

β 射线自动监测大气中 PM_{10} 含量的设计方案

张玉钧 刘文清 郑朝晖 王亚萍 蒋舸扬 宁柄超 周斌

(中国科学院安徽光学精密机械研究所光学环境监测研究室, 合肥 1125 信箱 230031)

摘要 本文论述了应用 β 射线吸收定律测量大气中 PM_{10} 含量的原理, 分析了 G-M 计数管的特性及测量数据的统计特征, 提出了 β 射线法在测量大气中 PM_{10} 含量的一种新的实现方法。

关键词 β 射线吸收定律; PM_{10} 统计特征

0 引言

大气悬浮颗粒污染物, 尤其是可吸入颗粒物 (Inhalable Particulate Matter, 如 PM_{10}) 对健康影响是明显的。因此, 监测大气中降尘、TSP、 PM_{10} 及其中的分散度和有害物质成分是很有必要的。世界上很多国家把大气中 PM_{10} 含量的多少作为大气质量的重要指标之一, 对大气中 PM_{10} 含量实施 24h 连续监测。

目前, 较常采用的检测方法主要有以下几种: 重量法、压电晶体差频法、光散射法等^[1,2]。 β 射线吸收法是重量法中较常采用的一种, 具有连续测量、价格低、系统工作可靠、运行费用低、安装简便、无需人员监护等优点。有关 β 射线吸收定律国内外已有文献系统地论述, 但有关构成实用系统中应当着重注意的技术问题及解决方法尚未见系统地论述, 本文的目的在于系统地阐述利用 β 射线吸收定律构成 PM_{10} 自动测量仪器的设计方法。文中首先叙述 β 射线的吸收定律及其在用于测量大气中 PM_{10} 含量的方法; 第②节讨论放射源和探测器的选择原则; 第③节分析测量数据的统计特征, 推导 PM_{10} 含量的计算公式; 最后在此基础上, 提出了一种用于测量大气中 PM_{10} 含量的新的系统实现方法。

1 β 射线吸收定律及其应用

1.1 β 射线的吸收定律^[3,4]

原子核在发生 β 衰变时, 放出 β 粒子。 β 粒子实际上是一种快速带电粒子, 它的穿透能力较

强, 当它穿过一定厚度的吸收物质时, 其强度随吸收层厚度增加而逐渐减弱的现象叫做 β 吸收。当吸收物质的厚度比 β 粒子的射程小很多时, β 射线在物质中的吸收, 近似为

$$I = I_0 e^{-\mu_m t_m} \quad (1)$$

式中, I_0 为没有吸收物质时的强度; I 是 β 射线穿过厚度为 t_m 的吸收物质后的强度, μ_m 称为质量吸收系数或质量衰减系数, 单位为 cm^2/g ; t_m 称为质量厚度, 单位为 g/cm^2 。实验表明, 对于不同的吸收物质, μ_m 随原子序数的增加而缓慢地增加。对于同一吸收物质, μ_m 与放射能量有关。

1.2 测量 PM_{10} 的方法:

应用 β 射线测量 PM_{10} 原理如下述:

首先, 探测电路记录下 β 射线通过滤纸时强度 I_1 , 由式(1)得

$$I_1 = I_0 e^{-\mu_m t_r} \quad (2)$$

第二步: 恒流抽气系统通过样气采集气路抽入一定量的空气, PM_{10} 颗粒被遮挡在滤纸面上;

第三步: 探测器记录下此时 β 射线的强度, 设为 I_2 , 由式(1)得

$$I_2 = I_0 e^{-\mu_m t_m - \Delta m} \quad (3)$$

式中, Δm 为 PM_{10} 的质量厚度。假设 I_0 在整个测量过程中保持不变, 式(2)和(3)联立, 得

$$\Delta m = \mu_m^{-1} \ln(I_1/I_2) \quad (4)$$

Δm 的单位为 g/cm^2 , 因为已知滤纸被探测面积和抽入的空氣的体积, Δm 可以换算成 g/m^3 , 即每立方米空气中 PM_{10} 的含量密度。

2 β 射线放射源与 β 射线探测器的选择与特性

2.1 β 源的选择及 μ_m 的标定

应选择半衰期很长的 β 放射源,保证前后两次测量中, β 源的强度基本不变。 C^{14} 源是理想的选择,其半衰期为5730年,放射能量 E_{max} 为0.156MeV,放射性活度选为3~5M bq。使用此种 β 射线源,安全耐用,对人体无害,不属于防治放射线规定的“放射性同位素”。由于其半衰期为5730年,在 PM_{10} 吸附前后(间隔 $<30min$)及相当长时间的 β 射线的测量中,可以认为其强度没有发生变化。一般每半年用标准质量的参考物校准一次 μ_m 值。

2.2 G-M计数管特性及正确使用^{3,5}

由上述讨论可知,测量 PM_{10} 吸附前后 β 射线穿过滤纸的强度,就可算出 PM_{10} 的含量,用于辐射强度探测的探测器有气体探测器、闪烁探测器和半导体探测器等,其中用盖革和弥勒名字命名的气体探测器,盖革-弥勒计数器是较常用的探测器,简称G-M计数器。

G-M计数器利用气体倍增大大地增加了沿辐射轨迹产生的初始离子对所呈现的的电荷,G-M管中形成的电场很高,提高了每次雪崩的强度,在适当条件下,雪崩本身可以在管内其他位置触发一个次级雪崩,G-M计数器探测射线具有灵敏度高、脉冲幅度大、稳定性高、使用方便、成本低廉、制作的工艺要求和仪器电路均较简单的优点,使整个测量系统可以做得轻巧灵便,适于携带。

为正确使用G-M计数测量 PM_{10} ,有必要说明G-M计数器的应用特性,包括工作电压的选择、死时间的校正等。

2.2.1 工作电压的选择:

在强度不变的放射源照射下,测量计数率随工作电压的变化,称为坪曲线³。曲线的特点是当工作电压超过起始电压 V_0 时,计数率由零迅速增大;工作电压继续升高时,计数率仅略随电压增大,并有一个明显的坪存在,工作电压再继续升高,计数率又急剧增大,这是因为计数管失去淬熄作用,形成连续放电。通常选择足以保证达到坪的平坦区域的工作点即可。从而,盖革放电的规模保持在最小值附近,这样计数稳定好,淬灭气体消耗率也最低。

2.2.2 死时间及校正方法

入射粒子进入计数管引起放电后,形成了正离子鞘,使阳极周围的电场削弱,终止了放电。这时,若再有粒子进入就不能引起放电,直到正离子鞘移出强场区,场强恢复到足以维持放电的强度为止。这段时间称为死时间。经过死时间后,雪崩区的场强逐渐恢复,但是在正离子完全被收集之前是不能达到正常值的。在这期间,粒子进入计数管所产生的脉冲幅度要低于正常幅度,直到正离子全部被收集后才能完全恢复,这段时间称为恢复时间。在实际上更有意义的是计数系统的分辨时间 t_f ,因为电子线路有一定的触发阈 V_d ,脉冲幅度必须超过 V_d 才能触动记录电路。因此,从第一个脉冲开始到第二个脉冲的幅度恢复到 V_d 的 t_d 时间内,进入计数管的粒子均无法记录下来。 t_f 便称为计数器系统的分辨时间,显然, $t_d < t_f$ 。实际测量中,计数管有确定的分辨时间 t_f ,若相继进入计数管的两粒子的时间小于分辨时间时,第二粒子会被漏记,实测计数率低于实际计数率。为此需要作分辨时间校正,有时也称死时间校正。设入射粒子是统计性的,单位时间内进入探测器的平均粒子数即平均计数率为 n 。在分辨时间 t_f 不变时,单位时间内的总分辨时间为 nt_f ,在此 nt_f 时间内进入计数器的粒子数为 nn_0t_f ,因此,计数率的损失为

$$\Delta n = n_0 - n = n_0 nt_f \quad (5)$$

于是,平均计数率为

$$n_0 = n / (\ln t_f) \quad (6)$$

2.2.3 计数管的探测效率

由于盖革管的填充气体中的一个离子对就可以触发全面盖革放电,对进入计数管有效体积的任何带电粒子来说,计数效率基本上都是100%。

3 测量数据的特征

在放射性测量中,即使所有实验条件都是稳定的,如源的放射性活度、源的位置、源与探测器之间的距离、探测器的工作电压等都保持不变,在相同时间内对同一对象进行多次测量,每次测到的计数并不完全相同而是围绕某个平均值上下涨落,这种现象称为放射性计数的统计涨落。这是微观粒子运动过程中的一种规律性现象,是放射性原子核衰变的随机性引起的。

根据文献^{1,4}中对核衰变统计分布规律的讨论可知,在一定的时间间隔为进入探测器中并产生有效计数的变量 n_i 服从Poisson分布,可以描述

为 λ , 在长度为 τ 任一区间内有 n_r 个点的概率

$$p_{n_r}(\tau) = e^{-\lambda\tau} (\lambda\tau)^{n_r} / n_r! \quad (7)$$

其均值和方差为

$$E[n_r] = \lambda\tau \quad (8)$$

$$\sigma_{n_r}^2 = \lambda\tau \quad (9)$$

当计数值大于20时, 分布趋于对称分布, 近似服从 Gaussian 分布.

显然, λ 值完全确定了计数值的统计特性, 且与 β 射线的强度成正比. 因此问题转化为根据有限次的测量结果估计出 λ 的值.

设 PM_{10} 吸附前后的均值估计分别为 $\bar{\lambda}_1$ 和 $\bar{\lambda}_2$, 代入(4)得

$$\Delta m = \mu_m^{-1} \ln(\bar{\lambda}_1 / \bar{\lambda}_2) \quad (10)$$

在数据的实际处理中, 考虑到微处理器的运算速度和运算精度, 对公式(10)进行变换得

$$\begin{aligned} \Delta m &= \frac{1}{\mu_m} \ln \frac{k\tau \bar{\lambda}_1}{k\tau \bar{\lambda}_2} = \frac{1}{\mu_m} \ln \frac{\sum_{i=1}^k N_{1,i}}{\sum_{i=1}^k N_{2,i}} \\ &= \frac{1}{\mu_m} \left[\ln \sum_{i=1}^k N_{1,i} - \ln \sum_{i=1}^k N_{2,i} \right] \quad (11) \end{aligned}$$

应用(11)可以避免一些中间运算, 从而减小了由于微处理器的运算精度不足带来的误差.

4 系统设计

4.1 系统设计原则与 PM_{10} 监测仪的组成

自动分析仪器的特点是它们能长期连续自动地进行测量; 能根据远程指令或在预先设定的时间内, 自动地进行零点和标度校正; 能在本监控站进行数据处理, 或向中心站自动地输出信息; 测量范围、测定下限浓度及各项指标须符合国家规定的大气质量标准的要求; 仪器最好能系统化、标准化, 易于统一比较、维修.

图1示出了 β 射线法构成的 PM_{10} 自动监测系统原理框图, 系统主要由样气采样子系统、机械传动、信号检测与处理、数据传递系统、系统控制等五部分组成.

4.2 系统硬件设计

在描述系统设计之前, 必须明确系统工作需要满足的条件, 在式(4)的推导过程中, 不难看出, 应用了以下四个条件: 1) PM_{10} 吸附前后的两次测量中, J_0 保持不变; 2) 为得到每立方米空气中的 PM_{10} 的含量, 抽入的空气的体积必须是已知的; 3) PM_{10} 吸附前后, 滤纸被探测面没有变化;

即要保证抽气前后滤纸和探测器、 β 源之间的相对位置不发生变化; 4) μ_m 的值一般每半年需要校准, 在测量过程中, 要保证 μ_m 的值与校准值一致, 一方面要求源的半衰期非常长, 认为在半年时间内基本无变化; 另一方面要求测量过程中(包括 PM_{10} 吸附前与吸附后), 放射源与探测器的相对位置不发生任何变化, 滤纸的材质均匀, PM_{10} 在滤纸上分布均匀.

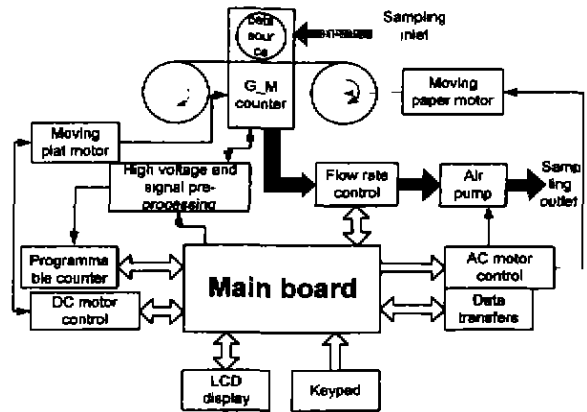


图1 β 射线法 PM_{10} 自动监测系统组成原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of measuring the content of PM_{10} using β ray

第一个条件和第四个条件的第一部分由所选择的放射源的性质决定, 如2.1节所述, C^{14} 是理想的选择. 其它条件的满足就需要在系统设计时解决了. 除了这些以外, 还要考虑构成测试仪器需要的控制功能.

4.2.1 PM_{10} 吸附前后滤纸与源和探测器相对位置保持不变及 PM_{10} 均匀吸附的实现

仪器测量精度很大程度上取决于这一部分. 在抽气过程中, 如果气体在到达滤纸时无遮挡, 直接通过滤纸, 就可以使 PM_{10} 在滤纸表面均匀分布; 为使滤纸、探测器、源之间的相对位置在 PM_{10} 吸附前后的测量中不发生变化, 又要使源不遮挡气路和不被污染, 我们在机械设计上, 采用了一种简单实用又能保证定位精度的方法.

在进行一次新的测量时, 首先走纸电机带动纸带系统更新滤纸, 为下一次测量作准备; 源转动电机带动有源的鼓形转盘顺时针转动 90° , 将源与滤纸下的探测器的探测面对齐, 系统处于测量状态, 对空白滤纸进行计数; 然后, 逆时针转动鼓形转盘 90° , 使放射源转到存储位置, 此时鼓形转盘上与源位置成 90° 的通孔与上下抽气通路对准, 系统处于抽气状态, 抽气时间可以编程控制,

一般为半小时;抽气结束后,鼓形转盘顺时针转动 90° ,使源处于测量位置,对 PM_{10} 吸附后的滤纸进行计数;最后,由数据处理模块完成 PM_{10} 含量的计算.显然在上述过程中,源、滤纸和探测器的相对位置在 PM_{10} 吸附前后没有发生变化,并且抽气通路上无任何遮挡,从而保证了两次测量条件的一致和 PM_{10} 均匀地吸附在滤纸上.

4.2.2 仪器电路的设计

仪器电路的组成包括盖革计数器前置放大与脉冲整形电路、82C54 定时计数器、流量检测与控制电路、源位置转动电机及其控制电路、走纸电机及其控制电路、滤纸压紧平台电机及其控制电路、电机位置检测光电耦合器、时钟电路、液晶显示器及其控制电路、键盘及其检测控制电路、打印机及其控制电路、采样管加热系统温度检测及控制电路、抽气泵电源控制电路、数据存储、数据传输电路、4~20mA 信号输出电路、系统自检功能电

路、主 CPU 及其外围电路、电源电路等.其中主 CPU 选用 AT89C52,配以时钟电路、液晶显示器及其控制电路、键盘及其检测控制电路、打印机及其控制电路、存储器构成系统的主控部分,这部分内容比较成熟⁸,本文不再赘述;下面仅叙述系统中特殊功能部分的实现方法.

盖革计数器前置放大与脉冲整形电路的作用是对盖革管输出的脉冲信号进行预处理,使之满足计数器的输入信号电平要求.原理电路如图 2 所示.对整形后的脉冲计数用 82C54 来完成,82C54 是工业标准的高性能 CMOS 器件,输入和输出都与 TTL 电平兼容,有三个独立的 16 位可编程计数器,可以实现各种方式的计数功能,使用非常灵活,功能很强.三个计数器都是减法计数器,可以按二进制计数,也可以按十进制计数.最高计数频率为 10MHz,盖革计数管输出的脉冲频率小于 $\lambda 10$ kHz.

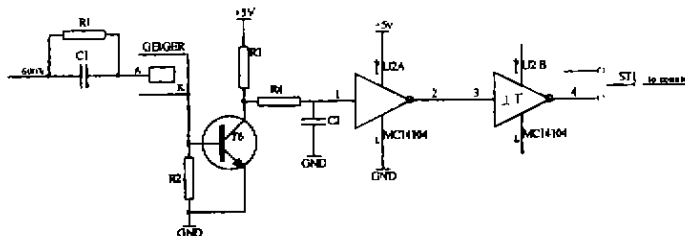


图 2 盖革管前置放大与 TTL 脉冲形成电路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of pre-amplifier and generating TTL pulse of G-M counter

流量检测与控制电路的作用是保证颗粒物采集过程中气路中气体流量恒定不变.这是因为采集气路中依据空气动力学原理分离 PM_{10} (或 TSP)的切割器要求气路中抽气流量保持恒定才能正确分离出 PM_{10} (或 TSP);因此为保证样气采集过程中能正确分离 PM_{10} (或 TSP)颗粒物,必须使采集气体流量稳定不变.另外,根据恒定的流量值和样气采集时间可以确定样气采集的体积,从而计算出每立方米空气中 PM_{10} (或 TSP)的含量.本系统采用调节电动阀的开启大小使抽气流量保持不变.

系统中共有两个直流电机和两个单相交流电机,其中控制源位置转动和滤纸压紧平台升降的电机是直流电机,进纸电机和抽气泵是交流电机.由于控制源位置转动和滤纸压紧平台升降需要电机能方便的实现正反转,所以采用直流电机比较方便.

为控制源的位置和滤纸压紧平台的松紧程度,必须要精确控制电机的转动角度,在系统中采

用了光电耦合器完成这一功能.在电机轴上装有一带有狭缝的转盘,通常情况下状态电平为低电平,当狭缝对准光电耦合器的光通道时,光耦导通,此时状态电平变为高电平.

进纸电机和抽气泵电机的控制是控制电机电源的通电时间,进纸电机在每次测量之前,将滤纸向前进一段,为新一轮的测量作准备.显然进给量的多少对测量的结果无任何影响;交流电源的通断采用 MP240D4 固态继电器控制,通电时间由主 CPU 的定时器 1 控制.抽气泵电机的控制与进纸电机相同.唯一的差别是抽气泵电机的通电时间一般为半小时,而进纸电机的通电时间仅为分钟左右.

系统自检功能的实现由自检功能电路和自检子程序组成.自检程序在系统开机时,完成对系统中各功能块的检查,如 RAM、机械转动定位、流量检测与调整、计数器检验、G-M 计数管高压检验、电源电压检验等.除 G-M 计数管高压、电源电压、A/D 转换器基准电压以及计数器电路等

部分的检测需要专门的自检电路外,其余部分可直接根据应用电路进行判别.系统设有分频电路,将 AT89C52 的时钟信号经 16 分频后作为检测信号连接到多路开关输入端,多路开关的另一输入端接 G-M 计数管的计数信号,自检时系统将检测信号端切换到计数器时钟信号端,启动计数器电路对检测信号进行计数,将结果与标准值进行比较,以确定计数器电路是否正常;利用 A/D 转换器对 G-M 计数管高压、A/D 转换器基准电压、电源电压等系统状态进行检测,当检测数值在允许范围之内时,表示系统状态正常,否则,提示系统错误.

4.3 系统软件设计

系统软件主要由系统监控程序(包括键盘、显示、打印、系统时钟)、远程数据传输与处理子程序、交流电机控制子程序、直流电机的控制子程序、流量控制子程序、系统自检子程序及数据测量与处理子程序等组成.系统监控程序起着管理指挥作用,其它各子程序完成相对独立地子功能,其中数据测量与处理子程序在整个软件设计中占有重要地位,限于篇幅,本节只说明这一部分内容,图 3 示出了完成一次测量的数据处理子程序流程图.

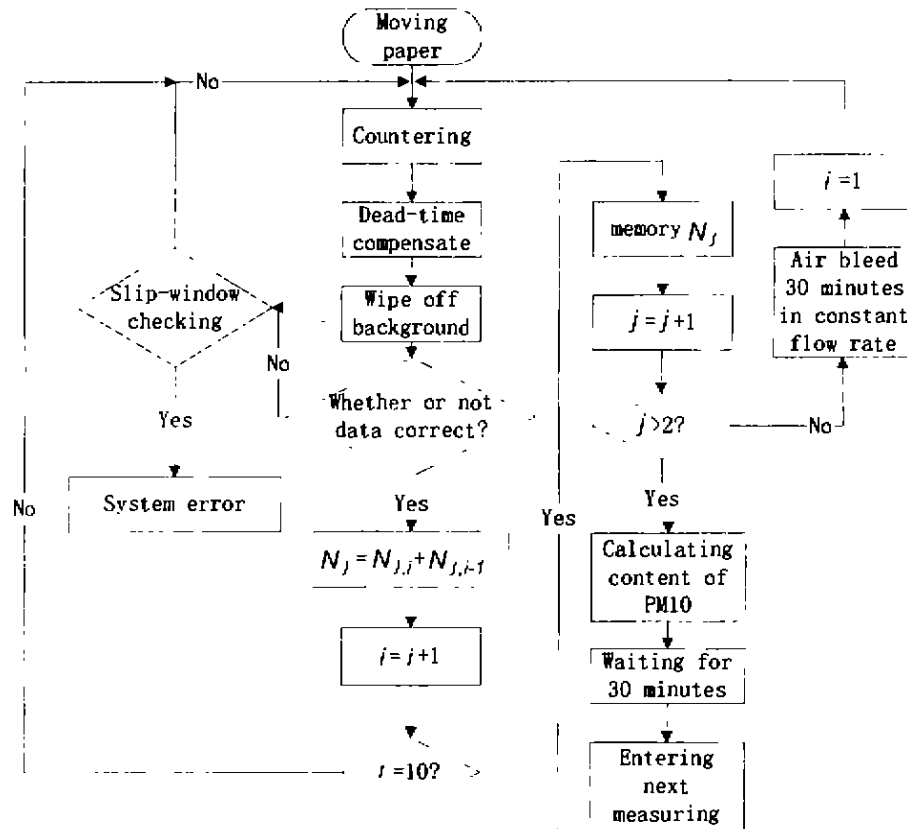


图 3 数据测量与处理流程图

Fig. 3 Flow chart of data processing

对已更新滤纸的测量过程和对经过采集 PM_{10} 后的滤纸的测量过程是一致的.取 10 次连续有效测量值,为满足(11)要求的条件,根据所选用的滤纸,调整计数时间使每次计数值在 2000 左右,存储该计数时间.开始时,如连续两测量数据值经判定是正常值,保留这两个值;并把第二个值作为下次比较的基准,第三个值与第二个值比较,有效则保留,否则就放弃,继续下面的测量;直到保留了 10 个有效的数据.另外,不能排除系统工

作的连续不稳定,即系统出现故障的情况,采用滑窗判别法,一般选择窗长为 3,即连续 3 次数据无效,则认为仪器工作不正常,发出错误报警信号.

需要指出的是,从式(11)可以看出,最终运算公式中只与计数的累计值有关系,因此也可以在连续 $k\tau$ 时间内计数,最后用式(11)得出结果.我们之所以采用 k 个 τ 时间分别计数的方法,是因为这种方法和步骤与经典的统计分析和参量估计理论相一致,数学概念清楚.并且图 3 所示的方

法便于对每次计数值的有效性进行检验,提高了系统测量数据的可靠性。

参考文献

- 1 Sawada S, Kobayashi K. Dust detection using multiple reflection. *Appl Opt*, 1991, 30(20):4966~4970
- 2 崔永恩等. 大气污染监测方法. 北京:化学工业出版社, 1997:1013~1030
- 3 Knoll G F. Radiation detection and measurement. American: John Wiley & Sons, 1979:3~92
- 4 吴治华等. 原子核物理实验方法. 北京:原子能出版社, 1997:1~21
- 5 Emery E W. Geiger-Muller and Proportional Counters, in: Attix FH, Roesch WC, eds. Radiation Dosimetry (Vol. 1). New York: Academic Press, 1966
- 6 Papoulis A. Probability random variables and stochastic processes (Second Edition). McGraw-Hill Inc, 1984:285~289
- 7 余永权. ATMEL89 系列 Flash 单片机原理及应用. 北京:电子工业出版社, 1997:88~133
- 8 王福瑞等. 单片微机测控系统设计大全. 北京:北京航空航天大学出版社, 1998:146~270

THE DEVELOPMENT AND IMPLEMENT OF MEASURING PM_{10} CONTENT IN AMBIENT AIR USING β -RAY ABSORPTION LAW

Zhang Yujun, Liu Wenqing, Zheng Zhaohui, Wang Yaping, Jiang Geyang, Song Bingchao, Zhou Bin
Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Science Hefei-230031, P. R. China

Received date: 2000-07-07

Abstract The principle for measuring the content of PM_{10} (Particulate Matter) in ambient air using β -ray absorption law is described in this paper. The characteristic of G-M counters and the statistical characteristic of data are analyzed. The new implementing method for measuring the content of PM_{10} using β -ray absorption law is also discussed.

Keywords β -ray absorption law; PM_{10} ; Statistical characteristic



Zhang Yujun received his MS in signal processing from the University of Electronic Science and Technology of Xi'an in 1991. Now he is working on his Ph. D. degree in Anhui Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica. His current research interests include optronic signal processing and automatic control and image processing.