

变推力发动机高模试验真空压力测量技术研究

窦双庆

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 变推力发动机高空模拟试验中真空压力是关键参数, 对于 76 km 高空环境试验系统, 真空压力测量的准确性是判断发动机能否点火的重要依据。重点介绍了真空压力测量技术在承担 76 km 高空环境试验中的应用, 研究了试验环境下高真空计的分段测量, 以及真空计的安装工艺、测量工艺和现场校准技术, 实现了 76 km 真空压力的准确测量。

关键词: 高模试验; 真空计; 真空压力测量

中图分类号: V416.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 03-0099-06

Research on measurement technology of vacuum pressure in altitude simulation test of rocket engine with variable thrust

DOU Shuang-qing

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

Abstract: The vacuum pressure is the key parameter in altitude simulation test of liquid rocket engine. As for the testing system of 76 km high altitude environment, the accuracy of vacuum pressure measurement is an important basis for determining if the engine can be ignited. The measurement technology of vacuum pressure used in the high altitude environment test of 76 km is introduced in the paper. The sectionalization measurement methods of vacuum gage in testing environment, installation, measurement process and calibration technology on spot of vacuum gage are introduced in this paper.

Keywords: altitude simulation test; vacuum gage; vacuum pressure measurement

0 引言

高空模拟试验是在地面条件下制造高空环

境, 将发动机或组合件置于此环境中, 研究发动机在高空环境下的实际工作性能。发动机高空模拟热试车中, 真空压力是判断试验点火的重要参数, 在以往开展的 54 km 高空试验中, 点火前的

收稿日期: 2012-11-20; 修回日期: 2013-03-05

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2009JY08)

作者简介: 窦双庆 (1969—), 女, 高级工程师, 研究领域为液体发动机试验测控技术

真空度要求为 40 Pa, 而随后承担的变推力发动机高空模拟试验中, 要求点火高度 76 km, 对应的真空度为 2.2 Pa, 原有的真空压力计已无法全程监测真空压力的变化过程, 同时从提升试验系统的综合能力来看, 有必要开展高真空度下压力测量的技术研究。

1 传感器安装技术

1.1 真空计的选择

76 km 高空模拟试验环境对应的真空压力下限是 2.2 Pa, 这个范围的真空测量通常是采用两个或两个以上不同原理的真空计来满足实际测量的需要, 从常规大气压到 2 Pa 真空度选用了电阻真空计和电容薄膜真空计。电阻真空计是利用压强与弹性金属丝阻值的关系测量真空, 电容薄膜真空计是利用压强与金属薄膜之间电容量的变化测量真空, 适宜在腐蚀性气体环境中重复使用。

近代真空技术提供了多种真空压力测量方法, 最高可以测量到 10~14 Pa 的压力, 但是任何一种方法都有一定的测量范围, 没有哪一种可以覆盖从大气压至 10~14 Pa 的压力。在发动机高空模拟试验中, 选择适合量程的真空计可以使测量区域相互衔接, 更好地监测真空变化过程。型号发动机试验系统中选择了 100 kPa, 1 kPa 和 200 Pa 量程的真空计, 100 kPa 真空计监测抽吸过程中大气压至 2 kPa 左右压力变化过程, 1 kPa 真空计主要监测抽吸过程的真空压力, 200 Pa 真空计主要监测点火前和点火过程中的高真空压力。这样分段测量, 可保证各区间内真空压力测量数据的准确性。3 种类型的测量传感器在现场校准时, 按实际测量区间范围进行校准。

1.2 传感器安装工艺

真空压力传感器用于被测点压力测量, 多数通过接管嘴或引压管安装, 引压管工艺接口的设计对测量结果有很大影响, 包括引压管的开口面与气流方向对测量结果也有很大影响, 如图 1 中所示, 当管路中有气体流动时, A, D 接法的引压管开口面与气流方向垂直, 动压基本不产生作

用, B, C, E 测出的压力则受气流方向的影响。常规安装方式是真空计与被测点的位置越近越好, 引压管开口应与气流方向垂直或直接插入到被测系统, 且引压管应尽量粗、短、直, 这样才能正确地测量出被测部位的实际压力, 通常采用图 1 中 A 或 D 的安装方法, 以读取接近于靠近中心部位或容器壁处的压力。

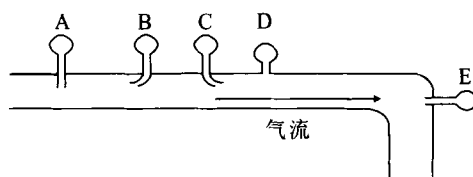


图 1 真空计引压管安装方法

Fig. 1 Installation of pressure pipe on the vacuum gage

传统引压管采用的是 M14×37° 内锥形式工艺接口, 其内径最小处仅为 6 mm, 且引压管在多次转接或存在弯管情况下, 真空计无法在短时间内与被测真空环境达到动平衡, 必然引起测量上的偏差。为配合高真空压力的准确测量, 真空计接口采用了 KF16 压嘴法兰连接形式, 压嘴法兰结构见图 2, 压嘴内径为 17.2 mm, 法兰面之间采取铝制支架+橡胶密封圈密封, 法兰对接面外侧使用卡箍固定, KF16 压嘴直接焊接在被测管路上, 或者采用 DN40 的集气管转接, 以保证真空计与被测气体的动态平衡。

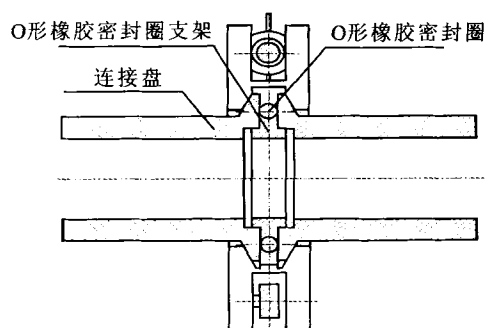


图 2 KF16 压嘴法兰结构

Fig. 2 Structural diagram of KF16 pressure flange

1.3 真空计安装位置选择

真空计测量的结果与其在真空系统中的安装

位置也有着密切的关系。高空试验系统是由多个容器串联组成的，用机械泵连接到图 3 所示的串联容器进行抽吸，设从容器流出的气体量为 Q ，抽吸速率为 S ，机械泵进口处压强为 p 。

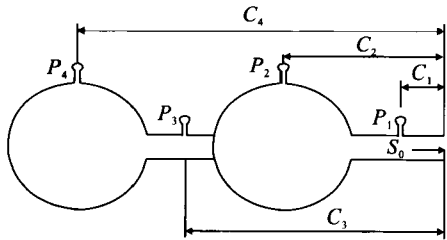


图 3 串联抽吸容器压力分布示意

Fig. 3 Pressure distribution of tandem suction vessels

图 3 中各个真空计的压力 P_1, P_2, P_3, P_4 要视与泵入口间的流导 C_1, C_2, C_3, C_4 而定，依据气体量恒定关系有：

$$Q = Sp = C_1(P_1 - P_0) = C_2(P_2 - P_0) = C_3(P_3 - P_0) = C_4(P_4 - P_0) \quad (1)$$

式中： Q 为容器流出的气体量， L ； S 为机械泵的抽吸速率， L/s ； p 为机械泵进口处压强； P_1, P_2, P_3, P_4 为各个真空计的压力， MPa ； C_1, C_2, C_3, C_4 分别为 P_1, P_2, P_3, P_4 点至泵入口间的流导， L/s 。

由 (1) 式可以得出：

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{C_2}{C_1} \cdot \frac{S + C_1}{S + C_2}, \quad \frac{P_1}{P_3} = \frac{C_3}{C_1} \cdot \frac{S + C_1}{S + C_2} \quad (2)$$

在抽真空系统中，一般存在 $S \gg C_1, S \gg C_2, S \gg C_3$ ，则：

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{C_2}{C_1}, \quad \frac{P_1}{P_3} = \frac{C_3}{C_1} \quad (3)$$

即容器内与管道上的真空压力与流导成反比，若管道直径一定，则真空压力与到泵口的距离成正比，安装在抽吸泵口附近的真空计测得的压力要低于远离泵口测得的压力，同时由于真空计一般都安装在容器的外壁上，测量到的压力也略高于距抽吸泵口附近和容器中心（发动机附近）的实际压力。

在实际应用中管道直径和走向有变化，串联容器的体积也不完全相同，诸多因素决定了容器和管道内的压力不是处处相同的。因此，应在容器和管道上布置一定数量的真空计，以监测真空系统工作的压力变化过程，一般容积在 100 m^3 以下，建议模拟环境中至少安装真空计 4 个、抽吸管路安装 2 个，按照图 1 中 A 或 D 方式安装。某试验系统真空舱测点分布示意图 4，分别在舱体顶部的前、中、后及抽吸管道上共设置 7 个真空测点。真空舱壁及管道上设置的真空计类型、测量范围及用途见表 1。

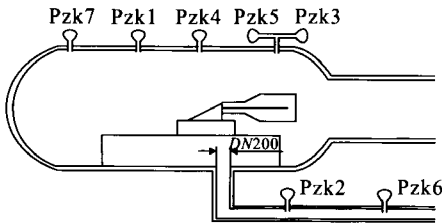


图 4 真空舱的真空计测点位置

Fig. 4 Locations of measuring points on vacuum chamber

表 1 真空舱壁及管道上真空计类型、量程、位置及用途

Tab. 1 Type, scale, location and application of vacuum gage on vacuum chamber wall and pipe

代号	类型	量程	位置	用途
Pzk1	电容薄膜真空计	1 kPa	舱顶前部	监测抽吸过程中真空度的变化
Pzk2	电容薄膜真空计	200 Pa	抽吸管道	监测真空度是否满足要求及点火过程中真空度变化
Pzk3	电容薄膜真空计	200 Pa	舱顶后部	监测真空度是否满足要求及点火过程中真空度变化
Pzk4	电阻真空计	1 kPa	舱顶中部	监测抽吸过程及点火过程中的真空压力
Pzk5	电阻真空计	1 kPa	舱顶后部	监测真空度是否满足要求及点火过程中真空度变化
Pzk6	电阻真空计	1 kPa	抽吸管道	监视机械泵抽吸过程中的真空压力，不采集记录
Pzk7	96 型电阻真空计	100 kPa	舱顶前部	监视真空舱压从大气压至 2 kPa 的变化过程

2 数据采集系统配置

2.1 数据采集系统

某型号高空模拟试验系统真空压力测量采用 P6000 太平洋数据采集系统, 系统模块化结构, 可以记录静态和动态数据。其中真空压力测量配置的 6013 模块为 8 通道高性能信号放大及 16 位 AD 采集板, 可以提供 $\pm 12\text{ V}$ 或 $\pm 15\text{ V}$ 的直流电源, 提供 4 阶低通 Butterworth 滤波器, 放大器倍数 1~5 000 程控可设, 每个通道都可提供过压保护。

电容薄膜真空计工作模式为 $\pm 15\text{ V/DC}$ 电源激励、 10 V/DC 输出, 由 1#, 2# 的 P6000 采集系统 6013 板同时记录, 1#P6000 系统的 6013 板提供 $\pm 15\text{ V}$ 电源激励, 传感器的并联输出信号至 1#, 2# 的 P6000 采集系统; 电阻式真空计工作模式为 220 V/AC 电源激励、二次表头输出 5 V/DC 信号, 由 1# 采集记录系统完成采集、记录。真空计电源激励、信号输出及设备连接图见图 5。

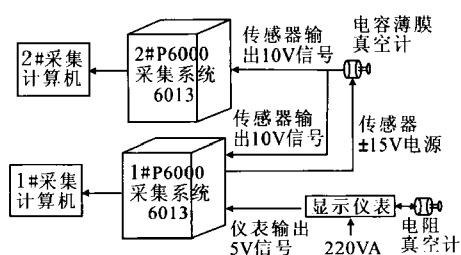


图 5 真空计采集系统设备连接图

Fig. 5 Equipment connecting diagram of vacuum gage acquisition system

2.2 真空计现场校准

电阻真空计及显示仪表经过二级校验, 作为现场标定的标准真空计使用, 采用 GJC-120 抽真空仪及电阻真空计对 1#, 2# 并记的 Pzk2, Pzk3 电容薄膜真空计进行现场标定, 系统组成见图 6, 标定档位按被测真空参数要求确定, 档位以电阻真空计的表头显示为基准, 校验一遍 6 档, 校验时 GJC-120 抽真空仪抽至校验档值附近停泵, 通过微调进气阀至预定数值, 由 1#, 2# 采集系统同时记录标定数据, 全部档位标定结束后, 对标

定数据进行线性拟合得出 a 和 b 的值, 以便试车中准确地记录电容薄膜真空计真空参数。

现场校准数据采用最小二乘法拟合出校准直线方程:

$$y = a + bx \quad (4)$$

式中: y 为校准时施加的标准值; x 为测量系统输出值。

校准线的系数 a 和 b 用下式算出:

$$b = \frac{\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (5)$$

$$a = \sum y_i - b \sum x_i \quad (6)$$

$$r = \frac{\sum x_i \sum y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (7)$$

式中: x_i 为校准时测量系统的记录值, y_i 为校准时每一档所加的标准值; r 为两变量之间的相关系数。

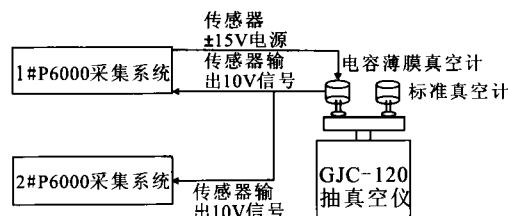


图 6 电容薄膜真空计现场标定系统

Fig. 6 Field calibration system of diaphragm type condenser vacuum gage

电容薄膜真空计 Pzk2, Pzk3 量程为 200 Pa , 为准确判断 2 Pa 真空度, 特在 $1.0\sim 3.5\text{ Pa}$ 范围内进行试前现场标定, 表 2 是 Pzk2, Pzk3 真空计试前并记标定的数据结果。

从表 2 中可以看出: 1#, 2# 采集系统标定结果一致, 现场标定的数据结果真实、有效。

3 真空压力测量系统应用

按照图 4 设置的 Pzk1~Pzk7 测点对某推力室 76 km 热试验的真空舱压进行了分段测量, 图 7 为一组真空舱抽吸过程压力变化曲线, 图 8 为发动机点火过程中的真空压力数据曲线。图 7 中舱

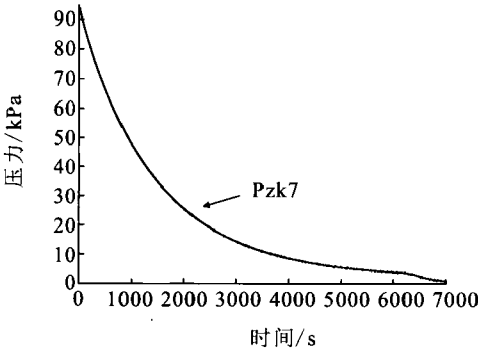
表 2 200 Pa 电容薄膜真空计试前标定的数据结果
Tab. 2 Calibration results of diaphragm type condenser vacuum gage of 200 Pa

参数代号		标定数据结果					
Pzk2	1# 采集系统						
	标准档位/Pa	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
	输出电压/V	0.575	0.609	0.643	0.681	0.705	0.727
	标定计算结果	<i>a</i>	-8.235 3	<i>b</i>	15.967 5	<i>r</i>	0.995 44
	2# 采集系统						
	标准档位/Pa	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
	输出电压/V	0.578	0.614	0.645	0.685	0.712	0.740
	标定计算结果	<i>a</i>	-7.846 7	<i>b</i>	15.244	<i>r</i>	0.998 2
	Pzk3	1# 采集系统					
标准档位/Pa		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
输出电压/V		-0.034	-0.007 5	0.024	0.058	0.082	0.101
标定计算结果		<i>a</i>	1.588 1	<i>b</i>	17.770 3	<i>r</i>	0.996 29
2# 采集系统							
标准档位/Pa		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
输出电压/V		-0.038	-0.010	0.017	0.052	0.082	0.111
标定计算结果		<i>a</i>	1.659 6	<i>b</i>	16.552 4	<i>r</i>	0.998 41

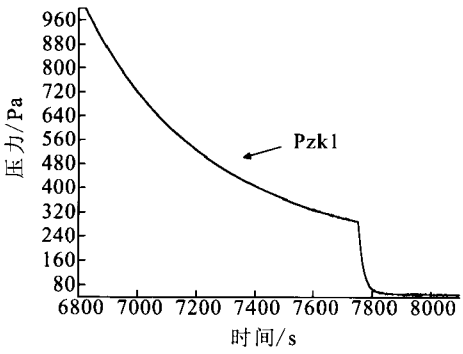
压 Pzk7, Pzk1~Pzk3 随时间呈现出指数衰减的趋势,符合密闭容器真空获得的规律。选择的各种真空计使得从大气压至 2.2 Pa 分段测量区间良好地衔接,有效地监视了抽吸过程中真空压力变化。图 7 (c)曲线显示真空舱压在热点火前为 2.2 Pa,满足发动机 76 km 高空点火要求。管道上 Pzk2 测点较 Pzk3 靠近机械泵组,故曲线上 Pzk2 点的真空压力较 Pzk3 点略低,符合容器舱压分布不均匀的现象。图 8 中舱压 Pzk2~Pzk5 的起伏与发动机工作、间歇同步。多个真空压力测点间的数据差异也反映了热点火过程中舱压分布并不均匀的状况。

从几次真空系统调试和热试车结果来看,通过文中介绍的方法,采用不同类型的真空计进行测量,可以准确地反映出真空舱试前抽吸及热点火过程中的压力变化,为产品在 76 km 热点火试验提供判断依据,解决了热试车中高真空压力准确测量的问题,在真空压力试验测量技术研究方面取得了进步,适用于今后发动机高空模拟试验

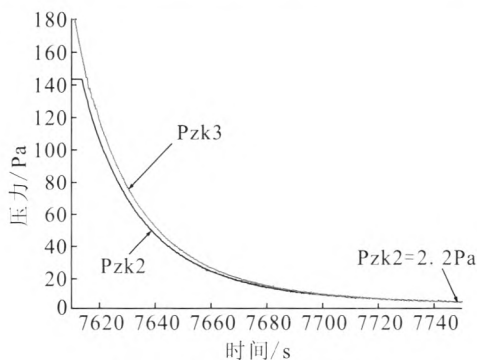
中高真空压力的测量。



(a) 100 kPa~1 kPa 压力曲线



(b) 1 kPa~100 Pa 压力曲线



(c) 200 Pa~1 Pa 压力曲线

图7 某推力室试前抽真空压力分段测量数据曲线

Fig. 7 Pressure curves of evacuation before test of a thrust chamber

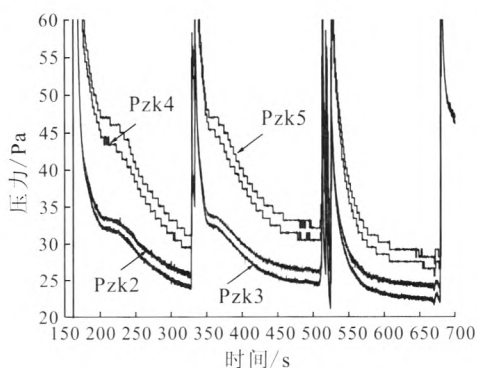


图8 热点火过程中真空压力数据曲线

Fig. 8 Vacuum pressure curves during firing test

4 结束语

通过对电阻式真空计、电容薄膜真空计的应用, 获得以下真空计的试验测量经验:

- 1) 精度要求低的真空压力测量 (100 kPa~1 kPa) 可以直接采用一般真空压力传感器直接测量;
- 2) 根据被测真空系统的真空压力范围、使用环境等选择合适的真空计;
- 3) 试验环境的容器、管道上真空呈非平衡分布, 实际的真空并不是处处相等, 但抽真空停止后真空舱压力逐步达到平衡;

4) 真空计的安装位置、引压形式应根据测量要求进行设计选择, 以提供更准确的真空试验测量数据。

本文针对高真空压力分段测量、安装工艺方式以及现场校准等技术进行了初步研究, 组建的高真空压力测量系统承担了变推力发动机试验并圆满完成了测量任务。随着发动机对高空模拟试验需求的不断提高, 开展现场更高精度的真空压力校准, 可进一步提高高真空压力的测量精度和范围。

参考文献:

- [1] 刘玉魁. 真空系统设计原理 [M]. 北京: 新时代出版社, 1988.
- [2] 王欲知, 陈旭. 真空技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [3] 赵万明. 液氧/煤油发动机试车主要参数测量方法研究 [J]. 火箭推进, 2006, 32(5): 51-55.
- [4] 郭霄峰. 液氧火箭发动机试验 [M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [5] 王晓冬, 巴德纯, 张世伟, 等. 真空技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [6] 王文龙, 耿直, 乔江辉, 等. 压力传感器静态校准方法改进 [J]. 火箭推进, 2012, 38(3): 80-84.
- [7] 王正义, 杜春林, 常冬林. 航天器密封舱内真空测量技术改进 [J]. 航天器环境工程, 2011, 28(1): 63-65.
- [8] 杨再华, 孙刚, 郭洁瑛. 空间实验室的精度测量新方法 [J]. 航天器环境工程, 2009, 26(5): 452-454.
- [9] 雷震, 唐云龙. VXI 数据采集系统的建立及其应用 [J]. 火箭推进, 2008, 34(5): 54-58.
- [10] 许丽人, 蔡军. 大气边界层环境影响效应的仿真试验 [J]. 装备环境工程, 2009, 6(4): 39-42.
- [11] 赵瑞国, 马杰, 何志勇, 等. 液体火箭发动机高速采集数据工程数据库设计及应用 [J]. 火箭推进, 2011, 37(3): 60-64.
- [12] 池保华, 洪流, 李龙飞, 等. 真空模拟环境下液体推进剂蒸发特性的试验研究 [J]. 火箭推进, 2010, 36 (1): 71-74.

(编辑: 张永秀)