

超低排放机组烟尘浓度测量方法的干扰因素分析及选型

韩平*
神华国能集团有限公司,北京 100033

摘要 针对超低排放下低浓度烟尘测量,分别介绍了激光前散射法、交流微电荷法和 β 射线法 3 种测量方法的原理和特点。在采用超低排放工艺的火电机组中,同时用上述 3 种测量方式分别分析了干式电除尘器出口和脱硫吸收塔出口的烟尘浓度。利用称重法对比分析测量结果,各种方法针对不同测量点位适应性迥异进行实验分析。对于干式静电除尘器,激光前散射法响应速度更快, β 射线法则有明显迟滞;对于湿法脱硫及湿式电除尘器, β 射线法更为适用,但需增设前置加热设备来消除湿烟气影响。

关键词 超低排放;烟尘测量;影响因素;选型

中图分类号 X513 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2017)06-3653-06 DOI 10.12030/j.cjee.201603026

Analysis of interference and selection of particle measurement methods for ultra-low emission coal-fired power plants

HAN Ping*
Shenhua Guoneng Energy Group Corporation Limited, Beijing 100033, China

Abstract In this paper, the principle and applicability of three different measurement methods are discussed: laser light forward scattering, AC micro-charge, and β -ray methods, for particulate matter (PM) measurements at low emission concentration. In a coal-fired power plant with ultra-low emission processes, all three of these methods were carried out at the outlets of a dry electrostatic precipitator and flue gas desulfurizer, to measure the dust concentration. Referring to the measurements obtained via the traditional weight method, the three experimental methods were compared for this application. For the dry electrostatic precipitator (ESP), the laser light forward scattering method showed shorter response time than did the β -ray method, while only the β -ray method, with pre-heating of the device, could be adapted for wet desulfurization and wet ESP.

Key words ultra-low emission;particle measurement;influence factors;method selection

近期,随着《火电厂大气污染物排放标准 GB 13223-2011》的执行,2014 年 7 月 1 日起所有火力发电厂燃煤锅炉烟尘排放限值全部达到 $30\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,重点地区火力发电厂锅炉烟尘排放限值全部达到 $20\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下。同时 2014 年 9 月,国家发改委、能源局、环保部联合文件[2014]2093 号文关于印发《煤电节能减排升级与改造行动计划》(2014—2020 年)的通知指出,到 2020 年现役燃煤发电机组大气污染物中烟尘排放限值要低于 $10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

基于上述政策背景,各大发电企业先期展开了燃煤超低排放技术改造工作^[1],以国神集团为例^[2],陆续对天津大港电厂 $4\times 328\text{ MW}$ 、宁夏鸳鸯湖电厂 $2\times 600\text{ MW}$ 、山西王曲电厂 $2\times 600\text{ MW}$ 等机组进行超低排放技术改造,将低温电除尘器、除尘三相电源改造及脱硫吸收塔增设高效除雾器等技术联合,最终将电除尘器和烟囱排放口出口烟尘浓度分别降至低于 $20\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[3-9]。

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2013AA065000)
收稿日期:2016-03-03;录用日期:2016-06-14
第一作者:韩平(1966—),男,硕士,高级工程师,研究方向:燃煤电厂科技环保管理。E-mail:17000162@shenhua.cc
* 通信作者

较低的排放浓度也对目前常用的激光浊度法烟尘浓度连续在线测量技术造成了极大考验。在工程现场中,激光浊度烟尘仪在低浓度工况下测量数据不稳定,而在湿式脱硫下游的烟囱排放口则由于水滴和雾滴气溶胶的存在而无法测量。低浓度烟尘测量仪器的技术要求严格,价值昂贵,相关维护技术门槛高,因此根据机组进行合理的技术选型和应用,是一个非常值得探讨的问题^[10]。

1 低浓度烟尘测量技术分类

一般烟尘浓度小于 $50\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的颗粒物浓度测量属于低浓度烟尘测量,其在线测量技术分为三大类:前向光散射激光法、交流微电荷法和抽取式 β 射线法,下面就 3 种技术逐一介绍。

1.1 前向光散射法

1.1.1 原理

前向散射激光法是将接收探头布置在激光发射头前方进行测量的方法。光散射法是利用烟尘对光的散射作用检测烟尘浓度、灵敏性高,在低浓度场所应用较多。按照其检测散射光位置不同可以分成前向散射、后向散射和边向散射 3 种类型。光散射法一般都是探头式,安装在烟道单侧即可,不需要准直等,安装方便;一般具备自动零点和量程校准功能;灵敏度高,最低量程可以做到 $0 \sim 5\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,适合于低颗粒物浓度下的小直径烟道中适用^[11-12]。

光照射在烟尘上时会被其吸收和散射并偏离入射路径,散射光强度与烟尘粒径以及入射光波长有关。按照烟尘粒径 r 和光的波长 λ 的大小关系,散射分成瑞利散射(即 $r/\lambda < 1$)、Mie 散射($r/\lambda = 1$)和几何光学散射($r/\lambda > 1$),烟气中烟尘粒径范围一般在 $0.1 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 或更大,当入射光范围在 $400 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 或更大。当入射光范围 $400 \sim 600\text{ nm}$ 时,瑞利散射、Mie 散射和几何散射都会发生。散射光在各位方向均有分布,且不同方向的散射光强度不同。

其计算公式为:

$$P_r = P_0 \times K_1^2 \times K_2 \times D \times K_3 \tag{1}$$

式中: P_r 为探测器接收功率, P_0 为探测激光源的输出功率, D 为烟道烟尘浓度, K_1 为挡尘片衰减, K_2 为烟尘反射系数, K_3 为透镜增益。

若 P_0 、 K_1 、 K_2 恒定, P_r 与 $K_2 \times D$ 成正比,设备安装后通过标定可以得到 P_r 与 D 的对应关系,即可以计算出烟尘浓度值:

$$D = A/K_2 \times P_r \tag{2}$$

式中: $A = 1/(P_0 \times K_1 \times K_2 \times K_3)$ 。

1.1.2 系统结构

前向散射激光法的仪器结构原理如图 1。其结构分为激光发射头(也叫光源)、分光镜、测量室、前向光学反射镜、接收光纤、光学接收头及相关冷却系统组成。激光器发出的光被烟尘散射后,其前向散射光波被中间投射边缘的发射镜反射并汇聚至光纤中,并最终由探测器检测。

1.1.3 特点

前向散射法使用的光源为激光,优点是发射、接收和反射模块可以以一体探头的形式插入烟道后管道的一侧,因而安装不需要光路准直。仪器安装简单,维护工作量小。其检测浓度可以达到 $0 \sim 10\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由于前向散射法光程设计较短,就采样方法来看,可以近似为点测量,对烟道前后直管段有一定的要求,一般要求有一定长直管段的烟道上。

前向散射法仪器不适合安装在烟尘浓度变化大的场所。浓度大于 $50\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时线性较差,主要原因

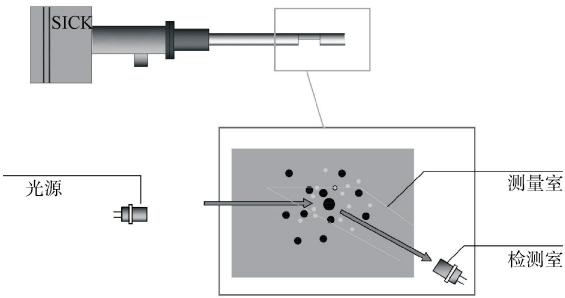


图 1 前向散射激光法原理结构
Fig. 1 Schematic diagram of laser light forward scattering method

是烟尘浓度偏大时,烟尘几何尺寸偏大,此时散射光强表现为几何散射光强,瑞利散射和 Mie 散射光强信号太弱,因此测量表现为非线性。

1.1.4 偏差和漂移

前向散射激光法采用了多元光电探测元件,需要与入射光严格对中,否则将导致测量误差的出现。一般不良的对中与入射光倾斜和偏心 2 种情况。后者造成的误差较前者为高,因此,在实际应用中降低入射光偏心程度极为重要。

此外基于 Mie 散射理论的数据计算过程需要输入折射率参数。在颗粒物粒径较小的情况下,向前散射法对折射率非常敏感,相对误差可高达 8%。因此,测试中应尽可能选择颗粒物的实际折射率数值,对于无法确切获得的颗粒物应将折射率设定为大于 2.0 来减小误差。

对于前向散射法,除了上述避免数据偏差的方法外,目前还通过扩大前向光电探测器的尺寸以增加采光散射角和采用傅里叶反变换的方式提高对细颗粒物的测量准确性和降低数据漂移。

1.2 交流微电荷法

1.2.1 原理

交流耦合式电荷法是利用带电烟尘运动在感应电极上产生交变信号的波动性而进行测量烟尘浓度的方法^[13]。

带电烟尘在经过电极附近时,会产生一个交变的感应电流,交变感应电流经过运放电路产生一个交变电压。再经过傅里叶变换后分离出直流信号和频率信号,将频率信号进行提取、解析,去除背景噪声频段和直流频段。剩余信号即为烟尘信号,对有效频段信号进行傅里叶逆变换并合为电流信号。电流信号与烟尘浓度关系如下:

$$D = I \times K_1 \times e^{uv} + B$$

(3)

式中: D 为待测烟尘浓度, I 为仪表输出的电流信号, K_1 为增益系数, e^{uv} 为速度补偿系数, u 为常量, V 为风速, B 为常量。

1.2.2 基本结构

其基本结构由采样探杆、及经过特殊工艺的传输导线、微处理器、速度补偿、数据输出单元组成。其核心是灵敏性极高的探头和微处理器单元。交流感应信号经过传感器形成微电流(见图 3),再经过特殊处理的屏蔽电缆,进行微处理器,在此完成的电流信号到电压信号的放大转换,完成电压信号的傅立叶解析和滤波,去处背景噪声及电容干扰,再对滤波后的信号进行傅立叶逆变换,进行电流信号输出。

1.2.3 特点

交流微电荷法的一次测量元件为金属探杆,不需要反吹扫装置,并且不会因为烟尘的粘结造成测量误差。同时不受烟尘颜色的干扰,有较强的现场适应性。随着近年来数字电路的技术和微处理器技术的进步,较好解决了漂移和信号抗干扰问题。由于交流微电荷法的探杆最长可达 3 m,属于线测量,对直管段要求较低,可以直接安装在结构紧凑的电除尘器出。为了减少电场对仪器的影响,在电除尘器出口安装交流微电荷法的仪表时需要加装法拉第笼装置,以屏蔽外部电场的干扰。交流微电荷法灵敏度较高,可以测量 $30\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下的烟尘浓度^[3]。

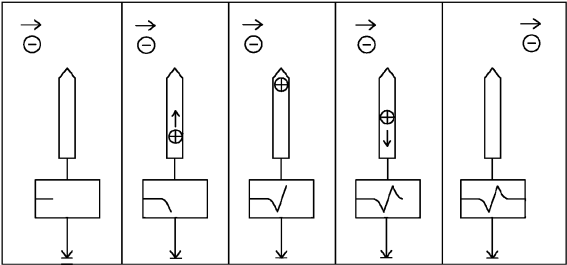


图 2 交流耦合简图

Fig. 2 Schematic diagram of AC coupling

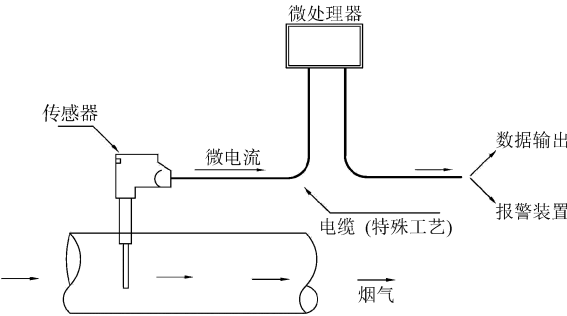


图 3 交流微电荷法简图

Fig. 3 Schematic diagram of AC micro-charge method

1.2.4 偏差和漂移

由于烟气中的紊流会影响撞击和感应电流,能够降低测量平均统计值,即直流信号。在极端紊流情况下直流信号甚至可以降至为零,因此良好的微电荷检测设备应该有较好的直交流性能,但放大颗粒物带来的微弱电流信号时,电子元器件会产生信号漂移和噪声。没有适当的补偿,信号就会被噪声掩盖,失去测量意义。

在微电荷测量技术研究初期,常采用分离信号处理单元对偏差和漂移进行规避,该方法容易丢失电流信息。故目前主要通过提高传感器采样频率至 10 kHz 以上来避免交流信号的空间过滤效应,同时避免直流信号的降低。通过对多组数据的信号滤波处理、统计和频谱分析,基于准确直流信号的精密算法能够提供更为精确的测量结果,避免长期运行带来的数据偏差漂移。

1.3 β 射线法

1.3.1 基本原理

β 射线具有一定的穿透性,当它穿过一定厚度的吸收物质时,其强度随吸收物质厚度的增加而逐渐减弱,即 β 吸收。当吸收物质厚度远小于 β 粒子的射程时,吸收近似满足如下关系:

$$I = I_0 e^{-\mu X} \tag{4}$$

式中: I_0 为未通过吸收物质的 β 射线强度, I 为通过一定厚度吸收物资的 β 射线强度, X 为吸收物质的质量密度, $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, μ 为质量吸收系数, $\text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$, μ 与吸收物质的属性相关,由式(4)可以得到:

$$X = -\frac{1}{\mu} \ln(I/I_0) \tag{5}$$

吸收物质的厚度(即质量密度)与 β 射线透过率的对数成正比。只要测得通过吸收物质前后的射线强度,就可以得到物质的质量^[14-16]。

1.3.2 系统构成

β 射线法一般分为采样单元和分析单元,采样单元是由采样探头、稀释模块、流量控制模块和抽取泵等组成,其作用是将烟尘烟气从烟道中抽取出来,并稀释降低至露点以下,通入分析模块。分析模块包括运动模块和检测模块,烟尘就被截留在纸带上,通过测量纸带沉积烟尘前后探测器的计数值得到烟尘浓度。稀释气为经过净化的压缩空气,过量的稀释气最终又排放回烟道中。检测模块一般为¹⁴C,探测器主要有比例计数器、盖革管和光电倍增管三类。

为了获得代表性的样品,提高测量的准确度,采样管的前端的采样嘴必须正对气流,且烟气流速等于采样流速;采用高压气体定期反吹皮托管,防止烟尘沉积在皮托管处影响采样;用稀释气稀释烟气防止水气和其他气溶胶在滤纸带上冷凝,干扰 β 射线。

1.3.3 特点

β 射线吸收法为重量测量法,其优点是不易受烟尘粒径变化、组分变化和水滴变化对测量影响小;直接测量断面点的质量浓度,属于点测量。该方法适合测量湿度大、烟尘粒径和组分变化大、流速变化不大的场合。对高湿地点的场所,需要增加稀释采样装置。β 射线吸收法的缺点是抽取累计测量,因此实时性较差,一般为 20 ~ 30 min 出一个数据,因此不能用在实时性要求高的场合。同时 β 射线吸收法为点测量,对烟道直管段要求也较高。

2 超净排放条件下烟尘浓度测量影响因素分析

超净排放下机组的烟尘浓度的在线连续测量技术,其烟尘浓度测量点,主要有 3 个,一是干式静电除尘器出口的干烟气,一般烟尘浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下。干式静电除尘器出口烟道特点一般为矩形大烟道,多有转角和拐弯。二是湿法脱硫出口,一般烟尘浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下,为饱和湿烟气。湿法脱硫出口烟道一般圆形大烟道,多为转角和拐弯。三是湿式电除除尘器出口,一般烟尘浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,为饱和湿烟气。湿式电除尘器出口一般为矩形大烟道,多有转角和拐弯。

综合来看,低浓度烟尘在线测量技术主要影响因素为仪表的灵敏度、安装位置和烟气中是否含有雾滴

及水滴因素影响。下面以某厂 600 MW 实现超净排放机组为例,进行几个方面的定量分析。

2.1 仪表灵敏度在烟尘浓度波动工况实验分析

实验方法是在干式电除尘器出口的同一个烟道截面上安装 3 种方法的仪表与手工称重法比较在不同负荷下进行测量烟尘浓度,实验结果如下表 1。

表 1 不同烟尘浓度测量技术测试结果及偏差				
Table 1 Results and relevant deviations of different particle measurement methods				
mg · m ⁻³				
偏差	方法			
	光散射法	交流微电荷法	β 射线法	手工法
50% 负荷	11.6	12.1	14.4	12.2
偏差值	-0.6	-0.1	2.2	—
偏差率/%	-4.9	-0.8	18	—
60% 负荷	13.2	14.5	13.7	14.1
偏差	-0.9	0.4	-0.4	—
偏差率/%	-6.3	2.8	-2.8	—
70% 负荷	15.1	16.4	16.4	15.7
偏差值	-0.6	0.7	0.7	—
偏差率/%	-3.8	4.5	4.5	—
80% 负荷	16.4	16.4	17.2	16.1
偏差	0.3	0.6	1.1	—
偏差率/%	1.8	3.7	6.8	—
90% 负荷	17.5	17.8	17.2	17.4
偏差	0.1	0.4	-0.2	—
偏差率/%	0.05	2.3	1.1	—
100% 负荷	19.6	19.7	18.5	19.2
偏差	0.4	0.5	-0.7	—
偏差率/%	2	2.6	-3.6	—

由表 1 可知,在不同的烟尘浓度下,同一测量截面上的 3 种测量方法的数据与手工称重法比较,光散射法最大偏差率为 -6.3%,交流微电荷法最大偏差率 4.5%,β 射线法最大偏差率 18%。β 射线法偏差大是因为取样头偏小,取样量太低,造成样本采样波动大造成的。光散射法与交流微电荷法偏差率均小于 10%,且绝对偏差值不大。

2.2 湿烟气对烟尘测量的影响分析

烟气的水滴和雾滴对低浓度湿烟气的测量影响是较大的影响因素。主要原因是湿法脱硫后和湿式电除尘器后既有不含固体物质雾滴同时也有被水滴包覆的烟尘颗粒物。为了研究湿烟气对不同测量方法仪表造成的定量关系,将 3 种不同方法的仪表安装在脱硫吸收塔的出口烟道同一个截面上。不同负荷下不同测量方法的实验结果如表 2 所示。

表 2 湿烟气对烟尘测量的影响											
Table 2 Affection of particle measurement by wet flue gas											
偏差	方法										
	光散射法		加热式光散射法		交流微电荷法		加热式交流微电荷法		β 射线法		手工法
机组负荷率/%	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100	50 100
湿法脱硫后测量值 /(mg · m ⁻³)	30.4	80.4	13.1	21.5	17.2	27.2	12.1	23.2	15.4	23.2	12.5 20.4
偏差值 /(mg · m ⁻³)	17.9	60	0.6	1.1	4.7	6.8	0.4	2.8	0.5	0.7	— —
偏差率/%	143	480	4.8	5.3	37.6	33	3.	13.7	4	3.4	— —

由表 2 得知,脱硫吸收塔后烟尘测量光散射法与手工比较最大偏差率可达 480%,交流电荷法可到 37.6%, β 射线法最大偏差为 4%。烟气含有大量液滴,对于激光散射影响最大,交流电荷法居中, β 射线法最小。 β 射线法测量影响最小,主要原因是 β 射线法测量中已经含有气体稀释工艺,将气体的湿度进一步降低,削弱了水滴对烟尘测量的影响。交流微电荷法影响居中,原因是交流微电荷法也可以将带水的固体烟尘测量出来。但是如果在光散射仪表增加前置烟气加热装置,由于液滴在加热装置变成蒸汽,则光散射法仪表最大偏差降低至 5.3%,几乎和 β 射线法等同。由于湿法脱硫后烟道条件和湿式电除尘器后出口烟道条件类似,因此上述分析结果一般视为两者等同。

3 结论

超低排放的火电机组由于选择技术工艺路线、烟尘烟气测量点位置和目的不同,应选择不同的低浓度烟尘的测量方法。

对于干式静电除尘器出口测量,由于测量目的是作为静电除尘器的出口浓度监视和控制,要求较高的灵敏度和快速响应能力,使用光散射法仪表可以得到较好的快速响应性, β 射线法烟尘在线仪表有一定的时间迟滞性。

对于湿法脱硫及湿式电除尘器的出口烟尘测量,主要测量目的是环保监测和计量,因为此处烟气湿度较大并且一般没有足够直管段,需要使用前置加热功能的仪表来消除湿烟气的影响。

同时,由于实验时间关系限值,未能对在线仪表长周期漂移性能进行跟踪分析。对低浓度在线测量仪表长周期运行漂移特点也是本实验不足之处。

参考文献

- [1] 闫克平,李树然,冯卫强,等. 高电压环境工程应用研究关键技术问题分析及展望[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2528-2544
- [2] 肖创英. 促进燃煤电厂烟尘超低排放[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 12-12
- [3] 陈建阁,王杰,吴付祥. 交流耦合式电荷感应法粉尘浓度检测技术研究[J]. 环境工程, 2014, 32(4): 131-134
- [4] 马洪金,徐建元,王仕龙,等. 燃煤电厂电除尘 PM 10 和 PM 2.5 的排放控制 VI: 以 $75 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ 工业锅炉为例分析讨论电除尘的运行(嘉兴协鑫环保热电分析)[J]. 科技导报, 2015, 33(18): 20-22
- [5] 马元坤,秦松,陈亮,等. 燃煤电厂电除尘 PM 10 和 PM 2.5 的排放控制 V: 以 660 MW 机组为例分析讨论高压电源运行优化[J]. 科技导报, 2015, 33(6): 69-72
- [6] 沈欣军,郑钦臻,宁致远,等. 燃煤电厂电除尘 PM10 和 PM2.5 的排放控制 IV: 采用二维 PIV 除尘[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 43-50
- [7] 王仕龙. 燃煤电厂电除尘 PM 10 和 PM 2.5 的排放控制 II: 电除尘电源改造与 PM 10 和 PM 2.5 的排放(以 660 MW 机组为例)[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 34-38
- [8] 王仕龙,陈英,韩平,等. 燃煤电厂电除尘 PM 10 和 PM 2.5 的排放控制 III: 电除尘电源及小分区改造与 PM 10 和 PM 2.5 的排放(以 $4 \times 330 \text{ MW}$ 机组为例)[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 39-42
- [9] 王仕龙,陈英,韩平,等. 燃煤电厂电除尘 PM 10 和 PM 2.5 的排放控制 I: 电除尘选型及工业应用[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 23-33
- [10] 王强,杨凯. 烟气排放连续监测系统 CEMS 监测技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015
- [11] 李霖峰,张雷,董磊,等. 光后向散射法测烟尘浓度的实验研究[J]. 光子学报, 2006, 35(6): 915-918
- [12] 王式民,陆勇. 前向小角光散射法测量颗粒平均尺寸[J]. 武汉大学学报: 自然科学版, 1997, 43(5): 691-696
- [13] 罗超,黄齐顺,查智明,等. 基于微电荷法的烟气颗粒物浓度检测技术及其应用[J]. 电力科技与环保, 2014, (4): 16-19
- [14] 施建兵,江建军. β 射线法测定 PM10 不确定度的评定[J]. 污染防治技术, 2010, 23(5): 91-92
- [15] 张予燕. β 射线法与振荡天平法测定环境中 PM10 的对比分析[J]. 仪器仪表与分析监测, 2006(1): 45-46
- [16] 张玉钧,刘文清,郑朝晖,等. 大气中可吸入粉尘(PM10) β 射线法测量的理论与数据处理[J]. 量子电子学报, 2001, 18(1): 75-81