



不可逆过程和循环的 有限时间热力学分析

Finite Time Thermodynamic Analysis of Irreversible
Processes and Cycles

陈林根



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

不可逆过程和循环的 有限时间热力学分析

Finite Time Thermodynamic Analysis of Irreversible
Processes and Cycles

陈林根



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

图书在版编目(CIP)数据

不可逆过程和循环的有限时间热力学分析/陈林根.
—北京:高等教育出版社,2005.1
ISBN 7-04-013975-8

I.不... II.陈... III.①不可逆过程热力学②热力学循环 IV.O414

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 123104 号

策划编辑 卢 广 责任编辑 陈大力 封面设计 张 楠
责任绘图 杜晓丹 版式设计 史新薇 责任校对 尤 静
责任印制 韩 刚

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
			http://www.landaco.com.cn
经 销	北京蓝色畅想图书发行有限公司		
印 刷	高等教育出版社印刷厂		
开 本	850×1168 1/32		
印 张	9.375	版 次	2005 年 1 月第 1 版
字 数	230 000	印 次	2005 年 1 月第 1 次印刷
插 页	1	定 价	19.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 13975-00

作者简介



陈林根(1964—),男,浙江海盐人,博士,教授,博士生导师,海军工程大学核能科学与工程系主任,研究生院院长,海军大校。分别于1983年7月、1986年2月和1998年5月在海军工程大学获工学学士、硕士和博士学位。1999年3月至2000年2月赴俄罗斯海军工程学院进修舰船动力专业。主要从事现代热力学、叶轮机械最优设计和现代维修理论与工程研究,目前承担973项目、解放军总装备部和海军装备部项目等10余项。1988年起参与热力学优化理论研究,在国内外学术刊物发表论文610余篇,其中欧美刊物190余篇,在美国出版专著2部。应聘担任工程热物理学会工程热力学分科学会委员,中国能源研究会热力学及工程应用专业委员会委员,中国科协学会部学科带头人,《工程热物理学报》、《汽轮机技术》、《燃气轮机技术》、《海军工程大学学报》编委。获全国优秀百篇博士学位论文奖,中国科协求是杰出青年实用工程奖,全军优秀教师,全军优秀博士,享受国务院政府特殊津贴和军队一类岗位津贴,荣立二等功一次,三等功两次。

导师简介



孙丰瑞（1939—），男，黑龙江哈尔滨人，海军工程大学动力工程系教授，博士生导师。1955年8月进入哈尔滨工业大学动力系学习，1960年7月毕业后至今在海军工程大学任教。主要从事现代热力学、热力系统可靠性、故障诊断学和核反应堆动力学研究。应聘担任湖北工程热物理学会副理事长，全国高校工程热物理学会常务理事，《海军工程大学学报》编委。获全国优秀博士学位论文指导教师奖，全军院校首批育才奖金奖，享受国务院政府特殊津贴。

摘 要

本书在全面系统地了解和总结有限时间热力学理论和应用研究现状的基础上,通过理论分析、数值计算与实验观测,对不可逆卡诺型理论循环和实际不可逆工程循环的有限时间(尺寸)最优性能进行了研究,取得了一些具有重要理论意义和实用价值的研究成果。

本书主要由以下三部分组成:

第一部分研究热机循环及类热机装置的性能优化。第2章建立了广义不可逆卡诺型单一和联合热机循环模型,并研究其最优性能,分析了导热规律对最优性能的影响。由所建立模型得到的最佳功率、效率关系呈回原点的扭叶型,与实际装置特性相一致,由此确定了热机参数设计与运行优域。这是本书在理论上最突出的贡献。第3章研究了 Diesel、Otto 和混合加热内燃机循环的功(功率)、效率特性。第4章研究了恒温和变温热源条件下内可逆和不可逆简单和回热式闭式燃气轮机循环的最优性能,得到了功率和效率解析式,发现实际装置的功率、效率关系也为回原点的扭叶型,回热对闭式燃气轮机循环功率有影响。这是本书在实际工程循环研究中最突出的贡献。第5章研究了单级和联合循环化学机和流体流动做功装置最优性能,在考虑质漏的影响时,其功率、效率特性也为回原点的扭叶型。提出基于广义热力学过程拓宽有限时间热力学研究范围。

第二部分研究制冷循环的性能优化。第6章建立了广义不可逆卡诺型单一和联合制冷循环模型并研究其最优性能,分析了导热规律对最优性能的影响。由所建立模型得到的制冷率、制冷系数特性与国外大量实验研究所得特性相同。第7章重点研究了简单和回热式空气制冷机性能,得到了系统的解析结果,其性能特性

与所建立理论模型特性相同。另外还研究了蒸气压缩式空调装置和热电制冷机的最优性能。第 10 章对热电制冷机进行了实验研究,所得制冷率与制冷系数特性与理论分析结果一致。

第三部分研究热泵循环的性能优化。第 8 章建立了广义不可逆卡诺型单一和联合制冷循环模型并研究其最优性能,分析了导热规律对最优性能的影响。第 9 章研究了简单和回热式空气热泵和热电热泵最优性能,并由有限高温热源的广义内可逆三热源热泵循环模型及其最优性能得到了线性唯象定律系统各种热力循环的统一描述。

关键词: 热机 制冷机 热泵 不可逆过程 有限时间热力学
最优性能

ABSTRACT

On the basis of understanding and summarizing the current developments of finite time thermodynamic theory and its applications, this book focuses on the studies of finite - time and finite - size optimal performance of irreversible Carnot - like theoretical cycles and real irreversible engineering cycles using the method of theoretical analysis, numerical calculation and experimental observation. It consists of the following three main parts:

The first part concentrates on the performance optimization of the heat engine cycles and the heat - engine - like devices. Chapter 2 builds up the models of generalized irreversible Carnot - like single - and combined - cycle heat engines, investigates the optimal performance of the models, and analyzes the effect of heat transfer law on the performance of the models. The optimal power vs. efficiency characteristics of the models is a loop - shaped curve, which is consistent with the real plant performance. The optimal region of the design and operation parameters of heat engines is determined. This chapter is the most important theoretical contribution to the study of finite time thermodynamics. Chapter 3 studies the work and/or power output vs. efficiency characteristics of Diesel, Otto and Dual cycles. Chapter 4 studies the optimal performance of endoreversible and irreversible simple and regenerated closed gas turbine cycles with constant - and variable - temperature heat reservoirs. The analytical expressions of power and efficiency are derived. It is found that the power vs. efficiency characteristics of the real cycles is also a loop - shaped curve, and that the regeneration affects the power of

the closed gas turbine cycle. This is the most important contribution to the engineering cycle analyses of finite time thermodynamics. Chapter 5 concerns to the optimization of the single – and combined – cycle chemical engines and the fluid flow power converters. With the considerations of mass leak, the power vs. efficiency characteristics of the two devices is also a loop – shaped curve. A new idea of extending the finite time thermodynamics to the generalized thermodynamic processes is provided.

The second part concentrates on the performance optimization of the refrigeration cycles. Chapter 6 builds up the models of generalized irreversible Carnot – like single – and combined – cycle refrigerators, investigates the optimal performance of the models, and analyzes the effect of heat transfer law on the performance of the models. The optimal cooling load vs. COP characteristics of the models is consistent with the experimental results provided by references. Chapter 7 studies the optimal performance of simple – and regenerated air – refrigeration cycles, derives the analytical expressions of the cooling load and COP. The performance characteristics are consistent with the theoretical results of the generalized irreversible Carnot – like cycles built in this book. The optimal performance of the real vapour – compression air – conditioner and thermoelectric refrigerator are also studied. Chapter 10 reports the experiment results of the thermoelectric refrigerator, which are consistent with the results of theoretical analysis.

The third part concentrates on the performance optimization of the heat pump cycles. Chapter 8 builds up the models of generalized irreversible Carnot – like single – and combined – cycle heat pumps, investigates the optimal performance of the models, and analyzes the effect of heat transfer law on the performance of the models. Chap-

ter 9 studies the optimal performance of simple – and regenerated air heat pumps and thermoelectric heat pump, and provides a unified description of linear phenomenological law system various endoreversible cycles using a generalized three – heat – reservoir heat pump cycle model with a finite high – temperature source.

Key words: heat engine, refrigerator, heat pump, irreversible process, finite time thermodynamics, optimal performance

主要符号说明

A	活塞面积;定义的中间参量
B	有效传热系数
C	热容率
C_i	热漏热导率
D	总压恢复系数;直径
E	生态学目标;内能;换热器有效度
F	换热面积
f	面积比
h	传质系数;比焓
I	不可逆度;电流
K	传热系数
κ	比热比;速率常数
L	拉格朗日函数;长度
M	有效传质系数
m	$(\kappa - 1)/\kappa$, κ 为比热比
$\dot{m}$	质量流率
N	传热单元数;传质量
n	传热指数;传质指数;循环个数
P	功率

p	压力
Q	换热量(对往复式循环);换热率(对连续流循环)
Q_i	热漏量
q	热漏率
Q_H, q_P	供热率
Q_L	制冷率
R	制冷率;电阻;流阻
r	等熵温比指数;流阻
s	比熵
T	热力学温度
t	时间
V	容积
W	功
x	工质温比;化学势差

希腊字母

α	燃烧相关常数;传热系数;Seebeck 系数
β	传热相关常数;供热系数
γ	压缩比
ϵ	制冷系数;卡诺系数
η	效率;卡诺系数
μ	摩擦系数;化学势;动力粘度
Π	利润率
π	压力比
σ	熵产率
τ	周期
ϕ	内不可逆性
ψ	价格

下	标
a	最佳值
C	卡诺
c	压气(缩)机
H	高温热源侧
HC	高温侧工质
in	进口
L	低温热源侧
LC	低温侧工质
m	最大利润率
max	最大值
min	最小值
opt	最佳值
out	出口
P	最大功率点
$Q_{H,q}$	最大供热率点
$Q_{L,R}$	最大制冷点
r	可逆
T	总量
t	涡轮(膨胀)机
TE	热电
wf	工质
β	最大供热系数点
ϵ	最大制冷系数
η	最大效率点
1,2,3,4,5,6	状态点

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街 4 号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 有限时间热力学的产生和发展	1
1.3 有限时间热力学的内涵	4
1.4 有限时间热力学的研究现状	5
1.4.1 无限热容热源牛顿定律热机系统	5
1.4.2 损失模型对热机最优性能的影响	9
1.4.3 热源模型对热机最优性能的影响	10
1.4.4 实际热机装置和热过程分析	10
1.4.5 制冷循环研究	14
1.4.6 热泵循环研究	16
1.5 本书的主要工作及章节安排	17
第 2 章 卡诺型热机循环性能分析与优化	20
2.1 引 言	20
2.2 牛顿定律系统分析与优化	22
2.2.1 热漏对往复式热机最优构型的影响	22
2.2.2 热漏对定常流卡诺热机功率效率特性的影响	26
2.2.3 新的广义不可逆卡诺热机模型及其优化	32
2.3 导热规律的影响分析	40

2.3.1 导热规律对内可逆热机有限时间炯经济性能的影响	40
2.3.2 导热规律对广义不可逆卡诺热机最优性能的影响	45
2.3.3 线性唯象定律传热时加热气体的最优膨胀	49
2.4 联合动力循环性能分析与优化	56
2.4.1 循环模型	56
2.4.2 基本优化关系	58
2.4.3 分析与讨论	60
2.5 小 结	61
第 3 章 内燃机循环性能分析与优化	63
3.1 引 言	63
3.2 Diesel 循环特性分析	63
3.3 Otto 循环特性分析	68
3.4 混合加热 (Dual) 循环特性分析	72
3.5 摩擦对 Diesel 循环特性的影响	76
3.6 小 结	80
第 4 章 闭式燃气轮机循环性能分析与优化	81
4.1 引 言	81
4.2 内可逆简单循环分析	82
4.2.1 恒温热源循环分析	82
4.2.2 变温热源循环分析	83
4.2.3 卡诺和布雷顿循环的性能比较	85
4.2.4 分析与讨论	88
4.3 不可逆简单循环分析	90
4.3.1 恒温热源循环分析	90
4.3.2 变温热源循环分析	93
4.4 实际回热式循环分析	95
4.4.1 循环模型	96
4.4.2 功率和效率解析式	98

4.4.3 数值算例	101
4.4.4 分析与讨论	107
4.5 小 结	110
第 5 章 类热机循环与装置的分析	112
5.1 引 言	112
5.2 单级等温化学发动机性能分析与优化	113
5.2.1 内可逆化学发动机的最佳功率效率关系	113
5.2.2 传质定律的影响	114
5.2.3 质漏的影响	115
5.2.4 分析与讨论	116
5.3 联合循环等温化学发动机性能分析与优化	117
5.3.1 内可逆联合循环的最优特性	117
5.3.2 质漏的影响	119
5.4 流体流动做功装置分析	120
5.4.1 线性压降流率关系下的功率效率特性	120
5.4.2 活塞与气缸间摩擦损失的影响	122
5.4.3 非线性压降流率关系的影响	124
5.5 讨 论	126
5.5.1 线性系统的一类基本特征	126
5.5.2 内可逆性泛化与广义热力学优化	127
5.6 小 结	128
第 6 章 卡诺型制冷循环性能分析与优化	129
6.1 引 言	129
6.2 牛顿定律系统分析与优化	130
6.2.1 热漏对往复式制冷机最优构型的影响	130
6.2.2 新的广义不可逆卡诺制冷机模型及其优化	133
6.3 导热规律的影响分析	143
6.3.1 导热规律对内可逆循环有限时间炯经济性能的影响	143
6.3.2 导热规律对广义不可逆卡诺制冷机最优性能的影响	146