

## 机场毁伤效果仿真技术

张 鹏,樊巧云

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 教育部精密光机电一体化技术实验室,北京 100191)

**摘 要:**提出了一种从微软虚拟地球遥感影像数据库获得毁伤前机场瓦片图像组的方法,并基于四叉树的数据结构分析获得了其在远程数据库的存储方式,以此为基础拼接得到高分辨率的毁伤前机场图像数据。在此基础上,分析了图像的投影方式,重点研究了基于 WEB 墨卡托投影的经纬度配准方法,从而实现了从地理经纬度坐标到机场局部图像像素坐标的转换。并利用经典的 Bernard 混凝土侵彻公式对动能物侵彻机场跑道混凝土的深度和成坑可见直径进行了仿真。最后,采用二维图像技术设计了仿真软件,将仿真得到的成坑数据和侵彻位置绘制在毁伤前机场图像中,得到了可视化的毁伤后机场仿真影像。

**关键词:**瓦片图像系统; 墨卡托投影; 经纬度配准; 四叉树

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)01-0261-06

## Simulation technology of damage effects of airport

Zhang Peng, Fan Qiaoyun

(Key Laboratory on Precision Opto-mechatronics Technology of Ministry of Education, College of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** A method of getting tile image groups of airport before damage from "Microsoft Virtual Earth" image database was proposed. The storage structure of these images in remote database was analyzed by using quadtree data structure. High-resolution image of airport before damage was developed by organizing these images together. After this, image projection method, especially the method of longitude and latitude registration was studied under WEB mercator projection. So geographical coordinate can be projected to local image pixel coordinate. The depth and visible diameter of craters caused by kinetic projectile on concrete runway were simulated with classical "Bernard's Formulas on Depth of Projectile Penetration in Rock". Finally the simulation software was designed with 2D image generated technology. With position and other property of the crater, the virtual damaged airport image was derived by superposing the simulated crater images on the image of airport before damage.

**Key words:** tile image system; mercator projection; longitude and latitude registration; quadtree

收稿日期:2011-05-05; 修订日期:2011-06-15

基金项目:长江学者和创新团队发展计划(IRT0705)

作者简介:张鹏(1983-),男,硕士生,主要从事图像仿真技术方面的研究。Email:zhpew@163.com

导师简介:樊巧云(1978-),女,讲师,主要从事天体敏感器及天文导航方面的研究。Email:fqy2003@aspe.buaa.edu.cn

## 0 引言

机场在交通运输中发挥着不可替代的重要作用。而跑道作为机场的核心设施,一旦遭到失事飞机残骸等高空坠落物体的撞击破坏即不能使用,会极大地影响机场的运行。因此,设法提供一种对机场毁伤效果进行可视化仿真的方法,对于提高机场应对突发事件的能力是非常重要的。

利用从网络获取的瓦片图像组,分析其数据结构,拼接生成高分辨率的机场跑道区域图像,分析该图像的地图投影方式,从而推导出从地理经纬度坐标到跑道区域图像坐标的变换公式,实现以经纬度为参数的毁伤效果仿真。同时,结合混凝土侵彻的数学模型和经验公式计算具体的毁伤效果数据。最后,通过使用二维图像生成技术实现可视化毁伤效果图像的输出。

## 1 毁伤前机场图像的生成

进行虚拟毁伤效果仿真需要高分辨率的毁伤前机场图像,现阶段获取机场图像主要通过航拍照相或者卫星遥感<sup>[1]</sup>。但是,两种方式获取的图像存在很严重的缺陷。首先,两种图像分辨率最高只能达到几米<sup>[2]</sup>。跑道上的坑状目标,一般直径在 10 m 以下,在这种低分辨率图像上成坑的直径只有几个像素,无法将其与图像噪声区分开。其次,这些图像资源只有少数部门和单位才有资格获取,绝大多数涉及国家秘密,也不适合作为仿真研究使用。因此,文中提出通过获取网络卫星图像,并使用基于四叉树位置坐标的图像拼接方法来生成毁伤前的机场图像。

虚拟地球是一种基于网络的卫星图像检索地理信息系统,提供最高 0.018 7 m/像素分辨率的图像。为了有利于图像在网络上的快速显示和缩放,不同分辨率的世界地图对应不同的缩放级别,也就是 level 值,并存储在服务器中。level 值为 1 的地图对应分辨率为 78 271.517 0 m/像素,level 值为 23 的地图对应最高分辨率为 0.018 7 m/像素,共 23 个缩放级别,缩放级别增加 1,则对应的地图分辨率提高一倍,如图 1 所示,图(a)为 level 值为 1 的图像,图(b)为 level 值为 17 的图像。

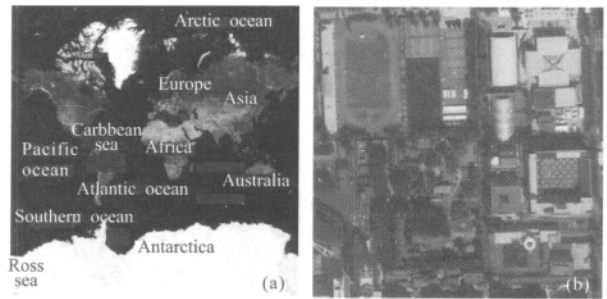


图 1 level 值为 1 和 17 的图像

Fig.1 Image under level 1 and level 17

通常,从网络获取卫星图像主要是通过鼠标将图像缩放到合适的级别、然后截取屏幕的办法。这种方法如果只是截取一幅图片,就只能获得低分辨率的机场图像或者高分辨率机场图像的一个小局部。如果希望通过多次截图来获得高分辨率的机场图像,不仅费时费力,而且由于手工截图不能保证方向和角度不变,得到的局部图片无法进行自动拼接,并且获得的图像无法确认其缩放级别。在实际应用中,将图像缩小到极值,可以得到一个 512×512 像素的图像块,该图像块即为 level 1 级别的世界地图。进一步分析得知,每个分辨率的地图被切割成数量不等的 256×256 像素的图像单元,称为瓦片图像系统(tile image system)。文中通过直接从服务器端获取机场区域的 256×256 像素的瓦片图像组,分析瓦片图像的组织 and 存储结构,用程序实现快速、大批量的瓦片图像拼接,以此解决仿真前期毁伤前机场图像的生成问题。以获取东京羽田国际机场的 04 号跑道区域图像为例,介绍获取和生成完整高分辨率跑道图像的方法。

东京羽田国际机场总共有三条在用跑道和一条在建跑道,主要分析机场东北侧的 04 号跑道区域的情况。从地图上可获知,该跑道的经度范围是 E139.759 826 660 156°~139.781 112 670 898°,纬度范围是 N35.566 304 831 516°~35.550 105 332 737 3°,设定地图缩放级别为 19,通过第三方软件就可以获取 899 张分辨率为 256×256 像素的瓦片图像,每个图像由一个 Quadkey 标识。以该跑道区域左下角的瓦片图像为例,其 Quadkey 为 1 330 021 123 302 032,由 19 个四进制数字组成,恰好等于图像的缩放级别,将 Quadkey 转换为二进制得到 01 111 100 001 001 011 011 110 010 001 110 111 010,将该二进制

序列按奇数位和偶数位分开,得到偶数位 1 110 001 101 100 010 100,奇数位 0 110 010 011 101 011 111,都转换为十进制可以得到偶数位 465 684,奇数位 206 687。进一步分析:Quadkey 为 213 的瓦片图像,可知其缩放级别为 3,四进制数 213 转化为二进制得到 100 111,拆分得到偶数位 011,奇数位 101,分别转换为十进制得到(3,5),说明在缩放级别为 3 的瓦片图像系统中,左上角图像坐标为(0,0),该图像位于第 4 列第 6 行,坐标为(3,5)。

因此,可以计算出 Quadkey 为 1 330 021 123 302 032 322 的瓦片图像,其坐标为(465 684,206 687)。以此类推就可以得到 899 张 256×256 像素的瓦片图像组中每张图像在缩放级别为 19 的世界地图中的位置坐标,根据瓦片图像之间的位置关系,依次将每张 256×256 像素的瓦片图像绘制到一张空白的地图中,就可以快速生成高分辨率的 04 号跑道区域图像,如图 2 所示。

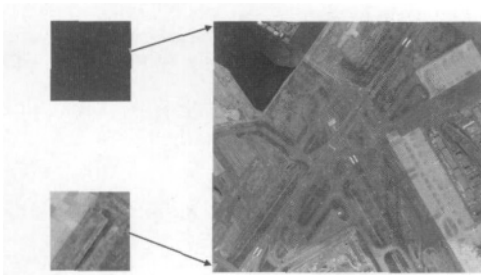


图 2 拼接示意图

Fig.2 Diagram of image mosaicking

## 2 经纬度配准

对毁伤效果进行仿真,需要使用地理坐标,即经纬度数值来描述弹坑在图像中的位置,这就需要把图像的像素坐标与其对应的经纬度坐标进行配准。地理坐标是球面坐标,而图像的像素坐标是平面坐标,因此,必须把地球的经纬度坐标通过一定的方法转换成平面图像的像素坐标,也就需要进行地图投影。在进行投影前必须先分析地球体的形状和大小。

地球的自然表面是一个非常不规则的表面。忽略一些不重要的变形,地球是一个扁率很小的椭圆绕其短轴旋转而成的旋转椭球体,椭球体的中心与地球的重心重合。世界各国都有自己定义的地球椭球体。我国从 1980 年开始采用 1975 年基本大地数据<sup>[3]</sup>:

地球长半轴为 6 378 137 m,短半轴为 6 356 752 m,扁率为 1:298.257。

地图投影,就是要将地球面上的点、线、面投影到平面上,较高精度要求的地图均使用数学分析法进行投影,投影平面与原椭球面之间有一定的函数关系。

虚拟地球提供的地球图像采用的是 WEB 墨卡托投影,是墨卡托投影的一种。墨卡托投影,又称为等角圆柱投影,假设一圆柱面与地球面相切,地球子午圈平面延伸与圆柱面相交,成为圆柱面上的一条母线;纬线圈平面延伸与圆柱面相交,在圆柱面上形成与母线垂直的一组平行圆。沿圆柱面的一条母线切开后展平,得到两组互相垂直的直线,即经纬线的投影<sup>[4]</sup>。圆柱投影的性质使得各经线间距与相应经差成正比;纬线的间距与等角的性质相关<sup>[5]</sup>。

先推算圆柱投影变形的一般公式,取赤道和本初子午线的交点为原点,为简化起见,先将地球简化为球体,由切圆柱投影的性质决定其一般公式为<sup>[4]</sup>:

$$x=f(\varphi) \quad y=R\lambda \quad (1)$$

式中: $R$  为地球半径; $\lambda$  为经度; $\varphi$  为纬度。在地球面上,微分弧  $\widehat{AB}=rd\lambda$ ,微分弧  $\widehat{AD}=\widehat{BC}=Rd\varphi$ ,在投影面上,微分线段  $A'B'=dy$ ,微分线段  $A'D'=dx$ ,由此得到<sup>[4]</sup>:

$$m=\frac{A'D'}{AD}=\frac{dx}{Rd\varphi}$$

$$n=\frac{A'B'}{AB}=\frac{dy}{rd\lambda}=\frac{Rd\lambda}{rd\lambda}=\frac{R}{r}$$

$$P=m \times n=\frac{dx}{Rd\varphi} \times \frac{R}{r}=\frac{Rdx}{R^2 \cos\varphi d\varphi}$$

$$\sin \frac{\omega}{2}=\left| \frac{m-n}{m+n} \right| \quad (2)$$

式中: $m$  和  $n$  分别为  $x$  和  $y$  方向的长度比; $P$  为投影面上微分椭圆与地球面上微分圆的面积比; $\omega/2$  为投影后角度变形的最大值; $r$  为纬度  $\varphi$  位置的纬线圈半径。

由墨卡托投影具有的等角性质, $\omega=0, m=n$ ,因此

$$\frac{dx}{Rd\varphi}=\frac{R}{r}=\frac{1}{\cos\varphi} \quad (3)$$

积分可得<sup>[4]</sup>:

$$\int dx=R \ln \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) + k \quad (4)$$

式中: $k$  为积分常数,由原点的定义可知, $k=0$ 。实际的地球体采用椭球体更为精确,应使用  $M, N \cos\varphi$  代替原公式中的  $R, r$ 。设  $a_e$  为椭球体长半径, $e_1$  为第一

偏率,  $M$  为子午圈曲率半径,  $N$  为卯酉圈曲率半径, 将二者带入并加以整理得到:

$$\frac{dx}{Md\varphi} = \frac{a_e}{N\cos\varphi}$$

$$dx = \frac{a_e d\varphi}{\cos\varphi} - \frac{a_e e_1^2 \cos\varphi d\varphi}{1 - e_1^2 \sin^2\varphi} \quad (5)$$

积分得到<sup>[4]</sup>:

$$x = a_e \ln \tan \left[ \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \left( \frac{1 - e_1 \sin\varphi}{1 + e_1 \sin\varphi} \right)^{\frac{e_1}{2}} \right] + k \quad (6)$$

以赤道为  $Y$  轴时, 可知  $k=0$ 。

由墨卡托投影公式可知, 当经度趋近于  $90^\circ$  时,  $x$  坐标接近无穷大, 墨卡托投影在高纬度地区变形非常严重, 失去了实用价值。因此, WEB 墨卡托投影舍弃高纬度地区的图像, 使展开后的图像长宽相等, 得到正方形的投影地图。为简化公式, 假设地球为正球体, 使经纬线等长:

$$x = y = R\pi$$

$$x = R \ln \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) = R\pi = y$$

$$\varphi = 2 \arctan(e^\pi) - \frac{\pi}{2} = 1.484\ 422\ 230 \quad (7)$$

将结果转换为角度值, 得到投影地图长宽相等时纬度极值为  $85.051\ 123\ 78^\circ$ , 因此 WEB 墨卡托投影将纬度范围限定在  $N85^\circ \sim S85^\circ$ , 同时认为地球为正球体。

由以上计算结果可知, 经过 WEB 墨卡托投影得到的世界地图为正方形, 适合对地图进行切割存储和检索。建立以地图左上角为原点的坐标系, 如图 3 所示。

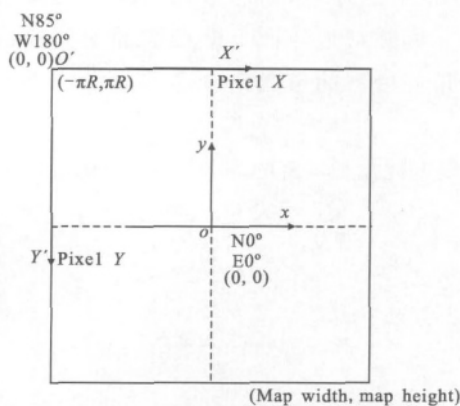


图 3 坐标系

Fig.3 Coordinate system

由图 3 所示的坐标系, WEB 墨卡托投影公式的  $x$  和  $y$  坐标轴对换, 公式变为:

$$y = R \ln \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad x = R\lambda \quad (8)$$

投影地图以图像左上角为原点, 也就是  $N85^\circ$ ,  $W180^\circ$  的位置, 坐标转换公式如下:

$$Y' = \pi R - y \quad X' = x + \pi R \quad (9)$$

代入公式(8)得:

$$Y' = \pi R - R \ln \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$X' = R\lambda + \pi R \quad (10)$$

所以可得地理坐标到图像坐标的转换公式为:

$$\text{pixel}Y = \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{4\pi} \ln \left( \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \right) \right] \times 256 \times 2^{\text{level}}$$

$$\text{pixel}X = \frac{1}{2\pi} (\pi + \lambda) \times 256 \times 2^{\text{level}} \quad (11)$$

文中使用的东京羽田国际机场 04 号跑道图像是缩放级别为 19 的世界地图中的一部分, 因此, 还需要根据图像的位置关系结合上一节的内容, 将弹坑地理坐标最终转换到局部图像坐标系中, 其中已知图像左上角的瓦片图像位置坐标为  $(\text{tile}X, \text{tile}Y)$ , 计算公式为:

$$\text{pixel}Y' = \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{4\pi} \ln \left( \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \right) \right] \times 256 \times 2^{\text{level}} - \text{tile}Y \times 256$$

$$\text{pixel}X' = \frac{1}{2\pi} (\pi + \lambda) \times 256 \times 2^{\text{level}} - \text{tile}X \times 256 \quad (12)$$

### 3 毁伤效果仿真

对毁伤效果进行仿真主要是根据破坏物的参数和目标特性进行相关效应的计算, 其中包括成坑数目、成坑位置、成坑深度和直径等参数。根据文中项目的实际, 忽略物体碰撞中的非主要效应, 只考虑物体自身以动能形式侵彻跑道混凝土表面, 毁伤效应主要是计算侵彻的深度和成坑的直径。

机场跑道多以混凝土作为材料, 因此对毁伤效应进行仿真就是研究混凝土的侵彻问题。混凝土结构是一种复杂的多项材料, 动能物体对混凝土的侵彻是一个瞬态、复杂的力学过程, 其中涉及固体力学和材料力学等多方面的知识<sup>[6]</sup>, 现阶段主要采用 3 种方法对混凝土侵彻的规律进行研究, 即经验公式、试验方法和数值计算方法<sup>[3]</sup>。根据文中项目的情况和要求, 并不具备进行动能物轰击靶体的试验



条件,另外,文中主要实现可视化的毁伤效果仿真,对精确度要求不高,而数值计算方法耗时长也不适合,因此,决定采用经验公式计算动能物侵彻混凝土的深度和成坑直径,只考虑刚性物体动能侵彻混凝土的毁伤效应。

目前,国内外常使用 Bernard 提出的 3 个混凝土侵彻深度计算公式侵彻公式<sup>[7]</sup>。国内采用较多的是 Bernard 公式 B,射弹最终侵彻深度与弹体质量成正比,与射弹直径的平方成反比,低速接触时侵彻深度与冲击速度是非线性关系<sup>[8]</sup>。结合项目特征,采用弹体侵彻混凝土公式进行动能物侵彻混凝土仿真计算<sup>[9]</sup>。

根据以上所述,物体在混凝土中的侵彻运动可以用二项式运动方程描述:

$$-m \frac{dv}{dt} = -mv \frac{dv}{dh} = \frac{\pi}{4} d^2 (1.6f_c + 3.6\sqrt{\rho f_c} v) \quad (13)$$

式中: $d$ 为射弹直径; $m$ 为弹体质量; $\rho$ 为靶体密度; $f_c$ 为靶体强度。将弹体视为刚体,忽略头部侵入过程中弹体直径的变化影响,从方程(13)可以解出<sup>[8]</sup>:

$$h = \frac{4m}{\pi d} \left| \frac{v}{3.6\sqrt{\rho f_c}} - \frac{1.6f_c}{3.6\sqrt{\rho f_c}} \ln \left| 1 + \frac{3.6\sqrt{\rho f_c}}{1.6f_c} v \right| \right| \quad (14)$$

射弹击中混凝土跑道目标后,使得目标材料发生压缩和剪切变形,在表面出现裂缝,产生脱落形成入口漏斗坑,对于坑的直径现在还没有明确的计算公式,一般采用经验法进行估算。由经验得到射弹侵彻目标所形成的入口漏斗坑的直径比射弹侵彻深度大 1.5~2 倍。计算时取保守值,令入口漏斗坑直径为射弹侵彻深度的 1.5 倍。

取一组示意性参数计算并生成示意图,如图 4 所示。

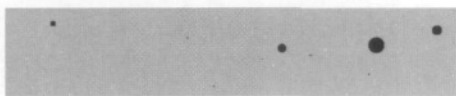


图 4 跑道毁伤图像

Fig.4 Image of the damaged runway

#### 4 软件设计

软件采用基于 MFC 的多文档框架结构设计,具有同时显示和处理多幅图片的能力,并可以将计算参数和结果效应保存在本地的数据库中,方便后期查询和对比。工作流程如图 5 所示。软件工作界面如图 6 所示。

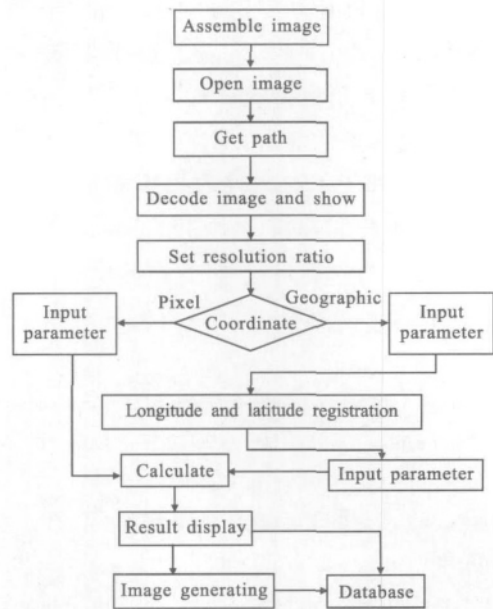


图 5 工作流程图

Fig.5 Flow chart of software



图 6 软件界面

Fig.6 GUI of software

#### 5 结束语

文中利用从网络获取的瓦片图像组,按照其在远程服务器中的存储形式和图像的相互位置关系,通过图像拼接技术生成了高分辨率的毁伤前机场跑道区域图像。继而根据地图投影的基本原理,依据等角切圆柱地图投影方法,推算出了地理坐标(经纬度坐标)到局部图像坐标的转换公式,从而可以直接使用地理经纬度作为参数在机场跑道区域上生成毁伤

图像,并通过仿真计算得到了碰撞成坑的仿真参数。使用 Visual Studio 2008 编写了基于 MFC 和 COM 技术的毁伤影像仿真系统软件。软件具有友好的用户界面,并提供了详细的文档以备以后扩展使用。通过使用 SQL SERVER 2000 数据库对仿真结果及图像路径进行组织和存储,使用户可以从本地或远程对图像和仿真结果进行快速、方便的检索。

#### 参考文献:

- [1] Chen Qiang. Analysis and correction of the image aberration of 45° directional mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 301-305. (in Chinese)  
陈强. 45°指向镜成像畸变特性分析和校正 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 301-305.
- [2] Li Haichao, Hao Shengyong, Zhu Qi. Fast seamless mosaic algorithm for multiple remote sensing images[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1381-1386. (in Chinese)  
李海超, 郝胜勇, 朱琦. 多片遥感图像的快速无缝拼接方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1381-1386.
- [3] Ji Xiaopeng. Experimental research on rock and concrete medium penetration effect [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2002. (in Chinese)  
吉晓朋. 岩石及混凝土介质侵彻效应的试验研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京校区), 2002.
- [4] Sun Da, Pu Yingxia. Map Projection [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2005: 9-11. (in Chinese)  
孙达, 蒲英霞. 地图投影 [M]. 南京: 南京大学出版社, 2005: 9-11.
- [5] Sun Jiu'ai, Lv Donghui, Zhuang Tiange. Stability analysis on projective invariants in computer vision [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(3): 190-192. (in Chinese)  
孙九爱, 吕东辉, 庄天戈. 计算机视觉中投影不变量稳定性的分析[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(3): 190-192.
- [6] Zeng Biqiang, Jiang Chunlan, Wang Zaicheng, et al. 3D numerical simulation of oblique penetration of antirunway penetrator to a multilayer runway target[J]. *Acta Aamamentarll*, 2009, 28(12): 1434-1436. (in Chinese)  
曾必强, 姜春兰, 王在成, 等. 反跑道动能弹斜侵彻机场多层跑道的三维数值模拟 [J]. 兵工学报, 2009, 28(12): 1434-1436.
- [7] Bernard R S. Depth and motion prediction for earth penetrators, AD-A056701[R], 1978.
- [8] Gong Ziming, Fang Qin, Zhang Yadong, et al. Research and discussion of bernard's formulas on depth of projectile penetration in rock[J]. *Journal of Ballistics*, 2007, 19(2): 66-68. (in Chinese)  
龚自明, 方秦, 张亚栋, 等. Bernard 岩体侵彻深度计算公式及其讨论[J]. 弹道学报, 2007, 19(2): 66-68.
- [9] Yin Fanglin, Yan Shaohua, Qian Qihu. Contrast analysis on calculation of penetration depth of projectile [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(1): 79-82. (in Chinese)  
尹放林, 严少华, 钱七虎, 等. 弹体侵彻深度计算公式对比研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(1): 79-82.

#### 下期预览

## 拖曳式红外诱饵干扰仿真与使用方法研究

王超哲, 童中翔, 芦艳龙, 柴 栋

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要:** 由于拖曳式红外诱饵的运动与辐射特性与载机密切相关, 如何建立拖曳式红外诱饵的干扰仿真模型, 以及如何有效使用拖曳式红外诱饵成为飞机红外对抗中的难题。采用拖曳线的等距约束模型建立了拖曳式诱饵的运动模型。根据拖曳式红外诱饵的干扰机理建立了其红外辐射模型。将拖曳式诱饵模型加入到飞行器红外对抗仿真平台之中, 反映了由攻击机、导弹、拖曳式红外诱饵和目标机组成的复杂系统空中运动的物理特性和随机特性。密切结合诱饵性能和所干扰导弹的性能, 经理论分析和仿真验证, 得到了拖曳式红外诱饵技术与战术相融合的最佳使用方法。