

自动化丛书

电子模拟装置

〔苏联〕A. K. 甘鲁里奇著 甘和贵译

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书是“自动化丛书”之一。丛书内容包括自动学及远动学的理論,自动装置、元件和仪器的結構及应用等。丛书选题主要取自苏联及其他国家的有关資料,也包括国内編写的专题論著。本丛书由“自动化丛书編輯委员会”主編。

本书目的在于使讀者了解小型电子模拟計算机的結構和作用原理。首先以随动系統作为具体例子来表明电子模拟計算机的运用范围,同时介紹模拟的原理,并談到如何在模拟机上实现加法、微分和积分等基本数学运算的情形。其次在談直流放大器綫路的同时,着重討論零点漂移的补偿和稳定的方法,并列岀各种运算放大器的实际綫路。最后則闡述函数轉換器和乘法装置。

本书适合对电子模拟計算机的作用原理和装置感兴趣的工程技術人員和大專师生作参考。

ЭЛЕКТРОННЫЕ МОДЕЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

А. К. Ганулич

Госэнергоиздат · 1961

自动化丛书(6)

电 子 模 拟 装 置

甘和貴 譯 虞冠新 校

自动化丛书編輯委员会主編

上海科学技术出版社出版(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业許可証出093号

上海大东集成联合印刷厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印張 2 10/32 排版字数 51,000

1962年12月第1版 1963年8月第2次印刷 印数 3,301—5,600

統一书号 15119·1694 定价(十二) 0.30 元

譯 者 序

这本小册子是一般希望掌握模拟技术的人员较理想的初步读物。书里介绍模拟装置中各个主要部件，同时也谈到一些模拟方法，使初学者读完之后，能有一个大致完整的初步概念，从而知道模拟装置在自动控制中可以解决些甚么问题。

模拟装置的质量、求解精度的高低，与其中直流放大器的质量有着密切关系，但甚么是直流放大器的质量指标？如何才能使它既有高达几万倍的放大系数又有极小的零点漂移？产生零点漂移的根源及其补偿方法又是甚么等等，针对这些问题，作者在第三章里深入浅出地作了解答，概念清楚，重点突出，使读者读后立即可以掌握其中关键。

关于线性部件和非线性部件的工作原理，作者一方面着重物理概念的解釋，一方面还举例加以说明，使人感觉到这些例子虽然数量不多，但却很确切，并都是些实际装置的线路，这点定会受到读者的欢迎，因学得的知識立即可用到工作中去。

本书对模拟方法的叙述略少，所以在读完这本书后，建议读者可接读[苏联]波·雅·柯崗著《电子模拟装置及其在研究自动调节系统中的应用》，就会更加深入和完整地掌握模拟技术的知識。

甘 和 貴

1962年8月于上海

原 序

从事各种自动装置的工程师在进行各种計算时，总希望在这些計算工作上花费最少的劳力和时间，因此，各种数学仪器和工具对工程师讲来，就显得格外重要了。

直到目前为止，計算尺仍是工程师最通用的数学工具，甚至剛毕业的大学生們也都已掌握。利用計算尺可以很快地完成各种数学运算（如算术运算、三角运算以及取对数等等）。

但从現代观点看来，这样的数学工具能解算的問題已显得非常狹窄。自动系統及其中发生的过程已变得越来越复杂，在研究、組成和使用这种系統时，工程师必須研究微分方程所描述的复杂物理現象。要求解和分析微分方程，单凭一支計算尺已无济于事，这时，就需要用计算机了。

苏联生产了不少的计算机。但其中許多都是一些复杂而笨重的装置，并且还只有精通計算技术的专家們才能运用。这些机器通常設置在科学研究所、設計局以及專門的實驗室里，同时还需要受过專門訓練的人員来运用。

大多数工程师需要的是另外一些結構簡單、使用方便的计算机，使得任何工程师都能在最短期間里熟悉它，并能象現在的計算尺一样独自地加以运用。此外，这些计算机的体型还應該小巧玲瓏，能够輕便地放在實驗室或車間的桌子上。最后，还要求它們的价格便宜，能够成批生产，使得所有的机关、企业都能配置到足够数量的计算机，尽量做到在每个工程师工作的地方都有这样的机器。

十分清楚，对这种能为大众所运用的计算机，不能在求解精度方面提出过高的要求。这样的机器目的在于帮助工程师

能很快地对自动系統中发生的各种現象进行近似的分析。解决高精度的复杂問題和进行大量的計算时，应该轉交給掌握更为复杂、能适应多种情况的通用計算机的专家們去工作。

在苏联科学家們和工程师們的努力下，用来求解微分方程的小型計算机已經試制成功。几年来，苏联工厂在大量生产这种机器的同时，还不断地改进了产品质量，縮小了体积。

目前，广大自动化工作者的基本任务是立即掌握这些机器的結構和操作原理。这本小册子的目的就在于促进这一任务的解决。讀者如具备工科大学高等数学和无綫电工学課程大綱範圍內的知識，就能順利地閱讀。

作 者

目 录

譯者序

原 序

第一章 电子模拟装置的作用原理	1
第二章 綫性运算部件	10
1. 加法綫路	10
2. 反饋放大器	14
3. 电压的微分和积分	19
第三章 直流放大器	25
4. 对直流放大器的要求	25
5. 直流放大器綫路	27
6. 零点漂移的阴极补偿	32
7. 零点漂移很小的放大器	35
第四章 函数轉換器	42
8. 有負荷电阻的二极管綫路	42
9. 地电平輸入的二极管綫路	51
第五章 乘法部件	57
10. 电压的相乘	57
11. 乘法部件的綫路	59
結 論	67
参考文献	67

第 1 章

电子模拟装置的作用原理

大家知道，在各种物理系統(机械的、电气的、液动的等等)中发生的現象和过程，不管它們的物理性质如何，常常可以用一些相同的数学方程，特别是微分方程来加以描述。这正是弗·伊·列宁曾經在《唯物主义与經驗批判主义》一书中指出过的事实。他写道：

“自然界的統一在关于各种現象領域的微分方程的‘惊人类似’中显示出来”(列宁全集第 14 卷 276 頁)①。

机械摆的运动和电振荡回路中的过程可以用相似的分方程来描述，就是这种类似的典型例子。

由此就产生一种企望，要求能够在一个物理系統中較为簡便和精确地来研究其他各种物理系統中发生的过程，或求解微分方程。这种系統常常称为所研究現象的数学模拟。

在大多数情况下，用电动和电子元件能方便地实现数学模拟。其中广泛应用的是由直流放大器构成的电子模拟装置，这是有代表性的数学模拟。模拟装置的基本构成原則在于要求由电子元件組成的綫路中产生的过渡过程能为被研究系統的方程式所描述。因而，問題的解就在于测量出所需要

① “唯物主义与經驗批判主义”中譯本，曹葆华譯，人民出版社 1956 年版 295 頁。——譯注

的变量来,这种变量在电子模拟装置中是以电压来表示的。

即由于电子模拟装置可以得出各种方程的解,因此就常把它称为计算机,同时还由于求解过程是連續进行的,所以电子模拟装置属于連續作用式计算机类。

利用电子模拟装置来求解綫性的以及非綫性的常微分方程最为方便。而大多数自动控制系统正是为常微分方程所描述,因而在研究各种自动控制系统时,电子模拟装置就成了很好的工具。

模拟装置調整容易,因此在用来研究自动系统的稳定性和品质时,能够在短时期内对所研究的系统各种工作状态进行分析。

模拟装置的最大优点是能够与实在的物体互相联结起来,被研究系统的一部分(經常是调节器的这部分)保持为实际的形式。这可以举《飞机-自动駕駛仪》的模拟系统为例来说明,当飞机用模拟装置替代时,飞机的运动方程即在該装置上进行安排,而自动駕駛仪則利用实物。模拟装置和自动駕駛仪通过轉換装置相連接。

电子模拟装置的作用原理如用具体的例子来加以說明,就比較容易理解。为此,我們来討論如何求解描述仿型銑床的方程組的情况^[1]。

仿型銑床的随动系統由下列各部分构成(見图 1):

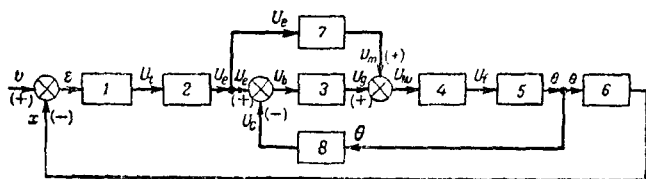


图 1 仿型銑床随动系統的结构图

(1) 系統的仿型儀器 1, 儀器的靠模指的位移 v 和銑頭的位移 x 在這裡進行比較, 並檢測出這兩個量的差值 ε , 即

$$\varepsilon = v - x \quad (1)$$

仿型儀器輸出變壓器上的電壓 u_t 與這個差值成正比

$$u_t = k_1 \varepsilon \quad (2)$$

式中 k_1 ——仿型儀器 1 的傳遞系數。

(2) 第一級電子放大器 2, 其輸出電壓 u_θ 與電壓 u_t 成正比

$$u_\theta = k_2 u_t \quad (3)$$

式中 k_2 ——第一級放大器 2 的放大倍數。

(3) 變壓器 3, 其初級繞組上的電壓 u_b 是電壓 u_θ 和 u_o (負反饋電壓) 的差值

$$u_b = u_\theta - u_o \quad (4)$$

變壓器次級繞組上的電壓 u_g 則與這個差值成正比

$$u_g = k_3 u_b \quad (5)$$

式中 k_3 ——變壓器 3 的變換系數。

(4) 第二級電子放大器 4, 其輸入值為變壓器輸出電壓 u_g 和正反饋電壓 u_m 之和

$$u_w = u_g + u_m \quad (6)$$

因而, 第二級放大器的輸出電壓為

$$u_f = k_4 u_w \quad (7)$$

式中 k_4 ——第二級放大器 4 的放大系數。

(5) 電機放大機和電動機 5, 在這兩個元件中發生的過渡過程由下列微分方程來描述

$$\begin{aligned} T_f T_k T_{\pi B} \frac{d^4 \theta}{dt^4} + (T_f T_k + T_f T_{\pi B} + T_k T_{\pi B}) \frac{d^3 \theta}{dt^3} \\ + (T_f + T_k + T_{\pi B}) \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{d \theta}{dt} = k u_f \end{aligned} \quad (8)$$

式中 θ ——拖动电动机轴上的轉角；

T_f ——电机放大机控制繞組的时间常数；

T_k ——电机放大机电樞正交回路和附加繞組的时间常数；

$T_{\text{дв}}$ ——电动机的时间常数；

k ——帶有电动机的电机放大机的傳遞系数。

(6) 进給减速机构 6, 其作用以下列方程表之

$$\alpha = k_5 \theta \quad (9)$$

式中 k_5 ——与减速器傳动比和进給裝置的螺杆螺距有关的系数。

(7) 正反饋回路中的校正裝置 7, 它是用来在系統中产生誤差值 ε 的导数, 其作用式如下

$$T_e \frac{du_m}{dt} + u_m = T_m \frac{du_\varepsilon}{dt} \quad (10)$$

式中 T_e 、 T_m ——校正裝置 7 的时间常数。

(8) 負反饋回路中的校正裝置 8, 其微分方程为

$$T_c \frac{du_c}{dt} + u_c = T_c k_n \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (11)$$

式中 T_c 、 k_n ——校正裝置 8 的时间常数和傳遞系数。

如果給出初始条件, 方程組 (1) ~ (11) 就把整个随动系統的状态描述了出来。

同时还假定, 放大系数 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 是可調整的, 并依据稳定性或調节品质对方程組进行研究的結果来最后加以选定。

在电子模拟裝置上如何来求解这个方程組呢? 为了模拟上述随动系統, 应该采用甚么样的綫路呢?

首先, 应该把給出的方程組变换成便于模拟的形式。为

此, 必須把方程組 (1) ~ (11) 化成一階微分方程組的形式。

要做到這一點, 並不困難。我們使用下列符號

$$\frac{d\theta}{dt} = x_1 \quad (12)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = x_2 \quad (13)$$

$$\frac{d^3\theta}{dt^3} = x_3 \quad (14)$$

由此即可導出兩個微分方程式

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 \quad (15)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = x_3 \quad (16)$$

此外, 由 (9) 和 (12) 兩式還可得出一個方程式

$$\frac{dx}{dt} = k_5 x_1 \quad (17)$$

最後, 為了一致性起見, 再引用下列符號

$$u_m = x_4 \quad (18)$$

$$u_c = x_5 \quad (19)$$

以式 (1) ~ (7) 中的量值代入式 (8), 並考慮到已引用的符號, 可得到

$$\begin{aligned} \frac{dx_3}{dt} = & -a_0 k_1 k_2 k_3 k_4 x - a_1 x_1 - a_2 x_2 - a_3 x_3 + a_0 k_4 x_4 \\ & - a_0 k_3 k_4 x_5 + a_0 k_1 k_2 k_3 k_4 v \end{aligned} \quad (20)$$

式中 $a_0 = \frac{k}{T_f T_k T_{\Delta B}};$

$$a_1 = \frac{1}{T_f T_k T_{\Delta B}};$$

$$a_2 = \frac{T_f + T_k + T_{\Delta B}}{T_f T_k T_{\Delta B}};$$

$$a_3 = \frac{T_f T_k + T_f T_{\text{AB}} + T_k T_{\text{AB}}}{T_f T_k T_{\text{AB}}}。$$

同样地,以式(1)~(3)中的量值代入式(10)和(11),并考虑到已引用的符号,得出

$$\frac{dx_4}{dt} = -a_4 k_1 k_2 k_5 x_1 - a_5 x_4 + a_4 k_1 k_2 \frac{dv}{dt} \quad (21)$$

$$\frac{dx_5}{dt} = a_6 x_2 - a_7 x_5 \quad (22)$$

式中 $a_4 = \frac{T_m}{T_e};$

$$a_5 = \frac{1}{T_e};$$

$$a_6 = k_n;$$

$$a_7 = \frac{1}{T_e}。$$

于是,我們得到了六个常系数一阶綫性微分方程式 (15)~(17) 和 (20)~(22), 其中系数 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ 是給定的, 而系数 k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 則可以在模拟过程中在規定範圍內变动。量值 v 为調节量, 而量值 x 則为被調量。我們假定, 方程組 (15)~(17) 和 (20)~(22) 在初始条件为零的情况下进行求解。

变量 $v, \frac{dv}{dt}, x, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$, 象已經談到的那样, 在电子模拟装置里是以电压形式来表示的 (按一定的比例尺)。

以方程組中的一个方程式, 如以式(22)为例来表明如何把各原始方程式变成机器方程式而引进模拟装置。机器方程式是依照原始方程式的形式, 以相当的机器系数替代原始变量而組成的。

式(22)的机器方程式

$$\frac{dX_5}{dt} = K_{52}X_2 - K_{55}X_5 \quad (23)$$

式中 X_2 、 X_5 、 $\frac{dX_5}{dt}$ ——机器变量(电压形式)；

K_{52} 、 K_{55} ——机器系数。

机器系数按下列方式来确定。

首先，写出机器变量和实际变量之间的关系

$$X_2 = m_2 x_2 \quad (24)$$

$$X_5 = m_5 x_5 \quad (25)$$

$$\frac{dX_5}{dt} = m'_5 \frac{dx_5}{dt} \quad (26)$$

式中 m_2 、 m_5 、 m'_5 ——比例乘数。

把式(24)、(25)代入式(23)，得

$$\frac{dx_5}{dt} = \frac{K_{52}m_2}{m'_5} x_2 - \frac{K_{55}m_5}{m'_5} x_5$$

再使上式与式(22)进行比较，即得出机器系数的表示式

$$K_{52} = \frac{a_6 m'_5}{m_2} \quad (27)$$

$$K_{55} = \frac{a_7 m'_5}{m_5} \quad (28)$$

式中包含的量 a_6 和 a_7 是已知的，而数值 m_2 、 m_5 和 m'_5 则由式(24)、(25)和(26)中变量的最大值来确定

$$m_2 = \frac{|X_2|_{\max}}{|x_2|_{\max}}$$

$$m_5 = \frac{|X_5|_{\max}}{|x_5|_{\max}}$$

$$m'_5 = \frac{\left| \frac{dX_5}{dt} \right|_{\text{макс}}}{\left| \frac{d\omega_5}{dt} \right|_{\text{макс}}}$$

机器变量的最大值 $|X_2|_{\text{макс}}$ 、 $|X_5|_{\text{макс}}$ 和 $\left| \frac{dX_5}{dt} \right|_{\text{макс}}$ 决定于模拟装置的线路参数(在许多机器里, 这些值不超出 100 伏)。至于实际变量的最大值, 则根据实际情况或近似计算来决定。

其余的机器方程式和机器系数, 也可用相似办法确定。

由上述机器方程式看出, 为了得到所求变量, 必须进行代

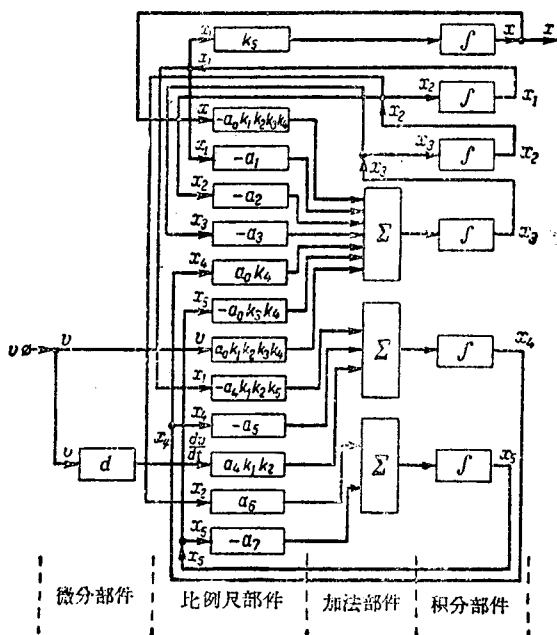


图 2 仿型铣床随动系统模拟的方框图

数相加,乘常数(比例乘数),以及积分等运算。此外,为了得到导数值 $\frac{dv}{dt}$,还必须对调节量进行微分。

因而,电子模拟装置中应包括加法、比例尺、积分和微分等部件。图2线路即是以这些部件组成的,它可以对前述方程组进行解算。这个线路中没表示出改变量值符号的部件(反相部件)。现在假定,在线路的输入端加入相应于量值 v 的电压,则在输出端我们将连续取得相应于量值 x 的电压。如果某一变量的初始值不为零,则在积分部件的输出端应设置出相当初始条件的电压。

应该指出,在模拟装置中,通常同一部件可以兼司几种数学运算,例如积分部件可以首先用来使几个数值相加,或乘常数以及符号的倒换。

上面我们讨论了线性微分方程组的模拟,但在许多自动控制系统中还包含有许多非线性因素,为了模拟这样的系统,在模拟装置里还应包括有非线性部件,如函数变换器,乘法器和除法器。

因此电子模拟装置是有公共电源和集中控制的各种运算部件的组合。这些部件的输入端和输出端的端子通常被接到专门的组合(开关)盘上,然后用导线来进行插接,从而组成在求解具体问题时所需要的模拟线路。

机器系数在运算部件上确定。

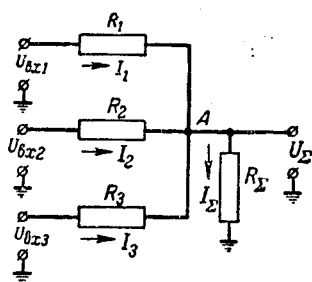
用能反应电压值的仪表,如:电压表,电子射线指示器,回线示波器,自动记录器等等来记录问题的解。

第 2 章

綫性运算部件

1. 加法綫路

現在我們來研究运算部件的結構和工作原理。首先看看如何來作代數加法的运算。為此，我們來分析圖 3 上最簡單的綫路，輸入电压 u_{BX1} 、 u_{BX2} 、 u_{BX3} 通过电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 作用



到相加點 A 上，點 A 還接有負荷电阻 R_{Σ} ，輸出电压 u_{Σ} 即由其上取得。

如果以符号 I_1 、 I_2 、 I_3 和 I_{Σ} 來表示流过 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_{Σ} 的电流，則按克希荷夫第一定律可寫出

圖 3 电压加法綫路

$$I_{\Sigma} = I_1 + I_2 + I_3 \quad (29)$$

电流 I_1 、 I_2 、 I_3 ，根据欧姆定律由下列各式決定：

$$I_1 = \frac{u_{BX1} - u_{\Sigma}}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{u_{BX2} - u_{\Sigma}}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{u_{BX3} - u_{\Sigma}}{R_3}$$

这些表示式中都包含了电阻 R_Σ 上的压降 u_Σ

$$u_\Sigma = I_\Sigma R_\Sigma$$

把此式以及电流 I_1 、 I_2 、 I_3 的表示式代入式 (29)，并稍加变换，即得

$$\begin{aligned} I_\Sigma = & \frac{u_{\text{BX1}}}{R_1 \left(1 + \frac{R_\Sigma}{R_1} + \frac{R_\Sigma}{R_2} + \frac{R_\Sigma}{R_3} \right)} \\ & + \frac{u_{\text{BX2}}}{R_2 \left(1 + \frac{R_\Sigma}{R_1} + \frac{R_\Sigma}{R_2} + \frac{R_\Sigma}{R_3} \right)} \\ & + \frac{u_{\text{BX3}}}{R_3 \left(1 + \frac{R_\Sigma}{R_1} + \frac{R_\Sigma}{R_2} + \frac{R_\Sigma}{R_3} \right)} \end{aligned}$$

前已指出 $u_\Sigma = I_\Sigma R_\Sigma$

以 I_Σ 的表示式代入此式，即得输出电压

$$\begin{aligned} u_\Sigma = & \frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_\Sigma} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} u_{\text{BX1}} \\ & + \frac{\frac{1}{R_2}}{\frac{1}{R_\Sigma} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} u_{\text{BX2}} \\ & + \frac{\frac{1}{R_3}}{\frac{1}{R_\Sigma} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} u_{\text{BX3}} \end{aligned}$$

引用下列符号：