

基于扩张状态观测器的快速反射镜控制研究

李军健, 何衡湘, 林国珊

(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 为了提高快速反射镜的动态性能并降低跟踪误差, 提出了利用扩张状态观测器引入反馈和灰色 PID 模型控制相结合的方法, 该方法基于音圈电机驱动的快速反射模型, 采用离散跟踪微分器对输入信号进行过渡和滤波以及对子系统零点配置, 并以扩张状态观测器引入反馈和灰色 PID 控制, 对系统的不确定因素进行了估计和补偿, 并同不完全微分 PID 和基于跟踪微分器的零点配置方法进行了性能比较。采用随机正弦信号进行跟踪仿真, 仿真结果表明, 采用文中算法的跟踪效果明显优于其他算法, 且跟踪误差更小, 被控对象的动态性能更优, 尤其在系统的模型参数发生变化时。该方法具有良好的工程应用价值。

关键词: 扩张状态观测器; 跟踪微分器; 灰色 PID 控制; 快速反射镜; 音圈电机

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Research on controlling fast steering mirror based on extended state observer

LI Jun-jian, HE Heng-xiang, LIN Guo-shan

(Southwest Institute of Technology Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on fast steering mirror's model driven by the voice coil motor, a controller design by discrete tracking-differentiator, extended state observer and grey PID control for promoting the fast steering mirror's dynamic ability and declining tracing errors was proposed. The discrete tracking-differentiator used for dealing with transient conditions and filtering, and configure the subsystem's zeros. Extended state observer and grey PID estimated and compensated uncertain parameters of the plant. Via simulation under signals appended random disturber, it's show apparently that the extended state observer and grey PID control arithmetic tracking effect and tracking errors are prior to others as mentioned, especially the plant's parameters varied, and it is proved that this method comparatively has feasibility.

Key words: extended state observer; discrete tracking-differentiator; grey PID control; fast steering mirror; voice coil motor

1 引言

在激光通信、光电对抗和光电测量等高精度激光光束跟踪和瞄准的跟踪伺服系统中, 大多数情况下, 都会采用快速反射镜(FSM)与大惯量机架结构的主轴系统共同构成复合轴跟踪系统, 实现对激光光束精准控制, 以达到对目标精确跟踪和瞄准的目的, 其性能决定着系统的跟踪精度。通常情况下, 快速反射镜的跟踪视场较小, 它的主要作用是校正大视场的粗跟踪系统的跟踪误差以及由风干扰力矩、

基座和机架等干扰所引起的视轴抖动^[1-2]。因此, 提高快速反射镜的动态性能十分重要。

本文在以音圈电机为驱动器的快速反射镜模型基础上, 利用离散跟踪微分器(Discrete Tracking-Differentiator)、扩张状态观测器(Extended State Observer)与灰色控制器相结合的思路进行控制器(ESO -

作者简介: 李军健(1982-), 男, 硕士, 主要研究方向为光电跟踪与伺服控制。E-mail: lijunjian_98@163.com

收稿日期: 2009-09-22; **修订日期:** 2009-10-22

GM)设计,仿真结果表明其对噪声干扰抑制效果明显,有效地提高了系统响应速度,使系统具有较好的动态性能,而传统的方法,如不完全微分PID和基于跟踪微分器的零点配置(TD)反馈方法等,由于过分依赖于系统辨识所得到的系统具体模型参数,而且,对于外界的干扰因素也过于依赖于干扰模型,这使得在实际工程遇到不少困难,而该方法可以有效地解决这一矛盾,具有一定的工程应用参考价值。

2 被控对象的系统模型分析

精跟踪系统中采用两块相互独立的快速反射镜实现对激光光束在方位和俯仰方向上的控制,由于对这两块快速反射镜的驱动方式和控制方法是一致的。因此,只用该系统中控制方位上的快速反射镜作为研究对象。音圈电机采用动圈式,以减小可动部分的惯量,降低系统动载荷。通过布置在同一轴线上的一对音圈电机的推拉作用,来实现反射镜的倾角控制。

通过分析其动力学模型,可以得出音圈电机的矩输出与反射镜的角偏转输出的传递函数关系:

$$G_1(s) = \frac{\theta(s)}{M(s)} = \frac{K_1}{s^2 + \alpha_{11}s + \alpha_{10}} \quad (1)$$

式中,转矩 M 为施加的力矩; K_1 为比例系数; $G_1(s)$ 中的参数 α_{11}, α_{10} 由镜架和反射镜的总转动惯量、驱动器、弹性支撑、位移缩小机构的合成刚度、等效阻尼系数、驱动器作用点到转轴的距离以及音圈电机的质量等因素决定。转矩 M 则由两只音圈电机提供,进一步分析可得,音圈电机的输入电压到力矩输出的传递函数:

$$G_2(s) = \frac{M(s)}{U(s)} = \frac{K_2}{R + Ls} \quad (2)$$

式中, R 为线圈内阻; L 为线圈电感; K_2 为比例系数。考虑到电路延迟,则实际中的 $G_2(s)$ 应在加以延迟环节 $e^{-\tau_0 s}$; τ_0 为电路延迟时间。

经推导可得系统传递函数:

$$G(s) = G_1(s)G_2(s) \quad (3)$$

可见,被控对象 $G(s)$ 实际为一个三阶系统,其中包括有二阶振荡环节、比例环节和惯性环节。

3 控制算法

跟踪微分器最初提出的目的是为了较好地解决由不连续或带随机噪声的量测信号合理提取连续信号及微分的问题,并逐步发展成便于计算的离散跟踪微分器。扩张状态观测器是把作用于开环系统的实际作用量扩充为新的状态变量,对作用于系统的扰动进行实时的补偿^[3-4]。灰色系统理论是处理不

确定量的一种有效途径,它需要的信息量少,通用性较好,对不确定的因素部分建立灰色模型,来使得控制系统中的灰色量得到一定程度白化,从而改善控制质量和鲁棒性^[5-6]。

3.1 离散跟踪微分器的常用形式

常用的二阶非线性离散形式的跟踪微分器^[2-3]如式(4)所示:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + \tau_1 x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + \tau_1 S_r(x_1, x_2, R_{in}, r, z) \\ y_{out}(k) = x_1(k) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $R_{in}, y_{out}(k)$ 分别为输入和跟踪输出信号; x_1 用于跟踪输入信号; x_2 用于跟踪输入信号的一阶导数; $S_r(x_1, x_2, R_{in}, r, z)$ 为最速控制综合函数^[3],它用于跟踪输入信号的二阶导数; r 为可调节速度因子, r 越大, x_1 越能更快的跟踪输入信号 R_{in} ; τ_1 为积分步长。事实上,对离散二阶跟踪微分器输入一个信号 R_{in} ,它将输出两个信号 x_1 和 x_2 ,其中 x_1 是对输入 R_{in} 的跟踪,把 x_2 作为 R_{in} 的“近似微分”,则由离散跟踪微分器所得到的微分信号是输入信号 R_{in} 广义导数的一种光滑逼近。二阶跟踪微分器的频率特性类似于二阶线性低通滤波器,但是具有线性系统无法比拟的优点,即在通带内有较小相移的同时,不产生谐振现象。所以,应用跟踪微分器是解决系统中超调与快速性之间矛盾的一个途径^[7]。

二阶线性跟踪微分器^[2]离散形式如下所示:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + \tau_2 x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + \tau_2 r(r(x_1(k) - R_{in}) + 2x_2(k)) \\ y_{out}(k) = x_1(k) \end{cases} \quad (5)$$

式中,同二阶非线性离散跟踪微分器一样, $R_{in}, y_{out}(k)$ 分别为其输入和输出信号; x_1, x_2 分别为输入信号的一、二阶微分信号; τ_2 为积分步长; r 为速度因子。

3.2 控制器设计

虽然,可对系统采用成熟的PID算法,但是PID参数调节、系统辨识所得模型参数的准确性以及外界各种不确定因素,都会给控制器的应用带来不少问题和缺陷。在工程中设计控制器在很大程度上依赖于所建立的数学模型的准确性,实际中被控对象的应用环境变化复杂,所建立被控对象的模型只是对实际模型的某种逼近。对于精跟踪环节中的快速反射镜,其控制精度要求是严格的,任何不确定因素都会影响跟踪精度。因此,通过引入扩张状态观测

器和灰色PID控制器,以实现系统的电路延迟、未建模部分和不确定性的扰动等因素进行实时的估计补偿以提高跟踪精度。

由离散跟踪微分器对系统输入进行处理,即对系统安排过渡过程。针对被控对象 $G(s)$,设计时采用二阶非线性离散跟踪微分器来安排系统的过渡过程并同时起到滤波器的作用^[3]。因为安排过渡过

程^[8-9]是实现无超调、快速跟踪控制目标的一种很有效的方法,可以使误差反馈和误差微分反馈增益的选取范围大为扩大,从而使其整定更为容易,控制器的鲁棒性更为加强,也使控制器参数不变时所能适应的对象范围大为扩大,同时也使闭环系统的稳定性提高。整个系统的控制原理框图如图1所示。

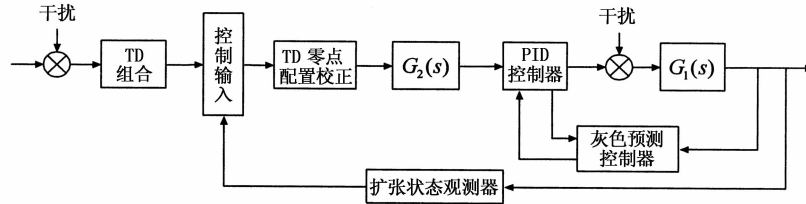


图1 系统控制原理示意图

对于 $G_2(s)$ 由于需要考虑电路延迟,可见延迟近似看作一阶惯性环节: $e^{-\tau s} \approx 1/(\tau s + 1)$,则:

$$G_2(s) = \frac{K_2}{L\tau s^2 + (R\tau + L)s + R} = \frac{K_2^*}{s^2 + b_1s + b_0s} \quad (6)$$

由于跟踪微分器具有配置系统零点的作用^[2],所以利用一二阶非线性离散跟踪微分器构造 $G_2(s)$ 的逆系统,对 $G_2(s)$ 进行零点配置,使该子系统的传递特性近似为1。

现假定系统 $G_1(s)$ 中的 α_{10}, α_{11} 和比例系数 K_1 是不变的而且是理论上的,易知 $G_1(s)$ 是可观测的,而实际中存在诸多干扰因素影响,这些因素对控制的影响不能够忽略,为了使控制器能够更好地适应各种不确定性,所以,需要对不确定部分建立灰色估计模型。对于 $G_1(s)$ 离散化后可得:

$$\mathbf{v}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{v}(k) + \mathbf{b}y(k) + \mathbf{b}D(v, k) \quad (7)$$

式中, $\mathbf{v} \in \mathbf{R}^n, y \in \mathbf{R}, D(v, k) \in \mathbf{R}, \mathbf{A}$ 为 $n \times n$ 系数矩阵; \mathbf{b} 为 n 维矩阵; $\mathbf{b}D(v, k)$ 为满足条件的系统的不确定部分,它包含有参数不确定与外界干扰等因素。

令 $D(v, k) = W_1v_1 + W_2v_2 + \dots + W_nv_n + d(k)$,则采用PID控制进行灰色预测,设 $y_p(k)$,有 $D(v, k) = (v(k+1) - Av(k) - by_p(k))/b$,那么再计算离散向量: $\underline{D}^{(0)} = (D(0) \ D(1) \ \dots \ D(N-1))^T$,再令 $D^{(1)}(k) = \sum_{i=0}^k D(i)$, $\underline{D}^{(1)} = (D^{(1)}(0) \ D^{(1)}(1) \ \dots \ D^{(1)}(N-1))^T$,在第 N 步之后,就可估计出灰色模型参数向量 \hat{W}^T ,有 $D^{(1)}(v, k) = W_1v_1^{(1)}(k) + W_2v_2^{(1)}(k) + \dots + W_nv_n^{(1)}(k) + d^{(1)}(k)$, $\hat{W} = (\hat{W}_1 \ \hat{W}_2 \ \dots \ \hat{W}_n \ \hat{f}_d)^T$,其中 $d^{(1)}(k) = \sum_{i=0}^k d(i)$,如果 $d(k)$ 为慢时变的扰动量,则可将其近似等效等常量,利用最小二乘法,可求得:

$$\hat{W}^T = (Q^T Q)^{-1} Q^T D^{(1)} \quad (8)$$

式中, $|\det(Q^T Q)| > 0$ 。

$$Q = \begin{bmatrix} v_1^{(1)}(2) & \dots & v_n^{(1)}(2) & 1 \\ v_1^{(1)}(3) & \dots & v_n^{(1)}(3) & 2 \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ v_1^{(1)}(N) & \dots & v_n^{(1)}(N) & N-1 \end{bmatrix}$$

如果 $Q^T Q$ 不可逆,则需要增加 N ,直到 $Q^T Q$ 可逆,通常取 $N \geq n$,那么在 $(n+1)$ 步之后,可得增加补偿控制量 y_c ,则实际对 $G(s)$ 的控制输入量为: $y^* = y_c + y_p$,其中, $y_c = -\sum_{i=1}^n \hat{W}_i v_i - \hat{d}$ 。对于该系统,取迭代次数 $N=3, K_p, K_d$ 为PID参数, $y_p(k) = K_p e(k) + K_d de(k)$, $e(k) = y(k) - y_{out}(k)$, $de(k)$ 为 $e(k)$ 的微分。采用该控制律,该子系统性能将明显改善,鲁棒性能也大为提高。

本文借助扩张状态观测器来引入反馈量,引入三个观测量,对整个系统 $G(s)$ 的最终输出 y 进行估计得到估计量 $\hat{y} = \{z_1, z_2, z_3\}$ 。

$$\begin{cases} e(k) = z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + \tau_3(z_2(k) - \rho_1 \cdot e(k)) \\ z_2(k+1) = z_2(k) + \tau_3(z_3(k) - \rho_2 \cdot e(k) + K_2^* \cdot \sigma \cdot u) \\ z_3(k+1) = z_3(k) + \tau_3(-\rho_3 \cdot e(k)) \end{cases} \quad (9)$$

式中, y 为 $G(s)$ 系统输出; u 为 $G(s)$ 的控制输入; τ_3 为积分步长; ρ_1, ρ_2, ρ_3 为可调节参数; u 为对 $G_2(s)$ 的控制输入,其中扩张状态 z_3 是对 $G(s)$ 的噪声干扰量总和的估计值。

对输入信号进行滤波后,加入一二阶非线性离散跟踪微分器,其形式如式(5),得到输入信号的两个

分量 x_1, x_2 , 则系统的状态误差为: $e_1 = x_1 - z_1, e_2 = x_2 - z_2$, 令 $u = f(e_1, e_2, z_3)$ 为 e_1, e_2, z_3 的线性或非线组合, 非线性组合反馈的抑制扰动效果要更为明显。对于该系统, 取误差反馈控制量为线性组合为: $u = (\alpha_1 e_1 + \alpha_2 e_2 - \dot{z}_3) / (K_1^* \cdot \sigma)$, 式中, α_1, α_2 为组合参数, σ 为决定补偿强弱的可调补偿系数, u 则作为对系统的控制输入, 最终输出 y 为系统在输入控制量为 u 下的输出。

4 仿真结果的比较与分析

为了验证扩张状态观测器与灰色 PID 控制算法设计的有效性, 基于 Matlab 进行仿真分析, 并与不完全微分 PID 算法(简称为 PID)、基于跟踪微分器的零点配置反馈算法做比较, 取采样时间 $T_s = 1.0 \times 10^{-4}$ s, 安排过渡过程的非线性离散跟踪微分器的参数: $\tau_1 = 0.01, r = 10000, z = 0.02$, 二阶线性离散跟踪微分器的参数: $r = 10000, \tau_2 = 1.0 \times 10^{-4}$, 扩张状态观测器的参数: $\tau_3 = 1.0 \times 10^{-4}, \sigma = 1, \alpha_1 = 1, \alpha_2 = 50$ 。 $W = [1.0, 1.0, 1.0], N = 3, K_p = 27, K_d = 8$ 。

图2和图3分别为 ESO-GM 与 PID、TD 阶跃响应比较。通过比较分析, ESO-GM 算法下的系统的阶跃响应是无超调的, 响应速度较快, 能够满足快速反射镜的快速响应的要求。与不完全微分 PID 算法相比较, 系统的响应速度改善非常明显; 与 TD 算法相比其上升时间要大一些, 在这两种算法下, 系统到达稳态的时间几乎是一致的, 但 TD 算法是根据系统模型的具体参数来对进行极点配置, 而 ESO-GM 算法不需要系统具体参数就可以有效改善系统的响应速度, 具有更好的适应性。

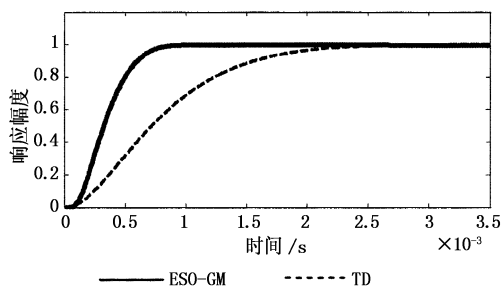


图2 ESO-GM 与 PID 阶跃响应比较

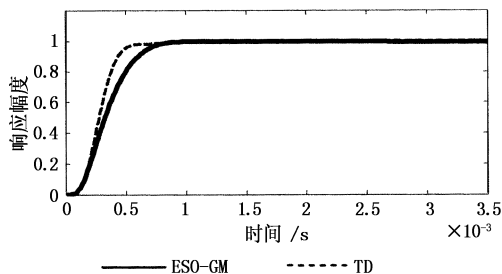


图3 ESO-GM 与 TD 阶跃响应比较

分别对这三种控制算法下, 分别输入 $10 \sin(2\pi \cdot 200 t) + \text{rands}(1)$ 信号, 其跟踪效果和跟踪误差对比分别如图4~图7所示。其中不完全微分 PID 算法的跟踪仿真结果果明显要劣于 ESO 算法和 TD 算法的跟踪效果, 其跟踪误差也是很明显比 ESO-GM 大的多。ESO-GM 算法和 TD 算法相比, 两者都安排了合适的过渡过程和滤波, 前者对该输入正弦的跟踪输出波形更为光滑平缓, 后者的跟踪误差要明显大于前者。

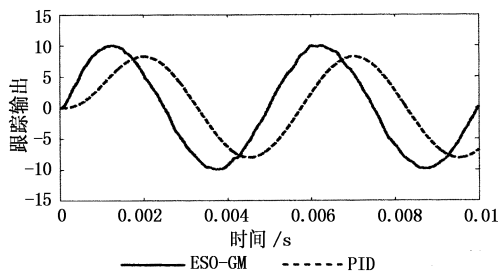


图4 ESO-GM 与 PID 200 Hz 正弦跟踪比较

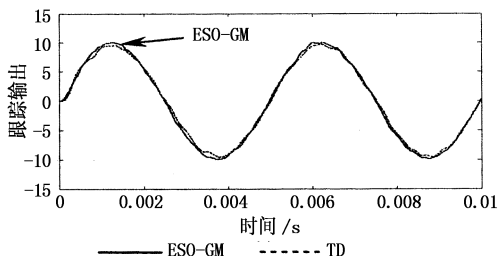


图5 ESO-GM 与 TD 200 Hz 正弦跟踪比较

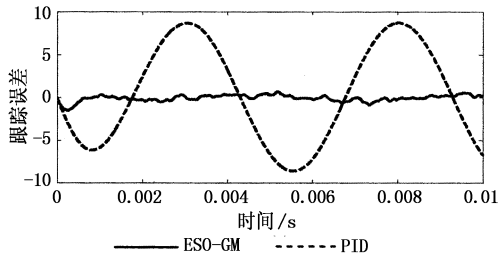


图6 ESO-GM 与 PID 200 Hz 正弦跟踪误差比较

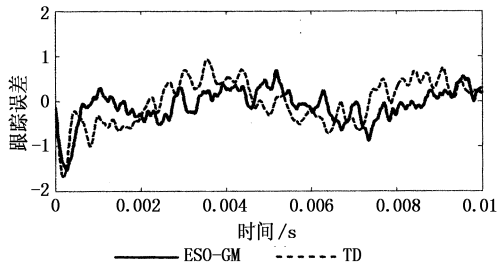


图7 ESO-GM 与 TD 200 Hz 正弦跟踪误差比较

同时注意到 PID 算法和 TD 算法对模型参数有很大的依赖性, 如果模型参数在限定范围内是变化的, 那么跟踪效果明显下降, 如图8所示, 对 TD 算法和 ESO-GM 算法作对比, 取输入信号为

$10 \sin(2\pi \cdot 100 t) + \text{rands}(1)$,虽然在TD算法中引入了反馈,但是跟踪效果并没有明显的改善,因为,在对系统配置零点时,依靠的是的系统辨识所得到的系统参数信息,而ESO-GM算法几乎不依赖系统模型参数,并且可以实时地去补偿未知的扰动,跟踪效果明显,其输出几乎和输入正弦信号波形重合,图9为两者跟踪误差比较,ESO-GM算法下的系统跟踪误差要明显小于TD算法的跟踪误差。

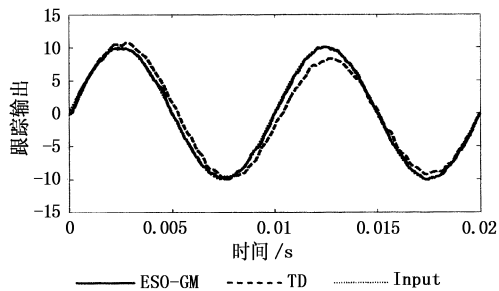


图8 ESO-GM与TD 100 Hz正弦跟踪比较

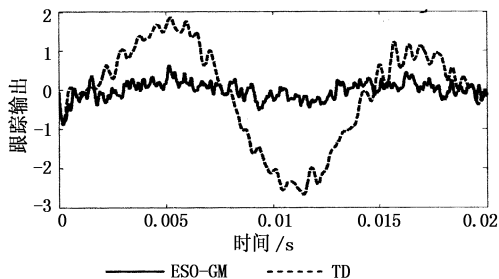


图9 ESO-GM与TD 100 Hz正弦跟踪误差比较

由仿真结果可见,随机干扰信号作用下,离散跟踪微分控制器可以有效的抑制随机干扰,同时对输入信号进行了相位和幅度调整,扩张状态观测器和灰色PID控制分别对系统中的不确定部分做了有效的估计和补偿,有效地降低跟踪误差同时提高了跟踪精度,为以后实际的跟踪实验提供了一定的理论依据。

5 结束语

通过以上的仿真分析表明,采用离散跟踪微分器安排过渡和滤波,使系统具有了更好的动态性能,

这为解决快速反射镜的跟踪滞后和抗干扰能力差等问题提供了一定的参考,利用扩张状态观测器和灰色PID控制相结合的方法有效的补偿不确定因素,有效降低跟踪误差的同时提高了跟踪精度,明显改善了系统的跟踪效果。

由于在仿真分析中,所引入的随机干扰信号比较单一,而精跟踪环节在实际中的干扰信号更为复杂,同时考虑到控制电路的驱动能力等原因,在实际应用中应考虑对系统的被控输入采用非线性组合形式^[10-11],以达到进一步提高跟踪精度同时降低跟踪误差的目的,这都有待进一步研究和探讨。

参考文献:

- [1] 卞青,宁天夫,等.强激光武器的设计考虑和作战效果分析[J].激光与红外,2008,38(6):528-530.
- [2] 马佳光.捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J].光电工程,1989,16(3):1-41.
- [3] 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,2008,9.
- [4] 韩京清,袁露林.跟踪微分器的离散形式[J].系统科学与数学,1999,19(3):268-273.
- [5] 邓聚龙.灰色系统论文集[M].武汉:华中理工大学出版社,1989.
- [6] 刘金琨.先进PID控制MATLAB仿真[M].北京:电子工业出版社,2004,9.
- [7] 韩京清,黄远灿.二阶跟踪-微分器的频率特性[J].数学的实践与认识,2003,33(3):71-74.
- [8] 武利强,韩京清.TD滤波器及其应用[J].计算技术与自动化,2003,22(3):61-63.
- [9] 黄焕袍,万晖,韩京清.安排过渡过程是提高闭环系统“鲁棒性、适应性和稳定性”的一种有效方法[J].控制理论与应用,2001,18:89-94.
- [10] 韩京清,张荣.二阶扩张状态观测器的误差分析[J].系统科学与数学,1999,19(3):465-471.
- [11] 黄一,韩京清.非线性连续二阶扩张状态观测器的分析与设计[J].科学通报,2000,45(13):1373-1379.