

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211468

高旋制导弹药转速测量装置及方法研究<sup>\*</sup>刘福朝<sup>1,2</sup> 李存健<sup>1</sup> 刘宁<sup>1,2</sup> 赵辉<sup>1,2</sup> 王桂奇<sup>1</sup>

(1.北京信息科技大学自动化学院北京100192;2.北京信息科技大学高动态导航技术北京市重点实验室北京100101)

**摘要:**针对高旋制导弹药高转速难以精确测量问题,设计了一种基于地磁传感器的转速测量装置,测量装置主要采用了HMC1053三轴地磁传感器和STM32H753 ARM芯片来完成转速测量功能。根据地磁传感器输出信号特性,利用过零点检测方法对转速信号的时域特性进行了仿真和分析,分别采用短时傅里叶变换和连续小波变换方法对转速信息的时频特性进行了仿真分析和对比,结果表明采用连续小波变换方法得到的频率分辨率更高,求解的转速精度更高。最后通过机床转速试验及弹载飞行试验进行验证,机床转速试验解算的转速最大误差为0.0113 r/s,试验结果表明了转速测量方法的可行性,为高旋制导弹药的导航和制导技术提供相关的支持,具有一定的工程应用价值。

**关键词:**高旋制导弹药;地磁传感器;转速测量;时频分析

**中图分类号:** TP29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 535.10

## Research on rotating speed measuring device and method of high rotation ammunition

Liu Fuchao<sup>1,2</sup> Li Cunjian<sup>1</sup> Liu Ning<sup>1,2</sup> Zhao Hui<sup>1,2</sup> Wang Guiqi<sup>1</sup>

(1. School of Automation, Beijing Information Science &amp; Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, University of Beijing Information Science &amp; Technology, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that it is difficult to accurately measure the high rotational speed of high rotation ammunition, a speed measuring device based on geomagnetic sensor is designed. The measurement device mainly uses HMC1053 three-axis geomagnetic sensor and STM32H753 ARM chip to complete the speed measurement function. According to the characteristics of the output signal of the geomagnetic sensor, the time-domain characteristics of the rotational speed signal are simulated and analyzed by using the zero-crossing detection method, and the time-frequency characteristics of the rotational speed information are also simulated and analyzed by using the short-time Fourier transform and continuous wavelet transform methods. The results show that the continuous wavelet transform method has higher frequency resolution and higher rotational speed precision. Finally, the machine speed test and missile-borne flight test are carried out to verify that the maximum error of the machine speed test is 0.0113 r/s. The test results show that the speed measurement method is feasible, which provides relevant support for the navigation and guidance technology of high rotation ammunition and has certain engineering application value.

**Keywords:** high rotation ammunition; geomagnetic sensor; rotating speed measuring; time-frequency domain analysis

## 0 引言

高旋制导弹药在飞行过程中具有高转速、高过载和高飞行速度等特点,随着武器装备信息化的快速发展,对制导弹药的新概念、新功能和新原理提出了更高的要求。制导弹药的转速测量是实现其精确制导与控制的前提条件,也是实现其稳定飞行的基础,由于现代战争对智能弹药的迫切需求,制导弹药的结构、工作机理及复杂应用环境,决定

了制导弹药转速测量方法的特殊性和必要性<sup>[1]</sup>。

常规制导弹药的转速测量一般由陀螺仪传感器直接测量可得,但其受量程饱和、高过载限制等因素,很难适应恶劣的工作环境。地磁传感器可以通过测量地磁场矢量信息,完成制导弹药的转速测量,且具有体积小、量程大、抗过载能力强及成本低等显著优势<sup>[2]</sup>。近年来,利用地磁传感器对高旋制导弹药进行转速测量的装置及方法得到了快速发展。主要包括基于单轴地磁传感器信号<sup>[3-4]</sup>和双轴地磁

收稿日期:2022-09-20

<sup>\*</sup> 基金项目:北京市自然科学基金(4214071, 4212003)、国家重点研发计划课题(2020YFC1511702)项目资助

传感器<sup>[5-6]</sup>信号以及三轴地磁传感器<sup>[7-8]</sup>信号的弹体转速测量装置,利用希尔伯特变换方法<sup>[9-11]</sup>对地磁信号进行时频分析,提取转速信息,利用傅里叶变换方法<sup>[12]</sup>、加权最小二乘法<sup>[13]</sup>及反正切法<sup>[14]</sup>计算转速。除此之外,利用快速傅里叶方法对双轴加速度传感器<sup>[15]</sup>采集的信号进行处理,也能实现转速的实时测量。

本文提出了一种基于三轴地磁传感器的转速测量装置,利用过零检测方法对地磁传感器输出特性进行了分析,给出了转速信息提取方法。分别采用短时傅里叶变换和连续小波变换方法对地磁信号的时频特性进行了仿真和分析,最后通过机床转速试验及弹载飞行试验验证了转速测量方法的可行性。

### 1 转速测量装置设计

高旋制导弹药转速信息获取是本文研究的主要目标,采用测试存储一体化设计,既要满足小体积化的安装要求,也要满足动态参数实时采集与存储的功能应用。本文选用了霍尼韦尔公司的 HMC1053 三轴地磁传感器作为转速测量器件,它是一种 16-pin LCC 小型表面贴装结构,具有功耗低、量程大、体积小、成本低以及无累计误差等优势。根据 HMC1053 地磁传感器的性能参数可知,其响应频率满足高旋制导弹药的转动频率的测量要求,其主要性能指标如表 1 所示。

表 1 HMC1053 磁阻传感器的性能指标

参数名称	单位	指标
量程	Gauss	±6
分辨率	μGauss	120
带宽	MHz	5
噪声密度	nV/√Hz	50
灵敏度	mV/V/gauss	1
供电电压	V	5
温度范围	°C	-40~125
尺寸大小	mm	3×3×0.9

转速测量装置主要由高强度机械外壳结构、内部硬件系统及接口组成,如图 1 所示。硬件系统主要包括核心处理单元、数据采集与存储单元、信号处理单元、传感器及其处理单元、通信单元、电源管理单元。传感器数据通过对应的处理电路处理后,信号进入信号处理电路进行阻抗、电压匹配,然后由数据采集单元进行信号采集,并将采集结构送至核心处理单元进行数据解算,核心处理单元将解算结果通过通信单元在上位机输出。

### 2 转速测量方法

#### 2.1 基于过零检测的转速测量方法

根据北-东-地坐标系  $o-xyz$ ,如图 2 所示,假设坐标

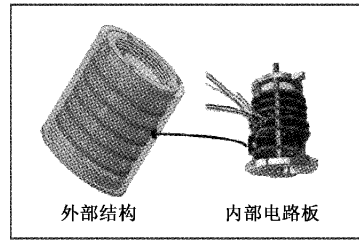


图 1 转速测量装置

系原点为  $o$ ,原点处的磁场  $H$  所在的垂面为地磁子午面, $x$  轴沿地理子午线向北为正向, $y$  轴沿纬度方向向东为正向, $z$  轴向垂直向下为正向。

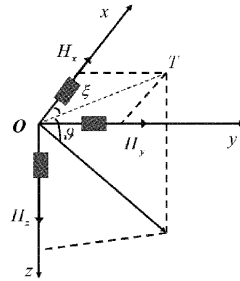


图 2 北-东-地坐标系及传感器配置

图 2 中  $H$  表示地磁强度, $H$  在水平面  $o-x-y$  上的投影为水平磁场强度  $T$ ,地磁子午面与地理子午面的夹角为磁偏角  $\xi$ ,与水平面的夹角为磁倾角  $\vartheta$ 。图中标识的相关变量称为地磁要素,相互关系表示为:

$$\begin{cases} T = H \cos\vartheta, H_z = H \sin\vartheta, \vartheta = \arctan\left(\frac{H_z}{T}\right) \\ H_x = T \cos\xi, H_y = T \sin\xi, \xi = \arctan\left(\frac{H_y}{H_x}\right) \\ H^2 = T^2 + H_z^2 = H_x^2 + H_y^2 + H_z^2 \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可以得到地磁传感器数据在东北地坐标系里的三轴分量,可以表示为:

$$\begin{cases} H_x = H \cos\vartheta \cos\xi \\ H_y = H \cos\vartheta \sin\xi \\ H_z = H \sin\vartheta \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知,制导弹药在飞行过程中,弹丸旋转所获得的地磁场数据始终关于零点对称,一个滚转周期内输出信号曲线可看成正弦或者余弦曲线,正弦波形或者余弦波形的一个周期即为制导弹药旋转一周的时间。非干扰环境下,地磁传感器测量信号具有明显的周期特性,根据测量信号曲线的波峰、波谷和零点来计算时间差,得到半个周期,如图 3 所示。

由图 3 可知,  $t_1 \sim t_2$  时刻的时间差即为滚转的半个周期,进而得到弹体每半个周期的近似转速可以表示为:

$$n = 1/2(t_2 - t_1) \quad (3)$$

因此测量制导弹药转速时只需要径向的地磁传感器采集地磁数据检测过零点时刻即可计算出弹丸转速,但是为

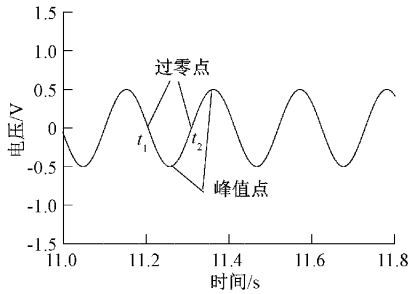


图 3 地磁传感器测量信号曲线

了保证测量数据的准确性,需要对地磁传感器进行数据标定和补偿才能应用。

### 2.2 基于短时傅里叶变换的时频域分析方法

传统的傅里叶变换方法只反映出信号在频率的特性,无法在时域内进行分析,为了解决这一问题,提出了短时傅里叶变换方法,其实是加窗的傅里叶变换,对信号做傅里叶变换之前乘以一个有限的窗函数  $h(t)$ ,假设非平稳信号在分析窗的短时间内是平稳的,通过窗函数  $h(t)$  在时间轴上的移动,对信号进行逐段分析,得到一组频谱,那么这个信号  $x(t)$  的短时傅里叶变换可以表示为:

$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(\tau - t)e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (4)$$

式中:  $h(\tau - t)$  表示以  $t$  为中心分析窗函数,对于给定的时间  $t$ ,  $STFT(t, f)$  可以看作是时刻的频谱,如果想得到局部化最优性能,窗函数的宽度应根据信号的特点进行调整。当窗口变窄时,时间分辨率变高,窗口变宽时,频率分辨率变高,想得到局部化最优性能,需要根据信号特点设置窗函数窗口的宽窄度,准确获取信号的时频特征。

### 2.3 基于连续小波变换的时频域分析方法

小波变换可以看成是分析信号在不同基函数上的分解或表示,小波变换的数值相当于不同基函数的系数,如果  $\varphi(t)$  为一平方可积函数,即  $\varphi(t) \in L^2(\mathbb{R})$  且  $\int_{\mathbb{R}} |\hat{\varphi}(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega < +\infty$ , 那么称  $\varphi(t)$  为一个基本小波,其中  $\hat{\varphi}(\omega)$  为  $\varphi(t)$  的傅里叶变换。连续小波公式可以表示为:

$$\{\varphi_{a,b}\} = |a|^{-\frac{1}{2}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right), b \in \mathbb{R}, a \in \mathbb{R} - \{0\}。 假定 \varphi$$

是基本小波,  $\{\varphi_{a,b}\}$  为连续小波,那么信号  $f \in L^2$  的连续小波变换定义为:

$$(W_{\varphi}f)(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5)$$

式中:  $(W_{\varphi}f)(a, b)$  被称为小波系数,  $a, b$  均为实数,  $a$  称为尺度,是表征频率的参数,  $b$  是表征时间或空间位置的参数。它的时、频域窗口中心及宽度均随尺度  $a$  的变化而伸缩,而连续小波基函数的窗口面积不随参数  $a, b$  而变。尺度的倒数  $1/a$  对应于频率  $\omega$ ,即尺度越小,对应频率越高,  $a$  尺度越大,对应频率越低。

## 3 试验与分析

### 3.1 地面机床转速试验

为验证上述方法的可行性,需要对转速测量方法进行试验验证,本文将通过机床试验所采集的数据进行分析和对比,如图 4 所示。首先将转速测量装置通过设计的试验工装安装到机床旋转轴上,先在静止状态下采集地磁传感器数据,将装置用卡具与弹体连接保证其同速同轴转动,将转速测量装置数据模式改为记录模式,供电端连接至锂电池,给装置上电,机床驱动装置转动,转速分别设定为 5、10、20、30、40、30、20、10、5 r/s,机床停止后读取记录仪存储的数据,进行分析和对比。

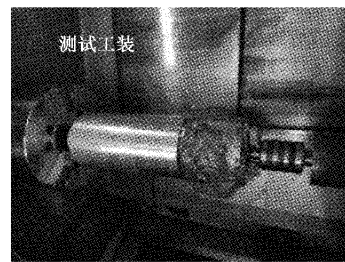


图 4 机床转速试验

通过转速测量装置采集的地磁传感器数据如图 5 所示,分别通过短时傅里叶变换和连续小波变换方法对地磁传感器数据进行时频域分析,如图 6 和 7 所示,最终解算的转速曲线如图 8 所示。

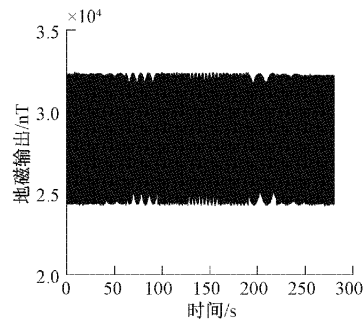


图 5 径向地磁测量数据

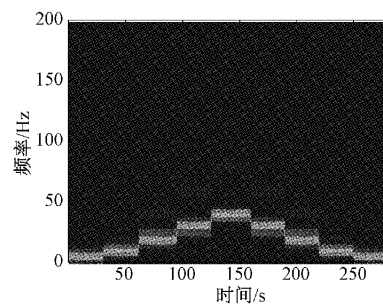


图 6 短时傅里叶变换时频曲线

从图 5 中可以看出随着机床转速的增大和减小,地磁

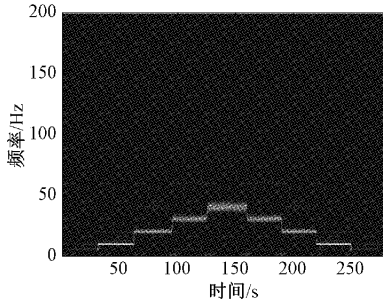


图 7 连续小波变换时频曲线

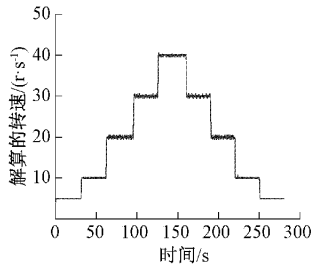


图 8 解算的机床转速曲线

传感器输出幅值未衰减,只是周期性频率发生改变。从图 6 和 7 中可以看出,采用短时傅里叶变换和连续小波变换方法对地磁信号的时频特性进行仿真分析,曲线变化基本一致,但是采用连续小波变换方法得到时频曲线更精细,频率分辨率更高,表明该方法优于短时傅里叶变换方法。由图 8 可以看出,通过提取时频曲线的频率信息,解算的转速与给定的机床转速一致,说明该方法是可行的,但是随着转速的增大,机床转轴存在一定的高频振动,导致解算的转速信息有一定的噪声影响。转速解算值及误差如表 2 所示。

表 2 转速误差

理论值/( $r \cdot s^{-1}$ )	解算值/( $r \cdot s^{-1}$ )	均值误差/( $r \cdot s^{-1}$ )
5	5.000 3	0.000 3
10	9.998 2	0.001 8
20	19.998 3	0.002 7
30	29.996 7	0.003 3
40	40.011 3	0.011 3

### 3.2 弹载飞行试验

将转速测量装置搭载某型号榴弹进行飞行试验验证,通过测量装置内部记录仪读取飞行过程中的试验数据进行分析,其中径向轴地磁传感器测量数据如图 9 所示。从图中可以看出,弹体飞行时间 25 s,地磁传感器输出曲线整体包络针对某一横轴对称,具有明显的周期特性。

图 10 为基于短时傅里叶变换的转速时频曲线,图 11 为基于连续小波变换的转速时频曲线,通过对比发现,采用连续小波变换方法对信号的高频成分的分辨率效果更好,

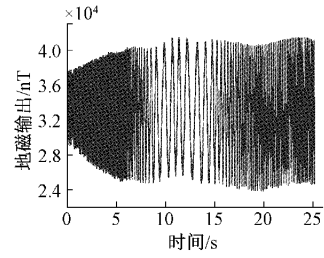


图 9 径向地磁测量数据

且具有一定的降噪作用,对转速频率分辨率精度高,具有很好的自适应能力。图 12 为解算的飞行过程中转速曲线,利用连续小波变换方法提取时频曲线的频率信息,进而解算出弹体实时转速信息。

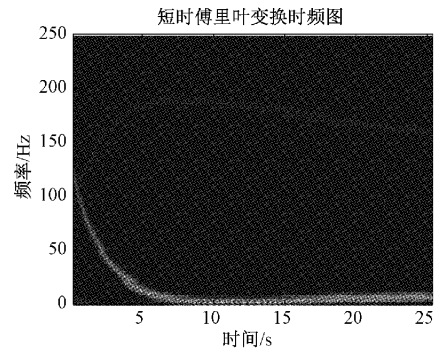


图 10 短时傅里叶变换时频曲线

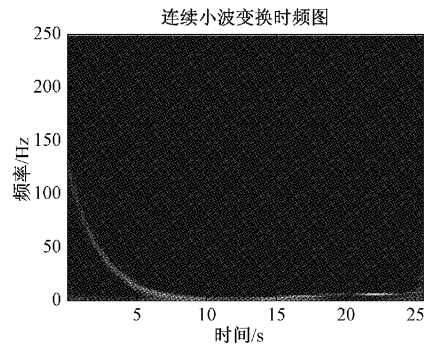


图 11 连续小波变换时频曲线

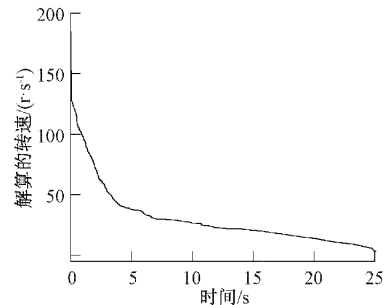


图 12 解算的飞行转速曲线

## 4 结 论

高旋制导弹药转速信息测量对于新型制导弹药及火炮的研制具有非常重要的意义,特别是制导弹药应用环境复杂和恶劣,运动参数测量难度很大。本文首先提出了一种基于三轴地磁传感器的转速测量装置,可获取弹体三轴旋转运动信息,分析了基于过零点检测的转速测量方法、基于短时傅里叶变换的时频分析方法和基于连续小波变换的时频分析方法,通过机床转速试验和弹载飞行试验,充分验证了方法的可行性,并且证明了采用连续小波变换方法对弹体转速解算的最优性,可实时有效获取弹体飞行过程中的转速信息,其计算简单快速,不需要进行滤波处理,具有更高的时间精度和准确性。

### 参考文献

- [1] 尚剑宇,邓志红,付梦印,等.制导炮弹转速测量技术研究进展与展望[J].自动化学报,2016,42(11):1620-1629.
- [2] 尚剑宇,张晓明,黄建林,等.常规弹药转速测量时频分析方法研究[J].传感技术学报,2012,25(7):951-956.
- [3] 刘英,张嘉易,郝永平,等.基于单轴地磁信号的滚转角及转速解算[J].传感器与微系统,2018,37(3):141-144.
- [4] 安亮亮,王良明,钟阳,等.单轴磁传感器测量转速及滚转角的低成本方法[J].兵器装备工程学报,2020,41(7):1-4.
- [5] 姜博文,管雪元,李文胜.基于磁阻传感器的高旋弹转速测量方法[J].电子测量技术,2017,40(5):47-50.
- [6] 张晓明,朱孟龙,张莺莺.改进的两轴磁传感器测量弹体滚转角方法[J].传感器与微系统,2021,40(8):9-12.
- [7] 李文胜,管雪元,杨梦雨,等.基于磁阻传感器的高旋弹转速测量系统[J].电子测量技术,2017,40(2):175-178.
- [8] 顾浩卿,陈志孟,光韦.地磁传感器飞行器转速测量法研究[J].电子测试,2016(10):23-24.
- [9] 王欢,裴东兴,陈昌鑫,等.基于 Hilbert 变换模拟弹丸转速信号的瞬时频率分析[J].火炮发射与控制学报,2018,39(4):81-85.
- [10] 杨文,于文松,裴东兴,等.弹载弹丸参数测试技术的研究[J].电子器件,2016,39(3):667-670.
- [11] 孙圆圆.基于环境磁场的膛内弹丸转速测量方法研究[D].太原:中北大学,2021.
- [12] 管军,易文俊,常思江,等.基于 FFT 旋转弹丸转速数据处理方法[J].弹道学报,2016,28(2):1-4.
- [13] 李文豪,秦丽,刘一鸣,等.基于加权最小二乘法的弹体转速测量方法研究[J].中国测试,2018,44(1):35-39.
- [14] 蒋孝勇,李孟委,张晓峰,等.基于隧道磁阻效应的反正切转速测量方法[J].传感技术学报,2017,30(5):692-696.
- [15] 郭泽荣,吴日恒,李世义,等.基于双轴加速度传感器的外弹道转速实时测量方法[J].兵工学报,2008(29):1367-1372.

### 作者简介

刘福朝,助理研究员,博士,主要研究方向为高动态导航技术、惯性测量装置、组合导航系统。

E-mail: lfc@bistu.edu.cn