

液体火箭发动机试验流量测量技术研究

赵万明, 罗维民

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 介绍了液体火箭发动机试验推进剂流量测量技术与方法, 阐述流量测量系统设计要点、传感器的选择与安装工艺、现场校准技术、信号调理器设计、抗干扰措施、数据分析与提供方法。文中论述的测量技术实现了发动机试验流量参数的准确测量, 为发动机性能评价提供准确、可靠的依据。

关键词: 发动机试验; 流量测量; 现场校准; 信号调理; 数据分析

中图分类号: V433.9-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2017)05-0074-06

Research on flow-rate measurement technology for liquid rocket engine test

ZHAO Wanming, LUO Weimin

(Xi'an Aerospace Test Technology Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The method and technology of propellant flow-rate measurement in LRE test is introduced in this paper. The design essentials, sensor selection and installation technology, field calibration technology, signal accommodator design, anti-jamming measures, data analysis and data providing methods of flow-rate measurement system is elaborated in this paper. The accurate measurement of flow-rate parameters in the engine test is realized with the flow-rate measurement technology described in this paper, which can provide accurate and reliable data for the engine performance evaluation.

Keywords: engine test; flow-rate measurement; field calibration; signal accommodation; data analysis

0 引言

液体火箭发动机试验中, 推进剂流量是评价发动机性能参数比推力和混合比的关键参数, 测准发动机工作过程的流量参数至关重要。液体火

箭发动机由于用途的不同, 其推进剂流量从轨姿控发动机的每秒毫克级到主动力发动机的每秒上千千克级, 推进剂种类有液体(低温、常温、有毒)、凝胶、气体等, 流量测量传感器大多处于高温(低温)、振动、腐蚀等恶劣环境条件下。所以, 为了提高发动机试验流量参数的测量准确

收稿日期: 2017-05-05; 修回日期: 2017-06-09

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量与控制技术

性,必须根据发动机介质类型、流量大小、试验特点等各种因素,针对性设计测量系统,选择高性能的传感器,研究校准方式、信号调理技术和数据分析方法。本文从流量参数测量系统设计要点、传感器选型及安装工艺、现场校准技术、信号调理技术、抗干扰措施、数据处理等方面论述液体火箭发动机试验流量参数测量关键技术。

1 流量测量系统设计要点

一个先进、可靠的发动机试验测量系统是参数测准、测全的前提条件。流量参数测量系统设计输入条件主要有:测量不确定度、推进剂类型、发动机工作模式、流量范围、传感器安装的环境条件、测量通道数、采样速率、数据提供形式等。设计重点考虑以下因素:①根据测量不确定度对测量各环节进行误差分配;②综合测量不确定度、量程、推进剂类型、数据获得可靠性、现场条件和安装方式等选择合适的传感器;③确定校准方式(首选现场原位校准方式),设计校准装置;④确定传感器冗余测量手段;⑤根据传感器输出信号类型、幅值大小、波形形状、采样速率等,设计信号调理器和数据采集装置;⑥提出数据分析要求,规定数据提供方法。

上述因素中,研究校准方式与建立现场校准装置、研制信号调理器是其中的关键环节。

2 传感器选择与安装工艺

液体火箭发动机试验中应用最多的是涡轮流量计和质量流量计。涡轮流量计的优点是响应快、流阻小、重复性好、环境适应性强。不足是精度一般,口径10 mm以上的多数涡轮流量计水校准精度一般达到0.5%,口径1~4 mm涡轮流量计水校准精度仅达到1%~2%。质量流量计优点是精度和可靠性高、范围宽、介质适应性强,缺点是流阻大、易受振动干扰、有一定的滞后性。由于发动机试验现场恶劣的环境及安装条件与计量校准时不同,加之推进剂特性和温度的影响,涡轮流量计使用计量水校准系数时存在一定的系统误差。当推进剂为液氧、液氢等低温介质时,误差较大。质量流量计在发动机试验现场使

用时,如果安装位置距发动机较近,易受到推进剂管路传递的振动干扰及介质脉动影响,当干扰信号频率和流量计测量使用的频率较近时,测量数据严重失真。

流量传感器选择主要考虑精度、流阻、现场安装条件、输出信号类型、可靠性等因素。推荐常温推进剂采用质量流量计+涡轮流量计的方式进行测量;低温推进剂使用分节式电容液面计平均流量测量装置+低温涡轮流量计的方式进行测量,发挥分节式电容液面计平均流量测量精度高、低温涡轮流量计可同时获得瞬时和平均流量的特点;气体流量使用质量流量计或气体涡轮流量计进行测量;凝胶推进剂使用质量流量计进行测量;轨姿控发动机小推力(小流量)试验系统使用质量流量计或高精度天平测量。

流量计正确的安装工艺是保证测量精度的前提条件之一。涡轮流量计安装时应注意:①上、下游安装一段与流量计口径相同的直管段,前直管段长应不小于通径的20倍,后直管段不小于5倍;②安装坡度一般小于 2° 。质量流量计安装时应注意:①尽可能远离发动机可靠安装,制作支架,在连接法兰上固定;②试验过程受到的振动大小应不影响测量数据的准确性和稳定性,建议在连接管路上安装波纹管或金属软管减小发动机振动对质量流量计的影响;③一般测量液体介质时弯管朝下垂直安装,靠近流量计处设置高点排气装置,测量气体时应安装在气体流场比较稳定的管路上,必要时设置缓冲器,对气体进行稳流;④安装好后选择合适的时间常数,并按4~20 mA对系统进行校准。

另外:①流量计安装后应注意安装应力的影响,别特是用于低温介质测量的流量计第一次使用时,应进行预冷处理;②使用涡轮流量计时,用于管路介质测温的传感器应安装在主管路流量计附近管路的侧下方。推荐常温介质选用铠装封闭式A级铂电阻传感器,插入深度 $1/3 \sim 1/2$ 管径。低温介质安装两只不同插入深度($1/4 \sim 1/2$ 管径)的铠装裸露式热敏电阻传感器,测量窄温区分层温度,求平均值。同时安装一只封闭式A级铂电阻传感器,用于预冷全过程温度监视。介

质温度测量误差一般应小于 0.4° 。

3 现场校准技术

火箭发动机试验中, 涡轮流量计使用环境、安装形式、测量介质的粘度、密度、温度等和计量校准时存在差异, 导致测量数据存在一定系统偏差。研究测量参数校准技术, 实现现场(原位)校准, 是提高参数测量精度的最有效途径。航天标准 QJ1794 中规定, 流量测量不确定度不大于 1% 时, 其传感器必须在现场用真实推进剂进行校准; 大于 1% 时可在计量部门实验室校准。根据实际经验, 发动机试验用涡轮流量计(精度 0.5%) 测量流量时, 当要求常温推进剂流量测量不确定度不大于 0.7%, 低温液氧、液氢流量不大于 1% 时, 应建立现场校准装置, 对涡轮流量计进行真实介质原位校准, 才可能达到要求的测量不确定度。液体火箭发动机试验现场流量校准装置一般按常温推进剂和低温推进剂分别设计。在满足测量不确定度要求前提下, 多数常温推进剂流量测量现场校准装置可采用质量流量计和涡轮流量计串联的方式进行现场原位校准, 校准原理如图 1 所示。

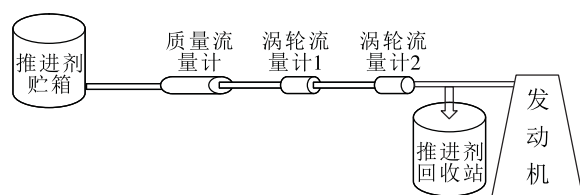


图 1 常温推进剂流量计现场校准原理图

Fig. 1 Field calibration principle of flow-meter for normal temperature propellant

质量流量计对涡轮流量计的校准方法和计量单位校准基本相同, 利用推进剂贮箱和推进剂回收箱之间放液进行校准。流量基准为质量流量计, 质量流量计同时获得质量流量和密度, 质量流量除以密度得到体积流量, 通过体积流量和涡轮流量计输出频率之间的对应关系, 用最小二乘法求出涡轮流量计在现场安装条件下真实介质的斜率与截距(或仪表系数)。通过改变贮箱压力获得不同校准点流量值。涡轮流量计经过现场原

位校准后, 提供的数据测量不确定度一般优于 0.7%。在额定工况流量值附近校准, 测量不确定度可优于 0.5%。

低温介质(如液氧、液氢)发动机试验一般不用低温质量流量计测量流量, 原因是低温质量流量计对于火箭发动机试验这样短时间工作方式的流量测量重复性、稳定性较差。小型低温介质发动机试验由于介质容器较小, 现场校准装置可采用称重法方式进行。中、大型发动机试验系统由于介质容器巨大, 不适合称重法对涡轮流量计进行原位校准。采用测量介质容器标准体积和密度的方法对涡轮流量计进行现场原位校准, 校准原理图如图 2 所示。

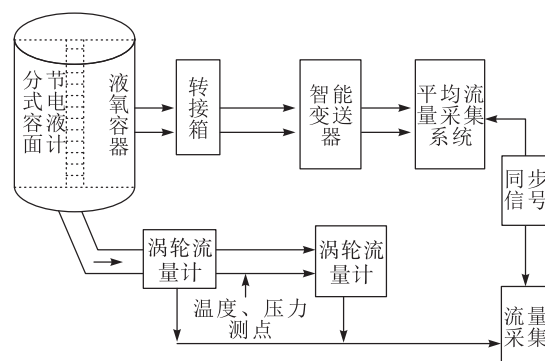


图 2 低温介质现场校准原理示意图

Fig. 2 Principle diagram of field calibration for cryogenic medium

校准原理如下: ①对低温介质容器进行计量标定, 获得体积和高度的对应关系, 并进行容器材料低温系数和使用压力体积修正。同时, 对容器内安装的液面计等其他设备占用体积进行修正; ②在标定过的容器中安装分节式电容液面计。低温介质放液时, 对液位高度变化信号进行调理、记录和处理, 查表、插值求出容器某时间段内流出的介质体积, 同时, 实时测量容器介质流出区域压力和温度计算密度, 获得该时间段标准平均质量流量; ③在同一时间段内, 测量涡轮流量计附近压力和温度计算密度, 求出涡轮流量计测量的质量流量。由于同一时间段内从容器流出的低温介质质量等于流过主管道涡轮流量计的介质质量, 即: 获得涡轮流量计的标准体积流量

同时获得了体积流量对应的频率。选择 4~6 校准点, 每个校准点重复 2~3 次。用最小二乘法对涡轮流量计的体积流量和对应的输出频率值拟合, 求出现场真实介质条件下的涡轮流量计的斜率和截距值, 实现对涡轮流量计现场原位校准。

需要注意的是, 以分节式电容液面计为核心组成的低温介质平均流量测量装置必须按相关标准进行测量不确定度评定。按照目前技术水平, 容器内低温介质温度测量误差控制在 $\pm 0.4\text{K}$ 以内, 容器容积检定不确定度在 0.1% (含容器低温压力、温度修正) 以内, 低温介质平均流量测量装置测量不确定度优于 0.5%, 用该装置对涡轮流量计进行现场原位校准后, 低温介质流量测量不确定度优于 0.7%。

4 信号调理技术

涡轮流量计输出的原始信号一般是较正规的正弦波, 多数频率在 20~3 000 Hz 范围内。但液体火箭发动机试验中, 涡轮流量计受结构、安装位置、振动、介质性质等因素影响, 涡轮流量计输出的波形有时不规则。图 3 所示为某低温涡轮流量计试验过程实际输出波形图, 这种不规则的波形对信号调理技术提出更高的要求。

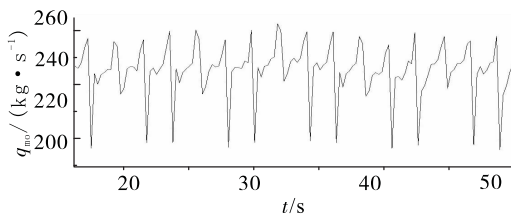


图 3 某低温涡轮流量计输出波形图
Fig. 3 Waveform output by a cryogenic turbo flow-meter

质量流量计输出信号是经过调理的正规脉冲或 4~20 mA 电流信号, 对信号调理要求不高。涡轮流量计输出的正弦频率信号测量方法有三种: 第一是计数法直接测频率, 第二是测周期 (单周期或多周期), 第三是 F-V 变换测量电压信号。直接测频法测量精度高, 但适合频率稳定且较高的场合。当被测频率变化较大, 且比较低的

情况下测周期法较理想。当采集装置未配置频率采集板时, 用 F-V 变换法测频率。F-V 变换法适合频率比较稳定的场合。火箭发动机试车中既要准确测量起动段、关机段数据, 又要准确测量稳定段数据, 且输出频率一般较低, 大多采用测周期法进行测量。由于发动机地面试验的核心采集部件多数引进或外购, 配置的频率型参数测量板卡上的整形电路比较简单, 不适应与各种不规则的流量信号直接匹配, 特别是发动机试验流量测量信号输出幅值波动大、波形奇异时, 采集的数据异常或误差大。因此, 研究满足要求的频率型参数信号调理技术, 设计适合多种发动机试验中流量输出信号的多功能、高可靠、抗干扰能力强的信号调理器是流量参数测量关键环节之一。

4.1 调理器的组成与要求

频率信号调理器一般由滤波、放大、整形、隔离、信号匹配 (分频、F-V 变换) 等环节组成, 如图 4 所示。对信调器的基本要求是: 截止频率、门槛电平、增益等分档可调, 硬件具有多档分频功能, 输入信号直接监视, 信号调理器与采集装置隔离, 可选择频率或电压输出, 各通道相互独立, 输入无信号或传感器不工作时无 50Hz 干扰, 能直接匹配多种幅值不同、波形复杂的流量计输出信号。

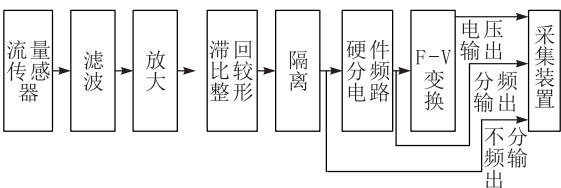


图 4 频率信号调理器组成框图
Fig. 4 Composition of frequency signal accommodator

4.2 设计要点

滤波与保护电路设计 多功能频率信调器一般由多级电路组成, 第一级一般设计滤波和限幅保护功能。限幅保护是为了防止误接特大信号。硬件滤波和正确接地是减小或抑制 50 Hz 工频和各种大功率电气设备产生的高频干扰的有效措施。

放大、整形电路设计 调理器的第二级为放大、整形电路。为适应几毫伏到几伏的不同传感器电压幅值,调理器应增益可调。整形电路对放大后的不规则正弦信号进行整形,使之成为同频率的正规方波信号。发动机试验中流量信号不规则的原因除工频、高频干扰信号叠加外,还有试车过程随机大振动引起传感器的信号发生器与切割磁力线的导磁叶片之间位移随机变化、导磁叶片磁性不均匀、介质不稳流等因素。如果采用简单的整形方式,可能导致采集结果不正确或波动大,不能正确反映被测对象的真实情况。整形电路在滤波、放大的基础上,通过设置合适的门槛电平(调整放大倍数),滤掉无用、干扰信号。门槛电平设置根据传感器在额定状态下输出幅值大小、波形是否正规和测量系统的噪声大小三个因素来确定。波形不正规时,门槛电平设置电压应比系统噪声大 2~3 倍,是实际波形峰值的 10~30%。波形正规时,一般设一个固定值(如 20 mV)。摸清发动机试车各种流量传感器的原始输出波形情况,是门槛电平设置的依据。

隔离电路设计 火箭发动机试车中测量参数众多,测控系统庞大,干扰信号机理复杂,传感器信号与数据采集系统应隔离。根据经验,滤波和整形基本消除了干扰信号,频率信号光耦隔离后仍是正规的方波信号。采用滤波—放大—整形—光耦隔离的方式效果比较理想。

分频电路设计 发动机试车中,涡轮流量计设计多个导磁叶片,转一周输出多个波。由于加工精度、发动机预冷后叶片变形、试车时大振动等因素影响,一周输出的多个波形幅值、脉宽有差异。采用单周期、按固定速率采样时,采集到的可能是一周内任意一个波,导致测量数据波动大,不能准确反映发动机的真实稳定工作状态。分频测量实际是多周期测量,分频数为流量计叶片数。分频后流量计转一周相当于只输出一个波,发动机稳定段转一周的脉冲宽度比较稳定,测得的数据波动大大减小。对频率信号分频时,可采用软件分频或硬件分频。软件分频的特点是很容易实现任意分频,简单、方便。硬件分频的特点是速度快,不占用软件开销。需要指出的

是,流量参数采用分频处理后,解决了数据波动问题,但试车启动段采集的第一个数是转动整周的波形(并不是第一周中第一个波)而产生一定的滞后。

F-V 变换技术 对未配置频率信号调理器、频率计数板的数据采集装置,在频率信号调理器上增加 F-V 变换功能。F-V 变换电路通常设计在信号调理器的光耦隔离后。

4.3 抗干扰措施

流量参数测量中,由于系统长线传输、接地不规范、大功率电器动作、电磁波辐射等原因容易引起干扰。如果在流量传感器未工作时,采集系统有 50 Hz 信号的主要原因是系统接地不良或不正确。输出波形中出现的尖脉冲(采集数据中的特定点)的主要原因是系统的大电器动作。叠加在输出波形上的毛刺或高频噪声的主要原因是电磁波干扰。系统抗干扰措施除选择抗干扰能力强、电磁兼容性符合国家标准的采集装置及软件抗干扰技术外,主要是通过滤波、去耦、屏蔽、调节门槛电平、隔离、接地等综合技术措施将干扰抑制到最小。如信号传输选用屏蔽双绞线(或同轴电缆),屏蔽层在传感器处浮空且全程连续,信号负线和屏蔽线在采集系统处一点接地,可有效地抑制系统干扰。

5 数据分析与提供方法

5.1 数据分析

液体火箭发动机试验中,用涡轮流量计、质量流量计、低温分节式电容液面计平均流量测量装置、孔板等测量手段测量的常温、低温、胶体等推进剂流量及气体流量数据需进行处理、分析和确认,排除系统设备偶发故障及信号干扰、系数错误、介质密度差异对数据的影响,对异常数据分析后给出结论,确认提供的测量数据准确可信。

数据处理与分析应注意以下事项:

1) 数据处理取舍方法:平稳段数据根据格鲁布斯舍点公式,剔除异常点。因采集系统不清零、工频 50 Hz 干扰、其他干扰造成尖脉冲等非正常流量数据应进行处理(按频率信号采集,开

车前无流量信号时采集的非零数据应置零,按F-V电压信号采集时,开车前无流量信号时零位应是一个很小的稳定值,漂移明显时应修正)。

2) 介质密度计算:常温介质密度推荐取发动机工作(10~20 s)后至关机前全程实时测量的温度平均值计算。低温介质液氢、液氧和甲烷等密度计算一般采用测温、测压和查NASA分度表方法获取密度。也可采用美国爱达荷大学应用热力学研究中心开发的《ALLPROPS》软件计算液氧、液氢、甲烷等常用低温介质密度。

3) 异常数据分析:若发现发动机试验过程流量数据变化规律、数值大小、时间对应关系有异常时,应分析测量系统、传感器、电缆转接环节是否正常,测量信号是否受到干扰;控制系统时序、工艺系统阀门动作、控制指令及发动机工作是否正常;介质供应系统是否有多余物等。

4) 冗余测量差异分析:同一位置,安装位置不变的串联流量计,发现本次试验各流量计测量的平均值差值较大或和以前规律不一致时,应分析流量计多次校准系数变化情况、稳定性及流量计工作是否正常,查明原因,采取措施。

5) 数据修正原则:原因清楚的异常数据(经冗余测量数据比较、分析,综合测试、验证等证明是传感器或测量系统引起)应进行修正,原因不清楚或经过反复复查证明测量系统无异常时,提供实测数据,并在数据报告中说明。

5.2 数据提供方法

发动机试验最终提供的数据报告必须真实、客观、准确、有效,反映发动机的固有性能和质量。对采取冗余测量手段及不同推进剂的流量数据可按以下方法提供数据:

1) 常温介质管路串联安装涡轮流量计和质量流量计,并确认质量流量计未受振动影响时,推荐用质量流量计提供数据。如果用涡轮流量计提供数据,应用质量流量计对涡轮流量计进行原位校准。

2) 常温推进剂发动机试验安装两只涡轮流量计,用质量流量计对涡轮流量计进行原位校准,且多次试验两只流量计稳定段平均值的差值稳定且在一定范围内,用涡轮流量计提供数据

时,推荐用两流量计各时间点的平均值。

3) 低温介质发动机试验系统,推荐经测量不确定度评估后的高精度平均流量测量系统对涡轮流量计进行现场原位校准,再用涡轮流量计全程提供数据。或用涡轮流量计提供瞬时数据,平均流量测量系统提供平均值数据。

4) 凝胶推进剂和气体流量推荐用质量流量计直接测量质量流量。如果用涡轮流量计测量气体流量时,应用质量流量计对涡轮流量计进行现场原位校准,密度用测温、测压方法计算获得。

6 结束语

液体火箭发动机试验过程中流量测量面临着非常复杂的恶劣环境,试验中为了完整、准确地获得发动机流量数据,除选择高可靠性、适合现场环境条件的传感器、测量设备外,还要研究测量工艺方法。特别是研究传感器安装工艺、现场校准、信号调理、抗干扰措施、数据综合分析及测量数据提供方法等技术,确保测量各个环节引入的误差在预估范围内。只有这样,才能保证提供的数据准确有效,反应发动机的固有质量,为发动机性能评判断提供准确可靠的依据。

参考文献:

- [1] 丁博深,李薇,李艳艳. 火箭发动机地面试验低温推进剂流量测量系统[J]. 测控技术, 2016, 35(7): 9-12.
- [2] 胡晓军,周林,陈燕东,等. 数据采集与分析技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2010.
- [3] 于海磊,陈锋,郑勤生,等. 低温推进剂液位监测系统设计[J]. 火箭推进, 2010, 36(3): 54-57.
YU H L, CHEN F, ZHENG Q S, et al. Design of monitoring system for cryogenic propellant level[J]. Journal of rocket propulsion, 2010, 36(3): 54-57.
- [4] 于劲松,李行善. 美国军用自动测试系统的发展趋势[J]. 测控技术, 2001, 20(12): 1-3.
- [5] 李科杰. 新编传感器技术手册[M]. 北京:国防工业出版社, 2002.
- [6] 中国电子学会敏感技术分会. 传感器与执行器大全[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.

(编辑:陈红霞)