跟踪微分器在半捷联导引头中的应用

孙 高[1,2],朱明超[1], 刘 慧[1],贾宏光[1]

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:对半捷联稳定方式导引头进行了研究,导出了半捷联导引头稳定控制原理,并进一步建立了完整的半捷联导引头稳定回路框图。介绍了跟踪微分器的工作原理,并对其进行了数值仿真,仿真结果显示了跟踪微分器良好的跟踪性能和滤波性能。在半捷联稳定中,为了减小由框架角位置微分求取框架角速度引入的较大的测速噪声,提出了采用跟踪微分器的方法。数值仿真和半实物实验结果说明了跟踪微分器能有效地从角位置信号中微分求得角速度信号,系统稳定精度提高了 80%,证明了跟踪微分器在半捷联稳定中应用的可行性和有效性。

关键词:半捷联导引头; 跟踪微分器; 光轴稳定

中图分类号:TP273 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2014)03-0785-05

Application of tracking differentiator in semi-strapdown seeker

Sun Gao[1,2], Zhu Mingchao[1], Liu Hui[1], Jia Hongguang[1]

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The research of semi-strapdown seeker was carried out, the control principle of semi-strapdown seeker was showed and the integrated stabilization loop of semi-strapdown seeker was proposed. The theory of tracking differentiator was introduced and the simulation was carried out. The simulation study result shows excellent track and filter capability of tracking differentiator. In order to cut down the noise of velocity measurement in semi-strapdown seeker, the tracking differentiator was used. The simulation and hardware in loop result show that the velocity of platform frame is well estimated by tracking differentiator, the stabilization precision of semi-strapdown seeker improves 80%, which testifies the feasibility and validity of the tracking differentiator in semi-strapdown seeker.

Key words: semi-strapdown seeker; tracking differentiator; LOS stabilization

收稿日期:2013-07-12; **修订日期**:2013-08-10

基金项目:中国科学院“三期创新”平台资助项目

作者简介:孙高(1985-),男,博士生,主要从事光电稳定平台伺服控制方面的研究。Email:gao_sun@163.com

导师简介:贾宏光(1971-),男,研究员,博士生导师,博士,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。
Email:jiahg@ciomp.ac.cn

0 引 言

随着导引头高精度、小型化和低成本的发展需要，半捷联稳定技术已成为导引头技术的重要发展方向。半捷联[1-4]稳定平台是一种数字稳定平台。在半捷联稳定方式下，平台框架上不安装惯性测量器件，其惯性测量单元固联于框架基座上，测量弹体运动的角速度信息，视线稳定必须通过复杂的数学解算才能获得。

为了能直接提取用于制导的视线角速度信息，半捷联稳定通常采用角速度稳定方式，即采用将弹载陀螺测量的弹体角速度信息与框架角速度信息合成的方式获取速度稳定的反馈信号。由于框架角速度无法直接获取，必须采用微分框架角位置信号的方法，一般情况下可通过数值微分获得，但是由于半捷联导引头特殊的工作环境以及系统性能的限制，此方法会引入较大的测速噪声，无法达到预期的稳定精度。

跟踪微分器 (Tracking Differentiator，TD)[5-7]，是为了较好地解决在实际工程问题中，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信号的问题。从理论上讲，跟踪微分器能减小由直接数值微分带来的测速噪声，因此，对半捷联稳定中由直接微分角位置信号求取角速度信号带来的测速噪声具有抑制作用。

文中针对半捷联稳定原理，采用跟踪微分器的方法求取框架角速度信号并用于稳定，有效减小了传统微分带来的测速噪声，提高了半捷联稳定精度。

1 半捷联稳定

半捷联稳定的本质是将垂直于视线和对准于框架轴的那部分弹体运动测出并分离出来，然后通过解算馈入适当的框架控制环，控制框架向扰动的反方向运动，从而抵消或有效减小由弹体运动引起的视线晃动。

半捷联导引头稳定原理如图 1 所示，从控制观点看，这是一种带有前馈稳定的复合控制方式。

根据半捷联稳定原理，考虑到电机模型，平台模型，测量噪声以及摩擦等干扰力矩，确定了完整的半捷联稳定回路模型，如图 2 所示，其中微分测速环节是半捷联稳定中的一个重点。

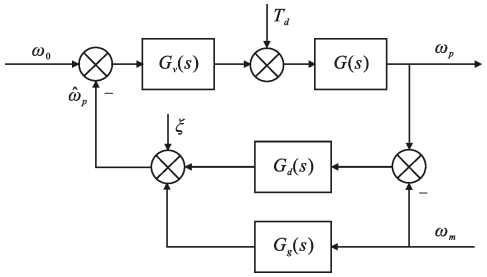

图 1 半捷联稳定原理

Fig.1 Principle of semi-strapdown stabilized platform

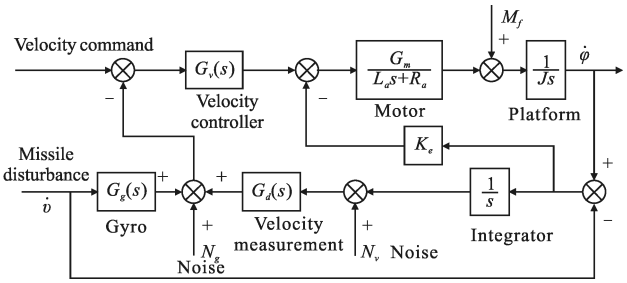

图 2 半捷联导引头稳定回路

Fig.2 Stabilization loop of semi-strapdown seeker

由图 2 可知，半捷联稳定方式与传统速率陀螺稳定方式的区别为用于保持探测器光轴在惯性空间稳定的角速率反馈信息是由弹载惯性测量单元信息和轴角位置传感器微分信息合成的。因此，半捷联稳定是速率陀螺稳定平台的一种等效转换。

2 跟踪微分器

在实际工程应用中，系统输出的信号或经采集的传感器信号往往是带有噪声的，为了对系统进行有效的控制或监测，必须设计滤波器以提取或恢复原始信号。

微分跟踪器对于给定的输入信号 $u(t)$将输出两个信号 $x_1(t)$和 $x_2(t)$，其中 $x_1(t)=u(t)$是对输入信号的跟踪，而 $x_2(t)=\dot{x}_1(t)$是对输入信号的微分。微分跟踪器理论[4]如下：

若系统

$$\begin{cases} \dot{z}_1=z_2 \\ \cdots \\ \dot{z}_{n-1}=z_n \\ \dot{z}_n=f(z_1,z_2,\cdots,z_n) \end{cases} \tag{1}$$

的解均满足 $z_i(t)\to 0(t\to\infty)$，$i=1,2,\cdots,n$，则对任意有

界可积函数 $u(t)$和任意常数 $T>0$,系统

$$\begin{cases}\dot{x}_1=x_2\\ \cdots\\ \dot{x}_{n-1}=x_n\\ \dot{x}_n=R^n f\left(x_1-u(t),\dfrac{x_2}{R},\cdots,\dfrac{x_n}{R^{n-1}}\right)\end{cases}\tag{2}$$

的解 $x_1(t)$满足:

$$\lim_{R\to\infty}\int_0^T|x_1(t)-u(t)|\mathrm{d}t=0\tag{3}$$

上述定理表明了 $x_1(t)$平均收敛于 $u(t)$。若将有界可积函数 $u(t)$看成广义函数,则 $x_2(t)$收敛于 $u(t)$的广义导数。这样,把公式(2)所表示的系统作为跟踪微分器,则由该系统得到的函数及微分,分别是在平均收敛和弱收敛意义下,对原函数及其导数的光滑逼近。

根据离散最速控制综合函数,可构造出关于输入信号 $u(t)$的跟踪微分器的离散形式:

$$x_1(k+1)=x_1(k)+hx_2(k)$$

$$\delta=h_1r,\ \delta_1=h_1\delta$$

$$e(k)=x_1(k)-u(k)$$

$$z_1(k)=e(k)+h_1x_2(k)$$

$$g(k)=\begin{cases}x_2(k)-\mathrm{sign}(z_1(k))\dfrac{r\left(h_1-\sqrt{\dfrac{8|z_1(k)|}{r}+h_1^2}\right)}{2},|z_1(k)|\geqslant\delta_1\\ x_2(k)+\dfrac{z_1(k)}{h_1},|z_1(k)|\leqslant\delta_1\end{cases}$$

$$x_2(k+1)=x_2(k)-hr\mathrm{sat}(g(k),\delta)$$

$$\mathrm{sat}(g(k),\delta)=\begin{cases}\mathrm{sign}(g(k)),|g(k)|>\delta\\ g(k)/\delta,|g(k)|\leqslant\delta_1\end{cases}$$

式中:h 为积分步长;h_1 为滤波因子,主要影响滤波效果;r 为速度因子,主要影响跟踪速度;$x_1(k)$和 $x_2(k)$分别为对输入信号的跟踪与微分。

3 跟踪微分器的数值仿真

为了分析跟踪微分器的性能及其使用效果,对跟踪微分器在 Matlab 环境下进行仿真。仿真初始条件为零,采用固定仿真步长为 0.001,主要验证跟踪微分器的跟踪性能和微分滤波性能。

为了验证跟踪微分器的跟踪性能,对速度因子的变化进行了仿真。为了仿真结果直观可信,取系统输入信号为单位斜坡信号,则其理想速度信号为单位阶跃信号。在仿真中,将滤波因子设为固定值 h_1=0.005,分别对速度因子 r 取 10、50 和 500 进行了仿真,仿真结果如图 3 所示。从图中可以看出,速度因子 r 可以改变跟踪微分器的相应速度,在滤波因子为固定值时,速度因子 r 越大,跟踪速度越快。

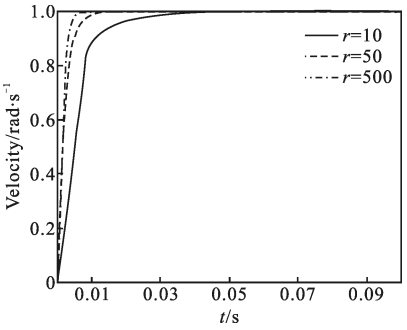

图 3 不同速度因子对阶跃速度信号的响应

Fig.3 Response of step velocity signal

为了验证滤波因子 h_1 对跟踪微分器输出的影响,在仿真中对输入信号引入了方差为 0.001 的高斯噪声,并且将速度因子设为固定值 r=100,分别对滤波因子 h_1 取 0.002 和 0.01 进行了仿真,仿真结果如图 4 所示。从图中可以看出,当 h_1=0.002 时,速度估计误差较大,约为±1.2 rad,而当 h_1=0.01 时,速度估计误差较小,约为±0.5 rad。因此,在速度因子不变的情况下,增大滤波因子 h_1 可以提高跟踪微分器对噪声的抑制能力。

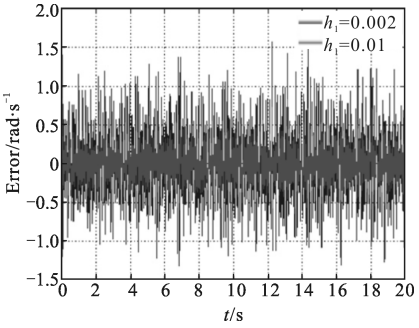

图 4 滤波因子对跟踪微分器滤波性能的影响

Fig.4 Filter performance of TD

在实际应用中,速度因子和滤波因子都不是越大越好,当输入信号存在噪声时,速度因子过大会对噪声有放大作用,并且会减低其速度估计的精度;而滤波因子过大会增大对输入信号及其速度估计的相位滞后。图 5 是选择滤波因子 h_1=0.01,速度因子 r=10 时的仿真结果。从图中可以明显看出,当减小速

度因子时，跟踪微分器对速度估计的精度也明显提高了，其误差约为±0.1 rad，比速度因子 r=100 时的估计精度提高了 80%。

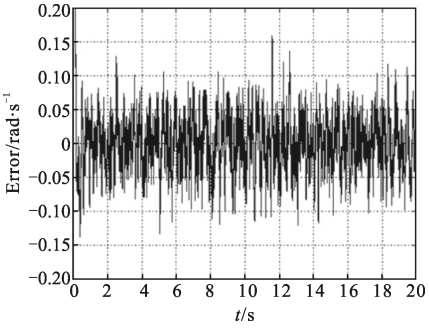

图 5 速度因子对速度估计精度的影响

Fig.5 Estimating precision of TD

通过上述仿真可知，跟踪微分器的跟踪性能以及对噪声的抑制性能主要与其速度因子和滤波因子相关。但在实际中对速度因子和滤波因子的取值需根据实际信号的性噪比来确定，在跟踪速度与速度估计精度之间权衡，取值应满足系统对信号的实际需要。

4 半捷联稳定的仿真与半实物实验

根据图 2 可知，半捷联稳定中，跟踪微分器主要完成微分测速的功能，即半捷联稳定中由角位置信号微分求取角速度的问题。

为了验证微分跟踪器的可行性和有效性，首先对其进行了仿真。仿真中设定采样时间为 1 ms，给定弹体扰动幅值为 5 rad，频率为 3 Hz，并设定测速噪声为均方差为 0.001 的高斯噪声，仿真结果如图 6 和图 7 所示。其中，图 6 对比了前向差分和跟踪微分器对框架速度的估计精度，从图中可明显看出，跟踪

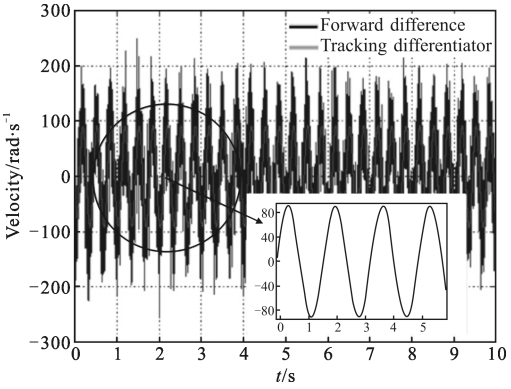

图 6 跟踪微分器与前向差分比较

Fig.6 Comparison of TD and forward difference

微分器能有效地从角位置信号中估计出角速度信号，减小速度测量噪声；图 7 显示了采用跟踪微分器前后半捷联稳定精度对比，根据计算可知，采用跟踪微分器之后，半捷联稳定精度提高了近 85%。

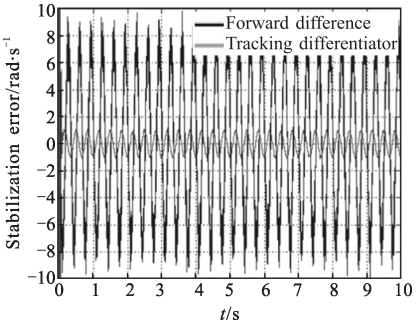

图 7 系统稳定误差比较

Fig.7 Stabilization error of semi-strapdown platform

为了进一步说明跟踪微分器的有效性，对半捷联稳定平台开展了半实物实验。半实物实验中根据设计要求，给定典型弹体扰动幅值为 2°，频率为 2 Hz，半实物实验结果如图 8 所示。

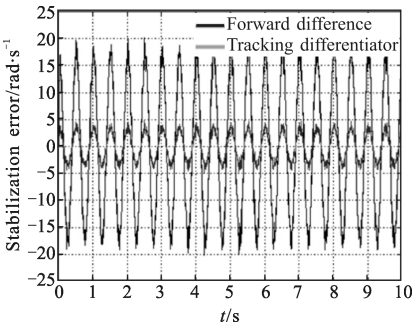

图 8 半捷联半实物稳定结果

Fig.8 Hardware in loop of semi-strapdown stability platform

从图中可以看出，虽然半实物实验中弹体扰动相对较小，但半实物实验的稳定误差较大，这是由于仿真中对摩擦等外部非线性扰动因素以及对测量噪声的简化处理造成的。从半实物实验结果可以看出，采用跟踪微分器之后，半捷联稳定精度提高了 80%，这进一步说明了跟踪微分器在半捷联稳定中的可行性和有效性。

5 结 论

在半捷联导引头中，应用跟踪微分器从框架角位置传感器信息中提取光轴稳定所需的框架角速度信息，仿真及半实物实验显示，跟踪微分器具有较强

的抗干扰能力和滤波能力，能有效解决半捷联导引头中框架角速度的提取，与普通的数值微分算法相比,跟踪微分器提高了对角速度的估计精度,从而提高了半捷联的稳定精度，证明了跟踪微分器在半捷联稳定中的可行性和有效性。

参考文献:

[1] Zhu Mingchao, Wang Tao, Jia Hongguang. Seeker kinematic analysis and calibration based on POE formula [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40(8): 1556-1562. (in Chinese)
朱明超, 王涛, 贾宏光. 基于指数积公式的导引头运动学分析与标定[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1556-1562.

[2] Russell T Rudin. Strapdown stabilization for imaging seeker [R]. AIAA-93-2660, 1993.

[3] Arnott Hamilton. Strapdown optical stabilization system for EO sensors on moving platforms[C]//SPIE, 2007, 2774: 631-645.

[4] Jia Xiaoyuan, Zhao Chao. New stabilization control and guidance information extract approach with a semi-strap-down structure [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40(12): 2474-2479. (in Chinese)
贾筱媛, 赵超. 半捷联稳定控制方案与制导信息提取方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2474-2479.

[5] Han Jingqing, Wang Wei. Nonlinear tracking-differentiator[J]. ***J Sys Sci & Math Scis***, 1994, 14(2): 177-183. (in Chinese)
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.

[6] Han Jingqing, Huang Yuancan. Frequency characteristic of second-order tracking differentiator [J]. ***Mathematics in Practice and Theory***, 2003, 33(3): 71-74. (in Chinese)
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.

[7] Shi Yongli, Hou Chaozhen. Design of improved nonlinear tracking differentiator [J]. ***Control and Decision***, 2008, 23(6): 647-650. (in Chinese)
史永丽, 侯朝桢. 改进的非线性跟踪微分器设计 [J]. 控制与决策, 2008, 23(6): 647-650.