

空间傅里叶变换红外光谱仪动镜速度稳定性研究

张明月^{1,2}, 章家保¹, 杨洪波¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了改善傅里叶变换红外光谱仪中动镜运动控制系统的动态性能和静态性能, 设计了基于扰动观测器的非线性 PID 控制器。首先对该动镜驱动系统进行数学建模, 分析系统中的非线性因素。之后给出了设计该控制器的理论依据。最后进行了数值仿真分析和实验验证。实验结果表明: 动镜以 133 mm/s 运动时, 采用基于扰动观测器的非线性 PID 控制器控制时, 系统响应超调量为 0, 上升时间为 3 ms, 稳态均方差为 0.0392, 性能明显优于传统 PID 控制器。结果证明了该控制器的可行性和实用性, 满足了干涉仪的动镜匀速性要求。

关键词: 非线性 PID; 扰动观测器; 傅里叶变换红外光谱仪; 控制器

中图分类号: TP273.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1240-07

Research on speed stability of moving mirror in FTIR spectrometer

Zhang Mingyue^{1,2}, Zhang Jiabao¹, Yang Hongbo¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to improve static and dynamic performance of moving mirror motion system in Fourier transform infrared spectrometer, nonlinear PID controller based on disturbance observer was designed. Firstly, mathematical model of moving mirror driven system was established, nonlinear factors in the system were analyzed. And then the theoretical basis designing this controller was given. At last, numeral simulation and physical experiment were carried on. The experimental results show that, when moving mirror is moving at 133 mm/s, the maximum overshoot of system is 0, rising time was 3 ms, steady-state variance is 0.039 2 using NPID with DOB, which is obviously better than traditional PID controller. Conclusion shows that NPID with DOB controller is feasible and usable and it meets the requirement uniform motion of moving mirror.

Key words: NPID; disturbance observer; FTIR; controller

收稿日期: 2013-08-22; 修订日期: 2013-09-26

基金项目: 中国科学院知识创新工程国防科技创新重要方向项目(YYYJ-1122); 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创
新工程资助项目

作者简介: 张明月(1986-), 女, 博士生, 主要从事精密机械设计 & 伺服系统设计方面的研究。Email: zyy_2011@163.com

导师简介: 杨洪波(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为光机电集成计算机辅助工程技术。Email: yanghb@ciomp.ac.cn

0 引言

傅里叶变换红外光谱仪广泛应用在遥感大气环境监测中,采用迈克尔逊干涉仪实现光的干涉,其中动镜的速度均匀性决定干涉效果。动镜由音圈电机直接驱动,外部扰动直接作用在电机上,使系统表现出明显的非线性。PID 控制器作为一种线性控制器,对这种非线性变化引起的速度波动,难以满足系统的稳定性及控制精度要求,为了降低动镜的速度波动,必须设计高效的动镜运动控制系统。

针对音圈电机驱动系统的特点,出现了多种消除外部扰动的控制策略,如神经网络 PID 控制^[1]、滑模变控制^[2]、模糊 PID 算法^[3-4]。神经网络 PID 控制器中神经网络算法容易陷入局部最优,影响控制效果;滑模变控制器存在高频振荡,影响控制精度;模糊 PID 控制器确定模糊准则困难,且只能取有限的等级,限制了精度提高。

非线性 PID 控制器利用非线性 fal 函数使控制器参数随误差大小进行调整,具有适应性强的特点,且具有经典 PID 控制的应用广泛性和控制精度高的特点^[5]。为了进一步改善动镜运动控制系统的抗扰能力,采用了扰动观测器(DOB, Disturbance Observer),其原理是采用扰动观测器估计系统中的内外的未知扰动,并进行扰动的反馈补偿。

文中基于动镜驱动系统,首先给出了动镜运动系统的驱动原理,建立了系统的数学模型,分析速度波动影响因素;之后提出了基于扰动观测器的非线性 PID 控制器(NPID with DOB),并给出了算法的理论依据;最后通过仿真分析和实验验证该控制器的可行性。实验结果表明,与传统 PID 控制器相比,该控制器提高了动镜运动控制系统的动态性能和静态性能。

1 动镜驱动系统分析及建模

傅里叶变换红外光谱仪采用迈克尔逊干涉仪完成干涉调试,其原理如图 1 所示。光源 S 发出光束,经分光镜分成两束,一束透过分光镜入射到测量反射镜 M2 被返回,另一束反射后到参考反射镜 M1 被返回,动镜 M2 的直线运动使经过动镜 M2 和定

镜 M1 的光束产生固定的相位差,两束光在分光镜相遇发生干涉,对该干涉信号进行傅里叶变换得到输入光束的光谱分布。

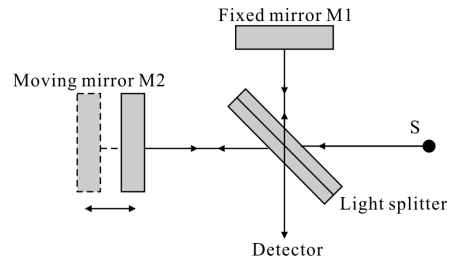


图 1 傅里叶变换红外光谱仪原理

Fig.1 Schematic diagram of FTIR spectrometer

动镜支撑系统采用全柔性结构,如图 2 所示。动镜移动平台由含有比例控制杆的两个柔性平行四边形杆支撑。动镜放在移动平台上,比例控制杆消除了平台运动时带来的垂直方向的耦合位移。全柔性结构无摩擦、无间隙且寿命长,提供了精确的线性导向作用,定位系统可以一次性加工,减少了装配误差,保证了机构精度,降低了系统的复杂度。该柔性结构采用的金属弹性材料是 Qbe2,具有很好的力学、化学、物理综合性能。

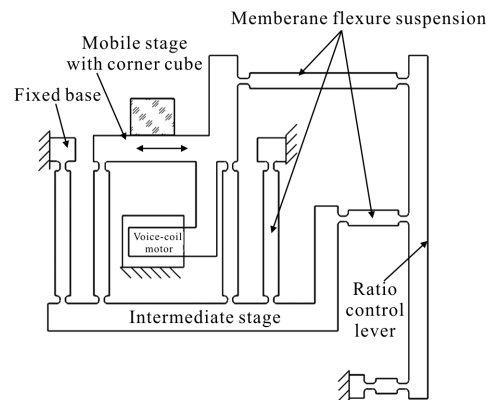


图 2 动镜全柔性支撑结构

Fig.2 Full flexible structure of moving mirror

动镜运动系统采用音圈电机驱动。音圈电机主要由定子和转子两部分组成,定子装有产生主磁通的永磁铁,转子是一个圆筒状绕组,当绕组卷轴进入永磁体后,根据电磁理论,产生一个和线圈中电流矢量有关的轴向牵引力,具有结构简单、动态响应快、调速范围宽、定位精度高等优点。文中采用 MF 型音圈电机,其数学模型如图 3 所示。

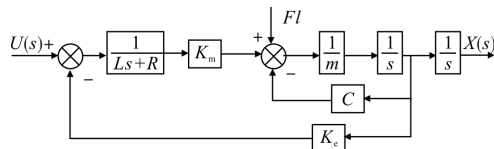


图 3 音圈电机模型

Fig.3 Model of voice coil motor

图中, L 为音圈电机线圈的电感, R 为线圈内阻, C 为粘滞阻尼系数, K_e 为反电动势系数, K_m 为推力系数, $U(s)$ 为电压控制信号, $X(s)$ 为动位移, Fl 为负载, m 为音圈电机移动质量, 不考虑外界扰动及摩擦时, 音圈电机开环传递函数为:

$$G(s) = \frac{K_m}{mLs^3 + mRs^2 + K_nK_e s} \quad (1)$$

动镜的速度波动决定了干涉效果。控制速度波动关键是建立动镜运动系统的速度环控制系统, 其控制模型如图 4 所示。

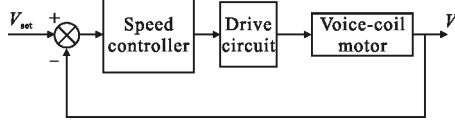


图 4 动镜驱动机构控制策略

Fig.4 Speed control model of moving mirror servo system

2 动镜运动系统稳定性因素分析

2.1 动镜运动系统特性分析

动镜支撑机构采用全柔性机构, 虽然消除了传动机构中摩擦、间隙、弹性变形等非线性因素对系统精度的影响, 但系统运行过程中因为柔性支撑结构变形力变大, 使音圈电机的负载大小随着位移的变化而变化。

音圈电机高加速时, 电机和动镜支撑系统之间动态特性不同, 产生相互作用力, 造成系统的残余振动, 还会产生非线性摩擦力和热变形, 影响系统的定位精度和稳定性。

因为动镜运动系统没有传动机构, 由元器件和测量装置带来的噪声和各种扰动没有经过缓冲或削弱环节直接作用在音圈电机上, 严重影响系统的稳定性。

2.2 动镜运动系统环境特性分析

傅里叶变换红外光谱仪应用在空间环境中, 空间环境的物体并非处于完全失重状态, 而是处于微

重力状态^[6]。系统在空间中姿态不断变化, 微重力的大小和方向也不断变化, 且具有不确定性。不确定的微重力对动镜运动系统的影响可以看作是扰动力, 严重影响着干涉仪中动镜运动系统的稳定性。

因为空间中动镜运动机构系统处于微重力状态, 使得系统的残余振动扰动影响更加突出。虽然残余振动幅值较低, 但对于高精度动镜运动系统不能忽略。

因此音圈电机的驱动控制系统需要综合考虑上述扰动的影响, 设计控制器改善系统的抗扰性。

3 控制策略分析

根据动镜驱动系统的非线性特性, 采用基于扰动观测器的非线性 PID 控制器对动镜速度环进行控制。

3.1 扰动观测器

扰动观测器^[7-9]的基本思想是将外部扰动及模型参数变化造成的实际对象与名义模型输出的差异, 全部等效到控制输入端, 观测出等效扰动, 之后通过反馈补偿扰动, 其原理如图 5 所示。其中 $G(s)$ 为动镜运动系统的传递函数, $G_n(s)$ 为动镜运动系统的名义模型, d 为等效扰动, \hat{d} 为观测扰动, u 为控制输入, $Q(s)$ 为低通滤波器, ξ 为量测噪声。

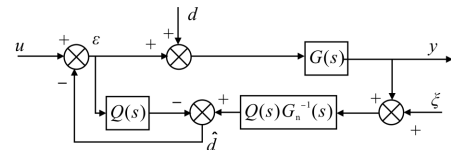


图 5 扰动观测器原理图

Fig.5 Schematic diagram of disturbance observer

扰动观测器不基于任何的扰动模型, 提供了快速、高效跟踪性能和平滑的控制性能。从指令 u 、扰动 d 和测量噪声 ξ 到输出 y 的传递函数为:

$$G_w = \frac{G(s)G_n(s)}{G_n(s) + [G(s) - G_n(s)]Q(s)} \quad (2)$$

$$G_{d\hat{}} = \frac{G(s)G_n(s)[1 - Q(s)]}{G_n(s) + [G(s) - G_n(s)]Q(s)} \quad (3)$$

$$G_{\xi} = \frac{G(s)Q(s)}{G_n(s) + [G(s) - G_n(s)]Q(s)} \quad (4)$$

通过上式可以看出, $G_n(s)$ 、 $Q(s)$ 设计非常关键。 $G_n(s)$ 为系统的名义模型, 可以根据音圈电机驱动系统的具体参数确定模型, 同时根据音圈电机驱动系

统的特性可知其名义模型为最小相位系统,可以直接对 $G_n(s)$ 进行求逆。 $Q(s)$ ^[9]设计必须满足 $Q(s)G_n^{-1}(s)$ 为正则,即 $Q(s)$ 的相对阶应不小于 $G_n(s)$ 的相对阶;其次是 $Q(s)$ 带宽的设计,必须同时满足扰动观测器的鲁棒稳定性和扰动抑制力,通常 $Q(s)$ 可以实现对低频扰动的有效观测和低频噪声的有效滤波,考虑到系统带宽的影响采用 H.S.Lee 的设计方法,因为被控对象是二阶系统,采用分母为三阶、分子为一阶的低通滤波器:

$$Q(s) = \frac{3\tau s + 1}{\tau s^3 + 3\tau s^2 + 3\tau s + 1} \quad (5)$$

参数 τ 的取值决定了 $Q(s)$ 的带宽,随着 τ 值变化, $Q(s)$ 的频率特性曲线如图 6 所示, $Q(s)$ 的截止频率分别为 10 000、1 000、100、10 Hz, 即 τ 越小, $Q(s)$ 的频带越宽,系统抑制外扰的能力越强,但对测量噪声的敏感性增大。反之, τ 越大, $Q(s)$ 的频带越窄,扰动观测器对测量噪声不敏感,但对外扰动的抑制抑制能力也越弱。因此,参数 τ 的选择实际是在扰动观测器的对外扰动的抑制能力及对测量噪声的敏感性两者之间的折中。根据光谱仪动镜驱动系统速度环带宽为 100 Hz, $Q(s)$ 带宽取 10 倍速度环带宽,取 $\tau=0.001$ 。

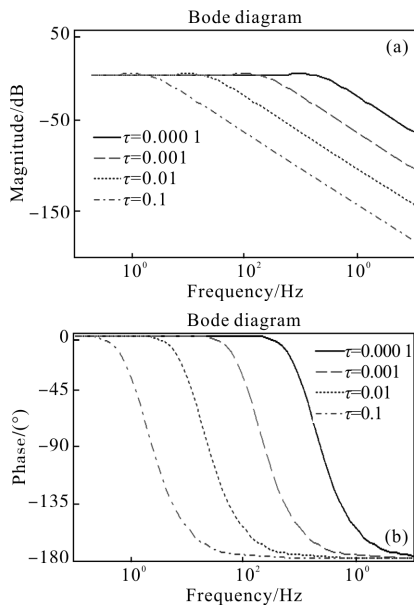


图 6 $Q(s)$ 频率响应曲线

Fig.6 $Q(s)$ frequency-response curves

3.2 非线性 PID

常规 PID 控制器,其参数恒定,不能满足动镜

在不同使用情况下系统对参数的自整定要求,从而影响动镜的控制精度。为了降低稳态误差,引入了非线性 fal 函数,构造非线性 PID。 fal 函数的定义为^[10]:

$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (6)$$

其数学拟合示意图如图 7 所示, fal 函数仅在 0 附近存在非常小的线性区域, e 为指令信号与被控对象输出之差, δ 为线性段的区间长度, fal 函数具有“小误差大增益,大误差小增益”的特点,故很多模糊控制器和增益设计控制器采用了这个算法特征,与模糊控制器相比,此控制器实现简单。所组成的非线性 PID 控制器如公式(7)所示:

$$u = \beta_1 fal(e, \alpha_1, \delta_1) + \beta_2 \int edt, \alpha_2, \delta_2) + \beta_3 fal\left(\frac{de}{dt}, \alpha_3, \delta_3\right) \quad (7)$$

其中, $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < 1 < \alpha_3$, e 为误差, $\alpha_2, \delta_2, \alpha_3, \delta_3$ 分别表示 fal 函数的参数,控制规律参考文献[10], $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 对应 PID 控制器中的比例、积分、微分控制参数。

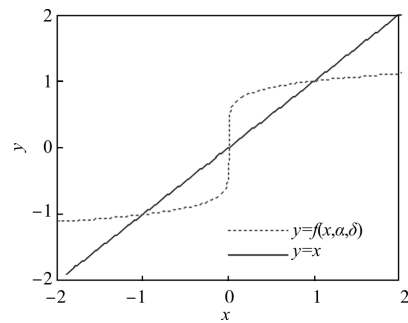


图 7 fal 函数拟合示意图

Fig.7 Fitting schematic diagram of fal function

4 仿真分析

为了分析基于扰动观测器的非线性 PID 控制器的性能及作用效果,在 MATLAB 的 SIMULINK 中搭建模型进行分析。

被控对象: $G(s) = \frac{0.082}{3.23 \times 10^{-3} s^2 + 23.55s + 178}$

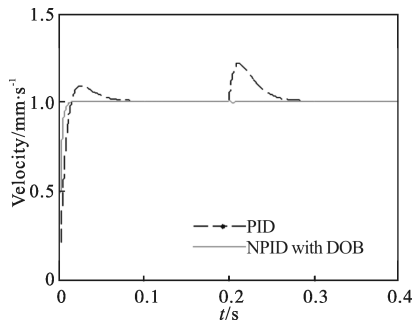
名义模型: $G_n(s) = \frac{0.089}{3.25 \times 10^{-3} s^2 + 22.85s + 178.6}$

低通滤波器: $Q(s) = \frac{3 \times 10^{-3} s + 1}{10^{-9} s^3 + 3 \times 10^{-6} s^2 + 3 \times 10^{-3} s + 1}$

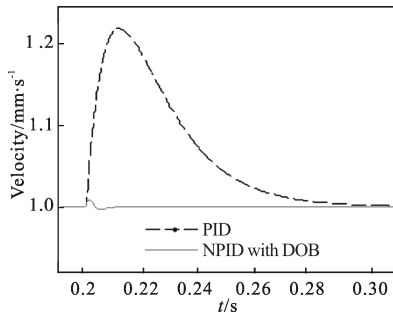
基于扰动观测器的非线性 PID 控制器参数分别

为 $\alpha_1=0.5, \alpha_2=0.75, \alpha_3=1.5, \delta_1=\delta_2=\delta_3=0.1, \beta_1=8 \times 10^4, \beta_2=1.2 \times 10^6, \beta_3=0$ 。PID 控制器参数为 $K_p=4.2 \times 10^4, K_i=1.6 \times 10^6, K_d=10$ 。

输入单位阶跃信号,在 0.1 s 加上信号为 2 的阶跃扰动,其响应结果如图 8 所示,与 PID 控制器控制性能对比如表 1 所示。可以看出基于扰动观测器的非线性 PID 控制器上升时间短,超调量为 0,扰动引起系统变化小,且在 10 ms 内扰动作用消除,系统恢复稳定,而 PID 动态性能和稳态误差均较差。



(a) 含扰动单位阶跃响应曲线
(a) Step response with disturbance



(b) 局部放大图
(b) Partial enlarged detail

图 8 不同控制器单位阶跃响应曲线
Fig.8 Step response curves of different controller

表 1 PID 和 NPID with DOB 阶跃响应控制性能对比
Tab.1 Step response controller performance comparison

Controller	Rising time (63.2%)/ms	Overshoot	Stabilization time of disturbance/ms	Disturbance amplitude
PID	6.15	8.2%	106	0.17
NPID with DOB	2.2	0	10	0.008

为了进一步验证基于扰动观测器的非线性 PID 控制器的对系统稳态精度的影响,在上述阶跃响应系统中加入功率谱密度为 30 的白噪声扰动,得出系

统的稳态误差如图 9 所示,PID 控制器误差均方差值为 0.062 6,而基于扰动观测器的非线性 PID 控制器误差均方差值为 0.009 8,显著提高了系统的稳态精度。可以看出提出的控制器能够有效降低上升时间、超调量、稳态误差,提高了动镜运动系统的动静态性能。

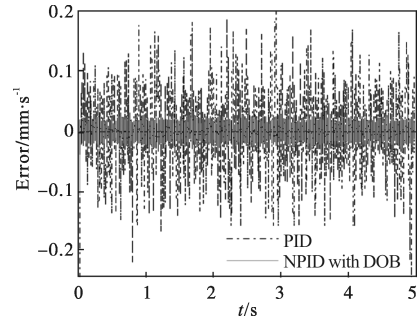


图 9 PID 和 NPID with DOB 控制稳态误差对比

Fig.9 Steady-state error comparison controlling by PID and NPID with DOB respectively

5 实验验证

为了验证基于扰动观测器的非线性 PID 控制器对光谱仪动镜速度环的实际控制效果,在某型 FTIR 光谱仪上实现完成了对动镜运动速度控制。根据整机性能对动镜提出的设计要求,动镜最大有效行程为 ± 10.25 mm,速度为 133 ± 1 mm/s,动镜预计寿命为 7 年, 4×10^8 圈。

选用的系统的具体参数:电机推力常数为 15N/A,最大峰值电流为 1 A,行程为 ± 15.5 mm,音圈电机移动质量为 1.1kg。驱动电压为 24V,持续力为 13N,峰值力为 18N,线圈电阻为 10.5 Ω ,线圈电感为 4.3mH。

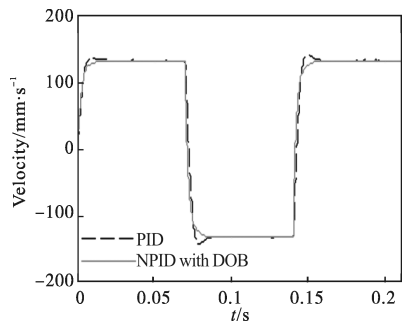
音圈电机的控制信号是电压控制信号,根据速度反馈单元提供的反馈量计算当时需要的输出电压,实现对音圈电机的速度环控制。具体硬件平台主要由主控电路、功率驱动电路和外围通讯与存储辅助电路组成。采用 TI 的 TMS320LF2407A DSP 作为主控制器,当控制指令产生偏差时,DSP 进行计算,输出 PWM 信号,该信号通过功率驱动电路实现对音圈电机的驱动控制,带动干涉仪动镜运动。动镜速度的检测需要和红外干涉仪光路完全平行的激光干涉仪,激光光源选用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 光,且在激光器前加上准直装置,得到准直性非常好的单色光源。探测器检测到的强度正弦变化的干涉激光信号进入 DSP 主控制器构成控制系统的

速度闭环,实现速度反馈,控制动镜匀速运动。控制系统的 PWM 基础频率为 10 kHz,系统速度采样频率为 1 kHz。PID 和基于扰动观测器的非线性 PID 控制器参数为 $\alpha_1=0.5, \alpha_2=0.75, \alpha_3=1.5, \delta_1=\delta_2=\delta_3=0.1, \beta_1=3.5 \times 10^5, \beta_2=7 \times 10^5, \beta_3=2000, K_p=2.35 \times 10^5, K_i=4.6 \times 10^6, K_d=0$ 。

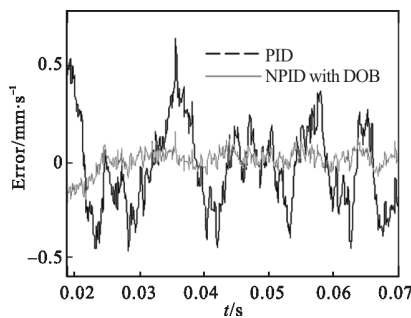
$$\text{名义模型: } G_n(s) = \frac{0.0489}{4.73 \times 10^{-3} s^2 + 11.55s + 225}$$

$$\text{低通滤波器: } Q(s) = \frac{3 \times 10^{-3} s + 1}{10^{-9} s^3 + 3 \times 10^{-6} s^2 + 3 \times 10^{-3} s + 1}$$

动镜的运动分为启动匀速和制动过程,对于 FTIR 光谱仪,红外调制信号在动镜的匀速扫描阶段完成,因而匀速阶段的速度波动直接关系到红外信号的干涉效果。采用方波输入信号,速度值为 $\pm 133 \text{ mm/s}$,分别采用 PID 控制器和基于扰动观测器的非线性 PID 对系统进行控制。图 10 中,图(a)表示响应曲线,图(b)表示系统稳态误差,两种控制器下系统响应性能如表 2 所示,可以看出基于扰动观测器的非线性 PID 控制器系统的上升时间、超调量和稳态误差均优于 PID 控制器。



(a) 133 mm/s 速度系统响应曲线
(a) Response curve of tracking 133 mm/s



(b) 稳态误差
(b) Disturbance tracking error time profiles

图 10 PID 和 NPID with DOB 控制方波响应曲线

Fig.10 Square wave response curves with PID and NPID with DOB

表 2 133 mm/s PID 和 NPID with DOB 控制器性能对比

Tab.2 Different controller performance comparison of 133 mm/s square wave input

Controller	Rising time/ms (63.2%)	Over shoot	Mean square deviation	Average value	Maximal positive error	Maximal negative error
PID	7	7%	0.225 5	133.449 9	0.839 4	0.492 9
NPID with DOB	3	0	0.039 2	132.965 0	0.154 8	0.164 0

采用频率特性分析仪对闭环后的系统进行扫描,频率特性曲线如图 11 所示。可以看出 PID 控制器动镜带宽为 98 Hz,谐振峰值为 11.58 dB,基于扰动观测器的非线性 PID 控制器控制动镜带宽为 102 Hz,且谐振峰值小。可见基于扰动观测器的非线性 PID 控制器性能由于 PID 控制器。

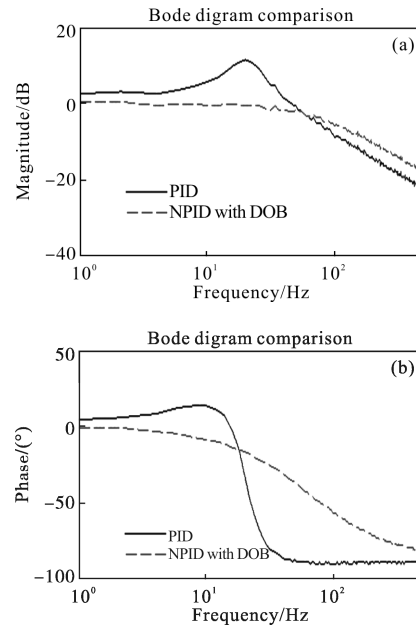


图 11 PID 和 NPID with DOB 扫频对比

Fig.11 Frequency sweep response comparison controlling by PID and NPID with DOB respectively

6 结论

针对 FTIR 光谱仪动镜运动系统中负载变化、机械谐振、测量误差等非线性因素,提出了基于扰动观测器的非线性 PID 控制器,该控制器参数随误差大小进行调整,具有适应性强的特点,使控制系统具有较强的鲁棒性和抗扰动能力。分别进行了数值

仿真分析和实验验证。实验结果表明,动镜运动速度为 133 mm/s 时,基于扰动观测器的非线性 PID 控制器控制时,超调量为 0,上升时间为 3 ms,稳态均方差为 0.039 2,性能明显优于传统 PID 控制器。仿真和实验表明,提出的基于扩张状态观测器的非线性 PID 控制器动态响应速度快,速度稳定性高,保证了动镜运动系统具有很好的动静态性能。为伺服驱动系统提供了一种控制思路。

参考文献:

- [1] Zhang Lijia, Wang Dayu, Guo Hong. Neural network PID control of voice coil motor [J]. *Electric Drive*, 2012, 40(6): 46–49. (in Chinese)
张立佳, 王大彧, 郭宏. 直线音圈电机的神经网络 PID 控制[J]. 电气传动, 2012, 40(6): 46–49.
- [2] Long Yingwen, Zhao Guangzhou. Servo with sliding mode variable structure fuzzy control [J]. *Electric Drive*, 2004(1): 26–28. (in Chinese)
龙英文, 赵光宙. 模糊变结构控制在伺服系统中的应用[J]. 电气传动, 2004, 34(1): 26–28.
- [3] Li Zhongbing, Xu Xianze, Le Yi, et al. Motion control of moving mirror based on fixed - mirror adjustment in FTIR spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(8): 2295–2298. (in Chinese)
李忠兵, 许贤泽, 乐意, 等. FTIR 光谱仪中基于定镜调整的动镜运动控制研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(8): 2295–2298.
- [4] Dou Xiuming, Dai Zuoxiao, Hua Jianwen, et al. Digital control of voice coil motor driving moving mirrors in FTS [J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, 7(17): 4292–4295. (in Chinese)
窦秀明, 代作晓, 华建文, 等. 音圈电机驱动光谱仪动镜的数字控制[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(17): 4292–4295.
- [5] Ristanovic M R, Lazic D V, Indin I. Nonlinear PID controller modification of the electromechanical actuator system for aero fin control with a PWM controlled DC motor [J]. *Automatic Control and Robotics*, 2008, 7(1): 131–139.
- [6] Shi Yufeng. Research on the control technology for the interferometer subsystem in space-borne infrared spectrometer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
施宇峰. 星载红外光谱仪干涉分系统的控制技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [7] Mohammadi A, Tavakoli M, Marquez H J, et al. Nonlinear disturbance observer design for robotic manipulators [J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21: 253–267.
- [8] Matauek M R, Ribicb A I. Design and robust tuning of control scheme based on the PD controller plus disturbance observer and low-order integrating first-order plus dead-time model [J]. *ISA Transactions*, 2009, 48: 410–416.
- [9] Liu Jinkun. Advanced PID Control with MATLAB Simulation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese)
刘金琨. 先进 PID 控制 MATALB 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [10] Han Jingqing. Active Disturbance Rejection Control Technique—the Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
韩京清. 自抗扰控制技术—估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.