

# 液体火箭发动机试验脉动压力测量技术研究

陈海峰, 邝 奇, 翟文化, 姚羽佳

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 对常规液体火箭发动机的脉动压力测量特点、测量系统组成与测量方式以及发动机不稳定性燃烧的关系和数据分析方法做了介绍, 并在此基础上阐述了现有常规液体火箭发动机脉动压力测量工艺方法。通过对现有常规液体火箭发动机脉动压力测量参数引入, 解决了常规液体火箭发动机在工作过程中以往无法对不稳定燃烧现象的监测及其有效评估问题。并为研究发动机工作状态和评价发动机工作性能提供了重要手段。

**关键词:** 发动机试验; 脉动压力测量; 工艺方法

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 05-0104-06

## Research on detection technology of fluctuating pressure in liquid rocket engine test

CHEN Haifeng, KUANG Qi, ZHAI Wenhua, YAO Yujia

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

**Abstract:** The characteristics of fluctuating pressure detection, compositions of detecting system, detecting methods, instable combustion and data analyzing methods of the conventional liquid rocket engine are introduced in this paper. The detecting method currently used in the fluctuating pressure detection of the conventional liquid rocket engine is also described. The problem that the instable combustion during the work of the conventional liquid rocket engine could not be monitored and evaluated effectively in the past has been solved by importing the measurement parameters of fluctuating pressure of the available conventional liquid rocket engine, which is useful for research of engine working state and evaluation of engine working performance.

**Keywords:** engine test; fluctuating pressure detection; technology method

## 0 引言

液体火箭发动机是我国目前运载火箭的主要动力装置, 发动机的工作可靠性关系到发射的成

败。液体火箭发动机试验中, 有时由于振动过大会出现发动机卡箍断裂, 推力室卡箍开裂等故障现象。这些故障的发生一种可能原因是由于发动机推力室存在不稳定燃烧现象, 从而产生大振动

收稿日期: 2016-02-15; 修回日期: 2016-03-18

基金项目: 国防科工局计量课题(JSJC2013203A001)

作者简介: 陈海峰 (1983—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机测量技术

进而导致发动机自身部件处材料受应力变形过大发生断裂。燃烧室燃烧不稳对发生器、燃烧室不利, 易造成发动机故障。发动机出现燃烧不稳定性的结果是毁坏发动机自身组件, 导致发动机不能正常工作, 但对燃烧不稳定的研究困难较大。

此外, 发动机工作过程中还有其它因素影响其可靠性, 如零件尺寸不符合要求, 工艺发生局部变化等。为了保证发动机的工作性能, 及时分析发动机组合件工作中出现的异常情况, 从设计阶段就要分析组合件的工作性能数据。如推力室、发生器组合件工作性能的评估以及发动机整机燃烧稳定性与可靠性的评定。通常发动机燃烧的稳定性是通过动态参数振荡及脉动来评估, 一般通过在推力室喷前入口、喷前管路、发动机头部壳体安装脉动压力传感器获得动态性能。

## 1 脉动压力测量系统组成及其特征

脉动压力测试系统主要由脉动压力传感器、信号调理器及动态信号采集分析系统组成。动态数据采集分析系统能够全程记录和回放多路动态信号时间历程曲线, 能够显示动态信号的最大值、最小值、平均值、峰峰值等时域统计参数, 能够对动态信号作平滑、微分/积分、数字滤波、FFT 分析、相关分析、幅值分析、频谱分析等处理。

### 1.1 脉动压力传感器特征

一般发动机不稳定性燃烧分为低频振荡、中频振荡和高频振荡三种。因此, 脉动压力传感器作为脉动压力信号的感受部件, 是信号产生的源端, 对脉动压力传感器的工作频带要求较宽。由于脉动压力测量通常要求较高的响应时间, 因此作为测量动态压力的压力传感器还应具有较高灵敏度、较快的频响、以及较宽的线性工作范围。

### 1.2 信号调理器及采集系统特征

信号调理器以电荷放大器为核心, 作用是输出与传感器电荷量成正比的电压信号。电荷放大器内配置的高、低通滤波器作用是滤除高频或低频干扰, 同时隔离输入偏置电压, 消除温度偏移等因素的影响。输出级放大器是为了使放大器输出适宜的电流、电压信号, 以用来驱动所配接的二次仪表。

输入信号调理器放大器的级联方式有两种: 接地 (单端输入) 和浮地 (双端输入)。作为数据采集系统的前置放大器, 一般具有差分 (双端) 输入, 当被测信号较强、内阻较小或连接电缆又较短时, 共模干扰信号可以忽略不计, 这时可将前置放大器的反向输入端 (一极) 接地, 构成单端 (接地) 输入方式。当被测信号较弱、内阻较大或连接电缆较长时, 为了准确的对被测信号进行数据采集, 就必须抑制共模信号的干扰, 这时应采用浮地 (双端) 输入连接方式。注意到在浮地情况, 实际上有两条输入线, 两条信号线 (分别接前置放大器的正负端) 和一条地线。如果采用三芯插座, 其中三根线中两根为输入端 (浮地), 一根接地; 如果采用双芯插座 (BNC 插头), 地线通常也就是仪器的机壳。

浮地连接时, 前置放大器具有对共模干扰信号的抑制能力, 后者常用共模抑制比 (CMRR) 来描述。共模抑制比定义为:  $CMRR = \text{差模电压增益} / \text{共模电压增益}$ , 对于数据采集用前置放大器通常要求具有 60 至 120 dB 的共模抑制比。

## 2 传感器对脉动压力测量的影响

传感器对动压测量的影响主要有两个因素: 一是传感器的安装对动压测量的影响; 二是传感器的动态特性对动压测量的影响。

### 2.1 传感器的安装方式

脉动压力传感器是获取流场中压力信号的部分, 因此需要进行合理的安装。安装过程既要考虑到传感器自身的性能, 同时又要兼顾被测量流场的状态。传感器的安装对动态压力测量会产生较大的影响, 由于传感器的安装对被测系统流场结构产生影响, 导致被测系统的状态与未安装传感器前不同而使得被测系统内被测压力的工作状态发生了变化, 从而影响到动态压力的测量。

传感器的安装方式通常可以分为齐平安装和附加连接管安装 (见图 1): 前者使传感器测量面与被测对象直接接触, 获得其动态特性 (这种做法通常是建立在管道和容腔的频率响应较低的前提下的); 后者是在几何空间不允许的条件下, 借助辅助管路传递压力的安装方式, 要同时兼顾管

道响应、温度影响和振动影响，通过对此三方面的分析与处理，使传递后的压力基本与引出处动态特性一致。

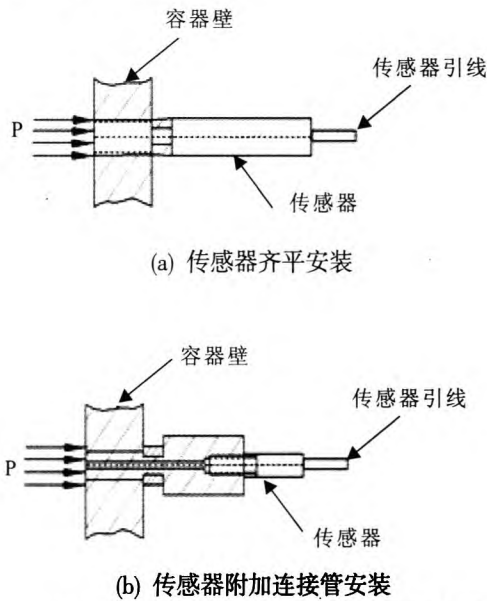


图 1 脉动压力传感器的安装方式示意图  
Fig. 1 Schematic diagram for installation of fluctuating pressure sensor

2.2 传感器的动态特性

在动态压力测量中，除了要保证传感器的安装不对被测系统压力工作状态产生影响，还要考虑传感器的动态特性对动态压力测量的影响。图 2 是一个典型的动态压力传感器的结构图。对这种结构的压力传感器通常具有两个谐振频率；一个是引压腔的谐振频率；一个是压力感应膜的谐振频率。

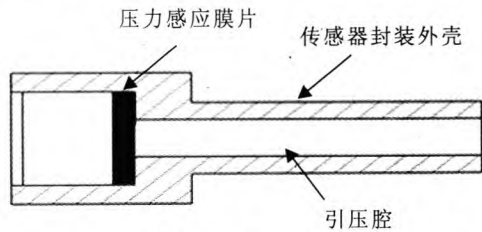


图 2 常规脉动压力传感器结构示意图  
Fig. 2 Structure of conventional fluctuating pressure sensor

对于这种结构的脉动压力传感，高频压力信号并没有被引压腔抑制掉，它仍然进入了引压腔并使压力感应膜片产生了共振，尽管引压腔的共

振频率与压力感应膜片的共振频率相差较大，倘若安装方式有问题仍可引起压力感应膜片的共振信号叠加在了引压腔的共振，从而在测量的脉动压力信号中产生干扰信号。

3 影响脉动压力测量性能的因素

脉动压力在测量过程中，影响其可靠性与测量准确性的因素主要涉及两个方面：一是发动机在工作过程中振动的影响；二是传感器接触的工作介质温度变化的影响。

3.1 振动影响

发动机在工作时会产生轴向、径向、切向三个方向的振动，脉动压力传感器在安装时与这三个方向任意一个重合时，就会受到该方向上振动的影响。这种振动效果会叠加到脉动压力的膜片上，进而对脉动压力输出信号产生影响。为避免或减小振动对脉动压力传感器的影响，可在脉动压力传感器附近安装一个同方向的振动传感器，利用补偿原理校正脉动压力传感器的输出信号。也可以正确选择脉动压力传感器安装方向。此外，脉动压力传感器对振动的敏感性也可通过热试车检查。方法是在同一个位置安装两个相同型号的脉动压力传感器：一个用于正常测量；另一个将压力入口封死，使其感受不到压力，比较这两个传感器的输出信号，就可鉴定振动对传感器的影响程度。

3.2 温度影响

在燃烧室工作时，其内部是高温的气体，该气体的流体力学特性（即燃烧室压力的变化）就反映出燃烧室工作的稳定性。在燃烧室启动时，其内部温度瞬间变化（图 3），当压电式压力传感器接触到高温气体时，传感器输出首先出现正跃变信号（正负跃变信号与传感器自身结构有关），当燃烧室内部温度稳定后，信号迅速减小为负值，而后逐渐回到压力稳定值，这就说明了瞬变温度在压电式压力传感器的壳体和基座等部件内产生了温度梯度，由此引起的热应力对膜片与基座之间的预紧力进行卸载，导致传感器的输出变现为卸载信号，然后热量才通过膜片进入压电晶体，产生热电输出，表现为加载信号。为了避免



温度对传感器的影响, 通常可采用水冷却膜片、烧蚀涂层、陶瓷涂层或各种转接座连接传感器。

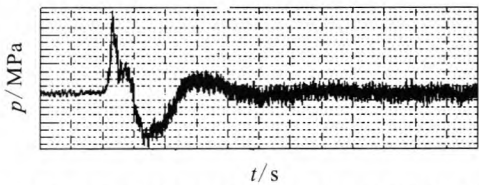


图 3 脉动压力传感器受瞬态温度影响的测量曲线

Fig. 3 Curve of fluctuating pressure sensor influenced by transient temperature

4 现有脉动压力测量工艺方法

现有常规液体火箭发动机对脉动压力测点的要求, 主要集中在氧化剂入口、燃料入口、推力

室氧化剂喷前以及燃烧室室压等几个发动机的关键部位点上。

4.1 推进剂入口脉动压力测量工艺方法

由于推进剂入口脉动压力需要在推进剂管路上打孔进行安装, 但考虑到现有压力测量系统, 其水击压力传感器就安装在推进剂进入发动机入口管上, 其传感器频响满足脉动压力测量要求, 故可用水击传感器来进行推进剂入口脉动压力的测量。推进剂入口脉动压力测量过程如下: 由于水击传感器输出的为电压信号, 其输出信号可以并联输出, 故经水击信号调理器输出并上两路电压信号输入进动态采集通道内, 脉动压力校验系数采用水击传感器压力校验系数, 进而对水击信号进行脉动压力采集和分析 (见图 4)。

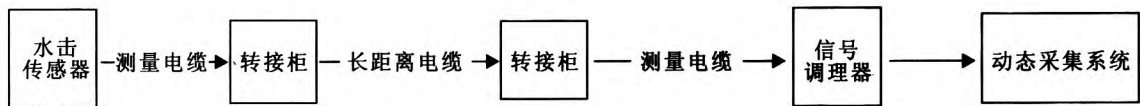


图 4 脉动测量系统原理图

Fig. 4 Principle diagram of fluctuating pressure detecting system

4.2 推力室氧化剂喷前和燃烧室室压脉动测量工艺方法

对于推力室氧化剂喷前和燃烧室室压脉动压力的测量, 采用在推力室头部安装脉动压力传感器, 其所选传感器型号为 CY-YD-205。测量过程如下: 由于 CY-YD-205 型脉动压力传感器属于电荷两线制输出, 具有较强的抗干扰和耐高

温特性 ( $\leq 150^{\circ}\text{C}$ ), 故其传输距离可以较远, 传输信号具有较强的抗干扰性, 其测量和数据分析方式与振动传感器一致, 该脉动压力传感器完全可以利用振动测量系统来采集和分析 (见图 5), 即就是脉动传感器电荷信号经活动电缆和长距离测量电缆进入 LMS 采集系统, 而后对信号进行采集和分析。



图 5 推力室氧化剂喷前和燃烧室室压脉动压力测量系统

Fig. 5 Fluctuating pressure detecting system in combustion chamber before oxidizer spraying

5 脉动压力特征与发动机不稳性燃烧的关系

燃烧不稳定性是由于燃烧和系统的流体动态过程之间耦合并引起。通过这一耦合, 用燃烧

所提供的振荡能量来维持振荡, 只有当系统中出现的阻尼过程足够强, 以致振荡能量的耗散要比其供应的快, 振荡才会衰减。燃烧不稳定性是用燃烧室内压力脉动的频谱分析来获得。主要是用突频幅值来定义的 (见图 6)。在火箭发动机系统

正常稳定工作时，室内压力的脉动在频谱上是连续的，只有少量可辨认的尖峰，即突频幅值。通过对大量热试车脉动压力突频幅值数据统计分析可得到的燃烧稳定性判据的试验值，在发动机工作稳定段和起动段，突频极大值并不一样。按照判据，将每次试验结果与极限值比较，即将突频峰值、频率等与极限值比较，以决定生产的发动机是否满足要求。当突频幅值、频率等参数高于极限值时则不能使用。但在不稳定情况下，在频谱上的一个或多个频率处呈现大的集中的振动能量，相对于正常的混乱噪音的背景是容易辨认出来的。实验和理论证明，如果压力振荡振幅的峰峰值与平均室压之比小于某一常数时，通常对燃烧时没有结构上的破坏。确定振荡源在推力室还是发源在输送系统，还是由于输送系统和燃烧时相互作用的结果是非常重要的。在一个特定的燃烧室中，室压力的振荡频率和系统的几何结构情况相关，同样也由推进剂管路内的流体流动、燃烧的物理化学过程和室内燃气的动力学之间的复杂的相互作用所决定的。理论和试验已经发现，在一个推力室的不稳定频谱上，显著影响每一个频率成分的只有一个物理过程，这就有可能将所观察的不稳定性按他们相对的重要性分成：高频或气体动力学的，低频或水力学的以及中频或燃烧动力学的。在频率大约为 1 000 Hz 以上的高频不稳定性常称为“损害性声振”或“尖哨”型不稳定性，他们是气体动力学的的不稳定性，是靠燃烧过程维持和引起的，并且他们集中在燃烧时的最上面的部位。高频不稳定性可用瞬时引起的特点来表征（从无到全振幅仅几毫秒），这类振荡主要是径向和切向型的。在频率大约低于 180 Hz 的这类不稳定性是水力学的振荡，他们的特点是燃烧过程和推进剂输送系统的流动过程之间是因果相关联的，其现象有时称为“喘振”。喘振最经常发生在发动机系统的启动和停车的时候，或发生在偏离预定的工作水平的时候。具有频率范围 200~1 000 Hz 的这类不稳定性有时称为燃烧动力学或“萤振”。他的特点是燃烧过程和推进剂输送系统的流动过程之间的联系类似弹簧—质量型式。它常常只出现在输送系统的某个部分，或限

制在燃烧室内，或在双组元推进剂系统中只发生在两个推进剂系统中的一个上。在一个泵式系统中，泵是这类振荡的最初振源。

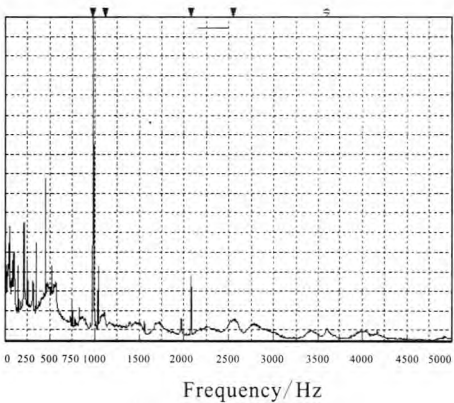


图 6 脉动压力频谱图

Fig. 6 Frequency spectrogram of fluctuating pressure

所有类型的燃烧不稳定性都是以室压振荡来表征的，其主要特征主要表现在以下几个方面：1) 振荡具有明显的周期性；2) 振荡能量集中在某几个固有频率的振荡上；3) 室内不同位置的燃气振荡之间具有一定的联系；4) 燃烧室压力的振荡幅值较大，在平均室压的 5% 以上或更高。

6 脉动压力测量存在隐患及其预防措施

6.1 推进剂入口脉动

推进剂入口脉动压力主要是采用水击传感器来进行测量的，其存在隐患主要存在于水击传感器自身的可靠性方面（损坏、泄露）。为此，每次进行水击测量时，都是用新的传感器，并在安装前对其进行静态校准和打压，满足操作规程后再进行安装，安装时满足特定安装力矩并在现场有岗位操作人员和质量工程师进行力矩再次确认，安装完成后在经进行气密性检查合格才进行试车使用。

6.2 推力室氧化剂喷前和脉动压力

推力室氧化剂喷前和燃烧室室压脉动压力主要是采用电荷输出型传感器来进行测量的，其存在隐患主要存在于传感器在试车时安装接口发生泄漏。

对于推力室氧化剂喷前和燃烧室室压脉动压力,安装时满足特定安装力矩并在现场有岗位操作人员和质量工程师进行力矩再次确认。在传感器安装完成后,对其进行气密性检查,在气密检测结果满足规程要求下方可进行试车使用。

同时,为保证测量的可靠性,每次进行推力室氧化剂喷前和燃烧室室压脉动压力测量时,都使用新校准后的传感器,并在安装前对其进行冲击检查和打压检查,满足要求后再进行安装。发动机上台后对传感器安装状态再次进行检查确认无误后,对采集通道进行对通道检查,完全无误后才进行试车使用。

## 7 结论

近几年某些型号试车中不断暴露出推力室轴向振动大,结构件出现不同程度的破坏。经分析发现结构破坏主要为推力室轴向振动大导致,振动大的主要原因为燃烧过程发生改变后引起的压力振荡与推力室结构耦合所致。通过对现有常规液体火箭发动机引入脉动压力测量和对不稳定燃烧现象的监测,为从物理结构上进行改进提供依据。

现有脉动压力测量系统已经进行了多次实际试车的应用,其对提高和验证发动机设计理论,研究发动机工作状态和评价发动机的工作性能提供了重要手段,并对解决和研究常规大推力液体火箭发动机大振动问题提供了有效方法。

## 参考文献:

- [1] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验 [M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [2] 王跃科, 叶湘滨. 现代动态测试技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [3] 李科杰. 新编传感器技术手册 [M]. 国防工业出版社, 2002.
- [4] 张贤达. 信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [5] 孟立凡, 郑宾. 传感器原理及技术 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2000.
- [6] 黄俊钦. 测试系统动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [7] 朱明, 梁人杰, 柳光辽, 等. 动压测量 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [8] 仲伟聪, 张峰. 单喷嘴燃烧流场仿真研究 [J]. 火箭推进, 2009, 35(6): 27-30.  
ZHONG Weicong, ZHANG Feng. Numerical simulation of combustion in a single-injector [J]. Journal of rocket propulsion, 2009, 35(6): 27-30.
- [9] 陈泓宇, 田爱梅. 叶-盘系统振动特性有限元分析程序实现 [J]. 火箭推进, 2011, 37(2): 40-45.  
CHEN Hongyu, TIAN Aimei. Implementation of FEA program for vibration characteristics of bladed disk system [J]. Journal of rocket propulsion, 2011, 37(2): 40-45.
- [10] 朱恒伟. 液体推进剂火箭发动机地面试车故障检测与诊断研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.
- [11] 申弘, 黄树红. 振动故障信号奇异性指数的统计特征研究 [J]. 振动工程学报, 2003, 16(4): 476-479.

(编辑:王建喜)