

## 结构与工艺

# 一种提高车载稳向系统稳向精度方法的研究

刘 彬, 高学鹏

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

**摘要:** 微机械石英音叉陀螺作为车载稳向系统中速度反馈元件, 其输出噪声和随机漂移直接影响到了最终的稳向精度。针对此种问题, 提出了对陀螺噪声采用自适应前向预测滤波的方法来进行消除, 并根据光栅的角度值与初始稳向角度值的误差来设置一个递增或递减的变量引入到速度闭环系统中。通过实际测试证明, 采用此方法可以将稳向精度提高到  $\pm 7.2''$  之内, 从而验证了方法的有效性。

**关键词:** 伺服平台; 自适应前向预测滤波; 石英音叉陀螺

中图分类号: TN204

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-04-0075-04

## Research on a Method to Improve Stable Precision of Vehicle Steering System

LIU Bin, GAO Xue-peng

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

**Abstract:** Micro-machined quartz tuning fork gyroscope as the speed feedback system in vehicle steering system, its output noise and random drift directly affect the final stable precision. In response to this problem, an adaptive forward predictive filtering method is proposed to eliminate gyro noise, and an incremental or decreasing variable is introduced into the velocity closed loop system according to the error of the angle value of the grating and the initial stable angle. The actual tests verify that the method can improve the stable precision to  $\pm 7.2''$ , which verifies the effectiveness of the method.

**Key words:** servo platform; adaptive forward predictive filtering; quartz tuning fork gyroscope

车载稳向系统中, 需要将伺服平台稳定在一个方向上, 从而满足系统的需求。由于陀螺具有稳向的功能, 所以在系统中需要加入陀螺作为速度测量元件, 实时感应出当前伺服平台的速度, 其作为速度闭环的反馈量, 从而起到稳向的作用。微机械石英音叉陀螺作为一种新型的惯性器件, 凭借着其体积小、成本低、质量轻、可靠性高等特点, 已经成功的应用于各种场合<sup>[1]</sup>。但是石英音叉陀螺是一种中低精度的陀螺, 其输出噪声和陀螺的漂移比较大, 这两个指标会直接影响到系统的最终稳向精度, 如何在应用中减少陀螺噪声和陀螺漂移对系统的影响是关键问题。文中在陀螺噪声上采用自适应前

向预测滤波的方法来对陀螺的输出进行滤波。由于陀螺的漂移分为常值量和随机量, 陀螺的常值漂移可以通过系统准备阶段进行数据的采集, 然后对所采集到的数据进行求平均的方法来求得。对于陀螺随机漂移可以采取需要稳向的角度信息来对系统的漂移进行补偿。

### 1 伺服平台及陀螺输出分析

图1为伺服平台控制原理图。其中陀螺的输出作为速度环的反馈量。由于陀螺的输出量含有多种噪声, 所以需要将陀螺的噪声进行系统辨识, AI-

lan方差就是解决此类问题的方法<sup>[2]</sup>。

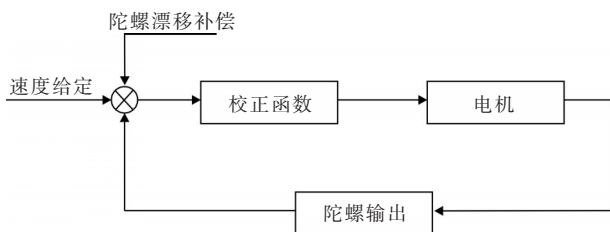


图1 伺服平台控制原理图

图2就是对陀螺输出进行Allan方差得出的曲线。

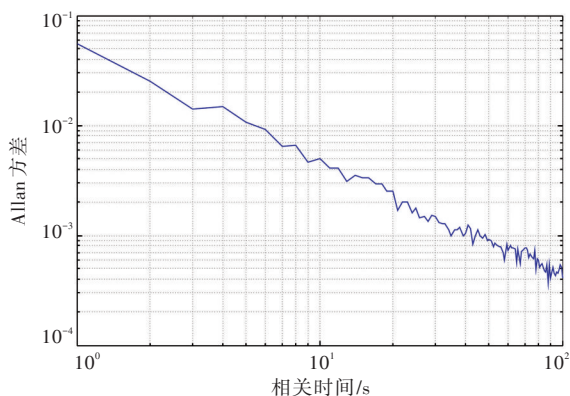


图2 陀螺的Allan方差曲线

从图2中可以看出,Allan方差曲线主要体现在斜率为-1的量化噪声上。为了更加直观的将陀螺的噪声体现出来,需要将陀螺输出在频域上体现出来。首先在系统静止状态下对其进行采集,然后计算出陀螺的零偏值,最后将去掉零偏后的数据进行快速傅里叶变换,从而得出陀螺输出在频域上的特性。图3就是其陀螺的原始数据去掉零偏后的输出曲线及其功率谱曲线。

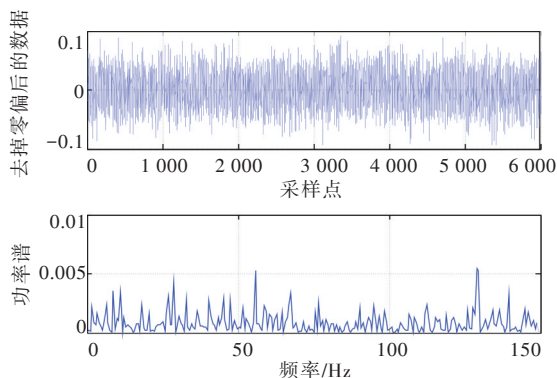


图3 陀螺去掉零偏后的数据和功率谱曲线

从其功率谱曲线上可以看出,陀螺的输出噪声在中低频率上都包括,所以为了得到较高的稳向精度,需要对陀螺的输出进行滤波。

## 2 自适应前向预测滤波

前向预测滤波方法的主要思想是把先前时刻的陀螺输出信号乘以相应的权值来预测当前时刻的陀螺信号。首先需要确定一个初始权向量,然后计算当前陀螺信号与预测值之差,并根据最小均方误差算法不断调整权向量,使其最终收敛到一个稳定的权值<sup>[3]</sup>。

前向预测滤波对陀螺信号当前值估计的表达式为

$$\tilde{y}(n) = \sum_{k=1}^M w_k \cdot x(n-k) = W^T(n) \cdot X(n) \quad (1)$$

式中,  $X(n) = [x(n-1) \ x(n-2) \ x(n-3) \ \dots \ x(n-M)]^T$  为先前时刻陀螺的输出值所组成的向量;  $W(n) = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ \dots \ w_M]^T$  为前向预测滤波的权值;  $M$  为滤波器的阶数。

定义陀螺信号的当前陀螺信号与预测值之差为

$$e(n) = y(n) - \tilde{y}(n) \quad (2)$$

根据最小均方差理论,为了使上式中的偏差  $e(n)$  最小均方根达到最小,则需要不断的调整前向预测滤波器的权值。由最小均方误差理论可得权值的迭代公式为

$$W(n+1) = W(n) + \mu \cdot E[e(n) \cdot X(n)] \quad (3)$$

在实际迭代过程中,为了减少计算量,常将均方误差简化为直接相乘的形式,即有下式

$$W(n+1) = W(n) + \mu \cdot e(n) \cdot X(n) = W(n) + \Delta \tilde{W}(n) \quad (4)$$

式中,  $\mu$  为步长因子,一般取  $\mu$  为一个大于零的较小值。在实际的应用中发现,  $\mu$  的取值对于整个算法的收敛性和收敛速度起到关键作用。为了寻求一种既能够保证算法的收敛速度又能得到较好的收敛精度,这时就需要一个变步长的算法,即在迭代的过程中不断的调整步长来达到上述要求,瞬时平方误差是MSE的一种好的简单估计。

瞬时平方误差可以由式(5)进行表示为

$$e^2(n) = y^2(n) + W^T(n) \cdot X(n) \cdot X^T(n) \cdot W(n) - 2y(n) \cdot W^T(n) \cdot X(n) \quad (5)$$

其中,  $y(n)$  为实际陀螺的输出信号。

由权值迭代公式(4)可以推算出对应的平方误差为

$$\begin{aligned} \tilde{e}^2(n) &= e^2(n) + 2\Delta\tilde{W}^T(n) \cdot X(n) \cdot X^T(n) \cdot W(n) + \\ &\quad \Delta\tilde{W}^T(n) \cdot X(n) \cdot X^T(n) \cdot \Delta\tilde{W}(n) - \\ &\quad 2y(n) \cdot \Delta\tilde{W}^T(n) \cdot X(n) \end{aligned} \quad (6)$$

于是有下式

$$\begin{aligned} \Delta e^2(n) &= \tilde{e}^2(n) - e^2(n) = \\ &\quad -2\Delta\tilde{W}^T(n) \cdot X(n) \cdot e(n) + \Delta\tilde{W}^T(n) \cdot \\ &\quad X(n) \cdot X^T(n) \cdot \Delta\tilde{W}(n) \end{aligned} \quad (7)$$

将  $\Delta\tilde{W}(n) = \mu \cdot e(n) \cdot X(n)$  代入式(7)可得

$$\begin{aligned} \Delta e^2(n) &= -2\mu \cdot e^2(n) \cdot X^T(n) \cdot X(n) + \mu^2 \cdot e^2(n) \cdot \\ &\quad [X^T(n) \cdot X(n)]^2 \end{aligned} \quad (8)$$

使  $\frac{\partial \Delta e^2(n)}{\partial \mu} = 0$  的  $\mu$  值为

$$\mu = \frac{1}{X^T(n) \cdot X(n)} \quad (9)$$

采用这种可变的步长因子,则权值的迭代公式变为

$$W(n+1) = W(n) + \frac{e(n) \cdot X(n)}{X^T(n) \cdot X(n)} \quad (10)$$

在实际应用中为了控制失调,在迭代公式(10)中需要引入一个固定的收敛因子  $\alpha$ 。另外,为了避免很小时出现很大的步长,还应该设置一个参数  $\beta$ ,于是式(10)变为

$$W(n+1) = W(n) + \frac{\alpha \cdot e(n) \cdot X(n)}{\beta + X^T(n) \cdot X(n)} \quad (11)$$

### 3 陀螺随机漂移的补偿方法

微机械陀螺的随机漂移量比较大,基本上1h都在十几度以上。如果伺服平台处于长期工作的情况下,势必会使视轴偏离原始的方向,从而对稳向精度带来很大的影响。为了消除该影响,文中根据初始稳向的角度为基准,实时察看光栅的角度值,如果光栅角度值偏离了初始角度,这时就会设置一个变量,使其以一个较小的增量(减量)形式变化,并且设置其上限制,然后将该变量引入到速度闭环中去,从而抑制视轴偏离原始方向。

### 4 系统仿真与分析

文中所采用的伺服平台为一维转台,并在转台上安装微机械陀螺和反射镜,反射镜的作用是在伺

服平台处于稳向的状态下利用自准直仪来精确测量稳向误差。自准直仪的测量范围为:X轴  $\pm 800''$ , Y轴  $\pm 600''$ 。分两种情况进行分析,第一种是在没有滤波的情况下通过对比补偿和没有补偿陀螺漂移,第二种是在补偿陀螺漂移的情况下通过对比滤波前后的稳向精度。

在第一种情况下,由于没有对陀螺随机漂移进行补偿,当伺服平台将自准直仪的光点稳定在自准直仪显示界面的中心点后,经过6s之后,光点已经偏离出自准直仪的显示界面,说明如果系统要想长时间的稳向必须对陀螺随机漂移进行补偿。在将系统的速度环带宽做到20Hz左右,就可以得出图4所示的稳向误差曲线。

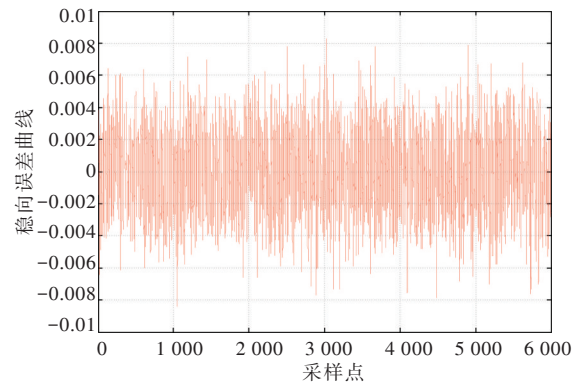


图4 补偿陀螺随机漂移且没经过滤波的稳向误差曲线

从图4中可以看出,在补偿完之后稳向误差在  $\pm 30''$  之间变化,从而验证了补偿陀螺随机漂移的必要性和补偿方法的有效性。

在第二种情况下,首先将采集到陀螺数据进行处理从而得出图5所示的曲线。

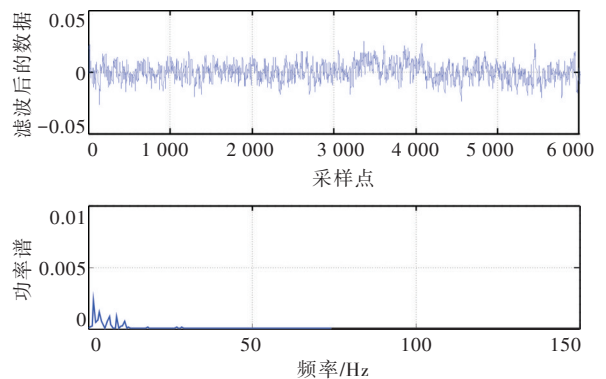


图5 滤波后的陀螺数据和功率谱曲线

从图中可以得出,经过滤波之后的陀螺数据的信噪比明显提高了,并且将原始信号的噪声限制在了10 Hz以下。将滤波之后的陀螺信号引入到原来的速度闭环中发现系统的带宽还可以继续压低,经过调整校正函数的参数最终将系统的速度环带宽做到了16 Hz左右。图6就是经过滤波且补偿陀螺随机漂移的稳向误差曲线。

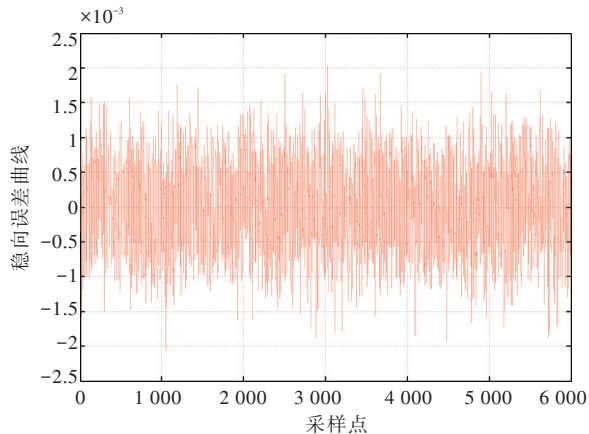


图6 经过滤波且补偿陀螺随机漂移的稳向误差曲线

从图中可以得出,稳向误差在 $\pm 7.2''$ 之间变化,稳向精度明显提高,从而验证了所用方法的有效性。

## 5 结论

以微机械石英音叉陀螺为研究对象,分析了其

输出噪声的特点,推导出了自适应前向预测滤波的公式,并针对陀螺随机漂移对系统的影响,建立了随机漂移的补偿方法。通过实际验证表明,文中所采用的方法可以有效的提高稳向精度。

## 参考文献

- [1] 杨培根,龚智炳. 光电惯性技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1999.
- [2] 张亚宁,朱涛,傅军. 基于Allan方差的MEMS陀螺误差分析[J]. 自动化与仪器仪表, 2013.
- [3] 易康,李延志,吴文启. FLP滤波算法在光纤陀螺信号预处理中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(5): 58-62.
- [4] 张海鹏,房建成. MEMS陀螺仪短时间漂移特性实验研究[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(1): 101-104.
- [5] 万俊,潘鸿飞,杨柏军. 陀螺仪随机漂移的测取和数学模型的确立[J]. 微计算机信息, 2003, 19(2): 17-18.
- [6] 潘金艳,朱长纯,樊建民. 微机械陀螺零位误差的研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(4).
- [7] 孙莉. 光电跟踪伺服系统中光纤陀螺滤波算法的应用[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(6).
- [8] 罗护,范大鹏,张智勇,等. 两轴陀螺稳定系统中陀螺安装的几种方法[J]. 兵工学报, 2005, 26(3).
- [9] 邹东明. 舰载光电跟踪设备视轴稳定分析[J]. 兵工自动化, 2003, 22(1): 15-19.
- [10] 孟中. 陀螺滤波在改善伺服系统低速特性中的应用[J]. 压电与声光, 2006, 28(1).

(上接第63页)

- [3] 强希文. 高功率激光表面大气击穿阈值的波长关系[J]. 光学技术, 1995, 5(9): 45-60.
- [4] 张显斌,李恩玲,施卫,等. 激光电离空气的多元过程及其应用[J]. 西安理工大学学报, 2001(17): 314-318.
- [5] Demichelis. Quantum Electronics[J]. IEEE, 1969, J- QE (5): 188.
- [6] 周军. 纳秒激光等离子体和冲击波初始阶段的光学诊断实验研究[D]. 南京:南京理工大学, 2009.
- [7] 孟令轩,延凤平,白燕,等. 产生波长793 nm中空光束

- 的双包层光纤的优化设计[J]. 光电技术应用, 2017, 32(1): 1-5.
- [8] 李庆轩,杨旭,秦文斌. 大功率半导体激光器防反射损伤技术研究[J]. 光电技术应用, 2017, 32(2): 21-24.
- [9] 李森森,吴凡,吕志伟. 基于液晶空间光调制器的激光近场光束整形[J]. 光电技术应用, 2017, 32(3): 19-23.
- [10] 王毕艺,陈亚楠. 飞秒激光大气等离子体通道诱导放电技术研究[J]. 光电技术应用, 2017, 32(3): 24-25.