

# 新型液体火箭发动机泵试验转速测量研究

封锡凯, 李辉, 李伟  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 通过对转速测量过程中的环境影响、传感器自身因素及出现问题的分析, 针对性地设计了限幅器、滤波器以及鉴真比较器等具体解决方案。实际应用表明, 采取的措施可行, 转速测量的稳定性显著提高。

**关键词:** 转速测量; 变换器; 可靠性

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2009) 03-0047-05

## Rotational speed measurement of liquid rocket engine pumps

Feng Xikai, Li Hui, Li Wei  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The method of rotational speed measurement of liquid rocket engine pumps is presented in this paper. Limiter circuit, wave filter circuit and comparator circuit were designed. The results show that the stabilization of rotational speed measurement is improved effectively in practical application.

**Key words:** rotational speed measurement; converter; reliability

### 0 引言

涡轮泵是液体火箭发动机的重要组成部分, 它的性能直接影响发动机的性能。新一代大运载液体火箭发动机研制中的涡轮泵具有体积小、转

速高及泵室压高等特点, 研制中需进行大量试验确定泵的性能。在泵试验中, 转速是泵测试中的重要参数, 也是反应泵性能的重要指标。在实际测试中, 转速传感器受到安装部位空间小、振动冲击和温度载荷大等诸多不利因素的影响, 使转速测量难度增大, 影响转速测量的准确性、可靠

收稿日期: 2009-01-09; 修回日期: 2009-03-09。

作者简介: 封锡凯 (1954—), 男, 特级技师, 研究领域为液体火箭发动机测试技术。

性,严重时可造成泵测试不能顺利进行,制约研制进度。

通过对转速测量过程中环境影响、传感器自身等因素及出现问题的分析,提出了具体解决办法,并针对性地设计了限幅器、滤波器及鉴真比较器等电路。

## 1 测量原理及组件结构

转速测量采用磁电式转速传感器,此类型传感器分为内磁式和外磁式。新型液体火箭发动机转速测量采用内磁式转速传感器,它由一个环绕在永久磁铁或软磁铁上的线圈和一个独立磁极构成(图1)。转速传感器穿过涡轮壳体,靠近装在泵轴上的转速螺母。转速螺母在其外径圆周上有若干等尺寸、等间距的齿,每个齿通过由永久磁铁产生的电磁场时,引起电磁场变化,线圈中感应产生一个脉冲电压信号。脉冲电压信号输出至发动机变换器,变换器将频率信号转换成与轴转速成正比例的电压信号。

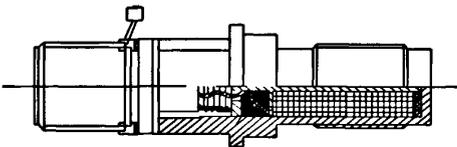


图1 转速传感器结构

Fig.1 Structure of the rotation sensor

## 2 影响测量可靠性的因素

### 2.1 干扰影响

#### 2.1.1 噪声干扰

转速传感器属磁电式传感器,对电、磁干扰敏感。电、磁可通过路和场对传感器形成干扰,这种干扰是最普遍和最严重的干扰。转速传感器吸入信号载体的无用脉冲产生噪声,分为差模噪声和共模噪声。差模噪声从既不靠近也不环绕信号载体的其它电子载体发出的尖峰脉冲中产生;共模噪声主要是由射频或电磁场引起的交流噪

声。

另外,涡轮泵转速测量过程中传感器与测控系统相距较远,长达几十米甚至数百米,干扰源通过电磁或静电耦合在信号线上的感应电压数值相当可观,长线传输干扰问题较为严重。

#### 2.1.2 电磁干扰

电磁干扰是由于磁场穿透外屏蔽层所致。动态磁场与电场成 $90^\circ$ ,可以改变幅值和波形,在电路中产生干扰。

### 2.2 硬磁特性影响

泵组件机加过程中,由切削造成的各种零件磁滞回线加宽,具有一定的硬磁特性(称为机加剩磁)。由于机加后没有退磁,泵试验中因剩磁干扰使传感器输出波形变形,形成干扰尾波,测量稳定性变差,造成测量数据的不可靠。

### 2.3 转速传感器输出接插件瞬断干扰

转速传感器固定到泵体后,输出由电接插件联接。由于电接插件受到机械、温度等载荷的影响,会出现瞬断现象,使转速测量误差增大。

### 2.4 转速螺母模数的影响

转速螺母上的齿间距、尺寸影响线圈中磁通量的变化;从而引起传感器输出信号幅值的变化。这样,在变换器阈值设定的条件下,会因传感器信号幅值太低引起测量误差甚至无法测量。

### 2.5 转速传感器结构的不利因素

(1) 转速传感器结构采用小型化设计,同时需保证较低转速条件下一定的电压幅值,从而要求传感器线圈匝数较多,且绕线的线径要小。此种情况下,因机械载荷造成线圈之间挠矩摩擦,容易出现线圈匝间短路或引出线断裂等故障。

(2) 由于转速传感器体积的关系,电感量不可做得很大,低转速时输出电压幅值较低,高转速时输出电压幅值较高。

(3) 转速传感器在低转速时,输出波形近似正弦,高速波形逐步出现非正弦波,并可能出现尾波。

(4) 由于转速传感器等效电容的存在,使转速测试时易受各种工业、自然快速瞬变脉冲串干扰,影响转速测量的准确性。

(5) 转速传感器所处安装位置极易受到大机械载荷的冲击,传感器的加固灌封是必不可少的。灌封材料固化应力太大,会使传感器引出线在大机械载荷的冲击下断裂失效。

从以上论述中不难看出,有些因素从工艺上可以解决,有些因素就必须由测量电路给予处理。例如上述 2.2 条,泵机加后剩磁影响,只要对切削加工的零件进行退磁处理,并测量剩磁量,控制剩磁量在允许的范围内,此问题就能够彻底解决。上述 2.3 条,转速传感器输出接插件瞬断干扰,可在电接插件安装吸收环用以消除冲击和振动。上述两条也可通过设计针对性的电路来处理。上述 2.5 项(1)、(5)条,可通过真空浸漆,GD414 灌封加固处理等工艺方法加以解决。现采用变换器针对性设计的方法对 2.2、2.3、2.5 项(2)、(3)条等问题进行处理。

### 3 解决方案

以往变换器均采用带通、带阻及带通有源滤波后,进行放大整形处理,然后滤除干扰,变换成与轴转速成正比的频率等信号。由于环境等因素的影响,泵没有转动,变换器就有输出脉冲,造成转速测量无法进行。

以上问题的解决方案见图 2 所示。

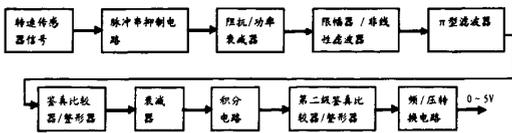


图 2 转速变换器框图

Fig.2 Block of the rotation converter

#### 3.1 快速瞬变脉冲串抑制电路

在电路输入端采用吸收型滤波器,可将工作时的吊车、试验电机等干扰源产生的快速瞬变脉冲串干扰吸收。吸收型滤波器由耗损器件构成,也就是铁氧体吸收型滤波器,作用是在阻带内吸收噪声的能量转化为热能损耗,达到滤波效果。

铁氧体吸收型滤波器根据铁氧体自身的特点,将铁氧体用作电感器,以构成低通滤波器,

在低频时提供感性-容性通路,而在较高频率时损耗较大。在实际应用中,铁芯能抑制任何寄生振荡,可以衰减感应或传输到元器件引线上或与之相连的电缆线中的高频无用信号。铁心通过消除或极大地衰减电磁干扰源的高频电流来抑制传导干扰。采用铁氧体能提供足够高的高频来减小高频电流。从理论上讲,铁心的阻抗依赖于频率,理想的铁氧体能在高频提供高阻抗,而在所有其他频段上提供零阻抗。

#### 3.2 阻抗/功率衰减电路

吸收型滤波器后为阻抗筛选,也可称为功率筛选电路。因为干扰信号具有比真值信号阻抗高,功率低等特点,采用低阻值电阻,可以有效降低输入干扰。快速瞬变脉冲串抑制电路、阻抗筛选电路见图 3 所示。

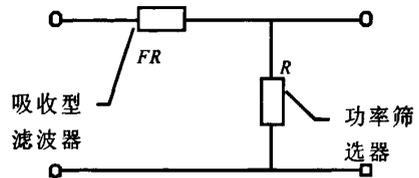


图 3 脉冲串抑制电路与阻抗筛选电路

Fig.3 The fast transient impulse train killer circuit and the impedance screening circuit

#### 3.3 输入信号限幅电路

通过阻抗筛选后对输入转速信号进行限幅,把输入幅值最大控制在 0.7V (图 4)。

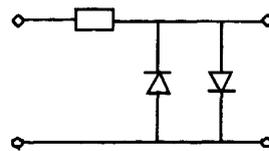


图 4 限幅器

Fig.4 The amplitude limiter

限幅电路由电阻及二极管组成,目的是为放大器的输入作准备,并对信号值进行进一步衰减。采用二极管构成的限幅器也称非线性滤波器。脉冲噪声是传感器噪声的一种重要表现形

式，通常它的振幅较大，对电路造成不良影响较大，大的尖脉冲经常损坏电路，也成为浪涌。它含有直流成份至高频成份，用通常的线性滤波器不能滤除这种噪声，采用非线性滤波器，可有效滤除这种噪声。

### 3.4 π型滤波电路

限幅器后由RC组成π型滤波器，通过控制RC选值可滤除转速传感器输入频率信号以外频率的信号及降低干扰幅值。π型无源滤波器是一种选频电路，能够使有用信号通过，而同时抑制(衰减)无用频率信号(图5)。

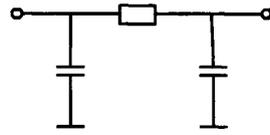


图5 π型滤波器

Fig.5 The π type filter

### 3.5 鉴真比较整形器

鉴真比较器将π型滤波传输过来的近似正弦转速信号进行幅值电压比较放大，输出等幅频率电压值。由电阻、运算放大器组成的单门限电压比较器见图6。

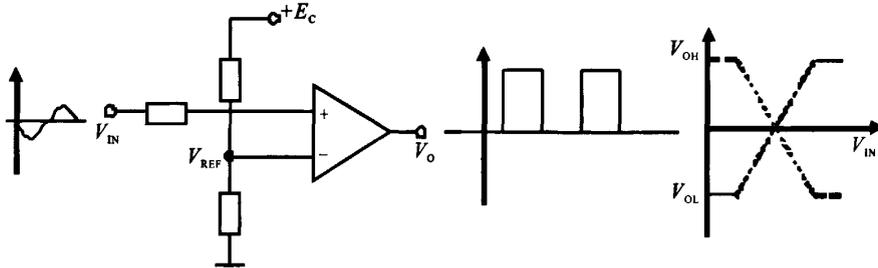


图6 鉴真比较整形电路

Fig.6 The wave-shaping comparator circuit

由于集成运放的开环电压放大倍数很大，运算输出电压  $V_{IN}$  小于参考电压  $V_{REF}$ ，即  $V_{ID} = (V_{IN} - V_{REF}) < 0$  时运算输出电压  $V_O$  为低电平  $V_{OL}$ 。反之，当  $V_{IN}$  升高到略大于  $V_{REF}$  即  $V_{ID} = (V_{IN} - V_{REF}) > 0$  时  $V_O$  为高电平。由以上分析可知，比较器输出电压  $V_O$  的临界转换条件是集成运放地差动输入电压  $V_{ID} = 0$  即  $V_{IN} = V_{REF}$ 。当  $V_{IN}$  由低变高经过  $V_{REF}$  时  $V_O$  由  $V_{OL}$  变为  $V_{OH}$ ，反之当  $V_{IN}$  由高变低经过  $V_{REF}$  时  $V_O$  由  $V_{OH}$  变为  $V_{OL}$ 。把比较器输出  $V_O$  从一个电平跳到另一个电平时相应的输入电压  $V_{IN}$  值称为门限电压或阈值电压  $V_T$ 。应用以上原理，构成鉴真比较器抑制 EMI 信号，将正弦波变为方波脉冲信号输出。

### 3.6 衰减器

由电阻组成的衰减器将鉴真比较器整形后输入的方波脉冲，衰减到 2/3 幅值。采取限幅措施的目的是避免内部管子进入深度饱和区，提高响应速度。

### 3.7 积分电路

积分电路将衰减器传来的方波脉冲进行积分。利用脉冲宽度鉴别真假信号，脉冲宽度大的输出大，而脉冲宽度小的噪声脉冲输出小，所以能将噪声干扰除掉。信号脉冲宽，积分后信号幅度高；干扰脉冲窄，经积分后信号幅度小。RC 积分电路的时间常数  $\tau$  选择合适时，将设置一个门坎电平，将幅度小的干扰脉冲去掉，从而达到抑制干扰脉冲的目的。

### 3.8 第二级鉴真比较整形器

由积分电路输入的信号，经第二级鉴真比较整形器处理后，输出等幅的转速频率脉冲信号，输入至测控系统。第二级鉴真比较整形器(图7)同第一级相仿，在此不再论述。

### 3.9 F/V 转换电路

采用 LM331 对方波信号进行频率-电压转换。LM331 外接电路简单，只需接入几个外部元件就可方便构成 V/F 或 F/V 转换电路；线性度

好, 最大非线性失真小于 0.01%, 工作频率低到 0.1Hz 时尚有较好的线性; 变换精度高, 数字分辨率可达 12 位。

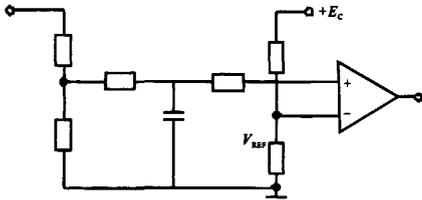


图 7 衰减、积分及第二级比较整形电路

Fig.7 Wave-shaping circuit for attenuation, integration and the second stage comparison

$F/V$  转换电路如图 8 所示。此电路转换频率高达 10kHz, 最大非线性  $\pm 0.01\%$ 。这里, 输出电压:

$$V_{OUT} = f_{IN} \times 2.09 \times \frac{R_F}{R_S} \times (R_1 C_1)$$

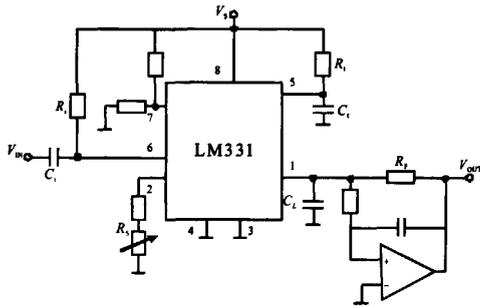


图 8  $F/V$  转换电路

Fig.8 The  $F/V$  switching circuit

由上式可知: 电阻  $R_F$ 、 $R_S$ 、 $R_1$  和电容  $C_1$  直接影响转换结果, 因此对元件的精度有一定要求, 为了提高精度和稳定性, 阻容元件选用低温系数的器件; 输入端微分电容  $C_1$  的选择不宜太

小, 要保证输入脉冲经微分后有足够的幅度来触发输入比较器, 但电容  $C_1$  小些有利于提高转换电路的抗干扰能力;  $C_1$  一般在 0.01~1 $\mu$ F 之间比较合适,  $C_1$  大些, 输出电压  $V_O$  的纹波会小些;  $C_1$  小些, 当输入脉冲频率变化时, 输出响应会快些。这些因素在实际运用时要综合考虑。

频率信号经  $F/V$  后转换为 0~5V 直流信号, 易于后续测量, 但直接测频比  $F/V$  转换后测压精度高一些, 且  $F/V$  转换后有滞后现象。这样,  $F/V$  转换部分可根据不同使用环境、测量要求酌情配置。

### 4 结论

根据以上方案制作的转速变换器, 经计量确认后用于泵试验。长期使用证明, 该变换器稳定、可靠, 具有较高精度, 解决了泵试验转速测量测值不稳问题, 为新型液体火箭发动机研制创造了良好条件。

以上实践不但解决了试验技术难点, 同时还获得了较大的经济效益。

### 参考文献:

- [1] 周旭. 电子设备防干扰原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] 陈大钦. 模拟电子技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [3] 王岗岭. 传感器噪声及抑制方法[J]. 传感器世界. 2007, 13 (2).
- [4] 李科杰. 新编传感器技术手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

(编辑: 王建喜)