

改进的导弹半实物仿真跟踪微分器设计*

明超¹, 孙瑞胜¹, 白宏阳¹, 祝刚²

(1. 南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏南京 210094;

2. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川绵阳 621900)

摘要:为了抑制三轴转台输出信号存在相位延迟和噪声对导弹半实物仿真系统性能的影响,研究并设计了一种改进的跟踪微分器进行相位补偿和滤波。基于传统跟踪微分器的工作原理,设计三轴转台输出信号跟踪的基本结构,分析其在输入信号存在噪声时,由于经过传统的跟踪微分器获取微分信号使得噪声强度放大,致使跟踪信号存在振荡的现象。在此基础上,提出一种将微分跟踪器产生的微分信号再串联一个跟踪微分器的相位超前补偿器设计方法,以滤除由于输入信号噪声引起的信号污染,进而消除输出信号的振荡问题。以某导弹半实物仿真系统三轴转台输出信号存在相位延迟和噪声的现象为算例,通过与超前校正方法对比研究,进行了系统仿真验证。仿真结果表明,改进相位超前补偿器能有效地提取姿态角速度信号,具有良好的滤波和相位超前补偿性能,进而证明了其在导弹半实物仿真试验应用的正确性和有效性。

关键词:跟踪微分器;三轴转台;半实物仿真;相位延迟和噪声;相位超前补偿器

中图分类号:TJ761.6; V412.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)05-068-06

Modified tracking differentiator design for missile in hardware-in-loop simulation system

MING Chao¹, SUN Ruisheng¹, BAI Hongyang¹, ZHU Gang²

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Institute of Electronic Engineering, China Academy Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to inhibit the influence of the output signals of three-axis simulator exhibited the phase delays and noise on the performance of missile's hardware-in-loop simulation system, a modified tracking differentiator which was used to filter and phase advance was analyzed and designed. Based on the principle of traditional tracking differentiator, the basic structure of tracking the output signals of three-axis simulator was designed. Due to the differential signal obtained from the tracking differentiator trembles existed noise, the vibration phenomenon of the output signals was analyzed. On this basis, a design method that the differential signal cascaded another tracking differentiator was proposed to filter the signal pollution and output signals noise. Finally, as the examples of one missile's hardware-in-loop simulation system which were the output signals of three-axis simulator exhibited the phase delays and noise, the performance of the system was verified by comparing with the lead correction method. Simulation results show that the attitude angular velocity can be extracted by the modified phase advancer efficiently, and the modified phase advancer possesses excellent filter and phase advanced performance, which prove the correctness and validity of the modified phase advancer in the hardware-in-loop simulation system for missile.

Key words: tracking differentiator; three-axis simulator; hardware-in-loop simulation; phase delays and noise; phase advancer

导弹半实物仿真是一种将研究对象的数学模型与物理(实物)模型相结合进行的综合模拟的实验技术,是地面仿真技术中置信度较高的一种研究手段^[1-2]。三轴转台用于精确模拟导弹在空中的飞行姿态,其模拟精度直接影响导弹飞行控制系统参数的设计和整定,也关系到仿真试验的可靠性和置信度,是导弹飞行控制半实物仿真系

统中一个关键运动环境模拟设备^[3]。但是在实践过程中,由于转台的台体及其控制器的老化,使得转台跟踪性能和跟踪精度有所下降^[4],也就是说,转台输出信号相对导弹的姿态真值出现相位滞后和信噪比下降的现象。这些误差将通过半实物仿真进入导弹飞行控制回路,进而影响了导弹控制系统的优化设计,降低了仿真的效果和置信

* 收稿日期:2016-05-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11176012)

作者简介:明超(1989—),男,辽宁朝阳人,博士研究生,E-mail:nust802mc@126.com;

孙瑞胜(通信作者),男,副教授,博士,博士生导师,E-mail:srscom@163.com

度。所以,研究具有滤波和相位补偿功能的补偿算法,对进一步提高半实物仿真系统性能具有重要意义。

传统处理相位滞后问题的手段就是在系统的响应回路上加入超前校正网络环节(Advanced Correction Network, ACN),补偿输出信号延迟对仿真系统的影响^[5]。其结构简单,便于实现。为此,在控制领域得到了广泛的应用^[6-8]。文献[6]采用超前校正网络解决了飞机高度稳定系统的高空振荡的关键技术问题,文献[7]对磁悬浮系统进行了相位超前校正网络设计,文献[8]利用综合法设计了导弹的姿态控制系统的校正网络。但是,由于增加了系统的带宽,会影响系统的抗干扰能力,从而进一步降低系统的稳定裕度。

跟踪微分器^[9](Tracking Differentiator, TD)可以得到输入信号的微分信号,实现对输入信号的超前校正。在现代控制^[10-11]、零点配置^[12]、系统辨识^[13]、最优控制^[14]、信号滤波^[15]和信号相位补偿^[16-17]等领域得到了广泛的关注。韩京清等^[16]提出了基于TD的相位超前补偿设计方法,在此基础上,弭寒光等^[17]采用TD对独立电源系统有源滤波器谐波信号进行了超前校正。但是采用上述的设计方法在处理污染的滞后信号时,跟踪微分器输出的微分信号会出现一定的震颤,采用此信号进行相位超前,会使得输出信号存在振荡问题。

为此,本文在文献[16-17]的基础上,利用跟踪微分器的滤波和微分信号提取原理,提出一种基于跟踪微分器的改进相位超前补偿器(Modified Phase Advancer, MPA)的设计方法。

1 问题描述

导弹半实物仿真系统的姿态回路结构如图1所示。

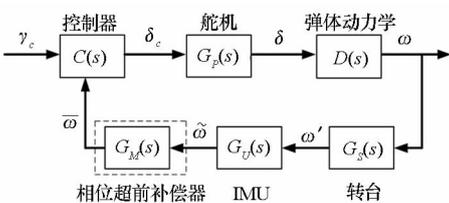


图1 导弹半实物仿真系统姿态回路结构图
Fig.1 Construction of missile's attitude loop hardware-in-loop simulation system

图中, $C(s)$ 为飞行控制系统控制器; $G_p(s)$ 为舵机动力学模型; $D(s)$ 为导弹弹体动力学环节; $G_U(s)$ 为惯性测量元件(Inertial Measurement

Unit, IMU)动态模型; $G_M(s)$ 为相位超前补偿器环节; $\tilde{\omega}$ 为IMU测量的角速度值; $\bar{\omega}$ 为角速度 $\tilde{\omega}$ 经过 $G_M(s)$ 环节后的角速度值; δ_c, δ 分别为舵偏角指令和实际舵偏角; $G_S(s)$ 为三轴转台的动力学模型。俯仰角速度 ω 经过 $G_S(s)$ 环节的输角速度 ω' 为^[18]:

$$\omega' = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \omega + \frac{T_s \text{sign}(\omega')/J}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

式中, ξ 为阻尼比, ω_n 为无阻尼自然频率, J 为转台的转动惯量, T_s 为静摩擦力矩。

式(1)是由对输入 ω 的响应和对 T_s 的响应两部分组成。第一部分为一个二阶振荡环节,则经过转台后的角速度 ω' 相比于角速度 ω 会出现相位延迟。而对 T_s 的响应是正负穿越函数。当 ω' 比较小且 $\omega' \leq 0$ 时,角速度 ω' 的存在会使得系统整个仿真系统的稳定裕度降低,或出现低速自激振荡,甚至使得整个系统发散,致使仿真试验失败。

2 跟踪微分器

2.1 跟踪微分器

跟踪微分器的一般形式^[9]为:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\omega}}_1(t) = \tilde{\omega}_2(t) \\ \dot{\tilde{\omega}}_2(t) = R^2 f(\tilde{\omega}_1(t) - \tilde{\omega}(t), \tilde{\omega}_2(t)/R) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $f(\cdot)$ 为非线性函数, R 为常量。跟踪微分器的结构图如图2所示。

对于任意有界可积的 $\tilde{\omega}(t)$ 和 $T > 0, R > 0$,方程(2)的解满足^[19]:

$$\begin{cases} \lim_{R \rightarrow \infty} \int_0^T |\tilde{\omega}_1(t) - \tilde{\omega}(t)| dt = 0 \\ \lim_{R \rightarrow \infty} \int_0^T |\tilde{\omega}_2(t) - \dot{\tilde{\omega}}(t)| dt = 0 \end{cases} \quad (3)$$

状态量 $\tilde{\omega}_1(t)$ 收敛于输入角速度信号 $\tilde{\omega}(t)$,

$\tilde{\omega}_2(t)$ 收敛于角速度的微分信号 $\dot{\tilde{\omega}}(t)$ 。也就是说,对于给定的输入角速度信号 $\tilde{\omega}(t)$,跟踪微分器可实现对信号 $\tilde{\omega}(t)$ 及其微分信号 $\dot{\tilde{\omega}}(t)$ 的提取,即:

$$\begin{cases} \tilde{\omega}_1(t) \rightarrow \tilde{\omega}(t) \\ \tilde{\omega}_2(t) \rightarrow \dot{\tilde{\omega}}(t) \end{cases} \quad (4)$$

2.2 相位补偿器

根据跟踪微分器可提取输入信号的微分信号的特点,可采用基于跟踪微分器的相位补偿器^[16](Phase Advancer, PA)对输入信号进行相位超前,其原理为:对于给定的输入角速度信号 $\tilde{\omega}(t)$ 通过

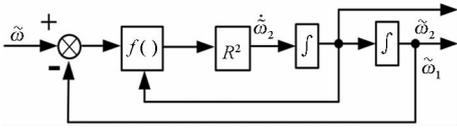


图 2 跟踪微分器的结构图

Fig. 2 Construction of tracking differentiator

微分跟踪器输出跟踪信号 $\tilde{\omega}_1(t)$ 和微分信号 $\tilde{\omega}_2(t)$ ，并将微分信号 $\tilde{\omega}_2(t)$ 向前预报 λ 时间，可得到相位超前后的输出角速度信号 $\bar{\omega}(t)$ ，其实现相位超前的原理如图 3 所示，算法的离散形式表示如下：

$$\begin{cases} fh = fhan(\tilde{\omega}_1(k) - \tilde{\omega}(t), \tilde{\omega}_2(k), r, h_1) \\ \tilde{\omega}_1(k+1) = \tilde{\omega}_1(k) + h\tilde{\omega}_2(k) \\ \tilde{\omega}_2(k+1) = \tilde{\omega}_2(k) + hf \\ \bar{\omega}(k+1) = [\tilde{\omega}_1(k) + \lambda h_1 \tilde{\omega}_2(k)]/\gamma \end{cases} \quad (5)$$

式中： h 为积分步长； r, h_1 分别为跟踪微分器的速度因子和滤波因子； λ 为向前预报时间参数； γ 为相位超前补偿器参数； $fhan(\cdot)$ 为最速控制综合函数，其调用方式 $fhan(x_1, x_2, r, h)$ 如下：

$$\begin{cases} d = rh^2 \\ a_0 = hx_2 \\ y = x_1 + a_0 \\ a_1 = \sqrt{d^2 + 8d|y|} \\ a_2 = a_0 + \text{sign}(y)(a_1 - 2)/2 \\ a = (a_0 + y)f(y, d) + a_2(1 - f(y, d)) \\ f = [\text{sign}(x + d) - \text{sign}(x - d)]/2 \\ fhan = -r(a/d)f(a, d) - r\text{sign}(a)(1 - f(a, d)) \end{cases} \quad (6)$$

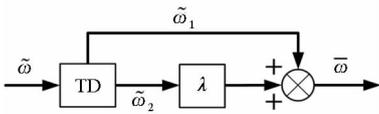


图 3 相位超前原理图

Fig. 3 Schematic diagram of phase advancer

利用 PA 可实现对输入角速度信号的跟踪及相位超前，但是当输入信号受到噪声污染时，输入信号经过跟踪微分器后的微分信号 $\tilde{\omega}_2(t)$ 会存在一定的震颤^[20]，从而导致利用微分信号 $\tilde{\omega}_2(t)$ 向前预报 λ 时间后的跟踪信号 $\bar{\omega}(t)$ 会受到污染。

2.3 改进的相位超前补偿器

2.3.1 工作原理

为解决 PA 相位超前后的跟踪信号的振荡问题，本文提出了一种基于跟踪微分器改进的相位超前补偿器，其原理为：在 PA 的基础上，将微分

跟踪器产生的微分信号 $\tilde{\omega}_2(t)$ ，再次通过另一个微分跟踪器，得到 $\tilde{\omega}_2(t)$ 滤波后的微分信号 $\tilde{\omega}_{21}(t)$ ，并将跟踪信号 $\tilde{\omega}_{21}(t)$ 向前预报 λ 时间，最终得到相位超前后的输出信号 $\bar{\omega}(t)$ 。这样通过对微分信号 $\tilde{\omega}_2(t)$ 的滤波来消除输出角速度信号 $\bar{\omega}(t)$ 的振荡问题。MPA 实现相位超前的方式如图 4 所示，其具体算法表示如下：

$$\begin{cases} fh_0 = fhan(\tilde{\omega}_1(k) - \tilde{\omega}(t), \tilde{\omega}_2(k), r, h_1) \\ \tilde{\omega}_1(k+1) = \tilde{\omega}_1(k) + h\tilde{\omega}_2(k) \\ \tilde{\omega}_2(k+1) = \tilde{\omega}_2(k) + hf \\ fh_1 = fhan(\tilde{\omega}_{21}(k) - \tilde{\omega}_2(t), \tilde{\omega}_{22}(k), r, h_1) \\ \tilde{\omega}_{21}(k+1) = \tilde{\omega}_{21}(k) + h\tilde{\omega}_{22}(k) \\ \tilde{\omega}_{22}(k+1) = \tilde{\omega}_{22}(k) + hf_1 \\ \bar{\omega}(k+1) = [\tilde{\omega}_1(k) + \lambda h_1 \tilde{\omega}_{21}(k)]/\gamma \end{cases} \quad (7)$$

式中， $\tilde{\omega}_{21}$ 为微分信号 $\tilde{\omega}_2$ 的跟踪信号， $\tilde{\omega}_{22}$ 为微分信号 $\tilde{\omega}_2$ 的微分信号。

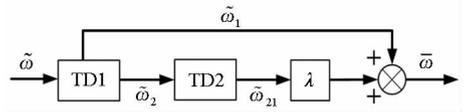


图 4 改进的相位超前原理图

Fig. 4 Schematic diagram of modified phase advancer

2.3.2 参数设计

根据前文对 MPA 的介绍，MPA 中含有 h, h_1, r, λ 和 γ 5 个参数。其中， h 是 MPA 工作的积分补偿； h_1 对噪声起滤波作用，可调参数 r 决定跟踪速度； λ 和 γ 可对输出信号 $\bar{\omega}(t)$ 的相位和幅值进行调节，参数对系统的影响特性及选取原则如下：

1) 积分步长 h 。根据计算精度的要求适当选取，减小积分步长有利于抑制噪声放大，一般 $h = 0.001$ 。

2) 滤波因子 h_1 。满足 $h_1 = nh$ ($n \geq 1$)， n 可根据系统输入信号被噪声的污染程度选取，增加 n 是增强滤波效果的有效手段，但是由此产生的滞后就越大，一般在 $1 \leq n \leq 10$ 范围内取值。

3) 速度因子 r 。速度因子 r 表征跟踪的快慢程度， r 越大，越快到达稳态值，但是输出信号中混杂的噪声越大。通常取为 $r = 0.000 1/h^2$ ，可根据系统的承受能力来适当调整参数。

4) 向前预报时间参数 λ 。参数 λ 减小，超前的相位就会减小，并且输入信号需超前的时间为 Δt 与参数 λ 满足 $\Delta t = \lambda h_1$ 。

5) 相位超前补偿器参数 γ 。参数 γ 对系统的输出信号的幅值有一定的影响。 γ 通常取为 $\gamma > 1$ ，

其具体值可根据相位超前后的信号与输入信号之间的幅值关系确定。

3 试验结果与分析

3.1 仿真算例1

为验证提出的MPA在对输入信号相位超前及滤波方面的性能,将MPA分别与PA和ACN进行对比仿真。

ACN的传递函数为:

$$G_{ACN}(s) = \frac{\alpha_1 T_1 s + 1}{T_1 s + 1} \quad (8)$$

设被噪声污染的仿真输入角速度信号 $\tilde{\omega}(t) = 4\sin(t) + 0.01n(t)$, $n(t)$ 为 $[-1, 1]$ 上均匀分布的白噪声。PA与MPA的参数: $r = 100$, $h = 0.001$, $h_1 = 5h$, $\lambda = 10$, $\gamma = 1.2$; ACN的参数: $\alpha_1 = 1.5$, $T_1 = 0.1$ 。仿真结果如图5~6所示。

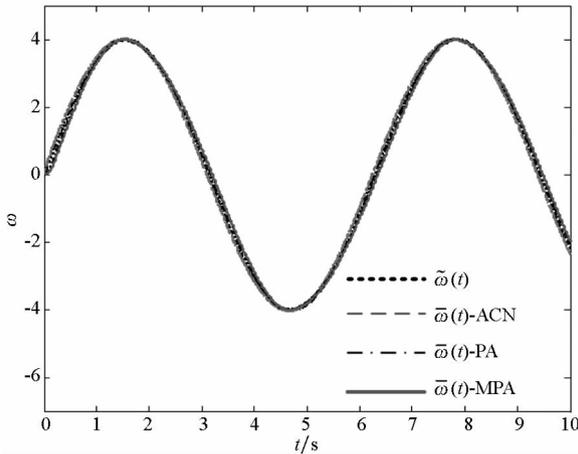


图5 跟踪信号对比曲线

Fig.5 Curves of tracking signal

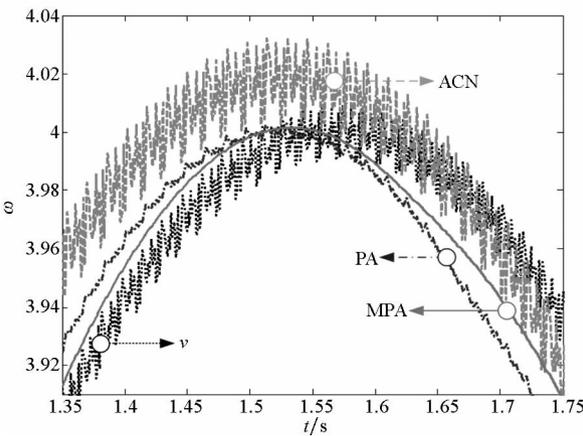


图6 跟踪信号对比曲线(局部放大)

Fig.6 Curves of tracking signal (Enlarged)

为评价输出信号的质量,引入文献[21]的超前因子为:

$$Q = \sum_{k=1}^N [\dot{\tilde{\omega}}(k) - \dot{\omega}(k)]/N; \text{噪声因子}$$

定义为: $R = \sum_{k=1}^N |\tilde{\omega}(k) - \omega(k)|/N$ 。其中, $\omega(k)$ 为无污染的仿真输入信号 $4\sin(t)$, N 为仿真时间长度, $N = t/h$, t 为仿真时间。 Q 越大,输出角速度信号相位超前越大; R 越小,系统的滤波性能越好。各方案下的性能指标如表1所示。

表1 各方案下性能指标对比

Tab.1 Contrast performance index of different case

Case	Q	R
ACN	0.209 5	3.458 5
PA	0.212 8	1.848 9
MPA	0.193 6	0.583 2

从图5和图6可以看出,三种方案下的输出信号与输入信号的趋势基本一致。ACN可实现对输入角速度信号的相位超前,但是跟踪信号中存在比 $0.01n(t)$ 强的噪声,这表明ACN实现相位超前功能,但降低了系统的抗干扰能力。PA能实现信号的相位超前,同时能在一定程度上对污染信号进行滤波,但跟踪信号仍存在振荡噪声。经过MPA处理的输出信号平滑无噪声,相位相比于输入信号超前。

由表1可以看出,在相位超前补偿性能方面,MPA与PA和ACN的超前因子 Q 差别不大,这表明MPA与PA和ACN都具有对时滞信号进行相位超前的功能;但相比于PA和ACN,MPA的噪声因子 R 更小,这表明输出超前信号的品质更好。因此,MPA具有良好的滤波和相位超前补偿性能。

3.2 仿真算例2

3.2.1 试验方案

以某筒控导弹为研究对象,将MPA引入其制导控制半实物仿真系统中,并采用以下3种试验方案进行对比仿真试验。

1) 无校正环节:采用传统的半实物仿真设计方法,对IMU测量的角速度 $\tilde{\omega}$ 不做处理,即将图1中相位超前补偿器环节 $G_M(s)$ 去掉;

2) ACN校正:采用ACN对IMU测量的角速度 $\tilde{\omega}$ 进行处理,即将 $G_M(s)$ 替换为ACN。

3) MPA校正:采用MPA对IMU测量的角速度 $\tilde{\omega}$ 进行处理,即将 $G_M(s)$ 替换为MPA。

3.2.2 试验结果分析

采用上述3种试验方案进行半实物仿真试验,并与纯数字仿真结果进行对比分析,仿真对比曲线如图7~10所示。

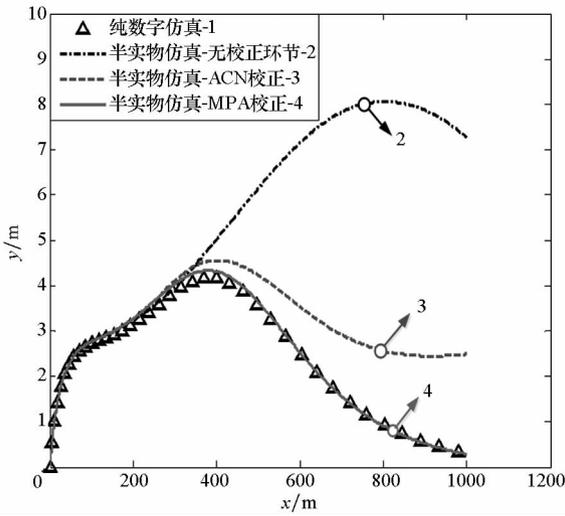


图 7 弹道对比曲线
Fig. 7 Curves of trajectory

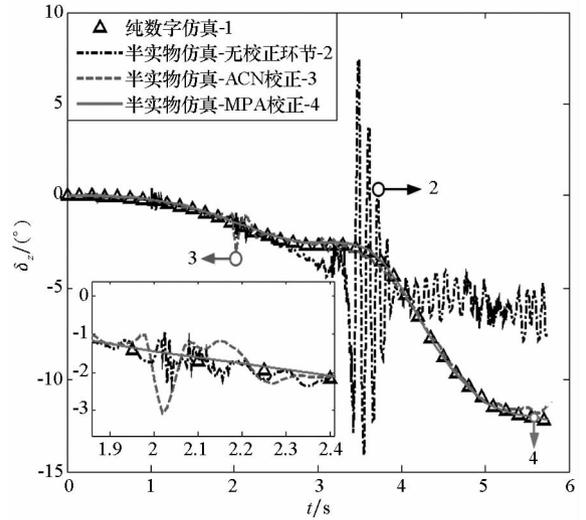


图 10 俯仰舵偏角对比曲线
Fig. 10 Curves of angle elevator

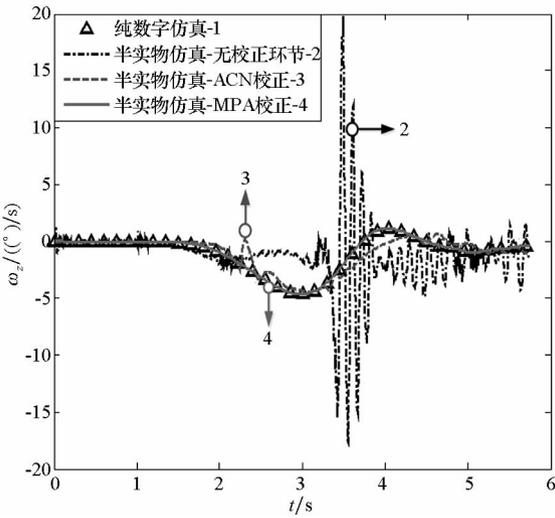


图 8 俯仰角速度对比曲线
Fig. 8 Curves of pitching rate

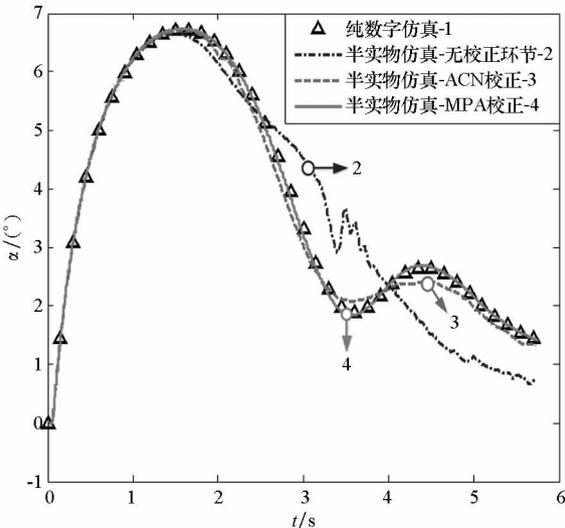


图 9 攻角对比曲线
Fig. 9 Curves of angle of attack

从图 8 可以看出,采用传统的半实物仿真设计方法进行试验时,俯仰角速度曲线与纯数字仿真结果差别较大,且三轴转台在 3 s 附近处出现较严重的自激振荡,IMU 测得的俯仰角速度信息存在较大噪声。从图 10 可以看出,控制系统在 3 s 后发散,使得控制系统很难准确跟踪制导指令,进而使其与纯数字仿真结果差别较大。采用 ACN 对 IMU 输出的角速度进行处理的试验方案并没有发生俯仰角速度发散现象,且俯仰角速度曲线与纯数字仿真结果趋势基本一致,说明 ACN 具有较好的相位补偿功能,但角速度信号仍存在小幅的振荡,从而使得飞行轨迹与纯数字仿真结果差异较大。

采用 MPA 对 IMU 输出的角速度进行处理的试验方案的俯仰角速度曲线与纯数字仿真结果差别很小,进而表明 MPA 能够很好地对 IMU 输出的存在时滞和噪声的角速度进行滤波和相位补偿。从图 7、图 9 和图 10 可以看出,采用 MPA 对 IMU 输出的角速度进行处理的试验方案的仿真结果与纯数字仿真结果差别不大,从而验证了 MPA 在导弹半实物仿真试验系统应用的可行性和有效性。

4 结论

1) 针对输入信号受到噪声污染时,经过跟踪微分器后的相位超前后的跟踪信号会出现高频振荡的问题,提出了一种基于跟踪微分器的改进相位补偿方法,并对其性能进行了仿真实验,仿真结果表明,改进的相位补偿器具有良好的滤波和相位超前补偿性能。

2)为了解决三轴转台输出信号存在噪声和相位延迟的问题,提出了一种基于改进相位补偿器的半实物仿真试验方法,并建立了完整的半实物仿真系统模型。仿真结果表明,所建立的模型是合理的。

3)采用改进后的半实物仿真系统进行试验,通过与纯数字仿真及传统半实物仿真设计方案结果的对比,仿真结果表明,在处理信号噪声和相位延迟方面,改进的相位补偿器具有明显的优势。同时,该方法也可用于其他平台的半实物仿真系统,能有效降低开发成本,提高系统的效率和可靠性,具有工程应用价值。

参考文献 (References)

- [1] Benninghoff H, Rems F, Boge T. Development and hardware-in-loop test of a guidance, navigation, and control system for on-orbit servicing [J]. *Acta Astronautica*, 2014, 102(2): 67-80.
- [2] 黄建强, 鞠建波. 半实物仿真技术研究现状及发展趋势[J]. *舰船电子工程*, 2011, 31(7): 5-7.
HUANG Jianqiang, JU Jianbo. Development introduction of hardware-in-the-loop simulation [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2011, 31(7): 5-7. (in Chinese)
- [3] Chen H L, Qiao X, Yang X W. Analysis of three-axis turntable for motion simulation based on virtual prototyping[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2010, 34(2): 1554-1560.
- [4] 赵玉华, 袁峰, 丁振良. 三轴仿真转台误差建模与分析[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2010, 42(6): 227-231.
ZHAO Yuhua, YUAN Feng, DING Zhenliang. Error modeling and analysis of three-axis simulator turntable[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2010, 42(6): 227-231. (in Chinese)
- [5] 王茂, 秦嘉川, 冯幼田. 测试转台全数字化控制系统设计[J]. *中国惯性技术学报*, 1999, 7(1): 54-58.
WANG Mao, QIN Jiachuan, FENG Youtian. The pure digital control system design for the test table[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 1999, 7(1): 54-58. (in Chinese)
- [6] 邵荣士. 某机高度稳定系统的高空振荡及气路延迟的补偿[J]. *航空学报*, 2001, 22(5): 396-399.
SHAO Rongshi. Compensation for the time delay of pitot-static tube causing the high-altitude oscillation in an altitude hold system of a fighter[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2001, 22(5): 396-399. (in Chinese)
- [7] Shuaiibu D S, Adamu S S. Design and implementation of a phase-lead compensator for magnetic levitation [J]. *Global Journal of Engineering and Technology*, 2009, 2(1): 35-49.
- [8] 许哲, 许化龙, 王宏力, 等. 某型地地导弹姿态控制系统校正网络的设计[J]. *弹箭与制导学报*, 2004, 24(s9): 466-468.
XU Zhe, XU Hualong, WANG Hongli, et al. The design of correct networks for a ground-to-ground missile's attitude control system[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2004, 24(s9): 466-468. (in Chinese)
- [9] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪-微分器[J]. *系统科学与数学*, 1994, 14(2): 177-183.
HAN Jingqing, WANG Wei. Nonlinear tracking differentiator[J]. *System Science and Mathematical Science*, 1994, 14(2): 177-183. (in Chinese)
- [10] Qing Z, Dong L L, Lee D H, et al. Active disturbance rejection control for MEMS gyroscopes[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2009, 17(6): 1432-1438.
- [11] Bu X W, Wu X Y, Zhang R, et al. Tracking differentiator design for the robust back-stepping control of a flexible air-breathing hypersonic vehicle [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2015, 352: 1739-1765.
- [12] 张文革, 韩京清. 跟踪微分器用于零点配置[J]. *自动化学报*, 2001, 27(5): 724-727.
ZHANG Wenge, HAN Jingqing. The application of tracking differentiator in allocation of zero [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(5): 724-727. (in Chinese)
- [13] Guo B Z, Han J Q, Xi F B. Linear tracking differentiator and application to online estimation of the frequency of a signal with random noise perturbation [J]. *International Journal of Systems*, 2002, 33(5): 351-358.
- [14] 韩京清, 侯增广. 利用跟踪微分器构造位置函数的寻优器及求根器[J]. *控制与决策*, 2000, 15(3): 365-367.
HAN Jingqing, HOU Zengguang. Tracking differentiator approach for solving optimization problem and finding roots of algebraic equations [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(3): 365-367. (in Chinese)
- [15] 武利强, 林浩, 韩京清. 跟踪微分器滤波性能研究[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(4): 651-652, 670.
WU Liqiang, LIN Hao, HAN Jingqing. Study of tracking differentiator on filtering [J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(4): 651-652, 670. (in Chinese)
- [16] 韩京清. 时滞对象的自抗扰控制[J]. *控制工程*, 2008, 15(s₂): 7-10, 18.
HAN Jingqing. Auto disturbance rejection control for time-delay systems [J]. *Control Engineering of China*, 2008, 15(s₂): 7-10, 18. (in Chinese)
- [17] 弭寒光, 袁海文, 郭鑫, 等. 利用跟踪微分器提高独立电源系统有源滤波器滤波性能的研究[J]. *电力自动化设备*, 2012, 32(2): 76-80.
MI Hanguang, YUAN Haiwen, GUO Xin, et al. Improving active filter performance by tracking differentiator for islanded power system [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(2): 76-80. (in Chinese)
- [18] 戚嘉兴. 低速转台性能分析与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
QI Jiaying. Analysis and research of turntable for low velocity performance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [19] 董小萌, 张平. 反正切形式跟踪微分器设计及相平面分析[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(4): 533-537.
DONG Xiaomeng, ZHANG Ping. Design and phase analysis of an arctangent-based tracking differentiator [J]. *Control Theory and Application*, 2010, 27(4): 533-537. (in Chinese)
- [20] 王新华, 陈增强, 袁著祉. 全程快速非线性跟踪-微分器[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(6): 875-878.
WANG Xinhua, CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi. Nonlinear tracking differentiator with high speed in whole course [J]. *Control Theory and Applications*, 2003, 20(6): 875-878. (in Chinese)
- [21] 范宏伟, 王洪福, 张伟明. 基于跟踪微分器的宽动态测速系统设计[J]. *电光与控制*, 2012, 19(8): 59-62.
FAN Hongwei, WANG Hongfu, ZHANG Weiming. Wide range velocity measurement system based on tracking differentiator [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(8): 59-62. (in Chinese)