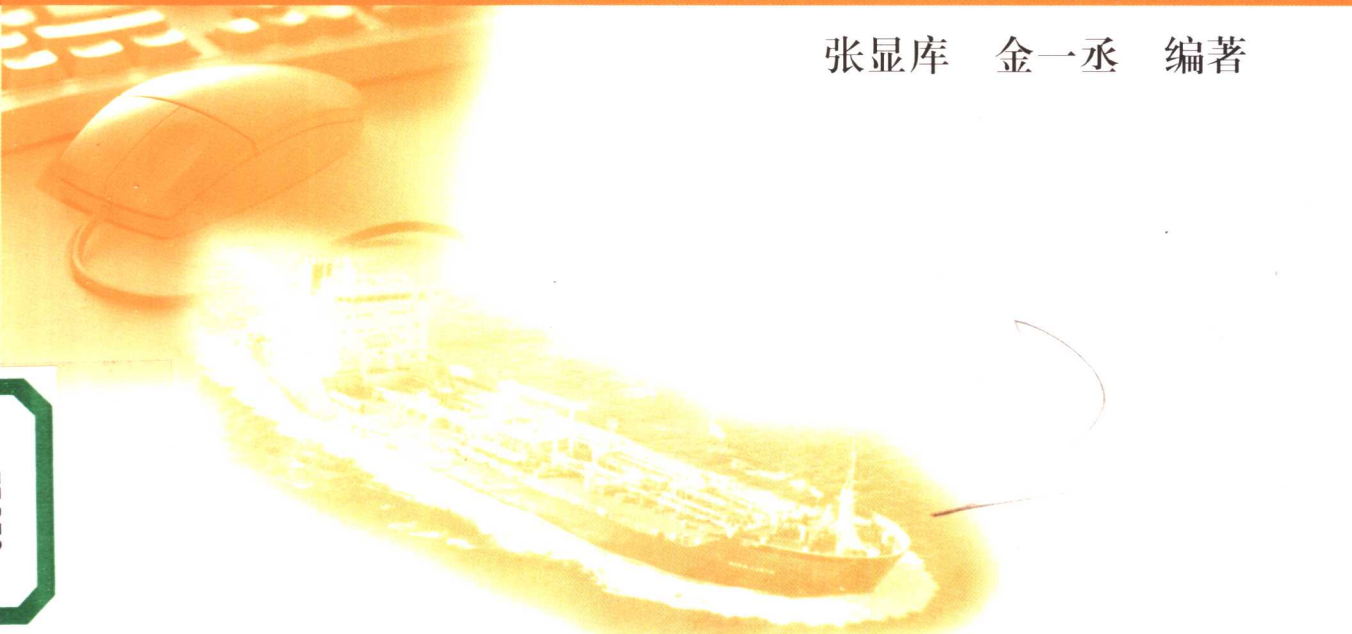




KONGZHI XITONG JIANMO YU
SHUZI FANGZHEN

控制系统建模与 数字仿真

张显库 金一丞 编著



 大连海事大学出版社

///

KONGZHI XITONG JIANMO YU SHUZI FANGZHEN

ISBN 7-5632-1792-4

定价: 22.00元

ISBN 7-5632-1792-4



9 787563 217922 >

第1章 绪论

控制系统建模与数字仿真主要研究如何给控制系统建立数学模型，然后进行模型仿真以观察和分析模型本身的特性，或进行系统仿真以研究和分析系统或控制器的特性。

1.1 控制系统建模与数字仿真在控制中的地位

建模和仿真是控制理论和控制工程专业课的重要组成部分。如图 1.1.1 所示，控制系统标准反馈结构图由 4 部分组成：信号部分 r, d, y, u ；控制器部分 K ；被控对象部分 P 和传感器部分 M 。控制理论与控制工程学科所有的专业课程都是围绕这 4 部分设置的。在信号部分可以学到“信号处理”、“信号检测”等课程；在控制器部分可以学到“控制原理”、“过程控制”及与各种控制算法有关的课程，如 PID 控制(自整定 PID、增益规划式 PID、自适应 PID、鲁棒 PID 及智能 PID)、最优控制、自适应控制、鲁棒控制、专家系统、智能控制、模糊控制、神经网络控制、混合智能控制、混沌控制、预测控制、变结构控制等等；在被控对象部分可以学到“建模与仿真”、“多模型理论”及“系统辨识”等课程；在传感器部分可以学到“传感器与仪表”等课程。

建模是得到 P 的过程，而系统仿真与 r, d, y, u, P, K, M 都相关，故控制系统建模与数字仿真在控制中的地位是非常重要的。

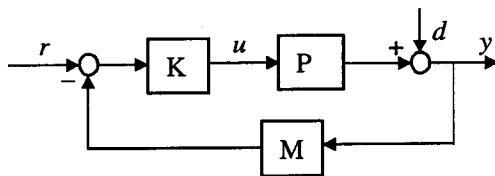


图 1.1.1 标准反馈结构图

1.2 控制系统建模与数字仿真的目的与意义

许多工程与科学技术问题，差不多都可以通过实验室仿真来验证其设计方案能否达到预期目的。如果不能达到目的，可以及时发现问题、修改方案，这样做既省时又安全。

仿真的基础是数学模型，在仿真中有许多具体的问题需要解决，如根匹配、终值匹配、实时性与稳定性、仿真的精度以及非线性系统的线性化仿真等。

● 仿真的目的与意义

1) 系统特性复杂，难于在实验条件下进行推导或作成比例模型，而又要降低这些系统的研究与设计费用，有时实验费用是惊人的。如美国海军 1975 年做了一次船舶性能试验，总计花费了 2 亿多美元，实验历时 3 个多月，为保证船舶的大范围的快速回转、Z 形及正弦试验，出动了大量的巡逻艇，防止渔船等进入实验海域。再如，火车提速要求机车的整体性能提高，

重新设计并试验机车电传动系统要求工厂停产，生产损失及试验费用(燃油及零部件报废)是相当大的。如果通过仿真研究将停产时间从1个月降至1周，将节省近百万元的经费。

2)需要验证在系统中所采用的数学模型方程系数是能用的。另外，模型比现实容易操作，尤其是一些参数值的改变在模型中操作比在现实问题中操作要容易。

3)有些变量在现实中要很长时间才能看出变化情形，但用模型研究时可以很快看出变化规律，从而能迅速抓住其本质特性。

4)通过灵敏度分析，可以看出哪些因素对系统影响更大。例如战略核武器杀伤力模型，当赫鲁晓夫鼓吹亿吨级氢弹时，美国却走提高导弹精度的道路，实践证明这是一条捷径。以 K 代表杀伤力， Y 代表威力， C 代表精度，即 $K = Y^{2/3} / C^2$ 。当威力提高8倍，杀伤力只提高4倍，而当精度提高2倍，杀伤力即可提高4倍，体积会大大缩小。

5)需要根据控制或决策变动后的估算，来预测系统对复杂控制或决策的响应。此时用仿真能达到省时、安全和省钱的目的。

第2章 控制系统描述方式及建模方法

(1) 数学模型

一个实际的系统针对所控的变量经一定的合理的假设就变成了物理模型,再根据物理定律和机械定律等进行推导就得到了数学模型。

数学模型只能对某些特定的输入响应,故它不能包含实际系统对输入响应的全部真实的信息,且数学模型是实际系统的简化,所以在建模时就有很大学问。

太复杂和精细的模型可能包含难于估计的参数,也不便于分析。过于简单的模型不能描述系统的重要性能。这就需要在建模时掌握好复杂和简单的度,作合理的折中。

(2) 仿真数学模型

建立数学模型意味着在计算机上建立起对象的可以计算的模型。一般来说,系统的数学模型都必须改写成适合于计算机处理的形式才能使用,这种模型被称为仿真数学模型。

(3) 仿真模型分类

数学模型分为静态模型和动态模型,前者主要用于系统的静态误差分析。动态模型又分为连续模型(用微分方程表述)和离散模型(用差分方程表述)。

系统的数学模型还可按目的分为三大类,即

- 1) 用来帮助对象设计和操作的模型;
- 2) 用来帮助控制系统设计和操作的模型;
- 3) 用来系统仿真的模型。

本书主要研究后两种情况。

2.1 控制系统描述方式

控制系统主要有如下6种系统描述方式:

(1) 微分方程(组)(状态空间)

这种方法比较直观,特别是借助于计算机,可以迅速而准确地求得结果。但是,如果系统结构形式改变,便需要重新列写并求解微分方程,因此不便于对系统进行分析和设计。

典型的状态方程如式(2-1-1)所示。

$$\begin{aligned}\dot{X} &= AX + Bu \\ Y &= CX + Du\end{aligned}\tag{2-1-1}$$

(2) 传递函数

运用拉氏变换求解系统的线性常微分方程,可以得到系统在复数域的数学模型,称其为传递函数。传递函数不仅可以表征系统的动态特性,而且可借以研究系统的结构或参数变化对系统性能的影响。

在经典控制理论中广泛应用的频率法和根轨迹法,就是在传递函数基础上建立起来的。因此,传递函数是经典控制理论中最基本也是最重要的概念。

传递函数与状态空间方程的关系为

$$G(s) = C[sI - A]^{-1}B + D$$

(3) 结构图

结构图是描述各组成元部件之间信号传递关系的数学图形。它表示了系统输入变量与输出变量之间的因果关系以及对系统中各变量所进行的运算，是控制工程中描述复杂系统的一种简便方法。

系统结构图实质上是系统原理图与数学方程两者的综合。在结构图上，用记有传递函数的方框取代了系统原理图上的元部件，同时，摈弃了元部件的具体结构，而抽象为数学模型。结构图既补充了原理图所缺少的变量间的定量关系，又避免了抽象的纯数学描述；既把复杂原理图的绘制简化为方框图绘制，又能直观了解每个元部件对系统性能的影响，可以对系统特性进行全面的描述。典型的系统结构图如图 2.1.1 所示。

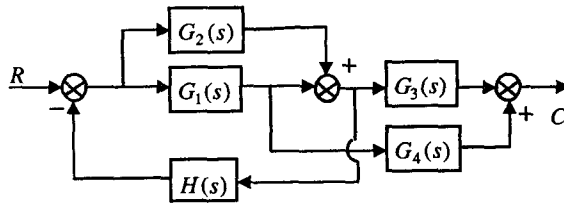


图 2.1.1 典型的系统结构图

(4) 原理图

这是一种物理的、原始的系统原理描述方框图，是理想元件(如电阻、电容等)的连接图或文字说明方框图等。典型的系统原理图如图 2.1.2 所示。

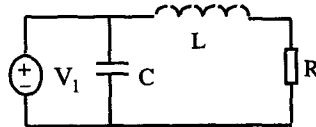


图 2.1.2 典型的系统原理图

(5) 信号流图

信号流图和结构图一样，都是控制系统中信号传递关系的图解描述，然而信号流图符号简单，便于绘制和运用。但是，信号流图只适用于线性系统，而结构图也可用于非线性系统。在系统的计算机模拟研究以及状态空间法分析设计中，信号流图可以直接给出计算机模拟程序和系统的状态方程描述，从而显示出它在这方面的优越性。图 2.1.1 的信号流图示于图 2.1.3。

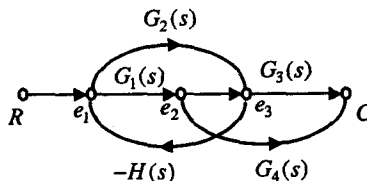


图 2.1.3 图 2.1.1 的信号流图

(6)键图

前几种系统描述方法的最大缺点是不能有效地描述有源或产生动力的元件的特性,而这也是键图法的最大优点,且该法已经标准化形成软件包,使用方便。

● 键图法的优点:

- 1)有利于研究系统模型的结构和各个部分的特性以及连接方式。
- 2)可以把不同类型能源的系统(如热、电、机械、液压、气动和磁系统等)连接起来。
- 3)只需很少的理想元件集合(7个)即可描述不特别复杂的系统。
- 4)易转换成微分方程和计算机仿真框图,形成标准软件包。

2.2 控制系统建模方法

常用的控制系统建模方法有如下8种:

(1)理论推导

根据系统的结构和机理,应用基本的物理定律,采用数学推导的方法得出数学模型。其缺点是烦琐,要求数学基础高且对系统了解深刻;优点是较准确。

图 2.2.1 为一个弹簧-质体-阻尼器系统。

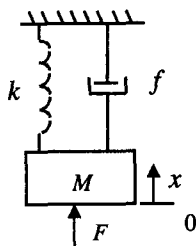


图 2.2.1 弹簧-质体-阻尼器系统

如图 2.2.1 所示,其输入是外力 F , 输出是位移 x , 则力的平衡方程为

$$F = M \frac{d^2 x}{dt^2} + f \frac{dx}{dt} + kx$$

设 $x_1 = x, x_2 = dx/dt, X = [x_1 \ x_2]^T$, 则

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$M\dot{x}_2 + fx_2 + kx_1 = F$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{M} & -\frac{f}{M} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \end{bmatrix} F \quad (2-2-1)$$

式(2-2-1)为弹簧-质体-阻尼器系统的标准状态空间数学模型。

(2)实验方法

1)飞升实验

给系统加上阶跃输入,得到系统的飞升实验曲线,如图 2.2.2 所示,适用于阶数较低的惯性系统。

由飞升实验曲线得到的数学模型为

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1}$$

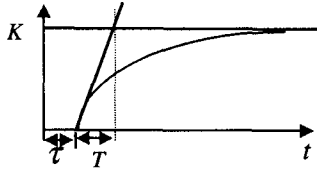


图 2.2.2 典型的飞升实验曲线

如果得到的实验曲线为振荡曲线，则数学模型采用二阶形式近似：

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

其中： $\omega_n \approx \frac{1+0.7\zeta}{t_d}$ ， $\zeta\omega_n = \frac{3.5}{t_s}$ (取 5% 误差带)， t_d, t_s 分别为上升时间和调节时间。

2) 频率实验

给实际过程加上正弦信号，其频率和幅值范围可根据被测对象的类型和要求选定，但正弦信号源必须没有波形畸变。测出系统频率的幅值和相角，画出系统的对数幅频特性曲线和对数相频曲线。如果确定实际过程是最小相位系统，则可忽略对数相频曲线。然后，将实验得到的对数幅频曲线用斜率为 0 dB/dec, ± 20 dB/dec 和 ± 40 dB/dec 等直线近似，即得近似对数幅频曲线，最后写出系统的数学模型。典型的频率实验曲线如图 2.2.3 所示。

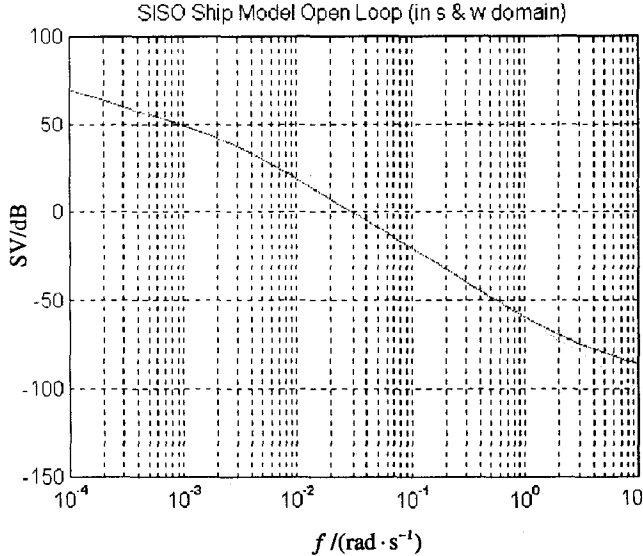


图 2.2.3 典型的频率实验曲线

对数频率特性曲线的特点如下：1) 最左端直线的斜率由传递函数的积分环节决定，每一个积分环节为 -20 dB/dec。2) ω 为 1 时，曲线的分贝值等于 $20\lg K$ ，最左端直线和零分贝线的交点频率在数值上恰好等于 K 。3) 在交接频率的地方，曲线斜率发生改变，改变多少视典型环节种类而异。

该曲线最左端直线斜率为-20 dB/dec，故对象存在一个积分环节；最左端直线与零分贝线的交点频率为0.3，故 $K=0.3$ ；在 $\omega=0.003$ rad/s 处曲线斜率发生改变，变为-40 dB/dec，故系统存在一个时间常数 $T=1/\omega=340$ s 的一阶惯性环节。

与典型频率实验曲线对应的数学模型为

$$G(s) = \frac{0.3}{s(340s+1)} \quad (2-2-2)$$

该系统实际的数学模型为

$$G(s) = \frac{0.32}{s(343s+1)} \quad (2-2-3)$$

比较式(2-2-2)和式(2-2-3)可知，模型误差是可以接受的。

(3) 系统辨识法

采用计算机技术，采集系统的输入和输出，运用系统辨识算法辨识出系统的结构及参数。它要求典型的激励信号，即输入信号的频率和幅值范围须充分大，才能辨识出系统的动态特性。典型的系统辨识框图如图2.2.4所示。

(4) 键图法

将系统的元件分成耗能元件(阻性元件)、储能元件(容性元件、感性元件)、源性元件(能流源、能力源)、连接元件(0接点(并联)、1接点(串联))、交换元件(变压器型、回旋器型)5种基本类型。元件之间的连接关系不是信号流，而是能量流，易于实现多种能量耦合系统的建模。键图易于计算机实现，并得出状态空间数学模型。典型的系统键图如图2.2.5所示(图2.1.2所示原理图的键图)。

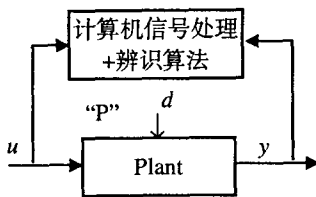


图 2.2.4 典型的系统辨识框图

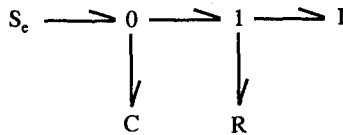


图 2.2.5 典型的系统键图

(5) 神经网络训练法

通过神经网络训练算法，求出未知系统的数学模型。适用于非线性系统的建模。典型的神经网络训练框图如图2.2.6所示。

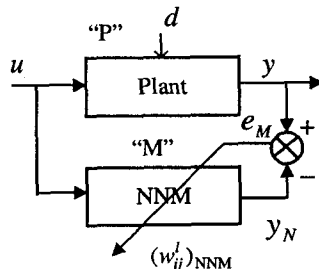


图 2.2.6 典型的神经网络训练框图

(6)模糊优化法

应用模糊优化算法求数学模型。该方法主要是定性地描述系统，涉及符号运算、模糊规则提取、数据发掘等知识。

(7)人工智能辅助法

综合运用第五、六种方法及专家知识形成人工智能辅助方法为系统建模。

(8)混合法或综合法

综合运用前述各种建模方法为系统建模，一般同时采用 2~3 种建模方法。一个实际的复杂系统分成若干个子系统，在为其建模时，有些子系统技术很成熟，可采用已有数学模型；有些子系统可根据本次研究情况稍作修改即可使用；还有一些子系统需要自己重新建模，可根据各个子系统的不同特点采用不同的方法建模，最后将所有子系统连接起来组成一个复杂的系统，系统的建模过程像搭积木一样。

● 系统分析、辨识及综合的区别

一般动态系统的模型如图 2.2.7 所示。

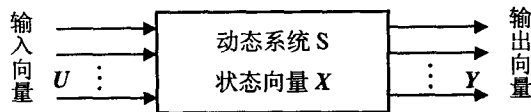


图 2.2.7 一般动态系统模型

1)分析：即给定 U, X, S ，预测 Y 的输出特性。

2)辨识：即给定 U ，通常用实验方法获得 Y ，然后求出系统模型 S 和状态向量 X 。

3)综合：即给定 U 和希望的 Y ，寻求模型 S 使得当 U 作用于 S 上时产生 Y 。此过程需不断重复，才能得到一个合适的模型 S 满足希望的输出 Y 。

第3章 键图法建模

3.1 工程多端口(engineering multiports)

在工程中,有许多子系统可以用一个或多个能量在子系统间流动的端口来描述,如电机、液压泵、轴、晶体管、曲柄机构、车轮等都具有2端口(见图3.1.1)。能量可从一端以转矩、角速度、电流、流量、速度、电压、力等形式流入子系统,再以电压、电流、流量、角速度、转矩、速度、力等形式从另一端流出,其能量流动可以是双向的。而扬声器,其能量只能从一端以电流或电压的形式流入,故是1端口(不考虑其声音输出控制)。再如直流电机是3端口,其能量可以从励磁、转子的电压、电流或电机的转矩和角速度3个方向流入流出。

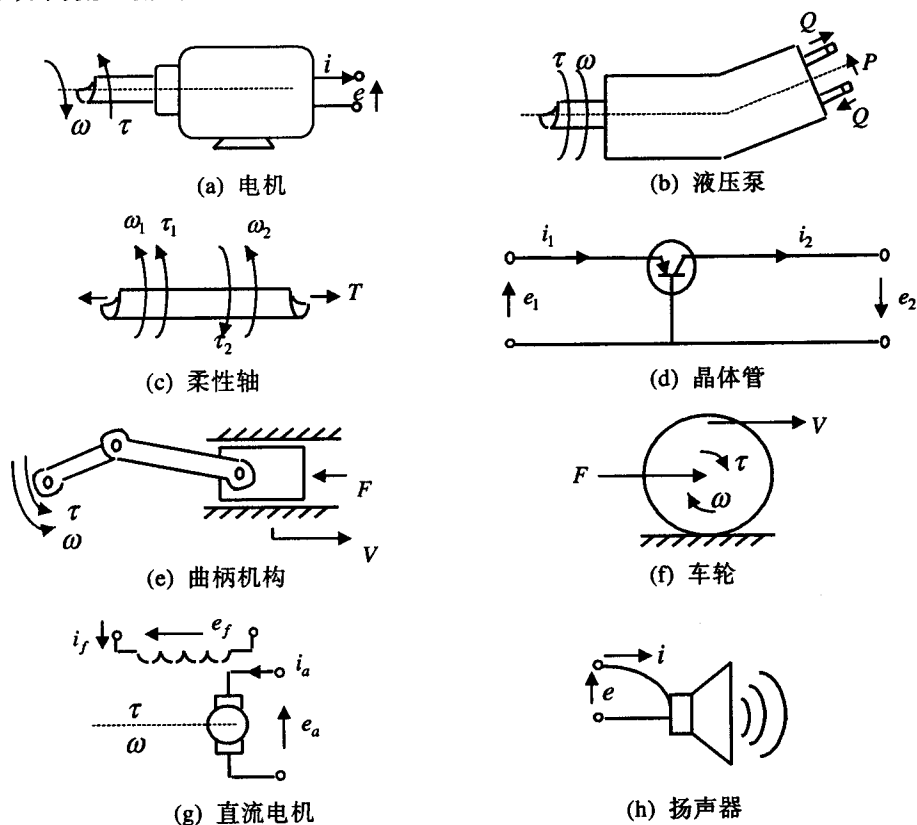


图 3.1.1 一些基本工程多端口

将几个多端口具有相同变量的端口连接起来就可构成一个系统,如将轴连到电机的驱动轴端,此时连接处的角速度和转矩将是一致的。连接处即端口就是能量传送的地方。端口处的一对变量称为能量变量,因为这一对变量的乘积就是一端口流入另一端口的瞬态能量。如电机和液压泵相连,从电机流入液压泵的能量将等于角速度和转矩的乘积。

因为能量可以从任何一方向流入，故需定义一个能量传送方向。

通常我们把作用于端口的能量变量分为能力(effort)和能流(flow)，表 3.1.1 给出几种能量交换的能力和能流变量。

表 3.1.1 一些能力和能流变量

领域	能力, $e(t)$	能流, $f(t)$
机械平动	力变量, $F(t)$	速度变量, $V(t)$
机械转动	转矩变量, $\tau(t)$	角速度变量, $\omega(t)$
液压	压力, $P(t)$	流量率, $Q(t)$
电	电压, $e(t)$	电流, $i(t)$

一般地，我们用 $e(t)$ 和 $f(t)$ 来广义地表示能力和能流，则功率 $P(t)=e(t)f(t)$ ，并且我们把能力的积分称为动量 $p(t)$ (momentum)，能流的积分称为位移 $q(t)$ (displacement)，即 $p(t)=\int e(t)dt$ 和 $q(t)=\int f(t)dt$ 或 $dp=e dt$ 和 $dq=f dt$ 。能量 $E(t)=\int P(t)dt=\int e(t)dq(t)=\int f(t)dp(t)$ 。为进一步区分，我们称 e 和 f 为功率变量， p 和 q 为能量变量。

3.2 键图

我们用一个 3 端口的直流电机的实例来说明如何画键图，用名称(如直流电机)来代表此元件，用从元件发出的直线表示端口，能力和能流变量分写在直线的两边，且规定能力变量 e 在直线的左边或上边，能流变量 f 在直线的右边或下边，而直线是有方向的，其半箭头方向为当所有能力和能流变量都为正时能量流入或流出方向。注意能力和能流的正负号规定，如电机驱动轴的角速度若规定逆时针为正，则转矩为正应是外轴加给电机的方向即顺时针方向。直流电机的电路连接图和键图如图 3.2.1 所示。

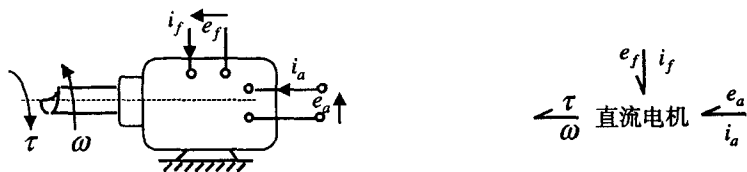


图 3.2.1 直流电机的电路连接图和键图

我们将表示能量流动方向的带有半箭头的直线称为键，而将用公共键的方式把多个端口元件连接起来的系统图称为键图(bond graph)。如泵、电机和电池的键图如图 3.2.2 所示。

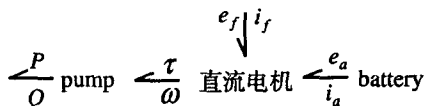


图 3.2.2 泵、电机和电池的键图

多端口子系统的特性可通过实验和理论推导获得。在做实验时，只能控制端口的能力和能流中的任一变量，不能同时控制两个变量。为了确定哪一变量是输入，我们在键的一端画一垂直线，用它表示能力的流动方向，其关系如图 3.2.3 所示。

如果把能量流入和变量输入选择结合起来，则可有 $A \rightarrow B$, $A \leftarrow B$, $A \vdash B$, $A \dashv B$ 。

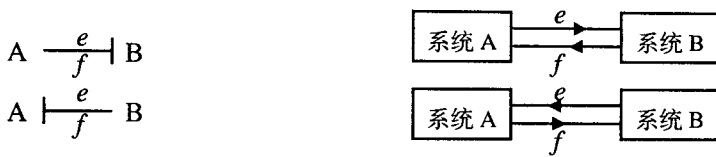


图 3.2.3 系统能量变量的输入关系

有时，多端口的两个能量变量只有一个是重要的，如对于电子放大器来说，只有外加电压是重要的，而电流实际上对电路没有影响或其影响可以忽略。再比如：用电压表量电压，认为流过电压表的电流为 0，此时键图减弱为有源键，表示为： $A \overset{e}{\rightarrow} B$ ，意为能力 e 由子系统 A 决定，且能流 f 可以忽略。我们用多端口来模拟元件在系统中的物理影响，但不能全部地和实际物理元件在系统中的作用一一对应。如：导线中的电阻、电容等分布是分散的，而在多端口中用集总的电阻、电容来描述。

用键图和能量及功率变量的分类来描述系统，只需几种基本类型的多端口元件来表达能量域变化的模型。键图比状态方程或为单能量域、信号流而不是功率流设计的一些其他图形法更容易观察系统的各个方面。研究复杂系统的键图模型通常能增加对系统的物理解力。

3.2.1 基本 1 端口元件

1 端口元件只有一对能力和能流变量存在。一般地，1 端口元件也可能是一个很复杂的子系统。这里我们处理最原始的 1 端口，我们将顺序考虑耗能、贮能、供能元件。通常我们把耗能元件称为阻性元件，图 3.2.4 中给出一些实际的 1 端口阻性元件。

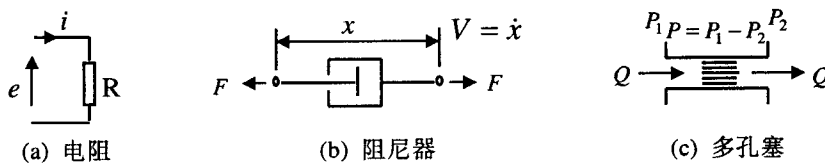
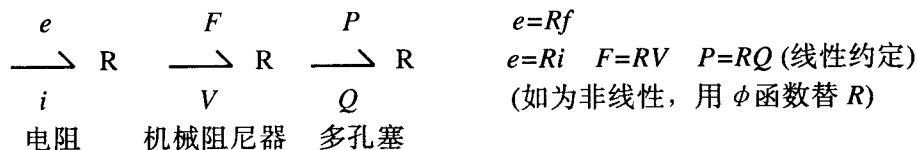


图 3.2.4 一些实际的 1 端口阻性元件

上面的 1 端口阻性元件的键图如下：



我们把贮能元件分成两类，第一类是把位移和能力变量联系起来的容性元件，1 端口容性元件能无损地贮存并释放能量，如物理元件的弹簧、电容和累加器等，图 3.2.5 给出一些实际的 1 端口容性元件。

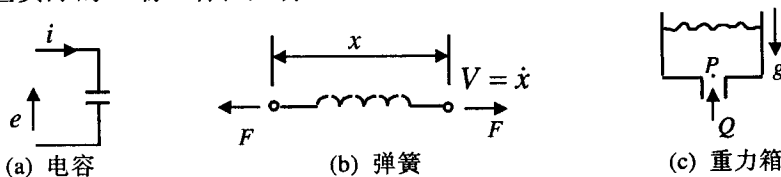
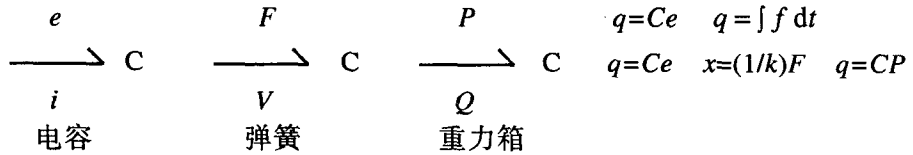


图 3.2.5 一些实际的 1 端口容性元件

上面的 1 端口容性元件的键图如下：



容性元件所贮存的能量为 $E(t) = \int_0^t e(t)f(t)dt + E_0$ 。因为位移 q 定义为 $f dt = dq$ ，故 $E(q) = \int_{q_0}^q e(q)dq + E_0$ 。通常，假设 $E_0 = 0$ ，则 $E(q) = \int_{q_0}^q e(q)dq$ 。

第二类能量贮存 1 端口是把动量和能流变量联系起来的元件，称之为惯性元件，图 3.2.6 给出一些实际的 1 端口惯性元件。

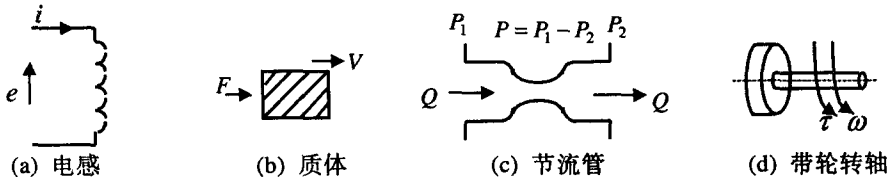
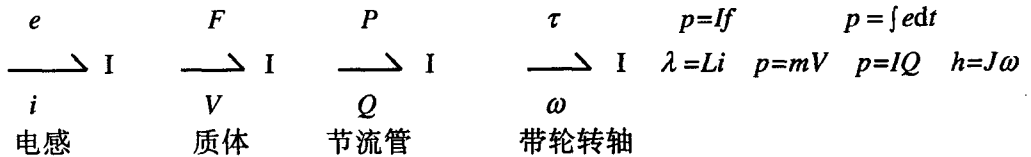


图 3.2.6 一些实际的 1 端口惯性元件

上面的 1 端口惯性元件的键图如下：



因 $edt = dp$ ，故能量贮存或释放 $E(p) = \int_{p_0}^p f(p)dp$ 。通常，与电容相关的能量称为势能，与惯性相关的能量称为动能。此概念主要用于机械系统，对于电系统，对应地称为电能和磁能。

为了帮助记忆，图 3.2.7 给出 3 个 1 端口元件变量间的关系。

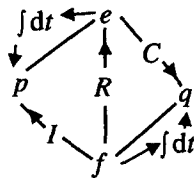


图 3.2.7 3 个 1 端口元件变量间的关系

最后定义两个非常有用和相当简单的 1 端口：能力源和能流源，它们是电压源、压力源、电流源等的理想化形式，其键图为：



3.2.2 基本 2 端口元件

对于有些不能用基本 1 端口建模的子系统可以用 2 端口建模，一般地，2 端口可分为变压器元件和回旋器(gyrator)元件。变压器元件典型键图为：



m 为变压器系数。对于 2 端口元件有 $e_1(t)f_1(t) = e_2(t)f_2(t)$ ，即能量守恒变送。具有变压器 2 端口的物理元件有很多，如理想的刚体杠杆、齿轮对、变压器、液压柱塞等，见图 3.2.8。

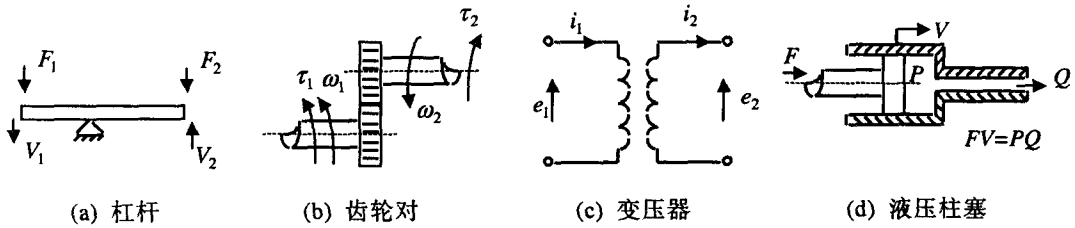
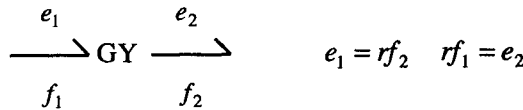


图 3.2.8 一些实际的 2 端口变压器元件

回旋器元件典型键图为：



r 为回旋器系数。具有回旋器 2 端口的物理元件有电动回旋器、机械回旋器等，见图 3.2.9。

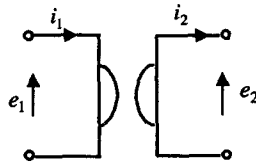
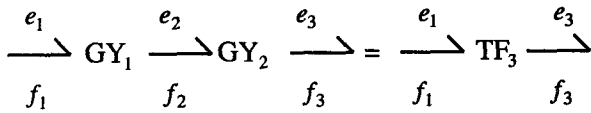


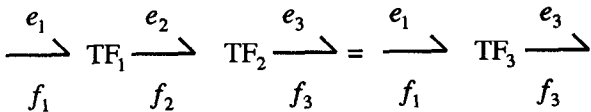
图 3.2.9 电动回旋器

实际上，回旋器和变压器元件相比是一个更基本的元件，因为两个回旋器级联构成一个变压器，而两个变压器级联仍为一个变压器。



$$e_1 = r_1 f_2; r_2 f_2 = e_3; \rightarrow e_1 = (r_1 / r_2) e_3;$$

$$r_1 f_1 = e_2; e_2 = r_2 f_3; \rightarrow (r_1 / r_2) f_1 = f_3;$$



$$e_1 = m_1 e_2; e_2 = m_2 e_3; \rightarrow e_1 = m_1 m_2 e_3;$$

$$m_1 f_1 = f_2; m_2 f_2 = f_3; \rightarrow m_1 m_2 f_1 = f_3;$$

可以注意到：—GY—I 等价于 —C 且 —GY—C 等价于 —I。

当变压器和回旋器系数 m 和 r 可调时，将产生调幅变压器和调幅回旋器，分别用下列符号表示：

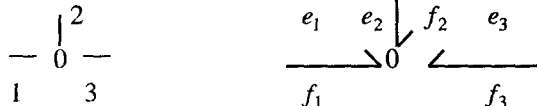


其中 m 和 r 作为作用在激活后的键上的信号。这意味着当 m 和 r 改变时, 无功率改变, 即总是 $e_1 f_1 = e_2 f_2$ 。

3.2.3 基本 3 端口元件

为了给工程中复杂对象建模, 还需要 3 端口元件。这些 3 端口称为接点。它们用来把其他多端口连到子系统或系统模型上。3 端口表达了用电系统的术语说叫串联和并联的多端口形式的两种连接方式。我们将看到, 这样的连接出现在所有类型的系统中, 尽管传统的处理不把接点的存在看做多端口。

首先, 看一下 0 接点或常用能力接点(相当于并联), 符号如下:



$$e_1(t) = e_2(t) = e_3(t) \quad f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) = 0$$

$$e_1(t)f_1(t) + e_2(t)f_2(t) + e_3(t)f_3(t) = 0$$

这就意味着, 如果能量从端口的两方流进 0 接点, 则必从第三方流出。0 接点的例子如导线和管道的 T 形连接等见图 3.2.10。

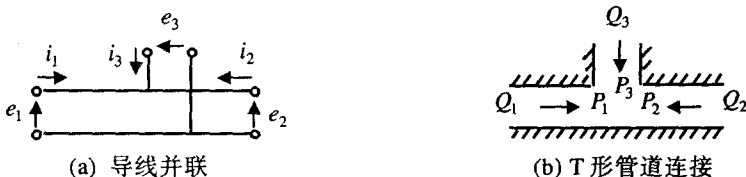
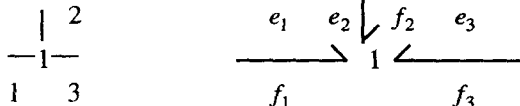


图 3.2.10 一些实际的 0 接点例子

与 0 接点对应的是 1 接点(相当于串联), 即



$$f_1(t) = f_2(t) = f_3(t) \quad e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) = 0$$

$$e_1(t)f_1(t) + e_2(t)f_2(t) + e_3(t)f_3(t) = 0$$

1 接点的例子如串联的电路回路等见图 3.2.11。同理, 3 端口可以推广到 4 端口…… n 端口。有时也会出现 2 端口接点, 它等价于一个单键。有时也用 2 端口来改变符号, 如:

$\rightarrow 0 \rightarrow = \rightarrow$; $\rightarrow 1 \rightarrow = \rightarrow$; $\rightarrow 0 \leftarrow$ 意味着 $e_1 = e_2, f_1 = -f_2$ 。
 $\rightarrow 1 \leftarrow$ 意味着 $f_1 = f_2, e_1 = -e_2$ 。

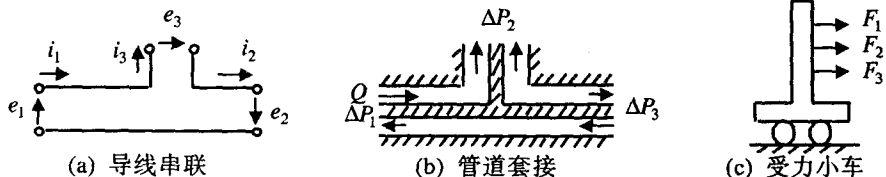


图 3.2.11 一些实际的 1 接点例子

下面我们来看一下简单的电路和机械系统的 0 接点和 1 接点的连接关系图, 见图 3.2.12。

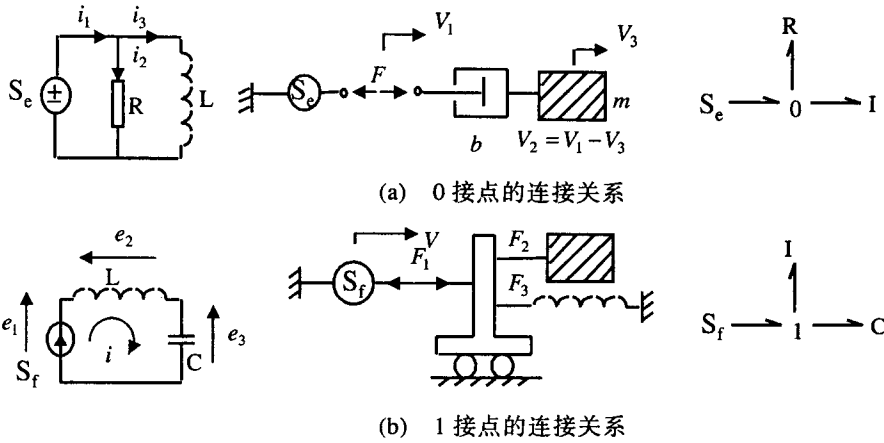


图 3.2.12 0 接点和 1 接点的连接关系图

3.3 基本多端口的因果关系考虑

我们可以看出, 一些基本多端口很大程度地受到可能的因果关系(哪个变量作为输入, 哪个变量作为输出)的约束, 一些多端口相对地对因果关系不关心, 而另一些多端口则对不同的因果关系呈现完全不同形式的结构规律。

基本 1 端口的因果关系: 能力源或能流源的因果关系形式为固定的, 如 $S_e \text{---|}$ 和 $S_f \text{|---}$, 而 1 端口阻性元件对因果关系不关心, 写在方程左边的变量为输出, 右边的变量为输入, 而在实际情况中, 往往根据需要进行确定其因果关系。对于容性和惯性元件, 由于其不同的因果关系导致元件的输入和输出呈现积分或微分特性, 故选择一个较喜欢的因果关系。由于积分关系在最后列写微分方程时较容易, 故对于容性和惯性元件, 我们选择积分因果关系为我们所喜欢的因果关系。

对于容性元件, 由于 $q = Ce = \int f dt$, 故 $e = (1/C) \int f dt$ 。若要保证积分关系, 必须 f 为输入, e 为输出, 对应的键图为 $\text{|---}C$ 。

同理, 对于惯性元件, 由于 $p = If = \int edt$, 故 $f = (1/I) \int edt$ 。若要保证积分关系, 必须 e 为输入, f 为输出, 对应的键图为 $\text{---|}I$ 。

基本 2 端口和 3 端口的因果关系: 对于基本 2 端口只有两种可能的因果关系, 即 |---TF| 或 ---|TF| ; |---GY| 或 ---|GY| 。对于 3 端口 0 和 1 接点, 其因果关系类似于基本 2 端口, 每个接点只有 3 种可能的因果关系。对于 0 接点(并联), 有 1 个因果关系棒(竖线)靠近 0 侧, 而对于 1 接点(串联), 有 2 个因果关系棒靠近 1 侧, 这是由它们的输入输出变量关系决定的。此法可以扩展到 n 个接点的情况。故我们称基本 2 端口和 3 端口的因果关系为受约束的因果关系。

综上所述, 总共有 4 种因果关系, 即固定的因果关系(fixed), 较喜欢的因果关系(preferred), 受约束的因果关系(constraint)和不关心的因果关系(indifferent)。在画键图时, 其考虑优先级顺序同上, 即固定的因果关系最先考虑, 而不关心的因果关系最后考虑。

3.4 系统模型

掌握了基本多端口元件后, 就可用键图法给系统建模了。本节首先讲述如何用直接、