

$$\frac{\partial(\rho_\phi\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_\phi \mathbf{U}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi$$

$$\int_V \nabla \cdot (\rho_\phi \mathbf{U}\phi) dV = \int_V \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) dV + \int_V S_\phi dV$$

$$\widetilde{\text{Res}}_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \sum_{nb} \tilde{a}_{nb} \tilde{\phi}_{nb} + \tilde{b} - \tilde{a}_p \tilde{\phi}_p \right|_i \leq \varepsilon_1$$

# 数值传热学实训

宇波 李敬法 孙东亮 编著

 科学出版社

# 数值传热学实训

宇波 李敬法 孙东亮 编著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书主要以陶文铨院士编著的《数值传热学》和《计算传热学的近代进展》部分章节为基础,并结合作者在数值传热学教学、科研中积累的心得体会编写而成。全书对数值传热学的重、难点知识进行归纳总结,设计了大量习题,并给出了详细的参考答案,以加深读者对数值传热学知识的理解。此外,为了提高初学者应用数值传热学的能力,本书设计了一些典型的编程题并给出了部分编程题的参考程序,同时对数值传热学的编程、调程经验及应用经验进行了比较系统的总结。

本书可作为能源动力、石油化工等领域相关专业的数值传热学课程参考用书,也可为高等院校和科研院所相关专业的研究生、工程技术人员和研究人员提供一定的参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

数值传热学实训 / 宇波, 李敬法, 孙东亮编著. —北京: 科学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-03-058040-5

I. ①数… II. ①宇… ②李… ③孙… III. ①数值计算—应用—传热学 IV. ①TK124

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第131466号

责任编辑: 万群霞 / 责任校对: 樊雅琼  
责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 正典设计

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>

天津市新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年6月第一版 开本: 720×1000 1/16

2018年6月第一次印刷 印张: 16 1/2

字数: 329 000

定价: 88.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 序

笔者年少时喜欢逛老家的旧书店(摊)，经常见到一些流行书的序言上这样写道：目前坊间关于××××的书籍可谓汗牛充栋，唯……。当时年幼不理解“汗牛充栋”的真正意思，及至近年来，各种关于如何使用各类商业软件的书籍及培训班招生的兴旺火爆的景象，才对“汗牛充栋”这个成语有了比较深刻的理解。笔者这样写绝非对各类商业软件有任何不敬，也没有对讲解商业软件的书籍及培训班有任何菲薄之意，学会正确使用商业软件是快速求解工程问题、至少定性上得出正确结果的一种有效途径，是眼下大学工科教育不可或缺的内容，而且呈现目前这样兴旺火爆的景象也是几十年来广大数值计算的研究与使用人员努力的结果。但笔者确实对目前状态隐含的某些问题有些杞人忧天：如果我们培养的大学生甚至研究生，只会使用商业软件，而不会自己开发软件，特别考虑到目前广为使用的商业软件均是国外的产品，那么多年后我们国家的工程技术和研究人员的开发水平会是什么样子？不堪想象！

商业软件有很多的优点，不需要我来赘述，但商业软件在作为教育手段方面存在的问题却往往被忽略。笔者愿意和读者共享两个亲身的经历。一件是2005年1月，一款著名的流动与传热商业软件的中国用户大会在沿海某城市召开，当时中国地区的负责人邀请我在会上就计算传热学的应用做报告，因此有幸见到时任该软件的总工程师。我当时就对他说：“作为大学教授希望刨根究底，你们能否把你们软件中的各种处理方法详细公开，我就会在课堂上介绍学生去用，不要光给出一个名字，有的名字连文献上都查不到，作为大学教授很不放心。”这位老总只是笑笑，不予回答。第二件事是在2017年3月，笔者有幸参加了在美国召开的一个学会的年会。该会议的第一个大会报告的汇报人是一个欧洲很著名的商业软件的开发人员，介绍了软件的功能及应用实例。报告完毕，笔者第一个提问，希望报告人说明他报告中一个例子的边界条件的具体数值处理方法，回答的结果也是不得要领。由此笔者深刻体会到商业软件的“商业”两个字是不能忘记的。

笔者目前仍然在西安交通大学开设数值传热学课程，也已经把商业软件的使用作为课程的一部分介绍，但始终要求学生既能使用商业软件，也需要理解数值方法的基本内容并具备开发程序的能力。正当我感到年迈力衰需要友军予以大力支持我的观点的时候，我见到了宇波、李敬法和孙东亮三位作者编著的《数值传热学实训》的初稿，笔者的眼睛顿时一亮，在进一步阅读了该书稿内容后更加确认这是一本好书。具体的内容读者自己会马上看到不用我细说，在这里仅举一例，

此书的第 10 章是数值传热学的编程与调程，就十分独特。笔者一贯主张学习数值传热学要“明其全而析其微”，就是既要对数值方法在原理上有透彻的理解，又要知道具体实施的细节。我只是提出了这样的要求，但没有给出怎样做到“析其微”，本书的第 10 章描述了作者们的亲身体会，对读者学习如何实施数值方法必定很有帮助。

宇波教授和孙东亮教授在西安交通大学攻读博士学位时就对数值计算表现出很大的兴趣和很高的悟性，分别提出了 MSIMPLER/ECBC 算法及 IDEAL/VOSET 方法，参加工作后在从事教学过程中还继续孜孜不倦地进行研究与实践，并取得显著成绩，值得称道；特别可喜的是第二作者李敬法博士是宇波教授的学生，他的加入表明坚持发展算法和独立开发程序的精神已经传播到了年轻一代的学子；同时也要感谢科学出版社编辑的慧眼，为计算传热学界遴选了一本好书。

陶文铨

西安交通大学教授

中国科学院院士

2018 年 4 月识于西安交通大学建校 122 周年之际

# 前 言

数值传热学是对描述流动与传热问题的控制方程采用数值方法，通过计算机予以求解的一门交叉学科，在探索未知领域、促进科技发展和保障国防安全等方面有着不可替代的作用。为方便广大科研工作者学习和掌握这一强有力的工具，西安交通大学陶文铨院士编写了《数值传热学》和《计算传热学的近代进展》两本著作。目前，国内很多高校均以这两本著作作为教材开设了数值传热学的相关课程，这两本书的问世对促进我国数值传热学教学与科研工作的开展起到了非常重要的作用。

多年来，笔者在讲授数值传热学课程及培养研究生的过程中发现，由于数值传热学课程知识点较多且实践性很强，初学者掌握这门课程的难度较大，往往需要投入大量的时间和精力，这促使笔者不断思考如何才能帮助初学者更快地学习和掌握这门课程。陶文铨院士在传授数值传热学学习方法时曾强调“要学会游泳，就必须下水”，意思是只有通过实践训练才能真正掌握数值传热学课程。基于这一理念，笔者在深入学习《数值传热学》和《计算传热学的近代进展》部分章节的基础上，对数值传热学的重、难点知识进行了归纳总结。同时，为了加深读者对这些知识的理解，笔者对拙著《流动与传热数值计算——若干问题的研究与探讨》附录中给出的部分随堂测试题及新设计的习题进行了解析，同时对拙著附录中所给的编程训练题进行扩展和补充，最终形成了这本《数值传热学实训》。本书是《数值传热学》和《计算传热学的近代进展》这两本著作的补充学习材料，希望本书能帮助初学者更快地掌握数值传热学这门课程并能给相关研究人员带来一定的参考价值。

针对数值传热学知识点多、实践性强的特点，笔者在编写此书时着重考虑了以下几个方面。

(1) 重、难点知识的归纳总结。本书按照一定的逻辑对重、难点知识进行梳理，同时将相互关联的知识点进行总结和比较，通过归纳总结试图使初学者“既见树木，又见森林”，从而提高学习效率。

(2) 重、难点知识的习题训练。在数值传热学实践中，程序开发的成败往往取决于研究者对细节的理解程度。为了加深初学者对数值传热学知识细节上的理解，笔者设计了大量的习题并给出详细的参考答案。

(3) 典型问题的编程训练。为了方便初学者有针对性地开展编程训练，本书第3~8章设计了一些典型的编程题。另外，为了帮助初学者更快地掌握编程和

调程方法并养成良好的编程风格，本书给出了 7 道代表性编程题的参考程序，详见附录说明。

(4)编程和调程经验的总结。编程是一份艰苦、细致的工作，掌握一些编程和调程的方法可大幅度缩减程序开发的周期。本书总结了笔者的一些编程和调程经验，希望这些经验能使初学者在编程时事半功倍。

(5)应用经验的总结。初学者在应用数值传热学解决流动与传热问题时常会面临诸多困惑，如选择什么样的湍流模型和对流离散格式等。对此本书总结了笔者多年来所积累的应用经验，以供参考。

全书共 11 章，由宇波、李敬法和孙东亮编写。其中，宇波编写第 1~4 章，孙东亮编写第 5 章，李敬法、宇波编写第 6~9 章，宇波、孙东亮编写第 10 章和第 11 章，全书由宇波统稿。能够完成本书，要感谢研究生曹志柱、邓雅军、袁庆、陈宇杰、邵倩倩、敖尚民、宁旭丹、杜世琦和齐亚强等在资料收集和程序编写方面提供的大量帮助；感谢研究生李岩岩、张琳、文硕、陈炳男和马渊博等在图表绘制方面提供的帮助；感谢王鹏、汪道兵、禹国军、王敏、张文华、章涛、向月、冯晓宇和张康鑫等对本书提出的宝贵建议。

最后，要衷心感谢西安交通大学陶文铨院士！本书作者宇波教授和孙东亮教授均师承陶文铨院士，正是陶文铨院士一直以来的谆谆教导才使笔者在数值传热学领域有所领悟，而他潜精研思的科研精神也鼓舞着笔者在数值传热学领域不断前行。本书完成之际正值陶文铨院士八十大寿，谨以此书献给陶文铨院士，祝先生松鹤同春、福寿康宁！

本书得到了国家重点研发计划项目(2016YFE0204200)和北京市属高校高水平教师队伍支持计划高水平创新团队建设计划项目(IDHT20170507)的资助，在此深表谢意！

由于笔者才疏学浅，书中难免存在疏漏或不当之处，恳请读者批评指正。

宇 波 李敬法 孙东亮

2018 年 3 月

于北京石油化工学院

# 目 录

序

前言

第 1 章	数值传热学简介	1
1.1	重点和难点知识归纳总结	1
1.1.1	流动与传热问题的研究方法	1
1.1.2	数值传热学的定义	1
1.1.3	数值传热学求解问题的基本步骤	1
1.1.4	数值解的误差	1
1.1.5	流动与传热数值计算的研究手段	2
1.2	典型习题解析	4
第 2 章	控制方程和定解条件	9
2.1	重点和难点知识归纳总结	9
2.1.1	描述流动与传热问题的控制方程	9
2.1.2	通用控制方程新形式	10
2.1.3	守恒型与非守恒型控制方程	10
2.1.4	控制方程的类型及性质	11
2.1.5	控制方程的无量纲化	12
2.1.6	定解条件	12
2.2	典型习题解析	13
第 3 章	计算区域、控制方程和边界条件的离散	26
3.1	重点和难点知识归纳总结	26
3.1.1	计算区域的离散	26
3.1.2	控制方程和边界条件的离散	27
3.2	典型习题解析	37
3.3	编程实践	61
第 4 章	离散方程的性质	65
4.1	重点和难点知识归纳总结	65
4.1.1	离散方程的性质	65
4.1.2	初值稳定性与对流项稳定性的对比	68
4.1.3	对流项迁移性、稳定性和有界性的对比	68



4.1.4	离散格式的选择	68
4.2	典型习题解析	69
4.3	编程实践	80
<b>第 5 章</b>	<b>压力-速度方程的耦合求解</b>	<b>83</b>
5.1	重点和难点知识归纳总结	83
5.1.1	交错网格和同位网格	83
5.1.2	压力修正算法	85
5.1.3	出口边界条件的常用处理方法	89
5.2	典型习题解析	89
5.3	编程实践	104
<b>第 6 章</b>	<b>代数方程组的求解方法</b>	<b>107</b>
6.1	重点和难点知识归纳总结	107
6.1.1	直接解法和迭代法	107
6.1.2	TDMA 方法	108
6.1.3	共轭梯度法	109
6.1.4	多重网格方法	111
6.1.5	收敛标准	112
6.2	典型习题解析	114
6.3	编程实践	129
<b>第 7 章</b>	<b>复杂不规则区域有限容积法</b>	<b>132</b>
7.1	重点和难点知识归纳总结	132
7.1.1	贴体坐标网格的生成	132
7.1.2	贴体坐标网格上控制方程的离散	133
7.1.3	非结构化网格生成	137
7.1.4	非结构化网格上控制方程的离散与求解	138
7.1.5	贴体网格和非结构化网格对比	139
7.2	典型习题解析	139
7.3	编程实践	165
<b>第 8 章</b>	<b>湍流数值模拟</b>	<b>168</b>
8.1	重点和难点知识归纳总结	168
8.1.1	直接数值模拟方法	168
8.1.2	大涡模拟方法	169
8.1.3	雷诺平均方法	170
8.2	典型习题解析	172
8.3	编程实践	178

<b>第 9 章 计算结果的后处理</b> .....	182
9.1 后处理软件介绍.....	182
9.1.1 Origin 软件.....	182
9.1.2 Tecplot 软件.....	182
9.2 物理问题.....	183
9.3 点线图.....	184
9.3.1 数据文件的准备.....	184
9.3.2 操作步骤.....	184
9.3.3 效果展示.....	193
9.4 等值线图.....	194
9.4.1 数据文件的准备.....	194
9.4.2 操作步骤.....	195
9.4.3 效果展示.....	200
9.5 等值面图.....	202
9.5.1 数据文件的准备.....	202
9.5.2 操作步骤.....	202
9.5.3 效果展示.....	205
9.6 速度矢量图.....	206
9.6.1 数据文件的准备.....	206
9.6.2 操作步骤.....	207
9.6.3 效果展示.....	208
9.7 流线图.....	209
9.7.1 数据文件的准备.....	209
9.7.2 操作步骤.....	210
9.7.3 效果展示.....	213
9.8 动态图.....	214
9.8.1 数据文件的准备.....	214
9.8.2 操作步骤.....	214
<b>第 10 章 数值传热学编程与调程</b> .....	218
10.1 数值传热学编程风格和建议.....	218
10.1.1 数值传热学编程风格.....	218
10.1.2 数值传热学编程的建议.....	223
10.2 数值传热学编程常见错误及调程建议.....	225
10.2.1 数值传热学编程中常见语法错误.....	225

---

10.2.2 数值传热学编程中常见逻辑错误 .....	226
10.2.3 数值传热学调程建议 .....	227
10.3 调程工具简介 .....	228
<b>第 11 章 数值传热学应用经验 .....</b>	<b>233</b>
<b>主要参考文献 .....</b>	<b>237</b>
<b>附录 .....</b>	<b>244</b>
附录 1 .....	244
附录 2 .....	250

# 第 1 章 数值传热学简介

流动与传热现象是自然界和人类社会最普遍的现象之一。本章首先介绍流动与传热问题的研究方法，然后对数值传热学的定义、基本求解步骤、数值误差和研究手段进行简要介绍。

## 1.1 重点和难点知识归纳总结

### 1.1.1 流动与传热问题的研究方法

研究流动与传热问题的方法主要有解析法、实验法和数值模拟法，这三种方法各有所长，相辅相成。解析法可以通过函数关系定量地反映各个参数之间的关系，经济性和可靠性好，但仅适用于简单问题。实验法通常可以获得真实可靠的数据，但一般实验测试的成本高、周期长，各影响因素难以分离。某些实验由于高危险性等因素而不易开展，在一些极端条件下甚至无法开展。数值模拟方法一般具有成本低、周期短的优势，如国产 C919 大飞机的研发，采用数值模拟技术后大大缩短了研发周期。此外，通过数值模拟可以得到完备的数据，各影响因素易于控制和分离，可以替代某些具有危险性或不能完成的实验，甚至可以发现新的物理现象，如湍流中马蹄涡的发现。另一方面，数值模拟方法也存在着一定的局限性，其准确性与建模的合理性密切相关，且往往需要通过实验等手段来验证。

### 1.1.2 数值传热学的定义

数值传热学(Numerical Heat Transfer, NHT)是对描述流动与传热问题的控制方程采用数值方法通过计算机予以求解的一门交叉学科。

### 1.1.3 数值传热学求解问题的基本步骤

数值传热学求解问题的基本步骤及数值解的误差来源如图 1.1 所示。

### 1.1.4 数值解的误差

由图 1.1 可知，数值解和物理问题真实解之间存在的偏差称为数值解的误差，由模型误差、离散误差和计算误差组成。

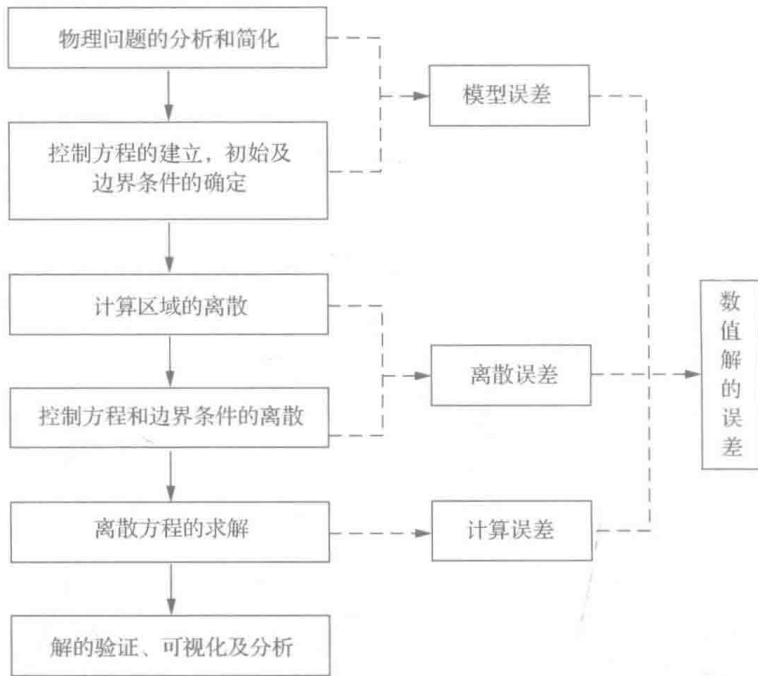


图 1.1 数值传热学求解问题的基本步骤及数值解的误差来源

在求解实际物理问题时，通常会对其进行简化处理来建立描述该问题的数学模型(微分方程或积分方程等)。数学模型精确解与实际物理问题真实解之间的偏差称为模型误差。模型误差的大小与求解物理问题时所做的简化和假设程度有关。离散方程精确解和数学模型精确解之间的偏差称为离散误差。离散误差的大小与离散方法和网格等因素密切相关。计算机实际求得的离散方程数值解与离散方程精确解之间的误差称为计算误差。计算误差包括舍入误差和迭代计算不完全误差。舍入误差是由浮点运算引起的，与计算机字长因素有关。迭代计算不完全误差是指收敛标准设置不够严格所引起的误差。数值传热学这门课程最关心的是离散误差。

### 1.1.5 流动与传热数值计算的研究手段

流动与传热问题的求解可以采用自主编程、商业软件或开源软件三种研究手段。研究者应综合考虑研究基础、自身数值计算背景、问题复杂程度和时间要求等因素选择合适的研究手段。下面对三种研究手段及其优缺点进行简要介绍。

自主编程的优点是容易对模型和算法进行改进，并根据自身需要对程序进行扩展，可操作性强。对于研究问题相对简单，侧重于新模型、新算法开发的研究者来说，自主编程是最好的选择。但自主编程要求研究者对物理问题、数值计算方法和编程语言等均有较深入的了解。对于多相流、燃烧和化学反应等复杂工程问题，网格生成和方程离散的过程均很复杂，编程难度很大，编程和调程的周期会很长，此时一般不推荐自主编程，可采用软件进行求解。从笔者在科学研究和

研究生培养方面的经验来看, 自主开发一些小型程序对理解并深入掌握软件的使用是十分有益的。

商业软件是指作为商品进行交易的软件。商业软件的优势在于拥有友好的图形用户界面和丰富的帮助文档, 而且程序的稳定性较好, 用户使用简单方便。但由于商业软件代码是封闭的, 用户很难知道程序中模型和算法及其实施的具体细节, 只能通过用户自定义函数(user-defined functions, UDF)来进行有限地扩展, 难以对算法或模型进行较大的改进。对侧重于工程应用、不太关心模型和算法开发的研究者来说, 商业软件是最好的选择。在流动与传热数值计算领域常用的商业软件有 ANSYS Fluent、STAR-CCM+、COMSOL Multiphysics、STAR-CD、CFX 和 PHOENICS 等。其中, ANSYS Fluent 是目前模拟和分析复杂几何区域内的流体流动与传热现象最广泛的商业软件。它基于“CFD (computational fluid dynamics) 计算机软件群的概念”设计, 针对每一种流动与传热物理问题的特点, 采用合适的数值解法, 在计算速度、稳定性和精度等各方面达到较佳的效果。ANSYS Fluent 拥有灵活的非结构化网格和强大的物理建模功能, 在传热与相变、化学反应与燃烧、多相流、旋转机械、航空航天、石油天然气和涡轮机设计等方面都有着广泛的应用。

开源软件是指源代码可以被公众使用的软件。由于开源软件的开放性, 用户可以很容易地获知模型和算法的一切细节, 可以进行任意的扩展。因此, 对于需要开发新模型和新算法, 同时又不想从头开发程序的研究者, 开源软件是一个好的选择。不过, 开源软件一般没有图形用户界面, 帮助文档较少, 入门比较困难。目前在流动与传热数值模拟领域常用的开源软件有 OpenFOAM、SU2 和 MFIX 等, 其中 OpenFOAM 的应用最为广泛。OpenFOAM 是一款采用 C++ 语言开发的面向对象的通用开源软件, 采用有限体积法求解, 支持任意多面体网格, 可以处理复杂的几何形状。OpenFOAM 的核心在于采用运算符重载技术, 对偏微分方程算子进行加减操作就可以方便地将复杂偏微分方程离散为代数方程组, 用户无需手动对方程进行离散, 只需选择相应的离散格式即可, 这极大地提高了编程效率, 降低了编程难度。如采用 OpenFOAM 求解动量方程的代码可写为

```
solve
(
  fvm::ddt(rho,U)
+ fvm::div(phi,U)
- fvm::laplacian(mu,U)
==
- fvc::grad(p)
);
```

## 1.2 典型习题解析

**例 1** 在你的研究领域中找一至两个流动传热问题进行简化，建立物理模型并分析简化过程中带来的模型误差。

**【解析】** 以埋地热油管道正常输送过程和旋风分离器气固分离过程这两个问题为例，分析如何对物理问题进行合理简化得到物理模型并分析建模过程中的误差来源。

### 1. 埋地热油管道正常输送过程

我国所产原油 80% 以上为易凝高黏原油，通常采用加热输送技术。为了制定安全、节能、环保的输送方案，需深入掌握输送过程中的水力、热力规律。数值仿真与现场试验相结合是查明易凝高黏原油管道输送过程中水力、热力规律的有效手段。

图 1.2 为埋地热油管道正常输送过程的示意图，下面分别从几何、物性、环境参数及边界条件等方面对该物理问题进行分析。从几何方面来说，热油管道通常为长输管道，管道长度长达数百甚至上千公里，如果直接对完整的三维水力-热力系统进行求解，计算量非常大，现有计算机的计算能力根本无法满足，因此有必要对计算区域进行简化。从物性和环境参数方面来说，管道输送过程中原油的温度是工程中最关心的物理量，其受土壤物性、环境温度和管道埋深等参数影响。由于管道很长，沿线土质变化较大且天气多变，这些参数存在一定的不确定性，为此有必要对物性和环境参数进行一定的简化。从边界方面来说，管道周围横截面的区域实际为无穷大，因此有必要引入热力影响区的概念，确定合适的边界位置和边界条件，从而保证计算的可行性和计算精度。下面从这三个方面对该问题做以下假设。

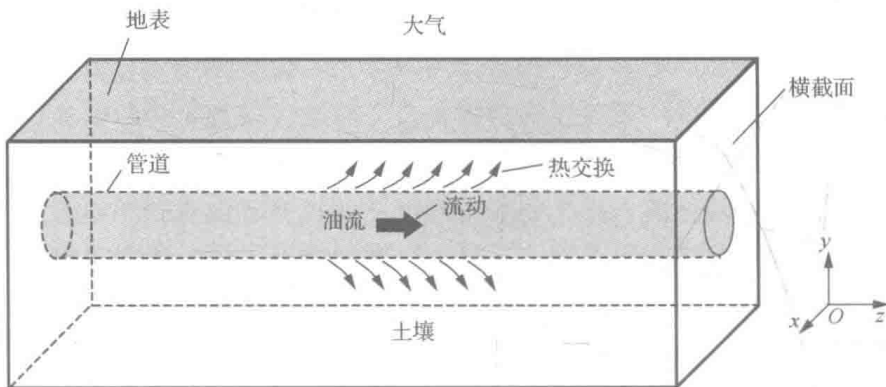


图 1.2 埋地热油管道正常输送过程示意图

## 1) 几何假设

(1) 管道轴向温度梯度比径向温度梯度小得多, 因此忽略轴向温降, 将该三维系统分成管内油流和横截面两个部分进行求解, 从而将管壁结构及管道周围土壤的导热问题从三维简化为二维。

(2) 管内的油流也是一个三维问题, 若对三维管道进行直接求解, 计算量依然非常大。考虑大多数原油管道内的流动为湍流, 温度分布比较均匀, 因此可以认为原油管输过程中油温分布只与时间和管道轴向位置有关。

(3) 引入热力影响区的概念, 认为在距地表深为  $H$ 、距管道中心宽为  $L$  的范围内土壤温度场受管道热力影响, 在此范围之外土壤温度场受原油管道的影响可以忽略, 其中  $H$  和  $L$  一般取 10m。管道热力影响区如图 1.3 所示。

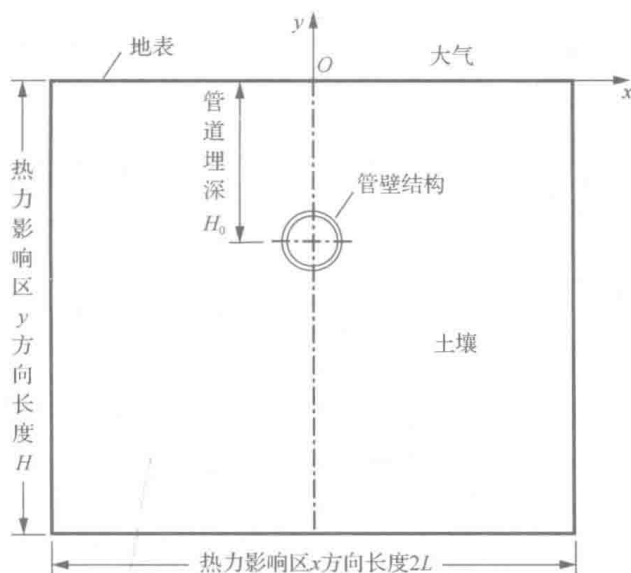


图 1.3 管道热力影响区示意图

(4) 认为土壤竖直对称面的两侧土壤温度场对称分布, 将计算区域横截面的导热问题转换为对称问题, 进一步减小计算量。

## 2) 物性和环境参数假设

(1) 不考虑横截面上土壤的各向异性, 认为在每个横截面上土壤的物性均匀分布, 其导热系数为常数。

(2) 大气温度取为月平均气温。

(3) 空气在地表处和油流在管道内壁处的对流换热系数通过经验公式计算得到。



### 3) 边界假设

(1) 上边界：只考虑地表与空气的对流换热，忽略太阳的辐射换热等因素。

(2) 下边界：管道埋深方向超过一定深度  $H$  后，管道下方土壤温度不随季节更替发生变化。因此下边界条件取为土壤恒温层的温度。

(3) 左边界：由于引入了对称性假设，采用对称边界条件。

(4) 右边界：水平方向超过一定距离  $L$  后，管道对水平方向土壤温度场的影响很弱，可以忽略不计。因此将右边界定义为绝热边界。

根据几何和边界条件假设，可得到横截面的计算区域与边界条件如图 1.4 所示。

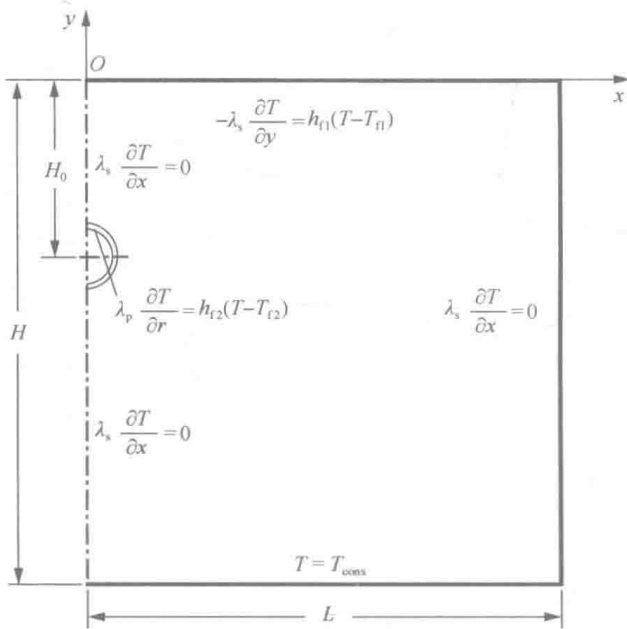


图 1.4 横截面计算区域与边界条件分布示意图

$\lambda_s$  和  $\lambda_p$  分别为土壤和管壁的导热系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ ； $T_{cons}$  为土壤在恒温层处的温度， $^\circ C$ ； $h_{t1}$  和  $h_{t2}$  为对流换热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ； $T_{t1}$  和  $T_{t2}$  为壁面处流体的温度， $^\circ C$

依据几何假设、物性和环境参数假设及边界假设可得到管内油流和横截面的数学模型。由假设造成的数学模型与实际问题之间的模型误差在数值计算中应充分考虑和评价。

## 2. 旋风分离器气固分离过程

旋风分离器是一种利用离心力将固体颗粒(或液滴)从含尘气体中分离出来的静止机械设备。其结构简单、紧凑，无运动部件，可以在较高温度和压力下运行，因此被广泛应用于石油化工等诸多行业中。随着流动与传热数值计算方法和计算机性能的发展，数值模拟已经成为旋风分离器设计和优化的重要研究手段。