

液氧/煤油发动机试车主要参数测量方法研究

赵万明

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 针对液氧/煤油发动机地面试车中测量参数类型多, 各参数测量原理不同, 采集装置各异、校准方法复杂, 测量过程出现转速数据波动, 低温温度测量精度低, 低温压力零位漂移, 负推力修正及低频脉动压力参数测量等诸多技术问题进行了深入研究, 提出了解决途径、验证方法等。

关键词: 液氧/煤油发动机试车; 参数测量; 测量方法

中图分类号: V433

文献标识码: A

文章编号: (2006) 05-0051-06

Research of measuring method in the LOX/kerosene engine tests

Zhao Wanming

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

Abstract: There are many kinds of parameters in the ground tests of LOX/kerosene engine. fluctuation of roating speed data fluctuation, low temperature deviation, zero position drift of pressure at temperature, negative thrust correction and measurement of low frequency pulsating pressure measurement are the technical problems in measurements. The methods of measurements and the technical problems are studied in this paper. Solutions and the methods of verification are also proposed in the paper.

Key words: LOX/kerosene engine test; parameter measurement; method of measurement

1 引言

液氧/煤油发动机地面试车中测量参数多, 校准方法复杂。传感器输出的信号有电压型、电流型、频率型及电荷型, 同一种参数的各种传感

器输出波形各异。这些参数中部分参数的测量原理、校准方法、数据处理要求和常规发动机不同, 且涉及低温测量技术。前期试车中出现了自带传感器如何校准, 转速数据波动, 低温温度准确测量, 低温压力零位漂移, 负推力修正及低频脉动压力如何测量等各种各样的测量技术问题。

收稿日期: 2006-02-03; 修回日期: 2006-07-04。

作者简介: 赵万明 (1958—), 男, 研究员, 研究领域为液体火箭发动机试验测控技术。

万方数据

为了准确、可靠、完整的获得被测参数,对出现的技术问题进行了深入细致的研究,采取了新技术、新方法,解决了许多技术问题。

2 流量、转速测量

液氧/煤油发动机试验中,流量、转速传感器输出的信号是频率信号,输出的波形为不规则的近似正弦波。试车中遇到了转速测量值波动较大,如何提供启动段、稳定段流量瞬时值、平均值等技术问题。

2.1 转速参数分频技术

液氧/煤油发动机自带主涡轮泵、氧预压泵和燃料预压泵三只转速传感器。这三只传感器沿动环圆周依次分布8个、3个、22个导磁叶片,涡轮泵转一圈,转速传感器输出多个波。由于加工工艺、精度等因素,多叶片之间的间隙不均匀,加之线圈的磁铁磁性不均匀,涡轮泵预冷后叶片外圆变形,同心度变差,试车时涡轮泵转动不平衡,强振动等因素影响,造成输出波形不正规,单周期测量的数据波动大。如主转速转一周输出8个波,8个波的幅值和周期宽度不一样,经整形后每个波的周期宽度仍不一样。单周期采样时,可能采到8个波中的任意一个波,导致采集的数据波动较大。解决的根本途径是改善转速传感器输出波形。但要做到涡轮泵预冷后叶片间隙均匀、转动平稳、振动小是很困难的。经过分析、研究,反复试验,可以从技术上采取分频(多周期测量)措施减小采集数据波动。

解决的技术途径是对转速采取硬件或软件分频。如燃料预压泵转一圈输出22个不规则的近似正弦波,经频率信号调理器的滤波、放大、整形、隔离,变成22个幅值相等、周期宽度不等的正规方波,经22分频处理,只输出一个完整的正规方波。这一个方波的周期相当于燃料预压泵转了一圈。采集一个正规的方波就代表了该时刻的转速,22个波中周期宽度不等的因素被消除了。图1是某次试车转速ntppf 22分频前后的曲线图。图中的曲线为22分频后的数据所绘制,波动大大减少。目前许多数据采集装置具有多周

期测量功能,这样可以进行任意软件分频。硬件或软件分频后,注意在转速数据处理时应乘以分频数。

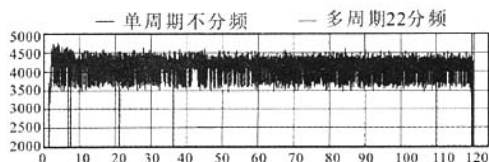


图1 某次试车 ntpf 转速分频图

Fig.1 A test ntpf rev division frequency diagram

需要指出的是,转速分频后,第一个转速值对应时刻发生滞后,时间要求准确时,时间轴作一些技术处理。另外,门嵌电平是频率信号调理器的关键,门嵌电平主要根据传感器在额定状态下输出幅值和测量系统的噪声大小来确定。门嵌电平设置电压应比系统噪声(或输出波形的尾波幅值)大2~4倍,为实际波形有效值(RMS)的10%~20%。功能完善的频率信号调理器应该是门嵌电平、截止频率和分频数通过插件可调。转速测量中除关键信号调理技术外,还应注意接地技术。如果接地不良或不正确易引起干扰,现象为开车前或关机后系统就会出现50Hz工频或高频干扰。解决的办法是传输电缆选用RVVP双胶屏蔽电缆,屏蔽线与信号负线连在一起,在采集系统处一点接地,可以有效地抑制干扰。

2.2 流量数据的处理方法

目前发动机试车用的流量传感器主要是涡轮流量计。主管路上串联安装双涡轮流量计测量稳定段流量,泵前安装第三个涡轮流量计测量启动段流量。这些流量计一般无现场真实介质校准条件,计算流量所用的系数是水校准系数,带来系统误差,低温测误差更大一些。估计经修正后常温流量测量精度在0.7%~1%左右,低温流量的测量精度在1%~2%左右。试车中系统三个流量计测量值有差异。通过数据综合分析,可虑试车台实际情况,提出以下流量数据提供方法:

(1) 试车启动段(-2~10秒):由于启动段流量不经过主管路,用泵前流量计提供数据。稳定段(10~关机前1秒)和关机段(关机前1秒~关机后4秒)用主管路两只流量计的平均值提供;

(2) 泵前流量计不再进行水校准, 定期检查, 主管路流量计定期计量检定合格。通过主管路流量计, 用冷调或试车数据对泵前流量计进行真实介质校准, 得到泵前流量计的校准系数。每次试车再用主管路两只流量计的平均值对泵前流量计测量值进行绝对值修正。

要进一步提高低温流量的测量精度, 需要在液氧容器内建立分节式电容液面计, 用分节式电容液面计对涡轮流量计进行液氧现场校准, 稳定段数据用液面计提供, 过渡段用涡轮流量计提供。

2.3 介质密度获取途径

介质的密度可用密度传感器直接测量, 也可以在涡轮流量计附近测量温度和压力计算。下面是液氧和煤油密度的计算公式:

$$\rho_0 = 1513.51569816 - 3.36413948T - 0.009259T^2 + (20.41793293 - 0.32679961T + 0.00155678T^2)p + (-1.66234299 + 0.02801104T - 0.00011895T^2)p^2 \quad (1)$$

$$\rho_F = 848.64009 - 0.843(T - 273) + 0.00155(T - 273)^2 + [0.838876 + 0.0254678(T - 273) - 0.00027(T - 273)^2]p + [-0.0112983 - 0.00049459(T - 273) + 10^{-6} \times 5.9(T - 273)^2]p^2 \quad (2)$$

式中, ρ_0 , ρ_F 分别为液氧密度和煤油密度, kg/m^3 ; T 为测量的温度值, K ; p 为被测介质液压力值, MPa 。

若不考虑压力影响, 可用简化公式计算:

$\rho_0 = 16.593 t_1^{0.8115} \text{ kg/m}^3$; 其中 t_1 为测量的液氧温度, $^{\circ}\text{C}$, 使用范围: $t_1 = -188.15 \sim -168.15^{\circ}\text{C}$; $p = 0.3 \sim 1.0 \text{ MPa}$, 误差小于 0.2%, 取液氧温度的绝对值。

煤油: $\rho_F = 835.6 [1 + 0.00085 (20 - t_2)] \text{ kg/m}^3$; 其中 t_2 为测量的煤油温度, $^{\circ}\text{C}$;

测量液氧温度的传感器选择铠装热敏电阻或铂电阻传感器, 测量煤油温度的传感器选择铠装铂电阻传感器。温度测量的绝对误差应在 0.3°C 以内。一般用试车稳定段测量的介质温度和压力平均值来计算密度。也可以用实时测量的温度、

压力值实时计算密度, 实时计算流量。

3 温度参数测量

3.1 第二参考点问题

液氧/煤油发动机试车温度测量中, 曾多次出现 T 型热电偶传感器测量的氧系统温度低于 -184°C , 甚至到 -200°C 的情况。同样的试车工况也出现部分氧系统温度参数测量值比实际值高 $15 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 的情况。经分析, 这些测量值不能真实反映被测对象。出现问题后对测量传感器进行了计量检定, 补偿导线、热偶丝极性检查, 液氧浸泡试验均正常, 说明温度测量系统没有问题。分析几个低于 -184°C 温度测点, 该位置的压力测量值大于标准大气压, 只有对试车时环境条件、连线情况进行分析。热电偶测量系统热试车和地面静态试验的连线情况一样, 不同点是试车时热偶丝、补偿导线及连接两者的三芯插头捆在发动机上。热偶丝和补偿导线按理应焊接在一起, 考虑安装的灵活性, 加一个三芯插头座。由于三芯插头座的材料和补偿导线不同, 带来一定测量误差。经静态试验, 连接插头座常温且温度稳定时, 插头座对测量带来的误差可以忽略。但用电吹风给插头座加温, 发现测量的液氧温度值变低, 说明插头座温度变化过程形成了第二参考点。

试车时液氧系统某些温度测点测量值偏离 -184°C 较大原因可以解释为: 试车前发动机预冷后, 插头座捆在温度由热变冷的管子上, 导致测量值比实际温度值高。试车过程连接插头座捆在这些由冷变热的管子上, 则测量值比实际温度值低。原因清楚后, 采取以下措施:

(1) 温度传感器的热偶丝引线加长到 2m 以上, 连点插头座捆在发动机上方的试车架上;

(2) 发动机自带的热电偶传感器大多引线较短, 将连点插头座用多层石棉布包扎后尽量捆在常温管子上, 减少温度的影响。

氧系统热电偶温度测点采取上述措施后, 测量值不准确的问题基本解决。

3.2 入口温度准确测量

氧入口安装了自行研制的T型热电偶和热敏电阻两只传感器。T型热电偶测量氧入口温度时误差1~2℃,热敏电阻测量时误差0.3~0.6℃。热敏电阻传感器在80~110K窄温区校准,预冷过程中两种传感器同时实时显示,预冷初期观看热电偶,预冷后期看热敏电阻,两者间有差异时,以热敏电阻为准。传感器安装前经液氧浸泡试验。经试验选择的传感器、测量通道相对固定。

另外,T型热电偶传感器测量-30~+80℃时,传感器输出电压仅-1~2mV,远距离传输测准难度较大。解决办法是研制抗干扰能力强的小信号调理器,选好传输电缆以及系统正确接地。

3.3 热敏电阻校准技术

热敏电阻传感器用来测量液氧温度,目前用电阻箱等效校准。购买热敏电阻传感器时,一般只给一个液氧或液氮点,其它温度对应的电阻值可由下式计算:

$$R_T = R_{T_0} \exp B_n \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (3)$$

式中, B_n 为热敏电阻传感器特性常数; T 为T点温度值,K; R_{T_0} 为 T_0 温度对应电阻值, Ω ; R_T 为温度 T 对应电阻值, Ω ; T_0 为 T_0 点温度值,K。

设 T 和 T_0 分别是液氮77K、液氧90K,带入公式(3),求得常数 B_n 。然后求得80~110K范围内每隔1K(或0.5K)温度对应的电阻值,形成电阻--温度表。校准时用标准电阻箱脱开传感器,加载电阻值,采集系统形成温度--电压分度表存入计算机。试车采集的电压值查表求温度。

3.4 温度传感器安装技术

铠装和热偶丝的温度传感器有不同的安装技术。铠装传感器安装时力矩要保证气密性,对介质满流的管路,插入深度一般为管径的1/3~1/2。热偶丝安装时,根据被测点的材质及测温范围选择点焊或胶粘。点焊时,将两热偶丝分别点焊,两点相距4~5mm。点焊后再胶粘。由于胶粘传感器固化时间长,粘贴时先用快速胶将偶丝头固定,再用相应的低温胶或高温胶粘贴,外层再粘2~5mm厚的毡片,目的是隔热,增加牢固性。点焊后再胶粘,并加粘毛毡片的工艺方法既解决了壁温传感器试车中途脱落问题,也提高了粘贴传感器测量准确性。

4 压力参数测量

4.1 低温压力零位修正

低温压力测量的关键技术是测量工艺、零位处理技术和传感器选择。低温压力可以用常温压力传感器和低温压力传感器来测量。常温压力传感器用于低温测量时必须用测压导管引出。测压导管的长度在0.6~2m、内径6~8mm范围内较理想。测压导管过短,低温通过导管外壁传到传感器上,影响传感器的性能。导管过长,测量值稳定,但滞后明显。低温压力传感器用在无法安装测压导管、或不允许压力测量滞后、或要求可靠性高的位置。目前低温压力传感器常温校准,低温使用,零位漂移和测量误差较大。一般传感器与采集系统连接后(发动机未预冷)的零位漂移主要是传感器的安装应力和计量室校准时安装应力不同造成。这时的零位漂移最大可引起0.6MPa的压力。但这个零位只要稳定,试车时通过减零位的方法可以消除。发动机预冷时的零位漂移可引起0.1~2MPa的压力,这个压力主要是压力传感器在低温状态下膜片应力变化(也有液氧液柱、汽化压力的因素)引起。试车实时显示数据用的零位是预冷前的零位(有的测点预冷后无法获得零位),用计量室校准的数据通过电压替代法获得的斜率。由于发动机自带的传感器无法实现低温现场校准,常温和低温两种状态下每一只传感器的零位、斜率变化值又不一样,修正比较困难。经过大量的低温试验和研究、分析,对零位漂移采取如下技术处理:

(1) 低温对传感器的零位影响较大,对斜率的影响甚小,可以忽略斜率的影响;

(2) 同一位置的低温测点,用不同长度的测压导管,测量值相差在0.2%以内(含传感器因素),但长度应控制在2.5m以内。直接安装传感器测量值比安装测压导管的传感器测量值偏大0.5%~1%;

(3) 发动机预冷后,连通大气的低温压力传感器应使用预冷后的零位(即减去液氧液柱产生的压力)。不通大气的传感器产生的压力有两种处理办法:一种是系统未增压前传感器的测量值应为液氧液柱产生的压力,试车数据应减去此时

的测量值与液柱自重产生的压力值之差；另一种是寻找和该低温压力传感器开车前位置相近的带测压导管的压力传感器，直接安装的低温传感器测量值和带测压导管的压力传感器测量值的差值就是低温零位漂移引起的，全过程数据减去差值即可（位置不同时考虑液柱差产生的压力）；

(4) 发动机自带压力传感器在计量室、总装车间的安装力矩应一样。

4.2 自带压力传感器校准技术

稳态压力传感器有国产和进口两种型号，其现场校准方法不同。进口传感器的检定证书给出了每档压力对应的校准电阻值。首次使用时，采用桥臂分档并电阻法进行现场校准；以后的现场校准采用分档加电压等效现场校准（既电压替代法）。用电压替代法校准传感器时，保证传感器的激励源和计量检定时的激励源偏差在 $\pm 0.003V$ 范围内，然后脱开传感器，在现场用标准电压源，按校准证书上给定的电压值加载，用最小二乘法拟合方程。电压替代法校准也可以用程控电压源在采集系统输入端，通过 GPIB 卡自动加载完成。

4.3 减小传感器的安装应力

压力传感器安装的基本要求是保证气密性和传感器可靠工作。安装时应选择合适的安装力矩，力矩过大降低传感器的强度和可靠性。安装力矩的大小通过实验和统计来确定。安装力矩一般考虑气密性、零位变化及试车振动、可靠性三个因素。象 Bm212 这样的压力传感器经多次统计，泵前管上安装力矩为 $45N \cdot m$ 较合适。测压导管的接管嘴为 M14 \times 1.5 和 M16 \times 1.5 时，安装力矩选 35~45 $N \cdot m$ 比较合适。根据经验，减小传感器安装应力有三条途径：一是传感器设计应力槽，消除受力端面安装应力，选择溅射式工艺结构，体积合适；二是确定合适装力矩；三是体积小传感器固定时，在受力端面上加胶皮垫片。

5 负推力修正问题

液氧/煤油发动机试车中负推力修正因素多、

难度大。原因是产品预冷后，发动机、泵前管、波纹管等预冷变形产生应力，液氧泵前管路和煤油泵前管路的变形量不一致，而发动机研制阶段产品结构尺寸、状态每次略有变化，发动机安装时力矩不一样等，因此会导致每次产生的负推力不一样。模样阶段后期-2 秒负推力在 10~20kN 大范围波动，进入试样阶段-2 秒在 11~14kN 范围内。经统计，发动机预冷及煤油充填产生的负推力占修正值的 60%~70%，入口增压产生的负推力占 30%~40%。其中，发动机液氧预冷（未抽真空和煤油充填）产生 6~8kN 负推力，抽真空后煤油充填产生 2~3kN 负推力，预冷后入口增压产生 2~4kN 负推力。经低温试验及数据分析，常温状态下推力系统校准斜率和低温常压（含液氧、煤油自重）校准斜率及低温增压（额定工况稳定段入口压力）三种状态下斜率变化 0.05%~0.08%。低温状态校准斜率微小，额定工况时斜率引起的误差约 0.3~0.8kN，可忽略不计。入口压力和负推力关系模样阶段为 1.2~1.8kN/0.1MPa，试样阶段为 0.6~0.8kN/0.1MPa。目前做法是：用常温校准斜率，预冷前记录推力零位，将修正-2 秒推力值为零。将-2 秒推力值修正为零的修正方法是整机开始试车时分析确定的。这种方法比较客观，但推力值大约多修正了 2 kN 左右。原因是-2 秒入口压力比稳定段入口压力平均值高 0.2~0.3MPa。如果可虑常温校准斜率微小因素，多修正推力约 1.5kN 左右。

需要指出的是，预冷及试车过程推力有 1~1.5kN 的波动，每次试车负推力不一样，发动机仍在研制阶段，将-2 秒修正为零（或-1.5kN）的负推力修正方法现阶段比较适用。特别对发动机尺寸变化，更换波纹管、泵前管，安装位置变化以及 45°试车台等因素更适合一些。

6 低频脉动压力测量

液氧/煤油发动机试车中，5~200Hz 范围内低频脉动压力是用 Bm212 传感器测量的。脉动压力参数测量时滤掉稳态或直流成份，数据处理时做时域处理和频域分析。

表 3 热试车两器系统试验数据
Tab.3 Data of firing test

参 数 名 称	100-023	100-023A	100-0238
氮气加热器氮气流量/(kg/s)	0.204	0.199	0.205
氮气加热器氮入口压力/MPa	1.483	1.493	1.490
氮气加热器氮气出口压力/MPa	0.753	0.772	0.782
液氧蒸发器氧出口压力/MPa	0.621	0.594	0.603
氮气加热器氮气入口温度/℃	5.5	3.9	-1.9
氮气加热器氮气出口温度/℃	266.4	265.5	263.5
液氧蒸发器氧出口温度/℃	142.5	137.2	157.0

6 结 论

设计的两器配气系统通过试验验证可以得出以下结论：

(上接第 55 页)

用一只压力传感器同时测量稳态压力和低频脉动压力时两系统应完全独立，互不影响。传感器的输出信号并联隔离记录。低频脉动压力的隔离放大器应满足频率响应特性，设置合适的上、下限截止频率和放大倍数。测量中校准方法是关键环节。具体方法是：在稳态压力校准数据中，找合适的一档电压毫伏数，求平均值并除以，作为校准正弦信号的有效值，频率选 80Hz。实际校准时取整数反算压力值，求斜率（MPa/mV）。频谱分析时，处理系统先采集校准信号，计算系统灵敏度，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，该等效校准方法误差小、精度高，是行之有效的一种方法。

一只传感器既测量稳态压力，又测量低频脉动压力，是液氧/煤油发动机试车中参数测量的一项新技术，该技术减少了安装在发动机上传感器

- (1) 两器配气系统保证了氮气的流量，维持了氮气加热器的正常工作。
- (2) 两器配气系统保证了加热器进出口的压力范围。
- (3) 两器配气系统保证了液氧蒸发器出口的压力范围。
- (4) 两器配气系统得到了液氧蒸发器的流量。
- (5) 两器配气系统工作振动小，可靠性高。

参考文献：

[1] 潘锦珊. 气体动力学基础 [M]. 北京：国防工业出版社，1989.

[2] 张坤元. 流体力学基础 [M]. 北京：国防工业出版社，2000.

[3] 王朋军. 过氧化氢/煤油发动机试验中压差式孔板流量计的设计 [J]. 火箭推进，2005，31（4）.

(编辑：马 杰)

数量，增大了试车参数获得信息量。

7 结束语

随着液氧/煤油发动机研制的进展，初步解决了转速数据波动大、自带各种传感器的校准方法、低温压力零位漂移的修正、温度的准确测量、负推力修正、低频脉动压力测量等许多技术问题。特别是低温测量技术，使现有测量系统的测量水平、测量能力明显提高。但仍存在被测参数无法进行低温介质现场校准，低温零位漂移只是粗略修正，低温应变测量误差较大，低温负推力难以准确修正等问题。今后积极开展传感器、校准方法、低温测量技术研究，为液氧/煤油发动机研制提供准确、可靠的测量数据。

(编辑：侯 早)