

火 箭 发 动 机

火箭工程导論

[美] G. P. 薩 登 著

何庆芝、李宜敏、馮文瀾 等譯

曹傳鈞、馮文瀾 等校

國防工業出版社

1966 長 理 長 理

內容簡介

本书系按 G.P. 薩登所著“火箭发动机”第三版(1963年)翻譯的。与第二版(1956年)比較,新版在內容取材上作了很大变动。书中新增加了关于核火箭推进、电火箭推进和固液混合型火箭推进的章节;其它章节也都相应地增添了新的內容、插图和数据,删去了第二版中一些較陈旧的内容。本书在一定程度上反映了近十年来火箭推进技术的发展概况。

本书內容包括两部分,一是关于火箭推进的普遍性問題,如噴管流动过程热力学、推进剂热化学、热交换、发动机試驗等;二是关于几种发动机的介紹,如液体火箭发动机、固体火箭发动机、核火箭发动机、电火箭发动机等。

本书可作高等院校有关专业的教学参考书,亦可供工程技术人員、研究人員参考。

ROCKET PROPULSION ELEMENTS
An introduction to the Engineering of
Rockets

[美] G. P. Sutton

JOHN WILEY & SONS, INC., 1963

火箭发动机

火箭工程导論

何庆芝、李宜敏、馮文瀾 等譯

曹傳鈞、馮文瀾 等校

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

850 × 1168¹/₃₂ 印張 14³/₁₆ 362 千字

1966 年 3 月第一版 1966 年 3 月第一次印刷 印数: 0,001—1,300册

統一书号: 15034·1097 定价: (科六) 2.10元

第三版序言

这本新版的“火箭发动机”是在前一版的基础上做了扩充和修訂，并试图跟上研究技术的迅速发展和反映近代的許多研究成果。由于在这一领域內有大量的文献和資料可供利用，因此本书只限于叙述火箭推进的基本原理，某些現時公认的、火箭推进的物理机理及其应用。本书只用作火箭发动机工程方面的入門书。

本书內容包括两部分：其一是关于各种基本原理的論述；这些論述对于某些类型的火箭推进装置都是通用的。这方面的論述包括噴管流动的热力学（第三章），傳热（第四章），飞行性能（第五章），推进剂的热化学（第六章），以及火箭試驗（第十六章）。其二是对各种类型的火箭推进装置做了專門的論述，例如液体推进剂火箭发动机（第七、八和九章）；固体推进剂火箭发动机（第十、十一和十二章）；核火箭发动机（第十三和十四章）；电推进火箭发动机（第十五章）；固液混合型火箭发动机（第十一章的最后部分）；以及論述較少的其它一些內容。

在論述每一种类型火箭发动机的那些章节中，针对这种特定的类型，作了某些简单的理論叙述和基本物理机理的描述，也提出了某些关键性的設計問題及其应用。本书对于化学火箭的論述要比核火箭发动机或电推进火箭发动机多，这是因为目前化学火箭的使用范围要广得多。本书有許多例題、习題、数据表以及近代火箭发动机的插图，所有这些都是为了說明所論述內容的实际应用的。

在本版中第一次加入了对于核火箭发动机、电推进火箭发动机和固液混合型发动机的論述，并对其他各章做了很大的修改，增加了新的內容，甚至整个地重新改写。对于表格和附图中的某

些数据，也作了更新，或有所增添，或改变了表达方式。和前一版比较起来，基础知识方面的论述也更为广泛。对于前一版中的某些已经陈旧的内容，或者只对某些少数专家才有用的部分（如火箭发展史的讨论）都被删去了。由于篇幅所限，本书未能涉及到某些有用的材料，读者欲想了解其他有关的课题和更为详细的细节，可以参阅其他资料，例如，本书参考文献目录所列的那些资料。

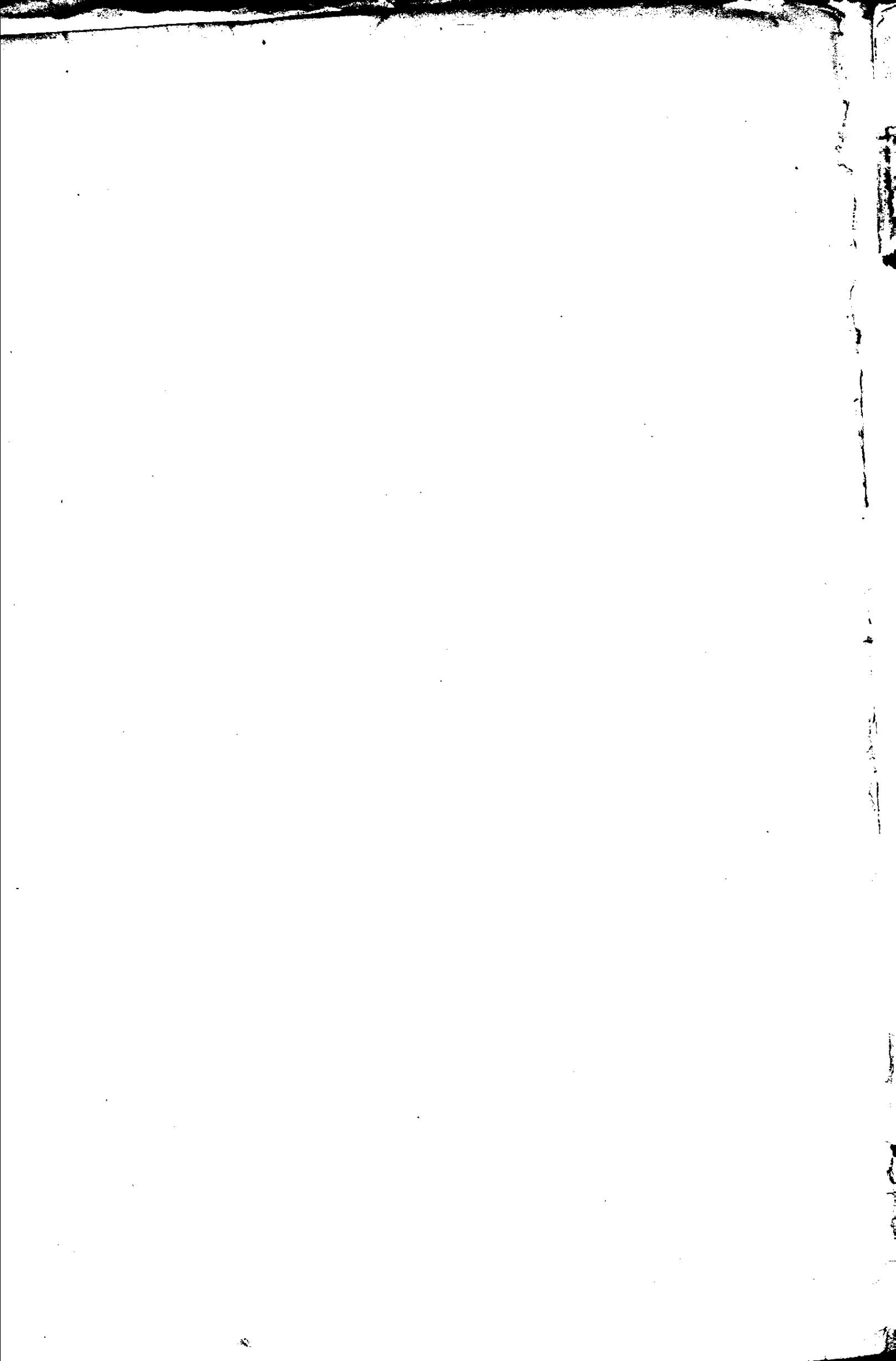
作者希望本书仍能作为大学生的教本。同时对于空间飞行这一宽广的领域有兴趣的工程人员来说，可以作为导弹或空间飞行器推进技术的一本入门书，对于刚从事推进技术的人员来说，可以成为使他们受益的工具书或者进一步学习的指南，最后对于推进技术的专家来说，亦可作某些基本公式和数据的参考书。本书的第一版（1949）和第二版（1956）已经成功地达到了这些目的。

前两版曾用作很多技术院校的教科书和军事及工业必修课程的教本。作者对于很多教授、学生和同行指出的错误和缺点表示感谢。所有这些意见在修订版中都已加以考虑，作者希望进一步收到更多的指正和建议。

G. P. 薩 登

目 录

第三版序言	3
第一章 分类	7
第二章 定义和基础知识	25
第三章 噴管理論和热力学关系式	42
第四章 傳热	88
第五章 飞行性能	120
第六章 化学火箭推进剂的性能計算	153
第七章 液体推进剂火箭基础	179
第八章 液体推进剂	202
第九章 液体推进剂火箭发动机系統	224
第十章 固体推进剂火箭基础	306
第十一章 固体推进剂	329
第十二章 固体推进剂火箭的設計	351
第十三章 核火箭反应堆基础	380
第十四章 核火箭发动机系統	394
第十五章 电推进火箭发动机	411
第十六章 火箭試驗	427
附录 书中用到的英制单位与公制单位換算表	447



第一章 分 类

就广义而言，推进系指改变运动的一种作用。推进装置則是給出一种力量使原来靜止的物体运动起来，使等速的运动发生变化，或者当物体通过介质时用以克服阻力。在任何推进装置中必須有两个基本部分：能源和将能量轉換成最适于推进的能量轉換机构。例如在汽車中，由于燃料和空气的化学燃燒过程供应能量，然后在发动机內部轉換成燃气的热能，随后变成了轉軸或飞輪的机械能。

由噴射物质的动量变化而給予装置的反作用力的这种推进方式称为噴气推进。

噴气推进可分成两种类型：噴出的物质全部貯藏在飞行器內部的叫作火箭推进；将周圍的流体吸入装置內，再以机械的或加热的方式，使流体加速至更大动量，然后向外噴出的叫作通管式推进。此外还有既噴射貯藏物质，又噴射周圍介质的組合式方案。

噴气推进的想法是古老的，但仅仅在最近几十年来才得到实际利用。对于許許多多种不同的用途，已經成功地設計出各式各样的噴气推进系統。本章将叙述这些不同噴气推进系統的一般分类。

火箭发动机是将能量轉变成适于推进的形式、并噴射所貯藏的物质以使飞行器获得动量的装置或机构。在火箭推进中所噴射的物质叫作推进剂。

对于火箭推进來說，在很多可能的能源中，有三种是可用的：（1）化学燃燒反应；（2）核反应；（3）来自輻射体（如太阳）的輻射能。由此，各种推进装置可归納为化学推进、核推进和太阳能推进三类。化学能的釋放是和分子內力和化学鍵的重新排列

同时发生的。辐射是一种传播能量的形式，在这里可以把连续的太阳能辐射认为是单独的一种类型。从原理上说，从一窄角的辐射器至一飞行中的接收器的电磁波的传播也算是一种辐射。核能的释放是和原子核内部粒子的转变同时发生的，核能有裂变、聚变或放射性物质的衰变等几种类型。其他能源不论是在飞行器内部的还是在外部的都是可以考虑的，在一力场（重力或磁力场）内的可用位能有时也可用作推进。火箭发动机往往是以喷射物质的动能形式输出能量。因此，发动机就是将来自能源的输入转化成此种动能形式。喷射的物质可以是固态的、液态的、或是气态的。在很高温度下也可能是一种等离子体，亦即一种电子激发的气体。实际上喷射物质经常是上述物质的两种或两种以上的组合。

在很多可能的喷气推进发动机中的几种重要的类型列举于下，并按其能源和推进剂的种类加以分类，如表 1-1 所示。

表1-1 几种不同的推进发动机的能源和推进剂的种类

推进剂种类	能源种类		太阳能的
	化学的	核能的	
周围介质用作推进剂的工质	带螺旋桨的汽船	核涡轮喷气发动机 核冲压喷气发动机 带螺旋桨的核潜艇	...
周围介质加贮存的推进剂	涡轮喷气发动机 冲压喷气发动机 冷凝空气火箭 通管式火箭	带有化学燃料补燃器的核涡轮喷气发动机	...
在飞行器内部贮存的推进剂	液体推进剂火箭 固体推进剂火箭 固液混合型推进剂火箭 电推进火箭的化学(燃料)电池	核裂变火箭 电推进火箭的核反应堆能源	太阳加热的液氢火箭
飞行器中不带推进剂	...	带有核反应堆的光子火箭	太阳帆

§ 1 通管式喷气发动机

这里提出的通管式发动机的主要目的在于使读者对于推进机有一更为全面了解。

机械压缩式喷气发动机 工质是用机械的方法压缩, 燃烧, 然后在喷管中膨胀。通常是用机械压缩机来完成这种压缩。压缩机则由涡轮(涡轮喷气)或其他机械带动。流体经过通管以后, 它的动量增加, 因而产生推力。

纯通管式喷气发动机 此种型式除不用压缩机或涡轮外, 原理上与机械压缩相似。利用适当的通道形状来获得流体的压缩。冲压喷气发动机所用的介质是空气。冲压喷水发动机用的介质是水, 它是一种水下推进器。图 1-1 是冲压喷气发动机的示意图。

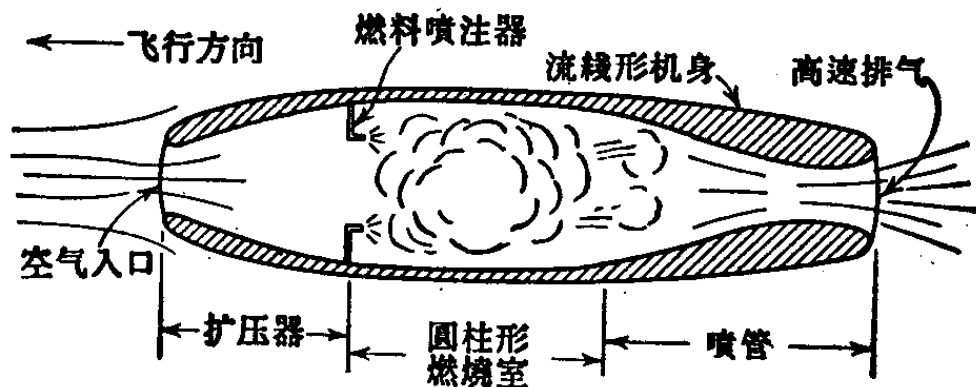


图1-1 冲压喷气发动机的示意图

核能通管式发动机

此类发动机包括核涡轮喷气机和核冲压喷气机。在这里, 空气接受了来自核反应堆的热量, 然后加速, 并由喷管喷出。

§ 2 火箭发动机

装备飞行器的火箭发动机携带其本身所需的全部推进剂。因此, 火箭发动机能不依赖于其环境介质而工作, 可用在大气中, 水下或真空中。火箭发动机可按照所用能源(化学的、核能的或太阳的)种类、用途(飞机用发动机、导弹用发动机、起飞加速器、空间飞行器用发动机等)、大小、推进剂种类、结构型式和

在給定飞行器中的发动机数目来进行分类。所有这些不同类型的火箭发动机将在以后各章中更詳細的討論。

化学火箭发动机

通常由燃燒剂（燃料）和氧化剂組成的推进剂在高压燃燒反应中釋放出来的能量，可将反应产物气体加热到很高的溫度（4500至7500°F）。这些气体随后在噴管中膨脹，并加速到很高的速度（6000至14000呎/秒）。按照推进剂的物理状态之不同，火箭发动机可以分为若干不同的类型。

液体推进剂火箭使用液体推进剂，推进剂由貯箱压注到推力

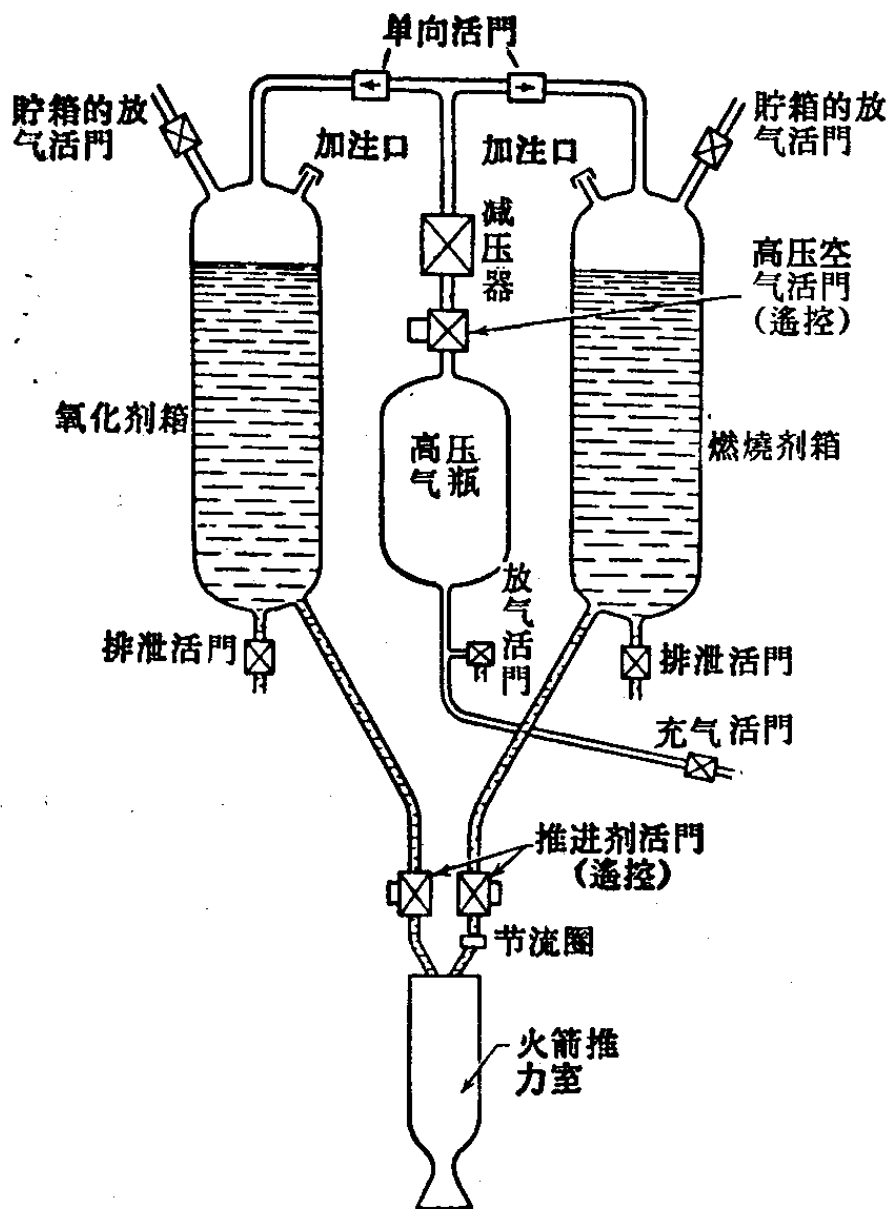


图1-2 气体挤压式輸送系统的液体推进剂火箭示意图

室[●]中。一个典型的挤压式液体推进剂火箭发动机系统示意图示于图 1-2。液体推进剂经常由液体氧化剂（例如液氧）和液体燃烧剂（例如汽油）组成。一涡轮泵输送的大型液体推进剂火箭发动机如图 1-3 所示。

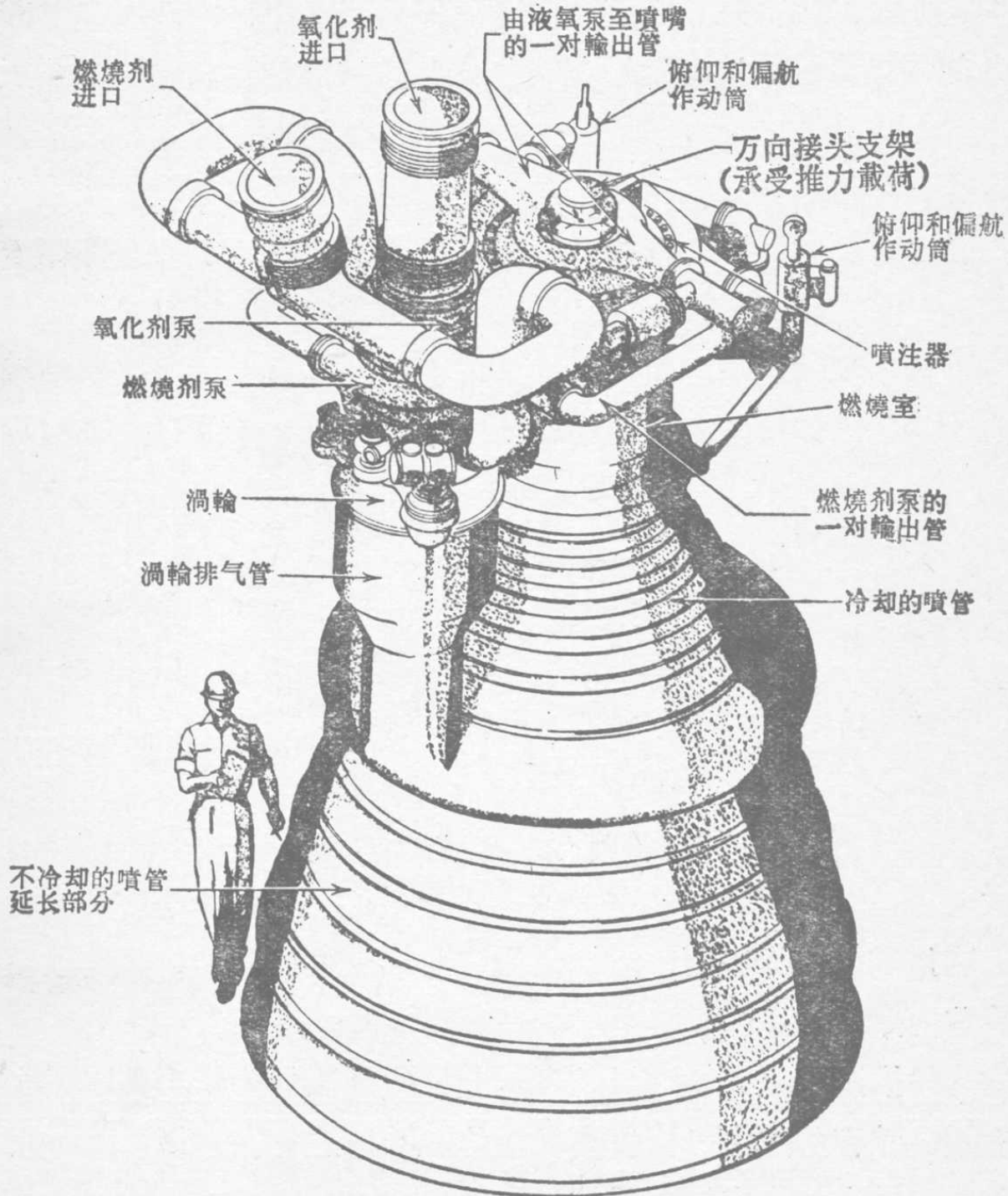


图1-3 推力为 1500000 磅的泵压式、F-1 型液体推进剂火箭发动机

- 推力室系指包括喷嘴、喷管和燃烧室在内的整个装置，此术语为若干官方机构所采用，因此本书也这样采用。但其他文献中也用诸如“火箭发动机”，“推力气缸”或“燃烧器”等术语。

在推力室中，推进剂燃烧生成热燃气，通过超音速喷管加速以后，以高速向外喷。因此，液体火箭通常可以多次运转，并能任意的启动和停车。若推力室具有充分的冷却，则只要推进剂的供应不受限制，液体火箭的工作超过1小时是可能的。但是液体火箭推进系统的设计是相当复杂的。它需要若干精确的活门，一套复杂的输送机构，这套输送机构往往包括推进剂泵，涡轮，或压送推进剂的装置。此外还需要一个相当复杂的燃烧室或推力室。

在固体推进剂火箭中，待燃烧的推进剂全部装在燃烧室或壳体内部。推进剂装药叫做药柱，药柱内包含足以完全燃烧的全部化学元素。一旦点燃以后，通常就在装药的暴露表面上以近乎恒定的燃速进行平稳的燃烧。由于不像液体火箭那样需要输送系统或者活门，因此固体推进剂火箭的结构通常是比较简单的（见图1-4）。

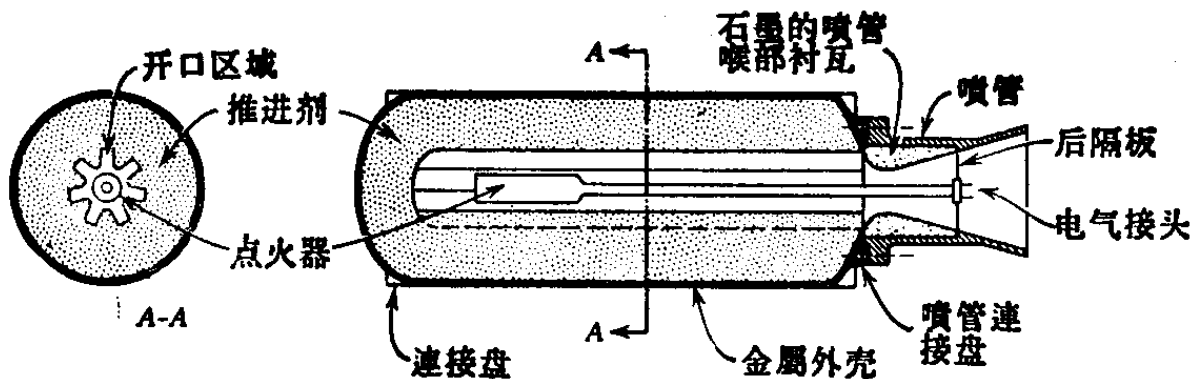


图1-4 固体推进剂火箭。此处推进剂药柱是和内壁粘结在一起的。药柱中央有七角星形孔

液体和固体推进剂，以及使用这些推进剂的发动机将在以后的章节内分别加以讨论。

气体推进剂火箭发动机是利用充好的高压气体作为其工质或推进剂。贮存所充之气体需要很重的容器。这种发动机只限于用在空间飞船上的姿态控制系统。

固液混合型推进剂火箭发动机既使用液体推进剂，又使用固体推进剂。例如，将液体氧化剂喷入一装填固体燃烧剂药柱的燃烧室中，经化学反应后就生成高温的燃气（见图1-5）。这种固体燃烧剂药柱是含碳的。关于这种类型的发动机将在第十一章中

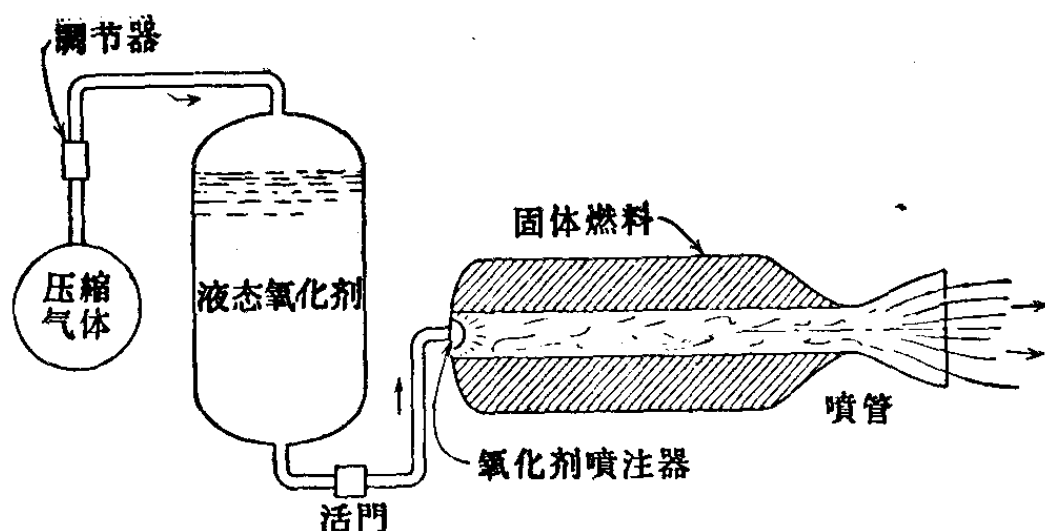


图1-5 典型的固液混合型火箭发动机的示意图

描述。

通管式喷气发动机和火箭发动机的组合

在原理上将火箭发动机和通管式喷气发动机组合成许多不同方式；以下只简单地叙述其中几个比较有价值的方案。

通管式火箭发动机基本上是一种变相的冲压喷气发动机，其中有一个或几个小火箭，用来点燃燃烧剂和稳定火焰，或者利用类似引射的作用来强化冲压喷气发动机（见图 1-6）。火箭发动机的高速气流和通管式发动机比较低速的气流相混合，可以增加推力，特别是在低速飞行时。通管式水下火箭与上述火箭相似，不过使用水作为工质，所用的水中有一部分将蒸发、汽化。

在火箭涡轮喷气发动机中，靠一小型火箭来推动涡轮工作。火箭的富燃排气推动涡轮后，再补加入一些燃烧剂和来自压气机的空气一起混合燃烧。

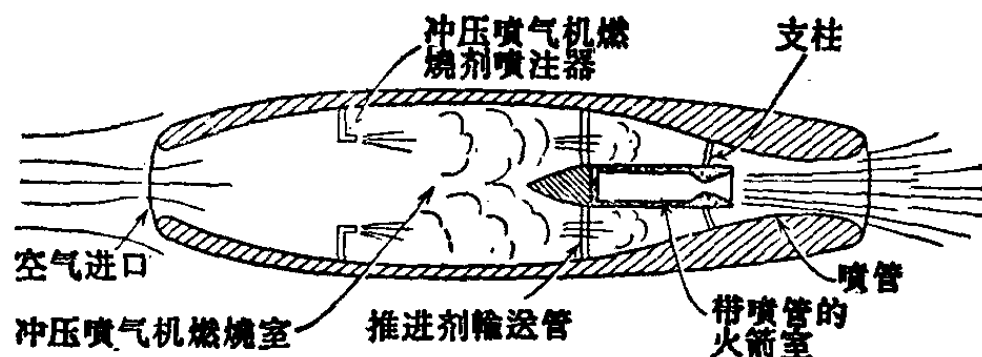


图1-6 通管式火箭发动机的简单示意图

冷凝空气火箭是在飞行过程中汇集气态空气冷凝成液态空气，然后在火箭燃烧反应中加以利用。正如图 1-7 所示，所携带的燃烧剂（液氢）在其蒸发过程中吸收热量，因此使进入的空气冷却和凝結。如有可能将空气分离成富氧的空气和多余的氮气，且将氮气排出火箭，则火箭的燃烧反应会更加强烈，并且同不将空气分离只将冷凝液态空气与氢的燃烧比较起来，性能会更好。

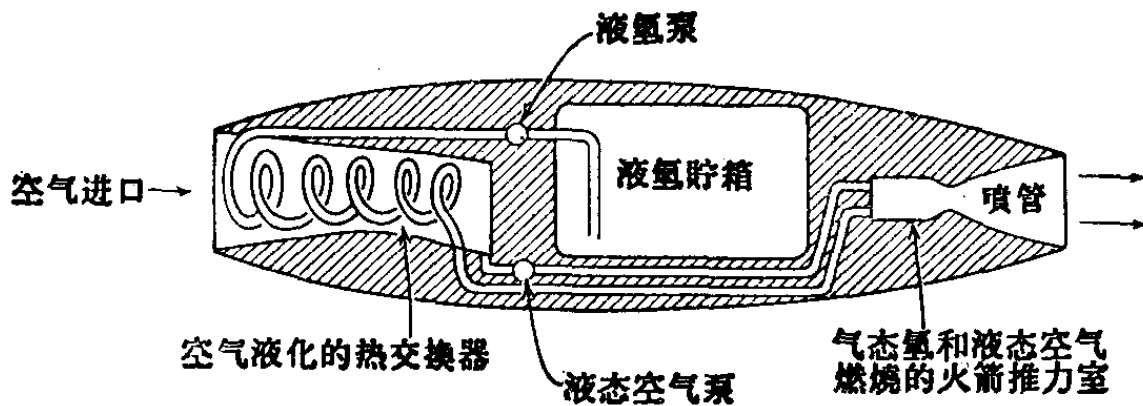


图1-7 冷凝空气火箭的示意图

核火箭发动机

将热量输送给工质的核能源可以认为有三种类型。工质通常是液氢，受热后液氢在喷管中膨胀，因而加速至较高的排气速度（20000 至 35000 呎/秒）。这三种类型是裂变反应堆、放射性同位素衰变源和聚变反应源。所有这些在最后面章中较为详细地叙述。所有这三种类型基本上都是液体火箭发动机的扩充，所不同的只是气体的加热不是靠化学反应来完成，而是靠原子核内的转变所产生的能量来完成。

在核裂变反应堆火箭（见图 1-8）中，热量是由铀的裂变产生的。此热量随后传递给工质。反应堆的高温（高于 4000°F）以及辐射对材料和人体的影响成了专门的问题。在同位素衰变的发动机中，放射性物质的辐射随即转变成热量，因此就可用来提高工质的温度。在火箭推进中采用核能的第三种方法是聚变，这可能成为一种吸引人的方法，但是在目前对于连续聚变过程的控制的了解尚不够充分，以致还不可行加以实际利用。

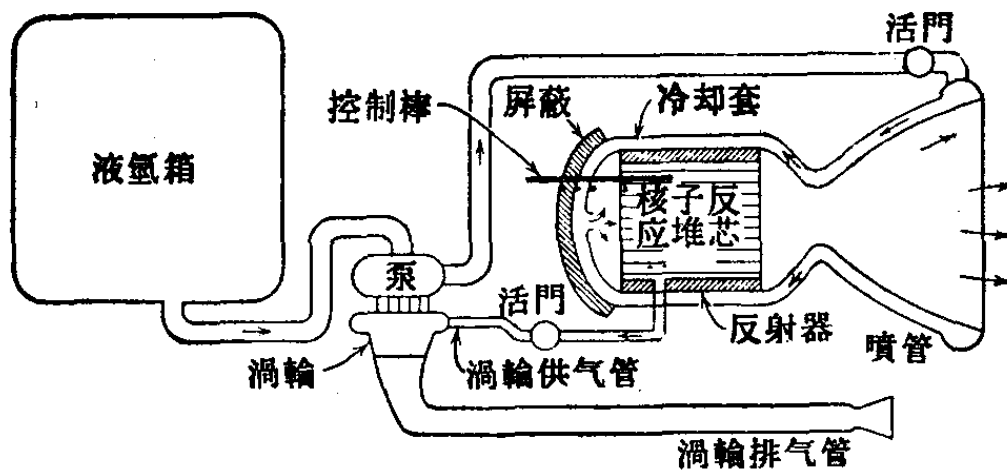


图1-8 采用固体堆芯裂变反应堆的核火箭示意图

电推进火箭发动机

在电推进火箭发动机的三种基本类型中，电弧加热式火箭发动机和上述的火箭发动机最为相似。如图 1-9 所示，电能是在两电极之间击穿的电弧中转换成热量的，因此当工质通过电弧时温度就升高。受热后的气体在喷管中进行热力膨胀、加速之后以高速（25000 至 65000 呎/秒）向外喷出。

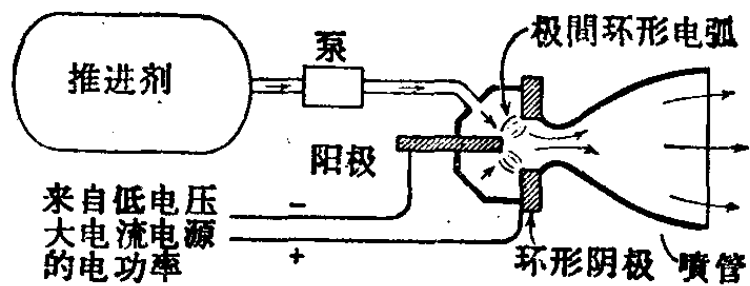


图1-9 电弧加热式火箭发动机的示意图

其他两种类型——离子推进发动机和磁等离子体发动机则是根据不同的原理作成的，在这两种发动机中不采用在喷管中气体进行热力膨胀的方法。在离子火箭中工质被电离失掉电子后即成为带电粒子，离子在静电场中被加速至很高的速度（120000 至 650000 呎/秒），随后离子被中和并向外喷出（见图 1-10）。在磁等离子体的类型中，带电的等离子体被电流和磁场的相互作用而加速，并以高速（50000 至 350000 呎/秒）喷出。这三种类型将在以后的章节中予以详细的说明。

太阳加热火箭

在太阳加热火箭中，将来自太阳的辐射能量收集起来，并加

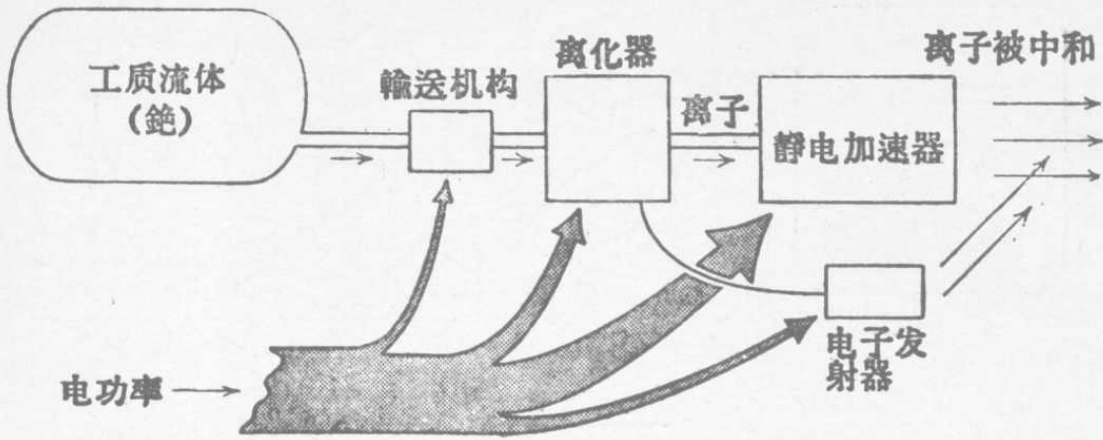


图1-10 一典型离子火箭的示意图

以聚集（通常靠精确地对准太阳的光学系统），然后用来加热水质至高温。高温气体随后进行热力膨胀并喷出（见图 1-11）。

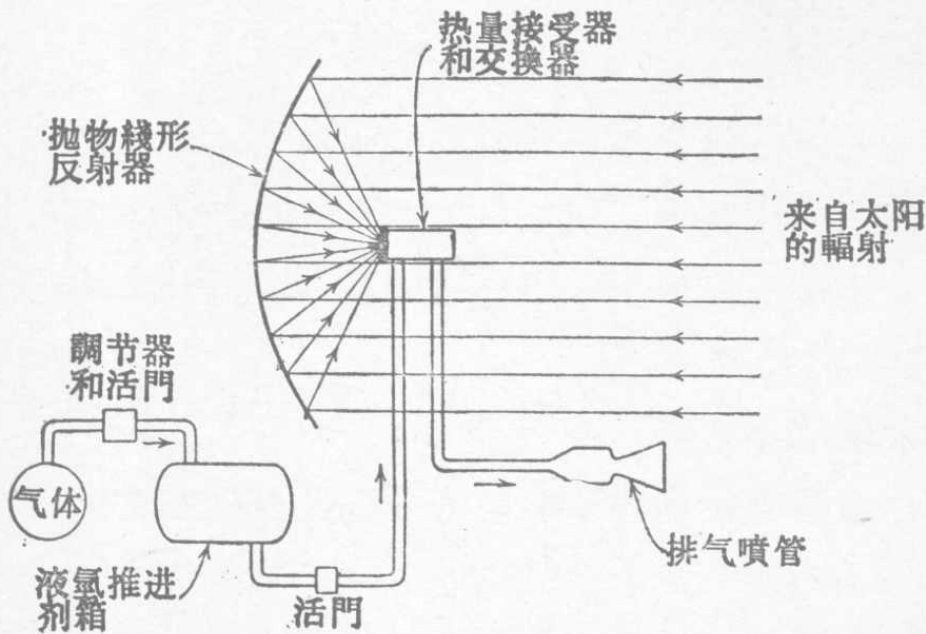


图1-11 太阳加热火箭的示意图

太阳帆和光子火箭

光子具有粒子及波的特性。光的反射可以看作是光子群从一表面跳开。阳光自太阳至地球这一段距离的辐射压力约为 10^{-7} 磅/平方·呎，但随离太阳的距离的平方而变化。与辐射方向成直角安放的完全反射表面上所感受的压力要为上述压力的两倍。

这种反射可把太阳压力的力用于空间飞船的姿态控制，以及用于太阳帆这一概念。从一空间飞船上将重量轻的反射器延伸到长的力臂上，就有可能得出足够的力距使飞船在几小时内任意