

1455

大众科学识丛

喷气式飞机

〔苏联〕A.K.巴莱夫·И.А.密尔库洛夫



科学普及出版社

1455

本書提要

自制噴氣式飛機和自制汽車，是我國社會主義工業目前兩個光榮產物。不但如此，而且噴氣式飛機的原理，還是我國發明的。這是怎麼說的呢？噴氣式飛機的飛行原理和構造究竟是怎樣的呢？它的發展現況和發展前途又是怎樣的呢？本書就是以生動的筆法談這些問題的。

總號：599

噴氣式飛機

САМОЛЁТ-РАКЕТА

原 著 者： Л. К. БАЕВ И И. А. МЕРКУЛОВ

原 出 版 者： ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, 1956

譯 者： 李

校 者： 張

出 版 者： 科 學



北京市書刊出

發 行 者： 新

印 刷 者： 北 京 市 印 刷

(北京市西便門內南大街乙1號)

開 本： 787×1092 1/32

1958年1月第1版

1958年1月第1次印刷

印 張： 1 1/2

字 數： 33,000

印 數： 4,450

統一書號： 15051·86

定 價： (9) 2 角 2 分

科学普及出版社出版

从飞机、导彈說到生产过程的自动化	錢学森著	0.10元
坦克	李 霖著	0.11元
海軍艦艇	陈書麟著	0.18元
雷达	陶望平著	0.21元
潜水艦	陈書麟著	即 出
导彈	史超礼著	.17元
火箭和人造衛星	史超礼著	0.10元
空軍和防空軍怎样打仗	楊 青著	0.23元
居民防御原子武器常識	警 鉄著	0.15元
噴气飞行	И. А. 密尔庫洛夫著	0.14元
直升飞机	П. К. 巴叶夫著	0.17元
飞机怎样飞行	А. А. 日阿波罗夫著	即 出
电工基础知識	刘格馬等著	0.50元
人造衛星	Ф. 齐格尔著	0.35元
人造衛星問題解答(第一集)	科学普及出版社編	0.29元

新华書店發行

V271.9
5801

目 次

緒言	1
为爭取提高飞行速度而斗争	1
噴气式發动机是怎样工作的	4
高速發动机	6
噴气技术的誕生	7
液体噴气式發动机	10
冲压式空气噴气式發动机	12
渦輪噴气式發动机	17
为克服音障而斗争	22
噴气式飞机的最初几次飞行	26
今日的噴气式飞机	31
自动控制的飞机	44
原子能在航空中的应用	47
結束語	50

緒 言

不久以前，活塞式內燃機是航空中所應用的唯一類型的發動機。按照這種原理工作的發動機，我們在汽車上、拖拉機上、內燃機輪船上、汽艇上都可以看到。近幾年來，在航空中，尤其是在軍用航空上廣泛地採用着一種新型的發動機——噴氣式發動機。

噴氣技術的出現究竟在航空中引起了哪些新的變革呢？噴氣式發動機是怎樣工作的？為什麼它能使飛行速度達到空前未有的程度呢？噴氣式飛機的飛行和一般飛機的飛行有什麼不同？當看到從空中迅速飛過的無螺旋槳的銀白色飛機的時候，有許多人會提出幾十個類似以上這樣的問題。

噴氣航空技術在蘇聯獲得了越來越廣泛的應用。本書就要談談這個技術部門的成就及其特點和發展道路。

為爭取提高飛行速度而鬥爭

速度高，這是空中交通工具首先不同於其他交通工具的地方。現在已經制成了比音速還快的飛機。這是科學和技術上的巨大勝利。為了獲得這一勝利，曾經克服了不少的困難。

增加飛行速度的主要障礙，是飛機運動時所受到的空氣阻力，隨着速度的增加，空氣阻力就不斷地增大。而阻力越大，用來克服阻力所需要的功率也得越大。

所以，為提高飛行速度而鬥爭，首先就是要為提高航空發動機的功率而鬥爭。

第一次世界大戰以前，在航空發展的初期，飛機的飛行速

度每小时是 100 公里左右。1940 年的时候，苏联优秀的歼击机之一米格-3 的速度达到了每小时 630 公里。

速度如此增长，是由于把航空发动机的功率提高到 20—25 倍的结果。

另外，飞机外形的改良，对飞行速度的增加也起着很大的作用。

研究各种物体在空气中运动时所产生的力的科学，叫做空气动力学。这门科学的奠基者是俄国科学家茹可夫斯基，列宁称他为俄罗斯航空之父。

科学家确定，空气阻力以运动着的物体的大小、形状、空气密度和运动速度为转移。空气阻力的增大是和飞行速度的平方成正比的。由此看来，使飞机运动的拉力也应该和飞行速度的平方成正比增大。因此，要想把飞机速度提高到原来的 2 倍，那就需要把发动机拉力增大到原来的 4 倍。

飞机运动所需功率等于拉力和速度的乘积。由此可知，功率的增大是和速度的立方成正比的。

因此，要想提高最大速度，例如，要把双发动机旅客机的速度从每小时 400 公里提高到每小时 800 公里，那就需要把它的发动机的功率增大到原来的 8 倍。譬如说，这架飞机的发动机的总功率是 2,000 马力，那末，要想把它的最大速度提高到原来的 2 倍（飞机的形状和重量不变），就需要有一个功率为 16,000 马力的发动机装置。

但增大功率，就必然要引起动力装置重量的增加。带空气螺旋桨和辅助机件的现代活塞式航空发动机，即所谓螺旋桨发动机装置，每一马力大约有 0.5 公斤的重量。这就是所谓动力装置的比重。因此，当发动机功率从 2,000 马力增大到 16,000 马力的时候，它的重量就要从 1 吨增加到 8 吨。但是这样的结

果，又势必要求增大机翼和尾翼的面积，而飞行器尺寸的增大又必然导致空气阻力的增大。这样，就需要进一步提高动力装置的功率才行。

計算表明，为了把飞行速度增大到原来的2倍，就必须將活塞式发动机的功率提高到原来的15—20倍。燃油的消耗量也需要相应地增加。

很显然，这种飞机的生产成本是非常高的，而且是很不經濟的。因此，尽管想尽一切方法来提高飞行的速度，但是还没有一架裝有活塞式发动机的旅客机能达到每小时800公里的速度。

要进一步增加速度，那就更加困难了。飞行速度越是接近音速^①，空气阻力就越是急剧增大。这样，飞机运动所需的功率的增加已經不再是和速度立方成正比，而是要大得多了。

为了爭取提高飞行速度，就不得不在高空中进行飞行。

大家知道，随着高度的增加，空气密度就不断地减小。在12公里高空处的空气密度只有海平面的1/4，而在32公里高空处則只有海平面的1/100。由此可见，随着飞行高度的增高，空气阻力就减小。因此，飞行高度如果增高，那末飞机运动所需功率將随速度的增大而緩慢地增加。例如，在接近地面时以每小时500公里的速度飞行的飞机，当它在12公里高空以每小时1,000公里的速度飞行的时候，发动机所需功率就不必增加到在接近地面时的8倍，而只要增加到原来的2倍就够了。

然而，实现高空飞行却是一件十分困难的事情。

主要困难在于，活塞式航空发动机不能在稀薄的大气層中产生出所需要的功率。活塞式发动机在一定時間內所燃燒的可燃混合气（汽油和空气的混合物）越多，它所产生的功率就越

① 在温度为15°C时，声音在空气中傳播的速度为每小时1,224公里。

大。但是，由于高空空气稀薄，随着高度的增加，发动机吸入的空气就越来越少。可燃混合气量减少，发动机的功率也就下降。除此以外，空气螺旋桨在稀薄的大气层中转动时，所“划动”的空气量比接近地面飞行时要少。由此可见，在高空飞行时，活塞式发动机的功率和螺旋桨的拉力都要减少。此外，只有飞行速度不超过每小时 800—900 公里的时候，螺旋桨才有高的效率。①

要想顺利地发展高速航空，必须创造一种轻便而紧凑的发动机，这种发动机必须能在高空及高速飞行时有效地进行工作。

这样的发动机已经制造成功了。它叫做喷气式发动机。

喷气式发动机是怎样工作的

下面是用来说明喷气式发动机工作原理的一个简单例子。在密闭容器中盛有强烈压缩了的气体（图 1，甲）。物理学告

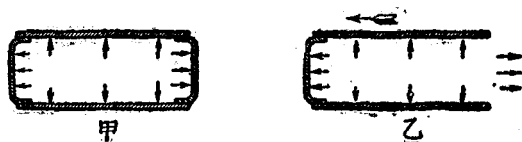


图 1 反作用力产生的情形。

诉我们，在这种情况下，气体压力是以同样大小的力作用在各个方向上，均等地分布在容器壁上的，因此容器保持不动。但是，如果我们拿掉其中一边的器壁，压缩空气就会从这个缺口向外冲出。这样一来，作用在缺口对面的器壁上的气体压力已不再能保持平衡了，容器便开始运动起来（图 1，乙）。这就是所谓反作用力。

① 效率表明在所消耗的能量中有多大一部分转变成有效的功。

例如，当發射槍炮的时候，我們就会碰到类似的现象。凡是射击过步槍或手槍的人，都知道后坐力。在發射的时候，火药气体以巨大的力均等地作用在各个方向上。火药气体的压力作用在子彈上，結果就把子彈从槍筒中射出，而作用在彈壳底部的压力就是后坐力的原因。

噴气式發动机就是按照这一原理工作的。

噴气式發动机的主要部分是燃燒室。燃燒室壁上有一个供气体流出用的排气口。为了增大气体流出时的速度，并使流动更加暢利起見，在排气口上安裝有一个噴口——往外逐漸扩大的管子（圖2）。

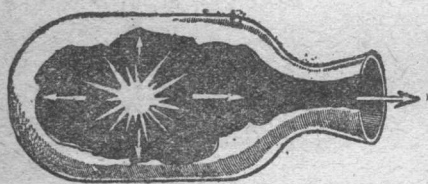


圖2 燃燒室。

所有的热力發动机——蒸汽动力裝置、活塞式內燃机、燃气輪机和噴气式發动机——都是利用化学变化所产生的能量进行工作的。

發动机的类型取决于發动机中的气体膨脹轉变为有效功的方法，取决于由哪些机构来承受气体压力。

大家知道，在活塞式發动机中，气体压力是由活塞来承受的。活塞上的压力通过連杆傳遞到曲軸上，曲軸又轉动某种机构，如飞机上的空气螺旋槳、輪船上的推进器、汽車上的車輪、拖拉机上的履帶。这种机构就叫做推进器。推进器和周圍环境——空气、水或土地——相互作用的结果，产生出为运动所必需的拉力来。

噴气式發动机却不是这样。在这里，作用在燃燒室壁上的气体压力，并不需要任何中間机构，就能产生出裝有噴气式發动机的飞行器所必需的推力来。

如圖 1 所示的容器是難以形成很大的壓力的，因為開口過大，這樣氣體就自由地通過開口流出。至於在噴氣式發動機上，氣體流出口的寬度比燃燒室本身的直徑要小得多。

利用特種儀器——像彈簧秤那樣的測力計——很容易測量出噴氣式發動機的推力來。

用計算的方法也可以算出推力來。在數值上，推力等於 1 秒鐘內從發動機噴口流出的氣體的質量和流出速度的乘積。

高 速 發 動 機

噴氣式發動機是一種高速發動機。

比方說，這裡有一具 100 公斤重的噴氣式發動機，這發動機每秒鐘所燃燒的液體燃料達 15 公斤，燃氣從噴口流出的速度為每秒鐘 2,000 米。

計算表明，這發動機的推力大約等於 3,000 公斤，並且在任何飛行速度下都保持恒定。

那末它的功率是多少呢？

噴氣式發動機的功率和飛行速度有關。飛機飛得越快，噴氣式發動機所產生的功率就越大。

當飛行速度為每小時 900 公里的時候，發動機的有效功率是 10,000 馬力。而當飛機以每小時 2,700 公里的速度飛行時，這個發動機所發出的功率則增至 30,000 馬力。也就是說，飛機飛行得越快，噴氣式發動機的功率就越大。

噴氣式飛行器的效率隨着飛行速度的增大而增長，當飛行速度增大到等於燃氣從噴氣發動機噴口流出的速度時，效率達到最大值。

對利用液體燃料來工作的現代噴氣式發動機說來，燃燒所產生的氣體的流出速度可以達到每秒鐘 2,500 米（即每小時

9,000 公里)。因此，在这样的飞行速度下，噴气式发动机的效率将达到最大值。如果再进一步增大飞行速度时，則噴气式发动机的效率就开始降低，但是下降得并不显著。

因为噴气式飞机在飞行速度很大的时候能产生巨大的功率，所以按重量說来，它只有活塞式航空发动机的几分之一。

噴气式发动机在高空中究竟怎样动作的呢？

噴气式发动机为了产生推力，并不需要排挤空气。它是借助于燃气从噴口流出时所产生的反作用力而运动的。噴气式发动机燃燒室中的燃气压力和燃油的消耗量以及噴口的截面大小有关，而和外部的压力无关。由此可知，当噴气式发动机升到空气稀薄的高空的时候，虽然外面的空气压力已經減小了，而燃燒室內部的气体压力却仍然可以保持不变。这样，燃燒室內外压力差就增大了，因而噴气式发动机的推力也就相应地增加了。所以，当高度增加的时候，噴气式发动机的效率不仅不会降低，甚至还会稍有提高。

由此可見，噴气式发动机是完全符合現代航空发动机的基本要求的。

噴气技术的誕生

最簡單的噴气式发动机，就是人所共知的火药火箭。

关于火药火箭的記載，在各个民族的历史中都可以看到。远在兩千多年以前，最早發明火药的中国人，在同敌人作战和圍攻堡壘时成功地利用了“火箭”——軍用火箭。这种火箭以其帶火焰的尾巴和声响来使敌人的軍隊感到恐惧，这样就往往把敌人吓退了。中国人也曾經使用过用弓来發射的燃燒火箭。

17世紀以后，火药火箭在俄国获得了广泛的应用。18世紀在印度就有了以軍用火箭装备的特种火箭部队。英国人从印度

人那里得到了关于噴气式武器的啓發。到19世紀，在欧洲各个国家已經广泛地应用軍用火箭。

作为軍用武器而誕生的火箭，經過了一段漫長而复杂的历程之后，才逐漸發展成今日的强大的航空發动机。可以說，噴气式發动机比活塞式內燃机既年長，又年輕。說它年長，是因为火箭是最簡單的噴气式發动机，并且在活塞式發动机出現以前很久它就發明了。說它年輕，是因为能够保証飞机飞行的噴气式發动机，还是在10—15年以前才出現的。

最先明确提出和論証了应用噴气式發动机来作飞行的想法的人是民粹派革命家基巴勒契奇。当他被判处死刑关在獄中的时候，他將自己一生中最后的时日献給了火箭飞行器的設計。然而基巴勒契奇的这一設計，一直被幽禁在警察机关的档案庫中，直到1917年才重見天日。1918年，設計的全文在“史实”杂志上第一次發表了。

在19世紀，有不少其他發明家試圖应用噴气式發动机来作飞行。但是，实际应用这样的發动机来供人类飞行，却遭到了很大的困难。因为那时还没有科学理論能帮助制造出輕便而可靠的大功率的噴气式發动机。

这一理論的基础是由卓越的俄国科学家康斯坦丁·爱都阿尔多維奇·齐奥尔科夫斯基的著作所奠定的。1898年8月，这位謙遜的、不出名的、卡魯加城的教师，在世界上第一次作出了噴气式發动机的計算。过了5年，也就是在1903年，“科学評論”杂志上才刊載了齐奥尔科夫斯基的“用噴气式器械来探測宇宙空間”的卓越著作，这一著作在俄国和世界技术发展上开辟了新紀元。齐奥尔科夫斯基在这一著作中从理論上証明，利用火箭，不仅可以在空气中飞行，而且还可以在真空的宇宙空間中飞行。

齐奥尔科夫斯基从数学上研究了火箭的飞行，从而得出了火箭运动的公式。他用确切的数学语言列出了描写火箭飞行这一物理现象的方程式。由这个方程式可以得出结论：喷气式发动机喷出的气流速度越大，火箭总重量中燃料所占的重量越大，则火箭飞行的速度就越大，因而航程也就越长。换句话说，增大火箭速度和射程的关键，在于提高气流速度和降低火箭本身相对于燃料的重量。

在过去，是用火药作为火箭的燃料的，这种燃料燃烧得非常迅速，但发出的能量并不多。齐奥尔科夫斯基曾建议利用更有效的液体燃料，并且拟定出利用液体燃料来工作的火箭发动机的设计方案。他研究出了连续供给发动机，以液体燃料的供油系统以及可靠的散热方法。他解决了喷气式发动机构造上的全部主要问题。

齐奥尔科夫斯基的学生和继承者柯斯莫捷米扬斯基教授公正地说：“想到应用火箭来解决科学问题，运用反作用原理来推动星际飞船，这都应该归功于齐奥尔科夫斯基。他是现代远射程液体火箭的创始人，他和其他科学家共同创造了理论力学新的一章。”

航空理论的奠基者茹可夫斯基在反作用运动理论方面作出了重大的贡献。远在1882年所发表的“论液体流出和流入的反作用”一文中，他就首先在科学界中得出了用来计算液流反作用力的公式。茹可夫斯基在最后的一些著作中详细地研究了流动液体的反作用，并得出计算液流效率的公式。

一些国外的科学家也曾研究过反作用运动理论的问题。1913年，法国科学家彼尔特拉发表了关于反作用运动的有价值的著作。美国果达德教授在1919年发表的关于借助于喷气式发动机到达高空的著作，以及德国科学家奥贝尔特的研究工

作，都是很有名的。

反作用运动理論的研究工作，在最近几十年特別广泛地得到了开展。在苏維埃时期，齐奥尔科夫斯基的生活和活动得到了十分美好的环境。他在1917年到1935年（他在这一年死去）間所發表的科学著作，比他在沙皇时期的全部著作要多3倍。齐奥尔科夫斯基是許多献身于噴气技术的苏联科学家和工程师的导师。

液体噴气式發动机

齐奥尔科夫斯基的著作是整个現代噴气技术賴以發展的理論基础。目前利用液体燃料的噴气式發动机，即所謂液体噴气式發动机，就是根据他的研究制造出来的。

这种發动机，尤其是在研究的最初几年，首先是預备安装在火箭上用的。因此，人們常常称它为火箭發动机。

液体噴气式發动机的主要部分是燃燒室（圖3）。燃油在燃燒室中和氧化剂起化学反应，同时放出大量的热把燃燒产物加热并使它膨胀。燃燒时所形成的燃气的体积越大，温度越高，那末噴气式發动机所产生的推力就越大。

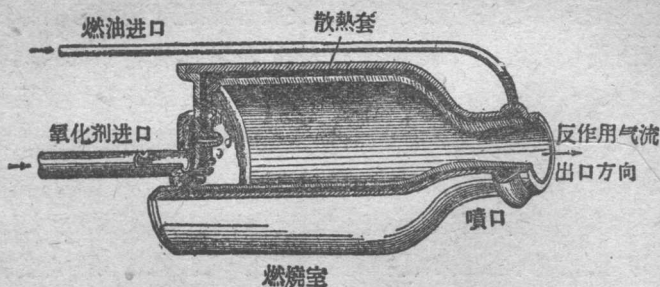


圖3 液体噴气式發动机的燃燒室。

液体燃料噴气式發动机所用的燃油和氧化剂通常并称为燃

料。对燃料的第一个要求是，要能在燃燒时放出大量的热。燃料的密度对航空用液体噴气式發动机說来也是極其重要的。燃料密度越大，燃料箱中所盛放的燃料就可以越多（按重量來說），因而航程也就越远。除此之外，燃料必須适合于用来使發动机冷却，并且对發动机的零件不起腐蝕作用。

最适宜于液体噴气式发动机的燃油是煤油、酒精和联氨，因为这些燃料在燃燒时能放出大量的热，并且价值便宜，用法簡單。

噴气式發动机常常采用液体氧作为氧化剂。虽然它的成本較低，然而为了使它能以液体状态儲存在飞机中，必須把它盛在温度低于攝氏零下 180° 的燃料箱里。其他的氧化剂，如硝酸和过氧化氢（它們含有大量的氧气）等，也可以采用。

噴气式發动机燃燒室的温度依燃料的种类和工作状态而定，最高可达攝氏 $4,000^{\circ}$ 。因此必須对燃燒室壁和噴口进行冷却。利用燃料本身来冷却是很好的办法，当燃油注入燃燒室以前，讓它先通过噴口和燃燒室的散热套，从外面来使器壁冷却。

在液体噴气式發动机中，燃气压力通常都不下于 20—30 个大气压。因此，要把液体燃料送入發动机，就必须用 40—50 个大气压才行。最簡單的供油方法是利用压缩气体，这种气体从特种气瓶中放出，进入燃料箱中，把燃油和氧化剂排出来，通过供油系統的导管而送入燃燒室里去。

液体噴气式發动机的另一种供油方法比較复杂，然而比較完善。在燃料供給系統中安上一个高效率的供油泵，它使燃油和氧化剂在进入燃燒室以前获得必需的压力。供油泵是由特种的渦輪帶動的。在这种情况下，盛燃油和氧化剂的油箱壁就不致承受像利用压缩气体来供給燃料时那样高的压力了。这就有可能减少油箱重量而增加燃料的儲备量。

噴氣式發動機工作中非常重要的因素是它的起動。蘇聯科學家已提出了利用自然混合氣的妥善的點火方法。

製造液體噴氣式發動機的工作遠在 30 年代就開始了。在蘇聯，第一台液體噴氣式發動機是由熱衷於火箭技術的臧捷爾工程師製造並試驗成功的。

在 30 年代初，蘇聯工程師季霍拉瓦夫所設計的裝有液體噴氣式發動機的气象火箭作了多次成功的飛行。1935 年，季霍拉瓦夫的火箭達到了幾十公里的高空。1936 年，按照波梁勒諾伊的設計所製成的供气象火箭用的發動機顯示了一些良好的結果。

1931 年在德國曾進行了維克列爾、里杰爾以及其他德國設計師們所設計的火箭的試驗。同年，在美國，果達德教授也進行了液體噴氣式發動機的第一次試驗工作。

多年來，由於對液體噴氣式發動機的製造進行了長時期的研究，這種發動機已經達到了非常完善的地步。現代的液體噴氣式發動機的重量只有 100 公斤多些，卻能發出將近 10 噸的推力來。這就是說，當飛行速度為每小時 5,000 公里的時候，它能發出將近 200,000 馬力的有效推進功率。這樣的發動機每公斤重量大約有 2,000 馬力，這比裝有空氣螺旋槳的最好的活塞式發動機要大 1,000 倍！

冲压式空氣噴氣式發動機

裝有液體噴氣式發動機的飛機能產生巨大的速度，這樣的速​​度是裝有其他型式噴氣發動機的飛機所不能達到的。然而，液體噴氣式發動機需要大量的氧化劑，這樣就加重了這種噴氣式發動機的載荷，從而大大地降低了它的續航能力和航程。因此擺在科學家和工程師面前的任務是製造不需要自己儲備氧化

剂而是利用周围空气中的氧气来工作的发动机。

这样的发动机已经制造成功了。1929年，苏联科学家斯切契金教授（现为科学院院士）研究出了利用大气作为氧化剂的喷气式发动机理论。这种发动机就叫做空气喷气式发动机。

让我们来看一看这种发动机的最简单的型式（图4）。这种空气喷气式发动机是一个流线型、雪茄形的躯体，里面有贯通的气道，气流沿着气道流动。要使发动机开动起来，就必须使发动机燃烧室的压力大于大气压力。因此进入燃烧室的空气应当预先加以压缩。不过，在这里不是利用压缩机（压缩空气的装置）来压缩空气的。

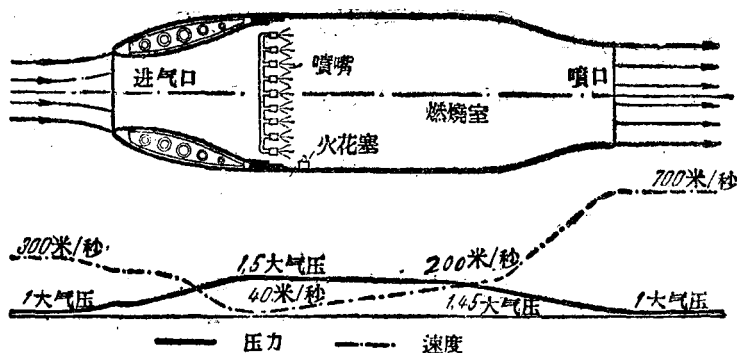


图4 亚音速飞行用冲压式空气喷气式发动机示意图。下面的曲线表示发动机内部燃气的压力和速度的变化情形。

远在18世纪，彼得堡科学院院士达尼尔·柏努利就发现了一项重要的物理学定律，就是说，当气体（或液体）沿着逐渐扩大的气道运动时，随着气体（或液体）流动速度的减小，它的压力就升高。

流入空气喷气式发动机的气流，沿着一个叫做进气口的逐