

30717

TP1-28C1

高等学校交流讲义

模拟理论与计算技术

戴景宸 吳国瑜 戚寿麟 編

只限学校内部使用



前 言

随着电力工业的飞跃发展，许多新课题的研究与解决都必须进行大量的计算和实验，这往往需要很大的计算队伍来进行很长期的工作。另一方面，许多实验和研究如果要在实际的设备上进行有时是不允许的，有了“模型”就完全可以免去这种困难。同时也只有这样，我们才能在电力系统未投入运行前就能预知可能发生的现象，而这一点往往是非常重要的。因此，模拟与计算技术在电力工业中日益显示出其重要性。

除此以外，不同型式的计算装置还广泛地应用在计算、建立与研究自动系统上。把劳动力从繁重的、重复性的劳动中解放出来，计算装置起着巨大的作用。目前，是否能够利用计算装置来实现巨型电站的全盘自动化，这已成了衡量一个国家电力工业技术水平标准之一。我国几年来已在这方面取得了显著的成就，为了早日赶上世界水平，我们必须对这门新兴的科学引起进一步的重视。

根据这种情况，许多兄弟学校都感到有必要在“发电厂电力网及电力系统”专业课程中增设“模拟理论及计算技术”一课。

本书就是按照教学要求而编写的。它着重说明了模拟理论和各种计算装置的结构原理（包括模拟计算装置与数字计算装置）。由于计算台、动态模拟等已广泛采用，所以本书中作了一定的介绍。而模拟计算装置与数字计算装置则在本书中占了较大的篇幅，并对如何利用它们来解决电力系统中

的各种計算問題与自动控制問題作了專門的說明。

由于实际經驗的缺乏和知識的淺薄，书中难免存在許多缺点和錯誤。希望讀者多提寶貴的意見，以便能够及时改正。意見請寄西安交通大学发輸配電教研組。

1961年5月

目 录

前言

第一篇 模拟理論

第一章	模拟理論概論	7
§1-1	模拟理論中的一些基本概念	7
§1-2	数学模拟与物理模拟	9
§1-3	相似定理	10
§1-4	相似判据的确定	14
第二章	电力系統的模拟	20
§2-1	直流計算台	20
§2-2	交流計算台	23
§2-3	电力系统动态模拟	32

第二篇 模拟計算裝置

第三章	自动計算裝置概論	35
§3-1	系統網絡的結構与元件	35
§3-2	量的表示	37
§3-3	模拟計算裝置与数字計算裝置	40
第四章	綫性运算元件	42
§4-1	开环型运算元件	42
§4-2	带有参数补偿的綫性运算元件	49
§4-3	閉环型(带有負反饋的)运算元件	52
第五章	直流运算放大器	58
§5-1	运算放大器的基本要求	59

§5-2	直流放大器的零点漂移	60
§5-3	具有参数补偿零点漂移的线路	62
§5-4	自动稳定零点的运算放大器线路	67
第六章	函数转换器	72
§6-1	概述	72
§6-2	二极管通用函数转换器	74
§6-3	二极管专用函数转换器	80
§6-4	二极管函数转换器中分段线性近似法的宗量轴分段规律和二极管函数转换器的参数计算	89
§6-5	利用电子射极管的函数转换器	98
§6-6	一些典型非线性特性的模拟	100
第七章	乘法与除法装置	105
§7-1	乘法装置的分类和构成原则的概述	105
§7-2	基于自动调节传递系数原理而组成的乘法装置	109
§7-3	由平方函数转换器组成的乘法装置	117
第八章	模拟装置的附属设备	121
§8-1	概述	121
§8-2	控制设备	122
§8-3	记录设备和电源设备	133

第三篇 数字计算装置

第九章	数字计算装置的运算基础	135
§9-1	概述	135
§9-2	数字计算装置的工作原理	136
§9-3	数的表示法	139
§9-4	二进制数的运算	143
§9-5	逻辑代数基础	146
§9-6	逻辑回路的构成	150
第十章	数字计算装置的基本元件	153

§10-1	触发器	153
§10-2	计数器	156
§10-3	基本邏輯部件	158
§10-4	二极管矩阵	161
§10-5	寄存器	166
第十一章	数字計算裝置的部件	171
§11-1	加法器	171
§11-2	运算部件	180
§11-3	存儲器	182
§11-4	程序設計	191
§11-5	控制部件	196
§11-6	数字計算裝置的發展趨勢	200
第十二章	量的轉換裝置	207
§12-1	概述	207
§12-2	位置——數碼轉換裝置	208
§12-3	电压——數碼轉換裝置	213
§12-4	數碼——連續量的轉換	216
 第四篇 計算技術在電力系統中的應用		
第十三章	模拟計算裝置中題目的編排和解題方法	219
§13-1	計算電路的構成	219
§13-2	运算元件傳遞函数的确定	223
§13-3	起始条件和扰动力的确定	226
第十四章	計算裝置在電力系統計算中的應用	227
§14-1	計算裝置的應用場合	227
§14-2	利用电子模拟計算裝置計算電力系統的暫态过程	231
§14-3	電力系統有功功率經濟分配自动計算裝置	235
第十五章	自动系統中的計算裝置	241

§15-1	基本情况	241
§15-2	数据的集中检查记录与信号系统	252
§15-3	自动寻找最佳运转点的控制系统	256
§15-4	关于综合自动化	265

第一篇 模拟理論

第一章 模拟理論概論

§1-1 模拟理論中的一些基本概念

模拟理論是有辯証唯物主义基础的。由于客觀世界具有物质的統一性，我們才有可能用一个領域中的現象來說明其它領域中的問題。B.И.列宁在“唯物論与經驗批判論”中就指出：“自然界的統一在关于各种現象領域的微分方程式的惊人类似中显示出来”^①。这种統一与类似提供了模拟的客觀可能性，使得模拟理論具有巩固的客觀基础。

現在介紹一些模拟理論中所遇到的概念。

“相似”是被我們所觀察的一些对象所具有的某些特性，这些对象是同一性质的，它們之間的區別只是量值的大小，它們的相应量之間有着一定的規律。

我們已十分熟悉几何学中的相似概念。图 1-1 所示为三个几何相似的图形。設图(a)的函数为 $\varphi(x, y, z)$ ，則图(b)可写成

$$\varphi'(x' y' z') = \varphi\{m_x x, m_y y, m_z z\}. \quad (1-1)$$

而图(c)可写成

$$\varphi''(x'' y'' z'') = \varphi\{m_x x, m_y y, m_z z\}. \quad (1-2)$$

其中 m_x, m_y, m_z 为一些无量綱的常数，称为相似常数。

模拟理論中所提出的“相似”概念要广泛得多。例如两个

① “唯物主义与經驗批判主义” 人民出版社1956年版，295頁。

“相似”的运动过程是指两个性质相同的运动过程，它們在相应的时刻，各相应变量都按相应的比例而变化，图1-1， ϵ 和 δ 即表示两个相似过程的曲线。

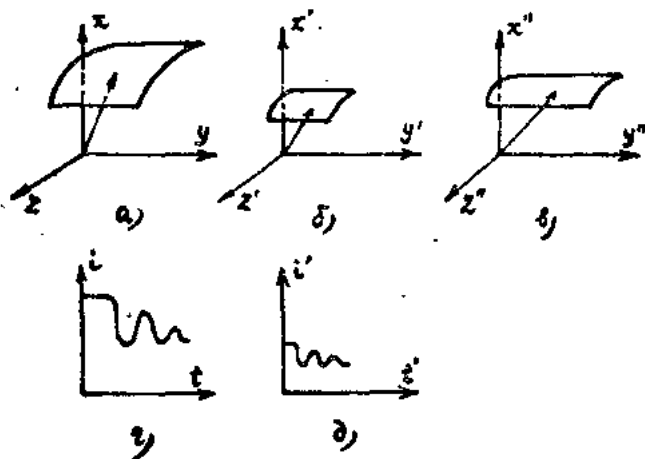


图 1-1

在电工学领域中，我們也同样存在相似关系。只要具有下列条件，两个R-L-C电路就完全相似

$$\frac{u_1(t)}{u_2(t)} = m_u; \quad \frac{i_1(t)}{i_2(t)} = m_i; \quad \frac{t_1}{t_2} = m_t;$$

$$\frac{R_1}{R_2} = m_R; \quad \frac{L_1}{L_2} = m_L; \quad \frac{C_1}{C_2} = m_C.$$

“类似”也同样是一些被观察对象的特性，这些现象的性质并不相同，但它們相应量之間却存在着一定的規律（一般地讲是具有一定的比例，而这些比例是具有量綱的，我們称之为类似常数）。例如直流計算台就是利用直流电路来模拟交流电路的“类似”情况。

1A-11-162C, TP1-106
TP1-28C,

在模拟时，原来被研究的对象称为原型，而与原型相对应的模拟装置称为模型。其中要特别提出的是电模拟，我們可以用电来模拟許多其它領域的現象，例如机械、水力、热力……。这种电模拟在实验研究中得到广泛的采用，主要是因为它有一系列的优点：便于控制、便于测量、占地小、容易設計、調节方便等等。

实际上我們并没有必要使原型与模型完全模拟，而使工作大大复杂与困难。我們只需抓住某些主要的物理量，只要这种歪变不致影响被研究的現象。这种模拟称为局部模拟。除此以外，在模拟过程中，我們还可以对原型进行某些简化，这种模拟方式称为近似模拟。例如在研究发电机的某些問題时可以不計靜子电流的直流分量和轉子电流的周期性分量。一般在模拟过程中总是对某些感到兴趣的現象进行局部模拟或近似模拟。

§1-2 数学模拟与物理模拟

根据模拟的性质来看，模拟又可分为数学模拟与物理模拟两种。在物理模拟中模型与原型区别只是大小比例的不同，而所进行过程的物理本质却完全一样，因此物理模拟可称为是保持同一物理本质的模拟。至于数学模拟則完全不同，这时模型与原型中所进行的物理过程本质不同。不过这些过程是按照同一形式的方程式进行变化。所以数学模拟基于各种現象之間方程式的等形性，而物理模拟則是各种原型的精小的縮影。

在进行数学模拟与物理模拟时都得知道被模拟系統的方程式或参与的物理量。数学模拟只有当方程式已經交換到便于求解的形式时才可实现。而物理模拟則不然，它可以应用

分析法或者数学模拟所不能应用的一般形式的方程式，甚至当只知道参与的物理量时也可进行模拟。物理模拟要比数学模拟更全面地表现出被模拟的现象。不过数学模拟仍有它的优越性，它易于标准化，通用能力强，还可以很简便地研究原型中各个物理量变化时对工作的影响，而这一点在利用物理模拟时就会感到很大的不便。不应该把数学模拟与物理模拟看成为互相排斥的，事实上它们是互相补充的，应当同时发展。

在电力工业领域内，我们所熟悉的动态模拟就是一种近似、局部模拟的物理模拟，而各种类型的计算台与计算装置即为数学模拟。

为了判断两个物理过程是否相似，或者为了找得两个物理过程相似所必需的充分与必要条件，我们得从相似定理出发来研究各种现象的相似判据。

§1-3 相似定理

相似定理是模拟的理论基础，它指出了相似(或类似)现象间的关系，提供了要使几个物理现象相似的充分与必要的条件。相似理论建立在三个基本定理的基础上。

第一定理：相似系统应该具有相同的相似判据，同时其相似指标应该等于一。

在模拟某一现象时，所参与的物理量间应保持某一固定的关系，这关系组成所谓相似判据。它们是无量纲的；它们可以同物理量一样在同样的程度上来形容任何具体现象。我们用符号 π 来表示相似判据，因此第一定理可简单地写成、 $\pi = idem$ ($idem$ 是相同的意思)。相似指标为模拟过程中各物理量所采用的相似常数间的关系。

这定理首先是由牛頓建立的，它可以从牛頓第二定律来加以說明。

根据牛頓第二定律，我們知道任意一个力学系統中，力、质量、长度与時間总是滿足下列关系

$$F_1 = M_1 \frac{d^2 l_1}{dt_1^2},$$

对于第二个力学系統同样具有关系

$$F_2 = M_2 \frac{d^2 l_2}{dt_2^2},$$

假如这二个系統是相似的，則

$$\frac{F_1}{F_2} = m_F; \quad \frac{M_1}{M_2} = m_M; \quad \frac{l_1}{l_2} = m_l; \quad \frac{t_1}{t_2} = m_t.$$

因此

$$F_2 m_F = M_2 m_M \frac{d^2 l_2}{dt_2^2} \cdot \frac{m_l}{m_t^2} = \frac{m_M m_l}{m_t^2} M_1 \frac{d^2 l_1}{dt_1^2},$$

由此可得

$$m_F = \frac{m_M m_l}{m_t^2}$$

或

$$\frac{m_M m_l}{m_t^2 m_F} = 1. \quad (1-3)$$

算式 $\frac{m_M m_l}{m_t^2 m_F}$ 称为力学系統的相似指标，很明显它表示各物理量所采用的相似常数間的关系。

如果将各相似常数所代表的物理量代入，則得

$$\frac{M_1 l_1}{F_1 t_1^2} = \frac{M_2 l_2}{F_2 t_2^2}.$$

这个无量綱的关系就是力学系統的相似判据，写成一般形式則为

$$\pi = \frac{Ml}{Ft^2}. \quad (1-4)$$

这个相似判据因由牛頓所建立，所以常用牛頓命名，称之为牛頓判据，表示为

$$Ne = idem.$$

我們可以将上述概念推广至任意一个物理过程中，任何几个相似过程总具有一些相同的相似判据。关于如何求得任意一个物理过程的相似判据，我們将在下一节中加以闡明。

第二定理又名 π 定理，为A. 費吉尔孟和E. 布金海所創立。它确定相似現象的基本性质之一，即任意系統的相似判据可以从該系統各物理量間的关系方程式中导出。在一定的条件下，相似判据还可用量綱分析的方法来求得。这样，即使不知道关系方程式的形式也可能导出相似判据。关于相似判据的具体求法将在下一节中闡明。

以上两个定理只提供了相似現象的性质，但没有告訴我們判断物理过程相似所需要的条件。

由 M.B. 基尔比吉夫所証明的相似第三定理补充了前两个定理的不足之处，它提出了判断相似性的充分与必要的条件。第三定理断言：在方程式相同的情况下，如果两个現象的单值条件相似，也即从单值条件引出来的相似判据相同，那末这两个現象相似。这定理終于使相似理論成为組織实验和进行模拟的科学方法。

所謂单值条件是指一个現象从一羣現象中区别出来时所需要的那些条件。属于单值条件的有下列几个因素：系統的几何特性，对被研究現象有重大影响的介质和其他物体的物理参数，系統的起始状态和边界条件。現在来研究上述各单值条件的相似性。

1. 几何相似 如果物理过程是在一个有限的，具有确定形状和大小的空間进行，則在几何相似的系統中任何相应点

的座标应满足比例 $\frac{t_1}{t_2} = m_t$ 。这种相似性在物理模拟及物理场的数学模拟时必须得到保证，对于模拟具有集中参数的系统，则不一定要求保持这种单值条件的相似。

2. 时间相似 在随时间而变化的过程里，每一时刻都对应着一批确定的物理量数值。一般情况下，随时间而变化的物理量的相似总是在相同的时间基础上进行的，因此我们必须保持不变的时间比例关系 $\frac{t_1}{t_2} = m_t$ 。这种时间的对应关系叫做时谐性。时间相似在物理模拟与数学模拟中都是必要的。

3. 物理参数的相似 如果原型的物理参数数值，是 C, L, R ，则在模型中相应点上的参数应该满足下列关系

$$\frac{C_1}{C_2} = m_C; \quad \frac{L_1}{L_2} = m_L; \quad \frac{R_1}{R_2} = m_R.$$

这些条件对物理模拟和数学模拟都是必要的，对数学模拟来讲，常数 m 是有量纲的。

4. 起始条件的相似 过程的进行一方面取决于过程的性质，另一方面也取决于起始条件。二个相似系统的相应起始条件之间的比例应该等于该物理量的相似常数。例如 $\frac{i_{10}}{i_{20}} = m_i$ ，其中 m_i 即为电流的相似常数。对于物理模拟及数学模拟都必须满足起始条件的相似。对于自动调节系统来说，起始条件有着重大的影响，在某些起始条件下系统是稳定的，而在另外一种情况下就可能不稳定。所以，在用模型研究调节系统时，正确地反映起始条件是十分重要的。

5. 边界条件的相似 在研究一个现象时，需要限制其活动范围，在其边界上可能有别的现象存在，这些现象本身并不依赖于被研究的现象，但是却对后者有影响，这样就不能

只依靠被研究現象的方程式來判斷各變量間的相互作用，而必須同時考慮邊界上所進行的所有現象，也即在相應的時刻，相應的邊界地點上的干擾因素應保持一定的比例常數。這一條件對物理模擬與數學模擬都是必要的。

必須指出，單值條件決定了被研究過程的變量和物理參數的大小。在方程式相同的情況下，單值條件相似就是這些現象相似的充分和必要的條件。

除了上述的基本定理外，B.A. 凡尼柯夫又補充了四條適用於電工問題的規則：

1) 由幾個相似系統組成的複合系統也互相相似，只要各個系統的邊界條件相似。

2) 適用於綫性系統的相似條件也可以推廣到非綫性系統，只要他們的可變參數的相對特性曲綫一樣。

3) 適合於各向同性系統和均質系統的相似條件可以推廣到各向異性和非均質的系統上，只要所進行比較的系統，它的非均質性和各向異性的情況相對地講是相同的。

4) 在幾何不相似的空間所進行的現象可能相似。並且一個系統的空間上的每一點都對應於另一個與之物理相似的系統的空間上完全確定的一點。

§1-4 相似判據的確定

確定相似判據有兩種方法：量綱分析法和分析方程式的方法，這兩種方法各有其特點和適用場合，現分別闡明如下：

1. 量綱分析法

進行量綱分析時必須知道有那些物理量參加所研究的現象，並且必須知道每個物理量的量綱方程式，即它們的單位

与基本单位间的关系。例如在研究力学系统时往往采用长度(L)、时间(T)和质量(M)作为基本单位。其他任何物理量的单位都可用基本单位表示。例如速度可表示为

$$\text{速度单位} = \frac{\text{长度单位}}{\text{时间单位}}.$$

或简单地写成

$$V = LT^{-1}.$$

同样可得加速度单位

$$A = LT^{-2},$$

力的单位为

$$F = MLT^{-2}.$$

一般说来，我们可以采用任何单位系统作为基本单位系统，并用它们来表示其他各物理量的单位。当然那些被采用来作为基本单位系统的物理量本身是必须相互独立的，例如我们不能采用 U 、 I 、 R 作为电学的基本单位。为了获得各物理量在任意基本单位系统情况下的量纲方程式，我们必须通过熟悉的另一基本单位系统来进行转换。现在仍采用上述力学系统为例来阐明变换的方法。

假定用 L 、 V 、 ρ （密度单位）做基本单位，则力的单位可写成

$$F = V^x L^y \rho^z,$$

为了确定指数 x 、 y 、 z 我们利用各个物理量在 M 、 L 、 T 单位系统中的量纲方程

$$F = MLT^{-2}; V = LT^{-1}; \rho = ML^{-3}.$$

因此

$$MLT^{-2} = (LT^{-1})^x L^y (ML^{-3})^z = L^{(x+y-3z)} M^z T^{1-2x}.$$

由此可得

$$x=2; z=1; x+y-3z=1 \text{ 或 } y=2.$$

而力的单位就可写成

$$F=V^2 L^2 \rho.$$

根据上述演算的方法，我們可以求得各种物理过程的相似判据。用量纲分析的办法之所以能够得出各种过程的相似判据，是因为量纲方程式本身就反映了这些过程的内在规律。但是必须指出，从量纲分析并不能获得考虑到例如磁路饱和等非线性的相似判据，因为在量纲方程中并不反映非线性，为了考虑这些现象，还必须有一些补充的条件。

设过程的变量与参数间的关系式为

$$f(j_1, j_2, \dots, j_n) = 0,$$

这个关系式对任何随意选定的基本单位系统都成立，因此我们可以选择方程式中的几个物理量来作基本单位。假定我们采用三个互相独立的物理量 j_q 、 j_r 、 j_s 作为基本单位，则其它各量的单位为

$$j_i = j_q^x j_r^y j_s^z.$$

指数 x 、 y 、 z 可用前述的方法来求得。

当两个物理过程相似时，则这些过程中的相应物理量 j_i 都应具有相同形式的量纲方程，也即这些过程的相似判据为

$$\pi_i = \frac{j_i}{j_q^x j_r^y j_s^z}, \quad (1-5)$$

当然

$$\pi_q = \pi_r = \pi_s = 1.$$

在具有 n 个物理量的过程中，如果选用了 m 个互相独立的物理量作为基本单位，则可得 $(n-m)$ 个相似判据。不过由于存在函数

$$f(j_1, j_2, \dots, j_n) = 0,$$

因此其中只有 $(n-m-1)$ 个为独立的。当然，如果当函数并