

模型参考算法在快速反射镜中的应用

杨东^{1,2,3}, 毛耀^{1,2}, 丁科^{1,2}, 李志俊^{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: 快反镜是光电跟踪系统中精跟踪系统的核心部件。精密光电跟踪系统要求快反镜闭环控制系统既具有高的扰动抑制能力又具有快的响应速度和高的跟踪精度。运用理论建模方法得出了快反镜的四阶模型结构, 通过实验建模方法建立了仿真中用到的快反镜的三阶模型。在拟定快反镜为三阶模型后, 选择了响应速度很快, 响应精度很高的三阶理想模型作为模型参考自适应控制算法中的参考模型。在快反镜之前叠加正弦信号模拟干扰, 通过大量仿真研究, 说明用这种自适应控制算法能有效地抑制干扰, 使快反镜输出很好地跟随参考模型。由于参考模型响应速度很快, 响应精度很高, 所以基于该自适应控制算法的快反镜控制系统具有很快的响应速度与很高的响应精度。

关键词: 精跟踪; 快反镜; 模型参考自适应控制

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2790-06

Application of model reference adaptive algorithm in fast-steering mirrors

Yang Dong^{1,2,3}, Mao Yao^{1,2}, Ding Ke^{1,2}, Li Zhijun^{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: Fast-steering mirrors is the core component of fine tracking system in the electro-optical tracking system. In order to meet the requirements of electro-optical tracking system, the fast-steering mirrors close-loop control system must has high disturbance rejection ability, fast tracking ability and high tracking accuracy. A fourth-order model structure by the approach of theoretical modeling and the needed third-order model structure by the approach of experimental modeling were obtained. After confirming the needed third-order model, an ideal third-order model was chosen which responses fast and precisely to be a reference model in the adaptive control algorithm. For simulating interference, two sinusoidal signals were put in front of the FSM. A large number of simulations explained that, interference could be suppressed efficiently by use of the adaptive control algorithm, and that the third-order reference model could be followed precisely. Since the reference model responses fast and precisely, the FSM control

收稿日期: 2013-02-17; 修订日期: 2013-03-20

基金项目: 国家 863 课题子项目

作者简介: 杨东(1987-), 男, 硕士生, 主要从事空间光通信中精跟踪技术研究。Email: yd_enjoy1987@163.com

导师简介: 毛耀(1978-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事光电跟踪系统的自动控制、惯性稳定以及数字信号处理方面的研究。Email: yoyo7802@yahoo.com.cn

system based on the adaptive control algorithm has the ability of responding fast and precisely.

Key words: fine tracking; FSM; adaptive control

0 引言

ATP 技术是空间光通信关键技术之一, 主要完成大范围、高概率和快速空间捕获, 及两运动平台间高精度视轴对准和动态跟踪^[1]。目前 ATP 系统大多采用近年来发展起来的复合轴光电稳定技术--粗跟踪环内嵌精跟踪环的粗精组合嵌套技术, 前者用于补偿大范围目标运动, 后者用于补偿粗跟踪残差量及高频抖动^[2]。主轴完成大范围粗跟踪, 由粗电视、电机等构成; 副轴对主轴残差进行补偿以完成精跟踪, 主要由精电视和快速反射镜等构成。由于基于运动平台的光电跟踪系统的控制光束受到平台振动、大气干扰等高频扰动的影响。所以整个 ATP 系统的性能提高在很大程度上取决于对快速反射镜控制的跟踪精度与响应速度的提高。

快速反射镜控制算法的优劣直接影响快速反射镜的跟踪精度与响应速度。PID 控制算法使快反镜控制系统具有足够高的低频增益, 对大气干扰、平台振动的低频扰动确实具有良好的抑制作用。且 PID 控制算法简单易行。所以目前通常采用 PID 控制算法或者 PI 控制算法等经典控制算法来控制快速反射镜。PID 或者 PI 控制算法的目标是尽量提高系统的控制带宽与稳定性。然而系统控制带宽不是越大越好的, 而是必须根据传感器的噪声大小和大气干扰以及平台振动的时间特性等实际工作情况来合理调整^[3]。这样才能最大限度的抑制噪声与扰动, 达到最优控制。遗憾的是, PID 或者 PI 等经典控制算法不能够完成这项最优控制工作。幸运的是自适应控制方法能够完成这项最优控制工作。

在自适应控制系统的研究中, 模型参考自适应

$$\frac{x_1(s)}{F(s)} = \frac{m_2 s^2 + b_2 s + k_2}{m_1 m_2 s^4 + (m_2 b_1 + m_2 b_2 + m_1 b_2) s^3 + (m_1 k_2 + m_2 k_1 + m_2 k_2 + b_1 b_2) s^2 + (k_1 b_2 + k_2 b_1) s + k_2 k_1} = \frac{m_2 s^2 + b_2 s + k_2}{(m_2 s^2 + b_2 s + k_2)((m_1 + m_2) s^2 + b_1 s + k_1) - m_2^2 s^4} \quad (3)$$

首先研究低频段, 低频段 m_1 和 m_2 的相对运动不明显, m_2 的质量可以忽略不计, 公式(3)可以等效为:

$$\frac{x_1(s)}{F(s)} = \frac{1}{(m_1 + m_2) s^2 + b_1 s + k_1} \quad (4)$$

控制是一种应用最为普遍的自适应控制算法。文中首先介绍了快速反射镜的数学模型, 然后介绍了参考模型的选择, 最后介绍了一种基于误差多项式的模型参考自适应控制算法, 并将该算法成功应用在了快速反射镜控制的仿真研究中。

1 快速反射镜的数学模型和参考模型

1.1 快反镜数学模型的理论推导

快反镜选用音圈电机类型。音圈电机的驱动电压只有十几伏, 行程较大^[4]。下面主要研究快速反射镜的位移 x 和驱动力 F 之间的关系, 图 1 是外力驱动柔性轴快速反射镜的等效原理图, 其中 k_1 代表柔性轴的弹性系数, b_1 代表相应的阻尼系数, m_2 代表力 F 按一定频率驱动时解耦出去的质量, 电涡流等效于安装在 m_1 上, 测量位移 $x_1, x_2 - x_1$ 实际上反映了镜面变形程度。从振动的角度来说, 这样的分析类似一个简单的模态分析, 列写运动方程^[5]可以得到:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + (b_1 + b_2) \dot{x}_1 + (k_1 + k_2) x_1 = F + b_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 \\ m_2 \ddot{x}_2 + b_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 = b_2 \dot{x}_1 + k_2 x_1 \end{cases} \quad (1)$$

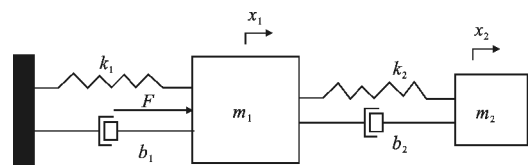


图 1 外力驱动柔性轴快速反射镜的等效原理图

Fig.1 External force drive fast-steering mirror

对公式(1)进行拉普拉斯变换得到:

$$\begin{cases} x_2(s)(m_2 s^2 + b_2 s + k_2) = x_1(s)(b_2 s + k_2) \\ x_1(s)(m_2 s^2 + (b_1 + b_2) s + (k_1 + k_2)) = x_2(s)(b_2 s + k_2) + F(s) \end{cases} \quad (2)$$

经整理得到:

公式(4)表明快速反射镜的力驱动模型在低频段是一个二阶系统。随着频率的增高, 解耦出去的质量越来越多, 实际上就是镜子变形越来越严重, 此时 m_2 的质量和 s 的高阶项不能忽略不计, 常数和 s 的

一次幂项则可以忽略, k_1 和 b_1 可以忽略, 等效为:

$$\frac{x_1(s)}{F(s)} = \frac{1}{(m_1+m_2)s^2} \frac{m_2s^2+b_2s+k_2}{\left(\frac{m_1m_2}{(m_1+m_2)}\right)s^2+b_2s+k_2} \quad (5)$$

公式(5)表明快速反射镜的力驱动模型在中高频段是一个二阶积分项和一个机械谐振对组成。机械谐振在运动系统中非常普遍, 它是由两个或多个部件之间的机械传动的柔顺性引起的, 谐振可能来自于电动机和负载之间的柔顺性, 也有可能来自于负载内部的柔顺性。从有限元的角度, 任何负载都可以看成若干个柔性耦合在一起的小单元构成, 也就是任何材料都有模态, 只是高低不同而已, 比如快速反射镜的镜托通常都会在几百赫兹的地方才出现明显的谐振。当然这样的谐振肯定不止一个, 所以公式(5)表达的也不是完整的, 这里只是为了简化分析, 如果在关心的频带有多个谐振对, 则需要在传递函数中串联多个公式(5)第二项类似的谐振对。

公式(4)在高频时也可以等效为:

$$\frac{x_1(s)}{F(s)} = \frac{1}{(m_1+m_2)s^2} \quad (6)$$

因此快速反射镜的力学模型可以写成公式(7):

$$\frac{x_1(s)}{F(s)} = \frac{1}{(m_1+m_2)s^2+b_1s+k_1} \frac{m_2s^2+b_2s+k_2}{\left(\frac{m_1m_2}{(m_1+m_2)}\right)s^2+b_2s+k_2} \quad (7)$$

1.2 实验建模得出的快反镜数学模型

由以上的理论推导可知, 快反镜应该是一个四阶系统。理论推导也是经过很多假设才推导出来的。工程实践中的快速反射镜建模多采用实验建模法。实验建模法是给系统施加测试信号, 记录输出响应, 并用适当的数学模型去逼近系统的输入输出特性。文中的快反镜实际数学模型就是通过实验建模方法在实验室测试出来的。为了简化控制算法的复杂度, 应该在保证快速反射镜主要性能得到反映的前提下, 用稍微低阶次的数学模型去近似作为快速反射镜的数学模型。文中所测的快速反射镜数学模型是一个三阶模型:

$$G_{RSM}(s) = 2924 \times 10^8 / (s^3 + 706.6s^2 + 9.162 \times 10^4s + 1.642 + 1.635 \times 10^7) \quad (8)$$

1.3 参考模型的选取

由公式(8)知道实验建模得到的快速反射镜模型是一个三阶数学模型。该快速反射镜的开环阶跃响应如图2所示。若取允许误差带宽度为稳态值的2%, 则由图2可以看出快反镜开环阶跃响应的调节

时间约 70 ms, 最大超调量约 33.3%。该快反镜的动态特性较差, 不能满足精跟踪系统的精度要求, 所以需要控制器来校正。

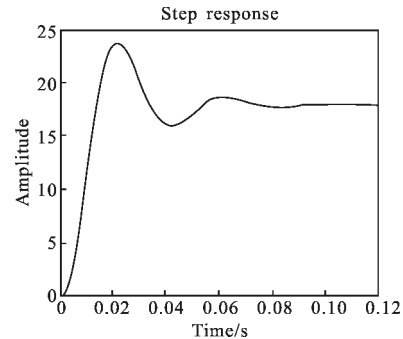


图 2 快反镜开环阶跃响应

Fig.2 Fast-steering mirror open-loop step response

为了提高整个 ATP 系统精跟踪的响应速度与响应精度, 要求快速反射镜控制系统响应速度快, 响应精度高。所以参考模型应该具有良好的稳定性, 快速性和准确性。

该套精跟踪系统中要求在单位阶跃信号的作用下, 快速反射镜控制系统的调节时间 $T_s < 10$ ms, 最大超调量 $\delta\% < 10\%$ 。根据这些性能指标要求, 选定了三阶参考模型为:

$$G_m(s) = 2.35 \times 10^8 / (s^3 + 1360s^2 + 900000s + 2.35 \times 10^8) \quad (9)$$

该理想三阶模型的阶跃响应曲线如图3所示。

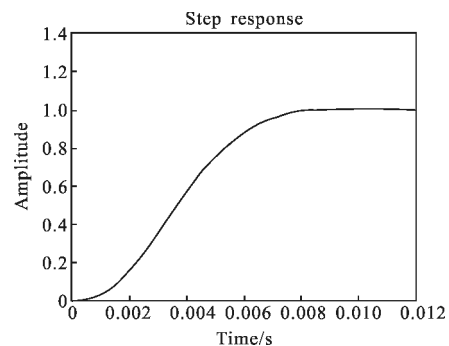


图 3 理想三阶模型的阶跃响应曲线

Fig.3 Step response curve of ideal third-order model

若取允许误差带宽度为稳态值的2%, 则由图3可以看出, 该参考模型阶跃响应的调节时间约为 8ms, 几乎没有超调量, 过渡比较平稳。该三阶模型可以满足系统设计的要求。通过模型参考自适应控制方法, 若能使快反镜对象比较精确地跟随参考模型的输出, 那么该快反镜控制系统就可以很好地满足精跟踪系统的要求。

2 快反镜自适应控制系统的构成

在快反镜控制系统中,需要对快反镜的 X 轴与 Y 轴进行控制,而且 X 轴与 Y 轴之间存在着耦合。文中重点研究的是基于误差方程多项式代数法的模型参考自适应方法应用在快反镜控制中的可行性与优势,所以文中为了简化模型,只考虑对快反镜 X 轴的控制,并不考虑两轴之间的耦合。快反镜控制系统仍然是一个单输入单输出系统。

文中考虑的扰动是用两个幅值为 1, 频率分别为 100 Hz 与 200 Hz 的正弦波叠加到受控对象前来模拟的。

基于误差方程多项式代数法的模型参考自适应方法常应用于连续系统模型参考自适应控制器的设计中,效果较好^[6]。将该自适应控制算法应用于快反镜控制可以获得很好的校正效果。图 4 为仿真中所用自适应控制模型图。

图 4 为模型参考自适应系统原理图。模型参考自适应控制的原理就是用某种自适应控制律来调整可调系统以使得受控对象的输出 y_p 跟随参考模型的输出 y_m 。在模型参考自适应控制系统中,设快反镜实际输出位置信号为 $y_p(t)$,参考模型的输出为 $y_m(t)$ 。则自适应控制误差为:

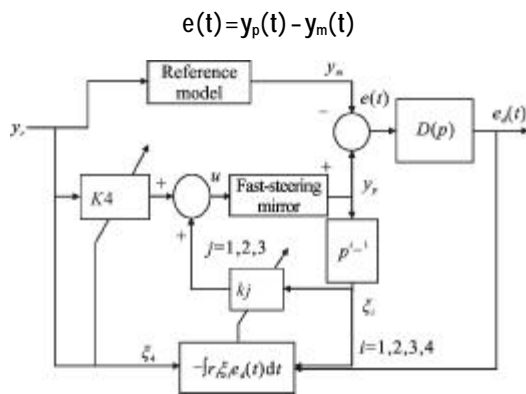


图 4 自适应控制模型图

Fig.4 Adaptive control model diagram

由快反镜的传递函数(8)可知,其分子多项式的阶数 $m=0$,分母多项式的阶数 $n=3$ 。根据基于误差多项式的模型参考自适应控制理论,取 P 为算子,则选择 m 阶稳定多项式: $H(P)=1$, $n-m-1$ 阶稳定多项式为:

$$D(P)=P^2+2\xi_m\omega_m P+\omega_m^2$$

$$\text{使 } \frac{H(p)D(p)}{A_m(p)} = \frac{D(p)}{A_m(p)} \text{ 严格证实。}$$

再设广义误差为:

$$e_d(t)=D(p)e(t) \approx \ddot{y}_p(t)-\ddot{y}_m(t)+2\xi_m\omega_m[\dot{y}_p(t)-\dot{y}_m(t)]+\omega_m^2[y_p(t)-y_m(t)] \quad (9)$$

取 $n+m+1$ 个自适应控制滤波信号 $\xi_i(i=1,2,\dots,n+m+1=4)$ 为:

$$\xi_1(t)=y_p(t) \quad \xi_2(t)=\dot{y}_p(t) \quad \xi_3(t)=\ddot{y}_p(t) \quad \xi_4(t)=u(t) \quad (10)$$

则该模型参考自适应控制系统的自适应律为:

$$K_i(t)=-\int_0^\infty r_i\xi_i(t)e_d(t)dt \quad (i=1,2,3,4) \quad (11)$$

其中公式(11)中的 $r_i(i=1,2,3,4)$ 为自适应控制增益,需要调节这四个参数以使得快反镜的输出更好地跟随参考模型的输出^[7]。

则被控系统的控制输入 $u(t)$ 为:

$$u(t)=\sum_{i=1}^4 k_i\xi_i(t) \quad (i=1,2,3,4) \quad (12)$$

3 Simulink 仿真实验

3.1 快反镜自适应控制系统的 Simulink 仿真模型

为了能够在 Simulink 仿真平台上构造上一节所介绍的模型参考自适应控制系统的仿真模型,必须将快速反射镜的数学模型即公式(8)以及参考模型即公式(9)进行拉普拉斯反变换,则分别得到快反镜和参考模型的微分方程为^[8]:

$$\ddot{y}_p+706.6\dot{y}_p+9.162\times 10^4y_p+1.635\times 10^7y_p=2.924\times 10^8u \quad (13)$$

$$\ddot{y}_m+1360\dot{y}_m+9\times 10^5y_m+2.35\times 10^8y_m=2.35\times 10^8y_r \quad (14)$$

将上述微分方程经过三次微分就可以得到快反镜以及参考模型的加速度、速度以及位移。因此基于这个思想得到的带扰动的快反镜以及参考模型的 Simulink 仿真模型分别如图 5 和图 6 所示。其中图 5

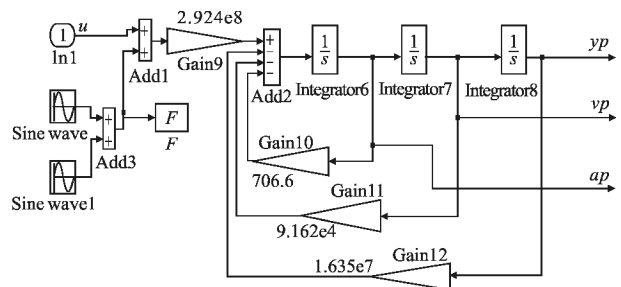


图 5 带扰动的快反镜 Simulink 仿真模型

Fig.5 Simulink simulation model of FSM with disturbance

中的两个扰动分别为 $F_1=\sin(2\pi\times 100t)$ 与 $F_2=\sin(2\pi\times 200t)$ 。两个正弦波扰动叠加后模拟总扰动 F 。

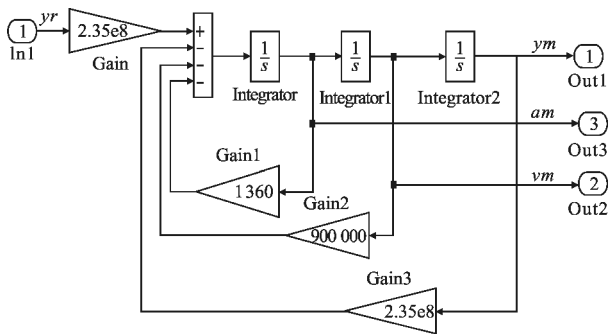


图 6 参考模型 Simulink 仿真模型

Fig.6 Simulink simulation model of reference model

以上述两个仿真模型为基础, 依托文中介绍的模型参考自适应控制系统的构成原理, 构造了基于 Simulink 的快反镜自适应控制系统的仿真模型如图 7 所示。

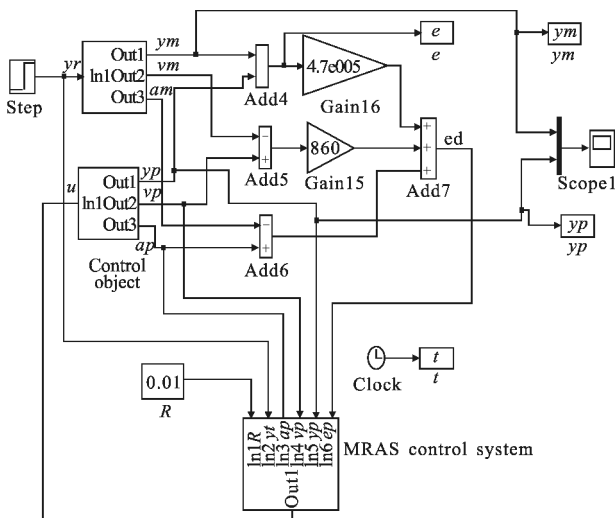


图 7 快反镜自适应控制系统 Simulink 仿真

Fig.7 Simulink simulation model of FSM adaptive control system

3.2 仿真实验

为了考察基于 Simulink 图型模式构成的快反镜自适应控制系统抑制扰动的有效性, 在仿真模型中的受控对象即快反镜之前叠加了两个正弦波来模拟扰动。

两个正弦波各是 $F_1=\sin(2\pi\times 100t)$ 与 $F_2=\sin(2\pi\times 200t)$ 。两个正弦波叠加后组成的扰动信号为 F , 如图 8 所示。

接下来需要考察在图 8 所示扰动的干扰下, 该自适应控制算法是否能使快反镜的输出很好地跟随参考模型的输出。

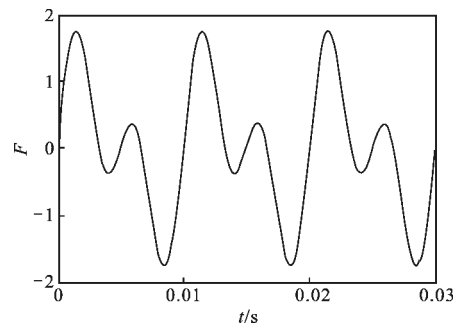


图 8 扰动信号 F

Fig.8 Disturbance signal F

按图 5、图 6 搭建 Simulink 仿真图型模式。其中 $R=-r_1=-r_2=-r_3=-r_4$ 为自适应增益的相反数, 该参数的绝对值越大, 受控对象的跟随速度就越快, 跟随精度也越高。但是该参数的绝对值太大, 受控对象的输出就会振荡甚至发散。所以在仿真过程中需要给出一个合适参数 R 。

首先考察该自适应控制系统的阶跃响应情况, 取 $R=-0.01$, 仿真结果如图 9 所示。

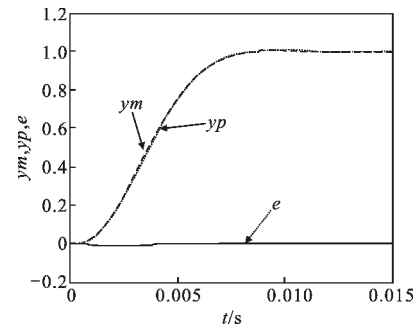


图 9 阶跃响应仿真结果

Fig.9 Step response simulation results

由图 9 可以看出, 阶跃响应情况下, 快反镜输出位置信号 y_p 与参考模型输出 y_m 几乎完全重合。说明快反镜输出很好地跟随参考模型输出而几乎没有受到叠加扰动 F 的影响。

再来考察该自适应控制系统的正弦波响应情况。参考输入信号为: $y_r=\sin 500t$ 。取 $R=-0.01$ 。仿真结果如图 10 所示。

由图 10 可以看出, 正弦响应情况下, 快反镜输出位置信号 y_p 与参考模型输出 y_m 几乎完全重合。说明在正弦波参考输入 $y_r=\sin 500t$ 的作用下, 快反镜输出仍然很好地跟随参考模型输出而几乎没有受到叠加扰动 F 的影响。

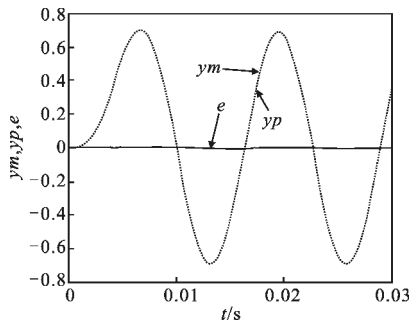


图 10 正弦波响应仿真结果

Fig.10 Sine wave response simulation results

最后考察该自适应控制系统的方波响应情况。参考输入信号为方波信号,该方波信号的幅值为 ± 1 ,频率为 30 Hz。取 $R = -0.03$ 。仿真结果如图 11 所示。

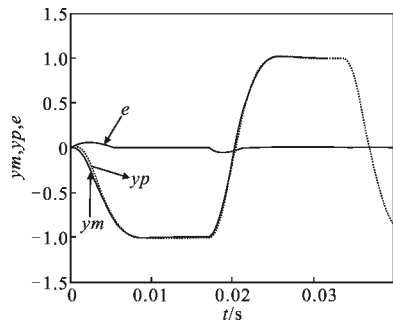


图 11 方波响应仿真结果

Fig.11 Square wave response simulation results

由图 11 可以看出,方波响应情况下,快反镜输出位置信号 y_p 与参考模型输出 y_m 重合地很好,只在阶跃处有稍许误差,但在可接受范围。图 11 说明在方波参考输入的激励下,快反镜输出仍然很好地跟随参考模型输出而几乎没有受到叠加扰动 F 的影响。

4 结 论

文中先由理论建模得出快速反射镜的四阶数学模型结构,再以工程实际中的方便与实用性为出发点,由实验建模的方法得出了该快速反射镜的三阶模型。该三阶模型完全能够表达快速反射镜的动态与静态特性,工程实际中可以用来作为快反镜的数学模型。

仿真研究中在受控对象即快反镜之前叠加了两个正弦波扰动 $F_1 = \sin(2\pi \times 100t)$ 与 $F_2 = \sin(2\pi \times 200t)$ 。大量仿真研究结果表明基于误差理论的模型参考自适应控制方法能够很好的抑制扰动,使快反镜输出很好地跟随参考模型的输出。只要参考模型选择得当,该方法能够获得比经典 PID 控制算法更好的控制效果。后期还将进一步研究该方法对实际精跟踪系统中存在的各种扰动的抑制能力。

参考文献:

- [1] Li Ming, Huang Yong, Ai Yong. Design of fine tracking controller in space optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 130-133. (in Chinese)
- [2] Xiao Yongjun, Ai Yong, Dong Ran, et al. Non maneuvering target tracking experiment based on ATP system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 220-223. (in Chinese)
- [3] Liu Min. Research of model and control for fast-steering mirrors [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(1): 115-117. (in Chinese)
- [4] Wang Haopan, Zhang Tianli, Jiang Chengbao. Giant magnetostrictive fast steering mirror and resonance frequency [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 55-58. (in Chinese)
- [5] Larry Edward. Control of a fast steering mirror for laser-based satellite communication [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [6] Wu Zhenshun, Zheng Huiqi, Yu Huayan. Application of error polynomial theory based model reference adaptive control in the system of asymmetric cylinder controlled by symmetric valve [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(8): 114-117. (in Chinese)
- [7] Wu Zhenshun, Xiao Yuan. Research about self-adaptive controller and application on the hydraulic system under the action of random disturbance [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2007, 35(8): 112-115. (in Chinese)
- [8] Wu Zhenshun, Xiao Yuan, Zhao Chunlei, et al. Realization of hydraulic adaptive control system based on simulink figure mode [J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(5): 210-214. (in Chinese)