

尘埃粒子计数器计数损失的分析研究

天津大学环境科学与工程学院 刘俊杰 朱能 田喆

文 摘 光散射式尘埃粒子计数器是用来测量空气洁净度的重要仪器, 粒子计数器的主要测量误差为重叠损失误差。本文介绍了产生计数损失误差的原因, 应用 Poisson 随机过程分析确定了粒子计数器的计数损失, 并提出了测量计数损失的实验方法。最后, 给出使用粒子计数器测量中减少计数损失的方法。

关键词 洁净室 尘埃粒子计数器 计数损失 重叠损失

Abstract Airborne particle counter (APC) is important instrument for air cleanliness certification in cleanroom. The main error of APC is coincidence loss. We present the reason of counting loss and the analysis of APC's counting loss error with Poisson random process. The testing method to measure the counting loss of calibrated APC is suggested as well. Finally, the suggestion on reducing counting loss APC is provided.

Key words Cleanroom Airborne particle counter Counting loss Coincidence loss

1 引言

许多工业厂房对厂内的空气洁净度有一个很高的要求, 洁净厂房的洁净级别常以单位体积的空气中最大允许的颗粒数即粒子计数浓度来衡量。旧的美国联邦标准 209E “洁净室及洁净区中空气悬浮粒子洁净度级别”^[1] 已经在 2001 年 11 月 29 日被新的国际标准 ISO14644-1 “洁净室及相关受控环境, 第一部分: 空气洁净度等级”和 ISO14644-2 “洁净室及相关受控环境, 第二部分: 认证 ISO14644-1 相符性的测试和监测技术条件”^[2] 所取代。为了和国际标准尽快接轨, 我国根据 ISO14644 制定了新的国家标准 GB50073-2001 “洁净厂房设计规范”^[3], 此规范已在 2002 年 1 月开始执行。在国际标准 ISO14644 和国家标准 GB50073-2001 中洁净室的洁净度划分为 9 级。

光散射式尘埃粒子计数器是用来测量空气洁净度的重要仪器。在安装好的洁净室的实际测量中经常发现, 使用不同的粒子计数器得到的测量结果相差很大, 有时差值差到一个数量级。这种测量偏差直接影响洁净室环境的洁净级别的最终

验收结果。这一问题已引起广泛注意, 并且有必要搞清引起测量结果偏差的原因。

另外, 当采用国标 GB 12218-89 “一般通风用空气过滤器性能试验方法”用大气尘分组计数法检测粗、中、高中、亚高效过滤器时, 必须用一台或两台粒子计数器同时测量过滤器的上下风侧气流中粒径大于或等于某一粒径 (例如 0.5, 1 或 5 微米) 的粒子浓度, 然后计算过滤器的在相应粒径下的计数效率。但是在直接使用粒子计数器测量时, 经常产生“负”效率的测量结果, 即过滤器下风侧的粒子浓度高于过滤器的上风侧浓度, 造成受试过滤器上、下风侧气流中大气尘计数浓度之差为负值。此时表明测量结果肯定有很大的误差, 产生误差的原因是粒子计数器的计数测量结果。

产生以上测量问题的主要原因是粒子计数器的重叠损失误差, 同时粒子计数器的主要测量误差为损失误差。

2 粒子计数器产生计数损失误差的原因

光散射式粒子计数器是以尘埃粒子在白光束或激光束中产生的光散射现象为原理。当测试区

洁净与空调技术

域内的空气中尘埃粒子经采样吸气孔进入粒子计数器内部光源区。光源产生的光束经过光学透镜组以一定角度照射被采样空气，空气中微粒快速通过测量区时，把入射光散射形成一个光脉冲信号，散射光脉冲经过光电倍增管的作用线性地转化为相应幅度的电脉冲信号，然后以内置的脉冲高度分析器电子线路来完成对各种规格的电脉冲幅度的计数工作，各种电脉冲的幅度就相应于不同的微粒大小，脉冲数量就是相应的微粒数目。其工作原理如图 1 所示：

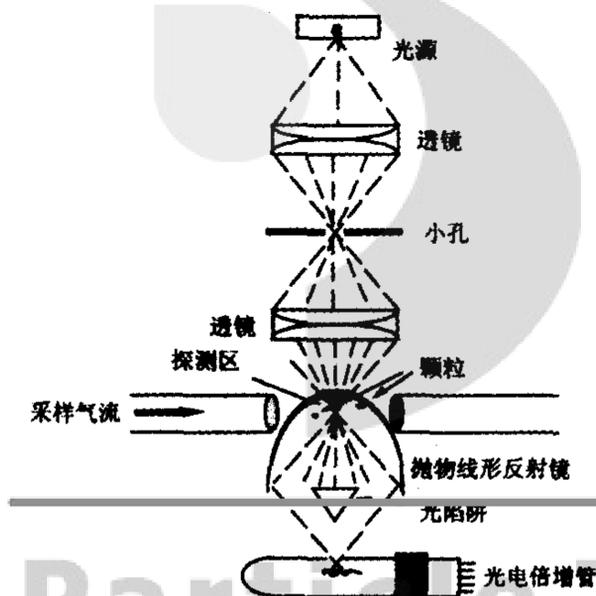


图 1 光散射式尘埃粒子计数器工作原理

当有两粒或两粒以上的尘埃同时进入探测区时，仪器只输出一个增大的脉冲信号，而不是真实的尘埃粒子个数相对应的脉冲信号。这是因为微粒重叠的结果，此时粒子计数器指示的微粒浓度将小于真实浓度，而且会形成一个偏高的大微粒数值。

另外，粒子计数器计数电路处理脉冲信号时也需要一定的回复时间，也称为计数系统的无效时间 (Dead Time)，在这个时间如果有微粒穿过探测区域，但此时的脉冲仍在记录前一个微粒，这将导致另一种微粒数的计数漏计，造成损失误差。

综上所述，重叠计数损失表示由于两个或两个以上粒子同时通过光探测区时，或电路的延迟时间所造成的重叠漏计数。如果被测量的空气中的粒子浓度增大，则在某时刻超过 1 个微粒出现在探测区的可能性会变大。粒子计数器产生重叠计数损失的可能性也增大，就越不能正确显示粒子浓度的真实值，因此，要求对于每个粒子计数器都要确定其最大测量粒子浓度，以保证此时的重叠计数损失在一定的可接受范围内，例如小于 10% 或 5%。

3 应用随机过程分析确定粒子计数器的计数损失

在粒子计数器仪器内部光源探测区内微粒出现 1 粒，2 粒，3 粒……等事件出现的次数是遵循 Poisson 过程的概率分布。

当出现在探测区的微粒重叠时，不论是 2 粒还是更多几粒的重叠，都将被记数为 1 粒。当利用 Poisson 分布粗略估计微粒数目，其关系式如下：

$$P(x) = e^{-\mu} \mu^x / x!, \quad x=0,1,2,\dots \quad (1)$$

μ : 长期平均值

K : 在给定时间内通过探测区的微粒数目

$P(x)$: 事件出现的概率

上式中 μ 是在探测区体积内的平均微粒数，即在长期过程中可以认为采样空气中微粒是均匀发布的，即：

$$\mu = C_0 * V \quad (2)$$

C_0 : 采样空气中真实的尘埃粒子浓度

V : 计数器中探测区可观察到的空气体积

在可观察的探测区体积中没有微粒的概率为： $P(0) = e^{-\mu}$ (3)

因此在同一时间，可观察的体积中至少有一粒的概率为：

$$P(x \geq 0) = 1 - P(0) \quad (4)$$

因而，在一特定时刻，通过粒子计数器测定得到的显示微粒数值为：

$$\mu_i = 1 - P(0) = 1 - e^{-\mu} \quad (5)$$

在这里 μ_i 也可以表示为 $\mu_i = C * V$ (6)

其中 C : 通过光散射粒子计数器测量得到的粒子浓度

公式 5 除公式 2 得到重叠后和重叠前的粒数比值为：

$$\mu_i / \mu = 1 - e^{-\mu} / \mu \quad (7)$$

则重叠损失比为：

$$C / C_0 = (1 - e^{-\mu}) / \mu \quad (8)$$

在一些文献中，采用了一个简单的方程表示重叠损失比：

$$C / C_0 = e^{-\mu} \quad (9)$$

将公式 (2) 代入公式 (9)

$$\text{则 } C / C_0 = e^{-C_0 V} \quad (10)$$

重叠损失误差和粒子浓度之间的关系如图 2 所示：

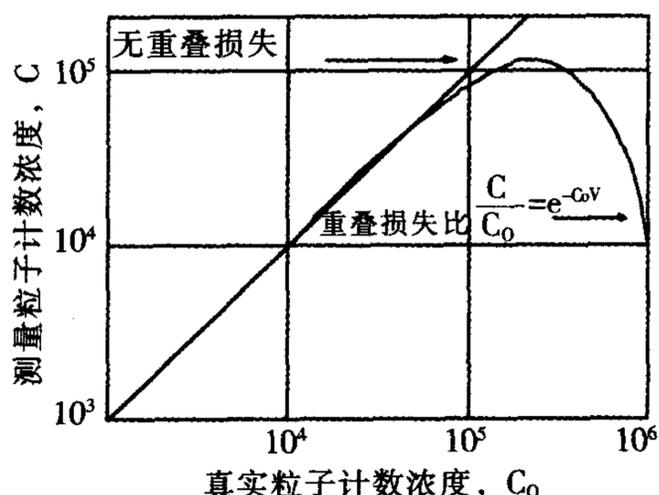


图2 重叠损失误差和粒子浓度之间的关系
(浓度单位为个/立方英尺)

此图上可以看出粒子浓度越大, 由于重叠损失的影响, 计数器测量值越来越偏离真实值。一般当粒子浓度超过 10^5 个/立方英尺, 计数器的测量结果就存在较大的重叠损失误差了, 使测量值低于真实值。当粒子浓度超过某一极限, 计数器的计数值可能为 0。

粒子计数器计数系统的无效时间 τ 对于一个计数器来说一般是不变的。当一个微粒穿过探测空间时, 经过一段时间, 由散射光产生的电脉冲达到一个峰值, 并且此峰值被计数为大于等于某一对应粒径的粒子, 这段时间也称为回复时间。当回复时间大于微粒通过探测区所用的时间 t 时, 此时的粒子就会被漏计, 这是一种绝对的计数损失。回复时间依赖于脉冲的强度, 以及仪器信号处理电路的性能, 这也是不同粒子计数器性能优劣的区别所在。一般由于无效时间引起的计数损失较小。

可以用 Poisson 分布综合考虑重叠和无效时间的计数损失。通常损失比率 C/C_0 的数值美国标准规定应大于 90%^[4], 日本标准规定应大于 95%^[5]。

4 计数损失的实验测量方法

使用图 3 连接实验设备。要求标准粒子计数器至少比被测粒子计数器在最大可测微粒浓度上大一个数量级。

将计数器设置为累积计数模式, 打开气溶胶发生器, 调节稀释空气量直到标准粒子计数器显示浓度大约为被测粒子计数器最大可测浓度的 2 倍。

打开被测粒子计数器并记下单位时间显示的微粒计数, 根据对应的采样流量速率, 计算出计

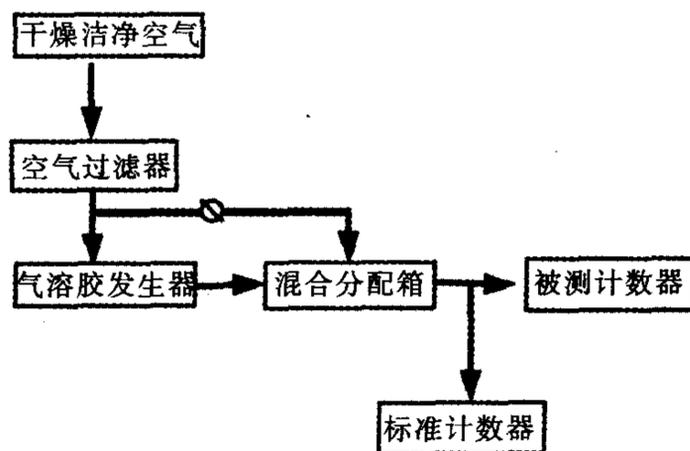


图3 计数损失测量流程图

数浓度。

调节稀释空气流量使标准粒子计数器显示浓度为被测粒子计数器最大浓度的 150, 100, 90, 85, 65 和 50%。对应于标准粒子计数器浓度记下被测粒子计数器的浓度, 以上数据可以制成关于标准粒子计数器真实浓度时对应被测粒子计数器测量值的图表。当真实浓度等于或小于最大浓度时显示浓度应为真实浓度的 $100 \pm 5\%$, 若不这样, 检查被测粒子计数器, 校正采样流速。若没问题, 则要调节光系统使探测区与采样流方向完全对应。

5 实际使用粒子计数器测量中减少计数损失的方法

光散射式尘埃粒子计数器测量洁净室的空气洁净度时, 要根据洁净级别合理选用粒子计数器。当计数器的采样流量速率越大时, 其最大可测微粒浓度越小。这是因为在探测区体积内的平均微粒数 μ 可用以下公式表示:

$$\mu = Q \cdot t \cdot n_0$$

式中 Q —采样空气流量速率 (m^3/s)

t —微粒通过探测区的时间 (s)

n_0 —计数损失小于 5% 时, 最大额定可测粒子浓度 (个/ m^3)

从公式中看出, 当计数损失小于 5% 时, 探测区体积内的平均微粒数 μ 会是一个确定值, 采样流量速率和最大可测微粒浓度成反比。当测量高级别洁净室时, 例如 100, 10, 1 级 (FS 209E 标准), 应使用大采样流量速率 (要求大于 1 立方英尺/分钟), 高灵敏度 (最小粒径 0.3 或 0.1 微米) 的粒子计数器保证测量的准确度。但在低级别的洁净室测量中, 例如 10, 30 万级, 上述粒子计数器就不适用了, 可以使用小采样流量速

(下转第 43 页)

表5 第16届国际污染控制学术会议论文分项目录

序号	名称	
一	污染控制 I	
1	手段 I	Facilities I
2	洁净室运行 I	Cleanroom Operations I
3	悬浮分子污染 I	Airborne Molecular Contamination I
4	静电排放	Electrostatic Discharge
5	悬浮分子污染 II	Airborne Molecular Contamination II
6	手段 II	Facilities II
7	人员污染	Human-Sourced Contamination
8	应用 II: ISO/TC 209	Applications II: ISO/TC 209
9	过滤器的改进	Filter Update
10	大学文章	University Presentation
11	ISO14644-1 及-2 与 FED-STD-209E 对比 Comparison of ISO14644-1 and -2 and FED-STD-209E	
12	洁净室运行 II	Cleanroom Operations II
二	与污染控制相关的设计、测试及评估	
13	内部空气质量	Internal Air Quality
三	设计、测试及评估	
14	分析技术 I	Analysis Techniques I
15	可靠性分析和测试	Reliability Analysis and Test
16	分析技术 II	Analysis Techniques II
17	持续性——基础与概念	Sustainability-Basic and Concepts
18	温度测试, 数据与分析	Thermal Test, Data, and Analysis
19	测试方法 I	Test Methods I
20	模拟测试技术	Modeling/Simulation Test Techniques
21	测试设施	Test Facilities
22	测试方法 II	Test Methods II
23	军事项目中使用商用产品 (COTS) 的经验	COTS Experience on Military Programs

(上接第 23 页) 率 (要求大于 0.1 立方英尺/分钟), 低灵敏度 (最小粒径 0.5 微米) 的粒子计数器。

用大气尘分组计数法检测通风过滤器时, 必须用合适的稀释器配合粒子计数器测量过滤器的上风侧气流中的粒子浓度, 避免产生“负”效率的测量结果。

6 结论

光散射式粒子计数器的主要测量误差为损失误差。应用随机过程可以分析损失误差的大小, 同时可以用实验方法验证损失误差。根据粒子计数器损失误差的特点, 在实际测量中应注意合理选用计数器, 同时必要时使用稀释器保证测量准确性。

参考文献

- 1 US Federal Standard 209E, "Airborne Particulate Cleanliness Classes in Cleanrooms and Clean Zones", US General Service Administration, 1992
- 2 ISO 14644-1,2 "Cleanrooms and Associated Controlled Environments, Part 1: Classification of Air Cleanliness; Part 2: Specifications for Testing and Monitoring to Prove Continued Compliance with ISO 14644 -1", International Organization for Standardization, 1999
- 3 中国国家标准 GB50073-2001, "洁净厂房设计规范", 中国国家技术监督局, 2002
- 4 ASTM F649-80, "Standard Practice for Secondary Calibration of Airborne Particle Counter Using Comparison Procedures", ASTM, PA, USA, 1999
- 5 JIS B992: 1997, "Light Scattering Automatic Particle Counter", JIS Committee, Japan, 1997. □