

相似理论 20 世纪的演进和 21 世纪的展望

左东启

(河海大学 南京 210098)

摘要 对相似理论的发展以 17 世纪到 19 世纪为先驱时期,以 20 世纪的前 70 年为大发展提高和广泛应用时期,以 20 世纪末和 21 世纪初为开拓更新时期而进行历史的概括、现状的分析和前景的预测。对“相似”、“模型”、“模拟”、“仿真”等概念进行比较、阐明和厘定,对当前的主要研究问题和发展方向提出意见和建议。

关键词 相似理论 模型试验 单值条件 模拟 适定方程 仿真 计算机试验 合交模型

1 相似概念的历史演变

整个 20 世纪是“相似”这一普通的概念和语词逐步成为专门特殊的学科的过程,其理论和应用日益发展扩大,进入各个领域,由广而专,又由专而更广。

正在 19 与 20 世纪之交,对与相似有关的理论在物理学界展开了重要的讨论,同时开始应用于工程领域。30 年代形成了各种理论体系和各种应用科学的模型试验方法的研究。70 年代由于计算机应用推广,“模型”和“相似”的概念突破了原来的范围,成为仿真技术的基础。近一二十年国内外又出现提出“相似论”作为从思维科学和认知哲学来进行研究的学术分支。

对这样蓬勃发展的势头,需要进行探讨,理清一些概念和体系。

2 进入 20 世纪前相似理论的准备阶段

17 到 19 世纪从理论和实践两方面为相似理论的建立已有许多先驱的工作。

1638 年伽利略在“论两门新的科学”中曾说明,威尼斯人在比照相似的小船而建造大船

时发现桅柱如只按几何尺寸简单放大则强度不够。这就已经深入到相似理论的实质内容。应该认为这是最早的相似科学的萌芽。

1686 年牛顿在理论上对其三定律就完全是用两个物体作相似的运动来表述、论证的。此外又提出后来被称为牛顿数的 $F/\rho V^2 l^2$ 的相似准数。

在实践上,有资料说明英国在 1741 年前就已进行过大量炮舰的水池拖曳试验。

到 19 世纪,在理论上,法国 J. B. 傅利叶 (1882 年) 提出了物理方程必须是齐次的。A. L. 柯西 (1823 年) 提出弹性体和声学现象的相似准数 $\rho V^2/E$ 。贝尔特朗 (1848 年) 提出相似准数 FL/MV^2 。麦克斯韦耳从电磁学提出因次的表达符号。在实验方面,弗洛德由船模试验提出相似准数约在 1872 年,是英国曳船试验以后 100 多年,可见是长期大量实验以后才摸索出明确的相似准则。法格的动床模型试验约在 1875 年。雷诺层流和紊流试验在 1883 年。恰恰在两个世纪之交的 1900 年,莱特兄弟首次进行了风洞试验。

相似理论和其它学科一样,都是随着社会生产需要、基础科学和有关相邻学科理论以及

作者简介:左东启,男,河海大学教授,从事水利工程教学与研究,著有《模型试验的理论和方法》等论著。

观察、实验、量测技术的前进而发展起来的。

3 因次分析、模型试验和相似理论

a. 因次分析就是以最普遍的函数形式描述所研究物理现象的方程分析。20 世纪前半世纪的相似理论主要是结合模型试验而发展起来的。模型相似重要的理论基础和方法手段之一就是因次分析, 而因次分析的意义和作用又远远超出模型试验的范围, 是整个物理科学体系中的重要一环。没有因次分析就不能揭示品类繁多的各种物理量之间的关系, 就不能建立严格的单位系统, 也不能正确建立和检验各种数学物理方程。相似概念不仅是试验模型的基本特性, 也是一切物理实验数据处理的基础和某些物理方程求解的手段。

对因次分析, 集中在 1900 年前后约 30 年中许多主要的物理学家发表了大量的论文和争议。如瑞利在 1891 年和 1915 年, 傅利叶在 1888 年, 雷包钦斯基在 1919 年, 瓦谢在 1892 年, 普朗克在 1916 年, 费斯特-阿芳纳赛瓦在 1916 年, 勃利基曼在 1922 年等, 而 1915 年布金罕姆把这理论普及到一般工程界。在这段时间以后的论著甚多, 几乎都是建立在以上讨论的基础上的; 实际上, 就这方面的问题而论, 也没有多少全新的内容了; 而世纪初遗留下的问题, 有的迄今也未得到解决, 如热和温度作为基准物理量的因次关系究竟应如何处理, π 定理究竟如何证明才算严格完整等。

b. 从一般实验到相似模型的实验是一

个跳跃。工业的发展急剧地推进了模型试验, 普及到各个门类的产业和工程, 尤其是造船、航空、水利、化工、建筑、热工、电工等方面。从此“模型”一词被赋予了新的涵义, 其涵义以后又不断地发展变化。从学科说, 流体动力学、固体结构力学、电磁学和热工学是四个主要的支柱。所以相似理论可以说是物理科学的一个特殊的分支。

英国《近代物理杂志》(Contemporary Physics, 21, No. 1, 1980) R. 派尔斯“物理学中的模型拟制”一文中将物理学中的“模型”分为 7 类: ①假说(“可能是真的”); ②唯象模型(“显得像是……”); ③近似(很大或很小); ④简化(为明晰而略去某些特性); ⑤示教性模型(非求证而提供知识); ⑥类比(仅具有某些共同点); ⑦理想实验(主要对某一可能性证伪)。这种分类并不明确严谨, 但也大致可以概括现有“模型”一词所指的若干涵义。

c. 相似理论的基本理论体系究竟是什么? 百年来的论述和书籍中很少讨论这个问题。现我国很多著作中都讲述 M. B. 基尔比契夫的“相似三原理”, 这是前苏联热工学者 1933 年《相似原理》一书中提出的。第一是: 两个物理体系相似必须由同一方程式表述, 各个相同变量之间保持了一定的比例(相似常数)。第二是: 表述物理体系的方程式可转换为包含若干个无因次的相似准数之间的关系式(例见图 1)。第三是: 如果两体系方程的单值条件及其所含各量组成的相似准数相等, 则两体系互为相似。一方面这确是迄今

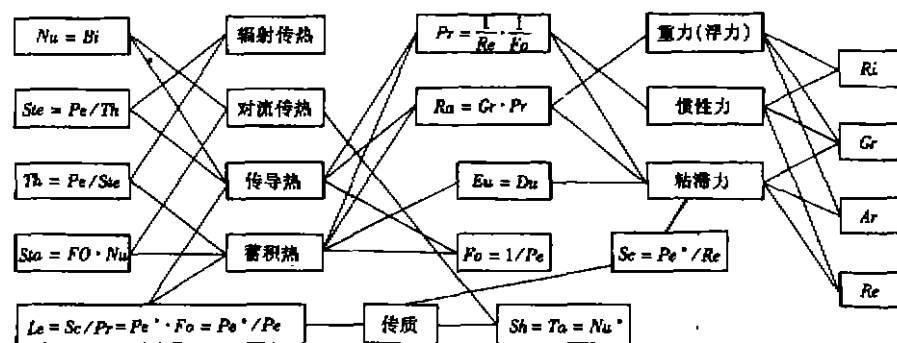


图 1 环境水力学相似准数

对相似理论最系统的概括,但另一方面,是否概括得最全面完整,还值得进一步探讨。其中所谓“单值条件”常被解释为初始条件和边界条件等,这与 M. B. 基尔比契夫原著是一致的,没有扭曲或模糊原理提出人的原意。但许多读者和许多引用或转述的书籍作者一样,似不甚理解究竟为何必须提出单值条件的意义和如何订出单值条件的方法。单值条件相同是相似原理中除了同一表述方程,各量互成比例,各不同量之间的比例关系须遵守一定的准则以外的一个重要的补充。须有这条,才使整个相似条件成为必要和充分的。因为同一方程由于初始条件、边界条件等不同而将有不同的解,也即是同一方程所表述的现象并不一定都互为相似,必须使该方程加上若干条件以后能使其解是单值的而不是多种多样的。这就涉及方程式的解的唯一性问题,以及通解和特解问题。原著者对这一点提出了而又未曾说清楚,所以始终成为传习者和应用者不易理解和使用的一个难点和疑点。

另一个前苏联热工学者 И. К. 孔纳珂夫在阐述基尔比契夫相似原理时对表述物理体系的方程式提为“完整的方程组”,并说明在确定某一具体运动问题时须将方程组的解和附加的单值条件相结合才能得到表现具体问题的特解。这样就将所谓“相似三原理”推进了一步,这已经是 20 世纪 50 年代以后了。但还主要只是在概念上深入提高了一步,在实用上解决这问题仍是很复杂的。

这推进一步的意义在于开始对相似理论中提出一个问题:在模拟、仿真课题中,要求相似到什么程度?相似是有不同程度、不同等级(hierarchy)的。两现象的相似,表述的方程有普遍性和特殊性、个别性。如运动的几个基本方程是在一大类物理运动过程体系中都是相同的,但不能认为满足这几个方程就是互为相似,就达到我们所要求的相似了,或者说,不去模拟也本来就是相似的了。

在相似理论主要应用于物理模型试验的年代中,“单值条件”的探讨未被重视,因为以

一个物理实体运动去模仿另一个物理实体运动,都在比例相似的空间(几何相似)和时间(斯特鲁哈数)中进行,同时研究者又探寻若干自动模型化的范围,使试验在这范围界限内进行,如液体紊流在阻力平方区内(气体动力学这方面研究更多)等,在试验过程中若干单值条件被自动地满足了。

70 年代后数值模型在计算机上仿真兴起,目前仍属初期,主要工作在离散格式、数值计算和收敛速度等方面努力;随着计算机上进行仿真试验日益开展,方程组的适定程度(wellposedness)和参数的选定必将成为最主要的研究内容。这也就是“相似程度”或“相似等级”的研究,也可认为:“单值条件”的研究,将比在物理模型试验中更具有重要意义。

由此,相似理论不但随物理模型试验的继续应用而仍然存在,而且随着计算机上数值仿真试验的广泛和深入而开拓了新的领域,进而得到更加扩大和提高。

4 模拟(analogy)——异类相似

较狭义的“模拟”主要专指异类相似。一般的“模型试验”主要是指同类相似,“模拟”的专门意义是指不同种类的物理体系遵循相同的数学方程而运动、变化,因此通过对某一物理现象的观测分析去研究另一物理现象运动的规律。

本世纪的前 60 年,模型试验是主要的研究手段,后 40 年计算机上的数值模拟(modelling)日益成为主要的方法,而“模拟”始终处于从属辅助的地位。但“模拟”不仅在 30 年代已有效地用于若干领域,而且也是计算机应用于仿真(simulation)的一种先驱的形式。今后仍将在总体仿真技术中发挥作用,也将始终是相似理论研究的对象,虽有的学者(如 G. Murphy)曾名之为“非相似模型”(dissimilar model)。

G. 摩尔菲曾按方程的性质将模拟分为五大类:①二项代数方程;②四项代数方程,如受轴力及弯矩的直梁的法向应力分布等;③二阶

常微分方程,如线性振动等;④二阶偏微分方程,如有势的渗流场、电场、扭力薄膜比拟等;⑤四阶微分方程,如艾里应力函数等。

由同类物理体系的模型试验变到异类物理体系的模拟试验,再变到更普遍化的模拟式计算机(包括各式各样的积分仪到电子计算机),计算机从计算功能扩大到仿真功能——以上几方面的改进和互相综合和联结就是整个 20 世纪相似概念扩大的仿真技术的发展过程。

现就“模拟”的演变简单表示如图 2。首先是图 2a,线性阻尼振动的方程 $M\ddot{y} + D\dot{y} + Ky = 0$, 式中 y 为位移; M 、 D 和 K 分别为质量、阻尼系数和弹簧常数。再是图 2b, 电路的方程 $L\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{1}{C}q = 0$, q 为电荷, L 、 R 、 C 分别为电感、电阻和电容。图 2c 为电子线路图。振动方程以计算简图表示,以电路图模拟,再以计算模拟机的线路图表示。如再向前一步,就是数字计算机的仿真了。

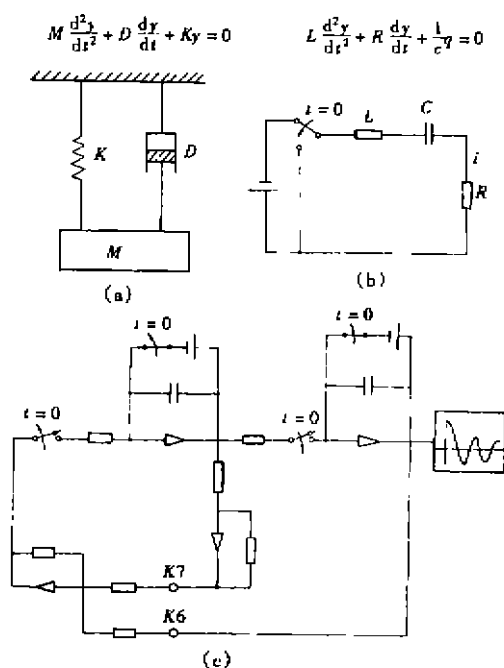


图 2 线性阻尼振动的模拟

5 仿 真

“Simulation”现已成为常用的词,但少有

提出严格定义的,我国也尚无统一的译名。由于长期以来国内外文献上,作为一种专门研究方法,都以“模拟”、“analogy”指称异类物理现象相似比拟的技术。

“仿真”大体上可定义为建立和运用某一体系(现实的或抽象的)的模型的技术,以研究该体系的行为、动态,而不改变、破坏真实的体系及其周围环境。“体系”是指自然的或人为的物体或事件的组合。对模型输入已知的自变量而通过模型的运转变化而由模型输出求知的各种因变量。

广义的“仿真”包括“模型试验”、“模拟”和“数学或数值模型”,现今“仿真”更多地指数值模型。建立模型的思考和策划称为“模化”(modelling)。对于具体工程问题于建立数值模型后在计算机上改变某些条件和参数以比较不同的律情(regime)或方案的运作,可视为在计算上实现的试验。

如能定出某一物理体系的完整数学物理方程组,定出“单值条件”,对以上所有有关函数能离散化求数值解,就可确定某专门的一组物理现象。这就是计算机“仿真”。

对仿真成果的评价常常侧重在离散化的方法和数值计算的技巧,而关键应在是否相似,而相似的要求主要在于建立和选定方程组和单值条件,在数模中单值条件包括方程组中各个函数,因为所待仿真的并不是广泛普遍的一大族种的相似现象群,而应是某一个别、专门、特定的现象。在力学体系中除基本方程如连续方程、平衡方程、动量方程等以外,还有若干反映该体系特点的若干补充方程而形成一完整的专门方程组,才能保证和提高“相似程度”或“相似等级”。在固体结构力学或岩土力学中有人称那些基本方程为“场方程”,称那些反映材料物质特性的方程为“本构方程”。

由于数值模型的定量精确性,仿真范围的广泛性,建模和操作的迅速性、经济性,以及与计算机配套各种周边设备功能的多样性,使数值模型具有极大的优越性,日益成为

仿真的主要手段。但当前的关键问题是正确的程度,亦即相似的程度,亦即方程组和其单值条件的适定程度。数值模型改进提高的困难主要在这一点,也就是数值模型的相似理论问题。首先模型和原型总体上是相似了,才能进而研究误差问题。

当前,对具体仿真对象,如果物理规律不进一步深入阐明,观测和试验研究不能同时并进,就很难提出足够适定的方程组和单值条件。这是比尺实物的物理模型试验虽有若干难以克服的弱点和困难而仍然发挥重要作用的原因之一。因此,要提高仿真技术的水平,只有三条路:一是继续加强原体的观测、试验;二是不断提高计算机自身的功能;三是和物理模型试验互相结合。

6 合交模型

数字计算机与模拟计算机相结合成为“合交计算机”(hybrid computer);数值模型和物理模型试验相结合使用,称为“合交模型”(hybrid model)。由于数模与物模各有优点和局限,结合使用是自然的思路和必然的趋势。

目前的结合有三种方式:①数模和物模平行研究,综合分析,以利于多个数模和多种物模分别同时交叉地深入研究,如美国的哥伦比亚河口模型(1984)。②数模和物模紧密结合、进行严格意义的高度合交,如加拿大的圣劳伦斯河口模型(1977)。③介于上述两者之间的数模和物模部分联结的合交,以适应现实的技术设备条件,如中国的大亚湾核电站港口和取排水口模型(1987)和灌河口模型(1991)。合交模型不等于数模和物模的简单叠加,而在两者“合交界面”(hybrid interface)或称“接口”的设计和控制在保证耦合性和实时性。合交的严格程度就在于耦合和实时的程度,也正是合交模型的技术困难所在。要实现合交仿真,除具有较高水平的数模人员和物模人员之外,还必须具有较高水平的自动控制技术人员的共同协作。同时还需有相应的一般实验室所很难具备的高精设备,如

果今后发展须具有模型相互反馈功能,则要求更高,需要投资巨大的专门设备。这些都是20余年来合交模型未能迅速推广的重要原因。目前对“合交程度”如要求太严格,反而不利于广泛应用,而且有时还限制了成果的质量,如有时对数模和物模两者为了适应互相合交的需要而都各自被简化。因此合交模型只能随着高新技术的提高而逐步推广。

今后对某些复杂的工程技术问题的研究与解决,可能不是单一的物模或数模足以做到的,将不得不求助于合交模型仿真。多因素、多目标、多变量、多模型的合交所要克服的困难将更大,需要依靠多种学科的长期协同努力。在改进提高高新技术的同时,仿真对相似理论研究的提高必然会提出新的要求。

7 作为思维科学的“相似论”

近20年来国内外出现了“相似论”研究的潮流,把相似理论与系统论、控制论、耗散结构论等并提为“几大论”。其应用对象除物理科学以外,兼及人文、社会学科的比拟、决策、预测等,这些方面的研究也可能逐渐随着物理学科应用的发展而共同提高,成为相似理论的一部分。但有所不同的是,“相似论”是作为一门“思维科学”和认知哲学来研究的。就其目前的进展看,应用于工程科技似还嫌空疏。因为凡属互有共性的事物都可在某一方面看成互为相似的,这样范围就无限广阔了;现在某些介绍为实际应用的事例似还不甚现实。但应重视其进展,从中吸取有益的借鉴。

8 结 语

a. 相似理论是否已成为一独立的学科,还只是一种辅助性的方法?虽然与传统的独立学科相比,似还缺少明确具体的研究对象,缺少统一的普遍的基础原理体系,其应用和发展离不开与其它学科的联系。但这些也许是一切新兴学科的特点。从20世纪初叶到末叶的不断发展提高、基本原理体系不断形

成,相似理论已成为一门特殊的学科,它在相当长一段时间内可定义为研究广义仿真的基础理论体系的学科,而其应用则与广泛领域的技术紧密结合。

b. 仿真的内容包括计算机仿真、物理模型试验和异类物理模拟等方面的专门技术及其组合,同时结合自动控制和有关人工智能的应用更向深度和广度进展。

c. 物理模型试验有一部分将不断地被“计算机试验”代替,但仍将长期使用并继续提高。研究提高的方向和课题为:①相似判据的研究;②比尺效应(包括变态模型)的研究;③模型及其输出成果“相似程度”(和不相似程度)的评价;④建模方案经济比较的研究;⑤工业上由实验室到工厂生产的中间试验研究;⑥最新量测技术特别是无损伤、无接触量测技术的研究。

d. 单一的异类物理模拟今后可能难有长足的独立发展,但仍将继续与数字计算机和物理模型共同结合进行,在某些情况下有特别简捷的模拟、传递和显示的作用。

e. 计算机应用于仿真的研究将特别重要,其进展除取决于自身硬件、软件的更新提高以外,在仿真技术方面主要研究问题有:①模型输出与被仿真对象相似程度的评价研究和提高相似程度的理论和技术的研究,这又包括了以下两方面问题的研究;②方程组的完整和适定程度进一步提高的研究,以及单值条件选定的研究,使完整的方程组能专门特定地反映物质特性和物理运动规律;③计算机仿真基本相似原理体系的探索和概括;④对某些专门问题,进行系列的物理模型试验,在此基础上建立和修正模型的方程组以更多地取代模型试验,更利于提高生产研究的效率;⑤与物理模型试验及人工智能技术紧密结合,协作研究复杂大型的合交模型。

此外,在流体力学的边界层理论、“卡门假设”中早有“相似解”和“自相似解”等现象和方法的说明。近年来在所谓“混沌”和“分形理论”中又提出“自相似性”等原理。今后

随着其逐渐应用于模拟仿真技术,则也可能纳入“相似理论”研究的内容。

参考文献

- 1 Murphy G. Similitude in engineering. New York: Ronald Press, 1950
 - 2 Birkhoff G. Hydrodynamics, A study in logic, fact and similitude. New Jersey: Princeton University Press, 1960
 - 3 Кутрич М В. Теория подобия. изд. АН СССР, 1953
 - 4 Конаков П К. Теория подобия и ее применения в теплотехнике. Госэнергоиздат, 1959
 - 5 Седов Л И. Методы подобия и размерности в механике. Гостехиздат, 1957
 - 6 左东启等. 模型试验的理论和方法. 北京: 水利电力出版社, 1984
 - 7 Barthel V, Funke E R. Hybrid modelling as applied to hydrodynamic research and testing. In: Recent Advances in Hydraulic Physical Modelling by Rui Martinez, Kluwer Academic Publishers, 1989
 - 8 Ervin Szucs. Similitude and modelling. Elsevier Scientific publishing Company, 1980
 - 9 左东启, 俞国青. 工程水力学中的合交模型. 河海科技进展. 1992, 12(4): 1~23
 - 10 Zuo Dongqi, Yu Guoqing. Hybrid approach and computer controlled model of sea outfall in tidal current field with 3 open boundaries. In: Lee & Cheuang eds. Environmental Hydraulics, Rotterdam, 1991.
 - 11 Walter Ameling. Simulation using parallelism in computer architecture. In: Javor A. Ed. Simulation In Research & Development, 1984
 - 12 Hardwick J D. Economic use of models. In: International Conference on The Hydraulic Modelling of C E Structures, bhra, 1982
 - 13 Otto Haszpra. Modelling hydroelastic vibrations, London, Boston, Melbourne: Pitman Publishing, 1979
- (收稿日期: 1997-01-22 编辑: 马敏峰)

· 简 讯 ·

据称,亚洲开发银行已经获准可向湄公河水电站工程(包括越南和中国云南省境内)、老挝、泰国、缅甸和柬埔寨等国的水电工程优先贷款。这一地带水电资源蕴藏量估计可达1万亿kW·h/a,而目前只开发了约2%。

(熊莉芸供稿)