

泵前管道波纹管对推力测量的影响分析

沈继彬, 曾晓军, 曹庆红

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 液体火箭发动机试验推力测量的准确性对评价发动机性能意义重大。为减小 1 200 kN 液氧/煤油发动机地面试验时由于试验系统的原因对发动机推力测量准确性带来的影响和提高推力测量精度, 针对 1 200 kN 液氧/煤油发动机试验台的推力测量系统, 通过理论分析和试验验证的方法分析了泵前管道推力分离面上的 2 台波纹管的受力状态及波纹管在低温状态和受压状态下对推力测量的影响, 获得了波纹管的竖向推力损失、低温与常温推力原位校准斜率修正系数、负推力修正系数等重要数据, 并提出了波纹管安装固定要求, 为修正 1 200 kN 液氧/煤油发动机推力测量数据、提高发动机推力测量准确性提供依据。

关键词: 波纹管; 推力测量; 负推力修正

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 04-0095-05

Analysis of effects of bellows in front of pump on thrust measurement

SHEN Jibin, ZENG Xiaojun, CAO Qinghong

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

Abstract: Thrust measurement in LRE test process is significant to estimate the LRE performance. To decrease the influence of test system on thrust measurement accuracy and improve thrust measurement accuracy in ground test of 120 t LOX/Kerosene engine, the forced state of two bellows before pump and the influencing of the bellows in low temperature and pressure status on thrust measurement were analyzed with theoretical analysis and test verification method. The longitudinal thrust loss, thrust local calibration coefficient at low/normal temperature, and negative thrust correction coefficient were achieved. The fixing requirements of the bellows was proposed to ensure the accuracy of thrust measurement data in test process of 120 t LOX/kerosene rocket engine.

Keywords: bellows; thrust measurement; negative thrust correction

收稿日期: 2014-12-04; 修回日期: 2015-06-07

基金项目: 国防计量基础科研项目(J032013Z005)

作者简介: 沈继彬 (1982—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验技术

0 引言

推力参数测量的精确与否对评价发动机的性能意义重大。随着航天技术的不断发展，对液体火箭发动机试验推力测量精度要求不断提高，推力参数由以往单因素分析向多因素分析方向快速发展。液体火箭发动机试验中，影响推力测量精度的因素较多，包括推力测量传感器的精度对测量数据处理的影响，推力现场校准过程与试验过程系统状态一致性对校准精度的影响，试车架的结构刚度、承力变形量对力传递系数的影响，推进剂供应管道对推力测量的影响等。120 吨液氧/煤油发动机为我国新一代大推力、无毒、无污染、高压补燃发动机，地面试验中要求试车台具备较高的推力测量精度。因此，开展推力测量影响因素分析研究，一方面满足型号研制需求，另

一方面为后续重型运载发动机研制和分推力计量测试技术发展奠定基础。

本文针对某 120 吨液氧/煤油发动机试验台，研究了推进剂供应管道上设置的水平波纹管对推力测量的影响。

1 波纹管对推力的影响分析

某 120 吨液氧/煤油发动机试验台推进剂供应泵前主管道上共安装了 6 台波纹管补偿器，其中发动机入口竖直管道上各有 2 台垂直波纹管，都位于动架内，用于发动机推进剂入口管道对接安装和管道温度补偿，对推力测量没有影响；而管道从试车架定架进入动架各有 1 台水平波纹管，主要用于动架与定架的柔性分离，降低主管道的刚性，减少推力损失，提高试车架的推力传递系数，如图 1 所示。

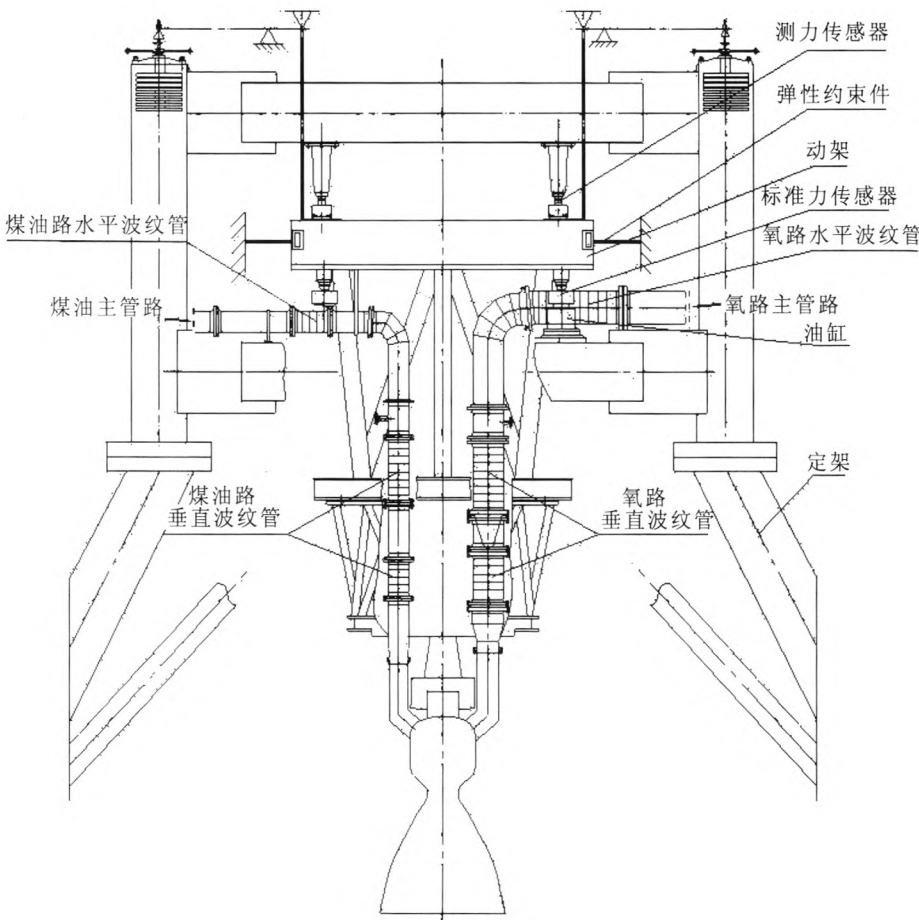


图 1 某试验系统推进剂管道布置图

Fig. 1 Layout of propellant pipelines in a test system

氧路和煤油泵前管路的 2 台水平波纹管设置在试车架的动架与定架的力分离面上, 相连的一端管路固定在定架上, 相连的另一端管路与动架连接, 在试车或校准时随动架移动, 可产生竖向位移, 降低了推进剂泵前管道的竖向刚度, 减小了试车架受力位移引起的管道牵扯力, 提高了推力传递系数。但波纹管的安装也引入了许多复杂的力学影响, 如波纹管自身的刚性和低温下刚性的变化、波纹管中介质的压力引起的盲板力、波纹管的安装固定方式等也影响推力测量的准确性, 需对其进行分析。

1.1 波纹管推力损失分析

波纹管自身存在径向刚度, 通过仿真分析得到 20 ℃时液氧和煤油水平波纹管的径向 (即推力竖向) 刚度分别为 887.8 N/mm 和 683.9 N/mm, 且径向刚度不受内部压力影响, 但与温度有关, 见图 2 所示。

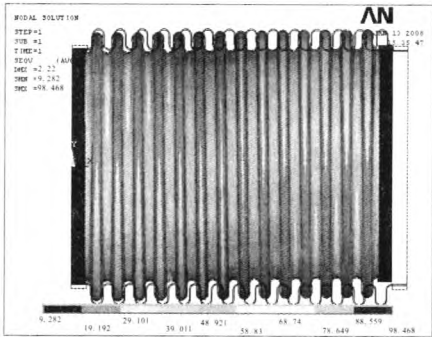


图 2 波纹管的变形应力分析结果
Fig. 2 Deformation stress analysis result of bellows

再根据校准过程施加 1 200 kN 标准力时波纹管与动架固定一端的竖向位移测量结果, 液氧

管道波纹管竖向位移 0.690 mm, 煤油管道波纹管竖向位移 0.710 mm。按公式 (1) 可以得出动架承受 1 200 kN 推力时推进剂管道波纹管引起的推力损失, 计算结果如表 1 所示。

$$F=K_y \times y \tag{1}$$

式中: F 为波纹管竖向力; K_y 为波纹管径向刚度; y 为波纹管竖向位移。

为验证波纹管的推力损失, 进行了波纹管推力损失验证试验。试验采用校准方法, 分别在拆除管道水平波纹管前 (原位状态)、拆除管道水平波纹管后进行零位记录和推力校准, 根据校准数据分析得到液氧管道波纹管和煤油管道波纹管的推力损失。仿真与试验结果见表 1 所示。

理论计算结果与试验值较接近, 可以确定: 在常温下推力系统加载 1 200 kN 力时, 推进剂管道波纹管对动架的牵扯力约为 1 kN。该牵扯力为弹性作用力, 可以通过在常温下的推力校准予以消除, 不影响测量精度, 只是降低了试车架的推力传递系数, 但由校准状态与试验状态液氧波纹管温度不一致引起的波纹管刚度的变化需要进一步分析。

1.2 液氧管道波纹管低温影响分析

发动机试车过程中, 液氧管道及波纹管处于低温状态, 与推力校准时状态不一致, 因此需要对低温影响因素进行分析。通过仿真分析, 液氧管道水平波纹管温度从 20 ℃降低至 -183 ℃时, 其径向刚度由 887.8 N/mm 升高至 951.2 N/mm。波纹管刚度变大增加了试车架的总刚度, 使低温下的校准斜率略有增加, 因此将常温校准斜率用于试车对推力测量精度有一定的影响。

表 1 推力损失计算及试验结果

	Tab. 1 Calculation and experimental results of thrust loss			
	计算值		试验平均值	
	液氧波纹管	煤油波纹管	液氧波纹管	煤油波纹管
推力损失/kN	612.4	485.6	786.2	247.2
总推力损失/kN	1.098		1.033	
损失系数/%	0.092		0.086	

对试车台历次的常温校准与低温校准进行比较分析, 结果见表 2 所示。

经过比较分析, 低温下校准斜率比常温下高 0.036 6%, 由于低温下校准更接近于发动机试车过程, 校准精度更高。因此, 采用常温校准系数计算发动机推力时推力值偏小, 按 1 200 kN 计算, 偏小了 0.439 kN。因此, 建议对常温推力校准系数进行修正。

表 2 常温、低温校准比较分析结果

Tab. 2 Comparison of calibration coefficients at low and normal temperatures

校准次数	校准状态	入口压力（表压）/MPa		校准斜率	相对变化量/%	平均值/%
		p_{i0}	p_{if}			
1	常温	0	0	91.682 1	0.036 4	0.036 6
	低温	0	0.17	91.715 5		
2	常温	0.40	0	91.693 8	0.012 5	
	低温	0.40	0.31	91.705 3		
3	常温	0	0	91.942 9	0.039 4	
	低温	0	0.17	91.979 1		
4	常温	0.40	0	91.942 9	0.057 9	
	低温	0.40	0.31	91.996 1		

1.3 介质压力的影响分析

发动机试车过程中, 发动机入口需要增压, 使波纹管处于一定的压力条件下, 波纹管内的压力使波纹管对两固定端产生作用力, 由于力分离面上的波纹管轴线并非完全垂直于发动机推力轴线, 与推力轴线成角度 α 。因此, 此作用力可以投影为沿推力方向的负推力。压力引起的负推力表达式如下

$$F_p = p \times A_e \times \cos\alpha \tag{2}$$

式中: p 为波纹管内的压力; A_e 为波纹管有效截面积。

负推力的大小通过负推力试验获得, 表 3 为试验台历次进行的负推力试验结果。

表 3 负推力试验结果

Tab. 3 Test results of negative thrust

试验次数	入口压力 (表压) /MPa		负推力大小/kN
	p_{io}	p_{if}	
1	0.55	0	3.875 0
2	0	0.20	0.952 7
3	0.55	0.20	5.033 3

由负推力试验结果分析并根据试验区平均大气压为 0.093 MPa, 可以得到以下关系:

a. 液氧入口压力与负推力的关系

$$\lambda_y = 3.875\ 0 / (0.55 + 0.093) = 6.026\ 4\ \text{kN/MPa (绝压)}$$

b. 煤油入口压力与负推力的关系

$$\lambda_f = 0.952\ 7 / (0.20 + 0.093) = 3.251\ 5\ \text{kN/MPa (绝压)}$$

为了减小负推力的影响, 目前试验系统采用发动机点火前-2 s 的推力测量值作为负推力值对推力零位进行了修正, 此时发动机推进剂入口已经预增压完毕, 减小了负推力的影响。但由于发动机点火前-2 s 的入口压力与试验过程中不一致, 且试验过程中发动机入口压力在一定范围内实时变化, 因此理想的修正方法应根据入口压力变化进行实时修正。修正方法见下面表达式:

$$F_{\text{负}} = F_{-2} - (p_{io-2} - p_{io}) \times \lambda_y - (p_{if-2} - p_{if}) \times \lambda_f \tag{3}$$

式中: F_{-2} 为点火前-2 s 的推力测量值, kN; p_{io-2} 和 p_{if-2} 分别为点火前-2 s 的发动机液氧和煤油入口压力, MPa (绝压); p_{io} 和 p_{if} 分别为试车过程中发动机液氧和煤油入口压力, MPa (绝压)。

2 波纹管的安装要求

通过波纹管的仿真计算和试验分析可知推力损失、低温影响、负推力大小等因素都与波纹管的安装状态有关, 主要分为波纹管安装时的轴向压缩量、竖向偏移量、倾斜角度和固定方式。通过分析总结出以下安装要求:

1) 波纹管在使用时不能使金属网套受到牵扯力, 因此安装时必须有压缩量, 根据波纹管的长度及两侧管道的长度计算。在液氧温度下, 两侧管道的收缩量约为 3 mm, 而波纹管的金属网套在低温下也收缩, 约 1.5 mm。因此波纹管安装时压缩量要控制在 5~10 mm, 太小会使金属网套受力影响动架受力状态, 太大影响波纹管的使用寿命。

2) 安装时要调整波纹管两侧的推进剂管道, 使两侧管道的轴线重合, 尽量减小波纹管的横向偏移量, 降低波纹管竖向应力, 也便于安装。

3) 波纹管的倾斜度受两侧管道的倾斜度的影响, 要尽量使波纹管保持水平状态, 消除负推力。

4) 波纹管两侧的管道分别固定在动架和定架上, 固定要可靠, 试验中不允许产生位移或松动, 以保证牵扯力值线性, 避免发生滑移、碰撞等非线性受力影响, 保证推力校准状态与试车状态一致。

3 结论

通过对某试验台液氧和煤油泵前管道推力分离面上的 2 台水平波纹管的受力分析及波纹管在低温状态和受压状态下对推力测量的影响分析, 得出以下结论:

1) 试车时动架的位移引起波纹管竖向变形, 产生推力损失, 大小约 1 kN, 但该推力损失可以采用推力校准消除, 不影响推力测量精度。

2) 低温下推力校准系数比常温下推力校准系数大 0.036 6%, 采用常温校准系数计算发动机推

力时, 推力值偏小, 按 1 200 kN 计算, 偏小了 0.439 kN, 因此, 建议对常温推力校准系数进行修正。

3) 通过负推力试验分析得到液氧和煤油管道入口压力与负推力的关系为液氧 6.026 4 kN/MPa、煤油 3.251 5 kN/MPa, 并提出了负推力表达式。

4) 为减小波纹管的安装状态对推力测量的影响, 提出波纹管的安装要求, 为波纹管的固定安装提供了指导。

参考文献:

- [1] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [3] 谢显奇. 液氢-液氧火箭发动机的推力测量[J]. 导弹与航天运载技术, 1997 (2): 49-62.
- [4] 付国防. 大型热油泵入口管系的柔性设计[J]. 炼油技术与工程, 2004 (7): 39-42.
- [5] 王争. 小推力液体火箭发动机推力测量研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- [6] BLUMBER J B. Testing of a magnetically levitated rocket thrust measurement system demonstrator for NASA [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002
- [7] RUNYAN R B, RYND J P, Jr, SEELY J F. Thrust stand design principles, AIAA-92-3976[R]. Reston: AIAA, 1992.
- [8] 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.
- [9] 赵宝林, 马凤琴, 陈述曾. 波纹管补偿器在管网中静压轴向推力的计算[J]. 华北水利水电学院学报, 2005 (4): 18-20.
- [10] 李永生, 李建国. 波形膨胀节使用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [11] 朱益民. 波纹管的动静力分析[D]. 北京: 清华大学, 1989.
- [12] 段玫, 钟玉平, 金桂筠, 等. 波纹管带压刚度研究[J]. 舰船科学技术, 2001 (2): 55-59.
- [13] 陈晔, 李永生, 刘艳江, 等. 用 ANSYS 软件对 U 形波纹管的有限元分析[J]. 压力容器, 2000 (3): 34-36.

(编辑: 陈红霞)