

双加速度计滤波法测量弹丸轴向加速度

王超, 霍鹏飞

(机电工程与控制国家级重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 弹丸的射程预测通常需要采用加速度计测量其轴向加速度。为了消除加速度计安装位置、安装误差以及弹丸姿态运动对弹丸轴向加速度测量精度的影响, 文中基于刚体弹道模型对双加速度计滤波法测量精度进行了仿真分析。仿真结果表明: 双加速度计滤波法测量误差为 $0.6 \text{ m/s}^2 (1\sigma)$, 该方法可以有效地提高测量精度。

关键词: 弹丸; 加速度测量; 精度分析

中图分类号: TJ012.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-1194(2009)04-0058-03

Projectile Axial Acceleration Measurement by Dual-accelerometer Filtering Method

WANG Chao, HUO Peng-fei

(National Key Laboratory of Electromechanical Engineering and Control, Xi'an 710065 China)

Abstract: Measurement of axial acceleration is necessary for projectiles range prediction. Dual-accelerometer filtering measurement method is used to eliminate axial acceleration measurement errors caused by accelerometer location, installation errors and attitude motion of projectiles. The dual-accelerometer filtering measurement method is simulated based on six-degree ballistic trajectory model, and the simulation results show that the error of dual-accelerometer filtering measurement is 0.6 m/s^2 . This method can improve the measurement precision effectively.

Key words: projectile; acceleration measurement; precision analysis

0 引言

射程修正引信需要进行射程预测。文献[1~2]提出了一种自主式射程预测方法, 其中弹丸轴向加速度的测量是关键技术之一, 弹丸轴向加速度测量精度受传感器安装位置、安装误差以及弹丸的姿态运动等诸多因素的影响。为了消除这种影响, 文中基于加速度计输出和弹丸质心加速度之间的关系, 采用双加速度计滤波法测量弹丸轴向加速度, 并基于刚体外弹道模型, 采用蒙特卡洛模拟仿真研究了该方法的测量精度, 以为自主式射程预测技术提供设计依据。

1 加速度计输出数据

在实际应用中, 加速度计的不理想特性(如零偏、横向灵敏度等)通常通过实验室标定来消除, 故文中假设加速度计的输出数据不受其不理想特性的影响。

设加速度计要求安装在引信轴对称线上, 其敏感方向与弹丸轴向一致, 如果加速度计安装在弹丸质心, 考虑到加速度计的输出是比力, 所以质心处轴向加速度计的理论输出为:

$$a_{\text{rg}} = u + g \sin \theta \quad (1)$$

式中, u 为弹丸的轴向加速度, g 为重力加速度, θ 为弹道倾角。

* 收稿日期: 2008-12-08 修回日期: 2009-03-19

基金项目: 国防预研基金项目资助(9140c3606100904)

作者简介: 王超(1983—), 男, 陕西户县人, 硕士研究生, 研究方向: 弹道仿真及控制技术。E-mail: wangchao20001112@tom.com.

若加速度计实际安装在离弹丸质心 $(\Delta i, \Delta j, \Delta k)$ 处, 则加速度计输出为:

$$a_i = u - \Delta i(q^2 + r^2) + (pq - r)\Delta j + (pr + q)\Delta k + g \sin \theta \quad (2)$$

式中, $\Delta i, \Delta j, \Delta k$ 分别表示加速度计安装位置距弹丸质心三个方向的距离, p, q, r 分别表示弹丸绕弹体坐标系 x, y, z 轴三个方向的转动角速度。

由式(2)可知, 为了得到弹丸的轴向加速度, 必须消除加速度计输出中的有害项:

$$-\Delta i(q^2 + r^2) + (pq - r)\Delta j + (pr + q)\Delta k \quad (3)$$

可以看出, 该有害加速度与传感器的安装位置、安装误差以及弹丸的姿态运动有关。

2 双加速度计滤波法

文献[3~4]中采用了双加速度计配置法获取弹丸在弹道初始段的轴向加速度, 本节给出这种测量方法的数学公式, 以供测量精度分析。

由于在弹道初始段弹道近似为一条直线, 所以可用实际弹道的射角来近似弹道倾角, 故质心处加速度计的输出可表示为:

$$a_{\text{cg}} \approx u + g \sin \theta_{\text{act}} \quad (4)$$

式中, θ_{act} 表示弹丸的实际射角。

设两个加速度计分别安装在弹纵轴点 $(\Delta i_1, 0, 0)$ 和点 $(\Delta i_2, 0, 0)$ 上, 则它们输出分别为 a_{i_1} 和 a_{i_2}

$$a_{i_m} = u - \Delta i_m(q^2 + r^2) + g \sin \theta_{\text{act}} \quad (m = 1, 2) \quad (5)$$

通过以下公式消除离心加速度 $\Delta i(q^2 + r^2)$

$$\frac{\Delta i_2 a_{i_1} - \Delta i_1 a_{i_2}}{\Delta i_2 - \Delta i_1} = u + g \sin \theta_{\text{act}} \quad (6)$$

从而由双加速度计组合测量到的弹丸轴向加速度为:

$$a_{\text{cg}} = u = \frac{\Delta i_2 a_{i_1} - \Delta i_1 a_{i_2}}{\Delta i_2 - \Delta i_1} - g \sin \theta_{\text{act}} \quad (7)$$

由上面的公式可以看出, 在理想情况下(仅存在轴向安装误差), 采用双加速度计配置法可以有效地消除测量误差, 当考虑径向安装误差时, 即加速度计安装在弹上任意一点 $(\Delta i, \Delta j, \Delta k)$, 则由双加速度计配置后得到的轴向加速度为:

$$a_{\text{cg}} = u = \frac{\Delta i_2 a_{i_1} - \Delta i_1 a_{i_2}}{\Delta i_2 - \Delta i_1} - g \sin \theta_{\text{act}} - \left[\frac{\Delta i_2 \Delta j_1 - \Delta i_1 \Delta j_2 (pq - r)}{\Delta i_2 - \Delta i_1} + \right.$$

$$\left. \frac{(\Delta i_2 \Delta k_1 - \Delta i_1 \Delta k_2 (pr - q))}{\Delta i_2 - \Delta i_1} \right] \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 双加速度计配置并不能完全消除有害加速度, 通过双加速度计配置后还存在部分有害加速度的残余项。由于残余项的频率为 250 Hz 左右, 因此本文选取巴特沃斯低通滤波器对其残余项再进行相应的处理, 可进一步地提高加速度的测量精度。

3 仿真分析

弹道仿真的初始条件为: 加速度计 1 安装在距弹丸质心 45 cm 处, 即 $\Delta i_1 = 45$ cm, 加速度计 2 安装在 $\Delta i_2 = \Delta i_1 - \Delta i$ 处, $\Delta i = 5$ cm, 设轴向安装误差服从正态分布 $\Delta i_1, \Delta i_2 \sim N(0, 1 \text{ mm})$, 偏离弹丸纵轴的安装误差服从正态分布 $\Delta j, \Delta k \sim N(0, 2 \text{ mm})$, 射角、阻力系数、初速服从正态分布^[3]: $\theta_0 \sim N(48^\circ, 0.693^\circ)$, $c_w \sim N(0.486, 0.0027)$, $v_0 \sim N(850 \text{ m/s}, 2.34 \text{ m/s})$ 。

在上面的仿真条件下, 基于刚体外弹道模型进行 50 次蒙特卡洛模拟仿真, 其统计结果见表 1, 比较两种方法的轴向加速度测量误差, 可以看出双加速度计配置法的测量误差很大, 双加速度计滤波法的测量误差非常小, 采用双加速度计滤波法后可以有效地提高测量精度。

表 1 50 次蒙特卡洛模拟仿真结果

Tab. 1 Fifty times Monte Carlo simulation analyses results

测量方式	质心加速度测量误差	
	均值/(m/s ²)	方差/(m/s ²)
质心加速度值	—	—
双加速度计配置法	-5.065×10^{-6}	10.147 4
双加速度 滤波频率 50 Hz	-0.018 2	0.081 4
滤波频率 100 Hz	-0.009 1	0.639 8
计滤波法 滤波频率 150 Hz	-0.006 1	2.117 1

双加速度计配置法轴向加速度测量误差大的原因分析: 在有害加速度(3)式中, 双加速度计配置所能消除的有害加速度项为 $\Delta i(q^2 + r^2)$, 不能消除的有害加速度项为 $(pq - r)\Delta j + (pr + q)\Delta k$, 图 1 可以看出双加速度计配置法的测量误差为零均值的震荡项, 由图 2、图 3 可知双加速度计配置消除的是有害加速度中的一个小部分, 有害误差较大的一部分并不能消除, 因此双加速度计配置法的测量误差较大。

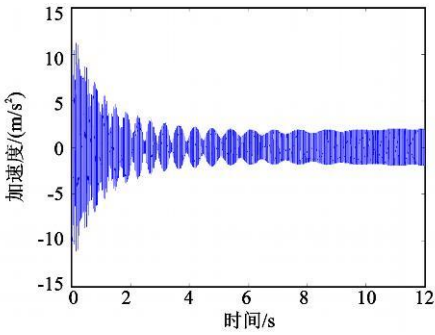


图 1 双加速度计配置法加速度残余项
Fig. 1 Dual-accelerometer configuration method measurement error

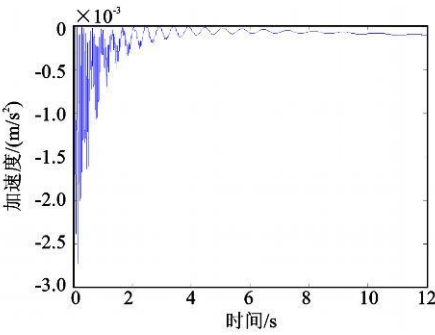


图 2 双加速度计配置法可消除的有害加速度项
Fig. 2 Measurement error eliminate part by dual-accelerometer configuration method

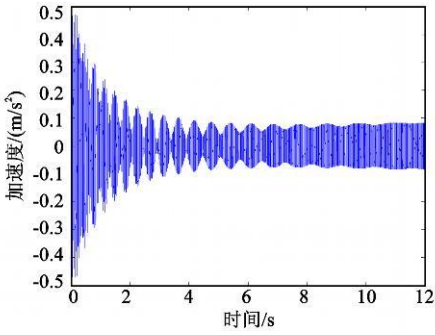


图 3 双加速度计配置法不可消除的有害加速度项
Fig. 3 Measurement error after dual-accelerometer configuration method

由于双加速度计配置后的残余有害加速度部分为含有频率很高的摆动角加速度 q, r , 因此可采用滤波处理进一步消除残余项, 以提高测量精度。通过表 1 可以看出, 滤波频率越低, 双加速度计滤波法测量精度越高。由图 4、图 5、图 6 可以看出, 随着滤波频率的增大, 轴向加速度测量误差也越大, 随着滤

波频率的增大, 测量误差呈现周期性变化。

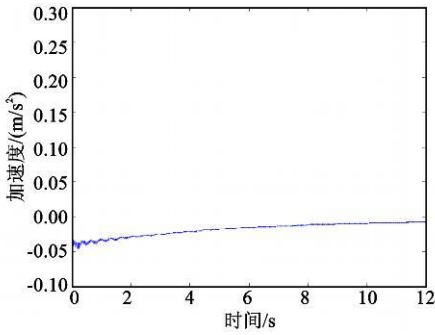


图 4 双加速度计滤波法测量误差(50 Hz)
Fig. 4 Dual-accelerometer configuration filtering measurement error (50 Hz)

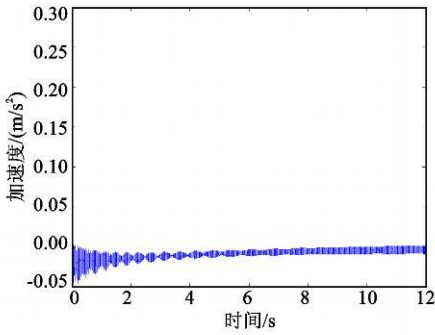


图 5 双加速度计滤波法测量误差(100 Hz)
Fig. 5 Dual-accelerometer configuration filtering measurement error (100 Hz)

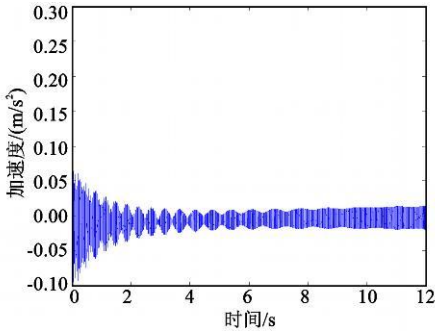


图 6 双加速度计滤波法测量误差(150 Hz)
Fig. 6 Dual-accelerometer configuration filtering measurement error (150 Hz)

4 结论

针对加速度计的安装位置误差, 采用双加速度计配置仅能消除有害加速度中的一小部分, 有害误

(下转第 65 页)

丸飞行速度等优点, 而且采用 SOPC 解决方案系统集成度高, 使测量装置本身引起的测量误差达到最小化, 通过误差分析, 系统测量误差小于 1%, 测速范围可以达到 400~4 000 m/s, 在枪炮测试领域具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 赵冬娥, 周汉昌. 基于大面积激光光幕的弹丸速度测试技术研究[J]. 测试技术学报, 2005, (4): 416-419.
ZHAO Dong-e, ZHOU Han-chang. Projectile velocity measurement technology based on large effective area laser screen[J]. Journal of Test And Measurement Technology, 2005, (4): 416-419.
- [2] 刘福才, 刘阳, 王世国, 等. 基于网靶和高速数据采集方法的弹丸速度测量[J]. 兵工自动化, 2008, 27(3): 72-74.
LIU Fu-cai, LIU Yang, WANG Shi-guo, et al. Measurement of bullet velocity based on net target and high-speed data collection[J]. Ordnance Industry Automation, 2008, 27(3): 72-74.
- [3] 王艳红, 周汉昌. 激光测速靶的经济实用性改进[J]. 弹箭

与制导学报, 2006, (4): 369-370.

WANG Yan-hong, ZHOU Han-chang. The economical and practical improving on laser measuring system[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, (4): 369-370.

- [4] 郝晓剑, 周汉昌, 苏尚恩. 大面积激光测速靶光学系统的设计与分析[J]. 测试技术学报, 2006, 20(1): 87-90.
HAO Xiao-jian, ZHOU Han-chang, SU Shang-en. Optical design and analysis of laser screen for projectile velocity measurement[J]. Journal of Test And Measurement Technology, 2006, 20(1): 87-90.
- [5] 周承仙, 李仰军, 武锦辉, 等. 弹丸速度及弹着点坐标测量系统研究[J]. 弹道学报, 2008, 20(3): 55-58.
ZHOU Cheng-xian, LI Yang-jun, WU Jin-hui, et al. Measuring system of velocity and impact point coordinate of projectiles[J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(3): 55-58.
- [6] 潘松, 黄继业. SOPC 技术实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [7] 杨吉祥, 詹宏英. 电子测量技术基础[M]. 南京: 东南大学出版社, 1997.

(上接第 60 页)

差较大的一部分并不能消除, 本文中提出的双加速度计滤波法相对于双加速度计配置法, 其测量精度大幅度提高, 其结果明显优于双加速计配置法, 且滤波频率越小其测量精度高。

参考文献:

- [1] Thomas E Harkins Joppa, Bradford S Davis. Drag-brake deployment method and apparatus for range error correction of spinning gun-launched artillery projectiles, US 6345785 B1[P]., 2002.
- [2] 刘创, 陈超, 霍鹏飞. 弹道修正射程预测比较器方法精度

分析[C]//第十五届引信学术年会论文集. 西安: 中国兵工学会引信专业委员会, 2007: 83-88.

- [3] Thomas E Harkins. Understanding body-fixed sensor output from projectile flight experiments. ARL-TR-3029, 2003.
- [4] 杨小会, 霍鹏飞, 崔飞. 双加速度计测量弹纵轴向加速度技术研究[C]//第十五届引信学术年会论文集. 西安: 中国兵工学会引信专业委员会, 2007: 89-94.
- [5] 申强, 李世义, 李东光. 一维弹道修正引信基于速度—时间序列的弹道辨识[J]. 探测与控制学报, 2004, 26(1): 41-44.
SHENG Qiang, LI Shi-yi, LI Dong-guang. A method of ballistics trajectory identification for CCF based on sequence of velocity-time, 2004, 26(1): 41-44.