

流量转速参数信号调理技术

赵万明

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 液体火箭发动机试验中, 流量和转速传感器输出的信号为不规则的频率信号, 对不规则频率信号的调理是准确测量的关键环节。介绍了液氧煤油发动机地面试验中流量和转速参数信号的调理技术, 重点阐述频率信号调理器的原理、功能、设计要点及调试方法, 给出了频率信号调理器的关键环节原理图。使用这种频率信号调理器对液氧煤油发动机试验中流量和转速传感器输出的频率信号直接进行调理, 保证了频率型参数的准确测量。

关键词: 发动机试验; 流量; 转速; 信号调理

中图分类号: V433.9

文献标识码: A

文章编号: (2008) 02-0049-06

Signal modulating technique of flow and rotating speed parameters

Zhao Wanming

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

Abstract: In a liquid rocket engine test, the signals transmitted by flow and rotating speed sensors are irregular frequency signals. Therefore, modulations of these signals are the key links for accurate measurement. In this paper the signal modulating technique of flow and rotating speed parameters was introduced, the principals, function and the key points of design and test methods were emphatically illustrated. The principal figure of the key link of frequency signal modulators was presented. The described frequency signal modulators directly modulate the frequency signals transmitted by the flow and rotating speed sensors during LOX/kerosene rocket engine tests. The accurate measurement of frequency parameters can be reached by applying the modulators.

Key words: rocket engine test; flow; rotating speed; signal modulation

收稿日期: 2007-09-26; 修回日期: 2007-11-10。

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。

1 引言

液体火箭发动机试验中流量和转速是关键参数,测准、测全至关重要。由于流量和转速传感器输出的信号是频率信号,传感器输出的电压幅值参数不同,其采集装置、信号调理技术也不同。液氧煤油发动机试车中,涡轮流量计和转速传感器输出信号的频率大多在 20~2500Hz 范围内,输出的波形为不规则的近似正弦波。常用的测量方法有 3 种,第一种是计数法直接测频率;第二种是测周期(单周期或多周期);第三种是 F-V 变换将频率信号转换为电压信号来测量。一般当采集系统的定时器或计数器位数一定、被测频率稳定且频率值较高情况下,直接测频法具有较高的测量准确度;当被测频率变化较大或频率值较低(如 20~1000Hz)情况下适合测周法。当采集系统未配置频率采集板,系统只能采集电压信号时,可用 F-V 变换法测频率。F-V 变换法适用于频率稳定的场合,比如发动机试车稳定段的流量、转速参数。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,因此大多采用测周期法进行测量。频率型参数测量无论采用测频率、测周期还是 F-V 变换法,关键技术是信号调理技术,也就是设计适合各种发动机试验中流量、转速传感器输出信号的多功能、高可靠、抗干扰能力强的信号调理器。

火箭发动机地面试车中,测量系统为了保证数据采集装置的可靠性、采样速率、测量精度等指标,采集系统的核心采集部件大多引进或外购。引进过程中,推力、压力及温度等电压型参数的信号调理器一起引进,流量和转速等频率型参数只引进计数板。计数板上仅设计简单的整形电路,适用于幅值较高且波形正规的正弦波或方波,无法与发动机试车中各种流量和转速传感器输出的不规则的信号直接匹配。特别是正在研制的液氧煤油发动机试验流量和转速参数多,输出波形、幅值差异大,经常出现奇异波形,造成采集数据不准确或异常。为了满足液氧煤油发动机

试车流量和转速参数测量需要,必须研究信号调理技术,满足要求频率型参数信号调理器。

2 频率信号调理器的作用、要求

频率信号调理器的主要作用是:滤波、放大、整形、隔离、信号匹配、硬件分频及 F-V 变换等。对信号调理器的基本要求是:截止频率、门槛电平及增益等分档可调;硬件可进行多种分频;输入信号直接监视;信号调理器与采集装置隔离、直接匹配;可选择频率或电压输出;能直接适用多种流量和转速传感器信号;各通道相互独立;输入无信号或传感器不工作时无 50Hz 干扰;抗干扰能力和可靠性高;信号调理对频率信号测量准确度影响程度小。

3 频率信号调理器设计技术

频率信号调理器一般由信号滤波、放大、整形、隔离、分频及 F-V 变换等组成,结构如图 1 所示,虚线框内为频率信号调理器。

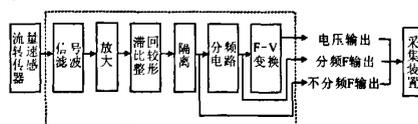


图 1 频率信号调理器结构框图

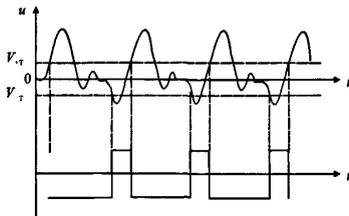
Fig.1 Structure block diagram of frequency signal modulators

发动机试验中,被测频率信号波形各异、幅值不等。图 2 是试车过程中两种不同的转速传感器输出波形,图 3 是采集的低温介质流量数据曲线图。绘制图 3 的数据实际波动范围超过了 12%,说明流量传感器的输出波形很不正规。因此,流量、转速参数信号调理器的设计除考虑可靠性和采集装置匹配的因素外,适用各种传感器输出波形是重点考虑内容。

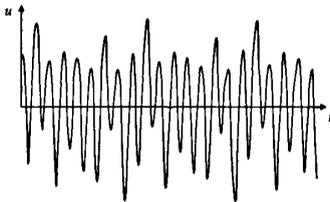
3.1 滤波器设计

火箭发动机地面试验中,叠加于有用频率信号之中的主要干扰信号有 50Hz 工频和各种大电流阀门动作产生的高频干扰。抑制的主要方法是硬件滤波和正确接地。

频率信号调节器由多级电路组成，第一级为滤波、限幅保护及跟随电路。由于液体火箭发动机试验中，流量转速信号的频率和幅值多数在 20~3000Hz、4~5000mV 范围内，常用的有源和无源滤波器均能够满足信号调理的需要，也不宜采用多阶或复杂的滤波器原理图。图 4 给出一种简易的 RC 低通滤波器。图中 C1~C3 通过跳线开关 R 构成不同的滤波截止频率，限幅保护是为了防止误接特大信号。信号跟随是为了提高输入阻抗，为第二级放大器提供合适的输入信号。



(a) 转速传感器 1 输出波形与整形结果



(b) 转速传感器 2 输出波形

图 2 转速传感器输出波形

Fig.2 Output wave form transmitted by a flow sensor

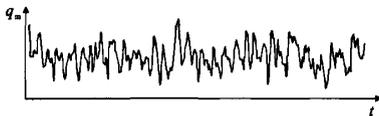


图 3 流量数据曲线图

Fig.3 Profile of flow parameters

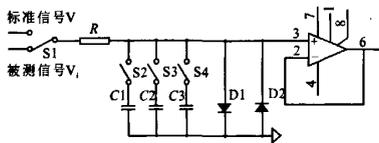


图 4 简易滤波电路

Fig.4 Simple filter circuit

3.2 放大、整形电路设计

调理器的第二级为放大和整形电路。为适应

几毫伏到几伏的不同传感器电压幅值，调理器应设置不同的电压放大倍数。为满足通用采集装置只适用正规方波信号的需要，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。发动机试验中流量和转速信号波形不规则的原因除工频、高频干扰信号叠加外，主要是试车过程随机大振动引起传感器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、介质流动不稳定等因素造成信号波形奇异、复杂。如果采用简单的整形方式，可能导致采集结果不正确或数值波动大，不能正确反映被测对象的真实情况。如图 5 所示。



图 5 某传感器输出信号波形

Fig.5 Output signal wave form of a sensor

如果简单整形，采集的数据可能是实际值的 2 倍。实际试验中，除叠加到有用信号上的差模干扰信号外，一般的干扰信号幅值比有用信号的幅值小，所以整形电路在滤波、放大的基础上，通过设置合适的阈值电平，过滤掉部分无用、干扰信号。常用施密特触发器组成的滞回比较器来整形，如图 6 所示。

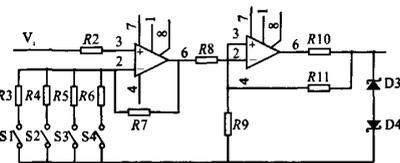


图 6 放大、整形电路

Fig.6 Amplifying and shaping circuit

在图 6 中，R3~R6 与 R7 构成不同放大倍数的同比例放大电路，R9 与 R11 对输出的信号稳压后进行分压，作为比较器的同相输入信号，与反相输入信号电压比较大小，在比较器的输出端产生与原信号同频率的正规方波信号。同相输入信号幅值的大小就是比较器的阈值电压，是一个固定值。阈值电压除以放大倍数，近似为信号

调理器的输入门槛电平。阈值电压虽然固定,但由于放大倍数可调,实际使门槛电平变为可调。当传感器输出信号(小于0.7V)放大后,大于门槛电平时,调理器输出低电平,反之输出高电平。在实际应用中,比较器采用滞回比较器,如图2(a)所示,大于正阈值电压 V_{+T} 时变为低电平,一直到小于负阈值电压 V_{-T} 时才变为高电平,这样,幅值小的干扰信号及有尾波的奇异信号,被整形成正确信号。

需要指出的是,信号调理器的门槛电平设置方法简单但很关键。具体设置时,一般根据传感器在额定状态下输出幅值大小、波形是否正规及测量系统的噪声大小3个因素来确定。波形不是很正规时,门槛电平设置电压应比系统噪声(或输出波形的尾波幅值)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20mV)。液氧煤油发动机试车中,信号调理器门槛电平一般设10~110mV。另外,流量和转速传感器输出的原始波形的形状、频率及幅值等参数应由传感器设计单位提供,但实验室取得的参数和实际热试车强振动环境条件下的参数差异较大,可以在试车中数据采集系统采集数据的同时,用模拟磁带机1:1记录原始波形,事后回放观察。经过多次记录分析,可以摸清同型号发动机试车各种流量和转速传感器的原始输出波形情况,为门槛电平设置提供准确可靠的依据。

3.3 隔离电路设计

火箭发动机试车中,测控系统庞大,测量参数众多,干扰信号机理复杂,将传感器信号与数据采集系统彻底隔离是必须的。设计中,有3种方式可供选择,一是采用变压器隔离-滤波-放大-整形的方式;二是滤波-仪表放大器隔离、放大-整形的方式;三是滤波-放大-整形-光耦隔离的方式。根据试车中信号的实际情况和干扰环境,采用第三种方式效果比较理想,原因是隔离前的滤波和整形,基本消除了干扰信号,而对方波频率信号用光耦隔离既简单,效果又好,且隔离后仍是规整的方波信号。

3.4 分频电路设计

频率型参数测量中,采用直接测量或F-V变

化间接测量方法。直接测频时,不用校准,方法简单,且测量精度优于间接测量方法。直接测频法有测周期和测频率两种方式,在测周期的方法中,又有测单周期和多周期之分。一般情况下,当被测参数频率较低(如小于1000Hz)、变化范围较大、采集系统计数器长度及标准计数时钟一定时,采用单周期测量法具有较高的精度。火箭发动机试车中,既要准确测量起动段流量和转速值,又要测量稳定段值,传感器信号大多数频率较低,且起动段频率值是一个从零开始逐渐变化,直至基本稳定的过程,所以,采用单周期测频法较合适;当被测信号频率较大(如大于1000Hz)时,可以采取分频处理。实际发动机试车中,流量信号频率小,可直接测量。只有液氧煤油发动机试验中,主涡轮泵和预压泵转速输出频率较大,需采用分频方式测量。采用分频测量还有另外一个重要原因,就是液氧煤油发动机涡轮泵设计多个导磁叶片,转一周输出不是一个正弦波,而是多个波。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、脉宽差异较大,如图2(b)所示。采用单周期原理测量时,按固定速率定时采样的波,可能是一周内多个波的任意一个波,导致测量数据波动很大,不能准确反映发动机的真实固有特性。分频测量实际上是一种多周期测量方法。分频数可按涡轮泵导磁叶片数设置,这样,分频后涡轮泵转一周相当于只输出一个波,试车稳定段转一周的脉冲宽度基本稳定,测得的数据波动大大减小。

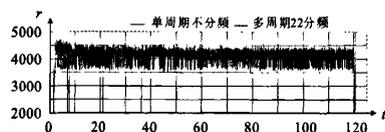


图7 某转速测量数据曲线图

Fig.7 Profile of a rotating speed measurement parameter

图7是某转速不分频测量数据绘制的曲线和分频后测量数据绘制的曲线比较结果,可见分频后波动显著减小。

对频率信号分频时,可采用软件分频或硬件

分频。软件分频的特点是非常容易实现任意分频，既简单又方便；硬件分频的特点是速度快，不占用软件开销，软件分频是利用部分频率参数采集装置具有的多周期测量功能，采集前预先设置多周期数（对应发动机涡轮泵导磁叶片数），采用减计数原理，将多个完整的周期波形按一个波处理。硬件分频就是在信号调理器上设计分频电路，最简单的分频方法是用 TTL 电路进行分频，如选用二进制计数器 74LS393 可实现 2^n 分频；选用二-五-十进制计数器 74LS290 可实现 10^n 分频；选用二-N-十六可变进制计数器 T213 可实现任意数分频等。由于不同型号的发动机涡轮泵导磁叶片数是固定值，信号调理器设计时，分频数可以设计成固定值，不同分频数的信调器板件用于对应的频率参数。一般将常用的分频数设计成跳线方式，便于改变。另外，输入信号两级分频（如 256 分频）后，连接发光二极管，通过闪烁情况可以直观粗略判断有无信号及信号频率高低。

需要指出的是，输出波形不正规的参数采用分频处理后，解决了数据大波动问题，但试车启动段采集的第一个数可能产生一定的滞后。原因是单周期测量开始时，启动瞬间可能采集到启旋第一周输出多个波的任意一个波，而分频处理后，只能等第一周多个波的最后一个波结束后采集。这微小的滞后，对研究发动机瞬间启动过程有参考价值，一般情况下无意义。

3.5 F-V 变换技术

发动机试验中，有些数据采集系统只能采集电压型参数，未配置频率信号调理器、频率计数板和相应的软件，无法采集频率型参数。有流量、转速参数测量任务时，可通过 F-V 变换技术，在现有的数据采集系统上完成测量任务。实现的技术途径是在频率信号调理器上增加 F-V 变换功能。F-V 变换技术在多数情况下，测量精度满足要求，用于液体火箭发动机试车流量和转速参数测量时，比直接测量频率精度略低一些，也产生一定的滞后（原理所决定）。如果用于定型产品试验，只关注稳定段数据，启动段数据不关注时，测量精度可以满足发动机试验流量和转速

的测量要求。

F-V 变换电路通常设计在信号调理器的光耦隔离以后，和分频电路的输入信号并联。调理器的输出信号是电压信号还是频率信号通过跳线选择。图 8 给出一个典型的 F-V 变换电路原理图。

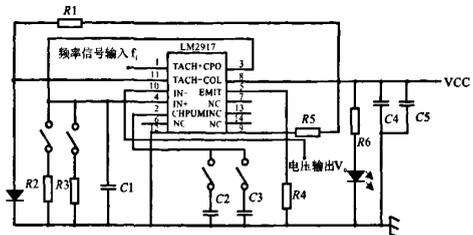


图 8 F-V 变换电路

Fig.8 F-V transferring circuit

图中通过 C2、C3 跳线开关，选择不同的信号频率范围。在输入频率、C2（或 C3）基本确定的情况下，通过 R1、R2 跳线调节输出电压大小。通过 F-V 变换技术测量流量转速参数时，试车前用标准频率信号源，选择和被测参数输出频率大小相近的几档频率进行校准，用最小二乘法求出斜率。试车时用采集的电压数减零位后乘斜率，得到被测信号频率（也可分段插值求频率）。表 1 是用标准频率信号经 F-V 变换结果比较。

表 1 标准频率信号 F-V 变换数据对比 (单位: Hz)

Tab.1 Comparison of standard frequency signal F-V transferring data (Unit: Hz)

	60	160	200	300	460	800
F-V 变换	60.14	159.82	199.89	299.99	460.00	800.03
绝对差	0.14	-0.18	-0.11	-0.01	0.0	0.03

表 2 试车信号 F-V 变换数据对比 (单位: Hz)

Tab.2 Comparison of testing signal F-V transferring data (Unit: Hz)

	转速 1	转速 2	转速 3	流量 1	流量 2
试车直接采集数据	171.75	753.82	291.09	293.29	275.27
F-V 变换	171.75	753.67	290.14	294.30	275.55
绝对差	0.0	0.15	0.95	-1.01	-0.28

表2是磁带机记录的热试车流量和转速信号前稳定段数据回放经F-V变换数据比较。数据说明:不规则的流量、转速信号经信号调理和F-V变换后,稳定段数据平均值比较接近,可以满足测量精度要求。

4 信号调理器调试技术

频率信号调理器设计完成后,可按以下内容和方法调试:

(1) 低通滤波器的截止频率调试:通常按被测频率信号上限的2~3倍设置截止频率,用标准频率和热试车记录的流量和转速磁带信号进行调试。液氧煤油发动机试验中,一般设置1kHz、2kHz、5kHz 3种截止频率用于不同的参数;

(2) 放大、整形及门槛电平电路调试:用标准频率源和数字示波器逐级调试放大、整形和门槛电平电路。对于整形和门槛电平还要用热试车记录的各种波形奇异的磁带信号反复回放调试,验证设计参数是否合适,是否适应各种流量、转速参数测量;

(3) 分频电路调试:用标准频率源和信号数据采集装置进行调试,分频结果应准确无误;

(4) F-V变换电路调试:用标准频率源调试F-V变换功能正确无误后,再用热试车记录的频率信号进行调试,调试结果应和试车直接采集的稳定段数据平均值基本一致。若两者差异影响测量精度,首先考虑图8中电容C2、C3的取值大小、电路电源的高低和纹波;其次考虑门槛电平、截止频率设置是否合适;

(5) 抗干扰调试:调试中发现流量和转速传感器连接,在传感器未工作时,采集系统有50Hz干扰,可能是测量系统未接地或接地不良造成的。解决的措施是:信号传输选用屏蔽双绞线,并将信号负线和屏蔽线在采集系统处联在一起接地,确保全系统一点接地,基本消除工频干扰。

5 结束语

信号调理器是数据采集系统的关键环节,它不仅把传感器输出信号准确无误送到采集装置,而且对信号进行调理,使信号适合数据采集装置的采集要求。对于频率信号调理器要完成滤波、放大、整形、隔离、分频及F-V变换等功能。火箭发动机地面试验中,由于数据采集系统对应各种发动机,传感器输出信号频率、幅值等不尽相同,多数波形不正规或奇异,设计的信号调理器应适应各种情况。上述介绍的频率信号调理器研制成功后用标准正弦信号调试精度优于0.05%,用多次液氧煤油发动机热试车记录的磁带数据回放进行测试全部通过。该调理器设计中采用的截止频率、增益、门槛电平可调技术,滞回比较技术,独立正、负电源技术,提高了测量系统抗共模干扰能力,极大抑制了系统干扰信号;采用的分频技术不仅解决了数据大波动问题,而且使系统具有输入信号直接监视功能。到目前为止,已参加了40多次热试车。测试和试车结果表明,该调理器设计先进、功能完善、运行稳定、操作简便,各项指标达到了设计要求,它的使用,为准确、完整地测量流量和转速参数提供了有力保证条件。该频率信号调理器是一个通用调理装置,可直接用于其他频率参数测量场合。

参考文献:

- [1] 余孟尝. 电子技术基础教程(上)[M]. 北京: 学术书刊出版社, 1989.
- [2] 何立民. 单片机应用技术汇编(2)[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 1994.
- [3] 赵保经. TTL集成电路[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [4] 赵万明. 液氧煤油发动机试车主要参数测量方法研究[J]. 火箭推进, 2006, 32(5): 51-55.
- [5] 李邦复. 遥测系统(上)[M]. 北京: 宇航出版社, 1987.

(编辑: 马杰)