

И.М.特切里包姆

电模拟

科学出版社

电 模 拟

И. М. 特切里包姆 著

吉 进 译



И. М. ТЕТЕЛЬБАУМ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Государственное издательство
физико-математической литературы
Москва 1959

内 容 简 介

本书主要论述电模拟的基本原理和应用技术,引用了大量的实例来阐明电模型的构成方法和它们在现代技术研究中的应用。

本书分三部分:第一部分阐述模拟基本理论,讨论了模拟中的相似理论和精确度问题;第二部分叙述物理系统的电模拟方法,研究了类比模型、矩阵式模型和结构式模型的构成原则;第三部分研究物理场的电模拟,包括用连续介质和阻抗网模拟场的方法。

本书可作为科学研究人员和工程设计人员的参考书,也可作为高等院校计算技术专业及其他有关专业的教学参考书。

电 模 拟

И. М. 特切里包姆 著
吉 进 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 117 号

北京市书刊出版业营业许可证出字第 061 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

*

1956 年 2 月第 一 版 开本: 850 × 1168 1/32

1956 年 2 月第一次印刷 印张: 9 5/8

印数: 0001—2,750 字数: 254,000

统一书号: 15031 · 221

本社书号: 3383 · 15—8

定价: [科七] 1.60 元

前 言

近代技术中，以被研究系统与模型之间的数学类比为基础的
电模拟装置具有很大意义。电模拟方法的特点是用模拟的方法在
物理状况下解出数学问题。可以说，模拟是实验的继续，但是系采
用另外的，即计算技术的手段。在需要进行多种方案比较的情况
下，模拟是寻求最佳工程解答时不可替代的手段。

本书叙述了电模拟基础，即模拟装置的基本构成原理及应用
原理。研究电模拟的基本方法时，作者力求用各技术领域中的实
例来说明它的应用。但这并不是提出描述具体模拟装置的结构和
线路的任务，所提到的这些装置仅仅是为了说明一般的情况。

本书由三部分组成。第一部分说明模拟方法的一般特征，研
讨模拟的相似和精确度问题。第二部分叙述物理系统的模拟，即
说明用类比模型、结构式模型和矩阵式模型解常微分方程问题。
第三部分是研究物理场的模拟，即在具有电导介质和电阻抗网的
模型上解边值问题。

本书是作者在荣获列宁勋章的莫斯科动力学院讲授的“电模
拟”教程的基础上写成的，可用作工程师指南，以及多科性工业大
学和电工学院计算技术专业的教学参考书。

И. М. 特切里包姆

目 录

前 言	iii
-----	-----

第一篇 模拟理论基础

第一章 模拟的一般问题	1
§ 1. 模型和计算机的特征	1
§ 2. 电模型	11
§ 3. 电模拟的精确度	20
第二章 模拟中的相似理论	29
§ 4. 电路相似	29
§ 5. 方程分析	33
§ 6. 量纲分析	51

第二篇 物理系统的电模拟

第三章 类比模型	57
§ 7. 计算台	57
§ 8. 电学力学类比。组成模型的方法	67
§ 9. 多维力学系统的电模型	93
第四章 矩阵式模型	114
§ 10. 具有对称矩阵系统的模型	114
§ 11. 具有非对称矩阵系统的变压器模型	125
§ 12. 带放大器的矩阵线路	130
第五章 结构式模型	141
§ 13. 线性系统的结构式模型	141
§ 14. 非线性系统的模拟	162
§ 15. 直流电子模拟装置	179

第三篇 物理场的电模拟

第六章 场的电类比·····	200
§ 16. 场的电模拟方法·····	200
§ 17. 流体动力学的电类比·····	213
§ 18. 电学热学类比·····	222
第七章 利用连续介质法模拟场·····	234
§ 19. 问题的类型和场模拟的原理·····	234
§ 20. 电解槽方法·····	248
§ 21. 固体模型方法·····	262
第八章 利用阻抗网法模拟场·····	269
§ 22. 应用阻抗网解边值问题·····	269
§ 23. 在阻抗网上编排被模拟区域的原理·····	281
§ 24. 解数学物理边值问题的电积分器·····	289
参考文献·····	301

第一篇 模拟理論基础

第一章 模拟的一般問題

§ 1. 模型和计算机的特征

“模型”的概念具有不同的意义。通常意味着，模型以一定的方式反映对象或过程在原型中的情况。

模型可分为几何模型、物理模型和数学模型。

几何模型给出原型的外表概念，在多数情况下服务于显示的目的。它表示出对象的工作原理；各部分间相互位置、安装和拆卸过程；对象的构成。机器和建筑结构的模型（技术展览陈列品或形象教材）、工艺过程和调度控制系统的显示图，都是几何模型的例子。

物理模型和数学模型是供作为在模型中量测相应的量的方法，确定原型中表征对象情况的量的数值之用的。

物理模拟中，原型与模型的对应量具有相同的物理性质。物理模拟能保留着在原型中进行实验的特点，但重要的是它简化了求取所需结果的过程，因为在模型中选择了最方便的几何尺寸和物理量的变化范围。这样，如“实验池”中的船只模型、风洞中的飞机和火箭模型等，就是物理模型的例子。

为了能够根据在模型上所测数据来判断原型中对象的情况，应当预先证明：原型与模型相似，皆服从于同一物理规律，并且用相同的数学关系式描述。如果已在普遍情况下证实了这一点，或者已知它是被研究现象所遵循的更为普遍的物理规律的推论，则当进一步提出研究具体对象的局部问题时，便可以越过描述现象的数学方程，按照基于相似理论的规则来制造模型。

于是,现象在模型中和在原型中所具有的相同数学描述便奠定了物理模拟的基础。由此得出结论:物理现象的模拟可以建立在类比的基础上,即建立在物理性质相异的物理现象所具有的相同数学描述的基础上。这也是数学模拟的基础,数学模拟是根据类比来进行的模拟,这里原型与模型用同样方程式描述,但它们的对应量具有不同的物理性质。数学模拟是类比在技术上的实现,其目的是根据模型中所测数据求出现象各量在原型中的数值。实质上,数学模型是将描述原型的方程式进行数值求解,亦即用作计算机(数学装置)。也如其他类型的计算机一样,原始数据是以模型中物理量给定值的形式输入的。由模型中进行的物理过程可以得出数学题目的解答,其结果通过量测仪器或记录仪器的读数从模型输出。

计算机(计算装置)分为两大类:

- (1) 不连续作用机;
- (2) 连续作用机。

不连续作用机用数字计数,其中数字是通过代码形式表示为继电元件位置或物理状态的组合。输入函数和输出函数表示为诸量的数值序列。

目前出现了快速电子计算机来代替机械式不连续作用机(分析计算机)。在这些机械装置中仅仅保留了输入和输出部件。几乎全部操作都用电子器件、半导体器件或磁性元件来实现,元件的总数以千计。

不连续作用计算机根据预先编好的工作程序按下列步骤完成一定顺序的算术及逻辑操作:指令—输入诸量—操作—输出和存储结果,等等。对不连续作用机编制程序(指令的顺序)是在算法的基础上进行的,所谓算法就是对所解题目排出计算程序所根据的规则。

不连续作用电子计算机很复杂,这里只可能提一下最简化的方框图——图1,它表示出机器基本部分间的相互作用。其中AY是运算器,它按照程序来完成由控制器YY的指令所给定的算术

操作。全部原始数据、程序以及中间结果都保存在存储器 $3Y$ 中，而最终结果则用输出装置送出。

不连续作用机原理上的特点是：题目的求解过程分解为一系列算术运算和逻辑运算，因此，为了完成这些运算，送入数据和给出结果之间要相隔某一段时间。在这

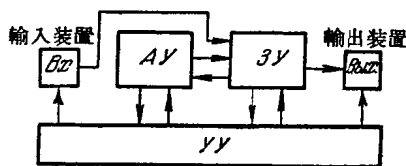


图 1

一段时间中，由于题目尚未解完，所以被研究过程的信息尚不能得到。因此，假定向不连续作用机送入表征被研究动态过程在时间 t 时的量，而需要求出该过程在时刻 $t + \Delta t$ 的状态，但是计算结果只有经过必需的解题时间 ΔT 以后才能得到。时间 ΔT 比过程真实进行时间 Δt 可能要超过很多。现代不连续作用电子计算机的特点是速度很快，每秒完成几千次甚至几万次算术运算。然而，应该看到：用数值解法解题时，要把数学题目分解成一系列最简单的算术运算，运算次数需要大量增加。只要回想一下数值积分法或者用级数法求三角函数及其他表格函数的例子就可以理解这一点了。

例如，假设机器每秒完成一万次运算，为了解出某个动态题目，仅仅需要进行 200 次运算，则不会在 $\Delta T = 0.02$ 秒以内得到结果。因此，不连续作用机是在时间间隔（步距） ΔT 的各点上给出被研究或被控制的连续过程的不连续状态。为了避免计算误差的积累并以所需精确度来表达被研究过程，应将它分为足够多的步数。于是，在本例中，如果将被研究的动态过程的整个周期仅定为 50 步，则计算机所作出的过程的频率不超过每秒一周：

$$\frac{1}{0.02 \times 50} = 1 \text{ 赫.}$$

根据上述原因，在不连续作用机上求解很多动态题目，只能以比其现象经过的真实时间更慢的步调进行。

不连续作用机工作的另一特点是需要预先编制题目的程序。

编制操作执行程序以及校核其正确性(“校对程序”)需要耗费一定时间。如果在研究过程中,需要变更问题的提法,就可能需要相应地改变程序,但是这种改变远不是经常可以预见到的,因为在进行工程研究时,只有在工作过程或者“意识实验”过程中通过检验各种假说才会出现许多新的想法,也如同在模拟中所作的那样。甚至,有时还需要在研究过程中根据已有的实验数据来校准和修正现象的数学描述。

不连续作用机的主要优点是解题精确度高和具有能求解很大范围内各种题目的通用性。解较复杂和解较简单题目的差别只是所耗费的时间不同,而设备的组成则差不多一样。对原始数据不多的题目多次重复使用同一程序时,采用不连续作用机特别有效。

在很多物理及技术问题中,由于已知的原始数据精确度有限或者题目的数学方程写得不够精确,因此并不要求解答具有多么高的精确度,但可能要求设备简单、快速性、形象性和便于对结果进行比较,以及有可能对大量数据进行运算(场的分析)。在一系列的的实际应用中,要求计算机工作在真实时间比例尺下,或者要求以快得多的步调工作,使在较短的时间内能进行大量解答的比较。在所有这些情况下,应用连续作用机是合适的,其中输入函数和求得的函数都是以物理量的大小来表示的。

在连续作用装置中,设备的组成与题目的复杂程度有直接关系。但是这里所有部件都是同时并联工作的。因此与不连续作用装置的区别是:解复杂的题目并不比解最简单的题目占时间多。同时解题时间可以比不连续作用装置短数百至数千倍。

在工程实际中,会遇到具有不同提法的两类技术问题。其中第一类是,要求获得数学题目的数值解,以便用在某执行机构中(这里指的是自动装置,部分情况下是炮火指挥仪、飞机及轮船的导航仪等)。第二类问题要求研究某物理过程的特性,估计这个或那个参数的变化对过程进行的影响,比较同一类型结构的各种不同方案。

为了求解第一类题目,应用计算(解算)仪器和装置,而求解第

二类题目,则应用模拟设备。

构成模拟装置有两个方向:

- 1) 作成类比模型;
- 2) 作成结构式模型。

结构式模型按计算装置的类型构成。

计算装置由结构式元件组成,它们连续地完成各种数学运算:算术及代数运算、积分及微分、函数变换等等。根据被解方程的形式,由这些称为运算元件的部件组成结构图,它综合数学运算,逐项表示出被解方程式。可以说,结构图是逐项地来模拟方程式的。因此这种结构图称为结构式模型。

类比模型——这是一种用类比法在物理状况下求解题目的计算装置。在类比模型中,项的划分不是按独立的数学操作进行,而是按物理元件进行的。类比模型元件中的物理过程直接利用被研究系统元件中过程的方程式来描述。

类比模型和结构式模型以及计算装置,后者也包括专用计算仪器,都是不同类型的连续作用计算机(装置)。现在还形成了一个阶段,即把不连续作用装置与连续作用装置结合起来,其目的是使第一类装置的精确度与第二类装置的解题解题的简单性结合起来。连续作用装置的结构式元件在不连续技术基础上加以实现。其结果就出现了不连续作用的模拟装置。

在向此方向发展的途径上还存在着前面说过的困难,即难于得到足够的快速性。另一困难是使设备复杂化了,因为用来实现一定数学运算的每一个结构式部件都形成一个充分自主的系统,各具有自己的运算器。如此,整个装置内可能需要几十个甚至几百个运算器。依次应用同一运算器作为结构图的不同元件,而将中间结果存储下来,这样能达到简化装置的目的,但是却使解题过程变得更慢了。

目前,不连续作用计算技术引出了一个新的模拟领域——逻辑模型,它用于研究生物机体中的思维过程和高级神经活动,它基于控制系统与生物机体之间的类比。构成各种逻辑自动机和人工

生物模型,实质上就是拟定对不连续作用机编制特殊程序的方法。

不连续作用装置超出了本书的范围,在本书中只讲述连续作用装置。目前,在用电计算装置解工程题目时,连续作用装置仍然是广泛地、最大量地被采用的一种形式。

现在,我们更仔细地划分模拟的基本方向的界限。其主要方向是:按操作来模拟方程式的结构,或在类比的基础上按元件来模拟物理系统。

在类比模型中,物理系统的每一元件相应于一个独立的被控制元件。和解算装置一样,在结构式模型中,方程式的每一系数以及其中被表达的每一函数关系都相应于一个独立的被控制元件。

在构成结构式模型时,选择最简单的部件结构图来完成求解给定方程式所需的数学运算。这种模型达到了用最经济的方法求解方程的目的,但它不能直接反映出物理系统中每一个对我们有意义的单个元件的工作情况。

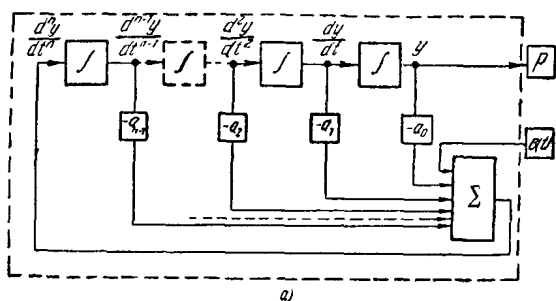
在结构式模型上研究某些系统时,总是需要将描述具体物理系统的方程式化为便于排题的形式。为此,必须对输入到装置中去的方程式系数完成补充的、而且常常是复杂的换算。但主要的是:输入到计算装置中的原始数据,即变换方程后所得的系数和函数,常常失去了与被研究系统物理元件参数的直接关系。因此,比如说,为了分析被研究系统中仅仅某一个因素或元件变化的影响,必须将被解方程式的很多甚至全部系数都进行换算。

利用类比模型时,和上述相反,则应当保持物理系统的元件在原型与模型中的直接对应。被研究物理系统的全部元件在类比模型中都重新出现,并且能单独地加以控制。

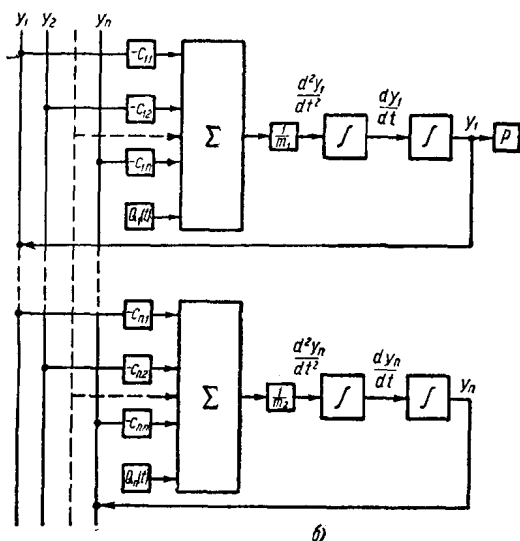
例如,图2,a示出求解常系数线性非齐次微分方程式的结构图:

$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b(t). \quad (1.1)$$

式中自变量是时间 t 。图2,a线路中,积分符号代表用电压表示的量按时间进行积分的元件。在第一积分器输入端送入 y 的最高次导数,即是说,各积分器顺序降低导数的阶次。图2,a线路



a)



b)

图 2

中, 元件 a_i 表示各相应的导数乘以常系数。所得带相反符号的方程式(1.1)左边各项, 除第一项外, 在加法装置中彼此相加; 方程式的右边部分, 用在时间上按给定规律变化的电压 $b(t)$ 的形式, 也送入这加法装置中, 如此, 加法装置 Σ 的输出端上便形成高次导数值:

$$\frac{d^n y}{dt^n} = -a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} - \dots - a_1 \frac{dy}{dt} - a_0 y + b(t), \quad (1.2)$$

此值再送到第一积分器的输入端上, 从而使模型线路闭合。这样的闭环系统便解出方程式 (1.1)。所求解答, 亦即 $y = f(t)$, 可用

为了求解以(1.3)的形式所表示的题目,可以连接成图 2, 6 的所谓矩陣式的结构式模型。在矩陣式模型中,可以即刻求得系统的所有坐标 y_i (其中 $i = 1, \dots, n$) 对时间的函数值。问题的这种提法扩大了用模拟方法进行工程研究的可能性,而且下面将要示出,矩陣式模型相当广泛地应用于实际中。但是,矩陣式模型也还没有满足对类比模型所提出的要求。事实上,只要改变图 3 所示系统中某一个弹性元件的参数或杠杆臂的长度比例,则势必要求重新计算整个的系数 c_{ik} 矩陣。

图 4 的类比模型最完整地反映了图 3 的弹性系统。

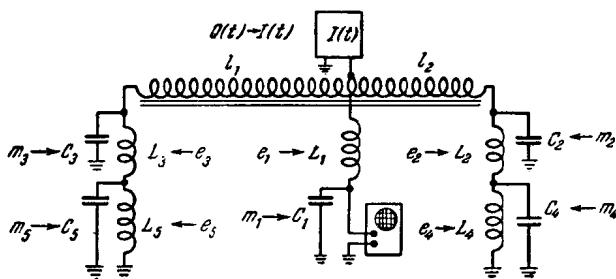


图 4

弹性系统的电模型(参看图 4)乃是与原型同样的方程所描述的电路。此电路按电学力学类比方法组成,该方法将在第三章中详细叙述。此处仅仅指出,原型中弹性系统的每一元件对应于模型中电路的一定元件。如此,图 3 的每一弹簧对应于图 4 模型中的电感 L_i ,而每一质量 m_i 对应于电容 C_i 。杠杆用自耦变压器来模拟,且杠杆臂的比对应于模拟该臂的变压器绕组的匝数比。模型的外扰动力用外电流源 $I(t)$ 的变化给出。当模型参数正确选择时,模型的全部元件中所进行的电过程相似于原型的机械过程,而在电模型各结点上的电压分布则模拟着原始系统相应各点上的速度分布。正如在原始弹性系统的实验研究时利用仪器可以量测出系统任一点的机械位移、速度和加速度一样,在类比模型中连接上电量测仪器,例如电子示波器,也可以逐点地进行研究。在此情况下,只要原始弹性系统参数不改变时,模型的线路和参数便保持不

变。如果在原始系统中改变某一个元件,则在模型中也仅需改变模拟它的元件的参数。此时,不必重新计算和改变模型中的其他元件。

因此,类比模型的工作特点是直观性,因为我们能立刻看出某一物理因素的变化如何影响被研究系统的工作情况。

模拟时,数学题目常常按它的物理状况形成。在模拟装置上常常依靠表征被研究对象的物理概念来进行工作。上面曾指出,在类比模型上编排题目的方式是:原始系统的每一物理参数或元件对应于模型的一个元件。例如,改变电模型的参数时,我们是将这一改变与原型中具有另一种物理性质的(力学的,热学的)具体参数的变化直接等同起来。模拟中形成的习惯是:利用原型的物理概念,在类比的基础上比较各个物理量,具体说来,这是电学与力学、电学与热学、电学与流体力学等等类比。如果已经肯定了两类现象之间的类比关系,即预先在普遍情况下证实了原型与模型的相似,则模拟具体系统时,并不需要以方程式的形式建立数学关系。类比模型根据以相应方式所准备好的被研究物理系统的统路来构成。利用这种类比模型进行工作时,从外表上看,模拟技术是在“不用数学”的情况下解题,而实际上,作为它的基础的却是预先经过证实的原型与模型间数学方程式的等同性。

如果要求在模型中将被研究的物理系统表现得越具体和越仔细,被模拟系统的元件数目越多,则在越大的程度上反映出类比模型的优点。这特别是针对具有分布参数的系统及物理场的模拟来说的。电模拟应用的主要限制是,用它不能解任意提出的物理题目。应该存在着类比关系,而且还需要证明这种关系并选择模型。由模拟各种数学操作的元件所组成的结构式模型就更通用些。因此类比模型适宜于专门性的应用,而结构式模型则常作成通用装置——积分机——的形式,它们得到了广泛的应用。

目前,在类比模型中使用着结构式模型(解算装置)的元件,其目的如下:

- a) 将类比模型所得结果进行补充的数学加工;

6) 作为辅助装置以给定类比模型所需的扰动力、边界条件等;

B) 作为类比模型的某些非线性元件。

模型中的元件数量应足够用来描述原型中对我们有意义的的所有各个元件。根据不同的研究目的,同一系统可以用不同的方式来进行研究:作为整体统观地研究或是按元件微观地研究,而且,根据题目的不同提法,可用不同的方法将系统分解成各个部分。

用来表示系统各个物理元件的模型元件,其内部线路可以作成结构式模型,它重现该元件的数学描述式。但是将这些元件连接成一个完整的类比模拟系统时,则可根据题目在物理上的提法来进行。可以用自动调节装置的模型作为例子,它由各动态环节的模型组成,其中每一环节模拟着该系统的一定部分。在极端情况下,可以想象有一结构式模型,相对于某些特征输出参量而言,它是某一复杂物理对象或整个过程的类比体。如此,将真实调节器与调节对象的模型结合为一体,对分析调节系统中调节器的动作是有很有效的。自然,这些模型应具有真实的时间比例尺。

如此,在一系列情形中,可能要使结构式模型与类比模型相结合。上述矩阵式模型也占有中间地位。但是,不应该将上面讨论的两个模拟技术方向一般地等同起来。

§ 2. 电 模 型

电模型分为物理系统的模型和物理场的模型。物理系统是用有限个的、实际上数目很少的量来描述的。物理场是用无限多的、实际上足够多的量来描述的。物理系统的电模型是由 R 、 C 、 L 无源元件、电流源和电压源及电子放大器等组成的各种电路。物理场利用连续介质中的电流场来模拟,同时也利用由大量元件所组成的被称为阻抗网的电路来模拟。

由于实现及操作均较简单,目前物理系统及物理场的电模型得到广泛的应用。

研究静态时利用电模型,然而,它们特别广泛地用于研究动态