

模型实验的 理论和应用

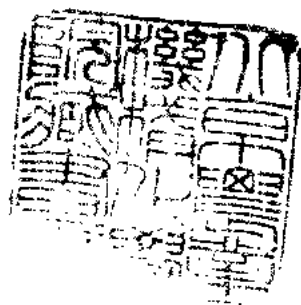
〔日〕江守一郎 等著

科学出版社

模型实验的理论和应用

〔日〕江守一郎 等著

郭廷玮 李安定 译



科学出版社

1984

内 容 简 介

本书论述模型实验的相似理论基础,以及模型的设计、部分相似的模拟等问题,书中列出了范围很广的各种相似参数。还介绍了模型实验在十三个领域中的应用:飞机、船舶、宇宙飞船、车辆机械、结构体、热机与流体机械、加工和处理、水的流动和沉淀、生物科学、地球科学、火焰和燃烧、电磁、音响。

本书可供力学工作者、工程技术人员、大学有关专业师生参考。

江守一郎 D. J. シューリング

模型実験の理論と応用

技報堂 1973

模型实验的理论和应用

〔日〕江守一郎 等著

郭廷玮 李安定 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984年8月第一版 开本: 787×1092 1/32

1984年8月第一次印刷 印张: 9 5/8

印数: 0001—6,100 字数: 217,000

统一书号: 13031 · 2047

本社书号: 3641 · 13—2

定 价: 1.50 元

译 序

本书是以江守一郎在美国加利福尼亚大学讲授模型实验时的讲稿为基础编写的。作者在美国从事模型实验研究和教学工作达二十年之久，对模型实验的理论和应用均有独特的见解，他们所倡导的“选定物理法则方式”不仅能够简单而可靠地求出相似法则，而且对人们理解所研究现象的物理本质也给予有力启示。

本书对模型实验的基本理论作了扼要而深入的论述，文字简练，深入浅出，条理清楚。列举了大量的深入到各个领域中的应用实例，并对每个应用实例均用“选定物理法则方式”详加阐明，是本书的最大特点，这对于读者掌握和运用模型实验的基本理论很有帮助，值得广大科技工作者及有关专业高等学校师生一读。

译者是按照1973年5月“技報堂”出版的日文版本“模型実験の理論と応用”翻译的，并参照作者1972年在美国加利福尼亚大学的英文讲稿进行了核对，尽管如此，由于译者水平有限，加之时间匆促，错误和疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

译者

1978年1月

原 序

由于电子计算机的发展, 物理现象的分析方法有了飞跃的进步, 验证随之而发展的数学模型所必要的实验也更加复杂而多样化了。由于某些原因, 用实物进行实验有时存在困难, 因此常常采用相似模型。例如, 众所周知, 象飞机和船舶之类, 用实物进行实验需要巨大的费用; 象宇宙飞船那样, 在地球上实现无重力场是很困难的; 象设计中的桥梁那样, 在实物尚未存在的情况下进行实物实验是不可能的, 等等, 对于这些情况, 都得用相似模型进行实验。也就是, 不用实物进行实验, 而用将长度、时间、力、温度及电流放大或缩小的相似模型来进行实验, 再把实验结果推广到原来的现象中去。如果这种代用实验成功, 则至少有如下一些优点。

(1) 可以使实验室难以处理的现象变成容易处理的形式;

(2) 把与现象有关的变量用适当的方法组合起来, 可以使实验简化;

(3) 促使人们从物理角度来理解现象。

第三个优点虽然非常重要, 但是, 人们对它还没有较深认识, 其原因在于过去一直用 π 定理求相似法则, 使过程过于形式化了。

一提到相似模型, 就往往被理解为几何相似, 然而, 本书中所讲的相似模型不仅与实物(即原型)是几何相似的, 而且连时间、速度、力、频率、温度、电流、电压等等都必须相似。也就是说, 模型现象的各个变量与所对应的原型现象中的各个

变量都必须相似的,显然,这个要求非常严格。

本书作者在很久以前就对相似模型实验有兴趣。要在地球重力下进行测定月球表面土质的实验,必须找到一个适当的模型实验,为了解决这个问题,我们曾于1962年前后在通用电机公司研究所一同进行了研究。从那以后,尽管我们的工作地点不同,仍然相互联系,搜集有关相似模型的文献。根据这些文献以及作者所进行的模型实验的经验,找到了求相似法则,亦即求有关模型的设计、制作和实验的规则的新方法。以前广泛采用的方法有两种,一种是所谓参数方式,即列出支配现象的参数,再把量纲分析应用于这些参数,找出相似法则;另一种方式是根据支配现象的微分方程求出无量纲数,然后找出相似法则。本书提倡的方式,是首先选定支配现象的物理法则,然后根据这些法则直接导出相似法则。这种方法比以前的方法简单得多,而且,作者深信,用这种方法很容易理解现象的物理意义。另外,根据用选定物理法则方式进行相似模型实验,还能解决如何放宽不相容的相似法则(即不可能实现的模型设计的规则)的问题,这是模型实验中最困难的问题之一。

本书是以江守一郎在美国加利福尼亚大学(ULCA)讲授模型实验时的讲稿为基础编写的,可作为理工科大学三、四年级学生或研究生的相似模型以及工程实验的基本理论的教科书使用。内容分为两大部分:第一部分介绍了相似模型的原理;第二部分介绍了实际应用。第一部分的第一章和第二章介绍了模型实验的一般原理;第三章讲述了用选定物理法则方式推导相似法则的方法以及模型实验的设计方法;第四章讲述了放宽实现困难的相似法则的方法;第五章从阿基米德数到 y 数按日文字母五十音序列出了著名的无量纲数,并阐明了它们的物理意义。

一般地说,在工程中要同时考虑科学性和艺术性,在模型实验中更是这样。因此,为正确理解相似法则的求法,就应用实例来考察是最简便的方法,这就和学习语言学一样,只记住文法还不能写出好的文章。只从推理的角度理解了相似法则的推导方法,就来设计相似模型往往要遇到困难。考虑到这一点,作者搜集了大约 600 个应用实例,从中选出 30 个左右,把它们分成 13 个领域在第二部分中讲述。应用实例的选择标准是,所选的相似法则是已经用实验证实了的,而且多数是最近十年内发表的。对于这些应用实例,都用作者提倡的选定物理法则方式把相似法则的求法全部加以改写,如在此过程中出现了误解文献的错误,责任当然由作者来负。在应用实例的末尾罗列的参考文献都是与应用实例类似的文献,或者是为了理解应用实例曾参考过的文献,也许不是有关领域的重要文献。因为最初的原稿是以美国加利福尼亚大学学生为对象的,所以对日文文献没有充分的调查,作者深表歉意。再重新调查一次日文文献需要相当多的时间,所以这次仍旧使用从前的原稿。由于作者学识浅薄,难免有不少疏漏之处,希望读者批评指正。(下略)

江守一郎

1973 年于武藏野

目 录

第一部分 基础理论

第一章 何谓模型实验	1
§ 1.1 相似模型	1
§ 1.2 用模型进行验证实验和生产实验	5
§ 1.3 自模拟	6
§ 1.4 模型实验的应用范围	7
第二章 相似原理	19
§ 2.1 基本相似比和诱导相似比	21
§ 2.2 π 数	23
第三章 相似模型的设计(相似法则的推导方法)	24
§ 3.1 确定物理法则设计模型	24
§ 3.1.1 相似法则	27
§ 3.1.2 代表值	29
§ 3.1.3 主 π 数	30
§ 3.1.4 实验结果的图式表示	31
§ 3.2 微分方程方式与参数方式	32
第四章 相似法则的放宽	38
§ 4.1 次要作用的物理法则的判别	39
§ 4.2 只考虑特殊现象的相似	44
§ 4.3 分割相似	44
§ 4.3.1 按时间分割	45
§ 4.3.2 按空间分割	45
§ 4.3.3 按指向分割	48
§ 4.4 集积效果的相似	50
§ 4.4.1 时间的集积效果	50

§ 4.4.2 空间的集积效果	51
§ 4.5 解析知识的利用	51
§ 4.6 材料的物理性质与相似法则的放宽	55
§ 4.6.1 可以忽视的物理性质	55
§ 4.6.2 密度的模拟	56
§ 4.6.3 相同材料的使用	57
第五章 古典的 π 数	59
§ 5.1 基本物理法则	59
§ 5.2 从阿基米德数到 y 数	67
第一部分的参考文献	107

第二部分 模型实验的应用

第六章 飞机	113
§ 6.1 XC-142A 型飞机的风洞实验	113
§ 6.2 直升飞机的运动	118
§ 6.3 X-15 型超音速飞机的底部压力	123
第七章 船舶	129
§ 7.1 船的推进阻力	129
§ 7.2 破冰船的性能	136
第八章 宇宙飞船	141
§ 8.1 阿波罗指挥船的飞行	141
§ 8.2 阿波罗指挥船再入大气层	144
§ 8.3 土星 SA-1 型火箭的弯曲振动	148
§ 8.4 火箭燃料贮罐的压力上升	152
第九章 车辆机械	159
§ 9.1 碰撞后汽车的轨迹	159
§ 9.2 轮胎的静应变	165
第十章 结构体	170
§ 10.1 吊桥的纵振动	170
§ 10.2 钢筋混凝土结构的断裂试验	174

§ 10.3	汽车与路标及路灯柱的碰撞	179
第十一章	热机与流体机械	187
§ 11.1	热管的定常性能	187
§ 11.2	液压变矩器的特性	192
§ 11.3	内燃机的容积效率	197
第十二章	加工和处理	203
§ 12.1	土壤的变形和处理	203
§ 12.2	金属板的爆炸成形	213
第十三章	水的流动和沉淀	219
§ 13.1	水的浸透	219
§ 13.2	净化槽的沉淀	223
§ 13.3	流动引起堆积物的移动	227
第十四章	生物学	233
§ 14.1	引起脑震荡的危险角加速度	233
§ 14.2	哺乳动物的体格	235
第十五章	地球科学	242
§ 15.1	近地表的空气流动	242
§ 15.2	堆积在地下的盐的隆起	248
第十六章	火焰和燃烧	254
§ 16.1	火焰的高度	254
§ 16.2	除去滑行跑道上的雾	258
第十七章	电磁	262
§ 17.1	电炉内熔融金属的运动	262
§ 17.2	弱导电性流体的不稳定汽动	267
第十八章	音响	273
§ 18.1	用吸音材料吸音	273
§ 18.2	音乐厅的音响效果	277
附录		285
解答		287

第一部分 基础理论

当研究机械的性能或自然现象的机理时，最可靠的方法是对实物进行试验和观察。然而，由于某些缘故，在实物难于处置的情况下，我们就想使用模型代替实物来试试。玩具等也许是模型的恰当的例子。孩子们要自己开汽车玩耍，女孩子还想让自己的娃娃穿衣服，但那都是办不到的事情。因此，他们不得已而使用模型作为代用品，也即拿玩具来满足自己的要求。可是用模型所代用的实物的性能越复杂，模型也就越复杂。当模型与实物一样复杂时，使用模型也便失去其意义。那么，如何设计制作尽量简单的模型，按照怎样的规律进行实验才能够达到代替实物的目的呢？以下我们将依次说明这些问题。

第一章 何谓模型实验

§ 1.1 相似模型

模型这个名词的含义很广，我们可以作种种的设想。玩具店里的塑料模型、精巧的火车模型等，已能够满足我们童年时期的理想了。在城市的规划中，为了得到建成时的立体感，时常使用模型，这一点恐怕是众所周知的。在用于建筑物室内设计的模型中，当然要使家具、窗户、窗帘、墙壁等都和实物相似，为了使自然光线再现还要制做人工天空来帮助设计。可是，这些模型，不论它们多么逼真，用模型所得的实验结果的

解释只是主观的判断,缺乏与原现象的科学关联,也就是说,根据可以行驶的玩具火车,即便能从概念上抓住实际火车行驶的状况,而为了用模型测定实际的火车行驶的稳定性,还不能不再动点脑筋。

本书中所谓的模型,是指这样意义的模型,也就是将某种物理现象的长度、时间、力、速度等缩小或扩大来进行实验的装置,它和不满足这种条件的模型,科学意义大不一样。因此,本书中特地将所谓的模型称之为相似模型。在用相似模型所作的实验中,必须能够再现原来的现象的本质。也就是说,要用比较容易,比较迅速,比较方便的方法再现实际发生的现象。所谓相似,我们常常认为是长度的相似,即几何相似,然而在相似模型中,所有的物理量,例如时间、力、密度、粘性等都必须相似。若假定能用相似模型研究原来的物理现象,那末从各种意义上讲真是再好不过了。例如,象很长的大桥的振动那样,原型过大,难于进行实验,或者象宇宙飞船那样,难于在实验室使它再现,在这种情况下,用相似模型就容易进行模拟实验。其它例子,还有象山林火灾那样,实物的试验是危险的,象地壳中水的渗透那样,现象变化非常缓慢的情况。采用相似模型,就能观察不能对实物进行实验的现象,或使实验变得非常容易进行。因此,技术人员和科学工作者很早以前就尝试过模型试验了。早在1829年,法国的科学家柯西(Cauchy)就用模型作过梁和板的振动实验。弗鲁德(Froude)于1869年就已经制作了船的模型进行实验。雷诺(Reynold)于1883年用模型对管中的流动进行了实验。此后不久,有名的赖特(Wright)兄弟建造最初的风洞,进行了机翼的实验。从此风洞就成为发展飞机的必不可少的工具,这是众所周知的。

可是,并不能认为所有的物理现象都适合做模型实验,需

要人来判断的现象,生物学的、医学的或是生物化学的现象,是不适合做模型实验的;另外,必须用统计学方法处理的现象,还有不能再现的现象,不能定量研究的现象,或者即使能定量化,但与那些变数相关的物理法则尚且不知的现象,也是不适合做模型实验的。能否模型化,取决于这些定量化的变数之间是否存在因果关系。但是,如果知道存在因果关系,也就足够了,至于函数关系本身也可以不知道。例如,准确地推测今天的天气也许是不可能的,然而我们可以相信,今天的天气是昨天的温度、风速、气压、湿度等的函数¹⁾。又如地震,我们居住的环境的变化,或是生物的进化等,要在不久的将来定量地加以说明也许是困难的。因此,虽然这些现象乍一看是非常复杂的,然而一旦能够定量化,就全都是能进行模型实验的现象。总之,将现象定量化之后,由于我们不能用数学方法求出其关系式,所以制作模型进行实验,从而给出正确的解答。

那末,归纳一下以上所讲的内容,在原来的现象(以下也称为原型)过大,变化过程太慢,或是实验的费用昂贵,因而难于处理的情况下,可以用相似模型作为容易处理的代用品进行实验。然而,如果对原来的现象不具备某种程度的知识,用相似模型实验就不能成功。总之,对任何物理现象,如果不具备某种程度的预备知识,就不知道现象的内在机理,则无论实验也罢,还是解析也罢,都不能给出正确解答。为了用相似模型进行实验,也就是说为了知道相似模型究竟能否作为原型的代用品来使用,如前所述,必须预先知道什么样的物理法则

1) 麦克斯·普朗克(Max Planck)在他的著作("The concept of causality in physics", *Scientific Autobiography and Other Papers*, F. Gaynor, transl., Williams & Norgate Ltd., London, 1950)中指出:"为了预测明天的天气,必须详细知道有关天气的所有物理现象的细节及其相互关系。当我们一碰上这样的难题,就往往假想,何处有通晓一切的万能学者。其它的物理现象也可以说是同样的概念。"

支配着原来的现象。在相似模型实验中,弄清楚这些物理法则是最困难的,同时也是最有趣味的。然而,正如后面将要讲到的那样,仅仅列举支配现象的物理法则,还不能立刻用相似模型进行实验。在多数情况下,如果不在某种程度上知道其物理法则的作用机理,模型设计就不可能。但是,关于机理的知识,也没有必要完善到能用微分方程来表示的程度。当然,如果有那么高水平的知识,在计算机发达的今天,还是用解析方法找到解答更为有利的。因此,相似模型在仅有较低程度的知识的情况下才是有力的。

现在,我们来研究一下相似模型的优点和缺点。如前所述,进行模型实验时,支配模型的物理法则与支配原型的物理法则必须相同,其作用机理也必须相同。因此,应当首先对原型某种程度的理解。不过,仅仅列举许多的物理法则,可能对有关模型的材料提出许多不适当的要求,这样就很有可能导致不能做模型实验的结果。例如,如果过分要求用动粘性系数小的流体作为模型材料,那末这样的材料在自然界中是不存在的,而人工制造也很困难。既然如此,为了能够进行模型实验,就必须用某种方法减少所列举的物理法则的数目。这一点既是模型实验的短处,又是模型实验的长处。为此,我们必须找出支配原型的本质的物理法则,从而促进了我们对现象本质的理解。也就是说,为了着手进行模型实验,即使是低维问题,也必须从准确地理解原来的现象开始。对此,数学模型如何呢?由于现代的计算机容量非常之大,所以即便是极其复杂的数学模型也能充分加以分析。可是,使用复杂的数学模型的结果即便与实验一致,也不能说那个数学模型一定是正确的。简单说来,如果用计算机适当地调整数学模型的100个参数的话,就能够在100个点上与实验结果一致。这就是说,数学模型与计算机配合,对于高维问题的分析是有力的,

然而在低维问题中却存在着产生误解的危险性。这样来研究问题时,把模型实验和解析两种方法适当地配合使用,可以说是工程技术人员最理想的武器。

§ 1.2 用模型进行验证实验和生产实验

相似模型的目的,是要用模型实验的办法代替原型实验。而在这之前必须预先知道所选的模型是否能作代用品使用。为了弄清这一点,除了检验模型实验的结果是否与原型现象相似之外,别无它法。如若不相似,或是由于错误地解释原现象,而忽略了重要物理法则,或是本来不是支配原现象的物理法则在模型实验中倒起了支配的作用,此外恐怕还有各种各样的缘故。总之不改正那些不完备之处,不证实模型现象与原现象相似,就不能用模型作为原型的代用品。以验证与原现象是否相似为目的所进行的模型实验称为验证实验(pilot experiments),而在证实相似的基础上将模型作为原型的代用品所进行的实验称为生产实验(production experiments)。我们的最终目的是生产实验。由于验证实验有时需要非常的努力,而且需要很多费用,所以往往不常使用。然而必须指出,这是最重要的实验。例如,在设计长吊桥时,风引起的振动值得研究,现在我们就来考虑可用模型实验取得其数据的情况。进行模型实验时,要取已有的相似的桥的振动数据,作那个桥的模型进行实验,检验其结果是否与原型相似。纠正模型直到相似为止,尔后用相同的方法制作已设计好的桥的模型,进行生产实验,发现问题,从而订正设计。

在实际中,验证实验和生产实验不一定都能这样区别。虽然说是生产实验,但也不能说已验证完了。就前面讲过的桥的振动而言,并不能认为新的桥与原有的桥全部相同,风的接触状态也许不一样。但是,如果起支配作用的物理法则及其机

理和已验证的现象相同,就可以认为生产实验能够放心进行。因此,在生产实验中,必须特别注意,不得超出所验证的范围。例如,将在层流区域里验证的模型,原封不动使用在紊流区域是危险的。所以应当特别小心,不要盲目地相信验证实验。

在实际的模型实验中,常常得不到原型数据,因此也有不能进行验证实验的情况。例如,最初设计宇宙飞船的模型实验时,原型的数据根本没有。另外,为了得到人类的容许值,用动物作“模型实验”,这种情况下,即便存在“原型”,也很难找到希望提供原型数据的动物。在这样不能进行验证实验的情况下,研究出来了用补充原型数据的各种方法。有一种方法是,制造两个以上大小不同的模型,验证各自的实验结果是否相似。如果它们是相似的,而且其中的一个模型的大小与原型差不多,就大体上可以认为是被验证了的模型。此外,常用的方法是比较模型实验结果与原现象的解析结果。用这种方法时必须特别注意的是,即使解析结果与实验结果非常相近,两者也可能同样地误解了原现象。作者知道的极端的例子,是刊登在某学会志上的研究报告:用模型实验研究在空心球壳中用弹簧和减震器吊起来的刚性球当外壳受到冲击时球的过渡振动。解析是用计算机进行的,得出了很好的结果,与实验结果也很一致。研究者认为,数学模型和模型实验相当于汽车碰撞时乘员的头碰到风档时脑子的运动,这似乎有点勉强。用上还高维分析也许是正确的,然而用低维分析就需要慎重,这就是其一例。数学模型越是复杂,我们往往有过于相信其正确的倾向。无论解析,还是模型实验,正确与否,可以说只能根据与原型现象的比较来判断,这一点必须充分注意。

§ 1.3 自模拟

把原型本身当作模型的情况称为自模拟。这种情况下,

模型的各部分尺寸和材料与原型的尺寸和材料一致,作模拟实验的方法,即解释现象或确认起支配作用的物理法则等,与一般的模型实验完全没有区别。例如,对某一机械以在较低转数下进行的实验代替在使用转数下的特性试验,从其实验结果来得到在使用转数下的特性,这就是自模拟,可以改变除尺寸和材料的物理性质以外的全部变数进行实验,也正象第二部分中所举的例子那样,特别在传热中,自模拟起着重要的作用。

§ 1.4 模型实验的应用范围

一说到相似模型,也许有人会想起管流,还有人会想起飞机的风洞实验。其实,只要知道原现象能数量化,且在数量化的变数之间存在因果关系,就有模型化的可能性,所以不难想象,相似模型会有相当广泛的应用领域。

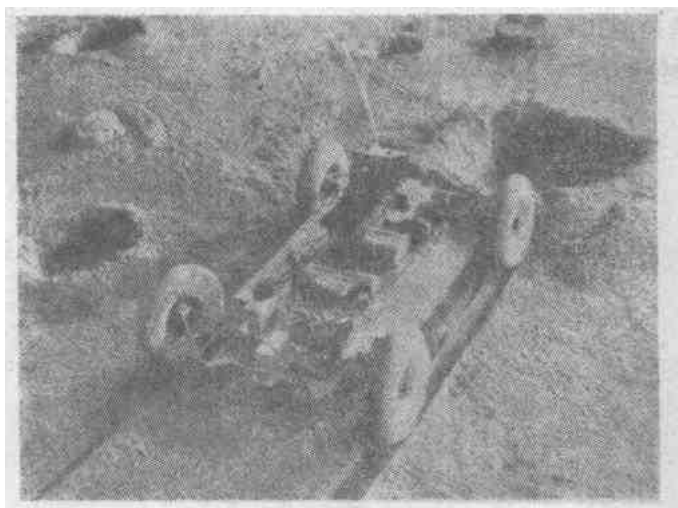


图 1.1 月球表面探索车模型

(比例尺 1:6)

(根据美国密西西比州维克斯堡美国陆军工兵航路试验站提供)