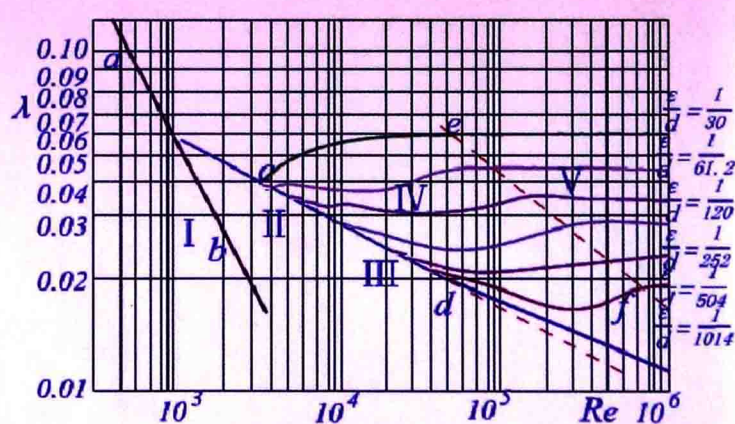


普通高等学校材料科学与工程学科规划教材

Thermal Engineering Fundamentals

热工工程基础

◎ 主 编 朱 明
主 审 余其俊



武汉理工大学出版社

普通高等学校材料科学与工程学科规划教材

Thermal Engineering Fundamentals

热工工程基础

主 编 朱 明

副主编 王怀德 赵蔚林

范海宏 汪和平

主 审 余其俊

Wuhan University of Technology Press

武汉理工大学出版社

【内容简介】

“热工工程”是我国高等工程教育材料科学与工程类学科专业的一门重要的学科基础课程。《热工工程基础》是普通高等学校材料科学与工程学科的规划教材之一,其编写与出版,旨在为我国材料科学与工程技术和具备较高理论水平研究型工程人员的培养提供必要的理论基础。

《热工工程基础》分为3篇。第1篇:从工程研究方法的角度对热工工程设备工艺结构的研究理论、应遵循的一般原则与典型范例进行了介绍,并将相似理论中的异类相似理念延伸到动量、热量与质量传递的理论学习中。第2篇:对传递原理的介绍侧重于涡流传递,并对不同传递过程中的边界层问题进行重点介绍与类比。第3篇:着重对工业生产过程中固、液、气三种典型燃料的燃烧机理、燃烧过程与控制、燃料燃烧的污染防治和燃烧器进行了介绍。

本书的编写以我国建筑材料工业热工生产过程的背景为参照,注重理论深度的提高和实际应用的有机结合,试图运用工程研究方法对热工工程的实质问题进行探讨,是为已经具备了一定热工基础知识的读者而编写的,适宜用作高等工程教育无机非金属材料专业方向研究生“热工工程”课程的教材,亦可供材料科学与工程类相关专业的科研、设计和工程技术人员阅读参考,或作为一般化学工程专业类本科生的课外参考书。

图书在版编目(CIP)数据

热工工程基础/朱明主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2014.9
ISBN 978-7-5629-4704-2

I. ① 热… II. ① 朱… III. ① 热工学 IV. ① TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 210717 号

项目负责人:	田道全	责任编辑:	田道全
责任校对:	万三宝	装帧设计:	许伶俐
出版发行:	武汉理工大学出版社		
地 址:	武汉市洪山区珞狮路 122 号(430070)		
网 址:	http://www.techbook.com.cn		
经 销 者:	各地新华书店		
印 刷 者:	崇阳文昌印务有限责任公司		
开 本:	880mm×1230mm 1/16		
印 张:	31.75		
字 数:	958 千字		
版 次:	2014 年 9 月第 1 版		
印 次:	2014 年 9 月第 1 次印刷		
印 数:	1—1500 册		
定 价:	58.00 元		

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

• 版权所有,盗版必究 •

前 言

工程建设中所使用的大多数工程材料,不论是金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料还是复合材料,通常都要经过一定的热历程进行再制备,这一制备过程具有一些共同的工程特点,即均是通过在一系列有机联系着的热工设备内综合进行的复杂的动量、热量与质量传递过程,其实质是“热工工程问题”。近年来,随着我国建筑材料工业的“做大做强”,一方面,大量的工程实践经验需要系统、科学的工程理论与研究方法进行指导,另一方面,也对具备高学历的工程技术人员培养提出了紧迫的要求。因此,我们编写《热工工程基础》教材的出发点,就是为我国材料科学与工程技术和具备较高理论水平的研究型工程人员的培养,提供必要的理论基础。

《热工工程基础》内容共分为3篇。第1篇为“工程研究方法”,从工程研究方法的角度对热工设备工艺结构的研究理论、应遵循的一般原则与典型范例进行了介绍,并将相似理论中的异类相似理念延伸到“动量、热量与质量传递”的理论学习中。第2篇为“动量、热量、质量传递与工程应用”,考虑到在工业生产过程中,涡流传递远远强于分子传递,本篇对传递原理的介绍侧重于涡流传递,并对不同传递过程中的边界层问题进行重点介绍与类比。同时,基于完整性考虑,对热量传递中的辐射换热现象也进行了简要的介绍。第3篇为“燃料燃烧与污染防治”,着重对工业生产过程中固、液、气三种典型燃料的燃烧机理、燃烧过程与控制及燃烧器进行了介绍。

本书的编写以我国建筑材料工业热工生产过程的背景为参照,注重理论深度的提高和实际应用的有机结合,试图运用工程研究方法对热工工程的实质问题进行探讨,是为已经具备了一定热工基础知识的读者而编写的,适宜用作高等工程教育无机非金属材料专业方向研究生“热工工程”课程的教材,亦可供材料科学与工程类相关专业的科研、设计和工程技术人员阅读参考,或作为一般化学工程专业类本科生的课外参考书。

本书由朱明担任主编,并负责全书的统稿工作。王怀德、赵蔚林、范海宏、汪和平担任副主编。济南大学赵蔚林,西安建筑科技大学范海宏,景德镇陶瓷学院汪和平、陆琳,武汉理工大学朱明、王怀德、何永佳、陈袁魁等参加了编写工作。具体编写分工为:第1、2、3、4章、21章(部分)由朱明编写;第21章中的第21.3.7由陈袁魁编写;第5、6、7、12章由范海宏编写;第8、14、15、16、17章由汪和平、陆琳编写;第9、10、11章由赵蔚林编写;第13章由何永佳编写;第18、19、20章由王怀德编写。全书内容由余其俊教授(华南理工大学教授,广东省珠江学者特聘教授)负责审稿。

本书的编写以参编人员的教案为基础,并参考了大量相关书籍与专业期刊中的部分内容。本书在编写过程中得到武汉理工大学胡曙光教授(硅酸盐建筑材料国家重点实验室),武汉理工大学陈晓敏教授(材料科学与工程学院),武汉理工大学出版社杨学忠总编辑、田道全副编审和武汉理工大学研究生院的大力支持,谨在此表示感谢。

由于本书涉及工程基础理论与工程应用领域较宽,编者选择的内容不可能面面俱到,书中难免有错误和疏漏之处,恳请读者批评指正,以便本书在日后的再版过程中不断修订与完善。

编 者

2014年8月

目 录

第 1 篇 工程研究方法

1 相似理论	(7)
1.1 相似的概念	(7)
1.1.1 物理相似	(7)
1.1.2 相似现象	(10)
1.1.3 相似准则	(12)
1.2 相似理论基本定理	(14)
1.2.1 相似第一定理	(14)
1.2.2 相似第二定理	(14)
1.2.3 相似第三定理	(15)
思考题与习题	(15)
2 相似准则的导出方法	(16)
2.1 方程分析法	(16)
2.1.1 相似转换法	(16)
2.1.2 积分类比法	(17)
2.1.3 方程无量纲化法	(18)
2.2 量纲分析方法	(19)
2.2.1 量纲的基本概念	(19)
2.2.2 量纲公式	(22)
2.2.3 物理量间函数关系的结构	(24)
2.2.4 量纲的齐次性和完整性	(25)
2.2.5 量纲分析的指数法	(27)
2.2.6 量纲分析的矩阵法	(30)
2.3 物理法则法	(37)
思考题与习题	(38)
3 模型研究	(40)
3.1 模型研究的基本原则	(40)
3.2 自模化	(40)
3.3 近似相似	(41)
3.4 模型设计与数据整理	(42)
3.4.1 定型尺寸	(42)
3.4.2 定性温度与介质温度	(43)
3.4.3 工作介质与模型尺寸	(44)
3.4.4 实验数据处理	(45)
3.5 过程研究的环节	(47)
3.5.1 小型工艺试验	(47)

3.5.2	过程放大	(47)
3.5.3	大型冷热态模型试验	(49)
3.5.4	中间试验	(49)
	思考题与习题	(50)
4	模型研究的工程应用	(52)
4.1	流体动力模型研究	(52)
4.1.1	流体动力模型相似准则的导出	(52)
4.1.2	流体动力模型试验研究	(53)
4.2	管道沿程阻力流体动力模型案例分析	(56)
4.2.1	管道沿程阻力流体动力准则关系式	(57)
4.2.2	管道内流体运动的普适阻力公式	(57)
4.2.3	管道沿程阻力流体动力实验	(57)
4.3	固体微粒在气流中的运动	(61)
4.3.1	固体微粒运动方程	(62)
4.3.2	固体微粒运动相似准则方程	(63)
4.4	对流换热模型研究	(64)
4.4.1	对流换热准则关系式	(65)
4.4.2	局部热模化	(66)
4.4.3	对流换热分析	(67)
4.4.4	火焰隧道窑对流换热模型研究	(69)
	思考题与习题	(73)

第2篇 动量、能量与质量传递与工程应用

5	动量、能量与质量传递衡算方程	(81)
5.1	总衡算方程	(81)
5.1.1	系统与控制体	(81)
5.1.2	总质量衡算方程	(82)
5.1.3	总动量衡算式	(84)
5.1.4	总能量衡算方程	(87)
5.2	微分衡算方程	(90)
5.2.1	质量传递微分方程	(90)
5.2.2	动量传递微分方程	(91)
5.2.3	能量传递微分方程	(95)
5.3	动量、热量、质量传递的类似性	(98)
5.3.1	三种传递形式在分子传递性质上的类似性	(98)
5.3.2	三种传递的涡旋机制相似性	(99)
	思考题与习题	(100)
6	边界层理论	(103)
6.1	普朗特边界层理论模型	(103)
6.2	层流向湍流的转换	(104)
6.3	速度边界层厚度	(104)
6.4	温度边界层与浓度边界层	(106)

6.4.1	温度边界层	(106)
6.4.2	浓度边界层	(106)
6.5	黏性不可压缩流体层流边界层方程	(107)
6.6	普朗特边界层方程的精确解——布拉修斯解	(109)
6.7	边界层动量积分方程——卡门关系式	(112)
6.8	边界层的分离与形体曳力	(114)
	思考题与习题	(116)
7	不可压缩流体运动的若干解	(117)
7.1	平壁间的轴向稳态平行层流流动	(117)
7.2	圆管中的轴向稳态层流流动——哈根-泊肃叶流动	(119)
7.3	同心套管环隙间的轴向稳态层流与周向层流	(120)
7.3.1	轴向稳态层流运动	(120)
7.3.2	周向层流运动	(123)
7.4	圆管中的湍流运动	(124)
7.4.1	湍流的特征	(124)
7.4.2	湍流运动方程	(125)
7.4.3	普朗特混合长度理论	(127)
7.4.4	圆管中黏性不可压缩流体的稳态湍流运动	(128)
7.5	平板上湍流边界层的近似解	(132)
	思考题与习题	(133)
8	热工设备中气流运动的阻力	(135)
8.1	气流运动阻力的成因	(135)
8.1.1	摩擦阻力	(135)
8.1.2	局部阻力	(135)
8.1.3	位压阻力	(136)
8.1.4	气体通过散料层的阻力	(136)
8.2	水泥工业预热器系统阻力的形成与控制	(139)
8.2.1	预热器系统阻力介绍	(139)
8.2.2	预热器阻力损失计算模型	(139)
8.2.3	预热器系统的降阻措施	(140)
8.3	玻璃工业蓄热室结构与阻力	(142)
8.3.1	玻璃工业蓄热室的结构	(142)
8.3.2	蓄热室气流阻力分析	(146)
8.4	陶瓷隧道窑的码料方式与阻力	(146)
8.4.1	隧道窑内阻力和码窑对窑烧成过程的影响	(146)
8.4.2	调整码窑方法的原则	(148)
	思考题与习题	(149)
9	导热	(150)
9.1	导热微分方程的定解条件与求解方法	(150)
9.1.1	定解条件	(150)
9.1.2	求解方法	(151)
9.2	稳态导热的分析解	(152)

9.2.1	一维稳态导热的计算	(152)
9.2.2	二维稳态传热计算	(160)
9.3	非稳态导热的分析解	(163)
9.3.1	薄壁物体内的非稳态导热计算	(164)
9.3.2	厚壁物体内的非稳态导热计算(第三类边界条件)	(167)
9.4	一维非稳态导热问题数值解	(171)
	思考题与习题	(176)
10	对流换热	(178)
10.1	对流换热机理	(178)
10.2	圆管内的层流换热	(179)
10.2.1	管内充分发展区的层流换热	(180)
10.2.2	管内动力进口段的层流换热	(184)
10.3	流体纵向流过平板时的层流换热	(190)
10.3.1	流体纵向流过平板时层流换热的精确解	(190)
10.3.2	流体纵向流过平板时层流换热的近似解	(195)
10.4	动量传递与热量传递的类似律	(198)
10.4.1	雷诺比拟	(199)
10.4.2	普朗特比拟	(200)
	思考题与习题	(202)
11	辐射换热	(203)
11.1	热辐射的本质	(203)
11.2	任意位置物体间的辐射换热	(204)
11.2.1	辐射角系数	(204)
11.2.2	灰体间的辐射换热计算	(210)
11.2.3	具有遮热板的辐射换热系统	(216)
11.2.4	具有镜面反射的物体间的辐射换热计算	(218)
11.3	气体辐射	(220)
11.3.1	气体辐射的特点	(220)
11.3.2	气体的发射率和吸收率	(221)
11.4	火焰辐射	(226)
11.5	太阳辐射	(229)
	思考题与习题	(231)
12	对流传质	(233)
12.1	质量传递概述	(233)
12.1.1	分子传质过程	(233)
12.1.2	对流传质过程	(234)
12.2	对流传质微分方程	(234)
12.3	浓度边界层中的传质	(236)
12.4	圆管内的稳态层流传质	(238)
12.5	流体纵向流过平板壁面的层流传质	(241)
12.5.1	流体纵向流过平板壁面时层流传质的精确解	(241)
12.5.2	流体纵向流过平板壁面时层流传质的近似解	(243)

12.6 动量、热量与质量传递过程的类似律	(244)
12.6.1 雷诺类似律	(245)
12.6.2 普朗特和卡门类比	(245)
12.6.3 奇尔顿-柯尔伯恩类比	(248)
思考题与习题	(250)
13 能量传递规律的工程应用	(252)
13.1 工业与民用建筑维护结构的隔热保温层设计	(252)
13.1.1 隔热保温层设计原理	(252)
13.1.2 工业窑炉炉体的耐热保温设计	(252)
13.1.3 多功能复合墙板设计	(261)
13.1.4 Low-E 玻璃	(265)
13.1.5 空气夹层在玻璃幕墙中的应用	(269)
13.2 大体积混凝土施工中的温控	(271)
13.2.1 概述	(271)
13.2.2 大体积混凝土的水化放热	(271)
13.2.3 大体积混凝土内部的温度和应力特征	(272)
13.2.4 大体积混凝土内部温度场和应力场的计算机仿真模拟	(273)
13.2.5 大体积混凝土施工及温控技术	(275)
13.3 新型工业窑炉换热方式	(278)
13.3.1 水泥预分解窑系统及换热特点	(278)
13.3.2 陶瓷辊道窑及其换热特点	(280)
13.3.3 玻璃熔制技术的改进	(281)
思考题与习题	(283)

第 3 篇 燃料燃烧与污染防治

14 燃烧的基本理论	(291)
14.1 燃烧的若干概念	(291)
14.1.1 点火、可燃性与熄火	(291)
14.2 燃烧热力学	(294)
14.2.1 应用于反应系统的热力学第一定律	(294)
14.2.2 应用于反应系统的热力学第二定律	(296)
14.3 化学动力学	(300)
14.3.1 化学反应速率	(300)
14.3.2 基元反应与总反应的反应速度常数	(302)
14.3.3 链式反应机理	(308)
14.3.4 H_2 、CO 及烷(烯)类碳氢化合物的氧化机理	(312)
14.3.5 局部平衡近似法及其在 $CO-H_2-O_2$ 反应中的应用	(316)
思考题与习题	(318)
15 气体燃料的燃烧过程	(320)
15.1 非预混火焰长焰燃烧(扩散式燃烧)	(320)
15.1.1 层流扩散火焰的结构与模型	(320)
15.1.2 湍流扩散火焰	(325)

15.2	预混火焰的燃烧	(328)
15.2.1	短焰燃烧	(328)
15.2.2	无焰燃烧	(339)
	思考题与习题	(341)
16	液体燃料的燃烧过程	(342)
16.1	液体燃料雾化燃烧的过程与火焰的结构	(342)
16.2	单个油珠的蒸发模型	(343)
16.3	蒸发油滴模型向单个燃烧油滴模型的扩展	(348)
	思考题与习题	(354)
17	固体燃料的燃烧过程	(355)
17.1	非均相反应的过程	(355)
17.2	碳的燃烧模型	(355)
17.2.1	单膜模型	(356)
17.2.2	双膜模型	(363)
17.3	煤粉的燃烧	(366)
17.3.1	煤粉燃烧的特点	(366)
17.3.2	煤粉烧嘴	(367)
17.4	其他固体燃料简介	(368)
	思考题与习题	(369)
18	燃烧污染与防治	(370)
18.1	NO_x 的形成与防治	(370)
18.1.1	NO_x 的产生	(370)
18.1.2	氮氧化物的控制	(372)
18.2	CO_x 的形成与防治	(378)
18.2.1	CO_2 减排技术	(379)
18.2.2	CO 的控制	(381)
18.3	SO_x 形成与防治	(381)
18.3.1	SO_x 的种类及生成机理	(381)
18.3.2	SO_x 控制技术	(382)
18.4	烟尘形成与防治	(390)
18.4.1	烟尘种类及生成机理	(390)
18.4.2	烟尘控制技术	(391)
	思考题与习题	(392)
19	燃烧的强化	(393)
19.1	概述	(393)
19.2	强化燃烧的实际方法	(393)
19.2.1	提高燃烧过程的温度	(394)
19.2.2	减小燃料的粒度	(395)
19.2.3	气流中颗粒的相对速度和燃烧的强化	(395)
19.3	燃烧过程的组织	(395)
19.3.1	湍流和燃烧的强化	(395)
19.3.2	已燃气体的回流、火焰着火和燃烧强化	(396)

19.3.3	旋转射流对火焰强化的影响	(397)
19.3.4	燃料特性和燃烧的强化	(398)
19.3.5	旋风炉燃烧及燃烧强化	(398)
19.4	煤粉燃烧的强化	(398)
19.4.1	煤粉燃烧过程与强化燃烧	(398)
19.4.2	煤粉燃烧的强化措施	(399)
19.4.3	回转窑的煤粉强化燃烧	(400)
19.4.4	汽化式强化燃烧技术在锅炉中的应用	(400)
19.5	气体燃料燃烧的强化	(401)
19.5.1	气体燃料稳定燃烧的条件	(401)
19.5.2	气体燃料燃烧过程的强化途径	(402)
19.5.3	低热值气体燃料燃烧的强化	(403)
19.6	液体燃料燃烧的强化	(403)
19.6.1	液体燃料的燃烧过程	(403)
19.6.2	液体燃料燃烧的强化	(405)
19.6.3	乳化油及其燃烧强化	(406)
	思考题与习题	(406)
20	燃烧器简介	(407)
20.1	气体射流	(407)
20.1.1	自由射流	(407)
20.1.2	受限射流	(409)
20.1.3	同心射流	(411)
20.1.4	旋转射流	(412)
20.2	气体燃料燃烧器	(415)
20.2.1	长焰烧嘴	(415)
20.2.2	无焰烧嘴	(416)
20.2.3	短焰烧嘴	(416)
20.3	液体燃料燃烧器	(418)
20.3.1	压力雾化烧嘴	(418)
20.3.2	机械雾化烧嘴	(419)
20.3.3	气动雾化烧嘴	(419)
20.3.4	气泡雾化烧嘴	(421)
20.4	固体燃料燃烧器	(423)
20.4.1	水煤浆燃烧器	(423)
20.4.2	水泥回转窑用煤粉燃烧器	(424)
20.4.3	低 NO_x 煤粉燃烧器	(426)
20.5	特种烧嘴	(429)
20.5.1	高速等温烧嘴	(429)
20.5.2	脉冲烧嘴	(430)
20.5.3	调温烧嘴	(430)
20.5.4	富氧/全氧燃烧器	(430)
	思考题与习题	(434)

21	工业窑炉热工性能检测	(435)
21.1	热工标定方案的制定	(435)
21.1.1	平衡体系的确定	(435)
21.1.2	热工标定方案的制定	(436)
21.2	标定准备	(438)
21.2.1	现场准备	(438)
21.2.2	设备准备	(438)
21.2.3	人员准备	(438)
21.2.4	预测试	(438)
21.3	工业窑炉热工性能检测范例	(439)
21.3.1	测定项目与测点分布	(439)
21.3.2	窑系统主机设备概况	(441)
21.3.3	标定及计算数据汇总	(442)
21.3.4	单项标定与计算	(446)
21.3.5	窑炉系统两大平衡计算	(455)
21.3.6	主要性能指标计算	(458)
21.3.7	分析与建议	(459)
	附录	(466)
	附录 1 常见气体的物理参数(标准大气压)	(466)
	附录 2 某些饱和液体的物理性质	(472)
	附录 3 常见液态金属的物理性质	(476)
	附录 4 固体材料的物性参数	(477)
	附录 5 几种气体的平均比热容 $\bar{c}_p$	(480)
	附录 6 某些材料的发射率	(480)
	附录 7 空气的相对湿度	(482)
	附录 8 不同温度与不同风速的传热系数	(488)
	参考文献	(491)

Section 1

Engineering Research Methods

第 1 篇

工程研究方法

- 1 相似理论
- 2 相似准则的导出方法
- 3 模型研究
- 4 模型研究的工程应用

第 1 篇 符号表

符号	物理意义	单位
a	热扩散率	m^2/s
A	面积	m^2
c	比热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c	声速	m/s
C_i	相似倍数	
c_A	组分 A 的浓度	mol/m^3
C_D	阻力系数	
c_p	比定压热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_v	比定容热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
C_φ	某物理量相似倍数	
d	直径	m
d_e	当量直径	m
D	扩散系数	m^2/s
f	力	N
F_b	单位质量力	m/s^2
$f_{\text{升}}$	升力	N
$f_{\text{阻}}$	阻力	N
$f_{\text{惯}}$	附加惯性力	N
$F(\alpha_i)$	函数	
g	重力加速度	m/s^2
G	万有引力常数	$\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$
h	高度	m
h	对流换热系数(膜系数)	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
κ	热导率	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
k	当量糙粒高度	m
l	几何尺度	m
l_0	特征几何尺度	m
$L, M(\text{或 } F)$	基本无量纲长度、质量(或力)	
m	质量	kg
$\boldsymbol{n}$	坐标向量	
p	压强	N/m^2
Q	热量	J
q_v	体积流量	$\text{m}^3/\text{h}, \text{m}^3/\text{s}$
r	矩阵的秩	
R	普适气体常数	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
R	半径	m
t	摄氏温度	$^{\circ}\text{C}$
t_f	流体温度	$^{\circ}\text{C}$
t_w	壁面温度	$^{\circ}\text{C}$
θ	过剩温度	$^{\circ}\text{C}$
T	热力学温度	K
$\boldsymbol{u}$	速度向量	m/s
u	点速度	m/s
u_{max}	最大速度	m/s
u_x, u_y, u_z	速度分量	m/s
ν	运动黏度	m^2/s
V	体积	m^3

续表

符号	物理意义	单位
w	平均速度	m/s
$x_i(i=1,2,\cdots,n)$	自变量	
x,y,z	直角坐标	
x^*,y^*,z^*	无量纲坐标	
α_i	单位比尺	
β	温度系数	1/K
γ	重度	N/m ³
γ	绝热系数(定压比热与定容比热之比)	
δ	黏性底层	
ε	绝对粗糙度	m
ε/d	相对粗糙度	无量纲
λ	沿程阻力系数	
μ	动力黏度	Pa·s
ξ	阻力系数	
π_y	待定准则(无量纲乘积)	
$\pi_n(i=1,2,\cdots,m)$	待定准则(无量纲乘积)	
π_i	已定准则(无量纲乘积)	
ρ	密度	kg/m ³
σ	表面张力	
τ	时间	s
τ	时间的量纲	
φ	某物理量(标量)	
Φ	某物理量(向量)	
φ^*	无量纲物理量	
φ_0	特征物理量	
$\varphi(\alpha_i)$	函数	
$\psi(\alpha_i)$	函数	
∇	哈密尔顿算子	
∇^2	拉普拉斯算子	
$D/D\tau$	随体导数或拉格朗日导数	
Ar	阿基米德准则	
Bi	毕奥准则	
Eu	欧拉准则	
Fo	傅里叶准则	
Fr	弗劳德准则	
Ga	伽利略准则	
Gr	葛拉晓夫准则	
Ho	谐时准则	
La	拉格朗日准则	
Ma	马赫数	
Ne	牛顿准则	
Nu	努塞尔准则	
Pe	贝克列准则	
Pr	普朗特准则	
Re	雷诺准则	
Stk	斯托克斯准则	
We	韦伯数	

对自然界和工程技术各学科领域中所展现出的大量的物理现象与诸多错综复杂的物理-化学过程的研究,主要有理论分析、数值计算和科学实验三种方法。这些研究方法相辅相成、相互补充,它们的有机结合,可以解决工程实际中提出的大量复杂问题。

理论分析方法是运用基本的物理概念、定律和数学工具对具体问题做定量分析,以得出定量的结论的一种方法。对于比较简单的问题,可以用理论分析的方法,即数学分析的方法来解决。一般而言,通过对各类物理现象机理的研究分析,并应用基本的物理定律,可以建立描述这类现象的基本方程或方程组,从而得到描述这类现象的数学模型或理论模型。这里的基本方程或方程组给出了某类现象应满足的一般规律,方程或方程组的解,是这类现象的通解。而为了把某一具体的特定现象从同类现象中区别出来,必须给出相应的单值条件,即定解条件。具体包括物理条件、几何条件、时间条件和边界条件。

原则上有了基本方程或方程组和相应的单值条件,就可以求出某个具体现象的特解。例如,根据描述流体运动普遍规律的纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程(克劳德-路易·纳维, Claude-Louis Navier, 1785—1836, 法国力学家和工程师; 乔治·加布里埃尔·斯托克斯, George Gabriel Stokes, 1819—1903, 英国力学家和数学家):

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \mathbf{F}_b - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \left(\nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) \right)$$

在理想流体、一元恒定流动,质量力只有重力的条件下,可得到其定解形式为:

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{u^2}{2g} = c$$

然而,在自然界和工程技术学科领域中所遇到的大多数问题都是比较复杂的,用理论分析方法求解存在着很大的困难。显然,人们目前还不能用已知的数学方法求得纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程的通解。这种已经建立了微分方程,却无法用数学分析方法求解的问题是大量存在的。对于这类情况,随着计算机的普遍使用以及一系列有效的近似计算方法的发展,如有限差分方法、有限元法、有限基本解法等运用,使数值计算方法在各学科领域中的作用和地位不断提高,并给理论分析方法以新的活力。

数值计算方法是借助一系列的近似计算方法对已建立数学模型,但尚不能运用理论分析方法进行求解或求解困难时所采用的一种步步逼近的计算方法,这种方法借助计算机手段已成功地运用于解决流体力学、传热学、燃烧动力学等学科中的问题。不仅如此,应用计算机还能进行数值模拟,代替部分实验,深化和扩大人们对某些现象物理本质的认识。但计算方法也不是万能的,比如对多种现象叠加的复杂三维问题的模拟研究,目前计算机的速度和容量也还是不够的。更何况,自然现象和工程技术各学科领域中提出的问题是千变万化、错综复杂的,很多问题人们还不了解其机理,要建立描述现象或过程的数据模型都是极其困难的,更谈不上用数学方法或计算方法求解了。对于这类尚未建立物理模型的复杂现象,试验研究方法有着重要的作用。

试验研究方法就是应用测试技术通过具体的试验弄清被研究现象的基本原理,确立支配所研究现象的规律,并根据实验结果建立被研究对象的物理模型的方法。同时,这种方法还可以验证理论分析解和数值计算解的正确性,因而具有更广泛的适用性和与实际情况相吻合的特点。然而,可以用同一组微分方程描述的同类现象是众多的,这就决定了采用直接实验的方法把所要研究的现象直接搬到实验室进行试验的方法是不可取的。因为,要积累试验数据,就必须进行大量的试验,甚至有时不

可能在实验室进行这种试验。例如,要解决流体在管路中的流动阻力这一简单的流体力学问题,就需要对不同尺寸、不同材料的管子,用不同种类的流体以不同的流速进行无数次试验,得到难以计数的试验数据,即便如此,所得到的试验数据仍是不完善、不完整的。可以想象,仅仅这样一个不能包含所有情况的简单问题的试验所占用的场地、消耗的物力、财力及时间都是非常可观的,而其试验结果却仅仅适用于与试验完全相同的情况。并且当使用这些数据时,查阅其中某一结果也是很困难的。这表明直接试验方法只能得到个别量之间的联系而难以揭示现象的全部内在本质,因而无法向试验条件范围以外的同类现象推广。这就促使人们去探究怎样利用试验结果去解决相似的同类现象这一科学问题。

一般情况下,对工程技术问题的研究通常是通过模型试验进行的。所谓模型试验,就是应用方程分析法或量纲分析法导出相似准则,根据相似原理设计模型并确定试验条件,然后通过试验建立相似准则之间的函数关系,最后将此函数关系推广到原型,得到原型工作规律的一种试验研究方法。模型试验在近代科学研究及设计工作中有着十分重要的作用。例如,空气动力学实验室的风洞,可用来进行各种空气动力学试验,测定设备的空气动力性能;水利学实验室中,可利用水力模型来研究自然界和水利学中的各种现象。冶金工业则以大量的模型试验工作作为设计和改进冶金炉的依据。同样,在热工设备(如各种类型的窑炉、热交换器、燃烧器、除尘设备等)中,为了探明有关流体的流动、热量传递和质量传递规律,提出改进措施,很多都是借助于模型试验取得的。通常当被研究的对象是新设计的热工设备时,应该首先进行模型试验。这里的模型就是所有和它相似的设备的“雏形”。通过模型试验获得与新设计的热工设备相似的现象,进而确定新设备的合理性或不足,为设备创新设计提供依据。但进行模型试验必须解决三个问题,即应该在什么条件下进行试验?试验中应该对哪些物理量进行测定?怎样整理试验结果以及用什么方法把模型试验结果换算到实物上去?人们通过长期的实践总结,终于找到了指导模型研究的全新理论,这就是相似理论。相似理论对以上三个问题可以给出直接的回答或有助于选定正确的途径,是指导模型试验的理论基础。

为了从理论上系统、深入地掌握模型研究方法的基本知识。本篇首先对指导模型研究的基本原理——相似理论以及有助于获得相似准则的量纲分析理论进行介绍,并在此基础上对模型研究的若干基本的工程应用进行案例分析。