

doi: 10.7690/bgzdh.2014.01.003

基于 GPS/MR 组合的弹道修正弹数据处理

周光磊, 李文彬, 曹鹏

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

摘要: 针对弹道修正弹的修正控制过程中最关键的弹丸滚转角的解算问题, 采用 GPS/MR 组合对弹道修正弹数据进行处理。基于卫星和地磁组合的弹道修正弹滚转角测量原理, 建立滚转角的数学解算模型。通过拉格朗日插值法对数据进行插值处理, 利用高频率的地磁数据进行小段的正弦拟合得到正弦函数角速率, 代替滚转角的角速度从而求得滚转角, 并以 Matlab 进行仿真比较。仿真结果表明: 通过高频率的地磁数据进行插值处理的方法是可行的, 能满足实际工程需求。

关键词: 弹道修正弹; GPS/MR; 滚转角

中图分类号: TJ760.6 **文献标志码:** A

Data Process of Trajectory Correction Projectile Based on GPS/MR

Zhou Guanglei, Li Wenbin, Cao Peng

(Key Laboratory of National Defense for Smart Ammunition, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In the trajectory correction projectile revision control process, we need to know the real-time angle of the projectile accurately. The roll angle is the most important. In this paper, established the mathematics model on the basis of measurement principle of roll angle of trajectory correction projectile based on GPS and magnetic resistance(MR). The data was interpolated by Lagrange interpolation and sine fit the high frequency geomagnetic data into small pieces to solve the angular rate to replace the angular velocity of the roll angle so as to obtain the roll angle. Then simulation and compare it through Matlab. Result shows that the interpolation method through the high-frequency geomagnetism data is feasible, and meets practical demand.

Keywords: trajectory correction projectile; GPS/MR; roll angle

0 引言

远程精确打击技术是当前弹箭技术的重点发展方向之一。在实现弹箭的远程精确控制飞行技术中, 弹箭的气动布局、弹道参数实时测量、控制方案与控制策略等, 均是一些重要的问题。其中, 实时准确测量弹箭飞行过程中姿态角度是制定实施控制方案的基础, 也是制导弹箭实现远程精确控制飞行的关键; 因此, 制导弹箭姿态角度实时准确测量成为国内外研究的热点^[1]。目前导弹等飞行体姿态角的测量方法有很多, 如 GPS、陀螺、加速度计及地磁场传感器等方法。然而由于炮弹的高过载、小体积、低成本等特点, 很多方法并不适合于炮弹。基于 GPS 与三轴磁阻传感器 (magnetic resistance, MR), 组合的弹丸姿态测量系统, 能够满足炮弹的要求, 并且具有误差不随时间累积、全天候及高频率工作的特点, 是一种可靠的、高效的姿态测量方案。

目前关于 GPS/MR 组合测量弹丸姿态角方案的研究中, 很多学者进行了工作。张华强^[2]对地磁采集系统数据方法处理进行了研究, 得到了较为理想的地磁数据。但是, 由于地磁传感器获得的频率较高, 而 GPS 接收机的频率仅有 10 Hz, 在弹丸实际

飞行控制中尤其是高转速的弹丸飞行中, 远远不能满足实时要求。在此背景下, 笔者根据 GPS 和地磁组合测量原理, 建立了滚转角的数学计算公式, 并根据实际问题对 GPS 采样数据进行了处理, 使之能够满足实际要求。

1 滚转角解算方法

地磁坐标系如图 1 所示, 地磁场矢量一般可以用 7 个磁场要素表示: 总磁场强度 B 、北分量 X 、东分量 Y 、垂直向下分量 Z 、水平分量 B_h 、磁倾角 I 和磁偏角 D 。7 个要素互相联系, 只需测定不在同一平面的 3 个要素, 就可以计算出另外 4 个要素。

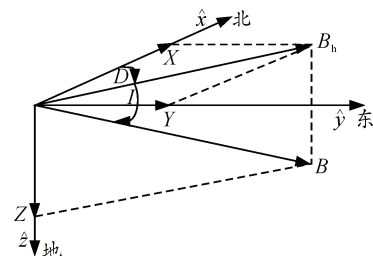


图 1 地磁坐标系

由图 1 可知, 地磁矢量在导航坐标系下的投影值, 为组合导航的初始地磁值, 如方程式 (1):

收稿日期: 2013-08-23; 修回日期: 2013-09-12

作者简介: 周光磊 (1990—), 男, 江苏人, 研究生, 从事智能弹药、弹丸姿态探测研究。

$$\mathbf{B}_0 = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B \cos I \cos D \\ B \cos I \sin D \\ B \sin I \end{pmatrix} \quad (1)$$

在弹丸飞行过程中，通过弹载地磁测量单元实

$$\mathbf{C}_n^b = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ -\cos \phi \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi & \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi & -\sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}$$

由于式 (2) 存在参量耦合的情况，若已知 2 个角度，则可求出第 3 个角度。将俯仰角和偏航角设为已知，则可求出滚转角

$$\gamma = \arctan \left(\frac{aY_i - bZ_i}{bY_i + aZ_i} \right) \quad (3)$$

其中 a 、 b 为中间变量：

$$\begin{cases} a = \sin \theta \cos \psi X_0 + \sin \theta \sin \psi Y_0 + \cos \theta Z_0 \\ b = -\sin \psi X_0 + \cos \psi Y_0 \end{cases}$$

在准速度坐标系与导航坐标系下，利用 GPS 提供的速度信息 v_i ，可以得到弹道倾角及弹道偏角的计算公式：

$$\begin{cases} \psi_v = \arctan \frac{v_{y_i}}{v_{x_i}} \\ \theta_v = \arctan \frac{v_{z_i}}{v_{x_i}} \end{cases} \quad (4)$$

式中， $v_i = (v_{x_i}, v_{y_i}, v_{z_i})^T$ 分别为准速度坐标系下， i 时刻的 3 个速度分量； ψ_v, θ_v 为弹道倾角和弹道偏角。

由外弹道知识可知^[3]：弹丸在上升段及下降段的飞行稳定阶段，弹丸的弹道攻角和侧滑角为小量，因此，可以用弹道倾角和弹道偏角代替俯仰角和偏航角，即

$$\psi \approx \psi_v, \quad \theta \approx \theta_v \quad (5)$$

由式 (1)、式 (3)~式 (5) 可求出弹丸滚转角。

2 数据处理原理

2.1 外弹道仿真

外弹道学是研究弹箭在空中运动规律及总体性能的科学，其研究对象包括枪弹、炮弹、航弹、火箭弹及导弹等飞行体。与导弹等制导武器系统类似，常规武器的外弹道也是用一阶微分方程组来描述的。只有少数微分方程能用初等方法求得解析解，多数问题的研究必须借助于现代仿真技术^[4]。

Matlab 是美国 MathWorks 公司推出的一套高性能数值计算和可视化软件，它集数值分析、矩阵运

时测量地磁数据，可以得到地磁与弹体姿态角的关系方程，如下式：

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{C}_n^b \mathbf{B}_0 \quad (2)$$

\mathbf{C}_n^b 为由导航坐标系到弹体坐标系的姿态转换矩阵。

算、信号处理和图形显示于一体，构成一个方便的、界面友好的用户环境^[5]。通过 Matlab 提供的 Simulink 仿真工具能够较方便地进行弹丸的外弹道仿真。根据弹丸的理论弹道方程组^[6]，通过 Matlab 对文中所用的 155 mm 的弹道修正弹进行外弹道仿真，得到其理论滚转角变化曲线如图 2。

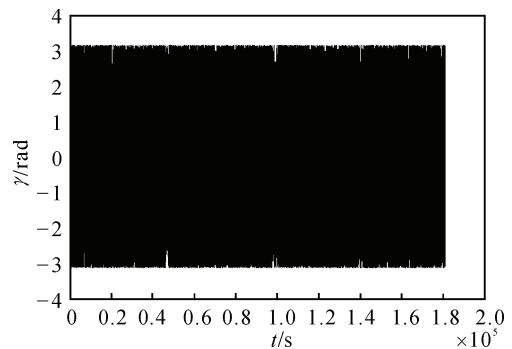


图 2 弹丸理论滚转角变化曲线

由于实际中 GPS 的接收机的频率仅为 10 Hz，所以解算得到的滚转角频率也仅为 10 Hz，得到的滚转角变化曲线如图 3。

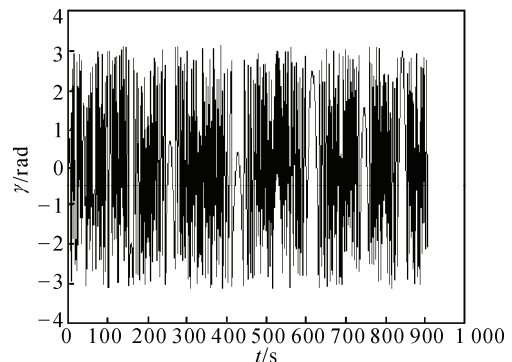


图 3 10 Hz 频率的弹丸滚转角变化曲线

2.2 数据处理原理

由于弹道修正弹原理是根据弹丸的滚转角度确定弹丸的姿态与理论弹道进行比较，然后通过弹上的修正机构对其进行修正的。由图 2 和图 3 对比可以发现，10 Hz 的滚转角频率远远不能满足弹道修正弹的精度要求，为了满足实际应用，需要对 10 Hz 的滚转角数据进行处理。

常用的插值方法有 Lagrange 插值、Newton 插值等。其中线性插值、抛物线插值是 Lagrange 插值的特例^[7]。分别采用线性插值及抛物线插值以及根据地磁进行插值，将 10 Hz 的频率插值并比较误差。

3 数据插值处理

3.1 线性插值

首先采取线性插值的方法将 10 Hz 的频率插值到 100 Hz，得到滚转角的变化曲线如图 4，滚转角误差如图 5。

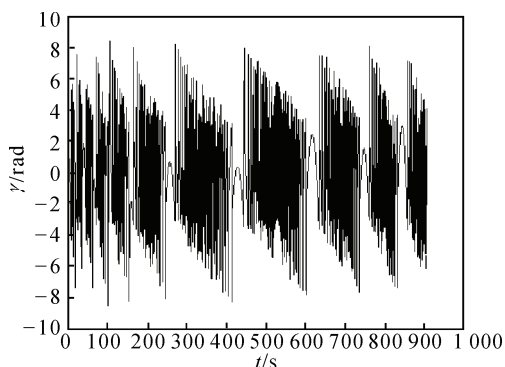


图 4 插值到 100 Hz 滚转角变化曲线

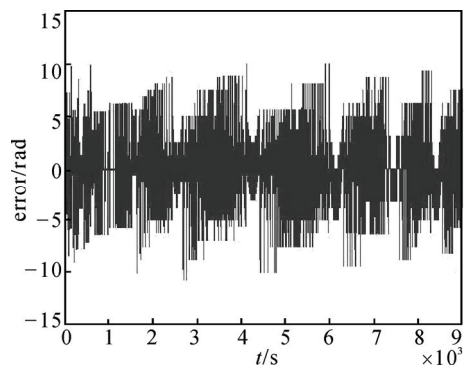


图 5 滚转角误差

3.2 抛物线插值

采取抛物线插值到方法将 10 Hz 的频率插值到 100 Hz，滚转角的变化曲线如图 6，误差如图 7。

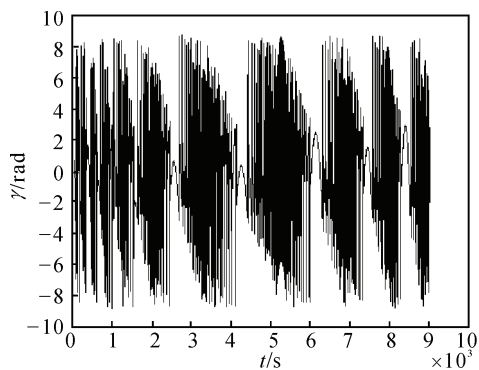


图 6 抛物线插值到 100 Hz 滚转角变化曲线

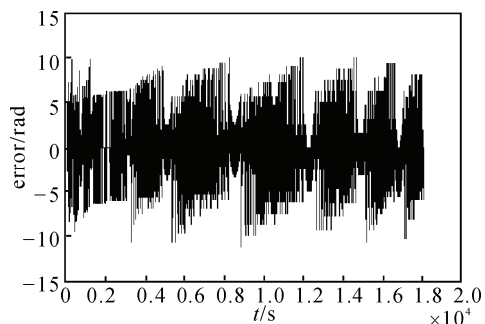


图 7 滚转角误差

3.3 根据地磁进行插值

根据图 7 可知，用拉格朗日插值处理数据误差较大，而往更高次阶插值运算较为复杂，所以这里采用另外一种处理方法。

由于地磁的频率为 2 kHz，且地磁的变化与弹丸的旋转有关，因此如果需要将 10 Hz 的 GPS 频率插值提高，可以首先通过高频率的地磁数据分别取小段进行正弦拟合，求出该正弦函数的角速率，用来代替这段时间内滚转角的角速度，即可以推算到这段时间内的滚转角，从而提高滚转角频率。

现将以 GPS 频率插值到 100 Hz 为例进行说明。由于原来 GPS 频率为 10 Hz，即 2 个数据点时间为 0.1 s，而在 0.1 s 内地磁数据有 200 个点，因此如将其插值到 100 Hz，可将这 200 个地磁点每 20 个点为一组进行正弦拟合，求出其角速率。其中第一段的 20 个点拟合曲线如图 8。

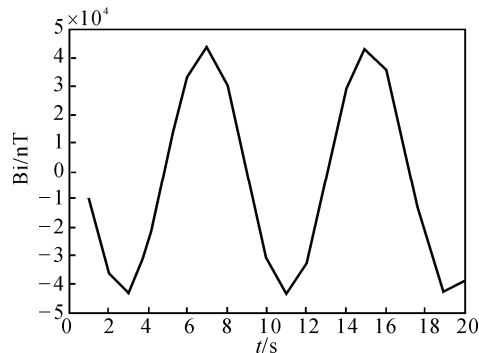


图 8 20 个地磁数据拟合正弦曲线

依次可以求出的角速率变化曲线，如图 9。

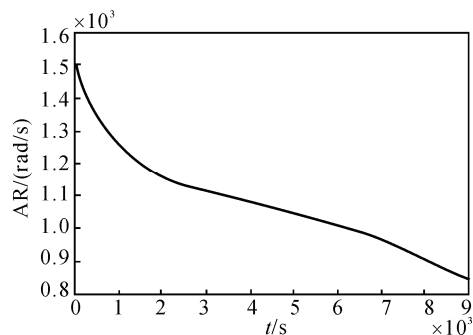


图 9 角速率变化曲线

由于求出的角速率与通过外弹道仿真得出的角速率曲线误差较小，将两曲线做差，得到误差图如图 10。

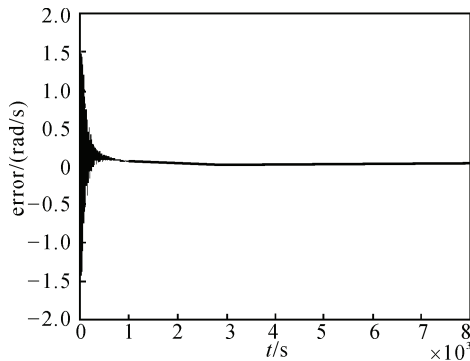


图 10 两曲线误差

依次通过 Matlab 编程即可根据角速率推算出滚转角，得到 100 Hz 的滚转角。滚转角曲线如图 11。

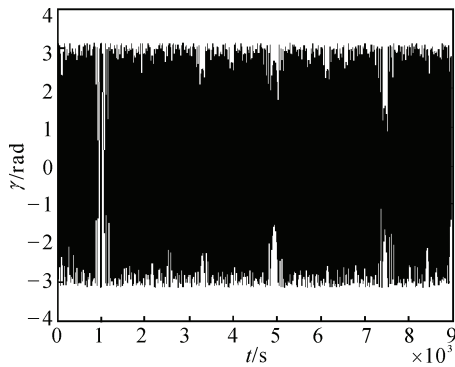


图 11 根据地磁插值到 100 Hz 滚转角曲线

滚转角误差见图 12。由图可知：滚转角误差较小，能够满足实际要求。

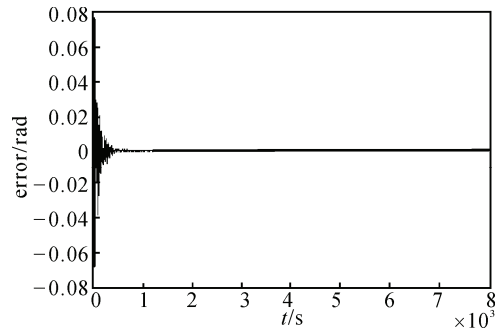


图 12 滚转角误差

4 结束语

笔者基于 GPS/MR 组合，建立了弹道修正弹的滚转角解算模型，通过对数据处理研究，利用高频率的地磁数据对滚转角进行插值处理，得到的滚转角误差较小，使其能够满足实际工程要求。

参考文献：

[1] 鲍亚琪, 陈国光, 吴坤, 等. 基于磁强计和 MEMS 陀螺的弹箭全姿态探测[J]. 兵工学报, 2008, 29(10): 1227-1231.

[2] 张华强, 郑宇, 吕清利. 地磁采集系统的处理方法[J]. 兵工自动化, 2011, 30(8): 69-71.

[3] 韩子鹏, 等. 弹箭外弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008: 25-32.

[4] 辛长范. 基于 Simulink 的质点外弹道模型仿真[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(6): 39-40.

[5] 张志涌, 杨祖樱, 等. Matlab 教程: R2011a[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 237-253.

[6] 王中原, 周卫平. 外弹道设计理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 66-72.

[7] 李长胜, 刘刚. 线性插值算法研究[J]. 机床与液压, 2002(1): 107-108.

量再生系统能够在一般坡道上实现平稳起步，在较大坡道上短时间避免车辆后溜。

参考文献：

[1] 严军, 过学讯, 谭罡风, 等. 基于联合仿真的液力缓速器液压控制[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(6): 1244-1250.

[2] 赵广俊, 吕建刚, 宋彬, 等. 履带车辆液压储能式制动系统制动性能仿真研究[J]. 机床与液压, 2011, 39(21): 132-135.

[3] 张治文, 宋蕴璞. 液压混合动力制动能量再生关键参数研究[J]. 机床与液压, 2011, 39(15): 32-34.

[4] 任国军, 祝凤全. 液压混合动力车辆中蓄能器的参数设计研究[J]. 液压与气动, 2010(8): 12-14.

[5] 张银彩, 祖炳洁, 郝长生. 车辆液压储能传动蓄能器的匹配分析[J]. 液压与气动, 2010(12): 85-87.

[6] 邢志娜, 瞿军, 王菊香. 重载车辆发动机油液的多技术监测方法[J]. 兵工自动化, 2012, 32(5): 83-86.

[7] 任彦恒, 吕建刚. 某型履带车辆变速液压操纵系统仿真[J]. 军械工程学院学报, 2008(1): 27-31.

(上接第 6 页)

由图 5~图 7 可看出，当坡度小于等于 8 时，车辆能够在液压系统单独驱动下起步(即有正向速度和位移)，此时蓄能器压力由最高工作压力 30 MPa 迅速下降。当坡度等于 16 时，蓄能器能够在一定时间内(大于 20 s)保持高压不变，车辆保持静止状态，未出现溜车现象。当坡度为 20 时，液压系统已不能驱动车辆，并出现了车辆后溜现象。由仿真结果可得，采用液压制动能量再生系统的车辆可以在一般坡道上实现平稳起步；在较大坡道的道路上实现短时间不溜车。

4 结束语

笔者通过对制动能量液压回收再生系统的数学模型分析和计算机仿真分析得出以下结论：1) 液压制动系统能够有效地控制车辆速度；2) 液压制动能量再生系统能够单独驱动车辆起步；3) 液压制动能