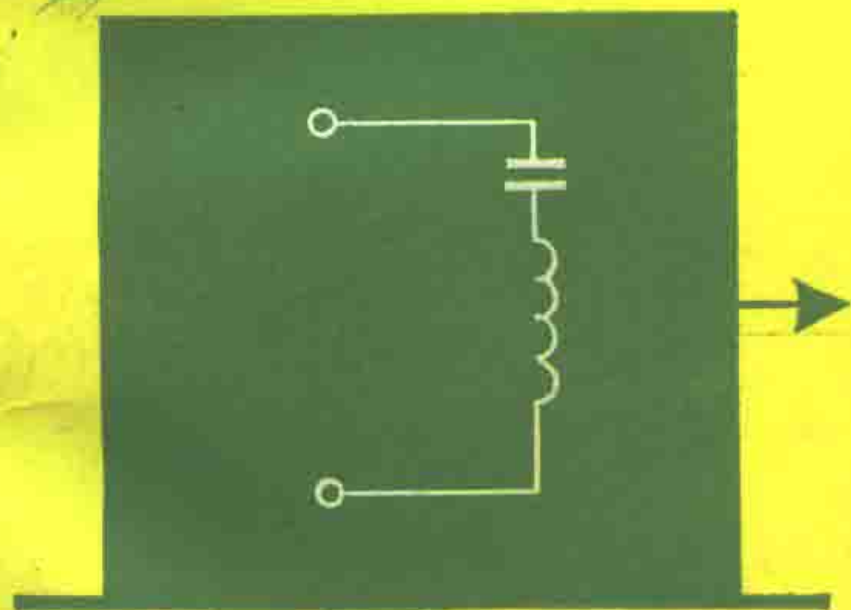




电工学教学小丛书

非电系统的电模拟

易德生 李昇浩 编



高等教育出版社

电工学教学小丛书

非电系统的电模拟

易德生 李昇浩 编

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是高等学校工科电工课程教材编审委员会电工学编审小组建议编写的电工学教学小丛书之一。内容主要包括:模拟理论的基本概念,电模拟与电系统,机械、液压、气压、热力等非电系统的电模拟,拉氏变换与传递函数,方块图与信号流程图,电子模拟计算机模拟及其在自动控制系统中的应用,数字机模拟与混合机模拟等。

本书较为系统地阐述了有关电模拟的基本知识和应用技术,书中有大量的工程实例和例题,在内容安排和叙述方法上也注意由浅入深、循序渐进。本书可作为大专院校非电类专业师生学习电工学的参考书,也可供学习电模拟技术的读者以及从事电模拟理论研究和电模拟技术应用的工程技术人员参考。

本书责任编辑 王缉惠

电工学教学小丛书 非电系统的电模拟

易德生 李昇浩 编

*

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
北京印刷一厂印装

*

开本787×1092 1/32印张 10.625 字数 230 000

1987年9月 第1版 1987年10月第1次印刷

印数00 001—3 065

书号15010·0879 定价 2.25 元

序 言

用电现象和电过程来模拟机械、液压、气压和热力等非电现象和过程就叫做电模拟。由于电模拟具有便于控制和测量、容易设计和调节等优点,因此在工程技术和科学研究中,它是应用最广泛的一种模拟。但是在电工学教材中,由于受教学时数和篇幅的限制,关于这方面的内容很少或根本没有。为了帮助非电专业的读者加深理解电工学的基本概念、基本定律和基本分析方法,进一步扩大知识面,学会运用电路原理解决非电系统的实际问题,掌握电模拟的方法和应用电模拟技术的能力,我们编写了这本教学参考书。该书围绕非电系统的电模拟这个中心,着重讨论了模拟理论的基本概念、电路模拟和模拟机模拟等三部分内容,同时对于有着广阔发展前景的数字机模拟和混合机模拟也作了概念性的介绍。

本书是学习电工学、拓宽知识面的教学参考书,而非电模拟的专著,因而所用的基础知识和分析方法,必须使仅学过电工学的读者既能够看得懂,又能够用得上。从这一点出发,本书对机械、液压、气压和热力等非电系统的电模拟方法作了较多的介绍,举了不少工程实例和例题进行具体说明。在介绍模拟研究的重要工具时,我们着重讨论以运算放大器为核心的电子模拟计算机,对涉及基础知识面更广、分析方法更复杂的电子数字计算机和混合计算机只作了概念性的介绍。

考虑到本书的对象主要是非电专业的读者,接触电系统

方面的知识较少，因此在编写过程中，特别注意了由浅入深、由简到繁以及和电工学中已学过的内容进行对照，专门列了一些表格来说明非电系统与电系统的模拟关系。另外，对于学习有关模拟机模拟自动控制系统所必须用到的基础知识，如拉氏变换与传递函数、方块图与信号流图等，考虑到这些内容也属于电工学中加宽加深的知识，对非电专业的读者来说，了解这些内容是非常必要的，因此书中也作了介绍，同时举了较多的例题，以帮助读者能够较好、较快地掌握这些内容。

本书第三章由李昇浩编写，其余各章均由易德生编写，全书统编和定稿也由易德生负责。

大连工学院蒋德川教授对本书初稿进行了非常认真、细致的审阅，并提出了许多宝贵的意见；在编写本书的过程中，武汉工学院郭萍讲师给予了大力支持，提了不少好的建议，并帮助誉写原文、绘制插图。在此对他们表示衷心的感谢。

殷切希望读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 模拟的基本概念	1
1-1 相似与类比	1
1-2 系统与模拟	6
1-3 数学模拟与物理模拟	12
1-4 直接模拟与间接模拟	14
第二章 电模拟与电系统	20
2-1 电模拟与系统描述	20
2-2 电系统的基本变量与基本参数	30
2-3 电系统的基本定律	39
2-4 电系统数学模型的建立	42
2-5 对偶关系	51
第三章 机械系统的电模拟	55
3-1 机械系统的基本参数	55
3-2 一阶机械系统的电模拟	67
3-3 二阶机械系统的电模拟	73
3-4 复杂机械系统的电模拟	80
第四章 其他非电系统的电模拟	94
4-1 液压系统的基本参数	94
4-2 液压系统的电模拟	109
4-3 气压系统的电模拟	116
4-4 热力系统的电模拟	124
4-5 典型系统的比较与守恒原理	130
第五章 拉氏变换与传递函数	140
5-1 拉氏变换的基本原理	140

5-2	拉氏变换的性质	153
5-3	拉氏反变换	157
5-4	传递函数的定义与求法	161
5-5	元件与系统的传递函数	164
第六章	系统的方块图与信号流图	171
6-1	系统的方块图	171
6-2	方块图的绘制	177
6-3	方块图的简化	182
6-4	系统信号流图	191
6-5	梅逊公式	205
第七章	电子模拟计算机模拟	209
7-1	模拟机的基本原理	210
7-2	模拟机的主要运算部件	215
7-3	模拟结构图的建立	229
7-4	比例尺的选择	240
7-5	传递系数的计算	254
第八章	模拟机模拟在自动控制系统研究中的应用	267
8-1	研究自动控制系统的方法	267
8-2	常用时间函数的模拟	271
8-3	典型非线性特性的模拟	276
8-4	典型环节的模拟	289
8-5	自动控制系统的模拟	314
8-6	数字机模拟与混合机模拟	324

第一章 模拟的基本概念

模拟是进行系统研究的一个重要方法，而电模拟又是应用最普遍的一种模拟。因此作为一个工程技术人员，掌握好电模拟的方法是非常必要的。

为了给阅读后面的章节打下基础，更加全面地掌握本书的内容，在开头的这一章中，我们主要讨论模拟的一些基本概念。首先介绍模拟的客观基础——相似与类比，然后讨论系统与模拟、原型与模型、物理模型与数学模型、静态模型与动态模型等有关术语的定义，最后举例说明数学模拟与物理模拟、直接模拟与间接模拟这几个重要概念。

1-1 相似与类比

相似与类比是自然界存在的两种特性。它们是模拟理论的客观基础，是模拟技术所必须遵循的基本原则。正因为我们所研究的对象（现象或过程）之间存在着这两种特性，这就为我们提供了模拟的可能性。

一、相似

相似是存在于对象之间的一种特性。如果我们所研究的两个对象（两种现象或两个过程），它们具有相同的物理本质，所不同的只是相应量的大小，而且这些相应量之间还存在着一定的规律，那么，对象之间的这种特性，我们就称它为相

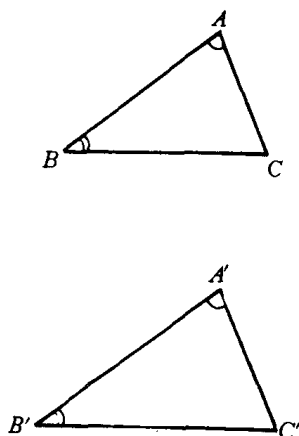
似。

例如，在几何学中，我们都知道，如果两个三角形（如图1-1-1(a)所示）或多边形（如图1-1-1(b)所示）相似，那么，它们之间的对应角相等、对应边成比例，即

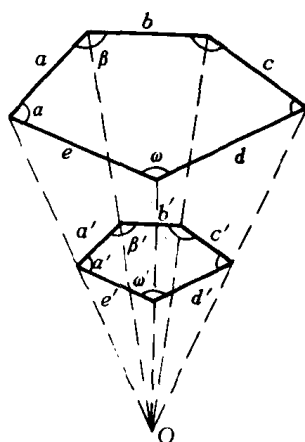
$$\begin{aligned} \angle A &= \angle A' & \angle B &= \angle B' & \angle C &= \angle C' \\ \angle \alpha &= \angle \alpha' & \angle \beta &= \angle \beta' & \dots & \angle \omega &= \angle \omega' \end{aligned}$$

$$\frac{AB}{A'B'} = \frac{BC}{B'C'} = \frac{CA}{C'A'} = \text{常数}$$

$$\frac{a'}{a} = \frac{b'}{b} = \dots = \frac{n'}{n} = \text{常数}$$



(a) 两个三角形相似



(b) 两个多边形相似

图 1-1-1

显然，这两个三角形或多边形之间的特性是符合相似定义的。它们的物理本质是相同的，都是几何图形（三角形或多边形），所不同的只是一个大些，一个小些；而且它们相应

的量（角和边长）又遵循一定的规律——对应的角相等，相应的边长成比例。所以说它们是相似的。

又譬如，在运动学中，如果运动过程（如图1-1-2所示）是相似的，则在相应的时刻（ t_1 对应 t'_1 ， t_2 对应 t'_2 ）各相应的变量（ x_1 对应 x'_1 ， x_2 对应 x'_2 ）都按相应的比例进行变化。换句话说就是存在如下的关系：

$$\frac{t_1}{t'_1} = \frac{t_2}{t'_2} \quad \frac{x_1}{x'_1} = \frac{x_2}{x'_2} \quad (1-1-1)$$

显然，这两个运动过程之间的特性也是符合相似定义的。它们的物理本质是一样的，都是形状相同的运动波形，所不同的仅仅是波形的大小是有差别；而且它们的相应量之间存在式（1-1-1）所示的关系。所以说这两个运动过程是相似的。

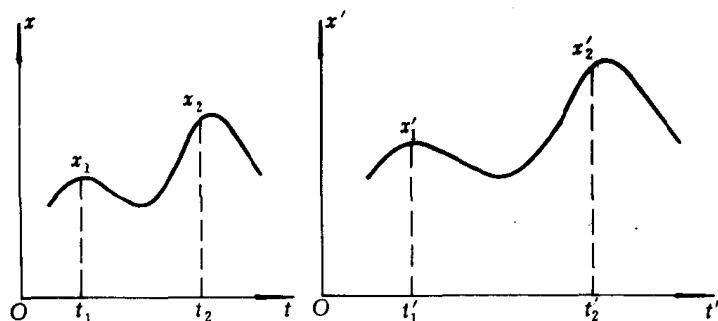


图 1-1-2 两个运动过程相似

二、类比

类比也是对象之间所具有的一种特性。不过这时我们所研究的对象，其物理本质并不相同。但它们的相应量之间同样存在一定的规律，而且描述两个对象（两种现象或两个过程）的数学方程式具有相同的形式。对象之间的这种特性，

我们就叫它做类比。

例如，有一辆质量为 m 的汽车，受到外力 F 的作用，以加速度 a 在公路上行驶。根据牛顿定律我们知道，汽车在公路上行驶所遵循的运动方程式为

$$F = ma \quad (1-1-2)$$

在电工学中我们知道，如果有一个导体，它的两端加以电压 U ，那么流过这个导体的电流 I 与导体的电阻 R 的乘积就等于导体两端的电压 U 。即电流在导体中流动所遵循的运动方程式为

$$U = RI \quad (1-1-3)$$

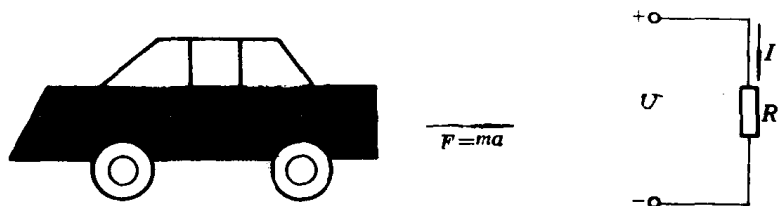


图 1-1-3 汽车运动与电流流动的类比

比较式 (1-1-2) 与 (1-1-3)，我们看到它们的形式完全相同。象这样的两种物理现象，一个是汽车在公路上行驶，一个是电流在导体中流动，它们两者的物理本质虽然不同，但是可以用形式相同的数学方程式来描述。我们就说这两种物理现象是类比的（图1-1-3）。

又譬如，有一个质量为 m 的物体，受外力 F 的作用，以速度 v 在粘性摩擦系数为 B 的平面上滑动，如图1-1-4(a)所示。此时物体受到三个力的作用：一个是外力 F ，一个是阻尼

力 $-Bv$ (负号表示与运动方向相反),一个是惯性力 $-m\frac{dv}{dt}$ 。

根据达朗贝尔原理,我们可以写出该物体的运动方程式为

$$F = Bv + m\frac{dv}{dt} \quad (1-1-4)$$

另外,从电工学中我们知道,一个如图1-1-4(b)所示的 $R-L$ 串联电路,根据克希荷夫电压定律,可以得到其电压平衡方程式为

$$u = Ri + L\frac{di}{dt} \quad (1-1-5)$$

式中 R ——电阻; L ——电感; i ——电流; u ——电压。

比较式(1-1-4)与(1-1-5),我们发现它们的形式完全相同。象这样的两个系统,它们的物理本质不同(一个是机械系统,一个是电系统),但具有形式相同的数学方程式,我们就说这两个系统是类比的。

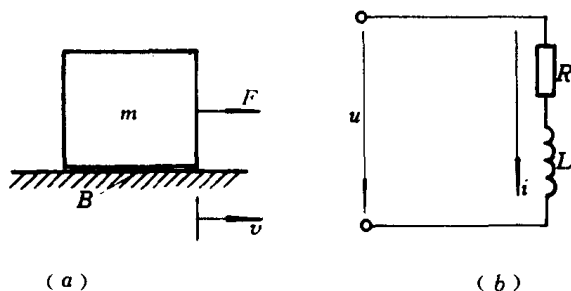


图 1-1-4 电系统与机械系统的类比

从以上的分析中可以看出,区别相似与类比这两个基本概念的主要标志是对象的物理本质是否相同。如果两个对象(两种现象或两个过程),它们的相应量之间尽管存在着一定

的规律，但其物理本质不同，仅仅具有形式相同的运动方程式，我们就说它们是类比的；如果两个对象，不但它们的相应量之间存在着一定的规律，而且物理本质还相同，所不同的仅仅是相应量的大小，我们就说它们是相似的。

1-2 系统与模拟

一、系统

随着社会的进步，科学的发展，在人们的交谈中，愈来愈多地用到系统这个名词，本书也涉及到了系统的概念。所谓系统，就是一些元件或部件，为了完成某一特定的任务，按照一定的方式组合起来的整体。譬如图1-2-1所示的单相

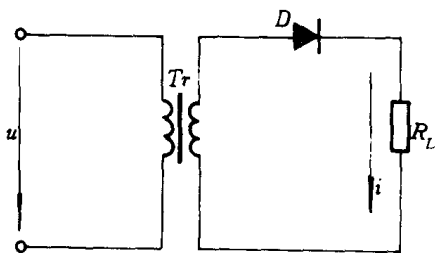


图 1-2-1 单相半波整流电路

半波整流电路，是为了完成整流这一特定任务，使用了整流变压器 T_r 、整流元件 D （晶体二极管）以及负载电阻 R_L 等三个元件，按照图1-2-1所示的方式组合起来，

完成单相半波整流的任任务。这就可以说是一个系统，一个小小的系统。又譬如图1-2-2所示的生产工厂，它是由采购、制造、装配、运输、控制等各相关部门按照一定的方式组合起来的，为的是完成制造产品的特定任务。因此，它也是一个系统，一个较大的系统。

在现代科学技术领域中，系统这个名词的含义很广。它不仅可以应用于具体的对象，而且也可以用于抽象的动态现

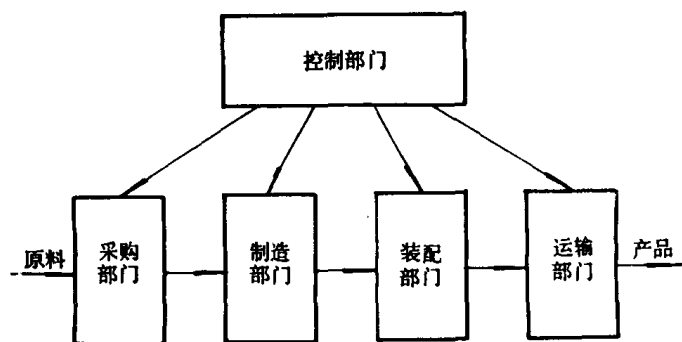


图 1-2-2 生产工厂

象。它不是人为规定的一个框框，而是指一个要研究和处理的对象。对象不同，系统包括的范围也不一样，既可大，也可小。譬如，我们可以把发电站作为一个系统；也可以把电站里面的汽轮机作为一个系统；还可以把汽轮机上的控制阀门作为一个系统。我们可以把一架飞机作为一个系统；也可以把飞机上的发动机或其他的部位作为一个系统。我们可以把一个国家的整个经济体系作为一个系统；也可以把经济体系中的某个部门或某条战线作为一个系统，如工业系统、农业系统、教育系统；还可以把它们之中的某个工厂、某个农场或某个学校作为一个系统。同样，我们可以把人体作为一个系统；也可以把人体中的某个器官作为一个系统。总之，系统这个概念应用十分广泛。根据研究的不同对象，在不同的环境、不同的时间、不同的目的、不同的用途或不同的方式下，可以有各种各样的系统，可以是大系统，也可以是小系统；可以是各种不同的物理系统，也可以是社会系统、经济系统、生物系统等。小至一个原子、分子，大至一个国家、整个地球、太阳系，都可以分别地作为一个系统看待。显然，

本书不可能涉及如此广泛的内容，我们所讨论的系统只限于物理系统中的非电系统，如机械系统、液压系统、气压系统、热力系统等，以及与之相模拟的电系统。后面几章所指的非电系统均指这几种系统。

二、模拟

所谓模拟，也叫做仿真，通俗地讲就是模仿真实的东西。说得具体一点就是用某一领域中的现象去模仿另一领域中我们所研究的现象。它是研究系统特性的一种重要方法。特别是当研究的对象比较复杂、难以观测时，模拟更显出其重要性。随着科学技术的发展，实验研究愈来愈重要，实验也愈来愈复杂了，有些大型而复杂的实验，或者是昂贵而重要设备的事故状态实验，几乎不可能进行。这时就可以采用模拟的方法，这种研究方法并不直接地研究某个现象或某个过程本身，而是设计一个与该现象或该过程相似或类比的模型，通过模型来间接地研究这个现象或过程，用以了解、处理或控制这个现象或过程。这种研究方法就叫做模拟的方法，简称模拟。用模拟方法研究自然科学的例子很多，例如在飞机制造业中，要设计制造一种新的超音速的大型飞机，往往先制造一个小的飞机模型在风洞中进行实验，用以研究机身或机翼的空气动力特性；在造船工业中，为了建造一艘大船，可以先造一艘比例尺寸缩小了的船模，在水中进行船体实验，以取得船体设计的资料；在农业上，可以用沙盘模型来研究河山的重新安排；在军事上，可以举行各种类型和规模的军事演习来研究战争；在医学上，常用动物进行某些毒性药物的疗效试验；在宇宙飞行中，先用狗代替人去太空探险等等。用模拟方法研究自然现象具有许多优点：它不但可以把对象放

大或缩小来研究，而且还可以使人们避免不必要的牺牲，摆脱危险的环境，缩短研制时间，节省资金，提高劳动生产率。所以模拟技术得到了广泛的应用。为了叙述方便，通常把模拟时原来所要研究的对象称为原型。如上述模拟例子中，我们所要建造的大船以及新的超音速飞机等就是原型。与原型相对应的模拟装置称为模型。或者说，用于模拟原型的装置称为模型。如上述模拟例子中缩小了尺寸的船模、小飞机以及沙盘等都是模型。如果模型是由一些电器、电子元器件所构成的装置，这个模拟装置我们就叫它做电模型。

三、物理模型与数学模型

一般说来，系统的模型有如图1-2-3所示的三种型式：

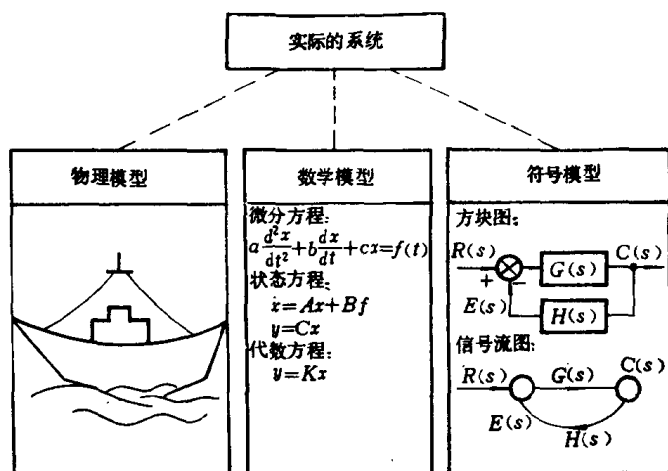


图 1-2-3 模型的分类

1. 物理模型

用缩小或放大的尺寸来制作的与原型相似的模型，模型的变量与原型的变量完全相同，这种模型就叫做物理模型。

例如缩小了尺寸的飞机模型、船模型等就是这种型式。

2. 数学模型

用数学方程式来描述某一系统的运动或某一个过程，这个或这组数学方程式就叫做数学模型。例如用线性微分方程或状态方程来描述某一运动过程，该微分方程或状态方程就是被描述的某一运动过程的数学模型。

3. 符号模型

用结构图或信号流程图来描述变量之间的关系，此结构图或信号流程图就叫做符号模型（关于结构图、信号流程图后面有介绍）。符号模型实质上就是数学模型，只是用符号或图解的方法来表示变量之间的数学关系就是了。因此，如果按模型的性质来区分，可以大致分为物理模型和数学模型两大类。这里所说的数学模型当然也就包括了符号模型在内。

四、静态模型与动态模型

如果按模型与时标的关系来区分，通常把模型分为静态模型和动态模型两种。

在生产过程中，生产的基本条件一般是希望保持不变的，而实际上往往也确实变化很小，这种微小的变化通常可以忽略不计。因此，我们可以利用这种被视为稳定的生产条件为背景来总结实测的数据，用统计的方法来拟定模型。显然，这样建立的模型与时标是无关的。这种不随时间而变化的模型就叫做静态模型，有时也叫稳态模型（因为它仅能表示系统处于平衡状态时的属性）。

由于任何事物都是处在不断地运动、发展和变化之中的，所以把一个系统的参量关系作静态模型处理是一种近似，是不完全符合实际的。严格说来，每一个系统都有驱动输入，