

基于空间调制干涉原理的红外成像光谱仪扫描系统控制研究

张培仲，雷正刚，张若岚，郑为建，杨智雄，袁小春

(昆明物理研究所，云南 昆明 650223)

摘要：讨论了基于空间调制干涉原理的红外成像光谱仪器中高线性大摆镜扫描系统的控制技术，详细地阐述了各扫描方式的优缺点、控制器的基本原理、控制器硬件设计，提出了一种基于传统 PID 的微分增强型控制算法，分析了扫描系统的扫描效率和线性度。

关键词：红外成像光谱仪；扫描系统；控制器；高线性；微分增强型 PID

中图分类号：TN216 文献标识码：A 文章编号：1001-8891(2015)02-0130-04

Research on the Controller of Scanner Used in Spatially Modulated Infrared Imaging Spectrometer

ZHANG Pei-zhong, LEI Zheng-gang, ZHANG Ruo-lan, ZHENG Wei-jian, YANG Zhi-xiong, YUAN Xiao-chun

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: This paper describes the controller of large and high linearity scanner used in spatially modulated infrared imaging spectrometer. The advantages and disadvantages of each scan mode, the basic principles of the controller and the controller hardware design are discussed in detail. Differential enhanced PID control algorithm is given. Scanning efficiency and linearity of the scanner are analyzed.

Key words: infrared imaging spectrometer, scanner, controller, high linearity, differential enhanced PID

0 引言

基于空间调制干涉原理的红外成像光谱仪已在化学气体探测领域获得应用。通过摆镜扫描方式使被成像空间光谱维的每一列遍历所有光程差，从而使空间调制转换成为时空混合调制后在探测器焦平面采集干涉图像数据立方体^[1]。如图 1 所示，摆镜一般都放置在空间调制干涉具的前面，其反射面大，质量大。同时，由于反射镜对光线的 2 倍角关系^[2]，要求摆镜每摆过 1/2 像素对应的角度时，成像电路能实时地采集一帧干涉图像数据，摆镜的扫描过程伴随着干涉图像数据的采集过程，摆镜的扫描性能直接影响由干涉图像数据变换得到的光谱数据质量。因此，一个高性能的扫描系统显得尤为重要。

针对以上应用，本文讨论了红外成像光谱仪中摆镜扫描系统的扫描方式、扫描系统控制原理及控制器的设计。

1 扫描方式

红外成像光谱仪的焦平面探测器确定了光程差

范围，为了让被成像空间光谱维的每一列遍历所有的光程差，摆镜被要求高线性地扫描一倍视场角，每走过 1/2 像素对应的角度时触发成像电路实时地采集一帧干涉图像数据，扫描速度由探测器成像的帧频确定。

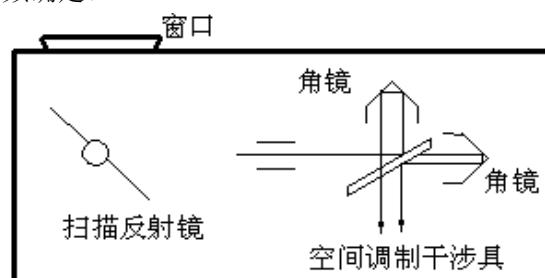


图 1 扫描摆镜与空间调制干涉具

Fig.1 Scanner and spatially modulated interferometer

从扫描系统控制命令出发，扫描方式主要有锯齿波和三角波两种方式，其区别如图 2 所示。

锯齿波扫描方式时，摆镜从初始位置扫描到结束位置后立刻回到初始位置开始新一周的扫描，只在一个正程运动方向存在有效扫描区间；三角波扫描方式时，有效扫描区间存在于摆镜来回两个运动

收稿日期：2014-12-17；修订日期：2014-12-30。

作者简介：张培仲（1987-），男，四川简阳人，在读研究生，研究方向为红外光电系统伺服控制技术。E-mail：zhangpeizhongfh@163.com。

基金项目：国家部委预研项目基金。

方向中。三角波扫描方式虽然有比锯齿波扫描方法更高的扫描效率,但是由于角位置传感器在正反转之间一般都存在一个很小的间隙,这个间隙可能导致红外图像中像素的错位,所以本系统选用锯齿波方式。

从干涉图像数据采集角度考虑,扫描方式可以分为等时间间隔方式和等空间间隔方式^[3]。等时间间隔方式默认摆镜在有效扫描区间内扫描速度为一恒定值,相等的时间间隔就对应相等的角度。这种方式虽然实现起来简单,但是由于摆镜轴承上摩擦不均匀等影响因素使得扫描速度不可能是一常量。等空间间隔方式由摆镜控制器判断扫描角度并实时给出脉冲,成像电路根据脉冲采集干涉图像数据。等空间间隔方式固然能克服等时间间隔方式不可避免的缺点,但是实现起来很困难,故大多数应用都还是等时间间隔方式,本文提出了一种追赶判断法较容易地实现了等空间间隔扫描方式。

2 扫描系统控制原理

扫描系统控制原理如图3所示,反馈控制是其基本原理^[4]。控制器将角位置反馈传感器检测到的当前位置和当前输入比较处理后输出控制信号,控制信号经过隔离后作用于驱动芯片驱动直流电机^[5]。图3中输入部分包括锯齿波函数和扫描系统启动、停止等控制命令;输出部分主要是对摆镜实时位置的监控显示。

电机的驱动方式主要有模拟功率运放驱动和数字脉宽调制(PWM)驱动两种方式。本系统选用

PWM驱动方式,其相对于功率运放驱动方式有更高的效率和精度^[6]。

角位置反馈传感器的性能,特别是其精度是影响整个扫描系统性能的关键因素之一。根据成像光谱仪的要求,摆镜扫描系统3.2 s内高线性的扫描7°,并等角度地给出640个脉冲,相邻两个脉冲间的角度为0.0109375°。为了保证高线性度,在相邻两个脉冲间设置10个控制点,即系统的采样频率为2000 Hz,每两个采样点间的角度间隔为0.00109375°。这就需要一个高精度的光电编码器或者圆光栅,本系统选用海德汉的旋转编码器EN425,其精度为25位二进制数据。

3 控制器设计

3.1 控制器硬件电路

控制器硬件电路原理图如图4所示,控制器的采样率为2000 Hz,通过单片机C8051F120定时实现,C8051F120每500 μs读一次旋转编码器EN425的数据,以25位并口的形式通过中断触发方式传递给主控ARM芯片STM32F103,并口相比串口的优点是保证采样数据的实时性。STM32F103响应中断后,将收到的当前角位置与输入比较,经过PID运算后转换为PWM波形,PWM波经过隔离芯片ISO7240 m隔离后作用于电机驱动芯片DRV8432驱动电机。另外,主控芯片STM32F103实时地把当前角位置通过RS422发送给上位机,在上位机中曲线清晰地显示摆镜的运动,同时等角度地给出脉冲信号触发成像电路采集数据。

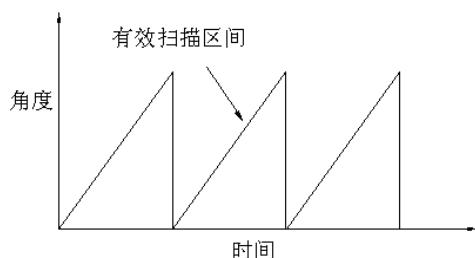


图2 三角波与锯齿波扫描方式区别

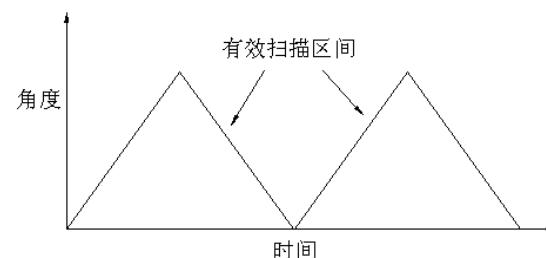


Fig.2 Triangle wave and sawtooth scanning

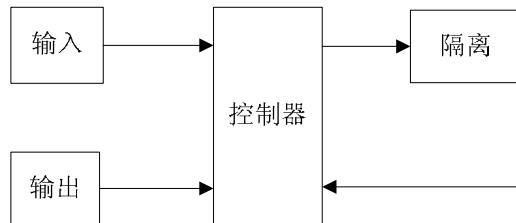


图3 控制原理

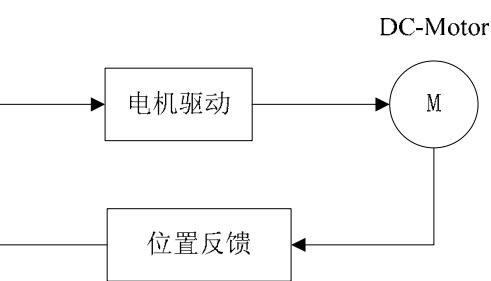


Fig.3 Control theory

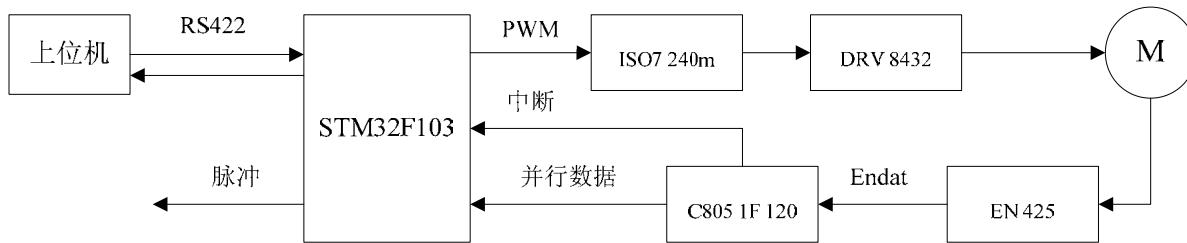


图 4 控制器硬件原理图

Fig.4 The controller hardware schematics

3.2 实时脉冲产生方法

本系统对触发红外成像电路的脉冲要求非常高,不仅要求高实时性,而且不允许脉冲丢失。一般的区间比较法容易引起脉冲丢失,本文提出了追赶判断法产生实时脉冲,基本原理是这样的:预先在主控芯片中存放第一个脉冲对应的理论角位置,因为相邻脉冲间角度的间隔相等,后继的脉冲都可以由起始角位置和增量来确定。由于每两个脉冲之间有 10 次实际角位置采样,那么每次采样都判断是否大于当前脉冲的理论角位置,如果大于则产生脉冲,然后当前理论脉冲角位置自加增量变为下一个理论脉冲角位置等待实际采样角位置的追赶。

这种追赶判断法在实际应用中即保证了高实时性,又确保了没有脉冲丢失。

3.3 控制算法

经典数字 PID 如式(1)所示^[7]:

$$P(k) = K_p E(k) + K_i \sum_{j=0}^k E(j) + K_d [E(k) - E(k-1)] \quad (1)$$

式中: $P(k)$ 为控制器第 k 次采样输出; $E(k)$ 为控制器的第 k 次采样误差; K_p 为控制器的比例系数; K_i 为控制器的积分系数; K_d 为控制器的微分系数。

本系统的控制算法是基于公式(1)的改进,主要的改进是变速积分和带权重的累加微分。改进后的控制算法如公式(2)所示:

$$\begin{aligned} P(k) &= K_p E(k) + K_i \left\{ \sum_{j=0}^{k-1} E(j) + f[E(k)]E(k) \right\} + \\ &K_d [E(k) - E(k-1)] + K_4 \left\{ \sum_{j=0}^{k-1} K_d [E(k) - E(k-1)] \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $f[E(k)]$ 是变速积分系数; 它是 $E(k)$ 的函数,更详细的定义见参考文献 [7]。

$K_4 \left\{ \sum_{j=0}^{k-1} K_d [E(k) - E(k-1)] \right\}$ 即是微分增强型 PID 控

制算法的带权重的累加微分项, K_4 是 0~1 间的权重系数,其值由具体系统而定,没有精确的要求。

此项的优点不仅加强了微分项的预测功能,而且将某个时刻被控量大的变动对系统的作用延续到了之后的一段时间,并且随着时间间隔越远,影响越小,这是符合自然规律的。这个改进在实际的控制中取得了非常好的效果。

4 实验结果及分析

扫描系统的 10° 阶跃响应如图 5, 图中时间坐标的数字表示采样点数,其间隔为 1 ms, 纵坐标表示角位置。图 5 描述了摆镜从 150° 突然到 160° 的阶跃响应情况,可以看出阶跃响应快而且没有超调和振荡。

扫描系统实际扫描过程如图 6 所示,有效扫描区间为 163.5°~156.5°,有效扫描时间 3.2 s,回程时间 0.2 s,扫描效率 94.12%。

衡量扫描系统的关键因素除了扫描效率之外还有另一个重要因素——线性度。随机抽取了一次有效扫描区间的实际角位置数据与理论角位置数据相比较,如图 7 所示:两条直线几乎重合在一起,统计得最大偏差为 0.018479。非线性度计算如下式:

$$L = \frac{\Delta y_{\max}}{Y} \quad (3)$$

式中: L 为非线性度; Δy_{\max} 为最大偏差; Y 为最大量程。

计算得到本扫描系统的非线性度为 $0.018479/7 = 0.26\%$ 。

5 结论

本文针对红外成像光谱仪的特点,设计了其高线性大摆镜扫描系统的控制器。详细阐述了扫描方式,控制原理及控制器硬件的设计。提出的基于经典数字 PID 的微分增强型控制算法在本系统中取得了较好的控制效果。实验结果证明,该扫描系统的扫描效率高,扫描线性度好,能很好地满足红外成像光谱仪的要求。

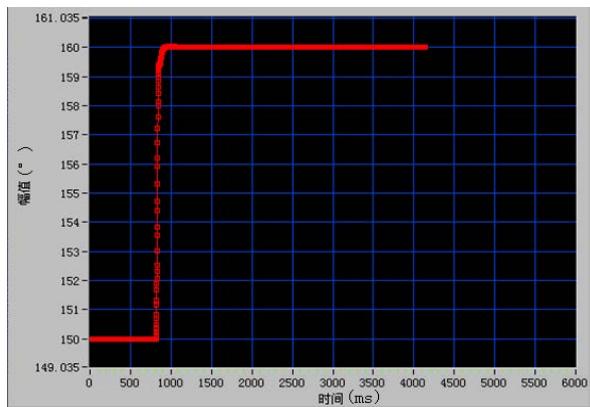


图 5 阶跃响应

Fig.5 Step Response

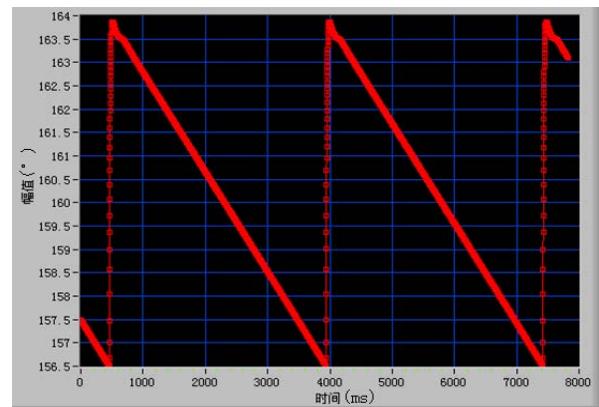


图 6 实际扫描过程

Fig.6 Actual scanning process

参考文献:

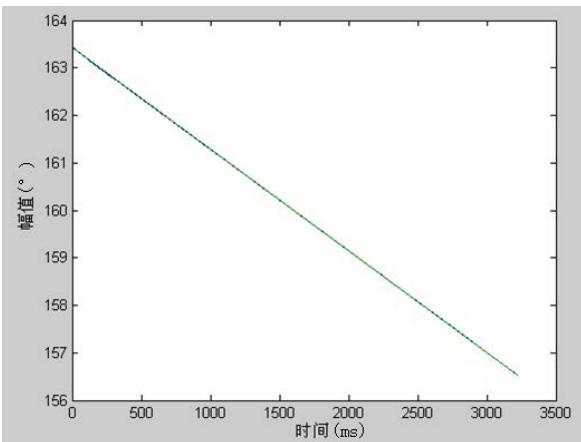


图 7 实际角位置与理论角位置

Fig.7 The actual angular position and required angular position

- [1] Hugo Lavoie, Jean-Marc Thériault, François Bouffard, et al. Detection of chemical pollutants by passive LWIR Hyperspectral imaging[C] //Proc. of SPIE, 2012, **8515**: 1- 10.
- [2] 吴超, 袁艳, 熊望娥, 等. 指向摆镜的精度分析[J]. 光子学报, 2008, **37**(10): 2071-2075.
- [3] 陈洁, 朱江, 浦恩昌, 等. 高线性大摆角扫描技术研究[J]. 红外技术, 2013, **35**(12): 792-797.
- [4] 谢克明, 刘文定. 自动控制原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 3-4.
- [5] 童子磊. 摆镜扫描的重复控制系统[J]. 红外与毫米波学报, 2006, **25**(3): 229-232.
- [6] 肖成, 毛永文, 颜方正, 等. 基于 PWM 装置的直流电机双闭环调速系统的设计与仿真[J]. 机械研究与应用, 2012(6): 122-125.
- [7] 潘新民, 王燕芳. 微型计算机控制技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 233-234, 245-246.