

CAD/CAM/CAE

工程应用丛书

ANSYS系列

# ANSYS Workbench 17.0 热力学分析实例演练

CAE应用联盟 组编 刘成柱 等编著



关注“机械工业出版社计算机分社”官方微信订阅号，即可获得本书配套资源，包含全部案例素材模型文件、结果文件和程序代码。



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

# ANSYS Workbench 17.0 热力学 分析实例演练

CAE 应用联盟 组编

刘成柱 等编著

机械工业出版社

本书以 ANSYS Workbench 17.0 为操作平台, 详细介绍了软件热力学相关的分析功能及应用。本书内容丰富, 涉及领域范围广, 使读者在掌握软件操作的同时, 也能掌握解决相关工程领域实际问题的思路与方法, 并能自如地解决本领域所出现的问题。

全书共分 3 篇, 基础理论篇从有限元理论着手介绍了热力学分析的基础理论以及 ANSYS Workbench 平台的基础知识; 项目范例篇以项目范例为指导, 讲解在 Workbench 平台中进行的稳态热分析、非稳态热分析、热辐射分析等内容的理论计算公式与案例实际操作方法; 高级应用篇作为传热分析的高级部分, 讲解在 Workbench 平台中进行的相变分析、优化分析、热应力耦合分析、热流耦合分析、磁热耦合分析、电磁热耦合分析等内容。

本书工程实例丰富、讲解详尽, 内容安排循序渐进、深入浅出, 适合不同基础的读者。本书适合理工院校土木工程、机械工程、力学、电气工程等与热学分析有关专业的高年级本科生、研究生及教师使用, 同时也可以作为相关工程技术人员从事工程研究的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS Workbench 17.0 热力学分析实例演练 / CAE 应用联盟组编; 刘成柱等编著. —北京: 机械工业出版社, 2017.4

(CAD/CAM/CAE 工程应用丛书)

ISBN 978-7-111-56727-1

I. ①A… II. ①C… ②刘… III. ①热力学—有限元分析—应用程序  
IV. ①O414.1-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 093320 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张淑谦 责任编辑: 张淑谦

责任校对: 张艳霞 责任印制: 常天培

保定市 中画美凯印刷有限公司印刷

2017 年 6 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm×260mm·28.5 印张·688 千字

0001-3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-56727-1

定价: 89.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: (010) 88361066

读者购书热线: (010) 68326294

(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

## 出版说明

随着信息技术在各领域的迅速渗透，CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用，从根本上改变了传统的设计、生产、组织模式，对推动现有企业的技术改造、带动整个产业结构的变革、发展新兴技术、促进经济增长都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用最早，使用也最为广泛。目前其最主要的应用涉及机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计，而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发，以保持自己技术上的领先地位和国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用，不但可以提高设计质量，缩短工程周期，还可以节省大量建设投资。

各行各业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性，掌握其中的一种或几种软件的使用方法和技巧，已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而，仅仅知道简单的软件操作方法是远远不够的，只有将计算机技术和工程实际结合起来，才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑，机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的“CAD/CAM/CAE 工程应用丛书”。本丛书涉及 AutoCAD、Pro/ENGINEER、Creo、UG、SolidWorks、Mastercam、ANSYS 等软件在机械设计、性能分析、制造技术方面的应用，以及 AutoCAD 和天正建筑 CAD 软件在建筑和室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖、空调布线图、电路布线图以及建筑总图等方面的应用。

本套丛书立足于基本概念和操作，配以大量具有代表性的实例，并融入了作者丰富的实践经验，使得本丛书内容具有专业性强、操作性强、指导性强的特点，是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社

## 前 言

ANSYS 公司的 ANSYS Workbench 作为多物理场及优化分析平台，将在流体市场占据份额较大的两家公司 FLUENT 及 CFX 软件集成起来，同时也将电磁行业分析标准的 ANSOFT 系列软件集成到其平台中，并且提供了软件之间的数据耦合，给用户带来了巨大的便利。

ANSYS Workbench 17.0 提供了 CAD 双向参数链接互动、项目数据自动更新机制、全面的参数管理、无缝集成的优化设计工具等，使 ANSYS 在“仿真驱动产品设计”（Simulation Driven Product Development, SDPD）方面达到了前所未有的高度，同时 ANSYS Workbench 17.0 具有强大的结构、流体、热、电磁及其相互耦合分析功能，除此之外，自从 ANSYS 17.0 开始，Workbench 平台中的分析界面进行了统一化改进，形成了 ANSYS AIM 分析环境。

### 1. 本书特点

本书以初、中级读者为对象，首先从有限元基本原理及 ANSYS Workbench 使用基础讲起，再辅以 ANSYS Workbench 在工程中的应用案例，帮助读者尽快掌握使用 ANSYS Workbench 进行有限元分析的技能。

本书不仅仅是对软件操作过程的详细讲解，还通过理论与实际操作相结合的方式帮助读者加深对有限元方法的理解。

本书作者结合多年 ANSYS Workbench 使用经验与实际工程应用案例，将 ANSYS Workbench 软件的使用方法与技巧详细地讲解给读者。本书在讲解过程中步骤详尽、内容新颖，讲解过程辅以相应的图片，使读者在阅读时一目了然，从而快速掌握书中所讲内容。

书中的案例是基于作者多年来对热力学有限元分析方法及热学相关理论的深入理解编制而成的；书中的多数案例均给出了解析计算的方法并与有限元算法计算的结果进行了对比。

### 2. 本书内容

本书在必要的理论概述基础上，通过大量典型案例对 ANSYS Workbench 分析平台中的模块进行了详细介绍，并结合实际工程与生活中的常见问题进行详细讲解。全书共分为基础理论篇、项目范例篇、高级应用篇 3 部分内容，具体安排如下。

基础理论篇介绍了有限元理论和 ANSYS Workbench 平台常用命令、几何建模与导入方法、网格划分及网格质量评价方法、结果的后处理操作等方面的内容，本篇包括以下 4 个章节的内容。

第 1 章：热力学分析的基础理论

第 2 章：几何建模

第 3 章：网格划分

第 4 章：边界条件与后处理

项目范例篇介绍了 ANSYS Workbench 平台结构基础分析内容，包括稳态热分析、非稳态热分析、热辐射分析等 4 个方面的内容，本篇包括以下 4 个章节的内容。

第 5 章：稳态热分析

第 6 章：非稳态导热分析

第 7 章：非线性热分析

第 8 章：热辐射分析

高级应用篇介绍了 ANSYS Workbench 平台结构进阶分析功能，主要包括热应力分析、热流分析、热学优化分析等内容，本篇包括以下 4 个章节的内容。

第 9 章：相变分析

第 10 章：优化分析

第 11 章：热应力耦合分析

第 12 章：热流耦合分析

第 13 章：磁热耦合分析

第 14 章：电磁热流耦合分析

### 3. 附赠网盘内容（详见封底说明）

附赠网盘主要包括案例模型与案例的操作文档，其中案例的模型文件与案例工程文件同放于相关章节的目录中，以方便读者查询。

例如：第 5 章的第二个操作实例“稳态导热案例二——复合层平壁导热”的几何文件和工程项目管理文件放置在“Char05\char05-2\”路径的文件夹下。

### 4. 读者对象

本书适合于 ANSYS Workbench 初学者和期望提高热力学有限元分析及建模仿真工程应用能力的读者，具体包括：

- ★ 相关从业人员
- ★ 初学 ANSYS Workbench 的技术人员
- ★ 大中专院校的教师和在校生
- ★ 相关培训机构的教师和学员
- ★ 参加工作实习的“菜鸟”
- ★ ANSYS Workbench 爱好者
- ★ 广大科研工作人员
- ★ 初、中级 ANSYS Workbench 从业人员

注：其中电磁分析模块（Maxwell）需要读者单独安装，另外本书中部分章节的内容需要安装接口程序。建议使用 ANSYS Workbench 17.0 及以上平台学习本教程。

### 5. 读者服务

为了方便解决本书疑难问题，读者在学习过程中遇到与本书有关的技术问题，可以发邮件到邮箱 [caxart@126.com](mailto:caxart@126.com)，或者访问博客 <http://blog.sina.com.cn/caxart>，编者会尽快给予解答。

### 6. 本书作者

本书由 CAE 应用联盟组编，主要由刘成柱编写，另外丁金滨、张建伟、丁伟、刘浩、王芳、韩希强、张岩、唐家鹏、石良臣、王菁、郭海霞、李昕、沈再阳、林金宝、高飞、宋玉旺、张文电、张亮亮、于苍海和孙国强也参与了本书的编写工作，在此一并表示感谢。

ANSYS 本身是庞大一个资源库与知识库，本书虽然卷帙浩繁，仍难窥其全貌，加之编者水平有限，书中错误与缺点在所难免，敬请广大读者批评指正，也欢迎广大同行来电来信共同交流探讨。

最后再次希望本书能为读者的学习和工作提供帮助！

编者

# 目 录

出版说明  
前言

## 基础理论篇

第 1 章	热力学分析的基础理论	1
1.1	传热学概述	1
1.1.1	传热的基本方式	2
1.1.2	传热过程	5
1.2	导热	7
1.2.1	基本概念及傅里叶定律	7
1.2.2	导热系数	10
1.2.3	导热微分方程式	14
1.2.4	导热的单值性条件	17
1.3	本章小结	19
第 2 章	几何建模	20
2.1	ANSYS Workbench 17.0 平台及模块	20
2.1.1	Workbench 平台界面	21
2.1.2	菜单栏	21
2.1.3	工具栏	35
2.1.4	工具箱	35
2.2	DesignModeler 17.0 几何建模	39
2.2.1	DesignModeler 几何建模平台	40
2.2.2	菜单栏	41
2.2.3	工具栏	51
2.2.4	常用命令栏	53
2.2.5	Tree Outline (模型树)	53
2.2.6	DesignModeler 几何建模实例——连接板	56
2.2.7	ANSYS SpaceClaim 同步几何建模实例——连接板	61
2.3	本章小结	69
第 3 章	网格划分	70
3.1	ANSYS Meshing 17.0 网格划分	70
3.1.1	Meshing 网格划分适用领域	70
3.1.2	Meshing 网格划分方法	71
3.1.3	Meshing 网格默认设置	73
3.1.4	Meshing 网格尺寸设置	75
3.1.5	Meshing 网格膨胀层设置	78

3.1.6	Meshing 网格 Patch Conforming 选项	79
3.1.7	Meshing 网格高级选项	80
3.1.8	Meshing 网格损伤设置	80
3.1.9	Meshing 网格评估统计	81
3.2	ANSYS Meshing 网格划分实例	87
3.2.1	应用实例 1——网格尺寸控制	87
3.2.2	应用实例 2——扫掠网格划分	94
3.2.3	应用实例 3——多区域网格划分	98
3.2.4	应用实例 4——网格移动	103
3.3	本章小结	106
<b>第 4 章</b>	<b>边界条件与后处理</b>	<b>107</b>
4.1	ANSYS Workbench 17.0 边界条件	107
4.2	ANSYS Mechanical 17.0 后处理	113
4.2.1	查看结果	113
4.2.2	结果显示	117
4.2.3	温度结果显示	118
4.2.4	用户自定义输出结果	119
4.2.5	后处理结果 (2)	120
4.3	案例分析	121
4.3.1	问题描述	121
4.3.2	启动 Workbench 并建立分析项目	121
4.3.3	导入创建几何体	121
4.3.4	添加材料库	123
4.3.5	添加模型材料属性	125
4.3.6	划分网格	126
4.3.7	施加载荷与约束	126
4.3.8	结果后处理	128
4.3.9	保存与退出	131
4.4	本章小结	132

## 项目范例篇

<b>第 5 章</b>	<b>稳态热分析</b>	<b>133</b>
5.1	稳态导热	133
5.2	平壁导热理论	133
5.3	稳态导热案例一——单层平壁导热	138
5.3.1	问题描述	138
5.3.2	解析方法计算	138
5.3.3	启动 Workbench 并建立分析项目	138
5.3.4	创建几何体模型	139
5.3.5	创建分析项目	140



5.3.6	划分网格 .....	142
5.3.7	施加载荷与约束 .....	142
5.3.8	结果后处理 .....	144
5.3.9	保存与退出 .....	146
5.4	稳态导热案例二——复合层平壁导热 .....	146
5.4.1	问题描述 .....	146
5.4.2	解析方法计算 .....	146
5.4.3	启动 Workbench 并建立分析项目 .....	147
5.4.4	创建几何体模型 .....	147
5.4.5	创建分析项目 .....	148
5.4.6	划分网格 .....	150
5.4.7	施加载荷与约束 .....	151
5.4.8	结果后处理 .....	152
5.4.9	保存与退出 .....	154
5.5	通过圆筒壁的导热 .....	155
5.5.1	第一类边界条件 .....	155
5.5.2	第三类边界条件 .....	157
5.6	稳态导热案例三——复合层圆筒壁导热 1 .....	159
5.6.1	问题描述 .....	159
5.6.2	解析方法计算 .....	159
5.6.3	启动 Workbench 并建立分析项目 .....	160
5.6.4	创建几何体模型 .....	160
5.6.5	创建分析项目 .....	162
5.6.6	划分网格 .....	163
5.6.7	施加载荷与约束 .....	164
5.6.8	结果后处理 .....	166
5.6.9	保存与退出 .....	167
5.7	稳态导热案例四——复合层圆筒壁导热 2 .....	167
5.7.1	问题描述 .....	168
5.7.2	解析方法计算 .....	168
5.7.3	启动 Workbench 并建立分析项目 .....	168
5.7.4	创建几何体模型 .....	169
5.7.5	创建分析项目 .....	171
5.7.6	划分网格 .....	172
5.7.7	施加载荷与约束 .....	173
5.7.8	结果后处理 .....	175
5.7.9	保存与退出 .....	176
5.8	稳态热分析案例五——各向异性结构导热 .....	177
5.8.1	案例介绍 .....	177
5.8.2	启动 Workbench 并建立分析项目 .....	177

5.8.3	创建几何体模型 .....	178
5.8.4	创建分析项目 .....	180
5.8.5	划分网格 .....	182
5.8.6	施加载荷与约束 .....	182
5.8.7	结果后处理 .....	184
5.8.8	保存与退出 .....	186
5.9	本章小结 .....	186
<b>第 6 章</b>	<b>非稳态导热分析 .....</b>	<b>187</b>
6.1	非稳态导热的基本概念 .....	187
6.2	无限大平壁的瞬态导热 .....	189
6.3	瞬态导热分析案例一——无限大平壁导热 .....	193
6.3.1	问题描述 .....	193
6.3.2	解析解法如下 .....	193
6.3.3	启动 Workbench 并建立分析项目 .....	194
6.3.4	创建几何体模型 .....	195
6.3.5	创建分析项目 .....	197
6.3.6	划分网格 .....	198
6.3.7	施加载荷与约束 .....	199
6.3.8	瞬态计算 .....	200
6.3.9	保存与退出 .....	202
6.4	瞬态导热分析案例二——热电偶节点散热仿真 .....	203
6.4.1	问题描述 .....	203
6.4.2	解析解法介绍 .....	203
6.4.3	启动 Workbench 并建立分析项目 .....	203
6.4.4	创建几何体模型 .....	204
6.4.5	创建分析项目 .....	205
6.4.6	划分网格 .....	206
6.4.7	施加载荷与约束 .....	207
6.4.8	结果后处理 .....	208
6.4.9	保存与退出 .....	210
6.5	瞬态导热分析案例三——圆柱筒导热 .....	211
6.5.1	问题描述 .....	211
6.5.2	解析解法介绍 .....	211
6.5.3	启动 Workbench 并建立分析项目 .....	213
6.5.4	创建几何体模型 .....	213
6.5.5	创建分析项目 .....	216
6.5.6	划分网格 .....	217
6.5.7	施加载荷与约束 .....	218
6.5.8	结果后处理 .....	219
6.5.9	保存与退出 .....	222
6.6	本章小结 .....	223



第 7 章 非线性热分析	224
7.1 非线性热分析概述	224
7.2 非线性热分析案例——平板非线性热分析	224
7.2.1 案例描述	224
7.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目	225
7.2.3 创建几何体模型	225
7.2.4 创建分析项目	226
7.2.5 划分网格	228
7.2.6 施加载荷与约束	228
7.2.7 结果后处理	230
7.2.8 保存与退出	233
7.3 本章小结	233
第 8 章 热辐射分析	234
8.1 基本概念	234
8.1.1 热辐射的本质和特点	234
8.1.2 吸收、反射和投射	235
8.2 热辐射案例——空心半球与平板的热辐射	237
8.2.1 案例介绍	237
8.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目	237
8.2.3 定义材料参数	237
8.2.4 导入模型	238
8.2.5 划分网格	238
8.2.6 定义荷载	241
8.2.7 求解及后处理	244
8.2.8 保存并退出	245
8.3 本章小结	245

## 高级应用篇

第 9 章 相变分析	246
9.1 相变分析简介	246
9.1.1 相与相变	246
9.1.2 潜热与焓	246
9.1.3 在 ANSYS Workbench 平台中相变分析的基本思路	247
9.2 相变分析案例——飞轮铸造模拟	248
9.2.1 问题描述	248
9.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目	248
9.2.3 导入几何体模型	250
9.2.4 创建分析项目	251
9.2.5 保存与退出	264
9.3 本章小结	264

<b>第 10 章 优化分析</b> .....	265
10.1 优化分析简介.....	265
10.1.1 优化设计概述.....	265
10.1.2 Workbench 结构优化分析简介.....	265
10.1.3 Workbench 结构优化分析.....	266
10.2 优化分析案例——散热肋片优化.....	267
10.2.1 问题描述.....	267
10.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目.....	267
10.2.3 创建几何体模型.....	268
10.2.4 创建分析项目.....	271
10.2.5 划分网格.....	273
10.2.6 施加载荷与约束.....	274
10.2.7 结果后处理.....	276
10.2.8 保存与退出.....	283
10.3 本章小结.....	283
<b>第 11 章 热应力耦合分析</b> .....	284
11.1 热应力概述.....	284
11.2 热应力基本理论.....	285
11.3 热应力案例一——瞬态热应力.....	287
11.3.1 热应力案例描述.....	287
11.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目.....	287
11.3.3 创建几何体模型.....	288
11.3.4 材料设置.....	289
11.3.5 划分网格.....	292
11.3.6 施加载荷与约束.....	292
11.3.7 结果后处理.....	294
11.3.8 保存与退出.....	300
11.4 热应力案例二——热应力对结构模态影响.....	300
11.4.1 启动 Workbench 并建立分析项目.....	301
11.4.2 创建几何体模型.....	301
11.4.3 创建分析项目.....	302
11.4.4 划分网格.....	304
11.4.5 施加载荷与约束.....	304
11.4.6 结果后处理.....	306
11.4.7 启动 Workbench 并建立分析项目.....	312
11.4.8 创建几何体模型.....	313
11.4.9 创建分析项目.....	314
11.4.10 划分网格.....	316
11.4.11 施加载荷与约束.....	316
11.4.12 结果后处理.....	318



11.4.13	启动 Workbench 并建立分析项目	324
11.4.14	创建几何体模型	324
11.4.15	创建分析项目	325
11.4.16	划分网格	326
11.4.17	施加载荷与约束	327
11.5	热应力案例三——热疲劳	329
11.5.1	案例描述	329
11.5.2	启动 Workbench 并建立分析项目	329
11.5.3	创建几何体模型	329
11.5.4	材料设置	331
11.5.5	划分网格	332
11.5.6	施加载荷与约束	332
11.5.7	结果后处理	333
11.5.8	保存与退出	339
11.6	本章小结	339
第 12 章	热流耦合分析	340
12.1	流体动力学实例一——CFX 流场分析	340
12.1.1	问题描述	341
12.1.2	启动 Workbench 并建立分析项目	341
12.1.3	创建几何体模型	341
12.1.4	网格划分	342
12.1.5	初始化及求解控制	346
12.1.6	流体计算	347
12.1.7	结果后处理	349
12.2	流体动力学实例二——Fluent 流场分析	350
12.2.1	问题描述	351
12.2.2	软件启动与保存	351
12.2.3	导入几何数据文件	351
12.2.4	网格设置	352
12.2.5	进入 Fluent 平台	355
12.2.6	材料选择	356
12.2.7	设置几何属性	357
12.2.8	流体边界条件	357
12.2.9	求解器设置	359
12.2.10	结果后处理	360
12.2.11	POST 后处理	362
12.3	流体动力学实例三——Icepak 流场分析	364
12.3.1	问题描述	366
12.3.2	软件启动与保存	366
12.3.3	导入几何数据文件	366

12.3.4	添加 Icepak 模块	367
12.3.5	热源设置	371
12.3.6	求解分析	372
12.3.7	POST 后处理	374
12.3.8	静态力学分析	375
12.4	本章小结	377
<b>第 13 章</b>	<b>磁热耦合分析</b>	<b>378</b>
13.1	磁热耦合概述	378
13.2	磁热耦合案例	379
13.2.1	问题描述	379
13.2.2	软件启动与保存	380
13.2.3	建立电磁分析	380
13.2.4	几何模型建立	381
13.2.5	求解域的设置	382
13.2.6	创建并赋材料	383
13.2.7	添加激励	386
13.2.8	分析步创建	387
13.2.9	模型检查与计算	391
13.2.10	后处理	391
13.2.11	创建几何数据共享	393
13.3	本章小结	399
<b>第 14 章</b>	<b>电磁热流耦合分析</b>	<b>400</b>
14.1	电磁热流耦合概述	400
14.2	电磁热流耦合案例	402
14.2.1	问题描述	402
14.2.2	软件启动与保存	402
14.2.3	建立电磁分析	403
14.2.4	几何模型建立	404
14.2.5	求解域的设置	407
14.2.6	创建并赋材料	407
14.2.7	添加激励	409
14.2.8	分析步创建	410
14.2.9	模型检查与计算	413
14.2.10	后处理	413
14.2.11	创建几何数据共享	415
14.3	本章小结	433
<b>附录 A</b>	<b>常用材料的热物性表</b>	<b>434</b>
<b>附录 B</b>	<b>空气热物性参数</b>	<b>439</b>
	<b>参考文献</b>	<b>441</b>



# 基础理论篇

## 第1章 热力学分析的基础理论

热力学分析是研究计算传热学与热力学的综合学科，本章内容主要以计算传热学的基础理论为主线，简单地介绍了传热学中的三个基本传热方式及基础理论，通过本章的学习，使读者对传热学基本概念和分析方法有总体的了解，为后面章节有限元分析的学习奠定一定的理论基础。

知识点	学习目标			
	了 解	理 解	应 用	实 践
传热学的基础	√	√		
三种传热方式		√	√	√
传热的基本应用		√	√	√

### 1.1 传热学概述

传热学是研究热量传递过程规律的一门科学。凡有温度差，就有热量自发地从高温物体传递到低温物体。

由于自然界和生产过程中到处都存在温度差，因此，传热是自然界和生产领域中非常普遍的现象，传热学的应用领域也十分广泛。传热学已是现代技术科学的主要技术基础学科之一，诸如以下领域都离不开传热学。

- 各种锅炉和换热设备的设计以及强化换热和节能而改进锅炉及其他换热设备的结构；
- 化学工业生产为维持化学工艺流程的温度而研制特殊要求的加热或冷却技术及余热回收；
- 电子工业中未解决超大规模集成电路或电子仪器而需研究散热方法；
- 机械制造工业测算和控制冷加工或者热加工中机件的温度场；
- 输电领域中为提高电力设备在高电压、大电流下的运行稳定性而研究其发热及散热特性；
- 核能、火箭等尖端技术中存在的需要解决的传热问题；
- 太阳能、地热能和工业余热利用工程中高效能换热器的开发和设计，以及应用传热学知识指导强化或削弱传热，达到节能目的；

● 其他如农业、生物、地质、气象、环保等。

近几十年来，传热学的成果对各个领域技术进步起到了很大的促进作用，而传热学向各个技术领域的渗透又推动了学科的迅速发展。

在电力行业与电力设备制造领域中更是不乏传热问题。例如电动机和变压器中冷却风扇的选择、配套和合理有效的利用，散热窗的布置与散热通道的开发、设计与实验研究，各供热设备管道的保温材料及建筑围护结构材料等的研制及热物理性质的测试、热损失的分析计算，各类换热器的设计、选择和性能评价等，都要求具备一定的传热学知识。传热学是一门重要的技术基础课程。

### 1.1.1 传热的基本方式

为了由浅入深地认识和掌握传热的规律，先来分析一些常见的传热现象。例如房屋墙壁在冬季的散热，整个过程如图 1-1 所示，可分为三段：首先热量由室内空气以对流换热的方式和墙与室内物体之间的辐射方式传给墙内表面；再由墙内表面以固体导热方式传递到墙外表面；最后由墙外表面以空气对流换热和墙与周围物体间的辐射方式把热量传到室外环境。显然在其他条件不变时，室内外的温度差越大，传热量也越大。

又如，在热水暖气片的传热过程中，热水的热量先以对流换热的方式传递给壁内侧，再以导热方式通过壁，然后壁外侧空气以对流换热和壁与周围物体的辐射换热方式将热量传递给室内。

从上述两个简单传热过程的描述不难理解，传热过程是由导热、热对流及热辐射三种基本传热方式组合形成的。要了解传热过程的规律，就必须首先分析三种基本传递方式。

本节将对这三种基本传热方式作简要解释，并给出它们最基本的表达式，使读者对传热学有一个基本的了解和认识。

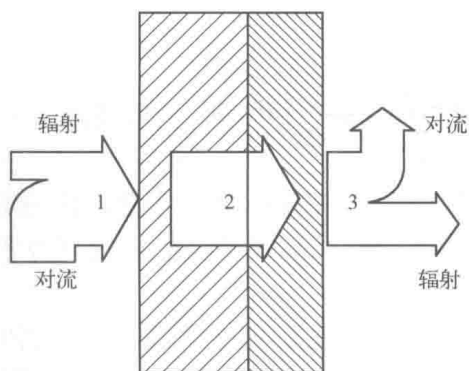


图 1-1 墙壁的散热

#### (1) 导热

导热又称为热传导，是指物体各部分无相对位移或不同物体直接接触时靠分子、原子及自由电子等微观粒子热运动而进行的热量传递现象，导热是物质的属性，导热过程可以在固体、液体及气体中发生。但在引力场下，单纯的导热一般只发生在密实的固体中，因为在有温差时，液体和气体中可能出现热对流而难以维持单纯的导热。

大平壁导热是导热的典型问题。由前述墙壁的导热过程看出，平壁热量与壁两侧表面的温度差成正比，与壁厚成反比，并与材料的导热性能有关。因此，通过平壁的导热量的计算



式是:

$$\Phi = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t A \text{ (W)} \quad (1-1a)$$

或热流密度

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (1-1b)$$

式中  $A$  —— 壁面积, 单位为  $\text{m}^2$ ;

$\delta$  —— 壁厚, 单位为  $\text{m}$ ;

$\Delta t$  —— 壁两侧表面的温差,  $\Delta t = t_{w1} - t_{w2}$ , 单位为  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\lambda$  —— 比例系数, 称为导热系数或热导率, 其意义是指单位厚度的物体具有单位温度差时, 在它的单位面积上每单位时间的导热热量, 它的国际单位是  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。它表示材料导热能力的大小。导热系数一般由实验测定, 例如, 普通混凝土  $\lambda = 0.75 \sim 0.8 \text{ [W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ , 纯铜的  $\lambda$  将近  $400 \text{ [W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ 。

在传热学中, 常用电学欧姆定律的形式 (电流=电位差/电阻) 来分析热量传递过程中热量与温度差的关系。即把热流密度的计算式改写为欧姆定律的形式。

$$\text{热流密度: } q = \frac{\text{温度差}\Delta t}{\text{热阻}R_{\lambda}} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (1-2)$$

与欧姆定律对比, 可以看出热流相当于电流; 温度差相当于电位差; 而热阻相当于电阻。于是, 得到了一个在传热学非常重要而且适用的概念——热阻。对不同的传热方式, 热阻  $R_{\lambda}$  的具体表达式将是不一样的。以平壁为例, 改写式 (1-1b) 得:

$$q = \frac{\Delta t}{\delta/\lambda} = \frac{\Delta t}{R_{\lambda}} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (1-1c)$$

用  $R_{\lambda}$  表示导热热阻, 则平壁导热热阻为  $R_{\lambda} = \delta/\lambda \text{ (m}^2\cdot\text{K/W)}$ 。可见平壁导热热阻与壁厚成正比, 而与导热系数成反比。 $R_{\lambda}$  越大, 则  $q$  越小。利用式 (1-1a), 对于面积为  $A \text{ (m}^2\text{)}$  的平壁, 则热阻为  $\delta/(\lambda \cdot A) \text{ (K/W)}$ 。热阻的倒数称为热导, 它相当于电导。

不同情况下的导热过程, 导热的表达式亦各异。本书将就几种典型情况下的导热的宏观规律及其计算方法进行分章节论述。

## (2) 热对流

依靠流体的运动, 把热量由一处传递到另一处的现象, 称为热对流, 热对流是传热的另一种基本方式。若热对流过程中单位时间通过单位面积有质量  $M \text{ [kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})]$  的流体由温度  $t_1$  的地方流至  $t_2$  处, 其比热容为  $c_p \text{ [J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$ , 则此热对流的热流密度应为:

$$q = M c_p (t_2 - t_1) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (1-3)$$

但值得注意的是, 传热工程涉及的问题往往不单纯是热对流, 而是流体与固体壁直接接触时的换热过程, 传热学把它称为“对流换热”, 也称为放热。而且因为有温度差, 热对流将同时伴随热传导, 所以, 对流换热过程的换热机制既有热对流的作用, 亦有导热的作用, 故对流换热与热对流不同, 它已不再是基本传热方式。计算对流换热的基本公式是牛顿于 1701 年提出的, 即:

$$q = h(t_w - t_f) = h\Delta t \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (1-4a)$$