

ANSYS工程应用系列丛书

三维书屋工作室
内附DVD光盘教学光盘



三维书屋工作室

胡仁喜 康士廷 等编著

ANSYS

14.0

视频操作 ■ 源文件 ■ 最终效果

热力学有限元分析从入门到精通



全面完整的知识体系
深入浅出的理论阐述
循序渐进的分析讲解
实用典型的实例引导

本丛书包含各书目分别由ANSYS工程应用领域的专家和学者执笔编写，书中融入了他们多年研究的经验和体会，为了便于读者快速掌握ANSYS工程开发技巧，书中引用大量的工程案例。



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

ANSYS 14.0 热力学有限元分析

从入门到精通

三维书屋工作室

胡仁喜 康士廷 等编著



机械工业出版社

ANSYS 软件是融结构、热、流体、电磁、声学多物理场于一体的大型通用有限元分析软件。包括多个模块,不但可进行隐式分析,也可进行显式分析,并且可进行多物理场间的复杂耦合分析。

本书首先介绍了 ANSYS 软件和应用 ANSYS 进行有限元分析的例子,随后介绍了自适应网格划分及生死单元技术,最后以具体的工程实例深入浅出地介绍了与温度场相关的耦合场分析。书中每个实例都先用 GUI 方式一步一步教读者如何操作,让读者轻松地学会,随后提供详细的命令流。

本书可供汽车、压力容器、国防军工、土木工程、金属热加工等行业进行热分析与产品开发使用,也可以作为大学本科学生与研究生进行热分析的参考教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS 14.0 热力学有限元分析从入门到精通/胡仁喜, 康士廷等编著. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2013. 7
ISBN 978-7-111-43344-6

I. ①A… II. ①胡…②康… III. ①热力学—有限元分析—应用程序 IV. ①0414. 1-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 161597 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: 曲彩云 责任编辑: 曲彩云

责任印制: 杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2013 年 8 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 28.25 印张 · 702 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-43344-6

ISBN 978-7-89405-020-5 (光盘)

定价: 68.00 元 (含 1DVD)



凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面防伪标均为盗版

前言

有限元法作为目前工程应用较为广泛的一种数值计算方法，以其独有的计算优势得到了广泛的发展和应用，并由此产生了一批非常成熟的通用和专业有限元商业软件。随着计算机技术的飞速发展，各种工程软件也得以广泛应用。ANSYS 软件以它的多物理场耦合分析功能而成为 CAE 软件的应用主流，在热分析工程应用中得到了较为广泛的应用。

本书以 ANSYS14.0 为平台，对 ANSYS 热分析和与热相关的耦合场分析的基本思路、操作步骤、应用技巧进行了介绍，并结合工程应用实例讲述了 ANSYS 具体工程应用方法。

本书首先介绍了 ANSYS 软件及应用 ANSYS 进行有限元分析的例子，随后介绍了自适应网格划分及生死单元技术，最后以具体的工程实例深入浅出地介绍了与温度场相关的耦合场分析。书中每个实例都先用 GUI 方式一步一步教读者如何操作，让读者轻松地学会，随后提供详细的命令流。全书分为 17 章，第 1 章介绍了 ANSYS 的热分析及耦合场分析能力，以及常用的拾取和显示操作方法；第 2 章介绍了热分析的基础知识；第 3 章介绍了 ANSYS 稳态热分析的基本步骤；第 4 章介绍了电线生热、蒸汽管、热力管、肋片换热器稳态热分析的 ANSYS 操作步骤；第 5 章介绍了 ANSYS 瞬态热分析与非线性热分析；第 6 章详细介绍了钢板加热过程、钢制零件淬油过程、温度控制加热器、两环形零件在一圆筒形水箱中冷却过程瞬态热分析的 ANSYS 操作步骤；第 7 章介绍了 ANSYS 热辐射分析的基本步骤；第 8 章详细介绍了黑体热辐射、两同心圆柱体间热辐射、一长方体形坯料空冷过程分析、圆台形物体热辐射分析的 ANSYS 操作步骤；第 9 章介绍了 ANSYS 相变分析的基本步骤；第 10 章介绍了茶杯中水结冰过程分析、某零件铸造过程分析、某焊接件两焊缝在顺序焊接过程分析的 ANSYS 操作步骤；第 11 章介绍了 ANSYS FLOTRAN CFD 分析的基本步骤；第 12 章介绍了应用 CFD 进行长方体热辐射、换热器分析的 ANSYS 操作步骤；第 13 章介绍了在热分析中应用到的自适应网格划分及生死单元技术；第 14 章介绍了 ANSYS 耦合场分析方法，并重点介绍了手工热-应力耦合分析方法。第 15 章介绍了两种不同膨胀系数的物体热应力分析、两厚壁筒热应力分析、两物体热接触分析、某扁挤压筒的热结构耦合分析、圆柱形坯料锻造过程分析的 ANSYS 操作步骤；第 16 章详细介绍了两物体相对滑动过程中和相对转动过程中的摩擦生热分析的 ANSYS 操作步骤；第 17 章为高级应用，主要介绍了地下弥散过程分析，应用自适应网格技术矩形截面梁的稳态热分析、热电耦合分析，电磁感应加热分析等的 ANSYS 操作步骤。

本书适合 ANSYS 热分析的初学者和期望提高热分析工程应用能力的读者，所举实例具有典型性、新颖性，本书配送光盘，包括全书所有实例的 APDL 程序的文件和实例操作过程录屏讲解 AVI 文件，读者可以轻松快捷地掌握 ANSYS14.0 进行热分析的操作技巧和工程应用方法。

本书由三维书屋工作室策划，主要由胡仁喜和康士廷编写。李鹏、周冰、董伟、李瑞、王敏、张俊生、王玮、孟培、王艳池、阳平华、袁涛、闫聪聪、刘昌丽、王培合、路纯红、王义发、王玉秋、杨雪静、张日晶、卢园、万金环、王渊峰、王兵学等人也参加了部分编写工作。由于时间仓促、作者水平有限，书中错误、纰漏之处在所难免，欢迎广大读者、业内人士登录网站 www.sjzsanweishuwu.com 或发邮件到 win760520@126.com 批评指正。

编者

目 录

前言

第 1 章 ANSYS 热分析简介及常用操作	1
1.1 ANSYS 热分析简介	2
1.1.1 ANSYS 的热分析能力	2
1.1.2 ANSYS 热分析分类	3
1.1.3 ANSYS 中与热相关的耦合场分析种类	3
1.1.4 ANSYS 中热分析单元简介	3
1.2 ANSYS 中常用操作	6
1.2.1 拾取操作	6
1.2.2 显示操作	7
第 2 章 热分析基础知识	10
2.1 传热学基本理论	11
2.1.1 符号与单位	11
2.1.2 热传递的方式	12
2.1.3 热力学第一定律	13
2.1.4 热分析的控制方程	14
2.2 热分析有限元法	14
2.3 热分析网格划分误差及计算误差估计	16
第 3 章 稳态热分析	18
3.1 稳态热分析概述	19
3.1.1 稳态热分析定义	19
3.1.2 稳态热分析的控制方程	19
3.2 热载荷和边界条件的类型	19
3.2.1 概述	19
3.2.2 热载荷和边界条件注意事项	20
3.3 稳态热分析基本步骤	20
第 4 章 稳态热分析实例详解	23
4.1 实例一——电线生热分析	24
4.1.1 问题描述	24
4.1.2 问题分析	24
4.1.3 GUI 操作步骤	24
4.1.4 APDL 命令流程序	41
4.2 实例二——蒸汽管分析	43
4.2.1 问题描述	43
4.2.2 问题分析	44
4.2.3 GUI 操作步骤	44
4.2.4 APDL 命令流程序	57

4.3	实例三——热力管分析.....	62
4.3.1	问题描述.....	62
4.3.2	问题分析.....	62
4.3.3	GUI 操作步骤.....	63
4.3.4	APDL 命令程序.....	81
4.4	实例四——肋片换热器分析.....	82
4.4.1	问题描述.....	82
4.4.2	问题分析.....	82
4.4.3	GUI 操作步骤.....	82
4.4.4	APDL 命令程序.....	89
第 5 章	瞬态热分析与非线性热分析.....	90
5.1	瞬态热分析概述.....	91
5.1.1	瞬态热分析特性.....	91
5.1.2	瞬态分析前处理考虑因素.....	91
5.1.3	控制方程.....	91
5.1.4	时间积分与时间步长预测.....	92
5.1.5	时间步长设置.....	93
5.1.6	数值求解过程.....	94
5.1.7	瞬态分析准确程度的评估.....	94
5.1.8	初始条件的施加.....	95
5.2	非线性分析综述.....	97
5.2.1	非线性分析特点.....	97
5.2.2	稳态非线性求解过程.....	97
5.2.3	非线性分析步骤.....	98
第 6 章	瞬态热分析实例详解.....	107
6.1	实例一——钢板加热过程分析.....	108
6.1.1	问题描述.....	108
6.1.2	问题分析.....	108
6.1.3	GUI 操作步骤.....	108
6.1.4	APDL 命令程序.....	116
6.2	实例二——钢制零件淬油过程分析.....	118
6.2.1	问题描述.....	118
6.2.2	问题分析.....	118
6.2.3	GUI 操作步骤.....	119
6.2.4	APDL 命令程序.....	125
6.3	实例三——温度控制加热器分析.....	128
6.3.1	问题描述.....	128
6.3.2	问题分析.....	128
6.3.3	GUI 操作步骤.....	129

6.3.4	APDL 命令程序	137
6.4	实例四——两环形零件在一圆筒形水箱中冷却过程	137
6.4.1	问题描述	137
6.4.2	问题分析	138
6.4.3	GUI 操作步骤	138
6.4.4	APDL 命令程序	144
第 7 章	热辐射分析	145
7.1	热辐射基本理论及在 ANSYS 中的处理方法	146
7.1.1	热辐射特性	146
7.1.2	热辐射基本术语	146
7.1.3	ANSYS 中热辐射的处理方法	148
7.2	ANSYS 中辐射建模方法	149
7.2.1	使用辐射线单元建立辐射模型	150
7.2.2	使用表面效应单元建立辐射模型	150
7.2.3	使用辐射矩阵单元建立辐射模型	152
第 8 章	热辐射分析实例详解	157
8.1	实例一——黑体热辐射分析	158
8.1.1	问题描述	158
8.1.2	问题分析	158
8.1.3	GUI 操作步骤	158
8.1.4	APDL 命令程序	162
8.2	实例二——两同心圆柱体间热辐射分析	163
8.2.1	问题描述	163
8.2.2	问题分析	163
8.2.3	GUI 操作步骤	163
8.2.4	APDL 命令程序	173
8.3	实例三——一长方体形坯料空冷过程分析	176
8.3.1	问题描述	176
8.3.2	问题分析	176
8.3.3	GUI 操作步骤	176
8.3.4	APDL 命令程序	181
8.4	实例四——一圆台形物体热辐射分析	181
8.4.1	问题描述	181
8.4.2	问题分析	182
8.4.3	GUI 操作步骤	182
8.4.4	APDL 命令程序	188
第 9 章	相变分析	190
9.1	相变基本术语	191
9.1.1	相和相变	191

9.1.2 潜在热量和焓.....	191
9.2 ANSYS 中的相变分析基本思路及求解设置.....	192
9.2.1 相变分析基本思路.....	192
9.2.2 求解设置.....	194
第 10 章 相变分析实例详解.....	197
10.1 实例一——茶杯中水结冰过程分析.....	198
10.1.1 问题描述.....	198
10.1.2 问题分析.....	198
10.1.3 GUI 操作步骤.....	198
10.1.4 APDL 命令程序.....	212
10.2 实例二——某零件铸造过程分析.....	215
10.2.1 问题描述.....	215
10.2.2 问题分析.....	216
10.2.3 GUI 操作步骤.....	216
10.2.4 APDL 命令程序.....	225
10.3 实例三——某焊接件两焊缝在顺序焊接过程中分析.....	226
10.3.1 问题描述.....	226
10.3.2 问题分析.....	226
10.3.3 GUI 操作步骤.....	226
10.3.4 APDL 命令程序.....	238
第 11 章 FLOTRAN CFD 分析简介.....	239
11.1 FLOTRAN CFD 分析概述.....	240
11.1.1 FLOTRAN CFD 分析的概念.....	240
11.1.2 FLOTRAN CFD 分析的种类.....	240
11.2 FLOTRAN CFD 分析基础.....	241
11.2.1 FLOTRAN CFD 单元的特点.....	241
11.2.2 FLOTRAN CFD 分析的一些限制及注意事项.....	242
11.2.3 FLOTRAN CFD 分析的主要步骤.....	243
11.2.4 FLOTRAN CFD 分析中产生的一些文件.....	244
11.2.5 FLOTRAN CFD 分析中提高收敛性和稳定性的常用的工具.....	244
11.2.6 FLOTRAN CFD 分析过程中应处理的问题.....	246
第 12 章 CFD 分析实例详解.....	249
12.1 实例一——长方体热辐射分析.....	250
12.1.1 问题描述.....	250
12.1.2 问题分析.....	250
12.1.3 GUI 操作步骤.....	250
12.1.4 APDL 命令程序.....	257
12.2 实例二——某换热器分析.....	258
12.2.1 问题描述.....	258

12.2.2	问题分析.....	259
12.2.3	GUI 操作步骤.....	259
12.2.4	APDL 命令程序.....	272
第 13 章	自适应网格划分及生死单元技术.....	274
13.1	自适应网格划分技术.....	275
13.1.1	自适应网格划分技术定义.....	275
13.1.2	自适应网格划分的先决条件.....	275
13.1.3	自适应网格划分技术的应用方法.....	275
13.1.4	定制 ADAPT 宏(UADAPT.MAC).....	278
13.1.5	自适应网格划分的一些说明.....	279
13.2	生死单元技术.....	280
13.2.1	单元的生和死的定义.....	280
13.2.2	单元生死的基本原理.....	280
13.2.3	使用 ANSYS 结果控制单元生死方法.....	283
13.2.4	单元生死技术的注意事项.....	284
第 14 章	与温度场相关的耦合场分析.....	286
14.1	耦合场分析概述.....	287
14.1.1	耦合场分析的定义.....	287
14.1.2	耦合场分析的类型.....	287
14.1.3	直接耦合解法或间接耦合解法的应用范围.....	290
14.1.4	涉及热分析的直接耦合和间接耦合分析典型应用实例.....	290
14.2	间接手工热-应力耦合分析.....	291
14.2.1	基本特点.....	291
14.2.2	基本过程.....	292
14.2.3	基本操作步骤.....	293
14.3	摩擦生热在 ANSYS 中的计算方法.....	295
第 15 章	热结构耦合分析实例详解.....	297
15.1	实例一——两种不同膨胀系数的物体热应力分析.....	298
15.1.1	问题描述.....	298
15.1.2	问题分析.....	298
15.1.3	GUI 操作步骤.....	298
15.1.4	APDL 命令程序.....	306
15.2	实例二——两厚壁筒热应力分析.....	308
15.2.1	问题描述.....	308
15.2.2	问题分析.....	308
15.2.3	GUI 操作步骤.....	308
15.2.4	APDL 命令程序.....	318
15.3	实例三——两物体热接触分析.....	320
15.3.1	问题描述.....	320

15.3.2	问题分析	321
15.3.3	GUI 操作步骤	321
15.3.4	APDL 命令程序	330
15.4	实例四——某扁挤压筒的热结构耦合分析	330
15.4.1	问题描述	330
15.4.2	问题分析	331
15.4.3	GUI 操作步骤	331
15.4.4	APDL 命令程序	339
15.5	实例五——圆柱形坯料镦粗过程分析	340
15.5.1	问题描述	340
15.5.2	问题分析	340
15.5.3	GUI 操作步骤	341
15.5.4	APDL 命令程序	351
第 16 章	摩擦生热分析实例详解	352
16.1	实例一——两物体相对滑动过程中的摩擦生热分析	353
16.1.1	问题描述	353
16.1.2	问题分析	353
16.1.3	GUI 操作步骤	353
16.1.4	APDL 命令程序	363
16.2	实例二——两物体相对转动过程中的摩擦生热分析	368
16.2.1	问题描述	368
16.2.2	问题分析	369
16.2.3	GUI 操作步骤	369
16.2.4	APDL 命令程序	376
第 17 章	高级应用实例详解	377
17.1	实例一——地下弥散过程分析	378
17.1.1	问题描述	378
17.1.2	问题分析	378
17.1.3	GUI 操作步骤	378
17.1.4	APDL 命令程序	382
17.2	实例二——矩形截面梁稳态热交换过程的分析	384
17.2.1	问题描述	384
17.2.2	问题分析	384
17.2.3	GUI 操作步骤	384
17.2.4	APDL 命令程序	389
17.3	实例三——表面受变压力载荷的矩形截面梁的分析	391
17.3.1	问题描述	391
17.3.2	问题分析	392
17.3.3	GUI 操作步骤	392

17.3.4 APDL 命令程序	400
17.4 实例四——矩形梁的隐式热结构—显式连续分析	400
17.4.1 问题描述	400
17.4.2 问题分析	401
17.4.3 GUI 操作步骤	401
17.4.4 APDL 命令程序	413
17.5 实例五——由铜板连接的两个半导体热电耦合分析	414
17.5.1 问题描述	414
17.5.2 问题分析	414
17.5.3 GUI 操作步骤	414
17.5.4 APDL 命令程序	421
17.6 实例六——圆柱形坯料的电磁感应加热过程的分析	421
17.6.1 问题描述	421
17.6.2 问题分析	422
17.6.3 GUI 操作步骤	423
17.6.4 APDL 命令程序	441
参考文献	442

第 1 章

ANSYS 热分析简介及常用操作

本章主要简单介绍了 ANSYS14.0 热分析能力及热分析单元(包括与热相关的耦合场分析单元),并详细讲述了应用 ANSYS 进行分析时常用的拾取、显示操作方法。

学 习 要 点

- ANSYS14.0 热分析能力简介。
- ANSYS14.0 热分析单元简介。
- ANSYS14.0 中拾取、显示操作。

1.1 ANSYS 热分析简介

1.1.1 ANSYS 的热分析能力

热分析用于计算一个系统或部件的温度分布及其他热物理参数，如热量的获取或损失、热梯度、热流密度（热通量）等。热分析在许多工程应用中扮演重要角色，如内燃机、涡轮机、换热器、管路系统、电子元件、锻造、铸造等。

在 ANSYS/Multiphysics、ANSYS/Mechanical、ANSYS/Thermal、ANSYS/FLOTRAN、ANSYS/ED 5 种产品中包含热分析功能，其中 ANSYS/FLOTRAN 不含相变热分析。ANSYS 热分析基于能量守恒原理的热平衡方程，用有限元法计算各节点的温度，并导出其他热物理参数。ANSYS 热分析包括热传导、热对流及热辐射 3 种热传递方式。此外，还可以分析相变、有内热源、接触热阻等问题。

在安装程序中，单击“ANSYS 14.0 > Mechanical APDL Product Launcher”，弹出如图 1-1 所示的对话框，在“License”中选择分析模块，在本书练习中，均选择“ANSYS/Mechanical/Emag/LS-DYNA”模块，当然也可选择其他模块，在第 9 章中选择

“ANSYS/Structural/ FLOTRAN”分析模块。在“Working Director”中设置工作目录，在“Job Name”中输入初始文件名，也可进入 ANSYS 后，更改工作文件名。选择分析模块以后，并设置工作目录和分析文件名后，单击“Run”，进入 ANSYS。

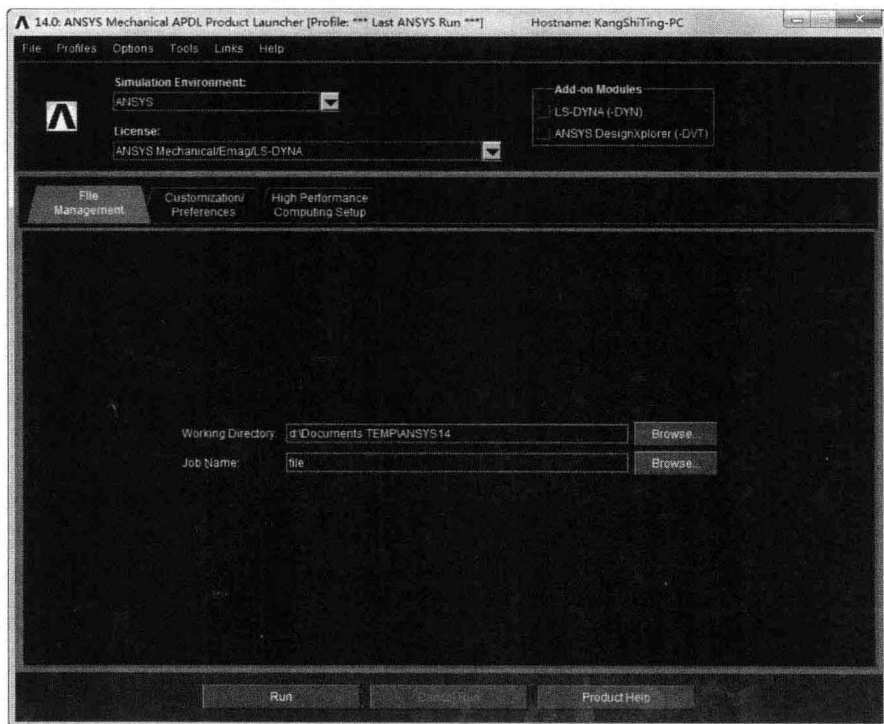


图 1-1 ANSYS14.0 分析模块选择界面

1.1.2 ANSYS 热分析分类

- 稳态传热：系统的温度场不随时间变化。
- 瞬态传热：系统的温度场随时间明显变化。

1.1.3 ANSYS 中与热相关的耦合场分析种类

- 热—结构耦合。
- 热—流体耦合。
- 热—电耦合。
- 热—磁耦合。
- 热—电—磁—结构耦合等。

1.1.4 ANSYS 中热分析单元简介

➤ PLANE35—二维六节点三角形热实体

它是一个与八节点 PLANE77 单元兼容的三角形单元。适用于形状不规则的模型（例如从不同的 CAD/CAM 系统产生的模型）划分网格。只有一个温度自由度。

适用于二维的稳态或瞬态热分析。如果包含该单元的模型还需进行结构分析，可被一个等效的结构单元（如 PLANE2）所代替。可用作平面单元或轴对称环单元。

➤ PLANE55—二维热实体

可作为一个具有二维热传导能力的平面或轴对称环单元使用。具有 4 个节点，每个节点只有一个温度自由度。此单元有一个选项，用来模拟通过多孔介质的非线性稳态流动（渗流）。此时，原有的热参数被解释成相似的流体流动参数。

可用于二维稳态或瞬态热分析问题。如果包含热单元的模型还需进行结构分析，该单元应当被一个等效的结构单元（如 PLANE42）所代替。

➤ PLANE75—轴对称谐分析热实体

可作为具有三维导热能力的轴对称单元使用。有 4 个节点，每个节点只有一个温度自由度。它是 PLANE55 单元轴对称型的一般形式，可承受非轴对称载荷。在剪切偏移中描述了各种载荷情况。

该单元可用于二维轴对称的稳态或瞬态热分析问题。其等效结构单元如 PLANE25，相似的带中间节点的单元是 PLANE78。

➤ PLANE77—二维八节点热实体

是 PLANE55 的高阶形式，每个节点只有一个温度自由度。八节点单元有协调的温度形函数，尤其适用于描述弯曲的边界。

➤ PLANE78—八节点轴对称谐分析热实体

可作为具有三维导热能力的轴对称单元使用。每个节点只有一个温度自由度。它是 PLANE77 单元的一般形式，可承受非轴对称载荷。在剪切偏移中描述了各种载荷情况。

八节点单元有协调的温度形函数，尤其适用于描述弯曲的边界。该单元可用于二维轴对称的稳态或瞬态热分析问题。与其对应的结构单元如 PLANE83。

➤ SOLID70—三维热实体

具有 8 个节点，每个节点只有一个温度自由度。该单元可用于三维的稳态或瞬态的

热分析问题，并可补偿由于恒定速度场质量输运带来的热流损失。如果包含热实体单元的模型还需进行结构分析，可被一个等效的结构单元（如 SOLID45）所代替。

此单元有一个选项，用来模拟通过多孔介质的非线性稳态流动。此时，原有的热参数被解释成相似的流体流动参数。例如，温度自由度等效为压力自由度。

➤ SOLID87—三维十节点四面体热实体

特别适合于对不规则的模型（例如从不同的 CAD/CAM 系统产生的模型）划分网格。每个节点只有一个温度自由度。

可用于三维的热稳态或瞬态分析问题，其等效的结构单元如 SOLID92。

➤ SOLID90—三维二十节点热实体

三维的八节点热单元 SOLID70 的高阶形式。20 个节点，每个节点只有一个温度自由度。二十节点单元有协调的温度形函数，尤其适用于描述弯曲的边界。

适用于三维的稳态或瞬态热分析问题。其等效的结构单元如 SOLID95。

➤ LINK31—辐射线单元

用于模拟空间两点间辐射热流率的单轴单元。每个节点只有一个自由度。可用于二维（平面或轴对称）或三维的、稳态的或瞬态的热分析问题。

允许形状因子和面积分别乘以温度的经验公式是有效的。发射率可与温度相关。如果包含热辐射单元的模型还需要进行结构分析，辐射单元应当被一个等效的或（空）结构单元所代替。

➤ LINK33—三维传导杆

用于节点间热传导的单轴单元。该单元每个节点只有一个温度自由度。可用于稳态或瞬态的热分析问题。

如果包含热传导杆单元的模型还需进行结构分析，该单元可被一个等效的结构单元所代替。

➤ LINK34—对流单元

用于模拟节点间热对流的单轴单元。该单元每个节点只有一个温度自由度。热对流杆单元可用于二维（平面或轴对称）或三维、稳态或瞬态的热分析问题。

如果包含热对流单元的模型还需要进行结构分析，热对流单元可被一个等效（或空）的结构单元所代替。单元的对流换热系数可以为非线性，即对流换热系数是温度或时间的函数。

➤ SHELL131—四节点热层壳单元

三维的层壳单元，具有面内和厚度方向的热传导能力。本单元 4 个节点，每个节点最多可以有 32 个自由度。本单元适用于三维的稳态或瞬态热分析问题，产生的节点温度可施加于结构壳单元以用于模拟热弯曲。其等效的结构单元如 SHELL43、SHELL63、SHELL143 或 SHELL181。

➤ SHELL132—八节点热层壳单元

三维的层壳单元，具有面内和厚度方向的热传导能力。本单元 8 个节点，每个节点最多可以有 32 个自由度。本单元适用于三维的稳态或瞬态热分析问题，产生的节点温度可施加于结构壳单元以用于模拟热弯曲。其等效的结构单元如 SHELL91、SHELL93、

SHELL99。

➤ PLANE13—二维耦合场实体

具有二维磁场、温度场、电场和结构场之间有限耦合的功能。由 4 个节点定义，每个节点可达到 4 个自由度。具有非线性磁场功能，可用于模拟 B-H 曲线和永久磁铁去磁曲线。具有大变形和应力钢化功能。当用于纯结构分析时，具有大变形功能，相似的耦合场单元有 SOLID5、SOLID98 和 SOLID62。

➤ SOLID5—三维耦合场实体

具有三维磁场、温度场、电场、压电场和结构场之间有限耦合的功能。本单元由 8 个节点定义，每个节点有 6 个自由度。在静态磁场分析中，可以使用标量势公式（对于简化的 RSP，微分的 DSP，通用的 GSP）。在结构和压电分析中，具有大变形的应力钢化功能。与其相似的耦合场单元有 PLANE13、SOLID62 和 SOLID98。

➤ INFIN9—二维无限边界

用于模拟一个二维无界问题的开放边界。具有两个节点，每个节点上带有磁矢量势或温度自由度。所依附的单元类型可以为 PLANE13 和 PLANE53 磁单元，或 PLANE55、PLANE77 和 PLANE35 热单元。使用磁自由度(AZ)时，分析可以是线性的也可以是非线性的，静态的或动态的。使用热自由度时，只能进行线性稳态分析。

➤ INFIN47—三维无限边界

用于模拟无边界场问题的开放边界。其单元形状为四节点四边形或三节点三角形，每个节点可以有磁势或温度自由度。所依附的单元类型可以是 SOLID5、SOLID96 或 SOLID98 磁单元，也可以是 SOLID70、SOLID90 或 SOLID87 热实体单元。当该单元具有磁自由度时，可以进行线性或非线性静态分析；当该单元具有热自由度时，只能进行静态分析（线性或非线性）。

➤ INFIN110—二维无限实体

用于模拟一个二维的边界开放的极大场问题，其一个单层用于描述无限体的外部子域。具有二维（平面的和轴对称）磁势能，温度或静电势能特性。由四或八节点定义，每个节点有单一的自由度。所依附的单元类型可以是 PLANE13 和 PLANE53 磁单元，PLANE55、PLANE35 和 PLANE77 热单元，或静电单元 121。加上磁势或温度自由度后，分析可以是线性的或非线性的，静态的或动态的。

➤ INFIN111—三维无限实体

用于模拟一个三维的边界开放的极大场问题，其一个单层用于描述无限体的外部子域。具有二维（平面的和轴对称）磁势能，温度，或静电势能特性。由八或二十节点定义，有三维磁标量和矢量势能，温度或静电势能特性。每个节点有单一的自由度。封闭的单元类型可以是 SOLID96、SOLID97、SOLID98、SOLID5 和 SOLID62 磁单元，SOLID70、SOLID90 和 SOLID87 热单元，或静电单元 SOLID122 和 SOLID123。加上磁势或温度自由度后，分析可以是线性的或非线性的，静态的或动态的。

对这个单元的几何体，节点坐标和坐标系在 INFIN111 中显示。由八或二十个节点和材料参数定义。必须定义非零的材料参数。

➤ MASS71—热质量

点单元，只有一个温度自由度。具有热容但忽略内部热阻的物体，如果其内部无明显温度梯度，则可使用热质量单元来模拟它以进行瞬态热分析。该单元还有一个功能，即温度与热产生率相关的能力。可用于一维、二维或三维的稳态或瞬态热分析。

在稳态求解中，它只起到温度相关的热源或热的接收器的作用。其他在热分析问题中有特殊用途的单元为 COMBIN14 和 COMBIN40。

如果包含热质量单元的模型还需要进行结构分析，该单元可被一个等效的结构单元所代替（如 MASS21）。

1.2 ANSYS 中常用操作

1.2.1 拾取操作

应用 ANSYS 进行分析中，无论前处理还是后处理，关键点、线、面、体、节点、单元选择很常用，掌握 ANSYS 的选择功能很重要，要掌握组合选择，比如基于体选单元等，也是提高分析效率的重要工具，现详细分析如下：

GUI 操作：选择 Utility Menu > Select > Entities，拾取菜单如图 1-2 所示。

命令：NSEL

使用格式：NSEL, TYPE, ITEM, COMP, VMIN, VMAX, VINC, KABS

其中：

TYPE：选择类型的有效标签。它的值有：

- S(From Full)：从数据集里选择一组新的数据子集(默认设置)。
- R(Reselect)：从当前选择的子集里再重新选择一组数据子集。
- A(Also Select)：从数据集中另外再选择一组子集与当前已选择的一组数据子集。
- U(Unselect)：从当前数据子集里删除刚选择的一组数据子集。

以上与图 1-2a 框 A 中所示对应。

- ALL(Sele All)：重新恢复到选择所有的数据集，即：全集。

- NONE(Sele None)：什么也不选择，即：空集。

- INVE 选择与当前子集相反部分的数据集，即：已选择的成为没有选择，而没有选择则被选择。

以上与图 1-2a 框 B 中所示对应。

ITEM, COMP：确定选择方式，与图 1-2b 框 C 所对应。

VMIN：项目范围的最小值。范围可以是节点编号、设置的编号、坐标值、载荷值以及适当项相对应的结果数据。也可以使用元件名来取代 VMIN。

VMAX：项目范围的最大值。对于输出值，其默认值为 VMIN；对于结果值，如果 VMIN 为正，其默认值为无穷大，如果 VMIN 为复，其默认值为零；如果 VMIN=VMAX，使用 $\pm 0.005 \times \text{VMIN}$ 的公差值；如果 VMIN=0，为 $\pm 1 \times 10^{-6}$ ；如果 VMIN \neq VMAX，使用 $1 \times 10^{-8} \times (\text{VMAX} - \text{VMIN})$ 的公差值。

VINC：在范围内的增量值。仅适用于整数范围，默认值为 1，且不能为负数。

KABS：绝对值控制键，若为 0，在选择期间检查值的符号；若为 1，在选择期间则使