

热物理学相似分析

〔苏〕C. C. 库塔捷拉泽 著

科学出版社

热物理学相似分析

〔苏〕C.C.库塔捷拉泽 著

蒋章焰 何文欣 王传院 译

蒋章焰 校

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书是国际上享有盛名的苏联著名工程热物理学家、苏联科学院院士С.С.库塔捷拉泽撰写的一本有特色的专著。全书共十四章，可分为四个部分。第一部分介绍量纲分析和相似方法的理论基础。第二部分阐述均匀介质热物理过程的相似分析，包括导热、流体动力学和气体动力学相似准则，并以大雷诺数下的边界层分析为例，阐明相似方法的应用技巧。第三部分讨论相似分析在研究非均匀介质热物理过程时的应用，包括气-液两相系统、沸腾临界以及弥散系统相似准则。第四部分介绍相似理论在研究附壁紊流结构、辐射换热、磁流体动力学以及物质热物性时的应用。

本书对象是能源、化工、冶金、航空、航天等方面的科技人员以及高等学校有关专业大学生、研究生和教师。

С.С.Кутателадзе

АНАЛИЗ ПОДОБИЯ В ТЕПЛОФИЗИКЕ

Издательство «НАУКА»

Сибирское отделение, Новосибирск, 1982

热物理学相似分析

〔苏〕С.С.库塔捷拉泽著

蒋章焰 何文欣 王传院 译

蒋章焰 校

责任编辑 陈德义 陈文芳

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院科技印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1987年12月第一版 开本：787×1092 1/32

1987年12月第一次印刷 印张：11 3/8

印数：0001—2,100 字数：251,000

统一书号：15031·894

本社书号：5499·15—10

定价：2.70元

序

相似概念是几何学中早已知道的一个概念，这一概念在观察物理现象时也直观地提出来了。然而，物理相似概念作为一种精确认识了实验规划方法，作为一种综合实验数据的方法，以及作为一种解析求解或借助数值实验求解具体问题选择综合坐标的方法，则还只是在二十世纪才形成的。

的确，瑞利 (Reyleigh) 在1915年有充分理由指出，令人感到惊讶的是，“甚至连新颖的物理学都对重要的相似原理那么忽视”^[127]。过了差不多二十年，С. И. 瓦维洛夫 (Вавилов) 在布里季缅 (Бриджмен) 著作^[17] 俄文版序言中清楚地表达了同样的想法：“量纲分析，作为物理学的一种研究方法，在比较好的情况下也只不过是作为一个例子，不加解释地提一提而已。这样的例子往往会给人留下莫测高深的印象，因而不大能令人信服。”

不过，多年之前Т. А. 阿法纳西耶娃-埃费斯特 (Афанасьева-Эрнфст) 就已认为有必要把量纲分析跟相似理论相比拟 (这里指的是对所研究现象的无量纲主导方程而作的分析)^[116]。可以认为，直到Т. А. 阿法纳西耶娃-埃费斯特的著作问世，才提出关于量纲分析跟构造物理-数学模型之间有着深刻联系这样一个还不成熟的见解，尽管早已有了关于动力相似的著名牛顿定理^[42]。此外，Н. 莫罗佐夫 (Морозов) 在他那本虽然有点粗浅、但却十分有意思的书中也已清楚地指出了量纲分析跟构造物理-数学模型之间的联系。

第一个单值表征基本物理现象的无量纲组合量是雷诺引

进的^[86]。这是一个物理参数、运动参数以及几何参数的无量纲组合量，也就是密度、粘度、流速以及通道直径的临界比值，它决定着流体流动存在层流和紊流工况的区域。

确定可能的无量纲组合量的数目跟构成这些无量纲组合量的有量纲量的数目之间的关系，对继续发展相似概念具有极其重要的意义。格尔特勒 (Görtler, H.)^[120] 的论文对形成相应定理的历程作了评述。量纲分析和相似分析真正成为构造物理-数学模型和综合实验数据的一种独特方法，则主要归功于以下一些人的著作：努赛尔^[124, 125]，白金汉 (Buckingham, E.)^[118]，瑞利^[127]，阿法纳西耶娃-埃费斯特^[8, 115]，布里季诺^[17]。格罗伯 (Gröber)^[121] 建议以杰出学者的姓名来命名相似理论中的基本的无量纲组合量、以所选姓名的第一个字母作为标识这些无量纲量的符号。因而相似分析就开始有了自己独特的、紧凑而又方便的符号，并且这些符号还都带有某种历史沿革的印记。

爱因斯坦的论文^[114] 是把量纲分析应用到介质物性研究中的早期实例之一。М. В. 基尔比切夫 (Кирпичев)、А. А. 古赫曼 (Гухман) 等人的著作^[27, 30, 43, 44] 把努赛尔和阿法纳西耶娃-埃费斯特的思想加以系统化、并加以发展了，据此建立了均匀介质热流体动力过程物理模化的法则。这些成果已经在工程实践中得到广泛应用^[30, 43, 54, 113]。可压缩性效应和不等温性的分析导致出现一些特殊的相似准则数——特征流速跟声速之比以及物质热物性随温度和压力的相对变化^[27, 107, 188]。这样一来，单相介质基本相似准则数的研究就算大功告成了。

也就是在三十年代，出现了研究多相介质热流体动力学相似条件的第一批论文。其中反映了一些极为重要的新动向：具有内部相界面的问题，宏观结构的多值性，相变，新

• 41 •

相产生条件的影响因素，产生本征准稳态的可能性。

引入第一类相变的热力相似准则^[40]，就可以把无量纲组合量的分析方法推广到物质集态改变时的换热过程，以及伴随有热效应的物理-化学变化时的换热过程。

物理相似问题的研究现状，已有内容极为丰富的一些专著和教科书^[12,14,29,46,76,91,96,104]作了论述。这时一般都假定读者已经具备相应的具体学科的基础知识，因而也已具备相似分析的基本知识。这些著作都相当关注具体的课题。之所以如此，不仅在于作者本人的研究，而且还跟这样一种极其重要的情况有关，即量纲分析和相似分析，虽然原理貌似简单，可是要卓有成效地加以应用，在某种意义上说却是一种技巧。

量纲分析在力学问题上的应用已由Л. И. 谢多夫 (Седов) 的专著^[91]作了广泛的论述。

热物理——这是关于能量和物质在伴随有热效应的情况下的宏观输运的一门科学。它所研究的现象涉及到在各种物质集态（固体、液体、气体、等离子体）下的热力过程、流体-气体动力学过程以及电动力学过程的复杂的相互作用。在这种情况下，往往缺乏完善的物理-数学处理方法，对于紊流和多相系统动力学问题尤其是这样。正因为如此，在热物理学中相似分析和模化或许要比物理学其他领域更有必要。

当然，这本书不可能对如此广泛的科学领域中的相似分析问题作出全面论述，更不可能反映出现有的具体处理方法和观点的多样性。然而，作者还是希望这本书不仅在内容上，而且在反映一定的科学学派的观点上，能对读者有用，并且有所裨益。

第十二章是跟В. А. 格鲁兹杰夫 (Груздев) 一起写的，

第十四章 是跟E. M. 哈巴赫 帕舍夫 (Хабахпашев) 一起写的。若干个别问题 跟B. E. 纳科里亚科夫 (Накоряков)、A. K. 列布罗夫 (Ребров) 以及H. A. 鲁布佐夫 (Рубцов) 进行了详细的讨论。13.7节系征得 И. Л. 波夫赫 (Повх) 的同意引自他的著作。

Н. И. 亚雷金娜 (Ярыгина) 作为科学编辑做了许多工作。Л. А. 别祖格洛娃 (Безуглова)、B. E. 盖杜琴科 (Гайдученко)、Н. И. 科津斯卡娅 (Козинская)、Э. Г. 马林科娃 (Маленкова) 以及H. K. 丘平娜 (Чупина) 协助整理了手稿。作者谨对所有这些人的帮助表示深切的感谢。

基 本 符 号

a	热扩散系数 (导温系数)
a_*	声速
a_λ	辐射吸收系数
A	不平衡系数
B	磁感强度
b	边界层理论中的壁面渗透性参数
C	浓度
c	光速
c	单位质量的热容——比热容; c_p —一定压比热容; c_v ——一定容比热容
c_f	流体动力摩擦系数
D	电感强度
D	质量扩散系数
D	直径
d_λ	辐射透射系数
E	电场强度
E	辐射密度
E	峰态系数
$E(k)$	波数空间内的紊流能谱密度
$E(\omega)$	频率空间内的紊流能谱密度
e	电荷
F	力
G	质量流量
g	加速度 (尤指重力加速度)

H	磁场强度
h	普朗克常数
I	辐射强度
I	电流强度
I	量纲公式中的电流强度单位
i	单位质量的焓——比焓
i^*	滞止焓
j	电流密度
j	质量流速
k	玻耳兹曼常数
k	波数
L	特征线性尺寸
L	量纲公式中的长度单位
l	自由程, 混合距离等
m	分子量; m_0 ——摩尔分子量
M_k	k 阶矩
M_k^*	k 阶中心矩
n	频率
p	压力
Q	热流
q	热流密度
R	气体常数; R_0 ——通用气体常数
R	半径
R_{ij}	浓度系数
r	第一类相变潜热; 反应热
r	温度恢复系数
r_λ	辐射反射系数
T	温度

T^*	滞止温度
T	量纲公式中的时间单位
t	时间
U	特征流速
u	流速
u, u, w	流速分量
V	体积
v	比容
v^*	动力速度 (切应力速度)
x, y, z	坐标
α	换热系数
β	体积膨胀系数
β	混合物的通流容积含气量 (即按容积流量计算的容积含气量, 又称流量系数) *)
γ	绝热指数, $\gamma = c_p / c_v$
δ	液膜厚度, 边界层厚度等
δ^*	位移厚度
δ^{**}	动量损失厚度
δ_T^{**}	能量损失厚度
ε	紊流能量耗散密度
e_n	紊流运动的动能密度
ζ	流体动力阻力系数
η	离壁面的无量纲距离, $\eta = v^*_{\tau} y / \nu$
λ	波长
λ	导热系数
μ	动力粘度

•) 为清楚起见, 此处增添了括号内的说明。——译者注

μ_m	介质的磁导率 (绝对值)
μ_e	介质的介电常数 (绝对值)
ν	频率
ν	运动粘度
ν_m	磁扩散系数 (磁粘度)
Π	无量纲组含量, 相似准则
π	热力相似公式中的折算压力
ρ	介质的密度
ρ_e	电荷密度
σ	表面张力系数
σ	正应力
σ_e	介质的电导率
τ	切应力
τ	热力相似公式中的折算压力
φ	混合流体的真实容积含气量
φ	热力相似公式中的折算容积
Ω	横截面积
ω	角速度
ω	圆周频率 ($2\pi n$)

角标: 0——标量; o_r ——相对的; cl ——层; cm ——混合物; ct ——壁面; gr ——边界; kr ——临界; n ——外法线; l ——辐射的; m ——磁的; t ——热的, 紊流的; e ——电的; D ——扩散的; $'$ ——较重的相, 速度、密度、压力等的脉动分量; $''$ ——较轻的相. 符号上标——无量纲标志; $\dim$, $[]$ ——量纲符号 (例如 $\dim \kappa = [1]$), $\langle \rangle$ ——平均值标志.

国际单位制中的基本计量单位, 主要的通用常数以及基本的相似准则数将在附录 1 和附录 2 中介绍.

目 录

基本符号	x
第一章 量纲分析和物理相似	1
1.1. 计量单位	1
1.2. 有量纲量和无量纲量	3
1.3. 原始物理-数学模型和量纲分析	6
1.4. 物理过程的相似	13
第二章 建立物理-数学模型时的相似分析	16
2.1. 数学模型的无量纲形式和相似准则	16
2.2. 单值性条件	19
2.3. 无量纲组合量的组合, 原始相似准则	20
2.4. 作为综合无量纲变量的相似准则	21
2.5. 模拟	23
2.6. 物理-化学变化的热力准则	25
2.7. 介质物性场的相似	27
2.8. 自模化和内尺度	30
2.9. 热力学相似	33
2.10. 自由边界上的条件	35
2.11. 化学反应动力学条件	37
2.12. 相似方法和实验	42
第三章 导热相似准则	45
3.1. 各向同性介质的导热方程	45
3.2. 相似准则	47
3.3. 应用量纲分析的一些实例	50
3.4. 各向异性介质的导热方程	53
第四章 流体动力学相似准则	55

4.1.	运动方程和导热方程·····	55
4.2.	相似准则·····	56
4.3.	紊流·····	58
4.4.	稳定边界层的动量和能量积分关系·····	63
4.5.	流动分离和挤出·····	67
4.6.	热自然对流·····	70
4.7.	温度系数·····	73
4.8.	不稳定对流·····	76
4.9.	流变介质·····	79
第五章	气体动力学相似准则·····	82
5.1.	稠密气体的运动方程和导热方程·····	82
5.2.	密度脉动对紊流摩擦和导热系数的影响·····	84
5.3.	激波绝热·····	85
5.4.	稀薄气流的相似准则和单值性条件·····	87
第六章	高雷诺数下的边界层·····	92
6.1.	粘度趋近于零的流体的边界层·····	92
6.2.	相对摩擦规律·····	93
6.3.	极限相对摩擦规律·····	94
6.4.	气体绕流不可渗透平板时的极限摩擦和换热规律·····	97
6.5.	气体绕流可渗透平板时的极限摩擦和换热规律·····	99
6.6.	可渗透壁面上的亚声速边界层·····	100
6.7.	可渗透平板上的超声速边界层·····	103
6.8.	分离区始点的边界层参数·····	104
6.9.	变换为有限雷诺数的问题·····	107
6.10.	绝热壁面上的热边界层衰减·····	114
6.11.	热屏时的绝热壁温·····	117
6.12.	非绝热壁面上的热屏·····	118
第七章	气-液两相系统的相似准则·····	121
7.1.	状态和流型的多样性·····	121
7.2.	相界面上的流体动力相互作用和热力相互作用·····	127

7.3.	内尺度和相似准则·····	130
7.4.	毛细力-声波相互作用准则·····	135
7.5.	相变的影响·····	139
7.6.	通道内气-液两相流的平均运动方程和平均 能量方程·····	144
7.7.	内部不稳定性对时均参数的影响·····	147
7.8.	气-液两相混合物中的波·····	150
7.9.	液体中单个气泡的浮升速度·····	153
7.10.	具有层流液膜的两相流的流体动力阻力·····	159
第八章 沸腾临界的流体动力学模型·····		165
8.1.	泡态沸腾和膜态沸腾·····	165
8.2.	第一沸腾临界, 热流体动力学参数·····	167
8.3.	两相不可压缩情况下的沸腾临界的流体动力学模型·····	168
8.4.	高速液流沸腾的流体动力学稳定性准则·····	170
8.5.	液体低于饱和温度的欠热度·····	172
8.6.	从单相对流直接转变为膜态沸腾时的相似准则·····	174
第九章 淤散系统的相似准则·····		178
9.1.	若干模型·····	178
9.2.	载流中颗粒的独立运动·····	179
9.3.	颗粒固定层·····	181
9.4.	动力层和颗粒流·····	184
9.5.	沸腾层的基本理论·····	187
9.6.	淤散混合介质流·····	190
9.7.	实验数据处理的一些实例·····	191
第十章 辐射换热的相似准则·····		197
10.1.	辐射介质和吸收介质·····	197
10.2.	黑体辐射定律·····	200
10.3.	辐射-导热和辐射-对流的相互作用·····	202
10.4.	相似准则·····	204
10.5.	蒸汽锅炉炉膛中的辐射-对流换热·····	205

10.6.	高超声气流绕流钝体迎面点时的换热	208
第十一章	磁流体动力学相似准则	212
11.1.	电学量和磁学量的计量单位	212
11.2.	电动力学方程	213
11.3.	相似准则	214
11.4.	磁场对导电介质流的影响的一些实例	216
11.5.	电弧放电跟气流的相互作用	218
11.6.	磁气体动力学通道中的边界层	223
第十二章	物质热力学性质和输运性质的相似	227
12.1.	热力学相似准则及其相应的状态	227
12.2.	决定的相似准则 C_i^* 的物理意义	232
12.3.	关于液体和气体平衡物性数据综合方法的 若干实例	237
12.4.	临界点附近的物性相似	248
12.5.	分析热流体动力学过程时的对应状态	252
第十三章	物理模化	255
13.1.	模化的基本法则	255
13.2.	一个决定相似准则	256
13.3.	两个决定相似准则	258
13.4.	物性的可变性	259
13.5.	局部模化	260
13.6.	流体动力学模型计算的两个实例	261
13.7.	研究叶栅的实验装置	277
第十四章	附壁紊流结构特性的相似	290
14.1.	平均流的结构	290
14.2.	流体动力场矩量和频谱函数	292
14.3.	局部的各向同性紊流的尺度	296
14.4.	无压力梯度时的不可渗透壁面上的边界层	301
14.5.	具有纵向压力梯度时的不可渗透壁面上的边界层	307
附录1.	物理量的单位	313

附录2. 基本的相似准则	318
附录3. 相似准则数中若干热气体动力学公式	324
参考文献	341

第一章 量纲分析和物理相似

1.1 计量单位

运动和空间-时间是物质存在的通用形式。这些属性的基本物理度量是质量、能量、距离、时间。由于质量和能量可以借助通用常数——真空中的光速互相关联起来，也就是说可以用同样的单位进行度量，因而基本的物理量不会超过三个，通过这三个物理量的单位可以从数量上表示任何由观察、实验和计算确定的具体物理现象的结果。这三个基本物理量就是质量（或能量）、距离（长度）、时间。

上面的论述会带来一些深奥的、哲学含义上的问题，如文献〔2,27〕所述。然而，就研究具体的对象而言，上述说明和推论一般说来是足够的了，也就是认为这三个基本物理量中的每一个都可以选出确定不变的数值属性，以此作为它们的尺度，以及作为它们复现的自然标准或人为标准。对于质量可以选出尺度 M ，对于长度可以选出尺度 L ，而对于时间则可以选出尺度 T ，这些尺度就是所谓基本计量单位。

根据量纲公式，由这些基本计量单位可以构成导出单位：

$$[A] = [L^i M^m T^n] \quad (1.1)$$

引进导出计量单位的意义在于，它们可以明显而又紧凑地表征某种足够广泛、足够普遍的物理状态，这是因为它们跟具体的物理现象关系更密切的缘故。此外，两个导出物理量的数值之比跟基本计量单位尺度的选择无关。