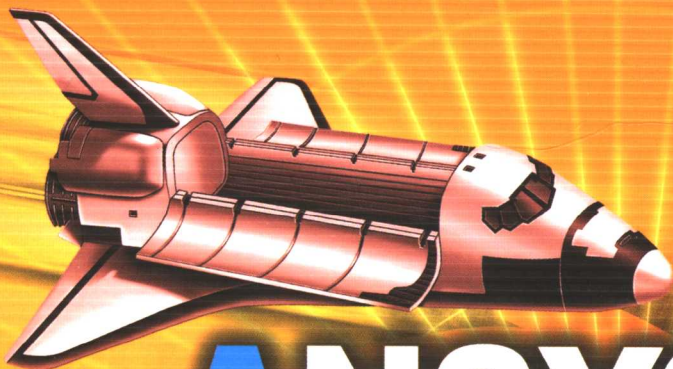


计算机工程应用系列丛书



ANSYS 8.0

热分析教程 与实例解析

★ 以最新版本的ANSYS 8.0为平台

★ 直观的图形界面，使初学者轻松学会ANSYS热分析的基本方法和技巧

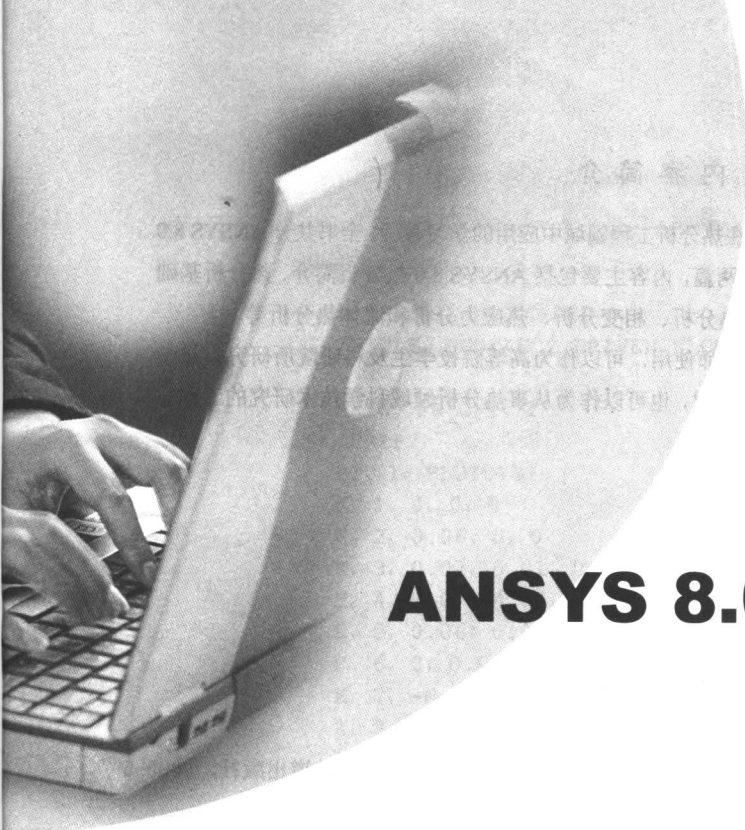
★ 精心挑选多个应用领域广、兼具典型性和专业性的计算实例

张朝晖 ● 主编 ● 范群波 ● 贵大勇 ● 张淑玲 ● 刘颖 ● 编著

★ 注重理论与实际相结合，力求使读者全面掌握ANSYS热分析技术

★ 实例分析步骤详尽清晰，讲解中大量融入作者宝贵的开发经验

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



ANSYS 8.0 热分析教程与 实例解析

张朝晖 主编

范群波 贵大勇 编著

张淑玲 刘颖

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书是通用有限元程序 ANSYS 8.0 在热分析工程领域中应用的学习教程, 全书共分 ANSYS 8.0 热分析基本教程和 ANSYS 8.0 实例解析两篇, 内容主要包括 ANSYS 8.0 热分析简介、热分析基础知识、稳态热分析、瞬态热分析、辐射热分析、相变分析、热应力分析和流体热分析等。

本书适合理工院校相关专业学生及教师使用, 可以作为高等院校学生及科研院所研究人员学习 ANSYS 8.0 有限元软件热分析模块的教材, 也可以作为从事热分析领域科学技术研究的工程技术人员使用 ANSYS 8.0 软件的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS 8.0 热分析教程与实例解析/张朝晖主编; 范群波等编著. —北京: 中国铁道出版社, 2005. 5

(计算机工程应用系列丛书)

ISBN 7-113-06537-6

I. A… II. ①张… ②范… III. 热分析-有限元分析-应用程序, ANSYS 8.0 IV. 0657. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 050367 号

书 名: ANSYS 8.0 热分析教程与实例解析

作 者: 张朝晖 范群波 贵大勇 张淑玲 刘 颖

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

策划编辑: 严晓舟 郭毅鹏

责任编辑: 苏 茜 吴 楠 王占清

封面制作: 白 雪

印 刷: 北京新魏印刷厂

开 本: 787×1092 1/16 印张: 26.5 字数: 646 千

版 本: 2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 1~4000 册

书 号: ISBN 7-113-06537-6/TP·1503

定 价: 45.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 请与本社计算机图书批销部调换。

前言

ANSYS 软件是集结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。它由美国 ANSYS 公司开发,它能与多数 CAD 软件接口,实现数据的共享和交换,是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一,也是迄今为止世界范围内惟一通过 ISO9001 质量体系认证的分析设计类软件。

随着 ANSYS 版本的不断更新,其核心技术不断完善,其应用领域也日益广泛。目前 ANSYS 可广泛应用于机械制造、石油化工、航空航天、汽车交通、土木工程、水利水电、国防军工、电子工程、生物医学、日用家电及能源、造船、地矿等一般的工业和科学研究领域。

本书的意义

本书在一定的理论描述的基础上,通过大量的、丰富的实例对 ANSYS 8.0 有限元软件的热分析模块进行了详细而具体的介绍,将对 ANSYS 8.0 软件热分析模块的学习溶入实际工程问题的解决过程之中,全书内容简洁、明快,给人耳目一新的感觉。

本书所有例题均经过精心设计与筛选,代表性强,并具有实际的工程应用背景,每个例题都通过图形用户界面及命令流两种方式向读者作了详细的介绍。对于渴望入门的新手来说,通过对第 1 篇相关知识的学习,可以在较短的时间内快速入门;对于希望解决实际工程问题的高级用户而言,也可以通过参考第 2 篇中类似例题的分析思路和求解过程圆满完成任务。

本书内容丰富、结构清晰,所举实例代表性强,具有较强的工程实用价值。

本书导读

本书分两篇,共十四章,其中第 1 篇是 ANSYS 8.0 热分析基本教程,主要介绍 ANSYS 8.0 软件的基本知识、基本操作及利用 ANSYS 8.0 进行稳态热分析、瞬态热分析、辐射热分析、相变分析、热应力分析及流体热分析的基本步骤。第 2 篇是 ANSYS 8.0 热分析实例教程,主要介绍利用 ANSYS 8.0 进行稳态热分析、瞬态热分析、辐射热分析、相变分析、热应力分析及流体热分析的工程应用实例。

本书以 Windows XP 为操作平台介绍了 ANSYS 软件,其他可以兼容的平台包括:Windows NT、Windows 2000。为了便于阅读理解,本书作如下约定:

- 本书中出现的菜单、命令均为英文并附有中文注释。此外,为了语句更简洁易懂,本书利用“|”表示上下级菜单或命令的关联,比如 Utility Menu | File | Resume From,表示选择工具菜单中的 File 菜单,执行其中的 Resume From 命令;又如 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Reflect | Lines,表示在主菜单中依次选择 Preprocessor、Modeling、Reflect、Lines 菜单,最后出现 Reflect Lines 菜单,其他依此类推。
- 在没有特别指明时,“单击”、“双击”和“拖动”表示用鼠标左键单击、双击和拖动。
- 为统一起见,本书所有命令流中的标点符号均采用中文格式,读者在练习过程中需将其修正为英文格式。

- 命令流中“!”号后面的中文为解释说明部分，读者在使用命令流过程中不必输入。

本书第1章、第2章、第9章、第10章、第11章、第13章由张朝晖执笔，第3章、第4章、第5章由范群波执笔，第6章、第12章由张淑玲执笔，第13章由贵大勇执笔，第7章、第8章、第14章由刘颖执笔，全书由张朝晖审定。

本书在编写过程中还得到了王鲁、李树奎、李云凯、苏铁键、王琳、苗杰、于晓东、苗凯、廖秋尽等同志的大力支持与帮助，在此一并表示感谢！

由于编者水平有限，时间仓促，书中缺点与错误在所难免，恳请广大读者批评指正，也欢迎业内人士及专家通过邮件共同探讨。

作者的 E-mail: zhang@bit.edu.cn

编者

2005年4月

目 录

第一篇 ANSYS 8.0 热分析基本教程

第 1 章 ANSYS 8.0 热分析简介.....	1
1-1 概述.....	2
1-2 ANSYS 8.0 热分析基本原理	3
1-3 ANSYS 8.0 耦合场分析	4
第 2 章 ANSYS 8.0 热分析基础知识	9
2-1 热分析符号与单位	10
2-2 传热学经典理论	10
2-3 三种基本热传递方式	11
2-3-1 热传导.....	11
2-3-2 对流.....	11
2-3-3 辐射.....	12
2-4 热分析材料基本属性	12
2-4-1 比热容 (Specific Heat)	12
2-4-2 焓 (Enthalpy)	12
2-4-3 生热率 (Heat Generation Rate)	13
2-5 边界条件与初始条件	13
2-5-1 三类边界条件	13
2-5-2 初始条件.....	13
2-6 热载荷	14
2-7 稳态与瞬态热分析	14
2-7-1 稳态传热.....	14
2-7-2 瞬态传热.....	15
2-8 线性与非线性热分析	15
第 3 章 稳态热分析.....	17
3-1 稳态热分析的应用	18
3-2 热分析单元	18
3-3 稳态热分析基本步骤	22
3-3-1 建立有限元模型	22
3-3-2 施加载荷.....	25

3-3-3 求解.....	39
3-3-4 后处理.....	43
第4章 瞬态热分析.....	45
4-1 瞬态热分析的应用	46
4-2 瞬态热分析单元	46
4-3 瞬态热分析基本步骤	46
4-3-1 建立有限元模型	46
4-3-2 施加载荷计算	48
4-3-3 求解.....	50
4-3-4 后处理.....	52
第5章 辐射	55
5-1 辐射热分析的应用	56
5-2 辐射热分析常用单元	56
5-3 辐射热分析基本概念	56
5-3-1 黑体.....	56
5-3-2 灰体.....	57
5-3-3 角系数.....	57
5-4 热辐射公式	58
5-4-1 角系数的计算	58
5-4-2 热辐射计算方程	58
5-5 辐射热分析求解方法	59
5-5-1 非隐藏法与隐藏法	59
5-5-2 点-点问题.....	60
5-5-3 点-面问题.....	60
5-5-4 面-面问题及 AUX12 矩阵生成器.....	61
5-6 空间节点的使用	67
第6章 相变分析	69
6-1 相变分析简介	70
6-2 相变分析应注意的问题	70
第7章 热应力分析.....	73
7-1 热应力分析简介	74
7-2 热应力分析单元	74
7-2-1 直接法进行热应力分析单元	74

7-2-2 间接法进行热应力分析单元	74
7-3 热应力分析基本步骤	75
7-3-1 直接法进行热应力分析基本步骤	75
7-3-2 间接法进行热应力分析基本步骤	89

第 8 章 流体热分析.....91

8-1 FLOTRAN 热分析简介	92
8-1-1 FLOTRAN 热分析的功能	92
8-1-2 FLOTRAN 热分析的基本要求	92
8-2 FLOTRAN 热分析求解	93
8-2-1 FLOTRAN 热分析的求解内容	93
8-2-2 FLOTRAN 热分析方法	93
8-2-3 FLOTRAN 热分析的基本步骤	94

第二篇 ANSYS 8.0 热分析实例解析

第 9 章 稳态热分析实例详解.....97

9-1 实例 1——短圆柱体的热传导过程	98
9-1-1 问题描述	98
9-1-2 问题分析	98
9-1-3 2D 建模求解步骤	98
9-1-4 3D 建模求解步骤	106
9-2 实例 2——长空心圆柱体的热传导过程	112
9-2-1 问题描述	112
9-2-2 问题分析	113
9-2-3 求解步骤	113
9-3 实例 3——保温筒的对流传热过程	117
9-3-1 问题描述	117
9-3-2 问题分析	118
9-3-3 求解步骤	118
9-4 实例 4——高温炉炉壁的热传导过程	126
9-4-1 问题描述	126
9-4-2 问题分析	127
9-4-3 求解步骤	127
9-5 实例 5——矩形截面梁的对流传热过程	133
9-5-1 问题描述	133
9-5-2 问题分析	134
9-5-3 求解步骤	134

9-6 实例 6——长圆柱体圆周受谐响应热载荷	138
9-6-1 问题描述	138
9-6-2 问题分析	138
9-6-3 求解步骤	139
9-7 实例 7——导管和罐体结合处的稳态热分析	143
9-7-1 问题描述	143
9-7-2 问题分析	144
9-7-3 求解步骤	144

第 10 章 瞬态热分析实例详解 157

10-1 实例 1——钢球瞬态传热过程分析	158
10-1-1 问题描述	158
10-1-2 问题分析	158
10-1-3 求解步骤	158
10-2 实例 2——型材瞬态传热过程分析	170
10-2-1 问题描述	170
10-2-2 问题分析	171
10-2-3 求解步骤	171
10-3 实例 3——平板承受热载荷	179
10-3-1 问题描述	179
10-3-2 问题分析	179
10-3-3 求解步骤	179
10-4 实例 4——半无限大体受线性变化的温度载荷	186
10-4-1 问题描述	186
10-4-2 问题分析	186
10-4-3 求解步骤	186
10-5 实例 5——高温铜导线冷却过程分析	194
10-5-1 问题描述	194
10-5-2 问题分析	194
10-5-3 求解步骤	195
10-6 实例 6——带轮淬火过程分析	200
10-6-1 问题描述	200
10-6-2 问题分析	201
10-6-3 求解步骤	201

第 11 章 辐射热分析实例详解 221

11-1 实例 1——黑体辐射	222
11-1-1 问题描述	222

11-1-2 问题分析.....	222
11-1-3 求解步骤.....	222
11-2 实例 2——等轴同心圆柱面的辐射传热.....	226
11-2-1 问题描述.....	226
11-2-2 问题分析.....	227
11-2-3 求解步骤.....	227
11-3 实例 3——等轴同心圆柱体的辐射传热.....	237
11-3-1 问题描述.....	237
11-3-2 问题分析.....	238
11-3-3 求解步骤.....	238
11-4 实例 4——型钢的热辐射过程.....	248
11-4-1 问题描述.....	248
11-4-2 问题分析.....	248
11-4-3 求解步骤.....	249

第 12 章 相变分析实例详解.....259

12-1 实例 1——水结冰过程分析.....	260
12-1-1 问题描述.....	260
12-1-2 问题分析.....	260
12-1-3 求解步骤.....	261
12-2 实例 2——冰融化过程分析.....	274
12-2-1 问题描述.....	274
12-2-2 问题分析.....	275
12-2-3 求解步骤.....	275
12-3 实例 3——铸造过程热分析.....	284
12-3-1 问题描述.....	284
12-3-2 问题分析.....	285
12-3-3 求解步骤.....	285

第 13 章 热应力分析实例详解.....301

13-1 实例 1——圆筒内部热应力分析.....	302
13-1-1 问题描述.....	302
13-1-2 问题分析.....	302
13-1-3 间接法求解步骤.....	302
13-1-4 直接法求解步骤.....	311
13-2 实例 2——冷却栅管的热应力分析.....	318
13-2-1 问题描述.....	318
13-2-2 问题分析.....	318

13-2-3 求解步骤.....	318
13-3 实例 3——两无限长平板热膨胀分析.....	332
13-3-1 问题描述.....	332
13-3-2 问题分析.....	332
13-3-3 求解步骤.....	332
13-4 实例 4——包含焊缝的金属板热膨胀分析.....	340
13-4-1 问题描述.....	340
13-4-2 问题分析.....	341
13-4-3 求解步骤.....	341
13-5 实例 5——连杆热应力分析.....	355
13-5-1 问题描述.....	355
13-5-2 问题分析.....	356
13-5-3 求解步骤.....	356
13-6 实例 6——热喷涂过程中熔滴在基体表面沉积凝固后的残余应力分析.....	371
13-6-1 问题描述.....	371
13-6-2 问题分析.....	372
13-6-3 求解步骤.....	373

第 14 章 FLOTRAN 热分析实例详解.....387

14-1 实例 1——层流流体受均匀壁面热通量.....	388
14-1-1 问题描述.....	388
14-1-2 问题分析.....	388
14-1-3 求解步骤.....	389
14-2 实例 2——空腔中空气的热稳态层流分析.....	403
14-2-1 问题描述.....	403
14-2-2 问题分析.....	403
14-2-3 求解步骤.....	403

Chapter



ANSYS 8.0 热分析简介

本章提示:

在本章中将向读者介绍 ANSYS 8.0 热分析的功能、ANSYS 8.0 热分析的基本原理，并着重介绍 ANSYS 热分析的目的、过程以及 ANSYS 中与热相关的耦合场分析的方法和单元。

学习目标:

通过本章的学习，要求读者掌握 ANSYS 热分析的基本概念，掌握热分析单元以及耦合场单元，熟悉 ANSYS 8.0 热分析基本原理。

1-1 概述

在实际生产过程中，常常会遇到多种多样的热量传递问题：如计算某个系统或部件的温度分布、热量的获取或损失、热梯度、热流密度、热应力及相变等。所涉及的部门包括：能源、化工、冶金、建筑、电子、航空航天、农业、制冷及船舶等。以机械加工为例，往往需要估算和控制工件温度场；分析不同工作条件下，不同材料及几何形状对温度场变化的影响；以及防止加工过程工件中缺陷的产生。ANSYS 作为新颖的有限元分析软件在热分析问题方面具有强大的功能，而且界面友好，易于掌握。用户可以随心所欲地选择图形用户界面方式（GUI）或命令流方式进行计算。

ANSYS 8.0 的热分析功能，一般包含于 ANSYS/Multiphysics、ANSYS/Mechanical、ANSYS/Thermal、ANSYS/FLOTTRAN、ANSYS/ED 五种产品模块中，其中 ANSYS/FLOTTRAN 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，用有限元法计算物体内部各节点的温度，并导出其他热物理参数。运用 ANSYS 软件可进行热传导、热对流、热辐射、相变、热应力及接触热阻等问题的分析求解。

和以前的版本相比较，ANSYS 8.0 在热分析方面，取得了较大的改善。其主要创新之处如下：

- 在对流传热方面引入了表面效应单元 SURF151、SURF152，此举使得转动机械的表面膜系数建模功能大为增强。
- 在与热分析相关的耦合场计算方面，引入了一种新型多功能求解器，运用该求解器可以进行解决以下与热分析相关的耦合场问题：
 - 电力机械（磁-热-结构耦合）；
 - 焦耳加热（热-电-结构耦合）；
 - 感应加热（谐电磁-热耦合）；
 - 感应激励（谐电磁-热-流体耦合）；
 - 射频加热（高频电磁-热-结构耦合）；
 - 热应力分析（热-结构耦合）。
- 在使用快速瞬态热分析求解选项（THOPT, QUASI）时可以采用面-面热接触分析，适用的单元包括 CONTA171、CONTA172、CONTA173 和 CONTA174，支持下面两种情况：
 - 接触热传导。使用实常数 TCC（热接触传导系数），它可以是时间与温度的函数。可以直接指定其数值，也可以利用数据表进行输入。
 - 理想热接触（TCC = infinity）允许两个触界面上具有完全不同的网格。此时，需要使用内部 MPC 方法（KEYOPT（2）= 2）和接触节点探测（KEYOPT（4）= 1 或 2）。

进入 ANSYS 8.0 用户界面之后，选择 Main Menu | Preferences 命令，出现 Preferences for GUI Filtering 对话框，如图 1-1 所示，选择与热分析相关的关键字过滤图形用户界面。

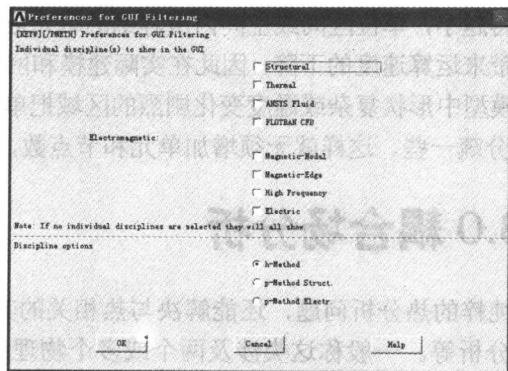


图 1-1 过滤图形用户界面

提示：所谓“过滤”是指简化图形用户界面，即只显示与所选关键字相关的内容。比如选择了 Thermal 关键字，那么在单元类型库中，只提供与热分析相关的单元类型。

1-2 ANSYS 8.0 热分析基本原理

ANSYS 进行热分析计算的基本原理是所处理的对象首先划分成有限个单元（每个单元包含若干个节点），然后根据能量守恒原理求解一定边界条件和初始条件下每一节点处的热平衡方程，由此计算出各节点温度值，继而进一步求解出其他相关量。

以 SOLID5 单元为例，该单元为 8 节点六面体单元，如图 1-2 所示。六面体中任意一点的温度被离散到 8 个顶点中，即可用 T_a 、 T_b 、 T_c 、 T_d 、 T_e 、 T_f 、 T_g 和 T_h 这 8 个温度值来表示该单元中的温度场。

$$T=f(T_a, T_b, T_c, T_d, T_e, T_f, T_g, T_h)$$

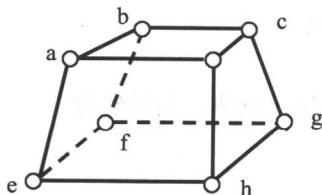


图 1-2 SOLID5 单元

对于图 1-3 所示具有一定边界的区域，可以将其划分为有限个 SOLID5 单元。每一节点都有对应的数字序号 1、2、3、……；每一单元也有其相应的编号①、②、③……。各相邻单元之间通过公共顶点相互关联。

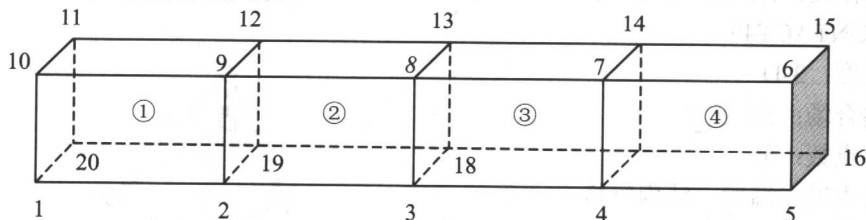


图 1-3 用有限个 SOLID5 单元表征具有一定边界的区域

一般来说,单元划分得越小,单位区间或空间内所容纳的单元数量越多,计算精度就会越高。但单元数量的增加会带来运算速度的下降,因此在实际建模和网格划分过程中需根据具体情况灵活处理。比如,在模型中形状复杂或温度变化剧烈的区域把单元划分得密一些;而在其余地方则可把单元适当划分疏一些。这样就无须增加单元和节点数,即可提高计算精度。

1-3 ANSYS 8.0 耦合场分析

ANSYS 不仅能解决纯粹的热分析问题,还能解决与热相关的其他诸多问题,如热-应力分析、热-电分析、热-磁分析等。一般称这类涉及两个或多个物理场相互作用的问题为耦合场分析。ANSYS 提供了两种分析耦合场的方法:直接耦合法与间接耦合法,下面分别进行介绍。

1. 直接耦合法

直接耦合法的耦合单元包含与相应的耦合场相关的所有必须的自由度,采用耦合单元仅仅通过一次求解就能得出耦合场的分析结果。这种方法实际上是通过计算包含所有必须项的单元矩阵或单元载荷向量来实现的。下面列出了所有与热分析相关的耦合场单元。

- SOLID5

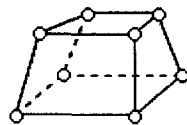
维度: 3-D

耦合场: 热-应力、热-电

节点数: 8

自由度: 温度、结构位移、电势、磁标势

单元几何形状:



- PLANE13

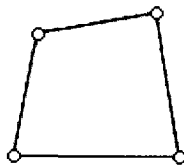
维度: 2-D

耦合场: 热-应力、热-电

节点数: 4

自由度: 温度、结构位移、电势、矢量磁位

单元几何形状:



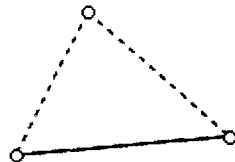
- CONTACT48

维度: 2-D

耦合场: 热-应力

节点数: 3

自由度: 温度、结构位移



- CONTACT49

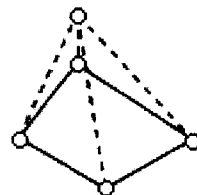
维度: 3-D

耦合场: 热-应力

节点数: 5

自由度: 温度、结构位移

单元几何形状:



- PLANE67

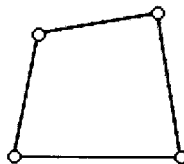
维度: 2-D

耦合场: 热-电

节点数: 4

自由度: 温度、电势

单元几何形状:



- LINK68

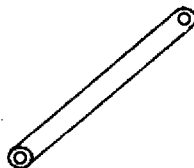
维度: 3-D

耦合场: 热-电

节点数: 2

自由度: 温度、电势

单元几何形状:



- SOLID69

维度: 3-D

耦合场: 热-电

节点数: 8

自由度: 温度、电势

单元几何形状:



- SOLID98

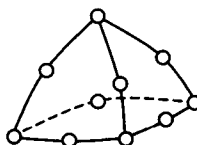
维度: 3-D

耦合场: 热-应力、热-电

节点数: 10

自由度: 温度、结构位移、电势、矢量磁位

单元几何形状:



- FLUID116

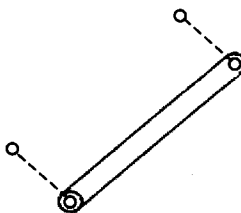
维度: 3-D

耦合场: 热-流体

节点数: 2 或 4

自由度: 温度、压力

单元几何形状:



- FLUID141

维度: 2-D

耦合场: 热-流体

节点数: 4

自由度: 温度、压力、速度

单元几何形状:



- FLUID142

维度: 3-D

耦合场: 热-流体

节点数: 8

自由度: 温度、压力、速度

单元几何形状:

- SHELL157

维度: 3-D

耦合场: 热-电

节点数: 4

自由度: 温度、电势

单元几何形状:

- TARGE169

维度: 2-D

耦合场: 热-应力-电

节点数: 1~3

自由度: 结构位移、温度、电势

单元几何形状:

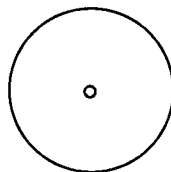
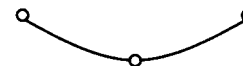
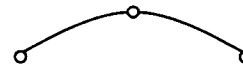
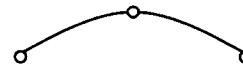
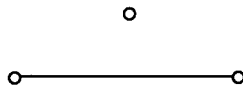
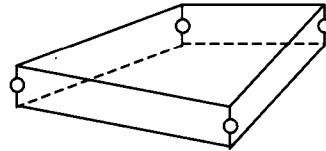
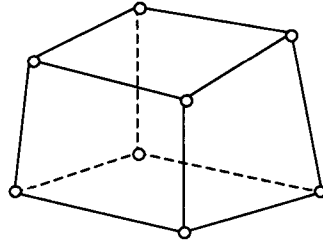
➤ 点

➤ 直线

➤ 弧 (顺时针)

➤ 弧 (逆时针)

➤ 圆



- TARGE170

维度: 3-D

耦合场: 热-应力-电

节点数: 1~8

自由度: 结构位移、温度、电势

单元几何形状:

➤ 点