

非标准气象条件下空地导弹弹道视景仿真

扈登贵, 袁修久, 杨小雷, 杨 荣, 赵学军

(空军工程大学理学院, 陕西西安, 710051)

摘要 为研究非标准条件下气象要素对导弹制导精度的影响, 给出了一种适用于空地导弹在三维空间飞行的复合导引律, 建立了非标准气象条件下的复合导引法导引弹道模型。同时给出了大气运动基本方程组(MM5方程组)易于编程计算的数值解法, 采用变步长的四阶龙格库塔数值积分法, 联立求解相关的微分方程组, 对比分析了标准大气环境下比例导引法导引弹道和非标准气象条件下复合导引法导引弹道, 得出了复合导引法导引弹道更接近真实的弹道。使用STK(卫星工具包)对某空地导弹的2种导引弹道进行了视景仿真, 直观形象地显示了导弹飞行的运动轨迹。

关键词 气象要素; 制导精度; 导引律; 空地导弹; 导引弹道; 视景仿真

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.06.017

中图分类号 TP391.9 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)06-0073-04

A Study of Visual Simulation on Air-to-ground Missile's Trajectory under Non-standard Weather Conditions

HU Deng-gui, YUAN Xiu-jiu, YANG Xiao-lei, YANG Rong, ZHAO Xue-jun
(Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to study the influence of meteorological elements on the guidance precision of missile under non-standard weather conditions, a type of combined guidance law applied to three-dimensional space is presented and a model of the combined guidance trajectory is established under non-standard weather conditions. An easy-to-program numerical solution of the basic equations of atmospheric motion is put forward and solved through numerical integral method of variable-step four orders Runge-Kutta combining the related differential equations. By way of contrast with proportional guidance trajectory under the standard atmosphere, the result shows that the combined guidance trajectory is closer to actual missile's trajectory. Which directly and vividly exhibits the motion trajectory demonstrating the situation in flying and hitting the target, by STK.

Key words: meteorology elements; guidance precision; guidance law; air-to-ground missile; guidance trajectory; visual simulation

导引律是描述导弹质心运动应该遵循的准则, 确定了导弹质心在空间的运动弹道, 其作用是确定

收稿日期: 2013-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11071256); 陕西省电子信息系统综合集成重点实验室资助项目(20112D005)

作者简介: 扈登贵(1988-), 男, 甘肃会宁人, 硕士生, 主要从事系统建模与仿真研究。

E-mail: hn_hudenggui@163.com

导弹飞行的运动学弹道。目前,国内外许多专家对导弹二维平面导引律已经做了相当深入的研究。而现实中空战发生在三维空间,必定有2个平面的耦合运动,因此有必要开展三维导引律的研究工作。文献[1]对比例导引法导引弹道进行了三维仿真,但是文献[1]没有考虑导弹的运动模型。文献[2]采用降维的方法,把运动分解到2个二维平面内,分别求解2个平面内的弹道,然后合成得到三维弹道。但是文献[2]没有考虑外界气象要素(如风)的变化对导弹制导精度的影响。本文既考虑了导弹的三维运动模型,又考虑了气象要素对导弹导引时的制导误差,且给出了地面移动目标的基本模型,最后采用仿真软件STK(卫星工具包)实现了对三维导引弹道的可视化仿真。

1 坐标系的定义及转换

1.1 坐标系的定义

目标坐标系 $o_t-x_m y_m z_m$:该坐标系的原点取目标点 o_t , $o_t x_m$ 轴在过目标点的水平面内指向北, $o_t y_m$ 轴过目标点的法线指向天, $o_t z_m$ 轴与 $o_t x_m$ 及 $o_t y_m$ 轴组成右手直角坐标系指向东。

视线坐标系 $o_t-x_s y_s z_s$:该坐标系原点取目标点 o_t , $o_t x_s$ 轴沿目标点指向导弹质心 o_z 的连线, $o_t z_s$ 轴在目标坐标系 $o_t x_m y_m z_m$ 平面内,垂直于 $o_t x_s$ 轴, $o_t y_s$ 轴与 $o_t x_s$ 及 $o_t z_s$ 轴组成的右手直角坐标系。

弹道坐标系 $o_z-x_r y_r z_r$:该坐标系的原点取导弹质心 o_z , $o_z x_r$ 轴与导弹的速度矢量 \mathbf{V} 重合, $o_z y_r$ 轴在过 $o_z x_r$ 轴的铅垂平面内且与 $o_z x_r$ 垂直,向上为正, $o_z z_r$ 轴按右手系确定。

1.2 坐标系之间的相互转换

本文主要使用目标坐标系与视线坐标系的转换矩阵及目标坐标系与弹道坐标系的转换矩阵,其具体形式见参考文献[4]。

2 气象要素的运动方程及数值算法

2.1 大气运动基本方程组(MM5方程组)

在标准大气条件下,一般将大气视为静稳大气,而实际大气是非标准的,本文利用大气运动基本方程组^[3]来模拟气象要素随时间和空间的变化。若水平纵风、横风和垂直气流分别记为 u 、 v 、 w ,大气密度为 ρ ,压强为 P ,温度为 T 。则非标准气象条件下气象要素的运动方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + fv \\ \frac{\partial v}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - fu \\ \frac{\partial w}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial P}{\partial t} = KT \frac{\partial \rho}{\partial t} + K\rho \frac{\partial T}{\partial t} \\ \frac{\partial T}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} + w \frac{\partial P}{\partial z} \right) / (C_P \rho) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 、 y 、 z 为空间三维坐标; t 为时间变量; $f = 2\Omega \sin \phi$, ϕ 为任意角, $\Omega = 7.29 \times 10^{-5}$; $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; $C_P = 1.005$; $K = 0.2867$ 。

2.2 大气运动基本方程组的数值算法

2.2.1 空间剖分

取时间步长为 h_τ ,空间步长分别为 h_x 、 h_y 、 h_z , (x_i, y_j, z_k) 表示空间任意点, t_n 表示任意时刻,记 (x_i, y_j, z_k, t_n) 为 (i, j, k, n) ,见图1。其表达式为:

$$\begin{cases} t_n = nh_\tau, n = 0, 1, \dots, N, N = [T/h_\tau] \\ x_i = ih_x, y_j = jh_y, z_k = kh_z, i, j, k \in Z \end{cases} \quad (2)$$

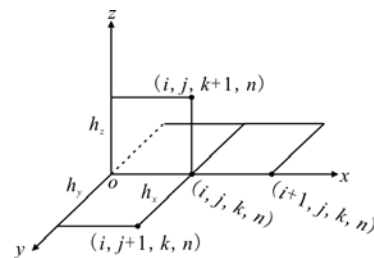


图1 空间剖分

Fig. 1 Space division

2.2.2 数值离散

利用向前差分代替偏导数的方法表示可得:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{(i,j,k,n)} = \frac{u_{ijk}^{n+1} - u_{ijk}^n}{h_\tau}, \quad \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{(i,j,k,n)} = \frac{u_{i+1jk}^n - u_{ijk}^n}{h_x} \\ \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{(i,j,k,n)} = \frac{u_{ij+1k}^n - u_{ijk}^n}{h_y}, \quad \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{(i,j,k,n)} = \frac{u_{ijk+1}^n - u_{ijk}^n}{h_z} \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_{ijk}^{n+1} 为 t_{n+1} 时 (x_i, y_j, z_k) 处的纵风; u_{ijk}^n 为 t_n 时 (x_i, y_j, z_k) 处的纵风; u_{i+1jk}^n 为 t_n 时 (x_{i+1}, y_j, z_k) 处的纵风; u_{ij+1k}^n 为 t_n 时 (x_i, y_{j+1}, z_k) 处的纵风; u_{ijk+1}^n 为 t_n 时 (x_i, y_j, z_{k+1}) 处的纵风。纵风离散为:

$$u_{ijk}^{n+1} - u_{ijk}^n = h_\tau \left[- \left(u_{ijk}^n \frac{u_{i+1jk}^n - u_{ijk}^n}{h_x} + v_{ijk}^n \frac{u_{ij+1k}^n - u_{ijk}^n}{h_y} + w_{ijk}^n \frac{u_{ijk+1}^n - u_{ijk}^n}{h_z} \right) - \frac{1}{\rho_{ijk}^n} \frac{P_{i+1jk}^n - P_{ijk}^n}{h_x} \right] + f v_{ijk}^n \quad (4)$$

同理可得横风、垂直气流、密度、温度、压强在 (x_i, y_j, z_k, t_n) 处的离散方程,分别为:

$$\left\{ \begin{aligned} v_{ijk}^{n+1} - v_{ijk}^n &= h_\tau \left[- \left(u_{ijk}^n \frac{v_{i+1jk}^n - v_{ijk}^n}{h_x} + v_{ijk}^n \frac{v_{ij+1k}^n - v_{ijk}^n}{h_y} + w_{ijk}^n \frac{v_{ijk+1}^n - v_{ijk}^n}{h_z} \right) - \frac{1}{\rho_{ijk}^n} \frac{P_{ij+1k}^n - P_{ijk}^n}{h_y} \right] - f u_{ijk}^n \\ \omega_{ijk}^{n+1} - \omega_{ijk}^n &= h_\tau \left[- \left(u_{ijk}^n \frac{\omega_{i+1jk}^n - \omega_{ijk}^n}{h_x} + v_{ijk}^n \frac{\omega_{ij+1k}^n - \omega_{ijk}^n}{h_y} + w_{ijk}^n \frac{\omega_{ijk+1}^n - \omega_{ijk}^n}{h_z} \right) - \frac{1}{\rho_{ijk}^n} \frac{P_{ij+1k}^n - P_{ijk}^n}{h_z} \right] - g \\ \rho_{ijk}^{n+1} - \rho_{ijk}^n &= h_\tau \left[- \left(u_{ijk}^n \frac{\rho_{i+1jk}^n - \rho_{ijk}^n}{h_x} + v_{ijk}^n \frac{\rho_{ij+1k}^n - \rho_{ijk}^n}{h_y} + w_{ijk}^n \frac{\rho_{ijk+1}^n - \rho_{ijk}^n}{h_z} \right) + \frac{u_{i+1jk}^n - u_{ijk}^n}{h_x} + \frac{v_{ij+1k}^n - v_{ijk}^n}{h_y} + \frac{w_{ijk+1}^n - w_{ijk}^n}{h_z} \right] \\ P_{ijk}^{n+1} - P_{ijk}^n &= h_\tau \left(KT_{ijk}^n \frac{\rho_{ijk}^{n+1} - \rho_{ijk}^n}{h_\tau} + K\rho_{ijk}^n \frac{T_{ijk}^{n+1} - T_{ijk}^n}{h_\tau} \right) \\ T_{ijk}^{n+1} - T_{ijk}^n &= h_\tau \left[- \left(u_{ijk}^n \frac{T_{i+1jk}^n - T_{ijk}^n}{h_x} + v_{ijk}^n \frac{T_{ij+1k}^n - T_{ijk}^n}{h_y} + w_{ijk}^n \frac{T_{ijk+1}^n - T_{ijk}^n}{h_z} \right) + \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{P_{ijk}^{n+1} - P_{ijk}^n}{h_\tau} + u_{ijk}^n \frac{P_{i+1jk}^n - P_{ijk}^n}{h_x} + v_{ijk}^n \frac{P_{ij+1k}^n - P_{ijk}^n}{h_y} + w_{ijk}^n \frac{P_{ijk+1}^n - P_{ijk}^n}{h_z} \right) / \rho_{ijk}^n C_P \right] \end{aligned} \right. \quad (5)$$

3 导引段数学模型

导引段定义为导弹在制导系统作用下飞向目标直至落地的全过程。

目标运动模型的不同对应的导引弹道也不同。若地面装甲目标作匀速直线运动,设 (x_0, y_0, z_0) 为目标初始位置,则某时刻 t 目标的坐标在惯性系中表示为:

$$\begin{cases} x_t = x_0 + V_t t \cos \psi_t \\ y_t = y_0 \\ z_t = z_0 + V_t t \sin \psi_t \end{cases} \quad (6)$$

式中: ψ_t 为目标进入角(目标速度与 $o_t x_m$ 轴的夹角); V_t 为目标速度。

以目标和导弹质心为基准,把导引段运动投影到纵向平面和侧向平面上,见图 2。

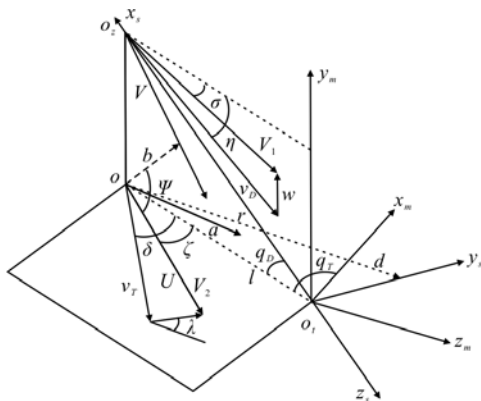


图 2 纵向平面和侧向平面

Fig. 2 Lengthways plane and lateral plane

图 2 中,纵向平面定义为导弹目标 o_t 和质心 o_i 及在水平面上投影点 o 所确定的平面,侧向平面定义为水平面,即 $o_t x_m y_m$ 平面。图中 V_1 和 V_2 分别为导弹在纵、侧向平面内相对惯性系的速度(地速); v_D 和 v_T 分别为导弹在纵、侧向平面内相对大气的速度(空速); w 和 U 分别为纵、侧向平面内的风速; q_D 为目标视线 $o_t o_i$ 与水平面的夹角,其在水平面上

方为正; q_T 为 $o_t o_z$ 在水平面内的投影与 $o_t x_m$ 轴间的夹角,沿 $o_t x_m$ 轴顺时针旋转定义为正; r 为视线距离; l 为水平面内视线的投影距离; σ 和 η 分别为地速、空速在纵向平面内的方位角; ζ 和 δ 分别为侧向平面(水平面)内地速、空速与视线的夹角; λ 为风速在侧向平面内的方位角; d 为 V_1 在水平面上的投影值; a 、 b 分别为 d 在 $o_t x_m$ 、 $o_t z_m$ 轴上的分解值。

通过分析导弹在纵向和侧向平面内相对目标的运动情况,得出导弹姿态角、飞行速度及弹目相对距离的几何关系分别为:

$$\left\{ \begin{aligned} V &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}, \quad V_2 = \sqrt{v_x^2 + v_z^2} \\ V_1 &= \sqrt{v_y^2 + d^2}, \quad v_D = \sqrt{(v_y - w)^2 + d^2} \\ d^2 &= a^2 + b^2, \quad az - bx = -v_y(zx_t - z_t x) / y \\ \sigma &= \arccos[(a(x_t - x) - yv_y + b(z_t - z)) / V_1 r] \\ \eta &= \sigma + \arccos((V_1^2 + v_D^2 - w^2) / 2V_1 v_D) \\ r &= \sqrt{(x - x_t)^2 + y^2 + (z - z_t)^2}, \quad l = r \cos q_D \\ q_{D0} &= \arctan(-z_0 / x_0), \quad q_{D0} = \arctan(y_0 / \sqrt{x_0^2 + z_0^2}) \\ \lambda &= \arctan(u / v), \quad v_T = \sqrt{(v_x - w)^2 + (v_z - v)^2} \\ \zeta &= q_T + \psi - \pi, \quad U = \sqrt{v^2 + u^2} \\ \delta &= \zeta + \arccos((V_2^2 + v_T^2 - U^2) / 2V_2 v_T) \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中: V 为导弹飞行速度; ψ 为弹道偏角; x_t 、 z_t 分别为目标在水平面的运动坐标; v_x 、 v_y 、 v_z 分别为速度 V 在惯性坐标系上投影值。方程组(7)中的变量 u 、 v 、 w 、由方程组(3)确定。

4 纵、侧向平面内的复合导引律

如何采用一种合适的导引律来提高导弹的命中精度,改善导弹的制导性能,一直是人们比较关注的热门话题。文献[4]提出一种复合导引法,但是文献[4]只考虑了导弹在水平面上的导引控制规律,且对应目标是固定的。而本文把该文献提出的复合导引律推广到三维空间,且攻击对象为移动目标。

4.1 纵向平面内导弹与目标的相对运动方程

为了描述导弹在实际大气中的运动状态,使改进的相对运动方程随模型参数和外界环境条件的变化而变化。

在纵向平面内,根据角度正负的定义, $\eta < 0$, 在视线方向上及垂直于视线方向上的速度矢量分别进行代数求和,则有:

$$\begin{cases} \dot{r} = \omega \cos(q_D - \pi/2) - v_D \cos(q_D + \eta) \\ r\dot{q}_D = v_D \sin(q_D + \eta) - \omega \sin(q_D - \pi/2) \end{cases} \quad (8)$$

4.2 侧向平面内导弹与目标的相对运动方程

为了消除各种不确定因素对导弹命中律的影响,减小脱靶量,采用式(8)的推导思路可得:

$$\begin{cases} l = r \cos q_D \\ l\dot{q}_T = v_T \sin \delta - U \sin(q_T + \pi/2 - \lambda) - V_i \sin(\psi_i + q_T) \end{cases} \quad (9)$$

由于弹道倾角 θ 和弹道偏角 ψ 的变化分别反映了导弹在纵向平面与侧向平面内的运动状况,为了实现比例导引和抑制视线转动,结合最优控制理论,得出如下形式的导引方法:

$$\dot{\theta} = \omega_z / \cos(\psi - q_T) \quad (10)$$

$$\dot{\psi} = [\omega_y - \omega_z \tan(q_T - \psi) \sin q_D] / \cos q_D \quad (11)$$

5 仿真分析

在同一时刻非标准气象要素(水平风、垂直气流、密度、压强、温度)随着空间位置的移动而发生变化。设离散后式(4)~式(5)的初始条件为:

$$t=0, \begin{cases} h_x = 10^4 \text{ s}, h_x = h_y = h_z = 10^3 \text{ m} \\ u_{ijk} = 20e^{-[(x_i-5)^2/2^2 + (y_j-5)^2/3^2]} \text{ (m/s)} \\ v_{ijk} = 10e^{-[(x_i-5)^2/3^2 + (y_j-5)^2/2^2]} \text{ (m/s)} \\ \omega_{ijk} = 5e^{-[(x_i-5)^2/3^2 + (z_k-5)^2/2^2]} \text{ (m/s)} \\ \rho_{ijk} = (x_i - 10^4) / 10^6 + 1.255(1 - 2.25586 \times 10^{-5} z_k)^{5.25588} \\ P_{ijk} = 10\rho_{ijk} z_k, T_{ijk} = 288.15 \text{ K} \end{cases} \quad (12)$$

用变步长四阶龙格-库塔算法编写 C++ 程序求角离散微分方程式(4)~式(5),得非标准气象因素随时间的变化规律。

制导初始条件^[5]: 导弹初始速度 $V_0 = 320 \text{ m/s}$, 初始弹道倾角 $\theta = 30^\circ$, 初始俯仰角 $\vartheta = 31^\circ$, 初始弹道偏角 $\psi = 0^\circ$, 导弹水平位移 $x = y = 0 \text{ km}$, 高度 $z = 10 \text{ km}$, 目标速度 $V_t = 21 \text{ m/s}$, 目标初始位置 $x_0 = 1.45 \text{ km}$, $y_0 = 50 \text{ m}$, 弹目初始距离 $r_0 = 17614 \text{ m}$, 目标进入角 $\psi_t = 15^\circ$, 仿真步长 $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ 。仿真结果见表1及图3~图4。

表1 2种导引律制导效果比较

Tab.1 Comparison of the guidance effect of the two guidance law

制导律	遭遇点 坐标/m	命中速度 /(m·s ⁻¹)	飞行时间 /s	脱靶量 /m
比例 制导律	(14 961.7, 0.307 98, 172.584)	465.706	22.8	0.908 0
复合制 导律	(14 949.8, 0.177 42, 169.421)	421.451	22.1	0.807 5

表1中的2种制导律对比分析表明:比例导引律在命中目标时速度比较大,而复合导引律较之比例导引律飞行时间较短,有效射程短且能够更精确的命中目标(脱靶量较小)。

图3~图4实现了对三维导引弹道的可视化仿真,形象地演示了导弹从制导到击中目标的整个过程。从图3~图4可以看出:导弹的比例导引弹道比较平缓,而在非标准气象条件下由于导弹在制导过程中受环境条件的影响,使导弹在自身所允许的较大过载下作转弯机动,以便“对准”目标飞行,弹道出现弯曲和扭曲。

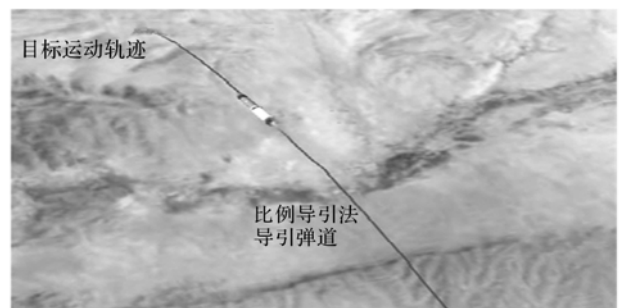


图3 比例导引法导引弹道

Fig.3 The proportional guidance trajectory

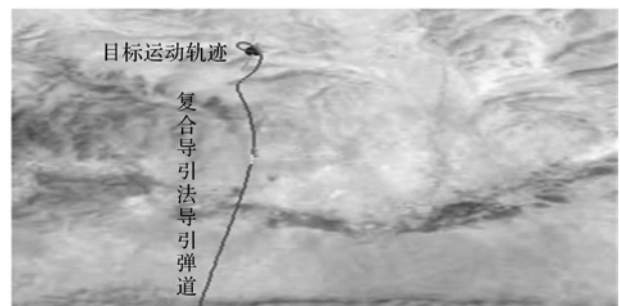


图4 复合导引法导引弹道

Fig.4 The combined guidance trajectory

6 结语

本文给出了一种在非标准气象条件下空地导弹
(下转第80页)

- [6] 赵伏军,谢世勇,潘建忠,等. 动静组合载荷作用下岩石破碎数值模拟及试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011,33(8):1290-1295.
ZHAO Fujun, XIE Shiyong, PAN Jianzhong, et al. Numerical simulation and experimental investigation on rock fragmentation under combined dynamic and static loading[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2011,33(8):1290-1295. (in Chinese)
- [7] 许金余,刘石. 大理岩冲击加载试验碎块的分形特征分析[J]. 岩土力学, 2012,33(11):3225-3229.
XU Jinyu, LIU Shi. Research on fractal characteristics of marble fragments subjected to impact loading [J]. Rock and soil mechanics, 2012, 33(11): 3225-3229. (in Chinese)
- [8] Liu Shi, Xu Jinyu. Study on dynamic characteristics of marble under impact loading and high temperature [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2013,62:51-58.
- [9] Ravichandran G, Subhash G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing ceramics in a split Hopkinson pressure bar [J]. Journal American ceramic society, 1994,77(1):263-267.
- [10] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社, 2005:52-60.
WANG Lili. Foundation of stress waves [M]. Beijing: National defense industry press, 2005:52-60. (in Chinese)
- [11] 刘石,许金余,支乐鹏,等. 高温后大理岩的冲击力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2):273-280.
LIU Shi, XU Jinyu, ZHI Lepeng, et al. Experimental research on mechanical behaviors of marble after high temperatures subjected to impact loading [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(2):273-280. (in Chinese)

本刊相关链接文献:

- [1]张仲林,许金余,朱笃美,等. 爆炸荷载作用下钢纤维混凝土梁的动力响应分析[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2004,5(5):92-94.
- [2]李秀地,徐干成,郑颖人. 爆炸荷载作用下地下结构抗层裂钢板机理分析[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2005,6(5):76-78.
- [3]许金余,罗鑫,吴菲,白二雷,高志刚. 地质聚合物混凝土动态劈裂拉伸破坏的吸能特性[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2013,14(5):85-88.
- [4]敦晓,王硕太,黄灿华,等. 机场道面新型混凝土抗裂性试验[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2006,7(6):29-31.

(编辑:徐敏)

(上接第76页)

的复合导引律。仿真表明,与比例导引律相比,复合导引律更能快速、精确地命中目标,且能更逼真地描述真实的导引弹道。但是模拟非标准气象要素随空间位置变化时精确度不高,因此,还需要在今后的研究工作中进一步完善。

参考文献(References):

- [1] 赵蕴杰,曹迎春,张庆斌,等. 基于 Matlab 的三维动态弹道仿真研究[J]. 计算机仿真, 2007,24(6):57-61.
ZHOU Yunjie, CAO Yingchun, ZHANG Qingbin, et al. Three-dimensional trajectory simulation of air defense missile based on matlab [J]. Computer simulation, 2007,24(6):57-61. (in Chinese)
- [2] 胡正东,曹渊,蔡洪. 一种打击地面固定目标的自适应比例导引率[J]. 系统仿真学报, 2009,21(13):4084-4087.
HU Zhengdong, CAO Yuan, CAI Hong. Adaptive proportional guidance law for ground stationary target [J]. Journal of system simulation, 2009,21(13):4084-4087. (in Chinese)
- [3] 沈桐立,田永祥,葛孝贞,等. 数值天气预报[M]. 北京:气象出版社, 2003.
SHEN Tongli, TIAN Yongxiang, GE Xiaozhen, et al. Numerical weather prediction [M]. Beijing: China meteorological, 2003. (in Chinese)
- [4] 沈明辉,罗继勋,于雷. 空地导弹的一种复合导引法[J]. 系统工程与电子技术, 2003,25(4):469-471.
SHEN Minghui, LUO Jixun, YU Lei. A combined guidance method for the air-to-ground missile [J]. Systems engineering and electronics, 2003, 25(4): 469-471. (in Chinese)
- [5] 朱永文,娄寿春,周林. 对抗仿真系统中的防空导弹比例导引法仿真弹道设计[J]. 系统仿真学报, 2005,17(12):3095-3097.
ZHU Yongwen, LOU Shouchun, ZHOU Lin. Proportional navigation trajectory simulation in air defence system [J]. Journal of system simulation, 2005, 17(12):3095-3097. (in Chinese)

(编辑:田新华)