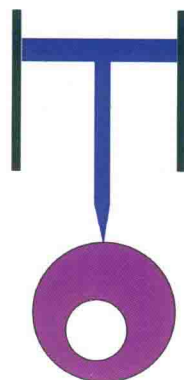
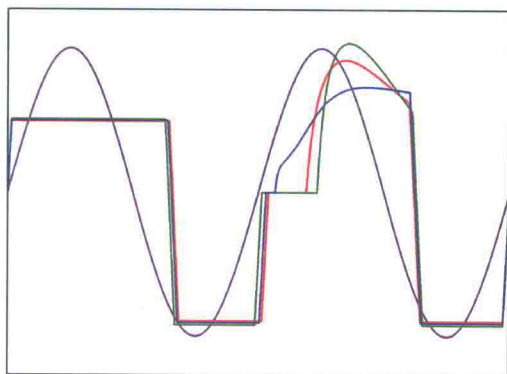


不可逆循环的 广义热力学动态优化

——工程热力装置与广义机循环

Generalized Thermodynamic Dynamic-Optimization of Irreversible Cycles:
Engineering Thermodynamic Plants and Generalized Engine Cycles

陈林根 夏少军 著



科学出版社

国家自然科学基金项目 (No. 51576207) 资助出版

不可逆循环的广义热力学动态优化 ——工程热力装置与广义机循环

**Generalized Thermodynamic Dynamic-Optimization
of Irreversible Cycles: Engineering Thermodynamic
Plants and Generalized Engine Cycles**

陈林根 夏少军 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

基于广义热力学优化理论,本书对工程界和人类社会中广泛存在的不可逆功、热能、电能、化学能和资本等工程热力装置与广义机循环开展了动态优化研究,获得了不同优化目标下的循环最优构型。本书汇集著者多年研究成果,第1章介绍有限时间热力学、熵产生最小化、广义热力学优化、焓理论等各种热学优化理论的产生,并回顾与本书相关的动态优化问题的研究现状。第2~6章分别对活塞式加热气缸、内燃机、光化学发动机、商业机、广义机的动态优化(最优构型)问题进行研究,提出广义热力学动态优化理论,给出解决各种不可逆广义能量转换循环与系统动态优化问题的统一方法以及普适研究结果。本书在研究方法上以交叉、移植和类比为主,最大特点在于深化物理学理论研究的同时,注重多学科交叉融合研究并紧贴工程实际,在研究过程中追求物理模型的统一性、优化方法的通用性和优化结果的普适性,最终实现基于广义热力学优化理论的不可逆循环动态优化研究成果集成。

本书内容丰富、结构严谨、概念新颖、难易适中,可供能源、动力、化工、航空航天、船舶工程、电子、经济等领域的科技人员参考,也可作为高等院校能源动力类相关专业本科生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

不可逆循环的广义热力学动态优化:工程热力装置与广义机循环 = Generalized Thermodynamic Dynamic-Optimization of Irreversible Cycles: Engineering Thermodynamic Plants and Generalized Engine Cycles / 陈林根, 夏少军著.
—北京: 科学出版社, 2018
ISBN 978-7-03-056725-3

I. ①不… II. ①陈…②夏… III. ①工程热力学—研究 IV. ①TK123

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第044517号

责任编辑: 耿建业 陈 琼 武 洲 / 责任校对: 彭 涛
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 北京铭轩堂广告设计有限公司

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年6月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018年6月第一次印刷 印张: 18 1/4

字数: 365 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



陈林根(1964—),男,浙江海盐人,教授,博士生导师,中国人民解放军海军工程大学动力工程学院院长,舰船动力工程军队重点实验室主任,舰船动力工程国家级实验教学示范中心主任。主要从事有限时间热力学、自然组织构形理论、叶轮机械最优设计、现代维修理论和工程研究。因教学科研和人才培养工作成绩卓著,荣立二等功1次,三等功3次。获湖北省自然科学二、三等奖8项,军队科技进步二、三等奖5项,军队教学成果二、三等奖3项。获首届中国科学技术协会“求是杰出青年实用工程奖”和“全国百篇优秀博士学位论文奖”。被评为全军院校教书育人优秀教师,全军优秀教师,全军优秀博士。获政府特殊津贴,中国人民解放军优秀专业技术人才一类岗位津贴。入选教育部“新世纪优秀人才支持计划”和“新世纪百千万人才工程”国家级人选。

主持国家973计划课题、国防973计划子课题、国家重点研发计划子课题、国家自然科学基金等国家级项目10项,军委科技委、总装备部和海军装备部项目32项,教育科研项目8项。已出版英文专著2部,中文专著7部,译著15部,发表学术论文1690篇,其中,540余篇为SCI摘录,580余篇为EI摘录,22篇为ESI高被引论文,7900余篇次为国外学者引用,2800余篇次为国内学者引用。入选Elsevier 2014年、2015年、2016年、2017年中国高被引学者,在能源领域高被引学者榜单中分别位列全国第一、第二、第二、第二。入选2016年“全球能源科学与工程学科高被引学者”名单。

指导出站博士后9名、毕业博士研究生25名、硕士研究生35名。获得2个全国优秀博士学位论文提名指导教师奖,57个海军、全军和湖北省优秀博士、硕士学位论文指导教师奖。

应聘担任教育部高等学校能源动力类专业教学指导委员会副主任委员,中国工程热物理学会理事,中国工程热物理学会工程热力学分会副主任委员,全国高校工程热物理学会副理事长,4个国家和省部级重点实验室学术委员会委员,1家国际学术刊物的主编,13家国际学术刊物和6家国内学术刊物的编委。



夏少军(1986—)，男，湖北仙桃人。2007年毕业于中国人民解放军海军工程大学舰艇动力工程专业，获学士学位；2012年毕业于中国人民解放军海军工程大学动力工程及工程热物理专业，获博士学位。现为中国人民解放军海军工程大学动力工程学院热力工程教研室副主任、讲师，主要从事现代热力学优化理论及其应用基础研究。

先后获 2013 年度全军和湖北省优秀博士学位论文奖、2015 年湖北省自然科学二等奖 1 项、2015 年军队教学成果三等奖 1 项，立三等功 2 次。主持国家自然科学基金项目 1 项、大学基金项目 3 项，参与国家 973 计划课题、国家重点研发计划子课题、国家自然科学基金项目等国家级课题 9 项。出版学术专著 3 部，发表学术论文 70 篇，41 篇发表在 *Energy*、*J. Appl. Phys.* 等国际学术刊物上，14 篇发表在《中国科学》和《科学通报》中、英文版上，40 篇为 SCI 摘录，41 篇为 EI 摘录，2 篇论文入选 ESI 高被引论文，2 篇论文入选中国科技期刊 F5000 顶尖学术论文，1 篇论文获《中国科学》高引次优秀论文奖，已发表论文被 SCI 他引 280 余篇次。入选中国人民解放军海军工程大学首批“33511 人才工程”支持计划，担任中国工程热物理学会热力学青年论坛组委会委员。

前 言

节能是我国国民经济可持续发展的基本国策，工程中各种节能手段与措施的实施迫切需要先进的节能理论提供指导。本书在全面系统地了解现今各种热力学优化理论和总结前人已有研究成果的基础上，基于广义热力学优化理论的思想，选定功、热能、化学能、资本等广义能量转换循环的动态优化问题为突破口，将热力学、传热传质学、流体力学、化学反应动力学、经济学、最优控制理论相结合，分析研究工程热力装置、商业机等不可逆循环在不同优化目标下的最优构型，获得各类不可逆循环新构型，同时，探索建立统一的广义热力循环物理模型，寻求统一的优化方法，获得普适的优化结果和研究结论，已有相关研究结果均为本结果的特例，有助于促进热力学优化理论成体系地向前发展和完善，可为各类能量转换系统及实际装置的优化设计与最优运行提供科学依据和理论指导。

本书主要由以下三个部分组成。

第一部分研究不可逆工程热力装置的动态优化问题。第 2 章在广义辐射传热规律条件下，研究活塞式加热气缸中理想气体工质不可逆膨胀过程最大功输出的活塞最优运动路径，并将线性唯象传热规律下得到的结果应用到活塞式加热气缸不可逆膨胀过程功率优化、内燃机性能优化和外燃机性能优化中；进一步考虑活塞运动对热导率影响，建立一个热导率随时间变化的、更符合实际的活塞式加热气缸模型，研究其在广义辐射传热规律下膨胀功最大时的活塞最优运动路径，揭示传热规律和变热导率对气体最优膨胀规律的影响。第 3 章研究广义辐射传热规律下 Otto 循环和 Diesel 循环热机，确定不同传热规律下存在热漏、摩擦和燃料有限燃烧速率等各种不可逆性损失的内燃机最大输出功时的活塞运动最优路径。第 4 章基于存在热漏、摩擦等不可逆性的广义辐射传热规律下 $[A] \rightleftharpoons [B]$ 型和线性唯象传热规律下 $2\text{SO}_3\text{F} \rightleftharpoons \text{S}_2\text{O}_6\text{F}_2$ 型光驱动发动机模型，研究其在循环最大输出功和最小熵产生时活塞运动最优路径；进一步将生态学性能指标引入到光驱动发动机最优构型研究中，以生态学函数最大为优化目标，得到活塞最优运动规律，揭示传热规律和性能目标对光驱动发动机最优构型的影响。

第二部分研究不可逆商业机循环的动态优化问题。第 5 章研究有限容量低价经济库下内可逆商业机最大利润时的循环最优构型，揭示经济库经济容量特性和商品传输规律对商业机最优循环构型和最优性能的影响；最后研究一类多库商业

机的最大利润输出时的循环最优构型。

第三部分研究不可逆广义机循环的动态优化问题。第 6 章分别建立两有限广义势库内可逆广义机、存在广义流漏的有限高势库不可逆广义机、多无限广义势库内可逆广义机和多级内可逆广义机系统等 4 种不可逆循环的物理模型, 研究循环广义输出最大化时的最优构型, 探索统一的优化方法, 获得普适的优化结果和研究结论, 初步实现基于广义热力学优化理论的不可逆循环动态优化研究成果集成。

本书在写作的过程中, 参考著者所在团队毕业博士研究生宋汉江、马康、李俊、戈延林等同志的博士学位论文, 他们为不可逆循环的广义热力学动态优化研究作出了重要贡献, 著者在此对他们的辛勤劳动和创造性贡献表示诚挚的谢意。

最后, 感谢国家自然科学基金项目 (No. 51576207) 的支持, 使得不可逆循环广义热力学动态优化的研究工作不断拓展和深化。

由于时间仓促, 本书在撰写过程中难免出现一些疏漏, 不当之处请批评指正。

陈林根 夏少军

2018 年 6 月

Preface

Energy saving is the basic national policy for the sustainable development of China's national economy, and the implementation of various energy-saving methods and measures in engineering needs advanced energy-saving theory to provide guidelines urgently. On the basis of understanding current various thermodynamic optimization theories and summarizing the previous research results, this book investigates the dynamic optimization problems of various generalized energy (including work, thermal energy, chemical energy, capitals and so on) conversion cycles with the idea of generalized thermodynamic optimization theory. Thermodynamics, heat and mass transfer, fluid mechanics, chemical reaction kinetics, economics and optimal control theory are combined with each other in this book. The optimal configurations of irreversible cycles such as engineering thermodynamic plants and commercial engines are analyzed and investigated. New configurations of various irreversible cycles are derived. Besides, establishments of unified physical models of generalized thermodynamic cycles are explored, unified optimization methods are searched, generalized optimization results and research conclusions are obtained, and the related results obtained in previous literatures are special cases of those obtained in this book. It contributes to the systematic development and perfection of thermodynamic optimization theory, and can provide scientific bases and theoretical guidelines for optimal designs and operations of various energy conversion systems and practical devices.

It consists of the following three parts:

The first part concentrates on the dynamic optimization problems of irreversible engineering thermodynamic plants. Under the condition of generalized radiative heat transfer law, Chapter 2 investigates the optimal piston motion path for the maximum work output of the irreversible expansion process of a heated ideal gas in a piston-cylinder system, and the optimization result is further applied into the power optimization of the irreversible expansion process and the performance optimizations of internal- and external-combustion engines. The effect of piston motion on the heat conductivity is further considered, and a more actual model of the heated ideal gas in

the piston-cylinder system with the time-dependent conductivity is established. The optimal piston motion path for the maximum expansion work of the system with generalized heat transfer law is investigated, and effects of heat transfer laws and variable heat conductivity on the optimization results are indicated. Chapter 3 investigated the maximum work output of Otto and Diesel cycle heat engines with generalized radiative heat transfer law $[q \propto \Delta(T^n)]$. It determines optimal piston motion paths of internal combustion engines with different heat transfer laws and various losses including heat leakage, friction and finite combustion rate of the fuel. Based on the generalized radiative law, $[A] \rightleftharpoons [B]$ type and the linear phenomenological law, $2\text{SO}_3\text{F} \rightleftharpoons \text{S}_2\text{O}_6\text{F}_2$ type light-driven engines with the irreversibility losses of heat leakage and friction, Chapter 4 investigated the corresponding optimal piston motion paths for the maximum cycle work output and the minimum entropy generation. The performance objective of the ecological function is further introduced into the optimal configuration researches of the light-driven engines, the optimal piston motion paths for the maximum ecological function is derived, and effects of heat transfer laws and performance objectives on the optimal configuration of the light-driven engines are indicated.

The second part concentrates on the dynamic optimization problems of irreversible commercial engine cycles. Chapter 5 investigates optimal cycle configuration for the maximum profit of an endoreversible commercial engine with a finite capacity low-price economic reservoir and generalized commodity transfer law $[n \propto \Delta(P^m)]$. It indicates effects of economic capacity characteristic of the economic reservoir and commodity transfer laws on the optimal cycle configurations and optimal performances of the commercial engines. Finally, the optimal cycle configuration for the maximum profit of a multi-reservoir commercial engine is also investigated.

The third part concentrates on the dynamic optimization problems of irreversible generalized engine cycles. Chapter 6 establishes four kinds of physical models of irreversible generalized engine cycles, including endoreversible generalized engine with two finite generalized-potential reservoirs, finite high-potential-reservoir irreversible generalized engine with generalized flow leakage, endoreversible generalized engine with several infinite generalized-potential reservoirs and multistage endoreversible generalized engine system, investigates generalized output maximization of the cycles, explores the unified optimization methods, and derives the

optimization research on the irreversible cycles in the frame of generalized thermodynamic optimization theory is preliminary realized.

During the writing process of this book, the Ph. doctoral dissertations of Hangjiang Song, Kang Ma, Jun Li and Yanli Ge in the research group of the authours of the book were consulted. They have made important contributions to the research of generalized thermodynamic dynamic-optimization of irreversible cycles, and the authors herein express the sincere gratitude for their hard work and creative contributions.

Finally, thanks to the support of the National Natural Science Foundation of China (No. 51576207), which makes the researches on the generalized thermodynamic dynamic-optimization of irreversible processes have been extended and deepened.

Due to the rush of time, there may be some errors and omissions in this book inevitably, and it is hoped that the readers will kindly point out them.

Lingen Chen, Shaojun Xia

June 2018

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 工程热力装置的动态优化现状	2
1.2.1 活塞式加热气缸最优膨胀规律	2
1.2.2 内燃机活塞运动最优路径	3
1.2.3 光驱动发动机活塞运动最优路径	5
1.3 商业机循环动态优化现状	6
1.4 本书的主要工作及章节安排	7
第 2 章 活塞式加热气缸气体最优膨胀规律	9
2.1 引言	9
2.2 广义辐射传热规律下加热气体的最优膨胀	10
2.2.1 物理模型	10
2.2.2 优化方法	11
2.2.3 特例分析	13
2.2.4 数值算例与讨论	18
2.3 线性唯象传热规律下优化结果的应用	27
2.3.1 过程时间优化	27
2.3.2 内燃机输出功率优化	31
2.3.3 外燃机输出功率优化	40
2.4 广义辐射传热规律下变热导率加热气体最优膨胀规律	44
2.4.1 物理模型	44
2.4.2 优化方法	46
2.4.3 特例分析	49
2.4.4 数值算例与讨论	53
2.5 本章小结	67
第 3 章 内燃机活塞运动最优路径	70
3.1 引言	70
3.2 广义辐射传热规律下 Otto 循环内燃机最大输出功	70
3.2.1 物理模型	70

3.2.2	传统内燃机活塞运动规律	72
3.2.3	优化方法	72
3.2.4	特例分析	77
3.2.5	数值算例与讨论	78
3.3	广义辐射传热规律下 Diesel 循环内燃机最大输出功	86
3.3.1	物理模型	86
3.3.2	优化方法	87
3.3.3	特例分析	89
3.3.4	数值算例与讨论	90
3.4	本章小结	98
第 4 章	光化学发动机活塞运动最优路径	99
4.1	引言	99
4.2	广义辐射传热规律下 $[A] \rightleftharpoons [B]$ 型光驱动发动机最大输出功和 最小熵产生	100
4.2.1	物理模型	100
4.2.2	优化方法	103
4.2.3	特例分析	106
4.2.4	数值算例与讨论	109
4.3	广义辐射传热规律下 $[A] \rightleftharpoons [B]$ 型光驱动发动机的最大生态学 函数	119
4.3.1	优化方法	119
4.3.2	特例分析	121
4.3.3	数值算例与讨论	123
4.4	线性唯象传热规律下 $2\text{SO}_3\text{F} \rightleftharpoons \text{S}_2\text{O}_6\text{F}_2$ 型双分子光驱动发动机 最大输出功和最小熵产生	132
4.4.1	物理模型	132
4.4.2	优化方法	135
4.4.3	数值算例与讨论	138
4.5	传热规律对光驱动发动机最大生态学函数最优构型的影响	144
4.5.1	物理模型	144
4.5.2	优化方法	146
4.5.3	特例分析	148
4.5.4	数值算例与讨论	149
4.6	本章小结	157

第 5 章 贸易过程和商业机循环动态优化	160
5.1 引言	160
5.2 有限低价经济库内可逆商业机最大利润输出	160
5.2.1 物理模型	160
5.2.2 优化方法	162
5.2.3 特例分析	163
5.2.4 数值算例与讨论	167
5.3 多库内可逆商业机最大利润输出	174
5.3.1 物理模型	174
5.3.2 优化方法	175
5.3.3 数值算例与讨论	178
5.4 本章小结	180
第 6 章 广义机循环动态优化	182
6.1 引言	182
6.2 两有限势库内可逆广义机最大广义输出	182
6.2.1 物理模型	182
6.2.2 优化结果	184
6.2.3 应用	185
6.3 存在旁通流漏的有限势库广义机最大广义输出	188
6.3.1 物理模型	188
6.3.2 优化结果	189
6.3.3 应用	190
6.4 多无限广义势库内可逆广义机最大广义输出率	193
6.4.1 物理模型	193
6.4.2 优化方法	193
6.4.3 应用	196
6.5 基于 HJB 理论的线性传输规律下多级广义机系统最大广义 输出率	198
6.5.1 物理模型	198
6.5.2 优化问题的 HJB 方程	201
6.5.3 应用	205
6.6 本章小结	209
第 7 章 全书总结	211
参考文献	217

附录 A 最优化理论概述	239
A.1 引言	239
A.2 静态优化	240
A.2.1 无约束函数极值优化	240
A.2.2 仅含等式约束函数极值优化	241
A.2.3 含不等式约束函数极值优化	242
A.3 动态优化	243
A.3.1 古典变分法	244
A.3.2 极小值原理	249
A.3.3 动态规划	252
A.3.4 平均最优控制理论	258
A.4 附录 A 小结	260
附录 B 第 6 章相关公式推导	261
B.1 6.2 节中定理的证明	261
B.1.1 欧拉-拉格朗日方程方法	261
B.1.2 平均最优控制理论方法	262
B.2 6.3 节中定理的证明	264
B.2.1 欧拉-拉格朗日方程方法	264
B.2.2 平均最优控制理论方法	265
附录 C 主要符号说明	267

Contents

Preface

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Introduction	1
1.2 The dynamic-optimization status of engineering thermodynamic plants	2
1.2.1 Optimal expansion of a heated working fluid in the piston-cylinder system	2
1.2.2 Optimal piston motion paths of internal combustion engines	3
1.2.3 Optimal piston motion paths of light-driven engines	5
1.3 The dynamic-optimization status of commercial engine cycles	6
1.4 The main work and chapters' arrangement of this book	7
Chapter 2 Optimal Expansion of a Heated Gas in the Piston-Cylinder System	9
2.1 Introduction	9
2.2 Optimal expansion of the heated gas with generalized radiative heat transfer law	10
2.2.1 Physical model	10
2.2.2 Optimization method	11
2.2.3 Analysis for special cases	13
2.2.4 Numerical examples and discussions	18
2.3 Application of the optimization results with the linear phenomenological heat transfer law	27
2.3.1 Process duration optimization	27
2.3.2 Power output optimization of an internal combustion engine	31
2.3.3 Power output optimization of an external combustion engine	40
2.4 Optimal expansion of the heated gas with generalized radiative heat transfer law and variable heat conductivity	44
2.4.1 Physical model	44
2.4.2 Optimization method	46
2.4.3 Analysis for special cases	49
2.4.4 Numerical examples and discussions	53
2.5 Chapter summary	67

Chapter 3 Optimal Piston Motion Paths of Internal Combustion Engines	70
3.1 Introduction	70
3.2 Maximum work output of Otto-cycle internal combustion engines with generalized radiative heat transfer law	70
3.2.1 Physical model	70
3.2.2 Piston motion path of conventional internal combustion engines	72
3.2.3 Optimization method	72
3.2.4 Analysis for special cases	77
3.2.5 Numerical examples and discussions	78
3.3 Maximum work output of Diesel-cycle internal combustion engines with generalized radiative heat transfer law	86
3.3.1 Physical model	86
3.3.2 Optimization method	87
3.3.3 Analysis for special cases	89
3.3.4 Numerical examples and discussions	90
3.4 Chapter summary	98
Chapter 4 Optimal Piston Motion Paths of Light-Driven Engines	99
4.1 Introduction	99
4.2 Maximum work output and minimum entropy generation of $[A] \rightleftharpoons [B]$ type light-driven engines with generalized radiative heat transfer law	100
4.2.1 Physical model	100
4.2.2 Optimization method	103
4.2.3 Analysis for special cases	106
4.2.4 Numerical examples and discussions	109
4.3 Maximum ecological function of $[A] \rightleftharpoons [B]$ type light-driven engines with generalized radiative heat transfer law	119
4.3.1 Optimization method	119
4.3.2 Analysis for special cases	121
4.3.3 Numerical examples and discussions	123
4.4 Maximum work output and minimum entropy generation of $2\text{SO}_3\text{F} \rightleftharpoons \text{S}_2\text{O}_6\text{F}_2$ type bimolecular, light-driven engines with linear phenomenological heat transfer law	132
4.4.1 Physical model	132
4.4.2 Optimization method	135
4.4.3 Numerical examples and discussions	138

4.5	Effect of heat transfer laws on the optimal configurations for the maximum ecological function of $2\text{SO}_3\text{F} \rightleftharpoons \text{S}_2\text{O}_6\text{F}_2$ type bimolecular, light-driven engines	144
4.5.1	Physical model	144
4.5.2	Optimization method	146
4.5.3	Analysis for special cases	148
4.5.4	Numerical examples and discussions	149
4.6	Chapter summary	157
Chapter 5	Dynamic Optimization of Commercial Engine Cycles	160
5.1	Introduction	160
5.2	Maximum profit output of endoreversible commercial engines with a finite low-price economic reservoir	160
5.2.1	Physical model	160
5.2.2	Optimization method	162
5.2.3	Analysis for special cases	163
5.2.4	Numerical examples and discussions	167
5.3	Maximum profit output of a multi-reservoir endoreversible commercial engine	174
5.3.1	Physical model	174
5.3.2	Optimization method	175
5.3.3	Numerical examples and discussions	178
5.4	Chapter summary	180
Chapter 6	Dynamic Optimization of Generalized Engine Cycles	182
6.1	Introduction	182
6.2	Maximum generalized output of endoreversible generalized engines with two finite-potential-reservoirs	182
6.2.1	Physical model	182
6.2.2	Optimization results	184
6.2.3	Applications	185
6.3	Maximum generalized output of finite-potential-reservoir generalized engines with bypass flow leakage	188
6.3.1	Physical model	188
6.3.2	Optimization results	189
6.3.3	Applications	190