

高等学校教学参考书

相似理论及其在 传热学中的应用

王丰 编著



高等教育出版社

高等学校教学参考书

相似理论及其在 传热学中的应用

王 丰 编著

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是作者在总结多年教学、科研工作的基础上写成的一本教学参考书，是目前尚少见的有关相似理论及其在传热学中的应用的著作。书中数学推导详尽，语言通俗易懂，叙述深入浅出。

全书共七章。第一、三、四、五章详细阐述了有关相似理论的基本内容；第二、六、七章介绍了传热学的有关知识，以及相似理论在传热学实验研究和理论分析中的应用。每章末附有详尽的参考文献，供读者进一步学习时参考。

本书可作为高等院校热能动力、工程热物理等有关专业的大学生、研究生和教师的教学参考书，也可供有关专业的科技人员参考。

高等学校教学参考书

相似理论及其在传热学中的应用

王 丰 编著

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行

民族印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 8.5 字数 210 000

1990年6月第1版 1990年6月第1次印刷

印数0001-1,270

ISBN 7-04-001997-3/TH·70

定价 2.70 元

序

人类社会正处在科学技术迅猛发展的时代，科学知识的总量激增，为了适应形势的要求，高等教育的任务应是，在传授知识的同时把工作重点置于发展学生智力和培养学生能力上来。掌握知识是培养能力的基础，而学习科学研究的方法则是培养能力的有力措施。因此，在高等教育中把传授科学知识和科学研究方法两者有机地结合起来，是培养学生独立工作能力的有效途径。

国内外许多著名科学家都曾以切身体会论述了掌握科学研究方法的重要性。例如：法国著名数学、物理学家笛卡儿（R. Descartes, 1596~1650）说过：“那些极慢前进的人，如果总是沿着正确的道路，就可以比那些奔跑着然而离开正确道路的人走在前面得多”；英国唯物主义者和现代实验科学的创始人培根（F. Bacon, 1561~1626）说：“跛足而不迷路的人，能赶上虽健步如飞但误入歧途的人”。由此可见，人们在学习科学知识时，除了要掌握某门学科所阐述的各种规律外，还应尽可能地了解并进而学会解决问题的科学方法，这是至关重要的。

相似理论是研究自然界和工程中各种物理过程相似原理的学说，是一门较新的科学。一百多年来，以相似理论为指导，人们在探索自然规律的过程中已形成了研究各种相似现象的新方法——相似方法。这种方法的本质在于，描述物理过程规律的微分方程应该满足齐次性的条件。

相似方法可以把个别现象的研究结果推广到所有相似的现象中去。同时，它也是模型实验的理论基础。相似理论已广泛应用

于水力学、空气动力学、传热学、热力学和物理化学等各种科学领域。对于从事工程热物理、热能动力、冶金和化工等工作的科技工作者来说，相似理论已成为他们解决科学技术问题的得力工具。

从实验研究的角度来看，相似理论是研究各种物理现象模拟方法的基础，实际上它已成为研究、整理和综合实验数据的一般方法论。相似理论能解决实验研究中几个关键问题：（1）实验中应该测量哪些物理量；（2）如何整理实验数据才能使个别实验结果得以推广；（3）什么样的现象与所研究的现象相似。

对理论研究而言，相似理论能确定某些相似变量的数学结构，使描述某些物理现象的偏微分方程组变为常微分方程组，从而使数学问题易于求解。

相似理论是把数学分析和实验研究结合起来的桥梁。它既可以把由描述物理过程的微分方程得出的一般形式的准则方程用于指导实验研究，使个别实验的结果具有普遍意义，又可利用实验所测得的可靠数据来充实、完善理论分析。

近半个世纪以来，理论和实验两种研究方法逐渐靠近，相辅相成，相得益彰，促进了多种科学技术的发展。在这一过程中，相似理论起着十分重要的作用。此外，利用相似理论使一般数理方程无量纲化，进而对方程中的各项进行数量级分析，从而可以看出方程中各项的相对重要性，使人们能够对一些复杂现象得出定性的认识。

但还应该指出的是，相似方法不是一种独立的科学研究方法，它不能与数学分析方法和实验研究方法相提并论。借助于分析方法或实验方法能够揭示各种物理现象的规律性，而仅靠相似方法做不到这一点，因为这种方法只是实验研究和理论研究的一种辅助方法。相似方法也和其它研究方法一样，只有把它与对所研究现象的深刻分析结合起来时，只有把它与由实验或分析解所

得到的对有关现象的物理本质的认识结合起来时，相似理论才是有价值的。如果对所研究的物理现象没有合理的数学描述，而只指望利用形式推理的方法来揭露客观现象的实质，那将是不可能的。

由于教学时数的限制，现有传热学教材无法对相似理论及其在传热学中的应用作全面、深入的介绍。因此作者认为，编写一本相似理论及其在传热学中的应用的参考书，无论对于深入了解传热学的内容及其研究方法，还是对于熟悉、掌握相似理论本身及其应用，都是颇有裨益的。

相似理论是一门比较抽象的科学，初学者往往感到比较困难。因此，在编写过程中，对数学推导力求详尽，对物理概念的叙述尽量做到言简意赅、通俗易懂，适合自学。书中部分内容总结了作者多年来教学和科研工作的点滴体会，如第七章中关于如何寻找相似变量的问题。

清华大学金德年副教授在百忙中详细审阅了原稿，并提出了宝贵的意见，对此谨表示衷心的感谢。

由于水平有限，时间仓促，书中疏漏和错误之处在所难免，敬请读者提出宝贵意见。

作者

1987年9月于北京

主要符号表

拉丁字母

- a ——加速度, 导温系数(或热扩散系数), 音速
 A ——横截面积
 c_p ——定压比热容
 c_f ——局部阻力系数
 d ——直径
 f ——力, 无量纲流函数, 微元环形面积
 F ——表面积
 g ——重力加速度
 G ——质量流量
 l ——长度, 特征尺寸, 高度
 m ——质量
 p ——压力
 Δp ——压差
 q ——热流密度
 q_v ——内热源强度
 r ——半径, 汽化潜热
 s ——壁厚
 t ——摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
 δt ——流体的温度变化
 T ——热力学温度, K
 ΔT ——过剩温度, 温差
 u —— x 向速度
 U ——流体流动速度
 v —— y 向速度
 w —— z 向速度

希腊字母

- α ——对流换热系数
 β ——体积膨胀系数
 δ ——速度边界层厚度
 δ_t ——温度边界层厚度
 Θ ——无量纲温度
 λ ——导热系数
 μ ——动力粘性系数
 ν ——运动粘性系数 (或动量扩散系数)
 ρ ——密度
 τ ——时间, 粘性力
 ψ ——流函数

下 标

- ∞ ——主流 (或来流)
 f ——流体
 \max ——最大值
 w ——壁面

相似准则

$$Re_x = \frac{Ux}{\nu} = \frac{\rho Ux}{\mu} \text{——雷诺准则}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\rho \nu c_p}{\lambda} = \frac{\mu c_p}{\lambda} \text{——普朗特准则}$$

$$Pe = Pr Re = \frac{Ud}{a} \text{——贝克来准则}$$

$$Nu_x = \frac{\alpha x}{\lambda} = \frac{3600 Gc_p}{\pi l \lambda} \frac{\delta t}{\Delta t} \text{——努谢尔特准则}$$

$$St = \frac{a}{\rho U c_t} = \frac{Nu}{Re Pr} = \frac{f}{F} \frac{\delta t}{\Delta t} \text{——斯坦顿准则}$$

$$Gr_r = \frac{\beta g \Delta t x^3}{\nu^2} \text{——格拉晓夫准则}$$

$$Gr_r^* = Gr_r Nu = \frac{g \beta \Delta t x^3}{\nu^2} \frac{\alpha x}{\lambda} = \frac{g \beta q_w x^4}{\lambda \nu^2} \text{——修正格拉晓夫准则}$$

$$Ra = Gr_r Pr = \frac{g \beta \Delta t x^3}{\nu^2} \frac{\nu}{\alpha} = \frac{g \beta \Delta t x^3}{\nu \alpha} \text{——瑞利准则}$$

$$Ra^* = Ra Nu = \frac{g \beta \Delta t x^3}{\nu \alpha} \frac{\alpha x}{\lambda} = \frac{g \beta q_w x^4}{\nu \alpha \lambda} \text{——修正瑞利准则}$$

$$Ho = \frac{U \tau}{l} \text{——均时性准则}$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho U^2} \text{——欧拉准则}$$

$$Fr = \frac{gl}{U^2} \text{——弗劳德准则}$$

$$Ga = Fr R^2 e = \frac{gl^3}{\nu^2} \text{——伽利略准则}$$

$$Ar = Ga \frac{\rho - \rho_0}{\rho} = \frac{gl^3}{\nu^2} \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \text{——阿基米德准则}$$

$$Ne = \frac{f \tau}{m U} \text{——牛顿准则}$$

$$Ma = \frac{U}{a} \text{——马赫准则}$$

$$Fo = \frac{\sigma \tau}{\delta^2} \text{——傅里叶准则}$$

$$Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda} \text{——毕渥准则}$$

$$Ec = \frac{U^2}{c_p (T_w - T_\infty)} \text{——埃克特准则}$$

$$La = \frac{\rho l}{\mu U} \text{——拉格朗日准则}$$

目 录

主要符号表	1
第一章 相似理论的产生及发展简史	1
§ 1-1 相似理论的产生	1
§ 1-2 相似理论发展简史	12
§ 1-3 相似理论的意义及应用	15
参考文献	18
第二章 单相介质对流换热的微分方程组	20
§ 2-1 概述	20
§ 2-2 影响对流换热的主要因素	21
§ 2-3 强迫对流换热的微分方程组	25
§ 2-4 单值性条件	34
§ 2-5 速度边界层与温度边界层	36
§ 2-6 速度边界层微分方程组	41
§ 2-7 温度边界层微分方程	47
§ 2-8 竖壁自然对流换热的微分方程组	51
参考文献	55
第三章 量纲理论	58
§ 3-1 概述	58
§ 3-2 物理量单位的选择和单位制的建立	59
§ 3-3 物理量的量纲表达式	65
§ 3-4 齐次方程与齐次函数	71
§ 3-5 量纲理论的应用	74
§ 3-6 有量纲量与无量纲量	83
§ 3-7 量纲分析的普遍理论——费德尔曼定理	85
参考文献	91

第四章 自然界中的相似现象	93
§ 4-1 概述	93
§ 4-2 几何相似及其应用	94
§ 4-3 相似常数和相似定数	96
§ 4-4 空间相对应的点和时间上相对应的瞬间	97
§ 4-5 物理量和物理现象的相似	99
§ 4-6 同类量的替代法则	104
§ 4-7 相似准则的推导	105
§ 4-8 相似准则的物理意义及其性质	116
§ 4-9 准则方程	123
参考文献	127
第五章 相似理论三定理	129
§ 5-1 概述	129
§ 5-2 物理过程相似的定义	129
§ 5-3 相似第一定理	131
§ 5-4 相似第二定理	140
§ 5-5 相似第三定理	153
§ 5-6 相似理论的实用意义及发展方向	162
参考文献	163
第六章 相似理论在传热学实验研究中的应用	165
§ 6-1 概述	165
§ 6-2 实验数据的整理与综合	167
§ 6-3 不可压流体流经圆管时压力损失的准则方程	176
§ 6-4 流体纵掠平壁层流换热时的准则方程	183
§ 6-5 流体沿竖壁自然对流层流换热时的准则方程	186
参考文献	193
第七章 相似理论在传热学理论分析中的应用	195
§ 7-1 概述	195
§ 7-2 相似解的物理实质	196
§ 7-3 半无限大物体非稳态导热的相似解	198

§ 7-4	流体纵掠平壁时层流速度边界层的相似解·····	202
§ 7-5	流体纵掠等温平壁层流换热的相似解·····	215
§ 7-6	摩擦阻力与换热之间的类似(或类比)·····	224
§ 7-7	具有轴向压力梯度的层流速度边界层的相似解·····	228
§ 7-8	纵掠等温楔形体层流换热的相似解·····	233
§ 7-9	流体沿等壁温竖壁自然对流层流换热的相似解·····	236
§ 7-10	流体沿等热流竖壁自然对流层流换热的相似解·····	243
§ 7-11	层流膜状凝结换热的相似解·····	248
	参考文献·····	252
附表	一些常见相似准则的物理意义·····	255

第一章 相似理论的产生及发展简史

§ 1-1 相似理论的产生

自然科学中的各种理论和定律，并不是人们强加在自然现象上的主观臆测，而是自然现象本身所固有的客观规律在人们头脑中的反映。科学研究的任务，就在于揭示自然界存在的客观规律。虽然人们无法改变自然界的各种规律，但能够通过对于自然界内在规律的认识来能动地改造世界，使其为人类的生存和发展服务。

自然界或工程中的各种物理现象的规律性，往往表现为描述该现象特征的各个物理量之间存在着一定的函数关系。为了揭示客观现象的规律性，一般采用两种研究方法，即实验研究方法（唯象法）和理论研究方法。

什么是实验研究方法，什么是理论研究方法，它们各有什么优缺点，这是下面将要介绍的内容。

一、实验研究方法

通常，在自然界和工程中遇到的各种物理现象都是相互制约、错综复杂的。为了揭示它们的规律性，需要采用人为的方法尽可能地减少某些次要因素的影响，使其在简化的条件下重复发生，而加以反复研究。这一过程就是实验。

通过实验，可以积累丰富的资料，在对这些资料进行分析、综合、判断和推理等一系列抽象思维活动的基础上，找出现象的本质，并确定表征现象特征的各个物理量之间在数量上的关系式。然后，经过实验的反复检验，当证明这种关系式足够正确地

反映了事物的规律性时，就产生了定律和理论。总之，实验方法是借助各种测试元件、测量仪表和实验设备探索支配各种现象的规律的一种基本科学研究方法。

近代自然科学发展初期的一些重大发现，例如哥白尼 (N. Copernicus, 1473~1543)、开普勒 (Kepler, 1571~1630)、伽利略 (G. Galileo, 1564~1642) 和牛顿 (I. Newton, 1642~1727) 等人分别提出的太阳中心说、行星运行定律、惯性原理和万有引力定律等，都是以观测和实验为基础的。

那么，实验研究方法有哪些优缺点呢？

首先，实验研究方法通过实验可以得到对客观物理过程本身的直观、真实的感性认识。因此，由实验所得到的数据、资料较为可靠。它能发现新的现象，能得到大量定性和定量的资料供人们分析思考，并通过这一过程得出规律性的结论。可以说，实验是研究那些至今尚未得出可靠的数学描述的问题，以及目前还不能用理论方法求解的某些复杂问题的有效方法。从这个意义上讲，实验是先行，而理论分析随后；实践具有决定性的作用，理论则具有指导意义。列宁说：“由生动的直观到抽象的思维，再由抽象的思维到实践——这便是认识真理、认识客观真实的辩证道路”〔12〕。

其次，实验研究方法的另一个特点是可以用人为的方法来控制影响自然现象的某些因素。因此，实验研究方法允许人们舍去次要的因素，着重考虑若干主要因素对所研究现象的影响，从而便于揭示现象的本质和规律性。例如，在固体导热过程中，物体的形状，物体和周围介质的对流换热，固体和周围物体之间的辐射换热以及其它一些偶然因素，都会影响导热量的大小。如果不设法减少或舍去这些影响因素，就很难，甚至不能找出导热现象所遵循的规律。因此，在实验过程中可以采取减少甚至消除对流换热和辐射换热影响的各种措施，并选择诸如平板、圆柱体或者

圆球等形状规则的物体作为实验试件，这样就容易找出导热现象所服从的规律。

实验研究方法的第三个特点是用实验方法所建立的规律具有一定的近似性和局限性。科学定律是建立在观察和实验基础之上的，而观察和实验都是在一定条件下和一定的参数范围内进行的。当然，观察和实验的结果，应该是在对各种物理量进行多次反复的实际测定后所获得的。各种物理量测量的准确程度依赖于当时的生产技术水平，即各种测试元件和测试仪器的完善程度，以及实验人员进行测量时的细心程度等。同时，还由于某些其它的原因（如在超高压、超高温和超低温时），人们暂时还无法了解客观事物的全貌。因此，由实验结果所建立的定律，通常不可能做到绝对精确地反映客观存在，而总有一定程度的近似性和局限性。所以，定律只在一定参数范围内和一定限制条件下才能应用。

科学定律虽不是绝对精确的，但各种定律的近似性和局限性并不会降低它们的客观价值，因为它们都能近似地、相当真实地反映客观事物的内部属性。同时，科学定律的准确程度将在人类认识自然的过程中不断提高。可见，科学仅仅给人们一幅与客观实际相近似的图画，而这些图画将随着时代的发展而变得愈来愈接近真实情况。随着人类对客观世界认识的不断深化，大自然无穷无尽的客观属性将逐个被人们所认识。

通过实验得出定律和理论，再通过实验来检验这些结果。但还不能认为，对客观事物的认识过程就此结束了。因为，经过一段时间之后，新的实验数据会与根据以往的数据所创立的定律或理论相矛盾，从而迫使人们用新的观点来重新审查全部实验结果。这样，在科学发展的新阶段上会产生新的更加完善的理论。例如，反映理想气体压力、温度和比容关系的状态方程，发展成为能确定实际气体压力、温度和比容关系的范德瓦尔（Van der

Waals) 方程、乌卡洛维奇 (М. П. Вукалович) 方程等状态方程的过程就是这种实例。一般说来, 新的定律很少是对原有定律加以补充, 而通常是给定原有定律一个应用范围, 即揭示它们的近似性质, 指出这些定律只有在一定的条件和范围内才是正确的。例如上面所说的范德瓦尔方程, 它能比理想气体状态方程更好地反映实际气体的真实性质, 但后者在压力较低和温度较高时才是接近实际的。

总之, 实验是发现客观规律的最基本、最重要的方法。虽然它不是科学研究的唯一方法, 但它在人类认识自然过程中所起的作用, 尤其是作为发现客观规律的手段, 以及在判断这些规律正确性方面, 具有决定性的意义。人们依靠直接实验的方法解决了许多依靠理论方法无法解决的问题, 而且今后还将继续运用这种方法去探索新现象, 解决新问题。

但是, 我们也不能不看到实验方法的局限性和缺点。首先, 这种局限性表现在这种方法受到各种条件的限制。例如, 大型设备做全尺寸的实验时费用太大, 以致于无法采用直接实验的方法。又如, 对于对流换热过程等复杂的现象, 一方面, 由于影响换热强度的因素很多, 要想分别研究每一个因素对换热的影响, 实验工作将十分繁重; 另一方面, 也无法在实验中孤立地改变某一个物性参数, 而保持其它的物性参数不变。因为, 流体的各种热物性参数都是温度的函数, 而且对于处于临界状态的流体, 其热物性参数不仅随温度发生剧烈变化, 而且还随压力发生明显的变化。因此, 当用改变温度的方法来改变流体的某一物性参数的大小时, 其它物性参数也将随之发生变化。在这种情况下, 人们无法应用一般的实验方法来分别研究每一个物性参数对换热的影响。对于这种情况, 相似理论将发挥重要作用。此时, 人们可以根据这个理论, 将与该过程有关的全部物理量组合成几个无量纲的相似准则, 然后把这些相似准则作为一个整体来研究它们之间

的函数关系，从而得知各种因素对于对流换热过程的影响。

一般实验方法的另一个缺点是它只能得出单个物理量之间的相互关系，难于揭示现象的本质，从而降低了实验结果的使用价值。用一般实验方法所得到的结论，只能应用到与实验条件完全相同的那些现象中，没有普遍的指导意义，所以也就不能将其推广到与实验条件不同的情况。对于不同的条件都必须重新做一次实验。而根据相似理论进行实验，则可以大大减少实验次数，并能避免在庞大的设备中进行实验的困难，从而可以大量节约资金和人力。

二、理论研究方法

在介绍理论研究方法以前，我们先来谈谈数学在人类征服自然的过程中的巨大作用。大家知道，在各种物理过程中，描述过程特征的各个物理量之间存在着密切的关系。所以，在研究诸如物理、化学或生物等的任何过程时，无论从局部还是从整体来探索其规律，数学都是必不可少的工具。因此，从这个意义上讲，数学是揭示自然界奥秘的钥匙。

伽利略曾经指出：“自然规律要用数学语言来记录”。不仅在自然科学的各个领域里，而且在社会科学的不同领域里，凡是必须从量的方面来考察客观事物的状态和过程时，人们都必须运用数学。对于从事科学研究和工程技术工作的人员来说，数学是他们进行理论分析的重要手段。在我们这样的时代，可以毫不夸张地说，如果没有数学，人们几乎不能对所研究的技术问题获得有价值的结果。此外，数学也是人们预见未来的有力武器。预言和现实相符，预言和未来发生的事件相符，这就充分证明了用抽象的数学形式所表示的规律，能正确地反映物质世界的现实关系。

在微积分发现之前，人类只能用初等数学这个工具从量的方面来探索自然界的规律性。但是，它只能研究事物在静止状态下的规律性，这大大限制了数学在探索客观世界时的深度和广度。