

用测量燃烧室的机械振动 来评定燃烧过程的稳定性

葛 国 华

摘 要

本文研究了,在大型液体火箭发动机研制过程中,由于测量技术方面的问题,在不能直接测定燃烧室脉动压力的条件下;采用测量、分析燃烧室头部机械振动的方法,来间接评定燃烧过程的稳定性及对发动机可靠性的影响。并介绍了用频谱图、量值历程图等手段对振动信号的分析方法。并详细介绍了这些分析方法在发动机研制中的各种应用。以及测量燃烧室头部振动方法的其它用途。

一、前 言

在我国自行研制的许多液体火箭发动机(简称发动机)中都遇到过程度不等的燃烧不稳定问题,以及由它引起的发动机可靠性* (简称可靠性)问题。而且是按照提高喷注器稳定性的途径,较好地把它解决了。对燃烧过程稳定性和由它引起的可靠性的判别现在和研制初期的认识有所不同。本文仅作简介,以求商榷。

我们知道,研制初期发动机出现过高频振荡燃烧,并伴有喷注器头部和燃烧室的严重烧蚀(或烧穿),和发动机其它组件被破坏的故障。但是没有准确地测出燃烧室脉动压力 $\tilde{P}_k$ (当 $\tilde{P}_k \geq 10 \sim 15\%$ 燃烧室压力 P_k ,作为产生燃烧不稳定的一种主要判据)。另外还认为发动机工作时,作受迫振动,主要振源就是 $\tilde{P}_k$ 。由于发动机在喷注器方案改进之前,测得的燃烧室综合加速度较大。因此必须要消除振荡燃烧,以降低作用在发动机其它组件上的振动载荷,提高发动机的可靠性。在喷注器和燃烧室设计改进后,稳定性和可靠性均达到令人满意的程度。早期发动机燃烧稳定性鉴定指标是:

1. 试车后的燃烧室头部及内壁均无任何烧蚀或破坏。
2. 额定工况时,燃烧室压力振荡值很小,振荡现象不明显。

而可靠性的鉴定途径和标准是:在长程、严工况试车后,主要组件必须完好。从现在的经验来看,这些指标过严了。

但是在不能直接测量 $\tilde{P}_k$ 的情况下,采用测量、分析燃烧室头部机械振动的方法来了解燃烧过程的稳定性;并对各个喷注器方案进行稳定性鉴别;同时在大量振动数据分析的基础上,确定一个允许的振动量值,来控制喷注器的固有稳定性;预测发动机由 $\tilde{P}_k$ 引起的可靠性。从而避免了在发动机试车后喷注器必须完好的过严要求。经多次试车证明,这是切实可行的,不但保证了发动机应有的可靠性,而且缩短了研制周期,节省经费。

* 不包括其它组件,由于本身设计、生产不当所引起的发动机可靠性。

用测量燃烧室机械振动（简称振动）来判别燃烧稳定性和可靠性的方法，对燃烧频率更高的空间小型双组元发动机的研制，在工程上也有很好的实用价值。

二、用测量振动来反映燃烧过程

从理论上讲，燃烧室中的燃气脉动压力是由许多燃烧单元的脉动压力 $\tilde{P}_{ki}$ 叠加而成。这样每一个 $\tilde{P}_{ki}$ 都会使燃烧室壳体产生动态变形，但其值甚微，相应位移极小，很难测准。然而振动传感器对力的作用反应很灵敏，因此测量振动是确定燃烧室壳体对脉动压力响应的较好途径。

固然压力脉动与振动加速度是两个物理概念，不同的参量，但它们是紧密相连，相互依存的。（有资料报道，燃烧室壳体的振动也会影响燃烧过程。）而在脉动压力响应成加速度的过程中，还有结构传递特性的影响。诚然这两个量值的对应关系有待试验确定，但是两者变化趋势是相同的。即脉动压力的幅值加大，振动加速度值也加大，反之亦同。

由于燃烧过程中每个 $\tilde{P}_{ki}$ 都会有相应的振动量值产生，从而能在振动信号分析中得到它们，但鉴于在正常燃烧过程中， $\tilde{P}_{ki}$ 是随机变化的，因此对振动信号的分析应以图1表示的为宜。

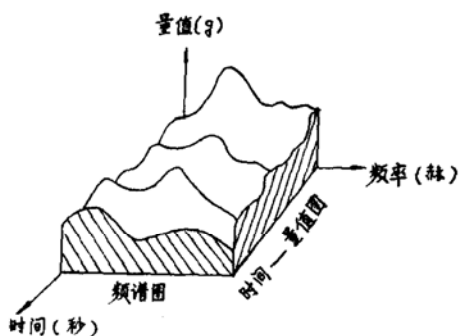


图1 振动信号三维分析示意图

虽然这个间接反映方法，早在60年代我们就有认识，由于当时主要缺乏对振动信号能实时分析的仪器，因此这个方法很长时间未能实际应用。后来有了比较先进的仪器，使这个方法在发动机研制中得到应用，不仅弥补了不能测量 $\tilde{P}_{ki}$ 的不足，而且还切实地解决了一些问题。

三、振动信号分析简介

既然振动信号中包含有许多频率分量，而且各个分量都在作随机变化，那么如何把这些分量的量值分开来，再观察这些量值的变化趋势，这是振动分析的主要任务。因而根据图1，主要分析方法为：

1. 频谱图：即量值沿频率的分布曲线。它又分为瞬时频谱图和某一段时间的平均值频谱图。

2. 量值历程图：即在某一固定频率下，量值随时间的变化曲线。

当然可根据使用仪器的性能，对上述分析方法有所增减。

鉴于对随机振动信号的分析是根据快速富里叶变换处理的（FFT），而它又是建立在对周期信号处理的基础上，这方面有专著。在此仅对有关部分简要介绍：

1. 对复杂周期信号 $X(t)$ 的分析可展开成福里叶级数

$$X(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi n f_1 t + b_n \sin 2\pi n f_1 t)$$

式中 $f_1 = \frac{1}{T_p}$

$$a_n = \frac{2}{T_p} \int_0^{T_p} x(t) \cos 2\pi n f_1 t dt \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

$$b_n = \frac{2}{T_p} \int_0^{T_p} x(t) \sin 2\pi n f_1 t dt \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

T_p 是周期, f_1 是基频。

而周期信号用复数形式表示更为方便, 由欧拉公式:

$$e^{i2\pi n f_1 t} = \cos 2\pi n f_1 t + i \sin 2\pi n f_1 t$$

$$e^{-i2\pi n f_1 t} = \cos 2\pi n f_1 t - i \sin 2\pi n f_1 t$$

则有

$$X(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(a_n - ib_n)}{2} e^{i2\pi n f_1 t} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(a_n + ib_n)}{2} e^{-i2\pi n f_1 t}$$

即周期信号可分为若干个谐波的迭加, 而这些谐波的频率都是基频 f_1 的倍数。故频谱图形状是等间距的离散谱。

2. 对随机信号 $X(t)$ 的分析可用富里叶变换

首先对随机信号进行局部周期化处理, 然后由局部转到全体, 把 $T_p \rightarrow \infty$, 即由周期信号转到非周期信号, 最后把富里叶级数处理成 $-\infty \sim +\infty$ 区域积分, 则可写成:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi f t} df$$

这样我们把随机信号也展开成由若干个谐波分量进行连续迭加。而它的频谱图形状是连续谱。这就是通常所说的频谱分析原理。

这个分析原理首先用于热学、光学, 后来扩大到许多其它领域。显然, 根据这个原理, 可以表明 $\tilde{P}_k$ 是由许多连续谐波分量 $\tilde{P}_{ki}$ 所组成。因此我们把振动信号中各参数与燃烧过程有关的物理含意联系起来可理解为: 频谱图上各个频率的量值(即分频加速度)及其变化, 就是对燃烧过程中各个 $\tilde{P}_{ki}$ 及其变化的响应; 而这些频率分量迭加的随机信号(即综合加速度), 就是对 $\tilde{P}_k$ 的响应。

但是把发动机燃烧室头部的振动信号, 进行处理所得的频谱图, 见图2(a₂), 其中既包含 $\tilde{P}_{ki}$ 引起的振动频谱, 同时也包含了传感器感受到的其它振源的激励。要把它们从复合频谱图中区分开, 还得做很多工作(包括做发动机全机振动试验)。据目前初步判断, 这个频谱图主要是 $\tilde{P}_k$ 的图形, 尤其复合频谱中量值较大的主要分量, 其频率恰与燃烧室一次纵向声学振型的计算频率相近, 故把此分量作为分析燃烧过程的依据。况且此分量确实随着喷注器方案和发动机工况的变化而变化。

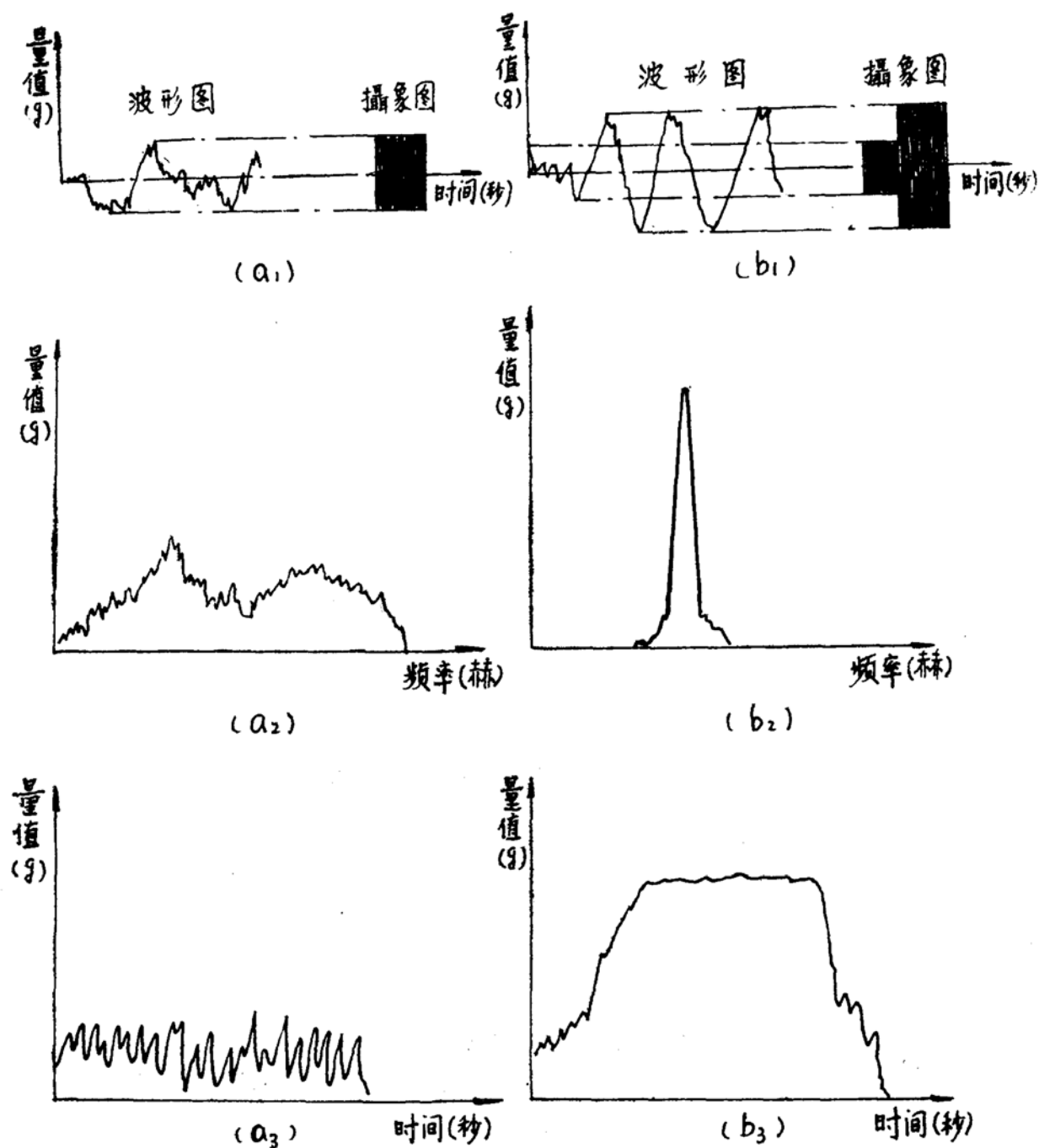


图2 宽带随机信号(左)、窄带随机信号(右)振动信号分析示意图

a_1, b_1 : 综合波形和摄像图

a_2, b_2 : 瞬时值和平均值频谱图

a_3, b_3 : 量值历程图

四、这个“反映”方法在发动机研制中的应用

1. 制定了适用于3348分析仪功能的振动分析规范: 由于在3348的荧光屏上能实时地显示出, 由400个频率分量组成的频谱图, 而且每隔40毫秒更换一幅, 随着信号连续输入, 频谱

图连续更换。因此我们制定了振动信号分析的规范为:

(1) 全工作时间的最大量值频谱图: 在全工作时间内的各个瞬时频谱图中, 每个频率都有自己的最大量值, 这个由400个频率最大值组成的频谱图, 就是全工作时间的最大量值频谱图。

(2) 某段时间的平均值频谱图: 由于不能把瞬时产生, 随即消失的脉冲值, 也作为产生大振动的依据。所以要做某一段时间内的量值平均值频谱图, 以判断大振动是否持续存在。

(3) 量值历程图: 即某一频率下, 全工作时间內量值随时间的变化曲线, 它主要观察量值变化趋势。

2. 我们研制的某一型号发动机, 早期的喷注器方案, 由于在试车时起跳大振动, 从而常使发动机有烧蚀和破坏等故障发生。后来采取改善燃烧稳定性的减振措施, 先后设计了一些改进方案的喷注器, 由于我们用振动来反映和鉴别各种喷注器方案的燃烧稳定性及可靠性, 所以加快了研制进程。

(1) 早期方案的大振动: 当时只能用综合波形的摄影图和量值历程图来分析问题, 诚然有的试车中振动明显加大, 见图2(b₃)(b₁)然而由于没有直接测得 $\tilde{P}_k$ 是否大于10~15% P_k , 深入研究没有依据, 但从大振动导致喷注器烧蚀、性能下降、发动机有机械破坏等现象判断, 可能已经产生了燃烧不稳定。

那段时期, 对燃烧不稳定的类型也众说不一。有的认为是横向, 理由是隔板转接座有烧蚀; 有的认为是纵向, 理由是燃烧主频率与燃烧室一次纵向声振频率相近。也有的认为是中频流量型, 理由是燃烧突出频率与推进剂供应的压力脉动频率相近; 并在泵后与喷嘴前采取脉动压力隔离措施, 经试验证明, 效果不明显。

但从大振动时的振动数据分析可以看出, 燃烧室轴向振动比径向和切向要大, 而且是同一规律, 因此认为是纵向振型更为合适。其实, 大振动(即大的 $\tilde{P}_{ki}$)会反馈影响推进剂的压力脉动, 故“流量型”可能是误解; 另外, 纵向振型在喷注器面处, 是压力波腹, 这样隔板转接座烧蚀, 也是可能的。

因此, 鉴于这个方案燃烧脉动能量较为集中释放, 会引起大振动发生的缘故。所以采取把单元燃烧时滞分散、空滞拉长, 即把火焰峰面沿轴向参差分布的措施, 对削弱纵向振型可能有积极效果。这样使脉动能量沿频率(即各个 $\tilde{P}_{ki}$)较均匀释放, 减小振动量值。

(2) 改进方案的减振趋势: 从量值历程曲线上看与早期方案有明显差别。早期当量值爬起后变平, 似乎大振动持续着, 见图2(b₃); 而现在是波浪起伏的曲线, 似乎有大振动激发和被抑制的“搏斗”趋势, 见图2(a₃)。故可得出减振措施方向正确的判断。

(3) 定型方案基本达到减振目的, 也提高了发动机的可靠性: 这个方案的设计指导思想, 基本如上所述, 详情从略。从许多次试车的振动信号分析看, 一般情况下, 振动频谱图呈宽带随机特征, 各个频率的量值均较小。从而认为相应的燃烧过程是稳定的。

从频谱图上看, 压力脉动能量不仅沿频率较均匀分布, 而且较高的脉动量值部分移到了高频区域。就可靠性角度分析, 高频振动产生机械破坏的可能性要低得多, 这也提高了可靠性。

但偶尔会起跳大振动, 这时的摄影图和频谱图等均与早期方案产生大振动时相似。后来分析认为, 这和推进剂温度较高有关。

故此只要控制推进剂的使用温度, 发动机便可稳定而可靠地工作了。

(4) 用“振动”反映发动机可靠性: 发动机的可靠性是以各零组件正常工作为主要标志, 而对于由 $\tilde{P}_k$ 引起的发动机可靠性, 也可以由“振动”来预测*。只要在发动机工作时各组件测得的振动量值不仅很小, 而且它们的主要频率互不相同, 这时各组件振动信号的频谱图都呈宽带随机特征, 发动机工作可靠; 但在早期发动机中一旦出现大振动, 不仅各组件的振动量值加大, 而且各主要频率均与燃烧室轴向振动频率相同, 频谱图都呈窄带随机特征, 甚至是谐波振动, 这时常有机械破坏已是规律。因此, 确认振动不仅反映燃烧过程的稳定程度, 同时也可以在一定程度上反映发动机可靠性, 甚至是可靠性的重要标志。我们可以统计地确定某一允许振动量值, 用以控制燃烧稳定程度和可靠性。

既然如此, 那么只要发动机各组件能正常工作, 而试车以后各组件本身存在的某些既不影响可靠性, 又不影响发动机性能的缺陷是允许的, 这已为多次试验所证实。因为要消除这些缺陷, 往往是很难的。

(5) 振动分析描述了燃烧过程:

a. 燃烧过程的波动性: 在实时显示的瞬间值频谱图中, 随着振动信号连续输入, 每个频率对应的幅值是在不停地跳动, 这说明 $\tilde{P}_k$ 中每个 $\tilde{P}_{ki}$ 是在波动的, 即使是稳定燃烧, 也会有波动只是波动较小而已。

b. 稳定燃烧过程中 $\tilde{P}_k$ 的宽带随机性: 频谱图上有许多量值不等的峰值, 并在小范围内变动。

说明压力波动能量较分散释放, 这是燃烧过程稳定的象征, 频谱图呈宽带随机特征, 见图2(a₂)。

c. 燃烧不稳定时大振动及其窄带随机性: 在产生大振动时, 频谱图中往往有“孤峰”突起的窄带随机特征, 见图2(b₂)。此时燃烧波动能量集中在几个、甚至是1个燃烧单元释放。如前所述, 大振动意味着有大的 $\tilde{P}_{ki}$ 存在, 伴随其它特征, 可以预计燃烧是不稳定的。

五、“振动”的应用

综上所述, 在沒有条件测量 $\tilde{P}_k$ 时, 用振动反映 $\tilde{P}_k$ 确有实用价值, 即使有条件测量 $\tilde{P}_k$ 时, 也不能缺少振动这个有效手段。它主要用途有:

1. 用“振动”鉴别 $\tilde{P}_k$ 测量的准确性

诚然脉动压力与振动加速度之间还没有确立对应数值关系, 况且泵压式发动机燃烧室振动信号中还迭加了其它振源的激振力, 但其频谱图中必然可以找到对主要燃烧频率 $\tilde{P}_{ki}$ 的振动响应。因此, 振动至少可以作为辅助手段, 定性地鉴别 $\tilde{P}_k$ 测量中几个主要 $\tilde{P}_{ki}$ 的频率和量值的准确性, 及其随时间的变化规律。

2. 用“振动”反映高频压力脉动

对大、中型运载发动机, 由于燃烧主频率居中, 而且多采用再生冷却加液膜冷却方法, 使燃烧室壁温较低, 所以 $\tilde{P}_k$ 测量较易实现。但对于空间小型发动机, 主要燃烧频率较高(在10千赫以上), 况且多采用液膜冷却加辐射冷却, 使燃烧室壁温较高(1000℃左右); 同时喷注器面积小, 所以要把脉动压力传感器直接与燃烧室内腔齐平安装, 就很难做到; 即使能引

* 预测是指在交付发动机的抽检试车中, 如果测到的振动加速度小于允许值, 则预测到交付发动机的可靠性较高。

出 $\tilde{P}_k$ 的信号,而高频信号部分频率损失较大,量值衰减较多,甚至达到无法分析的程度。更何况这种发动机多为挤压式,所以燃烧室上的机械振动基本上是对 $\tilde{P}_k$ 的响应。这时用“振动”反映脉动压力,更有工程上的实用价值。

3. 可在一定程度上反映可靠性

(1) 如前所述,在用确定的某一振动允许值来标志燃烧稳定性的同时,也在一定程度上表征由 $\tilde{P}_k$ 引起的发动机可靠性。

(2) 把振动频谱分析与各组件的共振频率相结合,可对各组件作动载分析,以掌握各组件的工作可靠性。

六、结束语

在发动机研制中,当没有条件准确测量 $\tilde{P}_k$ 时,可采用测振动来间接评定燃烧过程的稳定性及其对发动机可靠性的影响;还可避免试车后主要组件仍要必须完好的过严标准;起到引导喷注器改进和鉴别喷注器方案的作用,积极地推动了发动机的研制进程。

当然振动测量中测点位置、传感器安装、信号记录和分析中还有许多问题需要研讨,本文仅把实践中认识到的问题作初步小结,以求起到引玉作用。文中之错,恳请指正。

参 考 文 献

- (1) 刘涌康等译:频率分析.上海机电二局计量站,1979年.
- (2) 上海交通大学103教研室:《振动数据分析》.1977年.
- (3) Harrje D. T. and Reardon F. H.: Liquid propellant rocket combustion instability, 1972.
- (4) AD-626768, 31, 1965.