

# 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.sciencecp.com>

随 主 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)

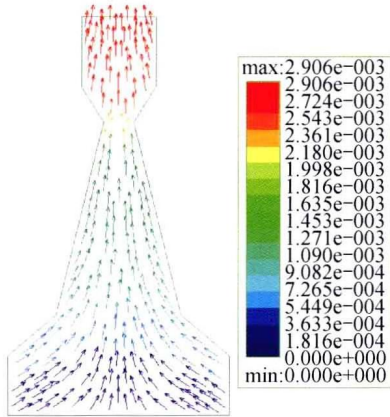


图 12.18 点图标表示的涡轮盘位移场

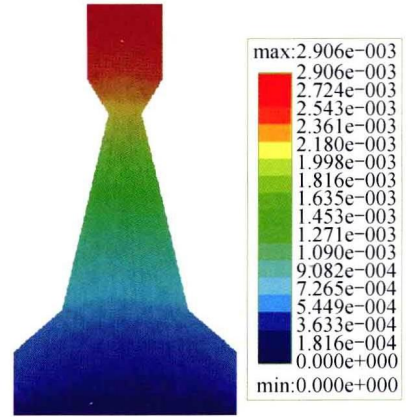


图 12.19 纹理表示的涡轮盘位移场

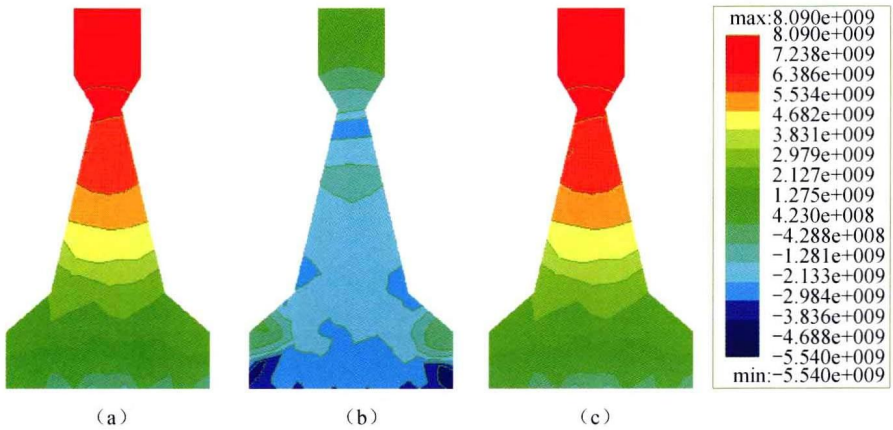


图 12.20 涡轮盘应力场云图

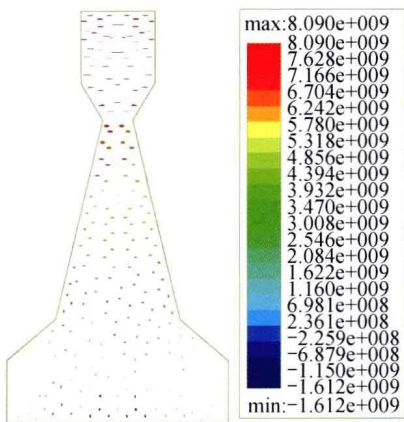


图 12.21 椭球图标表示的涡轮盘应力场

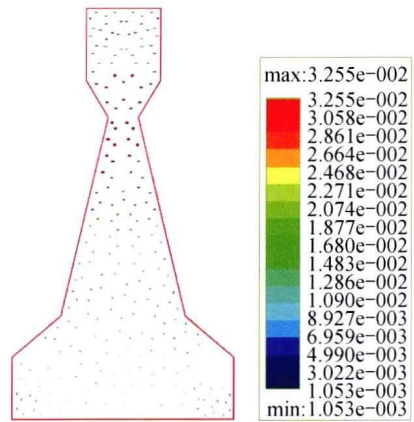


图 12.23 椭球图标表示的涡轮盘应力场

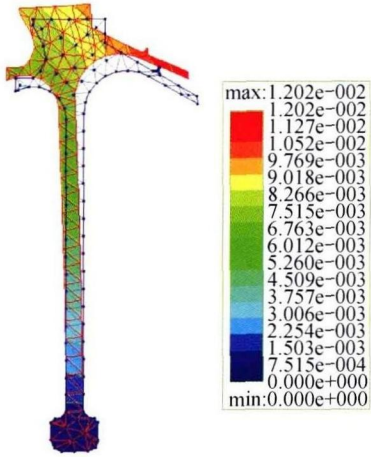


图 12.74 涡轮盘位移场变形的网格单元

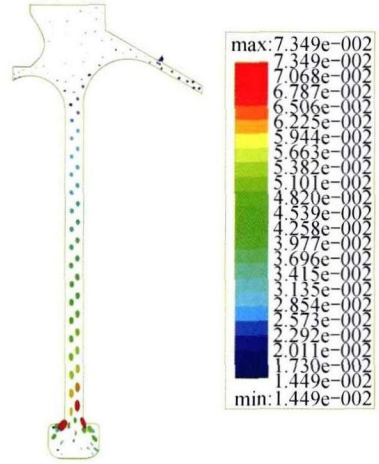
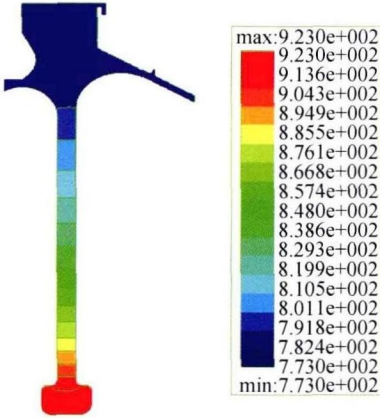
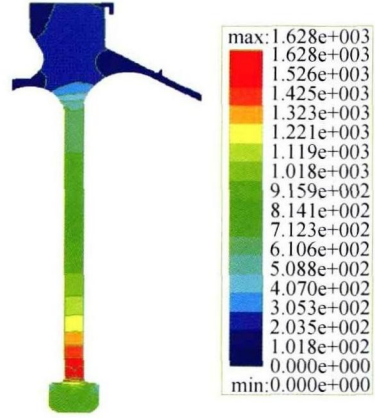


图 12.81 椭球图标表示的涡轮盘应力场

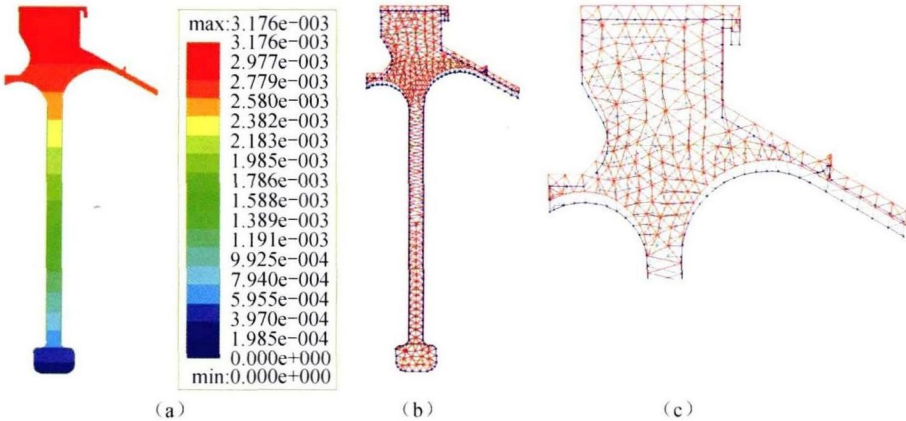


(a)



(b)

图 13.3 基于三节点三角形网格的压气机轮盘温度场云图及温度梯度场的模值云图



(a)

(b)

(c)

图 13.4 基于三节点三角形网格的压气机轮盘位移场的模值云图及结构变形

## 序

传热、气动、电磁和结构等物理场计算分析技术是航空、航天、船舶和车辆等复杂产品研制的共性核心技术,其相关的计算机辅助工程分析(CAE)软件系统是设计工程师必备的工具手段。随着经济建设和国防建设的发展,复杂产品性能需求越来越高,其运行工况越来越严苛。在急剧变化的多工况条件下,各种物理变化过程(如传热过程和结构变形过程)相互影响的耦合效应日益凸显和复杂,因此,在复杂产品研制过程中,计算机辅助多物理场耦合分析或多学科联合仿真分析技术与工具已成为重要的研究热点。

目前,国外商业化的 CAE 软件在国内装备制造企业、研究院所和高校中占据垄断地位,严重地制约了我国工程应用、技术研究和教学的快速健康发展,因此,急需发展我国自主的复杂产品 CAE 技术与软件系统。这是一条充满荆棘的道路,需要勇气、艰辛、智慧和坚持。令人感到欣慰的是,国内一些研究者和实践者敢于突破传统观念,积极倡导理论研究、自主知识产权软件开发和工程应用相结合,历经努力,已取得了一些良好的成果。《传热与结构分析有限元法及应用》一书研究内容即为其中之一。

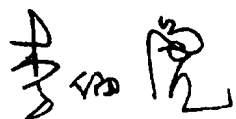
在工程应用实践的基础上,该书作者对传热分析、结构分析和热固耦合分析技术、软件开发和工程应用进行了深入系统的总结提炼。该书鲜明地体现多学科交叉融合的特色,内容包括传热学、固体力学、偏微分方程、有限元法和计算机软件等方面的知识。该书的另一个特色是物理模型、数值计算方法、软件开发和工程应用结合。

该书首先介绍了多维度的导热控制方程、二阶偏微分方程的分类和基本性质、初始边值问题的定解条件和具体的换热边界条件;然后介绍了平面和轴对称传热分析问题的三角形网格单元模型;最后,推导了传热分析问题的四边形等参单元模型和数值计算方法。在结构分析方面,该书介绍了平面和轴对称结构的平衡方程,推导建立了多种载荷和边界约束条件下的结构分析单元模型。为了使读者能够全面掌握有限元方法,该书在建立有限元模型过程中分别采用了迦辽金加权余量法、泛函变分法和虚功原理三种方法,并且论证了这三种方法的异同之处。

该书还介绍了热固耦合分析技术,并论述了多种热固耦合形式,提出了热固耦合数值计算方法,例如,当物性与温度相关时,由线性导热控制方程推导建立了非线性导热控制方程。该书还分别对热固耦合分析问题的弱耦合计算方法和强耦合技术方法进行了探讨。另外,该书还介绍了自主开发的热固耦合分析软件的功能,

并且对众多典型的传热和结构分析案例进行了计算验证和分析。

该书对从事复杂产品研制的工程师具有参考价值,对有自主知识产权的 CAE 软件设计开发具有指导作用,对高校相关专业的教学工作具有支撑作用。期望该书能够积极促进我国自主的复杂产品 CAE 技术与软件系统的发展及其在装备制造业中的工程应用。



中国工程院院士

## 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

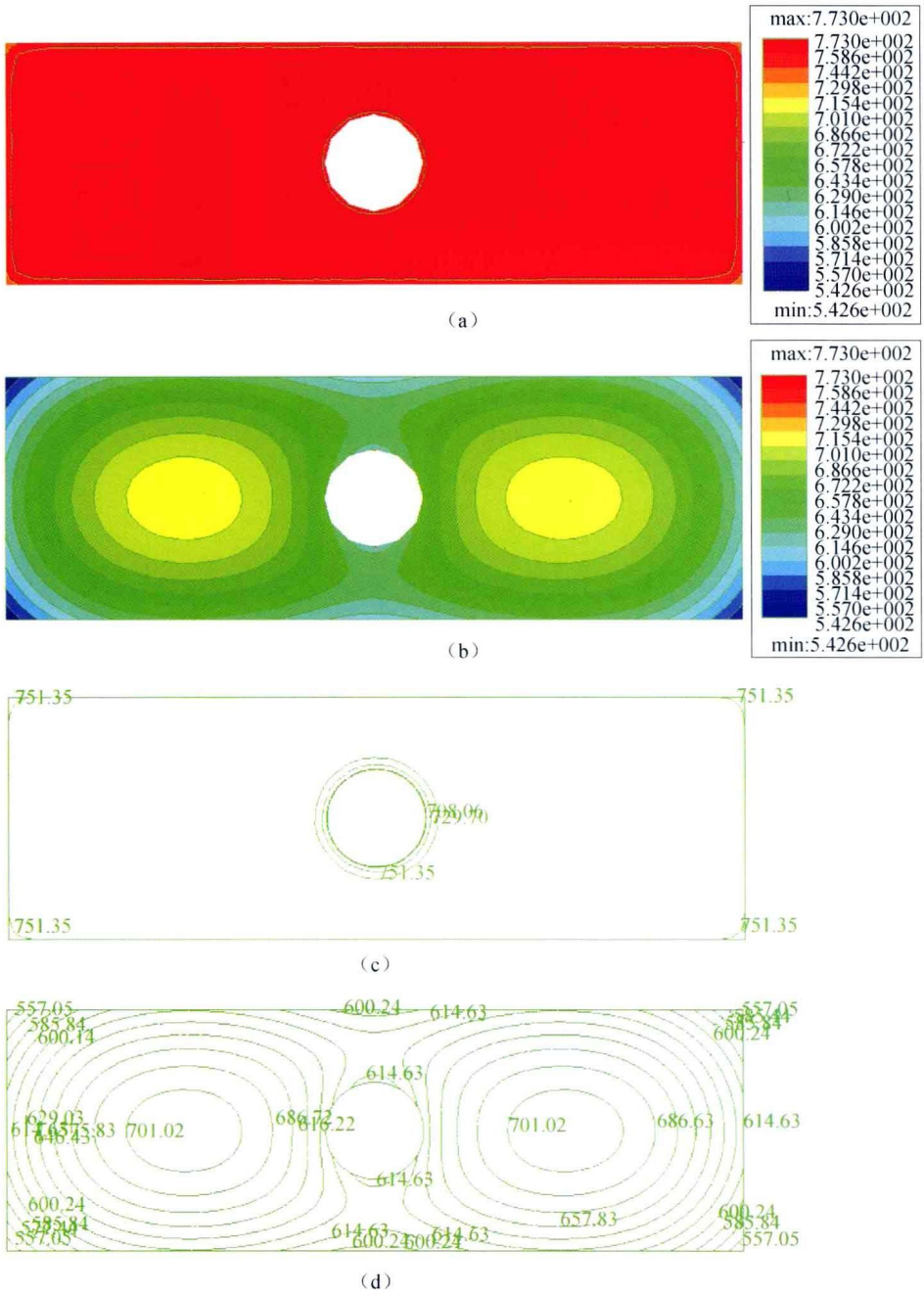
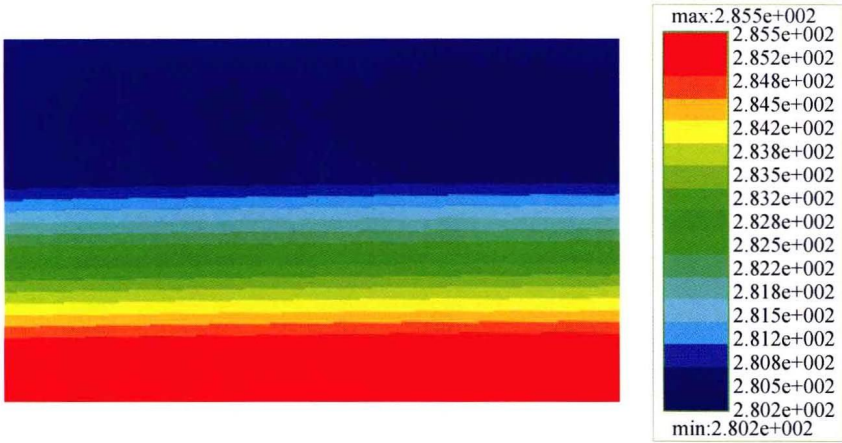


图 9.15 基于六节点三角形网格的金属板温度场云图及等值线

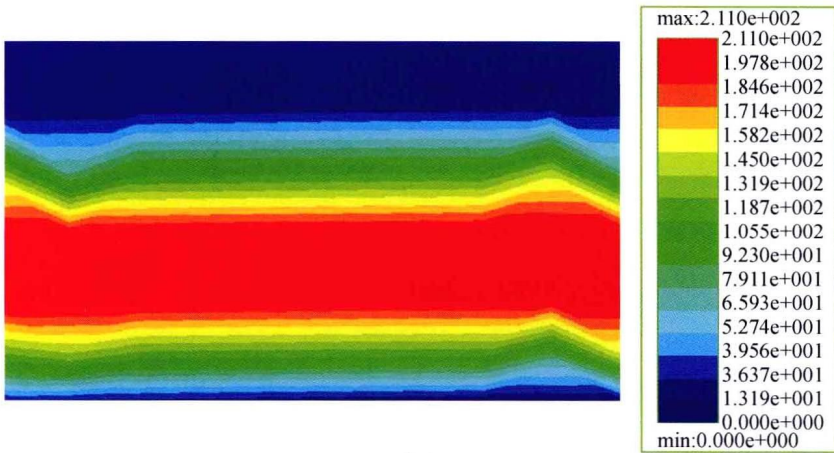


(a)



(b)

图 9.27 基于四节点四边形网格的潜水艇截面温度场云图及等值线



(a)

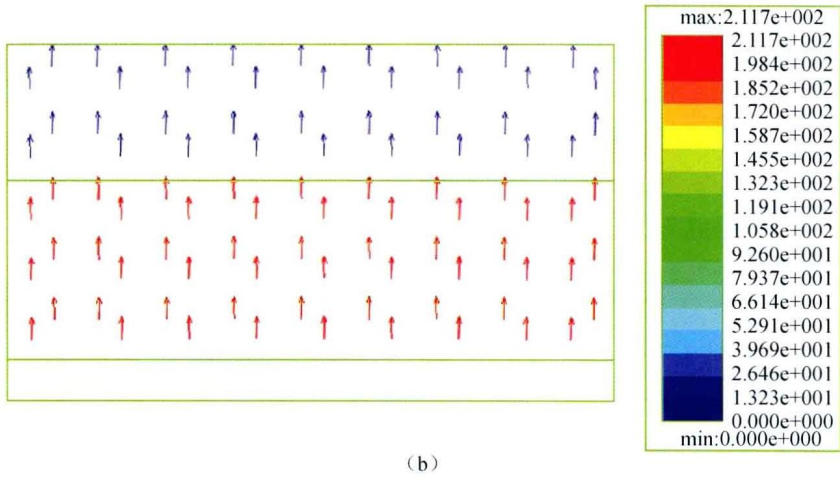


图 9.28 基于四节点四边形网格的潜水艇截面温度梯度场模值云图及点图标表示的温度梯度场

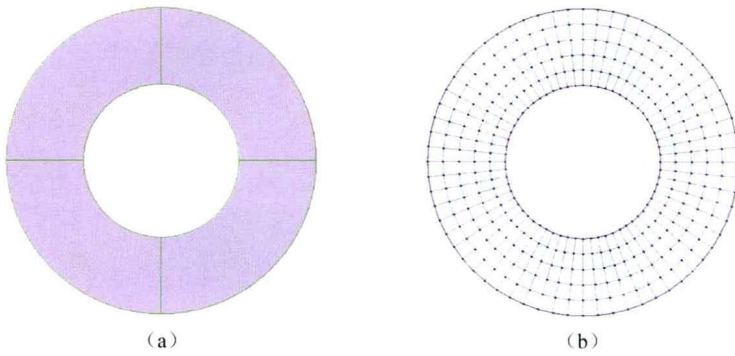
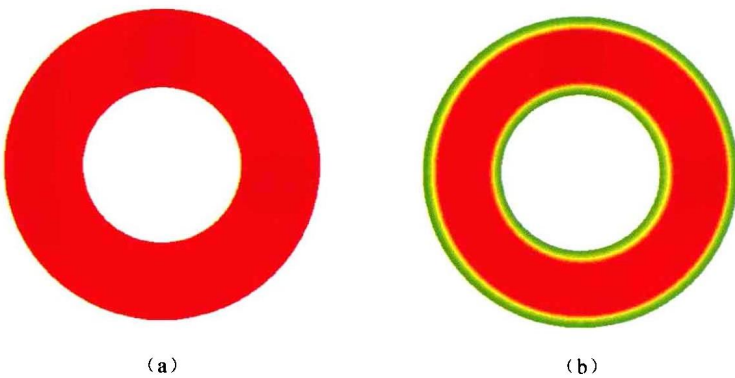


图 9.38 几何造型区域分割及映射网格划分结果



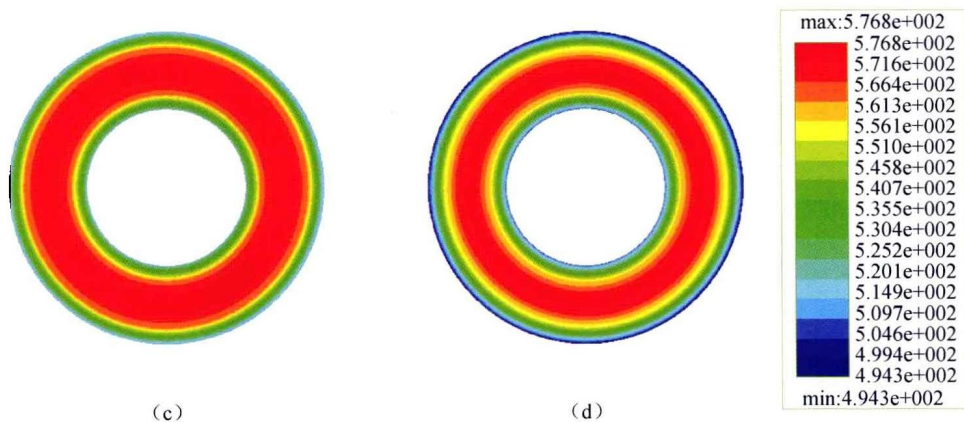


图 9.39 基于四节点四边形网格的潜水艇截面温度场云图

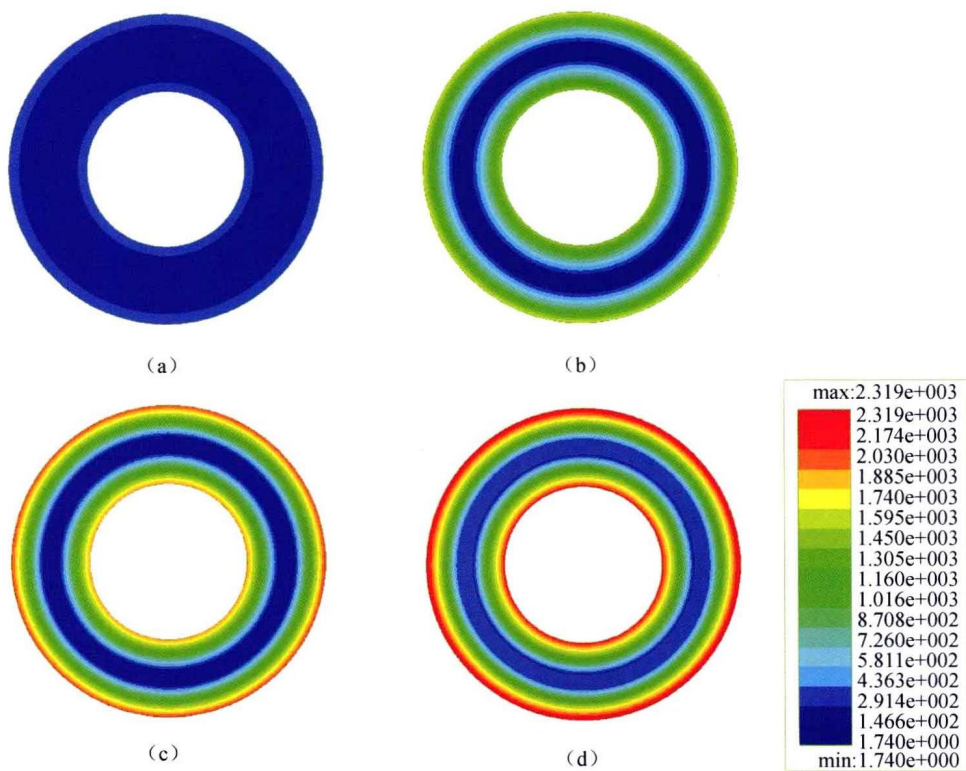


图 9.40 基于四节点四边形网格的潜水艇截面温度梯度场模值云图

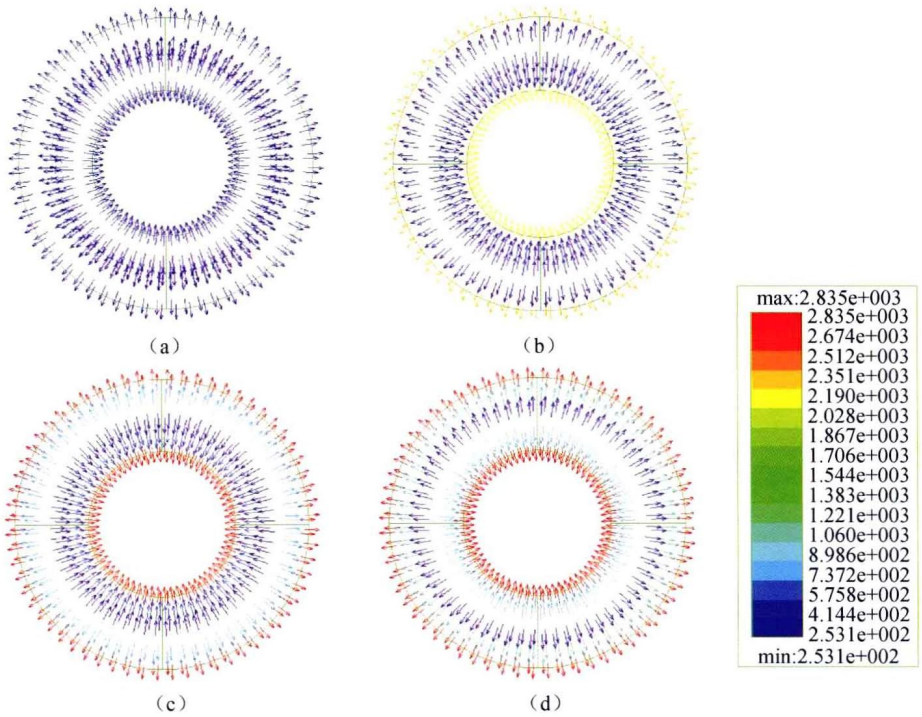


图 9.41 基于四节点四边形网格的点图标表示的潜水艇截面温度梯度场

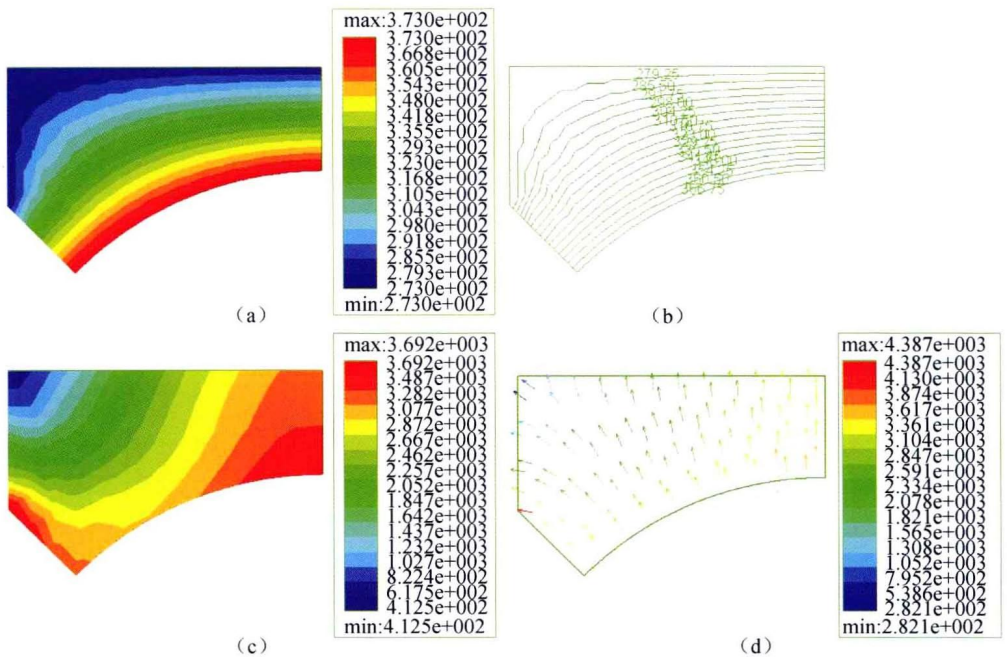


图 9.56 基于四节点四边形网格的钢管截面温度场云图、温度场等值线图、温度梯度场模值云图及点图标表示的温度梯度场

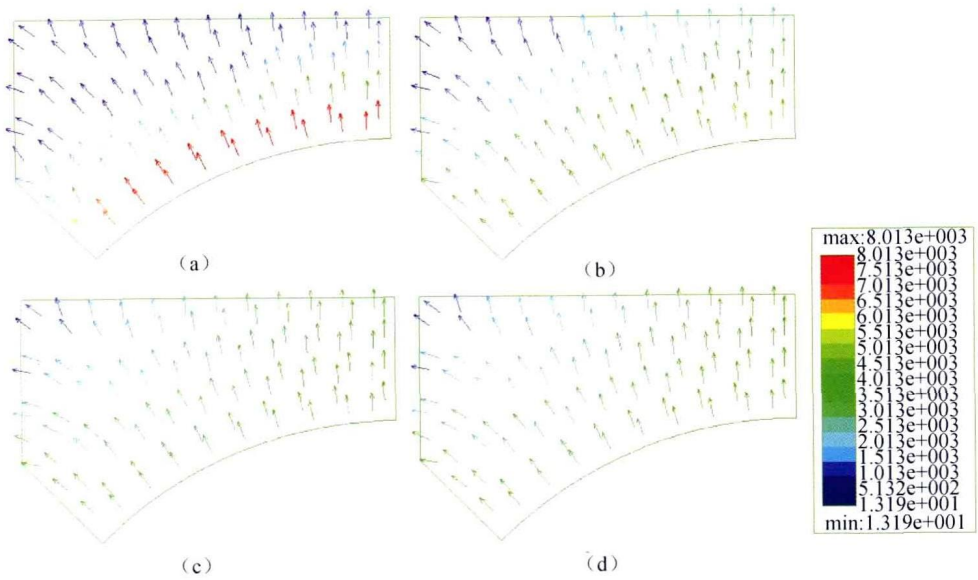


图 9.59 基于四节点四边形网格的点图标表示的钢管截面温度梯度场

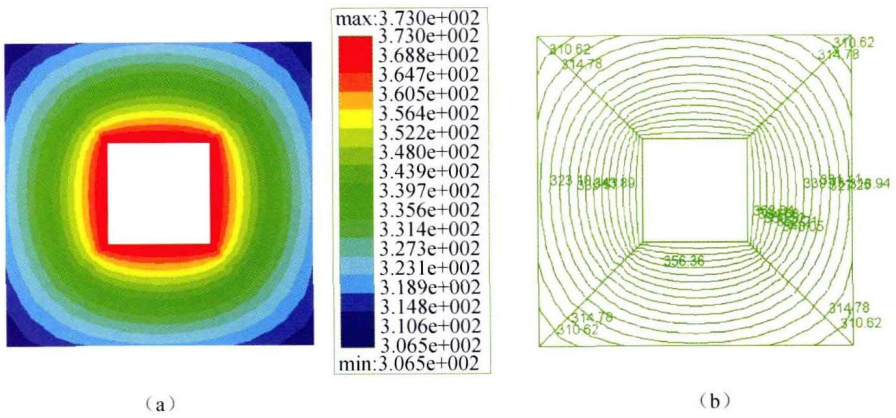


图 9.68 基于四节点四边形网格的烟囱截面温度场云图及等值线

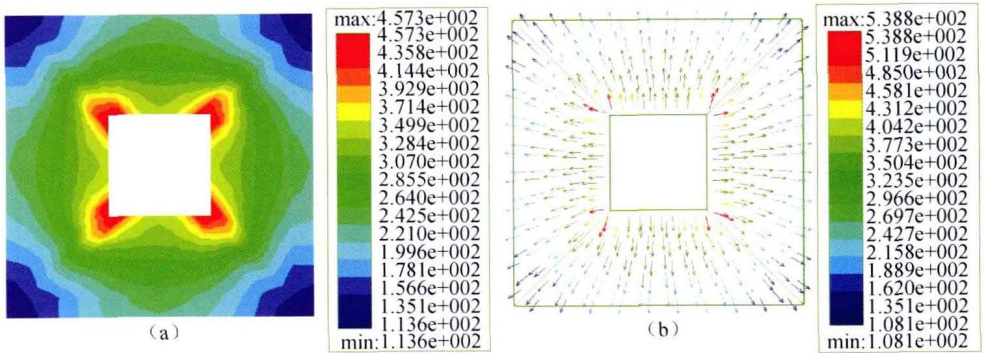


图 9.69 基于四节点四边形网格的烟囱截面温度梯度场模值云图及点图标表示的温度梯度场

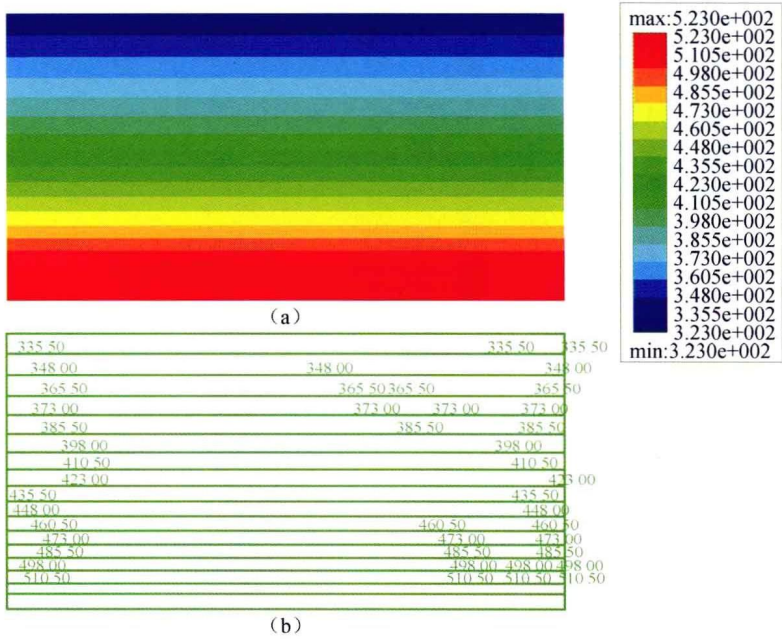


图 10.10 基于四节点四边形网格的热力管剖面温度场云图及等值线

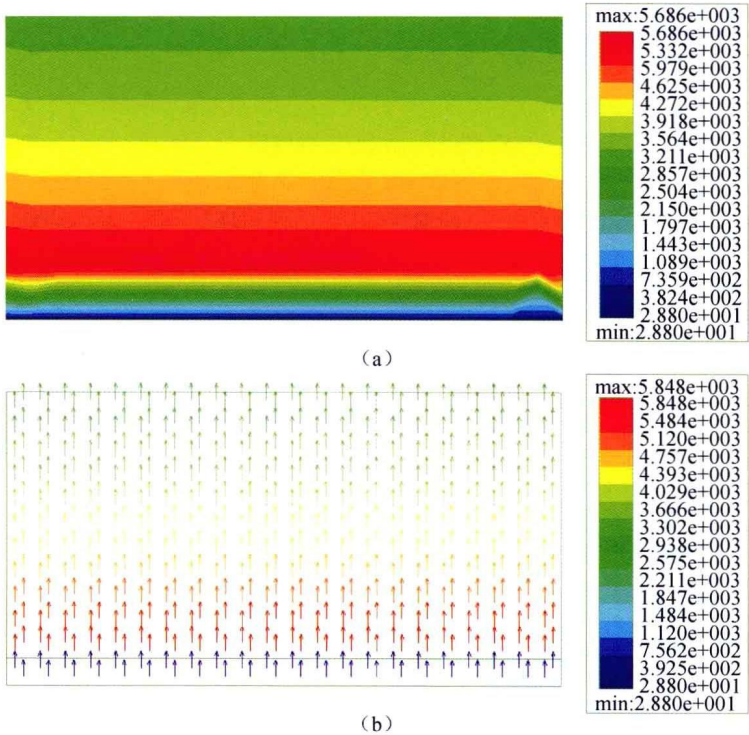


图 10.11 基于四节点四边形网格的热力管剖面温度梯度场模值云图及点图标表示的温度梯度场



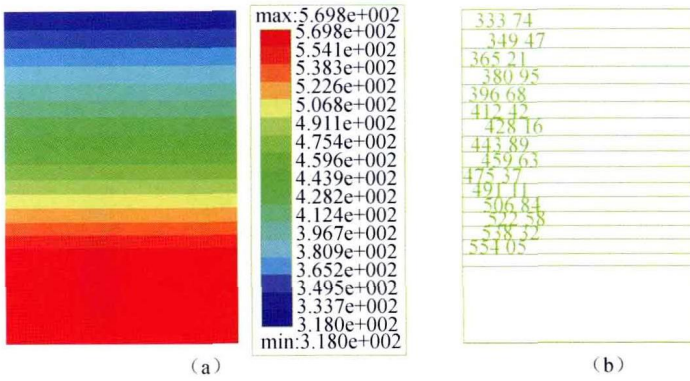


图 10.22 基于四节点四边形网格的蒸汽管剖面温度场云图及等值线

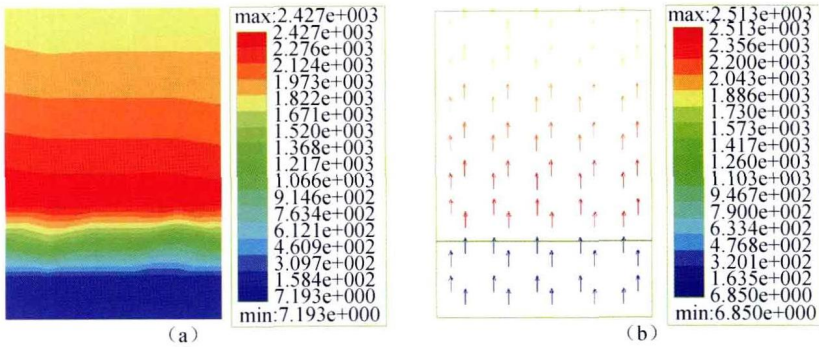


图 10.23 基于四节点四边形网格的蒸汽管剖面温度梯度场模值云图及点图标表示的温度梯度场

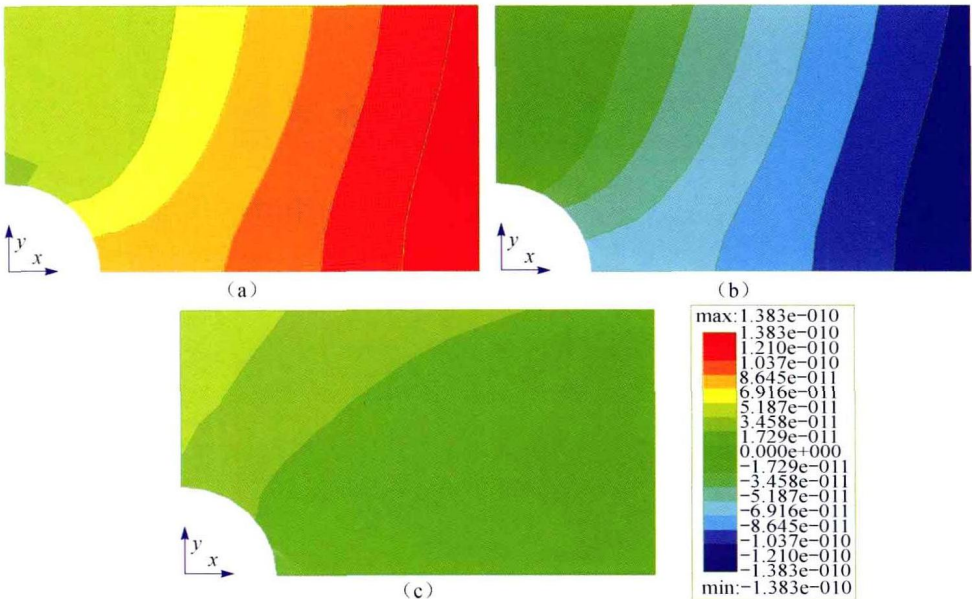


图 11.5 带孔薄板位移场云图