于 涛, 男, 1972 年出生, 2005 年于中国原子能科学研究院核能科学与工程专业获得博士学位, 副教授

收稿日期: 2004-12-17, 修回日期: 2005-05-09

率是 100 Hz 到 10 Hz 甚至更低。所以要对对 10^{-14} — 10^{-11} A 低频微弱噪声信号进行放大。

2 放大器电路设计

由于电离室里输出的是平均电流,是幅值信息,所以用电荷灵敏形式的放大电路,其典型接法^[4]如图 1 所示,改进后如图 2 所示。

理论上 R_f 越大,放大倍数越大,上升时间也由 R_f 、 C_f 决定。但如果 R_f 是高阻的话,将产生较大的对地的分布电容,这样将会影响电路的上升时间。有资料表明^[4]:在高灵敏度时常用 10^{12} Ω 高阻,这时 1 pf 的分布电容就可以造成 3 s 的上升时间。所以为了避免用高阻,又要确保较大的放大倍数和响应速度,要对电路进行改进。提高响应速度的方法是引入反馈。另外, T 型网络可使较小的反馈电阻获得较高的灵敏度^[5]。

同时,由于 R_f 的存在可消除放大器输入端电容对电路的影响。所以在设计中,前级放大采用这样的电路。这时的输入输出关系为(当放大倍数 A 与频率无关时):

$$V_o = -R_f \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \times I_i \quad (1)$$

本设计中, R_f 取 $10^7 \Omega$, R_1 取 1 k Ω , R_2 取 $10^6 \Omega$, 这样,前级放大倍数有 10^{10} 量级。再加上后级电路,即可对信号进行有效的放大。总的电路如图 3 所示。

本电路的前级放大芯片 LMC6001 和后级放大芯片 CA3140 之间采用电容 C_2 耦合, C_1 为隔直电容。通过 R_5 来调节 CA3140 部分的放大倍数, R_6 为调零电阻器, C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 、 C_7 、 C_8 、 C_9 、 C_{10} 均为滤波电容。总的传输关系为:

$$V_o \approx I \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \times R_f \times \frac{R_5}{R_3} \quad (2)$$

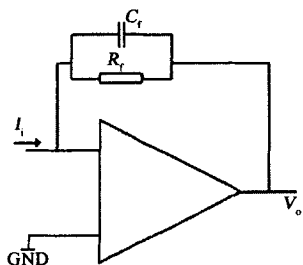


图 1 电流放大器典型电路

Fig. 1 A typical current amplifier

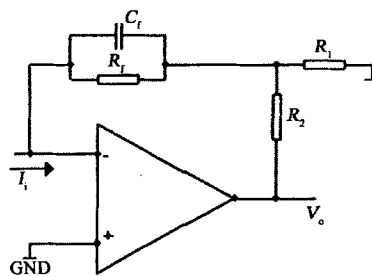


图 2 改进后的典型电路

Fig. 2 Reformed typical current amplifier

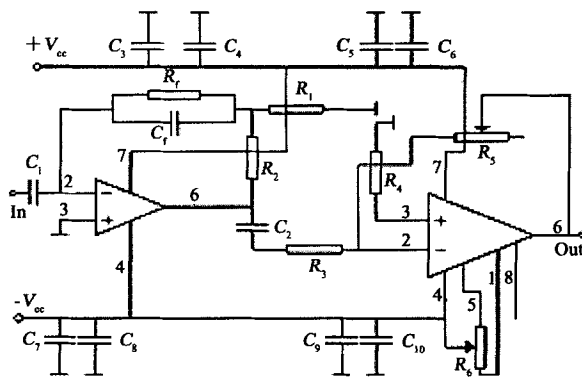


图 3 LMC6001 低频微电流放大调试电路

Fig. 3 Low frequency micro-current amplifier by LMC6001

3 微电流源设计

电路设计好之后,如何去验证它是否符合我们的设计要求,这是一个难点,也是重点所在。因为除了电离室一般电流发生器不可能产生 10^{-14} — 10^{-11} A 这么小的电流,所以要开发一个微电流放大器产生器,其基本思想是电压转换成电流,设计原理见图 4。传输特性为: $I_o = u_1 / R_0$ ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4$)。

理论上, V_i 一定时,只要 R_0 足够大,就可获得很小的电流。但 R_0 太大也是不切实际的。要取得 10^{-12} 、 10^{-1} A 的电流,还得降低 R_0 上的压降 u_1 , 所以电路改进如图 5 所示。

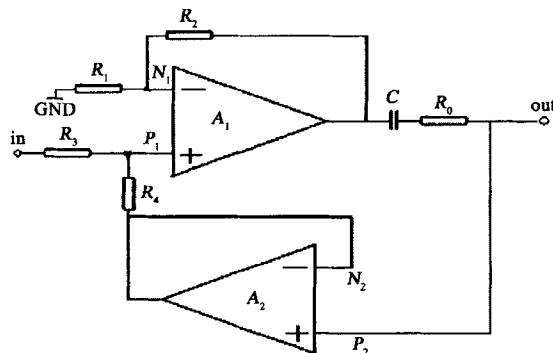


图 4 微电流源基本设计

Fig. 4 Basic design of a micro-current source

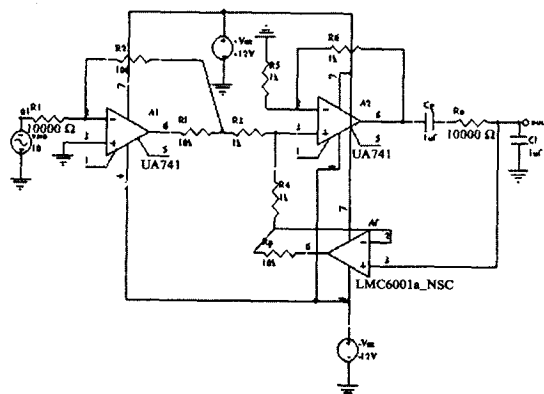


图 5 改进微电流源电路

Fig. 5 Reformed design of a micro-current

当在电路的输入端输入±1V 的正弦波时,输出电容上的电流为±1 pA 的正弦波;当输入为±0.1 V 的正弦波时,输出为±0.1 pA 的正弦波;频率即为

输入脉冲的频率,测得电路的通频带为 0.1 到 1200Hz。

4 Protel^[6]联合仿真调试运行结果

将所设计的微电流放大器与所设计的专用微电流源联合仿真调试电路图如图 6 所示。

4.1 电路放大倍数的测量

输入 10 pA、25 Hz 的信号测电路的放大倍数,输出电压峰值 $V=19.4/2 \text{ V}=9.7 \text{ V}$,故放大倍数 $A=(V/R)/I=(9.7/1) \div 10 \text{ pA}=9.7 \times 10^{11}$ (倍)。

4.2 参数测量

分别取频率为 0.83、1.6、10、25、135、198 Hz 对电路进行仿真。其结果如表 1 所示。可知通频带为 1.6—135 Hz,如图 7 所示。

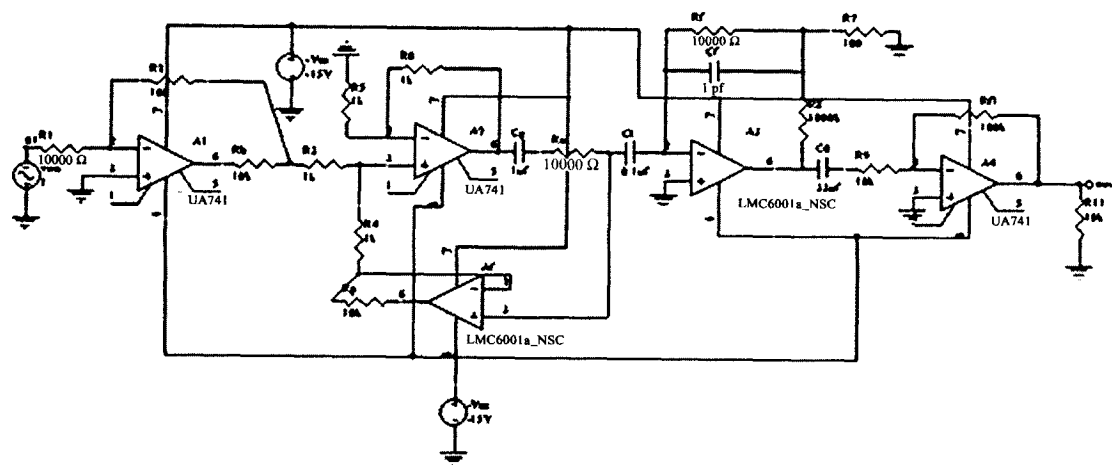


图 6 Protel 联合仿真调试电路图

Fig. 6 Final circuit diagram debugged by Protel tool

表 1 电路参数测量结果

Table 1 Measure of parameters of the electronic circuit

输入频率 f_{01} Input frequency f_{01}/Hz	输入电压 V_{01} Input voltage V_{01}/V	产生的电流源 I_i Produced current source I_i/pA	输出电压的频率 f_{out} Output frequency f_{out}/Hz	响应时间 τ Response time τ/ms	输出电压 V_{out} Output voltage V_{out}/V
0.83	1	1	0.83	1.5726	0.454
1.6	1	1	1.6	80.8	0.721
10	1	1	10	1.04	0.934
25	10	10	25	0.815	9.718
135	1	1.25	135	1.0126	0.694
198	1	1.25	198	1.0129	0.579

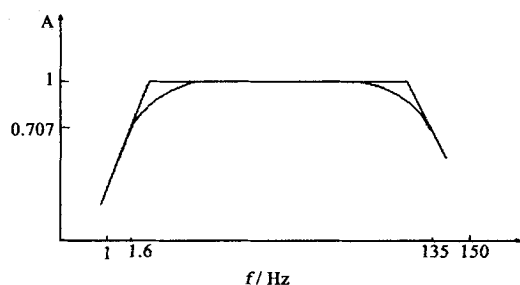


图 7 放大器的频率响应

Fig. 7 Frequency response curve

5 结论

(1) 我们成功地设计了微电流放大器的微电流源, 通过仿真调试取得了较好的效果; (2) 对微电流放大器的通频带进行了修改, 通过仿真调试取得了较好的效果; (3) 从调试的结果来看, 所设计的放大器能对反应堆内电离室中子统计涨落所产生的噪声信号进行获取与放大, 并且时间响应为毫秒量级; (4) 对于相当低的电流的放大, 因实验条件所限, 目前有相当大的困难。下一步是在实验室条件下克服困难, 进行真实的测量研究。

参考文献

- 1 丁大钊. 未来核能利用的方案探讨——加速器驱动放射性洁净核能系统. 加速器驱动放射性洁净核能系统概念研究文集. 北京: 原子能出版社, 2000. 3—27
DING Dazhao. A New Option for Exploitation of Future Nuclear Energy——Accelerator Driven Radioactive Clean Nuclear Power System. Beijing: Atomic Energy Press. 2000. 3—27
- 2 胡大璞, 郑福裕. 核反应堆物理实验方法. 北京: 原子能出版社, 1988. 221—296
HU Dapu, ZHENG Fuyu. Nuclear Reactor Physics Experiment Method. Beijing: Atomic Energy Press. 1988. 221—296
- 3 Muñoz-Cobos J L, Perez R, Valentine T, *et al.* A Stochastic Transport Theory of Neutron Photon Coupled Fields: Neutron and Photon Counting Statistics in Nuclear Assemblies, 2000, *Annals of Nuclear Energy* 27 1087—1114
- 4 于涛, 史永谦, 罗璋琳, 等. 核电子学与探测技术, 2003, 23(6): 529—531
YU Tao, SHI Yongqian, LUO Zhanglin, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2003, 23(6): 529—531
- 5 童诗白. 模拟电子技术基础. 第 3 版. 北京: 高教出版社, 2001. 351—355
TONG Shibai. Fundamentals of Analogue Electronic Technology. 3ed. Beijing: Higher Education Press. 2001. 351—355
- 6 谢淑如, 郑光钦, 杨渝生. Protel PCB 99 SE 电路板设计. 第 3 版. 北京: 清华大学出版社. 2002. 275—342
XIE Shuru, ZHENG Guangqin, YANG Yusheng. Protel PCB 99 SE Circuit Design. 3ed. Beijing: Tsinghua University Press. 2002. 275—342

A rapid micro-current amplifier used to measure the K_{eff} of the sub-critical reactor of accelerator driven system

YU Tao¹ SHI Yongqian² LUO Zhanglin² OU Bingcai¹ QIN Huan¹

¹(School of Nuclear Science and Technology, Nanhua University, Hengyang 421001, China)

²(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract In this paper a rapid micro-current amplifier used to measure the K_{eff} of the sub-critical reactor of accelerator driven system(ADS) was introduced, which is based on the noise analysis method used in the stochastic neutron and photon transport theory, and a micro-current source was designed. At last the circuit was debugged by the Protel tool and the test result was given.

Key words Noise analysis method, Accelerator driven system(ADS), Sub-critical reactor, Micro-current amplifier
CLC TL8, TN72