

# 基于双高速摄影的着靶姿态测量方法

黄含军, 郝志明, 张军, 王军评, 岳晓红, 毛勇建, 黄海莹

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** **目的** 获取物体在三维空间中的飞行着靶姿态。**方法** 提出一种基于2台高速相机双光轴交汇的测量方法, 即利用2台相机同步拍摄, 获得各自物体的姿态角度, 根据相机光轴方位、相机与目标物体的空间位置关系, 推导出物体着靶角的数学表达式, 结合实际应用需求, 获得几种特殊情形下的简化形式。**结果** 把该方法应用于跌落试验的实测分析, 迅速且准确地获得了物体的着靶姿态。**结论** 该方法中相机的布置方式受试验场所的约束较小, 可为跌落、高速撞击等异常安全性试验研究提供有效支撑。

**关键词:** 高速相机; 交汇; 测量; 着靶姿态

中图分类号: TJ410

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)05-0062-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.05.010

## Method for Measuring the Attitude Angle of Object Based on Two High-speed Cameras

HUANG Han-jun, HAO Zhi-ming, ZHANG Jun, WANG Jun-ping, YUE Xiao-hong,  
MAO Yong-jian, HUANG Hai-ying

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**ABSTRACT:** To obtain the target attitude of object in space, a measuring method was proposed through dual high-speed cameras with optical axis intersection. The attitude angle of object was simultaneously recorded using both of high-speed cameras. Considering the space relations between the axis intersection angle and location of two cameras, the mathematic expression of the attitude angle of object was constructed. The simplified forms were given under several special cases. The method was employed to measure the impact angle of object in the drop tests. Using the proposed method, the accurate impact angle of object was measured. The current method has little restriction of the camera arrangement during the measurement process. The method may provide key support for research of the aberrant drop and high-speed impact.

**KEY WORDS:** high-speed cameras; cameras axis intersection; measurement; the impact angle of object

收稿日期: 2021-01-10; 修订日期: 2021-03-30

Received: 2021-01-10; Revised: 2021-03-30

基金项目: 国防技术基础项目 (JSHS2019212C001), 国家自然科学基金项目 (12072334)

Fund: National Defense Technology Foundation of China (JSHS2019212C001); National Natural Science Foundation of China (12072334)

作者简介: 黄含军 (1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向冲击动力学试验技术及其应用。

**Biography:** HUANG Han-jun (1973—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: experimental technology of impact dynamic and its application.

通讯作者: 张军 (1988—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向冲击动力学试验技术及其应用。

**Corresponding author:** ZHANG Jun (1988—), Male, Doctor, Associate researcher, Research focus: experimental technology of impact dynamic and its application.

引文格式: 黄含军, 郝志明, 张军, 等. 基于双高速摄影的着靶姿态测量方法[J]. 装备环境工程, 2021, 18(5): 062-067.

HUANG Han-jun, HAO Zhi-ming, ZHANG Jun, et al. Method for measuring the attitude angle of object based on two high-speed cameras[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(5): 062-067.

军事装备和民用产品在使用过程中，不可避免会遭遇跌落、撞击等异常安全事故环境，相关装备或产品在使用前都需要进行跌落、撞击试验。如 STANAG 4375《安全跌落 弹药试验程序》<sup>[1]</sup>、MIL-STD-2105D《非核弹药的危险性评估试验》<sup>[2]</sup>、GJB 5144—2002《战术导弹战斗部通用规范》<sup>[3]</sup>、GJB 3852—1999《弹道式导弹常规弹头通用规范》<sup>[4]</sup>、GJB 11806—2019《放射性物品安全运输规程》<sup>[5]</sup>等都有此规定和要求，而有效获取装备运动姿态及着靶角度对于安全性评价与分析具有重要意义。在相关的规范或标准中，对跌落或撞击也有着靶姿态或方位角度的要求。例如，在 GJB 4038—2000《地地导弹子母弹战斗部试验规程》<sup>[6]</sup>、GJB 3557—1999《反坦克导弹破甲战斗部通用规范》<sup>[7]</sup>中规定了装备垂直、水平及 45° 的跌落姿态要求。在 GJB 11806—2019《放射性物品安全运输规程》中，也提出了“试样应经受能使其造成最严重损坏的取向”要求，这里的“取向”就是着靶或撞击姿态。为了确定试验姿态，通常采用计算机仿真来实现<sup>[8-9]</sup>。

产品运动或着靶姿态的测量有 2 类方法：内置传感器测量方法和外部非接触测量方法。第一类方法需要在产品内部安置传感器<sup>[10-11]</sup>，试验后读出数据进行分析，得到产品运动或着靶姿态信息。第二类方法有纸靶<sup>[12]</sup>、狭缝摄影<sup>[13]</sup>、光幕天幕靶<sup>[14]</sup>、线阵 CCD 摄像<sup>[15]</sup>、高速摄影<sup>[16]</sup>等方法。内置传感器法需要产品内部有布置空间，并会附加质量；纸靶由于精度较差，目前已很少使用，并且也难用于大尺寸产品；狭缝摄影不能实时获取数据，且应用较为繁琐；光幕天幕靶、线阵 CCD 摄像一般专用于野外武器系统的靶场弹道测试。常用场景主要应用高速相机，如火炮试验<sup>[17]</sup>、火箭撬试验<sup>[18-19]</sup>。目前，常用单台高速摄影进行测试，对于产品的运动姿态或着靶姿态的准确获取是不足的。

文中采用 2 台高速相机交汇拍摄方法用于跌落或撞击试验着靶角的测量，根据每台相机拍摄得到的各自着靶角分量，基于 2 台相机光轴关系以及光轴与跌落或撞击方向的关系，推导了着靶角的计算表达式，并应用于跌落试验着靶姿态的计算。

### 1 测量原理与方法

着靶姿态通常用着靶角来描述，通常采用试样的某一特征线或面与靶面的夹角，如轴线与靶面法线的夹角、底面与靶面的夹角等。这里定义着靶角为试样轴线与靶面法线的夹角，着靶角分量通过单台相机获取的图像中试样轴线与跌落/撞击方向的夹角确定。假定某台相机拍得的图像如图 1 所示，则该台相机所得的着靶角分量即为图中  $\alpha$  角。

单台相机、试样及相应着靶角分量的关系原理如图 2 所示。相机位于  $x$  轴上的  $F$  点位置，其仰俯角为  $\phi$ ， $AB$  为试样轴线， $OC$  为  $AB$  在  $xOy$  平面上的投影。 $z$  轴为靶面法线方向，相机与试样组成的平面  $FAB$  交

平面  $yOz$  于直线  $AD$ 。试样尺寸相对于其到相机的距离来说是一个小量，相机拍得的试样图像可认为就是平行光沿相机光轴照过去再按比例缩小的像，则相机在像平面  $yOz$  上得到试样  $AB$  的像即为  $AD$ ，角  $\alpha$  即为该相机拍摄获得的试样着靶角分量。在相机和试样相互位置关系确定的情况下，相机所得到的试样着靶角分量也就确定了。利用 2 台相机交汇拍摄，根据各自的试样着靶角分量，可计算得到试样的着靶角，即图 2 中的  $\theta$  角。

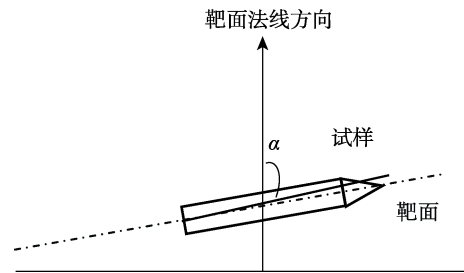


图 1 一台相机所得的着靶角分量  
Fig.1 The attitude angle component of the object from a camera

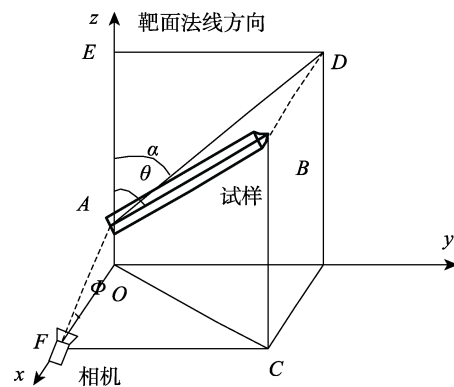


图 2 相机、试样及着靶角分量的关系  
Fig.2 The relation between the camera, the object and angles

### 2 着靶角计算数学表达式推导

某时刻试样、相机的空间位置关系如图 3 所示， $z$  轴为靶面法向， $AB$  为试样轴线。1 号相机位于  $x$  轴上，其仰俯角为  $\phi_1$ ，在其像平面  $yOz$  所得试样的图像为  $AL$ ，对应的着靶角分量为  $\alpha_1$ ；2 号相机位于  $x'$  轴上，其仰俯角为  $\phi_2$ ，在其像平面  $y'O'z$  所得试样的图像为  $AI$ ，对应的着靶角分量为  $\alpha_2$ ； $x$  轴在  $x'O'y'$  面内的投影与  $x'$  轴的夹角为  $\gamma$ 。垂直于试样速度方向的平面  $AHGF$  平行于  $xOy$  面或  $x'O'y'$  面， $AG$  为试样轴线  $AB$  在平面  $AHGF$  的投影， $L$ 、 $I$  在平面  $AHGF$  的投影分别为  $F$ 、 $K$ ， $E$ 、 $J$  分别为 2 台相机在不考虑仰俯角时  $B$  点对应像平面的像。设试样的着靶角为  $\theta$ ，即图 3 中试样轴线  $AB$  与靶面法向  $z$  的夹角。设  $\phi$  为试样轴线  $AB$  在  $xOy$  平面上的投影与  $x$  轴的夹角。 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  可通过某一时刻试样的图像分析获得。下面根据已

知的  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$  和  $\gamma$  来推导  $\theta$  的计算表达式。

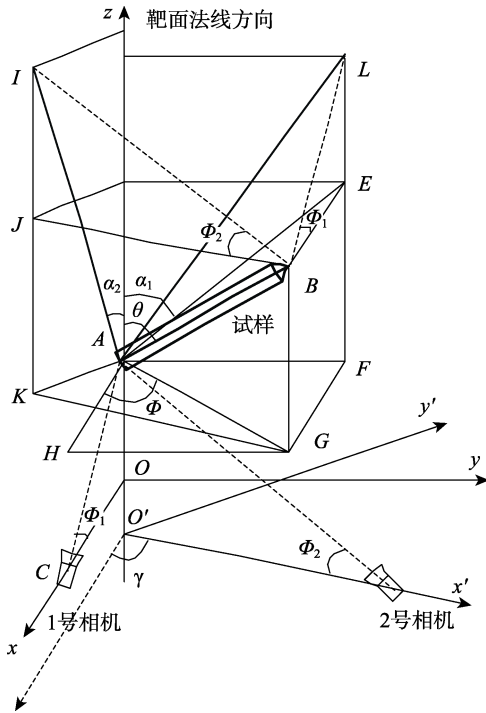


图3 相机与各角度空间位置关系

Fig.3 The space relation between the camera and each angle

由图3中几何关系有：

$$\tan \alpha_1 = \frac{\overline{AF}}{\overline{LF}} \quad (1)$$

$$\overline{AF} = \overline{AG} \sin \Phi = \overline{AB} \sin \theta \sin \Phi \quad (2)$$

$$\overline{LF} = \overline{LE} + \overline{EF} \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \tan \Phi &= \frac{\tan \alpha_1 \tan \alpha_2 \tan \phi_1 + \tan \alpha_1 \sin \gamma - \tan \alpha_1 \tan \alpha_2 \tan \phi_2 \cos \gamma}{\tan \alpha_2 + \tan \alpha_1 \cos \gamma + \tan \alpha_1 \tan \alpha_2 \tan \phi_2 \sin \gamma}, \gamma > \Phi \\ \tan \Phi &= \frac{\tan \alpha_1 \tan \alpha_2 \tan \phi_1 - \tan \alpha_1 \sin \gamma - \tan \alpha_1 \tan \alpha_2 \tan \phi_2 \cos \gamma}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1 \cos \gamma + \tan \alpha_1 \tan \alpha_2 \tan \phi_2 \sin \gamma}, \gamma < \Phi \end{aligned} \right. \quad (11)$$

如果  $\gamma = \Phi$ ，由图3可以看到，I点将落在z轴上，则  $\alpha_2 = 0$ ，由式(10)有：

$$\tan \theta = \frac{\tan \alpha_1}{\sin \gamma - \tan \alpha_1 \tan \phi_1 \cos \gamma} \quad (12)$$

式(10)、(11)、(12)组成了着靶角计算表达式。可见，在已知  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$  和  $\gamma$  时，可由相应表达式计算试样着靶角  $\theta$ 。在具体计算时，式(10)可直接选第一式。

在利用式(10)、(11)时，需要先判断  $\gamma$  与  $\Phi$  的大小，这可以通过某台相机的像平面内试样像与另一

$$\left\{ \begin{aligned} \tan^2 \theta &= \frac{\tan^2 \alpha_1 (\tan \alpha_2 \tan \phi_1 + 1)^2 + \tan^2 \alpha_2 (\tan \alpha_1 \tan \phi_2 + 1)^2}{(1 - \tan \alpha_1 \tan \alpha_2 \tan \phi_1 \tan \phi_2)^2}, \gamma > \Phi \\ \theta &= \alpha_1, & \gamma = \Phi = \pi/2 \\ \tan^2 \theta &= \frac{\tan^2 \alpha_1 (\tan \alpha_2 \tan \phi_1 + 1)^2 + \tan^2 \alpha_2 (\tan \alpha_1 \tan \phi_2 - 1)^2}{(1 + \tan \alpha_1 \tan \alpha_2 \tan \phi_1 \tan \phi_2)^2}, \gamma < \Phi \end{aligned} \right. \quad (13)$$

$$\overline{EF} = \overline{BG} = \overline{AB} \cos \theta \quad (4)$$

$$\overline{LE} = \overline{BE} \tan \phi_1 = \overline{GF} \tan \phi_1 = \overline{AG} \cos \Phi \tan \phi_1 = \overline{AB} \sin \theta \cos \Phi \tan \phi_1 \quad (5)$$

将式(4)、(5)带入式(3)有：

$$\overline{LF} = \overline{AB} \cos \theta + \overline{AB} \sin \theta \cos \Phi \tan \phi_1 \quad (6)$$

将式(2)、(6)带入式(1)可得：

$$\tan \alpha_1 = \frac{\overline{AB} \sin \theta \sin \Phi}{\overline{AB} \cos \theta + \overline{AB} \sin \theta \cos \Phi \tan \phi_1} = \frac{\sin \theta \sin \Phi}{\cos \theta + \sin \theta \cos \Phi \tan \phi_1} \quad (7)$$

式(7)即为1号相机所得试样着靶角分量与着靶角的关系，但式中包含未知的  $\Phi$ 。

一般  $\theta$  为锐角，式(7)可化为：

$$\tan \alpha_1 = \frac{\tan \theta \sin \Phi}{\tan \theta \tan \phi_1 \cos \Phi + 1} \quad (8)$$

同理，可推导获得2号相机试样着靶角分量与着靶角的关系：

$$\tan \alpha_2 = \frac{\tan \theta \sin(|\gamma - \Phi|)}{\tan \theta \tan \phi_2 \cos(|\gamma - \Phi|) + 1} \quad (9)$$

事实上，由图3可以看到， $\gamma$  与  $\Phi$  是有大小关系的，大小关系的不同也就导致式(9)的具体表达式也不一样。

由式(8)、(9)可得式(10)与式(11)：

$$\left\{ \begin{aligned} \tan \theta &= \frac{\tan \alpha_1}{\sin \Phi - \tan \alpha_1 \tan \phi_1 \cos \Phi} \\ \tan \theta &= \frac{\tan \alpha_2}{\sin(|\gamma - \Phi|) - \tan \alpha_2 \tan \phi_2 \cos(|\gamma - \Phi|)} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

相机的坐标轴在该像平面投影的关系确定。另一相机的坐标轴投影正向与试样像轴线所成夹角如果为锐角，则  $\gamma > \Phi$ ；如果为钝角，则  $\gamma < \Phi$ ；如果为直角，则  $\gamma = \Phi$ 。

通常，为了便于实际应用，对式(10)、(11)、(12)进行特殊情况的简化处理，可以更快地得到结果。下面分3种情况进行简化：

1)  $\gamma = \pi/2$ ，表示2台相机的光轴在垂直于试样速度方向平面内的投影相互垂直。

由式(10)、(11)、(12)可得：

式 (13) 中第二式也可直接由图 3 得到。当  $\gamma = \Phi = \pi/2$  时, 试样轴线就在 1 号相机的像平面  $yOz$  上。此时  $\alpha_2 = 0$ , 1 号相机所得着靶角分量即为着靶角。在实际应用中, 如果 2 台相机光轴在垂直于试样速度方向的平面内投影垂直, 若一台相机所得着靶角分量为 0, 则另一台相机所得着靶角分量即为试样着靶角。

2)  $\varphi_1 = 0$  和  $\varphi_2 = 0$ , 表示 2 台相机仰俯角为 0, 即 2 台相机的光轴垂直于试样速度方向。实际上 2 台相机光轴处于同一平面内, 该平面垂直于试样速度方向。

由式 (10)、(11)、(12) 可得:

$$\begin{cases} \tan^2 \theta = \frac{\tan^2 \alpha_1 + \tan^2 \alpha_2 + 2 \tan \alpha_1 \tan \alpha_2 \cos \gamma}{\sin^2 \gamma}, \gamma > \Phi \\ \tan \theta = \frac{\tan \alpha_1}{\sin \gamma}, \gamma = \Phi \\ \tan^2 \theta = \frac{\tan^2 \alpha_1 + \tan^2 \alpha_2 - 2 \tan \alpha_1 \tan \alpha_2 \cos \gamma}{\sin^2 \gamma}, \gamma < \Phi \end{cases} \quad (14)$$

当  $\gamma = \Phi$ , 即式 (14) 中的第二式成立时, 面  $ABG$  与面  $x'O'z$  共面, 从图 3 可知,  $AI$  与  $z$  轴共线, 此时  $\alpha_2 = 0$ 。

3)  $\gamma = \pi/2$ , 且  $\varphi_1 = 0$  和  $\varphi_2 = 0$ , 则表示 2 台相机的光轴在垂直于试样速度方向平面内的投影相互垂直, 且仰俯角为 0, 也就是 2 台相机光轴正交, 且垂直于试样速度方向。

由式 (13) 或 (14) 都可以得到:

$$\begin{cases} \tan^2 \theta = \tan^2 \alpha_1 + \tan^2 \alpha_2, \gamma \neq \Phi \\ \theta = \alpha_1, \gamma = \Phi \end{cases} \quad (15)$$

从上面的分析可以看到, 当  $\gamma = \Phi$  时, 2 台相机所得的着靶角分量中, 有一个为 0, 着靶角仅与另一个分量相关。当 2 台相机正交垂直试样速度方向拍摄时, 所得计算式最简单, 用起来最为方便。如果试验场地允许, 在实际应用中多采用这种相机布置方式。

### 3 试样着靶角实测分析

某产品的跌落试验初始状态如图 4 所示。2 台相



图 4 某产品的跌落试验初始状态  
Fig.4 The initial state for the drop-test sample

机的布置如图 5 所示,  $\gamma$  为  $45^\circ$ , 2 台相机光轴水平, 试验中两相机的幅频设置一致, 同时启动。

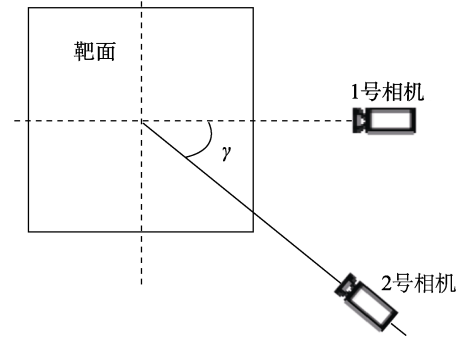


图 5 试验布局  
Fig.5 Test layout

图 6、图 7 分别为 1 号相机和 2 号相机在同时刻拍摄的图片, 通过图像分析获得的试样着靶角分量  $\alpha_1 = 17.4^\circ$  和  $\alpha_2 = 17.1^\circ$ 。由于 2 台相机光轴水平, 则  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0^\circ$ 。在图 6、图 7 中, 可判断试样轴线在垂直跌落方向的面内投影位于两相机光轴投影之外, 即  $\gamma < \Phi$ , 把  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\gamma$  化为弧度值带入式 (14) 第三式, 即可计算得到该时刻所处空中位置的试样着靶角为  $18.6^\circ$ 。

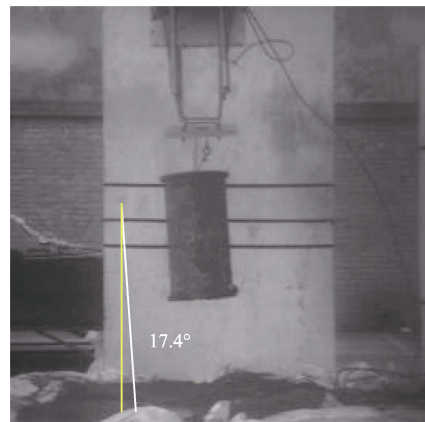


图 6 1 号相机拍摄图像  
Fig.6 The photograph from camera No.1

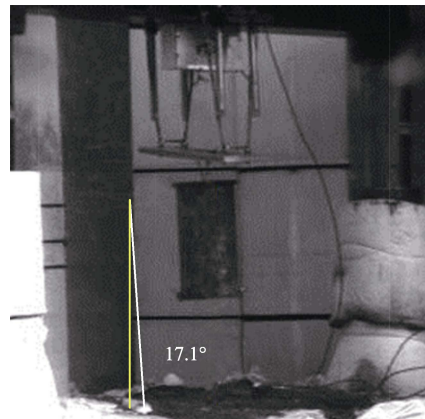


图 7 2 号相机拍摄图像  
Fig.7 The photograph from camera No.2

使用 2 台相机光轴交汇测量试样着靶角需注意以下几点。

1) 试样着靶角分析必须保证由 2 台相机获得的图片是同一时刻的, 实验中可通过设置相机相同拍摄幅频、同步触发来解决。

2) 计算表达式中的仰俯角  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  是有正负的, 相机光轴沿速度正向转动形成的仰俯角为正, 反之为负。

3)  $\gamma$  与  $\Phi$  之间大小关系的实际应用判断: 如果试样轴线都偏向另一台相机所在方位, 则试样轴线在垂直速度方向的面内投影位于两相机光轴投影之间, 即  $\gamma > \Phi$ , 反之则  $\gamma < \Phi$ 。

4) 采用数字图像处理技术对试样的轮廓图进行处理<sup>[11-12]</sup>, 可以得到更为准确的试样着靶角分量数据。

## 4 结论

1) 文中采用 2 台同步高速相机, 光轴交汇测试物体运动过程的姿态以及跌落或撞击的着靶角。根据 2 台相机光轴、物体及相应的着靶角分量的关系, 给出了着靶角计算表达式, 并对几种特殊情况进行了分析, 给出了简化形式。

2) 该方法可以较为灵活地布置相机, 因而受实际试验场所的约束小。对相机的拍摄幅频不做特别规定, 根据 2 台相机所得图像可计算得到物体着靶角。

3) 给出的着靶角测量方法可为跌落、高速撞击等异常安全性试验研究提供有效支撑, 也可用于其他类似试验的姿态测试。

### 参考文献:

- [1] STANAG 4375—2003, Safety drop, munition test procedures[S].
- [2] MIL-STD-2105D, Department of defense test method standard, hazard assessment tests for non-nuclear munitions[S].
- [3] GJB 5144—2002, 战术导弹战斗部通用规范[S].  
GJB 5144—2002, General specifications for tactical missile warhead[S].
- [4] GJB 3852—1999, 弹道式导弹常规弹头通用规范[S].  
GJB 3852—1999, General specification of conventional reentry vehicle for ballistic missiles[S].
- [5] GJB 11806—2019, 放射性物品安全运输规程[S].  
GJB 11806—2019, Regulations for the safe transport of radionactive material[S].
- [6] GJB 4038—2000, 地地导弹子母弹战斗部试验规程[S].  
GJB 4038—2000, Test regulations for ground to ground missile's warhead of sharapnel[S].
- [7] GJB 3557—1999, 反坦克导弹破甲战斗部通用规范[S].  
GJB 3557—1999, General specification for shaped charge warhead of antitank missile[S].
- [8] 张冬梅, 张亚, 何荣华, 等. 基于 Cosmosworks 跌落试验仿真[J]. 煤矿机械, 2010, 31(11): 73-75.  
ZHANG Dong-mei, ZHANG Ya, HE Rong-hua, et al. Simulation of drop test by cosmosworks[J]. Coal mine machinery, 2010, 31(11): 73-75.
- [9] 段良雷, 钱建平. 某型箱装弹药跌落过程动力学特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(4): 37-40.  
DUAN Lianglei, QIAN Jianping. Study on dynamic characteristics of drop process of a certain type of boxed ammunition[J]. Journal of ordnance equipment engineering, 2020, 41(4): 37-40.
- [10] 杜振宇, 石庚辰. 弹体飞行姿态测量方法探讨[J]. 探测与控制学报, 2002, 24(1): 53-56.  
DU Zhen-yu, SHI Geng-chen. Study on the measurement method of projectile attitude[J]. Journal of detection & control, 2002, 24(1): 53-56.
- [11] 谷智国, 张怀智, 郭胜强, 等. 弹药包装跌落实验研究[J]. 包装工程, 2009, 30(6): 14-15.  
GU Zhi-guo, ZHANG Huai-zhi, GUO Sheng-qiang, et al. Experimental study of ammunition package drop[J]. Packaging engineering, 2009, 30(6): 14-15.
- [12] 单长胜. 攻角纸靶测量技术[J]. 飞行器测控技术, 1994(3): 27-34.  
SHAN Chang-sheng. The measurement of the attack based on paperboard target[J]. Journal of spacecraft TT&C technology, 1994(3): 27-34.
- [13] 高昕, 王建军, 汤阳. 利用狭缝相机实现弹丸攻角的高精度测量研究[J]. 飞行器测控学报, 2004, 23(1): 69-72.  
GAO Xin, WANG Jian-jun, TANG Yang. Precision measurement of nutation angle using slit cameras[J]. Journal of spacecraft TT&C technology, 2004, 23(1): 69-72.
- [14] 倪晋平, 宋玉贵, 冯斌. 双天幕靶交汇测量弹丸飞行参数原理[J]. 光学技术, 2008, 34(3): 388-390.  
NI Jin-ping, SONG Yu-gui, FENG Bin. The principle for measuring motion parameters of projectiles using two sky screens in vertical intersection manner[J]. Optical technique, 2008, 34(3): 388-390.
- [15] 刘同现, 宋卫东, 宋丕极, 等. 线阵 CCD 用于飞行弹丸攻角测定的研究[J]. 光电子技术, 2002, 22(4): 228-230.  
LIU Tong-xian, SONG Wei-dong, SONG Pi-ji, et al. The research on the measurement of the attack angle of flying projectile by linear array CCD[J]. Optoelectronic technology, 2002, 22(4): 228-230.
- [16] 苏增立, 高昕, 王建军, 等. 高速摄像系统及其在靶场中的应用分析[J]. 飞行器测控学报, 2003, 22(3): 48-52.  
SU Zeng-li, GAO Xin, WANG Jian-jun, et al. An introduction to high speed photo-electronic camera and its application in range measurement[J]. Journal of spacecraft TT&C technology, 2003, 22(3): 48-52.
- [17] 杨成祥, 郭世明, 何承基. 火炮加载发射测试技术研究[J]. 中国测试技术, 2003(2): 16-17.  
YANG Cheng-xiang, GUO Shi-ming, HE Cheng-ji. Research on the measurement of projectile speed by can-

- non-shot[J]. China measurement, 2003(2): 16-17.
- [18] 孙海波, 王晓斌, 吴瑞斌, 等. 高速摄像技术在火箭撬头罩分离试验中的应用[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(3): 327-332.  
SUN Hai-bo, WANG Xiao-bin, WU Rui-bin, et al. Application of high-speed image acquisition technology in rocket sledge head cover separation experiment[J]. Spacecraft environment engineering, 2016, 33(3): 327-332.
- [19] 苏增立, 王建军, 高昕, 等. 高速摄像系统用于火箭弹离轨参数测量方法研究[J]. 飞行器测控学报, 2003, 22(4): 80-83.  
SU Zeng-li, WAN Jian-jun, GAO Xin, et al. Research on the measurement of initial trajectory parameters by using high speed photo-electronic camera[J]. Journal of spacecraft TT&C technology, 2003, 22(4): 80-83.
- [20] 张荣, 黄海莹, 卫剑峰. 炮弹攻角的图像自动化测量技术研究[J]. 工程设计与力学环境, 2007(2): 17-22.  
ZHANG Rong, HUANG Hai-ying, WEI Jian-feng. Research on automatic attack angle identification technology of cannon-shot based on digital image processing technology[J]. Engineering design and mechanical environment, 2007(2): 17-22.
- [21] 朱玉荣, 徐守时, 吴祖堂. 弹体飞行过程中攻角测量的图像处理技术[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 25(1): 397-399.  
ZHU Yu-rong, XU Shou-shi, WU Zu-tang. The technology image procession on measurement of attack angle of flying projectile[J]. Journal of projectiles, rockets, missiles and guidance, 2004, 25(1): 397-399.