

# 有翼飞行器外弹道测量数据融合处理研究

姚尚 张承虎 秦德明 胡长城

(95972 部队,酒泉 735018)

**摘要** 提高大气层内具有复杂弹道特性的飞行器外测弹道数据处理精度一直是困扰研究学者和数据处理人员的课题.本文应用已有的数据融合理论,结合大气层内机动飞行器的运动特性,提出了一种基于分段三次样条函数的外弹道数据融合处理算法.仿真和实测处理结果表明:该算法显著地提高了数据处理精度,在相关数据处理任务中具有一定的应用价值.

**关键词** 数据融合, 数据处理, 样条函数

## 引言

飞行器的战术技术指标往往需要外弹道测量进行验证和评估,目前外弹道测量对于长弹道、大高差、多目标、高精度的数据处理提出了更高的要求,过去的数据处理机制主要针对不同的信息源分别进行处理,在结果数据的统一和使用中暴露出许多新问题.特别是现行外弹道的光测、雷测、GPS 测量等不同手段,从各自的角度反映了靶试的客观实际;另一方面,不同的测量设备又为测量数据的相互校正、取得完整弹道、综合处理提高数据精度提供了丰富的信息源.逐点解算的最小二乘法<sup>[4][5]</sup>,是较为经典而且常被采用的弹道测量数据处理方法,简单鲁棒性好却存在精度不足的问题.

为解决上述两方面的问题,近年来数据融合处理方法得到研究和应用<sup>[1][2][3]</sup>,特别是在弹道式飞行器如运载火箭、弹道导弹和卫星的外弹道测量和定轨中得到了应用<sup>[6][7][8][9]</sup>,但这类飞行器的轨道主要在大气层外,不受复杂气动力作用,动力学模型和弹道比较简单,简单的数据融合处理并借助卡尔曼滤波方法可得到较好的精度<sup>[10][11][12]</sup>.

对于大气层内受复杂气动力作用的有翼飞行器,由于气动力的不确定性不能精确建模,卡尔曼滤波无法利用,另外弹道的强机动性导致弹道是高阶曲线.针对这里数据处理问题,本文充分根据多台光测、雷测、GPS 跟踪等的外弹道测量信息,利用四阶三次 B 样条函数处理模型,进行了外弹道数据

融合处理方法的研究,从仿真数据和实测数据验证的结果看,数据处理的精度有较大改善,表明在相关飞行器的试验数据处理方法具有一定的参考价值.

## 1 融合处理的数学模型和方法

数据融合的基本处理方法是将试验理论设计弹道或初始弹道经时空配准后,采用反算思想把弹道初值映射到外测系统各测量平台上,不断调整预处理后的测量值与映射值之间的残差,用融合模型的弹道数值去逼近目标飞行轨迹,从而得到较为真实的测元信号和目标飞行空间曲线,解算模型参数得到较高精度的各类试验参数.

### 1.1 融合模型基函数构建

目前数据融合模型的曲线拟合形式多样,有选用低次代数多项式的,有选用高阶样条函数的.本融合处理模型主要采用四阶三次规范 B 样条基函数来构建节省待估参数融合模型.

规范 B 样条函数的定义与性质

定义:在实轴上给定节点序列 $\dots < t_{-n} < \dots < t_0 < \dots < t_x < \dots < t_{N+n} < \dots$ 记  $W_{i,n+1}(t) = (t - t_i)(t - t_{i+1}) \dots (t - t_{i+n+1})$ ,称  $B_{i,n+1}(t) = (t_{i+n+1} - t_i) \sum_{k=i}^{i+n+1} \frac{(t_k - t)^n}{W'_{i,n+1}(t_k)}$ 为第  $i$  个  $n+1$  阶规范 B 样条函数,规范 B 样条函数具有如下四个性质

- i) 递推关系;
- ii) 微分性质;
- iii) 局部正支撑性;
- iv) 最小支撑性.

根据大气层内飞行器的弹道机动特性,选用 4

阶3次B样条函数作为表征弹道的基函数,函数表达式如下:

$$B_{i,t}(t) = \begin{cases} 0, & t \notin [t_i, t_{i+4}] \\ \left[ \frac{(t-t_i)^3}{W'_{i,4}(t_i)} \right] (t_{i+4} - t), & t_i \leq t \leq t_{i+1} \\ \left[ \frac{(t-t_i)^3}{W'_{i,4}(t_i)} + \frac{(t-t_{i+1})^3}{W'_{i,4}(t_{i+1})} \right] (t_{i+4} - t), & t_{i+1} \leq t \leq t_{i+2} \\ \left[ \frac{(t_{i+3}-t)^3}{W'_{i,4}(t_{i+3})} + \frac{(t_{i+4}-t)^3}{W'_{i,4}(t_{i+4})} \right] (t_{i+4} - t), & t_{i+3} \leq t \leq t_{i+4} \\ \left[ \frac{(t_{i+4}-t)^3}{W'_{i,4}(t_{i+4})} \right] (t_{i+4} - t), & t_{i+3} \leq t \leq t_{i+4} \end{cases} \quad (1)$$

## 1.2 待估参数的节省参数融合模型

弹道参数 $(x(t), y(t), z(t))$ 的表示是融合模型的核心,根据函数逼近理论,弹道状态参数可用基函数精确表示,且估计结构更加稳定,估计精度更高.文献[6]研究表明,利用文献[7]中所提出目标特征点概念,将弹道对于时间 $t$ 的可微性差的点作为样条函数的节点,用等距或不等距节点的四阶规范B样条函数可将弹道精确表示.在区间 $t_1 \leq t \leq t_m$ ,弹道轨迹的样条表示如下:

$$\begin{cases} x(t) = B_x(t) b_x = \sum_{j=1}^{M_1} b_j B_j(t), \dot{x}(t) = \dot{B}_x(t) b_x \\ y(t) = B_y(t) b_y = \sum_{j=1}^{M_2} b_{j+M_1} B_{j+M_1}(t), \\ \dot{y}(t) = \dot{B}_y(t) b_y \\ z(t) = B_z(t) b_z = \sum_{j=1}^{M_3} b_{j+M_1+M_2} B_{j+M_1+M_2}(t), \\ \dot{z}(t) = \dot{B}_z(t) b_z \end{cases} \quad (2)$$

由此,弹道由系数 $b = (b_x^T, b_y^T, b_z^T)$ 和样条节点 $T^x, T^y, T^z$ 唯一确定,由(2)式可知,弹道参数是样条系数 $b \triangleq \beta$ 的线性函数,测元真实信号是 $b \triangleq \beta$ 的非线性函数.

## 1.3 观测数据模型表达式

外测系统多平台各个时刻观测数据可表示为:

$$\begin{cases} \tilde{A}_j(t_i) = f_{j_i}(\beta, \alpha) + \varepsilon_j(t_i), 1 \leq j \leq M_1 \\ \tilde{E}_j(t_i) = f_{j_i}(\beta, \alpha) + \varepsilon_j(t_i), M_1 \leq j \leq 2M_1 \\ \tilde{A}_j(t_i) = f_{j_i}(\beta, \alpha) + \varepsilon_j(t_i), 2M_1 \leq j \leq 2M_1 + M_2 \\ \tilde{E}_j(t_i) = f_{j_i}(\beta, \alpha) + \varepsilon_j(t_i), 2M_1 + M_2 \leq j \leq 2(M_1 + M_2) \\ \tilde{R}_j(t_i) = f_{j_i}(\beta, \alpha) + \varepsilon_j(t_i), 2(M_1 + M_2) \leq j \leq 2M_1 + 3M_2 \end{cases} \quad (3)$$

于是 $t_i$ 时刻外测数据模型为:

$$y(i) = F_i(\beta) + \varepsilon(i) \quad (4)$$

将所有时刻数据联用,有

$$y = F(\beta) + e, e \sim (0, \text{diag}(\delta_1^2 I, \delta_2^2 I_2, \dots, \delta_N^2 I_N)) \quad (5)$$

## 1.4 观测数据模型求解

要对观测数据模型求解,必须估计样条系数与误差系数.由非线性回归分析理论,可用极值问题 $\arg \min \|Y - F(\beta)\|_2^2$ 的解作为样条系数与系统误差参数的估计.

记:

$$V(\beta) = \nabla F = \left( \frac{\partial f_i}{\partial \beta_i} \right) \quad (6)$$

$$S(\beta) = \|Y - F(\beta)\|_2^2 \quad (7)$$

则参数 $\beta$ 的LS估计可用改进的 Gauss - Newton 迭代法计算

给定初值 $\beta^{(0)}$ ,构造序列 $\{\beta^{(i)}\}$

$$\begin{cases} D^{i-1} = [V(\beta^{(i-1)})^T V(\beta^{(i-1)})]^{-1} V(\beta^{(i-1)})^T [Y - F(\beta^{(i-1)})] \\ S(\beta^{(i-1)} + \lambda_{i-1} D^{(i-1)}) = \inf_{0 \leq \lambda \leq 1} S(\beta^{i-1} + \lambda D^{(i-1)}) \\ \beta^{(i)} = \beta^{(i-1)} + \lambda_{i-1} D^{(i-1)} \end{cases} \quad (8)$$

$\beta^{(0)}$ 可由理论设计值或者初始弹道运用枢轴变换(扫描矩阵)算法求得,初始误差参数采用零向量代替,至此融合模型构建与解算完成.

## 2 数据融合处理中的两关键技术

虽然融合模型已完整建立,但在实际使用过程中却要着重解决以下两个问题.

### 2.1 样条函数的边界条件

使用样条函数,必然要对函数的边界条件加以解决,若无相应条件给函数边界作支撑,则模型无解;若无对算法合适的边界条件,则数据处理精度会大大降低.因此,研究和寻找满足条件的边界条件,对融合模型至关重要.在本模型中,采用了外推插值的方法,扩大界值数值区间,进行归一化处理.经仿真和实测算例验证,效果较好.

### 2.2 弹道特征点选取原则

算法中另一个值得重点把握的问题是要合理选取弹道的特征点.对曲线拟合的数值算法来讲,一旦特征点选取位置不对,将会破坏整条曲线的拟

合精度,甚至在某些时刻无法对样条进行二次或三次微分计算.本模型中采取的方法是用设计弹道或者初始弹道的数值结果找到目标运动变化的时间序列节点作初始节点,等距发布,通过首次融合计算后,再采用自由节点逼近方式进行二次样条拟合计算.

### 3 外弹道融合处理的基本流程

在建立了融合模型和系统算法后,为便于后续仿真和实测数据对系统进行验证,给出系统运行的基本流程.

本方案在不加误差时可验证融合模型对弹道的估计能力,在改变系统误差模型和随机误差模型时又可验证融合模型对误差的估计能力.流程图中初始弹道(I)可以是理论弹道经过最优节点样条拟合得到,也可以是实测数据逐点交会解算弹道方法得到的弹道经过最优节点样条拟合得到.

将初始弹道经过坐标转换后,反算到测站系下的测量设备上,然后利用过滤初差后的测量设备实测数据与初始弹道反算数据做融合计算,根据弹道差分分析与诊断结果,不断改进和修正误差模型,反复迭代计算,直至得到比较理想的融合计算结果.

外弹道融合处理的基本流程框图如图1所示.

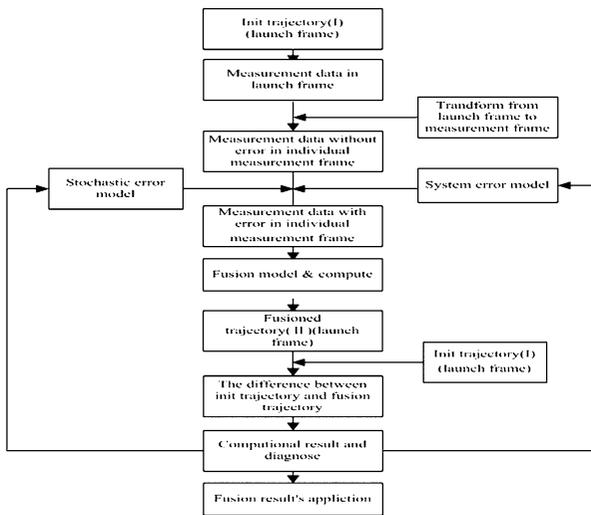


图1 外弹道数据融合处理的流程框图

Fig. 1 The flow chart of trajectory data fusion

### 4 数据融合方法的测试与验证

#### 4.1 弹道数据的仿真测试

经过上述建模,按照流程和算法,运用仿真数

据进行算法验证.仿真算法采用某一随机函数生成一条空间曲线,把空间曲线反算到某空域的各测量设备上(反算成方位、俯仰信息),然后将各设备上的信息运用此融合算法进行计算处理.弹道仿真具体作法是以  $t_0$  为相对时间零点,仿真产生 0~180 秒的弹道数据,采样频率为 20Hz.

使用仿真得到的理论弹道数据作为输入,在融合计算中使用 3 台光学测量设备,各台设备上加入角度观测误差 10 角秒,并且在计算中只使用 0~65 秒数据,数据采样频率 20Hz.节省参数模型采用一个特征段,该特征段开始时间 0 秒,结束时间 65 秒,最小节点数取 15 个,最大节点数取 40 个. XYZ 三个分方向上采用相同的特征段设置.按上述配置算得弹道与仿真弹道差残差见图 2、图 3、图 4.

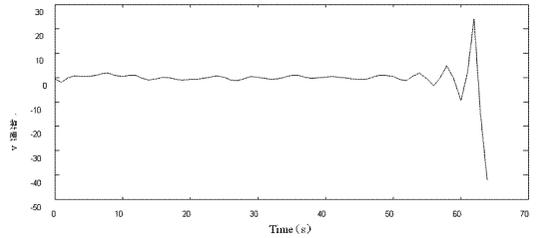


图2 融合解算结果与理论弹道 X 方向之差  
Fig. 2 The difference between data fusion and theoretical trajectory in X direction

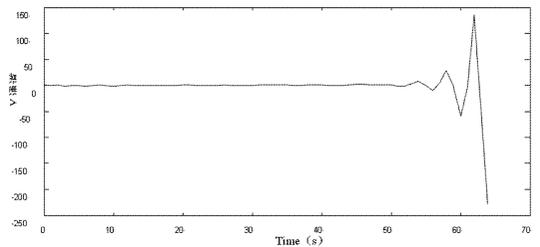


图3 融合解算结果与理论弹道 Y 方向之差  
Fig. 3 The difference between data fusion and theoretical trajectory in Y direction

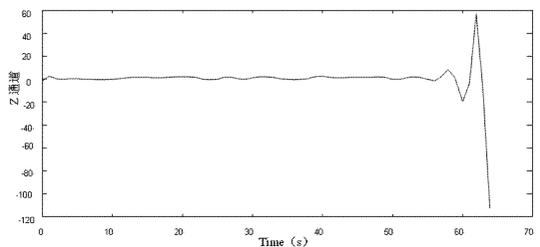


图4 融合解算结果与理论弹道 Z 方向之差  
Fig. 4 The difference between data fusion and theoretical trajectory in Z direction

从上述图形可以看到,系统的输出是收敛的.图中数据的尾端有较大的残差,那是因为目标越来越远离测站,观测几何结构迅速恶化,因此算法迭代的收敛速度也随之迅速下降,从而导致尾端输出有较大的误差.统计0~50秒系统收敛区域的精度,其指标如下:

表1 三台光学测量数据计算结果误差统计

Table 1 Computational Error Statistic Based on 3

Optical Measurement Instrumentations		
measurement	mean value	variance
X direction (unit: meter)	-0.108	1.010
Y direction (unit: meter)	0.155	2.231
Z direction (unit: meter)	0.061	1.307

## 4.2 实测数据验证

经过仿真数据验证后,将此融合算法运用到外弹道事后数据处理任务中,处理结果与高精度GPS作比较,残差绝对值结果见表2(单位:米).

表2 数据融合处理精度

Table 2 Processing Precision of Data Fusion

case	gps	data process type	X - X(gps)	Y - Y(gps)	Z - Z(gps)
case 1	gps data	fusion process	0.15822	0.62513	0.35718
		across process	1.68342	3.17542	1.03216
case 2	gps data	fusion process	0.21686	0.58810	0.32943
		across process	1.85723	2.22713	1.95750
case 3	gps data	fusion process	0.24617	0.66391	0.53070
		across process	2.10821	1.92513	2.05748
case 4	gps data	fusion process	0.30152	0.44089	0.2773
		across process	1.45892	1.70015	1.54721
case 5	gps data	fusion process	0.16551	0.33207	0.20512
		across process	1.73160	2.13813	1.85718
case 6	gps data	fusion process	0.25937	0.42869	0.31052
		across process	1.95824	2.05378	1.72513

从上表的统计残差统计结果可以看出,融合处理的结果与高精度GPS的处理结果更接近,其残差比光测交会处理结果与高精度GPS的处理结果的残差更小,结果准确,精度更高.

## 5 结论

本数据融合处理方法摒弃了机动目标原有精确站间距交汇处理的方式,经过仿真和实际处理任务检验,相比逐点解算最小二乘算法的数据处理精度有较大提高,基于4阶3次B样条函数的融合方法在小步长微分处理以及长弹道衔接方面也具有明显的优势,由此可见基于多台观测设备信息融合

的弹道数据处理是未来进一步的研究方向,尤其在受复杂气动力作用的机动目标数据处理中具有一定的参考和应用价值.

## 参 考 文 献

- 1 V J Aidala, and S C Nordone. Biased estimation properties of the pseudolinear tracking filter. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1982, 18(4): 432 ~ 441
- 2 X R Li, V P Jilkov. A survey of maneuvering target tracking: Measurements models, Proc. of SPIE: Signal and Data Processing of Small Targets 2001, 2001, 4: 473
- 3 L A Klein. Sensor and data fusion concepts and applications. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1999
- 4 马东升等. 数值计算方法. 北京: 机械工业出版社, 2006 (Ma D Sh et al. Numerical computational approach. Beijing: China Machine Press, 2006 (in Chinese))
- 5 刘利生, 吴斌等. 外弹道测量精度分析与评定. 北京: 国防工业出版社, 2010 (Liu L Sh, Wu B et al. Precision analysis & evaluation of trajectory measurement. Beijing: National Defense Industry Press, 2010 (in Chinese))
- 6 王正明, 朱炬波. 弹道跟踪数据的节省参数模型及应用. 中国科学(E辑), 1999, 29(2): 146 ~ 154 (Wang Zh M, Zhu J B. Reducing parameters model & its application of trajectory tracking data. *Science of China (Series E)*, 1999, 29(2): 146 ~ 154 (in Chinese))
- 7 王正明, 朱炬波. 弹道跟踪数据的校准与评估. 长沙: 国防科大出版社, 1999 (Wang Zh M, Zhu J B. Trajectory tracking data calibration & evaluation. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1999 (in Chinese))
- 8 王正明, 朱炬波. 测量数据建模与参数估计. 长沙: 国防科大出版社, 1996 (Wang Zh M, Zhu J B. Measurement data modeling & parameters estimation. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1999 (in Chinese))
- 9 夏佩伦. 目标跟踪与信息融合. 北京: 国防工业出版社, 2010 (Xia P L. Object tracking & data fusion. Beijing: National Defense Industry Press, 2010 (in Chinese))
- 10 王立辉, 申卯兴等. Kalman 滤波在雷达系统中的应用. 火箭与制导学报, 2006, 26(1): 584 ~ 586 (Wang L H, Shen M X et al. Application of Kalman Filter in Target Track Prediction. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(1): 584 ~ 586 (in Chinese))
- 11 张高煜, 江水等. 采用序贯滤波的红外/雷达机动目标跟踪. 控制理论与应用, 2007, 24(5): 811 ~ 814 (Zhang

- G Y, Jiang SH et al. Infrared/radar maneuvering target tracking via sequence filtering. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(5):811 ~ 814(in Chinese)
- 12 樊友平, 陈允平等. 火箭飞行实时测量数据的小波滤波快速算法. *数据采集与处理*, 2004, 19(4):395 ~ 400 (Fan Y P, Chen Y P et al. Speedy filtering algorithm based on wavelet for measured real-time-data in rocket aviation. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2004, 19(4):395 ~ 400 (in Chinese))

## A RESEARCH ON TRAJECTORY MEASUREMENT DATA FUSION FOR WINGED VEHICLE

Yao Shang Zhang Chenghu Qin Deming Hu Changcheng  
(Unit 95972, PLA, Jiuquan 735018, China)

**Abstract** It is the topic for data process researchers and technicians to improve the trajectory data-processing precision of vehicle with complicated properties in atmosphere. By virtue of the existing data fusion theory, and combing with the motion features of maneuver vehicle in atmosphere, this paper presented a data fusion algorithm based on a piecewise cubic B-spline function. Simulation & real experiments show that the algorithm can improve data-processing precision remarkably in relative data-processing projects.

**Key words** data fusion, data process, spline function