

掠地弹全弹道速度测量数据处理方法

张 焱^{1,2}, 卫青春², 周 健³, 赵华敏²

- (1. 西安电子科技大学, 陕西 西安 710071;
2. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081;
3. 遥感信息研究所, 北京 100192)

摘 要 分析了掠地火箭弹全弹道运动规律, 给出了不同弹道段的多项式数据模型, 基于变量差分法确定多项式阶数, 由最小二乘法计算多项式系数。采用正交多项式进行平滑、滤波、预测及数据合理性检验, 并通过径向速度修正和数据融合, 得到更高精度的测速数据。在此基础上开发了数据处理软件, 对实弹射击采集数据进行了处理。试验结果表明, 该算法平滑滤波后数据误差明显降低, 数据精度有较大的提高。因此, 该数据处理方法是有效的。

关键词 全弹道; 测速; 动力学模型; 数据处理

中图分类号 TJ06 文献标识码 A 文章编号 1003-3106(2011)07-0036-03

A Method for Data Processing of Whole Trajectory Velocity Measurement of Ground Skimming Projectile

ZHANG Yan^{1,2}, WEI Qing-chun², ZHOU Jian³, ZHAO Hua-min²

- (1. Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China;
2. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang Hebei 050081, China;
3. Remote Sensing Information Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract Whole trajectory motion rule of ground skimming rocket projectile is analyzed. Polynomial data model of different trajectory section is proposed, in which the variable difference method is used to determine polynomial order and the least square method is applied to compute polynomial coefficients. Smoothing, filtering, prediction and data rationality checking are carried out by orthogonal polynomial. Moreover, velocity measurement data with higher precision are got by radial velocity updating and data fusion. On the basis of this, data processing software is developed and used to process collection data by ball firing. Experimental results show that after smoothing and filtering, standard deviation is decreased and data precision is improved. Therefore, the data processing method is effective.

Key words whole trajectory; velocity measurement; dynamics model; data processing

0 引言

全弹道速度测量是为了测量掠地飞行的火箭弹及炮弹等高速飞行目标在各个环节的瞬态飞行参数, 提供给型号研制单位作全面细致的分析。全弹道速度测量在武器系统精度鉴定及产品统计检验工作中具有重要意义。可以说, 武器系统的精度分析^[1]离不开测量数据, 通过这些测量数据可以分析武器系统的各种参数、特性, 并将结果直接应用于武器系统。

对单一初速测量而言, 数据处理的特点是只要测量出口后一段短距离弹道参数即可。压力、风向、空气密度和温度等因素对运动学模型影响较小, 数据干扰少, 数据处理建模和计算方法相对简单。而对全弹道速度测量来说, 由于目标的飞行轨迹在不同飞行段的动力学模型不同, 所受到的环境影响不同, 需要对轨迹进行弹道拐点分段, 然后对各个弹道段分别建立数据处理模型。

1 弹道运动规律的动力学分析

以掠地飞行的火箭弹为研究对象, 根据动力学分析其弹体飞行弹迹可分为 3 段: 初速飞行段、火箭点火加速飞行段和火箭关机后惯性飞行段。

火箭弹经火炮发射在炮口获得最大速度 v_0 后受空气阻力影响减速飞行, 即初速飞行段。经过一段时间飞行后火箭发动机点火, 则弹体获得正加速度推力, 即进入点火加速飞行段。随后发动机关机由于受空气阻力影响会产生负加速度, 进入关机惯性飞行段。

基于对弹道运动学的初步分析, 弹体运动的速度曲线如图 1 所示。

在图 1 中, 弹体整个飞行时间段为 $t_0 \sim t_e$, 假设多普勒信号经 A/D 采样和 FFT 谱分析计算后, 给出 m 组弹道测速数据, 采样间隔为 h , 则在采样时间间隔 $t_i = ih$ 时刻, 弹道对应速度数据 v_i , 每一组

收稿日期: 2011-04-12

(t_i, v_i) , $i = 1, 2, \dots, m$ 构成要处理的弹道数据序列。在对全弹道数据进行处理时需要将测量数据分段, 此时就需要获取火箭开、关机时刻, 即图 1 中 t_s 、 t_c 的值。可以采用判断加速度拐点发生时刻的方法分离出火箭开、关机时刻。

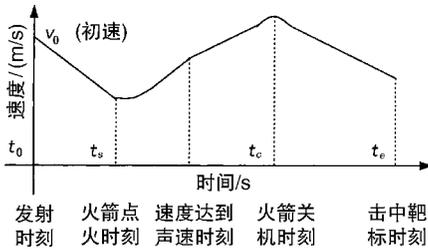


图 1 全弹道运动模型速度曲线

2 不同弹道段数学模型的确定

由于各种原因, 测量数据总含有随机误差, 必须通过相应的平滑与滤波处理, 减少随机误差的影响^[2]。不同的弹道段往往要采取不同的处理方法才能达到较好的处理结果^[3]。

依据火箭弹动力学规律, 不同弹道段对应不同运动方程, 但弹道运动方程在每时刻测量值模式可统一表述为:

$$v_i = a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 + \dots + a_p t_i^p + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中, v_i 为速度测量值; t_i 为速度测量时刻; ε_i 为测量噪声误差, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

不同的弹道段对应的多项式阶数 p 不同, 系数 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_p$ 也不同, 为此要依据测量数据, 确定不同弹道段的多项式阶数 p 和系数 $a_j, j = 0, 1, \dots, p$ 。

2.1 多项式次数确定

通过变量差分法分别确定 3 段弹道的多项式次数。由变量差分法知, 在每个弹道段当差分次数大于等于对应的多项式阶数 p 时, 速度测量值的差分序列中不再含测量数据的真实信息, 仅含有随机误差成分, 均方差估计量统计 $S_p, S_{p+1}, S_{p+2}, \dots$ 趋于定值, 有如下关系式成立:

$$S_{p+1} \approx S_p \quad (2)$$

因此, 对每个弹道段 S_i 的下列比值 δ_i :

$$\frac{S_{i+1}}{S_i} = \delta_i \approx 1, i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

即 δ_i 近似等于 1, 如满足 $0.9 \leq \delta_i \leq 1.1$, 则可确定该段弹道运动方程的多项式阶数为:

$$p = i - 1 \quad (4)$$

该段弹道数据的统计均方差, 即标准差为:

$$S = S_i \quad (5)$$

2.2 多项式系数确定

当每段测量数据 $v_i, i = 1, 2, \dots, N, N$ 值在

3 段弹道中分别对应值为 Z, W, L , 且 $N \geq p$ 时, 弹道运动方程可表示为矩阵形式为:

$$V = Ta + \varepsilon \quad (6)$$

式中,

$$T = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & \dots & t_1^p \\ 1 & t_2 & \dots & t_2^p \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & t_N & \dots & t_N^p \end{bmatrix}; \quad V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_N \end{bmatrix};$$

$$a = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_p \end{bmatrix}; \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_N \end{bmatrix}.$$

由最小二乘法估计可得到多项式系数向量 a 的估计值为:

$$\hat{a} = (T^T T)^{-1} T^T V \quad (7)$$

将每段的 $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_p$ 代入弹道运动方程, 则可获得每个弹道段的测量数据 v_i 的估计值为:

$$\hat{v}_i = \sum_{j=0}^p \hat{a}_j t_i^j, i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

因此得到每个弹道段的数学模型, 根据该数据模型可进行数据的野值剔除和平滑、滤波等工作。

3 径向速度修正与数据融合

为了获取更高精度的测速数据, 需要在平滑、滤波的基础上进行进一步处理。

3.1 径向速度修正

由于弹道雷达部署在火箭弹发射装置的侧翼, 因此测到的径向速度 v_r 要通过换算才能得到弹头相对发射装置的弹道切线速度 v_t 。

弹头在弹道上飞行的瞬时距离为:

$$R_r(t) = \sqrt{R^2(t) - D^2} \quad (9)$$

弹头飞行的瞬时线速度为:

$$V_r(t) = \frac{dR_r(t)}{dt} = \frac{R(t)V(t)}{\sqrt{R^2(t) - D^2}}$$

即

$$V_t = \frac{R_r V_i}{\sqrt{R_i^2 - D^2}} \quad (10)$$

式中, D 为弹道雷达到发射装置射向中心的捷径。实际应用时, 要将式中 V_i 用平滑后的速度数据 \hat{V}_i 取代, R_i 要通过 \hat{V}_i 的数字积分获得。

3.2 数据融合

火箭在初速飞行段由初速雷达和弹道测速雷达同时测量, 假设时标对齐后 2 部雷达测得的速度数据换算为射向线速度序列分别为 $\{\hat{V}_{ij}\}$ 、 $\{V_{ij}\}$, 通过对初速飞行段的残差统计分析, 可获得 2 部雷达在初速段测速数据的方差估计, 假设经估计的结果

分别为 σ_f^2 和 σ_r^2 , 将 2 部雷达测得数据融合在一起, 数据的精度可得到进一步提高。速度融合公式为:

$$V_i = \frac{1}{\sigma_f^2 + \sigma_r^2} (\sigma_r^2 V_{fi} + \sigma_f^2 V_{ri}) \quad (11)$$

4 软件实现及试验验证

采用上述数据处理方法开发了全弹道测速数据处理软件。数据处理软件采用 Visual C++ 和 Matlab 混合开发。将二者混合编程, 是一种有效的编程方式。将 Matlab 的以矩阵为基本编程单位的高效数值计算语言与 VC++ 程序文件小、执行速度快、实时性好的特点有效地结合, 显著提高了软件的开发效率与运行效率^[4]。

具体实现上采用 VC++ 进行程序主体框架的开发, 通过 Matlab 引擎直接调用 Matlab 内嵌函数完成数据的平滑、滤波等算法实现。完成后的数据处理软件流程如图 2 所示。

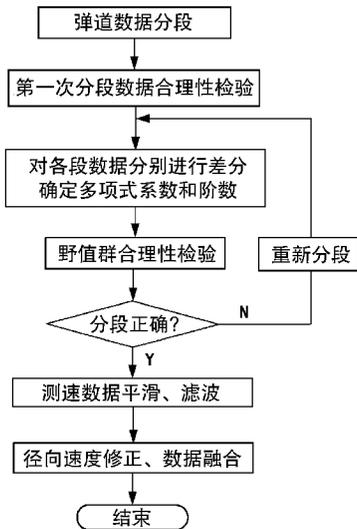
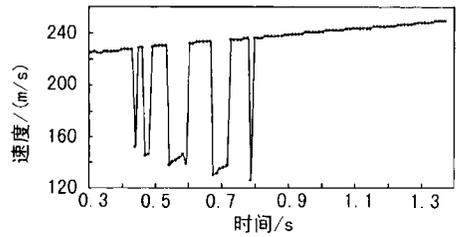


图 2 数据处理软件流程

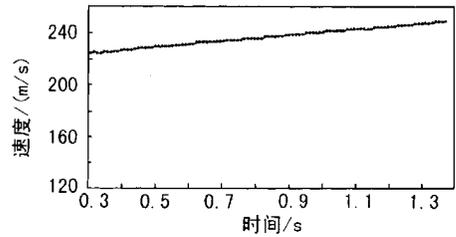
数据处理软件配合全弹道测速雷达系统参加了某型号反坦克火箭弹实弹射击试验。火箭弹加速飞行段的时间—速度曲线图如图 3 所示。

图 3(a) 为加速飞行段原始数据, 含有野值、野值群, 共有 15 点野值。图 3(b) 为经合理性检验后数据, 从图中可以看出野值及野值群已被剔除。图 3(c) 为经平滑滤波后数据, 数据经平滑后曲线变得光滑。

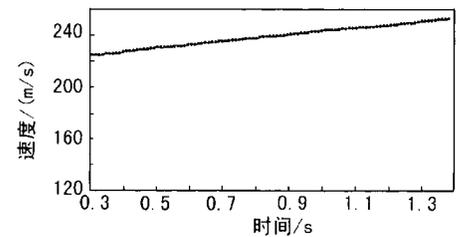
经合理性检验和平滑、滤波之后的数据同之前统计均方差之比为: $\mu = 0.1283$, $1/\mu = 7.79$ 。即经平滑滤波数据处理后, 测量速度的数据精度提高了 7.79 倍。



(a) 原始数据速度曲线



(b) 合理性检验后速度曲线



(c) 平滑滤波后速度曲线

图 3 时间—速度曲线图

5 结束语

根据掠地火箭弹运动规律分析结果建立弹道数据模型, 基于分段处理的思路进行全弹道测速数据处理。在具体处理中采用了正交多项式进行平滑、滤波、预测及数据合理性检验, 并通过径向速度修正和数据融合进行综合处理。据此开发的数据处理软件对实弹射击采集数据进行了处理, 获得了较高的数据精度, 取得满意效果, 具有较好的工程意义。✧

参考文献

- [1] 张锦斌, 马万权, 黄 巍, 等. 运用卡尔曼滤波理论求解测速雷达系统误差[J]. 飞行器测控学报, 2000, 19(4): 80- 88.
- [2] 华师韩, 王 青. 数字滤波在动态测量数据处理中的应用[J]. 宇航计测技术, 2005, 25(2): 50- 54.
- [3] 唐宏斌, 郑 键, 李 骏. 主动段弹道估计可观测性分析[J]. 电子信息对抗技术, 2006, 21(2): 27- 31.
- [4] 陈路路. VC++ 和 Matlab 集成应用的研究[J]. 无线电工程, 2006, 36(1): 55- 58.

作者简介

张 焱 男, (1979—), 中国电子科技集团公司第五十四研究所工程师。主要研究方向: 靶场测控系统、数据处理算法。