

文章编号 1004-924X(2016)增-0087-07

## 光谱仪调制器 PID 稳速控制系统

王智宏\*, 季绪飞, 陈琛, 张福东

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 为了减小光栅扫描型光谱仪调制器的调制信号频率波动, 提高光谱检测精度, 基于 PID 技术设计了光谱仪调制器稳速控制系统。调制器稳速控制系统主要包括 H 桥驱动电路、光耦及整形电路和单片机微控制器 3 部分。控制系统利用光耦及整形电路、单片机捕获功能实时获取调制器调制频率, 并以调制盘一圈内全部齿对应测量频率的平均值与目标频率值之差作为频率误差, 利用 PID 算法计算输出控制信号的控制量, 控制单片机的定时计数器产生 PWM 波, 通过 H 桥电路驱动直流电机, 保证调制器调制频率的稳定。实验结果表明, 与光谱仪调制器锁相环稳速控制系统对比, PID 稳速控制系统的调制器调制频率的波动量由 5.67 Hz 减小为 3.01 Hz, 光谱仪信噪比由 1 885 提高到 4 156, 有效提高了光谱仪的信噪比, 并具有较高的稳定性。

**关键词:** 近红外光谱仪; 调制器; 调制频率; 稳速; PID 算法; 直流电机

**中图分类号:** TH744.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0087

## Chopper stable speed control system based on PID in NIR spectrometer

WANG Zhi-hong\*, JI Xu-fei, CHEN Chen, ZHANG Fu-dong

(College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130021, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhwang@jlu.edu.cn

**Abstract:** In order to reduce the frequency fluctuation of modulating signals of the raster scanning spectrometer modulator and improve the spectrum detection precision, a high-performance stable speed control system based on proportional-integral-derivative (PID) algorithm was proposed. The control system of the modulator mainly comprised the H-bridge drive circuit, optocoupler, voltage comparator and single-chip-machine microcontroller. The modulating frequency of the modulator was monitored in real time through single-chip-machine, optocoupler and voltage comparator. By using the difference between average value of the measuring frequencies corresponding to all teeth in the modulating disk and the target frequency as the frequency error, the control output was calculated via the PID algorithm, regulating the timing counter of the single-chip machine to output the pulse width modulation (PWM) signals. The H-bridge circuit drove the DC motor, ensuring the stability of the modulating frequency. It is verified that the modulating frequency fluctuation decreasing from 5.67 Hz to 3.01 Hz compared with the phase-locked loop control system of spectrometer modulator, and the spectral Signal-to-Noise Ratio(SNR) is effectively improved from 1 885 to 4 156. The proposed PID control system can enhanced the SNR of the spectrometer with considerable stability.

**Key words:** near infrared spectrometer; modulator; modulation frequency; steady speed; PID algorithm; DC motor

收稿日期: 2016-05-28; 修订日期: 2016-06-19.

基金项目: 吉林省科技发展计划重大科技专项(No. 20116014)

## 1 引言

在近红外光谱仪器中,由于传感器的探测信号微弱、背景噪声大,常通过调制器(又称为斩光器或切光器)的直流电机带动调制盘的挡光和通光的交替将光信号转换为交流信号,以便于传感器后续的电路进行信号的放大和噪声的抑制<sup>[1-4]</sup>。由于在近红外光谱测量领域常采用锁相放大技术提取微弱信号,调制器不但要调制微弱信号而且要为相敏检波提供参考信号<sup>[5-6]</sup>。光谱仪中常见的调制器主要由直流电机、调制盘和轴套等组成,调制器误差会引起调制波频率和形状的变化,从而影响近红外光谱仪器检测信号的强度<sup>[4]</sup>。调制盘偏心误差、直流电机轴向晃动误差、调制盘齿形误差和直流电机的转速稳定性是光谱仪调制频率不稳的主要影响因素<sup>[7]</sup>。

在光谱仪调制器稳速控制系统方面,早期人们常采用恒压恒流技术控制直流电机输出稳定转速,进而控制调制器输出稳定的频率,但电压电流控制信号易受外部干扰。为此,葛成良等<sup>[8]</sup>通过脉宽调制技术完成对电机输入电压的调节,从而实现了斩光器频率的控制。随后,基于频率恒定的同步电机控制方法代替了恒压恒流控制方法。吕进等<sup>[9]</sup>研制了基于近红外光谱的茶叶成分检测仪,通过同步电机驱动调制器进而控制调制频率。刘运洋等<sup>[10]</sup>在研发红外光谱仪控制板时,通过单片机的控制来产生需要的正弦波频率对同步电机的速度进行控制,从而调节调制器调制频率。上述开环控制系统结构简单,易于实现,但控制精度较低。近年来,锁相环电机控制技术作为一种廉价而高精度的无频差闭环控制技术越来越受到重视,孙本贵<sup>[11]</sup>等基于锁相环技术研制了调制器稳速控制系统,使调制频率满足了相关检测的要求,但由于机械加工精度和安装精度的影响,锁相环路存在失锁问题,从而导致调制器的调制频率产生波动。

实验室自主研发的光栅扫描型近红外光谱仪(型号 PISA-S)<sup>[12-13]</sup>的调制器锁相环稳速控制系统也存在失锁问题,光谱仪的信噪比较低。为了减小调制信号频率波动,提高光谱检测精度,本文基于 PID 技术设计了光谱仪调制器稳速控制系

统。该稳速控制系统主要包括 H 桥驱动电路、单片机微控制器、光耦及整形电路。稳速控制系统通过控制程序减小了调制盘误差源对调制频率的影响,另外该系统具有过压、过流、过热等保护功能。实验表明,光谱仪调制器 PID 稳速控制系统的稳速效果好、可靠性高,有效提高了光谱仪的信噪比。

## 2 系统设计

光谱仪调制器 PID 稳速控制系统的原理框图如图 1 所示,系统主要由 H 桥驱动电路、光耦及整形电路和单片机微控制器 3 部分组成。调制信号通过光耦器件输出,整形电路处理光耦输出信号;单片机实现调制器频率的测量,PID 算法及脉冲宽度调制(Pulse width Modulation, PWM)波形的生成;H 桥驱动电路接受 PWM 波,控制直流电机进而调节调制频率。

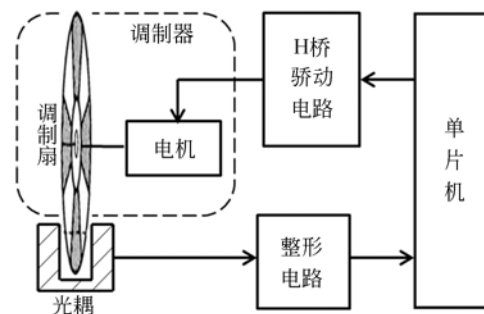


图 1 PID 稳速控制系统原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of PID light chopper steady speed control system

### 2.1 硬件设计

#### 2.1.1 光耦及整形电路

为了使单片机准确获取调制器的调制频率信号,在系统设计中引入了光耦及整形电路。电路主要包括光耦、电压基准源和电压比较器 3 部分,其中电压基准源为比较器提供参考电压,电压比较器将光耦输出信号转化成标准方波信号。单片机接收整形后的方波信号,从而完成调制器调制频率的测量。

#### 2.1.2 H 桥驱动电路

常用的电机驱动电路大多采用分立元件搭建,而分立元件易受外界条件的影响,并会给电路

板印制及电路调试增加困难,影响控制精度。另外,电路设计缺陷或电机误操作引发的过压、欠压、过流、过热等现象,容易损坏电机和控制电路。因此,传统的稳速系统很难可靠地完成调制器稳速控制的要求,而集成了控制电路和各种保护功能的专用电机驱动芯片能够较好地完成上述要求<sup>[14]</sup>。如 TI 公司生产的 DRV8833,该芯片内部集成了双通道桥式电路,无需外接 MOSFET 驱动芯片即可控制调制器转速,其外围电路简单、集成度高。另外,该器件具有自动关断功能,且提供了一个故障输出引脚,用于过流保护、短路保护、欠压闭锁和过热保护。基于 DRV8833H 的桥驱动电路如图 2 所示。

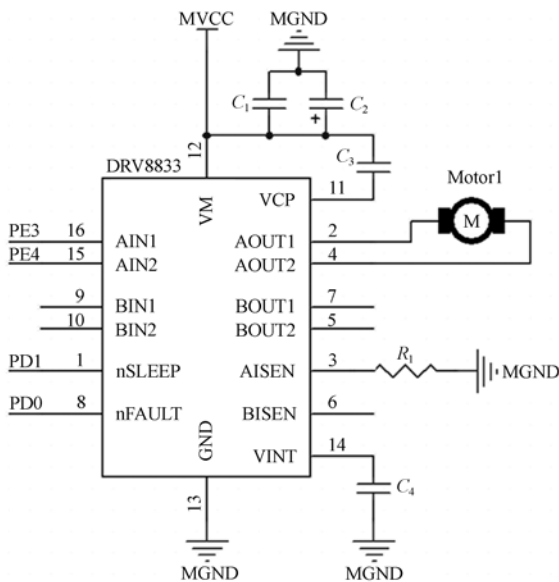


图 2 H 桥驱动器

Fig. 2 H-bridge motor driver based on DRV8833

电路设计中只选用 A 路 H 桥,而 B 路 H 桥备用。芯片引脚 AIN1、AIN2 用于接受单片机 I/O 口 PE3、PE4 输出的 PWM 信号,用于控制调制盘转速与方向。nSLEEP 引脚用于设置调制器的开启与关闭。nFAULT 引脚与单片机外部中断引脚 PD0 相连,用于提示 H 桥的工作状态。当 nFAULT 引脚输出低电平时,H 桥工作在欠压、过流或过热状态。电阻  $R_1$  用于设置 H 桥最大输出电流  $I$ ,计算公式为  $I=200 \text{ mV}/R_1$ 。

### 2.1.3 ATmega128 单片机主控制单元

ATmega128 是 ATMEL 公司生产的 8 位系

列单片机中最高配置的一款单片机<sup>[15]</sup>,它外设丰富、稳定性高,应用极其广泛。ATmega128 单片机主要实现频率测量、PID 控制量计算、PWM 波形生成及 H 桥工作状态监控等功能。单片机通过 PD4 引脚将调制信号传送给定时计数器 T1,利用定时计数器 T1 的捕获功能获取信号频率,通过 PID 算法生成控制信号,然后利用定时计数器 T3 快速 PWM 功能将控制信号转化成 PWM 信号,最后通过 PE3、PE4 引脚输出,从而驱动 DRV8833 芯片,控制调制器转速。另外单片机利用外部中断 INT0 监测 DRV8833 的工作状态,控制电机驱动电路的关断与开启。

### 2.2 软件设计

软件设计主要包括调制频率的获取、PID 控制量的计算等。

为获取调制信号的频率值,利用定时计数器 T1 捕获功能实时捕获频率信号的边沿(上升沿或下降沿)。捕获到相应边沿时,定时计数器自动保存捕获时刻的计数值,两次边沿捕获计数值之差反映两个边沿的时间间隔,通过式(1)即可计算出信号的频率。

$$f(n_j) = \frac{f_0}{N(n_j) - N(n_{j-1})}, \quad (1)$$

其中: $f(n_j)$ 表示第  $n$  次采样期间调制扇第  $j$  个齿对应的调制频率, $f_0$ 为计数信号的频率, $N(n_j)$ 表示第  $n$  次采样期间第  $j$  个齿对应边沿的计数值。该系统采用单片机内部计数信号,计数频率  $f_0 = 16 \text{ MHz}$ 。

测量调制扇一圈内所有齿对应的调制频率,以其平均值作为受控调制频率。该方法主要用于消除调制盘的齿形误差、偏心误差和安装误差对受控调制频率的影响。第  $n$  次采样的频率误差为:

$$e(n) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m f(n_j) - f_c, \quad (2)$$

其中: $m$ 表示调制扇的齿数(该系统调制扇共 15 个齿), $f_c = 609.00 \text{ Hz}$ 为目标频率。

PID 控制信号为:

$$u(n) = K_p e(n) + K_i \sum_{k=0}^n e(k) + K_d (e(n) - e(n-1)), \quad (3)$$

其中： $u(n)$ 为第  $n$  次采样的控制量， $K_p$  为比例放大系数， $K_i$  为积分放大系数， $K_d$  为微分放大系数。

主程序流程如图 3 所示。

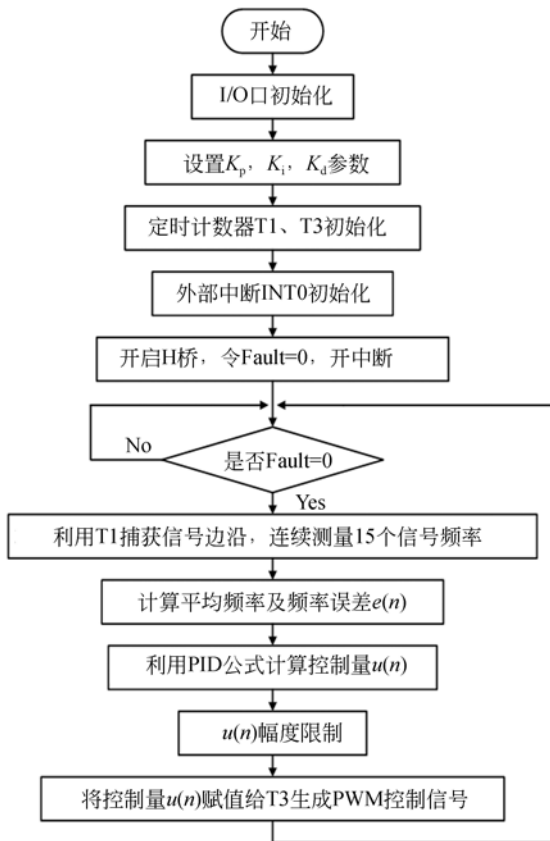


图 3 PID 稳速控制系统的主程序流程图

Fig. 3 Flowchart of main routine for PID speed steady control system

程序开始后对单片机 I/O 口、PID 参数 ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  参数)、定时计数器 T1, T3 和外部中断 INT0 进行初始化, 设置 Fault 变量等于 0, 开启 H 桥芯片, 开启外部 INT0 中断。其中 Fault 变量用于标注电机的工作状态, 当 Fault=0 时表示工作正常, 当 Fault=1 时表示工作在非正常状态 (过热、过流、过压或者欠压)。Fault 变量的值由外部中断函数设置 (H 桥电路提供外部触发信号)。初始化完成后, 判断 Fault 变量的值, 当 Fault=1 时, 程序循环判断 Fault 的取值, 直到 Fault=0。此时, 程序开始测量连续 15 个调制信号的频率值 (调制盘共 15 个齿), 然后对连续 15 个频率值取平均作为调制器的受控调制频率。将所求频率与目标频率作差求取频率误差  $e(n)$ , 随

后带入 PID 公式计算出控制量  $u(n)$ 。为了防止  $u(n)$  输出幅值过大, 引起执行机构的大幅度变化, 进而严重损坏系统, 加入幅值限制程序, 即当  $u(n)$  大于最大限定值或小于最小限定值时,  $u(n)$  以限定值输出。最后将控制量传送给定时计数器 T3, 利用 T3 的快速 PWM 功能生成所需的 PWM 波, 并通过单片机 I/O 口传送给 H 桥芯片进而控制调制器调制频率。

### 3 实验

#### 3.1 实验器材

(1) 调制器: 包括直流电机、调制盘和轴套。其中直流电机的额定电压为 5 V, 空载转速为 3 100 r/min, 空载电流为 0.026 A, 堵转转矩为 6.86 mN·m; 调制盘直径为 60 mm, 齿数为 15。

(2) 调制器稳速控制系统 2 套: 调制器锁相环稳速控制系统 MC-PLL 和调制器 PID 稳速控制系统 MC-PID。

(3) 自制测频系统: 利用 ATmega128 单片机内部定时计数器捕获功能, 通过周期测频法 (T 法) 测量信号频率, 其基准频率为 16 MHz 的晶振频率, 测量频率为 640~250 Hz, 测量精度优于 0.03 Hz。

(4) 自制光栅扫描型近红外光谱仪器 PISA-S: 包括光源、调制系统 (包括调制器及稳速控制系统)、分光系统、测样装置、锁相放大信号检测系统、控制通讯等模块, 扫描波长为 1 200~2 500 nm, 光谱分辨率为 7 nm, 采样间隔可选 (1, 2, 4, 8 nm)。采用调制器稳速控制系统 MC-PLL 和 MC-PID 分别组成实验仪器系统 PISA-S-PLL 和 PISA-S-PID。

实验使用的软件包括: 自制测频软件 ATmega128MesFre, 具有设置频率测量次数、测量时间间隔和测量组数等功能; 自制 PISA\_DEBUG 光谱测量软件, 具有扫描和定点采样功能。

附件为参比镀金铝板 (白板), 内有吸光涂层的背景筒 (背景)。

样品为高岭土 (产地: 吉林舒兰, 主要成分为 72.4% 的高岭土和 26.5% 的石英)。

#### 3.2 实验方法

##### 3.2.1 频率对比实验

分别采用调制器锁相环稳速控制系统 MC-

PLL 和调制器 PID 稳速控制系统 MC-PID,利用自制测频系统测量调制器的调制频率。电路启动后测量调制器的调制信号(图 1 中电压比较器的输出信号),每连续 150 个频率为一组,共测量 200 组,两组之间的测量时间间隔为 10 s,记录测量时间及频率数据。每套系统获得 30 000 个频率测量数据,计算对应的均值、方差、最大值、最小值和波动量(最大值与最小值之差)。

### 3.2.2 光谱对比实验

分别用实验仪器系统 PISA-S-PLL 和 PISA-S-PID 开展了全谱对比和单点信噪比对比实验。

设置实验仪器系统的采样间隔为 2 nm,依次扫描白板、背景、样品各一次,得三者的测量值  $A_1, A_2, A_3$ ,通过式(4)计算样品反射率  $R$ 。

$$R = \frac{A_3 - A_2}{A_1 - A_2} \quad (4)$$

将实验仪器系统的当前波长调到 1 500 nm 处,利用自制的光谱仪 PISA-DEBUG 光谱测量软件对镀金铝板连续定点采样 100 次,以均值比其标准方差计算信噪比。

### 3.3 实验结果与分析

#### 3.3.1 频率对比

两套稳速控制系统测得的 200 组(每组 150 个,共 30 000 个频率数据)数据如图 4(a)和 4(b)所示,200 组频率数据的平均值、标准差、最大值、最小值和波动量列于表 1。

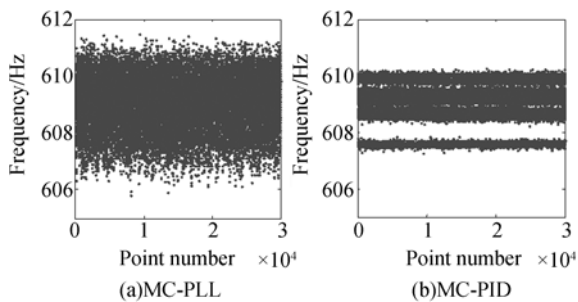


图 4 两种稳速控制系统 200 组频率测量数据

Fig. 4 200 sets of frequency data for two kinds of steady speed control systems

表 1 两种稳速控制方法的频率数据

Tab.1 Statistics of two kinds of steady speed control systems (Hz)

稳速系统	平均值	标准差	最大值	最小值	波动量
MC-PLL	609.07	0.89	611.48	605.81	5.67
MC-PID	609.02	0.67	610.37	607.36	3.01

由图 4 和表 1 可见,调制器锁相环稳速控制系统和 PID 稳速控制系统所测调制频率的平均值分别为 609.07,609.02 Hz,标准差分别为 0.87,0.67 Hz,波动量分别为 5.67,3.01 Hz。调制器 PID 稳速控制系统的控制精度高、稳速效果好,频率波动量减小了 2.66 Hz。另外,分别从两套稳速控制系统所测的 200 组数据中随机选取一组数据如图 5 所示,从 PID 稳速控制系统控制调制器的调制频率曲线可以看出频率数据周期性明显,每 15 个连续测量点为一个周期(调制盘的齿数正好为 15 个)。该频率的波动主要由调制盘齿形误差、偏心误差以及安装误差引起。

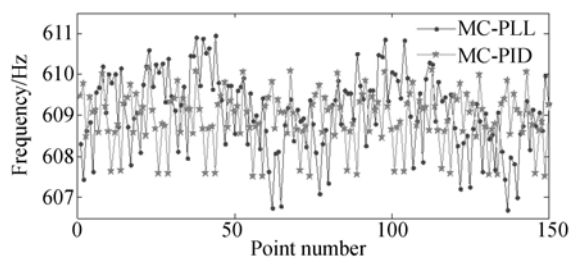


图 5 单组频率测量数据

Fig.5 Single frequency data of two kinds of steady speed control systems

#### 3.3.2 光谱对比

由 PISA-S-PLL、PISA-S-PID 系统测得高岭土的反射率数据如图 6 所示,两条曲线对比可知 PISA-S-PID 系统所测的高岭土反射率曲线更光滑。1 500 nm 波长点处镀金铝板的检测数据如图 7 所示,计算测量数据的信噪比可知,PISA-S-

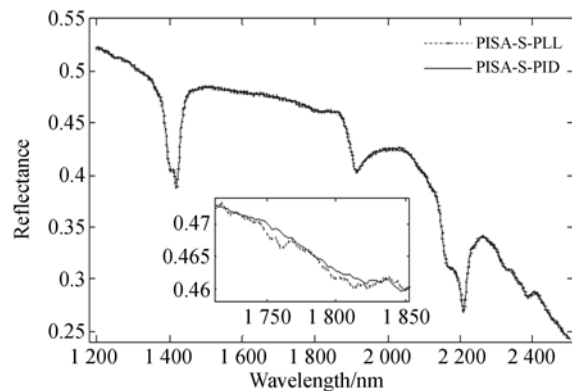


图 6 两套实验仪器系统所测高岭土的反射率数据

Fig.6 Reflectance spectra of kaolinite clay based on two sets of instruments systems

PLL 系统所测数据的信噪比为 1 885, PISA-S-PID 系统所测数据的信噪比为 4 156。由此可知,

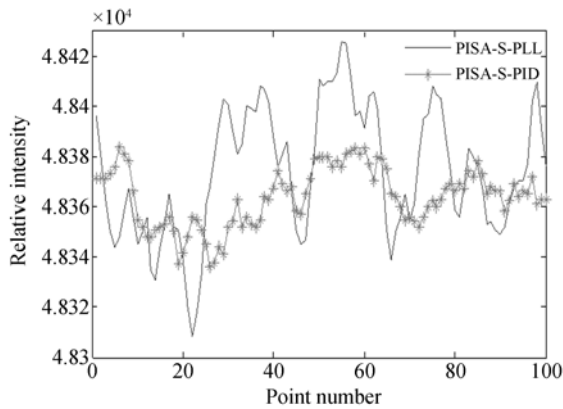


图 7 两套实验仪器系统在 1 500 nm 波长点处镀金铝板的检测数据

Fig. 7 Reference data of reflectance at 1 500 nm wavelength point based on two sets of instruments systems

#### 参考文献:

- [1] MORIMOTO S, MCCLURE W F, STAN-FIELD D L. Hand-held NIR spectrometry: part I: An instrument based upon gap-second derivative theory[J]. *Applied Spectroscopy*, 2001, 55(2): 182-189.
- [2] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 第二版. 北京:清华大学出版社, 2011.
- GAO J ZH. *Detection of Weak Signals*[M]. Second Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2011. (in Chinese)
- [3] 占细雄, 林君, 周志恒. 近红外光谱仪中的微弱信号检测技术[J]. *仪器仪表学报*, 2002, 23(3): 23-31.
- ZHAN X X, LIN J, ZHOU ZH H. The technique of acquiring weak signal in NIR spectrometer[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2002, 23(3): 23-31. (in Chinese)
- [4] 王智宏, 林君, 王一丁, 等. 近红外光谱仪中调制器的误差分析[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(4): 516-519.
- WANG ZH H, LIN J, WANG Y D, et al.. The error analysis on modulator of NIR spectrophotometer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 516-519. (in Chinese)
- [5] 贾振安, 王培培, 乔学光, 等. 基于锁相放大的近红外光谱信号提取电路研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2012, 4: 104-106.
- JIA ZH A, WANG P P, QIAO X G, et al.. Research on near-infrared spectrum detecting circuit with LIA[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2012, 4: 104-106. (in Chinese)
- [6] 徐晗, 卢启鹏, 朴仁官, 等. 基于锁相放大的近红外光谱信号提取电路研究[J]. *微计算机信息*, 2009, 23: 233-235.
- XU H, LU Q P, PU R G, et al.. Research of near-infrared spectrum detecting circuit with LIA[J]. *Microcomputer Information*, 2009, 23: 233-235. (in Chinese)
- [7] 周扬, 戴曙光, 吕进, 等. 基于最大熵的近红外光谱仪调制器工作状态判别方法[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(6): 927-931.
- ZHOU Y, DAI SH G, LÜ J, et al.. Working state discrimination method of near infrared spectrometer modulator based on maximum entropy[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(6): 927-931. (in Chinese)
- [8] 葛成良, 黄志伟, 范国滨, 等. 激光斩光器自动控制系統[J]. *中国激光*, 2006, 33(增): 5-7. (in Chinese)
- GE CH L, HUANG ZH W, FAN G B, et al.. Au-

调制器 PID 稳速控制系统应用于光谱仪后有效提高了光谱仪的信噪比。

## 4 结 论

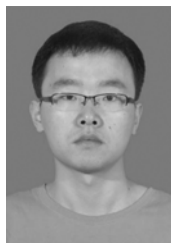
本文采用 PID 技术设计了光谱仪调制器稳速控制系统, 在原有机结构基础上, 利用单片机捕获功能通过光耦、整形电路实时获取调制盘每个齿输出的调制频率, 并以调制盘一圈内全部齿对应测量频率的平均值与目标频率值之差作为控制量, 由 PID 算法计算值控制定时计数器产生 PWM 波, 通过 H 桥电路驱动调制器, 从而构成闭环保证调制器调制频率的稳定。另外, 该系统具有过流、过热、过压等保护功能。实验表明, 与原锁相环稳速控制系统相比, 调制器采用 PID 稳速控制系统提高了稳速精度和信噪比, 调制频率波动量由原来的 5.67 Hz 减小为 3.01 Hz, 信噪比由原来的 1 185 提高到 4 156。

- to-controller of laser chopper[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(Suppl.): 5-7. (in Chinese)
- [9] 吕进,施秧,刘辉军,等. 基于 NIR 的茶叶成分检测仪的设计与实现[J]. *光电工程*, 2010, 37(1): 82-87.  
LÜ J, SHI Y, LIU H J, *et al.*. Development of tea component analyzer based on NIR spectrometry[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(1): 82-87. (in Chinese)
- [10] 刘运洋. PE983G 红外光谱仪控制板的研发[D]. 北京:中国地质大学, 2011.  
LIU Y Y. *The Development of PE983G Infrared Spectrometer's Control Panel*[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011. (in Chinese)
- [11] 孙本贵. 基于锁相环的高稳定性斩光器的设计[J]. *电子工程师*, 2005, 31(1): 5-7.  
SUN B G. Design of a high stability light chopper based on PLL[J]. *Electronic Engineer*, 2005, 31(1): 5-7. (in Chinese)
- [12] 王智宏,林君,武子玉. 便携式矿物近红外光谱仪器的研制[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(1): 1135-1138.  
WANG ZH H, LIN J, WU Z Y. Development of the portable mineral NIR spectrometer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(11): 1135-1138. (in Chinese)
- [13] 滕飞. PISA-S 型光谱仪器调试平台设计[D]. 长春:吉林大学, 2013.  
TENG F. *Design of NIR-Spectrometer Debugging Platform for PISA-S*[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [14] 徐利文. 智能车电机控制和图像采集系统设计与研究[D]. 西安:长安大学, 2012.  
XU L W. *Design and Research on Motor Control and Image Acquisition System for Intelligent Vehicles*[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [15] 张桂香,姚存治. 基于 ATmega128 单片机的智能供电测控系统设计[J]. *电力自动化设备*, 2009, 29(8): 136-139.  
ZHANG G X, TAO C ZH. Design of intelligent measuring and control system based on ATmega128[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2009, 29(8): 136-139. (in Chinese)

#### 作者简介:



王智宏(1968—),女,吉林长春人,教授,博士生导师,1995年于吉林大学(原吉林工业大学)获得硕士学位,2005年于吉林大学获得博士学位,主要从事近红外光谱及应用技术的研究。E-mail: zhwang@jlu.edu.cn



季绪飞(1987—),男,吉林吉林人,2011年于吉林大学获得学士学位,主要从事近红外光谱仪器硬件方面的研究。E-mail: jixufei@126.com