



国防科技图书出版基金

王丰 著

热力学 循环优化分析

Optimum Analysis of
Thermodynamic Cycle



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

热力学循环优化分析

Optimum Analysis of
Thermodynamic Cycle

王丰 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

热力学循环优化分析 / 王丰著. —北京: 国防工业出版社, 2014. 1

ISBN 978 - 7 - 118 - 09096 - 3

I. ①热... II. ①王... III. ①发动机-热力计算
IV. ①TK11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 267154 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售



*

开本 880 × 1230 1/32 印张 10½ 字数 289 千字

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 陆军 芮筱亭

李言荣 李德仁 李德毅 杨伟

肖志力 吴宏鑫 张文栋 张信威

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

人们的衣食住行,都离不开能源,能源是人类生存不可缺少的必需品,是经济发展和社会进步的重要物质基础。人类社会的发展与能源的开发和利用水平密切相关,任何一个国家要发展经济、改善人们的生活,就必须提高机械化、电气化和自动化的水平,这就意味着要消耗更多的能源。

20 世纪 50 年代以来,以石油和天然气为原料的石油化学工业突飞猛进,石油便成为国民经济各部门的主要能源,在近 30 年的时间里,世界上几个科技发达的国家,依靠石油和天然气创造了人类历史上空前灿烂的物质文明。能源不仅是国民经济发展的动力,而且也是衡量一个国家综合国力和人们生活水平以及国家文明发达程度的重要指标,因此有人认为:能源、材料与信息是现代工业和科技的三大支柱。

随着全球人口的不断增加和经济的继续发展,人类对能源的需求量将日益增长,能源资源正在迅速减少,人们将面临能源日渐匮乏的危机。能源对全球经济的发展和国际政治将产生更大的影响,与此同时,能源的生产和利用,对人类生存环境的破坏性影响也将进一步加剧,节约能源已成为举世瞩目的问题。

当今社会无论是电力、交通运输、农业、林业和矿业等民用企业,还是海、陆、空和二炮部队所使用的大型军用装备——坦克、战舰、飞机和导弹都是以各种活塞式发动机、燃气涡轮动力装置、涡轮喷气发动机、冲压喷气发动机和火箭发动机为动力的,这些动力装置主要是以石油产品(汽油、煤油和柴油等)为燃料。显然,能源既是一种日益宝贵的商品,同时也是一种重要的战略物资。因此,解决节能问题,不仅在经

济建设方面有巨大的经济价值和社会效益,而且在国防建设方面也有重要的意义。

在解决实际工程技术问题时,一般来说,基础理论的研究都是很重要的,忽视基础理论的指导作用,而只关注热力发动机的表面现象,则将“舍本逐末”,是不可能期待有突破性成果的。

1705年,人类发明了具有划时代意义的蒸汽机,从此掀起了第一次产业革命,这场革命使当时的工业从工场手工业发展成为大规模的机械生产。经过长时间和大量技术人员不断改进,直到1770年,瓦特才发明了具有较完善结构的蒸汽机,但它的热效率非常低,经济性差。

1824年,法国物理学家卡诺,在他的论文“论火的动力”中,提出了由两个可逆定温过程和两个可逆的绝热(即等熵)过程组成的理想循环——卡诺循环,从理论上解决了如何提高热机的热效率问题。由于采用气体作工质时,难以实现定温吸热和定温排热过程,所以到目前为止,人们尚未研制出按照这种循环工作的发动机。但是,卡诺所提出的循环热效率公式,指出了提高发动机经济性的根本措施,具有重要的理论价值,近200年来,卡诺循环的结论一直指导着热力发动机的发展方向。

热力学循环是研究如何将燃料的化学能转变为机械能的理论方案,根据它才能设计、制造出高质量的热动力装置,因此,循环理论是研制各种高质量热力发动机的理论基础。由不同热力学过程组成的循环,不仅决定了循环比功(单位质量工质所完成的循环功)的大小、热效率的高低,而且影响发动机几何尺寸和质量的大小、设备的多少和整个装置的紧凑度,以及运行的安全性和可靠性。研究各种热力发动机循环的目的,是要掌握它们工作的基本规律及其物理本质;了解各种因素对发动机性能参数的影响,从而找到增大循环比功、降低油耗以及减小整个动力装置的几何尺寸和质量的各种技术措施。

各种大功率的热力发动机是三军主要军事装备的“心脏”,它们性能参数的水平对坦克、军舰和战机的战斗力起着至为关键的作用,正因

为如此,美、俄等技术先进的国家都认为先进的发动机技术对保持军事装备和商业竞争的优势有着非常重要的意义,从而一直把优先发展新型动力装置作为一项基本国策,制定了长远的、高投入的发动机发展规划,并将创新型的热力学循环研究放在重要位置。按照这种热力学循环研制的动力装置将具有很高的热效率和很大的比功。用它作为飞机的动力,可使飞机飞得更快、更高、更远,同时改善其经济性。

著名科学家钱学森告诫我们:“我们不能人云亦云,这不是科学精神,科学精神最重要的就是创新。”科学的本质就是创新,技术创新是各行各业兴起及发展的前途和保障。科技实践证明,创新意识、原创性思想与创新战略对科技的发展,比充足的经费和精确的实验设备更具有决定性意义,而良好的创新氛围和实验条件是产生高水平创新成果的温床。重视基础研究,鼓励技术创新是国家富强民族兴旺的必由之路。

本书是一本研究各种发动机热力学循环的专著,它总结了作者 40 多年来的研究成果,其主要创新点如下:

第一、首先提出了热力学循环的优化分析法

这种方法包括建立各种物理模型;数学模型,以及用数学解析方法确定使发动机循环有最大循环功时的最佳增压比(或压缩比)和最高热效率时的最经济增压比等性能参数,并应用此法分析了各种民用和军用发动机的理想循环;

第二、传统的循环分析法,只研究热效率问题(未研究热效率是否存在极大值的问题),并将它作为评定热力学循环优劣的唯一指标。本书作者提出了采用最大循环功、最高热效率及其所对应的最佳增压比(或压缩比)和最经济增压比等参数作评价热力学循环性能好差的综合指标,能更科学的评价发动机的性能。为了计算各种性能参数共推导出各种理论计算公式 200 多年;

第三、建立了多种更符合发动机实际情况的物理模型和数学模型;提出了三种新型活塞式发动机理想循环,以及再加热回热和中间冷却、

再加热、回热燃气涡轮动力装置理想循环,用优化分析法,计算的结果表明,这些循环均具有优良的性能,研制按上述循环工作的动力装置将具有很大的经济效益、社会效益和军用价值;

第四、用单参数法和多参数法研究了各种部件效率、工质性质不同以及散热散损失等多种因素对最大循环功和最高热效率等性能参数的影响。深刻地揭示了发动机工作过程的物理本质;为提高发动机性能指明了方向;

第五、对提高热机性能的三种理论,即中间冷却、再加热和回热进行了全面、深入的分析。导出了能准确计算回热器对数平均温度差的理论公式(参考文献 13),该文被国外权威机构只读光盘(CD - ROM)数据库(COMPENDEX PLUX)摘录收藏;

第六、导出了按不同循环工作的涡桨和涡扇喷气发动机循环功为极大值时的最佳分配系数的理论计算公式;循环功为极大值时涡桨喷气发动机最大总单位力和总效率的理论计算公式。涡轮风扇喷气发动机循环功为极大值时最大单位比推力的理论计算公式;循环功为极大值时最佳推进效率和总效率的理论计算公式。冲压喷气发动机循环功为极大值和最大单位推力时的最佳飞行马赫数;循环功和单位推力为极大值时的推进效率与总效率的理论计算公式。

本书的大部分内容是目前国内外同类专著所没有的。总之,上述成果为研制高质量的动力装置奠定了可靠的理论基础。将理想循环循环功和热效率公式进行修正,即考虑压气机效率、涡轮效率、燃烧效率、燃烧室内工质的总压恢复系数空气与燃气热力学性质不同时,以及空气和燃气在换热器的压降(即各种流阻损失)的影响,上述优化分析方法就可用于新机的研制工作。

教育部高等学校能源动力类教学指导委员会副主任、热工基础教学指导分委员会主任、北京科技大学副校长张欣欣教授,中国工程院院士、北京航空航天大学王浚教授,北京航空航天大学能源与动力工程学院院长丁水汀教授在百忙中为本书的出版书写了推荐意见,作者对他

们的热忱支持表示衷心的感谢。

北京航空航天大学能源与动力工程学院副教授郭隽博士、湖南湘潭大学副教授李毅博士为本书完成了大量计算工作,并完成了书稿的录入工作,对他们的辛勤劳动,作者在此表示感谢。

由于本人才疏学浅,书中存在缺点甚至错误在所难免,欢迎读者批评指教。

王丰 2012 年 10 月 25 日
于北京航空航天大学
60 周年校庆

符 号 表

拉 丁 字 母

a_H	声速	m	涵道比
c_p	定压比热容	n	多变指数
c_v	定容比热容	p	绝对压力
C	气流速度	q	比热量
C_H	飞行速度	R	气体常数、推力
f	回热度	s	熵
G	流体流量	T	热力学绝对温度
h	比焓	v	比容
H_u	燃料热值	W_0	循环比功
k	比热容比(或称绝热指数)	W	部件功
M_H	马赫数		

希 腊 字 母

ε	压缩比或膨胀比	λ	压升比、加力比
η	效率	π_K	增压比
η_i	热效率	ρ	预胀比
η_f	飞行效率(或称推进效率)	σ	总压恢复系数
η_B	螺旋桨效率	χ	循环功分配系数
η_0	总效率		

下角标

a	空气的参数	$\lim$	极限值
B	螺旋桨参数	$\max$	极大值
c	燃烧室的参数	$\min$	极小值
e	膨胀过程的参数	opt	最佳值
eco	最经济值	p	定压过程的参数
f	燃油的参数	s	等熵过程的参数
g	燃气的参数	sp	比参数
H	飞行状态参数	T	涡轮的参数
K	压气机或压缩过程的参数	v	定容过程的参数

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 能源概述	1
1.1.1 太阳能	2
1.1.2 海洋能	3
1.1.3 风能	6
1.1.4 水能	7
1.1.5 地热能	7
1.1.6 生物质能	9
1.1.7 核能	10
1.1.8 氢能	11
1.1.9 可燃冰(甲烷水合物)	14
1.1.10 石油	16
1.1.11 天然气	18
1.1.12 煤	19
1.1.13 节约能源	23
1.2 能源使用及其发展的历史	24
1.2.1 能源使用的历史	24
1.2.2 能源未来的发展	28
1.3 热能动力装置在国民经济和国防建设中的作用	34
1.4 热力学循环优化分析法	36
1.4.1 现有循环分析法的缺点	37
1.4.2 物理模型法	38

1.4.3	数学模型法	40
1.4.4	热力学循环优化分析	41
1.4.5	因素分析法	43
第2章	活塞式内燃机理想循环(加热后工质的热力学性质不变)	45
2.1	卡诺循环	45
2.2	活塞式发动机的实际工作过程	48
2.3	理想循环的若干假设	49
2.4	活塞式发动机理想循环的优化分析	50
2.4.1	奥托循环(定容加热定容排热循环)的优化分析	50
2.4.2	狄赛尔循环(定压加热定容排热循环)的优化分析	59
2.4.3	双燃(又称混合加热定容排热循环)循环的优化分析	65
2.4.4	工质的最高压力比	71
2.5	三种活塞式发动机理想循环性能参数的比较	72
第3章	活塞式内燃机理想循环(加热后工质热力学性质变化)	74
3.1	工质的热力学性质	74
3.1.1	燃料的热值	74
3.1.2	理论空气量与余气系数	77
3.1.3	工质的热力学性质	79
3.2	活塞式发动机理想循环的优化分析	82
3.2.1	奥托循环(定容加热定容排热循环)的优化分析	82
3.2.2	狄赛尔循环(定压加热定容排热循环)的优化分析	87

3.2.3	双燃循环(混合加热定容排热循环)的优化 分析	90
3.3	考虑工质散热损失的活塞式发动机循环的优化 分析	92
3.3.1	工质与缸壁之间的传热及多变指数	92
3.3.2	多变过程的分析	95
3.3.3	考虑散热损失定容加热定容排热理想循环的优化 分析	98
3.3.4	考虑散热损失定压加热定容排热理想循环的优化 分析	102
3.3.5	考虑散热损失混合加热定容排热理想循环的优化 分析	106
第4章	新型活塞发动机内燃机理想循环	111
4.1	三种活塞式发动机理想循环的某些缺点	111
4.2	定容加热定压排热新型汽油机理想循环的 优化分析	112
4.3	定压加热定压排热新型柴油机理想循环的 优化分析	117
4.4	混合加热定压排热新型活塞式发动机理想循环的 优化分析	122
第5章	燃气涡轮动力装置理想循环	126
5.1	燃气涡轮动力装置理想循环的优化分析	127
5.2	考虑压气机效率影响燃气轮机循环的优化分析	131
5.3	考虑涡轮效率影响燃气轮机循环的优化分析	136
5.4	考虑工质在燃烧室总压恢复系数影响燃气轮机循环的 优化分析	140
5.5	同时考虑压气机效率和涡轮效率影响燃气轮机循环的 优化分析	144

第 6 章 中冷、再加热、回热涡轮动力装置理想循环 149

6.1 中间冷却、再加热和回热 149

6.2 中间冷却和再加热过程工质增压比与膨胀比的最佳分配 150

6.2.1 中间冷却总压缩功为极小值时增压比的最佳分配 150

6.2.2 分级加热(或称级间再加热)膨胀功为极大值时工质膨胀比的最佳分配 154

6.2.3 回热(或称余热回收) 154

6.3 中间冷却燃气涡轮动力装置理想循环的优化分析 155

6.4 再加热燃气涡轮动力装置理想循环的优化分析 161

6.4.1 单轴和双轴(或称分轴)两级膨胀、级间再加热涡轮动力装置的工作原理及其优缺点 161

6.4.2 单轴两级膨胀、级间再加热涡轮动力装置理想循环的优化分析 163

6.4.3 双轴、两级膨胀、级间再加热涡轮动力装置理想循环的优化分析 168

6.5 回热燃气涡轮动力装置理想循环的优化分析 172

第 7 章 燃气涡轮动力装置复杂理想循环 180

7.1 中间冷却-回热燃气涡轮动力装置理想循环的优化分析 181

7.1.1 中间冷却-回热燃气涡轮动力装置的工作过程 181

7.1.2 中间冷却-回热燃气涡轮动力装置循环的优化分析 182

7.2 再加热-回热燃气涡轮动力装置理想循环的优化分析 188