

过山气流低空风切变对野战火箭弹弹道特性影响分析

陈健伟, 王良明, 李子杰

(南京理工大学能源与动力工程学院, 南京, 210094)

摘要 针对过山气流低空风切变的流动特点,基于位势流动理论,在地面坐标系上建立考虑地面摩擦及背风旋涡的过山气流三维风场分布模型。结合六自由度刚体弹道模型,以某 122 mm 尾翼火箭弹为例,仿真分析了野战火箭弹在主动段受过山气流风切变影响的弹道特性变化。结果表明,过山气流低空风切变对野战火箭弹的飞行时间、射程、侧偏、落速及角运动均产生较大影响,其中对火箭横向运动的影响较为显著;风场强度与野战火箭弹受风场的影响程度正相关;野战火箭弹在迎风坡与背风坡发射时,弹道特性的变化规律相反,且背风坡处发射时弹道特性的变化更明显;中低射角范围内,增大野战火箭弹的射角能够降低过山气流低空风切变对射程的影响,但侧偏所受的影响会相应增大。

关键词 低空风切变;过山气流;位势流动;风场建模;弹道特性

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.01.011

中图分类号 TJ012.3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)01-0064-07

An Analysis of Influence of Airflow over Mountain Wind Shear on Ballistic Performance of Rockets

CHEN Jianwei, WANG Liangming, LI Zijie

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract In view of the flow features, a three-dimensional wind field model of airflow over mountain in consideration of the ground friction and the leeward vortex are established based on the theory of potential flow. Taking a certain empennage rocket of 122 mm as an example combined with 6-DOF ballistic model, this kind of empennage-rocket is studied on its ballistic performance of prior trajectory influenced by the airflow over mountain wind shear. The results show that the airflow over mountain wind shear has a certain impact on the flight time, the range, the side-slip, the falling velocity and the angular motion of a rocket, particularly on the lateral movements of a rocket. The wind field strength is positively related to the influences on a rocket by the airflow over mountain; The changing regularity of ballistic performance when the rocket launched on the windward slope is opposite to that of leeward slope and the ballistic performance is more affected when a rocket is launched on the leeward slope. Within the range of middle-low elevation, the incremental elevation of a rocket is enabled to influence on the range of a rocket by the air-

收稿日期: 2019-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(61603191); 装备预研国防科技重点实验室基金(614260403010117)

作者简介: 陈健伟(1990—)男,江苏盐城人,博士,主要从事火箭飞行与控制研究。E-mail:15850525545@163.com

通信作者: 王良明(1963—)男,江苏丹阳人,教授,博士生导师,主要从事火箭外弹道研究。E-mail:lmwang802@163.com

引用格式: 陈健伟,王良明,李子杰. 过山气流低空风切变对野战火箭弹弹道特性影响分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(1): 64-70. CHEN Jianwei, WANG Liangming, LI Zijie. An Analysis of Influence of Airflow over Mountain Wind Shear on Ballistic Performance of Rockets[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(1): 64-70.

flow over mountain, meanwhile the influence on the side-slip may increase correspondingly.

Key words low level wind shear; airflow over mountain; potential flow; wind field model; ballistic performance

相关研究表明,影响火炮射击准确度的所有误差源中,气象因素占 70% 以上,其中风是对弹箭飞行过程影响最大的因素^[1]。分析近年来的相关研究可以发现,目前弹道学中的风场建模方法大致分为 2 种:一是以海拔高度分层平均风模型^[2-6],该类模型考虑了不同高度层内的大气扰动特性,但忽略了同一高度上风速风向的变化;二是将风场视为随机扰动过程的统计模型^[7-8],该类方法形式较第 1 种更为简单。由于自然风的形成受到地域、地形、天气等多种因素的影响,因此这 2 种风场模型虽具有一定的工程参考价值,但都缺乏对复杂环境下典型风场的描述。

低空风切变是一种与复杂地形环境和气象条件密切相关的风场现象,其表现为海拔 600 m 以内风速和风向在空间短距离内的突然变化^[9]。火箭弹在发射初始阶段(主动段),初速低,抗扰动能力差,此时若遭遇低空风切变,急剧变化的风速风向将改变作用在火箭弹上的空气动力,影响弹丸飞行稳定性,最终引起较大的落点偏差^[10]。目前对于低空风切变的相关研究主要集中在民航飞行领域的风切变检测识别和危害防范等方面^[11-13],对于低空风切变对弹箭飞行的影响研究较少^[14]。

在山区环境中,由于地形诱导和热交换等因素,过山气流成为山区低空风场的主要表现形式^[15]。野战火箭弹在山地环境发射时,不可避免会受到低空过山气流的影响。因此,本文将目前较为成熟的山地气流风场模型^[16-17]与野战火箭弹六自由度刚体弹道模型相结合,探究山地气流低空风切变影响下的弹道特性响应,以为山地环境下野战火箭弹的射击校正和弹道控制提供一定参考。

1 过山气流风场模型

近年来国内外过山气流风场的主要计算模型有 4 种:①基于实测风场数据的真实模型;②基于流体力学微分方程的数值解模型;③飞行品质校核中的典型模型;④工程化模型。模型①需要大量实测数据,模型②计算复杂,模型③则不适用于火箭弹,综合考虑野战火箭弹弹道仿真的实时性和准确性要求,本文采用能够描述过山气流流动特点的工程化建模方法。

1.1 基于圆柱绕流的山形模拟

对于一般的山体,可以利用圆柱体绕流的流线形状来模拟山形,将该流线看作一固定壁面,且对整个流场流动过程没有影响^[18],如图 1 所示。

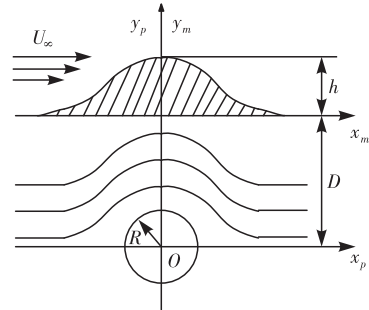


图 1 位流坐标系与山体坐标系

以中心 O,半径 R 建立圆柱绕流体系,(x_p, y_p) 表示圆柱绕流位流坐标系中的点,(x_m, y_m) 表示山体坐标系中的点,令山体高度为 h,U_infinity 为远前方气流速度,圆柱绕流位流体系与山体系在竖直轴的坐标差表示为 D=y_p - y_m。

圆柱绕流流函数表示为:

$$\Psi(x_p, y_p) = U_\infty \left(y_p - \frac{R^2 y_p}{x_p^2 + y_p^2} \right) \quad (1)$$

根据流体力学基本原理可知,一条流线上的点具有相等的流函数值,因此:

$$\Psi_1(0, h+D) = \Psi_2(\infty, D) \quad (2)$$

$$\Psi_1(0, h+D) = U_\infty \left[(h+D) - \frac{R^2}{h+D} \right] \quad (3)$$

$$\Psi_2(\infty, D) = U_\infty D \quad (4)$$

$$D = R^2 / h - h \quad (5)$$

这里引入描述山体形状的山形因子 S, S=h/R (0 ≤ S ≤ 1),当 S=1 时,h=R,D=0,山形可视为一驻点流线;当 S=0 时,R → ∞,D → ∞,山形逼近为平面。不同山形因子对应的山形曲线见图 2。

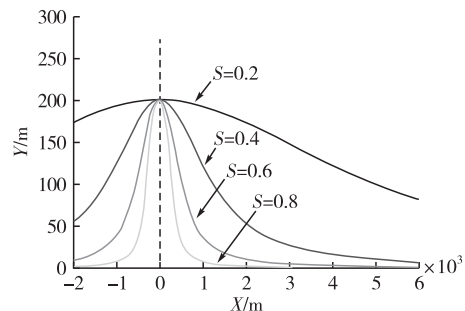


图 2 不同形状因子对应山形

1.2 考虑地形摩擦的三维风速分布

根据圆柱绕流速度势函数,计算得流场区域内

某点的速度分量表达式:

$$\begin{aligned} u_p &= \frac{\delta\Phi}{\delta x_p} = U_\infty \left[1 + R^2 \frac{y_p^2 - x_p^2}{(x_p^2 + y_p^2)^2} \right] \\ v_p &= \frac{\delta\Phi}{\delta y_p} = -U_\infty R^2 \frac{2x_p y_p}{(x_p^2 + y_p^2)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

考虑到山体表面摩擦对气流的影响,认为绕流场理论流速在以山体表面为基准的地面坐标系内符合地面边界层的分布规律^[18]:

$$u_s = C \ln \frac{y_s}{y_0} \quad (7)$$

式中: y_0 为地面粗糙度; $C = u_{s0}/k$, $k = 0.4$,为卡尔曼常数, u_{s0} 为摩擦速度, $u_{s0} = \sqrt{\tau_0/\rho_0}$, τ_0 和 ρ_0 分别为地面剪应力和空气密度。

按式(7)的水平气流速度与 u_s 与位流水平分速度 u_p 的比值为:

$$f(\Psi) = \frac{u_m(x_m, y_m)}{u_p(x_p, y_p)} \quad (8)$$

$$\begin{cases} u_m = u_p f(\Psi) \\ v_m = v_p f(\Psi) \end{cases} \quad (9)$$

定义 $f(\Psi)$ 为摩擦因子,用以计算山体地表的气流摩擦作用。在山体的背风一侧,气流相互作用常形成旋涡,称为背风涡,为模拟该山体背风涡,考虑在背风坡区域设置一强度为 Γ_0 的黏性涡,其诱导速度为^[19]:

$$v_i = \frac{\Gamma_0}{2\pi r} (1 - e^{-\frac{r^2}{4t}}) \quad (10)$$

式中: r 为某点到涡心的径向距离; ν 为流动黏性系数; t 表示涡的寿命,将该诱导速度在山体坐标系内分解即可得到水平分量 u_{si} 和 v_{si} ,将圆柱绕流速度场与背风涡诱导速度场叠加,同时计入摩擦因子 $f(\Psi)$,可得山地气流总的风场速度分布^[19]:

$$\begin{cases} u_m = (u_p + u_{si}) f(\Psi) \\ v_m = (v_p + v_{si}) f(\Psi) \end{cases} \quad (11)$$

设置山体坐标系与地面坐标系具有相同的坐标原点,将山体坐标系绕其纵轴 y_m 旋转一角度 β ,则在地面坐标系内的火箭弹发射飞行时即会受到过山气流三维流动风场的影响。山体坐标系到地面坐标系的转换矩阵为:

$$\mathbf{M}(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

通过坐标转换可获得地面坐标系下过山气流三维风场速度分量:

$$\begin{bmatrix} u_g \\ v_g \\ w_g \end{bmatrix} = \mathbf{M}(\beta) \begin{bmatrix} u_m \\ v_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_m \cos \beta \\ v_m \\ u_m \sin \beta \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据相关研究资料对模型参数做如下设置(见

表1),并进行数值仿真。图3为高度 $y = 250$ m水平截面内三维风速分量随水平距离的变化曲线,图4为水平距离 $x = 500$ m垂直截面内三维风速分量随高度的变化曲线。

表1 三维风场模型参数

参数名	数值
山体高度/m	200.0
形状因子	0.8
地面粗糙度/m	0.2
远前方流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	8.0
背风涡强度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	-18 000.0
背风涡寿命/s	600.0
背风涡中心坐标	(1 500, 10, 0)
涡黏性系数/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.5×10^{-5}
山体与地面系夹角/ $^\circ$	30.0

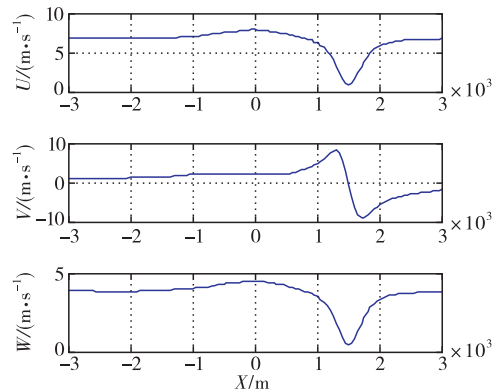


图3 $y = 250$ m水平截面内风速分量曲线

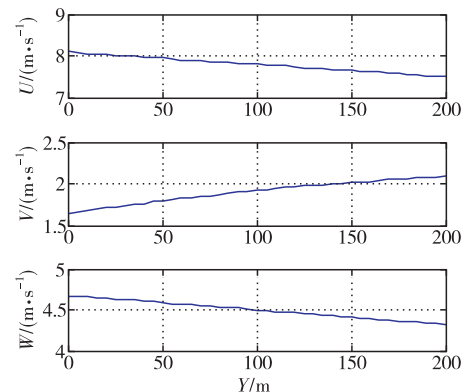


图4 $x = 500$ m垂直截面内风速分量曲线

由图3可以看出,在山体迎风坡,距离山坡越远,来流受山体影响越小,因此风速越低;在山体背风坡,受背风旋涡影响,水平风速出现极值后恢复稳定,垂直风速变化类似于正弦曲线规律,在一个变化周期内依次达到正负两个方向的极值。由图4可以看出,在风场垂直截面内,水平风速随高度增加而逐渐减小,垂直风速则随高度增加而增大。

2 野战火箭弹刚体弹道模型

2.1 火箭弹六自由度刚体弹道模型

基于外弹道学相关理论^[20],将运动中的火箭弹视为常质量的自由刚体进行动力学和运动学建模,忽略火箭燃气惯性作用力和力矩,认为弹丸质心加速度和转动惯量受到燃料燃烧的影响忽略不计。通过联立弹道坐标系及第一弹轴坐标系内火箭弹的质心运动和绕心运动方程,即可得到野战火箭弹六自由度刚体弹道模型:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} F_{x_2} \\ \frac{d\theta_1}{dt} = \frac{1}{mv \cos \phi_2} F_{y_2} \\ \frac{d\phi_2}{dt} = \frac{1}{mv} F_{z_2} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = v \cos \phi_2 \cos \theta_1 \\ \frac{dY}{dt} = v \cos \phi_2 \sin \theta_1 \\ \frac{dZ}{dt} = v \sin \phi_2 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \frac{d\omega_\xi}{dt} = \frac{1}{C} M_\xi \\ \frac{d\omega_\eta}{dt} = \frac{1}{A} M_\eta - \frac{C}{A} \omega_\xi \omega_\zeta + \omega_\xi^2 \tan \phi_2 \\ \frac{d\omega_\zeta}{dt} = \frac{1}{A} M_\zeta + \frac{C}{A} \omega_\xi \omega_\eta - \omega_\zeta \omega_\eta \tan \phi_2 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_a}{dt} = \frac{1}{\cos \phi_2} \omega_\xi \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = -\omega_\eta \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega_\xi - \omega_\zeta \tan \phi_2 \end{cases} \quad (17)$$

$$\frac{dm}{dt} = m_b \quad (18)$$

上述各式中相关变量含义详见文献[20],将式(14)~(18)联立,获得火箭弹弹体参数、发射条件、气象条件,即可通过数值积分算法计算火箭弹的完整弹道。

2.2 过山气流模型与弹道模型结合

结合 1.2 节过山气流三维风场分布的地面坐标系 $O_g-X_g Y_g Z_g$ 可知,获得火炮山体的相对位置后,即可通过原点平移完成发射系和地面系间的坐标转换。

对于发射坐标系内一点 $P_f(X_f, Y_f, Z_f)$,经过坐标系原点平移,得到其在地面系内的对应坐标 $P_g(X_g, Y_g, Z_g)$,将其代入第 1 节过山气流模型计算

获得对应的风速 $w_g(\omega_{xg}, \omega_{yg}, \omega_{zg})$,由于原点位置平移不影响速度大小和方向,因此 w_g 即为发射系内点 P_f 所遭遇的风速。

基于外弹道学理论可知,作用在火箭上的力 F_2 可以表示为弹体相对速度的函数:

$$F_2 = f(v - w_2) \quad (19)$$

式中: v 为弹筒质心速度矢量; w_2 为速度坐标系下的风速矢量,引入变换矩阵 $M(\theta_1, \phi_2)$ 来表示发射系到速度坐标系的转换:

$$M(\theta_1, \phi_2) = \begin{bmatrix} \cos \phi_2 \cos \theta_1 & 0 & \sin \phi_2 \\ -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ -\sin \phi_2 \cos \theta_1 & 0 & \cos \phi_2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$w_2 = M(\theta_1, \phi_2) \cdot w_g \quad (21)$$

式中:转换矩阵 $M(\theta_1, \phi_2)$ 及其相关元素定义详见文献[20]。将式(21)代入式(14)~(18)即可进行弹道解算。

3 仿真分析

基于第 2 节的火箭弹弹道模型,以某 122 mm 尾翼火箭弹为例进行仿真计算,弹道仿真参数如表 2 所示,为便于计算,火箭弹发动机燃料以匀速率质量燃烧考虑,同理,弹丸的转动惯量和质心位置也随时间均匀变化。仿真气象条件(除风以外)以炮兵标准气象条件为准。

表 2 火箭弹弹道仿真参数

参数名	数值
弹径/m	0.122
弹长/m	2.9
发动机比冲/s	250
发动机工作时间/s	3.0
火箭起始质量/kg	70.0
初始赤道转动惯量/(kg·m ²)	40.05
初始极转动惯量/(kg·m ²)	0.147
火箭初始质心位置/m	1.533
火药质量燃烧速率/(kg·s ⁻¹)	8.0
初速/(m·s ⁻¹)	40.0
射角/(°)	50.0
射向/(°)	0

3.1 不同来流风速下的仿真结果

远前方来流速度是过山气流风切变风场强度的决定性因素,因此,该组仿真中除远前方来流速度进行不同设置外,其余风场模型参数同表 1。火箭弹在山地坐标系内的发射坐标为(-1 000 m, 50 m),弹道特征参数的仿真结果见表 3。

表3 不同来流速度对应的仿真结果

来流速度/ (m · s ⁻¹)	飞行 时间/s	射程/m	侧偏/m	落速/ (m · s ⁻¹)
0	106.2	34 699	-9.3	368.3
6	109.0	34 993	-1 162.5	373.0
8	109.9	35 058	-1 565.2	374.6
10	110.8	35 106	-1 978.4	376.1
12	111.7	35 137	-2 405.3	377.7

由表3可以看出:①在射程方向上:由于火箭弹顺风发射,所受阻力减小,速度损失降低,因此在空中的飞行时间将会增长,同时射程相比弹道无风情况下增大;②在侧偏方向上:根据尾翼稳定弹质点弹道理论^[20],弹道横风将使弹箭产生顺风偏,且与风速大小正相关,因此过山气流横风分量使得火箭弹主动段末产生较大偏角,进而引起大幅度侧偏;③风场对火箭弹射程影响约占总射程的1%左右,而对侧偏的影响则是从10到10³产生量级变化;比较第2到第5行的弹道特征数据可以发现,来流速度越大(即风场强度越大),火箭弹弹道特征参数变化越为明显。

图4和图5分别给出了不同来流流速情况下,火箭弹高低攻角与方向攻角随时间变化的曲线。

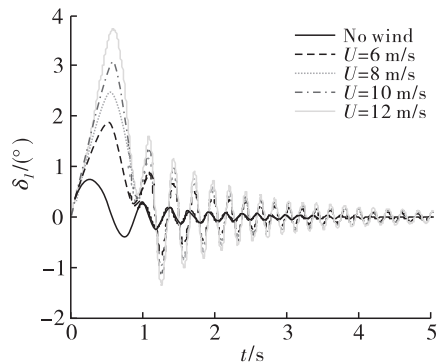


图4 火箭弹高低攻角曲线

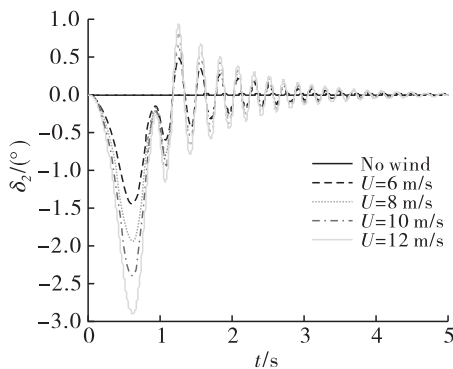


图5 火箭弹方向攻角曲线

可以看出,火箭弹在发射初始段穿越气流影响区时,受到风场扰动,产生高低方向和横向2个方向的附加攻角,离开气流影响区后,在尾翼弹丸稳定力

矩作用下,攻角波动衰减趋于平缓;在影响程度方面:以来流速度为8 m/s为例,与无风情况下相比,弹箭高低攻角幅值由0.8°变化为2.4°,而方向攻角从-2.4 × 10⁻⁵°变化至-1.9°,可见横风引起了方向攻角的大幅变化,其变化程度大于高低攻角。

3.2 不同发射位置的仿真结果

受来流方向以及背风旋涡的影响,迎风背风两侧山坡的风场分布各异,对野战火箭弹的发射也会产生不同的影响。本节仿真条件同3.1节,设置火箭弹分别从迎风坡和背风坡发射。弹道特征参数仿真结果见表4。

表4 不同发射位置对应的仿真结果

发射位置	飞行时间/s	射程/m	侧偏/m	落速/ (m · s ⁻¹)
无风情况	106.2	34 699	-9.3	368.3
迎风坡	109.9	35 058	-1 565.2	374.6
背风坡	101.4	33 975	1 613.0	360.9

由表4可以看出,在迎风坡处发射时,相关弹道特征量的变化与3.1节所述仿真情形具有相同的规律,而背风坡处发射时,作用在火箭弹弹体上的风力分量与迎风坡时方向相反,火箭弹逆风飞行阻力增大,射程减小,侧偏方向由负向变为正向,呈现出与迎风坡发射时相反的弹道变化规律;同时,比较各弹道参数相对于无风情况下的变化绝对值,按飞行时间、射程、侧偏、落速的顺序,分别为:迎风坡(3.7, 359, 1 556, 6.3),背风坡(4.8, 724, 1 622, 7.4),可以看出由于背风坡处,背风旋涡的存在提高了气流影响区内的风场强度,对火箭弹的弹道特性产生更大的影响。

图6和图7给出了2种发射位置下火箭弹高低攻角与方向攻角随时间变化的曲线。可以看出,在迎风坡与背风坡2种不同位置发射时,火箭弹的攻角变化方向相反;在背风坡处发射,弹箭攻角的变化幅值更大,攻角恢复稳定的时间更长,因此火箭弹在背风坡处发射时,角运动将会受到更大影响。

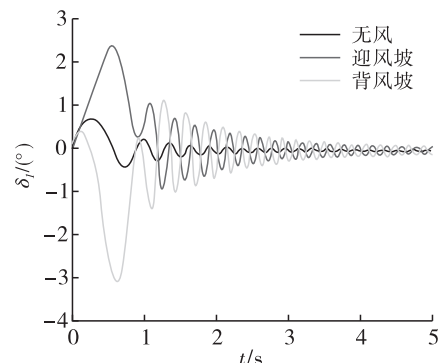


图6 火箭弹高低攻角曲线

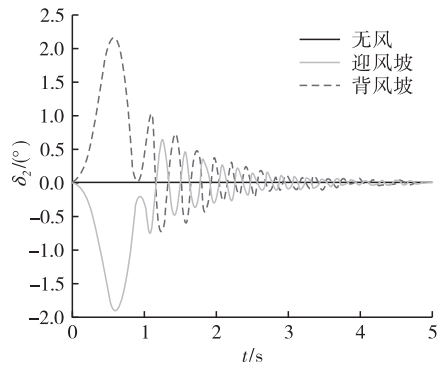


图 7 火箭弹方向攻角曲线

3.3 不同发射射角的仿真结果

在实战中,根据火箭弹的落点偏差,可以通过调整射角射向等方法对火炮进行校射,以提高火箭弹的命中精度。本节仿真中,设定火箭弹以不同射角发射,在相同射角下,计算无风情况下和山地气流影响情况下的弹道特征数据偏差,风场参数设置同 3.1 节,仿真结果见表 5。

表 5 不同射角对应的仿真结果

射角/ (°)	飞行时间 偏差/s	射程 偏差/m	侧偏 偏差/m	落速偏差/ (m · s ⁻¹)
40	3.5	643.3	-1 240.1	4.3
45	3.7	569.2	-1 385.4	5.4
50	3.7	358.6	-1 753.0	6.1
55	3.6	92.2	-1 935.5	6.7

由表 5 可以看出,随着火箭弹射角的增大,弹箭飞行高度增大,飞行时间将变长,由于发射位置为迎风坡,因此根据 3.1 节内容可知弹箭射程将增大,但由于提高射角使得火箭弹弹道曲率和轨迹发生变化,射角越大,最大弹道越高,但射程会越小,因此在射程变化上二者作用相反,从而产生射角越大,射程偏差越小的现象。因此,当火箭弹在迎风坡处发射时,可根据目标位置、理想弹道落点和偏差方向采取调整射角的方式进行射击校正。

4 结论

基于位势流动理论,本文建立了适用于野战火箭弹道仿真的过山气流低空风场模型,通过弹道数值仿真,得到如下结论:

1) 过山气流低空风切变对野战火箭弹的飞行时间、射程、侧偏、落速以及角运动等弹道特性均产生较大影响,其中对火箭弹横向运动影响较为显著,且影响程度与风场强度正相关。

2) 野战火箭弹在迎风坡与背风坡发射时,受风场影响后弹道特性具有相反的变化趋势;相比于迎

风坡发射,背风坡发射时火箭弹弹道特性变化幅度更大。

3) 在迎风坡发射时,中低射角范围内提高射角能够降低过山气流低空风切变对野战火箭弹射程的影响,在山地复杂风场环境下发射时,可以综合目标位置、理想弹道落点调整射角,提高射击精度。

野战火箭弹受控后,如何设计合理的控制方法和弹道修正策略,提高火箭弹在复杂风场环境下的射击精度,是后续进一步研究的内容。

参考文献

- [1] 吴汉洲,宋卫东,张磊,等. 低空风风场建模与对弹丸弹道特性影响的研究[J]. 军械工程学院学报, 2015(4):38-42.
- [2] 李臣明,张微,韩子鹏. 100 km 以下风场对远程弹箭运动的影响研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(10):1169-1172.
- [3] SHARIFI A, NOBAHARI H. Multiple Model Filters Applied to Wind Model Estimation for a Fixed Wing UAV[C]// 2016 7th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE). [S. l.]: IEEE, 2016.
- [4] 马民,张东升,张为华,等. 探空火箭风场补偿及等效弹道风转化[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(6):13-16.
- [5] 高太长,涂雪伟,方涵先,等. 关于 2 种典型风场对弹箭运动轨迹影响的三维数值分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011, 12(2):178-183.
- [6] MCPHEE J J, ANDREWS G C. Effect of Sidespin and Wind on Projectile Trajectory with Particular Application to Golf [J]. American Journal of Physics, 1988, 56(10):933-939.
- [7] 王欣,张凤阁,姚俊,岳明凯. 蒙特卡罗法分析随机风对火箭弹落点散布的影响[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(1):198-201.
- [8] RHUDY, MATTHEW B. Stochastic Spatial Wind Field Simulation using a Potential Field [C]//Proceedings of AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. [S. l.]: AIAA, 2014.
- [9] BHUIYAN M, RONALD W M. Wind Shear Detection for Small and Improvised Airfields[C]// 2012 IEEE Aerospace Conference. [S. l.]: IEEE, 2012.
- [10] 王建国,潘红华,许涛. 舰载火箭炮弹道风确定探讨[J]. 弹道学报, 2004, 16(1):11-15.
- [11] CHAN P W, LEE Y F. Application of Short-Range Lidar in Wind Shear Alerting[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 29(2):207-220.
- [12] LEITMANN G, PANDEY S, RYAN E. Adaptive Control of Aircraft in Windshear [J]. International

- Journal of Robust & Nonlinear Control, 2010, 3(2): 133-153.
- [13] GREENE R A. Airborne Detection of Low-Level Wind Shear [J]. Journal of Aircraft, 2015, 16(12): 823-827.
- [14] 陈健伟,王良明,李子杰. 两种典型低空风切变对火箭弹弹道特性的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(5): 1008-1017.
- [15] 孙毅,李正良,黄汉杰,等. 山地风场平均及脉动风速特性试验研究[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(5): 593-599.
- [16] SHEPPARD P A. Airflow over Mountains[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 82(354): 528-529.
- [17] SCORER R S. Theory of Airflow over Mountains: IV -Separation of Flow from the Surface[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 81(349): 340-350.
- [18] 刘刚,洪冠新,金长江. 复杂地形上空超低空风场的工程仿真方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(3): 193-196.
- [19] 陈健伟,王良明,傅健. 用于实时弹道仿真的低空风切变复合模型[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(11): 2597-2604.
- [20] 徐明友. 火箭外弹道学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2004: 136-146.

(编辑:徐敏)

(上接第 63 页)

参考文献

- [1] LEROSEY G, ROSNY J D, TOURIN A, et al. Time Reversal of Electromagnetic Waves[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(19): 193904.
- [2] FIND M, PRADA C, WU F, et al. Self Focusing in Inhomogeneous Media with Time Reversal Acoustic Mirrors[C]// IEEE Ultrasonics Symposium. Montreal, Quebec, Canada: IEEE, 1989: 681-686.
- [3] PARVULESCU A, CLAY C S. Reproducibility of Signal Transmissions in the Ocean[J]. Radio and Electronic Engineer, 1965, 29(4): 223-238.
- [4] LEROSEY G, ROSNY J, TOURIN A, et al. Time Reversal of Wideband Microwaves [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(15): 154101.
- [5] PENDRY J B. Time Reversal and Negative Refraction [J]. Science, 2008, 322(5898): 71-73.
- [6] TREFNA H D, TOGNI P, SHIEE R, et al. Design of a Wideband Multi-Channel System for Time Reversal Hyperthermia[J]. International Journal of Hyperthermia: the Official Journal of European Society for Hyperthermic Oncology, North American Hyperthermia Group, 2012, 28(2): 175-183.
- [7] CARMINATI R, PIERRAT R, ROSNY J, et al. Theory of the Time Reversal Cavity for Electromagnetic Fields [J]. Optics Letters, 2007, 32(21): 3107-3109.
- [8] ROSNY J, FINK M. Focusing Properties of Near-Filed Time Reversal [J]. Physical Review A, 2007, 76(6): 065801(1-4).
- [9] 孙程光. 基于模拟信号处理的电磁时间反演实现方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [10] 陈秋菊,姜秋喜,曾芳玲,等. 稀疏阵列相干信号功率合成栅基仿真技术[J]. 现代雷达, 2015, 37(11): 87-91.
- [11] 陈秋菊,姜秋喜,曾芳玲,等. 基于时间反演电磁波的稀疏阵列单频信号功率合成研究[J]. 物理学报, 2015, 64(20): 204101-1-6.
- [12] 陈秋菊,姜秋喜,曾芳玲,等. 稀疏阵列时间反演脉冲信号空间功率合成方法[J]. 电波科学学报, 2016, 31(3): 553-561.
- [13] MANZ B. Cognition: EW Gets Brainy [J]. The Journal of Electronic Defense, 2012, 35(10): 32-39.
- [14] 张春磊,杨小牛. 认知电子战初探[J]. 通信对抗, 2013, 32(2): 1-4, 20.
- [15] 张嘉焱,舒挺,袁成卫. 高功率微波空间功率合成的初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, 29(6): 915-918.
- [16] 何向翎. 分布式阵列功率合成及 DOA 估计研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [17] 范加武. X 波段多普勒雷达功率放大及空间功率合成技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.
- [18] 陈秋菊,曾芳玲,姜秋喜,等. 稀疏点源波束干涉合成建模与特征提取算法[J]. 探测与控制学报, 2015, 36(5): 35-39.
- [19] 高强,王晓华,王秉中. 基于宽带立体超透镜的远场超分辨率成像[J]. 物理学报, 2018, 67(9): 094101.
- [20] 郭玉春,张光生,周军. 方向回溯天线理论研究[J]. 通信对抗, 2009(4): 48-53.

(编辑:徐楠楠)