

文章编号:1002-2082(2012)03-0558-06

# 一维光幕测试旋转对称破片的动能

鲁倩,倪晋平

(西安工业大学 光电工程学院,陕西 西安 710032)

**摘要:**针对飞行破片动能测试,提出了一种采用光幕测试飞行破片动能的方法。该方法采用两台光幕靶测试飞过光幕的破片的速度,通过破片穿过光幕输出的波形提取体积信息,得到破片的穿靶质量,进而得到破片的动能。文中分析了光幕输出波形与破片体积关系的理论模型,采用3种典型的旋转对称形状物体仿真验证了理论模型,并研究了一种标定方法。实弹射击试验表明,所提方法可以测量旋转对称破片或弹丸的动能,测量精度满足靶场测试的要求。

**关键词:**光幕靶;弹形信号;破片动能;旋转对称破片

**中图分类号:**TN911.71

**文献标志码:**A

**doi:**10.5768/JAO201233.0303006

## Kinetic energy measurement for rotationally symmetric fragment using one-dimensional screen

LU Qian, NI Jin-ping

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

**Abstract:** Aiming at the measurement of kinetic energy for flying fragments, a measuring method of kinetic energy for the flying fragment using single screen was presented. Two screens were used to measure the speed of the flying fragment in the method, the volume information was got by mean of the output waveform of the fragment passing through the screen, further the quality and the kinetic energy of the fragment were obtained. This paper analyzed a theoretical model of the relationship between the output waveform of the screen and the volume of the fragment. Three typical rotational symmetry objects simulations were used to verify the theoretical model, and a calibrating method was studied. The testing result of the ball firing proved that the proposed method could measure the kinetic energy of the rotational symmetry projectile or fragment, the measurement precision satisfied the requirement of the range test.

**Key words:** light screen target; bomb-shaped signal; kinetic energy of fragment; rotational symmetry fragment

## 引言

在弹药威力评估的静爆试验中,破片的动能是需要测量的主要参数。现有的高速摄影<sup>[1]</sup>与靶网法<sup>[2]</sup>等测量破片飞行速度的方法存在测量精度低,仅能测试破片群中穿过网靶的第一枚破片等缺点,因而其使用受到了限制。由于光幕靶既能

测速又能测量着靶坐标,对高速飞行的弹丸甚至破片等弱信号具有很强的探测能力,在兵器研制和生产的靶场试验中应用愈来愈广泛。由于光幕输出的模拟信号的波形轮廓与弹丸的截面积有关,通过对光幕输出波形的分析,提取弹丸或者破片穿过光幕时所对应的截面积,从而获得体积信

收稿日期:2011-08-11; 修回日期:2011-09-14

基金项目:国家自然科学基金(60972005)

作者简介:鲁倩(1986—),女,陕西兴平人,硕士研究生,主要从事光电测试技术和信号处理研究工作。

E-mail:qlu1986@126.com

息,进而得到弹丸或者破片的质量,结合采用双区截原理获取的速度信息,最终得到穿过光幕的弹丸或者破片的动能。本文基于该思路,对一枚破片穿过一维光幕输出的弹形信号进行理论分析,提取弹形信号中的质量信息。

## 1 一维光幕测试破片动能的理论模型

### 1.1 光幕靶的测量原理

光幕靶<sup>[3-7]</sup>由发射装置与接收装置组成,是光束从发射装置出发到达接收装置的光电器件,光束行走所形成的空域,构成光幕,该光源形成的光幕面可以近似认为是厚度均匀和光束近似平行的<sup>[8-9]</sup>。本文假定光源发出的光线是平行的,当飞行物体穿过光幕,遮挡了光幕的部分光线,引起到达光电器件的光通量发生变化,从而产生变化的光电流,光幕靶中的信号处理电路将微弱变化的光电流放大,其输出的模拟信号的波形轮廓与弹丸的截面积有关,因此称之为弹形信号。光幕靶原理示意图如图1所示。

由于高速飞行的破片穿过光幕时,引起的光幕输出波形与弹丸遮住的光的大小有关,遮光的大小与弹丸的外形有关。因此,光幕的输出波形中隐含弹丸的体积信息。通过对光幕输出波形进行分析,提取出破片的体积信息,进而由破片材料的密度参数得到破片的质量。

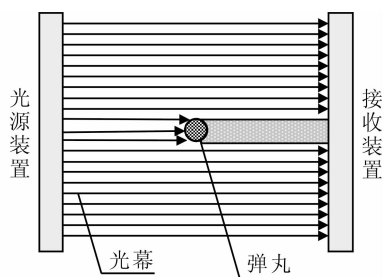


图1 光幕靶原理示意图

Fig. 1 The schematic of light screen principle

### 1.2 双区截测速原理

区截装置测速方法是将起始靶(光幕靶1)和截止靶(光幕靶2)置于预定弹道上且间隔一定距离 $L$ ,如图2所示,当飞行弹丸依次穿过两个光幕时,产生起始和截止两个信号,计时装置记录这两个信号的时间 $T$ ,根据公式(1)便可计算出弹丸在该区间的平均速度也即该区间的中点瞬时速度 $v$ :

$$v = \frac{L}{T} \quad (1)$$

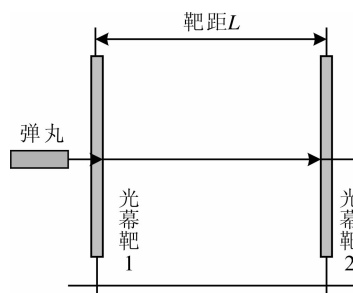


图2 区截装置测速示意图

Fig. 2 Schematic of real time speed testing by regional cut-off device

### 1.3 破片体积与光幕输出波形的理论模型

设光源发出的光线经光学系统后均匀地投射到光电器件上,光电器件光敏面上的照度为 $E$ 。当光电器件为光电二极管时,它输出的光电流 $I_L$ 与入射光照度呈线性关系:

$$I_L = S_\Phi EA \quad (2)$$

式中: $S_\Phi$ 为光电二极管的灵敏度; $A$ 为光电器件的受光面积。显然,在弹丸未进入光幕时, $A$ 为整个光电器件的光敏面:

$$E = \frac{I_0}{d^2} \quad (3)$$

式中: $I_0$ 为光源在垂直方向的发光强度; $d$ 为光源与接收器件之间的距离。

当弹丸进入光幕后,受光面积 $A$ 减小,必将引起光电流 $I_L$ 的下降。考虑光电二极管的灵敏度 $S_\Phi$ 为常数,光源所发出的光是稳定的,故也是常数。则光电流 $I_L$ 的变化只与受光面积 $A$ 有关。

当弹丸穿过光幕时,遮挡了部分光线,引起光电二极管接收到的光能量发生变化,被遮挡的面积变化为 $\Delta A$ ,则引起的光电流变化 $\Delta I_L$ :

$$\Delta I_L = S_\Phi E \Delta A \quad (4)$$

则放大电路输出电压 $\Delta U$ :

$$\Delta U = \beta \Delta I_L R_L \quad (5)$$

由(3)、(4)、(5)式可得:

$$\Delta U = \frac{\beta S_\Phi I_0 R_L \Delta A}{d^2} \quad (6)$$

式中: $R_L$ 为光电二极管的偏置电阻; $\beta$ 为电路的放大倍数。

由(6)式可知,某一时刻,光幕的输出电压 $U(t)$ 与该时刻弹丸的遮光面积 $A(t)$ 之间有:

$$U(t) = \frac{\beta S_\Phi I_0 R_L}{d^2} \times A(t) \quad (7)$$

考虑光电二极管的灵敏度 $S_\Phi$ 为常数,光源所

发出的光是稳定的, 故也是常数, 电路的放大倍数  $\beta$ 、光电二极管的偏置电阻  $R_L$  均为常数, 光幕接收与发射装置之间的距离  $d$  固定, 所以光幕某一时刻的输出电压只与该时刻的遮光面积有关, 而弹丸的遮光面积又与它的外形形状有关, 故可以通过光幕输出波形求得弹丸的体积。则, 飞行破片的动能为

$$W = \frac{1}{2} \rho V v^2 \quad (8)$$

式中:  $W$  为破片的动能;  $\rho$  为破片材料的密度;  $V$  为破片的体积;  $v$  为破片的飞行速度。

## 2 破片体积计算公式的推导及仿真

传统的破片战斗部可分为自然破片战斗部、半预制破片战斗部和预制破片战斗部<sup>[10]</sup>。半预制破片战斗部和预制破片战斗部是破片战斗部应用最广泛的形式, 半预制破片的形状主要是菱形、正方形、矩形或平行四边形的小块, 而预制破片通常制成立方体或球形。本文通过建立几种典型旋转对称破片的体积与光幕输出波形关系的理论模型, 计算出破片的体积, 进而得到破片的质量。

### 2.1 3种典型旋转对称破片的体积计算公式推导

当柱形弹丸穿过光幕面时, 在光幕面上的投影是1个矩形。设柱形弹丸的长度为  $L$ , 截面直径为  $D$ , 即投影是1个大小为  $L \times D$  的矩形。假定柱形弹丸以平均速度  $v$  穿过厚度为  $h$  的光幕面, 弹丸穿过光幕的示意图如图3所示。

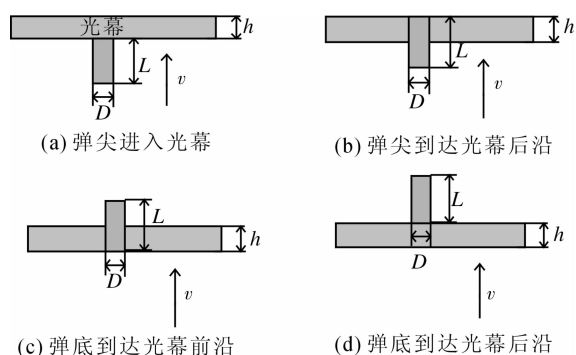


图3 柱形弹丸穿过整个光幕示意图

Fig. 3 Schematic of a cylindrical flying object passing through the light screen

设  $t_1$  为弹尖进入光幕前沿的时刻,  $t_2$  为弹尖到达光幕后沿的时刻,  $t_3$  为弹底到达光幕前沿的时刻,  $t_4$  为弹底到达光幕后沿的时刻。整个弹丸穿过光幕时, 走过的长度为  $L+h$ , 经过的时间为  $t_4 - t_1$ , 所以有:

$$L+h = v(t_4 - t_1) \quad (9)$$

即弹丸的长度  $L$ :

$$L = v(t_4 - t_1) - h \quad (10)$$

从  $t_1$  到  $t_2$  这段时间, 弹丸穿过光幕时, 遮光面积的变化量  $\Delta A$ :

$$\Delta A = D \Delta l \quad (11)$$

式中  $\Delta l$  为弹丸走过长度的变化量。

$$\Delta l = v \Delta t \quad (12)$$

亦即:

$$\Delta A = D v \Delta t \quad (13)$$

由(5)式和(6)式可知, 电路输出电压的变化为  $\Delta U$ , 且有关系式:

$$\Delta U = \frac{\beta S_{\Phi} I_0 R_L D v \Delta t}{d^2} \quad (14)$$

对(14)式两边积分( $t_1 = 0$ ), 得到:

$$\int_0^{U_{\max}} dU = \int_0^{t_2} \frac{\beta S_{\Phi} I_0 R_L D v}{d^2} dt \quad (15)$$

令  $k = \frac{\beta S_{\Phi} I_0 R_L}{d^2}$ , 则弹丸的截面直径  $D$ :

$$D = \frac{U_{\max}}{k h} \quad (16)$$

弹丸的体积  $V$  为

$$V = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 L \quad (17)$$

由(16)式可知, 弹丸的直径与光幕输出电压的最大值有关。

仿照以上推导过程, 可以推导出球形弹丸的直径和体积为

$$\frac{U_{\max}}{k} = \pi \times \left( \frac{D}{2} \right)^2 - \frac{1}{2} \left[ D^2 \times \arccos\left(\frac{h}{D}\right) - h \times \sqrt{D^2 - h^2} \right] \quad (18)$$

$$V = \frac{4}{3} \pi \times \left( \frac{D}{2} \right)^3 \quad (19)$$

式中  $D$  为球形弹丸的直径。

同理, 双锥形弹丸的长度、最大截面直径和体积为

$$L = v(t_4 - t_1) - h \quad (20)$$

$$D_m = \frac{2 \times \frac{U_{\max}}{k}}{L - \frac{(L-h)^2}{L}} \quad (21)$$

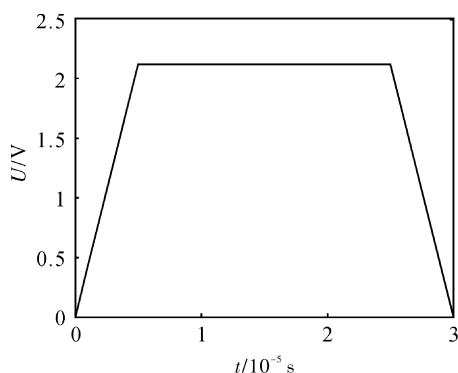
$$V = \frac{2}{3} \times L \pi \left( \frac{D_m}{2} \right)^2 \quad (22)$$

式中:  $L$  为破片的长度;  $D_m$  为破片最大截面直径。

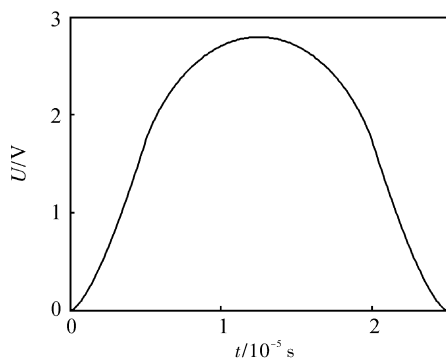
### 2.2 仿真分析

设一长度为 5 mm、截面直径为 3 mm 的柱形

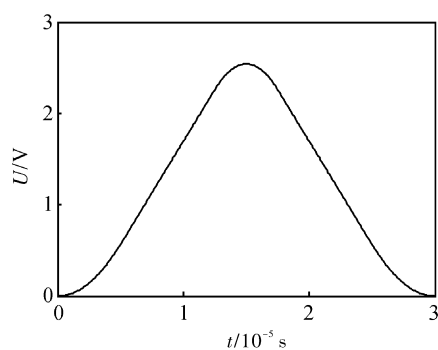
弹丸,一直径为 4 mm 的球形弹丸,一长度为 5 mm、最大截面直径为 4 mm 的双锥形弹丸,分别以平均速度 200 m/s 穿过厚度为 1 mm 的光幕面。设  $k=706\ 000$ ,则弹丸穿过光幕后,输出波形分别如图(4)(a)、(b)、(c)所示。



(a) 柱形弹丸波形仿真图



(b) 球形弹丸波形仿真图



(c) 双锥形弹丸波形仿真图

图 4 3 种典型形状弹丸波形仿真图

Fig. 4 Waveform simulation diagram of three typical shape projectiles

已知标准 4.5 mm 气枪弹外形尺寸如图 5 所示,设其以 155.5 m/s 的速度穿过厚度为 1 mm 的光幕,假定  $k=1\ 907\ 300$ ,则弹丸穿过光幕的输出波形如图 6 所示。

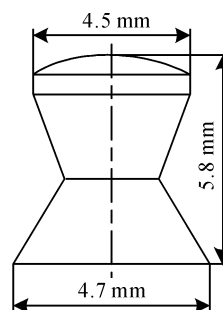


图 5 气枪弹外形图

Fig. 5 Outline drawing of bullet

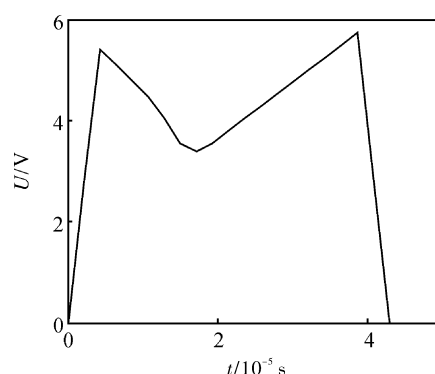


图 6 气枪弹波形仿真图

Fig. 6 Waveform simulation diagram of bullet

### 3 系统的标定方法

由于  $k = \frac{\beta S_{\Phi} I_0 R_L}{d^2}$  较难直接测得,根据以上推导的公式可知, $k$  仅与光幕厚度  $h$ 、 $D_m$ 、 $L$ 、 $U_{\max}$  有关,因此可以采用已知  $h$ 、 $D_m$ 、 $L$  的飞行物体穿过光幕,测得  $U_{\max}$  标定  $k$  的值,从而找到  $t_i$  时刻的光幕输出电压  $U_i$  所对应的遮光面积  $A_i$ 。

由 (18) 式可知,球形物体的标定参数为

$$k = \frac{U_{\max}}{\pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 - 2 \times \left[ \left( \frac{D}{2} \right)^2 \times \arccos \left( \frac{h}{D} \right) - \frac{1}{4} h \sqrt{D^2 - h^2} \right]} \quad (23)$$

### 4 试验与结果分析

为了验证所提方法的正确性,采用已知直径  $D=6.4\text{ mm}$  的球形钢珠穿过 XGK-2002 型小靶面

光幕靶,根据(23)式对未知参数  $k$  进行标定,得到的标定参数  $k=706\ 000$ 。通过实弹射击试验得到光幕输出的气枪弹波形,如图 7 所示。

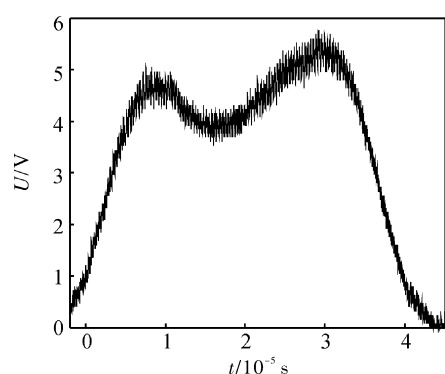
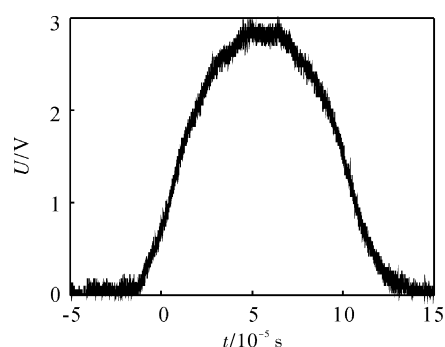
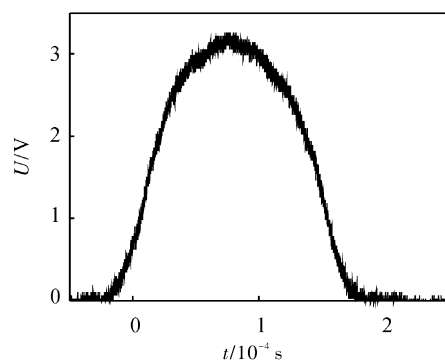


图7 气枪弹波形图

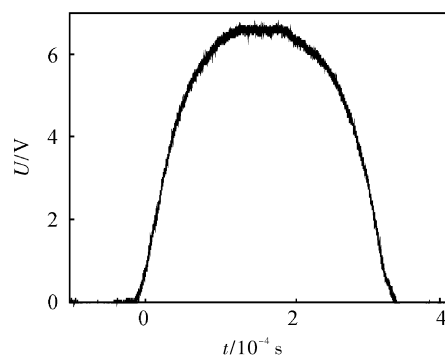
Fig. 7 Waveform of bullet



(a) 4 mm钢珠输出波形



(b) 4.8 mm钢珠输出波形



(c) 9.4 mm钢珠输出波形

图8 光幕输出波形

Fig. 8 Waveform output from the light screen

从波形图中可以得到光幕输出波形的最大幅值  $U_{\max}$  分别为 2.85 V、3.4 V、6.7 V, 已知光幕厚

度约为 1 mm, 则由推导公式计算得到结果如表 1 所示。

表1 测量结果

Table 1 Testing results

序号	1	2	3
实际 $D/\text{mm}$	4	4.8	9.4
测量 $D/\text{mm}$	4.078 1	4.850 4	9.507 6
$\Delta D/\text{mm}$	0.078 1	0.050 4	0.107 6
$\delta_D/\%$	1.95	1.05	1.14
$\delta_V/\%$	1.43	0.76	0.83

由表 1 可知, 测量得到的直径与钢珠实际直径值的相对误差分别为 1.95%、1.05%、1.14%, 则根据钢珠体积计算公式可以得到钢珠体积的相对误差分别为 1.43%、0.76%、0.83%。

由公式(8)可知, 破片动能的相对测量误差为

$$\delta_E = \delta_V + 2\delta_V \quad (24)$$

由以上试验数据得到破片体积的平均相对测量误差为 1.01%, 已知破片速度的相对测量误差为 0.1%, 则根据公式(24)得到破片动能的相对测量误差为 1.21%, 测量误差可能是由于试验人员操作误差和噪声干扰等因素引起的。

## 5 结论

本文提出了采用光幕输出波形测量破片动能的方法, 推导了光幕输出波形与破片体积关系的理论公式。给出了 3 种典型形状物体的测量公式, 在 Matlab 上仿真验证了算法。所提测量标定方法能够准确标定未知参数。实弹射击试验表明, 提出的测量原理正确, 测试精度满足实际需要。下一步的研究工作是分析文中所提方法的测量误差, 并对非旋转对称形状飞行物体展开研究, 以探索非规则破片的测量方法。

## 参考文献:

- [1] 黄正祥, 高森烈, 李良威, 等. 小口径弹丸破片的测速方法研究[J]. 南京理工大学学报, 2000, 24(5): 466-468.  
HUANG Zheng-xiang, GAO Sen-lie, LI Liang-wei. The Study of fragment velocity measurement for small caliber projectiles[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2000, 24(5): 466-468. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 倪晋平, 李晋慧, 王铁岭. 一种新的模拟导弹战斗部破片群单个速度测试系统[J]. 西安工业学院学报,

- 1999,19(4):274-278.
- NI Jin-ping, LI Jin-hui, WANG Tie-ling. A new velocity measuring system for single fragment of simulated missile warhead[J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 1999, 19(4): 274-278. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 倪晋平, 田会. 用于光幕测试的时刻信息提取方法研究[J]. 光学技术, 2008, 34(1): 141-144.
- NI Jin-ping, TIAN Hui. A study on method for acquiring moment on which a projectile going through a light screens[J]. Optical Technique, 2008, 34(1): 141-144. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 蔡荣立, 倪晋平, 杨敏, 等. 双缝光幕靶设计[J]. 应用光学, 2007, 28(4): 392-396.
- CAI Rong-li, NI Jin-ping, YANG Min, et al. Design on double-slit light screens[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(4): 392-396. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 倪晋平, 王铁岭. 光电靶的工作原理及应用[J]. 西安工业学院学报, 1997, 17(1): 42-46.
- NI Jin-ping, WANG Tie-ling. The principle and application of screens[J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 1997, 17(1): 42-46. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 倪晋平, 蔡荣立, 田会, 等. 基于大靶面光幕靶 30mm 口径弹丸速度测试技术[J]. 测试技术学报, 2008, 22(1): 17-22.
- NI Jin-ping, CAI Rong-li, TIAN Hui, et al. Velocity measuring technology for 30 mm-caliber flying projectiles based on large area light screens[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2008, 22(1): 17-22. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 智小军, 倪晋平, 田会, 等. 相关分析技术在光幕靶速度测量中的应用[J]. 探测与控制学报, 2005, 27(1): 44-46.
- ZHI Xiao-jun, NI Jin-ping, Tian Hui, et al. Application of cross-correlation analysis techniques in velocity measurement of light screen[J]. Journal of Detection & Control, 2005, 27(1): 44-46. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 席峰, 倪晋平. 大靶面光幕靶中发光二极管阵列线光源的设计[J]. 测试技术学报, 2005, 19(1): 40-43.
- XI Feng, NI Jin-ping. Design of linear light source composed of light-emitting diode array in large light-screen Target[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2005, 19(1): 40-43. (in Chinese with an English abstract)
- [9] 贾兆辉, 施浣芳. 光幕靶靶面光能分布均匀性的研究[J]. 西安工业学院学报, 2005, 25(4): 319-322.
- JIA Zhao-hui, SHI Huan-fang. Study on the distributing uniformity of light energy on screen[J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 2005, 25(4): 319-322. (in Chinese with an English abstract)
- [10] 卢芳云, 李翔宇, 林玉亮. 战斗部结构与原理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- LU Fang-yun, LI Xiang-yu, Lin Yu-liang. The structure and principle of warhead[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)