

旋转光栅式光谱仪的研制与应用

郑朝晖 张玉钧 周斌 王锋平 宋炳超 刘文清

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要 根据光谱仪原理, 研制了一种光栅匀速旋转式光谱仪, 其特点是测量周期短、灵敏度高、结构简单和操作方便. 该仪器可用于各种光谱的在线测量系统中, 已成功地用于烟道 SO₂ 浓度检测、空气中 NO₂ 浓度检测和固体染料的荧光光谱测量中.

关键词 旋转光栅; 摄谱仪; 在线检测; 应用

0 引言

现在光谱学的研究成果, 已经广泛的应用于生产实践中, 尤其是对污染物的监测和防治. 利用不同污染物的不同光谱特性, 实时检测污染物的特征光谱, 根据其光谱特性计算出污染物的浓度, 这就要求对被测光谱进行实时监测. 传统的光谱仪多是用步进电机驱动正弦机构或凸轮进行波长扫描, 光电倍增管将各个波长的光信号转换为电信号. 这种测量周期长, 在实时测量中易产生误差, 不能满足在线测量的要求.

我们研制的旋转光栅式光谱仪是光学技术与电子技术的结合. 利用带定位转盘的匀速电机直接驱动光栅旋转, 与传统的光谱仪相比, 大大缩短了测量周期, 且结构简单、使用方便、易于维护. 外置式模块化信号采集与数据传输系统, 实现了信号的高速采集、A/D 转换及与各种类型微机之间快速地数据传输. 先进的软件有强大的后期数据处理功能和良好的人机界面, 使光谱仪定标准确读数更方便. 模拟信号的输出, 实现了自动控制. 特别适用于在线实时检测系统中. 从而解决了光谱实时测量时既要求测量周期短又要灵敏度高的问题.

1 装置原理和设计

光栅光谱仪是多种多样的, 其主要是由光栅狭缝、成像系统和感光板(或出射狭缝)等部件组

成. 图 1 给出旋转光栅式光谱仪的原理与结构图. 多色光通过入射狭缝照射到镀铝凹面全反射镜上, 凹面全反射镜反射的光充满色散平面光栅, 光栅平面与电机轴同心, 由于采用了爪极永磁同步交流电机(或带稳流的直流电机), 光栅的旋转匀速, 转动稳定, 同心连接克服传动机械带来的误差. 光栅转动时, 经光栅色散的光谱通过同一块凹面全反射镜反射到出射狭缝, 出射狭缝后放置一光电倍增管, 轴上装有可调节的定位转盘, 由光电开

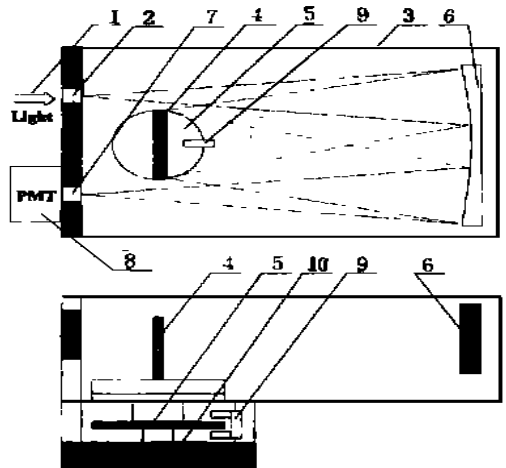


图 1 旋转光栅式光谱仪原理图

Fig 1 Schematic of grating rotated spectrometer
1. Incident light, 2. Entrance slit, 3. Body,
4. Grating, 5. Tabulator, 6. Concave reflector,
7. Exit slit, 8. Photon detector, 9. Switcher,
10. motor

关输出同步采集信号, 控制数据采集系统, 将光电倍增管输出的信号进行处理. 将各个波长的光转换为相应的电信号. 光栅的匀速旋转可以得到宽带连续光谱, 从真空紫外到远红外. 配合信号采集与数据处理系统, 可以实现对光谱快速连续测量. 从而解决了光谱实时测量时既要求测量周期短又要求灵敏度高的问题. 改变定位转盘与光电开关的相对位置, 可以方便地得到所需波段的光谱. 根据不同的应用要求, 改变电机转速、光栅刻线数目、入射和出射狭缝宽度, 可以改变光谱仪光谱分辨率, 以满足不同光谱测量的要求. 加不同的滤光片或改变同步信号的位置, 可以只得到所需特殊段的光谱. 先进的软件有强大后期数据处理功能和良好的人机界面, 使光谱仪定标准确读数更方便.

图 2 给出光谱仪光路原理图, 它是采用传统艾伯特-法斯提型光栅光谱仪光路, 利用一块凹面反射镜的两部分分别作为准直镜和成像物镜. 装置是水平对称式, 入射狭缝、反射镜、光栅和出射狭缝都左右对称地排布在光栅主截面内, 通过光栅平面的转动, 把不同波长的谱线调节到出射狭缝上. 用光电倍增管接收光信号. 这种方式的优点是准直镜产生的象差能为成像物镜所抵消.

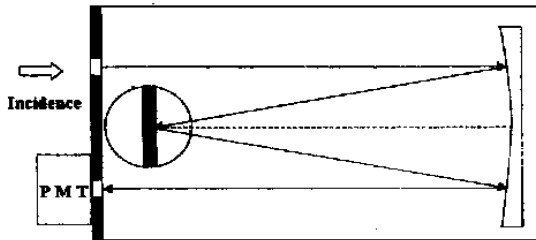


图 2 光谱仪光路图

Fig 2 Optical path of the spectrometer

2 仪器光学分辨率

光栅光谱仪是用来作光谱分析, 它的色分辨能力和色散能力是反映仪器性能的主要指标, 在设计过程中作了综合考虑. 为了能应用于在线检测系统中, 还需要满足分辨率高、结构简单、使用方便、易维护、体积小和成本低的要求.

根据光栅方程, 光栅的色分辨能力为⁴

$$d(\sin i + \sin \theta) = m \lambda \quad (1)$$

d 是光栅常数, i 是入射角, θ 是衍射角, λ 是衍射光波长, m 是光谱级.

根据瑞利准则和光栅方程可以推导出光栅的分辨率公式为

$$R = \lambda / \Delta \lambda = m N = W (\sin i + \sin \theta) / \lambda \quad (2)$$

式中 N 是光栅总刻线数, W 是光栅宽度.

从式(2)可以看出光栅的分辨率只决定光栅宽度、波长和所用角度. 与光栅总刻线数无关. 例如我们在测量烟道 SO_2 的在 300nm 附近吸收谱时, 选用刻划面积 $25 \times 25 \text{mm}^2$ 的光栅, 在 $\lambda = 300 \text{nm}$ 、 $(\sin i + \sin \theta) = 2$ 时光栅的分辨率最大不超过 1.67×10^5 . 想要获得高的分辨率, 要采用较宽的光栅, 用大的入射角和衍射角. 但在实际中受到仪器体积的限定不能选用过大的光栅.

光谱仪色散能力包括: 角色散和线色散.

角色散是指波长相差 $1 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ 的两条谱线之间的角距离, 即

$$d\theta/d\lambda = m/d \cos \theta \quad (3)$$

角色散与光栅刻线总数无关, 只与光栅刻线的密度 $1/d$ 成正比.

线色散它表示在焦平面上波长相差 $1 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ 的两条谱线间分开的距离, 即

$$dl/d\lambda = f d\theta/d\lambda = m f / d \cos \theta \quad (4)$$

式中 f 是焦距.

角色散能力、线色散能力以及色分辨能力三者是光谱仪器三个独立的性能指标, 各有各的作用, 彼此不能代替, 要根据实际光谱测量的需要相互匹配得当.

我们在测量 SO_2 的在 300nm 附近吸收谱时, 应用此光谱仪, 选用闪耀波长在 300nm 的平面光栅, 刻划面积 $25 \times 25 \text{mm}^2$, 刻线密度 2400lp/mm , 入射与出射狭缝 $40 \mu\text{m}$, 焦距 f 是 150mm, 其光学分辨率 0.3nm. SO_2 在 300nm 附近的吸收峰, 可以清晰的分辨出来.

波长标定在光谱仪的应用中是十分重要的, 是真实反映光谱特性所必须的. 系统测量的波长范围与光谱窗口与光谱仪的色散、光栅的位置、光纤的类型以及定位转盘和同步测量信号有关. 实际使用时, 该系列经常移动, 而且要根据不同的样品改变所测量的光谱范围和光纤种类, 一旦这些参量改变, 就要对系统进行波长标定, 以便获得准确的光谱数据. 由于汞灯在能量大于 600nm 的方向有多条尖锐的汞的谱线, 而在能量小于 600nm 的方向有多条氩的发光谱线, 是一种理想的标定光谱. 使波长定标更为准确. 定标时, 将汞灯放置在入射狭缝前或光纤末端, 记录汞灯尖锐谱线, 不同波长的谱线则记录于系统的存储单元. 利用线性拟合方法, 根据线性拟合公式 $y =$

$\alpha + \beta$. 我们在主程序中编制了一个线性拟合子程序, 配合定位转盘和同步测量信号, 将各谱线的波长值输入数据处理系统, 系统将确定出测量的起点波长和测量范围. 测量时对采集的任何光谱信号, 都可以方便地读出任意点的波长. 公式中 α 和 β 的值随着定位转盘和同步测量信号相对位置不同而变化, 所以当系统变化或改变光谱测量范围时, 需要进行波长定位. 图 3 为所测量的汞灯定标谱线.

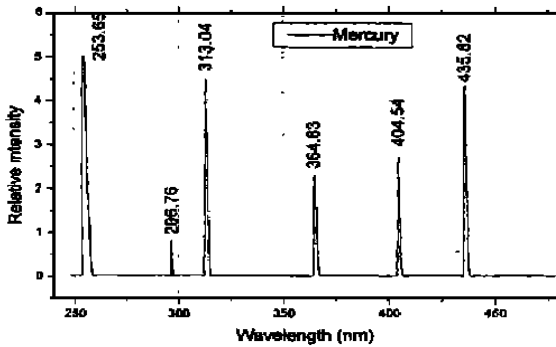


图 3 用旋转光栅式光谱仪测量的汞灯定标谱线

Fig 3 Spectral lines of mercury lamp obtained with this grating rotated spectrometer

3 电子学分辨率

在光电光谱仪中, 电学分辨率也是十分重要的指标, 它是将光谱信号真实反映出来所必须的, 它包括: 光电探测器的响应时间、阴极材料对光谱的灵敏度、采样频率和后期数据处理能力.

光电探测器选用光电倍增管, 它是一种灵敏度极高的光探测器, 它倍增过程的低噪音特性, 使光电倍增管成为一种理想的低噪音放大器, 通常它的增益为 $10^3 \sim 10^8$, 它在微光探测领域应用广泛. 我们知道光电发射第一定律为

$$I_k = S_k \cdot F_0 \quad (5)$$

式中 I_k 是光电流, F_0 是光强, S_k 是该阴极对入射光线的灵敏度. 它表明当照射到阴极上光线的光谱成分不变时, 阴极发射的光电流与入射到阴极上的光强成正比. 光电发射第二定律为

$$E = (1/2)mv^2 = h\nu - W \quad (6)$$

式中 E 是发射的光电子最大动能, h 是普朗克常量, ν 是入射光频率, W 是光电发射材料输出功率. 定律表明发射的光电子最大动能随入射光频率增加而线性增加, 而与入射光的强度无关, 也就是对脉冲光响应灵敏度高. 从定律中我们得知, 对于测量不同波段光谱, 应该选用不同阴极材料的光

电倍增管, 使其对被测光谱响应的量子效率最高. 一般光电倍增管的响应时间小于 10ns, 可以满足测量的要求. 对于要研究光谱精细结构, 可选用响应更快的光电倍增管.

采样定理告诉我们, 当采样频率大于被测信号最高频率的 2 倍时, 就可以通过获得的数据无失真地恢复被测信号. 实际上, 为了保证被测信号的质量, 采样频率是被测信号最高频率的 10 倍以上, 这样才能真实反映光谱特性. 我们在应用中, 采用外置式信号采集与数据传输系统, 实现了光谱仪与各型微机的方便连接. 应用软件有强大后期数据处理功能和良好的人机界面, 操作简单, 使定标准确读数更方便.

4 实际应用

我们研制的旋转光栅式光谱仪, 应用十分广泛. 选用不同光栅、光源和处理软件, 可以用于测量分析气体、液体和火焰等的光谱特性. 我们将此光谱仪应用于测量烟道 SO_2 和大气中 NO_2 浓度的系统中. 因 SO_2 和 NO_2 分别在 300nm 和 440nm 附近的有特征吸收谱, 按照朗伯-比尔定律

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp[-C\sigma(\lambda)L] \quad (7)$$

式中 $I(\lambda)$ 是测量到的光辐射强度, $I_0(\lambda)$ 是没有吸收的光辐射强度, $\sigma(\lambda)$ 是吸收截面, C 是分子量(浓度), L 是吸收光程, λ 是波长. 可由测量吸收峰的强弱变化计算出物质的含量, 求出物质的浓度.

图 4 给出了我们将光谱仪用于烟道 SO_2 测量系统中的系统框图. 系统中我们选用氘灯做光源, 氘灯发出的宽带光谱经石英透镜准直后透过样品池照射到光谱仪的入射狭缝上, 样品池上 0.20m, 装有透光波段 250~400nm 的紫外滤光

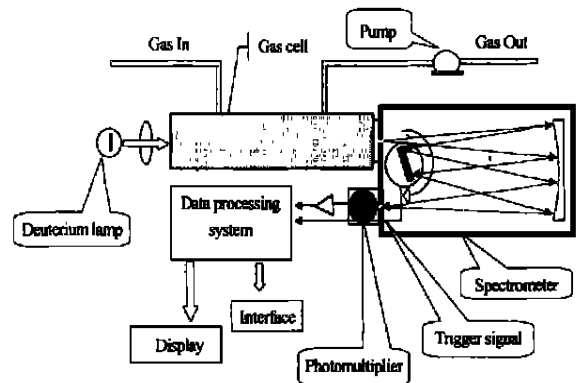


图 4 烟道 SO_2 浓度测量系统

Fig 4 Measurement system for flue SO_2 concentrations

片. 光栅匀速旋转, 完成 280~ 330nm 波段 SO₂ 吸收光谱的测量周期 10m s, 满足了实时测量光谱的需要. 探测采用侧窗式光电倍增管(Hamamatsu Ip28 型), 灵敏度高, 解决了光谱在线实时测量既要求测量周期短又要灵敏度高的问题. 光电倍增管输出的信号经前置放大器放大后送入高速信号采集 A/D 和 CPU 处理单元; 信号采集和处理单元的功能是将该信号数字化并存在存储器中, 然后由系统总控制单元采用适当地算法对其进行处理得到 SO₂ 浓度、温度、燃烧率等信息. 在数据分析和处理中采用硬件和软件平均滤波技术, 构成了差分吸收光谱测量系统, 从而使光源强度随着时间的慢变化不影响测量精度. 系统总控制单元除完成数据处理工作以外, 还担负着包括数据存储、LED 显示、PC 远程数据传输和控制等工作.

图 5 给出 5×10^{-8} 、 11×10^{-8} 、 20×10^{-8} 三种不同浓度时 SO₂ 的吸收谱线. 可以清晰地看到 SO₂ 在 300nm 附近的吸收峰, 随着浓度的增加对光的吸收也同比增加, 利用公式 (7) 和 SO₂ 在 300nm 的分子吸收截面计算出浓度值.

图 6 给出了我们将光谱仪用于大气中 NO₂ 测量系统中的系统框图. 我们利用太阳做光源, 使用自制的定日镜把太阳光通过光纤引入光谱

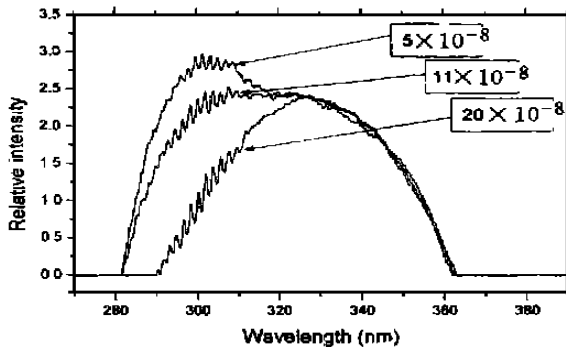


图 5 不同浓度 SO₂ 的吸收谱线
Fig 5 Absorption spectrum of SO₂ concentrations

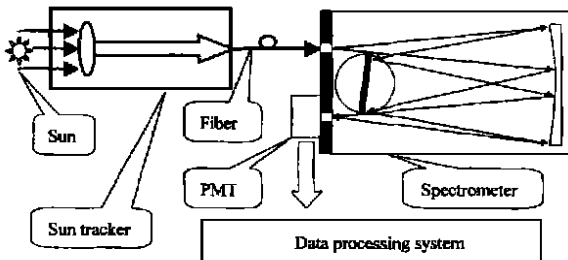


图 6 大气中 NO₂ 浓度测量系统
Fig 6 Measurement system for atmosphere NO₂ concentrations

仪, 这样只要是晴天无云的天气, 在日出到日落这段时间内的任一时刻, 我们都可以进行测量. 由于大气中 NO₂ 的浓度在一天内变化速度不是很快, 可以每隔 5 分钟或者 10 分钟采集一次数据, 这样每小时内有 6 组或者 12 组数据供分析, 基本上满足测量 NO₂ 浓度的日平均量和一天内变化趋势的要求.

当太阳光线经过大气时, 由于气体分子的吸收, 使得光线的强度有所减弱. 达到地面光强的对数与气体分子的浓度和吸收截面成反比, 这样我们就可以通过测量光线经过大气层时在气体吸收峰附近谱线强度的变化来推算出气体分子的浓度. 可以通过使仪器直接对准太阳得到太阳的谱线, 也可以使仪器始终对准天顶采集经过大气层中分子散射后的谱线. 如果太阳光是倾斜的, 计算中还应加上太阳天顶角的修正.

图 7 中的三条谱线 9901210845、9901211112 和 9901211614 分别是 1999 年 1 月 21 日 8:45、11:12 和 16:14 测得的三条谱线. 从图中可以看出虽然整个谱线偶尔有些移动, 但谱线中极大值和极小值的相对位置没有发生变化. 只要经过波长校正, 各条谱线之间就具有可比性. 这说明我们这套仪器在运行中是比较稳定的.

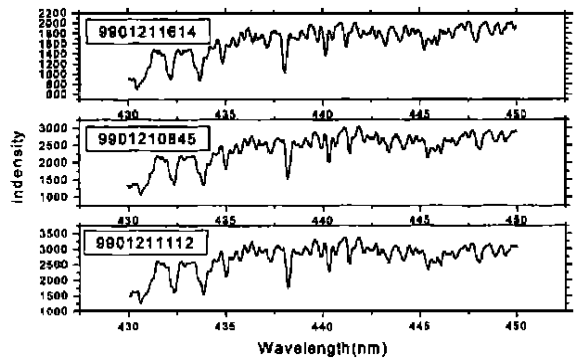


图 7 99 年 1 月 21 日不同时刻测得的谱线
Fig 7 Spectrum s taken in different time on 99/01/21

5 结论

根据我们的实验数据和实际应用的对比结果, 色散元件采用旋转光栅, 光电探测元件采用光电倍增管的光谱仪比色散元件采用固定光栅, 光电探测元件采用线阵 CCD 的光谱仪灵敏度高, 造价低和结构简单, 解决了光谱实时测量时既要求测量周期短又要灵敏度高的问题. 特别是可根据不同的光谱测量范围选择合适光谱灵敏度的光电倍增管, 无须更换不同闪耀波长的光栅, 使得该仪

器更具有普遍的适用性. 该仪器进一步的应用领域研究正在进行中.

参考文献

- 1 Ahmed S M, Kumar V. Quantitative photoabsorption and fluorescence spectroscopy of SO₂ at 188-231 and 278-320nm. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 1992, 47(5): 359~ 373
- 2 Grant W B, Kagann R H, McLenny W A. Optical remote measurement of toxic gases *J of Air & Waste*, 1992, 42(1): 18~ 30
- 3 陈国珍, 黄贤智, 刘文远等. 紫外-可见分光光度法. 北京: 原子能出版社, 1987, 12: 42~ 58
- 4 “发射光谱分析”编写组. 发射光谱分析. 北京: 冶金工业出版社, 1979, 6: 80~ 85
- 5 周斌, 刘文清, 王峰平, 宋炳超, 郑朝晖, 张玉钧. 空气中NO₂浓度的太阳光谱法测量研究. *量子电子学*, 1999(待发表)

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF SPECTROMETER WITH ROTATED GRATING

Zheng Chaohui, Zhang Yujun, Zhou Bing, Wang Fengping, Song Bingchao, Liu Wenqing
Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031

Received date: 1999-08-31

Abstract A spectrometer with rotated grating is developed having characteristics of short measurement period, high sensitivity, simple structure and easy operation. The spectrometer developed can be used for various on-line measurement systems. The spectrometer has been successfully used for flue SO₂ concentration monitoring, for ambient NO₂ concentration monitoring and for fluorescence measurement of solid dye.

Keywords Rotated grating; Spectrometer; On-line monitoring; Applications



Zheng Chaohui was born on May 14, 1968. He received the B. S. Degree in Nanjing University in 1991. He worked in the Ministry of Foreign Affairs of the P. R. China in 1991. Then he worked in the Institute of Geophysics, the Chinese Academy of Sciences from 1994. He is studying for M. S. Degree in Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica. His current research interests include applied spectroscopy, optoelectronic signal processing, automatic control, and environmental monitoring using optical methods.

OPTIMAL DESIGN OF WDM MULTI-FIBER RING NETWORKS*

Xiong Yizhi, Zeng Qingji, Cheng Yang, Wu Kai

R & D Center for Broadband Optical Networking Technology Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030

Abstract In this paper, the optimal design of WDM multi-fiber ring (MFR) networks is discussed. New integer linear programming (ILP) formulations are proposed to solve it. The optimal objective is to minimize the averaged node ports number. It can maximize the cost effectiveness of the designed MFR networks. By using these algorithms, the network performance of different type of MFR architectures (bidirectional and unidirectional) employing various routing schemes (wavelength path and virtual wavelength path) are analyzed. The obtained results can be used as a criterion in selecting the most suitable MFR architecture.

Keywords Wavelength division multiplexing; Wavelength routing; Multi-fiber ring; Wavelength path; Virtual wavelength path

0 Introduction

Wavelength-routed optical networks (WORNs) based on wavelength division multiplexing (WDM) and wavelength routing technologies is seen as a very promising approaching for the realization of future broadband networks¹. The WDM ring network employ optical add/drop multiplexers (OADMs) or optical cross-connects (OXC)s as routing nodes. The traffics are carried via lightpaths that can be setup between source and destination nodes by configuring the routing nodes. According to the availability of the wavelength converters in the wavelength routing nodes, the lightpath routing scheme can be divided into two categories: wavelength path (WP) and virtual wavelength path (VWP). In the case of WP, each lightpath is assigned a fixed wavelength along its route. In the case of VWP, a lightpath can have a different wavelength on each distinct fiber link^{2,3}.

Because of its simple structure and very fast

restoration capacity against service disruptions, WDM ring networks are being developed as part of testbeds and commercial products, and are expected to be an integral part of telecommunication backbone networks^{4,5}. Recently the studies of WDM ring networks design is focus on the wavelength requirement⁶⁻⁹. The results show wavelength requirements for WDM ring networks are almost proportional to the square of the number of nodes. Due to the technical feasibility and economy, the number of wavelengths that can be multiplexed within a ring network is limited to a relatively small value. Therefore, in order to meet the traffic demand, the ring network will have to employ space division multiplexing with multiple fibers and wavelength division multiplexing with a relatively small number of wavelengths. This will be a very effective architecture for a ring network.

In Ref. 10~12, the WDM multiple fiber ring

*The work is jointly supported by the National 863 Plan, National Natural Science Foundation, Shanghai Science and Technology Development Foundation, National Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission and Communications System

Received date: 1999-08-17