

11-210

7K471
2522

燃气轮机工作原理及性能

朱衍健 王雪瑜 著

科学出版社

1992

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是关于燃气轮机工作原理及性能方面的专著,它阐述了燃气轮机的基本理论、计算方法以及燃气轮机在航空领域和作为地面动力的各方面的应用。

本书分为三篇,共二十章。在燃气轮机的基本理论方面着重分析了与实际工作过程比较接近的实际循环理论、各部件的相互制约关系和部件匹配关系,这为燃气轮机的变工况计算和变工况分析打下了良好的理论基础。在计算方法方面,着重介绍了变比热计算方法并在附录中推荐了国外通用的空气、燃气热力性质表。在燃气轮机应用方面所作的介绍开阔了读者的思路,同时也探讨了燃气轮机的发展方向。

本书可作为从事燃气轮机性能研究和气动热力工程的科技人员的工具书或参考书,也可作为高等院校燃气轮机及其相关专业的本科生及研究生的教材或教学参考书。

燃气轮机工作原理及性能

朱行健 王雪瑜 著

责任编辑 陈文芳

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

北京市朝阳区东华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1992年12月第 一 版 开本: 860×1100 1/32

1992年12月第一次印刷 印张: 16 5/8

印数: 1—1 600 字数: 435 000

ISBN 7-03-003133-4/T·100

定价: 20.50元

前 言

近年来，随着我国改革、开放方针的贯彻，国民经济迅速发展，我国自行设计和研制生产新型号的航空燃气轮机已指日可待，地面燃气轮机在石油、化工、舰船等领域的应用也日益广泛。作为工程热力学一个重要分支的燃气轮机，在其工作原理和性能优化方面水平也得到了明显的提高。它为高性能飞机的设计，为工业系统中能源的充分利用，为燃气轮机自动控制系统的设计和完善奠定了良好的基础。

作为 50 年代初从事燃气轮机事业的一名工程技术人员和教师，看到许多熟悉的、共同奋斗过的同事和朋友纷纷从厂、所、院校的各个岗位上退居二线，年青的一代正在接班，一种历史责任感油然而生。为了将自己几十年来从事生产、科研和教学的成果和体会整理出来并传给后人，深感有必要撰写这本书稿。作为经验和体会可能挂一漏万，但将它献给年青的一代，深信他们会乐于接受，并会进一步创新发展，将我们燃气轮机事业推向世界先进行列。

本书第一篇基本理论部分中许多内容是教学经验的总结。第二篇中有关航空燃气轮机的特性都是根据作者设计的航空燃气轮机弹性数学模型专门计算的。作者在 1986 年访美期间，曾提出弹性数学模型理论，并与 W.F.O'Brien 教授作过多次深入讨论，此后共同署名发表了论文^[16]。第三篇中燃气轮机特性计算方法和燃气轮机模型，则是作者所在科研课题组的成果总结，也是国家自然科学基金支持项目的成果的一部分。

本书第二、四、十八、十九、二十章由王雪瑜副教授执笔。

清华大学倪维斗教授对全书作了仔细审阅，提出了许多重要而中肯的建议，并对本书有关地面燃气轮机的各章（第十四、十

五、十六章)作了重大补充和修改,还重写了第十六章,使本书比较全面地阐述了燃气轮机的地面应用。在此,谨向倪维斗教授表示由衷的谢忱。在本书有关航机陆用的阐述方面,清华大学赵士杭教授为本书提供了许多宝贵的材料,亦在此表示谢意。

朱行健

于北京航空航天大学

1991.8.10

目 录

符号表.....	viii
----------	------

第一篇 燃气轮机理论基础

第一章 绪论	1
§ 1-1 燃气轮机简介	1
§ 1-2 燃气轮机发展简史	4
§ 1-3 研究燃气轮机的主要学科分类	6
第二章 燃气轮机循环理论	8
§ 2-1 燃气轮机循环的主要性能指标	8
§ 2-2 理想燃气轮机循环分析	10
§ 2-3 实际燃气轮机循环分析	33
第三章 燃气轮机热力计算方法	47
§ 3-1 热力计算的目的	47
§ 3-2 等熵绝热过程的计算方法	48
§ 3-3 燃烧室油气比的计算方法	51
§ 3-4 热力计算的主要步骤	57
§ 3-5 热力计算举例	63
第四章 相似理论	75
§ 4-1 燃气轮机中气体定常流动的相似	75
§ 4-2 燃气轮机部件的相似工作	79
§ 4-3 燃气轮机的相似工作	87
§ 4-4 相似参数与换算参数	88
第五章 燃气轮机的部件特性	90
§ 5-1 轴流压气机特性	90
§ 5-2 透平特性	115

§ 5-3	主燃烧室和加力燃烧室特性	120
§ 5-4	进气道特性	128
§ 5-5	喷管特性	138
§ 5-6	混合器特性	144
§ 5-7	回热器特性	145
第六章	单轴燃气发生器	149
§ 6-1	单轴燃气发生器在稳态工作时各部件的相互制约	149
§ 6-2	单轴燃气发生器在设计工况下各部件的相互匹配	158
§ 6-3	单轴燃气发生器各部件在非设计工况下的共同工作	163
§ 6-4	单轴燃气发生器的控制方案	169
第七章	双轴燃气发生器	173
§ 7-1	双轴燃气发生器工作原理	173
§ 7-2	设计工况下高低压压气机之间压缩功的分配和转速的选择	178
§ 7-3	双轴燃气发生器各部件的相互制约以及在非设计工况下的共同工作	179
§ 7-4	双轴燃气发生器在设计工况下各部件的相互匹配	183
§ 7-5	双轴燃气发生器的控制方案	184
第八章	燃气轮机的过渡工作状态	185
§ 8-1	燃气轮机的起动过程	185
§ 8-2	燃气轮机的加速过程	188
§ 8-3	燃气轮机的减速过程	192
§ 8-4	起动和加减速过程中的控制参数	193

第二篇 燃气轮机的应用

第九章	航空燃气轮机概述	196
------------	-----------------------	------------

§ 9-1	航空燃气轮机的性能指标	198
§ 9-2	航空燃气轮机的推力和拉力	202
§ 9-3	航空燃气轮机的能量转化和效率	209
第十章	涡轮喷气发动机	215
§ 10-1	涡轮喷气发动机的设计参数选择	215
§ 10-2	飞机/发动机一体化参数选择方法	225
§ 10-3	单轴涡轮喷气发动机特性	226
§ 10-4	双轴涡轮喷气发动机特性	241
§ 10-5	双轴涡轮喷气发动机的台架性能调试	249
第十一章	涡轮风扇发动机	253
§ 11-1	涡轮风扇发动机的性能参数	254
§ 11-2	涡轮风扇发动机的设计参数选择	257
§ 11-3	涡轮风扇发动机各部件的相互制约和部件 匹配	264
§ 11-4	涡轮风扇发动机特性	269
第十二章	涡轮螺旋桨发动机和涡轮轴发动机	272
§ 12-1	涡轮螺旋桨发动机概述和性能参数	272
§ 12-2	涡轮螺旋桨发动机的设计参数选择	275
§ 12-3	涡轮螺旋桨发动机特性	277
第十三章	涡轮喷气发动机的加力	282
§ 13-1	喷射液体加力	282
§ 13-2	复燃加力	286
§ 13-3	复燃喷水加力	302
第十四章	地面燃气轮机概述	303
§ 14-1	发展简况和分类	303
§ 14-2	地面燃气轮机的各种负荷特性	306
§ 14-3	地面燃气轮机的性能指标	308
§ 14-4	航机改装的地面燃气轮机	309
第十五章	使用单轴和双轴燃气发生器的地面燃气轮机	320
§ 15-1	动力透平与单轴燃气发生器共轴的结构方	

案	320
§ 15-2 动力透平与单轴燃气发生器透平分轴的结 构方案	323
§ 15-3 分轴燃气轮机动力透平的超速问题	325
§ 15-4 动力透平导向器面积的调节	326
§ 15-5 分轴燃气轮机的控制	331
§ 15-6 使用双轴燃气发生器的地面燃气轮机	332
第十六章 蒸汽/燃气联合循环	336
§ 16-1 概述	336
§ 16-2 液体燃料与气体燃料的联合循环	338
§ 16-3 煤的气化蒸汽/燃气联合循环	340
§ 16-4 煤的沸腾燃烧蒸汽/燃气联合循环	344
§ 16-5 燃气轮机用于热电联供	348

第三篇 获取燃气轮机特性的方法 及燃气轮机仿真模型

第十七章 用试验方法获得燃气轮机特性	352
§ 17-1 地面试车台	353
§ 17-2 高空试车台	355
§ 17-3 飞行试车台	356
§ 17-4 性能参数测量方法简述	357
第十八章 用相似理论换算燃气轮机的特性	364
§ 18-1 燃气轮机的相似参数	364
§ 18-2 地面试车时燃气轮机性能的换算	368
§ 18-3 利用地面试车数据建立发动机的高度速度 特性	373
§ 18-4 性能换算时考虑大气湿度对性能的影响	376
第十九章 燃气轮机稳态和动态特性计算方法	390
§ 19-1 燃气轮机稳态特性的近似计算方法	390
§ 19-2 稳态特性的迭代算法	393

§ 19-3	迭代计算中寻找共同工作点的方法·····	397
§ 19-4	保证稳态特性计算收敛的措施·····	401
§ 19-5	燃气轮机的动态特性计算·····	406
第二十章	燃气轮机仿真模型及其应用·····	415
§ 20-1	燃气轮机仿真模型分类·····	415
§ 20-2	非实时仿真模型及其应用·····	416
§ 20-3	实时仿真模型及其应用·····	417
参考文献	·····	427
附录 1	国际标准大气表·····	429
附录 2	空气和燃气等温焓差表·····	433
附录 3	空气和燃气的热力性质表·····	438
附录 4	空气和燃气热力性质表分段拟合公式 (一) ·····	502
附录 5	空气和燃气热力性质表分段拟合公式 (二) ·····	505
索引	·····	517

第一篇 燃气轮机理论基础

第一章 绪 论

§ 1-1 燃气轮机简介

燃气轮机与一般常见的活塞式发动机一样，是一种以空气和燃气为工作介质将热能转变为机械能的热机。燃气轮机的简图如图1-1所示。

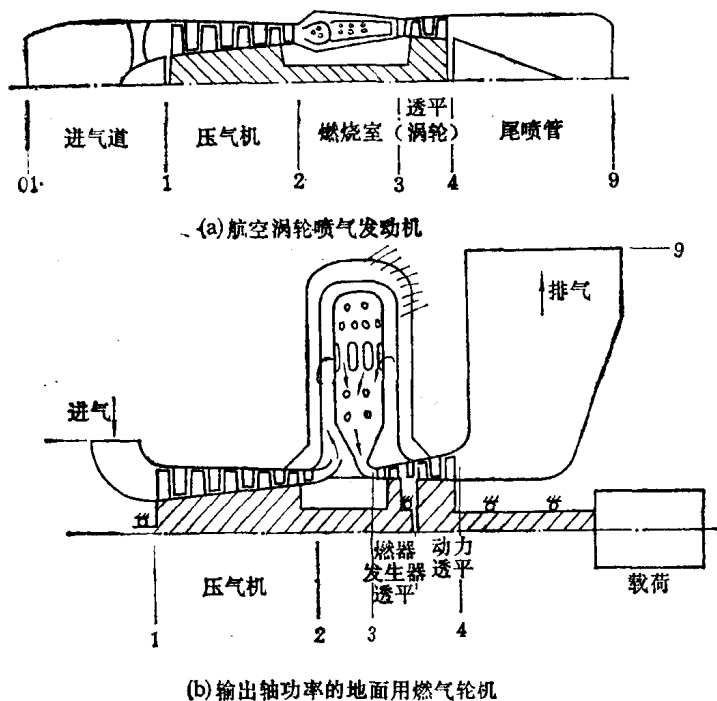


图 1-1 燃气轮机简图

大多数燃气轮机的工作介质是从周围大气中吸入的空气。空气连续不断地被吸入,在压气机中压缩增压后,进入燃烧室中喷油燃烧成为高温高压的燃气,再进入透平¹⁾中膨胀做功。显然,燃气的膨胀功必然大于空气在压气机中被压缩所需的功,这样就有部分富余的功可以被利用。可见,燃气轮机的膨胀功可以分为两部分,一部分膨胀功通过传动轴传递给压气机,用以压缩吸入燃气轮机的空气;其余的膨胀功则对外输出,用于发电或作为飞机、车辆、舰船等的动力。

燃气轮机与活塞式发动机不同之处在于:活塞式发动机工作时,空气是间断地进入气缸,气体的压缩、燃烧和膨胀过程发生在同一气缸中;而燃气轮机工作时,空气是连续不断地被吸入,气体的压缩、燃烧和膨胀过程分别在压气机、燃烧室、透平或尾喷管等不同的部件中进行。

压气机、燃烧室和用于带动压气机工作的透平,这三部分合称燃气发生器。这部分透平称为燃气发生器透平。燃气发生器出口的燃气具有一定的压力和温度,可以对外输出做功。不同用途的燃气轮机,输出做功的方式也不同。

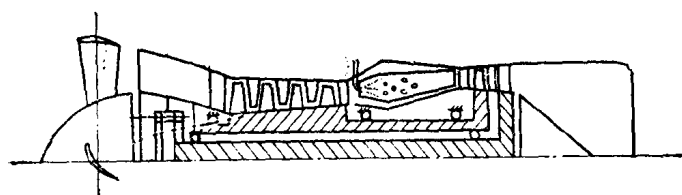
对于地面燃气轮机、船用燃气轮机或某些航空燃气轮机,要求提供轴功率,因此在燃气发生器后面再设置动力透平,如图1-1(b)所示。动力透平和燃气发生器透平可以固定在一根轴上,也可各有自己的旋转轴。燃气轮机的动力透平若具有单独的旋转轴,则称为分轴式燃气轮机。分轴式结构在性能上有许多优点,而最主要的优点则是,当燃气轮机在非设计工况下工作时,燃气发生器转子和动力透平可以有不同的转速,使得各部件具有较高的工作效率和较宽的运行范围。动力透平若与燃气发生器透平固定在同一根轴上,即为单轴式结构,往往很难用某一个截面来划分燃气发生器透平和动力透平,因为在设计时,一根轴上各级透平间的功率分配,并不是以燃气发生器透平和动力透平的功率大小来划分的。本书在研究燃气轮机各种用途之前,首先

1) 在我国航空工业领域里,习惯于将透平称为涡轮,而在本书中两者将通用。

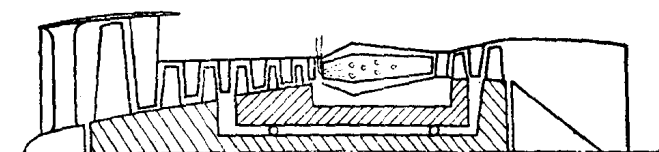
对燃气发生器进行较详细的分析研究，因此有必要提出燃气发生器透平的概念，并用一个假想的截面把两部分透平分开。

航空燃气轮机的最基本型式是航空涡轮喷气发动机（简称涡轮喷气发动机），如图1-1(a)所示。燃气发生器出口的高温高压燃气在尾喷管中膨胀加速，向后方高速喷射，可获得反作用推力。

在相同的燃气发生器的条件下，使航空燃气轮机获得更大的推力或拉力，可将燃气发生器出口的部分或大部分可用功，通过动力透平转化为轴功，轴功驱动螺旋桨成为涡轮螺旋桨发动机，轴功驱动外涵压气机（称为风扇）成为涡轮风扇发动机，如图1-2(a)、(b)所示。



(a) 航空涡轮螺旋桨发动机



(b) 航空涡轮风扇发动机

图 1-2 涡轮螺旋桨和涡轮风扇发动机

与活塞式发动机相比较，燃气轮机具有如下的优点：

(1) 功率大，单台燃气轮机的输出功率可达数万千瓦以上。

(2) 在功率相同的条件下，燃气轮机的重量比活塞式发动机轻得多。

(3) 不需要冷却水系统。

§ 1-2 燃气轮机发展简介

在19世纪末，人们对燃气轮机的方案就有了设想。20世纪以来，不断进行试验研究，到1939年先后制成第一台发电用燃气轮机和第一台航空燃气轮机。燃气轮机能够研制成功，是各领域科学技术进步的结果。

20世纪初，飞机的迅速发展促进了空气动力学的研究，为设计燃气轮机所必需的叶轮机空气动力学的发展打下了基础。为提高航空活塞式发动机的功率，设计了废气涡轮增压器，这就为设计高效率的压气机和透平准备了理论基础并提供了实践经验。

冶金工业的发展为燃气轮机提供了高强度合金钢、高强度铝合金以及用于制造燃烧室、透平等高温部件的耐热合金，这才有可能使燃气轮机工作转速和透平前燃气温度得以提高。

冷热加工工业的迅速发展，提高了制造工艺水平，才可能加工出形状复杂的压气机、透平叶片和其他燃气轮机零部件。

燃气轮机于1939年问世以来，航空燃气轮机的发展一直处于领先地位，特别是在军用航空领域里，用于歼击机的涡轮喷气发动机首先得到了迅速的发展。最初的涡轮喷气发动机，其压气机增压较低，仅4—12左右，透平前燃气温度也较低，约1 000—1 200K左右。这种最初的涡轮喷气发动机代替了活塞式发动机，使军用歼击机的飞行速度和高度有了大幅度的提高。近半个世纪以来，为了降低耗油率和减轻发动机的重量，压气机增压比和透平前燃气温度不断地提高。目前，压气机增压比已达到30以上，而透平前燃气温度则已超过1 600K。为进一步降低耗油率和减轻发动机的重量，从70年代起，在军用歼击机的发动机上，开始采用小涵道比涡轮风扇发动机，使耗油率下降到 $0.07 \text{ kg}/(\text{N}\cdot\text{h})$ 左右，推重比达到8左右。

在民用航空领域里，50年代初在大型运输机和旅客机上采用涡轮螺旋桨发动机代替活塞式发动机，使飞机的飞行速度和高度都

有所提高，但是由于螺旋桨性能的影响，其飞行速度不能超过 700 km/h。也有采用涡轮喷气发动机代替活塞式发动机的，但是涡轮喷气发动机的耗油率较高。因此，在50年代以后，广泛采用涡轮风扇发动机来代替涡轮螺旋桨和涡轮喷气发动机，作为大型运输机和旅客机的动力。

自50年代中期，我国开始仿制苏联BK-1Φ、PD-9B和P11-300Φ，并在仿制成功以后不断地改进和改型，使其成为具有我国特色的涡喷6、涡喷7系列发动机，用于强5、歼6、歼7和歼8等飞机上。1976年引进英国斯贝发动机的民用型，我国的代号为涡扇9。从1957年开始，我国自行设计了喷发1、红旗2两台涡轮喷气发动机和涡扇6涡轮风扇发动机。除喷发1发动机在歼教1飞机上进行过试飞以外，其他自行设计的发动机尚未在飞机上进行试飞，就由于各种原因而停止了进一步的试验研究。

在民用航空发动机方面，我国于60年代初仿制苏联AN-24涡轮螺旋桨发动机，并在此基础上将其改进改型成为我国涡桨5与涡轴5系列发动机。仿制苏联AN-20涡轮螺旋桨发动机，将其改型为涡桨6发动机。又于1980年从法国引进阿赫耶发动机，经改进改型后发展成为我国涡轴8和涡桨9系列发动机。

1976年以后，我国陆续将涡轴5、涡喷6、涡桨6和涡扇9等航空发动机改型为工业用的地面燃气轮机和军用舰艇的动力装置。

综观国内外燃气轮机的发展，到90年代，燃气轮机已成为航空动力的主要装置。而航空燃气轮机的迅速发展，使许多工业用或船用的燃气轮机采用航空燃气轮机改型的设计方案。

今后，对航空燃气轮机，仍将以提高其压气机的增压比和透平前燃气温度为主要任务，以提高燃气轮机的热效率；同时改进风扇压气机或螺旋桨的设计，以提高燃气轮机的推进效率。在降低发动机耗油率和增大发动机推重比的同时，进一步加强航空燃气轮机的结构完整性研究，使燃气轮机的使用可靠性提高，使用寿命延长，更便于维修。

在地面燃气轮机领域里,从60年代后期到70年代末,我国曾先后研制和仿制成多种燃气轮机,其功率从1 500 kW到23 000 kW不等。其中包括2 200 kW的长征 I、II型铁路机车用燃气轮机。作为铁路机车动力装置的燃气轮机,其热效率不如柴油内燃机,因此虽已研制成功,但并没有推广使用。

由于我国石油资源有限,燃气轮机在电站中的应用没有得到推广;而我国煤的资源比较丰富,所以大力发展用煤的蒸汽轮机。目前世界各先进国家正在研究发展燃煤的燃气蒸汽联合循环,燃气轮机以燃煤作为高温热源,充分利用燃气轮机的排气余热,供蒸汽轮机产生功率,并输出热水和蒸汽,建成热电联供的热电站。这种燃气蒸汽联合循环具有较高的热效率。

研究封闭介质的燃气轮机将为航天空间站提供新的能源设备。

用全功能电子数字自动控制系统来代替70年代以前普遍采用的机械液压式控制器是各种燃气轮机今后的发展趋势。由于电子数字控制技术的计算速度快,精度高,容易实现发动机的多变量控制和发动机-飞机一体化控制,从而能使发动机在各种工况下均能提供最佳的性能。这种全功能电子数字自动控制系统在英、美等国于80年代开始用于新型发动机上;我国正在积极进行预研试制中。

§ 1-3 研究燃气轮机的主要学科分类

按学科范畴,燃气轮机的研究工作主要有三个方面:

从气体动力学角度对燃气轮机进行研究。它从热力学,气体动力学,燃烧学等学科为基础,从空气和燃气的性质出发,来研究燃气轮机各个部件的工作原理和性能,研究各部件之间的性能匹配,以便设计出性能良好的部件和燃气轮机。

从固体力学角度对燃气轮机进行研究。它以金属和非金属材料学,结构力学,材料力学,强度与振动,结构设计等学科为基

础，从材料的性质和燃气轮机对结构的要求出发，来研究燃气轮机各个零部件设计时材料的选用，以及能满足燃气轮机工作要求的结构形状。

从燃气轮机控制的角度对燃气轮机进行研究。它以自动控制理论，燃气轮机动力学为基础，从系统控制的角度出发，来研究怎样才能使燃气轮机在各种工作条件下提供最佳的工作状态和最佳的过渡工作过程。

燃气轮机近50年的发展史，正是在上述各个学科领域里不断进行实验研究和理论研究，不断地更新设计所谱写的历史。

本书仅从气体动力学的角度对燃气轮机的总体性能和燃气轮机的数学模型进行由浅入深的分析研究，希望能对初学者和从事燃气轮机专业工作的工程师们有所裨益。

本书共分三篇，第一篇为燃气轮机的基本理论，包括循环理论，热力计算方法，相似理论，部件特性以及各部件共同工作时相互制约和相互匹配的工作原理等；第二篇为燃气轮机的应用，包括各种航空燃气轮机和地面燃气轮机；第三篇讨论了获取燃气轮机特性的方法，包括实验方法和计算方法，以及燃气轮机建模方法。

从50年代初开始，在燃气轮机工作原理及性能研究方面已有许多著作问世，如文献[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]。但是随着科学技术的发展，许多理论分析和计算方法都有了长足的进步。本书吸收了当前在科研和教学中的一些新成果。

第二章 燃气轮机循环理论

燃气轮机和其他热机一样，都是利用工作物质（简称工质），重复地进行着某些循环过程而不断地吸热做功。为了便于分析研究，需将燃气轮机的实际工作过程加以简化，作循环过程的理论分析。循环过程的理论分析对于提高燃气轮机设计状态的性能和研究变工况性能都是必不可少的。

燃气轮机问世以来，通过对其循环理论的分析研究，提出了一系列提高性能的途径。例如，提高透平前燃气温度；适当选取压气机的增压比；改善各部件的工作效率；采用压缩过程中间冷却和膨胀过程中间加热等措施。因此，燃气轮机循环理论及其所阐明的一系列概念是研究燃气轮机工作原理的理论基础。

§ 2-1 燃气轮机循环的主要性能指标

将燃气轮机作为一种热机进行热力循环分析时，主要的性能指标有以下两个：

1. 比功 w

燃气轮机是将热能转变为功的机械。为描述燃气轮机循环作功性能的优劣，需引入比功这个指标。

流过燃气轮机的单位质量工质所输出的机械功（或称有用功），或单位质量流量工质所输出的功率称为比功，其定义式为

$$w = \frac{dW}{dm} = \frac{P}{q_{ma}} \quad (2-1)$$

式中 dW ——流过质量为 dm 的工质所输出的机械功；

P ——当工质质量流量为 q_{ma} 时所输出的功率。

采用比功而不是采用总功率作为描述循环性能的指标，是因