

智能化核素活度计

叶 忠 保
(国营263厂)

本文介绍的智能化核素活度计由充氦井型电离室、MOS场效应管静电计测量头和Z80微型计算机组成。可测量 ^{226}Ra 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{32}P 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 $^{113\text{m}}\text{In}$ 、 ^{125}I 、 ^{131}I 等几十种常用核素的活度，是放射性同位素生产和应用中的计量仪器。活度值用4位数字显示。能存贮91个测样数据，并可将数据自动打印输出。

^{226}Ra 的测量范围为3.7Bq—8.7GBq。仪器有核衰变修正、扣除本底和自动检测故障的功能。

关键词：放射性核素 电离室 微电流测量 活度 Z80微型计算机

一、前 言

在放射性核素的科研、生产、应用及核医学领域内需要一种在现场能精确、快速和方便地测量放射性核素的仪器。本文介绍一种目前国内外常用的测量核素活度的仪器。本仪器可测能释放 γ 射线和 β 射线(能量大于0.3MeV)的核素活度，可用于放射性核素的分装称量、医用核素的剂量配制，液体或固体源的标定等工作。

二、仪器测量原理

核素活度计原理框图见图1。

当把被测核素放入井型电离室中，用键盘选择好被测核素后，按下“测量”键，继电器驱动器使常闭继电器J的触点拉开，放射性核素在电离室中的电离电流在积分器中的积分电容 C_f 上进行积分。积分器的输出电压为：

$$U = I \cdot t / C_f \quad (1)$$

式中， C_f 为积分电容； I 为核素在电离室中产生的电流； t 为积分时间。

仪器采用等精度测量原理。放射性测量的相对均方根误差 δ 与仪器所测放射性核素活度 A 和测量时间 t 的关系为：

$$\delta = 1 / \sqrt{A \cdot t} \quad (2)$$

由于核素的活度 A 和其在电离室中的电离电流 I 成正比：

$$A = k \cdot I \quad (3)$$

故
$$\delta = 1 / \sqrt{k I \cdot t} \quad (4)$$

当放大器放大倍数为1时，积分器积分区间为2—9V，因此， $\Delta U = 7\text{V}$ 。由式(1)得：

$$\Delta U = I \cdot t / C_f \quad (5)$$

式中， t 为电压从2V积分到9V所需测量时间。

从式(4)、(5)得：

$$\delta = 1 / \sqrt{k \cdot C_f \cdot \Delta U} \quad (6)$$

式中， $C_f = 100\text{pF}$ 。分别选择放大器的放大倍数为1、10、100时， ΔU 分别为7V、0.7V、0.07

V. 因此仪器相对应有低精度、中精度和高精度三档。

从式(3)、(5)得:

$$A = k \cdot \Delta U \cdot C_f / t = \frac{K}{t} \quad (7)$$

式中, 核素因子 $K = k \cdot \Delta U \cdot C_f$ 。

对于一定的测量仪器, 核素因子 K 只和核素种类有关。这样, 只要测量出积分区间 ΔU 内的测量时间 t , 计算机就能计算出核素活度。

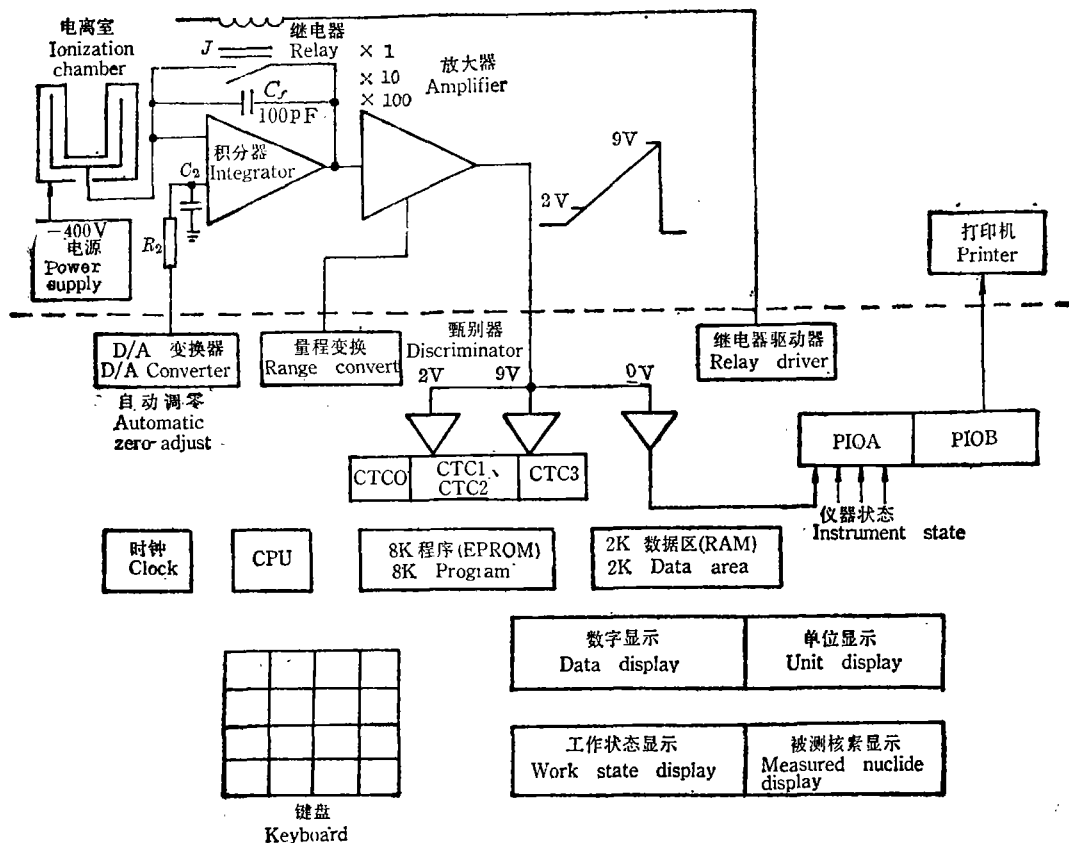


图1 智能化核素活度计原理图

Fig.1 Block diagram of the intelligent nuclide activity meter

三、电 离 室

电离室的结构由图2表示。

电离室的主要性能指标如下:

1. 电流转换率: $10^{-14} \text{A} / 3.7 \times 10^4 \text{Bq} (^{226}\text{Ra})$
2. 电离室有效体积: 8.5 l
3. 电离室充气: 10^5Pa 氡
4. 本底电流: $1.62 \times 10^{-14} \text{A}$
5. ^{226}Ra 的放射性本底: $4 \times 10^3 \text{Bq}$

6. 电压饱和特性: 用 $3.7 \times 10^8 \text{ Bq } ^{226}\text{Ra}$ 源, 距井底114mm, 当收集效率为99%时, 电压为85V; 收集效率为 99.9%时, 电压为160V。

7. 轴向位置响应: 测量误差小于1%、2%、3%时, 有效测量长度分别为70、90、100mm。

8. 径向位置响应: 径向位置移动12mm, 测量误差小于1.8%; $0-360^\circ$ 方位角响应误差小于1.4%。

四、MOSFET 弱电流放大器

本仪器采用积分式弱电流放大器, 其输入端电路如图3所示。输入器件采用场效应管 $3\text{C}02$, 它在SD短路时的 $R_{gs} \geq 10^{16} \Omega$ 。

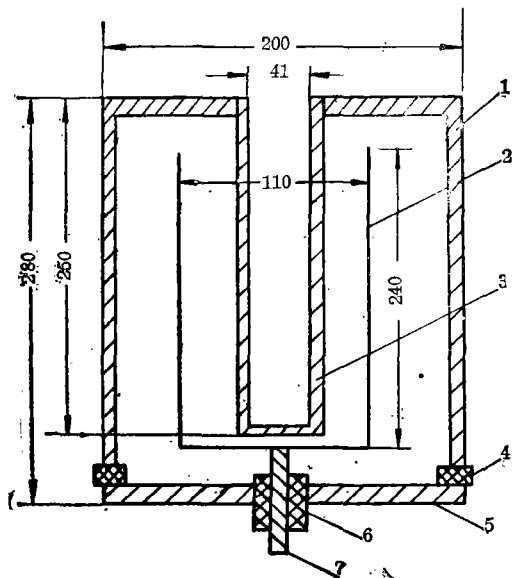


图2 4π 井型充氩气电离室结构示意图

1. 外高压电极(Fe镀Cu, 壁厚2mm) 2. 收集极(Cu, 壁厚 0.5mm)
3. 内高压电极(Al, 壁厚1mm) 4. 绝缘物(胶木) 5. 接地底板
(Fe镀Cu, 壁厚20mm) 6. 白宝石绝缘 7. 收集极引出棒

Fig.2 4π well-type argon-filled ionization chamber

1. Outer high voltage electrode (Cu-plated Fe, wall 2mm thick) 2. Collector (Cu, wall 0.5mm thick) 3. Inner high voltage electrode (Al, wall 1mm thick) 4. Insulator (bakelite) 5. Grounded plate (Cu-plated Fe, wall 20mm thick) 6. White gem insulator 7. Collector lead

为了保证弱电流放大器的低噪声、高稳定和低栅流, 采取对MOS FET 的单独连续供电。由于积分式弱电流放大器对温度、老化等慢漂移不敏感, 因此仪器无需严格工作在“零温度系数点”。为了避免自热效应, 取很小的漏极电流 $I_0 = 70 \mu\text{A}$ 。 C_f 是聚苯乙烯电容, 温度系数 $\geq -2 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 。在 50°C 工作范围内, 容量误差为1%。其绝缘电阻优于 $5 \times 10^{16} \Omega$ 。当测量电流为 $5 \times 10^{-16} \text{ A}$ 时, 由式(5)得:

$$t = \Delta U \cdot C_f / I \quad (8)$$

当放大倍数取100时, $\Delta U = 70 \text{ mV}$, $C_f = 100 \text{ pF}$, 因此 $t = 1.4 \times 10^4 \text{ s}$ 。低功耗运算放大器 FO12 的开环增益 $A_0 = 100 \text{ dB}$ 。积分式静电计的测量精度:

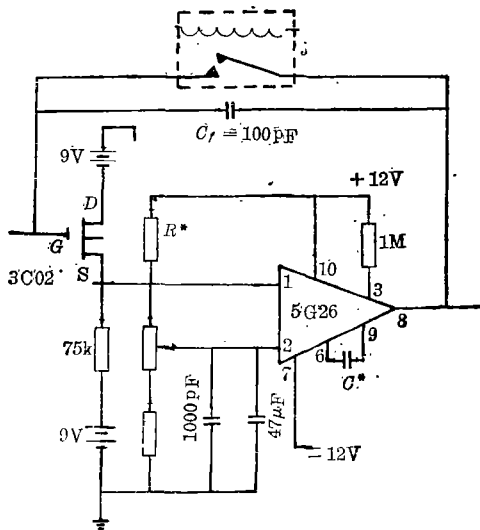


图3 积分式弱电流放大器

Fig.3 Integral micro-current amplifier

$$\delta = \frac{\Delta C_f}{C_f} + \frac{T}{R_f \cdot C_f} + \frac{C_1}{A_0 \cdot C_f} \quad (9)$$

式中, C_1 为输入端电容, 对本仪器就是电离室分布电容 $C_1 = 100 \text{ pF}$ 。由式(9)得: 积分式静电计的测量精度 $\delta = 1.8\%$, 这个精度比电阻反馈式静电计由于高温的温度误差 $\Delta R/R$ 而造成的测量精度 $\pm 10\%$ 要高一个数量级以上。

本仪器中弱电流放大器的主要指标如下:

1. 输出端噪声电压有效值: 反馈继电器短路时为 $140 \mu\text{V}$ 。开路时为 $180 \mu\text{V}$ 。
2. 反馈继电器开路时测得的开路背景电流为 $3 \times 10^{-17} \text{ A}$ 。
3. 反馈继电器拉开时输入放大器的短时间跳跃为 0.5 mV 。因此, 电磁开关转换时的寄生讯号 $Q = C_f \cdot V = 5 \times 10^{-15} \text{ C}$ 。
4. 用标准高值电阻发生的小电流对仪器进行线性测定。当电流从 $10^{-14} \sim 10^{-9} \text{ A}$ 时, 仪器的非线性不大于 5% 。

五、仪器的自动调零原理

测量头的弱电流放大器采用直流放大器, 因此仪器要不断地进行零点调整。弱电流放大器将电压输出到零电平甄别器(图1), 零电平甄别器发出甄别信号由PIOA送入计算机。计算机对零电平信号进行分析、计算后向D/A变换器发出调零信号, D/A变换器通过 R_2 、 C_2 的积分网络向弱电流放大器送调零电平。调零反馈网络的时间常数为:

$$\tau = R_2 \cdot C_2 \quad (10)$$

六、核素活度测量及自动量程转换

由式(6), 核素测量的相对均方根误差 $\delta = 1/\sqrt{k \cdot C_f \cdot \Delta U}$ 。仪器划分为三种精度的测量档。在高精度档, 放大器的放大倍数为1, 积分器的电压测量区间 $\Delta U = 7 \text{ V}$ 。中精度档的放大倍数为10, 电压测量区间 $\Delta U = 0.7 \text{ V}$ 。低精度档的放大倍数为100, 电压测量区间 $\Delta U = 0.07 \text{ V}$ 。这样, 对于同一种核素在高、中、低精度档相对均方根误差各相差 $\sqrt{10}$ 倍。表1列出常用医用核素相对于高、中、低精度档的相对测量均方根误差。

表1 高、中、低精度档的相对测量均方根误差(%)和源强为 $3.7 \times 10^4 \text{ Bq}$ 时低精度档测量时间
Table. 1 Root mean square deviation (%) of relative measurement at high middle and low accuracy and measurement time with low accuracy and activity $3.7 \times 10^4 \text{ Bq}$

核 素 Nuclide	^{226}Ra	^{131}I	^{125}I	$^{113\text{m}}\text{In}$	^{166}Yb	^{51}Cr	^{32}P	^{198}Au	$^{99\text{m}}\text{Tc}$
低 精 度 (%) Low accuracy	1.33	1.86	0.58	1.93	1.34	1.75	4.03	1.96	1.15
中 精 度 (%) Middle accuracy	0.42	0.59	0.18	0.61	0.42	0.55	1.27	0.63	0.37
高 精 度 (%) High accuracy	0.133	0.186	0.058	0.193	0.134	0.175	0.403	0.198	0.115
测量时间 (s) Measurement time	50.4	128	131	178	38.4	1490	351	187	108

本仪器可由用户任意选择不同的测量精度。由式(2) $\delta=1/\sqrt{A \cdot t}$ 看出,测量精度越高,需要的测量时间也越长,高、中、低精度档测量时间各相差10倍。由表1,对 $3.7 \times 10^4 \text{Bq}$ 的 ^{226}Ra 进行测量,其测量时间低精度档为50.5s,中精度档为8.4min、高精度档为80min。显然对于 $3.7 \times 10^4 \text{B}^{226}\text{Ra}$ 源的常规测量,选择中精度档和高精度档所需测量时间太长。本仪器能自动选择最佳的测量精度/测量时间比。仪器在正式测量前先进行量程判断。断开继电器触点,测量积分电压从零到0.02V所需测量时间,再把这时间分别换算到正式测量时相应于高、中、低测量档的测量时间,若高精度档测量时间小于1min,则选择高精度档,若高精度档测量时间大于1min,而中精度档测量时间小于1min,则选择中精度档,若高、中精度档测量时间都大于1min,则选择低精度档。

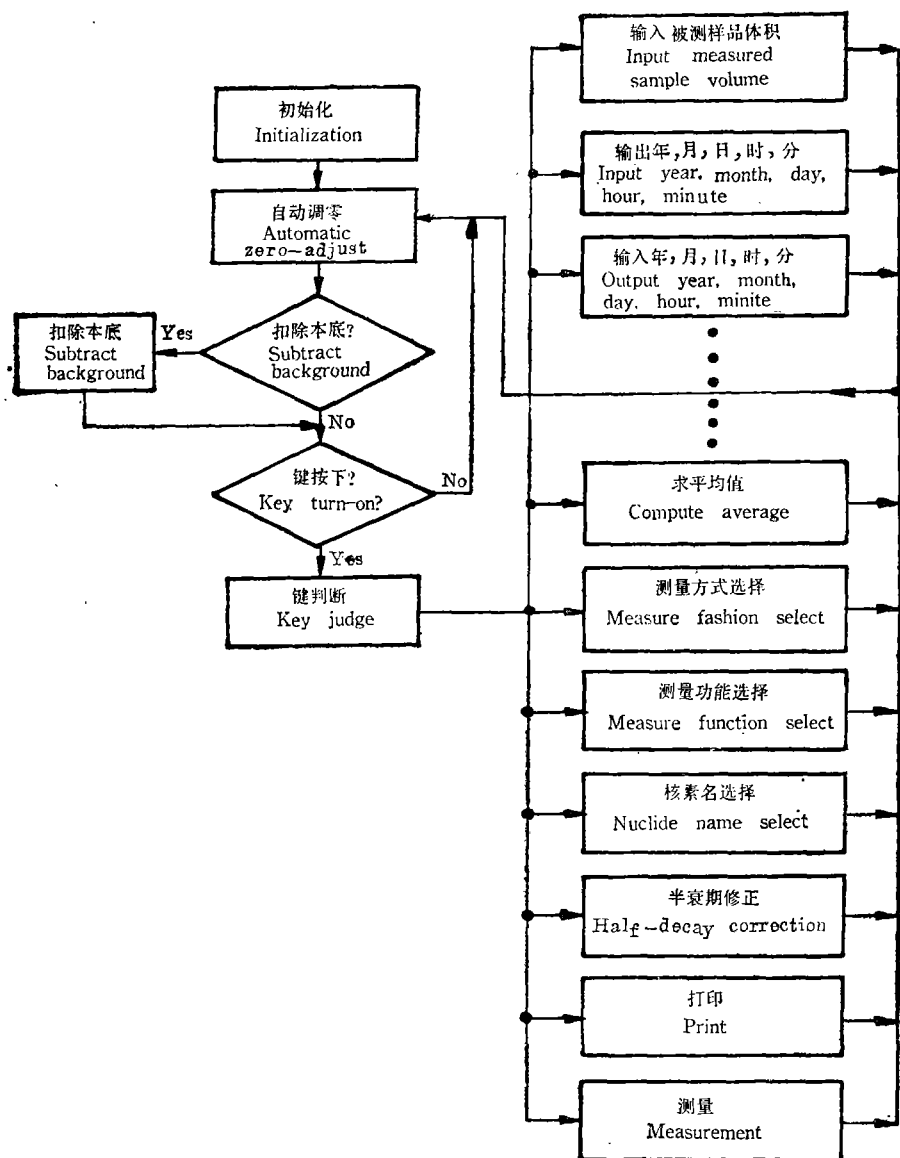


图4 智能化核素活度计软件方框图

Fig.4 Software of the intelligent nuclide activity meter

七、仪器功能和计算机软件

本仪器采用Z80计算机, 功能强, 使用方便。它具有下列主要功能:

1. 测量放射性核素活度。
2. 测量放射性溶液的浓度(比活度)。
3. 获得给定的核素活度所需要的被测放射性溶液的体积。
4. 对于 ^{32}P 、 ^{51}Cr 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 $^{113\text{m}}\text{In}$ 、 ^{125}I 、 ^{131}I 、 ^{137}Cs 、 ^{169}Yb 和 ^{198}Au 九种核素的核素活度、浓度、需要体积可进行放射性衰变修正。
5. 计算机内设置91个存贮器, 可寄贮核素名称、核素活度、浓度等测量值。
6. 所有的测量值和91个存贮器的核素数据都可由打印机打印。
7. 测量值能自动扣除本底。
8. 仪器读数能任意选择Bq或Ci两种单位制。
9. 用户可根据需要选择5种测量状态: 自动量程转换单次测量; 自动量程转换连续测量, 低精度连续测量; 中精度连续测量和高精度连续测量。
10. 对测量值求平均值。

图4是仪器计算机软件方框图。

八、仪器主要技术指标

1. 灵敏度: 对 ^{226}Ra 、 ^{131}I 、 $^{113\text{m}}\text{In}$ 、 ^{198}Au 等源, 仪器灵敏度为0.004MBq。
2. 放射性本底: 对 ^{226}Ra , 仪器的本底小于0.01MBq。
3. 量程: 对 ^{226}Ra 源, 仪器的测量量程为0.004MBq—4GBq。
4. 测量精度: 对 $^{226}\text{Ra} \leq 400\text{MBq}$ 时不大于 $\pm 2.7\%$, 对 $^{226}\text{Ra} \geq 400\text{MBq}$ 时不大于 $\pm 5\%$ 。

An intelligent nuclide activity meter

Ye Zhongbao

(State Factory No.263)

Abstract

The instrument consists of an argon-filled well type ionization chamber, a MOSFET electrometer and a Z80 microcomputer. It can measure the activity of tens of common nuclides such as ^{226}Ra , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{32}P , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, $^{113\text{m}}\text{In}$, ^{125}I and ^{131}I . It can be used as a calibrated instrument when the production and applications of radioisotopes are involved. The result of measurement are displayed in 4-digits. The instrument can storage 91 assayed data and print out the data automatically.

The operating range is 3.7 Bq to 3.7 GBq for ^{226}Ra . The functions of this instrument include correction for nuclear decay, background subtraction and automatical detection of trouble.

Keywords: Radionuclide Ionization chamber Microcurrent measurement Activity Z80 microcomputer

(1988年4月5日收到)