

一种电弧加热推进器推力测试架

李 腾 潘文霞 林 烈 吴承康

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要 设计制作了采用悬臂梁结构的微小推力测试架。通过标定、真空测试、温漂检验和实测应用, 证实其可用于电弧加热推进器推力性能的测量。

关键词 推力测量 电弧加热 推进器 力传感器 悬臂梁

A thrust Stand for Arc Heating Thruster

LI Teng PAN Wen-xia LIN Lie WU Cheng-kang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract A thrust stand based on cantilever structure is designed and fabricated for arc heating thruster. Thrust calibration, vacuum test, temperature drift verification and practical measurement of the thrust stand are presented and discussed. Experiments validated that this thrust stand can be used for thrust measurement of arc heating thruster.

Key words Thrust measurement Arc heating Thruster Force sensor Cantilever

1 引 言

电弧加热推进器已被证明是有效、可靠的星上控调发动机, 其应用包括同步卫星南北位置保持控制, 中、低轨道卫星的入轨和离轨推进^[1-4]。在地面模拟实验中, 电弧加热推进器的推力性能是最重要的指标之一, 推力大小一般在 10 mN ~ 1 N 范围内。相比其它脉冲式微推进器的 μN 量级推力, 电弧加热推进器的推力相对较大, 但即使如此, 气路、电路的连接、高温工作环境和振动以及恶劣的电磁环境对推力的测量会产生很大的影响。因此, 准确测量电弧加热推进器的推力依然是一个值得关注的问题^[5-7]。国内外推力性能测试采用的推力台架主要可以分为两类: 转化为位移量的测力方式^[8]和反馈

平衡模式的测力方式^[9]。采用应力应变片的力传感器直接测量推力从方法本质上讲属于前一类测量方式。由于应力应变片式小量程的力传感器对温度变化非常敏感, 电弧加热推进器工作时的热效应会使得测量结果产生较大的误差。此外, 振动对推力架的影响也会带来误差, 因此很多实际测量中往往转而寻求其它形式的推力架设计, 如采用倒摆、扭摆、双摆等结构^[8]。事实上, 只要做好传感器的隔热和推力架的减振, 就可以克服温漂和振动的影响, 保证推力测量的准确度。由于这一方式测量推力直接, 实现相对容易, 成本较低, 并适合于长时间连续动态测量记录, 因此在 10 mN ~ 1 N 量级的电弧加热推进器的推力测量中是合适的。采用应力应变片的力传感器, 我们设计了一套测力装置并应用在电

收稿日期: 2007 - 03 - 29

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目和国家自然科学基金创新群体项目 (10621202) 支持。

作者简介: 李腾 (1978 -), 男, 助研, 研究方向: 等离子体与燃烧中的测量技术。

弧加热推进器实验研究中。

2 基于推力力传感器的推力架设计

整个推力架的设计如图 1 所示 (工作状态):推进器和轴承组固联在一起,可在导轨上滑动,推进器产生的推力作用在与基座连接的悬臂梁上,悬臂梁的变形由位移传感器感知。通过标定关系即可获知推力大小。我们采用了市售的满量程范围是 0 N ~ 1 N,测力误差为 ± 1 mN 的应力应变片式力传感器,此种传感器即为悬臂梁测力结构,应力应变片作为感应件已被粘结在悬臂梁上构成应变桥,配用应力应变放大仪即可输出与加载在悬臂梁上推力相对应的电压值。在这个推力架的结构设计中,有三个要素需要注意:一是轴承组与导轨之间的摩擦力必须足够小,否则部分或全部推力将为摩擦力所平衡;二是使推进剂供给管道及电源线带来的扰动力尽可能使其垂直于推进器轴向,尤其对于推进剂供给管道,由于供气压力为几个大气压,管道会产生弹性变形,带来较大的干扰,如果干扰力作用方向与推进器轴向(推力方向)垂直,则此干扰力的分量在推力方向为零,不会带来附加的误差;三是台架的固定需要尽量减少外界振动(如由真空泵组带来的真空室振动)带来的影响,否则推力引起的悬臂梁形变将湮没在推力架的谐振中。

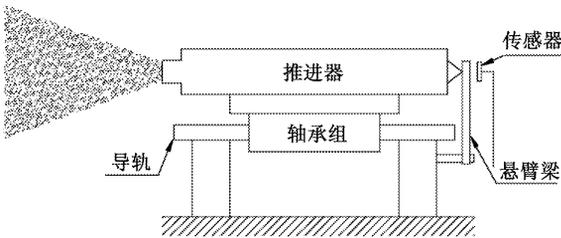


图 1 推力架结构示意图

图 1 中所示的这种悬臂梁测力结构如果采用其它的位移传感器,如电涡流位移传感器,同样可以用于推力的测量,配合合适的悬臂梁测力甚至可以达到更高的准确度^[10]。

3 实验测试

3.1 台架标定

应力应变片式力传感器的特性经过标定检验,

满足良好的线性关系。如图 2 所示,采用砝码作为标定标准,将砝码的重力通过定滑轮转化为加载在推力器上的水平推力,此推力作用在力传感器上,由此可以得到推力与输出电压的标定关系,并可测得台架摩擦力的大小。标定测试表明这种台架的测力误差为 ± 1 mN。

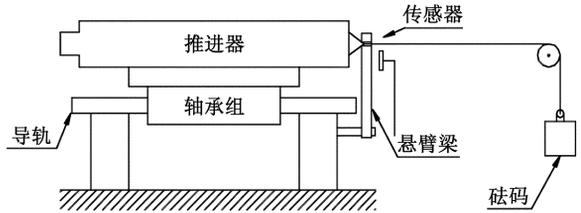


图 2 推力架标定示意图

3.2 真空测试

由于市售的应力应变式传感器是在大气压下使用,为了确认其在真空下的特性,必须进行真空室测试。对于用砝码给定的固定推力,测量的推力值(按大气压下的标定关系)随抽真空时真空室压力的降低而降低,在真空室压力减至 10 Pa 时,测量的推力值逐渐稳定。如果传感器置于真空室 12 h 以上,则测得的推力值基本不变。这可能与将应变片粘结固定的应变胶在真空下释放出气体,其力学特性发生变化有关^[11]。在真空条件下进一步考察推力发生变化时的测量情况,发现推力的变化量与输出电压的变化量依然保持线性关系,且此线性系数与大气压下定标得到的线性系数相同,因此应力应变力传感器在大气和真空环境下特性的变化只是力传感器的基值发生改变,这对真空室中推力的测量不会有影响。由于推进器和轴承组的重力分量会对力传感器有一个预置作用力,因此在真空室环境中,不供给推进剂的条件下,将此时预置力的测量值设为零点,后续即可进行推进器推力的测量。

3.3 冷态推力测量

冷态推力测量可以进一步验证台架测力的可靠性。此处冷态推力是指推进器没有点燃电弧,推进剂经由推进器直接喷入真空室时产生的推力。图 3 为不同质量流量氮气的冷推力测量数据,使用了计算机进行数据采集,采集程序中使用了平均滤波以平滑毛刺,采样频率为 5 Hz。图 3 中显示台阶的前沿对应控制推进剂流量的质量流量计电磁阀打开的时刻,台阶的后沿对应质量流量计电磁阀关闭的时刻。质量流量计电磁阀开和关时推力的变化情况显

示悬臂梁对推力的响应处于强阻尼的状态,这有利于实时跟踪测量实际推力值的变化。从图 3 数据可见,冷态推力与推进剂质量流量基本成正比,推力的波动在 1 mN 以内并且无质量流量时推力值回零良好,这说明了台架测力的可靠性。而较长时间的稳定推力数据说明了测力架测力在冷态下的漂移较低。因此,如果抑制传感器的温漂,测力架就可以用于长时间的推力测量。

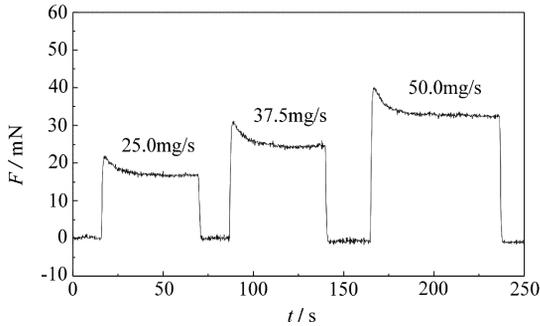


图 3 氮气冷态推力测试数据

3.4 温漂测试

为了了解传感器的温漂特性,在大气压下对其进行了实验测试。测试的方法是在给定负荷的条件下,测量辐射加热和自然冷却过程中传感器温度和传感器输出电压对应的推力(按室温标定关系)。测量的数据如图 4 所示。

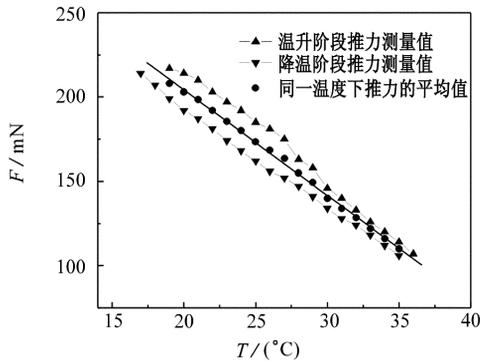


图 4 传感器温度变化时对应的推力变化

从图 4 中可以看出传感器输出对应的推力随温度的上升而下降,推力的变化与温度的变化表现为线性关系。1 的温差会带来约 6 mN 的测力偏差,对于 10 mN ~ 1 N 的推力测量而言,在推进器点火工作的条件下,传感器温度的上升必然会引起极大的测量偏差。这一偏差尽管可以通过实时测量传感器的温度而加以修正,但过高的温升还可能会引起传感器的失效。因此,更理想的办法是尽量保证传

感器所在局部环境处于恒温。实验中,多次调整了推力架部件的连接设计,尽量减少推进器与传感器之间的热传导,并对传感器加水冷套密闭保护以抑制对流传热和辐射传热。经过实验测试,基本满足了传感器恒温的要求。

3.5 推进器点火工作测试

在采用氩气作为推进剂的点火实验中,一次典型的推力测量数据如图 5 所示。图中标出了氩气的质量流量和电弧电流值,整个测量时长接近 30 min。在加热器达到稳定工况时,推力测量数据波动较小;当停止供气时,推力数值基本回到零点。这两点均说明了推力架实际测力温漂较小。如图 6 所示,当改变气流量、电弧熄灭、关闭质量流量计时推力值的变化是非常显著的,这与推进器实际工况变化相吻合。但从图 6 可以看到,电流变化对推进器推力的影响不如质量流量对推力的影响大,这可能和电弧弧安特性和推力效率的改变有关。图 5 中稳态推力的波动比冷态条件下的波动要大,分析认为是电磁干扰所导致的,通过信号隔离和电磁屏蔽,可以尽量减小这种波动。

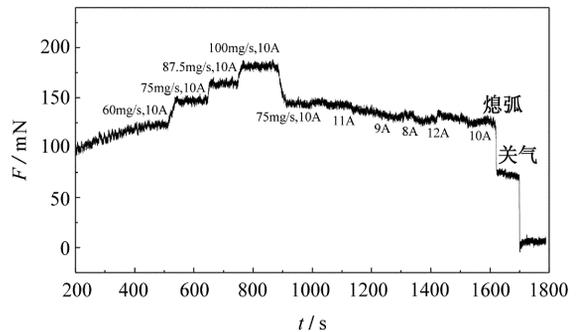


图 5 氩气电弧推进器推力随时间的变化

在氮氢混合气作为推进剂的点火实验中,一次典型的推力测试数据如图 6 所示。点火时推进剂为氮气,氮气质量流量为 18.75 mg/s,设定点火电流为 8 A,点火 30 s 后加入氢气,加入氢气后推力值进一步上升,调节电源功率并达到稳定工况,此时推进器喷口温升已达到 1 400 以上,但推力测量数据波动并不大。注意到电弧熄灭之后,高温喷嘴会对推进气体有加热作用,热气体喷出膨胀获得的推力会比冷气喷出得到的推力要高,随着喷嘴的冷却,喷嘴对气体的加热效应降低,推力也会随之下降,这一特点也被推力测量所证实,反映在图 5 和图 6 中表现为推力值在电弧熄灭后骤降,然后再缓慢下降。

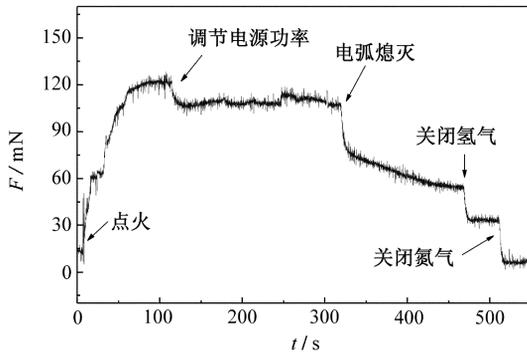


图 6 氮氢混合气电弧推进器推力随时间的变化

多次点火实验证实,在电弧加热推进器推力性能的测量中,采用水冷套保护传感器的推力架测力稳定、反应迅速、温漂较小,准确地反映了推进器工作状态的变化,可以满足较长时间推力的连续测量。

4 结束语

应力应变片力传感器直接测力的测力台架通过标定测试并最终应用到电弧加热推进器性能测量实验中,验证了此种台架测力的可靠性和准确性,可作连续的推力测试且温漂较小。可以认为,此种微小推力测量方式是 10 mN ~ 1 N 量级的电弧加热推进器的推力测量较为合适的解决方案之一。

参考文献

- [1] Auweter-Kurtz M, Glocker B, Goelz T, Kurtz H L, Messerschmid E W, Riehle M, and Zube D M. Arcjet thruster development. *Journal of Propulsion and Power*, 1996, 12 (6): 1 077 ~ 1 083.
- [2] Martinez-Sanchez M and Pollard J E. Spacecraft electric propulsion-An overview. *Journal of Propulsion and Power*, 1998, 4 (5): 688 ~ 699.
- [3] Arcjet Thruster Design Considerations for Satellites in NASA preferred reliability practices 1996, LEWIS RESEARCH CENTER, 1 ~ 5.
- [4] 吴汉基, 蒋远大, 张志远. 电推进技术的应用与发展趋势, *推进技术*, 2003, 24 (5): 385 ~ 392.
- [5] Haag T W. Thrust stand for high - power electric propulsion devices. *The Review of Scientific Instruments*, 1991, 62 (5): 1 186 ~ 1 191.
- [6] 刘向阳, 范宁军, 李科杰. 微型推进器推力测试的现状与发展趋势. *测控技术*, 2004, 23 (5): 18 ~ 20.
- [7] 沈岩. 低功率水电弧加热发动机的实验研究. 北京: 清华大学博士学位论文, 2004. 4.
- [8] 刘明侯, 孙建威, 陈义良, 蔡晓丹. 微推进器推力测试技术. *力学与实践*, 2003, 25 (3): 9 ~ 14.
- [9] 李晶, 蒋金伟, 赵宝瑞. 系列电火箭小推力自动测量系统. *宇航计测技术*, 2005, 25 (2): 35 ~ 37.
- [10] 熊继军, 周兆英. 实现微牛级动态推力测试的方法和试验研究. *测试技术学报*, 2004, 18 (3): 1 ~ 4.
- [11] 马云华, 蒋光林. 推力架测试系统误差的研究. *宇航计测技术*, 2005, 25 (2): 23 ~ 26.

(上接第 16 页)

运行速度;由于 DSP 的中断处理速度高,计算速度快,控制系统的跟踪信号频率可达 400 kHz。同时,利用 DSP 的内部采样进行电流反馈跟踪控制,步进电机的跟踪误差最小为 $\pm 0.75^\circ$ 能够很好地完成对二维步进电机的传动控制。

参考文献

- [1] Claude R, Phipps, James Luke. Micro Laser Plasma Thruster For Small Satellites[J]. *SPIE High-power laser ablation III*, 2000 (4065): 801 ~ 809.
- [2] Claude R, Phipps, James Luke. Laser Ablation Powered Mini-Thruster[J]. *SPIE High-power laser ablation IV*, 2002 (4760): 833 ~ 842.
- [3] 刘子林. 电机与电气控制 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 178.
- [4] 陈学军. 步进电机细分驱动控制系统的研究和实现 [J]. *电机与控制应用*, 2006 (6): 13 ~ 16.
- [5] 于水生. DSP 芯片介绍及其选型 [J]. *计算机技术与发展*, 2004 (8): 20 ~ 25.
- [6] 李为民, 邢晓正, 胡红专. 基于 DSP 的步进电机控制系统设计 [J]. *微特电机*, 2000 (6): 27 ~ 29.