

地磁传感器测量弹体滚转姿态方法研究

邱荣剑

(海军装备部,太原 030027)

摘要:地磁传感器抗过载能力强且成本低,在制导炮弹中得到广泛应用,它的主要功能是测量弹体姿态;介绍了一种双轴地磁传感器测量弹体滚转姿态的方法,该双轴传感器固联在弹体横截面上;该测量方法利用地磁传感器随弹体滚转时感应磁场变化产生的正弦输出解算弹体滚转角速率及滚转方向,利用经纬度信息及弹体俯仰偏航信息,根据地磁场模型计算地磁场矢量在弹体横截面上的投影分量,然后由投影分量的解算出滚转姿态角的基准角,最后根据双轴地磁传感器输出和基准角判定弹体姿态角;通过试验验证了该滚转姿态测量方法的可行性,并进行了误差分析,误差在可接受范围内,可满足简易制导炮弹需求。

关键词:地磁传感器;滚转姿态角;测量

本文引用格式:邱荣剑.地磁传感器测量弹体滚转姿态方法研究[J].四川兵工学报,2014(10):103-106.

中图分类号:TJ413.6

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2014)10-0103-04

Research on the Method of Measuring Projectiles Roll Attitude by Geomagnetic Sensors

QIU Rong-jian

(Equipment Department of Navy, Taiyuan 030027, China)

Abstract: Geomagnetic sensors had been far-ranging applied to guided cannonball owing to its high ability to over loading and low-cost. Geomagnetic sensors perform the function of measuring projectiles attitude. A method of measuring projectiles roll attitude by twi-axial geomagnetic sensors had been introduced. The sensors were installed on the cross section of projectiles, and rolled following the projectiles. This method used sensors' sine wave output to calculate roll rate and roll direction of projectiles; used geomagnetic model and the data of longitude, latitude, pitching and yawing to calculate the projection of geomagnetic field to the cross section of projectiles; used projection to calculate the fiducial angle; last, used the output of twi-axial geomagnetic sensor and fiducial angle to calculate the roll attitude angle. This method had been validated by experimentation, the measure error was inside acceptable area, can be used to simple guided cannonball.

Key words: geomagnetic sensors; roll attitude angle; measure

Citation format: QIU Rong-jian. Research on the Method of Measuring Projectiles Roll Attitude by Geomagnetic Sensors[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014(10):103-106.

现代战争中大口径火炮的作战使命和需求决定了需研制并装备具有远程攻击能力的制导炮弹^[1]。由于火炮发射环境恶劣及受国内惯性器件技术水平限制,目前惯性导航系

统还不具备在制导炮弹中应用的条件。近年来,随着国外应用地磁探测技术的制导武器的出现^[2-3],地磁探测定姿技术成为了国内导航技术研究的热点。地磁探测定姿技术主要

利用固定在弹上地磁传感器探测各弹轴上的地磁分量变化规律并以此解算出弹体姿态。介绍了根据地磁场模型,利用固联在弹体横截面上双轴地磁传感器及卫星定位信息解算弹体滚转姿态角及角速度的方法,并通过了试验验证。

1 地磁场模型

定义如图1的 $O-NEH$ 北东天导航坐标系, \vec{M} 表示地磁场矢量, X 为地磁场水平分量。图中所示 I 为地磁倾角。地磁倾角是表示地球表面磁场与地平线所成的夹角。图1中所示 D 为地磁偏角, 即磁北方向与真北方向之间存在一定的夹角, 向东偏为正, 西偏为负^[4]。

在地磁研究中, 国际参考地磁场 (IGRF) 是描述地球主磁场的标准全球模型, 在 IGRF^[5] 模型中, 各地磁场的标量磁位可用球谐函数表达^[5-7]:

$$M(r, \theta, \varphi) = a \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} (g_i^j \cos j\varphi + h_i^j \sin j\varphi) P_i^j(\theta) \quad (1)$$

式(1)中, a 为地球半径, r 为地球径向距离, g_i^j, h_i^j 为地磁场球谐系数(或高斯系数), $P_i^j(\theta)$ 为伴随勒让德函数, θ, φ 分别为经度和余纬, $\varphi = 90 - \lambda$, λ 为纬度, k 为模型的截断水平。

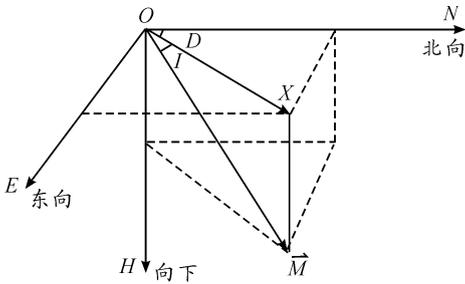


图1 地磁要素示意图

相应的地磁分量可表示为

$$\begin{cases} M_N = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} (g_i^j \cos j\varphi + h_i^j \sin j\varphi) dP_i^j(\cos\theta) \\ M_E = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} (g_i^j \sin j\varphi - h_i^j \cos j\varphi) P_i^j(\cos\theta) \\ M_H = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} (g_i^j \cos j\varphi + h_i^j \sin j\varphi) P_i^j(\cos\theta) \end{cases} \quad (2)$$

目前已有8代 IGRF (国际参考地磁场模型), 对于确定的地磁场模型 DGRF (Definite Geomagnetic Reference Field), 地磁场高斯系数今后不再修改。基于 DGRF^[8], 分别采用内插和外推的方法求解相应时间对应的高斯系数。

2 滚转速度测量方法

本文介绍地磁传感为双轴磁阻传感器, 磁阻传感器是基于磁电阻效应, 利用合金电阻对某一个方向磁场敏感的原理

制成^[9]。将双轴地磁传感器 $M_1 M_2$ 固连在弹体横截面上, 与弹轴方向垂直, 如图2所示, 其中 $oxyz$ 为准弹体坐标系。 \vec{M}_{yz} 是地磁场矢量 \vec{M} 在准弹体坐标系 oyz 平面的投影, φ 为 \vec{M}_{yz} 与 M_1 的夹角, 定义它为滚转姿态计算的基准角。当弹体以角速度 w 转动时, 顺时针为正, 地磁传感器输出为

$$\begin{aligned} M_1 &= M_{yz} \cos\varphi = M_{yz} \cos(r_0 + wt) \\ M_2 &= M_{yz} \sin\varphi = M_{yz} \sin(r_0 + wt) \end{aligned} \quad (3)$$

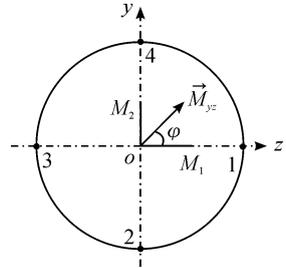


图2 双轴地磁传感器安装示意图

地磁传感器输出曲线如图3所示。根据磁阻传感器的输出特性, 滚转一周内各出现 $M_1 = 0$ 和 $M_2 = 0$ 的状态2次。假设 T_1 和 T_2 为弹体滚转一周两个 $M_1 = 0$ 的相邻时刻或是两个 $M_2 = 0$ 的相邻时刻。则

$$|\dot{\gamma}| = \left| \frac{1}{2(T_1 - T_2)} \right| \quad (4)$$

若地磁传感器输出按照 $\begin{cases} M_1 = 0 \\ M_2 > 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} M_1 < 0 \\ M_2 = 0 \end{cases} \Rightarrow$

$\begin{cases} M_1 = 0 \\ M_2 < 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} M_1 > 0 \\ M_2 = 0 \end{cases}$ 规律变化, 则可判定弹体正转(从弹尾看顺时针转), 反之则是反转。

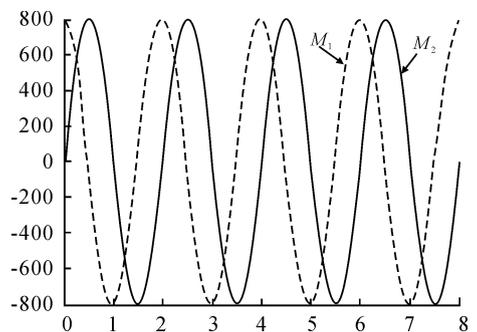


图3 双轴地磁传感器输出示意图

3 姿态角测量方法

由图2可知, M_1 安装对应弹体姿态“1”位置, M_2 安装对应弹体姿态“4”位置, 定义弹体姿态“1”位置与准弹体坐标系 Z 轴的夹角为姿态角 γ , 如图4所示, 弹体顺时针旋转为正, 且弹体姿态“1”位置在准弹体坐标系 Z 轴正半轴、弹体姿态“4”位置在准弹体坐标系 Y 轴正半轴时弹体姿态角为0。

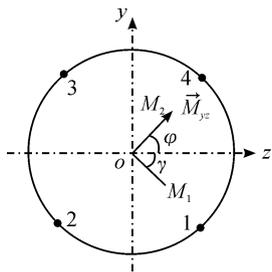


图4 $M_1=0, M_2>0$ 时弹体姿态示意图

假设 t_0 时刻,弹体姿态角为 γ_0 ,则 t 时刻弹体姿态角为

$$\gamma = \gamma_0 + \int_0^t \dot{\gamma} dt \quad (5)$$

由式(5)可知求解姿态角主要是求解 γ_0 。

以北东天导航坐标系为参考, ψ 为弹体偏航角(射向), ϑ 为弹体俯仰角。根据坐标变换^[10-11],将地磁场分量由北东天导航坐标系变换到准弹体坐标系下,由得到准弹体坐标系下 X, Y, Z 方向的地磁分量为

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta\sin\psi & \sin\vartheta & -\cos\vartheta\sin\psi \\ -\sin\vartheta\cos\psi & \cos\vartheta & \sin\vartheta\sin\psi \\ \sin\psi & 0 & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_N \\ -M_H \\ M_E \end{bmatrix} \quad (6)$$

则

$$\begin{aligned} M_y &= -M_N\sin\vartheta\cos\psi - M_H\cos\vartheta + M_E\sin\vartheta\sin\psi \\ M_z &= M_N\sin\psi + M_E\cos\psi \end{aligned} \quad (7)$$

由式(1)、式(2)可知,根据发射阵地和飞行过程中的经纬度和高度信息可以计算出任意飞行弹道点上的 M_y 和 M_z 。

根据飞行中卫星定位装置探测的速度信息: V_N, V_E, V_H 和弹道运动方程组可以初步计算出弹丸弹道倾角 θ_c 和速度航向角 ϕ (与真北夹角),根据炮弹姿态角转换关系^[11-12]: $\vartheta = \theta_c + \alpha$ 和 $\psi = \phi + \beta, \alpha, \beta$ 为炮弹攻角和侧滑角,本测量方法假定攻角和侧滑角为零。

滚转姿态的基准角为

$$\varphi = \text{atan}\left(\frac{M_y}{M_z}\right) \quad (8)$$

当弹体滚转到双轴地磁传感器输出为 $M_1 = 0, M_2 > 0$ 时,可判定弹体姿态角 $r_0 = 90^\circ - \varphi$,如图4所示。

4 试验验证及精度分析

针对设计的弹载地磁姿态测量装置和确定的地磁滚转姿态解算算法,设计了地面模拟转台调试装置,根据给定经纬度计算地磁分量 M_N, M_E, M_H 。通过改变炮弹的偏航角 β 和俯仰角 θ 来验证地磁解算滚转姿态信息的处理算法的正确可行性,并分析弹载地磁姿态测量装置的测试误差。

在某地区进行地磁传感器测试试验,将测试结果与理论计算进行比较。图5给出了射角 0° 、射向 300° 时滚转速度为 1 r/s 时地磁传感器输出原始信号,测得转速测量误差为 $\pm 0.05 \text{ rad/s}$ 。图6给出了射角为 0° 时,射向从 0° 起按 15° 增

量检测磁探测基准理论计算值与给定射向检测值的对比曲线,从比较结果看,理论计算值与实际检测值的误差在 $[-1.5^\circ \sim +1.2^\circ]$ 。图7给出了射向为 300° 射角从 $0^\circ \sim -45^\circ$,磁探测基准理论计算值与射角变化检测值的对比曲线,从几种检测结果看,理论计算值与实际检测值基本一致,最大偏差范围: $[-3^\circ \sim +3^\circ]$ 。

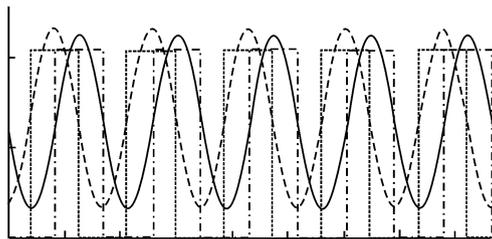


图5 射角 0° 、射向 300° 时磁组合姿态测量装置原始信号

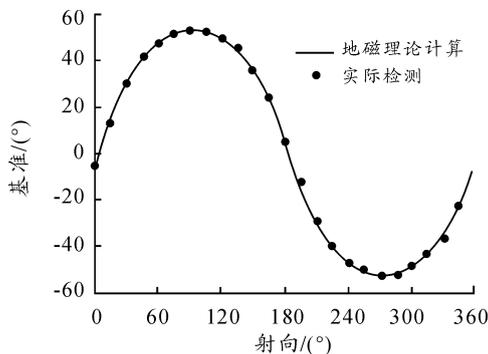


图6 射角 0° 时理论计算与实测基准曲线

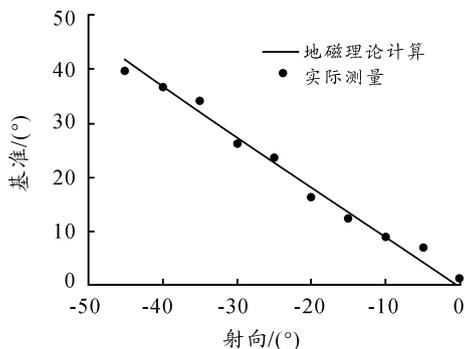


图7 射向 300° 、射角 $0^\circ \sim -45^\circ$ 理论计算与实测基准曲线

5 结论

由上述算法介绍可知,利用二维地磁传感器测量炮弹滚转姿态有如下优点:无需地面标定或对准传递,在空中组合卫星定位数据即可求解滚转姿态,使用方便;滚转每周都可以重新计算滚转姿态解算基准角和转速,姿态解算误差不会积累。该方法存在的不足:在求解姿态角时需要卫星定位信息,若卫星数据丢失,姿态角解算误差会随着弹体姿态变化

而增大;由于火炮的射向是 0° (360° ,当弹轴与地磁矢量平行时,地磁在弹体横截面上投影为零,地磁传感器只输出噪声,这时将无法解算炮弹的滚转姿态角。制导炮弹在实际飞行中,俯仰角是不断变化的,出现地磁双轴输出均为噪声的几率非常小,即便出现也是瞬间的,在控制系统设计时采取应对措施(如地磁失效时,姿态解算按照失效前的基准角及转速进行积分求解)即可避免因地磁失效造成对控制效果不利的影 响。由试验验证结果及上述分析可知,双轴地磁滚转姿态测量方法可用于地磁+卫星组合导航的简易制导炮弹中。

参考文献:

- [1] 修观. 非线性模型预测控制方法在滑翔弹道控制中的应用研究[D]. 南京:南京理工大学,2011.
- [2] 张珊珊. 德国在 MLRS 上测试弹道修正模块[J]. 外国炮兵,2005(3):46-47.
- [3] 知愚. 法国研究磁场制导技术[J]. 应用光学,2006(2):162.
- [4] 杨晓东,王炜. 地磁导航原理[M]. 北京:国防工业出版社,2009.

- [5] 徐文耀. 地磁场的三维巡测和综合建模[J]. 地球物理学进展,2007,4(8):113-117.
- [6] 王向磊,苏牡丹,丁硕等. 区域地磁场的连续傅立叶分析建模方法[J]. 测绘科学技术学报,2011,28(6):425-428.
- [7] 杨元喜. 地壳变形分析模型[J]. 郑州测绘学院学报,1990(2):20-26.
- [8] 徐文耀. 国际参考磁场模型中高阶球谐项对地磁长期变化的影响[J]. 地球物理学报,2003,46(6):774-784.
- [9] 张海峰,刘晓为,王喜莲,等. 磁电阻效应的原理及其应用[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(3):362-364.
- [10] 邓正隆. 惯性技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006.
- [11] 钱杏芳,林瑞雄,赵雅男. 导弹飞行力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2008.
- [12] 姜寿春. 导弹制导技术[M]. 北京:宇航出版社,1989.

(责任编辑 周江川)

(上接第 99 页)

参考文献:

- [1] 颜云辉,王展,董德威. 军事伪装技术的发展现状与趋势[J]. 中国机械工程,2012(17):2136-2141.
- [2] 王启超,赵大鹏,汪家春,等. 多光谱偏振探测对伪装目标的识别研究[J]. 光电工程,2013(3):29-34.
- [3] 郭中华. 关于自然光在两种介质分界面上反射和折射时的偏振特性讨论[J]. 论物理与工程,2013(4):10-13.
- [4] 丁光涛. 偏振光学的四元数方法[J]. 光学学报,2013(7):1-6.

- [5] 曹先平,孙萍. 不同波长的散射介质后向散射光偏振度特性[J]. 光子学报,2012(5):608-613.
- [6] 朱燕. 基于偏振态探测的分布式光纤振动传感器[D]. 成都:电子科技大学,2011.
- [7] 朱琰. 基于虚拟仪器和 MATLAB 的空调系统设计与研究[D]. 上海:东华大学,2014.
- [8] 华文立,苏传芳,张红梅. 基于.NET及COM组件的应用开发技术[J]. 蚌埠学院学报,2013(1):1-5.
- [9] 宋昕,徐维良. 基于COM组件的合同文本自动生成系统[J]. 现代电子技术,2013(12):61-64.

(责任编辑 杨继森)