

# 1.绪论

- 1.1 推进科学家 ..... 3
- 1.2 航天器分系统 ..... 7
- 1.3 推进系统的分类 ..... 16
- 1.4 化学推进 ..... 17
- 1.5 电推进 ..... 20
- 1.6 新概念推进 ..... 23



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

西北工业大学

出版资助项目  
ZIZHU XIANGMU

National Defense  
TEXTBOOK



# 航天器推进 系统及其应用

HANGTIANQI TUIJIN XITONG JIQI YINGYONG

毛根旺 唐金兰 等编著



西北工业大学出版社

## 1.1 推进科学家

在人类航天历史上，永远铭记三位科学家，他们是：

俄国的康斯坦丁·齐奥尔科夫斯基（Konstantin E.Tsiolkovsky）

美国的罗伯特·戈达德（Robert Hutchings Goddard）

德国的赫尔曼·奥伯特（Hermann Oberth）

外文名 К о н с т а н т и н Э д у а р д о в и ч Ц и о л к о в с к и й



主要成就：宇宙航行之父；

民 族：俄罗斯人；国 籍：俄罗斯；

中文名：康斯坦丁·齐奥尔科夫斯基；

出生日期：1857 年（丁巳年）9 月 17 日；

出生地：俄罗斯梁赞州；

职 业：火箭专家和宇航先驱；

逝世日期：1935 年（乙亥年）9 月 19 日

数学教授，第一个发现并提出火箭是空间探索的前提这一理论。

"地球是人类的摇篮，但人类不可能永远被束缚在摇篮里。"

早在 1883 年，记录下了空气的爆炸可以产生推力，因此即使在真空环境中，火箭依然可以工作。《自由空间》

在 1903 年，发表了一篇具有历史意义的文章《利用喷气工具研究宇宙空间》，文章详细讲述了如何利用火箭完成空间任务。

提出利用液氧液氢作为推进燃料。他描绘了一种分级火箭，并且在数学上证实了，完成空间飞行任务确实需要分级。



中文名：罗伯特·哈金斯·戈达德；

外文名：Robert Hutchings Goddard；

国籍：美国；

出生地：美国麻萨诸塞州伍斯特；

出生日期：1882 年 10 月 5 日；

逝世日期：1945 年 8 月 10 日；

职业：火箭专家

毕业院校：伍斯特理工学院；

“昨天的梦想就是今天的希望、明天的现实”。

建立了火箭运动的基本数学原理，并推导出火箭脱离地球引力所需的  $7.9\text{km/s}$  的第一宇宙速度。

于 1926 年 3 月 16 日发射了世界的第一枚液体火箭。

获得了 214 项专利，其中 83 项专利在他生前获得。

设立于 1959 年的美国国家航空航天局戈达德太空飞行中心以他的名字命名。

以他的名字命名月球上的戈达德环形山（Goddard Crater）。



奥伯特, Oberth, Hermann (赫尔曼·奥伯特); 1894~1989,

德国火箭专家, 现代航天学的奠基人之一, 航天学经典著作《飞往星际空间的火箭》《通向航天之路》一书作者。

第一次世界大战中他专注于宇宙航行的基础理论研究。

1938 年在维也纳工程军院从事火箭研究, 后又在德累斯顿大学研制液体火箭的燃料泵, 但他的主要兴趣在固体火箭方面。

1941 年到佩内明德研究中心参与 V-2 火箭的研制工作。

奥伯特建立了下列条件之间的理论关系: 燃料消耗、燃气消耗速度、火箭速度、发射阶段重力作用、飞行延续时间和飞行距离等, 这些关系是火箭设计中最基本的因素。

# 1.2 航天器分系统

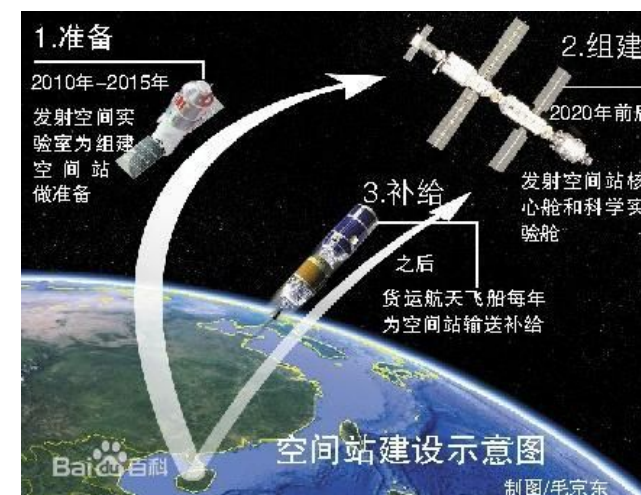
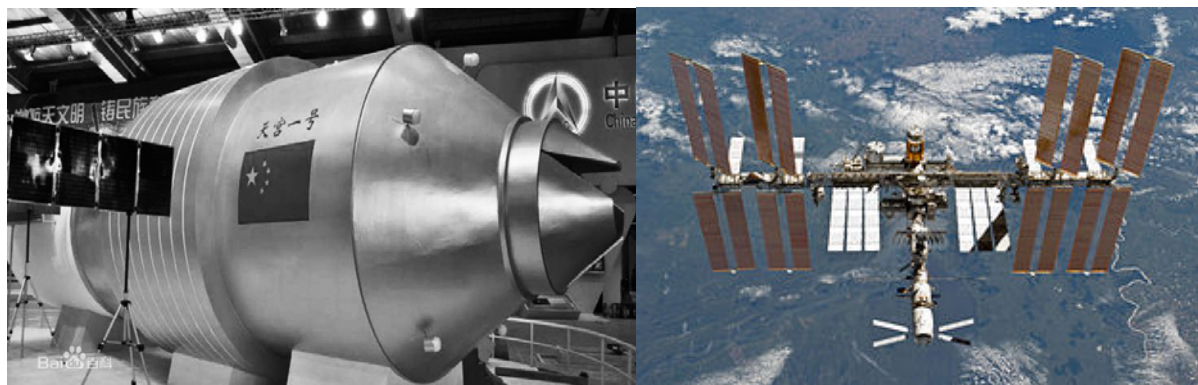
航天器一般指：

- 卫星

- a) 科学卫星
- b) 技术试验卫星
- c) 侦查卫星
- d) 气象卫星
- e) 地球资源卫星
- f) 海洋卫星
- g) 通信卫星
- h) 跟踪与数据中继卫星
- i) 导航卫星
- j) 测地卫星：数字地球，重力场。
- k) 反卫星卫星

## ● 空间站

- a) 空间站（Space Station）：又称航天站、太空站、轨道站。
- b) 是一种在近地轨道长时间运行，可供多名航天员巡访、长期工作和生活的载人航天器。
- c) 空间站分为单一式和组合式两种。
- d) 单一式空间站可由航天运载器一次发射入轨，组合式空间站则由航天运载器分批将组件送入轨道，在太空组装而成。
- e) 礼炮号空间站；和平号空间站；美国天空实验室；国际空间站
- f) 天宫



## ● 载人飞船

a) 载人飞船（manned spacecraft）能保障航天员在外层空间生活和工作以执行航天任务并返回地面的航天器。

b) 又称宇宙飞船。

c) 载人飞船可以独立进行航天活动，也可用于往返于地面和空间站之间的“渡船”，还能与空间站或其他航天器对接后进行联合飞行。

d) 载人飞船容积较小，受到所载消耗性物质数量的限制，不具备再补给的能力，而且不能重复使用。

e) 1961 年苏联发射了第一艘东方号飞船，后来又发射了上升号和联盟号飞船。

f) 美国也相继发射了水星号、双子座号、阿波罗号等载人飞船。

g) 阿波罗号是登月载人飞船。



| 载人飞船  | 发射日期             |
|-------|------------------|
| 神舟一号  | 1999 年 11 月 20 日 |
| 神舟二号  | 2001 年 01 月 09 日 |
| 神舟三号  | 2002 年 03 月 25 日 |
| 神舟四号  | 2002 年 12 月 29 日 |
| 神舟五号  | 2003 年 10 月 15 日 |
| 神舟六号  | 2005 年 10 月 12 日 |
| 神舟七号  | 2008 年 09 月 25 日 |
| 神舟八号  | 2011 年 11 月 01 日 |
| 神舟九号  | 2012 年 6 月 16 号  |
| 神舟十号  | 2013 年 6 月 11 号  |
| 神舟十一号 | 2016 年 11 月 17 号 |

## ● 航天飞机

- a) 航天飞机（Space Shuttle，又称为太空梭或太空穿梭机）是可重复使用的、往返于太空和地面之间的航天器，结合了飞机与航天器的性质。
- b) 它既能代表运载火箭把人造卫星等航天器送入太空，也能像载人飞船那样在轨道上运行，还能像飞机那样在大气层中滑翔着陆。
- c) 航天飞机为人类自由进出太空提供了很好的工具，是航天史上的一个重要里程碑。
- d) 发现号（STS Discovery OV-103）
- e) 亚特兰提斯号（STS Atlantis OV-104）
- f) 奋进号（STS Endeavour OV-105）
- g) 挑战者号（STS Challenger STA-099/OV-099）
- h) 哥伦比亚号（STS Columbia OV-102）
- i) 企业号（STS Enterprise OV-101）
- j) 暴风雪号太空梭



## ● 深空探测器等

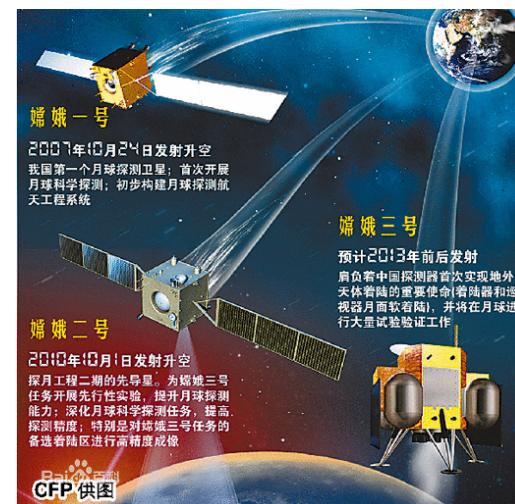
a) 空间探测器（space probe）：又称深空探测器或宇宙探测器。

b) 对月球和月球以远的天体和空间进行探测的无人航天器，空间探测的主要工具。

c) 空间探测器按探测的对象划分为月球探测器、行星和行星际探测器、小天体探测器等。

d) 1959 年 1 月苏联发射了第一个月球探测器——月球 1 号，此后美国发射了徘徊者号探测器、月球轨道环行器、勘测者号探测器。

e) 60 年代以后，美国和苏联先后发射了 100 多颗行星和行星际探测器、分别探测了金星、火星、水星、木星和土星，以及行星际空间和彗星。其中有先驱者（美）、金星（苏）、水手（美）、火星（苏）、太阳神（美、德合作）等探测器。美国在 1972 年 3 月发射的先驱者 10 号探测器，已在 1986 年飞越冥王星的平均轨道，成为第一个飞出太阳系的航天器。



公用平台主要包括七个分系统：

### （1）制导、导航与控制分系统（GNC）

用来保持或改变航天器的运行姿态。航天器一般都需要姿态控制，例如使侦察卫星的可见光照相机镜头对准地面，使通信卫星的天线指向地球上某一区域等。常用的姿态控制方式有三轴姿态控制、自旋稳定、重力梯度稳定和磁力矩控制等。

用来保持或改变航天器的运行轨道。航天器轨道控制以轨道机动发动机提供动力，由程序控制装置控制或地面航天测控站遥控。轨道控制往往与姿态控制配合，它们构成航天器控制系统。

### （2）遥控遥测分系统（通信分系统）

是卫星与地球或卫星与其它航天器之间联络的接口，正常工作时，以特定的频率同时收发射频信号；包括无线电跟踪、遥测和遥控 3 个部分。跟踪部分主要有信标机和应答机。它们不断发出信号，以便地面测控站跟踪航天器并测量其轨道。遥测部分主要由传感器、调制器和发射机组成，用于测量并向地面发送航天器的各种仪器设备的工程参数（工作电压、温度等）和其他参数（探测仪器测量到的环境数据、敏感器测量到的航天器姿态数据等）。遥控部分一般由接收机和译码器组成，用于接收地面测控站发来的遥控指令，传送给有关系统执行。

### (3) 综合电子分系统（星务管理；数据管理；指令和数据处理分系统）

管理卫星，用于存储各种程序、进行信息处理和协调管理航天器各系统工作。接收航天器指令，并将其译码、处理和分配，它还采集航天器上测量仪器的遥测数据，将其格式化、存储并发送；对航天器姿态和轨道测量参数进行坐标转换、轨道参数计算和数字滤波等。航天器计算机有单机、双机和多机系统。

### (4) 电源分系统（EPS）

给航天器提供电能，并对其进行储存、分配和控制；

用来为航天器所有仪器设备提供所需的电能。人造地球卫星大多采用蓄电池电源和太阳电池阵电源系统，空间探测器采用太阳电池阵电源系统或空间核电源，载人航天器大多采用氢氧燃料电池或太阳电池阵电源系统。

### (5) 热控分系统

在任务的各个阶段将航天器的所有部件都保持在它们需要的温度范围之内；

又称温度控制系统，航天器热控制的措施主要有表面处理（抛光、镀金或喷刷涂料），包覆多层隔热材料，使用热控百叶窗、热管和电加热器等

## （6） 结构和机构分系统

把航天器安装到运载工具上，并为启动火工装置分离动作创造条件；用于支承和固定航天器上的各种仪器设备，使它们构成一个整体，以承受地面运输、航天运载器发射和空间运行时的各种力学和空间环境。结构形式主要有整体结构、密封舱结构、公用舱结构、载荷舱结构和展开结构等。航天器的结构大多采用铝、镁、钛等轻合金和增强纤维复合材料。

## （7） 推进分系统

为航天器的轨道机动和姿态变化提供所需要的力和力矩。

主要作括： 1.从近地轨道送到高轨道或星际交会轨道； 2.为航天器提供轨道调整和姿态控制的力和力矩； 3. 为航天器的交会对接提供推力； 4. 为航天员的舱外活动提供推力。

## （8） 生活保障：

载人航天器生活保障系统用于维持航天员正常生活所必需的设备和条件，一般包括温度湿度调节、供水供氧、空气净化和成分检测、废物排除和封存、食品保管和制作、水的再生等设备。当航天员在任一飞行阶段发生意外时，用以保证航天员安全返回地面。它一般包括救生塔、弹射座椅、分离座舱等救生设备。它们都有独立的控制、生活保障、防热和返回着陆等系统。

## （9）跟踪回收

用于保障返回型航天器安全、准确地返回地面。它一般由制动火箭、降落伞、着陆装置、标位装置和控制装置等组成。在月球或其他行星上着陆的航天器配有着陆系统，其功用和组成与返回型航天器着陆系统类似。

## （10）有效载荷分系统

有效载荷就是直接执行特定航天器任务的仪器、设备或分系统。航天器的有效载荷从大的方面可分为航天员和物质性有效载荷两类。

其中，作为载人航天器的主要有效载荷——航天员，并非单指航天员本身，而是由航天员和一定的装备（如航天服、必要的工具等）组成的一个能从事航天活动的系统。

作为航天器必备的物质性有效载荷视航天任务的不同而异，在现阶段大体上分为进行科学探测的仪器和科学实验的设备、获取地球-大气层系统反射和辐射（发射）的电磁信息的遥感设备、转发无线电信息的通信设备、发送定位信息的导航设备等几种，今后还可以有批生产特种材料和药物的设备、发送电力的装置等。它们中的每一种都是由若干个成分组成的复杂系统。例如，遥感器可分为结构、光学、电控、存储和传输等几个分系统。

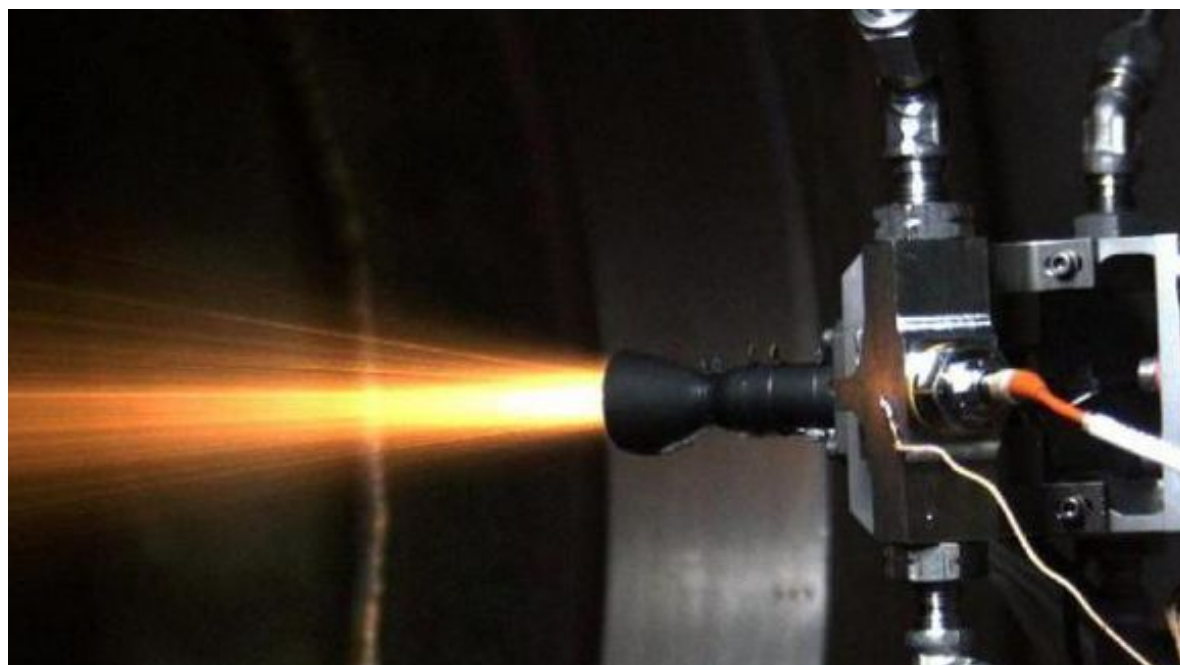
# 1.3 推进系统的分类

推进系统分两大类

- 主动控制式（内力，大部分）
- 被动控制式（外力，极少数）。

主动控制式推进系统可分为三种

- 化学推进
- 电推进
- 新概念推进



## 1.4 化学推进

化学推进的能源系统与推进剂供给系统是完全一体的，它是利用固体或液体氧化剂和燃料的燃烧或单质推进剂(如肼)的催化分解将推进工质的化学能变成内能和压力势能，然后释放产生推力。三高一低（高性能、高推质比、高可靠性，低成本）。

化学推进排放的羽流是各种物质分子的混合物，属中性气体，与航天器相容性好。

化学推进的最大特点是推力大，推力范围宽，可靠性高，特别适合于总冲要求大和快速机动的场合。

按常温下推进工质的物理状态，化学推进可分为三种：

- 冷气推进系统（GPS）

- 利用储气瓶中的高压气体通过喷管释放、膨胀并加速而产生推力。

- 固体火箭发动机（SRM）

- 以固体推进剂作为能源和工质，包括燃烧室、喷管和点火器三个基本组成部分。

## ● 液体火箭发动机（LRE）。

- 一类液体火箭发动机用于航天运载器和弹道导弹，包括主发动机、助推发动机、芯级发动机、上面级发动机、游动发动机等；
- 另一类液体火箭发动机用于航天器主推进和辅助推进，包括远地点发动机、轨道机动发动机、姿态控制和轨道控制发动机、主发动机等。
- 液体火箭发动机按其使用推进剂组元数可分单组元、双组元和三组元发动机。
- 单组元主要用于航天器辅助推进上，双组元占绝大多数，三组元发动机尚处于研制阶段。
- 双组元发动机按其推进剂的性质不同可分成可贮存和不可贮存推进剂发动机。
- 按其推进剂供应方式，液体火箭发动机可分为挤压式和泵压式供应系统发动机。

**表 各推进系统特征**

|          | 冷气               | 单组元                    | 双组元                    | 固体                     |
|----------|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 典型比冲,s   | 50               | 225                    | 310                    | 290                    |
| 推力大小, N  | 0.05-1           | 0.5-3000               | >10                    | >1500                  |
| 总冲范围, Ns | $<5 \times 10^3$ | $5 \times 10^3 - 10^5$ | $5 \times 10^4 - 10^8$ | $5 \times 10^4 - 10^8$ |
| 最小冲量, Ns | 0.001            | 0.015                  | 0.15                   | N                      |
| 复杂度      | Least            | Midrange               | Most                   | Midrange               |
| S/C 混合性  | N                | N                      | Y                      | Y                      |
| 重复启动     | Y                | Y                      | Y                      | N                      |
| 脉冲工作     | Y                | Y                      | Y                      | N                      |
| 调节性      | N                | Y                      | Y                      | N                      |

# 1.5 电推进

电推进的能源系统与推进剂供给系统是相互独立的。

- 电源在电推进系统中占有十分重要的地位,其体积、重量和技术难度往往超过推力器本身。
- 电推进排放的羽流为由电子、离子和工质的原子、分子等组成的等离子体。
- 等离子体整体上不显电性,但在有电磁场存在的情况下,会在电磁力的作用下发生偏转或产生定向运动。
- 电推进的最大特点是小推力和高比冲。

电推进系统组成一般为三部分:

## 1. 电源处理系统 (PPU)

- 用来调理来自太阳能电池阵的不稳定直流电,并按不同电压和功率等要求输送到电推力器和其它用电系统。
- 通常其体积和重量都较大,成本也较高,它是电推进系统中最复杂且最富有挑战性的系统;

## 2.推进剂贮存与供应系统

- 电推进的推进剂贮存与供应系统与一般冷气推进系统和单组元液体推进系统相差不大
- 推进工质流量一般很小，每秒只有几个毫克到几十毫克，且连续供应时间很长，这给电磁阀的流量精确控制和防止泄漏带来较大困难；

## 3.电推力器

- 电推力器的种类繁多，原理多样,性能指标相差很大,且各有各的特点和适用范围。
- 按电能加热和加速推进工质的原理分类，电推力器可分为电热式、静电式和电磁式。
- 电热式通常说的是电阻加热（Resistojet）、电弧加热（Arcjet）和微波加热（MPT）推力器；
- 静电式指的是离子发动机（IE)和稳态等离子推力器（SPT）；
- 电磁式包括脉冲等离子推力器（PPT）和 磁等离子体动力推力器（MPD）。

## 特点:

- (1) 电推力器比冲高,可以大大减少推进剂携带量,但却显著增加了航天器的用电量,因而也就增加了太阳帆板和 PPU 的质量;
- (2) 电推力器羽流中等离子体密度高,对太阳电池和通讯天线的影响要比常规化学推进严重得多,也复杂得多;
- (3) 电推进点火和 PPU 工作会增加航天器的热载荷,电热式推力器热污染是很严重的;
- (4) 电推力器的电磁场会以等离子体噪声的方式影响周围环境,泄漏的波动电磁场也会干扰电子设备的工作和微波通讯。

## 1.6 新概念推进

所谓新概念推进一般是指最新提出的、或虽然早就提出但并未得到大规模发展和广泛应用的推进。

核推进（NRE）是直接利用核反应能加热推进剂进行高速喷射产生推力；

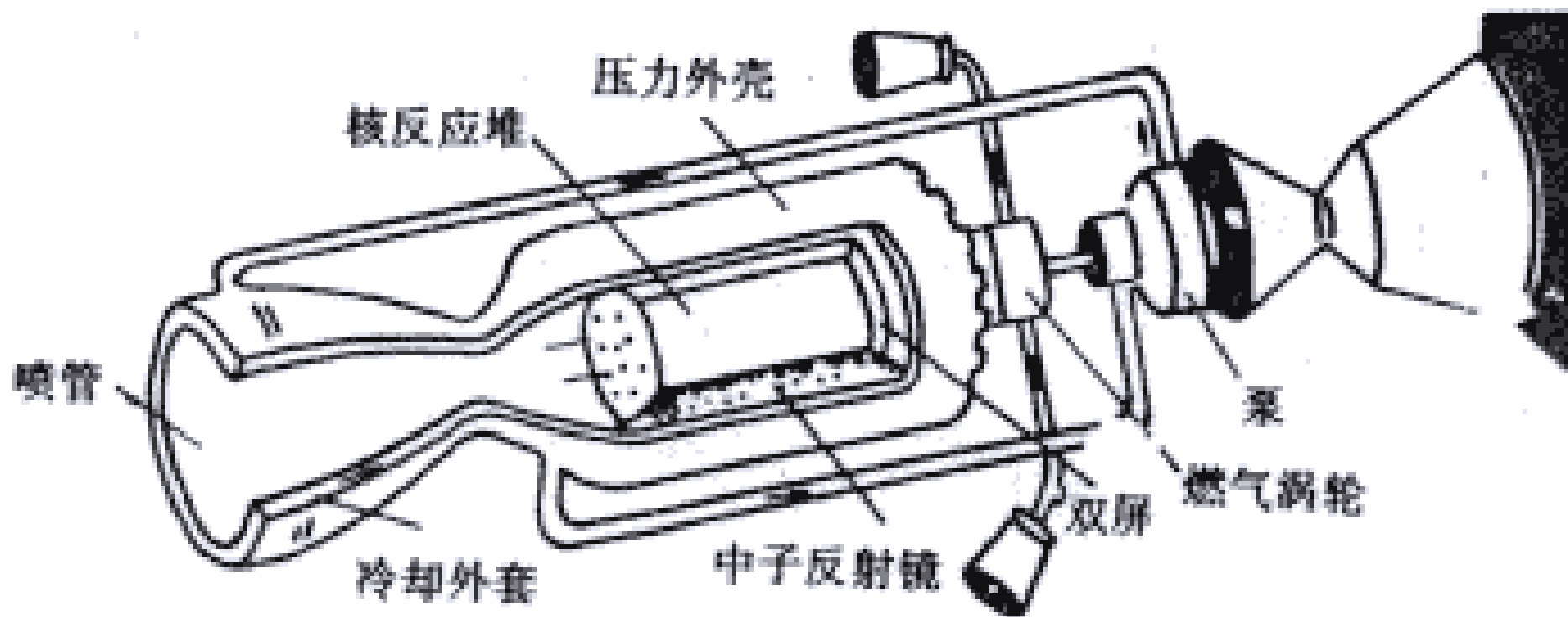


图 核能火箭发动机示意图

激光推进（LRE）则是基于强激光与固体物质相互作用的基本原理和作用特点而提出的新型推进技术；

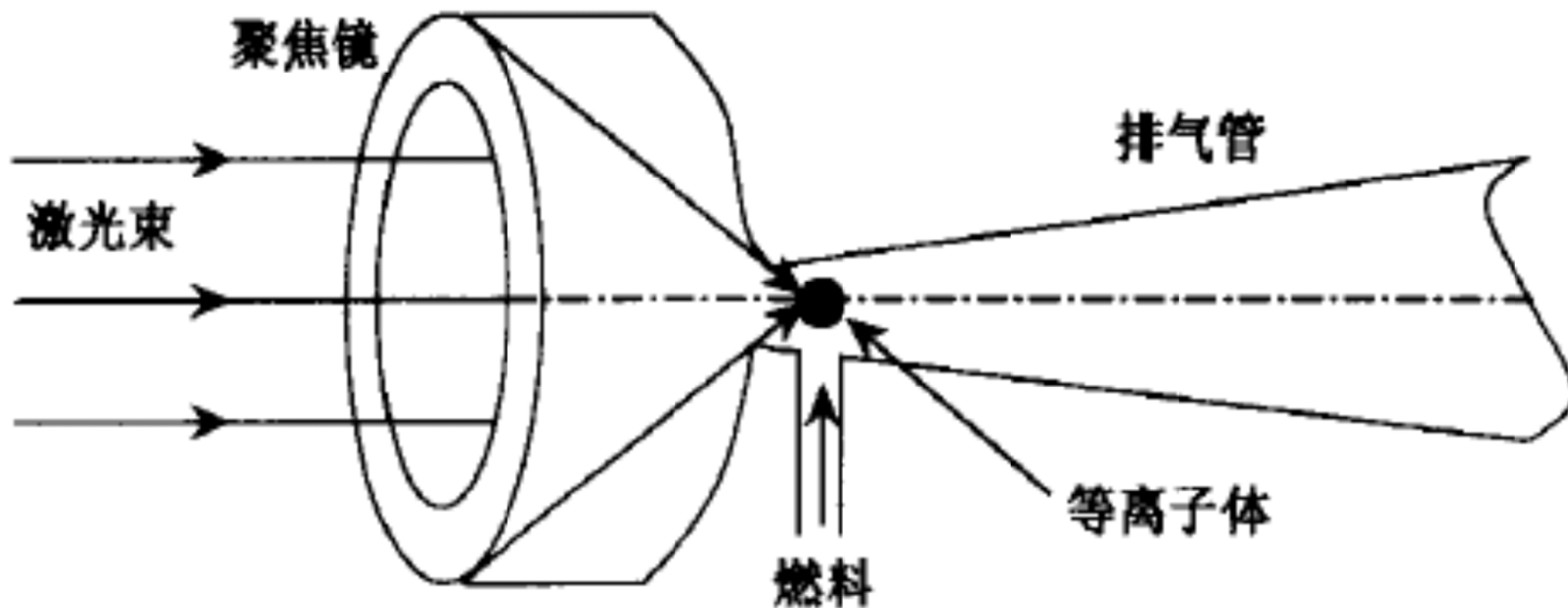


图 激光推进原理示意图

太阳能热推进（STP）是利用聚集的太阳能来加热推进剂进行高速喷射形成推力。

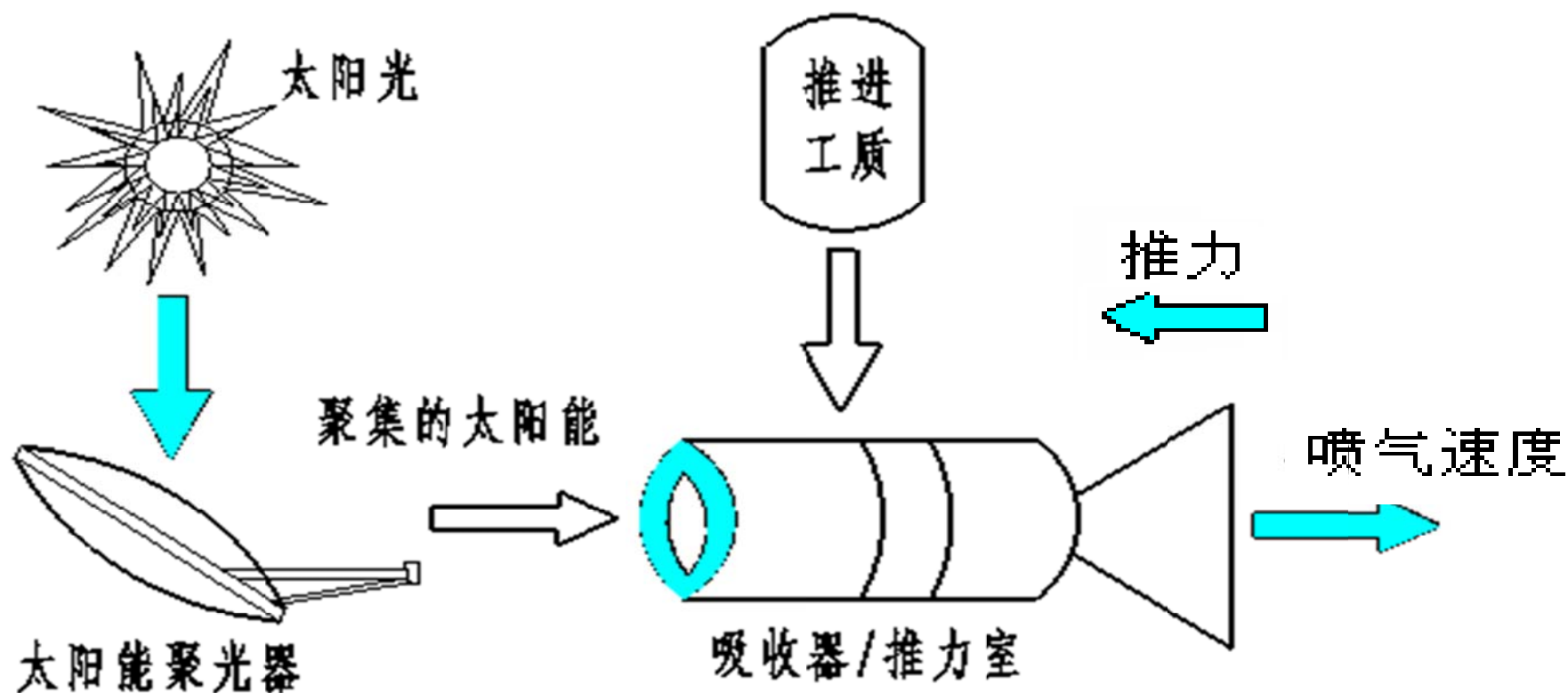


图 太阳能热推力器系统概念图

此外，还有反物质推进、太阳帆、激光辐射推进、微波辐射推进等新型推进技术。