

快速反射镜扰动信号的模糊补偿控制

艾志伟^{1,2,3}, 谭毅^{1,2}, 吴琼雁^{1,2}, 任戈^{1,2}

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了抑制扰动信号对快速反射镜系统输出性能的影响,保证快速反射镜结构特性改变后控制系统抑制扰动信号的能力,提出了一种对扰动信号进行模糊补偿的复合控制系统。系统中,模糊控制环节的输出参数同时用于整定PID控制参数和前馈环节控制参数,补偿系统因扰动造成的偏差,控制系统不需要增加额外的传感器,不会增加硬件系统的复杂性。利用频域分析方法,设计PID控制器的控制参数,进而设计模糊控制的规则。最后,对这种控制系统进行了仿真实验分析,结果表明:快速反射镜的结构参数变化前后,扰动模糊补偿控制系统对系统中的扰动信号均具有较高的抑制能力。

关键词:快速反射镜;模糊控制;扰动抑制;仿真

中图分类号:TN243 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.02.016

Fuzzy compensation control of disturbance signal in fast steering mirror

AI Zhi-wei^{1,2,3}, TAN Yi^{1,2}, WU Qiong-yan^{1,2}, REN Ge^{1,2}

(1. The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to suppress the influence of disturbance signal on fast steering mirror system and ensure the ability of suppressing disturbance signal when the structural characteristics of the fast steering mirror have changed, a compound control system which can fuzzily compensate the disturbance signal is proposed. To compensate the deviation caused by disturbance, the output parameters of fuzzy controller are used to set the control parameters of the PID controller and the feed forward link at the same time. The control system don't need extra sensors, which will not increase the complexity of hardware system. By using frequency domain analysis method, the initial control parameters of PID controller are designed, and then the rules of fuzzy control are designed. Finally, the simulation experiments are carried out. Experiment results show: whether the structural parameters of the fast steering mirror change or not, the disturbance fuzzy compensation control system both has a good ability to suppress disturbance signal.

Key words: fast steering mirror; fuzzy control; disturbance rejection; simulation

1 引言

快速反射镜是激光光源与接收端之间调整光束传播方向的重要器件。它具有结构紧凑、响应速度

快、闭环带宽高等突出特点^[1]。由于其偏转角度较小,因此通常与大转角的跟踪架一起构成复合轴跟踪系统,实现对目标的主、子跟踪。复合轴跟踪

基金项目:中国科学院某科技创新基金项目(No. CXJJ-15z004)资助。

作者简介:艾志伟(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为光机电控制。E-mail: aizhiwei752@163.com

收稿日期:2016-06-12

系统的主系统带宽窄、精度低,但工作范围大,可以对目标实现捕获和粗跟踪;子系统工作范围小,但带宽高、精度大,可以实现对跟踪目标的精确锁定,二者共同作用可以实现对运动目标的精确捕获跟踪^[2]。

由于工作环境的复杂性,快速反射镜不可避免地受到一些干扰因素的影响,这些扰动信号会造成系统不能产生精确的输出,甚至导致输出信号的失真。当快速反射镜控制系统中存在低频强扰动时,普通的反馈控制方式很难达到高稳态精度的要求。在反馈控制回路中构建前馈通路组成复合控制回路,在参数选择合适的情况下,几乎可以抑制所有的可量测扰动,其中包括低频强扰动^[3]。目前,这种自适应前馈复合控制在低频扰动控制中显示出了巨大的潜能,但是由于这种技术需要增加额外的传感器来获得参考信号,因此在一定程度上增加了控制系统的复杂性。

快速反射镜的控制系统一般采用 PID 控制器^[4],本文在 PID 反馈控制系统的基础上,在控制系统中引入模糊控制技术,组成扰动模糊补偿复合控制系统。由于模糊控制系统具有较好的鲁棒性,可以保证被控快速反射镜对象特性改变后系统抑制扰动信号的能力。同时这种控制系统不需要增加额外的传感器,不会增加整个硬件系统的复杂性。实验结果表明,该控制系统既保留了传统 PID 控制的优点,又很好地利用了模糊控制的优势,提高了快速反射镜控制系统在扰动信号作用下的适应能力和控制精度。

2 快速反射镜的模型

文中的被控对象是音圈电机提供动力的两轴四驱动柔性支撑快速反射镜,该型快速反射镜的机械部分主要包括反射镜组件、柔性支撑、音圈电机驱动器以及底座。音圈电机接收到控制信号后产生驱动信号,通过凸耳带动镜框产生线位移,进而带动反射镜完成规定的转角运动。因为该型快速反射镜的对称性较好,为了方便分析,可以将 FSM 系统简化为两个相同的单维理想模型,图 1 为该型快速反射镜简化后的结构原理图,其力矩平衡方程为:

$$(J + 2m_c l^2) \frac{d^2 \theta}{dt^2} + 2cl^2 \frac{d\theta}{dt} + k\theta = M \quad (1)$$

式中, J 为负载转动惯量; m_c 为音圈电机动子质量; l 为音圈电机作用点到转轴的距离; c 为音圈电机与柔性支撑的等效阻尼; k 为柔性支撑的扭转刚度; θ 为反射镜的偏转角; M 是音圈电机施加的力矩。

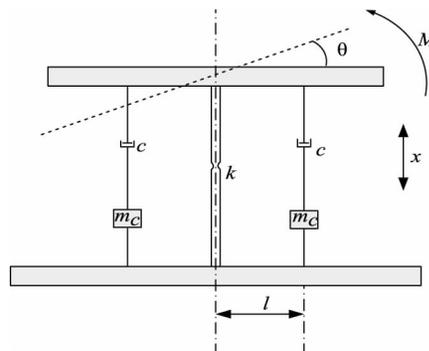


图1 快速反射镜简化结构图

Fig.1 Simplified structure of fast steering mirror

接着对 FSM 系统中的音圈电机进行电动力学分析。设 U 为音圈电机的工作电压, R 和 L 分别为音圈电机的电阻与电感, k_f 为音圈电机力矩系数, k_b 为抗压降系数。当给音圈载入工作电压时,音圈电机回路中的工作电流为 I ,此时音圈电机产生的反电动势为 U_b ,此反电动势与音圈电机的线圈运动速度 v 成正比,方向与施加电压方向相反,该电动势的计算公式为:

$$U_b = vk_b \quad (2)$$

由基尔霍夫定律:

$$U = L \dot{I} + IR + U_b \quad (3)$$

考虑到反射镜的转角 θ 较小,因此可近似认为 $\tan\theta \approx \theta$,由图 1 的结构图,可得到:

$$\begin{cases} v = dx/dt \\ x = l\theta \\ M = 2k_f l I \end{cases} \quad (4)$$

联立以上各式,可以得到快速反射镜的传递函数为:

$$G(s) = \frac{2k_f l}{[(J + 2m_c l^2)s^2 + 2cl^2 s + k](R + Ls) + 2k_f k_b l^2 s} \quad (5)$$

中国科学院光电技术研究所的林俊兰对某型快速反射镜平台进行了测试,得到快速反射镜的响应曲线,通过曲线拟合得到该快速反射镜的开环传递函数为^[5]:

$$G(s) = \frac{1.15 \times 10^5}{0.0003979s^3 + 1.013s^2 + 57.94s + 6.5720 \times 10^4} \quad (6)$$

传递函数分母项为 3 阶, 这表明快速反射镜总是可以分解为一个二阶振荡环节和一个惯性环节串联。通过适当的变换, 将式(6)表示为振荡环节和惯性环节的串联形式:

$$G(s) = \frac{1.7498}{(1.5221 \times 10^{-5}s^2 + 4.8708 \times 10^{-4} + 1)(3.9776 \times 10^{-4} + 1)} \quad (7)$$

3 控制系统设计

3.1 PID 控制参数设计

由于快速反射镜的低阶谐振峰主要是由二阶振荡环节引起的, 为了消除低阶谐振峰的影响, 在控制系统中引入不完全微分 PID 控制器。所谓的不完全微分 PID 控制器, 是在 PID 控制器的微分环节中引入低通滤波器, 表示为:

$$G_c(s) = k_p + k_i \frac{1}{s} + \frac{k_d s}{T_f s + 1} \quad (8)$$

通过抑制谐振峰可以改善 FSM 的使用性能^[6], 为了消除二阶谐振环节对系统的影响, 控制器的结构应该为:

$$C(s) = \frac{k(p_2 s^2 + p_3 s + 1)}{s(T_f s + 1)} \quad (9)$$

此时 FSM 系统的开环传递函数为:

$$C(s)G(s) = \frac{k p_1}{s(T_f s + 1)(p_4 s + 1)} \quad (10)$$

通过这种方法得到的控制系统的开环传递函数与辨识出的快速反射镜的模型有着直接的关系。快速反射镜的模型精度直接影响到整个系统的精度。可以看出开环控制系统由四个典型环节串联而成: 比例环节、积分环节、两个惯性环节。FSM 系统的性能指标主要有开环带宽 $f_c \geq 200$ Hz, 期望特性中频段的截止频率为 $w_c \approx 1256$ (对应的开环带宽为 $f_c = 200$ Hz), 此时有:

$$L(w_c) = 20 \lg A(w_c) = 0 \quad (11)$$

当 $T_f = 0.0004$, 有 $k = 897$ 。实际系统在获得上述频域特性时, 有下列等式成立:

$$G_c(s) = C(s) \quad (12)$$

由上式可以得到 PID 控制参数为:

$$k_p = 0.0781, k_i = 897, k_d = 0.0136$$

快速反射镜闭环幅相特性曲线如图 2 所示。从图中可以看到, 系统的闭环带宽约为 350 Hz, 符合频域性能指标。

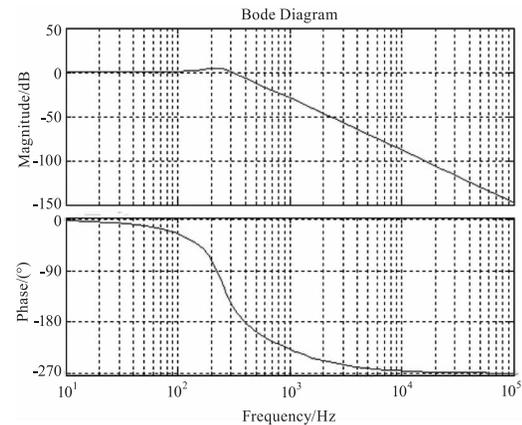


图 2 快速反射镜闭环 Bode 图

Fig. 2 Closed-loop Bode diagram of fast steering mirror

3.2 快速反射镜的前馈补偿

图 3 是前馈校正的原理图。从图中可以看出与反馈控制算法相比, 前馈校正的扰动信号也经过控制器产生控制信号, 若前馈环节的传递函数设计的比较合理, 则可以保证扰动信号产生的误差得到全补偿。

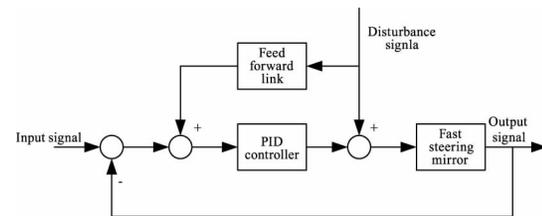


图 3 前馈校正原理图

Fig. 3 Schematic diagram of feed forward correction

根据梅森增益公式可以算得扰动信号的传递函数:

$$\Phi_n(s) = \frac{C(s)}{N(s)} = \frac{G(s)[1 + G_c(s)G_n(s)]}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (13)$$

使扰动信号对快速反射镜系统的影响达到最小, 即 $C(s) = 0$, 由此可以推得前馈控制环节的传递函数为:

$$G_n(s) = -\frac{1}{G_c(s)} = -\frac{(T_f s + 1)s}{(k_p T_f + k_d)s^2 + (k_i T_f + k_p)s + k_i} \quad (14)$$

3.3 扰动信号的模糊补偿控制

PID 反馈算法对扰动的抑制是不分宽带和窄带的, 其在误差抑制带宽内对误差的抑制从低频到高频

频逐渐减小,如果扰动的频带在误差抑制带宽外,反馈算法对其没有抑制能力^[7],可以考虑将这个误差信号作为模糊控制的输入信号之一,这样就可以保证误差信号在任何带宽均能得到抑制。

快速反射镜的对象特性不是一成不变的。对于固定参数的PID控制器和前馈环节传递函数来说,当快速反射镜的对象改变后,继续使用初始控制参数来控制系统,这样对扰动的抑制显然不好。模糊控制以误差 e 和误差变化 ec 作为输入,利用模糊控制规则对PID控制器和前馈环节的控制参数进行整定,保证快速反射镜的控制参数对系统控制的实时性。图4是扰动模糊补偿复合控制算法的原理图。

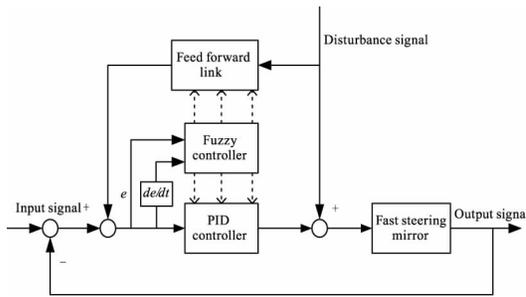


图4 扰动模糊补偿控制算法的原理图

Fig. 4 Schematic diagram of disturbance's fuzzy compensation control algorithm

模糊控制的核心是模糊控制器。模糊控制器最简单的实现方法是将模糊规则转化为一个查询表,存储在计算机中供在线控制时使用。定义快速反射镜的转角误差绝对值 $|e|$ 和转角误差变化率绝对值 $|ec|$ 作为输入语言变量,三个调校参数 k_p', k_i' 和 k_d' 为输出语言变量。它们在模糊集上的论域为:

$$|e| = |ec| = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

$$k_p' = k_i' = k_d' = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

对应的模糊子集为:

$$|e| = |ec| = \{Z(\text{零}), S(\text{小}), M(\text{中}), L(\text{大})\} \\ k_p' = k_i' = k_d' = \{Z(\text{零}), S(\text{小}), M(\text{中}), L(\text{大})\}$$

从快速反射镜系统的稳定性、响应速度、超调量等时域性能指标来制定模糊控制规则^[8],如表1所示。例如,当转角误差绝对值较大时,为了加快系统的响应速度,取较大的比例调校参数,这样可以使系统的时间常数和阻尼系数减小。但是比例调校参数也不能过大,否则会造成系统不稳定。

表1 快速反射镜的模糊控制规则

Tab. 1 The fuzzy control rules of fast steering mirror

k_p', k_i', k_d'	$ e = Z$	$ e = S$	$ e = M$	$ e = L$
$ ec = Z$	ZZZ	LLS	MZL	LZL
$ ec = S$	LLS	LLS	MZL	LZL
$ ec = M$	LLZ	LLS	MSM	LZM
$ ec = L$	MLZ	MMZ	SSM	MZS

运行 MATLAB 软件,打开模糊逻辑编辑器,将输入、输出参数的名称、参数、隶属度函数等输入到编辑器中,文中同时使用了三角隶属度函数和梯形隶属度函数,完成后再将归纳出的模糊控制规则表输入进去,完成后打开规则观察器观察三个输出语言变量的变化情况,比例-积分-微分调校参数的控制曲面如图5所示。从图中可以看出,三个曲面都是非线性的,这说明模糊控制本身是非线性的。

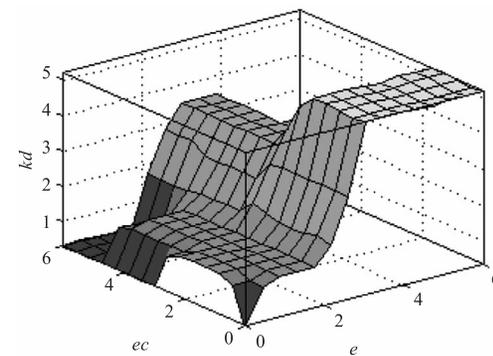
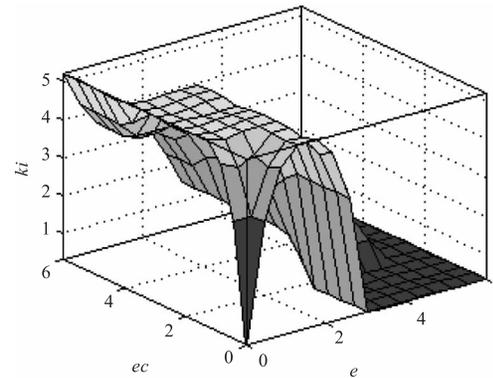
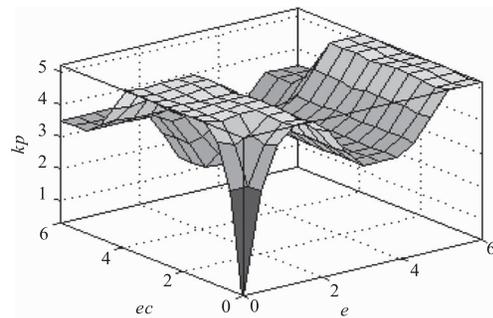


图5 模糊控制器调校参数的控制曲面

Fig. 5 Curved surface of tuning parameter of fuzzy controller

4 实验分析

快速反射镜的控制系统是由光栅测微仪提供位置信息的闭环反馈系统。整个系统主要由数字控制器、功率放大器、模糊控制芯片等部分组成。其中,数字控制器通过 DSP 实现;功率放大器作为驱动元件,可以接收数字信号;模糊控制器采用单片机实现。

图 6 是实验示意图。在 Simulink 环境下分别搭建快速反射镜前馈控制模型和快速反射镜扰动模糊补偿控制模型。快速反射镜的控制系统有两种工作模式:零位保持模式和跟踪模式,可以从这两种工作模式的输出特性验证快速反射镜在扰动作用下控制系统的性能^[9]。考虑到对于控制系统而言,阶跃信号最具挑战性,因此在系统中施加阶跃扰动信号,用于验证系统的输出性能。

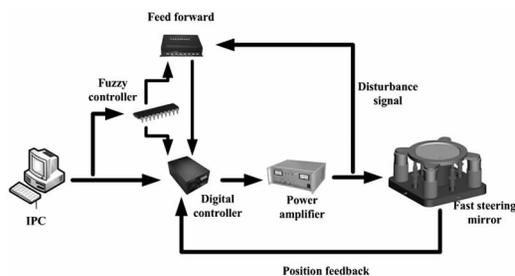


图 6 实验系统示意图

Fig. 6 Sketch for the experimental system

4.1 零位保持实验

零位保持是指快速反射镜根据控制系统给定的信号到达指定位置并保持稳定的动作过程。图 7 是前馈控制系统与扰动模糊补偿控制系统下输出曲线对比。可以看出前馈控制系统对扰动的抑制能力较差,在有扰动的情况下,需要很长的调节时间抑制扰动信号,使控制系统的输出稳定在给定的位置。而扰动模糊补偿控制系统在扰动出现后很快就可以将扰动信号完全抑制,并且在动态调节过程中超调情况也较弱。

4.2 跟踪实验

图 8 是前馈控制系统和扰动模糊补偿控制系统在正弦输入信号下的跟踪曲线。从图中可以看到,单纯的前馈控制系统在跟踪初期由于扰动信号的作用,造成输出信号的偏差很大,需要较长的调节时间才能保证跟踪的精确度。扰动模糊补偿控制系统的跟踪曲线在跟踪初始阶段也有误差,但是相比前馈控制而言,这种误差小的多,完全抑制扰动信号的作用的调节时间也有很大提高。

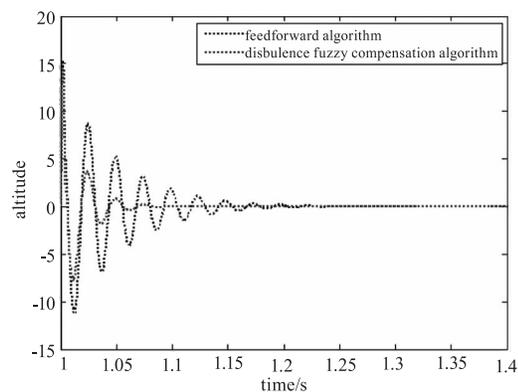


图 7 零位保持实验输出曲线

Fig. 7 Output curve of Zero-holding experiment

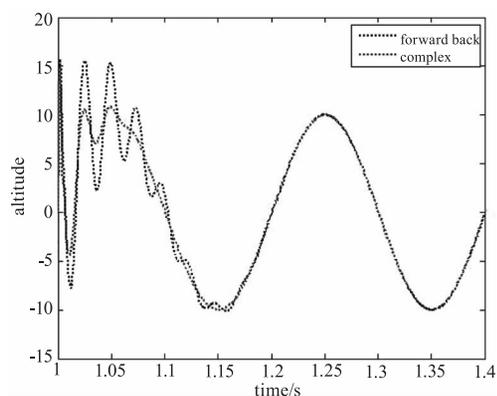


图 8 跟踪实验输出曲线

Fig. 8 Output curve of tracking experiment

4.3 阶跃实验

快速反射镜在长时间的使用后,其结构参数可能会发生变化,譬如结构的刚度的降低,这种会体现在式(7)上一阶系数的减小^[4]。图 9 是快速反射镜的结构参数改变前后阶跃信号的输出曲线。从图中可以看出,扰动模糊补偿控制系统在被控对象特性改变前后的输出性能基本未发生大的改变,说明该控制系统具有良好的鲁棒性。

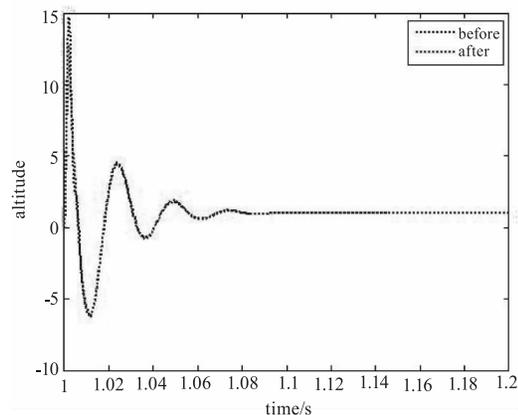


图 9 快速反射镜结构参数改变前后的阶跃响应

Fig. 9 Step response of the fast steering mirror before and after structure parameters change

5 结 论

快速反射镜的动力学模型可由一个二阶振荡环节和一个惯性环节组合构成,振荡环节是造成快速反射镜低阶谐振的主要因素。快速反射镜在受到低阶扰动后,控制系统中偏差信号会产生较大误差。在系统中引入模糊控制器,将系统的误差信号及其变化率作为模糊控制的输入信号,通过制定合适的模糊控制规则,将模糊控制器的输出参数同时用于整定 PID 控制参数和前馈控制参数,可补偿系统因扰动信号造成的偏差信号,有效减弱扰动信号对控制系统的作用。仿真实验结果显示:相较于前馈控制系统,扰动模糊补偿控制系统的时域性能有很大的提高;快速反射镜的对象特性变化时,加入模糊控制的快速反射镜系统具有更好的适应能力。

参考文献:

- [1] Kluk D J, Boulet M T, Trumper D L. A high-bandwidth, high-precision, two-axis steering mirror with moving iron actuator[J]. *Mechatronics*, 2012, 22: 257 - 270.
- [2] ZHANG Limin, GUO Jin. Simulative research on dual X - Y axis control of fast steering mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13 (supp.) : 142 - 147. (in Chinese)
张丽敏, 郭劲. 快速反射镜双 X - Y 轴控制的仿真研究[J]. *光学 精密工程*, 2005, 13 (增刊) : 142 - 147.
- [3] LI Ying, GE Wenqi, WANG Shaobin, et al. Adaptive inverse control of stable platform[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17 (11) : 2744 - 2749. (in Chinese)
李英, 葛文奇, 王绍彬, 等. 稳定平台的自适应逆控制[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17 (11) : 2744 - 2749.
- [4] WU Qiongyan, WANG Qiang, PENG Qi, et al. Wide bandwidth control of fast-steering mirror driven by voice coil motor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31 (8) : 15 - 18. (in Chinese)
- [5] LIN Junlan. The study of control technologies base on analog circuits for fast steering mirror[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, CAS, 2015. (in Chinese)
林俊兰. 基于模拟电路的快速反射镜控制技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究, 2015.
- [6] XU Xinxing, YANG Hongbo, WANG Bing, et al. Research on key technology of fast-steering mirror[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43 (10) : 1095 - 1102. (in Chinese)
徐新行, 杨洪波, 王兵, 等. 快速反射镜关键技术研究[J]. *激光与红外*, 2013, 43 (10) : 1095 - 1102.
- [7] DING Ke, HUANG Yongmei, MA Jiaguang, et al. Error adaptive feedforward composite control of fast-steering-mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38 (7) : 1 - 6. (in Chinese)
丁科, 黄永梅, 马佳光, 等. 快速反射镜的误差自适应前馈复合控制[J]. *中国激光*, 2011, 38 (7) : 1 - 6.
- [8] QIU Chengqun, LIU Chenglin, SHEN Fahua, et al. Design of automobile cruise control system based on Matlab and fuzzy PID[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28 (6) : 197 - 202. (in Chinese)
仇成群, 刘成林, 沈法华, 等. 基于 Matlab 和模糊 PID 的汽车巡航控制系统设计[J]. *农业工程学报*, 2012, 28 (6) : 197 - 202.
- [9] PENG Shuping, YU Hongjun, WANG Weiguo, et al. Design of servo system for novel fast-steering mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (5) : 1610 - 1615. (in Chinese)
彭树萍, 于洪君, 王伟国, 等. 新型快速反射镜伺服系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43 (5) : 1610 - 1615.