

# 推力室响应特性模拟试验研究

李 鳌, 张蒙正, 王 玫, 张志涛

中国航天科技集团公司第六研究院十一所

**摘 要:** 液体火箭发动机推力室响应特性包括起动加速性及关机减速性, 这些都是考核发动机性能的指标, 其通常结合发动机的热试车进行测量。本文提出了一种间接测量推力室响应时间的方法, 即通过测量发动机相关部件的充填时间等参数估算推力室响应特性, 然后对该方法的误差进行了分析。文中还介绍了具体的试验方案和试验结果, 讨论了本方法的应用效果和发展前景。

**关键词:** 推力室; 响应特性; 充填时间; 高速摄影

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2004)01-0016-04

## 1 引言

液体火箭发动机推力室响应特性包括起动加速性及关机减速性。起动加速性是从发出起动指令时刻到推力室压力达到额定压力 80~90% 时所需的时间, 关机减速性是从发出关机指令到完全停止燃烧和推力室内燃气完全排空为止的时间<sup>[1]</sup>。这两项指标是发动机的关键指标, 应该尽可能准确地提供。如果用户对该指标有明确的要求时, 在发动机的设计初期就应该进行分析研究。

推力室响应特性与启动阀门的动作特性、启动阀门与喷注集流腔之间的管路特性、集流腔特性、喷注器特性、推进剂化学反应特性等均有关系, 是多个阶段性过程消耗时间的总和。通常推力室的响应时间是在发动机热试车时直接测量, 即起动加速性是在发动机热试车时通过测量控制阀门开启时刻室压上升到额定压力 80~90% 时的时间间隔来确定, 关机减速性是在发动机热试车时测量控制阀门关闭时刻到室压下降到环境压力时的时间间隔来确定。

虽然在发动机热试车时直接测量得到推力室

的响应特性数据准确, 但是有两个方面的缺点: 一是必须要结合发动机热试, 热试的成本较高, 且通常要在设计的前期进行; 二是测量得到的数据是单一的、综合性的参数, 无法用于分析各个分过程需要的时间。

为了能够在发动机的设计阶段尽可能早地、低成本地研究响应特性的问题, 需要设计新的试验方案。在发动机设计初期对推力室响应特性影响因素进行试验及分析, 获得供应系统各零、部件对发动机响应特性指标的影响程度, 确定改善指标的努力方向和改善空间, 对管路、阀门、推力室头部集流腔的方案选择、设计改进有重要意义。同时, 也减轻了通过热试车直接测量造成的经费等方面的负担。

为了满足在短期内、低成本地研究推力室响应特性的现实需求, 本文提出了一种间接测量推力室响应特性的方法。该方法的核心是在模拟试验条件下测量发动机各相关部件的充填时间。

## 2 模拟试验原理及方案

### 2.1 模拟试验原理

挤压式液体火箭发动机准备起动时, 推进剂

收稿日期: 2003-09-02; 修回日期: 2003-09-29。

作者简介: 李鳌 (1972—), 男, 工程师, 研究领域为火箭发动机燃烧机理。

在挤压气体的作用下充填到启动电磁阀（推进剂主阀）前，当电磁阀接到启动信号打开后，推进剂在挤压气体作用下，流经电磁阀、管路、集流腔、喷注器通道，进入推力室，雾化、蒸发、燃烧产生燃气，推力室压力迅速升高。对泵压式发动机，则需要考虑发生器、管路等等更多的环节。

因为想通过模拟试验的方法获得推力室响应特性指标，所以不考虑使用真实的推进剂，而是用水进行推进剂模拟。发动机则使用真实部件。由于没有化学反应，无法通过发动机室压测量获得指标，但是可以利用其它手段进行间接测量，然后分析测量结果和真实指标之间的误差。所以本文采用的方法就是利用高速摄影手段测量模拟介质从电磁阀通电开启的时刻到开始流出推力室头部所经历的时间（充填时间）。当然，该方法完全适用于测量各个管路部件的充填时间，例如本文测量了电磁阀的起动特性。

采取同样的方法测量从电磁阀断电时刻到推力室头部射流完全断开时的时间间隔，可以估计发动机的关机减速性指标。

## 2.2 模拟试验方案

试验系统主要由高速摄影机、电磁阀、发光二极管、试验件、模拟介质供应部分、供应参数测量部分等组成，模拟试验系统的示意图见图1。

试验时，闭合手动开关，电磁阀通电开启，同时发光二极管通电起辉，模拟介质通过电磁阀、管路、然后进入推力室头部、从喷注器喷出，用高速摄影机记录这段时间的图像，进行分析计算，就可以确定相应的充填时间，进而可以估计推力室的起动加速性。断开手动开关、电磁阀关闭，同时发光二极管熄灭，模拟介质记录下发出电信号到喷注器出口完全断流的时间，可以获得电磁阀到推力室头部段的关闭特性，进而估算推力室的关机减速性。

如果试验中电磁阀、电磁阀组合阀后管路作为试验对象，就可以获得相应部件的充填特性和关闭特性，然后可以计算得到电磁阀、阀后管路、头部的充填特性和关闭特性，分析它们对发动机推力室响应特性的影响权重，确定改善的努力方向和改善空间。如果对不同的电磁阀、管路、头部方案进行对比试验，可以根据指标要求进行方案优选。

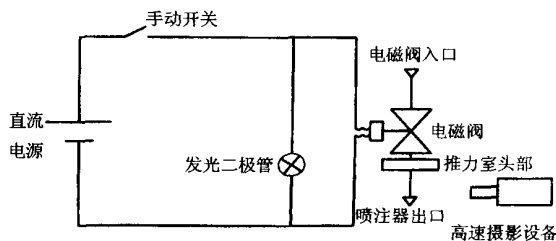


图1 推力室头部充填时间模拟试验系统示意图

## 3 模拟试验内容和结果

### 3.1 模拟试验内容

根据上述方案，进行某型号小推力发动机推力室响应特性研究。该发动机的介质供应方式为挤压式，推进剂是液体双组元自燃型。试验中主要进行了以下工作：

电磁阀、头部组合件的充填特性模拟试验。试验方案见图1。试验得到了从电磁阀通电时刻到推力室头部开始有水流出时的时间间隔。

电磁阀的起动特性模拟试验。试验方案类似图1的系统配置，但是去掉了推力室头部，所以试验结果是从电磁阀通电时刻到电磁阀出口开始有水流出时的时间间隔。

电磁阀的关闭特性模拟试验。试验方案见图1，得到了从电磁阀断电时刻到电磁阀出口射流完全断开时的时间间隔。

由于试验条件的限制，以上试验中氧化剂路与燃料路的试验均分开完成。如果改善试验条件，氧化剂路和燃料路的试验可以同时进行。这时还可以测量撞击式喷嘴从电磁阀通电到撞击式喷嘴射流开始撞击时（也可以选择完全雾化时刻）的时间间隔，该参数会更接近开机加速性指标。

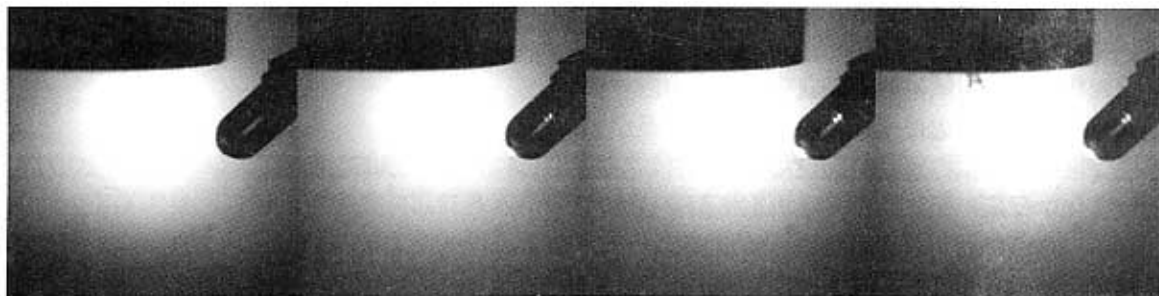
### 3.2 试验结果

图2是电磁阀、推力室头部组合件充填过程的部分图像，图3是电磁阀关闭过程的部分图像。试验时高速摄影机采用4500帧/秒速度拍摄。

从图2中可以清楚地看出，在第1835帧图像中的二极管尚未发光，而第1836帧图像中的二极管已经发光。将第1836帧作为通电零时刻，第1920帧明显地看出有液体流出，以第1920帧图像作为充填完成时刻，则充填时间 = (1920 -

$1836) \times 0.222 = 18.648 \text{ (ms)}$ 。即该推力室氧化剂路从电磁阀通电到氧化剂流出推力室头部需要的时间是 18.648ms。然后再进行燃料路从发出开

机指令到头部有介质流出的时间,最后可以将氧化剂与燃料二者中时间较长的作为开机加速性的参考值。



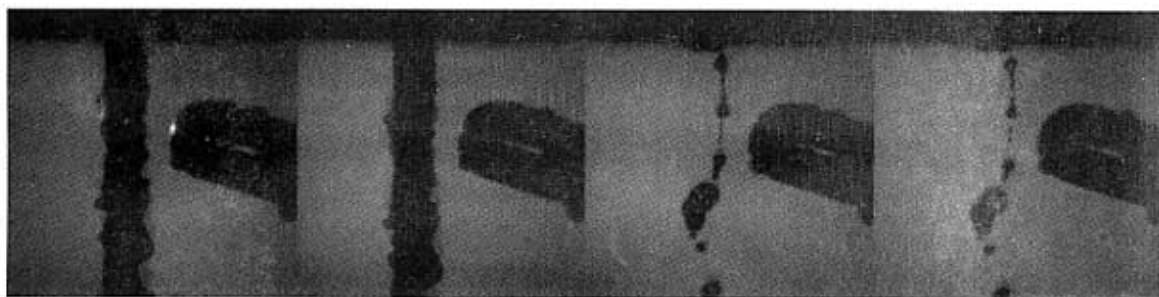
第 1835 帧

第 1836 帧

第 1919 帧

第 1920 帧

图 2 充填过程中推力室头部图片(节选)



第 6210 帧

第 6211 帧

第 6443 帧

第 6444 帧

图 3 关闭过程中的电磁阀出口处图片(节选)

从图 3 中可以清楚地看出,在第 6210 帧图像中的二极管正常发光,而 6211 帧图像中的二极管已经变暗,因此将第 6211 帧作为断电零时刻(发出关机指令时刻)。电磁阀关闭后,水流速度逐渐减缓、射流直径变细、破碎,从第 6444 帧图像中可以看出,液滴已经与头部彻底断开,所以将第 6444 帧作为关机完成时刻。最后计算关机时间 =  $(6444 - 6211) \times 0.222 = 51.726 \text{ (ms)}$ ,即燃料路从发出关机指令到头部没有介质流出的时间为 51.726ms。然后再进行燃料路从发出关机指令到介质停止从头部流出的时间,最后可以将氧化剂与燃料二者中时间较长的作为关机减速性的参考值。

## 4 模拟试验的误差分析

### 4.1 试验方法本身的误差

严格地说,模拟试验中测量的是充填时间,而推力室响应特性指标则与推力室室压变化时间两者有着密切的关系,但是肯定存在差别。对于开机加速性来说,充填完成后,推进剂仅仅是供应到燃烧室中,还需要经历雾化、蒸发、掺混、化学反应等过程,才能建立室压,所以充填时间的值要小于开机加速性的值。同样的,关闭时间与关机加速性之间也有一定的差别。

一种可能解决该问题的方法是:针对某一特定类型的推力室,将热试车时测量得到的数据与

模拟试验得到的数据进行对比，并积累一定数量的样本，进而分析总结两种数据之间的关系。有可能两种数据关系是比例关系，即充填时间与开机加速性的比值基本不变，也可能两者之间相差一个常数，然后根据对总结的规律进行验证。有了相当的置信度后，就可以根据充填时间估算开机加速性指标。同理也可以解决关机加速性问题。再者，试验中使用水模拟推进剂，存在物性上的差别，所以测量得到的充填时间与实际的充填时间有一定差别。

4.2 测量误差

除了测量方法本身的误差，测量用的仪器和设备也是可能的误差来源。经分析可能存在的误差如下（仅分析充填试验）：

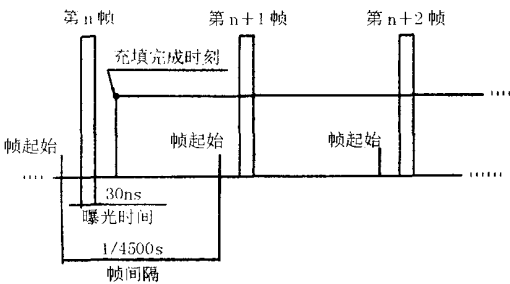


图 4 模拟试验图像拍摄方式

二极管通电到发出可被高速摄影即感受光强所需的时间。该影响有待进一步分析。

高速摄影机图像拍摄方式产生的误差。如图 4 所示，高速摄影的帧间隔是 0.222ms (1/4500s，高速摄影机有高质量的时钟芯片，脉冲间隔经过示波器检测)，但是其曝光时间是 30ns。而实际要捕捉的事件（填充完成）可能出现在第 n 帧图像曝光结束到第 n+1 帧图像开始曝光前的任何时刻，但是分析高速摄影结果时只能将第 n+1 帧作

为事件发生的时刻，这样就产生了误差。但是这种误差对于一个事件捕捉而言，其最大值也小于一个帧间隔。因为试验中需要捕捉两个事件（二极管发光和头部出水），所以此项误差的最大值小于±0.444ms。

5 应用前景

本文提出了研究推力室响应特性及其影响因素分析的模拟试验方法，经过实践证明是可行的，是高速摄影技术的一项具体应用。该方法还需要有一个逐步完善的过程。例如，如何选择具体的事件会更接近实际的推力室响应特性指标，是喷注器有介质流出，还是介质开始接触，还是介质充分雾化？还有使用物性更接近真实推进剂的介质是否更有利？还有模拟推力室工作时的外界压力环境是否更为有利？这些问题都需要通过实践来回答。有理由相信，终究会找到最合适解决问题的方法。

在发动机的研制过程中，有很多时候需要测量某事件需要的时间，只要事件是可见的（能够被高速摄影机捕捉到），就可以考虑使用本文提出的方法。

目前，由于高速摄影设备的价格比较昂贵，使本方法的使用受到一定程度的限制。但随着电子技术的飞速发展，高速摄影的性能会越来越好（如更快的拍摄速度能提高时间的分辨率），价格也将有所降低，会使该方法得到更为广泛的应用。

参考文献：

[1] 加洪 r r，等著. 液体火箭发动机结构设计. 宇航出版社，1992.