

文章编号: 1001-3806(2018)06-0868-05

应用于精密光束指向系统的复合 PID 控制器研究

刘洋, 夏润秋, 吕勇

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

摘要: 为了解决传统比例-微分-积分(PID)控制器在精密光束指向系统(FPB)应用中存在的控制精度与超调量之间的矛盾,并使其可在现有控制系统硬件平台中应用,设计了一种数字复合PID控制器。该控制器采用了传统PID、前馈补偿以及抗积分饱和算法三部分综合而成,在控制器复杂性和处理时间不显著增加的前提下,缩短了调节时间及过冲,改善FPB系统的指向精度及动态特性;对该控制器的结构进行了分析,并与采用传统PID控制器的FPB进行了对比试验。结果表明,在相同的实验条件下,采用复合PID控制器的FPB系统与采用传统PID控制器的FPB系统相比,调整时间缩短了约11.4%,最大超调量从12.7%降至1.8%。在现有计算能力受限的控制系统平台上,可实现FPB系统性能的有效提升。

关键词: 测量与计量;精密光束指向;前馈补偿;抗饱和和积分

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.06.027

Research on composite PID controller used in fine pointer of beam

LIU Yang, XIA Runqiu, LU Yong

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to solve the contradiction between control precision and overshoot in the application of traditional proportional-integration-differential (PID) controller in fine pointer of beam (FPB), and make it applicable to the hardware platform of the existing control system, one composite PID controller was designed. The controller was composed of traditional PID, feed forward compensation and anti-integral saturation algorithm. Without increasing the complexity and the processing time of the controller significantly, the composite controller shortened adjustment time and overshoot, and improved pointing accuracy and dynamic characteristics of FPB system. The structure of the composite controller was analyzed and was compared with traditional PID controller of FPB. The results show that, under the same experimental conditions, the adjusting time of FPB system with composite PID controller is shortened by 11.4% and the maximum overshoot is reduced from 12.7% to 1.8% compared with FPB system with traditional PID controller. In the existing control system platform with limited computing power, the performance of FPB system can be effectively improved by using composite PID controller.

Key words: measurement and metrology; fine pointer of beam; feed forward compensation; anti-saturation integral

引言

精密光束指向(fine pointer of beam, FPB)系统又称快速反射镜,是在较小的机械转角范围内(小于 5°),可精密控制指向的光机系统。其具有响应速度快、指向精度高、伺服带宽高等优点,已经广泛地应用于稳像、稳瞄、主动光电对抗等军事领域,并成为该类

系统的核心组件^[1-7]。FPB对控制系统的响应速度及控制精度均有较高要求,采用传统比例-微分-积分(proportional-integration-differential, PID)控制器不能很好地解决系统快速性和超调量的矛盾。为了获得更高的性能指标和良好的控制效果,国内外学者对此进行大量研究:DAI等人提出了一种快速抑制超调量的改进预测控制算法,在提高动态响应的同时,减少了超调量^[8];HUANG等人提出反馈微分和前馈微分自适应控制的新型控制策略,解决了位置伺服系统响应超调性和快速性之间的矛盾^[9];LONG等人提出基于退火算法提出一种全局优化的PID控制算法,提升了低频跟随及高频振动抑制能力^[10];TANG等人^[11]在PID控

作者简介:刘洋(1982-),男,博士,讲师,主要研究方向为主动光电探测系统、成像光谱技术。

E-mail:20141891@bistu.edu.cn

收稿日期:2018-07-20;收到修改稿日期:2018-09-13

制器基础上额外增加一个积分环节,从而减小了快反镜系统低频误差;NESTOR 等人提出一种基于自适应网络滤波器的可变阶数自适应控制器,并应用于微机电结构快速反射镜中,有效地扩展了抗扰动带宽范围;NESTOR 等人^[12]研究基于前馈及自适应滤波的快反镜控制器,提升了系统的响应范围及速度,从而对振动及光学抖动等的补偿具有更好的效果。由上述内容可知,目前国外高性能 FPB 的控制系统研究已经转向模糊控制、神经网络、自适应控制等为实现手段的现代控制理论领域,并取得了优于传统控制理论的结果。但在实际工程应用中,FPB 系统的计算能力始终受到成本及使用环境等外界条件的限制,从而使新型控制器的应用受到一定的制约;因此,如何立足现有 FPB 控制系统硬件平台实现更高的控制性能是目前迫切需求。

本文中在对传统控制算法研究分析的基础上,设计了复合 PID 算法,用于解决系统快速性和超调量之间的矛盾,且该算法的计算量及实时性可满足计算能力受限制的精密光束指向系统的要求。最后通过对比试验,证明本文中所研制控制器的性能优于传统 PID 控制器。

1 前馈补偿 PID 控制器原理

前馈控制在高精度伺服系统中常用于提高系统的快速性。但由于其为开环控制,在受负荷和工况等的影响时,无法检验自身补偿的效果,因此控制精度不高。而反馈调节则能够消除扰动给系统带来的影响,具有较高的控制精度高^[13-14]。因此前馈补偿 PID 将两者优点相结合,能够在提高系统快速性的同时,提高系统控制精度。前馈补偿 PID 控制器的结构如图 1 所示。

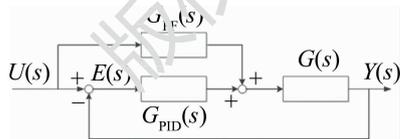


Fig. 1 Structure of Feed forward compensation PID

图 1 中, $U(s)$ 为系统输入信号, $E(s)$ 为系统误差信号, $G_{FF}(s)$ 为前馈补偿算法传递函数, $G_{PID}(s)$ 为 PID 控制器传递函数, $G(s)$ 为系统的开环传递函数。则前馈补偿 PID 系统的传递函数可由下式表示:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{G_{FF}(s)G(s) + G_{PID}(s)G(s)}{1 + G_{PID}(s)G(s)} \quad (1)$$

对(1)式进行整理,则系统误差 $E(s)$ 对输入 $U(s)$ 的传递函数可由下式表示:

$$\frac{E(s)}{U(s)} = \frac{1 - G_{FF}(s)G(s)}{1 + G_{PID}(s)G(s)} \quad (2)$$

从(2)式可以看出,当 $1 - G_{PID}(s)G(s) = 0$, 即 $G_{FF}(s) = 1/G(s)$ 时,可使得系统的误差为零。在实际的系统中,系统误差虽无法完全消除,但可以将其降低至可接受的范围,从而在获得更好动态特性的前提下,仍具有较高的控制精度。

2 复合 PID 控制器原理

高性能 FPB 系统由于对调节时间及稳态误差有更高的要求,因此出现多种新型控制器结构及实现方式^[15-21],但其复杂程度与计算量和传统 PID 调节器相比大大增加。该系统为了满足较宽的工作温度而采用工业级的数字信号处理器(Digital signal processor, DSP)作为主控芯片,并降频 50% 使用。其运算能力与目前市面主流商业级 DSP 相比较为有限。因此直接采用算法复杂程度较高的控制器时,实时性难以保证。为此本文中设计了基于前馈补偿 PID 算法及抗积分饱和和算法的复合 PID 控制器,在算法复杂程度及计算实时性不显著增加前提下,有效的 FPB 减小调节时间及稳态误差。其结构如图 2 所示。

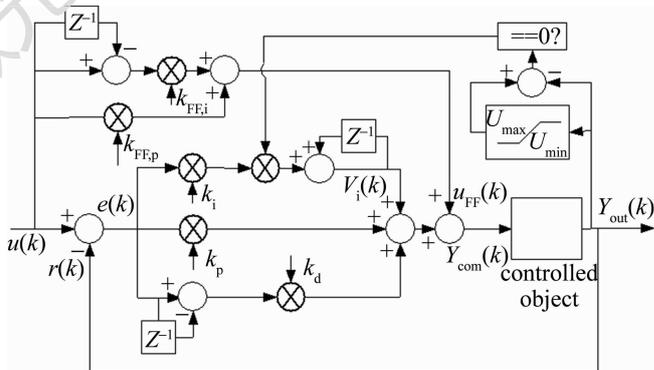


Fig. 2 Structure of composite PID controller

图 2 中, $u(k)$ 为被控对象期望值(即 FPB 目标指向角度), $Y_{com}(k)$ 为系统控制器输出值,受控对象为 FPB 的音圈电机所驱动的反射镜, $Y_{out}(k)$ 为反射镜实际指向角度, $r(k)$ 为角度测量机构的输出值, k_p, k_i 及 k_d 分别为 PID 调节器中比例、积分及微分项的系数;前馈补偿部分主要由微分项及比例项组成, $k_{FF,i}$ 为前馈部分微分通道系数, $k_{FF,p}$ 为前馈部分比例通道系数。当 $u(k)$ 发生变化时,前馈算法根据期望值计算出补偿值 $u_{FF}(k)$,进而对受控对象开环控制。同时 PID 算法根据 $u(k)$ 与 $Y_{out}(k)$ 产生的偏差 $e(k)$ 计算输出值 $Y_{com}(k)$,从而实现闭环控制;在受控对象向期望值运动过程中不断检测是否超出设定阈值范围 $[U_{min}, U_{max}]$,如果超出该阈值范围,则调整 PID 控制器的积分项,防止积分饱和。整个复合 PID 控制器可由下式

表示:

$$Y_{com}(k) = \begin{cases} k_p e(k) + V_i(k) + k_d [e(k) - e(k-1)] + u_{FF}(k), & (U_{max} \leq Y_{out}(k) \leq U_{min}) \\ k_p e(k) + V_i(k-1) + k_d [e(k) - e(k-1)] + u_{FF}(k), & (Y_{out}(k) \geq U_{max} \text{ or } Y_{out}(k) \leq U_{min}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, V_i 为 PID 算法积分项输出值, 离散计算公式为:

$$V_i(k) = K_i \sum e(k) \quad (4)$$

复合 PID 控制器流程图如图 3 所示。

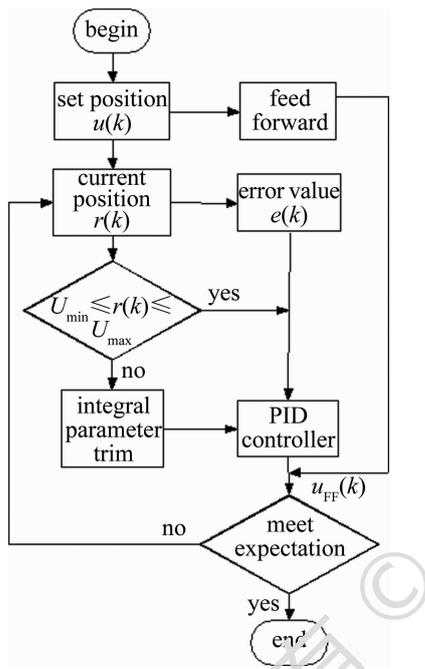


Fig. 3 Flow chart of composite PID controller

由上述图 3 中流程可知, 前馈复合 PID 控制器所增加的前馈环节及防积分饱和项的计算过程无需迭代等计算量较大的过程, 因此其在计算能力受限平台上运行的实时性可得到有效保证。

3 实验过程及结果

精密光束指向系统的测试环境如图 4 所示。该系统采用音圈电机(voice coil actuator, VCA)作为执行机构, 柔性铰链为镜面枢转元件。每轴采用两只电机推挽式配置以提高出力, 通过内部 2 维角度传感器反馈镜面实时转角, 并通过系统内部闭环控制, 完成镜面的高速精密指向控制。在本系统中, 系统主控芯片为 TI 公司 TMS320F2812P, 降频至 100MHz 运行。x 轴及 y 轴的复合 PID 控制器输出值分别通过 14bit D/A 数模转换器转为两路模拟电压信号, 并经电流放大后, 驱动音圈电机实现位置闭环控制。

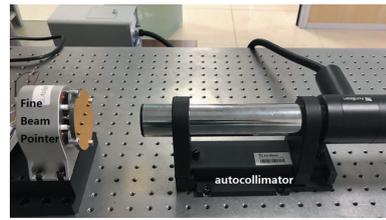


Fig. 4 Test condition of prototype of fine pointer of beam

实验中通过分别对该系统使用传统 PID 控制器及复合 PID 控制器时的阶跃响应及稳定指向进行测试, 从而在相同条件下, 对两种控制器的性能进行对比分析。由于系统运动部分为中心对称结构, 因此只对水平轴方向进行测试, 镜面偏转角度由自研非接触式角度传感器测量, 其分辨率为 $0.05''$, 重复定位精度不大于 $0.5''$, 采样频率为 10kHz, 并在气浮光学平台上通过自准直仪进行校准。自准直仪型号为 Acobeam AC300, 测角范围为 $\pm 1200''$, 分辨率为 $0.03''$, 可满足对内部角度传感器校准的需求。角度采样值存储于主控芯片的内部存储空间, 采样深度为 2048 点。当存储空间满时, 通过程序中设置的断点停止采集, 并通过 JTAG 仿真器读取并存储为 CSV 文件, 通过 Excel 进行显示, 从而对 FBP 系统的特性进行比较测试。

3.1 瞬态性能测试

分别对使用传统 PID 控制器和复合 PID 控制器的精密光束指向系统输入 $1500''$ 的阶跃信号, 以测试两者的瞬态性能。系统内部测角系统输出的阶跃响应分别

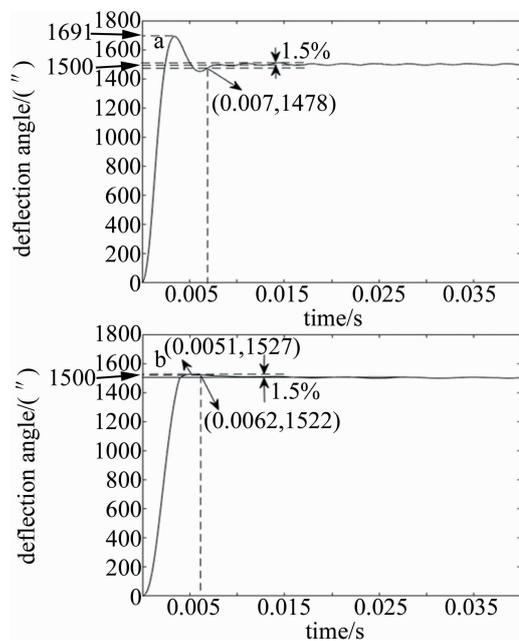


Fig. 5 Step-response of system by using traditional & composite PID controller

a—traditional PID controller b—composite PID controller

如图 5a 及图 5b 所示。

将图 5 中两种控制算法测试的系统阶跃响应数据中上升时间、最大超调量、允许误差带宽宽度以及系统的调整时间数据整理为表 1, 其中调节时间为系统超调量小于目标设定值的 1.5% 时所需时间。

Table 1 Parameters of step-response performance by using traditional & composite PID controller

transient performance	traditional PID controller	composite PID controller	ratio
rising time	1.6ms	2.2ms	138%
overshoot	12.7%	1.8%	14%
setup time	7ms	6.2ms	89%

由表 1 可知, 与采用传统 PID 控制器的系统相比, 使用复合 PID 控制器的系统的上升时间较长, 但其调整时间仅为前者的 89%, 且超调量仅为前者的 14%, 因此具有更好瞬态响应性能及更小的超调量, 从而解决了超调量与瞬态响应之间的矛盾。

3.2 稳态性能测试

向精密光束指向系统输入幅值为 400" 的阶跃信号, 对系统达到目标值后稳定情况进行测试, 测试结果如图 6 所示。

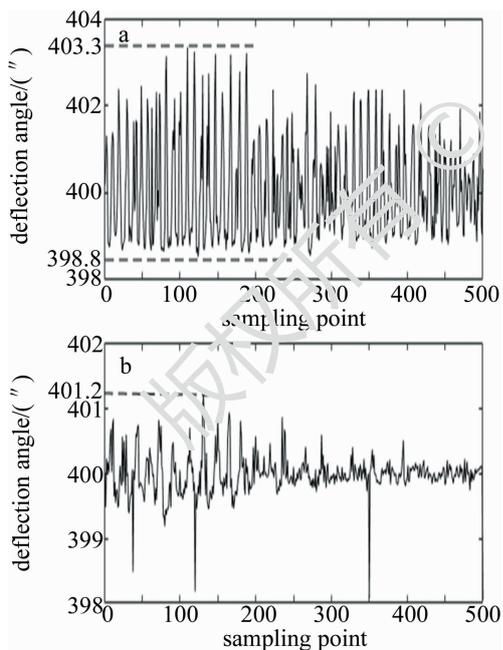


Fig. 6 Steady performance of system by using traditional & composite PID controller

a—traditional PID controller b—composite PID controller

图 6 为系统反射镜偏转角度随采样点数变化曲线, 采样频率为 10kHz。图 6a 为采样复合 PID 控制器时的结果, 图 6b 为采用传统 PID 控制器时的结果, 将两图中的数据整理为表 2。由表 2 中可以看出, 与采

用传统 PID 控制器的系统相比, 采用复合 PID 控制器的系统波动的峰峰值及稳态误差分别为原系统的 71.1% 及 73.3%, 从而可证明复合 PID 控制器的稳态性能优于传统 PID 控制器。

Table 2 Parameters of steady performance by using traditional & composite PID controller

steady performance		traditional PID controller/(")	composite PID controller/(")	ratio/%
steady	peak-peak value	4.5	3.2	71.1
state error	root mean square	0.75	0.55	73.3

4 结 论

研究分析了前馈补偿 PID 控制器原理, 并设计了基于前馈补偿、抗积分饱和及传统 PID 控制器的复合 PID 控制器, 并将其应用于精密光束指向系统。实验结果表明, 在一定误差带宽度内, 复合 PID 算法使系统调整时间缩短了约 11.4%, 最大超调量从 12.7% 降至 1.8%, 在一定程度上解决了计算能力受限制的 FPP 系统中快速性与超调量的矛盾, 提高了系统的稳定性。从而可以广泛用于计算能力受使用环境限制的高速、精密运动伺服控制系统中。

参 考 文 献

- [1] PENG Sh P, WANG W G, YU H J. Design of a control system of fast reflector in a laser autocollimator [J]. Laser Technology, 2013, 37 (4): 431-436 (in Chinese).
- [2] NI Y X, SAN X G, GAO Sh J, et al. Research of fast steering mirror in laser communication APT system [J]. Laser & Infrared, 2018, 48 (2): 140-147 (in Chinese).
- [3] WANG J K, YU J Ch, GAO T Y, et al. Design and adjustment of high energy laser precision pointing monitoring system [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45 (4): 0412004 (in Chinese).
- [4] LIU Sh T, CAO Y, PENG X F, et al. Research on line-of-sight initial alignment system in space laser communication [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31 (5): 658-662 (in Chinese).
- [5] PENG S P, YU H J, WANG W G, et al. Design of servo system for novel fast-steering mirror [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43 (5): 1610-1615 (in Chinese).
- [6] XU X H, YANG H B, WANG B, et al. Research on key technology of fast-steering mirror [J]. Laser & Infrared, 2013, 43 (10): 1095-1103 (in Chinese).
- [7] CHEN Zh B, FAN L, XIAO W J, et al. Directional error analysis of 2D galvanometer scanning system [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39 (2): 180-186 (in Chinese).
- [8] DAI W Zh, WU X L. An improved generalized predictive control algorithm for fast restraining overshoot [J]. CIESC Journal, 2010, 61 (8): 2101-2105 (in Chinese).
- [9] HUANG K Y, ZHOU T T, HUANG Sh D, et al. Non-overshoot, and fast response control of PMSM servo system based on differential adaptive compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,

- 2014,29(9):137-144 (in Chinese).
- [10] LONG B J, OU L, XIANG R J, *et al.* Optimization of control strategy for FSM system by using simulated annealing algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2016,24(9):2232-2238 (in Chinese).
- [11] TANG T, MA J G, GE R. PID-I controller of charge coupled device-based tracking loop for fast-steering mirror[J]. Optical Engineering, 2011,50(4):043002.
- [12] NESTOR O, PEREZ A, NEIL Ch, *et al.* Variable-order adaptive control of a microelectromechanical steering mirror for suppression of laser beam jitter[J]. Optical Engineering, 2006,45(10):104206.
- [13] ZHAO W Sh. Study on position control base on pulse including feedback and feedforward [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008:11-17 (in Chinese).
- [14] DANG J, NI F L, LIU Y Ch, *et al.* Control strategy for flexible, manipulator, based on feedforward compensation and fuzzy-sliding mode control[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011,45(3):75-80 (in Chinese).
- [15] QIAO G Y. Research on active disturbance rejection control strategy of fast-steering mirror close loop system [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2012:17-38 (in Chinese).
- [16] YANG L, JIA F X, QIU A P, *et al.* Application of variable structure PID to closed-loop drive circuit of micro-machined gyroscope [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2013,11(2):169-173 (in Chinese).
- [17] ZHAO J T, JIN G Sh, GAO X H. Fuzzy adaptive PID control algorithm based on fast steering mirror[J]. Laser & Infrared, 2018,48(6):756-761 (in Chinese).
- [18] AI Zh W, TAN Y, WU Q Y, *et al.* Design of control parameters for fast steering mirror by improving root locus [J]. Laser Technology, 2017,41(4):558-561 (in Chinese).
- [19] LIU Sh T, CAO Y, PENG X F, *et al.* PID control of optical axis stabilization for airborne laser communication based on fuzzy neural network [J]. Laser Technology, 2017,41(4):606-610 (in Chinese).
- [20] WANG R R, FANG A A, FENG G. Application of novel two degree-of-freedom Smith predictive control in ATP servo system [J]. Laser Technology, 2013,37(5):651-655 (in Chinese).
- [21] LI X T, ZHANG X P, MA G D Z, *et al.* Adaptive robust control over high-performance VCM servo [J]. Optics and Precision Engineering, 2017,25(9):2428-2435 (in Chinese).