

热力设备模型实验研究基础

李之光 编

国防工业出版社

1973

热力设备模型实验研究基础

李之光 编

国防工业出版社

1973

内 容 提 要

本书共分两篇。第一篇论述热力设备（锅炉、蒸发器、热交换器、除尘设备、燃烧设备等）模型研究的理论基础，包括：模型（试验台）设计的基本原理、模型实验应遵守的条件、模型实验数据或实际设备工业实验数据的综合整理方法等。第二篇结合热力设备中常遇到的问题，具体介绍模型研究方法与实验数据综合整理方法的实际应用。

本书可供从事热力设备研究的人员及大专院校的师生参考之用。

热力设备模型实验研究基础

李之光 编

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张4¹/₈ 82千字

1973年7月第一版 1973年7月第一次印刷 印数：00,001—24,000册

统一书号：15034·1301 定价：0.38元

序 言

毛主席教导我们：“人们要想得到工作的胜利即得到预想的结果，一定要使自己的思想合于客观外界的规律性，如果不合，就会在实践中失败。”“马克思主义的哲学认为十分重要的问题，不在于懂得了客观世界的规律性，因而能够解释世界，而在于拿了这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界。”

客观世界的规律性表现在质及量两个方面。以自然界中气体的规律性为例，气体受热以后会作功是在质的方面的一种表现，而气体的温度、压力、比容等之间的数量关系，则是在量的方面的一种表现。后者是设计、制造某些热机所必须掌握的。因此，从量的方面揭示客观事物的规律性对改造客观世界起着十分重要的作用。另外，“质的变化……只有通过物质或运动（所谓能）的量的增加或减少才能发生。”[●]因此，只有认真地研究事物的数量关系才能正确地认识事物的本质。

在古代，人们以初等数学（三角、代数、几何）为工具从量的方面来探索自然界的规律性。但初等数学所能发挥作用的范围是有限的，因初等数学以研究常量为主，只能研究静止状态。而在自然界中，绝大部分现象必须从量的变化角度来研究。此时，初等数学已无能为力。由于生产斗争、科

● 恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社1971年版，47页。

学实验的需要，于是出现了高等数学（微分、积分、微分方程等等）。恩格斯讲：“只有微分学才能使自然科学有可能用**数学来不仅仅表明状态，而且也表明过程：运动。**”[●]高等数学的出现是一个飞跃，它成为从量的方面探索自然规律性的一种强有力的工具。对于那些运动着、变化着的现象，可抽出这些现象的某一微元进行分析，写出它的微分方程式并给出边界条件以求得量与量之间的常量规律性关系。然而，自然界的现象毕竟是错综复杂的，有许多实际问题至今靠高等数学尚不能全部解决或根本无法解决，这是因为有时难以立出微分方程式，有时即使立出了微分方程式也无法求解。于是，人们不得不靠直接实验的方法来探求那些靠数学方法无法研究的复杂现象的规律性。但直接实验方法有很大的局限性：只能推广到与实验条件完全相同的现象上去；对于那些尚未建造出来的设备，则根本谈不上用此方法探索其规律性；对于某些已建造出来的设备，由于条件的限制（如温度或压力过高、设备过大或过小等），有时也是难于应用此方法的。另外，直接实验方法常常只能得出个别量之间的规律性关系，难以抓住现象全部本质。

社会生产的发展是无止境的，人类向大自然的斗争是永恒的。“人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。”大约在一百年前，开始酝酿一种探索自然规律性的新方法——以相似理论为基础的模型研究方法。在近三、四十年，它已成为探索自然规律广为应用的行之有效的办法。

● 恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社1971年版，249页。

所谓模型研究方法，就是用方程分析或因次分析方法导出相似准则，并在根据相似原理建立起的模型(试验台)上通过试验求出相似准则之间的函数关系，再将此函数关系推广到设备实物，从而得到设备实物工作规律的一种实验研究方法。这种模型研究方法，在近代科学研究及设计工作中，起着很重要的作用。多年实践表明，模型研究方法是探明大型复杂设备、复杂物理-化学过程内部规律的可行手段。

这种模型研究方法，在热力设备(锅炉、蒸发器、热交换器、除尘设备、燃烧设备等)中也得到了广泛的应用。在热力设备中有关流体动力、传热、气液两相介质流动、干净蒸汽的获得、部件合理结构的选择等方面所探明的规律及所提出的措施，很多是靠模型研究方法取得的。

全国解放以后，这种模型研究方法在我国科研部门、制造厂产品试验研究单位以及高等学校有关实验室中得到了普遍的应用，随着我国社会主义建设事业的飞跃发展，它在今后必将获得更为广泛的应用。与此同时，也就提出了进一步从理论上系统地、深入地掌握此种研究方法的必要性。编写此书的目的，是希图在这一方面起一定的作用。但由于编写者政治、业务水平所限，一定会出现不少缺点或错误，诚恳地希望同志们给予批评指正。

编 者

一九七二年

目 录

基本符号表	9
第一篇 模型研究的理论基础	11
第一章 相似的原理	11
§ 1-1 相似的概念	11
§ 1-2 对现象的数学描述	14
§ 1-3 相似性质	17
§ 1-4 模型法则	21
§ 1-5 实验结果的推广	27
§ 1-6 异类相似	30
第二章 相似准则的导出	31
§ 2-1 方程分析方法	31
§ 2-2 因次分析方法	39
§ 2-3 相似准则形式的改变	45
第三章 近似的模型研究	48
§ 3-1 流体动力的近似模型研究	49
§ 3-2 对流换热的近似模型研究	52
§ 3-3 几何形状不完全相似的近似模型研究	54
第四章 实验数据的综合方法	55
第二篇 模型研究在热力设备中的应用	61
第五章 流体动力的模型研究	61
§ 5-1 相似准则的导出	61
§ 5-2 模型实验应遵守的条件	67
§ 5-3 模型设计中的一些问题	69
§ 5-4 等温介质实验结果推广到不等温介质引起偏差的修正	74
第六章 对流换热的模型研究	76
§ 6-1 相似准则的导出	76

§ 6-2 模型实验应遵守的条件	78
§ 6-3 热流方向对换热的影响	80
第七章 气液两相介质流体动力实验数据的综合方法	81
§ 7-1 相似准则的导出	82
§ 7-2 气液两相介质在管内流动实验数据的综合方法	88
§ 7-3 浮泡流动实验数据的综合方法	94
§ 7-4 气液两相介质流体动力稳定性实验数据的综合方法	96
第八章 蒸汽带水实验数据的综合方法	101
第九章 固体微粒在气流中运动的模型研究	110
§ 9-1 相似准则的导出	110
§ 9-2 模型实验应遵守的条件	115
附录 1 对相似原理的论证	119
附录 2 常用相似准则一览表	130
附录 3 名词索引	131
参考文献	132

基本符号表

l —— 长度, 米;

d —— 直径, 米;

τ —— 时间, 时;

w —— 速度, 米/时;

w_x, w_y, w_z —— 在 x, y, z 轴上的速度分量, 米/时;

w' —— 液相流速 (液相真实流速), 固体微粒速度, 米/时;

w'' —— 气相流速 (气相真实流速), 米/时;

w'_0 —— 液相折算流速 (按全部流通截面折算的液相流速), 米/时;

w''_0 —— 气相折算流速 (按全部流通截面折算的气相流速), 米/时;

p —— 压力, 公斤/米²;

Δp —— 压差, 公斤/米²;

g —— 重力加速度, 米/时²;

g_x, g_y, g_z —— 在 x, y, z 轴上的重力加速度分量, 米/时²;

m —— 质量, 公斤·时²/米;

γ —— 比重, 公斤/米³;

$\rho = \gamma/g$ —— 密度, 公斤·时²/米⁴;

μ —— 粘度, 粘性系数, 公斤·时/米²;

$\nu = \mu/\rho$ —— 动粘度, 动粘性系数, 米²/时;

- σ —— 表面张力, 公斤/米;
 t —— 温度, 流体温度, $^{\circ}\text{C}$;
 Δt —— 温差, $^{\circ}\text{C}$;
 $t_{\text{壁}}$ —— 壁面温度, $^{\circ}\text{C}$;
 λ —— 导热系数, 千卡/米 $\cdot$ 时 $\cdot^{\circ}\text{C}$;
 α —— 放热系数, 千卡/米 $^2\cdot$ 时 $\cdot^{\circ}\text{C}$;
 c —— 比热, 千卡/公斤 $\cdot^{\circ}\text{C}$;
 c_p —— 定压比热, 千卡/公斤 $\cdot^{\circ}\text{C}$;
 $a = \lambda / c_p \gamma$ —— 导温系数, 米 2 /时;
 φ —— 流通截面中气相所占份额;
 β —— 流量容积含气量。

第一篇 模型研究的理论基础

第一章 相似的原理

§ 1-1 相似的概念

相似的概念首先出现在几何学里。几何学里的相似图形，例如图 1-1 中的两个相似三角形，是指对应尺寸不同，但形状相仿的图形。

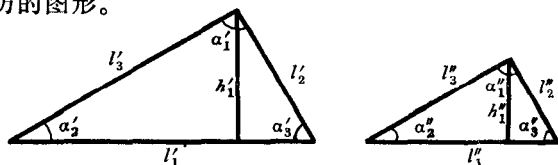


图1-1 相似三角形

这两个相似的三角形具有如下性质（称之为“相似性质”）：各对应线段（各边长、各垂线）的比例相等，各对应角彼此相等，即

$$\left. \begin{aligned} \frac{l''_1}{l'_1} = \frac{l''_2}{l'_2} = \frac{l''_3}{l'_3} = \frac{h''_1}{h'_1} = \frac{h''_2}{h'_2} = \frac{h''_3}{h'_3} = c_l; \\ \alpha''_1 = \alpha'_1, \alpha''_2 = \alpha'_2, \alpha''_3 = \alpha'_3, \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 c_l ——常数。

反过来讲，满足什么条件（条件要最少，但是充分的）两个三角形才能相似呢？显然，此条件（称之为“相似条件”）为：

$$\frac{l''_1}{l'_1} = \frac{l''_2}{l'_2} = \frac{l''_3}{l'_3} = c_l, \quad (1-2)$$

式中 c_i ——常数。

即满足条件式 (1-2) 时, 两个三角形相似, 式 (1-1) 的性质全部出现。

“相似性质”是指彼此已相似的现象具有什么性质, 而“相似条件”是指满足什么条件后, 一些现象才能彼此相似。

上述几何相似 (即空间相似) 也可推广到其他物理概念中, 如:

时间相似: 指时间间隔互成比例 (见图1-2), 即

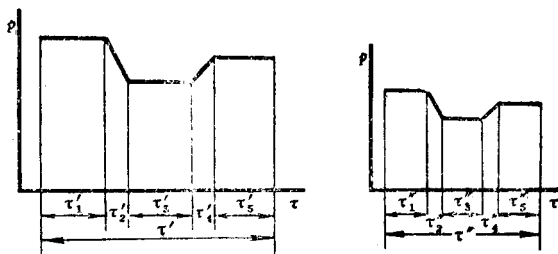


图1-2 时间相似

$$\frac{\tau''_1}{\tau'_1} = \frac{\tau''_2}{\tau'_2} = \dots = \frac{\tau''_5}{\tau'_5} = \frac{\tau''}{\tau'} = c_\tau,$$

式中 c_τ ——常数。

速度相似: 指速度场的几何相似, 它表现为各对应点对应时刻上速度的方向一致, 而大小互成比例 (见图1-3), 即

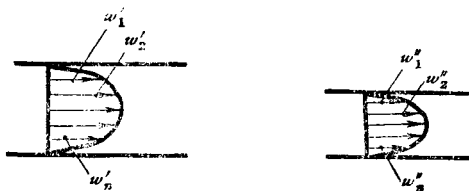


图1-3 速度场相似

$$\frac{w''_1}{w'_1} = \frac{w''_2}{w'_2} = \dots = \frac{w''_n}{w'_n} = c_w,$$

式中 c_w ——常数。

温度相似：指温度场的几何相似，它表现为各对应点对应时刻上温度互成比例（见图1-4），即

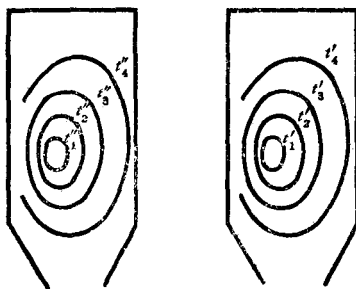


图1-4 温度场相似

$$\frac{t''_1}{t'_1} = \frac{t''_2}{t'_2} = \frac{t''_3}{t'_3} = \frac{t''_4}{t'_4} = c_t,$$

式中 c_t ——常数。

还有力的相似、压力相似、浓度相似等等。几何相似只是物理相似的一个特例。

热力设备中的各种现象，如流体的运动、热量的交换等，都伴随有许多物理量（如温度、压力、速度、密度、粘度、时间等）的变化。对于这种具有许多物理量变化的现象，相似是指表述此种现象的所有量在空间中相对应的各点及在时间上相对应的各瞬间各自互成一定的比例关系。

对于这些现象的“相似性质”及“相似条件”，要比前述的几何相似复杂得多。相似性质及相似条件是进行模型研究

所必须深入了解的内容，详见后述。

本书以后各节将着重讨论那些在实际中经常遇到的由多种量的变化所形成的现象的相似问题。

§ 1-2 对现象的数学描述

深入研究任何现象（过程）时，应熟悉对该现象的数学描述方法。同样，从事模型研究，特别是讨论模型研究原理时，对现象的数学描述方法是应首先了解的内容。

任何一种现象都可根据自然界的物理、化学定律把表征该现象的各种量结合成一组方程式。这组方程式反映出上述各种量之间的依赖关系，是用数学形式对该现象的一种描述。

以粘性[⊙]不可压缩流体的稳定等温运动为例，根据质量守恒定律可导出连续性方程[⊙]：

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0, \quad (1-3)$$

根据牛顿第二定律，即力等于质量乘加速度的定律可导出运动方程[⊙]：

$$\begin{aligned} \text{对 } x \text{ 轴} \quad & \rho \left(w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} \right) \\ & = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (1-4)$$

$$\begin{aligned} \text{对 } y \text{ 轴} \quad & \rho \left(w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_y}{\partial z} \right) \\ & = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (1-5)$$

⊙ 在粘性流体中，不仅存在垂直压力，也存在切向力；而在理想流体中，则仅存在垂直压力。空气、烟气、水等真实流体皆属于粘性流体。

⊙、⊙ 这些方程的推导在有关流体力学文献中均可找到。

$$\begin{aligned} \text{对 } z \text{ 轴} \quad & \rho \left(w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \\ & = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right). \quad (1-6) \end{aligned}$$

(式中符号见本书基本符号表。)

在上述运动方程中，等号左边表示惯性力，等号右边第一项表示重力，第二项表示压力（表面垂直力），第三项表示粘滞力（表面切向力）。

上述连续性方程及运动方程亦可用矢量形式表述^②，则式（1-3）可改写成：

$$\operatorname{div} \vec{w} = 0,$$

而式（1-4）~（1-6）可合并为一式：

$$\rho (\vec{w}, \operatorname{grad} \vec{w}) = \rho \vec{g} - \operatorname{grad} p + \mu \nabla^2 \vec{w}.$$

在上述四个方程式中， x 、 y 、 z 是自变量， w_x 、 w_y 、 w_z 及 p 是因变量（未知量），而 ρ 、 μ 、 g_x 、 g_y 、 g_z 是不变量（常数）。未知量共四个，方程式也是四个，故是一组完整方程式。

上述完整一组方程式全面地描述了表征粘性不可压缩流体稳定等温运动的各种量之间的依赖关系。但所描述的是普遍的、共同的上述现象（上述方程组既描述了海洋中水的流动，也描述了管道中油的流动等等），而不是具体某一特定现象（如在某一具体形状的通道内水的某一种流动等）。故求解上述一组方程式所得的，是对许多具有不同条件的上述流动都正确的通解。为求得某一特定的具体问题的特解，还必须给出称之为“单值条件”的附加条件。完整的一组方程

② 参见有关数学书籍或文献[1]中120~121页。

式和一些单值条件才描述了个别的、具体的某一特定现象。

单 值 条 件

单值条件能把服从于同一方程组的无数现象单一地划分出某一具体现象。它包括下列各项：

1. 几何条件——所有具体现象都发生在一定的几何空间内，因此，参与过程的物体几何形状和大小是应给出的单值条件。例如，流体在管内流动，应给出管径 d 及管长 l 的具体数值。

2. 物理条件——所有具体现象都是由具有一定的物理性质的介质参加进行的，因此，参与过程的介质物理性质也是单值条件。例如，前述的粘性不可压缩流体的等温运动，应给出介质密度 ρ 、粘度 μ 的具体数值。如流动的是不等温的可压缩的粘性流体，则应给出状态方程式及物理参数随温度变化的函数：

$$\frac{p}{\rho} = R(t + 273),$$

$$\mu = f_{\mu}(t),$$

$$\lambda = f_{\lambda}(t),$$

$$c_p = f_{c_p}(t),$$

式中 R ——气体常数；其他符号见本书基本符号表。

另外，由于密度 ρ 与重力加速度 g 有关，即 g 是伴随 ρ 出现的一个物理量，故重力加速度 g 也属于单值条件。

3. 边界条件——所有具体现象都必然受到与其直接相邻的周围情况的影响，因此，发生在边界的情况也是单值条件。例如，管道内流体的流动现象直接受进口、出口及壁面处流速的大小及其分布的影响，因此，应给出进口、出口处