

再考虑静止点火试验时与校准条件不一致而产生的不确定度,最后进行合成。

由于影响测量结果的量有许多,测量不确定度一般包含若干个分量,按评定方法的不同,标准不确定度分量可分为A和B两类。A类是指对一系列实验观测数列进行统计分析方法评定的不确定度;而B类为根据所有可利用的信息用非统计分析方法评定的不确定度。

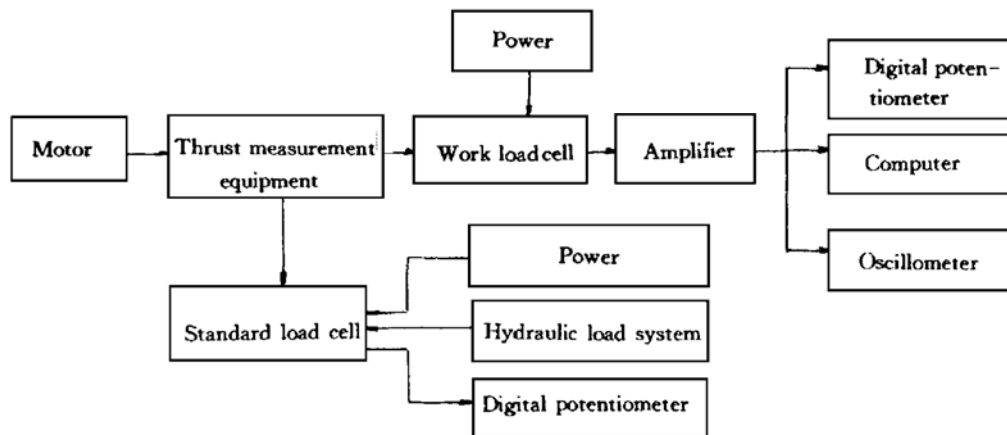


Fig. 1 Block diagram of thrust measurement

在评定不确定度时,首先要分析不确定度来源。要求仔细分析实际测量中所有可能影响测量结果的因素。不确定度来源按以下顺序确定:(1)校准等级,溯源到国家级;(2)数据取得;(3)数据处理。某发动机推力测量系统不确定度来源,在校准等级方面,有A类不确定度,来自标准传感器系统;B类不确定度,来自国家计量站测力机。在数据取得方面,A类不确定度来自测量记录系统的校准统计不确定性,B类不确定度则又可分为两类:①标准力源测量系统:a.标准传感器系统温度变化 u_{2-1} ,b.标准传感器位置变动 u_{2-2} ,c.标准传感器长期稳定性 u_{2-3} ,d.标准传感器系统零漂 u_{2-4} ,e.标准传感器蠕变 u_{2-5} ,f.标准力值加载控制准确性 u_{2-6} ,g.校准力对标准传感器的偏心 u_{2-7} ,h.激励电源稳定度的影响 u_{2-8} 。②测量记录系统:a.扳簧片的影响 u_{2-9} ,b.测量系统零漂 u_{2-10} ,c.工作传感器系统温度变化 u_{2-11} ,d.工作传感器蠕变 u_{2-12} ,e.侧向力对工作传感器的影响 u_{2-13} ,f.发动机安装影响 u_{2-14} ,g.发动机质量变化影响 u_{2-15} ,h.冲击对传感器性能的影响 u_{2-16} ,i.模数转换影响 u_{2-17} ,j.采样方式影响 u_{2-18} ,k.其他影响。

3 不确定度计算

3.1 B类不确定度计算

B类不确定度分量按有关规定方法计算,计算结果见表1。

3.2 A类不确定度计算

(1)标准传感器校准记录见表2。

按有关公式并按线性回归方程检验规定,进行回归方程线性检验后得回归方程为^[1]:

$$\hat{y} = -1.4999 + 4.7873x$$

式中: $\hat{y}$ 为测得值 y 的最佳估计值; x 为校准加载值。

校准方程为: $\hat{x}_0 = (y_0 + 1.4999)/4.7873$

式中: $\hat{x}_0$ 为约定真值的最佳估计值, y_0 为与约定真值 x_0 对应的测得值。

Table 1 Calculation result for uncertainty of category B

Relative uncertainty fraction u'	Method of obtaining	$\Delta_f (10^{-3})$	Factor of trustworthiness k_j	$\frac{\Delta_j}{k_j} (10^{-3})$	Freedom v_{Bj}
u'_{1-1}	Nominal value	2.7×10^{-2}	3	0.01	30
u'_{2-1}	Estimation	0.15	2	0.08	1
u'_{2-2}	Check value	0.10	2	0.05	30
u'_{2-3}	Check value (truthless)	0.30	2	0.15	1
u'_{2-4}	Estimation	0.17	2	0.09	1
u'_{2-5}	Check value	0.25	2	0.13	30
u'_{2-6}	Operation record	0.17	2	0.09	30
u'_{2-7}	Operation experience	0		0	
u'_{2-8}	Operation record	0.17	2	0.09	30
u'_{2-9}	Check calculation	0.01	2	0.01	30
u'_{2-10}	Operation record	0.22	2	0.11	30
u'_{2-11}	Estimation	0.30	2	0.15	1
u'_{2-12}	Measuring value	0.14	2	0.07	30
u'_{2-13}	Test estimation	0.14	2	0.07	1
u'_{2-14}	Test estimation	0.22	2	0.11	1
u'_{2-15}	Test estimation	0.28	2	0.14	1
u'_{2-16}	Test estimation	0.22	2	0.11	1
u'_{2-17}	Nominal value calculation	0.30	2	0.15	30
u'_{2-18}	Estimation	0.04	2	0.02	1

Δ_j —The limit value of variation of measured value caused by the uncertainty source No. j

Table 2 Calibration record of standardised load cell

Load (N)	Reading of forward stroke			Reading of backward stroke		Average values	Values of return
	1	2	3	1	2		
0	0	0	0	0	0	0	−1.4999
500	2393	2393	2391	2394	2391	2392	2392
1000	4786	4786	4784	4788	4785	4786	4786
1500	7180	7181	7178	7178	7178	7179	7180
2000	9573	9574	9570	9573	9570	9572	9573
2500	11967	11968	11964	11967	11963	11966	11967
3000	14357	14360	14357	14363	14360	14359	14361
3500	16755	16758	16754	16758	16753	16756	16754
4000	19149	19150	19147	19151	19147	19149	19148
4500	21542	21544	21540	21544	21540	21542	21542
5000	23935	23936	23933	23935	23936	23935	23935

单个测得值 y 的估计标准差：

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{kr_0 - 2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_0} e_{ij}^2} = 1.9243(\mu V)$$

式中： k 为校准点数， r_0 为每个校准点的测量次数。

已知测得推力为： $x_0 = 2400\text{N}$ ，并用 $kr_0 = 55$ ， $\bar{x} = 1500\text{N}$ ，代入系数计算公式^[1]

$$\sqrt{1 + \frac{1}{kr_0} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{r_0 \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}}$$
 计算出系数为1.0091。得标准传感器校准不确定度为： $S_{1-1} = 0.4056$

(N)；相对不确定度为： $S'_{1-1} = 0.017\%$ ；自由度为： $V_{1-1} = 53$ 。

(2) 测量记录系统液压原位校准记录见表3。

按公式计算，并进行回归方程线性检验后得回归方程为：

$$\hat{y} = 1.5714 + 1.8762x, \quad \hat{x}_0 = (y_0 - 1.5714)/1.8762$$

得估计标准差：

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{kr_0 - 2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_0} e_{ij}^2} = 2.5289(\mu V)$$

已知测得推力为： $x_0 = 2400\text{N}$ ，且 $kr_0 = 42$ ， $\bar{x} = 1500\text{N}$ ，计算得系数为1.0213。

得测量记录系统原位标准不确定度为： $S_{2-1} = 1.3766\text{ (N)}$ ；相对不确定度为： $S'_{2-1} = 0.057\%$ ；

自由度： $v_{2-1} = 40$ 。

3.3 合成不确定度计算

合成不确定度由各不确定度分量的方差及各分量间的协方差合成得到。当任意两个不确定

Table 3 Calibration record of work load cell

Load (N) Out (μV)		0	500	1000	1500	2000	2500	3000
1	Load	0	941	1878	2815	3752	4694	5631
	Unload	0	941	1878	2815	3757	4684	5631
2	Load	0	946	1878	2815	3757	4684	5631
	Unload	0	941	1878	2815	3752	4694	5631
3	Load	0	941	1878	2815	3757	4694	5631
	Unload	0	941	1878	2815	3757	4694	5631
Average value		0	942	1878	2815	3755	4691	5631
Value of retun		1. 5714	940	1878	2816	3754	4692	5630

Model of work load cell: C₃P₁, record instrument: computer M6800, temperature: 26°C
Bridge potential of work load cell: 5. 347V; Bridge potential of standard load cell: 12. 001V

度分量无关时，其计算公式为：

$$u'_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^2 S_i'^2 + \sum_{j=1}^{19} u_j'^2} = \sqrt{0. 3538 + 0. 1839} \times 10^{-3} = 0. 73 \times 10^{-3}$$

绝对合成不确定度为 $u_c(\hat{x}_0) = 2400 \times 0. 73 \times 10^{-3} = 1. 75(N)$

3. 4 有效自由度计算

$$v_{\text{eff}} = (\sum_{i=1}^n S_i^2 + \sum_{i=1}^m u_j^2)^2 / \sum_{i=1}^n \frac{S_i^4}{v_i} + \sum_{j=1}^m \frac{u_j^4}{v_{Bj}}$$

由上述各 A，B 不确定度分量及其自由度代入并得： $v_{\text{eff}}=56$ 。

3. 5 展伸不确定度计算

展伸不确定度 U 可由 u_c 乘以包含因子 $t_p(r_{\text{eff}})$ 得到，即 $U=t_p(r_{\text{eff}}) \cdot u_c(\hat{x}_0)$ 。取置信水平为 95%。查 t 分布表得： $t_{0. 95}(56) = 2$ 。所以展伸不确定度为：

$$U = t_{0. 95}(56)u_c = 2 \times 1. 75 = 3. 5(N)$$

即某型发动机推力测量结果为 $(2400 \pm 3. 5) \text{ N}$ ，置信概率为 95%。相对展伸不确定度为： $U'/x_0=0. 15\%$ 。

参 考 文 献

1 安克宁，荆风林. 航天工业行业标准 QJ1275-94固体火箭发动机测量不确定度评定. 北京：航天工业总公司七〇八所，1994。
2 荆风林，陶汉铭. 某发动机推力测量精度分析. 见：中国航空学会论文集. 北京：中国航天学会，1986。

边缘检测技术在火箭发动机 实验诊断中的应用^{*}

何国强 刘敏华 肖育民 蔡体敏

(西北工业大学航天工程学院, 西安, 710072)

摘 要: 对高速运动分析仪拍摄的 U 型燃气发生器固体装药燃烧和双组元液体喷嘴雾化图像进行了边缘检测图像分析, 根据被分析实物边缘层次性较强的特点, 在简单边缘检测的基础上采用自动门限、二次门限和最佳滤波的方法, 获得了固体燃气发生器在燃烧过程中的内部结构、推进剂瞬态燃速、绝热隔板烧蚀率等参数, 获得了双组元液体喷嘴的雾化角、粒子分布等特性。

主题词: 火箭发动机, 燃烧性能, 诊断 (物理), 实时显示, 图像处理, 边缘识别

分类号: V435.12, V 434.3

EDGE DETECTION TECHNIQUE FOR EXPERIMENTAL DIAGNOSIS IN ROCKET MOTOR

He Guoqiang Liu Minhua Xiao Yumin Cai Timin

(Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Abstract: X-ray real time radiography (RTR) technique was used to study solid propellant combustion in U-type gas generator and double liquid elements nozzle spray flow field, and the RTR images were processed with edge detection technique. As the tested objects are of distinct edge gradation, auto-threshold technique and optimum filter methods were employed to improve image process effect in the simple edge detection technique. With these methods the inner structure of chamber was viewed and the instantaneous combustion rate of solid propellant and ablation rate of insulated sheet were determined. The spraying angle and the particles distribution of spray flow field can be obtained in the same way.

Subject terms: Rocket engine, Combustion performance, Diagnosis (physics), Real time display, Image processing, Edge recognition

1 引 言

高速运动分析仪和 X 射线实时荧屏分析系统, 为研究固体火箭发动机内部燃烧、二次点火及二相流流动等带来了方便。它能够实时高速地将瞬态现象记录下来, 并慢速再现。国外已利用该技术进行了固体发动机装药燃烧及潜入喷管背壁粒子沉积机理研究、结构可靠性分析等。由于高速运动分析仪采集的图像其分辨率较低, 而且均为动态过程图像, 在模糊边缘的检测和前后图像动态信息相关上, 具有较大的难度。当前流行的图像处理商用软件 (如 PhotoShop, PhotoStyler 等) 虽然功能强大, 但大多用于图像的艺术化处理上, 对高速动态图像的处理效果不佳。因此, 根据 U 型

^{*} 收稿日期: 1997-06-12, 修回日期: 1997-09-15