

文章编号: 1003-1480 (2006) 01-0025-04

# 微化学推力器推力测试技术研究

叶迎华, 沈瑞琪, 肖贵林, 单志诚

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京, 210094)

**摘要:** 利用天平原理设计了微推力测试装置, 经标定, 该装置可以测量的最小推力为  $5 \times 10^{-5}$  N。测试了装有以硝酸胍镍为主要成分的微化学推力器的推力, 其药室直径为 1.0mm 和 1.5mm, 药室高度分别为 1.5mm 和 3.0mm。测试结果表明, 该装置测得的最小推力为  $3 \times 10^{-4}$  N, 可以满足微推力测试要求。

**关键词:** 测试技术; 化学; 微推力器; 推力

中图分类号: TJ450.6 文献标识码: A

## Study on the Thrust Test of Micro-chemical Thruster

YE Ying-hua, SHEN Rui-qi, XIAO Gui-lin, SHAN Zhi-cheng

(School of Chemical Engineering, NJUST, Nanjing, 210094)

**Abstract:** Based on the principle of balance, the equipment for determining the micro thrust was designed. It can measure the minimum thrust of  $5 \times 10^{-5}$  N. The thrust of micro-chemical thrusters (MCTs) charged with nickel hydrazine nitrite was tested. The chamber diameter of the MCTs is 1.0mm and 1.5mm, and the responding height is 1.5mm and 3.0mm respectively. The results showed that the minimum micro-thrust of the MCTs is  $3 \times 10^{-4}$  N, and such equipment can meet the requirement of the micro thrust testing.

**Key words:** Test technique; Chemistry; Micro-thruster; Thrust

随着微卫星等微航天器的发展, 能提供微小推力的微推进系统越来越引起人们的重视。作为一种微推进系统, 往往所需要的推力仅仅是几微牛到几牛之间。参照传统的化学推进系统, 许多国家发展了基于 MEMS 技术的微化学推进系统, 它们不但可以在推力上满足要求, 而且由于大范围地采用了硅材料和基于硅的微加工技术, 在体积和重量上也能满足卫星系统的整体要求<sup>[1-2]</sup>。

微化学推力器的特点是推力比较小, 一般推力在  $10^{-6}$ ~ $10^{-3}$  N 之间, 因此, 在进行微推力测试方案设计的时候, 要充分考虑设备可能达到的分辨

率、误差, 以及推力范围。本文根据天平原理, 并采用霍尔位移传感器, 通过静态标定, 得到位移和推力之间的关系, 进行微小推力测量。

## 1 推力天平测试原理

天平的结构原理见图 1。

设天平的 3 把刀子分别在  $O, A, B$  处, 梁长  $OA=OB=L$ ; 吊挂力分别为  $P, Q$ , 且  $P=Q, PL=QL$ 。

天平梁重  $R$ , 梁的质心在  $C$  处, 设  $OC=H$ 。当天平处于稳定平衡工作状态时, 天平梁的质心  $C$  在天

收稿日期: 2005-07-28

作者简介: 叶迎华 (1962-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事含能材料应用技术研究。

平中刀  $O$  下面。天平梁一边加一标准质量砝码  $m$ , 就有一基准力  $mg$ ,  $g$  为当地重力加速度。此时天平梁有一微小偏角  $\theta$ , 质心  $C$  偏转到  $C_1$  处, 位移为  $\Delta S$ 。对  $O$  点有力矩方程, 见 (1) 式。

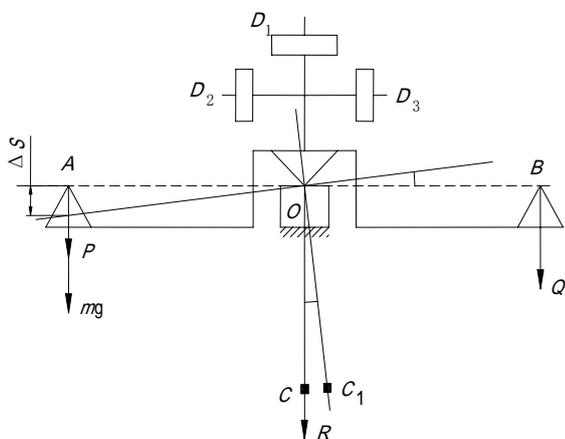


图1 天平的结构原理

Fig.1 Principle of balance

$$(P + mg)L \cos \theta = QL \cos \theta + RH \sin \theta \quad (1)$$

因为  $P=Q$ , 且当  $\theta$  很小时,  $\cos \theta = 1$ ;  $\sin \theta = \Delta S / L$ ; 故由 (1) 式有:

$$mgL = RH \Delta S / L \quad (2)$$

由 (2) 可得天平的基本原理公式如下:

$$L^2 = (RH)(\Delta S / mg) \quad (3)$$

(3) 式中:  $RH$ ——天平恢复力矩系数, 代表天平的稳定性;  $\Delta S / mg$ ——天平的力灵敏度。

调整平衡砣  $D_1, D_2, D_3$ , 使  $H=0$ , 即天平质心  $C$  与天平中刀  $O$  重合。则有:

$$RH \rightarrow 0; \Delta S / mg \rightarrow \infty$$

此时天平处于随遇平衡状态。这一状态的特点是  $H=0$ , 则  $RH=0$ , 表明天平梁自重  $R$  对外力  $mg$  无影响, 而天平的灵敏度为任意大。

## 2 天平质心计算

资料报道<sup>[3-4]</sup>, 因为微推力器的特点是其自重远远大于其产生的推力, 所以, 在重力场中测试微小推力, 要消除自重对推力的影响, 即解决自重与推力的分离, 但是要完全做到自重与推力的分离并不容易。因此, 本文所采用的方法不考虑自重与推力的分离问

题, 而将天平和微推力器作为一体考虑, 使用方便, 但缺点是微推力器所产生的推力必须能推动天平竖梁运动。为此, 要求各接触点为滑动摩擦, 以减小摩擦系数。

天平竖梁结构如图 2 所示。天平竖梁质量:  $m_1=15.7g$ ; 支撑点离上端长度:  $S_1=11mm$ ; 天平竖梁总长:  $S_2=200mm$ ;  $S_3=26mm$ 。

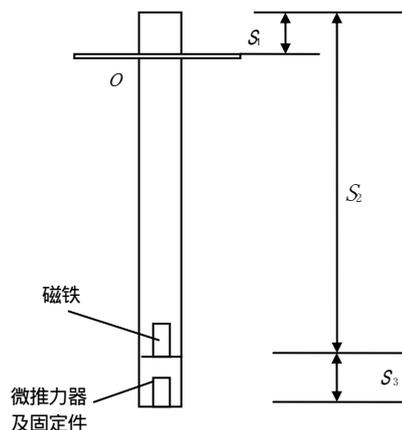


图2 天平竖梁结构示意图

Fig.2 Sketch of structure of upright balance beam

故实际运动过程中参与做功的天平竖梁的质量为:  $15.7 \times (200 - 11 \times 2) / 200 = 14g$

重心离支撑点的距离为:

$$d_1 = (200 - 11 \times 2) / 2 + 11 = 100mm$$

磁铁规格:  $5mm \times 5mm \times 2mm$ , 磁铁质量:

$m_2=0.45g$ , 因此磁铁重心离支撑点距离为:

$$d_2 = 5/2 + 200 - 11 = 191.5mm$$

微推力器重心离支撑点距离为:  $d_3=197mm$

微推力器固定件质量:  $m_3=4g$ , 固定件高度为  $S_3=26mm$ , 因此微推力器固定件重心离支撑点距离为:  $d_4=13 + (200 - 11) = 202mm$ 。

## 3 推力测试原理

因为预先调平了天平系统, 所以测试中只考虑天平竖梁的运动。

图 3 为推力测试原理图。微推力器受到外界能量的激发而燃烧, 燃烧气体产物受热膨胀而做功, 推动天平竖梁及其构件绕支点  $O$  运动, 当天平构件上升到最高点时, 动能转化成势能, 通过测量推力器的势能

变化，可以求出平均推力。

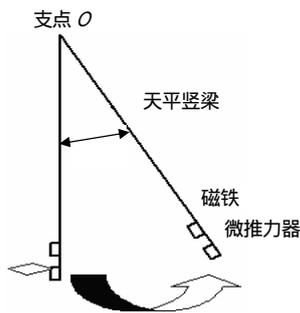


图3 推力测试原理图

Fig.3 Thrust testing principle

实验中采用的霍尔位移传感器属于线性传感器，对于均匀的磁场，它的感应电压与距离呈线性关系。本实验采用磁铁较小，产生的磁场为非均匀磁场，霍尔位移传感器的感应电压和距离之间不是线性关系，因此，必须进行霍尔位移传感器电压与距离关系曲线的标定。标定时磁铁要沿着与实际运动情况相符的曲线运行，即以支撑点为圆心，以支撑点到磁铁的长度为半径的一段圆弧，在标定时将磁铁的北极对准霍尔位移传感器。

标定结果如图4所示。从标定得到的数据可以看出，当距离越近时，霍尔位移传感器的输出电压就越大。距离越远时，输出电压就越小。当距离超过25mm时，霍尔位移传感器的输出电压变化已经变得非常小，基本上呈与x轴平行，没有明显变化。

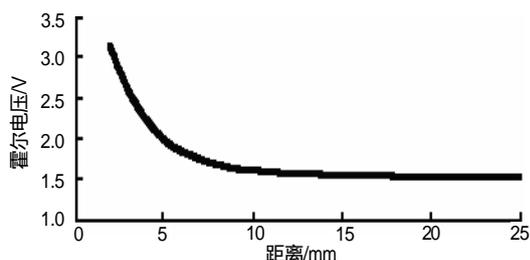


图4 霍尔位移传感器电压与距离曲线

Fig.4 Curve of Hall element voltage vs distance

经拟合后，可以得到相应的曲线方程：

$$y = y_0 + A_1 \cdot e^{(-x/t_1)} \quad (4)$$

其中： $y_0=1.55$ ， $A_1=3.65$ ， $t_1=2.42$

(4)式中： $y$ ——感应电压值，V； $x$ ——磁铁运动距离，mm。

根据(4)式，代入相应的电压值就可以得到与

之对应的移动距离。从而计算出微推力器产生的微推力、比冲以及装药密度等相关参数。

## 4 推力计算方法

根据(4)式，测得初始位置以及最高点位置电压的平均值后，就可以求得初始位置离最高点的距离 $x$ 。由 $x$ 再算出转动角度： $\theta = \arcsin(x/l_1)$ ，其中 $l_1$ 为磁铁距支撑点的距离。

由于转动角度非常小，而且转动半径较大，所以微推力器移动距离可以近似地等于微推力作用距离。则微推力器移动的距离： $s = l_2 \times \theta$ ，其中 $l_2$ 为微推力器离支撑点的距离。

在微推力器作用过程中，存在下面的关系式：

$$F \cdot s = m \cdot g \cdot d_1 \cdot (1 - \cos \theta)$$

$$\text{从而得出：} F = m \cdot g \cdot d_1 \cdot (1 - \cos \theta) / s$$

$$= (m_1 \cdot d_1 + m_2 \cdot d_2 + m_3 \cdot d_3 + m_4 \cdot d_4) \cdot 9.8 \cdot (1 - \cos \theta) / s \quad (5)$$

(5)式中：

$m$ ——天平及其配件的质量，kg；

$g$ ——重力加速度， $m \cdot s^{-2}$ 。

$$\text{则，} I = F \cdot t \quad (6)$$

$I$ ——冲量， $N \cdot s$ ；

$t$ ——发火时间，即推力作用时间，s。

## 5 实验结果及讨论

微化学推力器装药选择了综合性能较好的硝酸胍镍，用硝化棉做粘接剂，药剂主要性能如表1所示。

表1 药剂性能

Tab.1 Performance of the composition

药剂名称	颜色	假密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	5s 爆发点 $/s$	生成热 $/(kJ \cdot kg^{-1})$	氧平衡 $/(g \cdot g^{-1})$
硝酸胍镍	紫色	1.0	260~270	-	-0.057
硝化棉	白色	-	170 分解	-2 583	-0.387

微推力器药室直径分别为1.0mm，1.5mm，高度分别为1.5mm，3.0mm。根据硝化棉含量从少到多分为5种装药。实验分别测试了不同直径、不同高度、不同装药下的微推力，实验结果列于表2~3中，为

了便于讨论，将实验结果图示，见图 5~6。

表 2 药室高度为 1.5mm 时不同微推力器的推力 (mN)

药室直径 /mm	装 药 配 方 号				
	1	2	3	4	5
1.0	0.35	0.40	0.42	0.57	0.69
1.5	0.94	0.81	1.10	0.99	1.61

表 3 药室高度为 3.0mm 时不同微推力器的推力 (mN)

药室直径 /mm	装 药 配 方 号				
	1	2	3	4	5
1.0	0.27	1.33	1.23	1.56	1.72
1.5	1.15	1.66	2.08	2.59	3.01

实验结果表明，随着硝化棉含量增加，微推力器的推力增加。因为硝化棉本身是含能材料，除了作粘接剂外，对推力也有贡献。对装药相同、药室直径相同的微推力器，其推力随药室高度增加而增加。而当药室高度相同时，药室直径越大，推力越大。

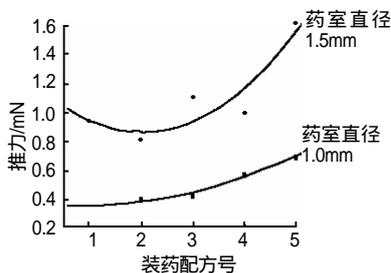


图 5 药室高度为 1.5mm 时不同微推力器推力

Fig.5 The thrust of different thrusters with 1.5mm chamber height

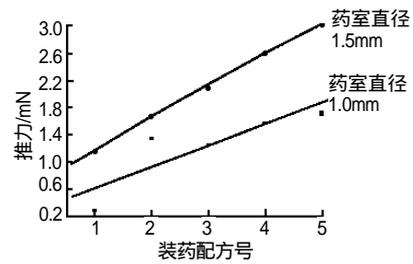


图 6 药室高度为 3.0mm 时不同微推力器推力

Fig.6 The thrust of different thrusters with 3.0mm chamber height

所设计的推力测试装置可以测到的最小推力为  $5 \times 10^{-5} \text{N}$ ，此时霍尔位移传感器移动距离为 0.2mm。本实验中测到的最小推力为  $3 \times 10^{-4} \text{N}$ ，相应的霍尔位移传感器的移动距离为 1mm。说明了该装置可以满足测试更小型的微推力器推力测试要求，对研究微化学推力器具有一定的推动作用。

#### 参考文献：

- [1] Siegfried W.Janson.Chemical and electric micropropulsion concepts for nanosatellites[C]. Proceedings of the 30th AIAA /ASME/SAE//ASEE Joint Propulsion Conference, Indianapolis IN , 1994,6:2998 .
- [2] Lewis.David H.Jr.,Antonsson Erik K.Integrated pulsed propulsion system for microsatellite[P] . US 6,131,385.
- [3] 赵宝瑞,李晶,蒋金伟. 微小推力自动测量系统研究[J]. 宇航计测技术, 2000, 20,(4): 31~35.
- [4] 赵宝瑞,李晶. 电火箭微小推力自动测量系统研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2000,(2): 40~43.