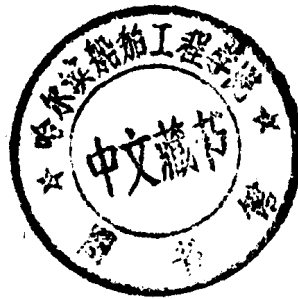


357674

航空燃气涡轮发动机

[美] 普拉特·惠特尼公司 编
周晓青 金如山 等译
周晓青 校



宇航出版社

序 言

《航空燃气涡轮发动机》,(普拉特·惠特尼工作手册 200)是提供给飞机空勤人员、维护人员和其他有关人员的一本关于这类动力装置的实用基本手册。本书描述并解释了航空喷气发动机基本原理和工作过程并提供了有助于理解不同工作状态及发动机维护的背景资料。

《航空燃气涡轮发动机》是在 1952 年作为《航空发动机及其工作》(普拉特·惠特尼工作手册 100)的续篇而首次出版的。那本书在当时是而且现在仍然是关于航空活塞式发动机的一本著名的基本手册。《航空燃气涡轮发动机》在最初编写时,主要介绍当时的离心压气机式涡轮喷气发动机。仅提到了刚开始生产的大型轴流压气机式航空燃气涡轮发动机的基本特性。该书在 1958 年彻底重写并以现在的形式出版,以后又于 1960 年、1970 年改写。1982 年版是做了一些小修订的再版本。

理解发动机如何工作,对于任何准备从事喷气发动机工作的人员都是很有用的先决条件。本书也许会满足人们的这一要求。

译 者 序

《航空燃气涡轮发动机》一书是世界三大航空发动机公司之一的美国普拉特·惠特尼公司编写的。该书集航空喷气发动机原理、结构和使用操作于一身,图文清晰,语言精练流畅,结构安排合理,实用性很强,是一本难得的好书。该书自1952年出版后,再版过三次,我们现在使用的是最新版本。

本书可供飞行员、地勤和其他从事航空喷气发动机工作的(诸如科研、计划、生产、采购、质量)科技及管理人员以及地面燃气轮机及航空发动机和工程热物理专业的大专院校的研究生、学生和教师使用。

全书由周晓青校对,译者分别为:第一章周晓青;第二章马恒儒;第三章马恒儒、于广经、周晓青、丁俊;第四章王庚;第五章金如山;第六章于广经。崔卫、宋兆武同志也为本书出版做了大量的工作。

书中不当之处,敬请读者指正。

译 者

目 录

序 言	
第一章 燃气涡轮发动机基础	(1)
引言	(1)
背景	(1)
喷气推进理论	(2)
飞机用喷气发动机	(3)
什么是喷气发动机?	(3)
涡轮喷气发动机如何工作?	(4)
为什么用推力而不用马力?	(5)
推力马力	(6)
推力的产生	(6)
质量的定义	(7)
简单喷气型发动机	(9)
涡轮喷气发动机的推力方程	(10)
净推力	(11)
总推力	(12)
推力从何而来	(13)
推力的实际测量	(14)
影响推力的因素	(14)
喷管燃气速度	(15)
空气速度	(15)
空气质量流量	(16)
空气密度以及温度和压力的影响	(16)
高度影响	(17)
冲压影响	(17)
飞机用喷气发动机的类型	(18)
涡轮喷气发动机	(18)
涡轮螺旋桨和涡轮轴发动机	(19)
涡轮风扇发动机	(21)
带加力燃烧室的喷气发动机	(23)
各式各样的反作用式发动机	(25)
冲压喷气发动机	(25)
脉冲喷气发动机	(26)
火箭发动机	(27)
第二章 燃气涡轮发动机术语	(29)
空速、马赫数和节	(29)
能量和效率	(30)
发动机各站的定名	(31)
当量轴马力(仅适用于涡桨发动机)	(33)
燃气发生器	(34)
字母和符号	(34)
百分数转速	(36)
压力、压力测量和压比	(37)
压力测量	(37)
压 比	(38)
燃油消耗率	(38)
推力燃油消耗率	(38)
当量燃油消耗量	(39)
标准大气状态	(39)
标准日	(40)
亚音速、音速和超音速气流	(40)
扩压器和扩压	(41)
温度、热、温度测量和温度比	(42)
温度和热	(42)
温度测量	(43)
静温和总温	(44)
温度比	(44)
第三章 燃气涡轮发动机部件	(46)
空气进气道	(46)
概 述	(46)
单进口进气道	(46)
吹气门	(47)
分隔进口式进气道	(48)
超音速飞机的几何可调进气道	(48)
涡桨发动机的进气道及减速齿轮箱	(49)
钟型压气机进气道	(50)
压气机进口网罩和空气粒子分离器	(50)
发动机进气段	(51)
涡扇发动机风扇段	(52)
压气机	(53)

离心压气机	(54)	燃油控制杆	(87)
轴流压气机	(55)	燃油控制器的功能及特性	(87)
双转子轴流压气机	(57)	涡轮螺桨和涡轮轴发动机的燃油控制器	
压气机喘振及压气机放气	(59)	(以及涡轮螺桨发动机的螺桨控制器)	
可调角度的压气机静子	(60)	(89)
扩压段和放气	(60)	润滑系统	(91)
燃油总管及喷咀	(61)	点火系统	(92)
燃烧段	(61)	点火器火花塞	(94)
单管燃烧室和复合单管燃烧室	(62)	发动机冷却	(95)
环型燃烧室	(63)	喷水系统	(97)
环管型燃烧室	(63)	防冰措施	(98)
环形燃烧室	(64)	压气机进口的防冰——离心压气机发动机	(99)
减少燃烧室冒烟	(65)	(99)
涡 轮	(65)	压气机进口的防冰——轴流压气机发动机	(99)
涡轮冷却	(67)	(99)
排气管	(68)	压气机进口处的防冰——涡轮螺桨发动机与涡轮轴发动机	(100)
常规收敛式喷管	(69)	燃油除冰系统	(100)
收敛-扩散型排气喷口	(70)	第四章 燃气涡轮发动机的工作	(102)
反推力装置	(71)	发动机功率状态	(102)
喷气噪音消音器	(72)	离心式压气机发动机	(103)
加力燃烧室	(74)	民用轴流式压气机发动机	(103)
加力燃烧室筒体	(75)	军用轴流式压气机发动机	(105)
带外涵燃烧室的发动机	(75)	发动机测量仪表	(106)
加力燃烧室的工作	(75)	发动机的推力指示	(108)
加力燃烧室排气喷口	(77)	推力(对涡桨发动机为功率)测量仪表	
加力燃烧室喷口控制器	(77)	(109)
辅助设备	(78)	发动机控制器及指示灯	(111)
放气驱动附件	(78)	发动机起动之前	(112)
机械传动附件	(78)	发动机起动	(113)
起动机	(79)	起 飞	(113)
空气涡轮起动机	(81)	爬升与巡航	(114)
燃烧起动机	(82)	下降、进场和着陆	(115)
火药筒-气动起动机	(82)	发动机停车	(116)
燃油系统与燃油控制	(82)	涡轮螺旋桨发动机的操作	(116)
基本燃油系统	(82)	紧急情况 and 故障	(117)
油 泵	(85)	发动机维修	(118)
应急或手动燃油系统	(85)	发动机状态监测	(119)
加压与卸压活门	(85)	第五章 发动机工作特性	(121)
加力燃烧室的燃油系统与燃油控制器	(85)	发动机空气流路的清洗	(121)
加力燃烧室的应急截断活门	(86)	压气机喘振	(122)
加力燃烧室点火器	(86)	发动机进气道防冰	(124)
喷水及燃油系统	(86)	推力调整、发动机状态和限制	(125)
燃油控制器	(87)		

发动机状态的时间限制	(126)	δ 和 θ 的实际应用	(150)
排气温度	(126)	雷诺数效应	(151)
排气温度限制	(128)	马赫数	(151)
不应该用排气温度来比较发动机型号	(129)	能量交换定律	(152)
燃 油	(129)	内流空气动力学与热力学基础	(152)
军用航空燃油	(130)	空气及其特性	(157)
民用航空燃油	(130)	飞机进气道	(158)
润滑剂	(131)	压气机	(159)
普·惠公司轴流压气机发动机的调试	(131)	燃烧室	(164)
涡轮发动机噪音	(136)	涡 轮	(164)
声音与噪音	(137)	喷 管	(165)
喷气发动机噪音控制	(139)	燃气涡轮发动机如何工作	(165)
维护操作人员的耳朵保护	(140)	燃气涡轮发动机的性能分析	(166)
涡轮喷气、涡轮螺桨和涡轮风扇发动机特性	(141)	一般考虑	(166)
涡轮喷气发动机的优缺点	(141)	服役发动机	(167)
涡轮螺桨发动机的特性	(141)	在试车台上	(167)
涡轮螺桨发动机的螺旋桨	(143)	装在地面静止飞机上的发动机	(170)
涡轮风扇发动机	(144)	装在飞行中飞机上的发动机	(172)
第六章 燃气涡轮发动机的性能	(147)	原型机或试飞发动机	(176)
定义与符号	(147)	部件性能详情	(181)
空气动力学	(147)	发动机空气进气道	(183)
气动升力与阻力	(147)	压气机	(183)
密度和比重	(148)	燃烧室和涡轮	(183)
质量和比热	(148)	尾喷管与涡轮风扇发动机的风扇排 气口	(185)
热力学	(148)	加力燃烧室	(185)
循环	(148)	附 件	(186)
δ 和 θ	(149)	放 气	(186)
		附录:单位换算表	(187)

第一章 燃气涡轮发动机基础

引 言

为了能够认识一个新的领域,人们必须首先熟悉它的基本理论和术语。喷气发动机有它自己的特性和语言。某些物理定律被给以专门的说明,普通的词语被赋予特殊的含义。第一章将解释为初步了解喷气发动机所需的最重要的基础知识。第二章是对第一章的补充,将讨论喷气发动机工作中最常用的术语。

确切说来,喷气发动机只是用来称呼航空涡轮发动机的一个俚语。这类发动机称为燃气涡轮发动机更为恰当。然而,这两种名称是同义词,将在本书中交替使用。

乍一看来,燃气涡轮发动机这个术语会使人误解。因为燃气^①这个词是如此经常地用来代表汽油,以至于人们会认为,这个术语指的是用汽油作燃料的发动机。然而,这个名称的含义是很确切的,它指的是一种用燃气而不是用诸如蒸气或水来驱动的涡轮型发动机。驱动涡轮的燃气是适量燃油与通过发动机的空气混合并进行燃烧时所生成的燃烧产物。在大多数燃气涡轮发动机中,燃料根本不是汽油,而是一种低品位的蒸馏燃料,如军用 JP-4,就是一种满足特殊要求的民用煤油的混合物。

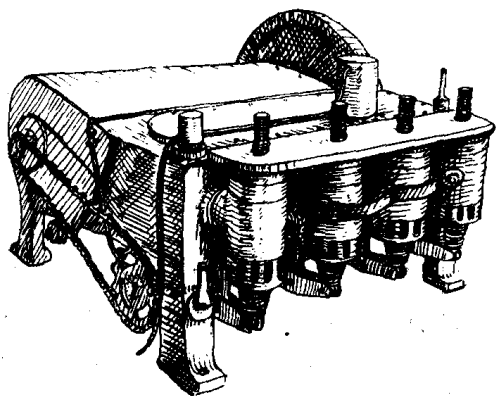
背 景

动力飞行的不断发展是紧紧地追随着适用的航空动力装置的发展的。与母鸡及鸡蛋这一永恒难题不同,航空上孰者为先是毫无疑问的。没有重量轻、功率足够的发动机,为某一用途作足够距离的操纵飞行是不可能实现的。由于没有合适的推进手段,里奥纳托·达·芬奇所设想的机械不能飞行,要是有了合适的推进手段的话,该机械本来是能够飞行的。虽然德国的诺·阿·奥托博士早在 1876 年就发明了四冲程内燃机,但直到 20 年后,达姆劳才制成了八马力的发动机,并使华弗特的“德意志”号第一次实现了用汽油作为动力燃料的可操纵飞行。莱特兄弟——魏尔伯和奥维尔不得不自已先研制发动机,然后才能于 1903 年在盖蒂·霍克实现成功的飞行。后来,葛兰·霍·冠蒂斯能够获得杰



^① 在美国英语中,gas 兼有燃气与汽油两种意思。——译者注

出成就,在很大程度上应归功于他对发动机的改进。遍观航空史,这类事迹比比皆是。更大、更有效的发动机导致出现更大、更快和飞得更高的飞机。



最初的飞机安装了驱动螺旋桨的活塞式发动机,因为在当时,它们是可以推动重于空气的机械作连续水平飞行的唯一手段。毋庸置疑,采用喷气推进来驱动空中飞行器的技术远远超越活塞式发动机的推进技术。

大多数历史学家都认为,至少在13世纪初,中国军人就采用火箭在敌人队伍中制造恐怖。在中国人于公元1000年发明火药(可能是偶然的)后不久,有人就学会了如何制造爆竹。当人们观察到一端填料脱落的有缺陷的爆竹会在地面上乱窜时,可能促使人们开始把一个一端开口的小筒子绑在箭杆上作实验。当筒子充满火药并点燃其火药时,箭就可以自己在

空中飞行。小筒的开口端起着喷管的作用,当火药燃气通过开口时就产生了“推力”,推动箭向前飞行。当然,那时的中国人并不一定知道这个道理。然而当代的喷气发动机产生推力的原理和那时是完全一样的。

喷 气 推 进 理 论

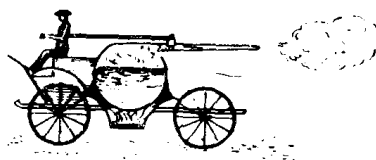
后面将详细解释喷气推进理论。简而言之,可以将喷气推进力描绘成当一团液体或气体在一定压力下通过一个称之为喷管的孔或开口流出时,在其流动相反方向上所产生的推动力。就象喷射高压水的消防喷头难以握住以至当喷头掉下时在地面上到处乱甩的现象,都是由喷射推进引起的。使美国独立日放的火箭射入空中的推力是同一原理的另一例子。不管喷射推进装置的形式如何,这装置实际上是一种反作用力发动机(或马达),它的工作原理遵从英国物理学家伊萨克·牛顿爵士在1687年第一次阐明的运动定律。

已知用来作功的第一台反作用力式发动机是阿历克赛特利亚的希隆(有时称为“英雄”)①在公元前250年左右制造的。希隆是一位著名的数学家和发明家。他设计了一个他称之为气转球的装置。这一装置主要由一个球形封闭容器组成,加压蒸气引入球内。当蒸气从彼此相对装在球面上的两个弯管(这两个管子就变成了喷管)逸出时,在喷管处产生了一个力,促使球体绕轴旋转。据说,希隆将滑轮、绳子、联动机构等装到旋转球的心轴上,并利用这一装置拉开庙门而无需人手去拉。

后来,伊萨克·牛顿采用了希隆所用的原理,那时他也造出一个现代喷气发动机的雏形。牛顿发明的是一台小四轮车。小车上装有一个蒸气锅炉,牛顿试图依靠从该锅炉向后排出的蒸

① 希隆为英文词 Heron 的音译,它与英雄 Hero 只差最后一个字母——译者注

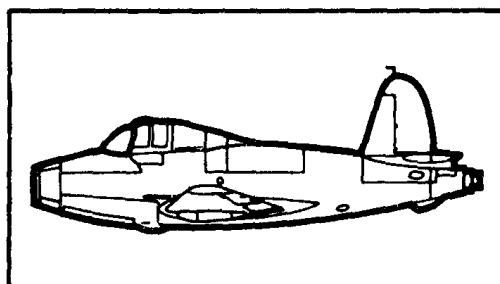
气射流来推动小车。牛顿的设想是正确的,但是那个装置功率太小了,以至无法工作。



飞机用喷气发动机

虽然喷气推进的飞机直到本世纪 40 年代中期才成为现实,但燃气涡轮推进的历史可以追溯到很久以前。1908 年,法国工程师雷纳·洛林提议用活塞式发动机压缩空气,随后将空气与燃油混合、燃烧,产生炽热燃气脉冲,并通过喷管排出,产生推动功率。但直到大不列颠帝国的法兰克·惠特尔爵士和德国的汉·冯·奥哈恩才实现了将喷气推进原理应用于可作为飞机动力的发动机设计。

1929 年 1 月,惠特尔提出了装离心式压气机的涡轮喷气发动机的最初专利。第一台惠特尔发动机按制造厂的名字命名,叫作动力喷气 W·1。该发动机于 1941 年 5 月 15 日装在英格拉斯特的 G·40 飞机上试飞。与惠特尔同时,德国的冯·奥哈恩也致力于发展一种用于飞机的喷气发动机。他于 1937 年制造和试验了第一台验证发动机。他制造的第一台飞行发动机是 Hes 3B,该发动机于 1939 年 8 月 27 日在亨格爾 He178 飞机上作了试飞。



格拉斯特 G.40

图 1-1 格拉斯特 G·40 飞机

惠特尔和冯·奥哈恩的发动机导致二次世界大战末出现了成功的喷气动力战斗机,其中最著名的是德国空军所用的梅塞施米特 Me262 战斗机。很有趣的是早期英国生产的喷气发动机采用离心式压气机,而德国生产的发动机则采用了更先进的轴流式压气机。第三章将讨论这两种压气机方案的优缺点。

什么是喷气发动机?

活塞式和燃气涡轮发动机都靠燃烧燃油和空气的可燃混合物产生功率或推力。它们都将燃气膨胀的能量转化成推进力。活塞式发动机实现这一转化的方式是将燃烧能量变成转动螺旋桨的机械能。螺旋桨赋予大量空气以较小的加速度,从而获得了飞机推进力。燃气涡轮发动机,按其基本的涡轮喷气发动机形式,则是把较大的加速度赋予少量空气,并直接产生推力或推进

力。在这点上,这两种发动机并不相似。

用于飞机的最简单的燃气涡轮发动机是涡轮喷气发动机。两端开口并称之为发动机机匣的水平安放罐状容器中设置了内部件。为便于发动机的装拆,机匣制成几段。大量空气通过前

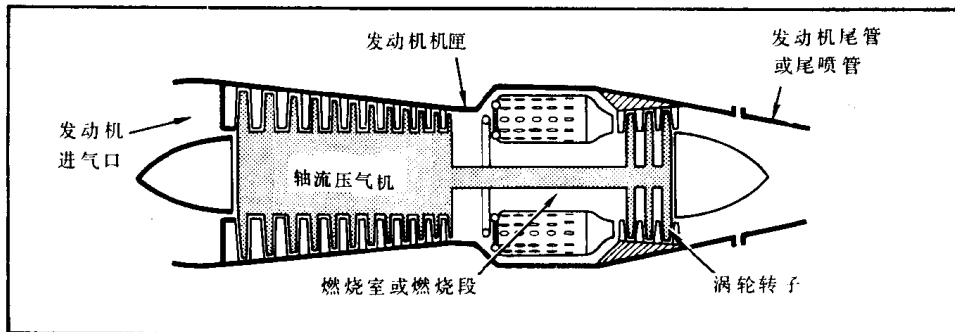


图 1-2

开口进入机匣。由于空气与燃油燃烧,空气被大大地加热与加速,此后,燃烧剩余的空气和燃烧中生成的燃气一起通过后开口排出。转动的压气机位于发动机机匣的前段。压气机后是燃烧室、燃烧段(或叫燃烧器),再往后是传动涡轮,它产生转动压气机所需的功率。最后是发动机尾管或排气管。它的后部通向外界大气。这个开口叫做尾喷管。

压气机使来流空气的压力提高,然后将其通入燃烧室。燃油通过喷嘴雾化进入燃烧室前部,形成燃油空气混合物并开始燃烧,产生炽热、膨胀燃气,燃气冲进涡轮段,使涡轮转子旋转。离开涡轮段后,燃气立即通过排气管(尾管)和尾喷管排入外界大气。涡轮转子从燃气获取的功率被用来驱动压气机。因为涡轮转子和压气机装在同一轴上,它们如同一个组件一起运转。因此可以说,单压气机涡轮喷气发动机只有一个主要运动部件。

燃气涡轮发动机家族中的其它成员,如双压气机(双转子)发动机、涡轮风扇(风扇喷气)、涡轮螺桨(螺桨喷气)和涡轮轴(轴涡轮)发动机等等,都是基本型单压气机涡轮喷气发动机的不同改型或发展。有关各种类型喷气发动机的介绍和图解,请参看本章结尾部分“飞机用喷气发动机类型”一节。

涡轮喷气发动机如何工作?

涡轮喷气发动机实质上是为在喷管处产生高速燃气流的唯一目的而设计的机器。发动机起动时靠起动机使压气机转动,然后在燃烧室中用一个或几个点火器点燃燃油空气混合物,这种点火器有点类似于汽车火花塞。当发动机起动后,压气机达到足够转速时,起动机和点火器都被关掉。然后,只要燃油与空气以合适的比例连续地进入燃烧室燃烧。发动机将自己运转,无需再借助外力。

涡轮喷气发动机能运转的秘密其实在于压气机。在正常大气压下由燃油与空气混合物燃烧所生成的燃气不能膨胀到足以作有用功。与燃油混合的必须是加压的空气,此后,燃烧产生

的燃气才能够成功地使活塞式发动机或涡轮喷气发动机工作。发动机可以压缩和利用的空气越多,它所能产生的功率或推力越大。

在涡轮喷气发动机发展的早期,寻找一种能完成压缩空气这一困难任务的满意方法曾是设计师最大的绊脚石。在英国,弗朗克·惠特尔用离心式压气机解决了这一问题。这种压气机类似于现在在飞机活塞式发动机上所采用的增压器。惠特尔将燃气驱动的涡轮装在紧靠发动机燃烧室后面的地方,用这种办法提供了转动压气机所需要的功率,其结构形式与现在所采用的大体相同。

在涡轮喷气发动机上驱动压气机所需的功率是很高的。要是有人知道如何制造一个可以产生足够功率以转动压气机同时在排气中还剩余足够能量以产生相当的前进推力的涡轮,那么可实用的燃气涡轮发动机就可以更早研制成。优良的压气机与涡轮的组合最终导致成功发动机的出现。

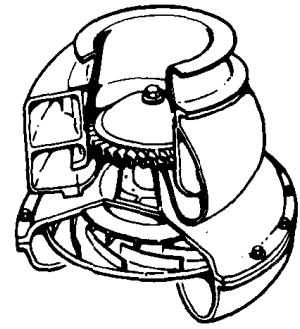


图 1-3 活塞式发动机涡轮增压器

为了说明一台中等稍大的涡轮喷气发动机的压气机要吸取多大功率,让我们假设一台约 12:1 压比的发动机产生 10000 磅起飞推力。当该发动机以最大推力运转时,涡轮必须产生约 35000 轴马力才刚好能带动压气机。产生这样大的功率的涡轮在发动机内所占的空间比通常功率低得多的普通家庭汽车用整台活塞式发动机所占的空间还小。一台喷气发动机所产生的功率中约有四分之三用来带动压气机。驱动飞机所需的推力只是剩下的功率产生的。

为什么用推力而不用马力?

在描述涡轮螺旋桨、涡轮轴或活塞式发动机时,通常采用的度量作功的时间率的单位是马力。能量是作功的能力,而功率是作功的时间率。有时候能量被称为固有功率。功率并不是用功的数量度量的,而是用与时间相关的作功数量度量的。1 马力定义为 1 秒钟内完成 550 呎-磅的功。此处 1 呎-磅乃是使 1 磅重物升高 1 呎所需的能量。因此,计算马力时需要知道时间与距离两个量。

若用公式表示,功率乃是:

$$P = \frac{F \times D}{T}$$

式中: P = 功率
 F = 力
 D = 距离
 T = 时间

若涡轮螺旋桨或活塞式发动机所作的功用来驱动使螺旋桨转动的轴,就可以用扭矩和转数 (rpm) 确定该发动机所发出的马力。在这种情况下,扭矩是发动机用来转动螺旋桨所施加的扭动或转动力,而转数则是发动机曲轴每分钟旋转的周数。

功率和马力这两个术语不适用于涡轮喷气或涡轮风扇发动机,因为通常并不涉及时间和距离这两个量。当涡轮喷气或涡轮风扇发动机并不向前移动时,如飞机停留在地面上而发动机在运转时,时间与距离的量都为零,因为发动机没有运动,这种运动本来是在一定时间间隔内测出的。虽然在发动机内由涡轮产生了扭矩和转数,但所产生的马力完全由发动机本身利用了。根据通常的确定功率的公式,在这种情况下没有产生功率。然而我们知道,这时发动机是推动着它的安装座,如果飞机放开制动器或者撤走轮垫,发动机所产生的推力或推动力将使飞机向前滑行。所以用磅作单位来度量涡轮喷气和涡轮风扇发动机发出的推进力,而不用功率或马力。

推力马力

因为活塞式和涡轮轴发动机,以及涡轮螺旋桨发动机都通过一转动轴传递功率,这种发动机常常可以放在一个装有测功计的试车台上。该测功计利用轴的转数和扭矩测量发动机所发出的马力。另一方面,喷气发动机试车台仅用磅推力测量发动机的输出,磅推力不易转换成马力。

一旦喷气动力的飞机开始移动,时间和距离这两个量出现了,就可以在飞机发动机所产生的推进功率和活塞式发动机在同样空速下可能产生的马力之间作一近似的比较。1 马力或每分钟 33000 呎·磅的当量值是每小时 375“哩·磅”。可以写出功率的标准方程,以表明,当空速为 375 哩/时时,1 磅推力等于 1 马力。这称为推力马力。

$$THP = \frac{\text{Thrust} \times \text{MPH}}{375}$$

式中:THP=以给定空速飞行时喷气发动机所产生的近似推力马力

Thrust=飞行中的喷气发动机所发出的以磅计的推力

MPH=以哩/时 计的空速

注:当空速为 375 哩/时时,1 磅推力=1 推力马力

当空速为 750 哩/时时,1 磅推力=2 推力马力

因为通过轴传递功率以驱动螺旋桨的活塞式和涡轮螺旋桨发动机通常是用测功器测出的制动马力来划分功率等级的,这类发动机在试车台上发出的制动马力必须乘以 80%的螺旋桨效率,这已被接受为工业标准。于是可以用这一乘积代表带螺旋桨的轴型发动机在给定空速下发出的推力马力,如果这类发动机与同样速度下飞行的飞机上的涡轮喷气或涡轮风扇发动机在推力马力的基础上进行比较的话。上面的公式表示了如何计算一台喷气发动机所发出的推力马力。

推 力 的 产 生

所有形式的纯喷气发动机,火箭发动机和活塞式发动机的螺旋桨等都以同样方式发出推力。已经提到,这是通过应用伊萨克·牛顿爵士的运动定律实现的。因为理解喷气发动机的推力来自何处是很困难的,现在就详细地解释这个问题。第一步是理解牛顿定律。

牛顿第一定律:静止物体将保持静止状态,直到它受到外力的作用为止。

例子:置于水平桌子上的一个球将保持无运动状态直到某个外力(如一股阵风或人手的推动)使它运动。

牛顿第一定律的第二部分说明,除非受到外力作用,运动物体将继续作匀速直线运动,在喷气发动机工作中我们不关心第一定律的这部分内容。

牛顿第二定律:“运动的变化正比于所加的力”。换一种说法:“当一物体(或质量)加速时,产生了一个正比于速度变化率的力。”牛顿第二定律可以用数学公式表示如下:

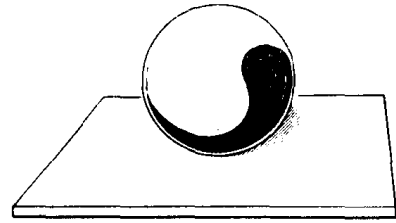


图 1-4

$$F = Ma$$

式中(用合适的单位)

$$F = \text{力}$$
$$M = \text{质量(重量)}$$
$$a = \text{加速度}$$

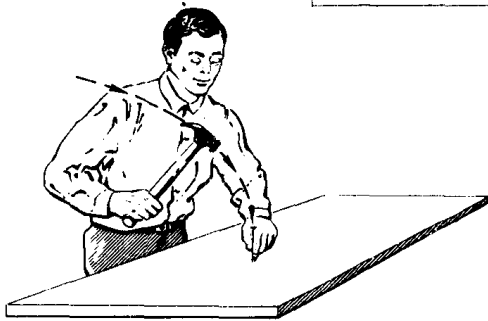


图 1-5

例子:当一个人用锤子钉钉子时,锤子打击钉子的力正比于锤子的质量(它与重量成正比),乘以人使锤头由零到最终速度的加速度。例如,很难用一个小的平头锤钉一根大的长钉子,因为这种锤的锤头质量太小。同样,即使用一个大锤子,仅仅很轻敲打长钉,也将是一件漫长而乏味的工作,因为加给锤头的加速度太小。

质量的定义

在此地停下来学习质量这个术语的含义是有益的。质量是物质的基本特性,它是任一物体中物质的数量。在重力场中,如在地球引力场中,它称为重量。然而,当一物体进入遥远的宇宙,该处不存在明显的重力场时,该物体仍将保留质量的特性。也就是说,它仍需要同样的力使其加速或减速,而且它仍需要加进同样的热量使其温度升高一定的度数。因为对喷气发动机来说,我们只与地球重力场中的质量打交道,公式 $F = Ma$ 可以改写如下以适用于喷气发动机。

$$F = \frac{W}{g} \times (V_2 - V_1)$$

式中： F = 以磅计的推力

W = 以磅/秒计的空气、燃气或液体（例如燃油）的流量

V_1 = 以呎/秒计的一团空气、燃气或液体的起始速度

V_2 = 以呎/秒计的一团空气、燃气或液体的最终速度

g = 重力加速度，32.2 呎/秒²

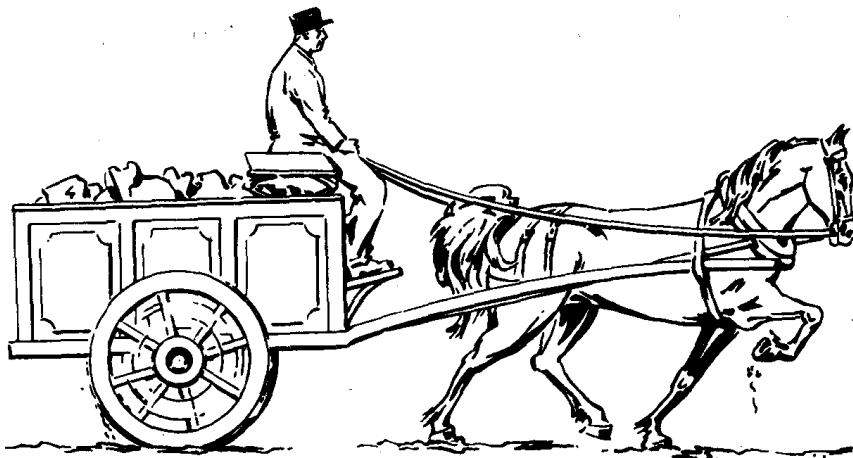
注： $M = \frac{W}{g}$ ；此处 M = 质量

关于重力加速度也需要解释几句。字母 g 是用来表示落体每秒钟速度增加量的通用符号。虽然 g 的数值随地理位置和海平面上高度的不同而略有变化，32.2 呎/秒² 是计算中常用的数值，它适用于靠近地球表面的高度。

关于上述公式，应当指出，重力加速度 g 实际上有两种用途。第一种用途是求得在地球重力场吸引下物体落向地球的速度。第二种用途，虽然与第一种有关，但如果在计算中必须用质量（或物体中物质的数量）而这一种计算与重力效应并无直接联系时。 g 应当看成是重量与质量的转换因子，重力加速度的第二种用途适用于上述公式。

牛顿第三定律：对每一个作用力，总存在一个大小相同方向相反的反作用力。

例子：当一匹马拉动一辆大车或马车时，马必须用它的蹄蹬踏路面，蹬力的大小决定了马牵动套索以拉动大车或马车的力的大小。



马向前拉车的力

马蹄蹬踏路面时产生的大小相同方向相反的力

图 1-6

简单喷气型发动机

所有喷气发动机,包括火箭发动机,脉冲式喷气发动机和冲压式喷气发动机(它们将在后面简介)都属于反作用式发动机的动力装置类型。自然,燃气涡轮发动机也是反作用式发动机。可以用儿童的玩具气球来形象地说明牛顿定律是如何使涡轮喷气发动机(或任何其它类型的反作用式发动机)产生推力的。当气球充以室温的空气,并封闭气球口使空气不致漏出时,气球在桌面上将保持不动,因为气球内的气压在各个方向上均匀地压在气球表皮上。由于没有施加任何力,故气球不会运动。

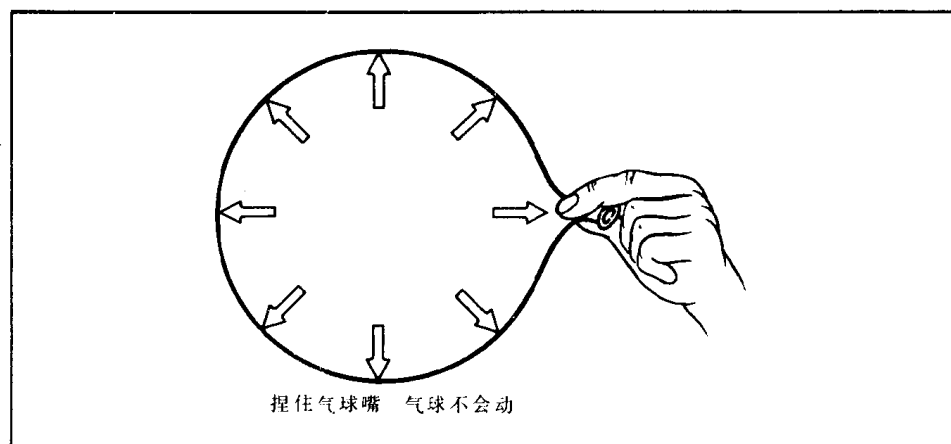


图 1-7

当气球口放开时,空气从开口处逸出。因为气球表面有了一个开口使作用在气球表皮上的力不再平衡,因为原先压在气球口封闭面上的力撤走了,而加在气球其余部分表皮上的力仍如以前一样。结果,压力的合力不平衡使气球沿与气球口相反的方向运动。

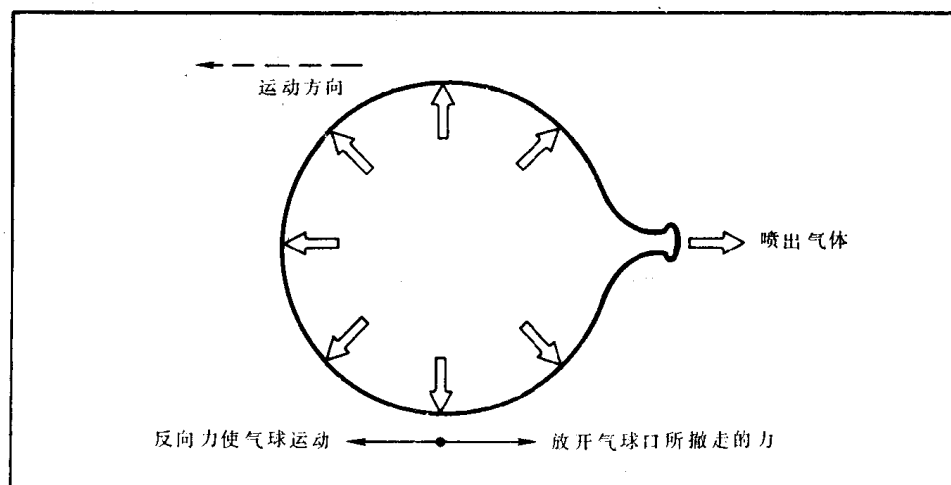


图 1-8

正是气球(或燃气涡轮发动机、火箭发动机、脉冲式喷气发动机或冲压式喷气发动机)内部

力的不平衡使各种反作用式发动机获得了自己的名称。这也是反作用式发动机为何能产生推力而无需实际推动排气喷管外面的空气的原因。伊萨克·牛顿爵士所描述的“作用”和“反作用”力都产生在燃气涡轮发动机、火箭发动机或其它反作用推进装置内。必须指出，上述玩具气球是会穿越房间的，即使这个房间是一个大的真空室。例如，火箭（它自己携带燃料和氧化剂）可以在外层空间的无空气王国中遨游。

涡轮喷气发动机的推力方程

现在由气球进而讨论喷气发动机，喷气发动机产生的推进力是发动机内发生的一连串非常复杂的作用和反作用力的综合结果。因为内力的用途是使一团炽热燃气加速，故可以不考虑内力直接用方程 $F = Ma$ 计算推力，条件是这时不存在某种机械手段，如装有推力测量装置的发动机地面试车台等。这个用来计算喷气发动机推力的方程（或公式）与以前用来解释质量定义的方程相同，为便于参考，再次表示如下：

$$F = \frac{W}{g} \times (V_2 - V_1)$$

注：1, $M = \frac{W}{g}$ ，此处 M 是质量

2, 虽然表达式 $(V_2 - V_1)$ 中每一项都是速度，单位以呎/秒计，这一速度差代表了加速度 a ，单位以呎/秒²计。应当指出，在公式 $F = Ma$ 中，质量 M 或者加速度 a 的变化都将使力 F 发生变化。这一点在后面将看得更清楚。

在实际工作中，确定涡轮喷气发动机所产生推力的方程仅由工程师使用。然而，解释这个方程是怎么回事和它是怎样导出的，将比其它任何方法都能更好地说明涡轮喷气发动机是如何产生推力的。

弄懂涡轮喷气发动机为什么和怎样产生总推力是比较容易的。令人庆幸的是，这就是与喷气发动机打交道的飞行员、机械员和一般人员通常需要知道的全部内容。要是有人想走得更远，希望真正弄懂空气和燃气从前到后经过成百个通道时，发动机内每一点处究竟发生了什么，那就需要较系统地熟悉热力学、空气动力学以及气体物理方面的定律。此处仅介绍产生推力的基础知识。

前面已经说明，涡轮喷气发动机主要是产生高速燃气的机器。另一种说法是，涡轮喷气发动机实质上是使通过它的空气和燃料的动量增加的机器。

动量是加给通过发动机的空气、燃料及燃烧产物的冲量。它可以用数学形式表示为运动物体的速度与其质量的乘积。因为质量是重力场中物体的重量除以重力加速度 g ，故在涡轮喷气发动机中动量是 $\frac{W}{g} \times V$ ，式中，如前所述， W 是通过发动机的空气和燃气的流量，单位为磅/秒。

方程 $F = Ma$ 在应用于涡轮喷气发动机时可表示为 $F = \frac{W}{g} \times (V_2 - V_1)$ 的形式，这一形式可以移项和改写如下：

$$F = \left(\frac{W}{g} \times V_2\right) - \left(\frac{W}{g} \times V_1\right)$$

因而可以看到,用动量这个词代替上式中表示为 $\frac{W}{g} \times V_2$ 和 $\frac{W}{g} \times V_1$ 的项后,一气团加速通过喷气发动机时所产生的力等于该气团最终动量与起始动量之差。

发动机排出气体的流出动量中必须减掉进入涡轮喷气发动机的空气和燃料的进入动量,这样才能求得总的动量变化,这一变化代表了发动机内产生的力。与此力方向相反的反作用力自然就是发动机推力。

$$F_n = \text{流出的排气动量} - (\text{空气进入动量} + \text{燃料进入动量})$$

式中: F_n = 净推力,单位以磅计

涡轮喷气发动机发出的推力来源于发动机中本身产生的不平衡力。当喷管出口处的静压超过环境(外部)空气的静压时,在喷口处产生一个附加的力,或推力。关于静压的定义,参看第二章“压力、压力测量和压力比”一节中有关静压与总压的部分。

净推力

有两种推力:净推力和总推力。到现在为止所讨论的推力都是净推力。后面将简单介绍一下总推力。净推力是由于通过发动机的空气和燃料质量流的动量变化所产生的。净推力也包括当喷管出口处静压超过环境(外界)空气静压时在喷管处产生的额外推力。

这一附加推力存在的原因与推动气球的力相同。可以回想起,后一个力的存在是因为气球口打开后球内压力的不平衡造成的。喷气发动机喷管处静压和环境空气静压之间的不平衡造成了同样的效果。就喷气射流而言,如象气球的情形那样,上游静压(在喷气发动机和气球运动方向上)大于下游静压,这个力加到称之为推力的“推动力”上。实际上,在喷气发动机和气球的喷口处产生附加力或推力的方式比刚才解释的要复杂得多。这一解释是简化了的,以便更容易理解基本原理。

如果我们暂时忽略喷管处产生的附加推力,并用合适的符号代替上面的方程中的语言,净推力的方程就变为:

$$F_n = \left(\frac{W_a + W_f}{g} \times V_j\right) - \left(\frac{W_a}{g} \times V_a + \frac{W_f}{g} \times V_f\right)$$

式中: F_n = 净推力(磅)

W_a = 通过发动机的空气流量(磅/秒)

W_f = 燃料流量(磅/秒)

g = 重力加速度

V_j = 排气速度(呎/秒)

V_a = 空气进入速度(呎/秒)

V_f = 燃料进入速度(呎/秒)