

# 静力试验位移测量异常原因分析 及推算方法研究

孙百红, 周云端  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 分析了发动机机架静力试验过程中某重要位移测点出现位移测量异常的原因, 提出了几点改进措施, 包括打磨接触面、采用粘贴面积较大的测量块等; 另外, 考虑到此次静力试验其余测点位移正常、试验过程结构和加载稳定, 通过结构整体刚度分析, 提出一种利用正常测点来推算异常测点位移的方法, 采用两次未出现测量异常的抽检静试数据对此推算方法进行验证, 分析推算值与测量值之间的误差, 结果表明, 这种理论推算方法的推算误差小于5%。

**关键词:** 静力试验; 位移测量; 机架

中图分类号: V434-33

文献标识码: A

文章编号: (2010) 05-0059-04

## Cause analysis and computative method of displacement measurement abnormality in static test

SUN Bai-hong, ZHOU Yun-duan

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The reason of abnormality appeared during the displacement measurement in the frame static test is analyzed. Some improvement approaches are put forward, including more smoother contact surface, bigger measuring block and so on. Based on the analysis of the stiffness of the whole frame, the derivation method for calculation the displacement of an abnormal measuring point by using the normal measuring points is proposed. The method is validated by additional two tests which do not contain abnormal displacement measuring points. The results show that the error of the computative method is less than 5%.

**Keywords:** static test; displacement measurement; frame

### 0 引言

静力试验是研究结构或构件在静载荷作用下

的强度、刚度、稳定性以及应力、变形的分布情况。发动机机架静力试验中位移测量是一项重要内容, 但试验中测量有时会因为各种主观或是客观原因出现一些异常。正确地判读以及合理地分

收稿日期: 2010-03-19; 修回日期: 2010-05-17

作者简介: 孙百红 (1976—), 女, 硕士, 研究领域为发动机结构强度分析与数据处理

析测量数据的异常,不仅能够避免数据资源的浪费和不必要的重复试验,还能根据测量异常产生的原因采取有效的改进措施。

## 1 试验描述

试验机架结构受力及位移测点分布见图1。本静力试验共10个测点,其中测点1、2在机架六边形结构中心位置,目的是测量机架中心垂直向下的位移;测点3和4、测点5和6以及测点7和8分别在机架A梁、B梁及C梁的两端,且沿梁的方向,目的是测出各梁的径向变形量。测点3、5、7所在位置通过螺栓固定在承力框上。

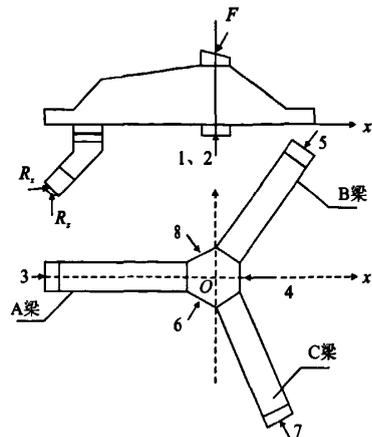


图1 结构受力及测点分布

Fig. 1 Load of bracket and distribution of measuring points

表1 位移测量数据

Tab.1 Measured displacement data

加载级	测点								mm
	1	2	3	4	5	6	7	8	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.93	0.87	0.4	-0.13	0.1	-0.03	0.28	-0.24	
2	1.79	1.75	0.62	-0.07	0.16	-0.08	0.42	-0.35	
3	2.91	2.88	1.11	0.19	0.21	-0.07	0.67	-0.48	
4	3.87	3.84	1.65	0.37	0.33	-0.19	0.86	-0.64	
5	4.83	4.76	2.19	0.59	0.55	-0.4	0.95	-0.69	
6	5.75	5.65	2.87	0.91	0.87	-0.63	1.09	-0.78	
7	6.57	6.53	3.14	0.95	0.96	-0.79	1.15	-0.81	
8	7.69	7.6	3.37	0.67	1.06	-1.61	1.19	-0.81	
9	8	7.79	4.52	0.7	1.69	-2.37	1.42	-0.91	
10	9.23	9.21	4.85	-3.85	1.84	-12.08	1.55	-0.99	
11	10.31	10.22	5.01	-13.74	1.92	-12.08	1.61	-1.49	
12	11.2	11.11	5.17	-13.74	1.99	-12.08	1.68	-5.56	
13	11.67	11.61	5.23	-13.74	2.03	-12.08	1.69	-6.73	
14	12.26	12.17	5.33	-13.74	2.07	-12.08	1.7	-12.83	
15	12.81	12.69	5.41	-13.74	2.1	-12.08	1.71	-12.83	
16	13.09	13.01	5.45	-13.74	2.12	-12.08	1.71	-12.83	
17	13.49	13.39	5.53	-13.74	2.15	-12.08	1.73	-12.83	
18	14.22	14.15	5.61	-13.74	2.19	-12.08	1.75	-12.83	
19	14.78	14.65	5.74	-13.73	2.22	-12.08	1.78	-12.83	
20	2.78	2.71	0.46	-13.74	0.51	-12.1	0.11	-12.83	

试验各加载级位移测量数据如表1所示。其中,第9级为试验要求级。试验要求给出

第9级时机架中心位置测点1、2的垂直位移,测点3、4在X方向(A梁的径向)变形量,测

点 5、6 在  $OB$  方向 (B 梁的径向) 变形量以及测点 7、8 在  $OC$  方向 (C 梁的径向) 变形量。

## 2 数据分析

### 2.1 异常原因分析

表 1 中加载级基本上是线性增加的, 试验过程出现的测量异常表现为: 测点 4 数据出现时负时正、时增时减; 测点 4 在第 11 级, 测点 6 在第 10 级和测点 8 在第 14 级测量数据出现突然急剧增大, 随后不再随载荷增加。

静力试验中, 影响位移测量的因素很多。分析本次试验数据特征后认为: 测点 4 位移数据时负时正、时增时减的异常现象是由传感器与位移测点接触面的凹凸不平引起的; 测点 4、6、8 测量数据突然急剧增大是由于位移传感器触头与被测点体脱落引起的 (试验后检查的确如此), 由于随着推力  $F$  的增大这几个测点向下的位移不断增大, 而位移传感器触头是指向测点所在梁的径向 (水平方向), 又由于测点 4、6、8 处面积很小 (见图 2), 造成位移传感器因向下方的滑动余量不够导致位移传感器触头与被测点体脱离。

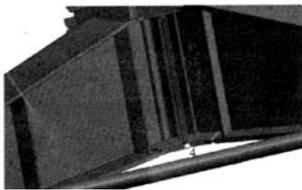


图 2 位移测点 4 的位置 (测点 6、8 类似)  
Fig. 2 Location of the fourth measuring point (The sixth and the eighth points are similar.)

### 2.2 测量改进措施

依据分析结果提出如下改进措施: 对接触面进行适当的打磨, 保持接触面为光滑的磨砂面, 这样一方面即使传感器产生其它方向的微小滑动, 也不至于影响数据的正负, 另一方面又能保证传感器不至于滑动太大而与被测点体脱离; 在接触面太小测点处粘贴面积较大的测量块; 试验前充分考虑结构的位移大小及方向, 保证位移传

感器滑杆具有足够的预压量或释放量。

## 3 异常数据的理论推算方法

### 3.1 推算方法

试验过程中, 除测点 4 在试验要求级 (第 9 级) 之前出现异常外, 其余测点均达到了测量要求, 因而测点 1、2 垂直方向位移、测点 5、6 的  $OB$  方向径向变形量、测点 7、8 的  $OC$  方向径向变形量均可直接根据位移测量值进行计算。

很显然, 由于测点 4 数据异常, 测点 3、4 在  $X$  方向的径向变形量就不能直接计算得到, 而需要通过理论分析对其进行推算。

相对于机架三根梁而言, 结构中间正六边形结构刚度要大得多, 因此可假设试验过程不考虑近六边形所在平面自身的变形, 即认为测点 4、6、8 所在的正六边形始终保持为边长不变的正六边形。结构变形前后几何关系如图 3 所示。图中实线表示位移前六边形结构位置, 虚线表示位移后六边形位置, 利用测点 6、8 第 9 级位移测量值推算出测点 4 第 9 级位移测量值。

图中,  $O_1F$ 、 $O_1A$  及  $PN$  分别表示测点 4、6、8 第 9 级时位移。设  $\angle AO_1E = \alpha$ ,  $\angle PO_2N = \beta$ ,  $O_1E = O_2P = l$ , 则根据几何关系, 有

$$O_1F = O_2M, O_1A = l \cdot \cos \alpha = 2.37, O_1F = l \cdot \cos (60^\circ - \alpha),$$

$$O_2M = l \cdot \cos (30^\circ - \beta), PN = l \cdot \sin \beta = 0.91$$

则,  $\alpha = 45.6$ ,  $\beta = 15.4$ ,  $O_1F = O_2M = 3.28$ , 则位移测点 3、4 在  $X$  方向的径向变形量为 1.24 mm。

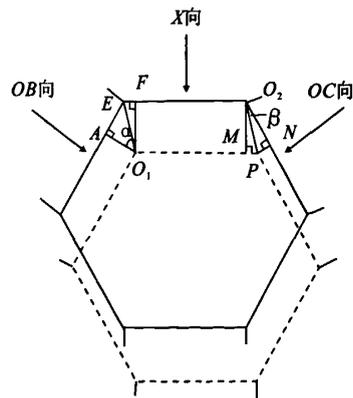


图 3 六边形结构位移前后位置图  
Fig. 3 Location of the hexagon before and after displacement

### 3.2 推算误差分析

采用两次未出现测量异常的抽检静试数据对此推算方法进行验证,分析推算值与测量值之间的误差。两次测量数据见表2,误差分析见表3。

表2 历次试验位移测量原始数据

Tab. 2 Displacement data for two tests

试验	测点						mm
	3	4	5	6	7	8	
第一次 第9级	-3.773	3.208	1.63	-1.457	2.181	-1.647	
第二次 第9级	-3.08	2.80	1.91	-1.56	1.55	-1.11	

表3 推算值及误差

Tab. 3 Predicted value and error

试验	测点4参数				mm
	测量值	推算值	绝对误差	相对误差	
第一次	3.208	3.105	0.103	3.2%	
第二次	2.80	2.67	0.13	4.6%	

## 4 结束语

在对发动机机架静力试验过程中位移测点出现测量异常原因分析的基础上,所采取的对接面进行打磨,采用较大的测量块等改进措施可提高静力试验中位移测量的有效性和准确性;基于结构整体刚度分析,采用了一种位移推算方法,

试验验证表明:这种理论推算方法的误差小于5%,满足试验数据测量要求。

### 参考文献:

- [1] 魏生道. 结构静力试验技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1988.
- [2] 罗彦, 林敏杜. 轴向位移影响因素的分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(6): 44-48.
- [3] 李锋, 邓长华, 鲍福廷. 液体火箭发动机冲击响应谱分析计算方法[J]. 西安工业大学学报, 2009, 29(1): 28-31.
- [4] 段毅, 刘宇, 覃粒子, 等. 高室压脉冲液体火箭发动机特性试验[J]. 火箭推进, 2009, 35(2): 12-17.
- [5] 王栋, 余陵, 武晓松. 火箭发动机六分力试验系统力学和误差特性[J]. 弹道学报, 2009, 21(3): 23-25.
- [6] 李文成, 李岩, 姜伟伟, 等. 基于两轴角传感器的机动测控装备自动调平系统 [J]. 现代电子技术, 2010 (14): 159-161.
- [7] 李海涛. 火箭发动机推力矢量测量理论、方法与自动测试技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [8] 朱子环, 耿卫国, 陈锋. 液体火箭发动机试验推力校准控制系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(11): 1575-1577.
- [9] 夏露露, 许化龙, 田鹏飞. 基于 PC/104 的陀螺仪动态测试系统设计[J]. 现代电子技术, 2009 (22): 31-33.
- [10] 罗艳强, 姚长虹, 张伟. 遥测技术在火箭发动机过载试验中的应用[J]. 现代电子技术, 2008 (23): 68-70.
- [11] 吴庆鸣, 李国超, 杨文清, 等. 发动机质心测量中轴线位置测量的一种新方法 [J]. 固体火箭技术, 2003, 26 (1): 76-78.
- [12] 费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [13] 伍文平, 张智盛, 张明. 环境试验室温、湿度模糊控制系统设计[J]. 现代电子技术, 2009 (21): 157-159.

(编辑: 陈红霞)