

# 振镜激光跟踪系统的鲁棒复合控制方法

王碧衡<sup>1</sup>, 董登峰<sup>2,3</sup>, 王中宇<sup>1</sup>, 纪荣祚<sup>2</sup>, 胡哲文<sup>4</sup>, 周维虎<sup>2,3</sup>

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191; 2. 中国科学院光电研究院, 北京 100094;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430074)

**摘要:** 为提高振镜激光跟踪系统的跟踪性能, 针对振镜系统在使用过程中存在不确定性的问题, 设计了一种基于前馈与反馈的复合控制方法; 该控制方法通过零相差跟踪控制器 (ZPETC) 提高了振镜系统的跟踪性能, 并采用了加性分解输出器抑制由系统的不确定性所带来的干扰, 然后再通过差分进化算法设计无超调 PID 控制器来补偿剩余误差; 在振镜系统辨识的基础上进行 Matlab 仿真实验, 给辨识模型加入扰动模拟系统参数摄动, 通过比较不同控制器下系统的跟踪误差, 验证各控制器的作用; 仿真结果表明, 组合控制器在跟踪过程中能有效降低系统不确定性带来的影响, 确保振镜系统拥有良好的跟踪性能。

**关键词:** 跟踪控制; 振镜电机; 零相差跟踪控制器; 加性输出分解; 差分进化

## Robust Compound Control Method for Laser Tracking System of Galvanometer

WangBiheng<sup>1</sup>, DongDengfeng<sup>2,3</sup>, Wang Zhongyu<sup>1</sup>, Ji Rongyi<sup>2</sup>, Hu Zhewen<sup>4</sup>, Zhou Weihu<sup>2,3</sup>

(1. Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
4. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to improve the tracking performance of the galvanometer laser tracking system. A combined control strategy based on feedforward and feedback is designed to solve the problem of uncertainty of the galvanometer motor. This control strategy improves the tracking performance of the galvanometer system through the Zero Phase Error Tracking Controller (ZPETC), additionally it uses additive output decomposition to suppress the interference caused by the uncertainty of the system. Then, the residual error can be compensated by the no overshoot PID controller which derived from differential evolution. On the basis of the identification of the galvanometer system and the simulation experiment on Matlab. The system parameter perturbation is simulated by adding disturbance to the identification model. By comparing the tracking error of different controller systems, the function of each controller is verified. Simulation results show that the combined controller can effectively reduce the influence of system uncertainty and ensure the good tracking performance of the galvanometer system.

**Keywords:** tracking control; galvanometer motor; ZPETC; additive output decomposition; differential evolution

## 0 引言

激光因其独有的特性在测量、通信等领域备受青睐, 而激光的跟踪控制是激光能精确指向目标所不可或缺的技术。激光跟踪系统的工作原理是: 数据采集电路获取反射镜偏转角、光束偏心率、测距信息后合成合作目标位置, 控制算法根据目标位置信息解算出反射镜输入量发送给执行机构, 执行机构驱动反射镜改变光束方向, 使光束偏心率趋近于零, 实现对合作目标的跟踪。激光跟踪技术在激光跟踪仪及激光通信等设备上有着广泛的应用, 而跟踪效果的优劣直接影响着此类设备性能, 选取高性能的执行机构电机并研究配套的控制策略是提高系统响应速度、跟踪精度的有效途径。

本文选用振镜电机作为激光跟踪系统的执行机构, 通过 X、Y 双轴振镜的偏转实现对激光指向的控制。传统的跟踪控制算法多数基于反馈控制, 例如文献 [1] 和文献 [2] 提出的控制方案是对传统控制结构的扩展, 通过给振镜系统增加一个带有 PID-L1 类型控制器的附加回路, 保证了系统速度响应和抗扰性。但该控制策略未引进前馈控制无法从根本上提高系统跟踪性能。对于非最小相位系统, 引入 ZPETC 能够极大提高跟踪精度, 但 ZPETC 性能受系统模型精度影响极大, 振镜电机在使用过程中因其配套的驱动板会大量发热, 引发系统参数摄动, 进而导致 ZPETC 性能恶化。文献 [3] 和文献 [4] 在 ZPETC 的基础上分别设计了定量反馈控制器和单神经 PID 反馈控制器, 通过反馈控制器补偿由模型不确定性引起的误差。但前者需要系统的不确定模型设计复杂, 而后者仅通过反馈补偿模型不准导致的误差, 效果有限。文献 [5] 提出了一种基于递归参数估计的自适应 ZPETC, 通过对系统进行实时辨识从而更新控制器参数, 提高了系统的鲁棒性, 降低了系统的不确定性, 但该算法仍存在着实时辨识误差和计算量较大的问题。

收稿日期: 2018-07-25; 修回日期: 2018-08-17。

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ12002); 国家自然科学基金项目(61675211); 国家自然科学基金项目(61575209)。

作者简介: 王碧衡(1991-), 男, 山西朔州人, 硕士研究生, 主要从事精密跟踪控制方向的研究。

针对上述问题, 本文在系统辨识的基础上, 首先设计了 ZPETC, 通过引入加性输出分解器<sup>[6]</sup>, 在提高跟踪精度的同时有效地抑制了系统误差及参数摄动对 ZPETC 控制效果的影响, 减小了计算量且易于实现。然后, 使用差分进化算法对控制器 PID 参数进行整定, 并利用 PID 控制器对剩余误差进行补偿, 实现了对输入信号的精确跟踪。最后, 通过仿真实验验证了该组合控制器的有效性和优越性。

## 1 振镜电机模型辨识

### 1.1 振镜电机数学模型

振镜电机是一种摆动式电机, 具有体积小、大转矩、响应速度快、宽频率特性等优点。因此特别适合高精度的跟踪控制。振镜电机的工作原理是电机转轴上的永磁体与内部线圈电流产生的磁场相互作用产生旋转扭矩, 使连接于转子之上的反射镜发生偏转<sup>[7]</sup>。此外, 振镜电机需在与配套的驱动板的控制下才能正常工作, 振镜电机通过转轴末端安装的角度传感器为驱动板提供角度反馈。驱动板和振镜构成一个闭环反馈系统。以下简称该闭环系统为振镜系统, 如图 1 所示。本文选用 S-8136 型动磁式双振镜定位电机作为跟踪系统的执行机构, 其驱动板为 SD-1000 型含积分的 I 型控制器。

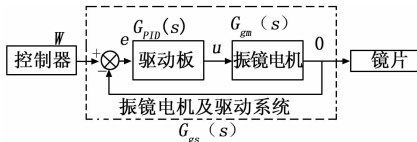


图 1 振镜系统结构

振镜电机模型如下:

$$G_{gm}(s) = \frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{K_T}{J s^2 + f s + g + \frac{K_T K_b s}{R}} \quad (1)$$

式中,  $J$  是电机转子和轴上反射镜片相对于电机转轴的转动惯量之和;  $f$  是电机内部和电机负载折合到电机轴上的粘性摩擦系数;  $R$  是电枢电阻;  $K_b$  是电动机反电动势系数;  $K_T$  为振镜电机的转矩系数;  $g$  是扭力棒弹性常数, 动磁式振镜的  $g$  为零。

驱动板模型如下:

$$G_{PID}(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2)$$

式中,  $K_p$  为增益系数;  $T_i$  为积分系数;  $T_d$  为微分系数。

振镜系统模型如下:

$$G_{gs}(s) = \frac{G_{PID}(s)G_{gm}(s)}{1 + G_{PID}(s)G_{gm}(s)} \quad (3)$$

模型近似简化:

考虑到驱动板作为 PID 控制器具有极零点补偿作用<sup>[2]</sup>, 振镜系统的传递函数可以用二阶传递函数来进一步简化(实际上用二阶模型比三阶模型的辨识效果更好), 整个系统的传递函数结构为:

$$G_{gs}(s) = \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} \quad (4)$$

### 1.2 系统参数辨识

为使辨识模型逼近真实的系统模型, 输入的辨识信号应在不同频段充分激励系统, 一般而言振镜电机带宽为 1000 Hz 左右, 这里选取频率为 1~5000 Hz 以对数方式递增的 sweeper 波对振镜电机进行激励<sup>[8]</sup>。在系统能够正常工作的前提下, 信号幅值越大辨识效果越好。但随着输入信号频率的增加, 信号幅值太大会使驱动板电容饱和而导致输出跳变, 根据经验 sweeper 波的幅值选为 0.1 V。采集输入输出信号如图 2。获取振镜系统输入输出信号后, 输入 Matlab 系统辨识工具箱中对系统参数进行辨识。

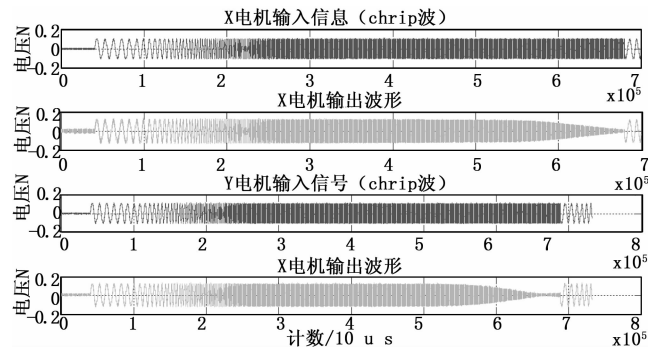


图 2 输入/输出信号

经过辨识可得到 X、Y 振镜系统的传递函数如下:

X 振镜系统传递函数:

$$G_X(s) = \frac{-3236s + 6.127 \times 10^7}{s^2 + 1.063 \times 10^4 s + 5.581 \times 10^7} \quad (5)$$

Y 振镜系统传递函数:

$$G_Y(s) = \frac{-2361s + 5.52 \times 10^7}{s^2 + 9867s + 5.018 \times 10^7} \quad (6)$$

在对连续控制系统进行离散控制设计时, 为了得到性能较好的控制效果, 一般可以根据连续系统带宽  $\omega_b$  选择控制频率  $\omega_a$ <sup>[9]</sup>, 选择关系如下:

$$\omega_a = (5 \sim 10)\omega_b \quad (7)$$

X、Y 振镜系统的带宽约为 1.1 kHz, 选择 10 kHz 作为控制频率, 故带有零阶保持器的振镜系统的脉冲传递函数如下:

X 振镜系统的脉冲传递函数:

$$G_X(z) = \frac{z^{-1}(0.0305 + 0.3298z^{-1})}{1 - 1.0172z^{-1} + 0.3454z^{-2}} \quad (8)$$

Y 振镜系统的脉冲传递函数:

$$G_Y(z) = \frac{z^{-1}(0.058 + 0.2787z^{-1})}{1 - 1.0667z^{-1} + 0.3728z^{-2}} \quad (9)$$

## 2 基于加性输出分解方法的 ZPETC

### 2.1 ZPETC 设计

激光跟踪系统通过获取反射镜偏转角、光束偏心量、测距信息合成并记录合作目标的位置信息。由于合作目标的运动频率较慢(不超 10 Hz), 远小于信号采集频率, 因此选取前  $k$  个目标位置, 利用多项式拟合预测算法既可求

得到当前目标运动轨迹<sup>[10]</sup>。根据所得轨迹函数可精确预测下一时刻的目标位置, 由此解算出两面反射镜在下一时刻的偏转角, 获得控制指令的超前值。

由式 (8)、(9) 可知,  $X$  振镜系统与  $Y$  振镜系统的脉冲传递函数分别存在不稳定零点  $z=10.81$  和  $z=4.80$ , 属于非最小相位系统。在指令超前值已知的情况下, 非最小相位系统直接采用逆控制器会给系统引入不稳定极点。为消除不稳定零点的影响日本学者 M. Tomizuka 提出了 ZPETC<sup>[11]</sup>。ZPETC 是通过引入零点来补偿逆系统中的不稳定极点。加入零相差前馈控制器后, 系统对低频输入响应增益近似为 1, 在全频域内相移为零。

非最小相位系统可以表示为:

$$G(z^{-1}) = \frac{z^{-d}B_u(z^{-1})B_a(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (10)$$

式中,  $d$  为延迟步数;  $B_u(z^{-1})$  是由所有不稳定零点构成的多项式;  $B_a(z^{-1})$  是由所有稳定零点构成的多项式;  $A(z^{-1})$  为分母多项式。

依据不变性原理, 系统的逆控制器可表示为:

$$G^{-1}(z^{-1}) = \frac{z^d A(z^{-1})}{B_u(z^{-1})B_a(z^{-1})} \quad (11)$$

为了补偿逆控制器的不稳定极点  $B_u(z^{-1})$ , 引入零点  $B_u(z)$ 。设计数字前置滤波器为:

$$Q(z^{-1}) = \frac{B_u(z^{-1})B_a(z)}{B_u(1)^2} \quad (12)$$

故 ZPETC 的表达式为:

$$F(z^{-1}) = \frac{z^d A(z^{-1})B_a(z)}{B_u(z^{-1})B_u(1)^2} \quad (13)$$

以  $X$  振镜系统为例, 加入 ZPETC 后系统的输入/输出函数为:

$$F(z^{-1})G(z^{-1}) = 0.0775z + 0.8449 + 0.0775z^{-1} \quad (14)$$

$$y(k) =$$

$$0.0775y_d(k+1) + 0.8449y_d(k) + 0.0775y_d(k-1) \quad (15)$$

可见, 输出量  $y(k)$  为期望值  $y_d(k+1)$ ,  $y_d(k)$ ,  $y_d(k-1)$  的加权平均值。对于低频输入信号, 系统的输出趋近于该时刻期望值, 从而实现了高精度跟踪控制。

## 2.2 基于加性分解的 ZPETC

设计 ZPETC 需要被控对象的精确模型, 但振镜系统在辨识过程中存在一定的辨识误差, 当振镜电机在长时间工作后, 由于驱动板上功率放大器件的持续发热会引起系统参数摄动。一般来说辨识误差相对较小, 而参数摄动引起的模型失准会导致 ZPETC 性能恶化。仅通过反馈控制器难以消除由参数摄动引起的误差。为了获得满意的控制效果, 本文在 ZPETC 的基础上引入加性分解输出的方法有效地解决了上述问题。

加性分解正是将一个不确定系统分解为一个与之相近的确定的主系统和一个不确定的辅助系统。原系统的输出量就等于主系统与辅助系统输出量之和。将主系统输出视为比较值, 辅系统输出则视为一个集总扰动, 通过将辅系

统输出量输入 ZPETC, 实现对该扰动的抑制, 提高系统的跟踪性能<sup>[12]</sup>。为表述方便, 以下证明均省略了算子  $z$ 。

定义系统跟踪误差为:

$$e = y - y_d \quad (16)$$

式中,  $y$  为系统输出量;  $y_d$  为期望值

假设原系统为:

$$y = Gu + d \quad (17)$$

因为辨识模型与实际模型接近, 且零相差前馈控制器依据辨识模型而设计, 故选择辨识模型作为主系统:

$$y_p = G_p u \quad (18)$$

故而可得辅助系统的输出  $y_r = Gu + d - G_p u$ , 即集总扰动为:

$$d_i = y_r = Gu + d - G_p u \quad (19)$$

振镜电机负载不变, 不可测扰动可以忽略, 故系统的不确定性主要来源于辨识误差和参数摄动, 由式 (19) 可知, 这些不确定性引起的扰动为集总扰动。在控制过程中集总扰动可由振镜实际偏转量与主控系统的状态计算值相减得到。基于基于加性输出分解方法的前馈控制器如图 3 所示。

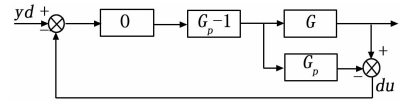


图 3 基于加性输出分解方法的 ZPETC 结构框图

由于式 (13) 可知 ZPETC 由辨识系统的逆函数与数字前置滤波器共同组成消除了不稳定极点, 且原系统稳定, 集总扰动有界, 符合加性分解条件。故振镜系统输入量为:

$$u = QG_p^{-1}[y_d - (G - G_p)u] \quad (20)$$

整理得:

$$u = Q[G_p - Q(G - G_p)]^{-1}y_d = QG_p^{-1}\bar{G}y_d \quad (21)$$

其中:

$$\bar{G} = [1 - Q + QGQ_p^{-1}]^{-1} \quad (22)$$

由于,  $G_p^{-1}$  为稳定系统, 且  $QG_p^{-1}$  稳定, 因此  $1 - Q + QGQ_p^{-1}$  也是稳定的。根据小增益定理, 满足条件:

$$\sup |Q - QGQ_p^{-1}| < 1 \quad (23)$$

故可推出  $\bar{G}$  稳定。由于前馈控制器输入的期望值有界, 可知振镜系统输入量有界。在引入加性输出分解后, 系统跟踪误差可表示为:

$$e = (GG_p^{-1}\bar{G}Q - 1)y_d = [1 - Q + QGQ_p^{-1}]^{-1}(1 - Q)y_d \quad (24)$$

当  $y_d$  为常值且  $Q(z) = 1$  ( $z$  趋近于 1 时), 因此  $(1 - Q)y_d$  为脉冲信号, 又由式 (22)、(23) 可知  $\bar{G}$  稳定, 则有:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |e(t)| = 0 \quad (25)$$

可见, 在 ZPETC 中引入加性分解输出后相当于在前馈控制器中引入对系统不确定量的反馈, 因而可以实现对系统参数摄动的抑制。

### 3 反馈控制器的设计

PID 控制器是最为常见的反馈控制器，它具有原理简单、易于实现的特点。由于 PID 控制器本身具有较强的鲁棒性，对系统中存在的不确定因素有较强的适应力。常见的参数整定方式有 Z-N 整定法和临界比度法等，但这些方法对系统不同的动态响应指标很难实现同步优化，且对操作人员的经验有一定的要求。

为了同步实现对不同动态性能的优化，可采用差分进化算法对 PID 参数进行整定。差分进化算法是一种基于现代智能理论的优化算法，通过群体内个体之间的相互合作与竞争保留优良个体，淘汰劣质个体，不断地进化引导搜索向最优解逼近。它主要由变异、交叉和选择三个操作组成<sup>[13]</sup>，参数整定具体流程如下：

#### 3.1 选择最优指标

系统在进行远场跟踪时，振镜微小的偏转会引光斑在合作目标上的较大位移而导致偏心量增大，因此控制器不仅要有较快的响应速度，对系统响应的超调量也要有严格的约束。为了获得较快的响应速度，选择阶跃响应过程中的误差绝对值之和  $J$  作为参数选择的最小目标函数，如下：

$$J = \sum_{i=1}^N |e(i)| \quad (26)$$

式中， $N$  表示误差绝对值累计数次，对于离散系统的振镜系统，阶跃响应时间在 2 ms 左右。这里选取  $N=30$  即采样 30 次（控制频率为 10 kHz）。为了减小超调量，设计惩罚函数，发生超调就会触发该函数，将超调量加入目标函数，此时的目标函数如下：

$$\text{if } e(p) < 0, J = J + 10 \times |e(p)| \quad (27)$$

式中，10 为超调惩罚权重。

#### 3.2 种群的初始化

在解空间中随机均匀产生地 30 个个体，每个个体由 3 维向量组成分别代表带整定的  $P$ 、 $I$ 、 $D$  参数。

$$x_{ij}(0) = \text{rand}_{ij}(0,1)(x_{ij}^U - x_{ij}^L) + x_{ij}^L \quad (28)$$

式中， $x_{ij}^U, x_{ij}^L$  分别为第  $j$  个染色体的上界和下界； $\text{rand}_{ij}(0,1)$  为 0~1 之间的随机小数。

#### 3.3 变异操作

在每次的进化迭代中，从种群中随机选择 3 个个体，生成的变异向量为：

$$h_{ij}(t+1) = x_{p1j}(t) + F(x_{p2j}(t) - x_{p3j}(t)) \quad (29)$$

式中， $x_{p2j}(t) - x_{p3j}(t)$  为差异化向量； $F$  为缩放因子； $p_1, p_2, p_3$  为 1~30 内的随机整数，表示个体在种群中的序号，且  $i \neq p_1 \neq p_2 \neq p_3$ 。变异操作是差分进化算法的关键步骤。

#### 3.4 交叉操作

该步骤是为了提高群体个体的多样性，具体操作如下：

$$v_{ij}(t+1) = \begin{cases} h_{ij}(t+1), \text{rand } l_{ij} \leq CR \\ x_{ij}(t), \text{rand } l_{ij} \geq CR \end{cases} \quad (30)$$

式中， $\text{rand } l_{ij}(0,1)$  为 0~1 之间的随机小数； $CR$  为交叉因子， $CR \in [0,1]$ 。

### 3.5 选择操作

为了确定  $x_i(t)$  是否是下一代的成员，实验向量  $v_i(t+1)$  和目标向量  $x_i(t)$  对评价函数进行比较：

$$x_i(t+1) = \begin{cases} v_i(t+1), f(v_{i1}, \dots, v_{im}) < f(x_{i1}, \dots, x_{im}) \\ x_{ij}(t), f(v_{i1}, \dots, v_{im}) \geq f(x_{i1}, \dots, x_{im}) \end{cases} \quad (31)$$

反复执行步骤 (3) ~ (5)，直至最大进化代数 50。

以 X 振镜系统为例，图 4、图 5 分别为最小目标函数值  $J$  的优化过程和 PID 参数整定过程，经过差分进化整定得到的 PID 参数分别为  $Kp=0.42, Ni=4.94, Nd=3.395$ 。

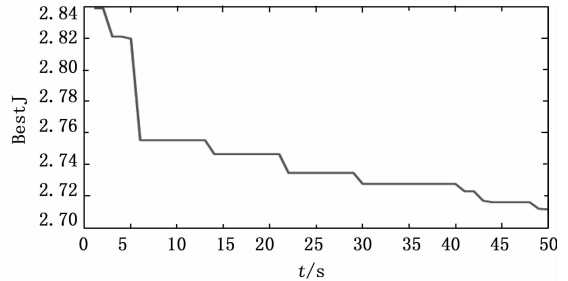


图 4 最小目标函数值  $J$  的优化过程

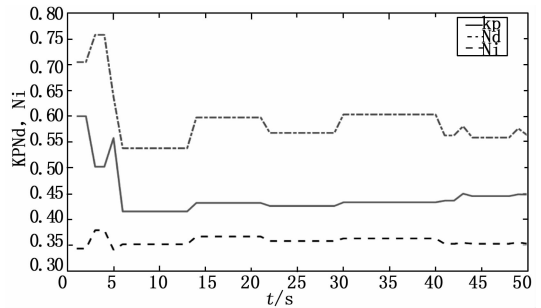


图 5 PID 参数整定过程

参数整定后系统阶跃响应如图 6 所示，系统阶跃响应上升时间约为 1.5 ms，超调量小于 1%。同样，Y 振镜系统整定的结果类似，反馈控制效果符合要求。通过差分进化算法整定参数后控制器有较快的响应速度，有效抑制了超调量。

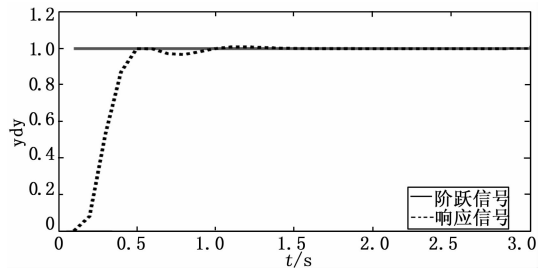


图 6 整定后反馈系统阶跃响应

系统的组合控制结构如图 7 所示。系统输入量为前馈量与反馈量之和，系统控制效果见仿真部分。

## 4 Matlab 仿真分析

S-8136 动磁式振镜偏转角为  $\pm 10^\circ$ ，电机输入输出均

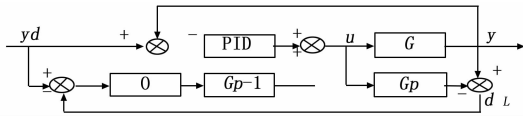


图 7 组合控制器结构框图

为 ±5 V, 即位置输入/输出信号的比例系数均为 0.5 V/°。假设数字控制电路采样时间为 0.1 ms, 选用 16 位 D/A 转换卡与电机驱动器相连为系统提供输入信号, 选用 16 位 A/D 转换器采集反馈信号; 为便于比较, 以 0~65537 作为振镜偏转角度值对应振镜转角为 -5~+5°, 即 1 代表最小分辨率约 5.32 μrad。在开始跟踪之前激光束首先进入合作目标中心, 系统获得目标位置及运动信息后开始跟踪。系统中 X 振镜 Y 振镜分别实现对目标水平方向和垂直方向上轨迹分量的跟踪, 本文以 X 振镜系统为例, 在 matlab 上进行仿真, 用正弦函数模拟合作目标运动轨迹在水平方向上的分量, 输入前馈信号如下:

$$y_d = \text{fix}(16384\sin(20\pi \times k \times ts + \pi \times 3/2)) + 16384 \quad (32)$$

式中,  $y_d$  为离散数字信号;  $\text{fix}$  为向零取整函数, 表示合作目标在水平方向上做频率为 10 Hz 的往复运动, 运动范围为 0°~5°。

由于数字控制器的输入/输出值均为离散值, 故在仿真过程中对控制器内部的数值计算均需做取整处理。

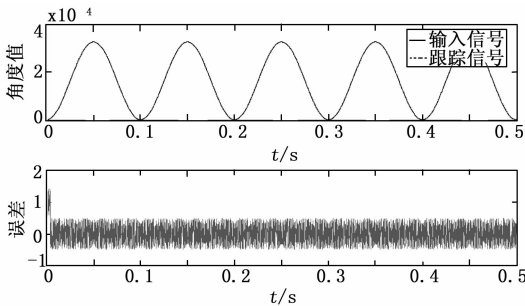


图 8 无干扰下 ZPETC 跟踪效果及误差

在模型准确的情况下无相前馈控制器的控制效果如图 8 所示, 系统输入/输出没有相移, 误差大小在一个分辨率以内, 主要由量化误差引起。系统跟踪效果良好。

分别在振镜系统的辨识模型的脉冲传递函数的分子多项式和分母多项式中加入低频扰动量模拟参数扰动如下:

$$\text{num}_0 = 0.3298 - 0.01\sin(2 \times \pi \times k \times ts) \quad (33)$$

$$\text{den}_0 = 0.3454 + 0.01\sin(2 \times \pi \times k \times ts) \quad (34)$$

式中,  $\text{num}_0$  和  $\text{den}_0$  分别为分子分母上  $z^{-2}$  项系数, 在加入扰动后, 随着参数的变化 ZPETC 性能变差, 系统跟踪误差明显增加, 如图 9 所示。

图 10 为基于加性分解输出方法的 ZPETC 的跟踪轨迹和误差曲线。对比系统加入加性分解输出前后的控制效果, 跟踪误差幅值由 2000 降至 400。可见, 跟踪误差明显减小, 证明了基于加性分解输出的 ZPETC 对系统的不确定性引起的扰动有着明显的抑制作用。

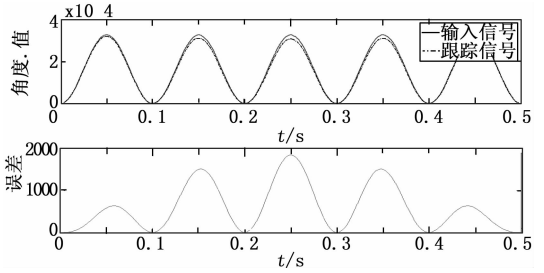


图 9 参数扰动下 ZPETC 跟踪效果及误差

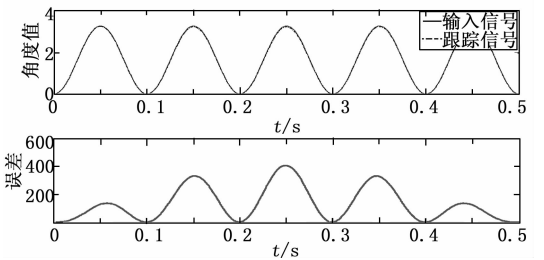


图 10 基于加性分解方法的 ZPETC 跟踪效果及误差

为了进一步补偿跟踪误差, 在前馈控制器的基础上加入 PID 控制器, 参数由第三节得出, 系统跟踪轨迹和误差曲线如图 11 所示。系统跟踪误差幅值由 400 缩小至正负 5 内, 反馈控制器有良好的误差补偿效果。以上仿真结果的比较表明, 基于加性分解输出方法的 ZPETC 与反馈控制的组合控制器能够实现对目标轨迹的精确跟踪。

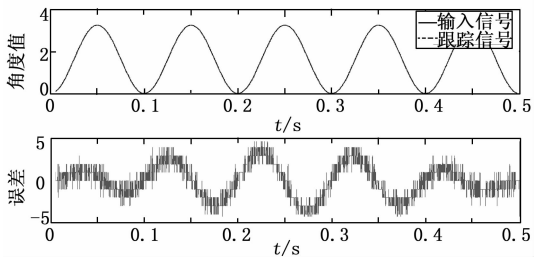


图 11 组合控制器跟踪效果及误差

## 5 总结

本文在振镜系统辨识的基础上设计了 ZPETC, 有效地提高了激光跟踪系统的跟踪精度。同时将加性分解方法引入前馈控制器后很好地抑制了由于模型不准及系统参数扰动所带来的干扰。通过无超调 PID 反馈控制器实现对剩余误差的补偿, 最终达到了期望的跟踪效果。通过 matlab 仿真结果验证了所提出复合控制器的有效性, 且控制器具有运算量少、易于实现的特点, 有良好的工程推广价值。

### 参考文献:

[1] Mnerie C A, Preitl S, Duma V F. Performance enhancement of galvanometer scanners using extended control structures [A]. IEEE: International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics [C]. IEEE, 2013: 127 - 130.  
[2] Mnerie C, Duma V F. Mathematical model of a galvanometer

—based scanner; simulations and experiments [J]. Proc Spie, 2013, 8789 (5): 15.

[3] 王福超, 田大鹏, 王昱棠. 基于 DOB 和 ZPETC 的 PWM 驱动快速反射镜控制方法研究 [J]. 机电工程, 2015, 32 (7): 903 - 908.

[4] 张春红. 单神经元 PID 补偿零相差跟踪误差方法研究 [J]. 科学技术创新, 2017 (2): 6 - 7.

[5] Yeh S S, Hsu P L. An optimal and adaptive design of the feed-forward motion controller [J]. Mechatronics IEEE/ASME Transactions on, 1999, 4 (4): 428 - 439.

[6] Ren J, Xi Z, Zhao L B, et al. Transient tracking performance improvement for nonlinear nonminimum phase systems; an additive-state-decomposition-based control method [J]. International Journal of Systems Science, 2017, 48 (10): 1 - 11.

[7] 井峰. 数字式振镜控制系统的研究 [D]. 西安: 中国科学院研究生院 (西安光学精密机械研究所), 2012.

[8] Li Z, Shan J J. LQG—based synchronization control of Fabry—Perot spectrometer using multiple piezoelectric actuators (PEAs) [C]. IEEE International Conference on Information and Automation. IEEE, 2017: 448 - 453.

[9] 胡寿松. 自动控制原理 (第六版) [M]. 科学出版社, 2013.

[10] 董登峰, 周维虎, 纪荣祯, 等. 激光跟踪仪精密跟踪系统的设计 [J]. 光学精密工程, 2016, 24 (2): 309 - 318.

[11] Tomizuka M. Zero phase error tracking algorithm for digital control [J]. Trans of Asme Journal of Dynamic Systems Measurements & Control, 1987, 109 (1): 349 - 354.

[12] Deng S, Du G X, Quan Q, et al. Tracking control of a small fixed-wing UAV based on additive-state-decomposition-based dynamic inversion method [A]. Control Conference [C]. IEEE, 2014: 3625 - 3631.

[13] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真 (第四版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.

(上接第 92 页)

由图 8 可知: T1103 从初始温度 20℃ 开始缓慢上升, 温度到达大约 50℃ 时, 反应剧烈放热, 通过调节冷热水流量使反应器温度以恒定的速率上升, 使反应快速进入升温阶段。在 450 s 左右, 反应器温度上升至 94℃ 时, 通过模糊 PID 参数自整定控制使温度达到稳态值, 平稳进入保温阶段。由图表可见其控制过程误差始终保持在 ±0.07℃。

实验结果表明: 传统 PID 控制在反应完全诱发后, 由于温度的大滞后性, 非线性等特点, 控制器无法根据反馈实时动态调节 PID 参数, 从而导致温度飞升, 在阶跃响应时, PID 控制超调量大, 调节时间长, 因此消耗的水能源大, 热水回收量少, 导致能源利用率低, 控制效果不是很理想。在双模式控制中, 尽管在预热、升温阶段反应器温度与液位具有强耦合性且系统存在滞后性, 但通过冷热水变比例多阀位开度控制器中规则的设定, 在其阶段稳定控制了温度的上升速率, 而保温阶段通过模糊 PID 参数自整定控制实时在线不断调节优化控制参数, 使温度调节更加平稳、精确, 基本无超调, 调节时间更短, 且提高了能源利用率, 弥补了 PID 控制的不足, 改善了控制性能。

### 5 结语

本文采用液位进料比值控制, 并设计了一种基于模糊 PID 控制与冷热水变比例多阀位开度控制相结合的反应器温度控制策略, 通过在 PCS7 上建立控制系统回路和设定控制流程, 运用 SMPT-1000 实验验证并与传统 PID 控制效果进行对比。结果表明了该控制方案的可行性, 不仅动、静态性能优越, 而且提高了能源利用率, 很好的改善了传统 PID 温度控制中存在的非线性、大滞后性、强耦合性等问题, 是一种有效的控制策略。但在实际工业控制过程中, 温度控制会存在多扰动性, 在实验过程也发现虽然温度最后趋于稳定, 但突加扰动的过程中, 温度会较大波动, 所

以还需再对温度的抗扰动性测试进行深入研究并改善控制策略, 但本设计对工业控制中提高能源利用率和控制效果方面具有一定的参考意义。

### 参考文献:

[1] 王捷, 艾红. 基于 SIMATICPCS7 的锅炉控制系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (9).

[2] 任帅, 石励, 慕德俊. 基于 SIEMENS PCS7 的聚丙烯 CSTR 控制策略及仿真研究 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (8): 1104 - 1106.

[3] 吴剑威, 孔慧芳, 唐立新. 智能模糊自适应 PID 在化学反应釜温度控制系统中的应用 [J]. 计算机与应用化学, 2013, 30 (2): 121 - 124.

[4] 蔡恩丰, 石守东. 基于专家—模糊 PID 的通用温度控制系统研究 [J]. 宁波大学学报 (理工版), 2014 (1): 48 - 52.

[5] 邵鹏飞, 曹江涛, 桑红, 等. Fuzzy—PID 复合控制在温室节水灌溉中的应用 [J]. 传感器与微系统, 2016, 35 (8): 144 - 147.

[6] 王鸿磊, 李晓东, 徐平平. 模糊专家与 PID 混合控制的温室高效增温算法研究 [J]. 现代电子技术, 2017, 40 (8): 14 - 18.

[7] 王蕊. 间歇式化学反应器分程控制系统的实现 [J]. 现代化工, 2014, 34 (7): 157 - 158.

[8] 詹攀, 谢守勇, 陈翀. 基于模糊 PID 的烟叶烤房温度控制系统的设计 [J]. 西南师范大学学报 (自然科学版), 2014, 39 (2): 099 - 104.

[9] Zhao X D, Xu S L, Zhou H B. A new strategy for batch reactor's temperature control [J]. Computer Science and Information Engineering, 2009, 5 (3): 56 - 61.

[10] 董哲, 谢龙, 张倩. 基于 PCS7 和 SMPT-1000 的锅炉控制系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2016 (1): 107 - 110.

[11] 叶方威, 薛士龙. 基于 PCS7 的加热炉控制方案设计及实施 [J]. 化工自动化及仪表, 2014 (5): 545 - 549.