

低频脉动压力测量方法研究

施海莉, 赵万明, 刘 薇

中国航天科技集团公司第六研究院一六五所

摘 要: 脉动压力测量在液体火箭发动机地面试验中占有重要地位, 它在判断发动机故障方面起着重要作用。介绍了一种用一只压力传感器既测稳态压力又测低频脉动压力的方法, 这是发动机地面试验参数测量领域的一项新尝试。文中着重论述测量系统构成、仪器选则、校准方法及实现过程。

关键词: 火箭发动机; 压力; 测量

中图分类号: V416

文献标识码: A

文章编号: (2004)02-0029-05

1 引言

在液体火箭发动机地面试验中, 测量的参数主要有稳态参数(如稳态推力、压力、流量、转速、温度、位移、缓应变等)和动态参数(如脉动压力、振动)两大类。这两大类参数所用传感器的机理、结构、频响不同, 其测量原理、方法、数据处理要求也不同。稳态参数只关心稳态成份,

滤掉动态成份, 所用传感器频响一般在 100Hz 以下, 数据处理时只做时域处理。动态参数只关心脉动成份, 滤掉稳态或直流成份, 数据处理时不仅时域处理, 还要频域分析, 而且频域分析是主要目的。动态参数传感器的频响大多在 200Hz~100kHz 之间。火箭发动机地面试车中的动态参数脉动压力、振动大多使用压电晶体传感器。使用压电晶体传感器的低频脉动压力一般用图 1 所示方法进行测量。

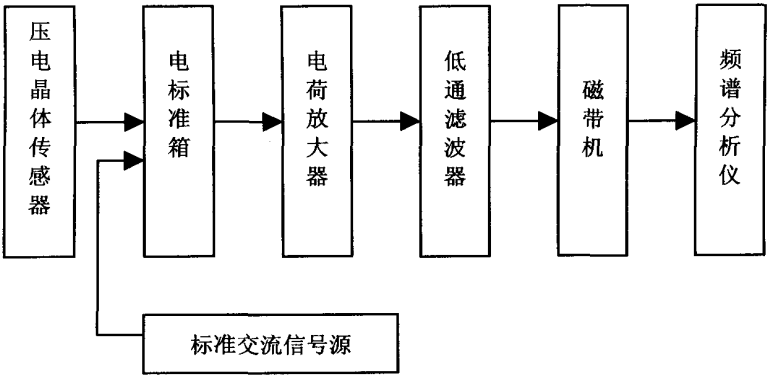


图 1 脉动压力测量框图

收稿日期: 2003-12-30; 修回日期: 2004-01-08。

作者简介: 施海莉 (1962—), 女, 技师, 研究领域为液体火箭发动机压力测量技术。

图 1 所示的低频脉动压力测量方式是目前最常见的测量方法。传感器不需供激励源,用标准交流信号源通过标准电容进行电校准,磁带机记录电压信号,事后用专用频谱分析仪进行处理分析。随着测量技术的迅速发展,磁带机和专用频谱分析仪合二为一的动态参数计算机采集分析系统已经开始使用。液氧煤油发动机试车中,发动机自带了大量传感器,设计人员想获得某些部位稳态压力的同时,还想获得该处低频脉动压力情况。但该位置已安装了稳态压力传感器,无法再安装脉动压力传感器,而且多安装一只传感器,就多一份危险。这就提出了能否用一个压力传感器既测稳态压力,又测 200Hz 以下低频脉动压力的问题。经过认真的探索、研究、试验后认为:只要该传感器具有 30~200Hz 的动态响应特性,采用特殊的校准技术和测量方法,选用合适的测量

设备,可实现这种设想。按这种设想开发的低频脉动压力测量系统已成功用于液氧/煤油火箭发动机地面试验。

2 测量系统的组成

稳态压力和低频脉动压力测量原理、数据处理、分析方法均不相同。从可靠性和重要性考虑,用一只压力传感器同时测量稳态压力和低频脉动压力时应坚持以下原则:

- (1) 两系统完全独立,互不影响;
- (2) 以稳态压力测量为主,低频脉动压力测量为辅;
- (3) 低频脉动压力主要关心开机和关机段。

按照这个原则设计的低频脉动压力测量系统如图 2 所示。

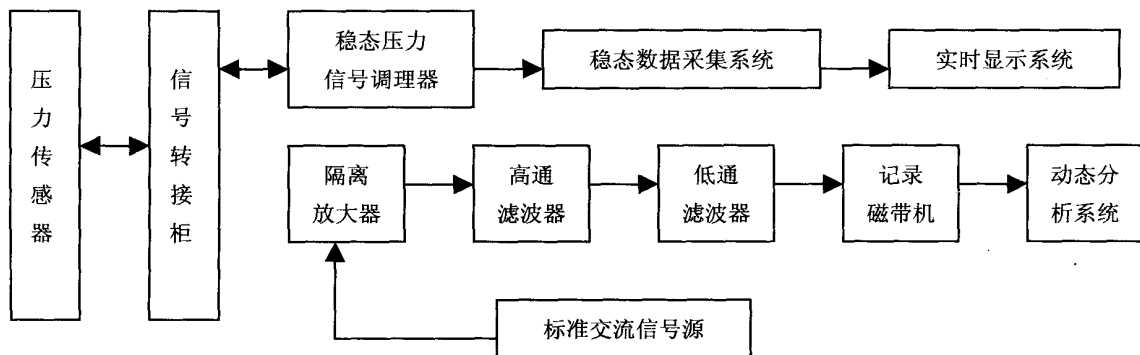


图 2 低频脉动压力测量框图

图 2 中,虚线框内为已有的稳态压力测量系统,其余为低频脉动压力测量系统。传感器激励源由稳态压力信号调理器提供,也可独立供电。传感器的输出信号在信号转接柜上并接。稳态压力信号调理器的滤波截止频率一般设为 10~15Hz。低频脉动压力的隔离放大器要满足动态参数的频率响应特性(如 SF—72 数据放大器),放大器的放大倍数根据传感器的输出幅值大小和记录磁带机的输入电压而定。高通滤波器的下限频率设置为 5Hz。低通滤波器的上限频率设置为 200Hz(根据任务书确定)。记录磁带机选用通用调频磁带机

即可。图中的传感器可靠性要高,精度在 0.2%以内。供桥激励源的纹波应在 0.05%以内。要求安装在发动机上的传感器抗振性能应满足发动机试车条件下的高温、大振动环境条件。

3 工作原理

发动机试车前,压力传感器未受力,理论上传感器输出电压为零。发动机启动后,传感器输出信号从 0 变化为一个较稳定的电压信号。启动过程和关机过程有一个较大的脉动成份,这些脉

动成份叠加在稳态成份基础上。发动机试车稳定段的低频脉动压力大约为同时刻稳态压力值的 10~30%，波动较小。发动机开车后传感器输出的电压信号实际上是一个脉动电压信号，隔离放大器对交流成份和直流成份同时放大。信号通过高通滤波器时，5Hz 以下成份被滤掉，也将大多数直流成份滤掉。通过低通时，200Hz 以上的高频成份被滤掉，最后记录在磁带机的是一个 5~200Hz 的脉动电压信号。由于信号中的低频成份少、幅值小，一般 5~200Hz 脉动压力信号在开机和关机较明显。试车当天综合测试后，根据试车大纲给定值分别对各低频脉动压力参数用交流标准信号源进行电压等效校准（灵敏度标定）。根据试车过程中实际信号幅值和频率大小确定磁带机的记录带速和输入电平挡位。试车后动态参数采集系统采集校准信号，获得系统灵敏度，然后对记录的试车信号进行时域和频域数据处理、分析。数据处理结果特别是频谱分析对发动机启动过程中的平稳特性具有重要参考意义。

4 校准方法

低频脉动压力测量中，系统校准是关键环节，校准误差大小对测量不确定度至关重要。稳态压力测量中一般对传感器用标准压力源进行现场校准。液氧煤油发动机试车中，考虑可靠性和气密性因素，有些测点压力传感器在发动机出厂时已安装好。而安装在发动机上的传感器在试车台上无法再进行现场标定。稳态压力传感器用计量室标定的数据，在现场用电压替代法进行等效现场标定。即传感器计量室标定时各档标准力对应的电压毫伏数，在现场确保传感器上供桥激励源和计量标定时完全一致的条件下，用高精度电压源在传感器处，带全系统分档加载电压毫伏数三遍六档（相当于加标准力值），最后用最小二乘法拟合曲线。而低频脉动压力仅关心脉动成份，用标准交流源校准一档即可。具体方法是：取试车大纲给出的该测点稳态压力参考值的一半（大纲给出的是某个范围时，取最大值一半），作为脉动压力的最大值（峰值）。在稳态压力参数校准数据中，找和该压力值最相近的一档电压毫伏数，求其三

遍平均值，并除以 $\sqrt{2}$ 作为正弦标准信号的有效值，频率一般选 80Hz。实际校准时常取整数（如 4mv），再用整数反算代表多少压力，如 12.8MPa / 4mv。隔离放大器的放大倍数可以选 60~100 倍。低频脉动压力信号不宜放大太多，因为放大信号的同时噪音也随之放大。这样，磁带机记录的交流校准信号一般为 80Hz，400~1000mv 的正弦交流信号。它代表具体的脉动压力值，例如 400mv 代表 12.97MPa。该校准信号记录在磁带的最前面。数据处理时，动态参数数据处理系统先采集校准信号，计算出系统灵敏度，再采集试车信号与其相乘，计算出试车实际脉动压力值。实践证明，这种等效校准方法误差小、精度高，是行之有效的一种方法。

5 数据处理分析

动态参数一般进行时域和频域处理与分析。图 3 是某个脉动压力测点时域图和时域综合值。综合值是时间和幅值关系，图中时间单位是秒，幅值单位是 MPa。图 4 是该测点平均频谱和极值谱图。谱图是频率和幅值关系，图中 X 代表频率，单位是 Hz；Y 代表幅值，单位是 MPa。如果发动机试车出现故障时，可以根据需要进行频域三维瀑布图、相关、相干谱等分析。

6 结束语

用一只传感器测稳态压力又测低频脉动压力，是液氧 / 煤油发动机研制中参数测量领域的一项新内容，该方法减少了发动机上传感器安装的数量，提高了发动机试验的可靠性，增大了试车中参数获得信息量。特别是新型液体火箭发动机研制初期，低频脉动压力和低频振动数据对判断发动机结构设计合理性和发动机启动过程平稳性具有重要意义。

液氧 / 煤油发动机试车中，部分位置压力传感器测量稳态压力的同时，进行低频脉动压力测量这种新方法，已成功的参加了十几次液氧 / 煤油发动机试车，获得了大量准确、可靠的数据，在液氧 / 煤油发动机研制中发挥了重要作用。

时间	
0.03152	0.15600
0.50028	0.18907
0.96904	0.18907
1.43780	1.21419
1.90656	0.13947
2.37532	0.30481
2.84408	0.18907
3.31284	0.25521
3.78160	0.35441
4.25036	0.35441
4.71912	0.25521
5.18788	0.20560
5.65664	0.30481
6.12540	0.25521
6.59416	0.35441
7.06292	0.25521
7.53168	0.30481
8.00044	0.22214
8.46920	0.33788
8.93796	0.32134
9.40672	0.30481
9.87548	0.25521
10.3442	0.22214
10.8130	0.15600
11.2818	0.18907
11.7505	0.32134
12.2193	0.32134
12.6880	0.22214
13.1568	0.15600
13.6256	0.25521
14.0943	0.30481
14.5631	0.37095
15.0318	0.17254
15.5006	0.27174
15.9694	0.27174
16.4381	0.22214
16.9069	0.33788
17.3756	0.42055
17.8444	0.25521
18.3132	0.15600
18.7819	0.23867
19.2507	0.28827
19.7194	0.25521

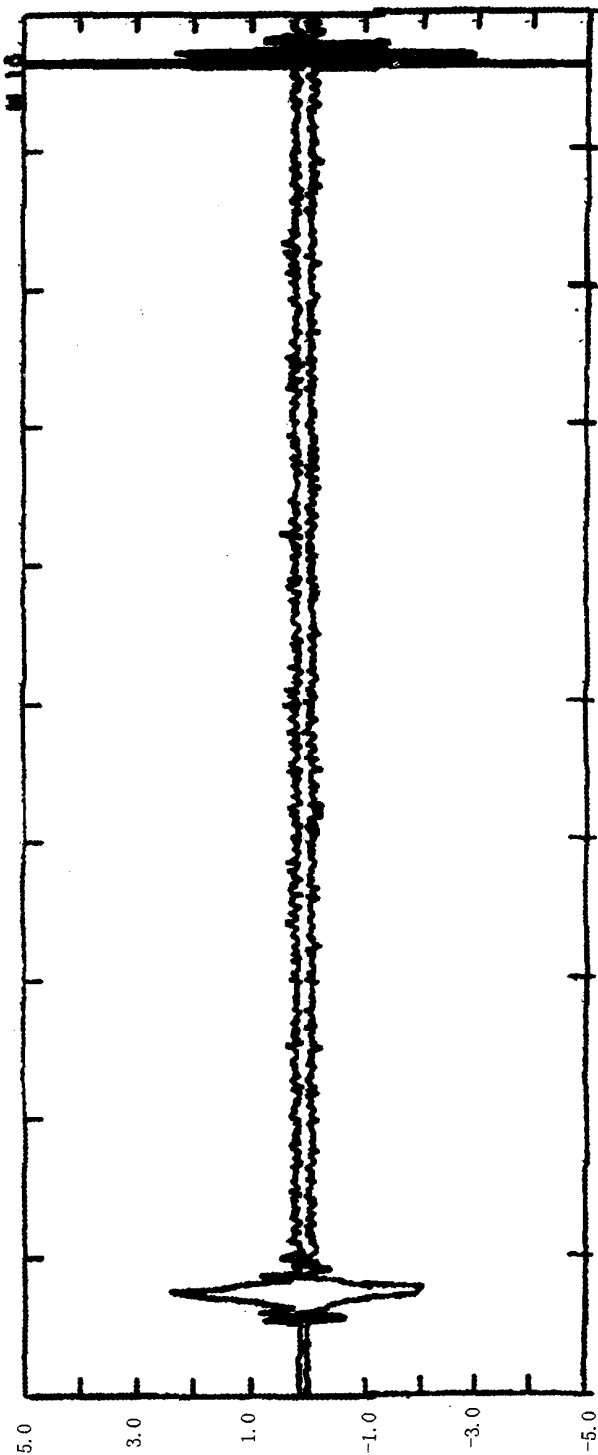


图 3 时域图和时域综合值

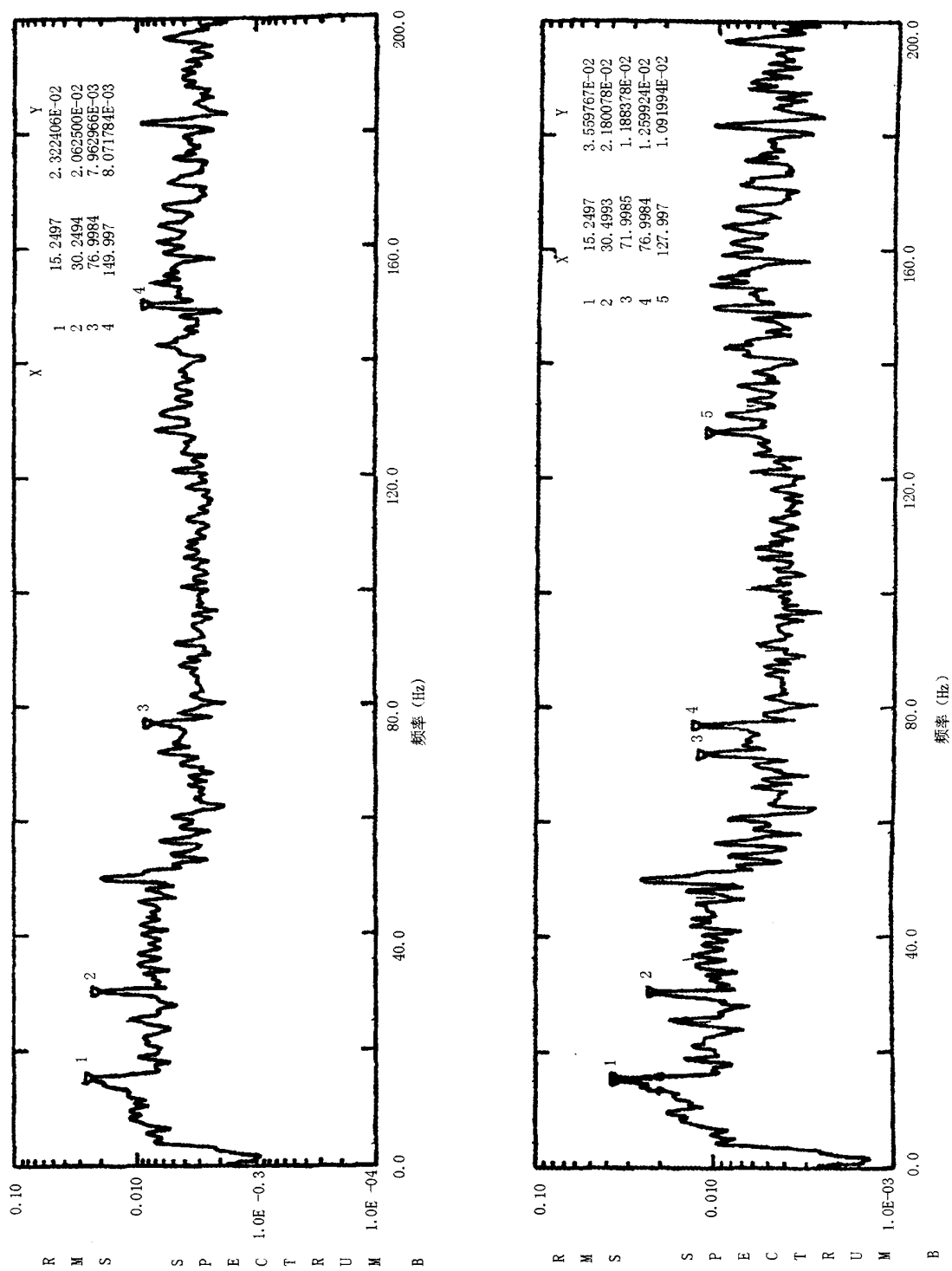


图 4 频谱和极值谱图