

# 固体火箭发动机体空间缺陷最大直径 矢量特征测量方法

朱 敏<sup>1</sup>, 李 朋<sup>2</sup>, 卢洪义<sup>2</sup>, 于光辉<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院 七系, 山东 烟台 264001;

2. 海军航空工程学院 飞行器工程系, 山东 烟台 264001)

**摘 要:** 针对固体火箭发动机工业 CT(computed tomography)三维扫描数据,从计算时间和测量精度两方面考虑,结合固体火箭发动机内部缺陷体空间数据场的特征,通过改进传统的空间最大距离求解法——插台法,提出了基于分类种子点法的体空间缺陷最大直径矢量特征测量方法. 设计了预置缺陷的固体火箭发动机,经实验验证,相比传统插台法,该方法能够提高测量精度和缩短计算时间,最大直径及其与轴向锐角夹角的最大测量误差在 10% 以下,为固体火箭发动机三维可视化故障诊断奠定了基础.

**关 键 词:** 固体火箭发动机; 体空间; 最大直径; 矢量特征测量; 工业 CT

中图分类号: V435

文献标志码: A

## Measurement method of defect maximum diameter vector feature of solid rocket motor in volume space

ZHU Min<sup>1</sup>, LI Peng<sup>2</sup>, LU Hong-yi<sup>2</sup>, YU Guang-hui<sup>2</sup>

(1. NO. 7 Department,

Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai Shandong 264001, China;

2. Department of Airborne Vehicle Engineering,

Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai Shandong 264001, China)

**Abstract:** Based on the three-dimensional scanning data of solid rocket motor by industrial computed tomography, and considering the computation time and measurement accuracy, the traditional space maximum distance measuring method, named as challenge method, was improved by combining the defect features of the solid rocket motor volume space data field. The defect maximum diameter vector feature measurement method in volume space based on classified seed point method was proposed. The solid rocket motor with presetted defects was designed. Experiments show that the proposed method can improve the measurement accuracy and shorten the computation time compared with traditional challenge method, and the maximum errors of maximum diameter and axial acute angle are less than 10%, which is the foundation for solid rocket motors three-dimensional visualization fault diagnosis.

**Key words:** solid rocket motor; volume space; maximum diameter;

vector feature measurement; industrial computed tomography(CT)

固体火箭发动机结构简单、机动性好、可靠性高且易于维护,但在生产和贮存期间,推进剂药柱

要承受各种载荷的作用,结构完整性可能被破坏,产生裂纹、气泡、脱粘等缺陷,这些缺陷将对固体

火箭发动机的使用安全造成不同程度的影响<sup>[1-4]</sup>. 经统计分析得出, 内部缺陷主要由4类参数表征<sup>[5-6]</sup>, 分别是缺陷的几何中心、缺陷的表面积、缺陷最大直径、最大直径与轴向锐角夹角.

目前, 针对这4类参数的检测已经完成了从二维空间向三维空间的拓展, 实现了基于工业CT断层图像的缺陷分类提取和三维重构<sup>[7-14]</sup>, 但是三维重构只是针对缺陷分类后的数据进行三维可视化处理, 有利于发现缺陷, 如何在三维体空间精确测量出这4类参数的几何特征尚待研究. 目前, 在三维体空间测量上主要有两个方向: 一种是基于取点操作的交互测量研究<sup>[15]</sup>; 一种是基于缺陷提取后的测量研究. 基于缺陷提取后的测量相对于交互测量更为精确, 也是本文的研究方向.

固体火箭发动机内部缺陷最大直径及其与轴向锐角夹角构成了缺陷最大直径矢量特征, 本文以此为对象, 研究这两类参数在体空间的精确测量方法, 以期为固体火箭发动机三维可视化故障诊断奠定基础.

## 1 测量方法原理

### 1.1 传统擂台法分析

缺陷完整提取后, 一一计算缺陷内两个点的距离并记录, 擂台法比较记录的所有距离, 得到的距离最大值即为最大直径, 最大直径端点的坐标已知, 从而可以求得最大直径与轴向锐角夹角. 这种方法思路简单, 易于实现, 结果唯一, 但算法空间复杂度和时间复杂度太大.

擂台法规则: 将第1个距离值作为最大值, 与第2个距离值进行比较, 如果第1个距离值大于第2个, 就将第1个距离值作为最大值继续与第3个距离值比较, 如果小于第2个, 就将第2个距离值作为最大值与第3个距离值比较, 依次类推, 直至所有距离比较结束得到“擂主”.

因为最大直径的端点必定在缺陷的边缘, 所以计算最大直径时只需考虑边缘点, 缺陷内部点不需进行比较, 从而可以降低空间复杂度.

假设三维数据场的尺寸为  $i \times j \times k$ , 一一记录并比较两点距离, 比较点的选择有  $i \times j \times k$  个, 而每个比较点都需要进行  $i \times j \times k$  次比较, 这种方法相同的两点会进行两次比较, 通过算法可以将比较次数减半, 该过程的复杂度为  $\frac{(i \cdot j \cdot k)^2}{2}$ , 需要较长的时间, 需要改进.

### 1.2 基于常规种子点法的最大直径测量方法

为提高比较的速度, 提出基于常规种子点法的最大直径测量方法. 该方法的步骤如下: 选取缺陷边缘任意一点作为种子点  $Z^1$ , 找到边缘上与种子点有最大距离的点作为新的种子点  $Z^2$ , 以  $Z^2$  为种子点找到  $Z^3$ , 以此类推找到  $Z^4, \dots, Z^{n-1}, Z^n$ , 当  $Z^{n-1}$  与  $Z^n$  互为种子点时, 搜索结束, 点  $Z^{n-1}$  与  $Z^n$  即为在种子点  $Z^1$  下的最大直径, 该过程的复杂度为  $n \cdot i \cdot j \cdot k$ . 一般情况下经过5次以内的循环搜索即可将最大直径求出, 但该方法也存在缺陷: 不同种子点可能会获得不同的最大直径.

以二维情形为例, 图1中的白色区域表示缺陷, 灰色区域不是缺陷.

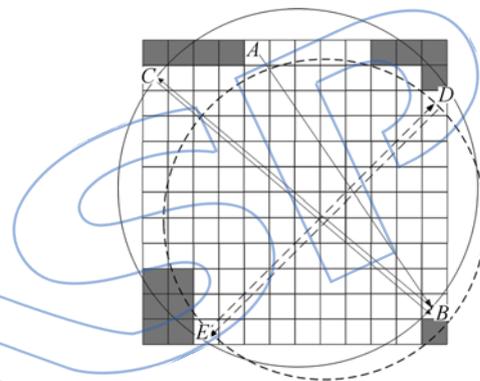


图1 不同种子点下的最大直径

Fig. 1 Maximum diameter under different seed points

假如缺陷种子点选在A点, 则种子点寻找流程为  $A \rightarrow B, B \rightarrow C, C \rightarrow B$ , 如图1中实线所示, 所以以A为种子点获得的最大直径为  $BC = \sqrt{10^2 + 12^2} = 2\sqrt{61}$ . 假如缺陷种子点选在D点, 则寻找流程为  $D \rightarrow E, E \rightarrow D$ , 如图1中虚线所示, 所以以D为种子点获得的最大直径  $DE = \sqrt{10^2 + 10^2} = 10\sqrt{2}$ . 因为  $BC \neq DE$ , 所以不同种子点获得的最大直径可能有差异.

### 1.3 基于分类种子点法的最大直径矢量特征测量方法

为解决这一问题, 提出分类种子点法, 该法的原理如下: 选取缺陷边缘任意一点作为种子点  $Z^1$ , 用基于常规种子点法的最大直径测量方法求出最大直径长度  $L^1$ , 直径两个端点的坐标为  $(^s L^1_x, ^s L^1_y, ^s L^1_z), (^e L^1_x, ^e L^1_y, ^e L^1_z)$ , 然后以  $L^1$  为直径做球  $S^1$ , 球外所有缺陷点的集合为  $Z_w = \{Z_w^1, Z_w^2, \dots, Z_w^m\}$ , 该过程的复杂度为  $i \cdot j \cdot k$ . 分别以  $Z_w^1, Z_w^2, \dots, Z_w^m$  为种子点求解获得的最大直

径分别为  $L_w^1, L_w^2, \dots, L_w^m$ , 该过程的复杂度为  $m \cdot n \cdot i \cdot j \cdot k$ , 直径的两个端点分别为  $(^s L_w^{1x}, ^s L_w^{1y}, ^s L_w^{1z}), (^e L_w^{1x}, ^e L_w^{1y}, ^e L_w^{1z}), (^s L_w^{mx}, ^s L_w^{my}, ^s L_w^{mz}), (^e L_w^{mx}, ^e L_w^{my}, ^e L_w^{mz})$ , 集合  $[L^1, L_w^1, L_w^2, \dots, L_w^m]$  的最大值即为最大直径  $L_w^{\max}$ , 最大直径的端点坐标为  $(^s L^{\max x}, ^s L^{\max y}, ^s L^{\max z}), (^e L^{\max x}, ^e L^{\max y}, ^e L^{\max z})$ , 假如最大直径与轴向锐角夹角为  $\alpha$ ,  $\alpha$  按式(1)计算.

$$\alpha = \arctan \frac{|^e L^{\max z} - ^s L^{\max z}|}{\sqrt{(^e L^{\max x} - ^s L^{\max x})^2 + (^e L^{\max y} - ^s L^{\max y})^2}} \quad (1)$$

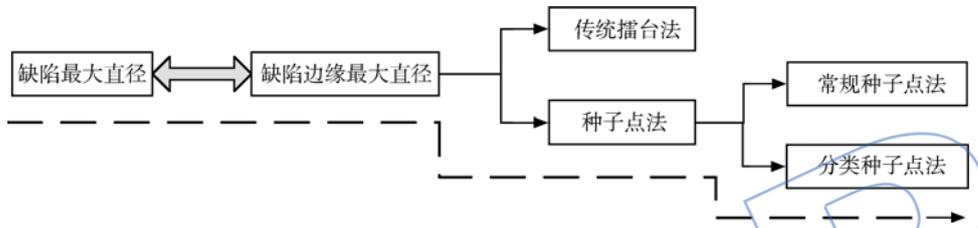


图 2 最大直径矢量特征测量方法

Fig. 2 Measurement method of maximum diameter vector feature

## 2 实验验证

### 2.1 实验条件

#### 2.1.1 预置缺陷固体火箭发动机设计与制作

设计一台预置缺陷固体火箭发动机, 发动机中含有已知形状、尺寸和位置的 3 个缺陷, 因此可以准确得到缺陷的 3 个测量参数理论尺寸, 再用工业 CT 对发动机进行检测得到序列 CT 图像, 利用文中提出的方法对发动机缺陷进行三维提取, 在提取基础上测量出缺陷的 3 个测量参数, 通过比较理论尺寸与测量尺寸来验证算法的准确性. 发动机外观如图 3 所示.

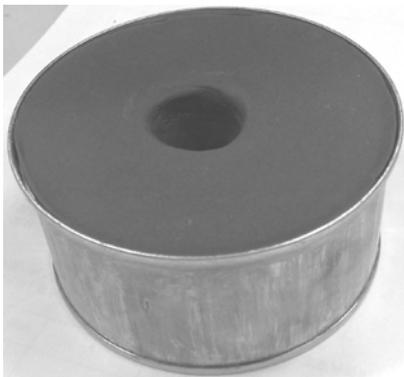


图 3 预置缺陷固体火箭发动机

Fig. 3 Solid rocket motor with presetted defects

分类种子点法的复杂度为  $(n + mn + 1) \cdot i \cdot j \cdot k$ , 传统擂台法的复杂度为  $\frac{(i \cdot j \cdot k)^2}{2}$ . 因为落于局部最大直径确定的球外的缺陷点数目很少, 即  $m \ll i \cdot j \cdot k$ ,  $n$  值一般小于 5, 因此  $(n + mn + 1) \ll \frac{i \cdot j \cdot k}{2}$ , 所以分类种子点法比传统擂台法能更快测量出最大直径.

最终确定最大直径矢量特征测量方法如图 2 中虚线走向所示.

钢圈厚度为 2 mm, 外径为 200 mm, 轴向长度为 100 mm, 预置 3 个缺陷, 缺陷 1 是夹渣, 由铁质圆柱体制成, 圆柱底面直径为 4 mm、高度为 6 mm; 缺陷 2 是气泡, 气泡由两个公底的薄塑料几何面构成, 一个是圆锥面, 一个是半球面, 公底底面直径为 6 mm, 圆锥高为 4 mm; 缺陷 3 由薄塑料半椭球面制成, 椭球长轴为 20 mm, 中轴为 16 mm, 短轴为 8 mm, 用于构建脱粘缺陷的半椭球面是由椭球面的长轴和中轴构成的平面平分得到的, 椭球面贴于钢圈内壁.

钢圈平分面截面上各个缺陷在钢圈中的位置如图 4 所示.

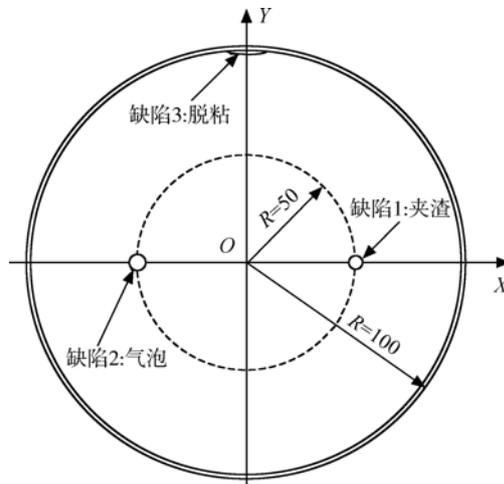


图 4 缺陷位置示意图(单位:mm)

Fig. 4 Sketch map of defect position (unit:mm)

制作夹渣时使夹渣中心位于该截面,且使夹渣轴线与钢圈轴线平行.以钢圈中心为坐标原点 $O$ ,以 $O$ 指向夹渣中心的方向为 $X$ 轴,以垂直于 $X$ 轴向上方向为 $Y$ 轴,以垂直于纸面向外方向为 $Z$ 轴建立坐标系.夹渣中心与 $O$ 距离为 $50\text{mm}$ ;气泡公底底面位于 $XOY$ 平面,底面中心在 $X$ 轴负半轴上,与 $O$ 距离为 $50\text{mm}$ ,圆锥锥尖指向为 $Z$ 轴正方向;夹渣长轴平行于 $X$ 轴,短轴平行 $Y$ 轴,且关于 $XOY$ 平面对称.

### 2.1.2 实际最大直径矢量特征计算

1) 缺陷1的实际最大直径 $L_1^1$ 及与轴向锐角夹角 $\alpha_1^1$ 为

$$L_1^1 = \sqrt{4^2 + 6^2} = 7.2\text{mm}$$

$$\alpha_1^1 = \arctan \frac{4}{6} = 33.7^\circ \quad (2)$$

2) 缺陷2的实际最大直径 $L_2^1$ 及与轴向锐角夹角 $\alpha_2^1$ 为

$$L_2^1 = 3 + 4 = 7\text{mm}$$

$$\alpha_2^1 = 0^\circ \quad (3)$$

3) 缺陷3的实际最大直径 $L_3^1$ 及与轴向锐角夹角 $\alpha_3^1$ 为

$$L_3^1 = 10 + 10 = 20\text{mm}$$

$$\alpha_3^1 = 90^\circ \quad (4)$$

### 2.1.3 预置缺陷固体火箭发动机检测

检测采用由海军航空工程学院研制的我国具有自主知识产权的固体火箭发动机无损检测系统——HICT-450工业CT系统<sup>[16-18]</sup>.经检测并实施缺陷提取和三维重构后的结果如图5所示.

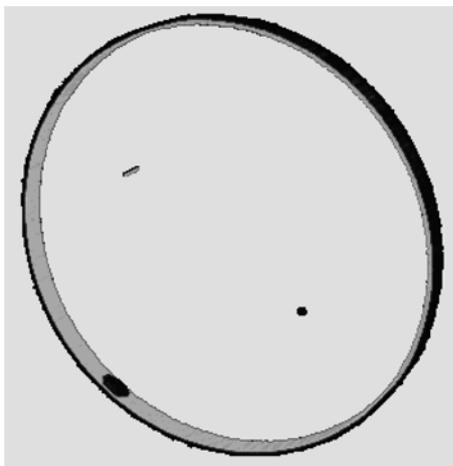


图5 固体火箭发动机缺陷及壳体体绘制  
Fig.5 Volume rendering of defects and shell of solid rocket motor

## 2.2 最大直径矢量特征测量及结果分析

### 2.2.1 最大直径矢量特征测量

利用第1.3节中所述的基于分类种子点法的最大直径矢量特征测量方法分别对第2.1.3节中三维重构的缺陷1、缺陷2和缺陷3进行测量.

1) 缺陷1的测量最大直径 $L_1^c$ 及与轴向锐角夹角 $\alpha_1^c$

缺陷1的测量最大直径端点的坐标为 $(51.5, -1.5, -3)$ 和 $(49.5, 1.5, 3.5)$ ,则

$$L_1^c = 7.4\text{mm}$$

$$\alpha_1^c = 29^\circ \quad (5)$$

2) 缺陷2的测量最大直径 $L_2^c$ 及与轴向锐角夹角 $\alpha_2^c$

缺陷2的测量最大直径端点的坐标为 $(-50, -0.5, -3)$ 和 $(-49.5, 0, 4.5)$ ,则

$$L_2^c = 7.6\text{mm}$$

$$\alpha_2^c = 8.5^\circ \quad (6)$$

3) 缺陷3的测量最大直径 $L_3^c$ 及与轴向锐角夹角 $\alpha_3^c$

缺陷3的测量最大直径端点的坐标为 $(-10, 97.5, 0.5)$ 和 $(10.5, 98, 0)$ ,则

$$L_3^c = 20.5\text{mm}$$

$$\alpha_3^c = 88.6^\circ \quad (7)$$

### 2.2.2 实验结果分析

#### 1) 最大直径测量精度

在超威公司 Athlon IIP340 双核处理器、1.74G 内存和 Matlab 软件环境对缺陷数据进行分析.

3种方法得到的测量最大直径 $L^c$ 和实际最大直径 $L^1$ 的对比如表1~表3所示.以测量最大直径与实际最大直径之差的绝对值和实际最大直径的百分比表示最大直径的测量精度.

表1 擂台法测量最大直径和实际最大直径对比

Table 1 Comparison of measuring maximum diameter and actual maximum diameter of challenge method

缺陷编号	$L^1 / \text{mm}$	$L^c / \text{mm}$	$ L^1 - L^c  / \text{mm}$	$\frac{ L^1 - L^c }{L^1} / \%$	时间 / s
1	7.2	7.4	0.2	2.8	224.6
2	7.0	7.6	0.6	8.6	212.3
3	20.0	20.5	0.5	2.5	632.6

表2 常规种子点法测量最大直径和实际最大直径对比

Table 2 Comparison of measuring maximum diameter and actual maximum diameter of conventional seed point method

缺陷编号	$L^l$ / mm	$L^c$ / mm	$ L^l - L^c $ / mm	$\frac{ L^l - L^c }{L^l}$ / %	时间/ s
1	7.2	6.2	1.0	13.8	1.5
2	7.0	5.8	1.2	17.1	1.5
3	20.0	15.4	4.6	23.0	6.2

表3 分类种子点法测量最大直径和实际最大直径对比

Table 3 Comparison of measuring maximum diameter and actual maximum diameter of classified seed point method

缺陷编号	$L^l$ / mm	$L^c$ / mm	$ L^l - L^c $ / mm	$\frac{ L^l - L^c }{L^l}$ / %	时间/ s
1	7.2	7.4	0.2	2.8	5.1
2	7.0	7.6	0.6	8.6	4.6
3	20.0	20.5	0.5	2.5	12.3

由表1~表3可以看出插台法所得数据与本文所提方法一致,但速度较慢.基于常规种子点法的最大直径测量方法速度较快但测量精度较低.

基于分类种子点法的最大直径矢量特征测量方法结合两者特点,能够加快插台法的速度,获得较为精确地结果.当数据量较大时,基于分类种子点法的最大直径矢量特征测量方法的优势更加明显.

## 2) 最大直径与轴向锐角夹角测量精度

测量最大直径与轴向锐角夹角(简称测量夹角) $\alpha^l$ 和实际最大直径与轴向锐角夹角(简称实际夹角) $\alpha^c$ 的对比如表4所示.以测量夹角与实际夹角之差的绝对值与 $90^\circ$ (锐角的上限)的百分比表示最大直径与轴向锐角夹角的测量精度.

表4 测量夹角和实际夹角对比

Table 4 Comparison of measuring angle and actual angle

缺陷编号	$\alpha^l$ ( $^\circ$ )	$\alpha^c$ ( $^\circ$ )	$ \alpha^c - \alpha^l $ / ( $^\circ$ )	$\frac{ \alpha^c - \alpha^l }{90^\circ}$ / %
1	33.7	29.0	4.7	5.2
2	0	8.5	8.5	9.4
3	90.0	88.6	1.4	1.6

从表4中可以看出,测量夹角与实际夹角之差的绝对值与 $90^\circ$ 的比值都小于10%,具有较高精度.

## 3 结论

在固体火箭发动机内部缺陷分类提取和三维重构的基础上,结合缺陷体空间数据场的特征,通过对传统插台法求解空间最大距离方法的改进,提出了基于分类种子点法的体空间缺陷最大直径矢量特征测量方法.经实验验证,该方法能够提高测量的准确性和缩短计算时间,并且该方法的相关技术原理还可以向医学和其他工业产品体空间几何特征参数测量方面推广.

## 参考文献:

- [1] 邢耀国,董可海,沈伟,等. 固体火箭发动机使用工程[M]. 北京:国防工业出版社,2010:129-130.
- [2] 朱敏,卢洪义,李海燕. 固体火箭发动机三维可视化无损检测系统设计[J]. 兵工学报,2008,29(7):891-896.  
ZHU Min, LU Hongyi, LI Haiyan. The design of solid missile motor 3D visualization nondestructive inspection system[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(7): 891-896. (in Chinese)
- [3] 朱敏,卢洪义,李海燕. 固体发动机虚拟剖切故障诊断技术研究[J]. 固体火箭技术,2010,33(4):232-236.  
ZHU Min, LU Hongyi, LI Haiyan. Research on virtual cutting fault diagnosis technology of solid rocket motors [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2010, 33(4): 232-236. (in Chinese)
- [4] Mueller K, Crawfis R. Eliminating propping artifacts in sheet buffer-based splatting[C]// Proceedings of Visualization Conference. [S. l.]:IEEE,1998:239-245.
- [5] Schulze J P, Kraus M, Lang U. Integrating pre-integration into the shear-warp algorithm[R]. Tokyo: Third International Workshop on Volume Graphics, 2003.
- [6] 朱敏,卢洪义,肖志斌,等. 固体发动机CT图像的一种自动分割方法[J]. 固体火箭技术,2008,31(2):201-204.  
ZHU Min, LU Hongyi, XIAO Zhibin, et al. A kind of automatic segmentation method for solid motor CT image[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2008, 31(2): 201-204. (in Chinese)
- [7] 朱敏,卢洪义,丛培胜,等. 固体发动机CT检测中的一种缺陷识别方法[J]. 航空动力学报,2009,24(1):230-234.  
ZHU Min, LU Hongyi, CONG Peisheng, et al. A method of defect recognition in solid motor CT testing[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(1): 230-234. (in Chinese)
- [8] 蒋祖信. 自由曲面的三维测量与反求工程[J]. 机电一体化,2003(4):15-18.  
JIANG Zuxin. Three coordinate measuring and reverse engineering technology of freedom surface[J]. Mechatronics, 2003(4): 15-18. (in Chinese)

- [9] 刘莉,姜志国,谢凤英,等. 光学体视显微图像立体测量系统研究与开发[J]. 中国体视学与图像分析, 2003, 12(4): 220-224.  
LIU Li, JIANG Zhiguo, XIE Fengying, et al. Research and development of stereoscopic system based on stereo light microscope image[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2003, 12(4): 220-224. (in Chinese)
- [10] Joaquim S, Jordi P, Joan B. Pattern codification strategies in structured light systems[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(4): 827-849.
- [11] Hara T, Yamamoto A, ZHOU Xiangrong, et al. Automated volume measurements of pulmonary emphysema on 3-D chest CT images[J]. International Congress Series, 2003, 1256: 1043-1048.
- [12] 朱敏,于光辉,卢洪义. 固体火箭发动机体空间缺陷精确定位方法[J]. 航空动力学报, 2013, 28(10): 2364-2369.  
ZHU Min, YU Guanghui, LU Hongyi, et al. Defect accurate positioning method of solid rocket motor in volume space[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(10): 2364-2369. (in Chinese)
- [13] 马志强,孙世宇,王春平,等. 基于迭代阈值的弹目图像边缘检测方法研究[J]. 信息技术, 2011(1): 26-28, 51.  
MA Zhiqiang, SUN Shiyu, WANG Chunping, et al. Research on projectile and target's image edge detection method based on the iterative threshold[J]. Information Technology, 2011(1): 26-28, 51. (in Chinese)
- [14] 刘俊,吴谨. 一种基于梯度的直方图阈值图像分割改进方法[J]. 计算机与数字工程, 2010, 38(4): 131-133.  
LIU Jun, WU Jin. A histogram threshold value image segmentation improvement method based on gradient[J]. Computer and Digital Engineering, 2010, 38(4): 131-133. (in Chinese)
- [15] 李燕. 交互式空间物体三维测量方法的研究与实现[D]. 西安: 西北大学, 2005.  
LI Yan. Research on the method of interactive 3-D object measurements and its realization [D]. Xi'an: Northwest University, 2005.
- [16] 朱敏,卢洪义,李海燕. 基于 VTK 的固体发动机三维重建与可视化[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(4): 136-140.  
ZHU Min, LU Hongyi, LI Haiyan. 3D reconstruction and visualization of solid motor based on VTK[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(4): 136-140. (in Chinese)
- [17] 杨兴根,侯本学,张存厚. 固体火箭发动机无损检测自动化系统设计思想[J]. 飞航导弹, 2001, 31(10): 41-43.
- [18] 杨兴根,陈宇杰. 固体火箭发动机专用 ICT 机械扫描系统[J]. 推进技术, 1999, 20(6): 106-108.  
YANG Xinggen, CHEN Yujie. ICT scan system for solid rocket motors [J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, 20(6): 106-108. (in Chinese)