

# 液体火箭发动机液流试验系统 测量过程控制研究

朱 伟, 王 昕

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 介绍了液流试验系统测量过程控制。从日常液流试验系统测量过程验证及控制方法入手, 详细介绍了各种测量验证及控制方法的应用场合及其优缺点。最后给出了目前开展测量控制工作所存在的问题及今后的发展方向。

**关键词:** 液流; 试验系统; 测量; 过程控制

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2011) 04-0071-05

## Measuring process control of liquid rocket engine liquid flow testing system

ZHU Wei, WANG Xin

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

**Abstract:** The measuring process control of the liquid rocket engine liquid flow testing system is introduced. Proceeding from daily testing and measuring process control method, the advantages and disadvantages of each measuring verification and control method are elaborated. The problems existing in current measuring process control and development trend of the liquid flow testing system for liquid rocket are pointed out.

**Keywords:** liquid flow; testing system; measurement; process control

## 0 引言

在液体火箭发动机液流试验中, 测试数据的准确性关系到对被测产品的性能评价。不准确的试验数据, 近之影响设计方案的确定, 远之关系到发射任务的成败。可以说测试数据准确、可靠是任何一项试验的基本要求。对测试实施测量过

程控制, 就是运用测量过程验证及控制方法, 对测试过程进行监控, 以保证测试数据准确可靠。

## 1 液流试验系统测量过程验证方法

一套典型泵压液流试验系统一般由泵源、管路、流量调节元件、压力、流量测量仪表以及系统控制等设备组成。被测试产品的测试过程可描

收稿日期: 2011-04-15; 修回日期: 2011-04-28

作者简介: 朱伟 (1978—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验技术

述为：在给定流量下或给定压力下，测量产品的压降或流量。试验中所使用的测量仪表都是经过计量单位检定并具有相应的准确度等级，仪表的检定周期一般为一年。那么，如何证实试验系统的状态是否满足要求？仪器仪表会不会有超差现象？将测量设备拿去再次检定是不切实际的，这时就需要引入一套可行的测量验证方法。目前获取测量过程中的变异情况最常用的方法是对核查标准的重复测量。核查标准在 GB/T19022-2003（对应的 ISO 标准为：ISO10012-2：2003）中定义为：为了对某个测量过程进行控制，通过测量来收集数据所使用的测量设备、产品或其他物体。在液体火箭发动机液流试验领域核查标准的建立有以下两种途径：a.通过设置考台件；b.引用同精度或更高精度的测量仪表。这里所提的考台件是指用来考核液流试验系统是否符合预期要求的试验样件或测量设备。

核查标准一旦确立，就应该制定相应的测量过程验证方法。依据核查标准的不同，测量过程验证方法又可分为考台件考核法及系统核查法。

### 1.1 考台件考核法

每个考台件都有各自的特征参数并具有相应的合格限。每次考台试验所得的测试值与考台件的合格限进行比对，并将单次考台值是否落在合格限范围内作为系统是否稳定的判据。

### 1.2 系统核查法

系统核查法是针对未设考台件或临时组建的试验系统所应用的一种验证方法，系统核查法中最常用的两种方法是流量核查和压力核查。

#### 1.2.1 流量核查

流量核查主要应用于小流量系统（流量一般小于 0.5 kg/s）和临时组建的试验系统中。小流量系统使用称重法对流量计进行核查。称重法是在稳定流量下，通过高精度的电子称称得流经流量计的总流量，通过计算得出单位流量后与流量计实测流量进行比对，要求差值的绝对值应小于流量计的满量程误差。对于临时组建的试验系统可以通过串联一台流量计的方法进行流量核查。两流量计实测值差值的绝对值应小于两仪表最大允许误差的均方根之和，仪表的最大允许误差指

仪表的满量程误差。在这里要求核查用的流量计的精度应不低于被核查流量计的精度，而量程也应不大于被核查流量计的量程范围。

#### 1.2.2 压力核查

压力测量的核查方法是引入一套核查用仪表，通过它与试验用仪表进行比对，要求压力之差应小于两仪表最大允许误差的均方根之和。同样在这里要求核查用的压力仪表精度应不低于被核查压力仪表精度，而量程也应不大于被核查压力仪表的量程范围。

对比考台件考核法和系统核查法，前一种方法优于后一种方法，这是因为考台数值的波动是对压力、流量以及系统管路等因素变动的综合反映，考台件考核法能够对整个试验系统的状态进行验证。

## 2 液流试验系统测量过程控制方法

测量的控制可以从简单的工艺规程、数据记录表格等到复杂的统计控制。统计控制是测量过程的高级别控制，也是目前最先进的控制方法。测量过程控制的先驱休哈特先生就说过：“如果测量工作没有调整到统计规律状态，则在逻辑上就完全不能被认为是在做某种测量”。

目前，在液体火箭发动机液试系统测试控制方面所应用的方法是对系统进行稳定性评估。系统的稳定性评估是指对考台件的考台值或测量仪表的系数通过数理统计的方法来判断测量过程是否处于随机统计控制状态，是否出现了粗大的或系统的变异干扰。稳定性评估的目的是根据评估分析结论，发现试验系统有关变异情况的信息并分析、查明原因，以便采取措施消除异常情况，使试验系统保持正常的工作状态。开展评估还应具备以下条件：a.试验系统技术状态应一致；b.考台件的技术状态应一致；c.以考台件的试验数据作为评估依据；d.观察值为独立随机样本。

## 3 液流试验系统稳定性评估方法

目前采用周期为一年的稳定性评估来判定试

验系统的稳定性。一旦确定系统稳定后, 就可对以后一年内系统的稳定性做出评定。稳定性评估方法依据程序文件和院标中的要求进行, 具体评估方法采用控制图评估法或统计检验法, 目前对液流试验使用控制图评估方法进行评测。

控制图法由以下两部分组成: a. 以考台件的合格限作为控制图的上下界限, 以每年度内考台值的均值作为子样做图, 采用 GB/T19022-2003 标准中相应判定法则判断测量过程是否处于统计控制状态; b. 对本年度内考台值的月均值进行数理统计, 通过计算得到月均值的平均值和标准差, 取置信水平  $\gamma=0.8$ , 双侧概率 (置信概率)  $P_1=P_2=0.05$ , 确定双侧容许限后制做控制图, 以反映考台件年度内的波动趋势。

从以后的发展趋势看, 控制图法越来越被广泛地认可和使用, 这是因为控制图法直观, 通过对控制图中子样点所在的位置及走势来判断测量过程是否处于统计控制状态。

## 4 目前存在的问题

### 4.1 缺少考台件的设计规范要求

考台件作为核查标准要解决两个问题: a. 通过测量核查标准发现测量过程中的变异情况, 建立信息反馈系统; b. 通过重复测量核查标准找出测量过程本身固有的统计特性参数。考台件作为一种敏感元件, 其制作、使用及其维护保养均应该遵循相应的规范要求。但是由于测试过程的复杂性和产品的多样性, 给编制设计规范带来一定困难, 以下仅给出了目前考台件的使用信息及需求。

#### 1) 考台件的分类

考台件有自制和直接借用产品两种。是否需要自制取决于产品的结构特性、外形尺寸及材质。如推力室等具有复杂型面大尺寸产品液流试验, 就必须自制考台件; 而如节流圈、钢制汽蚀管等小尺寸产品, 就完全可以移作考台件使用。

#### 2) 考台件的结构形式及材料要求

首先, 作为考台件, 任何能引起流量和压力测量波动的因素, 均能够快速反映到考台数值

上。双孔板节流件具有结构简单、性能稳定等特点, 目前大部分考台件采用此种设计结构, 图 1 给出了结构简图。考台件设计成双孔板结构, 其目的是增加一级孔板出口背压, 减少不必要的干扰因素。

除了双孔板结构, 在特征压力较高的场合下, 汽蚀管考台件也是一种不错的选择, 结构简图见图 2。汽蚀管考台件的优点在于高的稳定性。

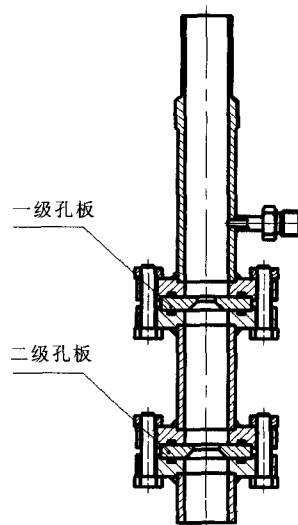


图 1 双孔板考台

Fig. 1 Dual orifice check-up article

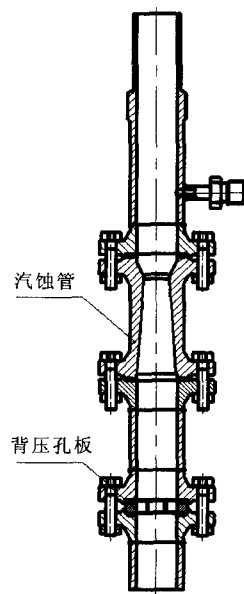


图 2 汽蚀管考台件

Fig. 2 Venturi check-up article

目前考台件的材料一般选用 1Cr18Ni9Ti, 该材料的优点是具有较强的抗腐蚀能力。

考台件在设计时应尽量避免焊接结构, 以降低材料内应力。除此之外, 孔板应具有足够的强度及刚度以抵抗试验介质所带来的应力。

### 3) 考台件特征值的确定

考台值是一个包含所有误差因素的综合特征参数, 它包括特征值本身及一定宽度的合格限。考台件的流量及压力变化范围应尽量涵盖产品的流量及压力范围, 也就是说, 考台件的流阻系数与产品相等或相近。

考台件特征值应可通过更准确的测量得出, 也可通过本测量过程的重复测量和分析来确定, 目前所使用的是第二种方法。重复测量的一般方法是在足够长的时间跨度内获得的一组考台数据, 并通过 QJ 1384-88 《正态分布双侧允许限系

数表》确定的具有上下限的控制限。一旦液流试验系统上设置了考台件并确定了考台件的值和其稳定性数据后, 就可通过考台件的值和其稳定性数据来确定要控制的测量过程的统计参数。

### 4.2 稳定性评估方法有待进一步完善

#### 1) 缺少极差控制图分析

在前面叙述中可知, 目前所使用的控制图法为均值控制图。而在 GB/T4091-2001 《常规控制图》中, 控制图为联合控制图, 其中最常用的是平均值-极差控制图。均值图用于观测产品质量特性均值是否处于或保持在所要求的水平; 极差控制图用于观测产品质量特性标准差是否处于或保持在所要求的水平。通俗地说, 均值图观测数据的位置, 而极值图观测数据的离散程度。

举例说明分析方法的建立过程。表 1 是一组考台数据, 共 30 个, 分为 10 个组。

表 1 考台数据分组  
Tab. 1 Data grouping of check-up article

		核 查 组 数									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量 次数	1	5.344	5.346	5.361	5.358	5.364	5.336	5.357	5.336	5.339	5.342
	2	5.360	5.357	5.357	5.360	5.348	5.354	5.340	5.351	5.326	5.342
	3	5.335	5.367	5.358	5.342	5.339	5.363	5.338	5.344	5.330	5.341
求和		16.039	16.07	16.076	16.06	16.051	16.053	16.035	16.031	15.995	16.025
平均值		5.346	5.357	5.359	5.353	5.350	5.351	5.345	5.344	5.332	5.342
极差		0.025	0.021	0.004	0.018	0.025	0.027	0.019	0.015	0.013	0.001

表中数据平均值和极差为:

$$\text{总平均值 } \bar{\bar{X}} = \frac{\sum \bar{X}_i}{30} = 5.348;$$

$$\text{平均极差 } \bar{R} = \frac{\sum R_i}{10} = 0.017.$$

计算控制限 (样本大小  $n=3$ ):

对于均值图 ( $n=3$ , 查表得  $A_2=1.023$ ),

上控制限为  $\bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R} = 5.365$ ,

下控制限为  $\bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R} = 5.331$ ;

对于极差图 ( $n=3$ , 查表得  $D_3=0$ ,  $D_4=2.574$ ),

上限为  $D_4 \bar{R} = 0.044$ , 下限为  $D_3 \bar{R} = 0$ 。

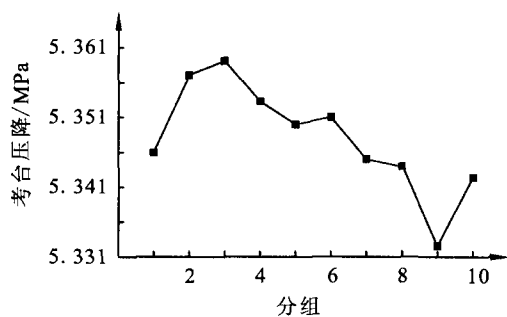
图 3 给出了平均值-极差控制图。

有了控制图后, 就可以开展控制图分析, 在 GB/T4091-2001 中对测量过程稳定状态的判断有相应的原则要求, 此处不再赘述。

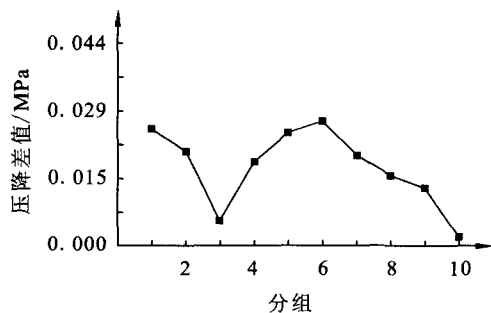
#### 2) 评估时间跨度大, 缺乏时效性

目前试验系统稳定性评估的周期为一年, 而在日常试验中仅进行考台试验, 并未开展统计分析工作。如果在试验过程中及时对考台试验数据进行统计处理, 或通过控制图法进行点子走势分

析,即可使测量过程实现实时统计控制。



(a) 平均值控制图



(b) 极差控制图

图3 平均值-极差控制图

Fig. 3 Control of mean values and range

目前已开展数据统计分析程序的开发研究,程序的核心是引用计量值控制图中的平均值-极差控制图方法,将实时考台数据输入指定数组中,可自动生成平均值控制图及极差控制图,并将异常数据或超出警戒限的数据自动标示出来,以实现实时监控的目的。

## 5 液流试验系统测量过程控制的发展方向

对液流试验系统开展测量过程控制有助于我

们掌握试验系统的状态,防止其出现较大的波动,进而保证测试数据准确反映被测试产品的特性。叙述了目前在测量过程控制工作中所使用的方法及其优缺点。在今后的工作中,液流试验系统测量过程控制将向标准化、程序化、实时监控方向发展,其必定会在液体火箭发动机液流试验系统测量过程中发挥重要作用。

### 参考文献:

- [1] 董双财. 测量系统分析-理论、方法和应用[M]. 北京: 中国计量出版社, 2006.
- [2] 上海市计量测试技术研究院. 常用测量不确定度评定方法及应用实例[M]. 北京: 中国计量出版社, 2000.
- [3] 李为柱. 2000 版 ISO9000 族标准统计技术应用教程[M]. 北京: 企业管理出版社, 2001.
- [4] 李宗扬. 计量技术基础[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
- [5] 孙淮清. 流量测量节流装置设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [6] 倪育才. 实用测量不确定度评定[M]. 北京: 中国计量出版社, 2010.
- [7] 蔡武昌. 流量测量方法和仪表的选用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [8] 于善奇. 应用统计技术[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [9] 耿文忠. 新型液体火箭发动机试车台起动试验系统方案设计[J]. 火箭推进, 2008, 34(3): 53-57.
- [10] 黄强, 吴建军, 刘洪刚, 等. 液体火箭发动机基于神经网络的实时故障检测算法实现 [J]. 国防科学技术大学, 2007, (5): 14-17.

(编辑: 王建喜)