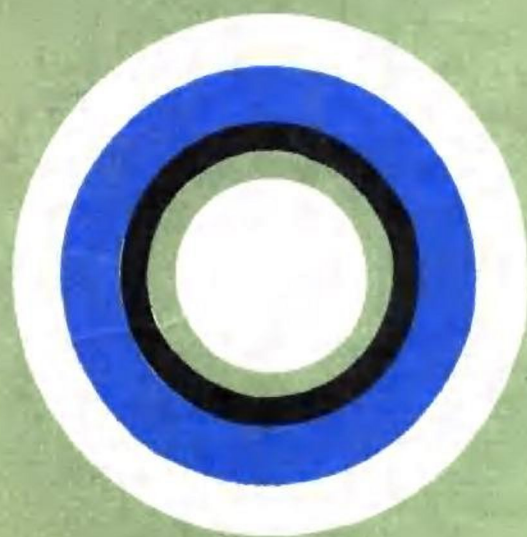


喷气发动机 基本原理

常凯本 王怀栋 译
邵福庆 校



海洋出版社

喷 气 发 动 机 基 本 原 理

常凯本 于怀栋 译
邓福庆 校

05

海洋出版社

1993 年 · 北京

(京)新登字 087 号

内 容 简 介

本书是根据美国普·惠公司 1985 年再版的“JET ENGINE FUNDAMENTALS”一书翻译的。该书是普·惠公司为用户编写的培训教材。全书共八章。前五章深入浅出地讲述了涡轮喷气发动机的基础理论;第六章概述了基础理论在喷气发动机工作中的应用;第七章介绍了部件性能的应用;第八章介绍了喷气发动机的使用要求。

本书将作为民用航空器维修人员基础执照培训喷气发动机原理的补充教材。本书可供民航广大机务维修人员阅读,也可供有关院校发动机专业师生参考。

喷气发动机基本原理

常凯本 于怀栋 译 邓福庆 校

特约编辑 吕曰恒 责任编辑 李 洪

*

海洋出版社出版发行(北京市复兴门外大街 1 号)

北京市昌平区百善印刷厂印刷

开本:1/16 787×1092 印张:6 字数:100 千字

1993 年 8 月第一版 1993 年 8 月第一次印刷

印数:1—4000

*

ISBN 7-5027-3571-2/V·10 定价:8.00 元

出版说明

《喷气发动机基本原理》是根据美国 PRATT&WHITNEY 公司 1985 年再版的“JET ENGINE FUNDAMENTALS”一书翻译的。本书是该公司为用户编写的培训教材,文中深入浅出地讲述了涡轮喷气发动机的基础理论,并将这些理论应用到涡轮喷气发动机的工作中。本书将作为民用航空器维修人员基础执照培训喷气发动机原理的补充教材而奉献给广大民航机务维修人员。

本书共八章。第一至第五章由于怀栋同志翻译,第六至第八章由常凯本同志翻译,全文由邓福庆教授校审。本书出版得到了民航局第一研究所的大力支持,在此表示衷心感谢。

由于我们水平有限,时间仓促,文中难免有误,敬请广大读者提出批评意见。

中国民航学院

1993 年 5 月

目 录

第一章	喷气“专门知识”.....	(1)
	初步介绍喷气推进,推进式发动机的类型,各类发动机的适用范围	
第二章	喷气用语.....	(6)
	术语汇编,发动机的参考站位,符号和它们的意义,符号角注	
第三章	数学工具($2+2=4$).....	(11)
	数学关系式,符号的使用,比率和它们的应用,百分率,指数和根数,曲线图和曲线,矢量 及其应用	
第四章	喷气发动机物理的回顾	(23)
	空气及其性质,空气和能量,怎样使空气做功,能量损失,运动定律,振动和应力	
第五章	喷气发动机空气动力学	(33)
	喷气发动机中空气控制,空气动力原理,压气机、发动机进气口、扩压段、燃烧室、涡轮的 空气动力学	
第六章	基础理论在喷气发动机工作中的应用	(46)
	推力的产生,影响推力的因素,效率,发动机工作循环图	
第七章	部件性能的应用	(54)
	压气机,放气和压气机失速,燃烧室,涡轮,排气管,喷气发动机润滑剂,滑油系统要求,发 动机点火系统	
第八章	喷气发动机使用要求	(70)
	燃油系统要求,喷气发动机燃油的讨论,喷气发动机仪表,研究喷气发动机使用技术,喷射 气流的管理	

附图目录

第一章

图 1-1 各个方向上压力相等	(1)
图 1-2 不相等的压力产生运动力	(2)
图 1-3 气球内压力的保持	(2)
图 1-4 用旋转气泵代替手动气泵	(3)
图 1-5 在气流中放置燃烧室	(3)
图 1-6 增加驱动压气机的涡轮	(3)
图 1-6A 典型的涡轮喷气发动机	(3)
图 1-6B 典型的涡轮螺旋桨发动机	(3)
图 1-7 增加螺旋桨、传动轴和驱动涡轮	(4)
图 1-8 加上图 1-6~1-7 就成了涡轮螺旋桨发动机	(4)
图 1-9 涵道风扇发动机	(5)
图 1-10 内外涵发动机——英国定义	(5)
图 1-11 内外涵发动机——美国定义	(5)

第二章

图 2-1 双转子发动机参考站位	(7)
------------------------	-----

第三章

图 3-1 比率应用至轴流压气机	(13)
图 3-2 一个因变量曲线图的组成部分	(15)
图 3-3 两个因变量曲线图的组成部分	(15)
图 3-4 确定曲线的斜率	(16)
图 3-5 有变化斜率的曲线	(16)
图 3-6 有变化斜率曲线的例子	(17)
图 3-7 阅读曲线的技术方法	(18)
图 3-8 箭头和矢量的差别	(18)
图 3-9 速度矢量的应用	(19)
图 3-10 力矢量的应用	(19)
图 3-11 速度的矢量差	(19)
图 3-12 力的矢量差	(19)
图 3-13 矢量分量	(20)
图 3-14 矢量分量应用的具体例子	(20)
图 3-15 求出合矢量	(21)
图 3-16 非直角的矢量	(21)

第四章

图 4-1 空气有重量	(23)
图 4-2 空气是可压缩的	(24)
图 4-3 温度表征分子运动速度	(24)
图 4-4 在定压下给空气加入能量	(25)
图 4-5 每秒容积的解释	(27)
图 4-6 给流动空气加入能量	(27)
图 4-7 伯努利定理的图解	(28)
图 4-8 分子流动摩擦	(29)
图 4-9 用矢量说明反作用定律	(30)

图 4-10	转子转速和离心力	(31)
图 4-11	金属强度和温度	(32)
图 4-12	金属强度中温度的积累效应	(32)
第五章		
图 5-1	发动机管道外壁	(33)
图 5-2	发动机管道内壁	(34)
图 5-3	压气机压力倍增	(34)
图 5-4	翼型上分子组成的空气流动情况	(35)
图 5-5	表明压气机旋转作用的矢量图	(36)
图 5-6	表明进气导向叶片作用的矢量图	(37)
图 5-7	表明第一级转子叶片作用的矢量图	(37)
图 5-8	表明第一级静子叶片作用的矢量图	(38)
图 5-9	表明第二级转子叶片作用的矢量图	(38)
图 5-10	完整的压气机级流动矢量图	(39)
图 5-11	压气机各级的面积变化	(40)
图 5-12	低速通过锐边孔	(40)
图 5-13	高速通过锐边孔	(41)
图 5-14	低速通过圆角孔	(41)
图 5-15	静态工作的钟口形进气道	(42)
图 5-16	飞行适用型进气道	(42)
图 5-17	燃烧室空气分配	(43)
图 5-18	涡轮级压力降低情况	(43)
图 5-19	转子轮毂至叶尖速度不同,要求相同的轴向出口速度	(44)
第六章		
图 6-1	进口面积和空气重量流量	(46)
图 6-2	速度变化	(47)
图 6-3	空速对推力的影响	(48)
图 6-4	空气温度对推力的影响	(49)
图 6-5	空气压力对推力的影响	(49)
图 6-6	高度对推力的影响	(50)
图 6-7	冲压对推力的影响	(50)
图 6-8	发动机压力-温度图	(52)
图 6-9	发动机压-容图	(52)
第七章		
图 7-1	离心式压气机的主要部件	(54)
图 7-2	轴流式压气机部件	(55)
图 7-3	轴流式压气机系统	(55)
图 7-4	双转子轴流式压气机系统	(56)
图 7-5	高度推力递减率	(57)
图 7-6	发动机横截面积	(57)
图 7-7	典型的筒形燃烧室组件	(59)
图 7-8	筒形燃烧室	(59)
图 7-9	环形燃烧室	(60)
图 7-10	典型的筒环形燃烧室	(61)
图 7-11	筒环形燃烧室火焰筒	(61)
图 7-12	单级燃气涡轮组件	(62)
图 7-13	冲击式涡轮转子叶片的作用	(62)

图 7-14	反力式涡轮转子叶片的作用	(63)
图 7-15	双转子压气机分开式涡轮	(64)
图 7-16	带冠的涡轮转子叶片	(64)
图 7-17	典型的喷气发动机滑油系统简图	(66)
图 7-18	典型的喷气发动机点火系统	(68)
第八章		
图 8-1	典型的燃油系统图	(71)
图 8-2	恒速控制	(72)
图 8-3	可变转速控制	(72)
图 8-4	加速和减速时的燃油流量控制	(73)
图 8-5	典型的发动机仪表示意图	(75)
图 8-6	典型的推力调定曲线	(78)
图 8-7	典型的起飞推力特性曲线	(79)
图 8-8	典型的温度-转速曲线	(79)
图 8-9	典型的进气和喷气尾流危险区域	(81)
图 8-10	假想的机械式反推装置	(81)

第一章

喷气“专门知识”

喷气“专门知识”，或者喷气发动机是如何产生推力的基本原理，是灵活排除各类燃气涡轮发动机故障所必需的知识。因此，本章专门进行喷气推进和推进发动机的一般性讨论。在讨论中有意地对一些复杂问题进行某些简化，以介绍一些容易理解的知识，在此基础上才易于理解后面各章。

喷气涡轮的运动就像一个玩具气球。谁都知道，如果我们把一个气球吹胀起来，拿在手中，然后突然松开球嘴，它就会以一个很高速度飞行几秒钟。

气球的这种运动并不是从球中喷出来的空气反作用于外部空气而产生的。

当一个气球被吹胀后，作用于球内壁上的空气压力要大于球外空气压力。当球嘴被扎紧后，球内各个方向的空气压力是相等的，这时气球不会运动（图 1-1）。

如果我们把这个气球放在真空中并松开球嘴，很明显，喷出的空气在真空中没有任何东西可以反作用。但是气球仍然像在正常大气环境中一样向一个方向运动。这是如何发生的呢？

开球嘴时，在球嘴附近球的内侧壁面上空气压力降低了。然而在与球嘴相对的球内壁面上，空气仍作用在一个相等的面积上，正是球内壁两边相对的空气压力差使气球向着喷气的反方向运动（图 1-2）。

由于气球内压力很快降低，所以气球的飞行时间很短。这个问题可以用向气球内不断注入压缩空气的方法去解决，即用一个自行车打气筒不停地向球内充气，以维持球内的压力和空气流量。现在我

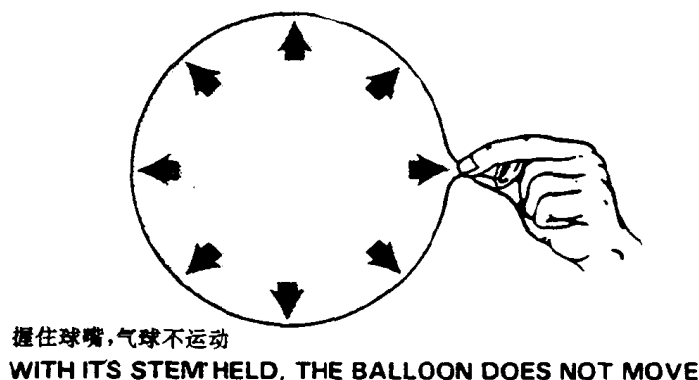


图 1-1 各个方向上压力相等

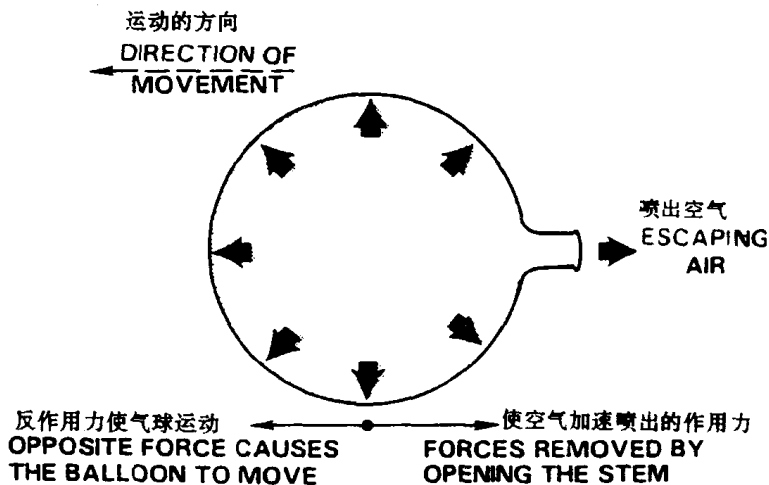


图 1-2 不相等的压力产生运动力

们已经完成了一个喷气发动机，它使用了推动飞机的动力装置的全部原理(图 1-3)。

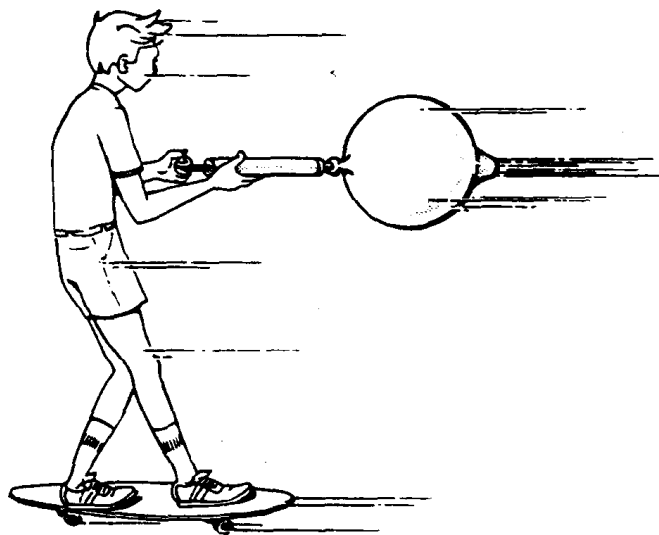


图 1-3 气球内压力的保持

用一连串的风扇即压气机代替手动气泵，如果压气机高速旋转，使大量空气通过气球，同时气球里保持很大压力，那就将这种装置转变为独立的喷气发动机了(图 1-4)。

把一个燃烧室放在气流中，用来提供能量。燃料燃烧后，空气的温度迅速提高，而空气微粒团的体积大大增加。因为压气机的压力阻挡了空气向前流动，所以空气只能向后面限制较少的出口流动(图 1-5)。

在加热的空气通道里安装一个风车(涡轮)，这些能量被用来旋转涡轮，涡轮又通过一根中间连接轴带动压气机转动。当通过排气管排出热燃气时，能量就被消耗掉了(图 1-6)。

现在这个转换过程已经完成了，只要有燃料燃烧，我们的气球“喷气发动机”就可以运转了。

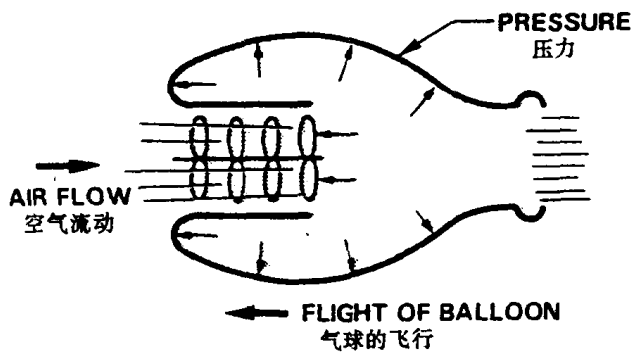


图 1-4 用旋转气泵代替手动气泵

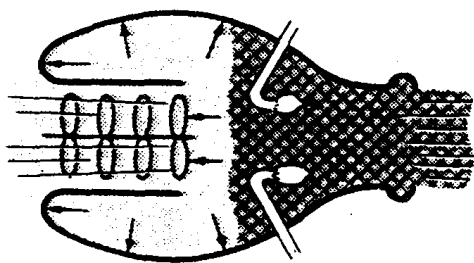


图 1-5 在气流中放置燃烧室

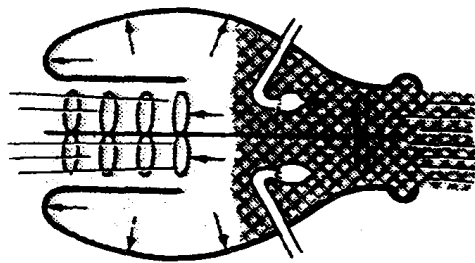


图 1-6 增加驱动压气机的涡轮

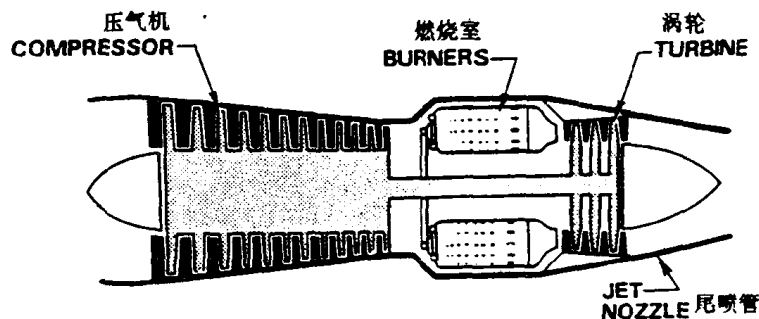


图 1-6A 典型的涡轮喷气发动机

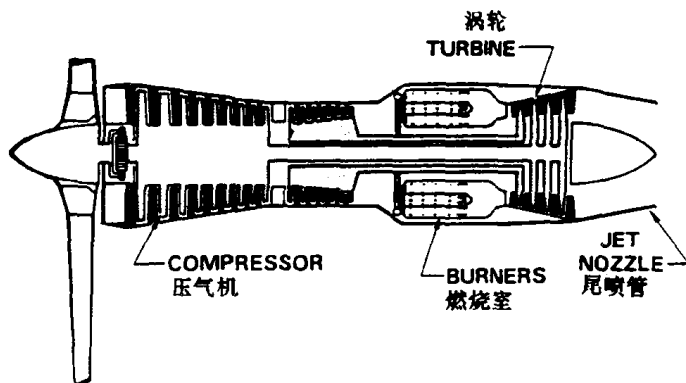


图 1-6B 典型的涡轮螺旋桨发动机

从涡轮喷气发动机到涡轮螺旋桨发动机

当涡轮型发动机通过一根驱动轴提供动力带动螺旋桨时，它被称为涡轮螺旋桨发动机。在这种情况下，它可以用来驱动螺旋桨，也可以用来驱动直升机的旋翼。这两种方案现在和过去都被用到了飞机设计中。

在图 1-7 所示的这个简单气球的例子中，我们可以看见放到气球喷嘴处的风车由喷出的空气带动它旋转，同时它又能通过一根连接轴驱动一个螺旋桨（或其他机械装置）转动。实际上，涡轮螺旋桨发动机利用了与涡轮喷气发动机相同的基本部分，这就是压气机、燃烧室和涡轮，除此之外，还有驱动螺旋桨的装置。

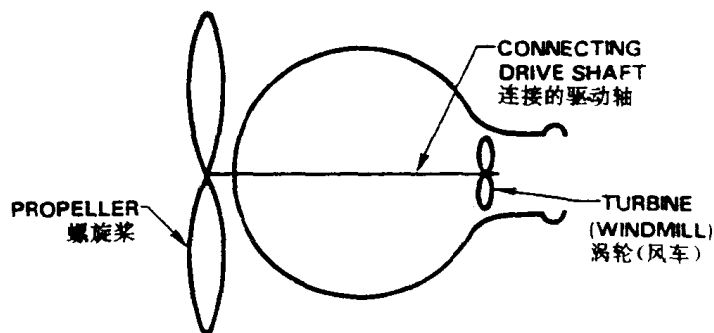


图 1-7 增加螺旋桨、传动轴和驱动涡轮

再看气球的例子（图 1-8），它说明了涡轮喷发动机的基本原理。涡轮螺旋

桨发动机的工作与涡轮喷气发动机相同之处在于压气机（风扇）都在高速旋转，压缩大量空气。压缩后的空气与燃料混合在燃烧室里被点燃，气体的温度迅速上升，增加了空气微粒间的间距。然后，在涡轮喷气发动机里气体向后流动转动涡轮。这里，涡轮喷气发动机和涡轮螺旋桨发动机的不同之处变得显而易见。为了提供能量驱动压气机转动，附加的涡轮需要从空气中吸取能量。因为大部分能量被用来驱动螺旋桨，只剩下很少一部分能量作为喷气推力。

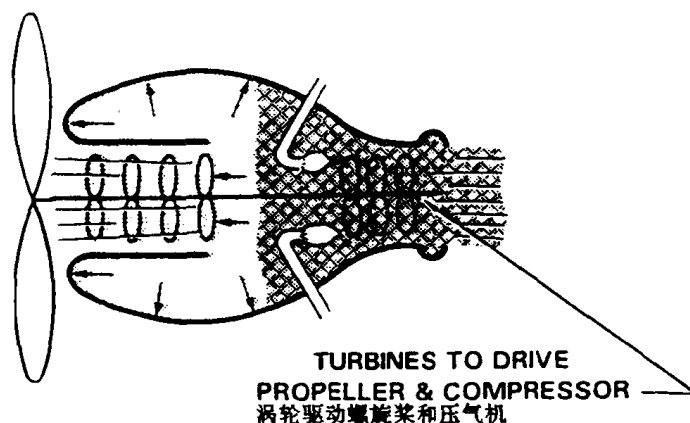


图 1-8 加上图 1-6~1-7 就成了涡轮螺旋桨发动机

其他类型的推进发动机

在理论上，燃气涡轮发动机的涡轮风扇型和涡轮螺旋桨型发动机是相同的，只是齿轮连接的螺旋桨被封闭在涵道中的轴流式风扇所代替，风扇被驱动以发动机转速转动(图 1-9)。这种发动机，只有 30%~60%^①的可用推进能量转移给风扇，假设在三种类型发动机中使用相同的燃气发生器构件，则涡轮风扇发动机的推进效率和燃油消耗率介于涡轮螺旋桨发动机和涡轮喷气发动机之间。如果把燃气涡轮发动机的涡轮连接到一根传动轴上，压气机也连到这根轴上，涡轮除了驱动螺旋桨外还可驱动其他装置，如直升机的旋翼，或地面空气压缩机装置，这种发动机就称为轴涡轮或涡轮轴发动机。

涡轮风扇发动机(或涵道风扇发动机)和内外涵发动机的定义是相当容易弄混的，无论是在国内或国外。例如，在英国，说内外涵发动机是一种把总气流分为两部分的发动机(图 1-10)。这种说法与美国的许多公司意见不一致。英国对涡轮风扇发动机或涵道风扇发动机有它自己的定义。为了明确起见，普拉特—惠特尼公司正努力使各种类型发动机的说明书趋向标准化。

根据普拉特—惠特尼公司的定义，涡轮风扇发动机和涵道风扇发动机是一种通过涵道控制的发动机，当外涵气流进入发动机时，被风扇进行了机械压缩。涡轮风扇发动机被分成混合排气发动机和非混合排气发动机。普拉特—惠特尼公司把内外涵发动机定义为外涵道气流只受冲压的发动机(图 1-11)。这种配置需要燃料在外涵道气流中燃烧，和常规发动机在加力燃烧室中复燃产生附加推力的方法一样。内外涵发动机的工作特性与涡轮风扇发动机是有区别的。

各类发动机的适用范围

从第一次动力飞行开始，对于飞机动力装置的前景和构造一直进行着激烈争论。活塞发动机、涡轮螺旋桨发动机、涡轮喷气发动机、冲压式喷气发动机和火箭发动机，这些发动机都有它的特殊应用和最适用的范围。活塞发动机长期作为中低空和中低速运输动力，它的体积和马力均已达到了顶点。

涡轮螺旋桨发动机飞机的速度相对地快，可以在中空和中航程飞行及在短跑道上起飞，显露了大载重的经济运输的优势。

涡轮喷气发动机的高效率适用于高空和高速飞行，因此在高空和高速军用飞机和远程运输机及航线客机获得了市场。

冲压式喷气发动机特别适用于高空和高速，但是为了使发动机能够启动和运转，必须在启动前提

① 目前高涵道比涡轮发动机可高达 80%。——译者注

供具有足够流动速度的气流。所以冲压式喷气发动机可以考虑用作特种用途动力装置,能够与多数常规的涡轮喷气发动机联合使用,作为它们的补充。

火箭发动机的应用是众所周知的,也是多种多样的,从给用其他装置推进的常规飞机提供起飞助推到把地球卫星送到预定空间并达到预定速度。火箭的未来应用实际上是无限的。

上面的各种类型发动机,在速度上和高度上都有一定的有效范围,每种发动机在其有效范围内使用是最经济和效率最高的。但是有一些范围是重叠的,在涡轮轴发动机和活塞发动机工作更经济的范围内,不应使用涡轮喷气发动机。在涡轮喷气发动机提供更好或更经济推力的范围内,不应使用冲压式喷气发动机。当其他类型发动机工作很好的时候,不应使用火箭发动机。尽管一个给定的飞行任务对此准则会有例外,但是在发动机选择上经济是最重要的考虑因素。

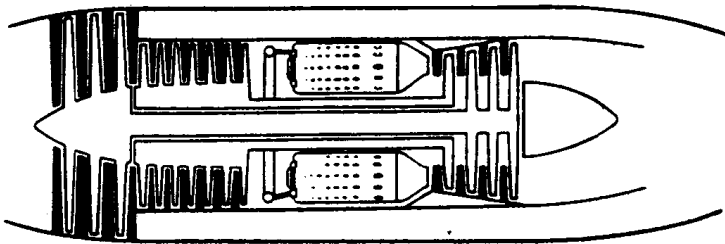


图 1-9 涵道风扇发动机

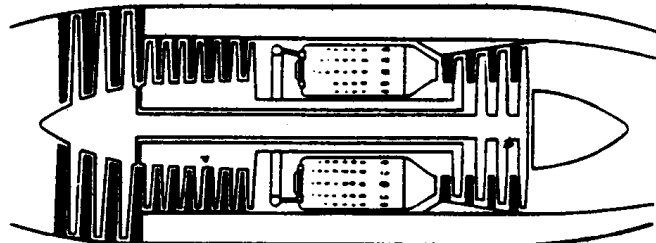


图 1-10 内外涵发动机——英国定义

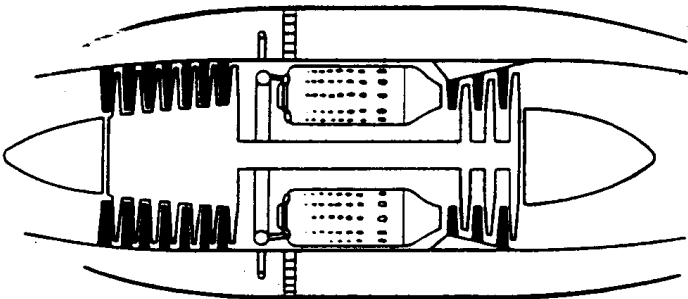


图 1-11 内外涵发动机——美国定义

第二章

喷气用语

现在你已被卷入了这个新的喷气时代,我们希望下面这个常用的术语和符号的部分汇编,以及发动机上一些参考站位和它们的位置,将证明对你们是有用的。

不打算或者说不指望通过这些简单的定义完全理解这些术语和符号。我们只试图介绍它们,使你们熟悉,以便在后面各章广泛使用时能够理解所讲的内容。

术语汇编

下面这些术语的排列不是按字母顺序,而是根据它们之间的相互关系进行的。

做功——一个力作用通过一段距离。

扭矩——力乘以垂直于轴的杠杆臂。

能量——做功的能力。

功率——做功的效率,即单位时间所做的功。

马力——人造的功率单位,相当于一分钟内把一磅^①重量举到 33 000 英尺^②高度所做的功。

惯性——当物体的静止或运动状态被改变后,还将保持原来状态的特性。

动量——处于运动状态的物体,继续保持运动的一种趋势。

离心力——当一个物体做旋转运动时,它施加在约束物体上的向外的力。

向心力——当一个物体做圆周运动时,约束物体施加给它的指向圆心的力。这个力与离心力大小相等,方向相反。

分子——存在并保持物质一切特性的物质最小微粒。

质量——一个物体内部所包含的物质总量。

密度——单位体积的质量。

环境——有关发动机周围存在的大气条件,如环境压力或温度。

比热——一种物质的热容量与水的热容量之间的比值。

推力——以磅为计量单位的反作用力。

总推力——在不考虑气团初始具有的动量的情况下,发动机所产生的推力。

静推力——和总推力一样,由于发动机的静止状态,气团无初始动量时的推力。

净推力——飞行中发动机产生的有效推力,考虑了气团在进入发动机之前的初始动量对发动机的影响。

推力耗油率——发动机产生一磅推力,每小时必须消耗的燃油。

超转——转速超过设计的 100% 转速。

超温——涡轮的出口温度超过了最大允许设计温度。

热启动——在启动时超温。

悬挂启动——在发动机启动期间未能达到正常的慢车转速。

压紧加速——油门杆的快速搬动,要求转子以最大速率增速。

① 1 磅=0.4536 公斤。——编者

② 1 英尺=0.3048 米。——编者

过渡状态——当发动机工作加速、减速或通过一个特定范围时，短时间可能出现的状态。

稳定工作——发动机的任何变量，如转速、温度或压力无明显的、有意或无意的波动的状态。

冲压——由于发动机通过空气的前进运动，在发动机压气机进口处超出外界的压力增量(空气的初始动量)。

冲压恢复——发动机进气道利用冲压的能力。

冲压比——冲压压力与外界压力的比值。

音速——在外界大气条件或当地条件下声音的传播速度。

亚音速——低于音速的速度。

超音速——超过音速的速度。

壅塞喷管——流速已达到音速的一种喷管。

反推装置——这种装置使发动机的排气部分地反向流动，从而产生一个向后的推力。

喷气消音器——这种装置用来降低由发动机尾喷管发出的低频振动，从而降低噪音因素。

矢量——用按比例的长度表示量值的一条线，箭头指示作用方向。

热电偶——两种不同金属导线对偶连接，当一端接点的温度比另一端高时，在线路中就会产生直流电压。

电压——测量电动势的单位。它是流动电流(安培)和对流动电流的电阻(欧姆)的函数。

安培——测量流动电流的单位。它与电压成正比，与对流动电流的电阻(欧姆)成反比。

欧姆——测量电流流动电阻的单位，它等于电压除以电流。

瓦特——测量功率的单位，它等于电压与电流的乘积。

焦耳——能量或做功的电单位。

发动机的参考站位

当要表示空气通过发动机在某一特定点上的空气动力学或热力学的某些特性时，利用发动机的参考站位是喷气发动机技术领域中的习惯做法。这些参考站位对于理解和表达“喷气用语”是一种非常重要的工具。图 2-1 用图解示出了这些参考站位在双转子轴流式压气机喷气发动机上的标准位置。

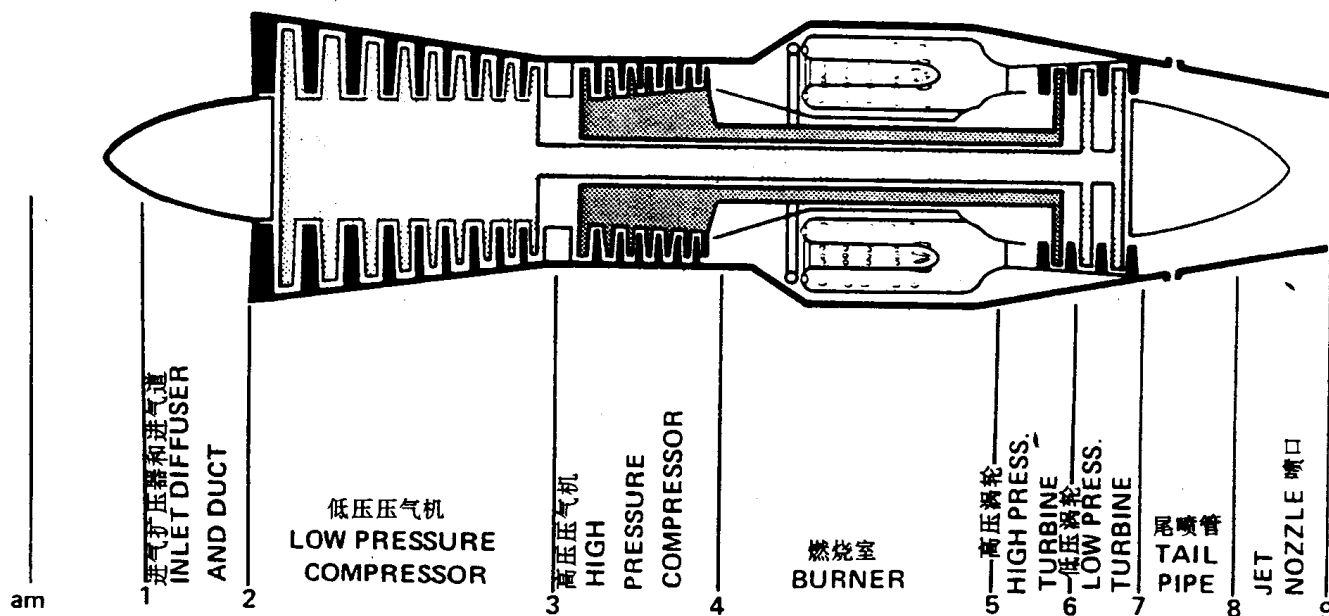


图 2-1 双转子发动机参考站位

喷气发动机的符号和它们的意义

在后面各章里你将看到,在把科学上证明的事实转换成数学关系中使用符号是极为方便的,反过来也如此。下面列出的符号是很不完全的。但它代表了大部分常用符号,你将在本教材中处处可见,也是飞行和维护中常用的一些符号。更高水平的一些科学符号在这里已被省略了,把它交给更深奥的理论作品去论述,因为它们已超出了本教材的范围。

A	面积,平方英尺(英尺 ²)
C_{bl}	引气损失修正系数
C_d	管道阻力损失修正系数
C_g	总推力系数
C_{px}	提取功率修正系数
F_g	总推力,磅
F_n	净喷气推力,磅
F_r	发动机气流的冲压阻力(进入空气的冲量)
g	重力加速度,32.17 英尺/秒 ²
hp	马力 ^①
IGV	压气机进口整流叶片
M	马赫数
N_1	低压压气机转速,rpm
N_2	高压压气机转速,rpm
P_{am}	外界大气绝对压力
P_0	标准大气海平面绝对压力
P_{t1}	进气道入口处总压力
P_{t2}	低压压气机入口处总压力
P_{t3}	低压压气机出口处总压力
P_{t3b}	低压压气机引气口处的总压力
P_{t4}	高压压气机出口处总压力
P_{t4b}	高压压气机引气口处总压力
P_{t7}	低压涡轮出口处总压力
P_{t8}	尾喷管进口处总压力
P_{t9}	飞机尾喷管出口处总压力
P_{tr}	由于冲压作用产生的总压力
P_b	燃油控制器使用的燃烧总压力
t	用华氏温标°F 表示的温度
t_{am}	外界温度,°F
t_0	标准大气海平面温度,59°F
t_{t2}	压气机入口处温度,°F
T	用兰金温标°R(°F+460)表示的温度
T_0	标准大气海平面温度,(519°R)

① 1 马力(hp)=0.746 千瓦。——编者

T	扭矩
T_{t2}	低压压气机入口处总温度
T_{t3}	低压压气机出口处总温度
T_{t4}	高压压气机出口处总温度
T_{t7}	低压涡轮出口处总温度
TAS	真空速,海里/小时
TSFC	推力燃油消耗率,每磅推力每小时所消耗的燃油磅数
v	速度 ^①
W_a	发动机空气流量,磅/秒
W_{bl}	压气机引气流量,磅/秒
W_f	发动机燃油流量,磅/小时
η	效率
γ	比热比(绝热指数), c_p/c_v

符号角注

你已注意到前面的符号在基本符号的上半部或下半部具有角注。这些角注更进一步说明了这个符号的意义。

例如 P_{t4} :

P 意思是压力,但它是什么压力,哪里的压力?

t 意思是与静压力有区别的总压力。

4 意思是发动机的基准点 #4。

因此, P_{t4} 的意思就是高压压气机出口处存在的总压力。发动机基准参考站位号数是使用最多的角注。其他一些常用角注将在下面给出。

角注

a	空气(W_a)
am	环境(t_{am})
av	平均
b	燃烧室(P_b)
bl	引气
c	压气机(η_c)
d	扩压器,管道
e	排气,出口
f	燃料(W_f)
g	总的(F_g)
i	接近入口处的初始条件
j	喷气(v_j)
n	净(F_n)
p	推进(η_p),尾喷管

^① 原书的速度符号为大写 V 。我国计量法规定速度符号应为小写 v ,现根据我国现行计量法改为小写 v ,以区别于体积符号 (V)。——编者