

文章编号: 2095-4980(2017)02-0234-05

基于 Matlab 的弹道转换算法

张家叶子¹, 吕游²

(1.92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125000; 2.91899 部队, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘 要: 针对靶场试验系统数据流程中弹道数据坐标表示方法和记录存储格式差异极大、现行坐标转换技术整合度低、操作性差等问题, 结合任务需求, 总结了试验任务中常用的坐标系。提出利用大地坐标系下的发射点和瞄准点, 通过改进的白塞尔算法计算发射方位角, 论证了将飞行高度转换为发射 y 向分量的解析几何计算方法, 利用 Matlab GUI 设计实现了弹道数据的自动化转换, 并应用于靶场数据处理工作。实践证明, 这种方法转换模型数据准确, 能够修正 2° 以内的给定方位角偏差, 操作灵活, 具有良好的用户体验。

关键词: 坐标系转换; Matlab GUI 软件; 射击方位角; 飞行高度; 弹道数据

中图分类号: TN959

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201702.0234

Ballistic transform method based on Matlab

ZHANG Jiyezi¹, LYU You²

(1. Unit 92941, Chinese People's Liberation Army, Huludao Liaoning 125000, China;

2. Unit 91899, Chinese People's Liberation Army, Huludao Liaoning 125000, China)

Abstract: The recording and storing methods of ballistic data differ from each other in coordinates and formats. The current coordinate transform software lacks integration and operability. Combined with the task requirements, several common coordinate systems are summarized. The Bessel algorithm is improved to calculate the azimuth angle by using the transmitting point and aligning point in the earth coordinates. A process is introduced to convert flight altitude to launch coordinate y component through analytic geometry. An automatic ballistic data converting system is designed and implemented based on Matlab and applied to the practical work of the range. It is proved that the proposed method has high model precision to fix the offset within 2° , and has flexible operation for good user experience.

Keywords: coordinate convert; Matlab GUI; firing azimuth; flight height; ballistic data

弹道数据坐标及格式转换的及时准确直接影响着试验任务的顺利进行^[1-2]。试验指挥控制系统二/三维信息显示和中心机实时数据处理系统的理论弹道数据采用固定时间步长的地心空间直角坐标系和大地坐标系, 厂家提供的理论弹道数据则形式繁杂多样, 以发射坐标系弹道为主, 还包括大地坐标系、地心空间直角坐标系、发射坐标系、飞行高度、北天东坐标系、惯性发射坐标系等。虽然当前对于点坐标的转换方法研究已经成熟, 但是对弹道轨迹坐标转换还没有系统的需求分析与解决方法。本文研究实现了不同坐标系下不同格式弹道数据转换方法, 并按照需求生成制定格式的弹道数据。

1 坐标转换原理

根据靶场试验任务需求, 下面给出系统中用到的几种坐标系之间的转换公式^[3-6]。

1.1 地心大地坐标系到地心空间直角坐标系

假若已知 P 点的大地坐标为 L, B, h , 可由式(1)得到相应的地心空间直角坐标系坐标为 X_G, Y_G, Z_G 。 N_G 为 P 点的卯酉圈曲率半径, e 为 DX-1 号(地心 1 号)参考椭球体的第一偏心率。

$$\begin{cases} X_G = (N_G + h) \cos B \cos L \\ Y_G = (N_G + h) \cos B \sin L \\ X_G = [N_G(1 - e^2) + h] \sin B \end{cases} \quad (1)$$

1.2 地心空间直角坐标系到地心大地坐标系

相同的坐标点与上一节做相反的坐标转换, a_G 表示参考球体扁率, $r = \sqrt{X_G^2 + Y_G^2}$, $E = \frac{e^2}{1 + K\sqrt{1 - (eZ_G^2)/R^2}}$,

$R = \sqrt{r^2 + Z_G^2}$, $K = \frac{R}{a_G}$, 所求 P 点的大地坐标为 L, B, h , 可表示成式(2)的形式:

$$\begin{cases} L = \arctan\left(\frac{Y_G}{X_G}\right) + \begin{cases} 0, X_G > 0, Y_G > 0 \\ \pi, X_G < 0 \\ 2\pi, X_G > 0, Y_G < 0 \end{cases} \\ B = \arctan\left[\frac{Z_G}{r(1 - E)}\right] \\ h = \sqrt{r^2 + (Z_G + N_G^2 \sin B)^2} - N \end{cases} \quad (2)$$

1.3 发射坐标系到地心空间直角坐标系

将发射坐标系 $O-XYZ$ 先后绕 OX, OY, OZ 轴旋转 A_T 角, λ_o 角, ϕ_o 角, 使发射坐标系与地心空间直角坐标系 $O_G-X_GY_GZ_G$ 对应的坐标轴平行, 然后平移发射系坐标原点 O 到 O_G , 2 坐标系重合。目标位置向量由发射坐标系转换成地心空间直角坐标系的关系如式(3)所示:

$$\begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_o & \cos \lambda_o & 0 \\ \cos \lambda_o & \sin \lambda_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -\sin \phi_o & \cos \phi_o & 0 \\ \cos \phi_o & \sin \phi_o & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A_T & 0 & -\sin A_T \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin A_T & 0 & \cos A_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{G_o} \\ Y_{G_o} \\ Z_{G_o} \end{bmatrix} \quad (3)$$

惯性发射坐标系在发射坐标系的基础上排除地球自转因素, 因此在弹道转换过程中先将惯性发射坐标系弹道转换到发射坐标系即可进行后续转换。

2 改进的弹道转换算法

发射方位角和飞行高度是导弹弹道的重要数据。利用发射点和靶位点计算得到的发射方位角能够提高弹道转换的数据精确度, 飞行高度数据需要经过坐标系转换处理。

2.1 发射方位角的计算

发射方位角是弹道转换过程中的重要数据, 在一定程度上影响了弹道数据的准确性。在试验任务的实际执行过程中, 使用试验方案给定发射方位角进行坐标换算时, 给定发射方位角数据准确度和数值精确度具有很大的局限性, 计算出的弹道数据航向偏差较大, 影响转换后弹道数据的准确性。精确的发射方位角计算能有效消除这种偏差。

实时数据处理获取的理论弹道信息中一般提供发射点和目标点的大地坐标系坐标, 发射方位角即可转化为计算 2 点的大地线方位角问题, 这是一个大地主题反解过程。大地主题解算复杂, 解法多样, 以白赛尔大地投影为基础的解法计算公式展开 e^2 与 e'^2 的幂级数, 解算经度与距离长短无关, 相对其他解法优势明显^[7], e 与 e' 分别为椭圆的第一、第二偏心率。本文根据白赛尔法大地主题反算方法, 为提高 Matlab 环境下编码效率, 结合靶场试验实际, 给出了相应的反算公式。已知发射点 O 、靶位点 D 的大地坐标 B_1, L_1 及 B_2, L_2 , 求弹道 OD 起点处的大地方位角。转换方法如式(4)所示。

$$\begin{cases} \tan u_1 = \tan B_1 \sqrt{1 - e^2}, \quad \tan u_2 = \tan B_2 \sqrt{1 - e^2}, \\ L = L_2 - L_1, \quad A_T = \arctan\left(\frac{\cos u_1 \tan u_2 - \sin u_1 \cos L}{\sin L}\right) \end{cases} \quad (4)$$

反余切函数在数学上的取值范围为 $0 \sim \pi$ ，经实验验证，在 Matlab 中反余切函数的取值范围为 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 。因此，在具体实现中采用如下策略：在标准二维地图上，由第三象限发射到第一象限的弹道数据发射方位角 $Dir=A_T$ ；由第四象限发射到第二象限和由第一象限发射到第三象限的弹道数据射击方位角 $Dir=A_T+\pi$ ；由第三象限发射到第一象限的弹道数据发射方位角 $Dir=A_T+2\pi$ 。

2.2 飞行高度数据转换

飞行高度是导弹主要战术指标之一^[8]，在厂家提供的弹道数据中，多将发射坐标系的 x 向和 z 向数据与导弹飞行高度数据作为同一组数据提供。在处理时需要将飞行高度转换成发射高度，再通过公式(5)进行转换。如图 1 中，在参考球体 O 上，飞行高度可以表示成 CD 的长度，在以 F 为发射点的发射坐标系中，目标对应的 y 轴方向取值取决于 C 点在 y 轴上的投影坐标。

由投影法则推导出飞行高度到发射系 y 轴取值的计算方法如式(5)所示：

$$Y = \sqrt{(OD+h)^2 - X^2 - Z^2} - OF \quad (5)$$

式中： OD, OF 代表对应位置的参考球体半径； h 表示飞行高度数据； X 和 Z 代表弹道在发射系 x 向与 z 向分量。

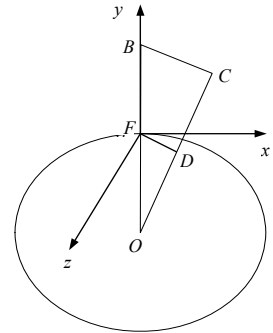


Fig.1 Flight height and launch coordinate height
图 1 飞行高度和发射系高度

3 算法实现与实验结果

3.1 体系结构设计

弹道转换算法的设计遵循体系化设计原则，各个模块既是系统结构的一部分，也可作为独立构件单独使用^[9]。体系结构设计如图 2 所示。

其中，数据处理模块功能丰富，主要算法步骤为：

- 1) 读取原始数据和配置信息，根据配置信息判定是否给定射向，给定则转到步骤 2)，否则转到步骤 3)；
- 2) 根据本文提出的方法计算发射方位角；
- 3) 判断位置坐标系转换需求，若源坐标系与目的坐标系不同，根据转换需求选择坐标系转换矩阵，进入下一步，否则转到步骤 7)；
- 4) 将坐标或速度数据转换到相应坐标系，下一步；
- 5) 判断速度转换需求，若速度转换需求标志有效，转到步骤 6)，否则转到步骤 8)；
- 6) 速度转换需求标志置为无效，判断源数据中是否有速度列，若有则根据转换需求选择坐标系转换矩阵并转到步骤 4)，否则下一步；
- 7) 根据位置数据计算相应坐标系速度数据，坐标转换矩阵选择与位置坐标转换时采用的同一矩阵，并将速度转换需求标志置为无效，转到步骤 4)；
- 8) 对结果数据进行插值，送到内部信息接口。

3.2 界面设计

操作显示主界面如图 3 所示。

- 1) 原始数据部分处理输入文件信息、时间单位选定、坐标系判别。文件注释内容行标识和原始数据读取选项。用户可以按照需求选择系统读取文件数据的任意几列并重排列序。
- 2) 结果数据部分处理生成文件信息。可配置项包括转换类型选择、生成文件路径、数据插值的时间步长、数据列的结果输出选择和排列顺序。
- 3) 射向部分处理发射点输入以及发射方位角计算。采用计算发射方位角和给定发射方位角 2 种方式。
- 4) $X(\text{km})$ 一行做数据单位转换处理，厂家提供数据坐标位置和速度的单位包括 $\text{m}, \text{m/s}$ 和 $\text{km}, \text{km/s}$ 等不同情况，

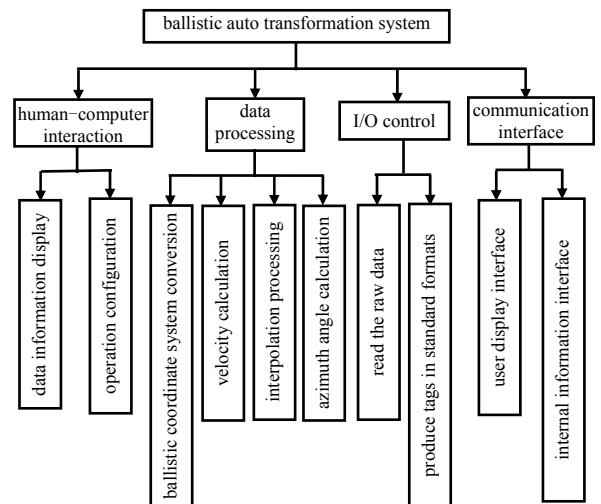


Fig.2 Diagram of ballistic data converting architecture
图 2 弹道数据转换体系结构图

读取用户配置的单位信息,生成具体单位转换需求,并进行单位换算。

弹道数据二维显示界面如图4所示。对生成大地坐标系下的弹道数据以弹出图形窗口的形式进行二维显示,画出转换后弹道数据的航迹曲线以及时间-高度曲线图,用户可以根据这些二维显示信息对转换数据的准确性进行核查。用户输入少量数据即可自动得到弹道转换的全部结果。



Fig.3 Main interface of operation and display
图3 操作显示主界面

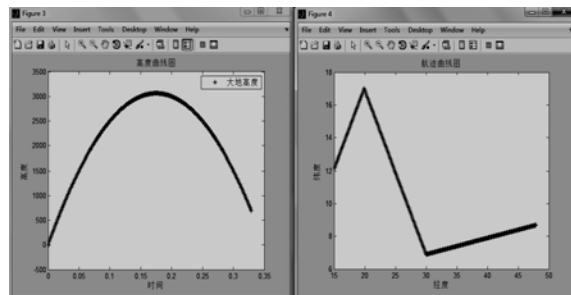


Fig.4 2-D display interface of ballistic data
图4 弹道数据二维显示界面

3.3 试验结果

对比将飞行高度直接当作发射系 Y 分量处理和通过本文提出的转换方法处理后得到的飞行高度数据结果如图5所示。

实验结果表明,在弹道数据后半段飞行高度与发射系 Y 分量的差别越来越大,符合文中论证的结果。采取本文论证的方法能够准确地将飞行高度转换成发射系 Y 分量,与直接使用飞行高度近似,高度数据准确度提高。

给定发射方位角与本文方法计算的发射方位角对比如表1所示。表中 O 点代表发射点, P 点代表靶位点, CA 表示采用文中方法计算得到的发射方位角, GA 代表传统运算时采用的给定发射方位角, $OFFS$ 表示2种方法对比后得到的方位角偏差。从对比结果可以看出本文方法计算出的发射方位角精确度和准确度都高于给定角。

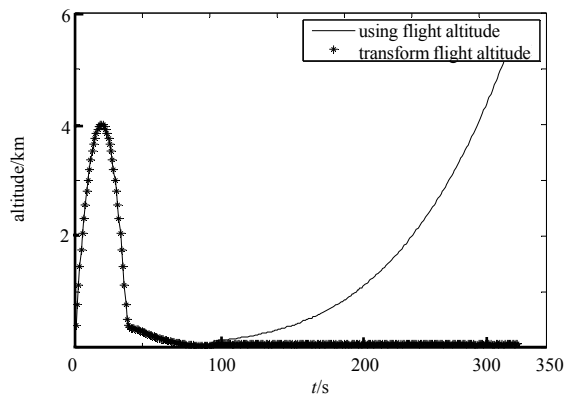


Fig.5 Flight altitude converting results of level flight
图5 平飞的飞行高度转换结果

4 结论

本文改进了发射方位角和飞行高度的解算方法,设计并实现了弹道数据转换算法。功能全面,操作方便,显示丰富,具有多种坐标系下弹道数据多格式转换、数据表格及二维显示、数据检验、发射方位角计算、速度计算等功能,在试验任务中起到了良好的保障作用。

参考文献:

- [1] 刘利生,吴斌,孙正容,等. 外弹道测量精度分析与评定[M]. 北京:国防工业出版社, 2010:17-32. (LIU Lisheng, WU Bin, SUN Zhengrong, et al. Accuracy Analysis and Evaluation for Exterior Ballistic Measurement[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2010:17-32.)
- [2] 张重雄,邱华,张先盟. 火箭助飞式声干扰器空中弹道的测试方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2006,4(2):94-97. (ZHANG Zhongxiong, QIU Hua, ZHANG Xianmeng. Air trajectory test method for rocket-propelled acoustic jamming equipment[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2006,4(2):94-97.)

表1 发射方位角计算结果对比

Table1 Contrast of launching direction calculation results

O	P	$CA/(^{\circ})$	$GA/(^{\circ})$	$OFFS/(^{\circ})$
120.123 4, 40.123 4	121.123 4, 40.123 4	90.000 0	90.0	0
120.123 4, 40.123 4	121.123 4, 38.123 4	230.475 7	230.5	0.024 3
120.123 4, 40.123 4	121.123 4, 38.432 1	219.202 4	219.1	0.102 4
120.123 4, 40.123 4	120.123 4, 38.432 1	180.000 0	180.0	0
120.123 4, 40.123 4	125.1234, 38.4321	131.9952	132.0	0.004 8

- [3] 宫晓春,吕志平,王宇谱,等. 几种坐标转换计算方法的比较[J]. 大地测量与地球动力学, 2015,35(4):697-701. (GONG Xiaochun,LYU Zhiping,WANG Yupu,et al. Comparison of calculation methods of several coordinate transformation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2015,35(4):697-701.)
- [4] 王文利,程传录,陈俊英. 常用坐标转换模型及使用性研究[J]. 测绘信息与工程, 2010,35(5):37-39. (WANG Wenli,CHENG Chuanlu,CHEN Junying. Coordinate transformation models and their practicability[J]. Journal of Geomatics, 2010,35(5):37-39.)
- [5] 孔祥元,郭际明,刘宗泉. 大地测量学基础[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2010:138-150. (KONG Xiangyuan,GUO Jiming,LIU Zongquan. Foundation of Geodesy[M]. Wuhan,China:Wuhan University Press, 2010:138-150.)
- [6] 周朝宪. 自定义坐标系的建立及其坐标变换实现[J]. 地质与勘探, 2015,51(4):699-704. (ZHOU Chaoxian. Custom coordinate system establishment and coordinate conversion[J]. Geology and Prospecting, 2015,51(4):699-704.)
- [7] 郝辉,李雪瑞,舒健生,等. 导弹常用空间直角坐标系间转换方法[J]. 四川兵工学报, 2013,34(2):18-20. (HAO Hui,LI Xuerui,SHU Jiansheng,et al. Conversion method among common space rectangular coordinates of missile[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013,34(2):18-20.)
- [8] 李莉. 利用大地主题解算准确计算导弹发射方位角的方法研究[J]. 战术导弹技术, 2010(5):44-46. (LI Li. Research on method of missile launching azimuth calculation using the solution of geodetic problem[J]. Tactical Missile Technology, 2010(5):44-46.)
- [9] 黄成,于鹏,赵锡旺. 基于 Matlab Simulink 的弹道仿真方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2015(2):169-173. (HUANG Cheng,YU Peng,ZHAO Xiwang. Method on trajectory simulation based on Matlab Simulink[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2015(2):169-173.)

作者简介:



张家叶子(1988-),女,辽宁省葫芦岛市人,硕士,助理工程师,主要研究方向为实时数据处理.email:zjyz1110@163.com.

吕游(1988-),男,黑龙江省嫩江县人,硕士,助理工程师,主要研究方向为实时数据处理.

(上接第 229 页)

- [12] XU Q,LI X,JI H,et al. Energy-efficient resource allocation for heterogeneous services in OFDMA downlink networks: systematic perspective[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014,63(5):2071-2082.
- [13] ZHANG H,JIANG C,BEAULIEU N C,et al. Resource allocation in spectrum-sharing OFDMA femtocells with heterogeneous services[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014,62(7):2366-2377.
- [14] NG D W K,LO E S,SCHOBER R. Energy-efficient resource allocation in multi-cell OFDMA systems with limited backhaul capacity[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012,11(10):3618-3631.
- [15] NG D W K,LO E S,SCHOBER R. Energy-efficient resource allocation in OFDMA systems with large numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012,11(9):3292-3304.
- [16] DINKELBACH W. On nonlinear fractional programming[J]. Management Science, 1967,13(7):492-498.
- [17] 3GPP Std.TR 36.814 V9.0.0. Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects[S]. 2010.

作者简介:



唐春菊(1984-),女,四川省南充市人,硕士,讲师,主要研究方向为认知无线技术及图像处理.email:tangchunju@126.com.