

文章编号 1004-924X(2015)01-0141-08

惯性稳定平台自适应前馈控制

朱明超*, 刘 慧, 张 鑫, 贾宏光

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:结合反馈控制提出了一种自适应前馈控制方法来提高惯性稳定平台稳定控制的指令跟踪性能。应用子空间辨识算法,由输入输出数据辨识稳定平台动态模型的状态空间描述;采用频域回路成型方法设计反馈回路控制器,用于抑制外部扰动。应用递推最小二乘(RLS)自适应滤波器构建反馈控制回路逆模型,构造指令信号的全通特性,提高指令跟踪能力。针对不同的指令信号进行跟踪实验,验证了自适应前馈控制方法的有效性。实验结果表明:提出的自适应前馈方法对阶跃指令响应快,超调量可由反馈控制的 30%降低至 4.5%,对 30 Hz 正弦信号的响应幅值无衰减,相位滞后由反馈控制的 90°降低至 54°。得到的结果显著提高了系统的暂态性能,控制性能优于单独的反馈控制回路。

关键词:惯性稳定平台;自适应控制;前馈控制;自适应滤波;子空间辨识

中图分类号:TP273.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152301.0141

Adaptive feed-forward control for inertially stabilized platform

ZHU Ming-chao*, LIU Hui, ZHANG Xin, JIA Hong-guang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: mingchaozhu@gmail.com

Abstract: An adaptive feed-forward control method combining with feedback control was proposed to improve the command tracking performance of control circuit in an inertial stabilized platform. On the basis of subspace system identification, the input-output data were used to identify a state space of the stabilized platform model and the frequency-domain loop shaping technique was used to design the feedback loop controller to reject the external disturbance. Furthermore, a Recursive Least Square (RLS) adaptive filter was taken to build the inverse model of the feedback control loop and to construct the all-pass transfer function for increasing tracking performance. Several tracking experiments were conducted on different command inputs to verify the validity of the adaptive feed-forward controller. Experimental results show that this method responses quickly to step commands and the overshoot has decreased from 30% to 4.5% as compared with that of the feedback control. For a sinusoidal signal at the frequency of 30 Hz, the adaptive feed-forward controller can obtain an amplitude response without attenuation and the phase lag is reduced to 54° from 90° as compared with that of the feedback control. This method significantly improves the transient performance and is superior to the feedback control alone.

收稿日期:2014-02-27;修订日期:2014-05-21.

基金项目:中国科学院知识创新工程国防科技创新重要方向项目(No. YYYJ-1122)

Key words: inertially stabilized platform; adaptive control; feed-forward control; adaptive filter; subspace identification

1 引言

惯性稳定平台是稳定光电传感器光轴指向并控制视线指向期望方位的装置,常应用于舰船、车辆、飞行器、卫星等移动载体以及一些手持设备,在监视侦察、目标跟踪、导弹制导、炮塔控制、激光通信和手持照相等领域具有广泛应用前景^[1-2]。

大多数惯性稳定平台控制系统应用经典的频率域回路成形技术。控制结构以超前滞后或 PID 加克服机械谐振的陷波器为主,扰动的抑制主要靠反馈回路的高增益实现^[3]。不过,在一些宽频带、高精度的稳定和跟踪系统中,采用经典设计方法很难达到设计指标。TI 公司在 20 世纪 90 年代开始应用现代综合方法设计稳定平台控制器。这些方法基于简单的一阶线性随机差分方程实时建模和补偿符号未知、慢变的非线性库伦摩擦,应用线性二次型高斯控制 (Linear Quadratic Gaussian, LQG) 控制算法计算反馈增益,取得了较好的控制性能^[4]。在后续的工作中,又针对稳定系统中的非线性扰动,采用 LQG 和 Kalman 滤波算法对扰动进行实时估计和补偿,并采用自校正控制方法提高 LQG 算法的鲁棒性^[5]。除传统控制方法外,各种先进控制方法如最优控制、前馈控制、神经网络以及模糊控制等也逐渐应用于稳定平台的控制系统^[6-9],这些控制方法的先决条件是获得模型的先验知识。由于传统的控制系统综合方法针对典型参数条件设计固定的控制结构,在设计参数出现摄动的情况下会导致控制性能下降^[10]。最近几年,应用最小均方 (Least-Mean-Square, LMS) 和 RLS 自适应滤波器的自适应控制系统成为较活跃的研究领域^[11-12]。应用自适应控制可以放宽对模型不确定性和参数变化的要求^[13],使机构设计或传感器的选择有更大的自由度,更容易达到尖峰控制性能。

本文将自适应滤波器应用于稳定平台,构成稳定回路的二自由度控制结构,提高了系统的响应频带。综合后的稳定回路的响应近似于小时间常数的滞后环节,有助于提高跟踪回路的带宽并简化跟踪回路的设计。

2 系统描述及模型辨识

2.1 惯性稳定实验平台硬件构成

单自由度惯性稳定实验平台如图 1 所示。主要由绝对式光电编码器、力矩电机、速率陀螺和电滑环等组成。稳定平台控制系统通常是由内稳定回路和外跟踪回路构成的双回路控制系统。稳定回路由稳定平台、陀螺、力矩电机及其驱动器和稳定回路控制器构成;跟踪回路由跟踪器、跟踪回路控制器和稳定回路构成。作为跟踪回路的内回路,稳定回路的性能在一定程度上会影响系统的跟踪性能。因此,稳定回路应具有精度高、快速性好、频带宽、鲁棒性强等特点。

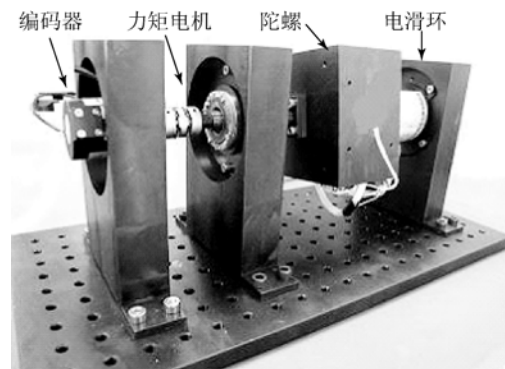


图 1 单自由度惯性稳定实验平台

Fig. 1 Inertially stabilized platform with one DOF

2.2 动态模型辨识

为了得到较精确的过程模型,采用子空间方法^[14]辨识稳定平台的动态模型。假设过程模型由状态空间描述:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k), \end{aligned} \quad (1)$$

将过程输入 $\mathbf{u}(k)$ 构造成 Hankel 矩阵:

$$\mathbf{U}_{0|2i-1} = \begin{bmatrix} u_0 & u_1 & \cdots & u_{j-1} \\ u_1 & u_2 & \cdots & u_j \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{i-1} & u_i & \cdots & u_{i+j-2} \\ u_i & u_{i+1} & \cdots & u_{i+j-1} \\ u_{i+1} & u_{i+2} & \cdots & u_{i+j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{2i-1} & u_{2i} & \cdots & u_{2i+j-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{0|i-1} \\ \mathbf{U}_{i|2i-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_p \\ \mathbf{U}_f \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$$\mathbf{U}_{0|2i-1} = \begin{bmatrix} u_0 & u_1 & \cdots & u_{j-1} \\ u_1 & u_2 & \cdots & u_j \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_i & u_{i+1} & \cdots & u_{i+j-1} \\ u_{i+1} & u_{i+2} & \cdots & u_{i+j} \\ u_{i+2} & u_{i+3} & \cdots & u_{i+j+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{2i-1} & u_{2i} & \cdots & u_{2i+j-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{0|i} \\ \mathbf{U}_{i+1|2i-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_p^+ \\ \mathbf{U}_f^+ \end{bmatrix}. \quad (3)$$

与 Hankel 矩阵行数相关的变量 i 不少于模型阶次的平方。采用同样的方法定义输出 $\mathbf{y}(k)$ 的 Hankel 矩阵 $\mathbf{Y}_{0|2i-1}$ 、 \mathbf{Y}_p 、 \mathbf{Y}_f 、 \mathbf{Y}_p^+ 和 \mathbf{Y}_f^+ , 并构造包含输入输出的 Hankel 矩阵:

$$\mathbf{W}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_p \\ \mathbf{Y}_p \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{W}_p^+ = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_p^+ \\ \mathbf{Y}_p^+ \end{bmatrix}. \quad (5)$$

定义状态矩阵:

$$\mathbf{X}_i = [x_i \quad x_{i+1} \quad \cdots \quad x_{i+j-1}], \quad (6)$$

$$\mathbf{X}_p = \mathbf{X}_0, \quad (7)$$

$$\mathbf{X}_f = \mathbf{X}_i, \quad (8)$$

输入输出方程可以描述为:

$$\mathbf{Y}_p = \mathbf{\Gamma}_i \mathbf{X}_p + \mathbf{H}_i \mathbf{U}_p, \quad (9)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.7998 & 0.1743 & 0.2615 & 0.0206 & -0.0166 \\ -0.2017 & 0.9698 & -0.1248 & -0.0510 & 0.0038 \\ -0.4541 & -0.0994 & 0.4122 & -0.5327 & 0.0299 \\ 0.0347 & 0.0828 & 0.5709 & -0.0331 & 0.2898 \\ -0.0305 & -0.0074 & -0.0094 & 0.2068 & 0.9284 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = [0.0016 \quad 0.0002 \quad 0.0018 \quad -0.0009 \quad 0.0002]^T,$$

$$\mathbf{Y}_f = \mathbf{\Gamma}_i \mathbf{X}_f + \mathbf{H}_i \mathbf{U}_f, \quad (10)$$

$$\mathbf{X}_f = \mathbf{A}^i \mathbf{X}_p + \mathbf{\Delta}_i \mathbf{U}_p, \quad (11)$$

其中: $\mathbf{\Gamma}_i$ 为可观测性矩阵, $\mathbf{\Delta}_i$ 为逆排列的可控性矩阵, \mathbf{H}_i 为下三角 Toeplitz 矩阵, 定义为:

$$\mathbf{H}_i = \begin{bmatrix} D & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{CB} & D & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{CAB} & \mathbf{CB} & D & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{CA}^{i-2} \mathbf{B} & \mathbf{CA}^{i-3} \mathbf{B} & \mathbf{CA}^{i-4} \mathbf{B} & \cdots & D \end{bmatrix}. \quad (12)$$

计算 \mathbf{Y}_f 沿 \mathbf{U}_f 在 \mathbf{W}_p 的斜投影矩阵:

$$\mathbf{\Xi}_i = \mathbf{Y}_f / \mathbf{U}_f \mathbf{W}_p. \quad (14)$$

将其进行奇异值分解可得:

$$\mathbf{\Xi}_i = [\mathbf{U}_1 \quad \mathbf{U}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_2^T \end{bmatrix} = \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1 \mathbf{V}_1^T. \quad (15)$$

式(15)中非零奇异值矩阵 \mathbf{S}_1 的阶次即为过程模型的阶次, 由于测量噪声和过程噪声的影响, 忽略较小的奇异值而将较大奇异值矩阵的阶次作为过程模型的阶次。

由于式(15)满足:

$$\mathbf{\Xi}_i = \mathbf{\Gamma}_i \mathbf{X}_f, \quad (16)$$

应用奇异值向量可以计算:

$$\mathbf{\Gamma}_i = \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1^{1/2}, \quad (17)$$

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{\Gamma}_i^+ \mathbf{\Xi}_i. \quad (18)$$

采用类似的方式计算可得:

$$\mathbf{\Xi}_{i-1} = \mathbf{Y}_f^- / \mathbf{U}_f^- \mathbf{W}_p^+ = \mathbf{\Gamma}_{i-1} \mathbf{X}_{i+1}, \quad (19)$$

$$\mathbf{X}_{i+1} = \mathbf{\Gamma}_{i-1}^+ \mathbf{\Xi}_{i-1}. \quad (20)$$

过程的状态空间描述可由下列方程求解:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_{i+1} \\ \mathbf{Y}_{i|i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_i \\ \mathbf{U}_{i|i} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

应用上述计算过程和周期为 1 ms 的限带白噪声过程激励以及平台的响应数据, 可计算单轴惯性稳定实验平台动态模型的状态空间描述:

$$C = [-84.622 \quad -310.35 \quad 109.74 \quad -6.5609 \quad -84.008],$$

$$D = 0.$$

稳定平台和辨识模型对随机激励的响应如图 2 所示。辨识模型能较好地反应稳定平台的动态响应,并可作为反馈回路控制器设计的依据。

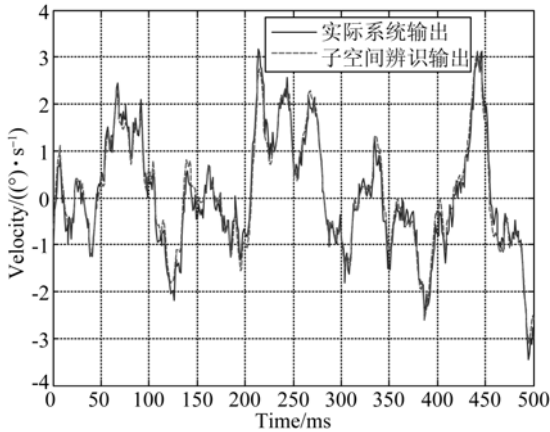


图 2 过程和模型对随机激励的响应

Fig. 2 Response of process and model to random excitation

3 反馈控制设计

稳定回路控制器可以应用 H_2 、 H_∞ 和模糊控制等常见的综合方法设计,针对外部扰动可以应用前馈补偿或者扰动观测的方式^[15]提高稳定性。为重点说明前馈控制设计,反馈控制回路采用经典频域回路成型方法设计而忽略提高稳定性的其它措施。简化的反馈控制回路结构如图 3 所示。

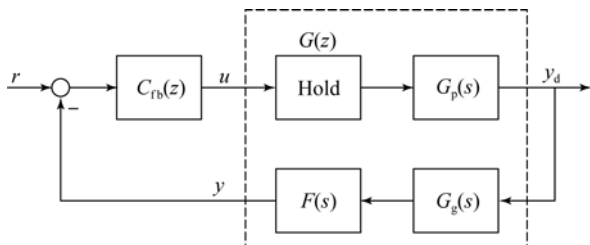


图 3 反馈控制回路结构框图

Fig. 3 Diagram for feedback control loop

$G_p(s)$ 为被控对象传递函数, $G_g(s)$ 为陀螺传递函数, $F(s)$ 为抗混叠滤波器传递函数, $C_{fb}(z)$ 为控制器脉冲传递函数, $G(z)$ 为包括保持器、被控对象、传感器、抗混叠滤波器的广义对象脉冲传递

函数。由辨识数据可计算广义对象脉冲传递函数为:

$$G(z) = C(zI - A)^{-1}B + D. \quad (22)$$

其频率特性如图 4 所示。

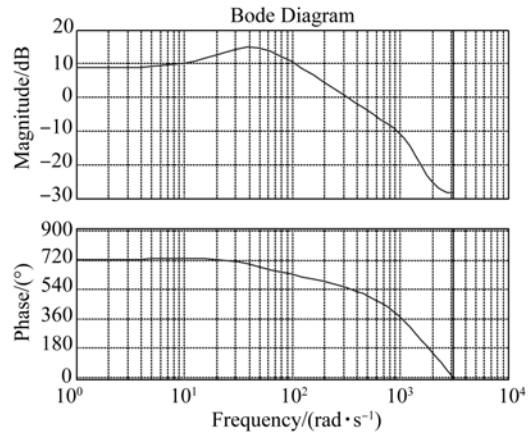


图 4 广义对象频率特性

Fig. 4 Frequency response of generalized plant

频域回路成型控制器设计为:

$$C_{fb}(z) = \frac{0.273(z-0.958)(z-0.958)}{(z-1)(z-0.965)}. \quad (23)$$

被控对象经回路成型设计后得到的开环频率特性如图 5 所示,系统增益裕度为 11.3 dB,相位裕度为 65.7°,剪切频率为 99.1 rad/s。设计结果表明,系统对模型不确定性有较好的鲁棒性,可以响应指令的快速变化。

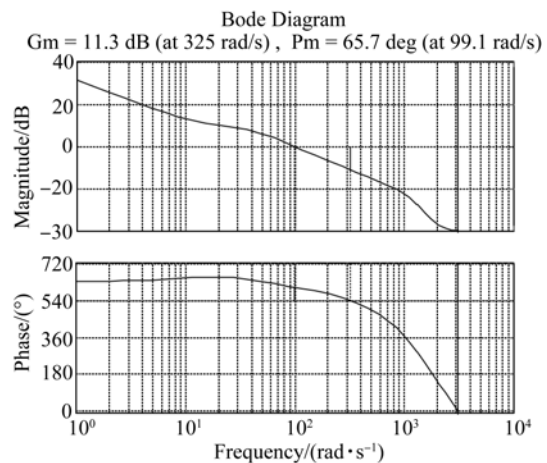


图 5 系统开环频率特性

Fig. 5 System open loop frequency response

4 自适应前馈控制

自适应前馈控制的结构框图如图 6 所示。其中, $C_{ff}(z)$ 为有限冲击响应滤波器实现的前馈补偿器, z^{-m} 为保证反馈控制回路具有 Shannon-Bode 逆解的延迟环节。算法通过自适应滤波器在线建模反馈控制回路的逆模型 $C_{ff}(z)$, 形成反馈控制回路的前馈指令。理想情况下, 指令 r 到输出 y 具有全通特性, 自适应前馈控制与反馈控制回路构成 2 自由度控制结构。

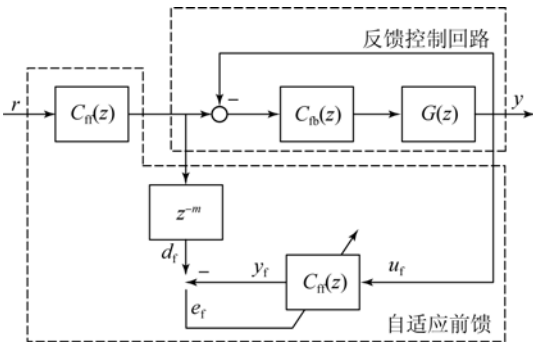


图 6 自适应前馈控制结构框图

Fig. 6 Diagram for adaptive feed-forward control

$C_{ff}(z)$ 权值的更新采用 RLS 算法, 假设滤波器的输入序列为 u_f , 输出序列为 y_f , 期望响应序列为 d_f , e_f 为期望响应与滤波器输出之差。RLS 滤波器的矩阵形式^[16]描述如下:

$$y_f(n) = w_f^T(n-1) u_f(n). \quad (24)$$

$$e_f(n) = d_f(n) - y_f(n). \quad (25)$$

$$k_f(n) = \frac{\lambda^{-1} P_f(n-1) u_f^T(n)}{1 + \lambda^{-1} u_f^T(n) P_f(n-1) u_f(n)}. \quad (26)$$

$$w_f(n) = w_f(n-1) + k_f^T(n) e_f(n). \quad (27)$$

$$P_f(n) = \lambda^{-1} P_f(n-1) - \lambda^{-1} k_f(n) u_f^T(n) P_f(n-1), \quad (28)$$

其中: n 为时间索引, w_f 为时变抽头权值, P_f 为递推 RLS 算法 Riccati 方程的解, k_f 为权值更新增益。图 7 所示为 M 阶自适应 RLS 滤波器的结构。

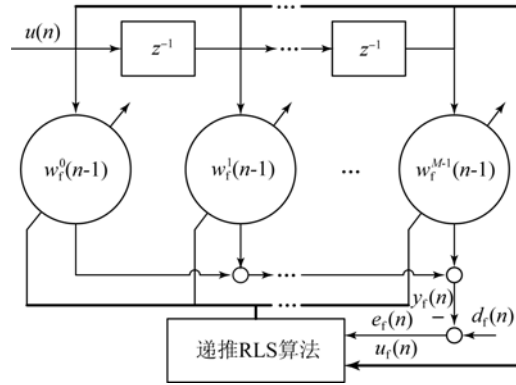


图 7 自适应 RLS 滤波器结构框图

Fig. 7 Diagram for adaptive RLS filter

5 实验结果

为了验证自适应前馈控制算法的有效性, 进行如图 8 所示的实验。实验系统由工控机, 串行通讯卡, DAQ 数据采集卡, 力矩电机驱动器以及单自由度惯性稳定实验平台等组成。实验平台由力矩电机驱动, 驱动器设置为力矩模式, 惯性空间速度由内置抗混叠滤波器的陀螺测量并发送至串行通讯卡。

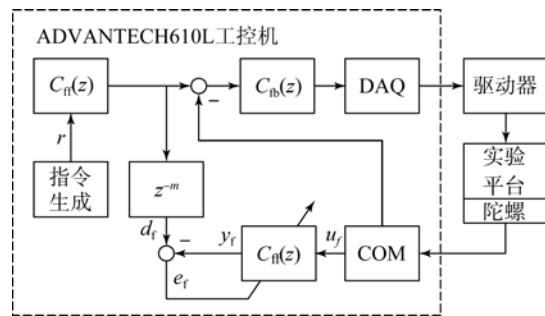


图 8 实验系统原理框图

Fig. 8 Diagram for tracking experiments

所有的计算环节包括指令生成、反馈控制器、自适应前馈控制器等, 均由工控机实时计算, 并将控制指令发送到 DAQ 数据采集卡输出给力矩电机驱动器。作为跟踪回路的内回路, 通常要求稳定控制回路的超调量不大于 10%, 并且在跟踪回路的剪切频率处有尽可能小的相位滞后以提高系统的稳定裕度。实验过程中, 指令生成模块生成方波指令信号、高斯随机指令信号和高频正弦指令信号分别测试算法对低频和低频指令的响应; 反馈控制器应用式(23), 延迟环节参数 m 设置为

5,自适应 RLS 滤波器阶次设置为 48,遗忘因子设置为 1,初始抽头权值 $w_f(0)$ 设置为各元素为 0.01 的 48 维行向量, $P_f(0)$ 设置为对角元素为 0.1 的 48 阶方阵。实验结果如图 9~12 所示。可见,自适应前馈控制在 RLS 算法收敛之前 200 ms 会对系统产生一定的冲击,收敛之后对方波和高斯随机指令信号响应快速,超调量为 4.5%,由于反馈控制回路为 I 型系统,自适应前馈控制对阶跃指令不存在稳态误差。由图 11~12 可见,RLS 算法收敛后自适应前馈控制对高频正弦指令响应较好,由于自适应作用,系统响应与跟踪指令相比延迟 m 个控制周期,与理论结果完全相符,对 30 Hz 正弦指令的响应滞后 54° ,幅值与指令一致。

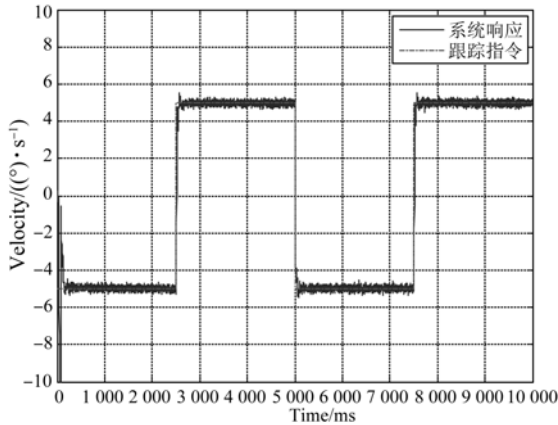


图 9 自适应前馈方波跟踪指令和系统响应
Fig. 9 Command and response of square signal for adaptive feed-forward control

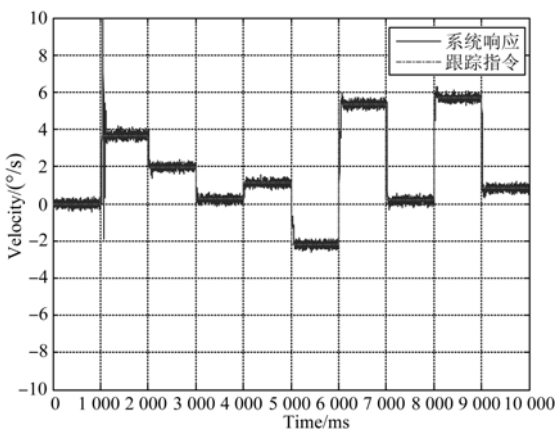


图 10 自适应前馈高斯随机跟踪指令和系统响应
Fig. 10 Command and response of Gauss random signal for adaptive feed-forward control

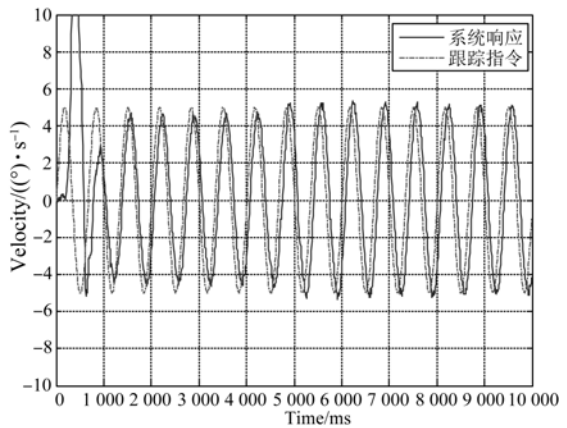


图 11 自适应前馈 15 Hz 正弦跟踪指令和系统响应
Fig. 11 Command and response of 15 Hz sine signal for adaptive feed-forward control

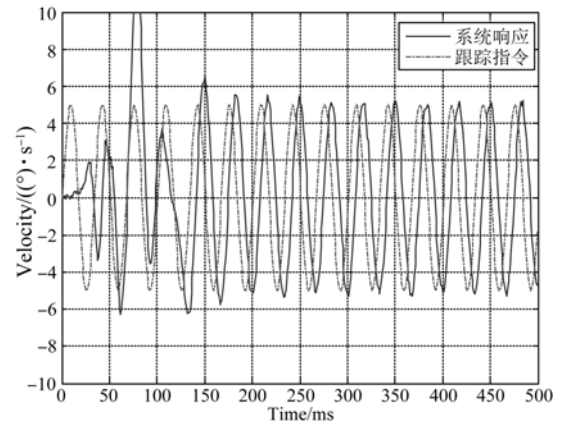


图 12 自适应前馈 30 Hz 正弦跟踪指令和系统响应
Fig. 12 Command and response of 30 Hz sine signal for adaptive feed-forward control

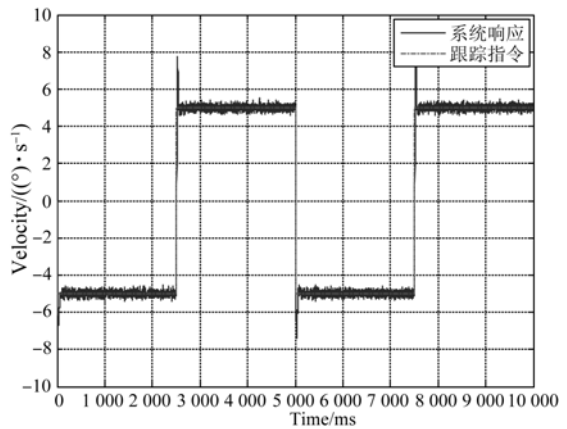


图 13 反馈控制方波跟踪指令和系统响应
Fig. 13 Command and response of square signal for feedback control

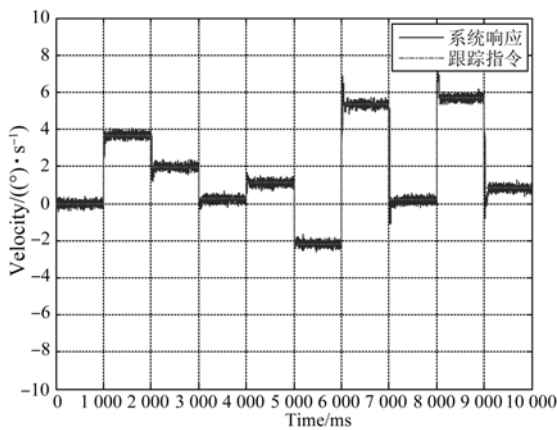


图 14 反馈控制高斯随机跟踪指令和系统响应

Fig. 14 Command and response of Gauss random signal for feedback control

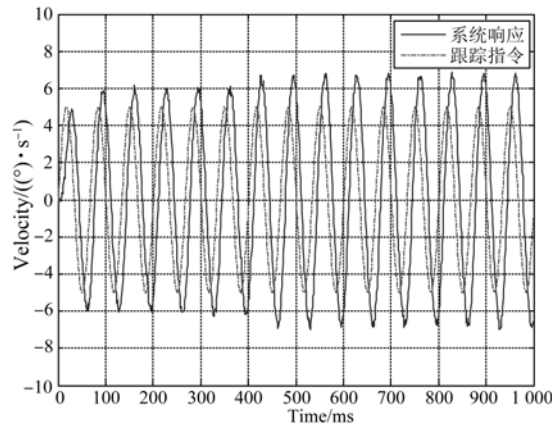


图 15 反馈控制 15 Hz 正弦跟踪指令和系统响应

Fig. 15 Command and response of 15 Hz sine signal for feedback control

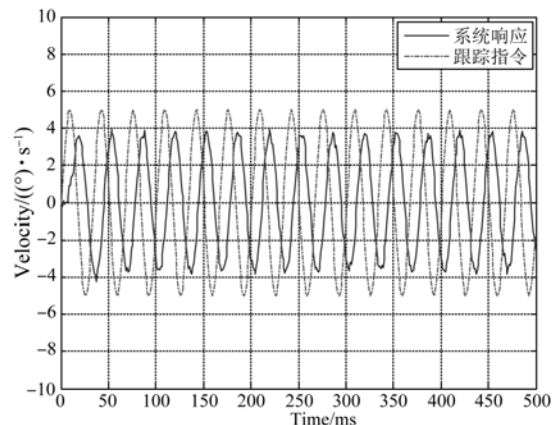


图 16 反馈控制 30 Hz 正弦跟踪指令和系统响应

Fig. 16 Command and response of 30 Hz sine signal for feedback control

参考文献:

[1] HILKERT J M. Inertially stabilized platform technology concepts and principles [J]. *IEEE Contr. Syst. Mag.*, 2008, 28 (1): 26-46.

与自适应前馈控制相对比,单独反馈控制回路对相同指令信号的实验结果如图 13~16 所示。

由图 13~14 可见,反馈控制对方波和高斯随机指令的响应快速无静差,但约有 30% 的超调。由图 15~16 可见,与自适应前馈控制相比,单独采用反馈控制对高频正弦信号的响应不佳,幅值和相位变化较为明显,对 30 Hz 正弦指令的响应滞后 90°,幅值衰减 -2.85 dB,说明反馈回路的跟踪带宽约为 30 Hz,对超过此频率指令信号的响应会严重衰减。实验结果表明,自适应前馈控制与单独反馈控制回路相比,具有更好的控制性能,其幅频特性近似全通,相频特性与滞后 m 个采样周期的纯延迟环节近似,应用此特性可以提高外跟踪回路的带宽并简化系统的设计。

6 结 论

提出了一种基于自适应滤波器的惯性稳定平台自适应前馈控制方法。控制系统由反馈控制回路和自适应滤波器构成 2 自由度控制结构。反馈控制回路主要用于扰动的抑制;前馈控制应用递推 RLS 算法在线更新抽头滤波器权值,使自适应滤波器近似于反馈回路的逆,形成指令到输出的全通特性,提高了系统的响应频带。对不同指令信号的跟踪实验结果验证了算法的有效性。实验结果表明,自适应前馈控制对阶跃指令响应快速,超调量降低至 4.5%,对 30 Hz 正弦信号的响应幅值无衰减,相位滞后降低至 54°,暂态响应优于单独的反馈控制回路。

[2] 刘廷霞,王伟国,陈长青. 车载动平台位置干扰的传递解算 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21 (9): 2287-2293.
LIU T X, WANG W G, CHEN CH Q. Transferrable arithmetics of position-disturbing value for ve-

- hicular dynamic platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (9): 2287-2293. (in Chinese)
- [3] MASTENM K. Inertially stabilized platforms for optical imaging systems [J]. *IEEE Contr. Syst. Mag.*, 2008, 28 (1): 47-64.
- [4] LI B, HULLENDER D, DIRENZO M. Nonlinear induced disturbance rejection in inertial stabilization systems [J]. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 1998, 6 (3): 421-427.
- [5] LI B, HULLENDER D. Self-Tuning controller for nonlinear inertial stabilization systems [J]. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 1998, 6 (3): 428-434.
- [6] MOORTY J A R K, SULE V R. H_∞ control law for line-of-sight stabilization for mobile land vehicles [J]. *Opt. Eng.*, 2002, 41 (11): 2935-2944.
- [7] ABDO M M, VALI A R, TOLOEI A R, et al.. Stabilization loop of a two axes gimbal system using self-tuning PID type fuzzy controller [J]. *ISA Trans.*, 2014, 53(2):591-602.
- [8] 孔德杰, 戴明, 程志峰, 等. 动基座光电稳定平台伺服系统中加速度反馈的实现 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20 (8): 1782-1788.
KONG D J, DAI M, CHENG ZH F, et al.. Realization of acceleration feedback for servo system of moving base optoelectronic platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20 (8): 1782-1788. (in Chinese)
- [9] LIN C L, HSIAO Y H. Adaptive feedforward control for disturbance torque rejection in seeker stabilizing loop [J]. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2001, 9 (1): 108-121.
- [10] HILKERT J M. Adaptive control system techniques applied to inertial stabilization systems [C]. *Proceedings of SPIE Acquisition, Tracking, and Pointing IV*, 1990, 1304: 190-206.
- [11] AIRIMITOAI T B, SILVA A C, LANDAU I D. Indirect adaptive regulation strategy for the attenuation of time varying narrow-band disturbances applied to a benchmark problem [J]. *Eur. J. Control*, 2013, 19 (4): 313-325.
- [12] CHEN X, TOMIZUKA M. Selective model inversion and adaptive disturbance observer for time-varying vibration rejection on an active-suspension benchmark [J]. *Eur. J. Control*, 2013, 19 (4): 300-312.
- [13] 白瑜亮, 崔乃刚, 吕世良. 水下运载器纵向轨迹自适应跟踪控制 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21 (7): 1719-1726.
BAI Y L, CUI N G, LU SH L. Adaptive tracking control of longitudinal trajectory for underwater vehicle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (7): 1719-1726. (in Chinese)
- [14] OVERSCHEE B D, MOOR B D. *Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation, Applications* [M]. Boston/London/Dordrecht: Kluwer academic publishers, 1996.
- [15] 张艳, 张淑梅, 乔彦峰. 基于舰载光电设备参考模型扰动估计的前馈控制 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21 (5): 1213-1221.
ZHANG Y, ZHANG SH M, QIAO Y F. Feed-forward control based on reference model disturbance observer of carrier-based optoelectronic theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (5): 1213-1221. (in Chinese)
- [16] HAYKINS. *Adaptive Filter Theory (4th Edition)* [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

作者简介:



朱明超(1980—), 男, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 主要从事惯性稳定平台运动学、动力学与控制方面的研究。E-mail: mingchaozhu@gmail.com



贾宏光(1971—), 男, 吉林长春人, 工学博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事精确制导控制技术、微机电一体化技术方面的研究。E-mail: jiahg@ciomp.ac.cn