

# 传热与结构分析 有限元法及应用

王成恩 崔东亮 曲蓉霞 乔赫廷 著



科学出版社

# 传热与结构分析 有限元法及应用

王成恩 崔东亮 曲蓉霞 乔赫廷 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书针对复杂装备研制需求,介绍了平面和轴对称传热问题以及平面和轴对称结构分析问题的有限元模型,同时介绍了等参单元和数值积分等有限元模型计算方法,并在此基础上讨论了热固耦合的表现形式、数值计算模型以及强弱耦合计算方法等。最后,作者检索和归纳了相关文献中的传热和结构分析问题,采用自主研发的热固耦合分析系统对这些典型的案例进行了数值计算和分析。本书的特点是理论方法、工程应用和软件开发紧密结合。

本书可作为装备研制领域的设计分析工程师的参考用书,也可以作为计算机应用技术、工程力学、传热分析和机械设计等专业的高校高年级本科生和研究生的教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

传热与结构分析有限元法及应用/王成恩等著. —北京:科学出版社,2012  
ISBN 978-7-03-034499-1

I. ①传… II. ①王… III. ①有限元法-应用-传热-结构分析  
IV. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 109658 号

责任编辑:杨向萍 陈 婕 / 责任校对:包志虹  
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

骏志印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012年6月第一次印刷 印张:27 插页:16

字数:523 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

我国在高端民用装备和军工装备研制能力与研制水平方面仍然落后于工业发达国家,例如,民用航空产品和零部件依赖进口,军用航空产品与国外先进水平相比具有较大差距。机床企业仍然采用基于经验的改型设计方法,缺乏创新设计理念和设计手段,在高端数控机床市场的竞争力较弱。

复杂装备研制是多学科协同的综合优化决策问题,各学科设计目标和约束相互影响,随着设备性能指标的提升,多学科耦合效应日益凸显。传统的设计理念仍然侧重于零部件结构尺寸设计和强度校核,没有充分考虑复杂工况下装备内部产生的多种物理变化过程。事实上,航空航天、船舶、重型机械、车辆和能源设备等复杂产品研制的关键是高效和高精度的计算流场、温度场、电磁场、结构变形与动态响应等物理现象(过程)。

分析各类物理系统及其耦合效应需要综合应用众多领域的科学知识和技术,其中包括力学和材料领域的机理模型、数学领域的偏微分方程计算方法和计算机领域的数值仿真技术等。其中,计算机软件代码是多物理问题计算和分析技术的一种物化形式,也是检验和修正物理机理模型的主要途径。只有将物理机理模型的数值计算方法编制为计算机软件代码,才能将理论成果应用于实际工程问题。

在我国,许多高校和研究所长期从事空气动力学、流体力学、固体力学、结构力学和传热分析等领域学术研究,但是由于缺乏具有自主知识产权的数值计算软件,所取得的理论成果只能束之高阁,无法在工程技术领域应用。虽然越来越多的企业采用商业化计算机辅助工程分析(computer aided engineering, CAE)系统计算多种物理变化过程,并分析这些物理过程对结构的影响,但是,商业化 CAE 系统是一个典型的黑箱,许多工程师只知其然,不知其所以然。同样,由于缺乏具有自主知识产权 CAE 系统,高校在某种意义上成为国外商业化软件的市场中介,从源头上制约了学生(未来工程师)的创新思维意识。

为了提高复杂装备创新设计水平,高等教育、科研和工业界都需要系统地掌握多物理系统的控制方程(governing equations)、数值计算方法和软件实现方法等。目前,一些有限元技术书籍学术性太强,不能直接指导系统开发及工程应用;另外一些参考书籍则重点介绍国外商业化软件(如 ANSYS)的操作步骤。但是,只有经历机理模型推导、算法设计、软件开发与工程应用的全过程,读者才能深入掌握并且正确应用 CAE 技术。

因此,作者对传热和结构分析的 CAE 系统开发及应用工作进行了总结,试图

系统地介绍相关技术研究、软件开发和工程应用方面的经验。作者已经撰写了《面向科学计算的网格划分与计算可视化技术》一书,介绍了 CAE 系统开发与应用两项关键支撑技术:离散化和可视化技术。本书则主要介绍传热和结构系统的控制方程、数值计算方法、软件开发与应用方法。

CAE 系统常用的数值计算方法包括有限差分、有限元、有限体积和边界元等方法。有限元方法是计算椭圆型和抛物线型偏微分方程的有效数值计算方法,广泛应用于传热和固体力学计算领域。因此,我们在传热和结构分析 CAE 系统开发中采用了有限元方法。

本书具体介绍平面和轴对称结构传热和结构分析控制方程,采用迦辽金加权法、虚功原理和泛函变分方法建立了三节点三角形、六节点三角形、四节点四边形和八节点四边形单元的传热和结构分析有限元模型;介绍了有限元模型的数值计算方法,以及有限元系统开发与典型问题案例的数值计算过程。

本书内容涉及的研究工作持续得到了中国人民解放军总装备部预研计划、国家国防科技工业局项目、国家高技术研究发展计划(简称 863 计划)、辽宁省及沈阳市科技计划等项目的支持,对此表示感谢!同时,感谢李伯虎院士在百忙中审阅了本书,并且作序。感谢中国航空工业集团的郭恩明研究员和周荣林博士,以及沈阳发动机设计研究所的杨士杰研究员和传热分析专业的工程师,他们为作者提供了将理论与工程应用相互结合的机会。感谢袁慧群教授在百忙中审阅了本书的初稿,并且提出了许多宝贵建议。最后,感谢众多直接或者间接支持作者科研工作的人士,这些宝贵的支持使得作者在崎岖的科研道路上跋涉前行!

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,衷心欢迎读者批评指正和提出宝贵的建议(wangc@mail. neu. edu. cn)。

王成恩

2011 年 11 月 30 日于沈阳

# 目 录

序

前言

第 1 章 三角形单元的平面传热分析模型	1
1.1 传热分析的概念	2
1.1.1 热力学基本定律	2
1.1.2 传热分析概念	4
1.2 热传导控制方程	5
1.2.1 傅里叶方程	5
1.2.2 导热控制方程	6
1.3 二阶偏微分方程	9
1.3.1 二阶偏微分方程的分类	9
1.3.2 定解条件	11
1.4 传热问题的定解条件	12
1.4.1 第一类边界条件	12
1.4.2 第二类边界条件	13
1.4.3 第三类边界条件	13
1.4.4 热辐射边界条件	13
1.4.5 初始条件	14
1.5 有限元方法简介	14
1.5.1 有限元方法	15
1.5.2 加权余量法	15
1.6 三节点三角形单元模型	18
1.6.1 单元插值函数	18
1.6.2 内部单元加权余量模型	21
1.6.3 边界条件计算方法	23
1.7 六节点三角形单元有限元模型	26
1.7.1 内部单元有限元模型	26
1.7.2 边界条件计算方法	31

1.8	小结	36
<b>第2章</b>	<b>三角形单元的轴对称传热分析模型</b>	<b>38</b>
2.1	引言	38
2.2	轴对称传热分析模型	39
2.2.1	轴对称传热控制方程	39
2.2.2	基于变分法的有限元模型	39
2.2.3	迦辽金加权方法	44
2.3	三节点三角形单元有限元模型	45
2.3.1	内部单元有限元模型	45
2.3.2	边界条件计算	46
2.4	六节点三角形单元有限元模型	49
2.4.1	内部单元有限元模型	49
2.4.2	边界条件计算	53
2.5	瞬态传热分析的时间域差分方法	55
2.5.1	热力学状态的传播	55
2.5.2	时间域差分格式	55
2.6	有限元模型装配方法	58
2.7	小结	59
<b>第3章</b>	<b>等参单元的传热分析模型</b>	<b>61</b>
3.1	四节点四边形单元的平面传热分析模型	61
3.1.1	任意四节点四边形单元平面传热分析模型	61
3.1.2	等参单元映射方法	62
3.1.3	正方形 $[0,1] \times [0,1]$ 的等参映射函数	64
3.1.4	正方形 $[-1,1] \times [-1,1]$ 的等参映射函数	65
3.1.5	平面传热分析的等参单元模型	66
3.1.6	边界条件计算方法	69
3.2	八节点四边形单元的平面传热分析模型	69
3.2.1	等参映射函数	69
3.2.2	正方形 $[0,1] \times [0,1]$ 的等参映射函数	71
3.2.3	正方形 $[-1,1] \times [-1,1]$ 的等参映射函数	72
3.2.4	平面传热分析的等参单元模型	72
3.2.5	边界条件计算方法	74
3.3	四节点四边形单元的轴对称传热分析模型	74

3.3.1	等参映射函数	74
3.3.2	轴对称传热的等参单元模型	74
3.3.3	边界条件计算方法	75
3.4	八节点四边形单元的轴对称传热分析模型	75
3.4.1	轴对称传热分析的等参单元模型	75
3.4.2	边界条件计算方法	76
3.5	六节点三角形等参单元传热分析模型	76
3.5.1	等腰直角三角形单元 $[0,1] \times [0,1]$ 映射函数	77
3.5.2	等腰直角三角形单元 $[0,2] \times [0,1]$ 映射函数	78
3.5.3	平面传热分析的等参单元模型	80
3.5.4	轴对称传热分析的等参单元模型	80
3.6	小结	81
<b>第4章</b>	<b>三角形单元的平面结构分析模型</b>	<b>82</b>
4.1	线弹性结构分析模型	82
4.1.1	应力概念	82
4.1.2	运动平衡方程	87
4.1.3	应变概念	89
4.1.4	线弹性本构关系	92
4.2	平面结构分析的有限元模型	94
4.2.1	平面应力问题	94
4.2.2	平面应变问题	95
4.2.3	基于虚功原理的有限元模型	97
4.2.4	基于迦辽金加权法的有限元模型	99
4.3	三节点三角形单元有限元模型	101
4.3.1	位移模式	101
4.3.2	基于虚功原理的单元模型	102
4.3.3	基于迦辽金加权法的单元模型	102
4.3.4	载荷与约束计算方法	104
4.3.5	应力与应变计算	107
4.4	六节点三角形单元有限元模型	108
4.4.1	位移模式	108
4.4.2	基于虚功原理的单元模型	109
4.4.3	基于迦辽金加权法的单元模型	110



4.4.4	载荷与约束计算方法	110
4.4.5	应力与应变计算	112
4.5	小结	113
<b>第5章</b>	<b>三角形单元轴对称结构分析</b>	<b>115</b>
5.1	轴对称结构控制方程	115
5.1.1	轴对称结构平衡方程	115
5.1.2	轴对称本构关系	118
5.2	轴对称问题有限元模型	119
5.2.1	基于虚功原理的有限元模型	119
5.2.2	基于迦辽金加权法的有限元模型	121
5.3	三节点三角形单元模型	124
5.3.1	基于虚功原理的单元模型	125
5.3.2	迦辽金加权法	126
5.3.3	载荷及约束计算	126
5.3.4	应变与应力计算方法	127
5.4	六节点三角形单元模型	128
5.4.1	虚功原理方法	128
5.4.2	迦辽金加权法	129
5.4.3	载荷及约束计算	130
5.5	主应力和主应变	131
5.6	小结	133
<b>第6章</b>	<b>结构分析等参单元模型和数值积分</b>	<b>135</b>
6.1	四节点等参单元的平面结构分析模型	135
6.1.1	四节点四边形的等参变换	135
6.1.2	四节点四边形等参单元模型	136
6.1.3	载荷边界条件的计算方法	138
6.2	平面八节点等参单元	138
6.2.1	八节点等参映射变换	138
6.2.2	八节点平面等参单元模型	139
6.2.3	载荷与边界条件的计算方法	140
6.3	轴对称四节点等参单元模型	141
6.3.1	单元结构刚度矩阵计算	141
6.3.2	载荷与边界条件的计算方法	142

---

6.4 轴对称八节点等参单元 .....	143
6.4.1 单元矩阵的变换 .....	143
6.4.2 载荷与边界条件的计算方法 .....	144
6.5 三角形六节点等参单元 .....	144
6.5.1 等参映射函数 .....	144
6.5.2 平面结构的等参单元模型 .....	145
6.5.3 轴对称结构的等参单元模型 .....	145
6.5.4 载荷计算方法 .....	146
6.6 单元刚度矩阵数值积分 .....	146
6.7 小结 .....	149
<b>第7章 热固耦合分析方法</b> .....	<b>151</b>
7.1 热固耦合形式 .....	152
7.2 平面结构热应力分析模型 .....	154
7.2.1 线性热弹性模型 .....	155
7.2.2 三节点三角形单元热载荷模型 .....	157
7.2.3 六节点三角形单元热载荷模型 .....	158
7.2.4 四边形单元热载荷模型 .....	159
7.3 轴对称结构热应力分析模型 .....	159
7.3.1 三节点三角形单元热载荷模型 .....	161
7.3.2 六节点三角形单元热载荷模型 .....	161
7.3.3 四边形单元热载荷模型 .....	162
7.4 温度与材料物性关系 .....	162
7.4.1 材料物性的线性插值模型 .....	163
7.4.2 非线性平面导热模型 .....	164
7.4.3 非线性轴对称导热模型 .....	167
7.5 热固耦合计算方法 .....	168
7.5.1 弱耦合式计算方法 .....	168
7.5.2 强耦合式计算方法 .....	171
7.6 小结 .....	172
<b>第8章 ThermoSolid 系统</b> .....	<b>174</b>
8.1 系统概述 .....	174
8.1.1 ThermoSolid 系统分析问题的基本流程 .....	175
8.1.2 项目管理功能 .....	175

8.1.3	项目报告生成	177
8.1.4	材料管理	177
8.1.5	图形显示	178
8.2	几何造型	179
8.2.1	二维几何建模功能	179
8.2.2	CAD模型的导入与操作	185
8.2.3	三维实体模型切割功能	185
8.3	网格划分	187
8.3.1	网格导入	187
8.3.2	网格尺寸设置	187
8.3.3	网格划分算法	188
8.3.4	网格删除	191
8.3.5	网格质量统计	191
8.3.6	网格细化/优化	191
8.3.7	坐标及比例尺设置	191
8.4	热边界定义	192
8.4.1	热边界段	192
8.4.2	常规热边界	193
8.5	结构载荷加载	196
8.5.1	结构边界段	196
8.5.2	集中载荷	197
8.5.3	体积载荷	198
8.5.4	表面载荷	198
8.5.5	位移载荷	199
8.6	有限元求解	201
8.6.1	温度场有限元求解	201
8.6.2	温度场分析	202
8.6.3	结构场有限元求解	203
8.6.4	结构场分析	205
8.6.5	热固耦合场有限元求解	205
8.6.6	热固耦合场分析	206
8.7	计算可视化	207
8.7.1	标量场	207

---

8.7.2	矢量场	211
8.7.3	张量场	212
8.8	小结	212
<b>第9章</b>	<b>平面传热问题计算</b>	<b>213</b>
9.1	带孔金属板冷却分析案例	213
9.1.1	问题描述	213
9.1.2	三节点三角形单元分析	214
9.1.3	六节点三角形单元分析	221
9.1.4	四节点四边形单元分析	224
9.2	潜水艇传热分析案例	227
9.2.1	问题描述	227
9.2.2	三节点三角形单元分析	227
9.2.3	四节点四边形单元分析	229
9.3	环形金属板降温分析案例	232
9.3.1	问题描述	232
9.3.2	三节点三角形单元分析	232
9.3.3	六节点三角形单元分析	237
9.3.4	四节点四边形单元分析	239
9.4	热水钢管道传热分析案例	242
9.4.1	问题描述	242
9.4.2	三节点三角形单元分析	242
9.4.3	六节点三角形单元分析	247
9.4.4	四节点四边形单元分析	250
9.5	烟囱稳态传热分析案例	253
9.5.1	问题描述	253
9.5.2	三节点三角形单元分析	254
9.5.3	六节点三角形单元分析	256
9.5.4	四节点四边形单元分析	257
9.6	有限元模型精确性验证	259
9.6.1	热力学第一类边界条件模型验证	259
9.6.2	热力学第二类边界条件模型验证	260
9.6.3	热力学第三类边界条件模型验证	262

<b>第 10 章 轴对称传热问题计算</b> .....	264
10.1 热力管保温传热分析案例 .....	264
10.1.1 问题描述 .....	264
10.1.2 三节点三角形单元分析 .....	265
10.1.3 六节点三角形单元分析 .....	268
10.1.4 四节点四边形传热分析 .....	269
10.2 蒸汽管传热分析案例 .....	271
10.2.1 问题描述 .....	271
10.2.2 三节点三角形单元分析 .....	272
10.2.3 六节点三角形单元分析 .....	274
10.2.4 四节点四边形传热分析 .....	276
10.3 钢球瞬态传热问题温度场分析 .....	278
10.3.1 问题描述 .....	278
10.3.2 三节点三角形单元分析 .....	279
10.3.3 六节点三角形单元分析 .....	282
10.3.4 四节点四边形传热分析 .....	285
10.4 带轮淬火过程分析案例 .....	288
10.4.1 问题描述 .....	288
10.4.2 三节点三角形热分析 .....	288
10.4.3 六节点三角形单元分析 .....	292
10.5 保温桶对流传热过程分析 .....	295
10.5.1 问题描述 .....	295
10.5.2 三节点三角形热分析 .....	296
10.5.3 六节点三角形单元分析 .....	299
10.5.4 四节点四边形传热分析 .....	301
<b>第 11 章 平面结构分析问题计算案例</b> .....	305
11.1 带孔薄板平面应力分析 .....	305
11.1.1 问题描述 .....	305
11.1.2 三节点三角形单元分析 .....	306
11.2 带孔连接板平面应力分析 .....	313
11.2.1 问题描述 .....	313
11.2.2 六节点三角形单元分析 .....	313
11.3 高层建筑承受风载荷的应力分析 .....	317

---

11.3.1 问题描述	317
11.3.2 三节点三角形单元分析	318
11.4 带孔拱形板平面结构应力分析	322
11.4.1 问题描述	322
11.4.2 三节点三角形单元分析	322
11.5 涵洞平面结构应变分析	327
11.5.1 问题描述	327
11.5.2 六节点三角形单元分析	327
11.6 厚壁圆筒承受压力载荷分析	333
11.6.1 问题描述	333
11.6.2 三节点三角形单元分析	334
11.7 方孔薄板承受拉力载荷的应力分析	338
11.7.1 问题描述	338
11.7.2 三节点三角形单元分析	338
11.8 小结	343
<b>第 12 章 轴对称结构分析问题计算</b>	<b>344</b>
12.1 分析圆盘形等厚度飞轮的轴对称问题	344
12.1.1 问题描述	344
12.1.2 三节点三角形单元分析	345
12.2 分析高速旋转涡轮盘的轴对称结构问题	350
12.2.1 问题描述	350
12.2.2 六节点三角形单元分析	351
12.3 分析厚壁圆球外压下的轴对称结构问题	355
12.3.1 问题描述	355
12.3.2 三节点三角形单元分析	355
12.4 分析圆筒受压下的轴对称结构问题	361
12.4.1 问题描述	361
12.4.2 三节点三角形单元分析	361
12.5 分析工字型车轮的轴对称问题	366
12.5.1 问题描述	366
12.5.2 六节点三角形单元分析	366
12.6 分析轴类零件的轴对称问题	371
12.6.1 问题描述	371

12.6.2	三节点三角形单元分析	372
12.7	分析高速旋转涡轮盘的轴对称结构问题	376
12.7.1	问题描述	376
12.7.2	三节点三角形单元分析	376
12.8	小结	380
<b>第13章</b>	<b>热固耦合分析方法与计算</b>	<b>381</b>
13.1	压气机轮盘耦合分析案例	381
13.1.1	问题描述	381
13.1.2	三节点三角形单元分析	381
13.1.3	六节点三角形单元分析	385
13.2	涡轮盘耦合分析案例	388
13.2.1	问题描述	388
13.2.2	结构场分析	389
13.2.3	耦合场分析	393
13.3	厚壁球内外受压耦合分析案例	401
13.3.1	问题描述	401
13.3.2	三节点三角形单元分析	402
13.4	压力容器耦合分析案例	405
13.4.1	问题描述	405
13.4.2	三节点三角形单元分析	405
13.4.3	四节点四边形单元分析	408
<b>参考文献</b>		<b>412</b>
<b>附录</b>		<b>414</b>

## 第 1 章 三角形单元的平面传热分析模型

热量是自然界和工程技术领域最常见的一种能量形式,对人类生活方式、科技发展、经济建设和国防建设等具有重要影响。欧洲学者早在 19 世纪就开始研究热量产生、传递和转换过程,并创建热力学和传热学等学科。现在,热力学和传热学已经在气象分析、环境监测、航空航天、电力、电子、生物工程、建筑工程、机械制造业和太阳能产业等领域得到广泛应用(Eckert et al., 1996)。

例如,随着推重比的提高,航空发动机涡轮前燃气温度已经达到或者超过 2000K,远远超过材料能够承受的温度极限。为了提高安全性和可靠性,必须对涡轮叶片等零部件进行有效的冷却,如气膜冷却和内部冲击冷却。传热分析计算技术是设计冷却方案和评估冷却效果的关键技术手段。如果预测的叶片温度超出实际温度  $10^{\circ}\text{C}$ ,叶片寿命将会减半,因此准确预测出传热系数和叶片温度有助于防止热穿孔和延长叶片寿命(韩介勤等,2005)。有些学者则认为温度场计算偏差如果达到  $10\sim 15\text{K}$ ,涡轮叶片的估计寿命偏差就达到一半(Rossette et al., 2009)。

另外,各种制冷空调系统都需要计算温度场分布和传热(散热)效率;太阳能发电设备需要计算和提高吸热器的辐射热流密度。纳米卫星采用包括隔热层和散热面等在内的被动热控系统来控制卫星舱内仪器设备的温度变化,保证其工作可靠性(李运泽等,2007)。汽车、火车和地铁等各种车辆在研制过程中都必须计算热量的产生和传递效果,以及其对系统性能、安全和舒适性的影响。

船用大功率柴油机的曲轴制造是支持船舶工业发展的关键技术之一;工程师在曲轴红套装配之前采用数字化计算技术可以掌握曲轴形状变化、热应力场、应变场和温度场的变化规律,指导红套工艺方案制订(余云岚,2008)。

在计算机技术广泛应用之前,学者们已经对热力学和传热学的机理模型进行了深入的研究,但是只能采用傅里叶变换和参数分离等数学方法分析简单的热力学过程;学者们在很大程度上依赖物理实验观察热量变化和传递现象,总结和验证传热规律。

近 30 年来,计算机技术的发展使得学者和工程师可以采用数值计算技术研究分析热量的产生、传递和转换过程。计算机数值计算技术和经典传热理论的结合产生了一门新的交叉学科——数值传热学(numerical heat transfer, NHT)或者计算传热学(computational heat transfer, CHT)。

数值传热学利用偏微分方程的数值计算技术(有限差分法、有限体积法、有限元法等)计算传热过程的状态变化(如温度场和温度梯度场的动态分布),并进一步



分析预测传热过程对结构系统的影响。数值传热分析及相应的计算机软件的发展,使得设计工程师可以十分方便地在各类工程技术领域中应用传热分析技术。

目前,科学与工程技术领域(如装备研制)广泛采用数值传热分析软件进行模拟仿真、分析预测和设计优化,以便提高热交换效率、冷却效率、热防护效率或者降低辐射率等。因此,掌握传热机理模型及其数值计算技术对于从事各类装备设计的工程师是十分重要的。而且,传热分析也是复杂装备多学科设计优化(multidisciplinary design optimization, MDO)技术领域的重要组成学科。传热分析技术是复杂装备创新设计和跨越发展的支撑技术。

## 1.1 传热分析的概念

在科学技术领域,人们普遍采用系统论的方法将研究对象从环境中分离出来形成“系统”。系统观念强调了研究对象与外部环境之间的分割及联系,并且强调了系统内部要素之间的交互作用。系统与外部环境的分割或者连接之处称为系统边界。通过定义一个系统,研究者可以明确界定研究对象的边界和内涵(王成恩, 2000, 2011)。

在与“热”相关的科学技术领域,学者们将研究对象从环境中分割开来,并且定义为热力学系统。热力学系统是一种“连续介质(continuum)”构成的系统,即大量的流体或者固体“质点”或者“粒子”占据连续空间位置构成一个没有缝隙的几何“体积”。学者们采用若干参数描述热力学系统的“状态”,这些参数称为热力学系统的状态参数或者性质。热力学系统的性质不是微观尺度上单个粒子的状态,而是宏观尺度上全部粒子统计平均规律。

一组确定的状态参数值称为热力学系统的一个状态,一个热力学系统可以具备多种状态。如果热力学系统的状态参数不随时间变化,则称热力学系统处于稳态或者平衡状态,否则称热力学系统处于瞬态或者非平衡状态。

热力学系统中常见的状态参数有:温度、压力、密度、内能、焓等。温度是描述热力学系统处于(瞬间)平衡状态的一个状态参数,热量是改变热力学系统状态的一种能量。

在工程技术领域,存在两门相互关联的研究热现象的学科:热力学和传热学。这两门学科分别从不同的角度研究了热力学系统的状态变化、热量传递和能量转换规律。

### 1.1.1 热力学基本定律

热力学主要研究热力学系统从一个状态变化到另一个状态时所伴随的热量变化或者热量与其他能量的转换。热力学系统与外界进行能量交换(传热或做功)的