

# 一种电推力器用小推力测量系统\*

汤海滨<sup>1</sup>, 刘 宇<sup>1</sup>, 赵宝瑞<sup>2</sup>, 李 晶<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083;  
2. 航天科技集团第一计量测试研究所, 北京 100076)

**摘 要:** 为了精确测量小功率电推力器的小推力, 从理论上提出了一种小推力测量的方法, 即利用电磁反馈补偿方法使推力测量天平工作在随遇平衡状态 (或接近于随遇平衡状态), 消除气路和电路连接的影响, 电磁力反馈补偿推力器产生的推力。通过对电弧加热等离子体推力器 (Arcjet) 的热实验, 测量装置测量了不同工况下的推力值。实验证明此测量方法可准确测得电推力器工作的小推力。

**关键词:** 电推进; 小推力; 推力测量

中图分类号: V439. 4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2001) 02-0174-03

## A small thrust measurement system of electric thruster

TANG Hai-bin<sup>1</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>, ZHAO Bao-rui<sup>2</sup>, LI Jing<sup>2</sup>

(1. School of Astronautics, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;  
2. The First Metrology and Measurement Institute of CASC, Beijing 100076, China)

**Abstract:** A small thrust measurement method was presented in theory for precision measurement of small thrust of low power electric thruster, namely when thrust measure balance is in the state of indifferent equilibrium (or near to the state of indifferent equilibrium), electromagnetism force feedback compensation can eliminate the influence of connection of gas line and electric wire and feedback electromagnetism force can compensation thrust of thruster. Thrust values of different operational mode of arcjet thruster were measured. Experiment validated that this measure method can measure small thrust of electric thruster accurately.

**Key words:** Electric propulsion; Low thrust; Thrust measurement

## 1 引 言

由于电推进推力器工作时的推力非常小 (一般小于 2 N, 小功率 Arcjet 推力器的推力为 10 mN~200 mN), 气路、电路的连接又对推力的测量产生很大的影响, 推力器工作时会产生高温, 而整个推力器必须在空间环境下工作, 因而给推力的直接测量带来很大困难。国内外不同实验室采用的方法和装置各异, 如美国 NASA Lewis 研究中心采用弯曲位移电磁力补偿、比例微积分电路控制方法测量 Arcjet 的推力<sup>[1,2]</sup>, 俄罗斯原子能研究所等机构采用钟摆位移电磁力补偿方法及我国中科院空间中心的柔性轴承支承测力<sup>[3]</sup> 等等, 但是

为解决小推力测量的问题, 研究初期设想了各种解决推力测量的技术途径, 如采用小力传感器测力, 弹性应变测力, 叉簧弹性支承测力, 摆秤测力, 柔性轴承支承测力及气浮轴承支承测力等等。但这些方法都带来如测量不稳定、精度低、价格高、技术难度大、不耐高温及受环境影响大等一系列问题。我们为微小推力测量设计加工一套精密电磁动态测力天平系统, 采用双重隔板进行热防护, 成功地解决了稳态短时间推力测量问题。

## 2 工作过程分析

利用电磁反馈补偿方法使天平工作在随遇平衡状态 (或接近于随遇平衡状态), 可大大提高普通天平

\* 收稿日期: 2000-04-25; 修订日期: 2000-06-16。基金项目: 国家教委工程基金资助项目。

作者简介: 汤海滨 (1970—), 男, 博士生, 工程师, 研究领域为电推进火箭发动机及高功率 CO<sub>2</sub> 气动激光。

的计量性能,提高天平的精度,从而准确地测量出小的推力。根据在重力场中重力对物体的作用特性,利用负恢复力矩系数补偿正恢复力矩系数,消除了重力对测量的影响。系统测量误差小于满量程2%。小推力测量系统框图见图1。

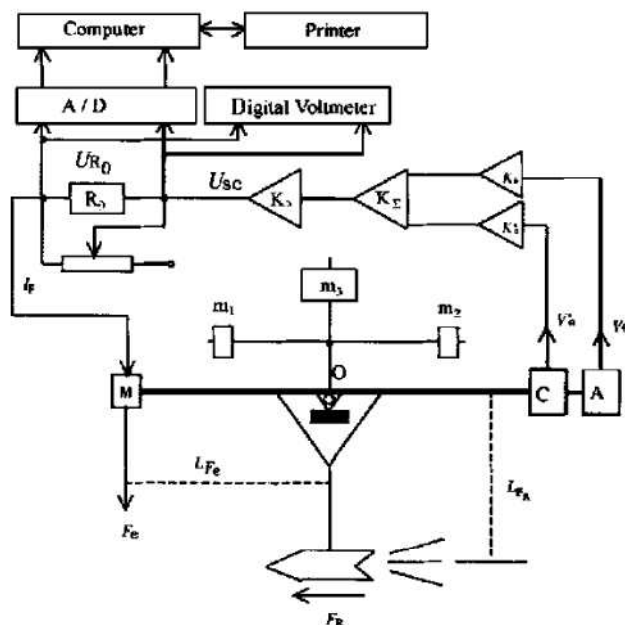


Fig. 1 Block diagram of thrust measure system

## 2.1 电磁反馈补偿方法分析

目前研究的推力器工作状态为稳态工作,只对电磁动态测力天平进行稳态分析。

图1中A为角位移传感器

$$V_{\theta} = k'_{\theta} \cdot \theta$$

C为角速度传感器

$$V_{\dot{\theta}} = k'_{\dot{\theta}} \cdot \dot{\theta}$$

M为力矩传感器

$$F_e = B \cdot W \cdot l_{cp} \cdot I$$

$k_{\theta}$  为可变角位移放大器;  $K_{\dot{\theta}}$  为可变角速度放大器;  $K_{\Sigma}$  为加权放大器;  $K_P$  为功率放大器;  $R_0$  为采样电阻;  $m_1, m_2, m_3$  为平衡感量砣;  $F_R$  为推力器推力;  $O$  为刀子、刀座;  $L_{Fe}$  为刀刀到力矩器垂直距离;  $L_{FR}$  为 Arcjet 推力器到刀座垂直距离。令

$$L_{FR} = L_{Fe}$$

$$k = k_p \cdot k_{\Sigma} \cdot k'_{\theta}$$

其中  $V_{\theta}, V_{\dot{\theta}}$  为电压,  $\theta$  为角位移,  $\dot{\theta}$  为角加速度,  $k'_{\theta}$  为角位移传递系数,  $k'_{\dot{\theta}}$  为角加速度传递系数,  $F_e$  为电磁力,  $B$  为磁通密度,  $W$  为线圈匝数,  $l_{cp}$  为平均匝长,  $I_k$  为电流,  $k$  为放大倍数。

调整感量砣  $m_3$ 、平衡砣和  $m_1$  和  $m_2$ , 使横梁重心与支点  $O$  重合(或接近于重合), 则天平工作在随遇平衡状态(或接近于随遇平衡状态)。

讨论稳态情况: 当推力器工作产生  $F_R$  推力时, 天平横梁偏摆转动则有偏角  $\theta$  及  $V_{\theta}$ ,  $V_{\theta}$  经放大器放大, 并经采样电阻  $R_0$  与力矩线圈电阻  $R_W$  产生电流  $I_M$ , 由  $I_M$  产生电磁力  $F_e$  与  $I_M$  唯一对应, 由系统对  $O$  的力矩方程:  $\Sigma M_O = 0$ ,  $F_R$  与  $I_M$  唯一对应。  $I_M$  经采样电阻  $R_0$  输出电压  $U_{R0}$ , 接 A/D 和计算机采集。

调整  $K_{\theta}$  阻尼比可进行动态推力测量。

对于目前的系统,  $K_{\theta}$  和  $K_{\dot{\theta}}$  为 10~80 倍可调的具有高输入阻抗和高共模抑制比的放大器,  $K'_{\theta}$  为差动片移动 0.1  $\mu m$  输出 1mV,  $K_{\Sigma}$  和  $K_P$  它与差动片移动位移有关,  $K_P$  功率输出采用场效应管。

## 2.2 消除附件连接对推力测量影响分析

对于电推力器, 不可避免要接入气路、电路等连接附件, 这对小推力测量造成很大影响, 如果处理不当, 则测量精度下降, 误差增大, 必须消除其影响。如此, 利用负恢复力矩系数补偿正恢复力矩系数的原理设计系统, 消除了附件连接对推力测量影响。

对于稳定平衡, 物体回到原位其恢复力矩系数称为正恢复力矩系数, 对不于稳定平衡, 物体离开原位(回到稳定位置)其恢复力矩系数称为负恢复力矩系数, 如图2所示。

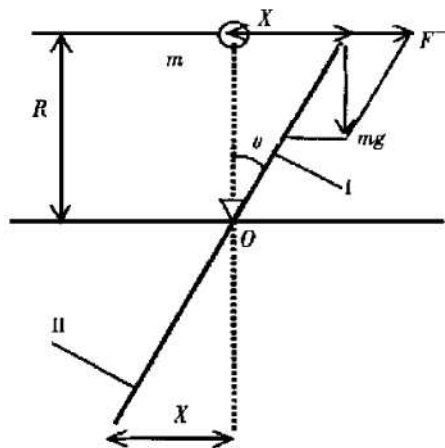


Fig. 2 Principle chart of restoring moment coefficient compensation

对于目前的系统, 附件(气路、电路)与推力器的连接采用弹性连件连接, 如图2中的 II 件,  $m$  为平衡感量砣, II 与感量砣的钢性杆 I 采用钢性连接, 则弹性连件的正恢复力矩与钢性连接的负恢复力矩相互补偿, 使装置

工作在近于随遇平衡状态,使附件与推力器在同一个系统内,消除了附件连接对小推力测量影响。

当  $\alpha$  角变化很小时,对于负恢复力  $F^-$  有

$$F^- = m \cdot g \cdot \sin \alpha = m \cdot g \cdot \frac{x}{R}$$

对于正恢复力(弹性力)  $F^+$  有

$$F^+ = k \cdot x = k \cdot R \cdot \sin \alpha$$

因  $F^+ = F^-$ , 则有  $mg/R = k$ , 其中左项为负恢复力矩系数,右项为正恢复力矩系数。所以调整  $m$  与  $R$  可使系统达到随遇平衡,补偿电路、气路的影响。

### 3 推力测量装置技术参数

利用电磁反馈补偿并使推力测量天平工作在随遇平衡状态,小推力测量装置的主要技术参数如下:

- (1) 可测轴向推力范围: 0 mN ~ 200 mN 和 0 mN ~ 1 000 mN;
- (2) 测量误差不超过标称值的  $\pm 2\%$ ;
- (3) 5 min 内转换过程各静态参数的瞬时不稳定性不超过 0.5%;
- (4) 24 h 内转换过程各静态参数的瞬时不稳定性不超过 1%;
- (5) 放大器输出额定值在 200 mN 档为 10 mV/mN, 在 1 000 N 档为 1 mV/mN;
- (6) 放大器输入电阻 10 M $\Omega$ , 放大器输出电阻 100  $\Omega$ ;
- (7) 输出信号稳定时间不超过 80 ms;
- (8) 功耗不超过 100 W;
- (9) 被测试单元最大质量 20 kg;
- (10) 预热时间 30 min。

### 4 结论及设想

通过对小功率的 Arcjet 推力器点火实验可以认为:

(1) 精密电磁动态测力天平工作在随遇平衡状态可准确、稳定、可靠地测出 Arcjet 稳态工作的小推力,测量精度小于满量程的 2%,测量数据曲线见图 3, 图 4。

(2) 能够与实验同步输出计算机数据采集系统所要求的模拟量(0 V ~ 5 V), 并线性对应标定的推力值。图 4 中工作初期推力曲线波动是由于 Arcjet 推力器工作不稳定引起的, 推力器的结构设计和供电电源系统需进一步改进, 工作稳定后可基本看出推力的变化。

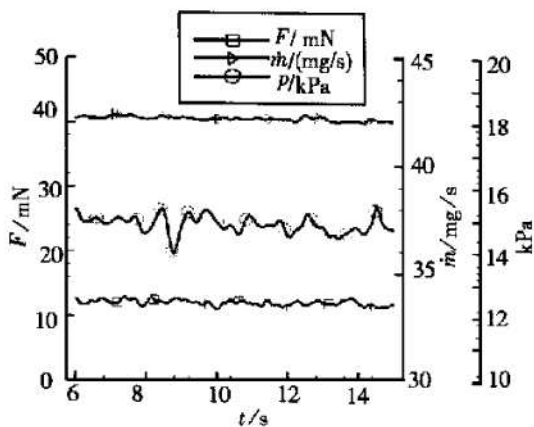


Fig. 3 Thrust, flux and pressure to time curves when Arcjet cold flow operating

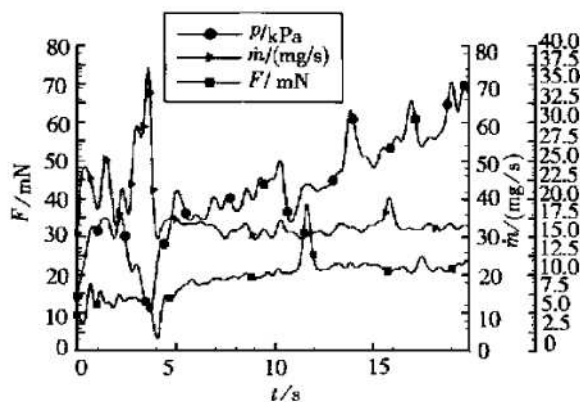


Fig. 4 Thrust, flux and pressure to time curves when Arcjet ignition operating

对今后工作的设想为: (a) 调整  $K_d$  阻尼比进行动态微小推力测量的研究; (b) 考核推力测量装置在电推力器长时间工作的热环境中的工作能力, 对测量装置加水冷措施; (c) 设计“在线”标定机械装置, 实现推力测量装置的“在线”标定; (d) 应用以上原理方法, 研究对质心、扭矩(动态)及微小流量的精确测量。

#### 参考文献:

- [1] Hang T W, Curran F M. Arcjet starting reliability: a multistart test on hydrogen/ nitrogen mixtures[R], AIAA 87-1061.
- [2] Willmes G F, Burton R L. Performance measurements and energy losses in a 100 Watt pulsed arcjet[R]. AIAA 96-2966.
- [3] 吴汉基, 冯学章, 等. 地球静止卫星南北位置保持控制系统的选择[J]. 中国空间技术, 1994(5).

(编辑: 龚士杰)