

电子模拟计算装置及其应用

朱培基編著

科学出版社

73.871
550

电子模拟计算装置及其应用

朱培基編著



內 容 簡 介

电子模拟计算装置是一种应用广泛的电子装备，它是科学研究及工程设计的重要工具。

本书对电子模拟计算装置及其应用作了较全面的阐述。全书共分十四章，前八章对部件及装置的原理和结构作了详细的介绍和讨论，并引述了近年来的新成就。第九章以后是以模拟方法为重点，除了讨论微分方程、代数方程和偏微分方程的模拟外，还介绍了实物系统的模拟及数字模拟方法。

本书可供从事研究、设计及应用电子模拟计算装置的科学工作者和工程技术人员的参考，也可作为高等学校的自动化、计算技术及其他有关专业的高年级学生参考用。

电子模拟计算装置及其应用

朱培基 編 著

*

科学出版社出版 (北京朝阳门大街 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 新华书店总经销

*

1963 年 9 月第 一 版

书号：2809

1963 年 9 月第一次印刷

字数：408,000

(京) 精装：1—2,100

开本：787×1092 1/16

平装：1—1,500

印张：19 5/8 插页：3

定价： 精装本 3.40 元
平装本 2.70 元

85800

前 言

电子模拟计算装置是一种应用广泛的电子装备，由于这种装置具有的灵活性及适用性，近二十年来得到了迅速的进展。我国这方面的研究和应用虽然开始得较晚，也已经迅速地取得成就，并在不断的发展中。但是这方面的中文书籍还比较缺乏。编写本书的目的是为了在这方面起到补缺和介绍新技术的作用。

模拟的技术方法是多种多样的，在这本书中显然不能全部包容。这里所提供的，主要是以函数部件为基础、以类比物理量为信号形式的函数式计算装置及其模拟方法。这种类型的模拟(类比)计算装置是目前应用最广泛、通用性最强的一种。全书共分十四章，第八章以前是部件及装置部分；第九章起以模拟方法的论述为重点。

部件和装置部分，按照线性和非线性部件的次序来论述。线性函数部件是模拟计算的基础，因此在概论之后，接着在第二章里对它的构成原理及方法，作了一般的概述。非线性函数部件的类别及技术方法是繁多的，这里用了三个章节来讨论。其中第五和第六章是电子式函数转换部件，第七章是机电式函数部件。

电子式函数转换部件的一般构成原理在第五章里进行了介绍，重点是二极管函数转换器，因为它的应用是很普遍的。乘法器是函数转换器的特殊形式，在模拟计算装置中，占有特别重要的位置，因此划分在第六章里作为专门问题来讨论。在这一章里，除了对目前应用最广的四分之一平方和脉冲调制两类乘法器作了较多的介绍外，其他类型的乘法器，如正弦调制、光电示波管、阶跃式、霍尔效应等也作了适当的介绍；为了全面起见，最后还引述了苏联学者提出的乘法组合装置。这种装置是由几个乘法器组合起来的，可以提高单个乘法器的静态准确度和动态响应。

第七章的内容是随动系统组成的机电函数部件，包括乘、除及其它非线性部件。组成部件的主体——随动系统，这里也作了一些介绍，但只是从实际出发结合计算机的需要来介绍的，它的理论则不属本书范围。

运算放大器是函数部件的重要组成部分，为了使读者对它有一个清楚的概念，本书用了两章(第三和第四章)来讨论。漂移和反馈稳定是运算放大器的两个重要问题，也在这两章里着重进行了论述，并介绍了一些构成运算放大器的新方法：象晶体管调制器、直馈原理和分频通道原理的应用等。

函数式模拟计算装置是函数部件的组合物，但并不是部件简单地累加，而是统一的系统。因此在装置中必须有各种控制、配线以及为保证系统可靠运算和方便工作等种种设备和机构，才能使零散的部件组成整个装置。这方面的问题，我们在第八章“直流电子模拟计算装置的系统组合”这一标题下来讨论。由于这方面的问题比较分散，很难作全面而

詳盡的介紹。

用模拟計算装置来构成数学模型,主要有三种类型:即常微分方程、代数方程和偏微分方程模型。它們的結構方法分別在第九、第十及第十一章內叙述。模型結構是以直流函数模拟計算装置为主要的解算工具,电网络則在偏微分方程模型中应用。

传递函数的形式是复变函数 S 的分式。以微分方程表示时,方程中含有輸出和輸入变量的各阶导数項。这类方程的模拟,比第九章里介紹的一般常微分方程要麻煩些,特别是当前者具有初始条件的情况下,这方面的問題在第十二章作了較詳細地論述。

实物系統的模拟和方程的解算是不同的。方程的解算仅仅是为了求得方程中某几个变量的解,而实物系統的模拟則是为了了解和研究系統的特性。在第九章里通过一些实例,說明实物系統模拟的具体方法,包括系統模拟、特性測量等。由于被模拟的对象是多种多样的,在一个簡短的章节里是不可能全面談到的,我們的目的仅仅是使讀者对此有一概略的認識而已。

第十四章也就是最后一章,內容为数字方法的应用。包括数字計算机运算原則在类比計算装置中的应用、数字混合模拟等。这些方法可以認為是模拟技术的进一步发展。在有些情况下,可大大节省函数部件的数量;在另一些情况下,可提高运算的准确度。这些方法的应用将扩大模拟計算装置的适用范围。

本书的初稿,大部分曾作为教材試用过,現經修改补充后編写而成。由于時間仓促,未及詳細审訂,并且限于水平,錯誤和不足之處一定很多,誠懇地希望广大讀者不吝指正,随时提出宝贵意見,以便有可能在下一版中得到糾正和补充。

本书能够在較短期間編写出版,主要是由于有关組織的支持和鼓励,在此表示衷心感謝。胡忠恕、李景湘、徐茂泰、赵季純等同志在本书編写过程中,給予了很大帮助,特别是胡忠恕同志,在这里也一并表示感謝。

編著者

1963年5月

810473/11

(31075/52)

目 录

前言	vii
第一章 概論	1
§1.1. 计算机的发展	1
§1.2. 模拟计算机的类比关系和模拟计算机的分类	2
§1.3. 模拟计算机的应用和作用	6
参考文献	7
第二章 綫性函数部件	9
§2.1. 用无源网络組成的綫性函数部件	9
§2.2. 用运算放大器和无源网络組成的基本函数部件	13
§2.3. 积分电容漏电及对地絕緣和电容器吸收效应及其影响	19
§2.4. 复合函数部件	23
§2.5. 基本函数部件的动态誤差	30
参考文献	40
第三章 漂移的影响和运算放大器	41
§3.1. 漂移的来源及其影响	41
§3.2. 电子管放大器第一級的等效电压漂移和补偿	44
§3.3. 放大器的輸出級	51
§3.4. 自动稳定零点的运算放大器	56
§3.5. 电流漂移的影响及克制方法	63
§3.6. 利用分頻通道組成的运算放大器	65
§3.7. 运算放大器綫路	66
参考文献	72
第四章 运算放大器的設計和分析	74
§4.1. 运算放大器系統的等效方框图	74
§4.2. 传递函数的形式	76
§4.3. 放大器的頻带及稳定补偿	81
§4.4. 带有自动稳定零点漂移綫路的放大器系統	86
§4.5. 改善放大器的一些途径	88
参考文献	92
第五章 函数轉換器	93
§5.1. 用非綫性阻抗構成的函数轉換器的一般方法	94
§5.2. 二极管非綫性单元特性	97
§5.3. 用二极管复制函数的方法	101
§5.4. 通用二极管函数轉換器	107
§5.5. 典型非綫性和邏輯开关	109

§5.6. 基利特非綫性电阻	112
§5.7. 函数轉換器的誤差	115
§5.8. 增加函数的分段和曲綫插值的方法	119
§5.9. 阴极射綫管式函数轉換器	121
§5.10. 多变量函数轉換器	123
参考文献	125
第六章 乘法部件	126
§6.1. 按照間接相乘关系构成的乘法器	127
§6.2. 調制式乘法器	134
§6.3. 变系数乘法器	146
§6.4. 乘法器組合装置	151
参考文献	154
第七章 随动系統式机电函数部件	156
§7.1. 计算机随动系統的环节的传递函数和系統的动态特性	156
§7.2. 随动系統的速度和加速度限制及齿輪比选择	161
§7.3. 放大器綫路和稳定网络	163
§7.4. 随动系統函数部件及其負載消除方法	166
§7.5. 用随动系統組成的除法运算	169
§7.6. 随动系統組成的函数轉換器	172
参考文献	176
第八章 直流电子模拟計算裝置的系統組合	177
§8.1. 装置中的部件配比和配綫方法	177
§8.2. 传递函数的設置和电位器	180
§8.3. 初始条件的建立	183
§8.4. 电源、运算和校驗的控制	184
§8.5. 自动設置和自动选择机构	191
§8.6. 程序和交替运算的控制	193
§8.7. 記錄和观察设备	195
参考文献	196
第九章 模拟計算裝置解算綫性及非綫性常微分方程	197
§9.1. 結構图使用的符号	197
§9.2. 綫性常系数微分方程的結構方法	197
§9.3. 幅值与時間尺度的选定	201
§9.4. 綫性变系数常微分方程的模拟	206
§9.5. 变系数部件和時間函数产生器	209
§9.6. 非綫性方程的模拟	212
§9.7. 断續系統的模拟	213
第十章 綫性联立代数方程的求解	218
§10.1. 联立代数方程的矩陣表示	218
§10.2. 綫性联立代数方程組的直接解法	221
§10.3. 放大器頻响特性与系統的穩定关系	223
§10.4. 綫性代数方程的普遍結構方法	226

§10.5. 用迭代方法提高准确度	227
§10.6. 联立代数方程组的系数为复数时的解法	228
§10.7. 固有值问题及多项式	228
参考文献	229
第十一章 求解偏微分方程	230
§11.1. 直角坐标定差方程的近似式	230
§11.2. 圆柱及球坐标的差分表示式	233
§11.3. 电阻网解算场的問題	235
§11.4. 用阻抗网解算具有时间导数的偏微分方程	237
§11.5. 用函数计算机来模拟偏微分方程	239
参考文献	241
第十二章 传递函数、迟延函数和一些时间函数的模拟	242
§12.1. 传递函数的模拟——連續积分法	242
§12.2. 传递函数的模拟——代换法	244
§12.3. 传递函数的模拟——拉氏轉換法	245
§12.4. 初始条件等于零的传递函数的模拟图表	246
§12.5. 純迟延网络	254
§12.6. 其他迟延方法	258
§12.7. 正弦函数的模拟	260
§12.8. 函数 $e^{\pm at}$ 、 e^{-at} 和 a^t 的产生	264
§12.9. 分数幂函数 $A(t+a)^a$ 的产生	265
§12.10. 倒数 $\frac{1}{t+a}$ 和对数 $\ln(t+a)$ 函数的产生	265
§12.11. 概率指数函数 $e^{-h^2 t^2}$ 的产生	265
§12.12. 幂级数(时间函数)的产生	266
参考文献	267
第十三章 实物系統模拟	268
§13.1. 系統模拟的方法	268
§13.2. 反饋系統的模拟	272
§13.3. 反饋系統部件的典型模型	278
§13.4. 系統特性的模拟和測量	283
§13.5. 伴随系統模拟	288
参考文献	296
第十四章 数字方法和数字模拟	297
§14.1. 程序和迭代計算	297
§14.2. 数字-类比型模拟装置	304
参考文献	307

第一章 概 論

§ 1.1. 計算机的发展

計算工具在社会生活的各个方面一向起着重要的作用。随着科学技术的进展，計算工具从简单的手工工具发展成为复杂、精确而高速的装备。它們的演变一直是沿着两条不同的道路进行着，它們的区别在于运算时所采用的方法。一种方法是将被运算的数值用数碼或代碼表示出来，按照数值运算法則进行运算。另一种方法是将被运算的数值用一定形式的物理量来表示，然后将物理量通过函数变换求得最后的解答。利用前一种方法构成的計算工具我們叫做数字計算装置，而后一种則叫做相似或类比計算装置。我国发明的算盘是最早的一种数字計算装置，进一步的进展有台式計算机、电动計算机、加法机等等。这些数字計算机經過多年的改进，結構上已經很完善。但由于采用的机械部件惯性較大，速度上进一步提高受到了限制。因此这类計算装置无法滿足近代科学技术上高速运算的需要，同时也很难按照事先規定的程序自动地进行运算。十九世紀末巴倍基^[1,2]提出了自动計算机的概念，但是每秒钟可进行数万次的真正自动快速計算机，只是在电子学及电子技术得到了发展以后才得以实现的。

計算尺、諾模图、面积仪也是我們所熟悉的計算工具，它們是属于类比計算机一类的。这些工具多年来作为科学技术工作者的左右手，一直有效地被用来解算科学技术工作中所遇到的計算問題。但是面对着日益发展着的科学技术，这些简单的类比計算机显然无法解决复杂的計算問題。在科学技术中人們經常涉及到許多物理現象，这些物理現象中相当大的一部分可以用微分方程式来描述，因而非常需要一种能解算微分方程的計算机。这种計算机終於在 1930 年左右为布希^[3,4]創造出来，成为解算微分方程的有力工具。布希的微分分析机的出現是类比計算机发展中的重要阶段。在这以前所有的类比計算机只能用手动的方法得到解答，而布希机則能自动地进行，并且可以跟随外界的輸入变化进行运算。当然布希机也具有前一时期的特征，运算部件都是机械的，并且很笨重。随着时代的推移，电子的部件也就很自然地替代了机械部件。目前的电子模拟計算机可以認為是布希机的进一步演变，虽然在結構原理上存在着巨大的差別。

无論是快速电子数字計算机还是电子模拟(类比)計算机，它們的出現都是由于計算上的需要。因此很自然地首先用来計算数学問題。但是人們发现模拟計算机当它随着外界訊号工作并給出輸出信号时，实际上是对被計算物理过程的模拟，也就是原物的模型。这种模型較实物模型优异之处是可以改变函数部件間的插接，很容易地从一种模型轉換到另一种模型。并且只要将輸入和輸出經過适当的轉換，便可代替原物和系統中其他装

置直接联接起来。这就可能通过用电子计算机构成的模型，间接地观察和研究原物的过程和系统中其他部件的性能。模拟计算机也是一个自动装置，在自动化技术日新月异的进展中越来越多的被引进到自动控制系统中。模拟计算机的上述非计算运用的可能性，对于数字机也是存在的，但目前的数字计算机由于速度、价格等原因，实际上还远没有达到模拟机已达到的那样普遍的程度。

§ 1.2. 模拟计算机的类比关系和模拟计算机的分类

模拟计算机的类比或相似关系存在于被研究的实物的物理现象或过程与计算机的物理现象或过程之间。为了便于说明可以区别为“实物”的和“机器”的物理现象或过程。实物和机器间的类比或相似关系可以从两方面来看待：即实物与机器所采用的物理量间的相似和实物与机器所服从的数学描述间的类比或相似关系。

当我们研究实物的物理现象或过程时，随着实物的物理本质不同，被引入到问题中来的物理量和衡量尺度是不同的。例如在研究天体运行轨道时有速度、加速度、距离和质量等物理量，而在研究电子光学时除了上述物理量外，还有电荷、磁通等另外一些物理量，而同样的物理量在天体运行及电子光学中所用的量度有很大差距。这些随着实物本质不同而引入到问题中来的千变万化的物理量，当它们进入到计算机的时候都被计算机中有限的另一些物理量所代替。计算机所用的物理量和实物所用的物理量尽管在性质上和尺度上并不尽同，但是它们之间存在着对应的关系和比例的关系（或简单的函数关系）。例如用电压来替代实物的长度，每一伏特相当于一米等。实物和机器物理量间的这种关系是一种类比关系。

实物的物理现象和过程可以用数学方程来描述。机器的物理本质同样也可以用数学方程来描述。尽管由于实物与机器的物理本质和它们所服从的数学关系中的参数不同，但是当计算机用来解算描述实物现象和过程的数学方程时，机器方程与实物方程将服从于同一的数学关系，也就是二者的数学描述具有类比关系。

各种模拟计算机的基本类比关系如上所述，但在不同的计算机中类比的程度并不一样。一般根据计算机和实物类比的紧密程度可划分为直接类比和间接类比两类：

直接类比计算机作为实物的模型来看，模型和实物除了服从类比的数学关系外，模型与实物方程的物理参数间还具有——对应的紧密类比关系。例如用电阻，电容和电感组成的电网络系统来模拟由质量、弹性阻力和粘性阻尼组成的机械系统，可以在数学方程上写成同一的形式如：

机械系统：

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + Kx = F(t). \quad (1.1)$$

电网络系统：

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{c} q = E(t). \quad (1.2)$$

(1.1)式和(1.2)式数学方程是相似的,各参数也具有一一对应的类比关系:

$$M \text{---} L, \quad x \text{---} q, \quad B \text{---} R,$$

$$F(t) \text{---} E(t) \quad K \text{---} \frac{1}{c},$$

这种对应的类比关系不仅存在于上述这些参数之间,而且它们的能量表示式也具有类比关系的。这种紧密的类比关系是由于电网络系统和机械系统的最基本物理本质的数学描述具有类比关系。如图 1.1 所示电网络的最基本关系式即克希霍夫定律:

1. 节点电流之和等于零:

$$i_{1x} + i_{2x} + \cdots + i_{nx} = 0 \quad (\text{图 1.1a}).$$

2. 回路电压之和等于零:

$$V_{12} + V_{23} + \cdots + V_{n1} = 0 \quad (\text{图 1.1b}).$$

在机械系统中与电网络对应的基本关系式是牛顿第二定律:

1. 物体受力之和等于零:

$$f_{1x} + f_{2x} + \cdots + f_{nx} = 0 \quad (\text{图 1.1c}).$$

这一关系式和克希霍夫节点电流关系式是相似的。

2. 机械系统各点相对速度矢量所构成的闭回路其相对速度之和等于零:

$$v_{12} + v_{23} + \cdots + v_{n1} = 0 \quad (\text{图 1.1d}).$$

这一关系式和克希霍夫回路电压关系式相似的。

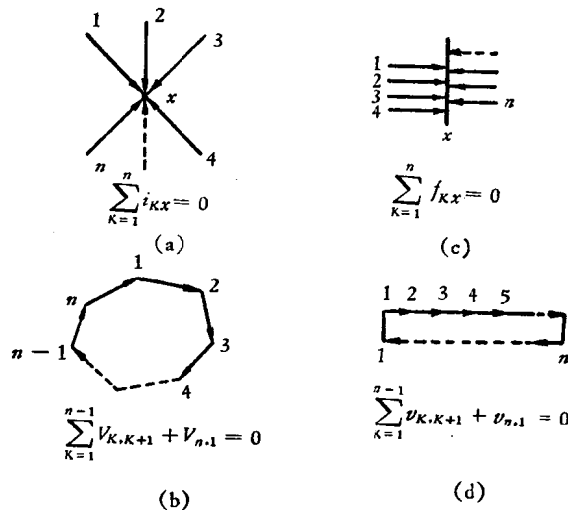


图 1.1 电网络和机械系统的对应关系

由上可知在电网络中电压与电流的关系和机械系统中速度与力的关系可表示成互相对应的关系式:

$$\left. \begin{aligned} V &= Ri + \frac{1}{c} \int idt + L \frac{di}{dt}, \\ v &= \frac{1}{\beta} f + \frac{1}{M} \int fdt + \frac{1}{K} \frac{df}{dt}; \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

或

$$\left. \begin{aligned} i &= \frac{1}{R} v + C \frac{dV}{dt} + \frac{1}{L} \int V dt, \\ f &= \beta v + M \frac{dv}{dt} + K \int v dt. \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

因此对于一个一维的机械系统,完全可用与电网络相似的“机械网络”来表示,而电网络对机械系统的模拟自然具有完全对应的直接类比关系。如图 1.2 (a) 所示的机械系统可利用牛顿第二定律给出各点的力的关系及等效机械网络如图 1.2 (b) 和 (c) 所示,图 1.2(d) 即此机械系统的电网络模拟。可以看到这种模拟可以直接从实物得出而不需先列出实物方程式。图 1.2(d) 及 (c) 各为电压源和速度源的电和机械网络。显然,可以利用对偶关系找到电流源和力源的电和机械网络,而电流源的电网络也是力源的机械网络的模拟。直接类比计算机与实物的紧密类比关系从这一例子中可以得到充分的说明。

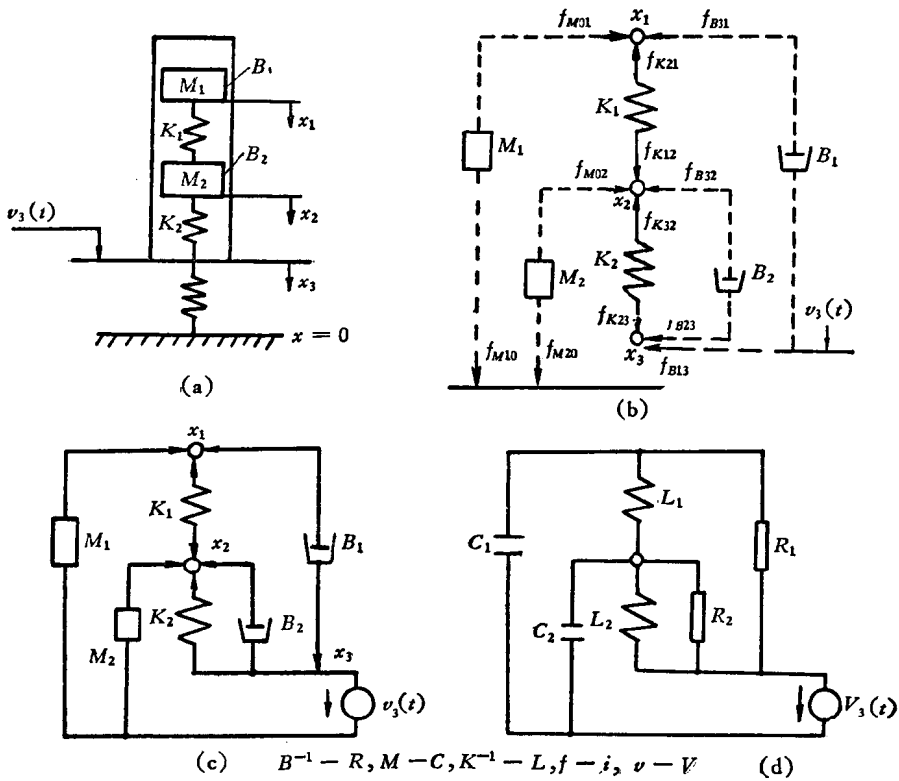


图 1.2 机械系统的电网络直接模拟

除了机械实物系统用电元件的模拟是直接类比的模拟外,在模拟场的问题时经常用到的电解槽,阻抗网等模型也是直接类比的模拟,场和模型间的直接类比关系是一目了然的。

间接类比模型是按照方程式的运算关系用相当的函数(运算)部件组成。如上述机械系统的方程式:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + Kx = F, \quad (1.5)$$

其中有加法、系数相乘、微分等运算关系。在組成模型时，只要采用一些相当的运算部件联接起来，如图 1.3 所示：

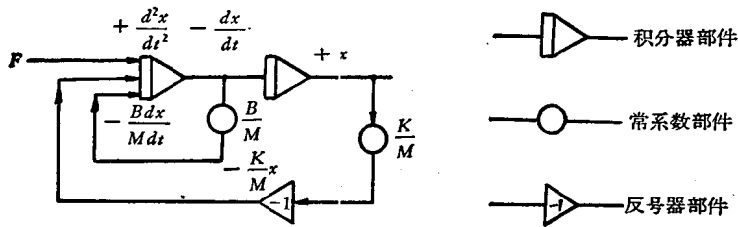
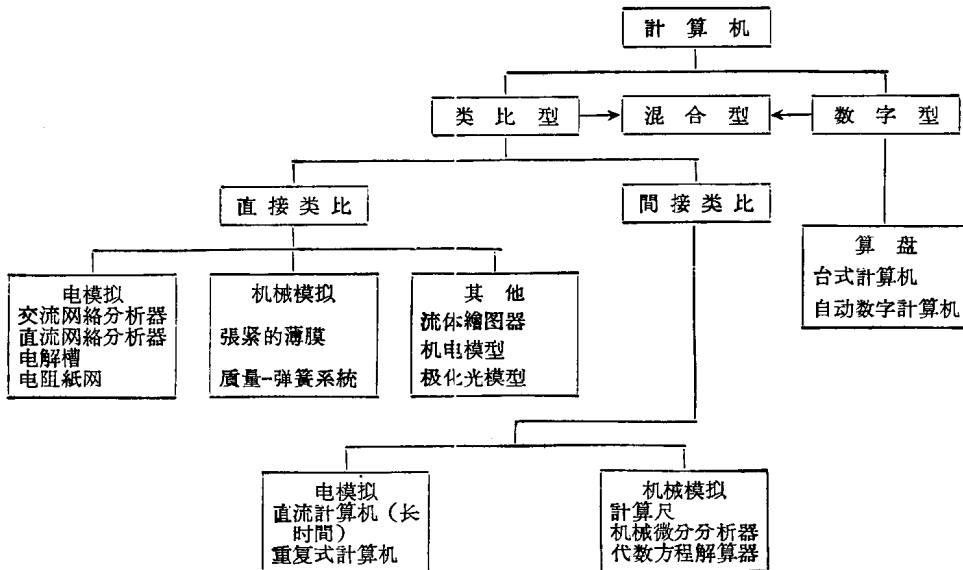


图 1.3 間接类比装置組成模型的結構图

方程式中質量，粘性摩擦和弹性系数在图 1.3 中沒有相应的元件性能来代表，位移、速度和加速度也沒有独立的对应参数。这些都是用电压(或电流)表示的。間接类比计算机組成的模型与实物間的类比关系仅仅是数学描述上的类比，因此必須按照实物方程式来組成模型。用間接类比原理构成的計算装置，因为是用一个个函数部件来組成模型的，因此可以用許多标准的函数部件构成通用性很強的計算装置。这种計算装置是各式类比計算装置中用途最广的一种，叫做函数計算机。由于这种計算机最早被用来模拟实物过程，习惯地叫做模拟計算机。函数計算机中还可分为直流模拟計算机，重复式模拟計算机等等。在本书以后提到的模拟計算机都是指这一种計算机。

类比計算装置在直接和間接类比二大类之下还可以按照采用的元、部件的性能划分成电的、机械的等小类别，如下表所示。



§ 1.3. 模拟计算机的应用和作用

模拟计算机在先进的国家中已经成为科学研究和工程设计中十分重要的装置，是解决工业部门和国防军事部门重大问题的有效工具。在有关国防和军事问题中，计算机被用来解决飞机和导弹的控制和制导系统的设计问题，飞机负载的设计和应力分析问题，雷达及反雷达的研究，火箭控制系统的分析以及飞行物体推进系统的设计等等问题。在非军事部门中计算机被用来研究热力学、电子光学和流体力学，也被用来进行核子动力和反应堆的设计和控制在研究，以及在化工、石油、冶炼、轧制等部门中解决有关控制、设计、分析等问题，并且也在经济规划、人员训练、生产调度等方面起着一定的作用。

模拟计算机的应用可分为四个方面：(1)作为计算工具，(2)作为实物的数学模型或试验装备，(3)作为训练装备，(4)作为控制部件和装备。计算机的基本用途是为了获致数学问题的解，模拟计算机可用来解算微分方程、代数方程等数学问题。微分方程和代数方程和近代科学技术建立着紧密的联系，描述着大量的物理过程和现象，因此它的求解对于科学技术工作是十分重要的。作为计算工具，模拟计算可以简捷胜任地获致解答。特别是线性变系数常微分方程和非线性常微分方程，用分析方法解算的困难，在模拟计算机上可以轻而易举的克服。

模拟计算机的第二个用途是作为实物的数学模型和试验工具，可能这是它的最重要用途。当模拟计算机被结构起来作为实物过程的模型时，它就成为试验研究的对象。而利用它给出的信号对另一对象进行试验研究时，计算机又成为研究试验的工具。在许多场合下，用模拟的方法可以使被研究的对象在实验室内以模型的形式被充分的研究、分析，并得到改善；可以使实物在人造的环境中经受到将在实际环境中所遭遇的种种考验。

用模拟计算机组成的陀螺仪系统是模拟计算机作为模拟和试验工具的一个例子。陀螺仪在飞机中用来检测飞机的旋(滚)角。当飞机在飞行中受到外界骚动而偏移时，偏移的角度通过陀螺仪被检测出来。陀螺仪检测到的偏移角度以电信号输给随动系统，随动系统则改变飞机两翼上的控制面(或副翼)，使偏移减少。陀螺仪试验系统如图 1.4 所示，陀

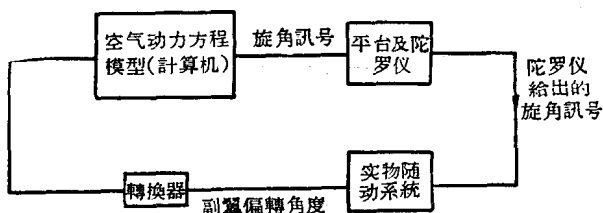


图 1.4 陀螺仪试验系统

罗仪被安置在飞行平台上，平台可以自由地按旋角转动。计算机模拟空气动力方程所描述的动力过程，按照预先给定的骚动计算出飞机的旋角，并把旋角信号引到平台，平台随动系统则按计算机给出的信号转动。

陀螺仪从平台上检查旋角，给出飞机的旋角信号，并引入实际的随动系统。随动系统则给出副翼偏转角度，经过转换再引入计算机。计算机模型则依据副翼角度及空气动力过程计算出翼面受到的力和力矩，并用以校正旋角偏移，这就构成陀螺仪控制的闭环系统。这样一个系统，不仅可以研究陀螺仪承受实际试验时的可靠性，同样也可以研究飞机

所承受的力、力矩、旋角和其它有关结果。

从这一例子可以看到模拟计算机作为实物的数学模型及试验工具，除了可以完成用实物很难完成的实验外，在经济上和安全上也是很可取的。

训练装置是在计算机和实物部件结合之间更进一步加上人的因素。训练装置的作用是使驾驶员在沒有进行实际操作以前，在模型中接受沒有危险的实际操作训练。无疑，这将带来安全和经济。飞行训练装置是一个由计算机、驾驶员和教员组合在一起的闭路系统。驾驶员在一间封闭的模型“飞机”里，当计算机使“飞机”飞行时，前面的仪表板上便给出“飞机”在飞行中的各种讯号，如转角、发动机转速、“飞机”高度和前进速度等。驾驶员便如同在实际的飞行中一样操纵驾驶杆和脚踏板。驾驶杆和脚踏板的讯号引到计算机，计算机经过计算后对飞机进行控制。教员的作用是观察被训练人员的飞行情况，并引入模拟的紧急情况，如“风暴”和发动机故障等。训练装置也可以用来训练轮船、坦克、飞机以及原子反应堆的操纵人员。

模拟计算机作为控制装置(或部件)，用在军事和航空方面是很重要的。如飞机自动驾驶仪，截击机的炮火控制等。在工业中由于自动化的进展，模拟计算机构成的控制装置也越来越多。一个较早的例子是汽轮机叶片铣床控制。如图 1.5 所示，汽轮机叶片的工作件(毛坯)和样板凸轮被安置在转台上。工作件和样板凸轮的转角依赖随动系统的控制保持相同，同样的方法保持铣刀与工作件的中心距离和滚轮 a 与凸轮的中心距离相等。当凸轮转动时铣刀便在工作件上铣出需要的叶片形状。为了保证加工出来的叶片光洁平整，必须使铣刀的切削速度恒定，因此凸轮和工作件的转速必须随着叶片的瞬时形状而改变。叶片的形状和转速的关系可以写成数学方程，计算机则可按给定的方程式结构成数学模型。当凸轮转动时凸轮形状的参数经检测转换后，作为计算机的输入讯号引入计算机。而计算机则给出一讯号来控制凸轮及工作件的转速，使得铣刀的切削速度保持恒定。

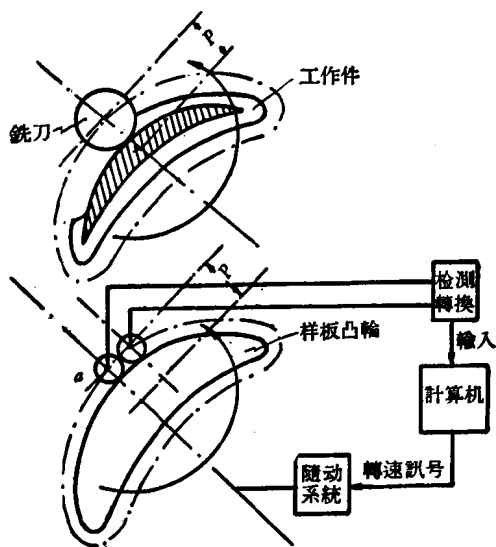


图 1.5 汽轮机叶片铣床控制

模拟计算机不仅用作机床控制，也用在电力系统功率分配，生产过程经济生产的最佳控制及核反应堆控制等各个方面。

参 考 文 献

- [1] Bowden B. V., *Faster Than Thought*, 1953.
- [2] Babbage H. P., *Babbage's Calculating Engines*, 1888.

- [3] Bush V. A., The Differential Analyzer, A New Machine for Solving Differential Equations, Journ. Frankl. Inst. V. 212, No. 10, 1931.
- [4] Bush V. A. and Coldwell C. H., A New Type of Differential Analyzer, Journ. Frankl. Inst. V. 226 No. 10, 1945.

第二章 綫性函数部件

类比计算机中应用最广的一种类型是函数计算机，函数计算机是由各式各样的函数部件组成的。函数部件基本上可分为两大类，即：綫性函数部件和非綫性函数部件。在这里綫性和非綫性的含义和我们在数学上的綫性方程和非綫性方程的含义是一致的。綫性部件意味着部件的输出和输入关系是綫性的关系，即：输出量作为输入量的函数中没有输入量的高次项，也没有输入与输出量的乘积项。在解算綫性微分方程时，无疑要用綫性函数部件来完成。但不等于说綫性函数部件只能用来解算綫性方程。同理，非綫性部件也不是只限于解算非綫性方程。例如，在解算变系数綫性常微分方程时，有时就需要用非綫性的函数转换器及乘法部件。因此对部件的綫性或非綫性的理解应只限于部件本身而不是被解算的方程。

函数部件按照它们结构的性能来划分，可分为机械的、机电的及电子的等种类别。机械的函数部件起源于布希氏微分分析机，其中主要的函数部件为机械积分器。机电函数部件通用的形式是用随动系统结构起来的。作为通用的具有独立的函数特性的部件来说，机械式函数部件目前只在专用的模拟计算机中使用，在本书中将不予讨论。机电式函数部件目前仍旧是很通行的，将在以后的章节中论述。这一章要讨论的綫性部件是采用电子元件及网络综合起来的部件。这种类型的部件，在我们实际接触的各种模拟计算机中占有最重要的地位。电子函数部件无论是綫性的还是非綫性部件，一般都采用电压这一物理量来代表输入和输出参量，因此方程式中函数的关系也就是电压的函数关系。用电流来代表各参量也是可能的，不过就目前科技状态来说，以电压来代表似乎更方便些。

綫性电子函数部件所要完成的最基本的函数关系有加法、积分、微分等。更复杂的函数关系实际上是这些基本函数的组合。例如部件的输入与输出是二阶微分方程的函数关系。它的函数关系可以用基本的函数部件结构起来，也可以用更直接的方法组成复合的部件。基本函数部件和复合函数部件都将在本章里讨论。重点则放在基本函数部件上。

§ 2.1. 用无源网络组成的綫性函数部件

用电的无源四端网络来组成函数部件是最直接的方法。如图 2.1 所示四端网络，把 e_i 和 e_o 作为输入和输出信号。 e_o 和 e_i 间的函数关系是綫性的。当给定 Y_i 及 Y_o 值时，便可以获得所需要的函数关系。图中 Y_L 为负载， $Y_i = \frac{1}{Z_i}$ ，其输出量和输入量可用 $E_o(s)$ 和 $E_i(s)$ 分别代表 $e_o(t)$ 与 $e_i(t)$ 的拉普拉斯变换式，导纳也用算子导纳 $Y_i(s)$ 来表示。图