

一种傅立叶变换红外光谱仪动镜扫描系统的设计

李 胜, 张玉钧, 高闽光, 徐 亮, 童晶晶, 金 岭

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031)

摘要: 针对一种倾斜补偿摆动式干涉仪, 利用旋转式音圈电机作为驱动单元, 设计了扫描控制反馈系统, 建立了控制系统的数学模型, 分析了系统的性能参数, 并将 PID 控制应用于系统的反馈控制设计, 提高了系统的稳态性能和动态性能。结果表明, 在波数为 8000 cm^{-1} 时对应干涉图频率的相对误差达到了 0.67%, 在实际应用中表现出良好的稳定性和可靠性, 能够满足大气环境监测对傅立叶变换红外光谱仪的需要。

关键词: 傅立叶变换红外; 干涉仪; 动镜; 扫描系统; 反馈控制; PID

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2012)01-0048-05

Design of the Moving Mirror Scanning System for a FT-IR Spectrometer

LI Sheng, ZHANG Yu-jun, GAO Min-guang, XU Liang, TONG Jing-jing, JIN Ling

(Key Lab of Environment Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: The feedback control system and model of moving mirror scanning system to a tilt compensated rotated Michelson interferometer for Fourier transform infrared (FT-IR) spectrometer are given, with a rotary voice coil motor driver. This system's performance is analyzed and a PID controller is added to the control system to improve the static and dynamic performance. The experiments have shown that the relative frequency error is 0.67% at wavenumber of 8000 cm^{-1} . This system has shown a good stability and reliability in practical application, and can be well used in the FT-IR spectrometer for atmosphere monitoring.

Key words: Fourier transform infrared, spectrometer, moving mirror, scanning system, feedback control, PID

引言

近年来, 光学遥感技术尤其是傅立叶变换红外 (FT-IR) 技术在大气环境监测中得到了广泛研究和发 展, 它克服了气相色谱等传统方法的不足^[1], 能够实现快速连续在线监测, 以及多组分的同时监测, 因此逐渐成为大气环境监测的一个主要手段^[2]。同时, 大气监测应用也给 FT-IR 光谱仪提出了新的要求, 比如外场监测、车载平台、机载平台, 要求仪器具有良好便携性、抗震性以及稳定性^[3], 但是大部分的 FT-IR 分析仪器主要面向实验室应用, 因此有必要研制适用于大气环境监测需求的 FT-IR 光谱仪。

FT-IR 光谱仪的核心部件为 Michelson 干涉仪, 光的干涉来源于干涉仪动镜和定镜间相对运动所产

生的光程差, 动镜扫描系统是光谱仪的一个重要组成部分, 动镜的扫描距离决定了光谱的最大分辨率, 动镜的位置误差和扫描匀速性决定了干涉效果和光谱质量^[4]。因此动镜扫描控制系统的设计, 要求能够控制动镜作高精度的匀速运动, 速度波动要严格控制在一定范围内, 研究表明, 当动镜相对速度误差在 2% 以内时, 动镜速度波动对光谱质量的影响可以忽略不计^[5]。动镜扫描系统的设计与干涉仪的结构以及驱动形式有关, 根据不同需求, 干涉仪的结构和驱动形式多种多样, 因此需要针对实际系统, 设计实现能够满足性能要求的控制系统^[6,7]。而如何建立起系统的准确模型, 并根据系统指标要求设计出合理的控制系统, 是其中的一项关键技术。

本文针对一种倾斜补偿摆动式干涉仪, 利用旋转

收稿日期: 2011-09-09; 修订日期: 2011-12-20.

作者简介: 李胜, 男, 1981年10月生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士生, 研究方向为傅立叶变换红外光谱学, 环境光学, 光学数据处理。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40905011); 国家“863”计划项目(2007AA061504); 安徽省科技计划科技攻关项目(09010301016)。

式音圈电机作为驱动单元，设计出一套扫描速度自动控制反馈系统。为了使控制系统的性能指标达到要求，首先建立了控制系统的数学模型，分析了系统的性能参数，在此基础上，将PID控制应用于反馈控制设计，提高了系统的稳态性能和动态性能。实验结果表明，该控制系统的性能指标达到了要求，在应用过程中表现出良好的稳定性和可靠性，满足了FT-IR光谱仪的性能要求。

1 原理与组成

FT-IR光谱仪系统主要由 Michelson 干涉仪、红外光源、动镜扫描控制系统、红外探测器、数据采集与处理系统组成。其中，光的干涉过程由 Michelson 干涉仪实现^[8]，其基本原理如图 1 所示。可知，若有一束波数为 $\tilde{\nu}_0$ 的单色光，强度为 $I(\tilde{\nu}_0)$ ，经过干涉仪之后，在探测器处检测到的强度为：

$$I'(\delta) = 0.5I(\tilde{\nu}_0)(1 + \cos 2\pi\tilde{\nu}_0\delta) \quad (1)$$

式中： δ 为光程差。在上式中，去除不变的常量部分，并加入与波数相关的矫正系数 $H(\tilde{\nu}_0)$ 得到：

$$I(\delta) = 0.5H(\tilde{\nu}_0)I(\tilde{\nu}_0)\cos 2\pi\tilde{\nu}_0\delta = B(\tilde{\nu}_0)\cos 2\pi\tilde{\nu}_0\delta \quad (2)$$

连续光源的干涉图可由如下积分式表示：

$$I(\delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\tilde{\nu})\cos 2\pi\tilde{\nu}\delta d\tilde{\nu} \quad (3)$$

光谱信号可通过傅立叶变换得到：

$$B(\tilde{\nu}) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\delta)\cos 2\pi\tilde{\nu}\delta d\delta \quad (4)$$

上述式(3)，(4)即是傅立叶变换光谱仪的基本积分。

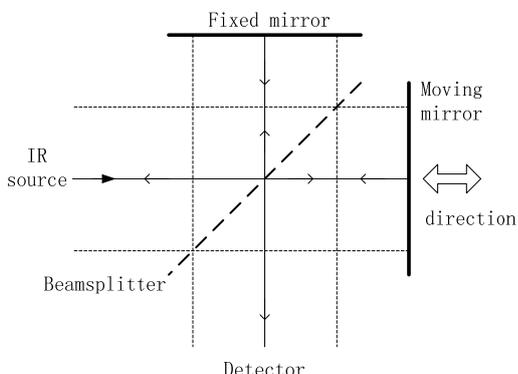


图 1 迈克尔逊干涉仪

Fig.1 Michelson interferometer

根据干涉仪的不同结构，动镜的运动形式主要有直线式和摆动式，直线运动形式要求动镜在整个扫描

运动过程中，动镜所在平面保持精确对齐，不能发生倾斜和旋转，对机械系统和控制系统要求很高；摆动式结构设计可以使运动过程中反射镜之间的相对位置不变，而作为一个整体进行运动，因此光路对倾斜不敏感，另外还可以在物理扫描距离不变的情况下，增大光程差的距离。

基于上述分析，干涉仪系统采用了倾斜补偿摆动式结构，其中的两个平面反射镜固定于扫描平台上并随其一起转动，由于二者距离固定分束镜的距离不同而产生光程差。如图 2 所示，扫描平台绕轴承转动，采用滚动轴承连接方式，以减小摩擦力。扫描驱动采用旋转式音圈电机，通电线圈置于两永磁体形成的恒定磁场中，在两边上产生安培力，在力矩作用下推动扫描平台绕轴转动。

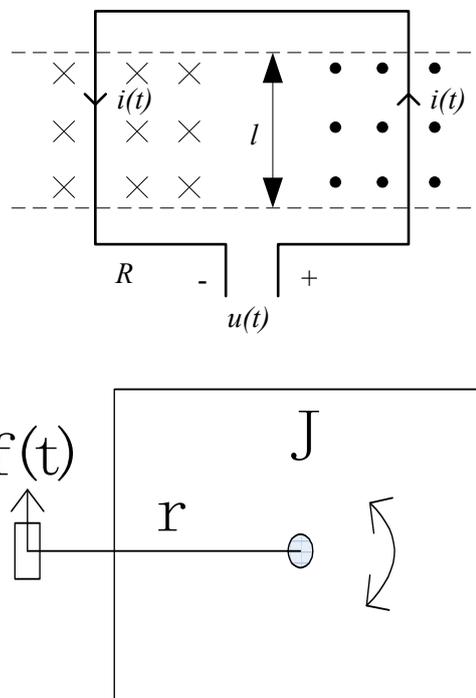


图 2 旋转式音圈电机及转动平台

Fig.2 Rotating voice coil motor and the platform

2 扫描系统的数学模型

为了定量分析动镜控制系统的性能，必须建立起系统的准确数学模型，由于转动平台、音圈电机等装置均是根据实际的干涉仪结构设计，因此需要具体分析其模型。若恒定磁场的磁场强度为 B ，线圈电阻为 R ，线圈的电感为 L ，线圈内电流为 $i(t)$ ，线圈端电压为 $u(t)$ ，线圈内磁通量为 $\phi_B(t)$ ，可列出线圈的电压平衡方程：

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{d\phi_B(t)}{dt} \quad (5)$$

线圈边长为 b ，线圈匝数为 N ，可得到安培力大小：

$$f(t) = 2NBb i(t) \quad (6)$$

力矩平衡方程为：

$$f(t)r = J \frac{d\omega(t)}{dt} + m(t) \quad (7)$$

式中：线圈到轴心的距离为 r ，轴承摩擦力矩为 $m(t)$ ，扫描负载的转动惯量为 J ，扫描运动角速度为 $\omega(t)$ 。

由于线圈位于恒定的磁场区域内，扫描运动的距离很小且速度较低，因此由线圈内磁通量的变化产生的感生电动势 $d\phi_B(t)/dt$ 可忽略。将上述时域表达式转化为 s 域表达式：

$$U(s) = RI(s) + LsI(s) \quad (8)$$

$$F(s) = 2NBbI(s) \quad (9)$$

$$F(s)r = Js\Omega(s) + M(s) \quad (10)$$

由方程(8)、(9)、(10)，又角速度转换为电压的系数为 α ，从而得到扫描系统数学模型框图如图 3 所示。

摩擦力矩很小，其作用可以看作系统的扰动输入，在系统分析设计时将其忽略。令 $k_1 = \frac{2NBb r \alpha}{LJ}$ ， $k_2 = R/L$ ，可得系统开环传递函数：

$$G_0(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{2NBb r \alpha}{LJs^2 + RJs} = \frac{k_1}{s^2 + k_2 s} \quad (11)$$

3 反馈控制系统设计

在开环系统中引入速度反馈之后，形成单位反馈控制系统，对动镜驱动控制系统的各个参数进行测量，得到 $N=150$ ， $L=0.002$ H， $b=0.02$ m， $R=21$ Ω ， $r=0.08$ m， $\alpha=10$ ， $J=0.006$ kg·m²，永磁铁材料为钕铁硼 (NdFeB)，磁性强度为 N35，两磁铁之间间隔为 5 mm，其表面 2 mm 处磁场强度约为 0.5 T。计算得出 $k_1=200000$ ， $k_2=10500$ ，得到反馈系统的闭环传递函数为：

$$G(s) = \frac{2 \times 10^5}{s^2 + 10500s + 2 \times 10^5} \quad (12)$$

该反馈系统的阶跃响应曲线如图 4 所示。

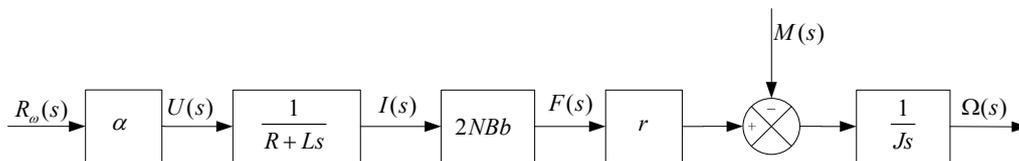


图 3 扫描速度控制系统框图

Fig.3 Block diagram of the control system of scan velocity

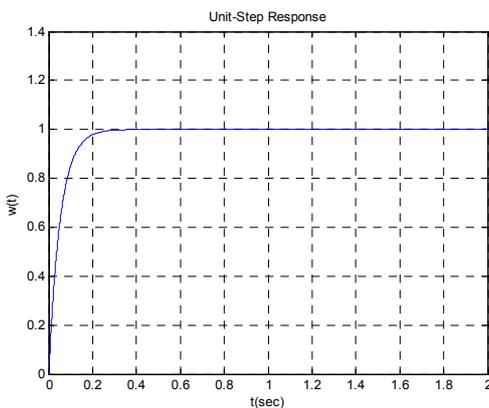


图 4 单位反馈控制系统的阶跃响应

Fig.4 Unit-step response of unit feedback control system

计算得到该二阶系统的相位裕量为 89.9 度，静态速度误差系数为 19.0476，表明系统相对稳定性较好；阻尼比为 11.7，调整时间为 0.157s（偏离稳态值 5% 时），表明系统响应速度较慢，动态性能不足^[9]。

为了进一步提高控制系统的性能，设计采用了 PID 校正系统。PID 控制器是根据给定值和输出值构成的控制偏差，将偏差按比例、积分和微分通过线性组合方式构成控制量，对被控对象进行控制^[10]。通过调整 PID 参数，不但可以提高系统的稳态精度，还可以改善系统的动态性能，从而使被调节的系统具有良好的稳态和动态性能。PID 调节器的传递函数为：

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (13)$$

式中： K_p 、 T_i 、 T_d 分别为比例、积分、微分系数。引入 PID 调节器之后，系统框图如图 5 所示。

设计 PID 控制器的主要工作在于参数的整定，通常分为理论计算法和工程方法两大类。针对上述模型，根据衰减曲线方法调整 PID 参数得到 $K_p=960$ ， $T_i=2.65 \times 10^{-4}$ ， $T_d=0.88 \times 10^{-4}$ 。得到系统的阶跃响应曲线如图 6 所示。

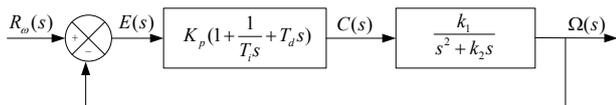


图5 基于PID的控制系统框图

Fig.5 Block diagram of the control system based on PID controller

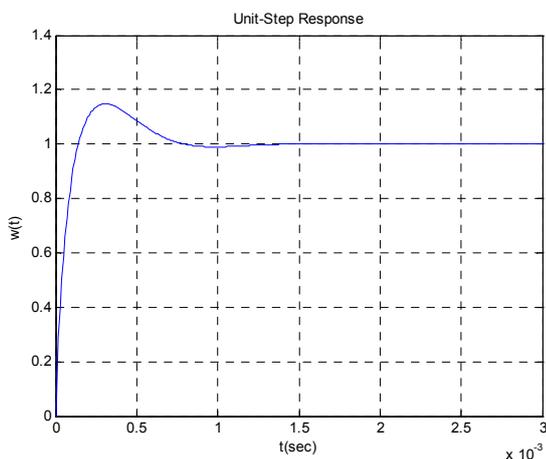


图6 基于PID的控制系统阶跃响应

Fig.6 Unit-step response of the control system based on PID controller

由计算结果可知，系统的相位裕量为 82.2，稳态误差趋向于 0，表明在系统稳定性不变的情况下提高了稳态精度；阶跃响应超调量为 15%，调整时间为 0.59 ms（偏离稳态值 5%时）。表明系统的响应速度大大提高。因此经过应用 PID 校正之后，系统的稳态和动态性能都得到了改善。

4 实验与分析

根据上述对控制模型的分析，设计实现了基于PID的扫描速度反馈控制系统。由 FT-IR 光谱仪的基本理论可知，单色光的干涉图为标准的正弦波，该正弦波的频率与扫描速度间存在一定的对应关系。若物理扫描速度为 v ，扫描距离与光程差距离的比例系数为 k_{opd} ，光程差速度为 v_{opd} ，单色光波数为 $\tilde{\nu}$ ，单色光干涉图频率为 $f_{\tilde{\nu}}$ ，则有如下关系式：

$$v_{\text{opd}} = k_{\text{opd}} v \quad (14)$$

$$f_{\tilde{\nu}} = v_{\text{opd}} \tilde{\nu} \times 10^{-2} \quad (15)$$

由式(15)可知，测量光谱中最高波数对应于最高的干涉图频率，扫描系统对速度稳定性的要求即为对最高干涉图频率的稳定性的要求。为了实现对此频率的高精度测量，系统通过一个高速信号采集卡，采集

He-Ne 激光参考干涉系统的干涉图，其干涉图为标准的正弦波，由 He-Ne 激光干涉图频率经过计算得到最大测量光谱波数所对应的干涉图频率，即所测量光谱范围内干涉图的最高频率。

经过实验测量，当 He-Ne 干涉图频率为 3 kHz 时，得到其频率相对误差为 0.93%，通过对 He-Ne 干涉图进行重采样，得到波数 8000 cm^{-1} 对应干涉图频率的相对误差为 0.67%，波数 4000 cm^{-1} 对应干涉图频率的相对误差为 0.54%。波数 8000 cm^{-1} 干涉图的频率曲线如图 7 所示。

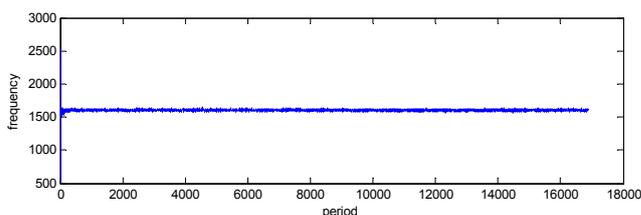


图7 波数 8000 cm^{-1} 干涉图的频率曲线

Fig.7 Frequency curve of the interferogram at 8000 wavenumber

在测量范围内的最高光谱波数对应于最高的干涉图频率，其相对误差也最大。用于大气环境监测的光谱范围一般为 $400 \sim 6000 \text{ cm}^{-1}$ ，其最高波数小于 8000，因此其相对误差也满足了 2% 的性能要求。

应用基于该动镜扫描反馈控制系统研制的 FT-IR 光谱仪器，在实验室内温度 23°C ，湿度 25% 条件下，采用双边扫描方式，进行 16 次平均，实际测量得到 $400 \sim 6000 \text{ cm}^{-1}$ 波段范围光谱图如图 7 所示，经过计算，光谱的分辨率达到了 1 cm^{-1} ，能够满足大气环境监测对 FT-IR 光谱仪的要求。

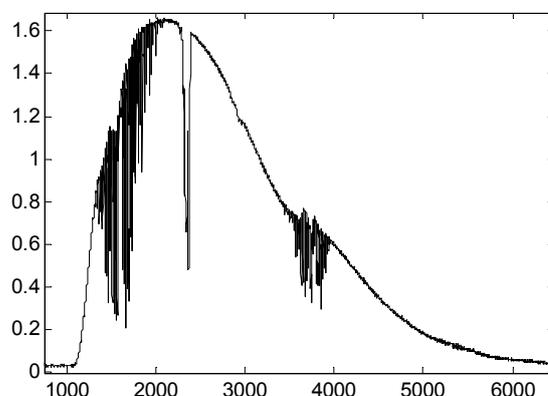


图8 $400 \sim 6000 \text{ cm}^{-1}$ 波段范围光谱图

Fig.8 Measured spectrum between $400 \sim 6000 \text{ cm}^{-1}$

5 结论

动镜扫描控制系统是 FT-IR 光谱仪系统中的一个重要部分和关键技术,直接影响到光谱的质量和仪器的最终性能指标。为了研制适用于大气环境监测需要的 FT-IR 光谱仪器,针对一种倾斜补偿摆动式干涉仪,利用旋转式音圈电机作为驱动单元,设计实现了扫描速度反馈控制系统,建立了控制系统的数学模型,并将 PID 控制应用于系统的校正,提高了系统的稳态性能和动态性能。实验结果表明,在 He-Ne 干涉图频率为 3 kHz 时,He-Ne 干涉图、波数 8000 cm^{-1} 干涉图、波数 4000 cm^{-1} 干涉图的频率相对误差分别为 0.93%、0.67%、0.54%,较好的满足了 2% 的指标要求。在对光谱仪的实际应用表明,该控制系统运行稳定可靠,干涉仪系统便于调节校正,已经应用到开放光路 FT-IR、抽取式 FT-IR、车载掩日通量 FT-IR 系统中,满足了多种监测需要。

参考文献:

- [1] Dae Woong Honga, Gwi Suk Heob, Jin Seok Han. Application of the open path FT-IR with COLISB to measurements of ozone and VOCs in the urban area[J]. Atmospheric Environment. 2004, 38: 5567-5576.
- [2] 徐亮, 刘建国, 高闽光 等. 开放光程 FT-IR 测量大气甲烷及其与点采样仪器的结果对比[J], 红外技术. 2007, 29(4): 239-242.
- [3] 童晶晶, 高闽光, 刘志明 等. 红外光谱法测量城市空气中 CH₄ 浓度[J], 激光与红外. 2010, 40(2): 166-168.
- [4] 高闽光, 刘文清, 张天舒 等. 机载 FT-IR 被动遥测大气痕量气体, 光谱学与光谱分析[J]. 2006, 26(12): 2203-2206.
- [5] Peter R. Griffiths, James A. Haseeth. Fourier Transform Infrared Spectrometry[M], John Wiley & Sons Inc. 2007.
- [6] 窦秀明. 空间大气环境干涉式监测仪动镜驱动技术[J], 红外. 2004, 10: 28-34.
- [7] Qinghua Yang, Renkui Zhou, Baochang Zhao. Principle of the moving-mirror-pair interferometer and the tilt tolerance of the double moving mirror[J], Applied Optics. 2008, 47(13): 2486-2493.
- [8] 吴瑾光. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用[M], 北京: 科学技术文献出版社. 1999.
- [9] 邹伯敏. 自动控制理论[M], 北京: 机械工业出版社, 2007, 06.
- [10] 胡杨, 张亚军, 于锦泉. 用于半导体激光器的温控电路设计[J], 红外与激光工程. 2010, 5: 839-842.