

# 液体火箭发动机试验推力 测量传感器并联影响研究

朱子环

(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

**摘要:** 介绍了推力测量传感器并联工作原理, 进一步确定并联作为液体火箭发动机试验推力测量中多只传感器的电路连接方法。通过对多只传感器并联的选配与分析, 在保证灵敏度与输出阻抗比值一定的情况下, 该方法可以提高推力测量精度, 同时输出力值不受偏心载荷影响。

**关键词:** 传感器并联; 推力测量; 液体火箭发动机

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2010) 02-0059-04

## Investigation of parallel connection of thrust sensors on measurement precision in liquid rocket engine tests

Zhu Zihuan

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing, 100074 China)

**Abstract:** The mechanism of parallel connection measurement is presented. Parallel sensors are chosen as the measurement method in liquid propellant rocket engine tests. Multiple sensors connections are analyzed and tested. The analysis and test results show that parallel connection measurement of thrust sensors can improve the measurement precision and eccentric load has little effect on the result.

**Key words:** parallel connection of sensors; thrust measurement; liquid rocket engine

收稿日期: 2009-11-03; 修回日期: 2010-03-12。

作者简介: 朱子环 (1977—), 女, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验推力测量技术及仿真技术。

### 0 引言

液体火箭发动机试验中推力是发动机性能指标的关键参数，该参数的稳态测量精度一般高于0.5%。推力测量装置需要满足试验系统的管路连接、意外情况的安全限位、发动机的安装等。考虑到推力高准确性测量和整体结构的要求，目前试验系统多数采用两只或三只应变式传感器来完成测量。电路连接方法上采用串联和并联两种方式，串联优点：传感器的输出信号比较大，适用于精度比较低的测量系统；缺点：每个传感器都需要一个激励电源，使测量系统变得复杂。另外由于输出比较大的模拟量信号会对系统带来干扰。并联优点：只需要一个供桥电源。测量平均值将减少 $\sqrt{n}$ 倍， $n$ 为并联传感器的数量；传感器并联输出阻抗低，提高了系统的抗干扰能力。缺点：对多只传感器的输出阻抗和灵敏度的一致性要求较高。

根据推力测量精度要求，考虑对多只传感器的测量状况采用并联电路连接方法。下面对并联原理、选配等作以分析。

### 1 推力传感器并联输出原理

推力稳态测量一般选用应变式力传感器，其电路为惠斯登电桥电路，如图1所示，图中 $R$ 为桥臂电阻， $U$ 为供桥电压， $E$ 为输出电压。它可以简化为一个电势和一个内阻组成的等效电源电路，如图2所示。 $n$ 只力传感器并联的输出电路，如图3所示。 $n$ 只传感器并联输出电路的等效电路，如图4所示。

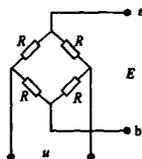


图1 力传感器电桥原理图

Fig.1 Schematic of the force sensor electric bridge

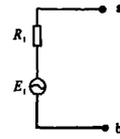


图2 力传感器等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit of the force sensor

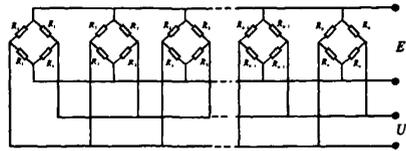


图3 n只力传感器并联电桥原理图

Fig.3 Schematic of electric bridge of parallel force sensors

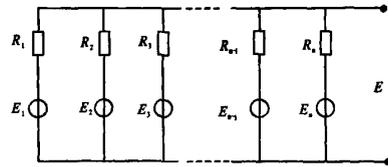


图4 n只力传感器并联等效电路图

Fig.4 Equivalent circuit of parallel force sensors

多只力传感器并联输出利用的是平均值电路原理，其输出电压每一只力传感器的灵敏度和输出阻抗有关。

以2只与3只传感器并联为例说明，根据欧姆定律推出输出电压。

2只传感器并联情况的输出电压如下：

$$E = \left( \frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} \right) \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \left( \frac{S_1 U F_1}{R_1 C} + \frac{S_2 U F_2}{R_2 C} \right) \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \tag{1}$$

3只传感器并联情况的输出电压如下：

$$E = \left( \frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} + \frac{E_3}{R_3} \right) \cdot \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2} = \left( \frac{S_1 U F_1}{R_1 C} + \frac{S_2 U F_2}{R_2 C} + \frac{S_3 U F_3}{R_3 C} \right) \cdot \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2} \tag{2}$$

式中， $E$ 为传感器并联后输出电压； $U$ 为传感器供桥电压； $C$ 为传感器额定容量； $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 为每只

传感器输出信号;  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  为每只传感器输出阻抗;  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  为每只传感器灵敏度;  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  为每只传感器承受载荷。

## 2 推力传感器并联选配分析

### 2.1 推力传感器并联分析

以两只推力传感器并联为例, 见并联输出电压的数学表达 (1):

a. 如果  $\frac{S_1}{R_1} = \frac{S_2}{R_2} = A$ , 则并联输出电压的数学表达式为

$$E = \left[ \frac{S_1 U F_1}{R_1 C} + \frac{S_2 U F_2}{R_2 C} \right] \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{A U R_1 R_2}{C(R_1 + R_2)} (F_1 + F_2) \quad (3)$$

数学表达式 (3) 中, 在保证传感器灵敏度与输出阻抗比值一致的情况下,  $\frac{A U R_1 R_2}{C(R_1 + R_2)}$  为常数, 输出电压只与几只并联传感器的受力总和有关, 与单只传感器的受力状态无关, 即与传感器是否受力均匀无关。

b. 如果  $\frac{S_1}{R_1} \neq \frac{S_2}{R_2}$ , 由并联输出数学表达式 (1) 可知:

输出电压不仅与每只传感器的灵敏度与输出阻抗的比值有关, 还与每只传感器所承受载荷的大小有关。只有在  $F_1 = F_2 = F$  时, 输出电压仅与  $F$  有关, 但是要保证几只传感器受力相等是很难做到的。

另外多只传感器的并联分析同上。

### 2.2 推力传感器并联选配分析

选择多只推力传感器并联时, 也很难保证灵敏度与输出阻抗比值的一致性。但可以通过附加电阻的方式调整输出阻抗, 下面介绍两种方法:

#### a. 增加隔离电阻

在每只传感器的输出端增加两只隔离电阻  $R$ ,  $R$  的阻值大约是传感器输出阻抗的 20~40 倍。以两只传感器并联为例的等效电路如图 5 所示。

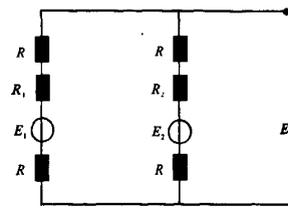


图 5 增加隔离电阻 2 只力传感器并联等效电路  
Fig.5 Equivalent circuit of 2 parallel sensors with isolating resistance

$$E = \left( \frac{E_1}{2R + R_1} + \frac{E_2}{2R + R_2} \right) \cdot \frac{(2R + R_1) \cdot (2R + R_2)}{(2R + R_1) + (2R + R_2)}$$

$$= \left( \frac{S_1 U F_1}{(2R + R_1) C} + \frac{S_2 U F_2}{(2R + R_2) C} \right) \cdot \frac{(2R + R_1) \cdot (2R + R_2)}{(2R + R_1) + (2R + R_2)} \quad (4)$$

由 (4) 式可见, 增加隔离电阻后,  $\frac{S_1}{2R + R_1}$ 、 $\frac{S_2}{2R + R_2}$  之间的差异远小于  $\frac{S_1}{R_1}$ 、 $\frac{S_2}{R_2}$ , 从而进一步减小偏载对推力测量精度的影响。

#### b. 增加微调补偿电阻

在传感器输出端增加一只微调电阻  $R$ ,  $R$  的阻值一般只有几欧姆。以两只传感器并联为例的等效电路如图 6 所示。

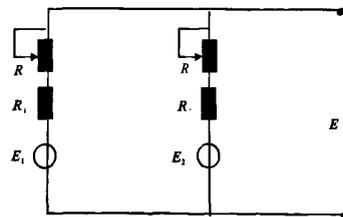


图 6 增加补偿电阻 2 只力传感器并联等效电路  
Fig.6 Equivalent circuit of 2 parallel sensors with resistance compensation

$$E = \left( \frac{E_1}{R + R_1} + \frac{E_2}{R + R_2} \right) \cdot \frac{(R + R_1) \cdot (R + R_2)}{(R + R_1) + (R + R_2)}$$

$$= \left( \frac{S_1 U F_1}{(R + R_1) C} + \frac{S_2 U F_2}{(R + R_2) C} \right) \cdot \frac{(R + R_1) \cdot (R + R_2)}{(R + R_1) + (R + R_2)} \quad (6)$$

由(6)式可见,可以通过调整补偿电阻 $R$ ,使得 $\frac{S_1}{R+R_1}$ 与 $\frac{S_2}{R+R_2}$ 保持一致。

### 3 试验中推力传感器并联测量误差结果分析

某试验中选用两只传感器并联的方式进行推力测量,两只传感器的基本指标见表1。

表1 两只传感器的基本指标

Tab.1 Basic parameters of the 2 sensors

	灵敏度 mV/V	输出阻抗 $\Omega$	额定容量 kN
传感器1	4.00032	351.124	50
传感器2	3.99736	350.835	50

以标准力施加在传感器并联式推力测量装置上,得到两只传感器测量结果。表2列出传感器单个和并联方式的各项误差。

表2 单只传感器与传感器并联测量误差

Tab.2 Measurement errors between single sensor and parallel sensors

	线性误差	滞后误差	重复性 误差	综合性 误差
传感器1	0.338%	0.959%	0.063%	0.798%
传感器2	0.338%	1.040%	0.047%	0.781%
传感器 1、2 并联	0.024%	0.0278%	0.029%	0.067%

由表2测量结果误差可以看出,在偏心载荷影响下,单只传感器的测量误差比较大,但

$$\frac{S_1}{R_1} = \frac{4.00032}{351.124} = 0.011393; \quad \frac{S_2}{R_2} = \frac{3.99736}{350.835} = 0.011394,$$

即 $\frac{S_1}{R_1} = \frac{S_2}{R_2}$ , 额定容量 $C_1=C_2=50\text{kN}$ , 保证传感器的

灵敏度与输出阻抗比值一致及额定容量相同的情况下,输出电压只与两只并联传感器的受力总和有关,与单只传感器的受力状态无关。并联结果的测量误差小于单个传感器测量误差一个数量级。

### 4 结论

- (1) 传感器并联方式可提高测量准确性。
- (2) 传感器并联方式要求相同额定载荷;灵敏度与输出阻抗比值一致。
- (3) 传感器并联方式可避免传感器受载不均匀时产生的附加误差。

### 参考文献:

- [1] 林自強. 国外高精度应变测力传感器技术的分析与探讨[J]. 计量技术, 1978.
- [2] 刘九卿. 称重传感器并联组秤原理及其误差合成[J]. 衡器, 2000.
- [3] 谢显奇. 液氢-液氧发动机的推力测量[J]. 导弹与航天运载技术, 1997.
- [4] 李建军. 涡轮流量计在火箭发动机试验中的应用[J]. 火箭推进, 2007, 33(3): 56-60.
- [5] 王志武. 基于虚拟技术的信号处理与故障检测系统[J]. 火箭推进, 33(4): 52-56.
- [6] 张万忠. 可编程控制器应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.

(编辑: 王建喜)