

# 固体火箭发动机高能 X 射线探伤 胶片影像三维重建

赵文才, 信 东, 赵洪海, 范仕刚, 朱晓光

(第二炮兵士官学校二系, 青州 262500)

**摘 要:** 固体火箭发动机是导弹武器系统的主要动力装置, 需要定期进行无损检测。常规的检测方法是利用 X 射线照相得到的二维胶片进行评判, 然而利用二维图像来反映三维空间结构, 在直观显示上存在很大的缺陷性。介绍了利用二维胶片图像还原发动机的空间三维结构的基本重建原理和六大体系结构, 即数字图像的获取、各项参数的标定、图像的预处理和特征提取、图像的立体匹配以及图像信息三维重建。

**关键词:** X 射线照相; 二维胶片; 三维重建

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)06-0460-03

## 3-D Reconstruction of High Energy X-Ray Film Images of the SRM

ZHAO Wen-Cai, XIN Dong, ZHAO Hong-Hai, FAN Shi-Gang, ZHU Xiao-Guang

(The Second Artillery Sergeant School, Qingzhou 262500, China)

**Abstract:** The SRM is needed to be tested, which is the mostly power equipment of the missile weapon system. Judging 2-D X-ray films of the SRM is the traditional method. It has many limitations on intuitive showing just using two dimension films because the SRM is 3-D object. 3-D reconstruction theory of the SRM by the two film images is studied in this paper. There have six parts: obtaining of digital images, demarcating of different parameter, pre-processing and feature extraction of digital images, feature matching, 3-D reconstruction of image's information.

**Keywords:** Radiographic testing; 2-D film images; 3-D reconstruction

随着军事技术的高速发展, 固体火箭发动机因其结构简单、机动性好、可靠性高、易于维护和作战反应快等优良特性, 广泛应用于现代战争和航天事业。在整个导弹系统中, 固体火箭发动机是主要的动力装置, 占有十分重要的地位。但是发动机在制作、贮存、运输和勤务处理期间要承受各种载荷的作用, 同时受温湿度等贮存条件的影响, 其推进剂、衬层及绝热层等将发生物理和化学性质的变化。这些作用破坏了发动机结构的完整性, 在内部容易产生气孔、裂纹和界面脱粘等缺陷, 直接影响发动机工作的可靠性, 因此必须对其进行定期的缺陷检查。目前, 高能 X 射线照相检测法是进行发动机探伤最有

效的无损检测手段之一, 可用于发动机各界面脱粘及药柱内部缺陷的检查。但是通过该方法得到的检测胶片局限在二维的投影图像上, 而发动机本身是空间三维体, 利用二维平面的投影图像来反映三维体的情况, 在直观显示上存在着局限性。因此利用现代技术将二维图像还原为发动机三维结构对于提高缺陷识别和判读的效率具有十分重要的意义。

### 1 三维重建技术原理

从固体火箭发动机二维 X 射线检测图像中获取发动机的空间三维信息属于计算机立体视觉和可视化的研究内容, 对于单幅检测图像而言难以从中获得发动机的三维信息。因此必须对同一位置进行两次甚至多次不同角度的检测, 从而获得多幅不同角度的检测图像, 然后充分利用不同方向 X 射线投影间的几何关系, 运用立体视觉算法即可重建发动

收稿日期: 2009-08-18

作者简介: 赵文才(1982—), 男, 硕士, 助教, 主要从事无损检测技术和发动机教学研究。

机的空间三维结构。

利用 X 射线胶片作为数据源来获取空间的三维数据点的理论如下: X 射线胶片上的一点代表三维空间中沿一条直线的所有点, 这条直线就是在曝光时连接 X 射线源和 X 射线胶片平面的相关位置的直线, 因此发动机缺陷特征点的空间位置可以通过两张相互联系的二维 X 射线胶片计算求得。理论上两条直线的交点就是该点在空间的实际位置, 但实际进行检测拍片中可能存在各方面的误差, 导致两条直线不能完全相交, 此时可以取两条直线的异面共垂线的中点作为该点的空间坐标。如图 1 所示, 正位片 I 和侧位片 II 互成  $90^\circ$ ,  $S_1$  和  $S_2$  分别代表两个高能 X 射线源, 或是同一个射线源的两个不同位置,  $AB$  代表三维空间中发动机上面某一缺陷, 在两张胶片上面的  $A'B'$  和  $A''B''$  分别代表物体  $AB$  在 X 射线的照射下投影到两张胶片的图像。通过原理图可以发现: 只要两张胶片 and 两个射线源的位置确定, 即在确定三维空间中的坐标值后, 物体  $AB$  在空间的位置就可以通过相应几何算法计算得到。通常固体火箭发动机的体积巨大, 因此在检测时需要使用切线照相法(图 2)。这样在发动机同一位置上检测得到的两张胶片就不垂直, 在进行重构的时候需要考虑角度的变化。

其具体步骤是: 定点(确定好 X 射线源和胶片的位置)、定基准点(确定好空间坐标轴)、校正(校正

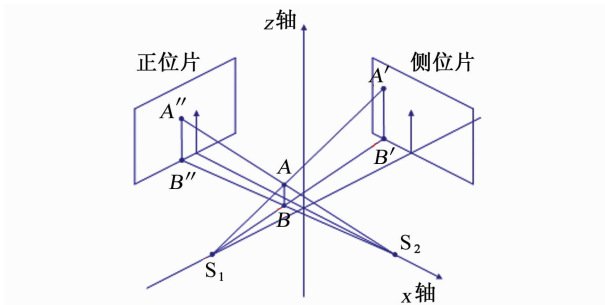


图 1 发动机 X 射线检测图像三维重建原理图

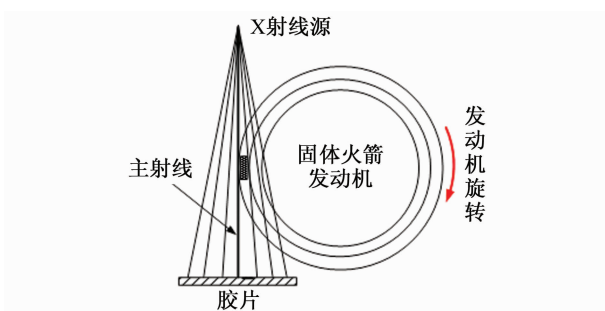


图 2 固体火箭发动机切线照相示意图

射线源的焦距和两张胶片的夹角)、计算点的三维坐标(利用相应的几何算法求解出投影点的空间坐标位置)。

## 2 三维重建系统体系结构

完整三维重建系统可分为以下几个部分(图 3): 包括数字图像的获取、高能 X 射线源和投影胶片的定位与校准、X 射线检测图像的预处理和特征提取、正侧位胶片图像的立体匹配以及被检测物体三维信息的恢复。

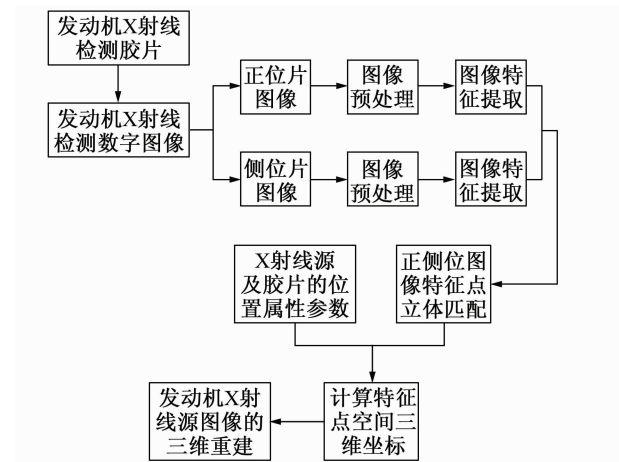


图 3 固体火箭发动机三维重建系统体系结构

### 2.1 X 射线检测数字图像获取

X 射线成像检测方式有两种: 一种是以胶片形式存储的离线检测, 另一种是非胶片实时在线数字成像检测。目前固体火箭发动机内部结构检测大都使用第一种方式, 所以一枚发动机在服役期间会拍摄大量的 X 射线检测胶片。因此发动机 X 射线胶片影像的数字化和采集是本系统的基础和前提。原始的影像数据都是通过图像采集部件采集量化模拟数据, 并将转换后的数字图像保存到计算机内。常用图像采集设备有摄像机加图像采集卡、图像扫描仪和数码相机等。

胶片数字化过程为: 将经过拍摄冲洗好的检测胶片放在图像采集设备中, X 射线胶片图像经过信号转换器转换成数字化图像信息, 传输到计算机进行保存, 为后面进行图像处理做好准备。

### 2.2 X 射线源和投影胶片的定位与校准

该模块用来确定 X 射线源及胶片的位置、属性参数和建立成像模型, 以便确定空间坐标系中发动机上一点同它在图像平面上像点之间的对应关系。三维重建的基本任务之一是从探伤胶片获取的数字

图像信息出发计算固体火箭发动机的三维空间信息,并由此重建和识别物体,而发动机上面某点的三维空间位置与图像中对应点之间的相互关系是由 X 射线探伤机检测成像的几何模型决定的,这些几何模型参数就是探伤机参数。在实际进行发动机检测时,射线源和胶片位置都是固定好的,然后将发动机放置在射线源和胶片之间。当检测好一个位置后将发动机进行轴向旋转或前后移动,进行下一个位置的检测,因此各项参数可以在检测之前测量得到。

### 2.3 X 射线检测图像预处理和特征提取

通过固体火箭发动机 X 射线检测胶片获取的数字图像有噪声大、对比度较低和缺陷信息模糊等缺点,无法准确地提取所需图像信息的特征,需要进行处理,突出有用信息,抑制无用信息,改善图像的视觉效果,提高图像清晰度,便于计算机的处理和提取图像特征点。图像的预处理有:图像的基本处理、降噪处理、增强处理和分割处理等。

X 射线检测图像特征点的提取和表达是下一步图像进行立体匹配的重要基础。对于三维重建系统来说,特征点的选择和描述是非常有必要的,较高的可分辨的特征点可减少进行立体匹配时需要检测点对的个数,从而提高进行匹配的效率和可靠性<sup>[1]</sup>。在三维重建中,最常用的特征包括结构特征、几何特征、统计特征和运动特征等。传统的特征提取方法有主分量分析、奇异值分解、投影追踪和自组织映射等<sup>[2,3]</sup>。

一般来讲,大尺度特征含有较丰富的图像信息,在图像中的数目较少,易于得到快速的匹配,但它们的定位精度差,特征提取与描述困难。而小尺度特征数目较多,其所含信息较少,因而在匹配时需要较强的约束准则和匹配策略,以克服歧义匹配和提高运算效率。良好的匹配特征应具有可区分性、不变性、稳定性、唯一性以及有效解决歧义匹配的能力。

### 2.4 X 射线检测数字图像的立体匹配

图像立体匹配是指在发动机 X 射线探伤图像的正位片和侧位片的两幅图像间寻找相互之间特征点的对应关系,即给定图像中的一个特征点,运用相应的匹配算法寻找另一幅图像中相对应的点,使得两个点为发动机上一点在两张胶片上的投影,用来恢复射线检测图像的深度信息,并可进一步求得胶片上这些特征点的空间坐标,进而计算得到发动机三维信息。进行两张发动机 X 射线检测胶片的匹配有步骤:

(1) 从正位片中选择与发动机内部结构相对应

的图像特征点。

(2) 利用匹配算法在另一幅图像中确定出发动机同一位置的对应图像特征。

(3) 确定两个特征点之间的相对位置,得到两幅图像之间的对应关系。

对固体火箭发动机进行 X 射线检测的过程中,存在各种因素:人为因素、设备误差、设备测量精度、胶片存储过程的磨损和腐蚀等。这些因素最后被综合成扫描所得到的单一图像灰度值。因此,要准确地对包含许多不利因素的图像进行完美匹配,是十分困难的。

通过相关文献的介绍可以发现:对于所选择的进行图像立体匹配方法的有效性主要依赖于三个问题的解决:选择正确的匹配特性、寻找特征间的本质属性及建立能正确匹配所选特征点的稳定算法。常用的图像匹配的方法主要有以下几种<sup>[4]</sup>:基于区域灰度的图像匹配方法、基于变换域的图像配准方法和基于特征的图像配准方法。

但是立体匹配涉及的问题太多,特别是在复杂场景中,如何提高算法的匹配效果和抗干扰能力,降低实现的复杂程度和计算量,都需要进行更深入的探索和研究。

### 2.5 X 射线检测图像的三维重建

发动机检测图像进行匹配之后可得到两幅检测图像相互匹配的特征点。利用这些匹配点便可通过立体视觉的算法获得空间点的三维坐标,进而恢复发动机空间几何模型。不同的检测图像有相应的三维重建算法。固体火箭发动机的体积较大,在进行射线检测时,考虑到射线源的强度和辐射范围,只能采用切线照相的方法。这样得到的发动机的数字图像会存在不同的夹角,因此进行三维重建之前需要进行空间坐标变换,将不同方向检测到的图像转换到空间同一个坐标系。只有各幅图像转换到同一个坐标系之后才可运用相应的三维重建算法来计算特征点的空间位置,进而得到所需信息的三维形状。文献[5]讲述了清华大学林勇博士在获取明胶空腔投影图像的基础上,对弹创空腔截面进行椭圆近似,建立弹创空腔的非均匀 B 样条曲面模型,提取非均匀 B 样条曲面控制节点,然后采用 OpenGL 虚拟现实技术实现了明胶弹创空腔三维重建。

## 3 结论

主要讲述了对固体火箭发动机 X 射线检测胶

(下转第 474 页)



- pounds, 2001, 314(1/2): 232—239.
- [8] Maker J M, Tanner B K. The effect of stresses approaching and exceeding the yield point on the magnetic properties of high strength pearlitic steels [J]. NDT&E International, 1998, 31(2): 117—127.
- [9] 尹大伟, 徐滨士, 董世运, 等. 不同检测环境下磁记忆信号变化研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(3): 319—323.
- [10] 陈铁群, 谢宝忠. 超声波·涡流和金属磁记忆复合检测系统: 中国, 专利号 200410051388. 4[P], 2005—03—02.
- [11] 王欢. 金属磁记忆检测方法及其试验研究[D]. 北京: 中国学术期刊. CDMD: 2. 2006. 038701: 19—22.
- [12] 任吉林, 乌冠华, 宋凯, 等. 金属磁记忆检测机理的探讨[J]. 无损检测, 2001, 24(1): 2—4.
- [13] 仲维畅. 铁磁性物体在地磁场中的自发运动磁化[J]. 无损检测, 2004, 27(1): 36—39.
- [14] 仲维畅. 金属磁记忆诊断法的理论基础—铁磁材料的弹·塑性应变磁化[J]. 无损检测, 2001, 23(7): 424—426.
- [15] 林俊明, 戴永红, 张印本. 磁记忆检测法诊断不同焊接条件的钢板焊接之试验研究[C]//第八届全国无损检测大会论文集. 苏州: 中国机械工程学会, 中国电机工程学会, 2003.
- [16] 周俊华, 周俊华, 雷银熙. 铁磁性材料磁记忆现象的理论分析[C]//第八届全国无损检测大会论文集. 苏州: 中国机械工程学会, 中国电机工程学会, 2003.
- [17] 温伟刚, 萨殊利. 金属磁记忆检测的机理及实现[J]. 北方交通大学学报, 2002, 26(4): 67—70.
- [18] 丁辉, 张寒, 李晓红, 等. 磁记忆检测裂纹类缺陷的理论模型[J]. 无损检测, 2002, 24(2): 78—80.
- [19] 陈香军, 马祥华, 苏兰海, 等. 铁磁构件疲劳损伤的磁记忆效应[J]. 理化检验(物理分册), 2008, 44(10): 2.
- [20] 王晓凤, 李路明. 对接钢管环焊缝残余应力的检测试验研究[C]//全国首届金属磁记忆检测技术研讨会文集. 上海: [s. n.], 2001.
- [21] Tanasienko A G, Suntosov S I, Dubov A A. Monitoring chemical plant by a metal magnetic memory method[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2002, 38(9/10): 624.
- [22] 李路明, 王晓凤, 黄松岭. 磁记忆现象和地磁场的关系[J]. 无损检测, 2003, 25(8): 387—389.
- [23] 张英, 宋凯, 任吉林, 等. ANSYS 软件在金属磁记忆检测中的应用[J]. 无损检测, 2004, 26(5): 217—220.
- [24] 宋凯, 任吉林, 任尚坤, 等. 基于磁畴聚合模型的磁记忆效应机理研究[J]. 无损检测, 2007, 29(6): 103.
- [25] 董丽虹, 徐滨士, 朱子新, 等. 铁磁材料磁记忆检测技术的研究现状[J]. 机械加工工艺与装备, 2005(9): 10.
- [26] 杨其明, 李国直, 王大生, 等. 铁路专用金属磁记忆检测仪的研制及初步应用[M]. 北京: 人民铁道出版社, 2004.
- [27] 李路明, 胡斌, 黄松岭, 等. 掌上型金属磁记忆检测仪[J]. 无损检测, 2004, 26(5): 249—252.
- [28] Lin Junming, Lin Fabing, Lin Chunjing. Nondestructive testing new technology of 21 century magnetic memory metal diagnostic technique[M]. Beijing: [s. n.], 2000.
- [29] 简虎. 磁记忆检测技术机理及其应用的研究[D]. 北京: 中国学术期刊. CDMD: 2. 2008. 022258: 65—67, 69—72.
- [30] 梁志芳, 李午申, 王迎娜, 等. 金属磁记忆信号的零点特征[J]. 天津大学学报, 2006, 39(7): 18.
- [31] 王丹, 董世运, 徐滨士, 等. 应力集中部位的金属磁记忆检测研究[J]. 失效分析与预防, 2007, 2(2): 5.

(上接第 462 页)

片进行三维重建的必要性和意义, 详细说明了三维重建基本原理和系统的主要组成。通过胶片和相应计算机立体视觉算法, 可以重建出发动机的立体结构, 以对发动机本身的缺陷进行仔细的分析, 不仅可以直观显示发动机内部缺陷的基本形状, 而且还可以对缺陷进行定量计算, 得到缺陷的体积大小。从而更加准确地分析固体火箭发动机的可靠性, 为其全寿命管理及延寿工程提供更加科学的依据。

#### 参考文献:

- [1] 唐好选, 全建国, 苏小红. 基于图像的规则模型形状的

三维重建方法[J]. 计算机科学, 2006, 33(8): 130—131.

- [2] 边肇祺. 模式识别[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [3] Andrew R Webb. Statistical Pattern Recognition[M]. Malvern UK: Andrew R Webb, QinetiQ Ltd, 2002.
- [4] 张浩. 多信息融合图像边缘特征提取及图像配准研究与应用[D]. 浙江: 浙江大学, 2008.
- [5] 林勇, 王经瑾, 宋征, 等. 明胶弹创空腔闪光 X 射线投影图像三维重建[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(12): 1576—1578.