

北京航空航天大学

第 24 届“冯如杯”

一种电火箭发动机推力测量的假想装置

2014 年 4 月

摘要

电火箭发动机是用电能加速工质（工作介质）形成高速射流而产生推力的火箭发动机。电能一般由太阳能、核能或化学能经转换装置得到。电火箭发动机比冲高、寿命长，但推力小于 100 牛（10 公斤力）。目前，微小推力准确测量是研究电火箭的关键技术之一，微小推力体现了电火箭的技术性能及可靠性的关键参数。测不出推力，就无法验证电火箭的基本性能——比冲。

本文设计的一种电火箭发动机推力测量的假想实验装置与现有的比较成熟的测量系统有所不同。借鉴了用拉伸法测弹性模量的相关方法与原理，将发动机的微小推力转化为光杠杆的位移，原理上更为简单易行，结构上则更轻便，便于拆装。

此设计创意新颖，可行性高，不仅具有比较高的测量精度，还节省了大量的试验费用。从市场分析上来看，此装置基本原理简单，光杠杆的价格相对便宜，非常适合市场的大量推广。

关键词：电火箭发动机，比冲，光杠杆，推力

Abstract

Electric rocket engine is a kind of rocket engine which can generate thrust by electrical energy which accelerates the working fluid to form the high-speed jet. Electric energy is usually changed by solar energy, nuclear energy and chemical energy. Electric rocket energy has high specific impulse and long lifespan, but its thrust is less than 100N. Currently, how to measure microthrust accurately is one of the key technologies of electric rocket. Microthrust is the key parameter of electric rocket.

The experimental device designed in this paper, which can measure the thrust of electric rocket engine correctly is different from other device. The paper draw theory of stretching measure to measure modulus of elasticity, which draw the microthrust of electric rocket into the displacement of optical lever. Generally speaking, the experimental device designed in this paper is easy to realize and it can disassembly and install conveniently.

Generally speaking, this design is an innovative idea and it can be produced easily. It not only measure microthrust accurately, but also can save a lot of money. From the market analysis, the principle of this design is simple and the price of the optical lever is cheap. In fact, this design will sell well if it is produced.

Keywords: electric rocket engine, specific impulse, optical lever, thrust

目录

1 绪论.....	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外主要的研究成果	2
1.3 主要设想	2
2 假想装置的设计及方案论证.....	3
2.1 方案设计	3
2.1.2 转角放大系统（类光杠杆）	4
2.1.3 测量工具.....	5
2.2 核心测量装置数据理论计算	5
2.3 光杠杆法测量微小推力实验装置的优点	7
3 项目进展及前景.....	7
3.1 研究时间 项目进程	7
3.1.1 项目计划进度.....	7
3.1.2 实际工作进展.....	7
3.2 项目中需改进的部分	7
3.3 创意作品的市场应用前景	8
结论.....	8
参考文献.....	8

1 绪论

1.1 研究背景

随着人类对星际探索的深入,化学能火箭已经无法满足航天高科技的迅猛发展。由于电火箭体积小、重量轻、寿命长、所需工质少,主要能源来自太阳能,比冲高,因此更能适应时代的要求。

研究电火箭的关键技术之一是电火箭的微小推力测量。微小推力体现了电火箭的技术性能及可靠性的关键参数。电火箭微小推力测量装置可以直观地看到电火箭的电参数、流量参数变化的引起的推力变化,为电火箭的研制设计及参数的选择提供了必要的、有力的技术手段。

电火箭微小推力难测的原因是由于研制电火箭是在重力场进行测量的,而电火箭的特点是自重远远大于产生的推力,即电火箭自重与推力比很高。

电火箭微小推力测试要解决 3 个问题

其一是电火箭自重与推力的分离问题。

其二是电火箭供电电路对推理的影响大小。

其三是电火箭供气气路对推力的影响大小。

在重力场中,消除自重对推力的影响,就是要解决自重与推力的分离,相当于电火箭不在重力场中。解决上述 3 个问题,就可以较好的解决电火箭微小推力的测试。

但是在国内外已有的方案中,大部分测试系统结构较为冗杂,且对实验环境要求较高,不便于进行小型测试实验,而且装置的稳定性也不是太高。但是,如果结构设计的简单,必然造成其测量的精度不会太高。如何协调精度与稳定性的矛盾关系,是对电火箭发动机推力测量的一个现实的问题。

本文作者受到物理实验中《拉伸法测钢丝弹性模量》实验的启发,设想出一种用光杠杆准确测量电火箭发动机推力的假想装置,将发动机的微小推力转化测量挡板的微小角位移,并通过光杠杆的放大作用,最终转化为一个比较大的位移。由于本文作者专业水平有限,并未考虑许多学术上的问题,只是给电火箭的推力测量提供一种假想的简单可行的测试方案。

1.2 国内外主要的研究成果

经过查阅大量资料及国内外论文,本文发现目前国外尚无较高测量准确度的微小推力测量设备。俄罗斯研制的电火箭及电火箭微小推力测量装置处于世界领先地位。

这些推力测量装置主要有两种方式:一种是采用钟摆式结构,利用测位移的方法推算推力;另一种是采用力传感器的方法测推力。

钟摆式结构利用单摆的原理,采用 PID 系统进行控制力求使摆线铅垂以减少被测物自重及气路管道电路导线对推力测量的影响,并没有从根本上消除二者的附加分力对推力测量的影响,而且结构较为冗杂;力传感器的方法也同样存在这样的问题,并且灵敏度不高。这样的方式不容易达到较高的测量准确度,长期稳定性也不理想。

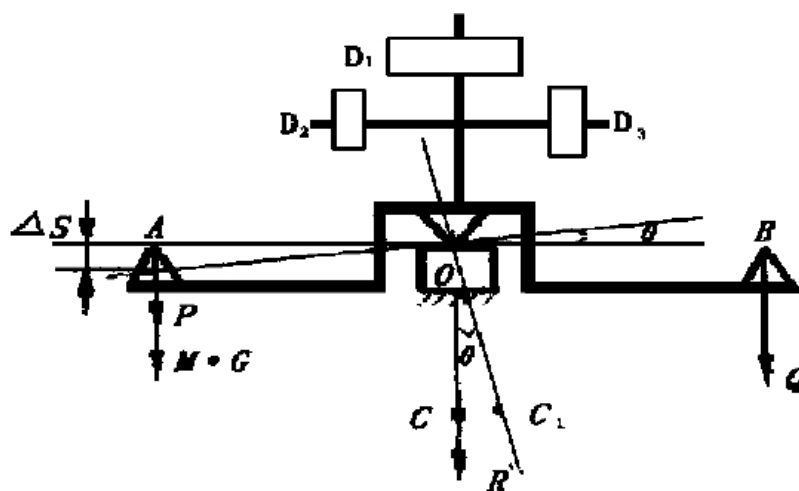


图1 天平结构原理

1.3 主要设想

结合国内外在此方面的先期研究,考虑到其设计装置的优缺点,本文设想利用一块不计质量且有足够强度的超轻薄板,一个反光镜,一个望远镜以及一个米尺,即可完成精确测量电火箭发动机推力的任务。首先需将反光镜固定在超轻薄版的中心,将超轻薄版悬挂在需要测量的推力处,在距离反光镜 L 远的地方,

放置一台望远镜正对反光镜，望远镜旁边是竖直放置的直尺。调整望远镜的焦距，使望远镜中心线对准平面镜中心，使实验员通过望远镜看到尺子上面的一个刻度。然后使发动机开始工作，将推力作用于超轻薄版的中心处，根据力平衡原理，此时薄板必受重力、推力、绳拉力，且三力平衡，可知，薄板必产生一个微小的转角，这个微小转角通过连接在镜子上面的连杆反映到试验者观察到的尺子刻度变化上面来。然后量出平面镜和尺子的距离，量出平面镜支架的长度，然后通过读出的刻度变化值，按照相似三角形原理算出薄板的微小位移，再根据薄板受力平衡方程，可以最终确定推力的大小。

该设想的实验装置包括两大部分。第一部分是能够感知发动机推力并把发动机推力转化为其角位移的耐高温纳米薄板，对薄板的要求是耐高温且足够轻；第二部分是类光杠杆系统，将薄板的微小角位移转化为较大的可测的米尺刻度位移差，并通过对这两种装置的数学计算，找到电火箭发动机推力 F 与米尺刻度读数差 L 的定量关系。

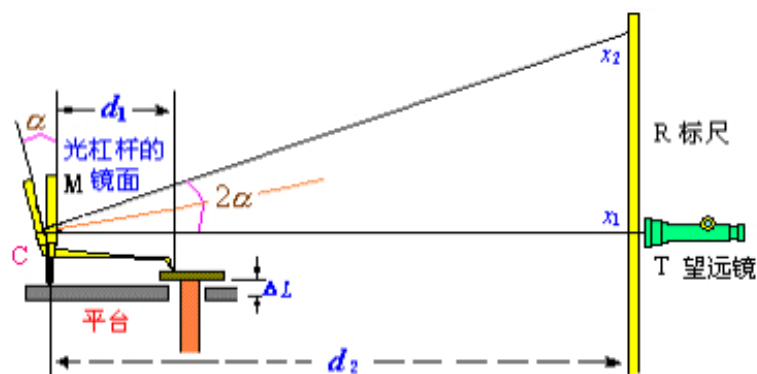


图2 光杠杆原理示意图

2 假想装置的设计及方案论证

2.1 方案设计

2.1.1 薄板选择

首先，薄板应该具有较高的耐热性，因为从电火箭发动机尾喷管中喷射出来的高压气体温度较高，如果材料没有较高的耐热性，其物理结构将被破坏，使

试验无法正常进行，甚者会引起火灾等危害。

薄板的选择应力求材质均匀，可以在理论计算时把薄板的全部质量转化到中心一点，便于受力分析。综合考虑材料的耐高温性能和材质的均匀性能，本文采用超轻耐高温纳米隔热薄板作为实验薄板。

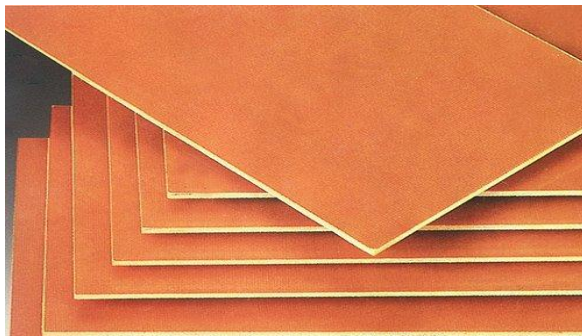


图3 耐高温纳米薄板

2.1.2 转角放大系统（类光杠杆）

转角放大系统可以直接由一套完整的光杠杆系统进行改造得到。光杠杆的望远镜以及米尺装置均无需改动，只需将平面镜的镜片取下，固定在超轻薄版的中心位置，即构成了一个类光杠杆系统。

当支架水平、平面镜垂直时，从望远镜中读得米尺上的一个刻度值，当支架下降 ΔL ，平面镜倾斜 θ 角时，从望远镜中又读得米尺上的一个刻度值，与前一个刻度值的差是 L 。

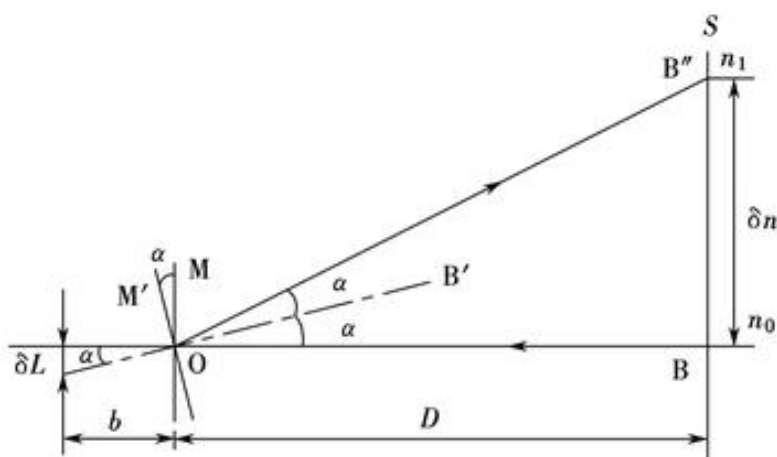


图4 转角放大装置原理图

2.1.3 测量工具

由 2.2 计算可知，本实验需要测量的数据较少，只需测量薄板和反光镜的总重 m ，反光镜到望远镜的距离 L ，以及望远镜在推力未作用和推力作用时的两次的读数差 D 。

需要使用的测量工具为 JA21001 型电子天平、钢卷尺、米尺（属于光杠杆系统的一部分）。

2.2 核心测量装置数据理论计算

1.首先需要计算薄板的转角 α 。由数学原理可知，薄板转动 α 角度，则由于反射角等于入射角，反射线转过的角度为 2α 。因为薄板到望远镜的距离 D 和望远镜测到的米尺读数之差 L 均为已知，此时可以方便的求得薄板转过的角度 α 。

$$\tan 2\alpha = \frac{L}{D} \quad (1)$$

当 α 甚小时 $\tan \alpha \approx \sin \alpha \approx \alpha$

则有

$$2\alpha = \frac{L}{D} \quad (2)$$

所以有

$$\alpha = \frac{L}{2D} \quad (3)$$

2 得出 α 角度以后，即可根据平衡方程计算出发动机推力 F

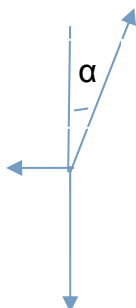


图 5 薄板受力平衡示意图

$$F = F_{\text{拉}} \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

$$G = F_{\text{拉}} \cdot \cos \alpha \quad (5)$$

联立 (4) (5) 两式得

$$F = G \cdot \tan \alpha \quad (6)$$

最后整理可得

$$F = G \cdot \tan \frac{L}{2D} = mg \cdot \tan \frac{L}{2D} \quad (7)$$

3. 不确定度的计算

通过查找资料, 可知。钢卷尺的仪器误差限为 0.5mm, 电子天平的仪器误差限为 0.1g。进一步可得,

$$\mu(D) = \mu_b(D) = \frac{D}{\sqrt{3}} = \frac{5 \times 10^{-4}}{\sqrt{3}} = 2.89 \times 10^{-4} m \quad (8)$$

$$\mu(m) = \mu_b(m) = \frac{m}{\sqrt{3}} = \frac{1 \times 10^{-4}}{\sqrt{3}} = 5.77 \times 10^{-5} kg \quad (9)$$

在计算 L 的不确定度时需要注意, L 的不确定度由 a 和 b 两部分不确定度组成, 由于没有试验数据, 故 $\mu_a(L)$ 无法获得, 但是根据光杠杆法测量钢丝弹性模量的实验可以知道, $\mu_a(L)$ 的量级大概在 $10^{-5} m$, 而 $\mu_b(L) = 2.89 \times 10^{-4} m$ 故

$$\mu(L) = \sqrt{\mu_a^2(L) + \mu_b^2(L)} = \sqrt{(10^{-5})^2 + (2.89 \times 10^{-4})^2} = 2.89 \times 10^{-4} m \quad (10)$$

间接观测量 F 是 L、D、m 的函数, 根据合成不确定度法则:

$$\mu(F) = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial m} \cdot \mu(m)\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial L} \cdot \mu(L)\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial D} \cdot \mu(D)\right)^2} \quad (11)$$

将 $F = G \cdot \tan \frac{L}{2D} = mg \cdot \tan \frac{L}{2D}$ 带入(11)可得

$$\mu(F) = \sqrt{\left(g \tan \frac{L}{2D} \cdot \mu(m)\right)^2 + \left(mg \frac{1}{\cos^2 \frac{L}{2D}} \cdot \frac{1}{2D} \cdot \mu(L)\right)^2 + \left(mg \frac{1}{\cos^2 \frac{L}{2D}} \cdot \frac{L}{2D^2} \cdot \mu(D)\right)^2}$$

2.3 光杠杆法测量微小推力实验装置的优点

该方法最突出的优点就是原理明了，结构简单，非常适合小型的电火箭发动机推力的测量实验，环境适应性强，而且测量装置组装方便，便于携带，节省了大量的资源和实验经费。虽然实验的精确性并不能有太多的保障，但是此方案仍然不失为一种简单测量电火箭发动机推力量级的理想装置。

光杠杆可以测量微小长度变化量。提高放大倍数即适当地增大标尺距离 D ，可以提高灵敏度；增大反射镜与接手屏间的距离 同时缩短光杠杆脚的距离 但也不是灵敏度越高越好 因为灵敏度越高 试验系统的抗干扰能力会下降 要视具体情况而定

3 项目进展及前景

3.1 研究时间 项目进程

3.1.1 项目计划进度

2014年寒假：查阅相关资料；

2014年2月：进行装置结构设计，完成对工作原理的分析；

2014年4月：完成项目论文的写作。

3.1.2 实际工作进展

我们的项目各项工作开展顺利，基本上按照既定的计划进行，能够跟上学院和学校要求的冯如杯的进度。

3.2 项目中需改进的部分

由于薄板在悬挂的时候会有摩擦，导致薄板的转角很难达到理想的无摩擦时的三力受力平衡，会给计算带来一些误差，这是需要改进的地方。我们设想用两根细绳将薄板悬挂起来，这样便于薄板平面保持与推力作用线为垂直关系，并将细绳的另外一端固定在支架上。

另外，如何确定薄板中心就是火箭推力的作用点是一个很大的问题，需要进行多次测量，通过大量数据分析，才能获得测量推力的理想位置。

3.3 创意作品的市场应用前景

本实验项目目前仅处于理论研究方面，并没有制作出实物模型，但是通过可行性论证可以得出结论。在仅需要计算出电火箭推力大小量级的实验中，该产品因简单易行、价格便宜，故优势较为明显。对于要求非常精确测量电火箭推力的实验，该产品与其他产品相比，优势不明显，需要进一步的理论研究来减小实验误差。

结论

由于本项目只是一种假想的实验装置，并没有实物模型，故装置的安全性及实验分析还无法进行。但是从前文的构想中，这种基于光杠杆原理测量电火箭发动机推力的装置从原理上来讲是可行且准确的，并且有相当广阔的应用前景。

参考文献

- [1]李朝荣. 基础物理实验[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.