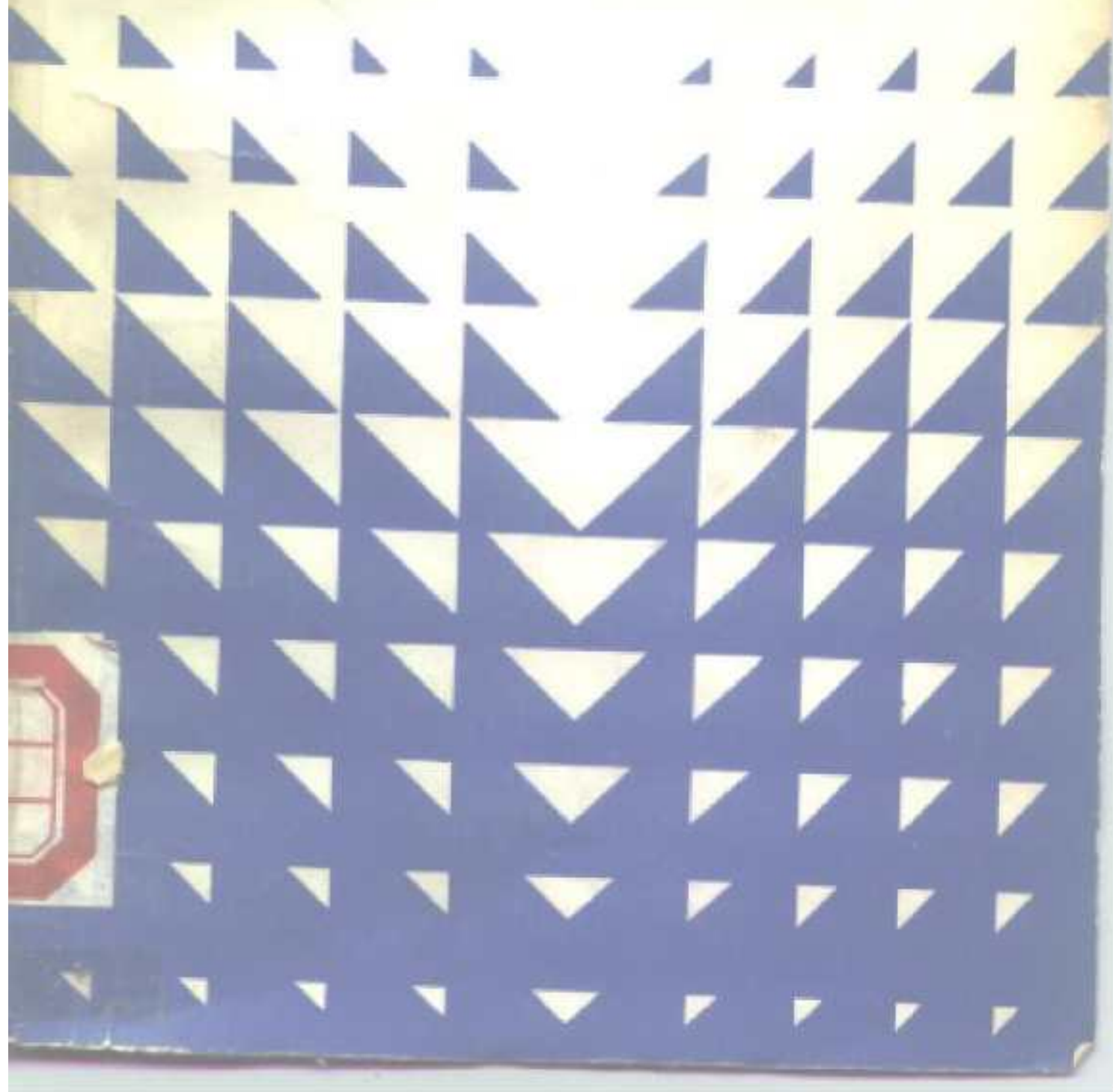


相似与模化

李之光 编著

(理论及应用)



50.359
249

相似与模化

(理论及应用)

李之光 编著



国防工业出版社

1110462

内 容 简 介

本书共两篇。第一篇论述相似与模化原理，包括：模型设计、模型实验应遵守的条件、模型实验数据或实际设备实验数据的综合整理等方面的理论基础。第二篇介绍模化方法与实验数据综合整理方法在各种问题上的实际应用，并讨论模化可靠性问题。

书中原理内容适用于各科技领域，应用实例以动力工程为主，也涉及到化工、机械、原子能、军工、空间技术等方面。

本书可供研究人员、工程技术人员以及大专院校师生参考使用。

相 似 与 模 化

(理论及应用)

李之光 编著

*

国防工业出版社 出版

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

*

850×1168¹/₃₂ 印张 9¹/₂ 241千字

1982年12月第一版 1982年12月第一次印刷 印数：0,001—3,800册

统一书号：15034·2384 定价：1.20元

前 言

以相似理论为基础的模化（物理模拟）方法，自从人类将它作为研究自然规律的一种手段以来，已有约半个世纪的历史。由于不少复杂现象靠其他方法研究难以奏效或无法进行，就使这种模化方法得到了很大发展。目前，它的应用范围仍在不断扩大。特别是，在原子能、空间等尖端科技领域，由于问题的复杂性或研究条件的限制，靠常规试验、数学模拟等办法有时难以进行，使模化方法成为不可缺少的研究手段。从复杂现象研究方法的方向上看，数学模拟必须与物理模拟互相配合、彼此验证，才会更见成效。基于以上情况，就必然提出从理论上系统地、深入地掌握这种研究方法的必要性，另外，也应全面了解应用模化方法时，可能遇到的各种实际问题。

自从《热力设备模型实验研究基础》一书于1973年出版后，不断收到各部门（动力、化工、铁路、原子能、军工等）所提出的理论或实用问题。作者在进一步了解国内外情况及组织人力对模化方法进行研究、试验的基础上，在本书中，对相似与模化的原理力求结合实际进行系统完整的论证，另外，介绍应用上可能遇到的各种问题，并指出处理办法，其次，对模化方法的可靠性进行必要的讨论，并提出一些验证方法。由于作者的水平有限，可能会出现不少缺点或错误，诚恳地希望同志们给予批评指正。

在完成本书最后一节“模化可靠性的旁证法”研究工作以及其他试验工作中，得到了哈尔滨工业大学热能工程教研室王铄庆、王怀彬、戴坚、孙洪宾、李清、阮根健、刘文铁等同志的大力支持与协作，在此深表谢意。

李之光

目 录

| | |
|-----------------------|----|
| 基本符号表 | 1 |
| 绪论 | 3 |
| 一、从数量上研究自然规律的方法 | 3 |
| 二、模化的分类 | 5 |
| 三、模化的发展简史 | 8 |
| 常用基本概念与定义 | 11 |

第一篇 模化的理论基础

| | |
|----------------------------------|-----|
| 第一章 相似原理 | 18 |
| § 1-1 相似的概念 | 18 |
| § 1-2 对现象的数学描述 | 22 |
| § 1-3 有因次量与无因次量 | 25 |
| § 1-4 相似性质 (相似第一定理) | 27 |
| § 1-5 模化法则 (相似第二定理) | 31 |
| § 1-6 自模性 | 37 |
| § 1-7 实验结果的推广 (相似第三定理) | 45 |
| § 1-8 异类相似 | 52 |
| 第二章 相似准则 | 54 |
| § 2-1 方程分析寻出相似准则的方法 | 54 |
| § 2-2 因次分析寻出相似准则的方法 | 61 |
| § 2-3 相似准则形式的改变 | 82 |
| § 2-4 相似准则形式的选择 | 87 |
| § 2-5 相似准则形式对模化条件与准则关系式的影响 | 89 |
| § 2-6 相似准则的物理意义 | 93 |
| 第三章 准则关系式 | 96 |
| § 3-1 实验数据的综合方法 | 96 |
| § 3-2 现象中物理量常量关系的求解方法 | 102 |

| | | |
|--------------------|----------------------------------|-----|
| 第四章 | 近似模化 | 109 |
| § 4-1 | 流体动力的近似模化 | 109 |
| § 4-2 | 对流换热的近似模化 | 112 |
| § 4-3 | 流体与结构相互作用的近似模化 | 114 |
| § 4-4 | 几何形状不完全相似的近似模化 | 118 |
| § 4-5 | 比例模化方法 | 119 |
| § 4-6 | 近似模化的一般原则 | 124 |
| 第二篇 模化的实际应用 | | |
| 第五章 | 单相流体动力的模化 | 126 |
| § 5-1 | 相似准则的导出 | 126 |
| § 5-2 | 模化条件 | 132 |
| § 5-3 | 模型分类 | 134 |
| § 5-4 | 模型设计 | 135 |
| § 5-5 | 模型实验结果整理 | 141 |
| § 5-6 | 多股气(液)流混合的模化 | 147 |
| § 5-7 | 热交换对流体动力的影响 | 150 |
| 第六章 | 不稳定导热的模化 | 158 |
| § 6-1 | 物体不稳定导热的模化 | 159 |
| § 6-2 | 冻结物质融化的模化 | 161 |
| 第七章 | 对流换热的模化 | 165 |
| § 7-1 | 相似准则的导出 | 165 |
| § 7-2 | 模化条件 | 167 |
| § 7-3 | 热流方向对换热的影响 | 168 |
| 第八章 | 气液两相介质流体动力实验数据的综合方法 | 171 |
| § 8-1 | 相似准则的导出 | 171 |
| § 8-2 | 气液两相介质在管内流动实验数据的综合方法 | 176 |
| § 8-3 | 浮泡流动实验数据的综合方法 | 181 |
| § 8-4 | 气液两相介质流体动力稳定性实验数据的综合方法 | 184 |
| § 8-5 | 液体雾化实验数据的综合方法 | 188 |
| 第九章 | 气体携带液滴的模化 | 191 |
| § 9-1 | 相似准则的导出 | 192 |

| | |
|----------------------------|-----|
| § 9-2 模化条件 | 200 |
| 第十章 固体微粒在气(液)流中运动的模化 | 203 |
| § 10-1 相似准则的导出 | 203 |
| § 10-2 模化条件 | 213 |
| 第十一章 固体物料流态化的模化 | 220 |
| § 11-1 相似准则的导出 | 221 |
| § 11-2 模化条件 | 225 |
| 第十二章 强度的模化 | 230 |
| § 12-1 弹性范围内的强度模化 | 230 |
| § 12-2 弹塑性范围内的强度模化 | 237 |
| § 12-3 强度模化应注意的问题 | 242 |
| 第十三章 模化的可靠性 | 245 |
| § 13-1 模化的可用范围 | 245 |
| § 13-2 模化可靠性的旁证法 | 259 |
| 附录 1 对相似原理的论证 | 272 |
| 附录 2 常用相似准则一览表 | 280 |
| 附录 3 常用物理特性表 | 281 |
| 附录 4 常用单位换算表 | 283 |
| 名词索引 | 286 |
| 参考文献 | 291 |

基本符号表

l, L ——长度, 米;

f ——面积, 米²;

V ——体积, 米³;

d, D ——直径, 米;

\bar{d} ——平均直径, 米;

r, R ——半径, 米;

τ ——时间, 时;

w ——速度, 米/时;

\bar{w} ——平均速度, 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;

Ω ——容积流量, 米³/时;

G ——重量流量, 公斤力/时;

P ——力, 公斤力;

W ——重量, 公斤力; 功, 公斤力·米;

N ——功率, 千瓦;

p ——压力, 公斤力/米²;

Δp ——压差, 公斤力/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, 公斤力·时²/米;
 γ ——重度 (比重), 公斤力/米³;
 $\rho = \gamma/g$ ——密度, 公斤力·时²/米⁴;
 v ——比容, 米³/公斤力;
 μ ——粘性系数, 粘度, 公斤力·时/米²;
 $\nu = \mu/\rho$ ——动粘性系数, 动粘度, 米²/时;
 μ ——浓度, 公斤力/公斤力;
 σ ——表面张力, 公斤力/米;
 t ——温度, 流体温度, °C;
 Δt ——温差, °C;
 $t_{\text{壁}}$ ——壁面温度, °C;
 Q ——热量, 千卡;
 q ——热流, 热负荷, 千卡/时;
 J ——热功当量, 公斤力·米/千卡;
 R ——气体常数, 公斤力·米/公斤力·°K;
 r ——相变潜热, 千卡/公斤力;
 λ ——导热系数, 千卡/米·时·°C; 摩擦阻力系数;
 α ——放热系数, 千卡/米²·时·°C;
 c ——比热, 千卡/公斤力·°C;
 c_p ——定压比热, 千卡/公斤力·°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;
 右下角“模”、“实”——模型、实物 (原型)。

绪 论

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于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。

一、从数量上研究自然规律的方法

在古代，人们以初等数学（三角、代数、几何）为工具来解决生产中所遇到的一些数量问题以及从量的方面来研究自然界的规律性，如计算土地面积、求堤坝土方的体积、确定建筑物的高度、求圆周的长度或圆的面积、研究固体受力作用的一些简单运动规律等等。据历史记载，利用初等数学已有两三千年的历史了⁽¹⁾。

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，只能研究稳定状态。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、科学实验的需要，大约在二百多年前出现了高等数学（微分、积分、微分方程等）。“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，并且也表明过程：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

● 恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社1971年版，47页。

● 恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社1971年版，249页。

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。

自然界的现象是错综复杂的，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，这是因为有时难以列出微分方程式，有时即使列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表面规律性关系，难以抓住现象的内在本质。

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。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化（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方法。

所谓模化方法，是指不直接研究自然现象或过程的本身，而是用与这些自然现象或过程相似的模型来进行研究的一种方法。严格一些讲，模化方法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。可见，模化方法是理论与实践密切结合的科学研究方法，此方法是以唯物论的反映论为依据的，是一种在实验室范围内的小型实践。这种模化方法，在近代科学研究、工程设计以及确定合理运行方式等工作中，起着重要的作用。多年实践表明，模化方法是建造大型复杂设备与结构（船舶、飞机、宇宙飞船、水力机械、热力设备、化工设备、堤坝、桥梁等）及探明复杂物理过程及物理-化学过程内部规律时广为应用的一种可行手段；利用模化方法可以用较小

的人力、物力和时间来取得对实物工作规律性的了解。

以热力设备（锅炉、蒸发器、热交换器、除尘设备、燃烧设备等）为例，有关流体动力、传热、气液及气固两相介质流动、干净蒸汽的获得、部件合理结构的选择等等方面所探明的规律及所提出的措施，大部分都是靠模化方法取得的。

大型设备的建造数量有限（非成批生产），而且造价高、建造时间长，因此，设计务求准确可靠。一般都要进行多种方案比较，并应预知所设计的产品在投入运行后的工作性能。目前，由于模化理论、模化技术水平的提高，使模化结果愈益准确，模化所需时间也有所缩短，因而，模化方法已成为方案比较、合理设计工作中的一个重要组成部分。

以相似理论为基础的模化原理，在实际设备（非模化设备）中，研究复杂现象时，也经常有所应用，因为研究出的结果，仅局限于应用在所研究的设备上是不够的，而也应能够推广到其他相似现象中去。故在实际设备中研究复杂现象时，一般也是先利用方程分析或因次分析方法，对所研究的现象进行必要的理论分析，并导出相似准则，试验内容以建立能够推广的准则关系式为准。

二、模化的分类

模化，广义地讲，是对真实事物（实物）的形态、工作规律或信息传递规律在特定的（一般是简化的）条件下的一种相似再现。模化一般都在模型上进行。

模型是指与实物的形态、工作规律或信息传递规律相似的物体或设备（试验台或电子计算机）。

模型可分为以下各类：

1. 参观用模型——根据实物复制成的参观、教学用的模型。一般仅保持外形、活动状态的相似。可用金属、塑料、石膏、木材等材料制成。

2. 定性分析用的简易模型——根据设想制成的分析、讨论用的模型。它能明显地、直观地体现设想，能有效地帮助构思。

一般仅保持外形、活动状态的相似。此种简易模型应很容易地改变方案，一般用木材、硬纸，甚至泥巴等材料制成。我国第一台一万二千吨水压机在设计初始阶段就曾用粘土泥巴制成简易模型帮助构思，供分析、讨论使用。

3. 定量研究用的模型——根据实物或设想制成的研究事物内部工作规律用的模型。这类模型又可分为：

(1) 物理模型——保持工作规律相似的模型。模型与原型区别，仅在于物理量大小比例不同，而现象的物理本质不变，故也可称为保持同一物理本质的模型。

模型与原型的物理特性一般是同类的，也可以是异类的，如用电场模拟温度场、浓度场等。但它们都应被同样的微分方程式所描述。

物理模型是研究某种现象，如流动、传热等现象所用的模型（试验台）。

(2) 数学模型——保持信息传递规律相似的模型。模型与原型所进行的物理过程本质不同，但信息传递按同一微分方程式进行。

数学模型只有当建立了微分方程式时才能实现，而物理模型在只知道参与的物理量时也能实现。

数学模型可以很方便地研究各物理量变化对工作过程的影响，故数学模型是着重研究某系统在改变输入信息后，工作过程变化的模型——一般是电子计算机。

随着电子计算机的发展，使数学模化不断扩大应用范围，但物理模化仍具有很广泛的用途。至今在模型研究范围内，绝大部分研究成果仍是靠物理模化来实现的。即使相当尖端的近代科技成就，例如阿波罗登月飞行中有关指令仓溅落海面时的壳体可靠性、宇航员承受减速度的大小、运载火箭起飞前的震动以及登月仓的功效等仍要依靠建造物理模型加以研究⁽¹⁰⁸⁾。由于物理模化能最大限度地反映出物理本质，并且具有直观性强的特点，因而，

即使应用数学模化时，一般也要同时进行物理模化，二者相辅相成。对于复杂的现象，物理模化与数学模化配合起来会更见成效。即把物理模化结果与数学模化结果进行对照，使数学模型渐趋完善，然后再利用被物理模化验证过的数学模型，藉电子计算机进行分析研究实物中的现象，这是今后研究方法的必然方向。

本书所涉及的内容为研究客观现象，如流体动力、换热、气液混合、结构强度等等现象的物理模化。它可应用于以下几个大的方面：

1. 在根据相似原理建立起的与实物保持相似的模型上，通过试验求出相似准则之间的函数关系，此函数关系适用于一切相似现象，故可推广到实物上去；

2. 在实物上通过冷态试验，求出相似准则之间的函数关系，并推广到实际工作状态（热态）上去；

3. 在实物上通过工作状态试验，求出相似准则之间的函数关系，并推广到其他相似条件下的实物上去。

模化方法的具体应用范围如下：

1. 用少量试验（模型试验、实物试验）配合方程分析或因次分析，来获得全面参量关系，可减少很多试验工作量。

2. 在实物设计阶段，通过模型试验，来了解实物的未来性能，对新产品的选型很有益处。

3. 对已有贵重设备的极限性能的了解。由于对设备极限性能的了解，往往要伴随设备的毁坏，故模型试验最可行。例如，已有油船与海上浮动物碰撞后的泄漏可能性、已有坦克对新式武器危害的防止等，可用模型研究。

4. 探索未研究过的现象的基本规律。由于需要作许多试验加以逐步摸索，故用模化方法最灵活、最经济。

5. 其他研究方法不能实现时可采用模化方法。例如，空间技术中，液体的晃动现象，在极低的重力场条件下，表面张力已显得十分重要。如在卫星或空间科学站中研究，其费用将是惊人

的；核爆炸后果的研究，并非随时均可进行。这时，采用模化方法势在必行。

三、模化的发展简史

我们伟大的祖国已有五千年的历史。在这漫长的历史中，我国劳动人民为了农业生产、工业生产以及抵御外患的需要，有着许多发明创造。在发明创造之前，一般总要提出设想，之后，常常利用缩小的（或放大的）及简化的实物（用竹片、木材等材料制成）试试看，如可行，再施工制造，使设想成为现实。有时，也有利用与实物大体相似的模型进行研究工作的。这就是古代通过制作简单模型，所从事的原始模化工作。

据历史记载，约一千九百年前，东汉汉安帝时期，太史令张衡（公元89~139年）造浑天仪时，曾用竹篾（竹皮）做模型，叫做“小浑”，用以代替青铜浑仪研究天象^{〔2〕〔3〕}。

唐玄宗开元九年，释一行和梁令瓚共同制造用以观测日月运行，并测量星宿经纬度的黄道游仪时，是先以木料试制成模型，称为“游仪木样”，证明可行后，再用铜铁铸成^{〔4〕}。

约一千年前，北宋时代，善于营造之法的我国杰出古代木结构专家喻皓在主持建造一座一十三层大型宝塔之前，画家郭宗恕先造模型，叫做“小样”，研究模型后，发现以“末底一级折而计之，至上层余一尺五寸，收杀不得”。喻皓“数夕不寐，以尺较之，果如其言”^{〔5〕}，于是依照修改的模型施工，收到了良好的结果。

明、清时期的大型建筑，如北京城的建筑，都是先造模型而后施工，此种模型一直保留至今。在水利设备的建造过程中，也是先造模型，可行之后再施工。

热力设备在历史上出现较晚。清朝、鸦片战争前后，福建人丁拱辰和一些工人曾造过配备有锅炉及蒸汽机的机车及轮船模型：“曾召良匠督配尺寸造小火轮车一乘，周身釜灶皆铜，长一尺九寸阔六寸，载物三十余觔”、“曾就火轮车机械，造一小火轮船，长四尺二寸阔一尺一寸，放入内河驶之，其行颇疾，惟质

小气薄不能远行。”⁽⁶⁾有关火轮船小样（模型）中锅炉及蒸汽机的图说在文献〔7〕中也有详细记载。

上述模型，一般是仅保持几何相似的简易模型。当时，还谈不上按相似原理来造模型。

过去，我国长期处于封建社会。封建社会统治者对科学技术一向不够重视，把发明创造诬蔑为“奇技淫巧”，甚至狂叫，作“奇技奇器以疑众，杀”⁽⁸⁾。因而，我国远较外国为早的光辉科技工作未能也无法继续发展下去。

欧州在文艺复兴以后，尤其在工业革命以后，科技工作得到大步前进。十七世纪，伽利略看到威尼斯人建造一艘比一般船的尺寸较大的帆桨大船，其支柱按几何相似的法则来计算，就显得不坚固时，曾指出，这就是一门新科学●的萌芽时期。之后，牛顿提出了关于机械运动相似概念的科学表述。牛顿去世后，相似的概念长期处于停滞状态。十九世纪，相似理论及以它为基础的模化研究工作，才广泛开展起来⁽⁹⁾。

英国科学家李约瑟正确估价了欧州科学发展与中国古代科学的关系，他指出，欧州科学的发展是建立在中国古代科学基础之上的⁽¹⁰⁾。

近百年来，英、美、俄、德、法等国家科技工作者在相似理论及模化研究工作中，进行了大量工作。例如，约一百年前，美国拔伯葛公司已开始应用模型来研究气流的流动阻力，并决定所需功率的大小；约四十年前，利用二维空气模型来研究炉膛形状对流动情况的影响⁽¹¹⁾。约三十年前，美国利用模型曾系统地研究工业炉的流体动力情况、温度分布情况等⁽¹²⁾。苏联在四、五十年前，已广泛利用模型来研究流体动力及传热问题⁽¹³⁾。目前，各先进技术国家都广泛采用模型研究方法，有的厂家把模化工作列为设计工作前必须进行的一项例行工作⁽¹⁴⁾。

我国解放前陷于半封建半殖民地社会，一切工业部门都受控

● 指相似理论。

于帝国主义国家，仅有的一些工厂以装配、修理为主，没有独立发展科技工作的条件。各项科技工作，一般都是解放后，发展起来的。相似理论及以它为基础的模型研究工作，也是在全国解放后，才在我国科研部门、制造厂产品试验研究单位以及高等院校有关实验室中得到了普遍的应用。目前，它已应用于我国各技术领域里。

近些年来，在许多国家里模化方法已伸展到更多的工程与研究领域。从民用到军事、从一般工程技术到尖端科学研究，都在广泛应用，例如：

在物体运动方面，汽车在碰撞事故中的运动规迹、由航空母舰上飞机的飞出、巨型浸没油罐向海底的沉没过程、阿波罗登月仓如落到月球倾斜表面上以及指令仓如跌落到地球陆地上的运动规律等等问题；

动载荷对结构的作用方面，如核反应堆内部爆炸引起压力壳的应变与震动频率、阿波罗指令仓溅落海面对其蜂巢结构外壳强度与刚度的影响以及减速度的大小、火箭发射架的震动、原子爆炸对地面设施与地下掩蔽物的作用等等问题；

在穿透力学方面，子弹穿入钢甲的过程、陨石对宇宙飞船外壳的碰撞、岩石对卡车板面的冲击后果等问题；

在流体运动方面，液体在容器中的晃动、海洋表面上油膜的扩散、轴承中润滑油的流动规律等问题；

在土壤动力学方面，火炮基础的设计、重型推土机或履带式拖拉机对土壤的作用、爆破挖掘、火箭排气对地面的冲蚀作用等问题；

在热力学方面，气温对铁路永冻路基的作用、拥挤城市建筑物火灾的传播规律、铁轨的受热弯曲、地球卫星或空间科学站内部温度的变化与调节等问题。

随着人类社会的发展，会不断出现更多的复杂现象有待于研究，预计模化方法以及模化方法配合数学模拟还会向更宽广、更深入的科技领域发展。