

在线同位素分离器束测装置中弱电流测量系统

马瑞刚 崔保群 马鹰俊 黄青华 唐 兵 陈立华

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 在线同位素分离器是串行升级工程项目实验装置之一,弱电流测量是该装置中束流诊断系统的关键技术。详细介绍了该装置中弱束流测量系统的组成、弱电流测量的难点和放大器方案确定,分析了影响弱电流测量的诸多因素以及在制作弱电流放大器时应注意的一些设计问题,提出了相应的解决方法。该弱电流测量系统在各种苛刻环境下进行多次实验,弱电流放大器的抗干扰能力和可靠性得以验证,性能指标满足该装置束流诊断系统的要求。

关键词 在线同位素分离器,弱电流测量,放大器,噪声,抗干扰

中图分类号 TL506

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.080402

在线同位素分离器(Beijing Radioactive Isotope Separator Online, BRISOL)是中国原子能科学研究院串行升级工程项目,该装置具有高质量分辨率,能够提供一百余种能量在 $0.5\text{--}15\text{ MeV}\cdot\text{C}^{-1}$ 、强度在 $10^6\text{--}10^{11}\text{ Particles}\cdot\text{s}^{-1}$ 的放射性核束。BRISOL束测装置中拾取的信号是在 $10^{-13}\text{--}10^{-4}\text{ A}$ 内的电流信号,现场环境中的强电磁干扰、地线干扰会造成较大的测量误差。弱电流放大器可以解决这些问题^[1]。BRISOL束测装置具有使用弱电流放大器数量众多(达80多台)、分布范围零散的特点,国外产品测量精度高,但性价比差;国内的标准产品少,且在噪声水平、测量精度、最小量程、外型尺寸等方面无法满足BRISOL束测装置的需求。根据BRISOL束测装置的特点,研制满足要求的弱电流放大器,构成BRISOL束测装置中弱电流测量系统。

1 弱电流测量系统组成

因BRISOL在调试束流时,需要在束流线的不同位置监测束流,所以F筒和四分板安装到束线的关键位置,并在束线的特定位置放置发射度仪和束流剖面扫描仪测量束流的指标。该设备的束流测量装置组成如图1所示。F筒和四分板拾取的是慢变化弱电流信号,频率小于10 Hz;发射度仪、束流剖面扫描仪拾取的是快变化弱电流信号,频率小于1 kHz。束测装置分布在靶源段、第一分析段、转换段、主分析段、爬升段和低能核素厅,靶源段和第一分析段有很强的放射性且处于高压区域,因此电气设备都集中放置到电源间的高压平台内。地电位的束测装置按照束流线走向分散安装,放大器的输出信号在PLC组成的控制系统中进行监测。

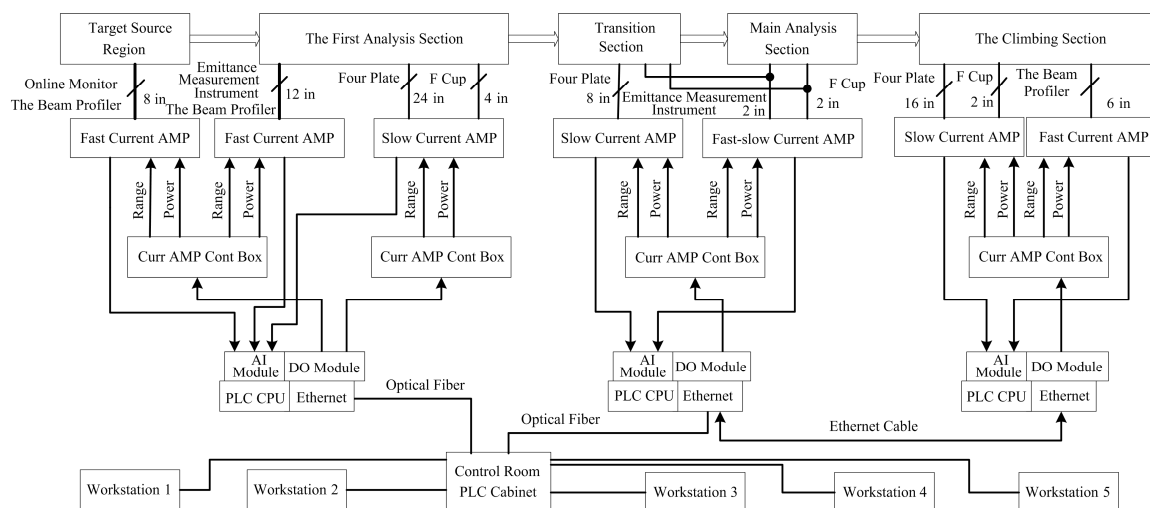


图1 在线同位素分离器弱电流测量系统
Fig.1 Schematic diagram of weak current measurement system in BRISOL.

第一作者: 马瑞刚, 男, 1971 年出生, 1998 年毕业于北京理工大学, 加速器物理, 核电子学和控制专业
收稿日期: 2014-03-11, 修回日期: 2014-05-04

2 弱电流测量难点

在实际测量电流时(图 2), 电流表有输入阻抗, 电流源有输出阻抗, 电流表测量的电流是 $I_a = I_s R_s / (R_s + R_a)$ 。可见, 电流表的输入阻抗和电流源的输出阻抗都会造成测量的误差, 连接电缆产生的低水平电流噪声影响测量灵敏度。连接电缆能俘获外部电流噪声, 连接电缆具有寄生电容, 这些因素都会影响电流测量的准确性^[2]。因此, 弱电流放大器可以解决上述问题。

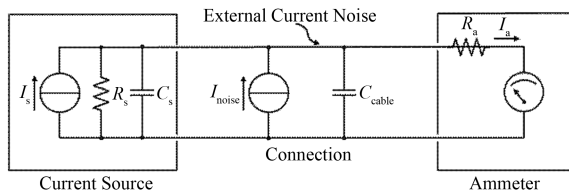


图 2 电流测量图

Fig.2 Current measurement principle diagram.

3 设计要求和方案选择

3.1 设计要求

电流放大器的测量范围是 0.1 pA–100 μA, 频率 DC–1 kHz, 稳定度为 <0.01%/8 h, 抗干扰能力, 可靠性高。

输入端设计保护线路, 防止放大器出现故障时, 加速器几百千伏高压进入放大器造成二次损坏; 在高压区域, 高压打火产生的浪涌脉冲很容易造成放大器损坏, 必须采取措施保证放大器稳定可靠工作; 加速器装置束流线比较长特点要求电流放大器设计必须尺寸小, 便于维护和集成安装, 以上诸多的因素都会增加电流放大器的设计难度。

3.2 方案选择

常见的弱电流测量方法有电流-电压测量和电流-频率测量。电流-电压测量方法可分为对数放大测量、积分测量和跨导放大测量。对数放大电路由放大器和晶体管构成的反馈网路组成, 具有动态范围宽, 省去了量程切换电路, 但被测信号的带宽范围窄, 晶体管的特性限制了电流测量的下限。积分电路由放大器和反馈网路中的积分电容构成, 它的输出电压是某段时间内积分的平均值, 因此动态响应差, 但具有精度高和零点漂移小等优势。I/F 放大器是通过对积分放大器的充放回路改进构成, 具有积分电路的优点, 频率信号便于远距离传输且抗干扰能力强, 但通常由分立元件组成, 稳定性差且电路复杂。跨导放大器具有响应速度快、量程范围可调等特点, 通过合理选择运算放大器, 设计完善的电路, 采取严格的制作工艺, 其零点漂移、输入阻抗均能满足要求。

跨导式放大电路通常有分流式放大电路和反馈式放大电路, 如图 3 所示。反馈式放大电路具有低的输入阻抗和更低的输出电压偏差^[3]。通过比较, 设计的电流前置放大器基本构成如图 4 所示, 包括保护电路、电流-电压变换电路、二阶低通滤波电路和射极跟随电路组成。输入采用二级保护线路, 防止放大器输入过流损坏和高压进入放大器。解决浪涌脉冲干扰的方法是在电流放大器的供电线路加装瞬变抑制二极管, 保证放大器的可靠性。使用继电器组成的量程切换电路提高了电流放大器的测量范围。反馈式放大电路实现 I/V 变换和滤波功能, 二阶低通滤波器提高了信噪比, 末端射极跟随器电路提高了弱电流放大器的输出驱动能力且增加短路保护功能。

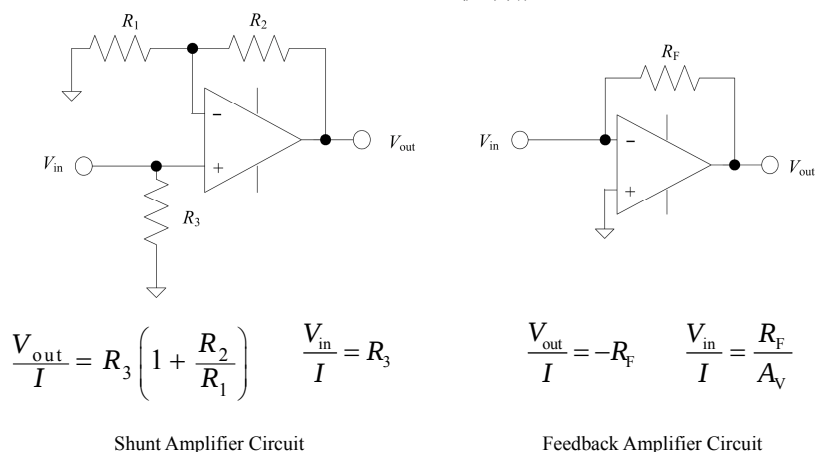


图 3 跨导式放大电路

Fig.3 Transconductance amplifier.

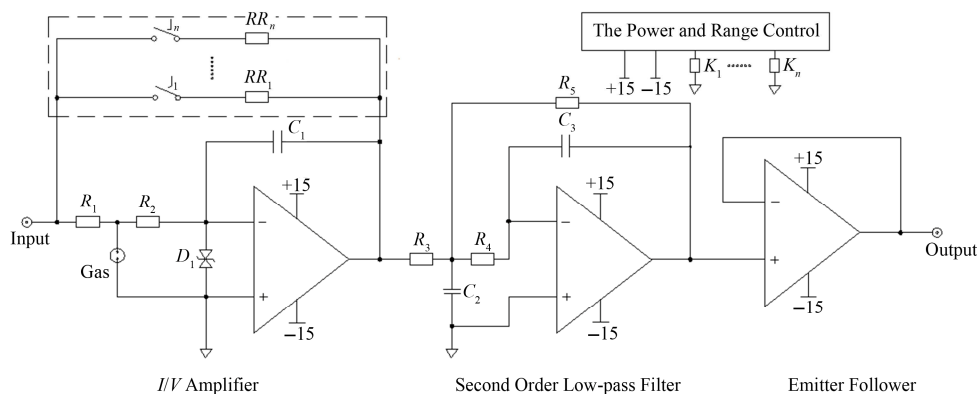


图4 电流前置放大器原理框图
Fig.4 Current amplifier block diagram.

4 外界噪声对放大器的影响

外界的电磁干扰、测量线之间的摩擦、地环干扰、污染（例如潮湿、灰尘等）可以降低绝缘体的绝缘电阻、漏电流、静电耦合、压电影响，上述这些都会影响测量的灵敏度，因此在低水平测量时，建议设计满足我们应用要求的小带宽跨导放大器。

4.1 电磁干扰

由于从外部干扰源发射电磁辐射，EMI 对电路产生了不希望的干扰。大多数 EMI 噪声是电力线产生，可以通过限制低水平电流测量的带宽，采用屏蔽措施解决 EMI 干扰，屏蔽效率要求是 100%。

4.2 摩擦电

摩擦电效应是由于导体和绝缘体发生摩擦，导线产生电荷。使用低噪声同轴线且电流放大器远离振动源可以减少这种影响。

4.3 污染

污染产生电化学效应。如果出现，离子化学在两导体间产生弱电池效益。污染（例如潮湿、灰尘等）可以降低绝缘体的绝缘电阻，它会影响低水平电流测量。通过清洁线路板、减少潮湿等措施减少污染的影响。

5 线路设计和集成

由于测量信号通路与其附近的电压源间的寄生电阻造成了漏电流，此电流易引起零点漂移。采用专用电路设计软件绘制弱电流放大器电路，通过 PLC 控制实现零点校准和放大器刻度，省去了复杂的硬件调零电路，这是此放大器特色之一。通过对

I/V 变换放大电路的输入采用保护线接地设计、接地大面积覆铜、采用高质量的绝缘材料等措施，提高放大器的抗干扰能力和测量精度^[4]。为了缩小放大器尺寸，95%以上的器件选择了高频特性好的贴片元件，减小了器件间的电磁和射频干扰，I/V 放大器选用具有高输入阻抗，低漏电流和输出电压偏移小和噪声低的贴片封装集成放大器，量程切换电路使用具有极高的绝缘电阻 ($>10^{14} \Omega$) 的常开触点 (Normally open contact, NO) 贴片继电器实现放大增益变换。反馈网路中的电阻选用低温漂 ($<10^{-4}$)，精度好于 1% 的高阻值电阻，滤波电容选择温度系数极高的 NPO 贴片电容。

放大器采用模块化的设计，放大器控制箱可以控制 10 个模块，其优点是便于维护，适合分布式放置。电流放大电路集成到铝合金屏蔽盒内，放大器输入使用高质量绝缘材料的 BNC 连接器，电流放大器的直流供电、量程转换和电流输出信号选用屏蔽性非常好的 LEMO 多芯连接器。选用低纹波高稳定度的线性电源保证放大器的精度，使用低噪声屏蔽同轴线可以消除分布电容和振动等因素造成的测量误差，采用上述措施保证了放大器的抗干扰能力和测量精度^[5]。

根据现场要求灵活配置弱电流放大器，例如：4 路快放、4 路慢放以及快慢放大器分别集成到一起，控制箱用于放大器的供电和量程切换。放大器的输出和量程切换连接到可编程控制器 (Programmable Logic Controller, PLC)，由 PLC 完成弱电流放大器的控制和显示，通过编程实现自动量程、手动量程、零点校准、电流显示等任务。弱电流放大器使用 KEITHLEY 261 PICOAMPERE SOURCE 和 PLC 控制系统进行标定，且在恶劣的实验环境下进行测试和改进，满足了设计要求。

6 放大器技术指标

量程: 1 nA, 10 nA, 100 nA, 1 μ A, 10 μ A, 100 μ A; 输出电压: 各量程输出电压 0–10 V (满量程); 带宽: 慢放大器 DC–10 Hz、快放大器 DC–1 kHz。

分辨率和零点偏移。从表 1 可知, 1 nA 量程的偏移为 0.2%, 其余量程的偏移不高于 0.3%。图 5 是在 1 nA 量程时, 环境温度变化 3 $^{\circ}$ C, 输出零点 7 h 温漂是 0.7 mV, 对应的电流温漂是 0.07 pA, 满足束测装置的测量要求。

表 1 分辨率和零点偏移
Table 1 Resolution and DC offset.

量程 Range	分辨率 Resolution	偏移 Offset
1 nA	0.1 pA	< 0.5 pA
10 nA	10 pA	< 2 pA
100 nA	0.1 nA	< 10 pA
1 μ A	1 nA	< 0.2 nA
10 μ A	10 nA	< 2 nA
100 μ A	100 nA	< 25 nA

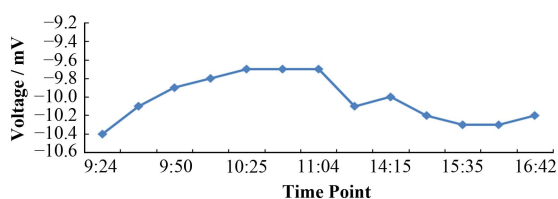


图 5 电流放大器温漂图
Fig.5 Current amplifier temperature drift diagram.

7 讨论

在线同位素分离器束测装置已经使用弱电流放大器, 可以测量 0.1 pA 最小流强。在加速器离子源打火放电时, 它能够稳定可靠地工作, 充分证明在设计时加入的各种保护措施的有效性。

该放大器是根据加速器固有特征 (例如: 束流线长、强电磁干扰等) 进行设计的, 测量的准确性和最小分辨率已经达到了国外同类产品的水平, 它的价格仅是国外产品的 1/10, 其尺寸比较紧凑, 32 路放大器的占用空间仅有国外 4 台放大器的尺寸, 模块化的设计便于维护。

弱电流放大器的零点随环境温度产生漂移, 如果内部采取恒温措施, 控制系统的 AD 转换精度更高, 放大器可以最低测量到 0.01 pA, 这些需要完善和改进。

8 结语

在线同位素分离器装置已成功使用该弱电流测量系统, 在束流调试和束流参数测量方面带来极大的方便, 它具有测量精度高、稳定性好、性价比高、便于集成、使用方便等诸多优点, 在加速器领域值得推广和采用。

参考文献

- 1 Keithley J F. Low level measurements handbook-precision DC current measurements[M]. 6th edition. Keithley Instruments Inc, 2004: 139–155
- 2 李岩, 宋常青, 候跃新, 等. 提高微弱电流放大器性能的方法[J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27(5): 978–981
LI Yan, SONG Changqing, HOU Yuexin, *et al.* Methods of improving performance of weak current integrated amplifier[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007, 27(5): 978–981
- 3 林伟, 付昌伟. nA 级电流检测电路和抗干扰技术研究[J]. 微纳电子技术, 2008, 45(7): 419–422
LI Wei, FU Changwei. Research on nA level current measuring circuit and anti-jamming technology[J]. Micronanoelectronic Technology, 2008, 45(7): 419–422
- 4 王晶, 李斌康, 阮林波, 等. 微弱电流高精度自动测量系统[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(8): 1975–1979
WANG Jing, LI Binkang, RUAN Linbo, *et al.* Automatic weak-current measurement system with high precision[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(8): 1975–1979
- 5 倪宁, 肖雪夫, 葛良全, 等. 微电流的 I - V 变换测量方法研究[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(6): 665–669
NI Ning, XIAO Xuefu, GE Liangquan, *et al.* The Research on I - V convertor for low-level current measurement[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, 33(6): 665–669

Weak current measurement system in BRISOL

MA Ruigang CUI Baoqun MA Yingjun HUANG Qinghua TANG Bing CHEN Lihua

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

Abstract Background: The Beijing Radioactive Isotope Separator Online (BRISOL) is one of the important experimental equipment in the improving project of Tandem accelerator. Its performance is heavily affected by the stability of the weak current measurement system. **Purpose:** The aim is to develop a robust weak current amplifier for the low level measurement system of BRISOL. **Methods:** After analyses of the composition and the difficulties of weak beam measurement system in BRISOL, effectual measures were taken to design the weak current amplifier. Many factors that may influence the low current measurement and some design problems were paid special attention to the implementation of this weak current amplifier by using specific design software for circuit layout, programmable logic controller (PLC) for baseline drift correction, etc. **Results:** Considerable experimental tests were carried out in a variety of harsh environments for the weak current measurement system in BRISOL, and promising results were achieved. **Conclusion:** The anti-interference ability and reliability of the weak current amplifier were verified. The performance of the weak current measurement system can meet the requirements of beam diagnostic system.

Key word Radioactive isotope separator online, Weak current measurement, Amplifier, Noise, Anti-interference
CLC TL506