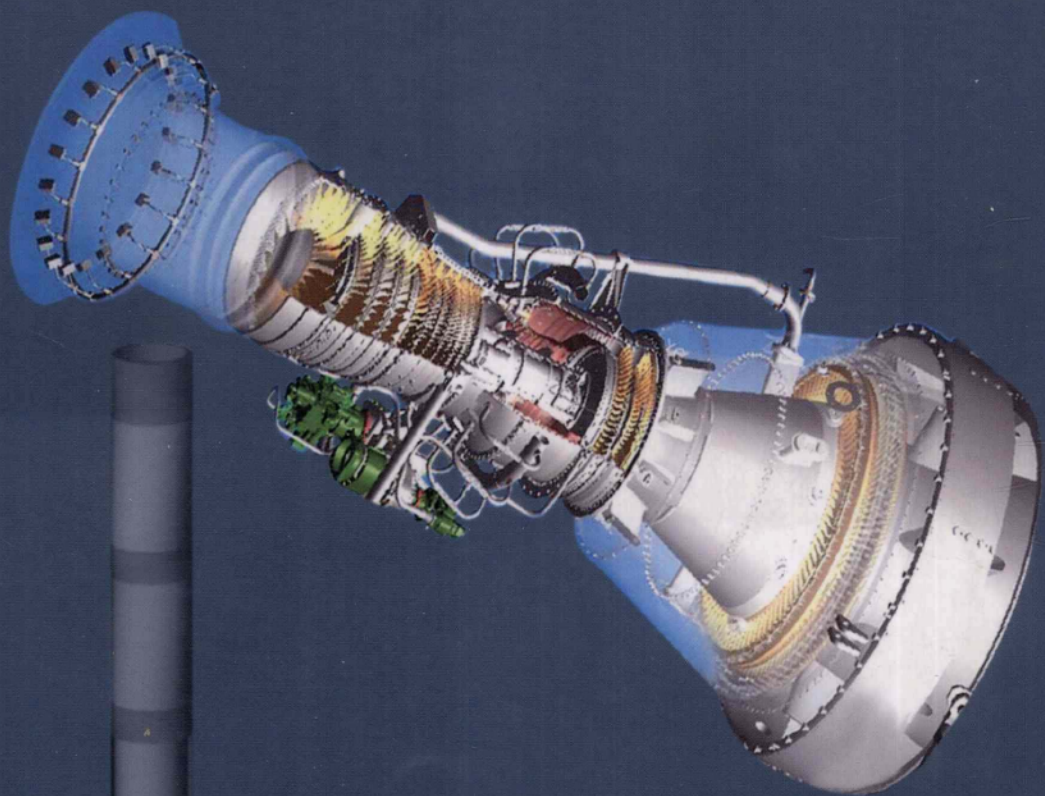


燃气轮机原理、 结构与应用

(下册)

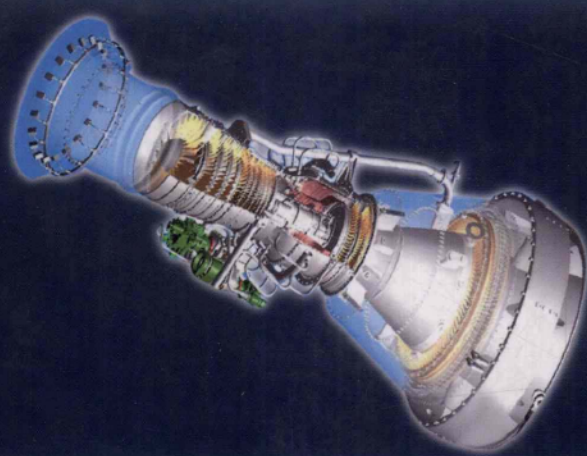


沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司



科学出版社
www.sciencep.com

(TH-0088.0101)



ISBN 7-03-010843-4



9 787030 108432 >

ISBN 7-03-010843-4

定价: 148.00 元 (上、下册)

燃气轮机原理、结构与应用

(下册)

沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司

科学出版社

北 京

内 容 简 介

全书分上、下两册,共14章。本书主要叙述了燃气轮机及其组成部件——压气机、燃烧室和透平的工作原理、设计特点及其试验、变工况性能和结构,以及调节控制、联合循环和应用等。为使缺乏热工知识的技术人员能顺利地掌握燃气轮机技术的有关知识,书中单列了热工基础知识一章。叙述内容中注意实用,除全面介绍辅机系统外,运行维护中还列举了典型故障分析,举例说明了燃气轮机性能验收试验方法,分析了在各部门应用中的一些具体问题等。此外,书中注意跟踪当今燃气轮机的新技术成就,介绍了先进的大功率燃气轮机和联合循环,新的航机改型机组,与高速发电机设计成整体的微型燃气轮机,压气机的可控扩压叶型,单轴燃气轮机型式的压气机全尺寸性能试验方法,干式低污染排放燃烧室,透平叶片的蒸汽闭环冷却和高效率的弯扭叶片,刷子气封,MARK V 控制系统,新的热力循环,以及燃气轮机在各应用部门中的新进展等,使读者能了解当今燃气轮机的发展水平。

本书可作为从事燃气轮机设计、试验研究、应用和运行等工程技术人员的参考用书,亦可作为燃气轮机培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

燃气轮机原理、结构与应用/沈阳黎明航空发动机(集团)

有限责任公司. —北京:科学出版社,2002

ISBN 7-03-010843-4

I. 燃… II. 沈… III. 燃气轮机—基本知识

IV. TK47

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第079527号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年10月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2002年10月第一次印刷 印张: 61

印数: 1-5 100 字数: 1 400 000

定价: 148.00 元(上、下册)

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

序

燃气轮机是20世纪兴起的一种新型动力机械,从20世纪中叶开始,首先在航空领域得到了迅速的发展,为今天的高速航空及宇航时代奠定了基础。随后,燃气轮机逐步向能源(发电)、海陆交通、石化等诸多领域发展。如今,随着社会发展、对动力需求的快速增长,燃气轮机技术已成为对国民经济持续发展有重大影响的高技术,是一个国家工业和科技水平的重要标志之一,亦是增强综合国力与国际竞争力的重要标志之一。可以说在当今世界中,谁掌握了先进的燃气轮机技术,谁就掌握了21世纪动力的未来。大量的研究表明:燃气轮机作为21世纪的主要动力装置,拥有广阔的发展前景和市场。

我国的燃气轮机工业起步于20世纪50年代末,经过几十年的发展,在科研、设计、生产和成套方面都积累了一定的经验,但同国外的先进水平相比,存在明显的差距。对我国而言,为了可持续发展、保护环境、保证能源安全,当前和今后对燃气轮机的市场需求庞大而迫切。因此,形成具有国际竞争力的国家燃气轮机产业,为我国实施可持续发展战略提供动力支撑已成了当务之急。我们务必要抓紧时机,大力发展燃气轮机技术,自主开发燃气轮机产品,通过有关关键技术的科研与开发,使我国具有先进燃气轮机的设计与制造能力。

本书,正是在这种背景下编写的。本书由在燃气轮机技术领域有多年研究经验的沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司技术中心组织编写,特邀清华大学燃气轮机专业赵士杭等同志与黎明公司总工程师庞为等同志组成编写小组,由中航一集团副总经理、黎明公司董事长林左鸣同志等任顾问,遵循“求实、求是、求新、求精”的原则来编写,并注意跟踪当今燃气轮机的新技术成就。为使缺乏热工知识的同志能顺利地掌握燃气轮机技术,单列了热工基础一章。本书由有多年燃气轮机技术研究经历的专家、学者编写,注重基础理论与工程实用相结合,具有较强的工程实用价值,适用于从事燃气轮机设计、试验、应用和运行研究等工程技术人员用作参考用书,以及用作大专院校燃气轮机相关专业的教材。我们相信:本书的出版,将促进燃气轮机技术的交流,对培养高水平的专业技术人员起到重要作用,并推动我国燃气轮机技术不断向前发展。



2002年7月

目 录

序

(上册)

第1章 总述	1
1.1 燃气轮机的工作原理及早期发展	1
1.2 燃气轮机的类型和优点	3
1.3 燃气轮机的现状及趋势	6
1.4 燃气轮机在我国的应用与发展	10
小结	15
第2章 热工基础知识	16
2.1 工质的状态参数	17
2.2 理想气体的状态方程	20
2.3 热力学第一定律	22
2.4 理想气体的热力过程	37
2.5 热力学第二定律	50
2.6 理想气体混合物	62
2.7 实际气体	64
2.8 水蒸气	67
2.9 热机动力循环	72
2.10 燃气的热力性质	81
2.11 气体一元流动基本方程	84
2.12 声速和马赫数	91
2.13 通过喷管的流量	100
2.14 流体的黏性和雷诺数	103
2.15 流体流动的压力损失	111
2.16 附面层	115
2.17 激波	116
2.18 传热学之稳定导热	124
2.19 对流换热	132
2.20 热辐射	141
2.21 综合传热	148
2.22 相似理论	152
小结	155

第3章 燃气轮机热力循环	157
3.1 理想简单循环	157
3.2 实际简单循环	159
3.3 回热循环	165
3.4 复杂循环	167
3.5 航空燃气轮机循环	172
3.6 闭式循环	177
3.7 燃气轮机热力循环计算方法	178
小结	187
第4章 压气机	189
4.1 概述	189
4.2 压气机级的工作原理	192
4.3 压气机叶栅的几何参数与叶片扭转规律	205
4.4 跨声速压气机级	222
4.5 压气机级中的能量损失	226
4.6 压气机工作过程的特点	231
4.7 多级轴流压气机	238
4.8 压气机变工况及特性曲线	245
4.9 压气机的喘振及防喘措施	254
4.10 轴流压气机通流部分的设计方法	262
4.11 压气机模型级与整机性能试验	264
4.12 离心压气机	271
小结	284
第5章 燃烧室	286
5.1 概述	286
5.2 燃烧室的工作特点、要求和指标	287
5.3 燃烧室的热力过程	295
5.4 燃烧过程的物理化学原理概要	306
5.5 典型燃烧室中燃烧过程的组织	316
5.6 燃烧室部件与结构	322
5.7 液体燃料喷嘴	339
5.8 气体燃料的燃烧	348
5.9 重质燃油的燃烧	353
5.10 低污染排放燃烧室	357
5.11 燃烧室设计与试验概述	362
小结	377
第6章 透平	380
6.1 概述	380

6.2	透平级的工作原理	381
6.3	透平叶片的冷却	388
6.4	透平叶栅的几何参数与叶片扭转规律	396
6.5	透平级中的能量损失和效率	412
6.6	多级透平	424
6.7	透平变工况及性能曲线	433
6.8	透平与压气机的比较	459
6.9	透平的设计与热力试验简介	464
6.10	向心透平	467
	小结	473

(下册)

第7章	燃气轮机变工况	475
7.1	概述	475
7.2	单轴燃气轮机的变工况性能	479
7.3	分轴燃气轮机的变工况性能	484
7.4	双轴燃气轮机的变工况性能	490
7.5	三轴燃气轮机的变工况性能	495
7.6	变几何的影响	498
7.7	部件性能恶化的影响	507
7.8	进排气压力损失变化的影响	509
7.9	大气参数变化的影响	511
7.10	燃气轮机与负载的平衡运行	522
7.11	燃气轮机的加载和减载	540
7.12	燃气轮机的起动	545
	小结	553
第8章	燃气轮机结构	554
8.1	概述	554
8.2	压气机	561
8.3	透平	574
8.4	联轴器与转子的支承	589
8.5	轴承与轴承座	597
8.6	单元体结构	612
8.7	通流部分的方便检查措施	616
8.8	燃气轮机的固定与总体布置	618
8.9	航机改型的燃气轮机	624
8.10	微型燃气轮机	635
	小结	639

第9章 燃气轮机辅机系统	641
9.1 概述	641
9.2 辅机的传动	641
9.3 起动装置	643
9.4 盘车装置	649
9.5 润滑油系统	651
9.6 燃料系统	657
9.7 通流部分的清洗装置	665
9.8 空气滤清设备	669
9.9 消声与隔声	676
9.10 灭火系统	684
9.11 其他系统	686
9.12 QD-128 燃气轮机辅机系统	690
小结	691
第10章 燃气轮机控制系统	693
10.1 概述	693
10.2 转速控制系统	696
10.3 温度控制系统	707
10.4 控制系统的动态特性	711
10.5 保护系统	721
10.6 程序系统	726
10.7 分轴燃气轮机调节的特点	730
10.8 输气管线用燃气轮机压缩机组的控制系统	736
10.9 计算机集散式控制系统	745
10.10 控制系统实例	758
小结	765
第11章 燃气轮机运行与维护	766
11.1 燃气轮机运行	766
11.2 燃气轮机日常检查与维护	770
11.3 燃气轮机检修	781
11.4 燃气轮机典型故障分析与处理	792
小结	798
第12章 燃气轮机性能监测与验收试验	799
12.1 性能参数的测量和运行性能的监测	799
12.2 燃气轮机的性能验收试验	806
小结	828
第13章 联合循环与系统	829
13.1 燃气蒸汽联合循环的基本方案	829

13.2	联合循环的热力性能	831
13.3	提高联合循环效率的措施	836
13.4	余热锅炉与汽轮机	839
13.5	联合循环的变工况性能	845
13.6	单轴与多轴机组	849
13.7	联合循环的控制系统	852
13.8	联合循环的运行	856
13.9	燃煤联合循环	862
13.10	注蒸汽的联合循环	871
13.11	燃气轮机热电联供	875
13.12	新的热力循环	881
	小结	884
第14章	燃气轮机应用	886
14.1	电力工业中的应用	886
14.2	油/气管道输送	891
14.3	石油、石化、冶金等工业中的应用	897
14.4	舰船动力	908
14.5	车辆动力	927
	小结	939
	参考文献	940

第7章 燃气轮机变工况

7.1 概 述

前面已分别介绍了燃气轮机循环,以及燃气轮机中的压气机、燃烧室和透平这些组成部件的工作原理和性能。本章则是讨论燃气轮机的总体性能,即变工况性能,它是设计和使用每一台燃气轮机时所必须掌握的。

7.1.1 变工况的含义

在燃气轮机的实际运行中,由于种种原因经常偏离设计工况,处于非设计工况下运行,此即一般所说的变工况。

燃气轮机输出功率大小的变化,是导致机组在变工况下工作的一个重要原因。例如燃气轮机用于电站带动发电机发电时,电网所需的电力随着电网负载对功率需求的变化而变化,使发电机的输出功率随之变化,导致燃气轮机的功率变化。又如带动天然气压缩机输送天然气时,当输气量变化后,燃气轮机的功率就变了。显然,在燃气轮机的功率变化后,燃气轮机的其他一些参数,如燃气初温、压比、空气流量、燃料流量和机组效率等都要变,使它们都偏离了设计工况下的数值。

在燃气轮机设计时,一般都按标准大气参数($t_a=15^\circ\text{C}$, $p_a=0.1013\text{MPa}$)来计算。但实际上大气温度和压力经常偏离上述标准状况,特别是大气温度,不仅经常变且变化范围较大。当大气参数变化后,压气机进口空气的参数就变了,使燃气轮机偏离设计工况,这是导致燃气轮机在变工况下运行的另一重要因素。

此外,当部件性能变化后也使燃气轮机处于变工况下运行。例如压气机或透平采用可调静叶——可变几何,在改变静叶安装角后就使压气机或透平的性能变化,于是由它们组成的燃气轮机性能也随之而变。又如压气机或透平叶片在运行一段时间后发生积垢或磨损,压气机或透平的性能恶化,燃气轮机的性能也就恶化,达不到设计的功率和效率。

由上可见,燃气轮机是经常处于变工况下运行的。本章将叙述在各种情况下燃气轮机的变工况性能。

7.1.2 平衡工况与不平衡工况

燃气轮机的变工况包括两种状态,一种是在某一工况下稳定运行,这时燃气轮机的输出功率 P_e 等于负载所消耗的功率 P_L ,即 $P_e=P_L$ 两者处于平衡状态,称为平衡工况。另一种是从一个平衡工况变化到另一个平衡工况的过渡过程,这时燃气轮机的输出功率与负载所消耗的功率不相同,即 $P_e\neq P_L$,两者不平衡,称为不平衡工况。显然,不平衡工况是一种暂时的、过渡的工况,在过程中诸参数在不断地变化,且随着过渡过程快慢的不同,诸参数变化的情况也不同。随着参数的变化,燃气轮机工况最终变至另一个平衡工况下稳定运行,过渡过程也就随之结束。因此,平衡工况与不平衡工况是两种性质不同的运行工况。

本章中着重叙述平衡工况下燃气轮机的性能,也就是在外界需求功率和大气参数等变化后,燃气初温和机组效率等参数的变化情况。对于不平衡工况,主要是从功率不平衡的角度出发,分析燃气轮机在过渡工况中诸参数随时间的变化情况,存在的问题和解决的措施。所叙述的不平衡工况,包括加载、减载和起动三种工况。

7.1.3 燃气轮机的轴系方案和负载规律

在上册1.2节中曾列出了七种现用的轴系方案的燃气轮机,并指出图1.5中所列七种燃气轮机虽然是简单循环,但由于轴系方案不同,其变工况性能不同。为便利读者阅读,这里再将该七种燃气轮机示于图7.1中。鉴于这些燃气轮机的变工况性能各不相同,因而需对它们分别予以叙述。

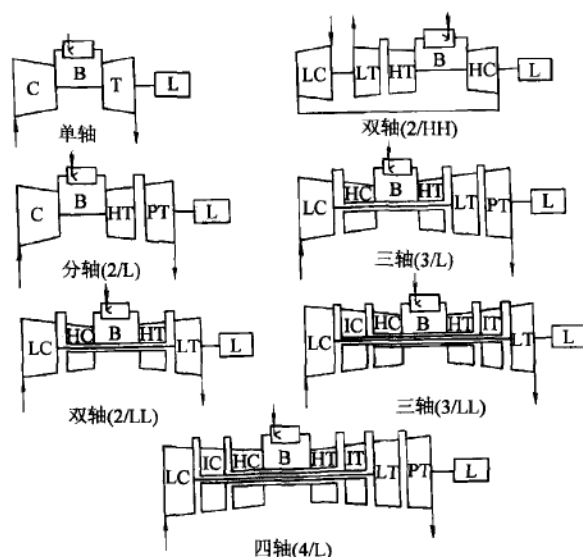


图 7.1 不同轴系方案的燃气轮机

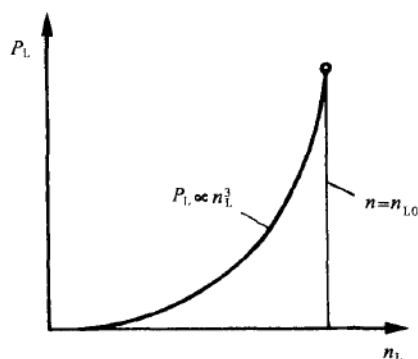


图 7.2 两种典型的负载规律

另外,燃气轮机的运行性能还与带动的负载变化规律有关。例如负载转速的变化规律,将对带动负载的转轴转速产生直接影响,从而影响燃气轮机性能。图 7.2 是两种典型的负载规律,一种是恒速负载 $n = n_{L,0}$,例如带动交流发电机发电;另一种是螺旋桨负载 $P_L \propto n_L^3$,例如用于船舶推进,在带动泵与压缩机时,在一定条件下也可视为这种负载。对于平衡工况, $P_e = P_L$,因而螺旋桨负载可表达为 $P_e \propto n_L^3$ 。

在下面对燃气轮机变工况性能进行分析时,我们将结合这两种典型负载规律来叙述。至于燃气轮机与负载之间平衡运行性能的深入分析,将在 7.10 节中具体叙述。

7.1.4 燃气轮机的平衡运行

按前述,平衡工况是稳定运行的工况,它是组成燃气轮机的各个部件之间、包括带动的负载在内的相互平衡运行,特点是功率平衡。由此可得,在燃气轮机中还有工质流量平衡、压力平衡和转速平衡等。下面我们以图 7.3 所示单轴燃气轮机为例来说明。

功率平衡,即 $P_e = P_L$,对于单轴燃气轮机可表达为

$$P_T - P_e - P_m = P_L \quad (7.1)$$

式中, P_m 为轴承摩擦等机械损失耗功。

压力平衡:压气机中压缩空气所达到的压力升高,与透平中的压力降落和各处的流动压力损失之和应相等。当用压力保持系数 ϕ 来描述各处的压力损失时,压力平衡表达为

$$\pi_T = \phi_1 \phi_2 \phi_4 \pi = \phi \pi \quad (7.2)$$

流量平衡:在平衡工况下,燃气轮机中透平的燃气流量与压气机的空气流量应满足

$$q_T = (1 + f)(1 - \mu_{cl})q \quad (7.3)$$

应指出,该式是在冷却漏气量 q_{cl} 完全损耗的情况下得到的。实际上其中的冷却空气量 q_{cl} 是流至透平中去冷却透平的叶片和轮盘等零部件的,它流入透平后还要作一部分功。因而认为 q_{cl} 完全不做功是有误差的,在 q_{cl} 相对量大时误差增大。为正确考虑 q_{cl} 做功的事实,一般采用等效流量来描述透平中的流量,这在上册 3.7 节中已描述过,不再重复。

转速平衡:共轴的部件转速相同,对于单轴燃气轮机为

$$n_T = n_c = n_L \quad (7.4)$$

上述四个平衡关系,具体的描述了一台单轴燃气轮机在平衡工况下应满足的关系式。对于其他轴系方案的燃气轮机,这些平衡关系同样应满足,只是由于轴系方案的不同,使关系式的数目和具体的表达公式有所不同。

除上述四个平衡关系外,一台燃气轮机中还有其他的平衡,例如燃烧室的热平衡,有回热器时还有回热器的热平衡。

所有的平衡关系,是燃气轮机各个部件和负载在所有平衡工况下所需遵循的。也就是说,通过这些关系就把各个部件和负载相互联系了起来,并相互制约,使燃气轮机的每个参数在变工况下按照一定的内在规律变化。因此,与组成燃气轮机的各个部件性能一样,诸平衡关系也是分析和计算燃气轮机变工况性能的重要基础。

还应指出,从形式上看上述诸平衡关系式与第 3 章热力循环部分所述是一样的,但热力循环部分只是叙述设计工况,而这里不仅指用于设计工况,同时还包括偏离设计工况时的诸平衡工况,因而含义更广泛。

7.1.5 燃气轮机平衡运行工况点的确定

按上面所述,一台燃气轮机在平衡工况下运行时,组成它的各个部件如压气机、燃烧室和透平等的参数处于平衡状态。因此,由这些部件之间参数平衡得到的工况点就是燃气轮机的平衡运行点。下面以图 7.3 所示单轴燃气轮机为例来说明平衡运行工况点的确定

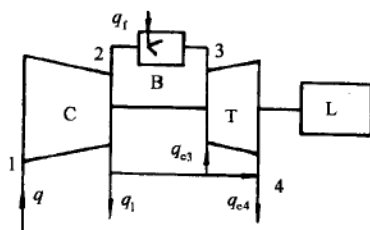


图 7.3 单轴燃气轮机

方法。

显然,平衡运行点必然是从各个部件的性能出发,用平衡关系式把它们联系起来而求得。图7.4中示出了压气机和透平的性能曲线。燃烧室的性能一般可近似地认为效率 η_B 和压力保持系数 ϕ_2 不变,即和设计工况时的数值一样,故未画性能曲线。此外,平衡关系式(7.2)和式(7.3)中的 ϕ_1 、 ϕ_4 和 μ_3 ,一般也可视为不变用设计时的数值。

在图7.4中的压气机性能曲线图上给定一点A,该点压气机的 $q\sqrt{T_1^*}/p_1^*$ 、 $n/\sqrt{T_1^*}$ 和 η_c 等参数就可从图上读得。 T_1^* 即大气温度 T_a , $p_1^*=\phi_1 p_a$,由此得到 T_1^* 和 p_1^* 。这里我们不考虑大气温度和压力的变化,即 T_1^* 和 p_1^* 保持设计状况,故 T_1^* 和 p_1^* 为设计值不变。由此可算得压气机在A点的流量 q 和转速 n 。接着由 T_1^* 、 π 和 η_c 进行压气机计算,得到压气机出口温度 T_2^* 。由 $\pi=p_2^*/p_1^*$ 、 $p_3^*=\phi_2 p_2^*$ 、 $p_4=p_a/\phi_4$ 和式(7.2),得到 p_2^* 、 p_3^* 和 π_T 。压气机转速与透平的相同,故透平转速已知。但仅知 π_T 、 p_3^* 和 n ,是无法在透平性能曲线图上确定相应的A点的。但若知道了这时的 T_3^* 值,就可解决这一问题。一般是用试算法求得。

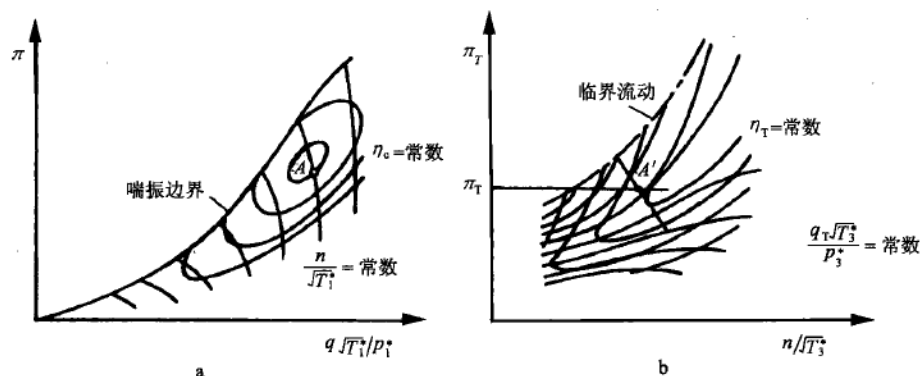


图7.4 单轴燃气轮机的平衡运行点

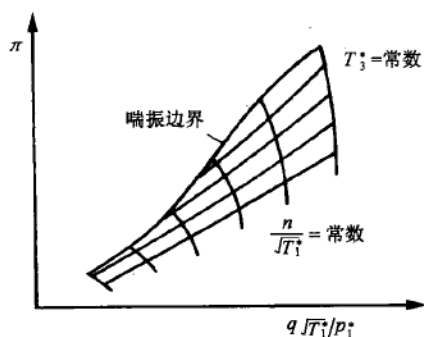


图7.5 单轴燃气轮机的等 T_3^* 线

先假设一 T_3^* 值,将它与 η_B 和上面求得的 T_2^* 一起,自然燃烧室热平衡方程求得燃料空气比 f ,进而从式(7.3)求得 $q_T\sqrt{T_3^*}/p_3^*$ 和 $n/\sqrt{T_3^*}$,这时可得到用这两数值可在图7.4中的透平性能曲线图上确定一个点,并读得该点 π_T 的值。如果它与上面通过压力平衡求得的 π_T 相同,说明该点能同时满足流量平衡、转速平衡和压力平衡,符合各部件之间平衡运行的要求,即所设 T_3^* 值是正确。通常,第一次设定的 T_3^* 是不可能同时满足上述各个平衡关系的,而要通过多次假设试算后才能得到正确解。图7.4中所示的,

是设定多个 T_3^* ,求得多个相应的 $q_T\sqrt{T_3^*}/p_3^*$ 和 $n/\sqrt{T_3^*}$,在透平性能曲线图上得到一条曲线,即图上的一条斜线,它与 $\phi\pi$ 线的交点就是与压气机相应的平衡运行点A'。

同理,在压气机性能曲线图上另外给定其他的点,也可在透平性能曲线图上求得相应的平衡运行点,每个点都有它们各自的 T_3^* 值。因此,压气机性能曲线图上各点都有它们相应的 T_3^* 值,当把图上各个 T_3^* 相同的点连接起来后,就得到了等 T_3^* 线,见图7.5。显然,每条等 T_3^* 线上的点都是平衡运行点,即这些线是每个 T_3^* 时的平衡运行点的连线,因而就是每个 T_3^* 时燃气轮机的平衡运行线。当用温比 $\tau(=T_3^*/T_1^*)$ 代替 T_3^* 后,等 T_3^* 线就变成了等 τ 线。

从上述过程来看,平衡运行点主要是在压气机和透平性能的基础上求得的,因而燃气轮机诸部件的平衡运行可看成主要是压气机和透平的平衡运行,等 T_3^* 线是压气机和透平平衡运行点的连线,是透平性能在压气机性能曲线图上的描述,这就是等 T_3^* 线的物理实质。

如果透平没有性能曲线时,可用式(7.5)弗留盖尔公式来近似代表透平的流量性能。

$$\frac{q_T}{q_{T0}} = \sqrt{\frac{T_{30}^*}{T_3^*}} \sqrt{\frac{\pi_T^2 - 1}{\pi_{T0}^2 - 1}} \quad (7.5)$$

燃料空气比 f 值很小,一般小于2%,可忽略它的变化对流量的影响,这时 $q_T/q_{T0}=q/q_0$,再考虑到 $\pi_T=\phi\pi$,于是式(7.5)变为

$$\frac{q}{q_0} = \sqrt{\frac{T_{30}^*}{T_3^*}} \sqrt{\frac{\phi^2\pi^2 - 1}{\phi^2\pi_0^2 - 1}} \quad (7.6)$$

用式(7.6)可直接在压气机性能曲线图上画出等 T_3^* 线,其图形与图7.5所示的相似,只是与用透平性能曲线得到的等 T_3^* 线相比有一定的误差。

在上面求取等 T_3^* 线的基础上,就能对各点进行热力循环计算,求得每个点的燃气轮机功率 P_e 、燃料流量 q_f 、机组效率 η_c 等,从而得到燃气轮机的变工况解。通常,用 $P_e \sim n$ 为坐标来作图,得到图7.6所示的图形,它全面地反映了单轴燃气轮机的变工况性能。

在具体的运行中,燃气轮机还必须与负载平衡运行,要满足负载规律 $P_L=f(n)$ 。由于 $P_e=P_L$,负载规律可改写为 $P_e=f(n)$,因而符合该规律的运行点就是燃气轮机与负载的平衡运行点。当把 $P_e=f(n)$ 画到燃气轮机变工况计算得到的 $P_e \sim n$ 图上后,位于该规律曲线上的诸参数变化情况,就是燃气轮机在该负载规律下的变工况解。例如图7.6中位于 $\overline{P_e}=\overline{n^3}$ 和 $\overline{n}=\overline{n_0}$ 线上的 T_3^* 和 q_f 等参数,就是该燃气轮机带动螺旋桨负载和恒速负载时的变工况解。为了观察和使用的方便,这时一般采用图7.9的形式来表达。从该图看出,同一台燃气轮机在带动不同负载时的参数变化是不一样的。为区别图7.6与图7.9所表达内容的不同,常把类似图7.6的曲线称为性能曲线网。

7.2 单轴燃气轮机的变工况性能

前面多次提及的单轴燃气轮机,是轴系方案最简单的、目前实际应用最多的燃气轮机,其功率范围由10kW左右至33.4万kW,是目前世界上功率最小的和功率最大的燃气轮机。这种轴系方案的一个特点是压气机与负载共轴,负载的转速变化规律直接影响压气机转速,即直接影响压气机工况,进而影响燃气轮机的工况。因此,负载规律对单轴燃气轮机变工况性能的影响必然很大。

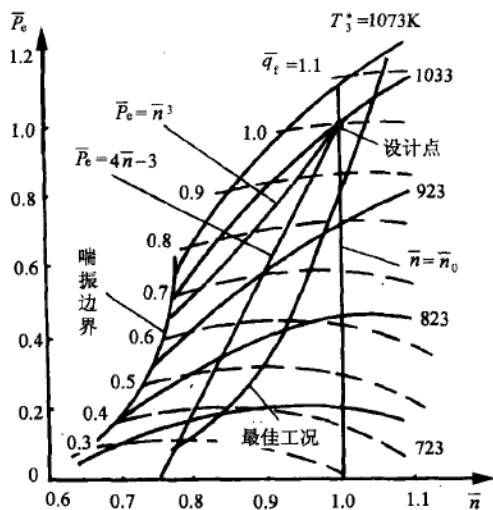


图 7.6 单轴燃气轮机的性能曲线网

7.2.1 性能曲线网

单轴燃气轮机的性能曲线网,通常是以输出功率 P_e 为纵坐标,以工作转速 n 为横坐标来作图,其中画有多条等 T_3^* 线和等 q_t 线,它可通过变工况计算或实验得到。图 7.6 为一台单轴燃气轮机通过实验得到的性能曲线网,除图中画的等 T_3^* 线和等 q_t 线外,还可画出其他参数的等值线,例如等 T_3^* 线、等 q 线和等 η_c 线等。因此,只要知道了机组在 P_e-n 图中的工作点,它的各个参数就能从图上得到。

图中等 T_3^* 线的位置可用图 7.5 的等 T_3^* 线来解释。从图 7.5 中可看出在相同的转速下 T_3^* 降低时 π 降低,透平做功迅速下降,导致机组功率下降,故图 7.6 中的等 T_3^*

线,下面线的 T_3^* 值低,上面的 T_3^* 值高。

图中的喘振边界即压气机的喘振边界,它与压气机的性能曲线密切相关,由于压气机不允许在喘振区运行,因而燃气轮机也不能在该区域内运行,即不能在图中喘振边界的左边运行。由这些可见,性能曲线网全面地反映了单轴燃气轮机在平衡工况下的性能。

也可以把图 7.6 所绘制的诸参数的等值线画到压气机性能曲线上,图 7.7 即是。因为怕曲线过多而看不清楚,图中只画了等 T_3^* 线和一条等 P_e 线($P_e=0$ 的零功率线)。图中还有燃烧室的熄火极限,它位于零功率线的下面,以确保燃气轮机在空载工况($P_e=0$)时能可靠地连续运行。通常,燃烧室在调试时,总希望把熄火极限尽可能地调得低些,使燃烧室在宽广的范围内能稳定燃烧。

当把负载规律画到图 7.6 和图 7.7 上后,就得到了单轴燃气轮机在带动该负载规律时的性能。在图中示例了 $\bar{n}=\bar{n}_0$ 和 $\bar{P}_e=\bar{n}^3$ 两种典型负载。表达在图 7.7 所示压气机性能曲线中的负载规律线,通常称为机组在带动该负载规律时的平衡运行线。

从图 7.6 和图 7.7 中还可看出燃气轮机的可能运行范围。通常,燃气轮机除受压气机喘振的限制外,还受高温零件材料耐温的限制,以及受转动部件离心应力的限制,此即一般所说的不能超温($T_3^* \leq T_{3\max}^*$)和不能超速($n \leq n_{\max}$)的限制,再加上机组不能在零功率线以下平衡运行,由此就形成了单轴燃气轮机的平衡运行区,简称运行区。以上述限制来作

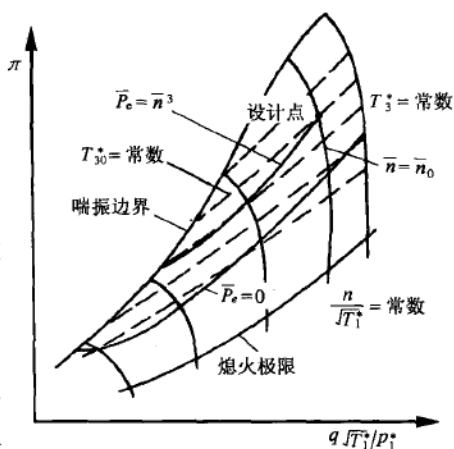


图 7.7 单轴燃气轮机的平衡运行区和平衡运行线

图,就得到了图7.8上所示的机组运行区,图中的 $T_{3\max}^*$ 和 $n_{\max}$ 均大于设计值 T_{30}^* 和 n_0 ,但也可以是 T_{30}^* 和 n_0 ,这由具体的设计来确定。通常,允许在超过 T_{30}^* 和 n_0 条件下运行的机组,允许超过量都是较小的。从图7.8上中可看出单轴燃气轮机转速的变化范围是较小的,通常 $n_{\min} \geq 0.65 \sim 0.70$,与7.3节中叙述的分轴燃气轮机相比较,这是它的一个较大的弱点。

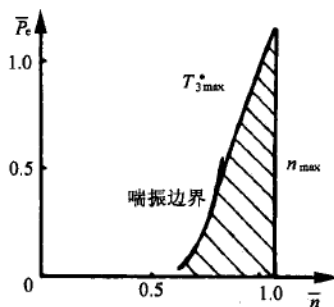


图 7.8 单轴燃气轮机的运行区

从图7.6看出,每一条等 q_t 线上有一个最高点,它是在该 q_t 下输出功率最大的、即效率最高的工况点。将诸等 q_t 线上的最高点连接起来,就得到了在变负荷下最经济的运行线,此即最佳工况,见图中所示。按理,燃气轮机的设计点应位于最佳工况线上,但图7.6所示的情况并非如此,且设计点位于最佳工况线的左侧,这是什么原因呢?原来是现有的简单循环燃气轮机,设计时所选择的压比,由于受压气机设计和运行等的限制,一般都比相应于 T_{30}^* 的最高效率处的压比 $\pi_{\eta_{\max}}$ 低很多。例如一台燃气轮机的 $T_{30}^* = 1377\text{K}$,相应的 $\pi_{\eta_{\max}}$ 约为24,而实际选用的压比 $\pi_0 = 12$,两者相差一倍。在这样的情况下,燃气轮机运行点沿图7.6中等 q_{t0} 线从设计点向右边移动时,转速升高,压比增加而接近于最佳压比,尽管这时 T_3^* 在下降,但 η_c 仍有所升高,形成了图中所示的结果。

7.2.2 带动具体负载时的性能

在燃气轮机带动具体负载后,可把参数的变化表达为输出功率的函数关系,对于转速变化的机组,也有的表达为转速的函数关系。图7.9为带动两种典型负载时单轴燃气轮机的性能曲线,现分述于下。

7.2.2.1 恒速负载

恒速负载的特点是转速不随输出功率的大小而变,始终在设计转速 n_0 下运行,即沿压气机的 $n=n_0$ 线运行,见图7.7。从图看出,在部分负荷下的运行点远离喘振边界,喘振裕度增加,机组在整个运行范围内(自空载至设计工况)都能良好地运行。其次是空气流量 q 随着 P_c 的降低略有增加,也有一些燃气轮机,压气机的等 n_0 线基本垂直于横坐标,于是在 P_c 降低时 q 不变,因此可将燃气轮机的 q 视为不变来进行分析。

燃气轮机的性能见图7.9。 T_3^* 随 P_c 降低的下降较快,且大体呈一条直线。这是由于机组的 q 不变,在 q_t 减少大体相同时 q 不变的 T_3^* 下降就快。而机组的压比下降不多,见图7.7,在空载时的 π_1 一般仅比 π_0 减少百分之十几。

在部分负荷下 T_3^* 下降快,对于机组的经济性不利,即 η_c 下降将较快。幸好简单循环的单轴机组,一般是 $\pi_0 < \pi_{\eta_{\max}}$,而 π 下降慢,相应于 T_3^* 的 $\pi_{\eta_{\max}}$ 由于 T_3^* 下降快而下降快,使在 P_c 降低时先是 π 与 $\pi_{\eta_{\max}}$ 相靠近,在相等之后才变为 $\pi > \pi_{\eta_{\max}}$,从而适当的减缓了 η_c 下降的

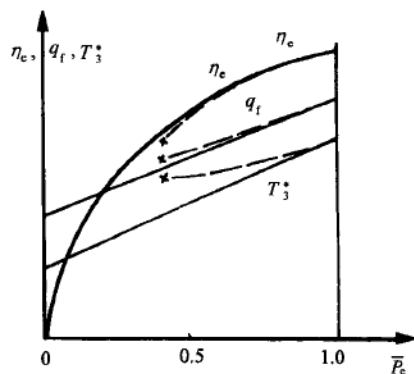


图 7.9 单轴燃气轮机带动负载时的性能

—— $n=n_0$ --- $P_c \propto n^3$, × 喘振