



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

空气热泵性能有限时间 热力学优化

毕月虹 陈林根 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

空气热泵性能有限时间热力学优化

毕月虹 陈林根 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书将有限时间热力学的思想和分析方法引入空气热泵循环的研究中,以供热系数、供热率、供热率密度、炯效率和生态学目标函数为优化目标,用热力学与传热学及流体力学相结合的方法,研究存在传热不可逆性和其他不可逆性的空气热泵循环的最优性能。书中全面阐述恒温和变温热源条件下内可逆简单循环、不可逆简单循环和实际回热式循环模型的建立,导出各种模型的五种优化目标与压缩机压比等主要影响参数间的解析式,并将五种优化目标结果进行综合比较,得出因不同优化目标的选取而表现出的不同性能特性,给出相应的优化准则和设计运行工况优域,为实际空气热泵装置的性能描述和优化提供理论依据。

本书适合从事制冷、空调、能源及动力等领域的科研和工程技术人员,高等学校的教师、研究生及本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

空气热泵性能有限时间热力学优化/毕月虹,陈林根著.—北京:科学出版社,2017.3

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-052211-5

I. ①空… II. ①毕…②陈… III. ①热泵—热力学—研究 IV. ①TH3

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第054809号

责任编辑:陈构洪 赵微微/责任校对:桂伟利

责任印制:肖 兴/封面设计:铭轩堂

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年3月第一次印刷 印张:14 3/4

字数:280 000

定价:96.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委(按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱 刘 伟

卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅 张文栋 赵 路

赵晓哲 钟登华 周宪梁

《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

节能环保是全球各行业普遍关注的焦点问题，现代热力学理论的长足进步为各类实际装置的性能描述和优化提供了理论基础。空气热泵循环以空气为工质，避免了蒸汽压缩式热泵中氟利昂工质对大气环境的影响，作为环保型的空气热泵技术在实际工程中具有很好的应用前景和发展潜力。有限时间热力学是热力循环分析和优化的有力工具。本书在系统总结空气热泵循环的有限时间热力学研究现状基础上，选定理论模型的完善化和实际工程循环分析的系统化为突破口，用热力学与传热学及流体力学相结合的方法，分析热泵循环性能优化问题，建立相应的优化准则和设计运行工况优域，在深化物理学理论研究的同时，注重于在物理学与工程学之间架起桥梁。本书以供热系数、供热率、供热率密度（循环供热率与最大比容之比）、炯效率和生态学目标函数为优化目标，通过理论分析和数值计算，研究存在传热不可逆性和其他不可逆性的空气热泵循环的最优性能。

第1章介绍有限时间热力学的产生、发展以及空气热泵的有限时间热力学研究意义及其研究现状。

第2章介绍内可逆简单空气热泵循环分析与优化，内可逆循环是有限时间热力学研究的最基本热力模型，由于在分析时计入了实际过程中存在的不可逆传热损失，因此其研究结果比理想可逆循环的分析更具实际意义。

第3章介绍不可逆简单空气热泵循环分析与优化，由于实际空气热泵中除了热阻损失以外，还有空气压缩机和涡轮膨胀机中的不可逆压缩和膨胀损失等，计入压缩机和膨胀机中的不可逆压缩和膨胀损失对循环的特性分析是非常重要的，本章将在第2章建立的模型基础上，进一步引入压缩机和膨胀机中的不可逆损失。

第4章介绍回热式空气热泵循环分析与优化，回热循环是空气热泵实际应用中的主要形式，本章分析中计入实际工程循环的所有内、外不可逆性，经典循环分析和各种条件下有限时间分析的结果均为本章所得结果的特例。

第5章介绍计算实例及结果分析，通过计算，得到供热系数、供热率、供热率密度，生态学目标函数以及炯效率的理论值与设计值的比较结果，优化热导率分配对供热率、生态学目标函数以及炯效率提高的相对量值，对理论分析结果加以检验。

第6章总结了全书的主要工作和创新点。

本书的写作及与本书密切相关的科研工作得到了海军工程大学孙丰瑞教授的关注和支持，对其中的关键问题孙教授提出了宝贵的建议，同时，周圣兵博士、

王文华博士、屠友明硕士也对本书进行了有益的讨论，作者在此表示最衷心的感谢。作者还要特别感谢科学出版社编辑认真细致的工作。

本书还得到了中国博士后科学基金(20060400837)、国家自然科学基金(51376012)和北京市自然科学基金(3142003)的支持，特此致谢。

由于作者的水平有限，书中难免有不足之处，恳请读者批评指正。

毕月虹 陈林根

2016年9月1日

目 录

《博士后文库》序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 有限时间热力学研究概况	1
1.1.1 有限时间热力学的产生和发展	1
1.1.2 有限时间热力学的研究内容	2
1.1.3 有限时间热力学的发展趋势	2
1.2 空气热泵循环的有限时间热力学研究意义及其现状	3
1.2.1 空气热泵循环的有限时间热力学的研究意义	3
1.2.2 空气热泵循环的有限时间热力学研究现状	4
1.3 本书主要工作	5
第 2 章 内可逆简单空气热泵循环分析与优化	7
2.1 引言	7
2.2 恒温热源循环	7
2.2.1 循环模型	7
2.2.2 供热率、供热系数、供热率密度、炯效率及生态学目标函数解析关系	8
2.2.3 供热率、供热系数分析与优化	10
2.2.4 供热率密度分析与优化	12
2.2.5 炯效率分析	15
2.2.6 生态学目标函数分析与优化	16
2.2.7 五种优化目标的综合比较	19
2.3 变温热源循环	21
2.3.1 循环模型	21
2.3.2 供热率、供热系数、供热率密度、炯效率及生态学目标函数解析关系	22
2.3.3 供热率、供热系数分析与优化	25
2.3.4 供热率密度分析与优化	28
2.3.5 炯效率分析与优化	33
2.3.6 生态学目标函数分析与优化	37
2.3.7 五种优化目标的综合比较	41
2.4 小结	43

第3章 不可逆简单空气热泵循环分析与优化	45
3.1 引言	45
3.2 恒温热源循环	45
3.2.1 循环模型	45
3.2.2 供热率、供热系数、供热率密度、炯效率及生态学目标函数解析关系	46
3.2.3 供热率、供热系数分析与优化	49
3.2.4 供热率密度分析与优化	56
3.2.5 炯效率分析与优化	61
3.2.6 生态学目标函数分析与优化	66
3.2.7 五种优化目标的综合比较	68
3.3 变温热源循环	72
3.3.1 循环模型	72
3.3.2 供热率、供热系数、供热率密度、炯效率及生态学目标函数解析关系	74
3.3.3 供热率、供热系数分析与优化	78
3.3.4 供热率密度分析与优化	87
3.3.5 炯效率分析与优化	93
3.3.6 生态学目标函数分析与优化	100
3.3.7 五种优化目标的综合比较	106
3.4 小结	111
第4章 回热式空气热泵循环分析与优化	112
4.1 引言	112
4.2 恒温热源循环	112
4.2.1 循环模型	112
4.2.2 供热率、供热系数、供热率密度、炯效率及生态学目标函数解析关系	113
4.2.3 供热率、供热系数分析与优化	117
4.2.4 供热率密度分析与优化	128
4.2.5 炯效率分析与优化	134
4.2.6 生态学目标函数分析与优化	142
4.2.7 五种优化目标的综合比较	145
4.3 变温热源循环	149
4.3.1 循环模型	149
4.3.2 供热率、供热系数、供热率密度、炯效率及生态学目标函数解析关系	151
4.3.3 供热率、供热系数分析与优化	156
4.3.4 供热率密度分析与优化	169
4.3.5 炯效率分析与优化	176
4.3.6 生态学目标函数分析与优化	186

4.3.7 五种优化目标的综合比较	196
4.4 小结	201
第 5 章 计算实例及结果分析	203
5.1 引言	203
5.2 实例模型与设计参数	203
5.3 计算结果与分析	205
第 6 章 全书总结	208
参考文献	211
附录 主要符号说明	219
编后记	221

第1章 绪 论

1.1 有限时间热力学研究概况

1.1.1 有限时间热力学的产生和发展

1824年,法国工程师 Carnot 提出了著名的卡诺循环,以卡诺循环为其工质循环方式的热机、制冷机和热泵,被分别称为卡诺热机、卡诺制冷机和卡诺热泵,并推导出相应的卡诺循环的效率,即卡诺热机效率、卡诺制冷系数、卡诺供热系数的计算式^[1],后经2年的研究,Carnot又提出了著名的卡诺定理。卡诺效率和卡诺定理为经典热力学的创立奠定了理论基础。一个多世纪以来,卡诺效率和卡诺定理对热力学理论的发展、热机及热力工程的技术进步都起了巨大的作用。

但是,要达到卡诺循环的效率,热机、制冷机和热泵必须完全可逆地运行,这就需要热力过程进行的时间无限长,显然,这与实际情况存在一定的差异,随着热力工程技术的发展,考虑不可逆热力过程影响的新理论也便应运而生。Novikov^[2]、Chambadal^[3]和 Curzon、Ahlborn^[4]等在对内可逆卡诺循环进行深入分析的基础上,分别于1957年和1975年导出了内可逆卡诺热机在最大输出功率时的效率: $\eta_{CA} = 1 - \sqrt{T_L / T_H}$ 。它提供了分析有限速率和有限周期热机的新方法,可以说,它的导出标志着热力学一个新的学科分支的诞生。1977年,Andresen、Berry等^[5]物理学领域的学派代表,将此类寻找热力过程性能界限、最优途径及最优性能关系的研究称为“有限时间热力学”^[6-8];1982年,美国Duke大学Bejan等工程学领域的学派代表,将此类具有时间(尺寸)约束条件的热力过程(循环)的极值问题研究称为“热力学优化”或“熵产生最小化”理论^[9-11]。“有限时间热力学”和“热力学优化”或“熵产生最小化”的基本出发点是统一的,即为减小热力过程(循环)的不可逆损失,在时间(尺寸)约束条件下,优化各种传热、流体流动和传质等传输过程或实际不可逆热力系统性能^[5-11]。经过五十多年的发展,有限时间热力学理论已逐步发展成为现代热力学理论的一个重要组成部分^[12-14],架起了物理学和工程学之间的桥梁,不仅深化物理学理论研究,同时也注重工程应用的研究,成为现代热力学非常活跃的研究领域之一^[11-37]。

1.1.2 有限时间热力学的研究内容

可逆循环所需循环周期为无限长, 尽管相应的效率为卡诺效率, 但是循环对时间的平均输出率(如热机的功率)为零, 而有限时间热力学区别于经典热力学的主要特征是考虑输出特性和性能系数的协调性。总结有限时间热力学的最初研究内容主要包括^[6,7,14,15,26]: ①建立广义热力学势; ②确定最优路径; ③寻求性能界限和性能指标; ④提出如热力学长度、有限时间熵等新概念。

从有限时间热力学理论建立至今的几十年中, 其研究不断向工程应用领域推进, 在各个研究方向上都取得了比较重要的发展, 表现在以下几个方面。

(1) 恒温热源牛顿定律系统^[38], 主要涉及 2 类问题: 求出给定过程或系统的性能界限及性能优化准则; 求取获得最大性能系数或最大输出率的最优路径。

(2) 损失模型对热力过程和循环、装置最优性能影响^[39], 包括求不同导热规律(热阻损失模型)下的性能界限和基本优化关系; 分析热阻以外的其他不可逆性, 主要是热漏和内不可逆性(含工质的非平衡效应和摩擦效应)对最优特性的定性和定量影响特点。

(3) 热源模型对热力循环最优特性影响^[40-42], 主要包括 2 种热源模型, 即有限热容热源以及外部加热泵入热流热源。

(4) 实际装置和热过程^[43-47], 已涉及的一些常见实际工程循环和过程包括: 蒸汽动力循环、联合动力循环、燃气动力循环、内燃机循环、斯特林(Stirling)发动机、热电热机、热电联产装置、太阳能驱动热机、太阳能电池、换热器、风能系统、材料熔化、各种分离过程、热声装置、热离子热机、磁流体动力装置等。

(5) 制冷和热泵循环^[48-54], 涉及: 蒸汽压缩式制冷机(热泵)、吸收(吸附)式制冷机(热泵)、空气制冷机(热泵)、热电制冷机(热泵)等。

(6) “类热机”过程^[13, 55], 如化学反应、流体流动、计算机逻辑运算、生命过程、自然组织的构形理论^[56]等。通过这些研究, 得到了一大批具有工程实际应用价值的结果^[6-27]。

本书作者也曾应用这一理论先后研究了联合制冷循环^[57,58]、联合热泵循环^[59,60]、热电热泵循环^[61]、三热源制冷循环^[62]和三热源热泵循环^[63]的性能优化问题, 并在研究流体流动做功过程优化中^[64]发现并订正了 Bejan 工作^[10, 65]中的错误。

1.1.3 有限时间热力学的发展趋势

由以上分析可以知道, 机械、电、磁、化学、气动、生命等过程和装置, 以及经济系统均可与传统热过程采取统一处理思想和方法进行分析和优化, 这一学科将在以下 3 个方面取得进一步发展。

(1) 广义热力学优化理论的建立和完善, 借鉴有限时间热力学对传统热过程的分析方法, 对机械、电、磁、化学、生命、经济等领域的过程或系统进行分析和优化。

(2) “自然组织构形理论”^[37]的建立和发展, 在阐明各种自然组织几何形状的热力学机理基础上, 进一步改进各种组织的性能。

(3) “热力学与环境”有机结合, 例如, 将焓、熵等热力学概念与环境问题相联系, 二者相得益彰。

1.2 空气热泵循环的有限时间热力学研究意义及其现状

1.2.1 空气热泵循环的有限时间热力学的研究意义

1.2.1.1 空气热泵循环重新受到重视

空气热泵循环又称为布雷敦热泵循环, 它由两个等压过程和两个等熵绝热过程组成。1872年, Brayton 获得了工作于这种方式的机器专利, 可是大约在 100 多年后, 空气热泵循环才开始应用于热水器^[66]及溶剂回收过程^[67], 这是由于空气热泵中透平机械固有的不可逆性较大, 且空气的比热较小, 因而其供热能力不大, 使得对空气热泵循环的研究一波三折。

近几十年来, 科学家们发现传统的氟利昂制冷剂会破坏大气臭氧层, 联合国已制定《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》, 即 2030 年前全世界完全停止生产和使用 CFCs 和 HCFCs 制冷剂, 大力寻求新的制冷剂。新研制出的制冷剂虽对臭氧层无影响, 但许多会产生一定的温室效应。吸收式热泵可以满足环保的要求, 但其经济性较差, 小型化还存在一定的困难。空气热泵以空气为工质, 取之不尽, 用之不竭, 且无害, 不存在购买、运输、保存等问题, 也不存在环境污染问题, 空气热泵在实际工程中具有很好的应用前景。自 20 世纪 90 年代以来, 先后有美国、澳大利亚、德国、日本、英国等国进行了空气热泵装置和技术的研究及试验。美国设计了用于住宅和商业建筑空调(采暖、空调)的空气封闭循环制冷装置样机, 德国已将空气热泵(制冷)装置成功地应用于 ICE (Inter City Express) 高速列车上^[68], 英国开发了用于火车车厢空调的空气制冷装置^[69,70], 国内学者也开始研发列车空调用的空气制冷(热泵)机组^[71,72]。近年来, 随着透平机械的发展^[73]和回热技术^[74-77]的应用, 空气制冷和热泵得到了重视和发展, 对空气制冷^[78-99]和热泵循环^[78, 100-117]的理论和实验研究已逐步活跃起来。同时, 空气制冷装置以其重量轻、维护简单、可靠性高等优点, 在航空航天、食品加工、石油化工、低温超导等领域也迅速得到应用。

1.2.1.2 空气热泵循环的有限时间热力学研究价值

依据经典热力学, 工作于温度为 T_H 与 T_L 的两热源之间的可逆空气热泵循环 (T_L 、 T_H 分别与绝热膨胀过程初、终点温度相同), 其最佳供热系数应为 $T_H / (T_H - T_L)$ 。然而, 该供热系数只能作为空气热泵循环的一个较为粗略的上限, 因为与这个供热系数界限相应的热力循环必须是可逆的, 而且在供热空间中空气必须被冷却到 T_H 温度, 且在吸热过程中吸收热量后其温度要达到 T_L , 即工质均须达到热源温度, 不能存在传热温差, 这就要求该循环所涉及的热力过程进行得无限缓慢, 于是, 该循环的供热率为零 (供热量与时间之比), 尽管该循环的供热系数达到了最高; 再或者, 需要无限大的换热器, 致使比供热率 (供热率与总传热面积之比) 为零。因此, 空气热泵循环只有在有限时间 (有限尺寸) 条件下进行, 才能产生非零的供热率, 为了更好地利用理论结果指导实际空气热泵系统设计, 非常有必要将有限时间热力学的分析方法引入进来。

1.2.2 空气热泵循环的有限时间热力学研究现状

经过五十多年的发展, 有限时间热力学已成为热力循环分析和优化的有力工具^[26-36]。主要表现在: 多种优化目标的选取, 基本优化特性的确立, 各种热力参数优选范围的建立。在热机循环的分析中, 功率密度目标优化, 不仅使热机保持了较高的效率和功率, 同时还有效地减小了热机的尺寸, 成为实际热机设计的一种可取的备选方案^[118-122]。在制冷循环分析中, Yavuz 和 Erbay 则分别用制冷率密度 (即制冷率与循环中工质最大比容之比) 分析了 Ericsson 循环^[123] 和 Stirling 循环^[124], Zhou 等^[125-128] 选定制冷率密度作为优化目标, 对不同热源形式的内可逆, 不可逆及回热式空气制冷循环进行了有限时间热力学研究, 得出采用制冷率密度作为优化目标, 可以比采用制冷率作为优化目标更有效地减小空气制冷机的尺寸。Erbay 和 Yavuz 用供热率密度 (即供热率与循环中工质最大比容之比) 作为优化目标分析了 Stirling 循环^[129]。本书将利用供热率密度作为优化目标, 来进一步研究空气热泵循环的特性, 可以使空气热泵的尺寸减小。

基于热力学第一及第二定律的熵分析法可以准确揭示热力系统热力学损失的原因和部位, 从而有效提高热力系统的性能^[130-133], 稳态稳流系统的熵平衡方程为

$$\sum_j (1 - T_0/T_j) Q_j - W_{cv} + \dot{m}x_{in} - \dot{m}x_{out} - E_d = 0 \quad (1.2.1)$$

式中, T_0 是环境温度; Q_j 为系统某一边界 (瞬时温度为 T_j) 上的热流率; $\dot{m}$ 和 x 分别表示质量流率和比熵流率; W_{cv} 是系统的循环净功率; E_d 表示熵损失率。

对于热泵循环, 有

$$E_{\text{in}} = -W_{\text{cv}} \quad (1.2.2)$$

热泵系统的供热率导致系统的焓输出率，其值为

$$E_{\text{out}} = \sum_j (1 - T_0/T_j) Q_j \quad (1.2.3)$$

由以上各式可得

$$E_{\text{out}} = E_{\text{in}} - E_{\text{d}} \quad (1.2.4)$$

Chen 等^[134]则把有限时间热力学和“焓”的概念结合起来，焓效率的定义式为

$$\eta_{\text{ex}} = E_{\text{out}}/E_{\text{in}} \quad (1.2.5)$$

屠友明等^[135-137]则对空气制冷循环进行了焓效率优化，得到了比传统的制冷率优化方法更科学、更合理的结果。

1991 年，“生态学目标函数”首次被 Angulo-Brown^[138]用于热机循环的分析中，文献[139]又建立了各种循环统一的生态学目标函数，即

$$E = A/\tau - T_0 \Delta S/\tau = A/\tau - T_0 \sigma \quad (1.2.6)$$

式中， A 为循环输出焓； τ 为循环周期； A/τ 即为循环的焓输出率； T_0 为环境温度； σ 为熵产率； $T_0 \sigma$ 即为循环的焓损失率； ΔS 为循环熵产，即

$$E_{\text{out}} = A/\tau, E_{\text{d}} = T_0 \sigma \quad (1.2.7)$$

一些文献分别研究了热机^[140-147]、蒸汽压缩式制冷循环^[148-150]、热泵循环^[151-154]和空气制冷循环^[155,156]的生态学优化问题。对于各种热泵循环，通过联立式(1.2.4)、式(1.2.6)及式(1.2.7)，可导出统一的生态学目标函数为

$$E = 2E_{\text{out}} - E_{\text{in}} \quad (1.2.8)$$

用有限时间热力学的方法对空气热泵^[101]循环的研究已逐步活跃起来，本书在相关文献^[13,157-161]的基础上，参照对空气制冷机的研究^[12,88-93,125-128,155,156,162]，进一步深入研究空气热泵循环的有限时间热力学性能，探讨不同优化目标下不同损失项下的一般性能和最优性能，并对不同目标下的优化结果进行比较分析。

1.3 本书主要工作

本书将基于前人工作，按照由浅入深、由简单到复杂的思路对空气热泵循环

的有限时间热力学性能进行分析和优化研究。

(1) 分别建立不同热源条件下各种闭式空气热泵循环^[163-174]的热力学模型, 导出相应的供热率、供热率密度、生态学目标函数、供热系数和炯效率与压缩机压比以及各种不可逆参数间的解析式。

(2) 将五种不同优化目标的优化结果进行综合比较^[163-174], 得到不同优化目标下的不同性能特性。

(3) 对于换热器(高温、低温和回热器)热导率总量一定的条件, 求出相应的热导率最优分配关系, 在一定供热率下, 使换热器尺寸最小化; 对于变温热源条件, 还可求出热源与工质间的热容率最佳匹配关系^[165,167,169,170]。

(4) 以某型回热空气热泵总体设计为参考依据, 将其设计参数与所得理论分析与优化结果进行比较, 验证模型的正确性和优化结果的有效性。

第2章 内可逆简单空气热泵循环分析与优化

2.1 引言

内可逆循环是有限时间热力学研究的最基本热力模型，本章将以供热率、供热系数、供热率密度、炯效率和生态学目标函数为优化目标，通过引入热阻损失，分别建立恒温、变温热源条件下的内可逆空气(即内可逆布雷敦)热泵循环模型，导出各热力学优化目标与循环压比以及各种不可逆参数间的解析式，在高、低温换热器的热导率总量一定的约束条件下，通过解析分析和/或数值计算求出使各热力学优化目标最大时高温侧换热器和低温侧换热器热导率之间的最优分配关系；针对变温热源条件下的空气热泵循环，还对工质与热源间的热容率匹配做优化分析与计算，得到使各热力学优化目标最大时工质与热源间的热容率最佳匹配关系。由于本章在分析时计入了实际过程中存在的不可逆传热损失，因此其研究结果比理想可逆循环的分析更具实际意义^[163-169]。

2.2 恒温热源循环

2.2.1 循环模型

图 2.2.1 所示为内可逆简单空气热泵循环(1-2-3-4-1)的 $T-s$ 图，其中 1-2 表示工质从低温热源的吸热过程，2-3 表示工质在压缩机中的等熵压缩过程，3-4

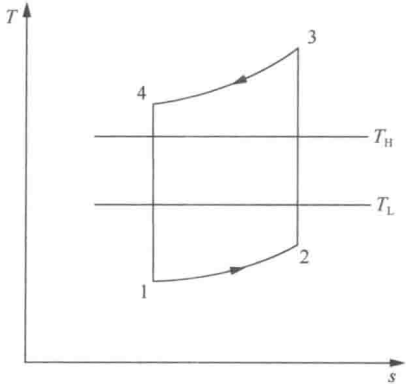


图 2.2.1 恒温热源内可逆简单空气热泵循环模型