

静力试验空间变形分析方法

邓长华, 王 珺, 吴 丹, 袁军社

(液体火箭发动机技术重点实验室, 陕西 西安 710100)

摘 要:液体火箭发动机机架在静力试验中, 通常在关键位置布置多个位移传感器来测量机架在静力试验过程中的位移值, 对所测的位移数据进行分析以确定机架是否满足刚度设计要求。由于位移传感器较多, 无法直观、快速查找到可能存在的异常测点, 同时由于无法可视化使得分析机架整体变形存在一定的困难, 因此提出了一种静力试验结构变形的三维可视化分析方法。该方法利用结构的几何位置及测点位移信息, 通过空间坐标重构连续再现结构在加载过程中的三维变形过程, 形成三维变形动画, 并基于 Matlab 软件平台开发了空间变形分析软件, 可直观分析结构整体变形、快速查找位移测量异常点, 同时软件分析结果可保存为文档文件和视频文件。该方法对于直观分析机架的整体变形过程, 快速判断测点位移数据是否异常具有重要的工程实用价值。

关键词:机架; 变形分析; 静力试验; 坐标重构; 可视化

中图分类号:V216 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2020)01-0096-06

Space deformation analysis method for static test

DENG Changhua, WANG Jun, WU Dan, YUAN Junshe

(Science and Technology on Liquid Rocket Engines Laboratory, Xi'an 710100, China)

Abstract: In the static test of the frame of liquid rocket engine, lots of displacement sensors are usually arranged at the key positions to measure the displacement of the frame. The displacement data measured are analyzed to determine whether the frame meets the stiffness design requirements. Because of the large number of displacement sensors, it is difficult to find possible abnormal points intuitively and quickly. At the same time, it is difficult to analyze the overall deformation of the frame because of lack of visualization. So a three-dimensional visual deformation analysis technique for static test was proposed. The continuous three-dimensional deformation of the structure in the loading process was reconstructed using the geometric positions of the structure and the displacements of the measuring points. The three-dimensional deformation animation of the structure was obtained. Based on the software platform of matlab, the software of spatial deformation analysis was developed, which is intuitively to analyze the overall deformation of the structure and find the abnormal points. The results of analysis can also be saved as document files and video files. Results show that the developed technique is helpful to judge whether the displacement data of the measuring points are abnormal, and is valuable for intuitively analyzing the overall deformation process of the frame in static test.

Keywords: frame; deformation analysis; static test; coordinate reconstructing; visualization

收稿日期:2018-11-21;修回日期:2019-06-20

基金项目:国家基础加强计划技术项目(2019-JCJQ-JJ-480)

作者简介:邓长华(1978—),男,博士,研究员,研究领域为液体火箭发动机力学环境试验技术

0 引言

液体火箭发动机机架^[1-3]是连接发动机与箭体的关键传力结构,是典型的承载结构件,机架的强度、刚度在通过强度设计、计算后,必须经过静力试验^[4-5]来考核和验证,或者批产后,通过静力试验来检验材料、生产过程和工艺方法是否满足设计要求,产品是否满足投入使用的条件。在机架静力试验中,通常在结构关键位置布置位移传感器来测量加载过程中机架的变形,变形过大则机架的刚度可能不满足要求。试验时同时还需要在夹具多个部位布置位移传感器,以监测夹具变形,一方面预防因夹具安装不牢或是刚度不够导致试验失败,另一方面为获取机架本身净位移做准备。当对试验所测的位移数据进行分析时,一般通过逐点查看数据,并在测点图中查找相应测点的位置,以判断试验数据是否正常,试验过程是否正常^[6-8]。由于试验中位移传感器较多,无法直观、快速查找到可能存在的异常测点^[9],同时由于无法可视化使得分析机架整体变形存在一定的困难。

为了直观地分析机架在静力试验中的整体变形过程,以快速确定试验数据及试验过程是否有效,本文提出一种静力试验结构空间变形分析方法,利用结构的几何位置及测点的位移信息,通过空间坐标重构^[10-12]连续再现结构在加载过程中的三维变形过程,形成三维变形动画,为了推广和使用该方法,基于 Matlab 软件平台开发了机架静力试验空间变形分析软件。

1 空间变形分析原理

机架在静力试验中通常在关键位置布置多个位移测点,以测量加载过程中关键点的位移,布置位移传感器的测点可视作一个节点,定义节点在直角坐标系下的几何坐标为 X_0, Y_0, Z_0 ,某一加载级 i 下所测的测点位移值分别为 D_{xi}, D_{yi}, D_{zi} ,则在该加载级下节点的位移坐标 X_i, Y_i, Z_i 可以根据下式进行重构

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} D_{xi} \\ D_{yi} \\ D_{zi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 k 为变形缩放因子,用于对实际位移值进行缩放,以便于观察变形。当 $k = 1$ 时, X_i, Y_i, Z_i 为当前加载级下结构的实际位移坐标。为便于观测, k 值通常大于 1,此时 X_i, Y_i, Z_i 定义为当前加载级下结构的观测位移坐标。根据节点观测位移坐标值重新绘制几何图形,可以获得当前加载级下的结构变形图。

静力试验中,有时采用柱坐标进行测点布局,这时需要对测点进行坐标变换,将柱坐标系下的节点坐标变换到直角坐标系下,变换算法如下

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 \cos \theta_0 \\ R_0 \sin \theta_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 R_0 和 θ_0 分别为柱坐标系下节点半径和角度。相应的需要对所测的位移值进行变换,变换公式如下

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} R_i \cos \theta_0 \\ R_i \sin \theta_0 \\ Z_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 R_i 和 Z_i 分别为加载级 i 下所测的节点径向和轴向位移。

2 软件设计

2.1 界面设计

为便于直观、方便快捷地分析机架在静力试验过程中的空间变形过程,基于空间变形分析原理,开发了静力试验空间变形分析软件。

在进行软件设计时,利用 Matlab 软件平台进行图形界面设计^[13-15]和算法编程,并最终编译成可脱离 Matlab 软件独立运行的可执行程序。静力试验空间变形分析软件包含 3 个界面:主界面、几何建模界面和坐标变换界面,分别如图 1 ~ 图 3 所示,其中几何建模界面和坐标变换界面通过主界面菜单调用。

空间变形分析软件主界面如图 1 所示,主要提供文件输入、输出及结构变形显示等功能。软件由文件输入区、变形图区和工况区组成。根据用户使用习惯,界面左侧设置文件输入区,包含几何文件和工况文件输入,并显示工况文件、节点和几何关系;界面中部为变形图区,设置结构变形绘图窗口,变形绘图窗口提供几何预览以及变形显示功能,变

形图右侧设置图形控制按钮;界面底部为工况区,用户可以直接在该区对加载级进行预览,拖动光标,可以按载荷步同步显示结构变形。

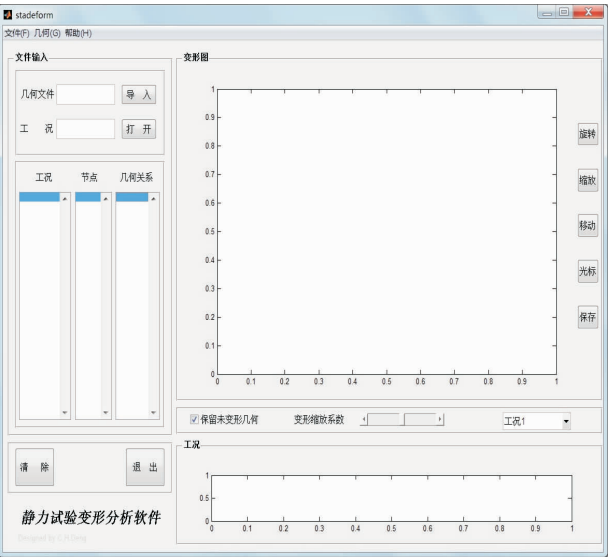


图 1 软件主界面
Fig. 1 Main interface of the software

几何建模界面如图 2 所示。几何模型为线框模型,界面左侧为几何模型显示和图形控制按钮区,界面右侧为几何节点和线段建立、编辑区。

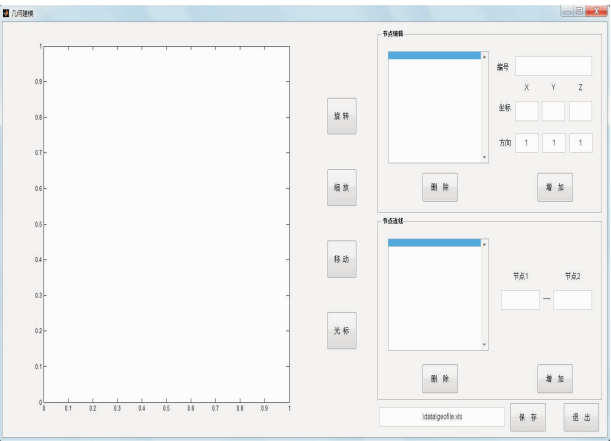


图 2 几何建模界面
Fig. 2 Interface of geometric modeling

坐标变换界面如图 3 所示。该子模块应用于位移传感器按柱坐标系而非直角坐标系布置时的数据转换。界面左侧为几何模型输入和测点显示区;界面中间为柱坐标系下的测点位移数据输入和测点显示区;界面右侧为设置及转换区。

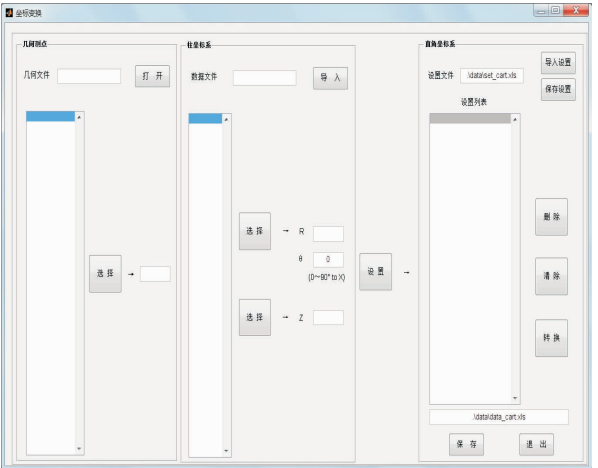


图 3 坐标变换界面
Fig. 3 Interface of coordinate transformation

2.2 功能设计

软件主要包括几何建模、工况构建和结构变形显示等 3 个功能模块。

几何建模提供了两种方法,第一种为采用图 2 所示的交互式界面建立,第二种为直接建立图 4 格式的表格文件。几何建模采用点、线方式来创建结构的试验线框模型。几何模型保存格式为 *.xls 表格文件。

| 测点 | X (mm) | Y (mm) | Z (mm) | 起点 | 终点 | X方向 | Y方向 | Z方向 |
|-----|--------|--------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|
| D1 | 0 | -200 | 0 | D1 | D2 | 1 | 1 | 1 |
| D2 | 141 | -141 | 0 | D3 | D2 | -1 | 1 | 1 |
| D3 | 200 | 0 | 0 | D3 | D4 | -1 | 1 | 1 |
| D4 | 0 | 200 | 0 | D5 | D4 | 1 | -1 | 1 |
| D5 | -141 | 141 | 0 | D5 | D6 | 1 | -1 | 1 |
| D6 | -200 | 0 | 0 | D1 | D6 | 1 | 1 | 1 |
| D7 | 282 | -282 | -400 | D7 | D8 | -1 | 1 | 1 |
| D8 | -282 | 282 | -400 | D9 | D8 | -1 | -1 | 1 |
| D9 | -282 | 282 | -400 | D9 | D10 | 1 | -1 | 1 |
| D10 | -282 | -282 | -400 | D7 | D10 | 1 | 1 | 1 |
| D11 | 1414 | -1414 | -1200 | D11 | D12 | -1 | 1 | 1 |
| D12 | 1414 | 1414 | -1200 | D13 | D12 | -1 | -1 | 1 |
| D13 | -1414 | 1414 | -1200 | D13 | D14 | 1 | -1 | 1 |
| D14 | -1414 | -1414 | -1200 | D11 | D14 | 1 | 1 | 1 |
| | | | | D11 | D7 | | | |
| | | | | D12 | D8 | | | |
| | | | | D13 | D9 | | | |
| | | | | D14 | D10 | | | |
| | | | | D2 | D7 | | | |
| | | | | D5 | D9 | | | |

图 4 几何模型表文件
Fig. 4 Table of geometric model

工况构建提供工况文件的生成功能,该文件为 *.xls 表格文件,包括“Sheet1”和“Sheet2”2 个表格,其中“Sheet1”为加载级,如图 5 所示;“Sheet2”为该工况下测点的位移信号,如图 6 所示。

图5 加载级表格文件

Fig.5 Table of loading levels

图6 位移测量数据表格文件

Fig.6 Table of displacement measurement data

由于结构变形分析在直角坐标系下进行,因此位移信号也必须是直角坐标系下的信号。针对位移传感器在柱坐标系下布置的情况,设计了坐标变换模块(图3),利用该模块可自动将柱坐标系下的位移信号转换到直角坐标系下。在该模块中,每个几何测点对应2个柱坐标系下的测点,其中 R 为径

向位移、 Z 为轴向位移, θ 为径向位移传感器与直角坐标系的 X 轴夹角(取值范围为 $0 \sim 90^\circ$)。针对不同工况,只要位移传感器不变,可以保存某一个工况的设置文件,其他工况可以直接调用该设置文件,以避免重复操作,该设置文件形式如图7所示。

图7 坐标变换设置文件格式

Fig.7 File format settings of coordinate transformation

3 应用示例

某发动机机架静力试验包含3个工况:0度、 $+6^\circ$ 和 -6° 工况,每个工况有3个载荷,加载级为0~12,其中0级和12级为零位。试验设置14个位移测点,按柱坐标系布置28个位移传感器。

在机架变形分析时,首先建立机架几何模型,几何模型由14个节点和20条线段构成;然后分别将3个工况下所测的位移信号转换到直角坐标系下;最后将几何模型和3个工况文件导入到软件中,通过下拉列表选择相应的工况,拖动鼠标可同步显示机架的变形过程,如图8所示。

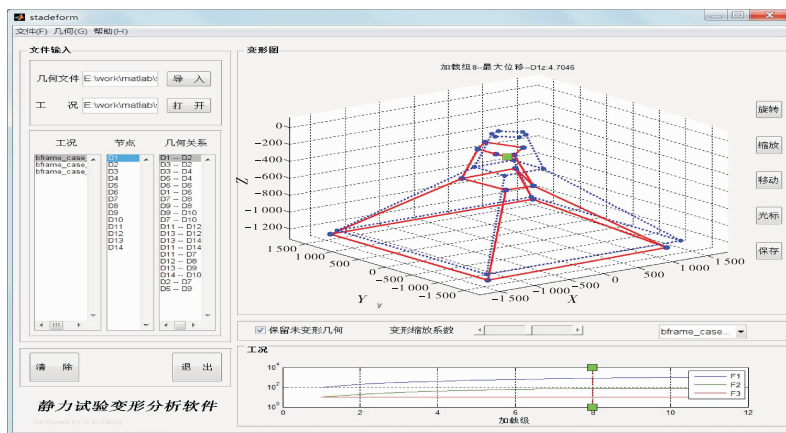


图8 机架变形显示

Fig.8 Deformation display of the frame

将文件保存,其中保存的文件包括3个*.doc格式的文档文件和3个*.avi格式的视频文件,分别对应3个工况。文档文件为3个不同工况下每一加载级下的机架变形静态图,视频文件为3个不同工况下的变形动画。

图9为 -6° 工况下第7加载级时的机架变形静态图,图中除了显示当前加载级下机架整体变形外,同时给出了当前最大位移的测点代号、测点方向及位移值,并且以绿色加亮方块显示当前最大位移的测点位置。

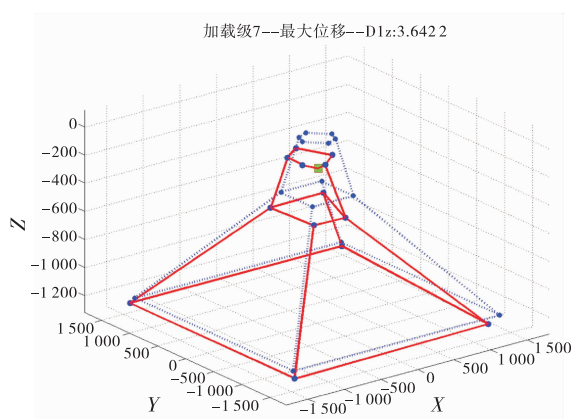


图9 变形显示文档文件示例

Fig. 9 Example of deformation display document

图10为 -6° 工况机架变形过程的动画文件截图,动画文件按加载级顺序动态显示机架的整体三维变形过程,同时显示当前加载级最大位移的测点位置、测点代号、测点方向及位移值。

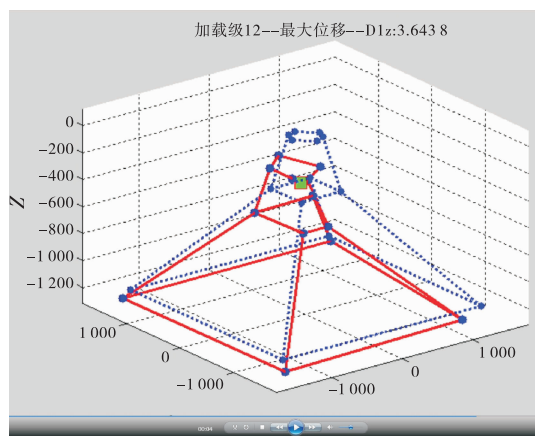


图10 变形显示视频文件示例

Fig. 10 Example of deformation display video

4 结语

针对机架在静力试验中无法直观显示整体变形的情况,提出了静力试验结构空间变形分析方法,从原理、软件设计及应用示例等方面进行了论述。结果表明:静力试验空间变形分析软件以*.xls表格作为输入文件,操作方便,且输出为*.doc文档文件和*.avi视频文件,文档文件可以方便地插入到试验分析报告中,视频文件可以逐级查看结构的三维变形过程,为试验现场直观分析结构整体变形、快速查找位移测量异常点提供了一种快捷方法。

参考文献:

- [1] 穆朋刚,李斌潮,杜大华,等.液体火箭发动机复合材料机架初步设计研究[J].火箭推进,2017,43(3):35-41.
MU P G, LI B C, DU D H, et al. Preliminary design for composite thrust frame of liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017,43(3):35-41.
- [2] 霍世慧,袁军社,徐学军,等.双推力室机架快速优化设计方法研究[J].火箭推进,2015,41(4):55-60.
HUO S H, YUAN J S, XU X J, et al. A rapid optimization design method for frame structure of double thrust chambers[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015,41(4):55-60.
- [3] 李斌潮,邓长华,周云端,等.液体火箭发动机阻尼机架减振特性研究[J].火箭推进,2013,39(2):46-51.
LI B C, DENG C H, ZHOU Y D, et al. Study on vibration attenuation of damping frame for liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013,39(2):46-51.
- [4] 魏生道.结构静力试验技术[M].北京:宇航出版社,1988.
- [5] 夏峰,穆家琛.全机静力试验多轮多支柱起落架支持与加载技术[J].科学技术与工程,2018,18(30):238-244.
- [6] 郝凤琴,贾令涛,黄嘉璜.飞机结构静力试验数据与分析数据一致性评估方法[J].结构强度研究,2015,1:25-31.
- [7] 黄玮,孙秦,冯蕴雯.飞机结构静强度试验数据分析软件的设计[J].民用飞机设计与研究,2003(2):19-22.
- [8] 刘亚龙,王生楠,刘海峰,等.基于MSC/PATRAN的飞机结构强度静力试验数据实时跟踪与处理系统开发[J].航空学报,2007,28(1):84-89.

- [9] 孙百红,周云端.静力试验位移测量异常原因分析及推算方法研究[J].火箭推进,2010,36(5):59-62.
SUN B H, ZHOU Y D. Cause analysis and computative method of displacement measurement abnormality in static test[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2010,36(5):59-62.
- [10] 刘捷.风洞试验模型弹性变形视频测量系统设计与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
- [11] 阮晓东,李世伦,诸葛良,等.用立体视觉测量多自由度机械装置姿态的研究[J].中国机械工程,2000,11(5):571-573.
- [12] 刘兆惠,王超,吕文红,等.基于非线性动力学分析的车辆运行状态参数数据特征辨识[J].吉林大学学报(工学版),2018,48(5):1405-1410.
- [13] 刘铁良,杜冬梅,章郁泱,等.基于Matlab_GUI的双泵喷水推进船舶仿真平台设计[J].实验室研究与探索,2018,37(11):74-76.
- [14] 苏关东,顾勋,张鹏,等.基于Matlab GUI的渗流力学虚拟仿真实验平台开发[J].实验室研究与探索,2018,37(6):129-134.
- [15] 王锴.基于MATLAB与VeriStand的自适应振动主动控制仿真及LabVIEW界面设计[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.
- (上接第88页)
- CHENG F, ZHANG B. Design for reliability improvement of high-pressure pneumatic solenoid valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017, 43(1):50-54.
- [10] 潘英朋,高汉平,刘刚.磁性双位自锁电磁阀磁路设计与分析[J].液压气动与密封,2010,30(1):29-34.
- [11] 任志彬,王宗伟,常志鹏,等.电磁阀用自锁电磁铁吸力与电压关系研究[J].推进技术,2016,37(7):1372-1379.
- [12] 汪兴明,张剑秋,王强.井下双位自锁式电磁铁参数优化及性能分析[J].磁性材料及器件,2017,48(3):26-31.
- [13] 王宗伟,任志彬,常志鹏,等.基于ANSYS和AMESim的螺管电磁铁吸力仿真研究[J].导弹与航天运载技术,2017(6):93-97.
- [14] 庞末红,杨伦奎,陈成峰.基于Maxwell方程的电磁阀特性仿真研究[J].导弹与航天运载技术,2015(6):78-83.
- [15] 蔡伟,张硕,戴民强,等.基于AMESim的电磁阀仿真与试验验证[J].科学技术与工程,2016,16(28):80-84.
- [16] 左全璋,胡双,左才科.双稳态永磁操动机构结构设计和性能计算(I)[J].华通技术,2002(2):13-17.
- [17] 王新亮,张洪信,赵清海,等.长行程直流电磁铁电磁力仿真分析与实验研究[J].青岛大学学报(工程技术版),2018,33(2):75-79.
- [18] 张伦威,许益民.比例电磁铁的有限元磁力分析[J].机床与液压,2013,41(17):169-170.
- [19] 付文智,李明哲,邓玉山.直流电磁铁磁场和牵引力的数值模拟[J].农业机械学报,2005,36(2):100-103.
- [20] 梅亮,刘景林,付朝阳.电磁铁吸力计算及仿真分析研究[J].微电机,2012,45(6):6-9.
- [21] 王晓罡,陈文曲,唐妹芳,等.比例电磁阀的特性分析与试验研究[J].火箭推进,2011,37(2):52-59.
WANG X G, CHEN W Q, TANG M F, et al. Testing and characteristics analysis of proportional solenoid valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(2):52-59.
- [22] 卢新波,谢宪旺,张中明.电磁铁相关技术参数分析[J].液压气动与密封,2010,30(11):36-38.
- [23] 张齐.基于Ansoft的比例电磁铁电磁力的有限元分析[J].沈阳师范大学学报(自然科学版),2009,27(3):306-309.
- [24] 鲁立中,孟彬,阮健.低惯量耐高压直动式电磁铁的静态特性仿真分析[J].浙江工业大学学报,2011,39(4):448-451.