

新型烟气流速和颗粒物浓度实时在线监测仪

杨阳 董凤忠* 倪志波 庞涛 吴边 张志荣 曾宗泳 王煜
(中国科学院合肥物质科学研究院安徽光机所,
合肥市科学岛蜀山湖路 350 号 1125 信箱, 230031)

摘要: 本文介绍了一种新型的烟气流速和颗粒物浓度实时在线监测仪。以烟道内颗粒物浓度场的起伏引起的光闪烁为基础, 讨论了利用光闪烁测量烟气流速和颗粒物浓度的基本原理, 并给出了闪烁互相关的理论表达式。基于光闪烁原理, 利用自主研发的新型烟气流速和颗粒物浓度实时在线监测仪进行了工业现场实际测量, 得到了实际烟道中光闪烁信号, 并将计算出的烟气流速与用皮托管测量的流速结果进行了对比, 证实了新型监测仪的实用性。

关键词: 光闪烁; 低频; 互相关; 流速; 颗粒物浓度

A Novel Online Monitor for Stack Gas Flow Velocity and Particulate Concentration Based on Optical Scintillation

Yang Yang, Dong Fengzhong*, Ni Zhibo, Pang Tao, Wu Bian,
Zhang Zhirong, Zeng Zongyong, Wang Yu

(Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract: A novel online monitor for simultaneous measurements of stack gas velocity and particle concentration was described in this paper. Based on the optical scintillation caused by the fluctuations of particle concentration field, the fundamental principles used the low frequency part of optical scintillation to measure velocity and particle concentration of stack gas flow were discussed, and the theoretical formula of cross-correlation was given. By analyzing the experimental data, the spectrum and cross-correlation of optical scintillation were obtained. The cross-correlation was used to calculate the velocity of stack gas flow. Comparison of measurement result of the stack flow velocity using the monitor presented in this paper and Pitot tube demonstrated the practical applicability of the monitor.

Key words: optical scintillation; low frequency; cross-correlation; flow velocity; particle concentration

*Corresponding Author: Feng-zhong DONG, E-mail: fzdong@aiofm.ac.cn Tel: +86-551-5595001, Fax: +86-551-5591054

1 引言

颗粒物是大气最重要的污染物之一，燃煤发电厂、水泥厂、金属冶炼厂、焚烧厂、玻璃制造厂等工业排放的烟气是大气中颗粒物和污染气体的主要来源。要控制、治理污染，必须对工业企业的污染物排放实行在线连续监测，必须对烟尘排放速度、颗粒物浓度、排放总量进行准确测量。

光通过工业管道烟气流产生闪烁的原因有很多。首先，当光束通过烟气流时，颗粒物随机地进入或移出视场引起光强的起伏^[1~4]。这种由粒子统计起伏造成的闪烁，仅在视场很小、光程很短、粒子直径较大、浓度较低的情况下才能够被观测到。在工厂大型烟道使用较大直径的发射、接收透镜测量光闪烁时，由于粒子数很多，因此闪烁强度很低，一般接收不到颗粒物空间分布统计起伏造成的闪烁信号。在高温烟气流中，因为湍流，很容易造成折射率空间时间的起伏，当光束通过时会产生闪烁。当发射望远镜口径较大（对于非相干光），或者接收透镜口径较大，例如 cm 量级时，由于所谓“孔径平滑”效应^[5]，闪烁的特征频率为

$$f \approx \frac{v}{D_r} , \quad (1)$$

如果 $D_r < 1\text{mm}$ ， f 在 10^4Hz 以上。折射率湍流造成的闪烁的频率集中在高频部分，可达到几百到几千赫兹。可以利用光闪烁的高频部分进行烟气流速测量^[6]，但当烟气流中温度分布均匀，折射率起伏很弱的情况下，这种方法就很难测得流速了。颗粒物浓度场的起伏同样会造成光闪烁，且烟气流造成的光闪烁的低频部分和颗粒物浓度场的随机起伏有关。在烟气流光闪烁的低频部分，其光强起伏的标准差和颗粒物浓度有很好的线性关系，可用于浓度测量^[7]。

本文主要介绍了一种新型烟气流速和颗粒物浓度监测仪，仪器能够根据烟道的实际情况在较大范围内改变两接收光瞳间的距离，对数据进行实时处理、存储和显示，不仅能测量由温度起伏造成的高频闪烁信号，同时也可以处理因烟尘浓度起伏引起的低频光闪烁信号，从而给出光路上流速的算术平均值。新流速测量仪可在烟道折射率湍流非常弱(光速流速计不能使用)的情况下获得光闪烁信息，具有测量精度高，非介入，安装方便、适用范围更广等特点。此外，本文也对使

用低频光闪烁信号测量烟气流速和颗粒物浓度的基本原理做了简要分析。

2 仪器的测量原理及结构

2.1 仪器的结构

如图 1 所示,仪器使用了双光源、双探测器的分体式结构,可根据烟道的实际情况在较大范围内改变两探测器间的距离。采用经高频调制的 LED 为光源。入射光经过聚焦透镜后到达探测器进行光电转换,电信号经过信号处理电路后进入数据处理设备。



图 1 测量仪器实物图

根据工业现场的实际情况,增加了处理因烟尘浓度起伏引起的低频光闪烁的能力,使仪器能够测量温度分布均匀、折射率起伏非常微弱的情况下的光闪烁信号。自适应的软件处理系统,可以根据实际情况选择不同频段的闪烁信号进行处理。系统硬件部分增加了用于提取对数光强起伏标准差的电路输出,软件部分对这一信号进行处理得到颗粒物浓度。

2.1 测量原理

利用高频闪烁信号测量烟气流速,已有比较成熟的理论。这里我们讨论利用低频闪烁信号进行流速和颗粒物浓度测量的基本原理。闪烁信号互相关的接收采用图 2 的方式。

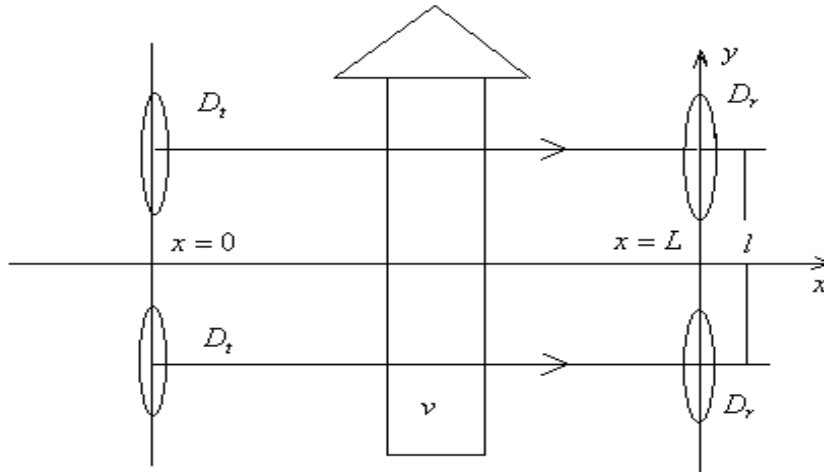


图 2 闪烁信号的发射和接收示意图

光源发射的光束为发散的球面波，光束轴线在 x 方向，原点在 $x=0$ 处，烟气流在 y 方向上流动，平均速度为 v ，接收探测器在 $x=L$ 处，两发射透镜和两接收透镜彼此间的距离均为 l 。

设烟气流的消光系数为 $\alpha(r,t)$ ，由比尔朗伯定理，探测点接收到的对数光强可以表示为：

$$\ln I(t) = \ln \langle I \rangle - \int_0^L \alpha'(r,t) dx. \quad (2)$$

式中角括号 $\langle \cdot \rangle$ 表示系统平均， $\alpha'(r,t)$ 为脉动量。对于均匀各向同性，时间平稳的湍流，相关函数仅和两点的距离和时间延迟有关，闪烁互相关函数为

$$C_{\ln I}(\rho, \tau) = \int_0^L \int_0^L R_\alpha(r_1 - r_2, \tau) dx_1 dx_2, \quad (3)$$

式中 $R_\alpha(r_1 - r_2, \tau)$ 为消光系数的相关函数。但是由于湍流沿 y 轴运动的，此时 y 方向考虑湍流的影响，根据 Taylor 冻结湍流假定，并且按照图 2 所示几何关系，有

$$R_\alpha(r_1 - r_2, \tau) = R_\alpha(x_1 - x_2, l - v\tau, 0), \quad (4)$$

将 (4) 式代入 (3) 中，利用等式

$$\int_0^L dx_1 \int_0^L dx_2 f(x_1 - x_2) = 2 \int_0^L (L-x) f(x) dx,$$

得到

$$C_{\ln I}(l, \tau) = 2 \int_0^L (L-x) R_\alpha(x, l - v\tau) dx, \quad (5)$$

消光系数的起伏 α' 和颗粒物浓度起伏 m' 成比例

$$\alpha' = K_m m', \quad (6)$$

式中 K_m 为比消光系数，和烟粒子的尺度分布、折射指数有关。假定颗粒物浓度为保守、被动标量，对于充分发展的湍流，湍流场中相距为 r 两点消光系数差的平方平均有如下关系

$$D_\alpha(r) = C_\alpha^2 r^{2/3}, \quad (l_0 \ll r \ll L_0) \quad (7)$$

式中 C_α^2 为消光系数的结构常数， l_0 和 L_0 分别是湍流的内尺度和外尺度。对于平稳随机过程 f ，相关函数可表示为：

$$C_f(\tau) = \frac{1}{2} [D_f(\infty) - D_f(\tau)] \quad (8)$$

其中 $D_f(\tau)$ 是随机过程的结构函数。我们使用湍流外尺度 L_0 代替 ∞ ，把 (7) 式代入 (8) 式，得到

$$R_\alpha(x, l - v\tau) = \frac{1}{2} C_\alpha^2 (L_0^{2/3} - r^{2/3}), \quad (9)$$

其中 $r = \sqrt{x^2 + (l - v\tau)^2}$ ，当 $r > L_0$ 时， $R_\alpha = 0$ 。

把 (9) 式代入 (5) 式，

$$C_{1\alpha}(l\tau) = \int_0^L (L-x) (L^3 - r^3)^{1/2} dx, \quad (r = \sqrt{x^2 + (l - v\tau)^2}) \quad (10)$$

对上式进行数值模拟，如图 3 所示：

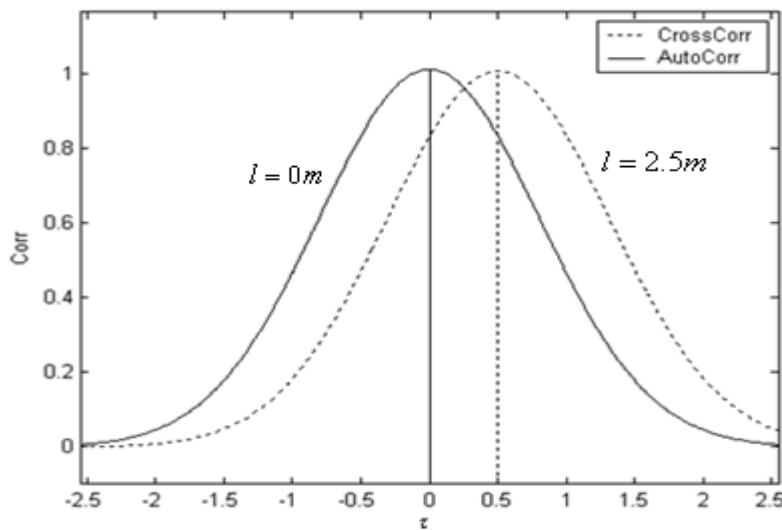


图 3 闪烁信号互相关的数值模拟，其中 $v = 5m/s$ ， $L = 2m$ ， $L_0 = 10m$

在图 3 中，互相关曲线的峰值所对应的时间延迟为 0.5s，而

$$l/\tau = 2.5/0.5 = 5 \text{ m/s}$$

它正是我们所设定的流速 $v = 5 \text{ m/s}$ ，所以可以使用这种方法进行流速反演。当然这里我们讨论的是点发射、点接收的理想情况，实际应用中，发射和接收透镜的口径较大时，应该考虑“孔径平滑”效应的影响，利用相位屏技术，得到互相关为

$$C(\rho, \tau) = 4\pi^2 k^2 \int_0^\infty d\kappa_0 \int_0^L dz S_{nl}(\kappa_0) \cos^2 \left[\frac{\kappa_0^2 z(L-z)}{2kL} \right] J_0[\kappa_0(\rho - v(z)\tau)] \\ \times \left[\frac{2J_1(D_r \kappa_0 z/2L)}{D_r \kappa_0 z/2L} \right]^2 \left[\frac{2J_1(D_t \kappa_0 (L-z)/2L)}{D_t \kappa_0 (L-z)/2L} \right]^2 \quad (11)$$

式中， κ_0 为烟道内的空间波数， $v(z)$ 为流速、 ρ 为两光束之间的平均距离， τ 为延迟时间、 L 为光束传输距离、 k 是光波数、发射和接收孔径分别用 D_t 和 D_r 表示， J_0 、 J_1 分别是零阶和一阶 Bessel 函数， $S_{nl}(\kappa_0)$ 是折射率虚部的谱。

同时，虽然烟粒子浓度变化过程比较复杂，产生起伏的原因也不太清楚，但对数光强起伏标准差与颗粒物平均浓度之间却是一个很简单的线性关系，即

$$\sigma_{\ln I} = \alpha \cdot m_0, \quad (12)$$

式中， α 为比例系数， m_0 为颗粒物平均浓度。比例系数 α 和流速等因素无关，可以通过称重法标定。

3 实验分析

我们于 2011 年 1 月在潍坊一化工厂对实际烟道进行了长时间的连续监测。实验烟道为一矩形管道，尺寸为 $1.96\text{m} \times 0.55\text{m}$ ，管道内温度为 150°C 。将测量系统的两发射单元安装在管道一侧，分别对准安装在另一侧的两接收单元，收发装置距离 2.12m ，两接收探测器的间距为 0.35m 。由大型煤燃烧炉排放的烟气经过一次电除尘，流过测量系统。发射单元发出高频调制光，经过烟气流到达接收单元，光电探测器接收光学闪烁信号，经电路放大、自适应滤波后，由高性能数据采集卡对两路模拟信号进行数据采集，由系统软件对光闪烁信号进行相关分析，给出流速测量结果。图 4 所示为测量软件得到的实时烟道流速随时间的变化曲线。

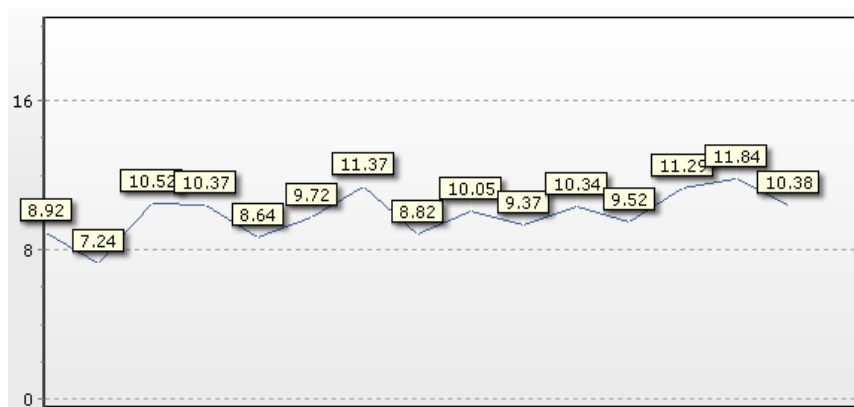


图4 实时流速曲线

图5所示是实验中由上、下游两个光电探测器接收到的一组光闪烁信号。由于上、下游的光路对准问题，导致两路信号的幅值有一定差别，但这并不影响对烟气流速的测量，这也是本系统的优势之一。两路信号在形状上非常相似，只是在时间上有一个延迟。我们就是通过两个光闪烁信号的时间互相关分析来得到光传播路径上的平均流速。

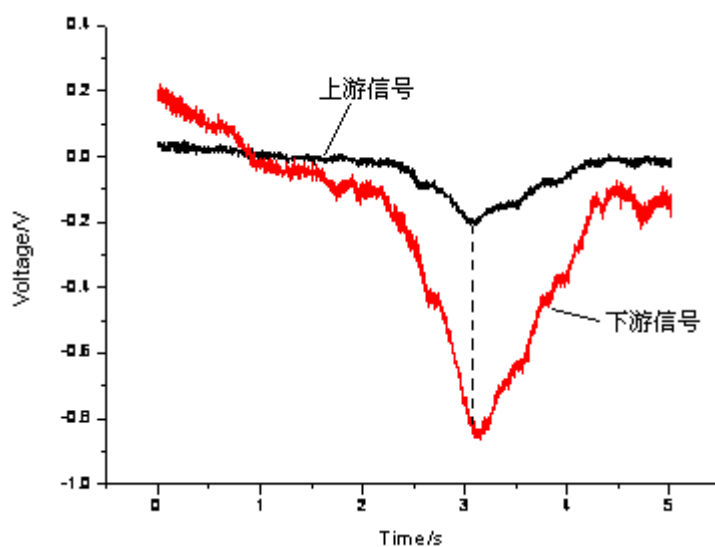


图5 两探测器接收到的光闪烁信号

系统软件对接收到的信号进行自适应滤波，根据烟气流实际情况自动选择测速所需的光闪烁频段。图6所示为滤波后的闪烁频谱（横轴取对数）。这里我们使用的采样频率为2500Hz。

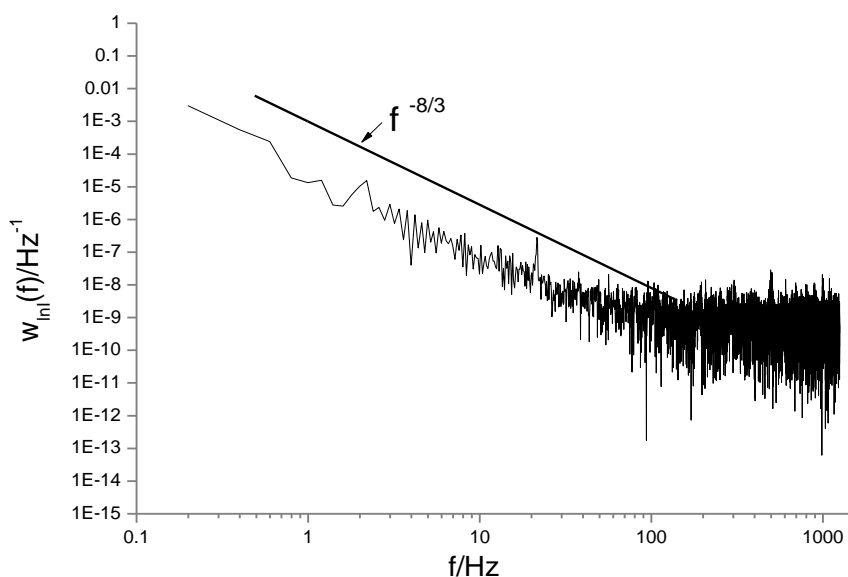


图6 烟气流光闪烁的频谱

从图6可以看出,自适应系统选择的光闪烁信号集中在0.2Hz到200Hz左右的低频部分。进一步的理论研究证明,光闪烁频谱的低频部分的幂率为 $-8/3$,而图6中的信号下降的斜率恰为 $-8/3$ 。

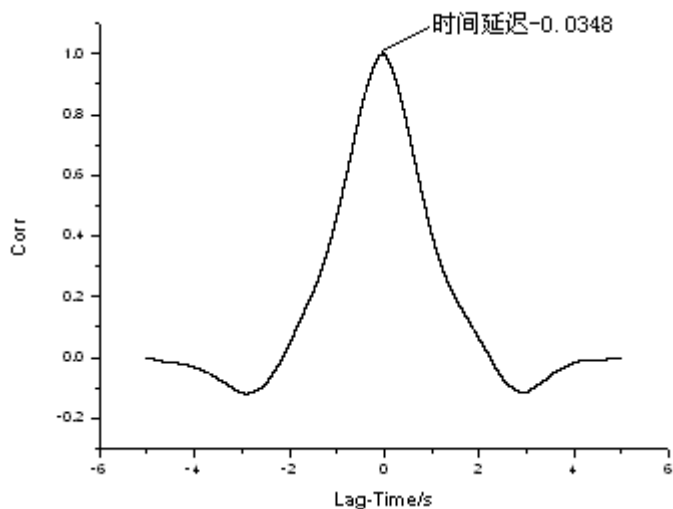


图7 两路信号的互相关

对两个光闪烁信号进行互相关分析,得到其互相关曲线,如图7所示。图中互相关曲线的峰值对应的时间延迟为0.0348s,这个时间延迟代表了湍流涡旋由上游到下游的渡越时间,烟气流速为两接收探测器的间距与渡越时间的比值 $0.35\text{m}/0.0348\text{s}=10.05\text{m/s}$,而这一速度与皮托管测量的结果相一致。

图8给出了我们研制的光学流速颗粒物浓度综合测试系统(OSPMC)、皮托管

(PitoVel)、进口光学流速计 (OFS) 在相同的条件下, 同时测量风洞流速的结果。测量时的光程为 4m, 共取了 10 个点, 由于第十个点的风速超过了皮托管的量程, 因此皮托管在此点没有数值, 但此点的风速可以由变频器的读数来计算出。图上横坐标值为风洞变频器的读数, 它与风洞风速有稳定的线性关系。

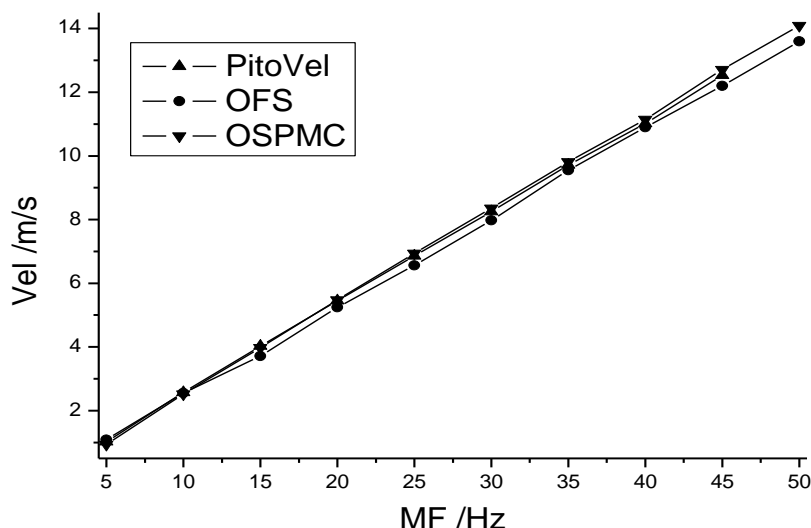


图 8 三种不同系统测量结果比较

从测量结果可以看出, 三者比较吻合, 皮托管测速系统的线性度最好, 我们研制的系统线性度略差于皮托管, 但比进口光学流速计要好。

4 总结

本文报道了一种新型烟气流速和颗粒物浓度实时在线监测仪并进行了简要介绍。讨论了利用低频闪烁信号测量烟气流速和颗粒物浓度的原理。对随机选取的一组实验信号, 进行了频谱和互相关的分析, 从互相关曲线上得到了最大互相关对应的时间延迟, 从而反演出烟气流速。而对风洞的风速测量中, 仪器取得了和皮托管测量基本一致的结果。此外, 本文也对烟气流中颗粒物浓度的测量进行了理论上的讨论。

当然, 由于工业现场的复杂环境, 烟气管道中的湍流特性, 如湍流谱特征, 湍流尺度等还需要进一步研究, 而这对于测速的精度是有一定影响的。同时对于颗粒物浓度的测量也存在很多基础性问题, 如“光通过烟气流得到的对数光强起伏的标准差与颗粒物浓度成线性”这一经验关系的成立条件、比例系数的确定等。至于排放总量的测量, 要在测速和测浓度的基础上做进一步研究。

参考文献

- [1] Anshi Chen、Jiming Hao、Zhongping Zhou etc., Theoretical Solutions for Particulate Scintillation Monitors, *Optics Communications*, Vol. 166, 1999, p.15~20.
- [2] Anshi Chen、Jiming Hao、Zhongping Zhou etc., Particulate Concentration Measured from Scattered Light Fluctuations, *Optics Letters*, Vol.25 No.10, 2000, p.689~691.
- [3] Chen Anshi、Hao Jiming、Zhou Zhongping etc., Measuring Particulate Concentration by Means of Scattered Light Scintillation, *Proc. SPIE*, Vol.4222, 2000, p.71~75.
- [4] 陈俊、沈建琪等, 时间域内的消光起伏光谱法, 上海理工大学学报, Vol.26 No.6, 2004, p.503~508
- [5] L.C. Andrews、R.L. Phillips、C.Y. Hopen, Aperture averaging of optical scintillations: power fluctuations and the temporal spectrum, *Wave Random Media*, Vol.10, 2000, p.53~70
- [6] Ting-i Wang、G.R. Ochs、R.S. Lawrence, Wind measurements by the temporal cross-correlation of the optical scintillations, *Appl. Opt.*, Vol.20 No.23, 1981, p.4073-4081
- [7] (苏) А.П.Клименко, 柴振荣译, 粉尘浓度的连续监测, 北京: 新时代出版社, 1984, p.31~41, p.120~121