

# 电火箭在卫星控制中的应用

卢文强

(中国科学院力学研究所)

1968年,美空军战术通讯卫星 LES-6 首次使用电火箭控制卫星姿态,在地球同步轨道上运行五年,顺利地通过了试验,标志着电火箭开始跨入航天火箭俱乐部。

与化学火箭不同,电火箭<sup>[1]</sup>喷出带电的高速气流,因而具有高“比冲”、长寿命、小推力、高精度的特点。化学火箭依靠热力膨胀,喷气速度仅有几公里/秒;电火箭依靠电磁加速,喷气速度却能大到几十公里/秒到几百公里/秒。因此,电火箭的比冲很高,能达数千到数万秒,比化学火箭高10—100倍。这种高比冲的火箭就特别适合于长时间运行的航天任务。电是电火箭的动力能,产生“克重”的推力要耗费近“千瓦”电。目前,由于空间电源的限制,电火箭的推力只有几个蚂蚁的力量(几个达因),了不起达到几十克重。但电火箭能获得极微推力。离子流又极易受电、磁控制,因而在卫星控制中,电火箭具有精细的控制性能。

电火箭可分为以下几类:

电热式火箭:它利用电阻或电弧加热工质(氮、氩),热气经喷管膨胀加速。这种火箭结构简单,但比冲低,与化学火箭差不多。

静电式火箭:它喷出离子流并依靠静电加速,又叫离子火箭。根据产生离子的原理,又分为电子轰击式和接触式等。

图1是轰击式原理图。从阴极发射出的电子,在飞向阳极途中,遇到电加热蒸发的水银蒸汽,

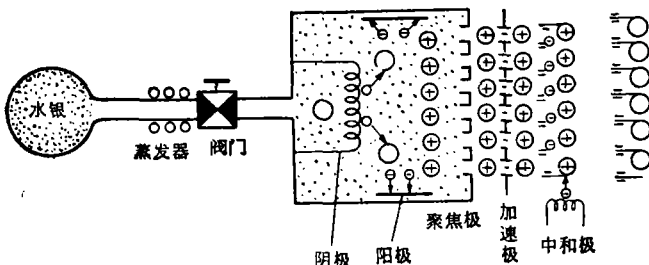


图 1

电子就如一颗颗炮弹轰击着水银蒸汽的中性原子,把一个个水银离子打出来,所以叫轰击式。离子通过聚焦极被拉出来,进入一个很强的负高压电场,被静电加速,以很高速度喷出。正离子在电火箭尾部大量积累,就会挡住后面跑来的正离子,因此在尾部加装了一个中和器,发射出电子,使带正电的离子变成电中性而保证电火箭能

继续正常工作。

接触式电火箭大多应用铯蒸汽的一种特性,即它在高温下通过高温钨时,与钨接触而被离化为铯离子流,在静电场加速下,以极高速度喷出。

除了上述两种外,还有利用高频电场和高压静电场来产生离子的。总的说来,离子火箭结构复杂,加工工艺较难,但比冲、效率较高,且易实现推力控制。

电磁式火箭,喷出等离子体流或含有一定量的离化气体,依靠电磁力加速。

在 LES-6 上运行的就是这类电火箭的一种,叫脉冲等离子体电火箭。其特点是结构简单,能达较高的比冲与较大的喷气速度,但效率较低。图2是工作原理图。弹簧是太氟隆工质供给系

统。电输送到高压储能电容器中,通过自动控制,在两极板间强电流(峰值可达 $10^4$ 安培以上)脉冲放电,形成高温电弧,一方面烧蚀太氟隆并离化为等离子体,另一方面产生很强的磁场。这种混有等离子体的热气流,就在电磁力作用下高速喷出。

电火箭可以应用于卫星的姿态控制。卫星在绕地球运动时,受到大气阻力、太阳光压、太阳和月亮摄动、地球形状摄动、地磁场摄动,其运动轨迹逐渐偏离初始轨道并发生变形。如地球同步通讯、导航、气象、电视广播卫星的东西、南北位置漂移;太阳观察、南北极地球物理考察、地球资源探测等极轨道卫星的拱点漂移等。这在使用上是不允许的,必须加以控制。

带位置保持的地球同步卫星,可节约卫星的传输功率、使用窄波束通讯,并且地面上采用便宜的固定天线;特别是将来同步轨道上卫星拥挤时,要实现卫星—卫星间、点一点间通讯,以及采用激光通讯等都要求有较高的位置保持精度。对于同步导航卫星,则位置保持精度越高,导航精度也越高。现有实验资料表明,每年每公斤卫星南北位置保持所需的总冲是 45.7 牛顿,比东西位置保持要高得多。随着卫星寿命延长,定点精度提高,南北位置保持所需的总冲将进一步增加。这时采用高比冲的电火箭会成为影响卫星有效载荷的关键技术。根据有关资料,15 年寿命 1 千磅重的卫星,用离子发动机作位置保持,其重量只占卫星总重的 8%,而用单组元肼(一种化学火箭)却占卫星总重的 38%,若用冷气系统则占卫星总重的 80—95%。

诸如这类高总冲的卫星轨道控制任务有:地球同步非定点战略预警卫星轨道拱点漂移补偿,

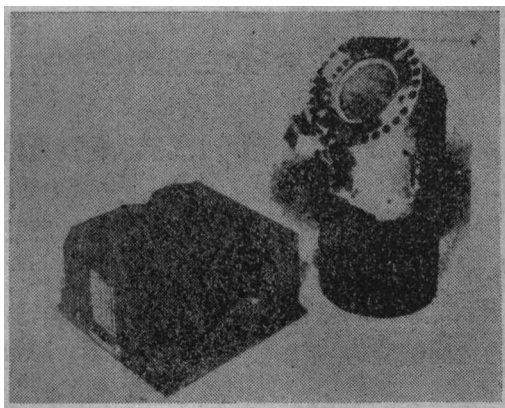


图 3

以及太阳同步极轨道卫星轨道拱点漂移补偿等等。这类任务,只需选用毫磅级推力的电火箭。如 1974 年美 NASA 选用两台直径 8 厘米的铯轰击式电火箭(图 3),在应用技术卫星 ATS-6 上运行,作南北位置保持。1970 年美国发射到太阳同步极轨道的 SERT-II 飞行器上装有两台 15 厘米毫磅级推力的水银轰击式电火箭,连续运行至今。最近,美国又研制了一种毫磅级推力的脉冲等离子体电火箭,准备用在同步战术通讯卫星上,作南北位置保持。

另一类微推力低总冲的轨道控制任务,如地球同步定点卫星的东西位置保持,用高比冲的电火箭代替化学火箭不会有显著的重量节省。但是,化学火箭长期运行存在催化剂老化、漏气等严重问题,如肼发动机在空间运行一年,一磅推力减至 0.5 磅。推力越小,运行时间越长,这一现象越严重。电火箭却能实现极微推力,且推力大小、方向易于控制,并有较高的可重复性、可备用性。因此,使用电火箭能获得较高的东西位置保持精度。如美空军 1968 年发射的战术通讯卫星 LES-6 就选用 4 台微磅级推力的太氟隆脉冲等离子体电火箭(图 6),作东西位置保持用。它在同步轨道上运行了五年。

卫星在运行期间,由于受到空间干扰力矩的作用,其姿态随时都在变化,以至无法正常工作。譬如说,卫星的天线对不准地面站,星体上许多测量仪器无法瞄准地球、太阳或其它天体等等。为

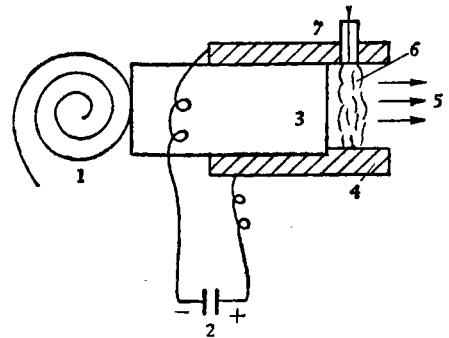


图 2

1 供给弹簧 2 储能电容器 3 太氟隆工质  
4 电极板 5 等离子体流 6 电弧 7 火花塞

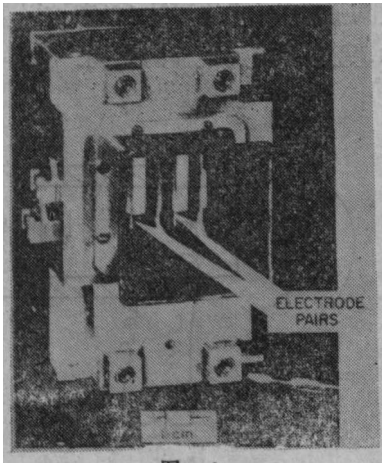


图 4

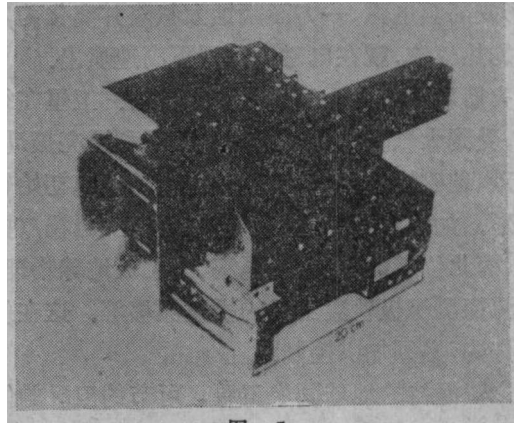


图 5

了保证卫星正常工作,必须对卫星姿态进行控制。这类任务大多属于微推力,低总冲,高精度的控制任务。

对不同姿态控制系统有不同的辅助推进要求。如自旋稳定系统,辅助推进用来建立自旋速率,维持自旋速率(卸载),使自旋轴进动与消除章动。美国的同步气象卫星(SHS)选用了脉冲等离子体微磅级推力的电火箭(图7)作卫星自旋轴进动控制,使星体自旋轴获得一弧秒的控制精度。

目前,三轴、主动式稳定系统是卫星(如通讯卫星)姿态控制系统的发展方向。在这系统中,辅助推进系统用作动量轮卸载,其卸载能力有可能影响姿态控制系统的寿命与控制精度。由于这种稳定方式机械结构复杂,还要增加章动阻尼器等系统,同时还存在高速转动部件长期运行的寿命问题,因而又兴起了无动量轮贮存的纯喷气控制系统。化学火箭由于存在上述缺点,无法获得高的控制精度,而微推力电火箭却与动量轮控制系统有竞争能力。美国曾研制由脉冲等离子体微推力电火箭组成的无动量轮纯喷气的三轴、主动式稳定系统,如LES8,9卫星上的三轴主动式姿态控制系统。

有关文献指出,到木星等行星的飞船,其三轴稳定系统若用脉冲等离子体电火箭代替动量轮系统,除具有上述优点外,还能节约重量48磅、电11瓦。

电火箭在航天技术中的潜在用途,促使许多国家从事这方面研究工作。仅以空间飞行试验及工程应用为例,据不完全统计,美国的电热式火箭除外,从1962年到1974年,有14台离子发动机和一种等离子体火箭,在十来个航天飞行器上进行飞行试验或工程应用;苏联在1964年到1975年进行了6—7次;日、英、法、德、意则进行了大量的地面试验,并研制成一些工程样机,如英国的T<sub>1</sub>系列、法国的CC<sub>1.5</sub>,西德的RIT<sub>10</sub>等。

展望80年代,欧洲空间局将发射30颗商用电视、导航、气象、地球观测等卫星。这些卫星的很大部分将可能采用电火箭作控制系统。如预计1981年发射的地球同步定点卫星,星上用激光束同步校正系统来校正美国与欧洲的原子钟,估计将采用电火箭。又如在将发射的7年寿命750公斤重的欧洲电视广播卫星上,已配备了T<sub>1</sub>型水银轰击式电火箭,作南北位置保持用。

日本预计在1980年发射的ETS-IV及航天飞机上,分别作脉冲等离子体电火箭与磁等离子体电弧射流火箭的飞行实验;还计划在1981年发射的工程实验卫星ETS-III上,安装5毫牛顿推力的水银轰击式离子火箭作飞行实验。

展望未来,美国在轻质高能电源、长寿命、高总冲、大推力的电火箭样机方面会取得新成果。随着空间事业的发展,电火箭将获得更广阔的应用。如在80年代将开展地球同步轨道太阳能电站

建设计划(HLLV),预计1995年发射第一颗发电量为数百万瓩的太阳能电站,寿命为10—30年。到2014年将有60个太阳能电站在地球同步轨道上运行。电站的全部建筑材料,由航天飞机运到数百公里的低轨道,然后由数十到数千瓩动力的电火箭,将建筑材料运往4万公里的地球同步轨道。这样每个电站的运费,单就使用电火箭而言,至少可减少35%左右。除上面已分析的南北位置保持与东西位置保持任务外,为了克服太阳辐射压力引起的轨道高度变化与偏心率变化,每公斤电站材料每年还分别得消耗总冲146牛顿与23牛顿;为了补偿微波辐射压力引起的电站轨道变化,每公斤电站材料每年得消耗总冲15牛顿。这样就得使用1400个8000秒比冲的离子火箭,每年得耗费推进剂24吨重,占电站总重的0.1%。若使用化学火箭,其耗资是不堪设想的。

人们设想,80年代在地球同步轨道上将有700个以上的卫星,包括载人的空间站,形成初步的空间工业系统。全部建筑材料用航天飞机运送到低轨道,再由电火箭转送到同步轨道。在同步轨道上配置、定点、装配空间站,及排除空间站相互撞击等,这些推进任务大多需用电火箭去完成。例如,8000公斤的天文望远镜,由载人空间站运往2公里远的空间装配,执行5个月的天文观察任务后返回载人空间站,对于这样的飞行任务,用离子火箭将耗水银55公斤,若用肼却要750公斤。

此外,具有重要军事价值与经济价值的太阳同步极轨道卫星的多次变轨任务;电离层、辐射带的长时间精密的科学测量彗星交会任务等,电火箭都可能获得有价值的应用。

## 新\*书\*架

## 《冶金热力学与动力学问题》一书即将出版

本书译自英国培加蒙出版社1977年出版的Problems in Metallurgical Thermodynamics and Kinetics一书,该书为美国大学教材,由C. S. 乌帕达耶、R. K. 杜布著,全书252页,约15万字。

众所周知,物理化学是一门基础学科,而热力学和动力学是冶金学的核心问题。对于冶金过程要有深入的了解,首先必须掌握热力学与动力学的基本理论和计算。但是,就目前国内出版的大专院校这方面的教材而言,从理论阐述到例题计算紧密结合冶金过程实际的还不多,在解题方面尤感欠缺。

这里介绍的《冶金热力学与动力学问题》一书,正好弥补了上述不足,是一本比较理想的教学参考书。它有如下几个特点:

1. 该书内容比较丰富。全书分九章,内容包括:热力学第一定律中热函变化与温度的关系、热化学及其在冶金中的应用;热力学第二定律中可逆、不可逆过程的熵变及其与温度的关系、自由能变化的计算、吉布斯自由能和热力学函数、吉布斯-亥姆霍茨方程;热力学第三定律的理论及应用;克劳修斯-克萊普朗方程对相变的应用及特鲁顿法则;逸度、活度和平衡常数的概念及应用;溶液的组成表示方法及拉乌尔定律,亨利定律,西维特定律;电化学电池的热力学;动力学中浓度、温度对反应速度的影响,以及反应动力学的碰撞理论、绝对反应速度理论,多变反应速度等。

上述理论的引入不是为了详尽地阐述它们,而与例题紧密配合,以通俗易懂和富有教益的形式加以介绍。

2. 该书每章均有包括基础理论和实际应用两方面的有解的数字例题(共50多个);章末附有为读者掌握理论和熟练运算的习题(共130多个),书末附有标准答案供读者核对。

书中例题和习题是作者以广大范围的冶金(包括钢铁和有色)实际过程为基础,同时参考了从事这方面研究工作者的著作后精心拟定出来的,并作了适当的分类,以使大学、理工学院冶金系师生及研究生都能得到裨益。

3. 鉴于目前正值由传统单位制向国际单位制过渡之际,因此,书中习题与例题的数据同时用两种单位加以表示。书末所附习题答案是以传统单位表示的,如欲将答案换算成国际单位制,则本书附录II中给出了换算因数可供读者使用。附录I中还录有国际单位制可供查对。

4. 为方便读者阅读起见,书前附有“符号和缩写一览表”;书末还附有书中涉及到的一些数学运算方法,包括:借助行列式求解联立方程;解二次和三次联立方程;只有一个未知数的方程图解法及图解积分或数值积分。

另外,译者按汉语拼音字母顺序编制了中文索引近400余条,对读者查找书中的重要定律,定义和公式都十分方便。

该书由金宝忠、阎庆甲译,冶金工业出版社编辑,预计1980年底出版。

(郭历平)