

文章编号:1007-1180(2011)11-0038-05

# 基于经纬仪测量数据的落点预测方法研究

葛 兵<sup>1,2</sup>, 高慧斌<sup>2</sup>, 张淑梅<sup>2</sup>, 余 毅<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 研究生院, 北京 100039

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 由于作用距离和布站等因素的限制, 经纬仪不能对弹道导弹进行全程的跟踪测量。本文采用解微分方程的方法对弹道落点进行预测。由于经纬仪测量的是目标的角度信息, 本文采用两台经纬仪交汇测量的方法得到目标的位置和速度。

**关键词:** 经纬仪; 弹道导弹; 落点预测; 交会测量

中图分类号: TH761.1

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI20112811.0038

## Research on Impact Point Prediction based on Measure of Theodolite

GE Bing<sup>1,2</sup>, GAO Hui-bin<sup>2</sup>, ZHANG Shu-mei<sup>2</sup>, YU Yi<sup>2</sup>

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, China)

**Abstract:** Because of limitation of the effective range and location, the theodolite can not track the ballistic missile all the way. This paper predicts the impact point by method of solving the differential equations. The theodolite measures the angles of the target, so convergent measurement is used for position and velocity.

**Keywords:** theodolite; ballistic missile; impact point prediction; convergent measurement

## 1 引言

当试验场发射导弹时,经纬仪对导弹进行实时跟踪测量和监视,由于布站限制和经纬仪作用距离的限制,只能测量导弹某一段飞行的状态。因此,要不断地根据获取的外部测量数据实时地估计出其飞行状态,并利用它们计算飞行器落点值。由于落点预测结果经常是通过图表直观地显示给有关指挥人员,故又称为落点预测<sup>[1]</sup>。落点参数是描述导弹或动载火箭飞行状态的最具有综合性、直观性和灵敏性的参数,它是对飞行器实施安全控制、飞行监视和落点预报的重要依据,因此,落点预示是弹道测量实时数据处理中的重要内容。

根据图1所示,导弹从发射点O到着陆点E为运动弹道,根据发动机工作与否分为主动段OC和被动段CE,被动段又根据受空气动力的大小分为自由飞行段CD和再入段DE。主动段指从导弹离开发射台起飞到发动机停止工作为止的一段弹道,也称动力飞行段。被动段指从发动机停止工作、导弹头体分离到弹头回地面为止的弹道,也是弹头飞行的阶段,它依靠头体分离所获得的能量作惯性飞行。被动段由自由飞行段和再入段组成,自由飞行段空气稀薄,忽略空气动力影响,可以精确知道弹头受力,运动方程可以准确地描述。当弹头近似按照自由椭圆运动到最高点时,其折回按照自由落体向下运动并返回大气层。在再入段时,空气动力对弹头影响不能忽略。一般再入点选在距地面60~80 km。根据导弹飞行力学原理可知,弹道式导弹落点位置主要

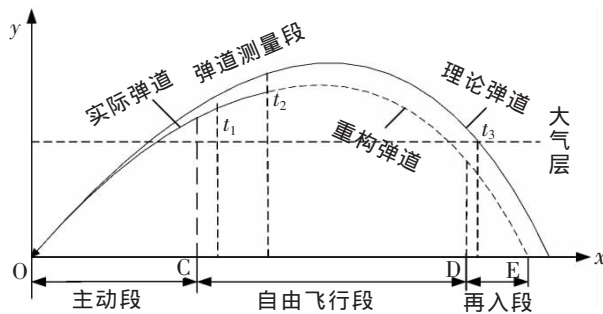


图1 导弹弹道示意图

取决于导弹主动段终点的位置和速度参数。

## 2 交会测量方法测量目标位置和速度

根据导弹飞行力学原理可知,影响弹道落点的因素很多,考虑到任务特点,本项目的导弹落点精度与本测量系统对导弹主动段终点的位置和速度的测量精度有关。经纬仪测量的是目标的角度信息,采用两台经纬仪交汇测量的方法可以得到目标的位置。

假设发射系为  $Oxyz$ ,  $O_1(x_{o1}, y_{o1}, z_{o1})$  和  $O_2(x_{o2}, y_{o2}, z_{o2})$  分别为两台经纬仪的原点,  $M$  为目标的位置,如图2所示。两台经纬仪和目标在发射坐标系  $Oxz$  平面做投影,形成如图3所示的投影。 $M'$ 、 $O'_1$ 、 $O'_2$  分别为  $M$ 、 $O_1$ 、 $O_2$  在  $Oxz$  平面的投影。 $(\Delta x, \Delta y_1, \Delta z)$ 、 $(\Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2)$  为目标在两个站址坐标系中的坐标。 $(A_1, E_1)$ 、 $(A_2, E_2)$  为两台经纬仪测得的目标在本站址坐标中的方位和俯仰角。由图2和图3推导出  $M$  在发射系下的坐标公式为:

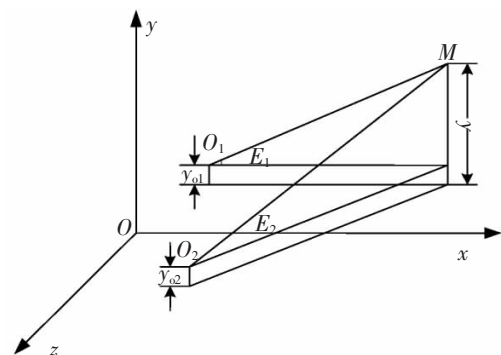


图2 发射坐标系

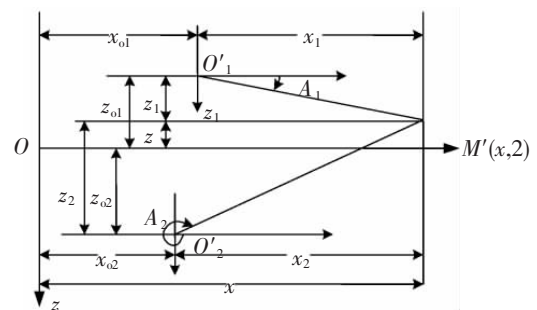


图3 投影坐标

$$\begin{aligned} x &= x_{01} + \frac{(x_{01} - x_{02}) \operatorname{tg} A_2 - (z_{01} - z_{02})}{\operatorname{tg} A_1 - \operatorname{tg} A_2} \\ y &= y_{01} + \frac{\Delta x_1}{\cos A_1} \operatorname{tg} E_1 \end{aligned} \quad (1)$$

$$z = z_{01} + \Delta x_1 \operatorname{tg} A_1$$

或

$$\begin{aligned} x &= x_{02} + \frac{(x_{01} - x_{02}) \operatorname{tg} A_1 - (z_{01} - z_{02})}{\operatorname{tg} A_1 - \operatorname{tg} A_2} \\ y &= y_{02} + \frac{\Delta x_2}{\cos A_2} \operatorname{tg} E_2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$z = z_{02} + \Delta x_2 \operatorname{tg} A_2$$

采用以上方法可以得到目标的位置, 通过预测滤波方法可以得到目标速度。以该位置和速度作为初值进行落点预测。

### 3 落点预测方法

导弹在头体分离之后, 处于无动力飞行阶段。在大气层外, 可以忽略空气动力影响, 弹头近似按照椭圆轨道运行。在进入大气层以后, 假设整个运动期间攻角为 0, 导弹外形和质量均关于纵轴对称, 考虑空气动力的影响, 建立标准条件下的导弹质心运动方程组如下<sup>[2-3]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= -\frac{R_x}{m} - g \sin \theta \\ \frac{dx}{dt} &= -\frac{g}{v} + \frac{v}{R+y} \cos \theta \\ \frac{dy}{dt} &= v \sin \theta \\ \frac{dx}{dt} &= \frac{R}{R+y} v \cos \theta \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $x, y$  为目标在发射坐标系的位置;  $v_x, v_y$  为目标在发射坐标系的速度分量,  $v_x = v \cos \theta$ ,  $v_y = v \sin \theta$ ;  $\theta$  为弹道倾角, 弹道升弧段取正, 降弧段为负;  $R_x$  为空气阻力, 计算公式为:

$$R_x = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_x \left( \frac{v}{a} \right) = i d^2 \times 10^3 H(y) F(v) \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为空气密度;  $S$  为导弹截面积;  $a$  为声速, 标准声速为 340 m/s;  $i$  为弹形系数, 与导弹外形有关;  $C_x \left( \frac{v}{a} \right)$  为马赫数  $\left( \frac{v}{a} \right)$  对应的标准阻力系数;

$F(v)$  为阻力函数,  $F(v) = 4.75 \times 10^{-4} v^2 C_x \left( \frac{v}{a} \right)$ ;  $H(y)$  为空气比重, 其随高度变化的公式为:

$$H(y) = \begin{cases} (1 - 2.190 \times 10^{-5} y)^{4.4}, & y < 9 \text{ 300 m} \\ e^{-ky}, & y \geq 9 \text{ 300 m}, k = 0.000 \text{ 1} \end{cases} \quad (5)$$

根据四阶龙格库塔公式, 可将大气层内弹道方程写成:

$$\begin{aligned} \dot{v} &= f_v(v, \theta, x, y) = -\frac{R_x}{m} - g \sin \theta \\ \dot{\theta} &= f_\theta(v, \theta, x, y) = -\frac{g}{v} + \frac{v}{R+y} \cos \theta \\ \dot{y} &= f_y(v, \theta, x, y) = v \sin \theta \\ \dot{x} &= f_x(v, \theta, x, y) = \frac{R}{R+y} v \cos \theta \end{aligned} \quad (6)$$

如图 1 所示,  $t_1 \sim t_2$  段为设备测量段。从  $t_1$  开始对测量数据进行滤波, 到  $t_2$  之前某时刻滤波精度满足精度要求, 取该时刻到  $t_2$  的弹道参数滤波结果作为弹道预测的初值。在  $t_1$  和  $t_2$  时刻, 目标处于大气层外, 可以忽略空气动力影响, 目标只受重力的影响, 按照椭圆轨迹运行, 可以得到目标再入点 ( $t_3$  时刻) 导弹的位置和速度。把  $t_3$  的结果作为方程组的初值, 解弹道方程组, 对后面的弹道进行重构, 预测弹道落点<sup>[3]</sup>。

### 4 仿真模型建立

在大气层外时, 导弹在被动段运行过程中只受重力的影响, 按照二体问题在 Matlab 中建立仿真模型, 如图 4 所示。该模型是在惯性坐标系下建立的。在我国弹道计算中, 重力加速度地面标准值常取为  $g_0 = 9.8 \text{ m/s}^2$ , 地球半径  $r_0 = 6 \text{ 358 } 922 \text{ m}$ 。以头体分离后某一时刻测量的速度和位置为初值, 假设该时刻测得的目标参数 (导弹发射坐标系) 为:

$$\begin{aligned} x_0 &= 800 \text{ 000 m}, y_0 = 500 \text{ 000 m}, \\ v_{x0} &= 3 \text{ 240 m/s}, v_{y0} = 3 \text{ 530 m/s} \end{aligned}$$

用这一方法可以确定导弹在自由飞行段任意时刻的位置和速度。选取 80 km 高度 ( $t_3$  时刻) 作为导弹的再入点, 此时目标在惯性系下的位置 (-4 059 404, -2 643 011, 4 136 819), 速度 (1 634, 2 643, -3 143)。目标进入大气层后以  $t_3$  点为初值, 调用 Matlab 中的

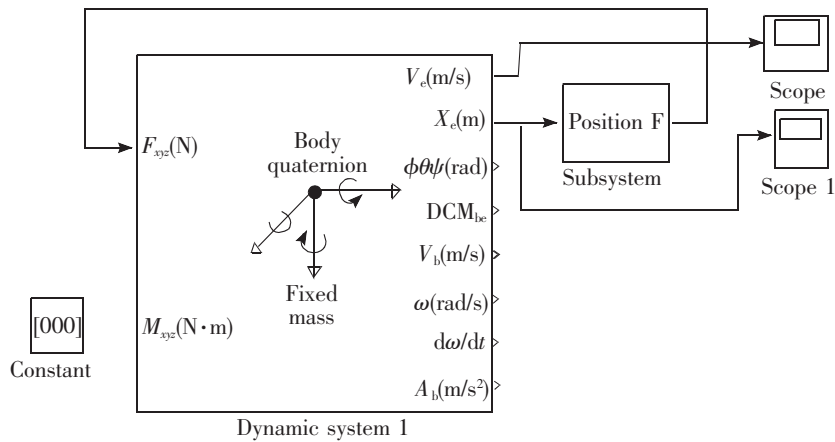


图4 弹道仿真模型

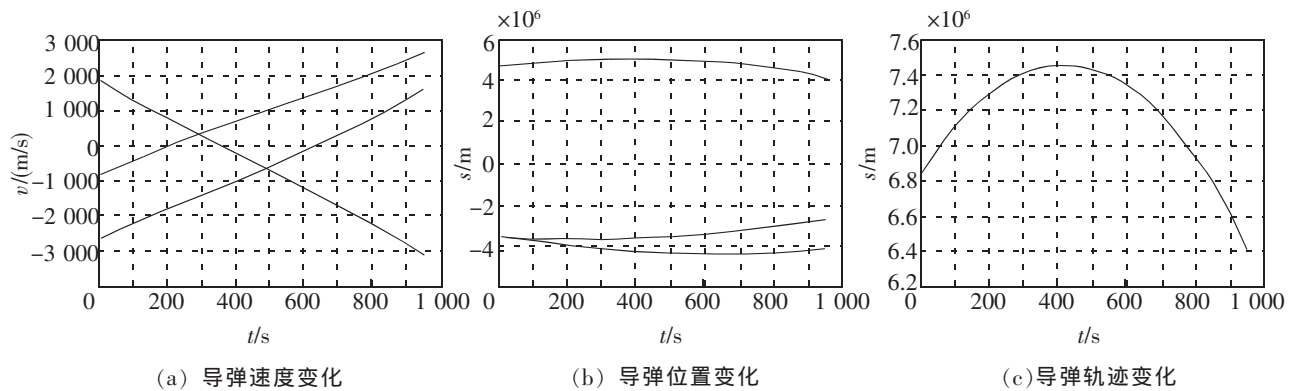


图5 预测弹道仿真

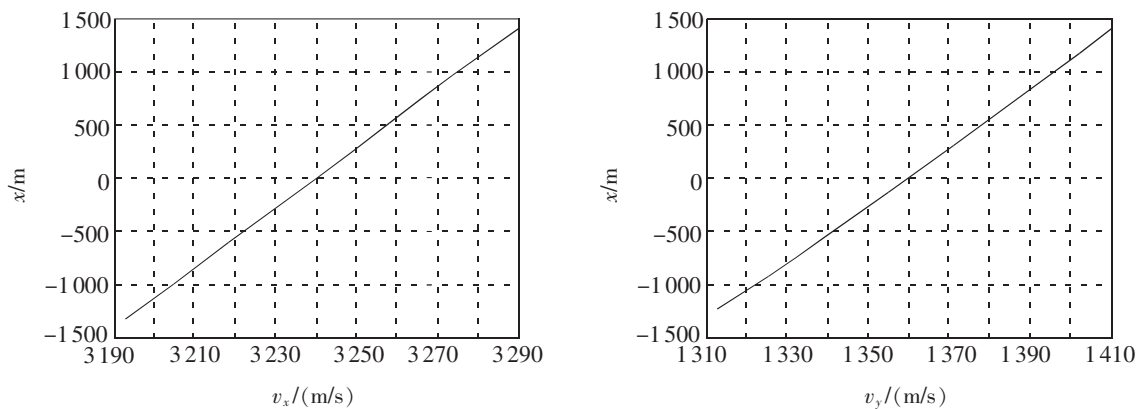


图6 测速对于落点的影响

龙格库塔函数，解四阶方程组，得到目标在惯性坐标系下的预测弹道，如图5，子系统将发射系转换为惯性坐标系。测速对于落点位置的影响如图6所示。

## 5 结 论

本文采用两台经纬仪交会测量的方法测量导弹

的位置和速度，并采用解微分方程组的方法进行了落点预测的研究。通过仿真得出测速精度是影响落点预测精度的主要因素。在测速精度达到20 m/s时，落点预测精度可达到2 km以内。

## 参考文献

- [1] 张荣涛, 薛金芳, 徐振来. 一种提高导弹落点预报精度方法的研究[J]. 现代雷达, 2008, 30(8): 37-39.
- [2] 陈有伟, 韩俊杰, 贺丛中, 等. 始终处于大气层内飞行的 TBM 被动段弹道预测[J]. 现代防御技术, 2007, 35(1): 18-22.
- [3] 韩子鹏. 弹箭外弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.

作者简介: 葛兵 (1982-), 女, 吉林桦甸人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事光电跟踪伺服控制研究。

E-mail: gebing1982@163.com

## 《光学 精密工程》(月刊)

《光学 精密工程》是中国仪器仪表学会一级学术期刊, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办, 科学出版社出版。由国内外著名科学家任顾问, 陈星旦院士任编委会主任, 国家科技部副部长曹健林博士担任主编。

《光学 精密工程》坚持学术品位, 集中报道国内外现代应用光学、光学工程技术、光电工程和精密机械、光学材料、微纳科学与技术、医用光学、先进加工制造技术、信息与控制、计算机应用以及有关交叉学科等方面的最新理论研究、科研成果和新技术。本刊自2007年起只刊发国家重大科技项目和国家自然科学基金项目及各省、部委基金项目资助的论文。《光学 精密工程》竭诚欢迎广大作者踊跃投稿。

本刊获奖:

中国精品科技期刊  
中国科学技术协会择优支持期刊  
中国百种杰出学术期刊  
第一届北方优秀期刊  
吉林省双十佳期刊

国际检索源:

《美国工程索引》(EI Compendex)  
《美国化学文摘》(CA)  
《英国INSPEC》(SA)  
《俄罗斯文摘杂志》(PKJ)  
《美国剑桥科学文摘》(CSA)

国内检索源:

中国科技论文统计源期刊  
中国学术期刊(光盘版)  
万方数据系统数字化期刊  
台湾华艺中文电子期刊网  
中国科学引文数据库  
中国物理文献数据库  
中国期刊网

中文核心期刊要目总览(北大)  
中国学术期刊综合评价数据库  
中国光学与应用光学文摘  
中国科学期刊全文数据库  
中国光学文献数据库  
中国学术期刊文摘  
中国物理文摘

电 话: (0431) 86176855

传 真: (0431) 84613409

E-mail: gxjmgc@ciomp.ac.cn gxjmgc@sina.com

http: //www.eope.net